



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

공간 네트워크를 활용한 물리적방호 체계
평가·강화 방법 연구

-국가중요시설에 대한 외부침입을 대상으로-

A Proposed Method for Evaluating and Improving
Physical Protection System using Spatial Network
-Focusing on Outside Intruders into Critical Infrastructure-

2022년 8월

서울대학교 대학원

건축학과

신재섭

공간 네트워크를 활용한 물리적방호 체계
평가·강화 방법 연구

-국가중요시설에 대한 외부침입을 대상으로-

A Proposed Method for Evaluating and Improving
Physical Protection System using Spatial Network
-Focusing on Outside Intruders into Critical Infrastructure-

지도교수 최 재 필

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2022년 8월

서울대학교 대학원
건축학과
신재섭

신재섭의 공학박사 학위논문을 인준함
2022년 8월

위원장 백 진 (인)

부위원장 최 재 필 (인)

위원 조 항 만 (인)

위원 이 경 훈 (인)

위원 김 민 석 (인)

공간 네트워크를 활용한 물리적방호 체계 평가·강화 방법 연구

-국가중요시설에 대한 외부침입을 대상으로-

서울대학교 대학원 건축학과 신재섭
지도교수 최재필

본 논문은 국가중요시설 중 건축시설에 대한 외부침입을 대상으로 공간 네트워크를 활용한 물리적방호 체계 평가, 강화에 대한 연구이다. 다층의 복잡한 실내로 구성된 공간 특성과 내부사용자가 많은 사용 특성을 고려한 물리적방호 평가·강화 방법을 제안하는데 목적이 있다.

선행연구 분석을 통해 기존의 방법들은 시설을 다이어그램이나 그리드로 단순화하여 시설에 대한 외부침입을 정확하게 분석하기에 한계가 있음을 확인하였다. 이런 방법은 복잡한 공간을 정확히 재현하지 못하고, 몇 가지 침입경로만을 가정하기 때문에 예상하지 못한 침입경로를 분석에서 누락할 가능성이 있다. 또한 내부사용자를 고려한 강화 지점을 제안하지 못하였다. 따라서 본 연구는 공간 네트워크를 활용하여 시설의 물리적방호를 정확하게 평가하고 내부사용자의 이동편의성을 최대한 저해하지 않는 강화 지점을 도출 방법을 제안하였다.

3장에서 물리적방호를 정량적으로 평가하는 EASI(Estimate of Adversary Sequence Interruption) 모델을 활용하여 건축계획 측면에서 시설의 물리적방호 강화 방법(방호성능 향상, 방호지점 추가)을 제안하였다. 이를 기반으로 공간 네트워크는 방호성능 향상과 방호지점 추가를 고려할 수 있는 노드가 필요하였다. 따라서 문(door)노드와 실(room)노드로 노드를 구성하고, 침입자의 이동을 가장 잘 재현할 수 있는 Medial axis 방법을 사용하여 엣지를 구성하였다. 이렇게 구현된 공간 네트워크를 활용하여 침입자가 목표구역에 접근할 수 있는 모든 가능 경로를 탐

색하여 EASI 모델을 활용한 물리적방호 유효성 도출 방법을 제안하였다. 이후 이동편의성을 고려한 물리적방호 강화 방법을 제안하였다. 이동편의성은 내부사용자의 업무생산성, 비상시 통행, 장애인 통행 등에 중요한 요인이다. 국가중요시설인 원자력발전소 운전원으로 대상으로 한 설문에서 물리적방호 강화는 이동편의성 저하에 영향을 끼치며, 이동편의성을 저해하지 않는 지점의 물리적방호 강화를 고려해야 한다는 결과를 얻었다. 따라서 본 연구에서 내부사용자의 이동편의성을 저해하지 않으면서 물리적방호 강화 최적 지점을 도출하기 위해 사이중양성(Betweenness centrality)을 이동편의성을 나타낼 수 있는 지표인 이동편의성 비용으로 선정하였다. 물리적방호 유효성과 이동편의성 비용을 고려하여 내부사용자의 이동편의성을 최대한 저해하지 않으면서 물리적방호 유효성을 향상시킬 수 있는 최적대안 도출 방법을 제안하였다.

4장에서는 3장에서 제안한 물리적방호 평가, 강화 방법을 구현할 수 있는 시스템을 개발하였다. BIM을 기반으로 설계 단계에서 활용할 수 있는 시스템으로 기능에 따라 Module 1.(공간 네트워크 구축 및 방호속성 추출), Module 2.(전 경로 물리적방호 유효성 분석), Module 3.(이동편의성 기반 물리적방호 강화 최적대안 도출)으로 구성하였다. 또한 제안한 방법의 유효성을 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시범시설을 선정하였고, 물리적방호 분석에 필요한 방호 값을 설정하여 물리적방호 유효성 및 강화 최적대안 도출 시뮬레이션을 수행하였다. 결론적으로 제안한 물리적방호 평가, 강화 방법이 유효함을 확인하였다.

5장에서는 본 연구에서 제안한 물리적방호 평가·강화 방법을 검증하였다. 검증을 위해 국가중요시설 중 전력시설 ‘가’급에 해당하는 원자력발전소를 검증대상으로 선정하였다. 또한 원자력발전소 건축설계 및 방호설계 경험이 있는 4명의 전문가를 대상으로, 내부사용자의 이동편의성을 고려한 물리적방호 강화 지점 선정 실험을 수행하였다. 4명의 전문가 실험 결과와 본 연구에서 제안한 물리적방호 강화 최적대안을 물리적방호 유효성 및 이동편의성 비용 측면에서 비교하였다. 결과적으로 본 연구에서 제안한 물리적방호 평가·강화 방법이 전문가의 정성적인 방법보다 더 나은 대안을 제시할 수 있음을 확인하였다.

마지막으로 6장에서 본 연구의 의의와 한계를 서술하였다. 기존에 인력운용에 초점이 맞춰진 물리적방호 체계에서 건축시설의 계획적 측면에서 물리적방호를 평가하고 강화하는 방법을 제안하였다는데 의의가 있다. 결론적으로 본 연구는 물리적방호 체계를 갖추어야 하는 시설을 대상으로 이동편의성을 저해하지 않기 위해

어떤 곳을 강화해야 하는지에 대한 대안을 찾는 것이다. 검증과정을 통해 제안한 방법의 유효함을 확인할 수 있었으며, 더 나아가 본 연구를 기반으로 국가중요시설에 대한 물리적방호 체계 정량적 설계기준 및 평가, 강화 과정에 활용이 가능하리라 생각한다.

주요어: 공간 네트워크, 물리적방호 체계, 국가중요시설, 외부침입, 원자력발전소, BIM(빌딩정보모델)

학 번: 2016-30246

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1. 연구의 배경	3
1.1.1. 연구의 배경	3
1.1.2. 연구의 목적	8
1.2. 연구의 방법 및 절차	10
1.2.1. 연구의 방법	10
1.2.2. 연구의 절차	12
제 2 장 이론적 고찰	15
2.1. 배경이론 고찰	17
2.1.1. 국가중요시설	17
2.1.2. 물리적방호 체계	30
2.1.3. 공간 네트워크	43
2.1.4. 중앙성(Centrality) 척도	52
2.2. 선행연구 고찰	56
2.2.1. 국가중요시설의 물리적방호 체계	56
2.2.2. 물리적방호의 정량적 평가	58
2.3. 본 연구의 차별성	63
2.3.1. 선행연구의 한계	63
2.3.2. 본 연구의 차별성	63
제 3 장 물리적방호 평가·강화 방법 제안	65
3.1. 물리적방호 평가·강화 범위 설정	67

3.1.1. 물리적방호 관련규정 분석	67
3.1.2. 물리적방호 평가·강화 범위 설정	74
3.2. 물리적방호 평가방법론 선정	78
3.2.1. EASI 모델에 따른 유효성 평가	78
3.2.2. 물리적방호 유효성 향상 요소 선정	80
3.2.3. 물리적방호 유효성 향상 방법 제안	81
3.3. 공간 네트워크 구현	85
3.3.1. 물리적방호 평가·강화를 위한 네트워크 구성 제안	85
3.3.2. 물리적방호 평가·강화를 위한 공간 네트워크 재현	88
3.4. 물리적방호 평가 및 강화 대안지점 도출	89
3.4.1. 모든 경로를 고려한 물리적방호 유효성 도출	89
3.4.2. 물리적방호 강화 대안지점 도출	91
3.5. 물리적방호 강화와 이동편의성	94
3.5.1. 물리적방호 강화에 따른 이동편의성 영향	94
3.5.2. 이동편의성 분석지표 선정	97
3.5.3. 이동편의성 비용 정의	99
3.6. 물리적방호 강화 최적대안 도출	103
3.6.1. 물리적방호 유효성 및 이동편의성 비용 도출	103
3.6.2. 물리적방호 강화 최적대안 선정	105
3.7. 소결	108
제 4 장 물리적방호 평가·강화 시스템 개발 및 시뮬레이션 · 111	
4.1. 시스템 개발 구성 및 개발 방법	113
4.1.1. 시스템 구성	113
4.1.2. 시스템 개발 방법	114
4.2. 시스템 개발	116
4.2.1. BIM모델 속성정보	116

4.2.2. (Module 1) 공간 네트워크 및 속성정보 추출	117
4.2.3. (Module 2) 전 경로 물리적방호 유효성 분석	120
4.2.4. (Module 3) 물리적방호 강화 최적대안 도출	122
4.3. 시범시설 선정 및 방호 값 설정	124
4.3.1. 시범시설 개요	124
4.3.2. 공간 네트워크 재현	126
4.3.3. 시설 방호 값 설정	127
4.3.4. 침입자 및 대응(Response) 관련 방호 값 설정	127
4.4. 물리적방호 유효성 평가	128
4.4.1. 물리적방호 유효성 분석	128
4.4.2. 강화 대안지점 도출 및 사이중앙성 분석	129
4.5. 물리적방호 강화 최적대안 도출	131
4.5.1. 강화지점 물리적방호 유효성, 이동편의성 비용 분석	131
4.5.2. 물리적방호 강화 최적대안 도출	134
4.6. 소결	138
제 5 장 물리적방호 평가·강화 방법 검증	139
5.1. 검증 프로세스	141
5.1.1. 검증 목적	141
5.1.2. 검증 방법 및 절차	141
5.1.3. 검증 결과 가정	142
5.2. 대상선정 및 관련규정 분석	144
5.2.1. 검증대상 선정	144
5.2.2. 설계기준위협(Design Base Treat, DBT) 설정	148
5.3. 대상시설 구축 및 전문가 선정	150
5.3.1. 대상시설 구축	150
5.3.2. 전문가 선정	154

5.4. 검증	155
5.4.1. 검증 실험 환경 및 절차	155
5.4.2. 본 연구 방법론을 통한 분석결과	156
5.4.3. 전문가 분석 결과	158
5.5. 결과 분석	162
제 6 장 결 론	165
6.1. 연구의 요약	167
6.2. 연구의 의의 및 한계	169
6.2.1. 연구의 의의	169
6.2.2. 연구의 한계	170
참고문헌	172
Appendix 1. 사이중양성, 통행량 상관관계 분석 결과	181
Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘	184
Appendix 3. 물리적방호 최적대안 및 전문가 검증실험 결과	201

<표 차례>

표 1-1. 연구 흐름도	14
표 2-1. 국가중요시설 중 ‘가’급 해당시설	18
표 2-2. EU 국가중요시설(Critical Infrastructure) 분류	20
표 2-3. 공간, 사용 특성에 따른 국가중요시설의 분류	21
표 2-4. 테러리스트 등급 및 특징 (Malcolm Nance, 2008)	27
표 2-5. 원자력발전소 테러 시나리오 (우태호, 2013)	29
표 2-6. 출입설비의 종류에 따른 탐지성능 (Betty E. Biringer, 2013)	32
표 2-7. Sandia National Lab.의 지연요소 성능값 (Betty E. Biringer, 2013)	34
표 2-8. 물리적방호 체계 구성요소별 사례	36
표 2-9. 외부침입에 따른 물리적방호 정량적 평가 예시	41
표 2-10. 물리적방호 유효성의 활용 예시	42
표 2-11. 중앙성 척도별 측정 방법 및 의미	55
표 2-12. 국내 국가중요시설의 물리적방호 관련 연구	57
표 2-13. 물리적방호 정량적 평가 방법 관련 선행연구	61
표 3-1. 국내외 국가중요시설 설계 관련 규정	67
표 3-2. 물리적방호 관련 규정별 방호지역 구분에 따른 설계기준	76
표 3-3. 침입경로의 지점별 소요시간 및 탐지확률	79
표 3-4. 물리적방호 유효성 향상 방법	80
표 3-5. 방호성능 향상(P3지점)에 따른 지점별 소요시간 및 탐지확률	81
표 3-6. 출입문의 종류별 지연성능 (Betty E. Biringer, 2013)	82
표 3-7. 방호지점 추가(P2-1지점)에 따른 지점별 소요시간 및 탐지확률	83
표 3-8. 공간 네트워크 구현과 물리적방호 평가·강화 시 활용	86
표 3-9. 제안한 네트워크의 사이중앙성과 통행량 회귀분석 결과	100
표 3-10. 물리적방호 강화 지점에 따른 이동편의성 비용	102
표 3-11. 물리적방호 강화 조합별 물리적방호 유효성, 이동편의성 비용	104
표 3-12. 물리적방호 유효성 목표 값에 따른 강화지점	107
표 4-1. BIM모델에서 추출한 엣지 리스트 예시	117

표 4-2. BIM모델에서 추출한 노드 리스트 예시	117
표 4-3. 문 방호성능	127
표 4-4. 침입자 및 대응출동 가정 값	127
표 4-5. 물리적방호 유효성 분석 결과	128
표 4-6. 강화 대안지점별 사이중양성 값	130
표 4-7. 물리적방호 유효성 목표 값에 따른 최적대안	134
표 4-8. 물리적방호 강화 최적대안 별 강화효과 및 강화지점	137
표 5-1. 검증 결과 가정	143
표 5-2. 설계기준위협 설정 (유호식(2008) 각색)	149
표 5-3. 펜스, 문 방호성능 값	153
표 5-4. 침입자 침입속도, 대응출동 및 임무 수행시간 가정 값	153
표 5-5. 전문가 주요 경력	154
표 5-6. 물리적방호 유효성 분석 결과	156
표 5-7. 물리적방호 최적대안 도출 결과	156
표 5-8. 전문가 (A, B, C, D) 물리적방호 강화 지점 검증실험 결과	160
표 5-9. 물리적방호 유효성 목표에 따른 이동편의성 비용	162
표 A1-1. 지점별 British Museum 통행량(Maximo Martinez, 2004), 사이중양성 값 비교 (지점의 자세한 위치는 Appendix 1. 그림 A1-1 참조)	182
표 A1-2. 사이중양성, 통행량 회귀분석 결과	183
표 A3-1. 본 연구 제안 물리적방호 강화 최적대안	201
표 A3-2. 전문가 A 물리적방호 강화지점 검증 실험 결과	203
표 A3-3. 전문가 B 물리적방호 강화지점 검증 실험 결과	205
표 A3-4. 전문가 C 물리적방호 강화지점 검증 실험 결과	207
표 A3-5. 전문가 D 물리적방호 강화지점 검증 실험 결과	209

<그림 차례>

그림 1-1. 전 세계 테러 사례 건수 (출처: GTD, 1970-2017)	3
그림 1-2. 전 세계 테러 유형별 발생비율 (출처: GTD, 1970-2017)	4
그림 1-3. 2016년 서울 정부청사 공시생 침입 사건	5
그림 1-4. 청와대 건물을 본떠 만든 건물에서 침입훈련을 하는 북한국 특수작전대대 사진 (2016.11, 시사주간 DB)	6
그림 1-5. 연구의 목적	9
그림 1-6. 연구의 방법	11
그림 2-1. 미국 국가중요시설(Critical Infrastructure) 16개 섹터 및 담당기관 (GAO-19-426)	19
그림 2-2. 오클라호마시티 폭탄테러 사건 (1995)	23
그림 2-3. 미국 연방법 10CFR73에 따른 원자력발전소의 물리적방호 핵심구역	24
그림 2-4. 미국 연방법에 따른 원자력발전소 내부 핵심구역 예시	24
그림 2-5. 범죄행위 사례	25
그림 2-6. 물리적방호 체계(PPS)의 설계, 평가 과정	30
그림 2-7. 물리적방호 체계의 3요소 (탐지, 지연, 대응)	31
그림 2-8. 침입 탐지를 확인하는 중앙통제실과 침입지점 확인 화면 예시 (IAEA Nuclear Security Series No. 40-T)	32
그림 2-9. 특수부대의 폭발물 사용을 통한 보안문의 지연성능 실험 사진 (SANDIA REPORT, SAND2007-5591)	33
그림 2-10. 한국원자력통제기술원의 지연성능 실험 사진 (강연욱, 2019)	34
그림 2-11. LPS 1175 기준에 따른 침입 도구별(A~H) 지연성능(1분~20분)을 조합한 보안문의 등급 기준 (https://www.lochrin-bain.co.uk/products/security-rated-products/)	35
그림 2-12. SAVI를 통한 물리적방호 취약경로 분석 화면 (신재섭, 2015)	38
그림 2-13. 쾨니히스베르크의 일곱 다리와 그래프	43
그림 2-14. 축선도로 재현된 G-Town (Hillier et al, 1984)	44
그림 2-15. 축선도에서의 노드, 엣지 개념 (변나향, 2014)	45

그림 2-16. J-Graph와 볼록공간도(Convex space) (Yelena Mclane, 2015)	46
그림 2-17. 공간구문론과 물리적 거리 개념에 기초한 네트워크 비교 (윤철재, 2014)	47
그림 2-18. Door-to-door 네트워크 예시 (Jin-kook Lee et al., 2010)	48
그림 2-19. Visibility Graph 예시 (Sam Niu et al., 2018)	49
그림 2-20. Generalized Voronoi Graph 예시 (소명뢰 외, 2015)	50
그림 2-21. Medial Axis Graph 예시 (W. R. Quadros et al., 2001)	50
그림 2-22. 의미론적 공간 네트워크 예시 (Liping Yang et al., 2015)	51
그림 2-23. 연결중앙성 그래프 예시 ($\alpha=1$, $\beta=0.125$)	53
그림 2-24. 네트워크에서의 각 노드별 사이중앙성 예시 (Matteo Riondato, 2015)	54
그림 2-25. 동일 네트워크에서의 각 중앙성 척도별 특성 (https://en.wikipedia.org/wiki/Centrality#Harmonic_centrality)	55
그림 2-26. Adversary Sequence Diagram (Sandia National Lab., https://share-ng.sandia.gov/itc/assets/19_presentation.pdf)	59
그림 2-27. 사전에 설정된 경로의 물리적방호 유효성을 평가 (Zou Bowen 외, 2017)	59
그림 2-28. 시설물 모델링 방식을 통한 물리적방호 평가 (서장훈 외, 2016)	59
그림 2-29. 그리드(Grid)로 단순화한 시설의 물리적방호 평가 (D.Andiwidayakusuma, 2019)	60
그림 2-30. Tile map을 활용한 물리적방호 평가 (Jung Yang 외, 2019)	60
그림 2-31. BIM모델의 공간정보를 활용한 침입 예상경로 도출 (Stuart Porter 외, 2014)	60
그림 3-1. 방호구역 및 시설 등급에 따른 물리적방호 설계기준 (Vulnerability Assessment of Federal Facilities)	69
그림 3-2. 원자력발전소 방호지역 구분 (NEI)	72
그림 3-3. 3지대 방호개념 (FEMA 430)	73
그림 3-4. 국가중요시설의 방호지역 구분	74
그림 3-5. 예시 침입경로의 CDP(최후 탐지지점), 탐지 영역	79
그림 3-6. 방호성능 향상(P3지점)에 따른 CDP, 탐지 영역	81

그림 3-7. 출입문의 방호성능 향상 사례	82
그림 3-8. 방호지점 추가(P2-1지점)에 따른 CDP, 탐지 영역	83
그림 3-9. 방호지점 추가 사례	84
그림 3-10. 물리적방호 평가·강화를 위한 공간 네트워크 재현	85
그림 3-11. 공간구문론 Convex map(좌), Door-to-door(우) 그래프 예시	86
그림 3-12. Medial Axis 구축 원리	87
그림 3-13. 엣지로 재현된 실내공간 예시 (오른쪽 그림: Fu (2020))	87
그림 3-14. 물리적방호 평가·강화를 위한 공간 네트워크의 노드 구분	88
그림 3-15. 침입 전 경로를 고려한 물리적방호 유효성 평가 절차	90
그림 3-16. 물리적방호 강화지점 도출 절차	91
그림 3-17. 물리적방호 강화 대안지점과 강화 방법에 따른 분류	92
그림 3-18. 물리적방호 강화 대안지점	93
그림 3-19. 물리적방호 강화와 이동편의성 설문조사 결과 (1)	96
그림 3-20. 물리적방호 강화와 이동편의성 설문조사 (2)	96
그림 3-21. 네트워크에서의 사이중앙성 도출 예시	98
그림 3-22. 제안한 네트워크의 사이중앙성과 통행량의 상관도	101
그림 3-23. 물리적방호 강화 최적대안 도출을 위한 공간 네트워크 예시	103
그림 3-24. 파레토 최적 예시 (https://en.wikipedia.org/wiki/Pareto_front 그림 가공)	105
그림 3-25. 자원배치에 따른 파레토 최적 (https://github.com/justinormont/pareto-frontier)	106
그림 3-26. 물리적방호 강화 최적대안 선정 개념도	107
그림 3-27. 물리적방호 평가·강화 절차	109
그림 4-1. BIM기반 물리적방호 평가·강화 시스템 구성도	113
그림 4-2. Module 별 시스템 개발 도구	114
그림 4-3. Visual vs Textural programming	115
그림 4-4. 물리적방호 분석에 요구되는 BIM 속성정보	116
그림 4-5. Module 1. 공간 네트워크 및 속성정보 추출 구성도	118
그림 4-6. BIM 모델 방호요소(문, 창문 등)에서의 방호속성 값	118
그림 4-7. Revit+Dynamo로 구현된 Module 1. 화면	119

그림 4-8. Module 2. 전 경로 물리적방호 유효성 분석 구성도	121
그림 4-9. Module 2.에서 도출한 전 경로의 물리적방호 유효성	121
그림 4-10. Module 3. 이동편의성 기반 물리적방호 강화 최적대안 도출 구성도	123
그림 4-11. Module 3.에서 도출한 각 지점의 이동편의성 비용(사이중양성)	123
그림 4-12. 시범시설 BIM 모델	124
그림 4-13. 시범시설 평면도 및 목표구역, 대응인력 위치	125
그림 4-14. 시범시설을 재현한 공간 네트워크	126
그림 4-15. 공간 네트워크의 노드, 엣지 리스트	126
그림 4-16. 침입 취약경로 도출 결과	128
그림 4-17. 물리적방호 강화 대안지점	129
그림 4-18. 강화 대안지점의 사이중양성 분석	130
그림 4-19. 대안지점 강화를 통한 물리적방호 유효성, 이동편의성 비용 도출	131
그림 4-20. 여러 지점 동시 강화를 통한 물리적방호 유효성, 이동편의성 비용	132
그림 4-21. 이동편의성을 고려한 물리적방호 강화 최적대안 도출 결과	133
그림 4-22. 물리적방호 강화 최적대안 지점	136
그림 5-1. 검증 절차	141
그림 5-2. 원전 APR1400 전경 (출처: https://aris.iaea.org/)	144
그림 5-3. APR1400 Power Block 배치 개념도	145
그림 5-4. 원자로+보조건물 단면도	146
그림 5-5. 보조건물 Quadrant 평면 개념도	147
그림 5-6. 설계기준위협(DBT) 예시 (지역별 설계기준 경향, https://www.cisworldservices.org/)	148
그림 5-7. 검증 대상시설 배치도	150
그림 5-8. 원전 APR1400 공간 네트워크 구축	151
그림 5-9. 원전 APR1400 시설 BIM모델 (출처: 신재섭, 2019)	151
그림 5-10. 침입 진입부	152
그림 5-11. 원전 APR1400 주제어실 평면도 및 전경 사진	152
그림 5-12. 검증실험 환경 및 설문지(도면)	155
그림 5-13. 최적대안 강화지점 (노랑색 : 방호성능 향상, 파랑색 : 방호지점 추가)	157

그림 5-14. 이동편의성을 고려한 물리적방호 강화 최적대안 도출	157
그림 5-15. 물리적방호 강화 최적대안(본 연구) vs 전문가 실험 결과	161
그림 5-16. 물리적방호 유효성 목표에 따른 전문가별 이동편의성 비용	162
그림 A1-1. British museum 통행량 자료 (https://spacesyntax.com/project/british-museum/) 및사이중양성 측정 지점	181
그림 A2-1. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 전체 구성도 ·	184
그림 A2-2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 1-1 구성도 ·	185
그림 A2-3. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 1-2 구성도 ·	186
그림 A2-4. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 2 구성도	187
그림 A2-5. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 3 구성도	188
그림 A2-6. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 4 구성도	189
그림 A2-7. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 5 구성도	190
그림 A2-8. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 6 구성도	191
그림 A2-9. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 7 구성도	192
그림 A2-10. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 8 구성도 ·	193
그림 A2-11. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 9 구성도 ·	194
그림 A3-1. 본 연구 제안 물리적방호 강화 최적대안	202
그림 A3-2. 전문가 A 물리적방호 강화 지점 검증실험 결과	204
그림 A3-3. 전문가 B 물리적방호 강화 지점 검증실험 결과	206
그림 A3-4. 전문가 C 물리적방호 강화 지점 검증실험 결과	208
그림 A3-5. 전문가 D 물리적방호 강화 지점 검증실험 결과	210

제 1 장 서 론

1.1. 연구의 배경 및 목적

1.1.1. 연구의 배경

1.1.2. 연구의 목적

1.2. 연구의 방법 및 절차

1.2.1. 연구의 방법

1.2.2. 연구의 절차

1.1. 연구의 배경

1.1.1. 연구의 배경

Global Terrorism Database (GTD)¹⁾에 따르면 그림 1-1.과 같이 1970년부터 2017년까지 전 세계적으로 182,438건의 테러가 발생했으며 1990년을 기점으로 테러 발생 건수가 줄어들다가 2010년경부터 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 특히 미국 9.11테러 이후 각 국가들은 많은 예산과 인적자원을 대테러 활동에 지출하여 일시적으로 발생 건수가 줄어들었지만 이후엔 지속적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

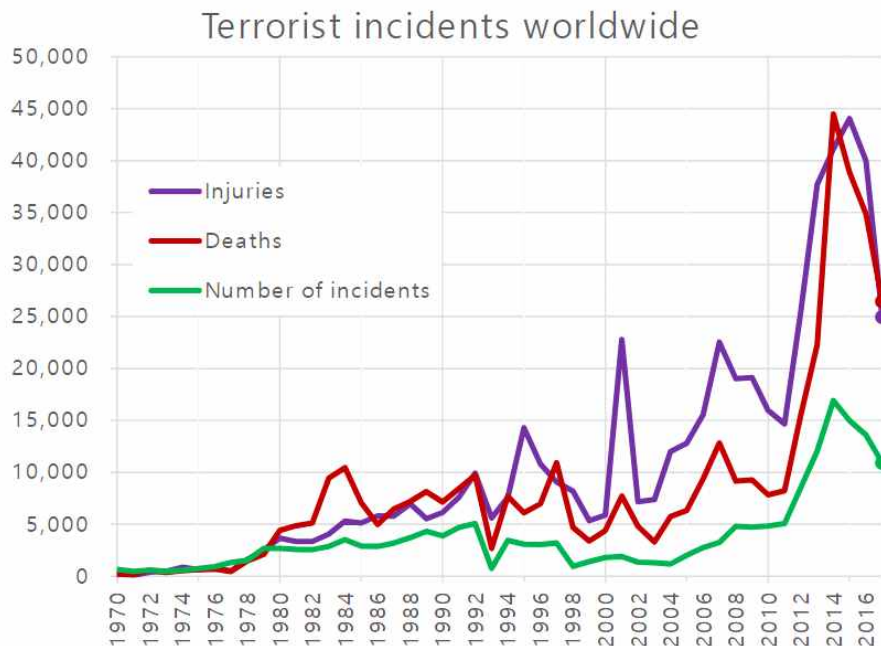


그림 1-1. 전 세계 테러 사례 건수 (출처: GTD, 1970-2017)

하지만 전 세계적으로 증가하는 테러 상황과 달리 우리나라의 상황은 비교적 안정적이라고 평가받는다. 다른 나라와 달리 안정된 치안 상황과 종교·인종적 갈등이 적고 총기규제가 강력한 점을 이유로 꼽는다. (장성진, 2017) 하지만 그동안 우리나라에서 발생한 테러 대부분이 북한에 의해 발생한 대남테러였고, 최근 2000년

1) 대표적인 테러 데이터베이스는 Global Terrorism Database (GTD), RAND Database of Worldwide Terrorism Incidents (RDWTI), International Terrorism: Attributes of Terrorist Events dataset (ITERATE), World Incident Tracking System (WITS), Terrorism in Western Europe: Events Database (TWEED) 등이 있으며, 이중 GTD가 가장 체계적이고 광범위한 테러 분야 데이터베이스로 꼽힌다. (Zhongbei Li, 2021)

이후 탈북자 및 외국인 노동자의 유입이 증가한다는 점에서 우리나라의 특수한 테러 환경이 있다고 평가받는다. 탈북자로 위장한 공작원, 국내에 위치한 100개 이상의 주한미군 시설 등은 국내 테러 발생 가능성이 낮지 않음을 보여준다. (국가정보원 테러정보통합센터, 2009)²⁾

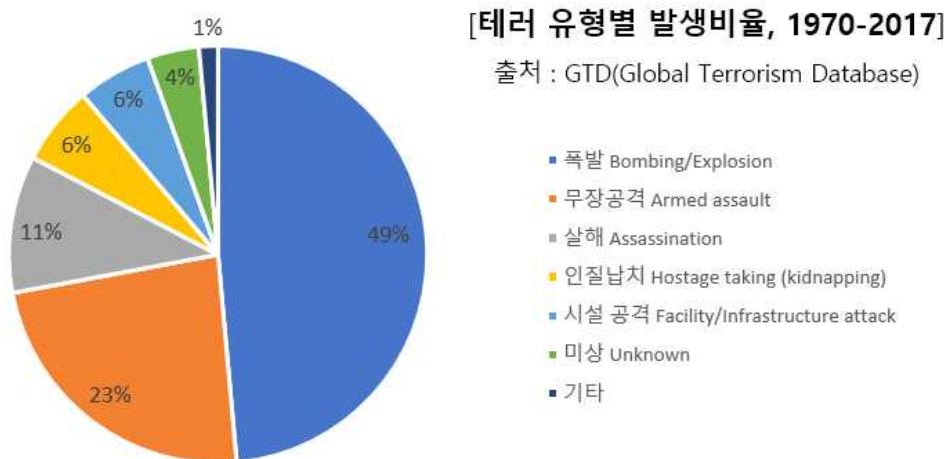


그림 1-2. 전 세계 테러 유형별 발생비율 (출처: GTD, 1970-2017)

테러 발생을 유형별로 살펴보면 그림 1-2와 같이 전 세계적으로 발생한 테러 중 전체의 약 50%는 폭발물을 이용한 테러이며, 무장공격(23%), 살해(11%), 인질 납치(6%), 시설 공격(6%) 순으로 나타났다. 폭발이나 무장 공격에 의한 테러가 전체의 70% 이상을 차지한다. 하지만 우리나라는 치안이 안정되고 사회적 갈등이 적어 폭발물 테러나 인질 납치, 살해 등의 테러 위협은 크지 않을 것으로 예상된다.³⁾ 대신, 산업이 발달하고 국가가 분단되어있는 특수한 상황에 놓인 우리나라는 국가 중요시설에 침입하여 기밀정보를 탈취하거나 핵심시설을 점거하여 사회적 혼란을 야기하는 등의 테러 사례가 더 빈번하게 발생할 것으로 예상된다.⁴⁾ 특히 일부 지역에 전력, 공항, 정유, 철강 등 국가중요시설이 밀집되어 있어, 이에 대한 침입 위협 대비가 필수적인 상황이다.⁵⁾

2) 장성진(2017)은 우리나라의 테러환경의 약점요인을 북한과의 군사적 대치상황과 국민들의 테러 불감증, 그리고 인터넷과 IT 발달에 의한 테러 통제의 어려움을 꼽았다.

3) 전 세계 테러 발생의 대부분은 중동 및 북아프리카(Middle East & North Africa), 남아시아(South Asia), 사하라 사막 이남 아프리카(Sub-Saharan Africa)에 집중되어 있는 것으로 나타났다.

4) 2001년 미국 국회의사당 습격사건때 펠로시 하원의장 및 제프 머클리 상원의원, 제임스 클라이번 하원의원의 노트북 및 태블릿 PC가 도난당해 국가 사이버 보안 문제가 제기되었다. (미국 의사당 난동 때 하원의장 노트북 등 도난...“사이버 보안 위협”, 2021.01.19., KBS News)

국가중요시설이란 「국가중요시설 지정 및 방호훈령」에 따라 공공기관, 공항, 항만, 주요산업시설 등 적에 의해 점령 또는 파괴되어 기능이 마비되었을 때 국가안보 및 국민생활에 심대한 영향을 미치는 시설을 의미한다. 대표적으로 청와대, 국회의사당, 원자력발전소, 정유시설, 항만, 공항 등이 이에 해당된다. 정확하게 국가중요시설로 관리되는 시설의 수는 알려지지 않았지만 2017년 기준 산업통상자원부에서 지정한 산업관련 국가중요시설은 156곳이며⁶⁾, 전체 관리대상 국가중요시설은 500여 곳에 이른다.⁷⁾ 이들 시설은 관련규정(국가중요시설 지정 및 방호 훈령, 국방부 훈령 제1057호)에 따라 시설운영자가 시설과 잠재적 침입자의 특성에 따라 위협을 분석하도록 규정하고 있고, 이에 따라 시설 특성을 고려한 국가중요시설의 설계가 이루어져야 한다. 하지만 국가중요시설은 지속적으로 외부 침입이나 테러로부터 위협받고 있다.

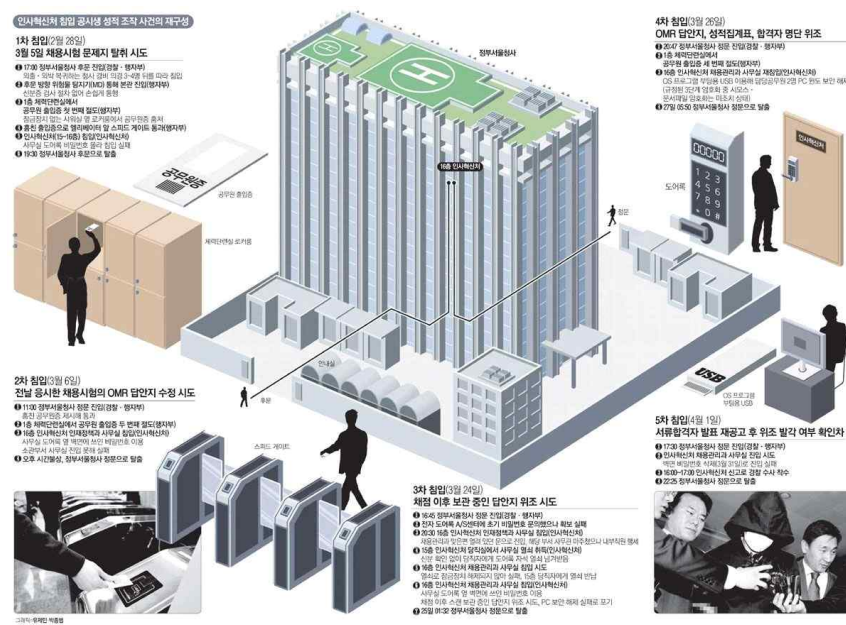


그림 1-3. 2016년 서울 정부청사 공시생 침입 사건

대표적으로 2016년 1월 공무원시험 응시생이 시험성적 조작을 위해 서울 정부청사를 5차레나 드나들어 시험담당자 컴퓨터를 켜고 시험결과를 조작한 사건이 발생하였다. 해당 사건을 계기로 정부청사에 출입하는 공무원들에 대해 출입증과 실

5) 정부세종청사는 각 부처건물이 밀집되어 위치하고 있고 내부 연결통로 및 옥상정원으로 각 건물들이 연결되어 있어 외부 침입으로 인한 테러에 취약한 형태이다.
 6) '국가 중요 시설 156곳 중 152곳이 북 미사일에 무방비', 조선일보 (2017.10.12.)
 7) '국가 중요시설, SCADA 시스템과 AI 영상보안 접목한 든든한 방비책 필요', CCTV news (2019.01.02.)

물을 필수적으로 대조하고, 가방을 보안검색대에 통과시켜 확인하는 출입절차가 강화되었다.⁸⁾

이 외에도 국내외에서 국가중요시설에 대한 위협, 침입사례는 꾸준히 발생하고 있다. 2021년 1월 20대 남성이 세종정부청사 담을 넘어 지하주차장을 통해 보건복지부 장관실을 포함한 청사시설에 침입하여 3시간가량 내부를 돌아다닌 사건이 있었다.⁹⁾

2016년 2월 북한은 중대성명을 통해 ‘1차 타격대상은 청와대’라고 밝히고 청와대 실제크기의 1/2모형을 건설하여 타격훈련을 진행하고 있다고 우리 군 당국이 발표하였다.¹⁰⁾ 이후 2017년에는 계룡대와 판문점 모형을 건설해 훈련용으로 사용된 사실이 공개되었다.¹¹⁾



그림 1-4. 청와대 건물을 본떠 만든 건물에서 침입훈련을 하는 북한군 특수작전대대 사진 (2016.11, 시사주간 DB)

2020년 2월 한 남성이 대검찰청 통제구역내 마약지문감정센터에 무단침입해 컴퓨터를 파손한 사건이 발생하였고¹²⁾, 2020년 12월 인터넷방송 BJ 2명이 청송교도소에 무단 침입해 교도소 내부를 무단 촬영한 사건이 발생하였다.¹³⁾

2021년 1월 미국 워싱턴DC 국회의사당에 시위대가 난입하여 4명이 사망하는

8) 정부청사 침입 ‘공시생’1차 시험 조작여부 수사, MBC (2016.04.08.)

9) 장관실 앞에 가방?... 마약범에 뺨 뚫린 정부청사, SBS (2021.01.29.)

10) 軍 “北, 청와대 모형 만들어 타격 연습 준비” CPBC News (2016.04.27.)

11) 청와대 모형에 타격 연습하던 北, 이번엔 ‘판문점’ 모형 건설, 아시아경제 (2019.04.05.)

12) 대검 통제구역 침입해 난동부린 30대 1심서 집유, 파이낸셜뉴스 (2020.10.14.)

13) 옛 청송교도소 무단 침입해 생중계한 BJ들... 경찰, 내사 중, 서울신문 (2020.12.15.)

사건이 발생하였다.¹⁴⁾ 이 과정에서 한 여성은 하원의장실에 침입하여 노트북을 훔쳐 달아났다. 이후 FBI에 체포된 여성은 노트북을 러시아 정보기관에 팔 계획이었다고 밝혔다.¹⁵⁾

2007년 11월 남아프리카공화국에서 무장괴한 4명이 철조망과 경비시스템을 뚫고 ‘펠린다바’원자력연구센터에 침입한 사건이 발생하였다. 비록 실패했지만 연구센터 안에는 핵무기 25~30기를 만들 수 있는 고농축우라늄 750kg이 보관되어 있었다.¹⁶⁾

이처럼 국내외 사례에서 언급한 것과 같이 국가중요시설은 지속적으로 테러나 외부의 침입으로부터 노출되어있다. 산업통상자원부에 따르면 국가중요시설로 지정된 곳은 ‘통합 방위지침’에 따라 안전·안보 관련 설계 및 장비를 마련해야 하지만 많은 시설들이 기준에 미흡한 실정이다.¹⁷⁾ 예를 들어 외부침투를 막기 위해 건물 외부에 높이 2.7m이상의 방호벽을 세워야 하지만 이를 지킨 것은 전체의 60.9%정도이며, 폭탄테러에 대비해 통제실·무기고 등에 방탄창을 설치해야 하지만 이를 만족하는 시설은 전체의 34.6%에 불과하다. 이처럼 많은 국가중요시설이 외부침입 및 테러에 대한 설계 미흡 등으로 외부 공격에 취약한 상태이다. 더욱이 국가중요 시설에 대한 물리적방호 지침은 설계기준 및 평가보다는 경비시스템과 안전인력 운영에 초점이 맞춰져 있어 설계단계에서 시설에 대한 외부 침입 및 테러에 대한 고려를 반영하기에 한계가 있다.

14) 사상 초유의 시위대 의사당 난입 사태로 모두 4명 사망, 헤럴드경제 (2021.01.07.)

15) “러시아에 팔려서...” 美의회 난입때 펠로시 노트북 훔친 女, 중앙일보 (2021.01.19.)

16) 1%의 안보위협 가능성에도 대비해야, 신동아 630호 (2012.03.14.)

17) 조선일보 기사 ‘국가 중요 시설 156곳 중 152곳이 北미사일에 무방비’ (2017.10.12.)

1.1.2. 연구의 목적

본 연구는 외부의 침입으로부터 안전하게 설계되어야 하는 국가중요시설을 대상으로 물리적방호 체계¹⁸⁾를 정량적으로 평가하고, 취약지점을 찾아내어 최적의 강화지점을 제안하는데 목적이 있다.

- 목적 : 국가중요시설의 위협 대한 물리적방호 체계를 정량적으로 평가하고 효과적으로 강화할 수 있는 최적 지점을 찾아내는 것
- 위협 : 사보타주 Sabotage¹⁹⁾
(시설에 침입하여 주요시설을 파괴하거나 인명, 재산에 손해를 끼치는 행위)

국가중요시설은 시설의 특성에 따라 건축시설, 산업시설, 옥외시설로 구분할 수 있는데, 이중 건축시설을 대상으로 공간특성(다층, 복잡한 실내공간)과 사용특성(내부사용자 많고 이동이 잦음)을 반영한 물리적방호 평가 및 강화 방법을 제안하였다.

특히, 물리적방호 강화방법을 고려할 때 국가중요시설 중 건축시설로 대표되는 국회의사당, 정부청사, 발전시설 등은 내부 사용자(근무자, 작업자 등)가 많아, 보안을 위해 출입을 통제하는 방식은 내부사용자의 이동편의성을 저하하고 생산성을 하락시키는 부작용을 초래할 수 있다. 실제로 원자력발전소 운전원 대상 설문조사 결과²⁰⁾에 따르면 조사대상의 50%가 보안설비(출입 절차 강화시스템 등 이동편의성을 저해하는 설비)때문에 작업의 편의성이 저하된다고 응답했으며, 58%가 보안강화가 작업 편의성 저하로 연결된다면 작업에 영향이 없는 지역만 강화하거나 강

18) 물리적방호 체계(Physical Protection System)란 자산의 도난 또는 시설의 파괴(사보타주), 악의적인 인적 공격을 보호하기 위한 인력, 절차, 장비 등의 통합체계를 의미한다. (Garcia, 2008) 물리적보안(Physical Security)이란 손실이나 손해를 유발할 수 있는 위협으로부터 조직(organization)의 자산을 보호하는 것을 의미한다. (FEMA) 두 용어를 사용하는 목적이나 기관에 따라 용어 사용에 미세한 차이가 있지만, 공통적으로 시설이나 자산을 보호하는 일련의 절차나 체계를 의미한다. 또한 일부에서는 'Physical protection (also called physical security)...' (<https://www.nrc.gov>)로 동일한 정의로 사용하기도 한다.

국내 학술연구를 기준으로 살펴보면, '물리적보안'의 용어 사용은 주로 시설을 안전하게 유지하기 위한 보안 활동에 초점이 맞춰져 있고, '물리적방호'는 시설의 설계나 계획적 측면에서 주로 사용되어 진다. 따라서 본 연구에서는 연구의 목적에 부합되는 물리적방호라는 용어로 통일하여 사용하였다.

19) 제2차 세계대전중 점령군의 기계(器材)에 대한 파괴활동에 대해서 붙여진 명칭으로 일반적으로는 전선(戰線)의 배후 또는 점령지역에서 적의 군사기재, 통신선과 군사시설에 피해를 주거나 그것들을 파괴하는 것을 목적으로 하거나 그 효과를 갖는 행위를 가리킨다. 스파이와는 달리 정보수집이 목적이 아니며 또한 작전지대 내에 한정되지 않고 적의 지배지역 전반에서 일어난다. (21세기 정치학대사전, 정치학대사전편찬위원회)

20) APR1400 물리적방호 설계체계 구축 과제 (2015), 40명 대상

화할 필요가 없다고 응답했다.

따라서 본 연구는 물리적방호 체계를 고려해야 하는 국가중요시설 중 내부사용자가 많은 건축시설을 대상으로, 공간특성을 반영한 물리적방호 평가방법과 사용특성을 반영한 물리적방호 체계 강화방법을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 제안한 방법을 검증하는데 최종 목적이 있다.

최종적으로, 이를 통해 국가중요시설(건축시설)의 설계 초기단계부터 물리적방호를 고려하여 외부 침입으로부터 안전한 설계가 가능한 방법을 제안하고자 한다.²¹⁾



그림 1-5. 연구의 목적

21) 테러예방설계 경험이 있는 실무자 조사결과 응답자의 46%가 기본설계 과정 중에 테러예방설계를 적용하는 것이 가장 바람직하다고 평가하였다. (강경연, 2019)

1.2. 연구의 방법 및 절차

1.2.1. 연구의 방법

본 연구는 국가중요시설 중 다층, 복잡한 실내공간을 가진 건축시설의 공간특성을 반영하여 물리적방호 평가방법을 제안한다. 이 과정에서 복잡한 실내공간을 정확하게 재현할 수 있는 공간 네트워크 구축 방법을 제안하였고, 외부의 침입을 정확하게 분석하기 위하여 침입 전 경로를 탐색하고 모든 경로의 물리적방호 유효성을 분석하는 방법을 제안하였다. 또한 내부인원의 이동이 빈번한 사용특성을 반영하여 이동편의성을 고려한 물리적방호 체계 강화방법을 제안하였다. 일반적으로 건축시설의 물리적방호 체계 강화방안은 출입설비(보안문, 신원확인 등)를 강화하고 내부공간을 세분화하여 출입단계를 늘려가는 방법이 효과적이다. 하지만 이런 방법은 시설 내부 사용자의 이동편의성을 저해하는 부작용을 야기한다. 따라서 내부사용자 사용 빈도가 낮으면서 보안이 취약한 지점을 찾아내고, 이를 강화하여 이동편의성 저하를 최소화하는 물리적방호 체계 강화 방법을 제안하였다.

시스템 개발과 시뮬레이션을 통해 제안한 물리적방호 평가, 강화방법의 유효성을 확인하였다. BIM을 기반으로 건축시설의 물리적방호를 평가하고 강화하는 시스템을 개발하였는데, BIM은 3차원의 설계모델에 공간, 문 등 방호요소의 속성정보를 포함하고 있기 때문이다. 또한 설계 저작도구로써 설계단계에서 물리적방호를 평가하고 강화하는데 활용이 가능하다고 판단했기 때문이다. 시뮬레이션 과정에서는 가상 시설의 BIM모델을 활용하여 앞에서 제안한 물리적방호 평가·강화 방법 일련의 과정을 수행하여 제안한 방법의 유효함을 확인하였다.

마지막으로 검증과정을 통해 본 연구에서 제안한 물리적방호 평가·강화 방법의 유효함을 확인하였다. 검증과정은 국가중요시설중 전력시설 ‘가’급에 해당하는 원자력발전소를 대상으로, 원자력발전소 설계 경험이 있는 전문가 4명의 물리적방호 강화 대안의 효과와 본 연구에서 제안한 물리적방호 강화 최적대안의 결과를 정량적으로 비교하였다.



그림 1-6. 연구의 방법

1.2.2. 연구의 절차

연구의 절차는 표 1-1.과 같다. 2장에서 선행연구 고찰을 통해 선행연구에서 시설의 물리적방호를 어떻게 정량적으로 평가했는지에 대해 분석하였다. 기존 연구에서는 복잡한 다층의 실내공간을 가진 건축시설을 다이어그램, 그리드 단순화하여 분석에 사용하였고, 침입경로를 미리 가정하여 선정된 침입경로의 물리적방호 유효성을 분석하였다. 이러한 선행연구는 시설의 특성을 정확히 반영할 수 없는 한계를 가지고 있었고, 내부사용자를 고려한 강화 대안을 제시하지 못한 한계가 있었다. 이러한 한계를 극복하기 위해 새로운 물리적방호 평가, 강화 방법을 제안하였다.

3장에서 침입자의 모든 침입경로를 고려한 물리적방호 평가 방법을 제안하였다. 첫 번째로 어떤 방법으로 물리적방호의 유효성을 도출할 수 있는지 방법론을 선정하였고, 이를 통해 평가와 강화에 반영해야 할 사항을 도출하였다. ‘방호지점 추가’와 ‘방호성능 향상’에 초점을 맞춘 공간네트워크 구축 방법을 제안하였다. 마지막으로 구축된 공간 네트워크를 활용하여 모든 침입경로를 고려한 물리적방호 유효성 분석 방법을 제안하였다. 이후 이동편의성을 고려한 물리적방호 강화방법을 제안하였다. 물리적방호를 강화하였을 때 내부사용자의 이동편의성에 대한 영향을 설문조사 및 선행문헌을 통해 분석하였고, 이동편의성을 분석할 지표로 사이중앙성(Betweenness centrality)을 선정하여 이동편의성 비용 산정방법을 제안하였다. 마지막으로 물리적방호 유효성과 이동편의성 비용을 고려한 물리적방호 강화 최적대안 도출 방법을 제안하였다.

4장에서는 3장에서 제안한 물리적방호 평가, 강화 방법을 구현할 BIM기반 시스템 개발과 시뮬레이션을 수행하였다. 시스템은 그 기능에 따라 Module 1.부터 Module 3.까지 구성된다. 또한 제안한 방법의 유효성을 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시범시설을 선정하였고, 물리적방호 분석에 필요한 방호 값을 설정하여 물리적방호 유효성 및 강화 최적대안 도출 시뮬레이션을 수행하였다. 결론적으로 제안한 물리적방호 평가, 강화 방법이 유효함을 확인하였다.

5장에서는 본 연구에서 제안한 물리적방호 평가·강화 방법의 검증을 수행하였다. 검증은 국가중요시설 중 전력시설 ‘가’급에 해당하는 원자력발전소를 검증대상으로 선정하였다. 또한 원자력발전소 건축설계 및 물리적방호 설계 경험을 가진 4명의 전문가를 선정하여 검증실험을 수행하였다. 4명의 전문가를 통한 원자력발전소 물리적방호 강화 검증실험과 본 연구에서 제안한 물리적방호 강화 최적 대안의 비교

를 통해, 본 연구에서 제안한 방법이 물리적방호 유효성 및 내부사용자의 이동편의성 측면에서 더 나은 대안을 제시할 수 있다는 점을 확인할 수 있었다.

마지막으로 6장에서 본 연구의 의의와 한계를 서술하였다. 기존의 인력운용에 초점이 맞춰진 물리적방호 체계에서 건축시설의 계획적 측면에서 물리적방호를 평가하고 강화하는 방법을 제안하였다는데 의의가 있다.

표 1-1. 연구 흐름도

1장 서론	연구의 배경 및 목적		연구의 방법 및 절차	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 국가중요시설의 수와 규모가 꾸준히 증가 ■ 설계단계에서 외부 침입 및 테러에 대한 고려가 필요 			
2장 이론적 고찰	배경이론 고찰		선행연구 고찰	
	<p>기존 연구와의 차별성 :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 복잡한 다층의 실내공간을 단순화 하지 않고 분석 ■ 침입경로를 가정하지 않고 모든 침입경로를 탐색, 분석 ■ 내부사용자를 고려한 최적의 강화지점을 제시 			
3장 물리적방호 평가·강화 방법 제안	침입 전 경로를 고려한 물리적방호 평가방법 제안			
	1) 물리적방호 평가 방법론 선정 (EASI 모델)	2) 공간 네트워크 구축 방법 제안 (2 Type 노드 + 엣지)	3) 모든 침입경로를 고려한 물리적방호 유효성 분석 방법 제안	
	이동편의성을 고려한 물리적방호 강화방법 제안			
	1) 물리적방호 강화와 이동편의성 영향 분석	2) 이동편의성 지표 선정 (사이중양성)	3) 물리적방호 유효성과 이동편의성 비용을 고려한 강화 최적대안 도출	
4장 시스템 개발 및 시뮬레이션	BIM기반 물리적방호 평가·강화 시스템 개발			
	BIM모델 형상, 속성정보	[Module 1] 데이터 추출	[Module 2] 물리적방호 유효성 분석	[Module 3] 강화 최적대안 도출
	물리적방호 평가·강화 시뮬레이션			
	시범시설 선정	방호 값 설정	물리적방호 유효성 분석	물리적방호 강화 최적대안 도출
5장 검증	물리적방호 평가·강화 방법 검증			
	대상 및 설계기준위험 설정	전문가 선정	검증 (전문가 실험)	검증결과 분석
6장 결론	연구의 의의		연구의 한계	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 국가중요시설 중 건축시설을 위한 물리적방호 평가·강화 방법 ■ 공간 네트워크를 활용한 침입 전 경로 물리적방호 유효성 도출 방법 제안 ■ 이동편의성을 고려한 최적 강화대안 지점 도출 방법을 제안 ■ 검증(전문가 실험)을 통해 본 연구의 물리적방호 평가·강화 방법의 효율성 검증 			

제 2 장 이론적 고찰

2.1. 배경이론 고찰

- 2.1.1. 국가중요시설
- 2.1.2. 물리적방호 체계
- 2.1.3. 공간 네트워크
- 2.1.4. 중앙성(Centrality) 척도

2.2. 선행연구 고찰

- 2.2.1. 국가중요시설의 물리적방호 체계
- 2.2.2. 물리적방호의 정량적 평가

2.3. 본 연구의 차별성

- 2.3.1. 선행연구의 한계
 - 2.3.2. 본 연구의 차별성
-

2.1. 배경이론 고찰

2.1.1. 국가중요시설

(1) 국가중요시설의 분류

우리나라의 국가중요시설은 「국가중요시설 지정 및 방호 훈령」(국방부훈령 제 1057호) 따라 국가중요시설의 지정 및 방호에 관한 사항이 규정되어 있다. 대표적으로 공공기관, 공항, 항만, 주요산업시설 등으로 적에 의해 파괴 또는 점령당하여 그 기능을 상실하였을 때 국가안보 및 경제에 큰 영향을 미치는 시설이 해당된다. 시설의 목적에 따라 국가·공공기관시설, 산업시설, 전력시설, 방송시설, 정보통신시설, 교통시설, 공항, 항만, 수원시설, 과학연구시설 총 10가지로 구분할 수 있으며 중요도에 따라 가, 나, 다 등급으로 나뉜다. 아래 표 2-1.은 국가중요시설의 분류 중 가장 중요도가 높은 ‘가’등급²²⁾의 사례에 해당되는 시설들이다.

표 2-1. 국가중요시설 중 ‘가’급 해당시설
(「국가중요시설 지정 및 방호 훈령」(국방부훈령 제1057호) 제7조(국가중요시설의 분류기준))

분류	해당 시설
국가 및 공공기관 시설	<ul style="list-style-type: none"> - 청와대, 국회의사당, 대법원, 정부청사 - 국방부·국가정보원 청사 - 한국은행 본점
산업시설	<ul style="list-style-type: none"> - 철강, 조선, 항공기, 정유 등 국가경제에 중대한 영향을 미치는 대규모 산업시설 - 전투기, 전차, 함정, 화포 등 중화기를 생산하는 방위산업시설 중 파괴 또는 기능 마비시 국가안보에 직접적인 영향을 미치는 시설 - 1,000만 배럴 이상의 대규모 저유시설과 LNG, LPG 인수기지 - 연쇄적인 폭발위험성이 있는 대규모 총·포탄, 화약류 생산시설
전력시설	<ul style="list-style-type: none"> - 원자력발전소
방송시설	<ul style="list-style-type: none"> - 전국권으로 방송되는 공영 라디오·TV방송 제작시설 - 라디오방송 송신출력 500kw 이상 송신시설

22) 적에 의하여 점령 또는 파괴되거나, 기능 마비 시 광범위한 지역의 통합방위작전수행이 요구되고 국민생활에 결정적인 영향을 미칠 수 있는 시설 (국방부훈령 제1057호 ‘국가중요시설 지정 및 방호 훈령’ 제6조 1항 1절)

정보통신시설	<ul style="list-style-type: none"> - 정부 전산망 통합관리시설 - 종합 전파탑
교통시설	<ul style="list-style-type: none"> - 종합 항공·교통 관제시설 - 한강상 주요 교량·철교 - 전국 단위 열차운행 종합사령실
공항	<ul style="list-style-type: none"> - 국제공항
항만	<ul style="list-style-type: none"> - 1만톤 이상의 선박출입이 가능하고, 동시 접안능력이 100만톤 이상인 항만시설
수원시설	<ul style="list-style-type: none"> - 급·취수능력 1일 150만톤 이상의 상수도 및 공업용수 공급시설 - 총 저수용량 10억톤 이상의 다목적댐
과학연구시설	<ul style="list-style-type: none"> - 종합적인 체계를 갖춘 연구시설 - 핵연료 개발 연구시설
교정·정착지원 시설	<ul style="list-style-type: none"> - 공안 및 공안 관련 사범의 수용을 위주로 하는 교정시설 - 2,000명 이상 수용하는 교정시설 - 북한 이탈주민 정착지원시설
지하공동구 시설	<ul style="list-style-type: none"> - 전력, 통신을 포함한 3개 이상의 시설을 수용하고, 대도시 인구밀집지역에 소재하여 기능 마비시 피해 영향이 크며, 국가 중요기관 또는 금융공동망, 증권망 등 경제·사회적 파급 영향이 큰 전산망이 수용된 지하공동구 시설
기타 시설	<ul style="list-style-type: none"> - 기타 적에 의해 점령 또는 파괴되거나 기능이 마비될 경우 국가안보 및 국민생활에 심대한 영향을 미치는 시설

미국은 국가중요시설(Critical Infrastructure)을 물리적 또는 가상의 자산으로 파괴나 무력화되었을 때 미국의 안보, 경제, 국민의 안전 등에 영향을 미치는 시설로 정의한다.²³⁾ 그림 2-1.과 같이 화학시설, 상업시설, 통신시설, 핵심생산시설, 댐, 국방제조시설, 응급의료시설, 에너지시설, 금융시설, 식량시설, 정부시설, 원자력시설, 교통시설, 수원시설 등 16개의 섹터로 구성되며 각각의 시설 성격에 따라 농무부(USDA), 국방부(DOD), 에너지부(DOE), 보건복지부(HHS), 국토안보부(DHS), 교통부(DOT), 환경청(EPA), 조달청(GSA) 등이 담당한다.

23) Critical infrastructure is an asset or system which is essential for the maintenance of vital societal functions. The damage to a critical infrastructure, its destruction or disruption by natural disasters, terrorism, criminal activity or malicious behaviour, may have a significant negative impact for the security of the EU and the well-being of its citizens. (Patriot Act, 2001)



그림 2-1. 미국 국가중요시설(Critical Infrastructure) 16개 섹터 및 담당기관 (GAO-19-426)

EU의 국가중요시설은 사회의 중요기능을 유지하는데 필요한 필수적인 자산 및 시스템으로, 손상, 자연재해, 테러, 범죄 등으로 파괴 또는 운영이 중단될 경우, EU의 안보와 시민 복지에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 시설을 의미한다.²⁴⁾ 표 2-2와 같이 시설 성격에 따라 11개 섹터, 37개의 세부 시설로 구성되어 있다.

24) Critical infrastructure is an asset or system which is essential for the maintenance of vital societal functions. The damage to a critical infrastructure, its destruction or disruption by natural disasters, terrorism, criminal activity or malicious behaviour, may have a significant negative impact for the security of the EU and the well-being of its citizens. (European Commission)

표 2-2. EU 국가중요시설(Critical Infrastructure) 분류
(European Commission, 2005)

	분류(sectors)	세부 분류(sub-sectors)
I.	Energy	1 Oil and gas production, refining, treatment and storage, including pipelines 2 Electricity generation 3 Transmission of electricity, gas and oil 4 Distribution of electricity, gas and oil
II.	Information, Communication Technologies, ICT	5 Information system and network protection 6 Instrumentation automation and control systems (SCADA etc.) 7 Internet 8 Provision of fixed telecommunications 9 Provision of mobile telecommunications 10 Radio communication and navigation 11 Satellite communication 12 Broadcasting
III.	Water	13 Provision of drinking water 14 Control of water quality 15 Stemming and control of water quantity
IV.	Food	16 Provision of food and safeguarding food safety and security
V.	Health	17 Medical and hospital care 18 Medicines, serums, vaccines and pharmaceuticals 19 Bio-laboratories and bio-agents
VI.	Financial	20 Payment services/ payment structures (private) 21 Government financial assignment
VII.	Public & Legal Order and Safety	22 Maintaining public & and legal order, safety and security 23 Administration of justice and detention
VIII.	Civil administration	24 Government functions 25 Armed forces 26 Civil administration services 27 Emergency services 28 Postal and courier services
IX.	Transport	29 Road transport 30 Rail transport 31 Air traffic 32 Inland waterways transport 33 Ocean and short-sea shipping
X.	Chemical and nuclear industry	34 Production and storage/processing of chemical and nuclear substances 35 Pipelines of dangerous goods (chemical substances)
XI.	Space	36 Space 37 Research

(2) 공간, 사용특성에 따른 국가중요시설 분류

국가중요시설을 공간 및 사용 특성에 따라 구분하면 아래 표 2-3.과 같이 건축시설과 산업시설, 옥외시설로 구분할 수 있다. 산업시설은 대표적으로 조선소, 정유시설, 제련소 같이 복잡한 철골 구조물로 이루어져 있지만 근무자가 사용하는 공간 측면에서 본다면 단층의 단순한 내부공간을 가지고 있다. 옥외시설은 항만, 수원시설(댐)이 해당되며 내부사용자가 적고 대부분 야외시설로 이루어져 있다. 반면 건축시설은 다층의 복잡한 실내공간으로 이루어져 있고, 내부는 많은 실로 구성되어 있다. 또한 내부사용자가 많고 사용자의 이동이 잦은 사용특성을 가지고 있다. 대표적으로 청와대, 국회의사당, 정부청사, 한국은행, 국정원 등이 해당된다. 이러한 공간, 사용 특성은 산업시설, 옥외시설과 달리 건축시설에만 해당되는 특징이다.

표 2-3. 공간, 사용 특성에 따른 국가중요시설의 분류

	1. 건축시설	2. 산업시설	3. 옥외시설
			
대표시설	청와대, 국회의사당, 정부청사	조선소, 정유시설, 제련소	항만, 수원시설
특성	<ul style="list-style-type: none"> • 다층, 실내공간 • 많은 실로 구획된 내부공간 • 내부 사용자, 이동 많음 	<ul style="list-style-type: none"> • 단층, 실내·외부 통합 • 단순한 내부 공간 	<ul style="list-style-type: none"> • 야외시설 • 내부사용자 적음

(3) 국가중요시설의 물리적방호 계획

국가중요시설의 물리적방호 계획은 통합방위법 제15조의2에 따라 국가중요시설의 소유자 또는 관리자(시설주)가 시설 자체 방호계획을 수립하고 시행해야 한다. 또한 이 계획에는 시설에 대한 잠재적 적의 위협을 분석하고, 방호 및 지휘체계, 5분 전투대기조 편성 및 운용계획 그리고 국가중요시설의 특징, 지형여건 등을 고려한 방호 인력·시설물·장비운용 계획 등이 포함되어 있어야 한다.

세부적으로 방호계획을 운용하기 위해 법·제도적 장치로 시설분류에 따라 「항공보안법」, 「국제항해선박 및 항만시설의 보안에 관한 법률」, 「원자력시설 등의 방호 및 방사능 방재 대책법」 등 개별법에서는 시설 내 불법행위 방지 및 보안을 확보하기 위한 기준과 절차, 의무사항, 물리적방호 체계 수립 등 방호·보안관리에 관한 사항을 규정하고 있다. (신형석, 2019)

특히 2016년과 2021년 사회적으로 문제가 되었던 중앙정부청사 침입사건과 관련한 물리적방호 기준은 대통령령인 「정부청사관리규정」에서 청사의 수급 및 관리, 청사수급관리계획, 청사의 취득 및 처분, 청사의 시설관리, 청사의 출입관리 등 총11개 조문으로 구성되어 있다. 구체적으로 정부청사의 방호·보안 관련 조문은 제8조의2(청사의 시설관리)3), 제8조 의3(청사의 출입관리)4), 제9조의2(방호진단)5)의 3개 조문에 불과하다. 공항·항만·원자력발전소 등 관계법령에 따라 국가중요시설 및 국가보안시설로 지정·특별 관리되고 있는 주요시설과 달리 다수 국가기관 및 공공기관이 입주해 있는 정부청사는 위와 같은 주요시설의 보안수준에는 미치지 못하고 있는 실정이다. (신형석, 2019)²⁵⁾

미국의 국가중요시설에 대한 물리적방호 규정을 살펴보면, 1995년 발생한 오클라호마시티 폭탄테러²⁶⁾로 연방정부 건물이 크게 파괴되고 많은 희생자가 발생한 것을 계기로 작성된 방호설계 지침 「Vulnerability Assessment of Federal Facilities」의 제정되었다.²⁷⁾ 해당 규정은 미국 연방정부시설에 대한 물리적방호

25) 신형석 (2019). 정부청사의 효율적 방호·보안관리를 위한 법령체계 정비방안에 대한 소고, 한국경호경비학회 제61호, pp 39-57

26) 1995년 4월 19일 미국 오클라호마주 미국 연방정부 기관이 위치해 있는 알프레드 머라 빌딩에서 발생한 폭탄테러로 아동 19명을 포함한 169명이 목숨을 잃었으며 680명이 부상을 입었다. (두산백과) 오클라호마 폭탄테러는 기존에 다루어지지 않았던 연방정부 건물에 대한 테러 위협에 대해 새롭게 인식하는 계기가 되었다. (Stephanie Smith, 2007)

27) 오클라호마 연방정부 건물 폭탄테러 이후 클린턴 대통령은 법무성(U.S. Department of Justice)에 테러 또는 폭력행위로 인한 연방시설의 취약성을 평가하고 방호 표준설계안을 개발하도록 지시하였다. (Stephanie Smith 2007, The Interagency Security Committee and Security Standards for Federal Buildings, CRS Report for Congress)

설계기준을 명시해 놓았으며, 시설에 상주하는 인원과 시설 성격에 따라 Level I부터 Level V까지 5단계로 구분하였다. 가장 높은 등급의 Level V는 미국 국방부 본청(Pentagon) 및 중앙정보국 본청(CIA Headquarter)같은 국방 및 정보기관에 적용되는 규정이다.

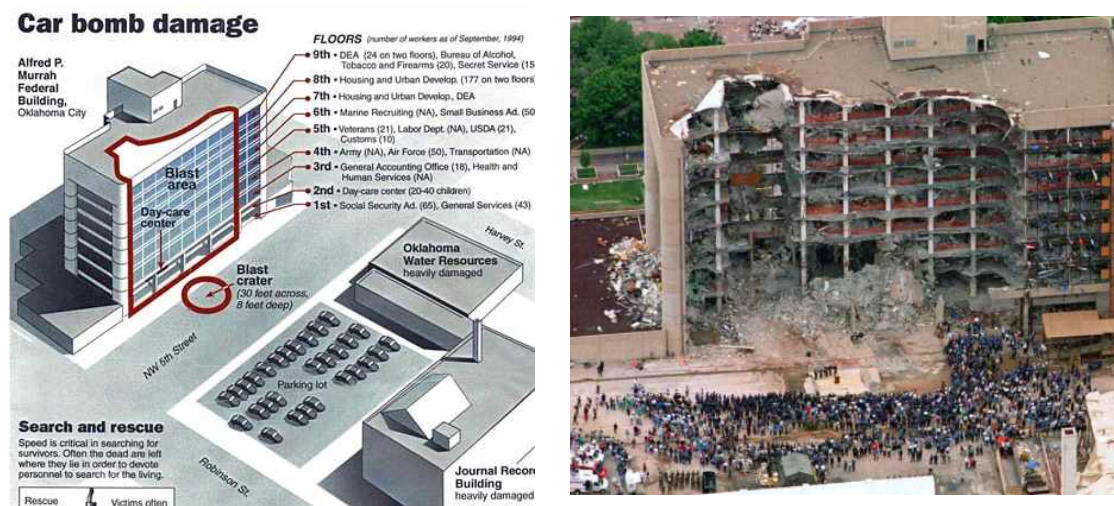


그림 2-2. 오클라호마시티 폭탄테러 사건 (1995)

이 외에도 U.S. GSA(General Services Administration)²⁸⁾는 Facilities Standards for the Public Buildings Service (PBS-PQ100.1)를 발간하여 공공청사에 대한 건축, 구조, 기계, 전기 설계에 대한 기준과 화재방호, 물리적보안에 대한 기준을 제시하였다. 이 중 Chapter 8은 물리적보안(Security Design)에 대한 설계, 운영 지침에 관한 내용으로 각종 탐지설비, 지연(출입통제), 중요보안구역에 대해 설명한다. 특히 현금출납부(Spaces where cash is disbursed), 어린이집(Child care centers), 컴퓨터·서버룸(Computer center) 등에 대해서는 특별한 보안을 고려해야 한다고 규정하고 있다.

미국 원자력시설에 대한 물리적방호는 연방법 10CFR73 「Physical Protection of Plants and Materials」에서 관련 기준들을 명시해 놓고 있다. 특히 원전시설 운영자가 원전에 대한 잠재위협을 분석하여 설계기준위협(Design Bases Threat, DBT)을 설정하고 이에 대한 물리적방호 계획을 수립하도록 규정하고 있다. 또한 물리적방호의 수행 목표, 자격요건, 보안계획, 보안조직, 시스템, 대응병력, 성능유

28) 우리나라의 조달청 역할을 하는 연방기관으로 조달기능 외에 청사관리, 물품관리, 공무여행수송관리, 관용 차량 관리, 전자정부 기능을 수행

지와 관련된 요구사항을 자세하게 명시해 놓고 있다. 특히 그림2-3.과 같이 Part 73.55에는 시설 내에서 필수적으로 물리적방호 체계가 구축되어야 하는 4개의 구역을 선정하여 핵심구역(Vital Area)으로 지정을 의무화하고 있다.

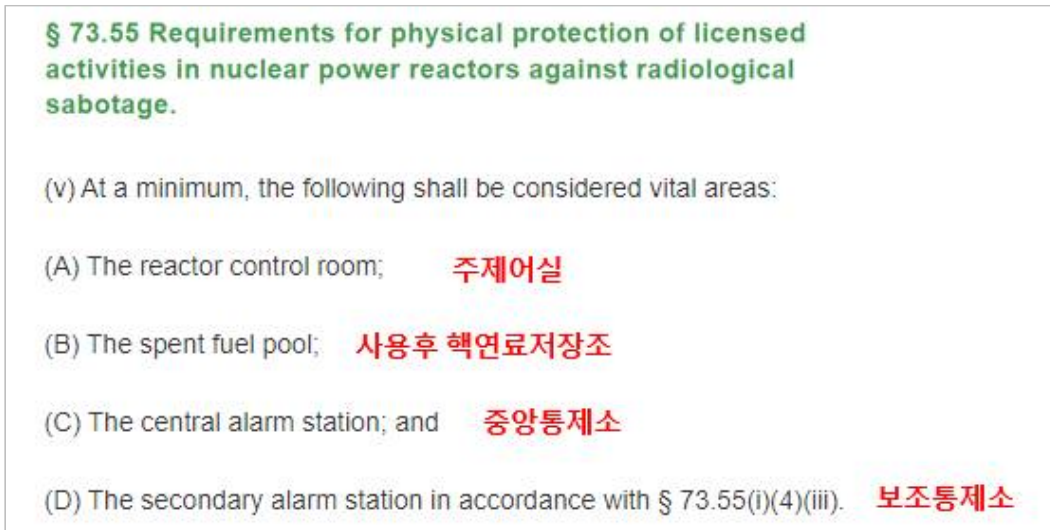


그림 2-3. 미국 연방법 10CFR73에 따른 원자력발전소의 물리적방호 핵심구역

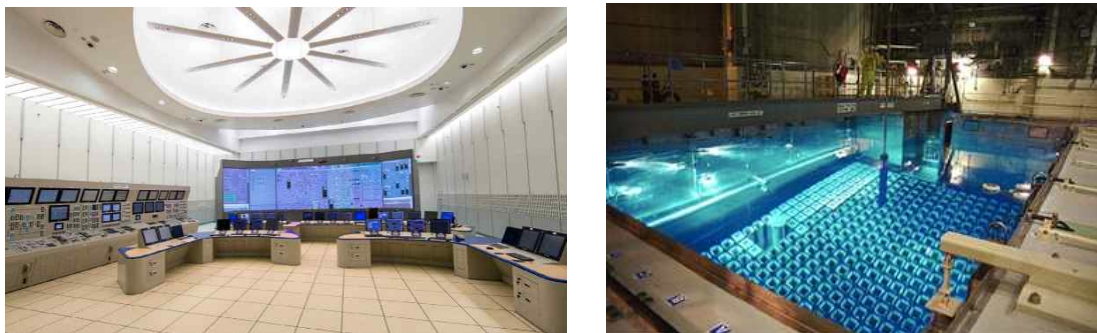


그림 2-4. 미국 연방법에 따른 원자력발전소 내부 핵심구역 예시
(좌: 주제어실 출처: www.enec.gov.ae,
우: 사용후핵연료 저장조 출처: www.ocw.snu.ac.kr)

하지만 국내외의 국가중요시설에 대한 물리적방호 기준을 살펴보면 외부침입으로부터 시설에 대한 물리적방호 유효성을 정량적인 기준으로 제시하고 있기보다는, 정성적인 설계기준(방호구역의 구분, CCTV 등의 설치 기준, 출입 절차 등)을 규정하고 있다.

(4) 물리적방호 위협

특정 시설 및 건축물에 대한 물리적방호 위협은 개인 또는 집단에 행해지는 적대적 행위를 의미한다. 개인이나 집단은 다양한 동기를 가지고 있으며, 동기 및 위협의 특성에 따라 분류할 수 있다.

Joseph A. Demkin(2003)은 물리적방호 위협을 ‘개인의 분노 표출’, ‘범죄 행위’, ‘테러 행위’로 구분하였다.

- ‘개인의 분노 표출’은 개인의 분노를 다른 사람이나 시설을 포함한 자산에 표출하는 것을 의미한다. 분노는 순간적으로 짧은 시간에 표출되지만, 오랜 시간 동안 쌓여 격렬한 분노로 표출될 수 있다. 직장 내 폭력이 대표적인 사례로 꼽힌다. 특징적으로, 분노한 개인은 의도적이고 주기적으로 분노를 표출한다. 그 후 다음 분노가 폭발할 때까지 후회와 슬픔을 경험한다. 이러한 분노의 표출은 범죄 또는 테러에는 해당하지 않는다.

- ‘범죄 행위’는 범죄자가 이익을 얻거나, 상대방에 해를 입히거나, 또는 두 가지 목적을 모두 얻기 위해 행해진다. 일반적으로 사회에서 행해지는 범죄는 대부분이 공공질서를 해치는 경범죄에 해당한다. 경범죄는 범죄자에게 발각 위협이 높다는 인상을 주는 환경을 조성하면 범죄 행위를 효과적으로 억제할 수 있다. 반면, 중범죄는 그 행위가 계획적인지, 충동적인지에 따라 대처 난이도가 결정된다. 충동적인 중범죄는 특정 시간 및 장소에 있는 사람들을 대상으로 무작위로 행해진다. 반면 계획범죄는 특정 개인 및 자산을 대상으로 행해지기 때문에, 사전에 전략적이고 효율적인 대응책이 요구된다.

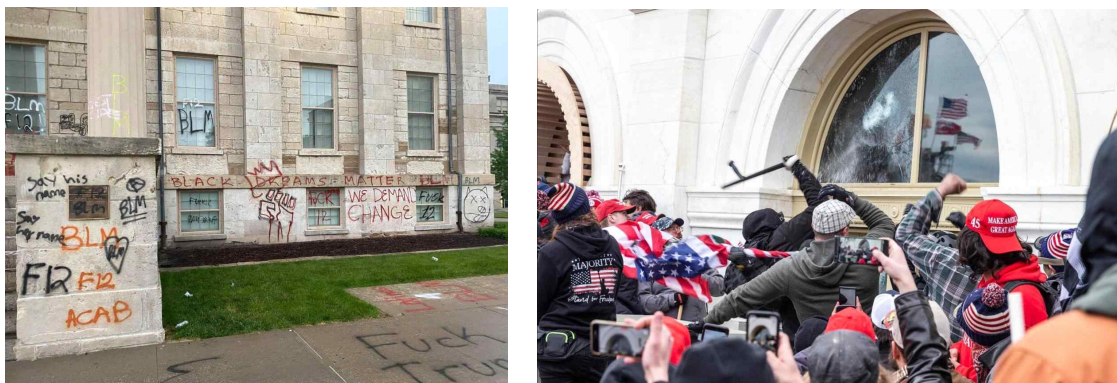


그림 2-5. 범죄행위 사례

(좌: 반달리즘 그래피티, 우 : 미국 국회의사당 점거 폭동사건 (2021.1.6.))

- ‘테러 행위’는 테러리즘을 기반으로 국가, 정치 체제, 개인 또는 시설 등 테러리

스트에게 중요하다고 판단되는 상징적 대상(아이콘)을 향해 행해진다. 테러리스트는 개인보다는 같은 의지를 가진 집단으로 행동하며, 정해진 하나의 목표(시설 파괴, 주요인물 살해 등)에 집중한다. 테러리스트의 결과는 사회적 이슈(미디어에서의 노출), 피해 인명 수, 시민들의 공포 정도 등이 테러 성공의 척도이다.

미해군 암호분석가출신 Malcolm Nance(2008)²⁹⁾는 테러리스트의 종류를 그 목표 및 특성에 따라 아래와 같이 5개 등급으로 분류하였다.

· 1등급 테러리스트: 정부에서 훈련받은 전문가로 잘 훈련되고 최신식 장비를 갖추고 있으며, 그들을 지원하는 정부 정보기관에서의 지원을 받는다. 1등급 테러리스트는 높은 수준의 훈련과 후보자 선별에 따라 임무수행에 실수요인이 적다. 이들은 사업가, 학생, 이민자 혹은 적대 단체 지원자 등으로 위장하고 비공식적으로 활동한다. 1972년 뮌헨 올림픽에서 11명의 이스라엘 체조 선수를 살해한 보복으로 팔레스타인 ‘검은 9월 테러단’을 암살한 이스라엘의 모사드가 대표적이다.³⁰⁾ 이들은 다른 나라의 정권을 목표로 삼거나 테러 보복 같은 보여주기 위한 작전을 수행한다.

· 2급 테러리스트: 이들은 극단적 성향의 종교조직에 충성을 맹세한 종교적 극단주의자이다. 테러를 수행하는 테러리스트로 살아가는 민간인으로, 고급 전투기술과 이데올로기 교육을 통해 임금과 그들의 가족에게 돌아가는 혜택을 위해 임무를 수행한다. 대표적으로 알카에다로, 2001년 9.11 테러를 주도하였다.

· 3급 테러리스트: 이들은 급진적 혁명주의자 또는 준종교적 극단주의자이다. 대표적으로 스페인 바스크 분리주의조직(ETA), 전 아일랜드 공화국군(IRA), 스리랑카 타밀 타이거 등이 해당한다.

· 4급 테러리스트: 이들은 게릴라, 용병으로 가장 예측 가능성이 높은 테러리스트이다. 그들이 같았던 기초 훈련이나 군대 및 군사조직에서 사용했던 장비에 의존하고 있기 때문이다. 일반적으로 약간의 교육을 받고 군대 또는 방위군에서 임무를 수행했던 전직 군인이다.

29) 송창영(2015) 번역,

30) 1972년 뮌헨올림픽에 참가했던 이스라엘 체조선수 11명이 숙소에서 팔레스타인 무장조직 ‘검은 9월단’에 인질로 잡혔다가 결국 전원 살해됐다. ‘평화의 제전’이라는 올림픽에 참가하러 떠났던 청년들이 시신으로 돌아오자 모사드는 ‘신의 분노’라는 이름의 보복작전에 착수했다. 이 테러에 개입한 검은 9월단 대원들을 9년간에 걸쳐 집요하게 추적했다. 할 수 있는 모든 방법을 동원해 이들을 응징했다. 프랑스 파리, 레바논 베이루트, 그리스 아테네 등지에서 보복 암살작전을 수행했다. 전화기에 부비트랩을, 침대 밑에 폭약을 설치하는 방식도 사용됐다. 자동차 폭탄과 포인트 블랭크(근접 사살) 등은 암살의 고전이 됐다. (중앙일보, ‘모사드, 국가안보를 위협한 자는 용서하지 않는다. 2017.12.04.)

· 5급 테러리스트: 아마추어(민간인, 교육을 받지 않은 범죄자, 혹은 민병대, 자경단 등)로 초보적인 경험을 가진 테러리스트이다. 미국의 KKK단이 대표적인 예이다. 비록 덜 조직적이고, 덜 체계적이지만 목표로 하는 시설에 중대한 피해를 가할 수 있는 위험 요소이다.

표 2-4. 테러리스트 등급 및 특징 (Malcolm Nance, 2008)

테러리스트 등급	특징	대표 조직	대표 사례
1등급	정부에서 훈련받은 전문가	이스라엘 모사드	뮌헨 올림픽 '신의 분노' 작전
2등급	종교적 극단주의자	알카에다	미국 9.11 테러
3등급	급진적 혁명주의자 또는 준종교적 극단주의자	아일랜드 공화국군 (IRA)	북아일랜드 '피의 금요일' ³¹⁾
4등급	게릴라, 용병	-	-
5등급	아마추어	KKK단, 개인(외로운 늑대)	오클라호마 시티 연방 건물 폭탄테러

우태호(2013)는 NCPA(2001)의 'Terrorism and Nuclear Power: What are the Risks?'에서 구분한 8가지 발생 가능한 테러를 기반으로, 원자력발전소에 대한 테러 공격시나리오를 분석하였다. 특히 '7. 건물 내부 침투 및 교란'과 '8. 상용항공기 자폭공격'이 위험이 큰 테러 시나리오라고 설명한다.

·1. 차량탐재 폭탄 : 폭탄을 실은 차량으로 원자력시설을 공격하는 시나리오다. 시설 외부에서 폭발하기 때문에 원자력발전소 주요건물에 끼치는 피해는 크지 않을 것으로 예상된다.

·2. 해상 침투 및 공격 : 일반적으로 국내에 위치한 원자력발전소는 해안가에 위치하기 때문에 선박이나 잠수함에 의한 접근성이 용이한 지리적 특성을 가지고 있다. 원전 인근에 해양 경찰이나 순찰대가 배치되어 있긴 하지만, 과거 중국 밀입국

31) 1972년 7월 21일은 북아일랜드 유혈분쟁사상 가장 끔찍한 '피의 금요일(Bloody Friday)'로 기록된다. 구교도와 신교도 사이의 갈등이 끊이지 않던 북아일랜드의 최대 도시 벨페스트에서 이날 오후 폭탄 22발이 잇따라 터졌다. IRA, 즉 아일랜드공화국군이 설치한 것들이었다. 도시 곳곳이 아비규환으로 변한 가운데 9명이 숨지고 130여 명이 크게 다쳤다. IRA는 이미 터진 폭탄 외에도 더 많은 폭탄을 설치해 놓았다고 경고해 온 도시를 공포의 도가니로 몰아넣었다. 결국 영국 정부는 같은 달 말일부터 대대적인 IRA 소탕 작전에 돌입한다. 북아일랜드에서는 아일랜드와의 통합을 바라는 구교도와 영국 내 존속을 바라는 신교도들이 유혈분쟁을 벌여 1969년 이후만도 수천 명이 희생됐다. ([1972년 7월 21일] 북아일랜드 '피의 금요일'테러, YTN, 2010.7.21.)

자들이 영광원전 인근 부지로 침입한 사례가 있다.³²⁾

·3. 폭탄탑재 소형 항공기의 자살공격 : 소형 항공기의 자살공격은 최근 드론의 등장으로 더욱 사회적 이슈가 되는 테러 시나리오이다. ³³⁾ 실제로 2019년 사우디아람코 정유시설이 예멘반군의 드론 폭탄테러로 피습된 사건이 발생하기도 하였다.

·4. 소형 화기로 무장한 테러단의 정면공격 : 소형무기를 휴대한 테러단체의 정면공격은 사건이 발생하면 원전의 비상조치체계의 보안 절차에 따라 물리적방호체계가 작동한다. 외부에서의 정면공격은 다른 시나리오보다 비교적 덜 위협적인 시나리오에 해당한다.

·5. 로켓 또는 중형 무기 공격 : 휴대용 견착식 로켓 등의 무기로 시설을 공격하는 시나리오이다. 원자력발전소의 주요 주요건물(원자로 및 핵연료 저장건물)은 두꺼운 콘크리트 외벽으로 구성되어 있어, 부분적 파괴가 발생할 수 있지만 빠른 시일 내에 회복이 가능할 것으로 예상된다.

·6. 송전선 파괴 : 원자력발전소는 기본적으로 전기를 생산하지만 동시에 외부에서 전력이 공급되어야 안전하게 운영될 수 있다. 원자력발전소에 연결되는 송전선은 그 범위가 넓고 깊은 산속을 통과하기 때문에 송전선로를 완전히 보호하는 것은 불가능하다. 송전선이 파괴되면 발전소내 비상 디젤발전기 등이 작동하여 외부전력이 원활히 공급될 때까지 시설을 유지시켜야 한다.

·7. 건물 내부 침투 및 교란 : 테러리스트가 원자력발전소 내부에 침입하거나 내부 사보타주(Sabotage)에 의한 공격은 많은 피해자를 발생시킬 수 있다. 특히 원자로 건물 등에서의 자살폭탄테러는 제2의 후쿠시마 사고 같은 사회적 혼란을 야기할 수 있다.

·8. 원자로건물 또는 사용후핵연료저장소 건물에 대한 납치된 상용항공기 자폭공격 : 9.11 테러와 유사하게 원자력발전소에 대형 상용항공기가 충돌한다면 충돌과 동시에 화재가 발생하여 여러 방사능 물질이 대기로 유출되고 큰 사회적 충격을 야기시킬 수 있다.

32) 목선타고 밀입국하던 중국인 3명 조사중 (노컷뉴스, 2011.10.05.)
0.6t 밀입국 어선에 영광원전 해상 뚫렸다 (연합뉴스, 2011.10.06.)

33) 국가중요시설 원전 인근 불법비행 드론 막을 방법이 없다. (365 Times, 2020.10.03.)
고리원전 상공에 이틀 연속 드론 추정 비행체 출현...군경, 실제 규명도 없이 사건 종결 (조선일보, 2019.08.16.)

표 2-5. 원자력발전소 테러 시나리오 (우태호, 2013)

시나리오	내용	가능성	중요도
1	차량 탑재 폭탄	자주(Frequently)	하
2	해상 침투 및 공격	종종(Often)	중 (리스크를 수반하는 사고)
3	폭탄 탑재 소형항공기 공격	종종(Often)	
4	소형 화기로 무장한 테러단의 정면 공격	종종(Often)	
5	로켓 또는 중형 무기 공격	종종(Often)	
6	송전선 파괴	드물게(Rare)	
7	건물 내부 침투 및 교란	드물게(Rare)	상 (심각한 사고 이상)
8	납치된 상용 항공기의 자폭 공격	드물게(Rare)	

2.1.2. 물리적방호 체계

(1) 물리적방호 체계의 개념

물리적방호 체계(Physical Protection System, PPS)란 도난, 파괴 또는 적의 공격으로부터 자산이나 시설을 보호하기 위한 인력, 절차 및 장비의 통합체계를 의미한다. 물리적방호 체계의 유효성을 정량적으로 평가하는 기술은 미국 에너지국(Department of Energy)산하 국립샌디아연구소(Sandia National Lab.)에서 1970년대부터 지속적으로 연구되었다.(Garcia, 2008) 본래 개발 목적은 적의 침입으로부터 파괴나 손실되었을 때 큰 사회적 혼란과 경제적 손실이 예상되는 원자력발전소 및 핵무기시설에 물리적방호 체계 설계를 적용하는 것이었으며, 이후 정유시설, 수원시설, 산업시설 등에도 활발히 적용 및 활용되었다. 물리적방호의 대상이 되는 시설들이 대부분 규모가 크고, 손실의 영향이 매우 큰 만큼 물리적방호 설계는 설계자가 어떤 자산이나 시설을 보호할 것인지, 위협은 무엇인지, 그리고 어느 정도의 사용가능한 자원(자본, 인력 등)이 있는지 평가한 후 진행되어야 한다.

물리적방호 체계의 설계 및 평가절차는 그림 2-6.과 같다. 첫 번째 단계에서는 시설 특성을 파악하고, 시설에 대한 잠재 위협을 분석해야 한다. 또한 침입자들이 시설내 목표로 하는 지역(실, 건물) 또는 탈취를 위한 물건, 물질 등을 사전에 정의해야 한다. 두 번째 단계에서는 시설 및 잠재위협을 반영한 물리적방호 체계를 구성해야 한다. 탐지 설비는 어디에 얼마만큼 설치해야 하는지, 지연을 위해서 출입설비 및 절차는 어느 수준으로 해야 하는지, 적절한 대응을 위해서는 어느 정도 규모의 병력을 배치해야 하는지 등이다. 세 번째는 앞에서 설계한 물리적방호 체계를 시설과 위협을 반영하여 평가하는 것이다. 만약 평가 결과가 시설기준에 미흡하다면 두 번째 단계인 물리적방호 체계 재설계를 통해 시설 방호를 강화해야 한다.

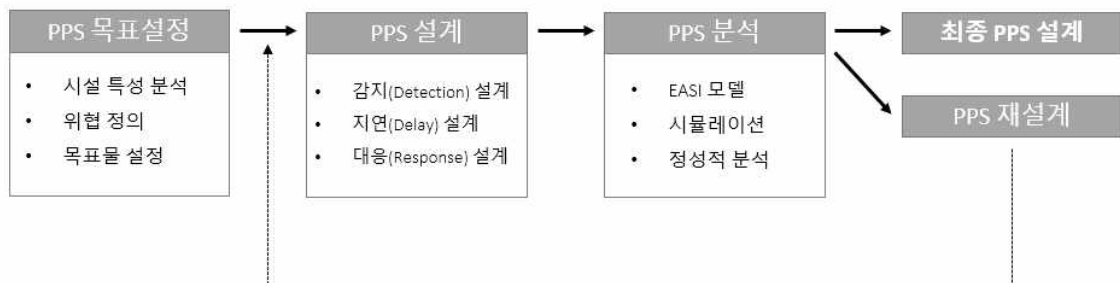


그림 2-6. 물리적방호 체계(PPS)의 설계, 평가 과정

(2) 물리적방호 체계의 구성

기본적으로 물리적방호 체계는 지연(Delay), 탐지(Detection), 대응(Response)로 구성되어 있다.(Garcia, 2008) 첫 번째, ‘탐지’는 적의 침입을 찾아내는 것으로 CCTV 카메라, 각종 센서들이 대표적이다. 두 번째, ‘지연’은 적이 시설에 침입하여 목표로 하는 구역 또는 실로 이동하는 시간을 늦추는 것을 의미한다. 주로 벽, 문, 방탄창문 등이 대표적이다. 마지막으로 ‘대응’은 적을 발견하고 제압하는 것을 의미하며, 대표적으로 시설경비가 대응의 역할을 수행한다. 즉 물리적방호 체계는 특정시설에 대한 외부침입을 빠르고 정확하게 탐지하고, 중요 구역에 대한 접근을 최대한 지연시키며 대응을 통해 침입자를 무력화시켜 시설을 안전하게 유지하는 것으로 이해할 수 있다.

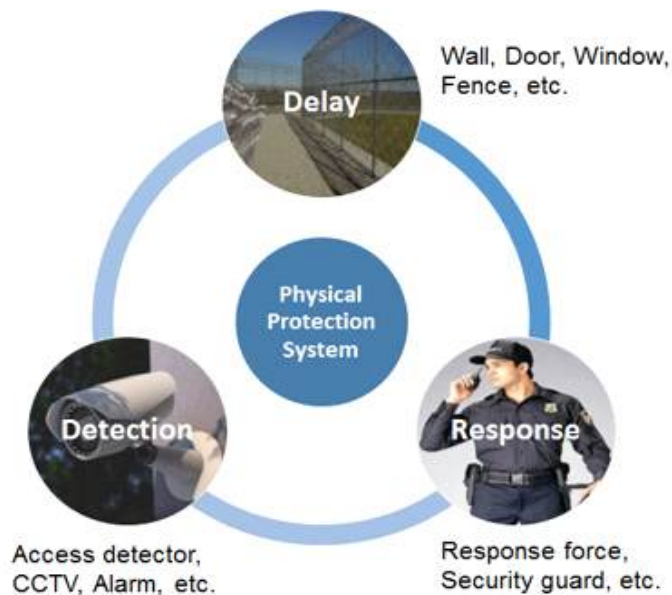


그림 2-7. 물리적방호 체계의 3요소 (탐지, 지연, 대응)

○ 탐지(Detection)

탐지는 시설 내 적이나 비인가자의 침입을 발견하는 기능으로 침입을 탐지하고 정보를 전달하고 이를 분석 및 판단하는 것을 의미한다. 탐지장치로는 탐지(적외선, 열화상)센서, CCTV, 문 자기장센서(Balanced Magnetic Switch) 등이 대표적이다. 탐지는 침입의 탐지확률을 높이고 분석 및 판단시간을 짧게 하고 불필요한 정보의 발생을 줄이는 것이 매우 중요하다. 예를 들어 탐지장치의 민감도를 높이면 탐지 알람이 과도하게 많아 이 정보가 유효한지에 대한 분석, 판단시간이 과도해지

는 부작용이 발생하기도 한다. 흔히 침입을 탐지하기 위한 각종 센서들의 정확도가 높으면 탐지확률이 높아질 것으로 예상하지만, 실제로 최종 판단은 방호 담당자가 수행하기 때문에 인적 오류, 피로도 등을 종합적으로 고려해야 한다. 대표적으로 국내 GOP(대북초소) 및 철책에 수많은 과학화 장비들이 설치되어 있음에도 탐지에 실패하는 사례가 종종 발생하는 이유도 이와 같다.³⁴⁾



그림 2-8. 침입 탐지를 확인하는 중앙통제실과 침입지점 확인 화면 예시 (IAEA Nuclear Security Series No. 40-T)

물리적방호의 정량적 평가를 위해 방호요소별 탐지성능은 표 2-6.과 같이 설치되는 설비의 종류에 따라 Low 단계부터 Very High 단계까지 구분할 수 있다. (본 연구의 시뮬레이션 및 검증과정에서 가정한 보안문의 탐지성능은 Low: 0%, Medium: 30%, High: 60%, Very High: 90%를 적용하였다.)

표 2-6. 출입설비의 종류에 따른 탐지성능 (Betty E. Biringer, 2013)

종류	탐지확률			
	Low	Medium	High	Very High
Intrusion sensor	None	Single sensor type	multiple sensors	-
Door position monitor	None	Position switch	Balanced magnetic switch	-
Door penetration sensor	Conducting tape	Vibration, glass break, or grid mesh	Multiple sensor type	-
ID check	None	Credential	Credential + PIN	Biometric identifier + PIN

34) 軍 ‘오리발 귀순’ 10회 포착하고도 총체적 부실 대응 (헤럴드경제, 2021.02.23.)
 "연간 21만 회 경고음..."계속 울려 노이로제" (2021.03.02., SBS)
 월북한 탈북자, CCTV 5번 잡혔지만 軍 놓쳤다...녹화영상 보고도 몰라 (조선비즈, 2022.01.05.)
 軍 첨단 감시장비도 무용지물... 비 오던 날 배수로 월북한 김씨 (한국일보, 2020.07.27.)

○ 지연(Delay)

물리적 방호 체계를 구성하는 두 번째 요소는 지연이다. 지연은 적의 침입을 늦추는 것을 의미하며 주로 벽, 펜스, 보안문, 방탄창, 잠금장치 등을 지연요소로 활용할 수 있다. 병력은 적의 침입이 예상되는 곳에 위치시킬 경우 적의 침입을 늦출 수 있기 때문에 지연요소로 간주된다. 또한 적절한 위치에 출입통제소를 배치하거나 장애물을 설치하고, 핵심구역까지의 동선을 길게 구성하는 등의 방법을 통해 효과적인 지연설계를 할 수 있다.

지연의 유효성 평가는 각각의 지연요소를 우회하기 위하여 요구되는 시간(탐지 후)이다. 적이 탐지되지 전에도 지연요소를 배치할 수 있지만, 이런 지연시간은 물리적 방호 체계의 유효성평가에 아무런 영향을 끼치지 않는다. 즉, 탐지 전의 지연 시간에는 대응병력이 출동할 수 없기 때문이다. 따라서 탐지 이전의 지연요소는 기본적으로 효과 없이 물리적 방호체계의 비용을 상승시키는 요인이다.

통상 물리적방호를 구성하는 지연요소들의 성능 값 (예를 들어, 보안문을 통과하는데 소요되는 시간, 펜스를 제거하고 통과하는 시간 등)은 실증실험을 통해 얻어진 값을 사용한다. 국내외 국가중요시설의 물리적방호를 연구하거나 규제하는 기관에서 주관하여 실증데이터를 제공한다. 대표적으로 미국은 Sandia National Lab.의 Access Delay Technology Department에서 1970년대 이후 지속적인 연구와 실험을 통해 가장 신뢰도 높은 지연 성능 기준을 제공한다고 평가받으며, 그림 2-9.와 같이 미군 특수부대의 도움을 받아 실험을 수행한다고 알려진다. Sandia Nation Lab.에서 제공하는 대표적인 문, 창문, 펜스, 구조물(벽)에 대한 지연성능 값은 표 2-7.과 같다.³⁵⁾



그림 2-9. 특수부대의 폭발물 사용을 통한 보안문의 지연성능 실험 사진
(SANDIA REPORT, SAND2007-5591)

35) 본 연구의 시뮬레이션, 검증과정에서 사용하는 물리적방호 지연 및 탐지확률은 Sandia National Lab.의 데이터를 적용하였다.

표 2-7. Sandia National Lab.의 지연요소 성능값 (Betty E. Biringer, 2013)

■ 문 지연성능

종류	시간(초)
Wood	10
Hollow core	10
Wire mesh	30
Tempered glass	30
Security glass	120

■ 펜스 지연성능

종류	시간(초)
Fence—8-ft. chain link	10
Fence—8- to 12-ft. chain link with outriggers	10
Vehicle barrier—Concrete blocks	30
Vehicle barrier—Guard rail	120
Vehicle barrier—Steel posts	120

■ 창문 지연성능

종류	시간(초)
Window—Tempered glass	20
Window—Laminated glass	45
Window—Acrylic plastic	30
Window—Polycarbonate plastic	45
Window—Safety glass	90

■ 구조물(벽) 지연성능

종류	시간(초)
Chain link mesh	10
Wood studs and plywood	30
Clay block	30
Concrete built-up roof with T-beam	60
5½-in. concrete roof	90

국내에서는 원자력시설의 물리적방호를 담당하는 한국원자력통제기술원에서 지연요소에 대한 성능기준을 제공한다.³⁶⁾ 한국원자력통제기술원은 그림 2-10.과 같이 실제 물리적방호 시설을 구축해 놓고 실증 실험을 통해 최적의 지연성능을 찾아 내거나 시설의 설계 및 검사에 기준이 되는 물리적방호 기술기준을 제정한다. 현재 물리적방호 기술기준은 대외비로 관리되고 있어 실제 지연 요소들에 대한 성능 값을 확인할 수는 없지만, 미국 Sandia National Lab.에서 제공하는 지연성능 데이터와 크게 다르지 않다고 알려진다.



그림 2-10. 한국원자력통제기술원의 지연성능 실험 사진 (강연욱, 2019)

36) <https://www.kinac.re.kr/board?menuId=MENU00491&siteId=SITE00002>

이 외에도 영국의 LPS(Loss Prevention Standard) 1175 표준은 그림 2-11. 과 같이 제품인증을 위해 침입자의 도구(Tool set) 종류에 따라 견딜 수 있는 지연 시간을 등급(SR1~SR8)으로 분류한다. 가장 낮은 등급의 SR1 등급은 작은 커터 칼 및 드라이버 등의 도구로 1분의 지연성능을 갖는 보안문을 의미하며, SR8 등급은 전동 톱, 글라인더 등의 도구로 20분을 견딜 수 있는 가장 높은 등급의 보안문을 의미한다.

LPS 1175의 기준이 앞에서 고찰한 미국 Sandia National Lab.과 한국원자력통제기술원의 방호요소의 지연 값과 비교해서 긴 지연시간 기준을 제시하는 것을 알 수 있다. 이는 앞의 두 기준은 국가중요시설에 대한 고도로 훈련받은 인력의 침입을 가정하여 소형 TNT 및 총기 등의 사용을 고려한 지연시간이고, LPS 1175는 테러리스트보다 낮은 강도 수준의 침입을 고려한 기준이다. 따라서 국가중요시설 물리적방호 체계 설계 및 평가 시 침입 대상시설의 중요성 및 예상 침입자의 수준 등에 따라 적합한 지연성능을 고려해야 한다.



















LPS 1175: Issue 8				Security Ratings (Tool Set + Delay)							
Threat ↑	 Extreme methods of access to very high value assets using portable tools.	H		H1	H3	H5	H10	H15	H20 SR8		
	 Enhanced professional attempts of access to high value assets.	G		G1	G3	G5	G10 SR7	G15	G20		
	 Professional attempts at forced entry into higher value storage areas.	F		F1	F3	F5	F10 SR6	F15	F20		
	 Experienced attempts at forced entry using tools of a greater battery power.	E		E1	E3	E5	E10 SR5	E15	E20		
	 Experienced attempts at forced entry.	D		D1	D3	D5	D10 SR4	D15	D20		
	 Deliberate forced entry using a wide selection of commonly available, relatively easily concealed tools.	C		C1	C3	C5 SR3	C10	C15	C20		
	 More determined attack using easily concealed tools of a greater mechanical advantage.	B		B1	B3 SR2	B5	B10	B15	B20		
	 Low technology level of attack using small, very easily concealed tools.	A		A1 SR1	A3	A5	A10	A15	A20		
 The Mark of Effective Security www.redbooklive.com				Tool Set		1	3	5	10	15	20
						Delay (Minutes) 					

그림 2-11. LPS 1175 기준에 따른 침입 도구별(A~H) 지연성능(1분~20분)을 포함한 보안문의 등급 기준

(<https://www.lochrin-bain.co.uk/products/security-rated-products/>)

○ 대응(Response)

대응은 적이 시설 내에 침입했을 때 대응군을 침입경로에 출동시켜 이를 저지하는 것을 의미한다. 예상되는 적에 대비하여 적절한 수의 병력과 적절한 위치에 배치시키는 것이 중요하다. 대응은 탐지를 통해 얻어진 침입정보를 전달받은 후 진행되게 되며, 적의 침입을 완전히 저지하였을 때 물리적 방호 체계의 기능도 종료된다. 기본적으로 국가중요시설의 대응병력은 관련 법령에 따라 ‘5분 전투대기조 편성 및 운용’이 의무화되어있어, 5분 내에 대상시설 모든 위치에 출동이 가능해야 하도록 규정되어 있다.

표 2-8. 물리적방호 체계 구성요소별 사례

물리적방호 체계 구성요소	대표 사례
탐지	CCTV, 문열림 감지센서, 움직임 감지 센서, 창문 경보기 등
지연	벽, 펜스, 보안문, 방탄창, 잠금장치, 복잡한 평면형상 등
대응	경비, 대응병력 등

(3) 물리적방호의 정량적 평가

대표적으로 물리적방호 체계를 정량적으로 평가하는 방법은 미국국토안전부 (Department of Homeland Security, DHS)³⁷⁾에서 사용 승인한 Sandia³⁸⁾ 방법론, ASME-ITI³⁹⁾ 방법론, FEMA⁴⁰⁾ 방법론 등이 있다. 이 중 Sandia 방법론은 여러 분야에서 가장 널리 쓰이고 있는 방법으로, 확장성이 높고 정성적, 정량적 방법의 조합으로 심도있는 분석을 요구하는 시설에 적합한 방법이라 평가된다. (Thomas, 2010)

1970년대 Sandia National Lab.에서 개발된 EASI(Estimate of Adversary Sequence Interruption) 모델은 개발 이후 지금까지 응용되어온 물리적방호 유효성 평가도구의 기초가 되는 도구이다. 분석시설에서 가장 취약하다고 판단되는 단일경로의 물리적방호 체계 유효성을 평가하는 방법으로 쉽고 간단하게 분석이 가능하다.(Bennett, 1977) 하지만 이 방법의 가장 큰 단점은 분석자가 미리 선정한 하나의 경로밖에 분석할 수 없다는 것이다. 대규모의 복잡한 공간을 가진 시설에서 가장 취약한 경로를 얻고자 한다면 분석자가 여러 가지 대안 경로들을 미리 선정하고 이들을 비교, 분석해야 한다. 그럼에도 불구하고 EASI 모델은 미국의 주요시설 및 원자력 시설의 물리적 방호 유효성을 분석하고 평가하는데 기본모델로 여전히 활용되고 있다. (Zdenek, 2012)

이후 1980년대 개발된 SAVI(Systematic Analysis of Vulnerability to Intrusion)는 다중경로를 평가할 수 있도록 개선되었고, 시설내부자의 위협을 고려할 수 있는 ASSESS(Analytic System and Software for Evaluating Safeguards and Security)가 개발되었다. 하지만 다중경로를 평가할 수 있는 SAVI와 이를 기반으로 개선된 ASSESS 모두 단순화된 침입경로 다이어그램(Adversary Sequence Diagram)을 평가에 사용하기 때문에, 침입경로의 정확한 거리를 분석에 반영하는데 한계가 있고 또한 실제 시설에 배치된 문, 펜스, 각종 센서의 위치와

37) 미국 정부의 대테러 업무 담당기관으로 9.11테러 이후 행정부 내 22개 기관에 분산되어 있는 테러 정보 분석 및 대테러 관련 업무를 통합함으로써 테러리즘의 위협에 효율적으로 대처하는 것을 목적으로 한다. (두산백과)

38) Sandia National Lab.은 미국 국립연구소로 핵무기 및 핵시설에 대한 종합적인 연구를 수행하는 기관으로, 핵시설에 대한 물리적방호 평가를 위해 Sandia 방법론이 개발되었다. 이후 화학시설, 정수시설 등 테러로부터 위협 시 사회적 손실이 큰 시설에 대한 물리적방호 체계 평가에 널리 활용되고 있다.

39) American Society of Mechanical Engineers(미국기계학회) Innovative Technologies Institute에서 개발하여 DHS에서 주요 사회기반시설의 위험도 평가에 활용한다.

40) Federal Emergency Management Agency(미연방재난관리청)에서 발간한 FEMA430는 건물 취약성 체크리스트에 기반 하여 물리적방호 체계의 취약성을 평가한다.

이들 간의 거리를 실제와 동일하게 배치하는데 한계가 있다.(S.S. Jang et al., 2007) 또한 실내 공간의 실(Room) 중심 핵심구역 개념을 구현하기엔 한계가 있고, 정형화된 시설 외에는 공간재현을 위한 별도의 조작성이 요구되며 개발된 지오래된 분석 도구인 만큼 정밀한 환경 구축 및 결과 값 도출엔 한계가 있다. (신재섭, 2015)

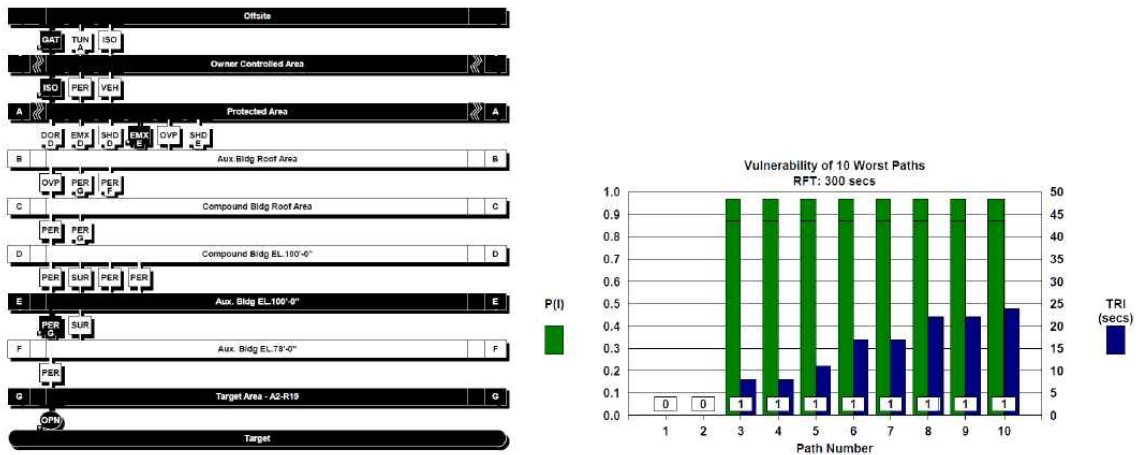


그림 2-12. SAVI를 통한 물리적방호 취약경로 분석 화면 (신재섭, 2015)

S.S. Jang(2008)은 휴리스틱(경험에 기초한 추측함수를 사용하여 탐색범위를 좁히는 방법) 탐색기법을 적용한 SAPE(Systematic Analysis of Physical Protection Effectiveness)를 개발하였다. (D. Cakija et al., 2020; S.S. Jang et al., 2009) EASI이후 개발된 물리적방호 체계 방법론 및 분석도구들은 경로의 수를 다양화 하거나 시설내부자를 고려하거나, 탐색효과를 높이는 등 기존에 비해 발전되었지만 기본적으로 침입자의 경로를 기반으로 분석하는 EASI를 기반으로 하는데 공통점이 있다. (Garcia, 2008; Y.A. Setiawan, 2018)

EASI 모델은 침입자의 이동경로를 기반으로 시설을 구성하는 탐지요소의 탐지 확률, 지연요소의 시간, 대응요소의 대응확률에 기반하여, 특정시설(목표물)이 얼마나 안전한지 그 유효성을 얻을 수 있다. 시설의 물리적방호 체계 유효성은 아래 수식 2-1.과 같이 적의 침입을 탐지할 확률과 적을 무력화할 확률의 곱으로 계산되며, 적의 침입을 탐지할 확률은 수식 2-2.와 같다.

$$P_{(E)} = P_{(I)} \times P_{(N)}$$

· $P_{(E)}$: 물리적방호 체계의 유효성 (Effectiveness of PPS)
· $P_{(I)}$: 저지확률 (Probability of Interrupting the attack)
· $P_{(N)}$: 무력화 확률 (Probability of Neutralizing)

수식 2-1.

$$P_{(I)} = [1 - \prod_{i=1}^k P_{(ND)}]$$

· $P_{(ND)}$: 특정 i지점에서 탐지지 않을 확률
· k	: CDP 이전의 탐지지점의 수
· CDP	<p>최후탐지지점 (Critical Detection Point)</p> <p>:최소 지연시간이 대응인력의 대응시간을 초과하는 탐지 한계점으로, 적의 침입 저지 및 무력화를 위해 탐지되어야 할 마지막 지점.</p> <p>※ CDP 이전에 침입이 탐지되어야 하고, CDP 이후에 대응군의 준비시간 확보를 위해 충분한 지연이 되어야 함.</p>

수식 2-2.

예를 들어 표 2-9의 상단 그림과 같이 단순화된 시설을 적이 침투한다고 가정하면, 침입자는 첫 번째 펜스(탐지지점: P01)를 통과한 후 두 번째 펜스(탐지지점: P02)를 지나 건물로 진입(탐지지점: P03)한 후 목표구역 및 목표물에 진입(탐지요소: P04, P05)하게 된다. 이 과정에서 소요되는 지연시간 및 탐지확률을 정리하면 표 2-9와 같다. Fence나 Door 같은 통과지점에는 이를 제거하면서 소요되는 시간과, 제거 과정에서 탐지되는 확률을 가지고 있다. 반면 통과지점 사이의 공간은 이동하는데 소요되는 시간만 있고 탐지확률을 가지지 않는다.

앞서 2.1.2 (3)장에서 설명한 통합방위법 제15조의2에 따라 국가중요시설은 5분 전투대기조가 편성되어야 한다는 규정에 따라 대응출동시간(Guard Response Force Time)을 300초로 가정하였다. 이는 적이 방호대상 시설에 침입했을 때 대응병력은 시설 어느 위치든 5분 내에 도달해야 한다는 것을 의미한다. 이에 따라 최후 탐지지점(Critical Detection Point, CDP)⁴¹⁾에 위치한 ‘#4 Double fence’앞에 설치된 탐지지점에서 반드시 적의 침입을 탐지해야만 적이 목표물에 접근하는 것을 막을 수 있다는 결과를 얻을 수 있다. 따라서 제시한 수식 2-1.과 수식 2-2.에 따라서 #4 Double fence 앞에서 적을 탐지할 확률 $P_{(I)}$ 과 제압확률을 곱한 $P_{(E)}$ 를 통해 예시의 침투경로를 갖는 시설의 물리적방호 유효성을 도출할 수 있다.⁴²⁾

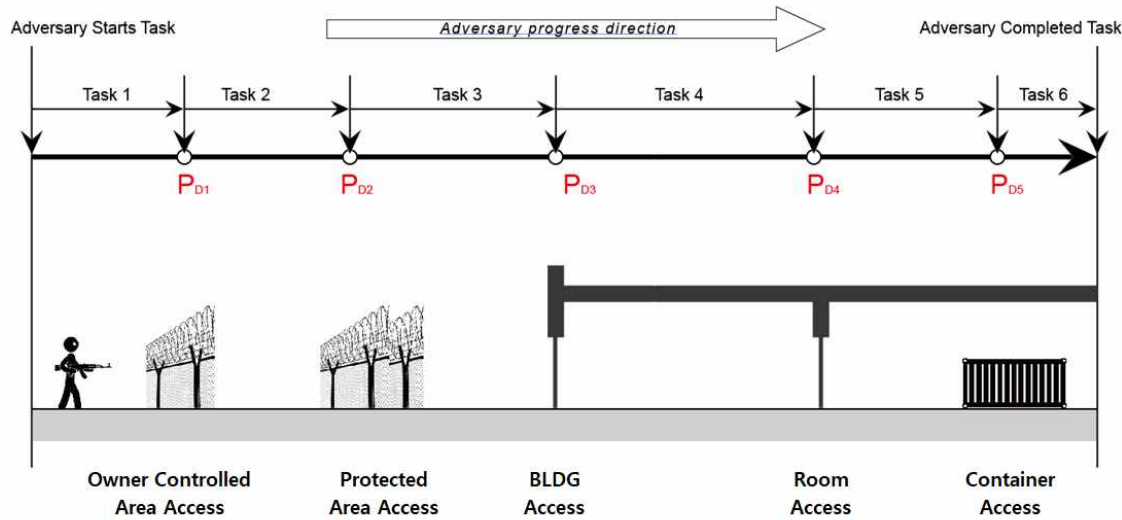
$$\cdot P_{(I)} = 1 - (0.5 \times 0.3) = 0.85$$

$$\cdot P_{(E)} = 0.85 \times 0.9 = 0.765$$

41) 적을 반드시 탐지해야 하는 위치(Critical Detection Point)는 #1부터 #10까지 전체 소요되는 시간 (630.4 초)에서 Guard Response Force Time 300초를 역으로 빼서 그 위치를 산정한다.

42) 강연욱(2019)은 국내 원자력발전소(고리1호기) 물리적방호 시스템의 취약성 평가 시뮬레이션 결과 0.96의 유효성을 도출하였고, O. D. Oyeyinka(2014)는 나이지리아 핵 연구시설의 물리적방호 유효성을 분석한 결과 일반적인 보안시설에 요구되는 유효성 0.75를 상회하는 0.9 이상의 결과를 도출하였다. Zou Bowne(2017)은 물리적방호 유효성을 얻기위한 저지확률 $P_{(I)}$ 을 0.95로 목표로 하여 최적의 대응출동 시간(RFT) 도출 연구를 진행하였다.

표 2-9. 외부침입에 따른 물리적방호 정량적 평가 예시



[방호값 설정]

- 침입속도: 2.75m/초 (10km/시간)
- 대응 출동시간 : 300초
- 무력화 확률(제압확률) : 90%

#	Description	소요시간	탐지확률	Note	최후 탐지지점 (CDP)
# 1	이동 (Owner Controlled Area)	36.4 초	-	이동 거리 : 100m	
# 2	펜스 제거	100 초	0.5	-	
# 3	이동 (Protected area)	72.7 초	-	이동 거리 : 200m	
# 4	이중펜스 제거	150 초	0.7	-	●
# 5	이동 (건물 접근)	54.5 초	-	이동 거리 : 150m	
# 6	건물 출입문 제거	120 초	0.7	-	
# 7	이동 (목표구역 접근)	18.2 초	-	이동 거리 : 50m	
# 8	목표구역 출입문 제거	60 초	0.9	-	
# 9	이동 (Container 접근)	3.6 초	-	이동 거리 : 10m	
# 10	Container 파괴	15 초	-		

(4) 물리적방호 유효성 활용

물리적방호 체계의 유효성($P_{(E)}$)은 특정시설이 외부 침입으로부터 얼마나 안전한지를 정량적으로 평가하는 지표로, 앞에서 물리적방호의 유효성 도출방법에 대해 서술하였다. 분석을 통해 도출한 물리적방호 유효성은 시설의 설계과정에서 표 2-10.과 같이 크게 4가지의 활용이 가능하다.⁴³⁾ 첫 번째는 시설운영자 또는 규제기관의 물리적방호 유효성 기준을 만족하도록 시설을 설계할 때 적용이 가능하다. 예를 들어, 국가중요시설 설계 발주 시 외부 침입으로부터 최소 0.9 이상의 물리적방호 유효성을 확보한 시설을 요구한다면, 설계자는 해당기준을 만족할 수 있도록 물리적방호 체계를 반영한 시설을 설계해야 한다. 두 번째는 시설 운영 중 물리적방호 강화를 위한 여러 가지 대안 중 높은 효과를 가진 대안을 선정하는데 활용할 수 있다. 예를 들어, A, B, C 지점의 강화 대안지점이 있을 때 어떤 지점을 강화하는 것이 가장 높은 효과를 갖는지 비교해 보고 최적대안을 선정하는 것이다. 세 번째는 시설의 개선(Upgrade) 전후의 물리적방호 유효성을 비교하여, 외부 침입으로부터 얼마만큼 안전해졌는지 정량적으로 평가할 때 활용이 가능하다. 마지막으로 장기적으로 사용하는 국가중요시설의 물리적방호 유효성을 주기적으로 평가하여 물리적방호 체계의 안정성을 시계열적으로 관리하는 데 활용할 수 있다.

표 2-10. 물리적방호 유효성($P_{(E)}$)의 활용 예시

	물리적방호 유효성 활용	예 시												
1	시설의 설계기준	OO국가중요시설의 물리적방호 유효성은 0.9를 만족하도록 설계												
2	최적 강화지점의 선정	<table border="1"> <thead> <tr> <th>대안</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>강화 후 물리적방호 유효성</td> <td>0.7</td> <td>0.88</td> <td>0.65</td> </tr> <tr> <td>선정 안</td> <td></td> <td>✓</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	대안	A	B	C	강화 후 물리적방호 유효성	0.7	0.88	0.65	선정 안		✓	
대안	A	B	C											
강화 후 물리적방호 유효성	0.7	0.88	0.65											
선정 안		✓												
3	시설 개선 전·후 효과 비교	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>개선 전</th> <th>개선 후</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>물리적방호 유효성</td> <td>0.7</td> <td>0.91</td> </tr> </tbody> </table> <p>※ 시설 개선효과: 0.21</p>		개선 전	개선 후	물리적방호 유효성	0.7	0.91						
	개선 전	개선 후												
물리적방호 유효성	0.7	0.91												
4	주기적 평가	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>'19</th> <th>'20</th> <th>'21</th> <th>'22</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>물리적방호 유효성</td> <td>0.7</td> <td>0.72</td> <td>0.8</td> <td>0.85</td> </tr> </tbody> </table>		'19	'20	'21	'22	물리적방호 유효성	0.7	0.72	0.8	0.85		
	'19	'20	'21	'22										
물리적방호 유효성	0.7	0.72	0.8	0.85										

43) Sandia National Lab. (https://share-ng.sandia.gov/itc/assets/17_evaluation-of-physical-protection-systems.pdf)

2.1.3. 공간 네트워크

(1) 네트워크(그래프) 이론

그래프 이론은 양의 변화를 시각적으로 표현할 때 정점 (node)와 점의 끝점으로 하는 변(edge)으로 이루어진 도형을 말하며, 1970년대 들어 건축 및 도시분야에서 본격적으로 사용되기 시작했다. (윤철재, 2014)

그래프 이론은 스위스의 수학자 L.오일러가 연구한 ‘괴니히스베르크의 다리 건너기 문제’가 시초이다. 괴니히스베르크를 추상화시킨 4개의 노드와 7개의 엣지로 구성된 그래프로 한 번에 7개의 다리를 건너는 방법을 수학적으로 증명하면서 그래프 이론이 학문 분야로 연구되기 시작하였다.

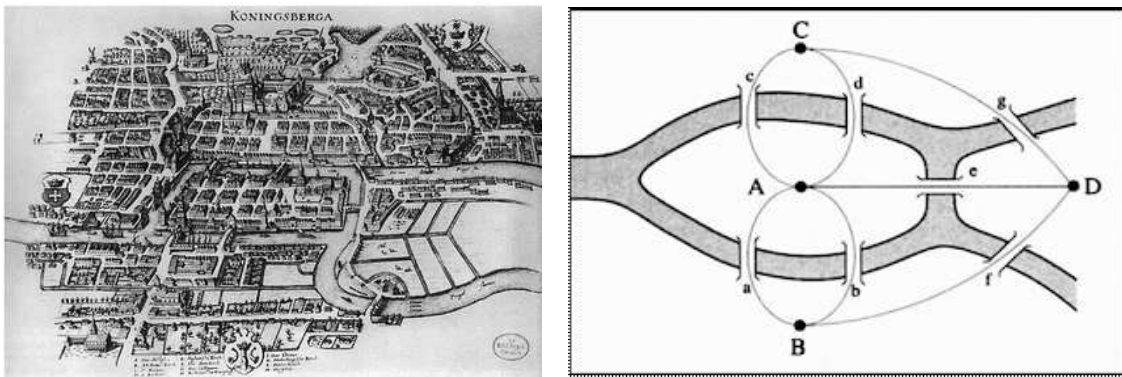


그림 2-13. 괴니히스베르크의 일곱 다리와 그래프

이후 발전된 그래프 이론은 다양한 분야에서 복잡한 시스템을 그래프로 재현하는데 활용되었다. 항공분야에서 항공노선을 분석하거나, 교통분야에서 도로 및 철도, 화물 운송 등을 분석하는데 사용되었으며, 건축, 도시분야에서 건축, 도시공간을 정량적으로 분석하고 보행을 예측하는 방법 등에도 활용되었다. 또한 그래프 이론에서 그래프의 특성을 정량적인 기법으로 표현하는 여러 지표들도 개발되었다. 대표적으로 중앙성(Centrality)은 네트워크에서의 노드의 영향력을 나타내는 지표이다. 세부적으로는 연결 중앙성(Degree Centrality), 인접 중앙성(Closeness Centrality), 사이 중앙성(Betweenness Centrality)⁴⁴⁾ 등이 있다.

44) 사이중앙성은 다른 점에서 점으로 가는 유일한 통로 역할을 얼마나 하는지 측정하는 지표로, 본 연구에서 실내 이용자의 이동편의성을 나타내는 지표로 활용하였다.

(2) 공간구문론 (Space Syntax)

공간구문론(Space Syntax)은 1984년 영국 런던대학교의 빌 힐리어와 줄리엔 헨슨(Bill Hillier & Julienne Hanson)에 의해 정립되었으며 공간을 정량적으로 기술하는 분석방법론이다. 이 둘은 건축물의 공간구조나 도시의 조직, 발생적 형태가 어떻게 특정한 형상(Configuration)을 나타내는가에 대한 의문에서 시작한다. 건축물의 공간 혹은 도시공간의 질서화는 실제 이 공간을 이용하는 사람들 행태에 기인한다. 그렇기 때문에 사회는 바로 건물, 도시의 공간 본질과 형태에 개입한다고 말한다. 즉, 건축공간의 기능이나 장식적 요소에 국한하는 것이 아니라 공간의 배열과 관계를 통해 공간적 질서를 발견하고자 했던 것이다. 다시 말해서 공간의 배열은 사람들의 움직임과 점유가 서로 만나고 교차하거나 분리되는 방법론적 이야기이다.

공간구문론에서는 공간의 배치를 노드(node)와 엣지(edge)의 그래프로 표현하여 분석하며, 여기에 깊이의 개념을 도입하여 전체적인 그래프 구조에서 개별 노드의 위상학적 중앙성을 지표화한다. 대표적으로 축선도(Axial map)와 볼록공간도(Convex map) 두 가지 방법으로 공간을 재현한다.

축선도는 도시규모의 공간을 재현하는데 주로 사용된다. 이는 축선도로 재현한 가로 네트워크에서 통합도 등⁴⁵⁾의 지표가 보행량을 잘 예측하기 때문이다. 하지만 직선의 길은 하나의 축으로 재현되지만 곡선형의 길은 무수히 잘게 잘라진 축으로 구성된다는 점과 지형의 고저차를 반영하지 못한다는 한계점이 있다. (조형규, 2005)

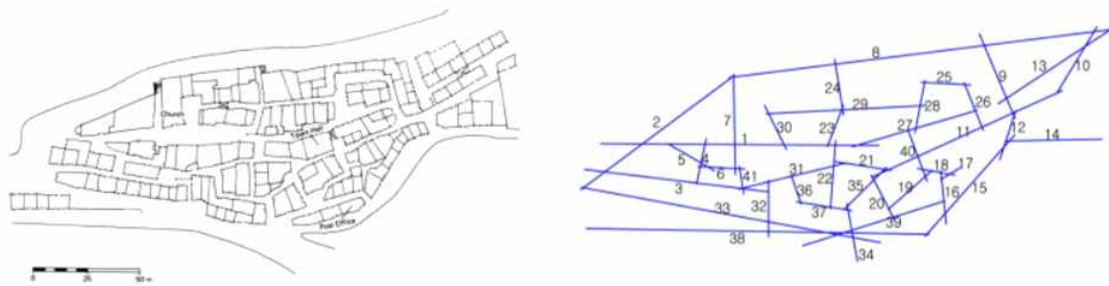


그림 2-14. 축선도로 재현된 G-Town (Hillier et al, 1984)

45) 공간구문론에서는 공간의 위상학적 관계를 정량적으로 분석하기 위해 통제도(Integration), 연결도(Connectivity), 명료도(Intelligibility), 통제도(Control value) 등의 지표가 주로 사용된다.

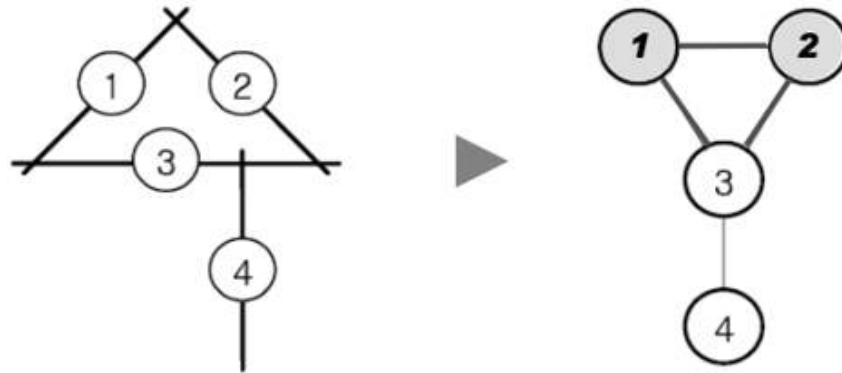


그림 2-15. 축선도에서의 노드, 엣지 개념 (변나향, 2014)

블록공간도는 건축물 규모의 공간을 재현하는데 주로 사용된다. 블록공간도는 블록공간과 그 공간을 연결하는 연결관계를 나타내는 것인데, 이때의 연결관계는 시각적 연결이 아닌 동선의 연결을 나타내는 것이다. (이상은, 2002) 따라서 축선도처럼 가시성에 기반을 두고 배치에 따른 공간 구조를 나타낸 것이 아니라 단순히 공간의 외양으로부터 기본 단위 공간을 구성하고 물리적 인접관계에 따라 연결관계를 시각화한 것이다. (조형규, 2005) 따라서 주로 주거(아파트)평면, 병원, 갤러리 등 건축물의 내부공간을 분석하는데 적합하다. 하지만 대형공간은 지나치게 큰 블록공간으로 형성되거나, 실내 평면 형태에 따라 블록공간 배치가 좌우되어 비정형의 공간은 과도하게 공간이 분할된다는 단점이 있다. (조형규, 2005)

블록공간도에서 공간을 정량화하는 방법은 그림 2-16.과 같이 공간을 분할하고 도식화하는 방법이다. 하지만 건축공간이라는 것이 명쾌하게 하나의 공간으로 인식되지 않고 불규칙한 공간의 조합으로 인식될 수 있다. 그러므로 J-Graph로 표현하기 위해 평면을 각각의 공간으로 정의해야 하는 문제가 발생하였고, 힐리어는 블록공간(Convex Space)⁴⁶⁾으로 그 해결책을 제시하였다. J-Graph는 어느 하나의 공간에서 연결된 다른 블록공간들과 선택할 수 있는 동선들, 즉 각각의 경우마다 다음 공간으로 가기 위해 통과해야 할 동선의 수를 나타낸다. 기준이 되는 공간에서 목표점이 되는 공간으로 가는 동안 통과하는 동선의 수를 그 공간의 ‘깊이(Depth)’라고 하고, 이렇게 구해진 공간들이 깊이의 평균값을 ‘평균적인 깊이(Mean Depth)’라고 정의할 수 있다.

46) 볼록(Convex)공간은 오목(Concave)공간과 구별되는 말이다.

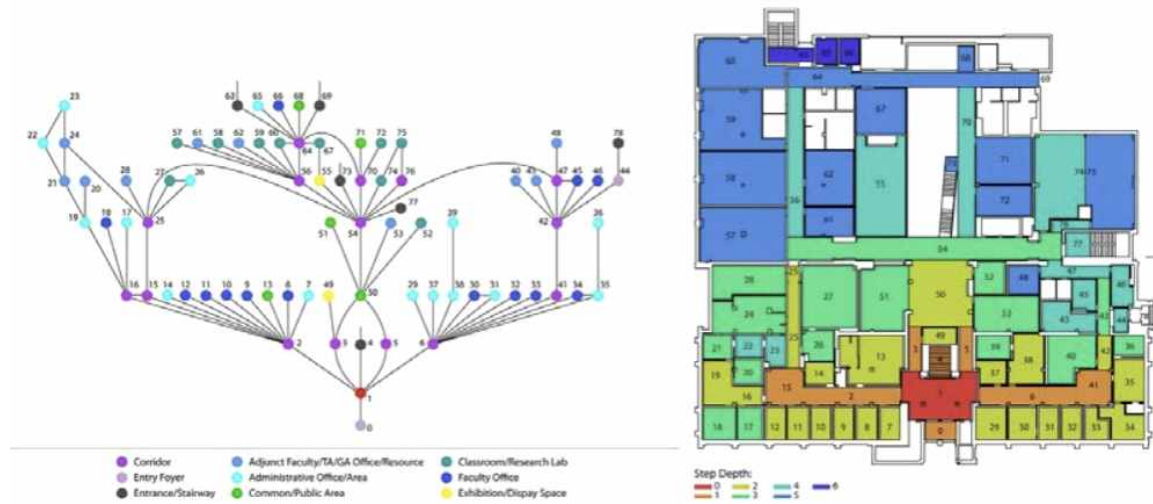


그림 2-16. J-Graph와 블록공간도(Convex space) (Yelena Mclane, 2015)

공간구문론에서 공간들간의 위상학적 관계성을 분석하는 지표로는 통합도(Integration)를 사용한다. 통합도는 단위공간에서 다른 단위공간까지의 연결관계의 평균적인 깊이(Mean Depth)의 정도를 나타내는 지표로,⁴⁷⁾ 어떤 공간의 통합도 값이 높다는 것은 나머지 공간들로의 연결관계의 평균적인 깊이가 얕고, 따라서 해당공간에서 다른 공간으로의 접근이 용이하다는 것을 의미한다.

47) 기본적으로 통합도는 평균적인 깊이(Mean Depth)에 반비례한다. 그러나 단순히 MD의 역수를 취하지는 않고, 전체적인 공간구조의 규모(전체적인 공간구조를 구성하는 노드의 개수)의 영향을 상쇄하기 위한 보정이 추가된다. 이에 대한 세부적인 설명은 공간구문론 원전(Hillier, B. & Hanson, J. "The Social Logic of Space," Cambridge University Press, 1984)을 참고한다. 그럼에도 불구하고 전체적인 공간구조의 규모에 의한 영향이 있을 가능성을 염두에 두고, 본 연구에서는 모든 분석사례가 동일한 개수의 노드로 구성되도록 하였다. 앞서 언급한 사례선정 원칙 또한 노드의 개수를 동일하게 하기 위함이다.

(3) 물리적 거리(metric distance)개념에 기초한 네트워크

물리적 거리개념에 기초한 네트워크는 앞에서 설명한 공간구문론과 달리 노드와 노드 간에 실제 보행 이동 시 발생하는 물리적 거리가 반영된 네트워크이다. 따라서 전체 네트워크 내에서 기하학적으로 얼마나 중심에 있는지, 또는 얼마나 주변부에 위치해 있는지 설명할 수 있다. 즉 실제 물리적 거리에 기초하였기 때문에 보행량 및 교통량 예측 모델이라는 목적으로부터 실제 보행에 동반되는 물리적 개념을 기반으로 기하학적 요소의 반영이 더욱 적합한 것이라는 가설의 설정이 가능하다. (윤철재, 2014)

따라서 물리적 거리 개념에 기초한 네트워크를 활용하면 그래프 이론에서 접근성 지표로 사용되는 중심성(Centrality)을 더욱 정확하게 도출해 낼 수 있다. 특히 하나의 노드에서 다른 노드까지 도달하는 최단거리의 평균을 나타내는 인접 중앙성(Closeness Centrality)과 하나의 노드가 다른 두 노드 간의 최단경로에 얼마나 포함되어 있는지를 나타내는 사이 중앙성(Betweenness Centrality)은 모두 거리 개념이 포함된 지표이기 때문에 물리적거리 개념에 기초한 네트워크를 활용하면 더욱 신뢰도 높은 지표로 사용될 수 있다.

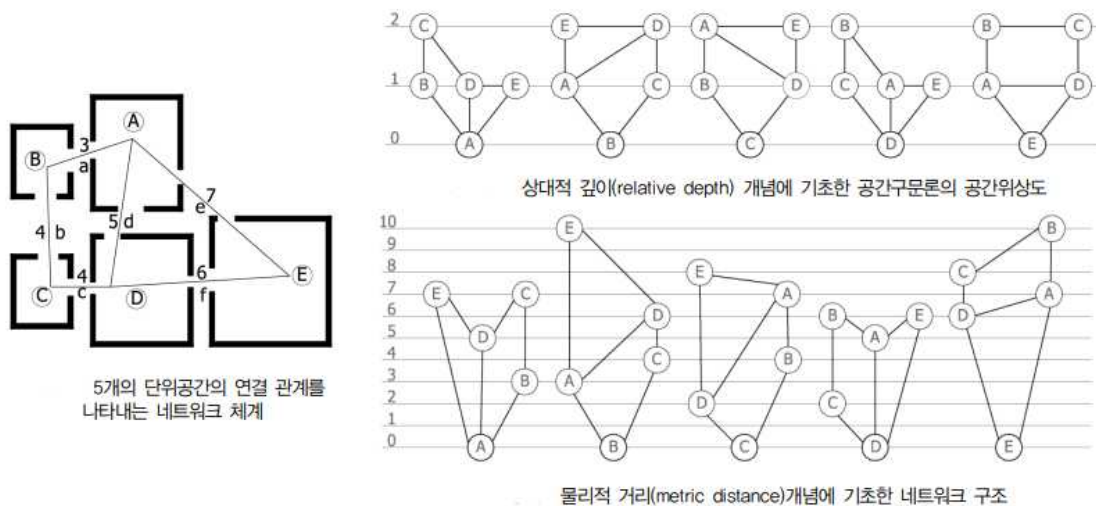


그림 2-17. 공간구문론과 물리적 거리 개념에 기초한 네트워크 비교 (윤철재, 2014)

(4) Door-to-door 네트워크

Door-to-door 네트워크는 한 공간 내에 위치한 문에서 다른 문까지 연결하는 방식이다. 각각의 문들이 노드가 되고 문을 연결하는 동선이 엣지로 재현된다. 즉 공간의 중심이 노드가 되고 이들간의 이동을 엣지로 재현하는 공간구문론(또는 물리적 거리에 기초한 네트워크)와 반대되는 개념으로 이해할 수 있다. 보통 문과 문을 연결하는 엣지는 최단경로로 고려한다. 실내공간에서 이동, 대피 등은 문을 기준으로 하기 때문에 Door-to-door 네트워크를 활용하면 실내공간 탐색을 위한 효율적인 경로를 도출할 수 있다. (L. Liu, 2011)

하지만 공간(실)을 나타낼 수 있는 대표 엣지가 없고, 한 공간에 여러 문이 설치되어 있는 경우, 많은 수의 엣지가 생성된다. 많은 수의 엣지로 재현된 시설에서 침입경로를 탐색하면 무의미한 연산이 많아지고 결과 도출에 오랜 시간이 소요되는 한계가 있다.

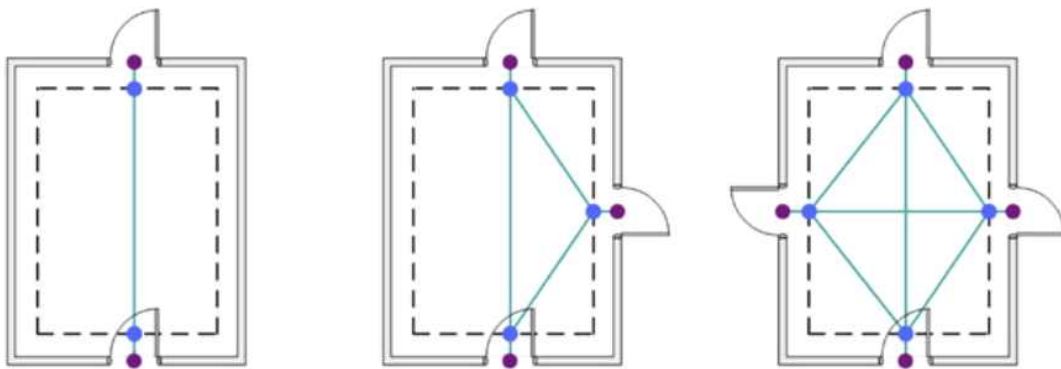


그림 2-18. Door-to-door 네트워크 예시 (Jin-kook Lee et al., 2010)

(5) 길찾기(Navigation) 네트워크

길찾기 네트워크(또는 길찾기 그래프)는 실내외 공간에서 길찾기 및 대피경로 선정 등에 사용된다. 주로 노드는 위상학적 공간, 엣지는 노드사이의 경로를 재현한다. 복잡한 대형시설에서 공간을 길찾기 네트워크로 재현하기 위해서는 정해진 규칙과 자동화된 방법이 필수적이다. 대표적으로 Visual Graph, Generalized Voronoi Graph, Medial Axis Graph 등이 주로 사용된다.

Visual Graph는 공간에 위치한 두 노드가 서로 시각적으로 연결되었을 때 엣지로 연결하는 방식이다. 하지만 이 방법은 노드가 늘어남에 따라 네트워크의 복잡도가 급격히 증가하고, 길 찾기가 인간의 인지와 일치하지 않는 단점이 있다. (Will Y. Lin et al., 2018)

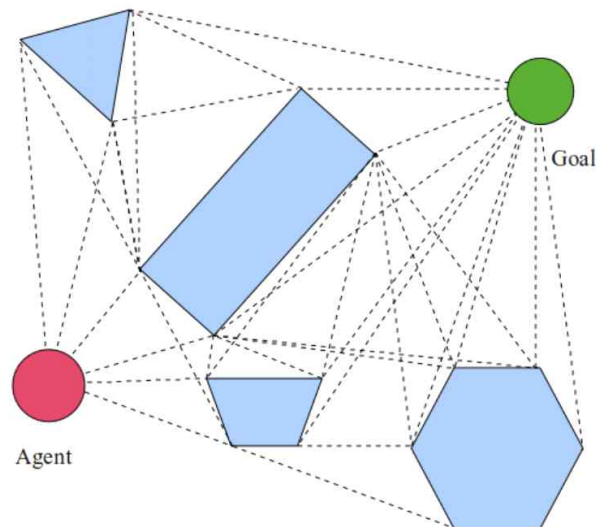


그림 2-19. Visibility Graph 예시
(Sam Niu et al., 2018)

Generalized Voronoi Graph(일반화된 보로노이 그래프)는 보로노이 다이어그램⁴⁸⁾을 활용하여 그래프를 생성하는 방식으로 서로 다른 두 장애물과 같은 거리에 위치한 점들을 집합화하여 생성한 그래프이다. 비정형의 장애물과 공간에 우수한 적용성을 가지고 있지만, 과도한 노드와 엣지가 생성되는 단점이 있다. (Liping Yang et al., 2018)

48) 1868년 우크라이나에서 태어난 러시아의 수학자 조지 보로노이의 이름을 따서 이름이 지어졌으며, 똑같은 다각형으로 채워져 있어 규칙이 없는 것처럼 보이지만, 수학적 원리로 평면을 분할하는 과정에서 나타나는 그림(다이어그램)을 의미한다. [네이버 지식백과]
평면 위에 위치한 여러 개의 점들 중 가장 인접한 두 개의 점을 선정하여 수직 이등분선을 그리면 평면이 분할되며 생성되는 다이어그램이라고 하며, 이때 생성되는 다각형을 보로노이 다각형이라고 부른다.

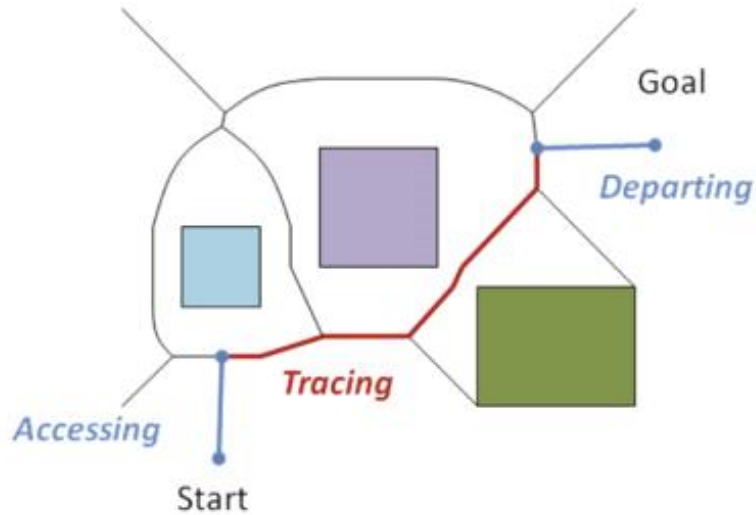


그림 2-20. Generalized Voronoi Graph 예시 (소명뢰 외, 2015)

Medial Axis Graph는 Skeleton이라고 부르기도 하는데, 공간 내 경계에 닿는 가장 큰 원들의 중심을 연결하여 그 공간의 내부를 연결하는 동선 및 형태를 추출하는 방식이다. 앞서 설명한 Visibility Graph, Generalized Voronoi Graph보다 적은 수의 노드와 엣지 공간을 동선을 간결하게 재현할 수 있고, 인간의 일반적인 경로 인지와 매우 유사하여 실, 복도 등의 실내 동선을 잘 구현해 낼 수 있다는 장점이 있다. (Meiqing Fu et al., 2020)

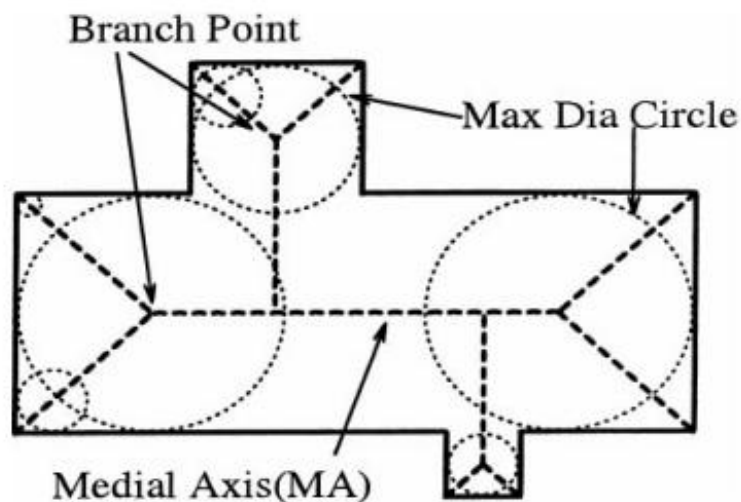


그림 2-21. Medial Axis Graph 예시
(W. R. Quadros et al., 2001)

(6) 의미론적(Semantic) 공간 네트워크

의미론적 공간 네트워크는 일반 네트워크에서의 사용되는 단일노드가 길찾기 및 공간탐색 과정에서 충분한 정보를 포함하고 있지 않은 한계를 극복하고자 공간 특성을 고려한 의미를 포함하고 있는 네트워크를 의미한다. 주로 노드에 공간 이름, 특성 등이 부여된다. 그림 2-22.와 같이 특정 노드의 기능에 따라 실 노드, 출입구 노드, 엘리베이터 노드, 분절점 노드 등으로 구분할 수 있다. 여기서 엣지는 노드간의 이동을 표현한다. 네트워크를 통한 공간의 재현은 인지와의 유사성이 매우 중요한데⁴⁹⁾, Medial Axis 기반의 의미론적(Semantic) 네트워크는 인간의 인지와 매우 유사한 장점이 있다. 특히 Liping Yang et al.(2015)의 연구를 통해서 아래 그림 2-22.와 같이 구분한 의미론적 공간 네트워크는 직관적 공간인식과 80% 이상의 유사도를 나타낸 것으로 나타났다.⁵⁰⁾

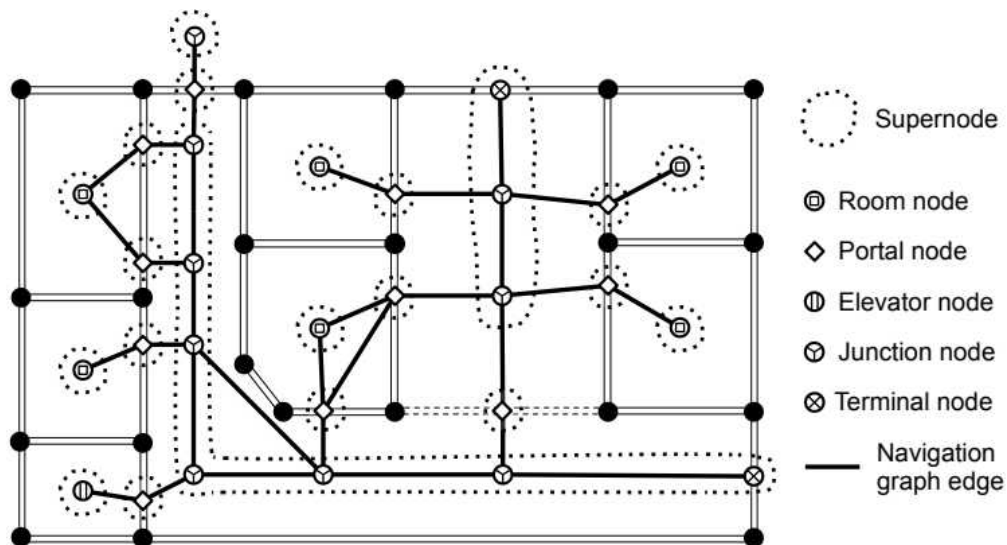


그림 2-22. 의미론적 공간 네트워크 예시 (Liping Yang et al., 2015)

49) Visibility Graph, Generalized Voronoi Graph의 대표적 단점은 인간의 공간(이동)인지와의 불일치임.

50) 10명의 실험참가자를 대상으로 공간인지 지도를 그린 후 Liping Yang et al.(2015)가 연구에서 제안한 의미론적 공간 네트워크의 유사성을 비교함. 결과적으로, 제안한 방법과 인간의 길 찾기 접근방식과의 유사성을 확인함.

2.1.4. 중앙성(Centrality) 척도

중앙성이란 하나의 네트워크에서 특정 노드가 얼마나 중요한지 측정하는 척도이다. 도시 내 교통 및 동선 분석같이 큰 규모의 네트워크부터 실내공간 구조 및 동선 등을 작은 규모의 네트워크에서 가장 널리 활용되는 지표이다. 연결중앙성(Degree Centrality), 인접중앙성(Closeness Centrality), 사이중앙성(Betweenness Centrality) 등이 대표적이며, 네트워크 분석의 목적에 따라 적합한 세부 사용성 지표가 활용된다.

(1) 연결중앙성 (Degree Centrality)

연결중앙성은 네트워크에서 특정 노드에 연결된 모든 엣지의 개수를 합산하여 중앙성을 평가한다. 만약 두 네트워크에 위치한 두 노드의 연결중앙성을 평가한다면, 규모가 큰 네트워크일수록 큰 연결 중앙성을 띄게 된다. 따라서 정규화를 위해 수식 2-1.과 같이 전체 노드 수(N)-1로 나눠 사용한다.

$$DC(v_i) = \frac{d_i}{N-1}$$

- $DC(v_i)$: v_i 노드의 연결중앙성 값 수식 2-1.
- d_i : v_i 노드에 연결된 엣지 수
- N : 전체 노드의 개수

그림 2-23.과 같은 네트워크에서 중앙에 위치한 v_1 노드는 8개의 엣지가 연결되어 있기 때문에 $8/(9-1)=1$ 의 연결중앙성 값을 가진다. 나머지 $v_2 \sim v_9$ 노드들은 각각 한 개의 엣지만 연결되어 있기 때문에 $1/(9-1)=0.125$ 의 연결중앙성 값을 가진다. 연결중앙성은 보통 사회관계망서비스(SNS)에서 특정 인물이 얼마만큼 많은 사람과 관계를 맺는지, 얼마나 많은 팔로워를 보유하고 있는지 등을 보여주기 때문에 특정인의 유대관계, 사회성, 사회적 영향력을 나타낼 수 있다.⁵¹⁾

51) Andrew Disney (2020). Social network analysis 101: centrality measures explained, <https://cambridge-intelligence.com/keylines-faqs-social-network-analysis/>

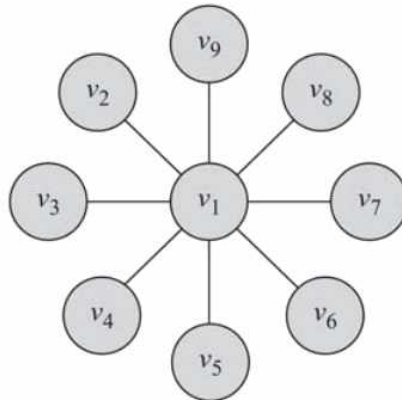


그림 2-23. 연결중앙성 그래프 예시
 $(DC_{(v_1)}=1, DC_{(v_2 \sim v_9)}=0.125)$

(2) 인접중앙성 (Closeness Centrality)

인접중앙성은 중요한 노드일수록 다른 노드까지의 거리가 짧을 것이라는 가정을 전제로 한다(Reza Zafarani et al. 2014). 네트워크의 특정 노드에서 특정 노드를 제외한 모든 노드까지의 거리의 합의 역수로 계산된다. 즉 인접중앙성이 클수록 특정 노드는 전체 네트워크 어디든 가까이 위치한다는 의미이다. 예를 들어, 도시에서 A 지점에 사는 사람이 B 지점에 사는 사람보다 도시 각 지점까지 이동하는 거리가 짧다면, 도시 내에서 A 지점이 B 지점보다 더 중심적인 지역이라고 판단할 수 있다.

$$CC(v_i) = \frac{N-1}{\sum_{j=1}^n dist(v_i, v_j)}$$

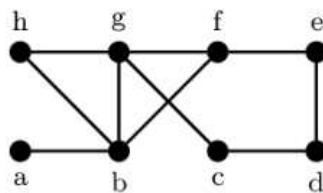
- $CC(v_i)$: v_i 노드의 인접중앙성 값 수식 2-2.
- $dist(v_i, v_j)$: v_i 노드와 v_j 노드간 최단거리
- N : 전체 노드의 개수

(3) 사이중앙성 (Betweenness Centrality)

사이중앙성은 특정 노드가 다른 두 노드가 최단경로로 이동하는데 얼마나 통로 역할을 하는지 측정하는 지표이다. 따라서 특정 노드가 다른 두 노드 간의 최단경로상에 많이 위치할수록 높게 나타난다. 연결중앙성과 마찬가지로 큰 네트워크에 위치한 노드의 사이중앙성은 높은 값을 보인다. 따라서 두 네트워크에 위치한 노드의 사이중앙성을 비교하기 위해서는 정규화를 위해 네트워크 내부의 모든 두 지점 사이의 경로의 수로 나눠 사용하며, 정규화된 사이중앙성은 0~1 사이 값을 띄게 된다.

$$BC(v_i) = \sum_{s,t \in V} \frac{\sigma_{s,t}(v_i)}{\sigma_{s,t}} / [(N-1)(N-2)/2]^{52}$$

- $BC(v_i)$: v 지점의 사이중앙성 값
- V : 노드의 세트 수식 2-3.
- $\sigma_{s,t}$: s, t 사이의 최단경로의 수
- $\sigma_{s,t}(v_i)$: v_i 지점을 지나는 최단경로의 수
- N : 전체 노드의 개수



(a) Example graph
(b) Betweenness values

Vertex v	a	b	c	d	e	f	g	h
$b(v)$	0	0.250	0.125	0.036	0.054	0.080	0.268	0

그림 2-24. 네트워크에서의 각 노드별 사이중앙성 예시 (Matteo Riondato, 2015)

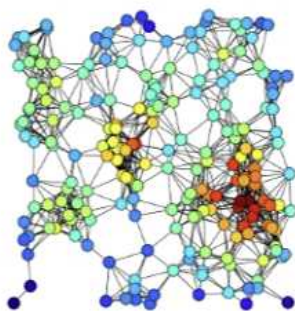
52) 정규화를 위해 $(n-1)(n-2)/2$ 로 나눠주며, Direct(일방향) 그래프의 경우 $(n-1)(n-2)/1$ 로 나눈다.

(4) 종합

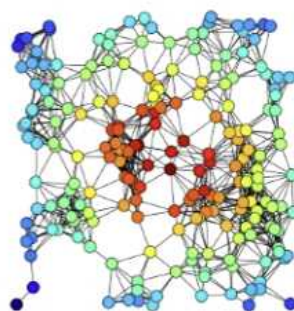
중앙성 척도 중 가장 널리 활용되는 연결중앙성, 인접중앙성, 사이중앙성에 대해 살펴보았다. 종합해보면, 표 2-11.과 같이 연결중앙성은 네트워크에서 하나의 노드가 얼마나 많은 지점과 연결되어 있는지를 나타내며, 인접중앙성은 각 지점에 소요되는 시간을 평균내어 특정 노드가 전체 네트워크에서 얼마나 중심에 위치하는지 나타내는 지표이다. 또한 사이중앙성은 네트워크내 임의의 두 지점을 최단경로로 이동할 때 얼마만큼 통로로 사용되는지 측정하는 지표이다. 그림 2-25.는 동일한 네트워크에서 각 중앙성 척도별 특성(높고 낮음)을 보여준다.

표 2-11. 중앙성 척도별 측정 방법 및 의미

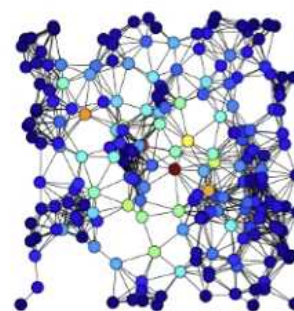
중앙성 척도	측정 방법	의미
연결중앙성 (Degree Centrality)	네트워크 내 특정 노드에 연결된 엣지의 수	특정 노드가 얼마나 많은 노드와 연결되어 있는지 측정 (국부 영향력)
인접중앙성 (Closeness Centrality)	네트워크 내 특정 노드에서 특정 노드를 제외한 모든 노드까지의 거리의 합의 역수	특정 노드가 전체 네트워크에서 얼마나 중심에 위치하는지 측정 (전체 중심성)
사이중앙성 (Betweenness Centrality)	네트워크 내 특정 노드가 다른 두 노드 사이의 최단경로 상에 위치하는지 측정	특정 노드가 전체 네트워크에서 얼마만큼의 통로 역할을 하는지 측정



a) 연결중앙성
Degree Centrality



b) 인접중앙성
Closeness Centrality



c) 사이중앙성
Betweenness Centrality

그림 2-25. 동일 네트워크에서의 각 중앙성 척도별 특성
(https://en.wikipedia.org/wiki/Centrality#Harmonic_centrality)

2.2. 선행연구 고찰

2.2.1. 국가중요시설의 물리적방호 체계

표 2-12.는 국내 국가중요시설의 물리적방호 체계와 관련된 연구 목록이다. 국가중요시설의 물리적방호 체계 범주분석, 경비 체계, 실태 파악에 대한 논문이 주를 이루고 있다.

신형석(2019)은 국가중요시설 중 정부청사를 대상으로 현재의 방호직 인력이 법률상의 권한 부재로 현장 대응에 한계가 있어, 정부청사의 방호 법령체계의 정비 필요하다고 분석하였다. 이민형 외(2015)는 국가중요시설 중 항만시설을 대상으로 텔파이 기법을 통해 항만시설에 필요한 물리적보안 요소의 필요성과 적합성을 평가하였다. 윤대현 외(2020)는 국가중요시설의 물리적 보안을 담당하는 보안 조직의 역량을 높이는 데 도움을 주기 위한 목적으로, 물리적 보안 조직의 보안업무 수준을 평가할 수 있는 평가지표를 제시하였다. 정태황(2012)은 건축시설을 대상으로 물리적 보안을 구성하고, 이에 영향을 주는 요인들을 선정하여 물리적 보안 수준 평가모형을 설계하였다. 우태호(2013)는 원자력발전소를 대상으로 테러 및 사보타주 등 인위적 손상으로부터 안전을 보장하기 위한 방법을 물리적방호 설비, 테러 시나리오별로 사례 측면에서 정성적인 방법으로 분석하고 개선을 위한 방안을 제시하였다. 마지막으로 나석중(2020)은 외곽 물리적방호 구성요소를 중심으로 신뢰도 높은 물리적방호 설계를 통해 국내외 보안 규제를 충족하고 물리적방호 체계 성능을 강화하면서 보안 투자비용을 낮추는 개선된 통합설계 방법론을 제안하였다.

하지만 국내 선행연구를 고찰해보면 시설의 설계측면에서 물리적방호를 정량적으로 평가하고 설계 대안을 제시하는 연구는 제한적이었다. 나석중(2020)의 물리적방호 연구동향 분석에 따르면 국내 학술논문 및 학술지의 물리적방호 관련 논문은 69건으로⁵³⁾, 실제 물리적방호 체계와 관련된 학위논문, 학회지, 단행본은 13건으로 매우 제한적이다. 이중 12건(92.3%)은 물리적방호의 프로세스, 목적결정, 분석 평가 연구에 편중되어 있고, 설계와 관련된 연구는 단 1건(0.7%)라고 밝혔다. 따라서 국내의 물리적방호 체계 설계방법에 대한 연구가 시급한 것으로 분석하였다.

53) 2010-2019년까지 학위논문(K-eArticle) 110건, 국가과학기술전자도서관(NDL) 65건, 학술연구정보서비스(RISS) 69건의 결과를 도출

표 2-12. 국내 국가중요시설의 물리적방호 관련 연구

논문 명	저자
국가중요시설의 물리적 보안 조직에 대한 보안수준물리적 방호 평가지표 개발, 한국산업보안연구학회, Vol.11 No.1, 2021	윤대현, 변서희, 서우중, 정창훈
국가중요시설의 물리적 보안 요인 분석-항만보안을 중심으로-, 한국융합보안학회, Vol.15 No.6-1, 2015	이민형, 이정훈
국가중요시설 물리적 보안 조직 보안수준 평가지표 개발, 한국정책학회, Vol.2020, 2020	윤대현, 변서희, 정창훈
원자력발전소시설의 전주기적인 물리적방호 규제체계 정립을 위한 법제개선 방안, 법학논문지 Vol.30 No.3, 2016	김종천
정부청사의 효율적 방호·보안관리를 위한 법령체계 정비방안에 대한 소고, 한국경호경비학회 Vol.61, 2019	신형석
국가중요시설의 물리보안 수준과 보안정책 준수여지가 보안성과에 미치는 영향, 경기대학교 박사학위논문, 2018	최연준
건축시설의 물리적 보안수준 평가모델 개발에 관한 연구, 전북대학교 박사학위논문, 2012	정태황
국가기반시설 외곽보안체계 통합설계 및 성능검증 개선방안 연구, 고려대학교 석사학위논문, 2020	나석중
원자력발전소의 물리적 방호에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문, 2013	우태호
국가중요시설의 물리보안 실태 및 개선방안: 화력발전소를 중심으로, 용인대학교 박사학위논문, 2019	김진오
국가중요시설 방호제도의 문제점과 개선방안: 방호직 공무원을 중심으로, 동국대학교 석사학위논문, 2013	박창규

2.2.2. 물리적방호의 정량적 평가

표 2-13.은 시설에 대한 물리적방호를 정량적으로 평가하는 선행연구 목록이다. 국내보다는 국외에서 주로 연구되었으며, 유사한 방식의 물리적방호 평가를 통해 특정시설의 취약한 지점을 찾아내거나 개선된 방식을 통한 물리적방호 정확성 향상 방법을 제안한다.

공통적으로, 그림 2-26.과 같이 시설을 단순화하고 침입경로를 다이어그램⁵⁴⁾으로 재구성한 뒤 물리적방호를 정량적으로 평가하는 방식을 사용한다. 그림 2-27. Zou Bowen 외(2017)의 연구에서도 동일하게 시설을 단순화하여 침입을 분석하는 방법을 사용한다. 이런 방식은 복잡한 다층의 복잡한 실내공간을 가진 시설을 분석하기 위해서는 공간의 단순화 과정이 선행되어야 한다. 하지만 단순화 과정에서 공간을 통합시키기 때문에 원래의 시설을 정확하게 분석하기에 한계가 있다. 서장훈 외(2016)도 동일한 방식으로 시설의 물리적방호 평가 방법을 제안하였지만 사용자가 직관적으로 침입 경로 확인이 어려운 한계를 보완하기 위해 3차원 모델링 기법을 활용해 침입경로를 즉각적으로 확인할 수 있는 방법을 제안하였다. 하지만 근본적으로 복잡한 시설을 단순화하는 과정에서 공간의 왜곡을 피하지는 못하였다. D.Andiwidayakusuma(2019)는 시설을 2차원 그리드(Grid)로 구성하여 외부에서 핵심구역까지 침입하는 최단경로를 도출하고 해당경로의 물리적방호 유효성을 도출하는 방법을 제안하였다. 앞선 연구보다 분석자의 주관이 덜 개입되는 장점은 있지만 다층의 3차원 공간을 분석하기에는 한계가 있다. 이와 유사하게 Jung Yang 외(2019)도 타일 맵(tile-map)을 활용한 분석방법을 제안하였지만, 이 또한 분석자가 침입 경로를 미리 가정하고, 가정된 경로를 기반으로 분석한다는 한계가 있다. 앞서 분석한 물리적방호 정량적 평가 선행연구를 살펴보면, 공통적으로 3차원의 복잡한 실내공간을 재현하기에 한계가 있다고 판단하였다.

반면 Stuart Porter 외(2014)는 3차원 정보모델인 BIM을 활용하여 외부 침입경로를 예측하고 가장 침입에 많이 사용되는 경로를 도출하였다. 침입자의 경로와 시설의 방호속성을 반영한 물리적방호 평가 연구가 아니라 실과 실 사이의 연결관계에 기초한 분석이 한계이긴 하지만, 3차원 모델을 기반으로 침입경로를 예측하였다는데 의의가 있다.

54) 침입경로를 다이어그램으로 재구성한 뒤 분석하는 방법을 ASD(Adversary Sequence Diagram)이라고 명명함.

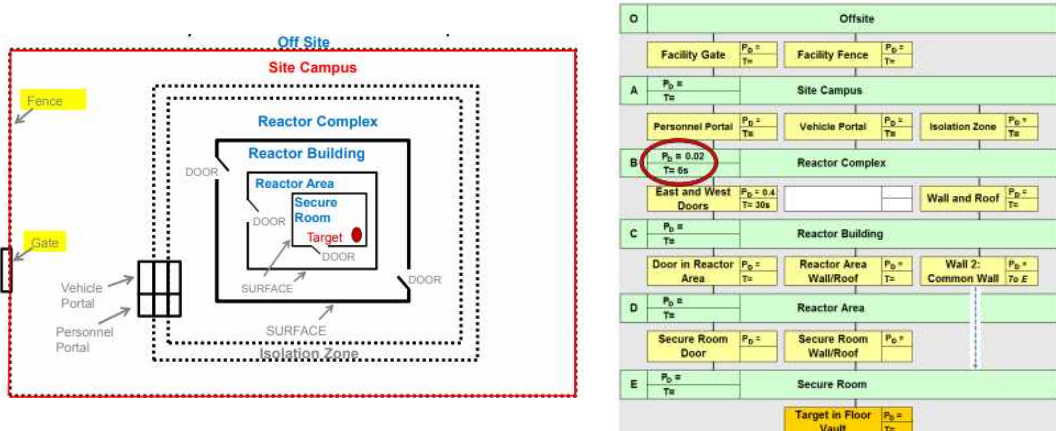


그림 2-26. Adversary Sequence Diagram (Sandia National Lab., https://share-ng.sandia.gov/itc/assets/19_presentation.pdf)

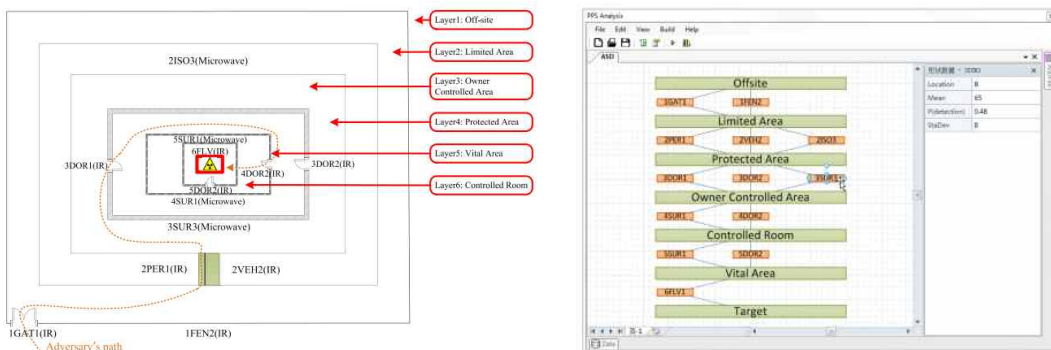


그림 2-27. 사전에 설정된 경로의 물리적방호 유효성을 평가 (Zou Bowen 외, 2017)

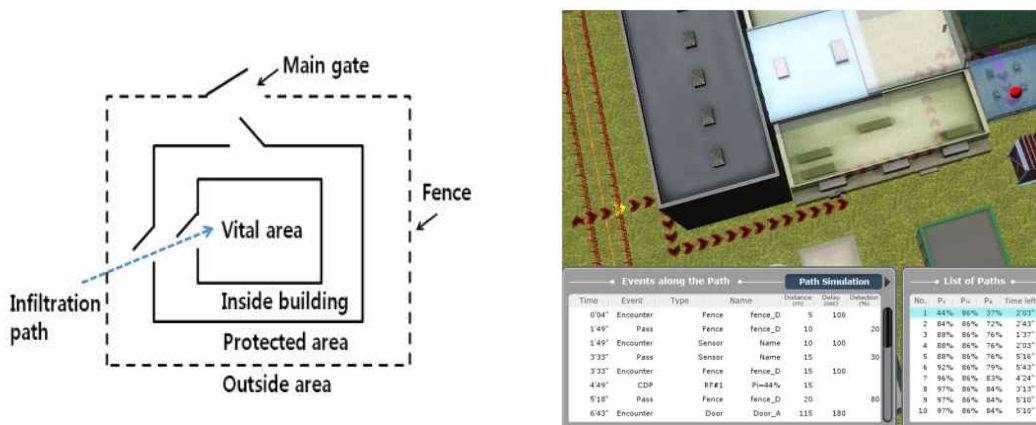


그림 2-28. 시설물 모델링 방식을 통한 물리적방호 평가 (서장훈 외, 2016)

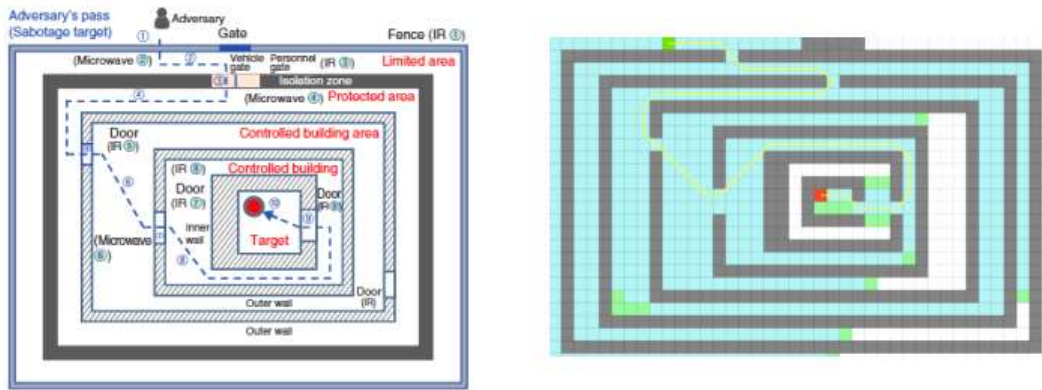


그림 2-29. 그리드(Grid)로 단순화한 시설의 물리적방호 평가 (D.Andiwidayakusuma, 2019)

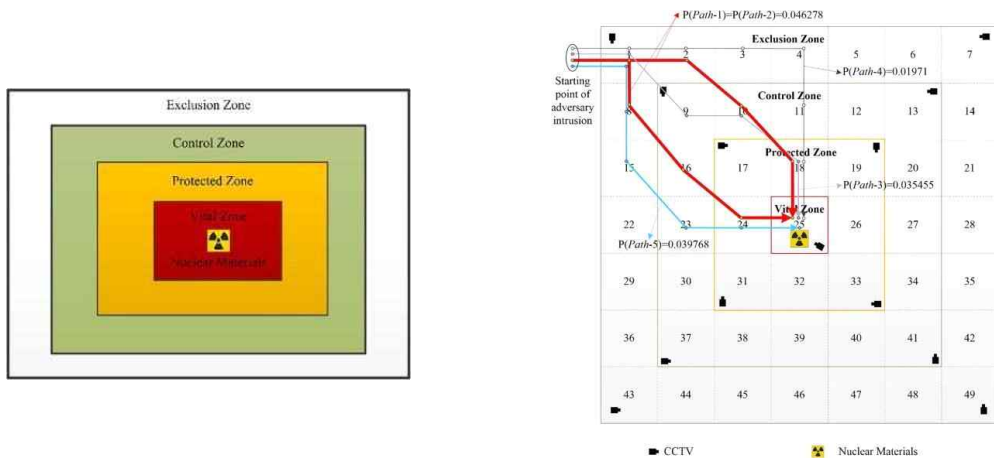


그림 2-30. Tile map을 활용한 물리적방호 평가 (Jung Yang 외, 2019)

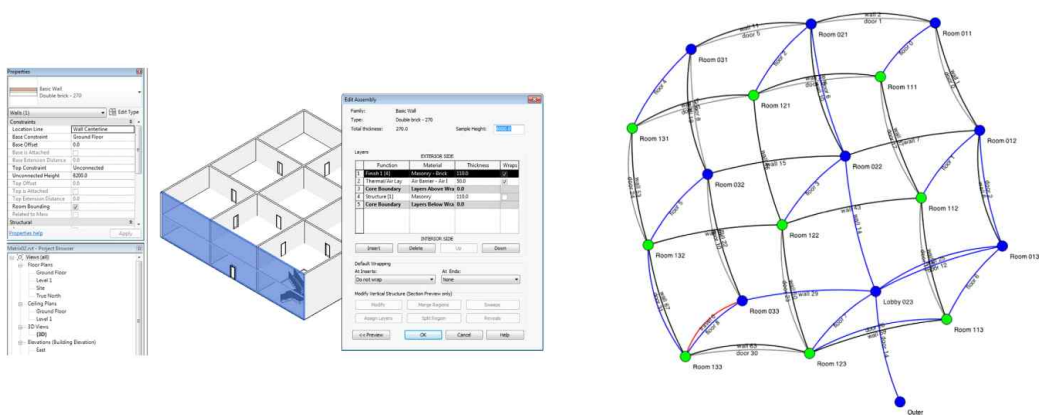


그림 2-31. BIM모델의 공간정보를 활용한 침입 예상경로 도출 (Stuart Porter 외, 2014)

표 2-13. 물리적방호 정량적 평가 방법 관련 선행연구

논문 명	저자
Physical Protection System and Vulnerability Analysis Program in China, 8th ISODARCO Conference on Arms Control, October 2002	Tang Dan, Yin Xiandong, Fang Ni, Guo Cao
Performance Assessment of Physical Protection System at Wolsong Nuclear Power Plant using SAVI code, Transaction of the Korean Nuclear Society, October 27-28, 2005	Won Moog Jung, Ho Jin Lee, Donghan Yu, Gyungsik Min
Vulnerability Analysis of Physical Protection System at Hypothetical Facility, Transaction of the Korean Nuclear Society, November 2-3, 2006	Won Moog Jung, Ho Jin Lee, Donghan Yu, Gyungsik Min
Development of a Vulnerability Assessment Code for a Physical Protection System: Systematic Analysis of Physical Protection Effectiveness (SAPE), Nuclear Engineering and Technology, Vol.41 No.5, 2009	Sung Soon Jang, Sung-woo Kwak, Hosik Yoo, Jung-soo Kim, Wan Ki Yoon
Breaking into BIM: Performing static and dynamic security analysis with the aid of BIM, Automation in Construction, Vol.40, 2014	Stuart Porter, Terence Tan, Tele Tan, Geoff West
시설물 모델링 방식에 따른 물리적방호 취약성 평가 프로그램 분석, 한국방재학회, Vol.15 No.5, 2016	서장훈, 장성순, 유호식
Evaluation of Physical Protection Systems Using an Integrated Platform for Analysis and Design, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: System, Vol.47, No.11, November 2017	Zou Bowen, Yang Ming, Yoshikawa Hidekazu, Lu Hongxing
Vulnerability Analysis of Physical Protection System of a nuclear installation using path analysis, Brazilian Journal of Radiation Science, Vol.07, No.03, 2019	Tavares, R.L., Fiel, J.C.B
A Comparative Study of the Algorithms for Path finding to Determine the Adversary Path in Physical Protection System of Nuclear Facilities, IOP Conf. Series: Journal of Physics 1198, 2019	D.Andiwidayakusuma, A.Mardhi, I.Savitri, T.Asmoro
An adaptive probabilistic mapping matrix search algorithm for vulnerability analysis of PPS, Annals of Nuclear Energy 131, pp.433-442, 2019	Jung yang, Jung Wang, Guanxiang Wei, Ming Yang, Hongxing Lu

<p>Optimizing physical protection system using domain experienced exploration method, <i>Automatika</i>, 61(2), 207-218, 2020</p>	<p>Dejan Cakija, Zeljko Ban, Marin Golub, Dino Cakija</p>
<p>BIM기반 3차원 네트워크를 활용한 건축물의 물리적방호 체계 정량적 평가시스템 개발, <i>대한건축학회 논문집</i>, Vol 37, No.6, 2021 ⁵⁵⁾</p>	<p>신재섭, 최재필</p>
<p>이동편의성을 고려한 건축시설의 물리적방호 체계 강화방법 제안, <i>대한건축학회논문집</i>, 38(1), 47-57, 2022 ⁵⁶⁾</p>	<p>신재섭, 최재필</p>

55) 본 연구와 유관 논문

56) 본 연구와 유관 논문

2.3. 본 연구의 차별성

2.3.1. 선행연구의 한계

선행연구 분석을 종합해 보면, 시설의 물리적방호 정량적 평가는 2차원의 다이어그램을 기반으로 한다. 사용자가 시설을 단순화하고 몇 가지 접근경로를 가정하여 분석을 수행하는 방법이다. 평가 속도가 빠르고 상황에 따라 손쉽게 유연한 시나리오를 작성할 수 있다는 장점이 있지만 복잡하고 다층의 시설을 단순화 하는 과정에서 가정하지 못한 침입경로를 누락하는 등의 한계가 있다. 더 나아가 본 연구에서 제안하는 내부사용자를 고려한 최적의 강화지점을 제안하지는 못한다.

2.3.2. 본 연구의 차별성

본 연구는 시설의 물리적방호 체계 평가 후, 어떤 지점을 효과적으로 강화해야 하는지 대안을 찾는 방법을 제안하였다. 특히 내부사용자가 많은 건축시설을 대상으로 이동편의성을 고려하여 최적 대안을 제시한다는 점에서 선행연구와 차별성을 가진다.

또한 본 연구는 3차원의 공간 네트워크를 활용한 건축물 물리적방호 체계 평가 시스템을 통해 설계 저작도구인 BIM 정보를 평가에 사용하고 개선 결과를 연동할 수 있다는 점에서 설계과정에서 활용성이 높다. 또한 선행연구와 달리 분석을 위한 별도의 과정과 취약경로를 가정하지 않고 시설의 모든 경로를 분석하기 때문에 정확성과 신뢰성이 높다는 차별성이 있다.

제 3 장 물리적방호 평가·강화 방법 제안

3.1. 물리적방호 평가·강화 범위 설정

- 3.1.1. 물리적방호 관련규정 분석
- 3.1.2. 물리적방호 평가·강화 범위 설정

3.2. 물리적방호 평가방법론 선정

- 3.2.1. EASI 모델에 따른 유효성 평가
- 3.2.2. 물리적방호 유효성 향상 요소 선정
- 3.2.3. 물리적방호 유효성 향상 방법 제안

3.3. 공간 네트워크 구현

- 3.3.1. 선형 네트워크 적용 한계
- 3.3.2. 물리적방호 평가·강화를 위한 네트워크 구성 제안
- 3.3.3. 물리적방호 평가·강화를 위한 공간 네트워크 재현

3.4. 물리적방호 평가 및 강화 대안지점 도출

- 3.4.1. 모든 경로를 고려한 물리적방호 유효성 도출
- 3.4.2. 물리적방호 강화 대안지점 도출

3.5. 물리적방호 강화와 이동편의성

- 3.5.1. 물리적방호 강화에 따른 이동편의성 영향
- 3.5.2. 이동편의성 분석지표 선정
- 3.5.3. 이동편의성 비용 정의

3.6. 물리적방호 강화 최적대안 도출

- 3.6.1. 물리적방호 유효성 및 이동편의성 비용 도출
- 3.6.2. 물리적방호 강화 최적대안 선정

3.7. 소결

3.1. 물리적방호 평가·강화 범위 설정

3.1.1. 물리적방호 관련규정 분석

본 장에서는 국가중요시설에 적용되는 물리적방호 설계규정을 분석하고 물리적방호 평가·강화 범위를 설정하였다. 대상으로 하는 물리적방호 설계 규정은 표 3-1.과 같다. 국내외 중앙(연방)정부청사 설계에 적용되는 규정은 「Vulnerability Assessment of Federal Facilities」와 「세종시 정부청사 방호·보안 개선을 위한 연구용역」 및 「정부청사 보안강화 대책」을 대상으로 하였다.⁵⁷⁾ 또한 국가중요시설 중 물리적방호 기준이 엄격한 원자력시설을 대상으로 한 국제기준인 「Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Rev.5)」와 미국 기준인 연방법 「10CFR73 Physical Protection of Plants and Materials」를 분석하였다. 마지막으로 미국 연방 재난관리청(FEMA)에서 발간하는 국가중요시설의 대테러 설계기준서인 「(FEMA 430) Site and Urban Design for Security Guidance Against Potential Terrorist Attacks」를 포함한 5건의 물리적방호 관련 규정을 분석하였다.

표 3-1. 국내외 국가중요시설 설계 관련 규정

	물리적방호 설계 규정	적용 시설
1	Vulnerability Assessment of Federal Facilities, U.S. Department of Justice, 1995	연방정부 시설 (미국)
2	「세종시 정부청사 방호·보안 개선을 위한 연구용역」 및 「정부청사 보안강화 대책」	정부청사 (국내)
3	Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Rev.5)	원자력시설 (국제)
4	10CFR73 Physical Protection of Plants and Materials, U.S. NRC	원자력시설 (미국)
5	(FEMA 430) Site and Urban Design for Security Guidance Against Potential Terrorist Attacks, U.S FEMA, 2007	국가중요시설 (미국) (Primarily to high-risk sites)

57) 국내 정부청사에 적용되는 물리적방호 기준은 별도로 존재하지 않기 때문에, 관련 용역 결과물로 설계 규정을 분석하였다.

(1) Vulnerability Assessment of Federal Facilities

「Vulnerability Assessment of Federal Facilities」는 1995년 발생한 오클라호마시티 폭탄테러⁵⁸⁾로 연방정부 건물이 크게 파괴되고 많은 희생자가 발생한 것을 계기로 작성된 물리적방호 설계 지침이다.⁵⁹⁾ 해당 규정은 미국 연방정부시설에 대한 물리적방호 설계기준을 명시해 놓았으며, 시설에 상주하는 인원과 시설면적 및 성격에 따라 Level I부터 Level V까지 5단계로 구분하였다.⁶⁰⁾ 가장 높은 등급의 Level V는 미국 국방부 본청(Pentagon) 및 중앙정보국 본청(CIA Headquarter)같은 국방 및 정보기관에 적용되는 규정이다. 그림 3-1.은 방호구역 및 시설 등급별 물리적방호 설계기준이다. 관련 내용은 요약하면 아래와 같다.

- 방호구역 구분은 Perimeter Security(외곽보안), Entry Security(출입보안), Interior Security(실내보안)로 구분한다.
- Perimeter Security(외곽보안)는 건물로 차량이 접근하는 것을 막기 위한 기준으로 물리적 방벽 및 CCTV, 조명설치 등이 설치되어야 한다.
- Entry Security(출입보안)는 보안요원의 배치, 순찰이 요구되며 건물에 출입하는 경로에 CCTV 설치 및 잠금장치가 있는 보안문이 설치되어야 한다.
- Interior Security(실내보안)는 개인 ID로 출입이 가능해야 하며 방문자를 별도로 관리할 수 있는 시스템이 갖춰져야 한다.

58) 1995년 4월 19일 미국 오클라호마주 미국 연방정부 기관이 위치해 있는 알프레드 머라 빌딩에서 발생한 폭탄테러로 아동 19명을 포함한 169명이 목숨을 잃었으며 680명이 부상을 입었다. (두산백과)
오클라호마 폭탄테러는 기존에 다루어지지 않았던 연방정부 건물에 대한 테러 위험에 대해 새롭게 인식하는 계기가 되었다. (Stephanie Smith, 2007)

59) 오클라호마 연방정부 건물 폭탄테러 이후 클린턴 대통령은 법무성(U.S. Department of Justice)에 테러 또는 폭력행위로 인한 연방시설의 취약성을 평가하고 방호 표준설계안을 개발하도록 지시하였다. (Stephanie Smith 2007, The Interagency Security Committee and Security Standards for Federal Buildings, CRS Report for Congress)

60) Level I 시설 : 연방정부 인원 10명 미만이 사용하고, 2,500 sqf 이하 연면적 시설
Level II 시설 : 연방정부 인원 11~150명 미만이 사용하고, 2,500~80,000 sqf 이하 연면적 시설
Level III 시설 : 연방정부 인원 151~450명 미만이 사용하고, 80,000~150,000 sqf 이하 연면적 시설
Level IV 시설 : 연방정부 인원 450명 이상이 사용하고, 150,000 sqf 이상 연면적 시설
Level V 시설 : 국방부(Pentagon), 중앙정보국(CIA Headquarter) 등 국가안보와 관련된 주요시설

PERIMETER SECURITY	LEVEL				
	I	II	III	IV	V
PARKING					
CONTROL OF FACILITY PARKING	▲	▲	●	●	●
CONTROL OF ADJACENT PARKING	▲	▲	▲	○	○
AVOID LEASES WHERE PARKING CANNOT BE CONTROLLED	▲	▲	▲	▲	▲
LEASES SHOULD PROVIDE SECURITY CONTROL FOR ADJACENT PARKING	▲	▲	▲	▲	▲
POST SIGNS AND ARRANGE FOR TOWING UNAUTHORIZED VEHICLES	○	○	●	●	●
ID SYSTEM AND PROCEDURES FOR AUTHORIZED PARKING (PLACARD, DECAL, CARD KEY, ETC.)	▲	▲	●	●	●
ADEQUATE LIGHTING FOR PARKING AREAS	▲	▲	●	●	●
CLOSED CIRCUIT TELEVISION (CCTV) MONITORING					
CCTV SURVEILLANCE CAMERAS WITH TIME LAPSE VIDEO RECORDING	▲	○	○	●	●
POST SIGNS ADVISING OF 24 HOUR VIDEO SURVEILLANCE	▲	○	○	●	●
LIGHTING					
LIGHTING WITH EMERGENCY POWER BACKUP	●	●	●	●	●
PHYSICAL BARRIERS					
EXTEND PHYSICAL PERIMETER WITH BARRIERS (CONCRETE AND / OR STEEL COMPOSITION)	-	-	▲	○	○
PARKING BARRIERS	-	-	▲	○	○

ENTRY SECURITY	LEVEL				
	I	II	III	IV	V
RECEIVING / SHIPPING					
REVIEW RECEIVING / SHIPPING PROCEDURES (CURRENT)	●	●	●	●	●
IMPLEMENT RECEIVING / SHIPPING PROCEDURES (MODIFIED)	▲	○	●	●	●
ACCESS CONTROL					
EVALUATE FACILITY FOR SECURITY GUARD REQUIREMENTS	▲	○	●	●	●
SECURITY GUARD PATROL	▲	▲	○	○	○
INTRUSION DETECTION SYSTEM WITH CENTRAL MONITORING CAPABILITY	▲	○	●	●	●
UPGRADE TO CURRENT LIFE SAFETY STANDARDS (FIRE DETECTION, FIRE SUPPRESSION SYSTEMS, ETC.)	●	●	●	●	●
ENTRANCES / EXITS					
X-RAY & MAGNETOMETER AT PUBLIC ENTRANCES	-	▲	○	○	●
REQUIRE X-RAY SCREENING OF ALL MAIL / PACKAGES	-	▲	○	●	●
PEEP HOLES	○	○	-	-	-
INTERCOM	○	○	-	-	-
ENTRY CONTROL W/ CCTV AND DOOR STRIKES	▲	○	-	-	-
HIGH SECURITY LOCKS	●	●	●	●	●

INTERIOR SECURITY	LEVEL				
	I	II	III	IV	V
EMPLOYEE / VISITOR IDENTIFICATION					
AGENCY PHOTO ID FOR ALL PERSONNEL DISPLAYED AT ALL TIMES	-	▲	○	●	●
VISITOR CONTROL/SCREENING SYSTEM	▲	●	●	●	●
VISITOR IDENTIFICATION ACCOUNTABILITY SYSTEM	-	▲	○	●	●
ESTABLISH ID ISSUING AUTHORITY	○	○	○	●	●
UTILITIES					
PREVENT UNAUTHORIZED ACCESS TO UTILITY AREAS	○	○	●	●	●
PROVIDE EMERGENCY POWER TO CRITICAL SYSTEMS (ALARM SYSTEMS, RADIO COMMUNICATIONS, COMPUTER FACILITIES, ETC.)	●	●	●	●	●
OCCUPANT EMERGENCY PLANS					
EXAMINE OCCUPANT EMERGENCY PLANS (OEP) AND CONTINGENCY PROCEDURES BASED ON THREATS	●	●	●	●	●
OEPs IN PLACE, UPDATED ANNUALLY, PERIODIC TESTING EXERCISE	●	●	●	●	●
ASSIGN & TRAIN OEP OFFICIALS (ASSIGNMENT BASED ON LARGEST TENANT IN FACILITY)	●	●	●	●	●
ANNUAL TENANT TRAINING	●	●	●	●	●
DAYCARE CENTERS					
EVALUATE WHETHER TO LOCATE DAYCARE FACILITIES IN BUILDINGS WITH HIGH THREAT ACTIVITIES	-	●	●	●	●
COMPARE FEASIBILITY OF LOCATING DAYCARE IN FACILITIES OUTSIDE LOCATIONS	-	●	●	●	●

● MINIMUM STANDARD ○ STANDARD BASED ON FACILITY EVALUATION ▲ DESIRABLE - NOT APPLICABLE

그림 3-1. 방호구역 및 시설 등급에 따른 물리적방호 설계기준 (Vulnerability Assessment of Federal Facilities)

(2) 「세종시 정부청사 방호·보안 개선을 위한 연구용역」 및 「정부청사 보안강화 대책」

우리나라 정부청사의 물리적방호 관련 법령은 대통령령인 「정부청사관리규정」이며, 이 법령은 청사의 수급 및 관리, 청사수급관리계획, 청사의 취득 및 처분, 청사의 시설관리, 청사의 출입관리 등 총 11개의 조문으로 구성되어 있다. 구체적으로 정부청사의 방호·보안 관련 조문은 제8조의2(청사의 시설관리) 3), 제8조의3(청사의 출입관리) 4), 제9조의2(방호진단) 5)의 3개 조문에 불과하다. 공항·항만·원자력 발전소 등 관계 법령에 따라 국가중요시설 및 국가보안시설로 지정·특별 관리되고 있는 주요시설과 달리 다수 국가기관 및 공공기관이 입주해 있는 정부청사는 위와 같은 주요시설의 보안수준에는 미치지 못하고 있는 실정이다. (신형석, 2019)

위의 지적과 같이 우리나라 정부청사의 물리적방호에 대한 지연, 탐지 등에 대한 상세규정이 미비하여, 본 장에서 국내 정부청사 물리적방호 기준은 ‘세종시 정부청사 방호·보안 개선을 위한 연구용역’⁶¹⁾ 및 ‘정부청사 보안강화 대책’⁶²⁾을 참고하여 도출하였다.

- 3지대 방호개념을 적용하여 물리적 방호·보안 강화
- 1지대: 청사대지 경계지역(경계지대)
울타리 동작감지센서 설치, CCTV등 첨단장비 설치, 통합상황관리 시스템 구축 등
- 2지대 : 대지경계와 건물사이 지역(주방어지대)
부지내 시설개선을 통한 집회·시위 예방 및 건물출입구 검색 강화, 얼굴인식 시스템을 통해 본인여부 자동식별
- 3지대 : 건물내부(핵심방어지대) : 철저한 출입통제시스템 및 방호원에 의한 사무공간 진입통제로 최종 방어

61) 과제명 : 세종시 정부청사 방호·보안 개선을 위한 연구 용역, 연구기간 : 2010.12.31 - 2011.03.30 (출처: 온나라 정책연구)

62) ‘정부청사 보안강화 대책 7가지, 어떤 내용 담겼나?’, 보안뉴스, 2016.05.12.

(3) Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Rev.5)

국제원자력기구(IAEA)에서 발간한 INFCIRC/225/Rev.5⁶³⁾는 IAEA 회원국이 이행해야 할 핵물질 및 원자력시설에 대한 물리적방호 규제체계와 이를 강화하기 위한 국제지침을 기술하고 있다. 물리적방호 체계의 목적, 원자력시설에 대한 물리적방호 체계의 구성요소, 사용·저장중인 핵물질의 불법이전에 대한 방호요건 등에 대한 내용을 담고 있다. 특히 5장에서 핵물질 탈취 방지를 위한 원자력시설의 물리적방호 설계요건을 기술하고 있으며, 내용을 요약해 보면 아래와 같다.

- 시설은 제한구역(Limited Access Area), 보호구역(Protected Area), 핵심구역(Vital Areas)으로 구성된다.
- 보호구역은 물리적방벽으로 둘러싸여 있고, 보호구역으로의 출입구는 최소화하며 출입은 탐지될 수 있어야 한다.
- 핵심구역은 보호구역 외에 지연, 탐지를 위한 1겹의 물리적방벽이 더 있어야 한다.
- 핵심구역으로의 출입구는 최소화하여야 하며, 탐지 가능한 설비가 설치되어야 한다.
- 보호구역에는 적의 침입을 탐지하기 위한 비주기적 순찰(Random patrol)이 수행되어야 한다.

63) 1987년 운송중인 핵물질의 방호조치에 관한 핵물질방호협약(CPPNM)이 발효되었고, 1999년에는 핵물질뿐만 아니라 원자력시설에 대한 위해를 방지하기 위한 방호조치를 상세하게 서술한 IAEA의 문서(INFCIR/225/Rev.4, 핵물질 및 원자력시설에 대한 물리적방호)가 발간되었다. 이후 핵물질 안전확보를 위해 물리적방호 규제체계를 강화하려는 움직임 속에서 2005년 핵물질방호협약을 개정하게 되었고, 2011년도에는 물리적방호 지침서의 개정판(INFCIRC/225/Rev.5)을 발간하였다. (김종천, 원자력발전소시설의 전주기적인 물리적방호 규제체계 정립을 위한 법제개선 방안, 법학논문집 제40집 제3호 pp/277-324, 2016)

(4) 10CFR73 Physical Protection of Plants and Materials

미국의 원자력시설 물리적방호 관련규정은 연방법인 「10CFR73 Physical Protection of Plants and Materials」에 기술되어 있다.⁶⁴⁾ Section 73.55에 물리적방호의 수행목적, 방호계획, 물리적 방벽, 목표설정, 접근통제 등의 물리적방호를 위한 요구사항에 자세하게 서술되어 있다. 특히 (e) Physical barrier 항은 물리적방호를 위한 시설 설계관점에서의 규제사항을 담고 있다. 관련 내용을 요약하면 아래와 같다.

- 시설은 사업주관리구역(Owner Controlled Area), 보호구역(Protected Area), 핵심구역(Vital Areas)로 구성된다.
- 보호구역 주변은 물리적 방벽으로 보호되어야 하며, 물리적 방벽을 통해 침투는 지연시키고 탐지하는 방식으로 보호되어야 한다.
- 보호구역으로의 출입 통제를 위해 잠금장치로 고정되어야 하며 탐지장비가 설치되어야 한다.
- 핵심구역은 최소한 2개의 물리적 방벽을 통과해야하는 위치에 배치되어야 하며, 중앙제어실, 사용후핵연료저장조(Spent fuel pool), 중앙경보실, 2차경보실은 핵심구역으로 관리되어야 한다.

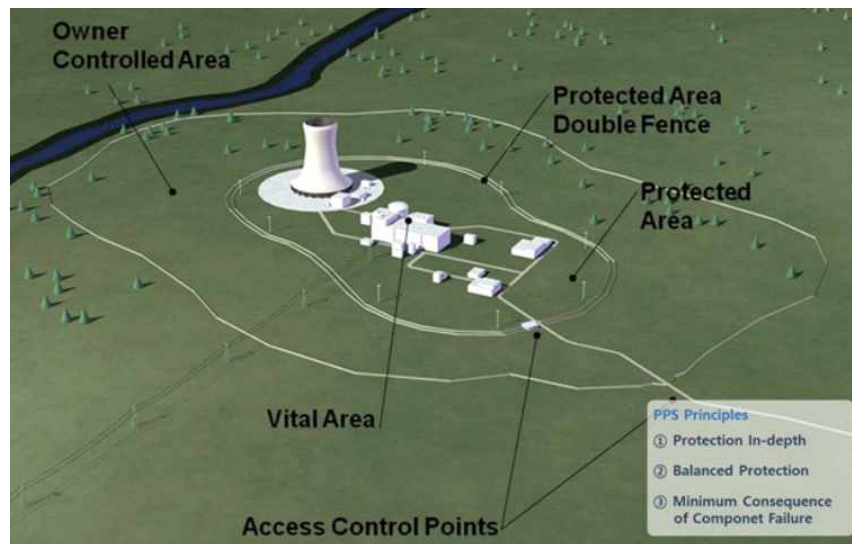


그림 3-2. 원자력발전소 방호지역 구분 (NEI)

64) CFR(Code of Federal Regulation)은 미국 연방법으로 연방정부의 부처 및 기관들에 대한 기본지침이며, 총 50개의 규칙으로 구분되어있다. 이중 10CFR은 에너지 분야의 연방법이며 10CF73은 원자력시설의 물리적방호 관련 근거 규정을 담고 있다.

(5) (FEMA 430) Site and Urban Design for Security Guidance Against Potential Terrorist Attacks

「Site and Urban Design for Security Guidance Against Potential Terrorist (FEMA 430)」은 미 연방재난관리청(Federal Emergency Management Agency, FEMA)에서 발간한 잠재적 테러 위협에 대비한 주요시설의 보호를 위한 설계개념을 제공하는 지침서이다. 건축, 조경, MEP 등 다양한 분야에서 건축물의 물리적방호를 위한 설계기준을 기술하고 있다. FEMA 430에서는 그림 3-3.과 같이 물리적방호 설계를 위해 기본적으로 3 지대 방호개념을 채택하고 있다.

- 3 지대 방호개념은 테러리스트 또는 적이 시설을 침입할 때 연속된 장애물을 통해 대응인력에게 대응출동시간을 충분히 제공하기 위함이다.
- 1 지대(First Layer of Defense)는 시설외곽의 경계울타리로 구획된 지역이다.
- 2 지대(Second Layer of Defense)는 1지대 경계와 건물 사이의 공간으로, 1 지대에서 발생할 수 있는 폭탄테러에 대비해 충분한 이격거리를 가져야 한다.
- 3 지대(Third Layer of Defense)는 테러리스트의 공격에 견딜 수 있는 건물의 구조와 외피를 갖추도록 해야 한다.

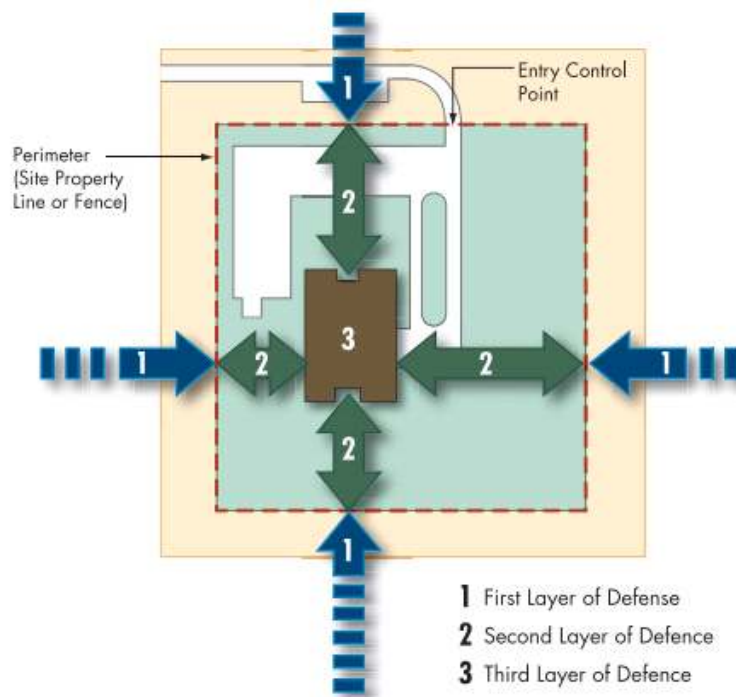


그림 3-3. 3지대 방호개념 (FEMA 430)

3.1.2. 물리적방호 평가·강화 범위 설정

앞에서 국내외 국가중요시설에 적용되는 설계 규정을 분석한 결과는 표 3-2와 같다. 세부적으로 작은 차이는 있었지만 공통적으로 물리적방호 대상이 되는 시설을 3개의 구역 또는 경계로 나눠 물리적방호 규정을 제시하고 있다. 건물 전체를 방호 대상으로 하는 경우⁶⁵⁾, ‘(1) 시설 경계 → (2) 대지경계/건물 사이 → (3)건물 경계’로 이어지는 심층방호 규정을 제시하였고, 건물 내부에 특정 구역 또는 실을 핵심구역으로 지정하는 경우⁶⁶⁾, ‘(1) 시설 경계 → (3)건물 경계 → (5) 핵심구역 경계’로 구성된 방호규정을 제시하였다. (그림 3-4. 참조)

정부청사같이 시설 내부에 사무공간이 넓게 퍼져 있는 시설은 건물 전체를 방호 대상으로 지정하고, 원자력발전소같이 시설 내부의 파괴나 도난, 탈취에 특별히 신경써야 하는 시설은 건물 내부에 핵심구역(Vital Area)를 따로 지정하여 더욱 강화된 물리적방호 규정을 제시하는 경향이 있었다.

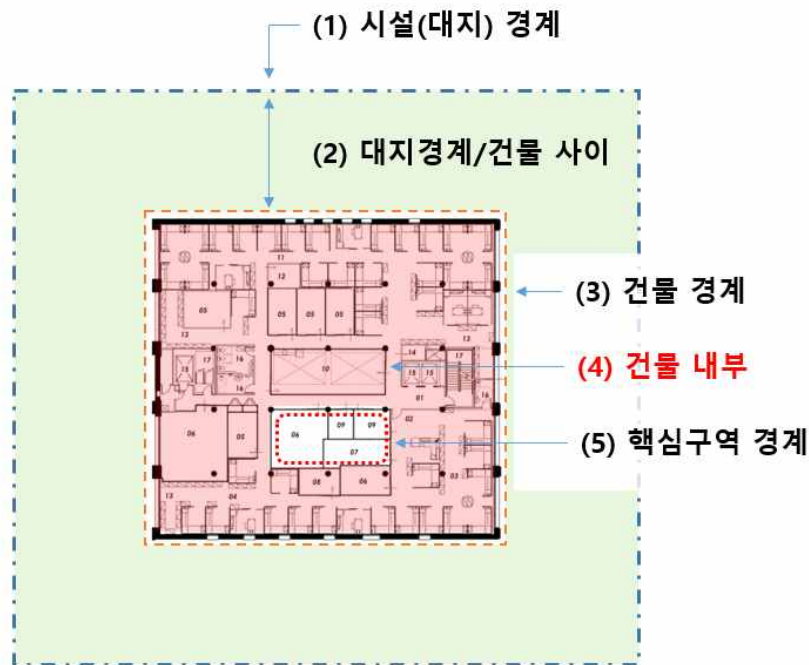


그림 3-4. 국가중요시설의 방호지역 구분

65) Vulnerability Assessment of Federal Facilities, 「세종시 정부청사 방호·보안 개선을 위한 연구용역」 및 「정부청사 보안강화 대책」, (FEMA 430) Site and Urban Design for Security Guidance Against Potential Terrorist Attacks

66) Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities, 10CFR73 Physical Protection of Plants and Materials

하지만 공통적으로 ‘(4) 건물 내부’에 대한 물리적방호 규정은 별도로 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 시설의 종류, 규모 등에 따라 건물 내부 형태가 달라 일괄적인 물리적방호 설계 규정을 제시할 수 없기 때문이다. 예를 들어, 국가중요시설 ‘가’급의 국제공항은 시설 내부에 탑승객과 내부직원이 사용하는 공간이 구분되어있는 반면 전력시설 ‘가’급의 원자력발전소는 오롯이 시설을 운영하는 내부자만 사용하는 시설이다. 또한 일부 정부청사는 성격에 따라 민원인의 출입이 가능한 지역도 동시에 존재한다. 이러한 이유로 기존의 정성적인 설계 가이드라인을 통해 건물 내부의 물리적방호 설계기준을 제시하기엔 한계가 있다고 판단된다.

따라서 본 연구에서 물리적방호 평가·강화 범위는 기존의 물리적방호 관련 규정들에서 다루지 못했던 그림 3-4의 ‘(4) 건물 내부’로 설정하였다.⁶⁷⁾ 물리적방호 환경이 균질한 시설 경계나 외부구역보다, 공간이 복잡하고 여러 침입 동선이 발생할 수 있는 건물 내부가 정확한 물리적방호 평가와 강화지점 도출에 핵심적이라고 판단했기 때문이다.⁶⁸⁾ 또한 기존의 3중 방호지역에 더해 설계자가 건축계획 측면에서 취할 수 있는 추가적인 방호지역으로 활용이 가능하기 때문이다.

67) 물리적방호 평가 및 강화지점 도출을 위해서 시설 외곽 펜스, 건물 출입부 등 시설을 구성하는 모든 지역을 고려하였지만 ‘방호성능 향상’과 ‘방호지점 추가’를 고려하여 물리적방호 강화 최적대안을 선정할 때, 건물 내부지점만을 대상으로 하였다.

68) 선행연구의 한계에서 밝혔듯, 건물 내부의 공간을 단순화하고 침입동선을 몇 가지로 가정하는 문제는 모두 복잡한 건물 내부를 재현하는데 한계가 있었기 때문이다.

표 3-2. 물리적방호 관련 규정별 방호지역 구분에 따른 설계기준

관련 규정	방호지역 구분	물리적방호 설계기준
Vulnerability Assessment of Federal Facilities	Perimeter Security (외곽보안)	• 건물로 차량이 접근하는 것을 막기 위한 기준으로 물리적 방벽 및 CCTV, 조명설치 등이 설치
	Entry Security (출입보안)	• 보안요원의 배치, 순찰이 요구되며 건물에 출입하는 경로에 CCTV 설치 및 잠금장치가 있는 보안문이 설치
	Interior Security (실내보안)	• 개인 ID로 출입이 가능해야 하며 방문자를 별도로 관리할 수 있는 시스템 필요
「세종시 정부청사 방호·보안 개선을 위한 연구용역」 및 「정부청사 보안강화 대책」	1지대: 청사대지 경계지역(경계지대)	• 울타리 동작감지센서 설치, CCTV등 첨단장비 설치, 통합상황관리 시스템 구축
	2지대 : 대지경계와 건물사이 지역(주방어지대)	• 건물출입구 검색 강화, 얼굴인식 시스템을 통해 본인여부 자동 식별
	3지대 : 건물내부(핵심방어지대)	• 철저한 출입통제시스템 및 방호원에 의한 사무공간 진입통제
Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities	제한구역 (Limited Access Area)	• 제한구역과 보호구역 사이는 물리적방벽으로 둘러싸여 있고, 보호구역으로의 출입구는 최소화하며 출입은 탐지될 수 있어야 함
	보호구역 (Protected Area)	• 적의 침입을 탐지하기 위한 비주기적 순찰(Random patrol)이 수행되어야 함
	핵심구역 (Vital Areas)	• 핵심구역은 보호구역 외에 지연, 탐지를 위한 1겹의 물리적 방벽이 더 있어야 함 • 핵심구역으로의 출입구는 최소화하여야 하며, 탐지 가능한 설비가 설치되어야 함

관련 규정	방호지역 구분	물리적방호 설계기준
10CFR73 Physical Protection of Plants and Materials	사업주관리구역 (Owner Controlled Area)	<ul style="list-style-type: none"> • 보호구역 주변은 물리적 방벽으로 보호되어야 하며, 물리적 방벽을 통한 침투는 지연시키고 침투를 탐지하는 방식으로 보호
	보호구역 (Protected Area)	<ul style="list-style-type: none"> • 보호구역으로의 출입 통제를 위해 잠금장치로 고정되어야 하며 탐지장비가 설치
	핵심구역 (Vital Areas)	<ul style="list-style-type: none"> • 핵심구역은 최소한 2개의 물리적 방벽을 통과해야하는 위치에 배치되어야 하며, 중앙제어실, 사용후핵연료저장조(Spent fuel pool), 중앙경보실, 2차경보실은 핵심구역으로 관리
(FEMA 430) Site and Urban Design for Security Guidance Against Potential Terrorist Attacks	1 지대 (First Layer of Defense)	<ul style="list-style-type: none"> • 시설외곽의 경계울타리로 구획
	2 지대 (Second Layer of Defense)	<ul style="list-style-type: none"> • 1지대 경계와 건물 사이의 공간으로, 1지대에서 발생할 수 있는 폭탄테러에 대비해 충분한 이격거리 확보
	3 지대 (Third Layer of Defense)	<ul style="list-style-type: none"> • 테러리스트의 공격에 견딜 수 있는 건물의 구조와 외피를 갖추어야 함

3.2. 물리적방호 평가방법론 선정

3.2.1. EASI 모델에 따른 유효성 평가

본 장에서는 물리적방호 평가 방법론인 EASI 모델을 활용하여 시설의 건축계획 측면에서 어떻게 물리적방호의 유효성을 향상시킬 수 있는지 예시를 통해 그 방법을 제안하였다. 기본적으로, EASI 모델은 침입자의 이동경로를 기반으로 시설을 구성하는 탐지요소의 탐지확률, 지연요소의 시간, 대응요소의 대응확률에 기반하여, 특정시설(목표물)이 얼마나 안전한지 그 유효성을 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 물리적방호 평가방법이 공간 네트워크를 기반으로 침입자의 경로를 고려하기 때문에 본 연구의 분석 대상 및 목적과 부합하는 평가방법론이라고 판단된다. 또한 선행연구 분석을 통해서 밝혔듯 물리적방호를 정량적으로 평가하는 연구의 대부분이 EASI 모델을 기반으로 하기 때문에 (Garcia, 2008; Y.A. Setiawan, 2018) 가장 신뢰도 높은 방법이라고 판단된다.⁶⁹⁾

그림 3-5.는 단순화한 시설의 침입경로를 표현한 다이어그램이다. 표 3-3.은 침입경로에 위치한 지점의 소요시간 및 탐지확률을 가정한 표이다. 만약 외부 침입자가 P1지점을 시작으로 P4까지 도달하는 것을 목적으로 접근한다고 가정하고, 시설을 보호하는 대응군의 출동시간은 120초, 제압확률이 100%라고 가정하면 해당 목표물에 대한 물리적방호 유효성은 0.3으로 도출된다. 즉 해당 경로로 접근하는 침입자를 저지할 수 있는 확률이 30%라는 의미이다. 그림 3-5.의 붉은 점선이 최후 탐지지점이다.⁷⁰⁾

69) 본 연구 2장 선행연구에서 분석한 Zou Bowen(2017), 서장훈(2017), D.Andiwidayakusuma(2019), Jung Yang(2019) 등 대부분의 연구가 EASI 모델을 활용하고 있다.

70) 전체 침입시간 175초 - 대응 출동시간 120초 = 55초지점 (CDP)

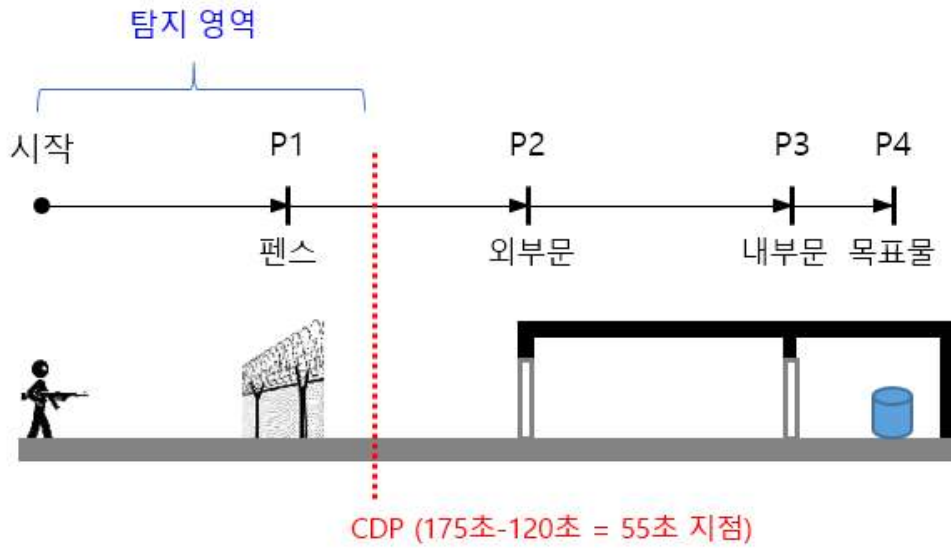


그림 3-5. 예시 침입경로의 CDP(최후 탐지지점), 탐지 영역

표 3-3. 침입경로의 지점별 소요시간 및 탐지확률

Action		소요시간 (초)	탐지확률	물리적방호 유효성
P1	펜스 제거	30	0.3	$1-(0.7) = 0.3$
	이동	30	-	
P2	외부문 제거	20	0.3	CDP
	이동	30	-	
P3	내부문 제거	30	0.3	대응 출동시간 : 120초 (가정)
	이동	15	-	
P4	목표물 파괴	20	-	
전체 침입시간		175		

3.2.2. 물리적방호 유효성 향상 요소 선정

물리적방호의 유효성을 높이는 방법은 기본적으로 최후 탐지지점을 목표물과 가깝게 이동시켜 탐지가능 영역을 확장시켜 탐지지점의 수를 늘리는 방법과 탐지영역에 포함된 탐지지점의 탐지확률을 높이는 방법이다. 그림 3-5.를 기준으로 물리적방호 체계를 구성하는 탐지, 지연, 대응 측면에서 물리적방호 유효성을 높이는 방법은 아래와 같다.

- 탐지 : 탐지영역에 포함된 탐지지점 펜스(P1)의 탐지확률을 높이는 방법
- 지연 : 통과 및 목표지점(P1~P4)의 소요시간을 늘려 최후 탐지지점을 뒤쪽으로 이동시켜 탐지영역을 늘리는 방법
- 대응 : 대응 출동시간을 줄여⁷¹⁾ 최후 탐지지점을 뒤쪽으로 이동시켜 탐지영역을 늘리는 방법

위와 같이 물리적방호 유효성을 높이는 탐지, 지연, 대응요소를 모두 고려하는 복합적인 방법이 가능하지만 건축계획 측면에서 고려할 수 있는 대안은 ‘통과 및 목표지점(P1~P4)의 소요시간을 늘려 최후 탐지지점을 뒤쪽으로 이동시켜 탐지영역을 늘리는 방법’이 가능하다고 판단된다.⁷²⁾ 세부적으로는 표 3-4와 같이, 1. 통과지점(문, 창문 등)의 방호성능을 향상시켜 지연시간과 탐지확률을 증가하는 방법과 2. 복도나 홀 등의 대형공간을 분할하여 중간에 지연 및 탐지지점을 추가 배치하는 방호지점 추가 방법이 가능하다. 다음 장에서 방호성능 향상과 방호지점 추가로 인한 물리적방호 유효성 향상 사례를 설명하도록 하겠다.

표 3-4. 물리적방호 유효성 향상 방법

	내용	향상 요소
1. 방호성능 향상	기존의 방호지점의 성능을 향상	탐지성능, 지연성능
2. 방호지점 추가	공간을 분할하여 방호지점을 신설	탐지성능, 지연성능

71) 외부 침입을 탐지했을 때 기존보다 빨리 해당지점에 출동한다는 것을 의미함.

72) CCTV 추가 설치, 침입센서 성능향상 등의 ‘탐지요소’와 대응병력 확충 등 ‘대응요소’ 강화는 전체 물리적 방호 체계의 효과를 높이는데 주요한 고려사항이지만, 본 연구는 국가중요시설 내부사용자의 이동편의성을 고려한 물리적방호 평가, 강화가 목적이기 때문에 이동편의성에 영향을 주는 ‘지연요소’와 지연요소에 같이 부여되는 탐지속성(예: 보안문에 같이 설치되는 센서 등)을 고려하여 물리적방호 유효성 향상 요소를 선정하였다.

3.2.3. 물리적방호 유효성 향상 방법 제안

본 장에서는 건축계획 측면에서 물리적방호 유효성을 향상시키는 방법(방호성능 향상, 방호지점 추가)을 제안하고 그 효과를 정량적으로 확인하였다.

(1) 방호성능 향상

그림 3-6.은 그림 3-5.의 예시 침입경로에서 내부분(P3)의 성능을 향상시킨 결과이다. 소요시간과 탐지확률을 각각 2배씩 향상시킨 결과로, 기존과 비교해 최후 탐지지점이 뒤쪽으로 이동한 것을 확인할 수 있다. 동시에 탐지영역이 확장되어 펜스(P1)과 외부분(P2)이 침입을 탐지할 수 있는 지점으로 포함되었다. 이를 기반으로 도출한 물리적방호 유효성은 0.51로 P3지점의 방호성능을 향상시키기 전보다 0.21 높아진 것을 확인할 수 있다.

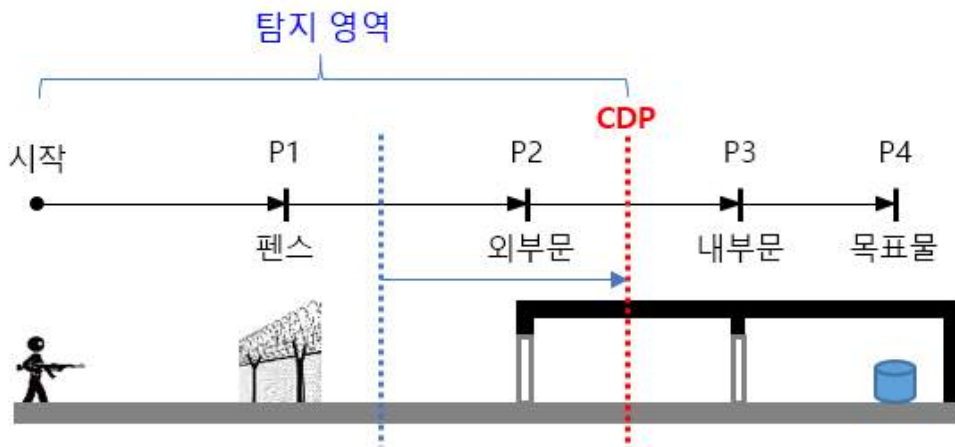


그림 3-6. 방호성능 향상(P3지점)에 따른 CDP, 탐지 영역

표 3-5. 방호성능 향상(P3지점)에 따른 지점별 소요시간 및 탐지확률

Action		소요시간 (초)	탐지확률	물리적방호 유효성
P1	펜스 제거	30	0.3	$1-(0.7 \times 0.7) = 0.51$
	이동	30	-	
P2	외부분 제거	20	0.3 CDP
	이동	30	-	
P3	내부분 제거	60	0.6	대응 출동시간 : 120초 (가정)
	이동	15	-	
P4	목표물 파괴	20	-	
전체 침입시간		205		

이처럼 지점의 방호성을 향상시키는 방법은 대표적으로 출입문의 구조, 재료 또는 잠금장치 등을 변경하는 것이다. 표 3-6.는 출입문의 종류별 지연성을 보여 준다.⁷³⁾ 특히 잠금장치에 따른 방호성능 향상은 시설 내부사용자의 편의성과 직접적으로 관련된 사항이기 때문에, 어떤 지점의 방호성능을 강화해야 하는지는 설계 단계부터 이에 대한 고려가 선행되어야 한다.

표 3-6. 출입문의 종류별 지연성능 (Betty E. Biringer, 2013)

Door Delay—Personnel or Vehicle	
Feature	Delay Time (seconds)
Wood	10
Hollow core	10
Wire mesh	30
Tempered glass	30
Security glass	120
Lock—Padlock	15
Lock—Electromagnetic strike	30
Lock—Keyed cylinder	30
Lock—Mechanical or electrical coded	60
Lock—Combination	180
Lock—Inaccessible	Infinite
Security personnel at post—No protection against firearms	0
Security personnel at post—Protection against firearms	60
Security personnel on patrol	0
Security personnel in tower	Infinite



그림 3-7. 출입문의 방호성능 향상 사례

73) 표 3-6.의 'Door Delay'는 1970년부터 약 20년간 미국 Sandia National Lab.에서 실험과 전문가 의견을 기반으로 구축된 데이터베이스로 Critical Infrastructure System Security and Resiliency (Betty E. Biringer, 2013)에 수록되어 있음.

(2) 방호지점 추가

두 번째 방호지점을 추가하여 물리적방호의 유효성을 향상시키는 방법이다. 그림 3-8.은 외부문(P2)과 내부문(P3) 사이에 중간문(P2-1)을 설치함으로써 방호지점을 추가한 예이다. 표 3-7.과 같이 추가된 중간문의 지연시간 및 탐지확률은 내부문(P3)의 2배 향상시킨 성능으로 설정하였다. 침입경로 분석 결과 기존과 비교해 최후 탐지 지점이 뒤쪽으로 이동하여 P2-1지점상에 위치한 것을 확인할 수 있다. 동시에 탐지영역이 확장되어 펜스, 외부문, 중간문이 모두 탐지가능 지점으로 확대되었다. 이를 기반으로 도출한 물리적방호 유효성은 0.804로 P2-1지점을 추가하기 전보다 0.504 높아진 것을 확인할 수 있다.

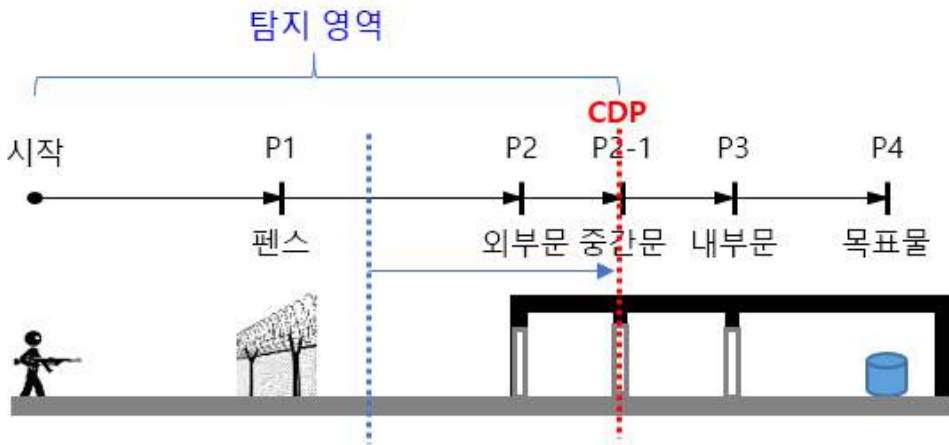


그림 3-8. 방호지점 추가(P2-1지점)에 따른 CDP, 탐지 영역

표 3-7. 방호지점 추가(P2-1지점)에 따른 지점별 소요시간 및 탐지확률

Action		소요시간 (초)	탐지확률	물리적방호 유효성
P1	펜스 제거	30	0.3	$1 - (0.7 \times 0.7 \times 0.4) = 0.804$ CDP 대응 출동시간 : 120초 (가정)
	이동	30	-	
P2	외부문 제거	20	0.3	
	이동	15	-	
P2-1	중간문 제거	60	0.6	
	이동	15	-	
P3	내부문 제거	30	0.3	
	이동	15	-	
P4	목표물 파괴	20	-	
전체 침입시간		235		

방호지점의 추가는 그림 3-9와 같이 실내공간에서 복도를 분할하여 보안문을 설치하거나 출입문에 방풍실(Vestibule)을 구획하여 방호지점을 늘리는 방법을 의미한다. 특히 긴 복도나 큰 홀을 가진 시설은 외부 침입자가 복도를 통해 원하는 지역까지 지연이나 탐지없이 손쉽게 이동할 수 있어 물리적방호 측면에서 취약한 계획이다. 따라서 복도나 홀을 분할하여 격실형태로 만들고 방호지점을 추가하는 것은 건축계획 측면에서 물리적방호 유효성을 높일 수 있는 방법이다. 하지만 복도나 홀은 내부사용자의 이동, 교류, 비상시 대피 등에 주요한 공간이기 때문에 이동 편의성을 고려한 방호지점 추가가 선행되어야 한다.



그림 3-9. 방호지점 추가 사례
(좌: mantrap portal, 우: turnstile)

3.3. 공간 네트워크 구현

3.3.1. 물리적방호 평가·강화를 위한 네트워크 구성 제안

(1) 노드 구성

본 장에서는 물리적방호 평가·강화를 위한 공간 네트워크 구성을 제안하였다. 이를 위해 그림 3-10.과 같이 문(Door)을 재현하는 노드와 실(Room)을 재현하는 노드를 구분하였다. 이는 물리적방호 평가 시 문은 지연시간과 탐지확률을 모두 가지고 있는 요소이지만, 실은 실 내부에 CCTV, 움직임 감지 센서 등이 설치된 경우 탐지확률만 포함한 요소이기 때문이다. 또한 3.1장에서 제안한 건축시설에서의 물리적방호 유효성 향상 방법인 ‘방호성능 향상’과 ‘방호지점 추가’를 고려하기 위해서는 방호성능 향상지점인 문과 방호지점 추가지점인 실이 별도로 구분되어야 하기 때문이다. 마지막으로 문 노드와 실 노드 사이는 엣지로 하여 시설의 내부사용자 및 침입자의 동선을 재현하였다.

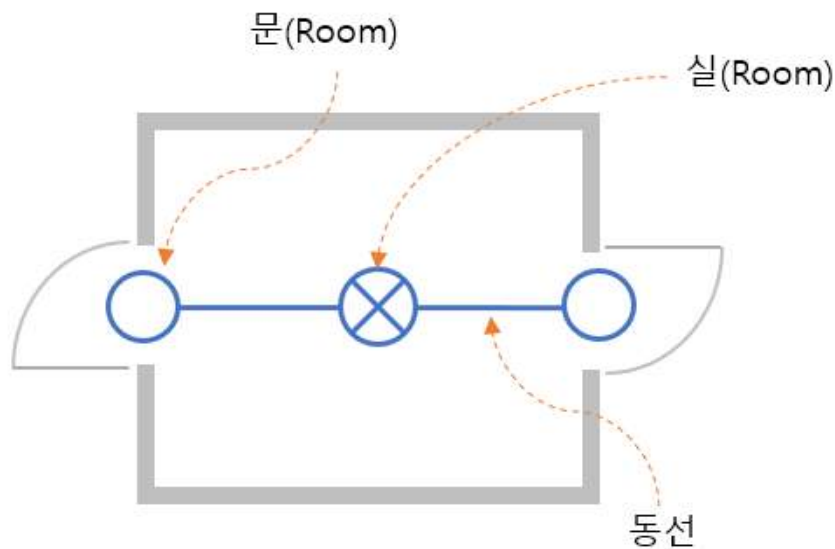


그림 3-10. 물리적방호 평가·강화를 위한 공간 네트워크 재현

이렇게 제안한 두 종류의 노드와 엣지를 각각 물리적방호 평가와 강화시 활용 목적별로 정리하면 표 3-8.과 같다. 물리적방호 평가를 위해서는 시설의 물리적방호 요소들을 정확히 재현하는데 목적이 있고, 물리적방호 강화시에는 최적의 강화지점을 찾아내는데 목적이 있다.

표 3-8. 공간 네트워크 구현과 물리적방호 평가·강화 시 활용

재현요소	네트워크 구성	물리적방호 평가 시 활용		물리적방호 강화 시 활용
		탐지(Detection)	지연(Delay)	
공간 (실, 구역)	실 Node	실에 설치된 CCTV, 침입센서 등에 의한 탐지확률	-	방호지점 추가 대안
	Edge	-	실을 통과하는데 소요되는 시간	-
방호지점 (문, 창문 등)	문 Node	문에 설치된 센서에서 침입을 탐지할 확률	문을 제거하고 통과하는데 소요되는 시간	방호성능 향상 대안

이처럼 공간 네트워크 구성 방법은 네트워크를 통해 분석하고자 하는 목적에 따라 달라지게 되는데 그림 3-11.과 같이 공간구문론은 공간의 위상학적 관계를 도출하고자 하여 실은 노드로, 실 간의 연결관계를 엣지로 재현하고 있다. 또한 Door-to-door 그래프에서는 공간 사용자의 이동 분석을 목적으로 하기 때문에 노드는 통과지점(문)으로, 엣지는 지점과 지점 간의 연결 동선으로 재현된다. 따라서 본 연구에서 제안한 공간 네트워크 구현방법은 물리적방호 평가를 위한 방호요소 재현과 물리적방호 강화를 위한 대안지점 도출에 목적이 있어, 기존의 공간구문론 및 Door-to-door 그래프 등과의 차별성을 가진다.

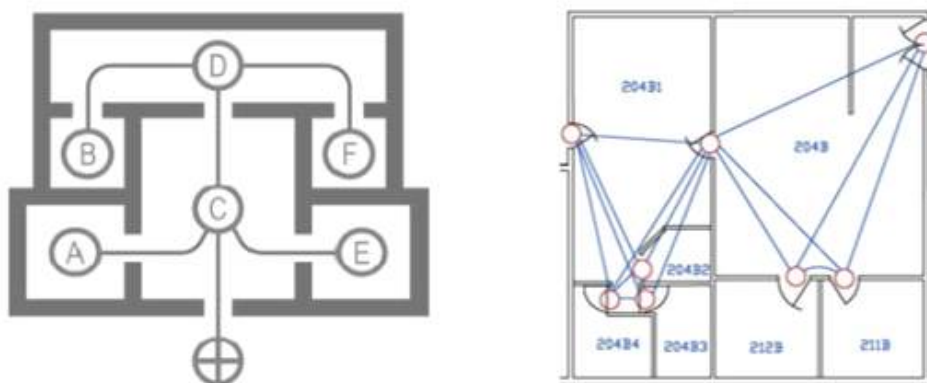


그림 3-11. 공간구문론 Convex map(좌), Door-to-door(우) 그래프 예시

(2) 엣지 구성

엣지는 물리적방호 평가시에는 침입자의 동선을, 물리적방호 강화시에는 내부사용자의 동선을 재현해야 한다. 따라서 최대한 실제 시설을 이용하는 사람의 동선과 유사하게 재현하는데 목적이 있다. 이를 위해 Medial axis(straight skeleton) 방식으로 엣지를 구축하였는데, Medial axis는 그림 3-12.와 같이 공간의 중심을 기준으로 동선을 재현하고 출입구나 분절점이 생길 때 최단경로로 이동하는 것을 고려한 방식이다.

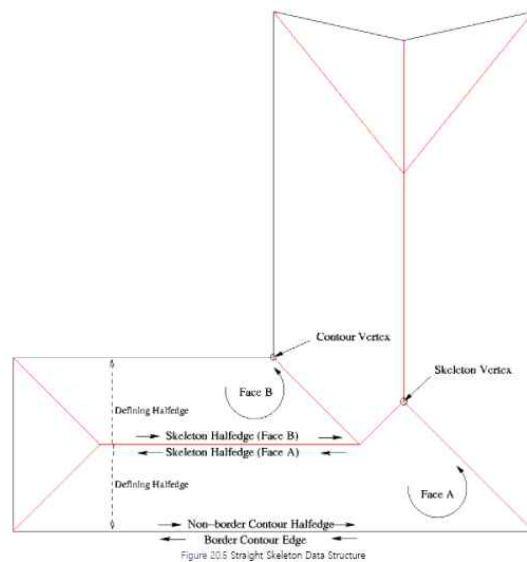


그림 3-12. Medial Axis 구축 원리
(<https://doc.cgal.org/>)

따라서 여러 선행연구에서 지도의 경로 설정 등에 가장 널리 쓰이는 방법 중 하나이며 (Taneja, 2019) 효과적으로 실내공간의 동선을 재현해 낼 수 있는 방법 (Fu, 2020)이라 알려져 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 공간 네트워크 중 엣지의 재현 모습은 아래 그림 3-13.과 같다.

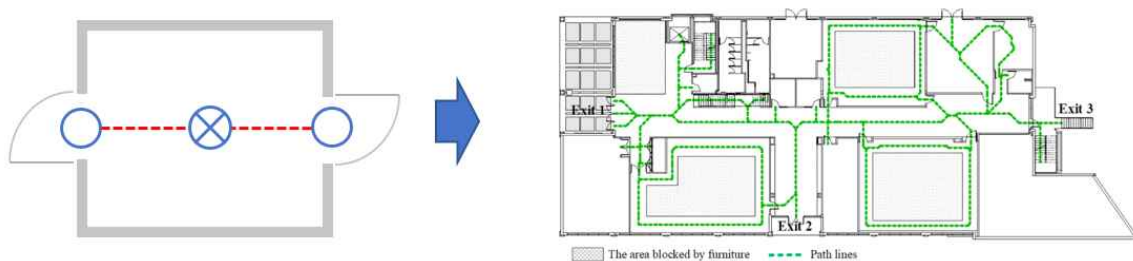


그림 3-13. 엣지로 재현된 실내공간 예시 (오른쪽 그림: Fu (2020))

3.3.2. 물리적방호 평가·강화를 위한 공간 네트워크 재현

세부적으로 물리적방호 평가·강화를 위한 공간 네트워크 재현 예시는 그림 3-14와 같다. 첫 번째로, 실 중심에는 각 실을 대표할 수 있는 하나의 실 Node가 배치된다. 이후, 실과 실 사이에 있는 문에는 문 Node가 배치된다. 여기서 실 Node는 각 실을 대표하는 지점과 속성을 포함하는 노드이고 물리적방호 강화시 방호지점을 추가할 수 있는 대안지점을 의미한다. 또한 문 Node는 문의 방호속성(지연시간, 탐지확률)을 포함하고 있으며 물리적방호 강화 시 방호성능을 향상시킬 수 있는 대안지점을 의미한다. 이후, Medial axis로 구축된 엣지의 접점에도 실 Node가 배치되는데, 이 Node들은 각 엣지들을 연결하는 목적으로 배치되며 지연 및 탐지속성은 가지지 않는다.

실 Node는 배치된 실의 이름을 노드 이름으로 가지며(예, Corridor 또는 Room_A), 문 Node는 문 이름을 노드 이름으로 가진다(예, Door_A 등). 또한 동선의 연결을 위해 배치된 Node도 위치에 따라 Corridor1, Corridor2, Room_A1 등의 노드 이름이 부여된다. 이는 Room_A에서 Room_B로 이동하는 경우, Corridor 실 Node를 지나가지 않음에도 Corridor Node를 통해 해당 동선이 어떤 공간을 통과하는지 확인할 수 있기 위함이다.

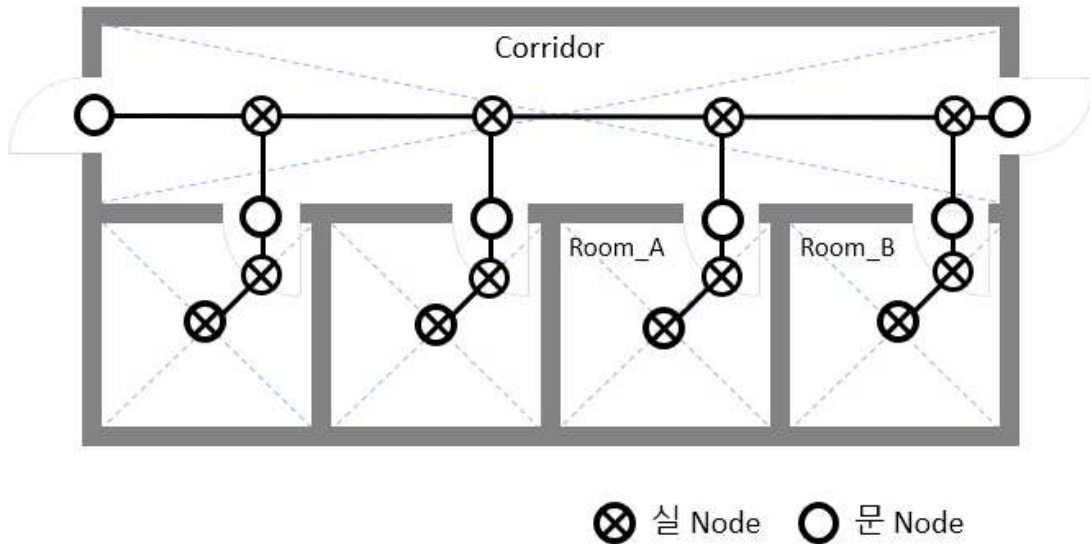


그림 3-14. 물리적방호 평가·강화를 위한 공간 네트워크의 노드 구분

3.4. 물리적방호 평가 및 강화 대안지점 도출

3.4.1. 모든 경로를 고려한 물리적방호 유효성 도출

물리적방호 평가는 기본적으로 침입 가능한 모든 경로를 탐색하고 탐색된 경로를 바탕으로 물리적방호 유효성을 분석하는 방법을 제안하였다. 본 연구 2장의 이론적 고찰에서 밝힌 선행연구의 한계의 대표적 요인은 분석자가 침입이 유력한 몇 개의 침입경로를 가정하기 때문에 예상하지 못한 침입경로가 발생할 수 있다는 것이다. 실제로 2021년 발생한 세종정부청사 침입사건에서도 침입자는 보안이 철저한 정문보다는 지하주차장 차량출입구를 통해 건물 내부로 진입하여 장관실 앞까지 접근한 것으로 알려져 있다.⁷⁴⁾

따라서 본 연구에서 제안한 물리적방호 평가 절차는 그림 3-15와 같이 모든 침입경로를 고려한다. 앞에서 제안한 공간 네트워크 구축방법으로 재현된 시설에서, 침입자부터 시설내 목표구역까지 접근 가능한 모든 침입경로를 도출하고 EASI 모델을 활용하여 모든 경로의 물리적방호 유효성을 도출한다. 단순 이동이라면 도출된 모든 경로 중 가장 짧은(소요시간이 작은) 경로가 최약한 경로라고 생각할 수 있지만, 경로상에 위치한 방호요소(문, 창문 등)와 동선의 길이 등에 따라 물리적방호 유효성이 달라지며 침입으로부터 가장 취약한 경로가 결정된다. 최종적으로는 가장 취약한 경로의 물리적방호 유효성은 시설 또는 침입구역의 물리적방호 유효성이라 평가할 수 있다.

74) ‘마약투여’의심 20대 男 무단침입 3시간 활보. 구명 뚫린 정부청사 (Newsis, 2021.01.05.)

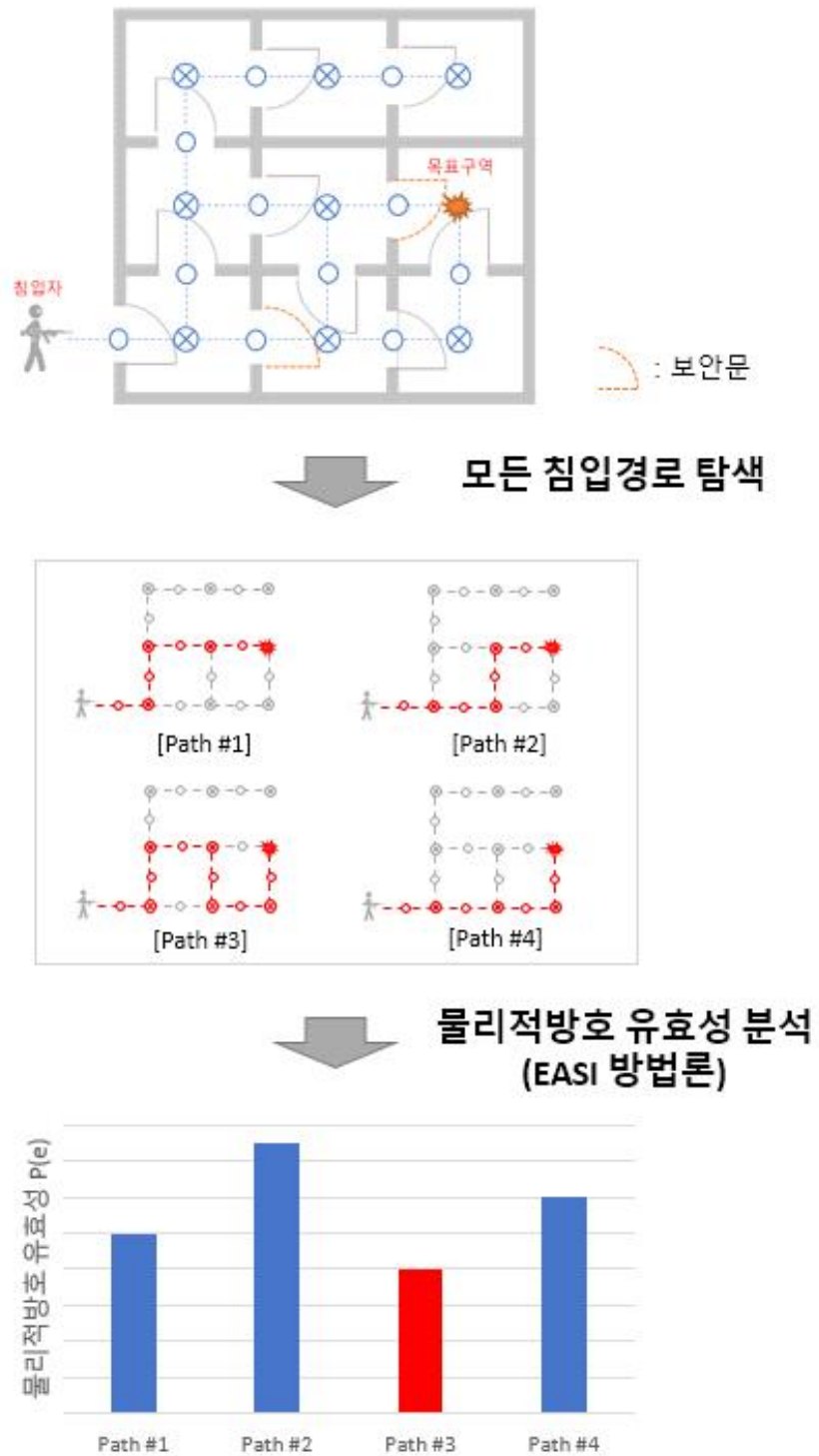


그림 3-15. 침입 전 경로를 고려한 물리적방호 유효성 평가 절차

3.4.2. 물리적방호 강화 대안지점 도출

물리적방호 평가결과를 통한 강화지점 도출 절차는 그림 3-16.과 같다. 이 과정에서는 외부에서 침입 목표구역까지 접근가능한 모든 경로를 탐색하고⁷⁵⁾, 경로들의 중첩되는 노드가 강화대안 지점이다. 예를 들어, 그림 3-16. [a]에서 핵심구역까지의 접근가능 경로는 path #1~#4까지 4개의 경로를 탐색하였고 Path #3이 가장 침입에 취약한 경로라고 가정하였다. 만약 path #3의 경로가 침입에 가장 취약하기 때문에 Path #3 에 위치한 5개의 노드만 강화대안 지점으로 가정하여 F지점을 강화한다면, F지점을 통과하지 않는 path #1과 #2이 취약한 경로로 바뀔 수 있다. 즉, 가장 취약한 경로만 물리적방호를 강화한다면 그 다음으로 물리적방호 유효성이 낮은 경로가 취약한 경로로 바뀔 수 있다는 의미이다. 따라서 최적 강화지점을 도출하기 위해서 모든 접근 가능경로의 노드를 강화 대안 지점으로 도출할 필요가 있다.

$$\cdot \text{강화 대안지점} = \bigcup_{i=1}^n \text{Node of path \#}n \text{ } ^{76)}$$

그림 3-16.의 [b]는 모든 접근가능 경로에서 강화대안 지점을 선정한 결과이다. 모든 침입경로 Path #1 ~ #4를 종합해 도출한 강화대안 지점은 A ~ G까지 7개의 노드이다.

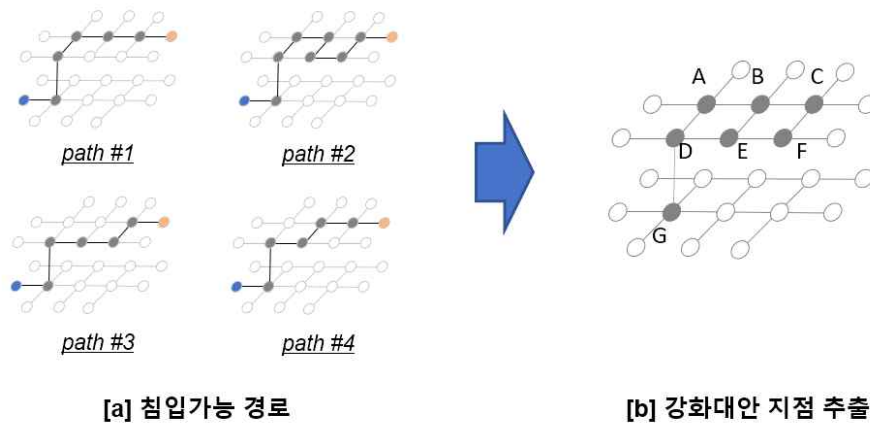


그림 3-16. 물리적방호 강화지점 도출 절차

75) 강화 전 핵심구역의 물리적방호 유효성을 분석하는 이유는 [3]에서 도출한 최적대안이 얼마만큼의 강화 효과를 갖는지 측정하기 위함임.

76) 경로의 시작 노드 s , 끝 노드 t 제외

그림 3-16.에서는 노드를 구분하여 표시하지 않았지만 세부적으로 노드를 살펴 보면 그림 3-17.과 같다. 붉은색의 점선 내부의 노드는 강화 대안지점으로 사용되고, 그 외의 노드는 침입에 사용되지 않는 노드이기 때문에 강화 유무가 목표구역의 물리적방호 유효성과는 무관하다. 강화대안 지점(노드)를 살펴보면 실 노드와 문 노드로 구분된 것을 볼 수 있다. 이는 본 연구 3.2.2. 장에서 제안한 방호지점을 추가하거나 방호성능을 향상하여 물리적방호를 강화하는 대안지점이다.



그림 3-17. 물리적방호 강화 대안지점과 강화 방법에 따른 분류

세부적으로 물리적방호 강화 대안지점을 살펴보면 그림 3-18.과 같다. 본 연구에서 제안한 실내 공간 네트워크 구축방법은 실 Node와 문 Node로 구분하고 이들 간을 엣지로 연결하는 방식이다. 여기서 실 Node와 문 Node를 구분한 이유는 물리적방호 강화 대안지점을 ‘방호지점 추가’와 ‘방호성능 향상’ 두 가지를 고려하였기 때문이다. 방호성능을 향상할 때는 앞의 그림 3-17.의 침입에 사용되는 지점 중 문 Node를 추출하여 강화 대안지점으로 선정하면 되지만, 방호지점을 추가할 때는 수많은 실 Node가 존재하여 모든 실 Node를 방호지점 추가 대안지점으로 선정하기엔 무리가 있다. 따라서 침입에 사용되는 실 중 공간을 분할하여 방호지점을 추가할 수 있는 실을 선정하는 것이 중요하다. 대표적으로 복도, 홀, 로비 등이 해당되며, 다른 실로 출입하는 연결지점의 노드가 아닌 실 중심에 배치된 노드가 방호지점 추가 대안지점으로 사용된다. (그림 3-18.의 Corridor 중심에 배치된 붉은색 노드)⁷⁷⁾

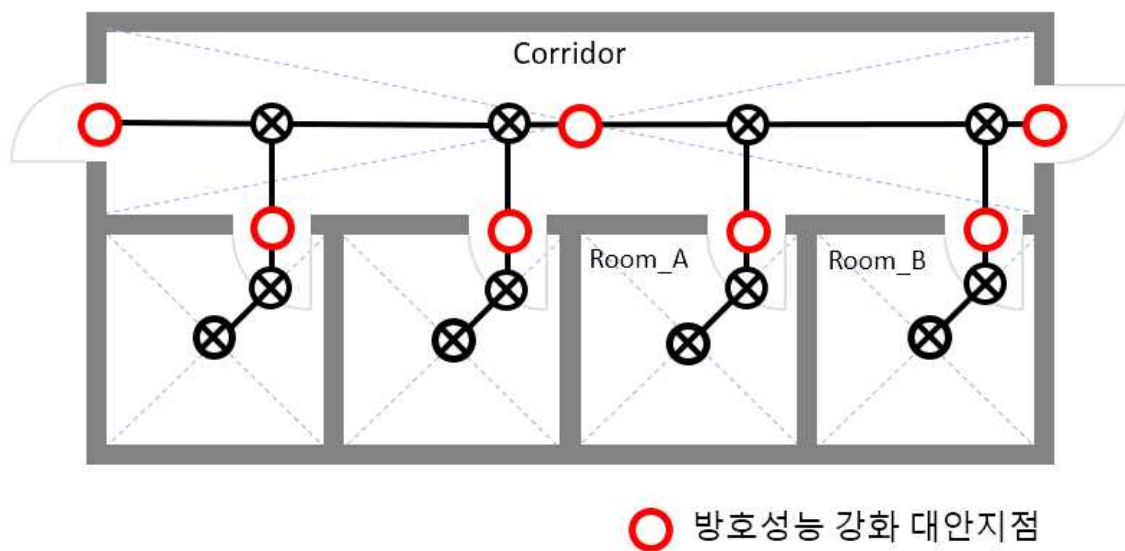


그림 3-18. 물리적방호 강화 대안지점

77) 본 연구 4장 시스템 개발의 ‘(Module 1) 공간 네트워크 및 속성정보 추출’부에서 노드가 배치된 실의 이름을 따서 노드 이름을 구성하도록 개발하였다. 이를 통해 강화 대안지점으로 추출된 노드들이 특정 실에 위치한 노드인지 복도, 홀, 로비에 위치한 노드인지 분류하도록 하였다.

실 중심에 위치한 노드를 실의 대표 노드로 선정하고 나머지 노드는 sub 노드로 이름을 부여하여 물리적방호 강화 대안지점 선정 시 대표 노드를 강화 대안으로 고려할 수 있도록 하였다. (예를 들어, Corridor의 중심에 위치한 노드이름은 Corridor, sub 노드들의 이름은 Corridor_1, Corridor_2 등으로 구분함.)

또한 방풍실 같이 공간이 협소하여 방호지점을 추가할 수 없는 지점은 강화 대안지점에서 제거하는 필터링 과정을 거쳤다.

3.5. 물리적방호 강화와 이동편의성

본 장에서는 이동편의성을 고려한 물리적방호 강화 지점 도출방법을 제안한다. 국가중요시설 중 건축시설은 내부사용자가 많고 이동이 잦은 사용특성을 가지고 있어 물리적방호 강화는 내부사용자의 이동편의성을 저해할 수 있기 때문이다. 따라서 이동편의성을 분석할 수 있는 지표를 선정하고, 이동편의성 비용과 물리적방호 유효성을 고려한 물리적방호 강화 최적대안을 제시하였다.

3.5.1. 물리적방호 강화에 따른 이동편의성 영향

건축시설의 물리적방호 강화 방안은 복도, 홀 등을 분할하여 방호지점을 추가하는 방법과 출입 설비 등을 개선하여 방호성능을 향상시키는 방법을 제안하였다. 하지만 이런 방법은 출입절차 및 이동 소요시간 등 측면에서 내부사용자의 이동편의성을 저해할 수 있다. 이동편의성은 시설을 사용하는 내부사용자의 업무 생산성이나 화재시 대피, 장애인 통행 등에 중요한 요인으로 꼽힌다. 또한 근무자들의 이동과 교류 등의 상호작용은 업무 생산성 향상에도 주요한 요인이다. (M.Palvalin, 2017)

정길현(2018)에 따르면 물리적방호 설계 전략 수립 시, 시설 사용자의 불편을 최소화할 수 있는 계획이 있어야 물리적방호가 실효성을 거둘 수 있다고 설명한다. 특히 장애물 및 출입통제시설의 위치가 합리적이어야 한다.⁷⁸⁾ 또한 시설의 사용단계에서 물리적방호 강화를 위한 추가적인 설비 추가는 내부사용자에게 과도한 불편을 초래할 수 있기 때문에 시설의 설계 단계부터 시설내부 사용자에게 불편을 초래할 수 있는 물리적방호 계획의 최소화를 고려해야 한다. (Lawrence J., 1992)

유승민(2013)은 K 공공기관 내부 사용자 240명 대상으로 건물, PC 등에 물리적 접근 통제에 의한 조직구성원이 체감하는 신체적, 정신적 부정적 반응을 물리적 보안 스트레스로 정의하고 그 정도를 설문조사 하였다.⁷⁹⁾ 결과적으로 물리적 보안과 시설 사용자가 체감하는 스트레스가 유의미하다고 밝혀냈다. 특히 유승민(2013)은 물리적 보안은 건물, PC 등에 물리적 접근 통제를 통한 극단적인 보안 요소이기 때문에 다른 보안 요소보다 기본적으로 스트레스가 높다고 말한다. 특히 회사의 환

78) 물리보안 & 대체러 전략, SDNA((사)보안설계평가협회), 2018

79) 유승민(2013)은 물리적보안의 범위를 시설에서의 통행 및 출입 뿐만아니라 보안 USB 사용, 무선랜 차단 등을 포함하여 설문하였다.

경적 요인(보안전략 신뢰도 등)에 따라 스트레스의 설명도가 높게 되었는데, 이는 시설의 중요도 따른 스트레스로, 중요도가 높은 국가중요시설 등에서 내부사용자가 체감하는 불편함과 스트레스는 더 클 것으로 예상된다.

실제로 국가중요시설중 건축시설에 해당하는 원자력발전소 내부 근무자들을 대상으로 한 물리적방호 설문조사에서 이와 같은 내용을 확인할 수 있다.⁸⁰⁾ 그림 3-19.는 내부 근무자를 대상으로 시설 내부에 물리적방호 설비(출입 절차, 본인 인증 기기 등)를 강화하였을 때 업무 편의성⁸¹⁾에 대한 영향을 설문한 결과이다. 전체의 50%가 물리적방호 강화는 이동편의성을 저해한다고 대답하였다. 또한 그림 3-20.과 같이 전체의 38%는 내부사용자의 이동에 영향을 주지 않는 지역만 물리적방호를 강화해야 하고, 20%는 물리적방호 강화가 내부사용자의 이동편의성에 영향을 끼친다면 물리적방호를 강화하지 않았으면 좋겠다고 대답하였다. 즉 물리적방호 설비로 인한 출입절차 및 소요시간은 내부사용자의 업무효율에 많은 영향을 끼친다는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 본 장에서 제안하는 물리적방호 강화 최적대안 방법은 시설 내부자의 이동편의성을 최대한 저해하지 않으면서 물리적방호를 효과적으로 높이는 지점을 찾아내는데 목적이 있다.

80) APR1400 물리적 방호 설계체계 구축 과제 (2012-2015, 한국에너지기술평가원)의 일환으로, 총 40명을 대상으로 설문조사함.

81) 업무를 함에 있어 시설 내부를 통행하는데 편의성을 저해하는지 설문

Q. 내부 보안설비로 인한 업무 운영편의성에 대한 생각은?



그림 3-19. 물리적방호 강화와 이동편의성 설문조사 결과 (1)

Q. 보안 강화로 운영편의성에 영향을 줄 경우 당신의 생각은?

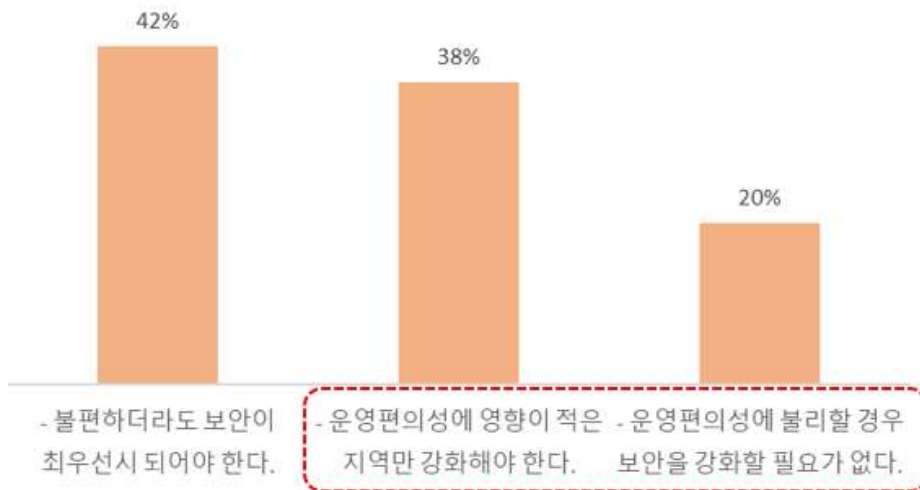


그림 3-20. 물리적방호 강화와 이동편의성 설문조사 결과 (2)

3.5.2. 이동편의성 분석지표 선정

물리적방호 강화를 위한 내부사용자의 이동편의성을 최대한 저해하지 않는 방호 지점을 찾기 위해 사이중앙성(Betweenness Centrality)⁸²⁾ 지표를 사용하였다. 그래프 이론의 분석지표 중 중심성(Centrality)은 노드의 영향력을 나타낸다. 중심성이 높은 노드는 네트워크 내에서 유리한 위치에 존재함을 의미하는 것으로, 분석목적에 따라 차수중앙성(Degree centrality), 근접중앙성(Closeness centrality), 사이중앙성(Betweenness centrality)등이 주로 사용된다. 이들 중 사이중앙성은 특정점에서 다른점으로 가는 유일한 통로 역할을 얼마나 하는지 측정하는 지표이다. 선행연구에 따르면 사이중앙성은 유일한 통로를 선정할 때 최단경로를 사용하기 때문에 보행접근성과 가장 연관 깊은 지표이며(윤철재, 2014), 건축분야에서는 도시 및 실내 보행량 예측이나 시설 프로그램 적합성 평가를 위해 사용하기도 한다. 대표적으로 Santosa(2009)는 실내공간에서 보행량 예측을 위해 사이중앙성 지표를 활용하였으며, 신두신(2019)은 내부사용자의 이동을 기반으로 건축프로그램 도출을 위해 사이중앙성을 사용하였다. 김민석 외(2014)는 도시분야에서는 도로의 보행 및 차량 통행량 예측을 위해 사용하는데, 선정도가 높은 공간은 통과동선의 교차가 빈번하기 때문에 교통이 활발한 공간이라고 가정하여 도시가로망에서 교통 예측에 활용하였다.

따라서 본 연구에서 국가중요시설 중 건축시설의 내부사용자 이동편의성을 분석하기 위한 사용량 지표로 사이중앙성을 선정하였고, 사이중앙성 값은 노드에 부여되어 문, 실 같은 지점을 내부사용자가 얼마만큼 사용하는지에 대한 상대적 지표로 활용하였다.

사이중앙성은 수식 2-3.과 같이 네트워크에서 v 노드의 사이중앙성 값을 구하는 수식으로 네트워크에서 임의의 두 노드 s, t 사이의 최단경로 중 v 를 지나는 경로의 수를 더한 값으로 산출할 수 있다.⁸³⁾

그림 3-21.은 수식 2-3.에 따라 9개의 노드로 구성된 네트워크의 사이중앙성을 도출한 결과이다.⁸⁴⁾ 사이중앙성은 0에서 1 사이의 값을 띄며, 1에 가까운 노드가

82) 연구자에 따라 매개중심성이라는 단어를 사용하기도 하며, 공간구문론(Space Syntax)에서는 선정도(Measure of Choice)라고 정의하며 수학적 계산과정은 동일하다.
(<https://www.spacesyntax.online/term/choice/>)

83) 본 연구에서 두 노드 s, t 사이 최단경로를 찾을때 edge의 길이를 가중치(weight)로 하여 최단경로를 결정하였다.

84) Python 3.0 기반 NetworkX 패키지의 ‘networkx.algorithms.centrality.betweenness_centrality’ 알

사이중앙성이 높은 곳으로 건축공간에서는 사용자의 이동이 빈번한 지점, 도시에서는 보행이나 차량 통행이 많은 지역이라고 이해할 수 있다. E나 I지점은 막다른 공간으로 통행으로 사용되지 않아 사이중앙성이 0으로 나타났다. 중앙에 위치하여 다른 공간들의 이동간에 통행에 가장 많이 사용될 것으로 예상되는 C지점이 0,548로 가장 높은 사이중앙성 값을 보였다.

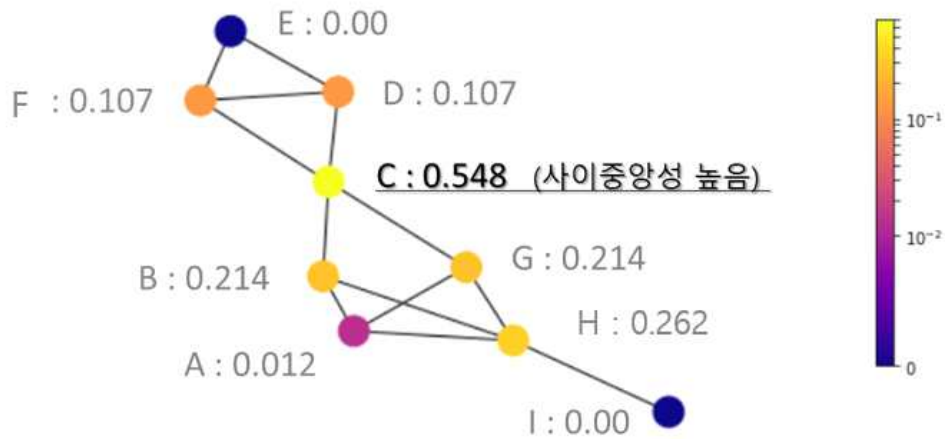


그림 3-21. 네트워크에서의 사이중앙성 도출 예시

3.5.3. 이동편의성 비용 정의

본 연구에서 사이중양성 지표를 활용하여 물리적방호를 강화하였을 때 저하되는 이동편의성을 ‘이동편의성 비용’이라고 정의하였다. 물리적방호 강화를 위해 동일한 효과를 낼 수 있는 통행량이 많은 실내 임의의 A 지점과 통행량이 적은 B 지점에 출입절차가 필요한 보안문을 설치할 수 있다고 가정해보면, A 지점에 보안문을 설치할 경우가 B 지점에 보안문을 설치하는 경우보다 많은 내부사용자의 이동편의성을 저하시킬 것이다. 따라서 물리적방호를 강화하고자 하는 설계자는 내부사용자의 통행량이 많은 A 지점보다 통행이 적은 B 지점을 물리적방호 강화지점으로 선정할 수 있다. 이러한 논리로 A 지점의 이동편의성 비용이 B 지점의 이동편의성 비용보다 높다고 가정할 수 있다.

이를 위해 3.3.3장에서 물리적방호 평가 및 강화를 위해 제안한 네트워크가 실내 공간에서 통행량을 대변할 수 있는지 검증하는 과정을 거쳤다. 특정 지점의 사이중양성 값이 실내 공간에서의 통행량을 대변하거나 높은 상관관계를 보여야 이동편의성 비용을 통한 물리적방호 최적대안 선정이 가능하기 때문이다. 검증을 위한 통행량 조사 데이터는 Space Syntax Limited⁸⁵⁾에서 진행한 British museum 통행량 결과를 사용하였다.⁸⁶⁾ 검증에 사용한 British museum의 평면 및 통행량 측정 지점, 그리고 재현된 네트워크는 Appendix 그림 A1-1.과 같다. Space Syntax Limited는 총 49개 지점의 통행량을 측정하였는데, 본 연구에서 제안한 네트워크의 사이중양성 비교를 위한 지점은 외부에서의 출입구 2개 지점을 제외한 47개 지점을 비교 대상으로 선정하였다.

47개 지점별 측정된 통행량과 사이중양성 값은 Appendix 표 A1-1.과 같다. 통행량은 최저 71에서 최대 1938의 값을 보이며, 사이중양성 값은 최소 0.0075에서 최대 0.3312 값을 가진다. 그림 3-22.에서와 같이 중앙 홀을 둘러싼 순환형 동선과 좌측부에 위치한 갤러리를 연결하는 중앙 복도가 높은 통행량을 보인다. 해당 지점은 시설을 이용하는 관람객이 이동하는 통로역할을 하는 공간으로, 해당 지점은 높은 사이중양성을 보일 것으로 예상된다. 따라서 British museum 평면을 물리적방호가 필요한 국가중요시설이라고 가정하면 해당 지점에 물리적방호 강화를 위한 보안문을 설치하거나 공간을 구분해 방호지점을 추가한다면 많은 사용자의 이동편의성 저하가 예상된다고 가정할 수 있다.

85) <https://spacesyntax.com/project/british-museum/>

86) British museum project (2004, 2005), Project Director: Maximo Martinez

결과적으로, 그림 3-22.는 42개 지점의 통행량과 본 연구에서 제안한 네트워크 사이중양성 값의 단순 회귀분석 결과를 보여주는 그래프이다. 회귀분석을 위해 독립변수를 각 지점의 사이중양성, 종속변수를 각 지점의 통행량으로 설정하였다. 표 3-9.와 같이 다중 상관계수(R)는 0.7599로 나타났다. 이는 독립변수와 종속변수 간의 상관관계를 나타내는 것으로 두 변수간에 선형관계를 보이며, 결정계수(R^2) 0.5775, 조정 결정계수(Adjusted R^2) 0.5682로 사이중양성 값이 통행량을 유의미하게 예측할 수 있음을 보여준다.⁸⁷⁾ 이는 실제 통행량에 대해 사이중양성의 설명력이 57.75%임을 의미한다.⁸⁸⁾ 따라서 본 연구에서 제안한 실내공간 네트워크 재현 방법을 기반으로 각 지점의 사이중양성을 활용하여 시설 내부사용자의 통행량을 예측할 수 있다고 판단된다.

표 3-9. 제안한 네트워크의 사이중양성과 통행량 회귀분석 결과

회귀분석 통계량	
다중 상관계수	0.7599
결정계수	0.5775
조정된 결정계수	0.5682
표준 오차	0.0516
관측 수	47

87) 일반적으로 유의미한 결정계수(R^2)는 Bio 분야는 0.95, 공학 분야는 0.7, 사회과학 분야는 0.3 정도를 기준으로 한다. (박성현(2007), 회귀분석, 민영사)

공간분석을 통한 통행량 예측 선행연구에서의 결정계수(R^2)는 보통 0.3~ 0.6 사이값을 보임.

- 박찬호 (2011)의 연구 (대학 캠퍼스의 통행량 상관관계 결정계수(R^2))
 - 전체통합도 : 0.1599 ~ 0.4455
- 조형규 (2005)의 연구 (코엑스몰의 통행량 상관관계 결정계수(R^2))
 - 통합도(3) : 0.6029, - V ERAM : 0.5632, - angular V ERAM(3) : 0.6083
- 최성필 (2019)의 연구 (대전역의 통행량 상관관계 결정계수(R^2))
 - 통합도(3) : 0.179, - V ERAM(3) : 0.236, - angular V ERAM(3) : 0.315, E V ERAM : 0.359

조형규(2005)와 최성필(2019)는 통행량의 선형화를 위해 로그(Log)를 취해 단순 회귀분석을 수행하였음.

본 연구에서 통행량을 선형화(로그)하여 사이중양성과의 단순 회귀분석 결과는 결정계수(R^2): 0.4447 임.

88) 일반적으로 단순 회귀분석을 하는 경우 일반 결정계수를 사용하며, 다중회귀분석을 수행하는 경우 조정 결정계수를 함께 고려한다.

더욱이, 본 연구에서 대상으로 하는 국가중요시설 사용자들은 시설 내부환경(복도, 계단실, 목적 실의 위치 등)을 미리 인지하고 있고, 이동의 목적성(A 사무실에서 B 회의실로 이동 또는 C 통제실에서 D 기계실로 이동 등)을 가지고 있기 때문에 최단경로를 선택하여 이동할 것으로 예상된다. 따라서 네트워크로 재현된 시설 특정 지점의 사이중앙성 값과 일반적인 국가중요시설에서의 내부 통행량은 검증 대상으로 선정한 British museum의 통행량 사례보다 더 높은 상관관계를 보일 것으로 예상된다.

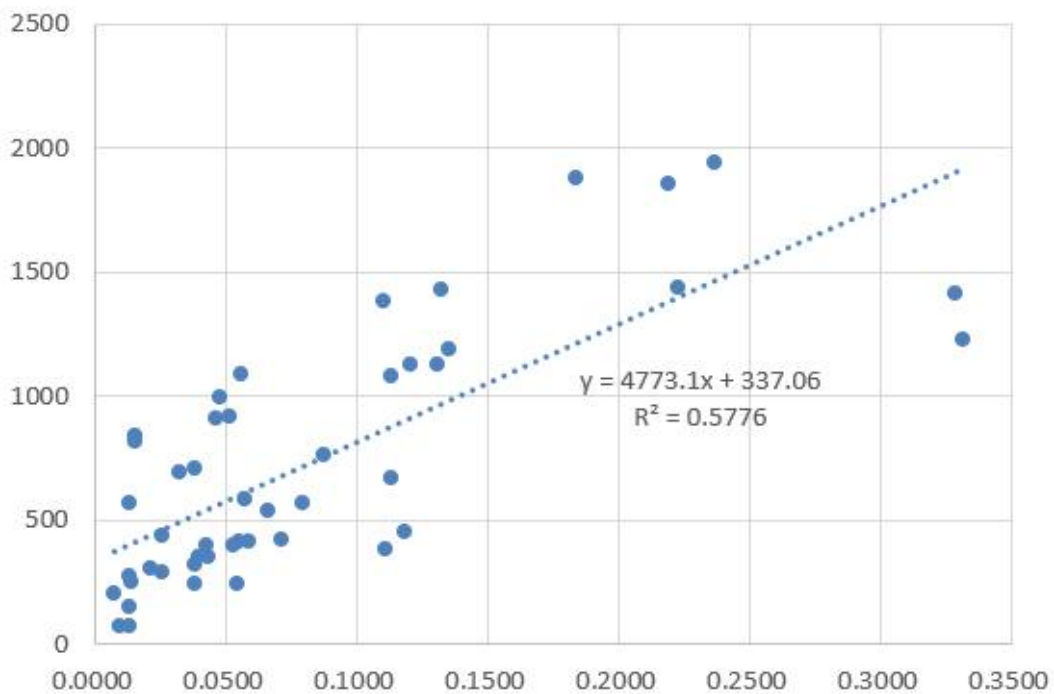


그림 3-22. 제안한 네트워크의 사이중앙성과 통행량의 상관도

앞에서 검증한 네트워크로 재현된 실내공간의 사이중앙성과 통행량이 유의미한 상관관계를 보임을 확인할 수 있었다. 따라서 국가중요시설에서 사이중앙성 값이 높은 노드는 내부사용자의 통행이 빈번한 지점이고, 보안을 강화하면 이동편의성 저하가 큰 지점이다. 결국 이동편의성 비용이 높은 지점이라고 결론 내릴 수 있다.

- 사이중앙성이 높은 노드
- = 통행이 빈번한 지점
- = 보안을 강화하면 이동편의성 저하가 큰 지점
- 이동편의성 비용(Cost)이 높은 지점

표 3-10.은 임의의 공간 네트워크에서 강화지점에 따른 이동편의성 비용을 산출한 결과이다. 두 지점 이상을 동시에 강화하였을 경우 강화 지점들의 사이중앙성 값을 합산하여 도출하였다. 이동편의성 비용을 제안한 이유는 다음 장에서 물리적방호 강화 최적 지점을 도출함에 있어 시설 내부사용자의 이동편의성을 최대한 저해하지 않는 물리적방호 강화지점을 찾기 위함이다.

표 3-10. 물리적방호 강화 지점에 따른 이동편의성 비용

	강화지점	이동편의성 비용
	A	0.012
	B	0.214
	C	0.548

	A+B	$0.012+0.214 = 0.226$
	A+C	$0.012+0.548 = 0.560$
	B+C	$0.214+0.549 = 0.762$

	A+B+C	$0.012+0.214+0.548 = 0.774$

3.6. 물리적방호 강화 최적대안 도출

3.6.1. 물리적방호 유효성 및 이동편의성 비용 도출

본 장에서는 물리적방호 유효성과 이동편의성 비용을 고려한 물리적방호 강화 최적대안 도출방법을 제안하였다. 물리적방호 유효성을 고려하면 외부 침입을 방호하는데 어떤 지점이 효과적인지를 찾을 수 있고, 이동편의성 비용을 고려하면 내부사용자의 이동편의성을 최대한 저해하지 않는 지점을 찾을 수 있기 때문이다.

그림 3-23.은 임의로 구축된 공간 네트워크이다. 침입자는 s(시작점)에서 t(목표 지점)까지 이동한다면, 물리적방호 측면에서 강화 가능한 지점은 A, B, C 이다. 혹은 A와 B를 동시에 강화하거나 B와 C, A와 C 또는 A, B, C지점을 모두 강화할 수 있다. 따라서 표 3-11.⁸⁹⁾과 같이 물리적방호를 강화할 수 있는 7가지의 조합이 생성되게 되고, 각각 조합마다 물리적방호의 유효성과 이동편의성 비용을 도출할 수 있다.

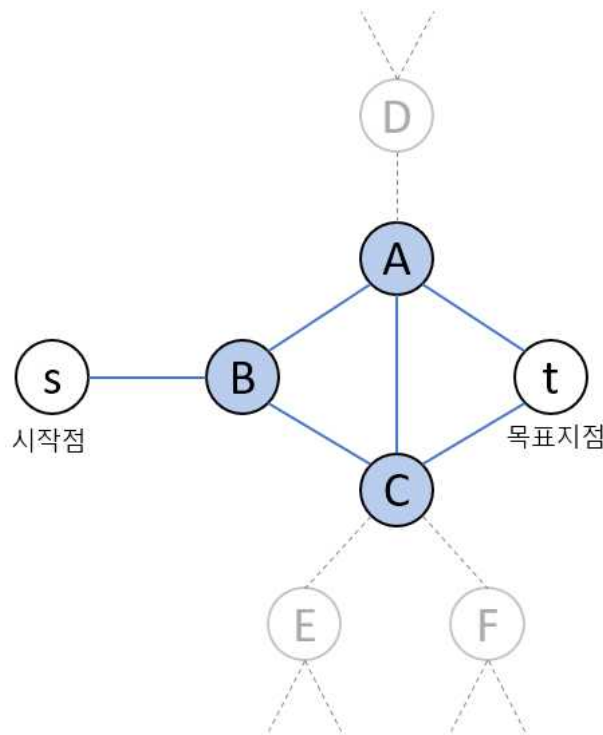


그림 3-23. 물리적방호 강화 최적대안 도출을 위한 공간 네트워크 예시

89) 표 3-11.의 물리적방호 유효성과 이동편의성 비용은 가상으로 설정한 값이다.

표 3-11.은 그림 3-23.의 공간 네트워크에서 도출한 강화(조합) 지점별 물리적 방호 유효성과 이동편의성 비용을 정리한 결과이다. A지점과 B지점의 강화 경우를 살펴보면, 두 지점을 강화하였을 때 기대할 수 있는 물리적방호 유효성은 0.3으로 동일하지만 B의 경우가 이동편의성 비용 측면에서 더 나은 대안임을 알 수 있다. C 지점을 강화하는 경우에는 A나 B 지점을 강화하는 것보다 더 높은 0.35의 물리적방호 유효성을 기대할 수 있는 반면, A와 B를 동시에 강화할 경우 C 지점보다 더 높은 물리적방호 유효성과 더 낮은 비용을 갖게 되므로 C보다는 A+B가 더 나은 대안임을 알 수 있다. 같은 방식으로 7가지의 강화 조합을 모두 종합해 보면, B, A+B, A+B+C의 물리적방호 강화 조합이 최적 대안임을 확인할 수 있다.

표 3-11. 물리적방호 강화 조합별 물리적방호 유효성, 이동편의성 비용

강화지점	물리적방호 유효성	이동편의성 비용	강화 최적 대안
A	0.3	0.2	
B	0.3	0.1	✓
C	0.35	0.5	
A+B	0.6	0.3	✓
B+C	0.6	0.6	
A+C	0.6	0.7	
A+B+C	0.75	0.8	✓

3.6.2. 물리적방호 강화 최적대안 선정

물리적방호 강화 최적대안 선정은 파레토 최적(Pareto optimality)⁹⁰⁾에 기초해 물리적방호 유효성과 이동편의성 비용을 가장 효율적으로 분배된 상태를 고려하였다. 여기서 파레토 최적상태이란 하나의 자원배분 상태에서 다른 사람에게 손해가 가지 않고서는 어떤 한 사람에게 이득이 되는 변화를 만들어 내는 것이 불가능한 상태를 말한다.⁹¹⁾ 파레토 최적상태는 여러 개일 수 있으며, 각각의 최적 상태끼리는 어떤 것이 우월하다는 비교가 불가능하다. 파레토 최적의 예는 그림 3-24와 같다. ‘비용’ 측면에서 A는 B와 C에 비해 우월하며, ‘효과’ 측면에서 B는 A와 C에 비해 우월하다. A와 B는 C에 비해 ‘비용’ 및 ‘효과’ 측면에서 항상 우월하며, A와 B는 서로 우월 여부를 가릴 수 없다. 즉, A와 B는 다른 어떤 해에 의해서도 지배되지 않으며, 이러한 지배 파레토 개체(non-dominated Pareto)의 집합을 파레토 최적 집합(Pareto optimal set) 또는 유효경계(efficient frontier)라고 한다. (김영진, 2009)

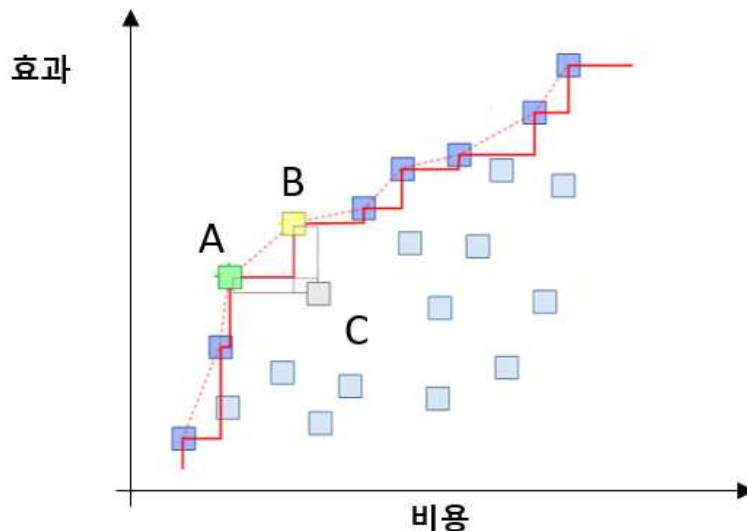


그림 3-24. 파레토 최적 예시
(https://en.wikipedia.org/wiki/Pareto_front 그림 가공)

파레토 최적은 보통 x축과 y축에 다른 두 자원을 비교하여 (0,0)점에 가까운 지점들을 최적의 대안으로 표현하는 경우가 많다. 하지만 두 자원의 비용, 효과, 수량

90) 이태리 경제학자 빌프레도 파레토의 이름에 따른 경제학적 개념으로 파레토 효율(Pareto efficiency)이라고도 불린다.

91) 이준구 (2019). 미시경제학, 문우사

등 어떻게 배치하는지에 따라 파레토 최적은 그림 3-25.와 같이 ‘Top Left Pareto frontier’, ‘Top Right Pareto frontier’, ‘Bottom Right Pareto frontier’, ‘Bottom Left Pareto frontier’로 나타낼 수 있다.

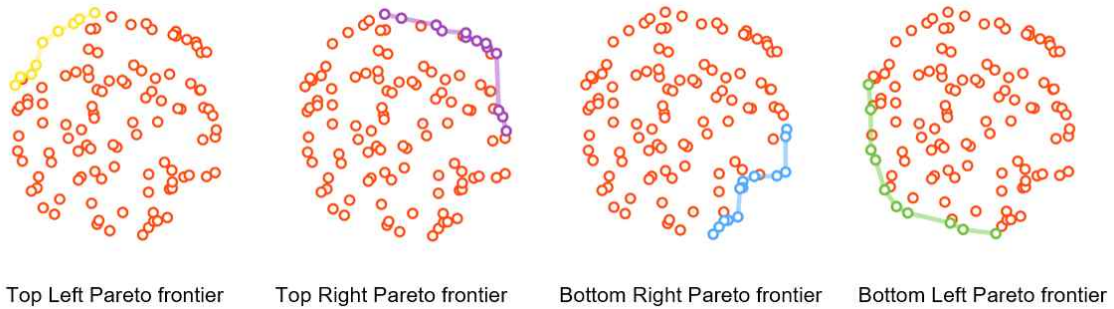


그림 3-25. 자원배치에 따른 파레토 최적
(<https://github.com/justinormont/pareto-frontier>)

본 연구에서 대상으로 하는 국가중요시설의 물리적방호는 경제성보다는 안전성이 항상 우선하여⁹²⁾, 물리적방호 유효성과 이동편의성 비용 간에 상충관계(함수관계)를 고려할 수 없다.⁹³⁾ 이에 따라, 물리적방호 최적대안 선정 방법은 아래와 같다.

$$U = (U_C, U_E)$$

$$V = (V_C, V_E)$$

U 의 이동편의성 비용($Cost$)과

물리적방호 유효성($Effectiveness$)이 V 보다 우월하다.

$$\Leftrightarrow (\forall_C: U_C \leq V_C, \exists_C: U_C \leq V_C) \vee (\forall_E: U_E \geq V_E, \exists_E: U_E \geq V_E)$$

물리적방호 강화 최적대안은 위 수식에 따른 U 벡터들의 집합이다.⁹⁴⁾

92) 선행 고려사항: 물리적방호 유효성, 후행 고려사항 : 이동편의성 비용

93) 본 연구에서 제안한 최적대안은 물리적방호 유효성과 이동편의성 비용간에 환산비율(함수관계)이 존재하지 않음. 즉, 설계자에게 물리적방호 유효성 범위에 따른 최적대안을 하나씩 제시하여 의사결정을 도와주는 결과물임.

물리적방호 유효성과 이동편의성 비용을 고려한 최적대안 도출 개념은 그림 3-26과 같다. 표 3-11의 강화지점 조합별 물리적방호 유효성과 이동편의성 비용을 그래프에 점으로 표시한 결과이다. x축이 이동편의성 비용이고 y축이 물리적방호 유효성이다. 즉 x축이 작고 y축이 높은 붉은색 점선으로 표시된 지점 위에 위치한 대안들[a]이 물리적방호 강화 최적대안임을 알 수 있다. 반면 [b]의 대안들도 강화하였을 때 물리적방호 유효성이 향상되지만 상대적으로 비용이 높아 비효율적 대안이라고 판단할 수 있다. 또한 물리적방호 강화 최적대안은 하나의 대안이 아니라 물리적방호 유효성 목표 값에 따라 여러 개의 대안들이 존재한다. 표 3-12와 같이 물리적방호 유효성 목표 값이 0.3이라면 B지점 강화가 최적대안이며 0.3~0.6은 A+B 지점, 0.6~0.75는 A+B+C 지점 강화가 최적대안이다.

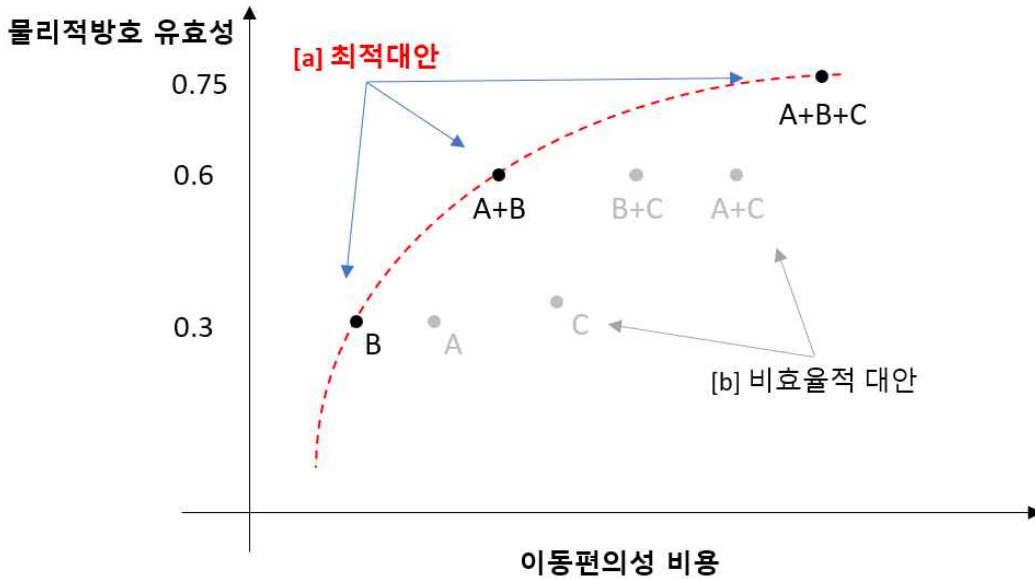


그림 3-26. 물리적방호 강화 최적대안 선정 개념도

표 3-12. 물리적방호 유효성 목표 값에 따른 강화지점

유효성 목표 P(e)	$P(e) \leq 0.3$	$0.3 < P(e) \leq 0.6$	$0.6 < P(e) \leq 0.75$
강화지점	B	A+B	A+B+C

94) 파레토 최적에서는 U 가 V 보다 비용이나 효과 측면에서 하나라도 우월하다면, “ V 는 U 에 의해 지배된다. 또는 V 는 U 보다 열성이다.”라고 표현한다.

3.7. 소결

본 연구에서 제안한 건축시설의 물리적방호 평가와 강화 방법을 종합하면 그림 3-27.과 같다.

첫 번째 단계에서는 건축시설을 공간 네트워크로 재현한다.[1-1] 이 과정에서 노드는 문 노드와 실 노드로 구분하고, 엣지로 침입자 및 내부사용자의 동선을 재현한다. 이렇게 구축된 공간 네트워크를 기반으로 외부에서 시설내 목표구역(핵심 구역)까지 접근 가능한 모든 경로를 탐색한 후 EASI 모델을 활용해 모든 경로의 물리적방호 유효성을 도출한다.[1-2] 가장 낮은 유효성값을 가지는 경로가 물리적방호 취약경로이며 현 상태의 물리적방호가 기준을 만족하는지, 강화가 필요한지 판단하는 값이 된다. 또한 최종적으로 강화대안을 제안할 때 기존보다 얼마만큼의 향상된 물리적방호 성능을 갖는지 비교 값으로 활용할 수 있다.

두 번째 단계는 물리적방호 강화과정이다. 첫 번째 단계에서 구축된 공간 네트워크를 활용하여 각 노드의 사이중앙성(Betweenness centrality) 값을 도출한다.[2-1] 또한 탐색된 모든 침입경로를 종합하여 강화 대안지점을 추출한다.[2-2] 강화 대안지점을 활용하여 하나 또는 여러 지점을 동시에 강화할 수 있는 물리적방호 강화 조합을 생성한다. 조합별 EASI 모델을 활용한 물리적방호 유효성과 사이중앙성을 활용한 이동편의성 비용을 도출한다. 여러 지점을 강화할 경우 각 지점(노드)의 사이중앙성 값을 합산하여 이동편의성 비용으로 산정한다. 강화 조합별 물리적방호 유효성과 사이중앙성 비용을 종합하여 물리적방호 유효성 범위별 강화 최적대안을 도출할 수 있다.

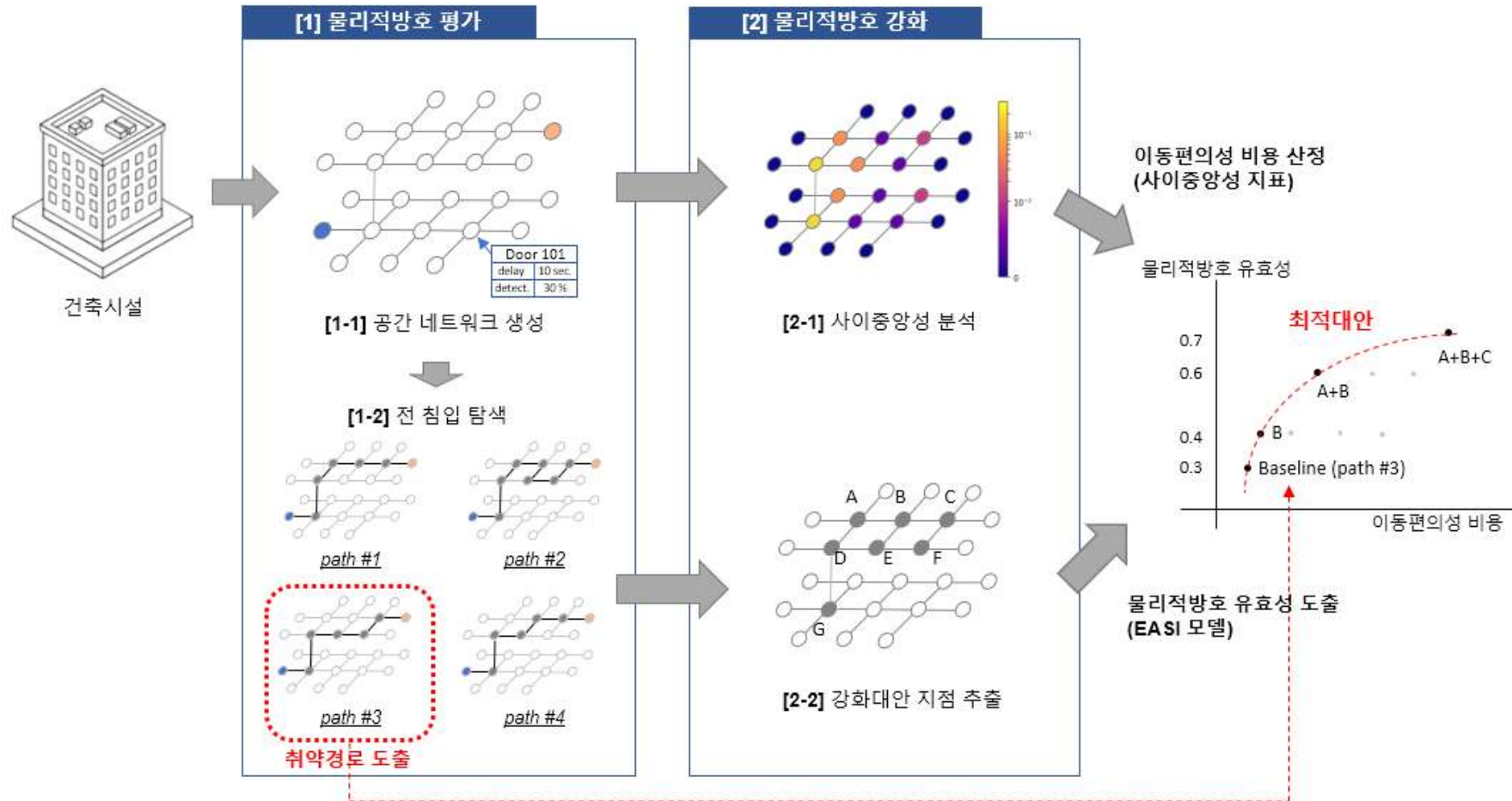


그림 3-27. 물리적방호 평가·강화 절차

제 4 장 물리적방호 평가·강화 시스템 개발 및 시뮬레이션

4.1. 시스템 개발 구성 및 개발 방법

4.1.1. 시스템 구성

4.1.2. 시스템 개발 방법

4.2. 시스템 개발

4.2.1. BIM 모델 속성정보

4.2.2. (Module 1) 공간 네트워크 및 속성정보 추출

4.2.3. (Module 2) 전 경로 물리적방호 유효성 분석

4.2.4. (Module 3) 물리적방호 강화 최적대안 도출

4.3. 시범시설 선정 및 방호 값 설정

4.3.1. 시범시설 개요

4.3.2. 공간 네트워크 재현

4.3.3. 시설 방호 값 설정

4.3.4. 침입자 및 대응(Response) 관련 방호 값 설정

4.4. 물리적방호 유효성 평가

4.4.1. 물리적방호 유효성 분석

4.4.2. 강화 대안지점 도출 및 사이중앙성 분석

4.5. 물리적방호 강화 최적대안 도출

4.5.1. 강화지점 물리적방호 유효성, 이동편의성 비용 분석

4.5.2. 물리적방호 강화 최적대안 도출

4.6. 소결

4.1. 시스템 개발 구성 및 개발 방법

4.1.1. 시스템 구성

본 장에서는 앞에서 제안한 물리적방호 평가·강화 방법을 구현하기 위한 시스템을 개발하였다. 기본적으로 BIM(빌딩정보모델)⁹⁵⁾을 기반으로 시스템이 운용되도록 개발목적을 설정하였다. BIM은 시설의 물리적방호를 평가하기 위한 공간(실), 문, 시설의 3차원 형상 및 속성정보 등을 포함하고 있고, 설계저작 도구로써 설계 단계에서 물리적방호 평가 및 강화에 활용이 가능하기 때문이다.

시스템 구성은 그림 4-1.과 같이, BIM모델과 기능에 따라 Module 1.부터 Module 3.까지 구성된다. BIM모델은 시설의 물리적방호를 평가하는데 필요한 실(Room), 문(Room), 그리고 동선 정보를 포함하고 있어야 한다. 특히 문은 침입자가 문을 통과하는데 소요되는 시간과 통과과정에서 탐지될 확률을 속성정보로 포함하고 있다. Module 1.은 대상 시설의 BIM모델로부터 공간 네트워크 정보와 노드 및 엣지의 속성정보를 추출하는 기능을 한다. Module 2는 앞에서 추출된 정보를 바탕으로 침입가능한 모든 경로를 탐색하고, 경로별 물리적방호 유효성을 평가한다. Module 2.에서 도출된 취약경로의 물리적방호 유효성이 설계기준을 만족하면 물리적방호 평가 프로세스가 종료되지만, 설계기준을 미달하게 될 경우 물리적방호 강화 프로세스가 진행되어야 한다. 따라서 Module 3.은 이동편의성을 기반으로 물리적방호 강화 최적대안을 도출하는 기능을 한다.

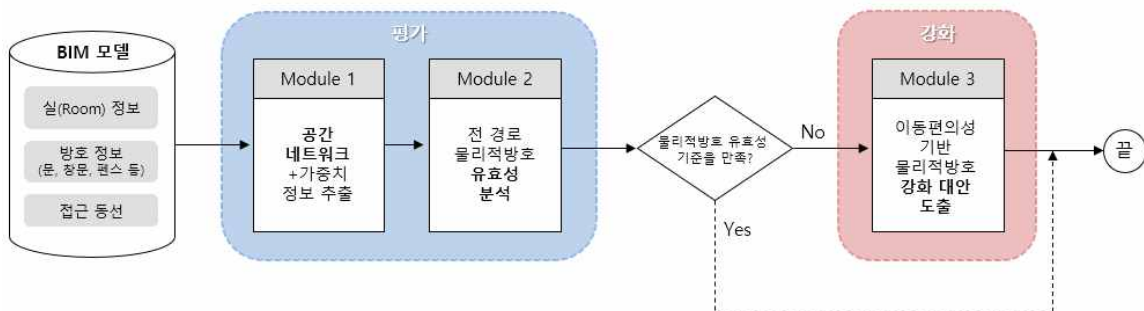


그림 4-1. BIM기반 물리적방호 평가·강화 시스템 구성도

95) 3차원 정보모델을 기반으로 시설물의 생애주기에 걸쳐 발생하는 모든 정보를 통합하여 활용이 가능하도록 시설물의 형상, 속성 등을 정보로 표현한 디지털 모형 (지형 공간정보체계 용역사전, 이강원)

4.1.2. 시스템 개발 방법

본 연구에서 개발한 물리적방호 평가·강화 시스템은 BIM을 기반으로 활용가능하도록, 대표적인 BIM도구인 Autodesk사의 Revit Architecture와 Revit기반 Visual programming tool인 Dynamo와 Python을 사용하였다.

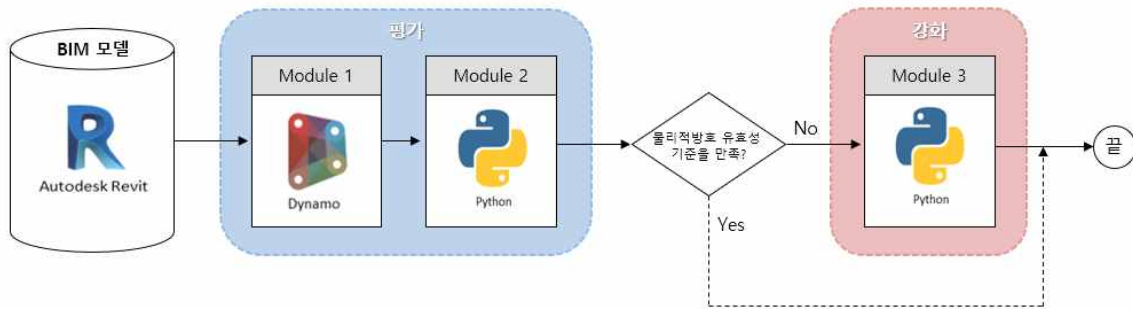


그림 4-2. Module 별 시스템 개발 도구

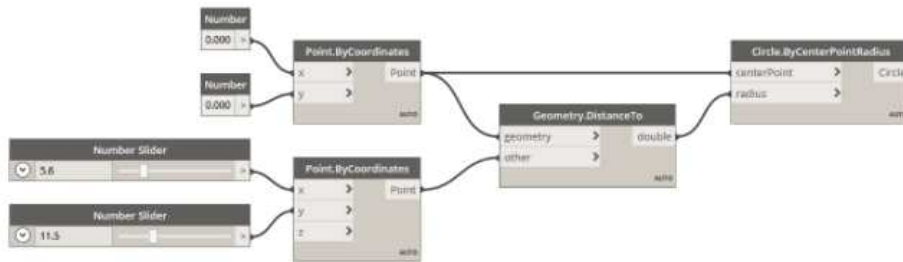
BIM기반 Visual Programming tool을 사용한 설계를 통상 Algorithm-Aided BIM이라고 부른다. Algorithm-Aided BIM은 알고리즘을 기반으로 BIM모델을 생성하거나 구축되어 있는 BIM 모델을 분석, 평가 등의 목적으로 활용하는 방법론을 의미한다. 알고리즘 기반 설계는 변수로 설정된 각 요소들 사이의 수학적 관계를 이용하여 복잡한 기하학적 요소들과 구조를 의도에 따라 조직하고 영향을 줄 수 있는 방법론을 말한다. Algorithm-Aided BIM의 가장 큰 장점은, 설계자가 설계 및 분석 시 수행하던 반복 작업을 algorithm을 통해 자동화 할 수 있다는 것이다. 또한 이 과정에서 발생할 수 있는 설계오류를 최소화하여 정확하고 빠른 설계가 가능해지며, 설계과정 중 발생할 수 있는 변경사항을 기존과 같은 프로세스로 빠르게 수행할 수 있다.

Algorithm-Aided BIM을 활용하는데 algorithm을 구현하는 방법은 그림 4-3. 과 같이 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 Textural Programming으로 설계자가 직접 코딩(coding)을 수행하는 방법이다. 이 방법은 여러 가지 코딩소스를 붙이고 변형하는 등 복잡한 형태생성 및 분석 그리고 이를 활용한 응용 측면에서는 유리하지만 설계자가 직접 코딩을 수행해야 한다는 점에서 한계가 있다. 두 번째는 Visual Programming⁹⁶⁾으로 설계자가 직접 코딩 언어를 입력하는 대신 BIM 개발사에서 제작한 시각화(visualized)된 소프트웨어를 활용하는 것이다. 이 방법의 장

96) 입력(input), 처리(processing), 출력(output)을 기본 로직으로 하며, 이를 시각적으로 algorithm화 한 것

점은 설계자가 별도의 코딩 언어를 배우지 않아도 의도한 algorithm을 구현할 수 있고, BIM tool마다 최적화된 소프트웨어⁹⁷⁾가 개발되어 널리 사용되고 있다는 점이다.

Visual Program:



Textual Program:

```

myPoint = Point.ByCoordinates(0.0,0.0,0.0);
x = 5.6;
y = 11.5;
attractorPoint = Point.ByCoordinates(x,y,0.0);
dist = myPoint.DistanceTo(attractorPoint);
myCircle = Circle.ByCenterPointRadius(myPoint,dist);
    
```

The results of our algorithm:

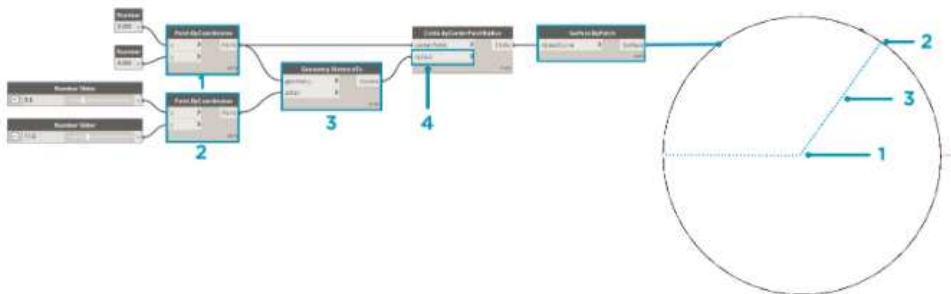


그림 4-3. Visual vs Textual programming
(출처 : <http://primer.dynamobim.org/>)

97) Autodesk Revit은 Visual programming을 위한 Add-in Dynamo를 제공하며, McNeel에서 개발한 넵스(NURBS)기반 모델링 툴인 Rhinoceros는 Algorithm 모델링 툴인 Grasshopper를 활용하여 visual programming을 수행할 수 있다.

4.2. 시스템 개발

4.2.1. BIM모델 속성정보

본 연구에서 제안한 물리적방호 평가와 강화 방법을 구현하기 위해서는 실(공간) 정보와, 문 등의 방호속성(지연시간, 탐지확률)과 동선이 표현된 BIM모델이 선행되어야 한다. 제시한 사항은 본 연구의 목적 중 하나인 시설의 물리적방호를 평가하고 강화할 수 있는 대안을 제시하기 위해 설계 초기단계에서 필요한 최소한의 설계정보라고 판단된다. BIM모델을 사용하면, 설계자 또는 분석자는 물리적방호 분석을 위한 별도의 모델링과 속성정보를 입력하는 단계가 불필요하고 물리적방호 평가 결과를 즉각적으로 설계에 반영할 수 있는 장점이 있다.

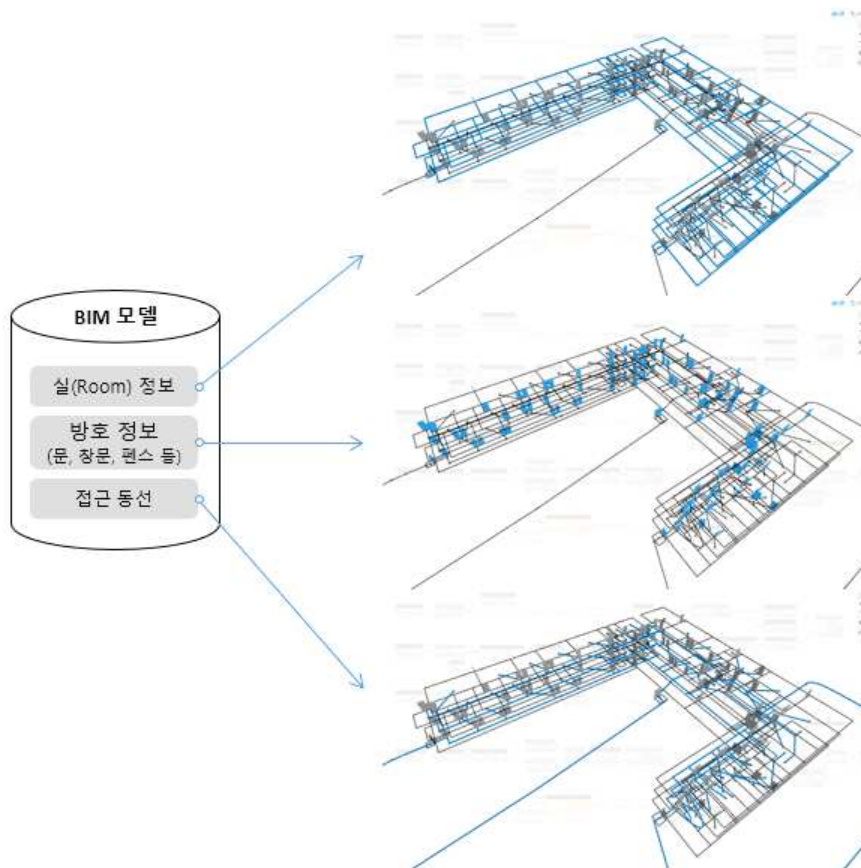


그림 4-4. 물리적방호 분석에 요구되는 BIM 속성정보 (실, 문, 동선)

4.2.2. (Module 1) 공간 네트워크 및 속성정보 추출

Module 1은 BIM 모델에서 물리적방호 체계 분석을 위한 데이터 추출을 수행한다. 분석에 필요한 데이터는 엣지와 노드로 구분하여 리스트로 추출되며 그 절차는 그림 4-5와 같다. 해당 과정의 구현은 그림 4-7과 같이 Revit기반의 visual programming tool인 Dynamo를 활용하였다.⁹⁸⁾ 이 과정에서 사용자는 목적에 맞게 분석 대상의 범위, 물리적방호 요소를 추가하거나 삭제할 수 있다.

그림 4-6과 같이 문, 창문, 펜스 같은 요소들은 모델의 중심점을 기준으로 노드가 생성되며, 여기에 지연(Delay), 탐지(Detection) 속성이 부여된다. 공간은 중심에 노드가 생성되며 공간으로 접근가능한 동선⁹⁹⁾은 엣지로 구현된다. 공간을 재현하는 노드와 엣지에는 각각 동선 길이(시간으로 변환되어 지연 속성)와 공간의 탐지속성이 부여된다. 이렇게 생성된 노드, 엣지 리스트 예시는 표 4-1과 표 4-2와 같다. 엣지 리스트는 분석 건축물에 분석자가 가정하는 모든 접근동선 Segment에 대한 정보이며,¹⁰⁰⁾ 노드 리스트는 건물에 설치되는 모든 문, 창문 등에 대한 속성을 가지고 있다.

표 4-1. BIM모델에서 추출한 엣지 리스트 예시

id	from	to	location	time (sec.)
1	Door_1	Room_1	Room_1	2.83
2	Door_2	Room_1	Room_1	1.95
...

표 4-2. BIM모델에서 추출한 노드 리스트 예시

id	name	time (sec.)	detect. (%)
A	Door_1	30	20
B	Door_2	30	30
C	Room_1	-	10
...

98) IFC(Industry Foundation Classes)같은 중립파일 포맷을 활용하지 않고 Revit과 Dynamo (Revit Add-in)을 사용한 이유는 데이터 입력 및 동기화 과정에서 객체정보 손실 및 부정확한 설계정보 전달을 최소화하기 위함이다.

99) 접근동선은 Revit에서 Line기능을 사용하여 작성함.

100) Table 4.에서 Edge의 양 끝점 속성을 'from', 'to'로 부여하였지만, 분석 시에는 양방향 이동이 가능한 무방향 그래프(Undirected Graph)로 가정함.

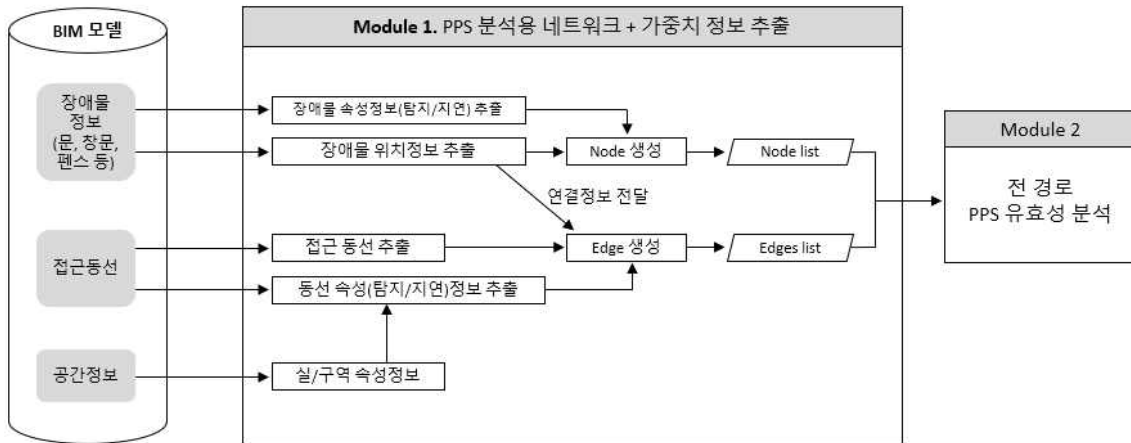


그림 4-5. Module 1. 공간 네트워크 및 속성정보 추출 구성도

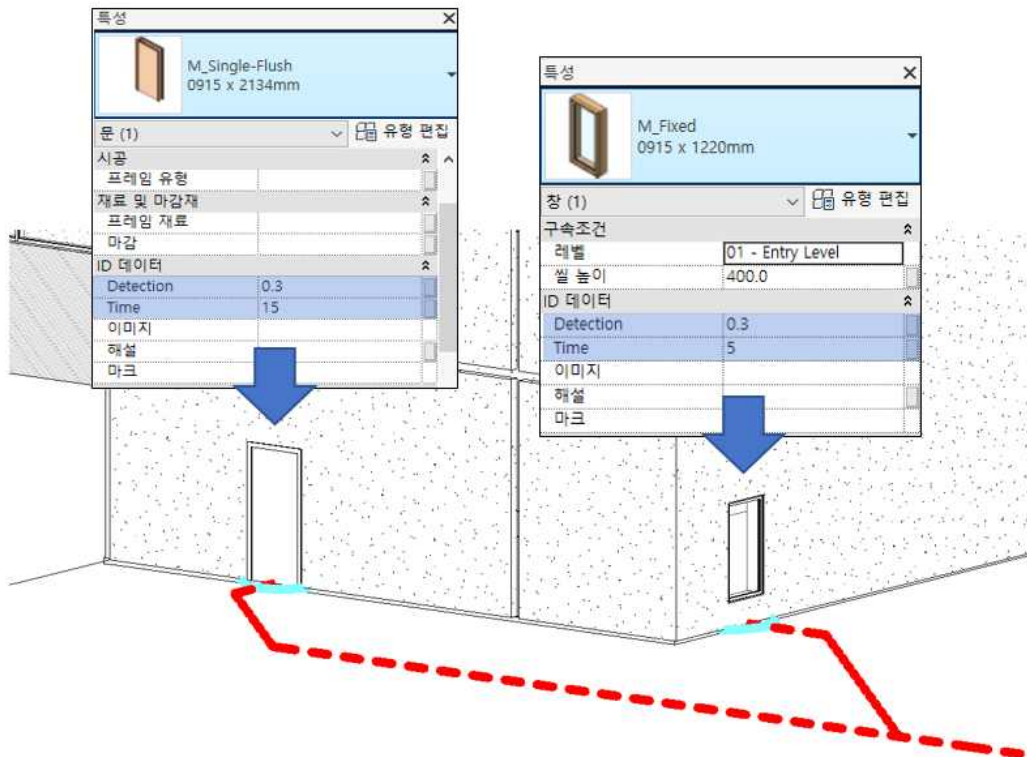


그림 4-6. BIM 모델 방호요소(문, 창문 등)에서의 방호속성 값

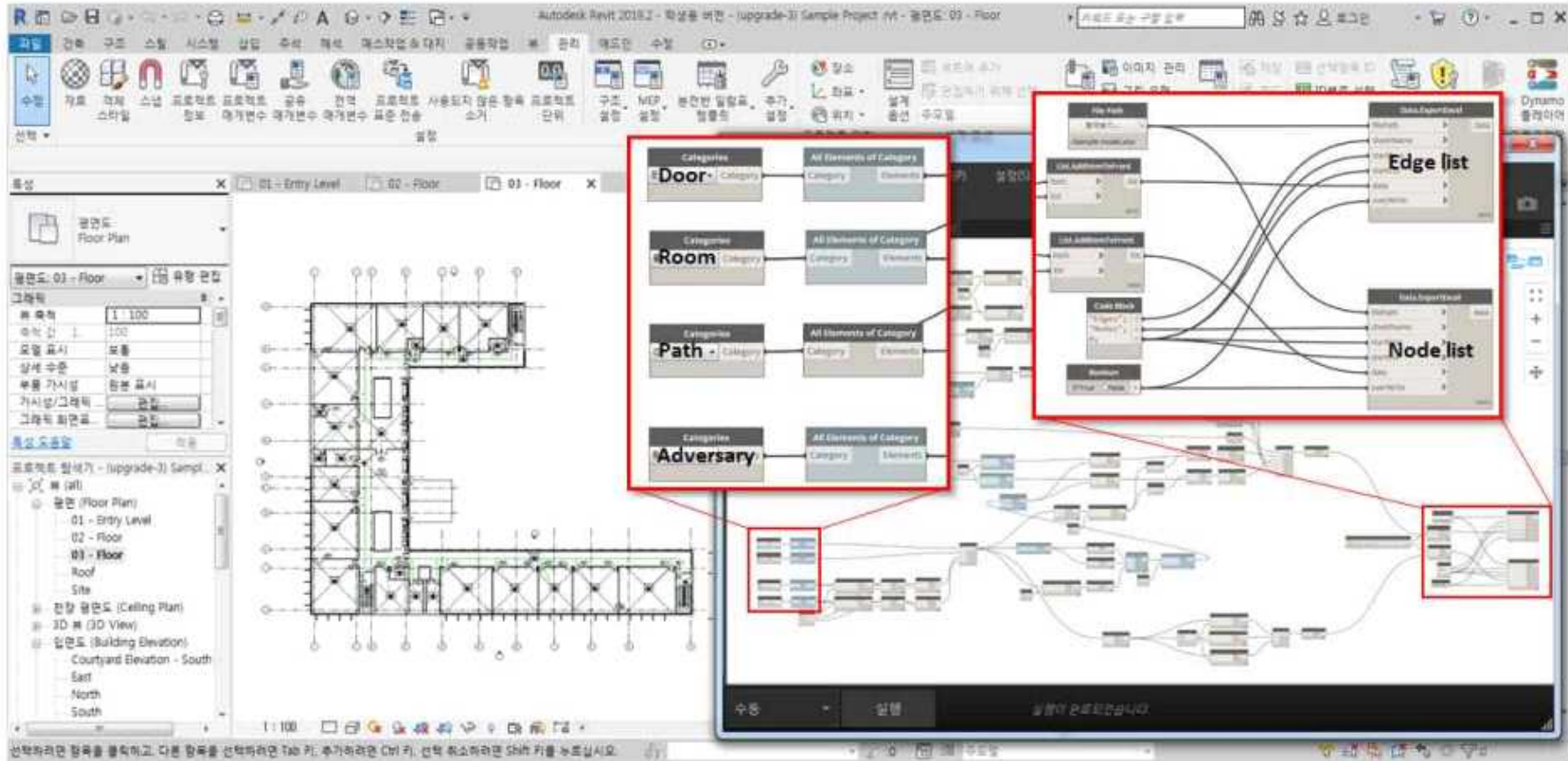


그림 4-7. Revit+Dynamo로 구현된 Module 1. 화면

4.2.3. (Module 2) 전 경로 물리적방호 유효성 분석

Module 2.는 그림 4-8.의 개념도와 같이 Module 1.에서 추출한 노드, 엣지 리스트를 통해 건물 내 동선체계 네트워크를 재구성하고 외부에서 핵심구역까지 접근 가능한 모든 경로를 탐색하여¹⁰¹⁾ 각 경로에 대한 물리적방호 체계 유효성 (Probability of PPS effectiveness)을 도출한다.

해당 모듈은 Python 언어를 기반으로 개발하였으며 핵심구역까지 접근가능 경로 탐색을 위해 NetworkX¹⁰²⁾ 패키지의 all_simple_paths¹⁰³⁾ 라이브러리를 사용하였다. 전 경로를 탐색한 후 경로 상에 위치한 노드와 엣지에 부여된 지연시간과 탐지확률을 기반으로 모든 경로의 물리적방호 유효성을 도출하게 된다.

설계자 및 시설운영자가 설정한 물리적방호 체계 설정 값(대응 출동시간, 제압 확률 등)을 기준으로 분석한 시설의 전 경로 물리적방호 유효성을 평가할 수 있다. 만약 특정 구역의 물리적방호 유효성 값이 목표 값에 미달한다면 해당구역은 물리적방호가 취약하다고 이해할 수 있다. 따라서 물리적방호 설계 강화과정을 통해 침입경로 상에 위치한 지점들을 강화해 나가면서 전체 시설에 대한 물리적방호 체계 유효성을 향상시켜 나갈 수 있다. 이처럼 Module 2.는 BIM으로 구축된 시설의 침입 가능경로를 탐색하고 취약한 경로를 도출함으로써 설계 개선에 필요한 경로 및 지점을 제시한다.

101) 깊이우선탐색법 modified depth-first search (Sedgewick, R., 2001)를 사용하여 모든 경로를 탐색

102) NetworkX는 복잡한 네트워크를 분석하고 그래프로 재현하기 위해 개발된 Python package이다. (networkx.org)

103) 출발점부터 목적지까지 한번 통과했던 구역은 다시 통과하지 않는 모든 경로를 탐색한다. (노드를 중복해서 통과하지 않음.)

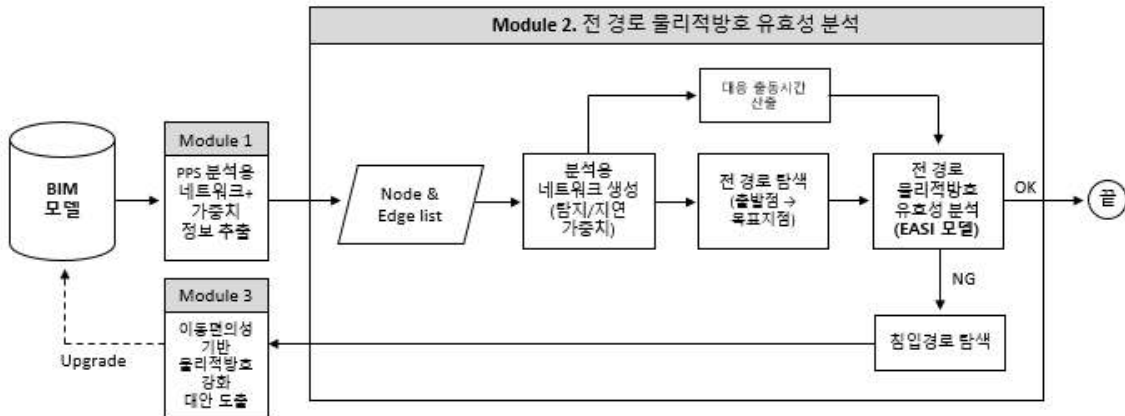


그림 4-8. Module 2. 전 경로 물리적방호 유효성 분석 구성도

```
In [22]: baseline=baseline.sort_values(by=['P(e)'])[['P(e)']].reset_index()['P(e)']

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
plt.figure(figsize=(20,10))
plt.plot(baseline,marker='o',markersize=4,markevery=3,label='baseline')
plt.grid(True,axis='y',color='gray',alpha=0.5,linestyle='--')#실선 설정
plt.axvline(x=datetime(2018,8,28),color='r',linestyle=':',linewidth=10)수직 일직선
plt.axhline(y=0.9,color='r',linewidth=1) #수평 일직선
plt.legend(loc='lower right',fontsize=20)
plt.ylabel('Probability of PPS effectiveness',fontsize=25)
plt.xlabel('Path (total '+str(len(baseline))+')',fontsize=25)
plt

Out [22]: <module 'matplotlib.pyplot' from 'C:\Users\YR\anaconda3\lib\site-packages\matplotlib\pyplot.py'>
```

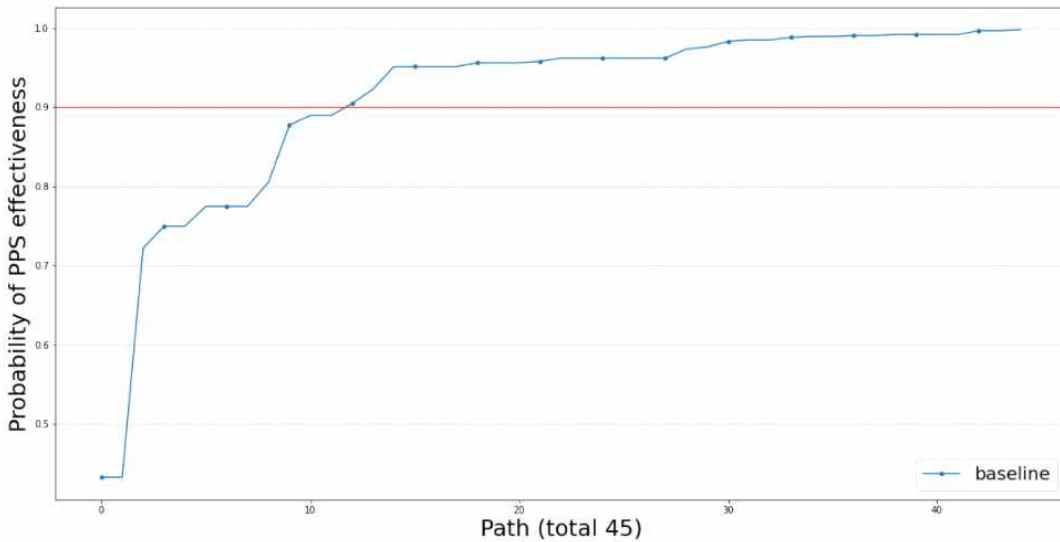


그림 4-9. Module 2.에서 도출한 전 경로의 물리적방호 유효성

4.2.4. (Module 3) 물리적방호 강화 최적대안 도출

Module 3.은 이동편의성을 고려한 물리적방호 강화 최적대안을 도출할 수 있다. 그림 4-10.과 같이 Module 2.에서 도출한 강화대안 지점들(침입자가 침입에 사용하는 지점)은 Module 1.에서 구축한 공간 네트워크를 기반으로 각 지점의 사이중앙성 값을 도출하게 된다.¹⁰⁴⁾ 여러 지점이 동시에 강화되는 경우에는 지점들의 사이중앙성 값을 합산하여 이동편의성을 비용으로 산출한다. 또한 지점들의 조합을 생성하여 물리적방호 강화 대안들을 적용한 물리적방호 유효성 분석을 수행한다. 결과적으로 모든 강화대안들의 물리적방호 유효성과 이동편의성 비용을 고려한 강화 최적대안을 도출할 수 있다.

최적대안은 하나의 대안이 아니라 물리적방호 유효성 목표 값에 따라 여러 강화 대안들이 발생하고, 설계자는 대상시설의 물리적방호 목표 또는 기준에 따라 최적안을 선정하여 시설 BIM모델에 반영하면 모든 프로세스가 종료된다.

104) Python 3.0 기반 NetworkX 패키지의 'networkx.algorithms. centrality,betweenness_centrality' 알고리즘(Brandes, U., 2001) 을 활용

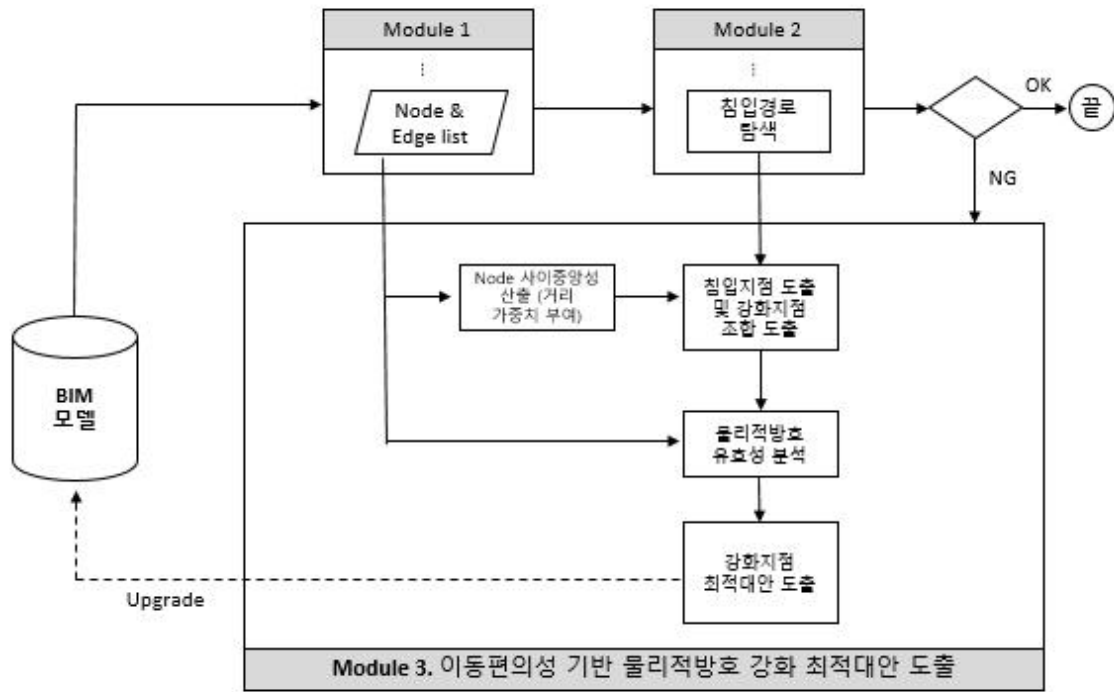


그림 4-10. Module 3. 이동편의성 기반 물리적방호 강화 최적대안 도출 구성도

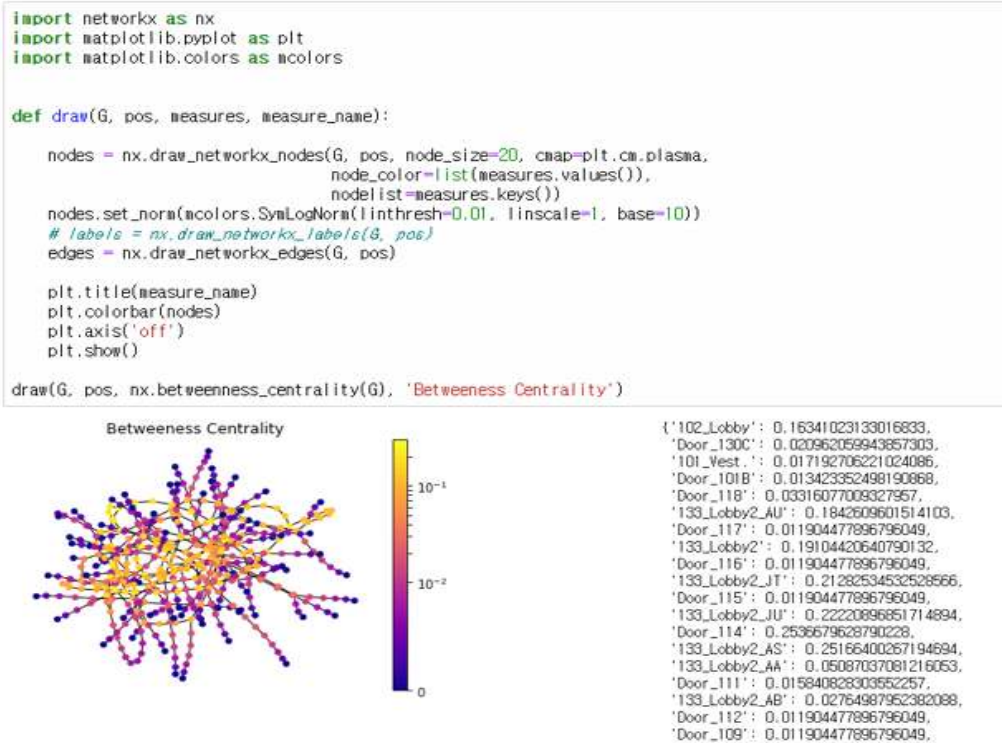


그림 4-11. Module 3.에서 도출한 각 지점의 이동편의성 비용(사이중양성)

4.3. 시범시설 선정 및 방호 값 설정

본 장에서는 본 연구 3장에서 제안한 물리적방호 평가, 강화 방법과 4장에서 개발한 시스템의 유효함을 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시범시설 BIM 모델을 선정하고, 방호 값을 가정하여 앞에서 제안한 방법과 시스템 검증에 위해 물리적방호 평가, 강화의 일련의 과정을 시뮬레이션하였다.

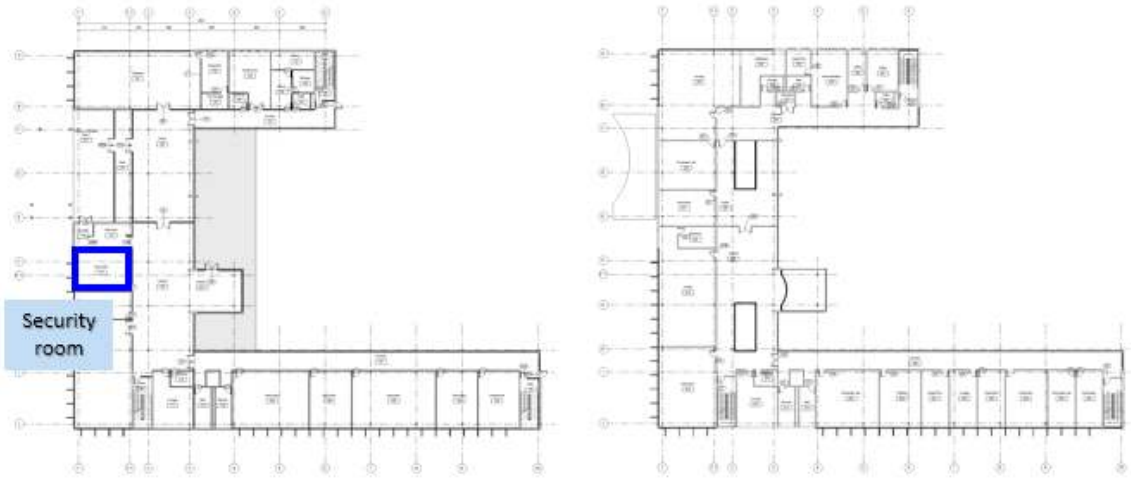
4.3.1. 시범시설 개요

시뮬레이션을 위한 시범 BIM모델은 그림 4-12. 및 그림 4-13.과 같다. BIM 프로그램인 Revit Architecture에서 제공하는 기본 모델로, 본 연구의 목적인 다층, 복잡한 실내공간을 갖춘 건축시설의 공간특성을 가지고 있다고 판단하였다. 기본적으로 ㄷ자 모양의 3층 규모의 건물로 각 말단과 중앙에 계단실을 갖추고 있다. 1층에서의 출입은 건물 좌측(주출입구), 우측(ㄷ자 안쪽), ㄷ자 양 말단에서 이루어진다. 시설 외부는 주차장을 포함한 도로가 배치되어있다. 물리적방호 유효성 분석을 위해서 아래와 같이 침입 목표구역, 대응인력 위치(Security room), 침입 시작지점을 설정하였다.

- 침입 목표구역 : 3층 Vital Room (그림 4-13. 참조)
- 대응인력 위치 : 1층 Security Room (그림 4-13 참조)
- 침입 시작지점 : 외부 주차도로 외곽

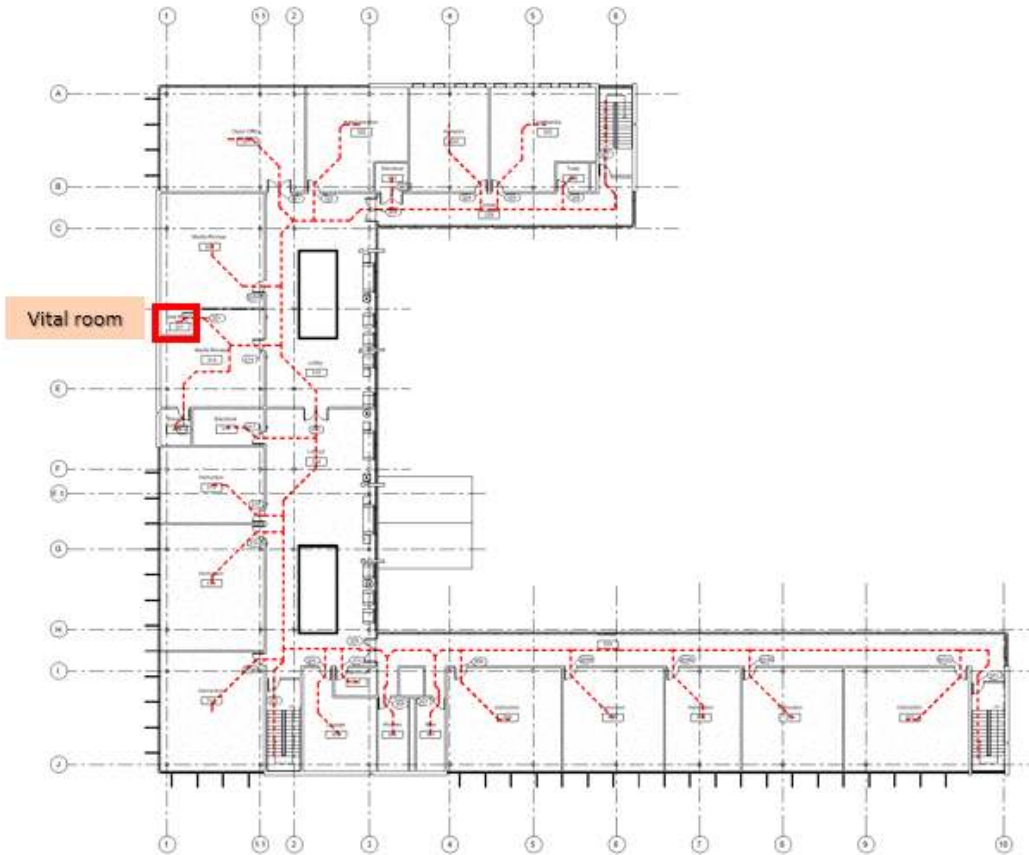


그림 4-12. 시범시설 BIM 모델



1층 평면도

2층 평면도



3층 평면도

그림 4-13. 시범시설 평면도 및 목표구역, 대응인력 위치

4.3.2. 공간 네트워크 재현

그림 4-14.는 시범시설을 3차원의 공간 네트워크 (노드, 엣지)로 재현한 결과이다. 노드는 시설의 실, 문 등을 나타내며 엣지는 침입자의 동선을 재현한다. 공간 네트워크를 구성하는 노드, 엣지 목록은 그림 4-15.와 같다.

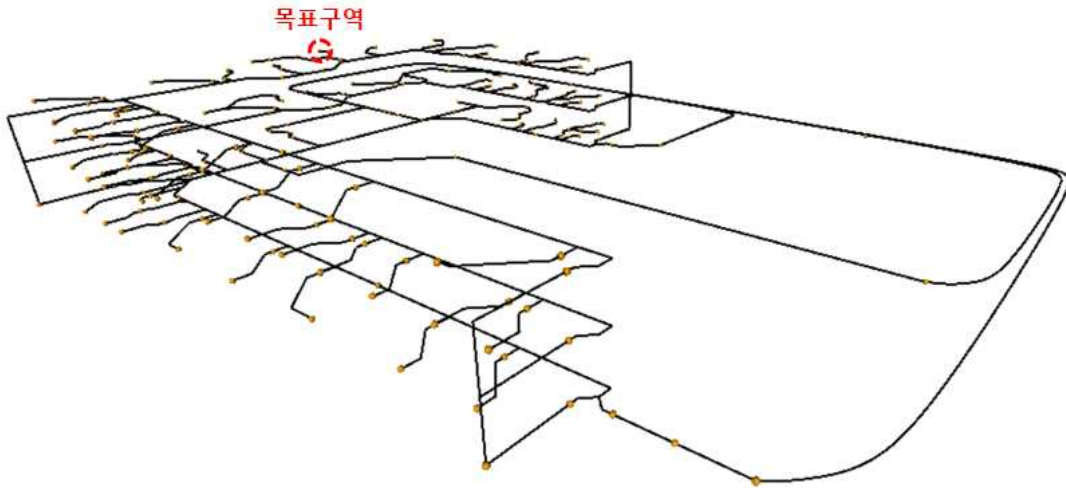


그림 4-14. 시범시설을 재현한 공간 네트워크

노드 리스트

	node	time	detection
0	Start	0	0.0
1	Door_122	15	0.3
2	Door_124	15	0.3
3	Door_125	15	0.3
4	Door_123	15	0.3
...
502	331_Vital Room	15	0.0
503	133-1_Lobby2-1	0	0.0
504	002_Owner Controlled Area-2	0	0.1
505	003_Owner Controlled Area-3	0	0.1
506	004_Owner Controlled Area-4	0	0.1

507 rows x 3 columns

엣지 리스트

	edge	from	to	location	time	detection
0	AA	102_Lobby	Door_130C	102_Lobby	1.33	0
1	AB	Door_130C	101_Vest.	101_Vest.	0.50	0
2	AC	101_Vest.	Door_101B	101_Vest.	0.28	0
3	AD	Door_118	133_Lobby2_AU	133_Lobby2	1.59	0
4	AE	Door_117	133_Lobby2	133_Lobby2	1.33	0
...
508	TO	131_Corridor	131_Corridor_AM	131_Corridor	0.61	0
509	TP	133-1_Lobby2-1	133_Lobby2_AV	133_Lobby2	1.36	0
510	TQ	235_Corridor	235_Corridor_ES	235_Corridor	1.39	0
511	TR	234_Corridor	234_Corridor_LC	234_Corridor	0.30	0
512	TS	328_Corridor	328_Corridor_HX	328_Corridor	0.18	0

513 rows x 6 columns

그림 4-15. 공간 네트워크의 노드, 엣지 리스트

4.3.3. 시설 방호 값 설정

시뮬레이션을 위해 설정한 시설의 방호 값은 표 4-3.과 같다. 시범시설의 모든 출입문에는 일반문이 설치되어있다고 가정하였고, 강화된다면 보안문으로 변경되어 지연시간과 탐지확률이 각각 30초와 60%로 개선된다.¹⁰⁵⁾

표 4-3. 문 방호성능

문	방호성능		Remark
	지연시간	탐지확률	
일반문	15 초	30 %	Pad lock & position switch
보안문	30 초	60 %	Electromagnetic strike & balanced magnetic switch

4.3.4. 침입자 및 대응(Response) 관련 방호 값 설정

침입자와 시설의 대응인력에 대한 가정 값은 표 4-4.와 같다. 침입자는 외부에서 3층의 침입구역까지 3.3/초¹⁰⁶⁾의 속도로 이동한다고 가정하였다. 이는 뛰기(4.5m/초)와 걷기(2.1m/초)를 반복하는 수준이다. 또한 대응 출동시간은 1층 Security room에서 3층 침입구역(Vital room)까지 111초¹⁰⁷⁾가 소요된다고 가정하였다.

표 4-4. 침입자 및 대응출동 가정 값

	값	Remark
이동속도	3.3m/초	걷기와 뛰기를 반복
대응 출동시간	111 초	Security room → Vital room

105) Biringer et al. 2013. Critical Infrastructure System Security and Resiliency, CRC Press, Appendix B: Physical Protection Features Performance Data

106) Biringer et al. 2007. Security Risk Assessment and Management, Wiley & Sons, Inc.

107) 1층 Security Room에서 3층 Vital Room까지 이동시간을 적용함.

국내 국가중요시설은 관련 법령인 ‘국가중요시설 지정 및 방호 훈령(국방부 훈령 제 1057호), 제3장 제10호(자체방호계획)’에 따라 5분(300초)의 대응 출동시간이 적용되지만, 본 시뮬레이션 대상 시설은 대응 출동시간 5분을 적용하기에 시설의 규모가 작음. 따라서 1층 Security Room에서 3층 Vital Room까지의 이동시간을 산정하여 대응 출동시간으로 적용함.

4.4. 물리적방호 유효성 평가

4.4.1. 물리적방호 유효성 분석

시범시설에 설정한 방호 값을 적용하여 분석한 물리적방호 유효성 결과는 아래 표 4-5와 같다. 외부에서 핵심구역까지 침입 가능한 경로는 총 45개로, 이 중 2개의 경로가 가장 낮은 물리적방호 유효성 0.433을 갖는 취약경로로 나타났다. 그림 4-16과 같이 [외부에서 시작하여 보조출입구 1을 출입해 계단을 통해 3으로 올라와 목표구역에 도달하는 경로]와, [부 출입구로 출입해 중앙 계단을 통해 3층으로 이동해 목표구역에 도달하는 경로]이다. 또한 45개의 전체 침입경로는 침입자가 침입 시 사용 가능한 모든 경로로, 해당 경로 상에 위치한 강화 대안지점은 총 33개(방호성능 강화 : 26개 지점, 방호지점 추가 : 7개 지점)로 도출되었다.

표 4-5. 물리적방호 유효성 분석 결과

전체 침입경로	물리적방호 유효성	강화 대안지점
45 개	0.433	33개 지점 (방호성능 강화 : 26, 방호지점 추가 : 7)

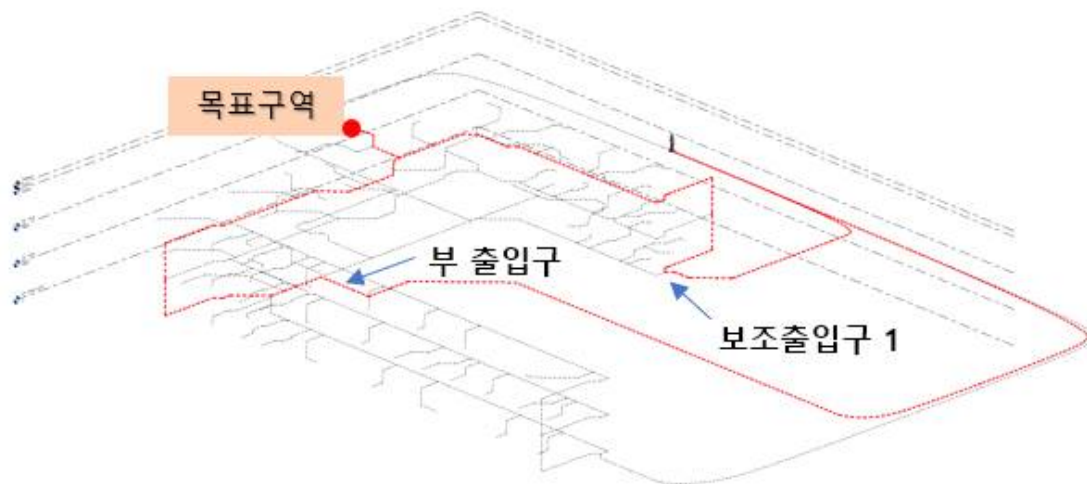


그림 4-16. 침입 취약경로 도출 결과

4.4.2. 강화 대안지점 도출 및 사이중앙성 분석

(1) 물리적방호 강화 대안지점 도출

물리적방호 강화 대안지점은 전체 침입경로에 사용되는 지점을 의미한다. 즉, 외부에서 목표구역으로 침입하는데 사용되는 지점이다. 시범시설의 전체 침입 경로를 대상으로 추출한 강화 대안지점은 33개 지점이며, 방호성능 향상이 가능한 지점은 26개 지점, 방호지점을 추가할 수 있는 곳은 7개 지점이었다. 그림 4-17.에서 방호성능 향상 지점은 붉은색, 방호지점 추가 지점은 파란색으로 표시하였다. 표 4-5.와 같이 현재 상태 시설의 물리적방호 유효성은 0.433으로, 취약 경로의 지점에 대한 물리적방호를 한 단계 강화하려면 취약경로에 해당하는 지점만 강화하면 되지만, 물리적방호 유효성 목표에 따른 최적대안을 제시하기 위해서는¹⁰⁸⁾ 전체 침입경로에 사용되는 지점을 강화 대안지점으로 선정해야 한다. 결과적으로 강화 대안지점으로 도출된 결과는 표 4-6.의 목록과 같다.

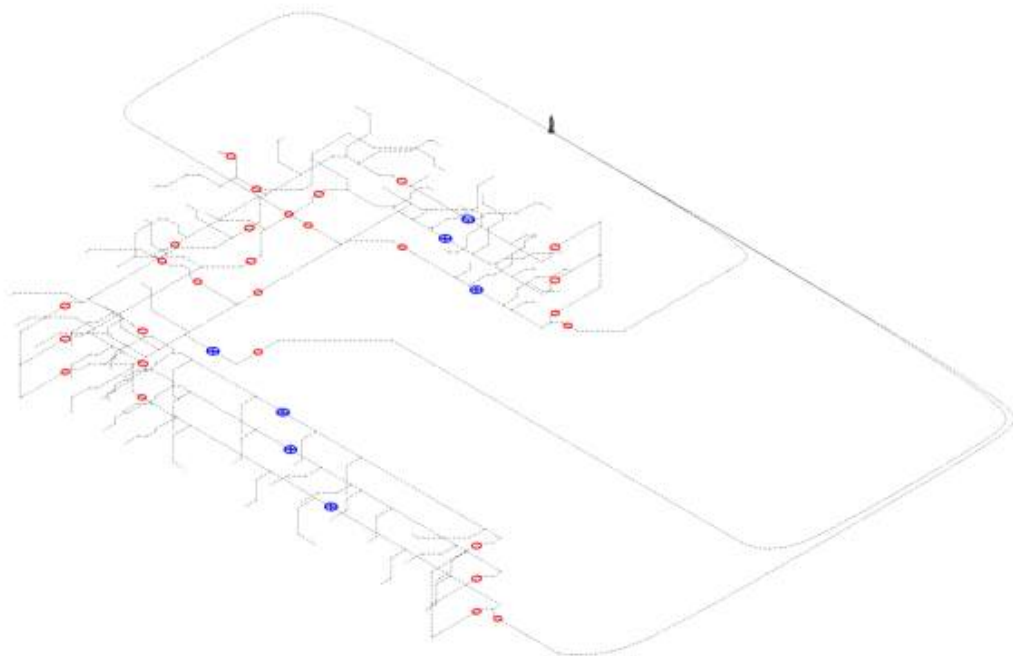


그림 4-17. 물리적방호 강화 대안지점
(빨강색 노드 : 방호성능 향상 대안, 파랑색 노드 : 방호지점 추가 대안)

108) 본 연구에서 수행한 물리적방호 강화 시뮬레이션에서는 0.6031부터 0.9222까지 총 11개의 물리적방호 강화 최적대안을 제시하였다.

(2) 사이중양성 분석

네트워크로 재현된 시설의 강화 대안지점의 사이중양성 분석 결과는 표 4-6.과 같다.¹⁰⁹⁾ 사이중양성 분석시 실제 이동거리는 가중치(weight)로 적용하여 보행 시 발생하는 물리적 거리개념을 반영하였다. 그림 4-18.은 평면 일부의 사이중양성 분석 결과를 표현한 결과이다. 네트워크의 말단에 있는 실은 보행의 통로역할을 하지 않기 때문에 0으로 나타났고 문은 0.1, 복도는 0.15 ~ 0.25, 중앙계단은 0.40 정도의 수준을 보였다.

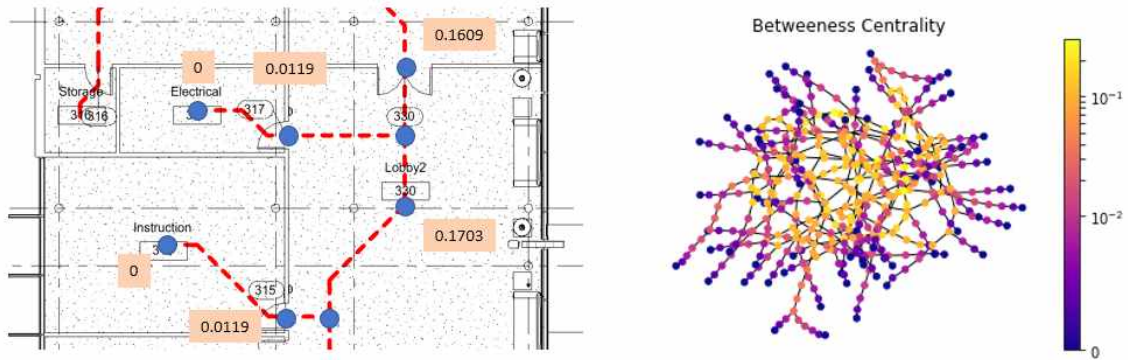


그림 4-18. 강화 대안지점의 사이중양성 분석

표 4-6. 강화 대안지점별 사이중양성 값

No.	강화 대안지점	사이중양성	No.	강화 대안지점	사이중양성
1	Door_101B	0.0135	18	Door_235	0.2777
2	Door_114	0.2530	19	Door_236	0.1797
3	Door_118	0.0335	20	Door_301	0.0800
4	Door_119A	0.0048	21	Door_312	0.2488
5	Door_119B	0.0144	22	Door_319	0.0587
6	Door_120	0.0120	23	Door_327	0.0924
7	Door_130	0.0148	24	Door_328	0.1079
8	Door_130A	0.0962	25	Door_329	0.1819
9	Door_130C	0.0211	26	Door_330	0.1612
10	Door_132A	0.1743	27	Door_331	0.0120
11	Door_132B	0.0090	28	131_Corridor	0.1200
12	Door_134	0.1282	29	133-1_Lobby2-1	0.0197
13	Door_135	0.1516	30	234_Corridor	0.1383
14	Door_201	0.1384	31	235_Corridor	0.2135
15	Door_217	0.3046	32	328_Corridor	0.1010
16	Door_233	0.1071	33	329_Corridor	0.1138
17	Door_234	0.1648		-	

109) 전체 중 대안지점으로 선정된 노드

4.5. 물리적방호 강화 최적대안 도출

4.5.1. 강화지점 물리적방호 유효성, 이동편의성 비용 분석

본 장에서는 모든 침입경로¹¹⁰⁾를 기반으로 도출한 강화 대안지점¹¹¹⁾을 강화하였을 때의 물리적방호 유효성과 이동편의성 비용을 분석하였다. 그림 4-19와 같이 강화 대안지점을 강화하였을 때 소요되는 이동편의성 비용을 x축, 물리적방호 유효성을 y축에 표시하였다. 하나의 지점을 선정하여 강화할 수 있고, 두 지점을 선정하여 강화할 경우, 세 지점을 강화할 경우 등을 모두 포함할 수 있다. 여러 지점을 동시에 강화할 경우 여러 지점의 사이중앙성 값을 합산하여 이동편의성 비용을 산정하였다.

그림 4-20은 한 지점을 강화할 경우부터 7개의 지점을 동시에 강화하는 경우까지 정리한 그래프이다.¹¹²⁾ 한 지점을 강화할 때보다 여러 지점을 동시에 강화할 때 물리적방호 유효성이 높아지는 경향이 있지만, 동시에 사이중앙성 비용도 같이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 여러 지점을 동시에 강화하면 외부의 침입으로부터 안전해지는 반면, 내부사용자의 이동편의성 저하가 크다는 것을 의미한다. 그림 4-21의 파랑색으로 표시한 지점은 각 조합별 최적대안을 나타낸다.

[강화 지점별 물리적방호 유효성, 이동편의성 비용 도출]

Case	강화지점	물리적방호 유효성	이동편의성 비용
1	Door_319	0.6031	0.0586
...			
251	Door_319 + Door_331	0.7221	0.0586+0.0120 = 0.0706
...			
3690	Door_114 + Door_130A + 329_Corridor	0.7732	0.2529+0.0961+0.1138 = 0.4628
...			

물리적방호 유효성

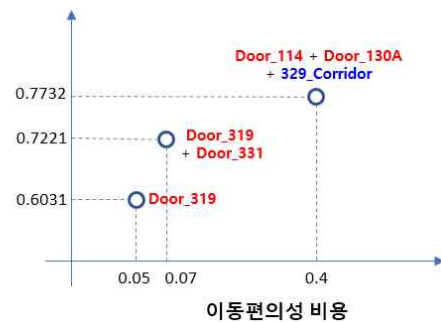


그림 4-19. 대안지점 강화를 통한 물리적방호 유효성, 이동편의성 비용 도출

110) 6.3.1 장에서 탐색된 45개의 침입경로

111) 6.3.2 장에서 도출한 33개 지점 ((방호성능 강화 : 26, 방호지점 추가 : 7)

112) 물리적방호 유효성을 0.9까지 높이는데 목표로 하여 조합 수를 늘려나갔으며, 최종적으로 7개의 조합으로 물리적방호 유효성 0.9에 도달 가능하였음.

예를 들어 4개 지점 동시강화 조합을 생성할 때, 임의의 4지점을 선정하지 않고, 3개 지점 동시강화 결과 물리적방호 유효성 향상에 무의미하게 나타나는 지점은 제외하고 4개 조합을 생성하는 방식을 사용함.



그림 4-20. 여러 지점 동시 강화를 통한 물리적방호 유효성, 이동편의성 비용

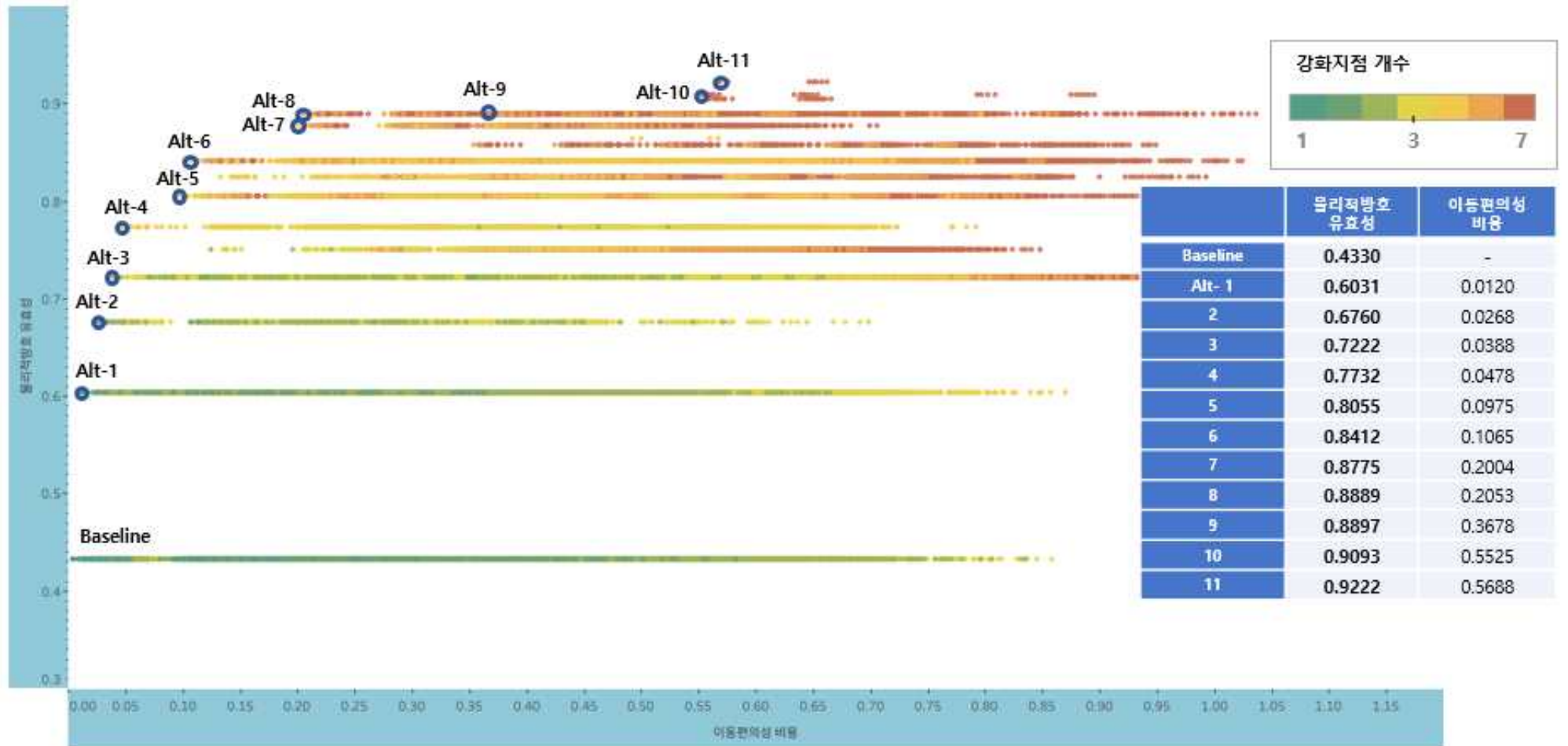


그림 4-21. 이동편의성을 고려한 물리적방호 강화 최적대안 도출 결과

4.5.2. 물리적방호 강화 최적대안 도출

그림 4-21.은 그림 4-20.(여러 지점 동시 강화를 통해 도출한 물리적방호 유효성 및 이동편의성 비용을 도출)을 종합한 결과이다. 최종적으로 11개의 물리적방호 강화 최적대안을 도출할 수 있었다. Alt-1부터 Alt-11은 이동편의성을 고려한 물리적방호 유효성 향상 최적 대안으로, 설계자는 물리적방호 유효성 목표값에 따라 어떤 지점을 강화해야 하는지, 즉 최적 대안을 알 수 있다.

현재 시뮬레이션 대상 시설(목표구역)의 물리적방호 유효성은 0.433으로, 외부침입을 막을 확률이 43%임을 의미한다. 예를 들어, 목표구역에 대한 물리적방호 유효성을 0.6으로 향상시키기 위해서 Alt-1의 대안을 선택하면 내부사용자의 이동편의성을 최대한 저해하지 않으면서 목표하는 물리적방호 유효성을 얻을 수 있다는 의미이다. 만약 물리적방호 유효성을 0.9 이상으로 향상시키기 위해서는 Alt-10의 대안을 선정할 수 있다. 표 4-7.과 같이 물리적방호 유효성 목표 값에 따라 최적대안을 선정할 수 있다. 113)

표 4-7. 물리적방호 유효성 목표 값에 따른 최적대안

물리적방호 유효성 목표 (Pe)	강화 최적 대안
$0.4330 < Pe \leq 0.6031$	Alt-1
$0.6031 < Pe \leq 0.6760$	Alt-2
$0.6760 < Pe \leq 0.7222$	Alt-3
$0.7222 < Pe \leq 0.7732$	Alt-4
$0.7732 < Pe \leq 0.8055$	Alt-5
$0.8055 < Pe \leq 0.8412$	Alt-6
$0.8412 < Pe \leq 0.8775$	Alt-7
$0.8775 < Pe \leq 0.8889$	Alt-8
$0.8889 < Pe \leq 0.8897$	Alt-9
$0.8897 < Pe \leq 0.9093$	Alt-10
$0.9093 < Pe \leq 0.9222$	Alt-11

도출한 최적대안을 통해 얻을 수 있는 강화 효과와 강화지점은 그림 4-22. 및 표 4-8.과 같다. Alt.-1은 ‘Door_331’을 강화하는 것¹¹⁴⁾으로 0.6031의 물리적방호 유효성을 얻을 수 있고, 이는 기존 대비 17%p의 향상된 값이다. 만약 Alt.-2의

113) Alt-9 (물리적방호 유효성: 0.8897)와 Alt-8 (0.8889)의 차이가 0.0008로 매우 미비하여, Alt-9를 최적 대안으로 선정해야 하는지에 대한 평가는 물리적방호 설계자의 기준에 따를 수 있다.

114) 일반문에서 보안문으로 강화하는 것 (표 4-3. 참조)

‘Door_120’과 ‘Door_130’을 동시에 강화한다면 24%p, Alt-3과 같이 ‘Door_331’, ‘Door_120’, ‘Door_130’을 모두 강화한다면 29%p의 개선된 물리적방호 유효성을 얻을 수 있다.

Alt.-7은 ‘Door_331’, ‘Door_319’, ‘Door_132B’, ‘328_Corridor’, ‘133-1_Lobby2-1’을 강화하는 대안이며 기존 대비 44%p의 강화된 물리적방호 유효성을 얻을 수 있다. 여기서 ‘328_Corridor’, ‘133-1_Lobby2-1’은 복도를 분할하여 중앙에 보안문을 설치하는 방호지점 추가 대안이다. 긴 복도를 출입절차 없이 통과하는 것이 물리적방호 체계를 구성하는 지연, 탐지 측면에서 취약하여, 방호지점을 추가하여 침입 소요시간과 탐지지점을 늘려 물리적방호 유효성을 높이는 것이 효과적인 방법이기 때문이다. 반면 복도는 내부 사용자의 통행이 빈번하여 강화하였을 때 이동편의성 비용이 높은 단점이 있다. 따라서 일정 단계(Alt.-7) 이상의 물리적방호 유효성에서 대안으로 도출되었다고 이해할 수 있다.

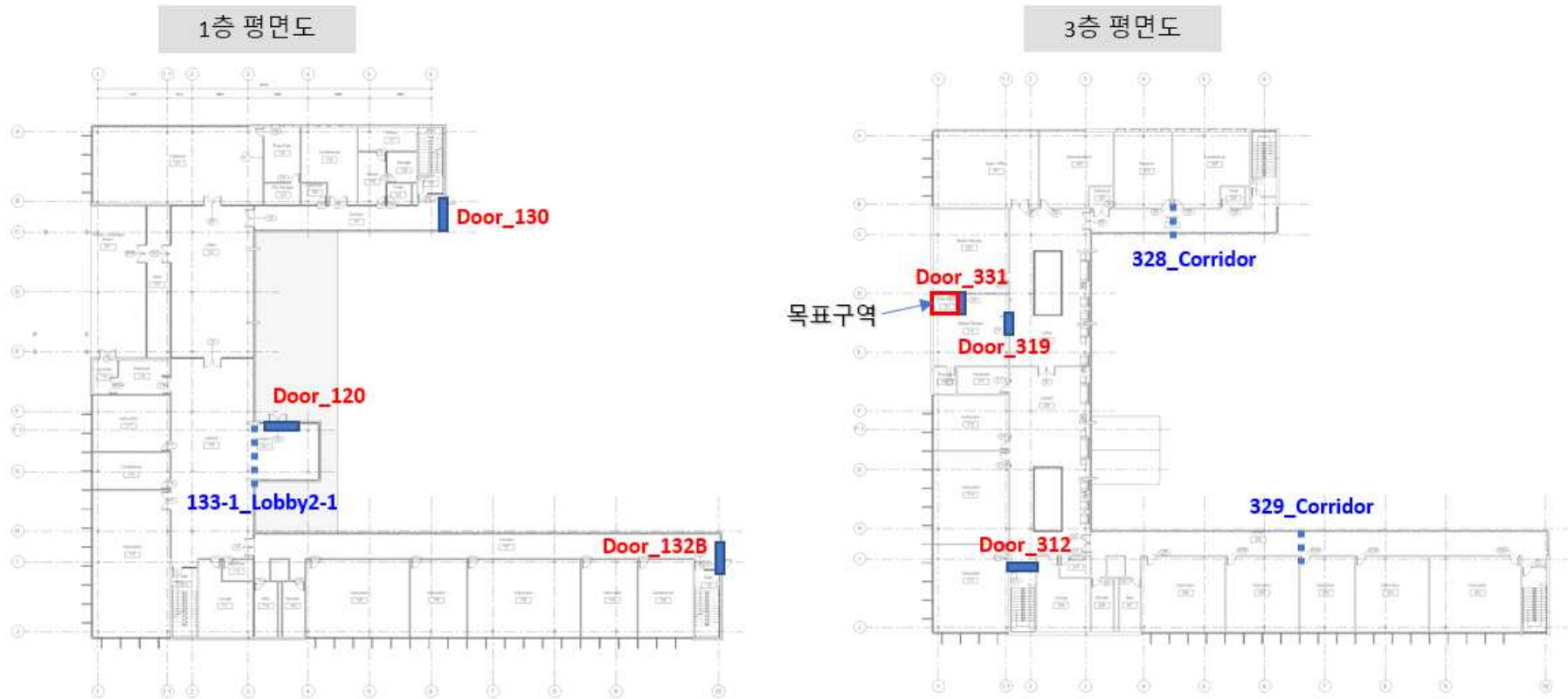


그림 4-22. 물리적방호 강화 최적대안 지점

표 4-8. 물리적방호 강화 최적대안 별 강화효과 및 강화지점
(붉은색 : 방호성능 개선, 파란색: 방호지점 추가)

	강화 효과	물리적방호 유효성	이동편의성 비용	강화 지점						
				1	2	3	4	5	6	7
Baseline	-	0.4330	-							
Alt- 1	17%p	0.6031	0.0120	Door_331						
2	24%p	0.6760	0.0268	Door_120	Door_130					
3	29%p	0.7222	0.0388	Door_120	Door_130	Door_331				
4	34%p	0.7732	0.0478	Door_331	Door_130	Door_120	Door_132B			
5	37%p	0.8055	0.0975	Door_319	Door_331	Door_130	Door_120			
6	41%p	0.8412	0.1065	Door_331	Door_319	Door_130	Door_120	Door_132B		
7	44%p	0.8775	0.2004	Door_331	Door_319	328_Corridor	133-1_Lobby2-1	Door_132B		
8	46%p	0.8889	0.2053	Door_319	Door_331	328_Corridor	133-1_Lobby2-1	Door_132B	Door_119A	
9	46%p	0.8897	0.3678	Door_319	Door_331	Door_330	Door_327	Door_130	133-1_Lobby2-1	Door_132B
10	48%p	0.9093	0.5525	Door_319	Door_331	Door_312	Door_327	Door_130	Door_120	329_Corridor
11	49%p	0.9222	0.5688	Door_319	Door_331	Door_312	328_Corridor	Door_130	133-1_Lobby2-1	329_Corridor

4.6. 소결

본 장에서는 3장에서 제안한 물리적방호 평가, 강화 방법, 그리고 개발한 시스템을 검증하기 위해 시범시설을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 선정된 시범시설의 BIM모델을 기반으로 공간 네트워크로 실내공간을 재현하고, 외부 침입에서 핵심구역까지 침입 가능한 모든 경로를 탐색하여 가장 취약한 경로의 물리적방호 유효성을 도출할 수 있었다. 또한 탐색된 모든 침입경로를 기반으로 강화 대안지점 33개 지점(문 : 26개 지점, 복도 7개 지점)을 찾아내어 강화 조합을 생성하였다. 한 개의 지점을 강화하는 경우부터 7개의 지점을 동시에 강화하는 경우까지 약 72,000개의 조합이 생성되었고, 이들의 물리적방호 유효성과 이동편의성 비용을 종합하여 총 11개의 물리적방호 강화 최적대안을 도출할 수 있었다. 일반적으로 한 지점을 강화하는 것보다 여러 지점을 동시에 강화하는 방법이 높은 물리적방호 유효성을 기대할 수 있었지만, 이동편의성 비용이 높아 내부사용자의 이동편의성을 저해할 가능성이 높았다.

최종적으로 11개의 강화 최적대안(Alt-1 ~ Alt-11)은 1개 지점을 강화하여 물리적방호 유효성을 0.6031로 향상시키는 대안부터 7개의 지점을 동시에 강화하여 물리적방호 유효성을 0.9222까지 향상시키는 대안을 포함한다. 방호지점을 추가하는 방법(복도를 분할하여 보안문을 추가 설치)은 침입 소요시간과 탐지지점을 늘려 물리적방호 유효성을 높이는 효과적인 방법이지만, 내부사용자의 통행이 빈번한 복도를 강화하기 때문에 이동편의성 비용이 높은 단점이 있다. 따라서 일정 단계 (Alt.-7) 이상의 물리적방호 유효성에서 대안으로 도출되었다.

제 5 장 물리적방호 평가·강화 방법 검증

5.1. 검증 프로세스

- 5.1.1. 검증 목적
- 5.1.2. 검증 방법 및 절차
- 5.1.3. 검증 결과 가정

5.2. 대상선정 및 관련규정 분석

- 5.2.1. 검증대상 선정
- 5.2.2. 설계기준위협(Design Base Treat, DBT) 설정

5.3. 대상시설 구축 및 전문가 선정

- 5.3.1. 대상시설 구축
- 5.3.2. 전문가 선정

5.4. 검증

- 5.4.1. 검증 실험 환경 및 절차
- 5.4.2. 본 연구 방법론을 통한 분석결과
- 5.4.3. 전문가 분석 결과

5.5. 결과 분석

5.1. 검증 프로세스

5.1.1. 검증 목적

본 연구에서 제안한 물리적방호 평가·방법의 효과를 확인하기 위해 전문가의 물리적방호 강화 대안과 비교검증을 수행하였다. 설계 초기단계에서 전문가가 검증 대상 시설의 물리적방호 강화 지점을 선정하고, 그 결과를 본 연구에서 제안한 방법을 통해 도출한 물리적방호 강화 대안의 효과(물리적방호 유효성) 및 이동편의성 비용과 비교하였다.

결과적으로 검증의 목적은 본 연구에서 제안한 물리적방호 평가·강화 방법을 사용하였을 때 복잡한 건축시설의 설계 초기단계에서 전문가가 놓치기 쉬운 경로의 물리적방호 강화 지점을 찾아내거나, 내부 사용자의 이동편의성 측면에서 더 나은 강화 지점을 제안하는 등의 효과를 입증하기 위함이다.

5.1.2. 검증 방법 및 절차

검증 절차는 그림 5-1.과 같다. 검증 대상을 선정하고 검증 대상시설에 적용되는 물리적방호 규정을 분석하여 물리적방호 평가를 위한 시설을 모델링하였다. 시설 모델링은 BIM을 기반으로 공간정보 및 문 등의 방호 값을 포함한다. 이를 통해 공간 네트워크를 활용한 물리적방호 유효성 평가와 이동편의성을 고려한 물리적방호 강화 최적대안을 도출하였다. 마지막으로 결과 검증을 위해 국가중요시설 설계 및 물리적방호 관련 전문가 시험을 통해 본 연구에서 제안한 방법의 유효성을 증명하였다.

본 연구에서 제안한 방법의 유효성 증명은 전문가들이 정성적인 방법을 통해 물리적방호 강화 지점을 도출하고, 전문가들이 제안한 대안의 물리적방호 효과와 본 연구에서 제안한 물리적방호 강화 최적대안과의 효과를 통계적으로 비교하여 입증하였다.



그림 5-1. 검증 절차

5.1.3. 검증 결과 가정

본 검증 프로세스를 통해 표 5-1.과 같이 세 종류의 결과 도출이 예상된다. 그래프의 붉은색 지점들은 본 연구에서 제안한 방법을 통해 얻을 수 있는 최적대안이며, 파랑색 지점들은 전문가 검증실험을 통해 얻은 대안이다.

- 검증결과 A : 본 연구와 전문가 검증결과가 유사하거나 동일
- 검증결과 B : 본 연구가 전문가 검증결과보다 이동편의성 비용측면에서 우월
- 검증결과 C : 본 연구가 전문가 검증결과보다 물리적방호 유효성 및 이동편의성 측면에서 우월한 결과를 도출

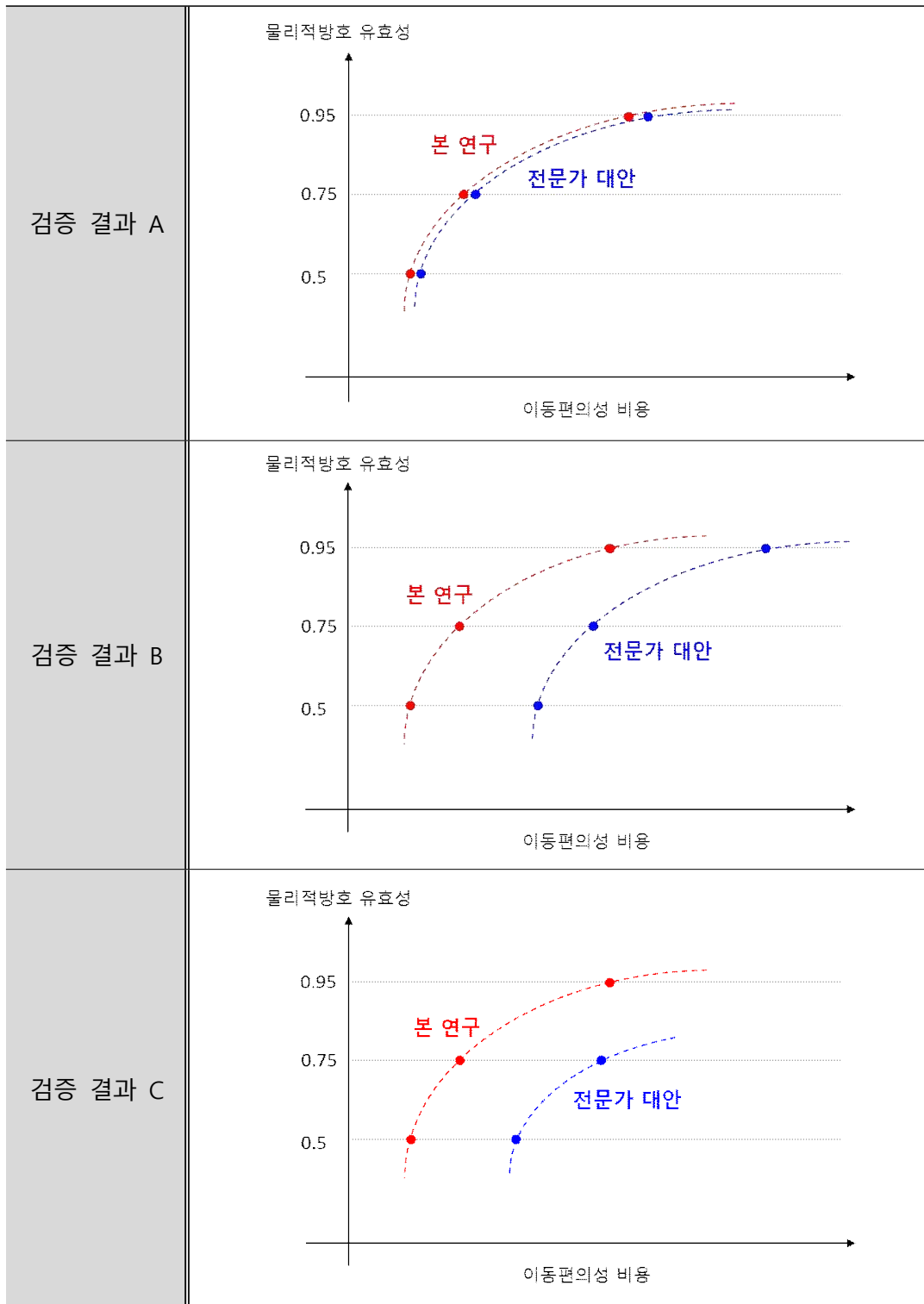
첫 번째(검증결과 A)는 본 연구에서 제안하는 물리적방호 유효성 및 이동편의성 비용을 고려한 최적 강화지점과 전문가가 제안한 강화지점이 동일 또는 유사하게 도출된 경우이다. 이는 본 연구에서 제안한 방법과 개발한 시스템이 전문가의 경험을 통해 제안한 대안이 크게 다르지 않다는 것을 의미한다. 이런 결과가 얻어질 경우, 본 연구 결과물의 효용성을 입증하기 위해 전문가 검증실험에 소요된 시간을 측정하여 본 연구에서 제안한 방법 및 시스템이 설계 초기단계에서 최적의 물리적방호 강화 지점을 제안하는데 설계자의 빠른 의사결정에 도움을 줄 수 있는지 확인이 필요하다.

두 번째(검증결과 B)는 전문가 검증실험을 통해 얻어진 물리적방호 강화지점이 본 연구에서 제안한 방법과 동일한 수준의 물리적방호 유효성을 얻을 수 있었지만, 이동편의성 비용 측면에서 더 높은 대안을 제시한 결과이다. 이와 같은 결과는 물리적방호 성능을 만족시키기 위해서 전문가 경험에 의한 물리적방호 강화지점을 도출할 수 있지만 시설 내부사용자의 이동편의성을 저해시키지 않는 측면에서 본 연구에서 제안한 방법과 시스템이 더 효과적이라는 것을 의미한다.

세 번째(검증결과 C)는 본 연구에서 도출한 물리적방호 강화 최적대안이 전문가 검증실험 결과보다 물리적방호 유효성 및 이동편의성 비용 측면에서 더 나은 대안을 제시하는 경우이다. 예를 들어, 표 5-1.의 ‘검증결과 C’ 그래프에서 본 연구 제안은 물리적방호 유효성을 최대 0.95까지 향상시키는 대안을 제시하였지만, 전문가 대안은 0.95까지 향상시키는 대안을 제시하지 못하였다. 또한 물리적방호 유효성을 0.5와 0.75까지 향상시키는 대안의 경우 본 연구의 제안보다 이동편의성 비용이 높은 대안을 제시하였다. 이와 같이 검증결과 C의 경우는, 본 연구에서 제안

한 방법과 시스템이 물리적방호 유효성 측면과 이동편의성 비용 측면에서 모두 더 나은 물리적방호 강화지점을 제안할 수 있다는 것을 의미한다.

표 5-1. 검증 결과 가정



5.2. 대상선정 및 관련규정 분석

5.2.1. 검증대상 선정

검증대상 시설은 국가중요시설 중 ‘가’급 전력시설인 원자력발전소를 대상으로 선정하였다. 국가중요시설은 기능과 역할의 중요성에 따라 ‘가’, ‘나’, ‘다’급으로 구분되며 전력시설 중 가장 높은 ‘가’급은 원자력발전소가 유일하다. 원자력발전소는 다른 국가중요시설과 달리 핵물질 및 주 제어실 이라는 물리적방호 대상이 명확하고 시설 측면에서도 9개 층과 약 800개 이상의 실로 구성된 대규모의 건축시설이다.¹¹⁵⁾ 원자력발전소는 성능과 설계개념에 따라 여러 노형이 존재하는데 본 연구에서 검증대상으로 선정한 원자력발전소는 APR1400(Advanced Power Reactor 1400MW)¹¹⁶⁾으로, 우리나라에 지어진 원자력발전소 중 가장 크고, 최신 노형이다. 2022년 기준 국내에는 신고리 3,4,5,6호기와 아랍에미레이트 BNPP 1,2,3,4호기가 건설 및 운영 중에 있다.



그림 5-2. 원전 APR1400 전경 (출처: <https://aris.iaea.org/>)

115) 한국형 신형원전 APR1400은 발전소 본관건물(Power block)을 기준으로 약 820개의 실로 구성된다. (신재섭, 2018)

116) APR1400은 1992년 12월부터 2001년 12월까지 약 10여년에 걸쳐 국가선도 기술개발과제를 통해 개발된 1,400MWe급 차세대 원자력발전소 노형이다. 한국전력기술(주), 한국수력원자력(주), 한국원자력연구소, 두산중공업 등이 중심이 되어 약 2,350억 원의 개발비가 투입되었으며, 발전소의 종합설계와 원자로계통설계의 기술개발은 한국전력기술(주)에 의해 수행되었다. APR1400은 개발 전 주력 원전모델인 OPR1000 대비 발전용량을 1,000MW에서 1,400MW로 키우고, 원전 설계수명을 40년에서 60년으로 늘렸다. 특히, 안전성 강화를 위해 보조건물(Auxiliary Building)에 4분면 Quadrant 배치 설계방식을 도입하여 화재, 내·외부 홍수, 지진, 등 사고 및 충격에 대한 대처능력을 강화한 것이 특징이다. 2006년 신고리 3,4호기를 시작으로, 신한울 1,2호기, 신고리 5,6호기 그리고 해외에 수출한 UAE BNPP 1~4호기가 준공 및 건설 중에 있다. 특히 2018년 10월 미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission, NRC)로부터 설계인증(Design Certification)을 취득하여 안전성을 입증한 노형이다. (신재섭, 2019)

(1) APR1400 배치개념 및 특성

검증대상 원자력발전소 APR1400의 구성은 그림 5-3.과 같이 원자로건물(Reactor Containment Bldg.), 보조건물(Auxiliary Bldg.), 복합건물(Compound Bldg.), 터빈건물(Turbine Generator Bldg.)을 포함하는 Power Block과 이외의 기타건물(Ancillary Bldg.)¹¹⁷⁾군으로 구분할 수 있다. 이중 본 연구의 검증 대상으로 선정된 건물은 붉은색 점선으로 표시한 보조건물이다. APR1400 원전을 구성하는 건물 중 가장 복잡하고 다층, 여러 수평, 수직동선으로 구성되어 있으며, 물리적방호 관련 법규에서 규정하는 핵심구역(vital area)인 주제어실이 위치한 건물이기 때문이다.

그림 5-3.과 같이 Power Block을 기준으로 2개의 원자로건물, 보조건물, 터빈건물이 종방향으로 배치(Slide Along) 되고, 경제성 및 운전편의성을 위해 두 보조건물 사이에 공용으로 사용되는 복합건물이 위치한다. 복합건물은 좌우에 배치된 보조건물 및 원자로건물에서 공통으로 사용하는 출입관리 및 방사성폐기물 처리 기능 등을 수행하기 때문이다. 보조건물은 원자로에 안전성관련 시스템 및 기기제공을 위해 원자로건물을 둘러싼 형태를 띤다.

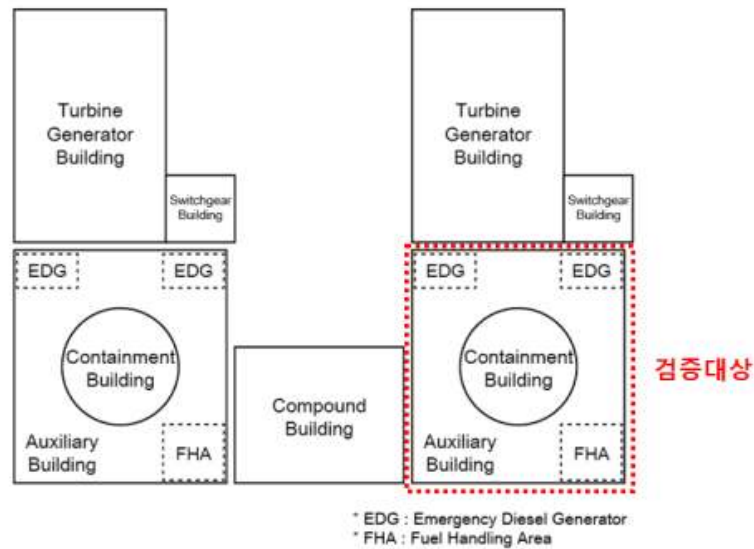


그림 5-3. APR1400 Power Block 배치 개념도

117) 기타 건물군의 종류 및 수는 프로젝트의 성격에 따라 상이하지만, 통상 수처리건물(Fire pump & water/wastewater treatment building), 가스저장시설(Gas storage facility), 중저준위저장고건물(Low & medium radioactive waste interim storage building), Auxiliary boiler building, Cold machine shop, Chlorination building, Switchyard control building, AAC generator building 등을 포함한 약 20개의 건물을 포함한다.

(2) 원자로건물 (Reactor Containment Building)

원자로건물은 그림5-4와 같이 보조건물 중앙에 위치하며 약 1.35미터(4.5feet)두께의 원통형 벽체와 반구형 돔으로 구성되는 프리스트레스 콘크리트 셸 구조로 이루어져 있다.¹¹⁸⁾ 원자로건물 내부에는 원자로(Reactor), 증기발생기(Steam generator), 가압기(Pressurizer), 핵연료재장전수조(In-containment refueling water storage tank, IRWST)와 원자로 냉각재계통 등이 위치한다.

원자로건물은 4개 층으로 구성되어 있으며, 최상층과 최하층에서 보조건물로 출입이 가능하도록 문(Hatch)이 설치되어 있다. 최상층에는 증기발생기 반입과 교체를 위한 직경 7.8미터(26feet)규모의 Equipment hatch가 설치되어 있으며, 돔 내부 상단에는 증기발생기 운송을 위한 크레인(Polar crane)이 설치되어 있다. 중간 두 개층은 철재 프레임과 그레이팅으로 구성된 Mezzanine 층이 있다.

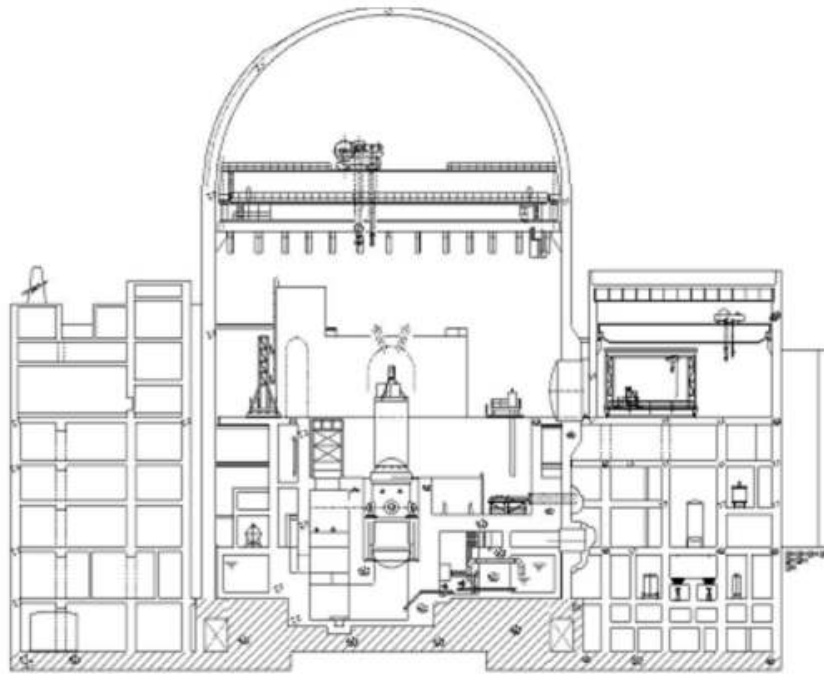


그림 5-4. 원자로+보조건물 단면도
(출처 : IAEA ARIS Database)

118) 원자로건물 내부 직경은 약 45m(150feet), 높이는 약 75m(250feet), 벽체 두께는 약 1.35m(4.5feet), 돔 두께는 약 1.2m(4feet)

(3) 보조건물 (Auxiliary Building)

본 검증의 대상인 보조건물은 원자력발전소를 구성하는 건물 중 가장 크며 지하 2층, 지상 5층 규모로, 중앙에 위치한 원자로건물을 둘러싼 형태를 띠고 있다. 그림 5-5와 같이 평면을 4분면으로 물리적 구분한 Quadrant 평면 개념을 가지고 있어, 내부 화재 확산이나 침수의 영향을 최소화 할 수 있도록 설계되었다. 안전성 관련 주요기기(Safety injection pump, Containment spray pump, Shutdown cooling pump, Component cooling water pump 등)는 각 4분면에 중복(4 Train safety system)¹¹⁹⁾ 배치하여 비상시 안전성을 확보하도록 설계되었다. 동시에 수직동선인 계단실과 엘리베이터가 각 4분면에 배치되어 비상시 대피가 원활하도록 설계되었다. 하지만 동시에 물리적방호 측면에서 침입자의 경로를 분석하고 강화하기엔 불리하게 작용한다. 공간배치 측면에서는, 방사선구역과 비방사선구역을 분리하여 방사선 피폭저감 및 오염 확산방지, 그리고 발전소 종사자의 이동 및 접근성을 고려하도록 설계되었다.

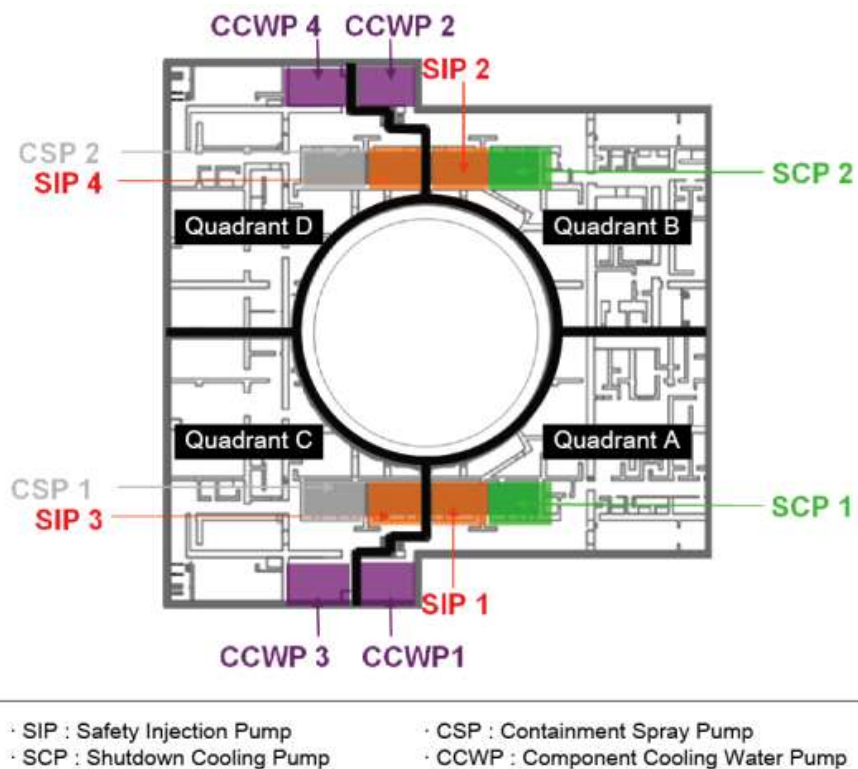


그림 5-5. 보조건물 Quadrant 평면 개념도
(출처 : 신재섭 (2018). 및 IAEA ARIS Database 가공자료)

119) 건물 평면을 4분면으로 나누어, 우측 하단부터 Quadrant A, B, C, D로 구분한다. ([그림 5-5] 참조)

5.2.2. 설계기준위협(Design Base Threat, DBT) 설정

(1) 설계기준위협

「원자력시설 등의 방호 및 방사능 방재 대책법」 시행령 제7조와 미국 연방법 10CFR73 「PHYSICAL PROTECTION OF PLANTS AND MATERIALS」에 따르면 원자력시설의 물리적방호 체계는 ‘설계기준위협 (Design Base Threat, DBT)’을 기반으로 수립되어야 한다고 규정한다. DBT는 원자력시설에 발생 가능한 위협 중 가장 심각한 위협으로, 보통 시설의 물리적방호 위험도를 분석할 때 가정하는 설계 위협 시나리오를 설정하는 근거가 된다. (유호식, 2008)

국제 원자력기구 IAEA(International Atomic Energy Agency)의 「핵물질 방호에 관한 지침」 INFCIRC/225 : Physical Protection of Nuclear Material에 따르면 정부는 원자력시설에 대한 위협을 평가하여 DBT로 정립하고, 이를 기반으로 물리적방호 설계를 진행해야 한다고 설명한다. DBT는 원자력시설 파괴 또는 방사성 물질의 탈취를 시도할 수 있는 잠재적 내·외부 적의 능력을 의미한다. 따라서 물리적방호 체계의 설계는 DBT를 기반으로 설계, 평가되어야 한다. 잠재적 외부의 적은 악의적인 목적을 갖고 핵물질을 탈취하거나 원자력시설을 파괴하려는 테러리스트가 대표적이다. 또한 내부의 적은 외부의 테러리스트가 임무를 수행하는 과정에서 도움을 주거나 시설 내부의 민감정보를 제공하는 사람을 의미한다. DBT는 과거 원자력시설에 대한 사건, 정보기관의 수집정보 등을 토대로 잠재적인 적과 그들의 규모, 특성, 가능성 등을 기반으로 정립된다.

Adversary Characteristics	North America	Europe	Africa and SW Asia
Adversary Type	Pseudocommando Terrorist	Terrorist	Terrorist
Number of Adversaries	1-2	1-2	4-5
Weapons and Caliber	5.56mm Assault Rifle	7.62x39mm Assault Rifle	7.62x39mm Assault Rifle
Entry Methods & Tools	Physical force without aid of tools other than weapons.	Physical force without aid of tools other than weapons.	Physical impact force without tools other than weapons. Possible use of IEDs to aid entry. If delayed intervention is expected, possible use of expedient tools (e.g., fire axe, pry bar, hammer, etc.).
Duration of Event	Reasonable: 5-10 Mins. Conservative: 2-3 Hrs.	Reasonable: 5-10 Mins. Conservative: 2-3 Hrs.	24-72 Hours

그림 5-6. 설계기준위협(DBT) 예시
(지역별 설계기준 경향, <https://www.cisworldservices.org/>)

그림 5-6.과 같이 DBT는 침입자의 유형, 침입자의 수, 보유하고 있는 무기 및 장비 등을 규정한다.

(2) 설계기준위협 설정

원자력발전소 및 관련 시설에 대한 DBT는 국가기밀사항으로 다뤄지기 때문에 본 연구에서 실제 DBT를 반영한 물리적방호 검증에 한계가 있다.¹²⁰⁾ 따라서 본장에서 수행하는 물리적방호 평가·강화 방법 검증에서는 선행연구에서 가능성이 높고 위협적으로 판단되는 물리적방호 DBT를 적용하였다.

유호식(2008)은 설계기준 위협을 크게 3가지로 구분하였는데, 본 검증에 적용한 설계기준위협은 표 5-2.의 시나리오 1과 같다. 침입자는 표 5-2.의 테러리스트 1등급에 해당하는 정부에서 고도로 훈련받은 전문가 3-5명이 원자력발전소 내부에 침투하여 폭발물 등을 사용하여 주요시설에 피해를 주는 시나리오이다. 이들은 장애물(펜스, 보안문 등)을 제거할 수 있는 전동공구와 자동소총 및 TNT 폭발물을 소지하고 있다. 외부에서 원자력발전소 대지 경계까지 차량을 타고 접근하여 펜스를 넘어 목표로 하는 구역으로 침투한다. 결과적으로 테러리스트는 주제어실(Main Control Room)을 점령하여 운전원을 인질로 삼고 비정상적으로 원자력발전소를 가동해 시설에 피해를 주거나, 주제어실 기기를 폭파하여 발전소의 기능을 상실할 수 있다.

표 5-2. 설계기준위협 설정 (붉은색 셀) (유호식(2008) 각색)

	시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3
개요	테러리스트가 원자력발전소에 침투, 폭발물을 사용하여 주요시설 피해	격렬해진 시위대가 화염병을 투척하여 외부 펜스 소실	범외자가 내부자와 공모하여 핵물질의 일부를 반출
침입자 수	3-5	300-500	3(내부자 1인 포함)
도구	전동공구	-	-
운송수단	자동차	-	트럭
무기 및 폭발물	자동소총 및 TNT	화염병	-
결과	발전소 기능 상실	대국민 신뢰도 추락, 방호시설 손실로 재산상 피해	핵물질의 불법이전으로 인한 2차 사고 발생

120) 우리나라 원자력시설에 대한 설계기준위협(DBT)는 원자력안전위원회 산하 한국원자력통제기술원에서 개정, 유지관리 하고 있다.

5.3. 대상시설 구축 및 전문가 선정

5.3.1. 대상시설 구축

(1) 시설 공간네트워크 구축

검증을 위해 선정된 APR1400 원자력발전소 BIM 모델과 위치를 개략적으로 배치한 모습은 그림 5-7.과 같다. 검증대상 건물을 구글어스(Google Earth) 위성사진을 통해 취득한 지형사진 위에 배치하여 시설 외곽에 침입 시작지점을 선정하였다. 또한 위성사진을 기반으로 대상 건물(APR1400 보조건물) 및 외곽 펜스의 위치를 확인하여 모델링하였다.

검증을 위해 구축한 시설의 BIM모델은 그림 5-9.와 같다. BIM모델 구축은 원자력발전소의 설계기준 관리를 위한 선행연구¹²¹⁾를 참조하여 동선, 실(room), 문 등의 정보를 입력하였다. 최종적으로 물리적방호 분석을 위한 공간 네트워크는 그림 5-8.과 같다. 점으로 표시된 지점은 실을 나타내는 노드이며, 선은 침입자 및 내부 사용자의 동선인 엣지이다. 세로로 길게 배치되어있는 엣지는 수직 동선이며, 위쪽과 좌우에 길게 연결되어있는 엣지는 외부에서 건물로 출입하는 진입부이다. 건물 중앙에 빈 공간은 원자로건물로 본 검증과정에서 대상건물에 포함되지 않아 노드 및 엣지가 배치되지 않았다.



그림 5-7. 검증 대상시설 배치도

121) 신재섭, 최재필 (2019). BIM기반 Algorithm을 활용한 APR1400 설계기준 통합관리 체계 구축, 한국건설 관리학회 20(5), 52-60

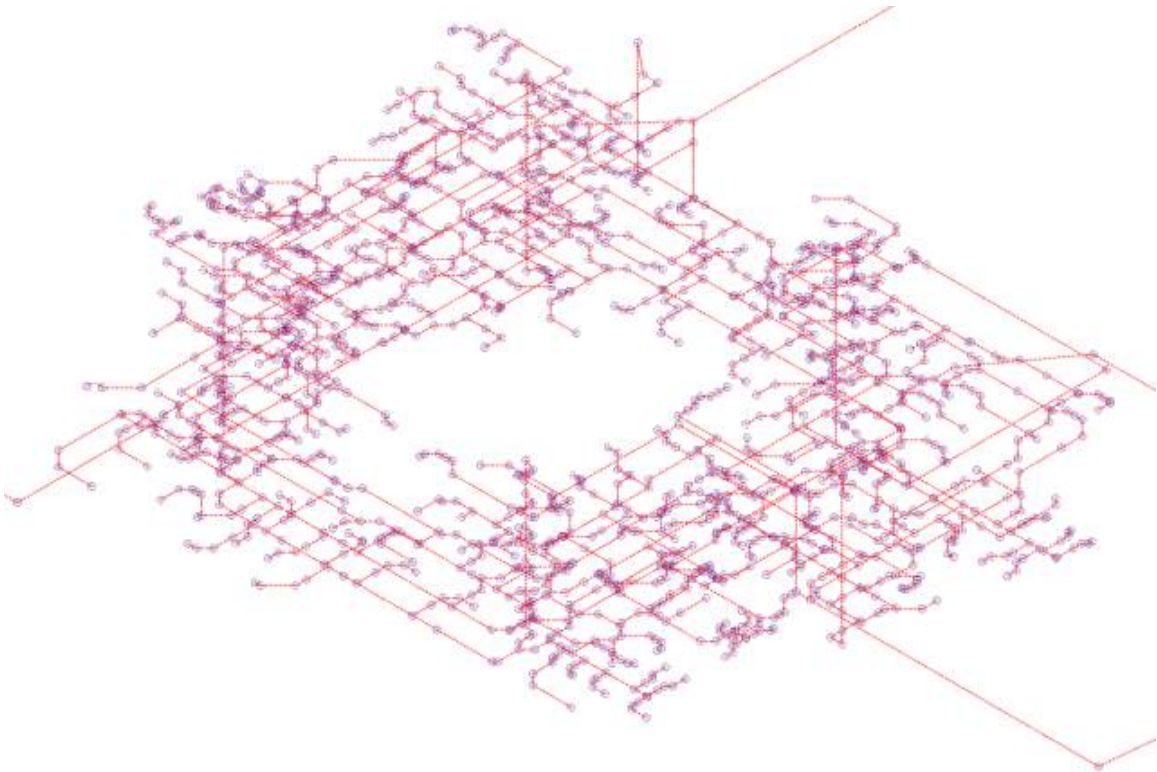


그림 5-8. 원전 APR1400 공간 네트워크 구축

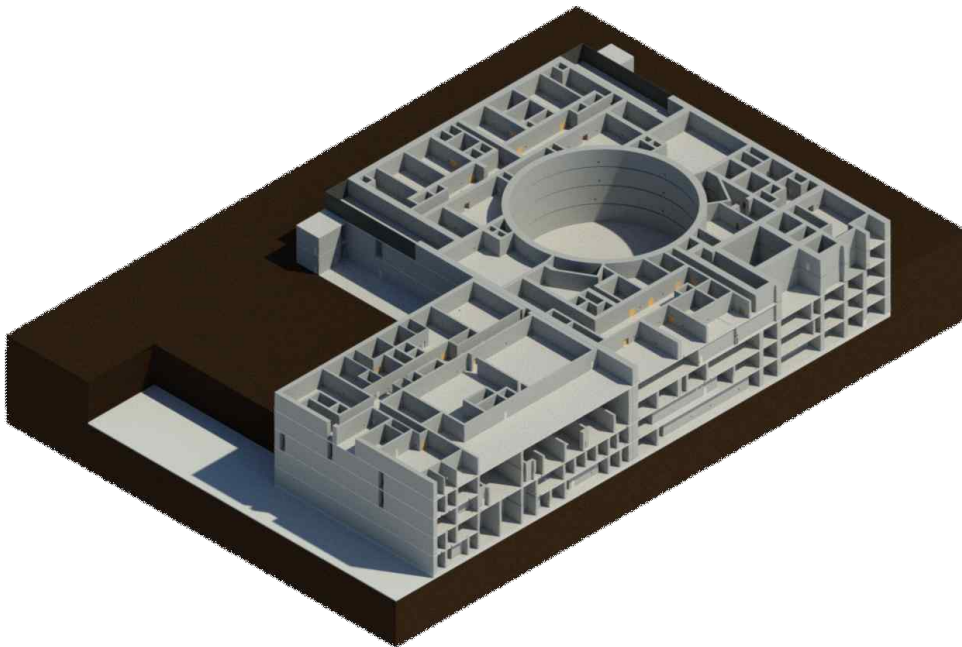


그림 5-9. 원전 APR1400 시설 BIM모델
(출처: 신재섭, 2019)

(2) 침입 시나리오 및 방호 값 설정

그림 5-7.에 표시된 ‘침입 시작지점’에서 보조건물에 위치한 ‘침입 목표지점’인 주제어실을 목표로 침입하는 시나리오를 가정하였다. 주제어실은 그림 5-11.과 같은 원자력발전소의 운영 및 발전을 통제하기 위해 여러 명의 운전원이 24시간 상주하는 구역이다. 주제어실을 폭파, 점령하기 위해 침입자는 외곽 펜스를 넘어 보조건물 지상층으로 진입하거나 외벽을 통해 4층 또는 5층으로 직접 진입할 수 있다. 그림 5-10.은 침입자가 건물 지상층 진입 및 벽을 타고 옥상으로 진입하는 6개의 진입부를 보여준다.

- 침입 목표지점 : 주제어실 (Main Control Room)
- 침입 진입지점 : 지상층 출입문(4개 지점) 및 옥상(2개 지점)

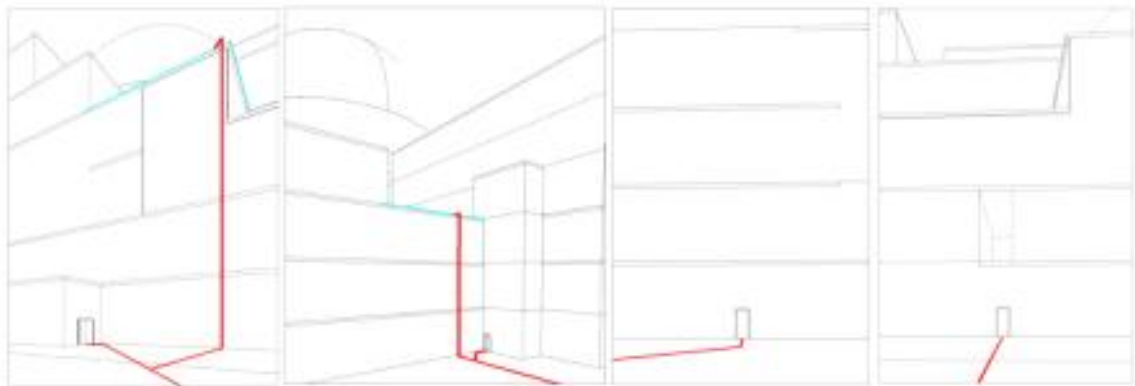


그림 5-10. 침입 진입부

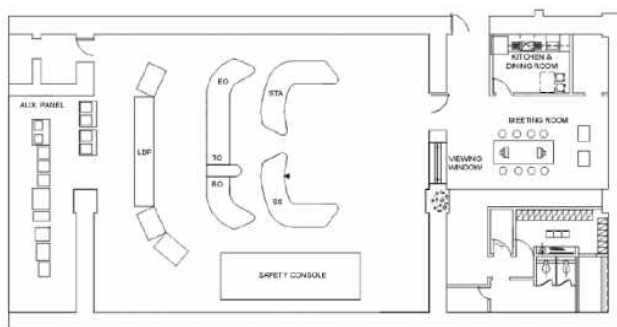


그림 5-11. 원전 APR1400 주제어실 평면도 및 전경 사진
(출처: <https://aris.iaea.org/>, <https://nucleus.iaea.org/>)

표 5-3.은 검증 시뮬레이션에 가정한 시설의 등급별 보안문 및 펜스에 입력한 방호 성능이다. 표 5-4.는 침입 시나리오에서 가정한 침입자의 이동속도 및 임무 수행시간(목표구역에 진입한 후 주요기기를 파괴하는데 소요되는 시간) 및 대응병력의 출동시간을 가정한 값이다.¹²²⁾ 대응출동시간은 「국방부 훈령 제1057호」에서 규정하는 법적 최소시간을 적용하였고, 이외의 문, 펜스 방호성능 및 침입속도는 Betty E. Biringer (2013)의 기준을 사용하였다.

표 5-3. 펜스, 문 방호성능 값

(Betty E. Biringer et al. (2013) Critical Infrastructure System Security and Resiliency, CRC Press, Appendix B: Physical Protection Features Performance Data)

종류	방호성능		설치 위치	Remark
	자연시간	탐지확률		
외곽 펜스	20초	30%	시설 외곽	8 ft chain link x 2 + Taut wire, vibration sensor
일반문	0초	0%	잠금장치 및 출입센서가 설치되지 않은 문	-
A등급 보안문	30초	30%	건물 외곽(외부에서 건물 내부로 출입하는 부분)	Keyed cylinder lock + position switch
B등급 보안문	60초	30%	물리적방호 강화를 위해 선정된 지점	Mechanical or electrical coded lock + position switch
C등급 보안문	180초	60%	핵심구역(주제어실) 출입부	Combination lock + balanced magnetic switch

표 5-4. 침입자 침입속도, 대응출동 및 임무 수행시간 가정 값

종류	값	Remark	
이동속도 ¹²³⁾	보행	3.3m/초	Walking + Running
	벽 오르기	0.3m/초	Climbing (up or down)
임무 수행시간 (Target task time)	60초	Minimum 15 seconds ¹²⁴⁾	
대응 출동시간	300 초	5분 전투대기조 편성, 운용계획 ¹²⁵⁾	

122) 우리나라 원자력시설에 대한 물리적방호 기술기준은 원자력통제기술원의 '물리적방호 분야 기술기준'에 따라 적용, 평가하도록 되어 있지만, 현재 관련 기술기준은 대외비로 관리되고 있음. 따라서 미국 Sandia National Lab에서 개발한 기술기준을 적용하여 사용하였음.

123) Betty E. Biringer et al. (2007) Security Risk Assessment and Management: A Professional Guide for Protecting Building and Infrastructures, Wiley & Sons, Inc.

5.3.2. 전문가 선정

전문가 검증실험을 위해 아래 표 5-5.와 같이 네 명의 전문가를 선정하였다. 주로 국가중요시설의 전력시설의 건축 설계 경력을 가지고 있고, 해당분야의 경력 5년 이상의 전문가를 선정하였다.

표 5-5. 전문가 주요 경력

● 전문가 A	
주요경력	기간 : 2013~현재 주요 경력 : - B(APR1400) 원자력발전소 종합설계 [국가중요시설 '가'급] - C(APR1400) 원자력발전소 종합설계 [국가중요시설 '가'급] - E 화력발전소 종합설계 [국가중요시설 '나'급] 등
기타사항	- 건축사
● 전문가 B	
주요경력	기간 : 2006~현재 주요 경력 : - A(APR1400) 원자력발전소 종합설계 [국가중요시설 '가'급] - B(APR1400) 원자력발전소 종합설계 [국가중요시설 '가'급] - C(APR1400) 원자력발전소 종합설계 [국가중요시설 '가'급] - D(APR1400) 원자력발전소 종합설계 [국가중요시설 '가'급] 등
기타사항	- APR1400 물리적방호 체계 구축 과제(산업부) 참여
● 전문가 C	
주요경력	기간 : 1995~현재 주요 경력 : - A(APR1400) 원자력발전소 종합설계 [국가중요시설 '가'급] - B(APR1400) 원자력발전소 종합설계 [국가중요시설 '가'급] - C(APR1400) 원자력발전소 종합설계 [국가중요시설 '가'급] - F(OPR1000) 원자력발전소 종합설계 [국가중요시설 '가'급] 등
● 전문가 D	
주요경력	기간 : 2013~현재 주요 경력 : - E 화력발전소 종합설계 [국가중요시설 '나'급] - F 복합화력발전소 종합설계 [국가중요시설 '나'급] - G 복합발전소 종합설계 [국가중요시설 '나'급] - H 복합발전소 종합설계 [국가중요시설 '나'급] 등

124) Betty E. Biringer et al. (2013) Critical Infrastructure System Security and Resiliency, CRC Press

125) 국가중요시설 지정 및 방호 훈령(국방부 훈령 제 1057호), 제3장 제10호 (자체방호계획)

5.4. 검증

5.4.1. 검증 실험 환경 및 절차

검증 실험을 위해 앞 장에서 선정한 4명의 전문가에게 대상시설(APR1400)의 각 층 평면도와 표 5-3., 표 5-4.에서 가정한 물리적방호 성능 값이 표기된 설문지를 제공하였다. 이해를 돕기 위해 평면도에는 지상층 및 옥상부분의 출입지점과 시설 내부 통행 동선을 표현하였다. 전문가 A, B, C는 대상시설의 설계경험이 있어 쉽게 공간 및 동선 파악이 가능했지만 전문가 D는 대상시설의 설계경험이 없어 주요 동선 및 수직동선(계단실)의 위치를 별도로 추가 설명하였다. 검증실험에 앞서 현 시설의 물리적방호 유효성 값은 0.657이며, 0.9 이상의 유효성을 갖을 수 있도록 물리적방호 강화지점을 선정해 달라고 요청하였다. 강화지점은 1개부터 순차적으로 약 10개 지점까지 누적해서 강화하는 대안을 요청하였고, 이 과정에서 내부 사용자의 이동편의성을 고려한 적절한 강화지점을 도면에 표기하는 방식을 사용하였다. 특히 화재시 대피에 사용되는 계단실 출입구 등은 건축법규 제약사항에 따라 강화지점 대안이 될 수 없음을 설명하였다. 검증 실험에 앞서 진행 과정을 간략히 설명하면 아래와 같다.

- 검증 대상시설의 도면 및 물리적방호 방호 값 설명
- 현재 상태의 물리적방호 유효성 값 및 목표 값 설명
- 물리적방호 유효성 강화 지점 제시 요청 (1개 ~ 10개 지점까지 누적)
- 건축법규에 따른 강화 불가 지점 설명



그림 5-12. 검증실험 환경 및 설문지(도면)

5.4.2. 본 연구 방법론을 통한 분석결과

본 연구에서 제안한 물리적방호 평가, 강화 방법을 적용한 결과, 표 5-6.과 같이 검증 대상시설(APR1400) 핵심구역에 침입할 수 있는 모든 경로는 921개가 탐색되었으며, 가장 취약한 경로의 물리적방호 유효성은 0.657로 도출되었다. 강화 대안지점은 ‘방호성능 강화’ 18개, ‘방호지점 추가’ 12개로 총 30개 지점을 도출할 수 있었다. 표 5-7.과 그림 5-14.와 같이 물리적방호를 강화할 수 있는 최적대안은 Alt-1부터 Alt-4까지 총 4개의 대안을 도출할 수 있었다. Alt-1은 물리적방호 유효성을 기존 0.657에서 0.7599로 15.7% 향상시킬 수 있는 강화안 중 이동편의성 비용이 가장 낮은 대안이다. Alt-2는 물리적방호 유효성을 0.8319로 26.6% 향상시킬 수 있는 대안이다. 또한 Alt-3과 Alt-4는 물리적방호 유효성을 각각 0.8824와 0.9176으로 향상시킬 수 있는 대안으로, 물리적방호 유효성 목표 값이 높을수록 강화 지점이 많아짐에 따라 이동편의성 비용도 늘어나는 것을 확인할 수 있다.¹²⁶⁾

표 5-6. 물리적방호 유효성 분석 결과

전체 침입경로	물리적방호 유효성	강화 대안지점
921개	0.657	30개 지점 ¹²⁷⁾ (방호성능 강화 : 18, 방호지점 추가 : 12)

표 5-7. 물리적방호 최적대안 도출 결과

	물리적방호 유효성	이동편의성 비용	강화 효과
Baseline	0.657	-	-
Alt-1	0.7599	0.2139	15.7% ↑
Alt-2	0.8319	0.5688	26.6% ↑
Alt-3	0.8824	0.5980	34.3% ↑
Alt-4	0.9176	0.7853	39.7% ↑

126) 물리적방호 강화 최적대안 별 강화지점은 첨부 참조.

127) 건축법규(화재시 대피 등)에 따른 강화 불가 지점 및 공간이 비좁아 방호지점을 추가할 수 없는 구역을 제외 (제외 전 강화대안지점 : 총 59개 지점 (방호성능 강화: 41개, 방호지점 추가 18개))

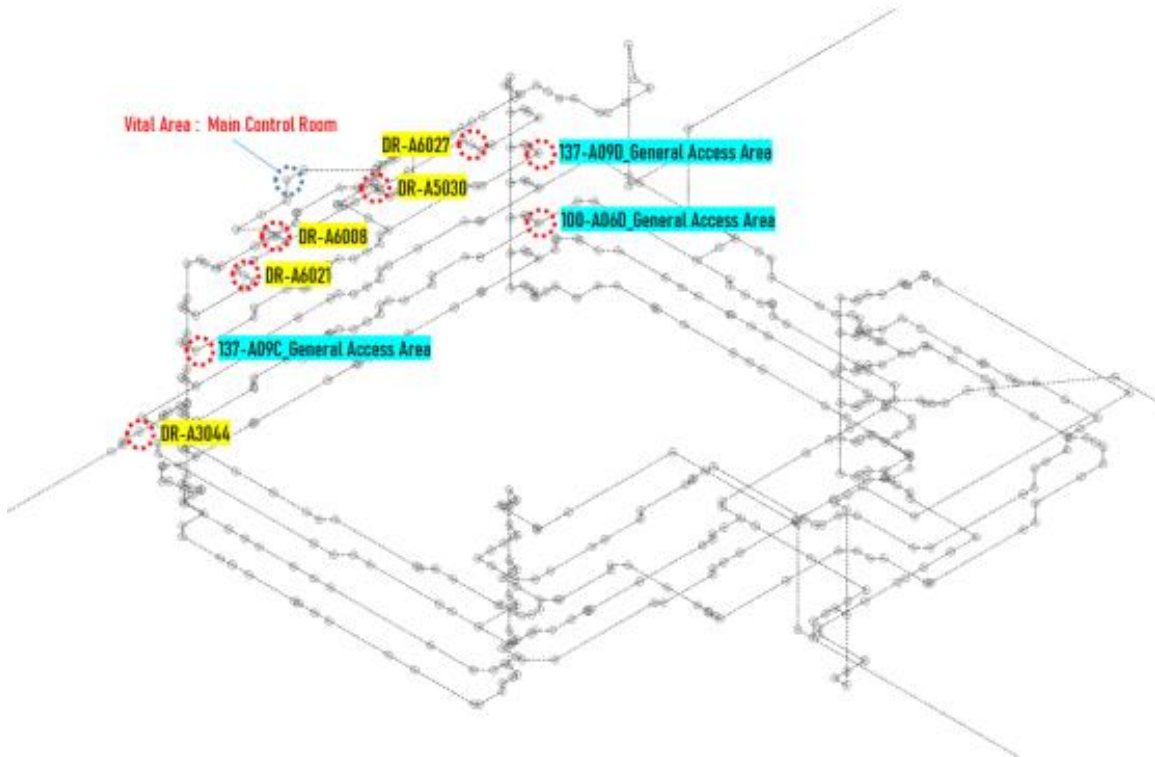


그림 5-13. 최적대안 강화지점 (노랑색 : 방호성능 향상, 파랑색 : 방호지점 추가)

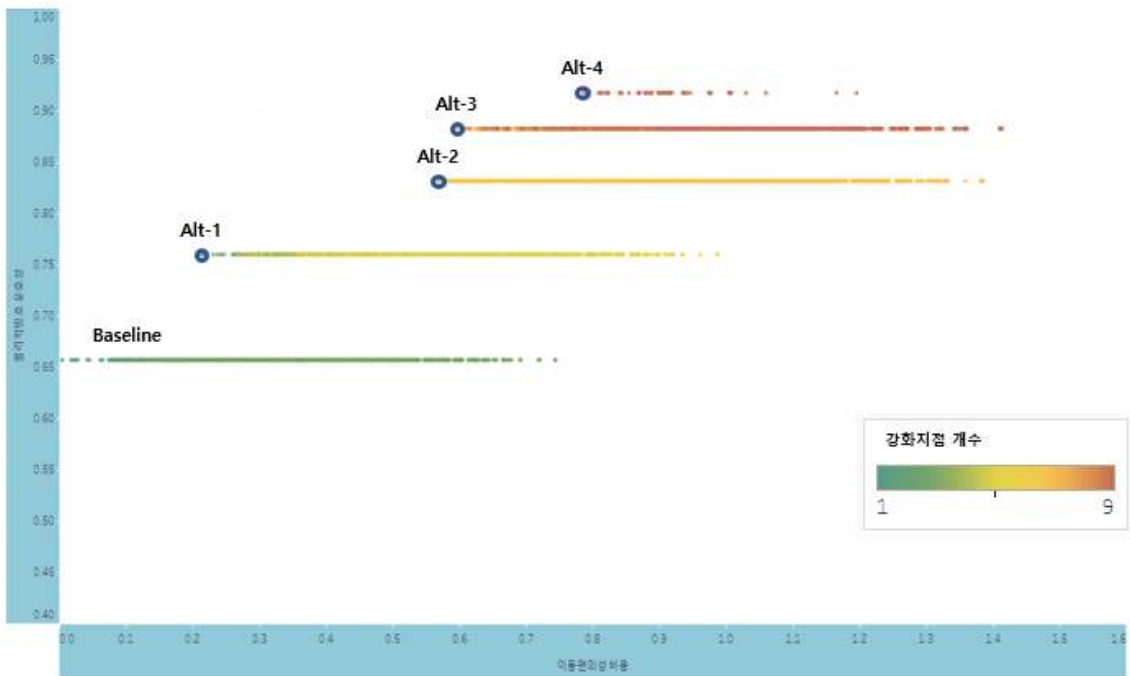


그림 5-14. 이동편의성을 고려한 물리적방호 강화 최적대안 도출

5.4.3. 전문가 분석 결과

(1) 전문가 A

전문가 A의 물리적방호 강화 검증실험 결과는 Appendix 3의 표 A3-2.와 그림 A-2.와 같다. 전문가 A는 검증 시설의 물리적방호 강화를 위해 1개 지점부터 10개 지점까지 강화지점을 선정하였다. 전문가 A는 지상층의 출입문은 보안이 충분하며, 벽을 타고 지상 3층 옥상으로 출입하는 경로가 가장 취약하다고 판단하여 'DR-A5029' 지점을 첫 번째로 강화하는 대안을 선정하였다. 결과적으로 전문가 A는 물리적방호 유효성을 0.7599와 0.8319로 향상시킬 수 있는 대안을 제시하였다.

(2) 전문가 B

전문가 B의 물리적방호 강화 검증실험 결과는 Appendix 3의 표 A3-3.과 그림 A3-3.과 같다. 전문가 B는 검증 시설의 물리적방호 강화를 위해 1개 지점부터 9개 지점까지 강화지점을 선정하였다. 전문가 B는 침입자가 검증대상 시설의 외곽 펜스를 넘어 건물의 가장 가까운 지상층 출입구로 침입하는 경로가 가장 취약하다고 판단하였다. 따라서 지상층 출입구인 'DR-A3008'과 출입구에서 가장 가까운 복도인 '100-A06D_General Access Area'를 첫 번째로 강화하는 대안을 선정하였다. 결과적으로 전문가 B는 물리적방호 유효성을 0.7599와 0.8319로 향상시키는 대안을 제시하였다.

(3) 전문가 C

전문가 C의 물리적방호 강화 검증실험 결과는 Appendix 3의 표 A3-4.와 그림 A3-4.와 같다. 전문가 C는 검증 시설의 물리적방호 강화를 위해 1개 지점부터 8개 지점까지 강화지점을 선정하였다. 전문가 C는 침입자가 검증대상 시설의 외곽 펜스를 넘어 건물 남쪽에 있는 출입구로 진입하는 경로가 가장 취약하다고 판단하였다. 펜스에서 건물 남쪽 출입구까지 이동하는데 소요거리가 북쪽 출입구보다 더 멀긴 하지만 남쪽 출입구로 진입하면 계단실로 바로 출입이 가능하기 때문이다. 따라서 남쪽 출입문인 'DR-A3044'를 첫 번째로 강화하는 대안을 선정하였다. 결과적으로 전문가 C의 8개 강화 대안은 물리적방호 유효성을 0.7599와 0.8319로 향상시킬 수 있다.

(4) 전문가 D

전문가 D의 물리적방호 강화 검증실험 결과는 Appendix 3의 표 A3-5.와 그림 A3-5.와 같다. 전문가 D는 검증 시설의 물리적방호 강화를 위해 1개 지점부터 8개 지점까지 강화지점을 선정하였다. 전문가 D는 전문가 B와 유사하게 검증대상 시설의 외곽 펜스를 넘어 건물의 가장 가까운 지상층 출입구로 침입하는 경로가 가장 취약하다고 판단하였다. 하지만 외곽 출입문은 이미 일정수준의 보안문이 설치되어 있기 때문에 내부 복도에 방호지점을 추가하는 방법을 제안하였다. 따라서 가장 첫 번째 강화해야 하는 지점을 '100-A06D_General Access Area'로 선정하였다. 결과적으로 전문가 D의 8개 강화 대안은 물리적방호 유효성을 0.7599와 0.8319로 향상시킬 수 있다

(5) 종합

종합하면 4명의 전문가를 대상으로 한 물리적방호 강화 검증실험 결과 전문가 A는 옥상을 통해 진입하는 경로가 가장 취약하다고 판단하였고, 전문가 B와 D는 펜스와 가장 가까운 시설의 북쪽 출입문을 통해 침입하는 경로가 가장 취약하다고 판단하였다. 또한 전문가 C는 건물 출입 후 계단실과 가장 가까운 남쪽 출입문을 통한 경로가 가장 취약하다고 판단하였다. 이를 기반으로 각각 8개~10개씩의 지점을 순차적으로 강화하는 안을 제시하였다. 표 5-8.과 같이 네 명의 전문가의 강화 대안을 통해 기존 물리적방호 유효성을 0.657(baseline)에서 0.7599와 0.8319로 향상시킬 수 있었지만 본 연구에서 도출한 0.9 이상의 유효성을 얻을 수는 없었다. 경험에 기반한 정성적인 물리적방호 강화 지점 도출은 어느 정도 이상의 강화 대안을 제시하는데 문제가 없었지만, 심층방호(취약경로의 여러지점을 동시에 강화)를 통해 물리적방호 유효성을 향상시키는 대안을 제시하는데는 한계가 있음을 확인하였다.

또한 물리적방호 강화 대안의 이동편의성 비용 측면에서 보면 본 연구에서 도출한 최적대안이 시설 내부사용자의 이동편의성을 덜 저해하는 대안임을 확인할 수 있다. 그림 5-15.는 본 연구를 통해 얻은 물리적방호 강화 최적대안과 전문가가 제안한 강화 대안의 물리적방호 유효성, 이동편의성 비용을 비교한 그림이다. 전문가 4명의 물리적방호 강화 대안은 물리적방호 유효성을 0.657(baseline)에서 0.7599와 0.8319로 향상시킬 수 있었지만 본 연구에서 제안한 대안보다 이동편의성 비용이 더 높은 대안임을 확인할 수 있다.

표 5-8. 전문가 (A, B, C, D) 물리적방호 강화 지점 검증실험 결과

	물리적방호 유효성	이동편의성 비용	강화 지점							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Baseline	0.657	-								
본 연구	0.7599	0.2139	DR-A6021	DR-A6027						
	0.8319	0.5688	DR-A6021	DR-A6027	100-A06D_General Access Area	DR-A3044				
	0.8824	0.5980	DR-A6021	DR-A6027	100-A06D_General Access Area	DR-A3044	DR-A6008	DR-A5030		
	0.9176	0.785	DR-A6021	DR-A6027	100-A06D_General Access Area	DR-A3044	DR-A6008	DR-A5030	137-A09D_General Access Area	137-A09C_General Access Area
전문가 A	0.7599	0.3087	DR-A5029	DR-A5004	DR-A6027	DR-A6021				
	0.8319	0.6416	DR-A5029	DR-A5004	DR-A6027	DR-A6021	DR-A7032	100-A06D_General Access Area	DR-A3044	
전문가 B	0.7599	0.5944	DR-A3008	100-A06D_General Access Area	DR-A3015	DR-A3044				
	0.8319	0.8653	DR-A3008	100-A06D_General Access Area	DR-A3015	DR-A3044	DR-A5029	DR-A6027	DR-A6021	
전문가 C	0.7599	0.3262	DR-A3044	100-A06D_General Access Area						
	0.8319	0.6048	DR-A3044	100-A06D_General Access Area	157-A17C_Corridor	157-A16D_Corridor	DR-A6021			
전문가 D	0.7599	0.3351	100-A06D_General Access Area	DR-A3068	DR-A3052					
	0.8319	0.8572	100-A06D_General Access Area	DR-A3068	DR-A3052	137-A09D_General Access Area	DR-A5005	137-A09C_General Access Area	DR-A6027	DR-A6021

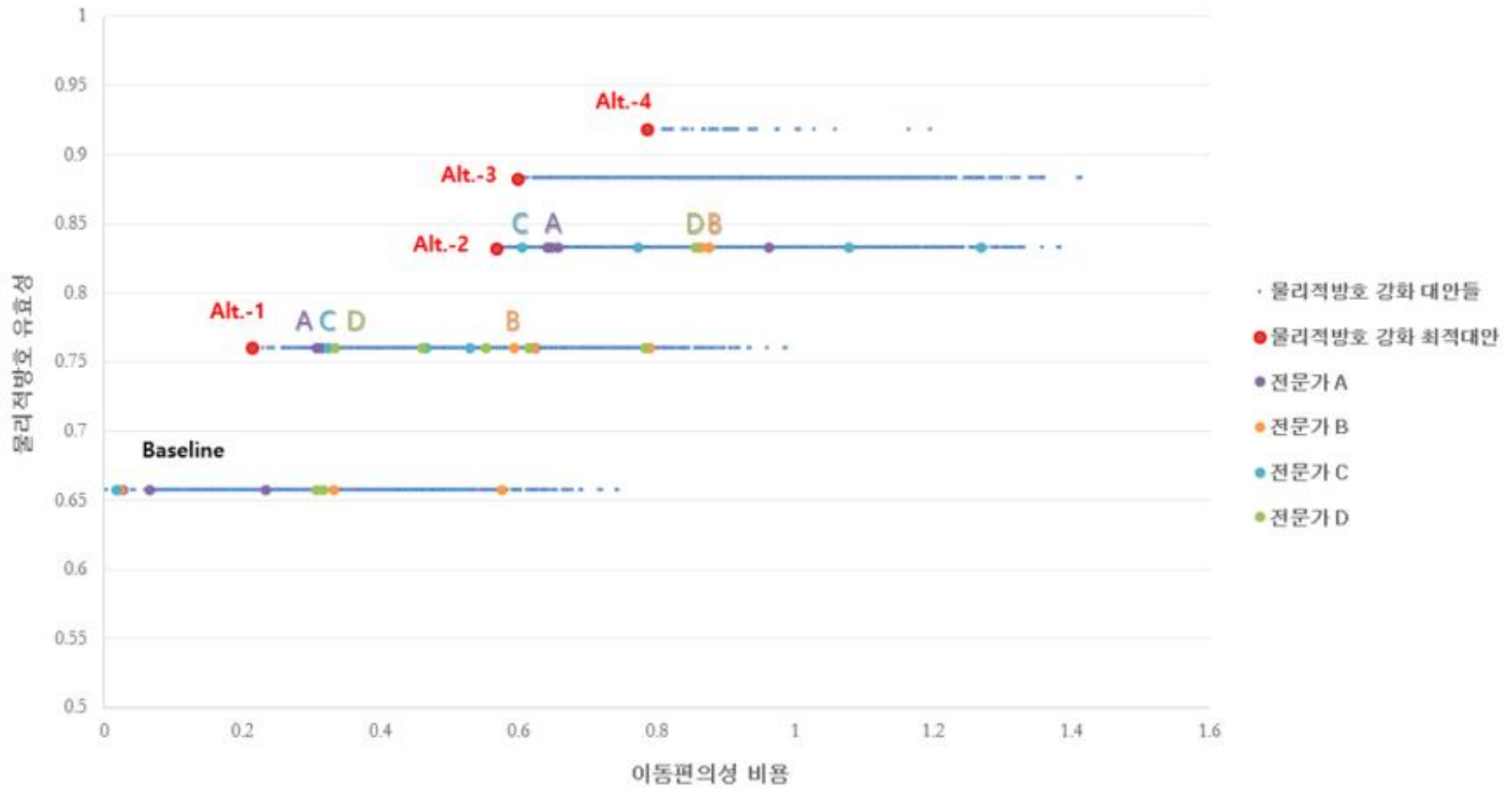


그림 5-15. 물리적방호 강화 최적대안(본 연구) vs 전문가 실험 결과

5.5. 결과 분석

본 연구에서 제안한 물리적방호 강화 방법을 적용한 결과와 전문가 4명의 물리적방호 강화 대안을 비교한 결과는 표 5-9.와 그림 5-16.과 같다. 목표별로 살펴보면, 기존 물리적방호 유효성을 0.657에서 0.7599로 향상시키기 위해 본 연구에서 제안한 최적대안은 0.2139의 이동편의성 비용이 소요되는데 반해 전문가의 대안은 0.3088부터 0.5944까지 다양했다. 또한 0.8319까지 향상시키기 위한 대안으로 본 연구는 0.5688의 비용이 소요되는데 반해 전문가들의 대안은 0.6048부터 0.8653까지 다양했다. 즉 본 연구에서 제안한 물리적방호 강화 대안이 시설 내부 사용자의 이동편의성 저해를 최소화하는 대안이라는 것을 알 수 있다.

표 5-9. 물리적방호 유효성 목표에 따른 이동편의성 비용

물리적방호 유효성 목표	이동편의성 비용				
	본 연구	전문가 A	전문가 B	전문가 C	전문가 D
0.7599	0.2139	0.3088	0.5944	0.3262	0.3350
0.8319	0.5688	0.6416	0.8653	0.6048	0.8572
0.8824	0.5980	제시 못함	제시 못함	제시 못함	제시 못함
0.9176	0.7853	제시 못함	제시 못함	제시 못함	제시 못함

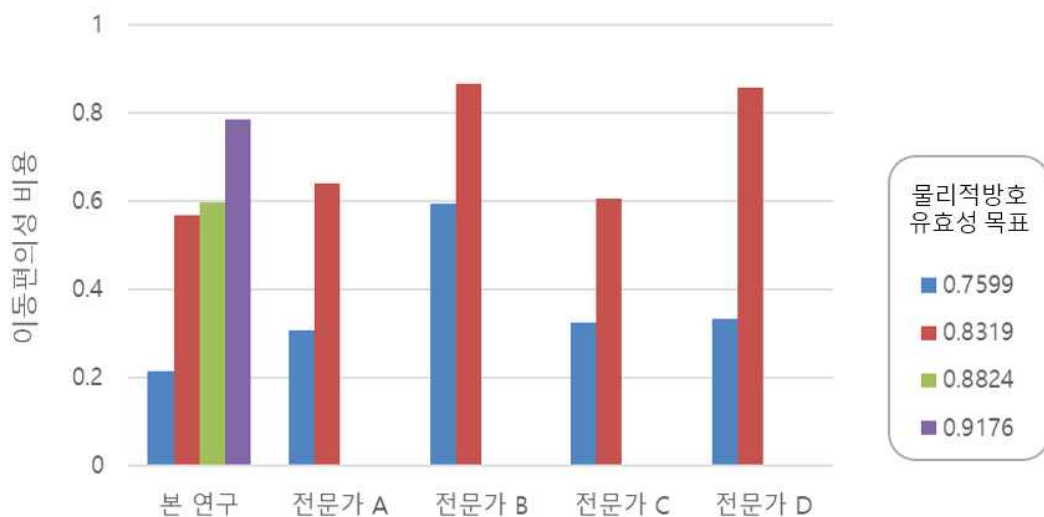


그림 5-16. 물리적방호 유효성 목표에 따른 전문가별 이동편의성 비용

또한 본 연구에서 제안한 방법을 통해 물리적방호 유효성을 0.8824, 0.9176으로 향상시키는 대안을 찾을 수 있었지만, 전문가의 대안은 물리적방호 유효성 0.8824 이상의 대안을 제시할 수 없었다. 이는 검증대상으로 선정된 원자력발전소 (APR1400)이 다양한 출입구와 수직동선을 포함하는 대규모 시설이기 때문에 짧은 시간 내에 경험에 기초한 정성적인 설계방법으로 일정수준 이상의 물리적방호 유효성 도출에는 한계가 있는 것으로 파악되었다.

결과적으로 전문가 검증 실험결과 5.1.3.장에서 가정한 세 번째(검증결과 C) 결과에 해당된다. 본 연구에서 도출한 물리적방호 강화 최적대안이 전문가 검증실험 결과보다 물리적방호 유효성 및 이동편의성 비용 측면에서 더 나은 대안을 제시할 수 있었다. 즉, 본 연구에서 제안한 방법을 사용하면 설계 초기에 물리적방호 유효성 측면과 이동편의성 비용 측면에서 모두 더 나은 물리적방호 강화지점을 제안할 수 있다는 것을 의미한다.

제 6 장 결 론

6.1. 연구의 요약

6.2. 연구의 의의 및 한계

6.2.1. 연구의 의의

6.2.2. 연구의 한계

6.1. 연구의 요약

본 연구는 국가중요시설 중 건축시설을 대상으로, 다층의 복잡한 실내로 구성된 공간특성과 내부사용자가 많은 사용특성을 고려한 물리적방호 평가·강화 방법을 제안하는데 목적이 있다.

선행연구 분석을 통해 기존의 방법들은 시설을 다이어그램이나 그리드로 단순화하여 정확한 분석에 한계가 있다는 점을 확인하였다. 복잡한 공간을 정확히 재현하지 못하고, 몇가지 침입경로를 가정하기 때문에 예상하지 못한 침입경로를 분석에서 누락할 가능성 있기 때문이다. 또한 내부사용자의 이동편의성을 고려한 강화 지점을 제안하지 못하였다. 따라서 본 연구는 공간 네트워크를 활용하여 시설의 물리적방호를 평가하고 강화 지점을 찾아내는 방법을 제안하였다.

3장에서 물리적방호를 정량적으로 평가하는 EASI 모델을 활용하여 건축계획 측면에서 시설의 물리적방호 강화 방법(방호성능 향상, 방호지점 추가)을 제안하였다. 이를 기반으로 공간 네트워크는 방호성능 향상과 방호지점 추가를 고려할 수 있는 노드가 필요하였다. 따라서 문(door)노드와 실(room)노드로 노드를 구성하고, 침입자의 이동을 가장 잘 재현할 수 있는 Medial axis 방법을 사용하여 엣지를 구성하였다. 이렇게 구현된 공간 네트워크를 활용하여 침입자가 목표구역에 접근할 수 있는 모든 가능 경로를 탐색하여 EASI 모델을 활용한 물리적방호 유효성 도출 방법을 제안하였다. 이후, 이동편의성을 고려한 물리적방호 강화 방법을 제안하였다. 이동편의성은 내부사용자의 업무생산성, 비상시 통행, 장애인 통행 등에 중요한 요인이다. 국가중요시설인 원자력발전소 운전원을 대상으로 한 설문에서 물리적방호 강화는 이동편의성 저하에 영향을 끼치며, 이동편의성을 저해하지 않는 지점의 물리적방호 강화를 고려해야 한다는 결과를 얻었다. 따라서 본 연구에서 내부사용자의 이동편의성을 저해하지 않으면서 물리적방호 강화 최적 지점을 도출하기 위해 사이중앙성(Betweenness centrality)을 이동편의성을 나타낼 수 있는 지표로 선정하였다. 물리적방호 유효성과 이동편의성 비용을 고려하여 내부사용자의 이동편의성을 최대한 저해하지 않으면서 물리적방호 유효성을 향상시킬 수 있는 최적대안 도출 방법을 제안하였다.

4장에서는 3장에서 제안한 물리적방호 평가, 강화 방법을 구현할 수 있는 시스템을 개발하고 시뮬레이션을 수행하였다. BIM을 기반으로 설계 단계에서 활용할 수 있는 시스템으로 기능에 따라 Module 1.(공간 네트워크 구축 및 방호속성 추

출), Module 2.(전 경로 물리적방호 유효성 분석), Module 3.(이동편의성 기반 물리적방호 강화 최적대안 도출)으로 구성하였다. 또한 시범 시설을 선정하여 본 연구에서 제안한 물리적방호 평가, 강화 방법과 개발한 시스템 검증을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 3층 규모의 건축시설을 대상으로 물리적방호를 분석하여 총 45개의 침입경로를 탐색하였고, 33개의 강화 대안지점을 도출하였다. 도출한 지점들의 강화 조합을 1개에서부터 7개까지 구성하여 모든 조합의 물리적방호 유효성과 이동편의성 비용을 분석하였다. 결과적으로 11개의 물리적방호 최적대안을 도출할 수 있었다.

5장에서는 본 연구에서 제안한 물리적방호 평가·강화 방법을 검증하였다. 검증을 위해 국가중요시설 중 전력시설 ‘가’급에 해당하는 원자력발전소를 검증대상으로 선정하였다. 또한 원자력발전소 건축설계 및 방호설계 경험이 있는 4명의 전문가를 대상으로, 내부사용자의 이동편의성을 고려한 물리적방호 강화 지점 선정 실험을 수행하였다. 4명의 전문가 실험 결과와 본 연구에서 제안한 물리적방호 강화 최적대안을 물리적방호 유효성 및 이동편의성 비용 측면에서 비교하였다. 결과적으로 본 연구에서 제안한 물리적방호 평가·강화 방법이 전문가의 정성적인 방법보다 더 나은 대안을 제시할 수 있음을 확인하였다.

결론적으로 본 연구는 물리적방호 체계를 갖추어야 하는 시설을 대상으로 이동편의성을 저해하지 않기 위해 어떤 곳을 강화해야 하는지에 대한 대안을 찾는 것이다. 검증과정을 통해 제안한 방법의 유효함을 확인할 수 있었으며, 더 나아가 본 연구를 기반으로 국가중요시설에 대한 물리적방호 체계의 정량적 설계 및 평가, 강화 과정에 활용이 가능하리라 생각한다.

6.2. 연구의 의의 및 한계

6.2.1. 연구의 의의

기존의 국가중요시설에 대한 물리적방호는 경비시스템과 인력운영에 초점이 맞춰져 있었다. 또한 시설 특성을 반영한 정량적인 물리적방호 평가와 설계에 한계가 있었다. 본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 건축설계 초기단계에서부터 외부 침입과 내부사용자의 사용성을 고려한 강화 최적지점을 찾아내고 정량적인 개선 효과를 제시할 수 있는 방법을 제안하였다. 특히 물리적방호 평가 시 기존의 연구들에서 한계로 제기되었던 공간의 왜곡과 침입경로 누락의 문제를 해결하였다. 또한 물리적방호 강화로 인해 저해되는 내부사용자의 이동편의성을 최소화하기 위해 이동편의성 비용과 물리적방호 유효성을 고려한 최적의 강화 지점도출 방법을 제안하였다.

또한 시설의 건축 설계단계에서 활용성 높이기 위해 BIM 모델을 기반으로 앞에서 제안한 물리적방호 평가·강화 시스템을 구현하였고, 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 유효함을 확인할 수 있었다. 특히 검증과정을 통해 본 연구에서 제안한 물리적방호 강화 방법이 이전의 방식(traditional)으로 물리적방호를 고려하였을 때보다 물리적방호 유효성과 이동편의성 비용 측면에서 우월한 대안을 제시할 수 있음을 확인하였다. 결론적으로, 본 연구에서 제안한 물리적방호 평가, 강화 방법과 개발한 시스템을 통해 국가중요시설의 설계 초기단계에서 보다 체계적인 방법으로 물리적방호 체계 설계가 가능하리라 예상한다.

6.2.2. 연구의 한계

본 연구에서 공간 네트워크를 기반으로 시설을 재현하고 모든 침입경로를 탐색하여 EASI 모델을 활용한 물리적방호 유효성을 평가하는 방법을 제안하였다. 또한 내부사용자의 이동편의성을 최대한 저해하지 않는 물리적방호 강화 최적대안 도출 방법을 제안하였다. 하지만 본 연구에서 제안한 물리적방호 평가·강화 방법에 ‘내부자 위협’, ‘시설 적용의 범용성’, ‘탐지, 지연, 대응 요소의 복합적 고려’ 측면에서 한계가 존재한다.

첫 번째, 본 연구는 국가중요시설에 대한 외부침입을 고려하였지만 시설 내부자의 협조 또는 내부자의 위협을 고려하지 않았다. 국외 사례를 살펴보면 테러리스트와 내부자의 공모, 또는 내부 사용자의 핵심구역 침입 등도 높은 수준의 위협으로 간주된다. 이는 종교, 인종 갈등, 갑작스런 해고 등이 대표적인 원인으로 꼽힌다. 하지만 국내의 경우 종교나 인종 갈등으로부터 안정적이고, 국가중요시설을 운영하거나 사용하는 내부사용자의 직업 안정성이 높다고 평가되어, 국내의 경우 내부 위협에 대한 발생 가능성이 크지 않다고 평가된다.

두 번째, 국가중요시설 중 건축시설을 연구의 대상으로 삼았는데, 본 연구의 방법이 모든 시설에 통용되기엔 한계가 있을 수 있다. 일부 정부청사는 민원인과 내부 직원이 사용하는 공간이 혼재되어 있고, 법원시설은 내부사용자와 외부 민원인의 동선과 공간이 분리되어 있지만, 일부 구역에선 접점이 발생하기도 한다. 동일한 이유로, 본 연구 검증과정에서 선정된 원자력발전소의 시설 특성이 모든 국가중요시설의 건축시설 특성을 대변하기엔 무리가 있다.

세 번째, 물리적방호 체계는 ‘탐지’, ‘지연’, ‘대응’ 3가지 요소가 복합적으로 작용하지만, 본 연구에서는 ‘지연’과 일부 ‘탐지’ 요소를 중점으로 고려하였다. 이는 본 연구가 설계 초기단계에서 외부 침입에 대한 고려와 내부사용자의 사용성을 고려한 강화 최적지점을 찾아내는 방법과 시스템 개발을 목적으로 하고 있기 때문이다. 특히 ‘대응’요소는 시설이 설계와 시공이 완료된 후 운영과정에서 대응 계획이 수립되기 때문에 본 연구에서 고려하기엔 한계가 있었다.

마지막으로, 검증과정에서 원자력발전소 및 화력발전소 건축설계 및 방호계획 전문가만을 대상으로 검증실험을 거쳤다는 점이다. 실제 국가중요시설을 운영하는 운영자 또는 보안분야 컨설팅 전문가의 실험이 보완되었다면 더 신뢰도 높은 결과를 보여줄 수 있다. 이는 원자력발전소 설계자료의 보안 문제 등으로 검증 대상을 관계자로 최소화하였기 때문이다.

참 고 문 헌

관련 논문

- 신재섭, 최재필 (2022). 이동편의성을 고려한 건축시설의 물리적방호 체계 강화방법 제안, 대한건축학회논문집, 38(1), 47-57
- 신재섭, 최재필 (2021). BIM기반 3차원 네트워크를 활용한 건축물의 물리적방호 체계 정량적 평가시스템 개발, 대한건축학회논문집, 37(6), 65-74

학술논문

- Aisan Kazerani, Stephan Winter (2009). Can Betweenness Centrality Explain Traffic Flow?, 12th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2009
- D.Andiwidayakusuma, A.Mardhi, I.Savitri, T.Asmoro (2019). A Comparative Study of the Algorithms for Path finding to Determine the Adversary Path in Physical Protection System of Nuclear Facilities, IOP Conf. Series: Journal of Physics 1198
- Dejan Cakija, Zeljko Ban, Marin Golub, Dino Cakija (2020). Optimizing physical protection system using domain experienced exploration method, Automatika, 61(2), 207-218
- Hisham Said, Khaled El-Rayes (2010). Optimizing the planning of construction site security for critical infrastructure projects, Automation in Construction, 19, 221-234
- Jin-kook Lee, Charles M Eastman, Jaemin Lee, Matti Kannala, Yeon-suk Jeong (2010). Environment and Planning B: Planning and Design 2010, volume 37, 628-645
- Jung yang, Jung Wang, Guanxiang Wei, Ming Yang, Hongxing Lu (2019). An adaptive probabilistic mapping matrix search algorithm for vulnerability analysis of PPS, Annals of Nuclear Energy, 131
- Lanjun Luo, Chao Qi (2022). The Tendency of Terrorist Organizations to Explosive Attacks: An Institutional Theory Perspective, Terrorism Organization Isomorphism, 13
- Liping Yang, Michael F.Worboys (2015). Generation of navigation graphs for indoor space, International Journal of Geographical Information Science

(IJGIS), May 2015

- Matteo Riondato, Evgenios M. Kornaropoulos (2015). Fast approximation of betweenness centrality through sampling, *Data Mining and Knowledge Discovery*, 30, 438-475
- Meiqing Fu, Rui Liu, Bing Qi, Raja R. Issa (2020). Generating straight skeleton-based navigation networks with Industry Foundation Classes for indoor way-finding, *Automation in Construction* 112
- O.D.Oyeyinka, L.A.Dim, M.C.Echeta, A.O. Kuye (2014). Determination of System Effectiveness for Physical Protection Systems of a Nuclear Energy Center, *Science and Technology*, 4(2), 9-16
- Reza Zafarani, Mohammad Ali Abbasi, Huan Liu (2014). *Social Media Mining: An Introduction*, Cambridge University
- Sam Niu, Yu Lu, Al Savvaris, Antonios Tsourdos (2018). An energy-efficient path planning algorithm for unmanned surface vehicles, *Ocean Engineering*. 161
- Saurabh Taneja, Burcu Akinci, James H.Garrett Jr., Lucio Soibelman (2016). Algorithms for automated generation of navigation models from building information models to support indoor map-matching, *Automation in Construction*, 61
- Stuart Porter, Terence Tan, Tele Tan, Geoff West (2014). Breaking into BIM: Performing static and dynamic security analysis with the aid of BIM, *Automation in Construction*, 40
- Sung Soon Jang, Hosik Yoo (2007). The Vulnerability Assessment Code for Physical Protection System, *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*
- Sung Soon Jang, Sung-woo Kwak, Hosik Yoo, Jung-soo Kim, Wan Ki Yoon (2009). Development of a Vulnerability Assessment Code for a Physical Protection System: Systematic Analysis of Physical Protection Effectiveness (SAPE), *Nuclear Engineering and Technology*, 41(5)
- Tang Dan, Yin Xiandong, Fang Ni, Guo Cao (2002). Physical Protection System and Vulnerability Analysis Program in China, 8th ISODARCO Conference on Arms Control
- Tavares, R.L., Fiel, J.C.B (2019). Vulnerability Analysis of Physical Protection System of a nuclear installation using path analysis, *Brazilian Journal of*

Radiation Science, 7(3)

- Will Y. Lin, Pao H. Lin (2018). Intelligent generation of indoor topology (i-GIT) for human indoor pathfinding based on IFC models and 3D GIS technology, Automation in Construction, 94
- W. R. Quadros, B. Gurumoorthy, K. Ramaswami, F. B. Prinz (2001). Skeletons for Representation and Reasoning in Engineering Applications, Engineering with Computers (2001) 17
- Yelena McLane (2015). Choreographing collaborative academic experiences: The 'quiet building' and the 'airport lounge', Proceedings of the 10th International Space Syntax Symposium
- Zdenek Vintř, Michal Vintř, Jindřich Malach (2012). 2012 IEEE International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST)
- Zhongbei Li, Xiangchun Li, Chen Dong, Fanfan Guo, Fan Zhang, Qi Zhang (2021). Quantitative Analysis of Global Terrorist Attacks Based on the Global Terrorism Database, Sustainability, 13
- Zou Bowen, Yang Ming, Yoshikawa Hidekazu, Lu Hongxing (2017). Evaluation of Physical Protection Systems Using an Integrated Platform for Analysis and Design, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: System, 47(11)
- 강경연, 박소연, 이경훈 (2019). 다중이용시설에서의 폭발물테러예방설계에 대한 건축설계 실무자 의식 조사, 한국셈테드학회지, 10(1), 137-168
- 강경연, 박소연, 허홍, 이경훈 (2018). 다중이용시설의 폭발물 테러위험도 평가를 위한 건축계획요소 체계화 연구, 대한건축학회 계획계, 34(7), 47-57
- 강연욱, 백인선 (2019). 국내 원자력시설 물리적방호 시스템의 취약성평가를 위한 시뮬레이션 방법 및 절차, 대한산업공학회 춘계공동학술대회 논문집, 1094-1116
- 김민석, 김영우 (2014). 북항대교 건립 전후 부산지역 도시공간구조 변화에 관한 연구 - 도시가로망의 교통효율 예측을 중심으로, 대한건축학회논문집, 30(5), 203-210
- 김종천 (2016). 원자력발전소시설의 전주기적인 물리적방호 규제체계 정립을 위한 법제 개선 방안, 법학논문지, 30(3)
- 권지훈 (2010). 옥외공간의 가시 네트워크 분석기법 연구 . 대한건축학회지회연합회 논문집, 12(3), 169-178.
- 나석중, 성하얀, 최선희 (2019). 국가기반시설 물리적 방호체계 운영개념 및 설계방법 개선방안 연구: 원자력발전소를 중심으로, 한국경호경비학회, 61, 9-38

- 박성진, 백두권 (1997). 다측면 유전자 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 최적화 기법, 한국 시뮬레이션학회 논문지, 6(1), 71-84
- 박찬호, 박진경, 오지영, 송승언, 김석태 (2011). 대학 캠퍼스의 공간구조와 보행량의 상관관계에 영향을 미치는 환경 요인 분석에 관한 연구 -부산광역시 소재 캠퍼스를 중심으로, Journal of Digital Interaction Design 10(1), 94-105
- 서장훈, 장성순, 유효식 (2016). 시설 모델링 방식에 따른 물리적방호 취약성 평가 프로그램 분석, 한국방재학회, 15(5)
- 소명퇴, 신동익, 신규식 (2015). 일반화된 보로노이 다이어그램을 이용한 논홀로노믹 모바일 로봇의 자율 주행, 한국생산제조시스템학회지, 24(1)
- 신두식, 조태호, 전영훈 (2019). 사회-공간 네트워크 분석을 활용한 학교설계 사용자 참여디자인 방향에 관한 연구 - 서울시 중, 고등학교 사례를 중심으로, 대한건축학회논문집, 35(10), 19-30
- 신재섭 (2015). 시뮬레이션 기반 물리적 방호 설계 소프트웨어에 대한 통합적 고찰 - 원자력발전소 적용을 중심으로, 2013 한국안전학회 추계학술대회
- 신재섭 (2018). 원자력발전소의 형상관리를 위한 실(Room)기반 데이터베이스 구축에 관한 연구, 한국건설관리학회 논문집, 19(6), 34-45
- 신재섭, 최재필 (2019). BIM기반 Algorithm을 활용한 APR1400 설계기준 통합관리 체계 구축, 한국건설관리학회 논문집, 20(5), 52-60
- 신재섭 (2019). Algorithm-Aided BIM 기반 원전 3차원 설계기준 관리시스템 개발, 한국건설관리학회 논문집, 20(2), 28-36
- 신재섭, 최재필 (2021). BIM기반 3차원 네트워크를 활용한 건축물의 물리적방호 체계 정량적 평가시스템 개발, 대한건축학회논문집, 37(6), 65-74
- 신재섭, 최재필 (2022). 이동편의성을 고려한 건축시설의 물리적방호 체계 강화방법 제안, 대한건축학회논문집, 38(1), 47-57
- 신형석 (2019). 정부청사의 효율적 방호·보안관리를 위한 법령체계 정비방안에 대한 소고, 한국경호경비학회 61, 39-57
- 장성진, 김영현, 신승철 (2017). 한국의 테러환경과 위기관리 방안, 한국경호경비학회, 제 52호, 73-91
- 유효식 (2008). 원자력시설에 대한 위험도평가를 위한 위험 시나리오 개발, 한국방재학회, 8(2), 60-65
- 윤대현, 변서희, 정창훈 (2020). 국가중요시설 물리적 보안 조직 보안수준 평가지표 개발, 한국정책학회, 2020
- 윤대현, 변서희, 서우중, 정창훈 (2021). 국가중요시설의 물리적 보안 조직에 대한 보안수준물리적 방호 평가지표 개발, 한국산업보안연구학회, 11(1)

- 윤철재, 민건희 (2014). 네트워크 구조의 물리적 거리 개념을 도입한 보향량 예측모델에 관한 연구, 한국도시설계학회지, 15(5), 173-182
- 이민형, 이정훈 (2015). 국가중요시설의 물리적 보안 요인 분석-항만보안을 중심으로-, 한국융합보안학회, 16(6-1)
- 이상은, 최재필 (2002). 공간구문론(Space Syntax)을 이용한 조선시대 안동지역 상류주택 공간배치 분석, 대한건축학회 논문집, 18(10), 123-180
- 정태황 (2011). 국가중요시설 안전관리 강화방안 -공공기관을 중심으로-, 한국치안행정 논집, 8(1), 93-110

학위논문

- Dora Erdos (2008). CENTRALITY MEASURES AND ANALYZING DOT-PRODUCT GRAPHS [Doctor's thesis, Boston University]
- Sigit Santosa (2009). Indoor Centrality [Master's thesis, University of Melbourne]
- Yanuar Ady Setiawan (2018). Adversary path analysis of a physical protection system design using a stochastic approach [Master's thesis, Texas A & M University]
- 김경태 (2016). 네트워크 중심성 지표를 활용한 서울시 도로 네트워크 강건성 분석 [석사학위논문, 서울시립대학교]
- 김진오 (2019). 국가중요시설의 물리보안 실태 및 개선방안: 화력발전소를 중심으로 [박사학위논문, 용인대학교]
- 나석중 (2020). 국가기반시설 외곽보안체계 통합설계 및 성능검증 개선방안 연구 [석사학위논문, 고려대학교]
- 박근송 (2018). 도시 공간분석을 위한 사회·물리적 공간 네트워크 모형 개발: 공간구문론과 위치 기반 소셜 네트워크 빅 데이터를 중심으로 [박사학위논문, 서울대학교]
- 박소영 (2012) 직선 중심축 추출을 이용한 위상학적 모델 자동 추출 알고리즘 개발 [석사학위논문, 서울시립대학교]
- 박창규 (2013) 국가중요시설 방호제도의 문제점과 개선방안: 방호직 공무원을 중심으로 [석사학위논문, 동국대학교]
- 변나향 (2014) 아파트단지과 단위세대 평면에서 나타나는 공간구조의 유전적 속성 [박사학위논문, 서울대학교]
- 우태호 (2013). 원자력발전소의 물리적 방호에 관한 연구 [박사학위논문, 서울대학교]
- 정태황 (2012). 건축시설의 물리적 보안수준 평가모델 개발에 관한 연구 [박사학위논문, 전북대학교]

- 조형규 (2005) 공간구조 분석을 위한 각도가중 ERAM 모델의 구축 및 적용 [박사학위논문, 서울대학교]
- 최성필 (2019). 수직·수평 연결 네트워크 공간분석을 위한 보행에너지 가중 Visibility ERAM 모델 구축 및 적용 [박사학위논문, 서울대학교]
- 최연준 (2018). 국가중요시설의 물리보안 수준과 보안정책 준수여지가 보안성과에 미치는 영향 [박사학위논문, 경기대학교]

단행본

- Betty E. Biringer, Rudolph V. Matalucci, Sharon L. O'Connor (2007). Security Risk Assessment and Management, Wiley & Sons, Inc
- Betty E. Biringer, Eric Vugrin, Drake Warren (2013). Critical Infrastructure System Security and Resiliency, CRC Press
- Hillier, B., & Hanson, J. (1984). The social logic of space, Cambridge University Press.
- Joseph A. Demkin, AIA (2003). Security Planning and Design: A Guide for Architects and Building Design Professionals, Wiley & Sons, Inc
- Lawrence J. Fennelly (1992). Effective Physical Security: Design, Equipment, and Operations, Butterworth-Heinemann
- Malcolm Nance (2008). Terrorist Recognition Handbook, 2nd Edition, CRC Press
- Mary Lynn Garcia (2007). Design and Evaluation of Physical Protection Systems, Butterworth-Heinemann
- NCPA (2001). National Policy Analysis #374: Terrorism and Nuclear Power: What are the Risks?, The National Center for Public Policy Research (NCPA), Washington D.C.
- Parliamentary Office of Science and Technology (2004). Assessing the risk of terrorist attacks on nuclear facilities
- Rafael Sacks, Chuck Eastman, Ghang Lee, Paul Teicholz (2018). BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Constructors, and Facility Managers (3rd Edition), Wiley
- Stephanie Smith (2007). The Interagency Security Committee and Security Standards for Federal Buildings, CRS Report for Congress
- Thomas L. Norman (2015). Risk Analysis and Security Countermeasure Selection 2nd Edition, CRC Press
- 박성현(2007), 회귀분석, 민영사

공창영 (2015). 국가기반시설과 국가중요시설 위협관리 및 방호 대책, 기문당

웹사이트

CGAL - <https://doc.cgal.org/>

Critical Intervention Service - <https://www.cisworldservices.org/>

The Dynamo Primer - <https://primer.dynamobim.org/>

UCL Space Syntax - <https://www.spacesyntax.online/term/choice/>

Networkx - <https://networkx.org/>

IAEA ARIS(Advanced Reactors Information System) - <https://aris.iaea.org/>

GAO - <https://www.gao.gov/assets/700/699547.pdf>

기타

APR1400 물리적방호 설계체계 구축 과제 (2012-2015, 한국에너지기술평가원)

Bennett, H.A. (1977). EASI approach to physical security evaluation, Sandia Labs., Albuquerque, N.Mex. (USA), SAND-76-0500

NCPA (2001). National Policy Analysis #374: Terrorism and Nuclear Power: What are the Risks?, The National Center for Public Policy Research (NCPA), Washington D.C.

U.S. Department of Justice (1995). Vulnerability Assessment of Federal Facilities

GSA (1993). Facilities Standards for the Public Buildings Service (PBS-PQ100.1)

10CFR73 「Physical Protection of Plants and Materials」, NRC

「국가중요시설 지정 및 방호 훈령」 (국방부훈령 제1057호)

「원자력시설 등의 방호 및 방사능 방재 대책법」 (법률 제17639호, 2020.12.8.)

「원자력시설 등의 방호 및 방사능 방재 대책법 시행령」 (대통령령 제31380호, 2021.1.5.)

(특허 10-2009-0052429) 장성순, 곽성우. 타일맵을 이용한 물리적 방호 시스템의 유효성 평가 방법

Appendix

Appendix 1. 사이중앙성, 통행량 상관관계 분석 결과

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

Appendix 3. 물리적방호 최적대안 및 전문가 검증실험 결과

Appendix 1. 사이중앙성, 통행량 상관관계 분석 결과

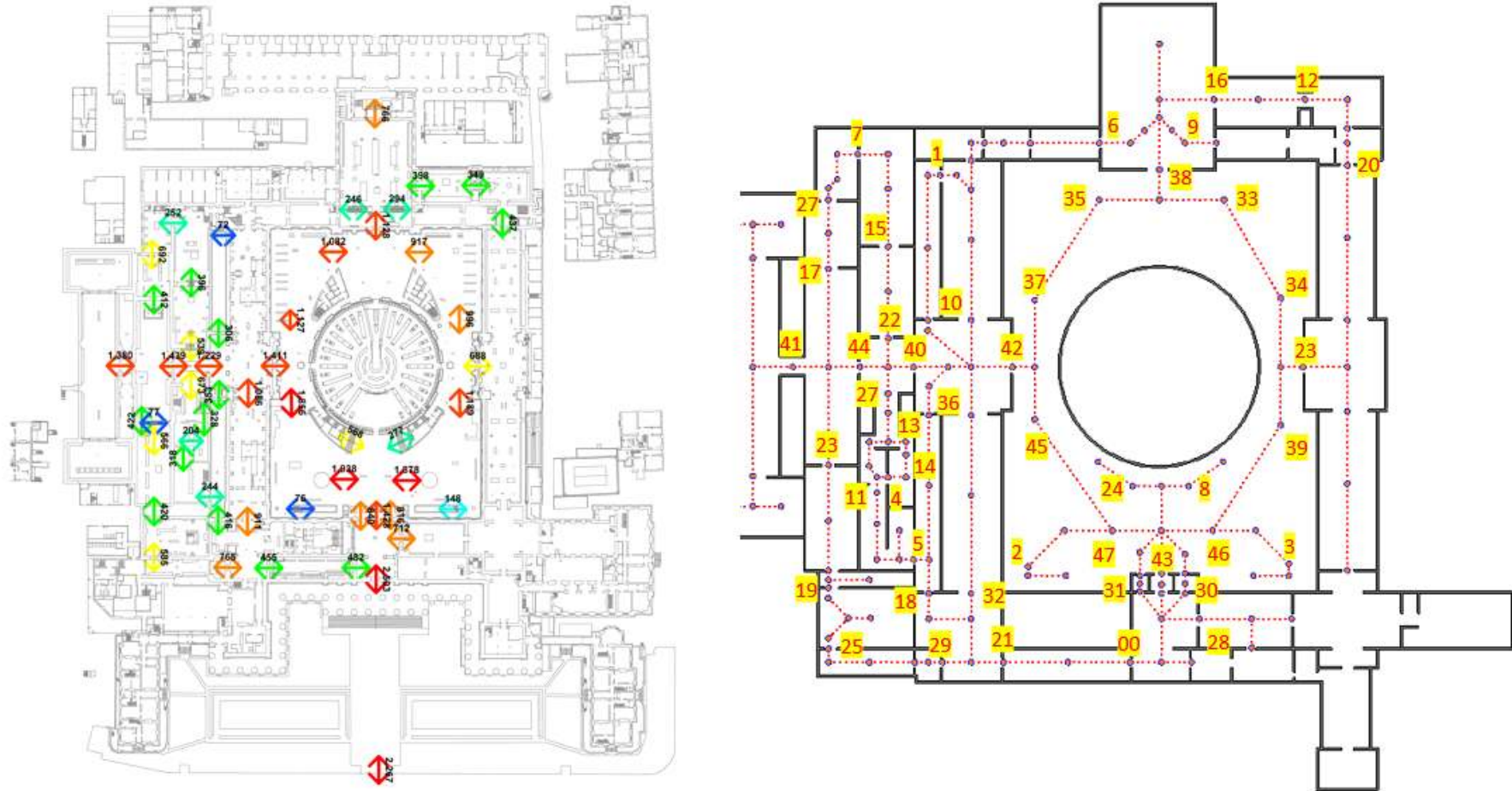


그림 A1-1. British museum 통행량 자료 (<https://spacesyntax.com/project/british-museum/>) 및 사이중앙성 측정 지점

Appendix 1. 사이중앙성, 통행량 상관관계 분석 결과

표 A1-1. 지점별 British Museum 통행량(Maximo Martinez, 2004), 사이중앙성 값 비교 (지점의 자세한 위치는 Appendix 1. 그림 A1-1 참조)

지점	통행량	사이중앙성	지점	통행량	사이중앙성
1	72	0.0091	25	585	0.0569
2	76	0.0129	26	673	0.1129
3	148	0.0129	27	692	0.0320
4	204	0.0075	28	712	0.0382
5	244	0.0545	29	765	0.0876
6	246	0.0379	30	816	0.0154
7	252	0.0137	31	840	0.0157
8	277	0.0129	32	911	0.0463
9	294	0.0256	33	917	0.0515
10	306	0.0216	34	996	0.0478
11	318	0.0381	35	1082	0.1129
12	349	0.0394	36	1086	0.0559
13	353	0.0436	37	1127	0.1202
14	382	0.1109	38	1128	0.1310
15	396	0.0426	39	1189	0.1355
16	398	0.0527	40	1229	0.3312
17	412	0.0552	41	1380	0.1101
18	416	0.0588	42	1411	0.3287
19	420	0.0712	43	1428	0.1321
20	437	0.0253	44	1439	0.2230
21	455	0.1181	45	1856	0.2191
22	539	0.0659	46	1878	0.1837
23	566	0.0792	47	1938	0.2370
24	568	0.0129			

Appendix 1. 사이중양성, 통행량 상관관계 분석 결과

표 A1-2. 사이중양성, 통행량 회귀분석 결과

회귀분석 통계량	
다중 상관계수	0.75999556
결정계수	0.57759326
조정된 결정계수	0.56820644
표준 오차	0.05169541
관측수	47

분산 분석

	자유도	제곱합	제곱 평균	F 비	유의한 F
회귀	1	0.16444	0.16444	61.53239	5.81E-10
잔차	45	0.120259	0.002672		
계	46	0.284699			

	계수	표준 오차	t 통계량	P-값	하위 95%	상위 95%	하위 95.0%	상위 95.0%
Y 절편	-0.0062092	0.013525	-0.4591	0.64837	-0.03345	0.021031	-0.03345	0.021031
X 1	0.00012101	1.54E-05	7.844258	5.81E-10	8.99E-05	0.000152	8.99E-05	0.000152

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

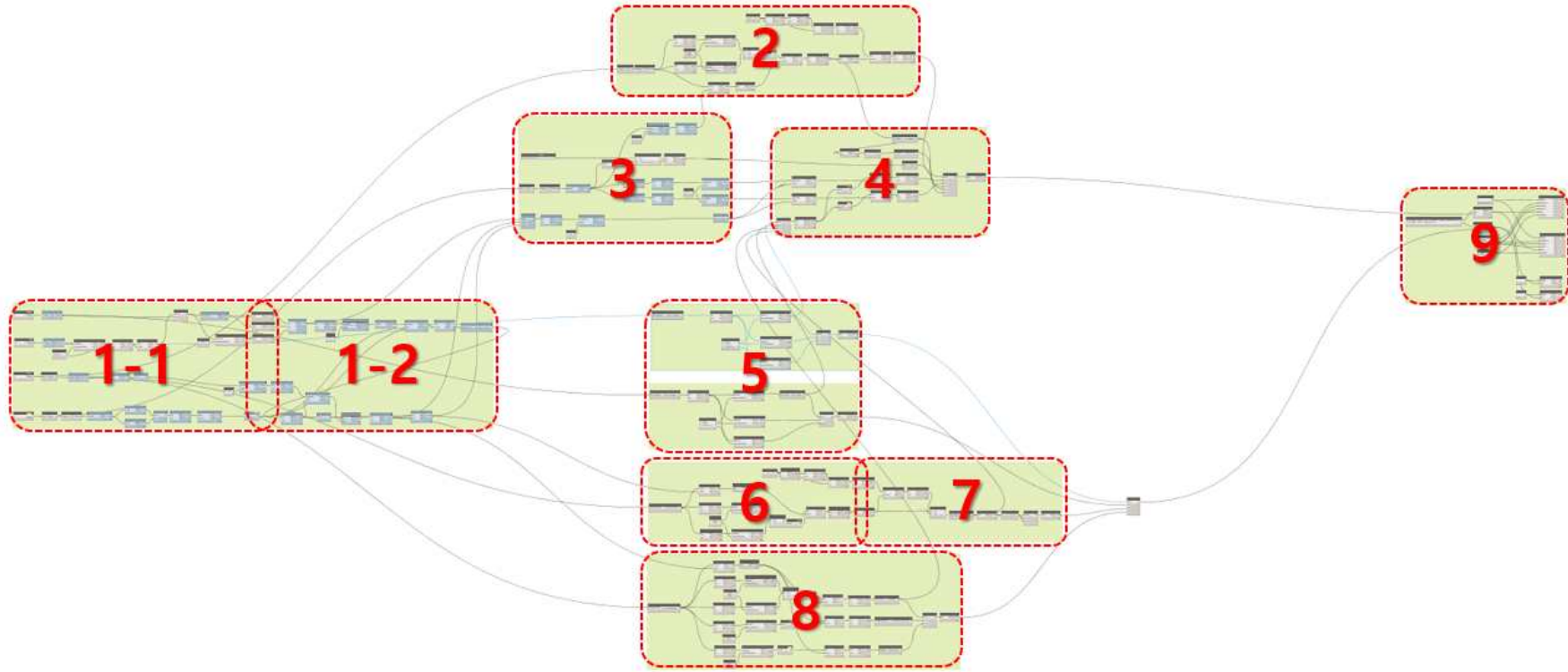


그림 A2-1. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 전체 구성도

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

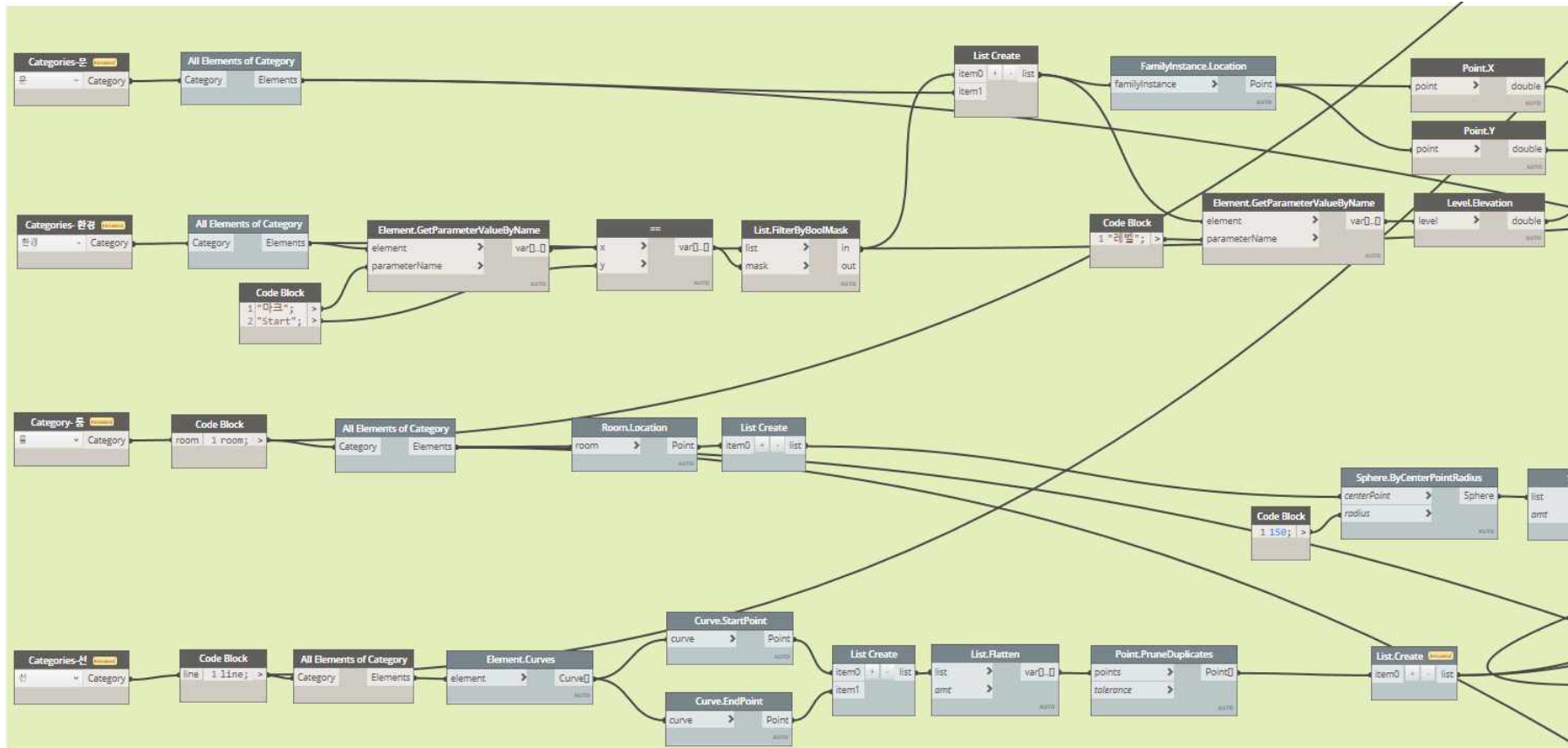


그림 A2-2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 1-1 구성도

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

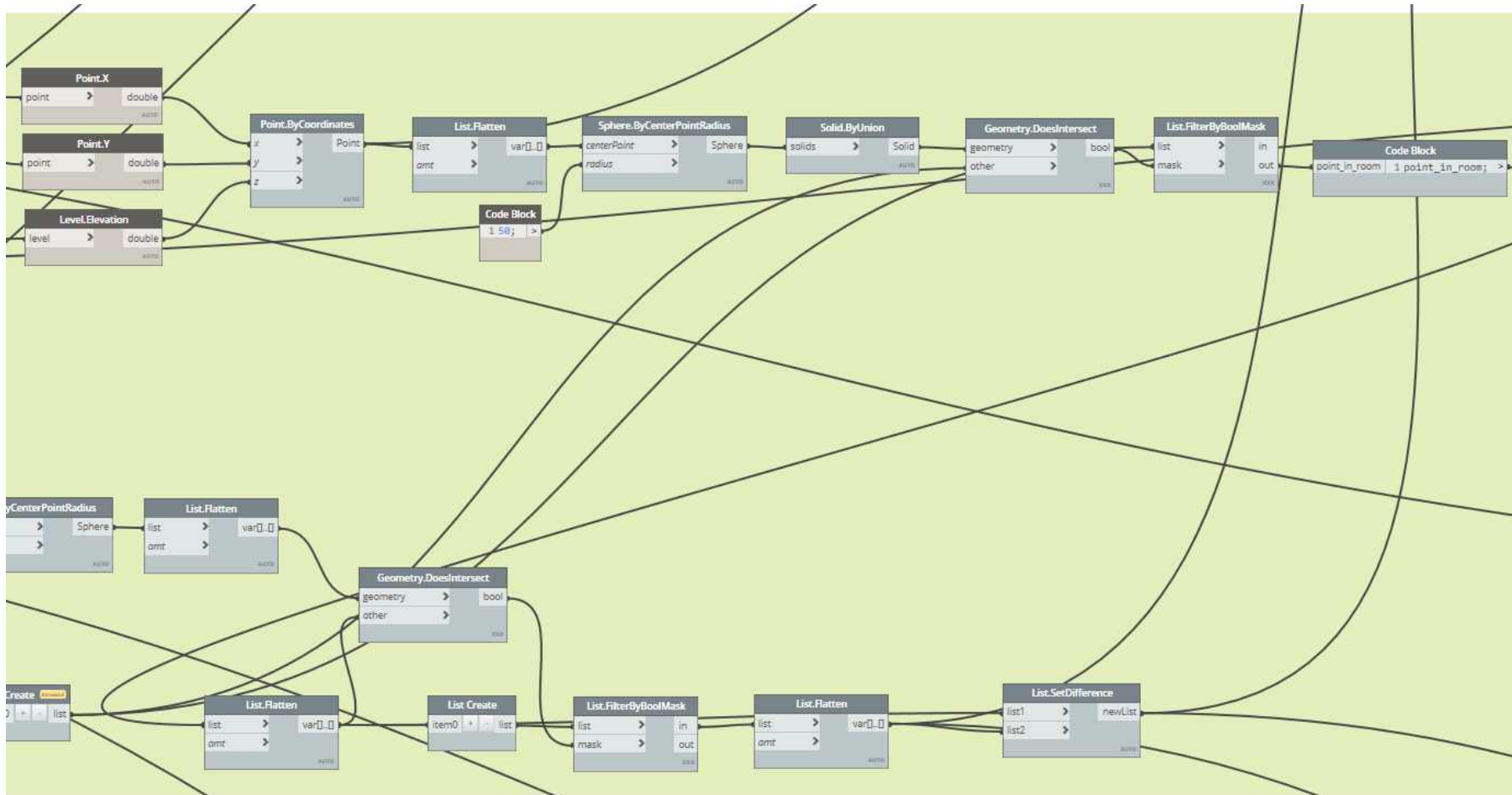


그림 A2-3. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 1-2 구성도

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

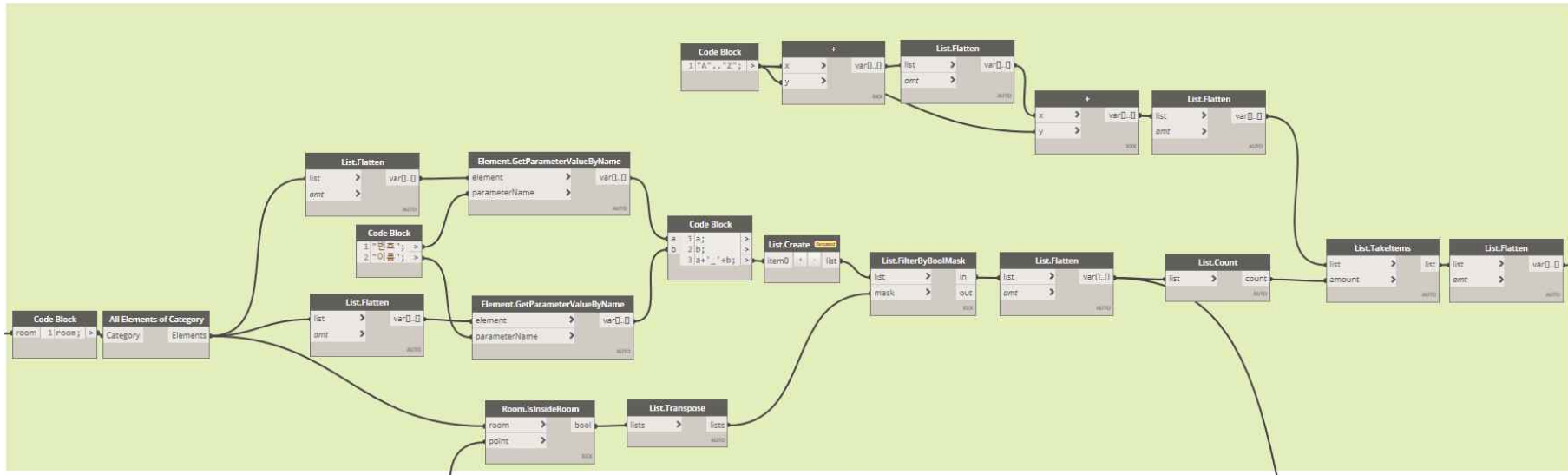


그림 A2-4. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 2 구성도

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

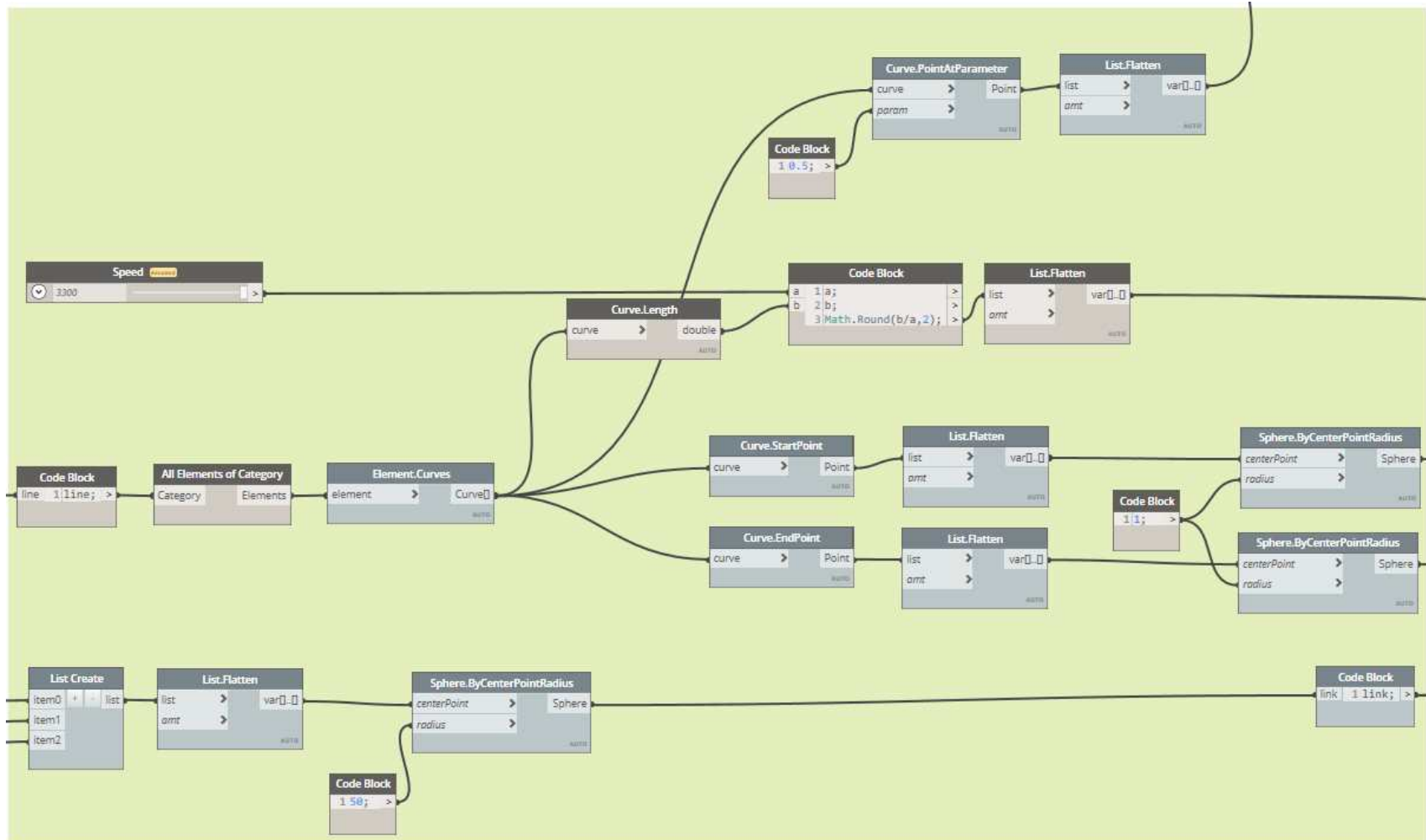


그림 A2-5. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 3 구성도

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

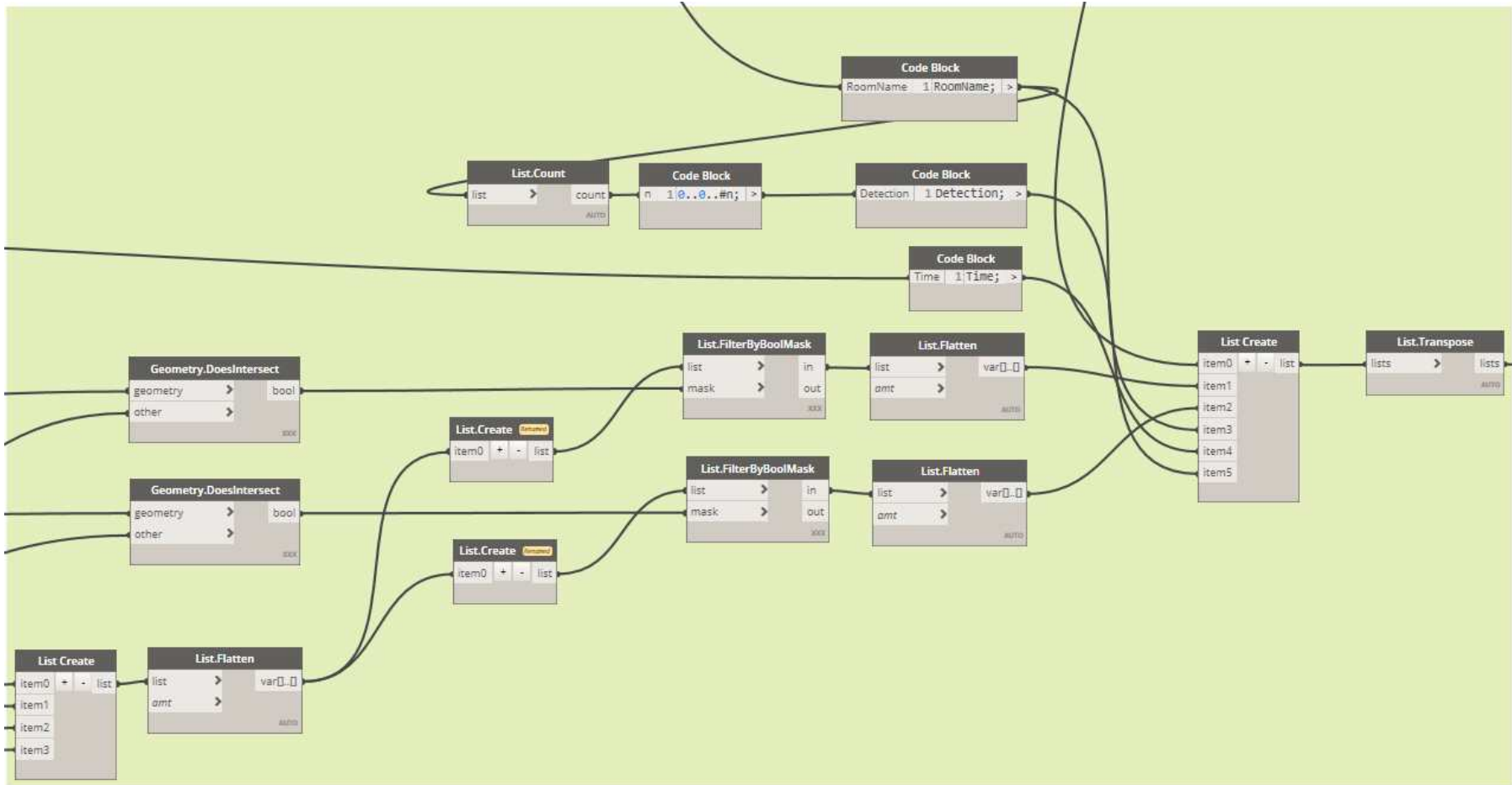


그림 A2-6. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 4 구성도

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

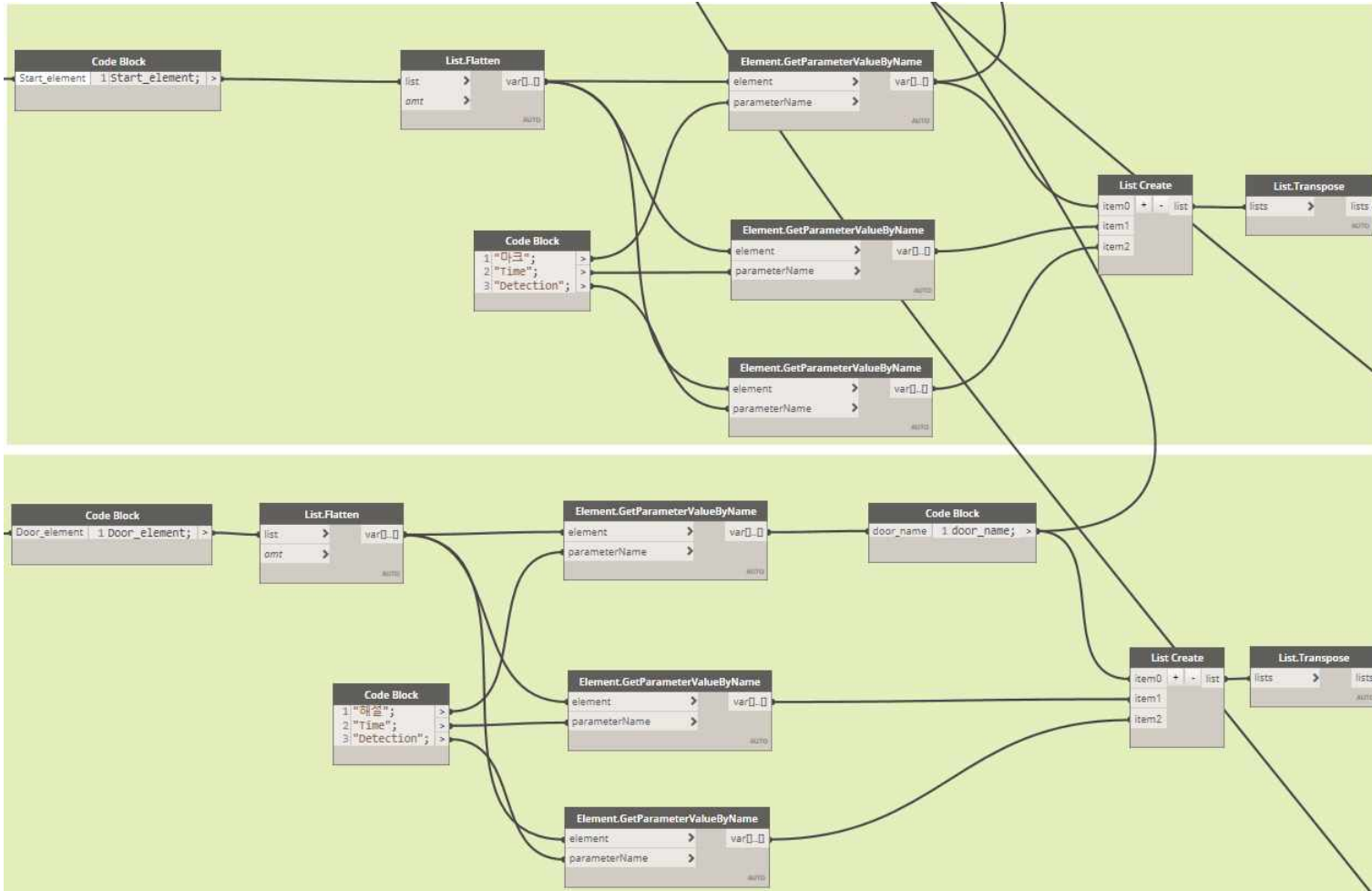


그림 A2-7. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 5 구성도

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

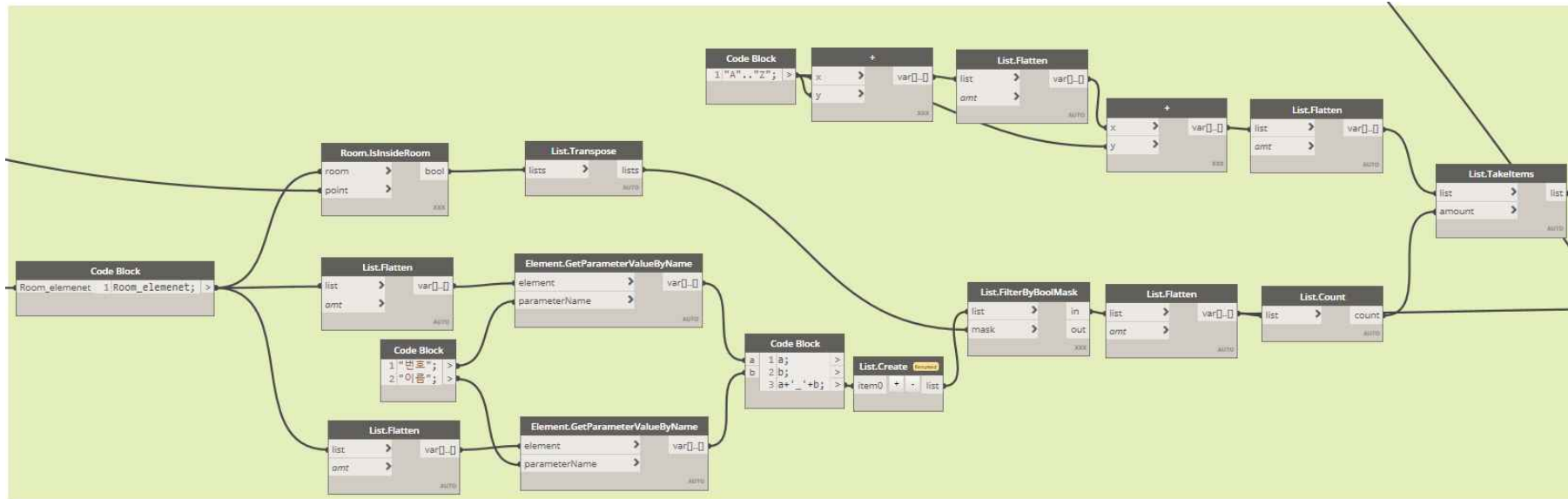


그림 A2-8. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 6 구성도

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

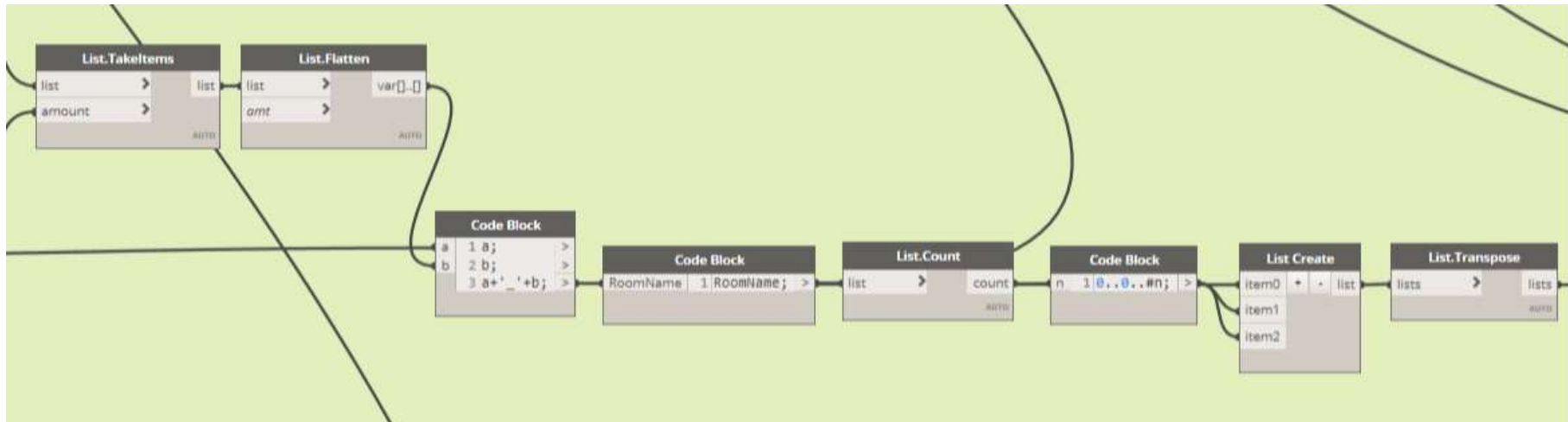


그림 A2-9. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 7 구성도

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

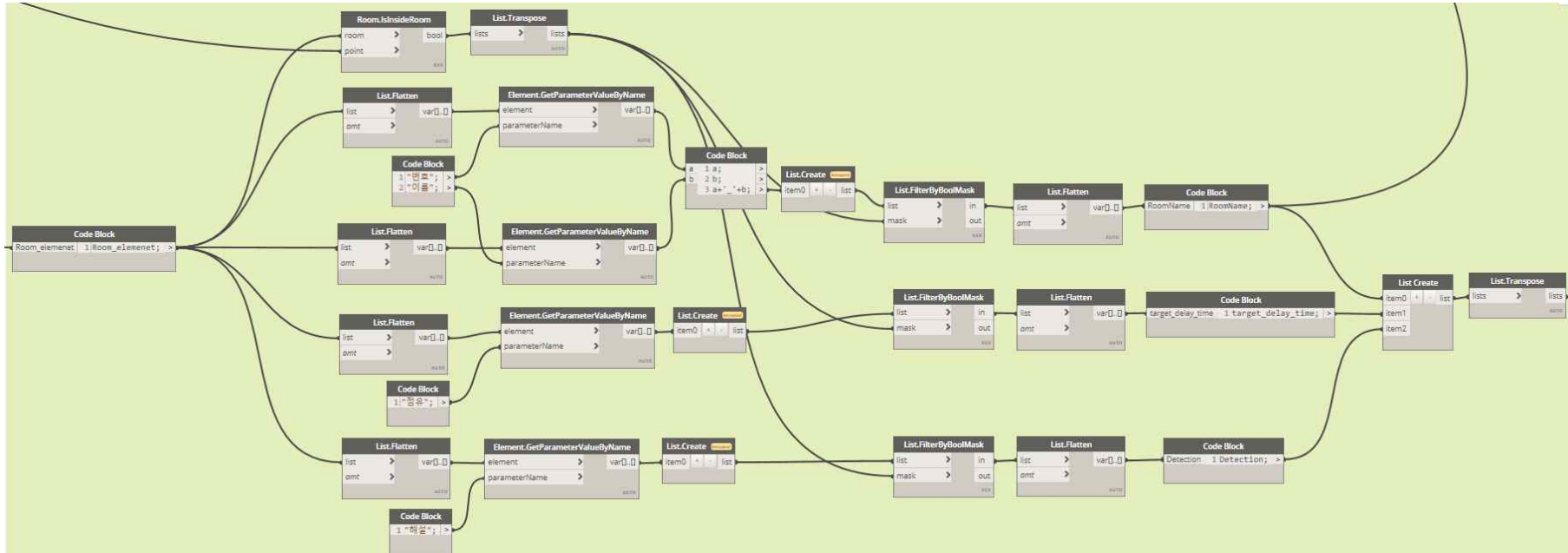


그림 A2-10. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 8 구성도

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

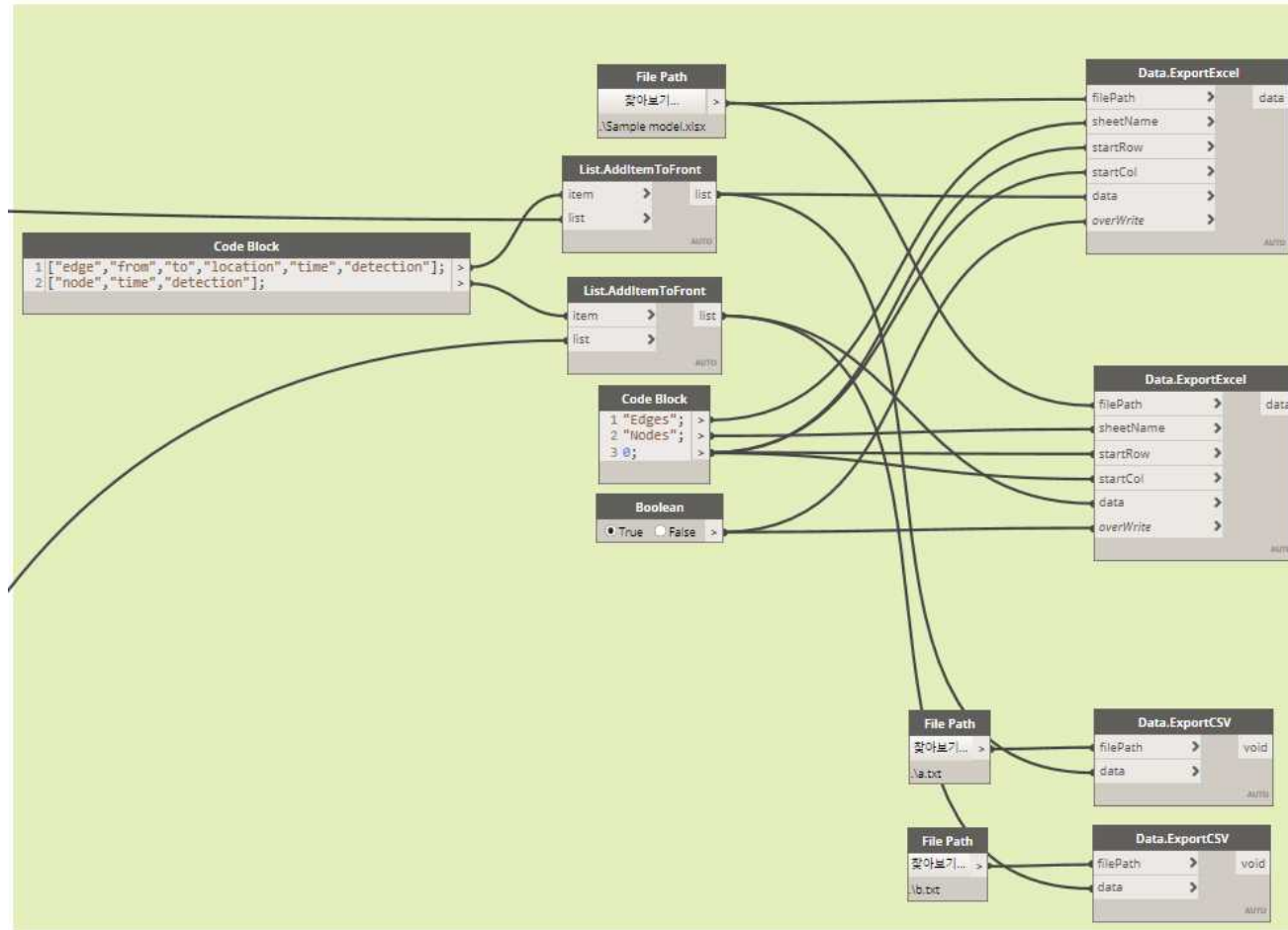


그림 A2-11. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 1) 9 구성도

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 2) _ 유효성 평가 부분

```
In [1]: import pandas as pd

df1 = pd.read_excel (r'Sample model.xlsx', sheet_name='Edges')
df2 = pd.read_excel (r'Sample model.xlsx', sheet_name='Nodes')
```

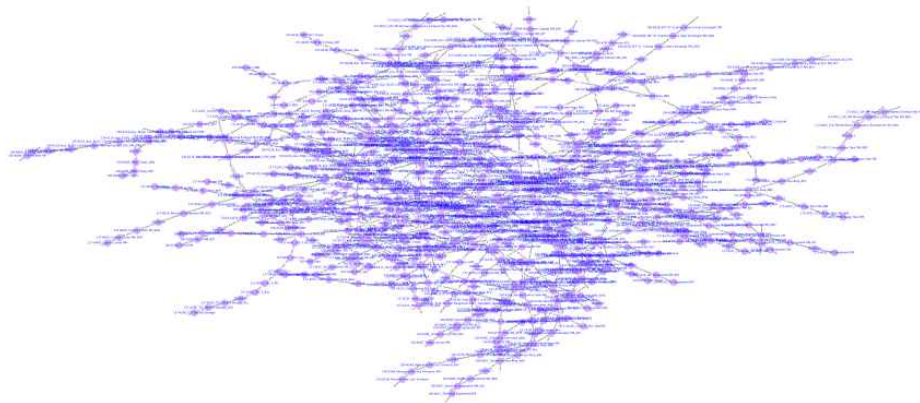
```
In [2]: pip install decorator==5.0.7
```

Requirement already satisfied: decorator==5.0.7 in c:\Users\Wsirsh\anaconda3\lib\site-packages (5.0.7)
Note: you may need to restart the kernel to use updated packages.

```
In [3]: import networkx as nx
from matplotlib import pyplot as plt

G = nx.from_pandas_edgelist(df1, 'from', 'to', edge_attr=['edge', 'location', 'time',
                                                       'detection'], create_using
                           = nx.karate_club_graph())

pos = nx.spring_layout(G)
plt.figure(figsize=(80,35))
nx.draw(G, pos, with_labels = True, node_color='#D0A9F5', font_color='b',
        ,node_size=1500, font_size=15)
#nx.draw_networkx_nodes(G, pos, nodelist=G.nodes(), node_color='r', node_size=1500)
labels = nx.get_edge_attributes(G, 'location')
nx.draw_networkx_edge_labels(G, pos, edge_labels = labels, font_size=10);
```



```
In [4]: df_G1 = df1.drop(['to', 'location', 'time', 'detection'], axis = 1)
df_G2 = df1.drop(['from', 'location', 'time', 'detection'], axis = 1)
df_G2.rename(columns={'to': 'from'}, inplace=True)
df_G3 = pd.concat([df_G1, df_G2], ignore_index=True)

G3 = nx.from_pandas_edgelist(df_G3, 'edge', 'from',
                             create_using = nx.karate_club_graph())

pos = nx.spring_layout(G3)
```

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

```
In [5]: df1.rename(columns={'edge': 'item'}, inplace=True)
df2.rename(columns={'node': 'item'}, inplace=True)
df_edge = df1.loc[:, ['item', 'time', 'detection']]
df_node = df2.loc[:, ['item', 'time', 'detection']]
df_item = pd.concat([df_edge, df_node],
                    ignore_index=True)
```

```
In [6]: path = nx.all_simple_paths(G3, source='157-A12C_Main Control RM', target='Start')
df_path = pd.DataFrame(path)
df_path.insert(0, 'path', '1.path')
df_path = df_path.rename_axis('index').reset_index()
```

```
In [7]: df_time = df_path.fillna(0)
df_time = df_time.replace(dict(zip(df_item.item, df_item.time)))
df_time = df_time.replace('1.path', '2.time')
```

```
In [8]: df_time_cum = df_time.drop(columns=['index', 'path'])
df_time_cum = df_time_cum.cumsum(axis=1)

df_time_cumulate = pd.concat([df_time['index'],
                             df_time['path'], df_time_cum], axis = 1)
```

```
In [9]: df_detection = df_path.replace(dict(zip(df_item.item, df_item.detection)))
df_detection = df_detection.replace('1.path', '3.detection')
```

```
In [10]: df_detection_cum = df_detection.drop(columns=['index', 'path'])
df_detection_cum = 1- df_detection_cum.iloc[:, :-1]
df_detection_cum = 1- df_detection_cum.cumprod(axis=1)

df_detection_cumulate = df_detection_cum.iloc[:, :-1]
df_detection_cumulate = pd.concat([df_detection['index'], df_detection['path'],
                                 df_detection_cumulate], axis = 1)
pd.options.display.float_format = '{:.2f}'.format # 소수점 2자리 까지 표시
```

```
In [11]: result = pd.concat([df_path, df_time_cumulate, df_detection_cumulate])
result = result.sort_values(by=['index', 'path'])
result = result.drop(columns=['index'])
result = result.fillna('-')
```

```
In [12]: j=0
RFT=300
PGC=1.00
baseline= pd.DataFrame(columns=['CDP', 'P(e)', 'T(r)'])

df_time_RFT=df_time_cumulate[df_time_cumulate.drop(['path', 'index'], axis=1)>=RFT]
df_time_RFT=df_time_RFT.fillna(10000).idxmin(axis=1)
while True:
    basere=result.loc[result.index==j]
```

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

```

i=df_time_RFT[j]
try:
    baseline.loc[j]=[basere[basere['path']=='1.path'][i].values[0]
                    ,basere[basere['path']=='3.detection'][i].values[0]
                    *PGC,basere[basere['path']=='2.time'][i].values[0]-RFT]
except:
    baseline.loc[j]=['-',0,'-']
j=j+1
if j==len(df_time_RFT):
    break

```

```

In [13]: baseline=baseline.sort_values(by=['P(e)'])[['P(e)']].reset_index()['P(e)']

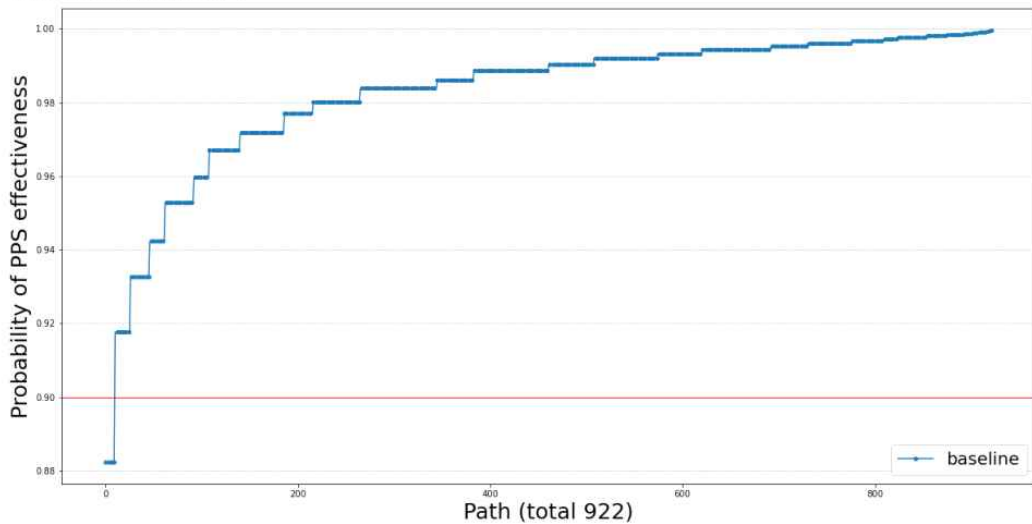
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
plt.figure(figsize=(20,10))
plt.plot(baseline,marker='o',markersize=4,markevery=3,label='baseline')
plt.grid(True, axis='y', color='gray', alpha=0.5, linestyle='--')# 실선 설정
#plt.axvline(x=datetime(2016, 6, 28), color='r', linestyle=':', linewidth=10)수직 일직
plt.axhline(y=0.9, color='r', linewidth=1) #수평 일직선
plt.legend(loc='lower right',fontSize=20)
plt.ylabel('Probability of PPS effectiveness',fontSize=25)
plt.xlabel('Path (total '+str(len(baseline))+')',fontSize=25)
plt

```

```

Out[13]: <module 'matplotlib.pyplot' from 'C:\Users\WWSirsh\Anaconda3\lib\site-packages\matplotlib\pyplot.py'>

```



```

In [14]: result.to_excel
(r'Sample model Analysis Result.xlsx', sheet_name='Result', index = False)

```


Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 3) _ 사이중앙성 도출 부분

```
In [1]: import pandas as pd

df1 = pd.read_excel (r'Sample model.xlsx', sheet_name='Edges')
```

```
In [2]: import networkx as nx

G = nx.from_pandas_edgelist(df1, 'from', 'to', edge_attr='time',
                           create_using = nx.karate_club_graph())
pos = nx.spring_layout(G)

result = nx.betweenness_centrality(G, weight='time')

df2=pd.DataFrame(result,index=[0])
df2.to_excel(excel_writer='Betweenness centrality.xlsx')
```

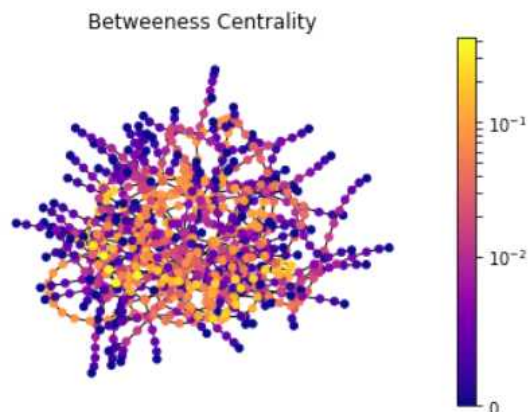
```
In [3]: import networkx as nx
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.colors as mcolors

def draw(G, pos, measures, measure_name):

    nodes = nx.draw_networkx_nodes(G, pos, node_size=20, cmap=plt.cm.plasma,
                                   node_color=list(measures.values()),
                                   nodelist=measures.keys())
    nodes.set_norm(mcolors.SymLogNorm(linthresh=0.01, linscale=1, base=10))
    # labels = nx.draw_networkx_labels(G, pos)
    edges = nx.draw_networkx_edges(G, pos)

    plt.title(measure_name)
    plt.colorbar(nodes)
    plt.axis('off')
    plt.show()

draw(G, pos, nx.betweenness_centrality(G), 'Betweenness Centrality')
```



Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘 (Module 3) _ 강화지점 도출 부분

```
In [1]: import pandas as pd

df1 = pd.read_excel (r'Sample model.xlsx', sheet_name='Edges')
df2 = pd.read_excel (r'Sample model.xlsx', sheet_name='Nodes')
df3 = pd.read_excel (r'Sample model.xlsx', sheet_name='List')
```

```
In [2]: pip install decorator==5.0.7

Requirement already satisfied: decorator==5.0.7 in c:\Users\Wsirsh\anaconda3\lib\site-packages (5.0.7)
Note: you may need to restart the kernel to use updated packages.
```

```
In [3]: import numpy as np
import networkx as nx

df3=df3.fillna(0)
tmp=pd.DataFrame(columns=['CDP','P[e]','T(r)'])

G = nx.from_pandas_edgelist(df1, 'from', 'to',
                           edge_attr=['edge','location','time','detection'])

df_G1 = df1.drop(['to', 'location','time','detection'], axis = 1)
df_G2 = df1.drop(['from', 'location','time','detection'], axis = 1)
df_G2.rename(columns={'to': 'from'}, inplace=True)
df_G3 = pd.concat([df_G1, df_G2], ignore_index=True)

G3 = nx.from_pandas_edgelist(df_G3, 'edge', 'from')
```

```
In [4]: no_of_list = 3654
no_of_cell = 9
vital_room = '157-A12C_Main Control RM'
response_force_time = 300

for i in range(no_of_list): # 리스트 갯수
    df1 = pd.read_excel (r'Sample model.xlsx', sheet_name='Edges')
    df2 = pd.read_excel (r'Sample model.xlsx', sheet_name='Nodes')
    for j in range(no_of_cell): # 항목 갯수
        if df3.loc[i][j]!=0:
            df2['time'][df2.loc[df2['node']==df3.loc[i][j]].index[0]]=60
            df2['detection'][df2.loc[df2['node']==df3.loc[i][j]].index[0]]=0.3

    df1.rename(columns={'edge': 'item'}, inplace=True)
    df2.rename(columns={'node': 'item'}, inplace=True)
    df_edge = df1.loc[:,['item','time','detection']]
    df_node = df2.loc[:,['item','time','detection']]
    df_item = pd.concat([df_edge, df_node],
                        ignore_index=True)
```

Appendix 2. 물리적방호 평가·강화 시스템 알고리즘

```

df_path = pd.read_excel (r'Sample model.xlsx', sheet_name='Path')
df_path = df_path.replace('-',0)

df_path.insert(0, 'path', '1.path')
df_path = df_path.rename_axis('index').reset_index()
df_time = df_path.replace(dict(zip(df_item.item, df_item.time)))
df_time = df_time.replace('1.path', '2.time')
df_time_cum = df_time.drop(columns=['index', 'path'])
df_time_cum = df_time_cum.cumsum(axis=1)

df_time_cumulate = pd.concat([df_time['index'],
                             df_time['path'],df_time_cum], axis = 1)

df_detection = df_path.replace(dict(zip(df_item.item, df_item.detection)))
df_detection = df_detection.replace('1.path', '3.detection')

df_detection_cum = df_detection.drop(columns=['index', 'path'])
df_detection_cum = 1- df_detection_cum.iloc[:, :-1]
df_detection_cum = 1- df_detection_cum.cumprod(axis=1)

df_detection_cumulate = df_detection_cum.iloc[:, :-1]
df_detection_cumulate = pd.concat([df_detection['index'],
                                   df_detection['path'],
                                   df_detection_cumulate], axis = 1)
pd.options.display.float_format = '{:.2f}'.format # 소수점 2자리 까지 표시

result = pd.concat([df_path, df_time_cumulate, df_detection_cumulate])
result = result.sort_values(by=['index', 'path'])
result = result.drop(columns=['index'])

result= result.fillna('-')

j=0
RFT=response_force_time
PGC=1.0
baseline= pd.DataFrame(columns=['CDP', 'P(e)', 'T(r)'])

df_time_RFT=df_time_cumulate[df_time_cumulate.drop(['path', 'index'],axis=1)>=RFT]
df_time_RFT=df_time_RFT.fillna(10000).idxmin(axis=1)
while True:
    basere=result.loc[result.index==j]
    z=df_time_RFT[j]
    try:
        baseline.loc[j]=[basere[basere['path']=='1.path'][z].values[0],
                        basere[basere['path']=='3.detection'][z].values[0]*PGC,
                        basere[basere['path']=='2.time'][z].values[0]-RFT]
    except:
        baseline.loc[j]=['-',0,'-']
    j=j+1
    if j==len(df_time_RFT):
        break

tmp.loc[i]=[baseline.min()[0],baseline.min()[1],baseline.min()[2]]

tmp

```

```
In [ ]: tmp.to_excel("output.xlsx", sheet_name="Sheet1")
```

Appendix 3. 물리적방호 최적대안 및 전문가 검증실험 결과

표 A3-1. 본 연구 제안 물리적방호 강화 최적대안

	물리적방호 유효성	이동편의성 비용	강화 지점								
			1	2	3	4	5	6	7	8	
Baseline	0.657	-									
Alt-1	0.7599	0.2139	DR-A6021	DR-A6027							
Alt-2	0.8319	0.5688	DR-A6021	DR-A6027	100-A06D_General Access Area	DR-A3044					
Alt-3	0.8824	0.5980	DR-A6021	DR-A6027	100-A06D_General Access Area	DR-A3044	DR-A6008	DR-A5030			
Alt-4	0.9176	0.785	DR-A6021	DR-A6027	100-A06D_General Access Area	DR-A3044	DR-A6008	DR-A5030	137-A09D_General Access Area	137-A09C_General Access Area	

Appendix 3. 물리적방호 최적대안 및 전문가 검증실험 결과

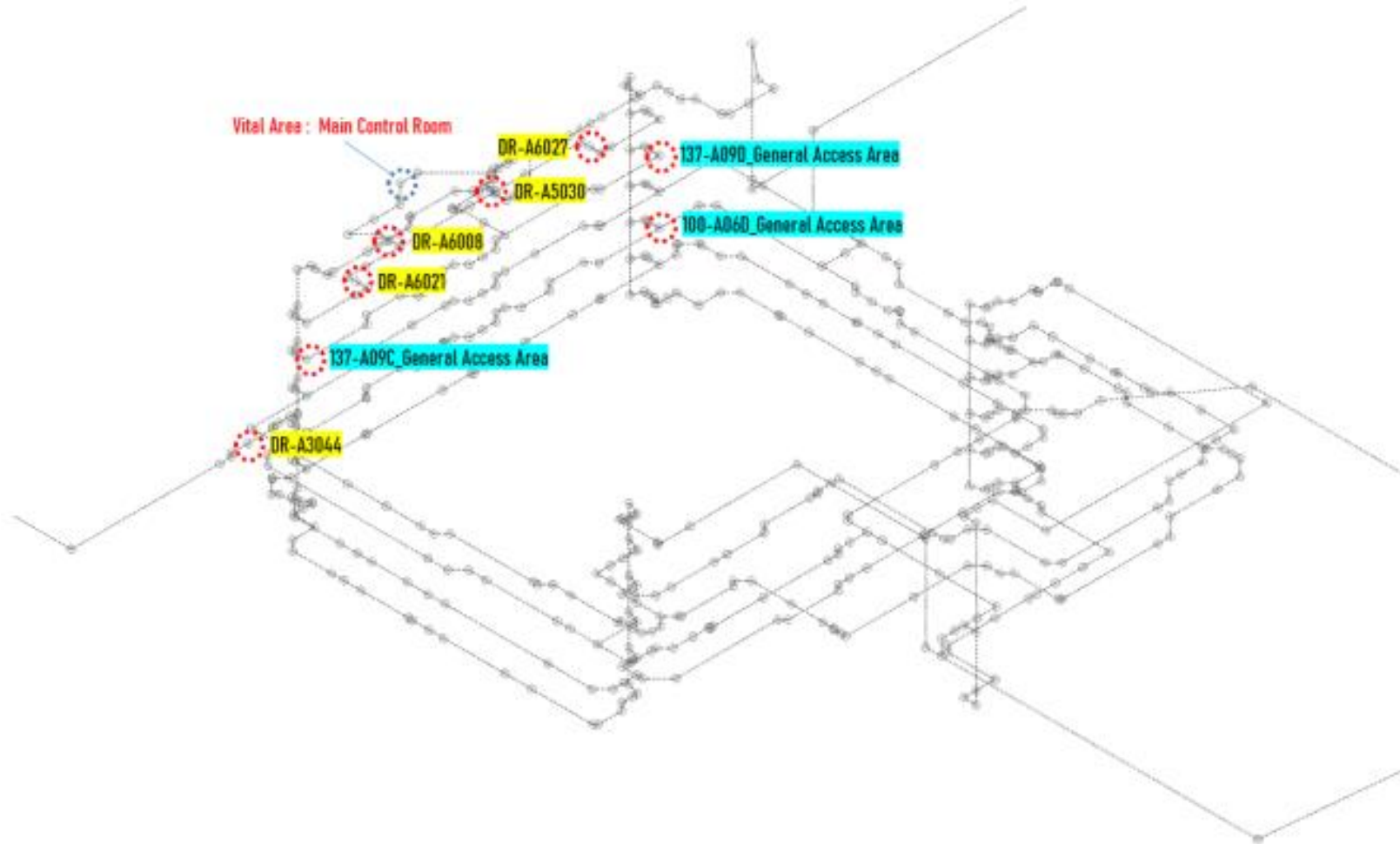


그림 A3-1. 본 연구 제안 물리적방호 강화 최적대안

Appendix 3. 물리적방호 최적대안 및 전문가 검증실험 결과

표 A3-2. 전문가 A 물리적방호 강화지점 검증 실험 결과

	물리적방호 유효성	이동편의성 비용	강화지점											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Baseline	0.657	-												
Alt-1	0.657	0.0284	DR-A5029											
Alt-2	0.657	0.0661	DR-A5029	DR-A5004										
Alt-3	0.657	0.2346	DR-A5029	DR-A5004	DR-A6027									
Alt-4	0.7599	0.3087	DR-A5029	DR-A5004	DR-A6027	DR-A6021								
Alt-5	0.7599	0.3154	DR-A5029	DR-A5004	DR-A6027	DR-A6021	DR-A7032							
Alt-6	0.7599	0.6240	DR-A5029	DR-A5004	DR-A6027	DR-A6021	DR-A7032	100-A06D_General Access Area						
Alt-7	0.8319	0.6416	DR-A5029	DR-A5004	DR-A6027	DR-A6021	DR-A7032	100-A06D_General Access Area	DR-A3044					
Alt-8	0.8319	0.6482	DR-A5029	DR-A5004	DR-A6027	DR-A6021	DR-A7032	100-A06D_General Access Area	DR-A3044	DR-A3073				
Alt-9	0.8319	0.6570	DR-A5029	DR-A5004	DR-A6027	DR-A6021	DR-A7032	100-A06D_General Access Area	DR-A3044	DR-A3073	DR-A3068			
Alt-10	0.8319	0.9621	DR-A5029	DR-A5004	DR-A6027	DR-A6021	DR-A7032	100-A06D_General Access Area	DR-A3044	DR-A3073	DR-A3068	DR-A3010		

Appendix 3. 물리적방호 최적대안 및 전문가 검증실험 결과

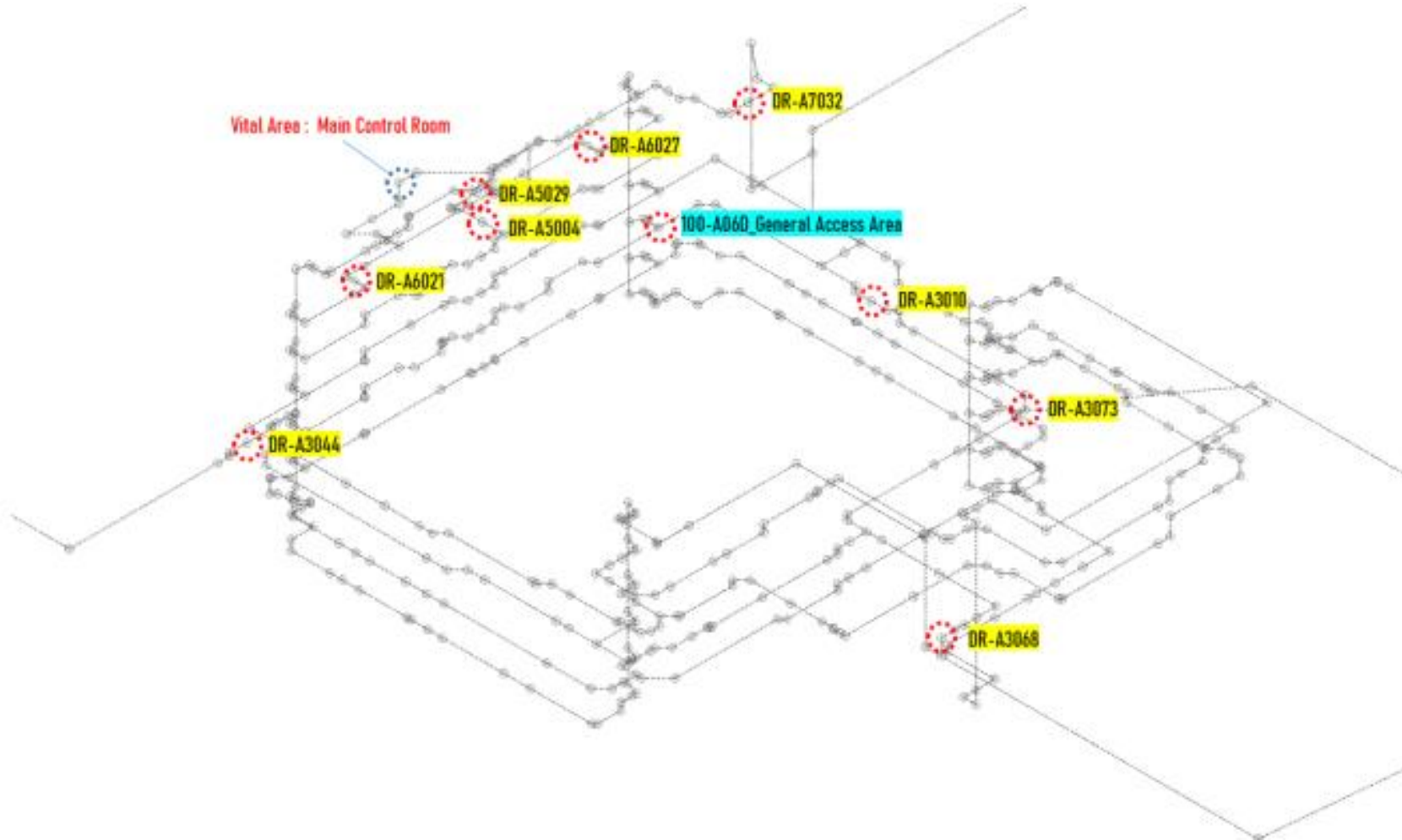


그림 A3-2. 전문가 A 물리적방호 강화 지점 검증실험 결과

Appendix 3. 물리적방호 최적대안 및 전문가 검증실험 결과

표 A3-3. 전문가 B 물리적방호 강화지점 검증 실험 결과

	물리적방호 유효성	이동편의성 비용	강화지점									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Baseline	0.657	-										
Alt-1	0.657	0.0241	DR-A3008									
Alt-2	0.657	0.3327	DR-A3008	100-A06D_General Access Area								
Alt-3	0.657	0.5768	DR-A3008	100-A06D_General Access Area	DR-A3015							
Alt-4	0.7599	0.5944	DR-A3008	100-A06D_General Access Area	DR-A3015	DR-A3044						
Alt-5	0.7599	0.6227	DR-A3008	100-A06D_General Access Area	DR-A3015	DR-A3044	DR-A5029					
Alt-6	0.7599	0.7912	DR-A3008	100-A06D_General Access Area	DR-A3015	DR-A3044	DR-A5029	DR-A6027				
Alt-7	0.8319	0.8653	DR-A3008	100-A06D_General Access Area	DR-A3015	DR-A3044	DR-A5029	DR-A6027	DR-A6021			
Alt-8	0.8319	0.8755	DR-A3008	100-A06D_General Access Area	DR-A3015	DR-A3044	DR-A5029	DR-A6027	DR-A6021	DR-A6008		
Alt-9	0.8319	0.8755	DR-A3008	100-A06D_General Access Area	DR-A3015	DR-A3044	DR-A5029	DR-A6027	DR-A6021	DR-A6008	157-A09C_Meet ing RM	

Appendix 3. 물리적방호 최적대안 및 전문가 검증실험 결과

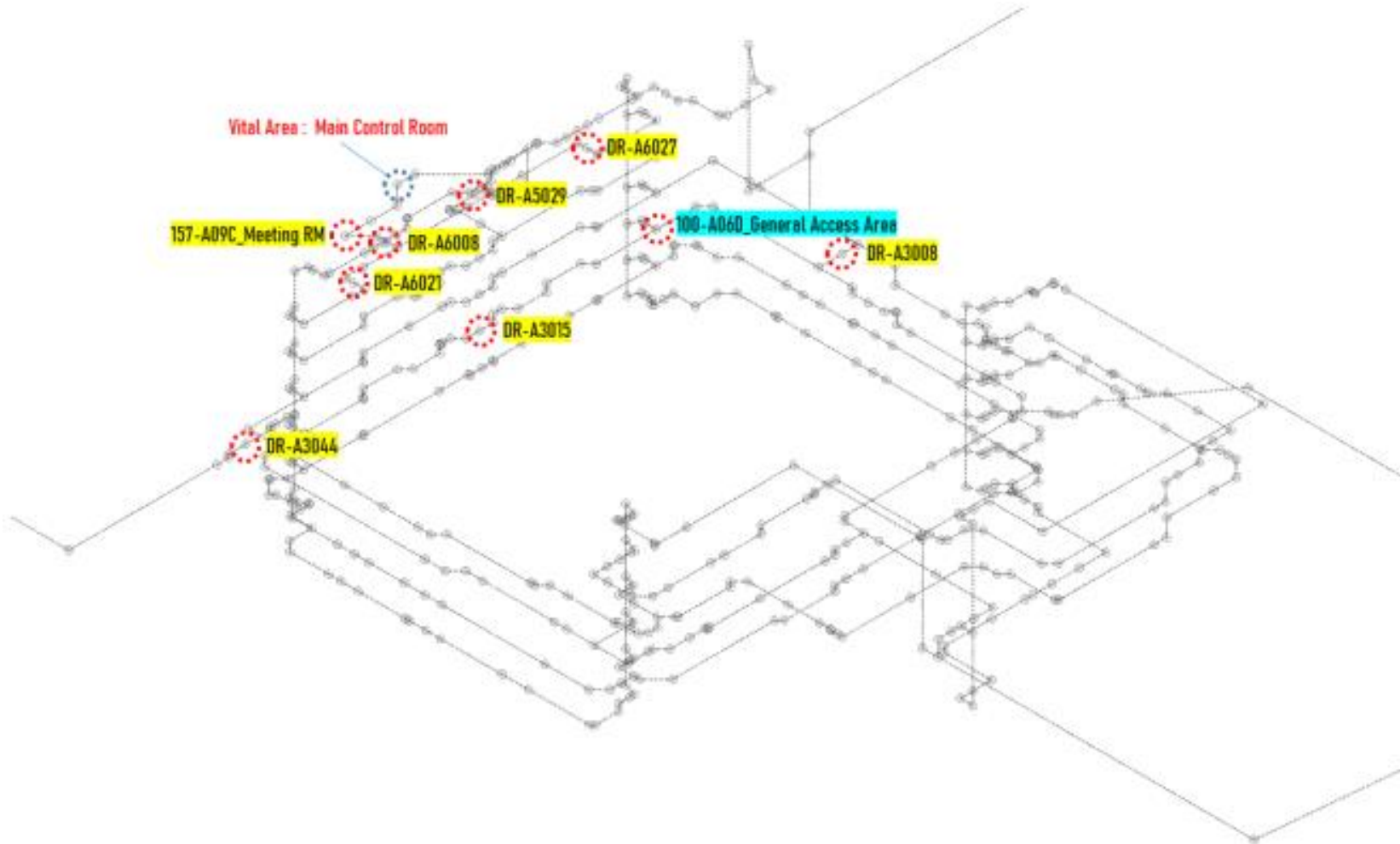


그림 A3-3. 전문가 B 물리적방호 강화 지점 검증실험 결과

Appendix 3. 물리적방호 최적대안 및 전문가 검증실험 결과

표 A3-4. 전문가 C 물리적방호 강화지점 검증 실험 결과

	물리적방호 유효성	이동편의성 비용	강화지점							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Baseline	0.657	-								
Alt-1	0.657	0.0176	DR-A3044							
Alt-2	0.7599	0.3262	DR-A3044	100-A06D_General Access Area						
Alt-3	0.7599	0.4659	DR-A3044	100-A06D_General Access Area	157-A17C_Corridor					
Alt-4	0.7599	0.5306	DR-A3044	100-A06D_General Access Area	157-A17C_Corridor	157-A16D_Corridor				
Alt-5	0.8319	0.6048	DR-A3044	100-A06D_General Access Area	157-A17C_Corridor	157-A16D_Corridor	DR-A6021			
Alt-6	0.8319	0.7732	DR-A3044	100-A06D_General Access Area	157-A17C_Corridor	157-A16D_Corridor	DR-A6021	DR-A6027		
Alt-7	0.8319	1.0783	DR-A3044	100-A06D_General Access Area	157-A17C_Corridor	157-A16D_Corridor	DR-A6021	DR-A6027	DR-A3010	
Alt-8	0.8319	1.2699	DR-A3044	100-A06D_General Access Area	157-A17C_Corridor	157-A16D_Corridor	DR-A6021	DR-A6027	DR-A3010	DR-A3071

Appendix 3. 물리적방호 최적대안 및 전문가 검증실험 결과

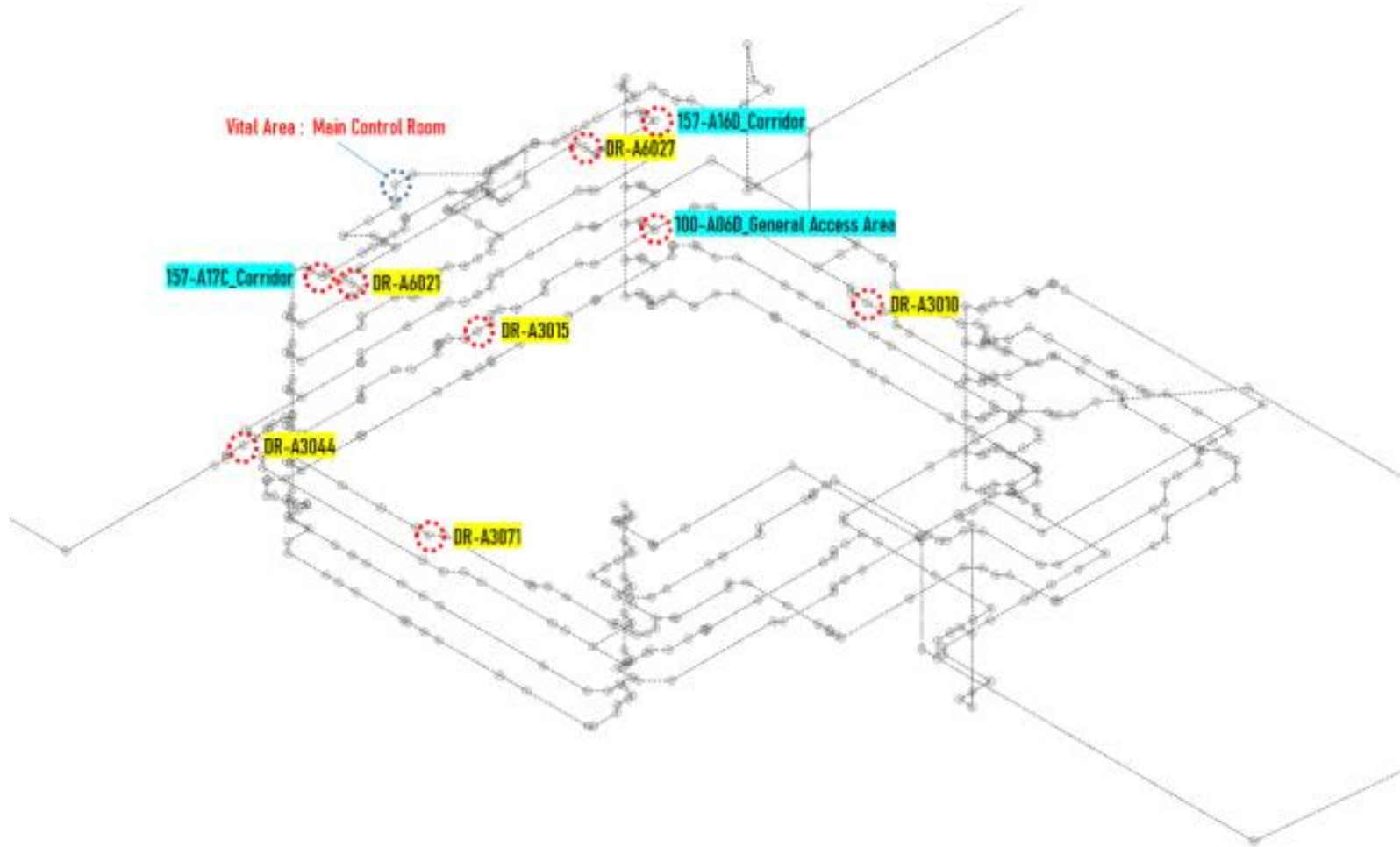


그림 A3-4. 전문가 C 물리적방호 강화 지점 검증실험 결과

Appendix 3. 물리적방호 최적대안 및 전문가 검증실험 결과

표 A3-5. 전문가 D 물리적방호 강화지점 검증 실험 결과

	물리적방호 유효성	이동편의성 비용	강화지점							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Baseline	0.657	-								
Alt-1	0.657	0.3086	100-A06D_General Access Area							
Alt-2	0.657	0.3175	100-A06D_General Access Area	DR-A3068						
Alt-3	0.7599	0.3351	100-A06D_General Access Area	DR-A3068	DR-A3052					
Alt-4	0.7599	0.4607	100-A06D_General Access Area	DR-A3068	DR-A3052	137-A09D_General Access Area				
Alt-5	0.7599	0.5530	100-A06D_General Access Area	DR-A3068	DR-A3052	137-A09D_General Access Area	DR-A5005			
Alt-6	0.7599	0.6146	100-A06D_General Access Area	DR-A3068	DR-A3052	137-A09D_General Access Area	DR-A5005	137-A09C_General Access Area		
Alt-7	0.7599	0.7830	100-A06D_General Access Area	DR-A3068	DR-A3052	137-A09D_General Access Area	DR-A5005	137-A09C_General Access Area	DR-A6027	
Alt-8	0.8319	0.8572	100-A06D_General Access Area	DR-A3068	DR-A3052	137-A09D_General Access Area	DR-A5005	137-A09C_General Access Area	DR-A6027	DR-A6021

Appendix 3. 물리적방호 최적대안 및 전문가 검증실험 결과

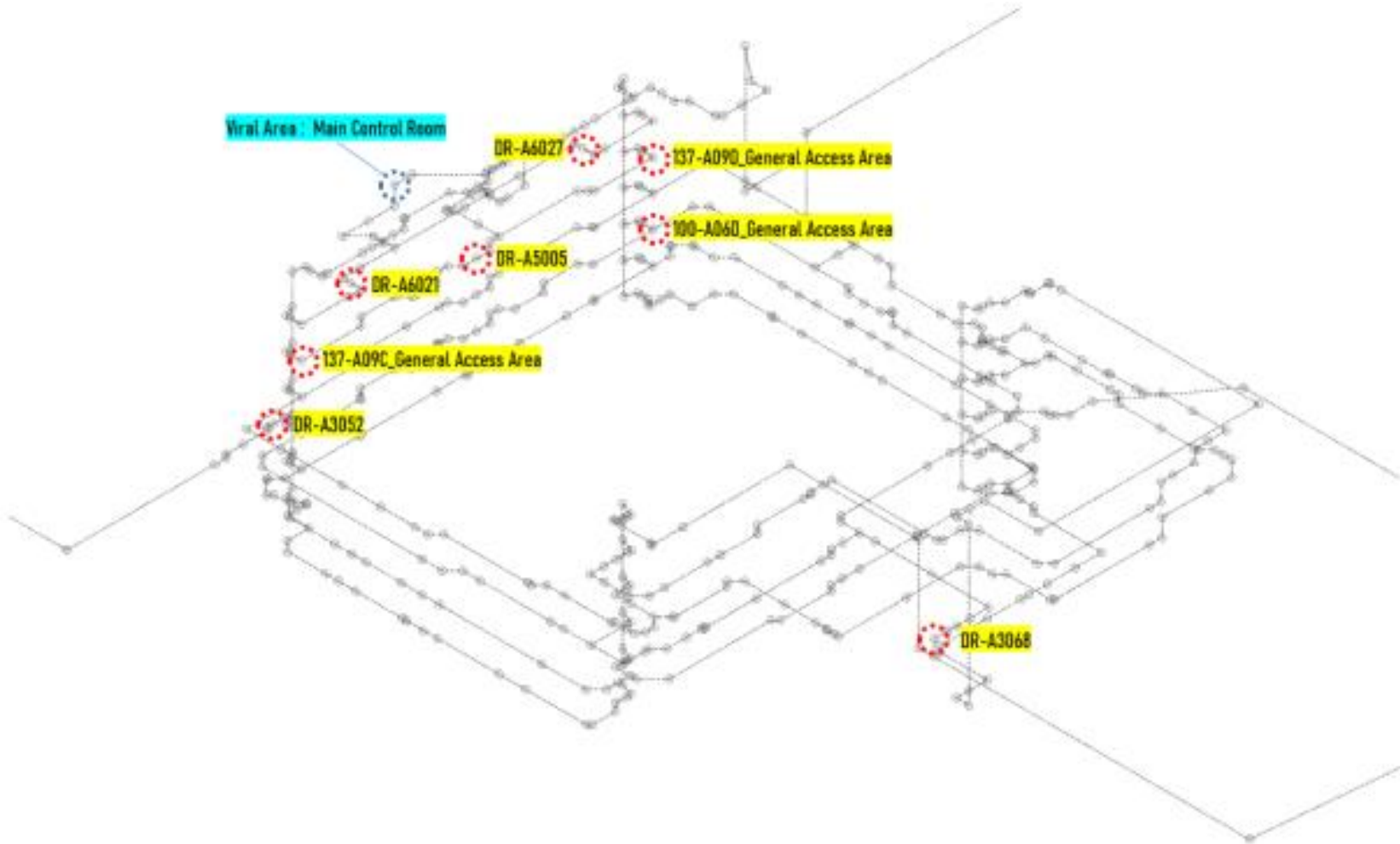


그림 A3-5. 전문가 D 물리적방호 강화 지점 검증실험 결과

Abstract

**A Proposed Method for Evaluating and Improving
Physical Protection System using Spatial Network
-Focusing on Outside Intruders into Critical Infrastructure-**

Shin, Jaeseop
Department of Architecture
Ph.D. Course in Graduate School
Seoul National University
Advised by Professor Choi, Jaepil

This thesis is a study on the evaluation and improvement of the physical protection system using spatial networks for outside intruders into building facilities among national critical facilities. The purpose of this study is to propose a method for evaluating and improving physical protection system in consideration of the spatial characteristics of a multi-layered complex space and accessibility of many internal users.

Through the analysis of previous studies, it was confirmed that the existing methods have limitations in accurately analyzing outsiders' intrusion into the facility by simplifying the facility to a diagram or grid. This method does not accurately reproduce complex spaces and assumes only a few intrusion paths, so unexpected intrusion paths may be omitted from the analysis. Also, previous studies could not propose improvement points considering internal users' accessibility. Therefore, this study proposes a method to accurately evaluate the physical protection system of a facility by using spatial networks and to derive improvement point that

does not impair the accessibility of internal users as much as possible.

In Chapter 3, based on the EASI (Estimate of Adversary Sequence Interruption) model, which quantitatively evaluates effectiveness of physical protection system, two methods (improving protection performance and adding protection points) were proposed in terms of architectural planning. To implement this, the spatial networks needed nodes that could improve protection performance and adding protection points. Therefore, the node is composed of a door node and a room node, and the edge is reproduced by the medial axis method that can best reproduce the path of the intruder. A method of deriving the effectiveness of physical protection system using the EASI model was proposed by exploring all possible paths through which an intruder could access the target area by using the spatial networks implemented in this way. Afterwards, a method of improving physical protection system considering accessibility of internal users was proposed. Accessibility is an important factor for internal users' work productivity, emergency passage, and disabled access. In a survey of the operators of nuclear power plant, which is national critical facility, it was concluded that the reinforcement of physical protection has an effect on the deterioration of the convenience of movement, and that physical protection system should be improved at the point that does not impair the accessibility. Therefore, in this study, in order to derive the optimal point for improving physical protection system without compromising the accessibility of internal users, betweenness centrality was selected as an index of accessibility. Considering the effectiveness of physical protection system and the cost of accessibility, I proposed a method for deriving an optimal alternative that can improve the effectiveness of physical protection without compromising the accessibility of internal users as much as possible.

In Chapter 4, a system that can implement the physical protection system evaluation and reinforcement method proposed in Chapter 3 was developed. It is a system that can be used in the BIM design stage. Depending on the function, it is composed of Module 1 (extraction of spatial network and

protection properties), Module 2 (analysis of the effectiveness of physical protection systems for all intrusion paths), and Module 3 (derivation of optimal alternatives for improving physical protection system based on accessibility).

In addition, simulation was performed to confirm the validity of the proposed method. By selecting a pilot facility and setting the physical protection values required for physical protection analysis, simulation was performed to derive the effectiveness and improvement of physical protection optimal alternatives. In conclusion, it was confirmed that the proposed physical protection system evaluation and improvement method is effective.

In Chapter 5, the evaluation and improvement method of the physical protection system proposed in this study were verified. For verification, nuclear power plant corresponding to the ‘가’ level of power facilities among national critical facilities were selected. For four experts with experience in nuclear power plant architectural design and physical protection design, a physical protection improvement point selection experiment was conducted considering the accessibility of internal users. Afterwards, the results of the experiments of four experts and the optimal alternative for improving physical protection system proposed in this study were compared in terms of physical protection effectiveness and accessibility cost. As a result, it was confirmed that the physical protection evaluation and improvement method proposed in this study could present a better alternative than the qualitative method based on expert’s experience.

Finally, in Chapter 6, the significance and limitations of this study are described. This study is meaningful in that it proposed a new method to evaluate and improve the physical protection system in terms of architectural planning, which was previously focused on the management of security personnel. In conclusion, this study is to find alternatives to where to improve in order not to impair accessibility that need to have a physical protection system. The validity of the proposed method was confirmed

through verification, and it is thought that it will be possible to use it in the process of quantitative design, evaluation, and improvement of the physical protection system for national critical facilities based on this study.

Keywords: Spatial Network, Physical Protection System, PPS, Critical Infrastructure, Outside Intruder, Nuclear Power Plant, BIM

Student Number: 2016–30246