creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

공학전문석사 학위 연구보고서

격납건물여과배기계통 건물의 내진해석

- 내진I등급 구조물의 내진해석 -

2018년 02월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

이 대 영

격납건물여과배기계통

건물의 내진해석

- 내진I등급 구조물의 내진해석 -

지도 교수 김 호 경

이 프로젝트 리포트를 공학전문석사 학위
연구보고서로 제출함
2018년 02월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
이 대 영

이대영의 공학전문석사 학위 연구보고서를 인준함
2018년 02월

위 원 장 구 윤 모 (인)

위 원 김 호 경 (인)

위 원 박 창 우 (인)

국문초록

본 연구에서는 격납건물여과배기계통 건물(내진I등급)의 지진하중을 계산하기 위하여 다음과 같은 일련의 과업을 수행하였다. 먼저, NRC RG 1.60[9]에 제시된 설계기준응답스펙트럼을 기준으로 인공지진가속도이력을 생산하였다. 이는 최대가속도 1.0g 기준이며 발전소가 요구하는 운전기준지진(OBE)와 안전정지지진(SSE)에 맞게 보정하여 기반암에서 발생하는 지진이 지표면까지 도달하면서 일어나는 파의 증폭현상 및 지반 물성치의 변화를 계산하기 위하여 지반응답해석을 실시하였다. 지반응답해석의 결과인 지표면가속도시간이력과 등가선형해석으로 변화된 지반 물성치를 사용하여 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction, SSI)해석을 실시하였다. 즉, 진원(Bed rock)에서 발생된 가속도 기록은 두 번의 증폭과정(지반응답해석, SSI)을 거치면서 구조물 기초에서는 새로운 가속도 기록을 가지게 된다. SSI 해석 결과로 도출된 각 방향별 시간이력은 Broadening을 통하여 층응답스펙트럼으로 작성하게 되고 이 응답스펙트럼을 설계기준으로 하여 응답스펙트럼해석을 통해 구조물에 작용하는 응력을 계산하였다.

주요어 : 내진I등급, 인공지진가속도, 지반응답해석, 지반−구조물 상호작용, 응답스펙트럼해석

학 번 : 2016−22247

목 차

제 1 장 서론 1
제 1 절 계통의 설명 1
제 2 절 내진해석의 목적 2
제 3 절 내진해석 범위 및 절차 3
제 4 절 가정사항 5
제 2 장 이론적 배경 6
제 1 절 인공지진가속도 생성 6
제 2 절 지반응답해석 9
제 3 절 지반-구조물 상호작용 19
제 4 절 동적해석방법 32
제 3 장 내진I등급 구조물의 내진해석 40
제 1 절 현장지반특성 및 입력지진생성 40
제 2 절 자유장해석 45
제 3 절 지반-구조물 상호작용 해석 52
제 4 절 응답스펙트럼해석 69
제 4 장 결론 80
참 고 문 헌 83

표 목차

표 1 지층 별 비선형 곡선 적용 모델 **46**

표 2 지반응답해석시 입력 물성 및 수렴결과**(P-20)** **49**

표 3 콘크리트 및 철골 구조물의 물성치 **63**

표 4 SSI 해석에 따른 최대가속도 응답 결과 **64**

표 5 Beam 요소에 사용된 KS 규격 단면성질 **70**

표 6 모드해석 결과 **71**

표 7 설계기준에 따른 방향 별 최대 유효응력 **73**

그림 목차

그림 1 격납건물여과배기계통의 계략도 2

그림 2 구조물 내진해석의 흐름도 4

그림 3 Envelop function 8

그림 4 SIMQKE 계산 흐름도 9

그림 5 기반암과 노두에서의 운동 10

그림 6 지진파의 굴절 11

그림 7 Soil of plural layers simplified (Kramer, 1996) 13

그림 8 flowchart of frequency domain analysis 15

그림 9 Comparison of shear strain hysteresis loop of ground by interior test and earthquake motion 16

그림 10 Process of calculation repeated for equivalent linear analysis 18

그림 11 지반-구조물 상호작용 21

그림 12 부분구조법과 직접법 23

그림 13 시간영역방법과 진동수영역방법 25

그림 14 점성경계 29

그림 15 전달경계 30

그림 16 혼용경계 30

그림 17 경계요소 31

그림 18 무한요소 32

그림 19 응답스펙트럼 작성절차 34

그림 20 Newmark's method:linear system 35

그림 21 울진 5,6호기 격납건물 구간 굴착 및 매립단면도 41

그림 22 수평방향 설계응답스펙트럼 43

그림 23 수직방향 설계응답스펙트럼 43
그림 24 인공지진 가속도 시간이력 (EW방향) 44
그림 25 인공지진 가속도 시간이력 (NS방향) 44
그림 26 인공지진 가속도 시간이력 (VT방향) 45
그림 27 Seed & Idriss 정규화 전단계수에 관한 비선형 곡선 46
그림 28 Seed & Idriss 감쇠비에 관한 비선형 곡선 47
그림 29 암반 지층의 정규화 전단계수 및 감쇠비에 관한 비선형 곡선 ... 47
그림 30 EW 방향 자유장 지표면 가속도시간이력 (OBE) 50
그림 31 NS 방향 자유장 지표면 가속도시간이력 (OBE) 50
그림 32 VT 방향 자유장 지표면 가속도시간이력 (OBE) 51
그림 33 EW 방향 자유장 지표면 가속도시간이력 (SSE) 51
그림 34 NS 방향 자유장 지표면 가속도시간이력 (SSE) 52
그림 35 VT 방향 자유장 지표면 가속도시간이력 (SSE) 52
그림 36 SSI 해석을 위한 구조물 및 지반 조건 54
그림 37 유연체적법에 의한 부분구조 모델링 기법 55
그림 38 SASSI2000의 모듈 구성도 59
그림 39 지반-구조물 상호작용 구조물 모델링 64
그림 40 Response Spectra Broadening 66
그림 41 EW방향 여과배기계통건물 기초의 FRS(OBE) 66
그림 42 EW방향 여과배기계통건물 기초의 FRS(OBE) 67
그림 43 EW방향 여과배기계통건물 기초의 FRS(OBE) 67
그림 44 EW방향 여과배기계통건물 기초의 FRS(SSE) 68
그림 45 EW방향 여과배기계통건물 기초의 FRS(SSE) 68
그림 46 EW방향 여과배기계통건물 기초의 FRS(SSE) 69
그림 47 응답스펙트럼해석 Modeling 71

그림 48 EW방향 지진에 따른 Con’c 유효응력(OBE) 74
그림 49 NS방향 지진에 따른 Con’c 유효응력(OBE) 74
그림 50 VT방향 지진에 따른 Con’c 유효응력(OBE) 75
그림 51 EW방향 지진에 따른 Con’c 유효응력(SSE) 75
그림 52 NS방향 지진에 따른 Con’c 유효응력(SSE) 76
그림 53 VT방향 지진에 따른 Con’c 유효응력(SSE) 76
그림 54 EW방향 지진에 따른 H빔 유효응력(OBE) 77
그림 55 NS방향 지진에 따른 H빔 유효응력(OBE) 77
그림 56 VT방향 지진에 따른 H빔 유효응력(OBE) 78
그림 57 EW방향 지진에 따른 H빔 유효응력(SSE) 78
그림 58 NS방향 지진에 따른 H빔 유효응력(SSE) 79
그림 59 VT방향 지진에 따른 H빔 유효응력(SSE) 79
그림 60 가속도시간이력의 증폭 81

제 1 장 서론

본 연구보고서는 서울대학교 공학전문대학원에서 실시하고 있는 응용공학프로젝트연구의 일환으로 작성되며, 그 목적은 현재 ㈜미래와도전에서 수행하고 있는 프로젝트 중 내진해석과 관련된 보고서 작성이 외부용역을 통하여 작성되고 있음에 따라 연구자는 내진해석의 기술을 습득하여 외주비 절감 및 외부대응이 가능한 수준으로 개인의 역량을 증진시키는 것을 그 목적으로 한다.

제 1 절 계통의 설명

격납건물여과배기계통(Containment Filtered Venting System, CFVS)은 원자력발전소 사고시 원자로 건물 내 과압으로 인해 파손위험성이 있을 경우, 격납건물 내부의 기체를 노즐을 통해 빼낸 후 방출기체 안에 포함된 방사성 물질을 충분히 여과하여 대기로 방출하는 시스템으로서 이것은 방사성 물질의 공기 중 방출로 인한 위험도를 최소화하기 위한 설비이다. 이러한 계통을 구성하는 주요 기기로는 여과배기용기, 분자체 용기, 입출구 배관, 충수탱크, 응축수탱크, 배수탱크 등이 있다. 여과배기계통의 건물에는 그림 1과 같이 이러한 주요 기기들이 설치되어 있으며 현장근무자가 계통 주요변수를 감시하며 밸브조작을 할 수 있는 원격제어실이 있다. 격납건물 압력이 CFVS 정격 개방 압력에 도달하게 되면 수동으로 CFVS 격리밸브가 개방되고, 이후 격납건물 내부의 가스(증기 및 NCG)는 원자로건물 관통부배관을 거쳐 CFVS 로 이동한 후 Stack을 통해 외

부환경으로 방출된다.

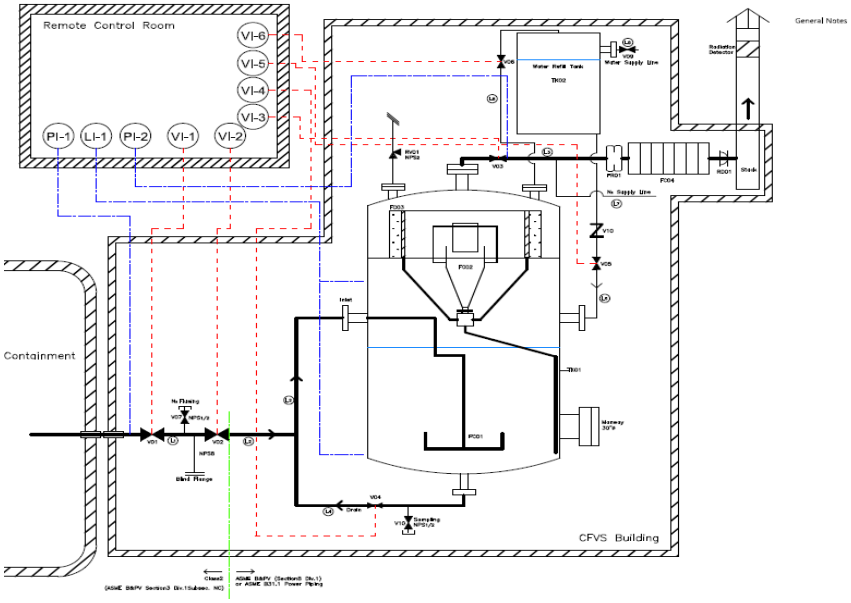


그림 1 격납건물여과배기계통의 계략도

제 2 절 내진해석의 목적

원자력발전소의 설계를 위해서는 10CFR 50 Appendix A에 따라 안전관련 구조물, 계통 등의 내진해석 수행하여야 하며, 원자력발전소를 구성하고 있는 안전관련 구조물, 계통 및 기기들을 지진으로부터 구조적 건전성과 기능적 건전성 확보하기 위하여 내진해석 및 설계 수행하여야 한다. 구조물 내진해석은 발전소 부지에 발생 가능한 최대설계지진에 부합하도록 시간이력을 개발하고 구조물과 주요 계통에 대한 수학적 모델을 작성한 후 입증된 동적 해석방법을 사용하여 구조물과 기기에 작용하

는 지진하중을 산출하는 것을 그 목적으로 한다. 따라서 설계자는 내진해석 결과로 산출된 지진하중과 다른 설계기준 하중(사하중, 활하중, 풍하중 등)을 조합하여 구조물과 기기가 안전하도록 요구되는 설계하중에 저항할 수 있는 구조 부재의 단면을 결정하게 된다.

격납건물여과배기계통은 원자력발전소 사고 시 생성되는 각종 기체 및 핵분열생성물의 증가로 격납건물이 과압되어 파손될 가능성이 있을 경우, 격납건물 내부의 방사성 물질을 충분히 여과하여 원자로 밖의 대기로 방출하여 직접 방출로 인하여 발생하는 주민의 방사선 피폭 위험도를 최소화하기 위한 설비이다. 이 계통은 원자력발전소 설계기준 상 내진범주 I 급에 해당되며 이에 상응하는 내진설계요건을 만족하여야 한다.

따라서 본 연구에서 사용되는 최대지반가속도는 내진설계요건을 만족하는 안전정지지진(SSE) 0.3g와 운전기준지진(OBE) 0.1g를 기준으로 인공지진파를 생성하여 해석을 수행하였다.

제 3 절 내진해석 범위 및 절차

격납건물여과배기계통의 설계에 있어 구조물은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 여과배기계통의 주요부품인 기계분야와 여과배기계통을 보호하고 있는 건물분야가 그것이다. 본 연구에서는 여과배기계통 건물의 내진해석으로 그 범위를 두고 역무를 수행하고 기계분야에 있어서는 해당구역의 층응답스펙트럼을 작성하여 이후에 이어질 기계분야 동적거동해석에 사용할 수 있도록 한다.

이를 위한 내진해석절차는 그림 2와 같다. 먼저 원자력발전소 설계에 사

용되어지는 설계응답스펙트럼을 결정한 뒤, 인공지진 생성 프로그램인 SIMQKE[2]를 통해 설계기준에 해당하는 방향 별 가속도시간이력을 생산한다. 그리고 이 가속도시간이력을 이용하여 지반응답해석 프로그램인 SHAKE91[3]을 이용하여 진동으로 발생하는 지반의 동적 물성치와 지표면 자유장에서의 가속도시간이력을 다시 계산하게 된다.

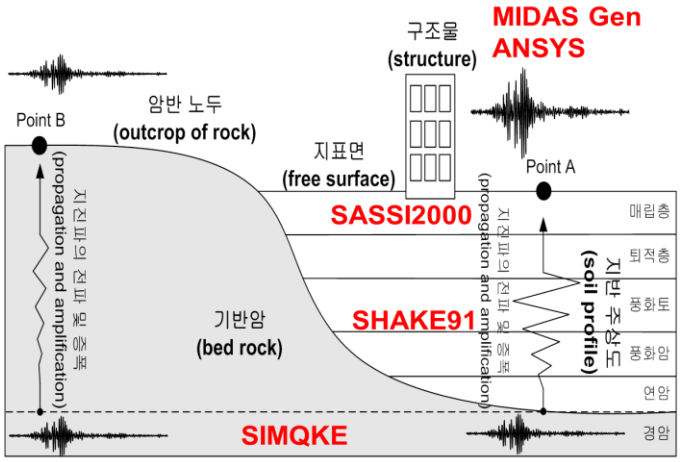


그림 2 구조물 내진해석의 흐름도

이를 이용하여 구조물의 기초지반에서 일어나는 지반-구조물 상호작용 해석(SASSI2000)을 실시하게 되면 구조물의 각 층에 해당하는 층응답스펙트럼을 생산하게 된다. 이는 다시 고정된 경계조건을 가진 구조물의 설계응답스펙트럼으로 사용할 수 있으므로 이 층응답스펙트럼을 통해 MIDAS Gen 혹은 ANSYS 와 같은 사용 구조해석 프로그램을 이용하여 응답스펙트럼해석을 실시하게 되면 지진에 의해 발생하는 구조물의 응력을 계산할 수 있다.

제 4 절 가정사항

현재 국산화에 성공한 격납건물여과배기계통은 아직까지 국내 원전에 설치되지 못하였다. 따라서 현장여건을 반영한 내진해석을 수행하기 위해서는 다음과 같은 가정사항을 필요로 한다.

- 대상 발전소는 한국표준형원전인 한울 5,6호기로 한다.
- 현장 지반상태를 반영할 시추공은 P-20으로 한다.(3장1절 참고)
- 현장상태는 토사지반이 거의 없는 암반 위에 건설된 원전이므로 지반물성치를 SPT-N값을 통하여 추정하도록 한다.
- SPT-N값이 없는 풍화암이나 연암 지반은 참고문헌을 통하여 해석자가 주관적으로 결정한다.
- 지반의 비선형 물성치를 반영하는 G/Gmax, 감쇠비 곡선은 참고문헌을 통하여 확보한 곡선을 사용한다.
- 1차원 지반응답해석 및 지반-구조물 상호작용 해석을 위해 지반구성은 수평 반무한 층상지반으로 가정한다.

실제 해석을 수행할 때는 현장의 여건을 잘 기술하고 있는 최종안전성분석보고서(FSAR)를 참고하여 현장 실험을 통하여 획득된 지층 별 전단파속도와 공진주시험과 같은 실내시험에서 분석된 지반의 비선형 곡선(G/Gmax, 감쇠비 곡선)을 해석에 반영하여야한다.

제 2 장 이론적 배경

본 장에서는 해석이 수행된 이론적 배경에 대하여 기술하도록 한다. 새로운 이론을 정립하는 연구가 아니므로 기존의 교과서에 수록된 이론적 배경을 프로젝트 수행과정에 관철시켜 서술하였다. 대부분의 내용은 동적해석의 교과서로 활용되고 있는 '구조동역학'(김두기)[13], '지반구조물의 내진설계'(지반공학회)[17], 'Dynamics of Structures'(Chopra)[1]의 내용을 준용하였다.

제 1 절 인공지진가속도 생성

원자력발전소의 내진등급 I에 해당하는 구조물의 내진해석을 수행하기 위해서는 입력 지진의 지반운동에 대한 가속도시간이력이 필요하다. 다행인지 불행인지 우리나라에서는 현재 설계에 이용할 만큼의 지진기록이 존재하지 않고 있어 국내지진기록을 설계에 적용하는 것은 어려운 실정이다. 따라서 내진해석을 수행하기 위하여 인공지진을 생산하거나 해외의 지진을 국내의 여건에 맞게 수정하여 사용하는 것이 일반적이다. 인공지진(artificial earthquake)생성 과정은 크게 설계응답스펙트럼에 상응하는 지진파를 Random vibration 이론을 통하여 작성하는 방법과 Earthquake Source, Wave propagation, Site response 등을 종합적으로 고려하여 Random vibration 이론을 이용하는 확률론적 방법이 있다. 본 연구에서는 첫 번째 방법에 해당하는 주어진 설계응답스펙트럼과 최대지반가속도를 만족시키는 가속도 시간이력을 구하는 기법을 이용하였다.

가장 일반적인 Random vibration 이론에 의해 인공지진 생성 방법은 Gasparini and Vanmarche(1976)의하여 제시된 방법으로, 본 연구에 사용된 프로그램인 SIMQKE(1976)[2]에 적용된 방법이다. 이 방법의 기본적인 가정사항은 지진가속도를 아래와 같이 임의의 주기함수의 합으로 나타낼 수 있다는 것이다.

$$x(t) = \sum A_i \sin(\omega_i t - \phi_i) \tag{2.1}$$

여기서 진폭 A_n 은 아래 식과 같이 스펙트럼밀도함수 $G(\omega)$ 로부터 계산할 수 있으며, 이를 모두 합하여 total power를 계산하면 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{A_n^{\,2}}{2} = G(\omega_n)\Delta\omega \tag{2.2}$$

$$\sum \frac{A_n^{\,2}}{2} = \sum G(\omega_n)\Delta\omega \Rightarrow \int G(\omega_n)\,d\omega \tag{2.3}$$

따라서 많은 수의 주기함수를 확장해 줌으로써, total power는 $G(\omega)$ 곡선 아래에 존재하게 된다.

여기에 중첩된 조화함수의 외형을 실제 지진과 유사한 형태의 크기로 조절해 주는 그림 3과 같은 envelope function을 곱해주면 다음과 같이 인공지진파를 계산할 수 있다.

$$z(t) = I(t)x(t) \tag{2.4}$$

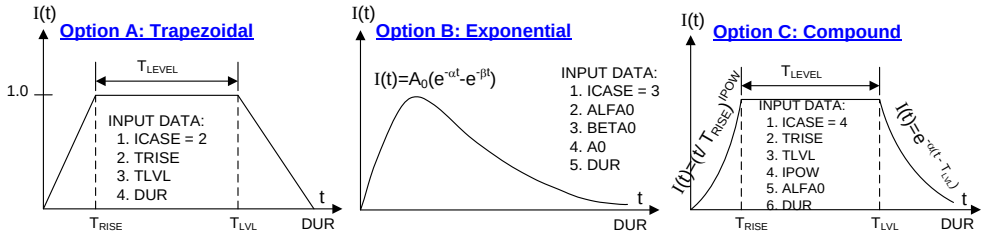


그림 3 Envelop function

이와 같이 작성된 인공지진을 최대지반가속도 및 응답스펙트럼의 목표값과 부합하도록 조정하고 기저선(base line)을 보정한다. 그리고 입력받은 감쇄비에 상응하는 응답스펙트럼을 형성하지는 여부를 계산하여 수렴성을 판단하게 되며 요구되는 설계응답스펙트럼에 부합하지 않을 경우 새로운 위상각과 $G(\omega)$를 수정하여 반복계산을 수행하게 된다. 이러한 과정을 모듈화한 프로그램 SIMQKE의 계산 흐름도는 그림 4와 같다.

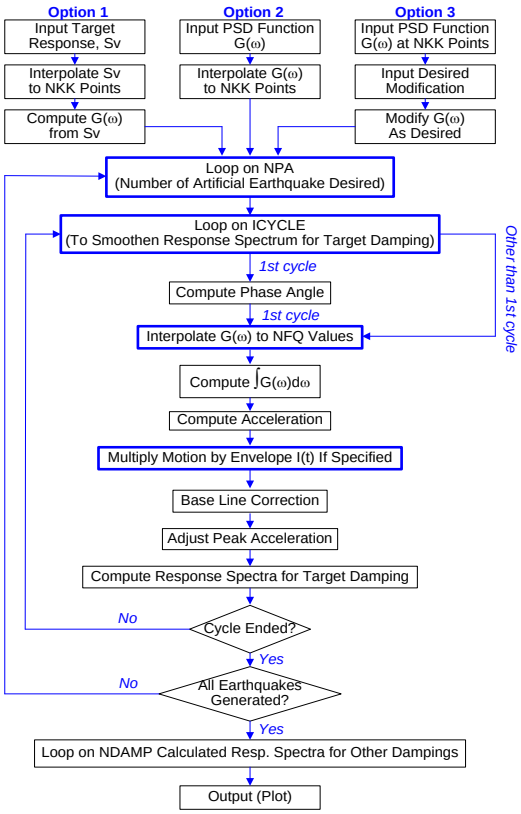


그림 4 SIMQKE 계산 흐름도

제 2 절 지반응답해석

인공지진을 통하여 진원에서 발생한 지진은 다양하고 예측하기 힘든 지질을 따라 구조물이 존재하지 않는 상부 지표면에 전달되면서 지반특성을 반영하여 증폭 혹은 감소된다. 이러한 지진파의 증폭을 예측하기 위하여 우리는 지반응답해석을 실시하게 된다. 지반응답해석을 수행할 경우 각 층별 지반의 최대가속도, 전단변형률, 전단파속도, 감쇄비를 계산하게되고 자유장에 전달되는 가속도시간이력을 최종적으로 생산하게

된다. 전단파속도를 기준으로 일정속도를 초과할 경우 지반을 강성이 큰 암반으로 가정하여 계산된 가속도시간이력을 통하여 동적해석을 수행하거나 일정속도를 초과하지 못할 경우 지반과 구조물의 상호작용을 고려한 시간이력을 다시 계산하는 과정을 거치게 된다. 이에 대한 자세한 설명은 다음절에 기술하도록 한다.

1. 1차원 지반응답해석

먼저 지반운동에 대한 명칭을 정의해 보면 그림 5에 나타난 바와 같이 지표면에서의 지진운동을 자유장 운동(free surface motion)이라 하며 상부에 지반층이 있는 기반암 표면에서의 지진운동을 기반암 운동(bedrock motion)이라 한다. 한편 기반암이 지표면상에 노출된 노두(outcrop)에서의 지진운동은 노두 운동(rock outcropping motion)이라 하며, 기반암 위에 지반층이 존재하지 않는 경우 기반암 노두운동(bedrock outcropping motion)이라 한다.

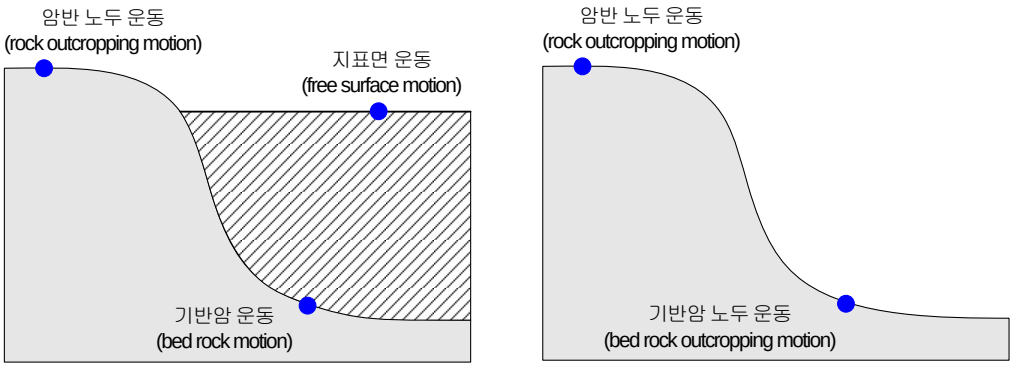


그림 5 기반암과 노두에서의 운동

지진시 실체파(body wave)는 진원으로부터 여러 방향으로 방사 된다. 실체파가 지반 내로 전파되면 서로 다른 지층을 만나게 되고 그 경계면에서 반사 혹은 굴절이 이루어진다. 일반적으로 지층에서 파동의 전파속도는 단단한 하부층이 상대적으로 연약한 상부층에 비하여 빠르다. 따라서 그림 6과 같이 연직면에 경사각을 가지며 전파되는 파동은 지층 경계면을 지나면서 snell의 법칙에 의해 굴절이 발생하여 차츰 연직 방향으로 전파되게 된다. 즉, 1차원 지반응답해석은 모든 지층의 경계가 수평이며 지반의 응답은 기반암으로부터 수직 전파되는 수평 전단파에 의해 일어난다는 가정을 기본으로 한다.

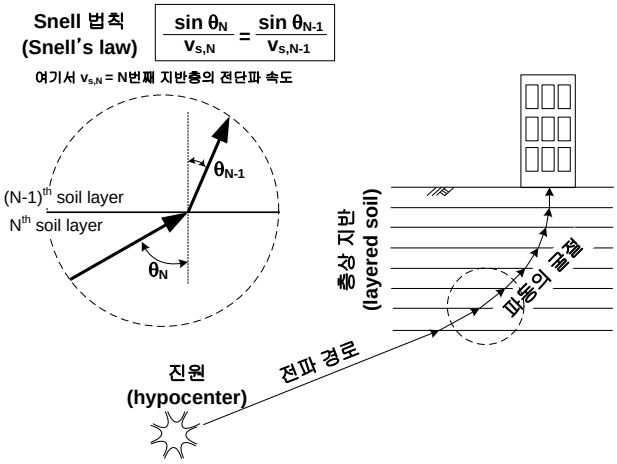


그림 6 지진파의 굴절

실제 파동의 전파는 3차원 현상으로 진행되지만, 위와 같은 가정을 통한 1차원 해석기법은 지진 시 지표면의 자유장 운동을 비교적 잘 예측하였다(Seed & Idriss, 1968). 1차원 지반 응답 해석은 해석영역에 따라 주파수 영역과 시간영역으로 구분할 수 있다. 주파수 영역 해석은 입력 물성

치가 적으며 계산이 속도가 빠르다는 장점이 있는 반면, 지반 거동을 선형으로 가정하여 해석하므로 실제 거동에 대한 불확실성을 가지고 있다는 단점이 있다. 실제 지진 시 지반은 비선형 거동을 하게 되며 이를 해석시 고려하는 것이 매우 중요하다. 따라서 주파수영역해석에서도 지반의 비선형 거동을 간접적으로 고려하기 위해 등가선형해석기법(Equivalent Linear Analysis)이 제안되었다. 한편, 시간영역에서는 굳이 이러한 방법을 사용하지 않아도 비선형해석이 가능하다. 비선형 해석은 다시 과잉간극수압의 발생모사여부에 따라 전응력해석과 유효응력해석으로 구분할 수 있며, 등가선형해석은 과잉간극수압을 모사 할 수 없으므로 전응력해석에 속한다.

2. 1차원 등가선형 해석방법

연직방향으로 전파되는 전단파의 1차원 파동방정식은 다음과 같다

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \tag{2.5}$$

여기서, ρ는 비중, τ는 전단응력, u는 변위, z는 지표면으로부터의 깊이이다. 흙의 전단응력-변형률 관계는 다음 식과 같이 Kelvin-Voigt의 모델과 같다고 가정한다.

$$\tau(x,t) = Gr + \eta \frac{\partial r}{\partial t} \tag{2.6}$$

여기서, G는 전단탄성계수, r은 전단변형률, η는 점성계수이다. 식(2.6)를 식(2.5)에 대입하면 다음과 같은 파동방정식을 얻을 수 있다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \tag{2.7}$$

흙의 감쇠비는 주파수의 영향을 받지 않는다고 가정하고, h 는 다음과 같이 정의된다.

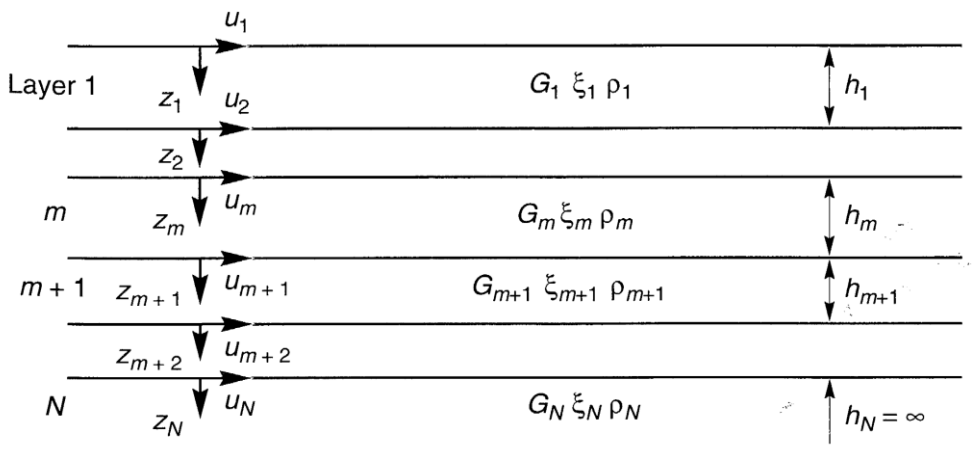


그림 7 Soil of plural layers simplified (Kramer[6], 1996)

$$\eta = \frac{2G}{\omega}\xi \tag{2.8}$$

여기서, ω는 입력 단순 조화파의 각속도, ξ는 등가감쇠비이다.

식(2.7)을 중복 반사이론에 입각하여 그림 7에 나타낸 것처럼 반무한 반탄성체의 기반 위에 복수의 지반이 놓여진 경우에 대하여 적용하여 해를 구할 수 있다(Schnabel, 1972). 각 층은 동일 layer 내에서 등방, 균질하며 물리적, 역학적 특성은 같다고 가정한다. 여기서 진동은 지반의 연직 방향으로 전달되는 전단파에 의해 발생하고 아래 식(2.9)와 같이 변위는 수평 방향으로만 발생한다.

위의 파동방정식을 풀면 각층의 상단과 하단에서의 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(Z_m = 0, t) = u_m = (A_m + B_m)e^{i\omega t} \tag{2.9a}$$

$$u(Z_m = h, t) = u_{m+1} = (A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m})e^{i\omega t} \tag{2.9b}$$

여기서, A_m과 B_m은 전파의 상향파 그리고 하향파 성분이고 h_m은 토층의 두께이다. 위의 식에 경계조건과 적합조건을 적용하면 다음과 같은 지층간의 상호식을 구할 수 있다.

$$A_{m+1} = \frac{1}{2}A_m\left(1+\alpha_m^*\right)e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2}B_m\left(1-\alpha_m^*\right)e^{ik_m^* h_m} \tag{2.10a}$$

$$B_{m+1} = \frac{1}{2}A_m\left(1-\alpha_m^*\right)e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2}B_m\left(1+\alpha_m^*\right)e^{ik_m^* h_m} \tag{2.10b}$$

$$\alpha_{m+1}^* = \frac{\rho_m\sqrt{G_m/\rho_m}\left(1+i\xi_m\right)}{\rho_{m+1}\sqrt{G_{m+1}/\rho_{m+1}}\left(1+i\xi_{m+1}\right)} \tag{2.11}$$

위의 식을 사용하여 지층간에 다음과 같은 전달함수를 유도할 수 있다.

$$F_{ij}(\omega) = \frac{|u_i|}{|u_j|} = \frac{A_i(\omega)+B_i(\omega)}{A_j(\omega)+B_j(\omega)} \tag{2.12}$$

전달함수(Transfer Function)는 특정 층에서의 변위를 알고 있을 때 다음 층의 변위를 계산할 수 있는 식이다. 따라서 지반 증폭효과(amplification)는 전달함수를 통하여 정의된다.

전달함수는 주기함수를 가진 입력하중에 대한 지반응답의 수학적 해이다. 하지만 지진파는 일정한 주기와 진폭으로 정의되는 주기함수와 달리 불규칙적인 특성을 가지고 있다. 따라서 지진파와 같은 불규칙 진동에 대한 해는 어떠한 불규칙 운동도 주기함수들의 합으로 나타낼 수 있는 Fourier transform의 특성을 이용하여 구할 수 있다. Fourier transform을 이용하여 응답운동을 구하는 방법은 다음과 같다.

① Fourier transform으로 지진파를 일정한 수의 단순조화파의 합으로 변환한다.

② 각각의 단순조화파에 대한 응답을 전달함수를 통하여 계산한다.

③ 계산된 응답을 Fourier Spectrum에 곱한다.

④ Inverse Fourier transform을 시켜 응답운동을 구한다.

이 과정을 그림 8에 도식적으로 나타내었다.

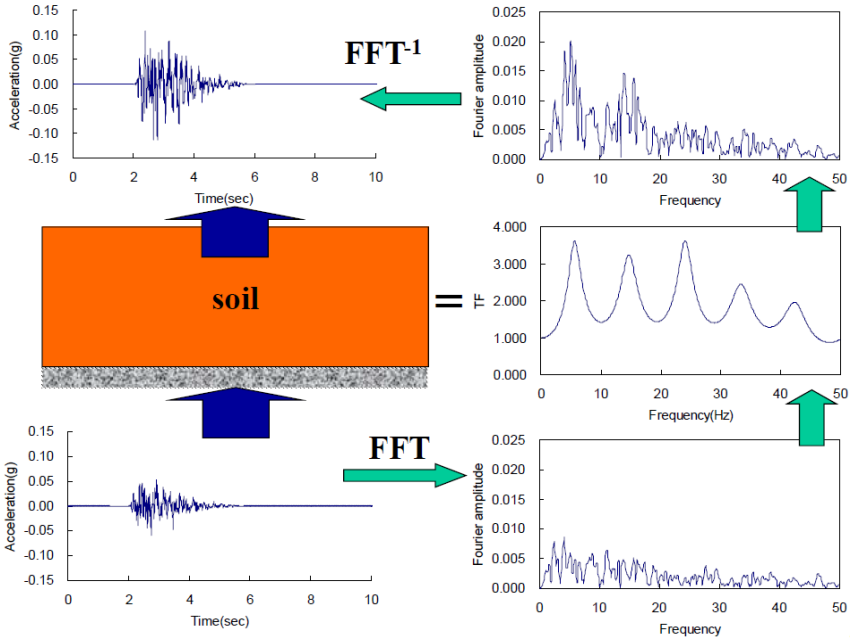


그림 8 flowchart of frequency domain analysis

지반에 지진하중을 가하게 되면 이로 인하여 전단변형률이 발생하고 이 변형률은 시간에 따라서 변하지만, 주파수영역 해석에서는 전단탄성계수와 감쇠비 값이 변하는 것을 반영하지 못한다. 등가선형해석방법은 이들이 시간에 따라 변화하는 것을 간접적으로 고려할 수 있는 방법이다.

선형해석시 사용되는 전단탄성계수와 감쇠비는 지반의 한 층에서 일정

한 값을 가지므로, 이에 상응하는 각층의 변형률 값을 산정하는 것이 이 방법의 핵심이다. 공진주 시험을 통해 구해지는 변형률에 따른 감쇠비 및 전단탄성계수 곡선은 그림 9과 같이 단순조화 운동에 의해 구해지며 전단변형률의 크기는 최대전단변형률의 크기에 따라 결정된다. 그러나 대부분 지진이력의 경우 지진운동이 가해지는 시간 이력 내에서 최대응력은 초기에 1~2회 정도 발생되게 된다. 그림 9에 공진주 시험과 지진운동으로 겪게 되는 지반의 변형률의 이력곡선을 비교하였다.

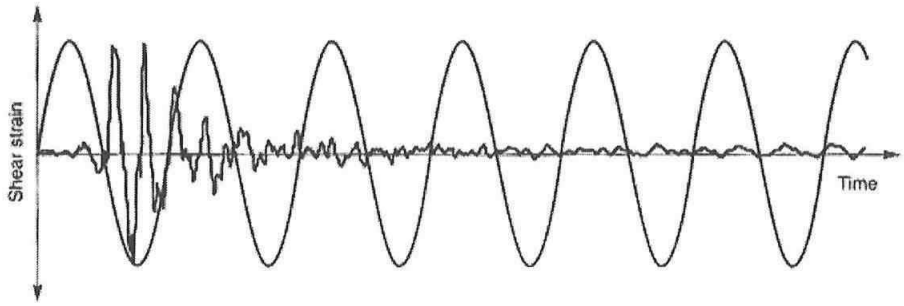


그림 9 Comparison of shear strain hysteresis loop of ground by interior test and earthquake motion

공진주 시험 중 지반이 받는 변형에너지는 일시적 진동인 지진에 의해 발생하는 지반의 변형에너지에 비하여 훨씬 크다. 따라서 이를 보정하기 위하여 지진 시 지반이 가지는 변형률의 크기는 최대전단변형률의 50~70%의 범위에서 유효변형률을 산정하여 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 최종 결과로 얻게 되는 지반의 지진 응답은 유효변형률의 범위에 큰 영향을 받지 않으므로, 일반적으로 최대전단응력의 65%를 사용한다. 또한 SHAKE91[3]에서와 같이 최대 전단 변형률의 크기를 지진 규모의 함수로 다음과 같이 정의하여 사용할 수도 있다(Idriss & Sun, 1992).

$$R_r = \frac{r_{eff}}{r_{\max}} = \frac{(M-1)}{10} \tag{2.13}$$

여기서 $r_{\max}$ 는 최대전단변형률, r_{eff} 는 유효전단변형률이다.

지진응답 산정시 계산된 변형률의 크기는 전달함수를 구성하는 등가선형 전단탄성계수 및 감쇠비의 값에 영향을 주는 요소이므로 모든 지반층에서 아래와 같은 과정을 통하여 최적값을 찾게 된다. 이를 도식적으로 나타내면 그림 10과 같다.

① 각 층에 대한 초기 가정치 G와 ξ를 산정한다. 일반적으로 초기 가정치는 모든 층의 전단탄성감소계수와 감쇠비 곡선에서 최소변형률에서의 G 와 ξ를 사용한다. 따라서 G 는 최대, ξ는 최소값으로 가정하게 된다.

② 초기 가정치 G와 ξ를 식(2.8)와 (2.9)에 대입하여 전달함수를 구하며 이를 통하여 지반 응답 및 각 층의 변형률 시간이력을 산정한다.

③ 산정된 변형률 시간이력으로부터 얻어진 최대 변형률로부터 각 층의 유효변형률을 계산한다. j번째 층에 대한 유효변형률은 다름과 같이 계산할 수 있다.

$$r_{eff}^{(i)} = R_r r_{\max}^{(i)} \tag{2.14}$$

④ 위에서 산정된 유효 전단응력으로부터 상응하는 등가선형 감쇠비(ξ_{i+1})와 전단탄성계수(G_{i+1})를 사용하여 지반응답 및 각 층의 변형률 시간이력을 산정한다.

⑤ ②~④의 과정을 반복하여 각 층에서 계산된 전단탄성계수 및 감쇠비가 정해진 전단탄성계수 및 감쇠비와의 허용오차 내에 존재

할 때까지 반복 연산을 수행한다.

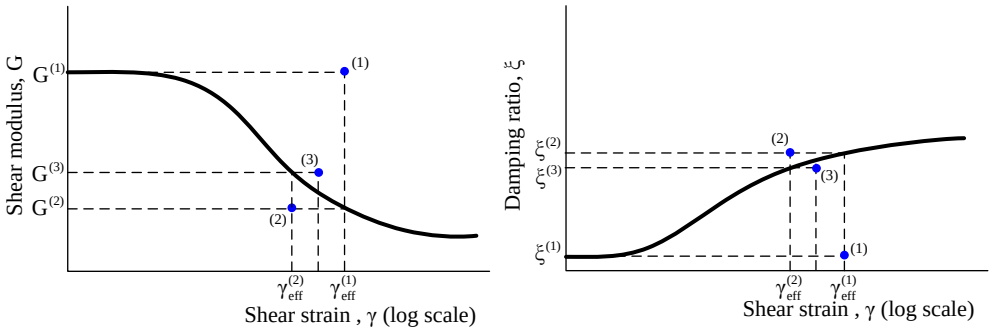


그림 10 Process of calculation repeated for equivalent linear analysis

이와 같은 일련의 등가선형 해석기법은 지반의 지진 거동시 각 시간대에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비의 변형률에 따른 변화를 고려하지 못하나, 비교적 신뢰할 수 있는 결과를 제공하며 1972년 Schnable 등에 의하여 SHAKE91[3] 프로그램으로 일반인에게 널리 알려졌다.

3. 지반응답거동의 증폭

지진발생시 지반응답거동은 지반의 전달함수로 대표될 수 있다. 지반의 전달함수는 식(2.12)와 같이 구해지며 이는 지반의 기하학적 특성(지층의 두께) 및 지반과 암반의 동적변형 특성(전단파속도, 감쇠비)에 따라 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 위의 영향요소 중 기하학적 형상과 지반의 전단파 속도는 지층의 공진주파수를 결정하며 이는 주파수 영역에서 특정 주파수 대역의 에너지가 크게 증폭이 일어나는 현상을 야기시킨다. 지반이 가지는 감쇠비는 지진시 지반에 의한 증폭현상을 감소시키는 역할을 하며 주파수대역이 높아짐에 따라 영향 정도가 커지게 된다.

반무한 탄성 암반 위에 지반이 존재하는 경우 강체 암반 위에 지반이 존재하는 경우에 비하여 지표면 자유장에서의 지반운동 크기는 적게 나타나므로, 기반암과 그 상부에 위치하는 지반과의 강성도 차이가 커짐에 따라 지반증폭현상이 크게 발생하게 된다. 앞에서 설명한 바와 같이 지반은 변형률의 크기에 따라 동적변형특성(전단탄성계수, 감쇠비)이 변화하는 비선형 특성을 가지므로, 위에 설명된 영향요소들 역시 지반의 변형률에 따라 그 영향 정도가 달라지는 것은 명확한 사실이다. 따라서 지반이 가지는 변형률에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비 곡선의 특성에 따라 지반증폭현상 역시 큰 영향을 받게 된다. 지반의 전달함수는 여러 가지 영향요소의 영향을 받으며 특히 전달함수가 가지는 공진 주파수에 의해 특정 주파수 대역에서 매우 큰 증폭이 일어남을 수 알 수 있었다. 따라서, 만약 기반암에 도달한 입력 지진의 에너지가 대부분 지층이 가지는 공진주파수 대역과 일치한다면 매우 큰 증폭이 일어날 것이며, 그렇지 않은 경우 미소한 증폭이 발생할 것이다.

제 3 절 지반-구조물 상호작용

암반노두(outcrop of rock)에서 지진파 특성은 기저암반(bed rock)에서 지진파 특성과 거의 유사하다고 할 수 있지만, 연약지반이나 깊은 지반의 지표면(free surface)에서의 지진파 특성은 지반의 특성에 따라 크게 달라질 수 있다. 특히, 연약지반에 구조물이 건설될 경우, 기초에 인접한 Near Field의 특성과 입력 지진파의 특성이 기초의 형상과 구조물의 동적 특성에 따라 달라지기 때문에, 지진시 연약 지반 위에 건설된 구조물의

거동은 암반 위에 놓인 구조물의 거동과는 큰 거동의 차이를 보이는데, 이와 같이 지반과 구조물이 서로 영향을 미치는 현상을 지반-구조물 상호작용(soil-structure interaction, SSI)이라고 한다. 지반-구조물 상호작용을 고려한 내진설계는 1960년대 미국 원자력규제위원회(nuclear regulatory commission, NRC)에서 원자력 발전소의 설계를 수행하면서 시작되었다. 그 이후 지반 및 구조분야에서 체계적인 연구를 통해, 중요 구조물의 내진설계시 고려 해야 할 중요한 분야 중에 하나로 자리잡게 되었다.

지진에 의한 구조물의 응답을 구하고자 할 때는 먼저 지반-구조물 상호작용의 해석 유무를 결정해야 한다. 보통 암반 상에 건설된 구조물은 지반-구조물 상호작용 효과가 거의 없기 때문에 SSI를 무시할 수 있다. 여기서 보통 암반이란 일반적으로 전단 변형률이 10^{-6}이하일 경우 전단파 속도가 1100 m/s 이상인 지반을 말한다. 그러나 최근 원전과 같은 중요 구조물의 경우, 지반의 전단파 속도가 2500m/s 이상인 경우를 제외하고는 지반-구조물 상호작용 효과를 내진설계에 고려하도록 규준을 강화하였다.

1. 운동상호작용과 관성상호작용

지반-구조물 상호작용 효과는 다음과 같다.

① (운동 상호작용에 의해) 구조물에 작용되는 기초의 지진운동이 변한다.

② (관성 상호작용에 의해) 구조물의 동적특성이 변한다(통상 구조물보다 강성이 작은 지반의 영향으로 구조계의 강성과 고유진동수가 작아짐).

③ (관성 상호작용에 의한) 방사감쇠(radiation damping)의 추가로 인한 구조계의 감쇠 증가이다.

이러한 효과는 지반의 적층 형상, 물성치, 입력지진과 구조물의 진동수 특성에 따라 다르므로, 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진응답해석 결과와 고정지반을 가정한 일반적인 지진응답해석 결과를 비교하여 응답의 크고 작음을 단정하기는 어렵다. 즉, 지반-구조물 상호작용의 영향은 획일적으로 예측할 수 있는 부분이 아니며, 지반과 구조물 그리고 지진의 주파수 특성에 따라 그 결과가 다르게 나타나는 특성을 가지고 있다.

지반-구조물 상호작용은 다음 그림 11과 같이 운동 상호작용(kinematic interaction)과 관성 상호작용(inertial interaction)으로 구분할 수 있다.

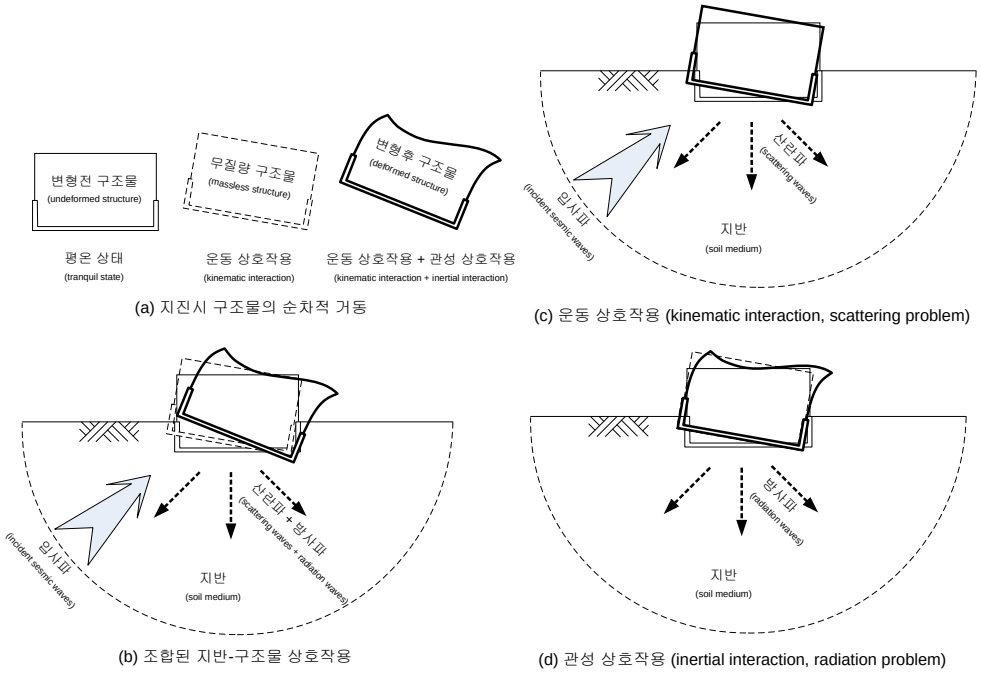


그림 11 지반-구조물 상호작용

1.1 운동 상호작용

운동 상호작용은 그림 11(c)와 같이 무질량 구조물(massless structure)이 놓인 지반의 거동은 구조물이 없는 경우의 지반거동(즉, 자유장 거동)과 다르게 나타나는 현상을 말한다. 즉, 고진동수 성분을 갖는 입사파는 파장이 짧아 기초의 강성에 의해 흡수 또는 반사되지만, 저진동수 성분을 갖는 입사파는 파장이 길어, 구조물을 통과하여 구조물의 운동을 유발시키게 된다. 여기서 운동 상호작용에 의해 발생하는 지반 운동을 산란운동(scattering motion)이라 하며 수직 입사하는 전단파는 주로 구조물의 회전운동(rocking motion)을 유발시킨다. 운동 상호작용은 입사파의 형태와 기초의 형상에 주로 영향을 받는데, 구조물이 지표면 상에 놓이거나 기초의 묻힌 깊이가 얕으면 표면파(surface wave)를 고려하지 않을 경우 SSI 영향이 크지 않아 지진응답해석시 그 영향을 무시하기도 한다.

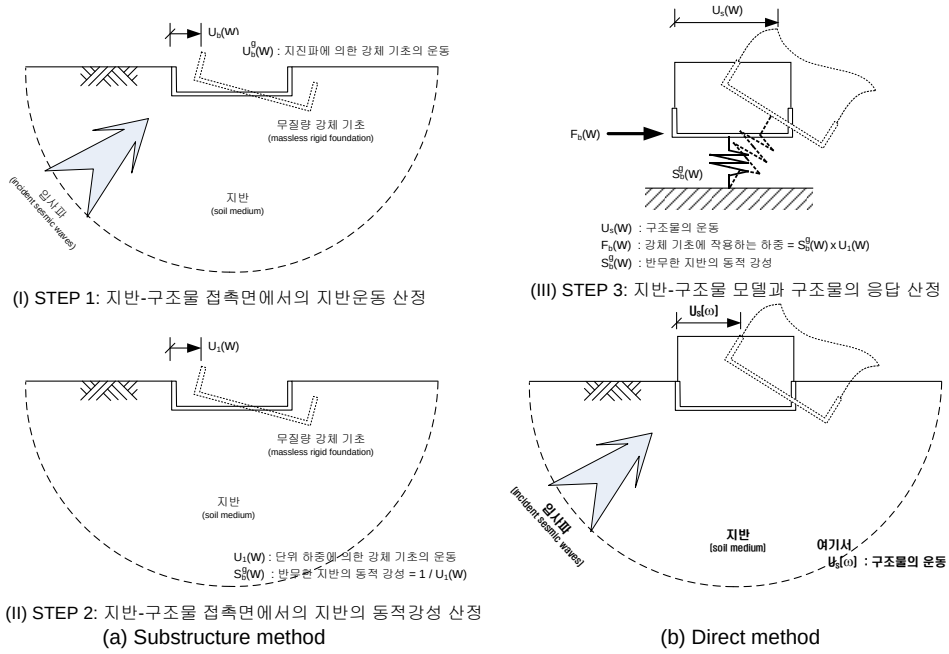
1.2 관성 상호작용

관성 상호작용은 그림 11(d)와 같이 지진 입력파에 의해 구조물이 진동하면 구조물의 질량에 의해 관성력이 발생하게 되고, 이 관성력에 의한 구조물의 운동에너지는 다시 Far Field으로 방사되면서 지반의 방사운동(radiation motion)을 유발시킨다. 관성 상호작용은 Near Field와 구조물간의 동적 강성차가 클수록 커지므로, 강성이 강한 저층 구조물이 연약한 지반 위에 놓였을 경우 그 영향이 더 크게 나타난다.

2. 부분구조법과 직접법

지반-구조물 상호작용의 해석방법은 그림 12와 같이 크게 부분구조법

(substructure method)과 직접법(direct method)으로 나눌 수 있다.



(a) Substructure method (b) Direct method

그림 12 부분구조법과 직접법

2.1 부분구조법

부분구조법은 전체의 해석과정을 다음과 같은 일련의 단계별로 분리 수행하고, 그 결과를 종합하여 최종응답을 구하는 방법이다. 운동 상호작용과 관성 상호작용의 개념을 사용하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 부분구조법에 의한 지진해석 절차는 그림 12(a)의 (I)~(III)와 같이 도식화 할 수 있다.

- ✓ STEP 1. 운동 상호작용 개념에 근거한 구조물의 무질량 기초를 가정하여 지진 시 구조물 기초의 산란운동을 구한다. 즉, 자유장에서 정의된 통제운동으로부터 지반의 특성과 기초의 영향을 고려하여 지반-구조물의 접촉면에서의 입력 운동을 결정한다.

- ✓ STEP 2. 운동 상호작용 개념에 근거한 구조물의 무질량 기초를 가정하여 지반의 동적강성(임피던스)을 산정한다. 즉, 지반-구조물 접촉면에서 반무한 지반의 동적 강성을 결정한다.
- ✓ STEP 3. 관성 상호작용 개념에 근거하여 지반의 영향을 임피던스(STEP 2)로 모델링한 구조물에 산란운동(STEP 1)을 입력운동으로 하여 지진시 구조물의 응답을 구한다. 즉, STEP 2에서 구한 지반의 동적 강성을 구조물과 조합하여 지반-구조물 시스템을 모델링한 후, STEP 1에서 구한 입력 운동으로 가진하여 구조물의 응답을 계산한다.

부분구조법은 지반의 비선형 특성을 자세히 고려하긴 힘들지만 다음과 같은 장점이 있다.

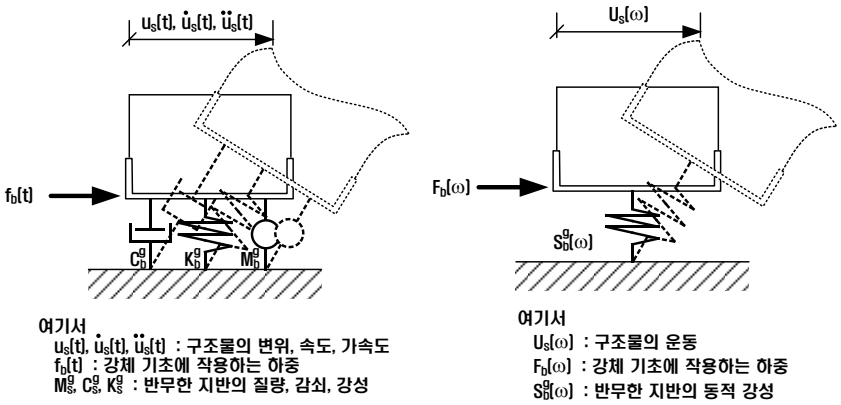
- 각 단계별로 가장 적합한 해석방법을 선택하여 해석할 수 있다. 즉, 각 단계별로 유한요소법, 경계요소법, 해석적 방법 등 적합하거나 용이한 방법을 선택적으로 사용할 수 있다.
- 각 단계별로 결과에 대한 평가와 민감도 분석 등이 가능하고, 직접법에 비해 경제적인 해석을 수행할 수 있다.

2.2 직접법

직접법은 구조물과 일정한 범위의 Near Field를 유한요소법이나 유한차분법 등을 통하여 동시에 모델링하여 해석하는 방법이다. 직접법은 지반-구조물의 경계면에서 비선형 적합조건 및 지반의 비선형성 등을 고려할 수 있는 장점이 있지만, 일반적으로 부분구조법에 비해 복잡하고 비경제적이다.

3. 시간영역방법과 진동수영역방법

지반-구조물 상호작용의 해석방법은 그림 13와 같이 시간영역방법(time domain method)과 진동수영역방법(frequency domain method)으로 구분된다.



(a) Time domain method (b) Frequency domain method

그림 13 시간영역방법과 진동수영역방법

3.1 진동수영역방법

진동수영역에서 지반-구조물 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} S_{ss}(\omega) & S_{sb}(\omega) \\ S_{bs}(\omega) & S_{bb}(\omega)+S_{bb}^{g}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_s(\omega) \\ U_b(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ f_b(\omega) \end{Bmatrix} \tag{2.15}$$

여기서 아래첨자는 시간영역에서와 그 의미가 같다.

다만, 동적 강성행렬$\left[S(\omega)\right]$은 지반과 구조물의 질량행렬$\left[M\right]$, 감쇠행렬$\left[C\right]$, 강성행렬$\left[K\right]$을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left[S(\omega)\right] = \left[K\right] + i\omega\left[C\right] - \omega^2\left[M\right] \tag{2.16}$$

또한 $U(\omega)$ 와 $F(\omega)$ 는 진동수영역에서의 변위벡터와 하중벡터이며, 다음과 같이 시간영역에서의 변위벡터[u]와 하중벡터[f]와는 Fourier transform 관계를 갖는다.

$$U(\omega)=\mathbf{F}\left[u(t)\right], \qquad F(\omega)=\mathbf{F}\left[f(t)\right] \tag{2.17}$$

진동수영역 해석방법은 해석에 사용되는 변수의 개수가 적어 계산이 간단하고, 심도가 얕고(<100m) 단단하고 지반상태 양호한 중약진 지역 ($a_{\max} \le 0.5$)에 적합하다. 하지만, 유효전단변형률(effective shear strain)을 이용한 해석은 가끔 잘못된 결과를 계산할 수도 있어 주의가 필요하다. 또한, 비선형거동특성을 반영할 수 없고, 간극수압을 고려할 수 없는 단점도 가지고 있다. 이론적으로 진동수영역방법은 선형해석에 국한되므로, 지반의 비선형 특성을 근사하기 위해 등가선형 해석 방법을 사용한다.

3.2 시간영역방법

시간영역에서 지반-구조물 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sb} \\ M_{bs} & M_{bb}+M_{bb}^{g} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{u}_s(t) \\ \ddot{u}_b(t) \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb}+C_{bb}^{g} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \dot{u}_s(t) \\ \dot{u}_b(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb}+K_{bb}^{g} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} u_s(t) \\ u_b(t) \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} 0 \\ f_b(t) \end{Bmatrix} \tag{2.18}$$

s : 구조물(structure)

b : 구조물-지반의 경계면(boundary)

g : 지반(ground)

시간영역방법은 지반-구조물 시스템에서 발생할 수 있는 비선형 특성을 고려할 수 있는 반면, 반무한 지반으로의 파동 전파는 진동수 의존적인

특성을 나타내므로 이를 고려하기가 상대적으로 어렵다. 또한, 지반운동의 형태와 관계없이 지반의 비선형성을 고려할 수 있고, 간극수압의 생성과 소산을 고려할 수 있는 장점이 있는 반면, 상대적으로 계산이 복잡하고 경제적이지 못하다는 단점이 있다. 하지만 최근 컴퓨터 기술의 발달로 이러한 단점을 극복하고 빠른 시간 내에 비선형문제를 계산할 수 있어 성능기반설계(Performance Based Design)에 사용되고 있다.

4. 지반의 경계조건

지반-구조물 시스템은 그림 14~18과 같이 구조물, Near Field, Far Field로 나눌 수 있으며, Near Field과 Far Field의 경계면을 가상경계면(artificial boundary surface)라 정의한다. 지반-구조물 상호작용에 의해 발생한 산란운동(Scattering)에너지와 방사운동(Radiation)에너지는 파동의 형태로 반무한 지반으로 전파되어 소멸하게 된다. 지반-구조물 상호작용 해석의 주관심대상은 구조물과 인접한 Near Field이며, 반무한영역으로 가정한 Far Field에 비하여 상대적으로 작은 부분이다. Near Field의 경우 유한요소법, 유한차분법 등을 사용하여 모델링할 수 있지만, Far Field의 반무한 지반을 모델링하는 것은 쉬운 일이 아니다. 또한 가상경계면을 일반 경계조건(롤러, 힌지, 고정단, 스프링)으로 가정하여 해석을 수행할 경우, 반무한 지반으로 전파되면서 소멸되어야 할 반사파는 가상경계면에서 다시 반사되어 지반-구조물 시스템의 거동에 영향을 주게 된다. 따라서 이러한 까다로운 반무한 지반의 경계조건을 현실적으로 구현하기 위하여 다음과 같은 다양한 방법들이 개발되었다.

4.1 점성경계(viscous boundary)

점성경계는 유한요소 정식화와 비선형해석 등에 적합한 가상 경계를 고려하는 가장 일반적 방법 중에 하나이다. 일반적으로 널리 사용되는 Kuhlemeyer등(1969, 1973)이 제시한 표준 점성경계(standard viscous damper)에 의하면 가상경계면에서 방사파에 의해 발생하는 지반 입자 운동(particle motion)과 응력은 다음과 같다.

$$\sigma(t) = \rho v_p \dot{w}(t) \qquad \tau(t) = \rho v_s \dot{u}(t) \tag{2.19}$$

여기서 σ 와 τ 는 각각 가상경계면의 수직 응력(normal stress)과 전단 응력(shear stress); ρ 는 지반의 질량밀도; v_p 와 v_s 는 각각 지반의 P파와 S파 속도; $\dot{w}$ 와 $\dot{u}$ 는 각각 가상경계면에 수직방향과 접선방향으로 운동하는 지반입자의 속도이다.

가상경계면의 응력을 감쇠계수의 형태로 변환하면 다음과 같다.

$$c_p(t) = \rho v_p A \qquad c_s(t) = \rho v_s A \tag{2.20}$$

여기서 c_p 와 c_s 는 각각 지반의 P파와 S파에 대응하는 가상경계면의 감쇠계수, A는 응력을 하중으로 전환하기 위한 면적이다.

일반적으로 가상경계면에 입사하는 P파와 S파는 지반 특성에 따른 파동의 반사와 굴절 등에 의해 가상경계면에 수직으로 입사하지는 않으므로, 통상 가상경계면에 입사하는 파동의 경사를 고려하여 다음과 같이 나타낸다.

$$c_p(t) = \alpha_p \rho v_p A \qquad c_s(t) = \alpha_s \rho v_s A \tag{2.21}$$

여기서 이론상 가상경계면에 수직하는 P파에 대해 α_p = 1이고, 가상경계면에 수직하는 S파에 대해 α_s = 1이지만, 경험적으로 α_p = 1과 α_s =1/4

을 사용한다. 참고로 점성경계는 가상경계면을 통과하는 S파에 대해 효과가 떨어진다고 알려져 있다.

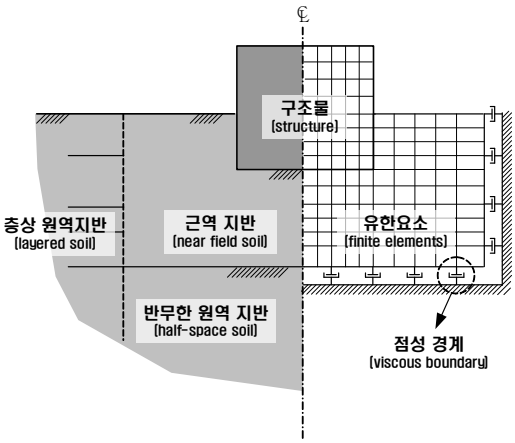


그림 14 점성경계

4.2 전달경계(transmitting boundary)

전달경계는 지반-구조물 상호작용 프로그램인 FLUSH(1975)와 SASSI(1981)에 적용되었으며, 수평방향으로 전파하는 표면파를 반해석적(semi-analytical) 방법으로 고려한다. 강체 암반 위에 놓인 층상지반에 연직 방향으로 가상경계면을 설정하고, Far Field로 전파하는 표면파를 고려한다. 반무한 지층을 근사하기 위해 수평 층상 지반의 깊이를 충분히 깊게 가정하여야 하고, 실체파를 고려하기 위해 점성경계 등을 추가적으로 사용하여야 한다.

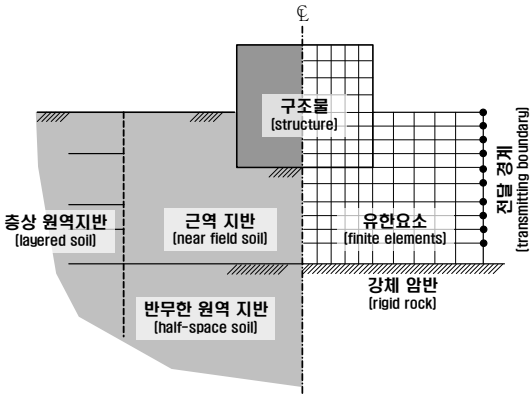


그림 15 전달경계

4.3 혼용경계(hybrid boundary)

혼용경계는 지반-구조물 상호작용 프로그램인 LASSI와 HASSI에 적용되었으며, Far Field의 임피던스를 해석적 방법으로 구한 후, 가상 경계에 설치하여 Far Field으로의 파동 전파를 근사한다(Penzien et al., 1983). 이 방법은 층상 지반의 임피던스를 구하기 어렵고, 가상 경계를 반원(2차원 해석) 또는 반구(3차원 해석)로 가정하여야 한다.

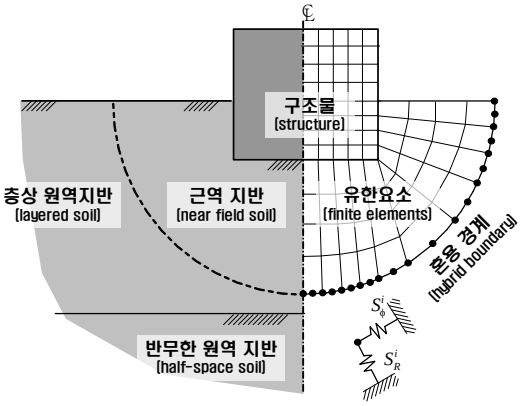


그림 16 혼용경계

4.4 경계요소(boundary element)

경계요소법(boundary element method, BEM)을 사용하여 Far Field을 모델링할 경우, 반무한 지반의 모델링이 용이하고, 가상 경계에서 이론적인 정확해를 구할 수 있다. 그러나 비선형 또는 층상 지반의 기본해(fundamental solution)를 구하기 어렵고, 경계요소법으로 유도한 Far Field의 시스템 행렬은 비대칭이므로, 유한요소법으로 유도한 Near Field의 대칭인 시스템 행렬과 조합이 어렵다.

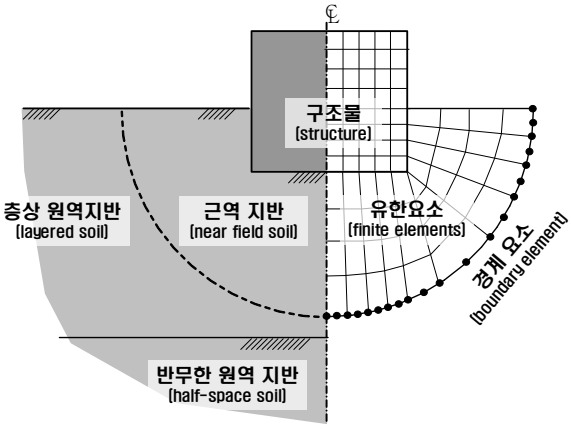


그림 17 경계요소

4.5 무한요소(infinite element)

무한요소를 유도하는 방법은 유한요소의 정식화와 동일한 절차로 무한 좌표계에서 정의한 형상함수(shape function)를 사용하여 이루어진다. 무한요소는 해석 대상의 종류와 모델링 방법에 따라 형상 함수를 달리 정의하여야 하지만 유한요소와 연계가 용이하다.

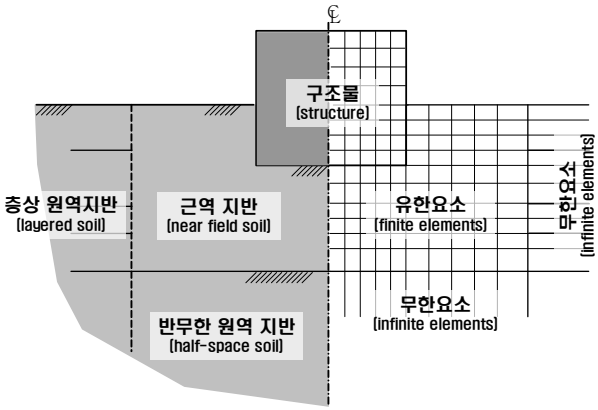


그림 18 무한요소

제 4 절 동적해석방법

지진이 발생하였을 때, 구조물의 정확한 응답을 얻기 위해서는 정적거동 보다는 동적거동이 지진의 운동형태에 가깝고 선형거동보다는 비선형거동이 실제의 응답과 더욱 유사하다. 하지만 일반적으로 우리는 구조물을 설계할 때 해석의 경제성과 하중의 보수성을 위하여 정적선형해석을 실시하는 경우가 많다. 하지만 도로교설계기준이나 건물설계기준(KBC)과 같은 가이드라인에서 내진해석에 있어서는 일정기준을 두어 동적해석을 실시하도록 하고 있다. 특히 원자력발전소의 경우 구조물의 복잡성을 고려하여 내진I등급에 해당하는 구조물은 동적해석을 실시하도록 하고 있으며 설계의 보수성을 보장하기 위하여 선형해석을 실시하고 있다.

동적해석은 크게 두가지 방법으로 나눌 수 있다. 먼저 구조물의 모드해석을 통하여 계산된 고유진동수로부터 설계응답스펙트럼에 해당하는 가속도를 계산하고 이를 SRSS나 CQC와 같은 모드조합법을 사용하여 응

답을 계산하는 응답스펙트럼해석법과 다자유도 운동방정식으로부터 모드중첩법이나 직접적분법을 통하여 응답을 계산하는 시간이력해석법이 있다.

1. 응답스펙트럼해석법

응답스펙트럼해석법은 구조동력학의 이론에 근거하여 구조물의 동적거동을 근사적으로 알아내는 방법이다. 이 방법은 구조물의 동적거동의 최대치를 구하기 위하여 사용된다. 왜냐하면 내진설계의 주 목적이 지진에 의하여 구조물에 발생하게 되는 변위나 응력의 최대치를 어떻게 제어하냐가 주 관심사이므로 구조물의 내진설계에 있어 주로 사용되는 동적해석법이다.

1.1 응답스펙트럼의 작성

응답스펙트럼해석을 실시하기 위해서는 먼저 응답스펙트럼이 필요하다. 보통 설계기준을 통하여 설계응답스펙트럼으로 제시되고 있는데 이는 지반의 특성을 반영하였다고 보기 어려운 상태이므로 앞서 제시한 방법들을 통하여 현장여건을 반영한 가속도시간이력을 계산하여 응답스펙트럼을 만들어 설계에 이용하기도 한다. 이러한 응답스펙트럼을 작성하는 방법은 그림 19와 같다.

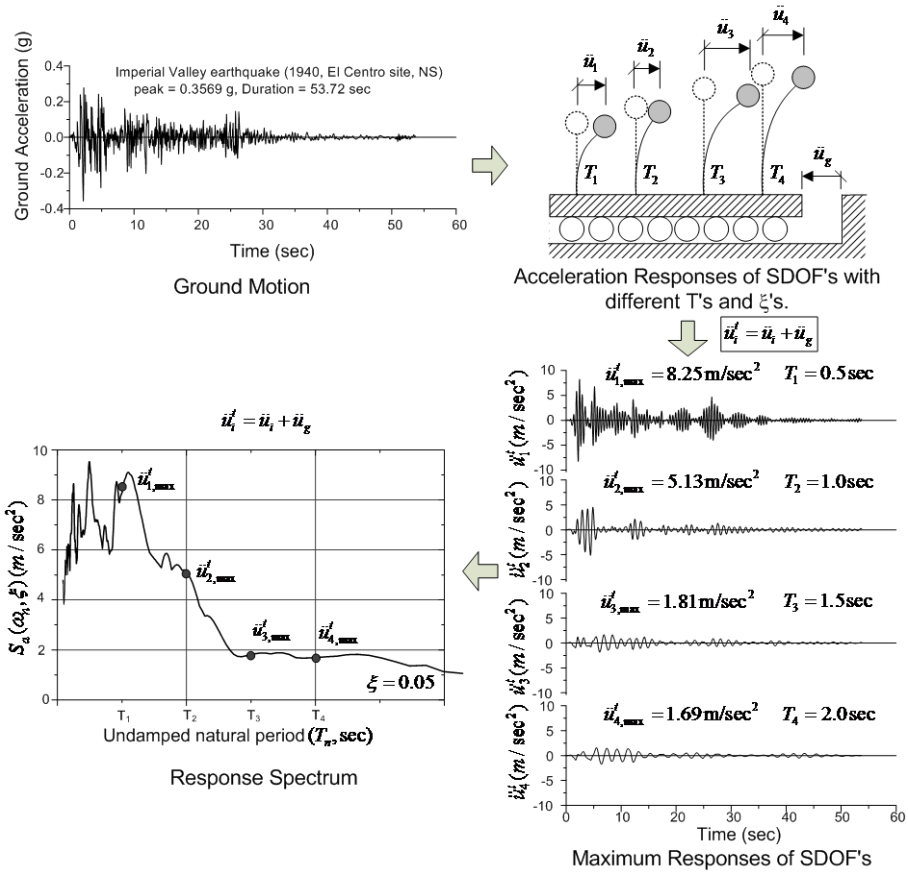


그림 19 응답스펙트럼 작성절차

먼저 계산된 가속도 시간이력을 단위 질량과 감쇠비를 가진 단자유도계에 가하면 이에 상응하는 응답이 계산된다. 이때, 계산에 사용되는 수치해석법은 보통 Newmark-β법을 사용하며 그 절차는 그림 20과 같다. 이렇게 계산된 응답의 최대값이 대상 단자유도계의 주기에 해당하는 응답이 된다. 여기서, 대상이 되는 주기를 바꾸어가며 응답을 구하고 그에 대한 각각의 최대값을 주기와의 관계로 나타내어 주면 응답스펙트럼이 작성되게 된다.

Special cases

(1) Average acceleration method ($\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{4}$)

(2) Linear acceleration method ($\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{6}$)

1.0 *Initial calculations*

1.1 $\ddot{u}_0 = \dfrac{p_0 - c\dot{u}_0 - ku_0}{m}$.

1.2 Select Δt.

1.3 $\hat{k} = k + \dfrac{\gamma}{\beta\,\Delta t}c + \dfrac{1}{\beta(\Delta t)^2}m$.

1.4 $a = \dfrac{1}{\beta\,\Delta t}m + \dfrac{\gamma}{\beta}c$; and $b = \dfrac{1}{2\beta}m + \Delta t\left(\dfrac{\gamma}{2\beta} - 1\right)c$.

2.0 *Calculations for each time step, i*

2.1 $\Delta\hat{p}_i = \Delta p_i + a\dot{u}_i + b\ddot{u}_i$.

2.2 $\Delta u_i = \dfrac{\Delta\hat{p}_i}{\hat{k}}$.

2.3 $\Delta\dot{u}_i = \dfrac{\gamma}{\beta\,\Delta t}\Delta u_i - \dfrac{\gamma}{\beta}\dot{u}_i + \Delta t\left(1 - \dfrac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{u}_i$.

2.4 $\Delta\ddot{u}_i = \dfrac{1}{\beta(\Delta t)^2}\Delta u_i - \dfrac{1}{\beta\Delta t}\dot{u}_i - \dfrac{1}{2\beta}\ddot{u}_i$.

2.5 $u_{i+1} = u_i + \Delta u_i, \dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta\dot{u}_i, \ddot{u}_{i+1} = \ddot{u}_i + \Delta\ddot{u}_i$.

3.0 *Repetition for the next time step*. Replace i by $i + 1$ and implement steps 2.1 to 2.5 for the next time step.

그림 20 Newmark's method:linear system[1]

1.2 모드해석

모드해석 또는 고유진동수해석(natural frequency analysis), 자유진동해석(free vibration analysis)은 구조물이 갖고 있는 고유진동수와 각 고유진동수에서의 변형형상(모드형상, mode shape)을 파악 하여 구조물의 공진여부와 진동에 의한 변형형상을 예측하는 해석이다.

만약 구조물 자체의 고유진동수와 외부하중의 작동주파수가 일치하게 되면 구조물에 공진(resonance) 이 발생하게 된다. 구조물에 공진이 발생하면 진동과 소음이 급격하게 커지고 궁극적으로 구조물이 파괴될 수도 있다. 따라서, 진동이나 주기하중이 지속적으로 작용하는 구조물의 경우

에는 반드시 모드해석을 수행하여 공진의 발생 가능성을 검토하는 것이 좋다. 모드해석은 모든 동적해석의 기본이 되는 해석이며, 특히 응답스펙트럼해석의 고유진동수를 파악하는데 대단히 중요하다.

모드해석은 구조물에 감쇠와 외력이 없는 조건에 대한 자유진동해석(undamped free vibration)이다. 이에 대한 단자유도계의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + kx = 0 \tag{2.22}$$

이 식을 일반적인 다자유도계에 대한 행렬식으로 표현하면 다음과 같습니다.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \tag{2.23}$$

이 식은 단순조화운동(simple harmonic motion, SHM)을 나타내며, 단순조화운동(SHM)의 일반적인 해는 $\{x\} = \{\Phi\}\sin(\omega t)$, 즉 $\{x\} = \{\Phi\}e^{i\omega t}$ 의 형태로 가정할 수 있다. 이 가정해는 진동수 ω에 따라 sin곡선의 형태로 움직이는 모드형상(또는 진폭)$\{\Phi\}$를 갖는 것을 의미한다.

이를 식(2.23)에 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\left([K] - \omega^2[M]\right)\{\Phi\} = 0 \tag{2.24}$$

이 식은 고유치문제(eigenproblem)이며, 해는 $\det\left([A] - \lambda[B]\right) = 0$ 를 통하여 구할 수 있다. 여기서 계산된 λ_i를 고유치(eigenvalue), 각 λ_i에 대한 $\{\Phi\}$ 를 고유벡터(eigenvector)라고 한다. 즉, 모드해석은 결국 관성항 $\omega^2[M]$과 탄성항$[K]$이 서로 평형(balance)이 되는 진동수ω와 모드형상 $\{\Phi\}$를 찾는 것을 의미함을 알 수 있다. 참고로, $\left([K] - \omega^2[M]\right)$을 동적

강성(dynamic stiffness)이라고 하며, 모드해석은 이 동적강성이 무효화 되는 진동수, 모드형상을 찾는 것으로도 생각할 수 있다.

1.3 응답스펙트럼해석 절차

응답스펙트럼해석을 사용한 다자유도계의 최대 응답을 구하는 과정은 다음과 같다.

① 모드의 직교성을 이용하여 지진하중(지반가속도)을 받는 다자유도계의 운동방정식을 서로 독립된 단자유도계의 운동방정식으로 분리한다.

② n번째 모드와 동일한 진동수와 감쇠비를 가지는 등가의 단자유계를 설정한다.

③ 등가의 단자유도계 운동방정식으로부터 모드참여계수를 구한다. 주의할 점은 모드참여계수가 클수록 해당 모드의 영향이 반드시 큰 것은 아니다. 이것은 모드형상은 임의로 정규화할 수 있으며, 모드참여계수는 모드 형상을 어떻게 정규화 하는지에 따라 달라질 수 있기 때문이다.

④ 구조물의 모드별 최대응답을 구한다. 응답스펙트럼을 통해 구한 최대 응답에 모드참여계수를 곱하면, 구조물의 각 모드별 기여도를 고려한 모드별 최대응답을 구할 수 있다.

⑤ 모든 모드의 응답이 동시에 최대에 도달하는 경우, 각 모드별 구한 절대최대변위를 더하면 구조 시스템의 최대변위응답을 구할 수 있지만, 실제 모든 모드의 응답이 동시에 최대로 발생할 가능성은 확률적으로 매우 낮다. 따라서 최대변위응답을 구하기 위해

모드별 최대응답을 조합하는 방법을 사용한다. 가장 많이 사용하는 조합법으로 SRSS와 CQC가 있다. 이 조합법 중에서 일반적으로 SRSS 조합법이 보편적으로 많이 사용되지만, 2개 이상의 인접한 모드에 대한 진동주기가 서로 비슷한 경우에는 응답을 과소평가할 수 있다.

2. 시간이력해석법

시간이력해석법은 구조물에 지진파가 입사될 경우 발생하는 응답의 시간에 따른 변화를 응답시간이력이라하며 이러한 지진응답의 시간이력을 자세히 알아내기 위하여 사용되는 방법이다. 모드중첩법과 직접적분법이 시간이력해석법의 대표적인 방법인데 모드중첩법은 선형해석을 비교적 정확하게 수행할 수 있는 방법인 반면, 직접적분법은 선형해석 및 비선형해석도 가능하다. 그러나 이러한 방법들을 사용하기 위해서는 먼저 대상 구조물에 영향을 미치게 될 지진에 의한 지반가속도시간이력이 필요하므로 사용하기에 상당히 번거로울 뿐만 아니라 해석시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 하지만 최근 발달된 컴퓨터의 계산성능과 비선형해석에 의한 구조물의 성능기반설계가 일반화되어 감에 따라 시간이력해석에 대한 요구도는 더욱 커질 전망이다.

3. 등가정적해석법

지진의 영향을 나타낼 수 있는 등가의 정적하중을 먼저 산정하고 이에 대하여 정적해석을 수행함으로써 구조물 각부의 응력을 구하여 내진설계에 반영하는 방법을 등가정적해석법이라 한다. 이 방법은 세 가지의 해

석법 중에서 가장 정확성이 떨어지기 때문에 간단한 구조물이나 정형구조물에 주로 사용이 되며 부정확성을 감안하여 해석에 사 용되는 지진하중을 안전측이 되도록 약간 과대평가하는 경향이 있다.

제 3 장 내진I등급 구조물의 내진해석

본 장에서는 내진I등급 구조물에 해당하는 격납건물여과배기계통 건물의 내진해석을 수행하였다. 앞서 2장에서 서술한 이론적 배경을 바탕으로 각 절차에 해당하는 결과물을 산출하였다. 만약, 본 해석의 대상이 건물이 아닌 CFVS vessel과 같은 기계분야의 해석이라면 CFVS내부의 유체로 인해 유체-구조물 동적 상호작용 해석이 필요할 것이다. 따라서 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

제 1 절 현장지반특성 및 입력지진생성

1. 현장 지반 특성

여과배기계통의 설치는 해당 설비의 설치가 필요한 모든 원자력 발전소를 그 대상으로 하나, 본 과업에서는 2005년 준공된 울진 5,6호기를 적용 대상으로 가정하였다.

울진 5,6호기의 최종안전성분석보고서(FSAR)에 따르면, 격납건물이 위치하는 구간의 지층 구성 상태는 지표면으로부터 매립층, 풍화대, 암반층(연암, 보통암, 경암)으로 구성되어 있다. 매립층은 주로 자갈이 섞인 실트질 모래로 구성되며, 상대밀도는 보통 조밀한 상태로 나타났다. 풍화대 상부는 주로 사질토 성분으로 구성되어 있으며 하부는 모암의 조직 및 상태를 유사하게 보여주며, 상대밀도는 보통~매우 조밀한 상태로 나타난다. 암반층은 주로 호상 편마암(Banded Gneiss), 각섬석 편암

(Amphibole Schist), 흑운모 화강 편마암(Biotite Granite Gneiss)으로 구성되는 것으로 조사되었다. 일부 파쇄대가 존재하며, 전반적으로 약함~강함의 강도를 나타낸다. 적용 대상 부지에 대한 지층분포 현황은 다음 그림 21과 같다. 다만, 여과배기계통이 설치될 위치의 주변 시추주상도는 현장 조사가 이루어 지지 않은 상태이므로 기존 시추공들 중 P-20에 해당하는 시추공을 해당 부지의 지반조건으로 가정하였다. 해당 시추주상도는 부록 A에 첨부하였다.

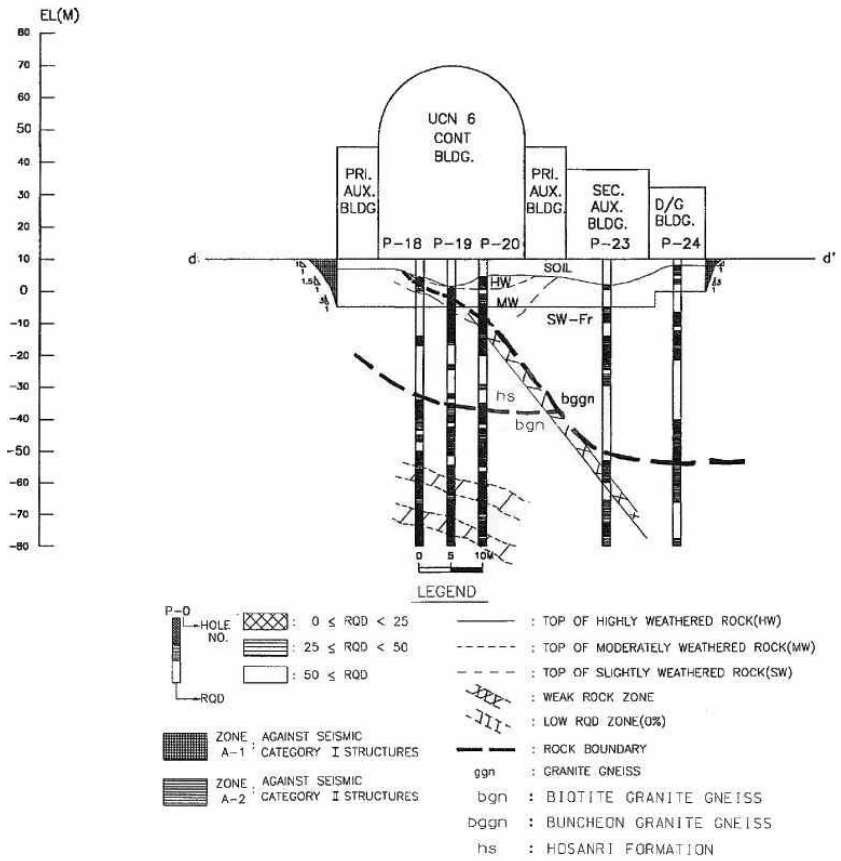


그림 21 울진 5,6호기 격납건물 구간 굴착 및 매립단면도

2. 입력 지진 생성

본 시설은 내진범주 I급 구조물로서 안전정지지진(SSE) 및 운전기준지진(OBE) 하중에 대하여 견딜 수 있도록 설계하여야 하므로 지진입력운동은 각각 직교하는 두 개의 수평방향 성분(EW 방향, NS 방향)과 한 개의 수직방향 성분으로 구성된다.

원자력발전소 내진I등급 구조물의 지진에 의한 응력을 구하기 위해서 안전정지지진의 최대 지반 가속도는 수평 및 연직방향 0.3g, 운전기준지진의 최대 지반 가속도는 수평 및 연직방향 0.1g의 요건을 충족하고, 그림 22과 그림 23와 같이 US NRC RG 1.60[9]의 표준응답스펙트럼에 준하는 가속도시간이력을 사용하여야 한다.

인공지진 생성을 위하여 주파수의 범위는 0.2Hz~50Hz 로 하였고 Envelop function 은 Trapezoidal 형태를 옵션으로 선택하였다. 또한 총 이력시간은 24초이며, 초기 발진시간 2초, 강진 지속시간 10초로 가정하여 최대가속도 1.0g에 해당하는 감쇠비 5%의 수평(EW, NS) 및 수직(VT)의 인공지진을 생성하였다.

제시된 설계응답스펙트럼과 시간조건을 바탕으로 SIMQKE[2]를 통하여 생성한 인공지진 시간이력은 그림 24~26와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 생성된 인공지진의 응답스펙트럼이 설계응답스펙트럼과 유사한 형태로 나타남을 알 수 있다. 이렇게 생성된 인공지진 시간이력은 설계요건(SSE 0.3g, OBE 0.1g)을 충족하는 최대가속도로 scaling하여 본 시설의 지층조건에 대한 지반응답해석(자유장해석)을 실시하고, 여기서 도출된 시간이력가속도를 지반-구조물 상호작용 해석 시 입력 지진으로 사용하게 된다.

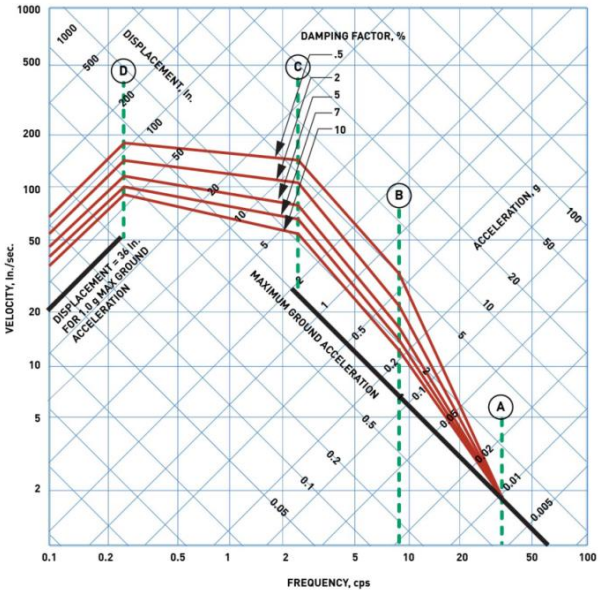


그림 22 수평방향 설계응답스펙트럼

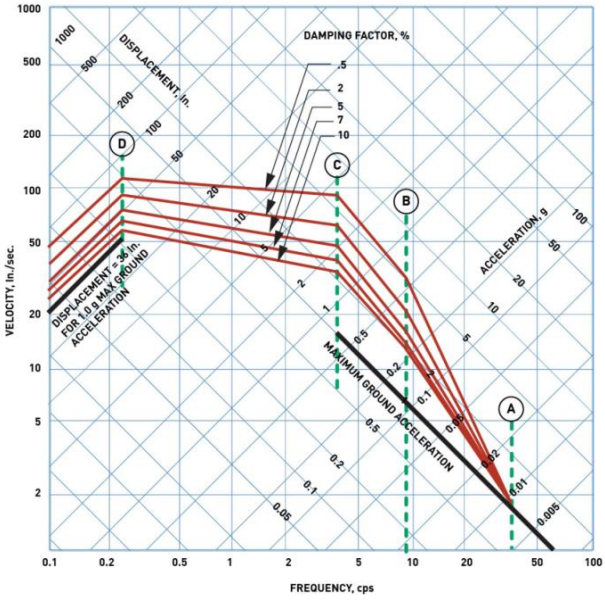


그림 23 수직방향 설계응답스펙트럼

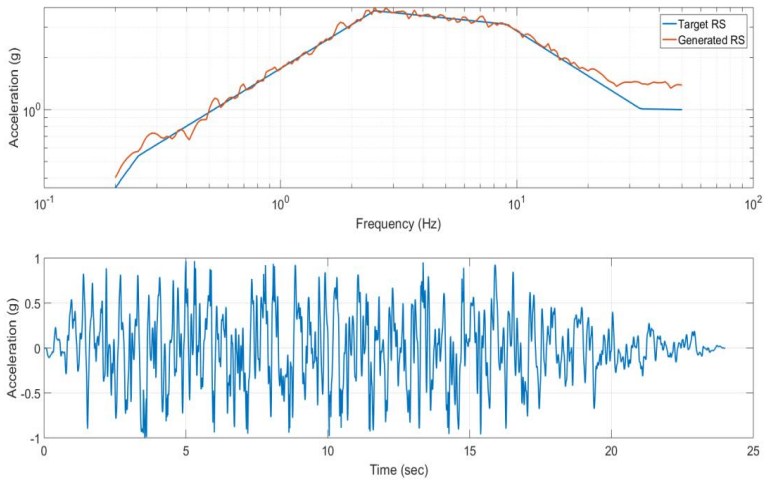


그림 24 인공지진 가속도 시간이력 (EW방향)

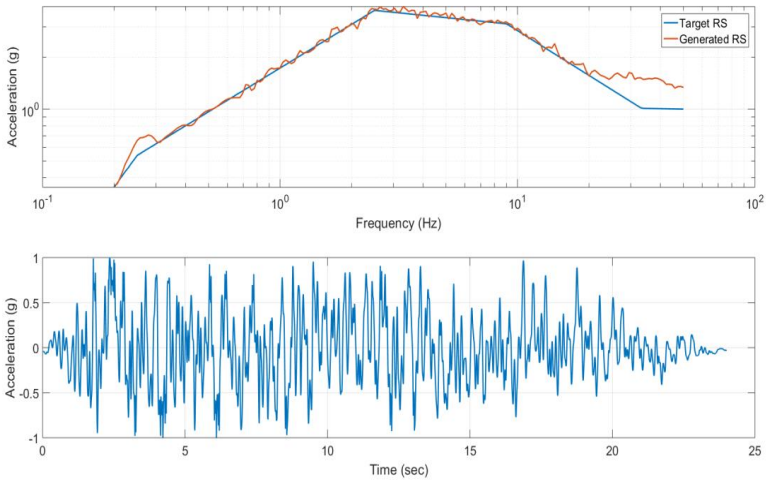


그림 25 인공지진 가속도 시간이력 (NS방향)

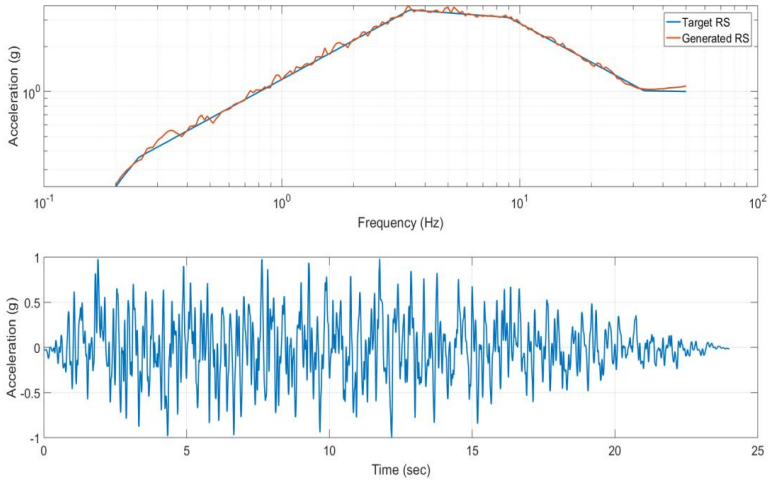


그림 26 인공지진 가속도 시간이력 (VT방향)

제 2 절 자유장해석

기반암에서 발생한 지진입력운동이 지반의 각 층을 지나면서 지반의 동적물성치(전단변형률, 전단탄성계수, 감쇠비)를 변화시키며 지표면에 도발하였을 때, 발생하는 지표면(자유장) 가속도시간이력을 도출하기 위하여 1차원 파전달 이론과 등가선형해석기법을 적용한 SHAKE91[3] 프로그램을 사용하여 지반응답해석을 수행하였다.

SHAKE91을 통해 지반응답해석을 하면 보통 지층을 반무한 수평층상으로 가정한다. 그리고 동적물성치를 적용하기 위하여 공진주시험을 통해 각 토층별 비선형 물성치 곡선을 적용해야 하지만 데이터의 구득이 어려워 지반응답해석에서 일반적으로 사용되는 Seed & Idriss Model로 이를 대신하였다. 그림 27, 28과 같이 Seed & Idriss Model은 토층의

종류에 따라 비선형 동적 특성을 나타내는 보편적인 Model로 각종 토질 조건에 대한 다수의 시험결과를 근거로 생성되었다.

SHAKE91의 입력으로 사용된 지층 별 비선형 곡선은 표 1과 같이 각각 적용하였다.

표 1 지층 별 비선형 곡선 적용 모델

	G/Gmax	**Damping Ratio**
매립층	Seed & Idriss(Average)	Seed & Idriss(Average)
풍화암	Seed & Idriss(Upper bound)	Seed & Idriss(Lower bound)
연암	Schnabel(1973)	Schnabel(1973)

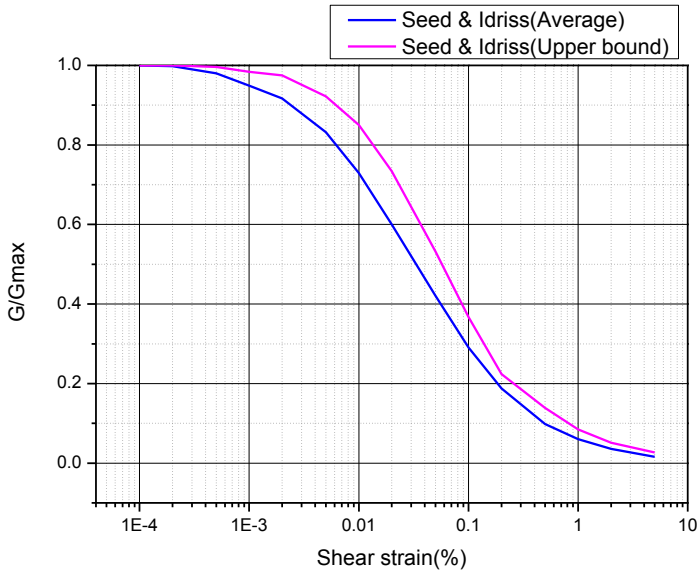


그림 27 Seed & Idriss 정규화 전단계수에 관한 비선형 곡선

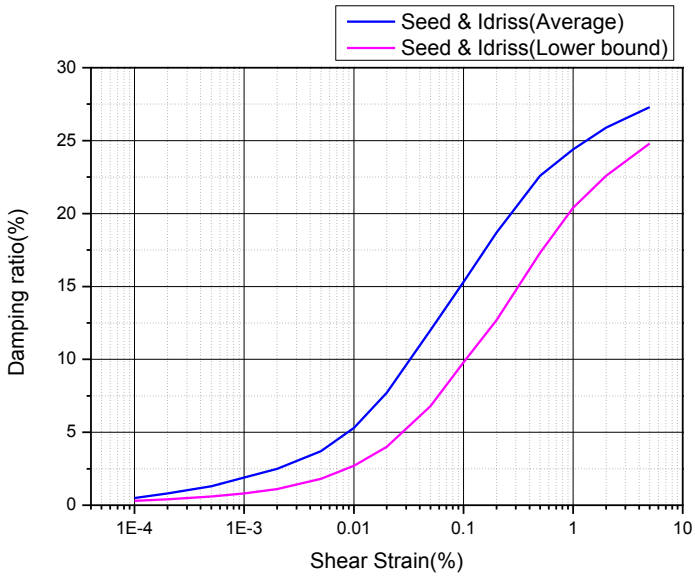


그림 28 Seed & Idriss 감쇠비에 관한 비선형 곡선

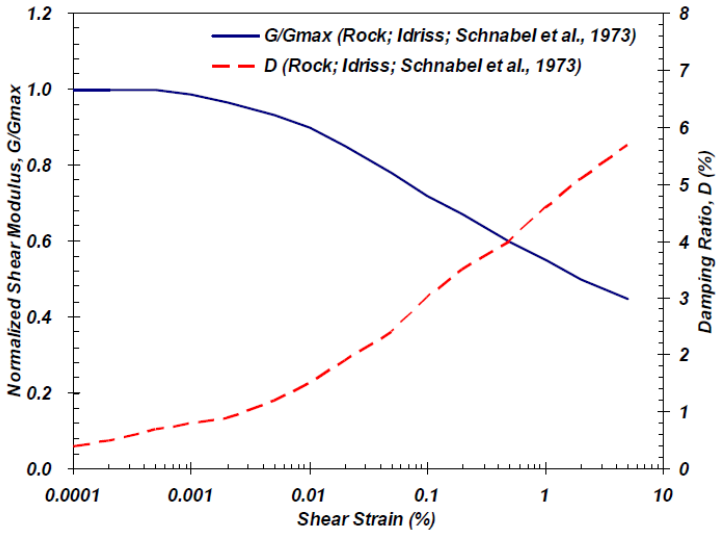


그림 29 암반 지층의 정규화 전단계수 및 감쇠비에 관한 비선형 곡선

1차원 지반응답해석시 지반은 종류에 따라 layer를 나누어 해석하게 되며, 이때 한 종류의 지층이 깊을 경우 같은 종류의 지반이라도 이를 적절한 개수의 지층으로 나누어 해석에 적용하게 된다. 따라서 지층 모델링 시 layer의 두께(H)는 해당 지층의 전단파속도(V_S)와 지층이 모사할 수 있는 최대주파수(f_{max})를 고려하여 아래와 같은 식은 통하여 계산하게 된다. 즉 50Hz와 같이 최대주파수를 크게 하기 위해서는 layer의 두께(H)를 작게 설정하여야 한다.

$$f_{\max} = \frac{V_S}{4H} \tag{3.1}$$

호상 편마암과 각섬석 편암의 경계를 기반암 시작 심도(GL-20.8m)로 간주하였으며, 기반암은 견고한 탄성반무한체로 규정하고, 지진의 입력운동은 기반암의 상부위치에 가상노두암 운동(rock-outcrop motion)으로 작용하는 것으로 정의하였다. 물성치 수렴을 위한 interation 횟수는 15회로 하였고 지진 시 변형률의 크기는 최대전단 변형률의 65%로 가정하였다. 일반적으로 아래 식을 통하여 계산할 수 있으며 M은 지진의 규모를 나타내므로 65%는 7.5규모 지진의 유효변형률 비라고 할 수 있겠다.

$$R_r = \frac{r_{eff}}{r_{\max}} = \frac{(M-1)}{10} \tag{3.2}$$

지반응답해석 수행시 입력 물성치와 해석 수행 후 수렴된 물성치는 다음 표 2와 같으며, 지반응답해석을 통하여 수렴된 물성치는 지반-구조물 상호작용 해석의 입력값으로 사용한다. 여기서 환산되어 지는 전단탄성계수와 전단파속도와의 관계는 다음 식과 같다.

$$G = \rho V_s^{\,2} \tag{3.3}$$

또한 각 방향 별 자유장 지표면의 가속도시간이력은 아래 그림 30~35와 같이 증폭된 결과를 나타내었다.

표 2 지반응답해석시 입력 물성 및 수렴결과(P-20)

	Input				Output					
					EW		NS		VT	
	H (ft)	γ (kcf)	Vs (ft/s)	ξ -	G (ksf)	ξ -	G (ksf)	ξ -	G (ksf)	ξ -
OBE	1.64	0.121	1382	0.05	7174	0.006	7071	0.012	7066	0.012
	3.29	0.121	1382	0.05	7039	0.013	6653	0.023	6638	0.024
	3.29	0.121	1191	0.05	4985	0.022	4462	0.036	4442	0.037
	3.29	0.121	1191	0.05	4880	0.025	4119	0.046	4101	0.047
	3.29	0.121	1234	0.05	5126	0.028	4233	0.051	4234	0.051
	3.29	0.121	2457	0.05	21873	0.016	20478	0.027	20527	0.027
	3.29	0.134	2457	0.05	24854	0.007	24274	0.012	24341	0.012
	3.29	0.134	2457	0.05	24791	0.008	24062	0.013	24149	0.013
	4.28	0.162	2293	0.05	26139	0.008	25199	0.011	25245	0.011
	6.58	0.162	2293	0.05	26013	0.008	24978	0.012	25030	0.012
	6.58	0.162	3276	0.05	53543	0.007	52021	0.010	52126	0.010
	6.58	0.162	3599	0.05	64641	0.007	62834	0.010	62979	0.010
	6.58	0.162	3599	0.05	64550	0.007	62541	0.011	62699	0.010
	6.58	0.162	4003	0.05	79940	0.007	77628	0.010	77813	0.010
	6.58	0.162	3155	0.05	49142	0.009	47103	0.012	47257	0.012
		0.174	3155	0.05	53789	0.050	53789	0.050	53789	0.050
SSE	1.64	0.121	1382	0.05	7069	0.012	7171	0.006	7172	0.006
	3.29	0.121	1382	0.05	6645	0.023	7013	0.014	7025	0.013
	3.29	0.121	1191	0.05	4450	0.037	4965	0.022	4971	0.022
	3.29	0.121	1191	0.05	4094	0.047	4861	0.026	4866	0.026
	3.29	0.121	1234	0.05	4205	0.052	5121	0.028	5129	0.028
	3.29	0.121	2457	0.05	20414	0.027	21863	0.016	21910	0.016
	3.29	0.134	2457	0.05	24242	0.012	24848	0.007	24872	0.007
	3.29	0.134	2457	0.05	24034	0.013	24784	0.008	24816	0.007
	4.28	0.162	2293	0.05	25185	0.011	26135	0.008	26153	0.008
	6.58	0.162	2293	0.05	24949	0.012	25997	0.008	26049	0.008
	6.58	0.162	3276	0.05	52001	0.010	53534	0.007	53569	0.007
	6.58	0.162	3599	0.05	62841	0.010	64622	0.007	64675	0.007
	6.58	0.162	3599	0.05	62571	0.011	64525	0.008	64585	0.007
	6.58	0.162	4003	0.05	77689	0.010	79903	0.007	79980	0.007
	6.58	0.162	3155	0.05	47163	0.012	49073	0.009	49225	0.008
		0.174	3155	0.05	53789	0.050	53789	0.050	53789	0.050

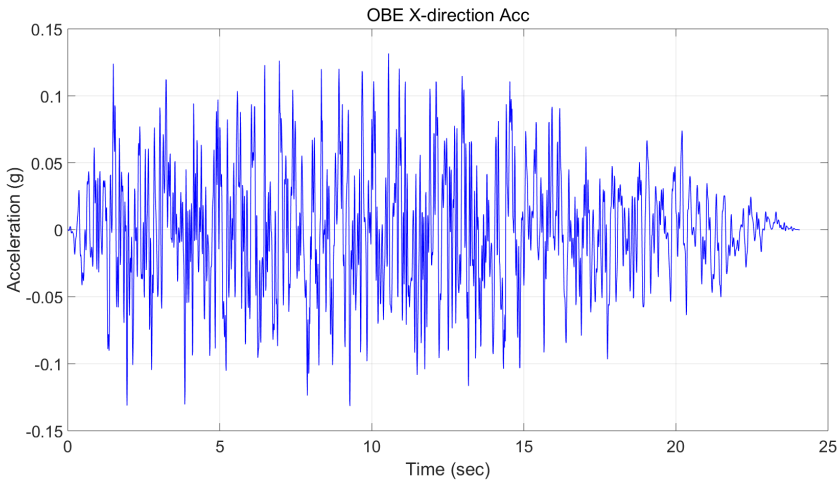


그림 30 EW 방향 자유장 지표면 가속도시간이력 (OBE)

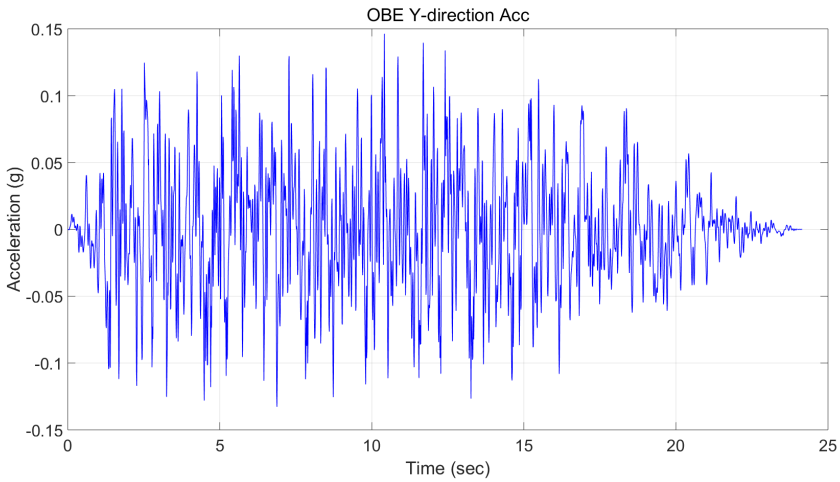


그림 31 NS 방향 자유장 지표면 가속도시간이력 (OBE)

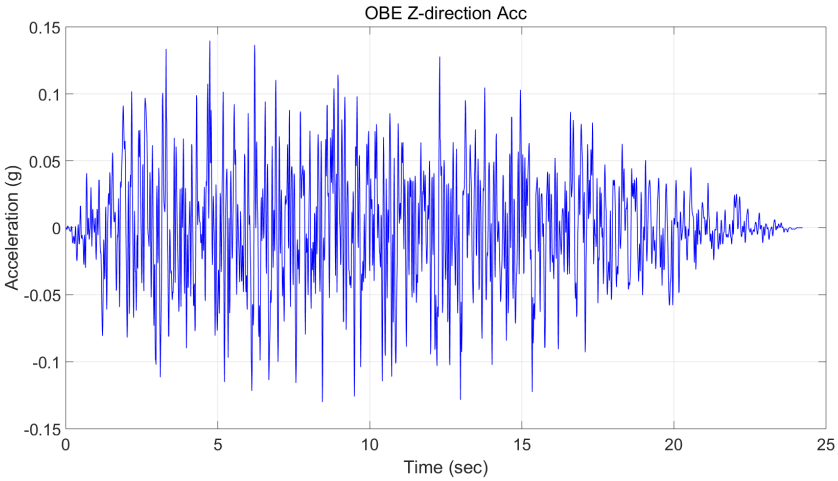


그림 32 VT 방향 자유장 지표면 가속도시간이력 (OBE)

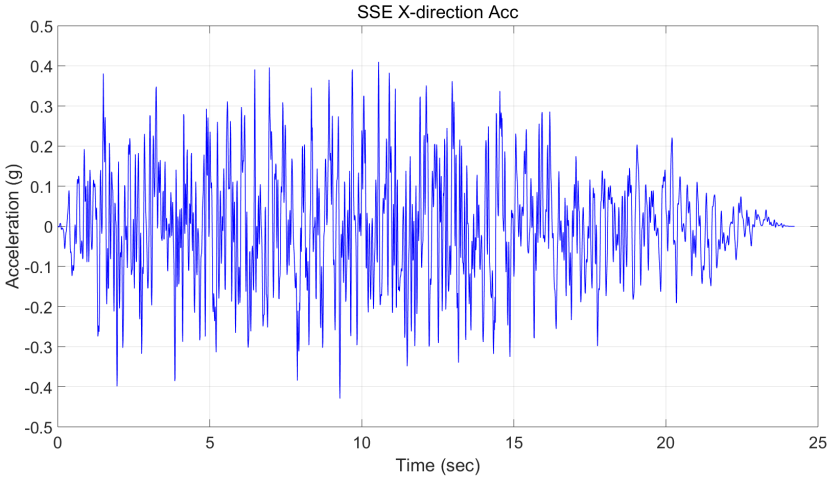


그림 33 EW 방향 자유장 지표면 가속도시간이력 (SSE)

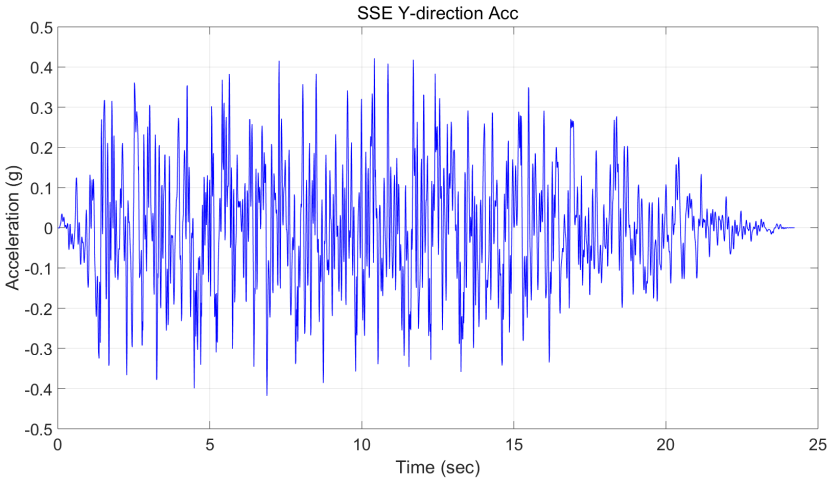


그림 34 NS 방향 자유장 지표면 가속도시간이력 (SSE)

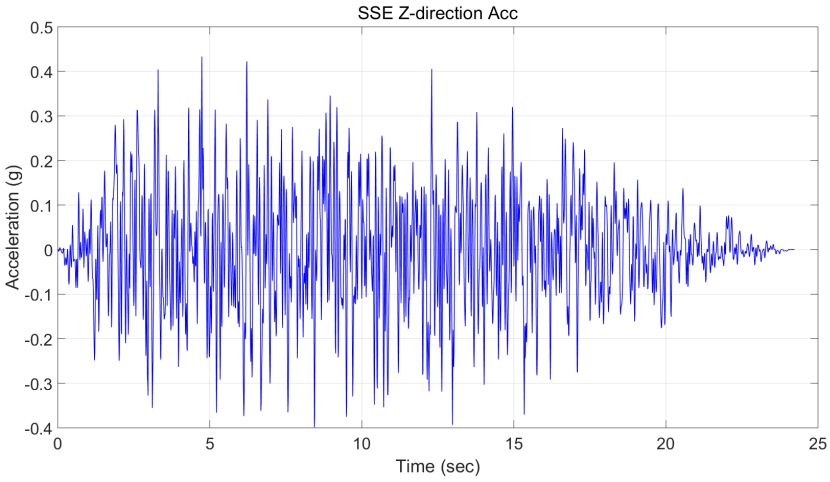


그림 35 VT 방향 자유장 지표면 가속도시간이력 (SSE)

제 3 절 지반-구조물 상호작용 해석

SSI(Soil-Structure Interaction) 해석을 수행하기 위하여 지반-구조

물의 상호작용에 대한 해석, 설계, 연구 및 검증사례가 다수 존재하며, 원전과업에서 그 신뢰성이 입증된 'SASSI2000' [5] 프로그램(유연체적법, flexible volume method)을 사용하였다.

SASSI[4] 모델에는 하부 지층조건(물성 및 두께), 입력 지진의 특성, 구조물 구성 및 배치, 부재의 물성/단면특성, 절점 질량 등의 정보가 포함되며, SASSI 모델 구성을 위한 각각의 선형요소는 단면특성을 결정하고, 작용하중 및 발생결과를 표현하기 위하여 고유의 로컬 시스템을 갖는다. SSI의 해석은 지진 입력 방향(X, Y, Z)의 3가지와 지진하중인 SSE 및 OBE를 고려한 2가지의 경우로 총 6개(3x2)의 해석을 수행하였다.

지층분포(반무한수평층) 및 상부 구조물(superstructure)모델링 형상은 다음 그림 36과 같으며, 실제로는 구조물 기초 하부가 지중에 2m 근입되나 보수성을 반영하기 위하여 지표구조물(surface structure)로 적용하여 해석하였다.

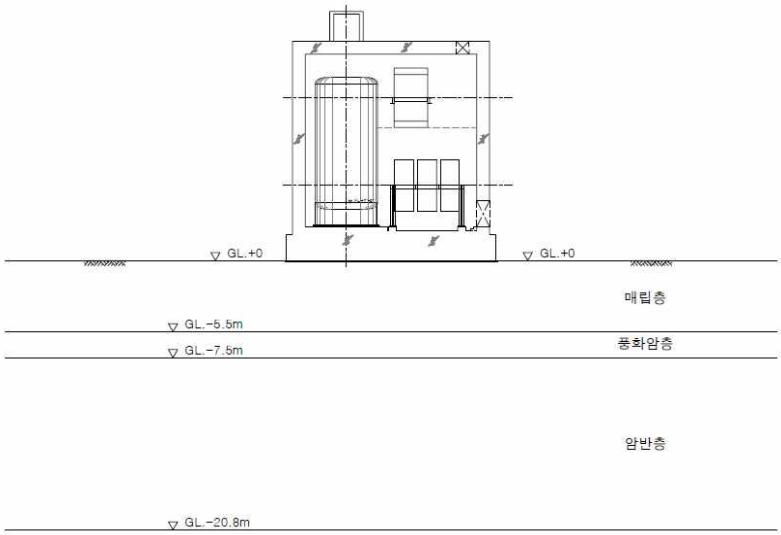


그림 36 SSI 해석을 위한 구조물 및 지반 조건

1. 해석 수행 방법

전산프로그램 SASSI[4]에 적용되어 있는 기본적인 해석이론은 소위 유연체적 부분구조 해석방법(flexible volume substructuring method)이라고 일컬어진다. 이 방법은 복소응답 해석방법과 유한요소기법을 이용하여 진동수영역에서 운동방정식을 구성한다. 유연체적방법에서 그림 37(a)에 제시된 전체 지반-구조물 시스템은 구조물이 놓이기 전의 지반(그림 37(b))과 구조물의 매입된 부분에서 굴착된 지반을 제외한 구조물(그림 37(c))의 두 부분구조로 크게 나누어진다. 여기서 지반 구조물의 상호작용은 구조물의 매입된 부분의 모든 기초절점에서 발생하게 된다. 그림 37의 부분구조(b)와 (c)가 결합되면 그림 37(a)와 같이 원래의 전체 지반-구조물 상호작용 시스템을 형성하게 되며 이 시스템에 대한 운동방정식은 그림 37(b)의 부분구조에 대하여 구한 해를 그림

37(c)의 부분구조와 결합하여 구성된다. 앞으로 전개되는 이론과 구성방정식은 2차원과 3차원 지반-구조물 상호작용 시스템에 동일하게 적용된다.

1.1 운동방정식

그림 37(c)에 보여준 지반-구조물 상호작용 시스템의 운동방정식은 다음과 같은 행렬형태로 나타낼 수 있다.

$$[M]\left\{\ddot{\hat{U}}\right\}+[K]\left\{\hat{U}\right\}=\left\{\hat{Q}\right\} \tag{3.4}$$

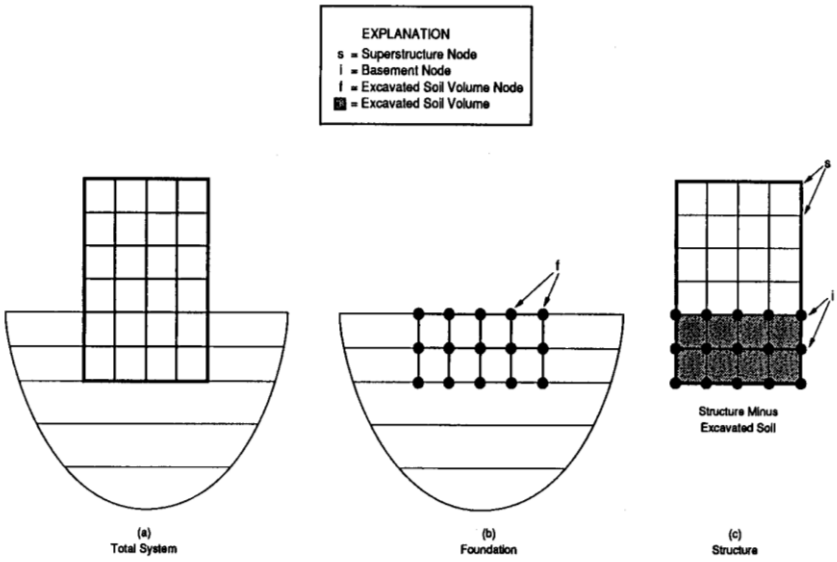


그림 37 유연체적법에 의한 부분구조 모델링 기법

여기서 [M]과 [K]는 각각 전체 질량행렬과 전체 강성행렬을 나타내고 {U}와 {Q}는 각각 전체 절점변위벡터와 외부 동적하중 또는 지진에 의한

하중을 나타낸다.

진동수가 ω인 조화입력운동에 대한 하중과 변위벡터는 다음과 같다.

$$\left\{\hat{Q}\right\} = \{Q\} e^{i\omega t} \tag{3.5}$$

$$\left\{\hat{U}\right\} = \{U\} e^{i\omega t} \tag{3.6}$$

여기서 {Q}와 {U}는 각각 진도수 ω에서의 복소하중벡터와 복소변위벡터이다. 따라서 각 진동수에 대한 운동방정식은 식(3.7)와 같이 나타낼 수 있다.

$$[C]\{U\} = \{Q\} \tag{3.7}$$

여기서 [C]는 복소 진동수-종속 동적 강성행렬(complex frequency-dependent dynamic stiffness matrix)로서 식(3.8)과 같다.

$$[C] = [K] - \omega^2 [M] \tag{3.8}$$

지진입력하중이 작용했을 경우의 운동방정식은 식(3.7)과 그림 37로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} C_{ss} & C_{si} \\ C_{is} & (C_{ii} - C_{ff} + X_{ff}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_s \\ U_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \left[X_{ff}\right]\left(U_f'\right) \end{Bmatrix} \tag{3.9}$$

s : 기초 절점을 제외한 상부구조물

i : 기초

f : 굴착된 지반

$\left(C_{ii} - C_{ff}\right)$: 구조물의 강성에서 굴착된 지반의 부분을 뺀 요소

$\left[X_{ff}\right]$: 그림 37(b)의 부분구조법으로부터 구한 임피던스함수 행렬

$\left\{U_f'\right\}$: 자유장 운동으로부터 계산된 상호작용 절점의 변위벡터

입력운동이 충격하중이나 풍하중과 같은 외부 동적 하중인 경우에는 식(3.9)에서 자유장운동항인 $\left\{U_f'\right\}$가 없어지고 하중벡터가 외부 동적하중에 의해 식(3.10)과 같이 다시 구성된다.

$$\begin{bmatrix} C_{ss} & C_{si} \\ C_{is} & (C_{ii} - C_{ff} + X_{ff}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_s \\ U_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_s \\ P_f \end{Bmatrix} \tag{3.10}$$

원칙적으로 식(3.9)의 하중벡터에 외부하중벡터 {P}를 합하여 지진하중과 외부하중을 함께 고려할 수 있지만, 실제적으로 두 하중이 동시에 고려되는 경우는 없기 때문에 SASSI에서는 두 하중을 합하는 방법을 사용하지 않는다.

1.2 해석단계

앞서 기술된 운동방정식의 구성방법에 따라 지진 또는 외부하중 작용시 지반-구조물 상호작용 문제의 해는 진동수영역에서 다음의 다섯 단계에 따라 구할 수 있다.

① 부지응답해석 : 지진입력운동에 있어서 굴착된 체적내의 상호작용 절점(그림 37(b))에 대한 자유장 변위진폭 $\{U_f'\}$을 결정하는 단계

② 임피던스함수 해석 : 임피던스함수 행렬 $\left[X_{ff}\right]$를 결정하는 단계

③ 하중벡터의 구성 : 지진 입력운동에 있어서의 하중벡터(식(3.9)우변)는 앞의 1,2단계로부터 얻을 수 있으며, 외부 동적 하중의 입력운동에 있어서는 식(3.10)과 같이 단순하게 하중벡터 구성

④ 복합강도행렬의 구성 : 지진 또는 외부 동적 하중 입력운동에 대하여 동일하며 식(3.9)과 (3.10)의 계수행렬 C를 구성하는 단계

⑤ 선형 운동방정식 해석 : 식(3.9)과 (3.10)의 선형 운동방정식의 해를 구하는 단계

1.3 SASSI2000의 구성

SASSI[4]는 Lysmer등에 의해 개발된 프로그램으로서 불연속화된 반무한체 지반모델을 이용한 일반적인 3차원 유한요소 부분구조법으로 몇 단계의 해석과정을 필요로 하는 유연체적 부분구조법을 적용한 프로그램이다. 해석 단계는 부지응답해석, 임피던스함수해석 및 상호작용응답 해석으로 이루어져 있다. SASSI는 소산된 지반입력운동을 명시적으로 결정하지 않는다. 즉, SASSI는 소산된 지반입력운동을 결정한 결과와 단일단계 상호작용 응답에서의 구조물 응답에 대한 해를 조합한다. SASSI는 방대하고

복잡한 프로그램이며 여러 사용자들에 의해 수정되었기 때문에 사용 및 적용에 어려움이 많다. 따라서 프로그램 사용 전에 적용시의 제한사항과 모델링 및 해석에서의 기준이나 유의 사항들을 반드시 파악하여야 한다. SASSI 시스템의 일반 구성도는 그림38에서 보인바와 같으며, 시스템을 구성하고 있는 각각의 프로그램 모듈에 대한 기능과 내용을 간략하게 설명하면 다음과 같다.

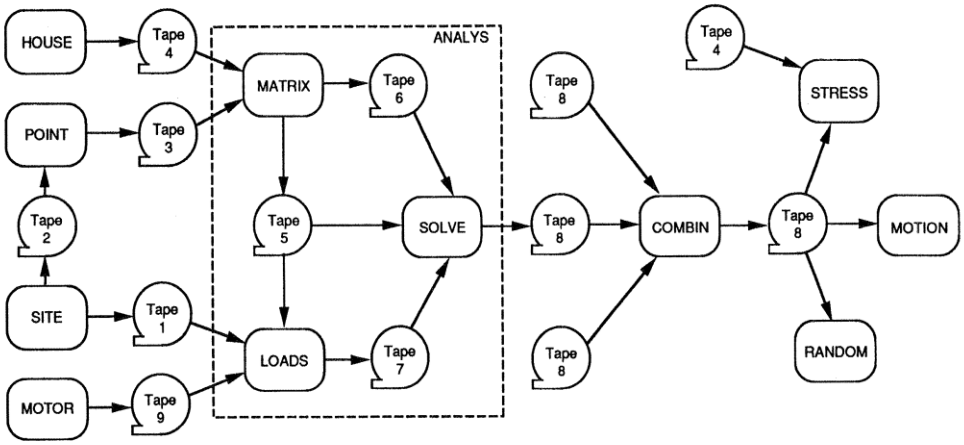


그림 38 SASSI2000의 모듈 구성도

HOUSE

상부구조물과 굴착된 지반토양에 대한 질량행렬과 기본적인 진동수 독립 강성행렬을 구성하며 그 내용은 임시저장파일 Tape4에 저장한다.

MOTOR

구조물내에 있는 회전진동계에 의한 하중이나 충격 또는 풍하중과 같이

구조물에 직접 작용하는 외력에 대하여 운동방정식(3.7)의 하중벡터 요소를 구성한다. 이렇게 구성된 하중벡터의 내용은 Tape9에 저장된다.

SITE

부지응답 문제가 프로그램 모듈 SITE에 의해 해석된다. 부지의 지반토양 특성을 입력으로 하여 통제운동의 자유장 모드형상 성질이 계산되어 Tape1에 저장된다. Tape1에 저장된 내용은 나중에 지진해석 단계에서 다시 사용된다. 따라서 이 테이프는 기초진동문제에 대해서는 생성되지 않는다. 실제적인 통제운동의 시간이력은 이 시점에 요구되지 않으나, 단지 통제운동을 유발시키는 파형태의 구성이 규정된다. 이 모듈은 또한 임피던스 문제를 푸는데 있어 사용되는 전달경계를 계산하기 위해 요구되는 정보를 Tape2에 수록하여 제공한다.

POINT

상호작용 절점에 대한 유연도 행렬(flexibility matrix), 를 계산하기 위해 필요한 점하중 해석결과(point load solution)가 해석의 각 진동수에서 이 모듈에 의해 얻어지며 그 내용이 Tape3에 저장된다. 이 모듈은 SITE에 의해 생성된 Tape2를 입력으로 요구한다. 따라서 프로그램 모듈 SITE는 반드시 모듈 POINT보다 먼저 실행되어야 한다.

ANALYS

프로그램 모듈 ANALYS는 프로그램 SASSI의 심장부에 해당한다. ANALYS는 세 개의 부속 프로그램 모듈 MATRIX, LOADS 및 SOLVE로 구성되어 있으며 SASSI 프로그램의 재해석 모드를 제어한다. 각각의 부

속 프로그램 모듈의 기능 및 내용은 다음과 같다.

(1) MAXRIX : 부속 프로그램 모듈 MATRIX는 Tape3과 Tape4를 입력으로 사용하여 각 진동수에 대한 임피던스행렬 를 구성하며 그 내용은 Tape5에 기록된다. 이 모듈은 또한 식(3.6) 또는 식(3.7)에 있는 수정된 복소강성행렬을 구성하고 그들을 삼각형화시켜 그 내용을 Tape6에 저장한다.

(2) LOADS : 이 부속프로그램은 식(3.6) 또는 식(3.7)에 있는 하중벡터를 각 진동수에 대하여 계산하고 그 내용을 Tape7에 저장한다.

(3) SOLVE : 부속프로그램 SOLVE는 Tape6에 있는 강성행렬과 Tape7에 있는 하중벡터를 읽어 들여 식(3.6) 또는 식(3.7)에 있는 전체변위의 크기를 구하기 위해 후장치환작업을 수행한다. 이렇게 계산되는 변위의 크기는 실제적으로 통제운동과 최종 응답운동간의 전달함수를 나타내며 그 내용은 Tape8에 저장된다. 전형적인 문제에 대한 이러한 계산은 단지 10~20개의 진동수에서만 수행되면 충분하며 그 외의 진동수에서의 전달함수 값은 진동수 영역에서의 보간법에 의해 구해진다. 이러한 보간작업은 프로그램 모듈 MOTION, STRESS 또는 RANDOM에서 수행된다.

COMBIN

이 프로그램 모듈은 두 세트의 진동수에 대한 ANALYS 해석결과를 서로 조합하는 기능을 하고 있다. 기본적으로 이 모듈이 하는 작업은 두 세트의 진동수에 대해 서로 각기 생성되는 Tape8들을 서로 조합하여 하나의 새로운 Tape8을 생성하는 것이다.

MOTION

이 프로그램 모듈의 주요 목적은 결정론적인 가속도, 속도 그리고 변위의 응답시간 이력을 계산하여 출력하는 것이며 또한 전달함수와 시간이력의 응답스펙트럼도 출력한다. 이 프로그램 모듈은 입력파일로부터 통제운동의 가속도 시간이력을 읽어들여 그것을 FFT 기법을 사용하여 진동수영역으로 변환시키고, 선택된 출력운동에 대한 보간되지 않은 전달함수를 Tape8로부터 읽어들여 보간작업을 수행하고, 통제운동에 대해 적분하여 그 결과를 역 FFT 알고리즘을 사용하여 시간영역으로 다시 변환시킨다. 이렇게 계산된 결과의 가속도 시간이력은 바로 출력되거나 또는 응답스펙트럼 형태로 변환되어 출력된다.

RANDOM

이 프로그램 모듈은 여러 가지 면에서 프로그램 모듈 MOTION과 유사하나 단지 확률론적인 응답계산을 수행한다. 현재의 SASSI 시스템에서는 아직 사용가능하지 않다.

STRESS

이 프로그램 모듈은 구조물 요소에서의 최대응력과 최대변위를 평가하거나 또는 각 지반토양요소의 중심점에서의 최대 8면체 변형률(maximum octahedral strain)의 평가를 통해 지반토양에서의 최대 전단변형률값을 구하는데 사용되어 진다. Tape4 와 Tape8 그리고 통제운도의 시간이력은 반드시 이 프로그램 모듈 입력자료의 일부분이 되어야 한다.

2. 구조물 해석 모델

상부구조물 모델링은 그림 39에서 보는 바와 같으며 구조물의 보 부재는 6자유도를 갖는 3차원 빔(beam) 요소를 사용하고 구조물의 기초판, 전단벽 및 슬래브는 6자유도를 갖는 3차원 판(plate)/쉘(shell) 요소를 사용하여 모델링하였다.

해석에 사용된 콘크리트와 철골구조물의 물성치는 각각 표 3과 같다. 구조물 하부에 분포하는 지층의 층상구조는 지반응답해석시의 두께와 동일하게 적용되었으며, 지반응답해석을 통하여 수렴된 지반의 물성치가 본 해석의 입력값으로 사용되었다. 또한 가상 노두암에서 정의된 통제운동에 의한 지반응답해석 결과(방향 별 시간이력가속도)를 지반-구조물 상호작용 해석 모델의 지표면에 통제운동으로 정의하여 사용하였다. 구조해석 수행 시 적용된 모델의 형상 및 하중조건을 동일하게 적용하였다.

주요 구조부가 철근콘크리트 구조이므로, 7%의 감쇠비를 적용하였다.(US NRC RG1.61[10]) 구조물 전체에 작용하는 각종 하중은 각 Component의 데이터에 근거하여 요소의 절점(node)에 집중질량으로 정의하였다.

표 3 콘크리트 및 철골 구조물의 물성치

	단위중량 (kN/m3)	탄성계수 (MPa)	포아송비	감쇠비
콘크리트	23.56	26458	0.2	0.07
강재	77.09	200000	0.3	0.04

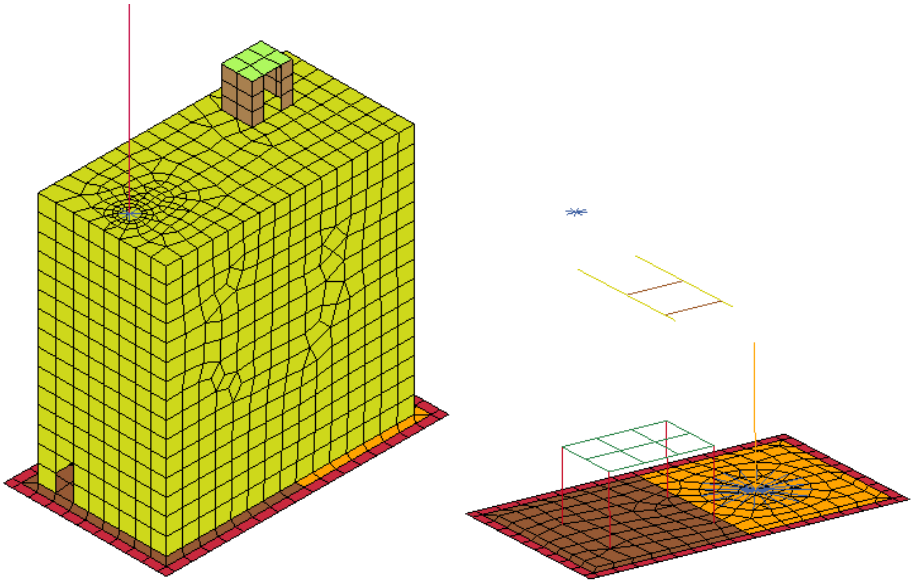


그림 39 지반-구조물 상호작용 구조물 모델링

3. 해석결과

기초부에 작용하는 가속도시간이력에서 각 기준 별 최대가속도응답은 다음 표 4와 같다. 이는 OBE에 비하여 SSE 하중조건이 적용될 경우 지반구조물상호작용에 의해 더 큰 증폭이 일어난다는 사실을 알 수 있다.

표 4 SSI 해석에 따른 최대가속도 응답 결과

	OBE(g)	SSE(g)
EW	0.2339	0.7241
NS	0.1989	1.3815
VT	0.2468	0.7924

격납건물이나 보조건물 내의 Reactor Vessel, Steam Generator, Turbine, Pipe 등의 주요설비들은 주구조물 내에서 각각 다른 층에 설치된다. 이 설비들의 내진설계를 위해서는 각 층마다 설계지진에 다른 동적 특성을 보이는 층응답스펙트럼(floor response spectrum, FRS)이 필요하며, 이를 이용하여 설비구조물을 주구조물과 독립시켜서 간편히 해석할 수 있다. 일반적으로 층응답스펙트럼은 설비가 포함되지 않은 구조물에 대해 해석을 수행하여 각 층의 동적응답을 구한 후 이를 바탕으로 작성하며, 설비의 지지점이 위치하는 높이 마다 각기 다른 층응답스펙트럼이 구해지게 된다.

각 하중조건 및 방향에 대한 지반-구조물 상호작용 해석을 수행한 결과, 각 노드 별 가속도시간이력이 계산된다. 총 노드의 수는 1237개에 달하며 이를 각각 의미있는 값으로 고려하는 것은 많은 시간이 들 뿐만 아니라 불필요하다. 따라서 우리는 관심이 있는 층의 설계응답스펙트럼을 생산하여 이를 다음 절에 나오는 응답스펙트럼해석의 입력으로 사용하는 것이 가장 보수적이며 편리하다. 본 연구의 해석대상은 단층 구조물이며 내부에 구조물들은 모두 바닥층에 기초를 두고 있으므로 바닥층에 해당하는 노드의 가속도시간이력을 모두 envelop 하는 층응답스펙트럼을 생산하도록 한다. 또한, NRC RG 1.122[8]에 따라 응답스펙트럼의 불확실성을 보완하기 위하여 그림 40과 같이 첨두값의 진동수에 대하여 ±15%의 확폭구간을 두어 층응답스펙트럼을 작성하였다.

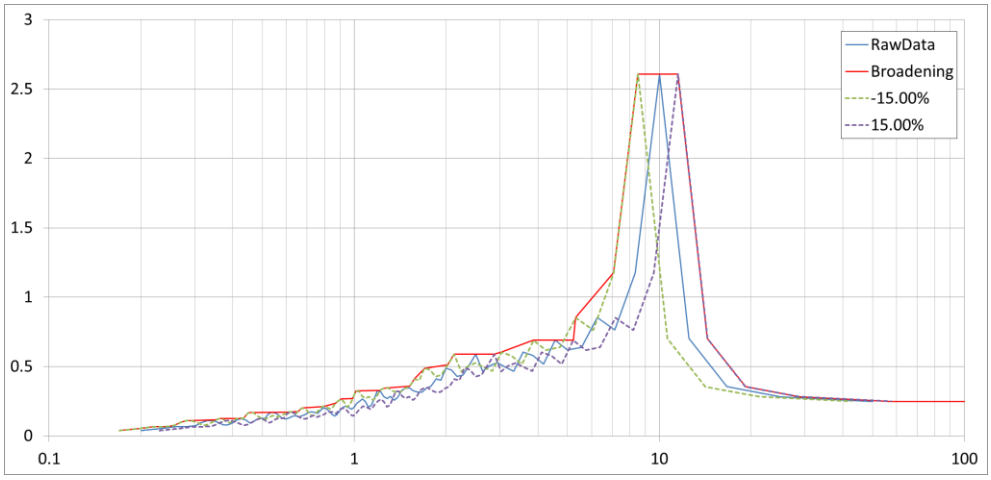


그림 40 Response Spectra Broadening

따라서 각 방향 및 설계기준에 따른 지반-구조물 상호작용을 고려한 격납건물여과배기계통 건물의 기초부의 감쇠비 별 층응답스펙트럼은 그림 41~46와 같다.

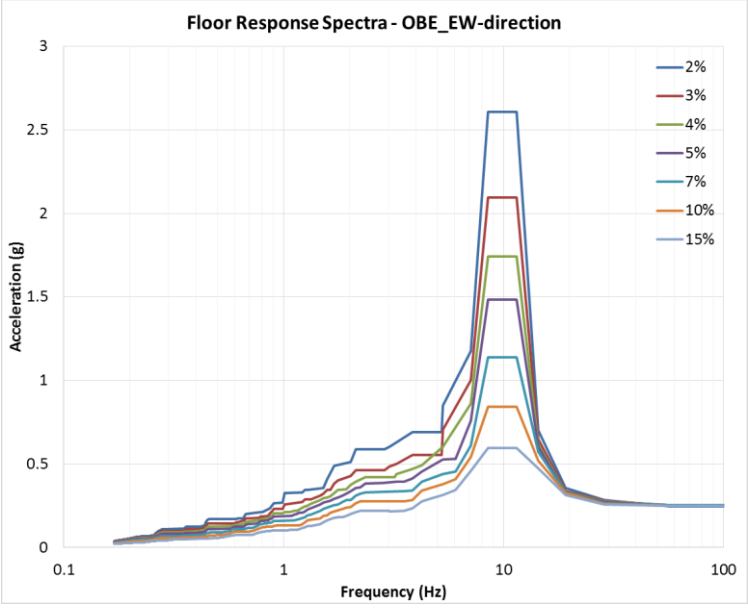


그림 41 EW방향 여과배기계통건물 기초의 FRS(OBE)

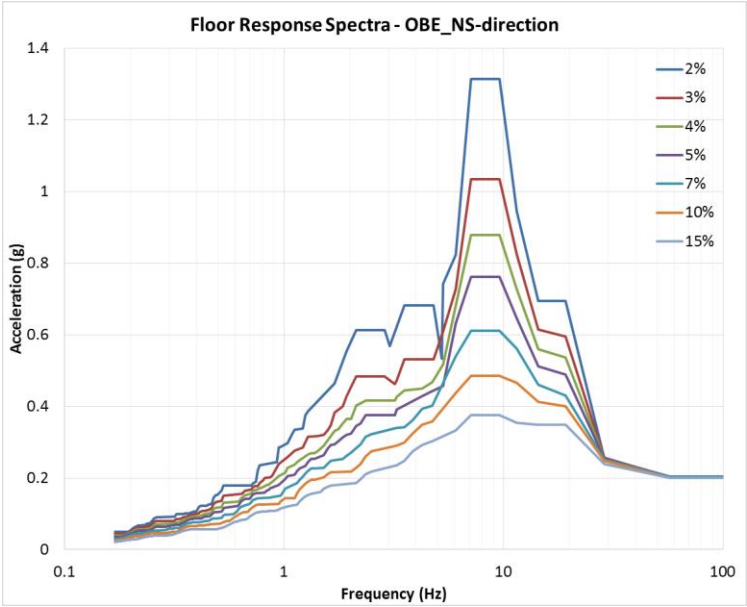


그림 42 EW방향 여과배기계통건물 기초의 FRS(OBE)

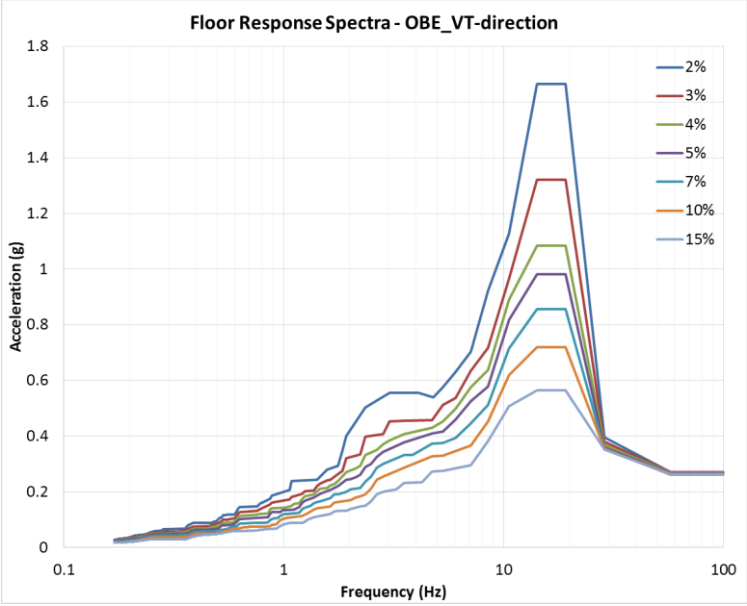


그림 43 EW방향 여과배기계통건물 기초의 FRS(OBE)

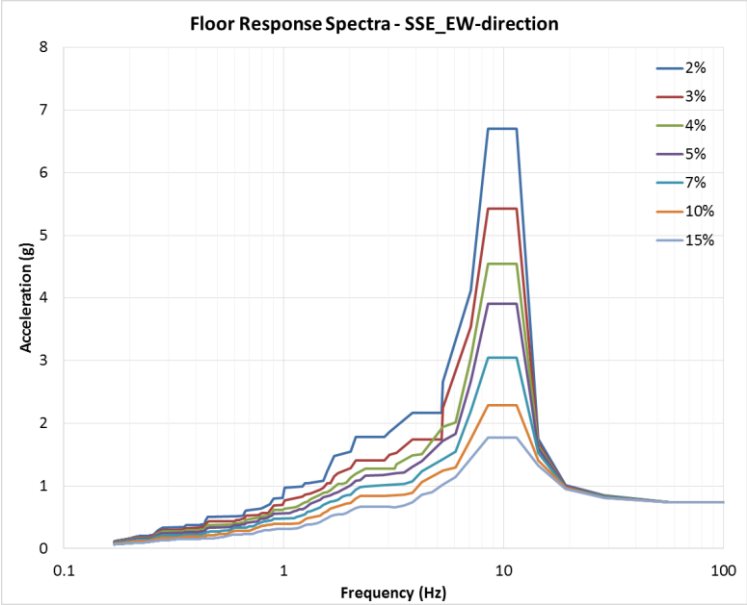


그림 44 EW방향 여과배기계통건물 기초의 FRS(SSE)

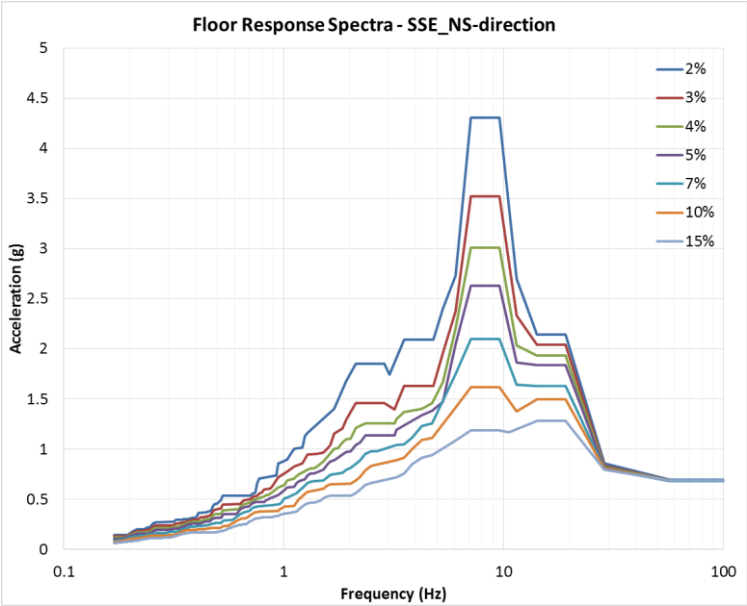


그림 45 EW방향 여과배기계통건물 기초의 FRS(SSE)

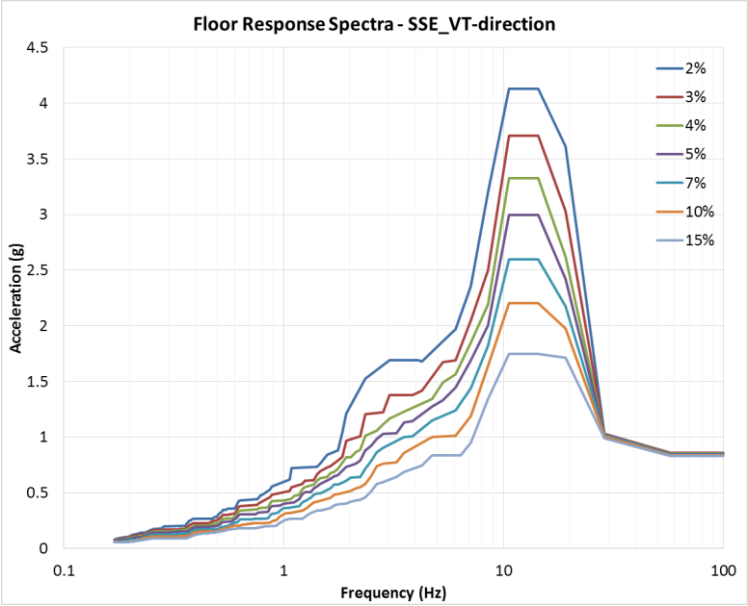


그림 46 EW방향 여과배기계통건물 기초의 FRS(SSE)

제 4 절 응답스펙트럼해석

지진의 발생으로 구조물에 작용하는 응력을 계산하기 위하여 앞서 기술한 동적해석방법 중 응답스펙트럼 해석을 실시하였다. 해석툴은 건축구조해석 및 설계분야에서 많이 쓰이고 있는 MIDAS Gen[7]을 사용하였고 적용한 응답스펙트럼은 SSI해석을 통하여 산출된 스펙트럼을 적용하여 응력을 계산하였다.

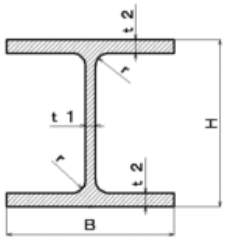
1. 구조물 모델링

해석 범위는 그림 47와 같이 격납건물여과배기계통의 건물 및 충수탱크를 지지하는 구조물로 제한하였으며 CFVS vessel과 분사체 지지구조

물은 유제-구조물 상호작용을 고려한 해석이 필요하므로 본 연구에서는 제외하였다. 각 요소는 건물의 콘크리트 외벽을 구성하는 Plate 요소와 지지구조물의 H-beam은 Beam 요소로 모델링하였다. 재료 물성치는 표 3과 같이 SSI에 적용한 ASTM의 콘크리트와 강재의 표준 물성치를 사용하였고, 각 요소의 단면은 표 5와 같은 KS 규격으로 가정하였다.

구조물의 경계조건은 SSI효과를 고려한 응답스펙트럼 중 US NRC RG 1.61[10]에 따라 7%의 콘크리트 감쇠비를 가진 스펙트럼을 입력으로 사용하였고 경계조건은 기초에 고정되어있는 fixed 조건으로 가정하였다. 하중조건은 자중, 고정하중, 활하중을 고려하였는데, 슬라브에 특별한 장비나 활동성이 없을 것으로 판단되나 해석의 보수성을 위하여 2.5 kN/m2의 고정하중과, 3.0kN/m2의 활하중을 적용하여 해석 시 질량으로 작용할 수 있도록 설정하였다. 또한, 충수탱크에 대한 하중도 각 Beam 요소의 절점에 Nodal load로 적용하였다.

표 5 Beam 요소에 사용된 KS 규격 단면성질



Pipe(mm)	O.D			Thickness	
Stack	979.2			46	
H-beam (mm)	H	B	t1	t2	r
	588	300	12	20	28

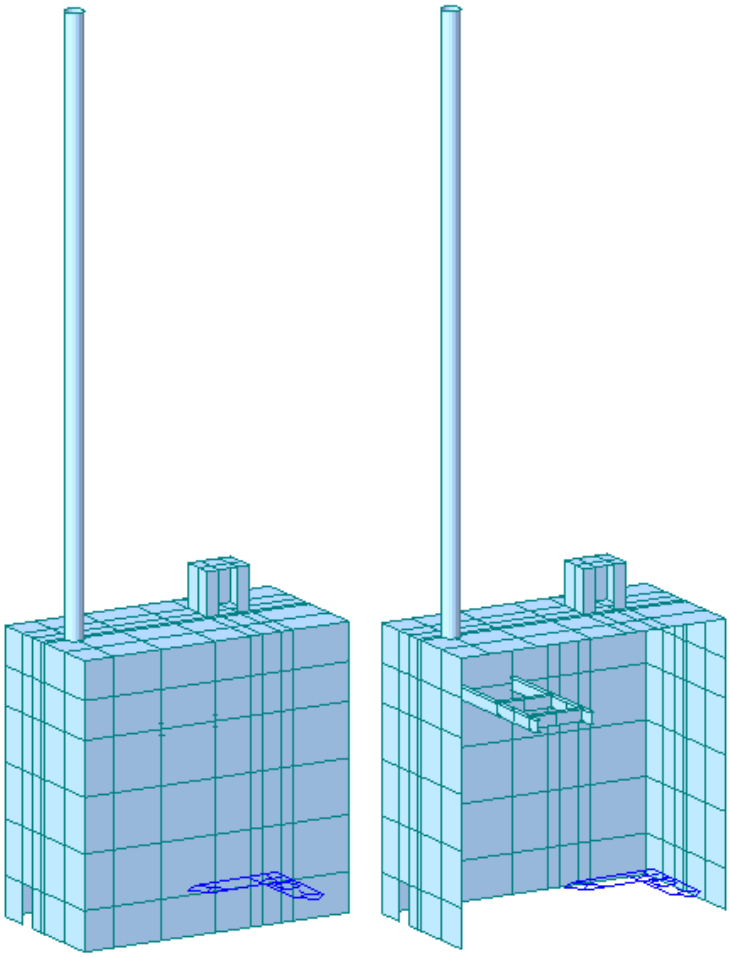


그림 47 응답스펙트럼해석 Modeling

2. 모드해석

상기 작성된 모델을 이용하여 모드해석을 실시하였다. 최초 모드수는 30개로 가정하여 모드해석을 실시한 결과 표 6과 같은 모드해석 결과가 계산되었다. 표에서 알 수 있듯이 각 방향 별 질량 참여율이 90% 이상으로 계산되었으므로 이를 이용하여 응답스펙트럼해석을 하게 된다.

표 6 모드해석 결과

Mode No	Frequency	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z	
	(cycle/sec)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)
1	5.475	**46.29**	**46.29**	0	0	0	0
2	12.723	0	46.29	2.41	2.41	0	0
3	13.412	0	46.29	0	2.41	**49.21**	**49.21**
4	15.531	0	46.29	33.59	36	0	49.22
5	17.769	0.01	46.31	0	36	0	49.22
6	17.820	3.77	50.08	0	36	0	49.22
7	18.611	0	50.08	0.01	36.01	0	49.22
8	24.780	0	50.08	0	36.01	8.06	57.28
9	30.443	0	50.08	0	36.01	0.02	57.3
10	36.633	8.49	58.56	0	36.02	0	57.3
11	47.775	0	58.56	**56.55**	**92.57**	0	57.3
12	73.309	0.01	58.57	0.11	92.68	0	57.3
13	80.572	0	58.57	6.8	99.48	0.02	57.33
14	107.543	40	98.57	0	99.48	0	57.33
15	125.492	0	98.57	0	99.48	28.03	85.36
16	174.835	0	98.58	0	99.48	0	85.36
17	177.907	0.7	99.28	0	99.48	0.21	85.56
18	263.500	0.01	99.29	0	99.48	3.37	88.93
19	290.444	0	99.29	0	99.49	0.04	88.97
20	349.221	0	99.29	0	99.49	0	88.98
21	364.856	0.16	99.45	0	99.49	1.17	90.15
22	375.366	0	99.45	0.29	99.78	0.01	90.16
23	399.303	0.01	99.45	0	99.78	0.13	90.29
24	416.004	0	99.45	0.01	99.79	0.01	90.3
25	447.474	0.01	99.46	0	99.8	0.43	90.73
26	449.062	0.14	99.6	0	99.8	6.74	97.47
27	480.247	0	99.6	0.02	99.81	0	97.47
28	509.072	0	99.6	0	99.81	1.15	98.63
29	535.416	0.15	99.75	0	99.81	0.06	98.68
30	568.268	0.01	99.76	0	99.81	0.12	98.81

3. 해석결과

응답스펙트럼해석결과 Plate 요소의 응력분포를 보면 그림 48~53과 같이 콘크리트 벽체 및 슬라브에 응력이 발생하였으며 특히 충수탱크의 지지대가 연결되어 있는 벽체에 최대 응력이 작용하였다. 또한 내부의 충수탱크를 구성하고 있는 Beam 요소의 응력분포를 보면 그림 54~59과 같으며 충수탱크의 연결부 혹은 콘크리트와의 연결부에 최대응력이 나타났다. 따라서 건물을 설계할 때, 지지대 연결부에 보강설계가 필요할 것으로 생각된다.

판 요소 및 빔 요소에 작용하는 최대 응력은 표 7과 같이 나타났다. 보통 콘크리트의 압축강도가 24Mpa인 점을 고려하면 매우 낮은 응력을 보이고 있으나 콘크리트 벽체 및 슬라브 설계에서는 KEPIC에서 제시하고 있는 하중조합을 이용하여 설계하여야 한다.

빔 요소의 최대 응력 또한 일반적인 강제의 항복응력이 240 Mpa인 것을 감안하면 이보다는 낮은 수치이나 EW방향 안전정지지진의 경우 지지물 H beam에 작용하는 응력이 227 Mpa에 달하므로 하중조합 시 탄성구간을 벗어날 가능성이 있으므로 강도설계법을 적용할 경우 좀 더 큰 항복응력을 가진 H-beam을 설계에 반영해야 할 것으로 보인다.

표 7 설계기준에 따른 방향 별 최대 유효응력

Direction		OBE_EW	OBE_NS	OBE_VT	SSE_EW	SSE_NS	SSE_VT
Max. Eff Stress (kPa)	Con'c	58.66	54.31	133.97	190.72	162.88	439.55
	Beam	69860.60	31128.50	36855.50	227250.00	92874.30	120914.00

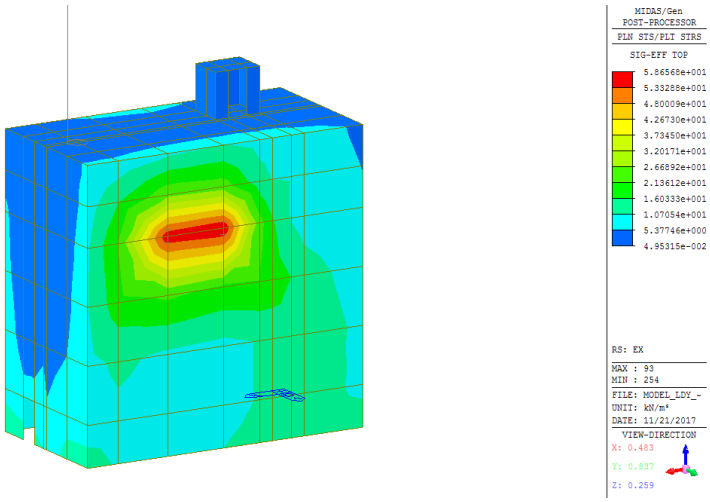


그림 48 EW방향 지진에 따른 Con’c 유효응력(OBE)

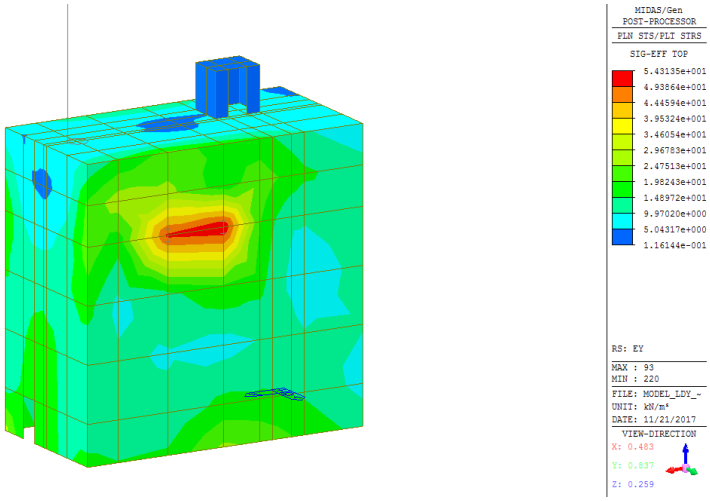


그림 49 NS방향 지진에 따른 Con’c 유효응력(OBE)

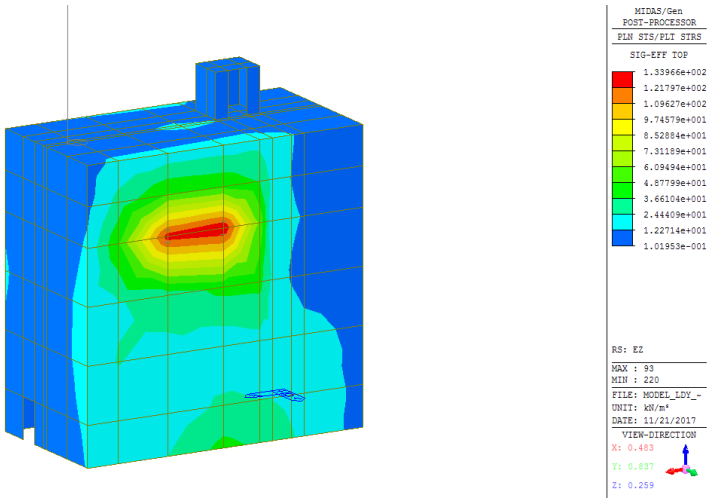


그림 50 VT방향 지진에 따른 Con’c 유효응력(OBE)

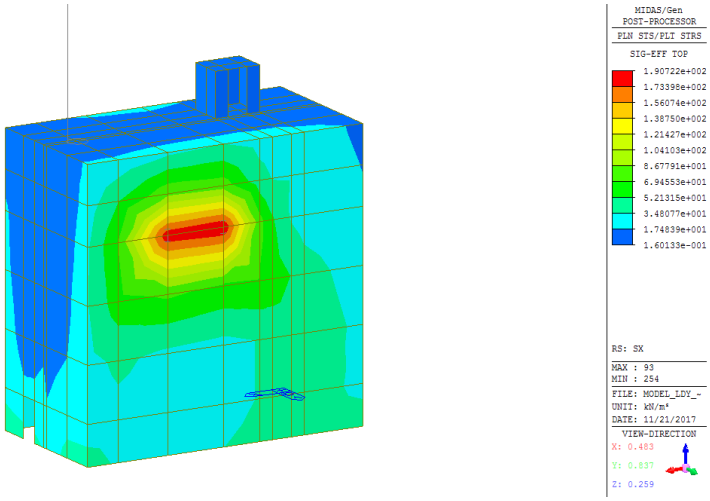


그림 51 EW방향 지진에 따른 Con’c 유효응력(SSE)

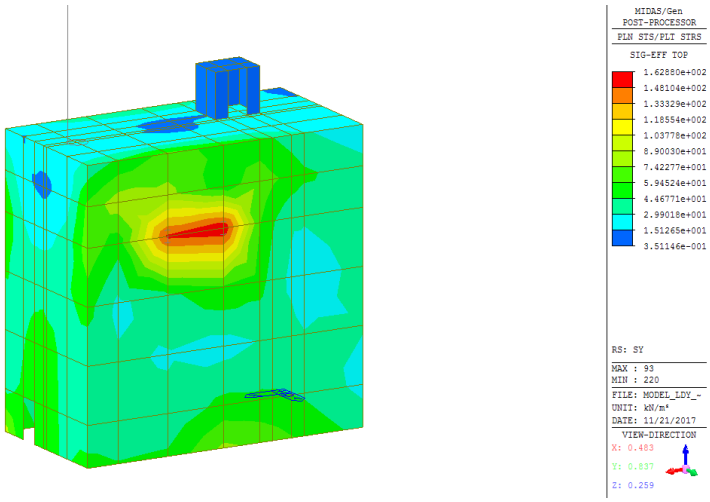


그림 52 NS방향 지진에 따른 Con’c 유효응력(SSE)

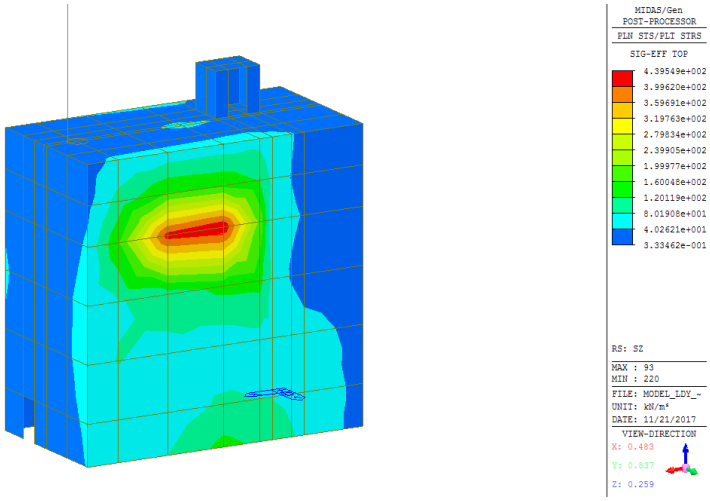


그림 53 VT방향 지진에 따른 Con’c 유효응력(SSE)

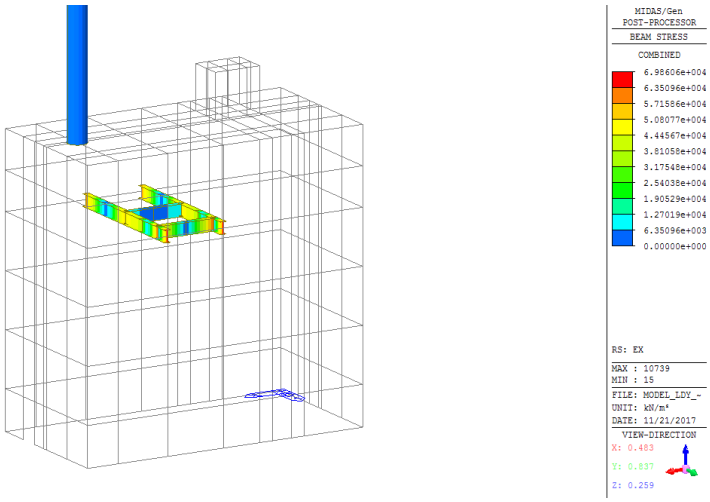


그림 54 EW방향 지진에 따른 H빔 유효응력(OBE)

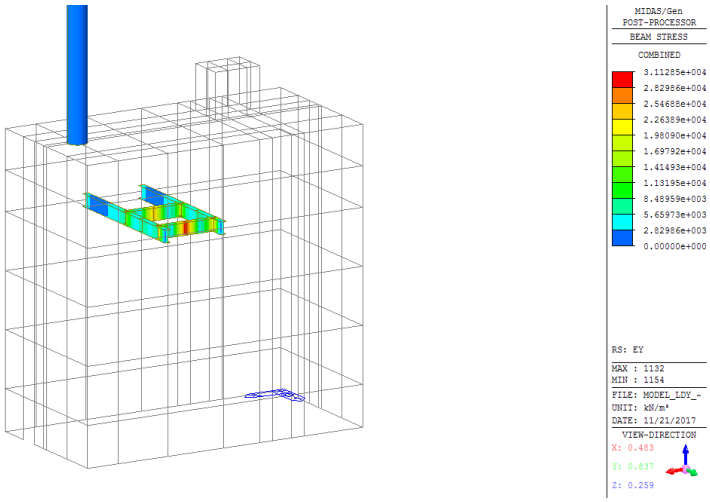


그림 55 NS방향 지진에 따른 H빔 유효응력(OBE)

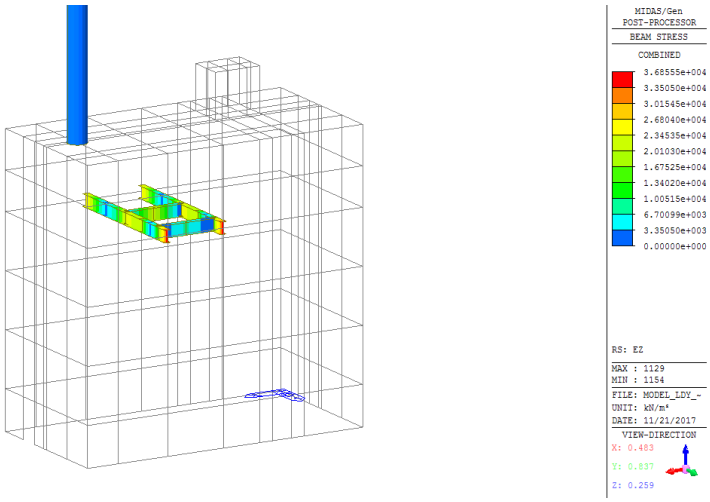


그림 56 VT방향 지진에 따른 H빔 유효응력(OBE)

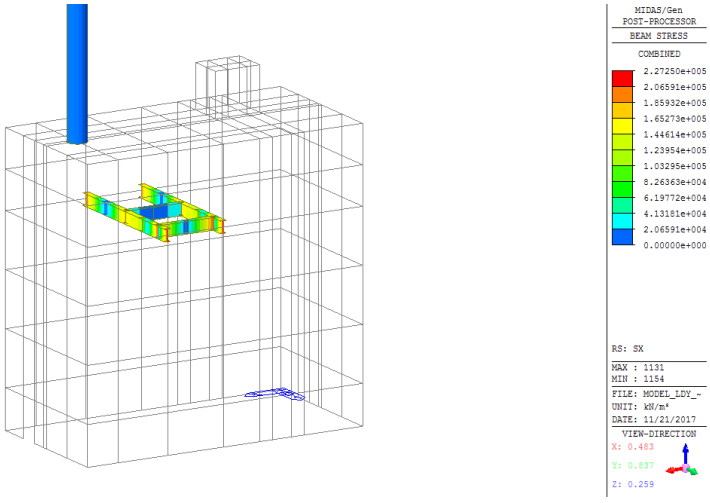


그림 57 EW방향 지진에 따른 H빔 유효응력(SSE)

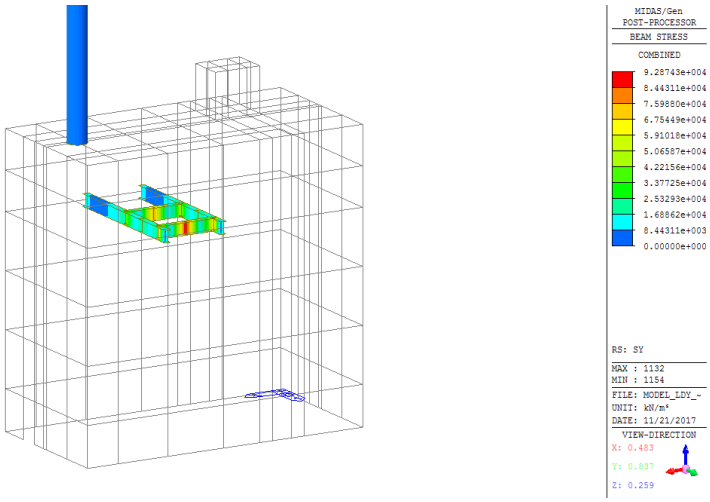


그림 58 NS방향 지진에 따른 H빔 유효응력(SSE)

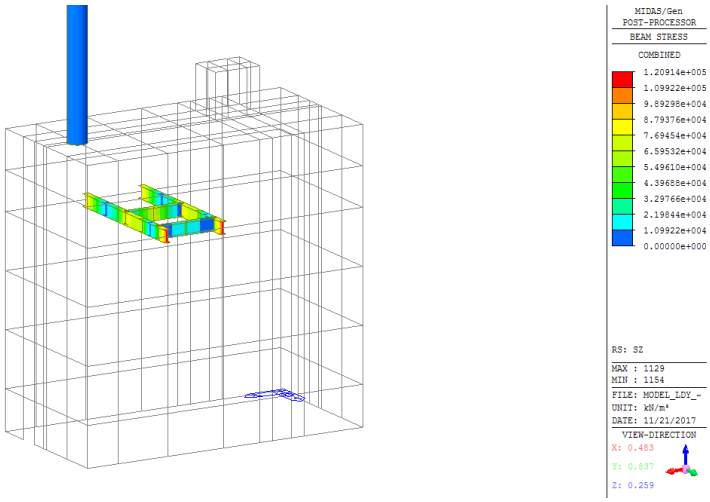


그림 59 VT방향 지진에 따른 H빔 유효응력(SSE)

제 4 장 결론

지금까지 원자력 업계에서 일반적으로 적용하고 있는 내진해석을 통하여 지진에 의해 발생되는 구조물의 응력을 구하는 과정을 연구해 보았다. 물론 이는 원자력계 뿐만 아니라 건축, 도로와 같은 일반 구조물에도 같은 원리를 통하여 내진해석으로 생겨나는 응력을 설계에 반영하고 있다. 하지만 지금까지는 유라시아판 내부에 속해있는 한반도의 지정학적 특성상 지진의 발생빈도를 낮은 수준으로 고려하였으며 본 연구에서 채택하는 동적해석보다는 간단한 식을 통하여 정적하중 형태로 지진하중을 산출하는 과정을 일반적인 주택이나 구조물에 적용하여 설계해왔다. 하지만, 작년에 일어난 경주 지진과 올해 일어난 포항 지진을 격으면서 내진해석에 대한 사람들의 관심이 높아졌다.

본 연구에서는 NRC RG 1.60[9]에 제시된 설계기준응답스펙트럼을 기준으로 인공가속도시간이력을 생산하였다. 이는 최대가속도 1.0g 기준이며 발전소가 요구하는 운전기준지진(OBE)와 안전정지지진(SSE)에 맞게 보정하였다. 이를 이용하여 기반암에서 발생하는 지진이 지표면까지 도달하면서 일어나는 파의 증폭현상 및 지반 물성치의 변화를 계산하기 위하여 자유장해석 즉 지반응답해석을 실시하였다. 국내 원자력발전소는 기본적으로 암반위에 건설되므로 과거에는 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction)을 고려할 필요가 없었으나, 최근 NRC SRP 3.7.2[12]의 개정으로 SSI를 계산하는 기준인 지반 전단파 속도가 3500ft/s에서 8000ft/s로 상향되면서 기존의 암반지형에서도 이 기준을 만족하지 못 할 경우 SSI를 설계에 반영하게 되었다.

따라서 본 연구에서도 지반응답해석의 결과인 지표면가속도시간이력과

등가선형해석으로 변화된 지반 물성치를 사용하여 SASSI를 활용한 지반-구조물 상호작용 해석을 실시하였다. 따라서 진원(Bed rock)에서 발생된 가속도 기록은 두 번의 증폭과정(지반응답해석, SSI)을 거치면서 구조물 기초에서는 그림 60과 같은 가속도기록을 가지게 되었다.

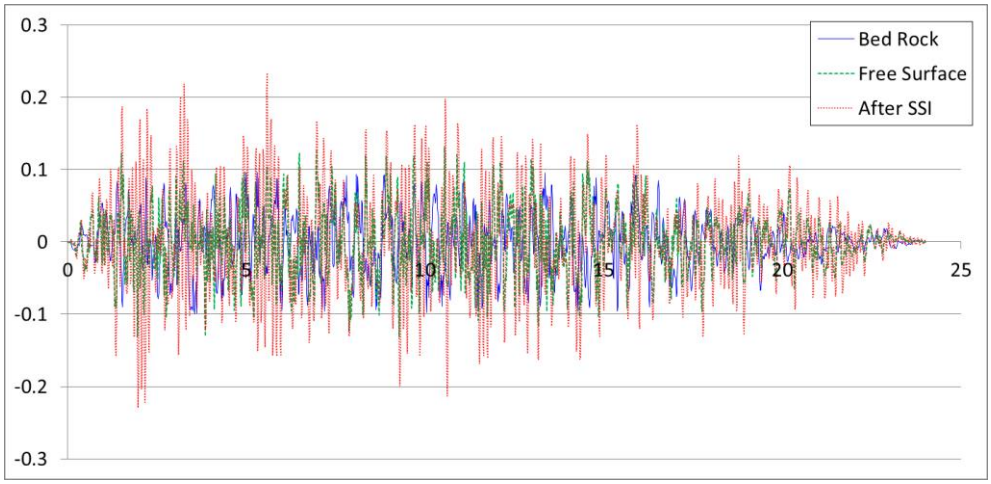


그림 60 가속도시간이력의 증폭

이를 이용하여 동적해석을 수행하게 되면 시간이력해석을 수행할 수 있으나 원자력의 안전에 대한 보수성과 해석시간의 경제성을 고려하여 일반적으로 응답스펙트럼해석을 실시고 있다. 따라서 SSI결과로 도출된 각 측의 시간이력은 Broadening을 통하여 층응답스펙트럼으로 작성하게 되고 이 응답스펙트럼을 기준으로 하여 구조물에 작용하는 응력을 계산하였다.

앞으로 이를 이용하여 강도설계법에 따른 하중조합으로 구조물의 응력을 산출하고 이를 견딜 수 있는 콘크리트와 철골구조물을 설계하는 연구가 더 필요할 것으로 보인다. 또한, 기존의 구조물이 과연 지진에 잘 견딜

수 있는가를 파악하기 위하여 비선형시간이력해석을 바탕으로 한 원자력 구조물의 내진성능해석에 대한 연구도 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

[1] Anil K. Chopra, ˹Dynamics of Structures˺ PEARSON(2014), p177, p513-p616

[2] Dario A. Gasparini & Erik H. Vanmarcke(1979), "SIMQKE USERS'S MANUAL AND DOCUMENTATION", NISEE Publication No. R76-4

[3] I.M IDRISS & JOSEPH I. SUN(1992), "USER'S MANUAL FOR SHAKE91", University of California Berkeley

[4] John Lysmer et al(1999), "SASSI2000 Theoretical menual", University of California Berkeley

[5] John Lysmer et al(1999), "SASSI2000 User's menual", University of California Berkeley

[6] Steven L. Kramer ˹Geotechnical Earthquake Engineering˺ Prentice Hall(1996), p254-p275

[7] MUSS, "MIDAS Gen 사용자메뉴얼", http://kor.midasuser.com/building/Down loads/list.asp?nCat2=580

[8] US NRC RG 1.122, "Development of Floor Design Response spectra for seismic design of floor-supported equipment or components"

[9] US NRC RG 1.60, "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants”

[10] US NRC RG 1.61, "Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants”

[11] US NRC RG 1.92, "Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis”

[12] US NRC SRP 3.7.2, "SEISMIC SYSTEM ANALYSIS", NUREG-0800

[13] 김두기, 「구조동역학」 구미서관(2009), p411-p480

[14] ㈜스마텍이앤씨(2016), “원자로건물 여과배기계통 내진설계 및 구조해석”, Doc. No.: CFVS-DQR-S02

[15] 이동근(2006), “건축물의 내진설계를 위한 구조동역학”, 한국건축구조기술사회 제13권 1호 특집기사

[16] 한국지반공학회, 「상호검증시험을 통한 지진 지반응답해석 이해」, 한국지반공학회(2010), 지반공학 특별간행물 3호, p15-p45

[17] 한국지반공학회, 「지반구조물의 내진설계」, 구미서관(2006), 지반공학 시리즈 3, p229-p305

Abstract

Seismic analysis of CFVS building

Dae-Young, Lee

Department of Engineering Practice

Graduate School of Engineering Practice

Seoul National University

This study carried out the following sequence of tasks to calculate the seismic loads of CFVS(Containment Filtered Venting System) Building(seismic category I) in the nuclear power plant.

First, the artificial ground acceleration was generated based on the design basis response spectra given in NRC RG 1.60.

These results had the maximum acceleration of 1.0g and were calibrated to comply with the requirements of the Operating Basis Earthquake(OBE) and the Safe Shutdown Earthquake(SSE) of NPP.

The ground response analysis was conducted to calculate the amplitude of seismic waves and the conversion of soil properties while waves were passing through the soil layers.

The Soil-Structure Interaction analysis was conducted using the ground acceleration time history of the free surface and the modified soil properties by the equivalent linear analysis, which was the result of the ground response analysis.

In other words, the acceleration time history generated from the bedrock had a new acceleration time history on the foundation basis, passing through two

amplification processes (Ground Response Analysis, SSI).

The acceleration time history derived from the results of the SSI analysis was converted to the floor response spectrum through the broadening process. Based on this floor response spectrum as the design criteria, the stresses applied to the CFVS building were calculated by response spectrum analysis method.

Keywords : Seismic category I, Artificial earthquake, Ground response analysis, Soil-Structure Interaction, Response spectrum analysis

Student Number : 2016-22247