



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

공학석사 학위논문

사회적 분석 기법을 기반으로 한
공급망의 구조적 견고성 평가
체계

2014 년 8 월

서울대학교 대학원

산업공학과

한 지 희

사회적 분석 기법을 기반으로 한
공급망의 구조적 견고성 평가
체계

지도 교수 홍 유 석

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2014 년 8 월

서울대학교 대학원

산업공학과

한 지 희

한지희의 공학석사 학위논문을 인준함

2014 년 8 월

위 원 장 _____ 문일경 _____ (인)

부위원장 _____ 홍유석 _____ (인)

위 원 _____ 강석호 _____ (인)

초 록

공급망의 세계화는 네트워크 구조의 복잡화를 야기하고 공급망을 더 많은 위험에 노출시키게 한다. 때문에 안정적인 공급망 운영 계획의 수립과 효율적인 실행력을 높여 공급망의 지속 가능성을 향상 시킬 수 있는 방안이 필요하다. 본 연구는 공급망 위험이 공급망 구조를 바탕으로 확산되어 나가는 위험 전파 현상을 통해 공급망 구조의 견고성을 평가할 수 있는 평가 체계를 개발하였다.

이를 위해, 하위 노드로부터 전파된 간접적 위험 확률과 특정 노드에서 발생된 직접적 위험 확률이 동시에 고려된 위험 전파 모델이 개발되었다. 이러한 위험 전파 모델을 기반으로, APL(Average Path Length)와 ID/OD(In Degree/Out Degree)의 2가지 지표를 통합하여 구조적 견고성 평가 모델을 정의하였다.

구조적 견고성 평가 모델을 통해 특정 네트워크가 구조적으로 위험에 얼마나 견고한지를 정량적으로 평가할 수 있다. 서로 다른 구조를 가진 랜덤 네트워크에 위험을 발생 및 전파시켜 특정 네트워크에 발생된 평균 위험 확률 값을 계산하였고, 이에 본 연구의 평가 모델이 제시하는 네트워크 견고성 수치를 비교하여 모델의 설명력을 파악하였다. 상관 관계 분석 및 대응표본 t 검정을 실시하여 제안된 모델의 성능을 평가하였고, 모델에 적용된 파라미터 값에 대한 민감도 분석을 실시하여 보다 적절한 파라미터 값의 조합을 구하였다. 실험 및 통계 분석을 통해, 네트워크의 견고성 평가의 정확성을 높이기 위해서는 네트워크에 존재하는 노드뿐 아니라 각 노드들이 어떠한 연결 관계를 가지는지도 함께 고려되어야 함

을 알 수 있다. 이는 결국 본 연구가 제안하는 평가 체계가 공급망의 견고성을 평가하는 적절한 방법임을 보였다.

제안된 방법론은 공급망 구조를 설계하는 단계에 적용될 수 있다. 특히 사업이 진행되고 난 이후에 네트워크 구조를 변경하는 것이 어려운 경우라면, 제안된 방법론을 통해 초기 설계된 네트워크의 견고성을 평가할 수 있을 것이다. 이는 결국 위험을 통해 발생하는 피해 및 복구 비용을 최소화 시킬 수 있는 방법으로 고려된다.

본 연구는 견고성을 기반으로 네트워크 구조를 설계할 수 있다는 점에 가치를 찾아볼 수 있다. 또한 기존의 연구들이 공급 및 수요의 변동으로 발생하는 위험 비용에 초점을 두었거나 오직 APL만을 고려한 모델로 견고성을 평가했다면, 본 연구는 공급망 구조의 전체 구조적 특징을 기반으로 APL이 가진 한계점을 ID/OD를 통합함으로써 극복하여 견고성을 평가했다는 점에 독창성이 있다.

주요어 : 공급망 구조 설계, 공급망 위험, 견고성, 사회적 분석 기법
학 번 : 2010-23382

목 차

1. 서론.....	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 논문의 구성.....	4
2. 배경 이론 및 관련 연구	5
2.1 공급망 위험 및 영향력의 측정	5
2.2 공급망의 견고성(Robustness) 측정.....	7
2.3 SNA(Social Network Analysis)를 이용한 공급망 관리.....	9
2.4 기존 연구의 한계점 및 개선 방안	12
3. 위험 전파 및 평가 모형 설계	14
3.1 위험 전파 및 정량적 평가 모형	14
3.2 위험 전파 모델 적용 예제.....	18
4. 공급망의 구조적 견고성 평가 모형 설계	21
4.1 공급망 구조와 위험 전파의 상관 관계.....	21
4.2 정량적 평가 모형.....	25
4.3 구조적 견고성 평가 모형 적용 예제.....	29
5. 실험 및 결과 토의	32
5.1 실험 설계	32

5.2 실험 결과 및 분석	36
5.2.1 제안된 방법론의 설명력 비교 예시	36
5.2.2 반복 수행 결과 분석	38
5.2.3 결합 비율에 의한 영향력 분석	41
 6. 결론	 45
 참고문헌.....	 48

표 목차

[표 1] 기호.....	14
[표 2] 위험 전파 예제 - 위험 발생 확률.....	20
[표 3] 네트워크 구조와 위험 전파 관계.....	23
[표 4] 기호.....	26
[표 5] 네트워크 구조와 ROB 값 비교.....	29
[표 6] 실험 설계에 따른 파라미터 값.....	32
[표 7] Set1 - APDR과 ROB 및 ROB_N 상관 관계 분석.....	38
[표 8] 30 Sets.....	39
[표 9] ROB와 ROB_N 의 설명력 비교.....	40
[표 10] 대응 표본 t-검정.....	40

그림 목차

[그림 1] 위험 전파 모형.....	15
[그림 2] 위험 전파 예제 그래프.....	19
[그림 3] Set1 - APDR과 ROB 및 ROB_N 산점도.....	36
[그림 4] α 및 β 값의 조합에 따른 ROB의 설명도 변화.....	42

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

급변하는 시장 환경과 공급망의 세계화 및 복잡화는 공급망 관리의 불확실성을 높이고 있고, 공급망 운영 계획의 안정적이고 효율적인 실행을 어렵게 만들고 있다. 이로 인해 공급망은 예상하지 못한 상황에 노출될 가능성이 높아지게 되었다[1]. 공급망 계획의 실행력과 지속 가능성에 부정적인 영향을 미치는 요소를 공급망 위험이라고 정의할 때, 이러한 위험 요소로부터 발생할 수 있는 영향력을 최소화하여 공급망의 지속 가능성을 높이는 것은 공급망 관리의 궁극적인 목표라 할 수 있다.

특히, 공급망의 구조가 복잡해져 다양한 이해관계가 얽힌 상황에서는 위험 요소가 발생하더라도 이에 대한 대처가 늦어지고, 위험의 복구 역시 어려워질 수 밖에 없게 된다[1]. 따라서, 급변하는 시장 구조와 고객의 요구에 빠르게 대응하고, 안정적인 제품과 서비스를 제공하기 위해서는 공급망을 설계하는 과정에서부터 이러한 위험 요소로 인해 발생할 수 있는 상황을 미리 예측하고, 공급망의 구조 자체가 해당 위험으로부터의 영향력에 강한 대응력을 갖출 수 있는 방안이 필요하다.

이를 공급망의 구조적 관점에서 해석하면 공급망의 일부 혹은 전체가 위험 상황에 노출되었을 때, 그 위험으로부터 얼마나 민감하게 영향을

받는지 혹은 해당 위협으로 인해 발생한 위기 상황에서 얼마나 빨리 벗어날 수 있는 지를 기준으로 해당 공급 네트워크의 안정성을 평가할 필요가 있다. 이는 결국 공급망을 설계하는 단계에서 공급망 위협에 대한 견고성이 높은 네트워크 구조를 설계하는 문제로 모형화된다.

이를 해결하기 위해 Wholesale quantity contract과 같은 Supply chain coordination을 통해 Disruption를 해결하는 방법[2]과 공급망 내에서 위협 평가에 있어 가장 중요한 노드와 아크를 찾아 집중 관리하는 방법[3]이 제시되었다. 또한 공급망의 유연성을 높임으로써 위협에 의한 영향을 최소화 시키는 방안을 제시한 사례도 존재하며[4], 예비 공급자를 통해 위협을 해결하는 방법도 제안되었다[5]. 특히, 공급망의 구조적인 특징들을 선별하고, 개별 특징이 가진 공급망 위협과의 관계를 증명하고, 이를 바탕으로 공급망의 구조적 요소 중 가장 영향력이 큰 요소를 선별하는 방법도 제시되었다[6]. 그러나 이러한 기존 연구는 선별된 구조적 특징들을 위협이 발생된 노드 하나에만 국한되어 측정 및 증명되었다는 한계점이 존재한다.

따라서 본 연구에서는 네트워크를 설명할 수 있는 구조적 특징을 특정 노드의 관점이 아닌 전체 네트워크의 관점을 통해 공급망의 견고성(Robustness)를 평가하기 위한 방법을 제안한다. 이를 위해 우선 공급망 내 특정 노드에서 발생한 위협 요소에 의해 해당 노드와 연결된 타 노드로 그 위협의 영향력이 전파되는 현상을 정의한 위험 전파 모형(Risk Propagation Model)[7]을 고려한다. 이와 함께, 사회적 관계 분석 기법의 평균 경로 길이(Average path length)[6]와 In/Out Degree를

고려하여 특정 공급망 구조의 견고한 정도를 평가한다. 그 결과를 바탕으로 위험 요소의 발생에 따른 전체 네트워크에 대한 영향력을 최소화할 수 있을 것으로 예상되는 공급망 구조를 파악하는 방안을 제시한다.

공급망의 구조적 견고성이 높은 네트워크를 설계함으로써 공급망 내에서 위험 요소가 발생하더라도 그로 인해 발생하는 비용을 최소화하거나 위험 요소로 인해 발생한 피해를 복구하는 데 소요되는 비용을 최소화할 수 있다[8]. 이는 결국 최종 고객에게 제공되는 제품과 서비스의 품질 수준을 높이거나 지속적으로 유지할 수 있게 되므로 공급망 전체의 안정성과 지속 가능성뿐만 아니라 최적화된 공급망 계획의 실행력을 높일 수 있게 된다.

1.2 논문의 구성

본 연구의 나머지는 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 본 연구의 수행 과정을 이해하기 위해 필요한 공급망 위험 및 견고성 (Robustness), 사회적 분석 기법 (Social Network Analysis)의 개념과 이를 공급망 관리에 활용한 기존 연구에 대한 분석 결과를 제시한다. 3장 및 4장에서는 위험의 전파 모형과 위험에 대한 견고함 정도를 판단할 수 있는 공급망 구조적 견고성 측정 모형을 각각 제안하고, 간략한 예제를 통해 설명한다. 5장에서는 본 연구에서 제안된 구조적 견고성 측정 기법의 구체적인 활용 방안과 적용 가능성을 다양한 실험과 통계적 결과 분석을 바탕으로 증명한다. 마지막으로 6장에서는 본

연구가 가지는 의의와 한계점 및 향후 연구의 확장 방안에 대해 설명한다.

2. 배경 이론 및 관련 연구

본 장에서는 이 연구에서 제안하는 방법을 이해하기 위해 필요한 기본적인 개념과 이론에 대해 간략하게 설명하고, 이와 관련된 기존 연구들을 종합적으로 분석하여 한계점과 해결방안을 제시한다

2.1 공급망 위험 및 영향력의 측정

공급망의 특정 노드에서 발생하는 위험은 해당 노드의 기능을 부분 또는 전체적으로 마비시킨다. 그로 인해 하나의 노드에서 발생한 위험은 다른 노드에까지 영향이 미치게 되며, 이는 결국 공급망 전체로 확산된다고 할 수 있다. 이와 관련하여 본 연구에서는 우선 공급망의 위험과 그 영향력을 Kleindofer[9]에 의해 정의된 내용을 바탕으로 해석한다.

Definition 1. 공급망 위험 및 영향력

공급망 위험이란 공급망에 발생한 위험으로 인해 전체 공급망의 계획 및 제품 공급에 차질이 생기는 상태를 말한다. 운영 중 발생하는 예상치 못한 사태(장비 또는 시스템 고장 등), 자연재해 (지진, 폭풍 등), 테러리즘과 정치 불안으로 나누어 근원을 찾아볼 수 있다.

공급망 위험을 평가하기 위한 방법으로는 수요의 변화량과 그에 따른 페널티 비용을 기준으로 측정한 후 Wholesale quantity contract를 이용하여 위험 상황을 회복하는 방법이 제안되었다[2]. 이러한 연구 결과를 확장하여 위험을 시장 크기의 변화량으로 반영한 연구[13], 비대칭 정보에 따른 비용을 위험의 영향력으로 고려하여 공급자들간의 Linear wholesale optimal contract을 찾고 비대칭 정보의 영향력을 보여준 연구[14]의 사례도 존재한다. 또한, 수요의 변화 뿐 아니라 생산 비용 및 생산물 관점에서 위험으로부터 회복되는 속도를 기준으로 평가한 경우도 존재한다[15]. 공급망의 외부 변화에 따른 위험의 평가 방법 외에도 Tranvouez[9]는 기업 내부에서 발생하는 위험을 함께 고려하여 주가의 변동을 기반으로 Disruption을 측정하였다.

공급망 위험을 측정하기 위해 다양한 평가 모델들이 개발되었으며, 이 중 Change Constrained Programming (CCP), Data Envelopment Analysis (DEA), Multi-Objective Programming (MOP)의 세 가지 기법의 성능을 비교 평가한 연구[15] 및 배송(Delivery), 품질(Quality), 일반적인 위험 요소 (General failure) 등 다양한 위험의 요소를 AHP에 투입하여 위험 평가 체계를 제안한 연구도 있다[16]. 이 외에도 System dynamics 방법을 이용하여 위험의 영향력을 측정한 방법도 제안되었다[3,5].

2.2 공급망의 견고성(Robustness) 측정

2.1에서 언급한 것과 같이, 공급망 위험은 위험 비용을 발생시키는 것 뿐아니라 공급망 운영 및 계획에 다양한 문제를 야기시킬 수 있다. 때문에 특정 공급망이 위험에 견고한지 여부를 판단하는 과정이 필요하며 이는 공급망의 견고성(Robustness)을 측정하여 파악할 수 있다[18,19]. 공급망 관리의 범위 안에서 견고성을 정의하면 다음과 같다.

Definition 2. 견고성(Robustness)

견고성은 여러 다양한 상황 속에서 공급망이 유연하게 그 기능을 수행하는가로 정의된다. 따라서, 견고한 공급망이란 미래에 발생할 수 있는 위험 요소들로부터 발생하는 영향력으로부터 어느 정도까지 버틸 수 있는가로 해석될 수 있다.

공급망의 견고성을 측정 혹은 개선하기 위한 대부분의 연구는 최적화를 위한 수리 모형의 목적함수를 견고성과는 음의 상관관계를 가진 비용 혹은 패널티를 기준으로 설계하여 적용한 사례가 대부분이다. Mulvey[19]는 시나리오를 기반으로 한 Robust Optimization 모델을 세운 후 할인된 현금 흐름(Discounted Cash Flows)을 통한 예상 수익의 평균으로 견고성을 평가하였으며, 예상 수익을 최대화하는 것이 높은 견고성을 달성하는 방법이라고 제안했다. 또한 Mausser[20,21]의 연구에서는 주어진 특정 상황에서 현재 운영방식에 따른 비용과

최적화된 방법에 따른 비용의 차이를 Regret으로 정의한 후, 절대적인 Regret 또는 상대적인 Regret을 활용하여 시나리오의 견고성을 측정하였고, 이 Regret을 줄이는 방향으로 공급망 관리하는 것이 높은 견고성을 달성할 수 있다고 제안하였다. 이에 대한 연장선으로 Snyder[22]은 어떤 시나리오에서도 상대적 Regret값이 p 를 넘을 수 없다는 제약조건을 추가한 p -Robustness를 제안했다. 다시 말하면, 특정 시나리오에서 발생하는 비용들이 $100(1+p\%)$ 범위 안에 존재해야 한다는 조건을 통해 공급망의 견고성이 낮아지는 것을 피할 수 있음을 주장하였다. 이와 같은 연구가 단일 요소만을 고려한 것이었다면, 예상 총 비용(Expected cost), 수요 불확실성(Demand Uncertainty)으로 인한 비용 변동성, 충족되지 못한 수요로 인한 예상 비용(Expected penalty) 등과 같은 여러 요소를 동시에 반영하여 Robust optimization 모형을 개발한 연구도 존재한다[23]. 이는 앞서 언급한 연구와 유사한 방식으로 견고성을 평가하였으나, 보다 다양한 변수를 동시에 고려했다는 점에서 차이가 있다.

2.3 SNA(Social Network Analysis)를 이용한 공급망 관리

SNA는 일반적으로 아래 Definition 3[24]과 같이 정의할 수 있으며, 네트워크의 특징을 여러 방면으로 분석하여 네트워크의 성격을 이해하는 기법으로 물류와 같은 가시적인 흐름과 지식 또는 관계도를 나타내는

비가시적인 흐름까지 연구 범위에 포함된다. 따라서 네트워크를 다루는 문제라면 SNA의 다양한 기법을 접목시킬 수 있고, 이는 SCM 분야 역시 예외일 수 없다[25,26,27].

Definition 3. SNA(Social network analysis)

SNA(Social network analysis)는 네트워크 안에 소속된 멤버들의 사회적 관계에 관한 다루는 것으로써, 관계의 패턴이 어떻게 되는지 파악하고 이를 정보화하여 활용할 수 있게 돕는다. 노드(Node)와 아크(Arc)의 연결 관계를 중심으로 노드의 중심성(Centrality) 및 등가성(Equivalence)을 판단할 수 있고, 네트워크가 가지고 있는 특징(관계의 복잡도 또는 정보의 흐름)을 알 수 있다.

Lambert[28]과 Rolf[29]은 SCM에 있어서 SNA은 활용도가 높은 분야라고 주장하였는데 특히 어떤 공급자가 선택되어야 할지 결정하는 상황에서 유용함을 보였다. 이는 SNA가 네트워크의 특성(Attributes)에 대한 정보를 갖고 있기 때문이며, 구체적으로 노드 및 아크의 성질을 파악할 수 있을 뿐 아니라 각 노드간의 관계에 대한 정보도 얻을 수 있기 때문이다. 즉, SNA를 통해 얻을 수 있는 정보들이 공급망 운영을 위한 계획 및 예측에 활용될 수 있음을 증명하였다. 특히 Kim[30]은 개별 노드가 얼마의 중요도를 가지는 지, 네트워크에서 어떤 역할을 수행하는 지, 네트워크가 가진 구조적 특성이 개별 노드들에 어떤 영향을 미치는지 등을 파악하기 위해서는 SNA가 제공하는 Social Network Index를 이용하여야 한다고 주장하였다. 이는 결국 SNA의

세부 분석 정보가 공급망 운영을 개선하고 최적화하는 데 중요한 기준으로 활용될 수 있다고 해석할 수 있다.

공급망 위험 관리(Supply Chain Risk Management: SCRM) 분야에서는 보통 위험이 가지는 영향력을 정량화한 후, 이를 수리 모형의 목적함수에 비용 요소로 추가하고, 전체 비용을 감소시키는 방향으로 연구가 진행되었다. 하지만 Nair[6]은 기존 연구와는 달리 공급망 위험이 네트워크의 구조적 특성에 따라 달라지는 것을 SNA를 통해 증명하였다. 이들은 공급망의 위험 관리를 위해 SNA에서 사용되는 여러 지표 중, 평균 경로 길이(Average Path Length: APL)가 공급망 내 위험에 대하여 가장 중요한 요소임을 실험적으로 증명하였다. 다시 말해, 공급망의 구조와 위험이 발생했을 때 공급망의 견고성의 관계를 파악하여, 기존에 제안되었던 여러 SNA 지표들 중 가장 견고성에 영향력을 미치는 지표를 파악하였다. 이 때 비교군은 노드들의 응집성(Clustering Coefficient), 네트워크에 존재하는 노드간 최대 거리(Maximum distance)등이 사용되었다. ABM(Agent-Based Model)을 이용하여 시뮬레이션 한 결과 공급망에서 발생한 위험 비용에 가장 큰 영향을 준 요소가 APL(Average path length)임을 보였다.

2.4 기존 연구의 한계점 및 개선 방안

앞서 언급한 것처럼 Lambert[28], Rolf[29] 및 Kim[30]에 의해

SCM과 SNA가가지는 중요한 연결 관계와 그 활용방안 이 제시되었다. 하지만 SNA의 장점이 일반적인 SCM 운영의 개선을 위한 연구 영역에서는 활용이 되고 있으나 공급망 위험 관리(SCRM) 영역에서는 Nair[6]의 연구를 제외하고는 아직까지 찾아보기 힘든 상황이다. 2.1절에서 이미 언급한 바와 같이 공급망 위험은 네트워크의 연결 구조를 따라 전파되는 특성을 고려할 때 SCRM 영역에서도 SNA의 접근법을 활용할 경우 그 효과를 극대화할 수 있을 것으로 예상된다.

공급망 위험 관리 연구 영역에 최초로 SNA기법을 적용한 Nair[6]의 경우, 공급망 위험이 노드의 구조적 위치에 따라 달라질 수 있음을 보였다. 하지만 네트워크의 구조적 특징을 노드 단위의 관점에 한정시켜 놓고 전체 네트워크의 견고성을 평가했다는 한계점이 존재한다. 또한 APL을 네트워크 전체의 시각으로 계산을 하게 되면 최하위 노드 (Leaf node)만 고려할 수 있을 뿐 최하위 노드로부터 최상위 노드 (Root node)까지 이어지는 과정에 위치한 노드와 그들간의 연결 관계를 설명할 수 없게 된다.

공급망의 견고성을 평가하기 위한 연구는 여전히 수요의 변화 또는 비용의 변화를 페널티의 형태로 목적함수에 추가하는 방법[19,20,21,22,23]이 주를 이루고 있다. 또한 기존 네트워크의 견고성 평가 방법들은 대부분 특정 시나리오 하에서 최적 상태와 현재 상태의 목적함수 값의 차이를 통해 측정하는 방법으로 국한 되어 있다고 볼 수 있다. 이는 수요의 변화와 같은 위험 상황하에서 전체 네트워크에서 발생하는 비용의 변화를 파악할 수 있지만, 네트워크 구조에 따라 위험이 전파되는 현상과 그에 따른 전체 네트워크 상에서의

위험의 변화와 같은 구조적 특징에 대해서는 설명할 수는 없다.

따라서 전체 공급망이 가지는 위험에 대한 견고성을 평가하기 위해서는 네트워크의 구조적 특징들을 노드와 노드 간의 연결관계에서부터 최하위 노드로부터 최상위 노드 까지 이어지는 공급망의 전체 연결 구조를 고려하여 평가해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 네트워크의 구조적인 특징을 기반으로 한 구조적 견고성 평가 모형과 위험의 전파 모형을 제안하였다. 제안된 모형을 통해 네트워크에 존재하는 각 노드의 위험 발생 가능성을 파악할 수 있고, 이를 통해 전체 공급망이 위험에 얼마나 노출되었는가를 파악할 수 있다. 이는 보다 높은 견고성을 보장할 수 있는 공급망을 설계하는 데 있어 객관적 기준 자료로 활용 될 수 있을 것이다.

3. 위험 전파 및 평가 모형 설계

3.1 위험 전파 및 정량적 평가 모형

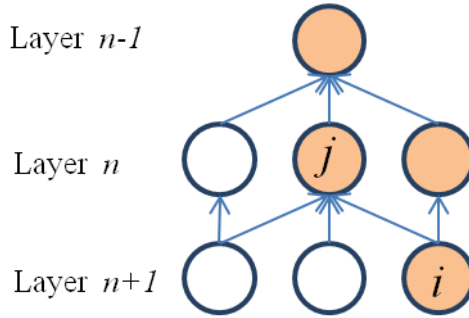
일반적으로 공급망의 구조는 노드의 집합과 각 노드 간의 연결 관계를 바탕으로 설명되며, 이러한 연결 관계는 정보, 자금, 혹은 자재의 흐름에 따라 일정한 방향성을 갖는다. 따라서 특정 노드에서 발생한 위험은 해당 노드 뿐만 아니라 연결되어 있는 다른 노드까지 영향을 미치게 된다[31].

단일 위험 요소가 노드 간 연결관계에 따라 전파되는 현상을 모형화하고, 개별 노드에서의 위험을 정량적으로 평가하기 위해 다음 [표 1]에서 정의한 기호를 사용한다.

[표 1] 기호

기호	내용
L	공급망 내 계층의 집합
N	공급망 내 노드의 집합
$\Pr(D_{jn} = \delta)$	계층 n 의 노드 j 의 위험 발생이 δ 일 확률, $j \in N, n \in L$
$\Pr(D_{jn}^{prop} = \delta)$	계층 n 의 노드 j 에 전파되어온 위험에 의한 위험

	발생이 δ 일 확률, $j \in N, n \in L$
$\Pr(D_{jn}^{direct} = \delta)$	계층 n 의 노드 j 에 자체적으로 발생된 위험에 의한 위험 발생이 δ 일 확률, $j \in N, n \in L$
$g(d_{ijn})$	계층 m 의 노드 i 와 다음 계층 n 의 노드 j 간의 거리에 대한 위험 전파 함수, $i, j \in N, n \in L$
c_{ijn}	계층 $n+1$ 의 노드 i 가 상위 계층 n 의 노드 j 로 조달받는 거래량, $i, j \in N, n \in L$
λ_{ijn}	계층 n 의 노드 j 가 하위 Layer $n+1$ 의 노드 i 로부터 조달 받는 거래량 비율, $i, j \in N, n \in L$



[그림 1] 위험 전파 모형

[표 1]과 [그림 1]을 통해 위험 전파 모형을 개발하기 위해 다음과 같은 가정사항을 둔다.

- 공급망은 1개의 최상위 노드(목적지)를 갖는다.
- 공급망은 n 개의 계층(Layer)으로 구성되어 있으며, 계층 n 의

노드들은 계층 $n+1$ 의 노드들로만 연결 관계를 갖는다.

- 공급망 구조적 특성에 따른 위험 전파 모형에 집중하기 위해 하나의 위험 요소만을 고려한다.

[그림 1]에서 보는 것과 같이 특정 노드에서 발생한 위험은 연결된 다른 노드의 위험 발생 확률에 영향을 미치게 되므로 위험 전파 모형은 노드간의 연결 구조를 기반으로 개발되어야 함을 알 수 있다.

이러한 노드간 위험 전파를 기반으로 각 노드들의 위험의 영향력을 정량적으로 측정할 수 있다. 특정 노드에서 측정되는 위험의 영향력은 해당 노드에서 직접적으로 발생된 위험에 의한 것과 하위 노드에서 발생한 위험으로부터 전파되어온 것으로 나누어 생각할 수 있다[31]. 하위 노드로부터 전파된 위험은 각각 하위 노드 i 가 가지고 있는 위험 발생 확률 ($\Pr(D_{i(n+1)} = \delta)$), 노드 i 와 노드 j 간의 위험 전파 함수 ($g(d_{ij})$), 그리고 노드 j 가 노드 i 에게 할당한 거래량 비율(λ_{ij})에 따라 결정된다. 2개 이상의 하위 노드로부터 연결된 경우 개별 노드로부터 전파되는 위험에 대한 중요도를 차별화하기 위하여 각각의 할당된 거래량을 In degree 자체에 가중치를 두어 반영한다.

또한 하위 노드 i 에서 발생된 위험이 상위 노드 j 에 전파되는 것에 관한 함수인 $g(d_{ij})$ 은 노드 간의 거리에 따라 위험이 더 크게 증폭되거나 감소되거나 또는 무관한 경우도 있을 수 있다[31].

기능이 손실된 2개 이상의 하위 노드로부터 조달받는 경우, 이 값들을 평균값으로 계산하여 상위 노드에 전파된 위험 확률 값을 계산한다. 이는 평균값을 택함으로써 여러 하위 노드의 서로 다른

영향력을 반영할 수 있기 위함이다.

$$\Pr(D_{jn}^{prop} = \delta) = \text{Mean}(\Pr(D_{i(n+1)} = \delta) \cdot \lambda_{ijn} \cdot g(d_{ijn})) \quad (1)$$

$$\text{where } \lambda_{ijn} = \frac{c_{ijn}}{\sum_i c_{ijn}}, i \in N$$

최종적으로, j 번째 노드에서 위험이 발생하여 노드 j 가 기능이 손실 되었을 경우 이는 상위 노드인 노드 j 에 영향을 미치게 된다. 그리하여 노드 j 에는 자체적으로 발생된 위험과 하위 노드로부터 전파되어온 위험, 2가지가 있으며 이 두 값 중 더 큰 값을 선택함으로써 보다 더 큰 위험의 상황을 반영할 필요가 있다. 노드 j 의 위험 발생 확률을 정량적으로 나타내면 다음과 같다[31].

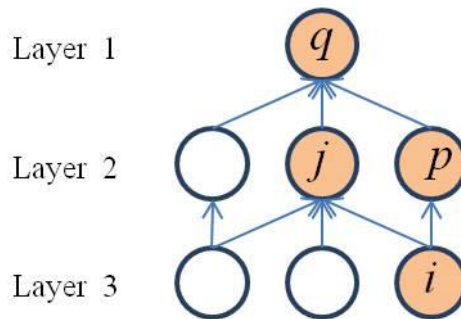
$$\Pr(D_{jn} = \delta) = \text{Min}(\text{Max}(\Pr(D_{jn}^{prop} = \delta), \Pr(D_{jn}^{direct} = \delta)), 1) \quad (2)$$

본 연구에서는 전체 공급망 내 모든 노드의 평균 위험 발생 확률을 APDR(Average probability of disruption per risk)로 정의하고, 이를 통해 공급망 전체의 위험의 정도를 측정한다.

3.2 위험 전파 모델 적용 예제

본 절에서는 간략한 예제를 통해 제안된 공급망 구조에 따른 위험의 전파 모형과 전체 공급망의 위험 평가 방법이 어떻게 활용될 수 있는지를 설명한다.

우선 본 예제에서는 전체 공급망에 위험이 발생하는 노드를 1개로 제한하고 나머지 노드에서는 전파된 위험의 가능성만 있다고 가정한다. 또한 노드 간 위험 전파 특성에 대해서는, 하위 노드에서 위험이 발생할 경우 거리에 따른 위험 전파 함수 $g(d_{jn})$ 를 1로 가정하여 하위 노드가 기능 손실된 부분만큼 상위 노드가 영향을 받는 것으로 한다. 상위 노드와 하위 노드의 거래량 비율인 λ_{jn} 은 동일한 값을 가지는 것으로 가정한다.



[그림 2] 위험 전파 예제 그래프

3.1절에서 정의한 바와 같이 노드 j 에서 위험이 발생하여 기능

손실이 되었을 경우, 노드 i 의 Out Degree를 따라 위험이 전파되어 노드 j 와 p 가 영향을 받게 된다. 이때 노드 p 는 In Degree가 오직 노드 i 하나이므로 노드 i 가 완전히 기능을 상실했다고 가정했을 때, ($\Pr(D_{i3}^{direct})=1$), $g(d_{ip2})=1$ 을 전제로 하였으므로 노드 p 또한 100%의 위험 발생 확률을 갖게 된다. 이와는 달리, 노드 j 의 In Degree는 3으로, 오직 한 개의 공급자(노드 i)에서만 조달을 100% 받지 못하게 되어 $100\%/3 = 33.33\%$ 의 위험 발생 확률을 갖게 된다 ($\lambda_{ij2} = 1/3$). 위험이 발생한 노드 i 의 위험 발생 확률은 100%, 이로부터 영향을 받게 되는 노드 j, p, q 의 위험 발생 확률은 다음 식을 통해 계산된다.

$$\Pr(D_{j2}) = \text{Min}(\text{Max}(\text{Mean}(1 \cdot \frac{1}{3} \cdot 1), \text{none}), 1) = \frac{1}{3} \quad (3)$$

$$\Pr(D_{p2}) = \text{Min}(\text{Max}(\text{Mean}(1 \cdot 1 \cdot 1), \text{none}), 1) = 1 \quad (4)$$

$$\Pr(D_{q1}) = \text{Min}(\text{Max}(\text{Mean}((\frac{1}{3} + 1) \cdot \frac{1}{3} \cdot 1), \text{none}), 1) = \frac{4}{9} \quad (5)$$

[표 2] 위험 전파 예제 - 위험 발생 확률

	노드				APDR
	i	j	p	q	
위험 발생 확률 (%)	100	33.33	100	44.44	34.72

마찬가지로 노드 q 의 경우 3개의 노드와 연결 되었는데 각각 0%, 33.33%, 100%의 노드 기능 손실을 기록하고 있으므로 노드 q 의 위험 발생 확률은 44.44%가 된다. 이러한 노드들로 구성된 전체 공급망의 APDR은 34.72% 가 된다.

4. 공급망의 구조적 견고성 평가 모형 설계

앞서 1장 에서도 언급한 바와 같이 공급망 내 특정 노드에서 위험이 발생했을 때 그 영향력이 전체 공급망으로 전파되는 것을 최소화 할 수 있도록 공급망 구조를 설계하거나 선택 가능한 여러 구조적 대안 중 최적안을 선택하는 의사결정 과정이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 위험의 영향력 전파를 최소화하는 것을 구조적 견고성을 높이는 것으로 정의하고, 구조적 견고성을 정량적으로 측정하기 위한 모형을 개발하는 것을 목적으로 한다. 본 장에서는 공급망의 구조와 위험의 전파 현상과의 관계를 우선 정의하고, 이를 이용한 공급망의 구조적 견고성을 평가하기 위한 모형을 설명한다.

4.1 공급망 구조와 위험 전파의 상관 관계

3장에서 이미 정의한 바와 같이 보다 정교하고 체계적인 위험 평가 체계를 위해서는 공급망 내 모든 위험 요소들이 독립적이지 않으며 상호간에 인과관계를 가지고 있어 공급망의 연결 구조에 따라 서로 전파될 수 있음을 고려해야 한다[32].

따라서, 본 연구에서는 공급망 위험 을 독립적인 요소가 아니라

노드의 연결 관계 및 물질, 자금 및 정보의 흐름에 따라 전파되는 것으로 가정한다. 다시 말해, 공급망 내에서 위험이 발생된 노드는 운영 기능을 상실하여 적시에 제품 공급이 되지 못하는 경우 그 다음 계층의 노드에까지 영향을 끼치게 된다. 따라서 위험의 평가 과정에서 특정 노드에 발생한 위험을 측정하는 것뿐만 아니라, 전체 공급망의 관점에서 위험에 의해 퍼진 영향력을 동시에 평가해야 함을 의미한다.




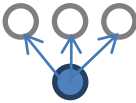
앞서 언급한 것처럼 공급망 내 위험의 전파현상으로 인해 공급망의 연결 구조가 바로 견고성을 결정짓는 가장 중요한 요소가 된다. 즉, 공급망의 구조적 특성과 위험 전파와의 상관관계를 사전에 정의해야 하며, 이를 위해 다음과 같은 사항을 가정한다.

- 다계층 공급망(Multi-Layered Supply Chain Network): 하나의 공급망은 노드의 집합으로 정의되는 다수의 계층으로 구성된다.
- 단일 제품(Single commodity): 공급망의 운영은 단일 제품 생산 및 조달을 목적으로 한다.
- 노드간 공급자 및 경쟁관계: 동일한 계층에 속한 노드는 다음 계층에 속한 노드의 공급자가 되며 서로 대체 가능한 경쟁 관계를 가정한다.

위와 같은 가정을 바탕으로 공급망의 구조적 특성을 이웃한 계층에 속한 노드 간의 연결 구조를 바탕으로 분석한다. 이를 크게 노드를 중심으로 수평적 연결 구조와 수직적 연결 구조, 아크를 중심으로 In

degree와 Out degree로 나누어 분석하였으며, 그 결과는 다음 표와 같다.

[표 3] 네트워크 구조와 위험 전파의 관계

구분	노드 기준		아크 기준	
구분	수직	수평	In Degree	Out Degree
네트워크 예시				
위험 전파와의 상관관계	양의 관계	음의 관계	음의 관계	양의 관계

노드의 수직적 특성은 위험 전파와 양의 관계를 갖는데, 이는 상위 계층에 있는 노드일수록 위험에 의한 영향력이 누적되기 때문이다. 상위 노드는 하위 노드로부터 물자를 공급받으므로 하위 노드가 운영 기능을 상실하였을 경우, 하부 구조의 깊이가 깊을수록 영향 받는 상위 노드들이 많아지게 된다. 이를 공급망의 견고성과 연결시켜 본다면, 공급망 견고성이 네트워크에 퍼지는 영향력을 낮추기 위해서는 네트워크의 수직적 연결 길이가 짧을수록 유리함을 알 수 있다.

수평적 특성은 수직적 특성과는 반대로 동일 계층에 있는 노드의 개수와 비례하여 평가된다. 앞서 언급했던 바와 같이 동일 계층에 있는 노드들은 서로 대체관계를 갖는 것으로 가정하였으므로, 특정 노드가 위험에 영향을 받았다 하더라도 같은 계층 중 연결관계를 가지는 다른 노드들에 의해 상황이 완화되어 상위 계층의 노드가 받는 위험의 영향력이 상쇄될 수 있다. 따라서, 수평적 연결 정도가 강할수록 위험 발생 시 다음 계층의 노드가 받는 위험의 영향력이 작아진다.

수직적 특성과 수평적 특성에서 살펴본 바와 같이 위험의 전파는 노드간 연결 관계에 따라 그 영향이 달라질 수 있으며, 특히 연결 구조는 특정 노드로 유입되는 In degree와 유출되는 Out degree로 나누어 모형화할 수 있다. 위험이 발생한 노드를 기준으로 Out degree가 높을수록 상위 노드로 위험이 전파되는 범위가 확대된다. 따라서, Out degree는 네트워크의 견고성과 음의 관계를 갖는다고 말할 수 있다. 이와는 반대로 이전 계층의 노드와 공급관계를 가지는 노드 기준에서는 In degree가 높을수록, 즉 대체 가능한 공급자가 많을수록 위험의 확산 가능성을 낮출 수 있게 된다. 이는 네트워크의 견고성과 양의 관계를 갖는다고 말할 수 있다.

4.2 정량적 평가 모형

본 연구에서는 공급망이 가진 연결 구조가 위험의 전파에 얼마나 안정적인지를 정량적으로 평가하기 위해 사회적 연결망 분석 기법 중

Nair[6]이 정의한 APL와 ID-OD(In-Out degree) 지표를 동시에 고려한다. 이를 정의하기 위한 기호와 간략한 설명은 다음 표 4와 같다.

[표 4] 기호

기호	내용
N	공급망 내 노드의 집합
L	공급망 내 계층의 집합
A	공급망 내 노드를 연결시키는 아크의 집합
l_{jn}	$\begin{cases} 1, \text{ layer } n\text{의 node } j\text{가 leaf node} \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases}, j \in N, n \in L$
p_{jn}	$\begin{cases} 1, \text{ layer } n\text{의 node } j\text{가 Out degree node} \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases}, j \in N, n \in L$
q_{jn}	$\begin{cases} 1, \text{ layer } n\text{의 node } j\text{가 In degree node} \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases}, j \in N, n \in L$
a_{ijn}	$\begin{cases} 1, \text{ layer } n + 1\text{의 node } i\text{가상위 layer } n\text{의 node } j\text{와연결} \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases}, i, j \in N, n \in L, a \in A$
$t(l_{jn})$	최하위 노드 l_{jn} 의 최상위 노드까지의 길이
α	APL 값과 ID-OD 값의 선형 결합 비율
β	ID 값과 OD 값의 선형 결합 비율
$f_A()$	APL과 공급망의 구조적 견고성 관계를 정의하기 위한 함수
$f_O()$	Out degree와 공급망의 구조적 견고성 관계를 정의하기 위한 함수

$f_l()$ In degree와 공급망의 구조적 견고성 관계를 정의하기
위한 함수

노드의 수직 및 수평적 연결관계는 아래 식 (6)과 같이 하나의 통합된 지표인 APL로 표현할 수 있다. 이는 네트워크 내에 있는 모든 최하위 노드들의 최상위 노드까지의 평균 길이를 나타내므로 동일한 갯수의 노드를 가정하는 네트워크 구조에서 노드의 수직, 수평성을 동시에 반영하기 때문이다. 이 때 APL은 수직성을 양의 값으로 시작하여 수평으로 구조가 퍼짐에 따라 값이 감소되는 형태이므로 APL 값과 위험 전파의 관계는 양의 관계라고 볼 수 있다.

$$APL = \frac{\sum_n \sum_j t(l_{jn})}{\sum_n \sum_j l_{jn}}, j \in N, n \in L \quad (6)$$

공급망에 존재하는 전체 아크 수는 전체 In degree 갯수 이면서 Out Degree 갯수이기도 하므로, 이는 각각 공급망 내 전체 아크수로 표현될 수 있다. 하지만 공급망 내에서 Out degree 노드와 In degree 노드는 서로 값이 다르므로 따라서 전체 아크 수를 In degree 노드 또는 Out degree노드의 갯수로 나누어 OD 및 ID 지표 값을 계산할 수 있다.

$$OD = \frac{\sum_n \sum_j \sum_i a_{ijn}}{\sum_n \sum_j p_{jn}}, i, j \in N, n \in L \quad (7)$$

$$ID = \frac{\sum_n \sum_j \sum_i a_{ijn}}{\sum_n \sum_j q_{jn}}, i, j \in N, n \in L \quad (8)$$

4.1절에서 언급했듯이 공급망의 견고성은 APL 및 OD와는 반비례, ID와는 비례 관계를 가지는 특징을 동시에 반영할 수 있도록 함수화하여 견고성 측정 기준에 반영할 필요가 있다. 즉, 단순히 APL, ID, OD 값을 이용하는 게 아니라 이 값이 위험 전파와 가지는 관계를 고려하여 반영해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 이를 각각 f_A , f_O , f_I 로 함수화하여 위험 전파와 각각 비례 또는 반비례 관계를 갖는 세가지 Input 지표를 견고성에 반영하였다.

또한 공급망 위험이 가진 개별적인 특성에 따라 노드들의 깊이(Depth) 혹은 아크가 상대적으로 더 중요하게 고려되어야 할 수도 있다. 따라서 구성 요소에 대한 상대적 중요도를 반영하기 위해 선형 결합의 형태를 제안한다. 이러한 공급망 구조적 특성을 고려하여 견고성을 평가하기 위한 함수를 식 (9)와 같이 정의하였다.


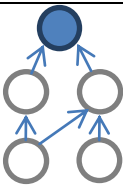
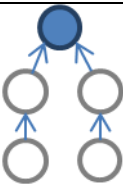
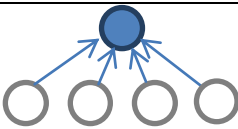
$$ROB = \alpha \cdot f_A(APL) + (1-\alpha) \cdot \{\beta \cdot f_O(OD) + (1-\beta) \cdot f_I(ID)\} \quad (9)$$

4.3 구조적 견고성 평가 모형 적용 예제

서로 다른 연결구조를 가진 세 개의 공급망을 대상으로 견고성 평가 결과 과정을 예로 들어 설명한다. 개별 공급망의 수직성 및 수평성은 APL을 통해 측정하고, 아크를 기준으로 ID-OD 값을 계산한다. 측정 과정을 단순하게 설명하기 위해 개별 공급망을 구성하는 노드 개수는 5개로 고정하고, ROB 측정함수의 선형 결합 비율 α 및 β 를 0.5로 가정하였다. 또한 위험 전파와 양의 관계인 APL 및 OD, 음의 관계인 ID에 대한 함수 정의는 다음과 같다.

$$f_A = \frac{1}{APL}, f_O = \frac{1}{OD}, f_I = ID \quad (10)$$

[표 5] 네트워크 구조와 ROB 값 비교

구분	Serial network	Hybrid network #1	Hybrid network #2	Parallel network
공급망 구조				
APL	$4/1 = 4$	$(2+2)/2$	$(2+2)/2$	$(1+1+1+1)/4$

		= 2	=2	= 1
Degree	In	$4/4 = 1$ 1.6667	$5/3 =$ 1.333	$4/1 = 4$
	Out	$4/4 = 1$ 1.25	$5/4 =$ $4/4=1$	$4/4 = 1$
ROB		0.625	0.8333	1.75

수직 및 수평 연결 구조와 In Degree, Out Degree가 가지는 특징을 바탕으로 가장 구조적으로 위험에 취약할 것으로 예상되는 네트워크는 Serial network이다. 모든 계층의 노드가 하위 노드에 전적으로 의존하는 형태이므로 네트워크의 유연성이 낮기 때문이다. 반대로 Parallel network은 특정 노드가 위험으로 인해 기능이 손실 되었다 하더라도 그 영향력이 같은 계층의 다른 노드에 의해 완화되므로 위험에 대한 견고성이 가장 높을 것으로 예상된다.

ROB 값을 살펴보면, 예상대로 마지막 Parallel network 구조가 1.75로 예상대로 가장 높은 값을 갖는 것을 알 수 있다. 반대로 Serial network은 ROB 값이 0.625로 3가지 네트워크 중 가장 낮은 값을 갖는 것을 확인할 수 있으며 이는 공급망 위험에 가장 취약한 형태임을 뜻한다.

5. 실험 및 결과 토의

5.1 실험 설계

본 연구의 실험은 다양한 구조를 가지는 네트워크들의 위험에 대한 견고성을 비교하고 제안된 방법론이 견고성의 정도를 잘 설명하는가 검증하는 것을 목적으로 하며 이를 위해 위험과 ROB 간의 상관 관계 분석 및 본 연구 방법론과 비교군과의 설명력 차이 여부를 판단한다. 또한 ROB 함수의 선형 결합 비율이 변화함에 따라 설명력의 차이를 보기 위해 민감도 분석(Sensitivity analysis)을 실시한다.

[표 6] 실험 설계에 따른 파라미터 값

파라미터	값
세트 한 개에 생성된 랜덤 네트워크의 갯수	20
세트 갯수	30
네트워크에 존재하는 노드 수	16
위험 발생 노드 갯수	1
각 공급망의 랜덤 위험 발생 횟수	15
$g(d_{ijn})$	1

α	0.5
β	0.5
$f_A()$	1/APL
$f_o()$	1/OD
$f_l()$	ID

각 네트워크에서 계산된 APDR(Average probability of disruption per risk) 값과 ROB 값과의 관계 분석을 위해 노드의 갯수가 최상위 노드를 제외한 15개로 고정된 공급망을 노드간 연결관계를 무작위로 생성하여, 서로 다른 공급망 서른 개를 생성하고, 각 공급망의 ROB 값을 우선 측정한다. 이후 각 공급망 내 하나의 노드에서 위험을 발생시켜 그 영향력이 전파되는 정도를 측정한다. 또한 위험이 발생하는 노드의 위치가 실험 결과에 미치는 영향력을 제거하기 위해 15개 노드에서 위험이 발생하는 경우를 모두 비교하였다.

이를 위해 우선 노드 i 의 노드 j 의 거리에 따른 위험 전파 함수인 $g(d_{ijn})$ 은 1로 가정하였으며, 모든 노드의 중요성을 동일하게 보아 λ_{ijn} 는 In degree수에 비례하게 할당시킨다. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\lambda_{ijn} = \frac{1}{\sum_i P_{i(n+1)}} \quad (11)$$

정량적 평가 모형에 사용되었던 함수들에 관한 실험 설계는 다음과 같다. ROB 함수 식에서 제안된 f_A , f_O 함수는 각각 APL과 OD 값을 역수화하는 함수로 설계하고, ID는 견고성과 비례 관계이므로 f_I 는 ID 값을 그대로 사용한다.

이 과정을 서로 다른 구조를 가진 공급망 20개를 생성하여 하나의 실험 세트를 구성하였으며, 무작위성에 의한 영향력을 제거하기 위해 총 30회 반복 수행하였다. 본 연구가 제안하는 ROB이 공급망 내 전파되는 위험을 얼마나 잘 설명하는지 그 설명력을 측정하기 위해서는 우선 무작위로 생성된 네트워크에서 발생한 15번의 위험 발생 확률 값을 평균하여 해당 네트워크의 ROB 값과 비교해 볼 수 있다. 이 과정을 서로 다른 20개의 네트워크에 적용한 후 측정된 ROB와 APDR의 상관계수를 통해 ROB이 네트워크 구조의 견고성을 잘 설명하는 지표인지 판단할 수 있을 것이다.

제안된 기법의 성능을 비교 평가하기 위해 Nair[6]가 정의한 APL을 동일한 공급망 구조에 적용하여 비교 분석한다. 이를 ROB_N 으로 정의하였으며, 이는 식 (9)에서 정의한 ROB에서 α 값이 1로 고정된 형태로 해석할 수 있다. ROB와의 정확한 성능 비교를 위해 APL만을 이용하는 ROB_N 과의 대응 표본 t-검정(paired t-Test)을 실시하여 두 기법 중 어느 것이 공급망 위험의 확산 결과를 보다 잘 설명할 수 있는지를 평가한다. 이를 위해 반복된 실험 결과에 대한 통계 검증을 통해 ROB과 비교군 ROB_N 의 대응 표본 t-검정을 통해 아래와 같이 귀무

가설 채택 여부를 판단한다.

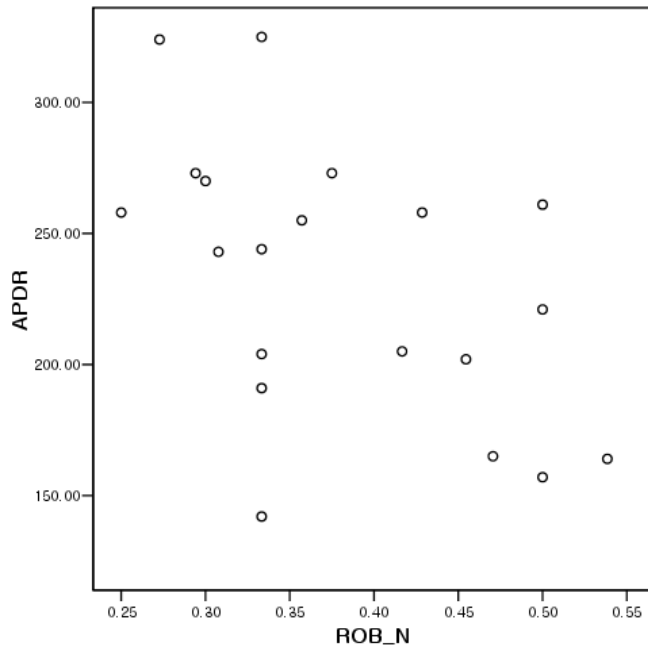
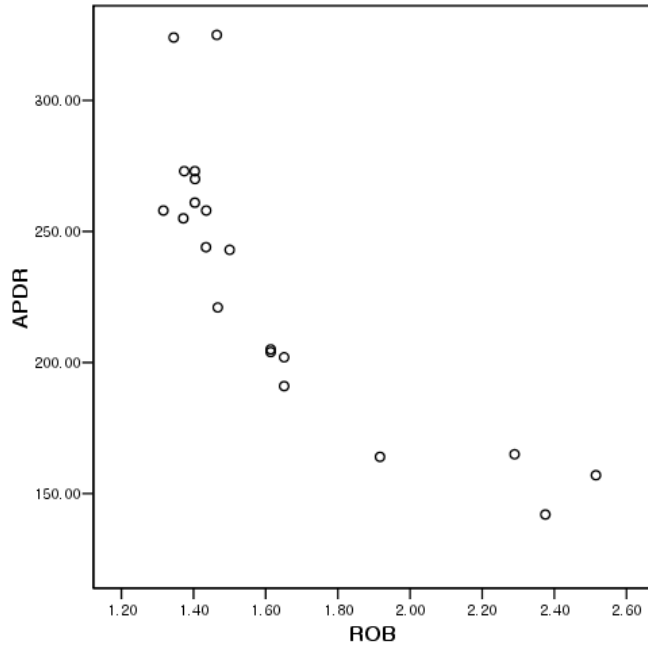
H0: ROB과 ROB_N 의 설명력 차이가 없다.

H1: ROB의 설명력이 ROB_N 의 설명력보다 높다.

5.2 실험 결과 및 분석

5.2.1 제안된 방법론의 설명력 비교 예시

5.2.1절은 전체 실험 중 하나의 세트를 비교하는 것으로써, 여기서 ROB의 선형결합 시 가정하는 기본 값은 $\alpha=0.5$ 및 $\beta=0.5$ 이다. 우선 랜덤하게 생성된 20개의 공급망 안에서 동일한 노드 하나에서 위험을 발생시키고, 영향력의 확산 결과를 계산하는 과정을 15회 반복 수행한다. 매회 다른 노드에서 위험을 발생시키게 되므로, 결국 모든 노드에서 위험이 발생한 경우를 고려하게 된다. 이를 통해 APDR 값과 제안된 방법론(ROB) 및 비교군(ROB_N)과의 상관 관계를 각각 알 수 있는데 이는 다음 그래프와 같다.



[그림 3] Set1 - APDR과 ROB 및 ROB_N 산점도

[표 7] Set1 - APDR과 ROB 및 ROB_N 상관 관계 분석

Set1	R ²	유의확률	네트워크 수
ROB	-.825**	.000	20
ROB _N	-.513*	.021	20

** . 상관계수는 0.01 수준(양쪽)에서 유의함
 * . 상관계수는 0.05 수준(양쪽)에서 유의함

우선 ROB와 ROB_N의 APDR에 대한 관계를 나타낸 산포도를 보면 ROB이 보다 강한 음의 상관 관계를 갖는 것을 알 수 있다. 이는 제안된 방법론과의 상관 계수 값(-.825)이 ROB_N의 경우 (-.513)에 비해 더 낮은 값을 가지는 것을 통해 확인 가능하며, 이는 유의확률(p-value < 0.01)을 값에 의해서 통계적으로 유의함을 보장할 수 있다.

5.2.2 반복 수행 결과 분석

앞선 5.2.1절에서 수행한 실험의 과정을 총 30회 반복한 결과는 다음 표와 같다.

[표 8] 30 Sets

Set No.	ROB	ROB _N	Set No.	ROB	ROB _N
1	-.825	-.513	16	-.867	-.771
2	-.744	-.431	17	-.737	-.455

3	-0.752	-0.566	18	-0.846	-0.527
4	-0.823	-0.617	19	-0.814	-0.347
5	-0.726	-0.465	20	-0.921	-0.762
6	-0.824	-0.441	21	-0.839	-0.602
7	-0.815	-0.731	22	-0.780	-0.533
8	-0.877	-0.759	23	-0.724	-0.607
9	-0.893	-0.681	24	-0.750	-0.666
10	-0.849	-0.697	25	-0.717	-0.528
11	-0.737	-0.520	26	-0.805	-0.711
12	-0.826	-0.658	27	-0.731	-0.538
13	-0.877	-0.666	28	-0.885	-0.674
14	-0.705	-0.606	29	-0.788	-0.541
15	-0.822	-0.565	30	-0.902	-0.780

세트 30개에 대한 실험의 기초 통계량 분석을 실시함으로써 ROB와 ROB_N 과의 평균 R^2 및 편차를 확인할 수 있다.

[표 9] ROB과 ROB_N 의 설명력 비교

	평균	개수	표준편차	평균의 표준오차
R^2 (ROB)	-0.8074	30	0.06295	0.01149
R^2 (ROB_N)	-0.5986	30	0.11330	0.02069

비교군과의 설명력 비교를 위하여 대응표본 t-검정을 실시하고, 이를 통해 5.1절에서 언급한 귀무가설 채택 여부를 결정한다. t-검정 실험 결과는 다음 [표 10]을 통해 확인할 수 있다.

[표 10] 대응표본 t-검정

Pair 1 – ROB와 ROB _N	값
평균	-.20883
표준편차	.09317
평균의 표준오차	.01701
차이의 95% 신뢰 구간	
하한	-.24362
상한	-.17404
t	-12.276
자유도	29
유의 확률(양쪽)	0.000

실험 결과, t 통계량은 -12.274로 -.196보다 낮은 값을 갖는 것을 알 수 있고, 유의확률 p-value 또한 0.000으로 0.05보다 작으므로 두 집단 간 차이가 있다고 볼 수 있다. 이는 본 연구가 제안하는 ROB과 비교군인 ROB_N의 설명력에 차이가 있는 것을 뜻하므로 귀무 가설을 기각하고, 대립가설인 "ROB의 설명력이 ROB_N의 설명력보다 높다."를

채택한다.

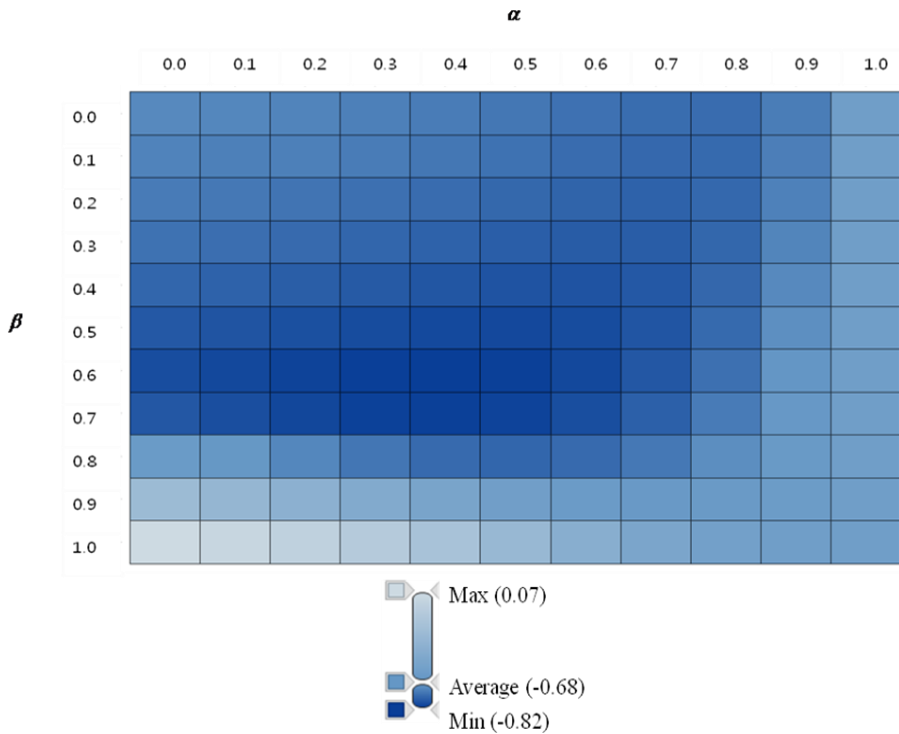
즉, 네트워크의 견고성을 평가할 때, 최하위 노드들의 평균 경로 길이만을 고려해서는 해당 네트워크의 견고성을 비교할 수 없으며 노드와 노드간의 연결 관계까지 함께 고려해야만 공급망 위험에 대한 네트워크의 견고성을 판단 비교 할 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

5.2.3 결합 비율에 의한 영향력 분석

앞선 반복 실험은 다시 노드와 아크간의 선형 결합 비율 α 와 In degree와 Out degree간의 결합 비율을 나타내는 β , 총 2가지의 비율에 대한 조합에 따라 그 결과가 달라질 수 있다.

이 두 가지 결합비율의 조합 중 가장 높은 설명력을 갖는 경우를 찾아내기 위해 각각의 결합 비율을 0.0에서 1.0의 범위로 0.1의 단위로 증가시켜 전체 100개의 조합에 대한 반복 실험을 수행하였다.

다음 [그림 4]는 5.2.1 절에서 사용된 30회 반복 실험 결과의 평균을 기준으로 α 와 β 조합 행렬을 Heat map의 형태로 나타낸 것이다.



[그림 4] α 및 β 값의 조합에 따른 ROB의 설명도 변화

그 결과, ROB의 선형 결합 비율인 α 가 0.3~0.5 사이의 값을 갖고 β 가 0.5~0.7 값을 갖을 때 상관 계수가 가장 높은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 비교군인 ROB_N 의 경우는 $\alpha = 1$ 인 상황이므로 [그림 4]에서 가장 오른쪽 열에 해당된다. 이 경우보다 구간 $(\alpha, \beta) = (0.3 \sim 0.5, 0.5 \sim 0.7)$ 에서 더 높은 설명력을 보장할 수 있음을 다시 확인할 수 있다. 이는 5.2.2에서의 통계 검증과 동일한 결과라고 할 수 있다.

α 에 의한 영향력과 β 에 의한 영향력을 조금 더 자세하게 살펴본다.

α 값은 네트워크의 노드와 아크의 상대적인 비율을 나타내는 값으로, α 값의 증가는 ROB에서 노드의 비중을 증가시킨 것과 같다. 즉, α 값을 0에 가까이 감소시키면 노드의 중요성은 떨어지고 아크의 중요성이 ROB 함수 내에서 커지게 된다. 앞서 설명했듯이 네트워크의 구조적 견고성을 가장 잘 설명하는 결합 비율 α 는 0.3~0.5 근처 값일 때이므로 30-50% 가량의 노드 비중이 함수 내에 포함되어야 네트워크의 견고성을 잘 설명할 수 있다고 볼 수 있다.

In degree와 Out degree의 결합 비율인 β 는 0.5~0.7 근처에서 가장 좋은 설명력을 보여주며 마찬가지로 이 값을 전후로 설명도는 감소한다. 하지만, β 가 1.0으로 증가되는 방향일 때 더 큰 폭으로 설명도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. ROB 함수에 따르면 β 값의 증가는 Out degree 지표 비중의 증가를 뜻하기 때문에 이와 같은 실험 결과는 In degree의 값의 영향력이 Out degree보다 크다고 해석될 수 있다.

6. 결론

본 연구는 공급망의 견고성을 공급망의 구조를 기반으로 평가하기 위한 방법을 제시했다. 이는 크게 2가지로 나뉠 수 있는데, 각각 네트워크에 퍼져있는 위험을 측정하기 위해 제안된 위험 전파 모형과 네트워크가 가진 구조적 특징을 APL과 In/Out Degree를 이용하여 개발된 구조적 견고성 평가 모형을 제시하였다. 단순히 공급망의 견고성을 수요 또는 공급의 변동성을 낮춤으로써 달성할 수 있다고 접근한 기존 연구와는 달리, 공급망의 견고성을 평가하기 위해 공급망 연결 구조를 기반으로 접근했다는 점과 이 과정에서 최종 최하위 노드에서 최상위 노드까지 연결되는 중간 과정도 반영했다는 점이다.

본 연구에서 제안하는 기법의 효과성을 검증하기 위해 ROB와 APDR의 상관 관계 분석 실험 및 ROB과 ROB_N 의 대응 표본 t-검정 실험을 실시하였고, 그 결과를 바탕으로 통계적 검증을 수행하였다. 그 결과, ROB과 APDR의 음의 상관 관계가 평균 80%이상을 보임을 알 수 있었고, ROB이 ROB_N 에 비해 공급망의 견고성 정도를 보다 잘 설명하는 지표임을 확인할 수 있었다. 이는 특정 네트워크가 공급망 위험에 견고한가 여부를 판단하려면 노드 기반의 특징과 아크 기반의 특징이 모두 고려되어야 하며, 만약 특정 요소 혹은 구조적 특징이 간과되면 그만큼 견고성 여부를 판단하는 지표의 설명력이 떨어지는 결과를 낳게 된다.

본 연구에서 제안한 정량적 지표는 공급망의 설계 단계에서 적극 활용될 수 있을 것이다. 특히, 공급망 운영에 있어 유연성을 확보하기 어려운 환경, 예를 들어 이미 생산 및 물류 시설에 대한 투자가 이루어져 있어 공급선을 다 변화시키기 어려운 경우에는 초기 공급망 설계시 네트워크의 위험에 대한 견고성을 고려하여 위험의 발생과 그 확산에 대비할 수 있을 것이다.

제안된 평가 기법이 현실적으로 적용가능하기 위해서는 몇 가지 한계점을 극복해야 한다. 우선, 같은 계층에 있는 노드들에 차이를 고려하지 않고 동일시 했다는 점이 있다. 특정 노드의 중요성 및 대체 불가능한 노드 등을 반영하는 방법이 추후 연구에서 고려될 수 있다. 본 연구에서는 위험이 구조적 연결 관계에 따라 확산되는 과정에 집중하기 위해 하나의 위험만을 고려하였다. 공급망 내에서는 다양한 위험 요소가 정의될 수 있으며, 이들 위험 간의 상관 관계 역시 고려해야 할 필요가 있다. 또한, 실험에서는 공급망 내 단일 노드에서 위험이 발생한 경우를 가정하였으나, 실제 상황에서는 다수의 노드에서 위험이 발생하여 전체 공급망에 중첩된 영향력이 확산되는 상황을 고려해야 한다. 이와 같은 한계점을 추후 연구에서 반영한다면 보다 견고한 공급망 설계를 위한 기준으로 활용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. You, Fengqi, John M. Wassick, and Ignacio E. Grossmann. "Risk management for a global supply chain planning under uncertainty: models and algorithms." *AIChE Journal* 55.4 (2009): 931–946.
2. Qi, Xiangtong, Jonathan F. Bard, and Gang Yu. "Supply chain coordination with demand disruptions." *Omega* 32.4 (2004): 301–312.
3. Wilson, Martha C. "The impact of transportation disruptions on supply chain performance." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 43.4 (2007): 295–320.
4. Skipper, Joseph B., and Joe B. Hanna. "Minimizing supply chain disruption risk through enhanced flexibility." *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 39.5 (2009): 404–427.
5. Min, Hokey, and Gengui Zhou. "Supply chain modeling: past, present and future." *Computers & Industrial Engineering* 43.1 (2002): 231–249.
6. Nair, Anand, and José M. Vidal. "Supply network topology and robustness against disruptions—an investigation using multi-agent model." *International Journal of Production Research* 49.5 (2011): 1391–1404.
7. Shin, KwangSup, Yongwoo Shin, Jihye Kwon, and Sukho Kang. "Risk propagation based dynamic transportation route finding mechanism." *Industrial Management & Data Systems* 112.1 (2012):

102–124.

8. Yu, Haisheng, Amy Z. Zeng, and Lindu Zhao. "Single or dual sourcing: decision-making in the presence of supply chain disruption risks." *Omega* 37.4 (2009): 788–800.
9. Kleindorfer, Paul R., and Germaine H. Saad. "Managing disruption risks in supply chains." *Production and operations management* 14.1 (2005): 53–68.
10. Chen, Keping, and Tiaojun Xiao. "Demand disruption and coordination of the supply chain with a dominant retailer." *European Journal of Operational Research* 197.1 (2009): 225–234.
11. Lei, Dong, Jianbin Li, and Zhixue Liu. "Supply chain contracts under demand and cost disruptions with asymmetric information." *International journal of production economics* 139.1 (2012): 116–126.
12. Xia, Yusen, Ming Yang, Boaz Golany, Stephen M. Gilbert, and Gang Yu. "Real-time disruption management in a two-stage production and inventory system." *IIE transactions* 36.2 (2004): 111–125.
13. Tranvouez, Erwan. "Multiagent modelling of cooperative disruption management in supply chains." *Service Systems and Service Management, 2006 International Conference on*. Vol. 2. IEEE, 2006.
14. Bogataj, David, and Marija Bogataj. "Measuring the supply chain risk and vulnerability in frequency space." *International Journal of Production Economics* 108.1 (2007): 291–301.

15. Wu, Desheng, and David L. Olson. "Supply chain risk, simulation, and vendor selection." *International Journal of Production Economics* 114.2 (2008): 646–655.
16. Kull, Thomas J., and Srinivas Talluri. "A supply risk reduction model using integrated multicriteria decision making." *Engineering Management, IEEE Transactions on* 55.3 (2008): 409–419.
17. Klibi, Walid, Alain Martel, and Adel Guitouni. "The design of robust value-creating supply chain networks: a critical review." *European Journal of Operational Research* 203.2 (2010): 283–293.
18. Mulvey, John M., Robert J. Vanderbei, and Stavros A. Zenios. "Robust optimization of large-scale systems." *Operations research* 43.2 (1995): 264–281.
19. Mausser, Helmut E., and Manuel Laguna. "A new mixed integer formulation for the maximum regret problem." *International Transactions in Operational Research* 5.5 (1998): 389–403.
20. Mausser, Helmut E., and Manuel Laguna. "Minimising the maximum relative regret for linear programmes with interval objective function coefficients." *Journal of the Operational Research Society* (1999): 1063–1070.
21. Snyder, Lawrence V. "Facility location under uncertainty: a review." *IIE Transactions* 38.7 (2006): 547–564.
22. Pan, Feng, and Rakesh Nagi. "Robust supply chain design under

- uncertain demand in agile manufacturing." *Computers & Operations Research* 37.4 (2010): 668–683.
23. Borgatti, Stephen P., and Xun Li. "On Social Network Analysis in a Supply Chain Context*." *Journal of Supply Chain Management* 45.2 (2009): 5–22.
24. Freeman, Linton C. "Centrality in social networks conceptual clarification." *Social networks* 1.3 (1979): 215–239.
25. Wolfe, Alvin W. "Social network analysis: Methods and applications." *American Ethnologist* 24.1 (1997): 219–220.
26. Capó–Vicedo, Josep, Josefa Mula, and Jordi Capó. "A social network–based organizational model for improving knowledge management in supply chains." *Supply Chain Management: An International Journal* 16.5 (2011): 379–388.
27. Lambert, Douglas M., and Martha C. Cooper. "Issues in supply chain management." *Industrial marketing management* 29.1 (2000): 65–83.
28. Mueller, Rolf AE, Doreen Buergelt, and Linda Seidel–Lass. "Supply chains and social network analysis." *1st International European Forum on Innovation and System Dynamics in Food Networks*. Sage, 2007.
29. Kim, Yusoon, Thomas Y. Choi, Tingting Yan, and Kevin Dooley. "Structural investigation of supply networks: A social network analysis approach." *Journal of Operations Management* 29.3 (2011): 194–211.

30. Shin, KwangSup, YongWoo Shin, Jihye Kwon, and Sukho Kang. "Development of risk based dynamic backorder replenishment planning framework using Bayesian Belief Network." *Computers & Industrial Engineering* 62.3 (2012): 716–725.
31. Chopra, Sunil, and ManMohan S. Sodhi. "Managing risk to avoid supply-chain breakdown." *MIT Sloan Management Review (Fall 2004)* (2012).

Abstract

Evaluation Mechanism for Structural Robustness of Supply Chain using Social Network Analysis

Jihee Han

Industrial Engineering

The Graduate School

Seoul National University

This paper aims to develop a novel evaluation mechanism for assessing the structural robustness of the supply chain considering risk propagation phenomenon that the impact of risks broke out propagates to whole supply chain along with the connected structure.

Disruption propagation model is developed by taking account into both propagated disruption probability and directly measured disruption

probability simultaneously. And then, based on the propagation model, structural robustness evaluation model is defined by integrating two indicators, APL(Average Path Length) and ID/OD(In Degree/Out Degree). With this indicator, the structural robustness of network can be evaluated. Based on the proposed methodology, the result of robustness assessment on random networks is obtained and compared with the probability of network disruption due to randomly outbreaked risk. Statistical evaluation using correlation analysis and paired t-test were conducted to evaluate the performance of the proposed models. Also, the sensitivity analysis has been conducted to find the better combinations of configurable parameters

Based on the result of numerical experiments and statistical verifications, it can be said that the proposed approach is better at explaining the robustness of supply chain network. In other words, all components of network, such as nodes, arcs and their relationship, should be considered altogether, in order to more accurately measure the robustness.

The proposed methodology can be applied to the very first step to design supply chain networks. Especially, in the case of being hard to redesign the supply chain structure after practically launching and operating the designed network, the proposed mechanism may be utilized to verify whether the planned supply chain is robust to risks or

not. The result of evaluation can be recognized as the critical success factor like the way to find minimum cost structure.

The major contribution of the proposed methodology can be found in the phase of network design based on the robustness. Although previous research have still focused on only risk costs due to the fluctuation of demand or supply, it can be said that this paper maybe the first trial to assess the robustness of network based on the whole structural features of supply chain network by integrating disruption propagation and revised structural indicator which release the limitations of APL model.

Keywords: Supply Chain Topology, Disruption Propagation, Robustness, Social Network Analysis

Student Number: 2010–23382