

위험 전파 모형을 고려한 공급사슬의 구조적 취약성 평가 지표 설계

Designing Index for Assessing Structural Vulnerability of Supply Chain considering Risk Propagation

문향기(Hyangki Moon)*, 신광섭(KwangSup Shin)**

초 록

공급사슬에서 발생한 위험의 영향력은 위험이 발생한 영역에만 국한되는 것이 아니라 연결 구조를 따라 네트워크 전체에 퍼지게 된다. 이러한 위험의 전파 현상으로 인해 공급사슬은 네트워크 연결 구조에 의해 위험의 영향을 받게 될 가능성이 달라진다. 따라서 공급사슬 네트워크를 설계하는 시점에 구조적 연결성을 고려하여 내외부 위험의 발생에 따른 비용을 최소화할 수 있어야 한다. 일반적으로 매개 중심성은 위험의 발생가능성과 영향력의 확산을 설명하는 지표로 해석할 수 있다. 본 연구에서는 구조적 취약성 관점에서의 재해석과 수정을 통해 서로 다른 공급사슬의 취약성을 정량적으로 비교하고, 보다 안정적인 네트워크 구조를 선택할 수 있는 방안을 제시한다.

ABSTRACT

It is general that the impact of supply chain risk spread out to the whole network along the connected structure. Due to the risk propagation the probability to exposure a certain risk is affected by not only the characteristics of each risk factor but also network structure. It means that the structural connectivity among vertices should be considered while designing supply chain network in order to minimize disruption cost. In this research, the betweenness centrality has been utilized to quantitatively assess the structural vulnerability. The betweenness centrality is interpreted as the index which can express both the probability of risk occurrence and propagation of risk impact. With the structural vulnerability index, it is possible to compare the stability of each alternative supply chain structure and choose the better one.

키워드 : 공급사슬 위험관리, 위험 전파, 구조적 취약성

Supply Chain Risk Management, Risk Propagation, Structural Vulnerability

이 논문은 인천대학교 2013년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

* First Author, Graduate School of Logistics, Incheon National University, Incheon, Korea
(munhyangki@gmail.com)

** Corresponding Author, Graduate School of Logistics, Incheon National University, Incheon, Korea
(ksshin@inu.ac.kr)

Received: 2015-05-07, Review completed: 2015-05-14, Accepted: 2015-05-18

1. 서론

시장 환경의 빠른 변화와 공급사슬의 세계화 및 복잡화, 인터넷 응용 분야에서의 취약성으로 인한 불확실성의 증가로 공급사슬 운영 계획을 실행하는데 있어서 안정성과 효율성이 낮아져 예상하지 못한 상황에 노출될 가능성이 높아지고 있다[12, 13, 22]. 이러한 불확실성과 위험에 따른 피해를 최소화하기 위해서는 공급사슬의 위험을 완화시키고 관리하는 것뿐만 아니라 더욱 견고한 공급사슬을 설계할 필요가 있다[7]. 보다 안정적인 공급사슬을 운영하기 위해서는 공급사슬을 설계하는 과정에서부터 이러한 위험 요소로 인해 발생할 수 있는 상황을 미리 예측하고, 공급사슬의 구조 자체가 해당 위험으로부터의 영향력에 강한 대응력을 갖출 수 있는 방안이 필요하다. 다시 말하면, 공급사슬의 특정 영역이 위험에 노출되었을 때, 해당 위험이 전체 공급사슬에 미치는 영향을 최소화하거나 해당 위험으로 인해 발생한 위기 상황에서 얼마나 빨리 회복될 수 있는지를 기준으로 공급사슬의 안정성과 강건성을 평가할 필요가 있다. 따라서 이러한 공급사슬에서 발생할 위험의 전파로 인한 영향을 정량적으로 평가하고 구조적 특성을 반영한 위험 평가 기준이 필요하다.

일반적으로 공급사슬은 노드와 아크로 구성된 하나의 그래프로 표현할 수 있으므로, 노드들과 아크들 사이의 관계를 분석함으로써 전체 공급사슬의 구조를 분석할 수 있다. 이러한 관점에서 공급사슬을 구조적 특징에 기반 하여 취약성을 분석하고, 공급사슬을 구성하는 요소들이 가지는 위험성을 평가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 네트워크를 설명할 수 있는 구조적 특징을

개별 노드 관점이 아닌 전체 네트워크 관점을 통해 공급사슬의 구조적 취약성을 평가하고자 한다. 본 연구의 목적을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 공급사슬을 구성할 때 가능한 후보 네트워크의 구조를 기반으로 공급사슬 위험에 대한 취약성을 정량적으로 평가한다. 둘째, 전략적 지표를 기반으로 위험이 발생했을 때 가장 영향을 크게 받을 수 있는 공급자를 선별한다. 셋째, 공급사슬 위험에 대한 취약성이 낮은 네트워크를 선정함으로써, 공급사슬 내에서 위험 요소가 발생하더라도, 그로 인해 발생할 수 있는 비용을 최소화하거나, 위험 요소로 인해 발생한 피해를 복구하는데 소요되는 비용을 최소화하는 것이다.

본 연구를 통해 최종 고객에게 제공되는 제품과 서비스의 품질 수준을 높이거나 지속적으로 유지할 수 있게 함으로 공급사슬 전체의 안정성과 지속 가능성뿐만 아니라 최적화된 공급사슬 계획의 실행력을 높일 수 있을 것이다.

본 연구의 나머지는 다음과 같이 구성되어 있다. 제 2장에서는 공급사슬 위험 및 평가 방법과 관련된 기존 연구들을 분석하고, 제 3장에서는 공급사슬의 구조적 취약성 평가지표 설계에 대해 설명한다. 그리고 제 4장에서는 4개의 산업군을 대표하는 네트워크와 무작위로 설계한 네트워크를 기반으로 수치적 실험을 수행하고 그 결과에 대해 토의한다. 그리고 마지막 제 5장에서는 본 연구가 가지는 의미와 한계점 그리고 향후 연구 방향에 대해 설명한다.

2. 관련 연구

본 장에서는 이 연구에서 제안하는 방법을

이해하기 위해 필요한 기본적인 개념과 이론에 대해 간략하게 설명하고 이와 관련된 기존 연구들에 대해 설명한다.

2.1 공급사슬의 구조적 측면의 분석기법

운영관리와 공급관리의 영역에서 Wilding [31]은 공급 네트워크에서 발생하는 동적 사건을 Supply Chain Complexity Triangle로 정의하고 이를 관리하기 위한 방안을 제시하였다. 이와 유사하게 Choi et al.[5]은 공급 네트워크를 Complex Adaptive System(CAS)로 개념화하였다. Surana et al.[30]은 얼마나 다양한 시스템의 개념이 공급 네트워크 모델에 이용될 수 있는지 제안하였다. Pathak et al.[23]은 CAS 원칙의 공급 네트워크에서 발생하는 다양한 복잡한 현상에 대해 유용함을 논의하였다. 또한 공급사슬의 구조에 대한 분석과 최적의 네트워크 설계를 위해 시뮬레이션 모델을 이용하는 방법이 제시되었다[14, 23, 24]. 이와 반대로 시뮬레이션 모델이 아닌 실제 네트워크를 대상으로 하는 연구도 진행되었다[3, 11, 22].

공급사슬의 네트워크 구조를 분석하기 위한 방법으로 사회적 네트워크 분석(Social Network Analysis; SNA)을 활용한 연구도 존재한다. Ellram et al.[8]은 공급사슬의 연구에 SNA가 유용함을 확인했고, Carter et al.[2]은 물류와 공급사슬 관리영역에서 SNA가 진보된 방법임을 주장했다. 실제로 Borgatti and Li[1]는 SNA의 특징을 공급 네트워크에 적용하여 더 체계적인 SNA 적용이 공급 네트워크 전체의 행동 메커니즘의 연구에 중요하게 활용될 수 있을 것이라 주장하였다. Choi and Liker[4]은 자동차 부품 공급 업체의 지속적 개선활동을

연구하기 위해 SNA를 사용하였다. Kim et al. [16]은 SNA의 중심성을 공급사슬의 네트워크에 적용하여 연구하였다. 하지만 자동차라는 특정 산업에 국한된 연구이며, 공급사슬 내 노드 간 연결 관계에 따라 다른 노드들이 끼칠 수 있는 영향을 고려하지 못했고, 각 노드의 가중치를 동일하게 설정하였다는 한계점이 있다.

공급사슬은 제품 또는 서비스의 원자재 조달과 생산, 사용과 관련해 상호 연결되어 있는 기업들로 구성되어 있다[10, 16]. 일반적으로 공급사슬의 구조는 노드의 집합과 각 노드간의 연결 관계를 바탕으로 설명할 수 있으며 연결 관계에 따라 방향성을 갖는다. 따라서 특정 노드에서 발생한 위험은 해당 노드 뿐만 아니라 이와 연결되어 있는 다른 노드까지 영향을 미치게 된다[26]. 따라서 특정 기업에서 발생한 위험은 상호 연결되어 있는 기업들에게까지 영향을 미치며, 공급사슬 전체로 전파될 수 있다. 이러한 이유로 위험은 관리가 어렵고, 특정 위험을 완화 시키더라도 다른 위험을 증가시킬 수 있다[25].

2.2 위험의 평가기법

Mitchell[18]은 위험을 ‘위험이 발생할 확률(Probability)’과 ‘위험으로 인한 영향(Impact)’으로 평가하는 방법($Risk_n = Probability(Loss_n) \times Impact(Loss_n)$)을 제안하였다. 위와 같은 방법으로 직관적으로 위험의 평가가 가능하고 상대적 중요도를 비교할 수 있게 되었다. 하지만 동일한 위험의 발생경험이 없다면, 발생확률과 영향력의 측정이 매우 어렵고 해당 위험이 가지는 특징을 반영하여 평가하지 못한다는 한계점이 있다. Harland et al.[10]은 공급사슬 네트워

크에서 위협을 평가하기 위한 6단계로 이루어진 도구를 제안하였다. 위 기법을 통해 위협에 대한 가시성이 증가하고 위협의 손실에 대해 준비할 수 있었다. 하지만 위협의 가능성과 손실에 대한 데이터의 가용성이 보장되어야 하며, 위협관리와 현재의 위협에 대한 전략을 보충하기 위한 운영적 지도가 필요하다는 한계점이 있다. Steele and Court[28]가 제안한 위협 평가 모델은 3단계로 구성되어 있다. 첫 단계는, 위협이 발생할 확률을 상, 중, 하로 구분하는 것이다. 두 번째 단계는 위협으로 인한 문제가 지속되는 기간을 추정하는 것이다. 세 번째 단계는, 위협으로 인한 영향력을 조사하는 단계이다. Kim et al.[15]은 공급사슬의 구조적 평가를 위해 회복력을 측정하는 지표를 제안하였다. 현실적인 4개의 네트워크를 단순화하여 네트워크를 구성하는 노드 또는 아크를 네트워크가 단절될 때까지 제거하여 회복력을 측정하였다. 네트워크 간 회복력을 비교함으로써 더 안정적인 네트워크 구조를 확인할 수 있었지만, 모든 노드와 아크가 같은 붕괴확률을 가진다는 가정을 통해 노드 및 아크의 중요도가 다양함을 고려하지 못하였다. 특히, Kim et al.[17]은 SNA의 중심성을 공급사슬의 네트워크에 적용하여 연구하였다. 하지만 자동차라는 특정 산업에 국한된 연구이며, 공급사슬 내 노드 간 연결 관계에 따라 다른 노드들이 끼칠 수 있는 영향을 고려하지 못했고, 각 노드의 가중치를 동일하게 설정하였다는 한계점이 있다.

2.3 기존 연구의 한계점 및 본 연구의 제안방법

공급사슬의 위협을 평가하는 다양한 방법들

이 시도되었음에도 불구하고 위협의 전파 모델을 고려한 사례를 찾아보기는 어렵다. 기존의 연구는 위협을 평가하는데 있어서 전략적 위협, 운영적 위협[25]과 같은 유형의 위협 정의하고 있다. 이로 인해 네트워크 설계 문제에서 단순거리 혹은 비용의 측면만을 고려한 비용최소화 혹은 수익최대화에 집중하기 때문에 위협으로부터의 안전성은 평가하지 못하고 있다. 또한 기존 제안되었던 평가와 관리 방법들은 개별 위협에만 집중하고 있다. 그러나 공급사슬을 구성하는 요소들이 서로 연결되어 있다는 공급사슬의 특징을 고려한다면 위협의 전파 모델은 반드시 고려되어야 한다.

본 연구에서는 위협의 전파를 고려한 네트워크 평가 지표를 제안한다. 네트워크에서 발생된 위협이 전파되어 네트워크 전체로 전파될 때, 구성원의 역할 혹은 위치에 따라 그 영향력이 다르게 전파될 것이다. 본 연구는 위협의 전파로 인해 위협이 어느 지점에 집중되는가를 분석하고자 한다.

3. 공급사슬 구조적 취약성 평가지표 설계

본 연구의 목적인 공급사슬이 가지는 구조적 위협을 평가하기 위해 개별 노드가 공급사슬 네트워크에서 가지는 의미를 분석한다. 이를 위해 개별 노드가 가지는 위협 관점의 정량적 중요도 평가를 위해 그래프 이론에서 제시된 중심성의 개념을 사용한다. 다음 <Table 1>은 정량적 평가 지표를 설계하기 위한 기호와 간략한 설명을 제시한다.

〈Table 1〉 Variables and Notation

Notation	Description
V	set of vertex
i, j	index of vertex
V_i	Vertex i ($V_i \in V$)
$A = \{a_{ij}\}$	Adjacency Matrix
$a_{ij} = 1$	if V_i is connected with V_j
r	Type of risk
$I^r(V_i)$	Business Impact of risk type r in V_i
$f^r(i, j)$	Function for risk propagation between V_i and V_j for risk type 'r'
$C_b(V_i)$	Betweenness centrality of Vertex i
$C_r(V_i)$	Risk centrality of Vertex i

3.1 위험의 전파모형

공급사슬에서 위험은 발생한 노드 혹은 아크와 연결된 아크를 통해 다른 노드로 전파된다. 즉, 두 노드 V_i 와 V_j 가 연결되어 있을 때

($a_{ij} = 1$), 〈Figure 1〉과 같이 V_i 에서 발생한 위험은 연결된 V_j 에 영향을 끼치고, 다시 V_k 에 까지 영향을 끼치게 된다.



〈Figure 1〉 Risk Propagation in between Nodes

V_i 에서 발생한 위험이 V_j 로 전파된다고 할 때, 그 크기를 위험의 유형, r 와 V_i 의 관계에 따른 함수 $f^r(i, j)$ 로 정의한다. 이 때 위험의 종류에 따른 전파 함수의 유형을 정의할 수 있으며, 다음 세 가지 유형은 쉽게 생각해볼 수 있는 사례들이다. 〈Table 2〉는 각 전파 유형에 따른 네트워크 구조의 예시와 위험 전파 함수의 형태를 나타낸 것이다.

위험의 전파는 위험의 종류와 네트워크의 구조에 따라 달라지게 된다. 기본적으로 위험의 종류에 따라서 영향력의 전파가 결정되지

〈Table 2〉 Risk Propagation Function

Propagation type	Network Structure	Risk propagation function
Type 1		$f^{r^1}(i, j) = I^{r^1}(V_i)$
Type 2		$f^{r^2}(i, j) = \frac{w_{ij}}{\sum_k w_{kj}} I^{r^2}(V_i)$
Type 3		$f^{r^3}(i, j) = \frac{1}{d_{ij}} I^{r^3}(V_i)$

※ w_{ij} : V_j 에 대한 V_i 의 상대적 가중치.

※ d_{ij} : V_i 에서 V_j 까지의 거리.

만 네트워크를 구성하고 있는 구조에 따라서 전파가 발생하기도 한다.

첫 번째 유형은, V_i 에서 발생한 위험의 영향력이 동일하게 V_j 까지 전파되는 경우이다. 예를 들어, 노드 V_i 에 위험이 발생하여 I 의 영향력이 발생했다면, V_i 와 연결된 V_j 에 동일하게 I 의 영향력이 전파되는 것이다. 위험이 이러한 위험의 전파는 가장 기본적인 형태의 전파라고 할 수 있다.

두 번째 유형은, 위험이 발생한 V_i 가 V_j 에 연결된 다른 노드에 비해 가지는 상대적 가치에 따라 영향을 받는 경우이다. 예를 들어, 여러 공급자로부터 제품을 공급받을 경우 공급량에 따라 공급자의 중요도가 달라질 것이다. 이러한 상황에서 공급에 문제가 생겼을 때 Type 2와 같은 위험의 전파가 발생할 것이다.

세 번째 유형은, 두 노드 사이의 거리에 반비례하여 영향력이 전파되는 모형이다. 즉, 거리가 멀리 떨어져 있을수록 상대적으로 작은 수준의 위험의 영향력이 전파되는 경우를 의미한다.

3.2 위험 전파 관점의 매개 중심성 (Betweenness Centrality) 재해석

중심성은 그래프 내에서 가장 중요한 노드를 확인하는 지표로 사용된다. 중심성을 통해 네트워크 내의 개별 노드의 상대적 중요도를 확인할 수 있는데, 노드의 중심성에 따라 네트워크와 다른 노드의 행동에 영향을 끼치게 된다[21]. 중심성은 연결 중심성(degree centrality), 근접 중심성(closeness centrality), 매개 중심성(betweenness centrality), 고유벡터 중심성(Eigen-vector centrality) 등 다양한 유형

이 개발 되었으며, 각 유형에 따라 네트워크 내에서의 역할과 의미를 다르게 해석 할 수 있다.

위험은 네트워크 내에서 연결된 노드를 통해 전파되므로 다른 노드와의 연결성을 나타내는 지표인 매개 중심성을 재해석하여 네트워크 내에서 위험의 전파를 측정하는 지표로 활용 할 수 있다. 매개 중심성은 서로 다른 두 노드를 연결하는 최단경로에 특정 노드가 포함되는 경우를 수치화 한 지표로 공급사슬에서 연결관계에 따라 발생하는 위험을 구조적으로 표현하기에 적합하다.

따라서, 본 연구에서는 매개 중심성을 적용하여 공급사슬의 구조적 위험을 평가하기 위한 지표를 제시한다. 매개 중심성은 식 (1)을 통해 계산 할 수 있다.

$$C_b(V_i) = \sum_j \frac{g_{jk}(V_i)}{g_{jk}} \quad (1)$$

식 (1)에서 g_{jk} 는 두 V_j , V_k 를 잇는 최단경로의 총 수를 의미한다. V_j 와 V_k 는 네트워크 내에서 발생할 수 있는 흐름의 시작과 끝을 의미하며, $g_{jk}(V_i)$ 는 V_i 를 포함하는 최단경로를 의미한다.

공급사슬에서 자재 혹은 정보가 흘러가는 과정을 중심으로 살펴보면, 매개 중심성이 높은 노드는 주로 공급사슬 내에서 허브의 역할을 담당하게 된다. 이 허브 노드는 전체 네트워크의 성과와 허브에 연결된 하부 노드의 운영에 직접적인 영향을 끼칠 수 있다. 예를 들어, 매개 중심성이 높은 노드에서 사고가 발생하여 생산량을 맞추지 못하거나 제품이 파손되는 경우에는 공급사슬 전체에 그 영향력이 급속도로 전파될 것이고, 시장의 요구나 수요의

변화에 대해 실시간으로 대응하지 못하여 공급이 쉽게 붕괴될 수 있다[25].

3.3 공급사슬의 구조적 취약성 지표 설계

특정 노드 V_i 에 미치는 위험의 영향력은 그 발생 원인을 기준으로 V_i 로 유입되는 연결고리를 가진 $V_k(a_{ki}=1; k, i \in V)$ 그룹에서 위험이 발생하여 전파되어 오는 영향력과 노드 V_i 내에서 위험이 발생하여 미치는 영향력이 있다. 따라서 특정 노드에서의 위험의 영향력을 측정하기 위해서는 노드 자체의 위험과 영향을 줄 수 있는 노드에서의 위험을 측정하여야 한다.

본 연구에서는 위험의 전파를 구조적으로 해석하고 이를 평가할 수 있는 지표를 위험 중심성(Risk Centrality)이라 정의하고 다음과 같은 함수를 통해 얻을 수 있다.

$$C_r(V_i) = \alpha \sum_k a_{ki} f''(k, i) C_b(V_k) + (1 - \alpha) C_b(V_i) \quad (2)$$

$C_r(V_i)$ 은 V_i 로 유입되는 V_k 의 C_b (매개 중심성)값들을 전파 유형에 따라 모두 더한 값에 V_i 의 C_b 를 이용하여 계산한다. α 값은 다른 노드로부터 유입되는 위험에 대한 중요도를 의미한다. 따라서, 값이 클수록 외부로부터 유입되는 위험의 크기에 따라 내부 위험의 발생 가능성이 크게 달라질 수 있는 경우로 볼 수 있다. 반대로 α 값이 작을수록 외부보다는 내부 위험 발생 여부에 더욱 집중하게 되는 경우를 의미한다. 이는 해당 공급사슬의 특성 혹은 관리자의 성향에 따라 방침에 따라 조정이 가능하다.

본 연구에서는 공급사슬 전체의 구조적 취약성을

전체 노드의 위험 중요도가 어떻게 분포되어 있는지를 기준으로 평가한다. 그 이유는 공급사슬의 전체 크기와 연결 정도에 따라 위험 중심도의 수준이 다르게 나타날 수 있기 때문에 단순 합, 평균 혹은 분산 등을 통해서서는 상대적 비교가 불가능하다. 즉, 공급사슬을 구성하는 전체 노드 중 특정 노드에 위험 중요도가 집중되는 지 여부를 기준으로 공급사슬의 구조적 취약성을 평가한다. 예를 들어, 위험 중요도가 하나 혹은 두 개의 노드에 집중되고 나머지 노드들은 모두 낮은 위험 중요도를 가진다고 하면, 높은 값을 가지는 노드에 문제가 생겼을 때 공급사슬 전체 큰 영향을 미칠 가능성이 높기 때문이다.

$$SV = \frac{\sum_i O(V_i) C_r(V_i)}{\sum_k O(V_k)} \quad (3)$$

$$O(V_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } C_r(V_i) > \mu C_r + \rho \sigma C_r \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

위 식에서 $O(V_i)$ 를 통해 해당 노드의 이상치 여부를 판별할 수 있다. 이 지표는 해당 노드의 위험 중심성 지표가 전체 노드의 평균값으로부터 얼마나 많이 떨어져 있는지를 기준으로 측정된다. ρ 값이 클수록 위험 중심성 값이 평균값과 멀리 떨어져 있더라도 정상인 것으로 판단하게 된다. 예를 들어 ρ 가 2인 경우 평균에서부터 2σ 보다 떨어진 위치를 기준으로 이상치 여부를 판단하게 되는데, 공급사슬의 특성과 관련 방침에 따라 이상치 값의 범위를 조정하여 판별할 수 있다. 최종적으로 공급사슬의 구조적 취약성은 위험 중요도의 크기가 다른 노드에 비해 이상적으로 큰 값을 가지는 노드들의 평균 위험 중요도인 SV로 평가하게 된다.

4. 수치적 예시

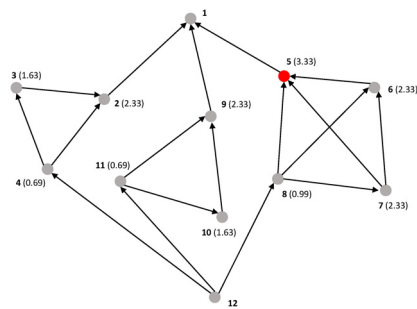
본 장에서는 앞서 제안한 정량적 지표의 계산 방법과 그 활용 가능성을 수치적 예제를 통해 설명하고자 한다. 먼저 공급사슬을 대표할 수 있는 4개 유형의 네트워크를 통해 각 네트워크의 구조적 특징에 따른 위험 중심성을 비교하고, 무작위 네트워크를 생성하여 비슷한 구조이지만 소수의 노드 및 아크의 구조적 차이에 따른 위험 중심성의 변화를 측정한다.

그러나 네트워크는 노드 및 아크의 수에 따라 구조적 차이가 발생하고, 위험 중심성의 수준이 달라지게 된다. 따라서 공급사슬을 구성하는 노드와 노드 간 연결을 의미하는 아크의 수에 따라 위험 중요도의 절대적 크기는 달라

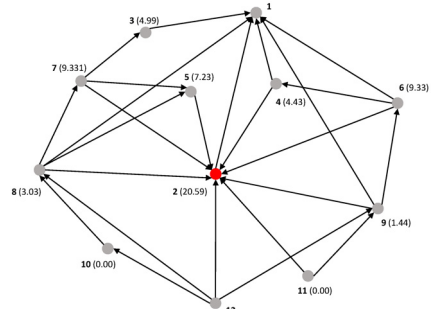
질 수밖에 없다. 따라서, 대표적인 공급사슬 구조 네 가지 유형에 대한 적용과 함께 노드와 아크의 수가 유사하지만 연결 관계에 따라 위험 중요도의 분포가 어떻게 달라지는지를 확인하기 위해 무작위로 생성된 공급사슬은 노드의 수를 같게 설정하였고, 아크의 수도 구조적 특성을 반영하는 정도를 벗어나지 않는 범위로 설정하여 실험을 진행하였다.

4.1 공급사슬 대표 유형별 네트워크 구조

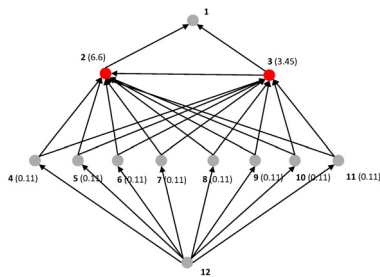
본 연구에서 제안하는 지표의 실험을 위해 구조의 특징에 따른 4개 유형의 네트워크를 활용한다. 4개의 네트워크는 <Figure 2>와 같으며 이는 Kim et al.[15]이 공급사슬의 회복력



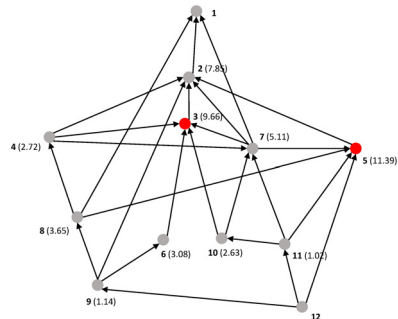
(1) Block-diagonal



(2) Scale-free



(3) Centralized



(4) Diagonal

<Figure 2> Network Structure and Risk Centrality

비교를 위한 실험에 적용한 네트워크로, 기존의 연구들에서 제안되었던 네트워크를 유형별로 분류하였다. 실험을 위해 각 네트워크의 출발지와 목적지를 제외한 10개의 노드에 대해 본 연구에서 제안한 위험 중심성을 측정하여 각 노드에 유입될 수 있는 위험의 수준을 확인하고 네트워크 전체가 가지는 위험에 대해서 비교 분석한다. 발생하는 위험은 영향력의 전파 유형은 Type 1로 위험의 영향력이 동일하게 전파되는 유형이며, 노드 간의 거리는 모두 같다. 또한 외부로부터 유입되는 위험의 비중을 설정하기 위해 α 값은 0.7로, 이상치 여부를 판단하기 위한 ρ 값은 2로 가정하였다.

4.1.1 유형별 네트워크 구조

Block-Diagonal 네트워크는 출발지와 목적지 사이에 군집이 구성되어 있는 형태로 군집 내에서는 연결이 존재하지만, 군집 간 연결은 존재하지 않는다[6]. 이러한 네트워크 구조는 자동차나 오토바이와 같은 모듈식의 제품을 생산하는 공급사슬에서 찾아 볼 수 있다[28, 30].

Scale-free 네트워크는 각 노드가 가지는 연결이 불균형한 형태의 구조를 가지고 있다. Hub-and-Spoke와 비슷한 형태의 모델로 연결이 집중되는 노드에는 먹힘수 또는 파레토 법칙과 같은 형태의 연결이 나타나게 된다[20]. 이러한 형태의 네트워크는 소수의 노드가 공급사슬의 흐름에 영향을 끼치게 되며 핵심 노드가 주변 노드들을 관리하고 통제하게 된다[9].

Centralized 네트워크는 특정 노드에 매우 집중화된 구조를 가진다. 몇 개의 노드는 거의 모든 노드와 연결이 되어 있지만, 그 밖의 노드들은 중심이 되는 노드 외에는 연결되어 있지

않다[6]. 이러한 구조의 네트워크에서는 상위 구성원이 디자인, 설계, 생산 등 전체 시스템에 책임이 있고 네트워크 전체의 계획과 관리에 참여하게 된다.

Diagonal 네트워크는 계층적으로 상호작용하는 흐름을 가진다. 상위 단계는 하위 단계로부터 공급을 받으며 반대방향의 흐름은 나타나지 않는다. 이러한 구조에서는 중간 단계의 노드들을 부분적으로 분할 할 수 있다. 하지만 순수한 계층적 구조와는 다르게 모든 상위 공급자가 하위 단계로부터 공급을 받는 것은 아니다. 이러한 형태의 구조는 국방물류와 OEM 제품에서 찾아 볼 수 있다.

4.1.2 공급사슬 대표 유형 실험 결과

공급사슬 대표 유형별 네트워크의 위험 중심성과 이상치 여부 측정 결과는 다음 <Table 3>에서 확인 할 수 있다. 이상치 판별을 위해 ρ 값은 2로 설정하였다. 즉, 평균에서 2σ 이상의 값을 가지는 값은 이상치로 판별하였다.

첫 번째 네트워크에서는 5번 노드의 위험 중심성이 3.33으로 기준치인 2.64보다 높아 이상치로 판별되었다. 5번 노드는 3개의 군집 중 4개의 노드를 가지고 있으면서 최종 노드의 전 단계에 위치해 있다. 하지만 평균과 표준편차가 낮아 전체적으로 안정적인 네트워크 구조임을 확인할 수 있다. 이러한 구조에서는 하나의 군집에서 위험이 발생하더라도 다른 군집에는 영향을 끼치지 않음을 의미한다. 군집 간 영향력이 전파되지 않으므로 한 영역에서의 위험으로 인해 전체 네트워크에 영향을 끼치지 않는다.

두 번째 네트워크의 경우 2번 노드의 위험 중심성이 20.59로 기준치인 11.37보다 높아 이

〈Table 3〉 Risk Centrality of each Network

	Network #1		Network #2		Network #3		Network #4	
	C_r	이상치	C_r	이상치	C_r	이상치	C_r	이상치
Node2	2.33	×	20.591	○	6.6	○	7.856	×
Node3	1.631	×	4.999	×	3.45	○	9.668	○
Node4	0.699	×	4.431	×	0.1125	×	2.725	×
Node5	3.33	○	7.231	×	0.1125	×	11.393	○
Node6	2.331	×	5.28	×	0.1125	×	3.08	×
Node7	2.331	×	9.331	×	0.1125	×	5.111	×
Node8	0.999	×	3.099	×	0.1125	×	3.656	×
Node9	2.33	×	1.449	×	0.1125	×	1.149	×
Node10	1.631	×	0	×	0.1125	×	2.636	×
Node11	0.699	×	0	×	0.1125	×	1.023	×
Average	1.83		5.64		1.09		4.82	
Standard deviation	0.81		5.73		2.08		3.42	
Criteria for outlier	2.64		11.37		3.18		8.25	

상치로 판별되었다. 대부분의 흐름이 2번 노드를 통과하고 있음을 확인 할 수 있다. 또한 평균이 4개의 네트워크 중 가장 높으면서 편차도 높다. 이는 네트워크가 구조적으로 위험에 대해 불안정함을 나타낸다. 한 노드에서 발생한 위험이 네트워크 전체에 퍼지기 쉬우며 중심이 되는 노드에 그 영향력이 가장 크게 작용할 수 있음을 의미한다.

세 번째 네트워크에서는 2번 노드, 3번 노드의 위험 중심성이 6.6, 3.45로 기준치인 3.18보다 높아 이상치로 판별되었다. 하지만 이상치 2개를 제외한 나머지 노드들의 위험 중심성은 매우 낮은데, 이는 흐름이 시작되는 12번 노드가 다음 단계인 8개의 노드에 직접적으로 연결되어 있음으로써 상대적으로 매우 낮은 위험 중심성이 측정되었다. 하지만 상위 단계에서는 평균과 편차에 비해 높은 수치의 위험 중심성

이 측정되었다. 이는 하위 단계에서 위험이 발생 시, 하위 단계의 구성원들은 위험의 전파로부터 자유롭지만 상위 단계에서는 위험에 영향을 받을 가능성이 높음을 의미한다.

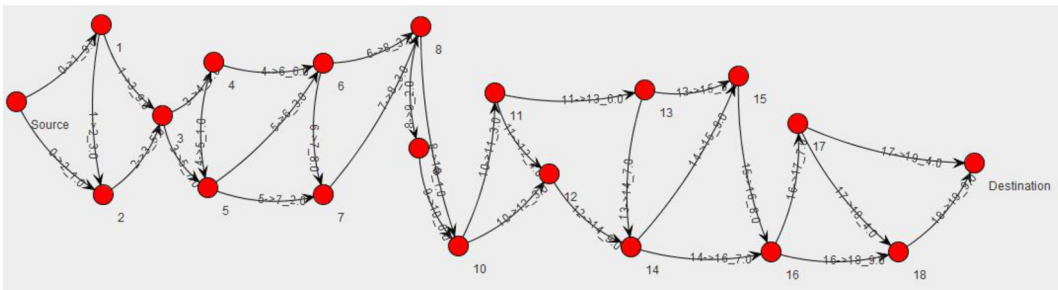
네 번째 네트워크에서 3번 노드, 5번노드의 위험 중심성이 9.66, 11.39로 이상치 기준인 8.25보다 높아 이상치로 판별되었다. 이상치로 판별되는 3번, 5번노드와 비슷하게 2번 노드 역시 다른 노드들로부터 유입이 많지만, 정상범위 내로 판별 되었다. 이는 다양한 경로가 존재하지만 위험을 부담하는데 있어서 집중되는 노드가 발생함을 의미한다.

위험 중심성을 측정하여 4개의 네트워크를 비교한 결과 Block-Diagonal 네트워크가 가장 안정적인 네트워크 구조임을 확인할 수 있었다. 각 노드들이 가지는 위험 중심성의 평균, 표준편차를 비교해 보았을 때, 평균은 Centralized

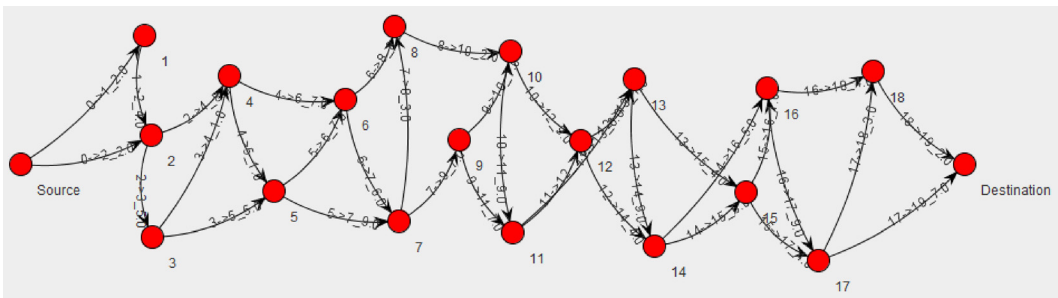
네트워크가 더 낮았으나 표준편차는 Block-Diagonal 네트워크가 더 낮은 값을 보이고 있었다. Block-Diagonal 네트워크는 노드들이 군집을 이루고 있어 서로 상관되지 않는 구조를 가지고 있어 네트워크 내에서 위험일 발생하더라도 클러스터 간 위험의 전파는 발생하지 않는다. 때문에 전체적으로 낮은 위험 중심성을 유지할 수 있었다. Scale-free 네트워크와 Diagonal 네트워크에서는 비교적 높은 위험 중심성 평균과 표준편차가 측정되었는데 이는 네트워크 구조가 특정 노드에 흐름이 집중되면서 노드 간 연결이 많아 위험의 전파가 쉽게 이루어짐을 알 수 있었다. 또한 무작위 네트워크 실험에서 네트워크 내에서 위험의 전파로 많은 영향력을 받을 수 있는 노드의 선별이 가능함을 확인할 수 있었다.

4.2 무작위 생성 네트워크

무작위 네트워크는 총 20개의 노드로 구성되며 유방향 비순환 그래프(Directed Acyclic Graph)를 이용해 네트워크를 구성하였다. 일관성을 잃지 않는 범위 내에서 실험을 단순화하기 위해 공급사슬은 하나의 Source (S)에서 시작하여 하나의 Destination (D)을 향해 흘러간다고 가정한다. 중간 노드들의 연결 구조를 표현하기 위해 인접행렬을 생성하였으며, 그 값은 1~10의 값을 무작위의 값을 가진다. 인접행렬의 값은 아크의 거리를 나타내고, 노드의 번호가 작은 번호에서 큰 번호로 가는 아크만 생성하여 역방향의 아크를 제한한다. 이를 통해 순환이 발생하지 않는 샘플 공급사슬 두 개를 생성하였다. 실험을 통해 생성된 그래프



〈Figure 3〉 Network Structure #1

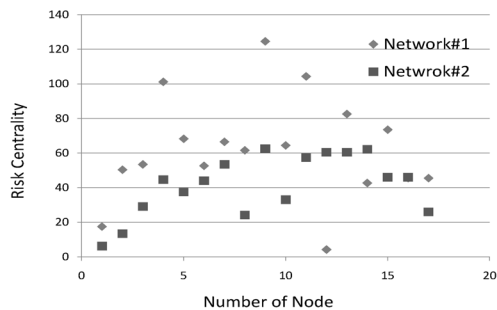


〈Figure 4〉 Network Structure #2

는 <Figure 3>과 <Figure 4>와 같다.

본 연구에서 제안하는 정량적 지표의 설명력을 검증하기 위해 공급사슬의 구조를 단순화하고, 발생하는 위험의 유형 역시 한 가지로 제한하였다. 본 실험에서는 이전 노드에서 발생한 위험의 영향력이 연결 구조를 따라 그대로 전달되는 형태인 Type 1의 전파 유형으로 가정하였다.

무작위로 생성한 네트워크의 위험 중요도와 이상치 여부 측정 결과는 다음 <Figure 5>에서 확인할 수 있다. <Figure 5>는 두 샘플 공급사슬에서 측정한 위험 중심성의 분포를 보여주고 있다.



<Figure 5> Risk Centrality Distribution of Random Network

두 번째 공급사슬에서는 대다수의 노드들이 첫 번째 공급사슬과 비교해서 상대적으로 낮은 위험중심성을 가지며 고루 분포되어 있음을 알 수 있다. 이는 공급사슬의 위험 중요도를 균등하게 나누어 가지고 있다고 말할 수 있다. 하지만, 첫 번째 공급사슬에서는 특정 노드 (10번 노드)가 타 노드에 비해 상대적으로 높은 위험 중심성이 측정되었으며, 해당 노드가 이상치로 판단되었다. <Figure 4>에서 10번 노드의 연결 구조를 통해 확인할 수 있듯이, 전체

공급사슬의 중심에서 양쪽을 연결하는 역할을 하고 있다. 결국 10번 노드에서 공급사슬 위험이 발생한다면 전체 네트워크의 흐름에 단절을 가져올 수 있게 된다.

반면 두 번째 공급사슬에서는 위험 중요도가 고르게 분포되어 있어 이상치는 발견되지 않았다. 이는 위험 중요도가 특정 노드에 집중되지 않았다고 이해할 수 있다. 따라서, 만약 두 번째 공급사슬 구조에서는 가장 높은 위험 중심성을 가진 10번 노드에서 위험이 발생하더라도 다른 경로를 통해 목적지까지 흐름이 연결될 수 있을 것이다. 본 연구에서 제안하는 위험 중심성은 바로 이러한 공급사슬을 구성하는 노드들이 가지는 연결성에 기반하여 안정적인 공급사슬의 운영 가능성을 측정하기 위한 정량적 도구로 활용될 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 공급사슬의 취약성을 평가하기 위해 위험의 전파 모형을 네트워크 관점에서 해석하고, 정량적 지표를 설계하였다. 공급사슬의 취약성을 정량적으로 평가하기 위해 본 연구에서는 각 노드의 중요도, 노드에서의 위험 발생 가능성 그리고 발생한 위험의 영향력과 같은 정량적 수준의 항목을 그래프 이론의 매개 중심성을 이용하여 평가하였다. 제안하는 취약성 평가 지표의 적용 가능성을 입증하기 위해 무작위로 생성한 네트워크를 이용하여 간단한 수치 실험을 수행하였으며, 각 산업군을 대표하는 네 개의 네트워크 구조를 대상으로 실험을 수행하였다. 실험 결과, 네트워크를 구성하는 노드들이 여러 개의 군집을 형

성하고 있는 형태의 네트워크 구조가 가장 위험 전파 모형으로부터 구조적으로 강한 취약성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 완전히 서로 다른 유형의 공급사슬 구조들을 비교하는 것 외에도 동일한 노드로 구성된 공급사슬이 그 연결 관계에 따라 위험 중요도의 분포가 어떻게 달라질 수 있는지를 보이기 위해 무작위로 생성된 네트워크 두 개를 서로 비교하였다. 만약, 대부분의 노드들의 위험 중심성이 전체적으로 고른 분포를 보이고 있다면, 그 중 일부 노드에서 위험이 발생하더라도 해당 노드가 가진 위험의 영향력이 타 노드와의 연결관계에 따라 빠르게 전파될 가능성이 낮기 때문에 상대적으로 높은 회복력을 가진 공급사슬 구조라고 말할 수 있다.

본 연구에서 제안한 구조적 취약성 평가 지표를 통해 공급사슬의 설계(Supply chain network design)부터 공급자 선정(Supplier selection) 그리고 시설 위치 계획(Facility Location Problem)등과 같은 공급사슬 운영과 관련된 문제에 확대 적용할 수 있을 것이다. 예를 들어, 공급자를 선정할 경우, 공급자의 공급사슬을 평가하여 위험 발생시 자신에게 미치는 영향에 대해 미리 예측함으로써 각 공급자들이 가지는 위험 수준을 평가할 수 있는 하나의 도구로 활용될 수 있을 것이다.

그러나 본 연구에서 제안한 공급사슬 취약성 평가 지표는 회수나 반환과 같은 역방향의 흐름을 고려하지 않아 이와 같은 네트워크에는 적용할 수 없다는 한계가 존재한다. 따라서 추후 연구에서는 위의 한계점을 극복하기 위해 역방향을 고려한 취약성 평가 지표 개발과 산업별 및 지역별 특수성을 가진 네트워크에서도 위험 중심성을 평가할 수 있는 연구로 확

장시킬 필요가 있다. 또한 특정 네트워크의 특징을 정확하게 반영할 수 있는 지표를 설계하기 위해서 α 와 ρ 값의 변화에 따른 위험 중심성의 분포와 이상치 판별여부의 변화에 대한 결과를 측정하는 민감도 분석을 추가로 진행될 필요가 있다.

References

- [1] Borgatti, S. P. and Li, X., "On Social Network Analysis in a Supply Chain Context," *Journal of Supply Chain Management*, Vol. 45, No. 2, pp. 5-22, 2009.
- [2] Carter, C. R., Ellram, L. M., and Tate, W., "The use of social network analysis in logistics research," *Journal of Business Logistics*, Vol. 28, No. 1, pp. 137-168, 2007.
- [3] Choi, T. Y. and Hong, Y., "Unveiling the structure of supply networks: case studies in Honda, Acura, and DaimlerChrysler," *Journal of Operations Management*, Vol. 20, No. 5, pp. 469-493, 2002.
- [4] Choi, T. Y. and Liker, J. K., "Bringing Japanese Continuous Improvement Approaches to US Manufacturing: The Roles of Process Orientation and Communications," *Decision sciences*, Vol. 26, No. 5, pp. 589-620, 1995.
- [5] Choi, T. Y., Dooley, K. J., and Rungtusanatham, M., "Supply networks and complex adaptive systems: control versus emergence," *Journal of Operations Management*, Vol.

- 19, No. 3, pp. 351-366, 2001.
- [6] Chopra, S. and Sodhi, M. S., "Managing Risk to Avoid Supply-Chain Breakdown," MIT Sloan Management Review, Vol. 46, No. 1, 53-61, 2004.
- [7] Christopher, M., McKinnon, A., Sharp, J., Wilding, R., Peck, H., Chapman, P., Jüttner, U., and Bolumole, Y., "Supply chain vulnerability," Cranfield University, Cranfield, 2002.
- [8] Ellram, L. M., Tate, W. L., and Carter, C. R., "Product-process-supply chain: an integrative approach to three-dimensional concurrent engineering," International Journal of Physical Distribution and Logistics Management, Vol. 37, No. 4, pp. 305-330, 2007.
- [9] Gerlach, M. L., "The Japanese corporate network: A blockmodel analysis," Administrative Science Quarterly, pp. 105-139, 1992.
- [10] Harland, C., Brenchley, R., and Walker, H., "Risk in supply networks," Journal of Purchasing and Supply management, Vol. 9, No. 2, pp. 51-62, 2003.
- [11] Jarillo, J. C. and Stevenson, H. H., "Cooperative strategies-The payoffs and the pitfalls," Long range planning, Vol. 24, No. 1, pp. 64-70, 1991.
- [12] Jeong, Y. K., "Analyzing Effects on Firms' Market Value of Personal Information Security Breaches," Journal of Society for e-Business Studies, Vol. 18, No. 1, pp. 1-12, 2013.
- [13] Jin, H. Y. and Chul, Y. J., "A Study on priorities of the Components of Big Data Information Security Service by AHP," Journal of Society for e-Business Studies, Vol. 18, No. 4, pp. 301-314, 2013.
- [14] Kim, W., "Effects of a trust mechanism on complex adaptive supply networks: An agent-based social simulation study," Journal of Artificial Societies and Social Simulation, Vol. 12, No. 3, p. 4, 2009.
- [15] Kim, Y., Chen, Y., and Linderman, K., "Supply network disruption and resilience: A network structural perspective," Journal of Operations Management, Vol. 33, pp. 43-59, 2015.
- [16] Kim, Y., Choi, T. Y., Yan, T., and Dooley, K., "Structural investigation of supply networks: A social network analysis approach," Journal of Operations Management, Vol. 29, No. 3, pp. 194-211, 2011.
- [17] Lamming, R., Johnsen, T., Zheng, J., and Harland, C., "An initial classification of supply networks," International Journal of Operations & Production Management, Vol. 20, No. 6, pp. 675-691, 2000.
- [18] Mitchell, V., "Organizational risk perception and reduction: a literature review," British Journal of Management, Vol. 6, No. 2, pp. 115-133, 1995.
- [19] Mitzenmacher, M., "A brief history of generative models for power law and lognormal distributions," Internet mathematics, Vol. 1, No. 2, pp. 226-251, 2004.
- [20] Mizuchi, M. S., "Social network analy-

- sis: Recent achievements and current controversies,” *Acta sociologica*, Vol. 37, No. 4, pp. 329-343, 1994.
- [21] Nishiguchi, T., “Strategic industrial sourcing: The Japanese advantage,” 1994.
- [22] North, M. J. and Macal, C. M., “Managing business complexity: discovering strategic solutions with agent-based modeling and simulation,” 2007.
- [23] Pathak, S. D., Day, J. M., Nair, A., Sawaya, W. J., and Kristal, M. M., “Complexity and adaptivity in supply networks: Building supply network theory using a complex adaptive systems perspective,” *Decision Sciences*, Vol. 38, No. 4, pp. 547-580, 2007.
- [24] Rivkin, J. W. and Siggelkow, N., “Patterned interactions in complex systems: Implications for exploration,” *Management Science*, Vol. 53, No. 7, pp. 1068-1085, 2007.
- [25] Shin, K., Shin, Y., Kwon, J., and Kang, S., “Risk propagation based dynamic transportation route finding mechanism,” *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 112, No. 1, pp. 102-124, 2012.
- [26] Simons, R., “How risky is your company?,” *Harvard business review*, Vol. 77, No. 3, pp. 85-94, 1999.
- [27] Starr, M. K., “Modular production: a new concept,” *Harvard business review*, Vol. 43, No. 6, pp. 131-142, 1965.
- [28] Steele, P. and Brian, H. C., “Profitable purchasing strategies: a manager’s guide for improving organizational competitiveness through the skills of purchasing,” 1996.
- [29] Sturgeon, T. J., “Modular production networks: a new American model of industrial organization,” *Industrial and corporate change*, Vol. 11, No. 3, pp. 451-496, 2002.
- [30] Surana, A., Kumara, S., Greaves, M., and Raghavan, U. N., “Supply-chain networks: a complex adaptive systems perspective,” *International Journal of Production Research*, Vol. 43, No. 20, pp. 4235-4265, 2005.
- [31] Wilding, R., “The supply chain complexity triangle: uncertainty generation in the supply chain,” *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 28, No. 8, pp. 599-616, 1998.
- [32] You, F., Wassick, J. M., and Grossmann, I. E., “Risk management for a global supply chain planning under uncertainty: models and algorithms,” *American Institute of Chemical Engineer Journal*, Vol. 55, No. 4, pp. 931-946, 2009.

저 자 소 개



HyangKi Moon (E-Mail: munhyangki@gmail.com)
2014 Incheon National University (Graduate in Industrial Engineering)
Research Interest Supply Chain, Risk Management, Operation Research, Supply Chain Optimization



KwangSup Shin (E-Mail: ksshin@inu.ac.kr)
2012 Seoul National University (Ph.D in Operations Management)
2012~Current Assistant Professor, Incheon National University
Research Interest Supply Chain, Advanced Analytics, Open Innovation, Cloud Computing, Process Management and Optimization, Game Theory