

# 물류비용을 고려한 공급사슬 유연성 구조에 관한 연구

남진모 · 박건수<sup>†</sup>  
KAIST 경영대학

## Impact of Logistics Costs on Supply-Chain Flexibility Structure

Jin Mo Nam · Kun Soo Park  
College of Business, KAIST

### ■ Abstract ■

As productions and deliveries of multiple products to multiple marketplaces have been increasingly popular, supply chain flexibility, which refers to an ability to deal with demand and capacity uncertainty, becomes an important issue in supply chain management. However, logistics costs have been largely neglected in the literature on supply chain flexibility structure. In this paper, we propose mathematical models to investigate the impact of the logistics costs on the optimal flexibility structure. We also conduct a simulation study and observe that logistics costs have a significant impact on the decision on supply chain flexibility structure. Such conclusion is also supported by the case study of a global car manufacturer, Honda Motors.

Keywords : Process Flexibility, Logistics Cost, Flexibility Structure, Supply Chain Flexibility

## 1. 서 론

공정유연성(Process Flexibility)은 한 시설에서 다양한 제품을 생산하는 능력[12, 29], 또는, 한 제

품이 다양한 시설에서 생산될 수 있는 능력을 의미한다. 이는 다양한 제품을 요구하는 시장에 대응하여, 각 제품별 수요 불확실성 하에서 기업이 최상의 성과를 유지할 수 있게 하는 역할을 의미한다. 생산

및 수요의 불확실성에 대응할 수 있는 역량인 공급사슬 유연성(Supply Chain Flexibility)에 대한 기업들의 관심이 높아지고 있다.

단일 시스템에서의 유연성 구조에서는 공급 주체가 되는 단일 기업의 생산단계만이 고려되는 반면, 하나 이상의 공급사슬단계가 포함되는 공급사슬 유연성 구조에는 시설과 수요지로 대표되는 제품을 공급하는 주체와 수요하는 주체가 각각 하나 이상 존재한다. 공급사슬이 올바르게 작동되면, 제품이 각 시설에서 수요지로 이동되는 물류활동(Logistics Activity)이 일어나게 되고, 각 시설-수요지 조합에 따라 서로 다른 물류비용(Logistics Cost)이 발생하게 된다. 이처럼 물류비용은 공급사슬 유연성 의사결정에 있어서 필연적으로 수반되는 비용이고, 함께 연구되어야 할 요인이지만, 공급사슬 유연성 분야에서 물류비용이 고려된 연구는 극히 드물다. 또한, 물류비용이 고려되더라도 단순히 생산량에 비례하는 비용의 하나로써 다른 비용들과 함께 하나의 통합된 생산비용으로 반영 되는 경우가 대부분이다.

하지만, 기업의 영업활동에서 물류비용은 총 비용의 많은 비중을 차지하고 있다. 공정유연성 연구에서 많이 다뤄진 자동차산업의 경우, 2000년 한국 자동차기업에서 물류비용이 전체 비용에서 차지하는 비중은 약 9%였다[8]. 이는 일반적으로 자동차기업의 영업이익이 매출액의 5~10% 정도라는 점을 감안했을 때 무시 못 할 비용이다. 특히, 자동차산업은 대규모 장치산업이기 때문에 소수의 기업이 글로벌 시장에서 경쟁하면서 필연적으로 물류비용이 많이 들 수밖에 없다. 이처럼 공급사슬 유연성 구조 결정시 물류비용은 간과할 수 없는 중요한 요소이다.

공급사슬 유연성 구조는 공급사슬의 물류비용에 큰 영향을 미치는 의사 결정이므로, 물류비용에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 유연성의 정도를 한 시설에서 몇 종류의 제품을 생산할 수 있는지로 측정하고자 한다. Jordan and Graves[23]은 유연성 수준이 증가할수록 다양한 종류의 제품의 서로 다른 지점의 고객들에게 공급할 수 있는 가능성이 커져 기대 판매량이 증가하지만, 투자비용을 고

려했을 때 낮은 유연성 투자가 더 경제적인 수 있음을 지적하고 있다. 하지만, 물류비용을 함께 고려한다면 낮은 유연성 수준이 항상 경제적인 의사결정이 아닐 수도 있게 된다. 낮은 수준의 유연성을 보유한 공급사슬 유연성 구조에서는 특정 제품이 생산되는 시설의 개수가 적기 때문에, 제품을 소비지까지 공급하는 총 거리가 증가한다. 반면에 높은 수준의 유연성을 보유한 공급사슬 유연성 구조에서는, 특정 소비지로 제품을 공급하는 시설의 수가 더 많기 때문에 좀 더 가까운 시설에서부터 공급받을 가능성이 많고, 그 결과 물류비용이 상대적으로 적어질 수 있다.

본 연구에서는 공급사슬 유연성 구조에서 중요한 고려 요소인 물류비용의 영향을 분석해 보고자 한다. 구체적으로, 제한된 유연성(Limited Flexibility) 구조에서 물류비용과 유연성의 관계를 수리 모형 및 시뮬레이션을 포함한 수치 분석을 통해 살펴보고, 이를 바탕으로 물류비용을 포함한 유연성 관련 발생비용을 고려하는 것이 최적의 유연성 수준(Flexibility Level) 및 공급사슬 유연성 구조에 어떤 영향을 줄 수 있는가를 보여주고자 한다.

## 2. 관련 연구

유연성은 시간, 노력, 비용, 성과의 최소한의 희생으로 기업이 변화에 대응할 수 있는 능력을 의미한다[32]. 기업 내부적인 변화와 외부적인 제약에 대응하기 위해, 제조 부문에서 유연성을 제고해야 한다는 연구가 많이 진행되었다[6, 29]. 유연성이 통일된 의미로 사용되지는 않지만, 초기 생산 및 제조분야의 유연성 연구의 초점은 제조유연성(Manufacturing Flexibility)에 맞추어져 있다. 제조유연성은 생산 분야에서 고객들의 다양한 요구에 효과적으로 대응하기 위해 자원과 불확실성을 관리할 수 있는 역량을 의미한다[33]. Sánchez and Pérez[28]는 공급사슬 유연성에 대해 공급사슬 전체의 관점에서의 영향을 파악하기 위해 각각의 개별적인 요소들과 함께 그들 간의 관계도 함께 고려해야 한다는 점을 강조하고 있다.

특히 공급사슬 유연성을 위해 크게 공정유연성과 물류유연성, 두 가지 측면을 고려해야 한다고 주장하였다. 이후 공정유연성과 물류유연성을 동시에 고려하는 공급사슬 유연성 관점의 연구들이 활발히 진행되었다[10, 16, 20].

공정유연성은 한 시설에서 다양한 제품을 생산할 수 있는 능력을 의미한다[12, 29]. 공정유연성 초기의 연구들은 각 시설 별로 한 종류의 제품만을 생산하는 지정시스템(Dedicated System)에 대한 완전유연시스템(Full-flexible System)의 장점을 규명하는데 집중되었다[13, 23]. 지정시스템은 불유연시스템(No-flexible System)이라고도 하며, 수요 변동성에 대응할 수 있는 유연성이 낮고, 시설에서 한 제품을 생산하여 모든 소비지로 공급해야 하기 때문에 물류비용이 많이 든다는 특성이 있다. 이와 반대로 완전유연시스템은 각각의 시설에서 모든 종류의 제품을 생산하는 경우를 말한다. 완전유연시스템은 수요변동에 대응할 수 있는 유연성이 높고, 각 시설에서 모든 제품을 공급하기 때문에 지역별로 소비지에 가깝게 시설을 입지시킬 수 있기 때문에 물류비용이 적어진다. 때문에 공정유연성 연구에서 지정시스템에 비해 완전유연시스템이 갖는 이점에 대한 연구가 주류를 이루었다.

하지만 유연성이 증가함에 따라 유연성에 대한 투자비용 또한 증가하기 때문에, 실제 현실에서 의사결정자들은 완전유연시스템을 구축하는 투자를 고려하지 않는다[23]. Jordan and Graves[23]는 유연 생산을 가능하게 하는 기술에 대한 R&D 투자, 유연 생산을 위해 추가로 필요한 직원들의 교육비용을 이러한 유연성 투자비용의 예로 들며 완전유연시스템의 실현 가능성에 의문을 제기하고 있다. 이렇게 제품의 다양성이 클수록 경영을 더 복잡하게 만들면서 증가하는 비용을 복잡성 비용(Complexity Cost)으로 정의한다[17]. Kim and Park[24]는 기업의 유연성(Flexibility) 역량이 통제성(Controllability) 역량과 반비례 하며 기업의 효율성을 저하시킨다고 설명하고 있다. 공정유연성(Process Flexibility) 연구들에서도 복잡성 비용은 유연성과 상충관계(Trade

-off)를 갖는 중요한 요인으로 고려되고 있다[13, 15, 16, 26].

이렇듯 완전유연시스템은 막대한 투자 및 추가 비용을 발생시킬 수 있어, 부분유연시스템(Partial Flexibility System)에 대한 필요성이 제기되었다[13]. Jordan and Graves[23]는 각 시설마다 적어도 한 제품씩 중복되게 제품을 생산하게 되면, 한 시설에서 많은 제품을 생산하지 않고도 제품별 수요에 유연하게 대응할 수 있게 하는 구조를 만드는 체인룰(Chain Rule)을 제안했다. 체인룰에서는 유연성 구조가 큰 유연성 효과를 갖게 하기 위해 다음과 같은 세 가지 가이드를 제시하고 있다. 첫째, 시설에 할당되는 제품 종류의 수를 같게 하고, 둘째, 각 제품이 생산되는 시설의 수를 같게 하며, 셋째, 되도록 긴 사슬을 이루도록 구성하는 것이다. 이 체인룰을 통해 기업은 완전유연성과 거의 비슷한 정도(90% 이상)로 제품별 수요 불확실성으로 인한 제품판매손실과 가동성 손실(Under-utilization)에 대응할 수 있다는 결과를 보여주었다. 특히, 체인룰에서 한 시설에서 두 제품만 생산하고, 한 제품씩 중첩하여 긴 사슬을 만드는 방법인 유연성 수준 2의 공급사슬 유연성 구조가 가장 적은 유연성에 대한 투자만으로도 높은 유연성 효과를 얻을 수 있기 때문에 비용-편익 관점에서 가장 효율적인 구조임을 보였다.

그 후 Jordan and Graves[23]의 연구를 바탕으로 제한적 유연 시스템(Limited Flexible System)에 대한 연구는 다양한 방향으로 확대되었다. 이 중 연구와 밀접히 관련된 것으로 물류 유연성(Logistics Flexibility)을 결합한 연구가 있다. 물류유연성은 시장으로 제품을 판매하거나 공급자로부터 부품을 공급받을 때 적용할 수 있는 다양한 물류전략과 관계된다[28]. 공정유연성 연구에서 물류유연성이 함께 고려된 연구에는 Garavelli[16]와 Aprile et al.[10]의 연구가 있다. Garavelli[16]는 공급자로부터 제조사를 거쳐 고객으로 이루어진 공급사슬구조에서의 공정유연성과 물류유연성이 리드타임 성과에 주는 영향을 연구하였다. Aprile et al.[10]도 마찬가지로 공급자, 제조사, 고객으로 이루어진 공급사슬

구조에서 서로 다른 유연성 구조가 고객 수요를 얼마나 충족할 수 있는지를 연구하였다.

### 3. 수리모형

#### 3.1 기본 가정

본 연구에서는 고객의 불확실한 수요가 실현되기 전과 후의 2단계의 최적화 과정을 사용한다. 1단계에서는 어떤 시설에서 어떤 제품이 생산되는지에 대한 전사적인 결정이 실제 수요가 발생하기 이전에 예측된 수요를 고려하여 이루어진다. 이는 한 시설에서 생산하는 제품의 종류와 범위가 정해지면 그에 따른 장비(기술)의 확보, 자재 수급, 인력 교육 등에 필요한 시간이 미리 확보되어야 하기 때문이다. 2단계에서는 실제 수요가 나타난 후 보유하고 있는 공급역량을 수요를 충족시키기 위해 사용한다. 이때, 기업은 각 시설에서 어떤 제품을 얼마나 생산하는지를 결정하게 된다.

기존의 연구들은 동일한 수요와 동일한 시설, 즉, 균형구조를 가정하고 연구를 수행했기 때문에 공급사슬 유연성 구조를 결정하는 단계는 대부분 생략되어왔다[23]. 하지만 본 연구는 시설의 위치에 따른 물류비용을 고려하는 것을 목적으로 하기 때문에, 제품이 어떤 시설에서 생산되는지에 따라 판매시 발생하는 비용이 달라지게 된다. 또한 본 연구에서는 동일한 수요, 동일한 생산용량의 가정을 완화한 좀 더 일반적인 모형을 가정하고 있기 때문에, 구조에 따른 차이가 발생하게 되므로 두 단계의 최적화 과정은 반드시 필요하다.

첫째 단계는 공급사슬 유연성 구조 결정 단계로, 시설 별 공급량(Capacity)과 수요, 유연성 수준을 고려하여 어떤 시설에서 어떤 제품을 생산하게 되는지를 결정한다. 1단계에서 사용되는 수요는 의사결정자가 기대하는 수요로 결정적 변수이다. 공급사슬 유연성 구조를 결정하는 단계는 실제 수요가 실현 되기 전에 이루어지기 때문에 의사결정자들은 과거의 정보를 바탕으로 기대 수요를 예측하게 되

고, 이를 바탕으로 공급량과 유연성에 투자를 결정한다. 하지만 일반적으로 실제 수요는 기대수요와 다르게 실현되기 때문에 1단계에서 계획한 구조는 실제수요에 완벽히 대응하지 못하게 된다. 현 시점에서 주어진 정보를 바탕으로 이러한 불일치를 최소화 시킬 수 있는 유연성 구조를 결정하는 단계가 공급사슬 유연성 구조 결정단계이다.

둘째 단계는 공급량 할당 단계이다. 1단계에서 결정된 공급사슬구조하에서, 목적함수를 최소화하는 공급량 할당을 결정한다. 2단계에서는 수요변화에 대한 공급사슬구조의 유연성을 측정하게 된다. 2단계에서의 수요는 임의의 확률적 수요이다. 이렇게 임의로 실현된 수요가 1단계에서 가정한 수요와 달라졌을 때, 이에 따른 판매손실 등의 각 발생비용을 최소화하도록 각 시설에서 제품들을 어느 지역에 얼마만큼 공급할 것인지를 결정한다. 최적 할당이 이루어진 후, 수요와 차이가 나는 부분을 얼마나 줄일 수 있는지의 여부가 기업의 유연성을 의미하게 된다.

본 연구에서의 한 가지 더 중요한 가정은 제한적 유연성 구조에 대한 가정이다. 가장 대표적이고, 여러 연구에서 유연성 성과(Performance)가 입증된 체인물을 따르는 구조로 가정하고 연구를 수행했다.

#### 3.2 변수 및 계수 설명

(Index)

- $i$  : 시설의 번호, 1부터  $I$ 까지
- $j$  : 제품의 번호, 1부터  $J$ 까지
- $k$  : 소비지의 번호, 1부터  $K$ 까지
- $s$  : 시나리오의 번호, 1부터  $S$ 까지

(Decision Variables)

- $b_{ij}$  : 시설  $i$ 에서 제품  $j$ 를 생산하는지의 여부.  
 $b_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j.$
- $z_{ij}$  : 매개변수.  $z_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j.$
- $x_{ijk}^s$  : 시나리오  $s$ 에서 시설  $i$ 로부터 제품  $j$ 를  $k$ 로 수송하는 양

$ls_{jk}^s$  : 시나리오 s에서 소비자 k에서 발생하는 제품 j의 판매손실(Lost Sales)

(Parameters)

$c_i$  : 시설 i의 공급량.

pfl : 공정유연성 수준 : 한 시설에서 생산되는 제품의 종류의 개수

$d_{jk}^s$  : 공급사슬 유연성 구조 결정단계에서, 시나리오 s에서 소비자 k에서 발생하는 제품 j의 기대수요

(Random Variable)

$D_{jk}^s$  : 공급량 분배 단계에서, 시나리오 s에서 소비자 k에서 발생하는 제품 j의 실현된 수요

본 모형에서는 i, j, k, s가 각각 시설, 제품, 소비자, 생산지를 나타내는 Index로 사용되었다.  $b_{ij}$ 는 공급사슬 유연성 구조 결정 단계에서 사용되는 결정변수이다.  $b_{ij}$ 가 0이면 시설 i에서 제품 j를 생산하지 않는다는 것을 뜻하고,  $b_{ij}$ 가 1이면 시설 i에서 제품 j를 생산한다는 것을 뜻하게 된다. 즉,  $b_{ij}$ 는 제품-시설 조합을 의미하며,  $b_{ij}$ 의 행렬식은 공정유연성 구조가 된다. 매개변수  $z_{ij}$ 는  $b_{ij}$ 가 체인룰의 세 번째 규칙을 반영하기 위해 도입된 변수로, 마찬가지로 0 또는 1의 값을 갖는다.

공정유연성 구조에서 각 시설이 보유한 제품-시설 조합의 개수는 한 시설에서 몇 종류의 제품을 공급하게 되는지를 결정한다. 한 시설에 포함되는 제품-시설 조합이 많으면, 한 제품이 생산될 수 있는 대체 경로의 수가 많아진다는 것을 의미하며 이는 더 큰 유연성 역량을 갖고 있다는 것을 뜻하게 된다. 본 연구에서는 한 시설과 연결되어 있는 제품-시설 조합의 수를 유연성 수준(pfl)으로 표현하고, 구조의 유연성 차원을 구분하는 변수로 사용했다. 본 연구에서 체인룰을 따르는 구조의 pfl은 양의 정수 값을 가지며, 지정시스템인 1부터 완전유연시스템을 나타내는 10까지의 값을 갖게 된다.

$x_{ijk}^s$ 는 각 시설에서 각각의 소비지로 얼마만큼의

제품을 할당할지에 대한 결정변수이다.  $ls_{jk}^s$ 는 수요  $D_{jk}^s$ ( $d_{jk}^s$ )와 공급량  $x_{ijk}^s$ 의 차이만큼 발생하는 판매손실이다. 각 시설은  $c_i$ 만큼의 공급량을 가지고 있으며, 이 공급량은 해당 시설에서 최대 생산할 수 있는 공급량을 의미한다. 대부분의 연구에서는 편의상 공급량을 동일하게 설정하고 연구를 진행하고 있다[15, 23, 25]. 하지만, 본 연구에서는 기존 연구들의 가정을 완화하여 시설 별로 서로 다른 공급량을 갖는다고 가정했다.

### 3.3 모형의 수립

Model 1- I은 공급사슬 유연성 구조 결정단계에서 판매손실을 최소화하는 공급사슬 유연성 구조를 도출해 내는 모형이다. 시스템에서 발생하는 판매손실  $ls_{kj}^s$ 의 총 합을 목적함수로 사용하며, 공급사슬 유연성 구조는 결정변수로 제약조건에 포함되어 최적화의 과정에서 만들어지게 된다.

• Model 1- I

$$\text{Minimize } \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (ls_{jk}^s) \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^J b_{ij} = pfl \quad \forall 1 \leq i \leq n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I b_{ij} = pfl \quad \forall 1 \leq j \leq n \quad (3)$$

$$1 - z_{ij} \leq 2 - b_{ij} - b_{i+1,j} \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$2z_{ij} \leq b_{ij} + b_{i+1,j} \quad \forall i, j \quad (5)$$

$$\sum_j z_{ij} \geq 1 \quad \forall i \quad (6)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad (7)$$

$$b_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ijk}^s \leq Mb_{ij} \quad \forall s, i, j \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk}^s \leq c_i \quad \forall s, i \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijk}^s + ls_{jk}^s \geq d_{jk}^s \quad \forall s, k, j \quad (11)$$

$$0 \leq x_{ijk}^s \quad \forall s, i, j, k \quad (12)$$

$$0 \leq ls_{jk}^s \quad \forall s, j, k \quad (13)$$

식 (2)~식 (8)은 체인룰을 따르는 공급사슬 유연성 구조를 갖도록 하기 위한 조건들이다. 식 (2)

는 체인롤의 첫 번째 조건인 각각의 시설에서 같은 수의 제품을 생산해야 한다는 규칙을 나타낸다. 식 (3)은 체인롤의 두 번째 조건인 각각의 제품은 같은 수의 시설에서 생산되어야 한다는 규칙을 나타낸다. 식 (4)~식 (8)은 체인롤의 세 번째 조건인 각 시설에서 생산되는 제품의 종류는 하나 이상씩 겹치며, 연결했을 때 긴 사슬을 이루어야 한다는 규칙을 나타낸다. 이 규칙을 표현하기 위해 식 (4), 식 (5)에서 두 시설에서 중복되는 제품을 생산하면 1, 아니면 0인 변수  $z_{ij}$ 를 정의한다. 식 (6)은 중복되는 제품이 적어도 하나는 있어야 한다는 것을 의미한다. 식 (7)은  $z_{ij}$ 의 값이 0또는 1의 값을 나타낸다는 조건이다. 식 (8)은  $b_{ij}$  0또는 1의 값을 나타낸다는 조건이다. 식 (9)은 시설  $i$ 에서 제품  $j$ 가 생산되지 않을 경우( $b_{ij} = 0$ ), 시설  $i$ 에서의 제품  $j$ 의 생산량이 없음( $x_{ijk} = 0$ )을 의미한다. 제약조건 (10)은 시설  $i$ 의 공급량은 시설  $i$ 에서 생산되는 모든 제품이 각 지역으로 수송되는 양보다 커야 한다는 것을 의미한다. 제약조건 (11)은 판매손실을 정의한다. 판매손실의 수량을 최소화하는 목적함수에 의해 모든 시설에서 수송되는 소비자  $j$ 로 수송되는 제품  $k$ 의 양  $x_{ijk}^s$ 가 해당 지역 제품  $k$ 의 수요보다 부족한 만큼  $ls_{kj}^s$ 가 발생한다. 제약조건 (12)와 제약조건 (13)은 각각 수송량  $x$ 와 판매손실  $ls$ 가 갖는 값을 양수로 제한한다.

- Model 1- II

Minimize (1)

subject to

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk}^s \leq \forall s, i \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijk}^s + ls_{jk}^s \geq d_{jk}^s \quad \forall s, k, j \quad (11)$$

$$0 \leq x_{ijk}^s \quad \forall s, i, j, k \quad (12)$$

$$0 \leq ls_{jk}^s \quad \forall s, j, k \quad (13)$$

$$s_{ijk}^s \leq D_{jk}^s b_{ij}^* \quad \forall s, i, j, k \quad (14)$$

Model 1-II는 판매손실 최소화를 위한 공급량 분배 모형이다. 첫 번째 단계에서 체인롤 구조가 결정되었기 때문에, 공급량 배분 모형인 Model 1-

II에서는 체인롤을 정의하는 식 (2)~식 (8)은 사용되지 않는다. 대신 첫 번째 단계에서 결정된 체인롤을 따르는 공급사슬 유연성 구조  $b_{ij}^*$ 가 모형에서 사용되게 된다.

식 (10)~식 (13)은 공급량 분배를 위한 제약조건으로 Model 1-I 과 동일하게 사용된다. 식 (14)는 Model 1-I에서의 식 (9)와 동일한 의미를 갖는 식이다. 결정변수인  $b_{ij}$ 가 모수  $b_{ij}^*$ 로 사용되면서, 시뮬레이션 모형 구현의 편의를 위해 식 (9) 대신 식 (14)를 사용하였다.

### 3.4 물류비용 고려 모형

$$\text{Lost Sales Cost} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S p_j \times ls_{jk}^s$$

판매손실 비용(Lost Sales Cost)은 소비자  $k$ 에서의 제품  $j$ 에 대한 수요를 충족시키지 못했을 때 발생하는 비용이다. 기존의 모형에서는 판매손실을 목적함수로 사용하였지만, 이 모형에서는 물류비용이 목적함수에 포함되므로 판매손실을 비용으로 전환해야 한다. 판매를 못한 수량만큼 판매손실비용이 생기므로, 간단히 판매손실에 손실 비율(Penalty Cost rate)을 곱하여 사용한다. 제품의 종류  $j$ 마다 판매손실에 따른 비용은 상이할 수 있기 때문에 서로 다른 손실 비율이 주어지게 된다. 본 연구에서는 기존의 연구들과의 비교를 용이하게 하기 위해 손실 비율은 발생 가능한 최대 물류비보다 큰 수준으로 가정하고 연구를 진행할 것이다.

$$\text{Logistics Cost} = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S l_{ki} x_{ijk}^s$$

물류비용은 제품이 소비자  $k$ 에서 시설  $i$ 로 공급될 때 발생하는 비용이다. 따라서 물류비용은 공급되는 제품당 발생하며, 공급량에 일정한 비용(1)을 곱한 형태로 표현될 수 있다. 물류비용의 계수 1은 소비자와 생산지 사이의 거리에 직접적인 영향을 받는다. 제품이 어떤 생산지에서 생산되어 소비자로 공급될 것인지는 공급사슬 유연성 구조에 따라

달라진다. 그렇기 때문에 다른 비용들과 달리 공급사슬 유연성 구조 의사결정과 직접적인 연관을 갖는다. 본 연구에서는 1을 제품이 공급되는 거리로 단순화한 가정을 사용하였다.

$$\text{Incurred Cost} = \text{Lost Sales Cost} + \text{Logistics Cost} \quad (16)$$

판매손실비용과 물류비용은 공급사슬 유연성 구조에 따라 달라지는 비용이므로, 본 연구에서는 이 두 비용을 발생비용(Incurred Cost)로 표현하여 목적함수로 사용하였다. 그 외 모형에서 추가되거나 변경되는 변수는 다음과 같다. 다른 변수와 계수는 앞서 제시한 내용과 동일하게 사용된다.

(Parameters)

- $l_{ki}$  : 소비자 k에서 시설 i까지의 물류비용
- $p_j$  : 제품 j의 판매손실에 대한 penalty cost

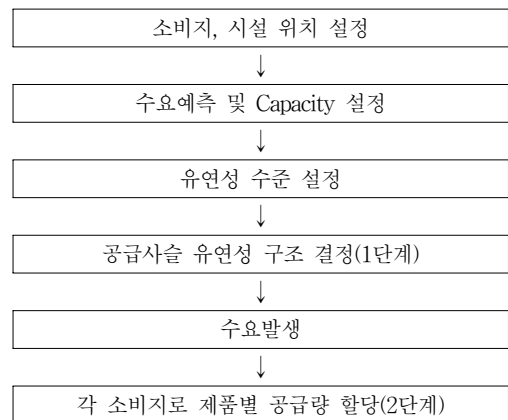
Model 2-I은 공급사슬 유연성 구조 결정 단계의 물류비용을 고려한 판매손실 최소화 모형이고, Model 2-II는 공급량 분배 단계의 물류비용을 고려한 판매손실 최소화 모형이다. 두 모형 모두 Model 1-I과 Model 1-II에서와 동일한 제약조건을 사용하게 된다. 반면에 목적함수는 판매 손실의 합뿐만이 아니라, 각 공급에 따르는 물류비용의 합이 포함되게 된다.

- Model 2-I  
Minimize  
Lost Sales Cost + Logistics Cost (16)  
subject to  
식 (1) ~ 식 (13)
- Model 2-II  
Minimize (16)  
subject to  
식 (10) ~ 식 (14)

## 4. 실험 및 결과

### 4.1 시뮬레이션 설정

본 연구에서 시뮬레이션 방법론을 사용하는 가장 큰 이유는 앞서 제시한 모형들이 NP hard 문제로 Analytical Method로 접근하기 어렵기 때문이다. 같은 이유로 기존의 많은 공정유연성 연구에서 시뮬레이션 방법론을 사용하였다[10, 15, 16, 18, 23, 26]. [그림 1]의 절차에 따라, 매 실험마다 1단계에서 설정된 유연성 수준 별로 2단계에서 확률적 수요에 대해 2,500번의 시뮬레이션을 수행하였다. 앞서 제3.1절에서 기술한 것처럼 본 연구의 시뮬레이션은 2단계의 과정을 거치게 된다. 이를 보다 세분화하여 [그림 1]에서 보는 바와 같이 총 6단계의 시뮬레이션 절차를 구성하였다. 각 절차에서 이루어지는 작업은 다음과 같다.



[그림 1] 시뮬레이션 과정

첫째로, 소비지와 시설의 위치를 설정한다. 소비지와 시설의 배치에 따라 유연성 구조에 의한 발생비용이 달라지는 효과를 배제하기 위하여, 매 실험마다 임의로 위치를 설정했다. 이로써 소비지와 생산지의 배치에 따른 물류비용의 변동 요인을 통제했다. 둘째로, 공급사슬 유연성 구조 결정을 위한 예상 수요를 확인하고, 시설 별 공급량을 설정한다.

서로 다른 공급량은 시설에 따른 특성을 결정짓는다. 만일 기존의 연구들과 마찬가지로 제품 별 예상수요와 시설 별 공급량을 동일하게 설정한다면, 시설과 소비지의 위치가 고려되지 않는 공급사슬 유연성 구조 결정단계는 의미가 없어진다. 그렇게 된다면, 판매손실을 최소로 하는 유일한 구조를 결정하기 위해서 본 실험에서는 시설마다 서로 다른 공급량을 갖는다고 설정하였다. 세 번째로, 유연성 수준을 설정한다. 각각의 유연성 수준에 따라 총 공급량과 물류비용, 총 비용이 어떻게 변화하는지 살펴보기 위해, 본 연구에서는 가장 낮은 유연성 수준( $pfl = 1$ )을 가진 지정시스템에서부터 가장 높은 유연성 수준( $pfl = 10$ )을 가진 완전유연시스템까지 각각의 유연성 수준에 대해 시뮬레이션을 진행하여 그 결과를 비교한다. 네 번째로, 공급사슬 유연성 구조를 결정한다. 그 다음, 예상수요와 상이한 수요가 관측되었다는 시나리오를 만들기 위해, 각 제품별, 지역별 수요를 임의로 발생시킨다. 마지막으로, 예상 수요와 상이하게 발생한 수요에 대해 제약조건과 분배 결정에 따라 수요를 최대한 만족시키도록 시설에 할당한다. 공급량, 판매손실, 물류비용, 생산용량이용률 등의 데이터를 모으고, 이 과정을 반복했다.

<표 1>은 시뮬레이션을 수행할 세 가지 실험을 보여준다. 실험 1에서는 Model 1-I 을 사용하여 물류비용을 고려하지 않은 상황에서 판매손실을 최소화하는 공급사슬 유연성 구조를 결정하고, Model 1-II 를 이용해 임의의 수요를 생성해 판매손실을 최소로 하는 공급량 분배를 수행한다.

실험 2에서는 Model 1-I 을 사용하여 물류비용을 고려하지 않은 상황에서 판매손실비용을 최소화하는 유연성 구조를 결정하고, Model 2-II 를 이용해 판매손실비용과 함께 물류비용을 최소로 하는 공급량 분배를 수행한다. 실험 2에서는 다음의 두 가지 사항을 확인 한다. 첫째, 물류비용을 고려하여 공급량을 배분했을 때, 판매손실비용만을 고려하여 배분한 결과와 공급량 측면에서 차이가 발생하는지 확인한다. 둘째, 물류비용을 고려하여 공급량을 배분했을 때, 유

연성 구조의 유연성 수준에 따라 물류비용이 어떻게 달라지는지를 확인한다. 실험 3에서는 Model 2-I 을 사용하여 구조 결정 단계에서부터 물류비용을 고려한 최적 공급사슬 유연성 구조를 결정하고, Model 2-II 를 이용해 판매손실과 물류비용을 동시에 최소로 하는 공급량 분배를 수행한다. 실험 3에서는 공급사슬 유연성 구조 결정단계에서 물류비용을 고려한 경우, 공급량 배분단계에서 물류비용과 총 비용에 어떤 차이가 발생하는지 확인한다. 이상과 같은 실험 모형의 설정을 <표 1>에 요약하였다.

<표 1> 실험 모형 설명

		유연성 구조 결정 단계	공급량 배분 단계
실험 1	고려요인	판매손실 최소화	판매손실 최소화
	모형	Model 1-I	Model 1-II
실험 2	고려요인	판매손실 최소화	판매손실, 물류비용 최소화
	모형	Model 1-I	Model 2-II
실험 3	고려요인	판매손실, 물류비용 최소화	판매손실, 물류비용 최소화
	모형	Model 2-I	Model 2-II

소비지와 시설의 위치는 1부터 100까지 균일분포를 이용하여 생성하여, 10곳의 소비지와 10곳의 시설이 100×100의 이차원 좌표공간에서 임의로 위치하도록 하였다. 그 후 소비지와 시설간의 유클리드 거리(Euclidean distance)를 계산하여 물류비용으로 사용하였다.

또한, 총 10개의 서로 다른 제품을 보유하고 있다고 가정하였다. 공급사슬 유연성 구조 결정단계에서 수요는 지역별로 제품 당 10의 동일한 수요를 가정하였고, 공급량 배분 단계에서는 1에서 20 사이의 균일분포를 사용하여 평균 기대 수요가 10이 되게 하여 임의로 수요를 생성하였다. 수요의 균일분포 가정은 다른 공정유연성 연구에서 자주 사용되는 가정으로[9, 10, 13, 26], 본 연구에서는 큰 수요불확실성 전제에서도 공급사슬 유연성 구조에서 물류비용에 대한 고려가 중요하다는 점을 밝히기 위해 사용하였다.



여러 공정유연성 연구에서와 마찬가지로 공급량 설정은 총 기대 수요인 1000과 동일한 공급량 총합을 갖도록 가정한다. 본 연구에서는 시설마다 서로 다른 공급량을 갖는다고 가정하였다. 현실에서 시설마다 같은 공급량을 갖는다는 경우보다 서로 다른 공급량을 갖는 것이 더 일반적이기 때문이다. 앞서 모형 설명에서와 같이 손실비용의 경우 물류비용의 최대치보다 큰 값을 갖도록 설정하였다.  $100 \times 100$ 의 이차원 좌표에서 발생 가능한 최대의 물류비용은  $100 \times \sqrt{2}$ 이므로 이보다 큰 값인 150으로 설정하였다. 유연성 수준에 따라 체인틀을 따르는 공급사슬 유연성 구조가 갖는 공정유연성이 달라지도록 하였고, 물류유연성의 경우 모든 시설에서 가능한 모든 수요지로 공급이 가능하다고 가정하였다. 즉, 물류유연성은 완전유연성을 갖도록 하여 유연성 수준에 따른 판매손실과 물류비용의 변화에 초점을 두도록 하였다.

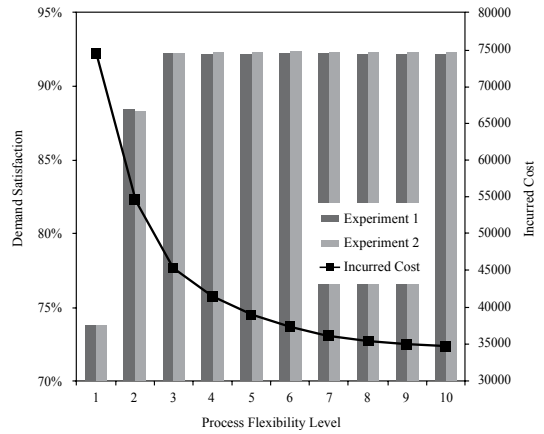
〈표 2〉 실험의 가정

소비지 수	10
시설 수	10
제품 수	10
시설-제품 별 수요	Uniform(1, 20)
공급량 총합	1000
Sales Penalty	150
물류유연성	Full-flexible

## 4.2 시뮬레이션 결과

### 4.2.1 실험 1의 결과

실험 1에서는 공급사슬 유연성 구조 결정 단계와 공급량 분배 단계 모두 판매손실 최소화만을 고려한 모형을 사용하여 시뮬레이션을 수행한다. 이 결과, 공급량을 완전유연구조의 공급량으로 나눈 값인 유연성효율(Flexibility Efficiency)이 98.5%(Jordan and Graves[23]에서 98.2%) 및 99.4%(Chou, Chua et al.[13]의 구조에서 99.7%)로 기존연구와 거의 동일함을 알 수 있었다.



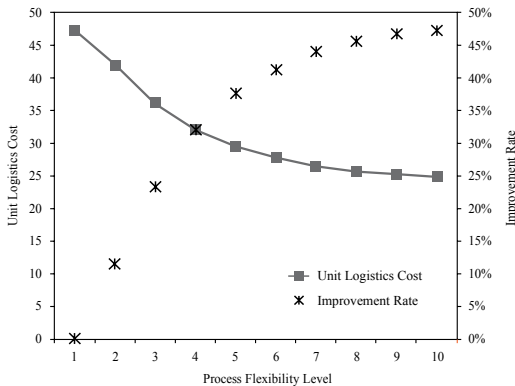
[그림 2] 유연성 수준에 따른 수요충족

### 4.2.2 실험 2의 결과

실험 2는 판매손실 최소화만 고려한 공급사슬 유연성 구조에서 물류비용과 판매손실을 모두 고려하여 공급량을 배분한 경우의 시뮬레이션이다. [그림 2]의 막대그래프는 실험 1과 실험 2에서의 공급량 배분 결과로서 수요충족률을 보여준다. 수요충족률은 총 수요에 대한 공급량을 의미하며, 두 실험은 모든 유연성 수준의 공급사슬 유연성 구조에서 거의 동일한 수요충족률을 보여주고 있다. 이를 통해 물류비용의 고려가 구조의 유연성 성과에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 이는 물류비용을 고려한 구조로 유연성 구조를 최적화하더라도 유연성 효과가 희생되지 않는다는 것을 의미한다. 그 이유는 발생 가능한 최대의 물류비용을 판매손실로 인한 비용보다 작게 설정하여, 판매손실의 최소화를 우선순위로 공급량 배분을 하기 때문이다.

[그림 3]은 이러한 설정의 공급사슬 유연성 구조에서 발생하는 물류비용을 보여준다. 여기에서의 물류비용은 총 물류비용이 아닌, 공급량 한 단위당 물류비용이다. 단위당 물류비용을 사용하는 이유는, 총 물류비용으로 비교할 경우 총 공급량에 따라 물류비용이 달라지게 되어 공급량이 다른 각 유연성 수준의 구조들끼리의 비교에 적합하지 않기 때문이다.

이때 유연성 수준이 2에서 10까지 증가하면서 물류비용은 지정시스템 대비 11.5%에서 47.3%까지 감소하고 있다. 또한, 판매손실이 유연성 수준 2에서 급격히 감소하여 완전유연시스템의 거의 모든 효과를 내는 모습과는 대조적으로, 물류비용은 유연성 수준 2에서 10까지 완만한 속도로 감소하고 있다.

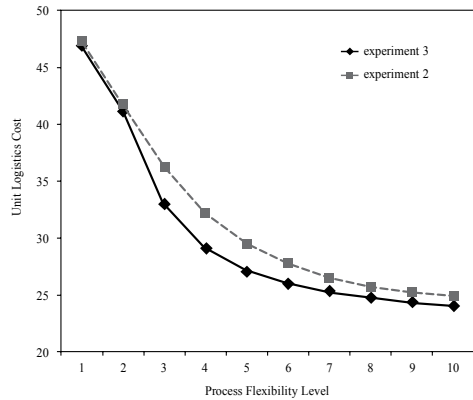


[그림 3] 유연성 수준별 단위당 물류비용과 개선 비율

이러한 결과는 공급사슬 유연성 구조 결정에 주는 시사점이 크다. 2를 넘어서는 유연성 수준을 가짐으로써 얻게 되는 유연성 효과는 적은 반면에 이로 인해 필연적으로 발생하는 복잡성 비용이 증가하므로, 많은 공정유연성 연구에서의 관심의 대상은 유연성 수준 2인 공급사슬 유연성 구조에 치우쳐있었다. 하지만 유연성 수준에 따른 물류비용의 행태는 유연성 수준 결정에 물류비용을 고려한다면 다른 결론이 나올 수 있다는 점을 시사한다.

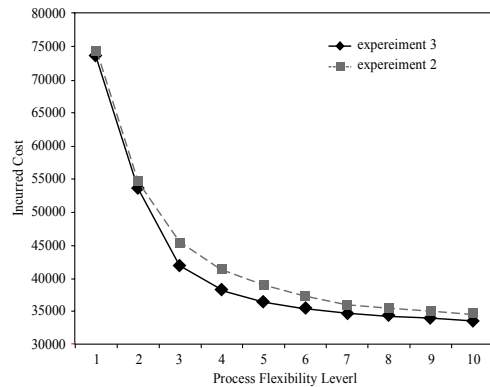
### 4.2.3 실험 3의 결과

실험 3은 공급사슬 유연성 구조 결정단계에서부터 물류비용과 판매손실을 모두 고려한 경우의 시뮬레이션이다. [그림 4]는 실험 3과 실험 2에서의 단위당 물류비용을 나타낸다. 점선으로 나타낸 실험 2의 단위당 물류비용과 비교했을 때 전반적으로 낮은 물류비용이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 주목할 만한 점은 유연성 수준이 1과 2일 때 그 차이가 적고, 유연성 수준 3과 4에서 차이가 증가했다가 점점 감소하고 있다는 점이다.



[그림 4] 유연성 수준에 따른 단위당 물류비용

[그림 5]는 유연성 수준에 따른 총 발생비용을 보여준다. 유연성 수준에 따라 물류비용에서 두드러지는 차이가 발생하기 때문에, 총 발생비용 또한 유연성 수준에 따라 점진적으로 줄어든다. 대다수의 공정유연성 연구에서는 유연성 수준이 2 이상이 되면 유연성 효과의 증가가 현저히 줄어들기 때문에, 비용-편익 측면에서 유연성 수준 2에서 공급사슬 유연성 구조를 형성하는 것이 가장 최적임을 주장하고 있다. 하지만, 물류비용이 함께 고려된다면 유연성 수준 2가 항상 최적이지 아닐 수도 있다는 것을 본 연구에서 확인할 수 있다. 본 연구에서는 유연성 투자비용이나 복잡성 비용을 고려하지 않고 있지만, 유연성 수준에 따른 총 발생비용을 알아보는 것이 중요함을 보여주었다.



[그림 5] 유연성 수준에 따른 총 발생비용

## 5. Case Study : 혼다자동차

### 5.1 대상 기업 소개 및 연구 설정

본 연구의 Case study로서, 혼다자동차의 실제 판매 데이터를 기반으로 앞서 도출한 수리 모형에 적용시켜 보았다. 혼다는 세계 각국에서 생산 및 판매가 이루어지고 있는 모델을 다수 보유하고 있고, 글로벌 자동차 기업 중 가장 높은 생산유연성을 갖춘 기업으로 평가 받고 있다. 실제로 2008년 상반기 혼다는 유연생산체제로 유가변동 및 경기침체로 인한 수요변화에 다른 경쟁자들에 비해 가장 빠르게 대응할 수 있었다. 이 시기 혼다는 주요 글로벌 자동차 기업들 중 유일하게 판매 증가를 기록했다[5].

혼다의 2011년, 2012년 지역별 모델 별 판매 데이터는 JADA(Japan Automobile Dealers Association), Zenkeijikyo(Japan Mini Vehicles Association), Japan Automobile Importers Association의 정보를 취합한 MarkLines Automotive Industry Portal[27]의 데이터를 사용하였다. 여기서 혼다의 자동차 모델 중 전 세계 5개 이상의 국가에서 판매되는 모델을 기준으로, Accord, CR-V, CR-Z, Civic, Crosstour, Fit(Jazz), City, Pilot, Insight의 10종을 선정하였다. 선정된 10종의 모델은 적게는 5개국에서 많게는 38개국에서 판매되고 있으며, 10종의 모델 중 하나라도 판매되는 국가의 수는 총 40종이다. 이 중 연간 총 판매 대수가 2,500대 이상인 30개 국가를 대상 소비지로 선정했다. 혼다 케이스의 설정은 <표 3>에 요약하였다.

본 수치 예의 설정에서 혼다는 총 49개의 제품-시설 조합을 보유하고 있다. 따라서 20개의 시설로 이루어진 시스템에서 혼다의 공급사슬 유연성 구조는 2와 3사이의 유연성 수준을 보유하고 있음을 알 수 있다. 본 연구의 가정에서는 유연성 구조가 체인롤을 따르고 있기 때문에 유연성 수준이 정수로 표현되었지만, 혼다의 경우와 마찬가지로 현실의 기업에서는 정확히 체인롤을 따르지 않는 경우가

대부분이다. 따라서 제품-시설 조합을 시설의 수로 나누어 값으로 표현되는 유연성 수준이 정수로 나누어 떨어지지 않는다(혼다의 평균 유연성 수준 : 2.45). 그러므로 본 연구에서 제안하는 유연성 수준 2와 3인 체인롤구조를 벤치마크 구조로 선정하여 혼다의 공급사슬 유연성 구조의 성과와 비교하여 보았다. 즉, 2011년 혼다의 공급사슬 유연성 구조가 2012년 실제 수요에 대응하는 역량을 연구에서 제시한 최적 공급사슬 유연성 구조의 성과와 비교-판단해보고자 한다.

<표 3> 혼다 실험 설정

제품	10종류	Accord, CR-V, CR-Z, Civic, Crosstour, Fit(Jazz), City, Pilot, Insight, Odyssey
생산지	14지역 (20 공장)	Argentina(1), Brazil(1), Canada(1), China(3), India(1), Indonesia(1), Japan(2), Malaysia(1), Mexico(1), Pakistan(1), Thailand(2), Turkey(1), UK(1), USA(3)
소비지	30지역	Argentina, Australia, Brazil, Canada, China, France, Germany, India, Indonesia, Iran, Israel, Italy, Japan, Korea, Malaysia, Mexico, Netherlands, Pakistan, Poland, Saudi Arabia, South Africa, Spain, Sweden, Switzerland, Taiwan, Thailand, Turkey, UAE, UK, USA

시설의 위치는 대상 제품들이 생산되는 20개의 공장의 위도와 경도 데이터를 사용하였다. 소비지의 위치는 제품이 판매되는 국가들의 영토의 중간 지점으로 가정하여 각 지역의 위도와 경도 데이터를 사용하였다. 그 후 각 지점의 위도 경도를 이용하여 거리를 계산하였다. 발생 가능한 최대 수송거리는 지구 둘레의 절반인 약 20,000킬로미터로 가정하였으며, Lost Sales Penalty는 발생 가능한 최대 물류비용보다 크게 가정하여 20,000으로 설정하였다.

부정확한 물류비용과 판매손실비용 산정으로 인한 오류를 방지하기 위해, 본 연구에서 물류비용은 단순히 거리에 정비례(즉, 물류비용 = 수송거리×1)

한다고 가정하였다. 그 후, 정종석[8]을 참고하여 실제 산업 및 회사에서의 판매 가격과 물류비용의 비율을 맞추기 위해 수송거리의 가중치를 1에서 0.5로 재조정(즉, 물류비용 = 수송거리×0.5)하였다. 이는 일본 완성차 업체의 매출액 대비 수출물류비중이 3.1%로 그 중 판매물류비 비중이 50%라는 자동차경제[8]의 자료에 기반하여 판매액 대비 약 1.5% 수준으로 물류비용을 책정하였다. 혼다자동차에서 이 방식을 채택했을 때 해당 물류비용은 판매액대비 1.4%로 현실에 가까운 범위를 보여주었다. 그러나 이 비용이 실제 부담하는 비용과 같지는 않을 수 있기 때문에 혼다자동차 케이스에서 결과값을 물류비용과 총 비용이 화폐단위로 표기하지 않았으며, 같은 이유로 유연성의 성과 또한 판매손실비용이 아닌 판매손실 대수로 결과를 비교하였다.

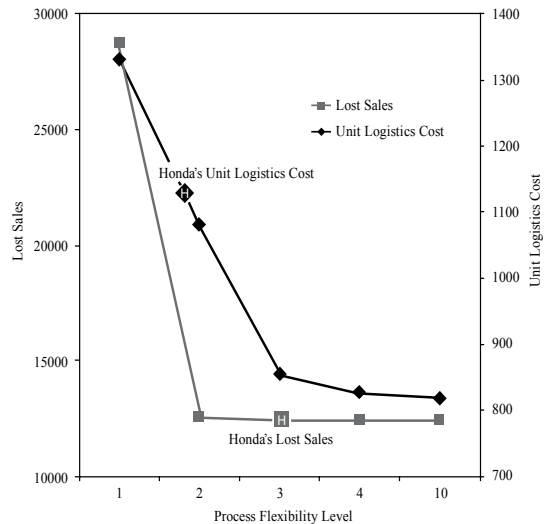
총 공급량은 2012년도 월별 평균 수요인 235,653대를 기준으로 비슷한 수준인 238,000대를 가정하였고, 실제 공장 별 공급량을 고려하여 배분하였다. 공급사슬 유연성 구조 결정단계에서 사용되는 수요는 실제 혼다의 2011년 지역별 모델별 수요 데이터를 사용하였고, 유연성 및 물류비용을 측정할 2012년의 수요는 혼다의 2012년 지역별 모델별 수요 데이터를 사용하였다.

## 5.2 분석 및 결과

[그림 6]은 2011년 혼다의 판매 데이터를 사용하여 Model 2-I로 공급사슬 유연성 구조를 결정하고, 2012년 혼다의 실제 판매 데이터를 사용하여 Model 2-II로 최적 공급량 배분을 유연성 수준별로 수행한 결과이다.

혼다의 2011년 유연성 구조에서의 유연성효율은 유연성 수준 3인 유연성 구조와 동일한 효과를 보이고 있으므로, 현재 혼다는 49개의 제품-시설 조합으로 높은 효율의 유연성을 갖는 구조를 갖추고 있다는 평가를 내릴 수 있다. 하지만, 40개의 제품-시설 조합(유연성 수준 2)만으로도 이에 근접한 유연성 효율(약 99%)을 갖는 구조를 갖출 수 있기

때문에, 9개의 제품-시설 조합을 추가로 보유하는데 발생하는 복잡성 비용과 이로 인해 얻게 되는 유연성 효과를 비교해야만 비용-편익 측면에서 더 정확한 평가가 가능하다.



[그림 6] 혼다 실험 판매손실과 해당 단위 물류비용

반면에 물류비용 측면에서 고려한다면, 2011년 혼다의 공급사슬 유연성 구조가 가장 효율적인 구조가 아니라는 것은 명백해진다. 첫째로, 유연성 수준 2인 최적 유연성 구조에서 실제 2011년 혼다 공급사슬 유연성 구조 보다 약 3.5% 적은 물류비용을 발생시키고 있다. 이는 혼다가 단지 어떤 시설에서 어떤 제품을 생산하는지를 변경하는 것만으로도 3.5% 적은 물류비용을 발생시키는 구조를 가질 수 있었다는 것을 의미한다. 둘째로, 유연성 수준 3인 최적 공급사슬 유연성 구조에서는 2011년 혼다 구조의 약 76%의 물류비용을 발생시킨다. 즉, 혼다는 11개의 제품-시설 조합(유연성 수준 3인 공급사슬 유연성 구조)에 추가로 투자했다면, 유연성 효율에 대한 손실 없이 물류비용의 약 24%를 절감할 수 있었다. 물론 이 24%의 물류비용이 11개의 제품-시설 조합을 신설하면서 발생하는 복잡성비용과 투자비용에 비해 적다면, 혼다가 유연성에 투자할 유인은 없어지게 된다.

혼다 공급사슬 유연성 구조의 효율성 분석을 종합했을 때, 기존의 연구들과 마찬가지로 유연성 측면에서는 유연성 수준이 2 이상을 가질 유인이 적지만, “물류비용 측면을 함께 고려했을 때 더 높은 유연성에 투자할 유인이 충분히 있다”는 본 연구의 결과를 확인할 수 있다. 유연성 수준의 증가에 따라 구조가 발생시키는 비용이 의미 있는 정도(24%)로 변할 수 있기 때문이다. 물론 정확한 유연성 투자 의사결정은 비용 절감 효과와 유연성 증가에 따르는 복잡성비용의 상충관계와 비교 후 가능할 것이다. 한 기업의 유연성과 이에 따라 발생하는 복잡성 비용은 기업마다 상이하기 때문에 본 연구의 모형들에서 직접적으로 다루지는 않았다. 하지만, 본 연구에서 제시하는 모형들과 결과를 바탕으로 의사결정자들은 최적의 공급사슬 유연성 구조의 이점에 대한 정보를 얻을 수 있고, 이를 복잡성비용과 비교하여 최적의 의사결정을 내리는데 유용하게 사용할 수 있을 것이라고 기대한다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 물류비용이 공급사슬 유연성 구조 결정 문제에서 어떤 영향을 미치는지 시뮬레이션 방법론을 통해 분석하였다. 기존의 공정유연성 연구에서 간과되어왔던 물류비용과의 연관성을 제시하고, 유연성 수준과 물류효율이 비례한다는 점을 밝혀냈다. 특히, 유연성 수준에 따른 물류비용의 감소비용이 유연성 효율 증가비용보다 점진적인 행태를 보인다는 것을 확인함으로써, 최적의 유연성 수준을 결정하는 문제에서 반드시 고려되어야 할 요인이라는 점을 확인했다. 또한, 혼다 사례를 통해 물류비용이 공급사슬 유연성 구조를 설계할 때 간과해서는 안 되는 요인임을 확인했다.

본 연구의 의의는 제한적 유연 시스템에서 물류비용 측면의 경제성을 확보할 수 있는 방안을 제시했다는 점이다. 적은 복잡성 비용 및 투자비용으로도 유연성 효과를 극대화 할 수 있는 제한적 유연 시스템을 설계할 때, 물류비용을 포함한 총 비용을

최소화 할 수 있는 구조를 계획하는 모형을 제시함으로써, 제한적 유연 시스템의 경쟁력과 활용도를 높였다. 본 연구 결과를 바탕으로 의사결정자들이 제한적 유연 시스템을 적용하는데 유연성, 투자비용, 복잡성비용과 함께 물류비용을 고려함으로써 비용-편익을 극대화 할 수 있는 공급사슬 유연성 구조를 계획할 수 있을 것이라고 기대한다.

본 연구는 공급사슬구조가 생산지에서 소비지에 이르는 단일 단계에서만 수행되었다. 향후 도남철[3], 김은갑[2], 김각규 외[1]와 같이 최근 중요성이 증가하고 있는 회수물류에서 공급업체와의 유연성 및 물류비용에 대한 연구가 수행할 수 있다면 자재 및 부품의 조달 과정에서 더욱 흥미로운 결과를 도출할 것으로 기대한다. 또한, 본 연구는 물류유연성에 대하여 완전유연성을 가정하였으나, 다양한 물류유연성 수준에 대하여 연구를 확장한다면, 물류비용과 물류유연성을 포함한 공급사슬 유연성의 구조를 이해하는 데 도움이 될 것으로 보인다. 마지막으로, 본 연구에서 다룬 고객 수요의 불확실성에 대비하기 위한 유연성 연구를 박찬규[4]나 유석천 외[7]와 같이 공급가격의 불확실성을 대비하기 위한 모형들로 확장한다면 통합적인 공급사슬의 불확실성 관리 모형을 다룰 수 있을 것으로 기대한다.

## 참고문헌

- [1] 김각규, 김성우, 조성진, 2013, “다품종 독립 적재공간을 갖는 배달과 수거를 동시에 고려한 차량 경로문제”, 『대한산업공학회지』, 제39권, 제6호(2013), pp.554-561.
- [2] 김은갑, “혼성 생산 시스템의 지속 가능 운영을 위한 신제품 생산과 회수제품 수용 통제의 통합 구현”, 『대한산업공학회지』, 제39권, 제 5호(2013), pp.440-449.
- [3] 도남철, “제품, 공정, 서비스 통합 설계를 지원하는 제품자료모델”, 『대한산업공학회지』, 제38권, 제2호(2012), pp.98-106.
- [4] 박찬규, “구매가격 변동 하에서 초기재고 재분

- 배를 통한 위험회피 재고모형의 효율화”, 『한국경영과학회지』, 제38권, 제2호(2013), pp. 95-115.
- [5] 서영석, “경기 침체기의 핵심 경쟁력 : 생산유연성”, 『KARI CEO Report』, 한국자동차산업연구소, 2008. 08. 01.
- [6] 오중산, “제조유연성과 성과 간의 인과관계 : 자동차 부품산업과 전자 부품산업을 대상으로 한 실증연구”, 『경영학연구』, 제39권, 제2호(2010), pp.309-340.
- [7] 유석천, 박찬규, 정 욱, “구매가격 변동시 위험을 고려한 재고모형”, 『한국경영과학회지』, 제35권, 제4호(2010), pp.33-53.
- [8] 정종석, “자동차산업의 물류혁신”, 『자동차경제』, (2002), pp.21-31.
- [9] Albino, V. and A. Claudio Garavelli, “Limited flexibility in cellular manufacturing systems : A simulation study,” *International Journal of Production Economics*, Vol.60(1999), pp.447-455.
- [10] Aprile, D., A.C. Garavelli, and I. Giannoccaro, “Operations planning and flexibility in a supply chain,” *Production Planning and Control*, Vol.16, No.1(2005), pp.21-31.
- [11] Beckman, S. and D. Rosenfield, *Operations strategy : competing in the 21st century*, McGraw-Hill/Irwin, New York, 2007.
- [12] Browne, J., D. Dubois, K. Rathmill, and S.P. Sethi, “Classification of flexible manufacturing systems,” *The FMS magazine*, Vol.2, No.2(1984), pp.114-117.
- [13] Chou, M.C., G.A. Chua, and C. Chung, “On range and response : Dimensions of process flexibility,” *European Journal of Operational Research*, Vol.207, No.2(2010), pp.711-724.
- [14] Das, S.K. and P. Nagendra, “Selection of routes in a flexible manufacturing facility,” *International Journal of Production Economics*, Vol. 48, No.3(1997), pp.237-247.
- [15] Elabassi, S.B., S. Benjaafar, and A.B. Hadj-Alouane, *On the performance of flexibility chaining in location-allocation problems under disruption*, 8th International Conference of Modeling and Simulation-MOSIM, 2010.
- [16] Garavelli, A.C., “Flexibility configurations for the supply chain management,” *International Journal of Production Economics*, Vol.85, No.2(2003), pp.141-153.
- [17] Garg, A. and H.L. Lee, “Managing product variety : An operations perspective,” in *Quantitative Models for Supply Chain Management*, Springer US, Vol.17(1999), pp.468-490.
- [18] Graves, S.C. and B.T. Tomlin, “Process flexibility in supply chains,” *Management Science*, Vol.49, No.7(2003), pp.907-919.
- [19] Ho, Y.-C. and C. Moodie, “Solving cell formation problems in a manufacturing environment with flexible processing and routing capabilities,” *International Journal of Production Research*, Vol.34, No.10(1996), pp.2901-2923.
- [20] Hopp, W.J., S.M. Iravani, and W.L. Wendy, “Vertical flexibility in supply chains,” *Management Science*, Vol.56, No.3(2010), pp.495-502.
- [21] Iravani, S.M., M.P. Van Oyen, and K.T. Sims, “Structural flexibility : A new perspective on the design of manufacturing and service operations,” *Management Science*, Vol.51, No.2(2005), pp.151-166.
- [22] Jayant, A. and H.S. Ghagra, “Supply Chain Flexibility Configurations : Perspectives, Empirical Studies and Research Directions,” *International Journal of Supply Chain Management*, Vol.2, No.1(2013), pp.21-29.
- [23] Jordan, W.C. and S.C. Graves, “Principles on the benefits of manufacturing process flexibility,” *Management Science*, Vol.41, No.4

- (1995), pp.577-594.
- [24] Kim, B. and C. Park, "Firms' integrating efforts to mitigate the tradeoff between controllability and flexibility," *International Journal of Production Research*, Vol.51, No.4(2013), pp.1258-1278.
- [25] Lim, M., A. Bassamboo, S. Chopra, S., and M.S. Daskin, "Use of Chaining Strategies in the Presence of Disruption Risks," *Working Paper*, 2011.
- [26] Mak, H.-Y. and Z.-J.M. Shen, "Stochastic programming approach to process flexibility design," *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Vol.21, No.3-4(2009), pp.75-91.
- [27] MarkLines Automotive Industry Portal, <http://www.marklines.com/>.
- [28] Sánchez, A.M. and M.P. Pérez, "Supply chain flexibility and firm performance : A conceptual model and empirical study in the automotive industry," *International Journal of Operations and Production Management*, Vol.25, No.7(2005), pp.681-700.
- [29] Sethi, A.K. and S.P. Sethi, "Flexibility in manufacturing : A survey," *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol.2, No.4(1990), pp.289-328.
- [30] Slack, N., "The flexibility of manufacturing systems," *International Journal of Operations and Production Management*, Vol.7, No.4 (1987), pp.35-45.
- [31] Snyder, L.V. and Z.-J.M. Shen, *Fundamentals of supply chain theory*, John Wiley and Sons, New Jersey, 2011.
- [32] Upton, D., "The management of manufacturing flexibility," *California Management Review*, Vol.36, No.2(1994), pp.72-89.
- [33] Zhang, Q., M.A. Vonderembse, and J.S. Lim, "Manufacturing flexibility : Defining and analyzing relationships among competence, capability, and customer satisfaction," *Journal of Operations Management*, Vol.21, No.2(2003), pp.173-191.