

## 공급사슬에서 생산 및 물류의 동기화를 위한 발견적 기법

### Heuristics for Synchronization of Production and Transportation Planning in the Supply Chain

정정우 \*, 이영해 \*\*

\* 한양대학교 산업공학과 (jungjw@scm.hanyang.ac.kr)

\*\* 한양대학교 산업공학과, 교신저자 (yhlee@hanyang.ac.kr)

#### Abstract

The aim of synchronization of production and transportation planning in the supply chain is to increase the flexibility and to decrease various costs. The suggested model in this study synchronizes the timing to supply to a downstream manufacturer directly after production and to be consumed in a downstream manufacturer right after receipt. This model deals with the frequent delivery in small amount which is a new trend of the transportation not governed the economy of scale principle. Moreover, various types of transportation governed by the economy of scale principle or not are considered. Then, the two-phase mathematical model is suggested to obtain optimal job sequence and production quantity for each tasks. But, it is difficult to gain optimal solutions if there is a transportation governed by the economy of scale principle in the supply chain, or the size of the problem is increased. Thus, heuristic algorithms based on simulated annealing and genetic algorithm are suggested to find good solutions in the reasonable time.

#### 1. 서론

공급사슬경영은 이를 구성하는 다양한 기업들의 다양한 속성들을 대상으로 다루는 까닭에 공급사슬의 효율을 증가시키기 위한 다양한 분야를 다루고 있다. 그 중에 중요한 개념이 동기화이다. 동기화란 어떤 사건이 동시에 발생하도록 하기 위한 조정으로 정의할 수 있다(Webster's Online Dictionary, 2005). 이 개념은 공급사슬에 존재하는 재고의 양을 줄이고 효율을 증가시키기 위하여 자주 사용되었다. Hahn 외 2 인(2000)은 공급사슬을 구성하는 모든 기업들의 활동은 최대의 수익을 얻기 위하여 동기화될 필요가 있음을 언급하였다. Ashcroft(2005)는 공급사슬 동기화는 높은 수준의 공급사슬 경쟁력을 갖추기 위한 가장 중요한 요소라고 하였다.

이에 공급사슬에 존재하는 다양한 요소들을 동기화하여 공급사슬의 생산성 증대를 얻기 위한 많은 연구들이 진행되었다.

우선, 공급사슬 계획의 동기화를 들 수 있다. Hahn 외 2 인(2000)은 공급사슬 계획의 동기화에 대하여 다루었다. 자동차와 관련된 협력 업체들이 특정 기간의 제품 수요를 협업적 예측을 통하여 수립하고, 이에 따른 생산 및 일정 계획을 동기화하는 절차와 효과를 서술하고 있다.

다음으로는, 생산 리드타임의 동기화에 관한 것이다. 만약 공급사슬을 구성하는 다양한 기업들의 제품 생산에 필요한 리드타임이 모두 다르다면 하위 생산자의 재고가 크게 증가할 수 있다. 그래서 재고를 줄이기 위하여 상위 공급자들의 생산 리드타임을 동기화하는 것이 필요하다. Takahashi 외 2 인(2005)은 공급사슬의 효율적 운영을 위하여 JIT(Just-in-time)의 Kanban, CONWIP, Synchronized CONWIP 모형을 개발하고, 이들의 효과를 시뮬레이션 실험을 통하여 비교하였다. 그 결과 제품 생산 리드타임을 동기화하는 Synchronized CONWIP 방법을 사용하였을 때 가장 좋은 효과를 얻을 수 있었다.

계속하여, 공급사슬 동기화에 대한 분야는 생산 및 운송 주기의 동기화에 관한 것이다. 이 부분의 동기화는 공급사슬의 총 비용을 줄이기 위하여 상위 단계의 공급자들이 생산한 제품을 운송하는 주기 시간(Cycle time)을 동기화하는 것을 말한다. 이는 기존의 JRP(Joint replenishment problem)의 개념과 같은 맥락에서 살펴볼 수 있다. Vergara 외 2 인(2002)은 공급사슬에서 운송비용, 준비비용과 재고유지비용의 합을 최소화하기 위한 제품 생산 순서와 동기화된 배송 주기를 결정하는 문제를 다루었다. 이 연구는 공급사슬 구성원 중 주도권을 지니고 있는 기업을 중심으로 최적 배송 주기를 구하고, 이를 모든 구성 기업에 동기화시키는 문제와 수익 배분 절차를 다룬 Khouja(2003)의 모형을 기반으로 하여, 유전자 알고리즘(Genetic

algorithm)을 사용한 휴리스틱 알고리즘의 개발에 초점을 두었다.

공급사슬 동기화에 대한 다른 분류로 기업 간 제품의 공급 및 수요를 동기화하는 것을 생각할 수 있다. 공급자의 생산 혹은 운송의 리드타임을 동기화하려는 것은 생산자의 기준에서 효과적인 생산 시점을 찾기 위한 것으로 공급자의 생산 시점의 결정에는 나쁜 영향을 줄 수 있다. 만약 하위 생산자와 상위 공급자 간의 공급 시점과 수요 시점을 동기화한다면 공급사슬의 총 비용을 줄일 수 있을 것이다. Deloitte & Touche(2003)의 모형은 생산자가 생산한 제품이 즉시 소매업자에 배송되도록 제품 흐름을 동기화하는 방법을 제안한다. 발생한 재고는 소매업자가 지니고 있도록 하고, 유통 비용과 생산자의 재고유지비용을 제품 가격에 전가하도록 했다. Garcia 외 2 인(2004)는 소비자에게 생산 직후 배송하여야 하는 콘크리트의 생산 및 배송 정책에 대한 휴리스틱 알고리즘을 개발하였다. 생산 직후의 공급 시점과 차량 경로를 결정하는데 No-wait 접근 방법이 사용되었다. Wang 외 2 인(2004)은 창고의 저장 공간을 고려한 창고와 소매업자 간 분배 계획을 다루었다. 모든 배송이 JIT의 개념에 알맞게 분배가 이루어지도록 하였다.

하지만 기존 연구에는 몇 가지의 한계가 존재한다. 대부분의 기존 연구에서는 공급사슬 동기화의 기대 효과에 대한 개념적 접근에 머물러 있다. 이들은 실제 문제에 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 최근에 들어 계량적 접근을 통하여 실제 공급사슬경영을 위한 공급사슬 동기화를 다룬 많은 연구가 진행되었다. 이들 연구들은 JIT 혹은 JRP 과 같은 개념을 바탕으로 동기화 모형을 제시하고 있다. 하지만 이러한 경우 각 단계마다 재고가 존재하는 단점을 보이게 되거나(Takahashi 외 2 인, 2005), 공급사슬의 특정 기업이 재고 비용을 부담하여야 하는 경우(Deloitte & Touche, 2003)가 발생하기도 한다. 비록 Khouja(2003)의 연구에서 수익을 재분배하는 정책이 개발되었지만, 현재 정의된 방법은 없는 상태이다.

게다가 기존 연구들은 현 운송 추세를 반영하는데 한계를 보이고 있다. 공급사슬 동기화 모형의 개발을 위하여 JIT 개념을 이용하고 있지만, 이들은 해상 운송과 같이 각 기업 간의 제품 운송이 규모의 경제 이론의 지배를 받는 운송 수단을 통하여 이루어진다는데 기반을 두고 있다(Khouja, 2003). 하지만 소량 다빈도 운송 체제의 활발한 활동은 공급사슬의 동기화에 있어 무시할 수 없는 중요한 요소이다. 소량 다빈도 운송의 이점은 이미 다양하게 연구되어 왔다(Aderohunmu 외 2 인, 1995; Lu, 1995). 이 방법은 JIT 환경에서 공급사슬 총 비용을 감소시킬 수 있는 방법으로 알려졌다. Kim 과 Ha(2003)는 공급사슬에서 소량 다빈도 운송 방법을 사용하는 공급자-구매자 협업 모형을 제안하고, 경제적 이득을 보였다. 고객 수요의 다양화, 재고 압축의 부담, 시장 세분화와 수요 주기의 단축은 소량 다빈도 운송 추세가 확산하는 배경이 되었으며, 3PL의 등장과 경쟁은 소량 다빈도 운송 추세를 가속화하고 있는 실정이다. 또한

소량다빈도 운송으로 인한 운송비의 증가 등의 문제를 해결하기 위한 공동물류(Consolidated transportation)의 확산이 이루어지고 있어 소량 다빈도 운송의 확산을 가속화하고 있다(진형인, 2002). 게다가 육상, 해상, 그리고 항공 운송의 결합을 이용한 복합운송이 증가하는 추세에 있어, 소량 다빈도 운송을 비롯한 다양한 운송 형태를 고려한 동기화 모형이 필요하게 되었다.

만약 제품들이 공급사슬을 구성하는 기업들 사이에서 소량 다빈도 운송 방식을 이용하여 어떠한 지체 없이 생산된다면, 각 단계마다 재고 수준을 획기적으로 줄일 수 있을 것이다. 이는 공급자가 제품을 공급하는 시점과 구매자의 구매 및 수요 시점을 동기화함을 의미한다. 그래서 본 연구에서는 상위 생산자의 공급 시점과 하위 생산자의 구매 및 소비 시점을 동기화하여 재고비용을 줄이기 위하여 No-wait 접근 방법을 적용한다. 그런데 이러한 접근 방법은 소량 다빈도 운송 체계가 존재하는 경우 가능하다. 현재 물류의 추세와 제 3 자 물류 사업자의 등장은 소량 다빈도 운송을 가능하게 하고 있지만, 규모의 경제 법칙을 적용하여야 하는 경우도 빈번히 존재한다. 따라서 본 연구에서는 규모의 경제 법칙의 존재 여부를 고려하여 상위 생산자의 공급 시점과 하위 생산자의 구매 및 소비 시점을 동기화하려는 문제를 다룰 것이다.

본 연구에서 제시하는 문제는 2 부분으로 구성된다. 먼저, 공급사슬 총 비용을 최소화하기 위하여 각 작업(제품)에 대한 각각의 생산 단계에서 생산하여야 하는 생산량을 구하고, 나머지 부분에서는 리드타임을 최소화하는 작업 순서를 결정할 것이다. 2 절에서는 공급사슬 동기화를 위한 수리 모형을 제시한다. 3 절에서는 2 절에서 제시한 문제를 보다 짧은 시간에 좋은 해를 얻기 위하여 개발된 발견적 기법을 보이고 간단한 수치 예제를 통하여 그 성과를 비교할 것이다. 마지막으로 4 절에서 본 논문의 결론을 제시한다.

## 2. 생산 및 물류 계획의 동기화

본 절에서는 새롭게 제시하는 공급사슬 동기화 모형에 대하여 설명하고 최적의 생산량과 작업 순서를 결정하는 수리 모형을 제시한다. 사용되는 색인들과 기호들은 다음과 같다.

색인	
$i, j$	작업
$k$	생산 회차 $(1, \dots, K)$
$m$	생산자 $(1, \dots, M)$
$M + 1$	소매업자
$e$	규모의 경제 법칙에 적용 받지 않는 운송 수단으로 연결되는 기업들의 집합에 대한 순번
$m_1^e$	규모의 경제 법칙에 적용 받지 않는 운송 수단으로 연결되는 기업들의 $e$ 번째 집합에서의 최 상위 생산자

$m_2^e$	규모의 경제 법칙에 적용 받지 않는 운송 수단으로 연결되는 기업들의 $e$ 번째 집합에서의 최 하위 생산자
기호	
$N$	작업 개수
$E$	규모의 경제 법칙에 적용 받지 않는 운송 수단으로 연결되는 기업들의 집합 개수, 즉, $(E-1)$ 번의 규모의 경제 법칙에 적용 받는 운송 구간이 존재함
$p_{jkm}$	작업 $j$ 의 생산 회차 $k$ 에서 생산자 $m$ 의 단위 제품 당 생산 시간
$upc_{jkm}$	작업 $j$ 의 생산 회차 $k$ 에서 생산자 $m$ 의 단위 시간 당 생산 비용
$uhc_{jkm}$	작업 $j$ 의 생산 회차 $k$ 에서 생산자 $m$ 의 단위 시간 당 재고 유지 비용
$utvc_{jkm}$	작업 $j$ 의 생산 회차 $k$ 에서 생산자 $m$ 의 단위 제품 당 운송 변동 비용
$utfc_{jkm}$	작업 $j$ 의 생산 회차 $k$ 에서 생산자 $m$ 의 단위 운송 당 고정 비용
$s_{jkm}$	작업 $j$ 의 생산 회차 $k$ 에서 생산자 $m$ 의 작업 준비 시간
$usc_{jkm}$	작업 $j$ 의 생산 회차 $k$ 에서 생산자 $m$ 의 작업 준비 단위 시간 당 비용
$cd_j$	소매업자로서의 작업 $j$ 생산품에 대한 시간 당 고객 수요량
$D_{jm}$	작업 $j$ 에 대한 생산자 $m$ 으로의 수요량
$tg_m$	생산자 $m$ 에서 육상 운송과 같이 규모의 경제 법칙에 적용을 받지 않는 운송 수단을 이용하여 하위 생산자에게 전달하는데 필요한 리드타임의 길이
$ts_m$	생산자 $m$ 에서 해상 운송과 같이 규모의 경제 법칙에 적용을 받는 운송 수단을 이용하여 하위 생산자에게 전달하는데 필요한 리드타임의 길이
$u_j$	순환 작업 순서에서 $j$ 번째 작업의 수행 순서
$EOS1$	규모의 경제 법칙에 적용 받지 않는 운송 수단으로 연결되는 기업들의 집합에서 최 상위 생산자로만 구성된 집합
$EOS2$	규모의 경제 법칙에 적용 받지 않는 운송 수단으로 연결되는 기업들의 집합에서 최 하위 생산자로만 구성된 집합
$rlt(i, j)$	작업 $i$ 종료 후 작업 $j$ 가 수행됨으로 증가하는 리드타임
$subrlt(i-1, i, k-1, k)$	작업 $i-1$ 종료 후 수행되는 작업 $i$ 의 생산 회차 $k-1$ 종료 후 생산 회차 $k$ 가 수행됨으로 증가하는 리드타임

$drlt(i, k, m_1^e, m_2^e)$

규모의 경제 법칙에 적용 받지 않는 운송 수단으로 연결된 생산자  $m_1^e$  부터  $m_2^e$  까지의 공급사슬에 대하여 생산자  $m_2^e$  이후에 규모의 경제 법칙에 적용 받는 운송 수단으로 제품이 이송될 때 생산자  $m_2^e$  가 작업  $i$  의  $k$  번째 생산 회차에서 생산한 제품이 운송 시작 까지 대기하는 시간

$dllt(i, k, m_1^e, m_2^e)$

규모의 경제 법칙에 적용 받지 않는 운송 수단으로 연결된 생산자  $m_1^e$  부터  $m_2^e$  까지의 공급사슬에 대하여 생산자  $m_1^e$  으로 규모의 경제 법칙에 적용 받는 운송 수단으로 운송된 제품이 생산자  $m_1^e$  가 작업  $i$  의  $k$  번째 생산을 시작할 때 까지 대기하는 시간

결정 변수

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{작업 } i \text{ 를 마친 다음 작업 } j \text{ 가} \\ & \text{수행될 때} \\ 0, & \text{그 밖의 경우} \end{cases}$$

$y_{jkm}$       작업  $j$  의 생산 회차  $k$  에서 생산자  $m$  의 생산량

본 연구 전체에서는 다음과 같은 가정 사항을 두고 동기화 모형에 관한 연구를 진행한다. 제품의 수요는 확정적으로 결정되어 있다. 또한 운송 전 공급자가 만든 제품은 공급자의 재고 유지 비용 체계를 따른다. 반면 생산자는 원재료에 대한 재고 보관 비용을 원재료를 생산한 공급자의 체계를 따르는 것으로 본다. 게다가 운송 수단은 충분한 용량을 가지고 있다고 생각하고 공급사슬에서 첫 번째 위치한 공급자는 원재료에 대한 재고 유지 비용을 고려하지 않는다고 하자.

제안하는 공급사슬 동기화 모형은 다수의 작업 각각을 모든 생산자가 다수의 생산 회차로 나누어 수행한다. 상위 공급자가 생산한 원제품 혹은 부품은 하위의 생산자에게 공급되는데 상위 공급자가 생산을 마치면 즉시 하위 생산자에게 운송되며, 공급을 받는 즉시 하위 생산자는 생산을 시작한다. 즉 상위 공급자의 생산이 종료되는 시점과 운반되는 시점이 동기화되고, 원제품이 공급되는 시점과 하위 생산자의 생산 시작 시간이 동기화된다. 이는 소량 다빈도 운송을 지원하는 운송 수단이 존재하는 경우 가능하다. 이와는 달리 선박 운송과 같은 규모의 경제 법칙에 적용 받는 운송 수단이 사용되는 경우에는 운송 직전에 위치하는 공급자가 각각의 생산 회차에서 생산한 제품 혹은 부품은 운송이 이루어질 때까지 기다려야 한다. 또한 규모의 경제 법칙에 적용 받는 운송 수단을 통하여 공급받은 원재료 혹은 부품은 하위

생산자가 생산을 시작할 때까지 지연이 발생한다.

규모의 경제 법칙에 적용을 받는 운송 수단이 고려되었을 때 규모의 경제 법칙에 적용을 받는 운송 수단을 이용하여 생산한 제품을 하위 생산자에게 보내는 공급자와 같은 수단을 이용하여 원재료 혹은 부품을 공급받는 하위 생산자는 별도의 재고 비용을 고려하여야 한다. 생산 회차는 정해진 순서로 진행되나 작업 순서에 의하여 각각의 길이가 변동하게 된다. 따라서 공급사슬 총 비용을 최소화하는 생산 회차를 구하는 문제는 최적의 작업 순서 (1,...,N) 에 대하여 아래와 같은 수리 모형으로 나타낼 수 있다.

$$MIN \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{m=1}^M c_{ikm} + \frac{1}{2 \cdot cd_i} y_{ikM}^2 \cdot uhc_{ikM+1} \right] \quad (1)$$

subject to

$$c_{ik1} = y_{ik1} \cdot p_{ik1} \cdot upc_{ik1} + \frac{1}{2} y_{ik1}^2 \cdot p_{ik1} \cdot uhc_{ik1} + y_{ik1} \cdot utvc_{ik1} + utfc_{ik1} + s_{ik1} \cdot usc_{ik1} \quad \begin{matrix} m=1, \\ m \in EOS1, \\ m \notin EOS2 \end{matrix} \quad (2)$$

$$c_{ik1} = y_{ik1} \cdot p_{ik1} \cdot upc_{ik1} + \frac{1}{2} y_{ik1}^2 \cdot p_{ik1} \cdot uhc_{ik1} + y_{ik1} \cdot utvc_{ik1} + utfc_{ik1} + s_{ik1} \cdot usc_{ik1} + drlt(i, k, 1, 1) \cdot uhc_{ik1} \cdot y_{ik1} + ts_1 \quad \begin{matrix} m=1, \\ m \notin EOS1, \\ m \in EOS2 \end{matrix} \quad (3)$$

$$c_{ikm} = y_{ikm} \cdot p_{ikm} \cdot upc_{ikm} + \frac{1}{2} y_{ikm}^2 \cdot p_{ikm} \cdot uhc_{ikm} + \frac{1}{2} y_{ikm-1} \cdot y_{ikm} \cdot p_{ikm} \cdot uhc_{ikm} + y_{ikm} \cdot utvc_{ikm} + utfc_{ikm} + s_{ikm} \cdot usc_{ikm} + dllt(i, k, m, m_2^e) \cdot uhc_{ikm} \cdot y_{ikm} \quad \begin{matrix} m \neq 1, \\ m \in EOS1, \\ m \notin EOS2 \end{matrix} \quad (4)$$

$$c_{ikm} = y_{ikm} \cdot p_{ikm} \cdot upc_{ikm} + \frac{1}{2} y_{ikm}^2 \cdot p_{ikm} \cdot uhc_{ikm} + \frac{1}{2} y_{ikm-1} \cdot y_{ikm} \cdot p_{ikm} \cdot uhc_{ikm} + y_{ikm} \cdot utvc_{ikm} + utfc_{ikm} + s_{ikm} \cdot usc_{ikm} + drlt(i, k, m_1^e, m) \cdot uhc_{ikm} \cdot y_{ikm} \quad \begin{matrix} m \neq 1, \\ m \notin EOS1, \\ m \in EOS2 \end{matrix} \quad (5)$$

$$c_{ikm} = y_{ikm} \cdot p_{ikm} \cdot upc_{ikm} + \frac{1}{2} y_{ikm}^2 \cdot p_{ikm} \cdot uhc_{ikm} + \frac{1}{2} y_{ikm-1} \cdot y_{ikm} \cdot p_{ikm} \cdot uhc_{ikm} + y_{ikm} \cdot utvc_{ikm} + utfc_{ikm} + s_{ikm} \cdot usc_{ikm} + drlt(i, k, m, m) \cdot uhc_{ikm} \cdot y_{ikm} + dllt(i, k, m, m) \cdot uhc_{ikm} \cdot y_{ikm} \quad \begin{matrix} m \neq 1, \\ m \in EOS1 \\ \cap EOS2 \end{matrix} \quad (6)$$

$$c_{ikm} = y_{ikm} \cdot p_{ikm} \cdot upc_{ikm} + \frac{1}{2} y_{ikm}^2 \cdot p_{ikm} \cdot uhc_{ikm} + \frac{1}{2} y_{ikm-1} \cdot y_{ikm} \cdot p_{ikm} \cdot uhc_{ikm} + y_{ikm} \cdot utvc_{ikm} + utfc_{ikm} + s_{ikm} \cdot usc_{ikm} \quad \begin{matrix} m \neq 1, \\ m \notin EOS1 \\ \cup EOS2 \end{matrix} \quad (7)$$

$$drlt(i, k', m_1^e, m_2^e) = \sum_{k=k'}^{K-1} \left[ \begin{matrix} MAX_{l=m_1^e, \dots, m_2^e} \left\{ \sum_{h=m_1^e}^l (p_{ikh} \cdot y_{ikh} + tg_h) + s_{ik+1l} + \sum_{h=l}^{m_2^e} (p_{ikh} \cdot y_{ik+1h} + tg_h) \right\} - \sum_{m=m_1^e}^{m_2^e} (p_{ikm} \cdot y_{ikm} + tg_m) \end{matrix} \right] \quad (8)$$

$$dllt(i, k', m_1^e, m_2^e) = \sum_{k=0}^{k'-1} \left[ \begin{matrix} MAX_{l=m_1^e, \dots, m_2^e} \left\{ \sum_{h=m_1^e}^l (p_{ikh} \cdot y_{ikh} + tg_h) + s_{ik+1l} + \sum_{h=l}^{m_2^e} (p_{ikh} \cdot y_{ik+1h} + tg_h) \right\} - \sum_{m=m_1^e}^{m_2^e} (p_{ikm} \cdot y_{ikm} + tg_m) \end{matrix} \right] \quad (9)$$

$$\sum_k y_{ikm} = D_{im} \quad \forall (i, m) \quad (10)$$

$$D_{im} \cdot y_{ikm+1} = D_{im+1} \cdot y_{ikm} \quad \forall (i, m, k) \quad (11)$$

$$y_{ikm} \text{ Integer} \quad (12)$$

식 (1)은 목적식으로 공급사슬 총 비용을 의미한다. 모형에는 규모의 경제 법칙을 따르는 운송 수단이 고려되기 때문에 각 작업 및 생산 회차에 대한 비용 구조가 변화한다. 공급사슬을 구성하는 기업이 규모의 경제 법칙을 따르는 운송 수단을 사용하는 다양한 경우에 대한 작업, 생산 회차, 그리고 생산자에 따른 비용 구조는 식 (2) - 식 (7)와 같이 나타낼 수 있다. 생산한 제품을 규모의 경제 법칙을 따르는 운송 수단을 이용하여 하위 생산자에게 공급하는 공급자의 경우 각 생산 회차에서 생산된 제품이 운송이 시작하기까지 대기하는 시간은 식 (8)와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (9)은 규모의 경제 법칙에 적용 받는 운송 수단을 이용하여 원재료 혹은 부품을 공급받는 경우 각 생산 회차가 시작될 때까지 대기하는 시간 길이를 의미한다. 식 (10)은 모든 생산자가 특정 작업  $i$ 에 대하여  $K$  번의 생산 회차로 나누어 생산할 때 제품의 총 생산량은 해당 생산자가 할당 받은 특정 작업  $i$ 에 대한 수요량과 일치하여야 함을 의미한다. 식 (11)은 상위 공급자가 특정 작업  $i$ 에 대하여 특정 생산 회차  $k$ 에서 생산한 제품의 양은 하위 생산자가 생산하는 제품의

양에 대하여 일정한 비율  $D_{im} / D_{im+1}$ 을 지님을 의미한다. 이는 공급자가 공급한 원재료 혹은 부품의 양에 비례하여 하위 생산자의 생산량이 결정됨을 의미한다. 식 (12)은 생산량에 대한 정수 조건을 나타낸다.

특정 작업 순서에 대하여 공급사슬 총 비용을 최소화시키기 위한 각 생산 회차에서의 생산량 결정에 이어, 각 작업을 구성하는 생산 회차에서의 생산량이 알려진 경우 리드타임을 최소화하는 작업 순서를 결정하여야 한다. 그런데 규모의 경제 법칙의 적용을 받는 운송 수단이 사용되는 경우에는 해당 운송 구간을 기준으로 규모의 경제 법칙의 적용을 받지 않는 운송 수단으로 연결되는 생산자들의 집합 각각에 대한 리드타임을 구하여 그 총합을 구하여야 한다. 또한 규모의 경제 법칙에 적용 받는 운송 수단에 소요되는 시간이 리드타임을 계산할 때 추가로 더해져야 한다. 따라서 각 작업을 구성하는 생산 회차의 생산량이 알려졌을 때 리드타임을 최소화하는 작업 순서를 결정하는 문제는 아래와 같이 모형화할 수 있다.

$$MIN \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N rlt_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{e=1}^{E-1} ts_e \quad (13)$$

subject to

$$\sum_{i=0}^N x_{ij} = 1 \quad \forall j \quad (14)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (15)$$

$$u_i - u_j + n \cdot x_{ij} \leq n - 1 \quad \begin{matrix} i \neq j, \\ i = 1, 2, \dots, n, \\ j = 1, 2, \dots, n \end{matrix} \quad (16)$$

$$rlt_{ij} = \sum_{e=1}^E \left\{ \begin{matrix} MAX_{l=m_i^e, \dots, m_j^e} \left[ \sum_{h=m_i^e}^l (p_{ikh} \cdot y_{ikh} + tg_h) \right. \\ \left. + s_{jll} + \sum_{h=l}^{m_j^e} (p_{jlh} \cdot y_{jlh} + tg_h) \right] \\ - \sum_{m=m_i^e}^{m_j^e} (p_{ikm} \cdot y_{ikm} + tg_m) \\ + \sum_{k=2}^K subrlt(i, j, k-1, k) \end{matrix} \right\} \quad (17)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad (18)$$

$$u_i, u_j \geq 0 \quad \forall i, j \quad (19)$$

식 (13)은 문제의 목적식으로 규모의 경제 법칙을 적용 받는 운송 수단이 사용될 때의 리드타임을 의미한다. 식 (14) - 식 (16)은 외판원 문제의 기본 제약식이다. 식 (17)은 규모의 경제 법칙을 적용 받는 운송 수단이 사용될 때 작업  $i$ 가 종료한 다음 작업  $j$ 가 수행되는 경우 증가하는 리드타임을 의미한다. 식 (18)와 식 (19)는 변수의 이진 정수 제약과 부호 제약이다.

### 3. 휴리스틱 알고리즘의 개발

앞 절에서 제시된 문제는 다음과 같은 이유로 최적해를 구하는데 많은 시간이 필요하다. 먼저, 생산량을 결정하는 수리 모형은 할당 문제로 모형화되었다. 만약 문제의 크기가 증가한다면 최적해를 구하는데 상당히 긴 시간이 소요된다. 다음으로 작업 순서를 결정하는 문제는 외판원 문제로 모형화되었다. 그런데 외판원 문제는 문제의 크기가 증가할 때 최적해를 구하는데 오랜 시간이 필요한 대표적인 NP-hard 문제로 알려져 있다. 게다가 제시된 2개의 수리 모형에서는 일정한 작업 순서가 알려진 경우 생산량을 결정하거나 일정한 생산량이 알려진 경우 작업 순서를 결정하였다. 이는 최적 생산량의 결정과 최적 작업 순서의 결정이 서로 영향을 주기 때문이다. 따라서 보다 짧은 시간에 최선의 생산량과 작업 순서를 동시에 구하기 위하여 휴리스틱 알고리즘의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 최선의 생산량과 작업 순서를 결정하기 위하여 대표적 메타휴리스틱 알고리즘인 Simulated annealing과 Genetic algorithm을 기반으로 다양한

휴리스틱 알고리즘을 개발한다. 그런데 본 연구에서 사용되는 Simulated annealing과 Genetic algorithm을 적용하기 위하여 초기해의 생성과 인접해를 생성하는 다양한 방법이 고려되어야 한다. 사용하는 초기해와 인접해 생성 방법에 따라 휴리스틱 알고리즘의 성능에 큰 영향을 주기 때문이다. 따라서 본 연구에서 개발하는 휴리스틱 알고리즘에는 문제의 특성을 고려하여 다양한 인접해 생성 방법이 제시될 것이다. 본 연구에서 개발되는 5가지의 휴리스틱 알고리즘은 아래와 같이 정리할 수 있다.

1. HSSCSA1 알고리즘

- ①초기 작업 순서 발생 : 임의 발생
- ②초기 생산량 발생 : 균등 배분 생산량 발생
- ③인접 작업 순서 발생 : AIS (Adjacent Interchange Scheme)
- ④인접 생산량 발생 : 2진수 해 변경 방법
- ⑤메타 휴리스틱 : Simulated Annealing
- ⑥종료 조건 : 정해진 탐색 횟수에 이르거나 개선이 없는 횟수가 일정 이상일 때

2. HSSCSA2 알고리즘

- ①초기 작업 순서 발생 : 임의 발생
- ②초기 생산량 발생 : 균등 배분 생산량 발생
- ③인접 작업 순서 발생 : 3-Optimal algorithm
- ④인접 생산량 발생 : 2진수 해 변경 방법
- ⑤메타 휴리스틱 : Simulated Annealing
- ⑥종료 조건 : 정해진 탐색 횟수에 이르거나 개선이 없는 횟수가 일정 이상일 때

3. HSSCSA3 알고리즘

- ①초기 작업 순서 발생 : 임의 발생
- ②초기 생산량 발생 : 균등 배분 생산량 발생
- ③인접 작업 순서 발생 : Radjendran(1994)'s algorithm
- ④인접 생산량 발생 : 2진수 해 변경 방법
- ⑤메타 휴리스틱 : Simulated Annealing
- ⑥종료 조건 : 정해진 탐색 횟수에 이르거나 개선이 없는 횟수가 일정 이상일 때

4. HSSCGA1 알고리즘

- ①초기 작업 순서 발생 : 임의 발생
- ②초기 생산량 발생 : 균등 배분 생산량 발생 후 2진수 해 변경 방법 수행
- ③Crossover : 2진수 해 변경 방법 응용
- ④Mutation : 2진수 해 변경 방법 응용
- ⑤Selection : Roulette wheel Selection
- ⑥메타 휴리스틱 : Genetic algorithm
- ⑦종료 조건 : 정해진 탐색 횟수에 이르거나 개선이 없는 횟수가 일정 이상일 때

5. HSSCGA2 알고리즘

- ①초기 작업 순서 발생 : 임의 발생
- ②초기 생산량 발생 : 균등 배분 생산량 발생
- ③Crossover : 2진수 해 변경 방법 응용
- ④Mutation : 2진수 해 변경 방법 응용

⑤Selection : Roulette wheel Selection, Elitist Selection

⑥메타 휴리스틱 : Genetic algorithm

⑦종료 조건 : 정해진 탐색 횟수에 이르거나 개선이 없는 횟수가 일정 이상일 때

다양한 휴리스틱 알고리즘을 적용하기 위한 해의 구조는 아래 그림 1과 같다. 작업 순서를 의미하는 해는 작업 번호를 나타내는  $N$  개의 해로 구성된다. 생산량을 나타내는 해는 모든 작업, 생산 회차, 그리고 생산자에 할당되는 각 생산량을 2진화한 해를 사용한다. 또한 인접해를 생성하는 것을 고려하여 해의 값이 증가하거나 감소하는 여유 공간을 두어야 한다.

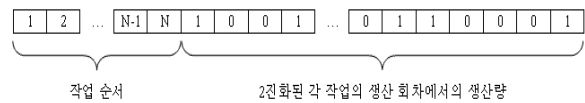


그림 1. 해의 구조

HSSCSA1은 공급사슬 총 비용과 리드타임의 최소화를 위한 각 생산 회차에서의 생산량과 작업 순서를 결정하는 문제의 해를 찾기 위하여 메타휴리스틱 중 하나인 Simulated annealing을 기본으로 한 휴리스틱 알고리즘이다. 초기 작업 순서는 임의로 발생하며, 초기 생산량은 모든 생산자의 작업에 대한 모든 회차에 균등하게 배분된다. 정수 제약을 만족하기 위하여 최종 회차의 생산량이 조정되어야 한다. 인접 작업은 AIS방법을 이용한다. 이 방법은 임의의 작업을 선택하고 난수를 발생시켜 0.5 이하의 난수가 발생된 경우 임의의 선택된 작업 왼편의 작업과 순서를 변경하고, 0.5 초과인 난수가 발생된 경우 임의의 선택된 작업 오른편의 작업과 순서를 변경하는 방법이다. 인접 생산량은 본 연구에서 제시하는 2진수 해 변경 방법을 사용한다. 본 문제에서는 모든 생산량이 2진화되어있다. 또한 각 생산 회차에 할당된 생산량의 총 합은 당해 생산자의 수요량과 일치하여야 한다. 게다가 상위 생산자의 특정 회차에 할당된 생산량의 변동은 상위 및 하위 생산자의 각 생산 회차에 할당하는 생산량의 변동을 필요로 한다. 그래서 본 연구에서 제안하는 2진수 해 변경 방법은 각 생산자가 총 수요량 조건을 만족하면서 각 생산 회차에서의 생산량을 변경하는데, 특정 생산 회차에서의 생산량을 감소시킨 후 동일 작업에 대한 다른 생산 회차에 대한 생산량을 감소된 생산량만큼 증가시킨다. 이 과정은 모든 작업 마다 수행되며, 생산자 간 수요량 비율 제약을 만족시키기 위하여 모든 생산자의 동일한 작업과 생산 회차에 할당된 생산량을 생산자 간 수요량의 비율로 조정한다. 이 과정은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 만약 그림 2의 경우에 속하지 않는 경우는 다른 2진수를 선택하여 변환을 실시한다.

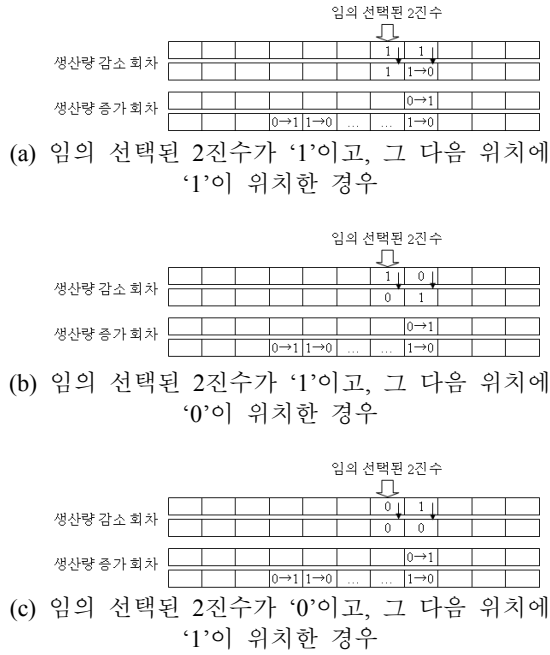


그림 2. 인접 생산량을 생성하기 위한 2진수 해 변경 방법

HSSCSA2는 HSSCSA1과 같이 공급사슬 총 비용과 리드타임의 최소화를 위한 각 생산 회차에서의 생산량과 작업 순서를 결정하는 문제의 해를 찾기 위하여 메타휴리스틱 중 하나인 Simulated annealing을 기본으로 한 휴리스틱 알고리즘이다. 하지만 인접 작업 순서를 생성하는 방법으로 3-Optimal algorithm(Lin과 Kernighan, 1973)을 사용하는 것이 다르다. HSSCSA3의 경우도 HSSCSA1과 HSSCSA2와 유사하나 인접 작업 순서 생성 방법으로 Radjendran(1994)의 알고리즘을 사용한다. HSSCSA1은 공급사슬 총 비용과 리드타임의 최소화를 위한 각 생산 회차에서의 생산량과 작업 순서를 결정하는 문제의 해를 찾기 위하여 메타휴리스틱 중 하나인 Genetic algorithm을 기본으로 한 휴리스틱 알고리즘이다. 초기 작업 순서와 초기 생산량은 앞의 알고리즘과 같다. 생산량을 나타내는 해에 대한 Crossover 과정은 모집단에서 선택된 2개의 염색체 중 하나를 대상으로 2진수 해 변경 방법을 사용하여 임의로 선정된 회차의 생산량을 감소하거나 증가시키고 나머지 염색체에 대응하는 회차 부분의 값을 증가시키거나 감소시킨다. 이는 모든 작업에서 반복된다. 작업 순서를 나타내는 해에 대한 Crossover는 OX(Order crossover)방법(Davis, 1985)을 사용한다. 생산량 결정을 위한 Mutation은 모집단에서 임의로 선택한 염색체를 대상으로 작업 중 하나를 선택한다. 선택된 작업에서 2개의 생산 회차를 임의로 선정하고 다음 선택한 회차에 대해서 앞의 2진수 해 변환 방법을 적용한다. 작업 순서 결정을 위한 Mutation 방법으로는 Reciprocal Exchange Mutation 방법 (Gen과 Cheng, 1997)을 사용한다. HSSCSA2는 HSSCSA1에 최선의 해가

모집단에 존재하도록 Elitist selection을 추가한 것이다.

개발된 5개의 휴리스틱 알고리즘의 성능을 비교하기 위하여 간단한 수치 예제가 수행되었다. 3개의 공장으로 구성된 공급사슬에서 각 작업을 3번의 생산 회차로 나누어 생산하는 경우 모든 운송 과정이 규모의 경제 법칙의 적용을 받지 않을 때 작업 개수의 변화에 따른 총 비용의 변화와 리드타임의 변화를 관찰하였다. 모든 모수의 값은 편의상 Uniform(1,5) 따르도록 발생시켰다. 단 시간당 고객 수요량은 Uniform(1,10), 생산자 별 할당 수요량은 50·Uniform(1,4), 육상 및 해상 운송 시간은 각각 Uniform(1,3), Uniform(1,10)을 따르는 난수를 사용하였다. 모든 알고리즘에서는 100번의 탐색 기간 동안 개선되지 않는 경우 종료토록 하였다. 성능을 측정하기 위하여 발생된 모수를 기준으로 30번씩 반복 실험 되었으며, 발생된 모수의 기준으로 발견된 최소의 공급사슬 총 비용과 리드타임에 대한 평균오차(Mean error)값을 사용하였다. 이 값은 작을수록 선호된다. 작업의 개수를 5, 10, 15, 그리고 20으로 증가시키면서 수집한 평균 오차의 크기는 그림 3과 그림 4에 정리되어 있다. 작업 개수의 변화에 따른 총 비용의 변화를 살펴보면 전체적으로 작업의 개수가 증가할수록 평균오차의 값이 줄어드는 것을 관찰 할 수 있다. 또한 작업 개수가 증가할수록 HSSCSA3의 성능이 개선되는 것을 볼 수 있다. 작업 개수의 변화에 따른 리드타임의 변화를 살펴보면 HSSCSA3의 결과가 다른 알고리즘들에 비하여 항상 나은 결과를 보였다.

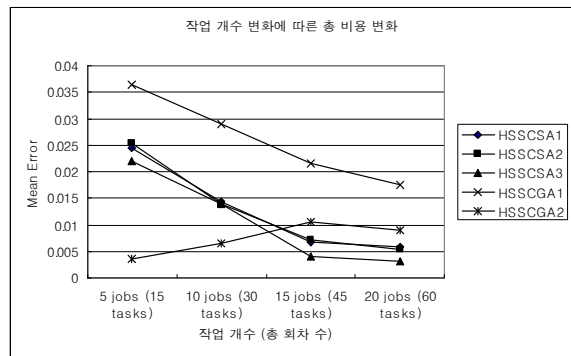


그림 3. 작업 개수 변화에 따른 총 비용의 변화

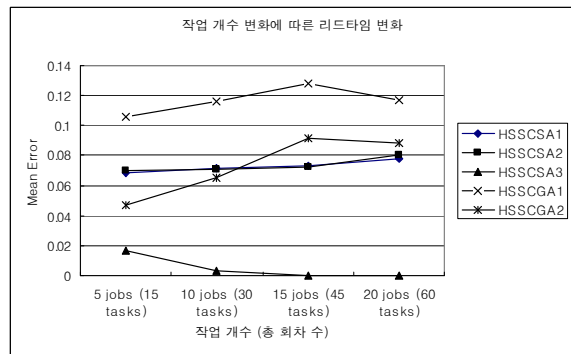


그림 4. 작업 개수 변화에 따른 리드타임의 변화

#### 4. 결론

본 연구에서는 공급사슬 동기화를 위하여 공급자의 공급시점과 운송 시작 시점, 그리고 운송 완료 시점과 생산자의 생산 시작 시점을 동기화시키는 새로운 동기화 방법을 제시하였다. 이러한 동기화를 표현하기 위하여 No-wait 접근 방법이 사용되었다. 또한 No-wait 접근 방법이 사용되기 위하여 필요한 규모의 경제 법칙에 적용 받지 않는 소량 다빈도 운송 방법을 고려하여 모든 작업이 수회의 생산 회차로 나누어 수행되도록 동기화 방법을 제시하였다. 게다가 규모의 경제 법칙에 적용을 받는 운송 수단을 고려할 수 있도록 하였다.

이후 공급사슬 총 비용을 최소화하는 각 생산 회차에서의 생산량의 결정과 리드타임의 최소화를 위한 작업 순서를 결정하는 수리 모형을 제시하였다. 본 문제의 경우 문제의 크기가 커지면 짧은 시간에 해를 찾기 어렵고, 생산량의 결정과 작업 순서의 결정이 서로 영향을 주고 있기에 생산량과 작업 순서를 동시에 결정하도록 휴리스틱 알고리즘이 개발되었고, 간단한 수치 예제를 통하여 성능을 비교하였다.

본 연구에서 제시한 각각의 휴리스틱 알고리즘은 더욱 좋은 성능을 지니기 위하여 개발된 각각의 절차를 개선할 필요가 있다. 또한, 공급사슬을 구성하는 모든 주체들이 항상 생산 및 운송 과정에서 동기화를 이루기 위해서 엄격한 관리가 필요하다. 하지만 항상 동기화 계획을 만족시키기는 어렵다. 따라서 생산자들에게서 발생하는 생산 시간 및 운송 시간의 증가와 같은 불확실성을 고려한 생산 및 운송 계획의 동기화에 대한 연구가 필요하다.

#### 참고문헌

진형인 (2002), *국제물류의 이해*, 박영사, 대한민국.  
 Aderohunmu, R. Mobolurin, A., and Bryson, N. (1995), Joint Vendor-buyer Policy in JIT Manufacturing, *Journal of Operational Research Society*, **46**(3), 375-385.  
 Ashcroft, J. (2005), *Eight Dimensions of Supply Chain Synchronization*, <http://logistics.about.com/od/synchronizeds/cm/> (accessed Jun 1 2005).  
 Davis, L. (1985) Applying Adaptive Algorithms to domains, *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 162-164.  
 Deloitte & Touche (2003), *Supply Chain Synchronisation in Retailer Distribution: the response to ECR*, <http://www.deloitte.com> (accessed Jun 1 2005).  
 Garcia, J.M., Lozano, S., and Canca, D. (2004), Coordinated Scheduling of Production and Delivery from Multiple Plants, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **20**, 191-198.  
 Gen, M. and Cheng, R. (1997), *Genetic algorithms and engineering design*, John Wiley & Sons, NY.  
 Hahn, C.K., Duplaga, E.A., and Hartley, J.L. (2000), *Supply-Chain Synchronization: Lessons from Hyundai*

Motor Company, *Interfaces*, **30**, 32-45.  
 Khouja, M. (2003), Synchronization in Supply Chains: Implications for Design and Management, *Journal of Operational Research Society*, **54**, 984-994.  
 Kim, S. and Ha, D. (2003), A JIT Lot-Splitting Model for Supply Chain Management: Enhancing Buyer-Supplier Linkage, *International Journal of Production Economics*, **86**, 1-10.  
 Lin, S. and Kernighan, B. W. (1973), An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem, *Operations Research*, **21**, pp. 498-516.  
 Lu, L. (1995), A One-Vendor Multi-Buyer Integrated Inventory Model, *European Journal of Operational Research*, **81**, 312-323.  
 Pearson, M. (2003), An Equilibrium Solution to Supply Chain Synchronization, *IMA Journal of Management Mathematics*, **14**, 165-185.  
 Rajendran, C. (1994), A No-wait Flowshop Scheduling Heuristic to Minimize Makespan, *Journal of Operational Research Society*, **45**, 472-478.  
 Takahashi, K., Myreshka, and Hirotsani, D. (2005), Comparing CONWIP, Synchronized CONWIP, and Kanban in Complex Supply Chains, *International Journal of Production Economics*, **93-94**, 25-40.  
 Vergara, F.E., Khouja, M., and Michalewicz, Z. (2002), An Evolutionary Algorithm for Optimizing Material Flow in Supply Chains, *Computers and Industrial Engineering*, **43**, 407-421.  
 Wang, W., Fung, R.Y.K., and Chai, Y. (2004), Approach of Just-in-time Distribution Requirements Planning for Supply Chain Management, *International Journal of Production Economics*, **91**, 101-107.  
 Webster's Online Dictionary (2005), *Synchronization*, <http://www.websters-online-dictionary.org> (accessed: Jun 7 2005).