다계층 공급사슬 환경에서 다자간 협상을 통한 최적 공급사슬 구성

Optimal Supply Chain Formation Using Multilateral Negotiation in Multi-layer Supply Chain Environment

조재형[a], 김현수[b], 최형림[c], 홍순구[d], 손정하[e], 강무홍[f]

[a] 부산외국어대학교 국제통상지역원
Tel: +82-51-640-3473, Fax: +82-51-640-3466, E-mail:chojh@pufs.ac.kr

[bcd] 동아대학교 경영대학 경영정보과학부
Tel: +82-51-200-{7478, 7477, 7488} Fax: +82-51-200-7481, E-mail:{hskim, hrchoi, shong}@dau.ac.kr

[ef] 동아대학교 경영대학 경영정보학과 대학원
Tel: +82-51-200-{7488, 7477}, E-mail: son@busanssm.com, mongy@dau.ac.kr

Abstract

공급사슬의 구성문제는 주문의 동적환경를 고려하여 전체 관점에서 스케줄링되어야 한다. 이러한 공급사슬구성문제를 본 연구에서는 에이전트 협상 방법론을 통해 해결하고자 한다. 에이전트 협상은 공급사슬망을 경쟁적 관계로 이해하고 개별목적을 가진 구성원 에이전트간의 협상과정을 통해 재스케줄링이 발생되어 공급사슬을 구성하게된다. 지금까지의 연구는 공급사슬 상에서 수직적 통합(vertical integration)을 중심으로 조직의 유연적 조정에 초점이 맞추어졌다. 그러나 본 문제에서는 다수의 구매자, 제조자, 공급자간의 3 단계 과정에서 협력적 관계를 통해 개별적 이익을 최대화하면서 공급사슬 전체의 관점에서도 비용 최적화를 이룰 수 있는 다자간 협상방법론을 제안한다. 본 협상방법론의 최적화 여부와 효율성을 Branch&Bound 알고리즘과 비교하여 검증하였다.

Keywords: 공급사슬 구성, 에이전트 협상, SET 모델

1. 서론

공급사슬 문제에서 서비스수준과 비용은 서로 상충관계(trade-off)가 있으나 기업은 효율적인 공급사슬관리를 통해 높은 서비스 수준과 낮은 비용을 동시에 달성하려고 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해 공급사슬의 효율적 설계와 운영을 통해 공급사슬과 관련된 불확실성을 최소화 하는데 지금까지 많은 연구가 이루어져 왔다. 또한 공급사슬의 개별 참여자들의 목적으로는 공급사슬 전체의 효율성과 효과성을 극대화시키기 힘들다 [8]. 그러므로 공급사슬 구성원간의 협력적 노력을 통해 고객의 요구에 즉각적으로 대응할 수 있어야 한다. 이것은 공급사슬 전체의 관점에서 관리할 수 있도록 통합적 개념이 필요하다. 이는 전통적으로 생산관리에서부터 수급불균형을 해소하기 위한 노력들이 이루어져 왔고 일반적으로 총비용을 줄이는데 중점을 두었다[4]. 그러나 지금까지의 연구는 공급사슬 상에서 지배적인 영향력을 갖는 기업들이 협력업체를 선정하고 업무를 할당하는데 있어, 통합 스케줄링과 같은 수직적 통합(vertical integration)의 유연적 조정에 초점을 두었다[8, 11].

본 연구에서는 공급사슬의 수직적 관계에서 벗어나 수평적 관계에 놓인 참여자간의 경쟁적 관계를 중점적으로 다루었다. 이러한 경쟁적 관계에서 정보의 공유가 없는 일정한 수의 참여자들은 상대방의 가격에 대한 정보만을 가지고 의사결정을 하는 것이 일반적이다[5, 1]. 그러나 수평적 관계에 놓인 참여자들은 경쟁적 관계가 우선적으로 유지되나 더 큰 이득을 위해서 자신의 일부 또는 전체 주문에 대한 정보를 서로 공유할 수 있는 전략적 관계를 가질 수 있으며 이를 본 논문에서는 협력적 공급사슬 환경으로 정의하였다. 그러므로 가격에 의한 의사결정 시 공급사슬에 존재하는 다수의 주문을 생산하기 위해 구매자-제조자-공급자의 3 계층에서 이루어지는 다자간 협상을 통해 각 구성원은 개별적 이익을 최대화하는 동시에 공급사슬 전체의 관점에서도 비용 최적화를 이룰 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 공급사슬구성 문제를 SET 모델 관점에서 비용구성과 스케줄링을 정의하였고, 3 장은 공급사슬망에서 할당문제가 NP-hard문제이며, 이를 위한 최적화 기법 중 하나인 분지한계법을 응용하였다. 4 장에서는 최적공급사슬 구성을 위한 방안으로 에이전트 협상방법론을 제시하였으며, 5 장에서는 실험을 통해 본 협상방법론의 최적화 여부와 성능을 검증하였다. 결론에서는 본 연구의 기여점과 향후 연구를 제안하였다.

2. 공급사슬구성 문제

2.1 SET 모델(Single machine Earliness/Tardiness Model)

본 연구에서는 제조자와 공급자가 단일기계에서 조기생산(earliness)과 지연생산(tardiness)을 동시에 고려한 비정규평가함수(irregular measure)를 고려하였다. SET모델은 Baker와 Scudder(1990), Kim Y.D(1994) 등 지난 수십년간 스케줄링 연구에서 제안되었으며, 가장 기본적인 E/T모델의 목적함수는 다음과 같다.

$$f(S)=\sum_{i=1}^{n}[\alpha_i(d_i-C_i)^+ +\beta_i(C_i-d_i)^+]=\sum[\alpha_i E_i+\beta_i T_i]\cdots ①$$

E_i : earliness, T_i : tardiness
C_i : completion date, d_i : due date
$E_i = \max\{0, d_i-C_i\} = (d_i-C_i)^+$
$T_i = \max\{0, C_i-d_i\} = (C_i-d_i)^+$
αi, βi : a unit earliness penalty, a unit tardiness penalty

<식1>에서 지연생산이 납기일 준수라는 고객과의 신뢰를 지키기 못함으로써 발생하는 비용으로 볼 수 있다면, 조기생산은 재고비용과 관련된 비용으로 모두 제조자가 부담해야 할 비용이다. 그러므로 이상적인 일정계획은 모든 작업들을 정확하게 각각의 납기일에 맞추는 것이다. 특히 납기와 작업 완료시점간의 편차를 최소화하는 것이 목적이며 이는 곧 지연생산비용과 조기생산비용의 합을 최소화하는 것이다(<식2>참조) [2, 6, 7, 9].

$$Min\, f(S)=\sum_{i=1}^{n} \mid C_i-d_i \mid =\sum (E_i+T_i) \quad \cdots\cdots ②$$

2.2 비용의 구성

본 문제는 주문-제조업체(Make-To-Order)의 경우로써 고객의 주문이 접수된 후에 제품생산이 이루어지는 경우로, 제조자는 재고를 확보하지 않고 있다. 제조자는 구매자로부터 주문의뢰 이후 공급자로부터 필요한 부품을 공급받게 된다. 제조자는 <식3>과 같이 납기일을 중요시하는 제조비용, 공급비용, 지연생산비용, 조기생산비용으로 구성된 CTP 함수(Capable To Promise)를 고려한다. CTP 함수는 각 주문의 공정순서에 따라 달라지고 각 제조자는 주문에 따라 자신만의 CTP함수를 가지고 있다.

$$f_{CTP}=f_{manufacturing}+f_{supplying}+f_{tardiness}+f_{earliness}\cdots ③$$

특히 작업의 일정이 납기일을 준수하지 못하는 문제(Restricted Problem)를 고려하였는데 이는 작업의 공정(processing time)이 각 주문마다 정해진 납기일(distinct due date)을 초과하는 경우이다[7].

본 문제에서 다루게 되는 공급사슬구성의 범위는 다수 구매자, 다수 제조자, 다수의 공급자의 관계를 다루었다. 다수의 구매자는 1개 이상의 주문을 공급사슬망에 존재하는 모든 제조자에게 의뢰하게 된다. 주문견적 의뢰를 받은 제조자는 각 주문에 필요한 부품견적을 공급자에게 요청하게 되며, 부품견적비용을 토대로 제품 생산에 대한 최적의 일정계획을 수립하게 된다. 이때 각 제조자간에 생산하는 제품 품질간에는 차이가 없으며 단지 CTP함수에 따라 생산비용의 차이만 있는 것으로 가정한다. 또한 각 구매자가 주문을 의뢰하는 시기(time)가 같거나 비슷한 시기에 들어온 것으로 가정한다.

그러므로 본 문제는 구매자의 주문을 생산하기 위해 공급사슬망 2계층에서 발생하는 제조자의 제조비용과 공급자의 공급비용을 전체 공급사슬망 관점에서 최소화하는데 있다. 본 문제의 목적함수 및 제약조건, 그리고 각 변수의 정의는 다음과 같다.

$$Min\sum_{i}\sum_{j}\sum_{k}^{s,n,n_j} x_{ikj}(mc_{ijk}^{s}+fc_{ijk}^{s}+tard_j^{s}\times T_{ijk}^{s}+earl_j^{s}\times T_{ijk}^{s})+$$
$$\sum_{i}\sum_{j}^{m,n} y_{ij}(mc_{ij}^{m}+fc_{ij}^{m}+tard_j^{m}\times T_{ij}^{m}+earl_j^{m}\times T_{ij}^{m})$$

$$s.t.\ \sum_{i}^{m} y_{ij}=1,\quad \forall j$$
$$\sum_{i}^{s} x_{ikj}=1,\quad \forall k,\ \forall j$$
$$Variables\, x_{ikj}=0\ or\ 1,\ y_{ij}=0\ or\ 1$$

x_{ikj} : a variable indicating supplier i produces component k for order j

y_{ij} : a variable indicating manufacturer i produces order j

m : number of manufacturers

s : number of suppliers

n : number of orders

n_j : number of components for order j

mc^s_{ijk} : manufacturing cost of supplier i for component k for order j

fc^s_{ijk} : fixed cost of supplier i for component k for order j

$tard^s_j$: suppliers' marginal penalty cost for missing delivery date for order j

$earl^s_j$: suppliers' marginal penalty cost for inventory for order j

T^s_{ijk} : time by which supplier i's delivery of component k for order j is late. This is function of sequence of x_{ikj}

mc^m_{ij} : manufacturing cost of supplier i for order j

fc^m_{ij} : fixed cost of supplier i for order j

$tard^m_j$: manufacturers' marginal penalty cost for missing delivery date for order j

$earl^m_j$: manufacturers' marginal penalty cost for inventory for order j

T^m_{ij} : time by which manufacturer i's delivery of order j is late. This is function of sequence of y_{ij}

2.3 스케줄링

먼저 제조자는 다수의 구매자로부터 주문에 대한 견적을 받게되며, 제조 스케줄링을 위해 다수의 공급자에게 부품견적을 의뢰하게 된다. 이때 각 단계에서 발생하는 견적의뢰는 가주문의 상태이므로, 각각의 주문을 독립적으로 인식하여 처리한다. 이것은 먼저 들어온 주문을 E/T모델을 고려하여 <그림1>과 같이 각 주문의 납기일에 맞추어 견적을 제시하게 된다.

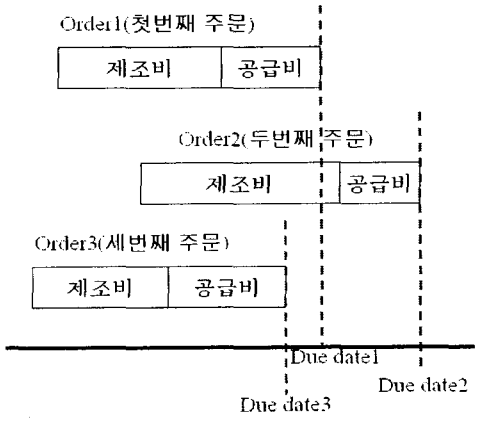

그림 1-각 개별주문을 위한 스케줄링

이후 구매자는 다수의 제조자로부터 받은 제조비용 중 가장 저렴하게 제시된 제조자에게 주문을 의뢰하게 된다. 주문의뢰를 받은 제조자는 이미 가장 저렴한 공급비용의 공급자를 선정한 상태이므로 이들에게 부품의뢰를 하게된다. 이때 각 단계에서 발생하는 주문의뢰는 확정주문의 상태이다.

그러나 확정주문은 가주문 때와는 달리 하나의 공급자에게 다수의 제조자로부터 부품의뢰가 들어오거나, 하나의 제조자에게 다수의 구매자로부터 주문의뢰가 들어올 경우, 다수의 주문을 동시에 고려하여 재스케줄링하게 된다. 결국, 동시주문을 고려하여 재스케줄링 함으로써 조기생산과 지연생산이 발생되고, 이때 공급자와 제조자는 가주문 견적 시에 산출되었던 초기비용보다 상승하게 된다. 이러한 조기생산과 지연생산의 추가비용은 납기와 작업 완료시점간의 편차만큼 증가하게 된다 (<식 2> 참조). <그림2>에서는 확정주문이 하나의 제조자 또는 공급자에게 2개가 발생됨으로써 동시스케줄링으로 변화되는 과정을 살펴볼 수 있다.

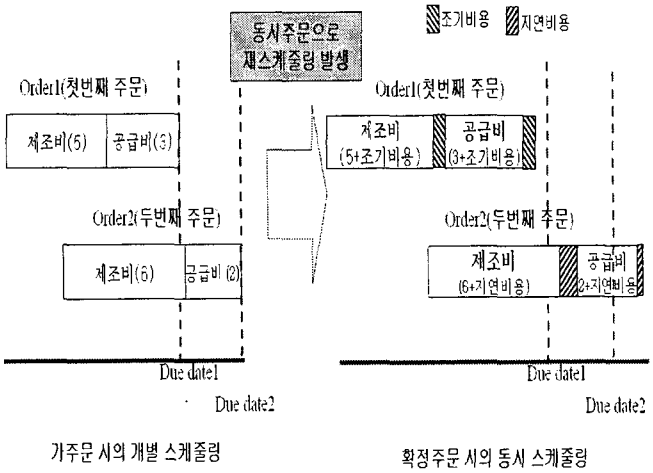

그림 2-동시주문을 고려한 SET모델에서의 순차적 스케줄링

3. 할당을 위한 최적화 기법

3.1 공급사슬망에서의 최적할당 문제

최적 공급사슬 구성문제는 결국 전체 공급사슬망에 존재하는 n개의 주문을 n개의 구성원에게 어떻게 할당할 것인가의 문제로 요약된다. 그리고 본 구성의 결과가 전체공급사슬에서 최소의 비용으로 달성되어야 한다. 그러나 어떤 주문을 어떤 구성원에게 얼마만큼 할당할 것인가는 동적환경을 고려함으로써 수시로 변화될 수 있다. 이러한 동적환경의 고려는 구성원의 실시간 스케줄링으로 반영된다. 그러므로 공급사슬망에서의 최적 할당 문제는 반드시 스케줄링과 병행되어야 한다. 지금까지의 연구에서는 하나의 제조자가 다수의 협력업체를 선택하는 문제와 같이 할당을 결정하는

참여자가 통합 스케줄링을 통해 하위 협력업체의 최적 공급사슬망을 구성하였다. 그러나 앞서 제시한 바와 같이 할당을 결정하는 참여자가 다수가 존재하고 하위의 협력업체들이 경쟁적 관계에 놓여 있을때는 통합 스케줄링만으로 문제를 해결할 수 없다.

표 1-공급사슬에서 에이전트와 주문의 조합을 위한 할당문제

	Order Combination						
Agent	{1}	{2}	{3}	{1,2}	{1,3}	{2,3}	{1,2,3}
A	80	60	50	150	160	150	220
B	30	90	20	130	**60**	140	200
C	80	**40**	40	140	130	100	210

예를 들어 <표1>에서는 3개의 에이전트와 3개의 주문이 주어진 상황에서 어떤 에이전트에게 어떤 주문을 할당할 것인지를 결정하는 문제이다. 위 표에서 주문 1과 3은 에이전트 B에게 할당하고, 주문 2는 에이전트 C에게 할당되었을 때 전체 공급사슬의 비용은 최소가 된다. 그러나 참여하는 에이전트의 수와 주문의 수가 n개가 되었을 때 본 문제는 $n\cdot(n-1)\cdot(n-2)\cdot\ldots\cdot2\cdot1=n!$로 n이 증가할수록 계산 복잡도(computational complexity)는 급증하게 된다[10]. 할당문제에서 전통적 방법론인 Hungarian 알고리즘도 $n\cdot n$ 문제에서 복잡도는 $O(N^3)$으로 최악의 경우(worst-case)를 도출하는 것으로 알려져 있다[3].

그러므로 주문의 조합에 따른 각 에이전트의 비용을 모두 알아야 하는 상황이므로 이를 통합스케줄링만으로 해결하는 것은 다수의 참여자와 경쟁적 관계를 고려할 때 현실적으로 해결 불가능하다.

결국 본 문제는 최소의 스케줄링 횟수, 즉 최소의 복잡도를 고려한 최적의 공급사슬을 어떻게 구성하는가의 문제가 되며, 특히 다수의 구매자가 경쟁관계에 놓인 다수의 제조자와 공급자를 선택해야 하는 3계층 공급사슬망으로 확대하여 고려하고자 한다.

3.2 분지한계법(Branch & Bound)

공급사슬망 할당 문제의 최적해를 구하는 방법 중 하나로 분지한계법(Branch & Bound)을 살펴볼 수 있다. 분지한계법으로 본 문제를 해결할 경우, 앞서 문제정의에서 서술한 바와 같이 공급사슬망 환경이 경쟁적 관계에 있으므로, 하나의 참여자(제조자 또는 공급자)가 모든 주문을 처리하는 경우와 다른 참여자와 함께 주문을 나누어 처리하는 경우로 나뉘어진다. 즉, 참여자간 주문의 수를 어떻게 배분하느냐가 중요하다.

기존의 분지한계법에서는 지금까지의 모든 경로를 다 기억해서 가장 최소의 경로로만 계속 분지하고 그 최소값이 한계로 설정되어 그 이상의 값이 나오면 분지를 하지 않는다. 그러나 본 문제에서는 일반적인 스케줄링에서의 분지한계법과는 달리 하위의 분지가 상위의 한계값보다 크다고 할지라도 다시 2단계 하위의 분지에서 최소값이 도출될 수 있으므로 결국 완전검색이 이루어져야 한다.

<표1>과 같은 문제가 주어질 때, 참여자와 주문의 조합을 고려하여 발생하는 스케줄링 횟수는 총 21회가 이루어져야 한다. 결국 분지한계법은 모든 비용을 안다고 가정함으로써 각 분지별로 각 비용 테이블을 나타낼 수 있다. <그림3>은 <표1>을 나타낸 참여자-주문조합별 분지 테이블을 나타낸 경우이다.

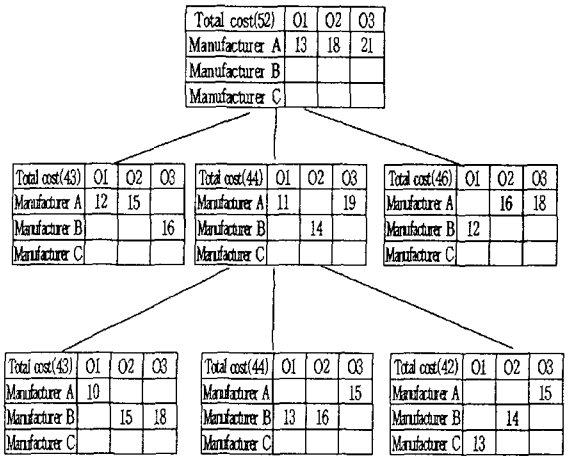

그림 3-하나의 참여자에 동시주문이 발생되었을 때 분지 테이블의 예

그러나 분지한계법은 문제의 규모가 n이 될 때, 계산시간이 n!로 급증하며, 공급사슬망을 누군가 중앙에서 통제할 수 있다는 가정에 기초하므로 다자간 동등거래를 추구하는 공급사슬망 관리에는 부적합하다.

그러므로 본 연구에서 최적의 공급사슬망을 구성하기 위한 분지한계법의 알고리즘을 다음과 같이 응용하여 수행하였다.

- Step 1: 각각의 제조자에게 n개의 주문이 들어올 때 모든 주문 집합을 W라 하고, W의 동시주문값을 구한 후, 이 중 최소값을 가진 제조자를 K, 나머지 제조자는 L이라고 한다. K에서 분지(Branch)를 시작한다.

- Step 2: 1차 분지에서는 K의 W에서 i번째에 있는 n-1개의 모든 가능한 동시주문 조합을 구하고, i번째가 빠진 주문은 L의 i번째 주문과 조합하여 합계를 구한다. 하나의 분지에서 구해진 합계 중 최소값이 되는 주문조합을 T라 하고, T에서 다음 분지를 시작하고 나머지 조합은 제거(Bound)된다.

- Step 3: 다음 분지에서는 T의 W에서 임의의 i,

j번째 있는 n-2개 만큼의 모든 가능한 동시주문 조합을 구하고, i와 j번째가 빠진 주문은 L의 i와 j번째 주문과 조합하여 합계를 구한 후 최소값을 구하고, 나머지는 제거된다.

- Step 4: K의 W가 한개의 주문이 남을때까지 분지를 실시한다.

- Step 5: 모든 분지에서 제거되지 않은 T가 최적구성이 되며 이때 합계가 최적해(최소값)로 결정된다.

4. 에이전트 협상방법론

최적의 공급사슬망 구성문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 에이전트 협상방법론을 제안한다. 본 협상방법론은 중개 에이전트를 통해 구성원의 스케줄링 정보를 전달하고, 최적 할당 메커니즘으로 협상을 활용한다. 본 협상방법론은 공급사슬 구성원 중 협상에 참여하는 모든 구성원이 전략적 협력관계로 발전함으로써 개별 이득을 최대화하는 동시에 전체 공급사슬망의 비용을 최소화할 수 있다. 먼저 공급사슬망의 협상모델링 과정을 살펴보고, 협상요소 및 알고리즘을 소개한다.

4.1 공급사슬망의 협상 모델링

공급사슬망에서 필요한 에이전트 기능은 크게 상위계층과 하위계층간의 주문과 부품의뢰에 대한 중개역할과 각 계층 참여자간의 협상조정기능으로 구분할 수 있다. 두가지 기능을 자세히 살펴보면 다음과 같다.

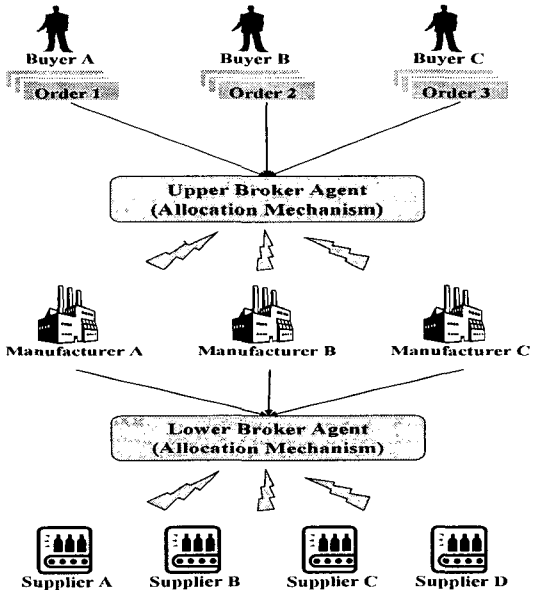

그림 4-중개 에이전트의 협상모델링

• 주문 · 부품의뢰 및 견적비용 산출

구매자는 자신의 주문에 대한 견적비용을 상위 중개 에이전트(Upper Broker Agent)에게 의뢰하게 된다. 상위 중개 에이전트는 이를 공급사슬망에 존재하는 모든 제조자에게 전달하며, 가주문에 대한 견적비용을 산출하기 위해 제조자는 다시 하위 중개 에이전트(Lower Broker Agent)를 통해 공급사슬망에 존재하는 모든 공급자에게 전달한다. 공급자는 각 주문에 대한 스케줄링 결과를 다시 하위 중개 에이전트에게 전달하며, 이는 각 제조자에게 제공된다. 각 제조자는 공급비용을 토대로 제조비용을 스케줄링하여 상위 중개 에이전트에게 전달한다. 상위 중개 에이전트는 각 주문에 따른 최소 견적비용의 제조자를 선택하게 된다. 그리고 확정주문에 대한 재스케줄링 비용을 제조자에게 요구하게 된다. 이는 선택된 제조자 중 2개 이상의 주문이 확정된 경우, 가주문 시의 개별 스케줄링 비용이 동시 주문 스케줄링 비용으로 증가될 수 있기 때문이다(2.3절 참조). 이러한 동시 스케줄링으로 인한 비용증가는 공급자에서도 동일하게 발생될 수 있다. 가주문 시의 스케줄링 비용보다 확정주문 시의 재스케줄링 비용이 클 경우, 다음 단계인 협상으로 진행된다.

• 협상 프로토콜

본 연구에서 제안하는 에이전트 협상방법론은 기존의 옥션, 입찰과 같은 협상방식과는 차이가 있다 경쟁적 관계에 놓인 참여자가 협상에 참여하여 이득을 얻으려는 목적은 동일하나, 기존의 협상결과가 Win-Lose라면 본 연구에서 제안하는 협상방법론은 모든 참여자가 Win-Win의 결과를 얻게된다.

본 협상방법론의 핵심 프로토콜은 다음과 같다.

- Step1: 제조자에게 동시주문이 발생하여 개별주문비용보다 클 경우, 하위 중개 에이전트에게 공급자간 협상을 의뢰한다.
- Step2: 하위 중개 에이전트는 공급자간 협상을 통해 최적의 공급자를 선정하여, 주문별 공급비용을 상위 중개 에이전트에게 전달한다.
- Step3: 상위 중개 에이전트는 최적의 공급비용을 모든 제조자에게 전달하고, 이를 반영하여 제조자간 협상을 진행하여 주문별 최적의 제조자를 선정한다.

다음으로 공급자·제조자간 협상에서 이루어지는 핵심 알고리즘은 동시주문으로 인해 하나로 집중된 주문을 어떻게 배분하느냐이다. 본 협상 방법론에서는 이를 이동 알고리즘으로 명명하여 다음과 같이 정의하였다.

- 이동 알고리즘 (1): 하나의 참여자(공급자, 제조자)에게 동시주문이 발생되었을 때, 동시주문 중 개별주문일 때 가장 큰

차액(동시주문비용-개별주문비용)의 주문만을 남기고 나머지 주문은 다른 참여자로 이동시킨다.

- 이동 알고리즘 (2): 이동 알고리즘 (1)과 반대로, 가장 큰 차액인 주문만이 타 참여자로 이동하고 나머지 동시주문은 그대로 남겨진다.

이때 이동하는 타 참여자는 개별주문의 값이 차선책 순으로 결정되며, 이동 후의 주문이 현재의 동시주문 비용보다 오히려 커져 손실이 발생할 경우, 이동하지 않은 주문의 이득(차액) 내에서 보상비용을 제시한다. 또한 이동 알고리즘 1과 2의 이동에서 더 큰 이득이 발생하는 이동을 최종적으로 선택하며, 이동 후에 더 이상의 동시주문이 발생하지 않거나, 동시주문이 발생되었으나 이동할 주문이 더 이상 이동할 참여자가 없을 때 협상은 종료된다. 자세한 협상 알고리즘은 다음절에서 살펴볼 것이고, 본 협상 프로토콜을 간단한 시나리오를 통해 먼저 살펴보도록 하자(그림 5 참조).

상위 중개 에이전트는 제조자간의 협상이 이루어지며, 하위 중개 에이전트는 공급자간의 협상이 발생된다. 먼저 제조자1에서 3개의 동시주문이 발생될 경우, 제조비용이 7만큼 상승하였다(제조자1 테이블의 1번 라인 참조).

이러한 상승의 원인은 제조자 동시주문뿐 아니라, 공급자도 동시주문이 발생하였기 때문이다. 그러므로 상위 중개 에이전트는 먼저 하위 중개 에이전트에게 공급자 협상을 의뢰하여 최적 구성이 이루어지도록 요청한다.

하위 중개 에이전트는 공급자 1에서 주문1과 2가 동시주문이 발생하여 비용이 각각 +1과 +2가 증가되었으므로, 이동알고리즘을 수행한다. 먼저 이동 알고리즘 (1)의 경우(공급자 테이블 3번 라인 참조), 주문1을 차선책 공급자 2에게 이동하나, 이미 공급자 2가 가지고 있는 확정주문 3과 동시주문이 재발생되어 비용이 증가된다(공급자 1 테이블 3번라인 참조). 이로인해 주문1은 +2로, 주문 3은 +3으로 증가되어 손실은 5가 된다. 공급자 1은 주문 2가 개별주문이 될 경우 동시주문일 때 보다 2만큼의 비용이 감소하나 보상비용으로 인해 본 협상은 -3으로 전체 손실이 발생된다.

다음으로 이동 알고리즘 (2)의 경우, 주문 2를 차선책 공급자 3에게 이동할 경우(공급자1 테이블 4번라인 참조), 동시주문보다 -1이 감소되고, 주문 1 또한 개별주문으로 생산할 수 있어 -1이 감소되어 전체적으로 +2의 이득이 발생된다. 그러므로 공급자 협상에서는 이동 알고리즘 (2)가 최종적으로 선택된다. 협상의 결과는 공급자1이 주문 1, 공급자2가 주문 3, 공급자 3이 주문 2를 생산함으로써 최적의 공급자를 구성할 수 있으며, 모든 공급자가 이득을 보게된다. 이러한 협상결과는 상위 중개 에이전트에게 전달되어 제조자 협상에 그대로 반영된다. 결국 제조자 협상에서는 최적의 공급자 구성을 기반으로 협상이 이루어지게 되며, 협상의 진행은 공급자 협상 프로토콜과 동일하게 진행된다.

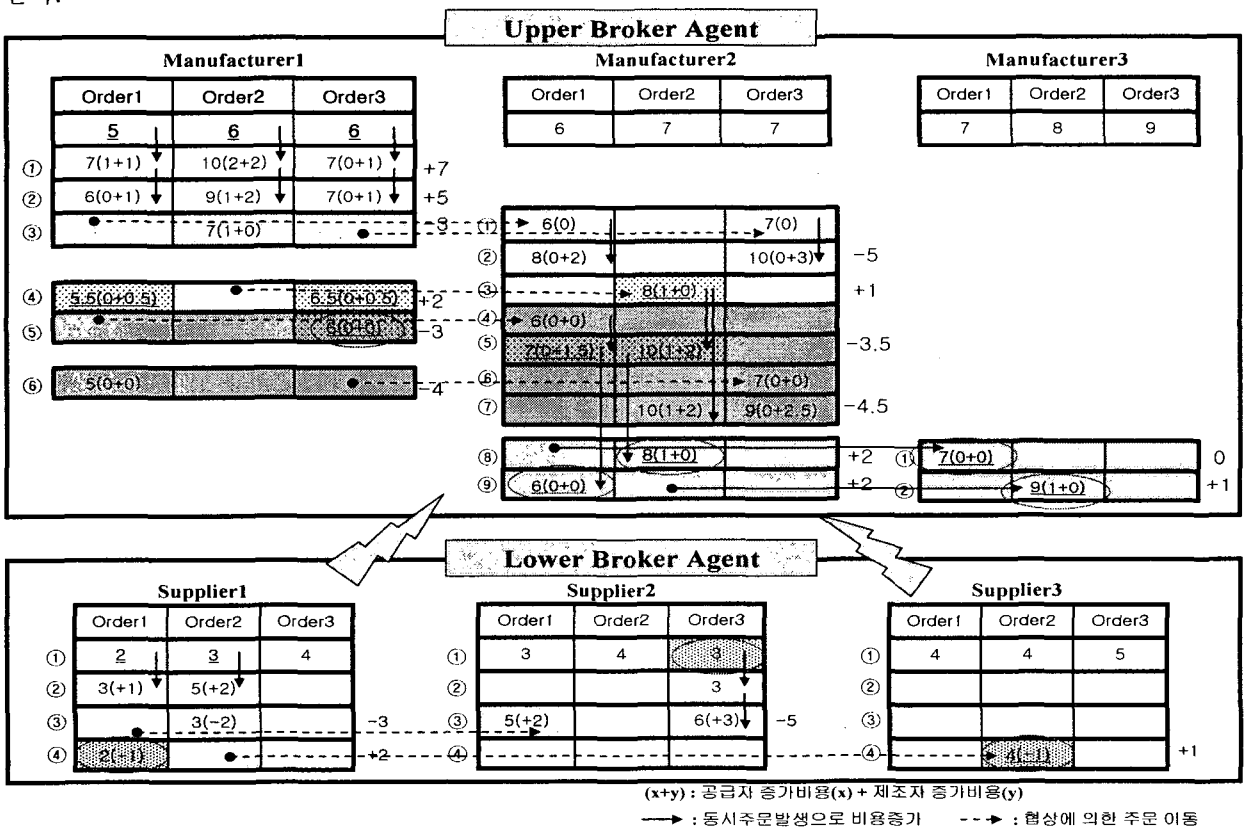

그림 5-중개 에이전트의 협상 시나리오

최종적으로 제조자의 협상결과에서도 제조자1이 주문3, 제조자2가 주문2 또는 주문1, 제조자3이 주문1 또는 주문2를 생산함으로써 최적의 구성이 이루어지며, 최소의 비용을 도출할 수 있다.

다음절에서는 본 협상방법론에서 이루어지는 협상요소와 전체 협상 알고리즘을 정의하고 이를 구현하였다.

4.2 협상요소 및 알고리즘 정의

본 협상방법론은 중개 에이전트간의 협상을 전제로 하고 있다. 협상참여자는 다만 중개 에이전트가 비용을 의뢰하였을 경우 그에 대한 대답을 하는 기능만을 제공한다. 협상참여자는 협상을 통해 전략적 협력관계를 형성하여, 서로가 손실을 보지않고, 이익을 얻을 수 있도록 협상을 하게되며, 이를 통해 최선의 참여자를 선택하고 최적의 공급사슬망을 구성하게된다. 이 때의 최적 공급사슬망은 파레토 최적임과 동시에 모든 제조자와 공급자들의 비용 합을 최소로 하는 공급사슬망이 된다. 본 협상방법론을 위한 협상요소 정의와 알고리즘 흐름도는 다음과 같다.

■ 협상요소의 정의

- 현재상태: 각 주문에 참여하는 제조자(공급자)의 첫번째 스케줄링에 의해 산출된 견적비용을 말한다.
- 최선책: 최선책 발견은 제조자(공급자)가 제시한 현재상태획득비용 중 가장 최소의 값을 말한다.
- 동시주문: 2개 이상의 주문이 하나의 제조자(공급자)에서 확정주문이 발생하면 이를 동시주문이라고 하고, 이때 제조자(공급자)는 모든 주문을 동시에 고려하여 재 스케줄링하게 된다.
- 현재수정상태: 제조자(공급자)가 동시주문으로 인해 재스케줄링 한 새로운 견적값을 말한다.
- 최대이득치 및 협상주도자, 협상대상자 결정: 현재수정상태와 최선책의 차액을 최대이득치라고 하며 이때 가장 큰 값을 가지는 참여자가 협상주도자가 된다. 이외의 참여자가 협상대상자가 된다.
- 차선책 및 차선이득치: 차선책은 현재수정상태에서 최선책을 제외하고 이동할 수 있는 비용 중에 최소값을 말한다. 차선이득치는 현재수정상태에서 차선책의 차액을 말한다.
- 경쟁자 보상비용: 협상주도자 및 협상대상자가 차선책 이동 시 이동하고자 하는 참여자에 이미 다른 확정주문이 존재하고 있으면 기존 확정주문과의 동시주문이 발생하여 현재수정상태 획득이 발생한다. 이때 기존 확정주문의 현재수정상태 획득으로 인해 증가하는 비용을 경쟁자 보상비용이라고 한다.
- 이동보상비용: 이동보상비용은 협상주도자의 의뢰에 의해 협상대상자가 동일주문의 타 참여자로 최종적으로 이동 시에 발생하는 비용으로 현재수정상태에서 최종 이동비용을 차액한 값이다.
- 이동손실비용: 이동손실비용은 협상주도자가 동일주문의 타 참여자로 이동 시 기존 확정주문 존재로 인해 동시주문이 발생되고 최종적으로 이동 시에 발생하는 비용으로 현재수정상태에서 최종 이동경로비용을 차액한 값이다.
- 진입비용: 경쟁자 보상비용과 이동보상(손실)비용의 합이다.
- 협상주도자의 협상금액: 협상주도자가 협상대상자에게 이동할 것을 의뢰할 때 이동보상비용이 발생하면 협상주도자는 최대(차선)이득치내에서 보상하게 되며, 이를 협상금액이라 한다.
- 최종이득치 & 라인이득치: 최종이득치는 협상으로 인한 각 주문의 이동 후 현재수정상태와 이동 후의 비용을 차액한 값을 말하며 라인이득치는 같은 라인에서 모든 주문의 최종이득치 합계이다.

다음으로 협상방법론의 전체 흐름도는 <그림6>에서 살펴볼 수 있으며, 전체 알고리즘 중 참여자간의 본격적인 협상을 통해 전체 공급사슬의 최적구성을 이루는 알고리즘은 <그림7>에서 흐름도로 표현하였다.

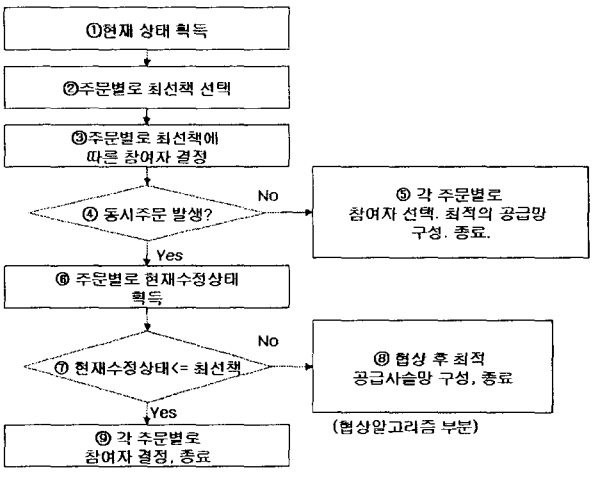

그림 6- 주문-제조생산 방식에서 주문의뢰에 대한 참여자 선정 알고리즘

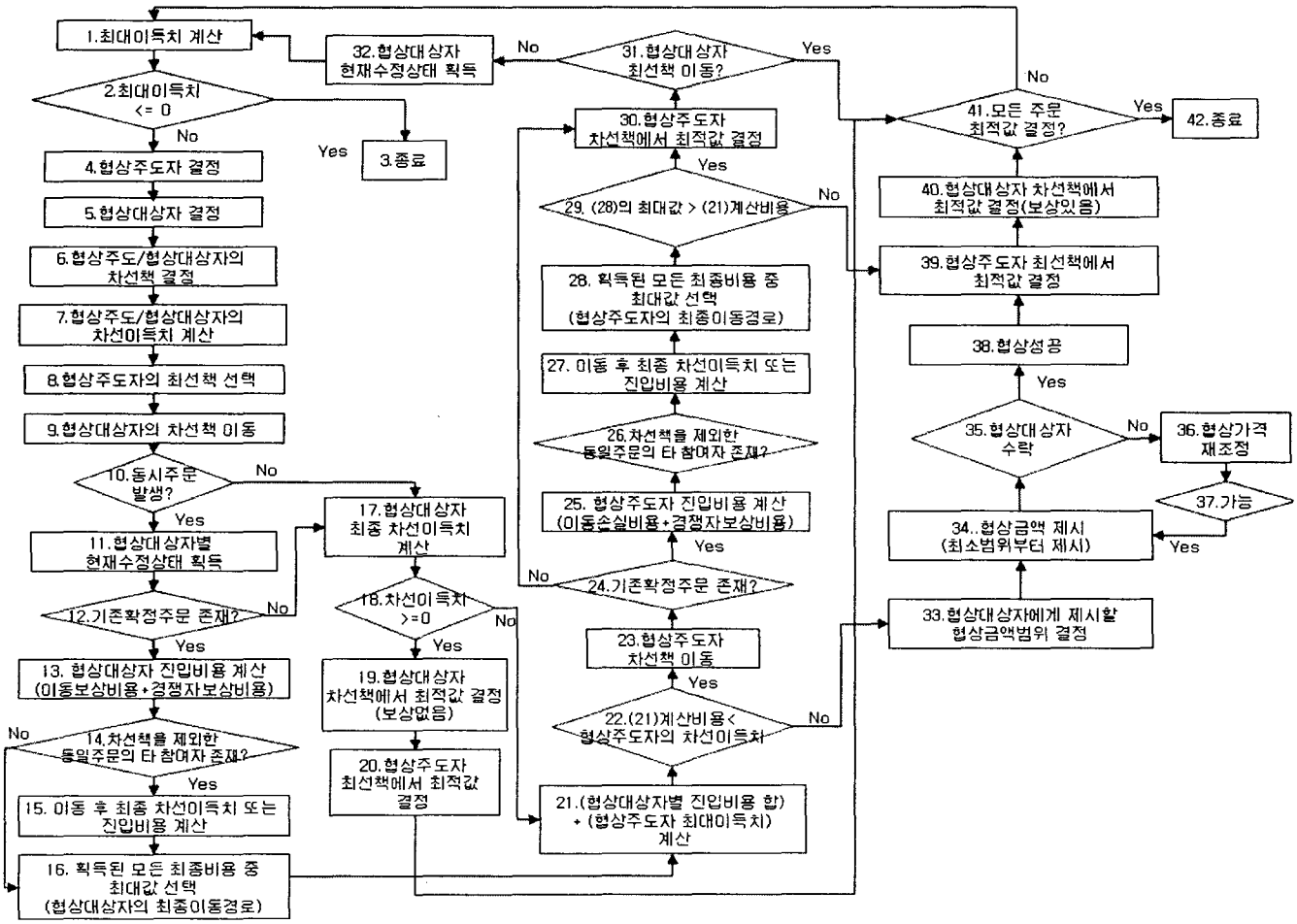

그림 7- 최적공급사슬 구성을 위한 협상방법론 알고리즘

5. 실험

5.1 최적화 실험

본 협상방법론이 공급사슬망의 최적구성을 이루어 전체비용의 최소화를 달성할 수 있는지를 먼저 실험하기 위해 최적화 실험을 진행하였다. 본 협상방법론은 프로그램 언어인 C++를 이용하여 구현하였으며, 본 협상방법론의 최적화 여부를 확인하기 위해 제시된 알고리즘으로 분지한계법을 구현하여 그 결과값을 비교하였다.

동시주문과 같은 스케줄링 결과는 본 알고리즘에서 난수를 발생시켜 진행하였다. 난수발생의 조건은 개별주문보다는 크며, 동시주문 발생개수에 따라 난수비용이 조절된다. 이때 난수발생의 범위는 수평적 관계에 놓인 구성원(제조자, 공급자)간에는 독립적으로 이루어진다.

최적화 실험의 데이터 구성과 실험 진행은 다음과 같다. 공급사슬망에는 4개의 주문이 있고, 제조자와 공급자는 3개로 구성하여 최소한 1개 이상의 동시주문이 발생하도록 하였으며, 총 3회의 실험을 진행하였다. 제조자와 공급자의 각 주문에 대한 비용은 <표2>, <표3>과 같이 구성하였는데, 초기 입력데이터는 각 주문에 대한 제조자와 공급자의 개별주문비용이다. <표4>는 구매자로부터 가주문에 대한 견적의뢰 비용이다. 이때에는 제조자가 이미 <표3>의 공급비용 중 주문별 최소비용을 선택하여 각자의 제조비용과 합한 비용으로 구성된다. 이렇게 제시된 비용 중 각 주문별 최소비용이 구매자로부터 선택되어 확정주문이 발생한다(<표4>의 빗금부분).

그러나 확정주문이 발생함으로써 <표5>와 같이 동시주문이 발생하는데, 이는 <표2>의 제조자 비용과 <표3>의 공급자 비용에서 동시주문이 발생하기 때문이다. 이로 인해 <표4>의 확정주문보다 비용이 상승되었음을 알 수 있다.

표 2-제조자비용 구성

□ 주문별 최소비용

제조비용		제조자 1				제조자 2				제조자 3			
		주문 1	주문 2	주문 3	주문 4	주문 1	주문 2	주문 3	주문 4	주문 1	주문 2	주문 3	주문 4
실험 1	초기입력데이터 1	10	9	8	**7**	12	15	**7**	10	**9**	**8**	10	11
실험 2	초기입력데이터 2	15	19	25	**16**	**14**	22	**17**	20	17	**18**	19	23
실험 3	초기입력데이터 3	**18**	**16**	**15**	23	19	22	20	**19**	18	21	22	20

표 3-공급자비용 구성

공급비용		공급자 1				공급자 2				공급자 3			
		주문 1	주문 2	주문 3	주문 4	주문 1	주문 2	주문 3	주문 4	주문 1	주문 2	주문 3	주문 4
실험 1	초기입력데이터 1	5	7	9	6	**4**	8	6	7	6	**6**	**5**	**4**
실험 2	초기입력데이터 2	7	**5**	6	**3**	**4**	6	7	4	5	7	**5**	5
실험 3	초기입력데이터 3	6	**5**	**4**	4	7	6	8	**3**	**4**	7	7	6

표 4-가주문 시의 제조비용과 공급비용의 합

가주문(개별주문): 제조비+공급비(최소비용)		주문 1	주문 2	주문 3	주문 4	주문 1	주문 2	주문 3	주문 4	주문 1	주문 2	주문 3	주문 4
실험 1	제조비용+공급비용	14	15	13	**11**	16	21	**12**	14	**13**	**14**	15	15
실험 2	제조비용+공급비용	19	24	30	**19**	**18**	27	**22**	23	21	**23**	24	26
실험 3	제조비용+공급비용	**22**	**21**	**19**	26	23	27	24	**22**	24	26	26	23

표 5-확정주문 시의 제조비용과 공급비용의 합

확정주문(동시주문) : 제조비+공급비		주문 1	주문 2	주문 3	주문 4	주문 1	주문 2	주문 3	주문 4	주문 1	주문 2	주문 3	주문 4
실험 1	제조비용+공급비용				16			16		17	22		
실험 2	제조비용+공급비용				23	22		27			27		
실험 3	제조비용+공급비용	27	33	29					22				

표 6-확정주문 시의 제조비용과 최적 공급비용의 합

확정주문 : 제조비+공급비(최적해)		주문 1	주문 2	주문 3	주문 4	주문 1	주문 2	주문 3	주문 4	주문 1	주문 2	주문 3	주문 4
실험 1	제조비용+공급비용				13			14		17	19		
실험 2	제조비용+공급비용				22	22		30			23		
실험 3	제조비용+공급비용	30	32	24					22				

표 7-확정주문 시의 최적해 조합

확정주문(최적해) : 제조비+공급비		주문 1	주문 2	주문 3	주문 4	주문 1	주문 2	주문 3	주문 4	주문 1	주문 2	주문 3	주문 4
실험 1	제조비용+공급비용	15			15			14			15		
실험 2	제조비용+공급비용				22			25		23	25		
실험 3	제조비용+공급비용	28		22					22		31		

이로인해 본 다자간 협상방법론을 이용하여 최적해를 구한 결과가 <표6>과 <표7>이다. 우선적으로 공급자간의 협상을 통해 최적 공급자를 선정한 결과가 <표6>이며, 이를 다시 제조자간 협상에 반영하여 전체 공급사슬의 최적구성을 달성한 결과가 <표7>이 된다. <그림8>에서는 3번의 실험결과를 종합한 것으로, 확정주문은 협상전의 전체 공급사슬비용이고, 제조자 협상결과는 다자간 협상방법론을 통해 구성된 전체공급사슬 비용이다. 3번의 실험 모두 전체공급사슬비용이 낮아졌음을 확인할 수 있다.

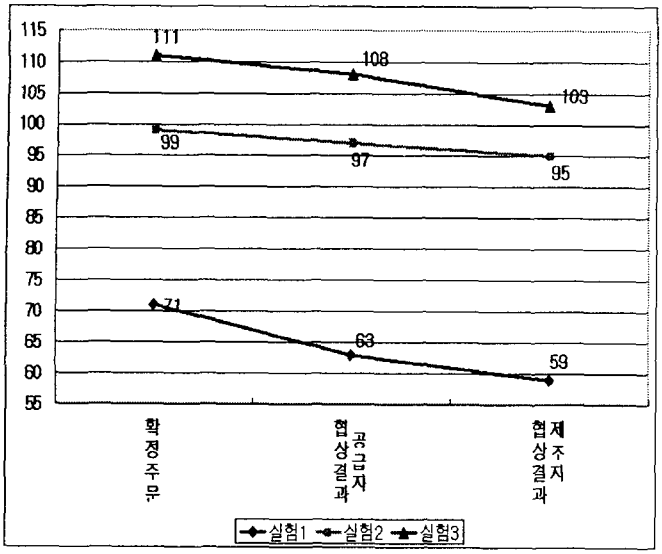

그림 8- 협상전후의 공급사슬 비용변화

또한 본 실험의 결과가 분지한계법의 결과와 동일하게 도출되었으며, 본 결과는 최소비용으로 전체공급사슬의 최적해가 된다. 그러나 분지한계법과는 달리 협상방법론은 협상과정에서 발생하는 이득과 손실을 실시간으로 계산할 수 있으므로, 이에 따라 협상참여자의 전략적 협력관계를 이룰 수 있다. <표8>에서는 다자간 협상방법론을 통해 구성원의 이득과 손실을 살펴볼 수 있다. 모든 실험에서 제조자와 공급자는 협상을 통해 이득을 얻을 수 있다.

협상과정에서 발생하는 협상비용은 협상주도자의 이득범위와 협상대상자의 손실범위에서 이루어지므로, 협상주도자와 협상대상자 모두 협상성공의 결과를 도출할 수 있다. 물론 본 실험에서 협상대상자는 최소한 자신의 손실을 보충하고, 협상주도자의 이득범위를 넘지않는 선에서 이득을 요구하도록 하였다.

본 협상방법론은 개인 또는 소수의 구성원이 독과점 형태의 시장을 형성하는 것보다 완전시장에서 경쟁균형을 어떻게 형성할 수 있는지를 보여준다.

다음장에서는 공급사슬망의 실험범위를 확대하여, 본 협상방법론의 성능을 실험하였다.

5.2 성능실험

앞절에서는 협상알고리즘의 최적화여부를 확인하였고 다음으로 협상알고리즘의 수행성능을 살펴보기 위해 먼저 입력 데이터를 확대하였다. <표 9>와 같이 주문개수와 협상참여자수에 따라 Type A, B, C로 분류하였는데, 이는 주문수가 협상참여자수와 크거나 같을 경우, 또는 작을 경우에 따라 성능의 차이가 있는지를 테스트하기 위해서이다. 각각의 Type은 30회씩 협상알고리즘을 수행하였으며 협상전후의 비용을 통해 차액을 구하고, 협상수행 횟수와 수행속도를 측정하였다. <표9>의 실험결과값은 평균값으로 도출되었다.

표 8-협상을 통한 구성원의 이득과 손실

		제조자1				제조자2				제조자3				제조비용 합계 (전체공급사슬비용)	협상 횟수
		주문1	주문2	주문3	주문4	주문1	주문2	주문3	주문4	주문1	주문2	주문3	주문4		
실험1	협상 전 제조비용(동시주문)				16			16		17	22			71	5
	협상 후 제조비용(주문재할당)	15			15			14			15			59	
	협상 후 제조자 증가이득	+0			+1			+2		+2	+7			12	
		공급자1				공급자2				공급자3				공급비용 합계	협상 횟수
		주문1	주문2	주문3	주문4	주문1	주문2	주문3	주문4	주문1	주문2	주문3	주문4		
	협상 전 공급비용(동시주문)					4					10	9	9	32	7
	협상 후 공급비용(주문재할당)		7			4						7	6	24	
	협상 후 공급자 증가이득		+0			0					+3	+2	+3	8	
실험2		제조자1				제조자2				제조자3				제조비용 합계 (전체공급사슬비용)	협상 횟수
		주문1	주문2	주문3	주문4	주문1	주문2	주문3	주문4	주문1	주문2	주문3	주문4		
	협상 전 제조비용(동시주문)				23	22		27			27			99	4
	협상 후 제조비용(주문재할당)				22			25		23	25			95	
	협상 후 제조자 증가이득				+1	-1		+2		+0	+2			4	
		공급자1				공급자2				공급자3				공급비용 합계	협상 횟수
		주문1	주문2	주문3	주문4	주문1	주문2	주문3	주문4	주문1	주문2	주문3	주문4		
	협상 전 공급비용(동시주문)		9		7	4						5		25	5
	협상 후 공급비용(주문재할당)		5			4						8	6	23	
	협상 후 공급자 증가이득		+4		+1	0						-3	+0	2	
실험3		제조자1				제조자2				제조자3				제조비용 합계 (전체공급사슬비용)	협상 횟수
		주문1	주문2	주문3	주문4	주문1	주문2	주문3	주문4	주문1	주문2	주문3	주문4		
	협상 전 제조비용(동시주문)	27	33	29					22					111	1
	협상 후 제조비용(주문재할당)	28		22					22		31			103	
	협상 후 제조자 증가이득	-1	+2	+7					0		+0			8	
		공급자1				공급자2				공급자3				공급비용 합계	협상 횟수
		주문1	주문2	주문3	주문4	주문1	주문2	주문3	주문4	주문1	주문2	주문3	주문4		
	협상 전 공급비용(동시주문)		11	9					3	4				27	3
	협상 후 공급비용(주문재할당)			4					3	7	10			24	
	협상 후 공급자 증가이득		+1	+5					0	-3	+0			3	

표 9- 협상알고리즘 수행성능 결과

Type	주문개수 x 협상참여자수	협상 전 비용	협상 후 비용	협상 전후 차액	협상 수행 횟수 (회)	수행 속도 (ms)
A	10 x 5	768	738.5	29.5	6.8	156
B	10 x 10	1536	1515	21.4	7.6	253
C	10 x 15	2584.5	2565	20.5	7.9	301

<표9>의 결과에서 볼 수 있듯이 Type A, B, C 모두 협상전후 차액이 양으로 증가되어 협상알고리즘을 통해 전체 공급사슬비용을 절감할 수 있음을 다시 한번 확인할 수 있었다. 그러나 Type에 따라 차액 차이는 발생하지 않았다. 또한 Type에 따라 협상수행 횟수, 즉 협상 라운드 횟수가 조금씩 증가하나, 큰 증가율은 보이지 않았다. 다만 Type에 따라 수행속도에는 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Type에 따라 협상수행 횟수가 큰 차이가 없는 것은 주문과 참여자의 수가 증가할수록 동시주문의 난수값이 계속 증가되어 협상이 조기에 종료하는 경우가 발생되었기 때문이다.

그러므로 협상방법론과 분지한계법의 최악 경우의 복잡도(worst-case complexity)를 통해 성능을 검증하고자 한다. 본 연구에서 최적 공급사슬 구성문제의 복잡도는 스케줄링의 수행횟수로 보았다. 또한 스케줄링의 발생원인은 동시주문이 일어나기 때문이다. 이는 두가지의 방법론이 지속적으로 스케줄링을 발생시키고, 더 이상 스케줄링이 발생되지 않을 때 종료된다. 그러므로 두가지 방법론 모두 부분 스케줄링의 발생횟수가 성능에 가장 큰 영향을 미친다.

Type에 따른 협상방법론의 최악의 경우는 동시주문이 하나의 협상참여자에게만 발생한 뒤, Type A는 협상참여자수보다 주문개수가 많아 하나의 참여자가 2개씩의 주문이 할당되고, Type B는 협상참여자와 주문개수가 같아 하나의 참여자가 1개의 주문이 할당되며, 마지막으로 Type C는 10개의 협상참여자가 1개의 주문을 할당받고, 1개의 주문도 할당받지 못하는 5개의 협상참여자가 발생된다. 결국 10개의 주문이 하나의 협상참여자에게 집중된 상황에서 협상을 통해 모든 협상참여자에게 골고루 주문이 할당되어야 한다.

그러므로 협상방법론과 분지한계법의 최악 경우의 복잡도를 계산하면 다음과 같다.

- 협상알고리즘 :

$$O(n^2) = \sum_{k=1}^{n}\{(n-1)(m-1)+(n-2)(m-2)+...+(n-k)(m-k)\}$$

- 분지한계법 : $O(n^3) = (1+2+3...+n) \times (m-1)$

위 함수에서 n은 주문개수이고, m은 협상참여자의 수이다. 협상알고리즘은 앞에서 언급한 대로 최악의 협상결과가 될 때, 하나의 협상참여자(최선책)에 발생된 동시주문이 이동할 수 있는 협상참여자 수는 차선책의 수가 되며, 한번 이동한 차선책은 다시 이동할 수 없으므로, $(m-1)$이 된다. 즉 하나의 구성원에서 부분 스케줄링은 (n-k)번 발생하고, 이것이 m개의 협상참여자만큼 발생한다.

분지한계법의 경우에는 주문의 수가 n일 때, 하나의 협상참여자에서 n만큼의 동시주문이 발생된 후 동시주문이 발생되지 않을 때까지 주문의 조합이 이루어진다. 예를 들어 하나의 협상참여자에 5개의 동시주문이 발생된 후, 다음 분지에서는 4개의 동시주문이 각각 조합되어 부분 스케줄링이 5회 발생되며, 이때 나머지 1개의 주문은 다른 협상참여자의 주문이 조합되어 부분 스케줄링이 이루어 진다. 그러므로 $(1+2+3...+n)$은 모든 분지에서 발생하는 스케줄링 발생횟수이며, $(m-1)$은 협상참여자의 수가 된다.

그러므로 협상알고리즘의 수행성능이 n^2만큼 발생하는 반면, 분지한계법은 n^3만큼 발생되어, 분지한계법보다 부분 스케줄링의 발생횟수가 현저히 적어 수행성능에서 월등히 뛰어남을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구는 동적 공급사슬환경에서 본 에이전트 협상방법론을 통해 공급사슬망에 존재하는 다수의 주문과 구성원간의 최적 조합과 할당을 선정할 수 있다. 특히 경쟁적 관계에 놓인 다수의 구성원이 협상에 참여함으로써 이득을 증가시킬 뿐 아니라 전체 공급사슬망도 최소의 비용을 달성할 수 있다. 결국 본 협상방법론을 통해 전략적 협력관계를 유도할 수 있음을 보여주었다. 이는 공급사슬이 동적으로 거래상대가 변화할 때마다 변경되는 주문비용을 협상을 통해 반영할 수 있음은 물론, 협상 시에 발생하는 이득과 손실을 계산하여, 모든 참여자가 만족할 수 있는 최소비용이라는 목적을 달성할 수 있기 때문이다. 각 개별 참여자의 스케줄링과 비용산정을 위해 SET 모델을 이용하였으며, 제조비, 공급비와 함께 조기생산비용과 지연생산비용을 모두 고려하였다.

향후 연구에서는 본 연구에서 제시한 협상방법론의 비용 구성을 더욱 다양화하여 적용할 예정이다.

참고문헌

[1] 최윤락, 한주윤, 정봉주, (2003). "경쟁적 공급사슬 환경에서 생산 원가 분석 및 경제적 주문량의 변화를 통한 생산자/수요자 협상모델," 한국경영과학회 춘계학술대회, pp. 564-571.

[2] Baker, K.R. and Scudder, G.D. (1990). "Sequencing with earliness and tardiness penalties: A review," Operations Research Society of America, Vol. 38, No 1, pp. 22-27.

[3] Bertsekas, P.D. (1981). "A New Algorithm for the Assignment Problem," Mathematical Programming 21, pp. 152-171.

[4] Bowersox, D.J. and Closs, D.J. (1996). "Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process," The McGaw-Hill Companies.

[5] Bylka, S. (2003). "Competitive and cooperative policies for the vendor-buyer system," International Journal of Production Economics, pp. 533-544.

[6] George, L. (1997). "Single Machine Earliness and Tardiness Scheduling," European Journal of Operational Research 96, pp. 546-558.

[7] Kim, Y.D. and Yano, C.A. (1994). "Minimizing Mean Tardiness and Earliness in Single-Machine Scheduling Problems with Unequal Due Dates," Naval Res.Logistics, Vol .41, pp. 913-933.

[8] Lee, H.L. and Billington, (1992). "Managing Supply Chain Inventory: Pitfalls and Opportunities," Sloan Management Review, Spring, pp. 65-75.

[9] Peng, S.O. and Thomas, E.M. (1989). "Morton, the Single Machine Early/Tardy Problem," Management Science, Vol. 35, No. 2, pp. 177-191.

[10] Rub, C. (1997). "Economic Mechanism Design for the Auction-based Coordination of Self-interested Agent," Diplomarbeit, Universitat des Saarlandes.

[11] Towill, D.R. (1996). "Industrial Dynamics Modeling of Supply Chains," International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol.26, No.2, pp. 23-42.