로봇 산업의 다중 공급망 환경을 고려한 생산 및 분배 관리를 위한 유전 알고리듬 개발

조성민* · 김태영** · 황승준***

Development of Genetic Algorithm for Production and Distribution Management in Multiple Supplier Network Environment of Robot Engineering Industry

Sung-Min Jo* · Tai-Young Kim** · Seung-June Hwang***

Abstract

Today, the management environments of intelligence firm are changing the way of production planning and logistics management, and are changing the process of supply chain management system. This paper shows the development of information system software for intelligence enterprises is used in supply chain management for robot engineering industry. Specifically, supply chain management system in this paper has been developed to analyze the impact of multi plant and multi distribution environment, showing the process analysis and system development of hierarchical assembly manufacturing industry.

In this paper we consider a production planning and distribution management system of intelligence firm in the supply chain. We focus on a capacitated production resource and distribution volume allocation problem, develop a mixed integer programming model, and propose an efficient heuristic procedure using a genetic algorithm to solve it efficiently. This method makes it possible for the population to reach the feasible approximate solution easily. The proposed regeneration procedures, which evaluate each infeasible chromosome, makes the solution converge to the feasible approximate solution quickly.

Keywords : Robot Engineering Industry, Integration Production and Distribution Planning

논문접수일 : 2013년 05월 07일　　논문게재확정일 : 2013년 06월 12일

※ 이 논문은 2013년 한양대학교 교내연구비 지원으로 연구되었음(HY-2013-G).

* 한양대학교 전략경영학과 박사과정, e-mail : jsm@gtp.or.kr

** 한양대학교 경상대학 경영컨설팅학과 겸임교수, e-mail : tykim1126@gmail.com

*** 교신저자, 한양대학교 경상대학 경영학부 부교수, e-mail : sjh@hanyang.ac.kr

1. 서 론

로봇 산업은 기술의 발전과 고령화 사회 도래 등에 따라 수요와 공급이 크게 증가할 전망에 있다. 로봇 산업은 혹독한 제조 작업 환경에 대응하기 위하여 1950년대 후반 조지 데볼[George C. Devol]과 조셉 엔젤버거(Joseph Engelberger)에 의하여 산업용 로봇이 개발되어 제조 현장에 적용되기 시작한 이래로, 주로 제조업을 위한 로봇 기술이 개발되어왔고 로봇 산업도 제조 산업 중심으로 성장하여 왔다[주종대, 2009]. 이후 로봇 산업이 태동하고 50여년의 시간이 흐르면서, 로봇의 제조 기술 및 로봇 움직임의 제어 기술이 축적되고 컴퓨터와 정보통신 기술이 비약적으로 성장하였으며, 지금까지 제조 현장 중심으로 성장해 왔던 로봇 산업이 21세기에 들어서면서 사람을 대상으로 하는 서비스를 위하여 활용되는 방향으로 그 적용 범위가 확장되고 있다.

이에 따라 일본, 미국, 독일 등 기존의 산업용 로봇 업계에서 우위를 지닌 로봇 강국들을 중심으로, 새롭게 떠오르고 있는 로봇 산업을 국가적인 전략산업으로 규정하고 기술 개발에 매진하고 있는 상황이다. 미국은 로봇기술을 "미래 10대 중요기술"로 선정하고 투자하고 있고, 일본은 "4대 신산업"에 로봇 산업을 포함시키고 국책 산업으로 지원하고 있으며, 유럽에서는 독일 중심으로 대규모 협동 연구가 진행되고 있다. 그 밖에 중국은 "863계획"에 로봇 기술을 선정하여 국책 프로젝트를 진행 중이다[경기테크노파크, 2012].

로봇 산업은 다양한 기술을 필요로 하는 많은 부품을 활용한 대규모 조립 산업의 특징을 가지고 있으며, 공급망을 설계하는 것이 매우 중요한 산업계의 이슈이다. 공급망 설계는 각지에 산재해 있는 고객, 물류센터, 제조 기업, 부품 공급 업체들의 유기적인 통합 방법이라고 할 수 있으며, 전체 공급망의 효율적인 구성을 위해서는 생산지와 물류센터의 개수 및 위치 지정, 각 거점들 간의 물류 이동계획 등의 문제가 중요하게 대두되는데, 공급망 네트워크 설계 문제(Network Design Problem)의 해결이 선결 과제이다.

공급 사슬의 관점에서 통합 생산 및 물류 계획에 관련한 연구로는 우선 Rizk et al.[2006]이 수리계획법에 의하여 단일 제품 생산자와 복수 물류센터를 갖는 공급망 환경에 대한 통합 생산 물류 계획 모형을 제안한 것을 들 수 있으며, Su et al.[2008]은 통합 생산 계획 수립과 기업 간 협력의 중요성에 대하여 다루었다. Romo et al.[2009]은 통합 생산 및 운송 계획 수립을 위한 수리모형과 해법을 제안하였으며 Mula et al.[2010]이 수리계획법에 의한 공급망 통합 생산 및 운송 계획 수립에 대한 연구들을 종합적으로 리뷰하였다. 그 밖에 최근에는 Chern and Hsieh[2007], Selim et al.[2008], Torabi and Hassini[2008] 등의 연구와 같이 다양한 목표를 동시에 추구하면서 통합 생산계획를 수립할 수 있도록 하는 목표계획법(goal programming)에 의한 수리모형 개발이 계속적으로 이루어지고 있다.

통합 생산 및 물류 계획을 통하여 최적해를 구하고자 할 경우, 해를 구하는 시간이 길다는 단점이 있다. 때문에 발견적 해법이나 이완 해법을 활용하여 가능한 시간 내에 해를 구하고자 하는 노력이 진행되어 왔다. Ekşioğlu et al.[2006]은 생산과 운송 계획을 통합한 수리모형을 제안하였고, Ekşioğlu et al.[2007]은 라그랑지안 분해법(lagrangian decomposition)을 이용한 이완 해법을 통하여 해를 구하였다. Gen and Syarif[2005]는 생산 및 운송을 위한 수리모형을 제안하고 유전 알고리듬으로 해를 구하였다.

본 연구는 로봇 산업계의 기업 간 협력 체계 마련을 위한 공급망 구성 방안을 2단계로 나누

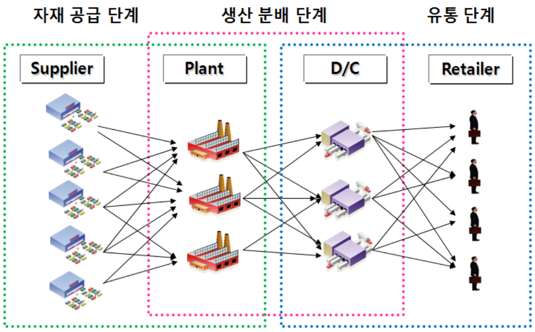
어서 제시하고자 한다. 기존의 통합 생산 및 물류 계획 수립을 위한 연구들에서는 대개의 경우 무리하게 단일 수리모형으로 모든 공급 사슬 환경에 대하여 적용하려고 하는 경우가 많이 발생하였으며, 혼합정수계획법의 NP-Complete 형태가 되는 경우가 많기 때문에 업무 현장에서 활용할 수 있는 가능 시간 내에 최적해를 구하기 어려운 문제가 발생하였다. 본 논문에서는 이러한 기존 연구들의 한계를 극복하고, 각 물류 거점의 시점별 재고량, 각 운송로의 시점별 운송량, 생산 거점의 생산량 등을 계산하기 위하여, 2단계로 나누어서 최적해를 구하도록 하는 통합 생산 및 물류 관리 수리모형을 제안하였다. 또한 유전 알고리듬(Genetic Algorithm)을 활용하여 업무 현장에서 활용이 가능한 시간 안에 해를 구할 수 있도록 함으로써, 효율성과 정확성을 모두 갖춘 지능형 통합 생산 및 분배 관리 시스템을 개발하였다.

이후 본 논문의 전개는 다음과 같다. 제 2장에서는 2단계로 구성된 통합 생산 및 물류 관리를 위한 수리모형을 혼합정수계획법(MIP)의 형태로 제시한다. 제 3장에서는 해당 수리모형을 이용하여 가능한 시간 내에 생산 및 분배 관리를 위한 수량과 시점에 대한 근사해를 구할 수 있도록 하는 유전 알고리듬을 제시한다. 제 4장에서는 제안한 수리모형의 최적해와 유전 알고리듬의 타당성을 수치 예제를 통하여 검증한다. 마지막 제 5장에서는 본 연구의 결론 및 향후 연구에 대해 설명한다.

2. 수리모형

2.1 생산 분배 단계 수리모형

본 연구에서는 공급 사슬 환경에서 생산 및 분배 관리를 통합하는 방안에 대하여 연구하기 위하여, 공급망의 주요 거점이라고 할 수 있는 공급처(Supplier), 공장(Plant), 물류센터(Distribution center), 리테일러(Retailer) 사이의 물류 흐름을 <그림 1>에 도시한 바와 같이 크게 '자재 공급 단계', '생산 분배 단계', '유통 단계'의 3 단계로 구분하여 파악하였다.



〈그림 1〉 공급망 환경에서 단계별 업무 흐름

<그림 1>에서 '준비 단계'는 공급업체와 완제품 제조 기업 사이에서 협상과 생산 계획에 의하여 원자재를 조달하는 과정을 의미한다. '생산 분배 단계'는 완제품 제조 기업이 생산을 완료 진행한 후 주요 물류센터에 완성품을 보내는 과정에 해당하며, '유통 단계'는 물류센터로부터 각지에 산재한 리테일러에게 고객 수요에 맞추어 운송이 진행되는 단계를 의미한다.

단일 수리모형으로 통합 생산 물류 문제를 해결하고자 할 때, 현실적이지 못한 가정과 많은 계산량으로 인하여 활용성이 떨어지므로, 본 연구에서는 물류 흐름에 맞추어 3단계로 나누어 공급망 운영 방안을 도출하는 것이 합리적이라고 판단하였다. 이 중 '자재 공급 단계'에 해당하는 공급자와 제조 거점 사이의 협상과 계약에 의하여 원자재 공급이 이루어지는 부분에 대한 운영 방안은 황승준 등[2011]의 선행 연구에서 이미 해법을 제시한 바 있으며, 본 연구에서는 '생산 분배 단계'와 '유통 단계'에 대한 2단계 통합 생산 및 분배 관리 모형을 수립하고 해법

을 제시하였다.

'생산 분배 단계'를 위한 수리모형에서 사용되는 기호는 다음과 같다.

<첨자(index)>

- k : 공장(plant),
- j : 물류센터(distribution center),
- l : 제품(product),
- t : 시점(time),
- m : 운송 유형(transportation mode),

<입력 모수(input parameter)>

- b^t_{jklm} : 시점 t에서 제품 l이 공장 k에서 물류센터 j로 운송유형 m을 통하여 운송되었을 때의 단위 운송비용
- f^t_k : 시점 t에서 공장 k를 운영할 때의 고정 운영비용
- d^t_{jl} : 시점 t에서 물류센터 j에 의한 제품 l의 수요량
- c^t_{kl} : 시점 t에서 제품 l을 공장 k에서 생산할 때의 단위 생산비용
- p^t_{kl} : 시점 t에서 제품 l을 공장 k에서 보관할 때의 단위 보관비용
- u^t_{kl} : 시점 t에서 제품 l을 위한 공장 k의 소요능력
- U^t_k : 시점 t에서 공장 k의 총 가용능력
- PW : 고려할 수 있는 공장수의 상한,
- v^t_l : 시점 t에서 제품 l의 단위 소요부피
- PV^t_{jkm} : 시점 t에서 공장 k에서 물류센터 j로의 운송 유형 m에 대한 운송능력

<결정 변수(decision variables)>

- Y^t_{jklm} : 시점 t에서 제품 l이 공장 k에서 물류센터 j로 운송유형 m을 이용하여 운송될 때의 운송량
- R^t_k : 시점 t에서 공장 k의 운영 여부에 대한 이진변수(0 또는 1)
- PQ^t_{kl} : 시점 t에서 제품 l이 공장 k에서 생산될 때의 생산량
- PI^t_{kl} : 시점 t에서 제품 l이 공장 k에 생산 후 보관될 때의 보관량

통합 생산 및 분배 관리를 위한 1단계 수리모형에서는 다제품(multi item)에 대한 복수개의 공장(multi plant), 다중 물류센터(multi distribution center)를 고려하여 혼합정수계획법(MIP) 형태로 모델링하였다. 이를 정리하면 식 (1)에서 식 (9)까지 전개된 수리모형 MIP 1과 같다.

MIP 1 :

$$Min \ \sum_t \sum_m \sum_l \sum_k \sum_j b^t_{jklm} Y^t_{jklm} + \sum_t \sum_l \sum_k c^t_{kl} PQ^t_{kl} + \sum_t \sum_l \sum_k p^t_{kl} PI^t_{kl} + \sum_t \sum_k f^t_k R^t_k \qquad (1)$$

subject to

$$\sum_m \sum_k Y^t_{jklm} \ge a^t_{jl} \quad \text{for } \forall j, l, t \qquad (2)$$

$$\sum_m \sum_l \sum_j u^t_{kl} (PI^{t-1}_{kl} + PQ^t_{kl}) \le U^t_k R^t_k \quad \text{for } \forall k, t \qquad (3)$$

$$\sum_t R^t_k \le PW \quad \text{for } \forall t \qquad (4)$$

$$\sum_l v^t_l Y^t_{jklm} \le PV^t_{jkm} \quad \text{for } \forall j, k, m, t \qquad (5)$$

$$PI^{t-1}_{kl} + PQ^t_{kl} = PI^t_{kl} + \sum_m \sum_i Y^t_{jklm} \quad \text{for } \forall k, l, t \qquad (6)$$

$$M \times R^t_j \ge \sum_k PI^t_{kl} \quad \text{for } \forall k, t \qquad (7)$$

$$P^t_j = \{0, 1\} \qquad (8)$$

$$Y^t_{jklm}, PI^t_{kl}, PQ^t_{kl} \ge 0 \qquad (9)$$

식 (1)은 각각의 공장(plant)에서 각각의 물류센터(D/C)로의 제품 이동비용의 합과 개별 공장에서의 제품 생산 비용의 합 및 재고 유지비용의 합, 그리고 사용할 공장의 개폐에 따른 운영

비용을 최소화해야 한다는 1단계 수리모형의 목적식이다. 식 (2)는 물류센터(D/C)의 기간별 제품 수요량 만족시켜야 한다는 수요 제약에 대한 제약식이고, 식 (3)은 사용하는 공장의 전체 생산 용량을 넘지 않도록 제품 생산하여야 한다는 용량(capacity) 제약식이다. 식 (4)는 사용 가능한 생산 기지의 오픈 개수 제한에 대한 제약식이고, 식 (5)는 운송을 위하여 사용된 총 소요 운송 능력과 전체 가용 능력에 대한 용량 제약식이다. 식 (6)은 각 생산 기지 및 물류센터에서의 생산량과 재고량 및 수송량의 관계에 대한 재고 균형식(inventory balance equation)이고, 식 (7)은 생산 거점 오픈 여부와 생산 거점의 재고 수량에 관한 Big M 제약식이다. 식 (8)은 생산 거점 사용여부에 대한 이진 변수(binary variable) 속성에 대한 제약식이고, 식 (9)는 생산량, 재고량, 운송량에 대한 비음 조건식이다.

이상과 같이 식 (1)에서 식 (9)와 같이 전개된 MIP 1 수리모형을 통하여 공장과 물류센터 사이의 최적 생산 및 재고 수량, 운송 수량에 대한 최적해를 구할 수 있다.

2.2 유통 단계 수리모형

‘유통 단계’는 리테일러의 수요에 따라 완성품이 물류센터에서 리테일러로 다시 분배되는 단계를 의미한다. 이 때 실수요자인 고객들이 발생시키는 수요 정보는 각각의 리테일러 단위에서 수요 영역(Demand Zone)을 구성하여 파악하는 것으로 가정하고 있으며, 리테일러에서 파악한 수요를 전체 계획 수립에 적용하게 된다. ‘유통 단계’를 위한 수리모형에서 사용되는 기호는 다음과 같다.

<첨자(index)>

i : 리테일러(retailer),
j : 물류센터(distribution center),
l : 제품(product),
t : 시점(time),
m : 운송 유형(transportation mode),

<입력 모수(input parameter)>

C_{ijlm}^t : 시점 t에서 제품 l이 물류센터 j에서 리테일러 i로 운송유형 m을 통하여 운송되었을 때의 단위 운송비용
g_j^t : 시점 t에서 물류센터 j를 운영할 때의 고정 운영비용
a_{il}^t : 시점 t에서 리테일러 i에 의한 제품 l의 수요량
s_{jl}^t : 시점 t에서 제품 l을 물류센터 j를 보관할 때의 단위 소요능력
W : 고려할 수 있는 물류센터수의 상한
W_j^t : 시점 t에서 물류센터 j의 총가용능력
v_l^t : 시점 t에서 제품 l의 단위 소요부피
V_{ijm}^t : 시점 t에서 물류센터 j에서 리테일러 i로 운송하기 위한 운송유형 m에 대한 총 운송능력,
h_{jl}^t : 시점 t에서 제품 l을 물류센터 j에서 보관할 때의 단위 보관비용

<결정 변수(decision variables)>

X_{ijlm}^t : 시점 t에서 제품 l이 물류센터 j에서 리테일러 i로 운송유형 m을 이용하여 운송될 때의 운송량
Z_j^t : 시점 t에서 물류센터 j의 운영 여부에 대한 이진변수(0 또는 1)
I_{jl}^t : 시점 t에서 제품 l이 물류센터 j에 보관될 때의 보관량
Y_{jklm}^t : 시점 t에서 제품 l이 공장 k에 생산 후 물류센터 j로 분배될 때의 흐름량

통합 생산 및 분배 관리를 위한 ‘유통 단계’ 수리모형에서는 다제품에 대한 다중 물류센터 및 복수개의 많은 리테일러(multi retailer)를 고려하여 혼합정수계획법(MIP) 형태로 모델링하였으며, 식 (10)에서 식 (18)까지 전개된 수리모형 MIP 2와 같다.

MIP 2 :

$$Min \ \sum_t \sum_m \sum_l \sum_j \sum_i C^t_{ijlm} + X^t_{ijlm} + \sum_t \sum_l \sum_j j^t_{jl} I^t_{jl} + \sum_t \sum_j g^t_j Z^t_j \quad (10)$$

subject to

$$\sum_m \sum_j X^t_{ijlm} \geq a^t_{il} \quad \text{for} \ \forall \, i, l, t \quad (11)$$

$$\sum_m \sum_l \sum_i s^t_{jl} (I^{t-1}_{jl} + Y^t_{jl}) \leq W^t_j Z^t_j \quad \text{for} \ \forall \, j, t \quad (12)$$

$$\sum_t Z^t_j \leq W \quad \text{for} \ \forall \, t \quad (13)$$

$$\sum_l v^t_l Y^t_{ijlm} \leq V^t_{ijm} \quad \text{for} \ \forall \, i, j, m, t \quad (14)$$

$$I^{t-1}_{jl} + Y^t_{jl} = I^t_{jl} + \sum_m \sum_i X^t_{ijlm} \quad \text{for} \ \forall \, j, l, t \quad (15)$$

$$M \times Z^t_j \geq \sum_l I^t_{jl} \quad \text{for} \ \forall \, j, t \quad (16)$$

$$Z^t_j = \{0, 1\} \quad (17)$$

$$X^t_{ijlm}, Y^t_{jl}, I^t_{jl} \geq 0 \quad (18)$$

식 (10)은 개별 물류센터(D/C)에서 각각의 고객으로의 제품의 운송비용과 각 물류센터의 재고 유지비용, 사용하는 물류센터에 대한 운영비용의 합을 최소화하겠다는 목적식을 나타낸다. 식 (11)은 고객의 기간별 제품 수요량을 만족시켜야 한다는 제약식이고, 식 (12)는 사용하는 물류센터의 전체 저장용량을 넘지 않도록 제품 저장 및 생산하여야 한다는 제약식이다. 식 (13)은 사용하는 물류센터의 사용 개수 제한에 대한 제약식이고, 식 (14)는 운송 소요 능력의 합이 전체 운송 능력을 넘지 않아야 한다는 제약식이다. 식 (15)는 각 제조 거점에서의 생산량에 의한 분배 거점의 입고량과 재고량 및 운송량에 대한 재고 균형식이며, 식 (16)은 분배 거점 오픈 여부와 생산 거점의 재고 수량에 관한 Big M 제약식이다. 식 (17) 분배 거점 사용 여부에 대한 이진 변수 정의이고, 식 (18)은 생산에 의한 입고량, 재고량, 운송량에 대한 비음 조건이다.

이상과 같이 식 (10)에서 식 (18)까지 전개된 MIP 2 수리모형을 통하여 물류센터와 리테일러 사이의 최적 입고량, 재고량, 운송량이 구해진다.

3. 알고리듬

3.1 혼합 유전 알고리듬 설계

생산 및 분배계획을 혼합 정수 계획법으로 푸는 것은 문제의 크기가 작은 경우에는 가능하다. 그러나 문제의 크기가 커지면 적정시간내의 해를 구하는 것에 있어 어려움이 발생한다.

이러한 어려움을 해결하는 방안으로 비교적 우수한 해를 빠른 시간 내에 풀 수 있는 알고리듬이 필요하다. 본 연구에서 이러한 알고리듬으로 선택되어진 것이 유전 알고리듬이다. 시뮬레이티드 어닐링, 타부 서치 등의 다른 경험적 알고리듬도 존재하나 복수의 해 집단을 유지함으로써 사용자에게 여러 대안 계획을 제공할 수 있다는 점과, SAP 또는 Oracle과 같은 기업용 SCM 소프트웨어를 공급하는 선도기업들이 이러한 문제에 사용하고 있는 알고리듬이라는 점에서 유전 알고리듬을 채택하게 되었다.

유전 알고리듬을 이용하여 문제의 해법을 찾기 위해서는 해의 유전적 표현, 선택 연산, 교배 연산, 변이 연산 등에 대하여 기존의 사용되어지고 있는 여러 방법들 중에서 적정한 것을 선택해야 한다. 이를 위하여 해의 유전적 표현 및 연산기법의 선택에 있어 많은 기법이 개발되었

지만, 통합 생산 및 분배 관리를 위하여 개발한 MIP 1 및 MIP 2 수리모형의 경우에는 독립적인 유전자로 문제를 표현하는 것이 어렵고, 유전자들 간의 상위 관계가 심하기 때문에 일반적으로 널리 활용되고 있는 유전 알고리듬만을 적용함으로써 우수한 해를 구하는데 한계가 있다. 이러한 이유로 Silver and Meal[1973]이 제안한 Silver-meal heuristic 기법에 의한 국지적인 최적화를 활용하여 혼합형 유전 알고리듬을 고안하였다.

혼합형 유전 알고리듬의 가장 큰 특성은 교배 및 돌연변이 연산을 통하여 생성된 자식해에 지역 최적화 기법을 적용하여 새로운 자식해를 만들어 해의 진화 가능성을 높인다는 점을 들 수 있다. 본 연구에서 제안된 유전 알고리듬은 LP-Relaxation을 통하여 비교적 우수한 해를 초기 모집단의 생성하였고, 이렇게 생성된 모집단의 진화를 보조하기 위하여 Silver-meal heuristic을 지역 최적화 기법으로 사용한 것이 특징이다.

유전 알고리듬은 찾고자 하는 해를 염색체의 형태로 표현한 후 임의의 초기 모집단을 생성하고, 다시 우수한 해가 선택되어질 확률을 높게 하여 중간 모집단을 생성하고 이들에 대하여 교차 및 변이 연산자를 통하여 새로운 세대를 구성하여, 이러한 세대를 통한 진화 원리를 이용하여 우수한 해를 탐색하는 과정으로 볼 수 있다.

교차 연산은 부모 해의 우수한 유전 특성을 기반으로 새로운 자식 해를 생성하는 것으로 이러한 교차 연산을 통하여 해의 진화가 이루어질 수 있다. 그러나 본 연구에서 다루고 있는 문제에 있어 유전자간의 상호 관계가 심한 관계로 교차 연산을 통한 해의 진화를 기대하기 힘들다. 사이트 2가 사이트 1에 대하여 단일 제품을 공급하는 공급 사슬에 있어 8기간 동안의 생산계획을 세우기 위해 필요한 해의 유전적 표현방법을 생각해보면 하나의 해는 16개의 유전자로 표현할 수 있다(사이트×제품×기간). <그림 2>에서의 두 염색체를 보면, 6번째 유전자의 값이 1에서 0로 바뀌었을 뿐 나머지 동일한 값을 가진다. 그러나 유전자의 의미를 고려하여 보면 6번째 유전자의 값이 1에서 0으로 바뀜에 따라 4번째, 9번째, 14번째 유전자의 의미가 모두 바뀌어진 것을 볼 수 있다. 본 연구에서 다루고 있는 생산 분배 문제는 이와 같이 특정 위치에서의 유전자의 값의 변화가 다른 유전자의 의미를 바꾸는 유전자간의 상호작용이 강한 문제이다. 앞에서 언급한 바와 같이 이러한 유전자간의 강한 상호 관계는 부모 해의 교차 연산을 통한 해의 진화를 기대하기 어렵게 만들기 때문에

염색체1																
	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0

사이트1/기간	1	2	3	4	5	6	7	8
수요	30	50	80	20	90	30	20	30
염색체1-1	1	0	0	1	0	1	0	0
생산(주문)량	160	0	0	110	0	80	0	0
사이트2/기간	1	2	3	4	5	6	7	8
수요	160	0	0	110	0	80	0	0
염색체1-2	1	0	0	0	0	1	0	0
생산(주문)량	270	0	0	0	0	80	0	0

염색체2																
	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0

사이트1/기간	1	2	3	4	5	6	7	8
수요	30	50	80	20	90	30	20	30
염색체2-1	1	0	0	1	0	0	0	0
생산(주문)량	160	0	0	190	0	0	0	0
사이트2/기간	1	2	3	4	5	6	7	8
수요	160	0	0	190	0	0	0	0
염색체	1	0	0	0	0	1	0	0
생산(주문)량	350	0	0	0	0	0	0	0

〈그림 2〉 선택, 변이, 교차 유전자 정의

이를 보완하기 위한 지역 최적화 알고리듬의 적용이 필요하다[Srinvas and Patnaik, 1994].

변이 연산은 부모 해에 없는 속성을 도입하여 탐색 공간을 넓히려는 목적을 가진 연산이다. 각각의 유전자에 대하여 [0, 1] 범위의 난수를 생성하여 미리 정한 임의의 임계 값 미만의 수가 나오면 해당 유전자를 임의로 변형시키고 그 이상의 수가 나오면 그냥 둔다. 본 연구 실험에서의 변이 연산으로는 알고리즘이 진행됨에 따라 점점 변이의 강도를 줄여가는 비균등 변이(non-uniform mutation) 연산자를 채택하였다[Srinvas and Patnaik, 1994].

선택 연산은 n개의 모집단에서 우수한 해가 선택되어질 확률을 높게 하여 복원추출을 통하여 새로운 n개의 모집단을 생성하는 과정이다. 본 연구에서는 이러한 선택 연산자로 품질 비례 룰렛 휠 선택 방법 및 엘리티즘 기법[Kim and Ellis, 2008]을 택하였다. 품질 비례 룰렛 휠 방법은 품질에 기반하여 각 염색체들에 확률 값을 정의하고 이를 기준으로 임의의 난수 값을 발생하여 새로운 모집단을 구성하는 방법이다. 진화 과정에서 생성되는 해들의 품질이 비교적 균등하게 분포되어 있기 때문에 이러한 선택 방법의 사용은 타당하다고 생각되어진다. 엘리티즘은 세대가 진화하더라도 각 세대에서 가장 우수한 해는 언제나 다음세대에도 존재하도록 만드는 기법으로 각 세대에서 가장 우수한 해는 선택 연산과정에서 적어도 하나 이상 포함되도록 하고 변이 및 교차 연산을 통한 해의 손상을 방지하는 방법이다.

또한 본 연구에서는 앞서 언급한 유전자간의 강한 상호작용으로 인한 해가 제대로 진화되어 질 수 없다는 점을 보완하기 위하여 Silver-meal heuristic을 적용하였다. <그림 1>에서 언급한 것과 동일한 문제에서 해의 교차와 돌연변이 연산을 통하여 위와 같은 해가 나왔다고 하자. 이 해를 연산을 통하여 보다 우수한 해로 변화하기 위해서는 해당 사이트에서의 생산(주문) 비용과 재고 유지 비용간의 관계만을 고려하여 현 시점에서 생산하는 것이 이익인 경우에는 생산을 하고(유전자 값 1), 그렇지 않은 경우 그 전기에서 생산을 통해 재고로서 수요를 만족시키는 것이 좋다면 생산을 안 하게 만들 수 있다(유전자 값 0). 그러나 이 기법의 적용에 있어 문제점은 상위 단계에서 해당 사이트에서 만의 비용을 고려하면 하위 단계에서의 비용 관계를 고려하지 않아 전체적으로는 더 안 좋은 해를 만들 수 있게 된다. 이러한 점을 보완하기 위하여 상위 단계에서는 아주 낮은 확률로서 Silver-meal heuristic을 적용하고 하위 단계로 갈수록 적용 확률을 높이는 것이 좋은 결과를 보일 수 있다. 이러한 일련의 과정은 다른 관점에서 보게 되면 돌연변이 연산과 유사하게 보일 수도 있다. 그러나 돌연변이 연산은 해의 진화 여부와 관계없이 임의로 유전자를 바꾸는 것이라면 이 과정은 교차 연산과 돌연변이 연산이 끝난 자식 해들에 대하여 각 유전자들을 대상으로 Silver-meal heuristic 기법을 통하여 보다 우수한 해로 대치시키는 과정으로 볼 수 있다.

3.2 통합 생산 및 분배 시스템을 위한 유전 알고리듬

본 연구에서 통합 생산 및 분배 시스템 모형의 해를 구하기 위하여 제안하는 혼합 유전 알고리듬을 알기 쉽게 도시하면 <그림 3>과 같으며, 해 도출 과정을 순차적으로 정리하면 다음과 같다.

Step 1 : 초기화 단계

모집단 크기, 세대수를 정한 후 유전자 개체 표현에 맞는 초기모집단을 임의로 생성한다.

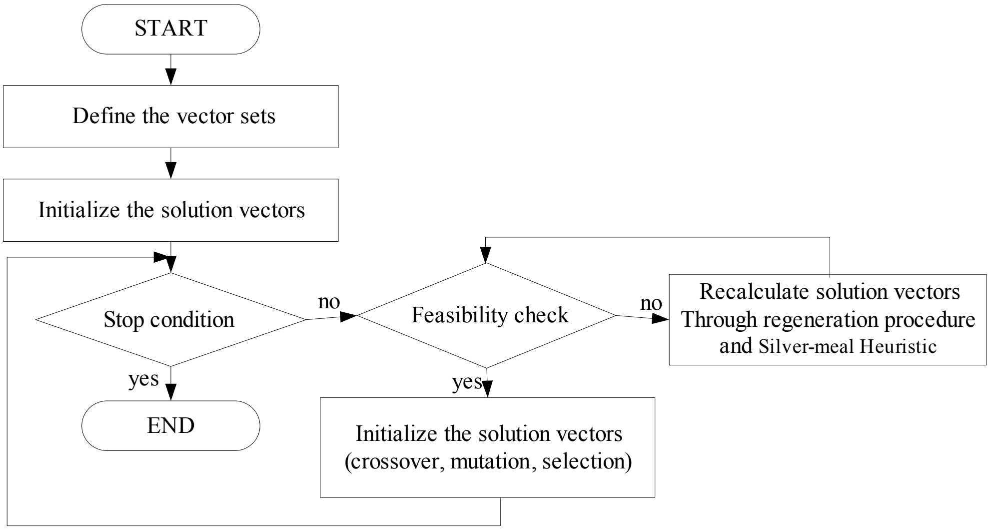
Step 2 : 지역 최적화 교차 연산
지역 최적화 알고리듬을 활용한 교차 연산을 진행한다.
Step 3 : 비균등 돌연변이 연산
비균등 변이 연산자에 의한 변이 연산을 수행한다.
Step 4 : 선택
품질 비례 룰렛 휠 선택 방법을 통하여 선택과정을 수행한다.
Step 5 : 가능해 검사 및 평가
5-1 : 해집단에 대하여 실행가능해 여부를 검사한다.
5-2 : 비가능해이면, 재생성 절차 및 Silver-meal heuristic 기법을 수행한 후 단계 2로 간다.
그렇지 않으면, 평가함수를 사용하여 평가점수를 계산한다.
Step 6 : 종료조건
종료조건을 만족하면 종료한다. 그렇지 않으면 Silver-meal heuristic 기법을 적용하고 단계 2로 간다.

이러한 혼합 유전 알고리듬을 우선 ‘유통 단계’의 수리모형 MIP 2에 적용하여 근사해를 구해낸다. 그리고 MIP 2의 해 중에서 공장에서 생산되어 물류센터로 분배된 흐름량의 계산 결과를 ‘생산 분배 단계’의 수리모형 MIP 1에 적용하여, 다시 혼합 유전 알고리듬으로 근사해를 구해낸다.

이렇게 ‘유통 단계’를 거쳐 ‘생산 분배 단계’로 이어지는 2단계에 과정으로 생산계획 및 분배계획 결과를 도출하게 되며, 생산, 저장, 운송에 대한 결정변수 값을 계획 수량으로 활용하게 된다.

4. 수치예제

로봇 산업계를 위한 통합 생산 및 분배 시스템은 로봇 산업계의 공급망을 구성하는 각 기업들의 재고량과 생산량, 운송량을 파악할 수 있어야 한다. 이에 따라 CPLEX 솔루션을 활용하여 구한 최적해와 제안한 혼합 유전 알고리듬의 수행 결과를 비교하였다. 고객의 수요에 대하여 공장의 갯수, 취급 제품의 수, 물류 센터의 수, 고객 등을 증가시켜가면서 제안한 통한 생산 및



〈그림 3〉 통합 생산 및 분배 시스템을 위한 혼합 유전 알고리듬의 수행 절차

분배 시스템의 수리모형과 혼합 유전 알고리듬의 효율성과 정확도를 평가하였다.

수치예제를 활용하여 알고리듬을 평가하는 데 있어, 2GB 메모리와 펜티엄Ⅳ(Intel Pentium Ⅳ processor 2.6 GHz)를 장착하고 Windows XP에서 구동되는 IBM 호환 PC 환경에서 Visual Studio 2008 C++랭귀지를 활용하여 제안 알고리듬을 프로그래밍하여 실험을 수행하였다. 특히 제안하는 혼합 유전 알고리듬의 정확도와 성능을 확인하기 위하여, 혼합정수계획법(MIP) 형태의 수리 모형에 대한 최적해를 구할 수 있는 IBM ILOG의 최적해 솔루션 CPLEX 12.1의 결과와 제안 알고리듬의 결과를 비교 평가하였다.

〈표 1〉 주요 입력 모수

입력 모수	값
공장 보관비용	0.70
물류센터 보관비용	0.70
생산 단가	0.20
운송 비용	0.05

본 연구에서 제안한 지능형 생산 및 분배 시스템의 수리 모형과 알고리듬을 평가하기 위한 주요 입력 모수는 <표 1>과 같으며, 이 때 사용한 고객의 수요는 <표 2>와 같다.

특히 본 연구에서 고객 수요 데이터로 적용한 <표 2>는 김태영[2010]의 연구의 수요를 활용하였으며, 경기테크노파크[2012]의 연구에 제시된 수도권과 대경권을 고려한 로봇 산업계의 공급망 구성에 대한 정보를 활용하였다.

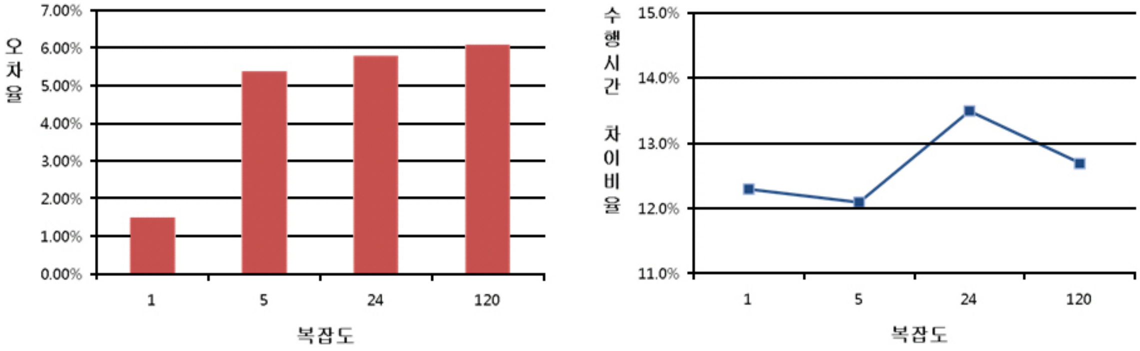
<표 3>은 CPLEX를 활용하였을 때와 본 연구에서 개발한 혼합 유전 알고리듬을 활용하였

〈표 2〉 통합 생산 및 물류 시스템을 위한 수요 자료

기간	수요	기간	수요	기간	수요	기간	수요
1	0	14	157	27	273	40	241
2	0	15	276	28	268	41	28
3	0	16	187	29	212	42	53
4	24	17	301	30	261	43	21
5	69	18	274	31	297	44	309
6	35	19	0	32	3	45	36
7	5	20	276	33	199	46	17
8	155	21	172	34	5	47	268
9	55	22	229	35	315	48	143
10	169	23	165	36	264	49	85
11	250	24	216	37	53	50	4
12	309	25	105	38	32		
13	244	26	306	39	235		

〈표 3〉 제안하는 혼합 유전 알고리듬과 CPLEX 솔버의 비용 최적해 및 계산 시간 비교

제품 수	공장 수	물류 센터 수	리테일러 수	기간 수	CPLEX		제안 유전 알고리듬	
					최적해 (비용)	CPU Time (s)	최적해 (비용)	CPU Time (s)
1	1	1	1	10	1635	2451	1660	301
1	1	1	1	50	3645	8150	3841	987
3	2	2	2	10	6278	222008	6641	58467
3	2	2	2	50	31125	604591	33023	93574



〈그림 4〉 문제의 복잡도에 따르는 알고리듬의 오차율과 수행시간 차이 비율

을 때의 차이를 보인 것이다. <표 3>을 살펴보면, CPLEX를 사용하였을 때와 본 연구에서 지능형 통합 생산 및 분배 관리 시스템을 위하여 개발한 혼합 유전 알고리듬의 사용하였을 때의 최적해 값이 거의 유사하다는 것을 확인할 수 있다.

특히 <그림 4>에서 알 수 있는 바와 같이, 본 연구가 제안한 유전 알고리듬은 CPLEX가 최적해를 도출한 결과와 6% 미만의 오차를 보이면서도, 계산 시간에 있어서 문제의 크기가 큰 경우에 대해서도 CPLEX에 비하여 현저히 빠른 시간에 해를 구하고 있음을 알 수 있다. 문제의 크기가 커짐에 따라 수행시간 차이 비율이 조금씩 커지고는 있지만 CPLEX로 해를 구하는 경우에 비하여 14% 이내의 소요시간 안에 해를 구하고 있으며, 따라서 본 연구가 제안하는 혼합 유전 알고리듬이 최적해와 큰 차이가 없는 해를 실제로 활용 가능한 시간 안에 빠르게 계산해 낸다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 로봇 산업계의 공급망 구성을 위하여 2단계로 구성된 혼합정수계획법(MIP) 수리 모형을 제안하였으며, 이러한 모형에 대하여 해를 구할 수 있는 혼합 유전 알고리듬을 개발하였다. 이를 통하여 공급 사슬 관리를 진행하면서 생산, 재고, 운송에 관련한 모든 제약 조건을 고려하면서 생산 및 분배 관리를 할 수 있는 지능형 시스템을 개발하였다. 특히 2단계로 개발된 수리 모형을 Silver-meal heuristic을 적용한 혼합 유전 알고리듬을 이용하여 최적해를 구하도록 함으로써, 효율성과 활용성을 크게 높인 것이 특징이다.

로봇 산업에서 기본적으로 필요한 기술이라고 할 수 있는 인식, 판단, 행동의 순서에서 가장 핵심이 되는 센서 기술은 국내 산업계의 기술 역량이 열악한 상태에 있으며, 로봇에 필요한 부품의 구매량이 많지 않다는 이유로 부품 공급업체가 기술 개발이나 부품 생산을 회피하는 경우가 많다. 따라서 정책적인 지원 및 IT기술의 융합화로 기술완성도를 향상시킬 수 있도록 하는 노력이 필요하다. 로봇 산업계를 위한 공급망 구성은 부품 공급업체의 역량 강화를 기반으로 이룩되어야 한다.

본 연구 결과를 활용하면 SCM 환경에서 생산 및 분배 관리를 최적화할 수 있는 IT Solution의 엔진으로 탑재하여 적용하는 것이 가능하며, 글로벌 경쟁 하에서 효율적인 업무수행을 뒷받침할 수 있는 로봇 산업계의 여러 기업의 협업을 위한 IT 시스템을 개발하고 완성하는 데 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

향후 연구과제로는, 로봇 산업의 경우 고객이 희망하는 시기에 희망 제품을 생산할 수 있게 하는 주문형 생산(Make to Order) 방식을 취하는 경우가 많으므로 이러한 경우를 위한 공급망 프로세스 및 템플릿 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] 경기테크노파크, "수도권과 대경권을 연계한 로봇기술사업화의 공급망 프로세서 개선 연구", 2012.

[2] 김태영, "유전 알고리듬을 적용한 지능형 ATP 시스템 개발", *지능정보연구*, 제16권 제4호, 2010, pp. 131-146.

[3] 주종대, "로봇산업의 발전방안에 관한 연구-로봇 전문기업 기술혁신을 중심으로", 연세대학교 경제대학원 석사학위논문, 2009.

[4] 황승준, 김태영, 금병찬, "공급망 환경에서 중소부품제조업체의 생산물류계획 통합 사례연구", *한국SCM학회지*, 제11권 제1호, 2011, pp. 105-120.

[5] Chern, C. C. and Hsieh, J. S., "A heuristic algorithm for master planning that satisfies multiple objectives", *Computers and Operations Research*, Vol. 34, No. 11, 2007, pp. 3491-3513.

[6] Ekşioğlu, S. D., Edwin, R. H., and Pardalos, P. M., "Cross-facility management of production and transportation planning problem", *Computers and Operations Research*, Vol. 33, No. 11, 2006, pp. 3231-3251.

[7] Ekşioğlu, S. D., Ekşioğlu, B., and Romeijn, H. E., "A Lagrangean heuristic for integrated production and transportation planning problems in a dynamic, multi-item, two-layer supply chain", *IIE Transactions*, Vol. 39, No. 2, 2007, pp. 191-201.

[8] Gen, M. and Cheng, R., *Genetic Algorithms and Engineering Design*, Wiley, NY, 1997.

[9] Gen, M. S. and Syarif, A., "Hybrid genetic algorithm for multi-time period production/distribution planning", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 48, No. 4, 2005, pp. 799-809.

[10] Goldberg, D. E., *The Design of Innovation*, Kluwer Academic Pub., MA, 2000.

[11] Kim, J. L. and Ellis, R. D., "Permutation based elitist genetic algorithm for multiple resource constrained project scheduling problem", *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 134, No. 11, 2008, pp. 904-913.

[12] Mula, J., Peidro, D., Díaz-Madroñero, M., and Vicens, E., "Mathematical programming models for supply chain production and transport planning", *European Journal of Operational Research*, Vol. 204, No. 3, 2010, pp. 377-390.

[13] Rizk, N., Martel, A., and D'Amours, S., "Multi-item dynamic production-distribution planning in process industries with divergent finishing stages", *Computers and Operations Research*, Vol. 33, No. 12, 2006, pp. 3600-3623.

[14] Romo, F., Tomasgard, A., Hellemo, L., Fodstad, M., Eidesen, B. H., and Pedersen, B., "Optimizing the Norwegian Natural gas production and transport", *Interfaces*, Vol. 39, No. 1, 2009, pp. 46-56.

[15] Selim, H., Am, C., and Ozkarahan, I., "Collaborative production-distribution planning in supply chain : a fuzzy goal programming

approach", *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, Vol. 44, No. 3, 2008, pp. 396-419.

[16] Silver, E. A. and Meal, H. C., "A heuristic for Selecting lot-size quantities for the case of a deterministic time-varying demand rate and discrete opportunities for replenishment", *Production Inventory Management*, Vol. 14, No. 2, 1973, pp. 64-74.

[17] Srinvas, M. and Patnaik, L. M., "Adaptive Probbilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms", *IEEE Transactionon Systems, Man and Sybernetics*, Vol. 24, 1994, pp. 656-667.

[18] Su, Q., Song, Y. Li, Z., and Dang, J., "The impact of supply chain relationship quality on cooperative strategy", *Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol. 14, No. 4, 2008, pp. 263-272.

[19] Torabi, S. A. and Hassini, E., "An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 159, No. 2, 2008, pp. 193-214.

■ 저자소개

조 성 민

영남대학교 경제학사, 한성대학교 경영학석사를 받았다. 한양대 경영학과 박사수료와 기술거래사, M&A 컨설턴트, 기업가치평가사 자격을 취득하였다. 현재 경기테크노파크 기술이전사업화센터 팀장으로 재직 중이며, 정부국책과제인 지능형로봇 서비스산업 지원사업 비R&D과제, 기술거래촉진 네트워크사업 수도권 컨소시엄과제 총괄 기획 및 실행을 수행하였다. 관심분야는 정부와 민간의 기술사업화 정책과 정책의 효율성이다.

김 태 영

한양대학교 산업공학과에서 공학사, 공학석사, 공학박사 학위를 받았다. 한양대학교 경상대학에서 겸임교수로 재직하였으며, 동양미래대학교 경영학부에서 전임강사로 재직하였다. 한국IBM에서 SCM 컨설턴트로 근무하였으며, 정보지식연구소에서 연구원으로 근무한 바 있다. 관심분야는 생산 및 물류관리, ERP/SCM, 경영과학이며, 국내외 전문 학술지에 다수의 연구 논문을 발표하고 있다. 저서로는 <알기쉬운 생산운영 관리 : 생산이론부터 ERP 실무지식까지>가 있다.

황 승 준

한양대학교 공학사, 미국 Georgia Institute of Technology 산업공학과 석사, 박사를 취득하였다. 현대전자 반도체연구소에서 기술기획/관리를 수행하였으며, 현 한양대학교 ERICA 경영학부 부교수로 재직 중이다. 생산서비스운영관리(지필, 2013)외 다수의 저,역서와 논문을 국내외에 발표하였다. 주요 관심분야는 물류/생산/서비스시스템 분석/최적화와 이를 활용한 중소/중견기업 경영컨설팅 방법론개발이다.

◈ 이 논문은 2013년 05월 07일 접수하여 2013년 06월 12일 게재확정되었습니다.