

Fractal 기반 공급망 관리에 있어서의 동적 재구성력

Dynamic Reconfigurability in the Fractal-based Supply Chain Management (fSCM)

류광열¹, 이석우¹, 최헌종¹, 정무영²

¹한국생산기술연구원 생산공정기술본부

²포항공과대학교 산업공학과

Abstract

The high degree of uncertainty in customer demands forces companies of today to equip with a flexible and adaptable structural organization. It also has an influence on the configuration of the company's supply chains, since the members in supply chains are dependent to the goods customers need. If a company can not come up with the customers' requirements and their level of satisfaction, the competitiveness of the company will be weakened in the market places. To meet such conditions, therefore, reconfiguration of supply chains should be considered as an important factor in a complex, dynamic, and fluctuating market environment. In this paper, therefore, we have adapted a fractal concept to SCM to facilitate reconfiguration of supply chains. To do so, we have first introduced fractal-based SCM, referred to as fSCM. Then, we have described definitions of the reconfigurability in supply chains and the methodology of Dynamic Restructuring Process (DRP) in supply chains including specific strategies and constraints. An exemplary model will also be briefly illustrated to demonstrate how supply chains conduct DRP autonomously.

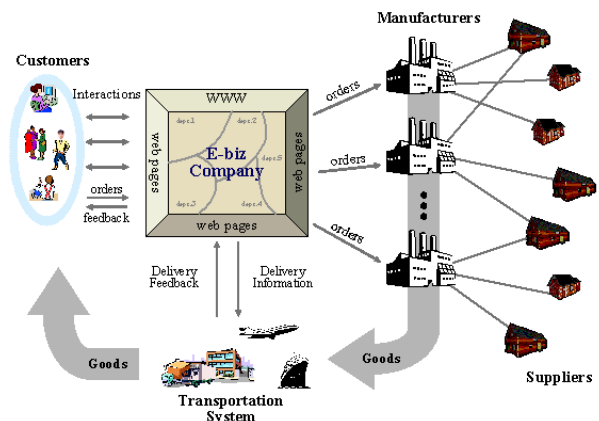
1. Introduction

최근의 급격한 시장변화와 소비자 구매욕구의 다양성은 e-biz 회사들로 하여금 고객을 만족시키기 위해 더더욱 어려운 상황이 되어가고 있다. 이로 인해 공급망 관리(Supply Chain Management)에 있어서도 전사적인 접근이 필요하며 분산되어 있는 망에 대한 통합 운영 및 망의 최적화가 절실하게 필요하게 되었다. SCM에 관한 연구는 전세계 많은 연구자들이 수행해 왔으며, 물류[1, 2], 교통 및 수송[3], 생산[4] 등 그 적용분야 또한 다양하다. 기업 경쟁력을 위한 SCM의 영향 및 전사적 측면에 있어서 SCM에 대한 연구로부터 얻을 수 있는 장점 등으로 인해 여러 산업분야에서 공급망의 중요성은 점차 증대되고 있는 추세이다[5-6].

과거 SCM의 연구는 생산자(manufacturer)와 공급자(supplier) 사이의 연관관계에 초점을 두어

연구되어 왔으나, 최근의 SCM에 대한 연구는 제품개발과정에 있어서의 공급자(supplier)의 참여, 공급자체에 대한 가격 및 품질, 공급망의 와해에 대한 위험 등이 주로 고려되고 있다[7]. 또한 제품 시장에서의 소비자에 대한 중요성이 증가되고 있는 만큼 SCM을 바라보는 관점 또한 생산자 중심에서 점차 소비자 중심으로 옮겨지고 있다[8]. 특히 인터넷의 보급으로 인한 온라인 시장의 활성화는 기업과 고객이 직접 거래하는 기회를 증대시켜 기업은 고객의 요구조건에 대해 즉시 반응하고 만족시킬 수 있어야만 살아남을 수 있게 되었다. 고객 중심의 e-Marketplace는 e-business 관점에서의 B2C (Business to Customer)를 형성하며, 이는 인터넷 상에서 흔히 접할 수 있는 온라인쇼핑몰을 예로 들 수 있다. B2C 상에서의 공급망 구성의 예는 [그림 1]과 같다.

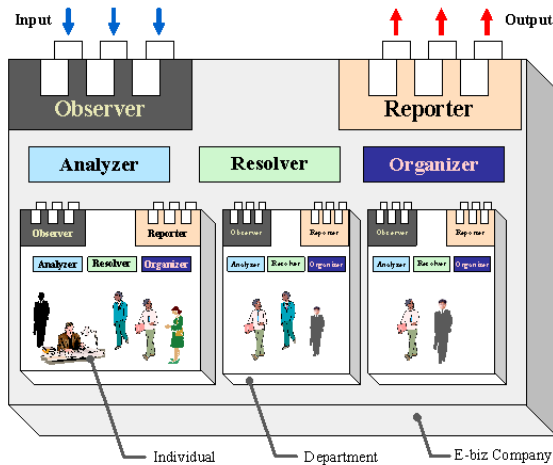
공급망은 적용 산업분야에 따라 종류와 복잡도(complexity)에 많은 차이를 보이게 된다. 고객의 다양한 수요변화에 대응하고, 이에 따른 제품 수명의 단축 및 짧은 신제품 개발기간 등을 지원하기 위해 각 기업은 동적 재구성이 가능한 공급망의 구성이 필요하다고 판단된다. 따라서, 본 논문에서는 복잡 다양한 공급망의 통합적 이해 및 관리를 위해 Fractal 개념을 적용하였으며, 급변하는 시장환경에 대응하기 위한 공급망의 동적 재구성력 (Dynamic Reconfigurability)에 관한 연구를 수행하였다.



[그림 1] e-biz(B2C) 기업 공급망의 예

2. Fractal-based Supply Chain Management (fSCM)

기업의 이익을 극대화하기 위해서는 공급망에 대한 포괄적이고 체계적인 설계, 운영 및 관리가 필요하다. 점차 복잡해져 가는 공급망에 대한 쉬운 이해 및 효과적인 관리를 위해 Fractal의 개념을 적용한 공급망의 관리, 즉 Fractal-based Supply Chain Management (fSCM)에 대한 연구가 진행되어 있다[9]. Fractal은 크게 Observer, Analyzer, Resolver, Organizer, Reporter 다섯 개의 기능모듈로 구성되어 있다. Fractal 개념을 SCM에 적용함으로써 공급망을 구성하는 각 구성요소 간 관계는 self-similar한 특성을 갖는 Fractal로 모델링이 가능하며 이는 각각의 개별 구성요소 뿐 아니라 전체 공급망에 대해서도 같은 방식으로 모델링이 가능하다. 이러한 fSCM의 특성은 [그림 2]에서 볼 수 있는 바와 같이, 공급망을 구성하는 개개인부터 각 부서 및 전체 기업에 대해 같은 기능모듈을 이용하여 표현할 수 있다.



[그림 2] e-biz Company의 Fractal 구조 예

Fractal은 본질적으로 self-organization, self-optimization, goal-orientation, self-similarity, vitality, dynamics와 같은 특성을 가지고 있다. 이 중 특히 자가재구성력(self-reconfigurability)이라는 특성은 self-organization에 의해 제약받고 다음과 같은 두 가지 방법으로 fSCM 내에서 구현된다.

- 1) 이론적 최적화법 : 시스템 내에서 Fractal의 구성 및 프로세스 제어를 최적화하기 위해 이에 적합한 최적화 기법을 사용하는 방법,
- 2) 동적 재구성법(Dynamic Restructuring Process; DRP) : 시스템 내의 구성요소 및 Fractal 간의 관계를 다이나믹하게 변화시키는 방법 (이론적 방법에서의 결과를 실제로 시스템에 반영하는 역할).

Fractal 기반의 시스템에서 자가재구성과 관련된 특성들은 Fractal들이 자체적으로 시스템 내에서 발현함으로써 점차 안정된 시스템의 구조를 만들어가게 되며, 특히 fSCM에서의 DRP는 공급망 요소의 변화를 Fractal들이 자율적(autonomous)이고 지능적(intelligent)이며 빠르게 공급망 구조에 반영하므로 기업으로 하여금 고객 수요변화에 따른 신속한 대응을 가능케 할 수 있다.

fSCM을 구성하는 각 Fractal들은 고유의 영역에 대한 goal 모델을 가지고 있다. 각 goal 모델은 Cost를 최소화 하거나 반대로 Profit을 극대화 하는 등 보통 수학적인 모델로 표현된다. 시스템 전체를 표현하는 Fractal은 각 Sub-fractal들의 모델을 통합하여 전체 시스템의 목적을 달성하게 된다. 이러한 Fractal의 Goal 모델을 개념적으로 나타내면 다음과 같다[9].

$$\begin{aligned} & \max p_f \text{ (profit of the fractal } f) \\ & \text{where,} \\ & p_f = \sum_{i=1}^n p_i - C^f \\ & p_i = \text{profit of sub-fractal } i \text{ (} i = 1, \dots, n) \\ & C^f = \text{additional fixed cost for the fractal } f \end{aligned}$$

각 Fractal의 Goal은 Analyzer에 의해 필요한 모든 상황데이터를 이용한 분석작업 (시뮬레이션 및 예측작업 등)이 수행된 후, 그 결과를 바탕으로 Resolver에 의해 최적화 된다. 결국, fSCM 내에서의 Goal 최적화 및 이들의 통합은 주로 Analyzer와 Resolver에 의해 수행된다. 각 Fractal의 Goal 통합은 개념적으로 다음과 같이 표현할 수 있다 (\oplus : model integration operator)[9].

$$\begin{aligned} & g_f = g_1 \oplus g_2 \oplus \dots \oplus g_n \oplus F_f \\ & \text{where,} \\ & g_i = \text{goal of the sub-fractal } i \text{ (} i = 1, \dots, n) \\ & F_f = \text{numerical expression for additional factors of fractal } f \end{aligned}$$

3. Dynamic Restructuring Process (DRP) in fSCM

3.1 Definition of DRP for Supply Chains

DRP는 시스템 내에 존재하는 Fractal들의 계층적 위치와는 관계없이 그들 사이의 논리적 연관 관계를 재구성 하는 것을 의미한다[10]. 기존에 정의되어 기능하던 Fractal 사이의 연결을 새롭게 하는 것 이외에 새로운 Fractal의 생성으로 인한 Fractal간의 관계 재구성 또는 기존 Fractal의 폐기로 인한 남은 Fractal 사이의 관계 재구성도 DRP의 범주에 해당된다. 특히 fSCM에서의 DRP의 의미는 결국 Goal 모델의 통합 및 재구성을 의미하게 되며 이는 각 Fractal들에 의해 수행되므로 결국 fSCM에서의 공급망 모델은 Fractal들에 의해 스스로 변화·발전해 나가게 된다.

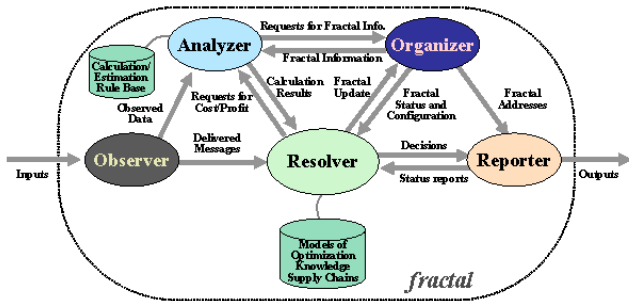
fSCM 내에서의 DRP는 [표 1]에서와 같이 크게 3가지로 구분할 수 있다. DRP 후의 공급망의 변화는 곧 시스템에 존재하는 fractal의 변화로 해석이 가능하며, \widehat{DRP}^* 는 Fractal의 자체 판단에 의해 수행이 시작되며, 나머지는 외부로부터의 명령이나 알림에 의해 수행되게 된다.

[표 1] DRP의 종류

종류	설명	DRP 후 변화
\widehat{DRP}^+	확장용 DRP	공급망 모델의 추가
\widehat{DRP}^-	축소용 DRP	공급망 모델의 삭제
\widehat{DRP}^*	개선용 DRP	공급망 모델의 재구성

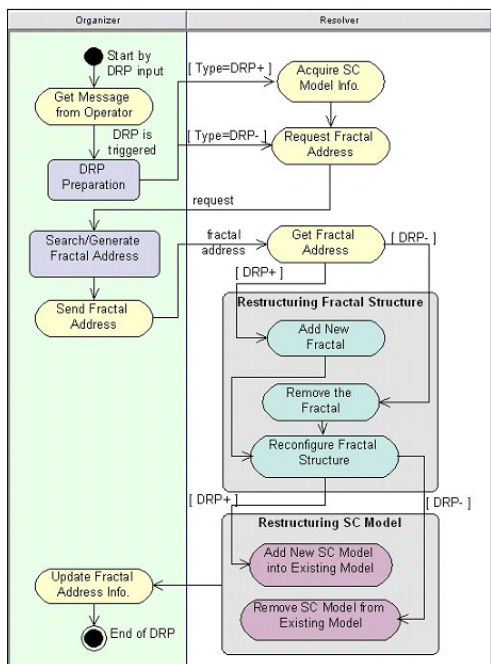
3.2 DRP Framework in fSCM

fSCM내에 존재하는 Fractal의 기능모듈 및 그들 사이의 관계는 기본적으로 [그림 3]과 같이 구성된다. 특히 DRP의 수행과 관련하여 Analyzer는 Fractal 공급망 모델의 최적화를 위한 기본적인 계산 및 예측 모델을 가지고 있으며, Resolver는 최적화 모델, 지식 모델, 그리고 공급망 모델을 가지고 있다. Organizer는 해당 Fractal과 관련된 상위, 또는 하위에 존재하는 Fractal 정보를 관리하며 Analyzer나 Resolver의 요청에 따라 Fractal의 주소나 상태정보를 그들에게 전달한다.



[그림 3] Fractal Architecture for fSCM

fSCM 내에서의 동적재구성 프로세스는 fractal의 기능모듈 중 하나인 Organizer로부터 시작된다. 가령, \widehat{DRP}^+ 의 경우 Organizer는 추가되어야 할 공급망의 모델을 입력받음과 동시에 DRP가 시작되었음을 다른 모듈에 알리게 된다. Resolver는 공급망에 대한 최적화 모델에 새롭게 입력받은 모델 정보를 Organizer로부터 받아 추가시키고 Analyzer로 이에 대한 내용을 알리면 Analyzer는 Organizer로부터 분석작업에 필요한 정보를 전달받아 계산하여 이에 대한 결과를 다시 Resolver에 통보한다. 마지막으로 Resolver는 Analyzer로부터의 결과를 이용하여 fractal에 존재하는 공급망 모델에 대해 최적화 결과를 도출해 내게 된다. [그림 4]는 \widehat{DRP}^+ 와 \widehat{DRP}^- 를 수행할 때 Organizer와 Resolver 사이에 발생하는 메시지와 Activity를 나타낸다.



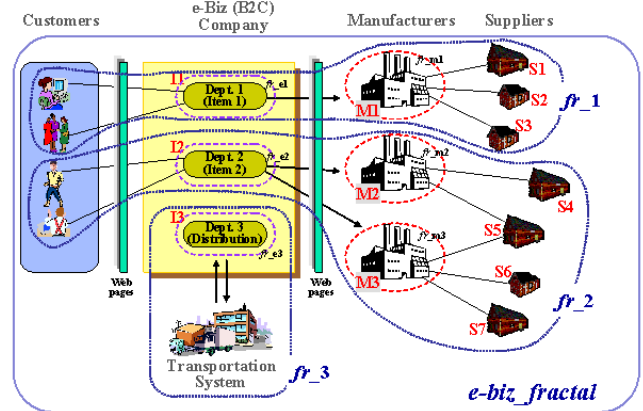
[그림 4] Activity Diagram of \widehat{DRP}^+ and \widehat{DRP}^-

[그림 4]에 나타난 메시지와 Activity 수행 및 조건들은 \widehat{DRP}^+ 와 \widehat{DRP}^- 를 수행하기 위한 내용만을 나타내며, DRP 수행 이후 각 기능모듈의 행동은 그림에 표현되지 않았다. 즉, Analyzer에서의 계산 및 예측 작업과 Resolver에서의 최적화 과정은 DRP가 끝난 이후에 발생하는 행동요소라 할 수 있다. 실제 공급망 모델의 통합 및 Fractal 구조의 재구성은 상당히 복잡한 절차를 거쳐 수행되므로 본 논문에서는 자세한 설명은 생략하기로 하되, 대신 다음 절에서 예를 통해 DRP의 적용 과정을 간단히 설명하기로 한다.

Resolver가 가지고 있는 공급망 모델을 통합하는 과정에서 주의해야 할 점은 각 공급망 모델의 Goal 사이에 일관성(consistency)이 유지되어야 한다는 것이다. 가령, Fractal A의 Goal은 생산자의 입장에서 생산원가를 줄이는 것(Minimize Cost)이고, Fractal B의 Goal은 소비자의 입장에서 이익을 최대화 하는 것(Maximize Profit)이라 할 때, e-Biz 기업의 Goal인 기업과 관련된 모든 구성원의 만족도를 극대화 시키기(Maximize Satisfaction) 위해서는 생산자의 Goal과 소비자의 Goal 사이에 일관성이 없으므로 각 공급망 모델을 통합하는데 문제가 발생하게 된다. 이러한 경우 상충되는 Goal 모델을 변환함으로써, 가령 Fractal A의 Goal인 Minimize Cost를 Maximize Profit으로 수정함으로써, 두 개의 모델이 일관성 있게 최적화될 수 있다.

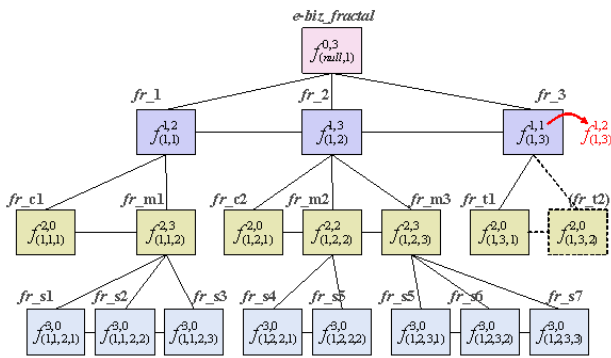
3.3 Exemplary \widehat{DRP}^+ in e-Biz Company

SCM을 위해 Fractal의 개념을 적용함으로써 얻을 수 있는 가장 큰 장점은 아무리 복잡한 공급망의 구성이라도 모두 같은 형태로 모델링이 가능하므로 이해 및 관리하기가 쉬워진다는 것이다. [그림 5]는 [그림 1]에서 보이는 e-Biz (B2C) 기업에 대한 Fractal의 구성을 나타낸다. 기존의 공급망 관리를 위해서는 기업에 전체에 대한 공급망 모델만이 존재하므로 하나의 구성원에 대한 정보를 모델로부터 추출하기가 쉽지 않을 뿐 아니라 관련된 구성원에 대한 정보가 변경되었거나 아예 바뀌었을 경우 전체 공급망 최적화 모델을 재수립해야만 하는 불편함이 존재한다. 그러나 [그림 5]에서와 같이 Fractal 단위로 모델을 수립하였을 경우 모델의 구성원이 변경되면 해당 Fractal의 모델만 변경이 일어나며 전체 최적화모델의 구조는 변하지 않는다. 또한 구성원의 변경에 따른 공급망 모델 또한 Fractal에 의해 관리되므로 새로운 모델의 입력시 Goal의 일관성만 유지한다면 모델의 통합은 자율적으로 진행되게 된다.



[그림 5] e-Biz 기업의 Fractal 구성 예

[그림 5]의 Fractal 구성에 대해 각 Fractal의 개념적 계층구조는 [그림 6]과 같이 표현할 수 있다. 여기서 각 Fractal은 고유한 표기법에 따라 표현된다. 가령, $f_{(c,d)}^{a,b}$ 로 표현되는 Fractal에서 a 는 Fractal의 수준, b 는 Sub-fractal의 개수, c 는 상위 Fractal의 identification을 나타내는 벡터, d 는 같은 수준에 존재하는 Fractal의 순번을 나타낸다. [그림 6]의 Fractal 계층구조를 표현함에 있어 Customer에 대한 Fractal은 각 부서(Department)의 공급망 모델에서 개별 Fractal로 정의되고, 공급자 S5에 대한 Fractal은 생산자 M2와 M3에 각각 표현된다.



[그림 6] Fractal의 개념적 계층구조

[그림 5]의 e-Biz 기업은 현재 한 곳의 물류업체(택배회사)와 계약을 맺어 소비자의 주문물품을 배송하고 있다. 주문량이 늘어남과 함께 늦은 배송에 대한 소비자의 불만이 커져 결국 e-Biz 기업은 한 곳의 다른 배송업체와 계약을 맺으려 할 경우 fSCM 내에서는 \widehat{DRP}^+ 가 수행되게 된다. 이에 따른 개념적 모델의 통합은 다음과 같이 진행된다. 참고로, fSCM에서의 DRP로 인한 공급망 최적화 모델의 수정은 전체 모델의 변화 없이 해당부분의 모델만을 수정하여 이루어지게 된다.

- 1) fSCM 관리자(operator)는 새롭게 추가될 Fractal의 특성(부서, 소비자, 생산자, 공급자 등 중 선택)에 관한 정보를 e-Biz 기업 전체에 대한 Fractal (*e-biz_fractal*)에 입력한다.
- 2) *e-biz_fractal*은 입력된 정보에 맞게 Fractal의 위치를 찾아 Fractal의 Identification을 부여하고 Fractal을 새롭게 생성한다([그림 6]의 *fr_t2*).
- 3) 하위 Fractal이 새롭게 구성되었으므로 $f_{(1,3)}^{1,1}$ 는 $f_{(1,3)}^{1,2}$ 으로 Fractal 정보를 수정하고, 하위 Fractal 간의 연결을 새롭게 한다([그림 6]의 점선 표시 부분).
- 4) *e-biz_fractal*은 새롭게 추가될 공급망 모델을 입력받아 이를 새롭게 생성된 fractal ($f_{(1,3,2)}^{2,0}$)에 전달한다.
- 5) 추가된 공급망 모델에 따라 $f_{(1,3)}^{1,2}$ 의 공급망 최적화 모델을 업데이트 한다.

위의 \widehat{DRP}^+ 과정에 따른 $f_{(1,3)}^{1,1}$ ($f_{(1,3)}^{1,2}$)의 Goal 모델 변화는 다음과 같이 개념적으로 표현할 수 있다 (자세한 세부모델은 생략).

$$g_{f_{(1,3)}^{1,1}} = g_{f_{(1,3,1)}^{2,0}} \oplus F_{f_{(1,3)}^{1,1}}$$

$$\rightarrow g_{f_{(1,3)}^{1,2}} = g_{f_{(1,3,1)}^{2,0}} \oplus g_{f_{(1,3,2)}^{2,0}} \oplus F_{f_{(1,3)}^{1,2}}$$

4. Concluding Remarks

본 논문에서는 효율적인 공급망 관리(Supply Chain Management; SCM)를 위해 Fractal 개념을 도입한 fSCM에 관한 연구의 일환으로, fSCM 내의 공급망의 재구성력(Dynamic Reconfigurability)에 관한 연구를 수행하였다. fSCM을 프레임워크를 사용함으로써 1) 복잡한 공급망 관리 시스템을 이해하고 운영하기가 쉬워지고, 2) Fractal의 독특한 특성들을 시스템에 그대로 반영하여 사용할 수 있으며, 3) Local Optimization을 시도함으로써 계산상의 로드와 최적화 시간을 단축시킬 수 있고, 4) DRP 등의 기법을 이용함으로써 공급망의 유연한 관리가 가능하다. 급변하는 시장 환경 및 소비자의 다양한 욕구를 만족시키기 위해서는 공급망의 구성에 있어 동적 재구성이 가능하여야 하며, 본 연구는 이에 대한 방법론을 마련함으로써 한층 발전된 공급망 관리 및 시스템의 구현이 가능하게끔 하였다고 판단된다. 그러나 좀 더 효율적인 공급망 모델의 통합을 위해서는 각 모델의 특성에 따라 자동적으로 Goal의 일관성을 맞추어줄 수 있는 기능이 Fractal에 부여되어야 하며 이에 대한 심도 있는 연구가 필요할 것이다.

References

- [1] Korpela, J., Lehmusvaara, A., and Tuominen, M., 2001, An analytic approach to supply chain development. *International Journal of Production Economics*, 71, (1-3), 145-155.
- [2] Alvarado, U.Y. and Kotzab, H., 2001, Supply chain management; the integration of logistics in marketing. *Industrial Marketing Management*, 30, (2), 183-198.
- [3] Vidal, C.J. and Goetschalckx, M., 2001, Global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation. *European Journal of Operational Research*, 129, (1), 134-158.
- [4] Dong M. and Chen, F.F., 2001, Process modelling and analysis of manufacturing supply chain networks using object-oriented Petri nets. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 17, 121-129.
- [5] O'Laughlin, K.A. and Copacino, W.C., 1994, Logistics strategy. In J.F. Robeson, W.C. Copacino (ed.) *The Logistics Handbook* (The Free Press, New York), pp. 57-75.
- [6] Clinton, S.R. and Calantone, R.J., 1997, Logistics strategy: Does it travel well?. *Logistics Information Management*, 10, (5), 224-234.
- [7] De Toni, A., Nassimbeni, G., 1999, Buyer-supplier operational practices, sourcing policies and plant performances: Results of an empirical research. *International Journal of Production Research*, 37, 567-619.
- [8] Korpela, J., Lehmusvaara, A., and Tuominen, M., 2001, Customer service based design of the supply chain. *International Journal of Production Economics*, 69, 193-204.
- [9] Ryu, K., Son, Y., and Jung, M., 2003, Framework of fractal-based supply chain management of e-Biz companies. *Production Planning and Control*, 14, (8), 720-733.
- [10] Ryu, K. and Jung, M., 2003, Dynamic restructuring process in the fractal manufacturing system. *Proceedings of the 2003 KIIIE Fall Conference*, PyoungChang, Korea, Sep. 26-27, 54-58.