

운영 효율성과 환경 영향을 고려한 공급사슬 평가에 관한 연구

김지연¹ · 김해중² · 신기태³ · *박진우^{2†}

A Study on the Valuation of a Supply Chain Considering Management Efficiency and Environmental Effect

Jiyeon Kim · Haejoong Kim · Kitae Shin · Jinwoo Park

ABSTRACT

Recently, the deepening of the environment and accompanying concerns produce various environmental regulations. For example, EPR(Extended Producer Responsibility) is emphasized in many countries such as USA and Europe. According to this, the construction of a reverse supply chain is under compulsion.

A diversity of parts can be controlled by a government or enterprises in the construction and management of a reverse supply chain and the effect to the environment is changed according to the policy. Therefore, it is essential to understand the effects of regulations or policies of a government and enterprises on a supply chain. The object of this research is to develop a means to assess the management efficiency and the environmental effect over a whole supply chain and show the effects of various reverse supply chain construction policies on a supply chain. This model can be utilized to establish appropriate policies by understanding the change in the management efficiency and the environmental effect according to the reverse supply chain construction and management method.

Key words : Reverse supply chain, Supply chain assessment, Environmental effect, System dynamics, Simulation

요 약

환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 제조업체들에게 생산제품의 수거 및 처리를 강제하는 규제들이 강화되었고, 이에 따라 제품 수명 종료 후의 흐름인 역공급사슬(Reverse Supply Chain)을 구축하도록 강요하고 있다.

역공급사슬의 구축과 운영에 있어 정책적인 선택에 따라 환경에 미치는 영향은 크게 달라질 수 있으므로, 관련 정책이나 규제, 기업의 전략이 공급사슬에 미치는 영향을 파악하는 것은 매우 중요하다. 본 논문에서는 공급사슬 전체에 걸쳐 환경 영향과 운영 효율성을 평가할 수 있는 도구를 개발하고, 시나리오 분석을 통해 역공급사슬 구축 정책이 공급사슬에 미치는 영향을 분석할 것이다. 본 연구에서 제안한 분석 모델은 정부의 환경 정책 수립, 기업의 역공급사슬 구축, 운영 효율성 향상 등에 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : 역공급사슬, 공급사슬 평가, 환경 영향, 시스템 다이내믹스, 시물레이션

1. 서 론

환경에 대한 인식이 높아지면서 환경 관련 규제가 강

화되고 있다. 제조업의 경우도 마찬가지로, 제조업체에게 수명 종료 제품을 일정 수준까지 재사용, 재활용하도록 법적 책임을 부과하고 있으며, 이러한 현상은 기업에게 제품 수명 종료 후의 흐름인 역공급사슬을 구축하도록 강요하고 있다.

단순한 제품 처리 정책의 변화가 환경 효율성(Eco-efficiency)에 큰 영향을 미친다는 연구 결과에서도 알 수 있듯이 정부의 환경 관련 규제나 기업의 정책이 공급사슬에 미치는 영향을 파악하는 것은 매우 중요하다(Michelsen 등, 2006). 그러나 역공급사슬 구축에 따른 비용과 이득을

2007년 7월 20일 접수, 2007년 9월 5일 채택

¹⁾ 삼성전자

²⁾ 서울대학교 산업공학과

³⁾ 대전대학교 산업시스템공학과

주 저 자 : 김지연

교신저자 : 박진우

E-mail; autofact@snu.ac.kr

분석할 수 있는 도구가 없기 때문에 정부는 역공급사슬에 대한 실제적인 비용 분석 없이 규제를 강화할 뿐이다. 기업 역시 규제에 따른 단기적인 대책 마련에 급급해 공급사슬 전체의 운영 효율성을 저하시키고 있다.

본 논문에서는 공급사슬 전체에 걸쳐 운영 효율성과 환경 영향을 평가할 수 있는 도구를 개발하고, 시나리오 분석을 통해 역공급사슬 구축과 관련된 다양한 정책들이 공급사슬에 미치는 영향을 분석할 것이다.

본 논문은 크게 다섯 부분으로 구성되었다. 1장에서는 연구의 배경과 목적, 연구의 범위를 다루었으며, 2장에서는 공급사슬의 운영 효율성 평가와 환경 영향과 관련된 연구들을 정리한다. 3장에서 역공급사슬 프레임워크를 제시하고, SCOR(Supply Chain Operations Reference) 모델을 이용한 공급사슬의 운영 효율성 측정 방법을 제안한다. 4장에서 공급사슬의 운영 효율성과 환경 영향을 계산할 수 있는 시스템 다이내믹스(System Dynamics) 모델을 제시하고, 여러 정책에 대한 시나리오 분석을 통해 각각의 정책이 공급사슬에 미치는 영향을 알아본다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론 및 추후 연구 방향을 서술한다.

2. 기존 연구

역공급사슬과 관련된 연구는 아직 기초 단계에 있으며, 기존 연구들은 역방향물류(Reverse Logistics)의 네트워크 설계(Network Design)나 프레임워크 디자인, 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment)를 이용한 특정 제품이나 산업에 대한 경험적 연구 등이 주류를 이루고 있다. 본 장에서는 공급사슬의 운영 효율성 평가, 공급사슬의 주체 평가 기준 그리고 환경 영향과 관련된 연구들을 정리한다.

2.1 공급사슬의 효율성 평가

공급사슬의 효율성을 평가하는 많은 연구들은 금전적 가치 혹은 고객 서비스를 평가기준으로 사용한다. Farris와 Hutchison(2002)은 현금흐름(Cash-to-cash)을 이용하여 공급사슬을 평가하였고, Lockamy와 Smith(2006)는 목표원가(Target Costing)를 이용하였다. Wang과 Shu(2006)는 목표서비스수준(Target Service Level)과 총공급사슬 비용(Total Supply Chain Cost)을 최소화하는 공급사슬 구성과 재고 정책에 대해 연구하였다.

하지만, 금전적 가치와 고객 만족도의 평가지표는 공급사슬의 최종 결과만을 이용하여 효율성을 판단하기 때문에 공급사슬 내부에서 일어나는 활동들의 효율성을 나타내기에는 한계가 있다. 공급사슬 내부의 상황까지 반영한

공급사슬의 평가 연구 또한 존재하지만(Perona와 Miragliotta, 2004; Ulusoy, 2003), 평가 요소의 나열에 그치고 결과가 수치로 표현되지 못해 활용도가 떨어지는 단점이 있다.

본 연구에서는 이런 단점을 보완하여 공급사슬 내부에서 일어나는 활동을 반영한 정량적인 공급사슬 평가지표를 개발하고자 한다.

2.2 공급사슬 내 특정 주체의 평가

공급사슬의 평가와 관련된 또 다른 연구 방향으로는 공급자 선택의 위한 공급자 평가가 있다. 많은 연구에서 여러 가지 공급자 선정 기준을 제시했으며, 이러한 공급자 선정 기준은 공급사슬 평가기준과 상통하는 면이 있다.

기존 연구에서 공급자를 평가하기 위해 주로 사용한 지표들로는 유연성(Flexibility), 신뢰성(Reliability), 반응성(Responsiveness), 비용(Cost), 품질(Quality), 운송(Delivery), 서비스(Service), 가격(Price), 시간(Time), 공급능력(Capability), 완제품재고(Finished Good Inventory), 연구개발(R&D), 재무(Finance), 자금소요(Cash Requirements), 생산성(Productivity) 등이 있다 (Verma와 Pullman, 1998). 이들 중 유연성, 신뢰성, 반응성, 공급능력은 직접 측정하기보다 다른 지표들에 의해 결정되는 공급자의 특성이라 할 수 있으며, 이를 제외한 지표들은 본 연구에서 제시하는 효율성 평가지표에 반영될 것이다.

2.3 환경 영향 계산

LCA는 특정 대상의 환경 영향 평가에 가장 널리 사용되고 있는 방법론으로, 제품 수명 전체에 걸쳐 재료, 프로세스, 제품 혹은 시스템이 환경에 미치는 영향을 검토, 확인, 평가한다(Graedel과 Allenby, 2003). 제품이나 프로세스의 환경 영향을 평가하는 대부분의 연구들은 평가 과정에서 LCA를 사용하고 있으며, LCA를 수행하기 위한 다양한 방법들이 개발되어 있다.

Eco-indicator는 PRé Consultants의 LCA 소프트웨어인 SimaPro에 포함된 환경 영향 평가 방법으로, Breedveld 등(2007), Tan과 Khoo(2005)의 연구 등에서 LCA 툴로 사용되었다. 본 연구에서는 Eco-indicator를 기반으로 환경영향을 계산할 것이다.

3. 공급사슬 평가지표 개발

3.1 역공급사슬 프레임워크

공급사슬의 역방향 활동은 크게 재사용(Reuse), 재제

조(Remanufacturing), 재활용(Recycle) 세 가지의 수명종료 제품처리 활동과 수거(Collection), 해체(Disassembly), 폐기(Disposal) 세 가지의 관련 활동으로 분류할 수 있다 (Ferguson과 Browne, 2001; Gerrard와 Kandlikar, 2007). 그러므로 역공급사슬 구성에서 추가되어야 하는 구성원은 6가지 활동 각각을 담당하는 주체들이다. 본 연구에서는 공급업자, 제조업자, 소매업자, 소비자로 이루어지는 기존 공급사슬 구성에 원자재 공급자를 추가하고, 앞에서 언급한 6가지의 역방향 활동 주체를 포함하며, 외부 공급사슬을 배제한 다음의 그림 1과 같은 역공급사슬 프레임워크를 사용하고자 한다.

3.2 운영 효율성 측정

3.2.1 운영 효율성 평가지표 추출

본 장에서는 SCOR 모델의 평가지표를 바탕으로, 기존 연구에서 사용한 평가지표를 결합하여 공급사슬의 운영 효율성을 평가하기 위한 평가지표를 추출한다. SCOR 모델의 성과 평가지표 부분에는 공급사슬의 운영 효율성에 영향을 미치는 다양한 요소들이 자세하게 정리되어 있으며, SCOR 모델 자체가 일종의 표준으로 사용될 수 있다.

SCOR 모델의 성과 측정을 위한 성능속성(Performance Attribute)은 신뢰성(Reliability), 반응성(Responsiveness), 유연성(Flexibility), 비용(Costs), 자산(Assets)으로, 본 연구에서는 SCOR 모델의 다섯 가지 성능속성을 기준으로 공급사슬의 운영 효율성을 측정하고자 한다. 우선 각 속성별로 그 속성을 결정하는 하위 평가지표를 파악한 뒤, 이를 운영 효율성 평가지표로 삼아 각 속성의 값을 측정하고, 이를 조합하여 최종적인 운영 효율성을 계산할 것이다. 이러한 방법을 통해 운영 효율성을 결정하는 여러 요소들의 값을 명확히 보여주고, 공급사슬별로 속성들의 중요도를 다르게 선택해 각 공급사슬의 특성을 반영할 수 있을 것이다.

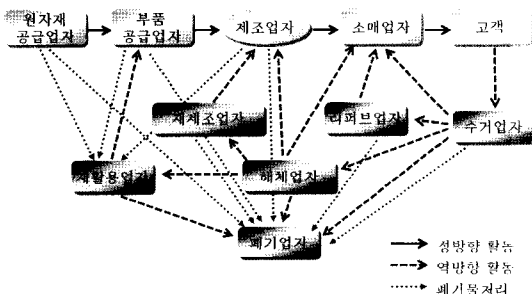


그림 1. 역공급사슬 프레임워크

3.2.2 운영 효율성 평가

공급사슬의 운영 효율성을 측정하기 위해서는 우선 공급사슬을 분석하고, 대상인 공급사슬의 특성에 따라 불필요한 속성이나 평가지표가 있는지 검토해 삭제한다. 다음으로 성능속성의 중요도와 수준 1, 수준 2 평가지표의 중요도를 설정한 뒤, 필요한 경우 최하위 수준인 수준 3 평가지표의 중요도를 설정한다. 이러한 과정을 통해 각각의 공급사슬의 특성을 반영할 수 있다.

중요도가 설정되고 나면 실제 운영 효율성을 계산하기 위해 최하위 단계 평가지표의 값이 정해져야 한다. 사이클 타임(Cycle Time), 공급업자 제약(Supplier Constraint)과 같은 평가지표의 경우 사전에 값을 결정해 입력해주며, 반품수량(Return Volume)이나 인력가용성(Staff Availability) 같은 평가지표들은 시뮬레이션 과정에서 값이 계산되어 결과에 반영된다.

3.3 환경 영향 계산

본 장에서는 공급사슬의 환경 영향을 계산하기 위해 환경에 영향을 미치는 자원을 정리하고, 이를 바탕으로 공급사슬의 환경 영향 평가 방법을 제안한다.

공급사슬의 환경 영향을 계산하기 위해서는 공급사슬에서 일어나는 활동을 파악한 뒤, 각 활동별로 발생하는 오염 물질과 소모되는 자원을 파악해야 한다. 이를 위해 Graedel과 Allenby(2003)는 특정 제품이 발생시키는 오염 물질을 기준으로 하는 고체잔량(Solid Residues), 유체잔량(Liquid Residues), 기체잔량(Gaseous Residues)과 물질유형선택(Material Choice), 에너지 사용(Energy Use)의 다섯 가지 분류를 사용하여 환경오염 물질을 파악하는 방법을 제시하였다. Jeong(2006)은 산업생태학에서의 대기권(Atmosphere), 수권(Hydrosphere), 지각권(Geosphere), 생물권(Biosphere), 인간권(Anthrosphere)의 다섯 가지 자원 분류를 근거로, 공급사슬의 활동이 소모하는 자원을 정의하고, 각 자원에 속하는 물질을 정리하였다. 본 연구에서는 Jeong(2006)의 연구에서 사용된 분류를 사용하되, 시뮬레이션에서 측정하기 까다롭고 건설이후 환경에 미치는 영향이 적은 인간권을 제외하였다. 대신 Graedel과 Allenby(2003)의 에너지 사용을 추가하여 대기권, 수권, 기각권, 생물권, 에너지 사용의 다섯 가지 분류를 사용한다.

본 연구에서는 환경에 영향을 미치는 활동을 파악하기 위해 Graedel과 Allenby(2003)가 제시한 The Environmentally Responsible Product Assessment Matrix를 수

정하여 사용하였다. 표 1의 가로축에는 5가지의 환경 분류를, 세로축에는 공급사슬 주체를 나열하고 해당 칸 안에 관련 활동을 기입한다.

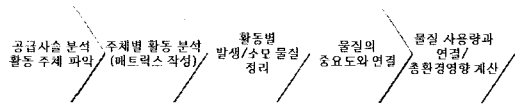


표 1. 공급사슬 활동 분석 매트릭스

공급 사슬주체	에너지사용	대기권	수권	지각권	생물권
원자재 공급업자	채광 배송	채광 배송 폐기	채광	채광	채광
공급업자	검수 가공 포장 운송 폐기	반송 가공 포장 운송 폐기	가공	가공	
제조업자	검수 제조 포장 운송 폐기	반송 검수 제조 포장 운송 폐기	제조	제조	
소매업자	진열 폐기	폐기			
수거업자	수거 검수 운송 폐기	수거 운송 폐기			
리퍼브업자	검수 리퍼브 포장 운송 폐기	리퍼브 포장 운송 폐기	리퍼브	리퍼브	
해체업자	검수 해체 포장 운송 폐기	해체 포장 운송 폐기	해체	해체	
재제조업자	검수 재제조 포장 운송 폐기	재제조 포장 운송 폐기	재제조	재제조	
재활용업자	검수 재활용 포장 운송 폐기	재활용 포장 운송 폐기	재활용	재활용	
폐기업자	소각 매립	소각	소각 매립	소각 매립	소각 매립

그림 2. 공급사슬의 환경 영향 측정 절차

환경 영향을 계산하는 절차는 그림 2와 같다. 우선 공급사슬상의 활동 주체들을 파악한 뒤, 각 주체들의 활동을 매트릭스를 이용해 정리하고, 각 활동별로 발생/소모 되는 물질을 나열한다. 다음으로 각 물질의 중요도를 파악해 시뮬레이션 파라미터를 설정하고 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션을 통해 각 물질의 사용량이 계산되면, 이를 물질의 중요도와 곱해 각 활동에서 발생한 특정 물질이 환경에 미치는 영향을 산출한다. 마지막으로 각 성능속성별로 미치는 물질의 환경 영향을 모두 합하면 대상 공급사슬의 총 환경 영향이 산출된다.

4. 시뮬레이션 모델 & 시나리오 분석

본 장에서는 3장에서 제시한 프레임워크와 절차에 따라 공급사슬의 운영 효율성과 환경 영향을 고려하는 시스템 다이내믹스 모델을 개발한다. 시스템 다이내믹스 모델링 과정은 크게 두 단계로 이루어져 있다(Towill, 1995). 첫 번째 단계는 시스템의 정성적 분석 단계로, 인과관계도(Influence Diagram)를 통해 주요 변수들 간의 관계를 개략적으로 나타낸 후, 흐름도(Flow Diagram)를 통해 변수들 간의 관계를 수식으로 표현한다(Sim, 2006). 공급사슬 활동 주체별로 모델을 수립한 뒤, 이를 연결하여 전체 공급사슬의 모델을 완성한다.

4.1 모델 설계

역공급사슬에는 순방향 5개, 역방향 6개 등 총 11개의 활동 주체가 존재한다. 이 중 공급업자와 제조업자는 주문을 받고, 생산하고, 주문을 내고 자재를 입고하는 동일한 형태의 업무를 수행한다. 기본적인 물질들의 흐름을 나타내기 위해 필요한 변수들을 정의하고, 정의된 변수와 그 의미를 표 2에 나타내었다. i는 공급사슬상의 주체를 나타내는 인덱스로, 1은 공급사슬의 앞쪽인 원재료공급업자, 2는 공급업자, 3은 제조업자, 4는 소매업자, 5는 고객을 의미한다. 인덱스 t는 시간을 나타낸다.

특정 시스템을 시스템 다이내믹스로 모델링하기 위한 첫 번째 단계는 변수들이 서로에게 미치는 영향을 인과관계도로 표현하는 것이다. 다음 표 2에서 정의한 변수들을

이용하여 제조업자의 활동에 대한 인과관계도를 작성하면 그림 3과 같다.

아래의 인과관계도를 바탕으로 변수간의 수학적 관계를 표 3에 나타내었다.

표 2. 변수 정의와 의미

변수명	의미
OR_t^i	기간 t에 i에서 받은 주문량
OS_t^i	기간 t에 i에서 배달한 주문량
OP_t^i	기간 t에 i에서 발주한 주문량
OD_t^i	기간 t에 i에서 배달받은 주문량
BO_t^i	기간 t에 i에서 이월주문
P_t^i	기간 t에 i의 생산량
I_t^i	기간 t에 i가 가지는 완제품 재고량
SS^i	i의 안전재고량
MI_i	기간 t에 i가 가지는 자재 재고량
MS_i	i의 자재 안전재고량
LT_t^i	i의 리드타임
F_t^i	기간 t에 i의 수요예측량
α^i	평활지수
Ca_t^i	기간 t에 i의 생산용량
R_t^i	기간 t에 i의 반품량
Dm_t	고객의 수요
Dp_t	기간 t에서의 폐기량

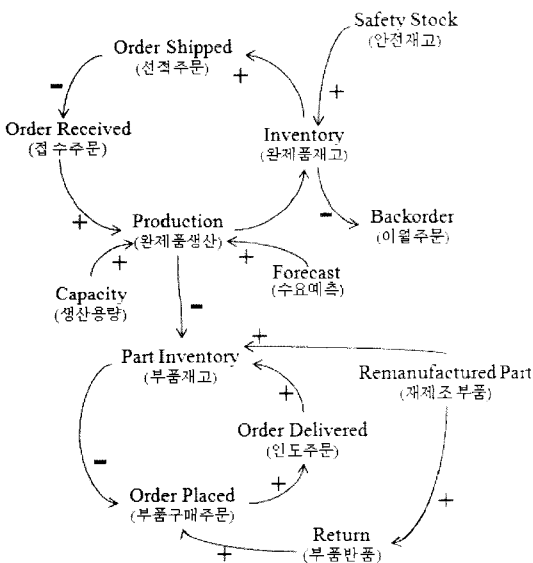


그림 3. 제조업자의 인과관계도

그림 3과 표 3을 바탕으로 작성된 제조업자의 활동에 대한 흐름도는 그림 4와 같다. 위에서 언급했듯이 제조업자와 공급업자는 주문을 받아 생산하고, 전단계의 주체에 주문을 내어 자재를 배달받는 동일한 업무를 수행하므로 공급업자의 흐름도도 이와 유사한 형태를 가진다.

표 4에서 제조업자의 변수들 간의 관계식을 보여준다. 공급업자의 변수간 관계식은 제조업자의 수식과 동일한 형태를 가진다.

이 외의 활동 주체들에 대해서와 이와 같이 인과관계도와 흐름도를 작성하였다. 각각의 객체에 대한 모델링을 완성한 뒤, '주문량(Order Placed)'과 '배달받는 양(Order Delivered)'를 연결하여 순방향의 공급사슬 모델을 완성하였다.

순방향 공급사슬 모델을 완성한 후, 이를 확장시켜 역방향 활동까지 포함하는 역공급사슬을 모델링한다. 수거업자, 리퍼버업자, 해체업자, 재제조업자, 재활용업자가 추가되며, 역방향 활동 주체들이 생김으로 인해 순방향 활동 주체들의 식에도 변화가 생긴다. 역방향 활동 주체들과 연결되는 제조업자나 공급업자의 경우, 주문량(Order Placed)과 배달받는 양(Order Delivered)을 계산할 때 새

표 3. 변수간의 관계

$$\begin{aligned}
 OR_t^i &= OP^{i+1}_t \\
 OS_t^i &= OD^{i+1}_t \\
 OR_t^i &= OS_t^i + LT^i + BO_t^i + LT^i \\
 I_{t-1}^i + P_t^i &= OS_t^i + I_t^i \\
 P_t^i &= \min[Ca_t^i, MI^i, \max\{0, OR_t^i * \alpha^i + F_t^i * (1 - \alpha^i) - I_t^i + SS_t^i\}] \\
 OP_t^i &= \max\{0, OR_t^i * \alpha^i + F_t^i * (1 - \alpha^i) - MI^i + MS_t^i\} \\
 OS_t^i &= \max(I_t^i + P_t^i, OR_{t-LT}^i) \\
 BO_t^i &= \max(OR_{t-LT}^i - OS_t^i, 0)
 \end{aligned}$$

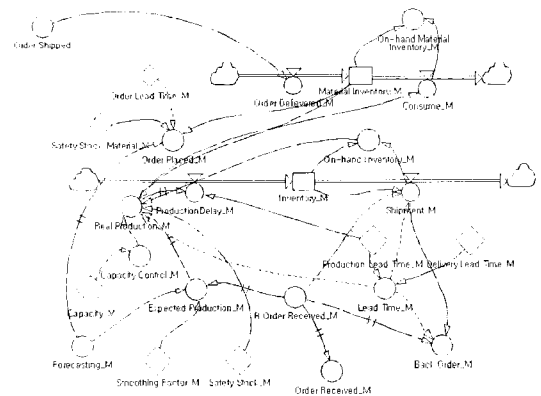


그림 4. 제조업자의 활동에 대한 흐름도

로 추가된 주체들을 고려해야 한다. 예를 들어 제조업자는 공급업자 뿐 아니라 재제조 업자에게도 주문을 내게 되며, 배달받는 양도 공급업자와 재제조업자가 배달한 양의 합이 된다. 이에 대한 변수나 수식관계는 순방향의 공급사슬과 비슷하므로 생략하기로 한다.

4.2 시나리오 분석

공급사슬의 운영 효율성과 환경 영향을 평가하기 위해 순방향의 공급사슬만 존재하는 경우와 서로 다른 형태로 역공급사슬이 구성된 경우 두 가지, 특정 정책이 실행된 경우로 구분하여 표 5와 같이 총 4가지의 시나리오를 설정하였다.

표 4. 제조업자의 변수간 관계식

$$\begin{aligned} \text{Lead Time}_M &= \text{Production Lead Time}_M + \text{Delivery Lead Time}_M \\ \text{Order Received}_M &= \text{DELAYPPL}(\text{'Order Placed}_R, \text{'Lead Time}_M, 25) \\ R \text{ Order Received}_M &= \text{Order Placed}_R \\ \text{Expected Production}_M &= \text{MAX}(0, \text{'R Order Received}_M * \text{Smoothing Factor}_M + \text{Forecasting}_M * (1 - \text{Smoothing Factor}_M)) \\ \text{Real Production}_M &= \text{MIN}(\text{'Capacity Control}_M, \text{MAX}(0, \text{DELAYPPL}(\text{'Expected Production}_M, \text{'Production Lead Time}_M, 30) - \text{'On-hand Inventory}_M + \text{Safety Stock}_M), \text{'Material Inventory}') \\ \text{Shipment}_M &= \text{MIN}(\text{Inventory}_M, \text{DELAYPPL}(\text{'R Order Received}_M, \text{'Lead Time}_M, 20)) \\ \text{Back Order}_M &= \text{MAX}(0, \text{DELAYPPL}(\text{'R Order Received}_M, \text{'Lead Time}_M, 20) - \text{Shipment}_M) \\ \text{Inventory}_M &= \text{Inventory}_M + \text{Real Production}_M - \text{Shipment}_M \\ \text{On-hand Inventory}_M &= \text{Inventory}_M - \text{Shipment}_M \\ \text{Order Placed}_M &= \text{MAX}(0, \text{DELAYPPL}(\text{Forecasting}_M, \text{'Order Lead Time}_M, 25) * (1 - \text{Smoothing Factor}_M) + \text{DELAYPPL}(\text{'R Order Received}_M, \text{'Order Lead Time}_M, 25) * \text{Smoothing Factor}_M - \text{'On-hand Material Inventory}_M + \text{Safety Stock}_M) \\ \text{Order Delivered}_M &= \text{Shipment}_S \\ \text{Consume}_M &= \text{'Real Production}_M \\ \text{Material Inventory}_M &= \text{Material Inventory}_M + \text{Order Delivered}_M - \text{Return}_M - \text{Consume}_M \end{aligned}$$

1) 'M'은 Manufacturer, 'R'은 Retailer, 'S'는 Supplier를 표현

2) DELAYPPL은 자원이동의 리드타임만큼 지연

4.2.1 시뮬레이션 설정

(1) 가정 사항

- 재활용된 물질은 원자재공급업자에 의해 공급되는 원자재와 동일한 품질을 가진다.
 - 재생산된 부품은 부품 인수 후 실시되는 검사에서 탈락할 확률이 높아진다. 생산 과정에서 차이는 존재하지 않으며, 재생산된 부품을 사용하여 생산된 제품의 불량률은 증가한다.
 - 해체된 부품은 재생산을 거쳐서 생산과정에 투입된다.
 - 재생산된 부품과 재활용된 물질은 가격이 저렴하며, 생산업자와 공급업자는 가능한 한 재생산된 부품이나 재활용된 물질을 구입하고, 충분하지 않을 경우 공급업자와 원자재공급업자에게 주문한다.
- 5가지의 성능속성은 순방향 공급사슬만 존재하는 경우를 기준치 100으로 설정하기로 하였으며, 각각의 성능속성과 평가지표의 중요도 또한 임의로 설정하였다. 본 시뮬레이션에서는 신뢰성, 반응성, 유연성, 비용, 자산의 중요도를 각각 8.0, 5.0, 4.0, 4.0, 3.0으로 설정하였다.

(2) 공급사슬의 효율성 계산

작성한 모델을 이용하여 공급사슬의 효율성을 계산하기 위해서 3장에서 제시한 평가지표를 모델과 연결시키고 관계를 설정하였다. 3.2.2에서도 언급했듯이,

표 5. 시뮬레이션 시나리오

번호	상 황
S0	- 순방향의 공급사슬만 존재 - 반환되었거나 수명이 종료된 제품/반제품/자재는 모두 폐기
S1	- 역방향 활동/ 수거업자 존재 - 역방향 활동 주체들은 공급업자나 제조업자와 특별한 관계없음
S2	- 역방향 활동/ 수거업자 존재 - 역방향 활동 주체들은 공급업자, 제조업자와 협력 관계에 있다. 공급업자나 제조업자가 재활용업자나 재제조업자와 거래할 경우, 공급자 파악이나 관리 등의 작업이 간단해짐
S3	- 역방향 활동 존재 - 수거업자 존재 - 전체 중량 대비 95% 이상이 재사용/재생산/재생되어야 한다는 법률(EU Directives) 통과. 이 한계를 맞추기 위해 재사용이나 재생산 대신 소각을 통한 에너지 재활용의 비율이 증가

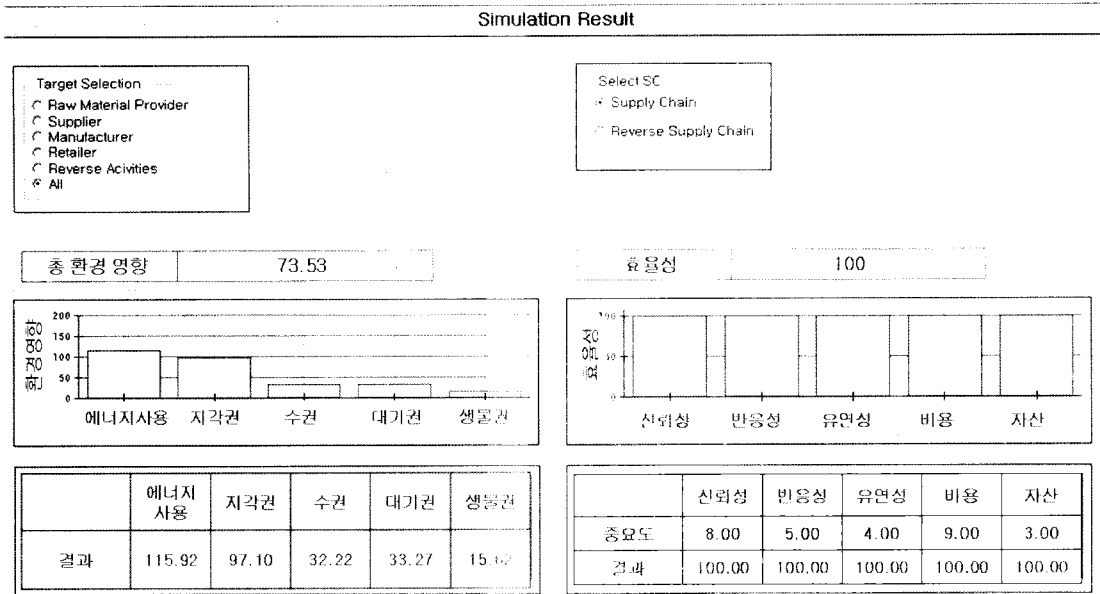


그림 5. 시뮬레이션 결과 화면

평가지표의 값은 사전에 입력해야 하는 경우와 시뮬레이션이 실행되면서 계산되는 경우가 존재한다. 사이클 타임과 같이 사전에 입력해야 하는 값들을 설정해주고 고객만족과 같이 시뮬레이션을 통해 계산되어지는 값들의 수식을 입력하였다. 수식을 입력할 때, 계산된 평가지표들은 모두 증가할수록 긍정적인 변화를 나타내는 것으로 변환해 주었다. 또 각 평가지표들의 중요도는 동일하게 설정하였다.

(3) 환경 영향 계산

환경 영향의 경우, 공급사슬 활동 분석 매트릭스에서 파악된 활동들과 각 활동이 발생시키거나 소모하는 물질들을 연결하였다. 물질의 중요도는 Eco-indicator에서 제시된 수치를 이용하였다. 그러나 Eco-indicator에는 물질 전체의 환경 영향도만이 제시되어 있기 때문에 에너지사용, 대기권 등의 5가지 분류에 따른 환경 영향도는 임의로 분배하였다. 환경 영향의 값은 클수록 환경에 영향을 많이 미치는 것이다.

(4) 시뮬레이션 대상과 범위

시뮬레이션의 대상은 자동차를 생산하는 공급사슬로 정하고, 1420kg의 자동차를 기준으로 질량 중 큰 부분을 차지하는 철금속, 비철금속인 알루미늄, 스테인리스 스틸, 구리, 타이어, 유리를 포함시켰다. 리퍼브되

표 6. 시뮬레이션 결과

	S0	S1	S2	S3
신뢰성	100	97.07	97.07	97.22
반응성	100	95.24	102.14	95.24
유연성	100	101.87	102.58	101.84
비용	100	105.01	106.12	104.46
자산	100	95.37	94.95	96.07
운영 효율성	100	98.60	100.29	98.64
에너지사용	115.92	94.30	94.42	97.27
기각권	97.10	64.21	64.30	86.33
수권	32.22	23.25	23.28	32.33
대기권	33.27	24.53	24.56	41.91
생물권	15.62	10.31	10.32	18.71
환경 영향	73.53	54.15	54.22	69.14

는 경우는 거의 없다고 가정하고 재생산과 재생에 중점을 두어 시뮬레이션을 수행하였다.

4.2.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 수행한 결과 화면은 그림 5와 같다. 환경 영향의 경우 에너지사용이나 지각권, 대기권과 같은 분류별로 각각 환경 영향의 값이 테이블에 보이는 동시에 막대그래프로 표현된다. 다섯 가지 분류의 환경 영향을 중

합한 결과는 ‘총 환경 영향’에 수치로 나타나게 된다. 운영 효율성의 경우도 마찬가지로 다섯 가지의 성능속성별로 사용자가 설정한 중요도와 시뮬레이션을 통해 얻은 결과 값이 테이블에 나타나며, 이들을 종합한 공급사슬 전체의 효율성은 그래프 위의 ‘효율성’에 나타난다.

위에서 제시했던 4가지의 시나리오를 이용해서 시뮬레이션을 수행한 결과를 정리하면 표 6과 같다.

순방향 공급사슬만이 존재하는 시나리오 S0의 경우, 총 환경 영향은 73.53으로 나타났다. 여기에 일반적인 수거업자, 재제조업자, 재활용업자 등으로 이루어진 역공급사슬이 추가되는 경우 환경 영향은 54.15로 크게 감소한다는 것을 알 수 있다. 이는 금속계열 물질들을 재생함으로써 에너지와 광물 사용량이 감소해, 에너지사용과 기각권 값이 크게 줄었기 때문이다. 반면 공급사슬의 운영 효율성은 약간 저하되었는데, 이는 공급자 다변화와 재생물질 사용으로 인해 유연성과 비용 부분의 값이 나아진 반면, 제품의 품질 저하와 공급사슬 내의 활동 주체 증가로 신뢰성과 반응성이 나빠졌기 때문이다.

공급업자, 제조업자와 역방향 활동 주체들이 협력 관계에 있는 경우인 S2의 경우, 환경 영향은 S1과 유사하나 효율성 측면에서 차이를 보임을 알 수 있다. 협력 관계 구축으로 인해 공급자 관련 제약이 완화되고, 공급자 파악/선정/협상 등 관련 시간이 단축되면서 반응성 값이 개선되기 때문이다.

S3에서는 S1과 같이 일반적인 수거업자, 재제조업자, 재활용업자 등으로 이루어진 역공급사슬 상황에서 재사용/재생산/재생 규정인 95%를 맞추기 위해 재사용과 재생산을 줄이고 소각을 통한 에너지 재생의 비율을 증가시켰다. 이 경우 운영 효율성은 S2와 큰 차이가 없는 반면, 소각으로 인한 대기권과 수권의 증가로 환경 영향은 오히려 증가함을 알 수 있다.

(3) 정책 평가

시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이, 역공급사슬이 구축될 경우에는 순방향 활동만 존재하는 공급사슬에 비해 환경에 미치는 영향이 감소함과 동시에 공급사슬의 운영 효율성 또한 감소하게 된다. 그러나 역공급사슬상에서 순방향 활동 주체들과 역방향 활동 주체들 사이 협력 관계가 형성될 경우, 공급자 관련 제약에 대한 값이 개선되면서 유연성이 증가하므로 환경에 미치는 영향은 감소되면서 공급사슬의 운영 효율성은 그대로 유지할 수 있게 된다.

유럽의 폐차처리지침과 같이 결과적인 재사용/재생산/재생 비율을 높게 규정하는 경우에는 생산자들이 물질 재

활용과 같이 환경에 영향을 적게 미치는 처리 방법을 택하기보다는 소각하여 에너지 재활용을 통해 총 재사용/재활용되는 비율을 높이는 쪽을 선택하게 되므로 환경에 미치는 영향이 오히려 증가하게 된다.

위의 시뮬레이션 결과를 종합해보면, 다음과 같은 역공급사슬과 관련 정책을 제안할 수 있다.

- 최종적인 재생 수치 규제 대신 최하 재사용율/ 재생산물 등을 구체적으로 규제한다.
- 부품이나 자재 수급이 불안정할수록 역공급사슬 구축 권장해 안정적인 부품과 자재 수급을 돕는다.
- 공급사슬 구성형태는 제품에 따라 다르다.
- (a) 자동차와 같이 부품 대체 가능성 낮은 제품의 경우 생산자가 직접 부품을 처리하거나 전략적인 제휴를 맺는다.
- (b) 컴퓨터와 같이 표준화가 이루어진 제품의 경우, 서로 다른 생산자들이 함께 역공급사슬을 구축하여 비용 부담을 줄인다.

5. 결론 및 추후연구

효과적인 역공급사슬 구축을 위해서는 정부의 환경 관련 규제나 정책이 공급사슬에 미치는 영향을 파악하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 역공급사슬 구축 및 운영에 따른 비용과 금전적인, 환경적 이득을 분석하기 위해 공급사슬의 운영 효율성과 환경 영향을 평가할 수 있는 모델을 제시하였다. 또한 시나리오 분석을 통해 역공급사슬의 구축과 관련 정책 변화가 공급사슬에 미치는 영향을 분석하였다.

역공급사슬이 구축될 경우 환경에 미치는 영향이 감소하는 대신 공급자 증가와 제품의 질 하락, 품질검사 증가 등으로 인해 공급사슬의 운영 효율성이 감소한다. 그러나 협력 업체 개발, 처리 시설 건설 등을 통해 공급사슬 내의 순방향 활동 주체들과 역방향 활동 주체들의 사이에 협력 관계가 형성될 경우, 공급자 관련 제약이 개선되어 환경에 미치는 영향을 감소시키고 동시에 공급사슬의 운영 효율성을 유지할 수 있다. 이미 실행중인 유럽의 폐차처리 지침에 대한 간단한 분석 또한 수행되었다. 시뮬레이션 결과 몇몇 연구에서 지적되었던 것과 같이, 재생산이나 재생보다 연소를 통한 에너지 재활용의 비율이 증가함으로써 환경에 미치는 영향이 증가한다는 것이 밝혀졌다.

본 연구에서 제안한 평가 모델은 역공급사슬을 분석하고 정부의 정책 변화에 따른 영향을 파악해 적절한 정책을 수립하는 데 활용될 수 있을 것이다. 기업의 입장에서

도 수명 종료 후 제품 처리 방법 등 다양한 제품 관련 정책의 영향을 분석하여 환경 영향을 최소화하는 동시에 역공급사슬의 효율성을 높이는 데 이용될 수 있을 것이다.

본 연구에서 측정되는 환경 영향은 물질이 환경에 미치는 영향을 Eco-indicator라는 지표를 활용하여 계산한 것이다. 그러나 Eco-indicator는 그 수치 자체가 얼마만큼의 영향력을 행사하는지에 대한 객관적인 의미를 가지지 않으므로, 제시된 모델의 이해도를 높이기 위해서는 대상 물질이 환경에 미치는 절대적인 영향을 알 수 있는 지표 계산이 필요하다. 제시된 운영 효율성 평가지표들이 실제적으로 공급사슬 효율성에 어느 정도의 영향을 미치는지와 평가지표들 간의 상관관계 또한 연구되어야 할 것이다. 마지막으로 제시된 모델을 실제 존재하는 역공급사슬에 적용하여 모델의 효과를 검증하는 연구도 진행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. Michelsen, O., Fet, A.M. and Dahlsrud, A. (2006), "Eco-efficiency in extended supply chains: A case study of furniture production", *Journal of Environmental Management*, Vol. 79, pp. 290-297.
2. Farris II, M.T. and Hutchison, P.D. (2002), "Cash-to-cash: The new supply chain management metric", *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, Vol. 32-4, pp. 288-298.
3. Lockamy III, A. and Smith, W.I. (2000), "Target costing for supply chain management: criteria and selection", *Industrial Management and Data Systems*, Vol. 100-5, pp. 210-218.
4. Wang, J. and Shu, Y. F. (2006), "A possibilistic decision model for new product supply chain design", *European Journal of Operational Research*, Vol. 177-2, pp. 1044-1061.
5. Perona, M. and Miragliotta, G. (2004), "Complexity management and supply chain performance assessment. A field study and a conceptual framework", *International Journal of Production Economics*, Vol. 90, pp. 103-115.
6. Ulusoy, G. (2003), "An assessment of supply chain and innovation management practices in the manufacturing industries in Turkey", *International Journal of Production Economics*, Vol. 86, pp. 251-270.
7. Verma, R., Pullman, M.E. (1998), "An analysis of the supplier selection process", *Omega*, Vol. 12, pp. 739-750.
8. Graedel, T.E. and Allenby, B.R. (2003), "Industrial Ecology", Prentice Hall.
9. Breedveld, C., Timellini, G., Casoni, G., Fregni, A. and Busani, G. (2007), "Eco-efficiency of fabric filters in the Italian ceramic tile industry", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, pp. 86-93.
10. Tan, R.B.H. and Khoo, H.H. (2005), "An LCA study of a primary aluminum supply chain", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 13, pp. 607-618.
11. Ferguson, N. and Browne, J. (2001), "Issues in end-of-life product recovery and reverse logistics", *Production Planning & Control*, Vol. 12-5, pp. 534-547.
12. Gerrard, J. and Kandlikar, M. (2007), "Is European end-of-life vehicle legislation living up to expectations? Assessing the impact of the ELV Directive on "green" innovation and vehicle recovery", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15-1, pp. 17-27.
13. Jeong, H.J. (2006), "The cost valuation model for reverse supply chain using system dynamics", Master dissertation.
14. Towill, D. (1995), "Industrial dynamics modeling of supply chains", *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, Vol. 26-2, pp. 23-42.
15. Sim, E. S. (2005), "Performance analysis and network design of supply chain for strategic decision making", Ph. D. dissertation.



김 지 연 (bluiland@hanmail.net)

2004년 서울대학교 산업공학과 학사
2007년 서울대학교 산업공학과 석사
2007년~현재 삼성전자 근무

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 공급사슬



김 해 중 (ieguru@mailab.snu.ac.kr)

2001년 서울대학교 산업공학과 학사
2003년 서울대학교 산업공학과 석사
2003년~서울대학교 산업공학과 박사과정

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 생산계획 및 스케줄링, 공급사슬



신 기 태 (ktshin@road.daejin.ac.kr)

1987년 서울대학교 산업공학과 학사
1990년 서울대학교 산업공학과 석사
1995년 서울대학교 산업공학과 박사
1995년~현재 대진대학교 산업시스템공학과 교수

관심분야 : 기업정보시스템, 전자상거래, 비즈니스 프로세스 설계



박 진 우 (autofact@snu.ac.kr)

1974년 서울대학교 산업공학과 학사
1976년 KAIST 산업공학 석사
1985년 U.C. Berkeley 산업공학 박사
1985년~현재 서울대학교 산업공학과 교수

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, ERP/SCM, Ubiquitous Sense Network