

역방향 로지스틱스 : 과제 및 기존연구

이동호^{1*} · 김화중² · 김지수¹

¹한양대학교 산업공학과 / ²인하대학교 물류전문대학원

Reverse Logistics : Research Issues and Literature Review

Dong-Ho Lee¹ · Hwa-Joong Kim² · Ji-Su Kim¹

¹Department of Industrial Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²Graduate School of Logistics, Inha University, Incheon 402-751, Korea

Among various environmental issues, those for worn-out products are increasingly important due to rapid development and improvement of products, shortages of dumping sites and waste-incineration facilities, and legislation pressures and customer recognitions to protect the environment. Under such circumstances, collection and product recovery activities give rise to additional material flows from customers back to collectors and reprocessors. Reverse logistics, the opposite direction of the conventional forward logistics, is concerned with the management of this material flow. In this paper, we consider the emerging concept of reverse logistics. First, the concept of sustainable development is explained to explain the philosophical background of various environmental issues. Second, we explain the basics of reverse logistics, which includes the overall structure and the classification of network types. Finally, we review the previous research articles, especially in the aspect of industrial engineering, after classifying the decision problems into : (a) product recovery strategy; (b) network design and operation; (c) inventory management; (d) disassembly problems; and (e) remanufacturing problems.

Keywords: Environmental Issues, Reverse Logistics, Literature Review, Sustainable Development

1. 서론

환경이란 일반적으로 우리를 둘러싸고 있는 물리적인 지구환경을 말하며 대기, 물, 토양 및 인간이 만들어 놓은 다양한 기반시설 등으로 구성된다(Rubin and Davidson 2001). 이러한 물리적인 환경은 지구상의 생명체에 직간접적으로 영향을 미치고 있으며 특히 인류에 대한 영향이 매우 중대하다. 즉, 인류의 문명은 자연과 불가분의 관계를 가져왔으며 문명이 발전할수록 인류는 자연을 더 많이 이용하고 개발하여 왔다. 그러나 산업혁명 이후 인류는 물리적인 지구환경에 지속적으로 부정적 영향을 미치고 있으며 최근 들어 그 영향이 기후변화, 오존층 파괴, 자원고갈, 폐기물 문제 등 전 지구적으로 매우 심각해지고 있다. 이러한 영향이 점차 지구가 감당할 수 있는 능력을 초과함에 따라 환경문제가 전 지구적인 시급한 문제가 됨을 인식하였고 그 결과 전 세계적으로 다양한 환경보전 노력들을 해 오고 있다.

전통적인 환경과학 혹은 환경공학 분야인 대기오염, 수질오염, 토양오염, 폐기 및 위험물질, 자원고갈 문제 이외에 최근 부각되는 환경문제 중의 하나가 수명이 다하거나 소비자가 폐기한 제품(end-of-life or refused products)의 수거 및 재처리에 관한 문제들이다. 이 분야는 현재 환경공학의 한 분야인 고체폐기물공학(solid waste engineering)에서 주로 폐기물처리 및 재활용 방법과 같은 하드웨어 측면에서 다루어져 왔으나 최근 들어 폐기물 수거 및 처리 시스템의 관리에 관한 연구가 진행되고 있다(고체폐기물공학에 대한 기본적인 내용은 Vesilind (2002)를 참조하기 바란다). 이러한 수명이 다하거나 폐기한 제품에 대한 문제가 최근 들어 중요해진 몇 가지 이유를 정리하면 아래와 같다.

- 제품의 수명주기 단축 : 소비자의 요구가 다양화 및 경쟁의 심화로 신제품 출시 주기가 단축되었고 신제품의 상태이나 고객이 더 이상 요구하지 않는 제품의 증가로 제품수명주기

본 연구는 2 단계 BK21 사업의 지원을 받아 수행되었음.

* 연락처 : 이동호, 133-791 서울시 성동구 행당동 17 한양대학교 산업공학과, Tel : +82-2-2220-0475, Fax : +82-2-2296-0471,

E-mail : leman@hanyang.ac.kr

2008년 1월 30일 접수; 2008년 5월 16일 수정본 접수; 2008년 5월 23일 게재 확정.

- 가 단축되어 이러한 제품의 처리요구가 급격히 증가
- 제품 폐기시설의 부족 : 제품들을 폐기하는 시설인 매립지가 급격히 줄고 있으며 폐기관련 규제의 강화로 매립비용 및 폐기비용의 급격한 상승
- 폐기제품 재활용의 경제성 증가 : 제품폐기에 필요한 비용이 과거에 비해 급격히 증가하여 제품의 재활용으로 기업이 얻을 수 있는 이익이 상대적으로 증가

이상의 기본적인 이유들 외에 다양한 국내외 폐기제품 수거 관련 환경규제들이 제정되고 국제환경협약이 체결되고 있어 수명이 다한 제품의 수거 및 처리에 관한 문제는 더 이상 미룰 수 없는 시급한 문제로 떠오르고 있다(Boks *et al.*, 1998).

일반적으로 수명이 다하거나 폐기한 제품의 수거 및 처리문제의 기본원칙은 오염자부담원칙(originator-principle)으로 정부의 환경관련 규제나 법규수립 시 이를 기본으로 하고 있다. 여기서, 오염자부담원칙이란 환경에 직접적으로 영향을 끼치는 당사자가 그 책임을 져야한다는 것을 의미하며 기업의 입장에서 제품의 생산 및 판매뿐만 아니라 판매된 제품이 수명이 다했을 때 수거 및 처리에 관한 부분도 고려해야 한다는 것을 의미한다. 이에 따라 기업에서는 제품의 설계, 제조, 유통, 사용 및 수명 말을 포함하는 제품의 전체 수명주기(product life cycle)를 통합적으로 관리해야한다.

본 논문에서는 수명이 다하거나 폐기한 제품의 수거 및 처리문제에 관한 프로세스 관점에서의 개념적인 틀인 역방향 로지스틱스(reverse logistics)에 대한 개요를 설명하고 관련 의사결정 문제들을 분류한 후 기존연구를 정리하였다. 일반적으로 역방향 로지스틱스란 역물류라고도 번역되며 수명이 다하거나 소비자가 폐기한 제품의 수거(collection)에서부터 분해(disassembly), 분류와 검사(sorting and test), 재사용(reuse), 재제조(remanufacturing), 재활용(recycling) 및 폐기(disposal) 등의 처리 활동들을 포괄한 개념으로 20세기 말부터 그 개념이 정립되기 시작하였고 현재 많은 연구들이 진행되고 있다. 다시 말해 역방향 로지스틱스란 원자재 공급, 생산 및 분배를 총괄하는 순방향 로지스틱스(forward logistics)를 확장하여 소비자가 제품을 사용 후 폐기 시 발생하는 추가적인 로지스틱스 분야로 정의할 수 있으며 단순한 물류의 기능을 넘어 공급사슬(supply chain) 구성원의 관심도가 적은 부분에 대한 보완역할을 수행하며 동시에 새로운 분야로 성장해가고 있다. 또한, 판매자의 재고정리, 소비자의 변신, 수리목적 등의 다양한 이유로 구입한 제품을 판매자 또는 공급자에게 되돌려 보내는 반품의 회수 및 처리와 관련된 반품물류 또한 역방향 로지스틱스의 한 분야로 구분할 수 있다. 하지만, 이는 오랫동안 조달물류(inbound logistics) 및 판매물류(outbound logistics)와 더불어 기업의 물류관련 중요한 과제들 중 하나였고 반품물류의 중요한 기능이 수거, 수리, 재사용이라는 측면에서 보면 제품의 수거에서부터 분해, 분류와 검사, 재사용, 재제조, 재활용 및 폐기를 포괄하는 역방향 로지스틱스의 범주에 들어간다고 볼 수 있다. 다른 환경공학 분야와 마찬가지로 역방향 로지스틱스 분야는

폐기물 처리기술위주의 전통적인 고체폐기물공학 분야를 물류의 관점에서 확장한 개념으로 볼 수 있으며 자원절약, 낭비 제거 및 생산성 향상을 위한 시스템 설계 및 운영에 강점이 있는 산업공학 분야와 다른 자연과학 및 공학 분야들과의 학제간 공동연구가 필요한 분야이기도 하다.

역방향 로지스틱스 분야에 대해서는 그 중요성 및 관심으로 인하여 최근 십여 년간 다양한 관점에서의 문헌조사 논문들이 발표되었다(Fleischmann *et al.*, 1997; Carter and Ellram, 1998; Bloemhof-Ruwaard *et al.*, 1999; Dowlatshahi, 2000; Guide *et al.*, 2000; Kausner and Hendrikson, 2000; Ferguson and Browne, 2001; de Brito and Dekker, 2004; Srivastava, 2007). 하지만, 이러한 기존 문헌연구들은 주로 역방향 로지스틱스의 단편적인 부분을 주로 다루고 있으며 전체적인 관점에서의 심도 있는 문헌연구가 부족하였다. 반면, 본 논문에서는 역방향 로지스틱스의 철학적 배경과 기본구조를 상세히 정의하고 이 구조 하에 기존 논문들을 산업공학 관점에서 총괄하고자 하였다. 그리고 각 의사결정 문제 별로 기존연구를 체계적으로 정리하여 역방향 로지스틱스에 관심이 있는 국내기업, 정부 및 연구자에게 실질적인 도움이 될 수 있도록 하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저, 전 지구적인 환경문제에 대한 전반적인 이해를 위하여 환경문제에 관한 정치철학적 개념인 지속가능발전에 대하여 역사적 배경, 정의 및 중요성 측면에서 설명한다. 다음으로, 이러한 철학적인 기반 하에 수명이 다한 제품 혹은 폐기물 수거 및 처리문제에 관련된 역방향 로지스틱스에 대하여 개요 및 기본구조를 소개하고 관련 네트워크의 형태들을 분류한다. 그리고 역방향 로지스틱스와 관련된 다양한 의사결정 문제들을 제품복구 전략, 네트워크 설계 및 운영, 재고관리 문제, 분해 관련 문제, 재제조 관련 문제로 분류하고 각 문제별 기존연구들을 정리한다. 마지막으로, 결론에서는 본 논문의 내용을 간략히 정리한다.

2. 환경문제의 철학적 배경 : 지속가능발전

본 절에서는 역방향 로지스틱스의 필요성을 설명하기 위해 환경문제에 대한 주요한 철학적 개념인 지속가능발전(sustainable development)에 대하여 소개한다. 지속가능발전은 전 세계적인 지구환경 보전을 위한 노력들에 대한 정치경제적인 배경으로 수명이 다하거나 소비자가 폐기한 제품의 환경문제와 관련된 역방향 로지스틱스과도 밀접한 관련을 가지고 있다.

2.1 역사적 배경

지속가능발전은 1987년 세계환경 및 개발 위원회(WCED : World Commission on Environment and Development)에서 발표한 'Our Common Future'라는 보고서를 통해 소개되었으며 미래세대의 필요를 충족할 능력에 손상을 주지 않으면서 현재대의 필요를 충족시키는 발전으로 정의하였다(지속가능발전에

대한 구체적인 역사적 배경은 Mebratu(1998)를 참조하기 바란다. 이는 전 세계적인 환경보전을 위한 핵심적인 규범으로 인간과 자연, 현세대 구성원간 및 현세대와 후세대간의 공생관계를 적절히 유지하여 지구환경을 지속적으로 보전하는 개념으로 발전과 환경의 조화라는 개념이 아닌 환경을 제약조건으로 하는 발전을 의미한다(박재창 외, 2004).

지속가능발전의 개념이 구체화되고 보편화된 것은 최근의 일이지만 지속가능발전에 관련된 천연자원의 지속가능한 운용이라는 개념은 다양한 문헌을 통해 찾아볼 수 있다. 예를 들어, von Carlowitz의 저서인 산림경제(1713)에서 벌목량은 새로 심은 나무의 성장에 의해서 보충될 수 있을 만큼만 허용해야 한다는 원칙을 제시하였고 어업자원의 남획문제와 관련하여 최대지속가능 어획량이 제정되었으며, 경제학적으로는 Malthus의 한계이론 등이 있었다(박재창 외, 2004). 이러한 개념들은 국지적이라는 한계와 환경문제에 대한 무관심으로 주목을 끌지 못하였으나 산업혁명 이후 인류의 환경파괴가 가속화되고 지구적인 환경문제가 발생함에 따라 지속가능성(sustainability)의 중요성이 부각되었다. 그 결과 1972년 스톡홀름에서에서 개최된 유엔인간환경회의(UNCHE : United Nations Conference on Human and Environment)에서 환경문제가 심각하며 공동의 노력을 통해서만 해결될 수 있다는 데 국제사회가 인식을 같이 하였다.

지속가능발전이란 개념이 정리되고 국제사회에서 그 인식을 공유하게 된 계기는 1987년 세계환경 및 개발 위원회(WCED : World Commission on Environment and Development)이다. 이 회의는 2000년대를 향한 장기 지구환경 보전전략을 수립하고 국제적 환경문제 대처를 위한 효율적인 방법을 검토하는 것을 목적으로 구성되었으며 그 연구결과를 ‘Our Common Future’라는 보고서를 통해 발표하였다. 그 후 1992년 리우회의로 알려진 유엔환경개발 회의(UNCED : United Nations Conference on Environment and Development)에서는 각국의 정상들이 지구적 환경보전을 위한 리우선언을 채택하였고 그 구체적 실천계획인 Agenda 21을 발표하였다. 2002년 요하네스버그에서 개최된 지속가능발전 세계정상회의(WSSD : World Summit on Sustainable Development)에서는 리우회의 이후 10년 간 국제사회의 지속가능발전 추진실적을 평가하고 향후 구체적인 추진계획을 마련하였으며 지속가능발전을 위한 노력을 지속할 것을 결의하였다. 이러한 국제사회의 움직임에 대처하기 위하여 국내에서도 2000년 대통령직속자문기구로 지속가능발전위원회를 설치하고 환경보전과 관련된 국제동향을 파악하고 이에 대한 대응방안을 강구하고 있다.

2.2 정의

앞에서 설명한 바와 같이 WCED의 ‘Our Common Future’라는 보고서에서는 지속가능발전을 미래세대의 필요를 충족할 능력에 손상을 주지 않으면서 현세대의 필요를 충족시키는 발전으로 정의하였다. 이 개념의 기본적인 철학은 경제발전에서 환경보전을 우선적으로 고려해야 한다는 점을 강조하고

있으나 그 개념의 모호성으로 인하여 아래와 같은 다양한 정의들이 있다(박재창 외, 2004).

- 인간의 욕구를 지속적으로 충족시키고 삶의 질을 개선시키는데 적합한 발전
- 인간종의 무한한 생존과 단순한 생물학적 생존을 넘어서는 삶의 질의 고양, 외견상 인류에게 어떠한 이익도 제공하지 않는 요소들까지 포함한 생태계의 모든 구성요소들의 존속
- 미래의 유사한 이익에 대한 잠재적 가능성을 위태롭게 하지 않으면서도 현재 살고 있는 사람들의 경제적·사회적 이익들을 극대화하는 사회적·경제 구조적 변혁을 위한 모형
- 미래세대의 삶의 질이 보장될 수 있도록 자연환경과 이와 결부된 자연자원 총량의 보존을 목표로 하는 구상

위의 정의들을 종합하여 지속가능발전을 정리하면 앞에서 설명한 바와 같이 발전과 환경의 조화가 아닌 환경을 제약조건으로 하는 발전을 의미한다. 또한, 세 가지의 공생관계로-인간과 자연, 현세대 구성원간 및 현세대와 후세대 간의 공생관계·지속가능발전이라는 개념을 정리할 수 있다(김일태, 1996). 여기서, 세 가지의 공생관계를 구체적으로 설명하면, 첫째, 환경용량 또는 지역수용력의 범위 내에서 개발함으로써 인간과 자연의 공생을 유지하여야 하며, 둘째, 현세대 구성원들의 공생을 유지하여야 하고, 셋째, 세대 간 자원배분의 형평성을 생각하여 개발을 절제함으로써 현세대와 후세대의 공생을 유지하여야 한다는 점이다.

2.3 중요성

앞에서 설명한 지속가능발전이라는 개념은 추상적이고 모호한 측면 있으나 과거 한계라는 비판적 전망을 지속가능이라는 희망적 전망으로 전환시키는 계기가 되었다는 점에서 기본적인 의의를 가진다(박재창 외, 2004). 즉, 로마클럽의 한계라는 개념을 넘어 자연의 수용능력이 지탱할 수 있는 범위 내에서 발전을 지속하자는 새로운 개념으로 정립함으로써 인류에게 희망적인 방향을 제시하였다. 또한, 정치적으로는 선진국과 개발도상국의 입장을 수렴하는 계기가 되었다는 점에서 그 중요성이 크다. 다시 말하면, 미래의 환경보전을 우선시하는 선진국의 입장과 과거 선진국이 발생시킨 환경오염의 책임을 강조하는 개발도상국의 입장을 지속가능한 발전이라는 개념하에 수렴함으로써 지구의 환경보전을 위한 기초를 마련하였으며 환경문제에 대한 국지적 대응에서 국제기구가 환경논의의 전면에 나서는 주요한 계기가 되었다.

지속가능발전이라는 정치경제적 개념은 환경문제에 관한 세계적 유수기업들의 인식을 바꾸고 있으며 그 구체적인 형태로 WBCSD(World Business Council for Sustainable Development)를 발족시켰다. WBCSD에서는 기업차원에서 지속가능발전을 미래의 기업활동에 필요한 인적자원과 천연자원을 보호하면서 현재의 기업과 이해관계자의 욕구에 부합하는 수준의 경영

전략 및 경영활동을 채택하는 것으로 정의하고 있으며 기업차원에서 지속가능발전을 위한 노력을 하고 있다. 또한, 환경과 무역의 연계성 측면에서는 기본적으로 환경규범과 무역규범 간의 마찰을 최소화하도록 지침들이 마련되고 있다. 하지만, 이러한 지침들은 마찰의 최소화라는 측면들 이외에 제품자체가 환경에 유해한 경우뿐만이 아니라 제품의 제조공정 및 생산방법이 환경에 유해한 경우 이를 무역규제에 어떻게 반영할 것인가의 측면이 집중적으로 논의되고 있다. 예를 들어, 지구환경보전을 위하여 환경오염을 유발하는 제품과 생산공정에 관한 무역규제를 논의하는 국가 간 다자간 협상인 그린라운드의 주요내용으로는 다음과 같은 것들이 있다(이진, 강현수, 2004).

- 오염배출 기업을 불공정 행위로 간주하고 무역규제
- 환경오염물질의 처리비용을 오염자부담원칙에 따라 수출국이 부담
- 국제환경협약의 이행

이러한 국제환경협약 및 환경과 무역의 연계에 관한 국제사회의 동향은 기본적으로 수출중심의 우리나라의 경우 관련 정부정책과 기업들의 대응방법의 마련을 매우 시급하게 하고 있으며 특히 기업의 경우 환경경영 개념의 도입을 서두르는 주요한 이유가 되고 있다.

3. 역방향 로지스틱스: 개요, 분류 및 구조

본 절에서는 역방향 로지스틱스에 대한 전반적인 이해를 위하여 개요, 분류 및 구조를 설명한다. 먼저, 개요에서는 역방향 로지스틱스를 정의하고 필요성 및 현실적 어려움을 소개한다. 다음으로, 역방향 로지스틱스 시스템을 분류하고 구조에 대한 기본적인 설명을 한 후 관련 네트워크의 형태들에 대하여 설명한다.

3.1 개요

역방향 로지스틱스란 앞에서 설명한 바와 같이 수명이 다하거나 폐기한 제품의 수거 및 처리에 관한 문제에 대한 프로세스 관점에서의 총괄적 개념이다. 일반적으로, 역방향 로지스틱스란 소비자가 더 이상 사용하지 않는 제품의 수거, 재사용, 재제조, 재활용 및 폐기에 관련된 일련의 활동을 총칭하는 개념으로 기존의 순방향 로지스틱스 개념을 확장한 양방향 로지스틱스 개념에서 반대방향의 활동 부분으로 볼 수 있으며 아래의 <Table 1>과 같이 다양한 정의가 있다(de Brito and Dekker 2004).

먼저, 역방향 로지스틱스에 대한 간단한 개념도는 아래의 <Figure 1>과 같다.

Table 1. Definitions of reverse logistics

Stock(1998)	Role of logistics in recycling, waste disposal, and management of hazardous materials ; a broader perspective includes all relating to logistics activities carried out in source reduction, recycling, substitution, reuse of materials and disposals
Pohlen and Farris(1992)	Movement of goods from a customer towards a producer in a channel of distribution
Rogers and Tibben-Lembke(2001)	Process of planning, implementing, and controlling the efficient, cost-effective flow of raw materials, in-process inventory, finished goods, and related information from the point of consumption to the point of origin for the purpose of recapturing value or proper disposal
European Working Group on Reverse Logistics	Process of planning, implementing and controlling backward flows of raw materials, in process inventory, packaging and finished goods, from a manufacturing, distribution or use point, to a point of recovery or point of proper disposal

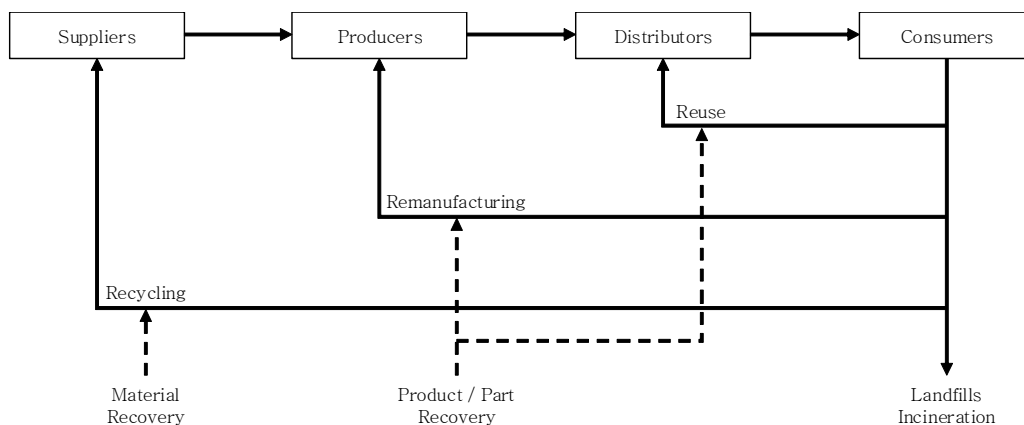


Figure 1. A simple description of reverse logistics

<Figure 1>은 원자재 공급자(supplier)에서 생산자(producer), 유통담당자(distributor) 및 소비자(customer)에게로 가는 전통적인 순방향 로지스틱스에서 수명이 다한 제품이나 폐기물의 수거, 재사용, 재제조 및 재활용을 나타내는 역방향 로지스틱스를 추가적으로 표현한 것으로 실선은 재사용, 재제조, 재활용 및 폐기 관련 제품의 흐름을 나타내고 점선은 원자재, 부품 및 제품복구의 형태를 설명하고 있다. 여기서, 소비자로부터의 역방향 로지스틱스는 크게 제품 및 원자재 복구(material and product recovery)에 관련된 물류와 폐기물 처리(waste disposal)에 관련된 물류로 구분할 수 있다. 제품복구에 관련된 역방향 로지스틱스란 소비자에서 유통담당자로의 역방향 로지스틱스가 발생하는 재사용, 소비자에서 생산자로의 역방향 로지스틱스인 재제조 및 소비자에서 원자재 공급자로의 역방향 로지스틱스가 발생하는 재활용으로 나누어 볼 수 있다. 여기서, 재사용과 재제조는 제품복구의 범주에 재활용은 원자재 복구의 범주에 들어간다.

제품의 재사용, 재제조 및 재활용에 관련된 활동은 새로운 현상이 아니라 이미 많은 재활용업체들을 중심으로 관련 활동들이 있어 왔으며 이에 따라 과거 역방향 로지스틱스라는 용어가 사용되지는 않았지만 재활용산업이라는 개념으로 존재해 왔다. 기존의 대표적인 재활용산업으로 철, 종이, 공병 재활용업체 등이 있으며 이러한 제품 혹은 원자재를 폐기하는 것보다 재사용, 재제조 혹은 재활용하는 것이 경제적으로 유리하기 때문에 관련 사업이 가능하였다. 이러한 기존의 재활용 산업에 대하여 역방향 로지스틱스라는 개념이 출현하고 관련 연구가 진행되고 있는 주요한 동기들로 아래의 세 가지를 들 수 있다(Bloemhof-Ruwaard *et al.*, 1999).

- 환경규제(environmental regulation) : 환경문제에 대한 정치경제적인 수단으로 제품 수거, 재사용, 재제조, 재활용 및 폐기에 관한 다양한 법규들이 제정되고 있다. 예를 들어, 독일의 경우 1990년대 초반 이미 제품 수거 및 복구에 관련법규를 제정하며 모든 제조업체가 수명이 다한 제품을 수거하고 가능한 수준까지 재사용, 재제조 혹은 재활용을 하며 동시에 제품폐기를 최소화하도록 유도하고 있으며 유럽의 국가들도 2000년 초반부터 제품에 환경과 관련된 세금을 의무적으로 부과하고 있다(Boks *et al.*, 1998, 국가청정생산지원센터, 2003). 또한, 유럽연합에서는 1998년부터 법규를 제정하여 각 회원국이 다른 회원국으로부터 재활용이 불가능한 폐기물의 수입을 거부하며 회원국이외 다른 OECD 국가로의 수출을 금지하는 권한을 갖도록 하였다. 우리나라의 경우도 2003년부터 생산자책임재활용제도를 제정 및 시행하여 각 기업들이 판매한 제품에 대해 수명 후에도 재활용의 물리적, 재정적 의무를 지게 하였고 재활용의무량을 달성하지 못할 경우 재활용부과금을 물도록 하였다. 결과적으로 이러한 법규들은 역방향의 물류흐름이 증가되도록 하고 있다.

- 경제적 이익(economic profitability) : 역방향 로지스틱스에 대한 경제적인 동기로는 먼저 매립이나 소각 등 제품폐기에 관련된 비용이 최근 꾸준히 증가되어 제품의 재사용, 재제조 혹은 재활용의 경제성이 증가되고 있다는 점이다. 즉, 제품의 재사용, 재제조 혹은 재활용으로부터 얻는 이익이 상대적으로 증가되어 기업들이 제품의 수거 및 복구에 상당한 관심을 가지기 시작하였다. 예를 들어, 세계적인 우수기업인 BMW, IBM, Hewlett Packard, Xerox 등이 이미 제품의 재사용, 재제조 혹은 재활용으로부터 상당한 경제적 이익을 얻었다고 보고하고 있다(Fleischmann *et al.*, 2000). 또한, 유럽에서 1994년의 경우 종이의 43%, 유리의 60%가 재활용되고 있으며 네덜란드의 경우는 1998년 통계로 보면 가정용 폐기물의 46%가 재활용된다고 보고하고 있다(Bloemhof-Ruwaard *et al.*, 1999). 우리나라의 경우는 2006년 통계를 보면 전자제품의 재활용률이 65%를 넘어서고 있다고 보고하였다(한국전자산업환경협회, 2006).
- 상업적 고려(commercial considerations) : 소비자의 환경에 대한 인식이 높아짐에 따라 점차 환경 친화 제품을 선호하게 되어 기업에서도 이를 적극적으로 경영에 반영하고자 하고 있다. 2007년 산업자원부의 보고서에 따르면 환경경영은 세계적인 추세로 기업들도 기업의 친환경 이미지 개선을 위해 환경경영시스템 인증을 획득하고 기업의 환경경영정보를 적극적으로 공개하고 있다. 세계적으로 2005년 기준 111,162건의 환경경영시스템 인증을 기록했는데 인증건수가 인증초기부터 매년 꾸준히 증가하고 있다. 국가별로는 일본이 23,466건으로 가장 활발하고, 중국(12,683), 스페인(8,620), 이탈리아(7,080), 영국(6,055) 순이며, 우리나라의 경우 2007년도 산업자원부 기술표준원의 자료에 따르면 2004년 10위에서 2005년 7위로 가장 빠른 상승세를 보였다(산업자원부 기술표준원 2007). 이에 따라 최근 기업들이 환경경영에 대하여 많은 관심을 가지기 시작하였으며 환경친화적 이미지의 구축에 노력하고 있다.

앞에서 설명한 다양한 동기에도 불구하고 현재까지 역방향 로지스틱스에 대한 연구결과가 미흡하며 실제 시스템을 구현하는데 많은 어려움이 따르고 있다. 이러한 어려움들 중 대표적인 몇 가지를 소개하면 아래와 같다(Pohlen and Farris, 1992).

- 순방향 로지스틱스와 차이점 : 역방향 로지스틱스의 다양한 활동들을 기존의 순방향 로지스틱스 시스템을 통하여 처리하기가 어려운 점이 있으며 수명이 다한 제품의 처리 방법과 순방향 로지스틱스 상의 문제들에 대한 관리방법에 본질적인 차이점이 존재한다.
- 역방향 로지스틱스의 고비용 구조 : 역방향 로지스틱스 시스템 구축 및 운영비용이 순방향 로지스틱스의 관련 비용보다 매우 높다.
- 시장의 협소성 : 재사용, 재제조, 재활용 등 환경친화적 개념

에도 불구하고 중고품이라는 소비자의 인식으로 인하여 그 시장이 크지 않다.

이러한 어려운 점들이 역방향 로지스틱스 시스템의 구축에 장애가 되고 있지만 앞에서 설명한 지속가능발전이라는 기본 철학의 구현 및 경제적 이익을 얻기 위하여 전 세계적으로 역방향 로지스틱스 관련 연구들이 다양하게 진행 중이다. 이에 국내에서도 정부 및 산업에서 역방향 로지스틱스 개념을 시급히 도입하고 효과적인 시스템 구축 방법론 및 관련기술의 개발을 통하여 효과적인 역방향 로지스틱스 시스템을 구축해야 한다.

3.2 분류

본 절에서는 앞에서 설명한 역방향 로지스틱스를 분류할 수 있는 기준들과 각각의 분류기준 하에서 기본 형태들을 설명한다. 기본적인 분류는 앞의 <Figure 1>에서 설명한 바와 같이 크게 제품 및 원자재 복구에 관련된 부분과 폐기물 처리에 관련된 부분으로 구분할 수 있는데 본 논문에서는 제품 및 원자재 복구에 관련된 부분에 대해 분류한다.

제품 및 원자재 복구가 발생하는 상황은 다양한 형태로 나타나는데 이러한 다양한 상황을 분류할 수 있는 기준으로 Fleischmann *et al.*(1997)은 재사용 동기, 복구 제품 혹은 원자재의 종류 및 재사용의 형태를 제시하였다. 각각의 기준 및 관련 형태에 대하여 정리하면 아래와 같다.

- 재사용 동기(reuse motivation) : 역방향 로지스틱스에서 제품 혹은 원자재 재사용을 하는 동기로는 크게 환경적 동기, 경제적 동기 및 상업적 동기가 있다. 여기서, 각 동기들은 독립적이지 않으며 동시에 고려해야 하는 것들로 특히 정부입장에서는 환경적 동기가 중요하며 기업의 입장에서는 경제적 동기와 상업적 동기가 다른 동기에 우선한다. 또한, 선진국들의 전략적 입장에서 보면 주로 유럽 국가들이 환경적 동

기에 우선순위를 주며 일본과 미국은 주로 경제적 동기를 중요시한다. 전반적으로는 환경에의 영향을 최소화하며 경제적 이익을 얻는 방향으로 역방향 로지스틱스 시스템이 구성되어야 하며 이를 통하여 지속가능발전의 방향에 부응할 수 있을 것이다.

- 복구 제품 및 원자재의 종류(types of recovered items) : 가장 기본적인 형태로는 포장재, 예비부품 및 소비재가 있으며 이들은 제품을 언제 그리고 왜 회수하는 지에 따라 분류한 형태들이다. 포장재의 경우 포장박스, 공병 등을 말하며 일반적으로 내용물이 소비자에게 전달되는 즉시 수거되며 예비부품의 경우 기계부품, 자동차 및 전자제품의 부품 등이 있으며 제품수리나 보전을 목적으로 제품판매 후 상당한 시간이 지난 후 수거된다. 그리고 소비재란 냉장고, 자동차, 복사기 등 제품의 수명이 다했을 경우 수거하며 일반적으로 예비부품의 경우보다 긴 시간이 지난 후 수거된다.
- 재사용의 형태(forms of reuse) : 제품 혹은 원자재의 재사용에는 앞에서 설명한 바와 같이 기본적으로 직접 재사용, 수리, 재활용, 재제조 등이 있다. 이상의 단편적인 분류와는 달리 Goggin and Browne(2000)은 일반적인 제품 및 원자재 복구형태를 투입제품의 복잡도와 산출제품의 복잡도에 따라 크게 세 가지로 분류하였으며 각각을 원자재 복구, 부품 복구 및 재제조로 명명하였다. 이 분류법에 대한 기본개념은 아래의 <Figure 2>와 같다.

<Figure 2>에서 원자재 복구의 경우 투입제품의 복잡도는 낮은 수준에서 높은 수준에 걸쳐 있으나 산출되는 원자재는 낮은 수준의 복잡도를 가진다. 중간 단계인 부품 복구의 경우는 투입제품의 복잡도는 중간 수준에서 높은 수준에 있고 산출되는 부품은 중간 수준의 복잡도를 가진다. 마지막으로, 재제조의 경우는 투입제품과 산출제품 모두 높은 수준의 복잡도를 가지는 형태이다. 앞에서 설명한 바와 같이 이러한 제품/원자재 복구형태에 따라 역방향 로지스틱스의 형태가 달라지며 관련 의사결정문제에도 변화가 있게 된다.

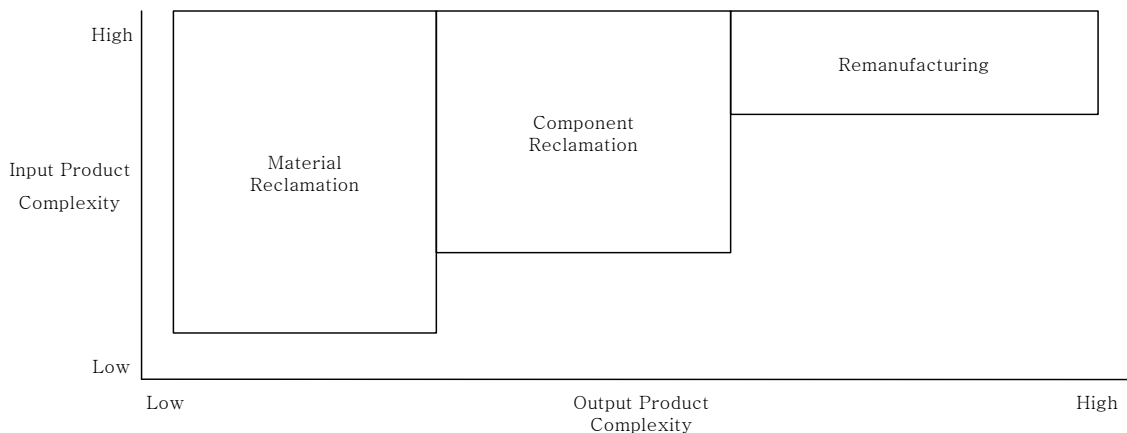


Figure 2. Types of material and product recovery

3.3 구조

본 절에서는 앞에서 설명한 역방향 로지스틱스 개요 및 분류기준을 바탕으로 구체적인 역방향 로지스틱스 네트워크 구조에 대하여 설명한다. 이를 위하여 먼저 앞에서 소개한 <Figure 1>을 확장한 역방향 로지스틱스 기본구조를 제시하고 각 구성 요소에 대하여 자세히 설명한다. 다음으로 제시한 기본구조를 기반으로 역방향 로지스틱스 네트워크 형태를 분류하고 설명한다.

3.3.1 기본구조

앞에서 설명한 바와 같이 역방향 로지스틱스란 수명이 다한 제품 혹은 폐기물의 수거 및 처리에 관한 총괄적 개념으로 소비자가 더 이상 사용하지 않는 제품의 수거, 재사용, 재제조, 재활용 및 폐기에 관련된 일련의 활동을 총칭한다. 이러한 추상적인 개념은 역방향 로지스틱스의 기본구조를 설명하기에 부족하여 본 절에서는 앞의 <Figure 1>을 확장한 형태의 역방향 로지스틱스 개념도를 설명한다. 먼저, 확장된 역방향 로지스틱스의 기본개념을 나타내면 아래의 <Figure 3>과 같다. 이는 단순히 수거, 재사용, 재제조, 재활용 및 폐기라는 기본활동들에 추가적인 활동 및 관계를 표현하며 <Figure 1>의 내용을 확장하고 구체화하였다(아래의 <Figure 3>에서 실선은 재사용, 재제조 및 재활용되기 전 제품의 흐름을 나타내며 점선은 재사용, 재제조 및 재활용 후 제품의 흐름을 나타낸다).

<Figure 3>에서 보면 역방향 로지스틱스란 제품의 수거(collection)에서부터 분해(disassembly) 및 분류와 검사(sorting and test) 후 재사용, 재제조 혹은 재활용으로 가는 제품 혹은 원자재 복구에 관련된 물류와 제품의 폐기(disposal)에 관련된 물류를 통합·관리하는 분야로 정의할 수 있으며 다른 용어로 역

물류 혹은 역방향 공급사슬(reverse supply chain)이라고도 한다. 이러한 역방향 로지스틱스는 순방향 채널, 순방향과 분리된 역방향 채널 혹은 두 가지가 결합된 채널의 형태로 구성될 수 있는데 역방향 로지스틱스 네트워크의 형태에 따라 다양한 형태가 나타날 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 역방향 로지스틱스는 전통적으로 많은 연구가 되어 온 순방향 로지스틱스와 밀접한 관련이 있으며 본 논문의 대상인 역방향 로지스틱스와는 달리 기존의 순방향 로지스틱스에서의 다양한 환경관련 문제, 기법 및 개선사례에 관한 연구도 있었다(Wu and Dunn, 1994, Hirsch *et al.*, 1998).

역방향 로지스틱스의 주요기능인 수거, 분해 및 분류/검사와 제품복구 및 폐기를 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

1) 수거(Collection)

수거란 수명이 다한 제품의 복구 및 폐기를 위하여 폐기제품을 수집하여 재제조 혹은 재활용 시설이나 폐기시설로 보내는 일련의 활동들을 의미하며 환경공학의 한 분야인 고체폐기물공학 분야에서는 이를 폐기물 수거(refuse collection)라고 한다. 일반적으로 폐기물의 수거는 지방자치단체나 제품을 생산 및 판매한 기업이 담당하고 있으며 본 논문에서는 이 두 가지를 모두 고려하는 일반적인 수거에 대하여 설명한다.

역방향 로지스틱스내의 수거는 기본적으로 제품을 구입 후 사용한 소비자로부터 시작되며 기본방식으로는 아래와 같은 두 가지 경우가 있다(Vesilind *et al.*, 2002).

- Curbside collection : 소비자가 폐기물을 도로가에 배치되어 있는 수거상자에 버리면 수거차량이 이 수거상자를 수거하는 형태
- Backyard collection : 소비자가 각 가구별로 비치한 수거상자

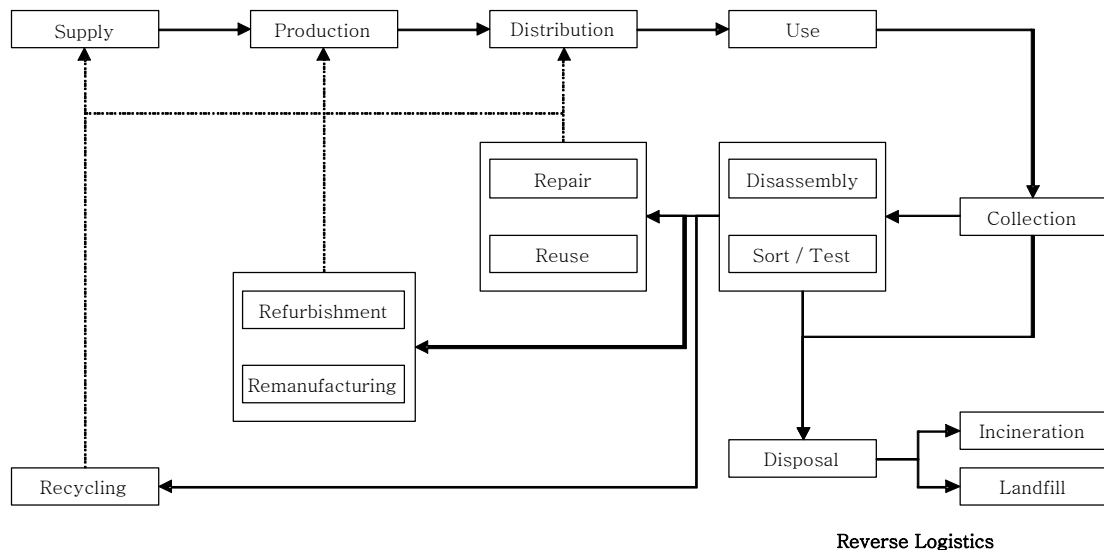


Figure 3. A detailed description of reverse logistics

에 폐기물을 버리면 수거차량이 이를 수거하는 형태

- 수거기능은 역방향 로지스틱스에서의 기능들 중 가장 기본적인 기능이며 동시에 병목에 해당한다. 즉, 기존에 역방향 로지스틱스 시스템이 효과적으로 구축되지 못한 가장 큰 이유들 중 하나가 수거기능에 있으며 특히 재사용, 재제조 및 재활용에 관련된 역방향 로지스틱스 시스템에서는 매우 중요한 기능이다. 따라서 관련 문제들의 합리적인 해결을 통한 효율적인 폐기물 수거시스템의 구축은 역방향 로지스틱스 시스템 구축에 핵심적인 부분이 되며 관련 연구가 시급히 필요하다.

2) 분해 및 분류/검사(Disassembly, Sorting/Testing)

분해란 수거한 제품을 부분조립품(subassembly) 혹은 부품(part/component)들로 분리해나가는 체계적인 과정으로 정의된다. 제품분해를 하는 기본적인 이유는 가치 있는 부분조립품 혹은 부품을 복구기능을 통하여 재사용, 재제조 혹은 재활용하는데 있으며 그 밖에 위험물질을 분리폐기 할 경우도 적용된다. 분해에는 크게 세 가지 형태가 있으며 각각에 대하여 살펴보면 아래와 같다.

- 비파괴 분해(non-destructive disassembly) : 분해과정을 통해 얻게 되는 부분조립품이나 부품의 파괴가 없이 제품을 분해하는 것으로 주로 제품의 재사용이나 재제조에 적용
- 부분파괴 분해(partially destructive disassembly) : 분해과정을 통해 얻게 되는 부분조립품이나 부품들 중 고가품을 얻을 목적으로 저가품이나 고장부품은 파괴하는 형태로 주로 부분조립품이나 부품의 재사용에 적용
- 완전파괴 분해(completely destructive disassembly) : 제품이 분해과정으로 통해 완전히 파괴되는 형태의 분해로 주로 원자재 재활용에 적용

분해는 간단히 조립의 역으로 생각할 수 있으나 불확실성이 매우 높다는 분해의 고유특성으로 인하여 조립과는 차별화된다(Zussman, 1995). 여기서 불확실성이란 분해로부터 얻는 부분조립품이나 부품은 분해 이후에 그 상태를 판단할 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 같은 종류의 제품이라도 소비자의 사용 방식에 따라 제품의 상태가 달라 분해시스템의 운영에 어려움이 따른다. 일반적으로 분해는 제품 복구나 폐기에 선행하는 핵심적인 기능으로 분해 생산성 향상 및 제품 설계의 관점에서 관련기술이 꾸준히 개발되어 오고 있다(O'Shea et al., 1998; Lee et al., 2001; Santochi et al., 2002; Kim et al., 2007a).

분류란 수거한 폐기물들을 재사용, 재제조, 재활용 및 폐기 등 폐기물 처리방식에 따라 구분하는 활동으로 정의된다. 앞에서 설명한 바와 같이 분류작업은 기본적으로 소비자가 할 수 있으나 수거 담당자 혹은 폐기물처리 담당자에 의해 추가적인 분류작업이 주로 수행되며 노동집약적으로 시간과 비용이 높아 병목작업이 되기도 한다. 그리고 검사는 분류된 제품이나 제품의 분해전후 발생하는 부품들에 대한 품질을 측정하

는 작업을 의미한다.

3) 제품복구 및 폐기(Product Recovery and Disposal)

제품 복구란 제품의 분해 후 발생하는 부분조립품 혹은 부품을 재사용, 재제조 혹은 재활용하는 것을 의미하며 폐기란 복구가 어려운 제품, 부분조립품 혹은 부품을 매립하거나 에너지 재활용을 위해 소각하는 것을 의미한다. 앞에서 설명한 바와 같이 재사용은 간단한 세척이나 수리를 통해 부분조립품 혹은 부품을 원래의 목적과 동일하게 이용하는 것을 의미하고 재활용이란 부분조립품 혹은 부품에 포함된 원자재를 추출하여 재사용하는 것을 의미한다. 그리고 재제조란 수명이 다한 제품을 적절한 재제조공정들을 통해 성능과 품질이 신제품과 동일하거나 더 우수하게 제조하는 것을 의미한다. 특히, 재제조의 경우 갑자기 발생한 새로운 산업이 아니라 과거에도 필요에 따라 다양한 형태로 존재해 온 산업으로 1998년 그 규모가 미국의 경우 530억 불이며 전 세계적으로는 1000억 불 규모에 달하는 막대한 규모의 산업이다(Steinhilper, 1998). 하지만 그 규모에 비해 재제조 시스템의 설계 및 운영은 매우 초보적인 단계로 이 분야에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

3.3.2 네트워크 형태

역방향 로지스틱스 시스템의 설계 및 운영에 관련된 사례연구들을 보면 다양한 형태의 역방향 로지스틱스 네트워크가 존재한다. 이러한 구조들은 앞에서 설명한 전반적인 기준을 기반으로 다양하게 분류할 수 있는데 본 논문에서는 Fleischmann et al.(2000)이 제안한 방법을 소개하고자 한다. 이 논문에서는 역방향 로지스틱스 네트워크를 재사용 네트워크, 재제조 네트워크 및 재활용 네트워크로 분류하였고 각각은 집중화 정도, 관련시설 단계의 수 및 네트워크의 개폐여부에 따라 다른 특징들을 가진다고 설명하였다. 각 네트워크별 기본구조 및 특징을 설명하면 아래와 같다.

1) 재사용 네트워크(Reusable item network)

재사용이 가능한 제품들에 대한 역방향 로지스틱스 네트워크를 의미하며 대표적으로 다음 <Figure 4>와 같은 구조를 가진다. 여기서 재사용이 가능한 제품들로 대표적인 것은 재사용 포장재(유리병, 플라스틱 병, 포장상자 등)가 있으며 그 밖에 다양한 부품들이 있을 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 판매자의 재고정리, 소비자의 변심, 수리목적 등의 다양한 이유로 구입한 제품을 판매자 또는 공급자에게 되돌려 보내는 반품물류의 경우 개념적으로 재사용 네트워크의 범주에 들어가는 것으로 볼 수 있으나 고객 이외에 판매자로부터도 수거가 발생할 수 있다는 점에서는 차이가 있을 수 있다. 민정용 외(2007)는 반품물류의 개념과 사례에 대한 체계적인 정리하였으며, Lee(2004)는 유통센터로 집중화된 반품회수 네트워크에 대해서 설명하고 있고, 김현수, 양재환(2005)은 반품물류 시스템의 여러 모형들과 관련 사례들을 설명하고 있으니 참고하기 바란다.

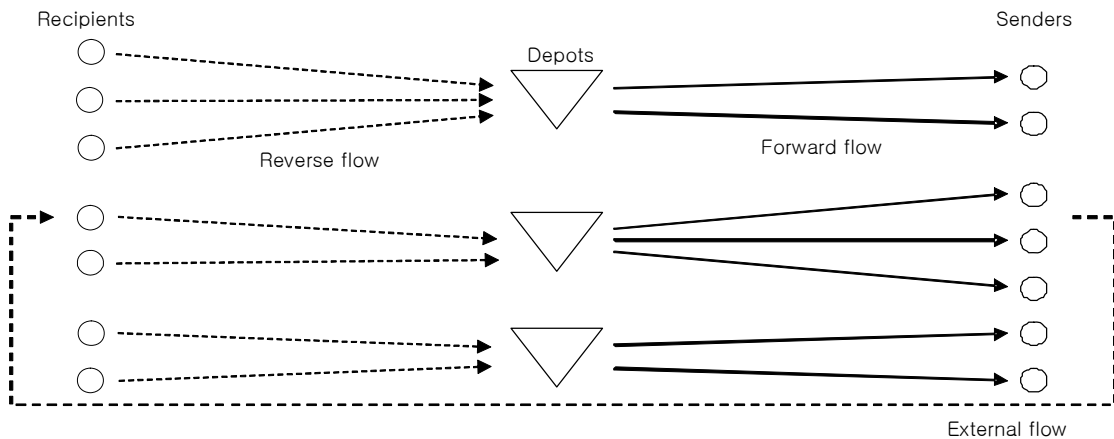


Figure 4. Reusable item network : basic structure

위 그림은 포장재에 대한 역방향 로지스틱스 네트워크의 예로 순방향 물류를 통해 포장재를 포함하는 제품을 판매하고 소비자가 제품을 받은 후 폐기 포장재는 역방향 물류를 통해 수거하는 형태를 따른다. 재사용 네트워크는 재사용품이 네트워크를 반복하여 순환하는 형태를 따르므로 기본적으로 폐쇄형 흐름을 가지며 다양한 지점에서 수거가 발생하는 분산구조를 가진다. 그리고 재사용에 관련된 처리공정으로 세척이나 간단한 수리가 있으므로 관련시설 단계의 수가 세 가지 형태 중 가장 적다.

재생과정을 통해 새로운 제품이 되며 복구가능성이 없는 제품들은 원자재 재활용을 하거나 폐기하는 형태를 가진다. 재제조 네트워크는 복구된 제품이 기능적으로 원래 제품과 동일하므로 일반적으로 폐쇄형 흐름을 가지며 그 형태는 일정한 특징이 없이 집중 혹은 분산 구조를 가진다. 그리고 제품의 재제조과정이 복잡하므로 다단계 관련시설의 수를 가진다. 다른 네트워크 구조와는 달리 재제조 네트워크는 원래의 제품 분배망과 밀접한 관련이 있어 분배망과 수거망의 효과적인 통합이 매우 중요하며 특히 수거된 제품의 품질문제로 인한 불확실성이 고려되어야 한다.

2) 재제조 네트워크(Remanufacturing network)

기계장비, 엔진, 자동차용 부품, 전자제품 등 재생가치가 있는 폐기제품들의 재제조에 관련된 역방향 로지스틱스 네트워크를 의미하며 대표적으로 아래의 <Figure 5>와 같은 구조를 가진다.

위의 그림에서 보면 재제조 네트워크는 공장에서 분배망을 통해 판매된 제품들을 분배망 혹은 분배망과는 다른 수거망을 통해 수거하고 검사를 거친 후 복구 가능성이 있는 제품들은

3) 재활용 네트워크(Recycling network)

종이, 유리, 금속, 플라스틱 등 원자재의 재활용에 관련된 역방향 로지스틱스 네트워크 형태로 대표적인 구조는 다음의 <Figure 6>과 같다.

재활용 네트워크는 역방향 물류를 통하여 소비자로부터 폐기물을 수거하고 적절한 재활용 시설에서 처리된 후 재활용된 자재를 구매자에게 판매하는 형태를 가진다. 재활용 네트워크

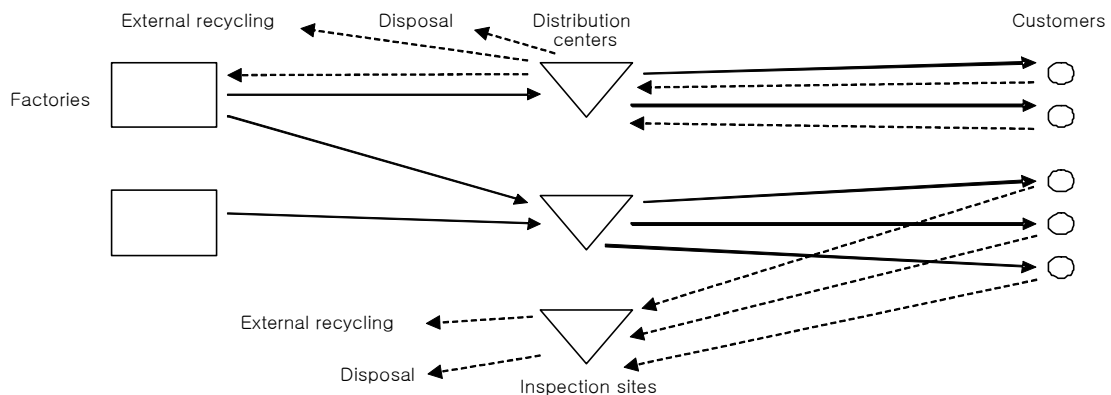


Figure 5. Remanufacturing network : basic structure

는 재활용된 자재가 일반적으로 원래 제품의 생산에 사용되지 않으므로 개방형 흐름을 가지며 일반적으로 복구될 재료의 가치가 높지 않아 대량으로 수거 및 처리하여 규모의 경제성을 얻는 집중 구조를 가진다. 여기서, 집중 구조란 몇 개의 집중된 곳에 재활용 시설들이 위치하는 형태를 의미한다. 그리고 위의 그림에 나타난 바와 같이 재활용시설 한 단계를 거치므로 관련시설 단계의 수가 위에서 설명한 재제조 네트워크보다 상대적으로 적다. 우리나라의 경우 2008년 현재 수도권, 충청권, 영남권, 호남권, 제주권 등 총 5군데의 리사이클링센터에서 폐전자제품으로부터 원자재의 재활용을 활발히 수행하고 있다. 그 밖에 재활용 네트워크에 대한 국내 사례연구로 Kim *et al.* (2001)은 우리나라 기업의 폐가전 제품의 재활용 사례 및 효과를 설명하였고 Lim *et al.*(2006)은 자동차 산업에 역방향 로지스틱스를 도입하였을 경우 시뮬레이션을 통하여 그 효과를 보여주고 있다.

4. 역방향 로지스틱스 : 의사결정 문제 및 기존연구

본 절에서는 앞에서 설명한 역방향 로지스틱스와 관련된 의사결정 문제-제품복구 전략, 네트워크 설계 및 운영, 재고관리 문제, 분해 관련 문제 및 재제조 관련 문제-를 체계적으로 설명하고 각 문제 별 기존연구를 간단히 정리한다. 앞에서 설명한 바와 같이 역방향 로지스틱스에 대해서는 다양한 관점에서의 문헌조사 논문들이 있지만 본 논문에서는 앞의 여러 문헌조사 논문들을 산업공학 관점에서 정리하였다.

4.1 제품복구 전략(Product Recovery Strategy)

일반적으로 전략이란 조직의 목표를 성취하기 위한 활동이나 활동의 패턴으로 기본적으로 조직의 중요한 활동들을 포함하며 이 활동들에 대한 통일성, 방향, 목적 및 외부환경의 변화

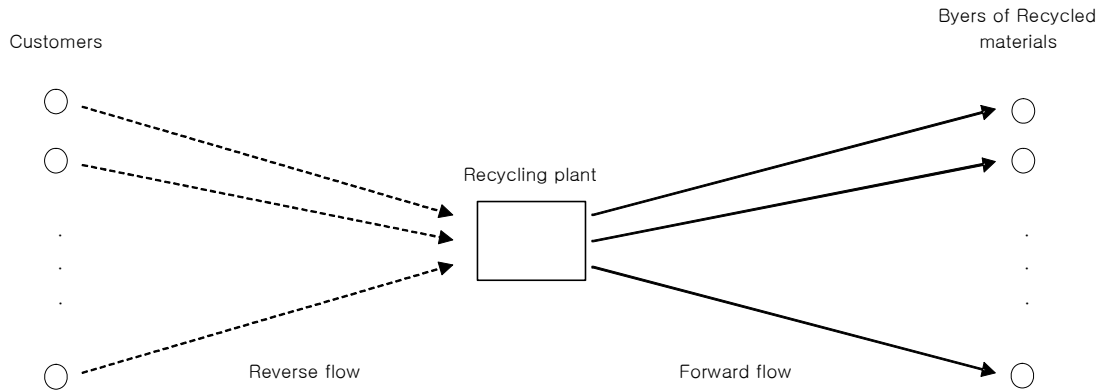


Figure 6. Recycling network : basic structure

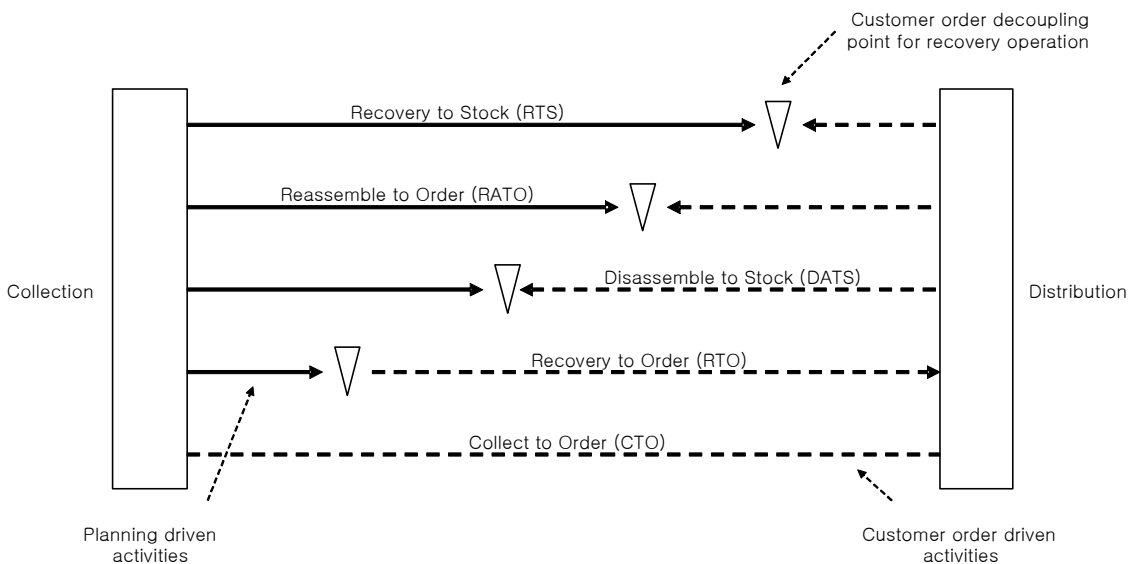


Figure 7. Product recovery strategies

에 대한 대응방안 등을 제공하는 조직의 최상위 의사결정으로 정의할 수 있다(이상범 2001). 즉, 전략이란 어떤 조직이 지속적으로 살아남기 위하여 필요한 근본적인 뼈대이며 동시에 지속적인 경쟁 우위의 확보를 위하여 변화하는 환경에의 적응을 관리하는 활동이다.

역방향 로지스틱스에 있어서도 다양한 형태의 전략이 있을 수 있는데 특히 기업의 제품복구활동 측면에서 Goggin and Browne(2000)은 재사용, 재제조 혹은 재활용 기업들의 제품복구 활동 유발 요인인 고객주문과 계획기반 수요예측의 상대적인 크기에 따라 제품복구전략을 recovery to stock(RTS), reassemble to order(RATO), disassemble to stock(DATS), recovery to order(RTO) 및 collect to order(CTO)로 구분하였으며 각각을 개념적으로 나타내면 앞의 <Figure 7>과 같다(이러한 전략의 구분 방법은 기존의 make to stock, make to order, assemble to order 등을 확장한 형태로 볼 수 있다).

<Figure 7>에서 실선으로 표현된 화살표는 계획기반 수요예측 활동을 의미하며 점선으로 표시된 화살표는 고객 주문기반 활동을 의미한다. 그리고 이들 화살표사이의 점은 물리적으로 복구제품, 부품 및 원자재 재고가 위치하는 지점으로 고객주문과 계획기반 수요예측의 상대적인 영향의 크기를 나타내며 이 점의 위치는 역방향 로지스틱스 시스템의 구조, 형태 및 통제에 대한 기초를 제공한다. 위의 그림에 대한 구체적인 이해를 위하여 각각의 전략에 대하여 자세히 설명하면 아래와 같다(Goggin and Browne, 2000).

- **Recovery to Stock(RTS)** : 이 전략은 제품의 복구 활동이 수요예측을 통해 얻는 복구 제품, 부품 혹은 원자재의 기대수요를 기반으로 수행된다. 이 경우는 복구 제품이 재고로부터 충족되므로 고객 인도기간이 짧으며 제품복구를 담당하는 기업과 복구된 제품을 구입하는 고객과의 접촉빈도가 매우 낮다. 그리고 수명이 다한 제품의 수거는 앞에서 설명한 바와 같이 수요예측을 통해 얻는 복구 제품, 부품 및 원자재의 기대수요에 기반을 두어 이루어진다. 이 전략을 따르는 예로는 원자재 재활용, 수리 가능한 부품 등이 있다.
- **Reassemble to Order(RATO)** : 이 전략은 주로 재제조 제품들에 적용되며 제품의 제조립 활동이 고객의 주문에 따라 수행되는 형태이다. 이는 제품의 종류가 매우 다양하나 한정된 표준화된 부품의 조립으로 완제품이 만들어지는 경우에 적용되는 전략으로 assemble to order에 대응한다. 따라서 고객 인도기간은 제조립할 부품의 확보여부에 따라 달라지며 일반적으로 중간정도의 시간이 소요된다. 그리고 수명이 다한 제품의 수거는 재제조제품에 대한 수요예측과 제조립에 사용될 복구부품의 재고수준에 따라 결정된다. 이 전략을 따르는 예로는 자동차용 재생 엔진, 재생 복사기 등이 있다.
- **Disassemble to Stock(DATS)** : 이 전략은 제품을 분해하고 분해한 부품을 재고로 유지하는 형태로 고객주문에 따라 제품을 분해하고 분해된 부품은 재생과정을 거친 후 관련 제품

의 제조립에 사용된다. 이 경우 고객 인도기간은 제품분해 이후 제조립에 소요되는 시간으로 인해 중간에서 긴 시간이 소요되며 수명이 다한 제품의 수거는 일반적으로 제품에 대한 기대수요와 수거제품의 가용정도에 따라 결정된다. 이 전략을 따르는 예로는 대형 컴퓨터나 자동차부품을 재제조하는 업체 등이 있다.

- **Recovery to Order(RTO)/Collect to Order(CTO)** : 이 전략은 제품의 복구 혹은 심지어 수거를 고객주문에 따라 수행하는 형태로 고객의 주문이 있기 전까지 제품의 복구에 관련된 활동을 하지 않기 때문에 일반적으로 고객 인도기간이 매우 길다. 따라서 이 전략은 고가의 복잡한 제품에 적용되며 그 수요는 적은 편이다. 이 전략을 따르는 예로는 고가의 의료장비, 통신장비, 항공기 엔진 등이 있다.

이상의 전략들 이외에 제품의 특성, 제품복구 기술 등에 따라 다른 형태의 전략들이 있을 수 있으며 제품복구에 관련된 역방향 로지스틱스의 기본적인 전략문제란 궁극적으로 비용, 품질, 납기, 유연성 및 환경 측면에서 어떤 전략을 선택하는 것이 바람직한지를 결정하는 문제가 되며 이 문제에 대한 연구는 기존의 경영전략에 관련되는 연구 분야로 다양한 사례연구가 필요한 것으로 판단된다.

4.2 네트워크 설계 및 운영(Network Design and Operation)

역방향 로지스틱스에서의 네트워크 설계 및 운영문제는 산업공학 관점에서 가장 핵심적인 문제들 중의 하나로 기존연구들이 주로 사례연구 중심으로 수행되어 왔지만 네트워크의 기본 형태를 규명하는 근본적인 이론연구가 필요하다(Dowlatshahi, 2000).

먼저, 네트워크 설계문제란 수명이 다하거나 폐기한 제품의 수거에서부터 재사용, 재제조, 재활용 및 폐기에 이르는 역방향 로지스틱스 시스템의 기본 구조를 결정하는 문제로 정의되며 순방향 로지스틱스 네트워크와의 주요한 차이점을 정리하면 다음과 같다(Fleischmann *et al.*, 2000). 여기서, 네트워크의 기본 구조란 역방향 로지스틱스 내 다양한 기능을 수행하는 시설들의 위치, 용량 및 시설 간 물리적인 수송망 등을 의미한다(네트워크 설계에 대한 문헌은 Bloemhof-Ruwaard *et al.* (1999)을 참조하기 바란다).

- **네트워크의 형태** : 순방향 로지스틱스의 경우 적은 지점으로부터 많은 지점으로 분배하는 분산 구조(divergent structure)를 가지는 반면 역방향 로지스틱스는 많은 지점으로부터 적은 지점으로 수거하고 처리하는 수렴 구조(convergent structure)를 가진다.
- **수거의 불확실성** : 역방향 로지스틱스의 경우 폐기물 재처리 시설의 입장에서 폐기물의 수거가 외부변수로 통제가 어렵기 때문에 순방향 로지스틱스의 분배망보다 큰 불확실성을

가지며 이 불확실성을 적절한 관리가 역방향 로지스틱스 네트워크의 설계 및 운용에 관련된 핵심사항이 된다.

- 시장의 규모 및 불확실성 : 역방향 로지스틱스의 재사용, 재제조 및 재활용 제품 시장의 규모가 순방향 로지스틱스의 신제품 시장보다 적으며 수요의 불확실성 또한 매우 높다.

역방향 로지스틱스에서 네트워크 설계문제는 기존의 순방향 로지스틱스 네트워크 설계문제와 전반적으로 유사하다고 볼 수 있으나 위에서 설명한 여러 특성으로 인하여 순방향 로지스틱스 네트워크의 순수한 역으로 보기 어려운 측면이 있다. 따라서 접근방법의 측면에서도 기존연구의 부분 혹은 전체적인 수정이 불가피하며 특히 순방향 로지스틱스와의 적절한 통합이 매우 중요한 문제가 된다(Fleischmann *et al.*, 1997). 반면, 네트워크 운용문제란 앞에서 설명한 네트워크 설계문제에 대한 해를 기반으로 결정된 역방향 로지스틱스 구조 하에 시스템의 운용에 관련된 제반 의사결정 문제로 정의된다.

본 논문에서는 역방향 로지스틱스에서의 네트워크 설계 및 운용에 관련된 하부문제들을 네트워크 형태 결정, 시설위치 및 용량 결정, 차량 및 작업자 수 결정 및 차량경로 문제로 구분하였다. 전반적인 접근방법으로는 순방향 로지스틱스와는 다른 역방향 로지스틱스 고유의 특성을 반영한 문제정의 및 관련해법이 개발되어야 하며 기존 순방향 로지스틱스 관련 문제들의 수정이나 확장이 필요하다. 각 하부문제에 대한 정의 및 관련 기존연구들을 정리하면 아래와 같다.

4.2.1 네트워크 형태 결정 문제(Network Topology Problems)

이 문제는 역방향 로지스틱스 네트워크 설계의 가장 기본적인 문제로 폐기물 및 재활용품 수거 및 처리 망을 어떠한 형태로 구성할 것인가를 다루는 문제이다. 이 문제에 대해서는 앞에서 설명한 네트워크 형태의 분류기준이 적용될 수 있으며 구체적으로 아래와 같이 분류할 수 있다(Fleischmann *et al.*, 2000).

- 수거망 물류의 형태 : 개방형(open-loop) 및 폐쇄형(closed-loop)
- 수거지점들의 분포 : 집중형(central collection) 및 분산형(distributed collection)
- 기존 분배망과의 관련 정도 : 새로운 수거망(entirely new collection network) 혹은 기존 분배망의 확장(extension of existing distribution network)
- 수거망 운영주체 : 내부(in-house collection) 혹은 외부(outsourcing collection)

이상의 분류기준들에 대한 특성들은 앞에서 설명한 바와 같이 기본적으로 폐기물의 형태(재활용품, 재제조제품, 재사용품, 폐기품 등)에 따라 다르나 수렴구조와 불확실성과 같은 역방향 로지스틱스의 특성을 반영해야 하며 구체적이고 정량적인 네트워크 형태 결정방법에 관한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

네트워크 형태 결정 문제에서 주요한 하부문제로는 다음과 같은 것들이 있다.

- 영역설계 문제(Sector design problem) : 이 문제는 재활용품 및 폐기물 수거 지역을 각 수거지점의 서비스 수준을 적절히 유지하며 일정한 개수의 영역으로 구분하는 문제로 정의되며 구분된 각 영역의 차량 운용은 일반적으로 독립적으로 수행된다. 이 문제에 관한 전반적인 내용은 Mansini and Speranza(1998) 및 Beullens *et al.*(2004)을 참조하기 바람과 기존 연구가 많이 없어 추후연구가 필요한 분야로 판단된다.
- 분배망과 수거망의 통합(Integration of distribution and collection networks) : 이 문제는 기존의 분배망과 수거망을 효과적으로 통합하는 문제로 정의되며 주요한 네트워크 형태 결정 문제로 볼 수 있다(Fleischmann *et al.*, 1997). 이 문제에 관한 기존연구로 Fleischmann *et al.*(2001)은 정방향 흐름과 역방향 흐름을 함께 고려하는 분배 및 회수 네트워크의 통합 모델을 정의하고 있으며 Ko *et al.*(2004)과 Ko and Evans(2007)는 정방향과 역방향 네트워크를 동시에 최적화하는 이론적 연구를 제시하였는데 각각은 혼합정수 비선형 모델을 통하여 유전알고리즘을 기초로 한 발견적 기법을 제안하였다. 그리고 Lu and Boste(2007)는 재제조 설비를 대상으로 하여 순방향과 역방향 흐름을 통합하는 문제를 고려하였으며 혼합정수 계획법으로 모델을 정의하고 라그랑지안 완화법(Lagrangian relaxation)에 기반을 둔 알고리즘을 제안하였다.

4.2.2 시설위치 결정 문제(Facility Location Problems)

이 문제는 일반적인 네트워크 설계에 있어 핵심적인 문제들 중 하나로 역방향 로지스틱스 네트워크에 관한 많은 사례연구들이 이 문제를 다루고 있다. 여기서, 시설위치 결정 문제란 결정된 네트워크 형태에 따라 역방향 로지스틱스 내 다양한 시설들(수거지점, 재제조, 재활용 혹은 폐기공정을 수행하는 처리시설 등)의 위치를 결정하는 문제를 말한다. 역방향 로지스틱스에서 시설위치 문제는 네트워크 설계의 핵심이 되는 문제로 일반적인 시설위치 문제와 유사하지만 역방향 로지스틱스의 특성을 반영한 기초적인 이론적 모형의 개발이 필요하며 자세한 내용은 Fleischmann *et al.*(1997) 및 Bloemhof-Ruwaard *et al.*(1999)을 참조하기 바란다.

역방향 로지스틱스 네트워크 설계를 위한 시설위치 문제에 대한 기존연구는 크게 사례연구와 이론연구들로 나누어볼 수 있는데 각각에 대하여 정리하면 다음과 같다.

1) 사례연구

본 논문에서는 역방향 로지스틱스 네트워크 설계를 위한 시설위치 문제에 대한 사례연구들을 재사용, 재제조, 재활용 및 폐기물 처리 네트워크로 구분하여 설명한다.

첫째, 재사용 네트워크에 대해서는 Kroon and Vrijens(1995)는 재사용이 가능한 수송용 포장재에 관하며 관련비용을 최소화하며 수거지점의 수와 위치 및 관련 포장재 흐름의 양을 동

시에 결정하는 수학 모형을 제시하고 관련해법을 제안하였다. 그 밖에 재사용 네트워크 설계문제에 대한 사례연구로는 시뮬레이션 기법에 기반을 둔 Kara *et al.*(2007)이 있다.

둘째, 재제조 네트워크에 대해서 Krikke *et al.*(1999)은 수명이 다한 제품을 수거하고 분해, 재제조, 재활용 등 다단계 처리 공정을 거친 후 얻는 원자재나 제품을 소비자에게 다시 판매하는 형태의 구조를 가지는 역방향 로지스틱스 네트워크에서 관련 처리시설의 위치와 물류의 양을 동시에 결정하는 수학 모형을 제시하고 관련해법을 제안하였다. 그 밖에 재제조 네트워크 설계문제에 대한 사례연구로는 전자장비 회사를 대상으로 연구한 Jayaraman *et al.*(1999), Listes(2005) 및 Lee and Dong(2007), 타이어 제조회사를 대상으로 연구한 Lebreton and Tuma(2006) 등이 있다.

셋째, 재활용네트워크에 대한 사례연구로 Barros *et al.*(1998)은 네덜란드에서 건축폐기물로 발생하는 모래를 분류하고 수거 및 재활용을 위한 역방향 로지스틱스 네트워크를 어떻게 설계할 것인지를 다루고 있다. 이 논문에서는 모래 재활용 시설들의 수, 용량 및 위치를 최소의 비용으로 결정할 수 있는 수학 모형을 제시하고 관련해법을 제안하였다. 그리고 Louwers *et al.*(1999)은 유럽에서의 폐기 카펫 수거 및 재활용에 관련된 역방향 로지스틱스 네트워크 설계문제를 다루었으며 Spengler *et al.*(1998)은 독일 철강업에서 발생하는 산업용 부산물의 재활용에 관련된 역방향 로지스틱스 네트워크 설계 문제를 다루었다. 그리고 Kim *et al.*(2007b)은 국내에서 발생하는 폐가전제품을 대상으로 회수물류 네트워크를 어떻게 최적화 할 것인가를 다루고 있다. 이 논문에서는 폐가전제품을 회수할 때 드는 비용을 최소화할 수 있는 수리계획 모형 및 관련 해법을 제안하였다. 또한, 향후 증가할 폐가전제품의 처리 수요를 감당하기 위해 재활용 시설의 신규 최적위치를 제안하고 있다. 그 밖에 재활용 네트워크 설계문제에 대한 사례연구로는 Realf *et al.*(1999), Shih(2001), Listes and Dekker(2005), Pati *et al.*(2008) 등이 있다.

마지막으로, 폐기물 처리 네트워크에 대한 사례연구로 Caruso *et al.*(1993)은 이탈리아 롬바디 지역의 폐기물 처리 시스템을 위치결정 및 할당 문제로 모형화하고 발견적 기법을 제안하였다. 그 밖에 폐기물 처리 네트워크 설계문제에 대한 사례연구로는 Bautista and Pereira(2005)가 있다.

2) 이론연구

역방향 로지스틱스 네트워크 설계를 위한 시설위치 문제에 대한 이론연구는 사례연구에 비하여 적으며 최근에 연구가 활발히 진행되고 있다. Jayaraman *et al.*(2003)은 이전 Jayaraman *et al.*(1999)의 사례연구를 기반으로 제품회수, 재활용, 재사용, 폐기 등의 다양한 활동들을 포함하는 2단계 역방향 분배문제에 대하여 반환되는 제품의 양을 고려하여 수거시설과 처리시설의 최적 위치와 수를 결정하는 문제에 대하여 일반적인 혼합정수계획 모형을 제시하고 3단계 휴리스틱 알고리즘을 제안

하였다. 그리고 Min *et al.*(2006)은 초기 수거지점, 집중 수거지점 및 집중화 반환센터(centralized return center)로 구성되는 역방향 로지스틱스 네트워크에서 수거지점과 집중화 반환센터의 최적 위치와 수를 결정하는 일반적인 문제를 다루었으며 관련 혼합정수 비선형계획 모형과 유전알고리즘을 기초로 한 발견적 기법을 제안하였고 Salema *et al.*(2007)은 역방향 로지스틱스의 중요성이 증가하고 많은 연구들이 있음에도 불구하고 대부분 사례중심인 한계를 극복하기 위해 Fleischmann *et al.*(2001)의 연구를 기반으로 일반화된 혼합정수계획 모형을 제시하고 분지한계법(branch and bound algorithm)을 제안하였다. 그 밖에 최근의 관련 이론연구로는 Kim and Lee(2007), Kim *et al.*(2008) 등이 있다.

이상의 기존연구들을 살펴보면 각각의 특수한 네트워크들의 특성을 반영하여 특정한 네트워크에만 한정된 연구가 아닌 모든 형태의 네트워크 특성을 포괄할 수 있는 일반적인 모형의 개발이 필요할 것으로 보인다. 또한, 역방향 로지스틱스에서의 시설위치 문제는 기존의 순방향 로지스틱스에서의 문제와 문제구조 및 접근방법 측면에서 크게 다르지 않다. 하지만, 역방향 로지스틱스가 가지는 특성을 반영한 연구가 추후에 진행되어야 할 것으로 판단되며 이를 통하여 기본적인 이론이 정립되어야 한다. 여기서, 역방향 로지스틱스가 가지는 대표적인 특성으로 분산구조, 수거량 및 품질의 불확실성 등이 있으며 Bloemhof-Ruwaard *et al.*(1999)에서 설명한 바와 같이 특히 기존 순방향 네트워크와의 통합은 주요한 추후연구과제로 판단된다.

4.2.3 차량 및 작업자 수 결정(Determining the Numbers of Vehicles and Workers)

이 문제는 앞에서 설명한 네트워크 형태 결정 문제 및 시설위치/용량 문제의 해결을 통하여 결정된 네트워크 구조 하에서 이 네트워크의 운영을 필요한 차량 및 작업자의 수를 결정하는 문제로 정의된다. 이 문제는 역방향 로지스틱스의 다양한 기능들 중 특히 수거망에 설계와 관련된 문제로 차량 수 결정을 위한 간단한 수학적 모형은 Vesilind *et al.*(2002)에 소개되어 있다. 하지만 이 방법은 실제 문제에 적용하기에는 너무 단순하여 추가적인 연구가 필요한 문제이다. 이 문제에 대한 개략적인 접근방법으로는 대기이론과 같은 수학적 모형도 가능하나 현실적인 고려사항들을 포함하기 위해서는 수거망에 대한 시뮬레이션 실험 등이 필요할 것으로 판단된다.

4.2.4 차량경로 문제(Vehicle Routing Problems)

수거시스템에 있어 주요한 운용관련 문제로는 앞에서 설명한 바와 같이 대표적으로 차량경로 문제가 있다. 이 문제는 폐기물 수거를 담당하는 차량들의 폐기물 수거지점들을 어떤 순서로 방문할 것인가를 다루는 문제로 수거시스템의 성능과 매우 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 수거시스템에서의 차량 경로문제는 수거폐기물의 형태에 따라 크게 호 경로문제와 마

다 경로문제로 구분되며 각각에 대하여 간단히 살펴보면 다음과 같다.

1) 호 경로문제(Arc routing problem)

호 경로문제 문제는 일반적으로 최소의 거리로 주어진 네트워크의 모든 호를 방문하는 순서를 결정하는 문제로 폐기물 수거시스템의 수거차량 경로문제에 적용되어 왔다. 대표적인 사례로는 Beltrami and Bodin(1974)이 있으며 미국 뉴욕시의 쓰레기차 경로문제에 적용하였다. 그리고 기본적인 호 경로문제의 확장으로는 최소의 거리로 주어진 네트워크의 모든 호를 방문하는데 각 호는 한번이상 방문할 수 있는 형태의 문제인 우편배달부 문제(chinese postman problem)가 있다. 호 경로문제 문제에 대한 해법의 기본은 그래프 이론의 Euler tour 문제가 있으며 다양한 변형된 문제에 대한 이론 및 응용에 대하여 꾸준히 연구가 진행되고 있다.

2) 마디 경로문제(Node routing problem)

마디 경로문제의 기본적인 형태는 최소의 거리로 주어진 네트워크의 모든 마디를 반드시 한번만 방문하는 경로를 찾는 외판원 문제(traveling salesman problem)이다. 이 문제는 대표적인 네트워크 최적화 문제로 많은 기존연구가 있었으며 현재에도 그 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서 대상으로 하는 역방향 로지스틱스 네트워크에서의 기본적인 차량경로 문제는 CVRP(capacitated vehicle routing problem)로 주어진 지점을 중심으로 최소의 거리를 가지는 각 차량별 경로를 결정하는 문제로 각 방문지점별로 분배 혹은 수거에 관련된 수요가 있으며 기본적으로 차량의 용량제약이 존재한다. 이 문제는 Dantzig and Ramser(1959)가 소개한 이후로 많은 연구가 진행되어 관련 문헌 연구는 Laporte(1992) 및 Laporte *et al.*(2000)을 참조하기 바란다.

역방향 로지스틱스 네트워크의 경우 위에서 설명한 CVRP를 확장한 모형들이 있는데 대표적으로 VRPPD(vehicle routing problem with pickup and delivery), PVRP(period vehicle routing problem), SVRP(stochastic vehicle routing problem) 등이 있다.

VRPPD는 분배 및 수거를 동시에 고려하는 차량경로 문제로 예를 들어 Chung and Park(2004)을 참조하기 바람 PVRP의 경우는 CVRP를 다 기간으로 확장한 경우로 각 기간별로 방문할 지점을 추가적으로 결정해야 하는 문제로 Cho and Lee (2007)를 참조하기 바란다. 특히, PVRP는 역방향 로지스틱스 네트워크에서 현실의 수거 차량경로 문제에 매우 가까운 형태의 문제이며 여러 사례연구들이 발표되었다(Angelelli and Speranza, 2002, Baptista *et al.*, 2002, Kim *et al.*, 2007c). 또한, SVRP란 VRP에서 분배 혹은 수거량, 차량이동 시간 등의 불확실성을 고려한 문제로 수거시스템에 적용한 사례로 Kim *et al.*(2007d)을 참조하기 바란다.

4.3 재고관리(Inventory Management)

기존의 순방향 로지스틱스에서와 같이 역방향 로지스틱스에서도 다양한 형태의 재고관리 문제가 존재한다. 재고관리 문제란 일반적으로 구매(생산)비용, 준비비용, 재고유지 비용 등의 합을 최소화하도록 주문시점과 주문량을 결정하는 문제로 재사용, 재제조, 재활용 업체들이 현실적으로 가지고 있는 매우 중요한 문제이다. 즉, 역방향 로지스틱스의 경우 순방향 로지스틱스에 비해 높은 수준의 공급 및 수요 불확실성으로 인해 적절한 수준의 재고를 유지해야 하며 이 때 재고관리 체계 및 관련 주문시점과 주문량을 어떻게 결정해야 하는지가 주요한 의사결정 변수가 된다.

일반적으로 역방향 로지스틱스에서의 재고관리 문제의 핵심은 기존의 순방향 물류와는 다른 역방향 물류의 특성을 재고관리에 어떻게 적절히 반영할 것인가에 있다. 즉, 기존의 재고관리 이론을 재사용, 재제조 혹은 재활용이 있는 역방향 로지스틱스의 상황을 반영하여 수정 및 확장해야 하는데 Fleischmann *et al.*(1997)은 아래의 <Figure 8>과 같이 역방향 로지스틱스에서의 재고관리 문제에 대한 기본적인 구조를 제시하였다.

<Figure 8>에서 보면 생산자는 새로운 제품에 대한 수요를

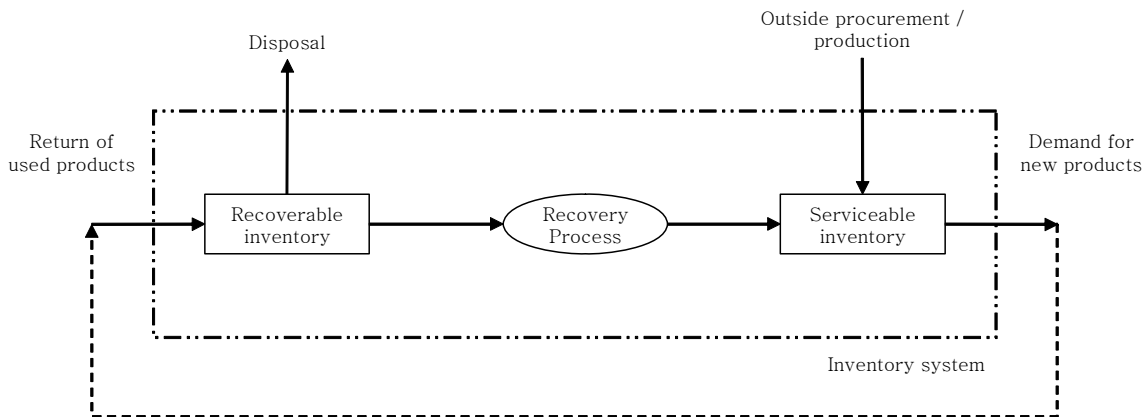


Figure 8. Inventory management in reverse logistics : basic structure

만족시켜주며 동시에 수명이 다한 제품을 역방향 로지스틱스를 통하여 수거한다. 여기서, 제품에 대한 수요는 두 가지 형태로 만족시켜줄 수 있는데 외부로부터 원자재 혹은 부품을 구매하여 제품을 생산하는 경우와 수명이 다한 제품을 재사용, 재제조 혹은 재활용하여 제품을 생산하는 경우가 있다. 위의 기본구조에서 보면 기본적인 재고의 형태로 분류공정 후 얻는 복구가능 제품 재고(recoverable inventory)와 생산과정 혹은 복구공정 후 얻는 완제품 재고(serviceable inventory)가 있으며 각 재고형태 별 재고관리 문제가 발생한다. 역방향 로지스틱스에서의 재고관리 문제에 대한 기존연구를 간단히 정리하면 다음과 같으며 전반적인 기존연구는 Fleischmann *et al.*(1997)을 참조하기 바란다.

- 경제적 주문량 모형(economic order quantity model)의 확장 : Schrady(1967), Nahmias and Rivera(1979), Mabini *et al.*(1992), Richter(1996a, b), Teunter(2001), Koh *et al.*(2002), Teunter(2004), Konstantaras and Papachristos(2007)
- 정기주문량 모형(fixed order interval model)의 확장 : Simpson(1978), Inderfurth(1997)
- 고정주문량 모형(fixed order quantity model)의 확장 : Muckstadt and Isaac(1981), van der Laan(1996a, b)
- 기타 : Cohen *et al.*(1980), Ashayeri *et al.*(1996), Kim *et al.*(2001), Kim(2007)

이상의 연구들은 기존 재고관리모형의 단순한 확장이며 역방향 로지스틱스의 복잡한 상황을 지나치게 단순화하여 그 적용에 어려움이 있다. 왜냐하면 일반적으로 역방향 로지스틱스는 물량, 품질 및 시점의 측면에서 생산자의 통제가 불가능한 외부변수로 기존연구들에서는 이러한 불확실성이 적절하게 고려되지 못했다는 측면이 있다. 따라서 역방향 로지스틱스에서의 재고관리 문제에 대한 추후 연구에서는 역방향 로지스틱스의 불확실성을 고려하여 좀 더 현실적인 모형의 개발이 필요하며 순방향 로지스틱스와 역방향 로지스틱스를 동시에 고려하고 통합하는 새로운 재고관리 이론의 개발 및 적용이 필요하다.

4.4 분해 관련 문제(Disassembly Problems)

이상의 역방향 로지스틱스 관련 기본적인 문제들 이외에 중요한 문제로 분해시스템에 관련된 문제들이 있다. 즉, 분해시스템의 경우 제품복구 혹은 폐기에 대한 가장 기본적인 공정이라는 특성으로 많은 연구들이 수행되어져 왔는데 대표적인 문제들로는 분해 공정계획(disassembly process planning) 문제, 분해 일정계획(disassembly scheduling) 등이 있다(Lee *et al.*, 2001). 각 문제에 대하여 간단히 설명하면 다음과 같다.

4.4.1 분해 공정계획(Disassembly process planning)

분해 공정계획이란 주어진 제품의 분해를 위해 필요한 공정

들을 정의하고 그 순서 및 관련활동들을 준비하는 것으로 크게 분해순서(disassembly sequence), 분해수준(disassembly level) 및 분해된 부품의 처리 옵션(end-of-life option)을 결정하는 것을 말한다(O'Shea *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2001; Santochi *et al.*, 2002; Lambert, 2003). 여기서, 분해수준이란 제품을 어느 정도 수준까지 분해할 것인가를 의미하며 분해된 부품의 처리 옵션으로는 재사용, 재활용, 재제조, 폐기 등이 있다.

일반적으로 분해 공정계획에는 다음과 같은 하부 문제들이 존재하며 자세한 내용은 Lee *et al.*(2001)을 참조하기 바란다.

- 제품 표현(product representation) : 분해 관련 문제의 해결에 가장 기본적인 제품구조를 표현하는 문제로 대표적으로 liaison graph가 있다. 여기서, liaison graph는 제품을 구성하는 부품을 마디(node)로 부품간의 접촉여부를 호(arc)로 표현하여 제품의 구조를 표현한다.
- 분해순서 생성(generation of disassembly sequences) : 제품의 분해순서를 생성하는 문제로 대표적으로 cut set method가 있는데 이는 앞의 liaison graph의 호들을 제거하며 분해순서를 생성하는 방법이다.
- 분해순서 표현(representation of disassembly sequences) : 분해순서를 표현하는 방법에 관한 문제로 대표적으로 AND/OR graph가 있다. 이 방법은 제품 혹은 부분조립품이 부품으로 분해되는 과정을 AND 관계와 OR 관계로 표현하는데 AND 관계는 제품 혹은 부분조립품이 부품으로 분해되는 하나의 경우를 OR 관계는 두 가지 이상의 경우를 표현하는 방식으로 자세한 내용은 Homem de Mello and Sanderson(1990)을 참조하기 바란다. 이 문제에 대해서는 AND/OR graph이외에 recovery AND/OR graph(Pnueli, and Zussman, 1997), process graph(Lambert, 1997), recovery graph(Erdos *et al.*, 2001), directed graph of assembly state(Kang *et al.*, 2002) 등이 있다.

분해순서 결정(Disassembly sequencing) : 앞에서 설명한 분해순서들 중 해당 목적함수 하에 최적의 분해순서를 결정하는 문제로 선형계획법, 동적계획법 등 다양한 최적화 기법을 이용할 수 있다. 이 문제에 대한 자세한 내용은 Lambert(2003)를 참조하기 바란다.

분해 공정계획 문제는 환경에의 부하를 최소화하도록 제품을 설계하는 문제를 다루는 환경 고려 설계(design for disassembly)와 밀접한 관련이 있다. 여기서, 환경 고려 설계는 동시공학 분야의 제조 고려 설계(design for manufacturing) 및 조립 고려 설계(design for assembly)를 제품의 사용 및 수명 말을 고려하여 확장한 분야로 볼 수 있다. 이에 대한 자세한 내용은 Gungor and Gupta(1999) 및 Zhang *et al.*(1997)을 참조하기 바라며 본 논문에서는 자세한 내용은 생략한다.

4.4.2 분해 일정계획(Disassembly scheduling)

분해 일정계획은 제품의 분해 후 얻는 부품이나 원자재의

수요를 만족하도록 수명이 다한 제품의 발주량 및 분해일정을 결정하는 문제로 조립시스템의 lot-sizing 문제와 유사하다. 하지만, lot-sizing 문제의 해결을 위해 개발된 많은 기존 알고리즘들이 분해 일정계획 문제에는 적용될 수 없는데 이는 분해 시스템이 가지고 있는 발산구조(divergent structure) 때문이다 (Lee *et al.*, 2001). 여기서, 발산구조란 제품을 분해하면 다수의 부품을 얻는 특성을 일컫는다. 분해 일정계획문제에 대한 자세한 내용 및 관련 기존연구는 Kim *et al.*(2007a)을 참조하기 바라며 본 논문에서는 자세한 내용은 생략한다.

4.5 재제조 관련 문제(Remanufacturing Problems)

재제조란 앞에서 설명한 바와 같이 수명이 다한 제품을 적절한 재생공정들을 통해 성능과 품질이 신제품과 동일하거나 더 우수한 제품을 만드는 것을 의미하며 부가가치를 창출하는 제품복구라는 의미에서 가장 상위 수준의 재사용 형태로 볼 수 있다(Lund, 1984, Steinhilper, 1998, Bras and McIntosh, 1999). 일반적으로 재제조가 주요한 연구분야로 최근 각광을 받기 시작한 이유로 경제적인 측면에서는 재製조를 통하여 얻는 이익이 비용을 초과하여 새로운 사업분야가 될 수 있다는 점과 환경적인 측면에서는 원자재 및 에너지 소비를 줄일 수 있다는 점을 들 수 있다.

재제조 시스템은 근본적으로 전통적인 제조시스템과 크게 다른 점은 없으나 아래의 측면에서 관련 의사결정 문제의 복잡도를 높인다(자세한 내용은 Guide(2000) 및 Guide *et al.*(2000)을 참조하기 바란다).

- 제품의 수거 시점과 양의 불확실성(uncertainty in timing and quantity of returns)
- 수거제품 분해의 필요성(need to disassemble the returned products)
- 복구 부품이나 원자재의 불확실성(material recovery uncertainty)
- 제품 수거시스템의 필요(requirement of a reverse logistic network)
- 제품경로 및 공정시간의 불확실성(stochastic routing and highly variable processing time)

산업공학 측면에서 재제조와 관련된 구체적인 의사결정 문제들로는 수요예측, 용량계획, 생산계획, 일정계획, 재고관리 등의 문제가 있으며 이 중 생산 및 일정계획 분야에 대하여 기존연구를 간략히 정리하면 다음과 같다(수요예측에 대해서는 Krupp(1992)를 재고관리 문제에 대해서는 제 4.3장을 참조하기 바란다).

재제조 시스템에서 생산계획 문제로 Clegg *et al.*(1995)은 이익(신제품 및 재제조 제품으로부터 얻는 수익에서 재고유지비용, 폐기 비용, 준해 비용, 조립 비용 등 관련 비용을 제외)을 최

대화 하는 총괄계획 문제에 대하여 선형계획 모형을 제안하였고 Guide and Spencer(1997)는 용량계획(rough-cut capacity planning) 문제를 다루었다. 그리고 Guide and Ghiselli(1995) 및 Guide (1996, 1997)는 미 해군의 항공기 엔진의 재제조 시스템에 대한 일정계획 문제를 다루었으며 제약이론(theory of constraints)의 drum-buffer-ropes를 적용하여 시스템 성능을 향상시켰다고 보고하였고 그 후 관련 논문을 꾸준히 발표하였으며 Kang *et al.*(2001)은 전화기 재제조 공정에 대한 시뮬레이션 연구결과를 발표하였다. 이상의 논문 외에 재제조 시스템에서의 생산 및 일정계획 문제에 대한 기존연구는 Guide *et al.*(1999)을 참조하기 바란다.

5. 결론

본 논문에서는 수명이 다한 제품 혹은 폐기품의 수거 및 처리에 관련된 일련의 활동들을 총칭하는 개념인 역방향 로지스틱스를 소개하였다. 먼저, 지구적인 환경문제에 대한 정치경제적인 배경인 지속가능발전이라는 철학적 개념을 역사적 배경, 정의 및 중요성 측면에서 설명하였다. 다음으로 지속가능발전이라는 철학적인 개념 하에 역방향 로지스틱스에 대한 개요 및 기본구조를 소개하고 관련 네트워크의 형태들을 분류하였다. 그리고 산업공학 관점에서 역방향 로지스틱스 시스템에 관련된 의사결정 문제들을 제품복구 전략, 네트워크 설계 및 운영, 재고관리 문제, 분해 관련 문제, 재제조 관련 문제로 분류하고 각각에 대하여 기존연구들을 간단히 정리하였다. 이러한 의사결정 문제들은 역방향 로지스틱스 시스템의 구축에 필요한 기본적인 의사결정 문제들로 정확한 문제정의 및 효율적인 해법의 개발이 필요하다. 특히, 기존의 순방향 로지스틱스와의 통합적인 관점에서 개별 문제들에 대한 새로운 접근방법에 대한 연구가 필요하며 특히 역방향 로지스틱스의 기본적인 특징인 불확실성에 어떻게 대응할 것인가가 매우 중요한 문제가 된다.

역방향 로지스틱스라는 개념이 처음 소개되고 부분적 사례 연구들이 발표된 지 십여 년 이상이 지났지만 국내의 경우 이제 그 개념이 조금씩 알려지고 있는 실정이다. 하지만 지속가능발전이라는 환경문제의 큰 틀은 정부 및 산업에서 환경문제를 더 이상 미룰 수 없는 현실문제이며 관련 국내외 환경규제들은 우리 기업의 발전에 큰 제약으로 다가올 것이 분명하다. 이에 본 논문에서 소개한 역방향 로지스틱스라는 개념을 정부 및 산업에서 체계화하고 학계에서는 관련 의사결정 문제들에 대한 효율적인 해법을 제안함으로써 좁게는 효과적인 역방향 로지스틱스 시스템의 구축을 위한 기초가 되고 넓게는 지속가능발전이라는 전 지구적 목표에 기여할 수 있기를 기대한다. 마지막으로 국내 산업공학계가 융합 분야로서의 환경문제에 주도적 역할을 담당할 수 있는 큰 틀로서의 역방향 로지스틱스 연구가 지속적으로 확산되기를 기대한다.

참고문헌

- Angeles, E. and Speranza, M. G. (2002), The periodic vehicle routing problem with intermediate facilities, *European Journal of Operational Research*, **137**, 233-247.
- Ashayeri, J., Heuts, R., and Jansen, A. (1996), Inventory management of repairable service parts for personal computers, *International Journal of Operations and Production Management*, **16**, 74-97.
- Association of Electronics Environment (2006), *Refused Electronic Products Discharge and Recycling Research on Actual State*.
- Baptista, S., Oliveira, R. C., and Zúquete, E. (2002), A period vehicle routing case study, *European Journal of Operational Research*, **139**, 220-229.
- Barros, A. I., Dekker, R., and Scholten, V. (1998), A two-level network for recycling sand : a case study, *European Journal of Operational Research*, **110**, 199-214.
- Bautista, J. and Pereira, J. (2005), Modeling the problem of locating collection areas for urban waste management. an application to the metropolitan area of Barcelona, *Omega*, **34**, 617-629.
- Beltrami, E. J. and Bodin, L. D. (1974), Networks and vehicle routing for municipal waste collection, *Networks*, **4**, 65-94.
- Beullens, P., van Oudheusden, and van Wassenhove L. N. (2004), Collection and vehicle routing issues in reverse logistics, in *Reverse Logistics: Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chain*, (eds Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, K., and van Wassenhove, L. N.) Berlin: Springer, 95-134.
- Bloemhof-Ruwaard, J. M., Fleischmann, M., and van Nunen, J. A. E. (1999), Reviewing distribution issues in reverse logistics, *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, **480**, 23-44.
- Boks, C., Nilsson, J., Masui, K., Suzuki, K., Rose, C., and Lee, B. H. (1998), An international comparison of product end-of-life scenarios and legislation for consumer electronics, *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 19-24.
- Bras, B. and McIntosh M. W. (1999), Product, process and organizational design for remanufacture, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, **15**, 167-178.
- Carter, C. R. and Ellram, L. M. (1998), Reverse logistics : a review of the literature and framework for future investigation, *Journal of Business Logistics*, **19**, 85-102.
- Caruso, C., Colorni, A., and Paruccini, M. (1993), The regional urban solid waste management system : a modeling approach, *European Journal of Operational Research*, **70**, 16-30.
- Cho, B.-M. and Lee, D.-H (2007), A two-stage heuristic for period vehicle routing : minimizing the fleet size, Technical Report, Department of Industrial Engineering, Hanyang University, Seoul, South Korea.
- Chung, E. Y. and Park, Y. B. (2004), A genetic algorithm for vehicle routing problems with mixed delivery and pick-up, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **30**, 346-354.
- Clegg, A. J., Williams, D. J. and Uzsoy, R. (1995), Production planning for companies with remanufacturing capability, in *Proceedings of the IEEE Symposium on Electronics and the Environment*, Orlando, Florida, USA, 186-191.
- Cohen, M. A., Nahmias, S. and Pierskalla, W. P., (1980), A Dynamic inventory system with recycling, *Naval Research Logistics Quarterly*, **27**, 289-296.
- Dantzig, G. B. and Ramser, J. H. (1959), The truck dispatching problem, *Management Science*, **6**, 80-91.
- de Brito, M. P. and Dekker, R. (2004), A Framework for reverse logistics, in *Reverse Logistics : Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chain*, (eds Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, K., and van Wassenhove, L. N.) Berlin : Springer, 3-27.
- Dowlatshahi, S. (2000), Developing a theory of reverse logistics, *Interfaces*, **30**, 143-155.
- Erdor, G., Kis, T., and Xirouchakis, P. (2001), Modeling and evaluating product end-of-life options, *International Journal of Production Research*, **39**, 1203-1220.
- Ferguson, N. and Browne, J. (2001), Issues in end-of-life product recovery and reverse logistics, *Production Planning and Control*, **12**, 534-547.
- Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J. M., van Wassenhove, L. N. (2001), The impact of product recovery on logistics network design, *Production and Operations Management*, **10**, 156-173.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., van der Laan, E.A., van Nunen, J. A. E. E., van Wassenhove, L. N. (1997), Quantitative models for reverse logistics : a review, *European Journal of Operational Research*, **103**, 1-17.
- Fleischmann, M., Krikke, H. R., Dekker, R., Flapper, S. D. P. (2000), A characterisation of logistics networks for product recovery, *Omega*, **28**, 653-666.
- Goggin, K. and Browne, J. (2000), Towards a taxonomy of resource recovery from end-of-life products, *Computers in Industry*, **42**, 177-199.
- Guide Jr., V. D. R., Jayaraman, V., and Srivastava, R. (1999), Production planning and control for remanufacturing, a state-of-the-art survey, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, **15**, 221-230.
- Guide, Jr., V. D. R. (1996), Scheduling using drum-buffer-rope in a remanufacturing environment, *International Journal of Production Research*, **34**, 1081-1091.
- Guide, Jr., V. D. R. (1997), Scheduling with priority dispatching rules and drum-buffer-rope in a recoverable manufacturing system, *International Journal of Production Economics*, **53**, 101-116.
- Guide, Jr., V. D. R. (2000), Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs, *Journal of Operations Management*, **18**, 467-483.
- Guide, Jr., V. D. R. and Ghiselli, G. A. (1995), Implementation of drum-buffer-rope at a military rework depot engine works, *Production and Inventory Management Journal*, **36**, 79-83.
- Guide, Jr., V. D. R. and Spencer, M. S., (1997), Rough-cut capacity planning for remanufacturing firms, *Production Planning and Control*, **8**, 237-244.
- Guide, Jr., V. D. R., Jayaraman, V., Srivastava, R., and Benton, W. C. (2000), Supply-chain management for recoverable manufacturing systems, *Interfaces*, **30**, 125-142.
- Gungor, A. and Gupta, S. M. (1999), Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery : a survey, *Computers and Industrial Engineering*, **36**, 811-853.
- Hirsch, B. E., Kuhnmann, T., and Schumacher, J. (1998), Logistics simulation of recycling networks, *Computers in Industry*, **36**, 31-38.
- Homem De Mello, L. S. and Sanderson, A. C. (1990), And/OR graph representation of assembly plans, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **6**, 188-199.
- Inderfurth, K. (1997), Simple optimal replenishment and disposal policies for a product recovery system with leadtimes, *OR spectrum*,

- 19, 111-122.
- Jayaraman, V., Guide, V. D. R., and Srivastava, R. (1999), A closed-loop logistics model for remanufacturing, *Journal of the Operational Research Society*, **50**, 497-508.
- Jayaraman, V., Patterson, R. A., and Rolland, E. (2003), The design of reverse distribution networks : Models and solution procedures, *European Journal of Operational Research*, **150**, 128-149.
- Kang, J.-G., Kraftsik, G., Lee, D.-H., and Xirouchakis, P. (2001), A simulation study on telephone remanufacturing processes, *International Journal of Environmentally Conscious Design and Manufacturing*, **10**, 9-22.
- Kang, J.-G., Lee, D.-H., Xirouchakis, P., and Lambert, A. J. D. (2002), Optimal disassembly sequencing with sequence dependent operation times based on the directed graph of assembly states, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **28**, 264-273.
- Kara, S., Rugrungruang, F., and Kaebnick, H. (2007), Simulation modelling of reverse logistics networks, *International Journal of Production Economics*, **106**, 61-69.
- Kausner, M. and Hendrikson, C. T. (2000), Reverse-logistics strategy for product take-back, *Interfaces*, **20**, 156-165.
- Kim, E. G. (2007), Optimal disposal policy in a hybrid production system with manufacturing and remanufacturing, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **33**, 312-321.
- Kim, H. S., Han, D. H., and Lee, I. C. (2001), A case study of the reverse logistics considering an environment, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, **24**, 69-77.
- Kim, H. S. and Yang, J. H. (2005), Analysis of Developing Models of Reverse Logistics Systems for Returns, *Logistics Study*, **13**, 39-56.
- Kim, H. S., Ryu, J. H., Hong, M. S., and Rim, S. C. (2007b), Optimizing reverse logistics network for end-of-life electrical appliances, *IE Interfaces*, **20**, 154-161.
- Kim, H.-J., Lee, D.-H., and Xirouchakis, P. (2007a), Disassembly scheduling : literature review and further research Directions, *International Journal of Production Research*, **45**, 4465-4484.
- Kim, I. T. (1996), What is Local Agenda21, *Local Administration*, **10**.
- Kim, J.-D., Choi, H.-S., and Lee, D.-H. (2007d), A case study on the stochastic vehicle routing in a refuse collection system, *Journal of the Korean Society of Supply Chain Management*, **7**, 57-65.
- Kim, J.-G., Cho, B.-M., and Lee, D.-H. (2007c), Period vehicle routing in a refuse collection system : a case study, Technical Report, Department of Industrial Engineering, Hanyang University, Seoul, South Korea.
- Kim, J.-S. and Lee, D.-H. (2007), Heuristic algorithms for the collection network design problem in reverse logistics, Technical Report, Department of Industrial Engineering, Hanyang University, Seoul, South Korea.
- Kim, J.-S., Choi, H.-S., and Lee, D.-H. (2008), Search heuristics for the capacitated collection network design problem for reverse logistics, Technical Report, Department of Industrial Engineering, Hanyang University, Seoul, South Korea.
- Kim, T. Y., Kim, J. S., and Hur, S. (2001), An algorithm for optimal inventory level in multi-echelon repairable-item inventory system with general service time distribution, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **27**, 226-232.
- Ko, H. J. and Evans, G. W. (2007), A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs, *Computers and Operations Research*, **34**, 346-366.
- Ko, H. J., Ko, C. S., and Chung, K. H. (2004), A genetic algorithm approach for logistics network integrating forward and reverse logistics, *IE Interfaces*, **17**, 141-151.
- Koh, S. G., Hwang, H., Sohn, K. I. and Ko, C. S. (2002), An optimal ordering and recovery policy for reusable items, *Computers and Industrial Engineering*, **43**, 59-73.
- Konstantaras, I. and Papachristos, S. (2007), A note on : Developing an exact solution for an inventory system with product recovery, *International Journal of Production Economics*, doi : 10.1016/j.ijpe.2007.03.021.
- Korea National Cleaner production Center (2003), *International Environmental Conventions and Legislations*, <http://www.kncpc.re.kr>
- Korean Agency for Technology and Standards (2007), *Development of Global Competitiveness to Environment Management*, <http://www.kats.go.kr>.
- Krikke, H. R., Kooi, E. J., and Schuur, P. C. (1999), Network design in reverse logistics : a quantitative model, *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, **480**, 45-62.
- Kroon, L. and Vrijens, G. (1995), Returnable containers : an example of reverse logistics, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, **25**, 56-68.
- Krupp, J. (1992), Core obsolescence forecasting in remanufacturing, *Production and Inventory Management Journal*, **33**, 12-17.
- Lambert, A. J. D. (1997), Optimal disassembly of complex products, *International Journal of Production Research*, **35**, 2509-2523.
- Lambert, A. J. D. (2003), Disassembly sequencing : a survey, *International Journal of Production Research*, **41**, 3721-3759.
- Laporte, G. (1992), The vehicle routing problem : an overview of exact and approximation algorithms, *European Journal of Operational Research*, **59**, 345-358.
- Laporte, G., Gendreau, M., Potvin, J.-Y., and Semet, F. (2000), Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem, *International Transactions in Operations Research*, **7**, 285-300.
- Lebreton, B. and Tuma, A. (2006), A quantitative approach to assessing the profitability of car and truck tire remanufacturing, *International Journal of Production Economics*, **104**, 639-652.
- Lee, D. H. and Dong, M. (2007), A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery, *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, Available online.
- Lee, D.-H., Kang, J.-G., and Xirouchakis, P. (2001), Disassembly planning and scheduling: review and further research, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B : Journal of Engineering Manufacture*, **215**, 695-710.
- Lee, J. and Kang, H. S. (2004), *Environmental Management*, Hyung Seol.
- Lee, J.-S., (2004) Reverse logistics network design for reuse, remanufacturing and recycling, *Korea Logistics Review*, **14**, 77-104.
- Lee, S. B. (2001), *Production and Operations Management*, Kyung Moon.
- Lim, J. S., Jeong, S. J., and Kim, K. S. (2001), The effect of reverse logistics with simulation method-An example from the automotive industry-, *Journal of the Korea Society for Simulation*, **15**, 13-21.
- Listes, O. (2005), A genetic stochastic model for supply-and-return network design, *Computers and Operations Research*, **34**, 417-442.
- Listes, O. and Dekker, R. (2005), A stochastic approach to a case study for product recovery network design, *European Journal of Operational Research*, **160**, 268-187.
- Louwers, D., Kip, B. J., Peters, E., Souren, F., and Flapper, S. D. P.

- (1999), A facility location allocation model for reusing carpet materials, *Computers and Industrial Engineering*, **36**, 855-869.
- Lu, Z., and Bostel, N. (2007), A facility location model for logistics systems including reverse flows : the case of remanufacturing activities, *Computers and Operations Research*, **34**, 299-323.
- Lund, R. T. (1984), Remanufacturing, *Technology Review*, **87**, 18-28.
- Mabini, M. C., Pintelon, L. M., and Gelders, L. F. (1992), EOQ type formulations for controlling repairable inventories, *International Journal of Production Economics*, **28**, 21-33.
- Mansini, R. and Speranza, M. G. (1998), A linear programming model for separate refuse collection service, *Computers and Operations Research*, **25**, 659-673.
- Mebratu, D. (1998), Sustainability and sustainable development: historical and conceptual review, *Environmental Impact Assessment Review*, **18**, 493-520.
- Min, H., Ko, H. J., and Ko, C. S. (2006), A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns, *Omega*, **34**, 56-69.
- Min, J. W., Kim, Y. J., Ha, H. K., and Park, Y. H. (2007), *Global Benchmarking Study for Streamlining Reverse Logistics*, Jungseok Research Institute of International Logistics and Trade.
- Muckstadt, J. A. and Isaac, M. H. (1981), An analysis of single item inventory systems with returns, *Naval Research Logistics Quarterly*, **28**, 237-254.
- Nahmias, N. and Rivera, H. (1979), A deterministic model for a repairable item inventory system with finite repair rate. *International Journal of Production Research*, **17**, 215-221.
- O'Shea, B., Grewal, S. S., and Kaebernick, H. (1998), State of the art literature survey on disassembly planning, *Concurrent Engineering : Research and Applications*, **6**, 345-357.
- Park, J. C., Choi, S. Y., Lim, J. H., Yoon, K. J., Cha, Y. J. and Hong, Y. H (2004), *Korean Environmental Sustainability : Evaluation and Assignment*, DaeYoung.
- Pati, R. K., Vrat, P., and Kumar, P. (2008), A goal programming model for paper recycling system, *Omega*, **36**, 405-417.
- Pnueli, Y. and Zussman, E. (1997), Evaluating the end-of-life value of a product and improving it by redesign, *International Journal of Production Research*, **35**, 921-942.
- Pohlen, T. L. and Farris, M. T. (1992), Reverse logistics in plastics recycling, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, **22**, 35-47.
- Realf, M. J., Ammons, J. C., and Newton, D. (1999), Carpet recycling: determining the reverse logistics system design, *The Journal of Polymer-Plastics Technology and Engineering*, **38**, 547-567.
- Richter, K. (1996a), The EOQ repair and waste disposal model with variable setup numbers, *European Journal of Operational Research*, **95**, 313-324.
- Richter, K. (1996b), The extended EOQ repair and waste disposal model, *International Journal of Production Economics*, **45**, 443-448.
- Rogers, D. S. and Tibben-Lembke, R. (2001), An examination of reverse logistics practices, *Journal of Business Logistics*, **22**, 129-148.
- Rubin, E. S. and Davidson, C. I. (2001), *Introduction to Engineering and the Environment*, McGraw-Hill.
- Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., and Novais, A. Q. (2007), An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty, *European journal of operational research*, **179**, 1063-1077.
- Santochi, M., Dini, G., and Failli, F. (2002), Computer aided disassembly planning : state of the art and perspectives, *Annals of the CIRP*, **51**, 1-23.
- Schrady, D. A. (1967), A deterministic inventory model for repairable items, *Naval Research Logistics Quarterly*, **14**, 391-398.
- Shih, L. H. (2001), Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computer in Taiwan, *Resources Conservation and Recycling*, **32**, 55-72.
- Simpson, V. P. (1978), Optimum solution structure for a repairable inventory problem, *Operations Research*, **26**, 270-281.
- Spengler, Th., Püchert, H., and Rentz, P. O. (1998), Environmental integrated production and recycling management, *European Journal of Operational Research*, **97**, 308-326.
- Srivastava, S. K. (2007), Green supply chain management : a state-of-the-art literature review, *International Journal of Management Review*, **9**, 53-80.
- Steinhilper, R., *Remanufacturing : The Ultimate Form of Recycling*, Fraunhofer IRB Verlag (1998).
- Stock, J. R. (1998), *Development of Implementation of Reverse Logistics Programs*, Council of Logistics management, Oak Brook, Illinois.
- Teunter, R. H. (2001), Economic order quantities for recoverable item inventory systems. *Naval Research Logistics*, **48**, 484-495.
- Teunter, R. H. (2004), Lot-sizing for inventory systems with product recovery. *Computers and Industrial Engineering*, **46**, 431-441.
- van der Laan, E. A., Dekker, R. and Salomon, M. (1996a), Product manufacturing and disposal : a numerical comparison of alternative control strategies, *International Journal of Production Economics*, **45**, 489-498.
- van der Laan, E. A., Dekker, R., Salomon, M. and Ridder, A. (1996b), An (s, Q) inventory model with remanufacturing and disposal, *International Journal of Production Economics*, **46**, 339-350.
- Vesilind, A. P., Worell, W., and Reinhart, D., *Solid Waste Engineering*, Brook/Cole (2002).
- Wu, H.-J. and Dunn, S. C. (1994), Environmentally responsible logistics systems, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, **25**, 20-38.
- Zhang, H. C., Kuo, T. C., Lu, H., and Huang, S. H. (1997), Environmentally conscious design and manufacturing : a state-of-the-art survey, *Journal of Manufacturing Systems*, **16**, 352-371.
- Zussman, E. (1995), Planning of disassembly systems, *Assembly Automation*, **15**, 20-23.