

자동차부품의 재활용률 증대를 위한 역공급사슬(Reverse Supply Chain)에 관한 연구

유미연*, 박진우**, 김해중**, 심억수**

*LG CNS

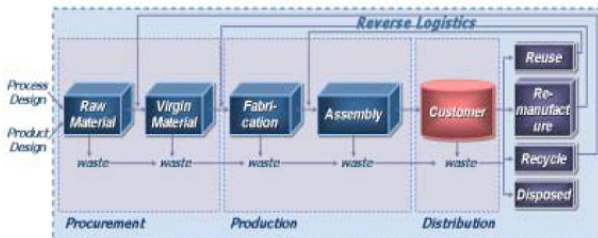
**서울대학교소속 산업공학과

Abstract

환경에 대한 관심이 증가하면서 소비자에게 판매한 제품이 사용 후 생산자에게 되돌아오는 과정에서 발생하는 waste를 줄이기 위한 역공급사슬(Reverse Supply Chain)의 개념이 발생하게 되었다. 특히 폐자동차의 경우는 다른 제품에 비하여 중량이 상대적으로 커서 폐기되는 양이 많고 환경에 유해한 재질이 많이 포함된 대형 내구성 폐기물이다. 그런데 이러한 폐자동차는 폐차장이라는 한정된 곳에서 발생하는 것이 특징이므로, 수거 및 회수 체계가 잘 관리된다면 보다 큰 재활용 효과를 얻을 수 있다. 이 논문에서는 현재의 수거 시스템 상에서 폐자동차 부품의 재활용이 가지는 경제성을 살펴보고, 자동차 부품의 재활용 또는 재 이용률을 높이기 위한 폐자동차의 역공급사슬을 새로이 제안하였다. 개선된 역공급사슬에서는, 자동차 판매업체(제조업체)가 주도적으로 부품 재활용에 참여하게 된다.

I. 연구배경 및 목적

기업이 자재를 구매하여 생산계획을 수립하고, 제품을 생산하여 소비자에게 전달하는 공급 사슬(Supply Chain)상의 issue들을 최적화하고 관리하기 위한 것이 공급 사슬 관리(SCM: Supply Chain Management)이다. 최근 환경적인 관심의 증대로, Reverse Supply Chain (이하 역공급사슬) 또는 Green SCM이 새로운 화제로 떠오르게 되었다. 역공급사슬은 이러한 Return Flow에서 발생하는 여러 가지 waste들을 최소화하기 위한 것으로, 일반적인 모습은 아래와 같다.



[그림 1] 환경 영향을 고려한 역공급사슬

SCM이 공급 사슬에서 발생하는 여러 waste들을 최소화함으로써 기업의 제반 비용을 감소시키는 노력이라면, 역공급사슬 관리는 return flow에서 발생하는 waste를 최소화하고 잠재적인 활용도를 최대화하기 위한 것이라 볼 수 있다. 소비자로부터 되돌아온 폐기물이나 중고 부품은 재생 절차를 거쳐 재이용(reuse), 재생산(remanufacture), 재활용(recycle) 또는 폐기(disposal)

된다. 이때 폐기량을 결정하는 적절한 기준과 폐기 방법 및 여러 재생방법을 선택하는 것은 기업의 몫이며 각각의 경우 경제성에 대한 연구는 사회각계에서 꾸준히 연구되어왔다. 대부분의 경우 중고 부품에 대해서는 폐기보다 재생(recovery)이 나은 편인데 이는 매립 등 물리적 폐기는 매립비용 등 추가적인 비용이 들지만, 재이용이나 재활용의 경우 부차적인 수익이 발생할 수 있기 때문이다. 따라서 사용된 제품의 잠재적인 가치를 최대화하고 폐기 비용을 최소화하는 수준의 적절한 재이용율과 방법을 연구할 필요가 있다.

이 논문에서는 폐자동차 부품을 자동차 제조공급사슬 상에서 발생하는 유해 폐기물의 관점에서 보고, 부품의 재 이용률을 높이기 위한 역공급사슬을 제안해보았다. 또한 선진국과의 비교를 통해 재 이용률을 높이기 위해 필요한 제도적 함의를 덧붙였다. 이를 통해 제조업체 등 폐자동차의 역공급사슬에 관여하는 주체들의 역할을 살펴보고자 하였다.

II. 이론적 고찰

2.1. 환경 규제와 자동차 산업

경제 수준 향상으로 산업 폐기량 증가, 다양화 및 생산성 향상과 재활용이 어려운 폐기물 증가로 인해 국토의 잠식뿐만 아니라 토양 및 수질 오염을 야기하므로 대안의 필요성이 증대되고 있으며 세계적 환경 규제 강화를 염두에 두어야 한다. EU의 폐차 처리지침으로, 명기된 재활용률을 지키지 못하는 차량의 경우 더 이상 유럽 지역에 수출을 할 수 없게 되어 폐차 회수 및 재활용의 문제가 무역 장벽으로 등장하게 되었다. 연간 150만대 이상을 수출하고 있는 자동차 생산국으로서 우리나라는, 최대 수출시장인 유럽 지역의 재활용 규제 강화에 능동적으로 대처함으로써 지속적인 수출 확대에 이바지해야 한다. 이처럼 환경적 측면의 규제가 강화되는 현재, 폐자동차의 재활용 문제에 힘써 환경친화적인 자동차 산업으로 변모해갈 수 있도록 해야 한다.

2.2. 재활용 정책에 대한 논의

자동차는 약 20,000여 점의 부품으로 구성되어 있으며, 철과 비철금속, 플라스틱, 고무, 유리, 오일류 등의 다양한 소재로 되어 있다. 현재 폐플라스틱의 가장 큰 발생원이 자동차 부품과 전자 부품 및 포장 폐기물이고, 우리나라 고철발생량의 약 8~10%가 폐자동차에서 발생하고 있다는 사실을 살펴보면, 특히 자동차에 사용되는 다양한 플라스틱 부품 재활용의 중요성이 점차

강조되고 있다.

높은 자동차 보급률과 함께 시민들의 높은 환경 의식 반영으로 강력한 환경정책에 따라 유럽을 비롯한 일본, 미국 등의 선진 자동차 업체들은 자동차 재활용을 위한 기반조성과 기술개발에 지속적으로 투자해오고 있다. EU에서는 폐차 재활용률을 2006년까지 중량 대비 85%로, 2015년까지는 95%로 향상 시켜야 하는 폐차재활용법안을 통과시킨 상태이다. 또한 환경 규제가 더욱 강화되고 또한 무역 규제 수단으로 일반화되면서 ‘오염자 부담 원칙’ 및 ‘생산자 책임 확대 제도’에 따라 제조업자에 대한 오염처리의 무사함이 강조되면서 제조업자가 폐차를 무상으로 회수하도록 규정하고 있다. 따라서 우리나라도 정책적으로 자동차 폐기물의 재활용을 독려하고 오염물질 발생을 최소화시켜 환경친화적인 생산 방식으로 전환하고 산업의 대외적인 국가 경쟁력을 확보하는 것이 시급하다.

우리나라도 현행 예치금 대상 품목과 일부 부담금 품목 및 포장재를 대상으로 생산자 책임 재활용제도(EPR:Extended Producer Responsibility)가 2003년 1월부터 시행되고 있는데, 이것은 제품이 생산-유통-소비-폐기되는 과정에서 환경에 미칠 수 있는 영향을 최소화하기 위해 생산자의 책임을 강조하는 개념으로 역공급사슬 관리의 목적과도 부합하는 것이다.

2.3. 선행 연구의 검토

유럽 지역에서 폐자동차 처리 지침에 대한 규정이 생기고 이를 환경 규제로 확대하려는 움직임 속에 수출 대응 방안을 마련하기 위해, 국내에서도 지난 90년대 중반부터 자동차 재활용에 관한 논의가 이루어지기 시작하였다.

기존의 연구들을 살펴보면 우리나라 폐자동차 처리의 현황과 문제점 파악에 중점을 두고, 각 부품별 또는 소재별 재활용 기술 개발에 집중하여왔다. 주요한 연구 몇 가지를 살펴보면, 먼저 산업자원부 기술 표준원에서는 ‘재 자원화 기술 개발 활성화를 위한 연구기획 사업’ [산자부 1999]에서 국내의 환경친화적인 폐차처리 시스템의 구축을 위한 관련기술 개발, 즉 작동유의 회수 및 부품의 해체 공정 및 장치확보가 필요하다고 지적하였다. 또한 회수 부품의 재이용 및 재료의 재활용 활성화 방안으로 국민 의식의 전환, 재활용 제품의 품질 인증, 유통구조 구축, 세제보완 및 보험 혜택 등을 제시하였다. 한국자동차 공학회의 연구[자동차공학회1998]에서는 중고부품의 원활한 재활용이 이루어지기 위해서 정부의 재활용 기술 개발 지원이 필요하다고 지적하였고, 현대 환경 연구원[환경연구원1998]에서는 현 폐차 재활용 관련 기술 수준이 미흡하여 낮은 경제성으로 인해 사회적 비용을 유발할 수 있다는 연구 결과를 내놓았다.

기존 연구들의 경우, 재활용률을 높이기 위한 기술 개발과 정책 입안에 중점을 두고 있을 뿐 구체적으로 관련되어 있는 주체들의 역할 정립과 방향 제시는 미흡한 편이다. 따라서 이제껏 연구되었던 기술 개발과 정책을 바탕으로 국내의 폐자동차 역공급사슬에 대하여 체계적으로 분석하고, 각 주체 별로 역할을 정립해 나가는 노력이 필요하다.

III. 폐자동차의 역공급사슬 관리

3.1. 국내의 자동차 재활용 현황 및 분석

1) 제도적 현황 및 문제점

국내에서 폐자동차 재활용과 관련되어 있는 정부 부처는 건설교통부, 산업자원부, 환경부의 3개 부처이다. 그 중 폐자동차의 재활용 관련 정책이 환경부와 산업자원부로 나누어져 있고, 건설교통부의 자동차 관리법에 의해 전반적인 폐차 업무가 이루어지고 있어서 자동차 폐기물 관련 정책이 효율적으로 추진되지 못하고 있다. 또한 환경부에서는 가전제품과는 달리 자동차에 대하여는 품목별 재활용 대책 수립에 별다른 수단을 강구하고 있지 못한 것이 현실이다.

2) 자동차 재활용율의 추정

폐자동차에서 재활용되고 있는 재료는 회수가 용이하고 시장에서 높은 가격에 거래되는 철이나 비철 금속 등과 제조업자가 회수를 의무적으로 하고 있는 윤활유와 타이어에 한정되고 있다. 이와 같은 현상 분석을 토대로 무게가 1톤 안팎인 소형 자동차의 재활용률을 추정해보면 다음 표와 같다.

[표 1] 폐자동차의 재활용률 추정

구분	철	비철	플라스틱	고무	유리	오일류	기타	계
무게 (kg)	610	93	74	45	29	40	78	969
구성비 (%)	63.0	9.6	7.6	4.6	3.0	4.1	8.0	100
재활용 되는 양 (kg)	610	88.35	0	19	0	-	16.28	75.3
재활용 비율 (%)	100	95	0	42.22	0	-	12.7	730.05

3) 부품 재활용의 경제성 분석

이 절에서는 먼저 폐자동차 발생 대수 예측치를 가지고, 현재의 수거 시스템 하에서 플라스틱의 재활용률을 높이는 것이 얼마나 경제성을 가질 수 있는지 살펴보고자 하겠다. 먼저 2000년 교통개발 연구원에서 국내 자동차 보유대수를 추정하여 평균 폐차율을 이용하여 폐자동차 발생대수를 구하고, 앞 절에서 보았던 폐기율(1-재활용률)을 이용하여 폐기물 발생량을 추정하면 다음과 같다.

[표 2] 폐자동차와 폐기물량 발생 추정(단위: 톤)

구분	폐자동차 대수	폐차 총중량	플라스틱	고무	유리	오일류	기타	ASR
2005년	883,251대	855,870	65,361	39,746	25,614	35,330	68,894	213,968
2010년	1,048,915대	1,016,399	77,620	47,201	30,419	41,957	81,815	254,100

위에서 본 폐기물 발생 추정량에 의하면, 2005년에는 폐플라스틱이 65,361톤, 2010년에는 77,620톤이 발생하게 될 것이다. 그렇다면 현재와 같은 폐자동차 역 공급 사슬에서 폐플라스틱을 재활용할 경우의 경제성을 먼저 분석해보겠다. 폐플라스틱 가운데에서도 범퍼는 자동차에서 분해하기가 비교적 쉬운 편이므로, 현재 재활용의 가능성이 가장 큰 범퍼를 재활용할 때의 경제성 효과와 범퍼와 같은 재질을 가진 플라스틱의 재활용 효과를 산정해보면 다음과 같다. [조운택 2001] 플라스틱 재활용의 경제성을 평가하기 위해서 직접(내부)비용과 재활용에 따르는 환경오염 비용, 그리고 재활용을 함으로써 얻게 되는 자원절약 또는 자원 회수의 편익 등을 모두 고려하여 비용/편익 분석을 행하였다.

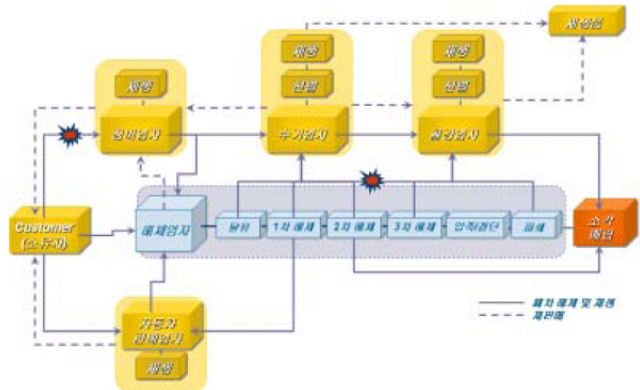
[표 3] 폐차용 재활용의 비용과 편익

구분	본당 비용	항목	금액
고정 비용	15,215 원 -A	비용	내부비용 549,881
재활용 비용	221,333 원	편익	내부편익 600,000
재료구입비	313,333 원 -B		외부편익 46,206
내부 편익	549,881 원	사회적 편익	96,325

3.3. 폐차동차의 역공급사슬 제안

1) 현재 폐차동차 역공급사슬의 문제

자동차 소유자인 고객이 정비업자나 자동차 판매업자 또는 직접 해체업자에게 폐차동차의 해체를 의뢰하면 해체업자는 여러 단계의 해체 공정을 거쳐 부품을 재이용 또는 재활용하거나 나머지 부분을 폐기하게 된다. 이 때 정비업자나 자동차 판매업자(또는 생산업자)들은 자체의 재생능력을 갖추고 있는 경우가 많으므로 해체업자에게 폐차동차가 넘겨지기 전에 많은 수의 부품이 음성적으로 유통되는 일이 발생한다. 또한 해체작업 중 탈유를 비롯하여 여러 해체 과정 중에 각각 수거업자와 철강업자들에 의해 수거되는 부품은 정확히 집계되기가 어려우므로, 후에 재생품을 판매하는데 있어서 품질 인증문제는 물론이고 적절한 가격을 산정하는 데에도 어려움이 있다. 해체업자의 경우 수거 비용에 비해 재생품의 경제성이 낮으므로 재활용에서 눈을 돌릴 수밖에 없다. 또한 소비자들은 중고 부품이 필요하다라도 신뢰도가 낮은 부품의 품질 문제와 신제품에 비해 그다지 싸지 않은 가격으로 인해 중고 부품 거래를 자주 이용하고 있지 않다.



[그림 2] 현재의 폐차동차 역공급사슬

위의 그림에서 보면, 체계적이지 못한 수거 시스템으로 인해 불필요한 수거 활동이 반복적으로 일어나기도 하고 소유자가 폐차동차를 폐차처리하고 재생품이 다시 판매되는 과정에서 어떠한 정보의 흐름도 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

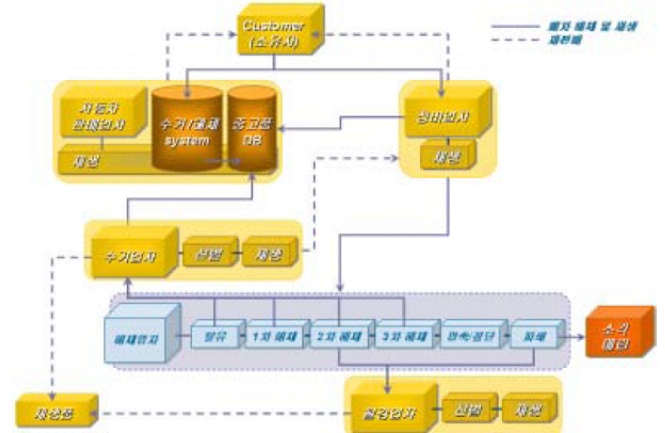
따라서 중고 부품의 거래를 활성화시키고 효율적인 수거 체계를 확립하여 폐차동차 부품의 재활용률을 높이기 위해서는 제조업자 중심의 역공급사슬이 고려되어야 한다. 역공급사슬 상의 어떤 주체보다 자동차 부품에 대하여 많은 정보를 가지고 중심에서 이끌어 나갈 수 있는 것이 제조업체이기 때문이다.

2) 주체와 역할

먼저 자동차 소유자가 자동차를 처분하고 싶은 경우, 현재와 같이 정비업체 또는 판매업체나 해체업자에게 맡기는 식으로 여러 경로를 통하는 경우 총체적인 관리가 어렵게 된다. 따라서, 소유자가 직접 해체업자에게 폐차동차 처리를 맡기는 경우보다는 판매업체나 정비업체의 비중을 더욱

높이는 것이 나을 것이다.

재생 공정을 갖추고 있는 자동차 판매업체는 자동 해체 시스템과 함께 중고 물품 데이터베이스, 그리고 수거 망 데이터베이스를 갖추고 있어야 한다. 폐차를 원하는 소유자가 있는 경우, 판매업체에서는 정비업자에게 소유자의 정보를 넘겨주고 정비업자에서 회수한 중고 부품의 정보들을 직접 관리하도록 하여야 한다. 자동차 판매업체를 통해 직접 수거되거나 정비업체의 재생과정을 통해 회수된 재이용 품 또는 재활용 소재들은 물론이고, 다음 폐차장의 해체과정에서 수거되는 물품 또한 데이터베이스에 저장되도록 하는 것이 바람직하다. 해체 과정에서 수거업자와 철강업자에게서 얻어지는 재활용 소재는 각각의 재생과정을 거쳐 재생품으로 판매할 수 있게 되고, 이것은 판매업체의 데이터베이스에 저장되어 소비자의 요구가 있을 때 보일 수 있도록 한다. 자동차 소유자들은 판매업체의 데이터베이스를 조회하거나 해당 정비업체에 방문하여 필요한 중고 부품들을 쉽게 구입할 수 있도록 한다.



[그림 3] 개선된 폐차동차 역공급사슬
3) 개선 시나리오

Customer (소유자)	자동차 판매업자	정비업자	해체업자	Others	Info.
폐차 문의	수거망 DB 검색				Customer 정보
폐차 대행 신청	폐차장소 지정	견인 준비			지정 폐차 장소
	재이용품 정리	폐차장 견인	폐차장 입고		등록 말소 서류
	재이용/재활용	폐차장 견인	해체 작업		재이용품 정보
	재이용/재활용			수거	재활용 정보
				재생 등	재생 가격 등

[그림 4] 역공급사슬 상의 주체별 역할

소유자가 자동차 판매업자에게 폐차문의를 하게 되면 자동차 판매업자는 데이터베이스를 검색하여 각 소유자의 위치와 근접하여 있는 폐차장소를 지정하고 정비업자에게 견인 준비를 위한 오더를 발송한다. 이 때 소유자의 정보가 자동차 판매업자에게 전달되고, 판매업자가 지정한 폐차장소에 대한 정보가 소유자에게 공지된다. 폐차장소에 대한 정보를 받은 자동차 소유자는 해당 정비업자에게 폐차 대행 신청을 하고, 정비업자는 소유자의 자동차를 견인하여 폐차 대행 서비스를 시작하면서 업소에서 필요로 하는 재이용품을 분리 해낸다. 분리해 낸 재이용 품은 자동차 판매업자의 데이터베이스에 저장하여 이후에 중고 부품

의 재고 추적이 가능하도록 한다. 정비업자에 의해 폐차장에 입고된 폐자동차는 해체업자에 의해 해체 작업을 거치게 된다. 이 때 여러 수거업자들과 철강업자들의 수거 활동이 이루어지게 되는데, 이렇게 수거된 재활용 품목 역시 자동차 판매업자의 데이터베이스에 저장되도록 한다.

이렇게 재활용되는 부품 또는 자재들의 정보가 입력됨으로써, 먼저 폐기물 통계에 기여할 수 있다. 현재 국내에서는 자동차 품목의 경우 따로 폐기물 통계를 산정하고 있지 않기 때문에, 재활용 또는 재이용 부품의 정보를 수집할 수 있게 되어 폐차 처리 대수만이 아니라 실제 폐기량은 물론 자동차를 구성하고 있는 각각의 품목에 대하여 재활용률을 정확히 집계하는 데에도 도움이 될 것이다. 또한 중고 부품 거래의 활성화에 있어서 가장 시급한 문제인 품질 인증 제도의 실시를 위해 무엇보다 필요한 일이라고 할 수 있다. 중고 부품 인증 제도가 실시되려면 공급업체의 역할이 다른 어떤 주체의 역할보다 중요하다. 폐기물 관련 법제를 지휘하고 있는 환경부나 산업자원부에서 독자적으로 이들 중고 부품에 대하여 인증하는 것은 매우 어렵기 때문에, 부품에 대해서 가장 많은 정보를 가지고 있는 자동차 제조업체나 부품 제조업체가 인증제에서 주도적인 역할을 하도록 해야 할 것이다. 물론 현실적으로 제조업체 역시 독자적으로 인증제도를 실시하기에는 많은 어려움이 있으므로, 정비업체나 폐차업체와 함께 그룹을 형성하여 중고부품을 재생하고 사후 보장하는 제도도 생각해 볼 수 있다.

정확한 자동차 폐기물 및 재활용률 통계와 중고 부품 품질 인증제도 지원 외에도 자동차 제조업체가 재활용 또는 재이용되는 부품의 정보를 가지고 있음으로써 중고 부품의 표준적인 가격 결정에 도움을 줄 수도 있다. 과거 주먹구구식의 가격 결정 방법과 수거 체계에서 벗어나 불필요한 수거 절차를 감소시키고 물품 재고의 정확한 현황 파악으로 투명성을 확보할 수 있는 방법이라 여겨진다.

IV. 결론 및 추후연구 과제

본 연구에서는 현재 국내의 폐자동차 처리 규제와 더불어 국내 자동차 처리 현황을 폐자동차의 역공급사슬이라는 관점에서 보고, 폐자동차가 해체되고 재활용 또는 재이용의 형태로 수거된 부품들이 재생과정을 거쳐 판매될 때 최대의 효율성을 가질 수 있도록 역공급사슬을 새로이 제안해보았다. 자동차 판매업자(생산업자)가 중심이 된 역공급사슬로 인해 정확한 폐자동차 재활용 자료들을 얻을 수 있고, 품질 인증 제도와 가격 산정 시스템의 기본으로 삼을 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 정부는 우선 폐자동차 또는 소재별로 정량적인 의무 재활용률을 정하는 방안을 고려하여 점차 선진국의 규제수준에 맞추어 나가도록 해야 한다. 또한 제조사 중심의 역공급사슬이 효율적으로 기능을 발휘하도록 하려면, 관련 산업 간의 지속적인 협조가 필요하다. 부품업체는 재활용이 쉬운 부품 개발 및 품질 보증 등의 방법으로 회수된 부품의 재사용률을 높이도록 해야 한다.

본 연구에서 제조업자 중심의 체계적인 역공급 사슬을 제시하였으나, 환경적인 편익까지 고려한 구체적인 개선 효과는 분석하는 데 어려움

이 있었다. 따라서 환경적인 측면, 특히 재활용으로 인한 2 차 오염 등의 비용까지 모두 포괄적으로 분석하여 자동차 제조업체뿐만 아니라, 소재 부품 업체까지도 참여하는 역공급사슬의 고려가 필요하다. 또한 이러한 역공급 사슬의 설계 시에 정부 등 기관의 정책적인 참여와 그에 의한 영향 평가도 앞으로 연구되어야 할 부분이다.

참고문헌

- [Warren2002] Warren Mellor, Elizabeth Wright, Roland Clift, Adisa Azapagic, Gary Stevens, "A mathematical model and decision-support framework for material recovery, recycling and cascade use", Chemical Engineering Science 57 (2002) 4697-4713
- [Hui2001] Hui Zhao, "Simulation and analysis of dealers' return distribution strategy", 2001 winter simulation conference
- [Roland2000] Roland Clift, Lucy Wright, "Relationships between environmental impacts and added value along the SC", Technological Forecasting and Social Change 65 (2000), 281-195
- [Goran1998] Goran Finnveden, Tomas Ekval, "Life cycle assessment as a decision support tool - the case of recycling vs. incineration of paper", Resources, Conservation and Recycling 24 (1998) 235-256
- [윤영채 1997] 윤영채, "재활용률의 결정 요인에 관한 연구: 미국 3 개 주의 경험 사례를 중심으로", 환경정책 제 5 권 제 1 호, 1997
- [조운택 2001] 조운택, 폐자동차 플라스틱과 유리 재활용의 경제성 분석." 석사논문, 서울대, 2001
- [산자부 1999] 산업자원부 기술표준원, "재자원화 기술개발 활성화를 위한 연구기획사업", 1999
- [자동차공학회 1998], 한국 자동차 공학회, "폐자동차 공동 회수.처리 체계 구축 및 부품 재활용 확대 방안 연구" 1998
- [환경연구원 1998] 현대 환경 연구원, "폐 자동차 재활용 전략", 1998
- [이순홍 1997] 이순홍, 윤주호, "자동차 리사이클의 활성화 방안", 산업자원부 기술 표준원 논문자료실, 1997
- [이성철 1997] 이성철, 옥성현, "자동차 부품 재활용 동향과 사례", 산업자원부 기술 표준원 논문자료실, 1997
- [박준우 1997] 박준우, 재활용 품목별 기술성.경제성 평가에 관한 연구", 한국자원재생공사, 1997, p.203
- [조원석 1994] 조원석, "자동차 Maker 의 폐차 리사이클 추진 방향", 자원 리사이클링 제 3 권 제 4 호, 1994
- [한국경제연구원 1996] 한국 경제 연구원, "폐차 중고 부품의 재활용 확대 방안", 1996
- [Hicks2003] C.Hicks, O.Heidrich, T.McGovern, T.Donnely, "A functional model of supply chains and waste", International Journal of Production Economics, accepted 2003
- [Joseph2003] Joseph Sharkis, "A strategic decision framework for green supply chain management", Journal of Cleaner Production 11 (2003) 397-409