

국내 철판가공 공정에 대한 전과정 평가

이상용, 이창근, 이건모

(아주대학교 환경·도시공학부)

Life Cycle Assessment for Steel Sheet Processing

Sang-Yong Lee · Chang-Gun Lee · Kun-Mo Lee

(School of Environmental & Urban Engineering, Ajou University)

ABSTRACT

Environmental performance of steel sheet processing processes was investigated by implementing a Life Cycle Assessment(LCA). The inventory analysis was performed with data obtained from four major companies within the country. The selected processes were welding, cutting and pressing process. In welding process, there were gas metal arc welding(GMAW), flux cored arc welding(FCAW), submerged arc welding(SAW) and spot welding. In cutting process, there were oxygen-acetylene cutting and oxygen-plasma cutting. In pressing process, there was 3500 ton press. Especially for cutting and pressing process, we made some equations with regard to each input such as electric power and mineral oil to activate the utilization of the life cycle inventory database. As for welding process, environmental impacts vary according to the kind of parents metal. however, the most significant impact was the abiotic resource depletion. In the case of cutting and pressing process, eco-toxicity and abiotic resource depletion were identified as the most contributing impact respectively.

Key words : life cycle assessment, steel sheet processing, welding, cutting, press, life cycle inventory database

요 약 문

철판가공 공정군에서 범용성이 높은 용접공정, 절단공정 및 프레스공정 등의 철판가공 공정에 대한 전과정평가를 수행하였다. 각 대상 공정군별 국내 공정가동량이 가장 큰 4개 업체 선정하여 전과정 목록 데이터베이스를 구축하였다. 용접공정의 세부 용접공정에는 gas metal arc welding(GMAW), flux cored arc welding(FCAW), submerged arc welding(SAW) 및 spot welding 등에 대한 전과정목록 데이터베이스가 구축되었다. 절단공정에는 플라즈마 절단 및 산소-아세틸렌 절단, 프레스에서는 3500 가압력 톤 수 프레스의 전과정목록 데이터베이스가 구축되었다. 추가적으로 절단 및 프레스 공정에서는 데이터베이스의 활용도를 높이기 위해 각 기능단위별 투입물에 대한 상관관계를 토대로 환경부하계산식을 작성하였다. 전과정평가 수행결과 용접공정군의 경우 각 용접기법과 용접 소재의 종류별로 영향 범주에 따라 환경영향이 차이가 있었지만 모든 용접공정에서 무생물 자원고갈 범주가 50%이상으로 전체 환경영향에 가장 기여도가 큰 것으로 나타났다. 절단공정군의 경우에는 공통적으로 생태독성 범주가 전체 환경영향에 55%이상으로 가장 기여도가 큰 것으로 나타났다. 프레스공정은 무생물자원고갈 범주가 전체 환경영향에 80%이상으로 가장 기여도가 큰 것으로 나타났다.

주제어 : 전과정평가, 철판가공 공정군, 용접, 절단, 프레스, 전과정목록 데이터베이스

I. 서 론

철판가공 공정은 철판을 가공하여 그 재료에 높은 가치를 부여하는 활동이라 할 수 있다. 이와 같은

철판가공 공정에는 다양한 종류가 있지만 이 연구에서는 국내 산업 현장에서 범용적으로 사용되는 용접, 절단 및 프레스공정을 연구대상으로 선정하여 수행하였다. 현재까지 상기 철판가공 공정에 대한 국내

LCA 연구는 전무한 상태이다. 이 연구는 철판가공 공정에 대한 전과정에 걸친 환경성 정보를 규명하고, 국내 LCA 수행시 철판가공 공정의 전과정목록 데이터베이스를 제공하기 위해 수행되었다.

1. 연구대상 기업 선정

연구대상 기업은 대상공정으로 선정된 범용성 있는 공정을 사용하며 일정수준의 평균공정 가동률을 유지하고 있어야 한다. 또한 객관적으로 평균수준의 공정설비를 갖추어야 한다. 이러한 조건을 만족하는 업체로서 A사, B사, C사 및 D사를 연구대상기업으로 선정하였다.

2. 세부 연구대상 공정 선정

용접공정의 세부 연구대상은 국내 대표적 5개 용접재료 생산업체의 용접재료별 생산량에 관한 통계 자료와 학계 및 연구소 용접 전문가의 자문을 토대로 하였다. 이에 범용적 용접공정인 gas metal arc welding(GMAW), flux cored arc welding(FCAW) 및 submerged arc welding(SAW)을 세부 연구대상 공정으로 선정하였다. 추가적으로 국내 자동화 공정에서 널리 사용되는 spot welding을 연구에 포함하였다. 또한 용접공정은 대상 모재의 종류에 따라 용접재료 및 전력사용량 등이 상이하기 때문에 모재 재질별(탄소강 및 스테인레스강)로 각각 LCA를 수행하였다.

절단공정의 세부 연구대상으로 국내 산업체의 현장 전문가와 학계로부터 자문을 구한 결과 산소-아세틸렌 절단 및 플라즈마(plasma)절단이 가장 범용적인 것으로 조사되었다. 이들 절단공정에 대해 범용적으로 사용되는 철판두께(12mm)에 대해 연구를 수행하였다. 그러나 이와 같이 특정 철판두께를 기준으로 계산된 절단공정 LCI 결과는 다른 철판두께에 적용하는데 무리가 따른다. 따라서 12mm 철판 이외에 국내 산업현장에서 주로 쓰이는 9, 16, 19 및 25mm 철판두께에 대한 추가 데이터를 조사하였다. 조사된 데이터를 토대로 각각의 환경부하 계산식을 산정하였다. 결과적으로 국내 범용적 철판두께인 9~25mm 범위내에서 환경부하 계산식을 통해 환경부

하 산정이 가능하도록 하였다.

프레스의 세부 연구대상은 국내 산업체의 현장 전문가와 학계의 자문을 토대로 프레스 설비를 가압력 기준으로 분류하였다. 즉, 철판을 성형할 때 누르는 가압력을 기준으로 3500 가압력 톤 수에 대해 연구를 수행하였다. 그러나 이와 같이 특정 가압력에 대해 작성된 프레스공정 LCI 데이터베이스는 다른 가압력 톤 수에 적용할 수 없다는 단점을 갖는다. 따라서 3500 가압력 톤 수 이외에 국내 산업현장에서 주로 쓰이는 400, 500, 700, 2500 및 3000 가압력 톤 수에 대한 추가 데이터를 조사하였다. 조사된 데이터를 토대로 각각의 환경부하 계산식을 산정하였다. 결과적으로 국내 범용적 가압력 톤 수인 400~3500톤 범위내에서 환경부하 계산식을 통해 환경부하 산정이 가능하도록 하였다.

II. 용접공정 전과정 목록분석

1. 목표 및 범위정의

1) 목표

연구수행 이유는 용접공정의 전과정에서의 환경부하를 계산하고, 이에 대한 환경측면을 규명하는데 있다. 연구 결과는 국내 LCA 수행시 용접의 전과정 목록분석 데이터베이스로 정부, 기업 및 학계의 LCA 실무자 등에 의해 활용가능하다.

2) 범위 정의

Table 1에 연구 대상 세부 용접공정의 기능, 기능단위 및 참고흐름을 도시하였다. 여기서 용착량이란 용접후 모재에 남아있는 용접재료의 양을 가리킨다. 결국 용착된 용접재료에 의해 분리된 모재의 접합이 가능하게 된다.

시스템 경계는 선정한 공정의 전과정 중 원료의 취득부터 용접공정까지(Cradle to Gate; CtG)로 이에 관련된 투입물 및 배출물을 연구대상으로 하였다. 또한 ISO 14041에 제시된 누적무게, 누적에너지 및 환경관련성 등의 cut-off 기준을 적용하여 연구대상 단위공정을 선정하였다. 연구대상의 특성상 비교적 환경영향이 적을 것으로 판단되는 내부 수송 및 단

Table 1. Function, Functional Unit and Reference Flow for each Welding Process

공정	기능	기능단위	참고흐름
GMAW FCAW SAW	분리된 모재 철판을 접합시키는 것	용착량 1kg	용착량 1kg
spot welding	분리된 모재 철판을 접합시키는 것	spot 1개	spot 1개

거리 수송은 연구 대상에서 제외하였다.

데이터 범주는 크게 자원, 에너지, 수계배출물, 대기배출물, 폐기물 및 방사성폐기물 등으로 분류하였다. 에너지 투입/배출물은 MJ 단위로 정량화 하였다. 전력생산에 관련된 환경부하는 국내 전력데이터 베이스(1999)를 사용하였다.

시간적 경계는 용접 수행공정의 데이터는 1년간(2000년1월1일~2000년12월31일)의 데이터를 수집하였고 지역적 경계는 원/부자재의 경우 각 해당 생산지역으로 하였다. 기술적 경계는 동일 업계에서 범용적으로 사용되며 현행 기술을 대표할 수 있는 평균 공정 기술을 대상으로 하였다. 또한 LCA 결과에 대해서 외부 LCA 전문가에 의한 정밀검토 수행 후 내용을 반영하였다.

2. 전과정 목록분석

1) 데이터 수집

설문서 작성 및 데이터 검증을 위한 수 차례의 현장방문과 전화통화로 진행되었다. 초기 투입물 포함

Table 2. Inputs to be included in this Study for applying the Cut-off Criteria

공정	투입물
GMAW(CS/SUS)	CO ₂ , Ar, 용접재료, 용접팁, 전력
FCAW(CS/SUS)	CO ₂ , 용접재료, Backing, 전력
SAW(CS/SUS)	용접재료, Flux, Backing, 전력
spot welding	용접팁, 압축공기, 전력

※Note: CS: 탄소강 / SUS: 스테인레스강

기준인 누적무게, 누적 에너지 및 환경관련성의 세 가지 기준에 의해서 연구대상의 범위를 결정하였다. Table 2 에 나타낸 바와 같이 cut-off 기준에 의해 각 용접공정에 대한 연구대상 투입물을 결정되었다.

2) 데이터 조사 및 계산

Table 3에서는 전과정 목록분석단계에서 데이터 수집내용과 방법을 기술하였다.

Table 3. Data Collection for Life Cycle Inventory Analysis

Activity	Data collection	
	저항용접(GMAW, FCAW, SAW)	spot welding
용접 공정	전력	평균적 용접조건(용접재료, 용접재료의 두께, 용접자세 등)을 선정하여 전력량 계산 측정치
	수계 배출물	없음 없음
	대기 배출물	용접 fume 성분비 및 fume 발생량 가정치로 계산 용접시 비산되어 소멸되는 용접팁의 양을 대기배출물로 가정(구매 용접팁 양 - 폐 용접팁 양)
	폐기물	슬래그, 스파터, 잔여 와이어 및 Backing 등의 폐기물 발생량 계산 폐용접팁
용접 재료	국내 주요업체의 생산 공정에서 전력사용량, 수계배출물 및 대기배출물 등 조사 (1차 공급사의 데이터 조사)	국내 주요업체의 생산공정에서 전력사용량, 수계배출물 및 대기배출물 등 조사(1차 공급사의 데이터 조사)
CO ₂		
Backing		
용접팁		

III. 절단 공정 전과정 목록분석

1. 목표 및 범위 정의

1) 목 표

연구수행 이유는 절단공정의 전과정에서의 환경부하를 계산하고, 이에 대한 환경성 정보를 규명하는데 있다. 연구 결과는 국내 LCA 수행시 절단공정의 전과정 목록분석 데이터베이스로 정부, 기업 및 학계의 LCA 실무자 등에 의해 활용 가능하다.

2) 범위 정의

Table 4에 선정된 절단공정의 기능, 기능단위 및 참고호름을 나타내었다. 기타 다른 시스템경계에 대한 내용은 용접공정과 동일하다.

Table 4. Function, Functional Unit and Reference Flow for each Cutting Process

공정	기능	기능단위	참고호름
산소-아세틸렌 절단	철판을 절단하는 것	1m 절단 (12mm두께 철판)	1m 절단 (12mm두께 철판)
산소-플라즈마 절단			

2. 전과정 목록분석

1) 데이터 수집

초기 투입물 포함기준인 누적무게, 누적 에너지 및 환경관련성의 세 가지 기준에 의해서 연구대상 항목의 범위가 결정되었다. 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Inputs to be included in this Study for applying the Cut-off Criteria

공정	투입물
산소-아세틸렌 절단	산소, 아세틸렌, 압축공기, 전력
산소-플라즈마 절단	산소, 질소, Bagfilter, 전력

2) 데이터 조사 및 계산

Table 6에서는 전과정 목록분석단계에서 데이터

수집내용과 방법을 나타내었다.

Table 6. Data Collection for Life Cycle Inventory Analysis

Activity	Data collection		
	산소-아세틸렌 절단	산소-플라즈마 절단	
절단 공정	전력 사용	절단기의 정격전압, 절단속도(m/min) 및 전류량을 이용한 계산치	절단기의 정격전압, 절단속도(m/min) 및 전류량을 이용한 계산치
	수계 배출물	없음	없음
	대기 배출물	없음	fume발생: 가정 계산치
	폐기물	슬래그 발생: 할당된 계산치	bagfilter 및 ash 발생: 실측치
압축공기	계산치	.	
아세틸렌	국내 주요업체의 생산공정에서 전력사용량, 수계배출물 및 대기배출물 등 조사 (1차 공급사의 데이터 조사)	.	
산소	국내 주요업체의 생산공정에서 전력사용량, 수계배출물 및 대기배출물 등 조사 (1차 공급사의 데이터 조사)	국내 주요업체의 생산공정에서 전력사용량, 수계배출물 및 대기배출물 등 조사 (1차 공급사의 데이터 조사)	
질소	.	.	
Bagfilter	.	.	

3. 환경부하 계산식

앞서 기술한바와 같이 12mm 철판 절단 외에 9, 16, 19 및 25mm 철판두께의 절단에 대한 투입물을 조사하였다. 이를 토대로 각 기능단위에 대한 투입물별 추세를 도출하였다. 따라서 해당되는 철판 두께에서 기능단위별 각 투입물량을 계산하는 식을 구할 수 있다. Table 7 및 8에 나타난 환경부하 계산식의 X값에 철판두께를 대입하면 해당 철판두께에 따른 환경부하가 계산된다.

Table 7에 산소-아세틸렌 절단의 환경부하 계산식을 나타내었다.

Table 7. Environmental Equation for Oxygen-Acetylene Cutting Process

투입물	상관식
산소	$y = 3.3749 x - 7.4479$
아세틸렌	$y = 0.0121 x - 0.0268$
압축공기	$y = 0.1859 x - 0.4102$
전력	$y = 0.0946 x - 0.2088$

Table 8 에 산소-플라즈마 절단의 상관식을 나타내었다.

Table 8. Environmental Equation for Oxygen-Plasma Cutting Process

투입물	상관식
산소	$y = 0.0110 x - 0.0346$
질소	$y = 0.0039 x - 0.0121$
Bag filter	$y = 2E-05 x - 7E-05$
전력	$y = 0.1723 x - 0.5396$

IV. 프레스 공정 전과정 목록분석

1. 목표 및 범위 정의

1) 목표

연구수행 이유는 프레스공정의 전과정에서의 환경부하를 계산하고, 이에 대한 환경성 정보를 규명하는데 있다. 연구 결과는 국내 LCA 수행시 프레스공정의 전과정 목록분석 데이터베이스로 정부, 기업 및 학계의 LCA 실무자 등에 의해 활용 가능하다.

2) 범위 정의

Table 9에 선정된 프레스공정의 기능, 기능단위

Table 9. Function, Functional Unit and Reference Flow for Press Process

공정	기능	기능단위	참고흐름
3500 톤 프레스	철관에 압력을 가하여 금형에 맞는 형상으로 변형하는 것	1회 프레스 (가압력 3500톤)	1회 프레스 (가압력 3500톤)

및 참고흐름을 나타내었다. 기타 다른 범위에 대한 내용은 용접과 동일하다.

2. 전과정 목록분석

1) 데이터 수집

프레스공정도 설문서 발송 및 데이터 검증을 위한 수 차례의 현장방문과 전화통화로 진행되었다. 초기 투입물 포함기준인 누적무게, 누적 에너지 및 환경관련성의 세 가지 기준에 의해서 연구대상항목의 범위를 결정하였다. 그 결과 작동유, 구리스, 압축공기 및 전력이 연구 대상 투입물로 결정되었다.

2) 데이터 조사 및 계산

표 10에서는 전과정 목록분석단계에서 데이터 수집내용과 방법을 정리해 놓았다.

Table 10. Data Collection for Life Cycle Inventory Analysis

Activity		3500 ton 프레스
프레스 공정	전력 사용	측정치
	수계 배출물	없음
	대기 배출물	없음
	폐기물	측정치
압축공기		가정 계산치
작동유, 구리스		주요생산업체의 전력사용량, 수계배출물 및 대기배출물 등의 데이터 조사 원료의 경우 국외 LCI 데이터베이스 사용

3. 환경부하 계산식

앞서 기술한 바와 같이 3500 톤 프레스 외에 400, 500, 700, 2500 및 3000 가압력 톤 수에 대한 투입물을 조사하였다. 투입물의 종류는 3500 가압력 톤 수의 경우와 같이 작동유, 구리스, 압축공기 및 전력

이다. 이를 토대로 각 기능단위에 대한 투입물별 추세를 도출하였다. 따라서 해당되는 철판 두께에서 기능단위별 각 투입물량을 계산하는 식을 구할 수 있다. Table 11에 나타난 환경부하 계산식의 X값에 가압력 톤수를 대입하면 해당 가압력에 따른 환경부하가 계산된다.

Table 11. Environmental Equation for Press Process

투입물	상관식
작동유	$y = 7E-07 x - 4E-05$
구리스	$y = 8E-09 x - 5E-07$
압축공기	$y = 1E-04 x + 0.0100$
전력	$y = 0.0003 x + 0.0288$

V. 환경영향평가지수

철관가공 공정군에 대한 국내 평균 전과정 목록분석 결과를 도출하였다. 이를 토대로 특성화된 환경영향(Characterized Impact: CI), 정규화된 환경영향(Normalized Impact: NI), 가중치 부여된 환경영향(Weighted Impact: WI) 및 환경영향평가지수를 구하였다. 환경영향평가지수를 도출하기 위해 사용된 영향범주는 무생물자원고갈, 지구온난화, 오존층고갈, 광화학산화물생성, 산성화, 부영양화, 생태독성 및 인간독성이다. 이 연구에서 수행된 용접공정 중 GMAW(탄소강용)의 영향범주별 가중치 부여된 환경영향을 Fig. 1에 도시하였다.

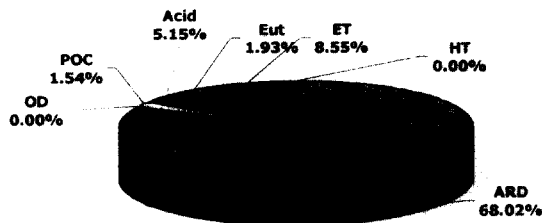


Fig. 1. Weighted impact of GMAW

Fig. 1에 나타난 바와 같이 가중치가 부여된 환경영향을 기준으로 하여 GMAW(탄소강용)가 환경에 미치는 영향은 무생물자원고갈(68.02%), 지구온난화

(14.81%), 생태독성(8.55%), 산성화(5.15%), 부영양화(1.93%), 광화학산화물생성(1.54%), 인간독성(0.00%) 및 오존층고갈 순으로 나타났다. 용접공정의 경우 각 용접기법과 용접 모재의 종류별로 영향범주에 따라 환경영향의 차이가 있었지만 모든 용접공정에서 무생물 자원고갈 범주가 전체 환경영향에 가장 기여도가 큰 것으로 나타났다.

수행된 절단공정 중 산소-아세틸렌 절단(12mm)에 의해 야기된 가중치가 부여된 환경영향을 Fig. 2에 도시하였다. 가중치가 부여된 환경영향을 기준으로 하여 산소-아세틸렌 절단(12mm)이 환경에 미치는 영향은 생태독성(55.84%), 무생물자원고갈(26.19%), 지구온난화(9.55%), 산성화(6.54%), 부영양화(1.02%), 광화학산화물생성(0.86%), 인간독성(0.00%) 및 오존층고갈 순으로 나타났다.

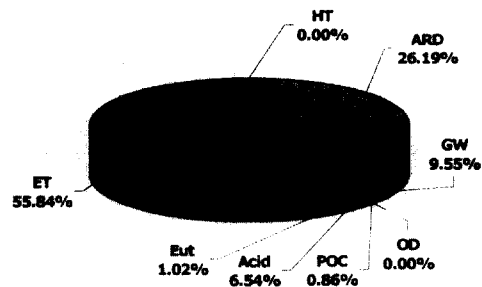


Fig. 2. Weighted impact of oxygen-acetylene cutting process

절단공정별 약간의 차이가 있으나 생태독성 영향범주가 전체 환경영향에 가장 기여도가 큰 것으로 나타났다.

3500ton 프레스에 의해 야기된 영향범주별 가중

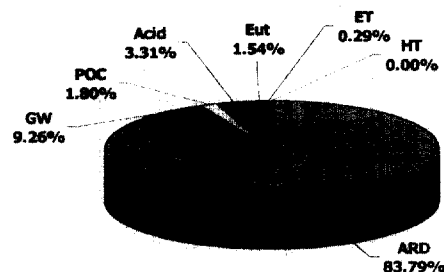


Fig. 3. Weighted impact of press process (3500ton)

치 부여된 환경영향을 Fig. 3에 나타내었다. 가중치가 부여된 환경영향을 기준으로 하여 3500ton 프레스가 환경에 미치는 영향은 무생물자원고갈(83.79%), 지구온난화(9.21%), 산성화(3.31%), 광화학산화물생성(1.80%), 부영양화(1.54%), 생태독성(0.29%), 인간독성(0.00%) 및 오존층고갈 순으로 나타났다.

VI. 요약 및 결론

철판가공 공정군에서 범용성이 높은 용접공정, 절단공정 및 프레스공정 등의 철판가공 공정을 선택하였다. 용접공정의 세부 용접공정에는 gas metal arc welding(GMAW), flux cored arc welding(FCAW), submerged arc welding(SAW) 및 spot welding 등에 대한 LCI 데이터베이스가 구축되었다. 절단공정에는 플라즈마 절단 및 산소-아세틸렌 절단, 프레스에서는 3500 가압력 톤 수 프레스의 LCI 데이터베이스가 구축되었다. 추가적으로 절단 및 프레스 공정에서는 데이터베이스의 활용도를 높이기 위해 각 투입물에 대한 상관식을 도출하여 환경부하를 계산할 수 있도록 하였다.

용접공정군의 경우 각 용접기법과 용접 모재의 종류별로 영향 범주에 따라 환경영향이 차이가 있었지만 모든 용접공정에서 무생물 자원고갈 범주가 전체 환경영향에 가장 기여도가 큰 것으로 나타났다. 절단 공정군의 경우에는 공통적으로 생태독성 범주가 전체 환경영향에 가장 기여도가 큰 것으로 나타났다. 프레스공정은 무생물자원고갈 범주가 전체 환경영향에 가장 기여도가 큰 것으로 나타났다.

사 사

이 연구를 수행하는데 있어서 재정적 지원은 산업자원부의 청정생산기술사업에 의해 제공되었다.

참고 문헌

1) 김정환 외, Arc 용접에서 fume 발생특성 및 용접봉 및 용접봉 송급성 평가기술, 한국생산기술연구소(1999).

2) 김희진, 국가청정생산기술센터 용접공정 실험실, personnel communication(2001).
 3) 산업기술연구소, 용접대학, 현대중공업(1995).
 4) 산업자원부, 환경 친화적 산업기반 구축을 위한 환경경영 표준화사업(1차년도 및 2차년도 중간보고서)(1999).
 5) 신근하, 아주대학교 기계공학과, personnel communication(2001).
 6) 용접재료 가이드, (주)현대중합금속(1999).
 7) 웹드넷, <http://www.weldnet.co.kr>, 용접지식정보센터(2001).
 8) 이종봉, "국내 용접재료의 생산추이", 포항제철 기술연구소(2000).
 9) CIT Ekologik, LCA inventory tool 3.0, Schalmers Industriteknik, Sweden(1998).
 10) Guinee, Jeroen B. et al., Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards, CML, <http://www.leidenuniv.nl/interfac/cml/lca2/index.html>(2001).
 11) ISO/TR 14049, Environmental management - Life cycle assessment - Examples of application of ISO 1041 to goal and scope definition and inventory analysis(2000).
 12) Habersatter, Kurt et al., Life cycle inventories for packagings, vol.2, SAEFL(BUWAL)(1998).
 13) Wenzel, Henrik et al., Environmental Assessment of Products, Vol.1, Chapman & Hall(1997).
 14) ISO 14041, Environmental management-Life cycle assessment -Goal and scope definition and inventory analysis(1998).
 15) Lee, Kun-Mo, "A weighting Method for the Korean Eco-Indicator", The International Journal of LCA, 4(3), pp.161-166(1999).
 16) Lindfors, E. G., et al Nordic guideline on life cycle assessment, Nordic Council of Ministers, Copenhagen(1995).
 17) PRé Consultants B.V. Simapro 4.0 software(1998).