

수력발전의 전과정 환경영향 분석

임노현, *최동희
에코시안, *한국수력원자력

Analysis of Life Cycle Environmental Impact for hydroelectric power generation

Noh-hyun Lim, *Dong-hee Choi
Ecosian Co., *Korea Hydro & Nuclear Power Co.

ABSTRACT

This study aims at evaluating the environmental impacts in the hydroelectric power generation. The environmental impacts was assessed from impact categories such as abiotic resource depletion(ARD), global warming(GW), acidification(AD), eutrophication(EU), ozone depletion(OD), and photochemical ozone creation(POC). The most impact categories for hydroelectric power generation is global warming potntials(67%). The most life Cycle stage for hydroelectric power generation is step before manufacturing stage(94%). The significant environmental aspects in step before manufacturing stage were related with Dam(75.4%), power plant(6.3%) and used electric power(6.3%).

1. 서론

18세기 이후 급격한 산업화에 따른 대량생산과 대량소비로 인한 무분별한 자원소비와 환경파괴가 국제적인 차원에서 통합된 대응이 요구될 정도로 심각해져 가고 있다. 따라서 21세기에는 경제와 환경이 상호 보완적으로 장기적인 성장을 위해 단기적인 자연자원을 파괴하지 않는 범위에서 경제적인 성장을 창출하자는 지속가능한 발전(sustainable development)이 가장 중요한 이슈로 부각되고 있으며, 특히 지속가능경영과 관련된 환경부분의 패러다임이 급속히 변화하고 있다. 기존의 사업장 중심에서 제품 중심으로, 사후 오염관리에서 사전 예방으로, 사내 관리에서 전과정 관리로의 변화가 그것이다.

과거에는 제품의 가치 및 기업의 가치는 품질

에 의해서 좌우되었으나 이제는 해당 제품과 기업의 환경성이 중요한 요소로 부각되고 있다. 따라서 기업의 친환경성 확보가 기업의 이미지 제고뿐만 아니라 경쟁력 강화에도 큰 영향을 미치고 있다.

전력시스템에 있어서 수력발전에 의한 전력생산은 국내 부존자원인 수자원을 이용하여 전력을 생산하므로 무공해 청정에너지라고 알려져 있다. 하지만 타 발전에 비해 수력발전에 의한 전력이 어느 정도 청정한 에너지인지에 대한 정량적인 결과는 제시하지 못하고 있다.

따라서 본 연구는 한국수력원자력의 화천수력발전소를 대상으로 수력발전을 통해 생산된 전력의 친환경성을 정량적으로 평가하여, 주요 환경측면을 규명하고 이를 토대로 추가적인 환경영향의 개선기회를 강구하고자 한다.

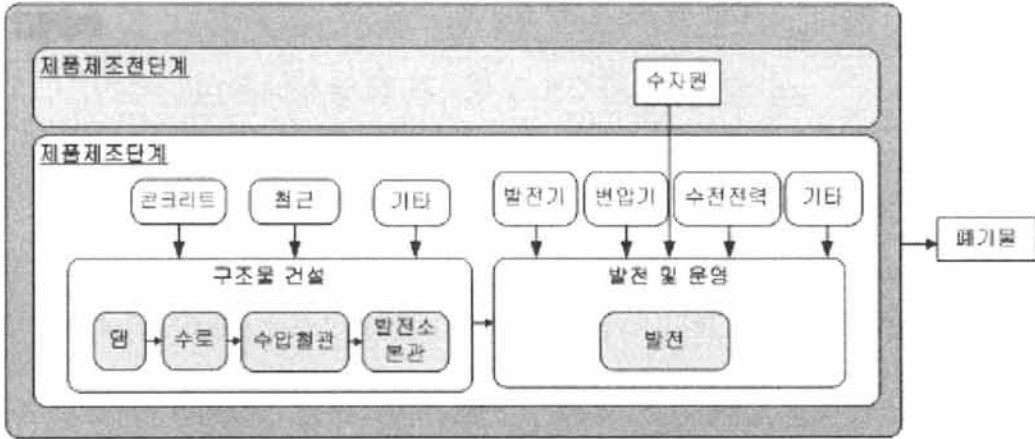


Fig. 1. 시스템경계

2. 수력발전의 환경성평가

2.1 목적 및 범위 정의

2.1.1 목적정의

본 연구의 목적은 전과정평가를 수행하여 무공해 청정에너지를 생산하는 수력발전에 대한 환경영향을 평가하여 원재료 및 공정 그리고 생산 전력의 주요 환경요소를 규명하고 이 결과를 통해 환경성적표지(EDP)인증을 획득하여 대외공신력을 확보하는 데 있다.

2.1.2 범위 정의

2.1.2.1 기능 및 기능단위 설정

본 연구의 대상은 전력시스템의 수력발전이며, 연구의 목적과 관련된 기능은 빛과 동력, 열로 사용되는 에너지로서의 기능이다. 기준흐름은 화천수력발전소에서 생산되어 한전의 송전선로로 송전되는 전력 1 kWh로 선정하였다.

Table 1. 기능, 기능단위, 기준흐름

제품명	수력발전 (화천수력발전소)
기능	빛과 동력, 열로 사용되는 에너지로서의 기능
기능단위	발전량 기준 1kWh 생산
기준흐름	전력 1kWh (송전기준)

2.1.2.2 시스템경계 설정

본 연구의 시스템경계는 수력발전의 전력생산을 위한 제품제조전단계와 제품제조단계를 포함한 "cradle to gate"의 범위를 가지고 있다. 그러나 본 연구의 목적은 EDP인증 획득이며, 이를 위해 EDP의 작성지침 상의 용어 및 시스템경계를 설정하였다. 따라서 생산된 전력의 사용 및 폐기 단계는 포함하지 않는다. 시스템경계는 Fig 1에 도식화하였다.

2.1.2.3 제외기준

본 연구에서는 제품 생산에 소요되는 투입 자재의 생산공정은 시스템 경계 내에서 제외하였으며, 해당 자재의 재질별 상위흐름을 연결하였다. 댐은 100년, 기타 시설 및 설비는 30년의 수명을 가정하여 시스템 경계 내에 포함하였다.

2.1.2.4 데이터 범주

본 연구에서 먼저 수집해야 할 데이터 범주는 원료 물질, 원부자재, 에너지, 제품, 수계 배출물, 폐기물 등이 있다.

Table 2. 데이터 범주

구분		세부항목		물질
투입물	원부자재	구조물 및 발전설비	취수	수자원
			댐	콘크리트
				철근
			수로	콘크리트
			수압철관	SS41, SM41B
			발전소본관	콘크리트
				철근
			수차 및 발전기	스테인레스강
				합금강
				철
				구리
			변압기	절연체
				철
	구리			
절연유				
발전 및 운영	카본브러쉬	graphite		
		구리		
	고무			
압유 및 윤활유	윤활유			
에너지/유틸리티	소내 전력	전력		
배출물	제품	판매 전력		
	수계배출물	방류수	수자원	
	폐기물	지정폐기물	액상 (재활용)	폐유
		일반폐기물	페카본브러쉬	

2.1.2.5 데이터 품질 요건

본 연구에서는 초기 데이터 품질 요건을 대상 업체 내부와 부품 및 물질의 생산업체를 의미하는 대상업체 외부로 구분하였다. (Table 2 참고)

Table 3. 시간적, 지역적, 기술적 경계

구분	대상업체 내부	대상업체 외부
시간적경계	2007년	① 2007년 ② 최근 5년 이내 데이터 ③ 가급적 최신 데이터
지역적경계	화천수력발전소	① 현장데이터 ② 국내데이터 ③ 해외데이터
기술적경계	화천수력발전소	① 제조공정 ② 동일공정 데이터 ③ 유사공정 데이터

2.1.2.6 할당

본 연구에서 할당은 최대한 피하려고 하였으며, 할당을 피할 수 없을 경우에는 Cut-off 방법을 사용하여 전과정평가의 목적에 맞도록 시스템 경계를 설정하여 경계를 벗어나는 부분에 대한 환경부하를 무시함으로써 실질적인 할당 문제를 회피하였다.

2.1.2.5 영향범주 및 영향평가 방법론

본 연구에서는 환경성적표지제도(Type III)의 영향평가방법론을 활용하여 영향범주 및 특성화 모델을 선정하고 분류화 및 특성화 단계를 수행하였다. 결과 해석단계에서 환경영향을 보다 쉽고 간략하게 분석할 수 있도록 ISO14040에서 선택사항으로 분류된 정규화 및 가중치 부여 단계를 추가적으로 수행하였다. 영향범주

Table 4. 영향범주 및 특성화 모델

영향범주		특성화 인자	특성화 모델
자원소모	Abiotic resource Depletion	kg Sb-eq/kg	Guinee et al. 2001
지구온난화	Global Warming	kg CO ₂ -eq/kg	IPCC 1994&1996, 100years
오존층영향	Ozone Depletion	kg CFC11-eq/kg	WMO, 1999
산성화	Acidification	kg SO ₂ -eq/kg	Heijungs et al, 1992
부영양화	Eutrophication	kg PO ₄ ³⁻ -eq/kg	Heijungs et al, 1992
광화학산화물 생성	Photo Oxidant Creation	kg ethene-eq/kg	Derwent et al. 1998

는 국제적으로 폭넓게 고려되고 있으며, 환경성적표지 등에서 영향평가 대상으로 설정한 6대 영향범주를 선정하였으며, 고려된 영향범주와 상응인자 단위는 Table 4과 같다.

2.1.2.6 가정 및 제한사항

본 연구에서 사용된 주요 가정과 제한사항은 다음과 같다.

- 발전설비 건설 부분은 기 건설된 건축물에 대하여 사용된 모든 자재를 분석할 수 없고, 건설 당시 사용된 각종 기자재와 연료 등을 평가하는 것도 불가능하여 이에 대해서는 설계도 상의 주요 투입자재들을 추정하여 적용함
- 제조공정에 투입되는 원료 및 원부자재는 현장데이터 수집을 원칙으로 하였으며, 그렇지 못할 경우 일반데이터베이스를 사용하여 연결함
- 원료 및 원부자재의 정확한 재질은 파악하지 못한 경우에는 가능한 조성정보를 취합함
- 국가 데이터베이스에 해당 물질의 데이터가 없는 경우, 해외 데이터베이스 및 유사 데이터베이스를 적용하였으며, 가장 공신력있고 널리 사용되고 있는 데이터베이스를 사용함
- 수송 과정에 대한 고려시 수송거리는 도시간 최단거리를 산출하여 적용함

2.2 전과정 목록분석

2.2.1 데이터 수집

본 연구에서는 제품제조단계는 크게 구조물 건설 공정과 발전 및 운영 공정으로 나뉜다.

2.2.1.1 구조물 건설

구조물 건설 공정은 원부자재의 설계자료를 기준으로 자재별 단위중량을 취합하여 댐 100년, 기타 설비 30년(환경성적표지인증 기준)으로 연간 투입실적을 환산하여 주요 자재의 투입량으로 반영하였다.

2.2.1.2 발전 및 운영

발전 및 운영 공정은 설비의 경우, 30년으로 수명을 고려하고 연간투입실적을 환산하여 주요자재의 투입량으로 반영하였다. 원부자재의 사용실적 자료는 연간투입량과 자재별 단위중량을 취합하고 연간 투입실적을 중량(kg)단위로 환산하여 주요자재의 투입량으로 반영하였으며, 에너지 사용량 및 제품생산량, 그리고 폐기물/배출물 발생량 등은 실적치를 취합하여 반영하였다.

2.2.2 데이터 계산 및 검증

본 연구는 댐 및 발전소 본관 등 구조물에 대해서 설계자료를 활용하였으며, 발전기, 변압기 등의 설비에 대해서는 설계데이터, 재질데이터, 계산데이터 등을 통해 투입물 및 배출물에 대

Table 5. 주요 파라미터 (C-t-G)

분류	경로	물질	값(kg)
자원사용	대기	질소(N2)의 9종	6.89E-05
	토지	철광석, 구리광석, 석탄 외 190종	1.41E-01
수자원	수계	물(water)	6.96E+03
환경배출	대기	이산화탄소(CO2) 외 297종	1.61E-02
	수계	BOD, COD, 인산염, 질산염 외 280종	6.96E+03
	토지	철, 알루미늄, 구리 외 126종	1.98E-06

Table 6. 특성화 결과

환경영향범주	제품제조전단계	제품제조단계	사용및폐기단계	총값
자원소모 (kg Sb-eq/전기 1kWh)	0.00E+00	3.41E-05	0.00E+00	3.41E-05
산성화 (kg SO ₂ -eq/전기 1kWh)	0.00E+00	3.08E-05	0.00E+00	3.08E-05
부영양화 (kg PO ₄ ³⁻ -eq/전기 1kWh)	0.00E+00	4.26E-06	0.00E+00	4.26E-06
지구온난화 (kg CO ₂ -eq/전기 1kWh)	0.00E+00	1.62E-02	0.00E+00	1.62E-02
오존층영향 (kg CFC11-eq/전기 1kWh)	0.00E+00	5.61E-10	0.00E+00	5.61E-10
광화학적산화물생성 (kg C ₂ H ₄ -eq/전기 1kWh)	0.00E+00	6.51E-06	0.00E+00	6.51E-06

한 계산을 수행하였다. 또한 수집된 데이터의 신뢰성 확보를 위해 물질수지(질량보존 법칙을 활용) 검토, 인과관계(전문가를 통한 각 목록의 투입 및 배출에 대해 검토) 파악, 데이터 값의 누락여부(국내외 관련 문헌자료를 참조)를 확인하여 데이터 검증을 수행하였다.

2.2.3 목록분석결과

본 연구에서는 수력발전에서의 발생하는 투입물 및 배출물 목록에 대한 분석을 실시하였다. 제조전단계 및 제조단계에서 구축된 gate to gate 목록에 상위흐름을 통해 발생하는 부품 및 물질의 데이터를 연결하여 cradle to gate 목록을 구축하였다. 구축된 목록 중에

발생량이 많은 항목을 주요 물질로 선정하였으며, 그 결과는 Table 5와 같다. 전력 1kWh(송전기준)을 생산하기 위해 전과정적으로 약 0.1kg의 자원과 약 7톤의 수자원을 소모하며, 0.016kg의 CO₂를 발생하고 있다.

2.3 전과정영향평가 및 해석

본 연구는 영향평가 방법론으로 환경부 영향평가방법론을 적용하여 수력발전의 잠재적인 환경영향을 정량적으로 도출하였다.

Table 6에서와 같이 특성화 결과는 사용단계 및 폐기단계는 고려하지 않았으며, 제품 제조전단계에서 투입되는 수자원은 환경영향을 가지고 있지 않으므로 환경영향이 없는 것으로 분석되었다.

Table 7. 온실가스 배출량 비교

구분	한국 전력 DB	화천수력발전소	IAEA 발표자료	vattenfall
이산화탄소량 (g CO ₂ -eq)	495	16.2	16 (2000년) 1~34 (2006년, 평균 8)	4.2
설비 수명	설비 제외됨	댐 100년, 기타 30년	댐 150년, 발전기 40년, 기타 설비 80년	구조물 100년, 기타 60년
비고	국내의 모든 발전사 운전 실적을 토대로 산출한 결과임	발전설비용량 (10.8만kW), 연간발전량 (18.476만kWh)	Ecoinvet 프로젝트 수행 결과 활용	연간발전량 (229,000만kWh)

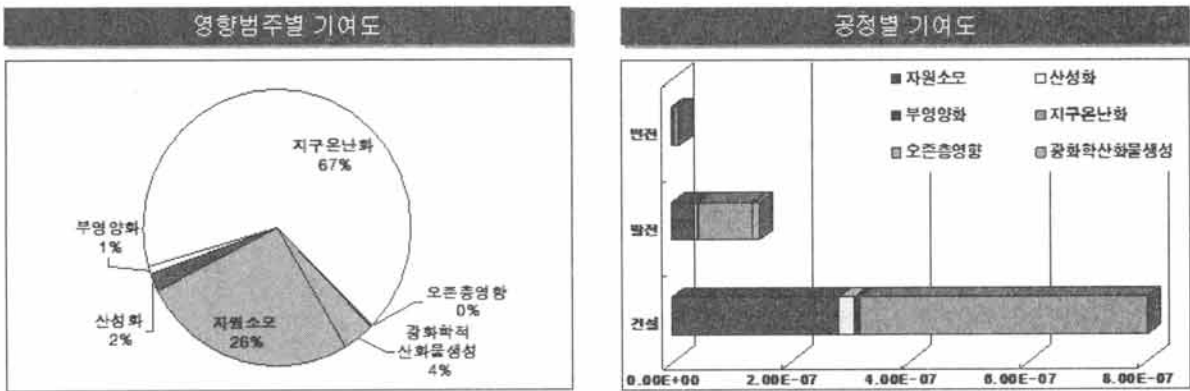


Fig. 2. 정규화 및 가중화 적용 결과

화천수력발전소의 발전 전력은 국가 데이터베이스로 구축된 국내 생산 전력에 비해 온실가스 배출량이 약 3% 수준의 청정 발전 방식임을 정량적으로 검증하였다. 그리고 해외 공개 자료에 비해 화천수력발전소의 온실가스 배출량이 높은 것으로 보이나 이는 가동률의 차이로 인해 구조물과 설비로 인한 영향을 상대적으로 많이 받는 것으로 분석되었다.

환경영향을 보다 쉽고 간략하게 분석할 수 있도록 ISO14040에서 선택사항으로 분류된 정규화 및 가중치 부여 단계를 추가적으로 수행하였다. 그 결과는 Fig. 2와 같이 지구 온난화 범주에서 환경영향이 가장 크게 나타났다. 이는 댐 등의 구조물 건설에 필요한 콘크리트 제조 시에 CO₂가 발생하여 그에 대한 환경영향이 높게 나타났기 때문이다.

또한 공정별 기여도의 경우에 건설단계에서 환경영향이 가장 크며 발전 및 변전의 환경영향은 설비에 의한 영향이며 실제 운전에 따른 환경영향 유발은 무시할 만한 수준임을 확인하였다.

3. 개선안 평가

3.1 호기별 분석

화천수력발전소의 발전기 호기별 환경영향 비교 분석 결과 1호기, 2호기, 4호기, 3호기 순으로 환경영향이 높게 분석되었다. 이는 발전기 효율과 변압기 효율로 인해 동일한 수자원을 이용했을 경우에 발전 및 송전량의 차이가 발생하기 때문이다.

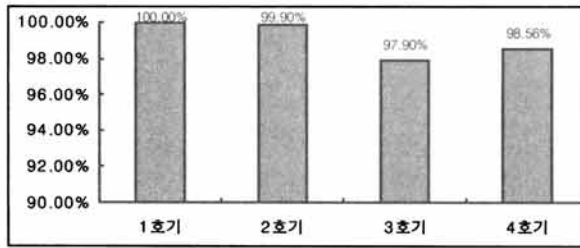


Fig. 3. 발전기 호기별 비교

3.2 운전 순위 변경

2007년도 화천수력발전소의 발전기 호기별 발전량 대비 수자원 사용량을 계산하였다. 발전량과 발전기 효율간의 관계가 존재하지 않아 발전 효율은 고정시키고 발전량 대비 수자원 사용량에 대한 효율순에 따라 운전 조건을 달리 하였다. 즉, 2007년 수자원 사용량을 발전량

Table 8. 호기별 발전량 대비 수자원 사용량

구분	1호기	2호기	3호기	4호기	합계
수자원 사용량(ton)	4.08E+08	3.75E+08	2.55E+08	2.48E+08	1.29E+09
발전량 (kWh)	5.96E+07	5.48E+07	3.82E+07	3.69E+07	1.89E+08
운전일수	198	209	149	148	-
수자원 / 발전량 (t/kWh)	6.86E+00	6.85E+00	6.68E+00	6.71E+00	6.79E+00

Table 9. 운전 조건 변경에 의한 발전량 증가량

구분	1호기	2호기	3호기	4호기	합계	2007년 대비
수자원 사용량 (ton)	2.56E+08	2.48E+08	4.08E+08	3.75E+08	1.29E+09	0.00E+00
발전량 (kWh)	3.72E+07	3.62E+07	6.11E+07	5.58E+07	1.90E+08	9.52E+05
수자원 / 발전량 (t/kWh)	6.86E+00	6.85E+00	6.68E+00	6.71E+00	6.76E+00	100.50%

Table 10. 변압기 효율 고려한 판매량

발전기	1호기	2호기	3호기	4호기	합계	2007년 대비
발전량 (kWh)	3.72E+07	3.62E+07	6.11E+07	5.58E+07	1.90E+08	9.52E+05
변압효율	9.77E-01	9.77E-01	9.73E-01	9.73E-01	-	
송전량	3.64E+07	3.53E+07	5.95E+07	5.43E+07	1.86E+08	7.66E+05

Table 11. 연결 변경에 따른 판매량

구분	1호기	2호기	3호기	4호기	합계	2007년 대비
발전량 (kWh)	3.72E+07	3.62E+07	6.11E+07	5.58E+07	1.90E+08	9.52E+05
변압효율	9.73E-01	9.73E-01	9.77E-01	9.77E-01	-	
송전량	3.62E+07	3.52E+07	5.97E+07	5.45E+07	1.86E+08	9.37E+05

대비 수자원 사용량이 적은 3호기, 4호기, 2호기, 1호기 순으로 적용하여 생산했을 경우의 발전량 증가량을 확인해 보았다.

효율순에 따라 3호기, 4호기, 2호기, 1호기 순으로 운전조건을 변경하는 경우, 약 95만 kWh의 전력을 추가 생산할 수 있으며, 이는 2007년도 발전량의 0.5%에 해당된다. 또한 발전효율이 증대됨에 따라 환경영향도 동일한 비율로 감소하는 효과를 얻게 된다.

3.3 변압기 효율 고려

앞서 운전 순위를 변경한 결과에 기존의 변압기를 연결하였을 경우 약 76만 kWh의 추가 판매를 기대할 수 있으며, 이는 약 7,300만원의 매출 증가를 예상할 수 있다.

변압기의 효율은 2007년 실적을 토대로 산출하였으며, 변압전력량과 무관하게 효율이 고정되었다고 가정하였다. 여기서 발전기와 변압기의 연결을 보다 효율이 높은 설비끼리 연결하였을 경우에 판매량 증가량을 확인해 보았다. 즉, 1호기 발전기에 3호기 변압기, 2호기 발전기에 4호기 변압기, 3호기 발전기에 1호기 변압기, 4호기 발전기에 2호기 변압기로 연결을 변경하였을 경우에 약 94만kWh의 추가 판매를 기대할 수 있으며, 약 8,900만원의 추가 매출 증대를 예상할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 수력발전의 전력 생산 전과정에 대해 국제표준인 ISO 기준에 의거하여 전과정평가를 수행하여 주요 물질에 대한 환경성 평가 및 영향범주별 기여도를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전과정평가 방법론을 이용하여 수력발전에 대한 정량적인 환경영향을 평가할 수 있었다. 전과정목록분석을 통해 전력 1kWh(송전기준)을 생산하기 위해 전과정적으로 약 0.1kg의 자원과 약 7톤의 수자원을 소모하며, 0.016kg의

CO₂를 발생하고 있다는 것이 규명되었다.

(2) 특성화 결과는 사용단계 및 폐기단계는 고려하지 않았으며, 제품 제조전단계에서 투입되는 수자원은 환경영향을 가지고 있지 않으므로 환경영향이 없는 것으로 분석되었으며, 그 결과는 국가 데이터베이스로 구축된 국내 전력 데이터에 비해 온실가스 배출량이 약 3% 수준의 청정 발전 방식임을 정량적으로 검증하였다.

(3) 환경성적의 각 환경영향범주를 통합한 통합 환경영향값을 도출하고 이를 토대로 각 요소의 환경영향 기여도를 분석하였다. 건설과 관련된 환경영향이 대부분을 차지하고 있으며 발전과 변전의 경우에는 설비에 대한 환경영향이어서 실제 운전에 따른 환경영향 유발은 무시할 만한 수준임을 확인하였다.

(4) 호기별 환경영향의 변화를 파악하고, 그 원인분석을 통해 발전기 및 변압기 효율을 고려한 운전 여건 변경 방안과 그 기대효과를 예측하여 발전기와 변압기 효율을 고려한 환경/경제 효율적 운전 방향을 제시하였다.

Reference

- 1) 이병욱, 황금주, 김남규(2005), 환경경영, 에코리브르, pp.17-218
- 2) ISO (2006) "ISO 14040, Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and framework", ISO
- 3) ISO (2006) "ISO 14044, Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and guidelines", ISO
- 4) 허탁, 안중우, 정재춘 (1995), "전과정평가의 기본 원리", 한국경영자총협회
- 5) 이건모, 허탁, 김승도 (1998), "환경 전과정평가(LCA)의 이론과 지침", 한국품질환경인증협회
- 6) Kun-Mo Lee, Hauschild (2004), "Life Cycle Assessment Best Practices of ISO 14040 Series", Environmental Science & Technology
- 7) 지식경제부(2003) "환경친화적인 산업기반 구축을 위한 환경경영 표준화사업", 지식경제부
- 8) 환경부(2006) "환경표지대상제품 및 인증기준", 환경부고시 제 2006-97호