

# LCA기법을 적용한 구리 및 알루미늄 금속자원 순환의 환경성 평가 An Environmental Evaluation of Copper and Aluminum Metal Resources Circulation by Life Cycle Assessment

신우철 · 황용우<sup>†</sup> · 문진영 · 공찬휘  
Woochul Shin · Yongwoo Hwang<sup>†</sup> · Jinyoung Moon · Chanhwi Kong

인하대학교 환경공학과  
Department of Environmental Engineering, Inha University

(2012년 12월 27일 접수, 2014년 2월 13일 채택)

**Abstract :** In this research, we quantified the environmental load while using and not using secondary resources. During the process of primary processed product of metal resources (copper, aluminum), we applied LCA technique and analyzed by dividing into 8 environmental impact categories that affect the environment. Furthermore, we analyzed the greenhouse gas that occur during the process of primary processed product domestically and globally according to the changes of each metal resource's recycling rate. Consequently, when producing 1 ton of copper using secondary resources, the environmental effects were found to be 6.09E + 01 person-yr/f.u. and 7.23E + 01 person-yr/f.u. Additionally, as the recycling rate increased both globally and domestically, the amount of greenhouse gas decreased. Producing 1 ton of Aluminum using secondary resources, the environmental effects were found to be 2.34E + 02 person-yr/f.u. and 3.01E + 02 person-yr/f.u. Moreover, as the recycling rate domestically decreased, the amount of greenhouse gas increased, however the globally was decreased.

**Key Words :** Life Cycle Assessment, Metal Resources, Resources Circulation, Greenhouse Gas

**요약 :** 구리 및 알루미늄의 1차가공제품을 제조함에 있어 2차자원(스크랩)의 사용 및 미사용 시 발생하는 환경부하량을 전과정평가(LCA)기법을 적용하여 정량화하고, 환경에 미치는 영향을 8가지 환경영향범주로 나누어 환경부하를 분석하였다. 또한 구리 및 알루미늄의 자원순환율이 증가할 경우 동일한 1차가공제품생산 단계에서 발생하는 온실가스 발생량을 국내범위와 전지구적범위로 분석하였다. 그 결과 구리의 경우 1차가공제품 1 ton 생산 시 2차자원의 사용 및 미사용 시 전체 환경범주에 대한 환경영향은 각각 6.09E + 01 person-yr/f.u. 및 7.23E + 01 person-yr/f.u.로 나타났으며, 온실가스 발생량은 국내범위 및 전지구적범위 모두 자원순환율이 증가함에 따라 저감되는 것으로 조사되었다. 알루미늄의 경우 1차가공제품 1 ton 생산 시 2차자원의 사용 및 미사용 시 전체 환경범주에 대한 환경영향은 각각 2.34E + 02 person-yr/f.u. 및 3.01E + 02 person-yr/f.u.로 나타났으며, 온실가스 발생량은 국내범위에서는 자원순환율이 감소함에 따라, 전지구적범위에서는 자원순환율이 증가함에 따라 저감되는 것으로 조사되었다.

**주제어 :** 전과정평가, 금속자원, 자원순환, 온실가스

## 1. 서론

지난 수십 년간 유가금속에 대한 원자재 가격은 하향 안정세를 유지해왔다. 그러나 중국, 인도 등의 나라에서 발생된 자원 수요 증가, 환율 및 물가 상승 등의 금융 위기 지속과 맞물려 최근 상승세를 보이고 있다.<sup>1)</sup> 특히, 중국, 인도 등 신흥경제국의 자원소비는 세계 20~30%를 차지할 만큼 막대하여 국제 자원수급시스템의 급격한 변화를 초래하고 있다. 이러한 자원 시장에서는 유한한 천연자원 고갈의 위기감이 증가되며, 향후 채굴 가능량에 비해 예상되는 수요량이 증가하고 있기 때문에 세계 각국은 산업의 핵심원료인 광물자원을 확보하기 위한 나라별 대안을 모색 중에 있다.

주요 자원생산국 중 하나인 중국은 자국 내에서의 금속 소비량 증가에 따라 기존 수출 장려정책에서 수출 억제정책으로 전환하였으며, 수출할당허가제도의 추진에 의해 수출수량을 제한, 강화하고 있다. 이와 같이 금속광물자원 생산국

은 자원 민족주의를 내세움으로써 자국의 부존자원 무기화가 심화되고 있으며, 금속광물자원에 대한 영향력을 강화하고 21세기 첨단 산업분야에서 강력한 힘을 발휘하여 국가 이익을 최대한 확보하려는 전략을 추진 중이다.<sup>2)</sup>

우리나라의 경우 원자재를 수입, 가공하여 제품을 수출하는 가공무역의 경제구조를 갖고 있으며, 특히 반도체, 자동차, 통신기기, 조선, 석유화학, 기계 등의 산업들은 국내의 수출제조업 중에서 중심적인 위치에 있는 산업으로 모두 자원의존도가 높다는 공통적인 특성을 가지고 있다. 대부분의 자원을 전량 수입에 의존하고 있는 우리나라의 경우 국제 자원가격의 변동, 환율 및 자원고갈 등의 위기에 따른 우리 산업에 미치는 영향을 완화시키고 자원의 수급안정을 위한 자원관리체계의 구축 및 자원생산성 향상을 위한 전략이 필요하다.<sup>3)</sup> 그 방안 중 2차자원(스크랩) 사용은 자원절약면 아니라 환경면에서도 긍정적인 영향을 미친다.

이에 본 연구에서는 주요 금속자원인 구리와 알루미늄에

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: hwangyw@inha.ac.kr Tel: 032-860-7501 Fax: 032-865-1425

대하여 원료단계와 1차가공제품단계에서 발생하는 환경부하를 규명하고, 2차자원의 사용 및 미사용 시 발생하는 환경부하를 전과정평가(Life Cycle Assessment: LCA) 기법<sup>4)</sup>을 활용하여 비교 분석하였다. 또한 이를 바탕으로 2차자원 사용 시 얻어지는 환경적 이득을 평가하였다.

## 2. 목적 및 범위설정

본 연구는 구리 및 알루미늄의 원료취득에서부터 1 ton의 1차가공제품을 생산하는 과정까지의 환경오염부하를 정성적, 정량적으로 분석함으로써 그에 따른 환경영향을 평가하고 제품 폐기과정에서 발생하는 물질의 재활용을 통해 생산된 제품에 대한 상대적인 환경영향 및 온실가스 발생량을 국내범위와 전지구적범위로 비교 평가하는데 목적이 있다.<sup>5)</sup>

연구 대상제품의 구리 및 알루미늄의 시스템 경계를 Fig. 1 및 2에 나타내었다. 본 연구에서 선정한 시스템 경계는 국내범위와 전지구적범위로 구분하여 설정하였다. 구리의 국내범위는 원광제련 및 원료제련단계이며, 전지구적범위는 국내범위에 원광채굴, 원광수입, 재활용 및 폐기단계를 추가하여 설정하였다. 알루미늄의 국내범위는 원료수입, 원료제련단계이며, 전지구적범위는 국내범위에 원광채굴, 원광제련, 재활용 및 폐기단계를 추가하여 설정하였다.

각 대상의 제품의 기능단위(Functional Unit, f.u.)는 생산업체에서 측정가능하며 입출력 데이터와 연관성을 가질 수 있는 1 ton으로 설정하였다. “금속 자원순환 활성화를 위한 분석지원 기반 구축 및 온실가스 저감량 평가”에서 선정한 대상업체는 구리의 경우 전기동, 동선, 동관, 동판 및 동봉 등을 생산하는 4개의 업체, 알루미늄의 경우 알루미늄관, 봉, 선, 합금 및 캔 등을 생산하는 3개의 업체로 원료단계와 1차가공제품단계로 분류하여 선정하였다.<sup>6)</sup>

구리 대상업체 총 4개 업체 중 A업체 1곳만이 광산에서 채굴된 1차자원을 제련공정과 전련공정을 거쳐 순도 99.9%

이상의 전기동을 생산하는 원료단계 업체이며, 알루미늄의 경우 괴의 형태로 전련 수입하기 때문에 원료단계의 환경영향은 산정하지 않았다.

구리의 1차가공제품인 동선, 동관, 동판 및 동봉 등을 생산하는 업체는 B, C 및 D 업체 3곳으로 B 업체는 A업체로부터 전기동을 구입하여 다른 비철금속을 합금하여 1차가공제품을 생산하며 이때 제품 생산 시 2차자원의 투입여부에 따른 환경성을 평가하였다. 이 때 2차자원의 투입 여부에 따라 B-C oil 및 전력 등의 에너지 사용량 또한 변화된다. C 업체는 폐기된 1차가공제품인 2차자원만을 사용하여 황동합금을 생산하는 업체이며, D 업체는 전기동과 2차자원을 사용하여 동양극 및 황동봉 등을 생산한다. 알루미늄의 1차가공제품인 알루미늄압연판재, 봉, 선 및 캔 등을 생산하는 업체는 E 업체(울산, 영주)와 C 업체 3곳으로 E 업체는 알루미늄 괴와 폐기된 1차가공제품인 2차자원을 사용하여 알루미늄압연판재를 생산하는 업체이며, C 업체는 알루미늄 괴와 아연 및 2차자원을 사용하여 알루미늄 합금을 생산한다.

## 3. 목록분석

Table 1에 나타난 구리와 알루미늄의 생산업체별 투입물 및 배출물을 이용하여 구리와 알루미늄에 대한 목록분석을 실행하였고, 목록분석 결과 중 대표적인 항목을 자원소모, 대기오염물 및 수질오염물 등으로 구분하여 Table 2에 나타내었다.

구리의 경우 동정광 및 전기동 등의 원료와 B-C Oil, LNG, 전력 및 용수 등의 유틸리티에 대한 목록분석 결과 총 420여개의 목록항목이 도출되었으며, 알루미늄의 경우 알루미늄 괴를 원료로 사용하고, B-C Oil, B-A Oil, LNG, LPG, 디젤, 전력 및 용수 등의 유틸리티에 대한 목록분석 결과 총 350여개의 목록항목이 도출되었다.

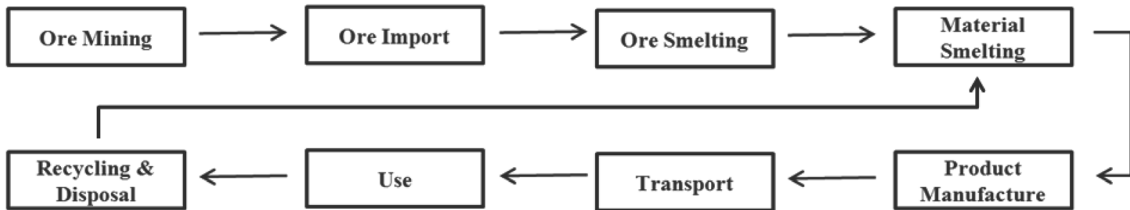


Fig. 1. System boundary in copper.

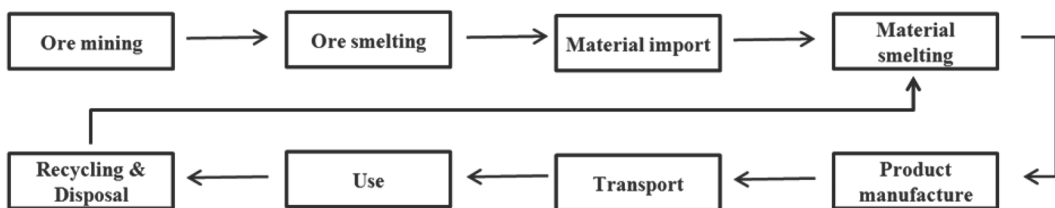


Fig. 2. System boundary in aluminum.

Table 1. Input and output in company in copper and aluminum

		Copper				Aluminum			
		A Com-pany	B Com-pany	C Com-pany	D Com-pany	E (Ulsan) Company	E (Yeongju) Company	C Company	
Input	Copper ore (ton)	1,345,000	-	-	-	Aluminum (ton)	192,363	153,691	10,500
	Electrolytic copper (ton)	-	108,602	0	8,148	Recycled scrap (ton)	61,225	95,394	500
	Recycled scrap (ton)	41,522	50,071	1,800	106,778	B-C Oil (L)	18,833,579	19,712,170	1,660,743
	B-C Oil (L)	23,958,000	20,515,780	170,820	-	LNG (ton)	3,771	17,072,262	-
	LNG (Nm <sup>3</sup> )	5,476,000	-	-	2,937,312	LPG (ton)	1,000	-	-
	Electricity (GWh)	522	115	-	66,015,508	B-A Oil (L)	260,469	-	-
	Water (m <sup>3</sup> )	3,685,000	-	-	-	Refined oil (L)	3,039,308	-	-
						Diesel (L)	451,642	-	-
Output	Production	Electrolytic Copper	Primary Processed Product	Latten	Brass bar	Water (ton)	470,981	475,511	-
	Production amount (ton)	466,192	175,340	1,460	100,607	Electricity (kWh)	144,609,000	173,111	-
						Zinc (ton)	-	-	10,500
					Output	Production	Aluminum rolling	Aluminum rolling	Aluminum alloy
						Production amount (ton)	278,247	199,110	20,503

Table 2. Results of inventory analysis

Flow	Material	Flow name	Units	Copper		Aluminum	
				Recycling used	Recycling unused	Recycling used	Recycling unused
INPUT	Resource	Aluminium	kg	4.13E-07	4.44E-07	1.54E-07	1.49E-07
INPUT	Resource	Ammonia	kg	2.91E-04	3.14E-04	1.15E-04	1.06E-04
INPUT	Resource	Bauxite	kg	2.15E-02	2.29E-02	1.59E+03	2.14E+03
INPUT	Resource	Bentonite	kg	3.34E-02	3.46E-02	1.97E-01	2.44E-01
INPUT	Resource	Carbon dioxide	kg	4.14E+01	4.55E+01	5.24E-05	4.83E-05
INPUT	Resource	Carbon	kg	1.78E-03	1.94E-03	2.86E-04	3.64E-04
INPUT	Resource	Clay	kg	1.79E-04	1.77E-04	3.65E-04	4.64E-04
INPUT	Resource	Coal	kg	1.74E+02	1.78E+02	1.11E+02	1.15E+02
OUTPUT	Air	Acetaldehyde	kg	4.36E-04	4.66E-04	3.28E-04	4.16E-04
OUTPUT	Air	Acetic acid	kg	8.31E-03	9.24E-03	1.32E-05	1.24E-05
OUTPUT	Air	Acetone	kg	2.61E-04	2.85E-04	1.25E-05	1.56E-05
OUTPUT	Air	Aluminum	kg	9.65E+00	1.21E+01	4.83E-08	6.54E-08
OUTPUT	Air	Ammonia	kg	1.08E-01	1.12E-01	2.33E-03	2.95E-03
OUTPUT	Air	Carbon dioxide	kg	4.89E+02	5.04E+02	1.92E+03	2.48E+03
OUTPUT	Air	CFC-11	kg	3.37E-09	3.39E-09	1.79E-08	2.23E-08
OUTPUT	Air	CFC-114	kg	3.47E-09	3.46E-09	1.83E-08	2.29E-08
OUTPUT	Air	Magnesium	kg	5.49E-03	6.01E-03	1.72E-08	2.33E-08
OUTPUT	Air	Manganese	kg	2.96E-02	3.23E-02	1.48E-05	2.00E-05
OUTPUT	Air	Mercury	kg	1.67E-04	1.85E-04	1.59E-06	2.12E-06
OUTPUT	Air	Methane	kg	5.24E-01	5.54E-01	2.39E+00	3.01E+00
OUTPUT	Water	BOD	kg	1.91E+00	2.15E+00	3.00E-02	3.85E-02
OUTPUT	Water	Ethylbenzene	kg	7.46E-05	7.44E-05	4.19E-04	5.25E-04
OUTPUT	Water	Fluoride	kg	1.04E-01	1.21E-01	2.78E-02	3.57E-02
OUTPUT	Water	Heavy metals	kg	1.97E-06	1.99E-06	1.09E-05	1.37E-05
OUTPUT	Water	Zinc	kg	4.81E-05	5.25E-05	1.23E-04	1.56E-04
OUTPUT		Product	kg	1.00E+03	1.00E+03	1.00E+03	1.00E+03

### 4. 영향평가

전과정 영향평가(Life Cycle Impact Assessment: LCIA)는 전과정 목록분석 결과를 바탕으로 잠재적인 환경영향의 중요성을 평가하는 단계이며, 환경부하를 정량적, 정성적으로 산출하여 연구 대상 시스템이 환경에 미치는 영향을 종합적으로 평가하는 것이다.

구리의 영향평가 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 1차가공제품 1 ton 생산 시 2차자원의 사용 및 미사용 시 환경영향은 각각  $6.09E+01$  person-yr/f.u. 및  $7.23E+01$  person-yr/f.u.로 나타났다. 2차자원 사용 시 자원고갈에 대한 환경영향이  $3.22E+01$ 로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 지구온난화  $2.04E+01$ , 산성화  $4.72E+00$ , 부영양화  $2.73E+00$ , 오존층파괴  $4.51E-01$ , 인간독성  $2.07E-01$ , 광화학산화물  $9.25E-02$ , 생태독성  $4.29E-02$  순으로 나타났다. 2차자원 미사용 시 자원고갈에 대한 환경영향이  $4.28E+01$ 로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 지구온난화  $2.09E+01$ , 산성화  $4.80E+00$ , 부영양화  $3.06E+00$ , 오존층파괴  $4.55E-01$ , 인간독성  $2.24E-01$ , 광

화학산화물  $1.00E-01$ , 생태독성  $2.24E-01$  순으로 환경영향에 미치는 영향범주의 순서는 2차자원 사용 시와 동일하였다.

알루미늄의 영향평가 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 1차가공제품 1 ton 생산 시 2차자원 사용 및 미사용 시 환경영향은  $2.34E+02$  person-yr/f.u. 및  $3.01E+02$  person-yr/f.u.로 나타났다. 2차자원 사용 시 자원고갈에 대한 환경영향이  $9.16E+01$ 로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 지구온난화  $8.45E+01$ , 산성화  $4.27E+01$ , 부영양화  $1.22E+01$ , 오존층파괴  $2.57E+00$ , 생태독성  $4.18E-01$ , 인간독성  $3.34E-01$ , 광화학산화물  $2.21E-01$  순으로 나타났다. 2차자원 미사용 시 자원고갈에 대한 환경영향이  $1.15E+02$ 로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 지구온난화  $1.09E+02$ , 산성화  $5.59E+01$ , 부영양화  $1.60E+01$ , 오존층파괴  $3.22E+00$ , 생태독성  $3.27E-01$ , 인간독성  $2.61E-01$ , 광화학산화물  $1.73E-01$  순으로 환경영향에 미치는 영향범주의 순서는 2차자원 사용 시와 동일하였다.

구리 및 알루미늄 모두 환경영향적 측면에서는 2차자원 사용 시 모든 영향범주에서 환경영향이 낮게 나타났다.

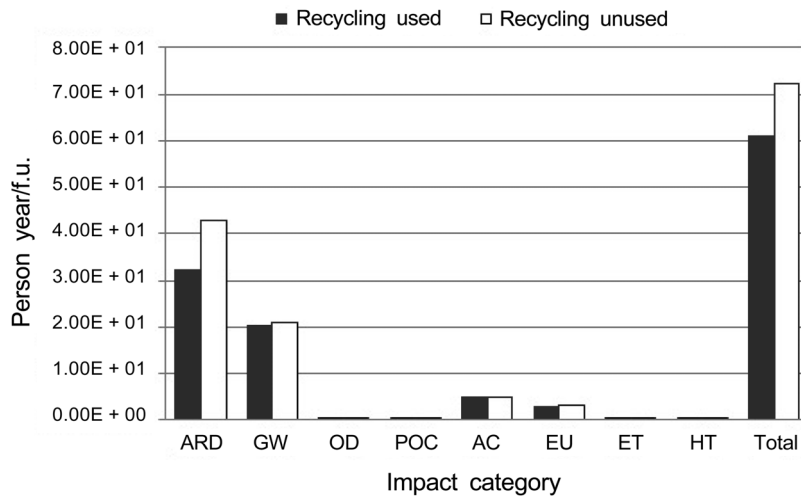


Fig. 3. Results of impact assessment (in copper).

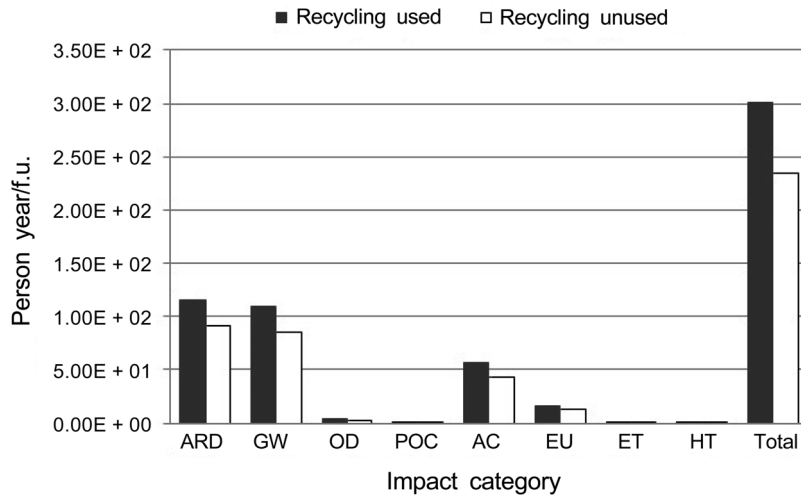


Fig. 4. Results of impact assessment (in aluminum).

## 5. 결과해석

본 연구에서는 구리 및 알루미늄 1차가공제품 1 ton 생산 시 2차자원 사용 및 미사용 시에 따른 환경영향을 주요 범주별로 평가하였다.

### 5.1. 환경영향평가 결과의 주요범주 규명

구리 및 알루미늄 1차가공제품 생산 시, 2차자원 사용 및 미사용 시에 따른 영향평가 결과를 바탕으로 환경영향범주별 주요 영향물질과 원인을 분석하여 Table 3에 나타내었다.

구리 1차가공제품 1 ton 생산 시, 2차자원 사용 및 미사용 시에 따른 환경영향을 평가한 결과 모두 동일하게, 자원고갈, 지구온난화, 산성화 및 부영양화 순으로 환경에 높은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 자원고갈의 주요 영향물질은 2차자원 사용 시 Coal이 약 57%로 가장 높은 기여도를 나타냈으며, 그 다음으로 Oil, Natural gas 및 Copper 순으로 나타났다. 2차자원 미사용 시 Coal이 약 51%로 가장 높은 기여도를 나타냈으며, 그 다음으로 Copper, Oil 및 Natural gas 순으로 나타났다. 지구온난화의 주요 영향물질은 2차자원 사용 시 CO<sub>2</sub>가 약 98%로 가장 높은 기여도를 나타냈으며, 그 다음으로 CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O 순으로 나타났다. 2차자원 미사용 시 CO<sub>2</sub>가 약 99%로 가장 높은 기여도를 나타냈으며, 그 다음으로 CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O 순으로 2차자원 사용 시와 기여도 순이 동일하게 나타났다.

알루미늄의 경우 2차자원 사용 및 미사용 시에 따른 환경영향은 두 동일하게, 자원고갈, 지구온난화 및 산성화 순으로 환경에 높은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 자원고갈의 주요 영향물질은 2차자원 사용 시 Bauxite가 약 86%로

가장 높은 기여도를 나타냈으며, 그 다음으로 Natural gas 및 Coal 순으로 나타났다. 2차자원 미사용 시 Bauxite가 약 89%로 가장 높은 기여도를 나타냈으며, 그 다음으로 Natural gas 및 Coal 순으로 2차자원 사용 시와 기여도 순이 동일하게 나타났다. 2차자원 미사용 시 더 많은 Bauxite를 사용함으로써, 자원고갈에 대한 환경영향이 더욱 높은 것으로 나타났다.

### 5.2. 자원순환에 따른 온실가스 발생량 비교평가

국내 구리산업의 경우 동정광 대부분은 수입에 의존하고 있다. 따라서 제련과정의 원료단계와 1차가공제품생산단계에서 발생하는 온실가스 뿐만 아니라 국외 채굴부터 수송되는 과정까지 포함하여 전지구적범위의 온실가스 발생량을 산정할 필요성이 있다.

2011년 기준, 국내로 수입된 동정광은 약 1,732,000 ton으로 조사되었으며, 칠레, 호주, 인도네시아, 페루, 아르헨티나 등 다양한 국가로부터 수입<sup>7)</sup>되었다. 그 중 칠레로부터 약 476,000 ton의 가장 많은 동정광을 수입하였다. 각 나라로부터 수입된 동정광의 수량과 항해거리<sup>8)</sup> 및 해상수송에 따른 외항선(벌크)의 탄소발생계수<sup>9)</sup> 등을 적용하여 동정광 수입 시 온실가스 총 발생량을 산정하였다.

구리의 2차자원 사용 및 미사용 시에 따른 온실가스 발생량을 국내 및 국외 범위에서 발생하는 온실가스 발생량을 Table 4에 나타내었다. 2011년 기준 동정광의 수입량은 약 1,732,000 ton에 해당한다. 이 수입된 동정광 및 2차자원을 사용하여 총 1,225,490 ton의 1차가공제품을 생산하게 되는데 이때 발생하는 온실가스의 양은 약 221,695 ton CO<sub>2</sub>로 나타났다. 그러나, 2차자원을 사용하지 않을 경우 동일한 양

Table 3. Major material of impact category

Impact category	Major material				
	Copper		Aluminum		
	Recycling used	Recycling unused	Recycling used	Recycling unused	
ARD	Coal (57.5%), Oil (19.0%) Copper (11.7%)	Coal (51.0%), Copper (20.4%), Oil (18.4%)	Bauxite (86.3%), Natural gas (7.7%), Coal (6.0%)	Bauxite (89.3%), Natural gas (5.8%), Coal (4.9%)	
GW	CO <sub>2</sub> (98.2%), CH <sub>4</sub> (0.1%), N <sub>2</sub> O (0.01%)	CO <sub>2</sub> (99.3%), CH <sub>4</sub> (0.1%), N <sub>2</sub> O (0.01%)	CO <sub>2</sub> (99.8%), CH <sub>4</sub> (0.1%)	CO <sub>2</sub> (99.8%), CH <sub>4</sub> (0.1%)	
OD	Halon-1301 (99.9%), CFC-11 (0.05%), CFC-12 (0.01%)	Halon-1301 (99.9%), CFC-11 (0.06%), CFC-12 (0.01%)	Halon-1301 (99.9%), CFC-11 (0.05%), CFC-12 (0.01%)	Halon-1301 (99.9%), CFC-11 (0.05%), CFC-12 (0.01%)	
POC	Methane (89.2%), Ethane (4.1%), Propane (2.0%)	Methane (88.8%), Ethane (4.3%), Propane (2.1%)	Methane (98.0%), Ethane (0.7%), Propane (0.4%)	Methane (98.0%), Ethane (0.7%), Propane (0.5%)	
AC	SOx (94.3%), SO <sub>2</sub> (5.5%), NH <sub>3</sub> (0.1%)	SOx (94.4%), SO <sub>2</sub> (5.5%), NH <sub>3</sub> (0.1%)	NOx (50.4%), SOx (38.3%), SO <sub>2</sub> (11.2%)	NOx (50.6%), SOx (38.3%), SO <sub>2</sub> (11.0%)	
EU	COD (62.8%), BOD (34.7%), PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (2.5%)	COD (62.3%), BOD (35.1%), PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (2.6%)	NOx (98.0%), COD (1.4%), N <sub>2</sub> O (0.2%)	NOx (98.1%), COD (1.3%), N <sub>2</sub> O (0.2%)	
ET	Oil (93.4%), Phenol (2.4%), Toluene (2.3%)	Oil (93.2%), Phenol (2.5%), Toluene (2.4%)	Oil (90.8%), PAH (2.6%), Phenol (2.4%)	Oil (90.7%), PAH (2.7%), Phenol (2.4%)	
HE	Air	SOx (58.9%), NMVOC (20.4%), CH <sub>4</sub> (17.8%)	SOx (51.5%), NMVOC (21.9%), CH <sub>4</sub> (17.8%)	NOx (28.3%), CO (21.7%), SOx (21.5%)	NOx (28.9%), CO (22.7%), SOx (21.9%)
	Water	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (48.7%), F <sup>-</sup> (36.8%), Oil (9.6%)	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (50.1%), F <sup>-</sup> (36.4%), Oil (8.8%)	Oil (65.5%), F <sup>-</sup> (22.3%), Fe (2.9%)	Oil (65.3%), F <sup>-</sup> (22.6%), Fe (2.9%)

**Table 4.** The range of greenhouse gas emissions in copper resource

Category		Recycling used (ton CO <sub>2</sub> )	Recycling unused (ton CO <sub>2</sub> )
Global	Mining step	221,695	221,695
	Transport step	34,629	21,260
Domestic	Ore smelting	351,267	376,800
	Primary processed product step	628,282	244,532
Total		1,235,873 (89%)	1,384,046 (100%)

의 1차가공제품을 생산하기 위해서는 약 279,960 ton의 동정광을 추가로 수입해야 하는데, 이때 추가로 발생하는 온실가스의 양은 21,260 ton CO<sub>2</sub>로 나타났다. 수송의 경우 각 국가로부터 수입된 수량과 해양거리 그리고 해양 외항선(벌크)의 탄소발생계수를 적용하여 동정광 수입에 따른 온실가스 발생량은 약 34,629 ton CO<sub>2</sub>로 나타났으며, 2차자원 미사용 시 3,321 ton CO<sub>2</sub>가 추가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 2차자원 사용 시 약 11%의 온실가스 저감 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

이때 자원순환율의 증가(24%, 50%, 70%)함에 따라 국내 범위에서 2차자원 미사용 시를 기준으로 각각 12.6% (123,629 ton CO<sub>2</sub>), 38.1% (304,434 ton CO<sub>2</sub>) 및 66.5% (440,629 ton CO<sub>2</sub>)의 온실가스가 저감되었으며, 전지구적범위에서도 각각 12.0% (148,210 ton CO<sub>2</sub>), 36.5% (369,753 ton CO<sub>2</sub>) 및 65.6% (548,210 ton CO<sub>2</sub>)의 온실가스가 저감되었다. 국내범위 및 전지구적범위 모두 자원순환율이 증가함에 따라 온실가스가 저감되는 것으로 나타났다(Fig. 5).

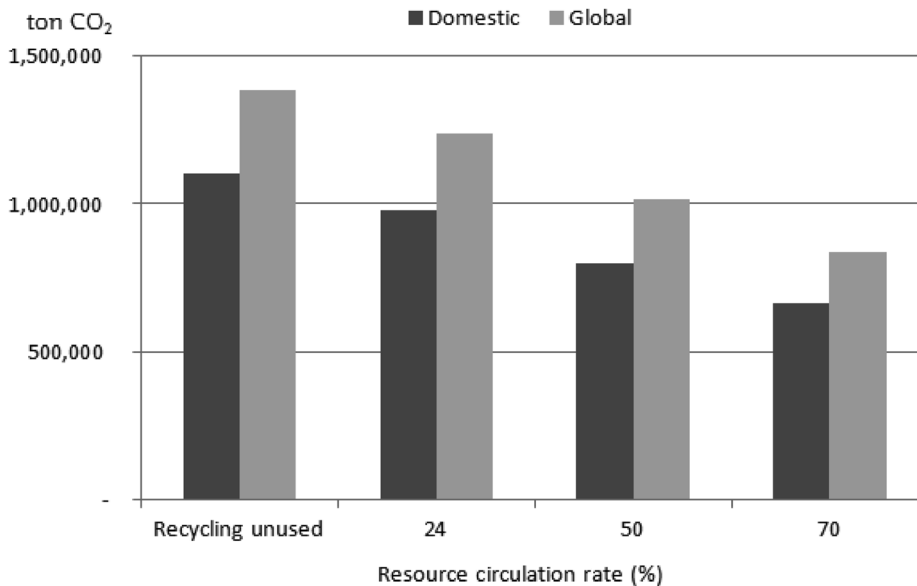
알루미늄의 경우 알루미늄과 전량을 수입에 의존하고 있다. 따라서 1차가공제품생산단계에서 발생하는 온실가스 뿐만 아니라 국외 채굴부터 알루미늄과 생산, 수송되는 과정까지 포함하여 전지구적범위의 온실가스 발생량을 산정하여야 한다.

2011년 기준, 국내로 수입된 알루미늄 껍은 약 1,208,595 ton으로 조사되었으며, 중국, 러시아연방, 호주, 남아프리카, 케나다 등 다양한 국가로부터 수입되었다. 그 중 호주로부터 308,528 ton의 가장 많은 알루미늄 껍을 수입하였다.<sup>7)</sup> 각 나라로부터 수입된 알루미늄 껍의 수량과 항해거리,<sup>8)</sup> 그리고 해양수송시 외항선(벌크)의 탄소발생계수<sup>9)</sup> 등을 적용하여 알루미늄 껍의 수입시 온실가스 총 발생량을 산정하였다.

알루미늄의 2차자원 사용 및 미사용 시에 따른 온실가스 발생량을 국내 및 국외 범위에서 발생하는 온실가스 발생량을 Table 5에 나타내었다. 2011년 기준 알루미늄 껍의 수입량은 약 1,208,595 ton에 해당한다. 이 수입된 알루미늄 껍 및 2차자원을 사용하여 총 1,007,429 ton의 1차가공제품을 생산하게 되는데 이때 발생하는 온실가스의 양은 3,633,292 ton CO<sub>2</sub>로 나타났다. 그러나 2차자원을 사용하지 않을 경우

**Table 5.** The range of greenhouse gas emissions in aluminum resource

Category		Recycling used (ton CO <sub>2</sub> )	Recycling unused (ton CO <sub>2</sub> )
Global	Mining step	3,633,292	3,633,292
	Transport step	13,749	846,951
Domestic	Primary processed product step	609,070	13,749
Total		4,256,111 (84%)	5,070,953 (100%)



**Fig. 5.** CO<sub>2</sub> emission by the resource circulation rate (in copper).

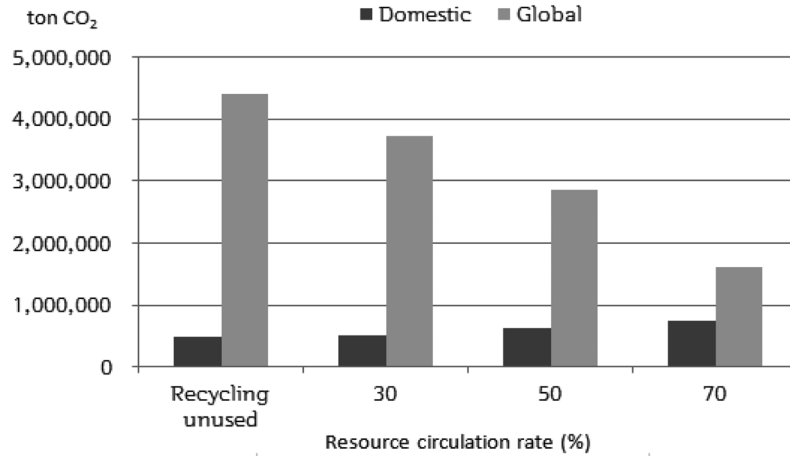


Fig. 6. CO<sub>2</sub> emission by the resource circulation rate (in aluminum).

동일한 양의 1차가공제품을 생산하기 위해서는 약 281,734 ton의 알루미늄 피를 추가로 수입해야 하는데, 이때 추가로 발생하는 온실가스의 양은 846,951 ton CO<sub>2</sub>로 나타났다. 수송의 경우 각 나라로부터 수입된 수량과 해양거리 그리고 해양 외항선(벌크)의 탄소발생계수를 적용하여 알루미늄 피 수입에 따른 온실가스 발생량은 약 13,749 ton CO<sub>2</sub>로 나타났으며, 2차자원 미사용 시 3,205 ton CO<sub>2</sub>가 추가적으로 발생하는 것으로 나타났다.

따라서 2차자원 사용 시 약 16%의 온실가스 저감 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

이때 자원순환율의 증가(30%, 50%, 70%)함에 따라 국내범위에서 2차자원 미사용 시를 기준으로 각각 6.1% (29,725 ton CO<sub>2</sub>), 27.7% (134,161 ton CO<sub>2</sub>) 및 52.0% (251,266 ton CO<sub>2</sub>)의 온실가스가 저감되었으며, 전지구적 범위에서도 각각 15.5% (684,863 ton CO<sub>2</sub>), 35.5% (1,570,428 ton CO<sub>2</sub>) 및 63.4% (2,804,863 ton CO<sub>2</sub>)의 온실가스가 저감되었다. 국내범위에서는 자원순환율이 낮을수록, 전지구적범위에서는 자원순환율이 높을수록 온실가스가 저감되는 것으로 나타났다(Fig. 6).

## 6. 결론

본 연구에서는 구리의 원료제련단계와 1차가공제품 제조 단계에 있어 2차자원의 사용 및 미사용 시 발생하는 환경부하량을 전과정평가(LCA)기법을 적용하여 정량화하고, 환경에 미치는 영향을 8가지 환경영향범주로 나누어 분석하였다. 또한, 금속자원별 자원순환율 변화에 따른 온실가스 발생량을 국내범위와 전지구적범위로 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 구리 1차가공제품 1 ton 생산 시 2차자원의 사용 및 미사용 시 환경영향은 각각 6.09E+01 person-yr/f.u. 및 7.23E+01 person-yr/f.u.로 나타났으며, 2차자원 사용 시 18.8%의 환경영향이 낮게 나타났다. 영향범주 중 가장 높은 환경영향을 미치는 항목은 2차자원 사용 및 미사용 시 모두 자원

고갈로 나타났다. 그 중 주요 영향물질은 Oil, Natural gas 및 Copper 등으로 나타났으며, 이는 동정광 사용에 의한 것으로 사료된다.

2) 구리 1차가공제품 생산 시 자원순환율이 증가(24%, 50%, 70%)함에 따라 국내범위에서 2차자원 미사용 시를 기준으로 각각 12.6% (123,629 ton CO<sub>2</sub>), 38.1% (304,434 ton CO<sub>2</sub>) 및 66.5% (440,629 ton CO<sub>2</sub>)의 온실가스가 저감되었으며, 전지구적범위에서도 각각 12.0% (148,210 ton CO<sub>2</sub>), 36.5% (369,753 ton CO<sub>2</sub>) 및 65.6% (548,210 ton CO<sub>2</sub>)의 온실가스가 저감되었다.

3) 알루미늄의 경우 2.34E+02 person-yr/f.u. 및 3.01E+02 person-yr/f.u.로 나타났으며, 2차자원 사용 시 28.4%의 환경영향이 낮게 나타났다. 영향범주 중 가장 높게 환경영향을 미치는 항목은 2차자원 사용 및 미사용 시 모두 자원 고갈로 나타났다. 그 중 주요 영향물질은 Bauxite, Natural gas 및 Coal 등으로 나타났으며, 이는 알루미늄광 사용에 의한 것으로 사료된다.

4) 알루미늄의 경우 자원순환율이 증가(30%, 50%, 70%)함에 따라, 2차자원 미사용 시를 기준으로 각각 6.1% (29,725 ton CO<sub>2</sub>), 27.7% (134,161 ton CO<sub>2</sub>) 및 52.0% (251,266 ton CO<sub>2</sub>)의 온실가스가 증가되었다. 반면, 전지구적범위에서는 각각 15.5% (684,863 ton CO<sub>2</sub>), 35.5% (1,570,428 ton CO<sub>2</sub>) 및 63.4% (2,804,863 ton CO<sub>2</sub>)의 온실가스가 저감되었다.

## 사사

본 논문은 산업통상자원부의 지원에 의해 연구되었으며, 일부는 인하대학교의 지원을 받았습니다.

KSEE

## Reference

1. London Metal Exchange, <http://www.lem.co.uk>.

2. Phipps, G., Mikolajczak, C. and Guckes, T., "Indium and gallium supply sustainability," 22nd EU PV Solar Conference, Milan Italy 4 Sep(2007).
3. The Ministry of Environment, Development of the SEEA (System of Integrated Environment and Economic Account) and the preparation of green GDP(III)(2005).
4. ISO/DIS 14041, 14042, 14043, Environmental Management-Life Cycle Assessment(1996).
5. Kim, J., Hwang, Y. and Park, K., "Methodology of recycling potential evaluation on end of life home appliance materials integrated by environmental and economical efficiency," *Kor. Soc. Waste Manage.*, **19**(8), 970~979(2002).
6. The Ministry of Knowledge and Economy, "Establishment of company-supporting infrastructure for chemical analyses of metal resource recycling & its evaluation of green house gas reduction,"(2010).
7. The Ministry of Knowledge and Economy, "The supply and demand of mineral commodity in 2011,"(2012).
8. Korea Ocean Research Development Institute, <http://www.kiost.ac>.
9. Korea Environment Industry Technology Institute, <http://www.edp.or.kr>.