

## 都市鑛山(使用後製品) 再資源化의 必要性和 背景†

† 吳在賢 · 金俊秀\* · 文碩敏\*\* · 閔芝源\*\*\*

延世大學校 名譽教授, \*韓國地質資源研究院, \*\*ACN, \*\*\*韓國資源리사이클링學會

## Necessity and Background of the Metal Recycling from Urban Mine Resources†

† Jae-Hyun Oh, Joon-Soo Kim\*, Suk-Min Moon\*\* and Ji-Won Min\*\*\*

*Professor Emeritus of Yonsei University,*

*\*Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, \*\*ACN,*

*\*\*\*The Korean Institute of Resources Recycling*

### 요 약

도시광산(사용후제품) 재자원화의 필요성과 배경을 설명하기 위하여, 자원고갈, 금속자원의 소비, 환경오염 그리고 금속재자원화 산업 등을 논하였다. 지속가능한 사회를 개발하기 위해서는 폐기물처리와 리사이클링이 가장 중요한 과제이고, 특히 도시광산을 재자원화하는 것이 자원고갈을 지연시키고, 환경오염을 감소시키는 첨경임을 잘 알고 있다. 그러기 위해서는 도시광산자원의 재자원화 제도의 구축과 고도의 재자원화 기술개발이 시급한 과제라고 할 수 있다.

**주제어** : 도시광산, 자원소비, 금속자원 리사이클링, 리사이클링기술, 리사이클링제도

### Abstract

To investigate the necessity and background of the metal recycling from urban mine resources, 4 bigger problems such as the limitation of the underground resources, consumption of the metal resources, contamination of environment and metal recycling business were reviewed. Waste management and recycling are the foremost issues facing Korea on its path to sustainable development in the 21st century. Especially, metal recycling from urban mines is the most urgent fact for global environment and resources conservation. In order to build a recycling-oriented society, it is necessary to develop the recycling technology, recycling practices and a recycling-oriented economic system.

**Key words** : Urban mine, Resources consumption, Metal recycling, Recycling technology, Recycling-oriented economic system

### 1. 머리말

오늘날 가장 시급한 과제는, 과거와는 비교할 수 없는 속도와 다양성으로 진행되는 사회에 통용되는 자원 공급시스템의 구축이다. 한편 그것 때문에 야기되는 자원고갈과 환경오염은 지구의 파국을 초래할 것이라는 우려를 낳고 있다. 그래서 우리는 과거 20년 동안에, 이 난국에서 탈피하기 위하여 리사이클링사회→자원순

환형사회→지속발전가능사회→저탄소·녹색성장사회 등의 실현으로 말을 바꾸어 대체해 왔다. 이러한 여러 가지 말들의 표현은 달라도 그 실현의 수단과 방법은 리사이클링<sup>a)</sup> 사회로 귀결된다.

사용후제품 즉, 도시광산<sup>b)</sup>을 재자원화(리사이클링)하는 것이 자원고갈을 지연시키고, 환경오염을 감소시키는 첨경임을 잘 알고 있다. 이러한 관점에서 본 총설에

† 2010년 9월 6일 접수, 2010년 9월 29일 1차수정

2010년 10월 8일 수리

\* E-mail: kirr@kirr.or.kr

<sup>a)</sup> 3R 즉 reduce, reuse, recycle를 합친 대의의 리사이클링

<sup>b)</sup> 사용 후 제품 내에 함유되어 있는 금속, 즉 사용 후 제품 또는 폐기물을 도시광산이라고 한다. 자세한 내용은 참고문헌 1. 참조.

서는 자원고갈문제, 금속소비량, 환경오염 그리고 금속 재자원화산업 등을 구체적으로 언급하여, 도시광산 재자원화의 필요성과 배경을 설명하고자 한다.

## 2. 지하자원의 고갈

Table 1은 D.H.Meadows 등<sup>2)</sup>이 작성한 중요한 광물·연료자원의 내용년수(耐用年數)를 계산한 자원표이다. 각 자원의 제3열의 수치는 정태적(靜態的) 내용년수 지표(Static Reserve Index)로 현재 알려진 자원 존재량(제2열)이, 현재의 연간 사용량이 계속될 때 어느 정도 유지될 수 있는가의 년수를 나타내고 있다. 이 지표는 장래의 자원가능성을 추정하는데 많이 이용

되는 것이다.

Table 1의 제4열은 모든 천연자원사용량이 기하급수적으로 성장함을 나타내고 있다. 현재의 자원소비성장률이 계속되는 것으로 가정할 때 각 자원이 몇 년 유지될 수 있는가를 나타내는 기하급수적 내용년수 지표(Exponential Reserve Index)가 제5열이다. 각 자원의 매장량이 새로운 발견으로 5배로 확대하는 것으로 가정할 때 같은 계산을 하여 얻은 내용년수 지표가 제6열이다. 위와 같은 가정 하에서 계산한 결과는 크롬, 코발트, 석탄 및 철을 제외한 대부분의 지하자원은 100년 이내에 고갈<sup>3)</sup>하게 됨을 나타내고 있다.

Table 2는 D.H.Meadows 등<sup>3)</sup>이 Table 1을 발표한 30년 후에 발표한 8개 금속의 확인된 매장수명이다.

Table 1. The limitation of the underground reserves made by D.H.Meadows etc. (\*)

1. 자원	2. 현재 매장량(a)	3. 정태적 사용년수 지표(b)(년)	4. 예상성장률(년평균)(c)			5. 기하급수적 내용년수 지표(d)(년)	6. 현존매장량을 5배로 했을 경우, 기하급수적 내용년수 지표(e)(년)
			고	평균	저		
알루미늄(Al)	1.17×10 <sup>9</sup> 톤	100	7.7	6.4	5.1	31	55
크롬(Cr)	7.75×10 <sup>8</sup> 톤	420	3.3	2.6	2.0	95	154
석탄	5×10 <sup>12</sup> 톤	2300	5.3	4.1	3.0	111	150
코발트(Co)	4.8×10 <sup>9</sup> 파운드	110	2.0	1.5	1.0	60	148
구리(Cu)	308×10 <sup>6</sup> 톤	36	5.8	4.6	3.4	21	48
금(Au)	353×10 <sup>6</sup> 토로이·온스	11	4.8	4.1	3.4	9	29
철(Fe)	1×10 <sup>11</sup> 톤	240	2.3	1.8	1.3	93	173
납(Pb)	91×10 <sup>6</sup> 톤	26	2.4	2.0	1.7	21	64
망간(Mn)	8×10 <sup>8</sup> 톤	97	3.5	2.9	2.4	46	94
수은(Hg)	3.34×10 <sup>6</sup> 프라스크	13	3.1	2.6	2.2	13	41
몰리브덴(Mo)	10.8×10 <sup>9</sup> 파운드	79	5.0	4.5	1.0	34	65
천연가스	1.14×10 <sup>15</sup> 입방피트	38	5.5	4.7	3.9	22	49
니켈(Ni)	147×10 <sup>9</sup> 파운드	150	4.0	3.4	2.8	53	96
석유	455×10 <sup>9</sup> 배럴	31	4.9	3.9	2.9	20	50
백금족(Pt족)	429×10 <sup>6</sup> 토로이·온스	130	4.5	3.8	3.1	47	85
은(Ag)	5.5×10 <sup>9</sup> 온스	16	4.0	2.7	1.5	13	42
주석(Sn)	4.3×10 <sup>9</sup> 英톤	17	2.3	1.1	0	15	61
텅스텐(W)	2.9×10 <sup>9</sup> 파운드	40	2.9	2.5	2.1	28	72
아연(Zn)	123×10 <sup>6</sup> 톤	23	3.3	2.9	2.5	18	50

(\*) 필자에 의해서 7, 8, 9, 10은 생략했으며, 자료출처의 계재도 생략했음.

3) 준경제적자원 혹은 경제한계하자원(經濟限界下資源)은 무진장이지만, 처리비용이 대단히 높아질 것이다.

Table 2. Life expectancies of identified reserves for eight metals

	년간 생산량 (1997-1999년 평균)	년간 생산량의 신장 (1975-1999년 평균)	1999년 확인된 매장량	매년 생산량이 2% 증가한 경우 확인된 매장의 수명	자원기반	생산량이 년2% 증가했을 때의 자원기반의 수명
금속	100만톤/년	율(년)	10억톤	년	1조톤	년
알루미늄	124	2.9	25	81	2,000,000	1,070
구리	12	3.4	0.34	22	1,500	740
철	560	0.5	74,000	65	1,400,000	890
납	3.1	-0.5	0.064	17	290	610
니켈	1.1	1.6	0.046	30	201	530
은	0.016	3.0	0.00028	15	1.8	730
주석	0.21	-0.5	0.008	28	40.8	760
아연	0.8	1.9	0.19	20	2,200	780

\* 이 Table은 확인된 매장량과 자원기반의 큰 차이를 나타내고 있다. 확인된 매장이란, 현재 알려져 있고, 현재 사용할 수 있는 기술과 현재의 가격으로 채굴할 수 있다고 생각되는 것이다. 한편, 자원기반은 지구의 지각 내에 존재하고 있다고 생각되는 자원의 총량이다. 인류는 이 자원기반을 모두 채취할 수는 없지만, 가격 및 기술혁신, 새로운 매장의 발견에 의하여, 확인된 매장량은 증가할 것이다.

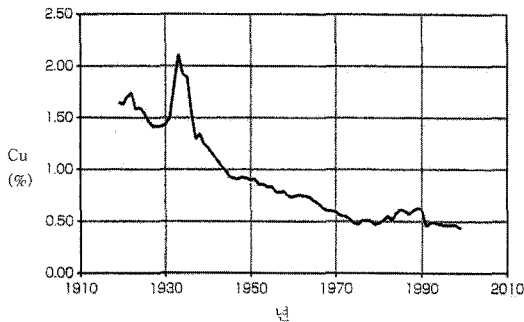


Fig. 1. The declining quality of copper ore mined in the United States.

생산량이 년 2% 증가할 때 현재의 매장량으로 생산을 유지할 수 있는 기간은, 15년부터 81년까지의 폭이 있다. 물론 기술은 진보할 것이고 금속가격은 상승할 것이다. 한편, 생산자는 새로운 지역을 탐사해서 새로운 채굴 가능한 매장을 발견하게 될 것이다. 따라서 지각의 방대한 추정치를 고려할 때 500~1,000년 이라는 생산 년 수의 계산치가 나온다. 그러나 실제 어느 정도 사용가능할 것인가는 별개문제이다.

Fig. 1<sup>4)</sup>은 미국에서 채굴된 동광석의 품위저하를 나타낸 것이고, Fig. 2<sup>4)</sup>는 광석의 고갈과 그 생산에 수반해서 산출되는 광재(광미)량을 나타낸 것이다. 원석 중에 함유된 이용 가능한 금속의 비율이 감소함에 따라, 채굴, 파쇄, 처리해야 할 광석량이 놀라울 만큼 증가한

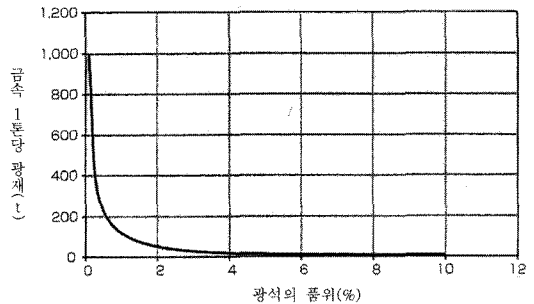


Fig. 2. Depletion of mineral ores greatly increases the mining wastes generated in their production.

다. 이러한 인과관계가 인간의 광물사용을 제한시키는 역할을 담당할 것이다. 이와 같이 생산자는, 조업의 사회적비용과 환경비용에 대처해야 하기 때문에, 「자원기반」부터 「매장량」으로 이첩되는 량은 어느 한계에서 제한되기 마련이다.

Table 3은 Nishiyama Takashi(西山孝)<sup>5)</sup>에 의하여 작성된 대표적 금속 35종의 생산량, 매장량, 내용 년 수 및 가격표이다. 이 표는 최신(2007년도) 자료를 인용해서 작성한 것이다. Table 1 및 Table 2와 비교해서 내용 년 수가 비슷한 것도 있고, 차이가 많은 것도 있다. 다만, 인프라스트럭처 구축과 관련이 강한 베이스메탈, 즉 구리, 납 및 아연의 내용 년 수는 50년 이내이고, 철도 75년으로 되어 있다.

Table 3. Production, reserves, durable years and prices of the 35 metals.

금속	단위	생산량(P)	매장량(R)	내용년수(R/P)	가격(U.S.\$/)	비고
보오크사이트	1,000t	202,000	27,000,000	134	0.031	
알루미늄(Al)	1,000t	38,000	-	-	2.8	금속
안티모니(Sb)	1t	170,000	2,100,000	12	5.7	
비소(As)	1t	55,900	-	-	1.8	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
베륨(Be)	1t	180	-	-	317	
비스무스(Bi)	1t	56,300	320,000	51	31	
붕소(B)	1,000t	3,850	170,000	44	0.65	붕사
카드뮴(Cd)	1t	20,400	490,000	24	7.6	
크롬(Cr)	1,000t	21,500	-	-	0.16	크롬철광
코발트(Co)	1t	65,600	7,100,000	108	67	
구리(Cu)	1,000t	15,400	550,000	36	7.1	
칼륨(K)	1t	230	1,000,000	4,348	530	
게르마늄(Ge)	1t	95	-	-	1240	
금(Au)	1t	2,380	47,000	20	22500	
인듐(In)	1t	563	-	-	795	정련량
철(Fe)	1,000t	2,000,000	150,000,000	75	0.06	철광석산출량
철(Fe)	1,000t	1,340,000	-	-	-	조강생산량
납(Pb)	1,000t	3,770	79,000	21	2.6	
리튬(Li)	1t	25,800	4,100,000	159	-	
망간(Mn)	1,000t	12,600	500,000	40	0.003	
수은(Hg)	1t	1,170	46,000	39	-	
몰리브덴(Mo)	1t	205,000	8,600,000	42	67	
니켈(Ni)	1t	1,660,000	70,000,000	42	37	
니오븀(Nb)	1t	60,400	-	-	22	
백금족	1t		71,000	-	-	
백금(Pt)	1	213,300	-	-	42100	
팔라듐(Pd)	1	219,000	-	-	11500	
희토류	1t	124,00	87,000,000	702	5.5	산화물생산량
레늄(Re)	1	51,000	2,500,000	49	1620	
셀레늄(Se)	1t	1,560	100,000	64	73	
실리콘(Si)	1,000t	5,600	-	-	2.49	
은(Ag)	1t	20,800	270,000	13	430	
스트론튬(Sr)	1t	511,000	6,800,000	13	0.067	
탄탈륨(Ta)	1t	815	131,000	161	79	
토륨(Th)	1t	-	1,200,000	-	4600	ThO <sub>2</sub>
주석(Sn)	1t	320,000	5,600,000	18	15	

Table 3. Continued

금속	단위	생산량(P)	매장량(R)	내용년수(R/P)	가격(U.S.\$)	비고
티타늄(Ti)	1,000t	6,290	730,000	116	0.11	티타늄철광 · 금홍석
텅스텐(W)	1t	54,500	3,000,000	55	17	가격은 WO <sub>3</sub> 기준
바나듐(V)	1t	58,500	13,000,000	222	16	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
아연(Zn)	1,000t	10,900	180,000	17	3.2	
지르코늄(Zr)	1,000t	1,430	51,000	36	0.76	
하프늄(Hf)	1,000t	-	610	-	250	HfO <sub>2</sub>
원유	1,000toe	3,897,600	159,644,000	41	0.53	생산량 · 매장량은 2005년
천연가스	1,000toe	3,034,886	151,253,143	50	0.28	생산량 · 매장량은 2005년
석탄	1,000t	5,901,485	847,488,000	144	0.087	생산량 · 매장량은 2005년
우라늄(U)	1t	41,699	3,296,700	79	195	생산량 · 매장량은 2005년

출전 : USGS, "Mineral Commodity Summaries", WEC, "2007 Survey of Energy Resources", BP, "Historical data". 생산량·매장량·가격은 2007년의 자료인용(단, 원유 · 천연가스 · 석탄 · 우라늄의 의 생산량 · 매장량은 2005년의 자료인용)

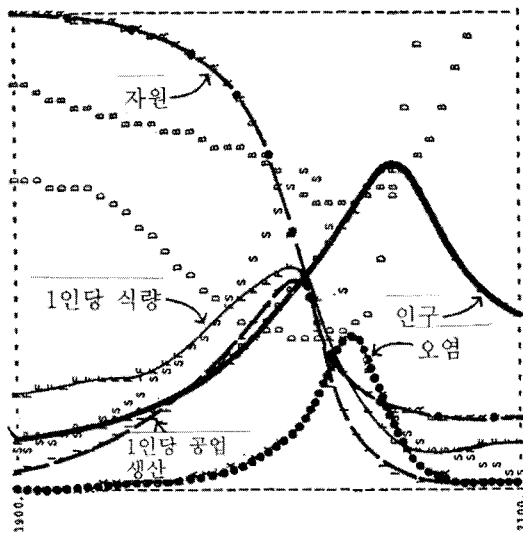


Fig. 3. The world model of the future predicted by D.H. Meadows etc.

Fig. 3은 D.H.Meadows등<sup>6)</sup>이 미래를 예측한 세계모델의 표준 계산 그림이다. 이 계산에 있어서 세계시스템의 발전을 지배해온 물리적, 경제적, 사회적 관계에 큰 변화가 없는 것으로 가정하고 있다. 여기에 인용된 모든 변수는 1900년부터 1970년까지는 실제의 수치이다. 식량, 공업생산 및 인구는 기하급수적으로 성장하고, 결국은 급속히 감소하는 자원이 공업성장을 저하시키게 된다. 시스템에 내재하는 시간지연(time lag) 때문에, 인구와 오염은 공업화의 정점에 달한 후, 당분간 증가가

계속된다. 인구의 증가는, 식량과 의료서비스의 감소에 의한 사망률의 상승에 의해서, 최종적으로 멈추게 된다. Fig. 3의 계산에서는 멀지 않은 미래에 지구의 파괴이 초래되고, 그것은 재생 불가능한 천연자원의 고갈에 의해서 발생함을 시사하고 있다.

### 3. 금속자원의 소비동향

Fig. 4<sup>7)</sup>는 세계의 금속(하이테크 산업에 사용되는 대표적인 레어메탈과 베이스메탈) 생산량의 추이를 나타낸 것이다. 가장 높은 증가율을 나타낸 것은 인듐(In)으로, 1983년 소비량의 25배가 되고 있다.

In 이외에도 Ta, Nb, Sb, REE, Mo, Pt 등의 증가도 현저하여, 2배 이상이 되고 있다. 이것은 전자·통신부문 및 자동차 부문을 비롯하여 하이테크산업의 발전, 즉 고부가가치화에 성공한 신제품의 개발과 보급에 기인하기 때문이다. 한편 베이스메탈의 움직임은, 레어메탈의 움직임에 비해서 상대적으로 그 폭이 좁다. 1950~1972년에는 증가를 나타내고, 그 후 정체상태가 얼마동안 지속되다가 1990년경부터 납을 제외하고는 다시 증가하기 시작하였다. Fig. 5<sup>8)</sup>는 세계 금속가격의 추이를 나타낸 것이다.

급격한 수요증가는 일시적인 가격의 상승을 유발한다. 탄탈륨(Ta), 몰리브덴(Mo) 및 인듐(In)의 가격추이를 보면, 일시적으로 8배(1983 = 1)를 넘어서고 있다. 이와 같이 개개의 금속 소비와 가격의 움직임은 통일성이 없고, 개별적인 양상을 나타내고 있다. 그러나 금속의 소비량도 가격도 전체적으로 상승하는 추이를 나타내고

있다. 전술한 Table 3에서 대표적 금속 35종의 생산량, 매장량, 내용 년 수 및 가격을 표시하였다. 기초차재(인프라스트럭처)에 사용되는 금속은 주로 생산량이 많은 금속이 차지하고, 첨단과학기술에서 활용되는 금속의 소비량은 극히 소량으로 양자의 차는 매우 크다. 가장 생산량이 많은 것은 철(조강)로 13.6억톤이고, 1,000만톤

대로 알루미늄과 구리가 차지하고 있다. 그리고 가장 낮은 것이 레늄(Re)으로 51톤에 불과하다. 내용 년 수에 있어서는, At, Au, Pb, Zn, Cu는 25년 이하로 짧고, Sb, Sn, As, Mg, Cd, B, Mo, Ta, Zr, Ni는 25-50년, 타 자원은 50년 보다 길다.

경제발전이 현저한 개발도상국의 베이스메탈과 에너지자원의 수요예측은 중요한 과제이다. 역사, 민족, 종교 등 사회 환경이 달라도, 개발도상국이 근대화를 추진하면, GNP의 상승과 더불어, 금속 및 에너지의 소비량이 급격히 증가한다.

Fig 6<sup>9)</sup>은 1983년을 기준으로 한 한국, 중국, 인도의 주요 금속 소비량과 GDP의 성장을 나타낸 것이다. 한국은 신흥공업국의 대표로 눈부신 발전을 하고 있다. 급성장이 시작한 것은 1980년대 후반부터이고 베이스메탈의 증가율은, GDP의 성장률과 에너지의 증가율을 초월하고 있다. 최근에는 팽창시대가 끝나고 정체경향으로 바뀌고 있다.

중국은 오늘날 가장 높은 경제성장을 이어가고 있는 나라이다. 1995년 이후의 Al, Cu, Pb, Zn의 소비량 증가는 급격한 양상을 띠고 있다. 인도와 중국은 모두 많은 인구를 가지고, 세계의 정치, 경제에 지대한 영향을 미치고 있다. 양국은 경쟁하다 시피 근대화를 추진하여 비교되지만, 인도의 베이스메탈 소비, 에너지소비, GDP의 성장은 중국보다 느리고 또 완만하다. 그러나 2000년경부터 GDP, 금속, 에너지의 급격한 증가의 징후가 보인다.

Fig. 7<sup>10)</sup>은 1인당 구리소비량의 추이를 미국, 일본,

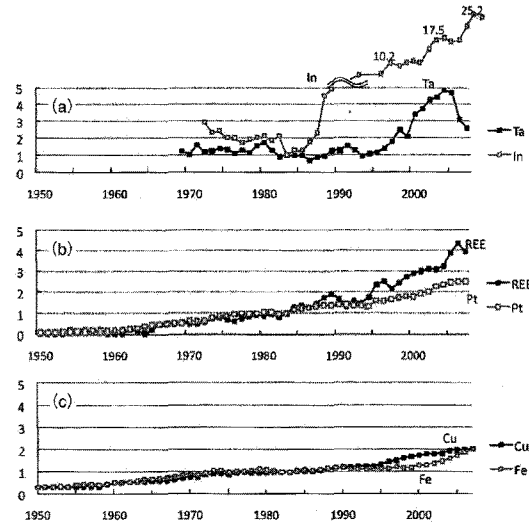


Fig. 4. Trends of the metal production in the world.

\* 소비량은 자원중에 의해서 크게 다르므로 Fig 4에서는, 1983년의 소비량을 1로 하여 상대량을 비교하였다. 소비량에 관해서는 직접 산출한 통계가 적기 때문에 1차생산량 + 수입량 - 수출량(소재고량)을 근사적 소비량으로 하였다.

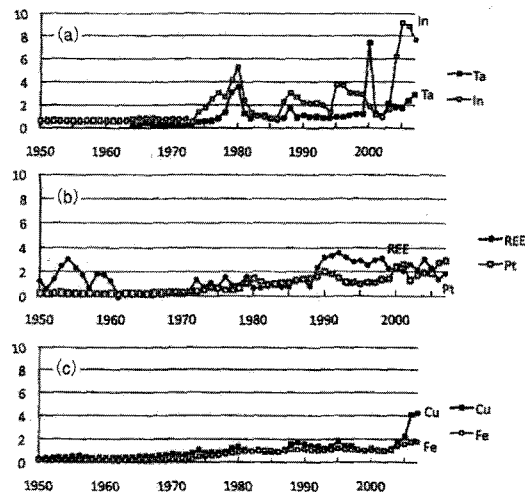


Fig. 5. Trends of the metal prices in the world.

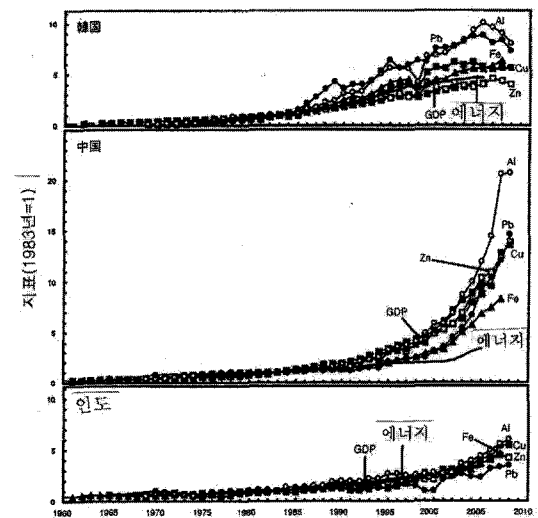


Fig. 6. Metal consumption and G.D.P. growth in Korea, China and India(1983=1).

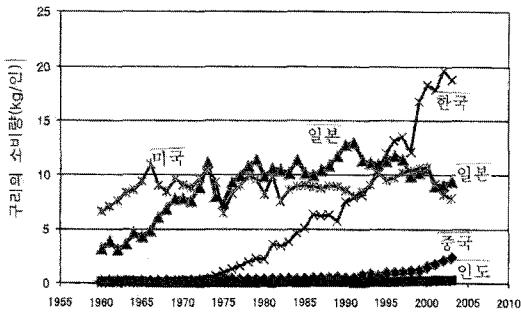


Fig. 7. Copper consumption per person in Japan, U.S.A., Korea, China and India.

한국, 중국, 인도에 대해서 나타낸 것이다. 중국은 1인당 3kg으로 일본과 미국의 약 1/3, 한국의 1/7에 불과하다. 만일에 중국의 1인당 소비량이 일본의 소비량과 같게 된다고 계산하면, 중국의 구리 소비량은, 현재의 세계 구리 소비량의 79%에 상당하다.

급격한 경제성장의 원동력이 되는 베이스메탈 및 에너지자원의 수요증대는 일본에서부터 시작하여 아시아 전체로 확대되고, 주역을 바꾸면서 당분간 지속되는 것으로 판단된다. 이 움직임은 중국만의 문제를 넘어서 세계 국가들과 더불어 새로운 곤란한 국면에 부딪히고 있다.

철이나 알루미늄 같은 이 위기를 이겨낼 수 있을지 알 수 없지만, 정태적 내용 년 수가 20여년인 구리와 아연에 있어서는 매우 어려운 상황에 직면하고 있다. 현재의 자원기술로 개발 가능한 자원량에 한정한다면, 자원고갈이라는 위기에 직면하게 될 것이다.

#### 4. 환경오염

지구로부터 채굴된 그 많은 금속 및 연료는, 그것이 사용되고 폐기된 후, 도대체 어떻게 될 것인가. 어떤 의미에서는 그들은 결코 없어지지 않는다. 그들의 구성 원자는 재배열되고, 결국 희석되어서, 사용 불가능 한 형태로 우리를 지구의 공기, 흙, 물속으로 흩어지게 된다.

자연의 생태학적시스템은 인간 활동 배출물의 많은 것을 흡수하여 타 생명체에 유용한, 적어도 유해하지 않은 물질로 재처리할 수가 있다. 그러나 어떠한 배출물이라도 너무 대규모로 배출되면, 자연의 흡수작용은 포화되고 만다. 인간문명의 폐기물은 자연 중에 축적되어 결국은 눈에 거슬리고, 장애가 되고, 유해한 것으로 된다. 바다생선의 체내에 숨어있는 수은, 도시의 공기 중에 함유된 납 분자, 도시쓰레기의 산, 해변의 유탁(油濁) 등 이

것들은 사람의 손을 거쳐 간 자원의 소비 결과이다.

이와 같은 관점에서 볼 때, 세계 시스템에 있어서 기하급수적으로 증가하고 있는 또 하나의 요인이 환경오염이라는 것을 쉽게 알 수 있다. 전술한 Fig. 3에서는 지구 파국은 재생 불가능 한 천연자원의 고갈에 의해서 발생함을 시사하였다. Fig. 8<sup>11)</sup>은 천연자원이 「무제한」인 경우의 세계모델이다. 이 모델에 있어서 자원고갈의 문제는 다음의 두 가정에 의해서 제거되었다. 제1은, 핵에너지에 의하여 개발 가능한 자원이 2배가 되고, 제2는 핵에너지에 의하여 광범위한 자원의 재순환과 대체가 가능하게 된다. 이들의 변화만을 시스템에 가산할 때, 오염의 증대에 의하여 성장이 정지된다. 이 경우 성장을 정지시키는 제일의 힘은 오염의 급격한 증가로 인한 문제이고 그 원인은 환경의 자연정화 능력에 과도한 부담을 주기 때문이다. 사망률은 오염과 식량부족으로 인하여 급격히 증가한다.

이와 같이 「무제한」의 자원은, 세계시스템의 성장을 뒷받침하는 열쇠가 될 수 없다. 이상에서 명백한 것은, 만일 세계시스템의 파멸을 피하게 하려면 자원을 이용한 경제적인 활동에서 오염문제를 줄이도록 해야 한다. Fig. 9는 Tetsuya Shoji(正路徹也)<sup>12)</sup>씨에 의해서 재자원화 과정을 도입한 광물자원의 흐름도이다.

광물자원 흐름을 나타내는 실선은 순환(최종폐기물 제외)하고 있으나, 에너지의 흐름을 나타내는 파선(波線)은 「에너지 자원」 부터 「열적 폐기물」로 일방통행임을 보여준다. 즉, 광물자원은 에너지자원을 사용함으로써

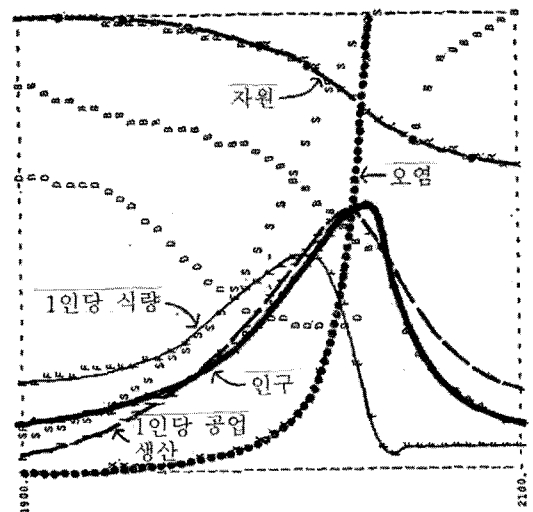


Fig. 8. The world model of the future predicted by D.H. Meadows etc. in case of limitless natural resources.

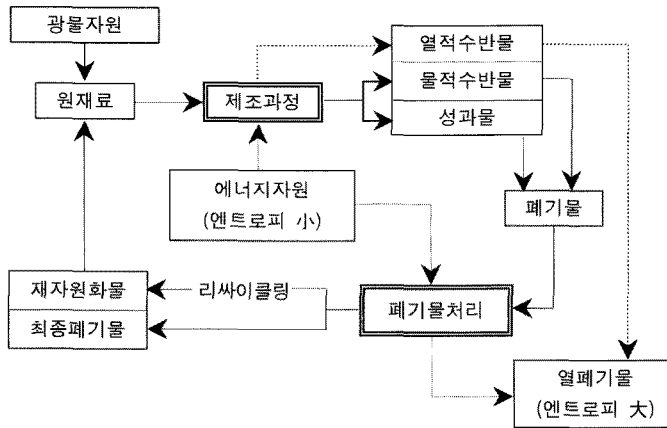


Fig. 9. Mineral resources flow by applying recycling process.

서 순환할 수 있으나, 에너지자원은 순환할 수 없다. 이 순환할 수 없는 에너지자원은 당분간, 석탄, 석유, 천연가스 등의 화석연료에 의지해야 한다. 그리고 이 화석연료의 소비에 의해서, 온실효과 가스인 이산화탄소가 발생한다.

자원의 절약과 환경보전을 목적으로 광물자원의 리사이클링이 추진되고 있다. 자원재순환은, 틀림없이 고품 폐기물과 특정 독성금속에 의한 오염을 감소시킨다. 그러나 엄격한 오염방지는 모든 오염의 방지를 의미하는 것은 아니다. 모든 오염을 제거한다는 것은 기술적, 경제적 제약 때문에 불가능한 것이다. 오염방지의 비용은 배출기준이 엄격하게 될수록 급속하게 상승한다. 만일 현재 사용하고 있는 광물자원의 거의 전량이 순환된다면, 광물자원의 개발량은 소비량의 증가 분 만으로 충분하다. 그러나 광물자원이 충분히 순환되어도 순환을 위한 에너지자원이 필요하다. 그리고 이 에너지자원의 소비에 의해서 환경오염이 발생한다.

5. 재자원화산업

천연자원의 고갈, 공해에 의한 환경오염의 진행, 발전도상국에 있어서의 폭발적인 인구의 증가, 공업생산, 식량부족 등에 의한 인류위기의 접근에 대해서, Meadows<sup>13)</sup> 등은 그 기술적인 해결책으로 다음 사항을 제언하고 있다.

- 1) 폐기물의 회수, 오염의 방제(防除)를 위한 새 방법
- 2) 자원의 고갈 속도를 감소시키는 재순환기술
- 3) 자본의 잠식률을 최소로 하기 위하여, 제품의 수명을 늘이고, 수리를 용이하게 할 수 있는 우수한 설계
- 4) 가장 오염이 적은 에너지원인 태양에너지의 이용

- 5) 생태학적 상호관계를 보다 완전하게 이해한 후, 해충을 자연적인 방법으로 구제하는 방법
- 6) 사망률을 감소시킬 수 있는 의료의 진보
- 7) 감소하는 사망률에 출생률을 동등하게 할 수 있는 피임법의 진보

이상의 7항 중에서 4항까지는 우리의 전문분야에서 접근할 수 있는 사항들이다. 다행이 금속자원은 재생가능자원이다.

Fig. 10<sup>14)</sup>은 금속 지하자원과 지상자원의 관계를 도시한 것이다. 지하자원이 감소되면 천연원료(Virgin raw material)는 고갈하지만, 실은 지상으로 이동했을 뿐이다. 지구상의 금속량은 일정하며, 존재 장소가 다를 뿐이다. 지상 금속자원은 재생 가능한 자원이기 때문에 「도시광산」으로 자리매김 할 수 있다.

지상자원으로부터 즉, 사용 후 제품 혹은 폐기물을 재자원화 한 금속자원을 사용해서 다시 제품을 만든다

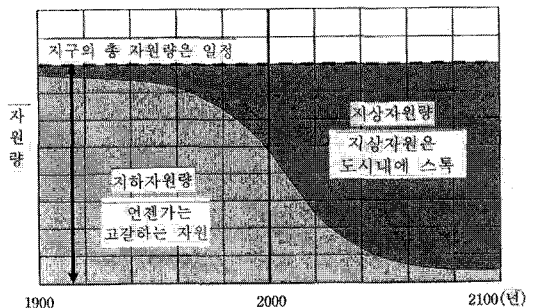


Fig. 10. The relationship of underground resources between overground resources.



는 것은 현실로 되었다. 아니, 오랜 역사를 가지고 있다.

재 자원화(리사이클링)에 의하여 원료를 지하자원에 의존하지 않고 사용 후 제품(도시광산)부터 조달한다면 지하자원을 사용하지 않아도 된다. 지하자원을 사용하지 않은 이점은 지하자원의 절약뿐 아니라 화석에너지 자원의 절약, 환경오염의 감소로 이어진다.

사용 후 제품·물질을 선별해서 리사이클링한다는 것은 지속가능사회로의 제일보이다. 세계는 이미 리사이클링산업(도시광산 재자원화산업)을 전개하여, 자원으로갈에 대응하고 있을 뿐 아니라 산업으로서 육성하고 있다.

물질의 이용은 재사용이라는 사고를 수반하기 때문에 자원재활용은 인류탄생과 더불어 시작되었다고 생각된다. 당연한 일이지만, 자본주의경제에 있어서는 리사이클링 기업도 이윤을 추구하는 것이 원칙이다. 리사이클링은 자연계에 매장되어 있는 자원과 경합관계에 있다. 따라서 리사이클링에서 얻은 금속가격은 금속의 국제가격보다 낮지 않으면 리사이클링을 추진할 수 없다. 도시광산의 자원 종류는 다양하다. 그 중에는 용이하게 회수할 수 있어 염가인 것도 있지만, 회수·처리가 곤란해

서 비용이 증가하여 리사이클링이 비현실적인 것도 있다.

리사이클링을 촉진시키는 요소를 정리하면 다음 4항으로 집약할 수 있다. 첫째는 금속의 시장가격을 바탕으로 한 리사이클링으로, 자연계로부터 생산되는 코스트보다 리사이클링에 의해서 재생하는 쪽이 염가인 도시광산의 경우이다. 두 번째는 카드뮴 및 수은과 같은 미량이지만 맹독성 금속은 높은 비용이라도 리사이클링을 하든지, 안전한 형태로 처리해야 한다. 이 경우에는, 생산자 혹은 소비자가 그 처리차액을 부담할 필요가 있다. 셋째는 알루미늄 및 철과 같은 경우로 경제적인 고효율의 리사이클링 시스템이 확립되어, 다량의 스크랩이 시장의 금속가격과 경합하면서 공급되고 있다. 네 번째는 자원고갈에 대한 기여이다. 리사이클링은 자원량을 증가시켜 고갈을 지연시키기 때문에 내용년수가 짧은 자원에 있어서는 매우 중요한 문제이다. 그러나 현실적인 리사이클링은 코스트(처리비용)가 우선되고, 자원의 고갈이 직접 리사이클링에 연결되는 사례는 드물다.

다음은 재자원화산업의 참고로 일본에서 조사한 희유

Table 4. The prices of rare metals in Japan(2007)

원소	지각내의 존재량(ppm)	가격(엔)	주 용도
리튬(Li)	20	580엔 (산화 Li 1 kg)	Li 전지양극재
베륨(Be)	3	4500엔/kg (2006)	X선검출기창
붕소(B)	10	55만엔/kg	글라스, 호우로우, 방충제
희토류	-	-	-
티타늄(Ti)	4400	1300엔/(஼로 Ti 1 kg)	합금, 안료, 광촉매
바나듐(V)	140	4300엔/(஼로 V 1 kg)	철동, 초전도체, 촉매
크롬(Cr)	100	280엔/(஼로 Cr 1 kg)	스테인레스, 합금
망간(Mn)	950	190엔/(஼로 Mn 1 kg)	철동, 합금, 전지, 자성체
코발트(Co)	26	6600엔/kg	초경공구, 특수강, 촉매
니켈(Ni)	76	3200엔/kg	스테인레스, 촉매, 전지
갈륨(Ga)	10	14만엔/kg (2006)	LED, 반도체소자
게르마늄(Ge)	1	87000엔/(이산화 Ge 1 kg)	형광체, 반도체소자, 촉매
세륨(Se)	0.04	8800엔/kg	복사기감광체, 태양전지
루비듐(Rb)	93	240만엔/kg	글라스, 촉매
스트론튬(Sr)	370	7400엔/(탄산 Sr 1 kg)	브라운관유리, 자성체
지르코늄(Zr)	167	90엔/(Zr 광 1 kg)	내화재, 원자력연료피복관
니오븀(Nb)	20	8000엔/(고순도단체 1 kg)	철동, 초전도체, 내식재
몰리브덴(Mo)	1.4	8087엔/(Mo 광 1 kg)	특수강, 합금, 촉매
파라듐(Pd)	0.01	140만엔/kg	배가스촉매, 전자부품
인듐(In)	0.1	77000엔/kg	형광체, 투명전극

Table 4. Continued

원소	지각내의 존재량(ppm)	가격(예)	주 용도
안티모니(Sb)	0.2	650엔/kg	합금, 특수강, 난연제
텔루륨(Te)	0.01	15000엔/kg	복사기감광체, DVD/CD
세슘(Cs)	3	500만엔/(고순도단체 1 kg)	축매, 광섬유
바륨(Ba)	429	200엔/kg	X선조영제, 브라운
하프늄(Hf)	4	260만엔/(고순도단체 1 kg)	원자로제어봉, 유리
탄탈륨(Ta)	2	17000엔/kg(2006)	콘덴서, 초경공구
텅스텐(W)	1	1890엔/(삼산화 W 1 kg)	초경공구, 특수합금, 축매
레늄(Re)	0.01	100만엔/kg	초내열합금, 석유정제축매
백금(Pt)	0.01	550만엔/kg	배가스축매, 전자부품
탈륨(Tl)	0.4	15만엔/(고순도단체 1 kg)	취약, 저용점유리
비스무스(Bi)	0.2	3700엔/kg	자성체, 전자부품, 축매

Table 5. Example of metal content in the small size IT equipments

	질량 (g/대)	Au (g/t)	Ag (g/t)	Cu (%)	Pd (g/t)	Pb (%)	Bi (%)	Se (%)	Te (%)	Zn (%)	Cd (%)	Hg (%)	As (%)
휴대용MD 플레이어	100	230	1400	8.7	10	0.003	0.01	<0.001	<0.001	0.022	0.002		<0.001
휴대용CD 플레이어	170	130	1210	5.5	6	0.180	0.002	0.001	<0.001	0.003	0.002		0.010
카세트 플레이어	140	40	850	8.2	6	0.140	0.004	0.004	<0.001	0.008	>0.001		0.006
디지털 카메라	360	170	500	5.6	4	0.020	0.040	<0.001	<0.001	0.005	0.001		<0.001
디지털 비디오	930	100	630	6.9	30	0.190	0.013	0.001	<0.001	0.011	0.001	미량 검출	0.014
휴대음악 플레이어	50	500	2400	11.3	50	0.400	0.003	0.001	<0.001	0.011	0.002		0.023

Table 6. Economical value of the P.C.B.

	함유율	단가	가치
Au		300g/톤 × 2500엔/g = 75만엔/톤	
Pd		100g/톤 × 1400엔/g = 14만엔/톤	
Ag		2000g/톤 × 50엔/g = 10만엔/톤	
Cu		150kg/톤 × 900엔/kg = 13.5만엔/톤	
Pb		10kg/톤 × 180엔/kg = 0.2만엔/톤	

(DOWA에코시스템(주) 에 의함)

금속가격(Table 4)<sup>15)</sup>, 소형전자기기중의 비철금속 등 함유량 분석 예(Table 5)<sup>16)</sup>, PC기판의 경제적 가치(Table 6)<sup>17)</sup> 등을 예시하였다. 금속함유량, 금속가격은 항시 변

동하는 것이므로 이점 유의하기 바란다.

다음은 재자원화하고 있고, 또 앞으로 해야 될 도시 광산자원(철 이외)을 예시한 것이다.

- 폐가전제품으로부터 구리, 알루미늄 및 귀금속 회수
- 폐 전기·전자기기로부터 동 및 희유금속 회수
- 폐자동차로부터 동 및 알루미늄 회수
- 제강분진으로부터 아연 회수
- 석유화학 폐촉매 및 자동차 폐촉매로부터 희유금속 회수
- 자석 및 초경 폐기물로부터 희토류 금속 회수
- 폐축전기·건전지로부터 납, 니켈, 코발트 등 회수
- 도금슬러지로부터 구리, 니켈 등 회수
- 폐캔으로부터 알루미늄 회수

## 6. 맺는말

1972년 로마클럽<sup>4)</sup>은 그 연구보고서 「성장의 한계」에서, 금세기내에 지구의 파괴가 초래되고, 그것은 재생 불가능한 천연자원의 고갈과 환경오염에 의해서 발생함을 경고하였다. 이러한 경고를 수용하여 세계는 「환경과 개발에 관한 UN회의」 등을 개최하여 「지속가능한 사회」「저탄소·녹색성장 사회」라는 정책을 개발·추진하고 있다.

그 결과 선진국의 공장의 굴뚝 및 배수관으로부터 오염물질이 제거되고, 선진적인 기업에서는 높은 환경효율을 추구하여 성공을 거두고 있다. 한편 자원유효이용 촉진법등의 제도를 구축하고, 도시광산재자원화산업의 육성에 박차를 가하고 있다. 그럼에도 희유금속의 리사이클링은 매우 부진하다.

지금 근대화를 추진 중에 있는 개발도상국의 금속자원 소비량은 급성장하고 있다. 이들 국가들이 선진국의 자원소비량과 동등한 자원을 소비할 때 자원고갈의 속도는 가속될 것이고, 환경오염은 가중될 것이다.

이러한 파괴를 막고, 지속가능한 사회를 구축하기 위해서는 자원순환형사회의 실현이 구체적이고 현실적으로 이루어져야 한다. 즉 지상자원인 도시광산자원을 고효율적으로 순환 이용해야 한다. 그러기 위해서 도시광산자원의 재자원화제도의 구축과 고도의 재자원화 기술 개발이 긴급과제라고 할 수 있다.

## 부 기

본 연구는 국가청정생산지원센터의 에너지 자원순환 촉진을 위한 기반구축사업 과제의 일환으로 수행되었으며, 본 연구를 지원해주신 국가청정생산지원센터에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 국가청정생산지원센터, 2010: “도시광산 산업동향 및 발전과제” 연구기획보고서
2. D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, W. W. Behrens, 2010: “성장의 한계(The limits to growth)”, p.45, 다이아몬드社, 日本.
3. Donella Meadows, Jorgen Randers and Dennis Meadows, 2004: “Limits to growth : the 30-year Update, p.105, Chelsea Green Publishing Company.
4. ibid 3, p.107.
5. 西山孝, 2009: “レアメタル·資源-38元素の統計と展望”, p.22, 丸善株式会社, 日本.
6. ibid 2, p.105.
7. ibid 5, p.5.
8. ibid 5, p.6.
9. ibid 5, p.35.
10. ibid 5, p.38.
11. ibid 2, p.115.
12. 正路徹也, 2004: 資源と環境は表裏一體, 資源と素材, Vol.120, pp.667-672.
13. ibid 2, p.162.
14. 馬場研二, 2008: 地上資源が地球を救う, p.38, 技報堂出版, 日本.
15. 小谷太郎, 2007: 宇宙で番美しい周期表入門, pp.74-77, 青春出版社, 日本.
16. ibid 14, p.57.
17. ibid 14, p.59.

<sup>4)</sup> 로마클럽(Club of Rome)은 1968년 이탈리아 사업가 아우렐리오 페체의의 제창으로 지구의 유한성이라는 문제의식을 가진 유럽의 경영자, 과학자, 교육자 등이 로마에 모여 회의를 가진 데서 붙여진 명칭이다. 천연자원의 고갈, 환경오염 등 인류의 위기 타개를 모색, 경고·조언하는 것을 목적으로 했다. 1972년 <성장의 한계> 라는 보고서를 발표, 제로성장의 실현을 주장하여 주목을 받았다.

**吳 在 賢**

- 현재 연세대학교 명예교수
- 현재 한국자원리사이클링학회 명예회장
- 당 학회지 제10권 5호 참조

**金 俊 秀**

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제11권 2호 참조

**文 碩 敏**

- 현재 ACN 기술이사

**閔 芝 源**

- 현재 한국자원리사이클링학회 실장

**學 會 誌 投 稿 安 內**

種 類	內 容
論 說	提案, 意見, 批判, 時評
展望, 解説	現況과 將來의 견해, 研究 技術의 綜合解説, Review
技 術 報 告	實際的인 試驗, 調查의 報告
技術, 行政情報	價値있는 技術, 行政情報를 간결히 解説하고, comment를 붙인다.
見 聞 記	國際會義의 報告, 國內外的 研究 幾關의 見學記 등
書 評	
談 話 室	會員相互의 情報交換, 會員 自由스러운 말, 階霜 등
Group 紹介	企業, 研究幾關, 大學 등의 紹介
研究論文	Original 研究論文으로 本 學會의 會誌에 掲載하는 것이 適當하다고 보여지는 것

수시로 원고를 접수하오니 많은 투고를 바랍니다.