텔레늄 소재의 현황 및 재자원화 기술동향

김효섭 · 홍순직*

공주대학교 신소재공학부 및 희소금속 연구소

Recycling Technology and Status of Tellurium Materials

Hyo-Seob Kim and Soon-Jik Hong*

Division of Advanced Materials Engineering & Institute for Rare Metals,
Kongju National University, Cheonan 330-717, Korea

1. 서 론

최근 전 세계적으로 “산업의 비타민”이라 불리는 희소 금속에 관한 관심과 수요가 급격히 증가하고 있다. 이는 단일 원료물질 또는 기능성 소재 제조 시 소량의 희소금속 첨가만으로도 소재나 제품의 성능 및 품질을 크게 향상할 수 있기 때문이다. 특히 기존 산업뿐만 아니라 첨단 기술 산업이 발달하면서 희소금속의 중요성은 날로 주목받고 있다[1, 2]. 여러 희소금속 중에서도 특히 텔레늄(Tellurium, Te)은 최근 우수한 특성때문에 합금원소, 화학 촉매, IT 분야, 전기전자, 신재생 에너지 등의 다양한 분야에서 필수 소재로서 주목을 받고 있다. 따라서 현재 국내외 텔레늄의 사용량 및 수요량은 매년 급격하게 증가하고 있다. 하지만 텔레늄은 다른 희소금속들과 마찬가지로 자원의 희소성, 지역적 편중성, 공급불안정성과 이에 따른 가격불안정성 등과 같은 자원적 문제점을 가지고 있으며, 산업의 고도화에 따른 텔레늄 자원의 중요성 대두와 자원 보유국의 무기화 정책, 각 국가의 생산전략에 따른 수출제한 때문에 수급불안 및 가격폭등의 문제가 점차 심화되고 있다[3]. 특히, 우리나라는 현재 텔레늄을 국가 주요 정책 산업 부품의 핵심원소로써 이용하고 있어 텔레늄자원에 대한 의존도가 매우 높으며, 국내에 사용되는 텔레늄 전량을 수입에 의존하고 있으므로 이에 대한 국가 차원의 대비가 요구되고 있다. 최근 텔레늄 수요급증과 가격폭등의 상황을 고려하여 앞으로 텔레늄 금속의 생산량을 예측해 보면, 재활용 없이 계속해서 소비만 하는 경우 텔레늄의 생산량은 200년 안에 모두 고갈될 것으로 예상하고 있다[4]. 따라서 텔레늄(Te)의 수요 증가 및 가격폭등을 대비한 자원 확보가 필수적이며, 천연자원의 한계성에 따른 재활

용, 저감대체 기술에 대한 개발이 절실히 요구되고 있다. 그러기 위해서는 현재 국내외 텔레늄 자원 및 시장현황과 선진국의 재활용 기술개발 동향에 대한 조사와 파악이 선행되어야 한다.

이에 본 고에서는 미래산업과 신성장 동력산업의 핵심 원소인 텔레늄 자원의 최근 현황을 살펴보고자 한다. 또한, 최근 텔레늄의 수급불안과 가격폭등에 따라 주목받고 있는 국내외 텔레늄의 재활용 기술 동향을 소개하고 이의 전망에 대해 소개하고자 한다.

2. 텔레늄 자원현황 및 사용현황

텔레늄(Te)은 지각 중에 비교적 폭넓게 분포된 희소 금속 중의 하나로, 자연에서 단일 광체로는 산출되지 않고 대부분 동제련 과정에서 생성되는 부산물인 Anode Slime을 처리하여 생산하고 있다. 텔레늄 함유 광물로는 테트라다이마이트($\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$), 칼라베라이트(AuTe_2), 웨사이트(Ag_2Te) 및 알타이트(PbTe) 등이 있으며, 현재까지 보고된 텔레늄의 매장량은 2008년 기준 약 47,000톤으로 추정되고, 상위 3개 국가(미국, 페루, 캐나다)가 매장량의 20% 이상, 생산량의 50% 이상을 점유하고 있어 자원의 지역 편중성이 매우 높은 원소이다. 최근 조사된 전 세계 텔레늄 자원현황

Table 1. Global resource reserves of tellurium [5]

Country	Reserve base*
World : Total (Rounded)	47,000
Canada	1,500
Peru	2,800
USA	6,000
Other countries	37,000

*Corresponding Author : Soon-Jik Hong, TEL: +82-41-521-9387, FAX: +82-41-568-5776, E-mail: hongsj@kongju.ac.kr

Fig. 1. Main uses and usage of tellurium.

을 요약하여 나타내면 표 1과 같다.

국내는 텔레늄의 자원현황(보유량)이 정확히 보고된 바가 없으나 최근 시행된 국내 광산조사 보고서를 보면 태백산 광화대와 황강리 광화대를 중심으로 광산이 형성되어 있는 것으로 보고되고 있다. 하지만 경제성을 고려하였을 때, 국내의 텔레늄을 함유하고 있는 광산은 텔레늄의 낮은 함유량의 이유로 개발의 가치가 없는 것으로 판단되고 있다[6].

텔레늄의 용도는 주로 납·구리·스테인리스강 등에 내산성·내피로성·절삭성을 높이기 위한 첨가제로써 사용된다. 이 중 전 세계 텔레늄 소비량의 반이상은 철의 가공성을 향상하기 위한 첨가제로써 사용되며, 나머지는 같은 이유로 구리의 첨가제, 또는 고무산업에서의 경화 촉진제, 합성섬유의 촉매로 사용된다[5]. 원래 텔레늄의 주요 용도는 야금 합금용 원소였으나, 최근에는 카드뮴-텔루라이드(CdTe) 박막 태양전지 소재로써 사용되거나, 열전발전 또는 전자냉각의 열전반도체 소자(Bi_2Te_3 , PbTe)로 그 수요가 급증하고 있다. 전 세계 텔레늄의 용도 및 사용현황을 도식화하여 나타내면 그림 1과 같다.

3. 국내·외 시장현황

3.1. 국외 시장현황

텔레늄은 전 세계적인 생산량을 쉽게 결정할 수 없는데 그 이유는 텔레늄을 생산하는 모든 회사가 생산량을 보고하고 있지 않고, 주로 반 정련된 상태의 생산품(텔레늄 화합물)이 거래되고 있기 때문이다. 전 세계 약 80개의 동체련소 중 절반만이 정련된 텔레늄 생산량을 보고하고 있는 실정이다[5]. 최근 조사된(2009년) 전 세계 텔레늄 생산량은 약 220~240톤으로 추정되며, 국가별로는 미국, 캐나다, 일본, 페루 순서로 상위국가가 전체 생산량의 반 이상인 130톤가량을 생산하고 있다(그림 2). 전 세계 대표적인 텔레늄 생산업체로는 미국의 생산업체인 Asarco, 벨기에의 Umicore가 있으나 이 업체들의 텔레늄 생산량의 정

Fig. 2. Annual international production of tellurium. (The main producing countries: USA, Canada, Japan, Peru)[5]

Fig. 3. Annual production change of thin-film solar cell [9].

확한 양은 보고되지 않고 있다.

최근의 텔레늄 시장은 기존의 용도 이외에 박막 태양전지 소재(CdTe)와 열전반도체(Bi_2Te_3 , PbTe 등)로의 수요가 급격히 증가하는 추세이며, 이 때문에 장기적으로 수급불안과 가격상승이 예상되고 있다. 그림 3에서 보이는 바와 같이 박막 태양전지의 생산 비중은 매우 증가하여(약 20%) 텔레늄을 기반으로 한 CdTe 박막 태양전지는 2008년 이후로 매년 약 100% 이상의 높은 성장세를 나타내고 있다[7]. 특히 미국은 CdTe 박막 태양전지 모듈을 통해 대량의 전기를 생산하는 계획을 가지고 있으며, 이 경우 소요되는 텔레늄 양은 매년 200톤 이상으로 현재 전 세계에서 생산되는 연간 생산량과 같은 수준이다. 따라서 이러한

Fig. 4. Market forecasting of CdTe thin-film solar cells [10].

Fig. 5. Potential market of thermoelectric materials (U.S.A.).

Fig. 6. Potential scale of thermoelectric materials.

박막 태양전지 시장의 급격한 성장은 앞으로 텔레늄의 수요와 가격의 급격한 증가를 예고하고 있다(그림 4)[8].

태양전지와 함께 앞으로 텔레늄 시장을 좌우하게 될 분야는 열전반도체 시장으로 열전냉각, 산업 및 자동차로부터의 배 폐열을 이용한 열전발전 등의 분야에서 잠재 가능성이 매우 높은 것으로 기대되고 있다(그림 5). 열전반도체는 현재 산업적으로 텔레늄계 소재(Bi_2Te_3 , PbTe)가 대부분 사용되고 있으며, 텔레늄의 수요는 에너지 저감 및 환경문제에 따른 열전소재 시장의 급격한 성장으로 그 수요가 크게 증가하고 있다. 특히, 전 세계적으로 열전소재 생산을 위해 요구되는 텔레늄의 양보다 상대적으로 공급되는 양은 적어 앞으로 가격상승 가능성이 매우 높다. 이러한 텔레늄의 공급 및 가격불안정성에도 미국 내 잠재시장 규모는 그림 6에서 보이는 바와 같이 2006년 기준 27조 이상이며 2019년에는 약 139조 원에 이를 것으로 예측되고 있다.

최근 이러한 박막 태양전지 및 열전반도체 분야의 수요 증가 추세에 따라 일반순도 텔레늄(3N)의 가격은 2004년 이후 2008년까지 약 5배 가까이 증가하여 Kg당 200\$ 이상의 가격폭등을 나타내고 있다(그림 7)[5]. 특히, 반도체 용으로 사용되는 텔레늄은 고순도의 특성(4N~6N)을 요구하기 때문에 높은 정련 및 정제기술을 필요로 하므로 일반순

Fig. 7. Annual international price change of tellurium [5].

Fig. 8. International price of high purity tellurium.

도보다 더욱 높은 국제 가격이 형성되어 있다(그림 8).

또한, 최근 텔레늄을 함유하는 Anode Slime의 고갈 때문에 생산량 저하로 인한 공급불안이 예상되고 있다. 결론적으로, 앞으로 텔레늄 수요 예측과 가격 추이를 볼 때 이러한 문제들을 해결하기 위한 유일한 방법은 사용 후 텔레늄의 재활용 기술개발이라고 할 수 있다.

3.2. 국내 시장현황

국내 텔레늄 생산은 연간 약 50여 톤 생산되어 모두 국외로 수출하고 있다. 국내의 대표적인 텔레늄 생산업체로는 LS-Nikko, 고려아연 등이 있으며, 주로 Anode Slime로부터 Ingot 형태의 텔레늄으로 제조하여 국외로 전량 수출 후 필요한 양만큼 재수입하고 있다.

국내 텔레늄의 수요는 2007년 기준으로 약 800 만 불, 1,500톤으로 추정되고 지속적인 증가추세에 있으며, 텔레늄화합물의 형태로 100% 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 수입된 화합물의 용도는 그림 9의 국내 텔레늄 물질 흐름에서 보이는 바와 같이 주로 축전지, 배터리, 자동차 부품, 철강산업의 첨가제, 화학공업 첨가제, 광디스크 용 및 각종 유기화합물 등의 다양한 분야에 사용되고 있는 것으로 파악되고 있으나, 이들 분야에 사용되는 정확한 비율은 보고되고 있지 않은 실정이다.

국내에 수입되는 텔레늄은 전량 화합물의 형태로 수입

Fig. 9. Materials flow of tellurium in domestic industry.

되고 있으며, 광석이나 금속재 형태로는 수입되지 않고 있다. 수입되고 있는 텔레늄 화합물은 2007년 기준으로 850톤(55.7%)을 중국에서 수입하고 있고, 영국 300톤(19.7%), 일본 299톤(19.6%), 그리고 미국에서 76톤(5%) 각각 수입되고 있으며, 특히 중국에 대한 의존율이 매우 높은 편이다. 텔레륨의 국내 수입동향을 표 2에 나타내었다.

국내 텔레늄의 수입량은 관련 제품의 수요증가에 따라 매년 급격히 증가하고 있으며, 현재 텔레늄화합물의 수입은 누적량으로 6,500톤 이상이 소비 되고 있는 것으로 보고되고 있다[12]. 연도별 국내 텔레늄화합물의 누적 수입량을 그림 10에 나타내었다.

국내에서 모든 형태의 텔레늄을 포함하는 텔레늄화합물을 수입하는 업체는 2010년 기준으로 한국유미코아, 대정화금, 삼성에스디아이, 바이엘코리아 등 약 80개 정도로 추정되고 있다.

국내 텔레늄 수출량은 수입량에 비례하여 매우 적은 양이지만 꾸준히 증가하고 있다. 2010년 기준으로 텔레늄 화합물의 수출량은 약 1,500톤으로서 전년대비 약 500톤이 증가한 값이다[12]. 연도별 국내 텔레늄화합물의 누적 수출현황을 그림 11에 나타내었다.

국내의 텔레늄 수출업체는 2010년 현재 LS-Nikko, 고려아연, 한국유미코아 등 약 20개 정도로 보고되고 있다.

현재 국내의 텔레늄 관련 수출입 현황 및 유통과정에 대한 정보는 정확히 파악되지 않고 있으며, 대부분 무역협회의 통계에 의존하고 있다. 이는 관련 업체들이 사용량을 제대로 보고하고 있지 않기 때문으로 생각된다. 또한, 국내 수입도

Fig. 10. Annual domestic import trends of tellurium.

Fig. 11. Annual domestic export trends of tellurium.

는 대부분의 텔레늄이 중국(55%)에 집중되어 있으므로 추후 발생 가능한 가격상승과 공급 차질에 대한 대책이 전혀없는 실정으로 이에 대한 국가 차원의 대비가 필요하다.

4. 국내 · 외 텔레콤 수급현황 및 문제점

최근 산업발전에 의한 자원소비 급증, 그런 산업으로 말미암은 희소금속의 의존도 확대, 자원보유국의 공급통제, 대규모 자원기업의 고가격 정책 등 때문에 상당수 금속자원이 공급불안 가능성에 놓여있다. 희소금속은 자원의 희소성과 생산국의 집중도를 비교하여 대략적인 금속자원의 공급 불안 정도를 가늠할 수 있는데, 일반적으로 자원의 가채년수가 짧으면서 생산 집중도가 높은 품목이 공급 차질위험이 크다고 할 수 있다. 현재 주요 희소금속의 자원 위험 현황을 표 3에 나타내었다. 이 중 텔레늄은 다른 희소금속에 비해 상대적으로 위험한(자원고갈 계수 3위, 가격 변동성 1위) 자원으로 최근의 수요급증과 가격폭등의

Table 2. Domestic import of tellurium in 2007 [11]

품목명	1순위		2순위		3순위		4순위		2007	
HSCode	금액	중량	금액	중량	금액	중량	금액	중량	금액	중량
텔레늄 (Te)	중국		영국		일본		미국		8.047	21,675
	4.48	850	1.585	300	1.58	299	0.402	76		

Table 3. The risk status of main rare metal resources

구 분	중요 10개 원소									
	1위	2위	3위	4위	5위	6위	7위	8위	9위	10위
자원고갈 가속계수 (값이 크면 자원고갈 가능성 높음)	레늄	인듐	텔레늄	셀렌	백금	카드뮴	비스무트	안티몬	탄탈	텅스텐
	30,000,000	3,800,000	2,900,000	1,200,000	650,000	250,000	240,000	180,000	66,000	33,000
가격변동성 (5년 편차)	텔레늄	셀렌	바나듐	카드뮴	몰리브덴	인듐	망간	비스무트	게르마늄	크롬
	877.3	805.6	636.7	527.3	523.8	440.0	438.2	390.2	321.1	319.2

Fig. 12. World production forecast of tellurium.

Fig. 13. Annual production change with tellurium recycling.

상황을 고려하였을 때 장기적으로 전략적인 관리가 필요할 자원이다[13].

최근의 텔레늄의 수요급증과 가격폭등의 상황을 고려하여 앞으로 텔레늄 금속의 생산량을 예측하여 보면(그림 12), 재활용 없이 계속해서 소비만 하는 경우 텔레늄의 생산량은 시간이 지날수록 급격히 감소하여 200년 안에 모두 고갈될 것으로 예상하고 있다[4].

따라서 이러한 텔레늄 자원의 고갈을 막기 위해서는 텔레늄 재활용이 반드시 필요한 상황이며, 만약 사용 후 텔레늄 소재를 지속해서 재활용 할 경우 그림 13과 같이 앞으로 2500년까지 지속해서 텔레늄 공급량을 유지하여 급

격한 고갈 없이 사용 가능 할 것으로 예측되고 있다[4].

이러한 측면에서 최근 선진국을 중심으로 폐기물이나 공정스크랩으로부터 발생하는 텔레늄의 유효 자원을 효과적으로 회수하기 위한 다양한 공정 개발이 활발히 이루어지고 있다. 하지만 국내에서는 텔레늄의 재활용 기술개발이나 연구실적이 전혀없는 상황이므로 이에 대한 대책이 시급히 요구되고 있다.

5. 국내 · 외 텔레늄 재활용 기술동향

전통적인 용도로서의 텔레늄의 사용량(첨가제)은 전체 생산량의 약 80% 이상을 차지하고 있지만, 사용 후 제품 내 함유량이 매우 낮아 경제적 가치가 낮고, 회수방법에 어려움이 있어 대부분 회수되지 못하고 폐기되고 있다. 하지만 최근 수요가 매우 증가하고 있는 태양전지 또는 열전반도체 제품은 텔레늄이 주요원소로서 사용되므로 제품 내 함유량이 높아 사용 후 제품으로부터 텔레늄유효자원의 회수가 경제적으로 가능할 것으로 판단되고 있다.

사용 후 CdTe 모듈 및 열전반도체 소재의 발생량은 해마다 큰 폭으로 증가하고 있으며, 특히 사용 후 CdTe 모듈은 유해성 폐기물로 인식되어 환경오염 최소화화 및 유효 자원 회수를 위해서 텔레늄 재활용 공정 개발의 필요성이 크게 주목받고 있다. 선진국에서는 이미 이에 대한 연구가 일찍이 시작되어 활발히 진행되고 있다. 선진국에서 사용 후 CdTe 모듈을 재활용하고자 하는 주요 목적은 앞서 말한 바와 같이 텔레늄 등의 희소금속을 회수하여 재사용하기 위한 목적도 있지만, 최근 환경규제에 따라 공정스크랩 혹은 수명이 다한 태양전지 모듈을 부적절하게 처리하였을 때 발생할 수 있는 중금속 오염에 의한 환경문제를 방지하기 위한 이유가 크다.

일반적으로 CdTe형 박막 태양전지의 모듈에서 Te를 포함한 CdTe는 전체 중량의 0.11~0.13%에 해당하는 양이 포함되어 있다. 전 세계적으로 사용 후 폐 CdTe 모듈을 재활용하는 방법은 크게 4가지로 나누어 볼 수 있으며 이를 나열하면 FeCl₃/HCl 침출법, 고압 황산 침출법, 질산 침출법, 황산/과산화수소 침출법으로 나눌 수 있다. 이러한 재

Fig. 14. CdTe module recycling process of the First Solar, Inc.(U.S.A).

Fig. 15. Major process of solar cell module recycling program (RESOLVED, EU).

활용 방법들의 평균 Te 회수율은 80% 이상이며, 회수된 금속의 순도는 약 99.7% 이상으로 보고되고 있다. 따라서 경제적으로 효율성 있는 회수방법이 개발된다면, 앞으로 발생할 사용 후 CdTe 모듈로부터 텔레늄 자원의 재자원화에 크게 도움이 될 것으로 예측되고 있다.

CdTe 모듈의 재활용을 위한 가장 대표적인 선진국 기술개발 사례로는 미국 ‘First Solar, Inc.’에서 개발하여 상용화한 방법으로 모듈을 일정 입도로 파쇄한 다음 황산(H_2SO_4)과 산화수소(H_2O_2) 용액으로 용해하고, 이온교환법으로 Cd, Cu를 분리한 다음 Cd는 전해채취(electro winning)법으로 Te는 환원법으로 각각 금속으로 제조하는 방법이다[14]. 이의 재활용 공정도를 그림 14에 나타내었다.

EU에서는 SENSE(Sustainability Evaluation of Solar Energy Systems)와 RESOLVED(Recovery of Solar Valuable Materials, Enrichment & Decontamination)라는 2개의 기술개발 프로그램을 현재 진행 중에 있으며, SENSE는 모

듈 분쇄 후 400°C 이상에서의 염소(Cl_2)가스 반응하여 화학적 침출하는 방법을 사용하고 있다. 반면, 그림 15의 RESOLVED 프로그램에서는 화학약품 사용을 줄이고 폐기물 발생량을 최대한 억제하기 위한 재활용 기술을 개발하고 있다[15].

이외에 다른 선진국은 아직 국가적 차원의 CdTe 모듈 재활용에 대한 프로그램은 공개되어 있지 않다. 하지만 대학 또는 연구기관을 중심으로 태양전지 모듈의 재활용 기술개발 중일 것으로 예상하고 있다.

열전반도체로부터 텔레늄 재활용에 대한 연구 사례는 CdTe 모듈 재활용과 비교하면 현재까지 거의 없는 실정이지만, 앞으로 사용 후 모듈의 발생량을 고려했을 때 이의 연구개발도 활발하게 진행될 것으로 예측된다.

대표적인 연구개발 사례로서 Sargar는 Bi_2Te_3 를 N-n-octylaniline을 유기 추출제로 사용하여 99.6%의 Te를 추출/분리한 것으로 보고하고 있다[16]. 또 다른 사례로는 PbTe 및 Bi_2Te_3 의 재활용 기술과 관련하여 Zanotti 등은 열전반도체 Ingot 재료를 분쇄하고 질산용액에서 가열하여 용해한 뒤, 이 수용액으로부터 Pb 및 Bi를 분리하고 최종적으로 Te 금속으로 회수하는 것으로 보고하고 있다[17].

그 밖에 Auman 등은 PbTe와 Bi_2Te_3 를 고온에서 NaOH와 반응시키는 방법으로 Te을 알칼리 추출하는 기술을 보고하였다[18].

국내에서는 아직 사용 후 박막 태양전지 모듈(CdTe) 및 열전반도체 소재 (Bi_2Te_3 , PbTe)로부터 Te를 재활용하는 기술은 전혀 없는 실정이다. 하지만 선진국조차도 텔레늄 재활용 기술개발이 최근에는 이루어지고 있으며, 앞으로 텔레늄의 자원확보를 위해서는 반드시 달성되어야 할 기술이므로 지금부터라도 꾸준히 연구를 진행한다면 선진국과의 기술 차를 좁히고 텔레늄 자원확보에 크게 도움이 될 것으로 생각한다.

6. 맺음말

위에서 살펴본 바와 같이 텔레늄은 현재 산업계 전반에 걸쳐서 폭넓게 사용되는 중요한 원소이며, 특히 미래산업 및 신성장 동력산업의 필수 원료로 주목을 받고 있다. 최근 박막 태양전지 및 열전반도체 분야에서 그 수요가 매우 증가하고 있으며, 자원의 고갈과 자원보유국의 수출제한으로 인한 수급불안, 가격폭등으로 그 중요성이 크게 증대되고 있다. 이러한 텔레늄 자원의 문제점에도 이를 대처할 만한 소재가 없는 만큼 텔레늄의 수요와 잠재시장은 앞으로도 지속해서 증가할 것으로 예측되며, 따라서 이를 해결하기 위한 새로운 방법이 모색되어야만 한다. 이러한 측면에서 사용 후 텔레늄 제품으로부터 재자원화 기술개

발은 텔레늄의 지속적인 사용에 필수적인 방법으로 일부 선진국들을 중심으로 기술개발이 이루어지고 있으나 아직은 걸음마 수준이다. 특히, 국가 주요 핵심산업의 텔레늄 의존도가 높고 전량을 수입에 의존하고 있는 국내는 앞으로 텔레늄 자원의 안정적인 확보와 선진국과의 기술 차를 극복하기 위해서라도 조속히 사용 후 텔레늄 자원의 재자원화 관련 기술개발이 이루어져야 할 것으로 생각한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 지원으로 에너지 기술평가원이 지원하는 “글로벌전문기술 개발사업”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Gordon B. Haxel, James B. Hedrick and Greta J. Orris: USGS, (2002) 087-02.
- [2] Castor B. and James B. Hedrick: Industrial Minerals and Rocks (2006) 769.
- [3] H. S. Choi, Y. H. Kim and Y. G. Ji: KIC News, **13** (2010) 20 (Korean).
- [4] L. David Roper: Tellurium Depletion Including Recycle, <http://www.roperld.com> (2010).
- [5] Micheal W. George: Minerals Yearbook 2010, U.S. Geological Survey (2011) 65.1.
- [6] C. H. Heo, J. H. Lee and S. J. Chi: J. KSGE, **45** (2008) 734 (Korean).
- [7] Y. K. Cho: “태양광 산업의 환경 변화와 시사점”, 삼성경제 연구소 (2010).
- [8] Matthew L. Scullin: Tellurium: Nerd's Gold, Waste Heat News (2010).
- [9] J. H. Kim, M. J. Chu, Y. D. Chung, R. M. Park and H. K. Sung: ETRI, **23** (2008) 2.
- [10] Nanomarkets: Material lead the way in Thin-Film and Organic photovoltaics, www.nanomarkets.net (2008).
- [11] 한국비철금속협회: 산업용 원자재 증장기 수급 안정화 방안연구, 지식경제부 최종보고서(2008).
- [12] KITA.net: 한국무역통계 주요원자재 수입현황 (2010).
- [13] LG Business Insight: 잠재적인 경쟁력 위협요인 금속 자원 리스크, LGERI Report (2010).
- [14] A. Mezei, M. Ashbury, M. Canizares, R. Molnar and H. Given: Technical Bulletin 2008-29.
- [15] W. Berger, F. G. Simon and K. Weimann: Res. Conserv. & Recycling, **54** (2010) 711.
- [16] B. M. Sargar and M. A. Anuse: Talanta, **55** (2001) 469.
- [17] L. Zanolli and F. Licci: Mikrochimica Acta, (1976) 225.
- [18] L. E. Auman, E. P. Loewen, T. F. Gesell and S. Ohno: J. Nucl. Sci. & Tech., **42** (2005) 618.