

국내 유로퐁의 산업 동향 및 물질흐름 분석

고한진 · 김정곤^a · 이일석^b · 강홍윤^b · 홍순직*

공주대학교 신소재공학과, ^a인천대학교 신소재공학부, ^b한국생산기술연구원 국가청정지원센터

Investigation of Material Flow and Industrial Trend of Domestic Europium

Han-Jin Ko, Jeong-Gon Kim^a, Il-Seuk Lee^b, Hong-Yoon Kang^b and Soon-Jik Hong*

Division of Advanced Materials Engineering, Kongju National University, 275, Budae-dong,
Cheonan, Chungnam 330-717, Korea

^aDepartment of Materials Science & Engineering, University on Incheon, 12-1 Songdo-dong,
Yeonsu-gu, Incheon 406-772, Korea

^bKorea Natinal Cleaner Production Center(KNCPC), KITECH, Seoul 135-918, Korea

1. 서 론

최근 IT/첨단 산업 제품에 필수적으로 사용되는 희소금속 속에 대한 관심이 높아지고 있다. 희소금속은 극소량만으로도 제품의 성능 및 품질을 획기적으로 향상시킬 수 있어 향후 산업 경쟁력 확보가 필수적이다. 특히 LCD, PDP, 디스플레이 제품 등의 수요증가로 희소금속 소비가 급증하고 있으나 탐사 및 채굴 비용 상승, 지정학적 리스크 확대 등으로 공급여건은 갈수록 악화되고 있다. 따라서 희소금속의 안정적 확보는 첨단제품 관련 업체가 많은 우리나라의 생존 문제와 직결되며, 주력 산업의 경쟁력 강화에 관건이 되고 있다[1-3]. 그 중 우리나라가 LCD, PDP, 디스플레이, 휴대전화 등 IT/첨단 산업의 선두주자로 발전하게 도움을 준 희토류 원소가 유로퐁(Eu, Europium)이다. 유로퐁(Eu)은 4f 전자 층의 특이성 때문에 가시광선 파장 범위에서 흡수 또는 발광 하는 성질의 우수한 광학적 특성을 가지고 있으며, 열중성자 흡수용량이 우수하다는 특성이 있어 다양한 분야에 사용되고 있다. 특히 산화물 형태로 존재시 극미량으로도 우수한 발광특성을 나타내기 때문에 형광체에 널리 사용되어지는데 주로 적색 형광체로 브라운관 컬러TV나 컴퓨터 모니터 및 디스플레이, 형광등, 광섬유, 레이저 등에 사용된다. 최근에는 액정화면(LCD)의 후방 조명(BLU, Back Light Unit), 발광다이오드(LED, Light Emitting Diode) 조명에 널리 사용되고 있다. 또한, 과거에는 중성자를 잘 흡수는 특성 때문에 원자로의

제어재로 사용되기도 하였다[4]. 유로퐁은 지각내 존재비가 약 1.8 ppm(0.00018%)으로써 매우 희귀한 원소로 모나자이트(Monazite), 제노타임(Xenotime), 바스트나사이트(Bastnaesite) 등의 광물에 매우 낮은 비율로 함유되어 있다. 주로 중국, 호주, 미국, 인도의 4개국에 편재되어 분포하고 있으며 전 세계 매장량은 약 15만 톤으로 추정된다[5]. 그러나 최근 중국의 희토류 쿼터제로 인해 유로퐁의 가격 급등으로 수급 불안정 및 경제적 어려움이 예상되고 있다. 따라서 이러한 가격 폭등 및 수급 불안정에 대해 미리 예측하고 대처할 수 있도록 국가 차원에서 수요와 수급의 안정성을 확보할 필요가 있다. 이에 본 논문에서는 IT/첨단 산업의 주요 희토류 원소인 유로퐁의 국내 물질흐름도 조사하여 수요 및 수급, 재자원화 동향 등을 알아보고 향후 국내 유로퐁의 안정적인 수급 확보를 위한 방안 에 대하여 기술하고자 한다.

2. 유로퐁의 물질흐름

2.1. 통합물질흐름 방법론

국내에 구축된 물질흐름분석(MFA)은 크게 원료 및 기초소재 단계, 1차 가공제품 단계, 중간제품 단계, 최종제품 단계 그리고 2차 재자원화 단계로 분류된다. 각 단계별 통합 물질흐름 방법론에 대하여 설명하면 먼저 원료 및 기초소재 단계는 유로퐁에 대하여 국내외에서 채굴되어 추출된 희토류 광석이 생산되는 단계로 정의한다. 원료단

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

계로 투입되는 유로퓸의 국내 수급량 조사 및 분석을 통한 원료단계 물질 흐름을 조사하고, 생산업체 설문 및 방문을 통하여 구축된 통계자료와 접합성을 검증하였다. 1차 가공제품 단계는 원료 및 기초소재를 거쳐 중간제품으로 가는 단계로 정의한다. 1차 가공제품 단계로 투입되는 산화유로퓸의 국내 수급량을 조사하고, 산업연관표의 부문분류표 등의 자료와 전문가 자문을 통해 1차 가공제품을 설정하였다. 중간제품 단계는 1차 가공제품으로부터 생산된 제품으로써 최종제품에 사용되기 위한 중간제품을 생산하는 단계로 정의한다. 중간제품 생산량을 포함하여 1차 가공제품이 각 중간제품으로 투입되는 수량을 파악하여 물질흐름을 조사하였다. 통합 국가자원관리체계 구축을 위해 명시된 Bottom-up 방식의 유로퓸의 중간제품 국내 수급량 산출식을 통한 국내 수급량 및 생산량의 접합성을 검증하였다. Bottom-up 방식이 어려울 경우 IO 분석을 통한 중간제품 흐름분석을 수행하였다. 최종제품 단계는 유로퓸이 투입된 중간제품들이 최종적으로 투입되는 산업으로써 전기 및 전자기기 분류와 각 산업의 대표적인 제품으로 구성되는 단계로 정의한다. 최종제품 생산량을 포함하여 중간제품이 각 최종산업으로 투입되는 수량을 파악하여 물질흐름을 조사하였다. 통합 국가자원관리체계 구축을 위해 명시된 Bottom-up 방식의 유로퓸의 최종제품 국내 수급량 산출식을 통한 최종제품 단계 수급량 산정 및 접합성을 검증하였다. 사용 및 축적 단계에서는 유로퓸이 투입되어 최종제품 단계에서 당해 연도에 생산된 최종제품의 소비 및 사용과 최종 제품별 내구년수를 고려하여 전년도 생산된 최종제품 축적, 그리고 유로퓸 자원의 사용 후 2차 자원으로 재자원화 되기 위해 수집 단계로 투입되

는 단계로 정의한다. 수집 단계는 유로퓸의 1차 자원이 사용 후 배출되어 2차 자원으로써 재활용되기 위해 수집되어 처리되는 단계로 정의한다. 유로퓸이 투입된 최종제품의 사용 후 발생하는 제품별 폐기량 및 유로퓸 함유량을 고려하여 2차 자원 수집 투입량을 파악하였다. 재자원화 단계는 수집단계 이후 재자원화 공정을 거치는 단계로 정의한다. 폐기 단계는 유로퓸이 최종 폐기되는 단계로 정의한다.

2.2. 자원 현황

우리나라는 유로퓸 자원이 부족하고 있지 않으며, 정·제련 시설 또한 없어 희토류 광석의 수입은 전무한 실정이다. 따라서 국내에서 소비되는 유로퓸은 중국이나 일본 등의 해외로부터 전량 수입에 의존하고 있다. 희토류 자원의 부족량은 지구의 크리스트 지역에 상대적으로 많이 분포되어 있으나, 여타 광물 대비 채굴 가능한 광상은 많지 않다. 표 1은 주요 국가 광물별 희토류 함유량을 나타낸 것이다[6]. 이 중에서 경제적 가치 측면에서 가장 큰 비중을 차지하는 광물은 바스트나사이트로써 중국과 미국에 주로 분포되어 있다. 다음으로 큰 비중을 차지하는 광물이 모나사이트이며, 대부분의 주요 희토류 광물은 호주, 브라질, 중국, 인도, 말레이시아 등에 분포되어 있다. 유로퓸의 정확한 부족량은 산출하기 어려우며 주로 4개국에 분포되어 있는 것으로 판단된다. 표 2는 세계 희토류 부족량 및 매장량을 나타내고 있으며 중국의 희토류 매장량은 3,600만 톤(REO)으로 세계 총 매장량의 약 36%를 차지하고 있다. 중국 희토류 협회(Chinese Society of Rare Earths)는 중국의 미확인 매장 및 부족량(Reserves and Resources)이 최대 1억 톤

Table 1. Properties of ores containing europium

(Unit : %)

Rare Earth Metal	Bastnaesite		Monazite		Xenotime	
	California	China	Eastern Australia	West Australian	India	Malaysia
Lanthanum	32.0	27.0	20.2	23.9	23.0	0.50
Cerium	49.0	50.0	45.3	46.1	46.0	5.00
Praseodymium	4.40	5.00	5.40	5.05	5.50	0.70
Neodymium	13.5	15.0	18.3	17.4	20.0	2.20
Samarium	0.50	1.10	4.60	2.53	4.00	1.90
Europium	0.10	0.20	0.20	0.05	-	0.20
Gadolinium	0.30	0.40	2.00	1.49	-	4.00
Terbium	0.01	-	0.20	0.04	-	1.00
Dysprosium	0.03	-	1.15	0.69	-	8.70
Holmium	0.01	-	0.05	0.05	-	2.10
Erbium	0.01	-	0.40	0.21	-	5.40
Thulium	0.02	-	trace	0.01	-	0.90
Ytterbium	0.01	-	0.20	0.12	-	6.20
Lutetium	0.01	-	trace	0.04	-	0.40
Yttrium	0.10	0.30	2.10	2.41	-	60.8

Table 2. Reserves of global rare earth metals (Unit : ton)

국가	부존량	매장량
중국	89,000,000	36,000,000
인도	1,300,000	3,100,000
브라질	-	48,000
독립국가연합 (CIS)	21,000,000	19,000,000
미국	14,000,000	13,000,000
호주	5,800,000	5,400,000
말레이시아	-	30,000
기타	22,900,000	22,000,000
전체	154,000,000	99,000,000

이 될 것으로 추정하고 있다. 이 밖에 주요 희토류 매장국가로는 독립국가연합(CIS)이 1,900만 톤으로 19.2%, 미국이 1,300만 톤으로 13.1%를 차지하고 있다[7-8].

2.3. 세계 수요와 공급

표 3은 세계 희토류 생산량을 나타낸 것으로 중국이 전 세계 희토류 생산량의 97%를 독점하고 있다. 현 상황에서 중국의 수출제한 조치는 선진국간의 긴장관계를 유발하고 있는 상황이다. 특히 원료 형태의 희토류는 중국의 수출금지 조치에 따라 국제 거래가 부진한 상황이며 대부분은 산화물 형태의 국제가격으로 시장이 형성되어 있다. 이로 인해 희토류 산화물의 공급부족 현상이 일어났으며, 산화 유로프의 가격도 폭등하게 되었다. 유로프뿐만 아니라 산화이트륨, 산화네오디움 등도 모두 가격이 인상되었다. 중국 정부가 취하는 생산총량 제한, 수출쿼터규제, 자원세 인상, 환경기준 강화 등과 같은 여러 희토류 관련 정책들로 인해 가격 상승을 더욱 부추기는 양상이 가속화되고 있다. 따라서 자원빈국인 우리나라에서는 다양한 희토류 원소 및 상대적으로 고가에 거래되는 유로프의 자원 확보 방안과 통계기반 구축이 시급한 실정이다. 그림 3은 세계 희토류 생산량 추이를 나타낸 것으로 중국이 대부분을 차

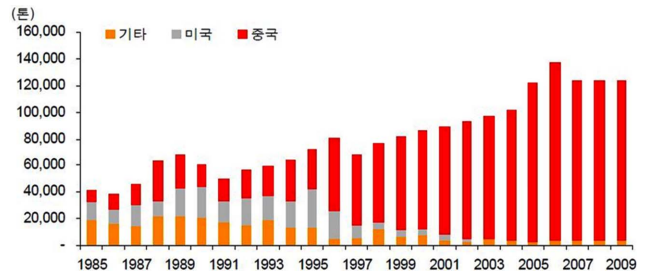


Fig. 1. Production trends of global rare earth metals.

지하고 있고, 중국에 의해 크게 좌우되고 있다는 것을 보여준다[9].

2.4. 국내 유로프 물질흐름

최근 우리나라에서는 금속자원에 대한 높은 수입 의존도 문제를 해결하기 위하여 유로프를 비롯한 총 63개의 금속들을 대상으로 국내 소비량이나 수출입량 등에 대해 물질흐름 분석을 수행하고 있다. 이러한 자원생산성 기반 구축 사업은 국내 자원의 안정적인 공급체계를 확립할 수 있는 중요한 기반자료로 활용될 수 있을 것이라 기대되며 2015년까지 지속적으로 물질흐름 분석을 수행하고, 기 구축되었던 자원들에 대해서도 지속적으로 갱신할 예정이다. 그림 2는 유로프의 물질흐름 결과를 종합하여 나타낸 간이 물질흐름도로서 물질흐름 단계는 원료 및 기초소재 단계, 1차 가공제품 단계, 중간제품 단계, 최종제품 단계 그리고 2차 재자원화 단계로 분류하고, 그림 3은 국내에서 소비되는 유로프의 상세 물질흐름도를 나타내었다.

2.4.1. 원료소재 및 기초 단계

국내에서는 유로프의 원료 및 기초소재 희토류 광석이 없으며, 정·제련 시설 및 기술력 부족으로 인해 원료 자체로 수입하는 업체도 없기 때문에 희토류 광석의 생산

Table 3. Annual production of global rare earth metals

국가	2008	2009	2010	2011	2012
미국	-	-	-	-	7,000
오스트레일리아	-	-	-	-	-
브라질	650	550	550	250	300
중국	120,000	120,000	130,000	105,000	95,000
독립국가연합(CIS)	-	-	-	-	-
인도	2,700	2,700	2,800	2,800	2,800
말레이시아	380	350	30	280	350
기타	-	-	-	-	-
합계	123,730	132,600	133,380	108,330	105,450

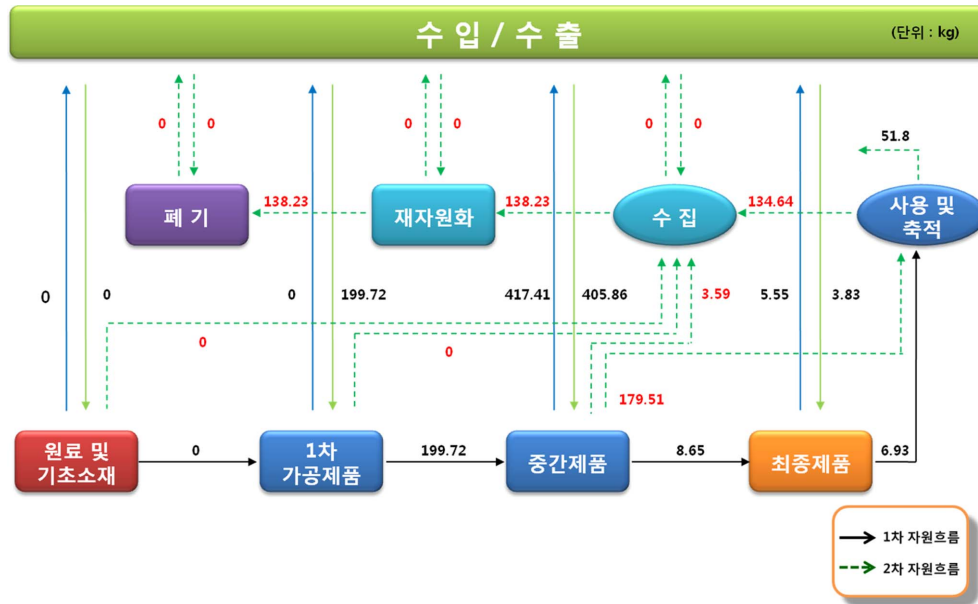


Fig. 2. Simple materials flow of europium in domestic industry.

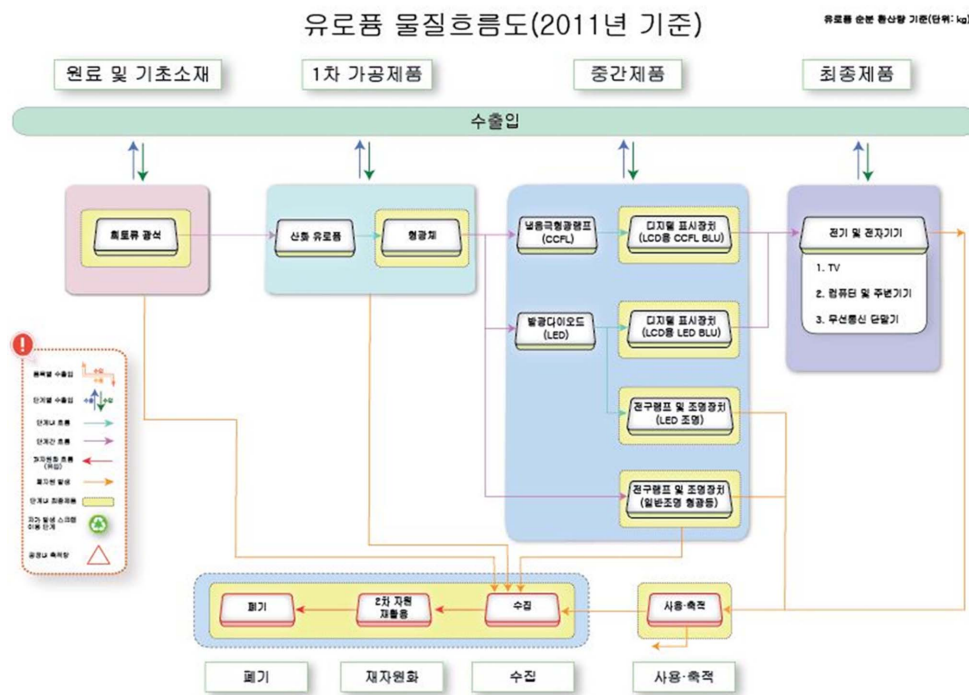


Fig. 3. Detail materials flow of europium in domestic industry.

및 수출입은 전혀 이루어지지 않고 있다. 따라서 원료 및 기초소재 단계인 희토류 광석으로부터 1차 가공제품으로 투입되는 양은 전혀 없는 것으로 조사되었다.

2.4.2. 1차 가공제품 단계

1차 가공제품 단계에서의 유로프는 관련 산업체 및 한국무역협회 자료를 기반으로 산화유로프로 분류하였다. 산화유로프는 90%이 형광체로 사용되어지며, 형광체 이

외에는 거의 사용되지 않는 것으로 조사되었다. 산화유로프는 형광체 제조에 활성제로 도핑 되어 사용되어져 수 마이크로그램에서 수 밀리그램의 적은 양이 사용되어진다. 그러나 산화유로프의 순도는 형광체의 발광특성에 큰 영향을 주기 때문에 4N(99.99%)의 고순도 산화물이 사용되어진다. 국내에서 소비되는 산화유로프는 전량 해외로부터 수입하고 있으며, 대부분은 중국에서 수입되고 일부는 일본에서 수입되어지는 것으로 조사되었다.

2.4.3. 중간제품 단계

중간제품 단계에서는 1차 가공제품인 산화유로품을 형광체 제조에 이용되어 중간제품으로 제조된다. 산화유로품은 냉음극형광램프(CCFL)와 발광다이오드(LED)의 형광체로 첨가 되어져 LCD 디지털 표시장치로 제조되고, 나머지는 LED 조명과 일반 형광등 제조에 사용되는 것으로 조사되었다. 냉음극형광램프(CCFL)는 LCD의 광원으로 사용되는 일종의 형광등으로 일반 형광등에 비해 지름이 훨씬 얇으며, 디스플레이 크기에 따라 적게는 1개에서 많게는 30여 개의 CCFL 램프가 사용된다. 발광다이오드(LED)는 전류를 흘리면 빛을 발하는 반도체 소자로서 냉음극형광램프에 비해 크기도 매우 작고, 유로품 함량도 낮으며 일반적으로 LED 조명 및 디스플레이 크기 등에 따라 수십에서 수백 개의 LED 칩이 사용된다. 최근에는 기존의 광원대비 월등히 높은 효율과 낮은 전력소모, 긴 수명, 빠른 응답속도, 친환경적이라는 장점으로 인해 LED 조명이 각광 받고 있어 앞으로 LED 조명 시장은 계속 증가할 것으로 예상된다. 형광등은 일반적으로 유리 내부에 형광체가 도포되어 사용되어지며, 형광등의 종류 및 크기에 따라 사용되어지는 유로품 양도 차이가 난다. 중간제품에서 사용되어지는 유로품은 조명분야에 약 70%, 디스플레이 분야에 약 30%의 비율을 차지한다. 또한 유로품의 중간제품 자체로는 수출량보다 내수량이 상대적으로 많았으며, 중간제품 제조과정 중 약 1%의 불량품이 발생하였다.

2.4.4. 최종제품 단계

최종제품 단계에서는 중간제품에서 제조된 제품들을 산업연관분류표에 따라 최종제품 분류명인 전기 및 전자기기로 나타내었다. 전기 및 전자기기는 TV, 컴퓨터 및 주변기기, 무선통신 단말기로 세부화 하여 분류하였다. 중간제품의 디지털 표시장치들은 TV, 컴퓨터, 휴대전화 등의 액정화면에 사용되어져 전기 및 전자기기 생산에 사용되어진다.

2.4.5. 재자원화 단계

재자원화 단계는 중간제품 및 최종제품으로 생산된 제품들이 사용 및 축적 단계 이동하여 수명이 다하게 되면 수집 단계로 이동한 후 2차 재활용을 거쳐 폐기단계로 이동하게 된다. 사용 및 축적 단계에서는 유로품이 투입되어 최종산업 단계에 당해 연도에 생산된 제품의 소비 및 사용과 제품별 내구년수를 고려하여 산출하였다. 내구년수는 제품마다 차이는 있으나 조명 및 형광등은 약 2~3년, TV와 모니터 디스플레이들은 약 4~5년 정도 수명을 가지는 것으로 조사되었다. 수집 단계에서는 1차 자원이 배출되어 2차 자원으로 재활용되기 위한 단계이다. 최종제품

이 사용된 후 수명이 다하면 수집 단계로 이동한다. 생산 자책임재활용제도(EPR)에서는 폐형광등 약 30%, TV 및 휴대전화 약 20%가 재활용을 위해 수집되어진다고 조사되었다. 수집 후 2차 재활용을 거치게 되는데 현재 국내에서 사용되는 형광체는 재활용 기술이 부족하여 수집되어진 제품들은 해외로 수출되거나 전량 폐기되는 것으로 조사되었다.

2.4.6. 국내 유로품 현안점

최근 IT/첨단 산업 제품의 고기능화 및 고성능화에 희토류 원소의 역할이 커지고 있다. 특히 LCD, LED, 형광등 등에 사용되는 형광체는 발광특성이 우수한 희토류 금속이 형광소재 및 활성제로 사용되고 있다. 주로 4f 전자를 가지는 Ce, Eu, Tb는 활성제로 광학적으로 불활성인 Y나 La는 모재 성분으로 사용된다[10]. 희토류 금속은 형광체 제조에 사용되어져 다양한 분야로 점차 확대되고 있으나 우리나라는 희토류 형광체의 재활용 기술 부족과 경제적인 등으로 인해 형광등의 수은이나 유리 재활용 이외에는 재활용이 이뤄지지 못해 전량 폐기되고 있다. 특히 희토류 원소 및 희소금속의 안정적 확보가 어려운 우리나라는 형광체 재활용에 대한 기술개발 연구가 반드시 필요하다. 그러나 형광체의 발광강도는 희토류의 농도 및 순도에 큰 영향을 받기 때문에 회수된 형광체는 고순도로 분리 회수하지 않으면 제품에 사용할 수 없다. 따라서 고순도의 희토류 원소를 얻기 위해 분리재생 기술이나 처리비용 등의 문제를 해결하여야 할 것이다. 일반적으로 연구되고 있는 형광체 재활용 관련 기술은 산침출법, 메커노케미컬법, 자화율분리법, 액액분리법 등이 있으며 아직까지 회수된 형광체의 순도는 높지 않은 것으로 조사되었다. 특히 산침출법은 오래 전부터 알려져 있는 폐 형광등의 형광체에서 희토류 원소를 분리 회수하는 방법으로 황산 등의 산을 이용하는 방법이다. 황산, 염산, 질산, 50% 수산화나트륨 용액의 어느 것에 대해서도 90% 이상의 침출율을 나타낸다. 침출율은 희토류가 함유된 형광체의 조성에 의존한다. Y, Eu는 산화물로 존재하여 침출이 용이하나 Ce, Tb, La는 인산염으로 존재하고 있어 고온에서 산으로 분해하지 않으면 침출되기 어려운 형태이다. 따라서 침출액으로 황산(36N의 농도, 형광체의 10배량)이 최적이며 침출온도 및 시간은 10°C, 1시간이 적당하다. 침출액에서 희토류 원소의 분리회수는 초산염 침전법을 이용하며, 전체적인 공정은 그림에서 나타나고 있다. 그 결과 5종의 희토류 원소를 동시에 회수하였으며 Y, Eu, La, Ce, Tb가 각각 99.9, 98.3, 96, 87.3, 91.8% 순도의 산화물이 회수되었다[11]. 그러나 재활용 기술개발 연구가 진행되고 있음에도 불구하고 실제로 국내에서 재활용되어 사용되어지는 유로품은

전혀 없는 것으로 파악 되었다. 해외 형광체 재활용 동향을 살펴보면 최근에 일본에서 회수된 형광체 물질에 일부 산화물 성분을 첨가해 유리화하고, 이후 산을 이용하여 침출하는 기술개발과 산침출한 용액에 희토류 금속을 추출하는 연구를 진행하고 있다. 미국이나 유럽 역시 일본과 유사한 공정으로, 최근 개발되고 있는 수은 및 형광체 회수 기술은 형광물질이 포함된 수은을 건조법을 이용하여 유기화합물을 혼합 및 가열하여 순수한 수은 및 형광체를 회수하는 기술을 적용하려 하고 있다[12].

2.5. 결론

희토류 금속인 유로폼은 지각내 존재비가 매우 적어 자원고갈 가능성이 높으며, 매장량은 중국, 호주, 인도 등의 일부 국가에만 편중되어 있다. 그 중에서도 특히 중국이 세계 희토류 생산량의 90% 이상을 차지하고 있다. 또한 최대 생산국인 중국의 자원 무기화 정책과 더불어 급격한 산업발전으로 인한 수요 급증으로 인해 향후 희토류 금속의 가격폭등 및 수급 불안성이 예상되고 있다. 특히, 우리나라의 경우 유로폼이 함유된 희토류 광석이 존재하지 않고, 정·제련 시설 및 기술력이 부족하여 국내에서 소비되는 유로폼은 1차 가공제품인 산화유로폼 형태로 해외(중국)로부터 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 국내 유로폼의 물질흐름 파악을 통한 통계 구축이 필요하고, 이를 바탕으로 국내 유로폼 자원의 자립화 및 수요/수급 안정화 대책을 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 “자원생산성 기반구축 사업”의 지원을 받아 수행된 연구결과로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] H. N. Kim, H. S. Jeong, J. G. Lee and T. Y. Lim: CEO Information, (2011).
- [2] J. W. Song, S. H. Lee, H. S. Hong, H. Y. Kang and S. J. Hong: J. Kor. Powd. Inst., **19** (2012) 79 (*Korean*).
- [3] J. G. Kim: J. Kor. Powd. Met. Inst., **18** (2011) 313 (*Korean*).
- [4] Mahmoud A. Rabah: Waste Management **28** (2008) 318.
- [5] H. S. Yoo: Kor. Inst. Sci. & Tech., 희토류광의 선별처리 기술동향, (2003).
- [6] K. J. Kim and W. G. Kim: Eugene Investment & Securities, 희소금속 분석 시리즈, (2010).
- [7] S. M. Koh: J. Miner. Soc. Korea, **11** (2009) 417.
- [8] H. S. Choi, Y. H. Kim and Y. G. Ji: J. Ind. & Eng. Che., **13** (2010).
- [9] U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries (2009-2013).
- [10] I. G. Kim: Kor. Inst. Sci. & Tech., 희토류 형광체의 리사이클링 기술, (2011).
- [11] Y. H. Kim: Kor. Inst. Sci. & Tech., 형광체에서 희토류 사용량의 저감 대체 재이용 연구 동향, (2011).
- [12] H. S. Hong, H. M. Lee, M. S. Kong and H. Y. Kang: J. Kor. Soc. Min. & Ene. Res., **47** (2010) 626 (*Korean*).