차세대 자동차용 희소금속 리사이클링 기술동향

황용길 · 김상철 · 김종현*

동아대학교 명예교수, ReSeat Program
*한국과학기술정보연구원

Technical Trends of Rare Metal Recycling in the Next Generation Automobile

Young-Gil Hwang, Sang-Cheol Kil and Jong-Heon Kim*

Professor Emeritus of Dong-A University : ReSeat Program
*Korea Institute of Science and Technology and Information

요 약

탄산가스 삭감과 자동차 연비를 향상시키기 위한 자동차의 경량화는 현시대적 큰 과제이다. 경량화를 위하여 Hybrid Electrical Vehicle(HEV), Electrical Vehicle(EV)의 고성능 모터용 Nd 자석, Li이온 2차전지 및 배기가스 정화용 PGM촉매의 성능개발이 활성화 되고 있다. 우리나라는 자동차 경량화와 기능 향상을 위하여 사용하는 희소금속을 자원이 편재되어 있는 중국 등에서 수입하기 때문에 수출국의 공급 조절, 가격 폭등 등으로 수급이 불안정한 경우가 있다. 이를 대비하여 차세대 자동차에서 배출되는 폐 희소 자원을 리사이클링 할 필요가 있다. 본고는 리사이클링 기술과 현상에 대하여 조사 분석한 정보를 기술자나 연구자에게 전해주어 국가 자동차 산업 발전에 기여하는데 목적이 있다. 조사 결과, 폐 자동차에서 배출되는 고성능 모터, 배기가스 정화용 백금족금속 (PGM) 폐촉매, Li이온 배터리 등의 리사이클링기술은 전처리 기술과 후처리 기술로 분류하는데, 전처리 기술인 기계적 분리 선별 기술은 연구 개발 중이며, 후처리기술인 습, 건식 제련 기술은 확립되어 있다. 리사이클링 경제성 측면에서 폐 부품의 기계적 선별 기술에 대하여 집중적으로 연구할 필요가 있다.

주제어 : 희토류 금속, Nd자석, 백금족 금속, 용매추출, 리사이클링

Abstract

Car exhaust CO₂ gas reduction and fuel efficiency of the car lighter for the current era is a big challenge. The developments of high-performance Nd magnets, Li-ion secondary battery and exhaust gas purification performance of PGM catalysts used in the lightweight EV and HEV are activated. Country in order to improve the car lighter and function that use the resources of rare metals are ubiquitous imported from China because of export supply control, as soaring prices have unstable supply and demand. Compared to the emissions from the next-generation automotive recycling, waste scarce resources need to be. This study investigated the recycling technology analysis and development of the information technology, or delivered to the researchers by giving national car industry aims to contribute to the development. Findings, pulmonary high-performance motor vehicle emissions in the exhaust gas purification PGM Catalysts, Li-ion battery and Nd magnets recycling technology, such as pre- and post-processing techniques to classify technology, pre-urban mining technology mechanical separation by screening techniques

* Received : December 11, 2013 · Revised : February 10, 2014 · Accepted : March 3, 2014

*Corresponding Author : Young-Gil Hwang (E-mail : y-h34109@hanmail.net)

Dong-A University Professor Emeritus, HWAIN Apt. 404, 35-1 Seo-Deasin-Dong, Seo-Gu , Busan City, 602-821 Korea
Tel : +82-51-247-1611

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

under development, the study and post-processing technology has, pyro and hydro metallurgical smelting technology is established. Waste Recycling in terms of economic efficiency of mechanical components for the intensive study of screening techniques is needed.

Key words : Rare Earth Metal, Nd Magnet, Solvent Extraction, Recycling

1. 서 론

지구환경 온난화에 영향을 미치고 있는 자동차는 온실가스 발생량을 줄이기 위하여 차체를 경량화 하여 연비를 향상시키는 방법으로 자동차 차체에 사용되는 금속재료를 얇고 강하게 하는 철강기술의 개발, 플라스틱 등의 비금속을 금속 대용으로 활용하는 방법 등이 개발되고 있으며, 최근에는 온실가스를 대폭 삭감하는 방법으로 Hybrid Vehicle(HV), Plug-in Hybrid Electrical Vehicle (PHEV) 및 Electrical Vehicle(EV)가 개발되어 실용화되고 있다. 이 자동차의 핵심 동력은 Li이온 2차전지, Ni수소전지 및 연료전지이다. 전지를 사용할 경우 운행을 담당하는 모터가 중요한 역할을 하고 있으며, 모터의 성능을 향상시키기 위하여 고성능 Nd자석을 사용함으로써 자동차의 무게를 줄이면서 성능을 향상시키는 역할을 한다. 자동차에 사용되는 희소금속의 용도를 Table 1에 제시하였다^{1,2)}.

우리나라에는 W, Mo 등의 희소금속이 약간 매장되어 있으나 현재 Mo 만이 조금씩 생산되고 있고, 대부분의 희소 금속을 수입하는 실정이다. 특히, PHEV, EV 자동차용 모터에 사용하는 Nd 자석 원료는 전량 수입하여 사용하고 있는 실정이다. Nd, Dy은 중희토류 금속이고, 이 원료는 중국이 전 세계 생산량의 약 97%를 생산하고 있다. 2000년대에 들어서 각종 희소금속의 가격이 급등하는 중에 2009년도에 중국은 수출규제를 하면서 2010년 희토류가격이 급등하고, 공급도 원활하지 않아서 원료를 사용하는 각국이 생산에 크게 지장을 초래하였다⁸⁾.

Table 1. Rare metals in the automobile ^{1,2)}

	용 도	금속종류
1	철강 기능화를 위한 원소	Ni, Cr, W, Co, Mo, Mn, V
2	공구용 초경합금	W, Co
3	자동차 배기가스 촉매	Pt, Pd, Rh, La, Ce
4	모터용 희토류자석	Nd, Dy, Tb
5	Li이온 2차전지	Li, Co, Ni, Mn

자원 확보를 통한 수요국가에서는 안정적인 희토류 금속의 공급을 목적으로 해외 광산개발, 대체재료 개발 및 폐자원 리사이클링 등의 자원 확보 전략을 세우고 있다¹⁾. 본 연구는 우리나라도 희소금속의 리사이클링이 필요하므로, 이 리사이클링 기술을 조사 분석하여 실제 사용하거나 연구하고 있는 산업체의 기술자와 연구자들에게 정보를 전하는데 목적이 있다. 본고는 Nd자석, PGM 및 Li이온 2차전지의 리사이클 현상에 대하여 기술한다.¹⁻⁷⁾

2. 희소금속의 자원과 리사이클링 개요

2.1. 희소금속의 중요성과 자원

세계 각국의 자동차 생산 업체 들은 자동차의 환경성 향상이나 에너지 절약, 소형, 경량화, 고기능화 및 내구성 향상 등을 위하여 경쟁적으로 기술을 개발하고 있다. 특히 차세대 자동차인 하이브리드 자동차(HV), PHEV 및 EV 자동차의 제조에는 각종의 광물자원이 필요한데, 특히 Li과 Nd의 수요량이 급증할 것으로 보인다. 희토류 금속자원의 세계 생산량을 Table 2에 제시하였다. Table 2에서 보는 바와 같이 2010년도 기준 희토류 금속의 세계 생산량은 124,000톤인데, 이 중 중국의 생산율이 97%^{8,9)}를 차지하고 있다. Nd, Dy 등

Table 2. Production volume of rare metals by the countries^{8,9)}

희소 금속 명	생산량 최대국명	금속 생산점유율(%)	세계생산량 단위(MT)
rare earth	중국	96.8	124,000
Nb	브라질	92.1	63,000
Ta	브라질	26.9	670
Co	중국	43.1	76,371
W	중국	90.8	82,342
Pt	남아프리카	75.6	195
Pd	러시아	44.2	197
Mo	중국	38.8	241,100
V	중국	41.1	56,000

Table 3. Typical Chemical components of rare earth minerals^{3,10)}

	Ion-adsorption clay mineral		Bastnasite		Monazite	Loparite
	Xuwun	Longan	Baotou	Mountain-pass	Australia	Russia
La ₂ O ₃	29.88	2.18	27.22	32.25	23.90	25.00
CeO ₂	7.18	1.09	48.73	49.17	46.03	50.50
Pr ₆ O ₁₁	7.14	1.08	5.13	4.35	5.05	15.00
Nd ₂ O ₃	30.18	3.47	16.63	12.02	17.38	0.70
Sm ₂ O ₃	6.32	2.34	1.24	0.79	2.53	0.09
Dy ₂ O ₃	1.77	7.48	0.09	0.02	0.69	0.70
Y ₂ O ₃	10.07	64.1	0.27	0.01	2.41	1.30
Tb ₄ O ₃	0.46	1.13	0.03	0.02	0.04	0.60
Others	7.04	17.13	0.66	1.37	1.97	6.11

Fig. 1. Price of rare metals between 2005 and 2011^{11,13)}.

의 희소금속가격은 2000년대에 와서 급격히 상승하는 경향을 보이다가 근래는 약간 하락하는 추세이다.

Table 3에 주요국가에서 생산하는 대표적 희토류광석의 성분 분석 예를 제시하였다^{3),10)}. Table 3에서 보는 바와 같이 중국산 희토류광석이 Nd, Dy 함량이 높고 이온흡착광으로 형성되었기 때문에 채광비용과 제련비용이 저렴하여 가장 경쟁력 있는 공급원이 되었다.

차세대 자동차에서 사용되고 있는 희소 자원이 일부

국가에 편재되어 있어서 수급이 불안정하여 가격이 급등하게 되었다. 특히 희소금속을 사용하는 최신 기술로 개발되는 제품수요의 확대, 신제품이나 새로운 용도개발, 투기자금에 의한 경제조작, 정책경쟁, 생산국에서의 파업으로 인한 생산 중단 등에 의해 그 가격 변동이 심하게 나타난다. Fig. 1에 중요한 희소금속의 가격변동 그림을 제시하였다^{11,13)}.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 자동차 촉매로 사용되는

Fig. 3. Processing flow of the Nd magnet fabrication¹⁰⁾.

2.3. 폐 Nd 자석의 리사이클링

사용하지 못하는 Nd 자석은 폐기형 스크랩, 자석이 공 공정 중에서 발생하는 스크랩, 제조과정 중의 불량품 등 여러 형태로 발생하기 때문에 리사이클링방법도 폐기된 자석품질에 따라 리사이클링법을 선정할 필요가 있다. Table 4에 희토류 소결자석의 리사이클 방법을 제시하였다⁷⁾.

Table 4 중의 ① 공정은 희토류제련법에 의한 원료 소재로 재생하는 공정이고, ② 공정은 자석합금을 원료로 재생하는 자석 재생법이다. ③ 공정은 자기재료 상태 그대로 이용하는 자석 재생법 등으로 대별 하였다. Nd 자석의 리사이클 공정도를 Fig. 4에 제시하였다^{2,3,7)}.

희토류금속은 화학적으로 활성이 강여 수용액상태에서의 전해 채취가 불가능하여 유기용매 등의 저온 비수용액을 이용하는 전해법 등이 연구되고 있다. Fig. 4는 Nd계 스크랩을 산처리나 알칼리 처리하여 수용액으로 제조한 다음, 용액을 정제하여 침전 분리, 용매추출이나 이온교환 법 등에 의해 목적 금속을 분리 회수한 고형

Fig. 4. A recycling process of Nd magnet scraps^{2,3,7)}.

물을 산화물이나 할로겐화 염으로 회수하는 공정과 회수한 재료를 환원하거나 용융염 전해법으로 희토류 금속을 회수하는 공정을 보여 준다.

Table 4. Recycling process of Sintered magnets⁷⁾

	Recycle 방법	
① 소재재생법	불화물염 침전법, Oxalic acid 염 침전법, 황산염 정출분리법, 질산염 침전법	습식 공정
	화학기상 수송법, 선택환원 증유법, 선택추출법	건식공정
② 합금재생법	전해재생법, 용해재생법, 수소/Ca환원 탈산법, 전기화학적 탈산법 Ca 하라이드 플럭스 하라이드 탈산법	합금재생법
③ 자석재생법	자석 재생법, 합금 재생법 자석합금을 가스켓으로 이용	
	자석 스크랩분에 희토류 합금분말을 첨가, 혼합하여 자석을 재생하는 방법	

Table 5. Production volume of Pd by the countries¹⁵⁾(MT)

Countries	Mine Production	Reserves PGM	Reserve Base Ore
United state	14,200	900,000	2,000,000
Canada	13,500	310,000	390,000
Russia	96,000	6,200,000	6,600,000
South Africa	81,700	63,000,000	70,000,000
Other Countries	10,400	800,000	850,000
World total (rounded)	216,000	71,000,000	80,000,000

Reference : U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey(2006), Mineral Commodity Summaries 2006

Table 6. Production volume of Pt by the countries¹⁵⁾ (MT)

Countries	Mine Production	Reserves PGM	Reserve Base Ore
United state	4,200	900,000	2,000,000
Canada	9,000	310,000	390,000
Russia	27,000	6,200,000	6,600,000
South Africa	170,000	63,000,000	70,000,000
Other Countries	7,600	800,000	850,000
World total (rounded)	218,000	71,000,000	80,000,000

Reference : U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey(2006), Mineral Commodity Summaries 2006

3. PGM 및 리튬 리사이클링

3.1. 배기가스정화장치에 사용된 PGM 계 자원

자동차 배기가스용 촉매로 사용하는 PGM (Platinum Group Metal) 중에서 Pd 생산량과 매장 광량을 Table 5 에, Pt 생산량과 매장 광량을 Table 6에 제시하였다¹⁵⁾. 이 자료들은 미국의 지질조사소(U.S. Geological Survey : USGS) 보고서에서 인용한 것이다.

Table 5와 Table 6에서 알 수 있는 바와 같이 Pd와 Pt가 같은 광석에 함께 포함되어 있고, 특히 이들의 광석이 Russia와 South Africa에 편재 되어 있다.¹⁸⁾ 또한 Pt와 Pd 금속은 원광 중에 미량 함유되어 있으므로 채광 및 선광 시에 폐석 처리 부하가 많이 부가된다. 특히 선광에 사용하는 물이 많이 사용됨으로 환경 관리에도 문제가 있다. 생산량도 편재되어서, 경제적 환경변화에 따라 가격 변동이 있으므로 원료 조달에도 항상 문제가 있고, 일정한 원료확보를 위하여 PGM의 리사이클링이 대단히 중요하다¹⁶⁾.

3.2. PGM 리사이클링과 Li 리사이클링

Au, Ag 및 Pt, Pd, Rh 등의 백금족금속(PGM)은

지각에 매장된 양 자체가 대단히 소량이라 귀금속이라고도 한다. 귀금속 리사이클링을 크게 나누면 Cu의 건식 제련 공정을 걸쳐서 Cu 전해 정련 시의 잔사로 회수하는 방법과 귀금속 전문업자가 독자적으로 회수하는 방법이 있다. 전자는 전자부품, 리드프레임 등의 폐자원을 원광석과 함께 동 제련할 경우에 귀금속 성분이 조동에 함입되고, 이 조동을 전해 정련 할 경우에 귀금속이 양극 Slime 으로 전해조 바닥에 침전된다. 이것을 회수하여 습식법을 중심으로 정제한다. 후자는 귀금속 스크랩이나 촉매 또는 자동차 배기가스 정화 촉매 등의 폐자원을 이용하여 습, 건식법을 이용하여 금속을 회수한다.^{2,17)}

PGM을 용매추출법을 중심으로 분리하는 공정은 INCO사의 Acton 제련소에서 귀금속 분리정제공정을 기초로 널리 응용되고 있다, Fig. 5²⁾는 PGM 스크랩을 동제련 시에 용융 농축하여 회수하는 Rose 법이다. Fig. 6은 자동차 배기가스 정화용 폐촉매의 리사이클링 공정이고¹⁷⁾, 이는 염소가스를 함유한 염산용액을 이용하여 PGM을 침출하여 PGM의 높은 염화물 이온상태의 화학종으로 반응시키는 것이 중요하다. 이들 PGM 염화물 이온 착체는 염화물 이온 농도 저하에 따라 Cl⁻

이 물분자로 치환되어 착체의 가수도 변화하기 때문에 분리계의 선택을 위해서도 용존상태를 파악할 필요가 있다. PGM 폐자원의 형태나 품위가 다르므로 제련법도 건식법, 습식법 및 습건식 혼합법 등에 의해 PGM을 회수한다. 자동차 배기가스 정화용 촉매에는 Pt, Pd 및 Rh, Ir 등이 사용되고 있기 때문에 폐기되는 가스 정화용 촉매가 세라믹스 담체중에 분산되어 있는 백금족을 농축시키는 공정으로서 산용해후 침전법 및 화합물 착체를 용매추출 법을 이용하여 각 각의 금속을 회

수하는 공정이다.

Li 용도는 리튬이온 2차전지, 유약, 내열 그라스 등이다. 리튬광의 매장량은 세계 매장량의 약 70%가 Chile에 매장되어 있고, 기타 호주, 중국, 알제진 등에 매장되어 있다. 세계생산 규모는 LiCO_3 로 환산하여 120,000톤 정도이고, 현재 한국은 수입하고 있는 실정이다⁶⁾. Li배터리의 리사이클링 방법은 전기 자동차에서 사용하고 난 후에도 70~80%의 용량이 남아 있으므로 이 배터리를 재이용(Reuse), 재판매(Resell), 재제품화(Refabricate), Recycle 하는 조직을 구성하여 진행하고 있다¹⁹⁾.

4. 국내외 희토류자석의 리사이클링 기술 동향

국내외의 희소금속을 포함한 폐부품을 리사이클링 하기 위해서는 폐자원 발생원을 조사할 필요가 있다. Nd 자석을 사용하는 대표적 부품의 원단위를 Table 7에 제시하였다³⁾. EV 자동차모터에 사용하는 자석은 EV 1대 당 1.3 kg의 Nd 자석이 사용되고 있으며, 금후 차세대 자동차의 보급이 확대됨에 따라 Dy를 포함한 고성능 자석이 증가될 것으로 예상된다.

2010년도 중국의 Nd 생산량은 27,000톤/년, Dy는 4,000톤/년 생산되었고, 일본은 13,000톤의 Nd 자석 합금을 생산하였다. 차세대 자동차 100만대를 제조할 경우 Nd 합금자석의 사용량을 계산해 보면, 1 kgNd합금 자석/1대 $\times$ 100만대 = 1,000톤의 자석이 필요하다. 1,000톤 중에 Nd는 300톤/년, Dy는 30~90톤/년 필요하다³⁾.

2010년 중국의 희토류 수출 정책, 사회 투기 등에 의해 희토류 값이 급등하여 2011년 7월 8일 가격이 Nd는 420 US\$/kg, Dy는 3,600 US\$/kg (CIF JP.)급상승하였다가 현재는 감소 추세이다³⁾. 이상과 같은 Nd 자

Fig. 5. Pyro process of PGM by Rose process²⁾.

Fig. 6. Hydrometallurgical recycling process of the waste automobile catalyst¹⁷⁾.

Table 7. Usage volume of the Nd magnet in the Units³⁾

제품	희토류자석 원단위 (kg/ 대)
하이브리드 자동차 (HEV)	0.25~1.25
전기자동차 (EV)	1.3
파워 스티어링	0.09
에어컨	0.12
하드디스크드라이브 (HDD)	0.01
휴대전화	0.0005
핵자기공명해상장치 (MRI)	1500

Table 8. NdFeB magnets volume of the import, export and reserves in Japan (unit : t)

	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년
생산량	5,500	7,100	8,230	9,350	10,500	10,500
수입량	463	627	766	1,045	1,115	1,112
수출량	5,092	5,241	6,726	7,370	8,535	7,361
비축증가량	931	2,576	2,270	3,025	3,080	4,250

Table 9. Rare earth consumption in Japan(2011) (unit : t)

희토류 종류	수요량	수요량
영구자석 Nd, Di, Sm, Dy, Tb	15,000	
		4,500 금속
Ni-MH전지 Mm(La, Pr, Nd)	8,000	
		3,000 금속
희토류형광체 Y, Eu, La, Ce, Tb, Gd	3,000	
		2,500 산화물
자동차 촉매 Ce, La, Pr, Nd	16,000	
		1,700 산화물
그라스 연마제 Ce, La, Pr, Nd	8,000	
		6,000 산화물

석의 수요량을 개략적으로 추산해 본 결과, Nd 자석의 리사이클링 양은 현실적으로 차세대 자동차 개발이 2000년대에 들어서 개발되기 시작하고 있고, 실용화는 수년전부터 실행하고 있기 때문에 폐기되는 자동차의 양이 적을 것으로 생각된다. 세계 Nd자석 생산량이 2010년도 기준 약 45,000톤이고 일본의 소결 자석은 약 13,000톤 생산하고 있으며 일본의 생산 비중이 상당히 큰 편이다. 일본의 NdFeB 자석의 수출입량과 일본의 비축량을 Table 8에 제시한다²²⁾.

2008년도까지의 Nd소결자석의 생산량 추이를 보면 생산량, 수입량 및 수출량과 비축량이 매년 증가하는 추

세를 보이고 있다. 2011년도 일본의 희토류 소비량을 Table 9에 제시하였다²²⁾.

Table 9에서 영구자석이 15,000톤 수요시에 희토류 금속이 4500톤 Ni-MH 전지용 8,000톤 중에 Misch metal이 3,000톤, 희토류 형광체용 산화물 2,500톤 자동차 촉매용으로 희토류 산화물 1,700 톤 및 그라스 연마제용 희토류 산화물로 6,000톤 수요가 있는 것을 나타내었다.

4.1. 희토류자석의 리사이클 현상

2011년 12월 01일 일본사단법인 신금속협회 (Japan Society of Newer Metals : JSNM) 산업기술심의 리사이클 소위원회 발표자료에서²³⁾, 2010년도 일본의 자석 생산량(합금환산) 15,000톤 자석 중의 Nd과 Dy 함유량이 약 30%, 최종적 모터에 소비하는 양이 30~40%로 추정 된다²³⁾. 여기에서 가장 큰 과제는 시장에서 리사이클 양을 확보하는 것이다. 회수효율을 향상하려면 우선 분리기술의 연구와 경제성 향상에 관해서도 연구가 필요하다. 현재 제조 공정 중에 발생하는 스크랩의 리사이클 시스템은 확립되어 있다. 그러므로 자석회수는 공정 스크랩 리사이클 시스템 이용이 가능하다. 희토류의 리사이클 현상을 Table 10에 제시하였다²³⁾.

Table 10에서 보이는 바와 같이 희토류자석은 생산 공정 중에서 약 80% 이상 리사이클링 되지만, 스크랩을 리사이클링하는 실적은 나타나지 않고 검토하거나 개발 중이다. 이 표에 제시하고 있는 대부분의 희토류 원소는 2000년대에 들어오면서 LED, 2차전지, HEV, EV 자동차 등의 개발 및 실용화 역사가 얼마 되지 않기 때문에 시장에서 폐기물 확보 문제가 있다고 생각된다.

Fig. 7에 희토류 자석의 리사이클 공정도를 제시한다. 이 공정은 희토류 원료를 습식 처리에 의해서 분리 정제하여 회수한 희토류 산화물이나 할로겐화 염을 용융염 전해하고, 공정에서 희토류 합금을 회수하고, 이 합금을 스트립 캐스팅해서 박판형으로 제조 후에 분쇄, 밀

Table 10. Rare metal recycling in Japan.²³⁾

종류	공정중	리사이클	리사이클 율 (%)
자석재료	◎	△	◎>80, ○=50-80, ×<20, △는 검토중, 개발중, Ni=○, 귀금속=◎
Ni-MH전지	△	△	
RE형광체	△	△	
자동차 촉매	×	△	
그라스연마제	○	△

Fig. 7. Recycling process flow of the rare earth magnet²³⁾.

Fig. 8. The material flow of Nd, Pr and Dy in Japan (2009).

링 하여 소결 자석을 얻는 공정으로서 자석 소결 가공 중에 발생하는 고형스크래프는 약 5%, 소결 자석 연마 과정에서 발생하는 연마 분은 약 30%가 발생하는 것으로서 공정 중에서 리사이클링 하는 방법이다. Nd 고성능 자석은 Dy가 3~10% 함유되어 있다. Nd 자석은 차세대 자동차 (HV, PHEV, EV), VCM의 HDD 등에 탑재되어 출하된다. Nd자석의 주 용도는 모터에 37%, VCM (HDD)에 34%, MRI에 11%, 음향기기에 8%, 기타 10%의 비율로 소비되고 있다¹²⁾. 2009년도 일본의 Nd계 수출입 및 응용제품의 물질유통 수지도를 Fig. 8에 제시하였다.

Fig. 8에서 보이는 바와 같이 Nd 2,500~2,800톤, Dy 금속 400톤을 사용하여 9,000~10,000톤의 합금을 제조하여 HDD용 29%, 모터용 25%, 자동차용 23%, 기타 23% 사용하여 각종 제품으로 판매되고, Nd 산화물 0~900톤은 배기가스 정화용 촉매로 180~650톤, 세라믹스 콘덴서용으로 0~300톤 사용된다. 자석 합금의 대표적 조성은 Nd 30%, B 1%, Fe Balance 이외에 Dy는 3~10% 사용되고, Pr, Tb도 첨가제로 사용한다.

Table 11. Expect demand volume of Nd and Dy in Japan²⁴⁾

금속 종	일본 국내 Nd, Dy 년도별 수요량		
	2010 년	2015 년	2020 년
Nd 금속	5,200	6,200	7,100
Dy 금속	600	720	740

Table 12. Estimation volume of the next generation automobile in the world auto market²⁵⁾

차종류	2012년 예측	2030년 예측	2012년비 증가
HV	233만대	1,187만대	8.6배 증가
PHV	5만대	1,034만대	206.8배 증가
EV	7만대	1,374만대	196.3배 증가

금후에 차세대 자동차와 고성능 가전제품의 수요가 증가함에 따라 Nd자석의 수요가 증가할 것으로 예상되어 2010년부터 2020년도까지의 Nd, Dy의 수요증가량 예측치를 Table 11에 제시하였다²⁴⁾.

차세대 자동차의 증가에 따라 희토류 자석 사용량은 필연적으로 증가할 것으로 예상됨에 따라 희토류 자석의 리사이클링 율도 증가할 것으로 예상된다.

HV, PHEV 및 EV 자동차의 세계 시장 예측에 대하여 Fuji-Keizai Goup이 2012년 2월 10일에 발표한 자료에서 세계시장 예측을 Table 12에 제시하였다²⁵⁾. Table 12에서 2030년이 되면 EV 전기차가 1,474만대로 가장 많이 생산될 것으로 예상 된다. HV는 2012, 2013년부터 각 자동차 회사가 신형차종을 투입할 것을 예상하고 있기 때문에 선진국을 중심으로 시장이 확대 되리라고 예상하고 있다. PHV는 2015년경부터 양산화 되어 HV에서 PHV로 생산 주력을 이동하여 확대할 것으로 예상하고 있다. EV는 2014년 초에 BMW i3, 닛산 (Leaf), 한국 기아차, GM의 스파크EV, 르노삼성의 SM3 Z.E. 등을 출시할 계획으로 모델을 선보이고 있다.

특히 전기차의 확대 보급을 위하여 각 선진국이 전기차 보조금을 1대당 약 1만 달러, 한국은 1,500~2,300만원까지 보조해주는 조건으로 생산을 서두르고 있다. (2013년 12월 10일 조선 경제) 현재 주행거리와 배터리 수명과 내구성 및 충전 단축 시간 등이 과제이지만, 2014년부터 배터리 충전 경제성이 정비되어 유럽부터 시장이 확대될 전망이다. 2025년경에는 전지 특성 향상, 기술의 혁신과 주행거리의 개선 및 리튬전지의 단가저하 현재 약 1,000원/wh에서 약 200원/wh로 저하될 것으로 예상 되고, 2030년에는 EV가 PHEV 보다 더 시

장규모가 확대될 것으로 예상된다²⁵⁾.

현재 Nd 자석을 탑재한 차세대 자동차나 고성능 가전제품 등이 사용되고 난 후의 배출량이 큰 폭으로 증가될 것으로 예상됨으로 리사이클링량을 확보할 수 있다고 예상된다.

Nd 와 Dy을 포함한 제품을 사용하고 난 제품으로부터 Nd자석을 분리회수 기술 현상을 Table 13에 제시하였다²⁴⁾. 탈자 분리회수 하는 전처리 기술 중에서 에어컨, 컴퓨터나 하드디스크의 전처리 기술은 실용화 되고 있으며, 차세대 자동차에 탑재한 모터의 전처리기술은 연구 중이고, Nd 자석으로부터 Nd과 Dy의 후처리 기술은 실용화 되고 있다.

희토류 금속의 기술 개발 동향을 Table 14에 제시한다. Table 14에서 보이는 바와 같이 각 전처리기술이 실용화되지 않는 이유는 폐기되는 기기의 분해를 인력을 이용함으로 경제성이 없기 때문이고, 이 문제 해결을 위하여 기계적으로 물리 선별하는 선별기 개발이 진행되고 있으며 후처리 기술은 건식, 습식법을 동원하여 분리 회수하는 기술은 확립된 상태이다.

4.2. 일본의 차세대 자동차 순환 및 해외유출실태

자동차 자체의 회수율은 거의 100%이지만, 회수 후

에 해체 업자 등을 통해서 해외로 유출하는 것이 상당량 존재한다. 차세대 자동차의 구동용 모터는 자동차회사에 매각하기도 하고, 해외에 수출하는 경우가 있다. 차세대 자동차의 구동용 전지는 자동차 공장에 인도하는 경우가 많고, 수출하는 경우는 적다. 해체 업자 중에는 금후 국내의 자원을 순환하기 위해서는 해체 업자만으로는 곤란하고, 자동차 회사나 비철제련 사업자 등 관련 있는 회사들과 연계하여 수집 경로를 구축할 필요가 있다. Fig. 9에 사용하고 난 후의 자동차 (ELV) 처리 물질 수지를 제시한다.²⁴⁾

Fig. 9에서 보는 바와 같이 폐차 2,871천 대, 이중 925천대(HV)를 수집업자가 수집 하여 중고차는 수출하고 폐차는 해체 업자에게 인도하고, 이 해체 업자는 주요 부품별로 분류하여 각 전문 처리업자에게 인도한다. 파쇄 부분은 리사이클링 사업자에게 인도하고, 구동용 모터나 전지는 국내 부품으로 재사용하거나 해외에 수출한다. 배터리는 해외에 수출 하지 않고, 일본 국내에서 처리하는 실정이다.

4.3. 차세대 자동차의 리어메탈 리사이클링에 대한 경제성 분석

차세대 자동차의 회소금속 리사이클링에 대한 경제성

Table 13. Development of the Nd magnets recycling technology²⁴⁾

	전처리	후처리	비고
하드 디스크	△	○	○ : 실용화 △ : 개발중, 실증시험, × : 미개발
에어컨, 컴퓨터 모터	△	○	
자동차용 모터	△	○	

Table 14. Development Trend of Nd magnet recycling ²⁴⁾

~ 2007년부터 2011년 사이의 기술개발 동향		
전처리기술	하드디스크 (HDD)	하드디스크를 분리하여 Nd자석을 분리회수 하는 자동화장치의 개발은 [METI]보조로 2008년 중순부터 시작하여 2010년 초에 보고되었다. 자동화 장치의 실용화 개발은 [NEDO]보조로 2010년 중순에서 2011년까지 실용화 개발하였다.
	전동파워 스티어링 모터	전동파워스티어링으로부터 Nd자석을 분리회수 하는 기술개발은 [NEDO]보조를 받아 2010년에서 2011년까지 수행하였다.
	자동차 구동용 모터	HV 자동차 등의 구동용모터에서 자석을 분리 회수하는 기술 개발은 2010년도 중순부터 2011년까지 개발되고 있다.
후처리기술		1990년대에 공정내 리사이클링이 사업화 되었으나 2009년대에 와서 2010년 초순까지 새로운 후처리기술이 [METI]보조로 되었고, 새로운 후처리기술을 [NEDO] 보조로 2011년도에 새로운 후처리기술을 개발하였다.

출처 : JSNM 산업구조심의회환경분과.리사이클소위원회(제19회)자료

Fig. 9. The recycling material flow of ELV and second cars²⁴⁾.

분석표를 Table 15에 2010년도 기준, Table 16에 2020년도 기준하여 작성된 표를 제시하였다. Table 15의 경제성을 보면 리어 메탈을 회수 안한 것이 회수한 것보다 경제성이 있음을 보이고, 2020년도에는 차세대 자동차의 배출량이 증가한 것과 리어메탈 회수기술 발전 등으로 인하여 리어 메탈을 회수한 것이 회수 안한 것보다 경제성이 있음을 예측하였다²⁴⁾.

다만 중간 처리 단계에서는 2020년에서도 Nd자석을 회수했을 때의 수지가 Nd자석을 회수하지 않았을 때보다 떨어졌음으로 리어 메탈 리사이클링을 촉진하기 위해서는 금속 회수단계의 수입을 일정한 수준으로 중간 처리에서 배분할 필요가 있다. 경과 년수에 따르는 감도 분석에서는 2016년 이후부터 리어 메탈 회수가 회수하지 않은 경우보다 경제성이 있다고 예시되었다²⁴⁾.

5. 리튬이온 2차전지 및 PGM의 리사이클링 기술동향

5.1. 리튬 수급과 리사이클링

Li 용도는 리튬이온 전지, 유약, 내열 그라스 등이 있다. 2008년도 기준 세계 리튬 매장량은 4백10만 톤인데, 이중 70%가 Chile에 편재되어 있다. 주요 생산국은 칠레, 호주, 중국, 알제진 4개국에서 80% 이상을 점유하고 있다. 상세한 내용은 불명이지만, 아시아가 Li_2CO_3 소비량을 50% 이상을 점유하고 그다음이 유럽·아메리카 순으로 소비하고 있다⁶⁾. 용도별로는 리튬이온 전지용 정극화합물과 전해질 재료로 23%, 도자기 유약 용으로 17%, 내열그라스용 첨가제로 14% 정도이다. 세

Table 15. Economical evaluation of the rare metal recovery in the next generation automobile(in bases 2010 year)²⁴⁾ (unit : 10,000\$)

2010		리어메탈 회수 안한 경우	인공으로 대체 회수
중간처리	비용	0	63
	수입	33	24
중간처리 단계에서 수지		33	-39
금속 회수	비용	-	50
	수입	-	78
금속회수단계에서 수지		-	28
합계 수지 (수입 -비용)		33	-11
(리어메탈 회수했을 때의 합계 수지- 리어메탈회수 안했을 때 합계수지)			-44

Table 16. Economical evaluation of the rare metal recovery in the next generation automobile(in bases 2020 year)²⁴⁾ (unit : 10,000\$)

2020		리어메탈 회수 안한 경우	인공으로 대체 회수
중간처리	비용		483
	수입	866	653
중간처리 단계에서 수지		866	170
금속 회수	비용	-	854
	수입	-	1,867
금속회수단계에서 수지		-	1,012
합계 수지 (수입 -비용)		866	1,182
(리어메탈회수 했을 때의 합계 수지- 리어메탈회수 안했을 때 합계수지)			+316

출처 : 산업구조 심의회환경부회폐기물·리사이클링소위원회(제 21회) 자료

계시장 규모는 Li_2CO_3 로 환산하여 약 12만 톤 이다. 일본과 한국은 광석으로부터 정제하지 않고 탄산리튬을 수입해서 사용하는 실정이고, 리튬 이온 전지는 Co 회수를 목적으로 리사이클링하고 있으나 리튬 회수는 안하고 있다. Fig. 10에 2008년도 기준 일본 국내의 리튬활용 물질 유통 수지도표를 제시하였다⁶⁾.

Fig 10에서 보이는 바와 같이 금속 Li 142톤, Li_2CO_3 2,548톤 리튬 수산화물 797톤을 수입하여 금속 환원제 리튬 전지 각종 리튬 화합물 리튬이온 2차전지 및 용제, 유기합성 환원제 등 다양하게 활용되고 있다.

세계 희토류 광석 생산량은 2008년 기준으로 중국이 97%를 차지하고, 특히 이 중 희토류인 Tb와 Dy은 99%를 생산하고 있다. Tb나 Dy은 Nd자석에 약 3~10%를 사용하여 고온에서도 높은 보자력을 유지할 수 있는 특징이 있다.

2011년 12월 중국 상무부가 제 1기 수출량을 24,904톤으로 공표하였는데, 이 중에 경희토류가 21,700톤, 중희토류 3,204톤을 발표하였다. 2010년도 일본의 수입량은 20,704톤 중 중국에서 19,721톤을 수입하였으니까 약 78%를 중국에서 수입하고, 중국 수출량의 22%는 다른 나라에 분배한 셈이다. 우리나라는 2010년에서 2016년까지 희토류 1,164톤 확보계획을 하고, 해외 광산 개발, 대체물질 개발 및 리사이클링 등 R&D 강화에 많은 대책을 강구하고 있다.

우리나라는 Nd이나 Dy을 수입하여 자석을 제조하고 있기 때문에 차세대 자동차에서 사용하고 배출되는 고성능 Nd자석은 리사이클링 해야 하는데, 자동차에 사용되는 Nd자석은 구동 모터용과 자동차의 전동 파워스티어링 모터에 사용되고 있다. 그런데 사용되는 Nd 자석의 성분도 다르고, 또 Nd자석 외에 페라이트 자석등도 사용하고 있기 때문에 회수할 때 선별 분리가 필요하다. 그러므로 고성능 모터 제조회사에서 Nd자석 종류를 모터에 표기하여 선별 회수하는데 편리하도록 하는 제조규정을 정할 필요가 있다고 생각된다.

자동차에 사용되고 폐기되는 Li이온 배터리를 이용하여 Li과 Co를 회수하는 경우에도, 현재 Li이온 배터리가 LiCoO₂, LiMnO₃계, LiFePO₄ Olivine계 등 새로운 배터리가 개발되고 있기 때문에 종류별로 분리 회수할 수 있도록 배터리 구성 성분이나 종류를 배터리에 표기하는 것을 제도적으로 확립할 필요가 있다.

현재 Nd자석 생산 시에 공정에서 발생하는 스크랩은 제조공정 내에서 순환 처리하는 리사이클링 공정이 대세를 이루고 있으나, 사용하고 폐기된 기기나 모터에서 희토류를 회수하고 있는 리사이클링 법은 실행되고 있지만 희소하다. 이 이유는 배출량도작지만 가장 기술적인 문제는 기기나 모터를 인품으로 분해 해체 하고 있는 수준임으로 경제성이 없는데도 큰 요인이 있다. 이 문제를 해결하기 위하여 도시광산 분야에서 모터 등을 분해, 파쇄 등에 의해 자석, 비철금속, 철 등을 자동적으로 분리 선별하는 장치와 시스템 개발이 진행되고 있다.

사용하고 배출되는 폐품을 정상적으로 리사이클링 하는데는 아래 몇 가지 요건을 구비해야 된다고 생각된다.
① 수집 방법이다. 배출되는 기기나 모터류가 한곳에서

배출되는 것이 아니고 산발적으로 배출되는 경우가 많음으로 일정한 곳에 수집되도록 하는 수집망이 필요하다. ② 원료가 확보되면 인공적으로 해체 분해하지 않고 기계적으로 해체 분해하여 선별할 수 있는 장치 개발이 필요하다. ③ 해체 분해된 물질을 물리, 열화학적으로 분리회수에 관한 경제성 있는 방법을 연구 개발하는 것이 필요하다.

차세대 자동차에서 사용하고 배출하는 리튬 이온배터리는 효율이 70~80% 있으므로, 이 배터리를 실생활에서 재활용할 수 있는 방법을 개발하는 방법도 중요하다. 배기가스정화용 촉매는 습식처리에 의해 회수하고 있으나, 담체인 세라믹의 재활용에 대해서도 연구할 필요가 있다고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술정보연구원(KISTI)이 미래창조과학부 과학기술진흥 기금과 복권기금을 지원 받아 2013년도 ReSEAT 프로그램에 의해 수행하게 되었음을 감사드립니다.

References

1. Tomio Harada, 2012 : Japan's Strategy for Ensuring Stable Supplies of Rare-earth Elements, Journal of Society of Automotive Engineers, Japan, 66(11), pp. 22-29.
2. TANAKA Mikiya, 2011 : Recycling of Rare-metals, Chemical and Education, Jp. 59(10) pp. 969-979.
3. S.Shirayama, T.Okabe, 2011 : Current Status of Rare Earth Elements and Their Recycling Processes, Journal of Society of Automotive Engineers, Jp. 65(11), pp. 87-94.
4. O. Takeda, T. Okabe, 2011 : Technical development and Real of the Rare Metals, Chemistry and Industry, Jp.66(11), pp. 774-776.
5. Tatsuya Oki, 2012 : Physical Separation Technology for Recycling of Rare Earth Metals, Journal of Society of Automotive Engineers, Japan, 66(11), pp. 74-79.
6. Satoru Okubo, 2010 : The trends of Supply and Demand for rare metals, Chemical Engineering, Jp. 74(3), pp. 120-126.
7. O. Takeda, T. Okabe, 2012 : Pyrometallurgy and Recycling of Rare Earth Metals, Journal of Society of Automotive Engineers, Japan, 66(11), pp. 68-73.
8. Y.Kita, S.Okubo, 2012 : Rare Metal, Its Exploitation and Resource Policy, Surface Tec. Jp. 63(11), pp. 612-617.
9. NAKAMURA Mamoru, 2011 : Rare Metals Problems,

- KINZOKU, Jp., 81(2), pp. 93-94.
10. Y. Kaaneko, 2006 : Deploy high-performance applications of NdFeB sintered magnets, Engineering Materials, Jp., 54(2), pp.48-52.
 11. K.Nose, T.Okabe, 2012 : Current Status and Problems of Rare Metals, Surface Tec. Jp.,63(10), pp. 618-624.
 12. Takehisa Minowa, 2011 : The Present Situation of the Rarte Earth Magnet and the Action Assignment in the Future, Journal of Society of Automotive Engineers, Japan, 65(11), pp. 14-15.
 13. Toru H.Okabe, 2010 : Current Status and Problems of Rare Metals and Precious Metals, Chemical Engineering, Jp., 74(3), pp. 102-108.
 14. Minowa Takehisa, 2010 : The Development trend of Processing of Rare Earth Magnet Tecknology and resource issues, Engineering Materials, Jp., 58(7), pp. 22-27.
 15. Recycle Symposium, 2007 : The Topic of the latest Phenomenon and Recycling Rare Metals, Japan Society of Waste Management, PP. 1-45.
 16. WATANABE Yasushi, 2011 : Platinum Group Resource Development and Processing times, KINZOKU Jp., 81(2), pp. 99-103.
 17. NARITA Hirokazu, 2011 : Platinum Group Metal Catalysts purified by recycling, KINZOKU, Jp., 81(2), pp. 104-108.
 18. Ypko Yamabe-Mitarai, et al, 2011 : Effective Use of Platinum Group Metals, J. Japan Inst. Metals, 75(1), pp. 10-20.
 19. Katsuo SUGA, 2011 : Development of Sustainable Automotive Materials, Chemical Engineering, Jp., 75(11), pp. 731-734.
 20. J.Shiobada, N.Murayama, M.Niinae, T.Fuji yama, 2011 : Environmentally Friendly Separation and Recovery Process of Tungsten and Cobalt from Tungsten Carbide Tool Waste, J. Japan Inst. Metals, 75(11), pp. 613-619.
 21. K.Nose, T.H.Okabe, 2011 : Recycling Technology of Tungsten, KINZOKU, Jp., 81(11), pp. 908-915.
 22. MORIMOTO Shinichiro, et al, 2011 : Presupposition of Supply and Demand of Rare Earth Elements, KINZOKU, Jp., 81(11), pp. 117-122.
 23. Recycling Symposium, 2011, 12.01 : Current Status of Rare Earth Recycling, Japan Society of Newer Metals. pp. 1-16.
 24. Situation of Rare Earth Recycling, 2012 : Japan Ministry of Economy Trade and Industry Trade. pp. 3-26.
 25. "World Market Research of PHV and EV", 2012 : <http://www.group.fuji-keizai.co.jp/>
 26. <http://www.koenergy.co.kr>

황 용 길

- 동아대학교 금속공학과 교수
- 현재 동아대학교 명예교수, 한국과학기술정보연구원 ReSEAT 프로그램 전문연구위원

길 상 철

- 산업연구원 책임연구원
- 산업기술정보원 책임연구원
- 현재 한국과학기술정보연구원 책임연구위원

김 종 현

- 현재 한국과학기술정보연구원 선임연구위원