



ISSN 1225-8024(Print)  
ISSN 2288-8403(Online)

한국표면공학회지  
J. Korean Inst. Surf. Eng.  
Vol. 49, No. 6, 2016.

<https://doi.org/10.5695/JKISE.2016.49.6.477>

<해설논문>

## 폐전자부품에서 유가금속 회수기술

김유상\*

한국과학기술정보연구원 ReSEAT 전문연구위원

## Recovery of Valuable Metal from e-Wasted Electronic Devices

Yu-Sang Kim\*

ReSEAT Program, Senior Research Fellow, Korea Institute of Science  
and Technology Information (KISTI), Seoul 02456, Korea

(Received December 19, 2016 ; revised December 29, 2016 ; accepted December 30, 2016)

### Abstract

As expensive and valuable metals being used in electronic and semiconducting industries are abandoned as industrial wastes after use of them, it is required to recover them from e-wasted electronics parts. Gold which is used for printed circuit boards or electronic equipments, accessories, etc., is one of e-Wasted materials and recently indium, gallium, zirconium, cobalt, molybdenum and lithium are become valuable metals to be recovered from the e-wastes. Since the amount of precious metals is now being faced with scarcity, lean too much on area and instability of supply, and industrial demands are rapidly increasing every year, it becomes more important to recover the valuable metals from the industrial wastes. In this review, we introduced technologies and research trend of the recovery processes of valuable metals from the e-wastes in high-tech devices over the world.

*Keywords : Valuable metals, Recovery, Indium, Gallium, Zirconium*

## 1. 서 론

반도체, LED, 스마트기기에는 고가의 유가금속이 다량 사용되고 있는데, 대부분이 폐기되고 있어 이를 회수할 수 있는 박리 및 표면처리 기술이 필요하다. 스마트폰에는 Cu가 15.12 g 정도 함유되어 있고 리튬이온 배터리에는 Li, Au, Ag, Pd 등의 귀금속뿐만 아니라 Cu, Fe, Sn, Ni, Zn, Pb의 유가금속도 다량 함유되어 있다. 2003년 중국의 Jirang Cui와 Eric Forssberg, 스웨덴의 Luleå Univ.에서 폐전기·전자 장치로부터 유가금속의 회수에 대한 기술동향을 발표하였다[1-2]. 이들은 배터리, 음극선 튜

브(CRTs), 토너 카트리지, 인쇄회로기판(PCB), 액정(LCD), 가스충전 램프에서 알루미늄, 동, 철, 납과 아연 등을 회수하였다[3]. 2004년 일본에서는 ITO 타겟에 사용되는 폐기물에서 인듐을 회수하였는데, 스퍼터링 공정에서 42%, 에칭에서 11%, 조립에서 4.1%, 재자원화에서 36%회수하였으나 LCD에 함유된 6.4%는 회수하지 못했다. 현재, 인듐의 수요량은 매년 급증하고는 있지만 회소성, 지역편중성, 공급불안정의 문제에 직면해 있다[4]. 이러한 문제들을 해결하기 위해서 인듐을 비롯한 유가금속들의 회수는 매우 중요하다. 이에 본 해설에서는 최근의 폐전자부품에서 유가금속을 회수하는 기술동향에 대하여 소개하고자 한다.

\*Corresponding Author : Yu-Sang Kim

Department of ReSEAT Program, Korea Institute of Science  
and Technology Information, Korea  
Tel : +82-2-3299-6231 ; Fax : +82-2-3299-6234  
E-mail : ysk4718@daum.net

## 2. 연구 및 기술 동향

리튬을 비롯한 금, 인듐, 갈륨, 지르코늄 등의 유

가금속은 스마트폰이나 LED, PC, 태양전지 및 연료전지 분야에서 널리 사용되고 있는 금속으로서 점차적으로 적용이 확대되고 있다. 1994년 태양금속공업(주)에서 산·금속 이온교환 회수설비를 개발하면서부터 현재 회성금속, 서라벌금속, 21세기금속 등의 기업에서 이러한 유가금속 회수설비를 제조하고 있다. 리튬이나, 인듐, 백금 등의 유가금속은 자동차 배기가스 정화용 및 석유화학 촉매, 유리산업, 전기전자 산업, 화학 산업, 치과용 재료, 장신구 분야의 소재원료로 수요가 급증하고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 최근 6년간 세계적인 백금(Pt)의 공급량은 매년 조금씩 감소되거나 정체하고 있는 반면, 수요량은 대체적으로 증가되고 있음을 알 수 있다[45]. 현재, 귀금속의 주요 생산국은 남아프리카 공화국, 러시아, 브라질, 미국, 캐나다, 짐바브웨, 가나, 콜롬비아 등이며, 금은 남아프리카공화국(40%), 브라질(35%), 구소련(15%)에서 주로 생산되고 있으며, 백금족 금속은 남아프리카공화국과 러시아가 전 세계 생산량의 90% 정도를 차지하고 있다[45]. 2015년 Johnson Matthey사의 PGM 시장보고서에 따르면 남아프리카 공화국에서 79.2톤이 공급되었으며 이는 세계 총 생산량의 25%를 차지한다. 용도별 백금의 수요량은 자기촉매(auto-catalyst) 용이 전체의 78%로서 가장 많으며 그 다음이 화학(chemical), 치과(dental)용순위로 조사되었다. 하지만, 백금의 재활용 점유율은 10% 이하로 보고되고 있다[7]. 한편, 스마트폰에는 마그네슘(Mg)이 약 5.54 g, 리튬 이차전지에는 코발트(Co)가 약 5.38 g, 주석(Sn)이 약 1.12 g이 함유되어 있으며[46] 유가금속 회수의 필요성이 고조되면서 이와 관련된 기술 정보제공이 선행되어야 할 것으로 사료된다.

2.1. 유가금속의 분리 및 회수기술

2.1.1. 침지법

금(Au)을 회수하고자 할 때에는 시안화나트륨

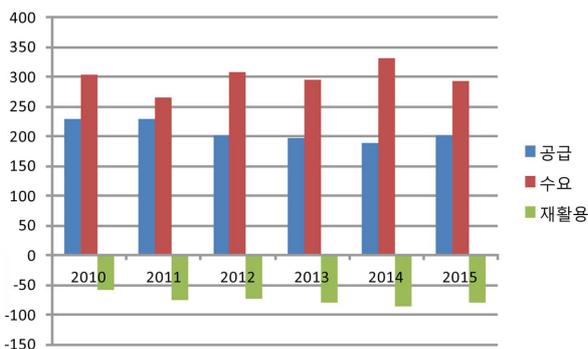


Fig. 1. Platinum tones; supply and demand (PGM Market November 2015, Johnson Matthey)[45, 46].

(NaCN), 시안화칼륨(KCN), 과산화수소 혼합용액을 60°C로 하여 수 초간 침지하면 금을 박리할 수 있다. Au/Ni도금층의 분리는 30%황수(진한 질산 : 진한 염산 = 1 : 3)를 사용하고, Cu도금층의 분리는 50% 암모니아수 20 ml에 과산화수소 4방울을 혼합한 용액에 침지하는 방법으로 이루어진다.

2.1.2. 전해법

전해법은 시안화나트륨, 수산화나트륨 혼합용액의 전해액 중에 폐기되는 전자부품을 양극으로 하고 스테인리스 판을 음극으로 하여 전해 회수하는 방법이다. 전해채취에 있어서 목적금속만 선택적으로 회수한다는 것은 매우 어렵다. 따라서 전위차나 침전 등을 통하여 여과하거나 용매를 다양하게 사용하여 목적으로 하는 금속만을 분리시키는 기술이 필요하다. 불순물의 분리법으로는 ① 가수분해에 의한 수산화물의 생성, ② 공침, ③ 특수한 침전제 첨가에 의한 화합물의 생성, ④ 환원에 의한 금속 또는 금속 화합물의 생성, ⑤ 이온교환이나 용매추출법을 이용하는 방법, ⑥ 기타의 분리법 등이 있다. 전해법에 사용되는 전해액으로서 요구되는 성질은 ① 목적금속 이온의 용해도가 높을 것, ② 전도율이 높을 것(유리산 농도가 높은 강산이나 강알칼리를 사용함), ③ 음이온이 화학적으로 안정할 것, ④ 값이 저렴할 것, ⑤ 슬라임의 양극면에서의 밀착성이 적고 분산유리가 일어나지 않을 것, ⑥ 평활한 전착을 얻을 수 있을 것 등이다. 가장 값이 싸고 안정한 염은 황산염이며 Cu의 정련에 사용된다. 수소 발생의 분극이 높은 금속, Ag, Zn, Pb, Cu, Sn에는 강산의 전해액이 사용된다. Cu를 전해채취할 경우 아교, 젤라틴, 리그닌 등처럼 보호콜로이드를 형성하는 첨가제와, 티오요소, 알로인과 같은 관능기를 지닌 유기물이 음극석출 상태를 개선하기 위하여 많이 사용된다. 일반적으로 첨가제에 함유된 NH<sub>3</sub>나 N은 평활효과, S는 광택효과, O는 표면장력을 낮추어 물과의 친화성을 높이는 중요한 역할을 한다.

2.1.3. 이온교환법 및 용매추출법

스마트폰이나 전기자동차 배터리에 함유된 리튬의 회수에는 이온교환수지법이 사용되고 있다. 최근 이온교환 및 용매추출 등의 방법이 침출액의 농축을 목적으로 사용되고 있다. 이온교환제로서는 제올라이트, 함수 알루미늄실리케이트 등의 무기물이 있으며 염가의 용매추출법이 개발되어 기술도 진보하고 있다. 이러한 용매추출법은 미량의 성분이나 고순도 금속을 회수하는데 뛰어난 방법이다. 이온교환수지를 이용한 산과 금속을 분리 회수하는 시스템은

전반적으로 불용성 고형물(TDS; Total Dissolved Solid) 함유량이 낮고 폐수 중의 유기물 성분이 적어야 효과적이다.

2.2. 유기금속의 회수동향

유기금속을 회수하는 방법에는 크게 건식법과 습식법이 있다. 건식법에는 벨트 샌딩, 그라인딩, 환원법이 있으나, 회수공정이 복잡하고 폭발의 위험이 따르고 고순도로 회수하는데 한계가 있다. 습식법에는 이온교환법, 역삼투법, 공침법이 있고, 전처리 공정을 거쳐서 선별된 유기금속들을 산이나 알칼리로 침출하고, 용매추출, 화학침전, 이온교환법, 여과 및 증류기술을 이용하여 목적금속을 분리, 농축한다. 전해정련하면 양극에서 Cu가 용해되고 음극에서 고순도의 Cu로 전착된다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 폐전자부품에 함유된 독성의 물질을 제거한 후, 마지막 공정에서 가스화하거나 열분해하여 유기금속을 회수한다. 2014년 IIT Roorkee사의 보고에 의하면, 폐PCB나 폐전자부품에 함유된 Polybrominated di-phenyl ethers, Polychlorinated Bi-phenyls, Polychlorinated di-benzodioxineins, Polychlorinated di-benzofurans, 중금속의 Cr, Pb, Ni, Cu, Cd, Hg 및 Polycyclic aromatic hydrocarbons의 독성물질에 대하여 세계적으로 논의되고 있다. 그림 3에서 보는바와 같이, 최근에는 폐스마트폰이나

배터리부품에 함유된 리튬이나 코발트 회수에 관한 연구가 절반을 차지하고 있다[5].

2.2.1. 인듐(In)의 수요 및 회수동향

인듐은 1863년 독일의 F. Reich와 H. T Richter가 아연광에서 짙은 남색의 Indigo스펙트럼을 발견하면서부터 인듐(Indium)이라고 명명하였다[6]. 1933년 미국에서 치과용 합금을 개발하여 최초로 상용화 하였다[8]. 인듐은 아연, 동, 철, 주석, 니켈 및 납의 황화합물과 황염광물을 제련하는 과정에서 갈륨, 은 및 금과 함께 부산물의 형태로 생산된다. 이러한 인듐을 회수하기 위해서는 황산이나 염산의 강산을 사용한다. 인듐은 유리, 액정, 세라믹 표면의 접합특성을 향상시키며 산화주석에 첨가됨에 따라 투명한 고성능 전도체(ITO)가 된다.

인듐의 전 세계 매장량은 16,000톤으로 추정되며 이중에서 중국이 70%를 차지하고 있다. 2015년을 기점으로 국내 디스플레이 산업이 중국에 추격을 당하면서부터 인듐의 수요량이 감소하는 경향이다 [1, 9]. 2009년 한국의 광공업과 무역통계에 따르면 국내에서 인듐은 총 132톤이 사용된 것으로 밝혀졌다[10]. 2009년 중국에서는 폐기되고 있는 태양 전지판의 액정 디스플레이 패널(LCDs)에서 인듐을 회수하였다[11]. 2003년 중국에서는 ITO유리 분극 필름을 230°C로 가열하여 산화처리한 후, 강산으로 흑색의 산화인듐을 침출 회수하였다. 하지만 비용이 많이 소요되어 경제성이 없는데다 유기용매 사용에 따른 환경오염 때문에 멤브레인 필터를 사용하여 고상으로 추출하거나 초임계 이산화탄소를 사용하여 전기화학적으로 추출하고 있다[12]. 2011년 중국의 J. Jiang, D. Liang, Q. Zhong은 소듐 트리폴리 포스페이트( $Na_5P_3O_{10}$ )를 사용한 가압산화 침출법으로 인듐을 분리 회수하는데 성공했다[9, 11].  $Na_5P_3O_{10}$ 을 이용한 pH변화에 따른 인듐의 회수량은 pH2.5까지 증가하였고  $Na_5P_3O_{10}$ 인듐 몰비가 0.91 일 때 95%의 높은 회수율을 나타내었다[13].

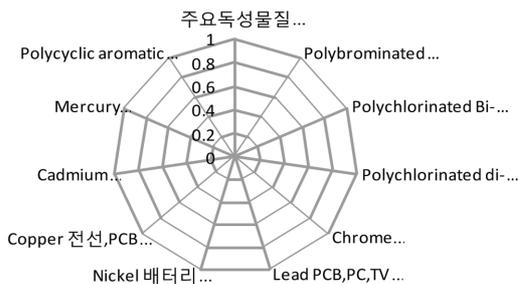


Fig. 2. Account of major toxicants in e-wasted electronic parts [46].

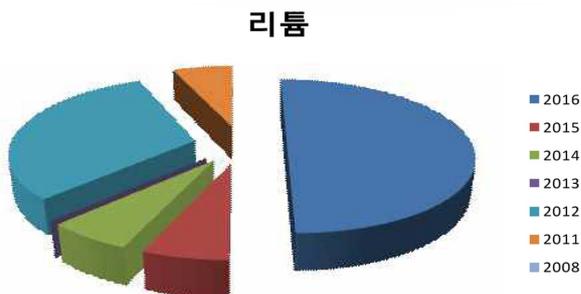


Fig. 3. Trend of recovery from e-Wasted Lithium-ion battery[5].

2.2.2. 갈륨(Ga)의 수요 및 회수동향

2015년 국내에서는 GPS (Gas Press Sintering furnace) 및 Plasma 회수 기술을 적용한 산화물 반도체용 산화 갈륨의 제조방법(10-1546612-0000, METHOD OF MANUFACTURING GALLIUM OXIDE FOR OXIDE SEMICONDUCTOR BY USING GPS AND PLASMA RECOVERY TECHNOLOGY)을 특허로 등록하였다[14]. 2014년 갈륨스크랩을 미분쇄하여 산으로 침출한 후, 알칼리로써 아연을 수산화물로 침전, 분리여과, 전해채취하여 갈륨을 회수

하였다[15].

최근 산화물 활성층을 갖는 TFT에 대한 관심이 증대하면서 투명전극(TCO)용으로 ZnO나 IGZO(In-Ga-ZnO)화합물이 연구되고 있다. 산화물 반도체 타깃의 핵심소재중의 하나인 갈륨의 회수기술은 아직까지 국내에서 확립되어 있지 않은 실정이다. 2009년 주식회사 엔코사에서 MO-CVD 공정에서 발생하는 폐기물로부터 갈륨의 회수방법을 특허로 출원하였다[16]. 포집설비에서 발생하는 폐필터로써 갈륨 함유 분진(Ga-dust)을 분리, 회수하여 침출 및 전해채취를 통하여 회수하는 알칼리 전해채취법을 적용하였다. 1992년 윤경석 박사는 소재 공정기술 개발 첨단소재용 갈륨 및 인듐 화합물의 제조기술 동향을 발표하였다[17]. 2004년에는 방향성 결정을 이용한 7N 이상의 고순도 갈륨 및 비소 정제기술 개발을 목표로 화합물 반도체의 원료로 양산할 수 있는 갈륨-비소 스크랩의 자체분석 기술을 확보하였다[18]. 이후, 2013년 LED 폐스크랩, 폐액, 폐모듈의 폐자원으로부터 회수금속의 회수기술을 상용화 하였다[19]. 태양전지나 LED에서 인듐과 갈륨의 농도가 700 ppm 이하인 저품위 폐자원에서 회수금속 회수가 어려웠지만 높은 부가가치를 창출할 수 있었다.

2.2.3. 지르코늄(Zr)의 수요 및 회수동향

2015년 국내에서는 불화물계 용융염을 이용한 지르코늄 스크랩의 전해정련 거동에 관한 논문이 발표되었다[20]. 6개의 다중전극을 이용하여 정련실험을 한 결과 낮은 25.64 mA/cm<sup>2</sup>조건에서 높은 98% 회수율을 보였고 회수된 Zr의 순도는 99.92%이었다. 이에 앞서 2013년 포스코 엠텍에서는 지르코늄과 하프늄 분리를 위한 용매추출 방법의 특허를 등록(KR10-1316335-1)하였다[21]. 수용액 중의 지르코늄과 하프늄을 용매추출 공법으로 분리하기 위해 이수소하이포인산(Hypophosphite, H<sub>2</sub>PO<sub>2</sub><sup>-</sup>) 이온을 첨가하여 두 금속간의 분리도를 향상시키고 지르코늄 회수율을 증진시킬 수 있는 용매추출 방법을 사용하였다. 2014년 재단법인 포항산업과학연구원에서는 염화 지르코늄의 환원장치 및 환원방법의 특허를 등록(KR10-1351323)하였다[22]. 2013년에는 사용 후 핵연료 지르칼로이-4 피복관의 LiCl-KCl 용융염 전해정련을 통한 제염 가능성을 평가하기 위해 방사화학분석 코드(ORIGEN-2)를 통해 원자로 내에서 방사화 지르칼로이 피복관 핵종의 조성을 분석하였다[23]. 본 과제를 통해 개발된 지르칼로이 피복관 전해정련 기술은 피복관 이외에도 원전에서 발생하는 기타 지르코늄 합금 폐기물을 제염하는데

적용함으로써 고가 금지르코늄 회수하는데 활용할 수 있었다.

3. 국내외 기술정보분석

3.1. 해외동향

최근 해외에서는 폐기되는 리튬-이온 배터리에서 유가금속을 회수하고자 하는 연구가 활성화 되고 있다[24-44, 48]. 그림 4에 연도별 최근의 해외의 유가금속 회수동향을 나타내었다. 2010년 중국의 L. Li와 J. Ge, F. Wu는 습식법으로 리튬과 코발트를 회수하였다. 2014년 중국 에서는 초음파 침출공정에 의한 페리튬-이온 배터리에서 유가금속 회수에 관한 연구결과를 보고하였다[53]. 2015년 Zhang Shengqiang 등은 초음파를 사용하여 니켈-수소 배터리의 폐전극에서 유가금속을 회수하는 기술동향을 발표하였다[59]. 하이브리드 자동차(HEVs)의 폐LiCoO<sub>2</sub> 배터리에서 유가금속을 침출 회수하고 있다[55]. LiCoO<sub>2</sub>는 높은 에너지 밀도와 높은 작동전압, 뛰어난 사이클 성능을 나타낸다. 하지만 가격이 비싸며 코발트(Co) 자원의 수급한계성과 독성 때문에 반드시 회수되어야 한다. 또 코발트와 리튬은 리튬이온 배터리에 각각 5~20 wt%, 5~7 wt%가 함유되어 있다[55].

2016년 이란 Tarbiat Modares Univ.의 N. Bahaloo Horeh 등은 휴대폰 페리튬-이온 배터리에서 바이오 침출에 의한 유가금속의 회수에 관한 연구를 진행하고 있다[49, 54]. 휴대폰 페리튬-이온 배터리에 함유된 Cu, Li, Mn, Al, Co와 Ni금속을 회수하는 기술로서, *Aspergillus niger*의 항균역할에 기초를 둔 바이오 습식야금 기술을 기반으로 한 회수기술이다. 여기서 유가금속의 회수율은 Cu 100%, Li 95%, Mn 70%, Al 65%, Co 45%과 Ni 38%이었다. 2011년 중국의 J. M. Zaho와 X. Y. Shen 등은 Cyanex272와 PC-88A를 사용하여 페리튬-이온 배터

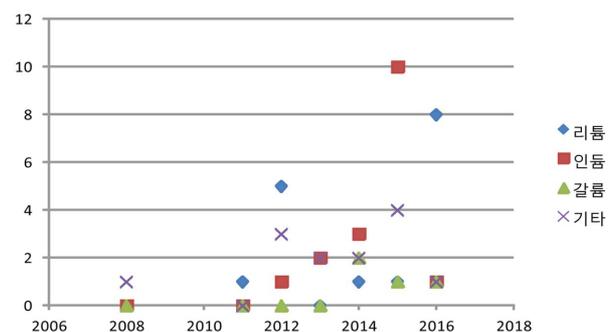


Fig. 4. Trend of recovery from the valuable metal in the world.

리의 양극재료에서 유가금속의 시너지적인 추출과 분리에 성공하였다[57]. 2016년 오스트레일리아 Swinburne Univ.의 M.A.H. Shuva와 독일의 M.A. Reuter 등은 1차 및 2차 Cu생산공정에서 폐기되는 전자부품에 함유된 유가원소(Fe, Al, Pb, Cu, Au, Ag, Sn, Se, Te, Pt, Pd, Ta, Co, In)의 습식야금학적 열역학적 데이터 기술동향을 발표하였다[56]. 이보다 앞서 2012년 대만 Chung Hwa Univ.의 Yi-Ming Kuo는 아연 인산염 슬러지에서 유가금속의 회수를 위한 연구결과를 보고하였다[58].

2015년 인도 Kuvempu Univ.의 G. P. Nayaka 등은 페리튬-이온 배터리의 캐소드 재료에 유기산을 사용한 유가금속 이온의 회수에 관한 논문을 발표하였다[47]. 80°C에서 리튬-코발트 산화물을 회수하는데, 킬레이트 화합물인 구연산과 아스코르브산을 환원제로 사용하였다. 2012년 중국 Central South Univ.의 Liang Sun 등은 페리튬-이온 배터리에서 유기 옥살산염을 침출제와 침전제로 사용하였다[3].

2012년 중국의 Liang Sun 등은 페리튬-이온 배터리에서의 코발트와 리튬회수를 위해 진공 열분해하여 LiCoO<sub>2</sub>와 CoO를 1.0M 옥살산염 용액으로써 CoC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O로 침전시켜서 120분간 고체/액체 비율을 50g/L로 하였다[3]. LiCoO<sub>2</sub>의 반응효율은 98% 이상이었으며, 습식야금학적 회수공정을 통하여 Co와 Li를 효과적으로 분리 회수할 수 있었다. 2007년 중국에서는 연성회로기관과 BGA(Ball Grid Array), CSP(Chip Scale Package)로부터도 유가금속을 회수하고자 하는 연구도 일부 진행되고 있다.

2016년 이란의 Tarbiat Modares Univ. P. Rasoulnia 등은 *Penicillium simplicissimum*을 사용한 열처리와 다양한 바이오 침출법으로 바나듐-니켈 잔사에서 해면상의 유가금속 침출에 관한 연구를 진행하고 있다[49]. 해면상의 V-Ni축매 잔사는 매년 전 세계적으로 발전소에서 생성되고 있으며 이러한 잔사에 함유된 유가금속의 회수가 중요하다. 본 연구에서는 2단계로 각기 다른 바이오 침출법을 사용하여 *Penicillium simplicissimum*의 침출성능을 조사하고 바이오 침출에 미치는 열전처리의 영향도 연구하였다[54]. 소정의 온도에서 전처리 공정에서 탄소와 휘발분을 제거하고 바이오 침출연구를 진행한 결과, V는 100%침출되었고 Ni는 40%가 침출되었으며 Fe는 48.3%회수율을 보였다. 생성된 순수 배양균은 고성능 액체 크로마토그래피 (HPLC)로써 유기산을 측정하고 물리화학적 특성과 함께 XRF, XRD, FTIR 및 FE-SEM 분석법으로 시료의 형태변화를 종합적으로 조사하였다.

2012년 스페인 Politècnica de Catalunya Univ.의

Michaela Petersková 등은 역삼투 농축의 선택적 용매를 사용한 유가금속(Cs, Rb, Li, U) 이온의 추출에 관한 연구결과를 보고하였다[50]. 염분이 증가할수록 ZrP에 의한 Cs흡착량은 감소하였고 Cs처리량은 공통이온의 효과보다는 Cs와 Rb양에 좌우되었다. 2016년 대만 Hungkuang Univ.의 Hung-Yee Shu 등은 폐수에서 유가의 TMAH(Tetra-Methyl Ammonium Hydroxide)회수에 필요한 양이온 수지 고정층 칼럼에 관한 연구결과를 보고하였다[51]. 본 연구에서는 TFT-LCD 박막의 액정 디스플레이 폐수에서 9N의 염산을 사용한 이온교환수지로써 99.6%와 98.0%의 TMAH를 회수하고 있어, 최근 TMAH가 폐기물 산업에서 중요한 이슈로 등장하고 있음을 알 수 있다.

2015년 그리스 Crete Univ.의 Vasiliki Savvilitidou 등은 폐LCDs에서 금속-유가자원 회수 연구결과를 발표하였다. 여기서는 폐기되는 전기전자부품의 LCD 스크린에서 인듐(In), 비소(As)와 안티모니(Sb)를 침출하였다[49]. LCD 스크린의 투명성 확보를 위하여 As 독성을 대체한 Sb를 회수하고 있는 것으로 알려졌다. 이들은 분극필름을 제거하기 위하여 열충격을 가하여 최적의 박리조건을 구했다.

### 3.2. 국내동향

폐Li배터리에 함유된 유가금속 회수에는 습식법이 가장 널리 사용되고 있다. 2005년 S.M. Shin과 N.H. Kim은 습식법으로 리튬과 코발트를 회수하고 2006년 D.P. Mantuano와 G. Dorella 등도 습식 전기화학법과 바이오 침출법으로 리튬과 코발트를 회수하였다[52]. 유가금속 박리 회수를 위하여 강산이나 강알칼리를 사용하여 박리 회수하고 있다. 전해 박리의 회수에서는 제품을 양극으로 하고 음극에 납이나 스테인리스, 탄소봉 등을 설치하고 직류전기를 통전한다. 최근 이온교환, 용매추출, 전해 등의 방법이 침출액의 정액이나 농축을 목적으로 사용되고 있다. 이온교환제로서는 제올라이트, 함수알루미늄실리케이트 등의 무기물도 있으며 염가의 용매추출법이 개발되어 기술도 진보하고 있다. 이러한 용매추출법은 미량의 성분이나 고순도 금속을 회수하는데 뛰어난 방법이다.

그림 5에 국내의 폐전자부품에서 유가금속 회수 기술을 나타내었다. 1994년 태양금속공업(주)에서는 이온교환수지를 이용한 금속회수 설비를 개발하였으나 상용화를 실현하지는 못했다. 이유는 멤브레인 교체의 어려움과 겨울철 용수공급이 원활하지 못했었기 때문이었다. 이러한 문제점 해결과 함께 향후, 이온교환수지의 성능, 공정별 운전조건, 반응

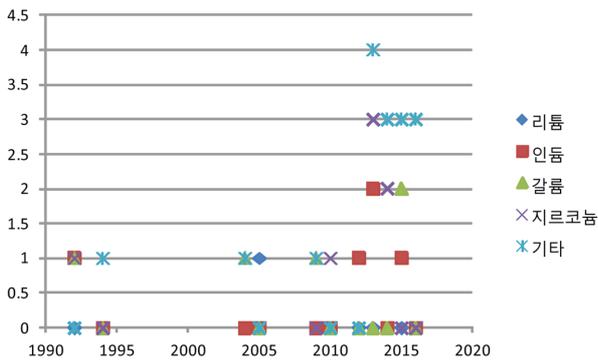


Fig. 5. Trend of recovery from the valuable metal in South Korea.

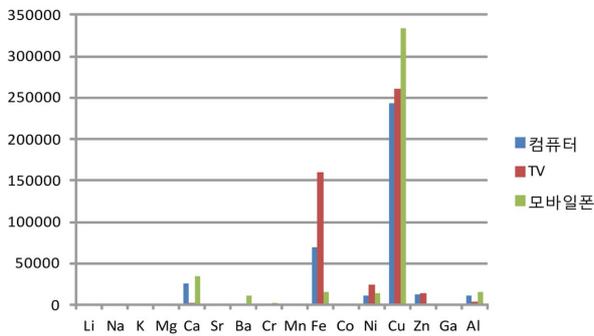


Fig. 6. Amount of valuable metal contained in e-wasted electronic equipments (mg/kg).

기 선정 및 자동화가 가능하다면 충분한 사업성이 있을 것으로 사료된다. 2013년 한국지질 자원연구소(KIGAM) 김병수 등은 인도의 Vinod Kumar와 함께 공동으로 폐DVD-PCs에서 희유금속의 환경친화적인 회수에 필요한 분리기술을 개발하였다[52]. 그림 6에서 보는바와 같이, 모바일폰에 유가금속이 가장 많이 함유되어 있음을 알 수 있다. 1990년대 국내 인쇄회로기판의 두께 금도금(50 μm) 공정에서 금을 대량회수하면서 한때 경제성이 부각되긴 했었다. 또, 중앙연산메모리(CPU) 반도체 칩에 함유된 금과 백금, 은을 회수할 수 있었다. 하지만 최근 소형화 부품으로 개발되면서 도금두께가 0.03 μm 이하로 얇아지면서부터 금이나, 은의 회수사업은 경제성이 희박한 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

스마트폰, 리튬이온 배터리, PC, 반도체, 자동차 부품이나 항공기 로켓에 유가금속을 많이 사용되고 있다. 본 해설의 이머징 기술동향 분석에서 보는바와 같이 2016년 현재, 해외에서는 폐기되는 스마트폰이나 전기자동차 리튬-이온 배터리에서 유가금속을 회수하고자 하는 연구가 활발하다. 현재 국내의

경우 리튬이나 인듐, 갈륨 및 지르코늄, 코발트, 망간 등, 고가의 유가금속은 전량 수입에 의존하고 있다. 따라서 유가금속의 회수가 매우 중요하며, 향후 유가금속의 경제적인 회수를 위해서는 경제성 분석과 함께 폐기되는 전자부품에서 다량의 유가금속을 재활용할 수 있는 유가금속 회수기술의 개발에 많은 연구 및 투자가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학기술정보연구원이 미래창조과학부 과학기술 진흥기금으로 수행하는 2016 ReSEAT 프로그램지원에 의해 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

#### References

- [1] J. Cui, E. Forssberg, Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review, *Journal of Hazardous Materials* B99 263 (2003) 243-263.
- [2] BRUCE A. FOWLER AND NIKKI MAPLES-REYNOLDS, Indium, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-59453-2.00039-1>, Volume II, Academic Press, Handbook on the Toxicology of Metals 4E CHAPTER 39 (2015) 845-853.
- [3] L. Sun, K. Qiu, Organic oxalate as leachant and precipitant for recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries, *Waste Management* 32 (2012) 1575-1582.
- [4] T. Wakabayashi, T. Maki, S. Mizutani, H. Hasegawa, H. Sawai, Ismail M.M. Rahman, Yoshinori Tsukagoshi, Selective recovery of indium from lead-smelting dust, *Chemical Engineering Journal* 277 (2015) 219-228.
- [5] S. Gupta, G. Modi, R. Saini, V. Agarwala, A review on various electronic waste recycling techniques and hazards due to its improper handling, *IRJES* 3 (2014) 5-17.
- [6] J. Cui, L. Zhang, Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review, *Journal of Hazardous Materials* 158 (2008) 228-256.
- [7] Johnson Matthey, PGM Market Report November, KISTI (2015) 2.
- [8] A. M. Alfantazi, R. R. Moskalyk, Processing of indium: a review, *Minerals Engineering* 16 (2003) 687-694.
- [9] J. G. Kim, Investigation on Recycling in Material Flow on Indium Demand Industry, *J. Kor. Powd. Met. Inst.* 19 (2012) 72-78.
- [10] L. Wang, M. Lee, Recovery of Indium from Secondary Resources by Hydrometallurgical

- Method, J. of Korean Inst. of Resources Recycling 22 (2013) 3-10.
- [11] J. Li, S. Gao, H. Duan, L. Liu, Recovery of valuable materials from waste liquid crystal display panel, *Waste Management* 29 (2009) 2033-2039.
- [12] F. Zhang, C. Wei., Z. Deng, X. Li, C. Li, M. Li, Reductive leaching of indium-bearing zinc residue in sulfuric acid using sphalerite concentrate as reductant, *Hydrometallurgy* 161 (2016) 102-106.
- [13] X. Li, Z. Deng, C. Li, C. Wei, M. Li, G. Fan, H. Rong, Direct solvent extraction of indium from a zinc residue reductive leach solution by D2EHPA, *Hydrometallurgy* 156 (2015) 1-5.
- [14] Heesung Metal Ltd, Method Of Manufacturing Gallium Oxide For Oxide Semiconductor By Using Gps And Plasma Recovery Technology, Korean Patent 2015-1546612.
- [15] Y.-J. Choi, S.-H. Hwang, D.-I. Jeon and K.-S. Han, Method for Making High Purity Gallium by Electrowinning, J. of Korean Inst. of Resources Recycling 23 (2014) 63-67.
- [16] Enco Ltd, A Recovery Method Of Gallium From The Mo-cvd Wastes, Korean Patent 2012-0159401
- [17] K. S. Yoon, Development of Material Process; Production Technology of Gallium and Indium for Hightech Material, KIST, 1992.
- [18] S. M. Woo, Development of Refining for High purity (>7N) Ga, As Metals, 2004.
- [19] D. H. Kwon, Development of Commercial Technology and Recovery of rare-Earth metal from e-Wasted LED, 2013.
- [20] D. J. Park, S. H. Kim, K. T. Park, J. H. Mun, H. H. Lee, J. H. Lee, Electrorefining Behavior of Zirconium Scrap with Multiple Cathode in Fluoride-Based Molten Salt, Chungnam National University, <http://dx.doi.org/10.7733/jnfcwt.2015.13.1.11>, *JNFCWT* 13 (2015) 11-19.
- [21] Poscomtech Ltd, Separation Method Of Zirconium And Hafnium By Solvent Extraction Process, Korpat 2013-13163351.
- [22] RIST, Method and Equipment of reduction for  $ZrCl_2$ , KORPAT 2014-1351323.
- [23] I. S. Hwang, Development of Process for Recovery of Zirconium by Electrorefining after using nuclear fuel, Seoul National University, 2014.
- [24] M. Redlinger, R. Eggert, M. Woodhouse, Evaluating the availability of gallium, indium, and tellurium from recycled photovoltaic modules, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 138 (2015) 58-71.
- [25] S. Nusen, T. Chairuangstri, Z. Zhu, C. Y. Cheng, Recovery of indium and gallium from synthetic leach solution of zinc refinery residues using synergistic solvent extraction with LIX 63 and Versatic 10 acid, *Hydrometallurgy* 160 (2016) 137-146.
- [26] L. Melk, M.L. Anttic, M. Anglada, Material removal mechanisms by EDM of zirconia reinforced MWCNT nanocomposites, *Ceramics International* 42 (2016) 5792-5801.
- [27] C. Tunsu, M. Petranikova, C. Ekberg, T. Retegan, A hydrometallurgical process for the recovery of rare earth elements from fluorescent lamp waste fractions, *Separation and Purification Technology* 161 (2016) 172-186.
- [28] X. Li, C. Wei, Z. Deng, C. Li, G. Fan, H. Rong, F. Zhang, Extraction and separation of indium and copper from zinc residue leach liquor by solvent extraction, *Separation and Purification Technology* 156 (2015) 348-355.
- [29] A. V. M. Silveira, M. S. Fuchs, D. K. Pinheiro, E.H. Tanabe, D.A. Bertuol, Recovery of indium from LCD screens of discarded cell phones, *Waste Management* 45 (2015) 334-342.
- [30] D. Fontana, Federica Forte, Roberta De Carolis, Mario Grosso, Materials recovery from waste liquid crystal displays: A focus on indium, *Waste Management* 45 (2015) 325-333.
- [31] L. Rocchetti, A. Amato, F. Beolchini, Recovery of indium from liquid crystal displays, *Journal of Cleaner Production* 116 (2016) 299-305.
- [32] L. Rocchetti, A. Amato, V. Fonti, Stefano Ubaldini, Ida De Michelis, Bernd Kopacek, Francesco Veglio, Francesca Beolchini, Cross-current leaching of indium from end-of-life LCD panels, *Waste Management* 42 (2015) 180-187.
- [33] H. Wang, Y. Gu, Y. Wu, Y.-N. Zhang, W. Wang, An evaluation of the potential yield of indium recycled from end-of-life LCDs: A case study in China, *Waste Management* 46 (2015) 480-487.
- [34] N. Sakai, M. Takeoka, T. Kumaki, H. Asano, T. Konakahara, Y. Ogiwara, Indium-catalyzed reduction of secondary amides with a hydrosiloxane leading to secondary amines, *Tetrahedron Letters* 56 (2015) 6448-6451.
- [35] H. Yoshida, S. Izhar, E. Nishio, Y. Utsumi, N. Kakimori, F. S. Asgharia, Recovery of indium from TFT and CF glasses of LCD wastes using NaOH-enhanced sub-critical water, *J. of Supercritical Fluids* 104 (2015) 40-48.
- [36] H. Yoshida, S., E. Nishio, Y. Utsumi, N. Kakimori, S. A. Feridoun, Recovery of indium from TFT and CF glasses in LCD panel wastes using sub-critical water, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 125 (2014) 14-19.
- [37] Y. He, E. Ma, Z. Xu, Recycling indium from waste liquid crystal display panel by vacuum

- carbon-reduction, *Journal of Hazardous Materials* 268 (2014) 185-190.
- [38] S. Hussain, C. Pezzeri, Y. Güüzcel, M. Rainer, C. W. Huck, G. K. Bonn, Zirconium silicate assisted removal of residual proteins after organic solvent deproteinization of human plasma, enhancing the stability of the LC-ESI-MS response for the bioanalysis of small molecules, *Analytica Chimica Acta*, 852 (2014) 284-292.
- [39] Smolenski, A. Novoselova, A. Osipenko, M. Kormilitsyn, Y. Luk'yanova, Thermodynamics of separation of uranium from neodymium between the gallium-indium liquid alloy and the LiCl-KCl molten salt phases, *Electrochimica Acta* 133 (2014) 354-358.
- [40] B. Gupta, P. Malik, Z. B. Irfan, Recovery of uranium, thorium and zirconium from allanite by extraction chromatography using impregnated chromosorb, *Water Resources and Industry* 4 (2013) 21-31.
- [41] H. Hasegawa, I. M. M. Rahman, Y. Egawa, H. Sawai, Z. A. Begum, T. Maki, S. Mizutani, Recovery of indium from end-of-life liquid-crystal display panels using aminopolycarboxylate chelants with the aid of mechanochemical treatment, *Microchemical Journal* 106 (2013) 289-294.
- [42] C. Jeon, J.-H. Cha, J.-Y. Choi, Adsorption and recovery characteristics of phosphorylated sawdust bead for indium(III) in industrial wastewater, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 27 (2015) 201-206.
- [43] J. Park, S. Choi, S. Sohn, K.-R. Kim, I. S. Hwang, Effects of operating conditions on molten-salt electrorefining for zirconium recovery from irradiated Zircaloy-4 cladding of pressurized water reactor, *Nuclear Engineering and Design* 275 (2014) 44-52.
- [44] C.-H. Lee, M.-K. Jeong, M. F. Kilicaslan, J.-H. Lee, H.-S. Hong, S.-J. Hong, Recovery of indium from used LCD panel by a time efficient and environmentally sound method assisted HEBM, *Waste Management* 33 (2013) 730-734.
- [45] Johnson Matthey, Platinum tones; supply and demand, *PGM Market Report* November, KISTI (2015).
- [46] S. Gupta, G. Modi, R. Saini, V. Agarwala, A review on various electronic waste recycling techniques and hazards due to its improper handling, *IRJES*, 3 (2014) 5-17.
- [47] G. P. Nayaka, J. Manjanna, K. V. Pai, R. Vadavi, S. J. Keny, V. S. Tripathi, Recovery of valuable metal ions from the spent lithium-ion battery using aqueous mixture of mild organic acids as alternative to mineral acids, *Hydrometallurgy* 151 (2015) 73-77.
- [48] Y. Yang, G. Huang, S. Xu, Y. He, X. Liu, Thermal treatment process for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries, *Hydrometallurgy* 165 (2016) 390-396.
- [49] P. Rasoulnia, S. M. Mousavi, S. O. Rastegar, H. Azargoshas, Fungal leaching of valuable metals from a power plant residual ash using *Penicillium simplicissimum*: Evaluation of thermal pretreatment and different bioleaching methods, *Waste Management* 52 (2016) 309-317.
- [50] M. Petersková, C. Valderrama, O. Gibert, J. Luis Cortina, Extraction of valuable metal ions (Cs, Rb, Li, U) from reverse osmosis concentrate using selective sorbents, *Desalination* 286 (2012) 316-323.
- [51] H.-Y. Shu, M.-C. Chang, J.J. Liu, Cation resin fixed-bed column for the recovery of valuable THAM reagent from the wastewater, *Process Safety and Environmental Protection* (2016).
- [52] V. Kumar, J.-C. Lee, J. Jeong, M. K. Jha, B.-S. Kim, R. Singh, Novel physical separation process for eco-friendly recycling of rare and valuable metals from end-of-life DVD-PCBs, *Separation and Purification Technology* 111 (2013) 145-154.
- [53] L. Li, L. Zhai, X. Zhang, J. Lu, R. Chen, F. Wu, K. Amine, Recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries by ultrasonic-assisted leaching process, *Journal of Power Sources* 262 (2014) 380-385.
- [54] N. Bahaloo Horeh, S. M. Mousavi, S. A. Shojaosadati, Bioleaching of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries using *Aspergillus niger*, *Journal of Power Sources* 320 (2016) 257-266.
- [55] Y. Xin, X. Guo, S. Chen, J. Wang, F. Wu, B. Xin, Bioleaching of valuable metals Li, Co, Ni and Mn from spent electric vehicle Li-ion batteries for the purpose of recovery, *Journal of Cleaner Production* 116 (2016) 249-258.
- [56] M. A. H. Shuva, M. A. Rhamdhani, G. A. Brooks, S. Masood, M.A. Reuter, Thermodynamics data of valuable elements relevant to e-waste processing through primary and secondary copper production: a review, *Journal of Cleaner Production* 131 (2016) 795-809.
- [57] J. M. Zhao, X. Y. Shen, F. L. Deng, C. F. Wang, C. Y. Wua, H. Z. Liu, Synergistic extraction and separation of valuable metals from waste cathodic material of lithium ion batteries using Cyanex272 and PC-88A, *Separation and Purification Technology* 78 (2011) 345-351.
- [58] Y. -M. Kuo, An alternative approach to recovering

valuable metals from zinc phosphating sludge,  
Journal of Hazardous Materials 201-202 (2012)  
265-272.

[59] Z. Shengqiang, H. Xiuyang, W. Dahui, Review

on Comprehensive Recovery of Valuable Metals  
from Spent Electrode Materials of Nickel-Hydrogen  
Batteries, Rare Metal Materials and Engineering,  
44 (2015) 73-78.