Resources Recycling
Vol. 33, No. 1, 2024, 3-14
https://doi.org/10.7844/kirr.2024.33.1.3
pISSN : 2765-3439 eISSN : 2765-3447

≫ 총 설 ≪

LED 폐자원 재활용: 현황과 향후 방향

이덕희 · 오현경 · §박경수

고등기술연구원 융합소재연구센터

Waste LED Recycling: Status and Prospects

Duk-Hee Lee, Hyeon-Kyung Oh and §Kyung-Soo Park

Materials Science & Chemical Engineering Center, Institute for Advanced Engineering, Gyeonggi-do 17180, Korea

요 약

LED 산업은 기술의 발전과 에너지 절감 정책을 바탕으로 수요가 급증하면서 시장은 급격히 확대되고 있다. 그에 따라 지속적으로 축적되는 LED 폐자원의 효율적인 재활용이 사회적 관심으로 증가하고 있어 현재 LED 폐자원의 재활용 상황과 향후 나아갈 방향에 대해 고찰하였다. 현재 LED 폐자원의 재활용은 Ga 회수기술에 초점이 맞춰져 있어 전처리 및 고부가가치 소재의 농축/회수 등 통합적인 재활용 기술 개발이 요구되는 상황이다. 본 논문에서는 LED 폐자원의 현황 및 재활용 기술을 알아보고 향후 방향에 대해 제시하였다.

주제어 : LED, 폐자원, 재활용, 생산자책임재활용제도

Abstract

Owing to technological advancements and energy-saving policies, the demand for LED is increasing, leading to rapid industry expansion. Consequently, efficient recycling of accumulated LED waste has become a growing social concern, and current recycling status of LED waste resources and future directions were reviewed. Currently, waste LED recycling is focused on Ga recovery. Therefore, the development of integrated recycling technologies such as pre-treatment and concentration/recovery of high valued materials is necessary. In this study, we investigated the status and recycling technologies of waste LED and presented prospects.

Key words : LED, waste, recycling, Extended Producer Responsibility (EPR)

1. 서 론

LED(Light Emitting Diode) 소자를 이용하는 LED 조명은 기존 조명 대비 에너지 효율, 수명, 소형화, 친환경성 등의 이점으로 인해 기존 조명을 빠르게 대체하였다[1-3]. 더욱이, LED 조명산업은 기술의 발달과 함께 다양한 보급정책(공공기관 LED 조명 설치 의무화, 고효율 에너지 기자재 보급을 위한 지원 제도 등)에 힘입어 시장은 성장하였다. 최근에는 단순히 사용자의 편의성을 높여주는 응용이 아닌 기존 조명에서 찾을 수 없었던 고부가가치의 융합 기술들이 적용되고 있어 관련 산업의 발전과 함께 경쟁이 더욱 치열해질 것으로 전망된다[4,5].

· Received : November 22, 2023 · Revised : December 11, 2023 · Accepted : December 11, 2023
§ Corresponding Author : Kyung-Soo Park (E-mail : kspark@iae.re.kr)
Materials Science and Chemical Engineering Center, Institute for Advanced Engineering, 175-28, Goan-ro 51beon-gil, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17180, Korea
ⓒ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.

이와 같이, 2012년부터 형광등을 대체하여 보급된 LED 조명의 사용량이 다양한 산업에서 급증하면서 수명이 다해 사용할 수 없는 LED 폐조명이 대량 발생할 것으로 예상되고 있다[6]. 환경부 보도자료에 의하면 2020년 LED 폐조명 약 16만 톤을 집계되었으나, 2030년 72만 톤으로 급격히 증가할 것으로 예상됨에 따라 LED 폐조명의 관리가 점차 중요한 환경 문제로 부상되고 있음을 의미한다. LED 폐조명 내부에는 금속(구리, 금, 은, 동), 플라스틱 등 유용 소재들이 포함되어 있고, 이러한 자원들은 첨단 산업의 중요한 원료로 사용할 수 있어 수요처가 점점 성장할 수 있는 동력을 제공할 수 있다[7,8]. 그러나, 대다수의 LED 폐조명은 재활용 기술의 부재로 매립 또는 소각으로 처리되고 있어 심각한 환경 부하(토양오염, 온실가스 및 유해가스 발생 등)의 원인이 되고 있으며, 폐자원의 해외 유출로 주요 자원 손실도 발생하고 있는 상황이다[9].

현재 주요 자원들은 한정된 매장량과 지역적인 편재로 인해 점점 고갈되고 있는 실정이며, 이로 인해 세계 각국은 자원 수입 비용 상승 문제 및 자원 확보를 위해 국가 간 이해 충돌이 심화되고 있다[10]. 더욱이, 글로벌 환경 보호 정책이 더욱 강화되고 있는 추세이기 때문에 주요 선진국에서는 폐자원을 활용한 다양한 자원 확보 전략들이 진행되어 왔다[11,12]. 이에 따라, 주요 재활용 선진국에서는 LED 조명을 생산자책임재활용제도(EPR: Extended Producer Responsibility) 품목으로 관리하는 등의 LED 폐조명 재활용의 중요성이 인식되면서 이를 활성화시키기 위한 정책들이 추진되고 있으며, 이를 통해 LED 폐조명을 회수하고 재활용할 수 있는 방안을 체계화하려는 노력이 진행 중에 있다[13,14].

우리나라에서도 LED 폐조명 처리 문제가 사회적 이슈로 대두되고 있으며, 오랫동안 한곳에 모아 처리해온 형광등과는 달리, LED 조명의 폐기 규정이 명확하지 않아 대부분 일반 쓰레기로 처리되어 왔다. 정부는 올해부터 LED 조명을 EPR 제도에 포함시켜 관리하고 있는데 재활용이 용이하고 유통량이 많은 전구형과 직관형만 우선 EPR 제도에 편입됐다[15]. EPR 시행 첫해인 올해 재활용 의무율은 생산량 대비 12% 정도로 낮게 설정되었으며, LED용 분리배출함을 따로 마련할 필요 없이 형광등 분리배출함에 폐기하도록 안내하여 쉽게 회수할 수 있도록 하고 있다. 현재, 천장 조명으로 많이 쓰이는 평판형, 십자형 및 원반형 LED 조명은 EPR에 포함되지 않은 상황이기 때문에 LED 폐자원 재활용 체계 구축 및 환경 오염 저감을 위한 국가적인 차원에서의 지원과 관련된 정책 확립이 동시에 요구되고 있다.

본 논문에서는 LED 조명 시장, 폐기물 현황, LED 폐자원 재활용 관련 기술에 대해 조사하고, 자원 선순환 구조를 구축하기 위한 향후 방향에 대해 제시하고자 한다.

2. LED 조명 특징

LED는 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이, 전기 발광(전자가 이동함으로써 발생하는 현상)이 발생할 때 빛을 방출하는 p-n 접합을 이용하여 제작된 반도체가 구성된 소형 장치이다[8]. LED 구조는 에폭시 수지로 만든 투명 캡슐 내부에 LED 칩, 본딩 와이어, 표면 지지체로 구성되어 있다. 표면 지지체는 하얀색 PPA(ployphthalamide) 플라스틱과 금속 열 싱크(metal heat sink)로 이루어져 있으며, 에폭시 수지와 첨가제로 결합되어 있다(Fig. 1(b))[16]. LED 조명에서 가장 큰 부분을 차지하는 것은 polymeric housing

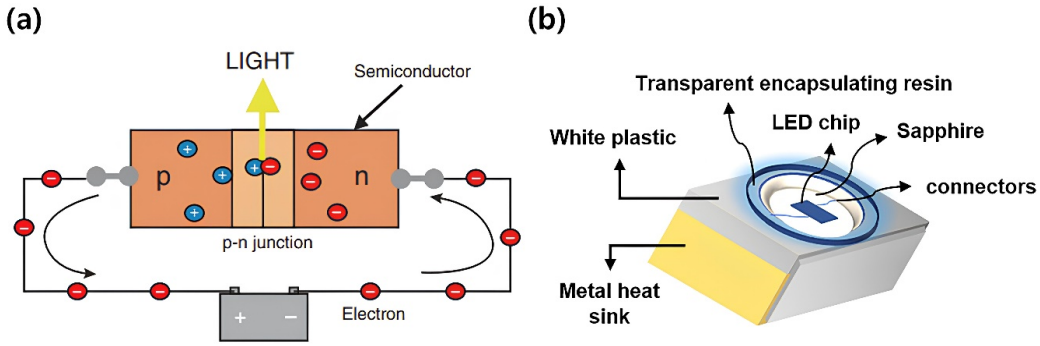


Fig. 1. (a) Schematic of light emission from a LED and (b) typical structure of LED[8,16].

(약 29%)이며, 그 뒤를 이어 polymeric cover(약 21%)가 차지한다. 질량 측면에서 가장 중요한 금속 관련 구성 요소는 metallic housing(약 14%)과 heat sink with LEDS (약 12%)에 포함되어 있으며, 이외에도 Edison screw(약 7%), coil(약 6%), PCB(약 5%)등으로 구성되어 있다[4].

역사적으로 GaAsP을 사용해 가시광을 방출하는 최초의 LED가 1962년에 Nick Holonnayak Jr.에 의해 개발되었다. 1993년, Shuji Nakamura는 처음으로 InGaN을 사용해 청색의 고휘도 LED를 소개하였으며, 그 이후로 백색 LED 개발이 가능하게 되었다. 1997년과 1998년에 처음으로 대량 생산된 LED 조명 제품들이 미국과 유럽에서 소개되면서 시장의 성장을 촉진하였다. 2007년 미국에서는 백열전구를 단계적으로 폐지하고 LED 조명으로 교체하였으며, 현재까지 다양한 형태와 소켓 유형의 모델들이 소개되었다. Fig. 2는 2008년까지 LED의 발전과정을 나타낸다[8]. 초기의 LED들은 광 출력이 매우 낮아 일부 전자기기에 한정적으로 사용되었다. 그러나 광범위한 연구를 통해 1W 이상의 출력을 낼 수 있는 LED가 개발되면서 사용 범위가 확대되었다. 고출력 LED의 등장으로 더욱 넓은 시야각에서 효율적으로 빛을 내면서 높은 광 출력값을 얻을 수 있게 되었고, 이는 LED로 대체하여 사용하는데 도움을 주었다. 이를 바탕으로 LED는 다양한 분야에서 기존의 전구를 대체하여 활용되고 있다[17,18].

3. LED 조명 산업 및 폐기물 현황

3.1. LED 조명 산업 및 시장 현황

LED 산업은 에너지 절감, 친환경적 특성을 가진 대표적인 녹색산업으로, 가전기기, 자동차, 건축, 의료기기 등 조명을 필요로 하는 거의 모든 산업에 응용되고 있다. Fig. 3은 LED 조명의 전후방 산업을 나타낸 것으로 소자, 광원 등 소재 시장을 후방 산업으로 하고 있으며, 모바일, 자동차, 농업/수산업 등 광범위한 전방 산업을 구성하고 있다[19]. 친환경, 고효율의 장점을 갖춘 LED 산업은 국제사회의 환경 규제 강화와 같은 외부환경 변화의 영향 및 세계 각국의 친환경 정책이 시장의 성장을 촉진하고, 다양한 분야로 수요가 확대되면서 성장률이 더욱 높아지고 있다.

Fig. 4에서 보듯이, LED 세계 시장(Fig. 4(a))은 2019년 261억 달러에서 연평균 12.3%로 성장하여 2027년 588억 달러로 성장할 것으로 전망된다. 또한, 지역별 시장점유율의 경우에도 2019년 기준 아시아 태평양(APAC)이 47.42%로 가장 높은 비율을 차지하였으며, 북미(North

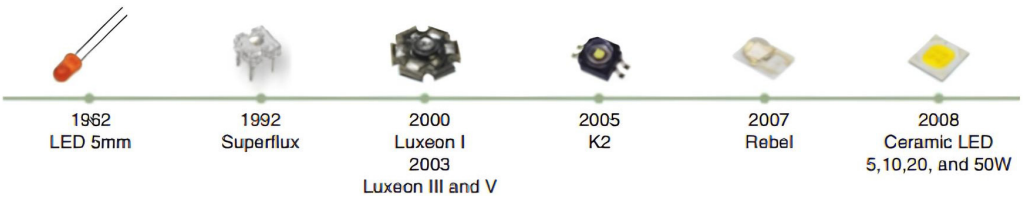


Fig. 2. A short history of LED lighting[8].

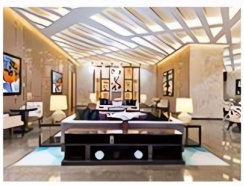
Upstream industry	LED Lighting	Downstream industry
		
LED chip/package, module, wafer, SMPS, PCB, lens	General/special lighting	Lighting, display, home appliances, agriculture, medical

Fig. 3. Upstream and downstream industries of LED lighting[19].

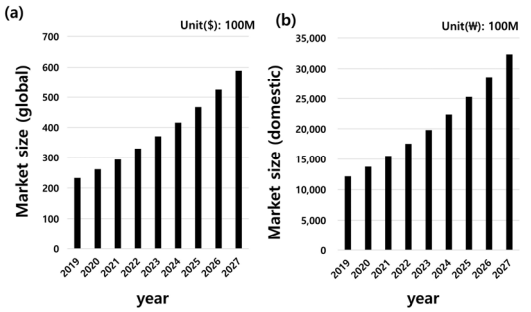


Fig. 4. LED market size forecasts for (a) global and (b) domestic markets from 2019 to 2027[20].

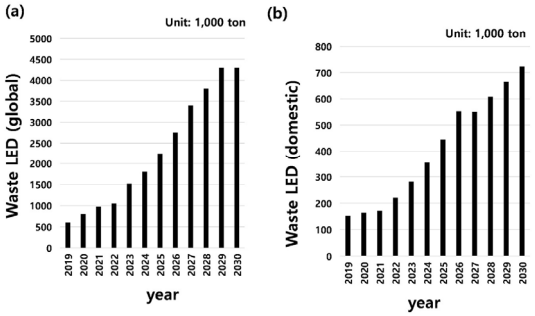


Fig. 5. Annual generation of waste LEDs from 2019 to 2030[14,21].

America) 19.6%, 유럽(Europe) 14.3%의 순으로 나타났다. 반면, 국내 시장(Fig. 4(b))는 2019년 1.2조원 규모에서 연평균 13.3%의 성장률로 증가하여 2027년에서는 3.2조원 규모로 형성될 것으로 예상되고 있다[20]. 최근 LED 조명 산업은 다른 산업과의 융합을 통해 에너지 소비를 최소화하고 사용자 편의를 극대화하는 기술이 도입된 혁신적인 형태로 빠르게 시장을 확대하고 있다.

3.2. LED 폐조명 발생 현황

Fig. 5는 국내외 LED 폐조명 발생량을 나타낸 것으로, Fig. 5(a)에서 보는바와 같이 2019년 전세계에서 발생된 LED 폐조명은 60만톤이며, 2030년에는 430만톤이 발생할 것으로 예상되고 있다[14]. 또한, 국내의 LED 폐조명 발생 현황(Fig. 5(b))을 보면 2019년 16만에서 2030년 72만톤의 폐자원이 발생할 것으로 전망되고 있다[21].

2020년, 환경부는 LED 폐조명 발생량의 예상 증가에 대비하여 수도권 지자체와 함께 4개월 동안 관련 재활용 시범사업을 추진하였고, 한국환경공단과 (사)한국조명재활용사업공제조합도 이 프로젝트에 참여하여 LED 조명의 배출 양식, 양, 재활용 프로세스, 그리고 재활용 제품 생산량 등을 분석하였다. 현재 LED 폐조명은 2023년 1월부터 EPR 품목으로 시행되면서 가정에서 배출되는 LED 폐조명(직관형 및 전구형)은 기존 폐형광등 수거함에 함께 배출한다. 이후 지자체별 수거업체에서 수거하고 재활용업체에서 최종 처리 후 공제조합에 신고하고 있다. 이와 같이 LED 폐자원의 재활용을 위한 정책적인 강화 및 인프라 지원 등 활성화를 위한 노력들이 이루어지고 있으나, 가정(단독 또는 공동주택)에서 발생하는 폐LED 분리수거 활성화를 위한 대책 마련은 여전히 미흡한 실정이다.

4. 국내외 LED 폐조명 EPR 제도 현황

다양한 폐자원의 재활용 관리를 위해 시행 중인 제도 중 대표적인 EPR 제도는 제품을 생산하거나 포장재를 이용하는 업체에게 해당 제품이나 포장재의 폐기물에 대한 일정량의 재활용 의무를 부여하여 재활용을 촉진하고, 이를 이행하지 않을 경우 재활용에 필요한 비용을 초과하는 부과금을 부과하는 제도이다[22]. 국내뿐만 대만, EU, 미국, 일본 등 재활용 선도국들에서는 LED 조명을 EPR 품목으로 관리하는 등의 구체적인 법적 방안들이 마련하였으며, 이를 통해 LED 폐조명 수거부터 재활용까지 체계화를 이루기 위해 노력하고 있다.

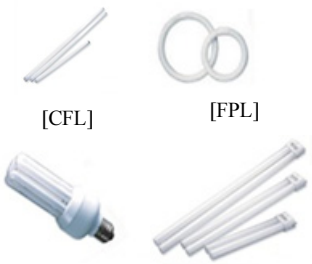
Table 1은 국내외 주요 국가의 LED 폐조명 EPR 제도의 대상 품목을 나타난 것이다. 대만은 폐기물 관리법에 의거해 EPR 제도를 운영하고 있으며 2015년 개정을 통해 직관형, 루프형, 안정기 내장형, 콤팩트형이 포함된 일반 가정용 LED 조명도 EPR 대상으로 확대하였다. 초기에는 회수율과 재활용률이 낮았지만 지속적인 홍보와 정책 장려, 재활용 회수 업체 증가 등을 통해 2019년 이후부터는 이들 지표가 증가하는 추세를 보이고 있다. EU(European Union)는 2018년 8월부터 개정된 WEEE(Waste of Electrical and Electronic Equipment) 지침을 통해 대상제품 범위가 기존 10개 범주에서 6개 범주로 분류되었으며, 기존 조명장비에 속하던 LED 조명을 램프군으로 분류해 EPR 제도 하에 관리하고 있다. 특히, 개별제품으로 출시된 LED, OLED 기술을 사용하는 광원, LED 개조 램프(retrofit lamp)를 대상 범위로 하고 있으며, 시장에 부품 형태로 출시된 LED 칩 또는 일체형 모듈 형태의 광원은 제외하고 있다[22,23].

국내의 경우, 앞에서 언급하였지만 2023년 1월부터

Table 1. Waste LED lamp EPR systems in major countries

Section	Korea	Taipei	Eu
	Extended Producer Responsibility (EPR)	Waste Management Act	WEEE
Target goods	- 4 packing materials - Fluorescent light - **LED**	- General lighting (intuitive, bulb) - LED (compact, intuitive, loop)	- Straight fluorescent lamp - Compact fluorescent lamp - Fluorescent lights - High-pressure sodium lamp, metal-halide lamp - Low pressure sodium lamp - LED

Table 2. EPR target fluorescent lamp and LED

Classification			Image
Product	Fluorescent lamp	Intuitive fluorescent lamp (FL),	[FL] [FCL] [CFL] [FPL] 
		Annular (circular) fluorescent lamp (FCL)	
		Stabilizer Built-in Lamp (CFL)	
		A compact lamp (FPL)	
	LED	Bulb type (Bulb, EL, MR16)	[Bulb] [EL] [MR16]
		Intuitive type (Intuitive, flat)	[Intuitive] [flat]

LED 폐조명이 EPR 제도에 포함되어 관리하고 있으며, 재활용이 용이하고 유통량이 많은 전구형과 직관형만 우선 EPR 제도로 편입됐다. Table 2는 EPR 대상 형광등 및 LED 조명을 나타낸 것으로, 형광등의 경우, 직관형(FL), 원형(FCL), 안정기 내장형(CFL), 콤팩트형(FPL)이 포함된 것을 확인할 수 있다. EPR 대상 LED 조명은 크게 전구형(Bulb)과 직관형(Intuitive)으로 분류되며 전구형에는 Bulb, EL, MR16가 포함되며, 직관형에는 직관형, 일자형이 포함된다. 시행 첫해인 올해는 업계의 부담을 최소화하기 위해 재활용 의무율을 12%로 비교적 낮게 산정하였으며 한국조명재활용공제조합이 주관 EPR 운영 기관으로 선정되어 관련 업무를 수행하고 있다. 그러나, 제도가 최근에 시행되었기 때문에 업체들도 아직 제도에 대한 충분한 이해가 이뤄지지 않은 상황이기에, 제도 정착을 위한 업계 홍보와 충분한 시간이 필요할 것으로 예상된다.

5. LED 폐조명 재활용 기술 및 R&D 연구 현황

5.1. 국외 LED 폐조명 재활용 기술 현황

LED 폐조명은 Fig. 6에서 보는 법과 같이 LED 조명 재

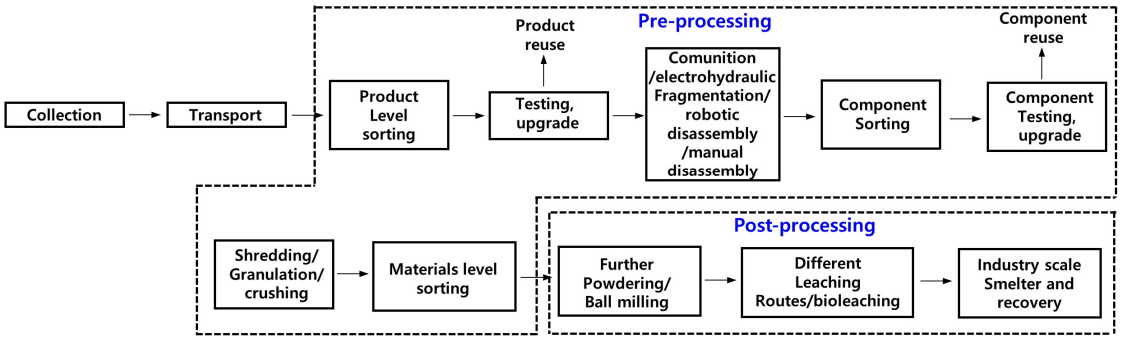


Fig. 6. Schematic diagram of typical LED lamp recycling process[24].

Table 3. Typical pre-processing process of waste LED

Sample	Process	Output
Waste LED	Granulator (40 mm) → magnetic separation → eddy current → windscreen separation	Recyclate
	Grinding/milling → mechanical separation → leaching	As, Ga, In, plastic, metal
	Shredding → splitter → hammer mil → crusher	Metal
	Hammer mill → magnetic/electrostatic separation → gravity separation	LED, plastic, etc
	Product level test → manual/comminution disassembly → shredding/sorting	Recyclate
	Manual disassembly → shredding/crushing → griding → homogenization → separation	Cu, Ni, Ga

활용은 크게 전처리(Pre-processing) 부분과 LED 내 함유된 유가자원 회수/재자원화(Post-processing) 하는 부분으로 나눌 수 있다[24]. 전처리 공정의 경우 Crushing, Cutting, Shredding 등 일반적인 분쇄법을 통해 처리하고 있으며, magnetic, floation, sieving, gravity를 이용한 선별 방법이 활용되고 있다. Table 3은 LED 폐조명의 주요 전처리 과정을 나타낸 것으로 hammer mill, grinding, shredding 등의 물리적인 해체/분리 공정을 통해 투입되는 LED 폐조명을 원하는 크기 범위로 분쇄한 뒤 선별과정이 적용된 것을 확인할 수 있다[24].

독일의 EPR 의무 대행 기관인 Lightcycle은 수거된 LED 폐조명을 기존 고효율 조명과 동일한 방식으로 처리하고 있으며, 원심 분리, 크로스 커팅(직관형), 유리 세척, 분쇄 공정과 같은 단계를 거쳐, 최종적으로 유리(80~90%, 재활용), 금속 및 플라스틱(7~14%, 산업 및 열 재활용), 형광체 분말(1~3%, 특수 매립 또는 재활용) 등으로 분류하여 회수하고 있다. 노르웨이에서는 산 · 학 · 연이 협력하여 LED 폐자원 재활용 방법에 대해 지속적인 기술적 논의를 진행하고 있다. LED 폐자원에 대한 효과적인 처리와 재활용을 위해 노력하는 중이지만, 기술 개발이 아직 충분히 이루어지지 않은 상태이며, 대표적인 재활용 회사인 Nordic recycling AB 역시 적절한 기술의 부재로 기존의 폐자원과 함께 처리하고 있는 상황이다. LED 조명을 구성하는 다양한 부품들로 인해 해체/분리의 어려움은 있지만, 폐조명의 적절한 전처리는 매우 중요하여 이에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. S.M. Mizanur Rahman 그룹은 다양한 LED 폐조명을 수동 및 자동화 방식의 해체/분리 공정 비교를 통해 효율적인 전처리 기술을 검토하였으며(Fig. 7)[14], Lotfi Benmamas 그룹은 electrodynamic fragmentation 기술을 활용해 LED 램프들의 파/분쇄 없이 LED를 구성 부품으로 해체할 수 있는 공정을 개발함으로써 LED 재활용을 위한 전처리 공정의 효율적인 분리 방법을 제안하였다(Fig. 8)[25]. 또한, Thiago R. Martins 그룹은 전처리 단계에서 다양한 기계적 처리를 통해 구성 요소를 효과적으로 분리할 수 있음을 입증하였다(Fig. 9)[4].

유가자원 회수/재자원화의 경우, 열분해, 침출, 이온교환, 전해 채취, 세멘테이션 등의 공정을 통해 유가금속을 회수하는 연구들이 진행되었다. 상당수의 연구가 Ga 회수에 초점을 맞추고 있으며 다른 희토류 및 귀금속 회수에 대한 연구는 제한적이다[26,27]. Ga 회수를 위해 무기산(HCl,

HNO_3, aqua regia) 및 유기산(oxalic acid)이 이용되는데 Swain 그룹에서는 HCl > HNO_3 > H_2SO_4 용매 순으로 효율이 높다는 것을 밝혔고, HCl을 이용한 Ga의 침출 반응에 대한 연구 결과도 제시하였다[28]. Zhan 그룹[29]은 기계적 전처리 후 진공 증발 및 선택적 추출을 통해 LED 재료에서 Ga과 In을 분리하는 것을 연구하였으며, Nagy 그룹[26]은 LED 폐조명에 함유된 GaN을 재활용하기 위해 적용한 기계 화학적 공정이 고농도의 Ga을 회수하는데 효과적인 도구임을 증명하였다. 그러나 LED 폐자원으로부터 Ga을 제외한 경제성 있는 목적 금속의 회수 기술에 대해서는 소수의 연구만이 이루어졌다. Hironori Murakami 그룹[7]은 이온 교환 방법을 사용하여 LED 폐조명에서 Au을 분리하고 회수하는 연구를 진행하였으며, 이들은 상업적으로 사용되는 폴리아민 타입의 음이온 교환체인 Diaion WA21J을 사용하였다.

현재 유럽에서는 증가하는 LED 폐자원에 대비해 이미 효율적인 재활용 기술 개발을 위한 다양한 프로젝트를 진행하고 있지만 LED 폐자원으로부터 경제성 있는 목적 금속의 회수 기술은 미흡한 상황이다. 또한, 수거 체계 미확립, 낮은 폐기물 발생량에 따른 기초연구 미흡 및 투자 부족으로 상용 공정 구축에 어려움을 겪고 있다[30].

Fig. 7. (a) Manual disassembly fractions of LED chips, aluminum, and plastic, (b) automated disassembly fractions of LED chips and PCBs[14].

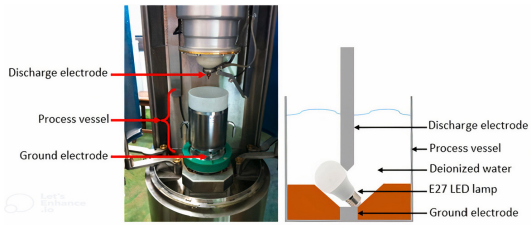


Fig. 8. Schematic representation of electrodynamic fragmentation process[25].

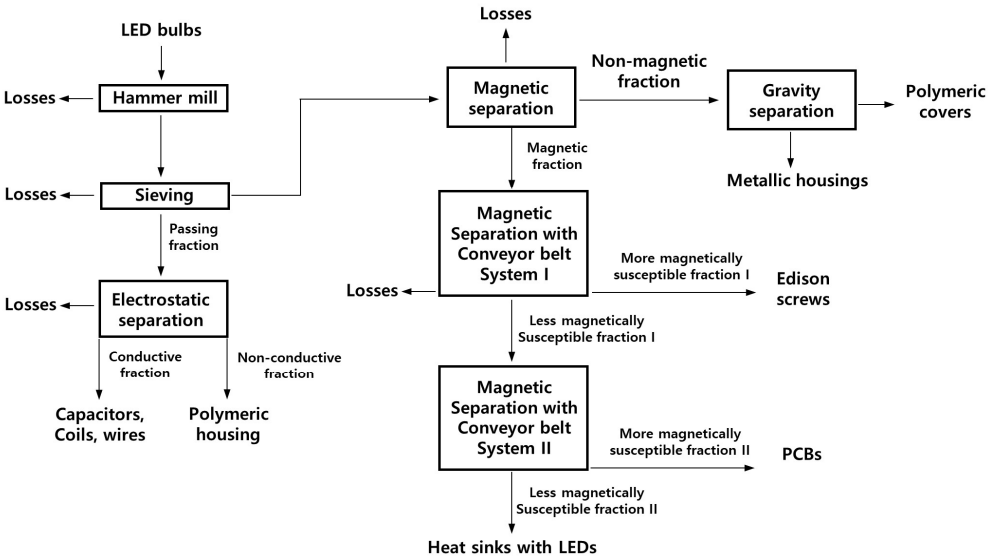


Fig. 9. A flowchart of the LED bulb recycling process[4].

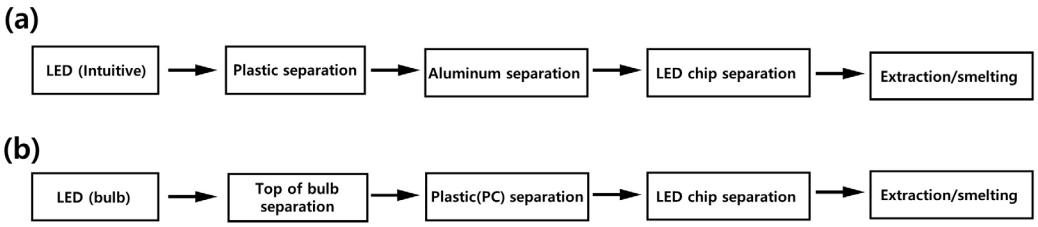


Fig. 10. Waste LED recycling process of intuitive and bulb type.

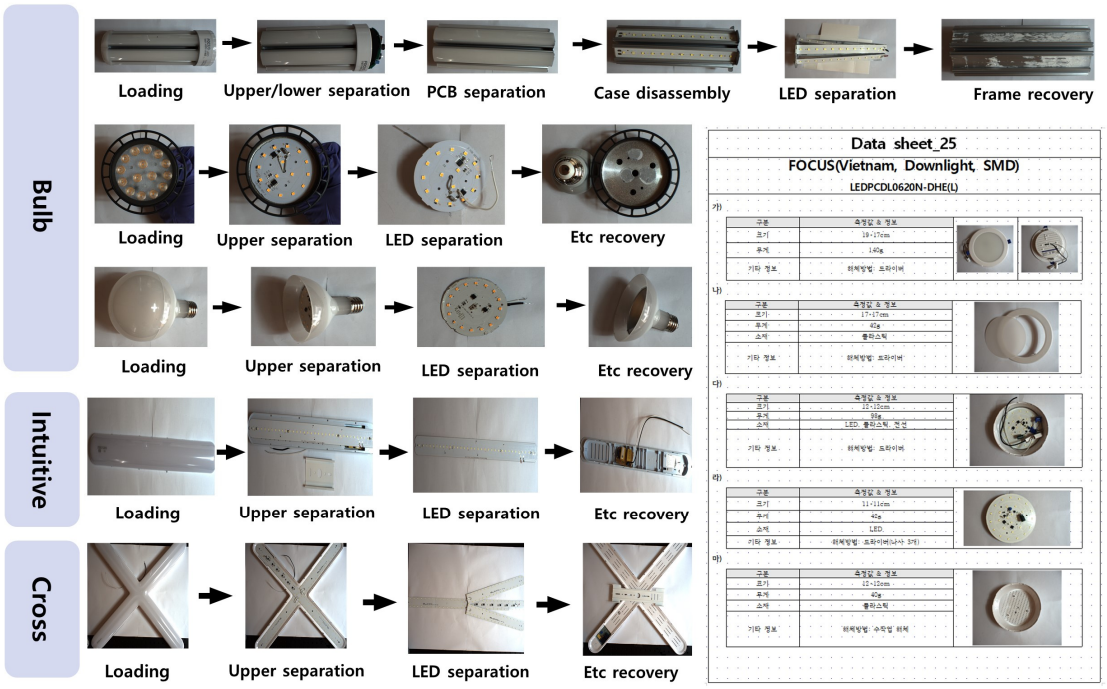


Fig. 11. Disassembly/separation process and data sheet for various LED lights.

5.2. 국내 LED 폐조명 재활용 기술 현황

국내 EPR 대상 LED 조명인 전구형과 직관형은 Fig. 10에서 보는 바와 같이, 크게 5가지 단계로 나누어 재활용하고 있다. 직관형의 경우, 제품 → 플라스틱 분리 → 알루미늄 분리 → LED 칩 분리 → 추출 및 제련으로 처리하며, 전구형은 제품 → 전구 상단 분리 → 플라스틱 분리 → LED 칩 분리 → 추출 및 제련의 공정으로 재활용되고 있다. LED 폐조명은 제품의 형태, 유형, 부품 조합 방식, 손상 정도 등에 따라 다양한 형태로 수집되기 때문에, 효율적인 재활용 프로세스를 위한 전제조건으로 LED 폐조명 부품을 단위로 분해하고 분리할 수 있는 맞춤형 전처리 공정이 필수적이다. 환경부 지원하에 수행 중인 정부 과제를 통해 다품종/다형상의 LED 폐조명을 처리하기 위한 다양한 정보를 수집하고 이를 바탕으로 전처리 공정을 개발하기 위해 데이터베이스를 구축 중에 있다(Fig. 11). 데이터베이스에는 판매사, 제조국, 형상, 타입, 모델번호를 작성해 제품의 기본적인 정보를 제공하고 각 해체/분리 단계별로 이미지, 크기, 소재, 무게 및 해체 방법 등의 정보를 작성해 수집하였다. 구축되는 데이터베이스는 단위 공정 간 정보 연계 및 공정 효율 향상을 위한 대안 마련에도 이용할 수 있을 것으로 예상된다.

현재까지 국내 LED 폐자원 재활용 관련 기술도 주로 Ga, In 회수에 중점을 두고 있으며, 귀금속의 경우 특허가 존재하기는 하나 공정의 복잡성 및 효율성 문제로 인해 상

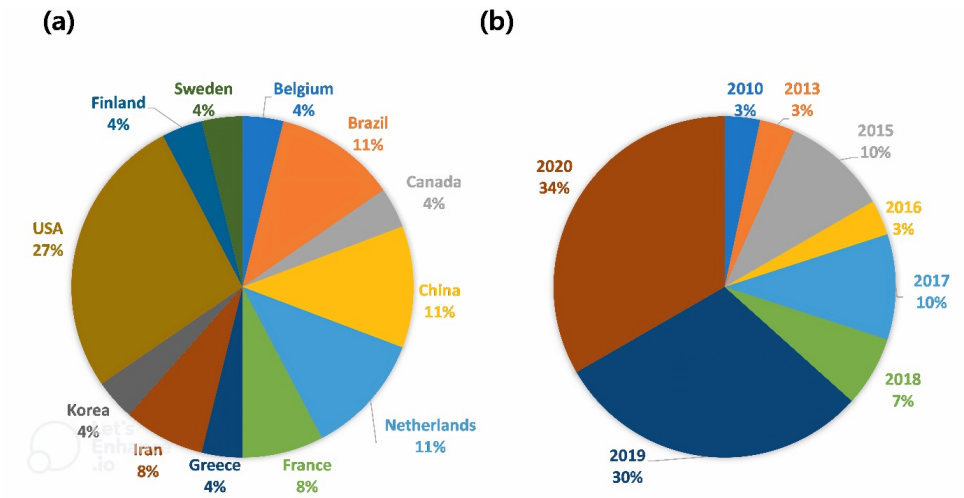


Fig. 12. Status of research on waste LED by country and year[24].

Table 4. Status of R&D the recycling of waste LED using NTIS

No.	Title	Business	Project period	Feature
1	Recovery of valuable metals and detoxification of toxic substances from LED wastes	Global Top Environmental Technology Development Project	2019-04 ~ 2020-12	Development of an integrated process for recovering Cu, Au, and Ag from waste LEDs through a dry-based metal recovery process
2	Development and commercialization of the recycling technologies, recovery efficiency above 95% and purity 99.999%, of the Ga & In from the LED wastes	Global Professional Technology Development	2013-03 ~ 2016-07	Development of Ga/In metal recovery process through pretreatment and recovery process of LED waste resources
3	Development of recycle preprocessing and valuable metals recovering from LED wastes	Technology development project to promote recycling of future waste resources	2022-04 ~ 2024-12	Development of integrated customized pretreatment process for various types of LED waste lighting

용화에는 이르지 못한 실정이다[31]. 폐조명의 해체나 분리를 위한 방법과 장치에 대한 특허도 일부 있지만, 이런 특허들은 주로 특정 형태의 조명에만 적용된다. 선진국 대비 국내 LED 폐자원 재활용 처리 기술 수준은 낮기 때문에 기술적 격차를 줄이기 위한 노력과 EPR 제도의 정착이 원활하게 이루어져 LED 폐조명 제품들을 통합적으로 재활용할 수 있는 환경을 조성하는 데 더욱 많은 노력이 필요하다.

5.3. LED 폐조명 재활용 R&D 연구 현황

LED 조명의 사용량이 급격히 증가하면서, 최근 몇 년간 다양한 전자 폐기물에서 발생하는 LED 조명에 대한 재활용 연구가 관심을 받고 있고 있으며 이에 따라 앞으로도 LED 폐조명에 대한 추가적인 연구들이 이루어질 것으로 예상된다. Fig. 12는 국가별, 연도별 LED 폐조명 관련 연구 현황을 나타낸 것으로 Fig. 12(a)에서 볼 수 있듯이, LED 재활용 연구에 참여한 국가는 소수에 불과하며, 이란과 브라질을 제외하고는 LED가 개발된 초기부터 이용하고 있는 선진국들이다. 미국이 27%로 가장 높은 비율을 차지하고 있고, 중국, 브라질, 네덜란드가 그 뒤를 차지하였다. 또한, 2010년 3% 수준이었던 LED 재활용 연구는 2020년에는 34%로 증가한 것을 확인할 수 있으며(Fig. 12(b)), 이는 LED 폐조명 재활용 기술에 대한 필요성이 반영되어 다양한 연구가 진행 중에 있음을 시사한다[24].

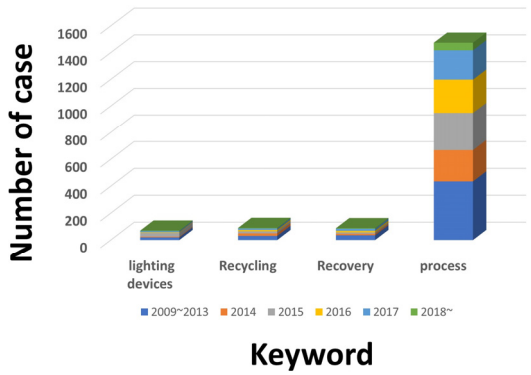


Fig. 13. Comparison results of the number of R&D projects by LED-related keyword[23].

국내 LED 폐조명 재활용 R&D 현황을 조사하기 위해 국가과학기술지식정보서비스(NTIS, National Science& Technology Information Service)를 이용해 R&D 연구 동향을 분석하였다. 과제분석 기간을 2003~2023으로 설정하고 LED 재활용을 키워드로 검색한 결과, 총 152건이 검색되었다. 이 중 실제 LED 폐조명과 관련된 R&D만 선별하면 Table 4와 같이 총 3건(대분류: 환경, 중분류: 폐기물 관리/자원 순환, 소분류: 폐기물 자원순환기술)으로 조사되었다. 주로 LED 폐자원으로부터 Ga, In, Cu, Au, Ag 등의 유용 금속을 추출/회수하는 기술과 LED 폐조명의 맞춤형 전처리 기술 개발로 분석되었다. 2018년 환경부가 조사한 'LED등 재활용 방안 수립의 위한 연구'보고서에 의하면[23], Fig. 13와 같이 조명기기, 재활용, 회수, 처리 키워드별로 조사한 결과, LED 처리로 분류된 과제는 전체 LED 관련 R&D 연구 중 약 85.5% 비율을 차지하였으며, LED 재활용은 5.2%에 불과한 것으로 분석되었다. 이는 LED 재활용에 관한 연구가 제대로 추진되지 않았음을 나타낸다.

6. 향후 방향

LED 산업의 성장이 두드러짐에 따라 향후 발생하는 폐자원의 관리는 기후 변화 완화, 중금속 오염 감소 및 자원 보존에 더욱 중요한 역할을 할 것으로 예상된다. 현재의 LED 폐자원 수집 시스템은 완벽하게 발달되지 않았으며, 재활용 기술 역시 대규모 적용에는 아직 미흡한 상황이다. 기술적으로는 습/건식 야금 기술들이 연구되고 있지만, Ga, In 및 희토류뿐만 아니라 모든 가치 원소들을 확보할 수 있도록 개선이 필요하며, 빠르게 증가하는 LED 폐자원에 대응하기 위한 재활용 능력을 점진적으로 확대해 생산 체인에서 규모를 증가시키는 것이 필요하다. 현재 LED 조명 제품들은 광범위한 분야에서 사용되며, 다양한 용도로 개발되었다. 이러한 제품들은 내부 구조와 재료 구성이 매우 다양해, 대규모 재활용을 어렵게 만드는 요인으로 작용한다. 따라서, 장기적으로는 구성품 재사용과 물질 재활용을 용이하게 하기 위한 모듈화나 재료의 범용성도 필요하며 표준화된 공정이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 환경적으로는 LED 폐자원의 양이 증가할 경우 이를 적절하게 처리하지 않으면 부정적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 LED 폐조명에 함유된 유해 물질의 함량이 낮더라도 효과적인 처리가 필요하다.

이와 같이, LED 폐조명의 효율적인 재활용을 위한 통합 체인(공정 및 규모 확대, 표준화 촉진, 구성품 재사용, 물질 재활용) 구축에 대한 점진적인 노력이 요구된다. 또한 정부 역시 LED 재활용을 원활하게 진행하기 위한 계획을 수립하고 기술 개발을 위한 많은 연구자원의 투입이 필요하다.

7. 결 론

LED 기술의 진보는 조명 산업에 획기적인 변화를 가져왔고, 다양한 시도가 이루어졌다. 기존의 전통 조명에 비해 효율과 성능이 우수한 LED 조명 제품들로 대체되면서 급속한 시장 확장에 기여하였고, 최근에는 새로운 융합 기술이나 대규모 신시장 창출의 기회를 제공함으로써, 산업 생태계가 확장되고 있다. 그러나 수명이 다한 LED 폐자원이 급격히 증가할 것으로 예상됨에 따라 종합적인 재활용 기술에 대한 요구는 높아지고 있지만, 체계적인 기술 개발은 추진되지 않은 것으로 확인되었다. LED 폐조명의 전처리나 금속 농축/회수 등에 대한 단편적인 고찰은 있었지만, 기술 개발 방향도 기계적 전처리 및 Ga 회수 등에 초점이 맞춰져 있다. 이로 인해 효율적인 해체/분리 기술에 대한 추가적인 이해와 Ga, In 및 희토류 원소와 같은 중요 원소들을 확보할 수 있는 상용 기술에 대한 많은 연구가 필요하다. 이를 위해 정부에서도 LED 폐자원 재활용 산업이 활성화되고 순환 경제로의 전환이 이루어질 수 있도록 다양한 중장기적인 계획과 지원이 필요하며,

관련 기업 및 연구자들은 통합 재활용 기술을 구축할 수 있도록 투자와 연구 개발에 힘써야 한다. 또한, EPR 제도가 시행되면서 LED 조명을 사용하는 소비자들도 폐자원 처리에 대한 관심이 필요하며, 분리배출에 적극적으로 참여하는 것이 필요하다. 본 논문이 LED 폐자원 재활용에 대한 지속적인 연구 기반을 마련하는 데 도움이 될 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 환경부 미래발생 폐자원의 재활용 촉진 기술 개발사업(2022003500001)으로 연구가 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

References

1. Oliveira, R. P. de, Benvenuti, J., Espinosa, D. C. R., 2021 : A review of the current progress in recycling technologies for gallium and rare earth elements from light-emitting diodes, Renew. Sustain. Energy Rev., 145, pp.111090-111105.
2. Marcelo Pilotto Cenci, Frederico Christ Dal Berto, Priscila Silva Silveira Camargo, et al., 2021 : Separation and concentration of valuable and critical materials from wasted LEDs by physical processes, Waste Manag., 120, pp.136-145.
3. Zissis, G., Bertoldi, P., 2018 : Status of LED-lighting world market in 2017, pp.1-76, European Commission, Ispra.
4. Martins, T. R., Eduardo, H. T., Daniel, A. B., 2020 : Innovative method for the recycling of end-of-life LED bulbs by mechanical processing, Resour., Conserv. Recycl., 161, pp.104875-104890.
5. Kumar, A., Kuppusamy, V. K., Holuszko, M., et al., 2019 : LED lamps waste in Canada : Generation and characterization, Resour., Conserv. Recycl., 146, pp.329-336.
6. Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., et al., 2017 : The global e-waste monitor 2017, pp.1-116, United Nations University, Vienna.
7. Murakami, H., Nishihama, S., Yoshizuka, K., 2015 : Separation and recovery of gold from waste LED using ion exchange method, Hydrometall., 157, pp.194-198.
8. Santos, E. C. A., Silveira, T. A., Colling, A. V., et al., 2020 : Recycling Processes for the Recovery of Metal from E-waste of the LED Industry, pp.159-177, E-waste Recycling and Management, SpringerLink, London.
9. Rahman, S. M. M., Kim, J., Lerondel, G., et al., 2017 : Missing research focus in end-of-life management of light-emitting diode (led) lamps, Resour. Conserv. Recycl., 127, pp.256-258.
10. Speirs, J., McGlade, C., Slade, R., 2015 : Uncertainty in the availability of natural resources: Fossil fuels, critical metals and biomass, Energy Policy, 87, pp.654-664.
11. Chen, W. S., Hsu, L. L., Wang, L. P., 2018 : Recycling the GaN Waste from LED Industry by Pressurized Leaching Method, Metals, 861(8), pp.861-873.
12. Zhan, L., Xia, F., Ye, Q., et al., 2015 : Novel recycle technology for recovering rare metals (Ga, In) from waste light-emitting diodes, J. Hazard. Mater., 299(15), pp.388-394.
13. Ilankoon, I. M. S. K., Ghorbani, Y., Chong, M. N., et al., 2018 : E-waste in the international context–A review of trade flows, regulations, hazards, waste management strategies and technologies for value recovery, Waste Manag., 82, pp.258-275.
14. Rahman, S. M. M., Kim, J., Lerondel, G., et al., 2019 : Value Retention Options in Circular Economy: Issues and Challenges of LED Lamp Preprocessing, Sustainability, 1(17), pp.4723-4743.
15. Green Economy, Environmental Corporation conducts campaign to separate and discharge waste LED lights, http://www.greenpostkorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=206812, November 22, 2023.
16. Mir, S., Vaishampayan, A., Dhawan, N., 2022 : A Review on Recycling of End-of-Life Light-Emitting Diodes for Metal Recovery, JOM, 74(2), pp.599-611.
17. Zheludev, N., 2007 : The life and times of the LED—a 100-year history, Nat. Photonics, 1, pp.189-192.
18. Akasaki, I., 2007 : Key inventions in the history of nitride-based blue LED and LD, J. Cryst. Growth, 300(1), pp.2-10.
19. Yoo, G., 2021 : Technology Analysis Report - Seoul Semiconductor, pp.1-16, NICE evaluation information.
20. Kook, Y., 2021 : Technology Analysis Report - Woori Lighting, pp.1-16, NICE evaluation information.
21. e-media, Waste LED is recycled…a pilot project for four months in the Seoul metropolitan area, http://www.ecomedia.co.kr/news/newsview.php?ncode=1065574273791073, November 22, 2023.
22. Kim, G. I., 2019 : Research on introduction of LED lighting EPR system, pp.1-192, Korea Environment Corporation, Incheon.
23. Min, D. G., 2018 : Research to establish recycling plans for LED lights, pp.1-115, Ministry of Environment, Sejong.
24. Rahman, S. M. M., Pompidou, S., Alix, T., et al., 2021 : A review of LED lamp recycling process from the 10R strategy perspective, Sustain. Prod. Consum., 28, pp.1178-1191.
25. Benmamas, L., Bouzidi, Y., Houset, G., et al., 2022 : Selective separation of plastic LED lamp components

using electrodynamic fragmentation for material recovery, Waste Manag., 144, pp.210-220.
26. Nagy, S., Bokanyi, L., Gombkoto, I., et al., 2017 : Recycling of Gallium From End-of-Life Light Emitting Diodes, Arch. Metall. Mater., 62(2B), pp.1161-1166.
27. Cenci, M. P., Berto, F. C., Schneider, E. L., et al., 2020 : Assessment of LED lamps components and materials for a recycling perspective., Waste Manag., 107(15), pp.285-293.
28. Swain, B., Mishra, C., Kang, L., et al., 2015 : Recycling process for recovery of gallium from GaN an e-waste of LED industry through ball milling, annealing and leaching, Environ. Res., 138, pp.401-408.
29. Zhan, L., Xia, F., Xia, Y., et al., 2017 : Recycle Gallium and Arsenic from GaAs-Based E-Wastes via Pyrolysis–Vacuum Metallurgy Separation: Theory and Feasibility, ACS Sustain. Chem. Eng., 6(1), pp.1336-1342.
30. Fang, S., Yan, W., Cao, H., et al., 2018 : Evaluation on end-of-life LEDs by understanding the criticality and recyclability for metals recycling, J. Clean. Prod., 182, pp.624-633.
31. Lee, D. H., Shin, D., Kim, T. H., et al., 2019 : Current Status of Recycling of LED Waste, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 28(2), pp.14-22.

이 덕 희

• 아주대학교 에너지시스템학과 석사
• 현재 고등기술연구원
융합소재연구센터 선임연구원

오 현 경

• 경기대학교 화학공학과 석사
• 현재 고등기술연구원
융합소재연구센터 연구원

박 경 수

• 고려대학교 신소재공학과 공학박사
• 현재 고등기술연구원
융합소재연구센터 수석연구원