

폐 젤리충진 통신케이블 업사이클링 연구

*조성수 · 이수영 · 홍명환 · 서민혜 · 이덕희 · 엄성현

고등기술연구원 신소재공정센터

Upcycling of Waste Jelly-Filled Communication Cables

*Sungsu Cho, Sooyoung Lee, Myunghwan Hong, Minhye Seo, Dukhee Lee and Sunghyun Uhm

Advanced Materials & Processing Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin 449-863, Korea

요 약

폐 젤리충진 통신케이블로부터 고순도 구리회수를 위한 친환경 공정 및 장치 개발과 고부가 나노분말 제조까지의 업사이클링 공정을 위한 적용성 평가를 수행하였다. 고압분사 공정은 공업용수만을 용매로 사용한 친환경 고효율 기계적 방법으로써 전산유동해석을 통해 최적화하여 배치공정 장치를 제작, 실험적으로 검증하였으며 99.5% 이상의 높은 고순도 구리 회수율을 얻을 수 있었다. 재활용 구리의 고부가가치화를 위해 액중전기폭발법을 이용하여 나노분말을 제조하였으며, 이에 대한 기초적인 경제성 평가를 수행하였다.

주제어 : 젤리충진 통신케이블, 업사이클링, 고순도 구리, 고압 수분사, 나노분말

Abstract

A feasibility test was carried out for upcycling of waste jelly-filled communication cables together with the development of environmentally friendly processes and equipments. High pressure water injection is proved to be an exceptionally environmentally friendly and highly efficient mechanical process. A batch-type cable barking equipment is designed and built on the basis of computational fluid dynamics modelling. It is optimized in terms of energy consumption and productivity with very high copper recovery of 99.5%. Copper nano-powder is prepared by an electrical wire explosion in ethanol media in order to improve the value of final products, and the preliminary economical assessment is also conducted.

Key words : jelly-filled communication cables, upcycling, high purity copper, high pressure water injection, nanopowder

1. 서 론

2000년대에 이르기까지 음성서비스, 인터넷 서비스, 초고속 인터넷망 등에 이용되었던 구리 기반 통신케이블은 당시 수요가 급증하면서 세계적인 메이저 케이블

기업(Nexans, Prysmian, General cable 등)들이 관련 제품을 폭발적으로 출시하였으며, 국내의 경우도 LS전선, 대한전선, 가온전선 등이 통신케이블을 생산하였다. 구리 기반 통신케이블은 케이블의 노화 및 광통신케이블로 교체에 따라 전 세계적으로 발생량이 증가하고 있

· Received : January 20, 2015 · Revised : February 23, 2015 · Accepted : March 6, 2015

*Corresponding Author : Sungsu Cho (E-mail : sungsu@iae.re.kr)

Advanced Materials & Processing Center, Institute for Advanced Engineering, 175-28, 51 Goan-ro, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Youngin-si, Gyeonggi-do, 449-863 Korea
Tel : +82-31-330-7688 / Fax : +82-31-330-7111

©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.

으며, 2008년 기준으로 국내에서만 연간 10,000톤 이상이 배출되었고, 이 중에서 켈리충진 케이블은 65%인 6,500톤 정도가 배출되는 것으로 추정된다. 폐 켈리충진 통신케이블에는 고순도 구리 성분이 약 70% 이상 포함되어 있기 때문에 회수가치가 높으며 대략적으로 재활용할 수 있는 구리의 양은 국내에서도 연간 약 4,000톤 이상으로 추산된다.¹⁻³⁾

구리 기반 통신케이블 유선통신 수요 감소 및 통신사업자의 설비축소 뿐만 아니라 광케이블로의 대체에 따라 시장 위축이 지속되면서 생산량이 해마다 줄어들고 있는 있으나 최근까지도 국내에서도 연간 2만톤 이상 생산되고 있으며, 이에 따라 재활용 처리해야 할 폐 켈리충진 통신케이블의 누적 물량이 약 50만톤 이상으로 추정되고 있기 때문에 향후 정확한 발생량 통계치를 기반으로 광물자원 지역편중 및 자원의 무기화 등에 선제적으로 대응하며, 국가 중장기발전 및 전략산업 육성 차원에서 재활용 기술을 필요로 한다.

켈리충진 케이블은 설치작업 중 훼손 또는 접속 부분에 물이나 기타 이물질이 들어감으로써 발생하는 통화 접촉 불량률을 막기 위해 외피 내측을 알루미늄박막으로 싸고 있으며, 알루미늄박막의 내부에는 켈리형 물질이 구리 세션 사이사이에 투입되어 세션을 서로 영겨 붙도록 하고 있는 구조로 이루어져 있다. 현재까지 주로 사용되고 있는 폐전선 재활용 방법에는 열분리 혹은 열분해 등의 소각법,^{1,4)} 와이어 절단 및 차핑(chopping)에 의한 기계적 방법,^{5,6)} 열매유 및 유기용매 등을 이용한 화학적 방법⁷⁻¹⁰⁾ 및 2종의 방법이 융합된 형태^{11,12)}가 있다. 개별적인 방법들은 각각의 문제점들이 부각됨에 따라 상업적으로는 융합형태의 방법이 주로 사용되고 있다.¹³⁻¹⁵⁾ 소각법의 경우는 피복제인 고분자 물질을 함유한 고형 폐기물의 처리방법으로 저온열분해나 소각공정의 고도화 연구가 진행되고 있으나, 소각시 산화제를 적절히 공급하지 않고 부족한 공기 상태에서 태우는 상태가 빈번하게 발생됨으로 인하여 다이옥신(dioxin)과 같은 유해가스 및 맹독성 물질이 발생하는 문제가 있다. 기계적인 방법은 켈리성분이 접착제 역할을 하여 구리 와이어와 합성수지 피복제의 분리를 불가능하게 하며, 화학적인 방법은 사용하는 유기용매가 합성수지물질을 효율적으로 분리하지만 주요 유기용매가 유해폐기물처리 대상으로, 2차 환경오염물질 발생문제를 부가적으로 해결하여야 한다. 유기용매 대신 열매유를 사용하게 되면 2차 환경오염물질에 대한 환경부하가 경감되는 효과가 있으나 악취제거를 위하여 추가적으로 환경설비를

설치하여야 하기 때문에 실증화를 위한 면밀한 검토가 필요하다.⁹⁾

본 연구에서는 폐 켈리충진 통신케이블로부터 고순도 구리회수를 위한 친환경 공정 및 설비 개발과 고부가나노분말 제조까지의 업사이클링 공정을 위한 적용성 평가를 수행하였다. 이를 위해 전산모사 기법을 활용하여 공정조건을 최적화하였으며, 상업적 나노분말 제조에 대한 기초적인 경제성 평가를 수행하였다.

2. 실험

2.1. CFD (Computational Fluid Dynamics)에 의한 전산모사

본 연구에서는 고압분사장치 설계 및 운전조건의 최적화를 위한 전산유동해석을 수행하기 위하여 유동해석 기법 중 유한체적법을 기본으로 하고 있는 상용 유체전산모사 코드인 Fluent (버전 6.3) 소프트웨어를 사용하였다. Mesh 수를 30만개 (사이즈 : 0.02 - 0.05 mm) 이상 구성하여 계산하였고, 이 때 케이블의 직경은 1 mm로 고정하였다. 고압분사장치의 체적 및 적정 수압을 설정하기 위하여 케이블 상부면 압력이 200 kg/cm² 이상으로 형성될 수 있는 토출압력을 계산하였다.

2.2. Pilot-scale 고압분사 박피장치 제작 및 운전

전산모사 결과의 적용성 평가 및 연속공정이 가능한 박피장치의 기본설계를 위하여 Pilot-scale의 고압분사 박피장치를 제작하였다. Pilot-scale의 고압분사 박피 장치는 수압이 0~1000 bar까지 조절 가능하고, 박피 과정시 투입된 원재료가 수압에 의하여 분사 포인트에서 벗어나는 것을 막아주기 위하여 가이드를 장착하여 설계되었다. 또한, 처리효율 최적화를 위해 원재료와 분사 노즐 사이의 거리는 0~15 cm까지, 분사각은 40~90°까지 변경할 수 있도록 설계되었다.

2.3. 액중전기폭발법에 의한 구리 나노분말 제조

고압분사 박피공정에서 얻어진 고순도 구리 와이어를 전구체로 사용하여 문헌에서 보고된 전형적인 장치를 이용하여 액중전기폭발법을 수행하였다.^{16,17)} 직경 0.9 mm의 구리 와이어를 에탄올 (99%) 용매 내에서 전기폭발장치 (NTi 10PC, (주)나노기술)를 이용하여 나노콜로이드를 제조하고 건조공정을 거쳐 나노분말을 얻었다. 노출된 구리 와이어 길이는 40 mm (feeding distance) 이고 320 V의 고전압을 반복적으로 인가하여 구리 나

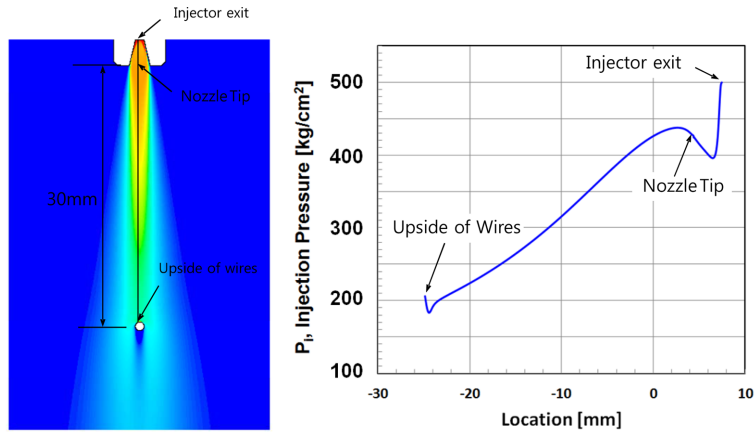


Fig. 1. Calculated pressure field from injector exit to upside of wires with an injection pressure of 500 kg/cm².

노 콜로이드를 제조하였다. 이후 1시간 동안 초음파 분쇄기(Ultrasonication)로 분산 후 오븐에서 60°C 5시간 동안 건조하여 나노분말을 회수하였다. 전기폭발법을 통해 얻은 구리 나노분말의 상변화, 크기 및 미세구조를 파악하기 위해 X선 회절 분석(XRD-6100, Shimadzu)과 FESEM (JSM-6700F, JEOL), TEM (Tecnai G2 F30 S-Twin, USA) 분석을 수행하였다. 상분석의 경우, 2θ Cu(Kα) target을 이용해 5°/min의 속도로 10~80° 구간까지 분석하였다. 또한 회수된 나노분말의 순도를 정량적으로 분석하기 위해 원소분석기 (EA, Flash1112, Thermo scientific, USA)를 이용해 함유된 성분을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

구리 와이어 외피는 주로 polyethylene (PE)으로 구성되어 있다.⁹⁾ 따라서 PE의 인장강도 이상의 압력이 표면에 인가되어야 박피가 시작될 수 있다. PE의 인장강도는 밀도에 따라 150 - 400 kg/cm² 정도로 차이가 발생하나, 노후화된 PE일 경우는 시간에 따라 밀도가 낮아져 200 kg/cm²을 넘지 않는 것으로 가정하여 외피 상부면 파단 압력을 200 kg/cm² 으로 설정하여 공정해석을 수행하였다.

Fig. 1은 인가압력 500 kg/cm²으로 분사할 경우 노즐 출구에서 구리 와이어 상부까지의 압력분포를 계산한 것이다. 노즐에서 멀어질수록 급격하게 압력이 감소하여 30 mm 이상이 되면 200 kg/cm² 이하로 압력이 떨어지게 된다. 따라서 500 kg/cm²의 분사압력에서는 30 mm 이하

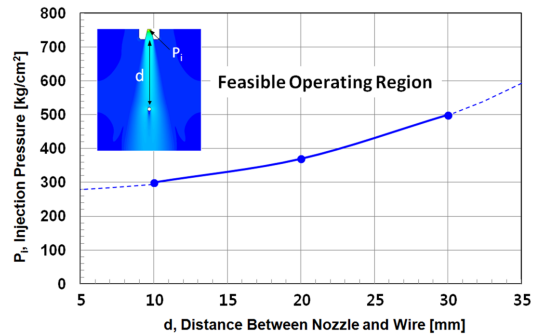


Fig. 2. Calculated injection pressure of nozzle for threshold pressure as a function of distance between nozzle and cables.

의 거리에서 구동조건을 설계하여야 한다. 이에 따라 노즐의 인가압력과 노즐/와이어 사이의 거리에 따른 상관관계를 Fig. 2에 도식화하였다. 장치의 전체적인 효율을 향상시키기 위해서는 박피효율을 유지한 채 최소한의 압력으로 분사하는 조건을 찾아야 한다. 그림에서 볼 수 있듯이 10 mm 이하의 거리에서 300 kg/cm² 이하의 인가압력으로 분사할 경우 적절한 박피효율과 에너지 소모량을 유지할 수 있다. 하지만, 그 이하의 거리가 되면 해당압력의 적용면적이 감소하여 생산성 저하를 유발하게 된다. 적절한 크기의 노즐을 적용하여 생산성을 향상시킬 수 있지만, 이것은 투입되는 에너지 투입량과 밀접한 관계가 있기 때문에 이들 변수에 대한 최적화 연구가 추가적으로 필요하다.

전산모사 결과를 실험적으로 검증하기 위하여 박피장

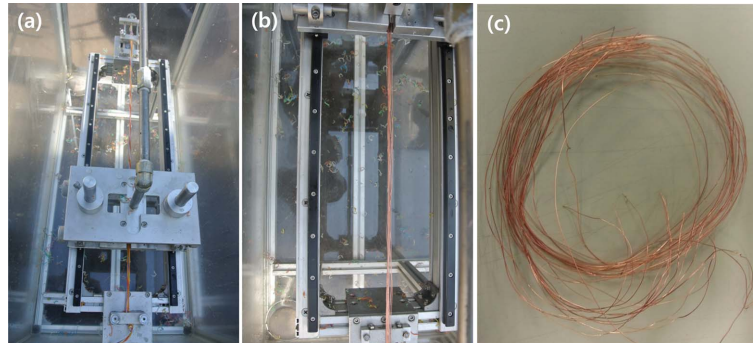


Fig. 3. Practical application of cable barking process with 400 kg/cm² water injection at 20 mm distance. Before treatment (a), after treatment (b) and recovered copper bundle (c), respectively.

Table 1. Copper content and composition of jelly-filled communication cables after treatment

Component	Weight ratio (%)	Remarks
Total	100	Several layers including galvanized steel tape
Without outer jacket and tapes	78.7	Jelly and polythene tape
Without petroleum jelly	68.8	
Copper conductor	62.2	

치를 제작하여 실증 테스트를 실시하였다. Fig. 3에서 400 kg/cm²의 인가압력으로 20 mm 거리에서 분사하여 케이블의 박피상태를 파악한 사진을 보여주고 있다. 박피 공정 전후의 사진에서 볼 수 있듯이 이론적인 전산모사 결과를 반영하여 박피공정을 거친 후 구리 와이어의 박피 상태를 보면 불순물이 거의 없는 깨끗한 표면상태를 유지한다는 것을 알 수 있다. Fig. 3의 고압수를 이용한 박피공정은 공업용수만을 사용한 가장 친환경적인 고순도 구리 회수공정으로 케이블 내에 함유된 구리의 회수율도 거의 100%에 가깝다. Table 1은 환경성을 고려하지 않고 가능한 물리화학적 방법을 활용하여 얻은 폐 첼리케이블의 구성표이다. 구리의 구성성분이 약 62% 수준인데, Fig. 3의 실험을 통해서 얻은 구리 와이어의 회수율은 99.5% 이상의 높은 값을 얻을 수 있었다.

Fig. 3은 전산모사 결과를 검증하기 위한 배치 장치이지만, 상업적으로 생산성을 고려한다면 대용량 처리를 한 다든가 연속공정으로 구동할 수 있어야 한다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 고압분사 노즐 장치뿐만 아니라 연속식 처리를 위한 케이블 공급장치, 사용 후 고압수 재순환을 위한 정화 장치 등이 필요하며, 고압수를 재사용하면서 발생하게 되는 케이블 외피를 고형연료로 사용하기 위한 회수 장치도 별도로 부차하여 사용하게 된다.

박피공정을 거쳐 얻어진 고순도 구리 와이어는 그 상태로 이미 상업적인 가치가 있지만, 추가적인 공정을 도입하여 윤활제, 저점도, 저마찰 오일 등의 고부가 제품 원료로 사용할 수 있도록 나노분말을 제조하였다. Fig. 5는 액중전기폭발법을 위한 장치와 이를 이용해서 얻어진 구리 나노분말의 XRD 결과를 보여주고 있다. Fig. 5(a)와 같이 에탄올 용매에서 320 V의 고전압을 인가하여 나노분말을 제조하며, 일정한 시간 간격으로 40 mm 길이의 구리 와이어가 연속적으로 투입되어 3000회의 전기폭발을 수행하여 적정수준의 양을 제조할 수 있도록 하였다. 제조된 구리 나노분말은 Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 산화물 발생을 억제하여 제조되었으나, 정량적 원소분석을 수행하면 구리함량은 92% 수준으로 나타났다. 이것은 분산도 향상을 위해 사용한 에탄올 용매의 열분해에 의해 구리표면에 탄소가 코팅되어 발생한 것으로 사료된다. 더불어 에탄올이 환원제 역할을 함으로써 구리의 산화를 억제하는 것으로 볼 수 있다. 이것은 TEM 사진을 보면 보다 극명하게 확인할 수 있는데, Fig. 6에서 볼 수 있듯이 나노분말 표면이 탄소층으로 코팅되어 있음을 볼 수 있다. 본 실험의 액중전기폭발법에 사용한 구리 와이어의 직경이 0.9 mm로 비교적 굵은 시료를 사용함에 따라 나노분말의 균일도는 양호

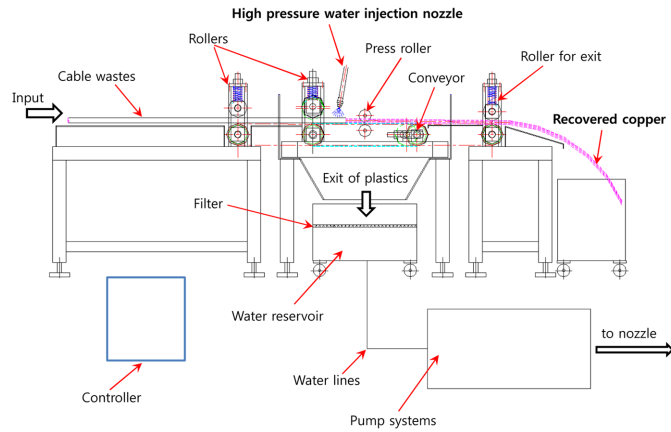


Fig. 4. Schematic illustration of continuous process for copper recovery from jelly-filled communication cables by high pressure water injection.

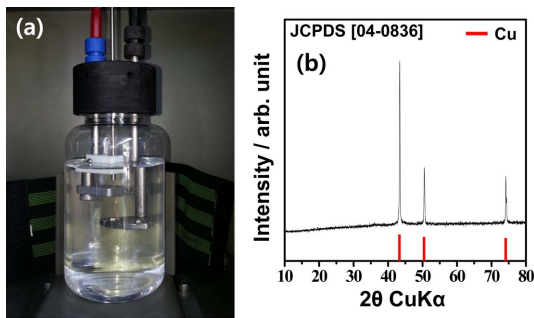


Fig. 5. Experimental set-up for the preparation of copper nanopowders by a wire explosion in ethanol (a) and XRD pattern of nanopowders (b), respectively. Voltage 320 V, distance 40 mm and copper diameter 0.9 mm.

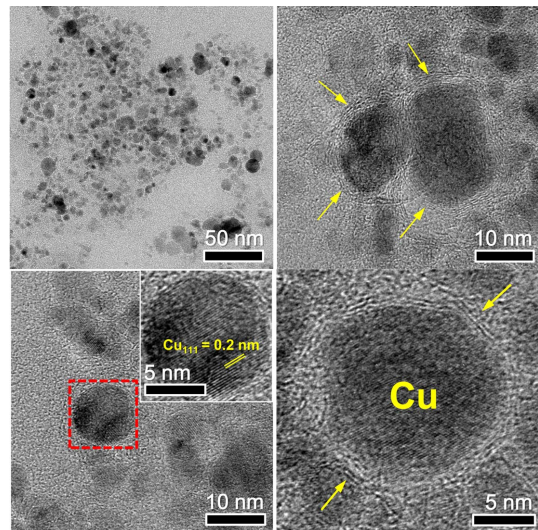


Fig. 6. TEM images of copper nanopowders prepared by the electric explosion of copper wires recovered from jelly-filled communication cables. Yellow arrows indicate carbon layers coated on copper surface.

하지 않으나, 10 - 20 nm 수준의 입도분포를 보여주고 있으며 향후 상업적 사용을 위해서는 전기폭발법의 조건을 최적화하여 분말의 크기 및 균일도 향상이 필요하다.

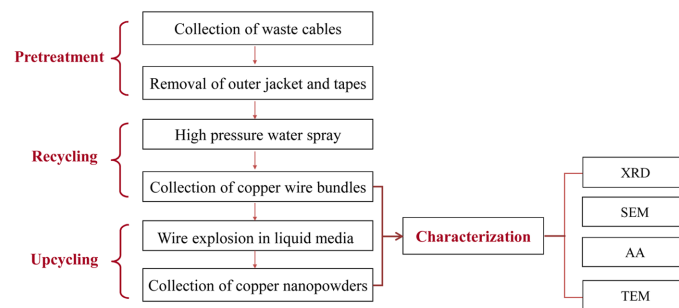
Fig. 7의 공정흐름도를 바탕으로 Table 2에는 폐 젤리충진 케이블 재활용을 통해서 얻은 고순도 구리에 대한 기초적인 경제성 평가를 수행하였다. 보다 면밀한 수익성 계산을 위해서는 제조원가 산정을 위해서 구체적인 비용발생 요소 검토와 최종제품의 유통물량 및 시장 가격에 대한 조사가 필요하다. 고순도 구리 와이어 자체 및 마이크로, 나노 분말은 국제시세 및 시장 유통물량에 따른 가격 변동이 비교적 크기 때문에 표에서 보이는 가치의 차이는 해당시점에서의 일시적인 설정 값으로 판단할 수 있다.

4. 결 론

폐 젤리충진 케이블로부터 고순도 구리 와이어를 회수하여 고 부가가치의 나노분말을 제조하기 위한 업사이클링 공정을 구성하여 적용성을 평가하였다. 종래의 방법과 달리 공업용수만을 사용한 친환경 공정을 도입하였으며, 전산유동해석을 통해 고압분사장치의 구동조건을 최적화하였고, 이를 실험적으로 검증하였다. 배치

Table 2. Preliminary economic assessment for copper recovery from 1000 kg waste communication cables

Copper	Cost and value	Remarks
1000 kg wastes	900,000 ₩	850-900 ₩/kg
Copper content	600 kg	60-68% of wastes
Operating cost	highly dependent on final products and applied processes	
Market price		
as copper cathode	3,504,000 ₩	80-85% over LME (LME = ca. 7,300 ₩/kg as of July 2014)
as micro powder	48,000,000 ₩	ca. 80,000 ₩/kg
as nano powder	420,000,000 ₩	ca. 700,000 ₩/kg

**Fig. 7.** Process flow diagram for copper nanopowder preparation from waste jelly-filled communication cables.

공정을 통한 구리 와이어 회수율은 99.5% 이상이였으며, 생산성 향상을 위한 대용량 연속식 공정 개발이 현재 지속적으로 수행되고 있다. 회수된 고순도 구리의 부가가치를 향상시키기 위하여 액중전기폭발법에 의하여 나노분말을 제조하였다. 분산도 향상을 위해 사용된 용매의 영향으로 구리표면에 카본층이 코팅되어있으나 상업적으로는 큰 문제가 되지 않는 수준이며, 향후 균일도 향상으로 위해 전기폭발 조건의 최적화 연구가 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션사업”으로 지원받은 과제임.

References

1. Seong-Kuk Han and Jae-Yong Ki, 2009: Low temperature pyrolysis for the recovery of value-added resources from waste wire(II), *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **20** (5), pp. 553-556.

2. Jae-kwan Ku, Sang-su Kim, Yong-ho Lee, Byung-Geol Kim, Young-Ju Cho and Bong-Gyoo Cho, 2013: Trend on the Recycling Technologies for Spent Electric Wire by the Patent and Paper Analysis, *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, **22** (5), pp. 63-70.
3. Jung-Il Yang, jung-Whan Oh, Woo-Zin Choi and Seon-Kook Hwang, 1994: Development of Recycling Technology for Used cables, *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, **3** (2), pp. 28-34.
4. Y. Jung, T. H. Im, and J. O. Jung, 1995: Recovery of copper from waste wire using pyrolysis, *J. Korean Solid Wastes Eng. Soc.*, **12**, pp. 93-98.
5. Y. H. Lee, T. D. Park, and B. K. Kim, 2010: Recycling device for jelly filling cable and recycling method for the same, *KR Patent 10-0943060*.
6. M. C. P. B. de Araújo, A. P. Chaves, D. C. R. Espinosa and J. A. S. Tenório, 2008: Electronic scraps - Recovering of valuable materials from parallel wire cables, *Waste Manage.*, **28**, pp. 2177-2182.
7. I. W. Sung and D. K. Min, 2003: A study on the recovery of copper from jelly cable, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **20**, pp. 260-265.
8. D. K. Min and I. W. Sung, 2003: Evaluation of separation

- on the copper recovery from jelly filled type cable, Korean J. Sanitation, **18**, pp. 20-26.
9. Sungsu Cho, Sooyoung Lee, Minhye Seo and Sunghyun Uhm, 2014: A study on the scale-up of highly effective copper metal recovery from waste jelly-filled communication cables, Appl. Chem. Eng., **25** (2), pp. 157-160.
 10. Chunghwa Telecom Co., Ltd., 2004: Cascade extracting and solvent refreshing method for recycling jelly cables, US Patent 10767440.
 11. J. T. Kim, 2008: The cable insulation jelly of content washing and separation a way, KR Patent 10-0822639.
 12. Y. J. Park and Y. C. Jang, 2010: Apparatus and method for separating jelly from jelly filled cables for communication, KR Patent 10-0980077.
 13. <http://www.eldan-recycling.com/>
 14. M. Zackrisson and A. Boss, 2013: RECYCLING PRO-
DUCTION CABLE WASTE - ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC IMPLICATIONS, WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities - 2nd International Conference.
 15. Annika Boss, Jan-Ove Boström, Per-Håkan Nilsson, Andreas Farkas, Alf Eriksson, Erik Rasmussen, Elin Svenningsson, Mattias Dalesjö and Alf Johansson, 2011: NEW TECHNOLOGY FOR RECYCLING OF PLASTICS FROM CABLE WASTE, 8th International Conference on Insulated Power Cables.
 16. Yu A. Kotov, 2003: Electric explosion of wires as a method for preparation of nanopowders, J. Nanopart. Res., **5**, pp. 539-550.
 17. Chuhyun Cho, Yoon-Cheol Ha, Chungil Kang, Yun-Sik Jin and Geun-Hie Rim, 2010: Preparation of a Nickel Nanopowder by Wire Explosion in Liquid Media, J. Korean Phys. Soc., **57**, pp. 1807-1810.



조 성 수

- 아주대학교 에너지시스템학과 박사수료
- 현재 고등기술연구원 신소재공정센터 수석연구원



이 수 영

- 연세대학교 금속공학과 석사
- 현재 고등기술연구원 신소재공정센터 선임연구원



홍 명 환

- 한양대학교 신소재공학과 석사
- 현재 고등기술연구원 신소재공정센터 선임연구원



서 민 혜

- 아주대학교 환경공학과 박사수료
- 현재 고등기술연구원 신소재공정센터 선임연구원



이 덕 희

- 아주대학교 에너지시스템학과 석사
- 현재 고등기술연구원 신소재공정센터 수석연구원



엄 성 현

- 인하대학교 화학공학과 박사
- 현재 고등기술연구원 신소재공정센터 수석연구원