

연구논문

레이저유도붕괴분광법(Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS) 기술을 적용한 도시광산산업의 경제 유발효과추정 연구

최정현¹ · 김지환^{2*}

¹이화여자대학교 환경공학과 교수, ²한국지질자원연구원 북방지질자원전략센터 선임연구원

Estimation of Economic Inducement Effect of Urban Mining Upon Applying Laser Induced Breakdown Spectroscopy Technology

Jung Hyun Choi¹ and Ji Whan Kim^{2*}

¹Professor, Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea

²Senior Researcher, Center for Northern Geoscience, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea

*Corresponding Author. Ji Whan Kim, kjiwhan@kigam.re.kr, Center for Northern Geoscience, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea

Received

10 August 2021

Final version Received

19 August 2021

Accepted

26 August 2021

Abstract

This study analyzed the economic inducement effect of urban mining owing to the application of laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) technology with input-output analysis by considering energy demand and CO₂ emission reduction, as well as production and employment. The estimation result showed that, as a result of the installation of LIBS facilities, the production inducement coefficient is 1.25, the value-added inducement coefficient is 0.46, the job inducement is 4.56 persons per 1 billion KRW, and the employment inducement is 3.74 persons per 1 billion KRW. Owing to the operation of LIBS facilities, the production inducement coefficient is 1.13, the value-added inducement coefficient is 0.50, job inducement is 6.35 persons per 1 billion KRW, and the employment inducement coefficient is 5.34 persons per 1 billion KRW. In addition, the application of LIBS technology can induce positive effects in urban mining with respect to energy demand and CO₂ emission reduction, as well as production and employment, by reducing 0.0003% of CO₂ eq. and 0.02% of the total energy input.

Key words : LIBS, urban mining, Input-Output statistics, induced effect

요약

본 연구는 LIBS 기술을 적용한 도시광산의 경제 유발효과를 산업연관표를 이용하여 분석하였다. 특히 도시광산 산업이 폐기물 재생을 통해 경제 및 환경 관점의 편익을 기대하고 있으므로, 산업연관 분석을 이용하여 도시광산 산업을 대상으로 유발효과를 추정하는 과정에서 생산유발, 고용유발 뿐만 아니라 에너지 수요·CO₂ 배출저감 측면에서의 효과도 추정하였다. 추정결과 LIBS 설비도입의 경우에 생산유발계수는 1.25, 부가가치유발은 0.46, 취업유발은 10억 원당 4.56명, 고용유발은 10억 원당 3.74명으로 나타났으며, LIBS 도입 도시광산산업 운영의 경우에 생산유발계수는 1.13, 부가가치유발계수는 0.50, 취업유발은 10억 원당 6.35명, 고용유발은 10억 원당 5.34명으로 나타났다. 또한 LIBS 기술도입 도시광산산업 운영의 경우에 우리나라 전체 에너지투입액의 0.02%를 저감하며, 0.0003%의 CO₂ eq.를 저감하는 것으로 나타나, LIBS 기술을 활용한 도시광산이 생산 및 고용 측면 뿐만 아니라 에너지 및 CO₂ 배출저감 측면에서도 긍정적인 효과를 기대해볼 수 있음을 알 수 있었다.

주요어 : 레이저유도붕괴분광법(LIBS), 도시광산, 산업연관표, 유발효과

서 론

우리나라는 석유 등 에너지 자원뿐만 아니라 금속광물자원의 부존 역시 희박하여 자원수급 불균형이 경제활동에 부정적인 영향을 미치기도 한다. 금속광물자원을 이용해 만들어지는 금속제품은 산업경제활동에 있어서 필수불가결한 생산요소로서, 제품의 특성을 결정하는 요소물질로 사용되기 때문에 대체할 수 있는 자원을 찾기 곤란하다(National Assembly Research Service, 2009; Yoon *et al.*, 2019). 한편, 소득증대에 따른 생활수준의 향상과 기술발전의 가속화는 가전제품의 다양성과 편의성을 촉진시키고 있어 실제 제품의 수명 추이와 달리 폐기가 급격히 증가하고 있으며, 이로 인한 신제품의 생산과 소비도 빠르게 늘어나고 있다(Aquiree *et al.*, 2013; Charles *et al.*, 2017). 우리나라는 금속광물자원의 부존에 비해 금속제품의 수요가 크기 때문에, 제품 또는 폐기물 형태로 생활주변에 넓게 분포되어 양적으로 광산규모를 가진 형태, 즉 도시광산을 활용한다면 원자재 해외의존도 완화 및 수입대체 효과 등 경제적 편익을 얻을 수 있을 것이다.

폐금속은 간단한 정제과정을 통해 바로 사용이 가능한 금속자원으로 재활용의 경제적 가치가 매우 높으며, 우리나라의 경우 매년 4조 원 규모의 폐금속 자원이 발생하고 있는 실정이다. 이중 사업장계 폐금속은 80% 이상 재활용되고 있으나, 일반 폐금속의 경우 재활용률이 10~15%로 매우 낮으며 폐금속으로 인한 2차 환경오염과 처리비용 발생으로 경제적 손실이 매우 크다. 그러므로 폐금속 재활용은 자원절약 차원에서 국가적 역점사업으로 전 세계적으로 추진되고 있지만, 높은 경제적 가치에도 불구하고 국내 폐금속 재활용기술 및 관련 산업활동은 매우 열악한 것으로 알려져 있다(Shin *et al.*, 2018).

폐전기전자제품(waste electronic electrical equipment, WEEE)의 경우 현실적인 경제성 확보의 난점으로 인해 재활용이 이루어지지 않고 있으나, 단순 폐기의 경우 포함된 유해성금속이 환경적으로 심각한 문제를 일으킬 수 있어 앞으로 보다 엄격한 관리가 적용될 것으로 전망된다(Yoon *et al.*, 2019). 폐전기전자제품의 재활용은 산업경제 관점의 편익뿐만 아니라 폐기물 관리라는 환경 관점의 편익도 갖 추고 있어, 환경에 대한 관심이 증가하는 이 시기에 중요성을 더해가고 있다. 하지만, WEEE의 회수공정은 산업적 가치를 높이기 위해 수작업의 의존도가 크고, 그 후 분쇄된 폐기물의 대상으로 진행되는 선별작업의 경우 재활용 가능한 부분이 극히 일부분이기에 다양한 WEEE에 포함된 다양한 금속 성분을 재활용하기에는 현재의 방법들은 한계가 크다. 따라서 파·분쇄된 폐기물 시료를 빠른시간내에 측정하여 효율적으로 포함된 금속 성분들을 분별해낼 수 있는 측

정방법의 개발이 요구되고 있다.

LIBS(Laser Induced Breakdown Spectroscopy, 레이저 유도붕괴분광법) 시스템은 레이저를 시료에 조사하여 레이저에 의한 높은 온도로 시료 표면을 플라즈마화시켜 원자를 들뜬 상태로 만들고, 플라즈마화 된 전자가 일정한 시간이 지나 바닥상태로 돌아가면서 각 원소마다 고유의 파장들을 방출하게 되는 원리를 이용한 원자 발광 분광법(Atomic Emission Spectroscopy)의 한 방법이다(Cremers *et al.*, 2012). 각 원소에 해당하는 고유의 파장들과 파장의 강도를 측정하여 원소의 정성·정량적인 분석이 가능하며, 동시에 여러 원소를 측정할 수 있으며 모든 성상의 시료 측정이 가능하다(Wang *et al.*, 2016). 기존 원소분석방법과 비교하여 분석과정 중 화학적 전처리 과정이 필요하지 않으며, 측정시 레이저의 조사와 샘플의 플라즈마화 및 스펙트럼 방출이 거의 동시에 이루어지기 때문에 신속하고 용이하게 분석이 가능한 장비로 주목받고 있다(Yu *et al.*, 2014). 또한 불순물 검출, 폭발물 탐지, 화학 및 생물학적 탐지, 핵물질 탐지, 지질학적 분석 및 우주 탐사, 고고학 물체의 진단 및 태양 전지의 금속 확산 등 다양하게 응용되고 있다(Bhatt *et al.*, 2015). 고체시료 분석에 초점을 두고 개발되어 왔지만 최근 액체시료에 대해서도 활발하게 진행되고 있다(Popov *et al.*, 2016).

한편 국내외에서 LIBS를 활용해 폐전기전자제품을 선별하고자 여러 연구가 수행되고 있다. Shin *et al.*(2018)은 국내 재활용업체에서 획득한 폐금속 스크랩을 활용하여 LIBS 기술과주성분 분석(principle component analysis, PCA)과 같은 통계기법들을 활용하여 실시간 선별 시스템을 개발하였다. Gurell *et al.*(2012)은 표준물질을 사용하여 얻은 특정 원소의 파장 강도 비율과 농도 비율의 상관관계를 기반으로 LIBS를 활용한 금속 스크랩 조각을 분류 시스템을 개발하였다. Aguirre *et al.*(2013)은 LIBS를 활용하여 핸드폰 스크랩의 고분자 화합물 부분을 측정된 후 얻어진 스펙트럼을 대상으로 PCA를 수행하여 각 부분을 구성하는 원소를 확인하였다. 그 외에도 Park *et al.*(2017)은 LIBS 분석 결과를 대상으로 인공지능 알고리즘을 활용하여 폐소형 가전에서 발생하는 흑색 플라스틱을 분류하고 분류율을 계산하였다.

특정산업의 변화가 경제에 미치는 효과는 산업연관표를 이용한 분석을 통해 추정할 수 있다. 산업연관표는 가공통계의 하나로 경제의 전체적 규모와 구조를 반영하는 중요한 미·거시적 경제통계이며, 산업(혹은 상품)간 연관관계를 기초로 풍부한 정보를 제공한다. 해당 시점(연도)의 산업 생산활동에서 중간재 소비를 중심으로 다른 산업과 갖는 관계를 제시하며, 대상산업 자체의 직접효과와 산업간 관계에 따른 간접효과를 파악하는 데에 유용하다. 따라서

산업연관표를 이용하면 특정산업의 도입, 생산기술의 개선, 대체생산, 재활용 등의 각종 효과를 추정·분석할 수 있다(Tsuchii *et al.*, 1996).

본 연구는 LIBS 기술을 적용한 도시광산의 경제 유발효과를 산업연관표를 이용하여 분석하고자 한다. 특히 도시광산 산업이 폐기물 재생을 통해 경제 및 환경 관점의 편익을 기대하고 있으므로 에너지 및 환경이 고려된 산업연관표를 작성하여 분석한다. 산업연관표와 환경을 접목한 환경산업연관표는 경제주체 및 산업간의 상품흐름에 수반되는 환경오염물질의 흐름을 보일 수 있다. 도시광산 산업을 대상으로 유발효과를 추정하는 과정에서 에너지 및 환경을 접목한 산업연관표를 이용할 경우 에너지 이용과 오염물질 배출 흐름에 미치는 효과를 추정할 수 있어 도시광산 산업이 경제 및 환경 측면에서 어떠한 편익을 유발하는 지 구체적으로 산출할 수 있다는 장점이 있다. 이에 본 연구는 LIBS 기술적용 도시광산산업을 반영한 산업연관표에 산업별 에너지소비량과 CO₂ 배출량을 연결하여 LIBS 기술적용 도시광산산업에 의한 효과를 에너지와 CO₂ 측면에서도 파악하여 진행한다.

본 론

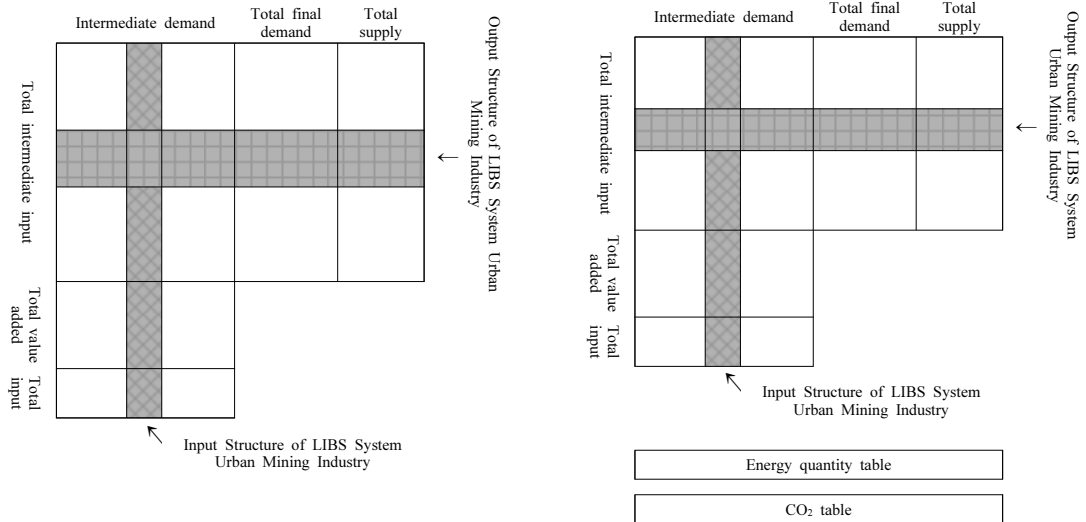
분석구조

LIBS 기술을 적용하여 도시광산산업이 조성될 경우 우리경제에 유발하게 될 효과를 추정하기 위해 먼저 도시광산산업이 반영된 산업연관표가 요구되며, 여기에 에너지

흐름과 CO₂ 배출을 연결하여 유발효과 추정에 사용할 에너지와 환경이 연계된 산업연관표를 작성하여야 한다. 이렇게 작성된 산업연관표를 기초로 유발효과를 추정·분석한다.

유발효과는 직접효과와 파급효과들의 합으로서 총효과이며, 직접효과에 대한 총효과의 비율은 총효과승수 또는 승수효과라고 한다. 본 연구는 생산과 고용에 관한 유발효과와 에너지 저감효과, CO₂ 저감 효과를 대상으로 추정·분석한다. 유발효과 측정 단위는 계수(= 유발효과액/최종수요액)로, 유발계수는 100만 원당의 배수 및 십억 원당 명(인원)으로 제시된다. 따라서 사업의 규모가 달라지는 것으로부터 영향을 받지 않는다.

LIBS 기술이 도입된 도시광산산업을 산업연관표에 추가하는 과정에서 해당 설비의 투입구조를 설정해야 하는데, 본 연구에서는“컴퓨터, 전자 및 광학기기”, “전기장비”, “기계 및 장비”를 부분적으로 포함하고 있으므로 이 3가지 산업의 투입구조를 합해서 적용하였다. 또한 LIBS 기술 설비가 도시광산산업에 도입되어 사용되므로 도시광산산업의 최종수요 중에서 민간고정자본형성에 배분한다. 도시광산산업은 한국표준산업분류에서 별도로 분류되어 있지 않는데, 도시광산은 수집·회수, 해체·분류, 전처리(파·분쇄), 선별, 정·제련의 공정을 갖지만, 수집 및 운반, 해체·분리, 정제련 등 산업단계별 분류코드가 달라서 산업통계를 파악하기 어렵다. 이에 한국은행(Bank of Korea, 2019)의 정의)에 따라, 도시광산의 투입구조를 구성할 때에는 기본 분류의 “폐기물 수집, 운반 및 처리(산업)”을 이용한다. 이를 도식화하면 Fig. 1과 같다.



<Transaction table including urban mining industry>

<Input-output table including urban mining industry>

Fig. 1. Input-output table reconstruction overview for induced effects estimation of urban mining industry.

실증분석

실증분석에서는 2015년 산업연관표 실측표(2019년 공표)를 사용하였다. 실측표는 실측조사로 투입 및 산출구조를 파악하므로 정확성이 높고, 기본분류 기준의 통계를 제공하므로 분석 목적에 따라서 산업분류를 재분류 및 재통합하기 용이하다.2)

한편, 한국생산기술연구원의 비용 조사 결과를 보면, 상품 제조를 100으로 할 때에 물질재활용의 비용은 93, 재제조의 비용은 16인 것으로 나타났으며, 비용구조는 물질재활용의 경우에 설비운영비 30%, 인건비 45%, 재료비 8%, 에너지 10%인 것으로 나타났고, 제조의 경우에 인건비 5%, 에너지 3%, 재료비 3%, 설비운영비 5%로 나타났다. 그리고 “광명시 재활용품 선별장 운영방식 개선 및 민간위탁 운영원가산정 연구보고서(KEAI, 2019)”의 원가 조사 결과를 이용하여 구체적인 값을 적용하는데, 이 보고서는 직무분석을 거쳐 적정인원 추정치를 제시하고 있으며, 운영원가를 노무비, 경비(보험료, 복리후생비), 일반관리비, 이윤, 시설운영비(유지관리비, 폐기물처리비), 대납(전력비,

용수비, 검사수수료)으로 구분하여 제시하고 있다. 이 보고서는 재활용품 선별장을 대상으로 하므로 본 연구가 대상으로 하는 LIBS 기술 도입의 도시광산산업과는 정확하게 일치하지 않으나, 이 보고서의 운영비 구조를 산업연관표 기본분류의 “폐기물 수집, 운반 및 처리(산업)”와 비교하면서 도시광산에 해당하지 않는 비용항목을 제외하는 방식으로 활용한다. 도시광산의 대상 금속은 희유금속과, 금, 은, 백금, 팔라듐, 코발트, 구리, 갈륨, 인듐, 니켈, 인, 카드뮴, 망간, 몰리브덴, 바나듐, 탄탈, 구리, 납, 바나듐, 로듐이며, 도시광산으로 부터의 생산물은 대부분 비철금속이므로 기본분류의 “연 및 아연 제련, 정련 및 합금제품”, “금은괴”, “기타 비철금속 제련, 정련 및 합금제품”, “기타 비철금속 1차 제품” 부분들의 배분구조를 평균하여 도시광산의 산출구조로 적용한다. 에너지 투입과 CO2 계수는 “철강연보”, “폐금속자원 재활용 대책”, “에너지통계연보”, “환경통계연감”, “국가온실가스인벤토리”, “대기환경연보”의 자료를 이용하여 추정한다. 이와 같은 과정을 통해 본 분석에 이용할 산업연관표를 작성하는데, 이를 도식화하면 Fig. 2와 같다.

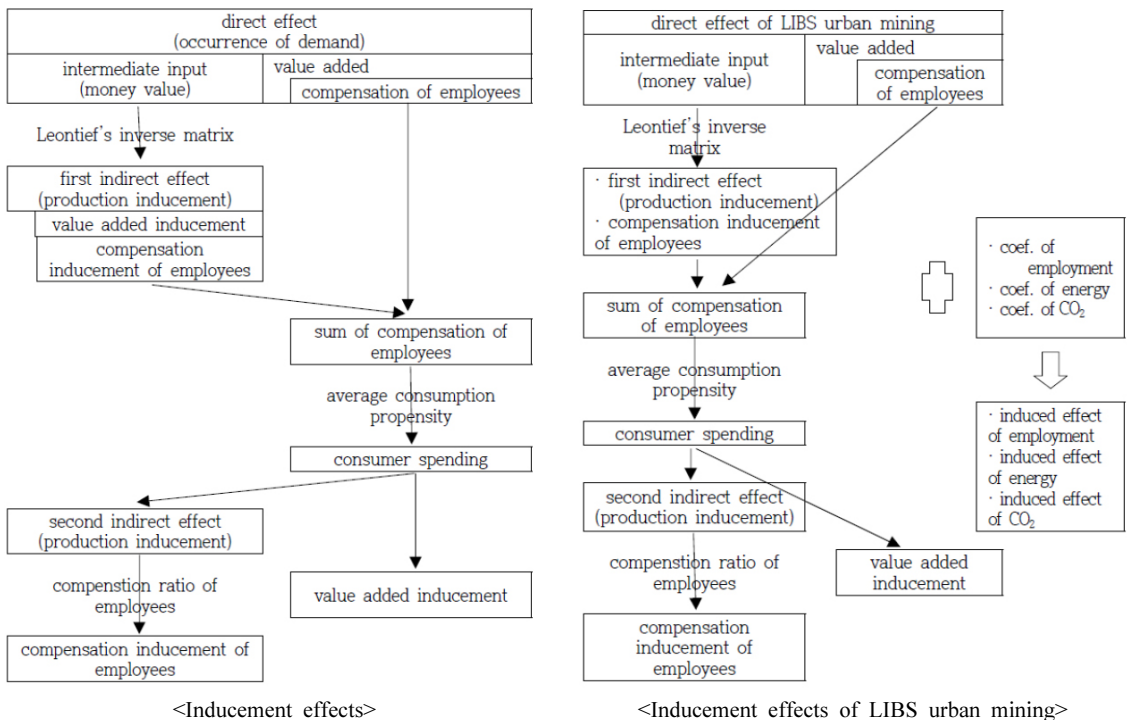


Fig. 2. Overview of inducement effect analysis of LIBS urban mining.

- 1) Bank of Korea(2019)에 따르면, 폐기물 처리는 가정 및 사업장에서 발생하는 폐기물을 수집운반, 처리 및 처분하는 활동과 폐기물, 스크랩, 기타 폐품 등을 처리하여 재생용의 금속 또는 비금속 원료물질로 전환하는 활동도 포함한다.
- 2) 2015년 실측표는 기본분류 기준(381부분)의 통계를 제시한다. 한편, 실측표와 연장표는 제공하는 최대 부분분류 수가 상이한데, 부분분류 수의 차이를 고려할 때에 실측표를 사용하는 것이 보다 상세한 산업분류의 투입 및 산출정보를 이용하는 것이다.

산업연관표에 LIBS 기술을 기반으로한 도시광산산업을 추가하면 기존의 산업연관표가 확장되는 것이므로 산업연관표의 행과 열에 대한 균형조정과정이 필요하다. 균형조정과정은 관련 데이터들을 이용하여 각 부문의 생산액 합계를 추정하고, 기준년도가 되는 기본거래표의 투입계수를 기준으로 예측시점의 투입계수를 예측한다. 연장표를 추정하는 경우에는 작성에서부터 공표까지의 시간적 제약 때문에 이용할 수 있는 자료들이 한정되므로 추정의 최종 단계에서 균형조정과정이 반드시 수행되어야 한다. 본 연구에서는 균정조정방법으로 라그랑주승수법을 적용하였다. 라그랑주승수법은 잠정 생산액에 예측시점의 투입계수를 곱했을 때에 그 행 방향의 합계와 열 방향의 합계를 각각 잠정 중간수요액과 잠정 중간투입액이 일치하도록 하는 제약 하에서 기준시점의 투입계수와 예측시점의 투입계수 간 차이의 제곱 합을 최소화하는 최소자승법에 의한 방법이다. 라그랑주승수법은 발산가능성을 갖지 않으며, 기준이 되는 행렬의 열비율(산업연관표의 투입계수를 의미)과 행비율(산업연관표의 산출비율을 의미)을 주어진 것으로 하고, 이 기준비율과 새롭게 추정한 행렬의 열비율과 행비율 각각의 가중 오차의 제곱합을 최소화하도록 각 항의 값을 추정하는 것이다.

실증분석 결과

LIBS 기술의 비용은 도입에서 100만 원, 운영에서 4,560만 원/년을 전제로 유발효과를 추정하였는데, 운영액 4,560만 원은 LIBS 기술 도입 도시광산산업의 1년간의 총투입액이며, 이는 총산출액과 같다.

유발효과를 추정할 때에 유발효과 크기를 기준으로 하면

LIBS 기술 도입 설비의 금액 규모와 LIBS 기술 도입 도시광산산업의 매출 규모가 커짐에 따라서 유발효과도 커지게 된다. 이에 설비 금액과 매출 금액에 의한 유발효과 크기에 더해 설비 금액과 매출 금액 대비 유발효과 크기인 유발효과계수도 제시하기로 한다.

유발효과 추정 결과는 Table 1과 Table 2에 제시하였다. LIBS 기술 설비도입의 경우에 생산유발계수는 1.25, 부가가치유발계수는 0.46, 취업유발은 10억 원당 4.56명, 고용유발은 10억 원당 3.74명으로 나타났다. LIBS 기술 도입 도시광산산업 운영의 경우에 생산유발계수는 1.13, 부가가치유발계수는 0.50, 취업유발은 10억 원당 6.35명, 고용유발은 10억 원당 5.34명으로 나타났다.³⁾

여기에서 취업자는 임금근로자, 자영업자, 무급가족종사자를 모두 합한 인원이며, 피용자는 순수 임금근로자 인원을 의미한다. 따라서 피용자를 대상으로 하는 고용유발효과가 취업유발효과보다 작게 나타난다.

에너지통계연보 2018(KEEI, 2019)의 산업별 에너지투입액을 이용하여 금액 기준 산업별 에너지투입계수를 도출해 LIBS 기술 도입 도시광산산업을 운영할 때의 에너지저감량을 추정하였다. 추정결과에 따르면 우리나라 전체에서의 에너지투입액(365,571,665백만 원)에서 73,234백만 원, 0.02%를 저감하는 것으로 나타났다. 또한 국가온실가스인벤토리(GIR, 2019)의 분야별 배출량과 산업연관표의 산업별 총투입액을 이용하여 배출계수(톤 CO₂ eq./백만 원)도 도출하였는데, LIBS 기술 도입 도시광산산업을 운영할 때의 CO₂ 배출 저감량은 우리나라 전체의 2015년 CO₂ 배출량(692,924,000톤 CO₂ eq.)에서 0.0003%에 해당하는 2169.277톤 CO₂ eq.를 저감하는 것으로 나타났다.

Table 1. Results of inducement effects of LIBS urban mining industry

(unit: KRW, person)

	Demand	Production inducement	Value added inducement	Job inducement	Employee inducement
Installation	100	125.3	46.2	45.9	37.4
Operation	40,560	5,170.7	2,271.5	2,904.5	2,439.8

Table 2. Results of inducement effect coefficients of LIBS urban mining industry

	Production inducement	Value added inducement	Employee inducement (per bil.KRW)
Installation	1.25	0.46	3.74
Operation	1.13	0.50	5.34
Average	1.84	0.76	-

3) 고용유발은 피용자를 대상으로 한다.

결 론

본 연구는 LIBS 기술을 적용한 도시광산의 경제 유발효과를 산업연관표를 이용하여 분석하였다. 특히 도시광산산업이 폐기물 재생을 통해 경제 및 환경 관점의 편익을 기대하고 있으므로 에너지 및 환경이 고려된 산업연관표를 작성하여 분석하였다. 산업연관분석을 이용함으로써 도시광산 산업을 대상으로 유발효과를 추정하는 과정에서 산업경제뿐만 아니라 에너지 수요·CO₂ 배출저감 측면에서의 편익유발도 추정하였다.

추정결과 LIBS 기술 설비도입의 경우에 생산유발계수는 1.25, 부가가치유발은 0.46, 취업유발은 10억 원당 4.56명, 고용유발은 10억 원당 3.74명으로 나타났으며, LIBS 기술 도입 도시광산산업 운영의 경우에 생산유발계수는 1.13, 부가가치유발계수는 0.50, 취업유발은 10억 원당 6.35명, 고용유발은 10억 원당 5.34명으로 나타났다. 또한 LIBS 기술도입 도시광산산업 운영의 경우에 우리나라 전체 에너지투입액의 0.02%를 저감하며, 0.0003%의 CO₂ eq.를 저감하는 것으로 나타났다.

자료 여건상의 한계로 인해 LIBS 기술을 도시광산산업과 관계된 제품과 활용법에 국한하여 분석을 진행할 수밖에 없었다. 그러나 산업경제 측면에서 긍정적인 유발효과를 갖는 것으로 나타났으며, 에너지 및 이산화탄소 배출저감 측면에서 역시 긍정적인 효과를 갖는 것으로 나타나 폐전기전자제품 문제가 대두되는 현재에 의미 있는 대안으로서 효과를 제한적으로나마 확인할 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업의 재원 및 한국연구재단의 이공분야기초연구사업(NRF-2016R1D1A1B04934910)의 재원으로 수행되었습니다.

References

- Gurell, J., Bengtson, A., Falkenström, M., and Hansson, B.A. M., 2012. Laser induced breakdown spectroscopy for fast elemental analysis and sorting of metallic scrap pieces using certified reference materials, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 74-75, p.46-50.
- Aguirre, M.A., Hidalgo, M., Canals, A., Nobrega, J.A., and Pereira-Filho, E.R., 2013. Analysis of waste electrical and electronic equipment (WEEE) using laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) and multivariate analysis, *Talanta*, 117, p.419-424.
- Bank of Korea, 2019. *2015 Input-Output Statistics*, Seoul, Korea.
- Bhatt, C.R., Alfarraj, B., Ayyalamayajula, K.K., Ghany, C., Yueh, F.Y., and Singh, J.P., 2015. Study of atomic and molecular emission spectra of Sr by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS), *Applied optics*, 54, 34p.
- Charles, R.G., Douglas, P., Hallin, I.L., Matthews, I., and Liversage, G., 2017. An investigation of trends in precious metal and copper content of RAM modules in WEEE: Implications for long term recycling potential, *Waste Management*, 60, p.505-520.
- Cremers, D.A., Yueh, F.Y., Singh, J.P., and Zhang, H., 2012. Laser-induced breakdown spectroscopy, elemental analysis. *Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation.*, <https://onlinelibrary.wiley.com/>
- Korea Economic Administration Institute (KEAI), 2019. *Gwangmyeong City Recycling Sorting Center Operation Method Improvement and Private Consignment Operation Cost Estimation Research Report*, Sungnam, Korea,
- Korea Energy Economics Institute (KEEI), 2019. *Yearbook of Energy Statistics 2018*, 2021.07.08. <https://www.kses.net/>
- National Assembly Research Service, 2009. *Problems and Improvement for Recycling of Rare Metals*, NARS pending issue report vol. 43, Seoul, Korea, 34p.
- National Center for Greenhousegas Inventory & Research (GIR), 2019. *National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea 2019*, 2021.07.20. <https://ngms.gir.go.kr/>
- Park, E.K, Jung, B.B., Choi, T.J., Choi, W.Z., and Oh, S.K., 2017. Automatic sorting system based on laser-induced technology for black plastics from used small household appliances, *Proceedings of the 2017 Autumn Conference of The Korea Society of Waste Management*, The Korea Society of Waste Management, Incheon, Korea, 12p.
- Popov, A.M., Drozdova, A.N., Zaytsev, S.M., Biryukova, D.I., Zorov, N.B., and Labutin, T.A., 2016. Rapid, direct determination of strontium in natural waters by laser-induced breakdown spectroscopy, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 31, p.1123-1130.
- Shin, S.H., Lee, J.P., Moon, Y.M., Choi, J.H., and Jeong, S.H., 2018. Classification of metal scraps using laser induced breakdown spectroscopy, *Journal Korean Institute of Resources Recycling*, 27(1), p.31-37.
- Tsuchii, A, Takeda, K, Suzuki, T., and Tokiwa, Y, 1996. Colonization and degradation of rubber pieces by *Nocardia* sp. *Biodegradation*, 7, p.41-48.
- Wang, X., Wang, H., Chen, C., and Jia, Z., 2016. Ablation Properties and Elemental Analysis of Silicone Rubber Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44(11), p.2766-2771.

Yoon, S.M., Choi, J.H., and Wee D., 2019. Improvement of Waste Metal Recovery Efficiency Using Multivariate Statistical and Deep Neural Network Analysis, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 56(5), p.535-547.

Yu, X.D., Li, Y., Gu, X., Bao, J., Yang, H., and Sun, L., 2014. Laser-induced breakdown spectroscopy application in environmental monitoring of water quality: a review, *Environmental Monitoring Assessment*, 186, p.8969-8980.



최 정 현

1997년 이화여자대학교 공과대학 환경공학과 공학사
2000년 미국 Princeton University 대학원 토목환경공학과, 환경공학석사
2004년 미국 Princeton University 대학원 토목환경공학과, 환경공학박사

현재 이화여자대학교 환경공학과 교수
(E-mail; jchoi@ewha.ac.kr)

김 지 환

현재 한국지질자원연구원 북방지질자원전략센터 선임연구원
(本學會誌 第57卷 第4号 参照)