

Mg₂NiH_x-5 wt% CaO 수소 저장 복합재료의 물질전과정평가

신효원, 황준현, 김은아, 홍태환*

한국교통대학교 응용화학에너지공학부 에너지소재공학전공
27469 충북 충주시 대소원면 대학로 50

(2021년 5월 4일 접수; 2021년 6월 8일 수정본 접수; 2021년 6월 10일 채택)

Material Life Cycle Assessment on Mg₂NiH_x-5 wt% CaO Hydrogen Storage Composites

Hyo-Won Shin, June-Hyeon Hwang, Eun-A Kim, and Tae-Wan Hong*

Department of Materials Science & Engineering, Korea National University of Transportation
50, Daehak-ro, Daesowon-myeon, Chungju-si, Chungbuk 27469, Republic of Korea

(Received for review May 4, 2021; Revision received June 8, 2021; Accepted June 10, 2021)

요 약

Mg₂NiH_x-5 wt% CaO 수소 저장 복합재료의 합성 공정에 대한 환경 영향 특성을 분석하기 위해 물질전과정평가(material life cycle assessment, MLCA)를 수행하였다. MLCA는 Gabi 소프트웨어를 사용하였으며, Eco-Indicator 99' (EI99)와 CML 2001 방법론을 기반으로 하여 분석하였다. Mg₂NiH_x-5 wt% CaO 복합재료는 수소 가압형 기계적 합금화법(hydrogen induced mechanical alloying, HIMA)에 의해 합성되었다. X-선 회절분석기(X-ray diffraction, XRD), 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM), 에너지 분산형 X-선 분광법(energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS), 비표면적 분석(Bruner-Emmett-Teller, BET), 열중량 분석(thermogravimetric analysis, TGA)을 이용하여 복합재료의 야금학적, 열화학적 특성을 분석하였다. CML 2001 및 EI99 방법론을 토대로 MLCA를 수행하여 분석한 정규화 결과, Mg₂NiH_x-5 wt% CaO 복합재료는 지구온난화(GWP)와 화석연료의 환경 부하 값에서 가장 높은 수치를 나타내었다. 이는 CaO 첨가에 따른 제조 공정에서의 추가적인 전기 사용으로 인한 것으로 판단된다. 따라서 향후 합금 설계 시에 제조 공정 시간 단축을 통한 공정 최적화 및 친환경적인 대체물질 탐구하여 환경적인 요인을 고려한 연구를 모색해 볼 필요가 있다.

주제어 : 물질전과정평가, 수소 저장, Eco-Indicator 99', CML 2001, 수소 가압형 기계적 합금화법

Abstract : Material Life Cycle Assessment (MLCA) was performed to analyze the environmental impact characteristics of the Mg₂NiH_x-5 wt% CaO hydrogen storage composites' manufacturing process. The MLCA was carried out by Gabi software. It was based on Eco-Indicator 99' (EI99) and CML 2001 methodology. The Mg₂NiH_x-5 wt% CaO composites were synthesized by Hydrogen Induced Mechanical Alloying (HIMA). The metallurgical, thermochemical characteristics of the composites were analyzed by using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), specific surface area analysis (Bruner-Emmett-Teller, BET), and thermogravimetric analysis (TGA). As a result of the CML 2001 methodology, the environmental impact was 78% for Global Warming Potential (GWP) and 22% for Eutrophication Potential (ETP). In addition, as a result of applying the EI 99' methodology, the acidification was the highest at 43%, and the ecotoxicity was 31%. Accordingly, the amount of electricity used in the manufacturing process may have an absolute effect on environmental pollution. Also, it is judged that the leading cause of Mg₂NiH_x-5 wt% CaO is the addition of CaO. Ultimately, it is necessary to research environmental factors by optimizing the process, shortening the manufacturing process time, and exploring eco-friendly alternative materials.

Keywords : MLCA (Material Life Cycle Assessment), Hydrogen storage, Eco-Indicator 99', CML 2001, HIMA (Hydrogen Induced Mechanical Alloying)

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: twhong@ut.ac.kr; Tel: +82-43-841-5388; Fax: +82-43-841-5380

doi: 10.7464/ksct.2021.27.2.107 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

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.

1. 서론

현대사회에서 지구온난화는 불가피한 현상으로 이를 최소화하기 위해 전 세계적으로 함께 노력해야할 과제이다. 이와 관련하여 구체적인 해결방안에 대한 다양한 의견이 제시되고 있으며, 아직 해답을 찾아가는 과정 중에 있다[1]. 최근 Covid-19 위기로 세계적인 온실가스 배출량이 일시적으로 감소했으나, 여전히 온실가스 배출은 높은 수준으로 유지되고 있다[2]. 그리하여 유엔기후변화협약과 C40 등 국제사회는 산업화 이전 대비 지구평균기온의 상승 정도를 1.5 °C 이내로 억제하기 위해 노력하고 있다. 기후 시나리오 분석에 따르면 1.5 °C 목표를 달성하기 위해서는 모든 당사국들이 적어도 2050년까지 온실가스 순 배출량을 0(탄소중립)으로 만들어야 한다. 이에 우리나라 정부는 2020년 10월 “2050 탄소중립 계획”을 선언하여 2050년까지 국가 온실가스 순 배출량을 제로화를 실현하겠다는 목표를 내세웠다[3]. 이에 따라 온실가스 배출량을 줄여 환경오염을 해결하기 위한 대표적인 차세대 에너지 중 하나가 수소에너지이다. 수소에너지는 물의 전기 분해로 쉽게 제조할 수 있으며 고압가스, 액체수소 등의 에너지로 활용할 수 있는 다양한 형태로 저장 가능하고, 다시 물로 환원할 수 있어 미래의 지속 가능한 청정 에너지원이라고 불린다. 그에 따른 미래 수소경제사회 구현을 목표로 현재 수소의 생산, 저장, 운송 등의 분야에 대한 연구개발이 활발히 진행 중이다[4,5]. 그 중 수소 저장에 관한 연구가 각 선진국들을 중심으로 활발하게 이루어지고 있으며, 고압수소 및 액화수소 저장, 금속수소화물에 의한 저장 등이 주류를 이루고 있다. 고압수소 저장은 수소를 고압으로 압축하여 제한된 체적의 용기 안에 저장하는 방식으로 다른 연료에 비해 질량 효율이 다소 낮은 단점이 존재한다[6]. 액화수소 저장의 경우 대기압 및 -253 °C와 같이 낮은 온도에서 극저온용 용기에 액체 상태로 저장하는 형태로 수소를 액화하기 위해 필요한 실제 에너지량이 약 11 kWh kg⁻¹인데, 이 값은 수소가 가지고 있는 에너지 함량의 약 28%에 해당되기 때문에 수소 저장의 근본적인 문제가 발생된다. 이와 같은 수소 저장

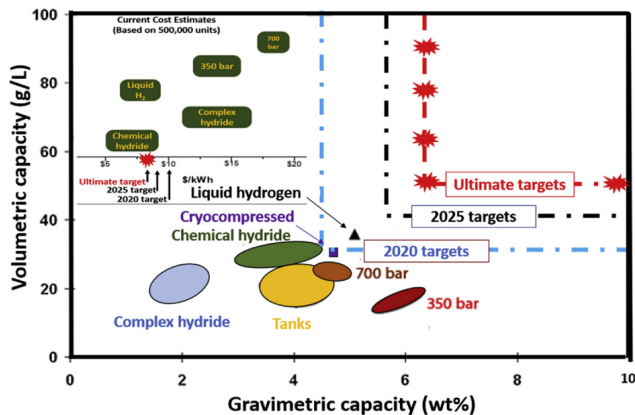


Figure 1. Current status of hydrogen storage systems-volumetric and gravimetric hydrogen density of existing developed hydrogen storage systems with respect to US DOE targets[9,10].

방법에 비해 경제적이고 안정한 수소화물을 형성하여 수소를 저장하는 수소저장합금이 주목 받고 있다[7]. 수소저장합금은 금속의 기체 수소가 금속수소화물(metal hydride)의 형태로 저장되는 것으로 수소원자들이 수소 분자의 Van der Waals 반경보다 작은 간격으로 저장되므로 안전하게 많은 양의 수소를 저장할 수 있다는 장점을 가진 고체수소저장방법이다[8].

Figure 1은 각각의 추정 비용과 함께 수소 저장 기술의 현재 상태를 보여준다. 또한 2020, 2025년을 넘어 궁극적인 목표의 중량 및 부피 용량을 강조하고 있다. 압축 수소, 액화 수소 및 복합 수소화물 등 서로 다른 수소 저장에 대해 측정된 중량 및 부피 용량은 각각 1.5~6 wt%, 20~40 g L⁻¹였다. 그림에서 볼 수 있듯이 액체 수소 저장 기술은 우수한 체적 저장 효율성을 보여주지만 특수 처리 요구사항, 액체 비등으로 인한 장기 저장 손실 및 극저온 액화 에너지 요구 사항이 적용 여부에 큰 단점으로 존재한다[11-15]. 따라서 최근에는 고체 수소 저장 기술에 관심이 집중되고 있으며, 특히 마그네슘계 수소화물은 수소저장합금에서 사용되는 대표적인 금속이다. 그 중 Mg₂Ni

Table 1. Hydrogen storage materials database (Department of energy, DOE)

Materials	Hydrogen Weight Percent (Gravimetric Density)	Heat of Formation (kJ mol ⁻¹ H ₂)	Temperature (°C)	Pressure (Atmospheres Absolute)
MgH ₂	7.6	74.4	350	1
Mg ₂ Ni	3.6	64.6	300	1.1
Mg (BH ₄) ₂	14.9	53	323	1
Mg (AlH ₄) ₂	9.3	41	380	1
Mg ₂ Fe	5.5	77.2	450	25
Mg ₂ Cu	2.6	72.9	295	6
Mg ₂ Co	4.5	76	450	16
Mg ₂ Al ₃	2.6	63.2	335	11
Mg ₆ Pd	0.9	80.3	160	0.014
Mg ₁₂ Ce	3.8	65	341	9
Mg ₁₂ Mm	4.6	82	350	7

합금은 수소화물이 안정하여 고온에서만 수소를 방출하고, 3.6 wt%의 수소 저장량을 가지므로 MgH₂보다는 낮지만, 수소화 및 탈수소화 반응속도가 더 빨라 비교적 우수한 수소화 거동을 지닌다. 이와 같이 전이원소(Fe, Ni, Ti 등), 금속간 화합물을 첨가하여 기계적 합금화법과 같은 공정 기술로 합금을 설계하여 기존 Mg계 수소화물의 단점인 수소저장 속도를 개선하고, 탈수소화 온도를 낮추는 등의 다양한 연구가 지속되어 왔다[16-20]. 하지만 자원순환 관점에서 수소저장능력을 개선하고자 할 때, 고려되는 다양한 합금 설계나 공정 등이 환경에 미치는 영향에 대한 고찰은 매우 미흡한 현실이다.

전과정평가(life cycle assessment, LCA)는 어떤 제품이나 서비스 전과정(원료채취, 제품생산, 유통, 사용, 폐기)에 걸친 환경부하 즉, 투입물에 의한 자원 고갈 및 배출물에 의한 환경영향평가를 하기 위해 투입 또는 산출물의 정량적 자료 목록을 작성, 환경영향을 평가하여 환경 성과를 개선하고자 대안을 검토하는 과정이라고 할 수 있다. 또한 환경경영 체제에 관련하여 국제 표준화 규격으로 통칭되는 ISO 14000 series의 기술적 바탕을 이루고 있어 국제적으로 중요시되는 기법이라 할 수 있다[21].

LCA가 “요람에서 무덤까지”처럼 환경부하를 측정함에 있어 귀중한 방법이지만, 제품 전체 공정에 관련한 데이터 해석 및 평가를 하기 위해서는 제한이 있다. 모든 제품은 재료로부터 생성되며 하나의 재료는 서로 다른 기술을 이용해 만들어지고 서로 다른 제품에 사용된다. ECO MATERIALS (environment conscious MATERIALS)를 재료 설계에 적용하기 위한 물질전과정평가(material life cycle assessment, MLCA)는 말 그대로 프로세스 보다 물질, 재료에 중점을 둔 환경 평가 방법으로 소재 연구에 중요한 tool을 제공할 수 있다. ECO MATERIALS은 3 요소 기술에서 시작된다. 첫 번째는 재료 생태를 위한 평가 기술, 두 번째는 재활용이 가능한 재료의 디자인 기술이며, 마지막으로 자연과 조화를 이루는 재료이다[22]. 따라서 본 연구에서는 Mg계 수소화물의 반응속도론적 특성을 개선할 것으로 기대되는 Mg₂NiH_x-5 wt% CaO 복합재료의 합성 공정을 MLCA로 평가하여 물질과 공정이 미치는 환경영향을 평가하고자 한다.

2. 연구 목적 및 범위 설정

2.1. 목적 정의

Mg₂NiH_x-5 wt% CaO 복합재료 합성공정에서 유발되는 환경부하를 정량화하고 환경성을 비교 및 분석한 후, 주요 원인을 규명하고자 한다.

2.2. 범위 정의

2.2.1. 대상 및 기능

본 연구의 대상은 Mg₂NiH_x-5 wt% CaO이고, 기능으로 Mg₂NiH_x-5 wt% CaO의 제조, 폐기와 재사용을 정의하였다.

Table 2. Scope definition

System	Manufacturing and characterization of Mg ₂ NiH _x -5 wt% CaO composites
Function	Hydrogenation Storage
Function unit	Hydrogen Contents (wt%)
Function flow	Mg ₂ NiH _x -5 wt% CaO powder (10 g)

2.2.2. 복합재료 제조 및 특성평가

Mg (Sigma-Aldrich, 98%)와 Ni (Sigma-Aldrich, 99.7%) 분말을 1/2인치 STS304 재질의 용기에 장입하였다. 이 때 Mg와 Ni 분말의 중량비는 Mg-Ni 이원계 상태를 참고하여 45:55로 설계하였다. 진공 펌프를 이용해 5×10^{-2} Torr까지 진공상태로 만든 후, 3.0 MPa의 수소 분위기에서 기계적 합금화법인 유성형 볼밀(planetary ball mill, PULVERISETTE-5, FRITTSCH)을 이용하여 200 rpm의 회전속도로 96시간 합금화하였다. 이때, 1/2인치 크롬 강구와 시료의 무게 비(ball to chips weight ratio, BCR)는 선행 논문을 참고하여 66:1로 하였다[23]. 그 후 제조된 시료와 5 wt% CaO (Sigma-Aldrich, 99.7%) 분말을 용기에 장입하여 동일한 조건으로 200 rpm의 회전속도로 24시간 합금화하였다. 합성된 복합재료의 결정구조를 분석하기 위해 X선 회절 분석기를 사용하였으며, 20 - 80°의 조사 범위와 1.5405 Å의 Cu K α 를 사용하여 분석하였다. 그리고 주사전자현미경을 이용해 시료의 표면 형상 및 입자 크기를 관찰하였다. 또한, 비표면적 측정 장비를 통해 수소 확산에 영향을 미치는 입자의 비표면적을 측정하였다.

Figure 2는 Mg₂NiH_x-5 wt% CaO 복합재료 분말의 XRD 분석 결과이다. 분석결과, 2-Theta = 40°에서의 피크 강도는 가장 크고 좁은 형태로 나타났다. Mg₂NiH₄, Mg₂NiH, CaO를 ICDD를 통해 확인하였으며, Mg₂NiH_x는 단사정(monoclinic) 구조, Mg₂NiH와 CaO는 입방(cubic) 구조로 나타났다. 회절 peak 면적이 넓은 형상은 합금화 동안 분쇄과정으로 인한 입자 크기 감소 때문이며 이는 수소화 확산 거리가 감소하여 수소화 반응

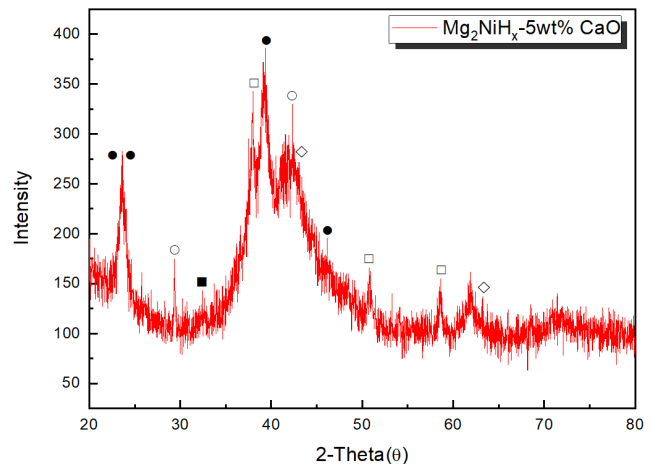


Figure 2. The result of XRD patterns on Mg₂NiH_x-5 wt% CaO composites (Mg₂NiH₄ (Monoclinic): ●, Mg₂NiH (Cubic): ○, CaO (Cubic): □).

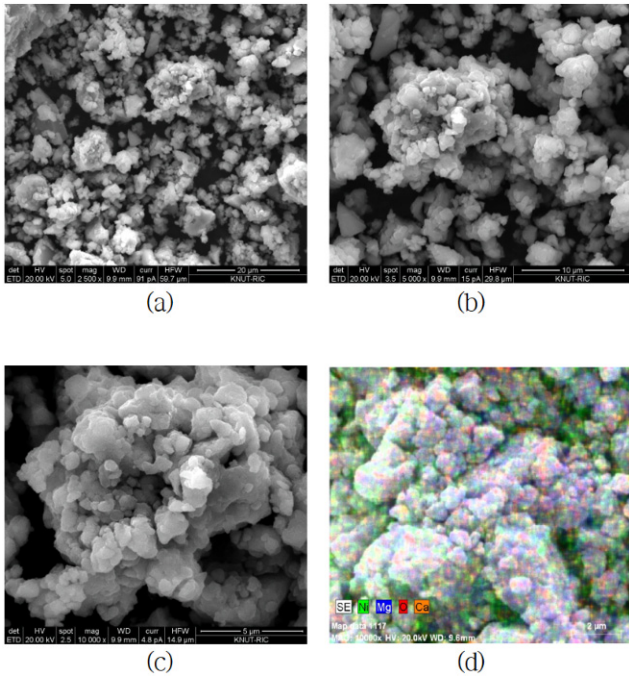


Figure 3. SEM image of (a) $Mg_2NiH_x-5 \text{ wt\% CaO}$ ($\times 2500$), (b) $Mg_2NiH_x-5 \text{ wt\% CaO}$ ($\times 5000$), (c) $Mg_2NiH_x-5 \text{ wt\% CaO}$ ($\times 10000$), and mapping image of (d) $Mg_2NiH_x-5 \text{ wt\% CaO}$.

속도가 증가할 것으로 판단된다[24]. 또한, 선행 연구 결과에 따르면 96시간 합성한 시료의 밀링 효과에 의한 입자의 나노구조화에 의한 현상으로 나타난다[25].

Figure 3은 $Mg_2NiH_x-5 \text{ wt\% CaO}$ 복합재료의 SEM 표면 형상 관찰사진이다. 입자 크기는 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 까지 나노 크기의 입자들이 관측되었으며, 분쇄과정으로 인해 입자가 뭉쳐 군집체를 형성하였다. 또한 입자 크기 및 수소 확산의 상관 관계를 선행 연구했던 Huang et al. [26]이 보고한 바에 의하면 나노화된 입자의 비표면적 증가는 수소의 흡착 및 탈착에 용이하다고 한다. 그러나 합금화 시간이 증가할수록 입자크기 감소로 인한 나노 및 비정질상이 생성되고 그로 인한 수소 저장량 감소 또는 합금 열화의 가속화가 발생한다는 보고가 있으므로 적합한 합금화 시간을 모색하는 과정이 필요하다[27].

Figure 4는 $Mg_2NiH_x-5 \text{ wt\% CaO}$ 복합재료의 질소 흡착·탈착 거동을 측정된 비표면적 분석 결과이다. 이 결과를 통하여 $Mg_2NiH_x-5 \text{ wt\% CaO}$ 의 비표면적 값은 $3.0 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 으로 계산되었다. 합금화 공정의 분쇄 효과로 인한 비표면적의 증가를 예상하였지만[28-30], CaO를 첨가함에 따라 입자 미세화로 인한 응집 현상과 입자 크기가 더 커지게 되어 비표면적 값이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

2.2.3. 시스템 경계

$Mg_2NiH_x-5 \text{ wt\% CaO}$ 복합재료 합성 공정의 제조와 재활용 및 폐기 단계를 시스템 경계로 정의하였다. 정의된 시스템 경계에서 조사되는 투입물 또는 배출물은 기본흐름(elementary)을 대상으로 분석하였다(Figure 5).

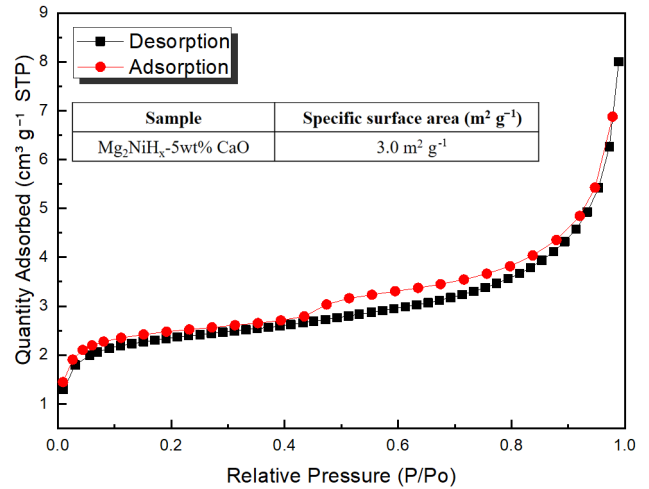


Figure 4. The results of BET on $Mg_2NiH_x-5 \text{ wt\% CaO}$ composites.

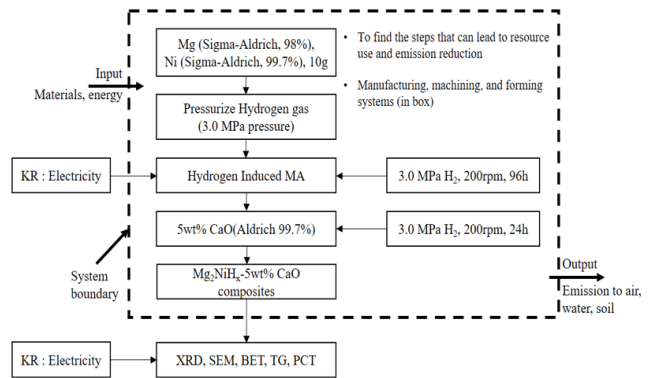


Figure 5. Process flow diagram for $Mg_2NiH_x-5 \text{ wt\% CaO}$ composites.

Table 3. Data source and emission for MLCA

Parameter		Materials
Input	Raw materials	Magnesium, Nickel, CaO, Hydrogen
	Energy	Electricity (medium voltage)
Output	Products	$Mg_2NiH_x-5 \text{ wt\% CaO}$ composites 10 g
	Emissions	$0.0378 \text{ kg (CO}_2\text{)}$

2.2.4. 데이터 범주

데이터 범주는 자원, 에너지, 수계 배출물 및 대기 배출물 등으로 분류하였으며, 이를 기반으로 데이터 분석을 수행하였다.

2.3. 데이터 질 요구 사항

2.3.1. 시간적 경계

재활용 단계 데이터는 2020년 3월 1일부터 2021년 2월 28일 까지 1년간의 데이터를 수집하였으며, 기타 데이터는 5년 이내의 데이터 사용을 목표로 하고 있다.

2.3.2. 지역적 경계

지역적 경계는 원/부자재의 경우 각 해당 생산지역이고, 제

Table 4. Quality of Data

Category	Manufacturing	Characterization	Disposal
Temporal boundary	Field data (2020.03.02. ~ 2021.02.28)	Expert and field data	Ecoinvent inventory database (v 2.2)
Regional boundary	Republic of Korea	Republic of Korea	Republic of Korea
Technical boundary	The laboratory	The laboratory	The laboratory

Table 5. Environmental impact categories applied using CML 2001

Environmental impact categories	Unit	Mg ₂ NiH _x -5 wt% CaO
Abiotic Resource Depletion (ARD)	Kg yr ⁻¹	6.85×10^{-3}
Global Warming Potential (GWP)	Kg CO ₂ eq	3.78×10^{-2}
Stratospheric Ozone Depletion Potential (ODP)	Kg CFC-11 eq	1.69×10^{-5}
Photochemical Oxidation Potential (POCP)	Kg C ₂ H ₄ eq	1.41×10^{-5}
Acidification Potential (ACP)	Kg SO ₂ eq	1.83×10^{-2}
Eutrophication Potential (EUP)	Kg PO ₄ eq	5.14×10^{-3}
Fresh-water Aquatic Ecotoxicity Potential (FAETP)	Kg 1,4-DCB eq	1.57×10^{-5}
Marine Aquatic Ecotoxicity Potential (MAETP)	Kg 1,4-DCB eq	1.89×10^{-5}
Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP)	Kg 1,4-DCB eq	3.14×10^{-4}
Human Toxicity Potential (HTP)	Kg 1,4-DCB eq	7.25×10^{-5}

Table 6. Environmental impact categories Eco-Indicator 99' (EI99)

Damage categories	Damage Unit	Mg ₂ NiH _x -5 wt% CaO	
Human health	Carcinogenic effect	DALY	1.12×10^{-8}
	Respiratory (organic)	DALY	2.47×10^{-8}
	Respiratory (inorganic)	DALY	2.98×10^{-2}
	Climate change	DALY	1.16×10^{-1}
	Ionizing radiation	DALY	2.03×10^{-2}
	Ozone depletion	DALY	1.26×10^{-8}
Ecosystem quality	Ecotoxicity	PDF × m ² × yr	1.32×10^{-2}
	Acidification / Nutrification	PDF × m ² × yr	1.84×10^{-2}
	Land-use	PDF × m ² × yr	1.16×10^{-2}
Resources	Minerals	MJ	1.73×10^{-2}
	Fossil	MJ	2.71×10^{-1}

품의 재활용 및 폐기는 대한민국으로 설정하였다.

2.3.3. 기술적 경계

기술적 경계는 대상제품을 재활용 후, 회수를 대상으로 하고 있다.

2.3.4. 데이터 수집 및 계산

본 연구에서는 네덜란드 Pre consulting 기관에서 개발한 End-point 개념의 Eco-Indicator 99' (EI99) 방법론 및 CML 2001 방법론을 기반으로 분석하였다. 소프트웨어는 Gabi 6를 사용하였으며, 복합재료를 합성하는 공정에 대한 환경영향 평가를 진행하였다. EI99 방법론에서는 3가지 피해 범주인 인간 건강, 생태계 건강 및 자원을 범주를 고려하였고 이 범주는 각각 발암

성, 호흡기 영향, 기후 변화, 방사능, 오존층, 생태독성, 산성화, 토지 이용, 자원 및 연료 채취 등으로 분류된다. 지표로는 인간 건강 범주에서 인간이 장애를 가지고 살아가는 기간(disability adjusted life years, DALY)을 지표로 하여 종말점 수준의 지수를 도출하였고, 생태계 건강에서는 생태계로 오염물질이 배출되어 산성화, 생태독성에 의해 단위면적(m²)당 종이 잠재적으로 사라질 확률(PDF × m² × yr)로 계산되며 자원고갈 범주에서는 자원 1 kg을 채취하기 위해 투입되는 잉여 에너지를 지표로 선정하여 분석한다[31]. 본 연구에서는 최초 Mg₂NiH_x 제조 공정에서 추출된 10 g의 복합재료와 5 wt% CaO를 첨가하여 합성한 공정을 합산하였다. 또한 전력량은 시간과 사용의 곱으로 계산하였다.

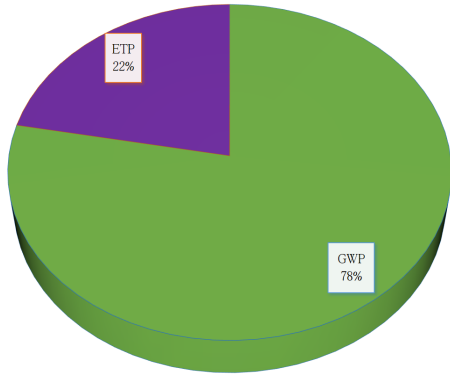


Figure 6. Impact assessment results for manufacturing process of $Mg_2NiH_x-5\text{ wt\% CaO}$ by CML2001.

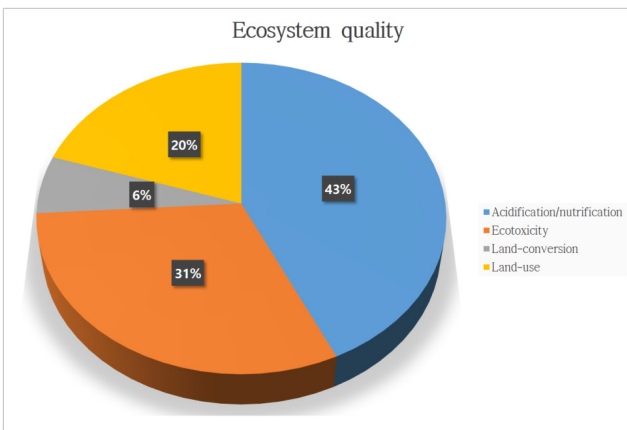


Figure 7. Impact assessment results for manufacturing process of $Mg_2NiH_x-5\text{ wt\% CaO}$ by EI 99.

3. 결과 및 고찰

물질전과정평가의 절차는 분류화, 특성화, 정규화로 진행되고, 이 순서에 맞춰 환경영향을 도출하고 이를 토대로 주요 원인을 규명하였다. 영향평가 과정에서 분류화는 10개 세부 영향 범주로 분류하였다. 10개의 영향 범주로는 무생물자원고갈(abiotic resource depletion, ARD), 지구 온난화(global warming potential, GWP), 오존층 고갈(stratospheric ozone depletion potential, ODP), 산성화(acidification potential, ACP), 부영양화(eutrophication potential, EUP), 생태독성(ecotoxicity potential, ETP), 인간독성(human toxicity potential, HTP)이 포함된다. 이 중 생태 독성은 수계생태독성(fresh-water aquatic ecotoxicity potential, FAETP)과 해양생태독성(marine aquatic ecotoxicity potential, MAETP), 토양생태독성(terrestrial ecotoxicity potential, TETP)이 포함되었다[32].

Figure 6에서는 전과정 영향 평가방법 중 CML 2001 방법론을 통하여 분석한 결과, 지구 온난화지수(GWP)가 약 78%, 생태독성(ETP)이 약 22%로 나타났다. 지구 온난화지수와 생태독성은 전력량에 의한 오염으로 나타나므로 합성 공정에서의 전기사용량이 환경오염에 매우 큰 영향을 끼치는 것으로 보인다. 따라서 심야 전기 및 신재생 에너지를 이용하는 것과 더불어

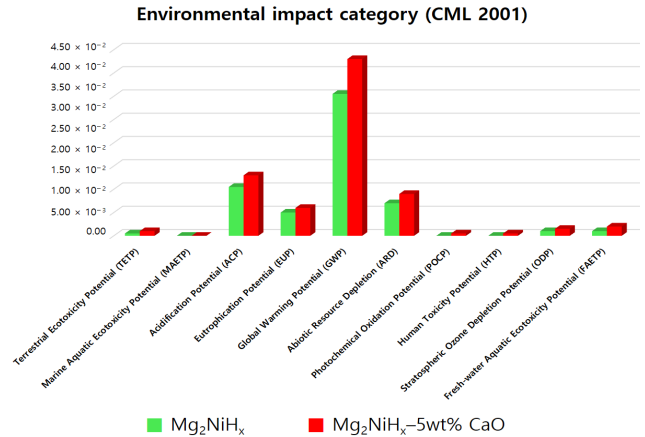


Figure 8. Normalization of $Mg_2NiH_x-5\text{ wt\% CaO}$ composites by Environmental impact category (CML 2001).

장비 관련 업체에서 전력사용량을 감소시킬 수 있는 장비를 사용하는 등 고효율 제품 개발을 통해 전기사용량을 줄이는 계획을 세울 필요가 있다.

Figure 7에서는 EI99 방법론으로 분석하였을 때, 산성화지수가 43%로 가장 높게 나타났고, 그 다음으로 31%의 생태 독성이 높게 나타났다. Mg_2Ni 로 인한 오염물질 배출과 함께 생태 독성의 주요 원인인 CaO의 첨가에 따른 높은 환경 부하 값으로 판단된다. 그리하여 CaO 양을 감소시키면서 고효율의 질량비를 탐색하여 합성 공정을 개선시킴으로 인해 환경 부하 수치를 감소시킬 수 있는 방법을 모색해야한다[33].

Figure 8은 $Mg_2NiH_x-5\text{ wt\% CaO}$ 복합재료를 CML 2001을 적용한 정규화 결과를 비교대상을 통해 하나의 그래프로 도식하였다. 그 결과, $Mg_2NiH_x-5\text{ wt\% CaO}$ 복합재료는 지구온난화 잠재력(global warming potential, GWP)이 가장 높은 수치를 나타내었고, 산성화(acidification potential, ACP), 자원고갈(abiotic resource depletion, ARD) 순으로 높은 영향 정도를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 GWP에서 Mg_2NiH_x 보다 훨씬 더 높은 수치를 확인할 수 있었는데, 이는 제조공정에서 살펴 보았을 때 Mg_2NiH_x 와는 달리 CaO를 첨가하여 추가적인 M.A 공정에 의한 전기의 사용으로 인한 영향으로 판단된다. 따라서 $Mg_2NiH_x-5\text{ wt\% CaO}$ 복합재료를 제조할 때 한 번의 M.A 공정을 수행하여 합성할 수 있는 공정을 연구하여 전기사용량을 줄여 지구 온난화 지수를 낮추는 방안을 모색할 필요가 있다.

Figure 9는 $Mg_2NiH_x-5\text{ wt\% CaO}$ 복합재료를 Eco-Indicator 99' (EI99) 방법론을 이용하여 하나의 그래프로 나타내었다. 그 결과로는 화석 연료(fossil fuels)가 가장 큰 수치로 나타났다. 또한, 기후변화(climate change)와 호흡기(respiratory) 순으로 영향 범주가 높게 측정되었다. 그 결과, Mg_2NiH_x 와 비교하였을 때 화석 연료와 기후변화 값에서 가장 큰 차이를 보이는데, 이는 앞선 CML 2001 방법론과 동일하게 지구온난화와 연관이 높은 것으로 나타난다. 호흡기의 경우 Mg_2NiH_x 와 비슷한 수치를 나타내는 것으로 비추어 보았을 때, 5 wt% CaO의 첨가로 인해 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다. 앞서 말한 바와 같이 제조 공정 중에 불필요한 에너지 소비를 최소화하고

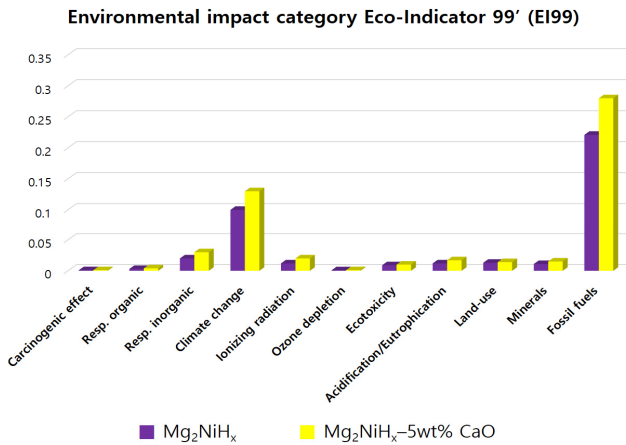


Figure 9. Normalization of Mg₂NiH_x-5 wt% CaO by Environmental impact category Eco-Indicator 99'.

전기 사용을 최대한 절약하여 많은 환경 부하 값을 감소시키기 위한 노력이 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 MLCA 공정을 통해 Mg₂NiH_x-5 wt% CaO 합성에 따른 환경오염 평가를 하였다. MLCA 소프트웨어는 Gabi 6를 사용하였고, Eco-Indicator 99 방법론을 통한 11가지 영향 범주에 대해 평가하였으며, CML 2001 방법론으로는 10가지 영향 범주에 대한 평가를 수행하였다. CML 2001 방법론의 결과, GWP 수치가 가장 높은 환경 부하 값을 띄는 것으로 나타났으며, 그에 따른 CO₂ 배출량이 0.0378 kg임을 확인하였다. 또한, Mg₂NiH_x와 비교하였을 때 CaO 첨가량에 따라 모든 환경 부하 값이 전반적으로 더 높은 수치를 보였다. 따라서 전기 사용량을 줄이기 위해 심야 전기 또는 신재생 에너지와 같은 고효율 에너지를 사용하거나 CaO보다 친환경적인 소재를 찾는 등의 방안을 모색해 볼 필요가 있다. 또한 EI99 방법론으로 분석한 결과로는 화석 연료가 가장 높은 값으로 나타났고, 호흡기, 기후 변화 순으로 높게 나타났다. 이는 앞서 말한 지구온난화의 높은 수치와 밀접한 관련이 있는 것으로 보이며, 그 외 환경 부하 값들은 매우 낮거나 유사해 첨가된 CaO에 따른 영향을 크게 미치지 않은 것으로 판단된다. 이로써 마찬가지로 전기 절약을 통해 전력량을 감소시켜 환경 보호와 지구 온난화 수치를 낮추는 방안을 고려해 볼 필요가 있다. 결과적으로 Mg₂NiH_x와 5 wt% CaO를 첨가한 Mg₂NiH_x-5 wt% CaO 복합재료의 환경영향을 비교해봤을 때 CaO 첨가로 인한 환경오염을 확인하였고, 이를 통해 차후 환경개선을 위해 합금 설계 시 공정 최적화 및 친환경적인 소재 탐구를 통해 환경적인 요인을 고려한 연구를 모색하는 방향으로 나아가야 한다.

감사

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(2019R1F1A1041405)와 교육

부에서 지원하는 한국기초과학연구원 보조금(2019R1A6C1010047)과 중소벤처기업부가 부여한 재원(S3045542)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Nomenclature

- MLCA: material life cycle assessment, 물질전과정평가
- Eco-Indicator 99: Consultants B.V.가 개발한 수명주기 영향 평가 도구이며, 설계자는 사용된 재료, 공정에 대한 환경 표시 점수를 분석하여 제품의 환경 평가를 수행한다.
- ISO 14000 series: Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework, Korean Agency for Technology and Standard, 2007
- GWP: Global warming potential, 상대적인 의미에서 다양한 기체들의 방출이 기후시스템에 미치는 가능한 미래의 영향을 측정하는데 사용되는 복사 특성을 기본으로 단순화한 지수의 한 종류이다.
- ODP: Ozone layer depletion potential, 오존을 파괴하는 화학 물질들의 파괴 정도를 숫자로 표현한 것으로, CFC-11의 오존층 파괴능력을 1로 기준을 두고 나머지 화학 물질들의 파괴력을 상정하였다.
- AP: Acidification potential, 산성화는 일반적으로 질소 산화물(NO_x)과 이산화황가스(SO₂)가 다른 대기 구성 요소와 함께 상호 작용하여 발생한다.
- EP: Eutrophication potential, 화학 비료나 오수의 유입 등으로 물에 영양분이 과잉 공급되어 식물의 급속한 성장 또는 소멸을 유발하여 물 속의 산소를 빼앗아 생물을 죽음에 이르게 하는 현상을 의미한다.
- ETP: Ecotoxicity potential, 생태독성은 화학물질, 농약 및 의약품 등이 담수생물에 미치는 생태영향 및 수생태계에 미칠 수 있는 위해성을 의미한다.
- HTP: Human toxicity potential, 총 배출량은 벤젠과 톨루엔 당량의 관점에서 평가하였으나, 잠재적인 선량은 어류 및 육류의 흡입, 섭취 및 진피 접촉을 포함한 다수의 노출 경로를 포함한다.

References

1. Kim, H. M., Oh, H. S., and Ryu, S. H., "A Study on the Passive House Technology Application of University Dormitory through The House at Cornell Tech," *The Journal of Korean Institute of Educational Facilities*, **25**(4), 11-18 (2018).
2. International Energy Agency (IEA), "World Energy Outlook 2020," Paris (2020).
3. Hwang, I. C., Kim, K. U., Baek, J. R., and Son, W. I., "Long-term Strategy and Sectoral Approaches of Seoul for Achieving Carbon Neutrality by 2050," The Seoul Institute, Report 1-162 (2020).
4. Grimes, C. A., Varghese, O. K., and Ranjan, S., "Hydrogen

- Generation by Water Splitting,” *Light, Water, Hydrogen*, Springer, Boston, MA, 35-113 (2008).
5. Goswami, D. Y., and Kreith, F., “ENERGY CONVERSION,” *CRC Press*, 2.1-2.21 (2007).
 6. Lee, S. G., Lee, J. H., and Park, J. S., “Hydrogen Storage Technology for Vehicles,” *Hydrogen Information*, **7**, 1-14 (2005).
 7. Lewis, F. A., and Alsdjem, A., “Hydrogen Metal System I,” *SCITEC PUB*, Zuerich, 37-54 (1996).
 8. Song, G. S., “Hydrogen Storage Alloy Technology Development Trend,” KEITI, Konetic Report No. 99 (2016).
 9. US Department of Energy, Target Explanation Document: Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Fuel Cell Vehicles (2014).
 10. Ordaz, G., Petrovic, J., Read, C., Thomas, G., and Satyapal, S., “Vehicular Hydrogen Storage: Goals, Challenges, and Progress,” *AIChE Spring Meeting and Global Congress on Process Safety, Orlando, FL* (2006).
 11. Schlapbach, L., and Andreas Z., “Hydrogen-storage Materials for Mobile Applications,” *Nature*, **414**, 353-358 (2001).
 12. Cardella, U., Decker, L., Sundberg, J., and Klein, H., “Process Optimization for Large-Scale Hydrogen Liquefaction,” *Int. J. Hydrog. Energy*, **42**(17), 12339-12354 (2017).
 13. Cardella, U., Decker, L., and Klein, H., “Roadmap to Economically Viable Hydrogen Liquefaction,” *Int. J. Hydrog. Energy*, **42**(19), 13329-13338 (2017).
 14. Sadaghiani, M. S., Mehrpooya, M., and Ansarinassab, H., “Process Development and Exergy Cost Sensitivity Analysis of a Novel Hydrogen Liquefaction Process,” *Int. J. Hydrog. Energy*, **42**(50), 29797-29819 (2017).
 15. Züttel, A., “Materials for Hydrogen Storage,” *Materials today*, **6**(9), 24-33 (2003).
 16. Kirchheim, R., Mutschele, T., Kieninger, W., Gleiter, H., Birringer, R., and Koble, T. D., “Hydrogen in Amorphous and Nanocrystalline Metals,” *Mater. Sci. Eng.*, **99**(1-2), 457-462 (1988).
 17. Singh, A. K., Singh, A. K., and Srivastava, O. N., “On the Synthesis of the Mg₂Ni Alloy by Mechanical Alloying,” *J. Alloy. Compd.*, **227**(1), 63-68 (1995).
 18. Zaluski, L., Zaluska, A., and Ström-Olsen, J. O., “Nanocrystalline Metal Hydrides,” *J. Alloy. Compd.*, **253-254**, 70-79 (1997).
 19. Iwakura, C., Nohara, S., Zhang, S. G., and Inoue, H., “Hydriding and Dehydriding Characteristics of an Amorphous Mg₂Ni-Ni Composite,” *J. Alloy. Compd.*, **285**(1-2), 246-249 (1999).
 20. Reilly, J. J., Jr., and Wiswall, R. H., Jr., “Reaction of Hydrogen With Alloys of Magnesium and Nickel and the Formation of Mg₂NiH₄,” *Inorg. Chem.*, **7**(11), 2254-2256 (1968).
 21. Lee, S. H., and Jo, Y. M., “Review of National Policies on the Utilization of Waste Metal Resources,” *KIC News*, **13**(1), 2-9 (2010).
 22. Lee, S. S., Lee, N. R., Kim, K. I., and Hong, T. W., “Environmental Impacts Assessment of ITO (Indium Tin Oxide) Using Material Life Cycle Assessment,” *Clean Technol.*, **18**(1), 69-75 (2012).
 23. Hong, T. W., Lim, J. W., Kim, S. K., Kim, Y. J., and Park, H. S., “Formation of Mg₂NiH_x Hydrogen Absorbing Materials by Hydrogen Induced Mechanical Alloying,” *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, **37**(3), 369-376 (1999).
 24. Jung, M. W., Park, J. H., Cho, K. W., Kim, K. I., Chol, J. H., Kim, S. H., and Hong, T. W., “Hydrogenation Properties of MgH_x-V₂O₅ Composites by Hydrogen Induced Mechanical Alloying,” *Trans. Korean Hydro. and New Energy Soc.*, **21**(1), 58-63 (2010).
 25. Hong, T. W., Lim, J. W., Kim, S. K., Kim, Y. J., and Park, H. S., “Effect of Atmospheric Hydrogen Pressure on Mg₂NiH_x synthesis,” *J. of the Korean Hydrogen Energy Society*, **10**(1), 27-40 (1999).
 26. Huang, Z. G., Guo, Z. P., Calka, A., Wexler, D., Lukey, C., and Liu, H. K., “Effects of Iron Oxide (Fe₂O₃, Fe₃O₄) on Hydrogen Storage Properties of Mg-based Composites,” *J. Alloys Compd.*, **422**(1-2), 299-304 (2006).
 27. Fernandez Samuel, A. M., Rao, M., and Srivastava, O. N., “The Structural Behaviour and Physical Properties of Some MX₂ (CdI₂ type) Layered Crystals,” *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, **7**(1-4), 391-450 (1983).
 28. Dvornik, M., and Mikhailenko, E., “The Influence of the Rotation Frequency of a Planetary Ball Mill on the Limiting Value of the Specific Surface Area of the WC and Co Nanopowders,” *Adv. Powder Technol.*, **31**(9), 3937-3946 (2020).
 29. Guzzo, P. L., Santos, J. B., and David, R. C., “Particle Size Distribution and Structural Changes in Limestone Ground in Planetary Ball Mill,” *Int. J. Miner. Process.*, **126**, 41-48 (2014).
 30. Zhang, J., Bai, Y., Dong, H., Wu, Q., and Ye, X., “Influence of Ball Size Distribution on Grinding Effect in Horizontal Planetary Ball Mill,” *Adv. Powder Technol.*, **25**(3), 983-990 (2014).
 31. Jeong, S. J., Lee, J. Y., Sohn, J. S., and Hur, T., “Life Cycle Assessments of Long-term and Short-term Environmental Impacts for the Incineration of Spent Li-ion Batteries (LIBs),” *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **17**(2), 163-169 (2006).
 32. Rashidi, A. M., Nouralishahi, A., Khodadadi, A. A., Mortazavi, Y., Karimi, A., and Kashefi, K. A., “Modification of Single Wall Carbon Nanotubes (SWNT) for Hydrogen Storage,” *Int. J. Hydro. Energy*, **35**(17), 9489-9495 (2010).
 33. Lee, N. R., Lee, S. S., Kim, K. I., and Hong, T. W., “Environmental Assessment of Chemically Strengthened Glass for Touch Screen Panel by Material Life Cycle Assessment,” *Clean Technol.*, **18**(3), 301-306 (2012).