

기술 및 시장을 고려한 최적 탄소자원화 기술 선정방법

이지현^{1)*} · 제갈성²⁾ · 조지은³⁾

Optimal Carbon Upcycling Technology Selection Method Considering Technology and Market

Ji Hyun Lee^{1)*} · Seong Jegarl²⁾ · Jieun Jo³⁾

Received 31 January 2023 Revised 3 March 2023 Accepted 9 March 2023

ABSTRACT Various carbon upcycling technologies have been proposed and are under development to achieve Korea's carbon neutrality target. Many chemical reactions are under development through various chemical reaction pathways, and different technological maturity levels are shown for each country and company. In this situation, it is essential to establish investment decisions such as research funds and human resources allocation through technological and economic analysis for close commercialization technologies and basic technologies with low technology readiness levels (TRL). Therefore, in this study, the technology development priority for developing carbon upcycling items was selected according to the domestic Carbon Capture & Utilization (CCU) technology roadmap using the stakeholder selection tool released by EU CarbonNext. As a result of the analysis, the TRL level of Korea's major carbon upcycling technologies was analyzed to be lower than that of other carbon resource technologies, and it was considered desirable to invest in mineral carbonization technologies among various candidate technologies.

Key words Carbon Capture Utilization & Storage(탄소 포집, 활용 및 저장), Carbon Upcycling(탄소자원화), Technology selection (기술 선정)

Subscript

CCS : Carbon Capture & Storage
CCU : Carbon Capture & Utilization
CCUS : Carbon Capture, Utilization & Storage

- 1) Principal Researcher, New & Renewable Energy Laboratory, Korea Electric Power Research Institute
- 2) Chief Researcher, New & Renewable Energy Laboratory, Korea Electric Power Research Institute
- 3) Senior Researcher, R&D Strategy office, Korea Electric Power Research Institute

*Corresponding author: jihyun.lee@kepeco.co.kr
Tel: +82-42-850-5350 Fax: +82-42-865-5390

1. 서론

우리 정부는 2050 탄소중립 달성을 위해 다양한 로드맵을 설정하고 이의 달성을 위한 다양한 기술개발을 추진 중이다. 탄소중립은 국가나 단체의 온실가스 순 배출량을 0으로 제한하는 개념으로 대기 중 온실가스 농도가 증가하지 않는 상태이다. 전 세계적으로 탄소중립을 위해 탈석탄, 재생에너지 확산 및 에너지 효율 향상 등 다양한 기술·정책 방안이 제안되고 있는 가운데 탄소자원화(Carbon Upcycling) 기술은 온실가스 저감을 위한 핵심 방안으로 평가받는다.

탄소자원화 기술은 화력발전소, 시멘트 및 석유화학 공장 등과 같은 대규모 배출원에서 발생하는 CO₂를 직접 이용하

거나 고부가 화합물로 전환하여 활용하는 기술이다. 기존의 CCS(Carbon Capture & Storage, 탄소 포집 및 저장) 기술이 대규모 CO₂ 저감을 위한 대표적인 기술 옵션으로 제시되고 있으나^[1] 배출원에서 발생한 CO₂를 포집-압축 및 수송을 통해 해상 또는 지중에 저장·처리하기 위한 높은 비용이 요구되는 반면(평균 처리비용 : 45~70 USD/tCO₂^[2]), 탄소자원화 기술은 CO₂를 산업적 용도로 직접 활용함으로써 온실가스 저감과 동시에 경제적 수익 창출이 가능하다는 장점이 있어 전 세계적으로 다양한 연구가 진행되고 있다.

지금까지 제시된 탄소자원화 기술은 Fig. 1에서 제시된 바와 같이, 고분자, 액체연료, 폴리머 및 광물 생산 등 다양한 기술에 관한 연구가 진행 중이며 일부 기술은 제품화 단계에 진입하였다.^[3] 이중 광물탄산화 기반의 건축자재 생산 기술의 경우, 미국, 캐나다 및 유럽에서는 이미 시장진입 단계에 있는 것으로 평가받는다.^[4] 또한 CO₂ 활용 메탄올, 에탄올 등의 청정 연료생산 기술은 CO₂ 저감은 물론 재생 에너지와 연계한 장주기 에너지 저장 기술로서 특히 산업부

문 간 에너지 연계 (Sector coupling) 구현을 위한 핵심 기술로서 잠재력이 기대된다.^[5]

탄소자원화 기술이 국가 탄소중립 목표 달성에 실질적으로 이바지하기 위해서는 지속적인 성능향상과 함께 실증 규모의 격상 및 타 산업체에서의 확대 적용이 필요하다. 앞서 제시된 바와 같이 일부 CO₂ 광물화 반응 기반의 탄소자원화 기술(예 : 건축자재, 광물 생산 등)의 경우 Pilot 규모의 소규모 실증을 통해 기술, 경제적 타당성이 확인됨에 따라 시멘트 공장, 제철소 등 다양한 산업체에서의 활용이 모색 중이다.^[6,7] 그러나 탄소자원화 기술은 Fig. 2에 제시된 바와 같이 상이한 반응경로 기반의 다양한 기술이 제안되고 있고 관련 시장 상황도 지속해서 변하고 있어 기술, 경제적으로 타당한 기술을 빠르게 발굴하기는 쉽지 않은 상황이다. 특히 광화학적 전환반응을 통한 액체연료 생산기술과 같이 낮은 기술 성숙도(TRL)를 갖는 기술은 여전히 Lab 또는 소규모 pilot 수준에서의 연구개발이 진행 중으로, 상세 공정 모델링을 위한 데이터가 충분하지 않아 기술·경제성 타당성 분석이 쉽지 않은 상황이다. 그러나 향후

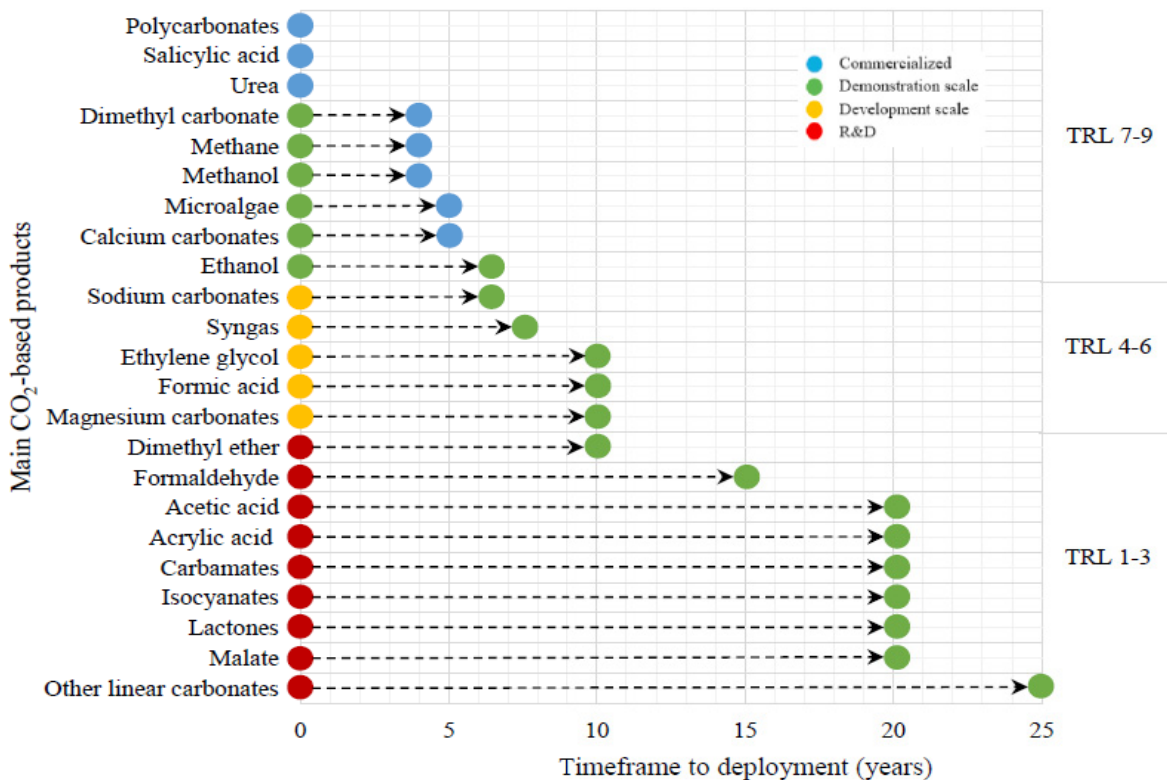


Fig. 1. Carbon upcycling technology : technology Readiness Level^[3]

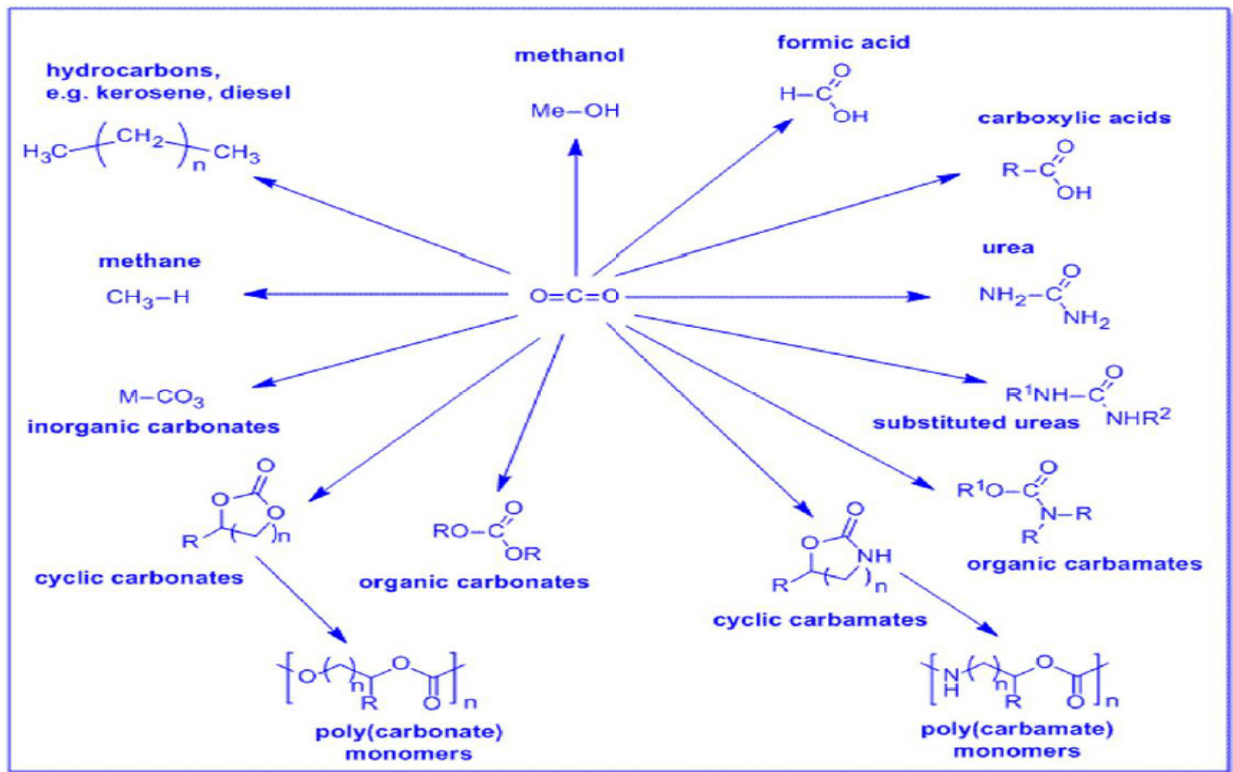


Fig. 2. Overview of chemicals from carbon dioxide^[8]

다양한 산업에서 큰 폭의 수요 증가가 예상되는 탄소자원화 기술의 보급 및 이의 확대를 위해서는, 상용화에 도달한 기술뿐만 아니라 기초/원천기술에 대해서도 빠르게 변화되는 연구성과를 바탕으로 해당 기술의 기술개발 타당성 및 용이성을 분석하고 이를 바탕으로 연구비 및 인력 배치 등의 투자 결정을 수립하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

상기 분석을 위해서는 세부 기술별 기술 타당성, 경제성 및 온실가스 감축 측면의 환경적 타당성이 종합적으로 고려되어야 한다. 그러나 탄소자원화 기술은 이러한 3가지 핵심 지표를 모두 만족시키는 것이 상당히 어려운 것으로 평가받는다. 이는 탄소자원화를 위한 핵심 원료 물질인 CO_2 가 화학적으로 매우 안정하여 이를 다른 고부가 물질로 전환하기 위해서는 상당한 에너지가 요구되며^[9] 이는 결국 사업의 경제성 또는 환경적 타당성을 저하하는 원인으로 작용하기 때문이다. 예를 들어 CO_2 전환반응을 위한 탄소자원화 공정에서 소비되는 전력 사용으로 인해 공정 내에서 직접적으로 활용되는 CO_2 의 양보다 플랜트 가동으로 간접 배출되는 CO_2 의 총량이 많아 순 CO_2 배출량은 오히려 증가하는 것으로 경우가 많다.^[10] 또한 탄소자원화를 통해 생산

코자 하는 제품의 총 생산량은 해당 시장 규모에 제약받기 때문에 설비 증설을 통한 사업의 경제성 향상에도 한계가 있다.^[11]

상기 제시된 바와 같이 탄소자원화 기술의 전주기 분석을 위해서는 서로 다른 기술개발 수준을 갖는 후보 탄소자원화 기술을 대상으로 상세 화학반응 메커니즘 분석 및 시장 데이터를 포함하는 광범위한 분석이 필요하나 이를 위한 체계화된 방법론 또는 분석 알고리즘은 공개된 바가 많지 않은 상황이다. 관련하여 KAIST에서는 상용화가 안 돼 있거나 개발단계에 있는 CO_2 활용 기술을 대상으로 구체적이고 세부적인 정보 없이 일부 제한적인 정보만으로도 해당 기술의 에너지 효율과 기술 경제성, 온실가스 저감 잠재량 등을 파악할 수 있는 툴을 제시한 바 있다.^[12] 해당 툴은 다양한 CCU 기술에 대한 공정 모델링을 바탕으로 기술의 경제성 및 온실가스 감축 효과를 정량적으로 제시하고 있다. 유럽의 경우 EU Horizon 2020 프로젝트인 CarbonNext에서 다양한 이해관계자를 위한 최적 CCU 기술 선정 툴을 공개하였다.^[13] 해당 툴은 생산하고자 하는 제품의 시장 가격 및 기존 제품의 시장 규모 등을 고려한 분석 툴로서, 앞

서 KAIST 등에서 개발한 틀에 비해 분석의 정밀도는 낮지만, CCU 관련 다양한 이해관계자들에게 국가 단위 CCU 기술개발의 전체적인 방향을 수립하고 기술개발 우선순위 선정에 활용을 기대할 수 있다.

향후 큰 폭의 수요 증가가 예상되는 탄소자원화 기술의 보급 확대를 위해서는 기술·경제적 타당성이 뛰어난 탄소자원화 기술 선정 및 사업모델의 기획이 중요하다. 이는 관련 연구진뿐만 아니라 기술 사업화를 위한 정부, 투자자에게도 중요한 핵심적인 사항이다. 이에 본 논문에서는 후보 탄소자원화 기술의 고유 화학반응 특성 DB 및 한국 내 시장 규모/제품가격 등을 바탕으로 최적 탄소자원화 기술을 빠르게 선정하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 최적 탄소자원화 기술 선정 방법

일반적으로 탄소자원화 공정을 통한 제품의 전주기 분석을 위해서는 후보 기술별, 생산하고자 하는 화합물의 화학반응 경로에 따라 시스템을 설계 구성하고 이를 바탕으로 공정 모사를 진행하여 열·물질 밸런스를 산출 후 이의 데이터를 활용하여 사업의 경제성을 평가한다.^[14] 그러나 앞서

제시된 바와 같이 검토 대상 품목이 상당히 많은 경우, 모든 기술에 대해 세부 화학반응을 고려한 기본 설계 및 공정 모델링 분석을 하는 것은 상당한 기간이 소요될 뿐만 아니라 시장 및 기술개발 변화를 빠르게 반영하는 데에 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 앞서 소개한 EU CarbonNext project에서 개발한 CCU 선정 틀(Stakeholder selection tool)을 활용,^[13] 우리 정부의 이산화탄소 포집·활용(CCU) 기술혁신 추진전략^[4]에 제시된 대표적인 탄소자원화 품목을 대상으로 기술, 경제적 타당성을 용이하게 비교할 수 있는 방법론을 제시한다. 관련하여 본 논문의 최적 탄소자원화 기술 선정을 위한 세부 알고리즘은 다음과 같다.

2.1 탄소자원화 기술 선정 알고리즘

본 논문의 최적 탄소자원화 기술 선정 알고리즘은 ① 후보 기술별 기술 성숙도 및 고유 화학반응 특성을 고려한 기술개발 적합성 ② 탄소자원화를 통해 생산하고자 하는 품목의 시장 규모를 고려한 경제적 타당성 ③ 기술사업화에 따른 국가 탄소중립 목표 달성 기여도를 고려한 환경적 타당성을 종합적으로 분석함으로써 기술·경제·환경 측면에서 지속 가능한 탄소자원화 프로젝트의 발굴 및 보급을 목적으로

A. Database



B. Technology scoring

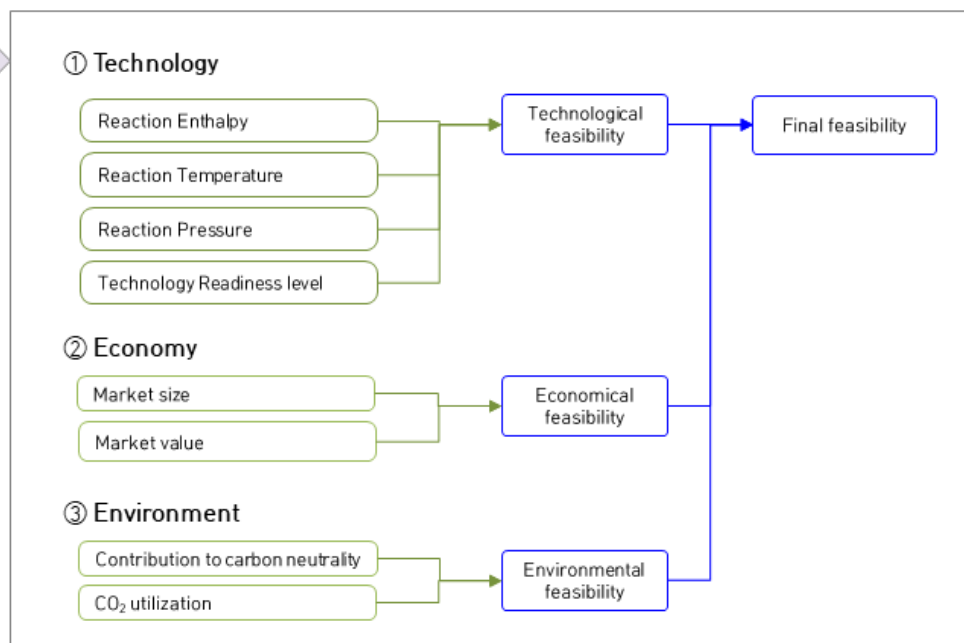


Fig. 3. Carbon upcycling technology selection algorithm

로 한다. 이를 위한 첫 단계로 후보 탄소자원화 기술의 고유 기술 특성치 및 시장 규모, 시장가격을 포함하는 Database를 활용하여 상기 제시된 기술성, 경제성 및 환경성 평가를 통해 대상 기술별 점수화를 통해 진행된다(Fig. 3 참조). 최적 기술 선정을 위한 주요 항목별 평가항목은 다음과 같다.

a. 기술적 타당성

기술 타당성 분석을 위한 주요 평가항목은 탄소자원화 반응을 통해 생산하고자 하는 품목의 고유 반응 특성(반응 엔탈피, 반응온도 및 반응 압력 등)과 해당 공정의 기술 성숙도를 포함한다. 상기 평가항목은 기술 사업화를 위한 격상 및 실증 측면에서 기술개발 용이성을 평가할 수 있는 핵심 지표이다. 예를 들어 분석 대상 후보 화학물의 반응 엔탈피(Reaction Enthalpy)가 0보다 작은 경우 이는 외부에서 열 공급이 필요 없는 발열반응에 해당하므로 흡열반응 공정에 비해 시스템 운영을 위해 소비되는 에너지가 적고 이는 결국 추가의 전력 사용에 따른 간접적 CO₂ 배출이 적음을 의미한다. 이와 유사하게 일부 화학적 전환기술의 경우 매우 높은 수준의 고온, 고압에서 화학반응이 요구되는 경우가 많으며 이 경우 탄소자원화 플랜트 구축 및 운영을 위한 비용 증가가 예상된다. 기술 격상 및 사업화 용이성 측면에서 기술 성숙도 항목도 중요한 평가항목으로서 고려될 수 있다. 예를 들어 광물탄산화 기반 생산기술의 경우 기술 성숙도 측면에서 이미 실증단계에 진입한 기술이 많아 가까운 시기에 기술 상용화가 유리하지만, 광화학반응 기반의 연료 생산기술의 경우 기술 잠재력은 확인되었으나 소재, 공정 내구성 등으로 인해 TRL 2~3단계에 수준으로 평가되는 경우가 많아^[3] 실제 상용화까지 많은 기간이 소요되며 이러한 기술은 결국 단기사업화 후보 기술로서는 적합하지 않은 것을 평가될 수 있다.

b. 경제적 타당성

탄소자원화 기술의 경제적 타당성은 탄소자원화를 통해 생산하고자 하는 품목의 시장 규모 및 시장가치 데이터를 통해 산출될 수 있다. 특히 탄소자원화 기술은 다량의 CO₂ 처리를 위한 CCS 기술과 달리 생산하고자 하는 품목의 시장 규모에 따라 실증 플랜트의 보급에 한계가 있다. 예를

들면 2022년 현재 산성가스 처리제 또는 식품 가공용으로 많이 사용되는 중탄산소다(NaHCO₃)의 국내 시장 규모는 연간 약 25만 톤 이하로 추정되는데,^[7] 탄소자원화 기술로 시장 규모 이상의 제품을 생산하는 것은 해외 수출물량을 고려하지 않는다면 경제적으로 불합리한 결정이라고 할 수 있다. 따라서 향후 기술 격상을 통한 탄소자원화 사업의 타당성 조사를 위해서는 사전에 해당 품목의 시장조사를 바탕으로 최대 설비용량 및 이를 통한 잠재 CO₂ 활용량에 대한 상세 분석이 중요하다.

c. 환경적 타당성

2021년 우리 정부에서는 2030 국가 온실가스 감축목표를 확정하여 발표하였다.^[15] 주요 내용으로 2030년 온실가스 감축목표를 '18년 배출량(727.6 백만톤) 대비 40% 감축하며 이중 CCUS(Carbon Capture, Utilization & Storage)를 통해 총 10.3 백만톤을 감축하는 것을 제시하였다. 또한 2050 탄소중립 시나리오에서는 CCUS를 통해 (A 안) 화력 발전을 전면 중단하는 시나리오의 경우 55.1 백만톤 저감, (B 안) 화력발전이 일부 잔존하는 대신 CCUS 기술을 적용하는 시나리오의 경우 84.6 백만톤 저감 목표를 제시한 바 있다.^[16] 상기 사항을 고려하여 후보 기술의 환경적 타당성 분석은 탄소자원화 기술개발을 통한 2030 NDC 및 2050 탄소중립 기여도 달성 기여도를 대상으로 평가하였다. 이를 위해 분석 대상 품목별 전주기 분석(Life Cycle Analysis)을 통해 확보한 제품생산 톤당 순 CO₂ 배출량 데이터와 해당 품목의 시장 규모를 곱하여 잠재 CO₂ 저감량을 산정하고 2030 CCUS를 활용한 감축목표(10.3 백만톤) 중 CCU에 해당하는 총 저감량(630 만톤)에 대한 기여도를 고려하였다.^[17] 제품생산 톤당 순 CO₂ 배출량 산정을 위한 인벤토리 개발 연구는 국내외에서 다양하게 수행 중에 있으나 본 논문에서는 Data의 일관성을 고려하여 CarbonNext의 DB를 참조하였다.^[13]

3. 사례 분석

3.1 대상 기술 선정

2021년 우리 정부는 CCU 기술개발 투자 및 제도적 지원

강화를 위한 이산화탄소 포집·활용(CCU) 기술혁신 추진전략^[4]을 발표하였다. 해당 보고서에서는 CO₂ 포집, 화학전환, 생물전환, 광물탄산화 및 기타 탄소활용 총 5개 분야 59개 기술에 대한 중장기 기술개발 마일스톤을 제시하였다. 관련하여 본 연구에서는 해당 기술 로드맵에서 제시하는 기술 중, 탄소중립에 가장 효과가 큰 전력산업 분야 측면에서 연관성이 높은 화학전환 및 광물탄산화 분야 11개 기술을 선정하고(Table 1, 2 참조) 이를 바탕으로 후속 분석을 진행하였다.

상기 내용에 따라 본 논문에서는 국내 시장 규모 등 핵심 데이터의 확보가 가능한 품목을 대상으로 세부 분석을 진행하였으며 이를 위한 세부 data는 Table 3과 같다. 상기 내용과 관련한 주요 반응조건과 관련한 데이터는 CarbonNext project에서 공개한 DB를 참조하였다. 이때 동일한 제품 생산에 대해 다양한 반응경로가 존재하는 경우, 반응조건을 고려하여 기술개발의 용이성이 가장 낮은 반응경로를

본 논문의 분석 대상으로 하였다. 또한 주요 시장 데이터는 국내 관련 시장환경 고려를 위해 관세청 수출입 시장 규모 및 거래금액 데이터를 활용하여 후보 품목별 시장 규모 및 시장가치를 산출하였다.^[18]

3.2 평가 기준

앞서 제시된 바와 같이, 기술, 경제성 및 환경성으로 분류된 각각의 항목별 배점 기준을 바탕으로 후보 기술별 점수를 산정한다. 항목별 주요 배점 기준에 대한 세부 사항은 Table 4와 같다. 먼저 기술성 평가에서는 앞서 제시된 주요 평가항목을 바탕으로 플랜트 구성 용이성 등 향후 기술개발 및 격상의 용이성이 낮은 것은 1점, 보통으로 평가되는 기술은 2점 그리고 격상이 용이한 기술로 평가되는 기술은 3점을 부여한다. 경제성 평가를 위한 배점 기준은 후보 기술의 시장 규모 및 이에 따라 산정된 시장가치를 기준으로 부여하였다. 상기 배점에 대한 기준은 본 논문에서 제시

Table 1. Technology screening flow

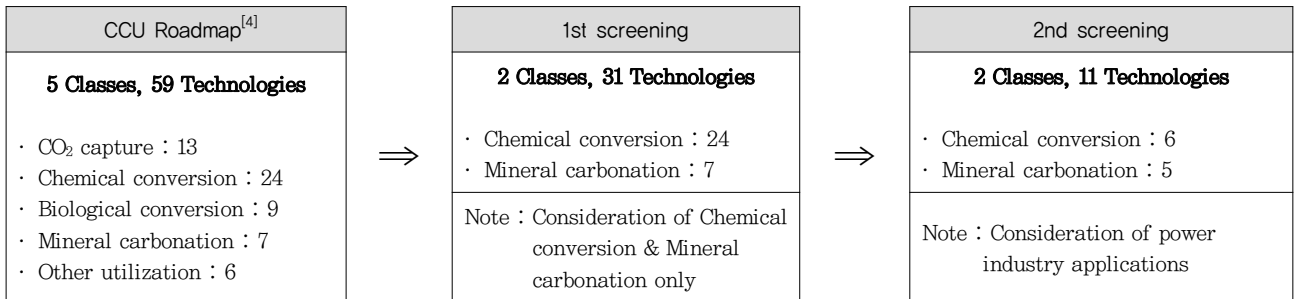


Table 2. Target products

Class		Products	This study
Chemical conversion	① Platform chemical	① Synthetic gas ② Methanol	②
	② Organic acid	③ Acetic acid ④ Formic acid ⑤ Oxalic acid	④, ⑤
	③ Organic carbonate	⑥ Dimethyl carbonate ⑦ Alkylene carbonate	⑥
	④ Polymer	⑧ Polycarbonate ⑨ Polyurethane	⑧, ⑨
Mineral carbonation	① Cement & Construction material	⑩ Cement-like products ⑪ Calcium/magnesium carbonate ⑫ Concrete products	⑩, ⑪, ⑫
	② Inorganic carbonate	⑬ Calcium carbonate ⑭ Sodium bicarbonate	⑬, ⑭

Table 3. Carbon upcycling technology Database

Technology		Evaluation Factors / weightings							
		3	3	3	3	3	3	3	
CO ₂ Product	Pathway	TRL	Reaction enthalpy (ΔHr) [kJ/mol]	Reaction Temp. [degC]	Reaction press. [bar]	Market size [t/yr]	Market value [\$M]	CO ₂ utilization [tCO ₂ /tproduct]	Contribution to Carbon neutrality [%]
Formic acid	Electrochemical reduction of CO ₂	Pilot	-31,49	25	1	7,938	8,14	0,96	0,12
Oxalic acid	Electrochemical reduction of CO ₂	Pilot	-34,68	25	1	10,671	9,45	0,49	0,08
Sodium bicarbonate	Two-step process, first carbonation of sodium hydroxide to sodium carbonate, then bicarbonation to sodium bicarbonate.	Pilot	-254,88	60	1	233,952	94,00	0,52	1,95
Calcium carbonate	Carbonation of calcium oxide	Pilot	-179	20	1	~1,000,000	103,89	0,44	6,98
Dimethyl carbonate	Carboxylation of alcohols (e.g. methanol to produce dimethyl carbonate)	Pilot	220,74	150-170	50	NA	NA	0,49	NA
Poly (propylene carbonate)	Carbonation of the epoxide propylene oxide to propylene carbonate in the presence of a catalyst which catalyses the polymerization	Lab	-97,09	190-200	80	703,373	2210,66	0,43	4,80
Polyurethane	Carbonation of an epoxide in the presence of a DMC- catalyst yields polyols for PU synthesis,	Lab	NA	100	15-90	109,715	535,62	0,13	0,23
Methanol	High temperature solid oxide cells use CO ₂ and water to produce H ₂ and CO, followed by compression and subsequent catalytic methanol synthesis,	Pilot	726,14	500-1000	1	2,048,415	804,95	1,38	44,71
Calcium/ magnesium carbonates – construction aggregates	Same process as described above, but using alkaline industrial wastes (high in reactive Ca/Mg oxides),	Pilot	-178,96	20-60	1-3	~1,000,000	9,69	0,44	6,98
Cement-like products	Captured flue gases react with alkaline industrial brines to produce carbonates and bicarbonates,	Pilot	-639,94	20	1	~1,000,000	76,42	0,53	8,41
Concrete products	CO ₂ injected into concrete to form calcium carbonate nanoparticles within the concrete,	Pilot	-178,96	20	1	~1,000,000	54,23	0,44	6,98
Reference		[4]	[13]	[13]	[13]	[18]	[18]	[13]	[18]

Table 4. Criteria for allocation of technology selection component

Component		Conditions	ref.
Technology	Reaction enthalpy	1: rapid endothermic reaction (> 100 kJ/mol) 2: mild endothermic reaction (< 100 kJ/mol) 3: exothermic reaction	[13]
	Operating temperature	1: > 250°C, 2: 50~250°C, 3: < 50°C	[13]
	Operating pressure	1: > 10 bar, 2: 5-10 bar, 3: < 5 bar	[13]
	Technology Readiness Level	1: Lab scale, 2: Pilot scale, 3: Commercial scale	[4]
Economy	Market size	1: < 1 kTon/y, 2: 1-10 kT/y, 3: > 10 kT/년	[18]
	Market value	1: < 10 M\$/y, 2: 10-100 M\$/y, 3: > 100 M\$/y	[18]
Environment	Contribution to carbon neutrality	1: < 1% , 2: 1-5%, 3: > 5%	[13, 17]

하는 사항으로서 이는 본 방법론을 사용하는 활용기관의 기술개발 추진전략에 따라 달라질 수 있다. 이와 환경성 평가를 위한 평가항목별 가점 기준은 앞선 기술, 경제적 타당성 평가와 동일하게 3점법으로 구성한다.

4. 분석 결과

4.1 DB 분석

본 연구의 검토 대상인 11개 기술의 우선순위 분석에 앞서 본 논문에서 제시된 EU CarbonNext project에서 제시하는 DB값과 우리 정부의 이산화탄소 포집·활용(CCU) 기술혁신 추진전략에서 제시된 주요 기술의 기술 성숙도 및 시장 규모를 비교 분석하였다. 해당 기술은 화학전환 분야 6개 및 광물탄산화 분야 5개 기술로 구분하였으며 주요 내용은 Fig. 4와 같다.

분석결과 국내의 경우 기술 대부분이 원천·연구단계로 일부 기술이 파일럿 실증연구 중에 있으나 상용화 사례는 부재한 것으로 분석되었다. 반면 해외의 경우 다양한 제품에 대한 원천연구와 함께 일부 기술은 이미 제품화 단계에 진입한 것으로 분석되었다. 특히 광물화 기반 기술의 경우 이미 실증단계에 진입한 것으로 분석되었다.

4.2 baseline case 우선순위 분석

상기 제시된 알고리즘 및 기본 Database를 바탕으로 다양한 탄소자원화 서비스(활용)별 적정 기술맵을 분석하였다. 또한 최적 탄소자원화 기술 선정을 위해 기술성, 경제성 및 환경 타당성 측면의 평가항목 누적 점수를 바탕으로 각 후보 기술을 서열화하였다. Fig. 5는 본 논문의 탄소자원화 기술별 기술, 경제성 및 정책적 타당성 및 종합 우선순위를 나타낸다. 제시된 바와 같이 앞서 제시된 조건에서 탄소중립 달성 목적 달성을 위한 기술개발 우선순위는 광물탄산화 기술분야로 분석되며 이중 탄산칼슘(CaCO₃), 시멘트, 건축 자재 생산과 중탄산소다(NaHCO₃) 순으로 분석되었다.

Fig. 6은 상기 분석의 우선순위에 있어 하위권에 있는 기술에 대한 분석결과이다. 제시된 바와 같이 Formic acid, oxalic acid의 경우 타 화학적 전환 기술에 비해 시장 규모가 크지 않으며 이로 인해 탄소중립 기여도도 크지 않은 것으로 분석되었다. Polyurethane의 경우 다른 화학적 전환 제품에 비해 시장 규모는 우수하나 기술 용이성이 낮은 것으로 분석됨에 따라 향후 새로운 반응공정 개발 및 격상 연구 등이 필요함을 유추할 수 있다.

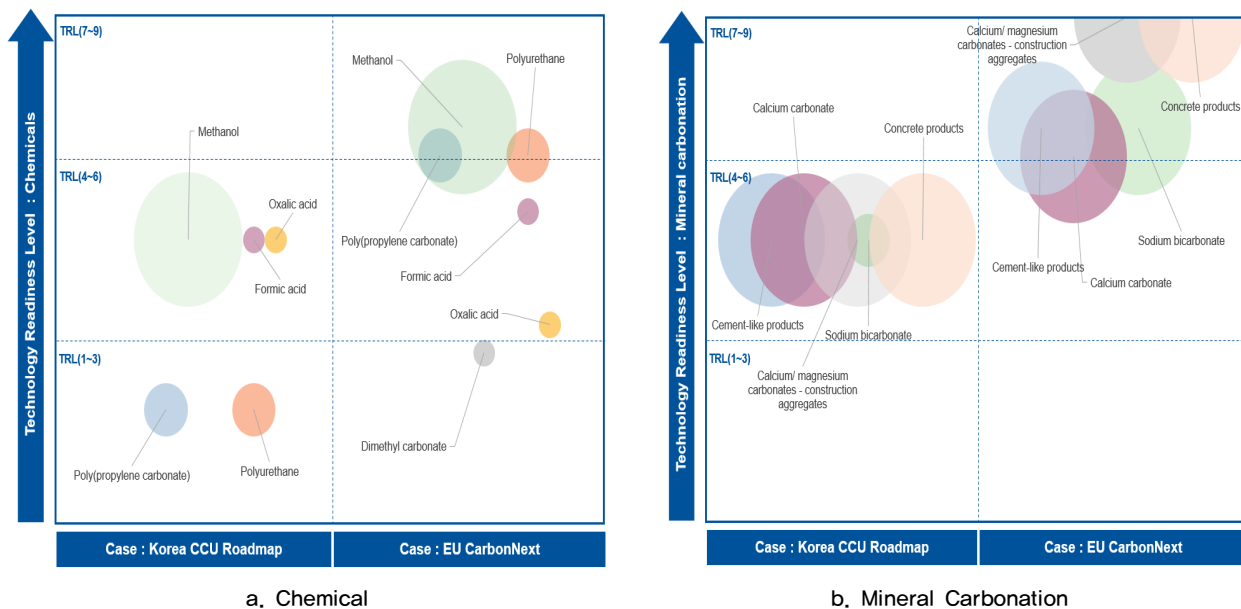


Fig. 4. TRL and market size data of Korea and EU CarbonNext case

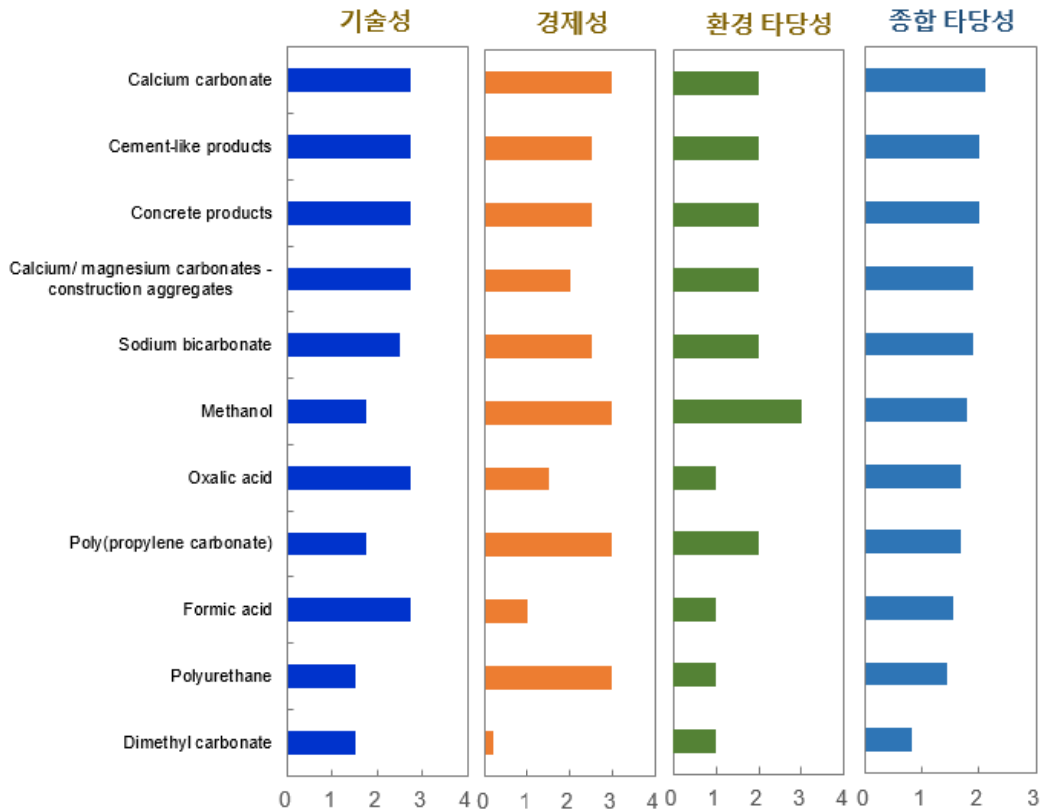


Fig. 5. Carbon Upcycling technology Feasibility evaluation

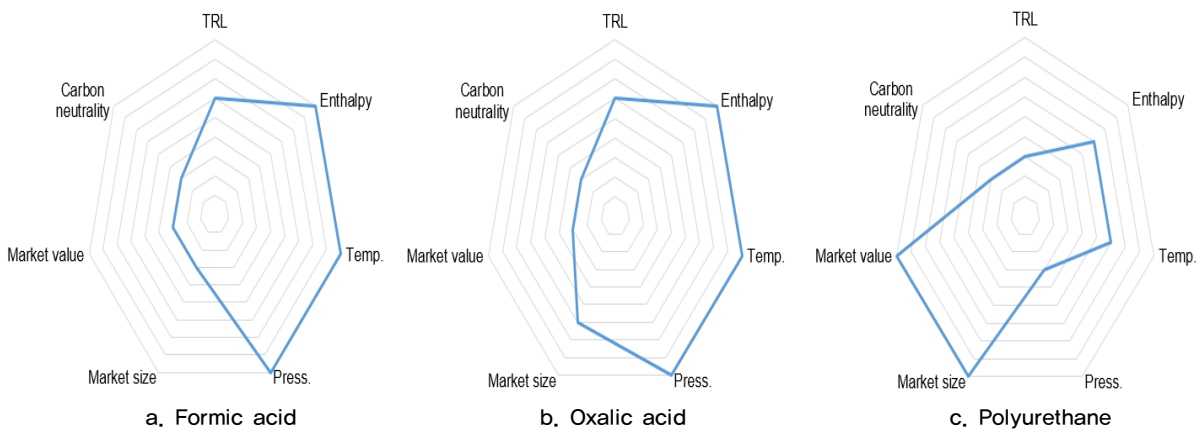


Fig. 6. Detailed Analysis of Carbon upcycling Technology

4.3 Sensitivity analysis

상기 baseline case 분석에 이어 민감도 분석을 수행하였다. 이를 위해 앞서 제시된 기준 조건에서 가중치의 변화에 따른 최적 기술개발 우선순위 변화를 분석하였다. 이를 위한 방법으로 각 항목별 가중치를 설정하고 이에 따른 변화를 분석하였다. 이를 위해 Table 5에 제시된 바와 같이

기술, 경제성 및 환경성 평가항목에 대한 가중치를 조정하여(3~5) 이에 따른 최적 탄소자원화 기술개발 우선순위 변화를 분석하였다.

상기 제시된 조건에서 분석결과, 모든 분석 case에 대해 광물탄산화 기술군이 화학전환 기술군에 비해 기술개발의 우선순위가 높은 것으로 분석되었으며 화학전환 기술군의

Table 5. Weighting conditions for sensitivity analysis

Cases	Technology				Economy		Environment
	TRL	Reaction enthalpy	Temp.	Press.	Market size	Market value	Carbon neutrality
Baseline	3	3	3	3	3	3	3
Case #1	5	5	5	5	3	3	3
Case #2	3	3	3	3	5	5	3
Case #3	3	3	3	3	3	3	5

Table 6. Sensitivity analysis results

Priority	Base case	Case #1	Case #2	Case #3	Comment
1	Calcium carbonate	Calcium carbonate	Calcium carbonate	Calcium carbonate	Mineral conversion
2	Cement-like products	Cement-like products	Cement-like products	Cement-like products	
3	Concrete products	Concrete products	Concrete products	Concrete products	
4	Calcium/ magnesium carbonates – construction aggregates	Calcium/ magnesium carbonates – construction aggregates	Sodium bicarbonate	Calcium/ magnesium carbonates – construction aggregates	
5	Sodium bicarbonate	Sodium bicarbonate	Calcium/ magnesium carbonates– construction aggregates	Sodium bicarbonate	
6	Methanol	Oxalic acid	Methanol	Methanol	Chemical conversion
7	Oxalic acid	Methanol	Poly (propylene carbonate)	Poly (propylene carbonate)	
8	Poly (propylene carbonate)	Formic acid	Oxalic acid	Oxalic acid	
9	Formic acid	Poly (propylene carbonate)	Polyurethane	Formic acid	
10	Polyurethane	Polyurethane	Formic acid	Polyurethane	
11	Dimethyl carbonate	Dimethyl carbonate	Dimethyl carbonate	Dimethyl carbonate	

경우에는 가중치에 따라 기술개발 우선순위에 다소 변동이 있는 것으로 분석되었다(Table 6 참조). 이는 앞선 Fig. 1에 제시된 바와 같이 다양한 탄소자원화 기술 중 광물탄산화 기술이 실증연구 사례가 많은 상황과도 부합하는 결과이다.

5. 결론

탄소자원화 기술개발 우선순위 선정을 위해 본 논문에서 제시한 알고리즘 및 방법을 활용한 분석 결과, 광물탄산화 기반 기술이 화학적 전환 기술에 비해 개발 용이성 및 시장 측면에서 우선순위가 높은 것으로 분석되었으며 세부 품목별 우선순위는 탄산칼슘(CaCO₃), 시멘트, 건축 자재 생산

과 중탄산소다(NaHCO₃) 순으로 분석되었다. 또한, 본 연구에서 제시하는 최적 탄소자원화 기술 선정 방법은 기술의 고유 특성과 시장 상황을 고려한 경제성 및 정책적 타당성에 대한 종합적 고려가 가능하여 향후 지속 가능한 탄소자원화 프로젝트의 발굴에 기여할 수 있음을 확인하였다.

6. 시사점

2021년 우리 정부는 CCU 기술개발 투자 및 제도적 지원 강화를 위한 『이산화탄소 포집·활용 기술혁신 로드맵(안)』을 발표하였으나^[4] 이의 목표 달성을 위한 투자 우선 순위 및 구체적인 실행전략은 제시되고 있지 못하다. 이러한 상황에서 본 논문에서 제시하는 방법론은 기술별 항목을 세

부적으로 분석하여 타 후보 탄소자원화 기술 대비 강/약점을 비교하고 이를 통해 기술개발 로드맵 및 사업전략 수립 등에 활용이 가능하다. 특히 상당한 데이터와 장시간이 요구되는 공정 모사 분석 없이, 핵심기술 특성치 및 시장 데이터 기반의 신속한 분석을 통해 관련 이해관계자들의 Decision tool로서의 활용이 기대된다. 다만 본 논문에서 제시하는 방법론의 활용도 제고를 위해서는 다양한 탄소자원화 기술 성능 및 시장 데이터 등에 대한 지속적인 모니터링 및 분석을 통해 핵심 DB의 구축이 매우 중요하다. 또한 본 논문에서 제시하는 알고리즘은 본격적인 기술개발 또는 투자를 위한 예비 타당성 분석을 위한 기초 툴로 활용이 되어야 하며, 실제 대규모 실증을 위해서는 상세 공정 모사를 통한 기본 설계 및 이에 기반한 기술, 경제성 평가가 요구된다. 관련하여 본 연구진은 연구 결과의 활용 및 확산을 위해 제시된 알고리즘을 바탕으로 웹 기반의 탄소자원화 기술개발 우선순위 분석 플랫폼을 구축할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 2022년도 한국전력공사의 지원을 받아 수행한 연구과제 성과물입니다(과제 번호: R22EA10).

References

- [1] International Energy Agency (IEA), 2020, "Energy technology perspectives 2020 -Special report on carbon capture utilisation and storage, CCUS in clean energy transition", <https://doi.org/10.1787/208b66f4-en>.
- [2] Lee, J.H., Kwak, N.S., Niu, H., Wang, J., Wang, S., Shang, H., and Gao, S., 2020, "KEPCO-China Huaneng post-combustion CO₂ capture pilot test and cost evaluation", *Korean Chem. Eng. Res.*, **58**(1), 150-162.
- [3] Chauvy, R., Meunier, N., Thomas, D., Weireld, G.D., 2019, "Selecting emerging CO₂ utilization products for short- to mid-term deployment", **236**, 662-680.
- [4] Joint Ministry of the Republic of Korea, 2021, "Carbon dioxide Capture·Utilization (CCU) technological innovation promotion strategy(proposal)", <https://www.korea.kr/common/download.do?fileId=195009538&tblKey=G> MN.
- [5] Haas, J., Cebulla, F., Cao, K., Nowak, W., Palma-Behnke, R., Rahmann, C., and Mancarella, P., 2017, "Challenges and trends of energy storage expansion planning for flexibility provision in low-carbon power systems –a review", *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **80**, 603-619.
- [6] Lee, J.H., Lee, J.H., Park, I.K., and Lee, C.H., 2018, "Techno-economic and environmental evaluation of CO₂ mineralization technology based on bench-scale experiments", *J. CO₂ Util.*, **26**, 522-536.
- [7] Lee, J.H., Lee, D.W., Kwak, C., Kang, K.J., and Lee, J.H., 2019, "Technoeconomic and environmental evaluation of sodium bicarbonate production using CO₂ from flue gas of a coal-fired power plant", *Ind. Eng. Chem. Res.*, **58**(34), 15533-15541.
- [8] Coninck, H.D., Ecn, H.R., and Armstrong, K., 2012, "Carbon capture and utilisation in the green economy Using CO₂ to manufacture fuel", chemicals and materials, <http://co2chem.co.uk/wp-content/uploads/2012/06/CCU%20in%20the%20green%20economy%20report.pdf>.
- [9] Song, C., 2006, "Global challenges and strategies for control, conversion and utilization of CO₂ for sustainable development involving energy, catalysis, adsorption and chemical processing", *Catalysis Today*, **115**(1-4), 2-32.
- [10] Brinckerhoff, P., 2011, "Accelerating the uptake of CCS: Industrial use of captured carbon dioxide", Global CCS Institute, <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/14026/accelerating-uptake-ccs-industrial-use-captured-carbon-dioxide.pdf>.
- [11] Lee, J.H., and Lee, J.H., 2021, "Techno-economic and environmental feasibility of mineral carbonation technology for carbon neutrality: A perspective", *Korean J Chem Eng*, **38**, 1757-1767.
- [12] Roh, K., Bardow, A., Bongartz, D., Burre, J., Chung, W., Deutz, S., Han, D., Heßelmann, M., Kohlhaas, Y., and König, A., *et al.*, 2020, "Early-stage evaluation of emerging CO₂ utilization technologies at low technology readiness levels", *Green Chem.*, **22**(12), 3842-3859.
- [13] CarbonNext, Accessed 20 December 2022, <https://Carbonnext.eu>.

- [14] Roh, K., Lee, J.H., and Gani, R., 2016, “A methodological framework for the development of feasible CO₂ conversion processes”, *Int. J. Greenh. Gas Control*, **47**, 250-265.
- [15] Presidential Commission on 2050 Carbon Neutrality and Green Growth, 2021, “2030 Nationally Determined Contribution (NDC)”, Accessed 20 January 2023, <https://2050cnc.go.kr/base/contents/view?contentsNo=11&menuLevel=2&menuNo=13>.
- [16] Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth, 2021, “2050 Carbon neutrality scenarios”, Accessed 20 January 2023, <https://2050cnc.go.kr/base/contents/view?contentsNo=10&menuLevel=2&menuNo=12>.
- [17] Lee, J.H., 2021, “CCUS Technology trend and future development direction for carbon neutrality”, *KEPCO Journal on Electric Power and Energy*, **7(2)**, 207-213.
- [18] Korea Customs Service, 2023, “Trade statistics for export/import”, Accessed 5 January 2023, <https://unipass.customs.go.kr/ets/>.