



## 온실가스 저감을 위한 CO<sub>2</sub>를 활용한 고성능 시멘트 복합 단열패널 개발에 관한 연구 - 선행연구 분석을 중심으로 -

### *Exploring High-Performance Cement Composite Insulation Panels Utilizing Mineralized CO<sub>2</sub> for Green House Gas Reductions - Focused on Literature Analysis -*

김이정\* · 김종현\*\* · 김철\*\*\*

Yi-Kyung Kim\* · Jong-Hyun Kim\*\* · Chul Kim\*\*\*

\* Undergraduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Pukyong National Univ., South Korea (rladlrud4@pukyong.ac.kr)

\*\* Undergraduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Pukyong National Univ., South Korea (rlawhdgus222@pukyong.ac.kr)

\*\*\* Corresponding author, Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pukyong National Univ., South Korea (chulkim@pknu.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** Due to the intensification of climate change, greenhouse gas reduction has become a global issue. In particular, the construction industry is one of the major industries responsible for 37% of global carbon dioxide emissions. Therefore, a technological approach to develop sustainable building materials by utilizing carbon from the cement production process is required. This study aims to analyze the feasibility of developing high-performance cement composite insulation panels utilizing supercritical CO<sub>2</sub>. **Method:** This study defined green cement and composite insulation panels, and analyzed the feasibility of developing high-performance cement composite insulation panels using supercritical CO<sub>2</sub> by analyzing the current status of Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) technology in the building field and previous studies. Based on the review, considerations for insulation panel development and suggestions for future research were presented. **Result:** The study found that the addition of nano-carbon dioxide to cement composites resulted in a denser pore structure, which improved compressive strength and durability, while increasing CO<sub>2</sub> capture efficiency. The considerations are divided into composite panel composition and composite panel structure. Composite panel composition includes compressive strength, durability, insulation type, and jointing method, while composite panel construction covers panel finishing joints and emphasizes the need for future research. This study is expected to provide basic data for the development of CCUS-based building materials and contribute to the development of carbon building technology.

#### KEYWORD

탄소 포집  
그린 시멘트  
복합 단열패널  
CO<sub>2</sub> 광물화 활용

Carbon Capture  
Green Cement  
Composite Insulated Panels  
Utilizing Mineralized CO<sub>2</sub>

#### ACCEPTANCE INFO

Received Feb. 4, 2025

Final revision received Feb. 13, 2025

Accepted Feb. 19, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

세계적으로 지구온난화는 심각한 환경 문제 중 하나로 그 영향은 해마다 더욱 심화되고 있다. 세계기상기구(WMO)의 최근 기후보고서에 따르면 2023년 지구 평균 기온은 1850~1900년 평균에 비해  $1.45 \pm 0.12^\circ\text{C}$  높았으며, CO<sub>2</sub> 농도는 지난 5년 전과 비교해 약 20% 상승한 것으로 나타났다[1]. 이러한 급격한 기후변화에 대응하기 위해 세계 각국은 다양한 온실가스 저감 방안을 모색하고 있으며, 특히 건설 분야에서의 저탄소 개발로의 전환이 중요한 과제로 대두되고 있다. UNEP (United Nations Environment Programme)에 따르면 건설 및 건축 부문은 전 세계 에너지 및 공정 관련 CO<sub>2</sub> 배출량의 37%를 차지한다[2]. 특히 시멘트 생산 과정에서 발생하는 CO<sub>2</sub>는 건설 분야 배출량의 주요 원인 중 하나로, 이를 저감하기 위한 다양한 접근법이 연구되고 있다. 이러한 과정에서 CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) 기술은 CO<sub>2</sub> 배출량 저감을 위해 주목받고 있는 해결책 중 하나이다. CCUS는 탄소 배출원에서 발생

되는 CO<sub>2</sub>를 포집하여 활용하거나 저장하는 기술을 의미하며, 탄소 중립을 위한 핵심 기술로써 많은 분야에서 적용하기 위한 기술 개발이 활발하게 진행되고 있다. 보스턴 컨설팅그룹(Boston Consulting Group)의 예측에 따르면 CCUS 기술은 2035년까지 CCUS 기술 용량이 현재의 10배인 약 3억 톤의 탄소를 감축할 수 있는 수준에 도달할 것으로 기대될 것이라 발표했다[3]. 이와 같은 CCUS 기술의 대규모 활용을 위해서는 관련 연구 또한 활발히 진행될 필요가 있다. 하지만 현재 주요 CCUS 관련 연구들은 건축 분야에 대한 탄소 포집 및 저장 기술 적용에 대한 연구가 미미한 실정이다. 특히, 건축분야 CCUS 기술의 활성화를 위해서는 건축산업 분야 및 건축물의 생애 주기를 고려한 다양한 CCUS 기술의 개발이 촉진될 필요가 있다.

따라서 본 연구는 건설분야에서 온실가스 저감을 위한 CCUS 기술 활성화를 위한 기초연구로써 CO<sub>2</sub> 부산물을 활용한 고성능 그린 시멘트 복합 단열패널 개발의 타당성을 논의하고자 한다. 본 연구에서는 CCU 기술에 기반한 시멘트를 그린 시멘트라고 정의한다. 이를 위해 CO<sub>2</sub> 부산물에 기반한 그린시멘트의 물리적 특성과 복합패널의 개발 가능성을 문헌조사에 기반하여 분석하였다. 본 연구의 성과는 향후 건설 산업분야에서 CCUS 기술에 기반한 다양한 소재 개발 및 활용을 위해 기여할 수 있으며, 현재 CCUS 기술의 적용 사례

를 검토함으로써 기후변화 대응을 위한 CCUS 기술 혁신의 대안을 제시에 활용될 수 있다.

## 1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 CCUS 기반의 건축자재 개발을 위해 선행연구를 바탕으로 CO<sub>2</sub> 부산물을 활용한 고성능 그린 시멘트 복합 단열패널의 개발 가능성을 진단하였다. 이를 위해 CCU 시멘트 복합체와 관련된 선행 연구를 분석하고 물리적 특성을 이해하여 CO<sub>2</sub>를 시멘트 복합 단열패널에 적용하는 방안과 개발시 고려사항에 대해 논의하고자 한다.

## 2. 탄소배출 저감을 위한 CCUS 활용기술

### 2.1. 건축분야 CCUS 기술현황 및 적용 방법

최근 세계적으로 온실가스 감축에 어려움을 겪으면서 CCUS 기술은 탄소 중립을 위한 핵심 기술로 주목받고 있다. 현재 CCUS를 통해 처리되는 전 세계 온실가스는 CO<sub>2</sub> 배출량 대비 0.1% 수준에 불과하며, 기술적 한계와 높은 비용 등으로 상용화에 어려움을 겪고 있다[4]. 따라서 한국을 비롯한 세계 각국은 기술 개발과 정책적 지원을 통해 CCUS의 효율성과 비용 절감을 위해 노력을 기울이고 있다. Fig. 1.은 건설분야를 포함한 전반적인 CCUS의 적용을 위한 접근 단계를 설명한다. 통상적으로 에너지 사용 및 산업화 과정에서 발생하여 포집된 CO<sub>2</sub>는 압축 및 수송 과정을 거친 후 지하 800m 이상 깊이의 육지나 해저에 주입하여 저장하거나 (Carbon Capture and Storage) 연료, 화학물질, 건축자재 등 새로운 제품 생산 과정에 활용(Carbon Capture and Utilization)된다[5].

현재 건축 분야에서 CCU를 위해 활용 가능한 탄소 포집 기술은 크게 4가지로 볼 수 있다[7]. 첫번째는 콘크리트를 이용한 탄소 포집 기술로 CO<sub>2</sub>가 포집된 재료를 활용하여 건축물에 안정적으로 CO<sub>2</sub>를 저장할 수 있다는 장점이 있다. 두 번째는 녹색 건축 자재 기술로 탄소를 흡수하는 특성을 가진 건축 자재를 사용하여 건물 자체가 탄소 포집 장치 역할을 하도록 설계하는 기술이다. 세 번째는 특수한 건물 외피 시스템으로 건물의 외벽이나 지붕에 탄소 포집 기능을 갖춘 특수 코팅이나 패널을 적용하여 탄소를 포집하는 기술이다. 네 번째는 실내 공기질 개선과 연계한 탄소 포집 기술이 있다. 실내공기정화시스템에 탄소 포집 기술을 접목시켜 실내 공기질 개선과 동시에 탄소 저감 효과를 얻을 수 있다.

이중 산업 부산물로 발생된 CO<sub>2</sub>를 포집하여 대량으로 활용하는 방식은 첫 번째에 제시된 CO<sub>2</sub>가 포집된 재료를 콘크리트에 저장하는 방식을 검토할 수 있다. 현재 건축분야에서 CO<sub>2</sub>가 포집된 재료를 만들기 위한 CCUS 기술은 대표적인 방법으로 광물 탄산화가 있다. 광물 탄산화는 대기 중에 존재하는 CO<sub>2</sub>를 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>) 및 탄산마그네슘(MgCO<sub>3</sub>)과 같은 안정적인 탄산염 광물 형태로 변환하여 저장하는 기술로 자연 풍화 과정을 가속화 한 반응이다[8]. 이러한 기술은 포집된 CO<sub>2</sub>를 누출 없이 영구적으로 저장할 수 있으며 산업부산물을 대량으로 활용해 산업 원료나 건축자재 등으로 활용할 수 있는 가능성이 있는 점에서 기술적 활용 의의가 있다(Fig. 2.).

따라서 기술적 장점을 바탕으로 광물화된 CO<sub>2</sub>를 건축 자재로 활용

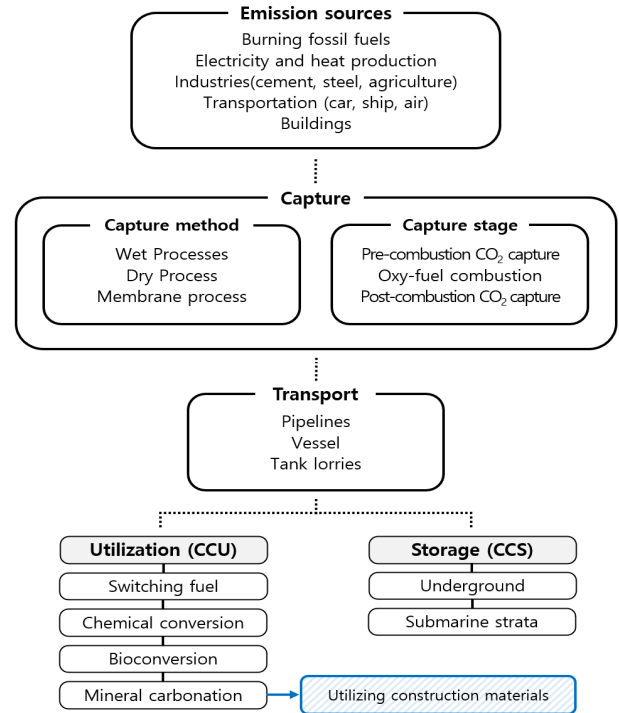


Fig. 1. Steps for applying CCUS (Adapted from [6])

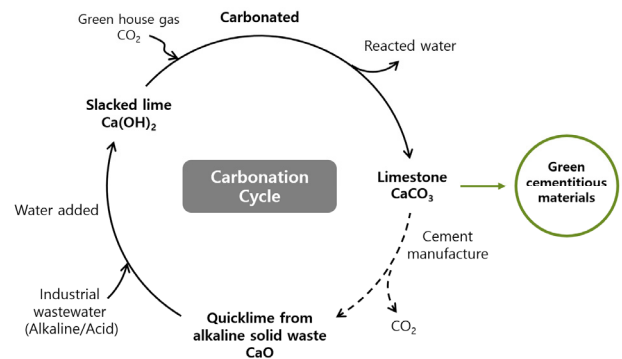


Fig. 2. Carbon dioxide mineralization processes for carbon dioxide utilization (Adapted from [9])

용할 경우, 장기적으로 기후변화에 긍정적인 영향을 미치며 경제적 이익을 창출할 수 있다. 선행연구에 따르면 세계적으로 2050년까지 CO<sub>2</sub> 활용량은 연간 1.0Gt에서 10.8Gt에 이를 것으로 예상되며, 시장 가치는 연간 0.8조에서 1조 달러에 이를 수 있다고 예측된다[10]. 건물과 건설 분야가 전 세계 CO<sub>2</sub> 배출량의 37%를 차지하는 만큼[2], 이러한 기술 개발은 우리나라가 2030년까지 CO<sub>2</sub> 배출량을 50% 감축해야 하는 파리 기후협정과 같은 글로벌 요구사항을 충족하는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

### 2.2. CCU 활용 건축분야 개발 현황 및 추세

건축 분야에 대한 탄소 포집 기술의 적용은 아직 초기 단계에 있지만, 최근 관련된 연구와 개발은 빠르게 진행되고 있다. Table 1.은 국내외의 CCU 기술을 활용한 건축 분야의 건축 재료 및 자재 연구 기술활용 현황을 조사한 결과이다. 일례로 영국 Cambridge Carbon

Table 1. CCU technologies for buildings

Project	Country	Use cases	CO <sub>2</sub> capture capacity	Capture technology	Contents	Ref.
CO <sub>2</sub> LOC	United Kingdom	Building materials in general	50,000kt CO <sub>2</sub> /year	Mineral carbonation	Utilizing the CO <sub>2</sub> LOC process, which selectively captures CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , and SO <sub>x</sub> from industrial emissions and converts them into a commercially useful magnesium carbonate mineral	[11]
Accelerated carbonation technology		Aggregates	500MtCO <sub>2</sub> /year	Mineral carbonation	Producing lightweight, carbon-negative aggregates provides an alternative to natural aggregates	[12]
CarbonCure	Canada	Ready mix concrete	7-11kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Mineral carbonation	Direct injection of CO <sub>2</sub> during concrete production	[13]
Paebbl on site	EU	Building materials in general	Storing 1t of carbon dioxide can produce 2.5t of material	Mineral carbonation	Convert CO <sub>2</sub> to CO <sub>3</sub> by adding water and silicate rock to produce a solid carbonate-based material, which can reduce concrete's CO <sub>2</sub> footprint by 70%	[14]
Plantd materials	USA	Panel	One house using Plantd panels for wall & roofs: 8tCO <sub>2</sub> /house	Biomass	Captures three times more carbon than a typical OBS panel (27%), with twice the moisture resistance and 1.4 times the strength	[15]
Nano bubble formulation water	Republic of Korea	Concrete mixing water	1.0-1.8kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	Mineral carbonation	Manufacturing technology that utilizes CO <sub>2</sub> nano-bubbled water along with industrial by-products to produce concrete instead of conventional mixing water	[16]
Eco-friendly sidewalk blocks		Block	9.6kg/m <sup>2</sup>	Direct Air Capture, Mineral carbonation	Superior strength and long-lasting durability compared to traditional sidewalk blocks, reducing maintenance costs	

Capture (CCC)에서 개발한 CO<sub>2</sub>LOC 기술은 광물 탄산화를 이용, CO<sub>2</sub>를 포집하고 안정적인 고체 형태로 변환해 콘크리트 충전재, 블록, 석고보드 등으로 활용 가능성을 보여주었다[11]. Carbon8은 Accelerated Carbonation Technology (ACT) 기술을 통해 산업부산물과 포집한 CO<sub>2</sub>를 결합하여 경량 탄소 음성 골재(Carbon Negative Aggregates)를 생산하였으며, 이를 통해 연간 500Mt의 CO<sub>2</sub> 저장이 가능한 자연 골재 대안을 제시하였다[12]. 캐나다의 CarbonCure는 콘크리트 생산 과정에서 CO<sub>2</sub>를 직접 주입한 후, 콘크리트 내의 화학 반응을 통한 광물 탄산화를 통해 CO<sub>2</sub>를 콘크리트에 안정적으로 저장하는 기술을 개발하였다. 이 기술은 탄소 저장뿐만 아니라 콘크리트의 강도를 약 10% 향상시킬 수 있으며 시멘트 사용량을 약 4~5% 줄일 수 있다는 특징이 있다[13]. 한편, 유럽의 Paebbl은 포집된 CO<sub>2</sub>를 활용하여 건설용 원자재를 생산하는 기술을 개발하였다. 저에너지 공정을 사용해 CO<sub>2</sub>를 CO<sub>3</sub>로 전환한 후 물과 분쇄된 규산염 암석을 추가하여 고체 탄산염 기반 물질을 생성한다. 이렇게 생성된 마그네슘 탄산염 분말은 실리카가 풍부해 건축 자재의 원료로 활용될 수 있다는 장점이 있다[14]. 미국의 Plantd Materials사는 셀룰로오스 섬유가 많은 섬유질 풀을 사용해 탄소를 포집하는 친환경 건축 패널을 개발했다. 이는 대기 중 CO<sub>2</sub>의 80%를 격리하여 건물 내에 저장한다. 건축물의 벽체, 지붕, 바닥재 등에 널리 쓰이는 OSB (oriented strand board) 패널(27%)보다 3배 더 탄소를 포집하며, 내습성은 2배, 강도는 1.4배 더 뛰어난 특성을 지닌다[15]. 국내에서 CCUS 관련 연구는 한국건설기술연구원이 나노버블 배합수를 개발 및 활용하여 대기 중의 CO<sub>2</sub> 포집 및 저장하고 CO<sub>2</sub>가 저장된 콘크리트를 제작하는 연구를 진행하였다. 나노버블 수만 다량의 나노버블이 존재하는 물에 CO<sub>2</sub>가 고농도로 용해된 배

합수를 의미한다. 이 기술을 통해 1m<sup>3</sup>의 콘크리트에 약 1.0~1.8kg의 CO<sub>2</sub>를 저장할 수 있다고 분석하였다[16]. 또한 건축자재로의 활용을 위해 국내 기업과 협력하여 이산화탄소 영구 격리 기술을 이용한 친환경 보도블록 개발하였다. 개발된 친환경 보도블록은 국내 최초로 강진만 생태공원에 시공되었으며 기존 보도블록 대비 강도 및 내구연한이 우수하여 유지보수 비용 절감에도 효과적일 것으로 기대되었다[16]. 지금까지 분석과 같이 최근 국내외적으로 건축분야에서 CCU 기술이 활발히 연구되고 있으나 아직 초기 개발 단계이며 제품이나 활용 방법이 제한적으로 이루어지는 것으로 나타나 건축분야에서 활용성 제고를 위한 연구의 필요성이 확인된다.

### 3. 그린 시멘트와 단열복합패널의 정의

#### 3.1. 그린 시멘트의 개념

건설사업 내에서도 국내 시멘트 산업에서 발생하는 이산화탄소 배출량은 2021년 국가 전체 배출량의 5.6%, 산업부문에서 약 8%를 차지한다[17]. 시멘트 소성 공정에서 대량의 이산화탄소가 배출되며 특히 시멘트 클링커를 소성하는 과정에서 석회석의 탈탄산 반응으로 인해 많은 양의 이산화탄소가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 시멘트 산업은 원료 대체와 전환 기술을 활용한 이산화탄소 포집 및 재자원화 기술을 개발하며 온실가스 배출량 감축에 힘쓰고 있다. 시멘트 산업 분야에서 CCU는 산업 공정에서 배출된 이산화탄소를 포집해 유용한 자원으로 전환하는 기술로 산화칼슘을 이용하여 이산화탄소를 광물화시켜 분말 형태로 제조된 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)으로 전환하는 방법 등이 고려된다. 그린 시멘트는 기존 포틀랜드 시멘트와 달리 물이 화학적으로 결합되지 않고 공정 중에 남

Table 2. General composition and construction method of insulating composite panels

Category		Description	Ref.
Insulation composite panel standard		<ul style="list-style-type: none"> <li>- The commonly composite panel(concrete panel + cement board) specifications are 75mm in thickness, 2,400mm mm in length, and 600mm in width</li> <li>- When insulation is included, it varies depending on the type and performance of insulation</li> </ul>	[18]
Types of insulation composite panel insulation	Vacuum insulation panel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Insulation that keeps the inside of the panel in a vacuum state after sealing the core material with a sealed metal sheath material with low moisture permeability and permeability</li> <li>- Due to the high of production, efficient manufacturing process and cost reduction measures for mass production should be considered</li> <li>- Its low thermal conductivity(below 0.003) allows it to combine with CCUS-based green cement, minimizing energy consumption</li> </ul>	[19]
	Cellulose	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Insulation using cellulose extracted from vegetable raw materials</li> <li>- In general, it has high compressive strength and tensile strength</li> <li>- Changes due to moisture or temperature variations must be considered, and natural cellulose, being highly flammable, requires fire resistance</li> </ul>	[20]
	Mineral wool	<ul style="list-style-type: none"> <li>- An insulating material made by melting and liquefying silicate-based minerals at high temperatures</li> <li>- It has an operating temperature of 650°C and is highly fire-resistant</li> <li>- A moisture barrier or waterproof treatment must be applied to prevent water infiltration and protect against exposure to humidity</li> </ul>	[21]
Insulated composite panel installation methods	Dry method	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A method of assembling directly without using materials that require hardening, such as concrete</li> <li>- It has the characteristics of simplifying field work by mass production and mechanized construction by industrialization</li> <li>- When designing a panel, the problem of low rigidity of the joint should be solved compared the wet method</li> </ul>	[22]
	Wet method	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Method of covering mesh and mortar over insulation and finishing with paint</li> <li>- The joints relatively high rigidity and allow for diverse aesthetic expressions</li> <li>- When designing panels, it is difficult to work during the rainy season and winter due to the long construction period</li> </ul>	

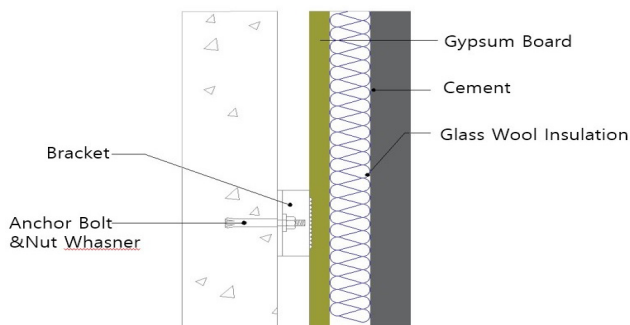


Fig. 3. Composition of insulated composite panels (example)

Table 3. Carbon dioxide emissions per ton of green cement

Type	Value (kgCO <sub>2</sub> /ton)
Emissions	216
Direct capture	440
Net capture	224

아있는 물이 건조 후에 공극으로 변하기 때문에 밀도가 낮아 경량화된 건축자재인 경량 콘크리트, 시멘트 보드에 적합하다. 기존 포틀랜드 시멘트에 비해 낮은 에너지 소모와 천연자원의 고갈 방지, 시멘트 생산과정에서의 과도한 이산화탄소 배출감소 등 지속 가능한 건축에 기여할 수 있다.

### 3.2. 단열복합패널의 개념

단열복합패널은 일반적으로 건축 재료를 복합적으로 사용하는 다중 레이어 패널로 기존 복합패널 대비 열적으로 향상된 특성이나 속성을 보여주는 두 가지 이상의 구성 재료가 혼합된 조합이다. Fig. 3.은 단열 복합패널의 구성 예로 외장패널의 내부에 열 차단을 위한 단열재를 포함하고 외부에는 시멘트 보드, 알루미늄 패널 등으로 구성되어 있다. 단열 복합패널의 사용은 시공과정에서 공사 기간을 줄이는데 기여하며 외단열 구성의 편의성을 향상시킨다. 단열 복합패널은 외단열 방식으로 건물 외피의 열교를 줄이고 기밀성 개선에 유리한 측면이 있어 냉난방 과정에서 열 손실을 줄이고 에너지 소비를 최소화하는 효율적인 기술 중 하나이다.

Table 2.는 단열 복합패널의 일반적 구성과 공법을 나타낸 표로 크게 단열 복합패널의 규격과 단열재의 종류 및 패널 설치 공법을 설명한다. 복합패널의 규격은 두께, 길이, 폭으로 나누어 일반적으로 사용되는 규격으로 구분하였다. 일반적으로 복합패널에 사용되는 단열재는 VIP(진공단열재), 셀룰로오스, 미네랄 울로 파악되며, 단열재 별 특징과 장단점을 정리했다. 설치 공법으로는 건식 공법과 습식 공법으로 나누어 특징을 정리했다.

그린 시멘트를 단열 복합패널에 적용하여 활용시 예상 CO<sub>2</sub> 저장량은 Table 3.과 같이 그린 시멘트 1t은 440kg의 CO<sub>2</sub>를 포집할 수 있을 것으로 예상된다. 제조과정에서 216kg의 CO<sub>2</sub>가 배출되므로 생산된 그린 시멘트 1톤당 224kg의 CO<sub>2</sub>를 순 포집될 것으로 기대된다[23].

Table 4. Physical properties of building materials with CO<sub>2</sub> capture and utilization

Category	Topics	Author	Results				Ref.
			Compressive strength	Micro-structure	Chloride ion diffusion	CaCO <sub>3</sub> optimal mixing amount	
Plain CaCO <sub>3</sub>	Effect of nano calcium carbonate on the properties of cement paste	Liu et al. (2012)	NC 2% incorporation resulted in a 28-day peak intensity of 108.6% of the reference sample	NC fills pores in cement particles to reduce porosity and form a dense structure	N/A	1%	[24]
	Effect of nano-calcium carbonate on hydration reaction and mechanical properties of cement mortar	Cosentino et al. (2020)	- 28-day compressive strength is highest at 2% admixture (55MPa) - 7-day strength is highest at 7% entrainment (44.61MPa)	- Higher amount of hydration products in 3% and 7% alternative specimens after 7 days of curing - Highest amorphous CSH production in 2% replacement specimen after 28 days of curing	N/A	2%	[25]
	Effect of calcium carbonate incorporation on concrete properties	Ali, Abdullah & Saad (2015)	- CaCO <sub>3</sub> -added concrete shows higher early compressive strength than OPC concrete - After 28 days, OPC concrete shows slightly higher compressive strength than CaCO <sub>3</sub> concrete	- CaCO <sub>3</sub> acts as a filler between cement particles - The charging effect of CaCO <sub>3</sub> promotes the hydration reaction and forms carboaluminate	N/A	N/A	[26]
	Developing new calcium carbonate concrete using waste concrete and CO <sub>2</sub>	Maruyama et al. (2021)	The average compressive strength of the CCC specimen was measured to be 8.6 MPa	Scanning electron microscopy (SEM) shows acicular crystals (aragonite) 1-3μm in diameter and less than 10μm long fill the voids	N/A	N/A	[27]
Admixture & CaCO <sub>3</sub>	Characterization of high volume fly ash (HVFA) concrete with calcium carbonate admixture	Shaikh & Supit (2014)	- 146-148% increase in early compressive strength when nano CaCO <sub>3</sub> is added compared to normal concrete - For long-term compressive strength, plain concrete improved by 40%, 39% fly ash HVFA concrete improved by 57%, and 59% fly ash HVFA concrete improved by 8%	Nano CaCO <sub>3</sub> reduces CH and CS in HVFA paste and forms additional CSH gel	60% and 32% reduction when adding 1% CaCO <sub>3</sub> nano-particles to 40% and 60% fly ash HVFA concrete	1%	[28]
	Effect of the addition of nano-calcium carbonate (nano-CaCO <sub>3</sub> ) on the properties of concrete with large amounts of blast furnace slag and fly ash	Hosan & Shaikh (2021)	- Improved initial strength and maintenance of good performance in long-term strength observed in concrete containing 9% blast furnace slag and 1% nano CaCO <sub>3</sub> - 48.5% blast furnace slag, 20.5% fly ash, 1% nano CaCO <sub>3</sub> concrete improved 3-day strength by 28% and exceeded the strength of OPC concrete at 28-day age	Interfacial transition zone (ITZ) densification for both HVS and HVS-FA upon addition of 1% nano CaCO <sub>3</sub>	Both HVS and HVS-FA with CaCO <sub>3</sub> show excellent resistance	N/A	[29]

## 4. CO<sub>2</sub> 기반 고성능 그린 시멘트 복합 단열패널 개발을 위한 문헌 분석

### 4.1. 그린 시멘트 복합체의 물리적 특성

산업화 과정에서 발생한 CO<sub>2</sub>를 안정된 고체 형태인 CaCO<sub>3</sub>로 변환하여 콘크리트 단열패널과 같은 건축자재로 개발시 화학반응을 통해 CO<sub>2</sub>를 강도 증진 물질인 탄산염 광물로 전환시켜 콘크리트 내부에 저장하고 탄산염 광물이 콘크리트 미세조직의 밀도를 증가시켜 일반 콘크리트보다 강도와 내구성이 향상된 콘크리트 제조가 가능하다(Table 4.).

선행연구에 따르면, Liu et al.(2012)은 나노 CaCO<sub>3</sub> (Nano Calcium Carbonate, NC)가 시멘트 페이스트의 특성에 미치는 영향을 주제로 연구를 진행하였다. W/C는 0.45로 동일하게 설정한 후, NC의 함량은 시멘트 중량 대비 0%, 1%, 2%, 3%로 변화시켜 그에 따른 유동성과 경화된 시멘트 페이스트의 강도, 건조수축에 미치는 영향을 분석했다. 그 결과 NC의 함량이 증가할수록 유동성이 감소하는 경향을 보였으며 휨강도는 NC 1% 혼입 시 28일 강도가 기준 시료의 108.3% 증가하였고 압축강도의 경우 NC 2% 혼입 시 28일 강도가 기준 시료의 108.6%로 최대 강도가 발현된 것을 확인하였다. 결과적으로 NC의 혼입은 시멘트 수화를 촉진시키며 혼입량이 증가할수록 유동성이 감소하고 응결시간이 단축되는 것으로 나타났다. 또한 시멘트 중량 대비 1%의 NC 혼입이 시멘트 페이스트의 강도 증진 및 초기 수축 감소에 가장 효과적인 것을 밝혔다[24]. Cosentino et al.(2020)은 나노 CaCO<sub>3</sub>가 시멘트 모르타르에 미치는 영향을 분석하였다. 28일 강도 기준, 휨강도와 압축강도 모두 CaCO<sub>3</sub> 2% 혼입 시 7.6MPa, 55MPa로 가장 높았으며 XRD 분석을 진행해 나노 CaCO<sub>3</sub>의 혼입이 수화반응을 촉진시키고 초기강도 향상에 기여하는 것을 확인했다[25]. Ali 외 2인(2015)은 시멘트의 10%를 CaCO<sub>3</sub>로 대체 시, 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 특성을 분석하였으며 CaCO<sub>3</sub> 혼입이 콘크리트의 작업성과 강도 향상에 기여하는 것을 확인하였다. 또한, CaCO<sub>3</sub>가 콘크리트 내부의 공극을 감소시키고 수화반응을 촉진하며 이때 형성된 카보알루미네이트가 초기 강도 증가에 기여한다고 도출했다[26].

앞선 연구들과 달리, CaCO<sub>3</sub>를 용액 형태로 활용한 연구로 Ippai et al.(2021)은 폐콘크리트와 대기 중의 CO<sub>2</sub>를 포집 후 중탄산칼슘 용액을 제조, 이를 활용한 탄산칼슘 콘크리트(Calcium Carbonate Concrete, CCC) 개발에 관한 연구를 진행하였다. 일반 포틀랜드 시멘트를 사용한 경화 시멘트의 CO<sub>2</sub> 고정량은 25.6 mass%, CCC의 CO<sub>2</sub> 고정량은 39.0 mass% CO<sub>2</sub>로 나타나 CCC가 더 높은 CO<sub>2</sub> 고정량을 보였다. 또한 CCC의 평균 압축강도는 8.6±0.65MPa, 공극률은 약 46%로 나타났다. CCC는 기존의 콘크리트에 비해 압축강도 측면에서 낮은 강도를 가지지만 빠른 수화시간, CO<sub>2</sub> 포집 및 저장, 폐콘크리트 활용 등의 장점을 가지며 순환 경제 기여 측면에서 우수한 특징을 보였다[27]. Shaikh 외 1인(2014)은 CaCO<sub>3</sub> 혼입에 따른 고용량 플라이애시(HVFA) 콘크리트의 특성 연구를 진행했다. CaCO<sub>3</sub>를 1% 혼입 시 모든 재령에서 가장 높은 압축강도를 보였으며 초기 압축강도가 일반 콘크리트 대비 146~148% 향상되었다.

또한 CaCO<sub>3</sub>를 1% 혼입한 HVFA 콘크리트가 일반 HVFA 콘크리트보다 더 미세한 기공 구조를 형성하고 염소 이온 투과성이 감소된다고 밝혔다[28].

한편, Hosan 외 1인(2021)은 나노-CaCO<sub>3</sub> (NC)가 고용량 슬래그(HVS) 및 고용량 슬래그-플라이애시(HVS-FA) 혼합 콘크리트의 압축 강도 및 내구성 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 일반 콘크리트(OPC), 고로 슬래그(BFS) 및 고로 슬래그와 플라이애시(FA) 함량이 69%인 HVS-FA 콘크리트에 1% NC를 혼입하여 진행했다. CaCO<sub>3</sub>를 혼입한 콘크리트가 OPC에 비해 압축강도가 높았으며 전반적으로 BFS와 1% CaCO<sub>3</sub> 혼합 콘크리트가 가장 높았다. 더 나아가 염소 이온 투과성과 건조수축이 감소하며 치밀한 미세구조를 형성하는 것을 확인하였다[29].

기존 연구를 종합한 결과, CaCO<sub>3</sub>의 최적 혼입량은 시멘트 중량 대비 1~2%로 이를 첨가할 시, 시멘트 복합체의 공극을 채워 치밀한 미세구조를 형성하고 수화반응을 촉진시켜 강도 향상에 도움을 준다. 또한, 염화물에 대한 저항성을 향상시키는 것을 확인하였다. 하지만 과도한 CaCO<sub>3</sub>의 사용은 시멘트 복합체의 강도를 감소시키고 응결 지연을 유발할 수 있으므로 적절한 양의 혼입이 필요할 것으로 확인되었다.

### 4.2. 복합 단열패널의 열적 성능 평가의 필요성

CCUS를 기반으로 CO<sub>2</sub> 부산물을 활용한 그린 시멘트 개발시 물리적 특성도 중요하지만, 복합 단열패널의 열적 성능 또한 매우 중요한 요소이다. 따라서 단열복합패널 개발시 열성능 검토 및 분석방법 도출을 위해 탄소 포집 기술을 활용한 건축자재의 열적 성능 분석에 대한 선행연구를 고찰하였다.

선행연구에 따르면 Pope et al.(2024)은 탄소 저장 및 건물 성능 향상을 위한 조립식 단열패널의 개발 및 평가와 관련된 연구를 진행하였다. 바이오매스 활용 패널 설계에 대한 구체적인 탄소저장량은 Material Carbon Emissions Estimator (MCE2) 도구를 사용해 측정을 진행하였으며 등온 평면법을 사용해 다양한 단열 옵션의 열 성능을 모델링 후 각 패널의 R값을 도출하였다[30]. Kim et al.(2022)은 다공성 물질인 목재 기반의 바이오차를 적용한 콘크리트 단열 벽체를 개발하고 단열성능평가를 진행하였으며 TPS (Transient Plane System)-1500 열전달 측정 장비를 활용해 열전도를 측정을 진행하였다[31]. Xiong et al.(2024)은 산업폐기물에 해당하는 탈황석고(Desulfurization Gypsum, DG)와 카바이드 슬래그(Carbide Slag, CS)를 활용해 CO<sub>2</sub>를 포집하고 이러한 탄소 포집 공정에서 배출된 혼합물을 사용, 상변화 복합재(PCC) 제작에 활용되는 골격 재료를 제조한 후, 복합재에 대한 열적 특성을 연구하였다. 동시 열분석기(STA 449F3, Netzsch)를 사용하여 CaCO<sub>3</sub>의 열분해 과정을 분석하고 시차주사열량계(DSC)와 열중량분석기(TGA)를 사용해 PCC 샘플의 상변화 과정을 분석하여 용해 잠열과 비열 값을 도출하였다[32].

선행연구를 분석한 결과 순환골재의 사용한 연구에서 다양한 산업폐기물이나 폐바이오매스를 활용한 복합 단열재의 성능분석이 진행되고 있지만 산업부산물로써 CO<sub>2</sub> 부산물을 광물화하여(예: CaCO<sub>3</sub>) 사용하는 경우와 이에 대한 열성능에 대한 연구는 상대적으로



Table 5. Considerations for the development of CO<sub>2</sub>-based concrete high-performance composite panels

Category			Previous studies	Considerations	Ref.
Composite panel configuration	CaCO <sub>3</sub> cement characteristics	Compressive strength	<ul style="list-style-type: none"> <li>- For the compressive strength test, specimens were manufactured and tested according to the ASTM C109 standard, with high temperatures (40°C, 60°C, 80°C) used as variables. Cement specimens measuring 50×50×50 mm<sup>3</sup> were utilized</li> <li>- At 40°C, the CaCO<sub>3</sub> cement paste showed no strength development on the first day and required 14 days to reach full strength, while at 60°C and 80°C, it reached full strength in 7 days and 3 days, respectively</li> <li>- Regardless of temperature, it was the same at 40 MPA after 14 days</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Since there is a difference in the expression of strength depending on temperature, it should be designed to meet the necessary climate conditions or initial strength during construction</li> </ul>	[33]
		Durability	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CaCO<sub>3</sub> cement is not alkaline like Portland cement and is close to neutral</li> <li>- Due to porosity, water permeates the voids in a freeze-thaw environment and is likely to be damaged</li> <li>- Its porous structure makes it suitable for lightweight building materials such as fiber cement boards and lightweight concrete</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Freeze-thaw resistance: Use a waterproof coating to minimize water seeping into voids or use an air-repellent agent to increase resistance when designing panels</li> <li>- Since the porous structure may have lower compressive strength than Portland cement, reinforcement should be used together</li> </ul>	
	Insulation material combination		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conventionally used insulation materials are vulnerable to fire, and there is a problem that durability and insulation decrease over time. though this, an experiment was conducted to develop an insulation material that is resistant to fire and cracks and has excellent insulation performance by using insulation materials</li> <li>- The physical properties were analyzed according to the replacement ratios when insulating materials such as V (vermiculite), PL (perlite), CB (ceramic bead), and EPS were incorporated into the mortar</li> <li>- As the insulation replacement rate of the mortar increases, the flow rate decreases, the air content increases, the unit weight and thermal conductivity decrease, and the bending strength decreases</li> <li>- The insulating material V+CB+PL combination can be confirmed as an excellent combination because the pores are reduced due to continuous particle size</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- By analyzing the effect of different adiabatic curing conditions on their properties, the practicality of the mortar replacement rate in the adiabatic production process should be examined</li> <li>- The properties of each material (heat conductivity, strength, etc.) should be balanced at the mixing ratio by laying the foundation for the mixing design of insulating materials</li> </ul>	[34]
Composite panel construction	Insulation to concrete bonding		<ul style="list-style-type: none"> <li>- By developing a prototype that changes the shape of fixing pins and ribs to the heat bridge and insulation fixing problem pointed out by the existing method, we would like to present an alternative with construction performance and economic feasibility</li> <li>- When bonding insulation and concrete, one-way rib-shaped bonding is a realistic alternative in terms of construction performance and weight reduction, and performance can be expected to be improved by increasing the adhesion between members and reducing the volume</li> <li>- In order to implement a system in which insulation and concrete are integrated, fixing pins are effective, and in particular, PVC fixing pins play a very effective role in preventing heat bridges by reducing heat bridges by more than 90%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- The fixed pin placement interval and installation method should be designed to minimize heat flow</li> <li>- The shape and material of the joints shall be designed to distribute the load effectively</li> </ul>	
	External insulation install method		<ul style="list-style-type: none"> <li>- In order to increase the stability and durability of the external insulation fixing method and prevent problems occurring in the external environment, an analysis was conducted</li> <li>- Wet, dry, and semi-dry methods are used for the external insulation fixing method, and among these, the semi-dry method showed a high bonding strength (1,083.4 N) and was confirmed to have little strength loss even under weather resistance and freeze-thaw conditions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material selection or additional protective coating is required to minimize strength loss of adhesive mortar and anchors</li> <li>- Although semi-dry construction methods offer superior performance, dry and wet construction methods are also considered for cost and construction efficiency. Because deterioration can occur over time, it is important to ensure long-term performance</li> </ul>	[35]

Table 5. Considerations for the development of CO<sub>2</sub>-based concrete high-performance composite panels (Continued)

Category		Previous studies	Considerations	Ref.
Composite panel construction	External insulation install method	- In the wind pressure performance test, the method of using adhesive mortar and anchors together showed a strength reduction of about 40~45% under weather and freeze-thaw conditions, and the anchor showed a decrease in bond strength of about 40% due to deterioration. However, this method showed high bond strength and deterioration resistance, and was effective in preventing detachment due to strong winds		[35]
	Panel, Finish joints	- To improve the problems occurring in the straight joints of existing composite panels, T-type, H-type +EPDM composite, and I-type joints were proposed - As a result of comparing the absorption performance, fatigue resistance, and tensile performance was improved by 20~40%, and the tensile strength was the highest for the I-shaped joint. All joint types showed excellent fatigue resistance without any fatigue-related damage (cracking, fracture, etc.)	- Since the purpose of absorption performance is to prevent moisture penetration, the sealing and waterproofing of the joints must be additionally strengthened during construction - The difficulty of construction varies depending on the shape of the joint, so the shape of the joint must be selected	[36]

으로 부족한 것으로 확인되었다. 따라서 향후 시멘트 산업을 포함한 건설산업에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량 저감을 위해서는 CO<sub>2</sub> 부산물을 활용한 시멘트 및 복합패널 등의 제품에 대한 다양한 연구가 수행될 필요가 있으며 특히 열성능에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 5. CO<sub>2</sub> 기반 고성능 그린 시멘트 복합 단열패널 개발 시 고려사항

Table 5.는 CO<sub>2</sub> 기반 콘크리트 복합패널 개발 시 고려해야 할 사항으로 크게 복합패널 구성과 시공방법으로 구분하였다. 복합패널 구성시 고려사항으로 압축강도, 내구성, 단열재의 종류 및 접합 방법을 주요 요소로 다루었으며, 복합패널 시공에서는 패널 마감재 접합부를 다루었다.

외장패널로써 그린 시멘트의 압축강도는 구조물의 기본적인 성능을 결정하는 핵심 요소이다. 선행연구 결과에 따르면 그린 시멘트의 압축강도 발현은 온도 조건에 의존하는 것을 확인할 수 있다. 온도에 따른 강도 발현차이가 있어, 시간에 따른 강도를 충족할 수 있도록 설계해야 한다. 내구성은 패널의 장기적인 성능 유지에 필수적인 요소이다. 선행연구에서 CaCO<sub>3</sub>에 기반한 그린 시멘트는 동결-해빙 환경에서 상대적으로 취약한 단점이 있다. 이를 저지하기 위해 방수코팅과 저항성을 높이기 위해 공기 연행제가 필요하다[33].

또한, 고성능 시멘트 단열복합 패널 설계 시 그린 시멘트에 단열 소재를 추가하여 단열 성능과 내구성을 향상을 기대할 수 있다. 단열 소재인 V(질석), PL(퍼라이트), CB(세라믹비드), EPS를 모르타르에 치환하여 물성을 파악한 결과 치환률 증가에 따라 작업성 감소, 공기량 증가, 단위용적질량 및 열전도율이 개선을 확인할 수 있다. 그린 시멘트의 열전도율 개선은 고성능 복합패널에서 추가적인 단열 성능 개선을 기대할 수 있다. 특히, 세라믹 비드와 같은 단열재는 공극을 균일하게 유지하여 일정 수준의 강도를 제공하여 내구성을 높일 수 있다[34]. 따라서, 고성능 복합 단열패널 개발시 제도적으로 요구되는 단열성능 충족을 위해 최적의 단열성능을 확보하기 위해 노력

할 필요가 있으며, 그린 시멘트와 단열 소재의 조합은 이러한 성능 확보에 기여할 것으로 보인다.

또한 고성능 시멘트 단열복합 패널의 개발과정에서 단열재와 콘크리트 간 접합은 패널의 구조적 안정성과 열적 효율성에 영향을 미친다. 접합부의 설계가 열전도율을 감소시켜면서도 강한 접합력을 유지할 수 있어야 하며, 특히 PVC소재와 같은 고성능 접합재의 사용을 통해 충족시킬 수 있으며, 고정핀 배치 간격이 열관류율에 최소 화할 수 있도록 설계해야 한다[35].

외단열 고정 방법은 단열재와 콘크리트를 안정적으로 연결하여 장기적인 성능을 유지할 수 있도록 중요한 역할을 한다. 선행 연구에서는 접착모르타르와 앵커를 병행한 경우 강도가 감소 했지만 높은 열화 저항성을 보여 강풍에 의한 탈락 방지에 효과적인 것을 확인할 수 있었다[35]. 마감재 접합부 부문에서 접합부분이 약하면 장시간 사용 시 크랙이 발생하고, 수분이 침투하면 단열 성능이 저하된다. 선행 연구에서 기존의 직선 접합부를 개선하기 위해 3가지 형태의 접합부를 제안했으며, 이에 따라 흡수성능과 피로저항성이 향상된 것을 확인할 수 있다. 따라 시공시 개선 방안인 3가지 접합부 형태 난이도에 따라 선택해야 한다[36].

따라서 고성능 시멘트 단열복합 패널의 개발시 강도 감소를 최소화하기 위해 재료 선택이나 추가적인 보호코팅이 필요하다고 판단된다. 한편, 내장재는 단열 성능 뿐만 아니라 내부 환경에 미치는 영향을 고려해야 한다. 친환경적이고, 내구성이 뛰어나며, 시멘트와의 물리·화학적 상호작용이 우수한 내장재를 연구하여 복합패널의 성능을 극대화할 필요가 있다. 특히 내장재가 흡음, 방열, 그리고 화재 안정성 등의 부가적인 기능을 제공할 수 있도록 설계되어야 한다.

## 6. 그린 시멘트 기반 복합 단열패널 개발 의의

결론적으로 그린시멘트에 기반한 콘크리트 복합 단열패널 개발은 향후 온실가스를 저감하고 콘크리트의 강도와 내구성을 개선할 수 있으며 단열 효과 증대를 기대할 수 있다. CaCO<sub>3</sub> 혼입은 콘크리트의 작업성과 내구성을 개선에 기여할 수 있으며, 1~2%의 적절한



혼입을 통해 시멘트 복합체의 치밀한 미세구조를 형성하여 휨강도와 압축강도를 증진시킬 수 있다. 결과적으로  $\text{CaCO}_3$ 를 활용한  $\text{CO}_2$  기반 고성능 그린 시멘트 복합 단열패널 개발 시 기존 패널에 비해 더 향상된 물리적 성능을 얻을 수 있으며 단열재의 종류, 마감재 접합부 등의 고려사항을 통해 추가적인 열성능을 확보할 수 있다. 그 과정에서 단열소재의 추가적인 혼입방안과 외단열 중심의 고정 방법을 이용하는 것을 검토할 수 있다. 그린시멘트의 활용은 산업화 과정에서 발생한  $\text{CO}_2$ 를 포집하여 건축자재에 저장하고 재료적 성능을 높인다는 점에서 연구의 필요성이 있으며, 향후 추가적인 연구를 통해 그린 시멘트 기반 복합 단열패널 개발을 위한 장기 내구성과 열성능에 대한 분석을 바탕으로 성능과 환경적 영향, 시공성과 비용을 고려한 최적화 방안을 도출할 필요가 있다고 판단된다.

## 7. 결론

본 연구는 건축분야 CCUS 기술 현황과 CCUS 기반 건축자재 개발에 대한 선행연구 고찰을 통해  $\text{CO}_2$  부산물을 활용한 고성능 시멘트 복합 단열패널 개발의 필요성을 논의하고 개발 과정에 대한 고려사항을 도출을 목표로 하였다. 이를 위해 건축분야의 CCUS 기술 적용현황 및 방법, 그린 시멘트와 단열 복합패널의 정의에 대해 살펴보았으며  $\text{CaCO}_3$ 를 활용한 시멘트 복합체의 물리적 특성을 중심으로 제시하였다. 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 건축 분야에 CCU를 적용하여 자재개발을 하기 위한 대표적인 방법으로 광물 탄산화 기술이 있으며 이는 포집된  $\text{CO}_2$ 를 광물화시켜  $\text{CaCO}_3$ 로 전환한다. 이를 활용하여 골재, 블록, 단열패널 등의 다양한 건축자재의 개발이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 아직까지 국내외적으로 연구 초기단계로 판단되며 지속 가능한 건축을 위해 연구의 필요성이 확인되었다.
- 2) 선행 연구 분석에 따르면 시멘트 복합체에  $\text{CaCO}_3$ 를 혼입할 경우, 일반 포틀랜드 시멘트 복합체에 비해 빠른 수화 반응과 치밀한 미세 구조를 형성하는 것을 확인하였다. 결과적으로 초기 압축강도가 향상되었으며 염소이온 투과성이 감소되었다. 따라서 건설분야 CCU 기술로써 그린 시멘트의 활용성이 확인되었다.
- 3)  $\text{CO}_2$  기반 그린 시멘트 단열 복합패널 개발 시 압축강도, 내구성, 단열재, 접합방법 등에서 고려사항이 확인되었다.  $\text{CaCO}_3$  시멘트의 온도에 따른 강도 발현, 단열성능 확보, 시공성을 고려한 열효율적 접합 설계 등이 중요한 요소이며 외단열 고정 방법과 다기능 내장재 선택 역시 패널의 성능과 안정성 향상에 필수적인 요소로 판단된다.
- 4)  $\text{CaCO}_3$ 에 기반한 건축자재의 기계적 성능이나 재료적 측면의 연구는 일부 연구가 진행되고 있으나 자재의 열적 특성을 주제로 한 연구는 소수로 미미한 실정임을 알 수 있었다. 따라서 그린 시멘트에 기반한 단열 복합패널 개발시 패널의 열성능과 더불어 접합부 취약점 등 고려사항을 반영한 열성능에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

본 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00409497).

## References

- [1] APEC기후센터, WMO 2023년 전지구 기후현황 보고서, 2023, p.5. // (APEC Climate Center, State of the global climate 2023, 2023, p.5.)
- [2] United Nations Environment Programme, 2020 global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector, 2020, p.10.
- [3] Boston Consulting Group, Scaling carbon capture won't break the bank, <https://www.bcg.com/publications/2023/scaling-carbon-capture-technology-wont-break-bank>, 2023.02.22.
- [4] 임채연, 정은태, 안지환, 이산화탄소 광물 자원화/전환 활용(CCUS) 기술, 기계저널, 제61권 제6호, 2021.06, pp.32-36. // (C.Y. Lim, E.T. Jung, J.W. Ahn, Carbon dioxide mineralization/conversion utilization (CCUS) technology, Journal of the KSME, 61(6), 2021.06, pp.32-36.)
- [5] 한국CCUS추진단, CCUS개요, [https://kccus.kr/bbs/content.php?co\\_id=ccus01](https://kccus.kr/bbs/content.php?co_id=ccus01), 2024.12.10. // (Korea Carbon Capture Utilization and Storage Association, CCUS Overview, [https://kccus.kr/bbs/content.php?co\\_id=ccus01](https://kccus.kr/bbs/content.php?co_id=ccus01), 2024.12.10.)
- [6] 윤세종, 오동재, 탄소포집, 이용 및 저장 기술 (CCUS) 현황 및 문제점 (SFOC ISSUE BRIEF Vol. 3), 기후솔루션, 2021, pp.1-7. // (S.J. Yoon, D.J. Oh, Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) status and issues (SFOC ISSUE BRIEF Vol. 3), SFOC, 2021, pp.1-7.)
- [7] 김형석 외 3인, 광물탄산화에 의한  $\text{CO}_2$  고정화 기술, 광물과산업, 제22권 제1호, 2009.06, pp.71-85. // (H.S. Kim et al.,  $\text{CO}_2$  immobilization technology by mineral carbonation, Mineral and Industry, 22(1), 2009.06, pp.71-85.)
- [8] P.C. Chiang, S.Y. Pan, Carbon dioxide mineralization and utilization, Singapore: Springer, 2017, pp.35-49.
- [9] 고문현, 안태용, CCS 관련 법적 쟁점, 법학논총, 제35권, 2016.01, pp.31-74. // (M.H. Koh, T.Y. Ahn, Legal issues of CCS, Soongsil Law Review, 35, 2016.01, pp.31-74.)
- [10] V. Sick, G. Stokes, F.C. Mason,  $\text{CO}_2$  utilization and market size projection for  $\text{CO}_2$ -treated construction materials, Frontiers in Climate, 4, 2022.05, pp.34-38.
- [11] M. Evans, Direct air  $\text{CO}_2$  capture & mineralisation, Cambridge Carbon Capture, 2022.01, pp.2-7.
- [12] Carbon8, Accelerated Carbonation Technology (ACT), <https://www.carbon8.co.uk/>, 2024.12.04.
- [13] CarbonCure, CarbonCure's sustainable concrete solution, <https://www.carboncure.com/>, 2024.12.04.
- [14] Paebbl, Mineral carbonation, <https://paebbl.com/>, 2024.12.04.
- [15] Plantd Materials, Biomass panel, <https://www.plantdmaterials.com/>, 2024.12.04.
- [16] 박정준, 친환경 Carbon Eating Concrete (CEC) 제조 및 활용 기술 개발, 한국건설기술연구원, 2022.12. // (J.J. Bak, Development of eco-friendly Carbon Eating Concrete (CEC) manufacturing and utilization technology, Korea Institute of Construction Technology, 2022.12.)
- [17] 이향선, 송훈, 칼슘 실리케이트 시멘트의  $\text{CO}_2$  양생에 따른 탄산화 광물상 및 압축강도 분석, 대한건축학회논문집, 제39권 10호, 2023.10, pp.271-279. // (H.S. Lee, H. Song, Analysis of carbonation mineral phase and compressive strength according to  $\text{CO}_2$  curing of calcium silicate cement, Journal of the Architectural Institute of Korea, 39(10), 2023.10, pp.271-279.)
- [18] 최수경 외 4인, 발포 폴리스티렌 경량콘크리트 복합패널의 구조적 안전에 관한 실험적 연구, 건설순환자원학회 가을학술발표 논문집, 제13권 제2호, 2013.11, pp.156-159. // (S.K. Choi et al., Structural safety test results of expanded polystyrene lightweight concrete panel walls, Conference Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 13(2), 2013.11, pp.156-159.)
- [19] 김상명 외 3인, 심재에 따른 진공단열패널의 특성 및 장기성능 평가, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제14권 제1호, 2020.01, pp.54-65 //

- (S.M. Kim et al., Long-term performance and characteristics evaluation of Vacuum Insulation Panels (VIPs), *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 14(1), 2020.01, pp.54-65.)
- [20] 박종문, 김동환, 서동진, 친환경 건축물 단열재 최근 연구 동향, *Clean Technology*, 제18권 제1호, 2012.03, pp.14-21. // (J.M. Park, D.H. Kim, D.J. Seo, Recent research trends for green building thermal insulation materials, *Clean Technology*, 18(1) 2012.03, pp.14-21.)
- [21] 지춘근, 샌드위치 패널의 화재위험성과 보험요율의 적용, 한국화재보험협회, 2006.03, pp.46-50. // (C.G. Ji, Fire risk and insurance rate application of sandwich panels, *Korea Fire Protection Association*, 2006.03, pp.46-50.)
- [22] 한국건설기술연구원, 경제적이고 안전한 건물 외벽 시스템, <https://www.xn--z69aksb59ee70eilbh1mizbn16d.kr/researchResultWeb/getResearchResultView.es?mid=a10301000000&id=185>, 2024.12.10. // (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Economical and safe building exterior system, <https://www.xn--z69aksb59ee70eilbh1mizbn16d.kr/researchResultWeb/getResearchResultView.es?mid=a10301000000&id=185>, 2024.12.10.)
- [23] C.W. Hargis et al., Calcium carbonate cement: A Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technique, *Materials*, 14(11), 2021.05, 2709.
- [24] X. Liu et al., Effect of nano-CaCO<sub>3</sub> on properties of cement paste, *Energy Procedia*, 16(B), 2012, pp.991-996.
- [25] Cosentino et al., Nano CaCO<sub>3</sub> particles in cement mortars towards developing a circular economy in the cement industry, *Procedia Structural Integrity*, 26, 2020.06, pp.155-165.
- [26] M. Ali, M.S. Abdullah, S.A. Saad, Effect of calcium carbonate replacement on workability and mechanical strength of Portland cement concrete, *Advanced Materials Research*, 1115, 2015.07, pp.137-141.
- [27] Maruyama et al., A new concept of calcium carbonate concrete using demolished concrete and CO<sub>2</sub>, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 19(10), 2021.09, pp.1052-1060.
- [28] F.U. Shaikh, S.W. Supit, Mechanical and durability properties of High Volume Fly Ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) nanoparticles, *Construction and Building Materials*, 70, 2014, pp.309-321.
- [29] A. Hosan, F.U.A. Shaikh, Compressive strength development and durability properties of high volume slag and slag-fly ash blended concretes containing nano-CaCO<sub>3</sub>, *Journal of Materials Research and Technology*, 10, 2021.01, pp.1310-1322.
- [30] H. Pope, M. Carver, B. Conley, Carbon-storing prefabricated retrofit panel designs, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1363(1), 2024.06, 012098.
- [31] 김정철 외 4인, 바이오차를 혼입한 콘크리트의 물성 특성과 단열성능에 미치는 영향, 한국건설순환자원학회논문집, 제10권 제4호, 2022.12, pp.428-434. // (K.C. Kim et al., Effect of concrete containing the biochar on properties and thermal insulation performance, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 10(4), 2022.12, pp.428-434.)
- [32] Xiong et al., Effect of carbon capture on desulfurization gypsum/carbide slag phase-change composites for waste removal and renewable energy storage, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 2024.06, 112484.
- [33] 한민철 외 4인, 단열소재 종류 및 조합에 따른 외벽단열 패널용 시멘트 복합체의 공학적 특성, 한국건축시공학회지, 제11권 제2호, 2011.04, pp.127-135. // (M.C. Han et al., Engineering properties of cement composite panel for outer wall depending on the types and combinations of insulation materials, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 11(2), 2011.04, pp.127-135.)
- [34] 윤영란 외 4인, 외단열 방식의 고단열 Precast concrete 개발 (1), 한국건축친환경설비학회논문집, 제7권 제3호, 2013.09, pp.161-167. // (Y.R. Yoon et al., The study on evaluating the heat transfer performance and developing of high-performance precast concrete wall system, *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 7(3), 2013.09, pp.161-167.)
- [35] 박원구 외 3인, 외단열 고정 방법에 따른 접착강도 기준의 제정 방안에 관한 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 제29권 제1호, 2013.01, pp.83-90. // (W.K. Park et al., A research on enactment plan of standard of bonding strength in bonding part of external insulation method, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 29(1), 2013.01, pp.83-90.)
- [36] 오상근 외 3인, 외장 단열 마감 패널재의 실링 접합부 형태에 따른 성능 평가 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 제27권 제7호, 2011.07, pp.109-116. // (S.K. Oh et al., A study on performance evaluation of sealing shape in joint of exterior insulated, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 27(7), 2011.07, pp.109-116.)