2024년도 연구보고서
계획지원-03

석탄 및 석회석 폐광산을 활용한 온실가스 감축방안

2024. 11.

삼척시탄소중립지원센터

환경부 Ministry of Environment
삼척시 SAMCHEOK CITY
시멘트산업사회공헌재단 Cement Industry Social Contribution Foundation
KNU 강원대학교 KANGWON NATIONAL UNIVERSITY

제 출 문

○ 과 제 명 : 석탄 및 석회석 폐광산을 활용한 온실가스 감축방안

○ 계약기간 : 2024년 10월 16일 ~ 2024년 11월 15일 (총1개월)
○ 계 약 일 : 2024년 10월 16일
○ 착 수 일 : 2024년 10월 16일
○ 완 료 일 : 2024년 11월 15일

본 보고서를'석탄 및 석회석 폐광산을 활용한 온실가스 감축방안'용역의 최종 연구보고서로 제출합니다.

2024년 11월 15일

소 속 : 강원대학교 신소재공학과
직 위 : 조교수
성 명 : 이 재 원 (인/서명)

삼척시탄소중립지원센터장 귀하

< 목 차 >

1. 연구배경 및 목적 ····· 1
1-1. 연구배경 ····· 1
1-2. 연구목적 ····· 3

2. 삼척시 관내 석탄 및 석회석 폐광산 현황 ····· 4
2-1. 삼척시의 지리적 및 산업적 배경 ····· 4
2-2. 주요 폐광산 현황 ····· 4
2-3. 폐광산의 경제적, 사회적 영향 ····· 6
2-4. 석회석 광산 ····· 6
2-5. 현재의 환경 복원 상태 ····· 7

3. 복합 탄산염 기반 폐광산 채움재 생산기술 현황 ····· 9
3-1. 탄소 포집 및 저장(CCS) 기술 개요 ····· 9
3-2. 폐광산 채움재의 개념 및 필요성 ····· 11

4. 폐광산 채움재를 활용한 온실가스 감축 사례 및 효과 ····· 13
4-1. 국내 온실가스 감축 사례 ····· 13
4-2. 해외 온실가스 감축 사례 ····· 13
4-3. 온실가스 감축효과 분석 ····· 15
4-4. 경제적, 환경적 혜택 ····· 16
4-5. 한계점 및 개선 방안 ····· 16

5. 결론 ····· 19

참고문헌 ····· 20

1 연구배경 및 목적

1-1. 연구배경

❖ 석탄은 오랫동안 세계 에너지 공급의 중요한 축을 담당해 왔으며, 대한민국에서도 경제 발전의 핵심 자원으로 활용됐음.

- 한국에서 석탄 사용은 2018년 이후 감소 추세에 있으며, 2024년에도 전체 전력 생산의 약 28~30%를 차지할 것으로 보이나, 수도권 송전선로 제약과 신재생 에너지 발전 확대의 영향으로 감소세가 지속될 것으로 전망됨.

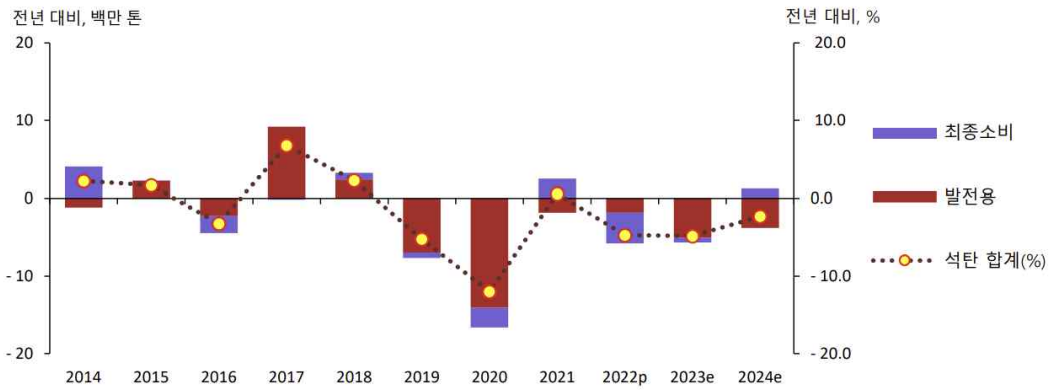


그림 1. 용도별 석탄 소비 증감 및 총 석탄 증가율 전망
(출처 : 에너지경제연구원(2024.01.), "KEEI 2024년 에너지수요전망")

❖ 석탄은 풍부하고 경제적인 에너지 자원으로 평가되지만, 사용 과정에서 심각한 환경 문제를 야기하고 있음.

- 석탄 연소 과정에서 다량의 온실가스가 배출되어 지구 온난화와 기후 변화에 큰 영향을 미침.

- 석탄은 주로 탄소로 구성되어 연소 시 이산화탄소(CO_2)를 생성하게 되며, 이는 대표적인 온실가스로 지구 온난화를 유발함.

- 석탄 채굴 과정에서 방출되는 메탄(CH_4)가스는 이산화탄소보다 약 25배 이상의 온실효과를 지니고 있어 기후 변화에 큰 영향을 미칠 수 있음.

- 석탄 연소 시, 배출되는 질소산화물(NO_x) 등의 오염물질은 대기 오염 및 간접적인 온실효과를 유발하여 환경 문제를 심화시키고 있음.

구분	이산화탄소 (CO_2)	메탄 (CH_4)	이산화황 (SO_2)	질소산화물 (NO_x)
석탄	2,100,000	350,000	3,900	1,600
천연가스	900,000	540,000	5	2,100
바이오매스	270,0000	na	540	3,300

표 1. 전력 생산으로 인한 배출량 (pounds per million kilowatt hours)
(출처 : FreeingEnergy, "Energy Fact – Comparing CO2, SO2, NOx, and methane across coal, natural gas and biomass")

❖ 이에 따라 석탄 사용의 증가는 지구 온난화와 기후 변화의 주요 원인이 되고 있으며, 석탄 산업의 지속 가능한 발전과 온실가스 감축 방안 마련이 시급한 과제로 대두되고 있음.

❖ 산업통상자원부의 「제6차 석탄 산업 장기계획: 2021~2025」에 따라 대한석탄공사의 주요 탄광 3개(화순, 장성, 삼척)에 대한 조기 폐광이 결정됨.

- 화순, 장성, 삼척 탄광은 오랫동안 지역 경제의 중추적인 역할을 해왔으며, 많은 주민이 이들 광산에서 일자리를 얻어 생계를 유지해 왔음.

- 조기 폐광은 단기적으로는 실업률 증가와 경제적 어려움을 초래할 수 있으나, 장기적으로는 새로운 산업과 일자리 창출을 통해 지역 경제의 다변화를 도모할 기회로 작용할 수 있음.

- 이에 따라 정부와 지역 사회는 폐광산의 효과적인 재활용 방안을 모색하고, 새로운 경제적 가치를 창출할 수 있는 다양한 프로그램을 시행할 필요가 있음.

❖ 석회석은 대한민국 시멘트 산업의 핵심 원료로 사용되며, 시멘트 생산 과정에서 상당한 양의 이산화탄소(CO_2)가 배출되고 있음.

- 시멘트 산업은 전 세계 온실가스 배출의 7%를 차지하는 주요 배출원 중 하나로, 대한민국에서도 시멘트 수요가 꾸준히 증가하고 있음.

- 시멘트 제조 과정에서 발생하는 CO_2 배출은 석회석의 고온 소성과 화석 연료의 연소에 기인하며, 이는 기후 변화 완화에 중요한 과제가 되고 있음.

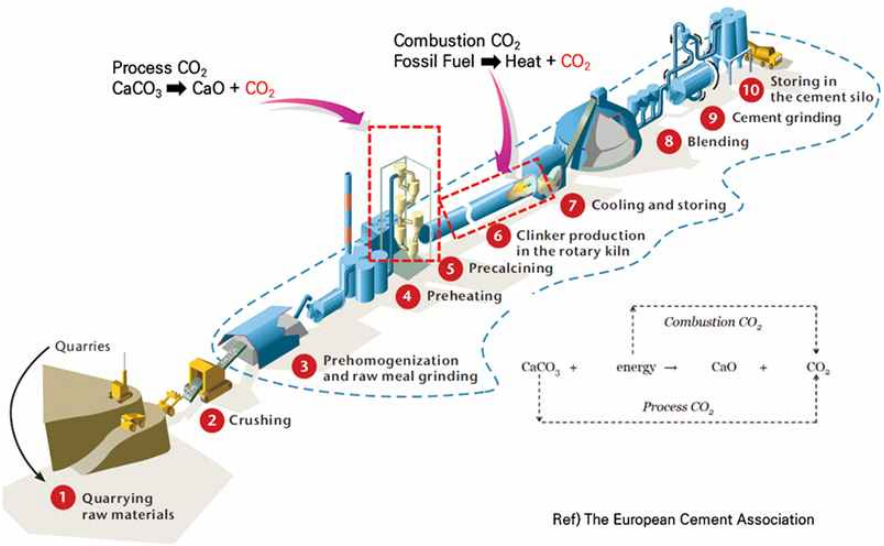


그림 2. 시멘트 산업의 CO_2 배출원

(출처 : Journal of Hydrogen and New Energy, 2024, 35, 249-256)

❖ 석회석 광산의 조기 폐쇄와 함께, 시멘트 산업과의 연계를 통한 광산의 재활용 방안은 온실가스 감축과 경제적 가치 창출을 동시에 도모할 기회를 제공함.

- 폐광산을 활용한 탄소 포집 및 저장(CCS) 기술과 복합 탄산염 기반 채움재 생산은 시멘트 산업의 CO_2 배출 저감과 더불어 광산의 환경 복원 및 경제 활성화에 이바지할 수 있는 전략으로 주목받고 있음.

❖ 이러한 맥락에서 본 연구는 석탄 및 석회석 폐광산을 활용한 온실가스 감축 방안을 종합적으로 모색하고자 함.

1-2. 연구목적

❖ 본 연구의 목적은 삼척시 관내 석탄 및 석회석 폐광산을 활용하여 온실가스를 효과적으로 감축하는 방안을 모색하는 것임.

- 이를 위해 폐광산의 현황을 파악하고, CO_2를 활용한 복합 탄산염 기반 채움재 생산 기술의 현황을 분석함.

- 국내외 사례를 통해 온실가스 감축 효과를 평가하고자 하며, 궁극적으로는 실질적인 온실가스 감축과 더불어 지역 경제의 재활성화 및 지속 가능한 발전에 이바지할 방안을 도출하는 것을 목표로 함.

2 삼척시 관내 석탄 및 석회석 폐광산 현황

2-1. 삼척시의 지리적 및 산업적 배경

❖ 삼척시는 강원도 동해안에 위치한 주요 도시로, 동해와 접해 있어 해양 자원과 풍부한 광산 자원을 보유하고 있음.

- 동해의 해양 자원과 산지의 광물 자원은 삼척시를 국가적으로 중요한 산업 도시로 만들었음. 삼척시는 해양 자원뿐만 아니라 광산 자원으로도 큰 가치를 지니고 있음. 이 때문에 삼척시는 오랫동안 석탄과 석회석 등 다양한 광물 자원의 채굴 중심지로 자리 잡아왔음.

- 석탄과 석회석 자원은 삼척시 경제의 중심축 역할을 하여, 광산 산업은 지역 주민의 생계를 책임지는 주요한 일자리 공급원이었음. 그러나 최근 들어 탄소 배출 감소 필요성과 지속 가능성에 대한 요구가 높아짐에 따라 이러한 산업 구조에도 변화가 요구되고 있음.

- 또한, 광산 채굴 과정에서 발생하는 환경 문제는 지역 사회와 생태계에 부정적 영향을 미칠 수 있음. 폐광산의 관리와 활용이 중요한 과제로 대두되고 있음. 삼척시의 산업적 배경을 고려할 때, 폐광산의 재활용 방안은 단순한 환경 복원을 넘어 새로운 산업적 가능성을 모색할 기회가 됨.

2-2. 주요 폐광산 현황

❖ 대한석탄공사가 운영하는 주요 석탄 광산은 화순, 장성, 도계 탄광이 있음. 이들 탄광은 석탄산업 장기계획에 따라 단계적으로 폐쇄되고 있으며, 각 광산은 고유의 특성과 현재 상황에 따라 환경 복원 및 경제적 활용 방안이 논의되고 있음.

- 화순, 장성, 도계 탄광은 모두 오랜 역사를 지닌 광산으로, 지역 경제에 깊은 영향을 미쳐왔음. 이들 광산이 폐쇄됨에 따라 지역 사회와 경제에 미치는 영향과 이를 극복하기 위한 정책적 지원이 중요함.

구분	개광연도	폐쇄 예정 연도	2023년 생산량	소재지
화순 탄광	1936년	2023년	67천톤	전라남도 화순군 동면 충의로 1064
장성 탄광	1936년	2024년	99천톤	강원도 태백시 태백로1889
도계 탄광	1934년	2025년	20천톤	강원도 삼척시 도계읍도계로 225

표 2. 주요 폐광산 현황
(출처 : 대한석탄공사(2023.12.31), "국내 탄광 현황")

❖ 화순 탄광은 전라남도 화순군에 위치한 광산으로, 화순 탄광은 고품질 석탄을 생산하며 지역 산업에 큰 역할을 해왔으나, 광산 노후화와 환경 문제로 2023년 폐쇄되었음.

- 현재 광산 부지에서는 환경 복원 프로젝트와 재활용 방안이 논의되고 있고, 복원 계획에는 토양 정화, 생태 복원, 재생에너지 부지 개발 등이 포함되어 있음.

❖ 장성 탄광은 2024년 폐쇄 예정으로, 열역학적 특성이 우수한 석탄을 생산해 온 광산으로, 다양한 산업에서 고부가가치 제품 생산에 필요한 자원을 공급해 왔음. 장성 탄광의 폐쇄는 지역 산업에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 중요한 결정이며, 이에 대한 사전 계획이 필수적임.

- 폐광 이후, 광산 내부의 구조 안정화가 중요한 과제로 대두되고 있음. 광산이 폐쇄된 이후에도 지반이 불안정해질 가능성이 있으므로 이를 대비한 기술적 대책이 필요함. 지반 보강, 붕괴 방지 구조물 설치, 지질 안정화 작업 등 다양한 방안이 논의되고 있음.

- 또한, 장성 탄광 부지를 활용한 재생 가능성이 높은 산업과의 연계를 고려 중임. 특히, 석회석 광산은 건축 자재 및 화학 산업에서의 수요가 높으므로, 폐쇄 이후에도 석회석 관련 자원을 재활용할 수 있는 방안이 유망함. 이를

통해 폐광 부지를 자원화하고 지역 경제에 기여할 수 있는 방향이 모색되고 있음.

❖ 도계 탄광은 2025년 폐쇄 예정으로, 지역 경제에 미치는 영향이 큼. 삼척 탄광이 폐쇄되면 지역 내 고용 및 경제 구조에 큰 변화가 예상됨.

- 삼척 탄광의 경우, 폐쇄 이후 환경 복원 외에도 다양한 온실가스 감축 기술의 도입이 필수적임. 온실가스 저감 기술과의 결합을 통해 환경적 가치를 극대화하는 방안을 고려 중임.

- 삼척 탄광 부지의 경우 현재 일부 복원 작업이 진행되고 있으며, 장기적으로 광산 폐쇄 이후에도 지속적인 관리와 기술적 지원이 필요함. 이를 위해 삼척시와 지역 사회는 폐광산 활용 및 복원 계획을 긴밀히 협력해 추진하고 있음.

2-3. 폐광산의 경제적, 사회적 영향

❖ 폐광산의 폐쇄는 지역 경제에 심각한 영향을 미침.

- 특히, 광산이 지역 주민의 주요 고용원이었던 경우, 폐쇄로 인한 실업 문제와 경제 침체가 우려됨. 폐광은 단기적으로 지역 경제에 부정적인 영향을 미칠 수 있으나, 장기적으로는 폐광산의 재활용을 통한 산업 다각화와 일자리 창출이 가능함.

- 폐광산의 환경 복원은 지역 주민의 삶의 질을 높일 기회를 제공함. 이를 통해 관광 산업 및 생태 관광 같은 새로운 경제적 기회를 창출할 수 있음. 또한, 지역 경제에 긍정적인 영향을 미칠 수 있음.

❖ 사회적으로도 폐광산의 폐쇄는 지역 공동체에 다양한 영향을 미침.

- 광산과 관련된 전통과 문화가 사라질 위험이 있으며, 광산과 관련된 역사와 문화의 보존은 지역 정체성을 강화하는 데 중요함. 폐광산 활용 프로젝트는 이러한 지역 정체성을 강화하고, 새로운 정체성 구축을 위한 기회를 제공할 수 있음.

- 또한, 폐광산 복원 사업은 지역 주민의 참여를 촉진하여 지역 사회와의 협력 관계를 형성할 수 있으며, 이를 통해 지속 가능한 지역 발전이 가능함.

2-4. 석회석 광산

❖ 삼척시에는 여러 석회석 광산이 운영 중이며, 대표적인 광산으로는 쌍용자원개발(주) 삼척사업소가 있음. 이 광산은 고품위의 석회석을 채굴하며, 시멘트 및 제철 산업에 중요한 원료를 공급하고 있음.

- 삼척시는 석회석 자원의 고부가가치화를 위해 석회석 신소재 산업화를 추진하고 있음. 2023년 2월부터 '삼척시 석회석 산업화 추진 기본계획 용역'을 진행하여, 석회석의 물리·화학적 특성을 분석하고 신소재 산업으로 육성하는 방안을 모색하고 있음. 이를 통해 일자리 창출과 지역 경제 활성화를 도모하고 있음.

- 일부 지역에서는 석회석 광산 개발로 인한 환경 문제와 주민 반발이 발생하고 있음. 특히 도계읍 마교리 지역에서는 신규 석회석 광산 채굴 추진에 대해 주민들이 환경 피해와 지역 이미지 훼손을 우려하며 반대하고 있음.

2-5. 현재의 환경 복원 상태

❖ 폐광산의 환경 복원은 생태계 회복과 주민 건강 보호를 위해 필수적임.

- 현재 삼척시의 폐광산 부지에서는 다양한 환경 복원 프로젝트가 진행 중임. 광산 부지 내 오염물질 제거, 수질 개선, 식생 복원, 생태계 회복을 위한 복원 작업은 장기적인 관점에서 지속 가능성을 확보하기 위한 필수적 과정임.

- 특히, 폐광산 내 잔존 오염물질을 제거하는 작업은 지역 주민의 건강 보호와 생태계 보전을 위해 중요한 작업임. 토양 오염과 수질 오염 방지를 위한 다양한 기술들이 도입되고 있으며, 복원 작업이 완료된 후에도 지속적인 모니터링과 관리가 필요함.

❖ 환경 복원 외에도 폐광산 부지의 재활용 방안도 함께 고려되고 있음.

- CO_2를 활용한 채움재 생산 기술이 주목받고 있음. 채움재 생산 기술은 폐광산에서 생성되는 이산화탄소를 활용해 다양한 산업에 필요한 자원으로 전환하는 기술로, 이를 통해 온실가스 배출을 줄이면서도 경제적 가치를 창출할 수 있음.

- 이러한 기술의 도입은 환경 복원과 더불어 지역 경제에 새로운 가치를 창출할 기회를 제공하며, 삼척시와 지역 사회는 이와 관련된 다양한 재활용 방안을 검토 중임.

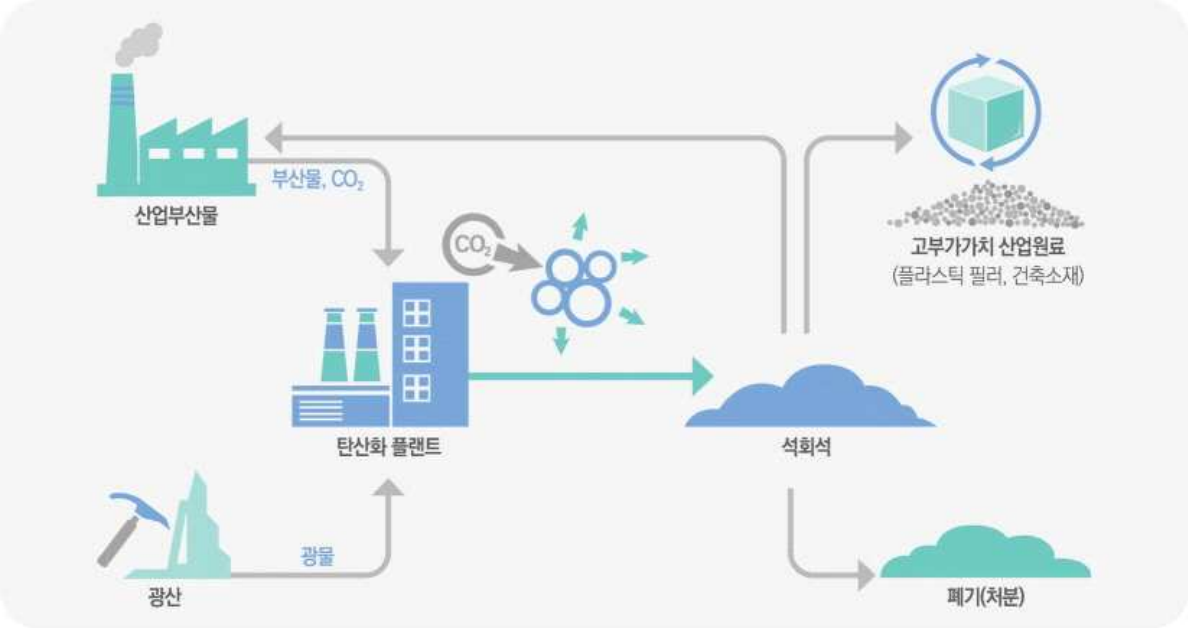


그림 3. 광물 탄산화 기술

(출처 : 한국지질자원연구원(2023.01.13), "탈황석고를 활용한 광물 탄산화 기술")

❖ 석회석 폐광 자원화·지원특례화 방안 추진

- 강원도 남부 지역은 국내 석회석 매장량의 80%를 차지하며, 석회석 산업은 국가 경제 발전에 크게 기여해 왔으나, 최근 휴·폐광산 증가로 자원화와 복구가 주요 과제로 떠오르고 있음.

- 석회석 폐광지의 고부가가치 산업화를 위해 자원 재활용과 대체 산업 발굴이 필요하며, 저품위·폐석 자원화, 관광·바이오산업 육성, 탄소중립화 기반 조성 등이 구체적인 방안으로 제안되고 있음.

- 국내 사례로는 폐광지를 관광지로 전환하여 성공적인 경제 효과를 거둔 동해시의 사례가 있으며, 해외 사례로는 캐나다와 프랑스의 창조적 활용 사례가 있음. 이를 벤치마킹해 강원도 석회석 폐광지역의 지속 가능한 발전 전략을 마련해야 한다는 점이 강조되고 있음.

3 복합 탄산염 기반 폐광산 채움재 생산기술 현황

3-1. 탄소 포집 및 저장(CCS) 기술 개요

❖ 탄소 포집 및 저장(CCS, Carbon Capture and Storage) 기술은 산업 공정이나 발전소에서 배출되는 이산화탄소(CO_2)를 포집하여 지하 깊은 곳에 안전하게 저장하는 기술임. CCS 기술은 2024년 현재, 전 세계적으로 연간 약 4,500만 톤의 CO_2를 저장할 수 있는 용량을 가지고 있으며, 향후 2030년까지 연간 약 1억 2천만 톤 이상을 저장하는 것을 목표로 기술 개발이 가속화되고 있음.

- CCS는 온실가스 배출을 줄이기 위한 핵심 수단으로 대규모 배출원에서 활용될 가능성이 크며, 산업 공정에서 발생하는 CO_2의 약 90%까지 포집할 수 있는 효율을 목표로 하고 있음.

- CCS 기술은 탄소 포집, 탄소 운송, 탄소 저장의 세 단계로 나뉘며, 각각의 단계에서 다양한 특화 기술들이 요구됨.

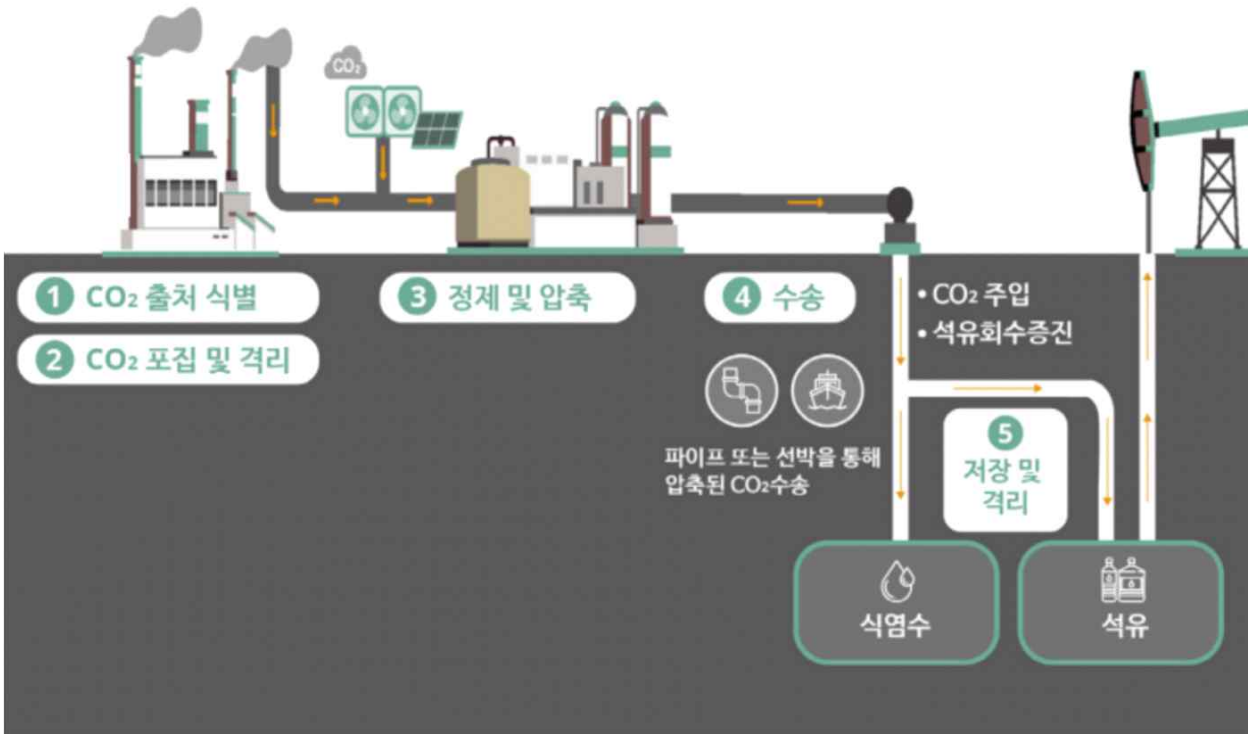


그림 4. 탄소 포집 및 저장(CCS) 기술

(출처 : 유엔 유럽 경제 위원회, "Carbon Capture, Use and Storage (CCUS)")

❖ 산업 공정에서 배출되는 CO_2를 포집하는 단계로, 화학적 흡수(예: 아민 흡수), 물리적 흡수, 분리막 등을 이용하여 CO_2를 분리하고 순도 높은 형태로 확보함. 현재 포집 비용은 톤당 약 40~120달러로 다양한 변수에 따라 다르게 책정됨. 아민 흡수법의 경우, 효율적이지만 대규모 시설에 적합하여 발전소, 제철소 등에 적용됨.

❖ 포집된 CO_2를 저장 장소로 운송하는 단계로, 주로 파이프라인과 선박을 통해 이루어짐. 파이프라인은 대규모 CO_2를 안정적으로 운송하는 데 적합하며, 주로 1,000km 이상 거리까지도 사용 가능함. 2024년 현재 전 세계적으로 CO_2를 운송하는 파이프라인의 총 길이는 약 8,000km에 달함.

❖ 운송된 CO_2를 지하 깊은 암석층이나 염수층에 주입하여 장기적으로 저장함. 저장 장소는 일반적으로 지하 1,000m 깊이의 층으로, CO_2를 안전하게 가두기 위해 지질적 안정성이 높은 장소가 선호됨. 저장 비용은 약 톤당 25달러로 책정되며, CO_2의 영구적 고정을 위해 추가 연구가 진행 중임.

❖ CCS 기술은 온실가스 감축에 효과적이지만, 높은 비용과 기술적 어려움, 저장 안전성 등의 문제로 인해 아직 상용화 단계에 도달하지 못한 경우가 많음. 2024년 현재 CCS 시설 운영 비용은 톤당 약 60~100달러로, 온실가스 배출권 가격이 높아야 경제성을 갖출 수 있음.

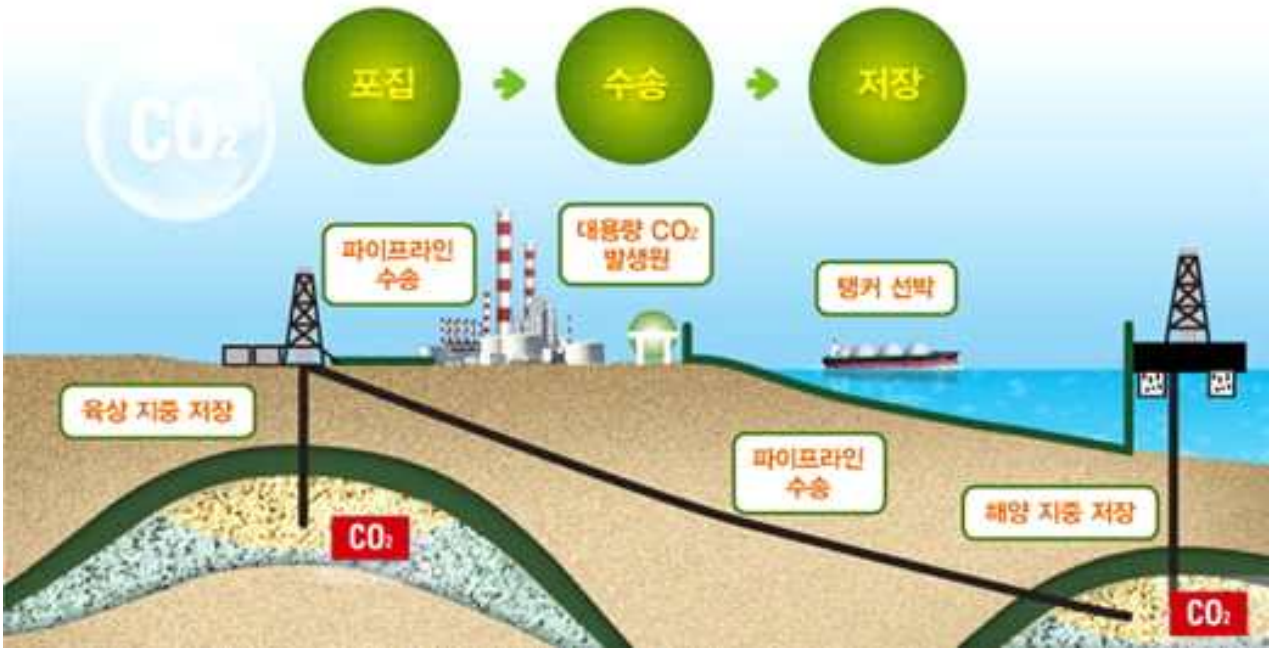


그림 5. 육상 지중 저장 및 해양 지중 저장 개요
(출처 : 한경BUSINESS(2012.10.23.), "이산화탄소 포집·저장 기술")

❖ 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 연구와 개발이 진행 중이며, 특히 폐광산을 활용한 CCS 기술은 비용 절감과 안전성 측면에서 유망한 방안으로 주목받고 있음.

3-2. 폐광산 채움재의 개념 및 필요성

❖ 폐광산 채움재는 폐광산 부지를 활용하여 CO_2를 고정시키는 물질로, 주로 탄산염 화합물을 이용함. 이는 CO_2를 안정된 형태로 저장하고 광산의 구조적 안정성을 높이는 데 중요한 역할을 함.

- 폐광산을 채움재로 활용할 필요성은 온실가스 감축, 광산 복원, 자원 재활용, 지속 가능한 발전 등 다양한 이유에서 비롯됨.

- 채움재는 환경 복원뿐만 아니라 폐광산 공간을 안전하게 채우고 지반을 안정화하는 효과를 가지므로, 산업적 및 환경적 측면에서 주목받고 있음.

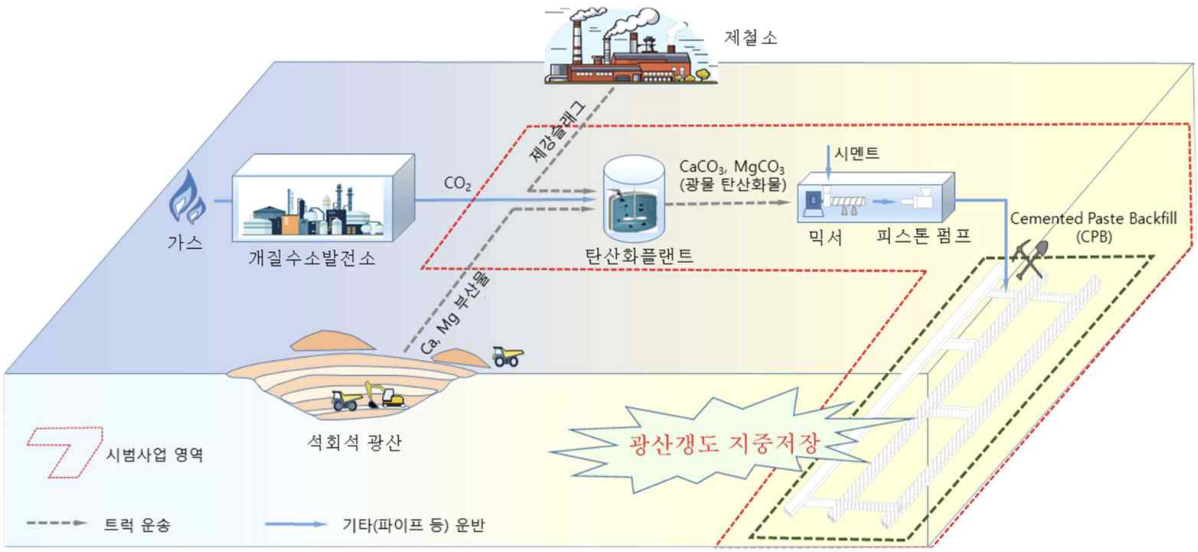


그림 6. CO_2 포집-탄산화-지중 저장의 공정
(출처 : 산업통상자원부장관, "폐갱도를 활용한 이산화탄소 육상저장 시범사업")

❖ 폐광산 채움재는 CO_2를 안정적으로 고정하여 대기 중으로의 배출을 줄이며, 기후 변화 완화에 기여함. 예를 들어, 삼척시의 폐광산 한 곳에 채움재를 사용하면 연간 약 5만 톤의 CO_2를 고정할 수 있음. 이는 연간 승용차 약 1만 대가 배출하는 CO_2를 상쇄하는 것과 같음.

❖ 폐광산의 빈 공간을 채움재로 메우면 광산의 구조적 안정성을 확보할 수 있음. 채움재 주입을 통해 광산 붕괴 방지 및 안전성을 개선할 수 있으며, 광산 붕괴 방지와 같은 안정화 작업에 드는 비용을 약 30% 절감할 수 있음.

❖ 폐광산 내 자원을 재활용하여 연간 약 20억 원 이상의 경제적 가치를 창출할 수 있음. 폐광산 부지의 자원은 채움재를 통해 순환 재활용되며, 지역 내 산업에도 경제적 이점을 제공함.

❖ 폐광산을 활용하여 지역 경제와 환경의 균형을 맞춤으로써 지역 주민의 경제적 안정성과 환경 보호를 동시에 도모할 수 있음.

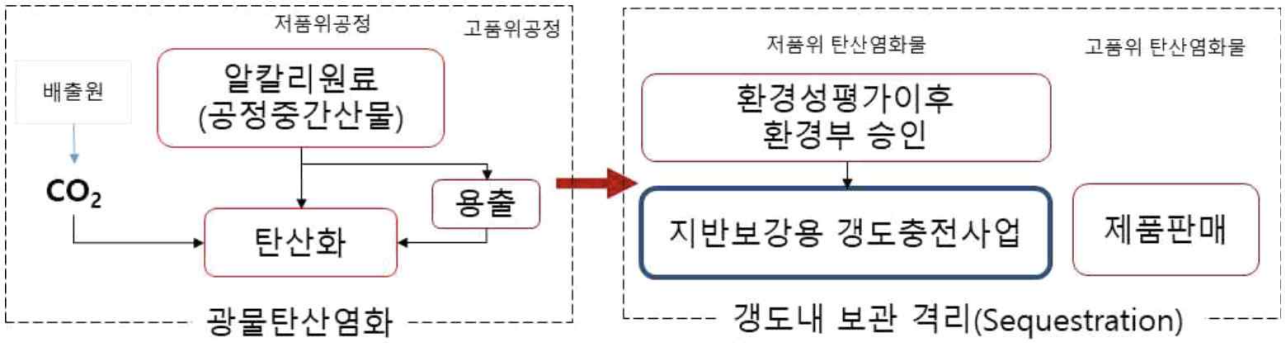


그림 7. 탄산칼슘, 탄산마그네슘으로 탄산염화 및 고체화 방안
(출처 : 산업통상자원부장관, "폐갱도를 활용한 이산화탄소 육상저장 시범사업")

❖ 이산화탄소(CO_2)를 탄산칼슘($CaCO_3$)과 탄산마그네슘($MgCO_3$)으로 탄산염화 및 고체화하여 안정적으로 저장하는 기술을 실증함. 이를 통해 탄소중립 목표 달성을 위한 안정적 탄소 저장 기술을 확보하고자 함.

- 폐광 예정 광산 및 기존 폐광산을 우선 대상으로 지하 유휴공간을 CO_2 육상 저장소로 활용하는 방안을 추진함. 광산의 특성을 활용하여 탄소를 장기적으로 안전하게 저장하고, 기술 실증을 통해 상용화를 위한 기반을 조성하고자 함.

- 광산의 지하 유휴공간을 활용함으로써 비용 효율적이고 지속 가능한 탄소 저장이 가능함. 이 기술은 폐광 지역의 새로운 활용 방안을 제시하며, 환경 복구와 경제적 활용을 동시에 달성할 가능성을 열어줌. CCUS 기술의 실증화는 탄소중립 목표 달성을 위한 산업 생태계 구축에도 기여할 수 있음.

4 폐광산 채움재를 활용한 온실가스 감축 사례 및 효과

4-1. 국내 온실가스 감축 사례

❖ 국내에서는 폐광산을 활용한 CO_2 기반 채움재 생산 프로젝트가 점차 확대되고 있으며, 주요 기업들이 다양한 기술을 적용해 온실가스 감축에 기여하고 있음.

- 포스코는 탄소 포집 및 저장(CCS) 프로젝트를 통해 폐광산을 활용하여 연간 약 2,000톤의 CO_2를 감축하고 있음.
- 포스코는 최신 탄소 포집 설비를 구축하고, 이 설비를 통해 배출된 CO_2를 폐광산 부지에 주입하여 안전하게 저장함.
- 이를 통해 탄소 배출권 거래에서 연간 약 6천만 원 이상의 수익을 창출할 수 있음.
- 대한석탄공사는 삼척시의 폐광산을 대상으로 다양한 연구 프로젝트를 진행 중이며, CO_2 기반 채움재 생산 기술 개발에 주력하고 있음.
- 이 기술은 폐광산의 안정성을 확보하면서 연간 약 3,500톤의 CO_2를 저장할 수 있도록 설계되어 있으며, 향후 상용화될 경우 국내 온실가스 감축 목표 달성에 큰 기여를 할 것으로 평가됨.
- 이러한 프로젝트는 기술적, 경제적 타당성을 검증하고 상용화 가능성을 높이기 위한 중요한 단계로 여겨지고 있음.

4-2. 해외 온실가스 감축 사례

❖ 해외에서는 이미 다양한 CCS 및 폐광산 활용 프로젝트가 진행되고 있으며, 각국의 대표적인 온실가스 감축 사례로 자리 잡고 있음.

- 노르웨이의 Sleipner 프로젝트는 북해 유전에서 발생하는 CO_2를 해저 지층에 주입하여 연간 약 100만 톤의 CO_2를 저장하고 있음. 이 프로젝트는 1996년부터 시작되어 현재까지 성공적으로 운영 중이며, CCS 기술의 성공

적인 적용을 통해 다른 국가들의 벤치마크로 자리 잡음. 연간 약 150억 원에 달하는 경제적 효과를 창출하며, 유럽 탄소 시장에서 지속적으로 경제적 가치를 확보하고 있음.

프로젝트	주요 특성
호주 Gorgon 프로젝트	• 2016년에 시작된 Gorgon 프로젝트는 세계에서 가장 큰 규모의 단일자원 프로젝트임. • 천연가스를 호주 서북부 해안에 위치한 The Greater Gorgon Area에서 바로우섬까지해저 파인프라인으로 수송한 후 천연가스 속 CO_2를 분리 · 포집하여 해저 2.3~2.5km 아래의 전용 지중저장소에 주입
캐나다 Quest	• Quest는 2015년 11월 상업 운영 시작, 연간 CO_2 포집 규모는 1.3백만톤임. • 정유 플랜트의 수소생산설비(SMR)에서 CO_2를 포집하며, 수명 기간(25년) 동안 예상되는 누적 저장 규모는 27백만톤임.
캐나다 Boundary DamCCS	• 사스크파워는 바운더리댐 발전소 3호기에서 CO_2 포집 설비 운영 • 2015년 이후 도입되는 신규 석탄발전기에 대한 배출 규제 기준 420톤CO_2/GWh 미만 준수를 위해 2014년 1백만톤 포집 규모로 완공
노르웨이 Sleipner CO_2 Storage	• Sleipner 프로젝트는 가스전 Sleipner East와 Sleipner West에서 생산된 가스에서 CO_2를 분리하여 해저 파이프라인을 통해 해저 1,000m 이상 아래의 주입 지점까지 약 12.5km 수송됨. • CO2 포집 규모는 연간 0.85백만톤~1백만톤 정도이며, 1996년부터 운영 중
카타르 LNG CCS	• 카타르 LNG CCS 프로젝트는 아랍 지층 지중저장소에 가스를 주입하며, GCCSI(2022)는 포집 규모를 2.2백만톤으로 보고하고 있음
미국 Shute Creek Gas Processing Plant	• 1986년 시작된 LaBarge 유전에서 생산된 천연가스는 Shute Creek 처리 시설에서 처리되어 CO_2, 메탄, 헬륨으로 분리되어 가스가 생산된 저장소에 주입함
미국 Great Plains Synfuels Plant	• 노스다코타에 위치한 Great Plains 합성연료 플랜트는 저품질 석탄인 갈탄을 가스화하여 메탄을 생산함. • Dakota Gas는 연간 최대 3백만톤 규모의 CO_2 포집 설비를 운용 중
미국 Century Plant	• Century Plant 가스 처리 시설은 북미 최대 규모의 단일 산업용 CO_2 포집 시설임. • 최대 65%의 CO_2를 함유한 천연가스를 처리한 후, 100마일 길이의 수송 파이프라인을 통해 EOR을 위해 CO_2를 공급
미국 ADM	• 에탄올 발효 공정에서 고농도의 CO_2를 포집, 탈수, 압축하는 시설 운영 • ADM은 미 EPA로부터 클래스 VI CCS 주입정 허가를 받은 첫 번째 회사로서 포집한 CO_2를 수송하여 사암 염분 저류층에 주입.

표 3. 주요 CCS 프로젝트

(출처 : 세계 에너지시장 인사이트(2024.09.30.), "세계 CCS 정책 동향 및 시사점")

- 미국 펜실베이니아 주의 폐광산 활용 CO_2 저장 프로젝트는 연간 약 5만 톤의 CO_2를 저장하고 있으며, 상용화를 목표로 진행되고 있음. 미국에서는 이와 같은 폐광산 활용 CO_2 저장이 연간 수천 톤의 CO2를 감축할 수 있는 중요한 사례로 평가되고 있음.

- 호주와 캐나다 또한 폐광산을 활용한 CO_2 저장 프로젝트를 활발히 추진 중이며, 연간 수십만 톤의 CO_2를 안정적으로 저장함. 특히 캐나다의 Boundary Dam 프로젝트는 연간 약 100만 톤의 CO_2를 감축하고 있으며, 이를 통해 약 250억 원에 달하는 경제적 효과와 탄소 배출권 거래 이익을 창출하고 있음.

4-3. 온실가스 감축효과 분석

❖ 폐광산을 활용한 CO_2 저장 및 채움재 생산은 온실가스 배출을 직접적으로 줄일 뿐만 아니라 간접적인 감축 효과도 제공하여 다양한 측면에서 긍정적 효과를 기대할 수 있음.

❖ 폐광산을 활용한 CO_2 저장은 CO_2가 대기로 배출되는 것을 직접적으로 방지하는 효과가 있음.

- 삼척시의 폐광산을 채움재로 활용할 경우 연간 약 5,000톤의 CO_2를 감축할 수 있음. 이는 승용차 약 1만 대가 배출하는 CO_2와 동일한 양이며, 한국의 온실가스 감축 목표 달성에도 기여함.

- CO_2 저장을 통해 발생한 탄소 배출권을 거래하면 연간 약 1억 원 이상의 경제적 혜택을 창출할 수 있음.

❖ 폐광산 활용은 재생에너지 사용 확대와 광산 복원을 통한 생태계 회복 등의 간접적 감축 효과도 기대할 수 있음.

- 폐광산에 CO_2 채움재를 주입함으로써 지반 안정성이 확보되면, 이후 태양광 패널과 같은 재생에너지 설비를 설치하기 용이해짐. 예를 들어, 폐광산 부지에 태양광 발전을 설치하면 연간 약 2천 톤의 CO_2 감축 효과를 추가로 기대할 수 있음.

- 광산 복원을 통해 생태계가 회복되면, 복원된 지역의 자연 탄소 흡수 능력

이 향상되어 장기적인 온실가스 감축에 기여할 수 있음. 복원된 삼림과 토양은 연간 약 300톤의 CO_2를 추가 흡수할 수 있는 효과를 가짐.

4-4. 경제적, 환경적 혜택

❖ 폐광산을 활용한 온실가스 감축은 경제적, 환경적 측면에서 다양한 혜택을 제공함.

❖ CO_2 저장을 통해 확보된 탄소 배출권을 거래하여 경제적 수익을 창출할 수 있음. 예를 들어, 삼척시 폐광산을 통해 연간 약 5,000톤의 CO_2를 감축하면 약 1억 5천만 원의 경제적 수익이 발생할 수 있음.

- 폐광산 활용 프로젝트는 CO_2 포집 및 저장 설비 구축과 운영 인력이 필요하며, 이를 통해 지역 내 100여 개의 신규 일자리가 창출될 수 있음.

- CCS 기술 및 채움재 생산 기술 발전을 통해 관련 산업의 기술 혁신을 촉진할 수 있으며, 이는 국내외 탄소 감축 산업의 경쟁력을 높이는 데 기여함.

❖ CO_2를 지하에 직접적으로 저장함으로써 대기 중으로 배출되는 온실가스양을 줄이는 직접적인 환경적 혜택을 제공함.

- 광산 복원을 통해 삼림 및 토양 생태계가 회복되며, 이는 지역 생태계를 복원하고 자연적인 탄소 흡수 능력을 향상시키는 긍정적 효과를 기대할 수 있음. 복원된 삼림은 연간 약 400톤의 CO_2를 추가로 흡수할 수 있음.

- 광산 부지의 환경 복원 작업을 통해 토양과 수질 오염을 줄일 수 있으며, 이는 지역 주민의 건강과 안전을 도모함.

4-5. 한계점 및 개선 방안

❖ 폐광산을 활용한 온실가스 감축 방안은 많은 장점을 제공하나, 여전히 여러 한계점이 존재하며 이에 대한 개선이 필요함.

❖ 현재의 CCS 기술은 높은 비용과 많은 에너지가 필요하며, 장기적인 CO_2 저장 안정성에 대한 불확실성이 있음. 예를 들어, 상용화된 CCS 설비의 톤당 CO_2 포집 비용은 약 80달러에 달해 경제적 부담이 큼.

- 이를 해결하기 위해 기술 개발과 효율성 향상이 필요함. 신소재 사용, 포집 효율 개선 등 기술적 연구를 통해 비용 절감과 에너지 효율 향상을 추구해야 함.

❖ 초기 투자 비용이 많이 들며, 경제적 혜택이 즉각적으로 나타나지 않는 경우가 많음. 삼척시 폐광산 CCS 프로젝트의 초기 투자 비용은 약 200억 원으로, 경제적 타당성을 확보하려면 지속적인 정부 지원이 필요함.

- 정부의 재정 지원과 민간 투자를 유치하고, 탄소 배출권 거래제 등의 경제적 인센티브 강화가 필요함.

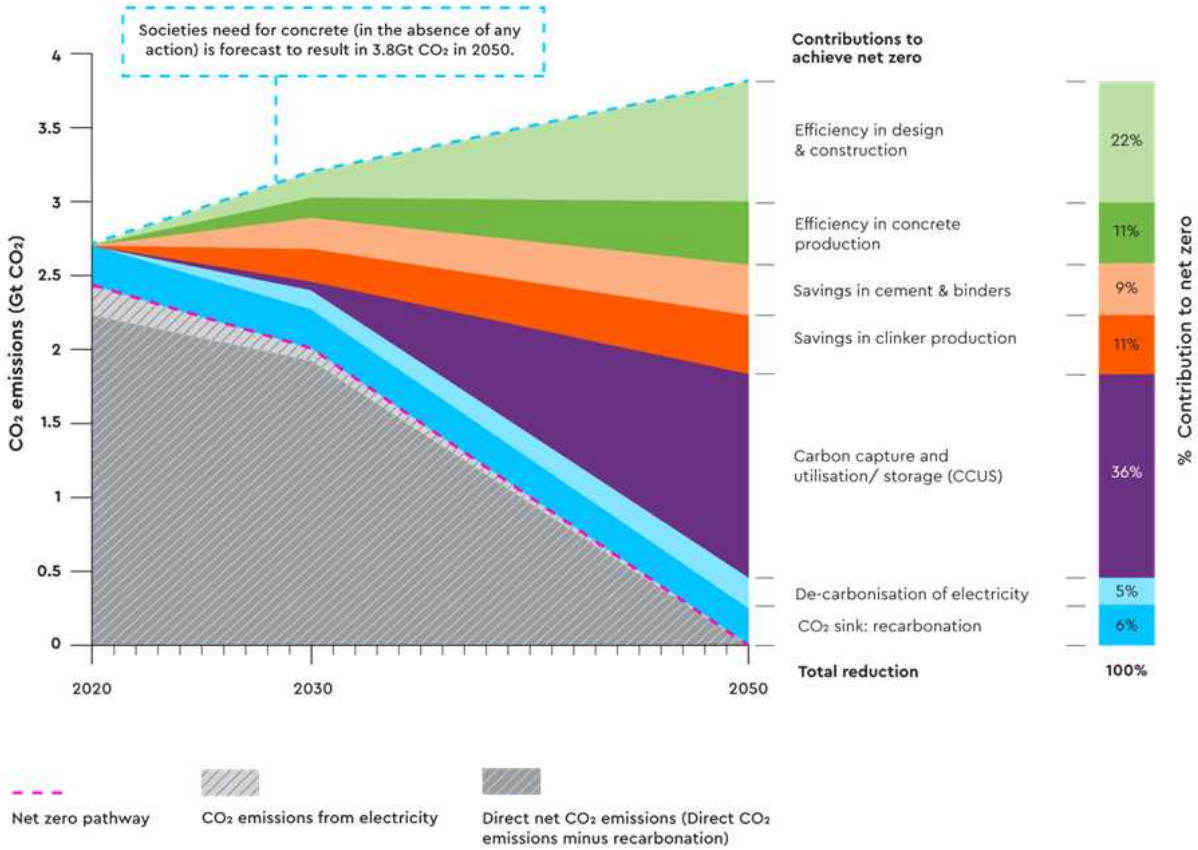


그림 8. 5C 전략별 목표감축량

(출처 : 글로벌시멘트-콘크리트협회(GCCA), "5C 전략별 목표감축량")

❖ 지역 주민의 이해 부족과 참여 부족으로 인해 프로젝트 성공 가능성이 저하될 수 있음. 이를 해결하기 위해 지역 주민과의 적극적인 소통과 투명한 정보 공개가 필요함.

- 주민 설명회, 교육 프로그램 등을 통해 지역 주민의 참여를 독려하고, 프로

젝트 진행 과정에서의 고용 기회 확대 등을 통해 긍정적 여론을 조성함.

❖ 현재의 법적 규제 체계는 폐광산 활용 프로젝트를 충분히 지원하지 못함. CO_2 저장을 위한 규제 승인이 복잡하고 시간이 오래 걸림.

- 규제 완화와 제도적 개선이 필요하며, 정부는 신속한 프로젝트 진행을 지원할 수 있는 법적 프레임워크를 마련해야 함.

5 결론

- ❖ 석탄 및 석회석 폐광산은 단순히 산업 유산으로 남는 것이 아니라, 온실가스 감축을 위한 핵심 자원으로 활용될 수 있음.
- ❖ 폐광산 내부의 공간을 활용하여 탄소 포집 및 저장(CCS) 기술을 적용하면 연간 수천 톤의 CO_2를 안정적으로 고정할 수 있음.
- ❖ 복합 탄산염 기반 채움재 생산 기술은 폐광산을 통해 CO_2를 안정된 형태로 저장하며, 환경 복원과 온실가스 감축이라는 두 가지 목표를 동시에 달성함.
- ❖ 삼척시 폐광산을 활용한 CO_2 저장은 연간 약 5,000톤 이상의 CO_2를 감축할 수 있는 잠재력을 가짐. 이는 승용차 약 1만 대의 연간 CO_2 배출량을 상쇄할 수 있는 수준임.
- ❖ 폐광산 활용을 통해 생성된 탄소 배출권 거래로 연간 약 1억 원 이상의 경제적 이익을 창출하며, 이는 지역 경제 활성화에 기여함.
- ❖ 복원된 폐광산 부지는 추가로 태양광, 풍력 등 재생에너지 시설 설치에 활용될 수 있으며, 이를 통해 간접적인 온실가스 감축 효과도 기대할 수 있음.

< 참 고 문 헌 >

- 산업통상자원부. (2021). 제6차 석탄산업 장기계획: 2021~2025.
- 산업통상자원부장관. 폐갱도를 활용한 이산화탄소 육상저장 시범사업.
- 대한석탄공사. (2023). 폐광산 관리 보고서.
- 강원남부 석회석 폐광지역들. 폐광 자원화·지원특례화 방안 추진. (2024).
- 포스코. (2022). 탄소 포집 및 저장 프로젝트 보고서.
- Norwegian Petroleum Directorate. (2023). Sleipner CO2 Storage Project.
- 한국환경공단. (2023). 폐광산 복원 및 활용 방안 연구.
- International Energy Agency (IEA). (2022). Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) in Industry.
- 유엔 경제 위원회 (UNECE). Carbon Capture, Use and Storage (CCUS).
- 김영희, 이철수. (2022). 폐광산 활용을 통한 온실가스 감축 방안 연구. 환경과학 저널, 35(2), 123-145.
- 에너지경제연구원. (2024). KEEI 2024년 에너지수요전망.
- FreeingEnergy. Energy Fact – Comparing CO2, SO2, NOx, and methane across coal, natural gas and biomass.
- 대한석탄공사. (2023). 국내 탄광 현황.
- 한국지질자원연구원. (2023). 탈황석고를 활용한 광물 탄산화 기술.
- 세계 에너지시장 인사이트. (2024). 세계 CCS 정책 동향 및 시사점.
- 글로벌시멘트-콘크리트협회(GCCA). 5C 전략별 목표감축량.