

Benchmarking and Impact Analysis of Carbon Abatement Technologies

Regulatory Pressure and Strategic Motivations Drive the Adoption of Carbon Emissions Mitigation Technologies Across Industries

탄소 저감 기술 사례 및 영향

규제 압력과 전략적 동기가 산업계 전반에 걸쳐 이산화탄소 배출 감축을 수용하도록 만들고 있다.

Frost & Sullivan

Contents

I. Executive Summary	225
II. 탄소 감축 필요성	225
III. 정유·가스 산업의 탄소 감축	226
IV. 시멘트 산업의 탄소 감축	228
V. 철강 산업의 탄소 감축	230
VI. 기술 조망	232
VII. 통찰	233

I. Executive Summary

인구 증가, 삶의 질 향상, 경제 확대 간 복잡한 상호작용의 직접적 결과로 이산화탄소의 발생 및 배출은 지속적으로 증가해 왔다. 이는 대기 중 이산화탄소의 절대 농도와 연간 증가율을 통해 명확하게 확인할 수 있다. 기후변화는 여러 분야의 이해관계자들에게 폭 넓은 우려를 가져왔으며, 기후변화 대응이 정부의 모든 조직에서 중요한 정책적 요소가 되면서 강력한 규제 정책이 구축되었다. 따라서 이산화탄소 발생을 줄일 필요성, 특히나 산업 분야의 배출을 줄이는 것이 21세기 가장 중요한 과학 및 기술적 도전이 되고 있다.

많은 이해관계자는 저탄소 경제로의 전환을 폭 넓게 추구하고 있다. Frost & Sullivan은 본 연구에서 저탄소 경제로의 전환에 도움이 되는 다양한 기술을 이해하기 위해 여러 기술을 조망한다. 기술 전망은 투입 공정, 중간 공정, 배출 공정의 세 단계에 걸쳐 수행된다. 이 세 단계에 걸쳐 에너지원 대체, 공정 혁신, 에너지 절약, 이산화탄소 포집·저장 등의 기술을 살펴본다. 현재와 향후 진행 경과를 이해하기 위해 정유·가스, 철강, 시멘트 산업 분야의 주요 이해관계자들이 수용한 핵심적 이산화탄소 감축 목표와 사례를 살펴본다.

- 산업 분야별 배출 구분
- 이산화탄소 감축 기술의 선택 방법

- 산업 분야별 이산화탄소 감축 목표
- 핵심 이해관계자들의 이산화탄소 감축 목표 및 사례
- 기술 전망
- 이산화탄소 감축 기술 벤치마킹

II. 탄소 감축 필요성

① 산업계의 탄소 감축 필요성

지구 온난화

산업계의 지속적인 이산화탄소 배출이 기후변화에 큰 영향을 끼치면서 기온 상승, 강우 및 강설 형태의 변화, 폭풍, 폭염, 홍수 등의 극단적 날씨 변화 등을 가져왔다. 지구 온난화를 야기한 이산화탄소 배출을 줄임으로써 우리는 이런 위험과 극단의 가능성을 줄이고 더 나은 미래를 만들 수 있다.

Article Information

이 보고서는 Frost & Sullivan이 2020년 3월 발간한 "Benchmarking and Impact Analysis of Carbon Abatement Technologies"를 Frost & Sullivan의 허가를 받아 한국전력공사가 번역 및 게재합니다. Frost & Sullivan과 한국전력공사는 원문 또는 한국어판의 저작권을 보유합니다. 한국전력공사와 Frost & Sullivan은 본 원고에 포함된 내용 또는 번역의 정확성을 보장하지 않습니다.

깨끗한 공기

이산화탄소는 지구 생명체에 다양한 만성적 질병을 일으키는 공기 오염물질 대부분을 차지하고 있다. 국제보건기구WHO의 연구에 따르면 지구 온난화를 일으킨 이산화탄소 배출의 유해한 영향을 줄임으로써 2100년까지 매년 3백만명에 이르는 조기사망을 방지할 수 있을 것이다.

지속가능한 사업

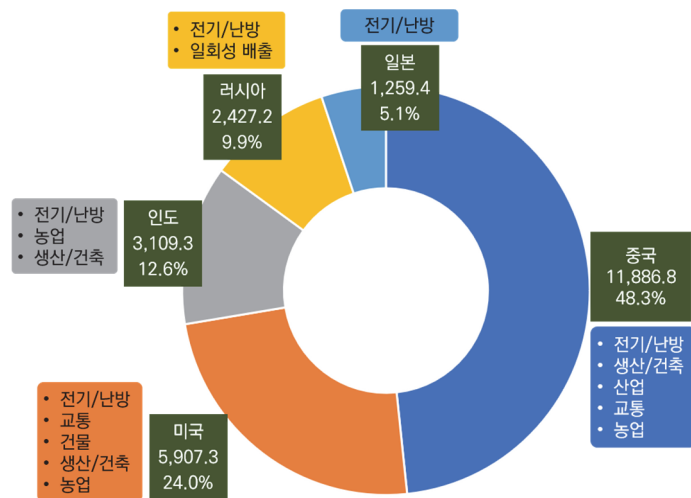
이산화탄소 배출을 관리함으로써 오늘날 기업이 처한 경쟁적 환경에서도 사업이 장기적으로 성공할 수 있다. 대형 정유·가스 기업은 이미 기술 투자 및 에너지원 다양화, 기업 내부의 기후변화 대응 목표, 환경 위험 평가 프로그램 등을 시작하였다.

에너지 효율

이산화탄소 배출을 줄이는 것은 소규모 또는 대규모로 에너지 효율을 개선한다. 또한 더 나은 단열, 효율 높은 보일러 및 장비, 난방 제어, 스마트 센서를 사용하는 효율적 조명 등을 통해 여러 산업 분야에 기회를 제공한다. 여기서 말한 기회란 이산화탄소 배출 저감과 에너지 효율 개선의 결합을 의미한다.

탄소 배출량의 반을 차지하는 5개 국가

전세계 이산화탄소 배출량은 46,141 Mt·CO₂로 중국, 미국, 인도, 러시아, 일본이 58% 이상을 차지하고 있다. 이 중 상당량은 석탄 의존에 기인한다. 또한 이 지역은 전세계 인구와 GDP에서 상당한 비율을 차지한다. 카타르나 호주 같은 국가는 가장 높은 1인당 이산화탄소 배출량을 기록하고 있다.



[2017년 이산화탄소 배출 상위 5개국 (단위: Mt CO₂Eq)]

산업 분야의 단계별 이산화탄소 감축 기회

에너지 및 재료 준비

- 저탄소 연료로 전환
- 전력, 냉난방용 에너지를 재생에너지로 전환
- 원재료 변경 - 재생품 사용, 다른 재료의 사용

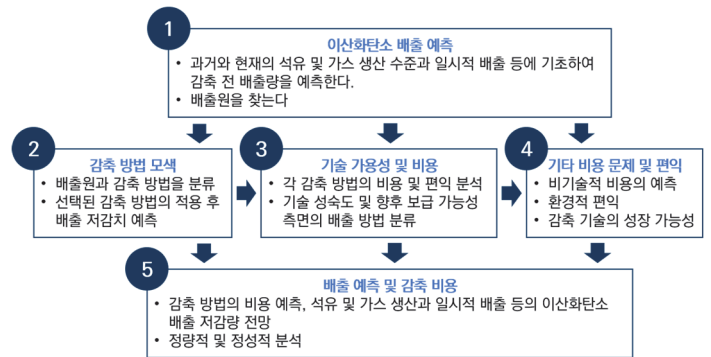
공정 혁신

- 에너지 효율 개선을 위한 공정 개선 및 변경
- 배출 저감을 위한 공정 변경

배출 관리

- 배출된 이산화탄소를 제품으로 만들거나, 지질학적 구조물에 장기 저장을 위한 포집, 활용 및 저장 기술의 채택

이산화탄소 감축 기술의 선택 방법



III. 정유·가스 산업의 탄소 감축

배출원 특징 및 배출량

이산화탄소 말고도 정유·가스 산업에서 배출되는 메탄의 배출량은 2017년 80 Mt (이산화탄소로 환산할 경우 24억톤)으로, 전세계 온실가스 총배출량의 15%를 차지한다. 석유 및 가스를 이용하는 에너지원의 단위 에너지당 직접 배출되는 이산화탄소 양이 석탄에 비해 20-30% 적기는 하지만, 간접적으로 배출되는 온실가스는 이산화탄소로 환산하여 52억톤이라는 매우 많은 양이다. 전세계 석유 생산에서 발생하는 간접적 메탄 및 이산화탄소 배출집약도 Emission Intensity는 주로 정유, 원유 수송, 플레어, 원유 채굴에

사용되는 에너지 등에 기인한다. 가스 산업의 간접적 배출집약도는 주로 원료의 처리 및 소비에서 발생하는 메탄, 파이프 누설, 이산화탄소 배출, 가스 채굴에 사용되는 에너지 등에 기인한다.

[역주] 플레어: 정유 과정에서 나오는 폐가스 연소

정유·가스 산업의 메탄과 이산화탄소 배출원은 다음과 같다.

배출 형태	배출원
연료 연소의 배기 과정	압축기, 가열기 및 기타 보조 기기
배기	배가스의 배출 장치
플레어	유정 최종 작업 및 가스흐름 시험기기

정유·가스 산업에서 발생하는 파이프 누설은 앞으로도 배출량의 상당 부분을 차지할 것으로, 이 누설량을 줄이기 위해서는 가스 생산 플랜트를 개선하여야 하며, 정유 및 가스망의 일부 폐쇄와 천연가스를 수소로 대체하여 줄일 수도 있다. 기후변화위원회 [Committee on Climate Change](#)는 가스망의 폐쇄와 수소 전환을 통해 2020년 55%에서 2050년 25% 수준까지 배출을 줄일 수 있을 것으로 예측한다. 또한 2050년까지의 배출량은 석탄 화력발전소가 폐쇄되고 석탄 기반의 생산 및 활용에서 나오는 배출량이 상당 부분 줄어들어 따라 주로 해상의 석유 채굴과 셰일가스 채굴에 기인하게 될 것이라고 지적하고 있다.

❓ 배출 분류

배출 형태 (직간접)	배출되는 온실가스	감축 기술	잠재적 감축량
석유 생산 -배기 및 플레어	메탄, 이산화탄소	플레어 축소 플레어 가스 축소	65~70%
가스 생산 -배기 및 플레어	이산화탄소	이산화탄소 포집 및 저장	70~80%
운송 및 저장 재가스화 (가스 생산)	이산화탄소	이산화탄소 포집 및 저장	70~80%
가스 누설	메탄	• 누설 감시 및 수리 • 위성감시, 데이터 분석 등 정보통신기술을 활용한 지속적인 감시	85%
다양한 연소 공정	이산화탄소	재생에너지와 배터리 저장 장치로의 전환	100%

❓ 이산화탄소 감축 기회

에너지 및 재료 준비

- 생산과 천연액화가스 개발 과정에서 재생에너지 및 저탄소 발전원에서 만들어진 전력 활용
- 태양열을 사용한 원유증진회수용 증기 생산
- 재생 가능한 정유용 원료로 전환

공정 혁신

- 빈번한 플레어의 감소
- 열병합 발전
- 정보통신기술을 이용한 정유 공장의 에너지 효율 개선
- 가스 터빈의 에너지 회수

배출 관리

- 플레어, 배기 및 기타 누출로 인한 메탄 배출 감소
- 원유증진회수에 적용할 수 있는 이산화탄소 포집 기술 적용
- 이산화탄소 포집·저장 기술 적용

❓ OGCI (Oil & Gas Climate Initiative)의 감축 목표

Oil & Gas Climate Initiative

- 정유 및 가스 기업을 회원사로 하는 산업 협회
- 회원사: BP, Chevron, CNPC, Eni, Equinor, ExxonMobil, Occidental, Pemex, Petrobras, Repsol, Saudi Aramco, Royal Dutch Shell plc.

회원사 특징

- 전세계 석유 및 가스 생산의 32% 차지 (전세계 에너지 수요의 17%에 해당)
- 7.24억톤의 온실가스 배출
- 임직원 210만명
- 저탄소 기술 연구개발에 65억불 투자

감축 목표 및 계획

- 2025년까지 석유 및 가스 생산 과정의 메탄 배출집약도를 0.25% (기준년도 대비 0.32%) 이하로 감축
- 2030년까지 온실가스 배출에 상당한 영향을 미칠 수 있도록 생산 기지의 탈탄소화, 이산화탄소 포집·저장 산업의 발족
- 2030년까지 플레어 제로화 달성

❓ 핵심 이해관계자의 감축 목표 및 사례

Saudi Aramco (사우디 아라비아)

Saudi Aramco는 유전의 메탄 배출 감소를 통해 온실가스 배출을 줄일 수 있는 누설 감시 및 유지보수 솔루션을 구현하였다. 또한 특별한 용도의 드론, 메탄량 측정 및 누설 완화를 위한 차세대 벨브 등을 이용한 연속감시시스템의 설치도 계획하고 있다. 누설 감시 및 유지보수 시스템을 이용한 현장 측정을 통해 Saudi Aramco는 메탄 누설을 현저하게 줄였으며, 이는 Saudi Aramco가 지속가능한 목표를 달성하는 데 도움이 되고 있다.

Exxon Mobil (미국)

Exxon Mobil이 보유한 종합 누설 감시 및 보수 솔루션과 Exxon Mobil의 운영 절차 개선을 통해 온실가스 배출을 2016년까지 20% 줄일 수 있었다. 또한 비용 효과적인 배출 감축 정책을 통해 2020 지속가능 목표를 달성하려고 한다

Repsol (스페인)

Repsol은 2025년까지 생산 과정의 연간 온실가스 배출량을 3 Mt CO₂e, 운영 중 배출집약도를 25%, 플레어는 50% 줄이는 목표를 가지고 있다. 메탄 배출 감소가 이 계획의 핵심으로, Repsol은 동남아시아에 있는 해상 채굴 장비에 차세대 멤브레인을 성공적으로 시범적용 하였다. 생산되는 가스에 고농도의 이산화탄소가 포함되어 있기 때문에, 품질 규격에 맞는 천연가스를 만들기 위해 다단계의 멤브레인이 필요하다. 멤브레인을 개선함으로써 Repsol은 메탄 배출을 줄이는 동시에 메탄 회수율은 높일 수 있었다.

Vermilion Energy (캐나다)

Vermilion Energy는 자사의 지질 및 채굴 분야 전문성과 가장 큰 관련이 있는 지열에너지 등을 포함하여 포트폴리오를 다각화했다. 2014년 Vermilion은 2020년까지 Scope 1 배출을 2014년 대비 50%까지 줄이는 목표를 설정하였다. Vermilion은 이미 2017년말 배출을 78% 줄여 목표를 초과 달성하였다. Vermilion은 이산화탄소 배출 감축 목표를 설정하는데 어떤 형태의 Scope 2 배출 및 Scope 3 배출을 포함할 수 있는지 평가 중이다.

[역주] Scope 1 배출: 기업의 활동으로 인해 발생하는 직접적 배출
 Scope 2 배출: 기업이 구매하여 사용하는 전기의 생산 과정에서 발생하는 간접적 배출
 Scope 3 배출: 기업의 활동으로 인해 발생하는 모든 간접적 기타 배출

Chevron Corporation (미국)

Chevron Corporation은 2016년을 기준으로 2023년까지 플레어의 배출집약도를 25-30%, 메탄의 배출집약도를 20-25% 줄이는 목표를 설정하였다. Chevron은 연속 감시 기술과 누설 감시 및 보수 기술 분야에 연구개발을 집중할 것이다.

Total S.A. (프랑스)

Total은 2018년 3억불 규모의 에너지 효율 계획에 착수하여, 정유 및 화학 공정에서 연간 이산화탄소 100만톤에 해당하는 온실가스의 배출을 줄일 예정이다. 이 계획을 통해 Total이 2024년까지 연 1%의 효율을 개선할 수 있을 것으로 예상된다.

Eni S.p.A (이탈리아)

Eni는 2025년까지 이산화탄소 배출을 43% 줄이는 목표를 가지고 있으며, 2014년 이미 20%의 감축을 달성하였다. Eni는 이 목표를 이루기 위해 다양한 계획을 활용해 왔다. 저탄소 및 무배출 에너지원, 이산화탄소 포집·저장, 메탄 배출 감소 등으로 전환을 통해 에너지원을 다양화하기 시작했으며, 효율 목표를 달성하는데 집중해왔다.

Equinor (노르웨이)

2018년 현재 플레어는 정유 과정에서 배출되는 이산화탄소의 27% 이상을 차지하고 있다. 이에 따라 Equinor는 플레어를 줄이는데 집중해 왔다. Equinor는 2025년까지 플레어를 완전히 없애는 목표를 가지고 있다. 2018년 Equinor는 투르크메니스탄에서 플레어를 없애는데 성공하여, 플레어 양의 9%를 줄였다. 또한 나이

지리아에 보유한 설비에서 플레어를 줄이는 프로젝트에 1.3억불을 투자했다.

IV. 시멘트 산업의 탄소 감축

❓ 배출원 특징 및 배출량

- 전세계 이산화탄소 배출량의 6%를 차지하는 시멘트 산업은 생산되는 시멘트 1 kg당 1 kg의 이산화탄소를 배출하는 것으로 추산된다. 시멘트 1톤당 이산화탄소 평균 배출량은 1990년대 이후로 생산 공정의 효율 상승 및 에너지 생산을 위한 폐기물 활용 등을 통해 18% 감소했다. 전세계에서 급속한 도시화 추세에 따라 지속가능한 건물과 인프라에 대한 요구가 증가하면서 탈탄소화 역시 폭 넓은 관심을 받고 있다.
- 다른 산업과 달리 시멘트 산업의 이산화탄소 배출은 주로 시멘트 생산을 위한 전처리 과정인 석회를 산화칼슘으로 바꾸는 생산 공정의 화학 반응에 기인한다. 석회를 산화칼슘으로 바꾼 후 클링커로 다시 바꾸는 과정에서 이산화탄소가 필연적으로 발생할 수밖에 없는 것이다. 즉, 시멘트 산업이 배출하는 대부분의 이산화탄소는 시멘트에 사용되는 클링커로 인해 발생한다고 할 수 있다.
- 따라서 시멘트 산업의 배출 감축은 새로운 시멘트 클링커를 만들거나 다른 재료로 바꾸는 것이다. 일부 연구자가 이산화탄소 감축 기술을 개발 중이지만, 정책의 부재로 인해 신물질이나 대체 물질을 개발하기 위한 연구가 많이 위축되어 있다.

배출원	배출 비중
공정 중 배출 (클링커 생산)	50%
열공정의 배출	40%
광산, 수송, 분쇄 및 기타 공정	10%

시멘트 산업에서 배출되는 이산화탄소가 대부분 생산 공정에서 필연적으로 나오는 것이다 보니, 다른 산업에 비해 배출 감축이 가능한 기회가 적어 시멘트 산업의 탈탄소화는 언제나 도전으로 받아들여졌다. 이로 인해 시멘트 산업이 비슷한 수준의 이산화탄소를 배출하는 다른 산업에 비해 상대적으로 정책 강요를 덜 받는다.

❓ 이산화탄소 감축 기회

에너지 및 재료의 변화

- 연료 전환
- 탄소가 제거된 원료
- 클링커가 없는 시멘트
- 이산화탄소 포집·저장을 사용하여 탄소를 줄인 시멘트

- 재활용 및 재사용 콘크리트
- 대체 결합제

공정 혁신

- 기존 재료와 클링커 준비 과정의 에너지 효율 개선
 - ✓ 건식 가마의 사용
 - ✓ 다단계 사이클론 가열기
- 폐열 회수
- 생산성 및 에너지 효율 증가를 위한 추가적 예열기

배출 관리

- 카본 양생, 골재, 합성가스 동시 생산, 조류/바이오 매스 재배 등을 위한 이산화탄소 포집·활용

가장 많은 배출 잠재력을 가진 이산화탄소 포집·저장·활용 기술 및 새로운 시멘트 재료

이산화탄소 포집·활용·저장 (감축률 95-99%)

가마에서 배출되는 배가스에 포함된 많은 양의 이산화탄소는 시멘트 산업이 이산화탄소 배출을 줄이는데 적절한 도구가 된다. 포집된 이산화탄소는 카본 양생, 골재 생산 공정에 재사용 가능하며, 연료나 화학 물질로도 변환할 수도 있다.

새로운 시멘트 (감축률 90-99%)

탄소를 제거하거나 탄소와 결합하지 않은 칼슘을 사용하는 방식으로, 칼슘이 풍부한 대체 원료를 사용하여 시멘트 생산 공정의 이산화탄소 배출을 효과적으로 줄일 수 있다.

클링커 대체 (감축률 7-90%)

화력발전소의 비산회Fly ash나 슬래그Slag 등을 대체 원료로 사용하는 것이 배출 감축을 위한 하나의 방법이 될 수는 있겠지만, 시멘트의 기계적 특성을 저해하기 때문에 사용처는 제한될 수밖에 없다.

재생에너지 사용 (감축률 40%)

태양광, 풍력, 바이오 매스 같은 청정 발전 및 재생에너지로 전환하여 시멘트 생산에 간접적으로 필요한 화석연료로부터 발생하는 이산화탄소를 줄일 수 있다.

공정 효율 개선 (감축률 4-8%)

기존 공정을 개선하여 원료 처리, 클링커 생산, 분쇄 및 기타 공정의 에너지 효율을 올린다.

GCCA (Global Cement and Concrete Association)의 감축 목표

Global Cement and Concrete Association

- 시멘트 기업을 회원사로 하는 산업 협회
- 회원사: Asia Cement, Cementos Progreso S.A., Dalmia Cement, LafargeHolcim, Ultratech, Orient Cement Ltd., SCG Cement, HeidelbergCement, Taiwan Cement Corporation, Vicat, Votorantim, West China Cemen

회원사 특징

- 38개 기업과 18개 기관
- 전세계 시멘트 생산 능력의 50% 이상을 차지

감축 목표 및 계획

- 회원사는 1) 기후변화 대응 전략을 개발하고, 목표와 절차를 발간하며, 2) 가이드라인에 맞춰 GCCA의 기후변화 자료를 연보로 발간하기로 했다.
- GCCA는 기후변화와 에너지, 환경과 자연 및 순환 경제 등이 지속가능성을 구성하는 기둥임을 찾아냈다.
- GCCA는 산업계 및 연구기관으로 구성된 28개 회원사간 연구 네트워크인 Innovandi를 발족하였다. 핵심 연구 분야로는 이산화탄소 포집·활용·저장 구현, 대체 원료, 저탄소 콘크리트 기술, 중성화 기술 등이 있다.

주요 시멘트 제조사의 감축 목표 및 사례

LafargeHolcim (스위스)

- 탄소 배출집약도: 561 kgCO₂
- 배출집약도 목표: 2022년 550 kgCO₂, 2030년 520 kgCO₂
- 탄소 감축 전략
 - 에너지 효율 개선
 - 대체 연료로 전환 (현재는 대체 연료 20% 사용)
 - 클링커 사용 축소
 - 이산화탄소 포집
 - 저탄소 솔루션에 투자

UltraTrech (인도)

- 탄소 배출집약도: 618.87 kgCO₂
- 배출집약도 목표: 2021년 600 kgCO₂ 이하
- 탄소 감축 전략
 - 폐열 회수 시스템 용량 확대 (총 소비에너지의 8% 수준)
 - 저탄소 제품 생산
 - 시멘트 산업에서 최대 재생에너지 사용자가 될 수 있도록 2021년까지 6.5억 단위 이상을 생산하는 재생에너지 확대

HeidelbergCement Group (독일)

- 탄소 배출집약도: 599.2 kgCO₂
- 배출집약도 목표: 2030년 540 kgCO₂
- 탄소 감축 전략
 - 클링커 비율 축소 (현재 74.4%)
 - 바이오 매스 등 청정 에너지원 사용 확대 (현재 21.7%)
 - 생산 공정 효율의 지속적 개선

Vicat (프랑스)

- 탄소 배출집약도: 610.2 kgCO₂
- 배출집약도 목표: 2030년 540 kgCO₂
- 탄소 감축 전략
 - 혁신적인 저탄소 시멘트 및 콘크리트 개발
 - 재료 확보부터 건설까지 전 과정의 개선
 - 2030년까지 시멘트 내 클링커 비율 75% 달성
 - 2030년까지 대체 연료 40% 사용 (이 중 바이오 매스가 15% 차지)

ACC Limited (인도)

- 탄소 배출집약도: 504 kgCO₂
- 배출집약도 목표: 2030년 494 kgCO₂
- 탄소 감축 전략
 - 960만톤의 폐기물 재활용 자원 사용, 2030년까지 1,070톤으로 확대
 - 철강 공정에서 나오는 슬래그나 화력발전소의 비산회를 사용하여 포틀랜드 슬래그 시멘트, 포틀랜드 포졸라나 시멘트 등의 혼합 시멘트 개발

Orient Cement (인도)

- 탄소 배출집약도: 596 kgCO₂
- 배출집약도 목표: 2025년 578.12 kgCO₂
- 탄소 감축 전략
 - 41,726의 재생에너지 인증서 구매
 - 2025년까지 대체에너지 10% 달성 및 클링커 30% 대체

V. 철강 산업의 탄소 감축

❓ 제로배출 전기와 전기아크로를 통한 최저 배출 달성

철강 산업은 전세계 온실가스 배출의 7-9%를 차지하고 있다. 철강 산업이 매우 지역적인 산업이자, 집중 투자가 필요한 반면 영업 이익률이 크지 않다 보니 철강 산업의 탈탄소화는 많은 집중을 받지 않았다. 정유·가스 산업과 달리 단 하나의 통일된 로드맵을 적용할 수도 없어 각 지역 사업자들끼리 뭉쳐 저탄소 기술의 개발과 활용을 통한 탈탄소화 계획을 세울 필요가 있다.

평균적으로 2018년 철강 1톤당 1.85톤의 이산화탄소가 배출되었다. 전통적인 생산 방법은 고로高爐, Blast Furnace - 전로법電爐, Basic Oxygen Furnace으로, 석탄을 이용하여 고온을 만들어 철광석에서 철을 분리하는 방법이다. 많은 기업이 이산화탄소 배출을 줄이기 위해 고로-전로법의 성능을 개선하거나 새로운 생산법을 모색하고 있다.

천연가스나 수소 기반의 직접환원철법Direct Reduced Iron이나 전기아크로Electric Arc Furnace가 고로-전로법을 대체 중이다.

생산 공정	철강 1톤당 이산화탄소 배출량
고로-전로법	2.3톤
가장 높은 성능의 고로-전로법	1.9톤
바이오 연료를 이용한 고로-전로법	1.1톤
천연가스 또는 수소 기반의 직접환원철	1.1톤
바이오 연료와 이산화탄소 포집 적용 고로-전로법	0.9톤
전기아크로	0.4톤
무배출 전기를 이용한 전기아크로	0.1톤

❓ 장기적 생산법으로서 적은 양의 철광석을 사용하는 전기분해법

상업화 단계	방법
전통적 방법으로, 대량 적용	<ul style="list-style-type: none"> 석탄 기반의 고로-전로법 천연가스 기반의 직접환원철 및 전기아크로 하이브리드 형태 (전기아크로 + 액체 상태의 철광, 직접환원철 + 고로-전로법)
산업체 적용	<ul style="list-style-type: none"> 바이오 매스 기반의 고로-전로법 바이오 가스 기반의 직접환원철-전기아크로
시험 보급	<ul style="list-style-type: none"> 수소 기반의 직접환원철-전기아크로 고로-전로법과 이산화탄소 포집 및 저장 Hlsarna-전로법 공정과 이산화탄소 포집 및 저장 가스 재활용과 이산화탄소 포집 및 저장을 갖춘 고로-기초산소강철제조로(BOS)
연구개발 중	<ul style="list-style-type: none"> 수소 기반의 고로-전로법 전기분해법

❓ 이산화탄소 감축 기회

에너지 및 재료의 변화

- ✓ 고철 재활용
- ✓ 고로 슬래그를 시멘트 산업에 공급하여 천연자원의 사용 감소
- ✓ 철광석 환원에 바이오 매스 기반의 목탄charcoal 사용
- ✓ 열 및 전력에 재생에너지 사용

공정 혁신

- ✓ 천연가스 또는 수소 기반의 직접환원철 도입
- ✓ 전기아크로 사용
- ✓ 전기분해법을 활용한 철광석 환원
- ✓ 에너지 효율 개선

배출 관리

- ✓ 이산화탄소 포집·저장을 통한 화학물질 및 연료 생산
- ✓ 이산화탄소 포집 및 지질 구조물에 장기 저장

④ 단기적 배출 저감 전략: 고철 재활용 확대와 에너지 효율 개선

고철 재활용

- 고철 재활용을 통해 철강 산업에서 배출되는 이산화탄소를 극적으로 줄일 수 있다. 금속은 기본적으로 손실되지 않고 지속적으로 재활용될 수 있어 엄청난 잠재력을 가지고 있다. 하지만 금속 제품 자체가 장기간 사용되다 보니 고철량이 한정되어 있다.
- 이산화탄소 배출 감소율: 100%
- 현황: 폭 넓게 활용 중

부산물 공급

- 철강 생산 중 생기는 고로 슬래그를 시멘트 산업에 공급하여 시멘트 생산에 필요한 천연자원 사용을 줄이고, 전체적인 이산화탄소 배출을 줄일 수 있다.
- 이산화탄소 배출 감소율: 3%
- 현황: 폭 넓게 활용 중

효율 개선

- 철강 산업의 에너지 소비는 이미 지난 50년동안 61%나 감소했다. 다양한 공정에서 에너지 효율을 높일 수 있는 여지가 있지만, 이산화탄소 배출을 많이 줄이는 데는 한계가 있다.
- 이산화탄소 배출 감소율: 15-20%
- 현황: 폭 넓게 활용 중

수소를 이용한 철광석 환원

- 철광석에서 철을 분리하기 위해 탄소 대신 수소를 사용하는 기술로, 이산화탄소 대신 물을 배출한다.
- 이산화탄소 배출 감소율: 100%
- 현황: 파일럿 시험 중

이산화탄소 포집·활용·저장

- 철강 플랜트에서 배출되는 이산화탄소를 포집 후 촉매를 이용하여 화학제품을 만들거나 장기 저장함으로써 철강 산업의 이산화탄소 배출을 줄일 수 있다.
- 이산화탄소 배출 감소율: 90%
- 현황: 기술 타당성 입증 완료

전기분해법

- 탄소 대신 전기를 이용하여 철광석에서 철을 분리한다.
- 이산화탄소 배출 감소율: 100%
- 현황: 파일럿 시험 중

철광석 분리를 위한 바이오 매스 사용

- 목탄 형태의 바이오 매스를 석탄 대신 사용한다.
- 이산화탄소 배출 감소율: 100%
- 현황: 폭 넓게 활용 중

⑤ 주요 철강 제조사의 감축 목표 및 사례

SSAB (스웨덴)

- 배출집약도: 조강 1톤당 1.41 tCO₂
- 배출 감소 목표: 2020년까지 이산화탄소 30만톤 감축
- 탄소 감축 전략
 - SSAB는 2045년까지 전체 플랜트에서 탄소 중립성을 달성하는 목표를 세웠다.
 - Vattenfall과 공동으로 석탄 연료를 대체하는 수소 기반의 철강 생산 기술을 개발할 계획이다.
 - 2025년까지 Oxelosund 플랜트에 전기아크로를 설치하여 배출량의 25%를 줄일 계획이다. 또한 스웨덴과 핀란드 내 설비 역시 전기아크로 기반으로 전환하여 이산화탄소 배출 대부분을 줄일 것이다.

ArcelorMittal (룩셈부르크)

- 배출집약도: 조강 1톤당 2.12 tCO₂
- 배출 감소 목표: 2020년까지 조강 1톤당 1.95 kgCO₂
- 탄소 감축 전략
 - 몇 종류의 이산화탄소 포집·활용 기술을 개발해 왔다. 고로에서 사용되는 바이오 에탄올과 합성 가스를 개발하여 성공적으로 시험 완료하였다.
 - 파일럿 규모의 수소 기반 직접환원철 기술을 개발하였다.
 - 보유한 인프라의 에너지 효율을 개선하기 위해 7.28억불이 투자되었다.

Tata Steel (인도)

- 배출집약도: 조강 1톤당 2.34 tCO₂
- 배출 감소 목표: 2025년까지 조강 1톤당 2 tCO₂ 이하
- 탄소 감축 전략
 - Tata Steel Jamshedpur는 이산화탄소 배출 감축의 국가적 모범 사례이다. Tata Steel Jamshedpur은 고철을 활용한 철강 생산을 늘려 인도 내에 공급할 계획이다.
 - Jamshedpur 및 Ferro-Chrome 플랜트에서 파일럿 규모의 이산화탄소 포집·활용 장치를 개발하고 있으며, 인도내 모든 사업장에서 재생에너지 사용을 늘리고 있다.

Nippon Steel (일본)

- 배출집약도: 조강 1톤당 1.79 tCO₂
- 배출 감소 목표: 2030년까지 이산화탄소 9백만톤 감축
- 탄소 감축 전략
 - 코크스로Coke oven에 수소를 공급하고, 고로에서 배출되는 이산화탄소를 포집하는 등 배출 감축 기술의 개발에 집중하고 있다.
 - 이산화탄소 배출 감축을 위한 코크스 건식 경화 설비의 도입을 선도하고 있다.
 - 또한 공정 부산물의 99%를 재활용하고 있다.

Hyundai Steel (한국)

- 배출집약도: 이산화탄소 2,251만톤
- 배출 감소 목표: 2050년까지 80% 감축
- 탄소 감축 전략
 - 고로의 부생 가스를 이용하여 전기를 생산하는 Verified Carbon Standard vcs 프로젝트를 통해 연간 198만톤의 이산화탄소 배출을 줄일 계획이다.
 - 또한 사용 중인 생산 공정의 에너지 효율 개선을 이루었다.

JFE Steel Corporation (일본)

- 배출집약도: 조강 1톤당 2.02 tCO₂
- 배출 감소 목표: 2030년까지 이산화탄소 900만톤 감축
- 탄소 감축 전략
 - 수소를 이용한 철광석 환원과 고로에 이산화탄소 포집·저장 기술을 적용함으로써 이산화탄소 배출을 30% 줄여 조강 1톤당 1.79 tCO₂를 배출하는 COURSE50 기술의 개발에 투자 중이다. 이 기술이 적용된 설비가 2030년 운영을 시작할 것으로 예상된다.

VI. 기술 조망

❓ 정유·가스 산업이 주목할 만한 혁신공급자

Bluefield (미국) - 메탄 누출 감시

- 실리콘 밸리에 위치한 스마트업 기업으로, 수 백만 개에 달하는 메탄 누출 지점을 지속적으로 감시할 수 있는 광학기술 및 고유의 기계 시각 알고리즘을 보유하고 있다. Bluefield는 대기 중으로 메탄을 배출하는 유전 지역을 감시하기 위해 전 세계의 대형 정유 및 가스 기업과 협업해 왔다. 또한 쓰레기 매립지, 폐수, 가축 감시 등으로 사업을 확장할 계획이다.
- 기술 성숙도: Low 1 2 3 4 5 High

Crusoe Energy Systems (미국) - 플레이어 완화

- 디지털 플레이어 완화 시스템을 이용하여 메탄 플레이어를 줄일 수 있는 대체 기술을 개발하였다. 디지털 플레이어 완화 기술은 플레이어로 버려지는 천연 가스를 이용하여 전기를 생산하고 이를 유전 지역의 에너지 사용이 큰 부하에 공급하는 방법이다. 이를 통해 운영자는 플레이어로 버려지는 천연가스에서 이익을 창출해 낼 수 있으며, 배출도 효과적으로 줄일 수 있다.
- 기술 성숙도: Low 1 2 3 4 5 High

Alphabet Energy (미국) - 열전 발전


- 유전 지역에 있는 발전기에서 배출되는 배가스를 이용하여 전기를 생산하는 모듈형 열발전 시스템, E1을 개발하였다. 현장에 있는 열전발전기가 다른 발전기의 발전량을 일부 떠맡게 되면서 발전기의 전체 이산화탄소 배출을 줄이는 동시에 연료 절약을 통한 비용 편익도 제공한다.
- 기술 성숙도: Low 1 2 3 4 5 High

❓ 시멘트 산업이 주목할 만한 혁신공급자


Solidia Technologies (미국) - 이산화탄소 포집·활용

- 콘크리트 양생 과정에서 배출되는 이산화탄소를 포집하여 다시 양생에 활용할 수 있는 솔루션을 일괄 공급 방식으로 제공하고 있다. 이 기술을 통해 콘크리트 양생에 사용되던 신선한 물을 이산화탄소로 대체할 수 있다. Solidia Technologies의 생산 설비 역시 더 빠르게 내구성 높은 콘크리트를 생산하기 위해 같은 기술 및 원재료를 사용하고 있다. Solidia Technologies의 콘크리트 제작 공정은 현재 적용된 콘크리트 생산 공정에 쉽게 적용 가능하다.
- 기술 성숙도: Low 1 2 3 4 5 High

Carbicrete (캐나다) – 이산화탄소 포집·활용


- Carbonation activation이라 불리는 공정을 적용하여 철강 공정의 부산물인 슬래그를 이용함으로써 콘크리트에 사용되는 시멘트 사용을 줄였다. 콘크리트 혼합물은 일반적인 콘크리트 처럼 틀에 붓고, 이산화탄소를 이용하여 양생한다.
- 기술 성숙도: 

CarbonCure Technologies (캐나다) – 이산화탄소 포집·활용


- 콘크리트 혼합 과정에서 콘크리트에 이산화탄소를 주입하는 이산화탄소 광물화 기술을 이용한다. 이산화탄소는 콘크리트와 반응하여 광물화된다. 이 과정을 통해 생산 효율이 개선되며, 이산화탄소 배출이 줄어든다.
- 기술 성숙도: 

❓ 철강 산업이 주목할 만한 혁신공급자


Heliogen (미국) – 태양열을 이용한 공정 기술

- 재생에너지 스타트업 기업으로, 태양열 초고온 집적 기술을 개발하였다. 개발된 시스템을 이용하면 온도를 1,000 °C 이상으로 올릴 수 있어, 다양한 탄소 집중 산업에 사용될 수 있으며, 또한 이산화탄소 배출 감축을 위한 비용효과적 방법을 제공한다. 또한 이 기술을 통해 대규모로 태양빛을 수소로 전환할 수 있다. 이 기술은 1 MW부터 수 GW 규모까지 확장될 수 있다.
- 기술 성숙도: 

LanzaTech (미국) – 이산화탄소 포집·활용

- 자연적으로 선택된 아세트산 생성 미생물을 이용한 가스 발효 공정을 통해 철강 플랜트에서 발생하는 이산화탄소 가스를 재활용하는 기술을 개발하였다. 철강 산업계는 LanzaTech의 기술을 이용하여 이산화탄소 배출을 줄일 뿐 아니라, 연료 및 화학물질 생산을 통해 추가적인 이익을 얻을 수 있다.
- 기술 성숙도: 

Sunfire (독일) – 수소 에너지

- 철강 산업과 같이 이산화탄소 배출이 많은 분야에 사용될 수 있는 세계 최대 규모의 고체산화물 가역적 전기분해(Solid Oxide reversible electrolysis, RSOC) 모듈을 개발하였다. 이 기술은 소둔Annealing, 경화, 소결, 가스 경화 공정 등에 적용 가능하다.
- 기술 성숙도: 

VII. 통찰

❓ 산업계의 큰 관심을 받고 있는 이산화탄소 포집 및 저장

	재료 효율	에너지 효율 개선	이산화탄소 포집·활용	이산화탄소 포집·저장	연료 전환
기술	다양한 기술 존재	성숙도가 높은 기술 존재	입증된 기술	확립된 기술 존재	확립된 기술 존재
규제	파편화된 약한 규제	기존 공정의 대체에 대한 관심의 증가 정도로 제한	지원 정책 존재	지원 정책 존재	지원 정책 존재
경제	생산 비용 절감	연료 절약 및 투자 결정에 필요한 요인	높은 비용	높은 투자비	태양광과 풍력의 가격 하락
사회	공공 참여 증가	에너지 효율에 대한 관심	브랜드 이미지 개선	석탄의 지속 사용과 지중 저장	브랜드 이미지 개선

높음
 보통
 낮음

❓ 분야별 비교 분석

정유 및 가스 산업

- 기업이 채택한 방법
 - 메탄의 배출집적도 감소
 - 설비 설계, 계약자 등의 변경을 통한 에너지 효율 개선
 - 병합발전
 - 재생에너지 전환을 통한 탈탄소화
 - 이산화탄소 포집·활용·저장
 - 가스터빈으로부터 에너지 회수
- 핵심 연구개발 분야
 - 조류 및 셀룰로우스 바이오 매스의 액상화 (바이오 연료)
 - 직접적인 공기 중 이산화탄소 포집
 - 메탄 플레어 중지
- 배출 감축 목표의 논의
 - 유럽 기업이 가스로의 전환, 야심적인 기후변화 목표 설정, 저탄소 기술에 대한 투자 등을 통해 저탄소 전환의 선두주자로 달리고 있다.
 - 산업별 전체 메탄 배출집적도를 줄이고 플레어를 중지하는 것이 이 분야의 핵심 관심 분야이다.

시멘트 산업

- 기업이 채택한 방법
 - 클링커를 비산화 및 고로 슬래그로 대체
 - 클링커를 사용하지 않는 시멘트
 - 이산화탄소 포집·활용 기술을 이용한 저탄소 시멘트
 - 콘크리트 재활용
 - 폐열 회수

- 핵심 연구개발 분야
 - 새로운 클링커 대체재
 - 이산화탄소 포집·활용
 - 직접적인 공기 중 이산화탄소 포집
- 배출 감축 목표의 논의
 - 시멘트의 클링커 비율 축소가 전세계적인 시멘트 업계의 주요 목표이다.
 - 전세계 시멘트 기업이 일반적으로 시멘트의 78% 정도 클링커를 사용하는 반면, 인도 기업은 69%만을 사용한다. 이는 비산화 및 슬래그 대체재를 사용한 결과로, 인도에서는 다른 지역에 비해 이것들을 구하기 쉬운 이유도 있다.

철강 산업

- 기업이 채택한 방법
 - 고철 재활용
 - 시멘트 업계의 고로 슬래그 사용 등 부산물 공급
 - 에너지 효율 개선
 - 이산화탄소 포집·활용·저장
- 핵심 연구개발 분야
 - 수소, 바이오 매스 목탄, 전기분해 등 철광석 환원 방법
- 배출 감축 목표의 논의
 - 고철 재활용이 가장 비용과 에너지가 적게 들면서 배출을 줄일 수 있는 방법이다. 고철이 얼마나 많은지가 가장 큰 제한적 요소이다.

❓ 이산화탄소 감축 기술의 성장 기회

정유·가스 산업의 저탄소 전환에 대한 정책적 의무화와 투자자로부터의 압력이 이 산업계의 탄소 배출 감축에 주요 원인이 된다. 메탄 플레어로부터 배출되는 이산화탄소가 단기적인 감축에 가장 높은 가능성을 가지고 있다. 배출 감시를 위한 디지털 솔루션 역시 중단기적 솔루션으로 검토되고 있다.

시멘트 산업은 점차 클링커를 비산화나 고로 슬래그로 대체한 시멘트의 판매 확대에 집중하고 있다. 최근 이산화탄소 포집·활용·저장 기술 역시 이산화탄소를 시멘트 생산 과정에 재활용함으로써 경제적 이익을 얻는 동시에 배출을 줄일 수 있는 기회를 제공하고 있다.

철강 산업에서는 전기아크로가 단기적으로 아주 유망한 배출 감축 방법으로 인식되고, 고철 재활용이 급격히 증가하고 있다. 고철이 다시 철강 공장으로 돌아오도록 하기 위해 철강 회사와 폐기물 수집업체의 협력이 중요해지고 있다.

❓ 코로나바이러스 감염증과 이산화탄소 배출 감소

중국에서 전국적 이동제한으로 인해 2020년 초 이산화탄소 배출이 25% 낮아졌다. 또한 소비 감소로 인해 2019년 4/4분기 석탄 사용이 40% 감소했다.

이산화탄소 감축을 위한 규제과 자금 지원이 생기면서 산업계는 규제를 만족하기 위한 이산화탄소 감축 기술을 견인하고 있다. 하지만 경기 후퇴가 기업의 투자 결정에 중요한 영향을 끼칠 것이며, 이산화탄소 배출 감축을 위한 대규모 프로젝트들이 연기될 수도 있다.

지속되는 코로나바이러스 감염증 사태의 유일하게 좋은 점이라면 이산화탄소 배출이 줄어들고, 세계 주요 도시의 대기질 지표가 개선되고 있다는 것이다. 중국과 이탈리아에서 탄소와 질소 배출이 30%까지 감소되었다고 보고되었다.

이는 주로 비행기 운항 중지, 자동차 이동 감소, 생산 감소, 자가 격리, 화석연료 소비 감소 등에 기인한다.

기업은 직원의 원격 근무를 통해 향후 이산화탄소 배출을 줄일 수 있다는 것을 이해하기 시작했다.

코로나바이러스 감염증을 하찮게 여길 수는 없겠지만, 이 중대한 상황으로 통해 산업계 역시 이산화탄소 배출을 줄일 수 있는 기회를 알아채기 시작했다. 기후 변화에 대처한다는 것은 코로나바이러스 감염증에 대처하는 것과 비슷하게 탄소 중립적 경제로 이행하기 위한 모두의 노력이 필요하다. 기업은 반드시 장기적 관점에서 훨씬 친환경적이고 기후 친화적인 사업으로 이행하는 것을 목표로 삼아야만 한다.

Reference

[1] TechVision Group of Frost & Sullivan, "Benchmarking and Impact Analysis of Carbon Abatement Technologies," Frost & Sullivan, D94A-TV, Mar. 2020.