

시멘트 생산 부문에서 지정폐기물 처리 비용을 고려한 CCU 경제성 분석 및 활성화 정책 제언

고 은 호 이화여자대학교 화학신소재공학전공
양 세 영 이화여자대학교 기후·에너지시스템공학전공
김 예 지 이화여자대학교 기후·에너지시스템공학전공



1. 서론

시멘트는 석회석과 석고 등으로 이루어진 가장 기본적인 건축 재료이지만, 시멘트 산업은 철강, 석유화학 산업을 잇는 대표적인 국내 에너지 다소비 산업에 해당한다. 한국시멘트협회의 ‘2021 한국의 시멘트 산업 통계’에 따르면, 2021년 기준 국내 시멘트 생산량은 50,450천 톤 규모로 이는 세계 13위에 달하는 수치다.¹⁾ 시멘트 생산은 주로 석회석 채석장이나 탄산염 원료 생산지 근처에 위치한 대규모의 자본 집약적 공장에서 이루어지고, 석회석 채광 - 1, 2차 조쇄 - 석회석 혼합 치장 - 원료 분쇄 및 저장 - 소성공정 - 시멘트 분쇄 과정을 거쳐 생산된다.²⁾ 본고에서 주목한 부분은 소성공정이며, 해당 단계에서 CaCO_3 가 로터리 킬른(rotary kiln)에서 가열되면 하소되는 과정에서 시멘트의 주원료인 클링커(Clinker)가 생산된다. 이와 더불어 킬른에서 중금속과 고농도의 염소가 포함된 CKD(Cement Kiln Dust)가 대량 발생하며, 킬른 상부 및 냉각단에서 이산화탄소가 배출된다. 그러나 CKD는 지정폐기물로 분류되어 약 40만 원/톤의 처리 비

1) 한국시멘트협회(2022), p. 185 참조.

2) 에너지관리공단(2009), p. 7 참조.

용이 발생하기 때문에 이를 불법 매립하려는 시도들이 적발되는 실정이다. 또한 이산화탄소의 경우 2019년 기준 시멘트 생산으로 인해 발생한 배출량은 약 39,000,000톤이며, 국내 산업부문에서는 시멘트 산업이 배출 3위를 기록하고 있다. 따라서 급변하는 기후에 대응하고, 시멘트 산업의 운영비용을 증가시키는 원인인 CKD를 활용하기 위한 방안에 대해 논의할 필요가 있다.³⁾

이산화탄소 포집·저장·활용 기술(Carbon Capture, Utilization & Storage, 이하 CCUS)은 산업 공정에서 발생하는 이산화탄소를 포집하여 저장하거나, 고부가가치 화합물로 전환하여 활용하는 기술이다. 제조업 위주의 산업 구조를 가진 우리나라에서는 현저한 탄소 저감 달성이 어렵기 때문에 탄소중립을 달성하는 데 CCUS의 기여도가 클 것으로 예상된다. IEA(International Energy Agency)는 2050년 CCUS의 탄소중립 기여도를 약 15%로 제시했으며⁴⁾ 시멘트 산업의 경우 CCUS가 거의 유일한 CO₂ 저감 방안임을 언급했다⁵⁾. CCUS가 주목받기 시작하면서 산업통상자원부는 2021년 9월 ‘Net-Zero 수요관리사업’의 신규 R&D 과제 중 하나로 시멘트 산업의 킬른 배기가스 대상 CO₂ 포집 기술 개발과, 포집된 CO₂를 콘크리트 제품 제조에 적용할 수 있는 ‘현장 맞춤형 탄산화 기술’ 및 저탄소 화학원료(메탄올) 제조 기술 개발을 지원하였다. 이와 같이 CCUS 기술에 대한 연구개발 및 지원은 확대되고 있는 추세임에도 불구하고 아직까지 관련 법 및 제도는 미비한 상황이며, 2021년 발족된 K-CCUS 추진단이 단일법 제정 작업을 진행 중이다. 따라서 본고의 목적은 시멘트의 주원료인 클링커 생산 과정에서 발생하는 CKD와 CO₂를 반응시켜 CaCO₃를 생산하는 과정에 대한 경제성 평가와 더불어 평가 결과를 바탕으로 CCUS 활성화 방안에 대해 논의하는데 목적이 있다. 본고의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 CKD 단순 폐기 방법과 CCU를 이용하여 CKD를 CaCO₃로 전환하는 방법의 경제성에 대해 논의하며, 3절에서 경제성 평가를 토대로 정책 제언을, 4절에서는 결론과 향후 과제를 제시하고자 한다.

2. 경제성 분석

CKD를 단순 폐기하는 방법과 CCU 기술을 활용해 CKD를 CaCO₃로 전환하는 방법으로 클링커 생산 과정을 나누어 경제성 분석을 수행한다. 이때, 전체 공정 과정에서 탄소가 발생하는 ‘보일러, 화로, 터빈, 운송수단, 소각로, 온실가스 발생 화학공정’ 중 소성공정 단계까지 발생하는 탄소만 고려하였다.

가. CKD 단순 폐기 방법

총 생산비용은 클링커 생산 비용에 추가적으로 CKD의 폐기 비용과 배출된 CO₂의 배출권 가격을 더해 산정한다. 우선, 클링커 생산 비용을 구하기 위해서는 클링커 생산에 대한 CAPEX(Capital Expenditures)와 OPEX(Operating Expenditures)를 계산한다.

3) 환경부 온실가스종합정보센터(2020), p. 33 참조.

4) IEA(2020), p. 74 참조.

5) 한국에너지기술연구원(2021), p. 5 참조.

1) CAPEX 계산

CAPEX는 Equipment Costs와 Set Up Costs로 나뉘는데⁶⁾, <표 1>과 같이 Total Equipment Costs(TEC)를 제외한 항목들이 모두 Set Up Costs에 포함된다. IEA 보고서를 참고하여⁷⁾ 클링커 910,000 t/yr를 생산하는 plant의 TEC는 €87,000,000로 산출하였으며, 2008년 기준 환율 1103.36 W/€을 적용하면 ₩95,992,320,000이다. 해당 값을 다시 현재 가치로 환산하면 ₩128,331,978,610이다. 이때, 시멘트 생산 이전인 클링커 생산 단계까지만 고려하였다. TEC를 바탕으로 나머지 항목들에 대하여 <표 1>과 같이 계산했다⁸⁾. 최종적으로 각 항목의 값과 합계는 <표 2>에 나타냈다.

본고에서는 현재 국내에서 운영 중인 cement plant의 규모를 참고하여 500만 t/day 급 설계를 수행하였다. <수식 1> ‘six-tenth rule’을 적용하여 최종 CAPEX 값을 ₩673,651,541,874로 산정하였다.

표 1 CAPEX 계산

Capital Cost Elements			Nominal Value
Equipment costs	A	Process equipment cost (PEC)	Sum of all process equipment
	B	General facilities	10-20% PEC
		Total equipment cost (TEC)	A+B
Set up costs	C	Instrumentation	15% TEC
	D	Piping	20% TEC
	E	Electrical	7% TEC
	F	Total installed cost (TIC)	A + B + C + D + E
	G	Start-up costs	8% TIC
	H	Engineering	5% TIC
	I	Owners costs	7% (F + G + H)
	J	Engineering procurement, construction and owner's cost (EPCO)	F + G + H + I
	K	Project contingency	10% EPCO
		Total capital cost (CAPEX)	J + K

자료: Minh T et al., Comparison of MEA capture cost for low CO₂ emissions sources in Australia, 2011.1

수식 1 six-tenth rule

$$Cost_B = Cost_A \times \left(\frac{Q_B}{Q_A} \right)^n \quad Q : \text{Capacity}$$

6) Minh T. Ho et al.(2011), p. 51-54 참조.

7) IEA(2008), p. 130-135 참조.

8) Stefania Osk Gardarsdottir et al.(2019), p. 6-7 참조.



표 2 클링커 CAPEX 계산 결과

Total Equipment costs (TEC)	₩128,331,978,610
Instrumentation	₩19,249,796,791
Piping	₩25,666,395,722
Electrical	₩8,983,238,503
Total installed cost	₩182,231,409,626
Start-up costs	₩14,578,512,770
Engineering	₩9,111,570,481
Owners costs	₩14,414,504,501
Engineering, procurement, construction and owner's cost (EPCO)	₩220,335,997,378
Project contingency	₩22,033,599,738
Total CAPEX	₩242,369,597,116
six-tenth rule 적용 후 CAPEX	₩673,651,541,874

2) OPEX 계산

OPEX는 Variable Costs와 Fixed Costs로 구성된다. 이는 <표 3> 오른쪽에 나타낸 비율을 바탕으로 한다⁹⁾. 현재 국내 시멘트 업계 수준을 고려하여 연봉을 ₩40,000,000으로, 운영 인원은 30명으로 설정하고, salaries를 산정한 후 나머지 비용을 비율에 맞추어 계산한다. 계산 결과는 다음과 같다.

9) Asmaa Mahdi Al-Hashimi and Ameer Ageed kadhim Al-ardawe(2020), p. 9 참조.

표 3 클링커 CAPEX 계산 결과

Variable Costs		Ratio to Total OPEX(%)
		0.38
Direct wages	₩457,142,857.14	0.08
Indirect wages	₩342,857,142.86	0.06
Commodities supplies	₩742,857,142.86	0.13
Service supplies	₩457,142,857.14	0.08
Other costs	₩171,428,571.43	0.03
Fixed Costs		0.62
Salaries	₩1,200,000,000.00	0.21
Commodity Supplies	₩857,142,857.14	0.15
Service supplies	₩685,714,285.71	0.12
Interest and Rents	₩342,857,142.86	0.06
Depreciation	₩285,714,285.71	0.05
Other costs	₩171,428,571.43	0.03
Total OPEX	₩5,714,285,714.29	100%

자료: Asmaa Mahdi Al-Hashimi and Ameer Ageed kadhim Al-ardawe, Implementing Target Costing within the Supply Chain to Lean, 2020.1

CKD 폐기 비용을 계산한다. CKD는 고농도의 염소 성분이 포함되어 있으므로 지정폐기물로써 톤 당 ₩400,000의 처리 비용이 발생한다¹⁰⁾. 1톤의 클링커를 생산할 때 0.2톤의 CKD가 발생하므로¹¹⁾ 본고에서 설정한 cement plant에 대해 발생하는 전체 CKD는 1,000,000톤이다. 이에 대한 총 폐기 비용은 <표 4>와 같다.

표 4 클링커 CAPEX 계산 결과

CKD 처리 비용	₩400,000/tCKD
CKD 발생량	0.2 tCKD/tClinker
총 폐기 비용	₩400,000,000,000

CKD 폐기 후 잔존하는 CO₂에 대해 발생하는 탄소배출권 비용을 산정한다. CO₂는 클링커 생산 공정 자체에서 나오는 탄소와 CKD로부터 발생하는 탄소로 구분된다. 클링커로부터 배출되는 CO₂는 0.507 tCO₂/tClinker이며, CKD에서 발생하는 CO₂는 클링커 생산과정에서 발생하는 전체 CO₂ 양의 2~6% (중간값인 4%로 설정, 0.02028 tCO₂/tClinker)로 밝혀졌다.(Michael J. Gibbs et al, 2001)¹²⁾ 따라서 클

10) 순관(2021), p. 50-53 참조.

11) U.S. Environmental Protection Agency(1993), p.1 참조.

12) Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC)(2009), p. 3.10-3.17 참조.

링커 생산 과정에서 발생하는 전체 CO₂ 배출량은 0.52728 tCO₂/tClinker이다. 500만 t/day 급 설계에 적용하면 총 CO₂ 배출량은 2,636,400 tCO₂/yr이며, 이에 대해 탄소배출권 평균 가격 ₩21,239/tCO₂를 적용한다. 환경부의 제3차 계획 기간 국가 배출권 할당계획에 의거하면 무역집약도와 비용발생도의 곱이 0.002 이상인 업종에 한해 배출권을 전부 무상할당한다. 시멘트 산업은 0.239로 무상할당 대상 업체에 포함된다. 본고의 클링커 플랜트 배출권 무상 할당량은 제3차 계획 기간의 쌍용 C&E를 기준으로 산정했으며, 2,848,349.54 tCO₂/yr가 도출된다. 배출권 무상 할당량이 전체 CO₂ 배출량을 능가하기 때문에 탄소배출권 판매 수익 ₩4,501,596,268/yr이 발생한다.

클링커 단가는 연간 CAPEX, 클링커 OPEX와 지정폐기물 처리 비용의 합에서 탄소배출권 수익을 제외한 전체 OPEX를 더한 후, 해당 값을 전체 클링커 생산량으로 나눴으로써 산출한다. 연간 CAPEX는 <수식 2>를 이용해 계산하며, *i*는 interest rate, *n*은 depreciation period in yr이다. *i*와 *n*는 각각 0.08, 25 yr으로 설정한다.¹³⁾

수식 2 six-tenth rule연간 CAPEX 계산

$$C_{annual} = C$$

위의 계산식에 의해 연간 CAPEX는 ₩63,106,853,949이고, 전체 OPEX를 산출하면 ₩401,212,689,446이다. 따라서 CKD 단순 폐기 방법에서의 클링커 단가는 ₩92,864/tClinker임을 알 수 있다.

표 5 CKD 단순 폐기 방법에서의 클링커 단가

annual CAPEX		₩63,106,853,949
지출	클링커 OPEX	₩5,714,285,714.29
	지정폐기물 처리 비용	₩400,000,000,000
수익	탄소배출권 판매	₩4,501,596,268
전체 OPEX		₩401,212,689,446
클링커 단가		₩92,864 /tClinker

나. CCU 기술을 활용해 CKD를 CaCO₃로 전환하는 방법

CKD 단순 폐기 방법과 유사한 방식으로 CAPEX와 OPEX를 계산하면 해당 방법을 적용했을 때의 클링커 단가를 도출해낼 수 있다. CAPEX는 첫 번째 방법과 동일한 과정을 통해 구한 클링커 생산 CAPEX와 CCU Plant의 CAPEX를 고려한다. OPEX는 클링커 생산에 대한 값과 CCU Plant의 OPEX 및 합성 후 남은 원료에 대한 처리비용, 그리고 생산된 제품에 대한 판매수익을 고려하여 산정한다.

13) Stefania Osk Gardarsdottir et al.(2019), p.8-9 참조.

1) CCU Plant의 CAPEX와 OPEX 계산

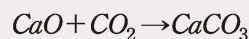
CCU Plant는 ‘광물탄산화 이산화탄소 포집 및 활용기술을 적용한 석탄 화력 발전소에서의 온실가스 저감량 산정 방법과 경제성 평가에 관한 연구(이봉재, 2021)’를 바탕으로 400 t CO₂/day급 설계를 수행하였다. CCU Plant의 CAPEX와 OPEX는 <표 6>과 같다.

표 6 CCU Plant CAPEX 및 OPEX 계산

CAPEX		OPEX		
기계공사	₩7,170,000,000	인건비	₩1,152,000,000	
		전력비	계약전력	₩588,600,000
전기공사	₩1,950,000,000		사용전력	₩2,027,279,640
		약품비	Fly Ash	₩1,818,360,000
토목/건축공사	₩12,210,000,000		액상촉매	₩381,500,000
		용수비	기본요금	₩708,000
			사용요금	₩362,088,000
Total CAPEX	₩21,330,000,000	Total OPEX	₩6,330,535,640	

CKD 단순 폐기 방법에서는 배출권의 무상 할당량으로 인해 탄소 배출과 관련된 비용이 발생하지 않지만, 탄소는 대기 중에 그대로 배출된다는 단점이 있다. 따라서 두 번째 방법에서는 CCU Plant를 설계하여 배출되는 탄소의 양을 줄이고자 한다. 탄소 배출을 방지하는 방법으로 본고에서는 클링커의 CaO와 CO₂를 합성하여 CaCO₃를 생성하는 방식을 채택하고, 생성물을 판매하는 방법을 제안함과 동시에 경제성 분석을 진행한다. 먼저, CCU plant에서 미반응 CO₂를 고려하면 포집되는 CO₂ 양은 77,830 tCO₂/yr (= 1,768,461,713 mol CO₂/yr)¹⁴⁾이다. 다음으로는 CKD로부터 존재하는 CaO의 양을 결정한다. 위와 동일한 CKD 배출량을 활용하며, 각 plant마다 CaO의 함량은 상이하므로 이를 참고하여 CKD의 CaO 함량을 50%로 설정한다. 단위를 환산하면 해당 plant에서 배출되는 CaO는 8,915,834,522 mol CaO/yr이다. CO₂와 CaO는 1:1로 반응한다.

수식 3 CaCO₃생성 화학반응식



또한 생성된 CaCO₃는 176,863.8559 tCaCO₃/yr (= 1,768,461,713 mol CaCO₃/yr)로 산출되며, 평균 시장가격을 고려하여 CaCO₃의 단가는 ₩397,500/t으로 설정한다. 위의 설정값을 바탕으로 CaCO₃ 판매 수익을 산정한다. 계산 결과는 <표 7>과 같다.

14) 이봉재(2021), p. 58-60 참조.

표 7 CaCO₃ 생성 및 판매 수익

총 CO ₂ 배출	2,630,400 tCO ₂ /yr	CKD 발생	1,000,000 tCKD/yr
CO ₂ 포집량	77,830 tCO ₂ /yr =1,768,461,713 mol CO ₂ /yr	CaO (50%)	500,000 tCaO/yr =8,915,834,522molCaO/yr
CaCO ₃ 생산	1,768,461,713 molCaCO ₃ /yr = 176,863.8559 tCaCO ₃ /yr		
CaCO ₃ 판매 수익	₩70,303,382,736.88/yr		

위에서 산정한 바와 같이 탄소배출권 무상 할당량은 2,848,349.54 tCO₂/yr이며, 포집 후 잔여 탄소 배출량은 2,558,570 tCO₂/yr다. 배출권 무상 할당량이 잔여 탄소 배출량을 능가하므로 탄소배출권 평균 가격 ₩21,239/tCO₂을 적용하여 판매 수익을 계산하면 ₩6,154,627,638.40이다.

첫 번째 방법에서는 CKD의 고농도 염소 성분과 증금속으로 인해 지정폐기물 처리 비용이 발생하지만, 현 방법에서는 CKD에서 KCl을 분리한다. 분리 과정에서 CKD의 CaO 함량이 높아지므로 CO₂와 반응해 CaCO₃를 생성하기에 용이하다. CKD와 증류수를 1:2 이상 비율로 배합하는 경우 KCl 수득량에서 큰 증가를 발견할 수 없으며¹⁵⁾, 전체 CKD 양의 3%에 달하는 침전제(NaOCl)을 투여하는 경우 증금속이 검출되지 않는 것으로 드러났다¹⁶⁾. 따라서 CKD와 증류수를 1:2로, 침전제를 CKD의 3% 투입한다고 설정한다. CAPEX는 위에서 사용한 계산 방법을 적용하며 TEC를 기준으로 나머지 금액을 산정한다. KCl 분리에 대한 OPEX는 인건비와 원료비만 고려한다. 계산 과정에 따른 전체 CAPEX와 OPEX는 <표 8>에 기재한다.

표 8 KCl 분리 CAPEX, OPEX

CAPEX		OPEX	
Total Equipment costs (TEC)	₩5,687,354,628,000	인건비	₩547,692,840,492
Instrumentation	₩853,103,194,200		
Piping	₩1,137,470,925,600		
Electrical	₩398,114,823,960		
Total installed cost	₩2,388,688,943,760		
Start-up costs	₩191,095,115,501	원료비	₩890,000,865,800
Engineering	₩119,434,447,188		
Owners costs	₩188,945,295,451		
EPCO	₩2,888,163,801,900		
Project contingency	₩288,816,380,190		
Total CAPEX	₩3,176,980,182,090	Total OPEX	₩1,437,693,706,292

15) 윤영민 외 2인(2016), p.2-5 참조.

16) 윤영민 외 5인(2017), p.2-6 참조.

CKD와 증류수 1:2의 배합 조건에서 KCl을 분리하는 경우 수득률은 CKD 양의 약 30%¹⁷⁾로 나타났기 때문에, 생성되는 KCl의 양은 300,000t이다. KCl의 단가는 \$562.5/t¹⁸⁾으로 1294.11 ₩/\$ 환율을 적용하면 ₩727,936.88/t이다. 이를 바탕으로 KCl 판매수익을 ₩218,381,062,500으로 산정한다.

전체 CAPEX는 클링커 plant, CCU plant와 KCl 분리의 CAPEX를 합한 ₩3,871,961,723,964이며 <수식 2>를 적용하여 구한 연간 CAPEX는 ₩362,720,646,837이다. 클링커 plant, CCU plant와 KCl 분리 OPEX의 합에서 CaCO₃ 수익, 탄소배출권 수익과 KCl 수익을 제외한 전체 OPEX는 ₩1,154,899,454,771.32이다. 클링커 단가는 연간 CAPEX와 전체 OPEX의 합을 클링커 생산량으로 나눈으로써 산출할 수 있다. 따라서 CCU를 이용하여 CKD를 CaCO₃로 전환하는 방법에서의 클링커 단가는 ₩303,524/tClinker임을 알 수 있다.

표 9 CCU를 이용하여 CKD를 CaCO₃로 전환하는 방법에서의 클링커 단가

지출	annual CAPEX	₩362,720,646,837
	클링커 OPEX	₩5,714,285,714.29
	CCU OPEX	₩6,330,535,640
	KCl 분리 OPEX	₩1,437,693,706,292
수익	CaCO ₃ 판매	₩70,303,382,736.88
	탄소배출권 판매	₩6,154,627,638.40
	KCl 판매	₩218,381,062,500
전체 OPEX		₩1,154,899,454,771.32
클링커 단가		₩303,524 /tClinker

다. 계산 결과 및 분석

위의 계산 결과를 정리하면 <표 10>과 같이 나타낼 수 있다.

표 10 클링커 단가 계산 총정리

CKD		단순 폐기	CaCO ₃ 전환
CAPEX	클링커	₩673,651,541,874	
	CCU	-	₩21,330,000,000
	KCl 분리	-	₩3,176,980,182,090
지출	클링커 OPEX	₩5,714,285,714.29	
	CCU OPEX	-	₩6,330,535,640
	KCl 분리 OPEX	-	₩1,437,693,706,292
	지정폐기물 처리	₩400,000,000,000	-
수익	CaCO ₃ 판매	-	₩70,303,382,736.88
	탄소배출권 판매	₩4,501,596,268	₩6,154,627,638.40
	KCl 판매	-	₩218,381,062,500
클링커 단가		₩92,864 /tClinker	₩303,524 /tClinker

17) 윤영민 외 2인(2016), p. 2-5 참조.

18) KB증권(2022), p. 4-5 참조.

쌍용 C&E의 시멘트 단가가 ₩105,000/t임을 고려할 때, 이는 생성된 CKD를 단순 폐기하는 경우의 클링커 단가 ₩92,864/tClinker와 유사하다. CCU를 적용하는 경우 클링커 단가는 ₩303,524/tClinker으로, 단순 폐기하는 경우 대비 약 3.27배 높다는 것을 확인할 수 있다.

앞서 제시한 첫 번째 조건인 CKD 단순 폐기에서는 클링커 생산 과정에서 발생하는 탄소가 전량 배출되에도 불구하고, 오히려 탄소배출권에 의한 수익이 발생하여 클링커 단가가 낮아지는 결과를 초래한다. 국내에서는 시멘트 산업이 100% 무상할당 대상이기 때문에 상대적으로 타 업종에 비해 탄소배출권 구매 비용을 지출할 확률이 낮다. 따라서 CCU 제품 자체의 경제성 확보 외에도 현행 배출권거래제와 관련하여 CCU 기술을 활성화할 수 있는 정책을 제안하고자 한다.

3. 정책 제언

가. 녹색 인센티브 제도 도입

국내에서 CCUS 기술이 상용화되기 위해서는 해당 기술을 활용하여 생산한 제품의 경제성이 확보되어야 한다. 본고에서는 CCU 기술을 적용하여 CaCO_3 와 KCl을 생산하는 방식을 설계했다. 「녹색제품 구매 촉진에 관한 법률」을 바탕으로, 공공부문에서의 구매 제품 선정 시 CCU 기술을 활용한 제품에 가중치를 부여하는 등 CCU 기술을 활성화하는 장치가 마련되어야 한다. 탄소 배출 저감량 목표달성 기준을 별도로 설정하여, 기준에 부합하는 과정을 거쳐 생산된 제품에 한해 녹색 인증 마크를 제공하거나 가산점을 부여하는 등 제품이 시장경쟁력을 확보하는 방안에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 또한 2022년 12월 20일 「자원순환기본법」의 개정안이 의결되면서, 폐기물과 CCUS 기술을 이용하여 포집한 이산화탄소를 합성하여 새로이 생산한 제품을 폐기물로 분류했던 이전과 달리, 상대적으로 자원 활용이 용이할 것으로 예상된다.

나. 배출권 무상할당량 비중의 기준 감소 추진

2절의 경제성 분석 결과를 바탕으로, 현재 시멘트 산업에서의 탄소배출권 무상 할당량이 총 탄소 배출량을 능가함을 알 수 있다. 막대한 탄소배출권 판매 수익으로 인해 CCUS 기술 적용 시 탄소 저감에 대한 환경적 이득을 보기 어려운 현황이다. EU-ETS의 배출권 할당 방식은 경매를 기본으로 채택하고 무상할당 방식을 예외적으로 허용하지만, 탄소 누출 고위험군의 산업에게는 여전히 무상할당을 제공한다. 그러나 각 산업의 최대 무상 할당량이 설정되어 있어 해당 기준을 넘기지 못하며, EU-ETS 3기를 기준으로 전체 배출량의 57%가 유상할당 대상이다¹⁹⁾. 주목할 점은 한국과 달리 제조업 전체 배출권의 80%를 무상할당 대상으로 규정하고 있으며, 2020년에는 30%로 대폭 감소시켰다. 국내의 현 정책과 같이 기업에 극도로 높은 비중의 무상할당을 적용하는 경우 배출권 거래제는 대규모의 탄소를 배출하는 산업에게 실효성이 낮은 정책으로 전락할 우려가 있다. 무상할당 비율을 낮춰 운영함으로써 배출권 거래제의 효과적인 목적 달성을 기대한다.

19) 박효민(2022), p.10-11 참조.

4. 결론 및 향후 과제

2050 탄소중립 이해 및 탄소 국경세 등 각종 탄소 규제 정책이 수립됨에 따라 탄소 배출량을 저감함과 동시에 경제성을 확보하기 위한 방안이 필요하지만, 국내의 산업구조 특성상 괄목할 만한 탄소 저감 성과를 도출하는 것은 어렵다. 이에 본고에서는 대표적으로 탄소 배출량이 많은 시멘트산업에 대한 CCU의 경제성 분석을 수행했다. 계산 결과에 따르면 CCU를 적용한 경우 톤당 클링커 생산 단가는 약 3배 이상 높은 것으로 확인되었다. 따라서 현 상황으로는 ‘CKD의 CaCO_3 로의 전환 + 잔량 탄소 배출’ 방법이 다른 방법에 비해 경제성과 경쟁력을 갖추지 못한 것으로 판단된다. CKD를 단순 폐기하는 경우 탄소 배출량은 많으나 배출권 무상 할당량이 이를 능가하여 오히려 탄소배출권 판매 수익이 발생하여 단가가 낮아지게 된다.

CCU의 경제성을 확보하기 위해서는 단계적으로 무상 할당량의 비율을 줄일 필요가 있다. 또한 CCU 제품은 CCU 기술의 기술 숙련도가 상대적으로 낮기 때문에 도입 초기의 단가가 높아, 기존 제품과 비교했을 때 시장경쟁력이 약하다. 따라서 시장을 안정적으로 확보하기 위한 보조금 식의 제도 연구 및 시행과 더불어 CCU 제품의 단가를 낮추기 위한 R&D(Research and Development) 투자에 대한 노력 확대가 이루어져야 한다.

본고에서는 국내 시멘트 업계에 대한 자료 미비로 인해 해외 사례를 참고하여 경제성 분석을 수행했기 때문에 국내의 실정을 온전히 반영하지 못하는 한계가 존재한다. 추후 pilot plant 설계를 통해 국내 실정을 정확히 반영한 데이터를 확보하여, CCU 기술을 적용한 시멘트 산업에 대한 경제성 분석을 활발히 수행할 필요가 있다. 또한 정책적인 측면에서 국내 CaCO_3 시장 현황을 바탕으로, 녹색 인센티브 제도의 효과에 대한 검증과 더불어 배출권 무상할당 비율 감소의 실효성에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

국내 문헌

- 과학기술정보통신부, 이산화탄소 포집·활용(CCU) 기술혁신 로드맵, 2021
- 박효민, “EU 탄소국경조정메커니즘(CBAM)의 WTO TBT 협정 합치성,” 법제처, 2022
- 산업연구원, 국내 시멘트산업의 탄소중립 추진 전략과 정책과제, 2022
- 에너지관리공단, 시멘트 업종 온실가스 배출량 산정 Good Practice, 2009
- 윤영민 외 2인, “시멘트 바이패스 더스트에 존재하는 염화칼륨의 용해 및 수득 특성,” 『자원리사이클링』 제25권 제3호, 2016, pp. 43-48
- 윤영민 외 5인, “염소 바이패스 더스트를 이용한 염화칼륨 제조 및 중금속 제거,” 『자원리사이클링』 제26권 제2호, 2017, pp. 11-17
- 이봉재, “광물탄산화 이산화탄소 포집 및 활용 기술을 적용한 석탄화력발전소에서의 온실가스 저감량 산정 방법과 경제성 평가에 관한 연구,” 서울시립대학교 박사학위 논문, 2021
- 한국시멘트협회, 2021 한국의 시멘트 산업 통계, 2022
- 한국에너지기술연구원, CCUS 심층 투자 분석 보고서, 2021
- 환경부 온실가스종합정보센터, 시멘트산업의 온실가스 감축수단 동향. 기후변화와 녹색성장, 제19호, 2020, pp. 32-38
- KB증권, 유니드(014830), 2022

해외 문헌

- Asmaa Mahdi Al-Hashimi and Ameer Ageed kadhim Al-ardawe(2020). “Implementing Target Costing within the Supply Chain to Lean.” Journal of Xi'an University of Architecture & Technology 7(2) : 1308-1320.
- International Energy Agency(IEA)(2008). CO2 CAPTURE IN THE CEMENT INDUSTRY. 프랑스 : IEA.
- International Energy Agency(IEA)(2020). Energy Technology Perspectives 2020. 프랑스 : IEA.
- International Energy Agency(IEA)(2021). Net Zero by 2050. 프랑스 : IEA.
- Minh T. Ho, Guy W. Allinson and Dianne E. Wiley(2011). “Comparison of MEA capture cost for low CO2 emissions sources in Australia.” International Journal of Greenhouse Gas Control 5(1) : 49-60.
- Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC)(2009), Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. 스위스 : IPCC.
- Stefania Osk Gardarsdottir, Edoardo De Lena, Matteo Romano, Simon Roussanaly, Mari Voldsund, José-Francisco Pérez-Calvo, David Berstad, Chao Fu, Rahul Anantharaman, Daniel Sutter, Matteo Gazzani, Marco Mazzotti and Giovanni Cinti(2019). “Comparison of Technologies for CO2 Capture from Cement Production—Part 2: Cost Analysis.” energies 12(3) : 542.

웹사이트

- 국가통계포털, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_2KAA811&conn_path=12
- 산업통상자원부, <http://www.motie.go.kr/>
- 우리은행 외환센터, <https://spot.wooribank.com/pot/Dream?withyou=FXRT0014>
- 통계청, <https://kostat.go.kr/mondyValueCalc.es?mid=b70302000000>
- 한국산업기술진흥협회, <http://webzine.koita.or.kr/summary/%EC%8B%9C%EB%A9%98%ED%8A%B8-%EC%82%B0%EC%97%85%EB%8F%84-%E2%80%98%92%ED%83%84%EC%86%8C%EC%A4%91%EB%A6%B-D%2%80%99%EC%97%90-%ED%9E%98-%EB%B3%B4%ED%83%A0%EB%8B%A4-1>
- 환경부, <http://www.me.go.kr/>
- EU Commission, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en
- KBS NEWS, <https://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=5573845>