

국내 시멘트 산업의 폐합성수지 활용 현황 및 연료대체율 증가에 따른 KS제도 개선 필요성 연구

Study on the Utilization of Waste Plastic in the Korea Cement Industry and the Revision of KS Standards for Increasing Fuel Substitution Rates

조장훈¹ · 윤성일^{2*} · 이세진³ · 최재호⁴ · 김의철⁵

Jang-Hun Jo¹ · Sung-Il Yun^{2*} · Se-Jin Lee³ · Jae-Ho Choi⁴ · Eui-Chul Kim⁵

(Received August 13, 2024 / Revised September 11, 2024 / Accepted September 12, 2024)

In this study, the status of fuel substitution in Korea cement industry and the chloride contents of cement products were investigated to consider the revision of KS F 4009. The annual average chloride contents of cement products were 130~485 ppm, and the chloride in cement products was calculated to be 1,033 ppm with increasing the use of waste plastic. As a result from the increase of chloride in cement, the chloride contents in concrete will exceed 0.3 kg/m³, if more than 250 kg/m³ of cement is used. In many countries, the limit of chloride in concrete is decided by the environment where concrete is used and the quantity of cement used in concrete. Considering the inevitable increase in the chloride in cement and concrete due to the increased use of waste plastic and the trends in overseas standards for chloride of concrete, it is thought that the revision of KS F 4009 should be reviewed.

키워드 : 폐합성수지, 탄소중립, 대체연료, 염화물

Keywords : Waste plastic, Carbon neutrality, Alternative fuel, Chloride

1. 서론

시멘트는 건물, 도로, 댐 등의 사회 기반 시설을 건설하는데 사용되는 필수요소로서 현대에 들어와서는 단순히 집을 짓는 재료를 넘어 시멘트 벽화, 시멘트 두상 등 예술작품의 재료 등으로도 사용되고 있다(Miller et al. 2018). 1980년대 연간 생산량 2,000만 톤 규모였던 국내 시멘트 산업은 현재 약 6,500만 톤의 생산설비를 갖추었으며, 2021년도 기준 국내 시멘트의 생산량과 소비량은 각 5,045만 톤 및 4,936만 톤 규모이다. 시멘트 산업은 온실가스 다배출 업종이며, 2021년도 기준 시멘트 산업의 온실가스 배출량은 약 4,304만 톤으로 전체의 7.26 %이며, 국내 산업부문 온실가스 배출

량 3위를 차지하고 있는 실정이다. 이러한 시멘트 산업의 온실가스 다배출 특성은 클링커 생산을 위해 사용되는 화석연료의 연소 및 주 원료로 사용되는 석회석의 열분해 공정에서 발생하는 이산화탄소에 기인한다. 정부의 2030 NDC(Nationally determined contributions) 상향과 2050 탄소중립을 선언함에 따라 시멘트 산업 분야에서 2030년까지 357만 톤, 2050년까지 1,440만 톤의 온실가스 감축 목표를 설정하였다. 시멘트 생산 공정에서 석회석 및 점토 등의 원료를 소성하기 위하여 유연탄이 사용되며, 유연탄 등의 화석연료 사용량을 감소시키고 가연성 순환자원(폐합성수지, 폐플라스틱 등)을 적극적으로 활용하여 온실가스 배출량을 감축하는 것이 가연성 순환자원을 활용한 탄소중립의 핵심 수단이다

* Corresponding author E-mail: ysi5689@cement.or.kr

¹한국시멘트신소재연구조합 연구개발실 주임 (R&D department, Korea cement advanced-materials research association, 04790, Korea)

²한국시멘트신소재연구조합 연구개발실 팀장 (R&D department, Korea cement advanced-materials research association, 04790, Korea)

³한국시멘트신소재연구조합 연구개발실 선임 (R&D department, Korea cement advanced-materials research association, 04790, Korea)

⁴한국시멘트신소재연구조합 연구개발실 주임 (R&D department, Korea cement advanced-materials research association, 04790, Korea)

⁵한국시멘트신소재연구조합 산학협력본부 본부장 (Office of University-Industry Cooperation, Korea cement advanced-materials research association, 04790, Korea)

(Rahman et al, 2013; Lippiatt et al, 2020), Fig. 1에 화석연료 및 대체연료 종류별 탄소배출량 및 저위발열을 비교하여 나타내었다 (Nicolas and Jochen 2008). 폐합성수지는 유연탄 대비 열량 당 이산화탄소 배출이 적고, 이산화탄소 배출량 규제도 적용을 받지 않아 환경친화적 연료로 활용 가능하다.

하지만 클링커의 소성을 위한 연료로 가연성 순환자원을 많이 사용하는 경우 클링커 소성 후 클링커 내에 연화물 함량 증가를 유발하며, 이는 콘크리트 내 철근 부식을 야기하여 구조물의 내구성 저하를 일으킬 수 있다(Yoon and Nam 2014). 이러한 이유로 각 국가별 콘크리트 내 연화물 규제를 실시하고 있다. 한편, 국내의 기준은 다른 선진국에 비해 엄격하여 가연성 순환자원의 사용량을 증가시키기 어려운 실정이다.

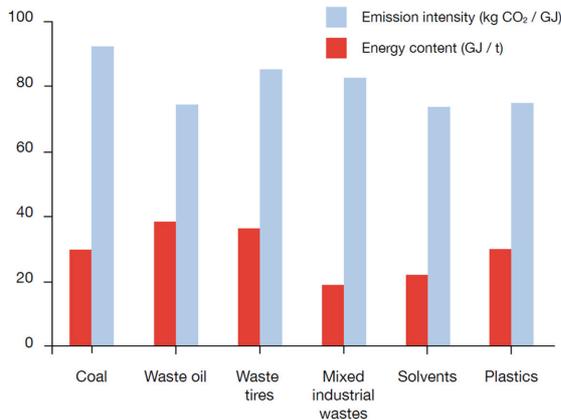


Fig. 1. The characteristics of fossil fuel and alternative fuel

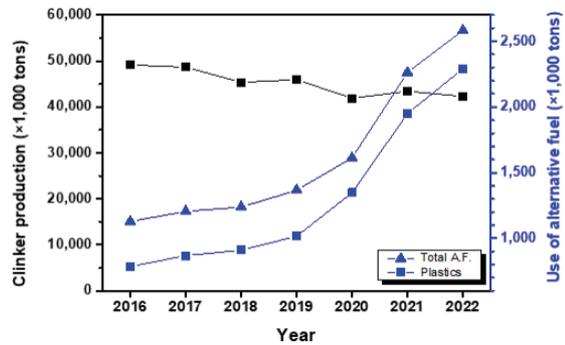
본 연구에서는 국내 시멘트 업체별 대체연료 반입량과 클링커 생산량에 대한 기본 데이터를 토대로 폐합성수지 내 연화물량 분포에 대해 분석하였다. 각 시멘트사 제품별 연화물량을 세분화하여 분기별 연화물량 변동 추이 분석을 진행하였으며 폐합성수지 사용량 증가 시 시멘트 및 콘크리트 내 연화물량 증가를 산술적으로 도출하였다.

2. 이론적 배경

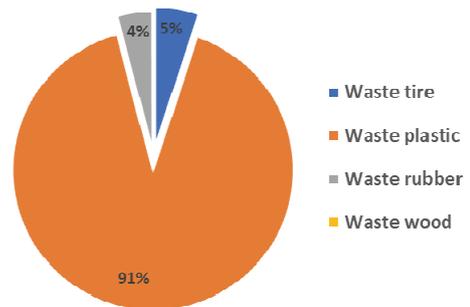
1997년 페타이어의 연료화를 시작으로 시멘트 산업에서 순환자원을 재활용하는 기술을 연구하기 시작하였으며, 2050 탄소중립 선언 이후, 대체연료 연구개발을 통해 시멘트 업계는 유연탄을 가연성 폐합성수지로 대체하여 활용해왔다.

그림 Fig. 2(a)에 따르면 2022년 기준 시멘트업계 클링커 생산

량은 2016년 4,914만 톤 대비 2022년 4,229만 톤으로 감소하였고, 폐합성수지 사용량은 229만 톤으로 매년 증가하고 있으며, 2016년도 약 60만 톤에 비해 3배 이상 증가하였다. 2021년 국내 폐합성수지 발생량은 1,217만 톤이며, 에너지 잠재량은 폐합성수지 저위발열 열량 6,000 kcal/kg으로 가정 시 약 7,300천 Toe(ton of oil equivalent)로 시멘트업계 사용 연료 에너지의 1.7배 수준이다. 따라서 국내 발생 폐합성수지를 시멘트 열원으로 사용할 경우, 화석연료에 비해 친환경적인 연료로 활용이 가능하다. 국내 시멘트 산업에서 대체연료로 사용되는 폐기물은 한 종류만 있는 것이 아니라 페타이어, 폐합성수지, 폐고무 등 다양한 종류가 사용되며, 이들 각각의 연소성분과 발열량에 차이가 있다.



(a) The productions of clinker and use of alternative fuel



(b) The usage ratio by type of alternative fuels(2022)

Fig. 2. The statistics data of domestic cement industry

시멘트 킬른에 다양한 연화물 함량을 갖는 대체연료가 투입이 되면 공정 내에서 시멘트 연화물량을 관리하는 연소 바이패스 설비의 운용에 어려움이 발생하기 때문에 “시멘트 소성로 폐기물 사용·관리기준”으로 시멘트 킬른에 투입되는 대체연료의 품질을 관리하고 있다.

폐기물관리법 시행규칙의 폐기물 재활용 기준에 따르면 폐기물을 시멘트 보조연료로 사용하는 것은 R-8-1 유형에 속한다. 폐기

물을 해당 유형으로 재활용하려면 폐목재를 제외한 폐기물들은 저위발열량 4,500 kcal/kg 이상, 염소농도 2.0 wt.% 미만을 만족하여야 한다.

Fig. 2(b)는 2022년 국내 시멘트사에서 사용된 대체연료의 비율을 도식화하여 나타낸 그림이다. 2022년 전체 대체연료 중 폐합성수지의 양은 약 91 %로 소량의 폐목재를 제외하고 전량 폐플라스틱을 활용하고 있다. 폐타이어는 2013년도 소량 투입한 이후 투입하지 않고 있으며, 폐고무의 경우 2013년도 이후 투입량이 점차 줄어 2016년도부터는 사용하지 않고 있다. 폐목재 및 기타 대체연료는 2015년도까지는 증가하는 추세였으나 2016년도 이후 점차 줄어들어 2022년도에는 거의 사용하지 않는 것으로 나타났다.

2.1 대체연료 사용 시 시멘트 내 염화물 영향성

대체 원료 내에는 천연광물과 비교하여 무기계 염소 화합물(NaCl, KCl 등)의 함량이 높지만 클링커 조성의 한계로 인해 천연 원료를 대체할수 있는 원료용 폐기물의 투입량은 한계가 있고, 이로 인하여 대체원료의 활용에 의한 염화물량 증가는 제한적이다 (Table 1).

Table 1. The contents of chloride in raw materials and fuels

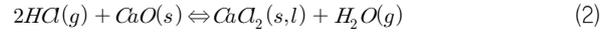
Relative chlorine contents	Raw materials	Fuels
Natural/Fossil	Tens to hundreds of ppm	Around 1,000 ppm
Alternative	Higher than natural raw materials	Extremely high (~10,000 ppm)

따라서 염화물량 증가에 기여할 수 있는 원인은 대체연료이며, 그 중 대표적인 예시는 PVC[(CH₂CHCl)_n]이며, 그 외에도 클로로화 폴리에틸렌, 다이클로로메탄, 카르보닐 디클로라이드 등이 포함된 플라스틱과 고무 제품들이 있다. 이러한 물질들은 버너 및 예열기에서 사용되는 폐합성수지류 중 일부는 아래와 같은 열분해 반응을 통해 염산(HCl)을 자체적으로 형성한다.



Fig. 3은 시멘트 킬른 내에서의 기상의 염소화합물 발생과 연소 가스의 순환을 통해 원료물질에 고형의 염소화합물을 형성하는 클링커 염화물 형성 기구 모식도를 나타낸다. 소성로 내부 화염부의 온도는 2,000 °C에 달하고 킬른 내부를 따라 이동하는 원료 등 물질의 온도는 약 1,500 °C 내외로 시스템 내 유입된 염소는

연소부에서 휘발하여 연소가스를 따라 대류하여 온도가 상대적으로 낮은 연료 투입부에서 응축된다(Cortada Mut et al. 2015). 폐기물에 함유된 염화물, 알칼리, 유황 등의 휘발성분은 킬른과 예열기 내에 1,200 °C 구간에서 휘발하여 800 °C에서 다시 응축되는 순환 구조를 이룬다. 지속적인 폐합성수지 투입으로 인해 재취발 과정을 거치면서 연속된 순환현상이 발생되며, 응축되는 과정에서 원료나 소성로 벽에 응축된다.



이러한 소성로 내 코팅 문제 등 킬른의 안정성을 떨어뜨려 시멘트 제조 공정의 불안정성을 높이게 된다. 킬른 내화물에 응축된 염화물은 클링커 내 염화물 성분이 포함되어 일부 배출되지만, 다량 포함될 경우 시멘트 품질에 영향을 미치기 때문에 소성로 안에서 염화물을 효과적으로 제거하기 위한 방안이 필요하다.

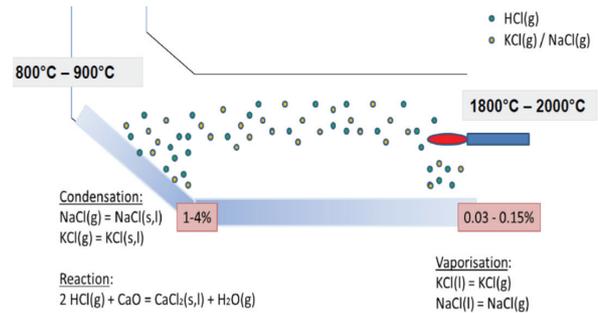


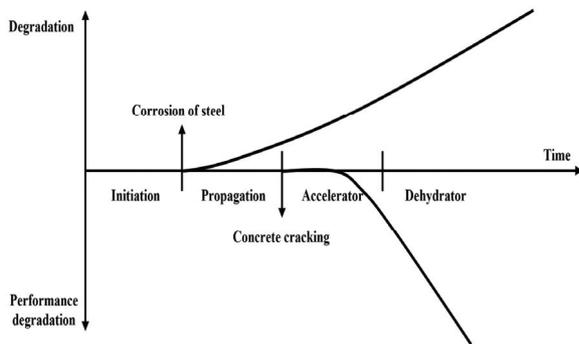
Fig. 3. The formation of chlorine compound in cement kiln

2.2 콘크리트 내 염화물에 따른 열화 메커니즘

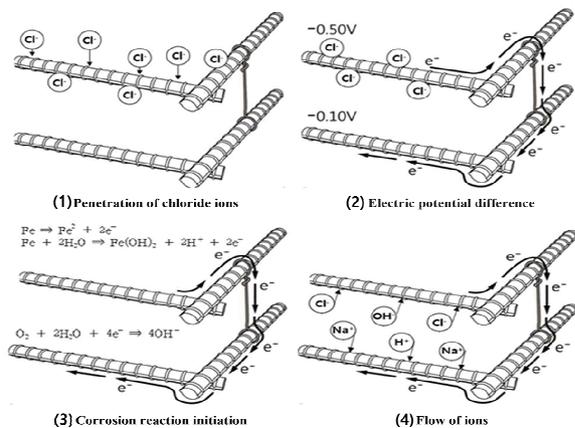
콘크리트를 비롯한 다공질 매체로의 물질 이동 메커니즘은 재료적 특성과 환경조건에 의해 결정된다. Lee et al.(2010)는 재료의 물질 고정화 능력, 공극 구조에 따른 침투성, 그리고 온도, 압력, 함수비, 물질의 이동 능력과 양에 따라 다양한 침투 메커니즘들을 제시하였다.

염화물은 콘크리트 내에 염화물 이온이 시멘트의 구성성분의 하나인 알민산 칼슘(3CaO · Al₂O₃, C₃A)과 반응하여 프리델 염(3CaO · Al₂O₃ CaCl₂ 10H₂O)이라 불리는 복염 생성을 통해 콘크리트 내부에 고정화되며(Shi et al. 2017), 가장 큰 비중을 차지하는 화학적 구속에 의해 콘크리트 내부에 존재하게 된다.

콘크리트에 염소이온이나 산성 음이온이 존재하게 되는 경우 철근 주위의 부동태 피막이 파괴되고 철근은 부식하기 쉬운 상태



(a) The failure of concrete by chloride inclusion



(b) The mechanism of chlorided-induced corrosion

Fig. 4. The failure mechanism of reinforced concrete

가 되며, 이때 철근 표면에서 철이 이온화하는 산화반응과 산소가 환원하는 환원반응이 이루어진다(Fig. 4).

따라서 콘크리트 내에 염화물이 일정량 이상 존재할 경우 철근의 부식이 시작되고, 생성된 녹의 팽창압에 따라 콘크리트 구조물에 균열 혹은 박리가 발생하여 최종적으로 내구수명이 감소한다.

3. 대체연료 활용현황 및 염화물량 변화예측

3.1 국내 대체연료 활용 현황

국내 시멘트산업의 가연성 순환자원 활용 규모는 2020년 899만 톤 규모이며, 화석연료의 대체율은 25 %이다. 2021년 기준 국내 시멘트 업계의 28~44.8 % 범위이며, 2021년도 국내 시멘트 산업 평균 연료대체율은 약 35 % 수준으로 크게 증가하였다. 앞서 Fig. 2에서 보는 바와 같이 국내 시멘트 킬른에 투입되는 대체 연료 중 91 %를 폐합성수지가 차지하기 때문에 본 논문에서는 증가되는 대체연료를 폐합성수지로 가정하여 연구를 진행하였다. Table 2에 2022년도 하반기 6개월 간 7개 시멘트사에 반입된 폐합성수지 내 중금속 및 염화물 함량의 평균 값을 나타내었다. 폐합성수지 내 중금속 및 염화물 함유량은 시멘트 업체간 편차가 다소 존재하지만, 각 시멘트 업체들은 “시멘트 소성로 내 폐기물 사용 및 관리 기준”을 준수하여 폐합성수지를 활용하는 것으로 조사되었다.

3.2 폐합성수지 사용량에 따른 시멘트 내 염화물 함유량 영향 분석

본 논문에서는 폐합성수지 사용량 증가 시 시멘트 염화물에 미치는 영향을 파악하기 위하여 폐합성수지 내 염화물량에 대한 통계분석을 수행하였다. 폐합성수지의 반입처 및 반입 시기별 염화물 값에 대한 평균(Average), 표준편차(Standard deviation) 및 변동계수(CV, Coefficient of variation)를 분석하였다. 표준편차는 표본의 데이터 분포를 나타내기 위해 보편적으로 활용하는 지표이지만 산술적으로 평균의 수치가 커지면 표준편차도 증가하는 단점이 있다.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{N}} \quad (3)$$

Table 2. The contents of heavy metal and chloride in waste pastic used in the second half of 2022

Company	Usage (ton)	Pb (<200 ppm)	Cu (<800 ppm)	Cd (<9 ppm)	As (<13 ppm)	Hg (<1.2 ppm)	Cl (2~9%)	Lower calorific value (Kcal/Kg)
A	90,710	52.76	50.65	1.79	0.49	0.15	0.74	5,776.5
B	100,317	43.51	110.26	5.98	5.19	0.13	0.76	5,399.1
C	414,082	65.68	141.45	1.67	0.6	0.13	0.70	5,089.7
D	48,987	29.75	79.1	1.2	1.41	0.05	0.50	6,634.7
E	132,133	91.93	208.36	1.95	0.3	0.19	0.75	4,918.3
F	116,973	38.7	103.96	1.18	0.31	0.27	0.25	5,592.8
G	215,710	52.74	309.75	2.72	5.45	0.47	0.56	5,072.3

변동계수는 이러한 평균과 표준편차에서 발생할 수 있는 오류를 보완하기 위한 표준화 기법으로 표본(염화물량)의 분포(변동성)를 비교하는데 효과적인 지표로 사용되며, 데이터 집합의 표준편차 σ 와 데이터 값의 중심 경향성을 나타내는 데이터 집합의 평균값 μ 를 통해 도출된다.

Table 3. The statistical analysis of chloride content in waste plastics

Product	Average chloride contents (%)	Standard deviation (%)	CV (%)
A	0.74	0.32	43.3
B	0.76	0.33	43.6
C	0.70	0.30	43.3
D	0.50	0.45	88.4
E	0.75	0.49	64.7
F	0.25	0.15	57.1
G	0.56	0.11	19.1

시멘트사에 반입되는 폐합성수지의 염화물량은 반입시기와 반입처에 따라 큰 차이가 있기 때문에 향후 다른 시기에 조사 시 폐합성수지 염화물량 통계조사 결과에 변동이 있을 가능성을 인지하여야 한다. Table 3에 나타난 바와 같이 2022년도 하반기 기준 국내 시멘트사에 반입된 폐합성수지 산업에서 사용된 폐합성수지 내 염화물 함유량은 0.25~0.76 %였으며 평균적으로 0.609 % (6,090 ppm)의 염화물을 포함하고 있는 것으로 조사되었다. 또한, 폐합성수지 내 염화물량에 대한 표준편차와 변동계수는 0.11~0.49 % 및 19.1~88.4 %로 업체별로 큰 차이를 보였다. F 및 G사를 제외한 5개 시멘트사에 반입되는 폐합성수지 내 염화물량의 변동계수는 0.3~0.49 %로 반입시기와 반입 업체에 따라 큰 염화물 차이를 나타내는 것으로 분석되었다.

3.3 시멘트 내 염화물 함유량 변화

2016년도부터 2023년도까지 국내 시멘트 제품 내 염화물 함유량을 분석한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 각 시멘트 제조사의 5년간 염화물 함유량의 평균은 A사는 0.032 %, B사는 0.028 %, C사는 0.024 %, D사는 0.024 %, E사는 0.028 %, F사는 0.026 %, G사는 0.027 %로 측정되었다. 분기별로 측정된 각 시멘트사의 시멘트 염화물량의 표준편차와 변동계수는 각각 0.008~0.014 %와 33.5~48.7 %로 나타났으며, 시멘트 염화물량에 대한 최소 변동계수 값이 34.3 %로 같은 시멘트사에서 생산한 시멘트 제품이어도 생산 시기에 따라 시멘트 내 염화물량에 변동이 큰 것으로 확인

되었다.

Fig. 2에 따르면 국내 시멘트 업계는 2019년까지 점진적으로 대체연료 사용량을 증가시켜왔으며, 2020년부터 급격한 대체연료 사용량 증가율을 보였다. 대체연료 사용량 증가 시 일반적으로 시멘트 내 염화물량이 증가하지만 대체연료의 분리선별 및 염소 바이패스 설비 운영과 개선 등을 통해 시멘트 내 염화물을 제어할 수 있는 것으로 알려져 있다.

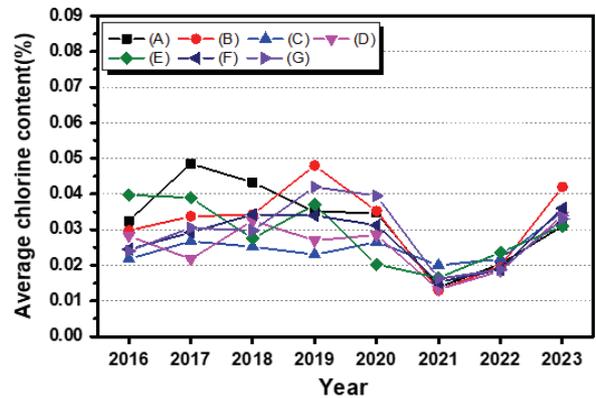


Fig. 5. The variation of chloride contents in domestic cement products

2020~2021년간 폐합성수지 사용량이 증가하였음에도 불구하고 염소 바이패스 설비 풍량 증가 등에 의해 시멘트 염화물량이 감소한 것으로 판단되며, 2022년부터 시멘트 염화물량이 증가하는 이유는 대체연료 사용량은 꾸준히 증가하였지만 염소 바이패스 설비의 추가적인 개선이 한계에 다다른 것으로 해석된다.

3.4 폐합성수지 활용에 따른 염화물 함유량 변화예측 분석

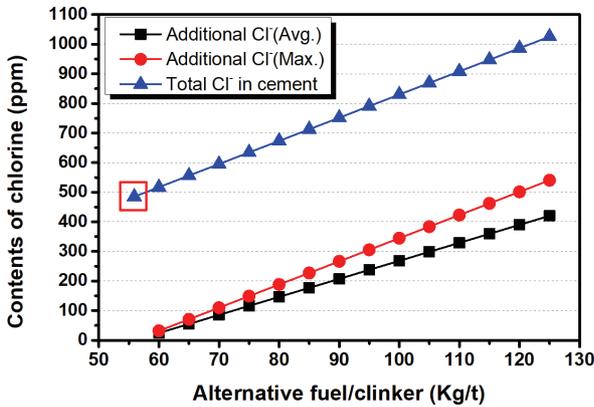
국내의 시멘트 공정 중 대체연료 사용량은 유럽 등의 선진국과 비교했을 때 절반 수준으로 매우 낮은 수준이며, 향후 국내 시멘트 공장의 대체연료 사용량도 선진국과 유사한 수준으로 증가할 것으로 예상된다. 연료대체를 증가 시 필요한 대체연료 사용량을 파악하기 위해서 폴란드 시멘트산업 통계자료를 조사하였다. 2019년 폴란드는 연료 대체율 69 %를 달성하였으며, 이 때 클링커 1톤당 대체연료 사용량은 125.9 kg이며, 2022년 기준 한국 시멘트 산업의 클링커 1톤당 대체연료 사용량은 55.9 kg이다.

시멘트 및 폐합성수지 내 염화물량을 바탕으로 폐합성수지 사용량 증가에 따른 시멘트 염화물량 증가를 일본의 경제산업성 보고서를 참고하여 계산하였다. 클링커 내 평균 염화물량 증가분(Δ

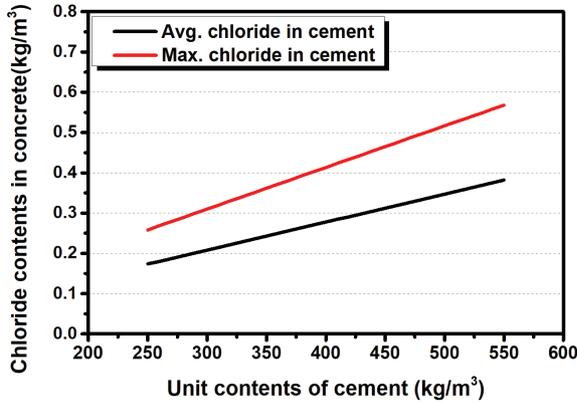
$Cl_{clinker}$)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta A_{clinker} = (t_{A.F.Pol} - t_{A.F.Kor}) \cdot C_{A.F.} \quad (4)$$

여기서, $t_{A.F.Pol}$ 는 폴란드 시멘트 산업의 대체연료 사용량이며, $t_{A.F.Kor}$ 는 한국 시멘트 산업의 대체연료 사용량이며, $C_{A.F.}$ 인 폐합성수지 내 염화물량을 의미한다. 상기 계산 방식에 도출된 클링커



(a) The increase of chlorine contents in clinker by using alternative fuel



(b) The variation of chloride contents in concrete with increasing the unit contents of cement

Fig. 6. The effect of alternative fuel on the increase of chloride contents in clinker and concrete

Table 4. The national standards for chloride of cement and concrete

Country	South Korea	Japan	China	EU	USA	Australia
Chloride limit for cement	None	350 ppm	600 ppm	1,000 ppm	none	none
Chloride limit for concrete	0.3 kg/m ³	0.3 kg/m ³	binder × 0.3 %	binder × 0.2 % (wet) binder × 0.3 % (dry)	binder × 0.3 % (wet) binder × 1.0 % (dry)	binder × 0.2 % (common) binder × 0.4 % (indoor)
The state of concrete	Fresh	Fresh	Hardened	Hardened	Hardened	Hardened

내 염화물량 증가는 염소 바이패스 설비 등 염화물 저감 공정이 개선되지 않는 경우를 가정하였다.

Fig. 6(a)에 클링커 1톤 당 대체연료 사용량이 증가하였을 때 예상된 시멘트 염화물량을 나타내었다. 2016~2023년에 조사된 각사별 연평균 시멘트 염화물량 중 최대 연평균 염화물량은 485 ppm이었다(붉은 박스). 각 시멘트사별 폐합성수지 내 평균 염화물량 중 최대값인 0.76 %를 이용하여 폴란드와 동일한 수준으로 폐합성수지 사용 시 폐합성수지로부터 발생하는 염화물량은 548 ppm이며 최종적으로 시멘트 내 염화물량은 1,033 ppm까지 증가할 것으로 계산되었다. 또한, 시멘트 및 폐합성수지 내 염화물량을 각각 평균값으로 가정하는 경우의 예상 시멘트 염화물량은 694 ppm으로 계산되었다.

앞서 증가된 염화물량(694~1,033 ppm)을 갖는 시멘트를 기준으로 하여 콘크리트 배합 시 예상되는 콘크리트 내 염화물량을 계산하였다.

콘크리트 내 시멘트를 제외한 원재료(골재, 혼합재 및 배합수)에서 기인하는 염화물량을 0 kg/m³으로 가정하였으며, 단위 시멘트량에 따른 콘크리트 내 염화물량 Fig. 6(b)에 나타내었다. 시멘트 및 폐합성수지 내 염화물량을 각각 평균값으로 가정하였을 때 단위 시멘트량이 250 kg/m³인 경우 콘크리트 내 예상 염화물량은 0.174 kg/m³이었으며, 단위 시멘트량을 440 kg/m³이상 사용하는 경우 KS F 4009기준을 초과하는 것으로 나타났다. 또한, 시멘트 및 폐합성수지 내 염화물량을 각각 최대 평균값으로 가정하는 경우 단위 시멘트량이 290 kg/m³이상일 때부터 KS F 4009기준을 초과하였다.

4. 시멘트 및 콘크리트 염화물 기준 개선 필요성

4.1 국내·외 염화물 기준의 차이점

Table 4에 시멘트 및 콘크리트 내 염화물에 대한 규제 기준을 정리하여 나타내었다(Lee et al, 2023). 한국산업표준에서는 콘크리트의 구성재료를 고로슬래그 미분말, 플라이애시, 콘크리트용

골재 및 배합수 등으로 분류하여 각각의 구성재료별 염화물 이온 함유량을 규정하고 있지만, 시멘트 내 염화물 함유량에 대한 규정은 별도로 없는 상태이다. 일본은 시멘트 내 염화물 기준을 350 ppm으로 관리하고 있으며, 중국 및 유럽연합은 각각 600 ppm과 1,000 ppm으로 시멘트 내 염화물을 관리하도록 규정하고 있다. 상기 2개국과 유럽연합을 제외한 미국과 호주 등 다수 국가는 시멘트에 대한 염화물 기준을 관리하고 있지 않는 상황이다.

콘크리트 내 염화물에 대한 관리 기준은 총량제와 종량제로 구분할 수 있다. 총량제는 투입되는 시멘트량과 관계없이 일정한 수치로 콘크리트 내 염화물량을 제한하는 제도이며, 종량제는 투입되는 시멘트량(kg/m³)에 비례하여 콘크리트 내 염화물량을 유동적으로 제한하는 제도이다.

한국과 일본은 콘크리트 내 염화물량을 총량제(0.30 kg/m³ 이하)로 관리하고 있으며, 단위 시멘트량 및 시멘트 내 염화물량이 증가하더라도 콘크리트 내 염화물 기준은 변동이 없기 때문에 총량제는 매우 엄격한 염화물 관리 기준이다. 반면에, 유럽연합의 일반 철근 콘크리트에 대해 습윤 환경에서 사용되는 경우 결합재(시멘트)량에 0.2%만큼 비례하는 종량제를 기준으로 염화물을 관리하고 있다. 종량제는 단위 시멘트량에 비례하여 콘크리트 내 염화물량을 제한하기 때문에 단위 시멘트량이 증가하여도 콘크리트의 염화물 기준을 만족시키기 용이하다.

4.2 대체연료 활용과 염화물 기준개선 필요성

시멘트 산업에서 혼합재 및 혼합시멘트 사용량 확대와 각종 가연성 폐기물을 대체연료로 활용 하는 기술은 대표적인 탄소중립 수단으로 거론되고 있는 상황이다. 유럽(유럽연합-27 기준) 시멘트 산업의 평균 연료대체율은 2021년 기준 53%이며, 독일 및 스위스 등 일부 국가의 경우 연료대체율 70%를 달성하였다.

프랑스 라파즈 사의 발표자료(Pisch et al. 2015)에 따르면 해당 시멘트사에서 생산하는 클링커 내 염화물 함량은 300~1,500 ppm 수준으로 보고된 바 있다. 해당 자료 발표시기를 고려하였을 때(2014~2015년) 연료대체율은 36~38% 수준으로 2023년 기준 국내 연료대체율(35%)보다 소폭 높은 것으로 확인되었다.

이와 같이 대체연료 활용에 의한 시멘트 염화물 증가는 불가피한 상황이며, 로트별 클링커 내 염화물 관리 및 선별 혼합을 통해 전반적으로 생산되는 클링커 내 염화물량을 관리하고 있다. 또한, 상대적으로 염화물 함량이 낮은 혼합재 첨가를 통해 최종 시멘트 제품 내 염화물 함량을 낮출 수는 있지만 혼합재 첨가 시 발생하는 압축강도 등 품질 저하 문제로 인하여 혼합재 첨가에 의한 염화물

량 감소는 제한적이다. 한국의 시멘트 산업 또한 유럽과 같이 폐합성수지 사용량을 60%까지 확대하는 것을 탄소중립 전략으로 추진하고 있는 상황에서 현행 KS F 4009 기준(0.3 kg/m³)을 유지하는 것은 탄소중립 추진에 걸림돌로 작용할 것으로 생각된다.

향후 한국 시멘트 산업의 탄소중립 달성을 위해서는 유럽 및 미국 등과 같이 단위 시멘트량에 비례하여 콘크리트 내 염화물량을 규정하는 종량제 도입이 필요할 것으로 생각된다. 그러나, KS F 4009의 총량제 기준을 종량제로 개정하기 위해서는 국내 산업 환경에 맞는 결합재 비율(%), 유럽의 경우 시멘트 량에 0.2%)을 찾기 위한 수행이 추진되어야 하며, 토목·건축 구조물의 안정성이 확보되는 합리적인 염화물 기준 개선(안)이 도출되어야 한다. 추가로 염화물 기준 개정을 위해서는 안정성 검증 등 연구 결과를 토대로 한 레미콘·콘크리트 산업의 공감대 형성이 우선시되어야 할 것으로 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 시멘트 회사 및 연도별 대체연료 반입량과 클링커 생산량을 기반으로 시멘트 내 염화물량 추이 및 영향에 대해 조사하였다. 시멘트 제품 내 염화물 함유량, 대체연료 종류에 따른 투입 비율은 2016~2023년도 국내의 데이터를 기준으로 분석하였다. 또한, 해외 시멘트 염화물량 현황 및 기준 비교를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 2022년 기준, 국내 시멘트 클링커 생산량은 4,229만 톤, 대체연료 중 폐합성수지 사용량은 229만 톤으로 조사되었다. 이는 시멘트 생산 시 대체연료의 약 91%에 해당된다.
2. 국내 시멘트 산업의 가연성 순환자원 활용 규모는 899만 톤으로 화석연료 대체율은 35% 수준이다. 대체 연료의 91%는 폐합성수지가 차지하였다. 2022년 하반기 국내 시멘트사들이 반입한 폐합성수지의 중금속 및 염화물 함유량은 시멘트 소성로 폐기물 사용 및 관리기준에 적합한 것으로 평가되었다.
3. 해외 탄소중립 선도국과 유사한 수준의 대체연료 활용 시 예상되는 시멘트 내 염화물량은 1,033 ppm으로 도출되었으며, 현행 KS F 4009기준이 유지된다면 단위 시멘트량에 따라 KS 품질 기준을 초과할 수도 있다.
4. 대체연료 사용량 증대 시 시멘트 및 콘크리트 염화물량 증가는 불가피하며, 연구수행을 통한 합리적 염화물 기준도출과 이해관계자 공감대 형성을 통해 종량제 도입 검토가 필요할 것으로 생각된다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2024년 산업통상자원부 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(RS-2023-00261230).

References

Cortada Mut, M,D,M., Nørskov, L,K., Frandsen, F,J., Glarborg, P., Dam-Johansen, K. (2015). Circulation of inorganic elements in combustion of alternative fuels in cement plants, *Energy & Fuels*, **29(7)**, 4076–4099.

Lee, C.S., Park, J.H., Kim, Y.O. (2010). Service life prediction of RC structures considering chloride binding, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, **10(1)**, 15–22 [in Korean].

Lee, H.W., Yoon, Y.S., Bae, S.C., Kwon, S.J. (2023). Current status of chloride content in domestic cement/concrete and recommendations for related specifications, *Journal of the Korea Concrete institute*, **35(5)**, 495–503 [in Korean].

Lippiatt, N., Ling, T.C., Pan, S.Y. (2020). Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement-based materials and the future perspective, *Journal of Building Engineering*, **28**, 101062.

Miller, S.A., John, V.M., Pacca, S.A., Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050, *Cement and Concrete Research*, **114**, 115–124.

Nicolas, M., Jochen, H. (2008). A Blueprint for a Climate Friendly Cement Industry, WWF International, Switzerland.

Pisch, A. (2015). Chlorine in Clinker, GTT Annual Users' Meeting 2015.

Rahman, A., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., Sharma, S. (2013). Impact of alternative fuels on the cement manufacturing plant performance: an overview, *Procedia Engineering*, **56**, 393–400.

Shi, Z., Geiker, M.R., Lothenbach, B., De Weerd, K., Garzón, S.F., Enemark-Rasmussen, K., Skibsted, J. (2017). Friedel's salt profiles from thermogravimetric analysis and thermodynamic modelling of Portland cement-based mortars exposed to sodium chloride solution, *Cement and Concrete Composites*, **78**, 73–83.

Yoon, I.S., Nam, J.W. (2014). Influence of chloride content of on electrical resistivity in concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **18(6)**, 90–96 [in Korean].

국내 시멘트 산업의 폐합성수지 활용 현황 및 연료대체율 증가에 따른 KS제도 개선 필요성 연구

본 연구는 국내 시멘트 산업의 폐합성수지 활용 현황과 대체연료 사용량 증가에 따른 시멘트 내 염화물 함량에 대해 조사하였으며, 국내외 시멘트 및 콘크리트 내 염화물 기준 조사를 통해 KS제도 개선 필요성에 대해 고찰하였다. 2016~2023년에 조사된 각사별 연평균 염화물 함량 중 최대값은 485 ppm이었으며, 폐합성수지 사용량 증가 시 1,033 ppm까지 증가할 것으로 계산되었다. 국내 콘크리트 염화물 관리 기준은 총량제로서 0.3 kg/m³로 제한하고 있지만, 계산된 시멘트 염화물량(1,033 ppm)을 기준으로 하였을 때 단위시멘트량이 290 kg/m³ 이상이 되는 경우 현행 KS 염화물 기준을 만족하기 어려운 것으로 나타났다. 해외 다수의 국가에서는 시멘트 투입량에 따라 콘크리트 염화물량을 제한하는 종량제를 채택하고 있는 상황에서, 한국 또한 시멘트 산업의 탄소중립 달성을 위해서 연구수행을 통한 합리적 염화물 기준도출과 이해관계자 공감대 형성을 통해 종량제 도입 추진이 검토되어야 할 것으로 생각된다.