

## 시멘트 염소 함량과 콘크리트의 슬럼프, 압축강도 간의 상관관계 연구

# A Study on the Correlation between Cement Chlorine Content and Concrete Slump, Compressive Strength

김경석<sup>1</sup> · 서동균<sup>1</sup> · 우지완<sup>1</sup> · 최재원<sup>2\*</sup> · 유병노<sup>3</sup>

Kyoung-Seok Kim<sup>1</sup> · Dong-Kyun Seo<sup>1</sup> · Ji-Wan Woo<sup>1</sup> · Jae-Won Choi<sup>2\*</sup> · Byeong-Know You<sup>3</sup>

(Received April 15, 2024 / Revised May 23, 2024 / Accepted May 23, 2024)

This study was analyzed the relationship between concrete slump, compressive strength and other factors such as the quantity of chloride or others using statistics method. The amount of chloride in cement was selected to range from 236 to 794 ppm, and cement that satisfied the KS L 5201 standard for other physical properties was used for this experiment. As a result, no factors had a interrelationship for initial slump and the strong-negative correlation between concrete slump elapsed time and the quantity of chloride. The proportion of chloride was shown as a strong-positive correlation for compressive strength from 1-day to 7-day curing. However, there was no correlation between chloride and compressive strength at 28-day curing.

**키워드** : 염소, 콘크리트, 폐기물, 압축강도, 통계

**Keywords** : Chloride, Concrete, Waste, Compressive strength, Statistics

## 1. 서론

### 1.1 연구목적

탄소중립과 더불어, 시멘트 산업에서는 제품의 물성향상(압축 강도, 응결, 동결융해 등)을 위한 관련 연구들이 진행되고 있다. 특히, 시멘트 제품의 압축강도에 영향을 미치는 주요 요인들은 시멘트 클링커의 화학성분, 클링커 광물 조성(Bogue and Lerch 1934; Beaudoin and Ramachandran 1992), 클링커 광물의 반응성(Saniitsky 1992), 석고 함량(Odler and Abdul-Maula 1987), 알칼리 함량(Odler and Wonnemann 1983), 분말도 및 입도분포(Osbaeck and Johanse 1989) 등이 거론되고 있다. 한편, 할로겐족 원소에 소속된 염소(Cl)는 타 이온과의 반응성이 매우 높은 성질을 가지고 있다(Kim et al. 2018), Roskopf et al.(1975) 및 Dorn et al.(2022)에 따르면, 높은 반응성을 가진 염소 이온을 시멘트 모르타르에 적용시, 20 °C 환경에서의 응결시간 단축(3 h → 1 h) 및 1일 압축강도 증가(2 wt.% CaCl<sub>2</sub> 혼합조건, 2배 상승) 등의 결과

를 도출하였다. 더불어, Xie and Quan(2024)의 연구에 따르면, 시멘트 수화물 중 monosulfate(AFM)가 Cl<sup>-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > NO<sub>2</sub><sup>-</sup> > CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > OH<sup>-</sup> 순으로 반응을 하여, 형성된 염소 화합물(염화물)은 더 이상의 화학반응이 진행되지 않아, 콘크리트의 대표적인 문제인 DEF(Delayed Ettringite Formation) 등을 발생시키지 않는 긍정적인 역할을 하는 것으로 분석하였다.

한편, Galan and Glasser(2015) 연구에서는 다량의 염소 성분이 철근 부식 뿐만 아니라 칼슘을 용해시켜 시멘트 제품의 내구성에 악영향을 미칠수도 있다고 분석하였다. 더불어, 미국콘크리트 협회 기준(ACI 313/ACI 301)에서는 습윤 환경에서는 시멘트량의 0.3 %, 건조환경에서는 1.0 %까지 시멘트의 염소 성분을 허용하고 있다. 또한, Zhu et al.(2019)는 폐기물로부터 유입된 염소를 시멘트 제조공정에 활용시 시멘트 소성설비에 문제를 발생시켜 최종적으로 제품의 질을 감소시키는 것으로 발표하여, 제조공정에서 염소 함량을 제어하는 것이 매우 중요하다고 언급하였다.

본 연구에서는 시멘트 염소(Cl) 함량 증가가 콘크리트의 기초

\* Corresponding author E-mail: [cjw@asiacement.co.kr](mailto:cjw@asiacement.co.kr)

<sup>1</sup>아세아시멘트 기술연구소 연구원 (R&D Center, Asiacement Co., Chungbook, 27125, Korea)

<sup>2</sup>아세아시멘트 기술연구소 선임연구원 (R&D Center, Asiacement Co., Chungbook, 27125, Korea)

<sup>3</sup>아세아시멘트 기술연구소 책임연구원 (R&D Center, Asiacement Co., Chungbook, 27125, Korea)

물성에 관한 연구의 일환으로, 실제 시멘트 제조공정을 이용해 Cl 함량을 단계적으로 제어한 시멘트 시료를 제조하고, Cl 함량 및 기타 품질 지표가 콘크리트의 슬럼프 및 압축강도에 미치는 영향을 통계적 방법을 이용하여 평가하였다.

## 1.2 이론적 검토

염소 성분을 갖는 염화물에 의한 시멘트 수화반응 촉진 메커니즘은 다음과 같이 진행된다.

(1) 염화물은 석고의 용해 속도를 증가시켜 용액 내  $SO_4^{2-}$ 의 가용성을 높이고 에트리징사이트 형성을 향상시키며,  $C_3A$ , 석고 및 혼합수 사이의 반응이 가속화된다(Dorn et al, 2022).

(2) 염화물은 1차 C-S-H의 밀도를 감소시키며, 감소된 밀도를 갖는 C-S-H의 형성은 친수성 콜로이드의 형성 또는 C-S-H 상에  $Cl^-$  이온의 흡착에 기인한다(Colleparidi and Massida 1971).

(3) 수화된  $C_3S$  페이스트에서 염화물은 C-S-H 겔 형태를 초기에 더 긴 “바늘” 형성 방향으로 변경하고 압축강도 증가의 원인이 될 수 있는 “honeycomb” 겔 구조의 형성을 유도한다(Ben-Dor and Perez 1976).

(4)  $Cl^-$  이온은 무수  $C_3S$ 를 덮고 있는 보호층으로 확산되고,  $OH^-$  이온이 해당 층에서 용해되는 속도를 증가시켜 전체 반응 속도를 증가시킨다(Kondo et al, 1977).

(5) 염화물은 CH로 기공 용액을 빠르게 과포화시킨다. 이는 유도 기간을 줄이고  $C_3S$  수화를 가속화하는 역할을 할 수 있다(Young et al, 1977).

(6)  $Cl^-$  이온은 이온 크기가 작기 때문에 C-S-H 보호층을 관통하여 파괴한다(Singh and Ojha 1981).

(7) 염화물은 시스템이  $C_3S$ 의 용해 증가와 반응하여 더 많은 석회를 방출하는 pH를 감소시킨다(Brown et al, 1986).

(8) 염화물은 촉매 역할을 한다(EI-Didamony et al, 1996).

(9) 시멘트 수화의 핵 생성 및 성장 모델을 기반으로 염화물은  $C_3S$  표면에서 이질적인 C-S-H 핵 생성 속도를 증가시킨다(Thomas et al, 2009).

(10) 용액에 존재하는  $Cl^-$  이온은 초기에 형성된 AFm 상에서  $SO_4^{2-}$  이온을 대체한다. 이는  $Cl^-$  농도에 따라 Kuzel 염 또는 Friedel 염 형성으로 이어진다. AFm에서  $SO_4^{2-}$  이온이 치환되면 용액 내  $SO_4^{2-}$ 의 가용성이 증가하고 결과적으로 에트리징사이트 형성이 강화되며, 시멘트 제품의 물성을 향상시킨다(Balonis et al, 2010).

(11) 염화물은 균일한 핵형성을 선호하는데, 이는 기공 용액에

유입된 칼슘 이온과  $C_3S$ 에서 용해된 규산염 이온이 풍부함에 따른 영향으로 나타난다(Nicoleau 2011).

Ogirigbo and Ukpata(2017) 연구결과에 따르면 재령 7일까지 Friedel’s salt, Kuzel’s salt 등의 염화물 생성으로 기공을 빠르게 막아 (pore-blocking) 압축강도 증가에 큰 영향을 미치는 것으로 연구하였다(Fig. 1).



Fig. 1. Pore variety followed by chlorine-cement hydrate

## 2. 시험분석

### 2.1 시험재료

실제 시멘트 제조설비를 이용해 염소 함량이 각기 다른 182개의 시멘트 시료를 제작하였다. Table 1은 연구에 사용한 시멘트의 주요 기술 통계량을, Fig. 2는 이를 히스토그램으로 나타낸 것이다. 일부 시료는 일부 분석 항목에 누락값이 존재하였다. 염소함량(Cl)의 경우, 최솟값(Min.) 236 ppm, 최댓값(Max.) 794 ppm, 평균(Mean) 518.30 ppm, 변동계수(Coef. Var.) 21.35 %로 분석되었다. 그 외  $SO_3$ (Max, 2.73 %), f-CaO(Max, 0.59 %) 및 분말도(Min, 3469  $cm^2/g$ )에서는 KS L 5201[포틀랜드 시멘트] 내 1종 규격( $SO_3$  : 3.5 % 이하, f-CaO : 5.0 % 이하, 분말도 : 2,800  $cm^2/g$  이상)을 만족하는 수준이었다. 각 요인별 변동계수들은 염소를 제외하고 10 % 이내를 하회하는 수준으로 나타내었다.

Table 1. Results of descriptive statistic of cement

Factor	Num.	Mean	Coef. var.	Min.	Max.
LOI (%)	168	2.74	8.90	2.14	3.33
$SO_3$ (%)	180	2.49	3.84	2.26	2.73
f-CaO (%)	180	0.59	5.52	0.52	0.67
Cl (ppm)	181	518.30	21.35	236.00	794.00
LSF (%)	182	89.83	2.12	85.19	94.90
Blaine ( $cm^2/g$ )	181	3735.00	2.95	3469.00	4031.00

잔골재(모래)는 원주 문막에서 채취된 것으로 조립률 2.52의 강사(강모래)를 사용했으며, 굵은골재는 영월에서 채취한 최대치

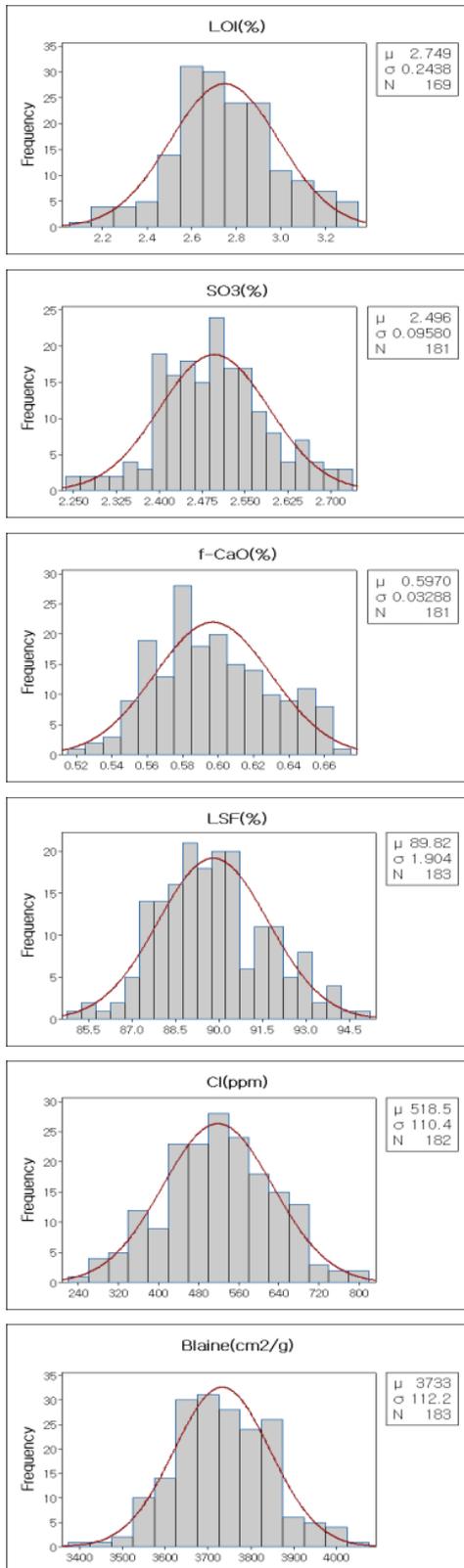


Fig. 2. Histogram of factors from cement

수 25 mm의 석회석 골재를 사용하였다. 작업성 확보 및 공기량 확보를 위해 준PC계 감수제를 사용하였다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 콘크리트 시험

콘크리트는 25 mm(굵은골재 최대치수) - 24 MPa(목표 압축강도) - 180 mm(슬럼프) 배합비를 기준으로 했으며, 배합비는 Table 2에 표기하였다. 본 실험에서는 포틀랜드 시멘트 사용량을 70 wt.% 및 혼합재로서 고로슬래그 15 wt.%, 플라이애시 15 wt.%를 사용하였으며, KS F 2402(콘크리트의 슬럼프 시험방법) 방법에 의거하여 굳지 않은 포틀랜드 시멘트의 콘크리트 슬럼프 시험을 진행하였다. 우선, 콘크리트의 초기 슬럼프(Slump-ini) 측정을 실시했으며, 60분간 방치 및 샅을 이용한 퇴비빔 과정을 거쳐 경시변화(Slump-loss)를 확인하였다.

콘크리트 샘플은 KS F 2403(콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법)에 의거하여 지름 100 mm 및 높이 200 mm의 원주형 공시체를 제작하였으며, KS F 2405(콘크리트 압축강도 시험방법)에 의거하여 재령별 압축강도를 측정하였다.

Table 2. Mixture proportions of cement concrete

Unit volume weight (kg/m <sup>3</sup> )							
W	C	BS	FA	S	G	SP	AE
185	223	48	47.8	810.2	1,005.5	3.83	0

※ W : water C : Cement S : Sand  
 G : Gravel SP : Super Plasticizer(semi-PC)  
 AE : Air Entraining BS : Blast Slag FA : Fly Ash

### 2.2.2 상관분석

시멘트의 품질 요인으로 시멘트의 SO<sub>3</sub>, LSF, 분말도, 염소함량을 독립변수로 하고, 콘크리트 성능 요인으로 슬럼프와 재령별 압축강도를 종속변수로 하여 분석을 실시하였다. 분석 기법으로는 각 변수간 상관분석과 다중 회귀분석(MRA, Multiple Regression Analysis)을 활용하였다. 다중 회귀분석은 일반적으로 여러 요인들이 동시에 작용하는 반응에서 요인과 반응간의 관계를 파악하기 위한 실험계획법 중 하나로서 모든 변수들 간의 교호작용을 확인하고자 2차 이상의 항을 고려해야 하나, 본 연구에서는 각각의 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 직관적으로 파악하기 위해 선형의 1차 항만을 고려하였다. 모든 분석은 Minitab<sup>®</sup> 프로그램을 활용하였다.

### 3. 시험결과

본 연구에서는 각 요인별에 대한 상관분석 결과를 이용하여 분석하였다. 상관계수(Pearson R) 값은 각 요인 간 양&음의 상관관계 계수이며, p-value는 이러한 상관관계의 유의성을 판별하는 지표이다. 즉, Pearson R 값이 1.0에 가까울수록 강한 양의 상관관계(정비례), -1.0에 가까울수록 강한 음의 상관관계(반비례)가 있다고 정의되며, p-value가 0.000에 가까울수록 각 요인 간의 상관관계 유의성이 있다고 판단된다. 본 연구에서의 신뢰구간은 90 %로 설정했으며, 이는 p-value가 0.100 이하를 갖는 데이터에 대해 유의성을 갖는 것으로 선정하였다.

#### 3.1 염소 함량이 콘크리트 슬럼프에 미치는 영향

Table 3은 본 실험에서 도출된 콘크리트 초기 슬럼프 및 콘크리트 경시변화에 대해 기술 통계량 분석 결과값을 나타냈으며, 이를 토대로 가시적인 효과를 높이기 위해 상자 그림을 표현하였다(Fig. 3). 총 샘플수 181개에 대해 초기 슬럼프(Slump-ini.) 값은 평균 193 mm를 나타냈으며, 변동계수 3.86, 최솟값 175 mm에서 최댓값 215 mm로 분석되었다. 콘크리트 경시변화(Slump-loss) 또한 동일하게 181개의 샘플을 측정하였으며, 평균 78.98 mm, 변동계수 31.84, 최솟값 40 mm에서 최댓값 125 mm까지 분포하는 것으로 확인되었다.

Table 3. Results of descriptive statistic of concrete slump

Factor	Num.	Mean (mm)	Coef. var.	Min. (mm)	Max. (mm)
Slump -ini.	181	193.43	3.86	175.00	215.00
Slump -loss	181	78.98	31.84	40.00	125.00

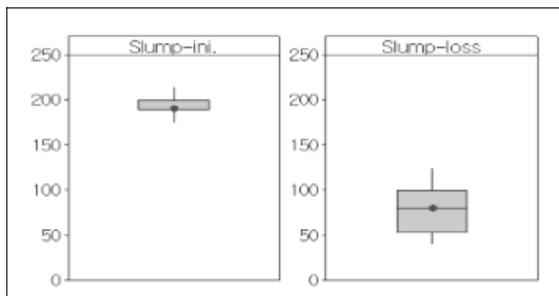


Fig. 3 Box plot of concrete slump(ini. vs loss) (unit : mm)

다중 회귀분석 결과를 Table 4에 표시하였다. 염소 함량과 초기 슬럼프간의 p-value는 0.100 이상으로 유의한 상관관계를 나타내지 않았다. 한편, 콘크리트 경시변화는 염소함량에 대해 유의한(p-value = 0.012) 양의 상관관계(Pearson R = 0.186)를 가지며, LSF는 유의한(p-value = 0.002) 음의 상관관계(Pearson R = -0.232)를 나타내고 있는 것으로 확인되었다.

Table 4. Results of correlation analysis on independent(SO<sub>3</sub>-Blaine) and concrete compressive strength

Factor	Method	SO <sub>3</sub>	Cl	LSF	Blaine
Slump -ini.	Pearson R	-0.010	-0.056	0.010	-0.120
	p-value	0.897	0.453	0.897	0.108
Slump -loss	Pearson R	-0.013	0.186	-0.232	0.037
	p-value	0.868	0.012	0.002	0.624

\* Slump-loss : slump after 60 minutes

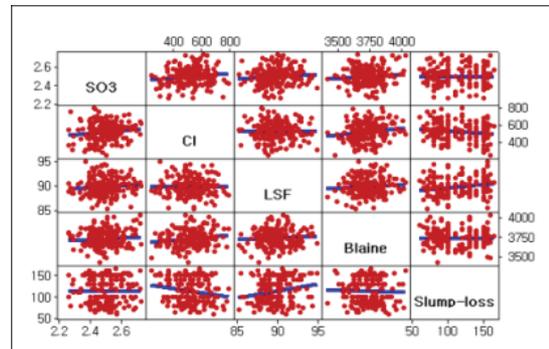


Fig. 4. Matrix scatter plot for verification of slump-loss and each factors (SO<sub>3</sub> : %, Cl : ppm, LSF : %, Blaine : cm<sup>2</sup>/g, slump-loss : mm)

각 요인들에 대한 콘크리트 경시변화 결과를 산점도표 형태로 나타냈으며(Fig. 4), 각 요인들의 변화가 콘크리트 경시변화에 미치는 영향을 확인하고자 회귀식을 도출하였다.

$$\begin{aligned} \text{Slump-loss(mm)} &= 318 - 2.978 \text{ LSF} + 0.0421 \text{ Cl} \\ &\quad - 3.6 \text{ SO}_3 + 0.0041 \text{ Blaine} \end{aligned} \quad (1)$$

(1) 식은 각 요인의 영향을 직관적으로 파악하기 위해 요인의 1차 항만을 고려한 선형 분석 결과로, 2차 항 이상을 포함하여 분석하면 콘크리트 경시변화를 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 도출된 회귀식에서는 염소 함량이 증가하거나, 분말도가 증가하는 경우 슬럼프 경시변화가 증가하는 반면, LSF와 SO<sub>3</sub>의 증가는 슬럼프 경시변화를 감소시키는 것으로 나타

났다. 특히, 염소 함량의 증가가 초기 슬럼프에 미치는 영향은 비교적 명확하지 않지만, 슬럼프 경시변화와의 상관관계가 존재하는 것으로 판단된다. 한편, slump-loss의 회귀식에 대한 R<sup>2</sup>값은 8.57%로 나타났다.

염소 함량 증가가 슬럼프 경시변화를 증가시키는 것은 염소 성분에 의해 초기 수화물 피막에서 OH<sup>-</sup> 이온과 Cl<sup>-</sup> 이온의 상호확산 작용에 따른 alite의 수화촉진과 함께, 에트링자이트(Ca<sub>6</sub>[Al(OH)<sub>6</sub>]<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> · 26H<sub>2</sub>O)로부터 Friedel's (C<sub>3</sub>A · CaCl<sub>2</sub> · 10H<sub>2</sub>O), Kuzel's salt(C<sub>3</sub>A · 0.5CaCl<sub>2</sub> · 0.5CaSO<sub>4</sub> · 10H<sub>2</sub>O) 생성이 좀 더 빠르게 이루어져, 응결속도가 빠르게 증가되어 슬럼프 경시변화 또한 증가되는 것으로 판단되었다(Choi et al. 2023; Lee et al. 2021).

Fig. 5는 회귀식을 바탕으로 염소함량, LSF와 콘크리트 경시변화 간의 상관관계에 대한 주요과도를 나타낸 것으로서 콘크리트 경시변화와 염소간 양의 상관관계, LSF와는 음의 뚜렷한 상관관계가 있음을 파악할 수 있다.

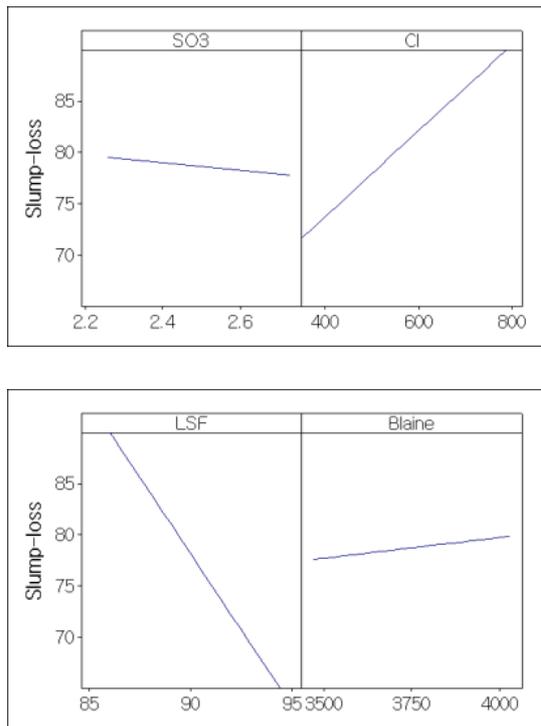


Fig. 5. Results of main effect diagram for concrete slump-loss (SO<sub>3</sub> : %, Cl : ppm, LSF : %, Blaine : cm<sup>2</sup>/g)

### 3.2 염소 함량이 콘크리트 압축강도에 미치는 영향

Table 5는 제조 콘크리트 샘플의 재령별 압축강도에 대한 기술 통계량 분석 결과를 나타낸 것으로, 콘크리트 슬럼프와 동일하게

181개의 샘플들을 바탕으로 하여 분석하였다. 각 재령별 압축강도 값은 1일 평균 4.2 MPa, 3일 평균 14.5 MPa, 7일 평균 23.1 MPa, 28일 평균 34.1 MPa로 나타났으며, 변동계수는 각각 13.08, 7.56, 7.53, 4.89로 도출되었다. 각 재령별 압축강도의 평균값 및 최댓, 최솟값과의 크기 변화를 시각화하고자 Fig. 6의 상자그림을 활용하였다.

Table 5. Results of descriptive statistic of concrete compressive strength

Factor	Num.	Mean (MPa)	Coef. Var.	Min. (MPa)	Max. (MPa)
1D	181	4.2	13.08	3.1	5.6
3D		14.5	7.56	12.3	17.1
7D		23.1	7.53	19.1	27.5
28D		34.1	4.89	30.8	38.3

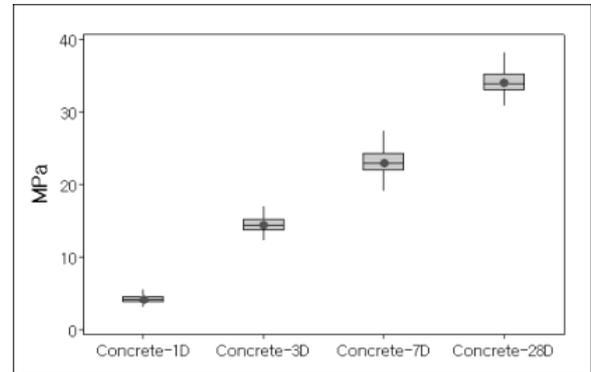


Fig. 6. Box plot of concrete compressive strength (unit : MPa)

재령별 압축강도 및 각 요인별 상관성 분석 결과를 Table 6에 나타내었다. 슬럼프 경시변화 분석과 동일하게 p-value가 0.100 이하 값에 만족하는 요인들에 대해 재령별 압축강도와 상관성이 있다고 판단하였다.

콘크리트 초기 압축강도 범주에 속하는 1일 압축강도에서는 염소(Pearson R = 0.171), 분말도(Pearson R = 0.168)가 유의한 상관관계를 나타내며(각 p-value = 0.025, 0.027), 모두 양의 상관관계를 확인할 수 있다. 1일과 같이 초기 압축강도 범주에 속하는 3일 압축강도에서는 모든 요인에 대해 유의한 양의 상관관계를 나타내고 있다(Pearson R = 0.129 ~ 0.201, p-value = 0.009 ~ 0.094). 콘크리트 7일 압축강도에서는 SO<sub>3</sub>(Pearson R = 0.136), 염소(Pearson R = 0.251) 및 분말도(Pearson R = 0.182)의 상관성이 유의한 것(각 p-value = 0.069, 0.001, 0.014)으로 나타났으며, 특히 염소에 대한 양의 상관성은 크게 증가한 것을 확인하

**Table 6. Results of correlation analysis on independent(SO<sub>3</sub>~Blaine) and concrete compressive strength**

Factor	Method	SO <sub>3</sub>	CI	LSF	Blaine
Con-1D	Pearson R	0.033	0.171	0.108	0.168
	p-value	0.668	0.025	0.155	0.027
Con-3D	Pearson R	0.156	0.129	0.201	0.175
	p-value	0.043	0.094	0.009	0.022
Con-7D	Pearson R	0.136	0.251	0.051	0.182
	p-value	0.069	0.001	0.496	0.014
Con-28D	Pearson R	0.001	0.118	-0.123	0.083
	p-value	0.986	0.124	0.106	0.278

\* Slump-loss : slump after 60 minutes  
 \* Con-xD : concrete age X days

였다. 28일 압축강도에서는 각 요인별 상관계수에 대한 유의성 (p-value > 0.1)이 모두 없는 것으로 확인되었다.

Table 6에서 도출된 각 재령별 콘크리트 압축강도 및 요인들 간의 상관성을 바탕으로 다음 회귀식을 도출하였다.

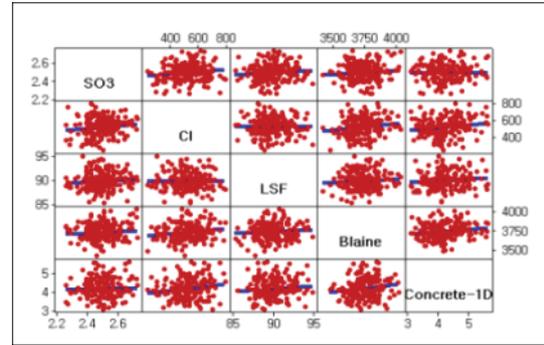
$$\begin{aligned} \text{Con-1D (MPa)} &= -1.56 + 0.0318 \text{ LSF} \\ &+ 0.000706 \text{ CI} + 0.016 \text{ SO}_3 \\ &+ 0.000671 \text{ Blaine} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Con-3D (MPa)} &= -4.24 + 0.1072 \text{ LSF} \\ &+ 0.000999 \text{ CI} + 1.277 \text{ SO}_3 \\ &+ 0.001456 \text{ Blaine} \end{aligned} \quad (3)$$

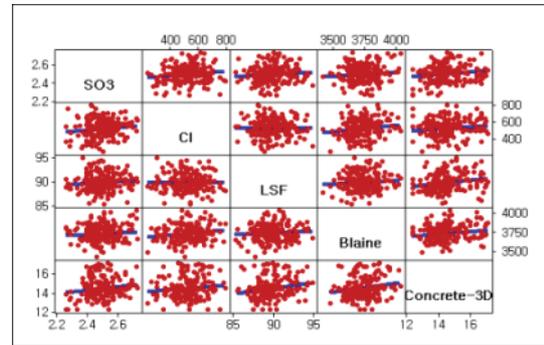
$$\begin{aligned} \text{Con-7D (MPa)} &= 5.46 + 0.0412 \text{ LSF} \\ &+ 0.00339 \text{ CI} + 1.74 \text{ SO}_3 \\ &+ 0.00209 \text{ Blaine} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Con-28D (MPa)} &= 38.06 - 0.1021 \text{ LSF} \\ &+ 0.00170 \text{ CI} - 0.20 \text{ SO}_3 \\ &+ 0.00130 \text{ Blaine} \end{aligned} \quad (5)$$

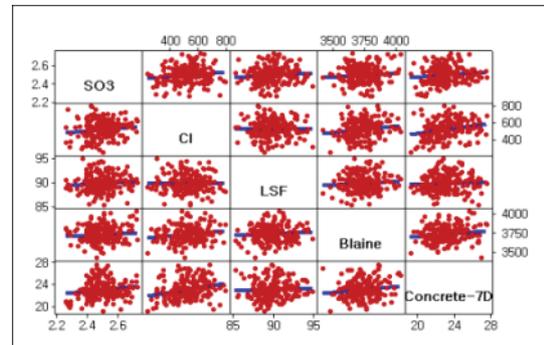
(2)~(5) 식은 콘크리트 재령일별에 대한 각 요인별 영향성을 1차 항만 고려한 선형 분석 결과를 나타낸 것이다. 본 연구에서 도출된 회귀식에서는 염소함량 및 분말도가 증가함에 따라 모든 재령일별 압축강도가 증가하는 것으로 확인되었으며, 재령 28일 압축강도에서는 LSF 및 SO<sub>3</sub>가 반비례적인 거동을 나타내는 것으로 확인되었다. 한편, 재령별 콘크리트 압축강도의 회귀식에 대한 R<sup>2</sup>값은 각각 5.64 %(1일), 9.30 %(3일), 9.48 %(7일), 3.61 %(28일)로 나타났다.



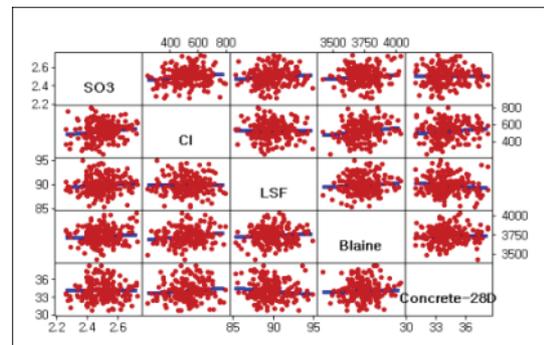
(a) Concrete-1D



(b) Concrete-3D



(c) Concrete-7D



(d) Concrete-28D

**Fig. 7. Matrix scatter plot for verification of concrete compressive strength and each factors (unit : MPa)**

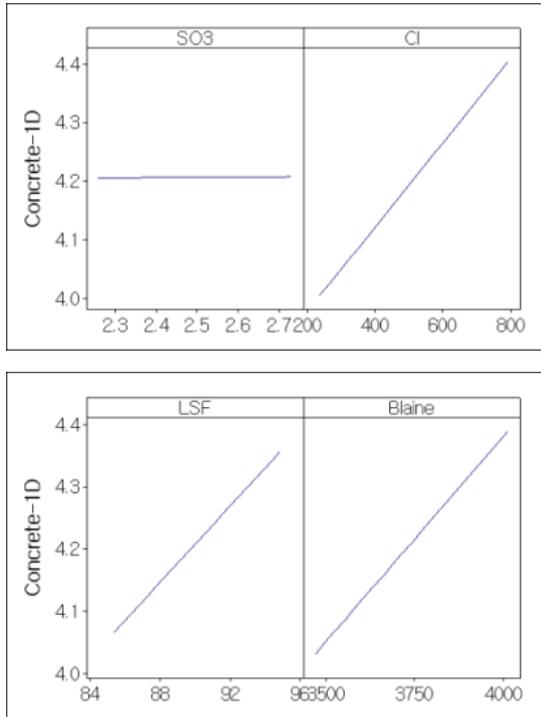


Fig. 8. Results of main effect diagram of concrete compressive strength (1D) (unit : MPa)

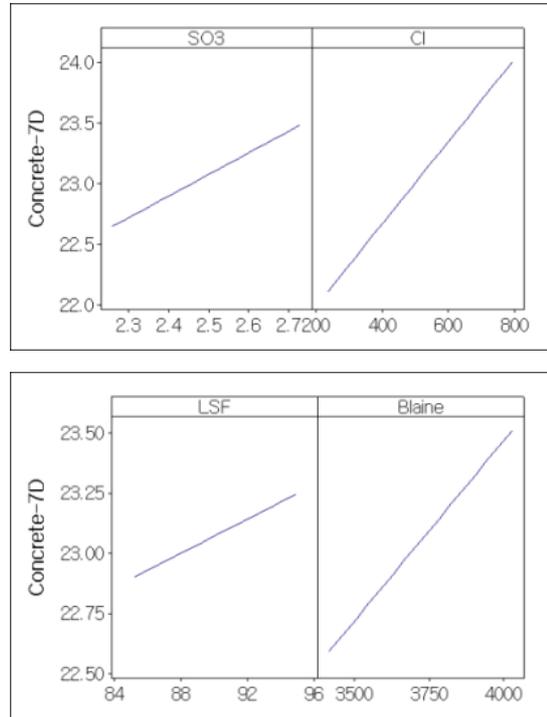


Fig. 10. Results of main effect diagram of concrete compressive strength (7D) (unit : MPa)

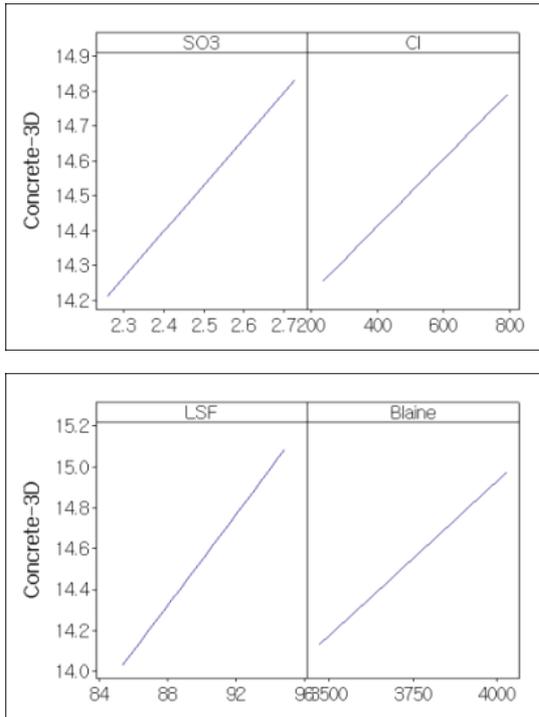


Fig. 9. Results of main effect diagram of concrete compressive strength (3D) (unit : MPa)

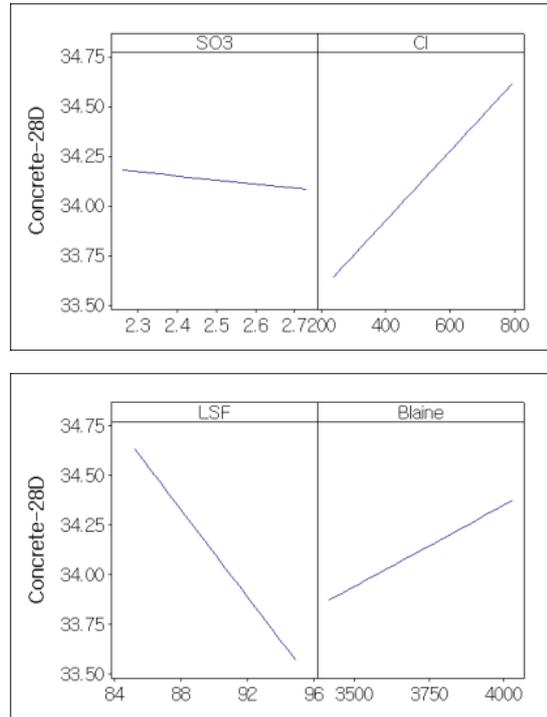


Fig. 11. Results of main effect diagram of concrete compressive strength (28D) (unit : MPa)

Fig. 7 및 Fig. 8~11은 콘크리트의 각 재령별 압축강도 및 요인들에 대한 산점도표 및 주효과도를 나타낸 것이다. 상기 회귀식을 바탕으로 도출되었으며, 각 요인들의 콘크리트 재령일별 영향수준을 가시적으로 확인할 수 있었다. 염소 함량의 경우, 콘크리트 재령일별 압축강도에 대해 양의 상관관계가 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 분말도 또한 염소 함량과 마찬가지로 양의 상관관계를 띄고 있었다. LSF 및 SO<sub>3</sub>는 콘크리트 재령 1일~7일 압축강도에 대해 양의 상관관계를 갖는 반면, 28일 압축강도에 대해서는 음의 상관관계를 나타내고 있다.

한편, 본 연구에서 선정된 요인 외에도 C<sub>3</sub>S(alite), C<sub>2</sub>S(belite), C<sub>3</sub>A(aluminate)과 기공성 간의 상관관계, 혼합재의 성분(슬래그, 플라이애시) 등에 대한 압축강도의 영향이 존재할 것으로 추측되며, 추가 요인들에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 염소 함량에 따른 콘크리트 슬럼프 및 압축강도와의 상관관계를 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 염소 함량은 콘크리트 초기 슬럼프에 유의한 수준의 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. 본 분석 수준에서, 콘크리트 초기 슬럼프에 미치는 영향은 분말도 > 염소 함량 > SO<sub>3</sub> = LSF 순으로 나타났다. 반면, 콘크리트 경시변화에서는 LSF > 염소 함량 > 분말도 > SO<sub>3</sub> 순으로 영향성으로 나타나며, LSF는 유의한 음의 상관관계 및 염소 함량은 유의한 양의 상관관계를 가진다.
2. 염소 함량과 분말도 증가는 1~28일 재령에서 콘크리트 압축강도를 향상시키는 것으로 나타났다. 하지만 재령 28일 압축강도에서는 각 요인별 상관관계의 유의성이 본 연구범위에 만족하지 않았다.
3. 염소 함량 증가는 콘크리트 슬럼프 경시변화를 증가시키는 부정적 효과는 있지만, 콘크리트 재령별 압축강도를 증가시키는 긍정적인 효과가 존재하는 것으로 확인되었다.

#### Conflict of interest

None.

#### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 한국산업기술기획평가원 탄소중립 산업핵심기술개발사업(RS-2023-00261157) 지원으로 수행되었습니다.

#### References

- Balonis, M., Lothenbach, B., Le Saout, G., Glasser, F.P. (2010). Impact of chloride on the mineralogy of hydrated Portland cement systems, *Cement and Concrete Research*, **40(7)**, 1009–1022.
- Beaudoin, J.J., Ramachandran, V.S. (1992). A new perspective on the hydration characteristics of cement phases, *Cement and Concrete Research*, **22(4)**, 689–694.
- Ben-Dor, L., Perez, D., (1976). Influence of admixtures on strength development of Portland cement and on the microstructure of tricalcium silicate, *Journal of Materials Science*, **11**, 239–245.
- Bogue, R.H., Lerch, W. (1934). Hydration of Portland cement compounds, *Industrial & Engineering Chemistry*, **26(8)**, 837–847.
- Brown, P.W., Harner, C.L., Prosen, E.J. (1986). The effect of inorganic salts on tricalcium silicate hydration, *Cement and Concrete Research*, **16(1)**, 17–22.
- Choi, J.W., You, B.K., Seo, D.K., Kim, K.S., Han, M.C. (2023). Effect of chlorine content in clinker on setting and compressive strength of early strength cement, *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*, **11(3)**, 218–225 [in Korean].
- Collepari, M., Massida, L. (1971). Hydration of tricalcium silicate, *Journal of the American Ceramic Society*, **54(9)**, 419–422.
- Dorn, T., Blask, O., Stephan, D. (2022). Acceleration of cement hydration—A review of the working mechanisms, effects on setting time, and compressive strength development of accelerating admixtures, *Construction and Building Materials*, **323**, 126554.
- El-Didamony, H., Sharara, A.M., Helmy, I.M., El-Aleem, S.A. (1996). Hydration characteristics of  $\beta$ -C<sub>2</sub>S in the presence of some accelerators, *Cement and Concrete Research*, **26(8)**, 1179–1187.
- Galan, I., Glasser, F.P. (2015). Chloride in cement, *Advances in Cement Research*, **27(2)**, 63–97.
- Kim, K.S., Seo, S.K., Chu, Y.S. (2018). Extraction of potassium chloride using fly ash from cement bypass dust, *Journal of Ceramic Processing Research*, **19(3)**, 231–235.
- Kondo, R., Daimon, M., Sakai, E., Ushiyama, H. (1977). Influence of inorganic salts on the hydration of tricalcium silicate, *Journal*

- of Applied Chemistry and Biotechnology, **27(1)**, 191-197.
- Lee, Y.J., Kim, N.I., Cho, J.H., Seo, S.K., Chu, Y.S. (2021). A study on the characteristics of clinker and cement as chlorine content, Resources Recycling, **30(5)**, 10-16 [in Korean].
- Nicoleau, L. (2011). Accelerated growth of calcium silicate hydrates: experiments and simulations, Cement and Concrete Research, **41(12)**, 1339-1348.
- Odler, I., Abdul-Maula, S. (1987). Investigations on the relationship between porosity structure and strength of hydrated Portland cement pastes III. Effect of clinker composition and gypsum addition, Cement and Concrete Research, **17(1)**, 22-30.
- Odler, I., Wonnemann, R. (1983). Effect of alkalis on Portland cement hydration: I. Alkali oxides incorporated into the crystalline lattice of clinker minerals, Cement and Concrete Research, **13(4)**, 477-482.
- Ogiri, O.R., Ukpata, J. (2017). Effect of chlorides and curing duration on the hydration and strength development of plain and slag blended cements, Journal of Civil Engineering Research, **7(1)**, 9-16.
- Osbaeck, B., Johansen, V. (1989). Particle size distribution and rate of strength development of Portland cement, Journal of the American Ceramic Society, **72(2)**, 197-201.
- Roskopf, P. A., Linton, F. J., Pepler, R. B. (1975). Effect of Various Accelerating Chemical Admixtures on Setting and Strength Development of Concrete, Journal of Testing and Evaluation, **3(4)**, 322-330.
- Saniitsky, M.A. (1992). Correlation Between the Crystal Structure of Calcium Minerals and their Reactivity with Water, International Congress on Chemistry of Cement, New Delhi, 292-297.
- Singh, N.B., Ojha, P.N. (1981). Effect of CaCl<sub>2</sub> on the hydration of tricalcium silicate, Journal of Materials Science, **16**, 2675-2681.
- Thomas, J.J., Allen, A.J., Jennings, H.M. (2009). Hydration kinetics and microstructure development of normal and CaCl<sub>2</sub>-accelerated tricalcium silicate pastes, The Journal of Physical Chemistry C, **113(46)**, 19836-19844.
- Xie, Y., Quan, C. (2024). Improved ettringite stabilization by calcium carbonate and calcium nitrate additions in ternary PC-CSA-C\$ systems, Cement and Concrete Research, **175**, 107383.
- Young, J.F., Tong, H.S., Berger, R.L. (1977). Compositions of solutions in contact with hydrating tricalcium silicate pastes, Journal of the American Ceramic Society, **60(5-6)**, 193-198.
- Zhu, H., Wang, Y., Jing, N., Jiang, X., Lv, G., Yan, J. (2019). Study on the evolution and transformation of chlorine during co-processing of hazardous waste incineration residue in a cement kiln, Waste Management & Research, **37(5)**, 495-501.

### 시멘트 염소 함량과 콘크리트의 슬럼프, 압축강도 간의 상관관계 연구

본 연구에서는 콘크리트 슬럼프 및 압축강도와 시멘트 염소 함량을 포함한 기타 요인과의 상관관계에 대해 통계적으로 분석하였다. 시멘트 염소 함량은 236 ~ 794 ppm 범위로 선정했으며, 기타 물성들은 KS L 5201 규격에 만족하는 시멘트를 사용하였다. 분석 결과, 어떠한 요인들과도 초기 슬럼프와는 상관관계가 존재하지 않았다. 슬럼프 경시변화에서의 염소 성분은 강한 음의 상관관계를 나타내고 있으며, 1일 ~ 7일 압축강도에서는 강한 양의 상관관계를 갖고 있는 것으로 분석되었다. 한편, 28일 압축강도에서는 염소 성분과 압축강도 간의 상관성이 없는 것으로 확인되었다.