

# 혼화재 혼입에 따른 콘크리트에 매립된 철근의 부식 임계 염화물량의 변화

## Variation of Critical Chloride Content of Rebar Embedded in Concrete with Admixture

박 장 현<sup>1</sup>

이 윤 수<sup>2</sup>

이 한 승<sup>3\*</sup>

Park, Jnag-Hyun<sup>1</sup> Lee, Yun-Su<sup>2</sup> Lee, Han-Seung<sup>3\*</sup>

Doctor's course, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea 1

Doctor's course, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea 2

Professor, Department of Architecture & Architectural Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan, 15588, Korea 3

### Abstract

The critical chloride content of rebar embedded in concrete was experimentally evaluated according to the admixture replacement ratio and admixture type. Four types of reinforced concrete were mixed OPC 100%, OPC 70% + GGBFS 30%, OPC 40% + GGBFS 60%, and OPC 40% + GGBFS 40% + FA 20%. NaCl solution was supplied to the specimens, and the open circuit potential of the embedded rebar was monitored. The specimens determined to initiate corrosion were cut at intervals of 5mm from the NaCl solution supply surface and conducted to chlorine ion profile. Corrosion initiation time of rebar embedded in concrete was delayed as the admixture replacement ratio increased. Looking at the critical chloride content of the types of reinforced concrete, it was highest in OPC 1.46kg/m<sup>3</sup>, followed in order by S30 0.98kg/m<sup>3</sup>, TBC 0.74kg/m<sup>3</sup>, and S60 0.71kg/m<sup>3</sup>.

Keywords : concrete, admixture, open circuit potential, corrosion, critical chloride content

## 1. 서 론

콘크리트의 성능은 일반적으로 강도 및 내구성에 의해 결정되며, 최근 콘크리트의 내구성이 사회적인 문제로 부각되면서 고품질 고내구성을 갖는 콘크리트의 개발이 절실히 요구되고 있다. 철근 콘크리트의 내구성에 있어 가장 중요한 문제는 매립된 보강철근의 부식이며, 철근의 부식에 의해 철근 콘크리트 구조물의 열화가 진행된다[1,2]. 콘크리트에 매립된 철근은 강알칼리의 시멘트 환경에서 표면에 안정한 산화피막이 형성되어 철근이 부식으로부터 보호받지만, 콘

크리트의 중성화로 인한 pH의 감소나, 염화물 이온의 침투에 따라 산화피막이 파괴되고 철근은 부식하게 된다[3].

콘크리트의 염해에 대한 내구성을 향상시키기 위한 방안으로 콘크리트의 공극구조를 치밀하게 하여 염화물이온등과 같은 유해인자의 침입을 차단하는데 유효하다고 알려져 있는 고로슬래그 미분말(Ground Granulated Blast Furnace Slag)이나 플라이 애시(Fly Ash) 등의 혼화재를 활용하는 방법이 제시되어 있다[4]. 특히 콘크리트에 사용되는 보통 포틀랜드 시멘트를 혼화재로 치환하여 사용하는 경우, 시멘트 사용량을 감소시켜 시멘트 제조 공정에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출을 감소시키는데 도움이 되는 것으로 보고되었다[5,6]. 콘크리트의 동일한 강도 발현을 기준으로 할 때, 혼화재의 치환에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량은 플라이 애시 13~15%, 고로슬래그 22%의 감소효과를 볼수 있는 것으로 알려져 있다[7]. 또한 경화된 콘크리트의 수분 및 염소이온의 침투성과 확산속도가 크게 감소하여, 콘크리트의 밀

Received : October 7, 2019

Revision received : November 6, 2019

Accepted : November 26, 2019

\* Corresponding author : Lee, Han-Seung

[Tel: 82-31-400-5181, E-mail: ercleehs@hanyang.ac.kr]

©2019 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

도 증가로 인해 황산염, 알칼리-골재 반응을 억제하고, 철근의 부식도 억제되는 것으로 알려져 있다[8,9].

하지만 콘크리트에 사용되는 시멘트를 고로슬래그 미분말, 플라이 애시와 같은 혼화재로 치환하여 사용하는 경우 콘크리트에 매립된 철근의 부식 임계염화물량이 감소한다는 연구결과가 보고되고 있으며[10,11], 철근 콘크리트의 정확한 내구성 설계를 위해서는 다양한 영향인자를 고려하여 철근 부식 임계염화물량( $C_{lim}$ )을 선정하는 것이 중요하다[12]. 국내의 콘크리트 표준시방서[13]에서는  $C_{lim}$ 을 단위결합재량의 0.4%로 규정하고 있으며 이는 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트에 대한 기준으로, 혼화재로 치환배합에 사용하는 콘크리트에 대한 규정 및 관련연구가 부족한 실정이다. 또한 콘크리트에 매립된 철근의 임계염화물량의 변화는 염해에 대한 내구성 확보의 어려움을 야기할 수 있다. 따라서 혼화재 종류와 사용량에 따른 콘크리트에 매립된 철근의 부식 임계염화물량 산정이 필요한 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 콘크리트에 사용되는 혼화재 종류와 치환율이 철근의 부식 임계염화물량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 콘크리트에 매립된 철근의 자연전위를 실시간으로 모니터링하여 부식개시시점을 판단하고, 부식개시시점에서의 콘크리트 염화물량을 평가하여 혼화재 종류 및 치환율에 따른 철근 부식 임계염화물량을 평가하고자 하였다.

## 2. 기존연구의 고찰

### 2.1 혼화재가 철근부식임계염화물량에 미치는 영향

포졸란 재료로서 플라이 애시와 잠재수경성 재료로서 고로슬래그 미분말을 사용한 경우에는 수화생성물 특성상 경화체 내부의 조직이 매우 밀실해지기 때문에 일반적으로 염소이온 확산계수가 낮아지게 되어, 염소이온의 투과를 매우 효과적으로 억제할 수 있게 된다. 그러나 Michael[10]의 연구에 따르면, 철근 부식 임계염화물량 관점에서는 플라이 애시를 사용한 경우 플라이 애시 치환율이 증가할수록 플라이 애시를 사용하지 않은 수준 대비 철근 부식 임계염화물량은 비례하여 낮아진다는 연구결과를 발표하였으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

Ryou and Ann[11]의 연구에서는 혼화재 사용시 철근 부식 임계염화물량의 변화를 내재염분과 외래염분의 관점에서 분석 하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 1.  $C_{lim}$  according to FA replacement ratio

Fly Ash(% , mass of binder)	$C_{lim}$ (% , mass of cement)
0	0.70
15	0.65
30	0.50
50	0.20

Table 2.  $C_{lim}$  according to binder type

Binder type	$C_{lim}$ (% , mass of cement)	
	internal	external
OPC 100%	1.15 ~ 1.36	0.48 ~ 1.52
OPC 40% + GGBFS 60%	0.66 ~ 0.78	0.43 ~ 0.71
OPC 70% + FA 30%	0.32 ~ 0.46	0.22 ~ 0.35
OPC 90% + SF 10%	1.13 ~ 1.27	-

내재염분이 존재하는 환경에서는 보통포틀랜드시멘트를 사용한 조건과 비교하여 혼화재 사용에 따라 철근 부식 임계염화물량이 크게 낮아지는 결과를 나타냈으며, 외래염분의 경우에도 사용재료에 따른 철근 부식 임계염화물량 변화폭은 낮았으나 혼화재 사용에 따라 철근 부식 임계염화물량은 낮아지는 결과를 제시하였다. 플라이 애시 및 고로슬래그 미분말과 같은 혼화재를 시멘트와 병용하여 사용할 경우에는 수화물 특성상 이온의 흡착이 쉬운 저 C/S 비를 갖는 C-S-H 구조가 생성되며, 보통포틀랜드시멘트를 단독으로 사용한 조건 대비 액상 중에  $OH^-$  농도는 상대적으로 낮아지게 된다. 따라서 혼화재를 사용한 조건에서의 철근 부식 임계염화물량은 수화물에 의한 염화물 이온의 고정화에 따른 증가요소와  $OH^-$  농도의 저하에 따른 감소요소 관계에서 결정된다고 판단된다.

### 2.2 철근콘크리트의 부식 전위 측정 방법

콘크리트를 파괴하지 않으면서 콘크리트에 매립된 철근의 부식상태를 확인하는 가장 간단한 방법은 철근의 자연전위를 측정하는 방법이다. 철근과 같은 금속성 물질은 각각의 자연전위를 가지고 있으며, 부식성 환경에 노출된 금속은 환경과 평형을 이루어 안정화되려고 하는 성질을 가지고 있다. 이때 철근의 자연전위가 부식성 환경과 평형을 이루는 과정을 부식이라고 할 수 있다. 철근이 부식환경과 평형상태로 이동할 때의 자연전위의 변화를 기준전극(Reference Electrode)를 이용하여 측정하는 것으로 철근의 부식상태를 확인할 수 있다[14,15]. 이러한 자연전위는 기준전극에 대해 음의 방향으로 큰 값을 가질수록 이온

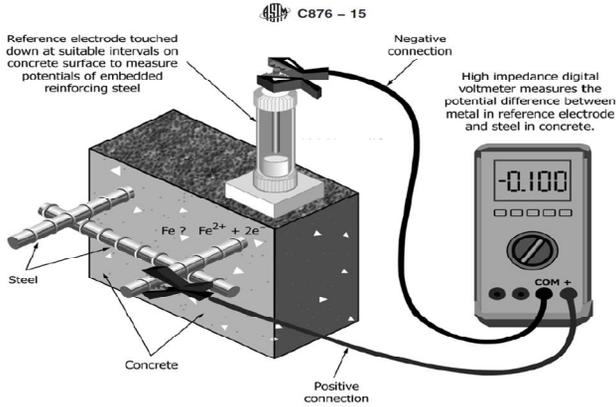


Figure 1. Schematic diagram of corrosion potential measurement of rebar embedded in concrete

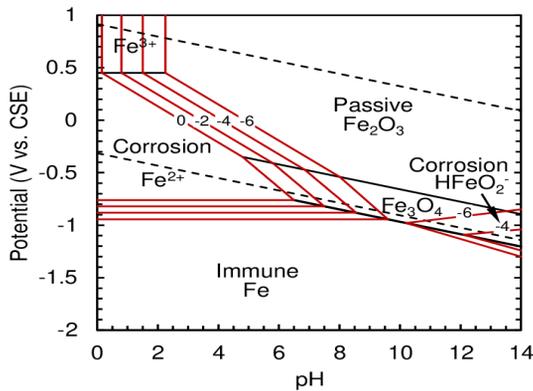


Figure 2. Pourbaix diagram of iron

화하기 쉬운 상태임을 나타낸다. 철근이 매립되어 있는 콘크리트 표면에 기준전극으로 철근의 부식전위를 측정할 수 있으며 그 개요도를 Figure 1에 나타내었다.

기준전극은 전위차계 (potentiometer)의 (-)단자에 연결하고, 철근을 (+)단자에 연결하여 기준전극에 대한 철근의 전위를 측정한다. 그리고 철근콘크리트는 Figure 2와 같이 부식전위와 pH와의 상관관계를 나타낸 도표를 통해서 철근이 부식상태, 부동태상태, 불활성상태 중 어느 영역에 있는지를 평가할 수 있다[15,16].

보통 콘크리트 환경에서 철근의 자연전위는 -100mV (vs.CSE) 부근이고 pH는 대략 12~13정도이므로 부동태 (passivation)영역에 존재한다. 즉 철근표면에 부동태 피막이 형성되어 철근이 부식으로부터 보호되고 있음을 알 수 있다. 미국에서는 1970년대에 실질적인 부식전위 측정에 의해 ASTM C-876 standard 기준을 제시하였으며, 철근콘크리트의 부식에 대한 가능성을 평가하고 있다. 일반적으로 철근콘크리트의 부식전위가 CSE전극을 기준으

로 -200mV 보다 높게 나타나는 경우 부식이 발생하지 않을 확률이 90% 이상으로 간주하며, -350mV 이하시 부식의 발생확률이 90% 이상이라고 간주한다[15].

### 3. 사용재료 및 시험체

#### 3.1 사용재료

연구에 사용된 결합재의 화학적 조성을 Table 3에 나타내었다. 시멘트는 KS L 5201에 명시되어 있는 밀도 3.15g/cm<sup>3</sup>, S사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며[17], 고로슬래그 미분말은 KS F 2563에 명시되어 있는 분말도 4000cm<sup>2</sup>/g의 고로슬래그 미분말 3종을[18], 플라이 애시는 KS L 5405에 명시되어있는 분말도 3000cm<sup>2</sup>/g의 플라이 애시 2종을 사용하였다[19].

Table 3. Chemical compositions of binder

Name	Chemical Compositions (%)									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	etc.	L.O.I
OPC	19.7	5.3	0.3	2.9	61.7	3.8	2.5	0.9	2.8	2.3
GGBFS	33.4	13.4	0.6	0.3	44.6	4.1	2.7	0.4	0.5	0.1
FA	52.7	21.4	0.9	9.2	5.0	2.0	0.3	1.1	7.3	3.86

#### 3.2 콘크리트 배합

본 연구에서 사용된 콘크리트 시험체의 실험수준에 따른 콘크리트 배합비를 Table 4에 나타내었다.

실험에 사용된 철근콘크리트 시험체는 콘크리트의 혼화재의 종류 및 치환율에 따른 콘크리트의 물리적 재료특성 및 철근 부식 임계염화물량을 비교평가 하기 위하여 결합재를 OPC 100%, OPC 70% + GGBFS 30%, OPC 40% + GGBFS 60%, OPC 40% + GGBFS 40% + FA 20%로 총 4개의 수준으로 구분하여 제작하였다. 굵은골재의 크기에 따른 콘크리트의 기초성능 및 염해저항성에 대한 영향을 줄이기 위하여 굵은골재 최대크기를 13mm로 제한하여 사용하였으며, 잔골재는 쇄사와 세척사를 일정비율로 혼합하여 사용하였다. 혼화제는 콘크리트의 유동성 및 공기량을 확보하기 위하여 고성능 AE감수제와 SP제를 함께 사용하였으며, 철근 부식 및 염해저항성에 대한 영향을 최대한 줄이기 위하여 염소이온이 포함되어 있지 않는 S사의 제품을 사용하였다.

Table 4. Concrete mix proportion

Name	W/B (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )								
		W	C	GG BFS	FA	S1 <sup>1</sup>	S2 <sup>2</sup>	G <sup>3</sup>	S.P.	A.E.
OPC		180	300	-	-	640	273	867	3.00	0.09
S30	60	180	210	90	-	640	273	867	2.40	0.12
S60		180	120	180	-	633	267	867	2.10	0.25
TBC		180	120	120	60	620	267	867	2.10	1.00

<sup>1</sup>Crushed Sand, <sup>2</sup>Sea Sand, <sup>3</sup>Maximum size of coarse aggregate : 13mm

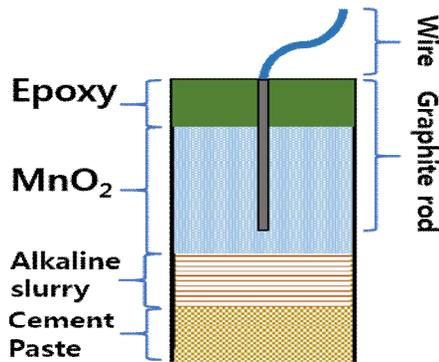


Figure 3. Schematic diagram of MnO<sub>2</sub> sensor

3.3 콘크리트 매립형 부식센서

기존에 사용되고 연구되어온 기준전극 중에서 은/염화은(Ag/AgCl) 기준전극, 이산화망간(MnO<sub>2</sub>) 기준전극은 원격 부식 모니터링용의 매립형 기준전극으로 적합하다고 알려져 있다[20]. 본 연구에서 사용된 콘크리트 매립형 센서는 MnO<sub>2</sub>를 이용하여 제작된 고체형 기준전극으로, 센서의 개요도를 Figure 3에 나타내었다.

MnO<sub>2</sub> 센서의 구조는 바닥층에 다공성 물질인 시멘트 페이스트를 채워 이온의 이동이 가능하게 하고, 그 위에 미량의 알칼리 슬러리(동일비의 NaOH+KOH+CaO, pH 13.5)로 채워 센서 내부의 pH가 강알칼리 환경으로 유지되도록 하였다. 그 위에 MnO<sub>2</sub> 파우더를 다짐하며 채우고, 전기전도성을 향상시키기 위한 탄소봉(Graphite Rod)을 분체 가운데에 고정한 후 에폭시로 마감하여 제작하였다.

3.4 시험체

시험체 제작에 사용된 철근 콘크리트 시험체는 100×100×400mm 각주형 몰드에 아크릴을 이용하여 철근을 배근하고, MnO<sub>2</sub> 센서를 배치한 후 콘크리트를 배합 및 타설하여 제작하였으며, 실험체의 개요도 및 단면

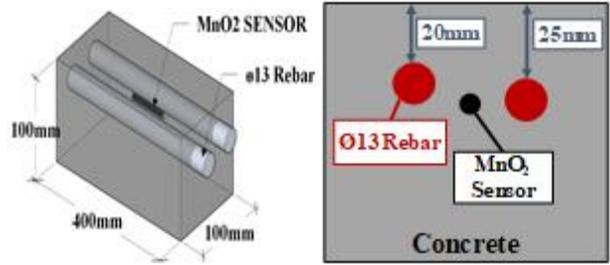


Figure 4. Schematic diagram & cross section of specimen

도를 Figure 4에 나타내었다. 콘크리트는 몰드에 타설 직후 밀봉하였으며, 24시간 뒤 탈형하여 28일간 항온항습기를 이용하여 온도 20±2℃, 상대습도 60±5%에서 양생을 실시하였다.

콘크리트 피복깊이에 따른 철근의 부식개시시기 판정을 위하여 콘크리트 피복을 20mm와 25mm로 구분하여 철근을 위치하였으며, 철근 사이에 콘크리트 매립형 부식센서를 함께 매립하여 철근 콘크리트 시험체를 제작하였다.

4. 실험개요 및 방법

4.1 콘크리트의 물리적 특성 평가

KS F 2402 콘크리트의 슬럼프 시험방법에 따라서 콘크리트 슬럼프 측정을 실시한 후[21], KS F 2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법에 따라 콘크리트의 공기량 측정을 실시하였다[22]. 그 후 KS F 2403 콘크리트 강도 시험용 공시체 제작방법에 따라 Ø 100×200mm 원주형 공시체를 제작하였다[23]. 콘크리트의 압축강도 측정은 KS F 2405 콘크리트 압축 강도 시험방법에 따라 UTM(Universal testing machine)을 이용하여 실시하였으며[24], 콘크리트 시험체의 양생일에 따라 3일, 7일, 28일에 걸쳐 3회 측정하였다.

4.2 철근의 자연전위 모니터링

염소이온 침투에 의한 콘크리트에 매립된 철근의 부식개시시점을 파악하기 위하여, NaCl 수용액을 시험체에 공급하며 철근의 자연전위를 모니터링 하였으며, 실험에 대한 개요도를 Figure 5에 나타내었다.

철근의 자연전위 모니터링 실험은 ASTM C 876 자연전위 측정법(Half-Cell potential method)에 따라 철근의 부식상태를 확인하며 진행하였다[15]. 시험체의 철근과

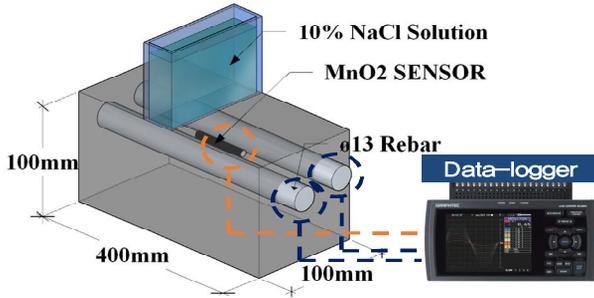


Figure 5. OCP Monitoring experiment of rebar

MnO<sub>2</sub>센서를 전선을 이용하여 Data-logger (Graphtec, GL-820)에 연결한 후, 시험체 윗면에 아크릴을 이용하여 NaCl 수용액 공급셀을 설치하였다. 공급셀을 통하여 증류수를 24시간동안 공급하며 콘크리트를 충분히 습윤한 상태로 만든 뒤, NaCl 10wt%수용액을 지속적으로 공급하며 NaCl 수용액 공급시간에 따른 철근의 자연전위 변화를 실시간으로 모니터링 하였다.

MnO<sub>2</sub>를 사용한 기준전극의 부식판정에 따라, 자연전위 모니터링 중 콘크리트 피복 20mm철근의 자연전위가 -515mV(vs. MnO<sub>2</sub>)이하로 감소하는 경우를 철근의 부식개시점으로 판단하여 모니터링을 종료하고 시험체를 할렬하여 철근 표면의 부식상태를 육안으로 확인하였다. 철근의 부식판정에 사용된 ASTM C 876의 기준전극 종류별 철근의 자연전위에 따른 철근의 부식판정 기준을 Table 5에 나타내었다[16].

Table 5. ASTM C876 criteria for corrosion

CSE	Potential of Rebar (mV)			Corrosion Probability
	SCE	SHE	MnO <sub>2</sub>	
< -500	< -426	< -184	< -665	Severe
< -350	< -276	< -34	< -515	90% ↑
-350 ~ -200	-276 ~ -126	-34 ~ +116	-515 ~ -419	50% ↓
> -200	> -126	> +116	> -419	10% ↓

### 4.3 콘크리트 피복깊이별 염화물량 평가

콘크리트 피복깊이별 염화물량 평가를 위한 콘크리트 시험체에 대한 개요도를 Figure 6에 나타내었다.

콘크리트 피복 20mm철근의 부식이 개시되어 시험을 중단한 시험체는 NaCl 수용액 공급면으로부터 5mm간격으로 시험체를 절단하여 콘크리트 시료를 채취하고 KS F 2713에 따라 전염화물량 평가를 실시하였다[25]. 콘크리트 피

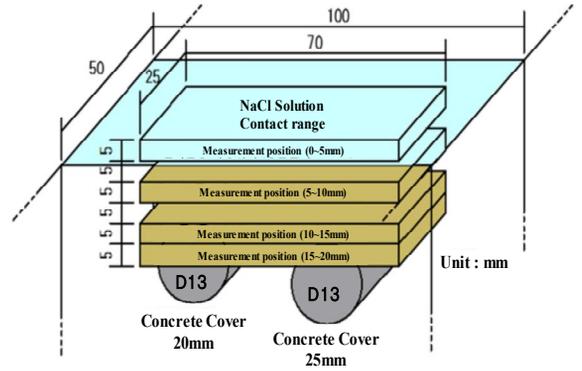


Figure 6. Schematic diagram of concrete sample for chloride evaluation

복깊이에 따른 염화물량 프로파일링이 완료되면, 철근이 부식한 콘크리트 피복 깊이 20mm와 철근이 부식하지 않은 피복깊이 25mm사이의 염화물량을 콘크리트에 매립된 철근의 부식 임계염화물량으로 산정하여 비교평가를 실시하였다.

콘크리트 염화물량 측정은 AgNO<sub>3</sub>적정법을 이용하여 측정되었으며, AgNO<sub>3</sub>적정량에 따른 콘크리트 질량에 대한 염화물량 계산식을 식 (1)에 나타내었다[25].

$$Cl^- (\%) = \frac{3.545[(V_1 - V_2)N]}{W} \quad \text{----- (1)}$$

- V<sub>1</sub> : 시료에 적정에 사용된 0.05N 질산 은 용액의 부피 (ml, 당량점)
- V<sub>2</sub> : 바탕 적정에 사용된 0.05N 질산 은 용액의 부피 (ml, 당량점)
- N : 0.05N 질산 은의 용액의 정확한 노르말 농도(N)
- W : 시료의 질량(g)

콘크리트 질량에 대한 염화물량(%)을 계산 한 후, 시멘트 혹은 결합재에 대한 염화물량(%)으로 계산하기 위해서는 염화물량(%)에 100/P를 곱하여 사용하면 된다. 이때 P값은 콘크리트 중의 결합재질량비(%)를 사용하였다.

## 5. 실험결과 및 분석

### 5.1 콘크리트의 물리적 특성 평가결과

혼화재 치환에 따른 콘크리트의 물성이 본 연구범위의 목표성능을 만족하는지 평가하기 위하여 슬럼프 플로 및

공기량 측정을 실시하였으며 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 굳지 않은 콘크리트 슬럼프 측정결과 배합에 따라 편차를 보이긴 했으나, 모든 수준에서 본 연구에서 목표했던  $200 \pm 25\text{mm}$ 를 만족하였다. 공기량 측정결과도 각 배합에 따른 편차를 보이긴 했으나, 모든 수준에서 본 연구에서 목표했던  $4.5 \pm 1.5\%$ 를 만족하는 결과로 나타났다.

Table 6. Properties of fresh concrete

Name	Target Slump (mm)	Slump (mm)	Target Air content (%)	Air content (%)
OPC	200±25	195 (-5)	4.5±1.5	3.6 (-0.9)
S30		195 (-5)		5.2 (+0.7)
S60		200		4.5
TBC		200		3.0 (-1.5)

실험수준과 양생일에 따른 콘크리트의 압축강도 측정결과를 Table 7에 나타내었으며, 콘크리트 압축강도의 변화를 Figure 7에 나타내었다.

Table 7. Result of concrete compressive strength

Name	Compressive Strength (MPa)		
	3d	7d	28d
OPC	18.0	23.2	29.2
S30	13.6	20.9	28.2
S60	11.8	20.9	27.4
TBC	8.4	15.4	21.8

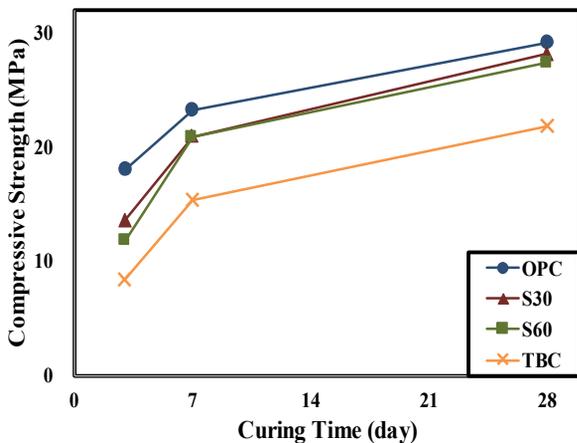


Figure 7. Result of compressive strength according to curing day

측정된 콘크리트의 초기 압축강도(3d)는  $\text{OPC} > \text{S30} > \text{S60} > \text{TBC}$  순으로 높게 나타났으며 28일 압축강도의 경우  $\text{OPC} 29.2\text{MPa}$ ,  $\text{S30} 28.2\text{MPa}$ ,  $\text{S60} 27.4\text{MPa}$ ,  $\text{TBC} 21.8\text{MPa}$  순으로 나타나며 초기 압축강도와 같은 경향을 나타냈다.

시멘트의 혼화재 치환율이 증가할수록 콘크리트 압축강도가 감소하는 경향을 확인하였으며, 같은 비율인 60%치환의 경우 고로슬래그 미분말을 60% 사용한 시험체가 고로슬래그 미분말 40% + 플라이 애시 20%를 사용한 시험체보다 압축강도가 높게 나타났다. 이는 기중양생 조건 및 시멘트의 절대량이 40%인 조건에서 시멘트의 수화가 충분히 일어나지 못하고, 이에 따른  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  생성량이 감소하면서 플라이 애시의 포졸란 반응 역시 제한적으로 일어나 콘크리트 압축강도 발현이 제한된 것으로 판단된다. 추후 콘크리트의 공극구조 분석 및 미세분석을 통하여 압축강도 발현을 감소에 대한 검증이 필요한 것으로 사료된다.

### 5.2 철근의 자연전위 모니터링 결과

NaCl 10wt% 수용액 공급시간에 따른 콘크리트에 매립된 철근의 자연전위 모니터링 결과를 실험수준에 따라 Figure 8~11에 나타내었다.

모든 시험체의 자연전위가 NaCl 수용액 공급 직후부터 측정이 가능했으며  $-200\text{mV} \sim -300\text{mV}$ 로 유지되며 철근이 부식하지 않은 부동태상태로 유지되는 것을 확인하였다. 각 실험 수준에 따른 철근의 자연전위 편차가 나타나긴 했으나, 부식으로부터 안전한 범위 내에서 유지되고 있는 것으로 판단된다.

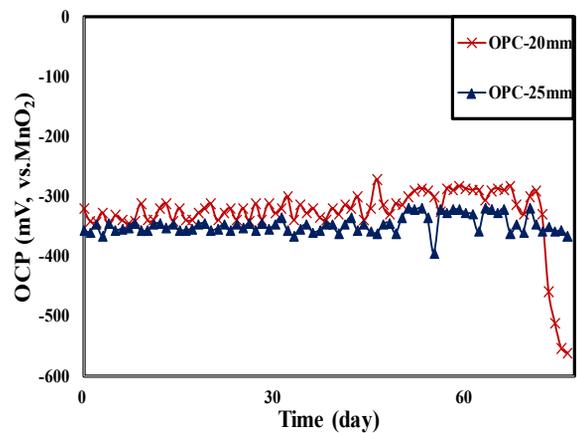


Figure 8. Result of OCP monitoring experiment (OPC)

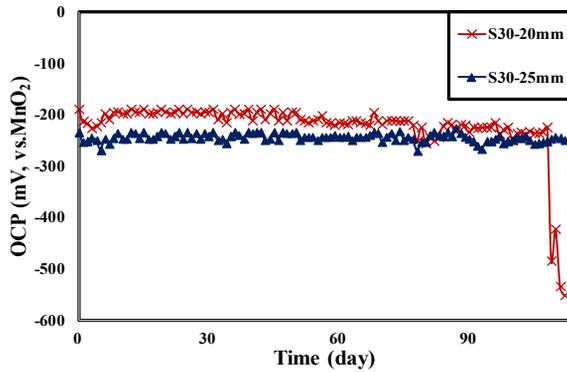


Figure 9. Result of OCP monitoring experiment (S30)

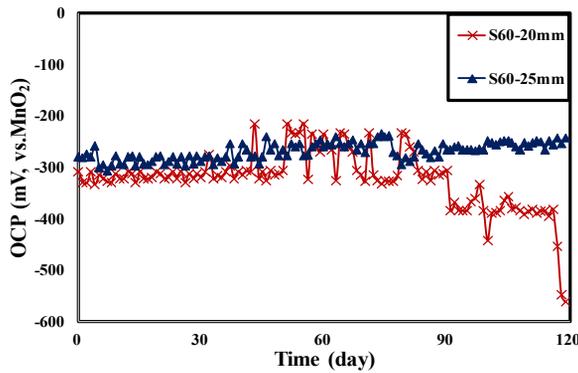


Figure 10. Result of OCP monitoring experiment (S60)

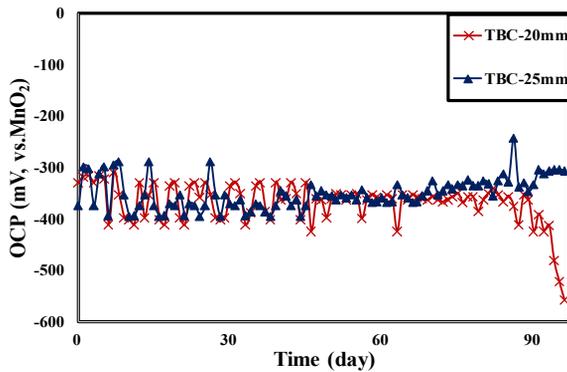


Figure 11. Result of OCP monitoring experiment (TBC)

NaCl 수용액 공급시간이 증가함에 따라 콘크리트 피복 20mm의 철근의 자연전위는  $-515\text{mV}(\text{vs. MnO}_2)$  이하로 감소하며 철근의 부식이 발생한 것으로 판단되었다. 이때 콘크리트 피복 25mm의 철근은 자연전위가 안정적으로 유지되며 철근의 부식이 발생하지 않은 것으로 관찰되었다. NaCl 수용액 공급시간에 따라 콘크리트 피복 20mm의 철근이 부식하기까지 걸리는 시간은 OPC 76일, TBC 96일, S30 112일, S60 119일 순으로 부식이 발생한 것으로 판단되었으며, 이는 기중양생 조건에서도 보통포틀랜드시멘트를 고

로슬래그 미분말이나 플라이 애시와 같은 혼화재로 치환하여 사용하는 것이 염화물 침투를 막는것에 대해 효과적인 것으로 판단된다.

하지만 고로슬래그 미분말 40% + 플라이 애시 20%를 치환하는 경우 치환율이 60%임에도 불구하고 고로슬래그 미분말 30%치환 시험체보다 부식이 먼저 개시되는 것을 확인하였다. 이는 높은 혼화재 치환율과 기중양생 조건에서 시멘트의 절대량과 수화생성물량이 감소로 인해 고로슬래그 미분말의 잠재수경성이나 플라이 애시의 포졸란 반응이 충분히 일어나지 못하면서 경화체 구조가 밀실하게 되지 못한 것으로 판단된다. 이로 인하여 콘크리트의 압축강도가 감소하고, 염화물 침투에 대한 저항성도 낮아진 것으로 판단된다. S60 시험체가 S30 시험체와 부식개시시점이 7일 정도의 차이로 크게 차이나지 않는 것과도 같은 경향으로 보이며, 추후 콘크리트의 염화물이온 확산계수 측정을 통한 검증이 필요한 것으로 판단된다.

콘크리트 피복 20mm철근의 부식이 개시된 것으로 판단된 시험체는 NaCl 수용액 공급을 중단하고, UTM을 이용하여 콘크리트를 할렬하여 철근의 부식발생여부에 대하여 철근표면을 육안으로 관찰하였으며, 그 결과를 Table 8에 나타내었다.

Table 8. Surface Image of rebar after monitoring experiment

Name	OPC	S30
Surface Image		
Name	S60	TBC
Surface Image		

콘크리트에 매립된 철근의 표면을 육안으로 확인한 결과, 모든 시험체의 콘크리트 피복 20mm철근에서 부식생성

물이 발견되었으며, 콘크리트 피복 25mm의 철근의 표면은 부식하지 않고 건전한 상태로 유지되는 것을 확인하였다.  $MnO_2$  센서를 이용한 철근의 자연전위 모니터링을 통하여 철근의 부식개시시점 판단이 유효한 것으로 판단되며, 그 부식정도에는 차이가 있었지만 부식유무판단은 정확한 것으로 판단된다. 이는 추후  $MnO_2$  센서의 정밀도의 개선을 통하여 수정할 수 있을 것으로 예상된다.

특히 콘크리트 피복 25mm 철근의 표면은 부식하지 않고 건전한 상태로 유지되고 있는 것을 확인하였으므로, 콘크리트 피복 20mm~25mm의 콘크리트 염화물량 측정을 통해 콘크리트의 철근 부식 임계염화물량을 개략적으로 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

### 5.3 콘크리트 피복깊이별 염화물량 평가

철근의 부식이 개시된 것으로 판단된 시험체는 NaCl 수용액 공급면 으로부터 5mm 간격으로 절단하여 콘크리트 시료를 채취하고 전염화물량 평가를 실시하였으며, 그 결과를 Table 9에 나타내었다.

또한 피복깊이에 따른 콘크리트 염화물량의 변화를 Figure 12에 나타내었다.

Table 9. Result of total chloride measurement

Cover Depth (mm)	Amount of Chloride content ( $kg/m^3$ )			
	OPC	S30	S60	TBC
0-5	4.44	3.81	2.96	3.52
5-10	2.12	2.15	2.03	1.73
10-15	2.14	1.52	1.13	1.61
15-20	1.57	1.31	1.01	1.16
20-25	1.46	0.98	0.71	0.74

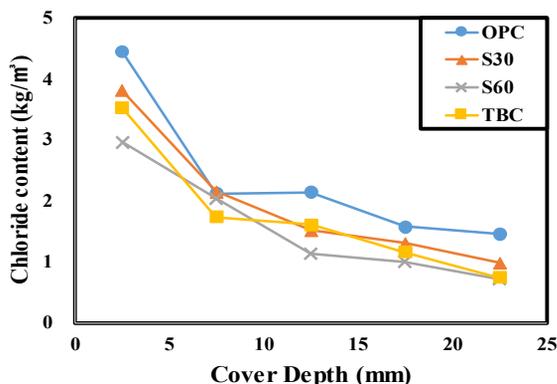


Figure 12. Chloride content according to cover depth

모든 실험수준에서 콘크리트 염화물량은 피복깊이가 깊어질수록 낮아지는 경향을 나타냈으며, 시멘트의 혼화재 치환율이 증가할수록 콘크리트의 염화물량이 감소하는 것을 확인하였다. 이때 염화물량 측정결과 중 철근이 부식한 피복깊이 20mm와 철근이 부식하지 않은 피복깊이 25mm사이의 전염화물량을 콘크리트에 매립된 철근 부식 임계염화물량으로 산정하였으며, 산정된 철근 부식 임계염화물량은 OPC  $1.46kg/m^3$ , S30  $0.98kg/m^3$ , TBC  $0.74kg/m^3$ , S60  $0.71kg/m^3$  순으로 높게 나타났다. 이는 고로슬래그 미분말 혹은 플라이 애시의 치환율이 증가할수록 콘크리트에 매립된 철근부식 임계염화물량이 낮아지는 것으로 확인되었다. OPC를 100% 사용한 시험체에 비하여 OPC 40%+GGBFS 60%를 사용한 시험체의 철근 부식 임계염화물량이 51.37% 감소하는 것으로 나타났다. 치환율 60%의 시험체의 경우 GGBFS를 60%치환한 시험체가 GGBFS 40%+FA 20% 치환한 시험체보다 철근부식 임계염화물량이 근소하게 낮게 나타났으며, 추후 추가실험을 통한 혼화재 종류에 따른 철근 부식 임계염화물량 평가가 필요한 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 콘크리트의 시멘트를 혼화재로 치환하는 경우 콘크리트에 매립된 철근의 부식 임계염화물량에 미치는 영향을 평가하기 위하여 자연전위 모니터링을 이용하여 철근의 부식개시시점 및 철근부식 임계염화물량을 비교평가 하였으며, 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 기존문헌의 분석을 통해 콘크리트 매립형  $MnO_2$  센서를 제작하고 콘크리트에 철근과 함께 매립하여 NaCl 수용액 공급시간에 따른 철근의 자연전위를 실시간으로 모니터링 하고, 철근의 부식개시시점을 탐지할 수 있음을 확인하였다.
- 2) W/B 60%, 기중양생 28일 실시한 콘크리트에 NaCl 10wt% 수용액을 공급하며 부식개시시점을 평가한 결과, 실험수준에 따라 OPC 100% 76일, TBC 96일, S30 112일, S60 119일 순으로 부식하는 것을 실험적으로 확인하였으며, 콘크리트의 시멘트를 혼화재로 치환하여 사용하는 경우 콘크리트에 매립된 철근의 부식이 지연되는 경향을 확인하였다.

3) 시멘트를 혼화재로 치환하여 사용하는 경우 철근의 부식임계염화물량은 OPC 1.46kg/m<sup>3</sup>, S30 0.98kg/m<sup>3</sup>, TBC 0.74kg/m<sup>3</sup>, S60 0.71kg/m<sup>3</sup>순으로 높게 나타났으며, 혼화재 치환율이 증가할수록 콘크리트에 매립된 철근의 부식 임계염화물량이 감소하는 것을 확인하였다.

## 요 약

혼화재 혼입에 따른 콘크리트의 철근부식 임계염화물량의 변화를 실험적으로 평가하였다. 콘크리트 배합조건은 OPC 100%, OPC 70% + GGBFS 30%, OPC 40% + GGBFS 60%, OPC 40% + GGBFS 40% + FA 20% 로 구분하여 4가지 배합의 철근 콘크리트 시험체를 제작하였다. 시험체에 NaCl 수용액을 공급하며, 매립된 철근의 자연전위를 모니터링 하였다. 부식이 발생한 것으로 판단된 시험체는 NaCl 수용액 공급면으로부터 5mm간격으로 절단하여 염소이온량 프로파일을 실시하였다. 콘크리트에 매립된 철근의 부식 개시시기는 시멘트를 혼화재로 치환하여 사용하는 경우 지연되는 것을 확인하였다. 하지만 콘크리트에 매립된 철근의 부식임계염화물량은 혼화재 혼입을 증가에 따라 감소하여, OPC 1.46kg/m<sup>3</sup>, S30 0.98kg/m<sup>3</sup>, TBC 0.74kg/m<sup>3</sup>, S60 0.71kg/m<sup>3</sup> 순으로 높게 나타났다.

**키워드** : 콘크리트, 혼화재, 자연전위, 부식, 임계염화물량

## Funding

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT). (No. 2015R1A5A1037548)

## ORCID

Jang-Hyun Park, <http://orcid/0000-0001-9911-8145>

Yun-Su Lee, <http://orcid/0000-0002-7360-6439>

Han-Seung Lee, <http://orcid/0000-0001-9776-5859>

## References

- Bertolini L, Elsener B, Pedeferra P, Polder R, Corrosion of steel in concrete: Prevention, Diagnosis, Repair. Weinheim: WILEY-VCH; 2003. 392 p.
- Wallbank EJ. The performance of concrete in bridges. A survey of 200 highway bridges. London: HMSO; 1989. 96 p.
- Skalny J, Mindess S. Materials science of concrete. westerville: American Ceramic Society; 1999. p. 285-313.
- Hussain SE, Mechanisms of high durability performance of plain and blended cements [PhD Thesis]. [Dhaharan (Saudi Arabia)]; King Fahd University of Petroleum and Minerals; 1991. 367 p.
- Malhotra VM. Concrete technology for a sustainable development in the 21st century. Gjørv OE, Sakai K, editors. London: CRC Press; 1999 Dec. Chapter 19, Role of supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions; p. 226-35.
- Jung YB, Yang KH, Choi DU. Influence of fly ash on life-cycle environmental impact of concrete. Journal of Korea Institute of Building Construction. 2014 Dec;14(6):515-22. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2014.14.6.515>
- Flower DJ, Sanjayan JG. Green house gas emissions due to concrete manufacture. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2007 Jul;12(5):282-8. <https://doi.org/10.1065/lca2007.05.327>
- Berke NS. Resistance of microsilica concrete to steel corrosion erosion and chemical attack. American Concrete Institute Special Publication. 1989 May;114:861-86.
- Hussain SE, Rasheeduzzafar. Corrosion resistance performance of fly ash blended cement concrete. Materials Journal. 1994 May;91(3):264-72.
- Thomas M. Chloride thresholds in marine concrete. Cement and Concrete Research. 1996 Apr;26(4):513-9. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00035-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00035-X)
- Ryou JS, Ann KY. Variation in the chloride threshold level for steel corrosion in concrete arising from different chloride sources. Magazine of Concrete Research. 2008 Apr;60(3):177-87. <https://doi.org/10.1680/mac.2008.60.3.177>
- Yang SK, Kim DS, Um TS, Lee JR, Kono K. Study on the critical threshold chloride content for steel corrosion in concrete with various cement contents. Journal of the Korea Concrete Institute. 2008 Aug;20(4):415-21. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2008.20.4.415>
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (KOREA),

- Concrete Standard specification, 2016, 358 p.
14. Jin CK, Kyoung EJ, Jeong JN. A study on the corrosion monitoring of multi-functional sensor for reinforced concrete structures: Part 1. Corrosion Science and Technology, 2012 Dec;11(6):270-4.  
<https://doi.org/10.14773/cst.2012.11.6.270>
  15. Parthiban T, Ravi R, Parthiban GT. Potential monitoring system for corrosion of steel in concrete. Advances in Engineering Software, 2006 Jun;37(6):375-81.  
<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2005.09.004>
  16. ASTM Standard C876. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. American Society for Testing and Materials, 1991.
  17. KS L 5201, Portland Cement, Korean Agency for Technology and Standards, 2016.
  18. KS F 2563, Groung granulated blast-furnace slag for use in concrete. Korean Agency for Technology and Standards, 2009.
  19. KS L 5405, Fly ash, Korean Agency for Technology and Standards, 2018.
  20. Muralidharan S, Sarawathy V, Madhavamayandi A, Thangavel K, Palaniswamy N. Evaluation of embeddable potential sensor for corrosion monitoring in concrete structures. Electrochimica Acta, 2008 Oct;53(24):7248-54.  
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.04.078>
  21. KS F 2402, Standard test method for concrete slump. Korean Agency for Technology and Standards, 2017.
  22. KS F 2421, Standard test method for air content of fresh concrete bt the pressure method : air receiver method, Korean Agency for Technology and Standards, 2016.
  23. KS F 2403, Standard test method for making and curing concrete specimens. Korean Agency for Technology and Standards, 2014.
  24. KS F 2405, Standard test method for compressive strength of concrete. Korean Agency for Technology and Standards, 2010.
  25. KS F 2713, Standard test method for analysis of chloride in concrete and concrete raw materials. Korean Agency for Technology and Standards, 2017.