



무시멘트 콘크리트의 염소이온 침투 및 황산염 침투 저항성

이현진¹ · 배수호² · 권순오¹ · 이광명³ · 전준태⁴

안동대학교 토목공학과 박사과정¹ · 안동대학교 토목공학과 교수² · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수³ ·
 인하공업전문대학 토목공학과 교수⁴

Resistance against Chloride Ion and Sulfate Attack of Cementless Concrete

Lee, Hyun-Jin¹ · Bae, Su-Ho² · Kwon, Soon-Oh¹ · Lee, Kwang-Myong³ · Jeon, Jun-Tai⁴

¹PhD., Candidate, Department of Civil Engineering, Andong National University, Andong, Korea

²Professor, Department of Civil Engineering, Andong National University, Andong, Korea

³Professor, Department of Civil & Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

⁴Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Inha Technical College, Incheon, Korea

Abstract: It has been well known that concrete structures exposed to chloride and sulfate attack environments lead to significant deterioration in their durability due to chloride ion and sulfate ion attack. The purpose of this experimental research is to evaluate the resistance against chloride ion and sulfate attack of the cementless concrete replacing the cement with ground granulated blast furnace slag. For this purpose, the cementless concrete specimens were made for water-binder ratios of 40%, 45%, and 50%, respectively and then this specimens were cured in the water of 20±3°C and immersed in fresh water, 10% sodium sulfate solution for 28 and 91 days, respectively. To evaluate the resistance to chloride ion and sulfate attack for the cementless concrete specimens, the diffusion coefficient for chloride ion and compressive strength ratio, mass change ratio, and length change ratio were measured according to the NT BUILD 492 and JSTM C 7401, respectively. It was observed from the test results that the resistance against chloride ion and sulfate attack of the cementless concrete were comparatively largely increased than those of OPC concrete with decreasing water-binder ratio.

Key Words: Cementless concrete, Ground granulated blast furnace slag, Chloride ion attack, Sulfate attack, Sodium sulfate solution

1. 서론

최근, 이산화탄소 배출 증가로 인한 온실효과로 지구온난화가 급격히 진행됨에 따라 콘크리트산업 분야에서도 온실가스 배출량을 줄이기 위한 탄소발생 저감 기술 개발이 요구되고 있다(Bae et al., 2013). 이로 인해 대표적인 이산화탄소 배출 산업인 시멘트 분야에서도 온실가스 저감을 위한 많은 노력이 이루어지고 있다(Goo et al., 2013). 시멘트 제조 과정 중 석회석(CaCO₃)을 고온으로 가열하여 시멘트의 주성분인 CaO와 CO₂로 분리하는 소성공정

에서 전체 이산화탄소 배출량의 60% 이상이 발생하게 된다(Lee et al., 2013). 이 같은 배경 하에 산업부산물인 고로슬래그 미분말(Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBFS) 및 플라이애시(Fly Ash)가 시멘트 대체재료로서 주목 받고 있으며, 이들을 이용한 지오폐리머(결합재로서 시멘트 대신에 비소성 바인더를 사용한 콘크리트로, 무시멘트 콘크리트라고도 부른다) 콘크리트에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다(Kim et al., 2014).

한편, 염해환경에 노출된 철근콘크리트 구조물의 경우 염소이온의 침투로 인해 콘크리트 속 철근이 부식되어 내구수명 저하의 큰 원인이 되고 있다. 이

주요어: 무시멘트 콘크리트, 고로슬래그 미분말, 염소이온 침투, 황산염 침투, 황산나트륨 용액

Corresponding author: Bae, Su-Ho

Department of Civil Engineering, Andong National University, 1375 Gyeongdong-ro, Andong, Gyeongsangbuk-do 760-749, Korea
 Tel: +82-54-820-5896, Fax: +82-54-820-5896, E-mail: shbae@andong.ac.kr

Received May 11, 2015 / Revised June 13, 2015 / Accepted June 15, 2015

처럼 염해환경에 노출된 콘크리트의 내구성 저하의 주된 원인은 콘크리트 내부로 침투·확산된 염소이온에 의한 철근 부식으로 인한 염해이며, 이는 다른 열화요인에 비해 매우 심각한 것으로 알려져 있다(Kwon, 2013). 이러한 콘크리트의 염소이온 확산에 영향을 미치는 주요 인자로는 물-결합재비(W/B), 노출환경 및 온도, 시멘트 종류 및 플라이애시, 실리카 폼, 고로슬래그 미분말 등과 같은 광물질 혼화재의 사용여부 등을 들 수 있다(Bae et al., 2009; Park, 2013).

또한, 토양 속, 지하수 및 해수 환경 등에 건설되는 콘크리트 구조물은 황산염에 의한 화학적 침식으로 인하여 성능저하가 발생할 수 있다. 황산염 등의 유해이온이 콘크리트 내로 침투하여 시멘트 수화물과 반응함으로써 콘크리트 조직에 팽창 수화물의 형성 및 연화작용(Softening action)이 일어나기 때문에 콘크리트 내구성능을 크게 저하시킬 뿐만 아니라 심한 경우 균열 발생 및 조직 붕괴를 일으키게 된다(Mehta, 1983; Park et al., 1998). 이 같은 경우, 일반적으로 2가지 주요 메커니즘으로 설명할 수 있는데, 하나는 콘크리트 내의 수산화칼슘과 황산염 이온(SO_4^{2-})들이 반응하여 석고(Gypsum)를 생성함으로써 콘크리트 매트릭스의 연화와 강도 손실을 일으키는 것이고, 다른 하나는 석고와 C_3A 의 반응으로 부피 증가를 수반하는 에트링자이트(Ettringite)가 생성됨으로써 콘크리트의 팽창과 균열을 일으키는 것이다.

따라서, 본 연구에서는 무시멘트 콘크리트의 실용화를 위한 일환으로, 물-결합재비 40%, 45% 및 50% 각각에 대해서 무시멘트 콘크리트 공시체를 제작한 후, NT BUILD 492(1999) 및 JSTM C 7401(1999) 각각에 따라 이들의 염소이온 침투 저항성과 황산염 침투 저항성을 평가하였다. 염소이온 침투 저항성은 표준양생한 무시멘트 콘크리트 공시체의 염소이온 확산계수에 의해서 평가하였으며, 황산염 침투 저항성은 10% 황산나트륨 용액에 침지한 무시멘트 콘크리트 공시체의 압축강도 비, 질량 변화율 및 길이 변화율에 의해 평가하였다.

2. 실험 개요

2.1 사용 재료

무시멘트 콘크리트를 제작하기 위하여 결합재로서 3종 고로슬래그 미분말(분말도: $4,250\text{cm}^2/\text{g}$, 밀도: $2.89\text{g}/\text{cm}^3$)을 사용하였다. 잔골재와 굵은골재는 각각 경북 안동에서 생산된 낙동강산 하천사와 부

순돌을 이용하였으며, 이들의 물리적 성질은 Tables 1 및 2와 같다. 무시멘트 콘크리트의 유동성 조절을 위한 화학혼화제는 Table 3과 같은 폴리카르본산계의 고성능 감수제(Superplasticizer, SP)를 사용하였으며, 알칼리 활성화제는 수산화나트륨(NaOH)과 공업용 물유리 3종을 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 공시체 제작

무시멘트 콘크리트를 제작하기 위하여 Table 4와 같이 물-결합재비는 40%, 45% 및 50%로, 목표 슬럼프는 $150\pm 25\text{mm}$ 로 설정하였으며, 알칼리 활성화제로 Na_2O 는 고로슬래그 미분말 질량비로 6% 사용하였고, $\text{Ms}(\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O})$ 는 1.0으로 고정하였다. 한편, 무시멘트 콘크리트는 시멘트 전량을 고로슬래그 미분말로 대체한 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트로, 일반 콘크리트와는 제조방법 및 특성이 상이하므로, 무시멘트 콘크리트의 특성과 비교하기 위한 OPC 콘크리트의 배합비를 도출하기가 어려워, OPC 콘크리트의 배합비는 기존의 연구결과를 이용하였다(Bae et al., 2009; 2010). KS F 2403에 따라 원주형 공시체($\varnothing 100\times 200\text{mm}$) 및 각주형 공시체($100\times 100\times 400\text{mm}$)를 제작하였으며, 제작된 공시체는 성형 후 24시간 경과하여 몰드를 제거한 후, 염소이온 침투 시험을 위한 공시체는 시험 재령 전까지 $20\pm 3^\circ\text{C}$ 의 온도로 습윤양생하였으며, 황산염 침투 시험을 위한 공시체는 JSTM C 7401에 따라 전처리를 거친 후 황산염 용액(10% 황산나트륨)에 침지하였다.

2.2.2 염소이온 침투 저항성 평가

무시멘트 콘크리트의 염소이온 침투 저항성을 평가하기 위하여 북유럽에서 규격화된 NT BUILD 492 방법으로 염소이온 확산계수를 평가하였다. 콘크리트 시편은 공시체 중앙부에서 두께 $50\pm 2\text{mm}$ 로 절단하고, 처음 절단부에 보다 가까운 단 표면을 염소이온 용액에 노출되는 면으로 하였다. 그 후, Fig. 1과 같이 진공용기에 거치하여 $1\sim 5\text{kPa}$ 의 압력 범위로 3시간 동안 유지시켜 진공상태에서 포화 수산화칼슘 용액에 침지시키고, 일정 시간 동안 공기가 유입되기 전까지 진공상태를 유지시킨 후 18 ± 2 시간 동안 정치하였다.

Table 1. Physical Properties of Fine Aggregate

| Specimen | Density (g/cm ³) | Absorption (%) | Unit mass (kg/m ³) | Amount of passing 0.08mm sieve (%) | Fineness modulus |
|------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| River sand | 2.54 | 2.15 | 1,660 | 2.25 | 2.72 |

Table 2. Physical Properties of Coarse Aggregate

| Specimen | G _{max} (mm) | Density (g/cm ³) | Absorption (%) | Unit mass (kg/m ³) | Fineness modulus |
|--------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------|
| Crushed rock | 25 | 2.65 | 1.22 | 1,648 | 7.27 |

Table 3. Properties of Chemical Admixture

| Type | Specific gravity | pH | Solid content (%) | Quantity(%) (by mass of cement) | Main component |
|------------------|------------------|-----|----------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Superplasticizer | 1.05 | 3~4 | 18 | 0.5~2.5 | Polycarbonic acid admixture |

Table 4. Mix Proportions of Cementless Concrete

| W/B (%) | S/a (%) | Unit mass(kg/m ³) | | | | | SP (B×%) | Na ₂ O/Binder (%) | Ms (SiO ₂ /Na ₂ O) |
|------------|------------|-------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------------|---------------------------------|---|
| | | W* | C* | GGBFS | S* | G* | | | |
| OPC | 38 | 164 | 432 | - | 795 | 907 | 1.0 | 6 | 1.0 |
| | 43 | 165 | 388 | - | 811 | 925 | 1.0 | | |
| 40 | 50.5 | 165 | - | 412.5 | 840.1 | 849.1 | 1.4 | | |
| 45 | 50.0 | 165 | - | 366.7 | 852.1 | 878.6 | 1.2 | | |
| 50 | 49.5 | 165 | - | 330.0 | 859.7 | 904.4 | 1.3 | | |

* W: Water, C: Cement, S: Fine aggregate, G: Coarse aggregate

음극셀은 10%의 NaCl 수용액을, 양극셀은 0.3M의 NaOH 수용액을 사용하였으며, Figs. 2 및 3과 같이 확산셀 장치를 구성한 후, 전원공급장치를 이용하여 30V의 전압을 걸고 초기전류를 측정하였다. 초기전류의 크기에 따라 전압 및 시험 시간을 결정하고, 시험이 끝나면 콘크리트 시편을 측정방향으로 2개의 조각으로 할렬하여 그 단면에 0.1M AgNO₃ 용액을 분무하여 염소이온 침투깊이를 측정하였다.

측정된 결과를 근거로 식 (1)을 이용하여 염소이온 확산계수를 구하였다.

$$D = \frac{RT}{zFE} \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } E = \frac{U-2}{L}$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)$$

여기서, D 는 염소이온 확산계수(m²/s), z 는 염소이온 원자의 절대값($z=1$), F 는 패러데이 상수(9.648×10^4 , J/(V · mol)), U 는 적용 전압의 절대값(V), R 은 기체상수(8.314, J/(K · mol)), T 는 양극용액에서 초기 및 최종 온도의 평균값(K), L 은 시편의 두께(m), x_d 는 염소이온 침투깊이의 평균값(m), t 는 실험 시간(sec), erf^{-1} 은 error function의 역, c_d 는 변색부에서의 염소이온 농도(OPC 콘크리트의 경우, $c_d=0.07N$)이며, c_0 는 음극용액에서 염소이온 농도($c_0=2N$)이다.

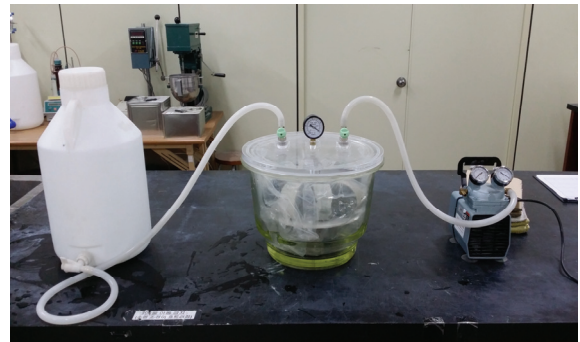


Fig. 1 Pre-treatment of Concrete Specimen

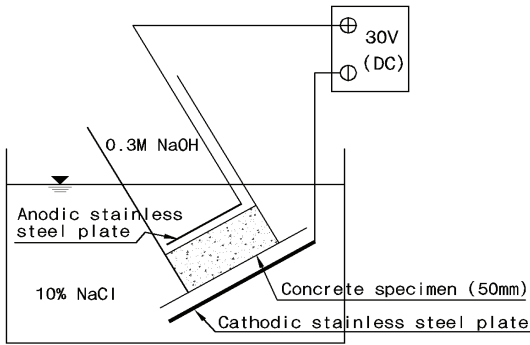


Fig. 2 Detail of Migration Set-up

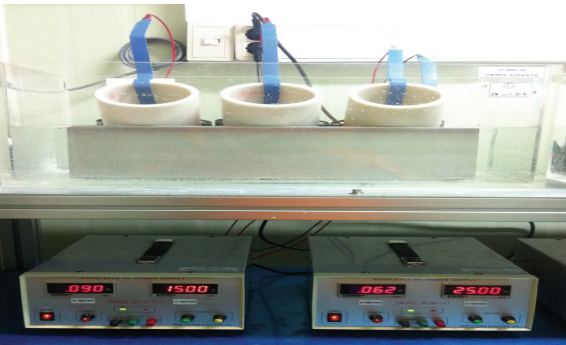


Fig. 3 Arrangement of Migration Set-up

2.2.3 황산염 침투 저항성 평가

콘크리트의 내약품성 시험 방법은 ASTM C 1012(2007)에도 명시되어 있으나, 이는 모르타르에 의한 시험 방법이므로, 이 연구에서는 JSTM C 7401의 “콘크리트의 용액침지에 의한 내약품성 시험 방법”에 의하여 황산염 침투 저항성 시험을 수행하였다. 이 시험 방법은 산 또는 염류 등의 용액에 공시체를 소정의 기간 동안 침지시켜 측정치의 변화를 표준양생시킨 공시체와 비교하여 내약품성을 평가하는 방법으로, 이 방법에 제시된 약품 중, 황산염인 10% 황산나트륨 용액을 선정하여 시험을 수행하였다. 이를 위하여 Fig. 4와 같이 피복하지 않은 공시체의 전처리 과정을 시행한 후, 공시체를 10% 황산나트륨 용액에 침지하였다.

일반적으로 황산염 침투 저항성은 압축강도 비, 질량 변화율 및 길이 변화율로 평가하는데, 이들은 각각 식 (2)~(4)와 같이 구할 수 있다.

$$\text{압축강도비} = \frac{\sigma}{\sigma_w} \tag{2}$$

여기서, σ : 시험용액에 침지한 공시체의 압축강도(MPa)
 σ_w : 표준양생한 공시체의 압축강도(MPa)

$$\text{질량 변화율}(\%) = V - V_w \tag{3}$$

여기서, V : 시험용액에 침지한 공시체의 초기치에 대한 변화율의 평균치
 V_w : 표준양생한 공시체의 초기치에 대한 변화율의 평균치

$$\text{길이변화율}(\%) = L - L_w \tag{4}$$

여기서, L : 시험용액에 침지한 공시체의 측정치와 초기치와의 차의 평균치
 L_w : 표준양생한 공시체의 측정치와 초기치와의 차의 평균치

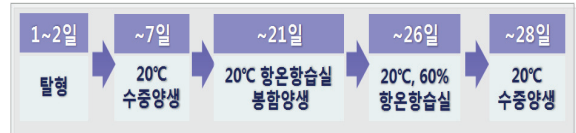


Fig. 4 Pre-treatment Process of Concrete specimens

3. 실험결과 및 고찰

3.1 염소이온 침투 저항성

일반적으로 콘크리트의 염소이온 침투 저항성은 염소이온 확산계수로 평가되는데, 염소이온 확산계수가 작을수록 염소이온 침투 저항성이 우수한 것을 나타낸다. Fig. 5는 무시멘트 콘크리트의 물-결합재비별로 염소이온 침투 저항성을 나타낸 것으로, OPC 콘크리트의 재령 28일 및 91일 염소이온 확산계수는 각각 약 $16 \times 10^{-12}(\text{m}^2/\text{s})$, $12 \times 10^{-12}(\text{m}^2/\text{s})$ 로 나타났으며, 무시멘트 콘크리트의 재령 28일 및 91일 염소이온 확산계수는 약 $2.0 \times 10^{-12}(\text{m}^2/\text{s})$, $1.2 \times 10^{-12}(\text{m}^2/\text{s})$ 로, OPC 콘크리트보다 매우 작은 것으로 나타나, 무시멘트 콘크리트의 염소이온 침투 저항성은 매우 우수한 것으로 나타났다. 또한, 무시멘트 콘크리트의 염소이온 침투 저항성은 물-결합재비가 작고 재령이 증가할수록 염소이온 침투 저항성이 우수한 것으로 나타났으며, 재령 91일까지의 염소이온 침투 저항성은 물-결합재비에 관계없이 OPC 콘크리트보다 약 8배 이상 개선되는 것으로 나타나, 무시멘트 콘크리트는 염소이온 침투 저항성이 대폭 개선되는 것으로 나타났다.

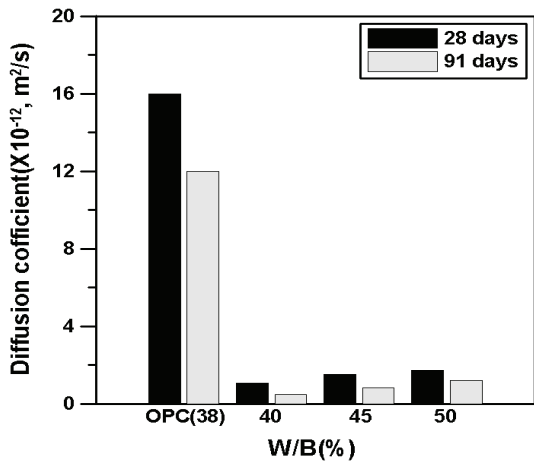


Fig. 5 Diffusion Coefficient for Chloride Ion of Cementless Concrete

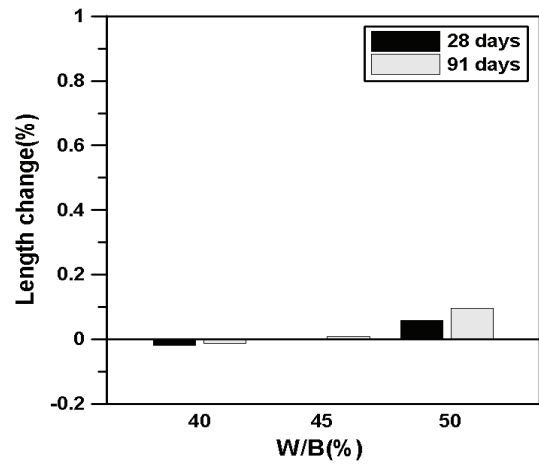


Fig. 8 Length Change Ratio of Cementless Concrete

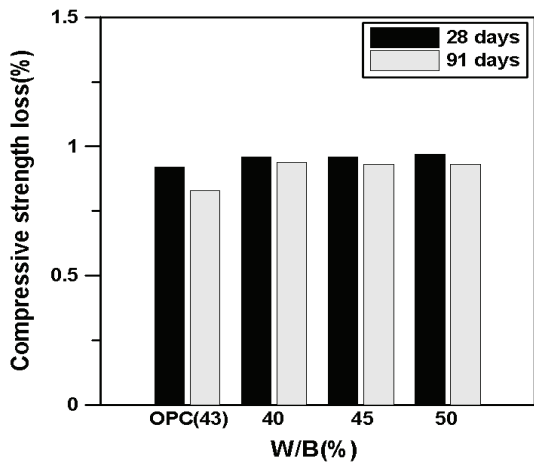


Fig. 6 Compressive Strength Ratio of Cementless Concrete

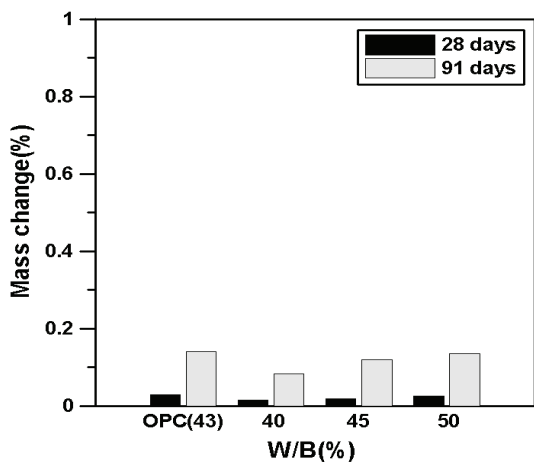


Fig. 7 Mass Change Ratio of Cementless Concrete

3.2 황산염 침투 저항성

3.2.1 압축강도 비

Fig. 6은 물-결합재비별로 무시멘트 콘크리트의 압축강도 비를 나타낸 것으로, 압축강도 비는 표준양생한 콘크리트의 압축강도에 대한 황산염 용액에 침지한 콘크리트의 압축강도를 나타내며, 압축강도 비가 클수록 황산염 침투에 대한 저항성이 우수한 것을 나타낸다. OPC 및 무시멘트 콘크리트의 재령 28일 및 91일의 압축강도 비는 각각 0.83~0.90, 0.93~0.96으로 나타나, 무시멘트 콘크리트의 압축강도 비가 OPC 콘크리트보다 약 10% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 무시멘트 콘크리트의 압축강도 비는 물-결합재비가 크고 황산염 용액 침지 재령이 증가할수록 작아지는 것으로 나타났으나, 현재까지는 황산염 용액 침지재령이 비교적 작아서 그 차는 매우 미미한 것으로 나타났다.

3.2.2 질량 변화율

Fig. 7은 물-결합재비별로 무시멘트 콘크리트의 질량 변화율을 나타낸 것으로, 질량 변화율은 황산염 용액에 침지한 콘크리트의 초기치에 대한 질량 변화율과 표준양생한 콘크리트의 초기치에 대한 질량 변화율의 차를 나타내며, 질량 변화율이 작을수록 황산염 침투에 대한 저항성이 우수한 것을 나타낸다. OPC 및 무시멘트 콘크리트의 재령 28일 및 91일의 질량 변화율은 각각 0.03~0.14, 0.02~0.11으로 나타나, 무시멘트 콘크리트의 질량 변화율은 OPC 콘크리트의 약 80% 이하 수준으로 감소되는 것으로 나타났다. 무시멘트 콘크리트의 질량 변화율은 물-결합재비가 크고 황산염 용액 침지 재령이 증가할수록 커지며, 그 차이도 커지는 것으로 나타났다.

3.2.3 길이 변화율

Fig. 8은 물-결합재비별로 무시멘트 콘크리트의 길이 변화율을 나타낸 것으로, 길이 변화율은 황산염 용액에 침지한 콘크리트의 측정치와 초기치와의 차에서 표준양생한 콘크리트의 측정치와 초기치와의 차를 뺀 값을 나타내며(마이너스(-)는 수축, 플러스(+)는 팽창), 길이 변화율이 작을수록 황산염 침투에 대한 저항성이 우수한 것을 나타낸다. 무시멘트 콘크리트의 재령 28일 및 91일의 길이 변화율은 각각 $-0.018 \sim 0.059$, $-0.012 \sim 0.095$ 로, 물-결합재비가 작은 무시멘트 콘크리트의 초기 침지재령의 경우, 수화물 중의 수산화 칼슘과 황산염의 반응으로 인한 석고와 같은 팽창 수화물의 발생 지연으로, 초기에 수축을 일으키다가 침지재령이 증가할수록 팽창이 발생하는 것으로 나타났다. 무시멘트 콘크리트의 길이 변화율은 물-결합재비가 크고 침지 재령이 증가할수록 커지나, 침지 재령 91일에서도 0.1% 이하로 매우 작은 것으로 나타났다.

4. 결론

NT BUILD 492 및 JSTM C 7402 각각에 따라 물-결합재비별로 무시멘트 콘크리트의 염소이온 침투 저항성 및 황산염 침투 저항성을 평가한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 무시멘트 콘크리트의 재령 91일까지의 염소이온 침투 저항성은 물-결합재비에 관계없이 OPC 콘크리트의 약 8배 이상 개선되는 것으로 나타나, 염소이온 침투 저항성이 대폭 개선되는 것으로 나타났다.

2. 황산염 용액으로 10% 황산나트륨 용액에 무시멘트 콘크리트를 91일까지 침지시킨 결과, 압축강도비는 OPC 콘크리트보다 약 10% 증가되었고, 질량 변화율은 OPC 콘크리트의 약 80% 이하 수준으로 감소되었으며, 길이 변화율은 0.1% 이하로 매우 작은 값으로 나타나, 무시멘트 콘크리트의 황산염 침투 저항성은 OPC 콘크리트보다 크게 개선되는 것으로 나타났다.

3. 상술한 실험결과는 재령 91일까지의 결과로, 향후 재령 365일까지 염소이온 침투 저항성 및 황산염 침투 저항성 시험을 수행하여 무시멘트 콘크리트의 장기 염소이온 침투 및 황산염 침투 저항성을 평가할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(11기술혁신F04)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Al-Amoudi, O. S. B. (1998), "Sulfate Attack and Reinforcement Corrosion in Plain and Blended Cements Exposed to Sulfate Environments," *Building and Environment*, Vol. 33, No. 1, pp. 53-61.
- ASTM C 1012 (2007), "Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to Sulfate Solution," *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, USA.
- Bae, S. H., Park, J. I., Lee, K. M., and Choi, S. (2009), "Influence of Mineral Admixtures on the Diffusion Coefficient for Chloride Ion in Concrete," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 4A, pp. 347-353. (in Korean).
- Bae, S. H., Park, J. I. and Lee, K. M. (2010), "Influence of Mineral Admixtures on the Resistance to Sulfuric Acid and Sulfate Attack in Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 2, pp. 219-228. (in Korean).
- Bae, S. H., Kwon, S. O., Goo, M. S., and Lee, H. J. (2013), "Resistance Estimation against Chloride Attack of High Volume Fly Ash Concrete," *Proceedings of the Korean Recycled Construction Resource Institute*, Vol. 13, No. 1, pp. 110-113. (in Korean).
- Goo, M. S., Kwon, S. O., Bae, S. H., Lee, H. J., and Jung, S. H. (2013), "Comparative Evaluation for Resistance to Chloride Attack of High Volume Fly Ash and Plain Concrete according to Strength Level," *Proceedings of the Korean Recycled Construction Resource Institute*, Vol. 13, No. 2, pp. 15-18. (in Korean).
- JSTM C 7401 (1999), "Method of Test for Chemical Resistance of Concrete in Aggressive Solution," *Japanese Industrial Standard*, Japan.
- Kim, S. H., Koh, K. T., Lee, J. H., and Ryu, G. S. (2014), "Study on Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Using Industrial By-Products," *Journal of the Korean Recycled*

- Construction Resources Institute*, Vol. 2, No. 1, pp. 52-59. (in Korean).
- Kwon, S. O. (2013), Comparative Analysis on Experimental Method of Diffusion Coefficient for Chloride Ion in Concrete, *Master thesis*, Department of Civil Engineering, Andong National University, Andong, Korea. (in Korean).
- Lee, H. J., Kwon, S. O., Bae, S. H., Goo, M. S., and Jung, S. H. (2013), "Resistance Evaluation to Reinforcement Corrosion and Chloride Ion Penetration of High Volume Fly Ash Concrete," *Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers*, pp. 1336-1339. (in Korean).
- Mehta, P. K. (1983), "Mechanism of Sulfate of Attack on Portland Cement Concrete - Another Look," *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, No. 3, pp. 401-406.
- NT BUILD 492 (1999), "Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments," Nordtest.
- Park, J. I. (2013), Resistance against Chloride Ion Penetration of Concrete Containing Mineral Admixtures, *Ph.D thesis*, Department of Civil Engineering, Andong National University, Andong, Korea. (in Korean).
- Park, Y. S., Suh, J. K., Lee, J. H., and Shin, Y. S. (1998), "Strength Characteristics on High Strength Concrete against Sulfate Attack," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 10, No. 5, pp. 117-127. (in Korean).
- Santhanam, M., Cohen, M. D., and Olek, J. (2003), "Mechanism of Sulfate Attack : A Fresh Look Part 2 : Proposed Mechanisms," *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 341-346.
- Shazali, M. A., Baluch, M. H., and Al-Gadhib, A. H. (2006), "Predicting Residual Strength in Unsaturated Concrete Exposed to Sulfate Attack," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 343-354.
- Wee, T. H., Suryavanshi, A. K., Wong, S. F., and Anisur Rahman, A. K. M. (2000), "Sulfate Resistance of Concrete Containing Mineral Admixtures," *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 5, pp. 536-549.