

서냉 및 급냉슬래그를 적용한 콘크리트의 복합열화 저항성

Resistance of concrete made with air- and water-cooled slag exposed to multi-deterioration environments

이 승 태	Lee, Seung-Tae	정회원 · 군산대학교 토목공학과 교수 (E-mail : stlee@kunsan.ac.kr)
박 광 필	Park, Kwang-Pil	군산대학교 산학협력단 연구교수 · 교신저자 (E-mail : pkp78@kunsan.ac.kr)
박 정 희	Park, Jung-Hee	군산대학교 토목공학과 박사수료 (E-mail : pjh309@ex.co.kr)
박 세 호	Park, Se-Ho	군산대학교 토목공학과 박사수료 (E-mail : yegam88@nate.com)

ABSTRACT

PURPOSES : Durability of concrete is traditionally based on evaluating the effect of a single deterioration mechanism such as freezing & thawing action, chloride attack, carbonation and chemical attack. In reality, however, concrete structures are subjected to varying environmental exposure conditions which often results in multi-deterioration mechanism occurring. This study presents the experimental results on the durability of concrete incorporating air-cooled slag(AS) and/or water-cooled slag(WS) exposed to multi-deterioration environments of chloride attack and freezing & thawing action.

METHODS : In order to evaluate durable performance of concretes exposed to single- and multi-deterioration, relative dynamic modulus of elasticity, mass ratio and compressive strength measurements were performed.

RESULTS : It was observed that multi-deterioration severely affected durability of concrete compared with single deterioration irrespective of concrete types. Additionally, the replacement of cement by AS and WS showed a beneficial effect on enhancement of concrete durability.

CONCLUSIONS : It is concluded that resistance to single- and/or multi-deterioration of concrete is highly dependent on the types of binder used in the concrete. Showing the a good resistance to multi-deterioration with concrete incorporating AS, it is also concluded that the AS possibly is an option for concrete materials, especially under severe environments.

Keywords

concrete, air-cooled slag, water-cooled slag, multi-deterioration

Corresponding Author : Park, Kwang-Pil, Researcher Professor
Department of Civil Engineering, Kunsan National University, 558
Daehak-ro, Kunsan, Jeonbuk, 54150, Korea
Tel : +82.63.469.4798 Fax : +82.63.469.4791
E-mail : pkp78@kunsan.ac.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (Print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Jan. 19, 2018 Revised Jan. 22, 2018 Accepted Jun. 04, 2018

1. 연구배경 및 목적

콘크리트는 경제성 뿐만 아니라 역학적 성질 및 내구성성이 우수하여 철강재와 더불어 건축물, 사회기반시설물 등 건설구조물 축조에 적용되어 오고 있다. 그러나,

콘크리트 구조물이 오랜 기간 동안 내구성 저하요인에 노출되면 내하성 및 체적 안전성이 크게 저하되고 투수성, 공극량, 균열 등이 증가하게 되어 열화가 가속화되고 심할 경우 구조물이 붕괴되는 현상이 발생하게 된다.

일반적으로 환경적 원인에서 기인하는 콘크리트 구조물의 내구성 저하요인으로는 동결융해(freezing & thawing action), 염해(chloride attack), 탄산화(carbonation), 화학적 침식(chemical attack) 등으로 분류할 수 있으며, 이들 단일 열화요인에 의한 내구성 저하 메커니즘 규명과 관련한 연구는 국내외적으로 많이 수행되어 오고 있으며, 콘크리트의 내구성능 방지대책도 다양하게 제안되어 오고 있다.

그러나, 내구성이 저하되는 환경에 노출되는 콘크리트 구조물은 단일 열화요인에 노출되는 경우보다 해양환경, 지하환경, 제설제 살포환경 등과 같이 염해, 동결융해, 화학적 침식, 탄산화 중 두 가지 이상의 열화요인에 노출되는 경우가 많으며, 열화에 의한 콘크리트의 내구성 저하 현상도 상대적으로 훨씬 심각하게 나타나게 된다(Park et al., 2011).

이러한 이유로 인하여 최근 북미, 유럽을 중심으로 콘크리트의 복합열화에 대한 연구를 활발하게 수행하여 오고 있으며, 복합열화 메커니즘을 규명하기 위한 가시적인 연구성과도 발표되고 있다. 특히, Vesikari(2011) 및 Kuosa et al.(2014)은 콘크리트의 복합열화에 대한 실험적, 해석적 연구를 진행하여 복합열화가 콘크리트 내구수명에 미치는 영향에 대하여 연구결과를 보고하였으며, 콘크리트의 복합열화 대책으로서 고로슬래그 등 광물질혼화재의 효용성에 대하여 강조하였다.

또, 최근 환경보호, 경제성 확보 등의 이유로 인하여 혼화재료를 적용한 콘크리트에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 현재 콘크리트용 결합재로 활용되어지고 있는 혼화재로는 플라이애시, 고로슬래그, 실리카흙, 메타카올린 등이 있으며, 이 중 고로슬래그는 냉각방법에 따라 급수로 냉각처리된 급냉슬래그와 공기 중에 냉각처리된 서냉슬래그로 분류할 수 있다(Ozbakkaloglu et al., 2016).

급냉슬래그의 경우, 콘크리트용 혼화재료로서 활용도가 높으며, 생산량의 약 30%정도가 결합재로 활용되어지고 있는 반면, 서냉슬래그는 약 70%정도는 폐기처분되고 있으며, 나머지는 대부분 도로노반재, 성토재 등으로 사용되고 있다. 그러나, 최근 선진외국에서는 서냉슬래그를 콘크리트용 혼화재료로 재활용하기 위한 일련의 연구가 수행되었으며, 연구결과에 따르면 서냉슬래그는 콘크리트의 수화열 감소, 유동성 및 마모저항성 향상 등의 특성을 나타냄으로써 콘크리트용 혼화재료로서 적용가능성 여부에 대한 건설기술자 및 연구자의 관심이 고조되고 있는 실정이다(Morioka, 2002). 특히, 서냉슬

래그는 화학적으로 안정한 구조인 결정질이며 수경성은 낮지만 화학조성이 급냉슬래그와 유사하고 염기도가 높아 콘크리트용 혼화재료로 활용될 경우, 콘크리트 중 수산화칼슘과의 잠재수경성 발현에 유리하여 콘크리트의 역학적 성능도 우수할 것으로 판단된다(Mostafa et al., 2001).

본 연구에서는 서냉 및 급냉슬래그를 적용한 혼합시멘트 콘크리트의 동결융해 저항성 및 염해-동결융해 복합열화 저항성을 실험적으로 검토하였다. 실험 및 분석을 통하여 도출된 결과를 이용함으로써 한랭지역 해양환경 및 제설제 살포 환경에서 서냉슬래그의 콘크리트용 혼화재료로서의 적용성을 제시하는데 본 연구 목적이 있다.

2. 실험개요

2.1. 사용재료

본 연구에서 사용한 시멘트는 KS L 5201에 준하는 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC, ordinary portland cement)를 사용하였으며, 혼화재료는 급냉슬래그(이하 WS, water-cooled slag) 및 서냉슬래그(이하 AS, air-cooled slag)를 사용하였으며, 그 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

잔골재(S)는 부순모래를 사용하였으며, 굵은골재는 19(G1) 및 25mm(G2) 부순돌을 사용하였다. 각각의 물

Table 1. Chemical Composition and Physical Properties of Binders

Types	OPC	WS	AS
SiO ₂ (%)	19.8	31.7	30.8
Al ₂ O ₃ (%)	4.8	14.5	12.1
Fe ₂ O ₃ (%)	3.1	0.4	0.7
CaO (%)	61.5	41.7	49.7
MgO (%)	2.9	5.4	2.7
SO ₃ (%)	2.8	2.1	1.8
lg. loss (%)	2.9	2.6	2.2
Density (g/cm ³)	3.15	2.92	2.91
Fineness (cm ² /g)	3,400	4,700	4,900

Table 2. Physical Properties of Aggregates

Items	Sand	G1	G2
Gmax (mm)	-	19	25
Absorption (%)	1.14	0.78	0.93
F.M.	2.9	6.2	6.8
Density (g/cm ³)	2.53	2.73	2.75

리적 성질은 Table 2와 같다. 또한 콘크리트의 적절한 유동성과 공기량 확보를 위해 PC계열 고성능감수제 (SP) 및 AE제(AEA)를 각각 사용하였다.

2.2. 콘크리트 배합

본 실험은 광물질혼화재를 사용하지 않은 기준배합 콘크리트(OPC 콘크리트), OPC에 WS를 40% 대체한 콘크리트(WS40 콘크리트) 및 AS를 5 및 10% 각각 대체한 콘크리트(WS35AS05 및 WS30AS10 콘크리트) 등 총 4배합의 콘크리트를 제조하여 실험을 수행하였으며, 각 콘크리트의 배합특성을 Table 3에 나타내었다. 콘크리트의 w/b 및 S/a는 각각 45% 및 36%로 고정하였다. 또, 모든 콘크리트의 목표공기량을 6±1%로 하여, 콘크리트 내구성에 대한 공기량의 영향을 최소화하였다. 믹싱된 4종류 콘크리트는 제작 1일 후 공시체를 탈형하여 20±3℃ 조건에서 각각 수중양생하였다.

2.3. 실험방법

2.3.1. 압축강도

콘크리트는 제작 1일 후 탈형하여 수중양생을 실시하였으며, 재령 7, 28 및 91일에서 KS F 2405 “콘크리트의 압축강도 시험방법”에 준하여 압축강도를 측정하였다.

2.3.2. 동결융해 저항성

동결융해 저항성 평가 시험은 ø100×200mm의 원주형 공시체를 제작한 후, 콘크리트의 강도발현을 고려하여 재령 28일 공시체를 대상으로 ASTM C 666 A법의 규정을 참조하여 실험을 실시하였다. 온도측정용 중심공시체의 온도가 4℃에서 -18℃를 거쳐 다시 4℃에 도달하는 과정을 1 사이클로 하여 총 300 사이클을 진행하였으며, 매 30 사이클마다 콘크리트 공시체의 동탄성계수 및 질량을 측정하였으며, 콘크리트의 압축강도는 90, 210 및 300 사이클 후 KS F 2405에 준하여 측

정하였다. 콘크리트의 상대동탄성계수, 질량비 및 압축강도 감소율은 다음 Eqs. (1)~(3)과 같이 산정하였다.

$$E_{d,c} = \left(\frac{n_c}{n_0}\right)^2 \times 100 (\%) \quad (1)$$

여기서,

$E_{d,c}$: c사이클 후 콘크리트의 상대동탄성계수 (%)

n_c : c사이클 후 콘크리트의 공명진동수 (Hz)

n_0 : 열화환경 노출 전 콘크리트의 공명진동수 (Hz)

$$\text{질량비} = \frac{M_c}{M_0} \times 100 (\%) \quad (2)$$

여기서,

M_c : c사이클 후 콘크리트의 질량 (g)

M_0 : 열화환경 노출 전 콘크리트의 질량 (g)

$$\text{압축강도 감소율} = \frac{(f_0 - f_c)}{f_0} \times 100 (\%) \quad (3)$$

여기서,

f_0 : 열화환경 노출 전 콘크리트의 압축강도 (MPa)

f_c : c 사이클 후 콘크리트의 압축강도 (MPa)

2.3.3. 염해-동결융해 복합열화 저항성

염해-동결융해 복합열화 저항성 시험은 ø100×200mm의 원주형 공시체를 대상으로 제작 28일 동안 수중양생 후 ASTM C 666의 A시험법에 준하여 평가 시 4% CaCl₂ 수용액을 동결수로 사용하여 300 사이클까지 동결융해 시험을 실시하였다. 이 때, 염화물 용액은 매 60 사이클마다 교체하여 사용하였다. 동결융해 저항성 실험과 마찬가지로 매 30 사이클마다 동탄성계수 및 질량의 변화를 측정하였으며, 90, 210 및 300 사이클 후 콘크리트의 압축강도를 측정하여 Eqs. (1)~(3)과 같이 콘크리트의 상대동탄성계수, 질량비 및 압축강도 감소율을 산정하였다.

Table 3. Mix Properties of Concrete

(unit : kg/m ³)													
Types	Air (%)	Slump (mm)	w/b (%)	S/a (%)	W	C	WS	AS	S	G1	G2	SP*	AEA**
OPC	6±1	60±10	45	36	157.5	350	-	-	645	595	599	0.33	0.25
WS40						210	140	-	632	584	588	0.3	0.4
WS35AS05						210	122.5	17.5	639	590	594	0.5	0.5
WS30AS10						210	105	35	661	609	614	0.55	0.5

*SP : wt. of binder, % **AEA : wt. of SP, %

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 콘크리트의 강도 특성

본 연구에서 사용한 4종류 콘크리트의 재령별 압축강도 특성을 나타낸 것이 Fig. 1이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 OPC 콘크리트는 초기재령(재령 7일)에서 약 28.68MPa로 크게 나타낸 반면, AS 및 WS를 사용한 콘크리트의 압축강도는 약 23.5MPa로서 OPC 콘크리트에 비해 다소 작은 값을 나타내었다. 한편, 재령 28일에서는 OPC 콘크리트가 약 34.5MPa의 강도 값을 나타내었으며, WS40 콘크리트의 압축강도는 약 37MPa로 나타났다. 또한 WS35AS05 및 WS30AS10 콘크리트의 압축강도는 WS40 콘크리트의 압축강도와 유사한 경향을 나타내었다.

따라서, 콘크리트 결합재로서 AS를 적용한 콘크리트는 대체율이 5~10%까지는 압축강도가 WS40 콘크리트와 유사한 결과를 보여주고 있다. 이는 AS에 포함되어 있는 Larnite(β - Ca_2O_4Si)가 장기강도 발현의 특성을 갖고 있으며, WS의 잠재수경성에 의하여 장기강도가 발현되었기 때문으로 판단된다(Mostafa, 2002).

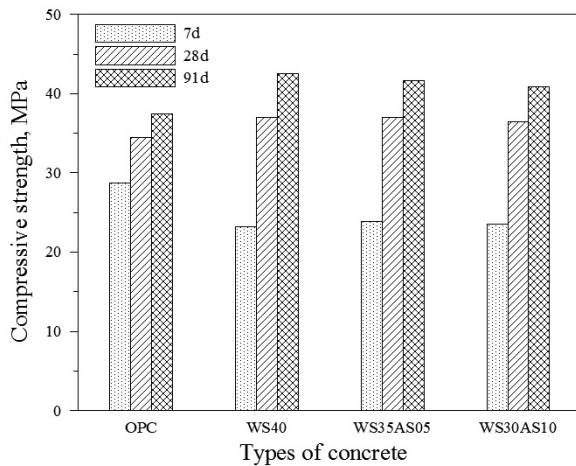


Fig. 1 Compressive Strength Development of Concrete

3.2. 콘크리트의 동결융해 저항성

콘크리트는 동결융해 작용을 지속적으로 받으면 세공속의 수분이 동결 및 융해의 반복작용으로 인하여 미세 균열 및 표면박리가 발생함으로써 열화가 가속화된다 (Jeon et al., 2008). 본 연구에서는 콘크리트의 동결융해 저항성을 평가하기 위하여 ASTM C 666에 준하여 촉진실험을 실시하였으며, 매 30 사이클마다 상대동탄성계수 및 질량비를 측정하였다. 또, 소정의 사이클에서 콘크리트의 압축강도를 측정하여 동결융해작용을 받은 콘크리트의 압축강도 변화를 고찰하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 적용한 4종류 콘크리트의 상대동탄성계수 측정결과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 OPC 콘크리트는 150 사이클에서 상대동탄성계수가 90% 이하로 감소하는 반면, WS40, WS35AS05 및 WS30AS10 콘크리트의 상대동탄성계수는 90% 이상으로 OPC 콘크리트에 비하여 다소 큰 값을 나타내었다.

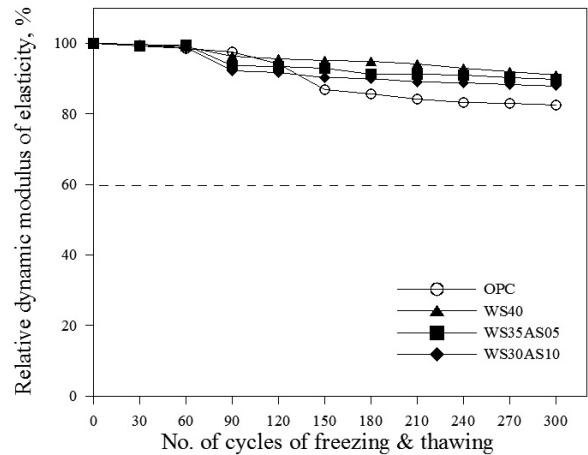


Fig. 2 Relative Dynamic Modulus of Elasticity (E_d) of Concrete Specimens by Freezing & Thawing Action

동결융해 반복작용을 받은 콘크리트의 질량비를 나타낸 것이 Fig. 3이다. 콘크리트의 질량비는 Fig. 2에 제시된 상대동탄성계수 경향과 유사하게 나타난 것으로 조사되었다. 특히, WS40 및 WS35AS05 콘크리트의 질량비는 매우 유사하게 나타났으며, 300 사이클에서 약 98%의 질량비를 나타냄으로써 매우 우수한 동결융해 저항성을 나타낸 반면, OPC 콘크리트의 질량비는 약 89%로 나타냄으로써 동결융해 저항성이 상대적으로 떨어지는 것으로 나타났다.

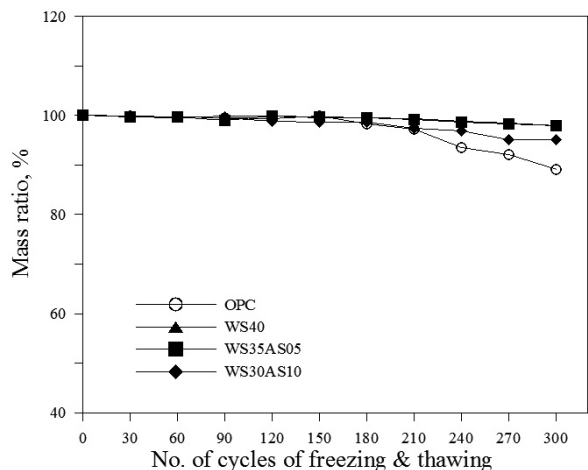


Fig. 3 Mass Ratio of Concrete Specimens by Freezing & Thawing Action

Fig. 4는 동결융해를 받은 콘크리트를 대상으로 90, 210 및 300 사이클의 압축강도를 나타낸 것이다. 동결융해를 받은 콘크리트 압축강도는 90 사이클에서 OPC 콘크리트가 약 31.1MPa의 압축강도를 나타낸 반면, WS 및 AS를 사용한 콘크리트의 압축강도는 약 33.8~35.9MPa로서 OPC 콘크리트에 비하여 다소 큰 값을 나타내었다. 또한, 300 사이클에서는 OPC 콘크리트가 약 23.1MPa의 강도 값을 나타낸 반면, WS40 콘크리트의 압축강도는 약 30.1MPa를 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한 WS35AS05 및 WS30AS10 콘크리트의 압축강도는 각각 약 29.5 및 28.1MPa로서 OPC 콘크리트의 압축강도보다 비교적 큰 값을 나타내었다.

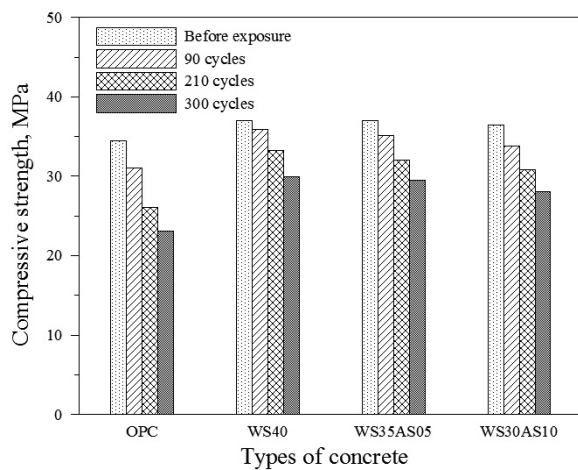
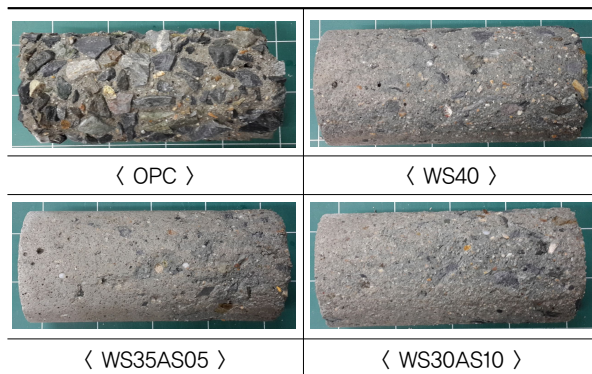


Fig. 4 Compressive Strength of Concrete Specimens by Freezing & Thawing Action

Table 4는 300 사이클 동안 동결융해 반복작용을 받은 4종류 콘크리트의 외관을 나타낸 것으로서 콘크리트 종류에 따라 열화도가 상이하게 나타남을 확인할 수 있다. 특히, OPC 콘크리트는 동결융해 작용에 의한 표면 박리로 인하여 골재노출 및 탈락이 심하게 나타난 것으로 조사되었으며, WS40, WS35AS05 및 WS30AS10

Table 4. Visual Appearance of Concrete Specimens After Freezing & Thawing Action of 300 Cycles



콘크리트는 OPC 콘크리트에 비하여 상대적으로 동결융해 반복작용에 의한 열화가 작게 나타난 것으로 관찰되었다. 이는 El-Diamony et al.(2013)의 연구결과에도 나타났듯이 WS 및 AS의 잠재수경성으로 인하여 조직구조가 상대적으로 밀실화하여 동결융해 저항성이 우수한 것으로 나타났으며, 콘크리트 결합재로서 AS의 대체율이 5~10%까지는 동결융해 저항성이 만족스러운 것으로 판단된다.

3.3. 콘크리트의 염해-동결융해 복합열화 저항성

지금까지 콘크리트의 내구성을 평가하기 위한 연구는 열화요인별로 구별하여 촉진시험법을 적용한 단일열화 내구성에 대한 연구가 주류를 이루어 오고 있는 반면, 콘크리트 구조물에서 발생할 수 있는 복합열화 내구성에 대한 연구는 몇몇 연구를 제외하면 그다지 많지 않은 실정이다. 본 연구에서는 한랭지역 염해환경에 노출된 콘크리트의 내구성을 평가하기 위한 일환으로 염해-동결융해 작용을 동시에 받는 복합열화 저항성을 평가하였으며, 2.2절에 제시한 콘크리트의 동결융해 저항성과 비교·고찰하였다.

Fig. 5는 염해-동결융해 복합열화를 받은 4종류의 콘크리트의 상대동탄성계수를 사이클별로 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, OPC 콘크리트의 상대동탄성계수는 120 사이클 이후 급격히 감소하는 것으로 나타난 반면, 3종류 혼합시멘트 콘크리트는 상대동탄성계수의 감소가 상대적으로 완만하게 감소하는 것으로 조사되었다. 또한, 실험이 종료된 300 사이클에서 WS40 콘크리트는 약 88%, WS35AS05 콘크리트는 약

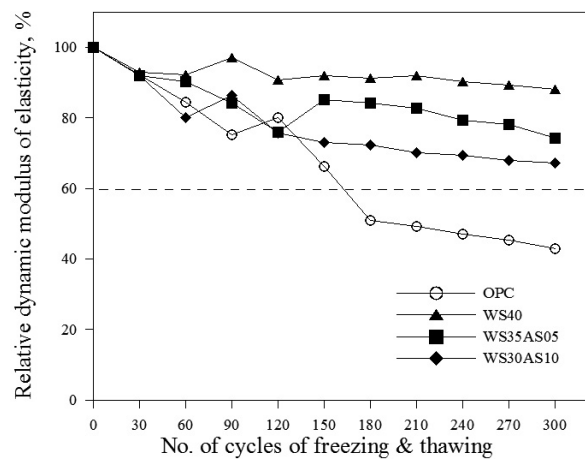


Fig. 5 Relative Dynamic Modulus of Elasticity (E_d) of Concrete Specimens by Multi-deterioration of Chloride Attack and Freezing & Thawing Action

74%, WS30AS10 콘크리트는 약 67%의 상대동탄성계수 값을 나타낸 반면, OPC 콘크리트의 상대동탄성계수는 콘크리트의 성능파괴에 해당하는 60%보다 낮은 약 43%를 나타냄으로써 염해-동결융해 복합열화에 대한 저항성이 가장 떨어지는 것으로 관찰되었다.

Fig. 6은 복합열화를 받은 콘크리트의 질량비를 나타낸 것으로서, 이 그림으로부터 WS40 콘크리트는 노출 사이클에 관계없이 가장 적은 질량변화를 나타내었으며, WS35AS05 콘크리트의 질량변화도 WS40 콘크리트와 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 AS를 10% 대체한 WS30AS10 콘크리트의 질량변화는 WS40 콘크리트에 비하여 상대적으로 다소 크게 나타났으며, 300 사이클에서 질량비가 약 74.2%로서 WS40 콘크리트의 약 88.9%보다 상대적으로 복합열화에 의한 질량손실이 크게 나타난 것으로 관찰되었다. 한편, OPC 콘크리트는 300 사이클에서 질량비가 약 44.6%로 매우 낮은 값을 나타내었다.

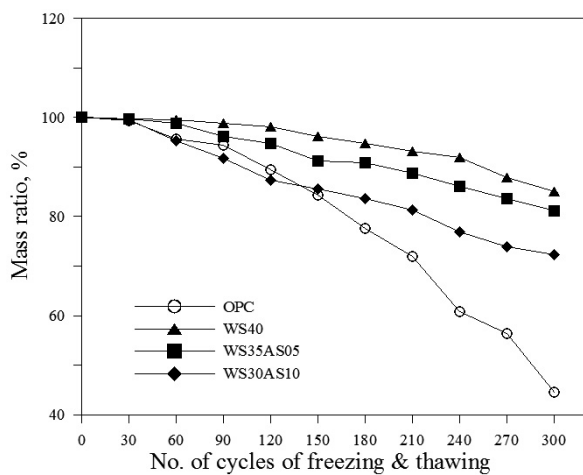


Fig. 6 Mass Ratio of Concrete Specimens by Multi-deterioration of Chloride Attack and Freezing & Thawing Action

염해 및 동결융해 복합열화를 받은 콘크리트의 압축강도 변화를 도시하여 나타낸 것이 Fig. 7이다. Fig. 4의 실험결과와 비교해 보았을 때, 동결융해 단일열화요인에 의한 콘크리트보다 복합열화요인에 의한 콘크리트가 노출 사이클 및 콘크리트 종류에 관계없이 압축강도가 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히, 복합열화를 받은 OPC 콘크리트의 90, 210 및 300 사이클에서 압축강도는 각각 약 20.1, 15.3 및 4.2MPa로서 동결융해 단일열화를 받은 OPC 콘크리트의 약 18~64% 정도로 나타남으로써 압축강도 손실이 매우 큰 것으로 조사되었다. 이와 같이 염해 및 동결융해의 복합열화를 받은

콘크리트의 열화정도가 크게 나타나는 이유는 염화물과 시멘트 수화물과의 반응으로 인하여 콘크리트의 조직구조는 다공화되고 동결융해 작용에 의한 팽창압으로 인하여 콘크리트 조직구조 내부의 미세균열이 확장되어 콘크리트의 열화가 더욱 가속화되었기 때문으로 판단된다(Park et al., 2011). 한편, 복합열화를 받은 WS40 콘크리트는 OPC 콘크리트에 비하여 압축강도가 상대적으로 크게 나타났으며, WS를 5% 대체한 WS35AS05 콘크리트의 300 사이클 후의 압축강도가 15MPa 이상으로 조사됨으로써 WS40 콘크리트와 큰 차이가 없는 것으로 관찰되었다. 따라서, 염해-동결융해 복합열화 환경에서 콘크리트의 내구성 및 경제성을 고려한 WS35AS05 콘크리트의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

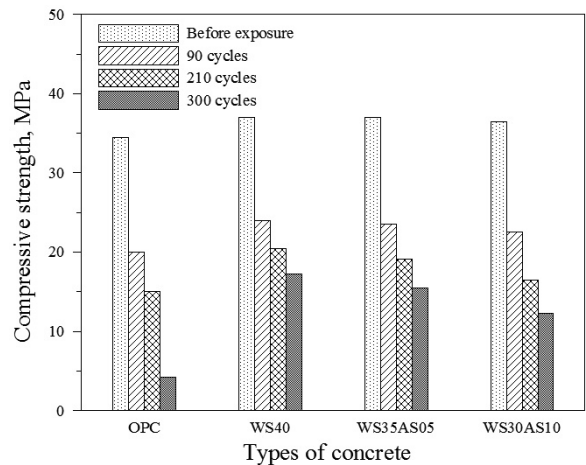
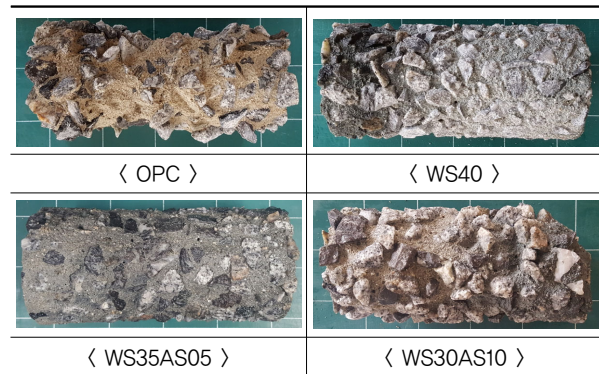


Fig. 7 Compressive Strength of Concrete Specimens by Multi-deterioration of Chloride Attack and Freezing & Thawing Action

콘크리트의 복합열화 저항성을 시각적으로 조사하기 위하여 300 사이클동안 염해 및 동결융해 반복작용을 받은 4종류 콘크리트의 외관을 나타낸 것이 Table 5로

Table 5. Visual Appearance of Concrete Specimens After Multi-deterioration of 300 Cycles



서, 복합열화에 의한 OPC 콘크리트의 골재탈락, 스폐링, 단면감소 등의 심각한 열화현상이 관찰되었다.

한편, Fig. 8은 동결융해 반복작용 및 염해+동결융해 복합열화를 받은 콘크리트의 300 사이클 후 상대동탄성계수와 질량비와의 상관관계를 나타낸 것으로서, 콘크리트의 내구성 평가 지표로서 상대동탄성계수와 질량비는 노출환경에 관계없이 좋은 상관관계를 나타내는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 Fig. 9에 나타난 바와 같이 콘크리트의 상대동탄성계수와 압축강도 감소율(Eq. (3) 참조)의 관계에서도 유사한 경향인 것으로 관찰되었다.

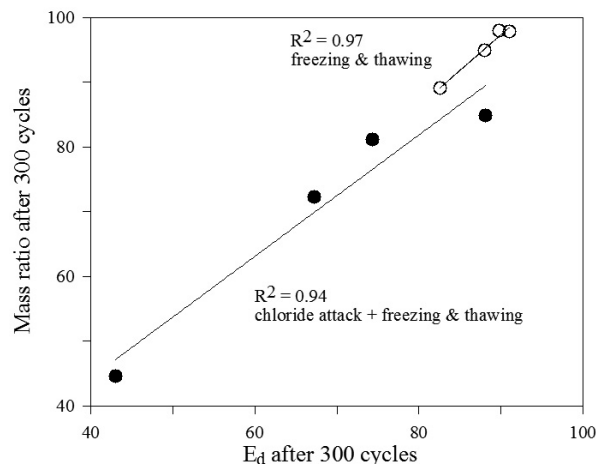


Fig. 8 Relationship between Relative Dynamic Modulus of Elasticity (E_d) and Mass Ratio of Concrete Specimens

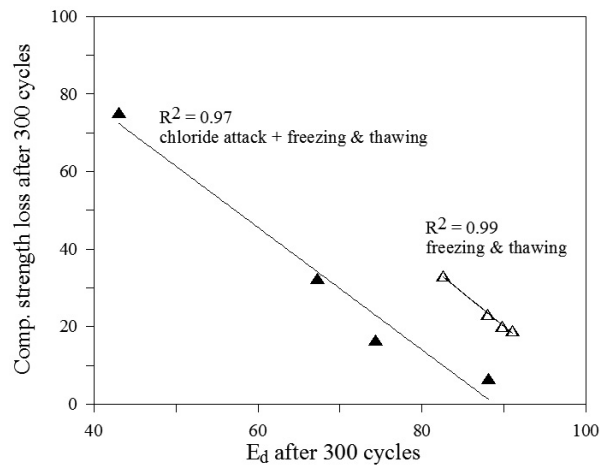


Fig. 9 Relationship between Relative Dynamic Modulus of Elasticity (E_d) and Compressive Strength Loss Ratio of Concrete Specimens

4. 결론 및 요약

본 연구는 서냉 및 급냉슬래그를 결합재로 적용한 콘

크리트의 염해-동결융해 복합열화 저항성을 실험적으로 평가한 것으로서, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 콘크리트의 압축강도 발현특성을 조사한 결과, AS 및 WS를 사용한 콘크리트의 압축강도는 초기재령에서 OPC 콘크리트보다 작게 나타났으나, 재령 28일 이후에서는 강도발현이 오히려 우수하게 나타났다. 특히, AS를 적용한 콘크리트는 WS40 콘크리트와 압축강도가 유사하게 발현되는 특성을 나타내었다.
2. 동결융해 반복작용을 받은 WS40, WS35AS05 및 WS30AS10 콘크리트의 상대동탄성계수는 300 사이클에서 90% 이상으로 나타남으로써 OPC 콘크리트에 비하여 우수한 동결융해 저항성을 나타내었으며, 이러한 경향은 콘크리트의 질량비, 압축강도 및 외관조사 결과에서도 유사하게 관찰되었다.
3. 콘크리트의 염해 및 동결융해 복합열화 저항성을 고찰한 결과, 300 사이클 후 OPC 콘크리트의 상대동탄성계수는 콘크리트의 성능과파괴에 해당하는 60% 보다 낮은 약 43%였으며, 골재탈락, 스폐링, 단면감소 등의 심각한 열화현상이 관찰되었다. 반면, 혼합시멘트 콘크리트는 67% 이상의 상대동탄성계수 값을 나타냄으로써 상대적으로 복합열화 저항성이 우수하게 나타났다.
4. 본 연구의 범위에서 종합적으로 고찰해 보면, 콘크리트는 동결융해 환경뿐만 아니라, 염해-동결융해 복합열화 환경에서도 WS와 AS를 적용한 콘크리트의 우수한 저항성이 관찰되었으며, 내구성 및 경제성 관점에서 AS를 콘크리트용 혼화재료로 적용하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 그러나, AS를 적용한 콘크리트의 미세구조 및 최적배합에 대한 추가적인 연구도 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 "온실가스 배출 최소화를 위한 친환경 포장도로 (Eco-Road)" 연구단을 통하여 지원된 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 건설기술혁신사업에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

El-Diamony, H, Amer, AA, El-Sokkary, TM, Abd-El-Aziz, H. (2013). Effect of substitution of granulated slag by air-cooled slag on the properties of alkali activated slag, *Ceramic International*, Vol.39, pp.171-181.

Jeon, JK, You, JO, Moon, JH. (2008). Durability evaluation of

- tunnel lining concrete reinforced with nylon fiber, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.20, No.4, pp.487-493.
- Kuosa, H, Ferreira, RM, Holt, E, Leivo, M, Vesikari, E. (2014). Effect of coupled deterioration by freeze-thaw, carbonation and chlorides on concrete service life, *Cement and Concrete Research*, Vol.47, pp.32-40.
- Morioka, (2002). Influence of fine powder of air-cooled blast furnace slag on fluidity and its mechanism, *Cement Science and Concrete Technology*, Vol.56, pp.72-77.
- Mostafa, NY, El-Hemaly, SAS, Al-Wakeel, EI, El-Korashy, SA, Brown, PW. (2001). Hydraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag at different temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol.31, pp.475-484.
- Shoib MM, Ahmed, SA, Balaha MM. (2001). Effect of fire and cooling mode on the properties of slag mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol.31, pp.1533-1538.
- Ozbakkaloglu, T, Gu, L, Pour, AF. (2016). Normal and high strength concretes incorporating air-cooled blast furnace slag coarse aggregates, *Construction and Building Materials*, Vol. 126, pp.138-146.
- Park, KP, Kim, SS, Lee, ST, Kim, JP, Jung, HS. (2011). Properties on the freeze-thaw of concrete subjected to seawater attack, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.1, pp.23-30.
- Vesikari, E. (2011). Modelling of carbonation and chloride penetration interacted by frost damage, In: *Proceedings of Nordic Concrete Research*, Finland, pp.255-258.
- Tossavainen, M, Engstrom F, Yang Q, Menad N, Lidstrom Larsson M, Bjorkman B. (2015). Properties of pervious concrete made with air-cooling electric arc furnace slag as aggregates, *Waste Management*, Vol.27, Issue 10, pp.1335-1344.