

서냉슬래그 미분말을 적용한 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성 평가

이승태*, 박광필
군산대학교 토목공학과

Mechanical Properties and Durability of Concrete Incorporating Air-Cooled Slag

Seung-Tae Lee*, Kwang-Pil Park

Department of Civil Engineering, Kunsan National University

요약 고로슬래그는 제철과정에서 생산되는 산업부산물로써, 냉각방법에 따라 서냉슬래그와 급냉슬래그로 구분된다. 본 연구에서는 콘크리트 결합재로써 서냉슬래그를 시멘트에 대하여 부분 대체(0, 5, 10, 20, 30 및 40%)하여 삼성분계 시멘트 콘크리트 공시체를 제조하였으며, 강도, 흡수율, 투수공극량 등 콘크리트의 역학적 특성뿐만 아니라, 염소이온 침투저항성, 탄산화 저항성 등 콘크리트의 내구성능을 실험적으로 평가함으로써, 서냉슬래그의 콘크리트용 혼화재료로써 적용 가능성에 대하여 고찰하고자 하였다. 본 연구를 통하여 도출된 실험결과로부터, 서냉슬래그를 약 10% 대체할 경우, 콘크리트의 성능은 만족할 만한 수준의 성능을 나타내는 것으로 조사되었다. 그러나, 서냉슬래그를 30% 이상 사용한 콘크리트는 결정질의 AS가 다량 대체됨으로 인하여 수화반응 및 포졸란 반응 등 결합재의 경화반응이 상대적으로 지연된 탓으로 인하여 역학적 성능 및 내구성이 다소 떨어지는 결과를 나타내었다. 따라서, AS를 콘크리트용 결합재로 적용하기 위한 최적 대체율이 존재하는 것으로 나타났으며, 건설재료의 경제적 및 환경적 관점에서 AS를 약 10% 정도까지 적용할 경우, 구조용 콘크리트 재료로써 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract Blast furnace slag(BFS) is a by-product generated during the manufacture of pig iron, and is divided into water-cooled slag(WS) and air-cooled slag(AS) by the coking method of BFS. In this study, concrete specimens with ternary binders were produced at the various replacement levels of cement by AS. Various mechanical properties of concrete, such as compressive and split tensile strengths, absorption and water permeable pore, were measured. In addition, the chloride ions penetration resistance and carbonation resistance were tested to evaluate the durability of concrete incorporating AS. The experimental data indicated that the use of AS up to a maximum of 10% replacement level enhanced the concrete performance. However, a higher replacement of AS exhibited poor mechanical properties and concrete durability.

Keywords : Air-cooled slag, Water-cooled slag, By-product, Mechanical properties, Durability

1. 서론

최근, 시멘트 사용량을 줄이고, 경제성을 확보하기 위

하여 혼화재료를 적용한 콘크리트에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 현재 콘크리트용 결합재로써 활용되어지고 있는 혼화재료로써 고로슬래그, 플라이애시, 실리

본 논문은 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원(KAIA)의 교통물류사업 “온실가스 배출 최소화를 위한 친환경 포장 도로 연구” 연구과제에서 연구비를 지원받아 수행된 결과입니다. 이에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Seung-Tae Lee(Kunsan National Univ.)

Tel: +82-63-469-4877 email: stlee@kunsan.ac.kr

Received February 15, 2017

Revised (1st February 27, 2017, 2nd March 2, 2017)

Accepted March 10, 2017

Published March 31, 2017

카 흙, 메타카올린 등이 있으며, 이 중 고로슬래그는 냉각방법에 따라 급수로 냉각처리된 급냉슬래그와 공기 중에 냉각처리된 서냉슬래그로 분류될 수 있다[1].

급냉슬래그의 경우, 콘크리트용 혼화재료로서 활용도가 높으며, 생산량의 약 30%정도가 결합재로 활용되어지고 있는 반면, 서냉슬래그는 약 70% 가량이 폐기되고 있으며, 나머지는 대부분 도로노반재, 성토용 재료, 규산질비료 등으로 활용되어지고 있는 실정이다. 그러나 최근의 연구결과에 따르면, 서냉슬래그는 수화열 감소 및 유동성 향상 등의 특성이 있는 것으로 보고되고 있어, 서냉슬래그의 콘크리트 혼화재료로서 적용가능성 여부에 대한 관심이 고조되고 있는 실정이다[2]. 서냉슬래그는 화학조성이 급냉슬래그와 유사하고 염기도가 높아 콘크리트용 혼화재료로 사용될 경우, 콘크리트 중 수산화칼슘과의 잠재수경성 발현에 유리하여 콘크리트 결합재로서 활용이 가능할 것으로 보고되어지고 있다[3]. 또, 냉각처리된 서냉슬래그 중에는 F-CaO, F-MgO가 거의 존재하지 않기 때문에 다른 슬래그와 구별되게 특별한 안정처리가 불필요한 것으로 알려져 있다. 한편, 서냉슬래그는 급냉슬래그의 비해 3배정도 빠른 분쇄능으로 인하여 경제적 효율도 높을 것으로 기대할 수 있으며, 또한 $S_2O_3^{2-}$ 이온 용출이 급냉슬래그에 비하여 많아, 콘크리트의 유동성 측면에서 성능이 우수한 것으로 보고되고 있다[2].

이러한 서냉슬래그의 물리화학적 특성을 기반으로 하여 서냉슬래그를 콘크리트 재료로서 활용하기 위한 몇몇의 연구가 진행되어 오고 있다. 특히, 서냉슬래그 적용경화체의 미세구조에 대한 연구는 Mostafa 등에 의하여 수행되었으며, El-Didamony 등은 서냉슬래그를 사용한 페이스트의 응결 및 강도특성에 대하여 고찰하였으며, 급냉슬래그의 대체 재료로서 서냉슬래그의 사용 가능성을 실험적으로 입증하고자 하였다[4,5].

본 연구의 목적은 콘크리트용 혼화재료로서 널리 활용되고 있는 급냉슬래그의 대체재료로서 서냉슬래그의 재활용 가능성을 규명하기 위한 것이다. 따라서, 본 연구에서는 서냉슬래그를 콘크리트 결합재로 사용하여 공시체를 제조하였으며, 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성을 실험적으로 평가함으로써, 서냉슬래그의 콘크리트용 혼화재료로서 적용가능성을 실험적으로 검토하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 결합재

본 연구에서는 시멘트로서 KS L 5201에 준하는 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC)를 사용하였으며, 혼화재료로는 급냉슬래그(이하 WS (water-cooled slag)) 및 서냉슬래그(이하 AS (air-cooled slag))를 사용하였으며, 그 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1 같다.

2.1.2 골재

잔골재는 경기도 포천에서 채취한 강모래(<5mm)를 사용하였고, 굵은골재는 최대치수 25mm인 부순자갈을 사용하였으며, 골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

2.1.3 화학혼화제

콘크리트의 적절한 유동성(150 ± 10 mm) 및 공기량($4.5 \pm 0.5\%$)을 확보하기 위하여 폴리칼본산계 고성능감수제(SP제) 및 공기연행제(AE제)를 사용하였다.

Table 1. Chemical composition and physical properties of binders

Items	OPC	WS	AS
SiO ₂ [%]	17.0	29.6	30.8
Al ₂ O ₃ [%]	3.8	12.7	12.1
Fe ₂ O ₃ [%]	4.15	0.87	0.71
CaO [%]	67.8	50.0	49.7
MgO [%]	2.28	3.19	2.71
SO ₃ [%]	3.01	1.82	1.75
Density [g/cm ³]	3.15	2.92	2.91
Blaine [cm ² /g]	3,400	4,700	4,900

Table 2. Physical properties of aggregates

	Density [g/cm ³]	Absorption [%]	F.M.
Fine aggregate	2.53	0.98	2.80
Coarse aggregate	2.54	0.66	6.63

2.2 배합

본 연구에서는 WS 및 AS를 사용하지 않은 기준배합(OPC 콘크리트)과 OPC에 슬래그미분말(WS+AS)을 40% 대체한 6종류 혼합시멘트계 콘크리트 등 총 7배합

Table 3. Mix proportions of concrete

Codes	Unit weight (kg/m ³)						SP*	AEA**
	W	OPC	WS	AS	S	G		
OPC	170	340	-	-	805	911	0.70	0.5
WS40AS00		204	136	-	801	906	0.55	1.3
WS35AS05		204	119	17	801	906	0.52	1.0
WS30AS10		204	102	34	801	906	0.50	1.0
WS20AS20		204	68	68	801	906	0.45	1.0
WS10AS30		204	34	102	801	906	0.42	1.0
WS00AS40		204	-	136	801	906	0.40	1.0

* Superplasticizer : wt. of binder (%)

** Air entraining agent : wt. of SP (%)

의 콘크리트를 제조하여 실험을 수행하였다. 이때, 혼합 시멘트계 콘크리트에 적용된 AS의 사용량은 총결합재의 0, 5, 10, 20, 30 및 40%로 각각 정하였다. 각 콘크리트의 배합특성을 나타낸 것이 Table 3이다. 콘크리트의 물-결합재비(W/B) 및 잔골재율(S/a)은 각각 50% 및 47%로 고정하였으며, 믹싱된 콘크리트는 제조 1일 후 탈형하여 20±3°C 조건에서 소정의 기간동안 수증양생하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 강도특성

수증양생한 Ø100×200mm 원주형 공시체를 대상으로 KS F 2405 및 2423에 준하여 재령 7, 28 및 91일에서 콘크리트의 압축강도 및 쪼갬 인장강도 실험을 실시하였다.

2.3.2 흡수율

ASTM C 1585에 준하여 콘크리트의 흡수율(I) 실험을 실시하였으며, 재령 28일 시편을 대상으로 초기흡수 계수(S_i : Initial absorption coefficient)는 흡수율 실험 시작 후 6시간까지 측정된 데이터의 기울기(slope)로써 식 (1)과 같이 산정되었다.

$$I = S_i \sqrt{t} \quad (1)$$

여기서, I = 질량증가분/접촉면적/물의밀도(mm),

t = 시간(sec)이다.

2.3.3 투수공극량

콘크리트의 투수공극량 시험은 ASTM C 642에 준하

여 공시체 중량 800g을 초과하지 않는 범위에서 공시체 두께를 20mm로 정하여 절단한 후 표면건조포화상태 중량(W_{ssd}), 수증중량(W_{susp}) 및 노건조상태 중량(W_{dry})을 측정 한 후, 다음 식 (2)와 같이 투수공극량(P_{wat})을 계산하였다.

$$P_{wat} = \frac{W_{ssd} - W_{dry}}{W_{ssd} - W_{susp}} \times 100(\%) \quad (2)$$

2.3.4 염소이온 침투저항성

콘크리트의 통과전하량은 ASTM C 1202에 준하여 두께 Ø100×50mm의 공시체를 대상으로 하여 측정하였다. 시험체 양단에 60V의 직류전압을 6시간 동안 통전 시키면서 시험체에 흐르는 전류를 데이터 로거를 이용하여 30분 간격으로 측정하였으며, 측정된 전류로부터 시간에 대한 전류의 적분 값을 취하여 식 (3)으로써 총 통과전하량을 산정하였다.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3)$$

여기서, Q = 총 통과전하량(Coulomb),

I_x = x분에서의 전류값(A)이다.

또, 콘크리트의 염소이온 확산계수는 전기화학적 측진실험법 중 Nordtest 방법인 NT BUILD 492법에 의하여 다음 식 (4)로 산정하였다[6].

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (4)$$

여기서, $E = \frac{U-2}{L}$, $\alpha = 2\sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1}(1 - \frac{2c_d}{c_0})$

D : 비정상상태에서 염소이온 확산계수 (m^2/s),
 z : 이온의 원자기($z=1$), F : 패러데이 상수, U : 전압차(V), R : 기체상수, T : 용액의 온도(K), L : 시편의 두께(m), x_d : 염소이온의 침투깊이(m), t : 실험기간(s),
 erf : error function, c_d : 비색법에 의한 반응 농도 및 c_0 : 음극셀의 염소이온 농도이다.

2.3.5 탄산화 저항성

수중에서 28일간 양생한 콘크리트 공시체를 대상으로 KS F 2584에 준하여 탄산화 촉진실험을 실시하였으며, 탄산화 촉진 챔버에 28 및 91일간 노출된 공시체를 1% 페놀프탈레인 알콜 용액을 사용한 변색법으로 탄산화 깊이를 측정하였다. 이때, 콘크리트의 탄산화 노출은 온도 $20\pm 3^\circ C$, 상대습도 60% 및 CO_2 농도 10%의 조건으로 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 강도특성

Fig. 1은 본 연구에서 제조된 7종류 콘크리트의 압축강도 실험결과를 나타낸 것이다. 콘크리트 압축강도는 초기재령(재령 7일)에서 OPC 콘크리트가 약 18.4MPa의 압축강도 값을 나타낸 반면, AS 및 WS를 사용한 콘크리트의 압축강도는 동일재령에서 약 9.7 - 12.9MPa로써 OPC 콘크리트에 비하여 다소 작은 값을 나타내었다. 한편, 재령 28일에서는 OPC 콘크리트가 약 21.6MPa의 강도 값을 나타낸 반면, WS를 OPC에 40% 대체한 WS40AS00 콘크리트의 압축강도는 약 25.8MPa를 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한, WS 및 AS를 OPC에 대하여 각각 30-35% 및 5-10% 대체한 WS35AS05 및 WS30AS10 콘크리트의 압축강도는 WS40AS00 콘크리트의 압축강도와 비교적 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 2는 콘크리트의 쪼갬 인장강도 실험결과를 나타낸 것으로써, 재령 7일에서 OPC 및 WS40AS00 콘크리트의 인장강도가 각각 0.69MPa 및 0.90MPa를 나타내었고, AS 대체율이 5, 10 및 20%인 콘크리트의 인장강도는 WS40AS00 콘크리트와 유사한 경향을 나타내었으나, AS 대체율이 30% 이상일 경우 인장강도는 상대적으로 낮은 값을 나타내었다.

따라서, 콘크리트 결합제로써 OPC에 대한 AS 대체율이 5 ~ 20%까지는 압축강도 및 인장강도가 WS40AS00의 콘크리트와 유사한 결과를 보여주고 있으나, AS 대체율이 30% 이상일 경우, 강도 성능이 떨어지는 경향을 나타냄을 확인할 수 있었다. 그 이유는 결정질의 AS가 다량 대체됨으로 인하여 수화반응 및 포졸란 반응 등 결합제의 경화반응이 상대적으로 지연된 탓에 기인한 것으로 판단된다[7]. 또한, 장기재령으로 갈수록 콘크리트 결합제로써 AS의 대체율이 30% 이상인 콘크리트의 강도 값이 다소 작게 나타남으로써, 강도발현 측면에서 콘크리트 결합제로써 AS를 다량 사용하는 것은 효과적이지 못한 것으로 판단된다.

한편, Fig. 3은 콘크리트의 압축강도와 쪼갬인장강도와의 상관관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, AS 대체율과 상관없이 재령이 증가함에 따라 콘크리트의 압축강도 및 인장강도가 증가됨을 나타내고 있으며, 압축강도와 인장강도는 $R^2=0.89$ 로 좋은 선형관계를 나타내고 있음을 보여준다.

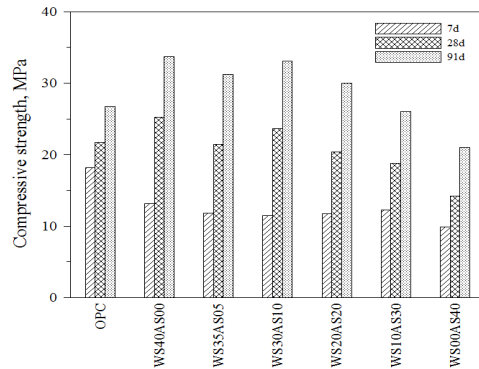


Fig. 1. Compressive strength of concrete

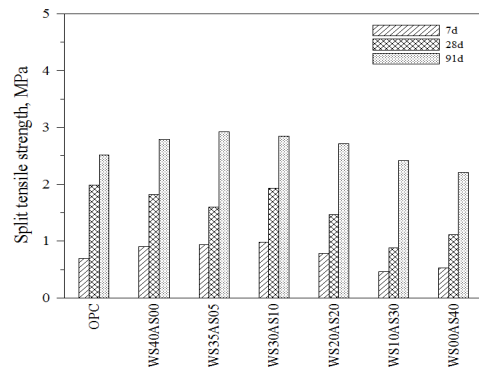


Fig. 2. Split tensile strength of concrete

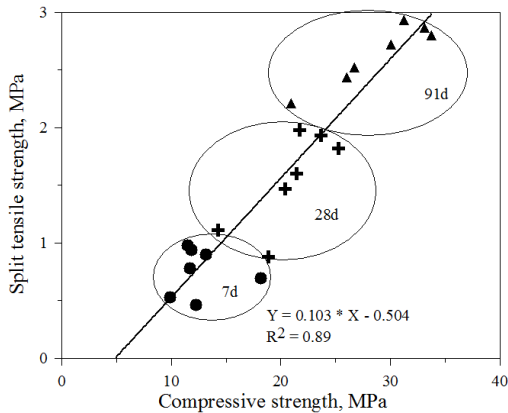


Fig. 3. Relationship between compressive and split tensile strength of concrete

3.2 흡수율

콘크리트의 공극특성은 결합재의 종류, 수화물량 및 종류, 배합조건, 양생방법 등과 같은 다양한 인자에 따라 달라지게 되며, 시간 함수에 지배적인 영향을 받게 된다. 이러한, 콘크리트의 공극특성은 투수성에 결정적인 영향을 미치게 된다[8].

본 연구에서는 7종류 콘크리트의 표면투수 특성을 평가하기 위하여 흡수율 실험을 수행하였으며, 콘크리트 종류별 재령 28일에서 상호 비교하여 Fig. 4와 같이 나타내었다. 측정결과, WS를 OPC에 대하여 40% 대체한 WS40AS00 콘크리트가 가장 낮은 흡수율을 나타내고 있으며, AS를 5 - 20% 사용한 콘크리트의 흡수율은 WS40AS00보다 크게 나타났으나, OPC 콘크리트에 비하여 상대적으로 낮은 흡수율을 경향을 나타내었다. 또, AS의 대체율이 30% 이상일 경우, 비교적 큰 흡수율을 나타내었으며, 이는 다량의 AS를 적용한 콘크리트의 경화반응이 지연되어 미세조직구조가 다공질화 되었기 때문으로 판단된다.

한편, Table 4는 ASTM C 1585에 준하여 산정된 콘크리트의 초기흡수계수(S_i : Initial absorption coefficient)를 비교하여 나타낸 것이다. 이 표에서 알 수 있듯이 콘크리트 종류에 따라 S_i 값은 상이하였으며, OPC 콘크리트의 S_i 값은 $8.67 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^{1/2}$ 로 나타났다. 한편, WS 및 AS를 적용한 혼합시멘트 콘크리트는 AS의 대체율이 증가할수록 S_i 값이 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, AS 대체율이 30% 이상인 WS10AS30 및 WS00AS40 콘크리트는 S_i 값이 WS40AS00 콘크리트의 2배 이상으로 크

게 나타나는 것으로 조사되었다. 이러한 경향은 콘크리트의 강도특성과도 유사하게 나타난 것으로 판단된다.

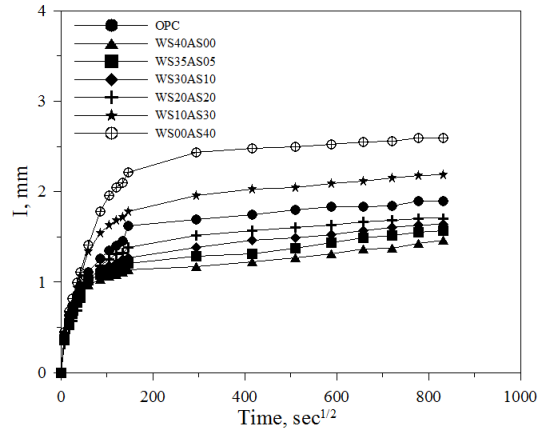


Fig. 4. Results of absorption measurement of concrete

Table 4. Initial absorption coefficient (S_i) of concrete at the age of 28 days

Mixtures	S_i [$\times 10^{-3} \text{ mm/s}^{1/2}$]
OPC	8.67
WS40AS00	5.75
WS35AS05	6.54
WS30AS10	6.99
WS20AS20	8.34
WS10AS30	10.69
WS00AS40	13.74

3.3 투수공극량

Fig. 5는 AS 대체율에 따른 재령 28 및 91일 콘크리트의 투수공극량(water permeable pore) 결과를 나타낸 것이다. 실험결과에 따르면, 재령 28일에서 AS 대체율 5 및 10% 콘크리트의 투수공극량은 각각 6.2 및 6.4%로 WS40AS00 콘크리트의 6.3%와 유사하게 나타났으나, AS 대체율이 20% 이상일 경우, WS40AS00 콘크리트에 비하여 투수공극량이 상대적으로 증가되는 경향을 나타내었다. 한편, 재령 91일에서는 재령 28일보다는 전반적으로 낮은 투수공극량을 나타내었으나, 재령 28일의 투수공극량 결과와 마찬가지로 AS 대체율이 증가할수록 투수공극량도 증가하는 결과를 보여주고 있다.

따라서, AS 대체율이 증가할수록 콘크리트의 수밀성이 떨어지는 경향을 보였으나, AS 대체율 10%까지는 WS만을 적용한 WS40AS00 콘크리트와 유사한 수밀성 향상 효과를 나타내는 것으로 조사되었다.

한편, Fig. 6은 콘크리트 재령 28일의 초기흡수계수와 투수공극량의 상관관계를 나타낸 것으로써, 콘크리트의 초기흡수율과 투수공극량의 상관관계는 $R^2=0.82$ 정도로 나타난 반면, Fig. 7과 같이 콘크리트의 압축강도와 투수공극량의 상관관계는 $R^2=0.41$ 로써 매우 낮은 선형성을 나타내었다.

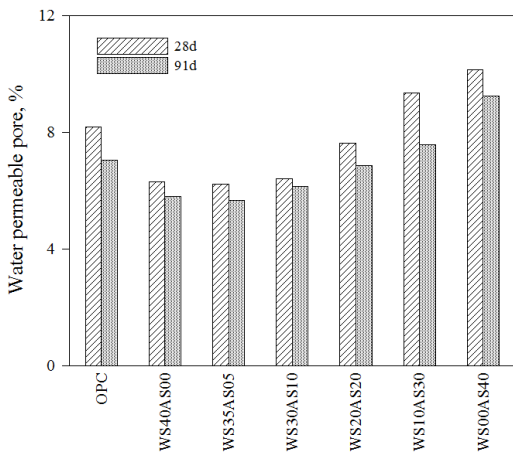


Fig. 5. Water permeable pore of concrete

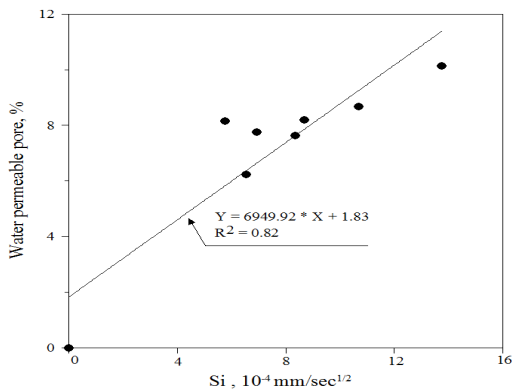


Fig. 6. Relationship between initial absorption coefficient and water permeable pore of concrete

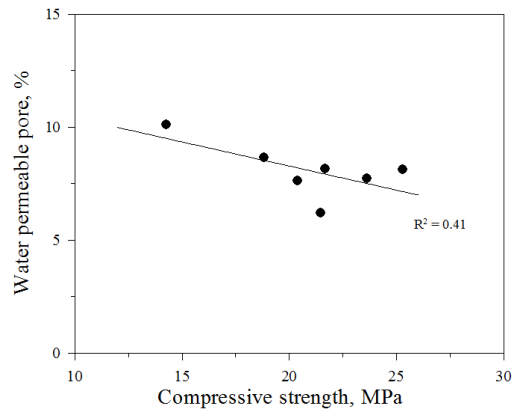


Fig. 7. Relationship between compressive strength and water permeable pore of concrete

3.4 염소이온 침투 저항성

재령 28 및 91일 콘크리트를 대상으로 총통과전하량 (total charge passed)을 측정하여 콘크리트의 염소이온 침투저항성을 나타낸 것이 Fig. 8이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 WS40AS00, WS35AS05, WS30AS10 및 WS20AS20 콘크리트의 총통과전하량은 OPC 콘크리트에 비하여 현저하게 작은 값을 나타낸 반면, AS를 40% 대체한 WS00AS40 콘크리트는 OPC 콘크리트와 유사한 총통과전하량 값을 보였다. 특히, AS 대체율이 5 및 10%인 콘크리트는 WS만 사용한 콘크리트와 총통과전하량 값이 거의 유사하게 나타나는 좋은 경향임을 확인할 수 있었다.

한편, Table 5는 재령 28일에서 7종류 콘크리트 배합의 비정상상태 염소이온 확산계수를 측정한 결과를 나타낸 것으로써, OPC 콘크리트 및 AS 대체율이 10%인 WS30AS10 콘크리트의 확산계수가 WS40AS00 콘크리트에 비하여 다소 크게 나타난 반면, AS 대체율이 5%인 WS35AS05 콘크리트는 확산계수가 WS40AS00 콘크리트와 거의 동일하게 나타남을 확인할 수 있다. 반면, AS 대체율이 30% 이상인 WS10AS30 및 WS00AS40 콘크리트의 확산계수는 WS40AS00 콘크리트에 비하여 약 3.5 - 4.9배 정도 크게 나타남으로써 염소이온 침투저항성이 상대적으로 떨어지는 것으로 조사되었다. 이는 AS를 다량으로 대체한 콘크리트의 경우, 결합재의 경화반응이 상대적으로 늦어져 콘크리트의 조직구조가 치밀하지 못하였기 때문에 내구성능이 떨어지는 것으로 판단된다[7,9].

3.5 탄산화 저항성

7종류 콘크리트의 탄산화 저항성을 고찰하기 위하여 재령 28 및 91일 콘크리트를 대상으로 탄산화 깊이(carbonation depth)를 측정하여 정리한 것이 Fig. 9이다. 이 그림에서 재령 28일 콘크리트의 탄산화 깊이는 OPC 콘크리트가 가장 작은 좋은 경향을 나타내었으며, AS 및 WS를 적용한 혼합시멘트계 콘크리트의 탄산화 깊이는 OPC 콘크리트에 비하여 상대적으로 크게 나타났다. 그러나, 장기재령으로 갈수록 AS를 0 - 10%까지 적용한 콘크리트의 탄산화 깊이는 OPC 콘크리트와 유사한 경향을 나타낸 반면, AS 대체율이 20 - 40%인 콘크리트의 탄산화 깊이는 OPC 콘크리트에 비하여 상대적으로 크게 나타나는 것으로 관찰되었다. 이는 다량의 AS를 콘크리트 결합재로 사용할 경우, 콘크리트 수화시 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 생성량이 감소되며, C-S-H로부터 Ca 이온의 공급이 어려워져 콘크리트의 pH 유지능력이 떨어지기 때문인 것으로 판단된다[10].

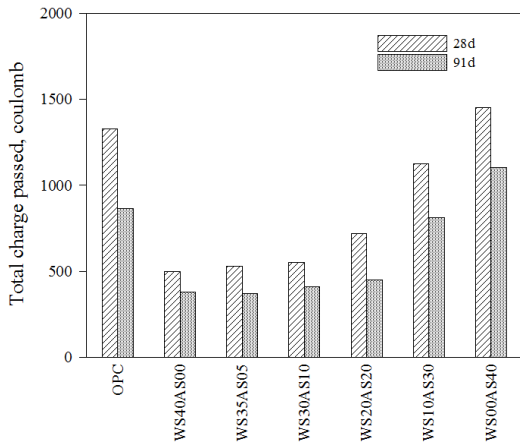


Fig. 8. Total charge passed through concrete

Table 5. Non-steady state diffusion coefficient of concrete at the age of 28 days

Mixtures	$D_{28}, \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
OPC	12.4
WS40AS00	6.6
WS35AS05	6.7
WS30AS10	9.1
WS20AS20	13.4
WS10AS30	23.5
WS00AS40	32.9

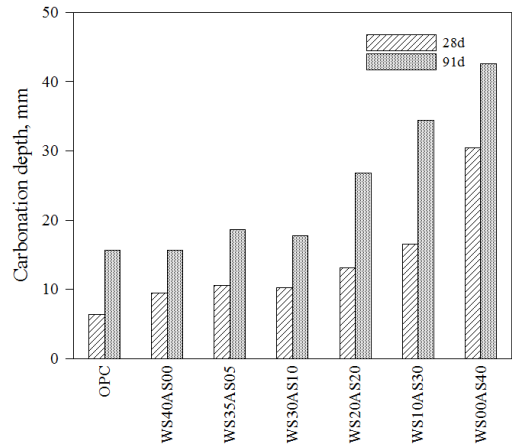


Fig. 9. Carbonation depth of concrete

4. 결론

본 연구는 서냉슬래그 및 급냉슬래그를 결합재로 적용한 콘크리트의 역학적 성능 및 내구특성을 실험적으로 평가한 것으로서, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. AS를 적용한 콘크리트의 압축강도를 조사한 결과, AS를 OPC에 대하여 5 및 10% 대체한 콘크리트의 압축강도는 WS만 적용한 콘크리트와 유사하게 나타났으나, AS를 30% 이상 적용한 콘크리트는 경화반응이 지연된 탓으로 인하여 압축강도 값이 상대적으로 작게 나타나는 경향을 보였다. 또한, 이러한 경향은 조결 인장강도 측정결과와도 어느 정도 유사하게 나타났다.
2. 재령 28일 콘크리트의 흡수율 측정결과, AS 30% 이상 적용한 콘크리트의 흡수율은 OPC 콘크리트보다 오히려 크게 나타났으며, AS 대체율이 상대적으로 작은 콘크리트의 흡수율은 OPC 콘크리트보다 적게 나타나는 경향을 보였다. 한편, AS 대체율 10%까지 적용된 콘크리트의 투수공극량은 WS만을 적용한 WS40AS00 콘크리트와 유사하게 나타나는 것으로 조사되었다.
3. 콘크리트의 내구성을 고찰한 결과, AS 적용 콘크리트의 염소이온 침투저항성 및 탄산화 저항성은 콘크리트의 역학적 특성 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 또한, AS를 다량으로 적용할 경우 콘

크리트의 내구성은 효과적으로 향상되지 않는 것으로 조사되었다.

4. 본 연구의 범위에서 종합적으로 고찰해 보면, AS를 콘크리트용 결합재로 적용하기 위한 최적 대체율이 존재하는 것으로 나타났으며, 건설재료의 경제적 및 환경적 관점에서 AS를 약 10% 정도까지 적용할 경우, 구조용 콘크리트 재료로서 적용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나, AS를 적용한 콘크리트의 미세구조, 최적배합 등에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 요구된다.

References

[1] T. Ozbakkaloglu, L. Gu, A. F. Pour, "Normal and high strength concretes incorporating air-cooled blast furnace slag coarse aggregates: Effect of slag size and content on the behavior", *Construction and Building Materials*, vol. 126, pp. 138-146, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.015>

[2] Morioka, "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, 2002.

[3] N. Y. Mostafa, S. A. S. El-Hemaly, E. I. Al-Wakeel, S. A. El-Korashy, P. W. Brown, "Hydraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag at different temperatures", *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 475-484, 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00462-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00462-2)

[4] N. Y. Mostafa, S. A. S. El-Hemaly, E. I. Al-Wakeel, S. A. El-Korashy, P. W. Brown, "Characterization and evaluation of the hydraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag", *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 899-904, 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00497-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00497-5)

[5] H. El-Didamony, A. A. Amer, T. M. El-Sokkary, H. Abd-El-Aziz, "Effect of substitution of granulated slag by air-cooled slag on the properties of alkali activated slag", *Ceramic International*, vol. 39, pp. 171-181, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.06.007>

[6] NT BUILD 492, "Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments", Finland, Nordtest, 1999.

[7] S. Y. Kang, "Study on Compressive Strength Development Properties of Concrete using Slow Cooling Ground Granulated Slag High-Powder", Master's thesis, Tongmyong University, 2004.

[8] M. F. M. Zain, Md. Safiuddin, H. Mahmud, "Development of high performance concrete using silica fume at relatively high water-binder ratios", *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 1501-1505, 2000.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00359-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00359-8)

[9] J. H. Heo, S. U. Jung, J. W. Heo, N. G. Im, "Basic Properties of Concrete with Ultrafine-Blaine Air Cooling Slag as Admixture", *Korea Institute of Building Construction*, vol. 9, pp. 77-83, 2009.
DOI: <http://doi.org/10.5345/JKIC.2009.9.2.077>

[10] X. Zhang, X. Zhou, H. Zhou, K. Gao, Z. Wang, "Studies on forecasting of carbonation depth of slag high performance concrete considering gas permeability", *Applied Clay Science*, vol. 79, pp. 36-40, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.020>

이 승 태(Seung-Tae Lee)

[정회원]



- 1999년 8월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

건설재료, 콘크리트 구조, 콘크리트 포장

박 광 필(Kwang-Pil Park)

[정회원]



- 2003년 3월 : 대전대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2010년 8월 : 대전대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2014년 5월 ~ 현재 : 군산대학교 토목공학과 연구교수

<관심분야>

건설재료, 콘크리트 내구성, 콘크리트 유지보수