

고밀도 폐유리와 제강슬래그의 중량 콘크리트 골재로의 적용성에 관한 연구

최소영¹, 김일순², 최윤석³, 양은익^{4*}

A Study on the Applicability of Heavyweight Waste Glass and Steel Slag as Aggregate in Heavyweight Concrete

So-Yeong Choi¹, Il-Sun Kim², Yoon-Suk Choi³, Eun-Ik Yang^{4*}

Abstract: The many countries are facing the shortage of natural resources, and the supply of aggregates are being exhausted. To consider this situation a variety of studies were performed for the development of alternative resources. In particular, high density filler material was used for shielding radioactive waste, large amount of natural aggregates are required in order to produce filler material. Also, in order to improve the shielding performance of filler material, it is required to increase the density of the filler material. Therefore, in this study was carried out to provide basic data for expanding the feasibility of high density industrial waste resource as aggregate in heavyweight concrete. From the test results, OPC case, concrete strength decreased by using heavyweight waste glass as fine aggregate, however, it is improved by using mineral admixture as binder. Therefore, when the heavyweight waste glass and steel slag are applied to heavyweight concrete, it is desirable to use mineral admixture, especially to use BFS than FA. Meanwhile, when the steel slag was replaced as coarse aggregate of heavyweight concrete, elasticity of modulus and radiation shielding performance can be improved owing to high density of steel slag.

Keywords: Heavyweight waste glass, Steel slag, Heavyweight concrete, ASR, Mechanical properties

1. 서 론

최근 정부에서는 신규 원전 건설을 백지화 하고 현재까지 건설된 노후 원전 역시 해체를 결정하면서 2038년까지 원전을 14기로 감축하는 에너지전환 로드맵을 마련함으로써 탈원전 정책을 추진하고 있다 (KAIF, 2017).

특히, 원자력에너지를 생산과 원전구조물의 해체에 의해 발생하는 폐기물은 방사성을 띠고 있어 처분시 각별한 주의가 요구되며 (Choi et al., 2015; Choi et al., 2017), 현재 방사성 폐기물 처분에는 많은 양의 천연골재를 사용하여 생산된 채움재가(콘크리트 혹은 모르타르) 사용되고 있다. 채움재의 생산을 위해서 사용되는 천연 골재는 국가 경제의 근간이 되는 건설 산업의 자원으로써 안정적인 공급이 필수적이다. 그러나 지속적인 감소와 환경규제 등으로 인하여 점차 수급이 불안정해지고 있으며, 2010년을 기점으로 하천골재 채취 허가

량이 급격하게 감소되고 있다 (Ministry of Land Infrastructure and Transport of Korea, 2014), 따라서 골재 대체재 개발연구의 일환으로, 산업폐기물을 건설 재료로 재활용하고자 하는 다양한 연구가 진행되어왔으며 특히, 기존 골재보다 우수한 물성(예를 들면, 밀도)을 갖는 재료를 콘크리트용 골재로 적용하기 위한 시도가 진행되어왔다 (Lim et al, 2011; Choi et al., 2015; Choi et al., 2017; Lim and Lee, 2017a; Kim et al., 2018).

한편, 철강은 전 세계적으로 산업 전 분야에 걸쳐 사용되는 매우 기초적인 소재이며 전방연쇄효과가 큰 산업 분야이다. 특히 철강 제조에 있어 필연적으로 발생하는 철강슬래그는 철을 생산하는 과정에서 발생하는 산업부산물을 총칭하는 것으로 철강 공정에서 발생하는 불순물을 제거하기 위해 사용되는 화학약품과 불순물의 물리, 화학적 반응에 의해 형성된다 (Choi et al., 2007). 제강슬래그의 경우, 전기로에서 발생하는 산업부산물로 주성분이 석회와 실리카로 구성되어 일반적인 골재의 특성과 유사하기 때문에 골재로의 활용 가능성에 대하여 논의되어 왔으나 (Lim and Lee, 2017a; Lim and Lee, 2017b), 대부분 성토용, 매립재 등으로 적용되었다. 이는 제강슬래그 생산 공정에 의해 존재하는 유리석회 (free-CaO) 및 유리산화마그네슘 (free-MgO)이 제강 슬래그에 포함되고, 이후 free-CaO 및 free-MgO가 물과 접촉하여 수산화칼슘(Ca(OH)₂)

¹정회원, 강릉원주대학교 방재연구소, 전임연구원, 공학박사

²정회원, 강릉원주대학교 토목공학과, 박사과정

³정회원, 한국건설생활환경시험연구원, 선임연구원, 공학박사

⁴정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: eiyang@gwnu.ac.kr

Department of Civil Eng., Gangneung-Wonju National University, Jukheon-gil 7, Gangneung-si, Gangwon-do, 25457, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2019년 3월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

으로 변화하여 체적이 2배로 증가, 제강 슬래그의 팽창 붕괴를 유발하기 때문이다 (Park and Kim, 2012; Kuo and Shu, 2014). 이와 관련하여 기존 연구자들은 숙성 (Aging)을 통해 free-CaO 및 free-MgO의 함량이 감소됨을 확인하였으며, 특히 증기 Aging 및 수중 Aging을 실시할 경우, 기중 Aging의 경우보다 효과적인 것으로 보고하였다 (Yoo and Choi., 2006). 그러나 콘크리트용 골재로 적용하기 위해서는 제강 슬래그의 팽창 특성 및 체적안정성을 검토할 필요가 있다. 특히, 기존 연구자 (Lim et al, 2011; Lim and Lee, 2017a; Lim and Lee, 2017b)에 의해 제강슬래그에 다양한 물성과 차폐성능에 관한 연구가 진행된 바 있으나, 본 연구는 중금속을 함유한 고밀도 폐유리도 함께 적용하여 검토하였으며, 산업폐자원의 활용 가능성을 확대하기 위한 기초자료를 제공하기 위한 것이다. 따라서 본 연구에서는 중금속을 함유하여 차폐 성능 개선이 가능한 고밀도 폐유리(Choi et al., 2019)를 전량 잔골재로 대체하고 제강슬래그를 함께 적용하여 중량 콘크리트의 골재로 사용 가능성을 평가하기 위해 고밀도 폐유리를 전량 잔골재로 대체하고, 제강 슬래그의 굵은 골재 대체율 변화에 따른 콘크리트의 안정성, 시공성 및 역학적 특성을 검토하였다.

2. 실험계획 및 변수

2.1 실험변수 및 콘크리트 배합표

본 연구에서는 고밀도 폐유리와 제강 슬래그를 혼입한 콘크리트를 제작하기에 앞서, 제강슬래그(EFG)의 KS 기준 충족 여부를 검토하고자 KS F 2527 (콘크리트 용 골재) 기준에 따라 물리적, 화학적 분석을 실시하였다. 또한, 고밀도 폐유리 및 제강 슬래그를 적용한 콘크리트의 특성을 평가하기 위하여 고밀도 폐유리는 잔골재로 전량 대체하여 사용하고, 물-결합재비는 45%로, 제강 슬래그는 굵은 골재로 대체하였으며, 이때 대체율을 각 0%, 50%, 100%로 결정하였다. 이때, 광물질 혼화제의 영향도 함께 고려하기 위하여 플라야이시 (FA)는 20%, 고로슬래그 미분말 (BFS)은 30%를 각각 사용 시멘트양에 질량 대체하여 사용하였으며, 본 연구에 사용된 실험 변수 및 배합표는 Table 1, Table 2에 각각 나타내었다.

2.2 사용재료

2.2.1 결합재

결합재는 시멘트(이하 OPC), FA 및 BFS를 사용하였으며, 사용된 결합재의 물리적, 화학적 특성은 Table 3과 같다.

2.2.2 골재

본 연구에서 사용된 천연 굵은 골재 및 제강 슬래그의 최대

치수는 19 mm이며, 제강 슬래그의 밀도는 3.65 g/cm³으로, 배합에 사용된 골재의 물리적 특성은 Table 4에 나타내었다. 한편, 천연 굵은 골재와 제강 슬래그의 조립률이 다르기 때문에 제강 슬래그의 혼입률 증가에 따라 변화된 굵은 골재의 조립률은 Table 5에 나타내었다.

Table 1 Test variables

Item	Content
W/B ratio	45%
Mineral admixture (replacement ratio)	Fly ash (20%), Blast Furnance Slag (30%)
EFG substitution ratio	0, 50, 100 (%)
Specimen size (mm)	∅100 × 200 (Compressive strength, Elastic modulus, Density) 100 × 100 × 400 (Flexural strength) 25.4 × 25.4 × 285 (ASR expansion)
Curing condition	Water curing (20±3 °C)

Table 2 Concrete mix proportions

Specimen ID	W/B (%)	S.R ¹ (%)	Unit weight(kg/m ³)						
			W	C	G	Glass EFG ²	FA	BFS	
OPC-EFG-0	45	0	170	378	1008	851	-	-	-
OPC-EFG-50	45	50	170	378	504	851	686-	-	-
OPC-EFG-100	45	100	170	378	-	851	1373	-	-
FA-EFG-0	45	0	170	302	992	838	-	76	-
FA-EFG-50	45	50	170	302	496	838	676	76	-
FA-EFG-100	45	100	170	302	-	838	1351	76	-
BFS-EFG-0	45	0	170	265	1004	848	-	-	113
BFS-EFG-50	45	50	170	265	502	848	684	-	113
BFS-EFG-100	45	100	170	265	-	848	1367	-	113

¹ S.R: Substitution ratio of EFG, ² EFG: 제강 슬래그

Table 3 Physical and chemical properties of the binders

Properties	Type	OPC	FA	BFS
	Physical	Specific gravity	3.15	2.19
Blaine (cm ² /g)		3,200	3,200	6,330
SiO ₂		21.36	51.74	33.54
Chemical (%)	Al ₂ O ₃	5.03	21.47	15.22
	Fe ₂ O ₃	3.31	3.16	0.51
	CaO	63.18	1.10	43.88
	MgO	2.89	-	2.62
	SO ₃	2.30	-	2.54
	LOI	1.40	2.56	0.01

Table 4 Physical properties of all of the aggregate

Type	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
Coarse	2.68	1.35	6.86
Heavyweight waste glass	3.0	0	3.32
EFG	3.6	2.05	6.6

Table 5 Fineness modulus of coarse aggregate

Substitution ratio	0	50	100
F.M.	6.68	6.64	6.6

2.2.3 제강 슬래그

본 연구에서 사용된 제강 슬래그는 H사에서 배출되는 제강 슬래그를 최대치수 19 mm 미만으로 채취하여 사용하였다. 이때, 환경부고시 제 2014-193호(철강슬래그 및 석탄재 배출 사업자의 재활용지침)에 따라 1개월 야적장에서 숙성(Aging)을 실시한 후 콘크리트 골재로 적용해야하나, (Lim and Lee, 2017) 기존 문헌을 통해 기중 Aging에 비하여 수중 Aging 및 증기 Aging이 free-CaO, free-MgO 함량 저감에 우수(Yoo and Choi, 2006) 한 것으로 밝혀져 본 연구에서는 수중 Aging을 1개월 이상 진행하여 실험에 사용하였다.

2.2.4 고밀도폐유리

본 연구에서 사용된 고밀도 폐유리는 브라운관 후면부 유리로써, 브라운관에서 발생하는 전자파의 외부방출을 방지하기 위하여 철, 납, 카드뮴등의 다량의 중금속을 함유하고 있는 특성이 있다. 본 연구에 잔골재로 적용하기 위하여 고밀도 폐유리를 jaw crusher를 이용하여 분쇄한 후 5mm 이하만 사용하였으며, 밀도는 3.0 g/cm³이다.

2.3 실험 방법

2.3.1 철강슬래그의 수침 팽창 실험

제강 슬래그의 수침 팽창 실험은 KS F 2580(철강슬래그의 80°C 수침 팽창 시험방법)에 따라 실시하였다. KS 기준에 의거하여 입도 조정된 제강 슬래그를 수침 팽창용 몰드에 투입하여 자유낙하 92회, 3층 다짐을 실시한 시료를 준비한 후, 80°C의 물에 6시간 침지, 6시간 경과 후 18시간 동안 20°C에 보관하는 것을 1cycle로 하여 총 10cycle을 실시하였다.

2.3.2 ASR에 의한 팽창 실험

free-CaO에 관한 정량 분석 방법은 존재하지만, 정밀한 화학실험으로 현장에서는 적용하기 어렵다. 또한, 제강 슬래그를 골재로 사용하여 제작된 콘크리트의 팽창률을 직접적으로 평가하는 기준은 존재하지 않기 때문에 자기수축 실험 방법을 통해 간접적으로 평가되고 있으나, 소요 기간 및 자기수축 실험시 결정된 원점에 따라 팽창률이 달라질 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 제강 슬래그를 골재로 적용할 경우, 콘크리트에 발생할 팽창에 대한 안정성을 평가하기 위하여 ASR에 의한 팽창 평가를 ASTM C 1260에 의거하여 실시하였다.

2.3.3 압축강도 및 탄성계수

콘크리트의 압축강도 및 탄성계수 측정은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 따라 실시하였다. 공시체는 \varnothing 100 × 200 mm 크기인 것을 사용하였으며, 만능재료시험기(UTM)를 이용하여 하중제어 방식으로 실시하였다. 이때, 선형변위 측정기(LVDT)를 설치하여 콘크리트의 변형률도 함께 측정하여 탄성계수를 산정하였다.

2.3.4 휨강도

제강 슬래그 및 고밀도 폐유리를 혼합한 콘크리트의 휨강도 측정방법은 KS F 2408(콘크리트의 휨 강도 시험방법)를 이용하여 4점 재하방식으로 실시하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 기초물성 평가 결과

Table 6에는 KS F 2527 기준에 따라 실시한 제강 슬래그의 물리적 특성 결과를 나타내었다. 실험 결과를 살펴보면, 수침 팽창 및 절건 밀도, 단위용적 질량은 모두 KS 기준을 만족하는 것으로 나타났으나, 흡수율은 2%보다 약간 높은 2.05%로 나타났다. 이는 제강 슬래그의 표면 형태가 일반 골재에 비해 많은 공극을 포함하는 것에 영향을 받은 것으로 보인다.

Table 6 Physical properties of EFG

Type	Standard	Specification value	Test results
Property of immersion expansion	KS F 2580	below 2%	0.07%
Density	KS F 2503	3.1 g/cm ³ and above	3.58 g/cm ³
Unit weight volume	KS F 2505	1.6 g/cm ³ and above	2.2 g/cm ³
Absorption ratio	KS F 2503	below 2%	2.05%

일반적으로 골재의 흡수율이 높아지면, 물이 접할 수 있는 비표면적이 증가하기 때문에 시공성, 강도 및 내구성에 악영향을 끼칠 가능성이 있다 (Mehta, 2014). 따라서 제강 슬래그를 콘크리트용 골재로 적용하기 위해서는 KS 기준인 흡수율 2% 이하를 안정적으로 확보하기 위한 방안 마련이 필요한 것으로 사료된다.

한편, Table 7에는 제강 슬래그를 XRF를 이용하여 분석한 화학적 성분에 대하여 나타내었다. Table 8에 나타난 바와 같이, CaO 및 MgO는 기준치 이하로 검출되었으나, 철산화물(FeO)에는 기준치보다 높은 함량을 갖는 것으로 나타났다. 이는 철강 제련공정에서 포함된 철 성분의 추출 기술 부족에 의해 존재하는 것으로 사료된다. 또한, 염기도 역시 기준치인 2.0보다 높은 것으로 나타났으나, 염기도는 콘크리트 중 수산

화칼슘과의 잠재수경성 발현에 유리하므로, 향후 제강 슬래그를 골재로 효율적으로 적용할 경우 혼합시멘트 콘크리트의 성능 개선에 유효할 것으로 판단된다(Lee and Park, 2017).

Table 7 Chemical properties of EFG

Type	CaO	MgO	FeO	Basicity (CaO/SiO ₂)
Specification value (%)	below 40	below 10	below 50	below 2.0
Test result (%)	24.36	0.54	51.47	2.97

3.2 안정성 평가 결과

3.2.1 철강슬래그의 수침 팽창 실험 결과

Table 8에는 제강 슬래그의 수침 팽창 측정 결과를 나타내었다. 실험 결과, 실험을 통해 얻어진 팽창률은 0.07% 수준인 것으로 나타나 제강 슬래그 자체의 팽창에 대해서는 안전한 것으로 나타났다. 따라서 충분한 Aging을 실시하게 되면 제강 슬래그 자체의 팽창은 충분히 저감 가능한 것으로 판단된다.

Table 8 Immersion expansion ration of EFG

Duration (days)	Measurement value (mm)	Immersion expansion ratio (%)
Initial	0	0
1	0.02	0.016
2	0.02	0.016
3	0.03	0.024
4	0.04	0.032
5	0.08	0.064
6	0.08	0.064
7	0.085	0.068
8	0.075	0.06
9	0.08	0.064
10	0.085	0.068

3.2.2 ASR 팽창성 실험 결과

Fig. 1에는 ASTM C 1260 기준에 의거하여 실시한 ASR 팽창 실험 결과를 나타내었다. 그 결과, 결합재를 OPC만 사용하더라도 팽창 한계 기준인 0.1% 미만의 팽창이 발생하였으며, 특히 광물질 혼화재인 FA와 BFS를 함께 적용하게 되면 더욱 팽창 저감이 가능한 것으로 나타났다. 이는, 광물질 혼화재 대체에 의해 절대 시멘트량 감소 및 알칼리 성분 감소로 인해 영향을 받은 것으로 보인다. 이러한 경향은 고밀도 폐유리를 골재로 사용한 경우에서도 (Choi et al., 2018) 동일하게 나타났으므로, 고밀도 폐유리 및 제강 슬래그의 ASR에 의한 팽창으로부터 안전한 것으로 사료된다.

3.3 굳지 않은 콘크리트의 특성평가 결과

Fig. 2, Fig. 3에는 고밀도 폐유리 및 제강슬래그를 골재로 대체한 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 측정 결과를 각각 나타내었다. 일반적으로 고밀도 골재를 사용할 경우에 재료분리 및 블리딩 발생 가능성이 증가하여 콘크리트의 성

능을 저해할 수 있으므로 슬럼프 특성을 평가해야한다. Fig. 2에 나타난 슬럼프 측정 결과, 바인더의 종류에 관계없이 제강 슬래그를 대체함에 따라 시공성능이 다소 저하되었다. 그러나 유의할 수준의 감소가 발생한 것이 아니고 재료분리 경향도 없는 것으로 판단되므로 콘크리트의 일반적인 슬럼프 범위가 80~150 mm 인 것을 감안하면 중량 골재를 사용함에도 우수한 시공성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

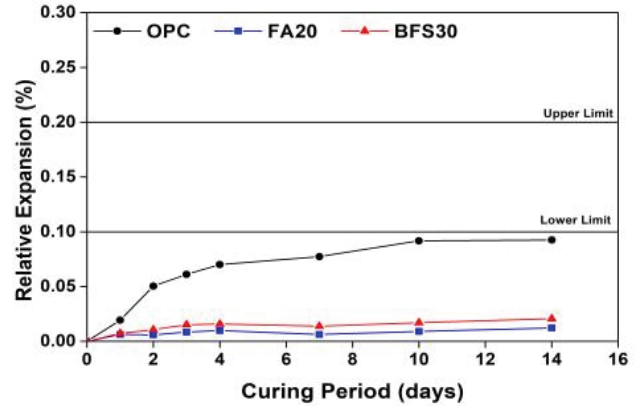


Fig. 1 Results of ASR expansion test

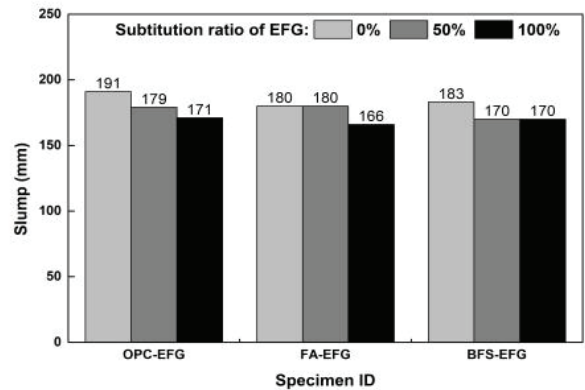


Fig. 2 Results of slump test

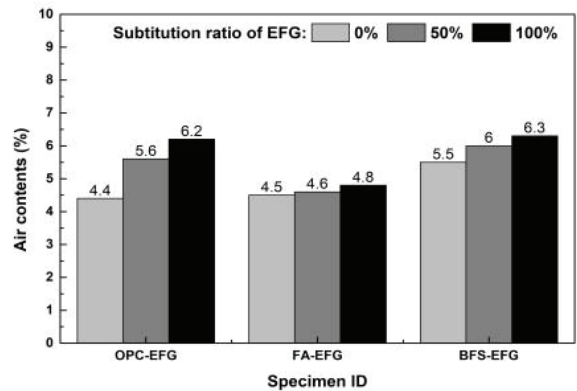


Fig. 3 Results of air contents test

Fig. 3에는 고밀도 폐유리 및 제강슬래그를 혼입한 콘크리트의 공기량 측정 결과를 나타낸 것이다. 측정 결과, 제강슬래그의 대체율이 증가함에 따라 공기량이 증가하는 경향이 나타났으며 이는 제강슬래그에 존재하는 다수의 공극에 의해 영향을 받은 것으로 보인다. 그러나 공기량이 과도하게 존재하게 되면 콘크리트 강도에 악영향을 끼칠 가능성이 증가하므로, 고밀도 폐유리 및 제강슬래그를 골재로 적용하게 될 경우, 공기량을 조절할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

3.4 밀도 측정 결과

Fig. 4에는 고밀도 폐유리와 제강슬래그를 골재로 대체한 시험체의 밀도 측정 결과를 나타내었다. 실험 결과, 제강슬래그의 혼입률이 증가할수록 밀도가 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 일반 골재에 비해 높은 밀도를 갖는 고밀도 폐유리 및 제강슬래그에 기인한 것으로 고밀도 폐유리 및 제강슬래그를 골재로 사용하면 콘크리트의 밀도 증가가 가능할 것으로 판단된다. 한편, 콘크리트의 밀도는 방사선차폐율과 직접적인 관련이 있으며, 밀도와 차폐율에 관한 다양한 예측식이 제안된 바 있다 (Kim et al, 2005; Chang, 1999, Lim et al, 2011; T. C. Ling et al 2011). 따라서 본 연구에서는 식 (1)~(4)를 통해 계산된 차폐율에 대하여 보통 콘크리트의 단위중량인 2,300kg/m³을 기준으로 하여 계산된 차폐율의 증가비율을 Fig. 5에 나타내었다.

$$S_{28} = 0.0128 W + 43.595 \quad (1)$$

$$S_{28} = 0.01038 W + 36.5 \quad (2)$$

$$S_{28} = -E - 0.5 W^2 + 0.086 W - 60.824 \quad (3)$$

$$A = -0.005 W + 13.45 \quad (4)$$

여기서 S28은 재령 28일에서의 방사선 차폐율(%), W는 콘크리트의 단위용적질량(kg/m³) A는 방사선 흡수선량(mGy)이다.

분석결과, 연구자에 따라 차폐 증가율의 차이가 있으나 모두 밀도가 증가함에 따라 차폐증가율이 개선되는 것으로 나타나, 고밀도 폐유리와 제강슬래그를 콘크리트 골재로 적용하는 경우, 차폐 성능의 개선이 가능할 것으로 판단된다.

3.5 압축강도 측정 결과

Fig. 6에는 고밀도 폐유리와 제강슬래그를 골재로 대체한 시험체의 압축강도 측정결과를 결합재 종류 및 재령 변화에 따라 나타내었다. OPC의 경우, 제강슬래그 혼입에 관계없이 모두 재령 증가에 따라 강도가 증진되는 일반적인 특성이 나타났으나, 재령 7일부터 재령 28일까지의 강도 증가율(1.8~4.8%) 보다는 재령 28일에서 재령 91일까지의 강도 증가율(23.8~40.6%)이 더 높은 것으로 나타났다. 이는 고밀도 폐유

리에 포함된 미분말이 포졸란 반응에 기여하였기 때문으로 사료된다 (Lsmail and Al-Hashmi, 2009). 그러나 기존 연구결과 (Ryu et al., 2009)와 달리, 제강슬래그 혼입양이 증가함에 따라 강도가 감소하는 것으로 나타났으며 고밀도 폐유리 잔 골재 대체에 따른 증가된 시멘트 수화물과 고밀도 폐유리의 부착력 저하에 기인(Choi et al., 2015; Choi et al., 2017; Choi et al., 2018)한 것으로 사료된다. 한편, FA를 사용한 경우, 100%까지 대체해야 재령초기(7일)에서도 강도 개선효과를 나타내었다. 이는 FA에 의해 발생한 포졸란 반응을 비롯하여 FA가 제강슬래그와 시멘트 수화물의 부착 강도 개선에 기여한 것으로 사료된다. 그러나 BFS를 결합재로 사용한 경우에는, 재령 초기에도 제강슬래그의 굵은 골재 대체율이 증가함에 따라 강도가 증진되었으며, BFS의 높은 분말도로 인하여 제강슬래그 표면과 시멘트 수화물 사이에 존재하는 공극을 채워주는 필터 효과에 기인한 것으로 사료된다. 따라서 고밀도 폐유리 및 제강슬래그 골재 사용에 의한 강도저하는 광물질 혼화재를 혼입함으로써 개선 가능한 것으로 사료된다.

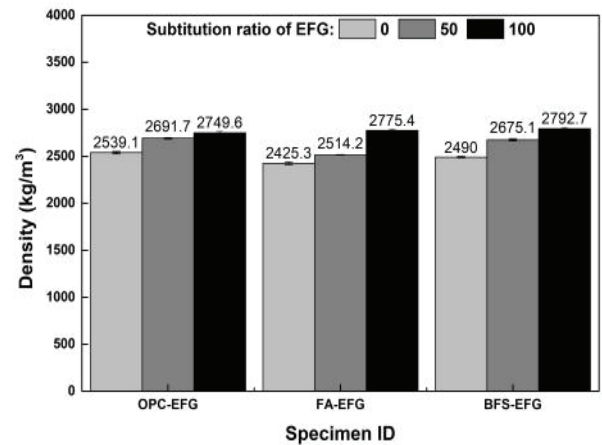


Fig. 4 Results of density test

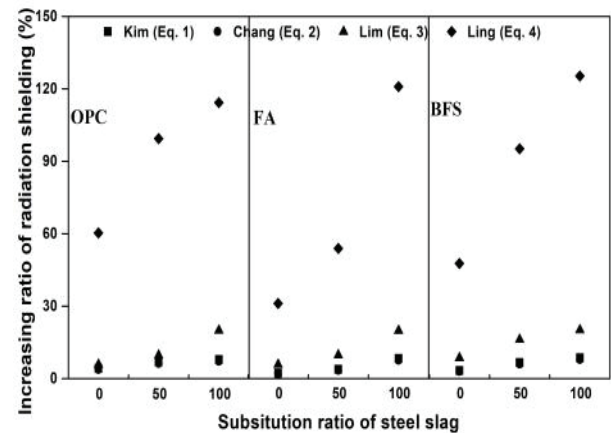


Fig. 5 Correlation between substitution ratio of steel slag and increment ratio of radiation shielding

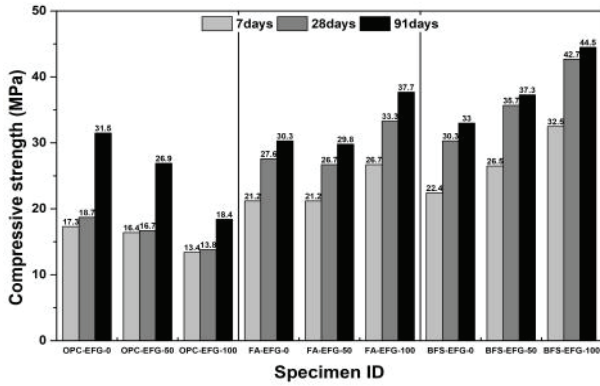


Fig. 6 Results of compressive strength test

3.6 휨강도 측정 결과

Fig. 7에는 제강 슬래그 혼입에 따른 휨강도 측정결과를 나타내었다. 휨강도 측정결과, OPC만 사용한 경우에는 압축강도 측정결과와 마찬가지로 제강 슬래그 혼입율이 증가함에 따라 휨강도가 감소하는 것으로 나타났으며, 재령 7일에서 28일 까지의 휨강도 증가율은 3.5~19.5%, 재령 28일에서 재령 91일 까지의 강도 증가율은 10~15% 수준으로 강도 개선효과는 압축강도에 비해 미비하였다. FA의 경우, 재령 7일에서는 제강 슬래그 대체율이 증가함에 따라 휨강도가 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 고밀도 폐유리의 영향이 상대적으로 커서 제강 슬래그 혼입에 따른 강도 발현을 저해한 것으로 보인다. 한편, 재령이 증가함에 따라 FA와 고밀도 폐유리 미분말에 의한 포졸란 반응이 공극을 충전하여 제강 슬래그 표면에 존재하는 공극이 감소하고 강도가 개선되었으며 이는 기존 문헌과도 일치하는 것으로 나타났다 (Ryu et al., 2009). 또한 BFS를 혼입한 경우, 압축강도 측정결과와 마찬가지로 제강 슬래그 대체율이 증가함에 따라 휨강도가 증가하는 압축강도와 동일한 경향을 나타내었다. 따라서 고밀도 폐유리 및 제강 슬래그 대체에 따른 휨강도저하는 압축강도와 마찬가지로 광물 질 혼화제를 사용하면 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다.

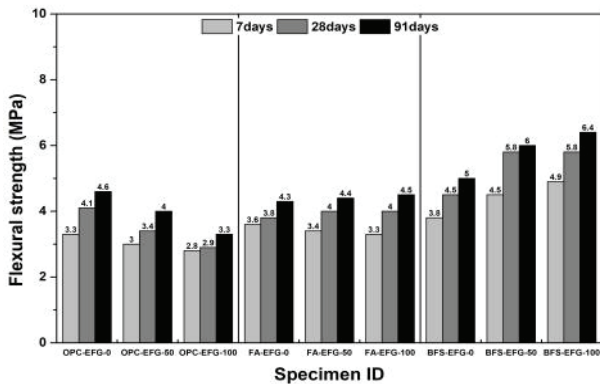


Fig. 7 Results of flexural strength

3.7 압축-휨 상관관계

국내 구조기준(KCI 2012)에서 휨강도(파괴계수)는 경량골재를 제외하고는 골재의 밀도를 별도로 고려하지 않는다. 이는 CEB-FIP, ACI 318 에서 제공하는 예측 모델에서도 유사한 경향을 나타내고 있으며, 일부 구조기준(EC 2, ACI 363)에서는 경량 및 일반 골재를 사용한 콘크리트의 휨강도 분포 범위를 밀도에 관계없이 다음과 같이 $0.62\sqrt{f_{ck}} \sim 0.99\sqrt{f_{ck}}$ 제안하고 있다. 따라서 본 연구에서는 KCI 2012, CEB-FIP, ACI 349-13 (ACI 318-08) 및 JSCE에 의한 예측모델 식(5)~식(8)로 구한 예측결과와 실험결과를 비교, 분석하였으며 ACI 363에서 제시하는 휨강도 분포 범위를 함께 도시하여 Fig. 8에 나타내었다.

$$f_r = 0.63\sqrt{f_{ck}} \quad (5)$$

$$f_r = 0.3(f_{ck})^{2/3} \quad (6)$$

$$f_r = 0.62\sqrt{f_{ck}} \quad (7)$$

$$f_r = 0.44\sqrt{f_{ck}} \quad (8)$$

여기서, f_{ck} 는 압축강도 (MPa), f_r 는 휨강도 (MPa)이다.

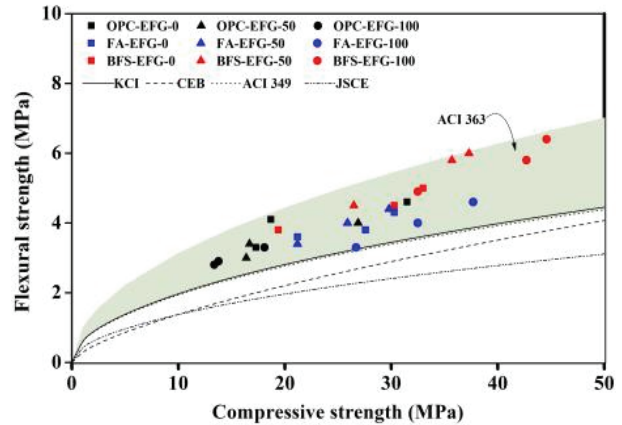


Fig. 8. Correlation between the compressive strength and the flexural strength

분석결과, 제강 슬래그의 대체율 변화 및 광물질 혼입에 관계없이 모두 기존 예측모델보다 동일한 압축강도에서의 휨강도가 상회한 것으로 측정되었다. 한편, 압축강도 증가대비 휨강도의 증가는 크지 않은 것으로 나타났으나, 사용하는 결합재에 따른 휨강도 특성이 다른 것으로 판단된다. 특히, BFS를 사용하는 경우에 압축 및 휨강도 증가가 우수하게 나타났다. 따라서 예측모델 종류에 관계없이 제강 슬래그 및 고밀도 폐유리 대체에 따른 휨강도는 압축강도만으로 효과적으로 예측할 수 없는 것으로 보이며, 고밀도 재료 사용에 의한 특성을 반영하기 위해서는 예측모델의 수정이 필요한 것으로 사료된다.

3.8 응력-변형을 관계

Fig. 9에는 산업폐자원을 골재로 사용한 콘크리트의 응력-변형을 곡선을 나타내었다. 일반콘크리트와 동일하게, 실험 변수에 상관없이 초기 응력 단계에서는 선형 거동이 나타났으며, 최대 응력의 40% 이상에 도달한 이후 비선형거동을 보였다. 한편, OPC의 경우, 재령 7일의 경우를 제외하고는 제강 슬래그의 대체율이 증가함에 따라 응력이 감소함에도 불구하고 초기응력 수준에서의 기울기의 차이가 발생하지 않았다. 이는 제강 슬래그의 밀도가 일반 골재보다 높고 골재 강도가 우수하기 때문에 응력-변형을 곡선의 기울기에 영향을 끼친 것으로 보인다. 또한 광물질 혼화제를 사용한 경우, 제강 슬래그의 대체율이 증가함에 따라 탄성계수가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 제강 슬래그 대체는 응력-변형을 곡선 기울기에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

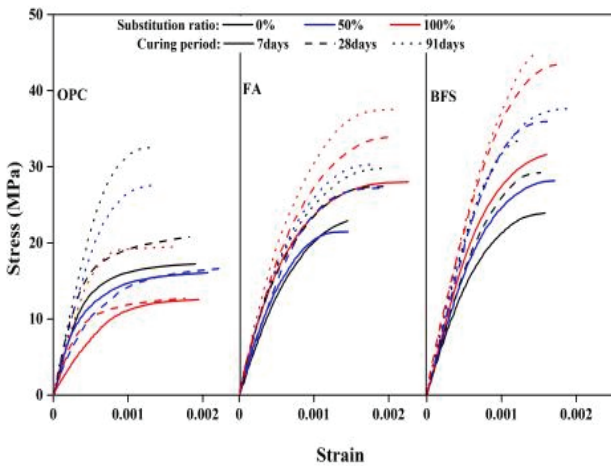


Fig. 9 Results of stress-strain curve

3.9 탄성계수

Fig. 10에는 탄성계수 측정 결과를 나타내었으며, OPC의 경우, 제강 슬래그의 혼입율이 증가함에 따라 압축강도가 8 ~ 37.9% 까지 감소한 반면, 탄성계수의 경우, 5.6 ~ 23.9% 수준으로 압축강도에 비해 감소비율이 저감하였으므로, 제강 슬래그에 의해 탄성계수가 개선된 것으로 판단된다. 또한, FA 및 BFS의 경우, 제강 슬래그 사용에 의해 압축강도가 개선되었기 때문에 탄성계수 역시 개선되었으며 기존 연구(Kim et al., 2018)와 달리, 제강 슬래그의 높은 밀도로 인해 탄성계수가 크게 증가한 것으로 보인다.

한편, 콘크리트의 탄성계수는 골재의 밀도 및 콘크리트의 단위중량에 영향을 받기 때문에 이를 고려한 예측모델을 각 기준마다 제공하고 있다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 단위중량 및 골재의 밀도를 고려한 KCI 2012, CEB-FIP, ACI 349-13 (ACI318-08)의 예측 모델인 식(9)~식(11)를 통하여

탄성계수를 산정하여 예측모델과 실험결과를 비교, 분석하여 Fig. 11에 나타내었다.

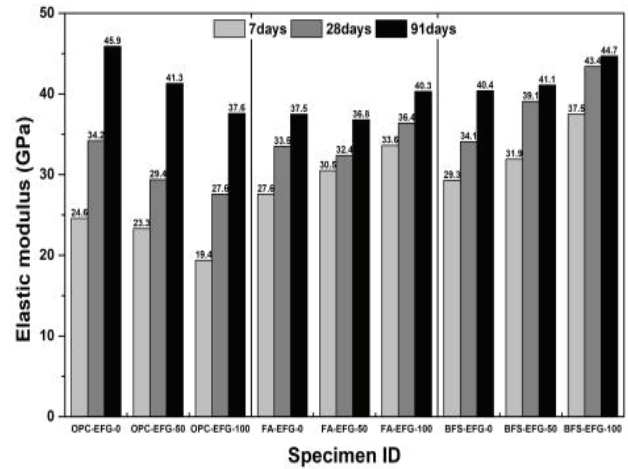


Fig. 10 Results of modulus of elasticity

$$E_c = 0.077m_c^{1.5} \sqrt[3]{f_{cu}} \quad (9)$$

$$E_c = E_{c0} \cdot \alpha_E \left(\frac{f_{ck} + \Delta f}{10} \right)^{1/3} \quad (10)$$

$$E_c = 0.043m_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}} \quad (11)$$

여기서, E_c 는 탄성계수 (GPa), m_c 는 콘크리트 단위중량 (kg/m^3), α_E 는 골재의 밀도에 의해 결정되는 골재 계수 (본 연구에서는 1.2 적용), f_{ck} 는 압축강도 (MPa), f_{cu} 는 $f_{ck} + \Delta f$ (MPa)이다.

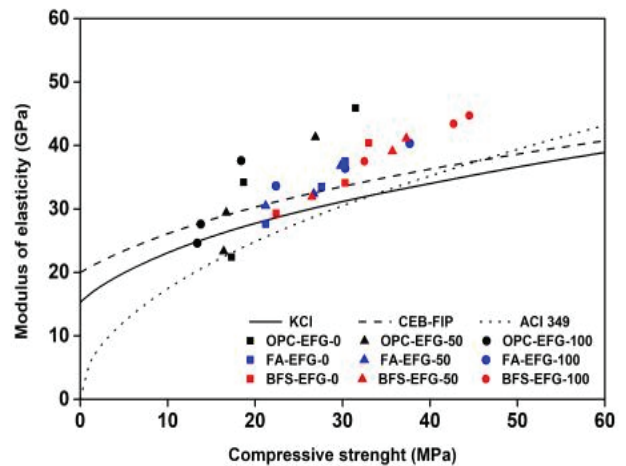


Fig. 11 Correlation between the compressive strength and the modulus of elasticity

탄성계수 예측모델에 사용될 수 있는 콘크리트의 단위중량은 최대 $2,500 \text{ kg/m}^3$ 이나, 본 연구에서는 탄성계수 산정을 위

해 사용된 시험체는 최대 단위중량이 약 2,800 kg/m³ 까지 나타났기 때문에 기존 예측식을 이용한 실제 탄성계수의 예측은 무리가 있을 것으로 판단된다. 그러나 CEB-FIP에서 제공하는 예측모델의 경우, 골재 종류의 영향을 받는 밀도에 대한 골재계수를 다른 예측모델에 비해 자세하기 제공하기 때문에 이를 수정 및 보완한다면 제강 슬래그 밀도에 따른 탄성계수 개선 효과를 반영할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

고밀도 폐유리 및 제강슬래그를 혼입한 중량콘크리트의 기초물성 및 역학적 특성을 비교, 평가한 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 고밀도 폐유리와 제강슬래그를 골재로 사용한 시험체의 압축강도 측정결과, OPC만 사용하면 고밀도 폐유리 사용에 의한 강도감소는 제강슬래그를 사용해도 개선되지 않았다. 이는 고밀도 폐유리와 제강슬래그의 표면 형상 및 공기량의 영향을 받은 것으로 판단된다. 그러나 광물질 혼화재를 함께 사용하게 되면, 압축강도, 휨강도 및 탄성계수 모두 개선되었으며, FA보다는 BFS가 효과적인 것으로 나타났다.
2. 고밀도 폐유리와 제강슬래그를 골재로 사용한 콘크리트의 압축-휨, 압축-탄성계수의 상관성을 평가한 결과, 제강슬래그 혼입률이 증가함에 따라 차이점이 발생하였으며, 특히 일반 골재에 비해 높은 밀도를 갖는 제강슬래그에 의해 탄성계수가 효과적으로 개선되었다.
3. 특히, 고밀도 폐유리와 제강슬래그에 의해 증가된 밀도는 차폐 성능 향상에 기여하는 것으로 나타나, 고밀도 폐유리 및 제강슬래그는 중량 콘크리트 골재로 활용이 가능할 것으로 판단된다.
4. 따라서 산업폐자원을 골재로 적용하기 위해서는 광물질 혼화재 혼합사용 및 역학적 특성에 대한 규정 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20171520101680).

References

1. Ministry of Land Infrastructure and Transport of Korea (2014), The fifth aggregate demand and aggregate supply (in Korean).
2. ACI 318-08 (2008), Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute.
3. ACI 349-13 (2013), Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures, American Concrete Institute.
4. CEB_FIP Code (2010), CEB-FIP Model Code, Design Code, Comite Euro International du Beton, Lausanne.
5. Chang, C. I. (1999), A study on the radiation shielding performance of heavy weight concrete, Ph. D. dissertation, Kwangju, Chonnam National University, Department of architectural engineering (in Korean).
6. Choi, S. W., Kim, V., Chang, W. S., Kim, E. Y. (2007). The Present Situation of Production and Utilization of Steel Slag in Korea and Other Countries. *Magazine of Korea Concrete Institute*, 19(6), 28-33 (in Korean).
7. Choi, S. Y., Choi, Y. S., Won, M. S., & Yang, E. I. (2015). Evaluation on the Applicability of Heavy Weight Waste Glass as Fine Aggregate of Shielding Concrete. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(4), 101-108 (in Korean).
8. Choi, S. Y., Choi, Y. S., & Yang, E. I. (2017). Effects of Heavy Weight Waste Glass Recycled as Fine Aggregate on the Mechanical Properties of Mortar Specimens. *Annals of Nuclear Energy*, 99, 372-382.
9. Choi, Y. S., Kim, I. S., Choi, S. Y., & Yang, E. I. (2019). Fundamental Properties and Radioactivity Shielding Characteristics of Mortar Specimen Utilizing CRT Waste Glass as Fine Aggregate. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(1), 163-170 (in Korean).
10. Japan Society of Civil Engineers (2007), Standard specifications for concrete structures.
11. Kim, J. M., Cho, S. H., Kwon, K. J., and Kim, M. H. (2005), An Experimental Study on the Engineering Properties of Radiation Shielding Concrete According to the Replacement Ratio of Rapid-Chilled Steel Slag Fine Aggregate, *Journal of the architectural institute of Korea : Structure & construction*, 197, 121-128.
12. Korea Atomic Industrial Forum, (2017), Nuclear Industry, Korea Atomic Industrial Forum, 37(10), 10-14.
13. Korea Concrete Institute (2012), Concrete Structure Design Code and Commentary, Korea Concrete Institute, Seoul.
14. Kim, Y. M., Choi, S. Y., Kim, I. S., & Yang, E. I. (2018). A study on the Mechanical Properties of Concrete using Electronic Waste as Fine Aggregate. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 22(2), 90-97 (in Korean).
15. Kuo, W. Ten., Shu, C. Y. (2014). Application of high-temperature rapid catalytic technology to forecast the volumetric stability behavior of containing steel slag mixtures. *Construction and Building Materials*, 50, 463-470.
16. Mehta. P. K. (2014), Concrete structures, properties and materials, 4th Edition, Prentice-Hall, Inc., Englewood cliffs, New jersey, 256-264.
17. Lee, S. T., Park K. P. (2017). Mechanical Properties and Durability of Concrete Incorporating Air-Cooled Slag, *Journal of the Korea*

Academia-Industrial Cooperation Society, 18(3), 256-363 (in Korean).

18. Lim, H. S., Lee, H. S., and Choi, J. S. (2011), Experimental Study on the development of X-ray shielding concrete utilizing electronic arc Furnace oxidizing slag, *Journal of the Architectural Institute of Korea : Structure & Construction*, 273, 125-131 (in Korean).
19. Lim, H. S., Lee, H. S. (2017 (a)). Study on Performance Evaluation of Concrete Using Electric Arc Furnace Oxidizing Slag Aggregate. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 21(4), 97-103 (in Korean).
20. Lim, H. S., Lee, H. S.(2017(b)). Experimental Study on Evaluation on Volume Stability of the Electric Arc Furnace Oxidizing Slag Aggregate. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 21(2), 78-86 (in Korean).
21. Ling, T. C., Poon, C. S., Lam, W. S., Chan, T. P., and Fung, K. K. L. (2011), Utilization of recycled cathode ray tubes glass in cement mortar for X-ray radiation-shielding applications, *Journal of Hazardous Materials*, 199-200, 321-327.
22. Park, Hun il; Kim, J. M. (2012). Characteristic of the Electric Arc Furnace Slag with Various Sources as Concrete Aggregate. *Journal of Korea Society of Waste Management*, 29(5), 431-440 (in Korean).
23. Ryu, D. H., Kim, K. H., Park, C. G., Son, Y. S.(2009). The Study of Concrete Basic Properties Using Oxidized Electric-furnace-slag Aggregate. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 25(8), 143-150 (in Korean).
24. Yoo, J. H., Choi, J.J. (2006). A Study on the Residual Expansibility of Electric Arc Furnace Slag Aggregate, *Journal of the Koeran Recycled Construction Resources Institute*, 2, 128-135 (in Korean).
25. ZZ. Ismail, E.A. AL-Hashmi (2009), Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete, *Waste Management*, 29, 655-659.

Received : 12/18/2018

Revised : 02/18/2019

Accepted : 02/22/2019

요 지 : 현재 많은 국가들이 천연자원이 고갈되는 문제에 직면해있고, 골재 공급이 어려운 상황이다. 이러한 상황을 고려하기 위하여 대체 자원 개발을 위한 다양한 연구들이 수행되어왔다. 특히, 방사성 폐기물의 차폐를 위해 사용되는 고밀도 채움재는 많은 양의 골재를 필요로 한다. 또한, 채움재의 차폐 성능 개선을 위해서는 채움재의 밀도 증가가 요구된다. 따라서 밀도가 높은 산업폐자원의 중량콘크리트 골재로의 활용성을 확대하기 위한 기초 자료의 제공을 위해 본 연구가 수행되었다. 실험결과, OPC의 경우, 고밀도 폐유리에 의해 감소된 콘크리트의 강도는 제강슬래그를 사용해도 개선되지 않으나, 광물질 혼화재를 결합제로 사용하면 성능이 개선되었다. 따라서 고밀도 폐유리와 제강슬래그를 중량 콘크리트에 적용할 경우, 광물질 혼화재와 함께 사용하고, FA보다는 BFS를 사용하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 한편, 제강슬래그를 중량콘크리트의 골재로 대체할 경우, 제강슬래그의 높은 밀도로 인하여 탄성계수와 차폐성능의 개선이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 고밀도 폐유리, 제강 슬래그, 중량 콘크리트, 알칼리-골재반응, 역학적 특성
