

전기로 산화슬래그 잔골재와 석회암 골재의 조합사용이 80MPa급 초고강도 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 영향

The Effect of Combinations of Electric Arc Furnace Slag and Lime Stone aggregates on Engineering Properties of Ultra High Strength Concrete with 80MPa

한민철¹ · 문병룡^{2*}Min-Cheol Han¹ · Byeong-Yong Moon^{2*}

(Received July 27, 2017 / Revised August 31, 2017 / Accepted September 4, 2017)

The aim of research is to investigate various physical properties of ultra high strength concrete of 80MPa class using a combination of limestone aggregate and electronic arc furnace oxidizing slag aggregate. For aggregate combinations, granite and limestone are used for coarse aggregate, granite and limestone are also used for fine aggregate. And also, limestone fine aggregate is replaced by electronic arc furnace oxidizing slag aggregate of 25% and 50%. Test results indicated that flowability and compressive strength increased when limestone fine aggregate was used compared to that using granite fine aggregate due to higher modulus of elasticity by limestone. Also substitution of electronic arc furnace oxidizing slag aggregate resulted in a decrease of compressive strength slightly. It is found that the use of electronic arc furnace oxidizing slag aggregate and limestone aggregate would be favorable for reducing the autogenous shrinkage by as much as 9~25%.

키워드 : 전기로 산화슬래그, 석회암, 초고강도 콘크리트, 자기수축

Keywords : Electronic arc furnace oxidizing slag, Lime stone, Ultra high strength concrete, Autogenous shrinkage

1. 서론

최근 국내외적으로 구조물의 대형화, 고층화 및 장대화에 대한 수요가 증가하고 있고, 이중 우리나라 같은 경우는 40층 이상의 건축물 수가 세계 4위 수준으로 고층 구조물이 급속하게 증가되는 추세이다(Kang et al. 2010).

이러한 초고층 건물의 내력확보 차원에서 초고강도 콘크리트의 활용은 필수적인데, 이와 관련한 연구 또한 국내외적으로 매우 활발하게 진행되고 있다(Kang et al. 2010; Shin et al. 2013). 이러한 초고강도 콘크리트의 경우 구조물의 단면 감소에 의한 공간의 효율적 이용이 가능하며, 건설유지관리 비용 절감 및 내구수명의 연장 등 장점이 있지만, 요구성능 발현을 위한 실리카퓌, 고성능 감수

제 등 고가의 사용재료 증가로 인해 경제성 측면에서 바람직하지 않은 것이 사실이다. 또한, 낮은 물·결합재비로 인한 자기수축등에 의한 초기균열의 발생 가능성이 존재함에 따라 설계단계에서 경제성적인 측면과 균열저하 등에 대한 측면이 동시에 고려되어야 하는 어려움이 상존하고 있는 실정이다.

특히, 초고강도 콘크리트의 목표성능을 보다 경제적으로 확보하기 위한 방안으로 사용 재료의 선정 및 배합설계가 매우 중요한 요인으로 대두되고 있는데, 이러한 초고강도 콘크리트의 경제적 배합을 위하여는 고성능 감수제의 사용량을 최소화 할 수 있는 방안으로의 접근이 매우 효과적인 것으로 보고되고 있다. 이를 위하여는 사용량이 가장 많은 골재의 효율적인 선택이 중요하게 대두되는데, 특히 입형이 양호한 골재를 사용할 경우 유동성개선을 통

* Corresponding author E-mail: mby4177@naver.com

¹청주대학교 건축공학과, 부교수 (Department of Architectural Engineering, Cheong-ju University, Associate Professor, Cheongju, 28503, Korea)

²청주대학교 건축공학과, 석사과정 (Department of Architectural Engineering, Cheong-ju University, Master's Course, Cheongju, 28503, Korea)

한 고성능 감수제 사용량을 감소시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.

이와 관련하여 Han et al.(2015) 등에 따르면 초고강도 콘크리트의 골재로서 석회암 골재를 사용할 경우 타 골재에 비해 높은 입형 판정 실적률을 가지고 있어, 제조시 고성능 감수제 사용량을 저감할 수 있는 것으로 보고한 바 있다.

한편 이러한 초고강도 콘크리트의 또다른 골재자원으로서 전기로 산화슬래그 골재를 생각해볼 수 있는데, 전기로 산화슬래그 골재는 철강생산과정에서 얻어지는 부산물로서 현재 KS F 2527에 콘크리트용 골재로서 활용이 가능하도록 규정하고 있다. 그런데 골재 중 Free-CaO의 존재로 체적안정성이 문제시되어 최근에서 급냉 등 별도의 처리과정을 거쳐 안정화된 골재로서 활용이 가능한 상황에 와 있고, 이와 관련하여 Sohn et al.(2010) 등에 따르면 전기로 산화슬래그를 잔골재로 제조한 고강도 콘크리트의 경우 일반 골재에 비해 높은 자기수축저감 성능을 보임을 확인한 바 있어 초고강도 콘크리트의 유효한 골재자원으로서 활용가능성이 클 것으로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 보다 경제적인 초고강도 콘크리트 제조를 위한 방안으로 국내에 유통되는 석회암과 전기로 산화슬래그를 잔골재로 조합사용하여 이들이 80MPa급 초고강도 콘크리트의 제반 물성에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하고자 한다.

2. 실험계획 및 사용재료

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같다. 콘크리트의 배합사항으로 먼저, W/B는 19%, 결합제 구성비는 OPC : FA : SF를 각각 7 : 2 : 1의 비율로 계획하였고, 석회암 굵은 골재와 석회암 잔골재를 사용한 배합에 대해 목표 슬럼프 플로 650±50mm를 만족하도록 고성능 감수제 사용량을 결정하였다. 그리고 골재의 조합이 유동성에 미치는 영향을 평가하기 위해 다른 골재 조합에도 동일한 량의 고성능 감수제를 사용하는 것으로 계획하였다.

한편 골재조합으로 굵은골재의 경우 화강암 골재와 석회암골재를 사용하였으며, 석회암 굵은골재를 사용한 경우에 한하여 전기로 산화슬래그 잔골재를 석회암 잔골재에 0, 25, 50%로 치환하는 것으로 총 6수준으로 계획하였다.

실험사항으로 굳지 않은 콘크리트에서 슬럼프 플로와 공기량, 단위용적질량 및 응결시간, 경화 콘크리트에서는 압축강도 및 탄성계수, 할렬 인장강도, 자기수축 길이변화율을 각각 계획된 재령에서 측정하는 것으로 하였다.

Table 2는 초고강도 콘크리트의 배합표를 제시한 것이다.

Table 1. Experimental plan of concrete

Factor		Levels	
Mixture	W/B(%)	1	· 19
	Slump flow(mm)		· 650±50
	Air contents(%)		· 2.0±1.0
	OPC : FA : SF		· 7 : 2 : 1
	Coarse aggregate maximum size of coarse aggregates(mm)		· 10
	Electronic arc furnace oxidizing slag aggregate rate(%)		· 0, 25, 50
	Coarse aggregate sources		2
Experiment	Fine aggregate sources	3	· Granite aggregate · Limestone aggregate · Electronic arc furnace oxidizing slag
	Fresh concrete	6	· Slump flow · Air contents · Unit volume weight · U-Box · 500mm reaching time · Setting time
	Hardened concrete	4	· Compressive strength (1, 3, 7, 28days) · Modulus of elasticity (28days) · Splitting tensile strength (28days) · Autogenous shrinkage (1, 2, 3, ... 28days)

Table 2. Mixture proportions of the concretes

Mixture No	W/B (%)	S/a (%)	Weight(kg/m ³)									SP (%/c)
			W	B			G		S			
				C	FA	SF	G ¹⁾	L ²⁾	G	L	E ³⁾	
GG0	19	39	150	552	158	79	855	-	538	-	-	1.65
GL0				552	158	79	855	-	-	555	-	
LG0				553	158	79	-	885	538	-	-	
LL0				553	158	79	-	885	-	555	-	
LLE25				553	158	79	-	885	-	416	179	
LLE50				553	158	79	-	885	-	278	357	

- 1) Granite aggregate
- 2) Limestone aggregate
- 3) Electronic arc furnace oxidizing slag fine aggregate

2.2 사용재료

본 연구의 사용재료로써 국내 H사 보통 포틀랜드 시멘트를 사

Table 3. Physical properties of cement

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Setting time (min)		Compressive strength (MPa)		
		Initial set	Final set	3days	7days	28days
3.15	3,390	230	345	24.8	39.3	56.9

Table 4. Physical and chemical properties of mineral admixtures

Admixtures	Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Chemical composition(%)		
			L.O.I	SiO ₂	Al ₂ O ₃
FA	2.21	3,520	4.60	52.3	22.24
SF	2.20	160,000	0.05	96.65	1.67

Table 5. Physical properties of coarse aggregate

Aggregates	Surface saturated density (g/cm ³)	Water absorption (%)	F.M	Passing 0.08mm sieve size	Distribution of grain shape
Lime stone	2.69	0.84	6.19	0.62	63.27
Granite	2.72	0.82	6.28	0.34	61.55

Table 6. Physical properties of fine aggregate

Aggregates	Surface saturated density (g/cm ³)	Water absorption (%)	F.M	Passing 0.08mm sieve size(%)	Distribution of grain shape(%)
Lime stone	2.64	1.34	2.87	4.9	68.01
Granite	2.56	1.83	3.49	6.9	62.36
Electronic	3.40	1.91	3.14	9.3	55.8

Table 7. Chemical components of Electronic arc furnace oxidizing slag fine aggregate

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	T.Fe	MnO	MgO
26.7	17.7	12.2	21.2	7.9	5.3

용 하였고, 혼화재로서 FA는 국내산, SF는 노르웨이산을 사용하였으며 그 물리적·화학적 성질은 Tables 3, 4와 같다.

골재로서 굵은골재의 경우 석회암 골재는 충북 제천산을 사용하였으며, 화강암 골재는 충남 세종산을 사용하였고, 잔골재의 경우 석회암은 굵은 골재와 동일한 충북 제천산 부순골재를 사용하였으며, 화강암은 충남 공주산 그리고 전기로 산화슬래그 잔골재의 경우 국내 F사에서 제조된 것을 사용하였는데, 골재 각각의 입도곡선, 물리적 성질 및 외형은 Figs. 1~3, Tables 5 및 6과 같고, 전기로 산화슬래그 잔골재의 화학적 성분 조성은 Table 7과 같다. 또한 고성능 감수제는 국내 S사의 유지형 폴리칼본산계(밀도:



(a) Limestone (b) Granite (c) Electronic

Fig. 1. Density and water absorption depending on various different types of fine Aggregate

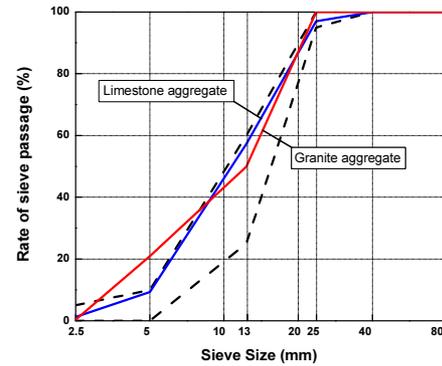


Fig. 2. Grading curve depending on coarse aggregate

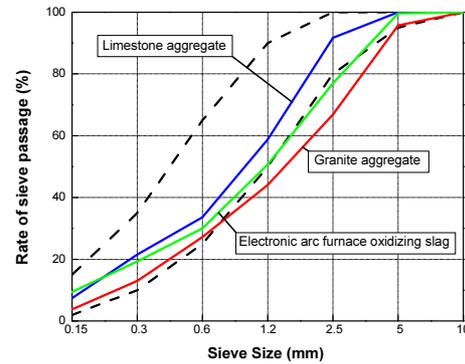


Fig. 3. Grading curve depending on fine aggregate

1.06g/cm³, 점성: 99.6cPs)를 사용하였다.

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 먼저 콘크리트의 혼합은 트윈 샤프트 믹서를 사용하였다. 굳지 않은 콘크리트의 물성을 평가하기 위해, 슬럼프 플로는 KS F 2594, 공기량 및 단위용적질량은 KS F 2421와 2409에 의거하여 실험을 진행하였고 U-Box 충전시험 같은 경우는 콘크리트의 유동성 및 충전성을 평가하는 시험으로 시험기 안쪽에 시료를 채운후 시험기의 중앙 격리판을 들어 올려 콘크리트가 중앙 철근을 통과하여 반대쪽으로 올라와 멈췄을 때, 양측 간의



Fig. 4. Experimental measurement of experiment

높이 차를 측정하였다.

경화 콘크리트 실험으로 압축강도, 탄성계수 및 쪼갬인장강도는 각각 KS F 2403, 2438 및 2423에 의거하여 재령별로 3개씩 제작 후 측정을 실시하였다. 또한 자기수축 길이변화율은 KS F 2586에 의거하여 100x100x400mm의 각주형 몰드에 시료의 자유로운 변형이 구속되는 것을 방지하기 위해 바닥에 1mm의 테플론 시트를 깔고, 양단부의 안쪽에 폴리스틸렌 보드를 넣은 후, 중앙에 매립형 스트레인 게이지를 설치하여 공시체를 각각 배합별로 2개씩 제작한 후 Data logger를 사용하여 자기수축 길이 변화율을 측정하였다. Fig. 4는 본 연구의 슬럼프 플로, 500mm 도달시간 및 압축강도, 탄성계수 측정 모습이다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

3.1.1 슬럼프 플로 및 500mm 도달시간

Fig. 5는 골재 조합별 콘크리트의 슬럼프 플로를 나타낸 것이다. 먼저, 슬럼프 플로는 석회암 잔·굵은 골재를 사용한 LL0의 경우 배합설계에 의해 목표 슬럼프 플로 범위인 650±50mm를 만족하는 것으로 나타났고, 여기에 전기로 산화슬래그 잔골재를 25%, 50% 치환한 경우도 슬럼프 플로가 약간 저하지만, 목표범위 이내로 나타났다. 이는 전기로산화슬래그골재의 경우 미분량은 많지만, 흡수율이 작고 밀도가 높아 배합수의 흡착이 상대적으로 적어 급격한 슬럼프플로의 감소가 나타나지 않은 것으로 판단된다.

반면에, 화강암 골재를 잔골재 혹은 굵은 골재로 사용한 배합은 모두 목표 슬럼프 플로를 만족하지 못함을 알 수 있었다. 이는 본 연구에서 사용된 화강암 잔골재의 불연속 입도분포 및 높은 흡수

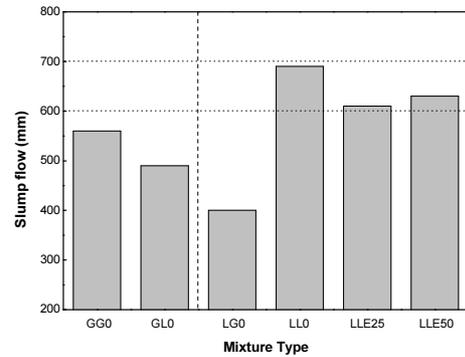


Fig. 5. Slump flow depending on mixture type

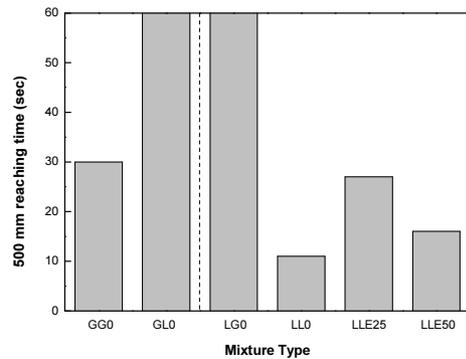


Fig. 6. 500mm reaching time depending on mixture type

율에 기인하여 급격한 슬럼프플로 저하가 나타난 것으로 사료된다. 따라서 본 연구범위에서 화강암 골재 사용시 목표 슬럼프 플로 확보를 위해서는 보다 많은 량의 고성능 감수제를 사용해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 골재조합에 따른 500mm 도달시간을 나타낸 그래프이다. 먼저, 배합설계로 제조된 LL0의 경우 500mm 도달시간이 11초로 가장 빠르게 나타난 반면, 화강암 골재를 기반으로 한 골재조합은 슬럼프 플로가 500mm에 도달하지 못하거나 석회암 골재만을 사용한 골재에 비해 현저히 지연되는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 석회암 잔골재에 전기로 산화슬래그 잔골재를 치환한 조합에서는 유동성이 다소 저하함에 따라 500mm 도달 시간 LL0보다 지연되는 것으로 나타났다.

3.1.2 U-Box

Fig. 7은 골재조합 변화에 따른 U-Box 충전높이차를 나타낸 것이다. 전술한 슬럼프 플로 결과와 유사한 경향으로 화강암 잔·굵은 골재를 사용한 배합의 경우 유동성이 감소함에 따라 석회암 잔골재 사용 배합에 비해 현저히 큰 충전높이차를 보이고 있는데,

이는 화강암 골재의 거친 입형과 불연속 입도분포에 기인한 것으로 판단된다. 전기로 산화슬래그 잔골재 치환에 따른 충전 높이차는 석회암 잔골재를 사용한 경우와 비교하여 큰 차이는 없는 것을 확인 할 수 있었다.

따라서 슬럼프플로, 500mm 도달시간 및 U-BOX 충전성 평가 시험을 토대로 석회암 잔·굵은 골재를 사용하고 여기에 부분적으로 전기로 산화슬래그잔골재를 치환할 경우 석회암골재를 사용하는 경우보다 목표 유동성 확보를 위한 고성능 감수제 사용량을 절감

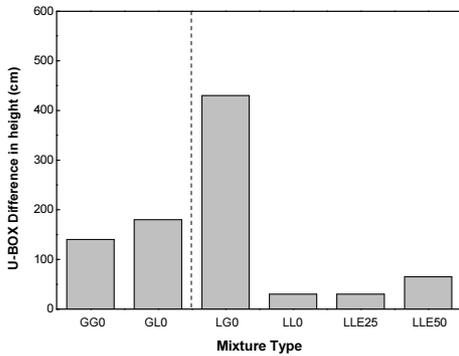


Fig. 7. U-Box difference in height depending on mixture type

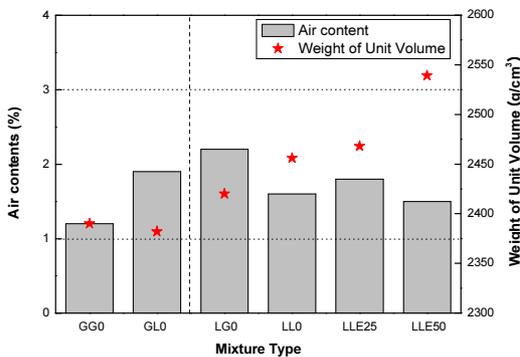


Fig. 8. Air content depending on mixture type

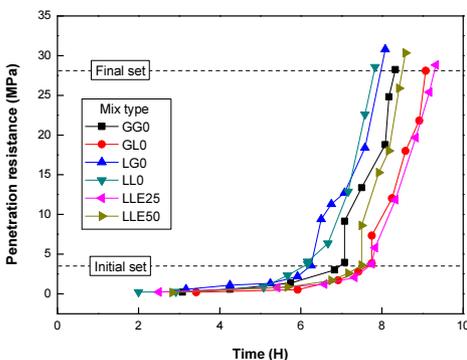


Fig. 9. Penetration resistance in depending on the time

시켜 보다 경제적인 배합의 구현이 가능할 것으로 판단된다.

3.1.3 공기량 및 단위용적질량

Fig. 8은 배합 종류에 따른 공기량 및 단위용적질량을 나타낸 그래프이다. 골재종류 변화에 상관없이 모두 목표 공기량인 $2.0 \pm 1.0\%$ 에 만족하였다. 석회암 골재를 사용한 배합에 전기로 산화슬래그 치환율이 증가할수록 단위용적질량 또한 증가하였는데, 이는 전기로 산화슬래그 자체의 밀도가 3.4로 여타의 잔골재보다 매우 크기 때문인 것으로 사료된다.

3.1.4 응결시간

Fig. 9는 배합 종류별 관입 저항치의 경시변화와 초결 및 종결을 나타낸 것이다. 먼저, 석회암 잔골재만을 사용한 LLO의 경우 약 7시간에서 종결이 나타났고, 화강암 골재를 사용한 경우 석회암 골재만을 사용한 배합보다는 응결이 30분 내외로 지연되는 것을 알 수 있었다. 한편, 석회암 잔골재에 전기로 산화슬래그 잔골재를 치환시킬 경우 응결이 지연되는 것으로 나타났으며, 25%를 치환한 경우 9시간 만에 종결에 도달하였다. 이와 관련하여 Lee et al.(2006)의 연구결과에 따르면 전기로슬래그를 시멘트 대체제로 사용하였을 때, 전기로 슬래그 내부 유리 CaO 와 Ca(OH)_2 에 의해 모르타르 내부의 Ca^{2+} 이온의 농도가 증가하고, alite의 수화를 촉진시켜 초기 수화발열속도가 증가함에 기인하여 응결시간이 빨라진다고 보고된바 있는데, 본 연구의 결과에서는 상반된 결과가 도출되었다. 이는 본 연구에서는 전기로 산화 슬래그를 잔골재로서 활용함에 따라 얻어진 결과로 판단되며, 이에 대한 추가적인 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

3.2 경화 콘크리트의 특성

3.2.1 압축강도 및 탄성계수

Fig. 10은 골재조합 변화에 따른 재령별 압축강도를 나타낸 그래프이다. 전반적으로 재령 28일을 기준으로 석회암 잔·굵은 골재를 사용한 LLO 배합이 여타 골재조합의 경우보다 약 13~22% 높은 압축강도를 나타내었다. 이는 석회암골재자체의 탄성계수가 60~80GPa 정도로 50GPa수준인 화강암골재보다 크고, 화강암 골재 생산과정 중 파쇄공정을 거치며 골재 내부의 미세균열 등으로 인해 골재 자체의 강도가 낮아져 석회암을 사용한 콘크리트 압축강도가 높게 나타난 것으로 판단된다(A, Kiliç et al. 2007).

또한 전기로 산화슬래그 잔골재를 석회암 잔골재에 각각 25%, 50% 치환한 LLE25, LLE50의 경우 LLO보다 초기재령에서는 높은

압축강도를 보였지만, 재령이 지날수록 강도 발현 속도가 둔화되는 것으로 나타났다. 이는 초기재령에서 전기로 산화슬래그의 유리석회 일부가 콘크리트의 수화반응에 기여하여 얻어진 결과로 판단되나, 이후 재령이 증가함에 따라 28일 이후에는 전기로 산화슬래그 잔골재의 치환률 만큼 석회암 골재량이 작아져서 전반적인 탄성계수의 저하로 LL0에 비해 압축강도가 낮아지는 것으로 판단된다. 다만, 화강암골재를 사용한 여타 배합에 비하여는 전기로

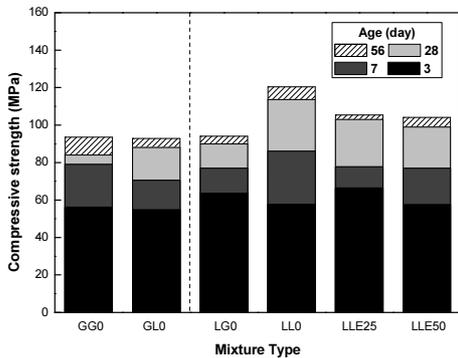


Fig. 10. Compressive strength depending on mixture type

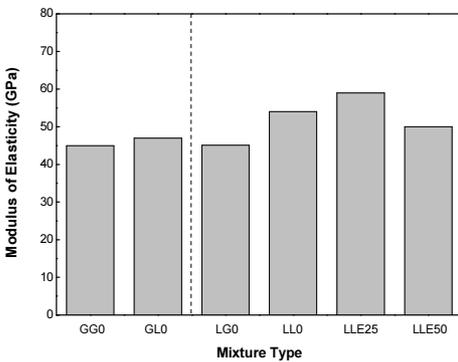


Fig. 11. Modulus of Elasticity depending on mixture type

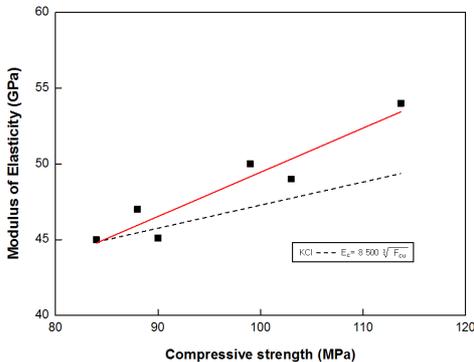


Fig. 12. Relationship between compressive strength and modulus of Elasticity depending on mixture type

산화슬래그 잔골재를 사용한 배합이 높은 압축강도를 발휘하고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 골재조합 변화에 따른 콘크리트의 28일 탄성계수값을 나타낸 것이다. 전반적으로 화강암 골재를 사용한 배합의 경우보다 석회암 골재를 사용한 배합이 상대적으로 탄성계수가 약 17% 높은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Alexander and Mindness (2005)의 연구결과에 따르면 콘크리트의 탄성계수는 콘크리트 페이스트, 골재의 탄성계수와 천이영역의 존재에 직접적인 영향을 받고 있는데, 본 연구에서는 배합상 골재종류에 관계없이 동일한 결합재량으로 시멘트 페이스트의 영향 및 천이영역이 유사한 조건임을 감안하면 골재의 탄성계수가 지배적으로 콘크리트의 탄성계수에 영향을 미치게 되기 때문이라고 판단된다.

Fig. 12는 재령 28일에서 압축강도와 탄성계수의 관계를 나타낸 것으로서, 전반적으로 본 연구에서는 80MPa급 초고강도 콘크리트를 사용함에 따라 한국콘크리트학회(KCI)의 탄성계수 압축강도 관계식보다 동일압축강도에서 탄성계수값이 높게 평가됨을 알 수 있었다.

3.2.2 쪼갬인장강도와 압축강도의 비교

Fig. 13은 재령 28일에서 압축강도와 쪼갬인장강도를 비교한 것으로, 본 연구 결과 쪼갬인장강도는 압축강도의 약 3%정도로 나타났고, KCI에서 제시하고 있는 $0.57 \sqrt{F_{ck}}$ 보다 상대적으로 약 3MPa 정도 낮은 강도를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 일반강도 콘크리트의 경우 압축강도의 7~10% 수준의 인장강도를 발휘하지만, 콘크리트가 고강도화 될수록 일반강도와 휨강도의 차이가 더 커져 이러한 결과가 나타난 것으로 사료된다(Shin et al, 2013).

3.2.3 자기수축 길이변화율

Fig. 14는 재령에 따른 골재 조합별 자기수축 길이변화율을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 골재 조합이 자기수축에 미치는 영향을 고찰하고자 일반적으로 자기수축에 영향을 미치는 주된 요인으로 알려진 W/B, 단위시멘트량, 결합재 종류를 고정한 조건에서 실험을 진행하였다. 통상적으로 자기수축에 주된 요인인 시멘트량의 변화 없이 골재 종류의 변화만으로도 자기수축의 발현이 주목할 만한 수준을 보이고 있었다.

먼저 화강암골재를 사용한 GG0의 경우가 자기수축이 가장 크게 나타났으며, 석회암골재 및 전기로 산화슬래그잔골재를 치환한 LLE50, LLE25 및 LL0의 조합이 자기수축이 7~25%정도 감소되

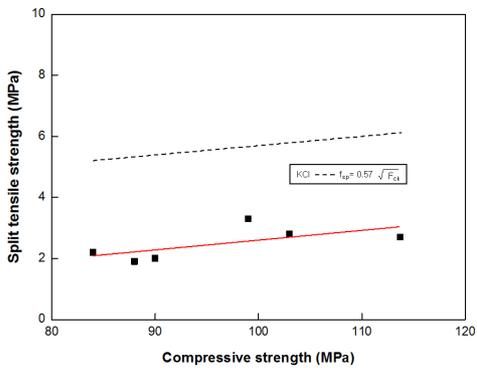


Fig. 13. Relationship between compressive strength and modulus of Elasticity depending on mixture type

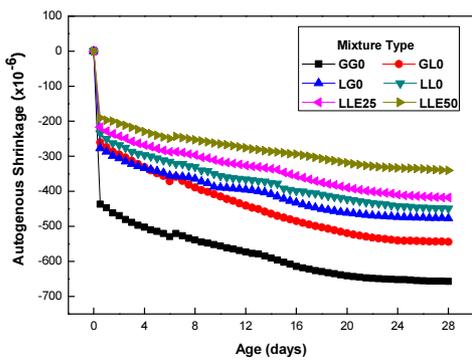


Fig. 14. Autogenous shrinkage depending on age

는 것으로 나타났다. 결국 이는 골재의 종류가 자기수축에 영향을 미치는 것으로 판단되며 석회암골재의 경우 높은 탄성계수 값과 석회암의 $CaCO_3$ 성분이 시멘트의 C_3A 와 반응하여 모노 칼보 알루미늄 하이드록사이드를 생성하는데 이때 발생하는 팽창으로 인해 자기수축 저감을 일으키는 것으로 사료된다(G. Luis et al. 2015).

또한 전기로 산화슬래그 잔골재의 경우도 유리석회가 팽창반응을 일으키는 원인으로 자기수축 저감에 기여하는 것으로 판단되어 이들의 석회암잔골재와 전기로 산화슬래그 골재조합이 초고강도 콘크리트의 자기수축 저감에 긍정적으로 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 단, 전기로 산화슬래그 골재의 경우 free-CaO 함량이 일정하게 관리되지 않을 경우 과팽창을 일으킬 수 있음에 유의할 필요가 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 석회암 잔골재와 전기로 산화슬래그 잔골재의 조합이 초고강도 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 영향을 고찰하고, 양질의 골재선정에 따른 초고강도 콘크리트의 유동성개선을

통한 보다 경제적 배합을 검토하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 슬럼프 플로, 500mm도달시간 및 U-Box 충전 시험결과 석회암 잔·굵은 골재 및 여기에 전기로 산화슬래그 잔골재를 치환한 경우가 전반적으로 화강암 골재를 사용한 경우보다 개선된 성능을 발휘하였다. 특히, 화강암골재 사용시 목표성능을 확보하기 위한 고성능 감수제 사용량이 석회암보다 증가되어야 함에 본 연구범위에서는 석회암 골재 사용이 초고강도 콘크리트 경제적 제조를 위한 방안으로 고려될 수 있을 것으로 판단된다.
2. 압축강도는 석회암 잔·굵은 골재 사용시 가장 높은 강도값을 나타내었으며, 전기로 산화슬래그 잔골재를 석회암 잔골재에 치환시 초기 강도는 높았으나, 28일 이후 강도 발현 속도가 저하되었다. 탄성계수는 압축강도와 유사한 경향을 나타내었다.
3. 자기수축은 석회암 골재를 사용하였을 때 높은 탄성계수 및 모노 칼보 알루미늄 하이드록사이드 반응 등에 기인하여 화강암 골재 사용에 비해 저감 되었으며, 석회암 골재에 전기로 산화슬래그를 치환할수록 자기수축이 더욱 저감되는 것을 확인 할 수 있었다.

이상을 종합하여 볼 때 초고강도 콘크리트 제조시 석회암 잔·굵은 골재 사용하는 경우 화강암 골재를 사용하는 경우보다 경제적 배합의 구현이 가능할 것으로 판단된다. 또한 전기로 산화슬래그 잔골재를 부분 치환할 경우 자기수축 저감 저감에 효과적인 것으로 확인되었으며, 이에 대한 구조적 특성을 규명하기 위한 후속 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

References

A, Kil iç, C.D, Atiş, A, Teymen, O, Karahan, F, Özcan, C, Bilim, M, Özdemir. (2007). The Influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete, *Cement and Concrete Composites*, **30(4)**, 290–296.

M, Alexander, S, Mindess. (2005). *Aggregates in Concrete*, Taylor & Francis, Oxon.

G, Luis, M, Thomas, L, Karen, S, Masha, W, Lars. (2015).

- Hydration States of AFm Cement Phases, Cement and Concrete Research, **73**, 143–157.
- Han, M.C., Jung, S.W., Lee, H.K. (2015). Effect of mineralogical sources of coarse aggregate on the engineering properties of ultra high strength concrete with 80MPa, Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction, **31(7)**, 59–66 [in Korean].
- Han, M.C., Lee, H.K. (2016). Engineering characteristics of ultra high strength concrete with 100MPa depending on fine aggregate kinds and mixing methods, Journal of the Korea Academia–Industrial Cooperation Society, **17(2)**, 536–544 [in Korean].
- Kang, H., Ahn, J.M., Shin, S.W. (2010). Evaluation on mechanical and mixing properties of ultra–high strength concrete with fck = 150MPa, Journal of The Korean Institute of Building Construction, **10(3)**, 113–120 [in Korean].
- Kim, S.M., Park, J.W., Lee, H.H., Kim, K.H. (2008). Study on utilization of electric arc furnace oxidizing slag as fine aggregates for cement concrete, Journal of The Korean Society of Civil Engineers A, **28(3A)**, 407–415 [in Korean].
- Lee, S.H., Hwang, H.J., Kwon, S.K. (2006). Properties of blast furnace slag cement modified with electric arc furnace slag, Journal of the Korean Ceramic Society, **43(7)**, 408–414 [in Korean].
- Shin, H.O., Lee, S.H., Lee, W.J., Yoon, Y.S. (2013). Evaluation of mechanical properties of 200MPa ultra–high–strength concrete incorporating different fine aggregates, Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction **29(9)**, 47–55 [in Korean].
- Sohn, Y.S., Park, C.G., Lee, S.H., Choi, S.W., Ryu, D.H. (2010). “The shrinkage characteristics of concrete in using oxidized electric–furnace slag aggregate,” Proceeding of the Korea concrete institute, Korea Concrete Institute, **22(1)**, 253–254 [in Korean].

전기로 산화슬래그 잔골재와 석회암 골재의 조합사용이 80MPa급 초고강도 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 영향

본 연구에서는 초고강도 콘크리트의 경제적인 제조 방안을 제시하기 위하여 국내에 유통되는 석회암골재와 전기로 산화슬래그를 잔골재로 조합사용하여 이들이 80MPa급 초고강도 콘크리트의 제반 물성에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하고자 한다. 골재종류로서 화강암 굵은골재, 석회암 굵은골재 조합에 잔골재로서 석회암, 화강암을 사용하였고, 추가적으로 석회암 잔골재에 전기로 산화슬래그 잔골재를 25% 및 50% 치환한 조합으로 골재를 선정하였다. 연구결과에 따르면, 석회암 잔골재를 사용한 경우와 여기에 전기로 산화슬래그 잔골재를 치환한 경우 설계된 고성능 감수제량으로도 목표 슬럼프플로를 만족하였으나, 화강암골재를 사용한 경우 목표값을 만족시키지 못해 고성능 감수제량을 증가시켜주어야 할 것으로 판단된다. 압축강도의 경우 석회암골재의 높은 탄성계수에 기인하여 화강암 골재를 사용한 경우보다 높은 콘크리트 압축강도를 발휘하였고, 전기로 산화슬래그를 치환한 경우 28일이후 강도가 다소 저하하는 것으로 나타났다. 자기수축은 석회암잔골재에 전기로 산화슬래그잔골재를 치환한 경우 자기수축을 9~25%정도 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.