Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 17, No. 2 pp. 536-544, 2016

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.2.536
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

잔골재 종류 및 혼합방법 변화에 따른 100 MPa 급 초고강도 콘크리트의 공학적 특성

한민철[1*], 이홍규[1]
[1]청주대학교 건축공학과

Engineering Characteristics of Ultra High Strength Concrete with 100 MPa depending on Fine Aggregate Kinds and Mixing Methods

Min-Cheol Han[1*], Hong-Kyu Lee[1]
[1]**Department of Architectural Engineering, CheongJu University**

요 약 최근 초고층 구조물이 증가함에 따라 구조내력 확보를 위해 80~100 MPa 수준의 초고강도 콘크리트 사용이 증가하고 있는데, 이들 구성 재료 중 사용량이 가장 많은 골재는 종류나 특성에 따라 초고강도 콘크리트의 성능 및 경제성에 미치는 영향이 크므로 이에 대한 고찰이 요구된다. 이에 본 연구에서는 100 MPa 급 초고강도 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 잔골재 영향을 고찰하고자, 석회암잔골재(LFA), 전기로 산화 슬래그 잔골재(EFA), 세척사(SFA) 및 화강암 부순 잔골재(GFA)의 4종과 이들을 상호 혼합한 4종의 혼합골재를 선정하여 초고강도 콘크리트의 공학적 특성을 고찰하고자 한다. W/B 20 %에서 보통포틀랜드시멘트:플라이애시:실리카흄의 비율을 7:2:1로 조합한 콘크리트를 제조하였다. 연구결과에 따르면 LFA 사용 배합이 양호한 잔골재의 입형 및 입도 등 입자특성에 기인하여 동일 고성능 감수제 사용량에서 가장 높은 슬럼프 플로 및 높은 충전성을 확보하며, 혼합골재 사용 배합에 비해 전반적인 유동성이 우수함을 확인할 수 있었다. 또한, 압축강도 및 자기 수축 저감 성능은 EFA 및 LFA 사용 배합이 여타 골재 종류 및 혼합조합에 비해 골재 자체의 양호한 탄성계수 및 강도 그리고 EFA의 free-CaO에 기인하여 보다 양호한 성능을 갖고 있음을 확인하였다.

Abstract Recently, with the increase in the number of high rise and huge scaled buildings, ultra-high strength concrete with 80~100 MPa has been used increasingly to withstand excessive loads. Among the components of concrete, the effects of the kinds and properties of fine aggregates on the performance and economic advantages of ultra-high strength concrete need to be evaluated carefully. Therefore, this study examined the effects of the type of fine aggregates and mixing methods on the engineering properties of ultra-high strength concrete by varying the fine aggregates including limestone fine aggregate (LFA), electrical arc slag fine aggregate (EFA), washed sea sand (SFA), and granite fine aggregate (GFA) and their mixtures. Ultra-high strength concrete was fabricated with a 20 % water to binder ratio (W/B) and incorporated with 70 % of Ordinary Portland cement: 20 % of fly ash:10 % silica fume. The test results indicate that for a given superplasticizer dose, the use of LFA resulted in increases in slump flow and L-flow compared to the mixtures using other aggregates due to the improved particle shape and grading of LFA. In addition, the use of LFA and EFA led to enhanced compressive strength and a decrease in autogenous shrinkage due to the improved elastic properties of LFA and the presence of free-CaO in EFA, which resulted in the formation of C-S-H.

Keywords : Autogenous Shrinkage, Distribution of grain shape, Elastic Properties, Fine Aggregate, Flowability, Limestone Fine Aggregate, Ultra High Strength Concrete

본 논문은 청주대학교 연구과제로 수행되었음.
*Corresponding Author : Min-Cheol Han(Cheongju Univ.)
Tel: +82-43-229-8484 email: twhan@cju.ac.kr
Received December 28, 2015 Revised February 3, 2016
Accepted February 4, 2016 Published February 29, 2016

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

전 세계적으로 건설구조재료 중 가장 많은 비중을 차지하고 있는 콘크리트는 최근 초고층화 및 대형화되는 구조물의 적절한 내력 확보를 위해 기존 콘크리트에 비해 압축강도가 월등히 높은 100 MPa 수준의 초고강도, 고내구성 및 고유동성을 동시에 갖는 초고강도 콘크리트의 등장을 초래하게 되었다.

특히, 기존 콘크리트 대비 4 배 이상의 압축강도와 200년 이상의 내구수명을 요구하는 시설물들이 등장하면서 이에 부응하는 콘크리트를 개발하기 위해 선진국들을 중심으로 초고강도 콘크리트의 최적 재료 배합 및 구조물 활용기술 개발에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며, 국내에서도 최근 초고강도 콘크리트의 개발 및 실용화에 대한 연구에 대한 관심이 증가되고 있는 시점이다 [1-3].

이러한 초고강도 콘크리트는 전술한 바와 같이 100 MPa 이상의 압축강도를 확보하기 위해 다량의 시멘트를 사용하고 그에 따르는 유동성 확보를 위해 고가의 저점도 타입 폴리칼본산계 고성능 감수제(SP제)를 다량 사용함에 따라 제조비용의 급격한 상승을 초래하는 문제점을 안고 있다. 이에 초고강도 콘크리트의 경제성에 관한 관심이 집중되면서 경제성을 갖는 재료 선정 및 배합설계를 위한 시도가 진행되고 있다. 이러한 초고강도 콘크리트의 경제적 제조와 연관하여 특히 콘크리트 구성 재료 중 70 % 이상을 차지하고 있는 골재의 역할이 중요할 것으로 판단되는데, 즉 골재의 특성 중 양호한 입형 및 입도, 골재 자체의 높은 탄성계수 및 압축강도 등은 콘크리트의 유동성 및 역학적 특성에 유리하게 작용될 수 있다.

이와 연관하여 골재의 입형 및 입도가 양호하며 역학적 특성이 우수한 골재를 사용할 경우 배합설계 단계에서 목표 유동성 확보를 위한 단위수량 및 고성능 감수제 사용량을 줄일 수 있어, 고가의 시멘트와 SP제가 다량 사용되는 초고강도 콘크리트에 있어 경제성을 성취할 수 있을 것으로 판단된다.

그러므로 본 연구에서는 100 MPa 급 초고강도 콘크리트의 경제적 제조를 위한 방안으로 최적의 입자특성 및 역학적 성능을 갖는 잔골재를 선정하여 초고강도 콘크리트에 활용하고자, 시중에 유통되고 있는 각종 잔골재를 4종류 선정하고 이들을 혼합 사용한 4종류를 선정하여 이들의 사용에 따른 초고강도 콘크리트의 제반 공학적 특성을 분석하고자 한다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 계획

본 연구의 실험 계획은 Table 1과 같고 배합설계는 Table 2와 같다.

Table 1. Experimental plan

Factors				Levels
Mixture	W/B (%)		1	20
	Flow (mm)			650 ± 50
	Air content (%)			2.0 ± 1.0
	OPC : FA : SF			7 : 2 : 1
	Aggregate	Coarse aggregate	1	· Lime stone (LA)
		Fine aggregate	4	· LFA, EFA, SFA, GFA
			4	· S+G · L+E · L+S · L+G
Experiment	Aggregates		5	· Density · Water absorption · Grading · Fineness modulus · Distribution of grain shape
	Concrete	Fresh concrete	5	· Slump Flow · 500 mm reaching time · Air content · U-box height · L-flow
		Hardened concrete	3	· Compressive strength (1, 3, 7, 28, 56 days) · Modulus of elasticity (28 days) · Autogenous shrinkage (until 28 days)

LFA - Lime stone crushed fine aggregate (L)
SFA - Sea sand fine aggregate (S)
GFA - Granite fine aggregate (G)
EFA - Electric arc furnace oxidizing slag fine aggregate (E)

Table 2. Mixture proportions of the concretes

Fine aggregate	W/B (%)	S/a (%)	Weight (kg/m^3)						SP (%)
			W	C	FA	SF	S	G	
LFA	20	41	165	578	165	83	534	778	1.0
EFA	20	41	165	578	165	83	710	778	1.0
SFA	20	41	165	578	165	83	536	778	1.0
GFA	20	41	165	578	165	83	534	778	1.0
S+G	20	41	165	578	165	83	268	267 778	1.0
L+E	20	41	165	578	165	83	281	280 778	1.0
L+S	20	41	165	578	165	83	281	354 778	1.0
L+G	20	41	165	578	165	83	281	267 778	1.0

먼저, 콘크리트의 물결합재비(W/B)는 100 MPa를 확보하기 위해 20 %의 1수준, 결합재는 예비실험을 통해 보통 포틀랜드 시멘트(OPC):플라이애시(FA):실리카흄(SF)를 각각 7:2:1로 계획하였고, 여기에 석회암 굵은골재(LA)와 석회암 잔골재(LFA)를 사용한 배합을 토대로 목표 슬럼프 플로 650 ± 50 mm와 공기량 2.0 ± 1.0 %를 만족하도록 잔골재율 및 SP제 사용량을 결정하였으며 골재 종류에 관계없이 동일한 조건을 적용하였다. 단, 본 연구에서는 골재 종류에 관계없이 동일한 배합을 적용함에 따라 골재 종류 별 초기 물성치 변화가 예상되나, 향후 동일한 초기 물성치 확보 조건에서 제반 물성 확보 여부를 판단하기 위하여 골재 종류별 배합을 목표 유동성 및 공기량이 확보되도록 재료량을 설계하는 추가 실험이 필요할 것으로 사료된다.

사용 골재 변수로서 굵은골재는 석회암(이하 LA)을 사용하였고, 잔골재는 암종에 따른 특성을 고찰하기 위하여 석회암 잔골재(이하 LFA), 전기로 산화 슬래그 잔골재(이하 EFA), 세척 바다모래(SFA) 및 화강암 부순 잔골재(이하 GFA)등 총 4종, 잔골재 혼합사용에 따른 특성을 고찰하고자 SFA+GFA(S+G), LFA+EFA(L+E), LFA+SFA(L+S), LFA+GFA(L+G)의 4수준으로 총 8수준을 계획하였다.

2.2 사용재료

본 연구의 사용재료로써 시멘트는 국내 A 사산 보통 포틀랜드 시멘트(밀도 : 3.15 g/m^3, 분말도 : 3 390 cm^2/g)를 사용하였다. 골재로서 LA는 충북 제천산을 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 3과 같다. 잔골재로써 LFA는 충북 제천산, EFA는 국내의 F사에서 제조된 전기로 산화 슬래그 골재, SFA는 충남 공주산, GFA는 충북 제천산을 사용하였으며, 각각 물리적 성질은 Table 4와 같다.

혼화재로서 플라이애시(FA)는 국내산 제품으로 밀도 2.21 g/cm^{3}의 분말도 3 520 cm^2/g을 사용하였고, 실리카퓸(SF)은 노르웨이산 제품으로 밀도 2.2 g/cm^{3}의 분말도 약 160 000 cm^2/g을 사용하였다. SP제는 국내산 D사의 폴리칼본산계를 사용하였다.

Table 3. Physical properties of coarse aggregate

Surface Saturated Density (g/cm^3)	Water absorption (%)	FM	Passing 0.08 mm sieve size (%)	Distribution of grain shape (%)
2.59	0.84	6.19	0.62	59.27

Table 4. Physical properties of fine aggregate

Fine aggregate	Density (g/cm^3)	Water absorption (%)	FM	Passing 0.08 mm sieve size (%)	Distribution of grain shape (%)
LFA	2.69	1.34	2.82	4.9	58.5
EFA	3.40	1.91	3.10	9.3	55.8
SFA	2.57	2.27	2.17	1.5	58.8
GFA	2.56	2.73	3.37	4.6	54.3
S+G	2.57	2.50	2.77	3.05	56.6
L+E	3.05	1.63	2.96	7.1	57.2
L+S	2.63	1.81	2.50	3.20	58.7
L+G	2.63	2.04	3.10	4.75	56.4

2.3 실험 방법

본 연구의 실험 방법으로 골재의 물성 분석은 KS F 2504, 화학성분 분석은 KS L 5120, 입자 특성 분석은 KS F 2502 및 KS F 2511에 의거하여 실시하였다.

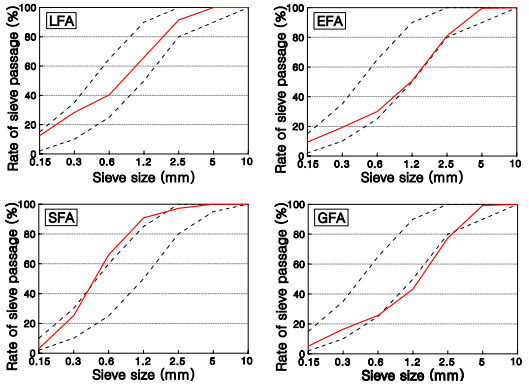
굳지않은 콘크리트의 슬럼프 플로는 KS F 2594, 공기량은 KS F 2421에 의거하여 실시하였고, U-box 충전시험은 U 형 box 시험기의 한쪽에 콘크리트 시료를 채운 후 시험기의 중앙 격리판을 들어 올려 콘크리트 시료가 중앙 철근을 통과하여 반대쪽으로 올라와 멈췄을 때, 양측 간의 높이차를 측정하였고, L-flow는 시험기에 콘크리트를 채워 넣고 경계 차단기를 들어 올려 차단기 내면으로부터 콘크리트 앞부분까지의 거리를 측정하였다. 경화 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수는 KS F 2403과 2438에 의거하여 실시하였고, 자기 수축 길이변화율은 KS F 2586에 의거하여 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

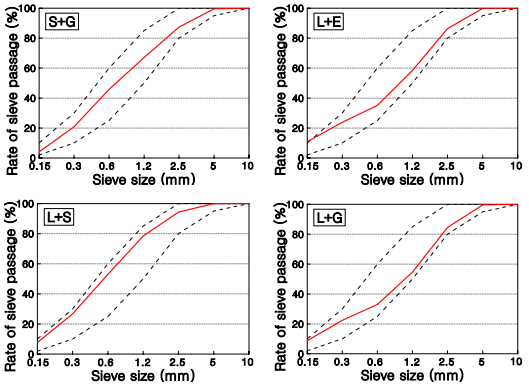
3.1 골재의 입자특성 분석

본 연구에서 사용한 골재의 물리적 특성은 Table 4에 제시되어 있는데, 모든 골재가 공히 KS 표준을 만족하고 있는 것으로 나타났다.

한편, Figure 1은 본 연구에서 사용한 단일잔골재종류 및 혼합잔골재 조합에 따른 골재의 입도 곡선을 나타낸 것으로, 먼저, 단일잔골재의 입도 곡선의 경우 SFA와 GFA가 KS 규격에 벗어나는 것으로 나타났는데, 이는 SFA 경우 바다모래로서 전반적으로 산지특성상 잔 입자가 대부분을 차지하여 나타난 결과로 판단된다. 또한, GFA의 경우 최근 들어 국내 골재시장에서 잔입자로 구



(1) Single fine aggregate



(2) Mixed fine aggregate

Fig. 1. Grading curve depending on different source and mixing types of fine aggregates

성된 SFA가 대량 유통됨에 따라 실무 혼합을 통한 입도 보정을 위해 GFA 제조업체에서 인위적으로 굵은 입자를 다량 함유하도록 제조하여 나타난 결과로 판단된다.

또한 입형 판정 실적률은 KS F 2527에서 53 % 이상으로 규정하고 있는데, 모두 KS 규정치를 상회하는 결과를 나타내었고 GFA에 비해 LFA, EFA, SFA모두 높은 입형 판정 실적률을 나타내고 있어, 동일 배합 조건에서 골재의 구형 형상으로 말미암아 슬럼프 플로가 증가될 것으로 예상되었다.

3.2 잔골재 종류 및 혼합이 굳지않은 콘크리트의 특성에 미치는 영향

3.2.1 슬럼프 플로

Figure 2는 잔골재 단일 및 혼합사용에 따른 슬럼프 플로를 나타낸 것이다. 먼저, 본 연구에서는 배합 설계 시 전술한 바와 같이 LFA 사용 배합에 적용된 SP제량

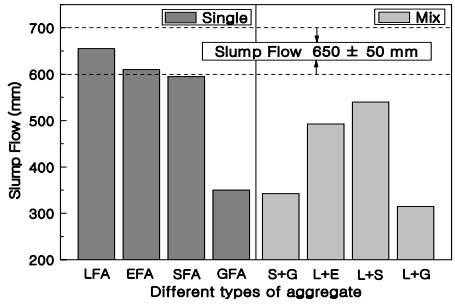


Fig. 2. Slump flow depending on fine aggregate kinds

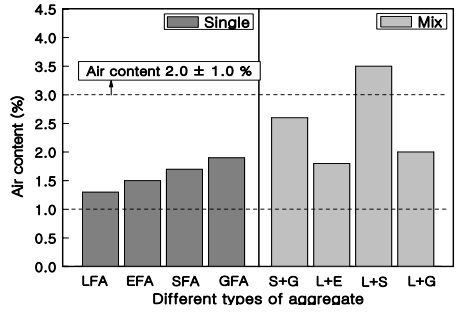


Fig. 3. Air contents depending on fine aggregate kinds

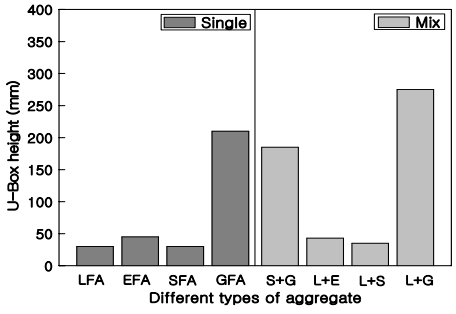


Fig. 4. U-box depending on fine aggregate kinds

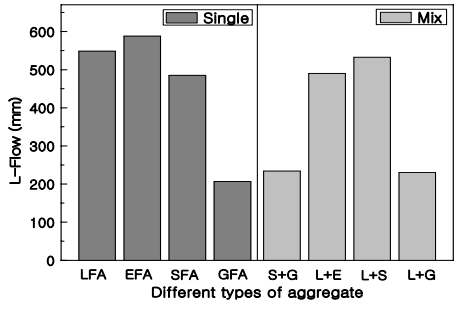


Fig. 5. L-flow depending on fine aggregate kinds

을 기타 골재를 사용한 모든 배합에서 동일하게 적용하였다.

먼저, 혼합 방법 별 슬럼프 플로는 단일잔골재 사용 배합이 혼합잔골재 사용 배합보다 전반적으로 높은 슬럼프 플로를 나타내었는데, 이는 잔골재 2종을 혼합 사용함에 따라 입형이 불량해지고 미립자량이 증가하여 전반적인 점성이 증가 및 슬럼프 플로가 저하된 것으로 판단된다.

단일잔골재 사용 배합의 경우 슬럼프 플로는 LFA와 EFA 사용 배합이 목표 슬럼프 플로 범위인 650±50 mm를 만족하는 것으로 나타났으나, SFA 사용 배합은 목표 범위에 거의 근접하는 것으로 나타났다. 이는 LFA 및 EFA의 경우 골재 자체의 높은 입형 판정 실적률과 양호한 입도분포에 기인하여 목표 값을 만족하였고, SFA의 경우 입도가 다소 불량하지만, 높은 입형 판정 실적률에 기인한 구형 형상으로 목표치에 근접하는 것으로 판단된다. 반면에, GFA 사용 배합에서는 목표 범위를 만족하지 못하였는데, 이는 GFA 파쇄 과정에서 골재의 불량한 입형과 불연속 입도에 기인한 결과로 판단된다.

한편, 혼합골재를 사용한 경우 전술한 바와 같이 모든 배합에서 목표 슬럼프 플로를 만족하지 못하고 있고, 특히 S+G와 L+G의 경우 GFA를 단독 사용한 수준으로 슬럼프 플로가 저하하는 것으로 나타났다. 이와 연관하여 현재 국내 대부분의 레미콘 제조업체에서는 잔골재로서 S+G 조합이 가장 많이 사용되고 있는데, 가장 높은 슬럼프 플로를 갖는 LFA와 비교할 경우 LFA가 185 % 높은 슬럼프 플로를 확보할 수 있어 동일 수준의 슬럼프를 갖도록 배합 설계할 경우 LFA 사용 시 SP제 사용량을 S+G 조합에 비해 대폭 절감할 수 있어 매우 높은 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구 범위에서 목표 슬럼프 플로 확보 측면에서 잔골재를 혼합 사용하는 것은 비경제적일 수 있음에 바람직하지 않을 것으로 사료된다.

3.2.2 공기량

Figure 3은 잔골재 단일 및 혼합사용에 따른 공기량을 나타낸 것이다.

먼저, 단일잔골재 사용 배합에 따른 공기량은 배합설계에 의해 모두 목표 범위인 2.0 ± 1.0 %를 만족하는 것으로 나타났으며, 혼합잔골재 변화에 따른 공기량은 L+S 사용 배합을 제외한 모든 배합에서 목표 범위인 2.0 ± 1.0 %를 만족하는 것으로 나타났다. 특히 L+S 사용 배합의 경우 타 배합보다 높은 공기량을 나타내었는데, 이는 입자가 비교적 고운 SFA의 특성으로 인해 콘크리트의 점성이 높아짐에 따라 공기량이 증가한 것으로 판단된다.

3.2.3 U-box 충전 시험

Figure 4는 잔골재 단일 및 혼합사용에 따른 배합별 U-box 충전 높이차를 나타낸 것이다.

U-box 충전 높이차는 전반적으로 슬럼프 플로와 유사한 경향을 나타내었으며, GFA가 포함된 배합을 제외한 모든 배합에서 30~40 mm의 양호한 충전성능을 나타내었다. 하지만 GFA가 포함된 배합에서는 180~280 mm의 다소 낮은 충전성능을 나타내었는데, 이는 GFA의 거친 입형과 불연속 입도분포에 기인하여 유동성이 감소한 결과로 판단되며, GFA를 잔골재로 단일 또는 혼합 사용할 시 유동성 저하 및 충전성능 저하가 예상되어 골재 자체의 품질관리에 주의가 필요할 것으로 판단된다.

3.2.4 L-flow

Figure 5는 잔골재 단일 및 혼합사용에 따른 L-flow를 나타낸 것이다.

L-flow는 전반적으로 슬럼프 플로와 유사한 경향을 나타내었으며, EFA 사용 배합의 경우 가장 높은 L-flow를 나타내었다. 이는 EFA 사용 배합의 점성 증가와 EFA 골재 자체의 높은 밀도로 인한 높은 단위 용적 질량에 기인하여 높은 일 방향 변형량이 측정된 것으로 판단된다. 또한 혼합잔골재 사용 배합 중에서는 L+E 및 L+S 사용 배합이 다소 높은 L-flow를 나타내었다. 반면, GFA가 포함된 배합의 경우 타 배합보다 현저히 낮은 L-flow를 나타내었는데, 이는 슬럼프 플로의 경우와 같이 GFA의 불량한 입형과 낮은 입형 판정 실적률에 기인한 것으로 판단된다.

3.3 잔골재 종류 및 혼합이 경화 콘크리트의 특성에 미치는 영향

3.3.1 압축강도

Figure 6은 잔골재 단일 및 혼합사용에 따른 재령별 압축강도를 나타낸 것이다.

먼저, 혼합 방법에 따른 재령 1일 압축강도는 잔골재 종류 변화에 상관없이 모든 배합에서 약 31~36 MPa의

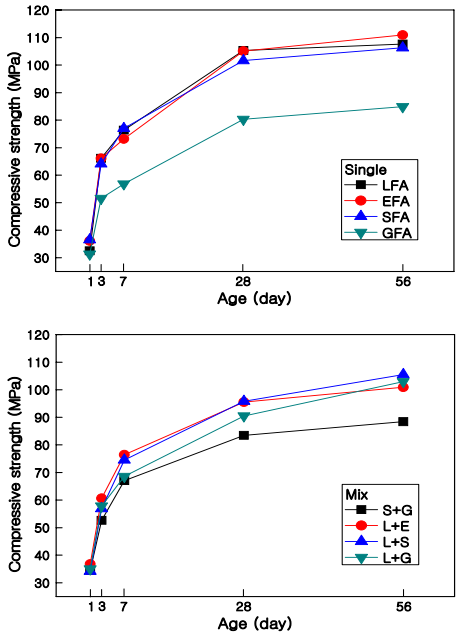


Fig. 6. Compressive strength depending on fine aggregate kinds and mixing methods

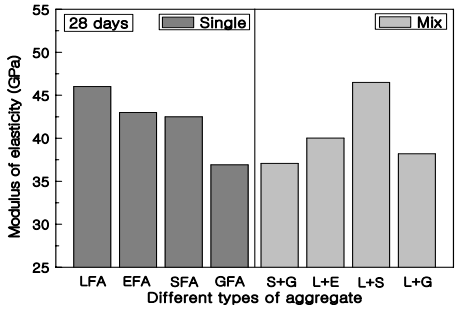


Fig. 7. Modulus of elasticity depending on fine aggregate kinds

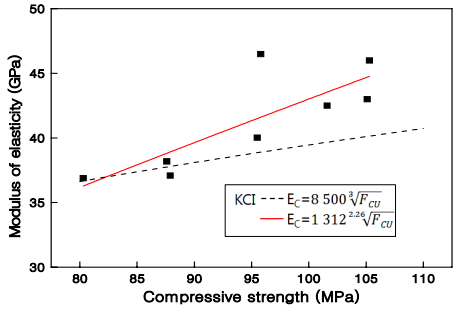


Fig. 8. Relationship between compressive strength and modulus of elasticity depending on various fine aggregate type

압축강도를 나타내었고, 재령 3일 압축강도는 GFA 사용 배합과 S+G 사용 배합이 다소 압축강도가 감소하는 것으로 나타났으나, 모든 배합에서 60 MPa 이상의 압축강도를 나타내었다. 재령 28일 압축강도의 경우 단일잔골재 배합 중 EFA 및 LFA를 사용한 경우에서 가장 높게 나타나고 100 MPa를 상회하는 것으로 나타났는데, 이는 Lee 등에 의하면 EFA의 경우 EFA에 존재하는 free-CaO가 콘크리트의 천 이대에서 SF 중의 Si 성분과 반응하여 C-S-H 수화물을 생성시켜 잔골재와 페이스트 간의 부착력을 개선하여 강도가 향상된다고 보고하고 있어, 이에 의한 영향으로 판단된다[4]. 또한, LFA의 경우 LFA 자체적인 압축강도가 100~120 MPa 정도로 높고 탄성계수도 60~80 GPa 정도로 높게 나타나는 것으로 알려져 있어 골재 자체의 높은 탄성계수와 압축강도에 기인하여 높은 압축강도를 발휘하는 것으로 사료된다. 반면에 GFA 배합의 경우 28일 압축강도가 80 MPa 수준에 머물고 있음을 알 수 있는데, 이는 GFA 생산과정 중 파쇄공정을 거치면서 GFA 자체의 미세 균열 등으로 인해 골재 자체의 강도가 낮아져 여타 골재를 사용한 경우보다 강도 발현이 이루어지지 않은 것으로 판단되며 기존의 연구결과들과 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있었다[5-6].

또한, 혼합잔골재 배합 중 L+E 및 L+S 사용 배합의 28일 압축강도는 약 95 MPa로 나타났는데, 이는 전술한 바와 같이 LFA의 높은 역학적 특성 및 EFA의 free-CaO 성분에 의한 추가 수화반응의 조합으로 높은 강도를 확보한 것으로 판단된다. 반면에 GFA가 포함된 S+G배합의 경우 여타보다 7 %정도 낮은 약 87 MPa을 발휘하는 것으로 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 GFA의 제조상 미세균열 등의 결함으로 인해 여타 골재가 혼합되더라도 강도에 긍정적인 기여를 하지 못해 나타난 결과로 사료된다.

3.3.2 탄성계수

Figure 7은 잔골재 단일 및 혼합사용에 따른 재령 28일 탄성계수를 나타낸 것이고 Figure 8은 동일 재령의 압축강도와 탄성계수를 상호 비교한 것이다.

먼저, 혼합 방법에 따른 재령 28일 탄성계수는 전반적으로 단일잔골재 사용 배합이 혼합잔골재 사용 배합보다 높은 탄성계수를 나타내었다. 단일골재 사용 배합의 경우 LFA 배합이 가장 높은 탄성계수를 나타내었는데, 이

는 LFA 자체가 60~80 GPa 수준의 높은 탄성계수를 갖고 있어 높은 탄성계수를 갖는 골재를 사용한 콘크리트는 콘크리트의 탄성계수도 높게 나타난다는 Alexander 등의 연구결과와 유사한 경향으로 판단된다[7]. 또한, 콘크리트의 압축강도가 가장 낮게 나타난 GFA 사용 배합은 여타보다 15~20 % 정도 낮은 탄성계수를 확보하고 있음을 확인할 수 있었다. 혼합잔골재 변화에 따른 재령 28일 탄성계수 또한 전반적으로 혼합골재 조합별 압축강도와 유사한 경향을 나타내었으며, 압축강도 발현율이 가장 높은 L+S 사용 배합이 혼합잔골재 사용 배합 중 가장 높은 탄성계수를 나타내, 압축강도와 탄성계수는 비례한다는 기존 문헌의 경향과 유사한 결과를 보였다[7].

3.3.2 자기수축

Figure 9는 잔골재 단일 및 혼합사용 및 재령 경과에 따른 자기 수축 길이변화율 나타낸 것이다. 자기수축에 미치는 지배적 영향요인은 시멘트 량의 대소, 물-결합재비 등을 들 수 있는데, 본 연구의 범위에서는 시멘트의 량을 골재 조합에 관계없이 동일하게 유지한 조건에서 실험을 진행하였는데, 골재 종류별로도 자기 수축에 다소 차이가 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 잔골재 단일 사용 조건에서는 GFA를 사용한 배합에서 재령 28일에서 600×10^{-6} 정도의 수축량을 보여 가장 높은 수축을 보였으나, EFA를 사용한 경우 400×10^{-6}정도로서 GFA대비 35 %정도 자기 수축량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 EFA의 경우 제조과정에서 free-CaO와 free-MgO 성분이 포함되는데 이 성분이 H_2O와 반응하여 체적팽창으로 수축이 감소하여 나타난 현상으로 판단된다[4].

또한, 혼합잔골재 사용의 경우 LFA와 EFA를 혼합한 L+E 배합이 가장 낮은 자기 수축량을 보였는데, 이는 전술한 바와 같이 EFA의 free-CaO에 의한 팽창과 LFA 중의 $CaCO_3$가 시멘트의 C_3A와 반응하는 모노칼보네이트 반응에 기인한[8] 팽창의 복합적인 효과로 수축이 감소한 것으로 판단된다. 반면에 S+G 배합의 경우 가장 높은 자기 수축량을 나타내었다. 따라서 초고강도 콘크리트 제조 시 중요하게 고려되어야 하는 자기 수축 문제를 잔골재로서 EFA나 L+E 혼합잔골재를 사용할 경우 자기 수축 저감에 긍정적으로 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

이상을 종합하면, 본 연구 범위에서 LFA의 양호한 입

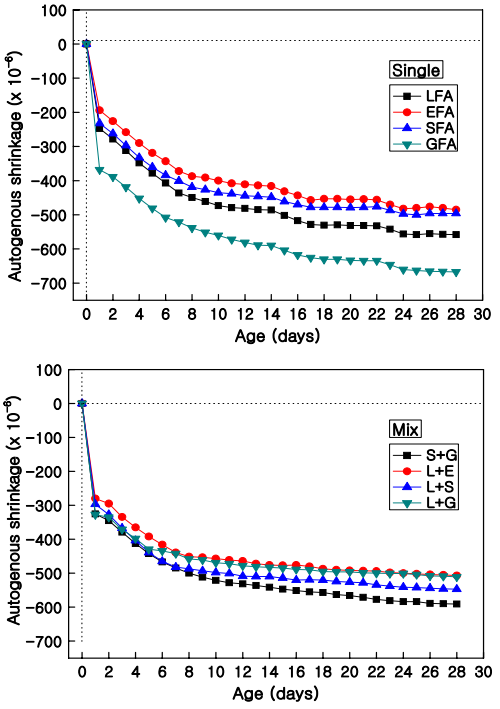


Fig. 9. Autogenous shrinkage with age depending on fine aggregate types

자특성으로 인해 단독 사용 시 유동성 개선을 통한 SP제 사용량을 감소시켜 경제성을 추구할 수 있을 것으로 판단되며, 이러한 조건하에서 LFA의 높은 탄성계수 및 강도로 인해 초고강도 콘크리트의 목표 압축강도 및 탄성계수 확보에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, EFA 단독 사용의 경우도 양호한 유동성 및 free-CaO의 영향에 기인한 강도 향상 및 자기 수축 저감 효과로 경제적 배합의 성취가 가능할 것으로 판단된다. L+E(LFA+EFA)의 조합은 유동성 저하가 다소 나타나고 있으나, 전반적인 강도 및 자기 수축 특성이 양호하게 나타나고 있어 두 잔골재 간의 혼합 비율을 조정하여 유동성을 개선할 경우 긍정적 효과가 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 100 MPa급 초고강도 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 잔골재의 종류 및 혼합방법의 영향을 실험적으로 고찰하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 슬럼프 플로는 단일잔골재 배합이 전반적으로 혼합잔골재 사용 배합보다 더 높은 유동성을 나타내었고, LFA 및 EFA가 우수한 입자특성에 기인하여 높은 유동성을 나타낸 반면에, GFA를 포함한 배합에서는 유동성이 현저히 저하하는 것으로 나타났다. 특히, LFA 사용 배합은 동일 SP제 사용량 조건에서 여타 잔골재 종류 및 혼합 방법에 비해 5~185 % 정도의 높은 슬럼프 플로를 확보할 수 있어, 배합 시 경제성 성취에 매우 유리하다고 판단된다.
2) U-box 충전 결과는 슬럼프 플로와 유사한 경향으로 단일잔골재 배합에서 LFA 및 EFA 사용 배합, 혼합잔골재 사용 배합에서 L+E 배합 L+S 배합이 양호한 충전성을 나타내었으며, GFA 사용 배합의 경우 현저히 낮은 충전성을 나타내었다. L-flow는 U-box와 유사한 경향을 나타내었지만, EFA의 배합의 경우 골재 특성으로 인해 높은 일 방향 변형량이 측정되었다.
3) 압축강도는 단일잔골재 배합의 경우 재령 28일에서 GFA를 제외한 배합에서 모두 약 100 MPa 이상을 확보하였으며, EFA 사용 배합은 free- CaO의 C-S-H 형성 반응으로 인해 여타 골재 사용 배합보다 가장 높은 압축강도를 확보하였다. 그러나, 혼합잔골재 사용 배합은 모든 조건에서 재령 28일에서 100 MPa를 만족하지 못하였다.
4) 자기 수축은 잔골재 종류 변화에 따라서도 자기 수축량에 차이를 보였는데, 단일잔골재 중 LFA 배합과 EFA 배합이 낮은 자기 수축을 나타내었고, 혼합잔골재 사용 배합의 경우 LFA가 포함된 L+E 배합이 낮은 자기 수축을 보였는데, 이는 LFA의 모노칼보알루미네이트 반응과 EFA의 free-CaO의 팽창반응에 의한 영향으로 사료된다.

이상을 종합하면 LFA를 사용한 초고강도 콘크리트는 유동성과 압축강도 및 자기 수축 저감에 뛰어난 성능을 나타내었는데, 이는 골재 자체의 우수한 입자특성 및 역학적 성능에 기인한 것으로 판단된다. 또한 LFA를 사용함에 따라 여타 잔골재 배합에 비해 동일 유동성 확보를 위한 고가의 고성능 감수제 사용량도 저감이 가능할 것으로 사료된다.

따라서, 100 MPa급 초고강도 콘크리트의 경제적 제조를 위한 최적 골재 조합으로서 석회암 굵은골재 사용 시 LFA 사용 배합이 가장 적절할 것으로 판단된다.

References

[1] G. T. Go, G. S. Ryu, G. S. Park, B. S. Kim, Development of high performance construction material : development of hybrid bridge system appling FRP and FRC, Korea institute of construction transportation technology evaluation and planning, 2010.

[2] M. Alkaysi, S. E. Tawil, Z. Liu, W. Hansen, "Effect of Silica Powder and Cement Type on Durability of Ultra High Performance Concrete", Cement and Concrete Composites, Vol.66, pp.47~56, 2016.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.005

[3] W. Li, Z. Huang, F. Cao, Z. Sun, S. P. Shah, "Effects of Nano-Silica and Nano Limestone on Flowability and Mechanical Properties of Ultra- High-Performance Concrete Matrix, Construction and Building Materials, Vol.95, pp.366~374, 2015.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.137

[4] S. H. Lee, D. S. Lim, S. H. Lee, J. H. Lee, “Mechanism of Strength Development in Ultra High Strength Concrete Using the Electric Arc Furnace Oxidizing Slag as Fine Aggregate”, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 25, No. 1, pp. 3~9, 2013.
DOI: http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2013.25.1.003

[5] C. G. Han, G. W. Yoon, “An Experimental Study on Properties and the Mixing Design of Crushed Sand Concrete”, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 12, No. 9, pp. 263~268, 1996.

[6] C. G. Han, H. Y. Bahn, G. W. Yoon, J. K. Lee, “An Experimental Study on the Properties of the High Strength Concrete with Crushed Sand”, Vol. 13, No. 1, pp. 185~190, 1997.

[7] M. G. Alexander, S. Mindess, Aggregate in concrete, Taylor & Frances, 2005

[8] G. Luis, M. Thomas, L. Karen, S. Masha, W Lars, "Hydration States of AFm Cement Phases", Cement and Concrete Research, Vol. 73, pp. 143~157, 2014.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.011

한 민 철(Min-Cheol Han) **[정회원]**

- 1998년 2월 : 청주대학교 대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 청주대학교 대학원 건축공학과 (공학박사)
- 2002년 3월 ~ 2004년 2월 : 중부대학교 건축공학과 전임강사
- 2004년 3월 ~ 2006년 2월 : ㈜건설과 환경 기술개발부 선임연구원
- 2006년 3월 ~ 현재 : 청주대학교 건축공학과 부교수

<관심분야>
건축시공, 건축재료, 건설관리

이 홍 규(Hong-Kyu Lee) **[정회원]**

- 2016년 2월 : 청주대학교 대학원 건축공학과 (공학석사)

<관심분야>
건축시공, 건축재료