

순환 석회암골재를 사용한 초고강도 콘크리트의 특성

Properties of Ultra High Strength Concrete Using Recycled Limestone Aggregates



한민철 Min-Cheol Han
청주대학교 건축공학과 부교수
E-mail : twhan@cju.ac.kr



현승용 Seung-Yong Hyun
청주대학교 건축공학과 석사과정
E-mail : yc0933@naver.com



문병룡 Byeong-Yong Moon
삼표산업기술연구소 연구원
E-mail : mby4177@naver.com

1. 서언

전 세계적으로 건설구조재료로서 가장 많은 비중을 차지하고 있는 콘크리트는 초고층화 및 대형화되는 구조물의 충분한 내력 확보를 위해 기존 콘크리트에 비해 압축강도가 월등히 높은 100MPa 수준의 초고강도, 구내구성 및 고유동성을 동시에 갖는 초고강도 콘크리트를 등장할 것으로 기대되었다.

특히, 기존 콘크리트 대비 4배 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.

100MPa 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 경제적인 제조와 관련하여 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 관련하여 골재의 입형 및 입도가 양호하며 높은 탄성을 갖는 등 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 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 일례로 두바이 버즈칼리퍼 초고층 프로젝트나, 잠실 L타워 등의 초고층 프로젝트에 전술한 요구성능을 만족하기 위하여 경질의 석회암골재를 사용하여 소요 역학적 성능의 확보 및 경제성을 추구한 사례가 보고된 바 있다.

따라서 본고에서는 100MPa급 초고강도 콘크리트의 경제적 제조를 위한 방안으로 순환

석회암 굵은 골재와 잔골재를 사용하여 초고강도 콘크리트를 제조하고 이들이 초고강도 콘크리트의 제반 공학적 특성에 미치는 영향을 고찰한 필자 연구진의 연구결과를 소개하고자 한다.

2. 순환 석회암골재의 특성

2.1 석회암

석회암은 탄산칼슘(CaCO_3)을 주성분으로 하는 퇴적암으로서 화학적 침전이나 유기적 또는 생화학적 작용에 의해 생성된 암석을 말하며 경우에 따라 백운석과 아라고나이트, 석영, 장석류, 운모류, 점토광물 등을 수반하지만 일반적인 주구성광물은 방해석으로, 결정입자가 육안으로 확인되기 어려울 정도로 입경이 작다.

한편, 시멘트 생산에 있어 주원료로 사용되는 석회암은 전체 구성 원료 중 85% 이상을 차지하며, 이러한 석회암은 저품위 광석이 사용되는 시멘트 및 골재부터 고품위로 사용되는 석회제조 분야에 이르기까지 성분구성에 따라 다양하게 사용된다. 이러한 석회암의 품위를 구분 짓는 화학성분상의 주요 성분은 CaCO_3 함량을 들 수 있다. 그런데 이러한 석회석 중 시멘트 품질 및 경제성 측면에서 석회암 품위가 CaCO_3 함량

기준으로 75% 이하, MgO 함량 2% 이상인 마그네시아 석회암은 시멘트 제조과정에서 저품위로 여겨져 폐석으로 매립되어 버려지고 있는 상황이다.

2.2 순환석회암을 이용한 골재

석회암을 시멘트용 원료로 사용하는 과정에서 MgO 함량이 너무 높거나, 일부 실리카 함량이 너무 높고 CaCO_3 함량이 낮은 석회암의 경우 순도 부족으로 인한 시멘트 품질저하를 유발하거나 분쇄과정에서 효율이 저하되는 문제가 발생하기 때문에 시멘트 제조용 석회암으로 부적당하다. 따라서 일부 시멘트 제조사의 경우 이를 폐기하거나 골재자원으로서 재활용하는 사례가 증가하고 있다. 그러나, 이러한 저순도 혹은 고실리카질 석회암(이하 순환 석회암)은 비록 시멘트 제조용으로 사용할 수 없으나, 제반 품질이 골재의 품질규격을 만족하고 탄성계수 및 강도가 높아 콘크리트용 골재로서 적절하다고 판단된다.

2.2.1 저순도 석회암 골재

전술한 바와 같이 CaCO_3 함량이 75% 이하, MgO 함량이 2% 이상인 마그네시아 석회암 등을 저순도 석회암 골재라고 하며, 대부분 폐석으로 매립되어 버려지고 있다. 이러한 저순도 석회암은 경질이면서, 파쇄시 입형이 구형으로 강도 및 내구성

[표 1] 석회석 돌로마이트계 암석의 화학조성에 의한 분류 예(단위 %)¹⁾

석회석(돌로마이트)의 함유량		암석명	CaO	MgO	CO ₂
100	(0)	석회석	56.0		44.0
95	(5)	마그네슘 석회석	54.8	1.0	44.2
90	(10)		53.6	2.0	44.4
50	(50)	돌로마이트질 석회석	43.7	10.5	45.8
		석회질 돌로마이트			
20	(80)	돌로마이트	35.9	17.2	47.0
10	(90)	고품위 돌로마이트	33.1	19.5	47.4
0	(100)		30.4	21.9	47.7

이 콘크리트용 골재와 유사한 수준을 보임에 따라 골재자원으로서 재활용할 경우 효과가 클 것으로 판단된다. ([표 2]참조)

2.2.2 고실리카질 순환석회암 골재

일부이지만, CaCO₃ 함량이 낮고 SiO₂ 함량이 높은 고실리카질 석회암이 시멘트 제조 과정 중 사용되는 경우가 있는데, 이러한 고실리카질 석회암은 자체의 강도 및 내구성이 커서 분쇄가 곤란한 문제가 대두됨에 따라 공정 밖으로 배출되어 산업 폐기물로 관리되고 있다(<그림 1> 참조). 그런데, 이러한 고실

리카질 석회암의 경우도 콘크리트용 골재자원으로서 제반품질을 만족하고 탄성 및 강도가 높아 그 활용성이 기대된다.

3. 순환 석회암골재를 사용한 100 MPa급 초고강도 콘크리트의 특성

3.1 개요 및 실험계획

본 절에서는 순환석회암 잔골재 및 굵은 골재를 사용하여 100MPa급 초고강도 콘크리트를 제조하기 위한 일련의 연구 결과를 소개하고자 한다.

100MPa 강도를 확보하기 위하여 물-결합재비는 15~30%의 4수준으로 결정하였고, 특히, 실험 중 굵은 순환석회암 굵은골재 및 잔골재의 영향을 고찰하기 위하여 굵은골재의 종류를 순환 석회암(LA 또는 RLA), 화강암(GA), 고실리카질 석회암(HSRLA) 및 현무암(BA)의 4종류를 선정하였다. 또한, 잔골재의 경우 순환석회암 잔골재의 단독사용 및 이중골재와 혼합사용에 따른 특성을 검토하기 위해 세척사(SFA), 순환 석회암 부순 잔골재(LFA), 전기로 산화 슬래그 잔골재(EFA) 및 화강암 부순 잔골재(GFA)를 선정하였다.

혼합골재 조합으로서 세척사와 화강암 부순잔골재(S+G), 순환 석회암 부순 잔골재와 전기로 산화 슬래그 잔골재(L+E), 순환 석회암 부순 잔골재와 세척사(L+S) 및 순환 석회암 부순 잔골재와 화강암 부순 잔골재(L+G)의 8종류를 선정하여 초고강도 콘크리트의 배합 및 물성을 고찰하고자 하였다. 각 골재의 외형 및 물리적 성질은 [표 3] 및 <그림 2>에 제시되어 있다.

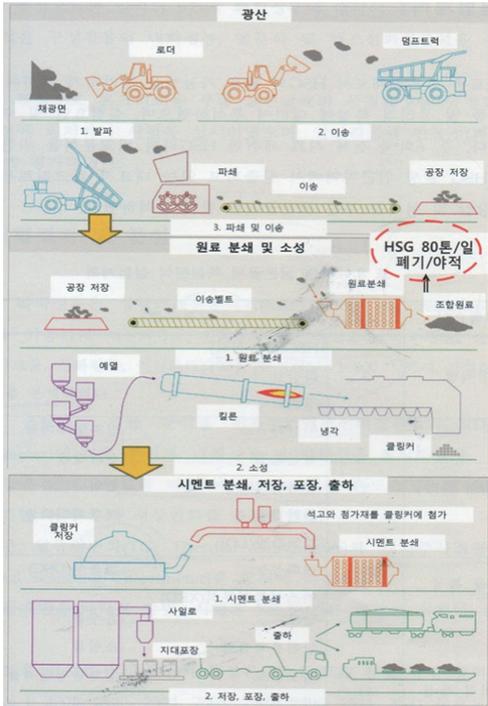


그림 1. 고실리카질 석회암의 발생과정²⁾

[표 2] 저순도 석회암 골재의 품질특성¹⁾

품질항목	진밀도(g/cm ³)	흡수율(%)	안정성	마모율(%)	세척시손실율(%)	입형판정실적률(%)
굵은골재	2.66~2.74	0.17~1.09	0.3~8.7	15.3~27.2	0.10~2.00	57.5~68.5
잔골재	2.62~2.69	0.60~1.84	1.0~3.8		2.6~14.3	52.9~57.5
품질항목	연석률	점도함량	실적률	조립률	단위용적질량(t/m ³)	밀도1.95용액에 침수율
굵은골재	0~0.6	0~0.5	57.7~63.6	6.39~6.97	1.52~1.75	0~0.8
잔골재	-	0.1~1.0	62.4~74.0	2.56~3.59	1.63~1.90	0~0.2

3.2 순환 석회암 굵은골재 사용 초고강도 콘크리트의 특성

3.2.1 굳지않은 콘크리트의 특성

순환굵은골재를 포함한 골재 종류 및 W/B 변화에 따른 슬럼프 플로를 <그림 3>에 나타내었다. 먼저, 굵은 골재 특성이 콘크리트의 유동성에 미치는 영향을 검토하고자 W/B별로 단위수량 및 고성능 감수제 사용량을 고정하도록 배합설계 하

였는데, 측정결과 골재 종류에 관계없이 콘크리트는 모두 목표 슬럼프 플로 범위에 만족하는 것으로 나타났다.

골재종류별로는 BA를 사용한 경우, 여타 골재를 사용한 경우에 비하여 동일 고성능 감수제 사용량조건에서 10% 이상 높은 유동성을 발휘하는 것으로 나타났다. 아울러 RLA 및 HSRLA를 사용한 경우도 W/B에 따라 약간의 차이는 있으나, GA를 사용한 경우보다 높은 슬럼프 플로값을 갖는 것으로 나

[표 3] 굵은 골재 및 잔골재의 물리적 특성

골재	구분	밀도 (g/cm ³)	흡수율 (%)	조립률	0.08 mm체 통과량(%)	입형판정 실적률(%)
굵은골재	GA	2.67	0.68	6.26	0.08	57.4
	LA or RLA	2.59	0.84	6.19	0.62	59.3
	HSRLA	2.71	0.89	6.05	0.50	59.6
	BA	2.58	2.12	6.26	0.34	61.1
잔골재 (단독)	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
잔골재 (혼합)	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

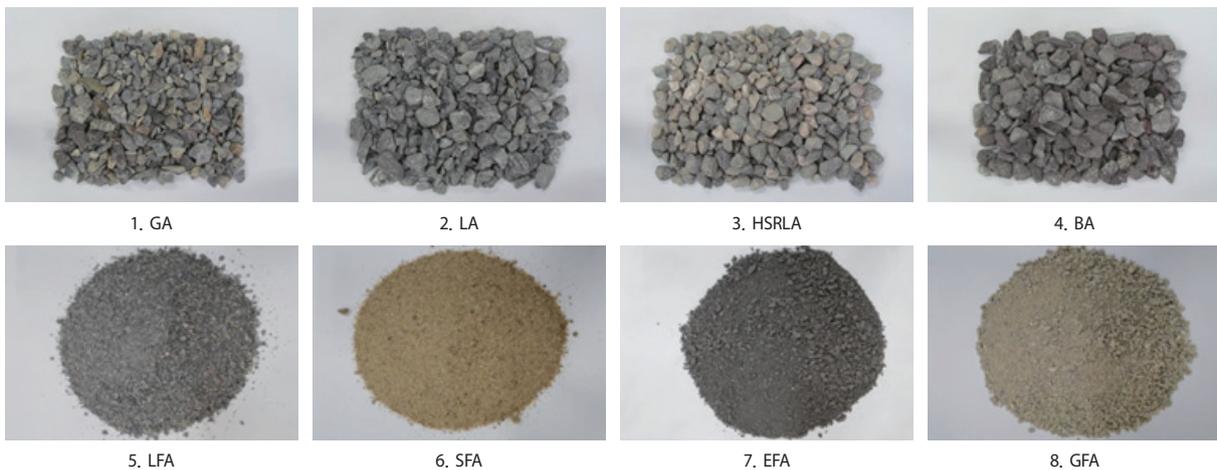


그림 2. 잔·굵은골재 종류

타났다. 이는 BA와 석회압계열의 RLA 및 HSRLA 골재가 높은 입형관정실적률에 의한 구형형상 및 골재자체의 매끄러운 표면형상에 기인한 결과로 판단된다.

<그림 4>는 W/B 변화에 따른 공기량을 나타낸 것으로 공기량은 W/B 변화와 골재변화에는 관계없이 배합설계에 의해 모두 목표 범위인 $2.0 \pm 1.0\%$ 를 만족하였다.

3.2.2 굵은 골재의 변화에 따른 경화 콘크리트의 특성

굵은 골재종류별 재령 28일 압축강도를 <그림 5>에 나타내었다. 먼저, 골재 종류에 따른 압축강도는 재령 28일에서 RLA를 사용한 경우가 빠른 강도발현으로 인해 여타의 골재와 동등 혹은 상회하는 강도를 발휘하는 것으로 나타났다. RLA의 이러한 경향은 탄성계수가 높은 골재를 사용할 경우 초기강도는 저하하나, 이후 강도발현속도가 빨라져 여타 골재를 사용

한 경우와 동등수준이상의 강도를 발현한다는 연구결과와 유사한 경향을 보였다. HSRLA를 사용한 경우도 RLA와 유사한 경향을 보임을 알 수 있었다.

한편, BA를 사용한 경우 W/B 20~30% 범위에서는 28일 강도가 타 골재를 사용한 경우보다 비교적 작게 나타났는데, 이는 BA 자체의 낮은 압축강도(100MPa 이하로 보고됨)와 탄성적 성질에 기인하여 전체적인 강도가 낮게 나타난 것으로 판단되는데, 이러한 경향은 Hans 및 Kilic의 연구결과와 유사한 것임을 알 수 있다. 아울러 압축강도 시험 후 공시체의 파괴형상을 육안 관찰한 결과, 100MPa이하의 조건에서는 계면 파괴 혹은 골재균열 등이 확인되었다. 또한, 초기 낮은 압축강도영역에서는 BA, HSRLA를 사용한 경우가 높게 나타나고 있으나, 80MPa 영역에서는 RLA 및 HSRLA를 사용한 경우가 다소 높게 나타남을 확인 할 수 있었다.

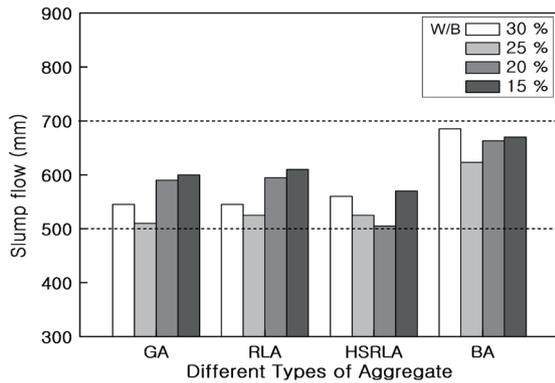


그림 3. 골재 종류 및 W/B 변화에 따른 슬럼프 플로

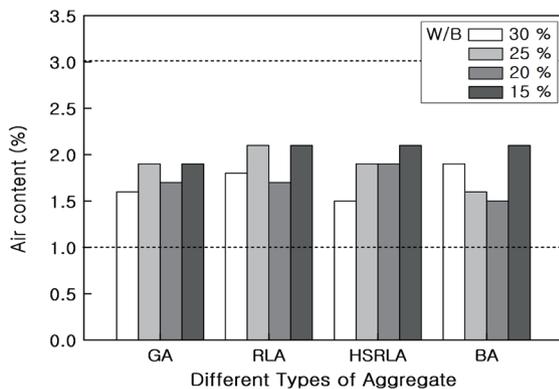


그림 4. 골재 종류 및 W/B 변화에 따른 공기량

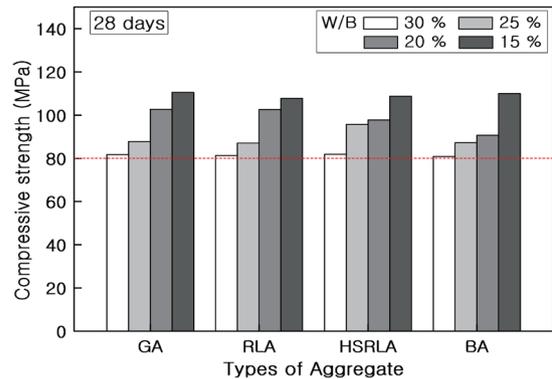


그림 5. 골재종류별 W/B 변화에 따른 재령 28일 압축강도

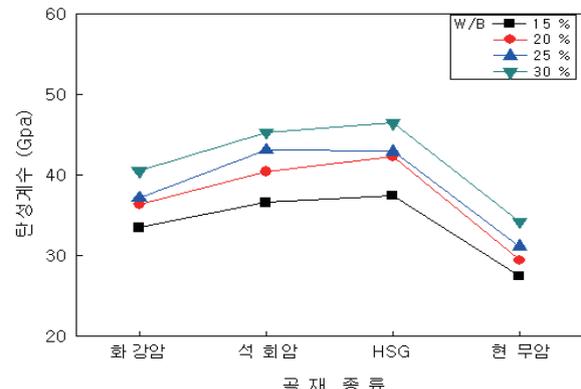


그림 6. 골재종류별 콘크리트의 탄성계수(28일)

골재종류별 초고강도 콘크리트의 탄성계수 변화를 <그림 6>에 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 순환석회암 및 고실리카질 순환 석회암을 사용한 경우가 여타의 골재를 사용한 콘크리트의 탄성계수보다 높게 나타남을 확인 할 수 있었다.

한편, 석회암 골재의 경우 높은 탄성계수 등에 의한 효과로 고강도 콘크리트의 자기수축을 감소시킬 수 있다는 일련의 연구보고가 있다. 본 연구에서 수행한 결과, <그림 7>에서 나타남과 같이 석회암 골재 계열의 RLA를 사용한 경우, 자기수축이 가장 낮게 나타났는데, GA에 비해 RLA가 약 20.7% 저감되는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 골재의 종류가 자기수축에 미치는 영향을 고찰하고자 일반적으로 자기수축에 영향을 미치는 주된 요인으로 알려진 W/B, 단위시멘트량, 결합재 종류를 고정한 조건에서 실험을 진행하였다. 그런데 전술한 바와 같이 RLA를 사용한 경우에서 자기수축이 GA 대비하여 감소되는 것으로 나타났는데, 결국 이는 골재의 영향으

로 판단되며 RLA의 CaCO_3 성분이 시멘트의 C_3A 와 반응하여 모노 칼보 알루미늄에이트를 생성하는데 이때 발생하는 팽창으로 인해 수축저감을 일으키는 것으로 사료된다.

3.3 순환 석회암 잔골재 사용 초고강도 콘크리트의 특성

3.3.1 슬럼프 플로

순환석회암을 포함한 잔골재를 단일 및 혼합사용 했을 경우 슬럼프 플로를 <그림 8>에 나타낸 것이다. 먼저, 배합 설계 시 전술한 바와 같이 LFA 사용배합에 적용된 SP제량을 기타 골재를 사용한 모든 배합에서 동일하게 적용하였다. 혼합방법별 슬럼프 플로는 단일잔골재 사용배합이 혼합잔골재 사용배합보다 전반적으로 높은 슬럼프 플로를 나타내었다. 단일잔골재 사용배합의 경우, 슬럼프 플로는 LFA와 EFA 사용 배합이 목표슬럼프 플로 범위를 만족하는 것으로 나타났으나, SFA 사용배합은 목표범위에 거의 근접하는 것으로 나타났다. 반면에, GFA 사용 배합에서는 목표 범위를 만족하지 못하였는데, 이는 GFA 파쇄과정에서 골재의 불량한 입형과 불연속 입도에 기인한 결과로 판단된다.

한편, 혼합골재를 사용한 경우 전술한 바와 같이 모든 배합에서 목표 슬럼프플로를 만족하지 못하고 있고, 특히 S+G와 L+G의 경우 GFA를 단독 사용한 수준으로 슬럼프플로가 저하하는 것을 알 수 있었다.

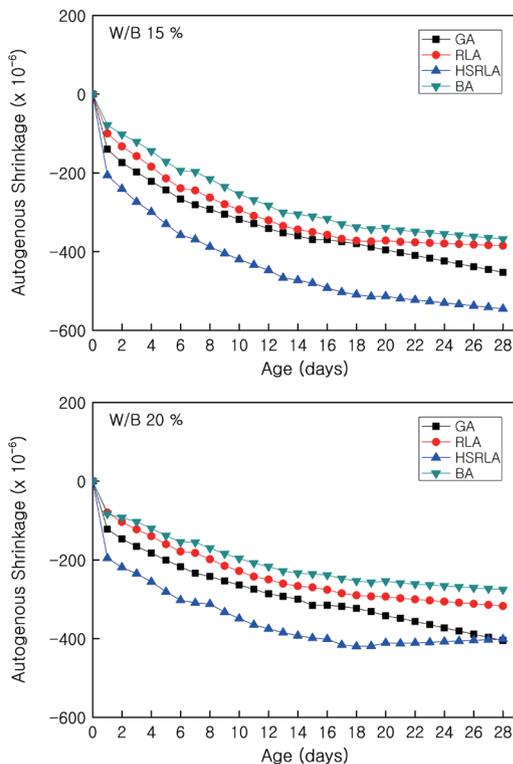


그림 7. 굵은골재 종류별 자기수축 길이변화율

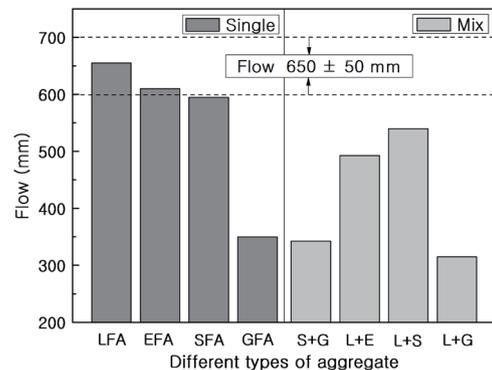


그림 8. 잔골재 단일 및 혼합사용에 따른 슬럼프 플로

3.3.2 압축강도 및 자기수축

〈그림 9〉는 잔골재 단일 및 혼합사용에 따른 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. 먼저, 재령 28일 압축강도의 경우 단일잔골재 배합 중 EFA 및 LFA를 사용한 경우에서 가장 높게 나타났고, 100 MPa를 상회하였다. 이는 먼저, EFA의 경우 EFA에 존재하는 free-CaO가 결합재중 SF중의 SiO₂ 성분과 반응하여 C-S-H 수화물을 생성시켜 잔골재와 페이스트간의 부착력을 개선하여 강도가 향상된 것으로 판단된다. LFA의 경우에는 LFA 자체의 높은 탄성계수에 기인하여 높은 압축강도를 발휘하는 것으로 사료된다.

반면에 GFA 배합의 경우 28일 압축강도가 80MPa 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 낮은 압축강도를 나타내는 것으로 판단되며, 기존의 연구결과들과 유사한 경향

을 보임을 확인할 수 있었다.

또한, 혼합잔골재 배합 중 L+E 및 L+S 사용 배합의 28일 압축강도는 약 95 MPa로 나타났는데, 이는 전술한바와 같이 EFA의 free-CaO성분에 의한 추가 수화반응의 조합으로 높은 강도를 확보한 것으로 판단된다. 반면에 GFA가 포함된 S+G배합의 경우 여타보다 7% 정도 낮은 약 87MPa를 발휘하는 것을 확인할 수 있었다.

잔골재 단일 및 혼합사용에 따른 자기수축 길이변화율을 〈그림 9〉에 나타내었다. 잔골재 단일사용 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 자기수축량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 EFA의 경우 free-CaO성분이 체적팽창을 일으켜 그에 따른 자기수축량이 감소한 것으로 판단된다.

또한, 혼합잔골재 사용의 경우 LFA와 EFA를 혼합한 L+E

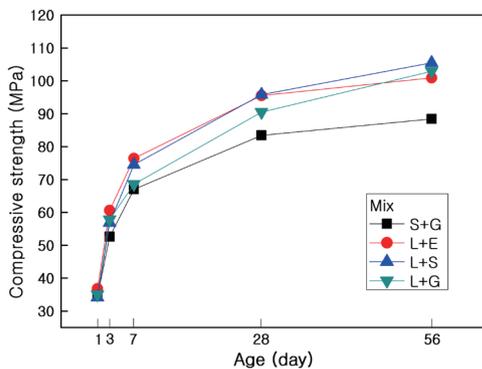
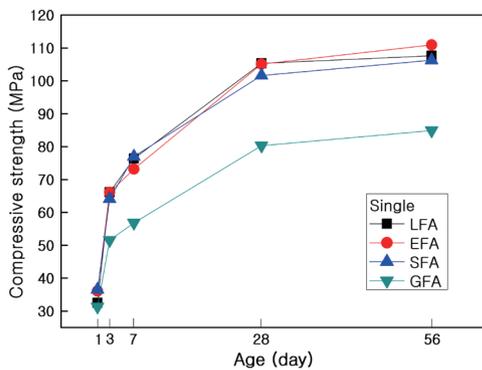


그림 9. 잔골재 단일 및 혼합사용에 따른 재령별 압축강도

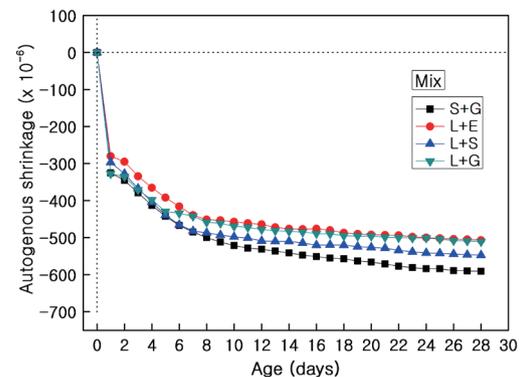
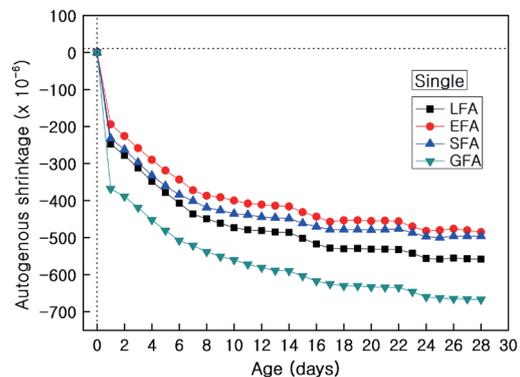


그림 10. 잔골재 단일 및 혼합사용 및 재령경과에 따른 자기수축길이변화율

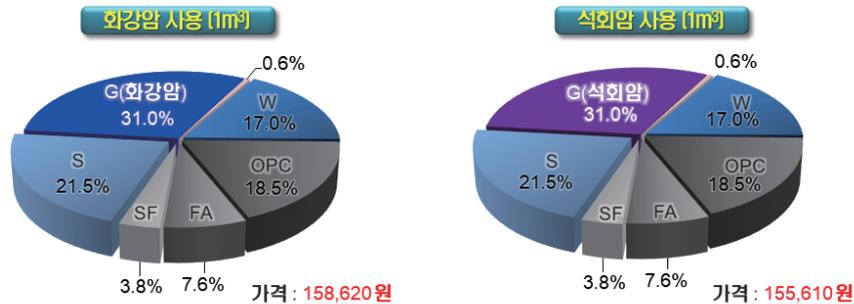
배합이 가장 낮은 자기수축량을 보였고, S+G 배합의 경우 가장 높은 자기수축량을 나타내었다. 따라서 초고강도 콘크리트 제조시 중요하게 고려되어야 하는 자기수축 문제를 잔골재로서 EFA나 L+E 혼합잔골재를 사용할 경우 자기수축 저감에 긍정적으로 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 순환석회암 골재사용에 따른 초고강도 콘크리트의 제조단가 비교

본 연구의 결과를 토대로 화강암 사용배합(GA)과 석회암 사용배합(LA or RLA)의 초고강도 콘크리트 1m³의 제조비용을 계산한 결과가 <그림 11>에 제시되어 있다. 계산결과에 따르면, 1m³ 기준으로 RLA 사용시 일반적으로 사용되고 있는 GA보다 약 3,010원(약 2%)정도 절감이 가능한 것으로 분석되었다.

5. 결론

본고에서는 저순도 혹은 고실리카질 성분으로 인해 그동안 폐기되거나 방치되었던 순환석회암 굵은골재 및 잔골재를 활용하여 100MPa급 초고강도 콘크리트의 경제적 제조 방법을 필자의 연구결과를 토대로 고찰하였다. 순환석회암골재의 양호한 입형 및 표면특성과 높은 탄성계수는 목표 유동성을 확보하기 위한 고성능 감수제 사용량을 감소시켜 경제성을 추구할 수 있을 뿐만 아니라, 초고강도 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수를 향상시키고, 아울러 자기수축을 기존의 화강암골재를 사용한 경우보다 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 궁극적으로 순환자원으로서 순환석회암을 재활용할 경우 초고강도 콘크리트의 성능향상과 경제성 확보에 긍정적으로 기여할 수 있을 것으로 기대된다.



W: 물, OPC: 시멘트, FA: 플라이애쉬, SF: 실리카폼, S: 잔골재, G: 굵은골재

그림 11. 골재 종류별 m³당 제조단가 비교

참고문헌

1. Asia cement, (2014), Limestone story, Asia cement, 1-50 (In Korean)
2. Han C.G., Kang C.W., (2012), Use of silicious limestone by product from raw metal grinding of cement as coarse aggregates for concrete, Journal of Architectural Institute of Korea, 28(7), 133-140 (In Korean)
3. Han M.C., Lee H.G., Jeong S.W. (2015), Effect of Mineralogical Sources of Coarse Aggregate on the Engineering Properties of Ultra High Strength Concrete with 80 MPa, Journal of Architectural Institute of Korea, 31(7), 59-66 (In Korean)
4. Alexander M.G., Mindess S. (2005), Aggregate in concrete, Taylor&Francis, 1-25

담당 편집위원 : 고경택(한국건설기술연구원)