

고강도혼합재를 사용한 콘크리트의 강도증진에 관한 실험적 연구

김중구* · 이상배 · 윤용선 · 박정순 · 노진호 · 권순욱 · 변형만
(한일시멘트 중앙연구소)

1. 서 론

최근 건축구조물이 고층화, 대형화되어감에 따라 콘크리트의 고강도화에 대한 요구는 날로 증대되어가고 있다. 콘크리트의 고강도화 방법^{1,2)}에는 결합재 자체의 강도를 높이는 방법과 결합재와 골재간의 결합력을 증대시키는 방법이 있다.

결합재의 강도를 증대시키는 방법으로는 페이스트의 물시멘트비를 낮게 하거나 충전제 또는 고강도를 발현하는 원재료를 사용한다.

콘크리트의 물시멘트비를 낮게 하는 방법은 고성능 감수제 등 혼화제를 사용하여 단위수량을 작게하거나 시멘트량을 증가시켜야 하는데 필연적으로 콘크리트 중의 단위시멘트량이 높아지게 되어 과도한 점성으로 인해 작업성이 나빠지고 타설 후에는 콘크리트의 수화열이 높아지고 이에 따른 콘크리트의 균열 발생 등의 단점이 있다.

반면에 충전제 등 고강도를 발현하는 원재료를 사용하게 되면 콘크리트 중의 시멘트량을 상대적으로 줄이면서도 고강도를 갖게 할 수 있어 앞서 언급한 단점들을 개선시킬 수 있다. 최근에는 이러한 고강도용 혼합재가 속속 개발되어 고강도 콘크리트 실용화가 용이해지고 있다.

당사에서는 최근 고강도혼합재를 개발 시판중에 있는 바, 본 고강도혼합재는 무수석고와 포졸

란 물질을 혼합 분쇄하여 제조한 것으로써 이를 콘크리트 제조시 시멘트와 치환사용하게 되면 콘크리트의 강도가 증진되며 유동성이 좋아지고 장기적으로 내구성이 향상되는 특성을 갖고 있다.

본 연구에서는 시멘트페이스트, 모르타르 및 콘크리트에서의 고강도혼합재의 강도발현 특성을 파악하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험재료

2.1.1 고강도혼합재

고강도혼합재는 무수석고계로서 브레인 8,000 cm/g 수준의 당사에서 시판중인 제품을 사용하였다. 고강도혼합재의 물리화학적 특성은 <표 1>과 같다.

2.1.2 시멘트

시멘트는 당사 단양공장산 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 시멘트의 물리화학적 특성은 <표 1>과 같다.

2.1.3 골재

실험에 사용된 골재는 모르타르 실험에서는 주

<표 1> 실험에 사용된 고강도혼합재 및 시멘트의 물리화학적 특성

재 료 명	분 말 도 (cm/g)	비 중	화 학 성 분 (%)						
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	L. O. I
고강도혼합재	8,000	2.90	26.65	13.54	0.95	41.94	4.14	10.67	0.12
시 멘 트	3,208	3.14	21.10	5.13	3.30	62.51	2.72	2.37	1.39

〈표 2〉 실험에 사용된 골재의 특징

구 분	종 류	비 중	흡수율 (%)	조립율	씻기손실량 (%)
굵은골재	20mm 쇄석	2.70	0.7	6.70	0.9
잔 골재	강모래	2.58	1.5	2.71	0.8

문진표준사를 사용하였고 콘크리트 실험에 사용된 골재로서 굵은골재는 20mm 쇄석을, 강모래는 금강산 강모래를 사용하였다. 골재의 특성은 〈표 2〉와 같다.

2.1.4 혼화제

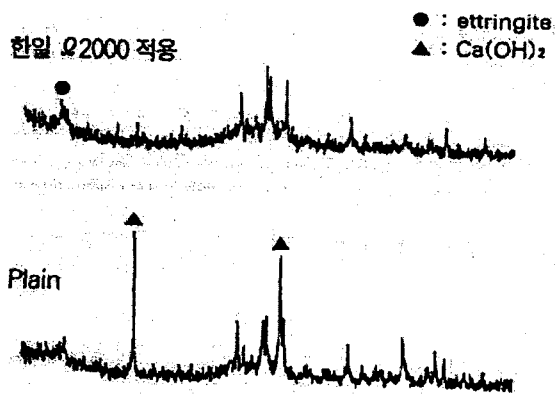
혼화제는 콘크리트 실험에서는 나프탈렌계 고성능 AE감수제를 사용하였고, 고강도과일 실험에서는 나프탈렌계 고성능 감수제를 사용하였는데 모두 시판중인 제품을 사용하였다.

3. 실험결과

3.1 X선 회절분석

시멘트와 혼합 사용된 고강도혼합재의 강도발현 기구를 알아보하고자 시멘트페이스트 수화물의 X선 회절분석을 실시하였다.

고강도혼합재를 사용한 경우 에트링자이트의 생성과 Ca(OH)₂의 감소를 확인할 수 있었다(〈그림 1〉). 즉, 고강도혼합재는 시멘트 성분중의 C₃A 등과 반응하여 에트링자이트³⁾를 생성시키고 Ca(OH)₂와 반응하여 C-S-H 수화물을 생성시킴으로써 페이스트의 공극을 충전시킴으로써 강도를 증진시키는 것으로 판단된다.



〈그림 1〉 시멘트페이스트 경화체의 XRD 분석 결과

〈표 3〉 고강도혼합재 치환량별 모르타르 실험 결과

W/B (%)	치환첨가량 (CX%)	FLOW (%)	압축강도 (kgf/cm ²)			비고
			3d	7d	28d	
33.5	0	111	400	468	474	
	20	117	503	570	622	
	40	110	389	602	632	

3.2 모르타르 실험 결과

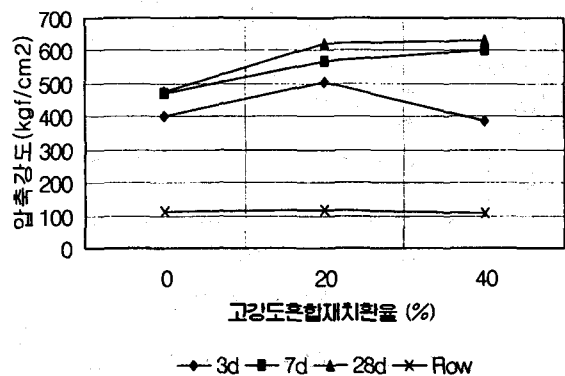
시멘트에 고강도혼합재를 중량비로서 0, 20, 40% 치환첨가하여 KS L 5105(시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법)에 따라 모르타르를 제조하되 cement/sand비는 1:1, 혼합수량은 고강도혼합재 치환율 0%의 배합에서 Flow치로 110~115가 만족되도록 결정하였다.

모르타르는 반죽의 질기(consistency)를 비교하기 위해 플로우를 측정하였으며 공시체를 제작하여 재령별 압축강도를 측정하였다. 그 실험결과는 〈표 3〉과 같다.

모르타르 실험결과, 고강도혼합재의 치환 사용량이 증가됨에 따라서 압축강도는 증가되었고 플로우치는 20% 치환에서 가장 높게 나타났다. 이는 고강도혼합재의 입경이 시멘트에 비해 작아 페이스트의 공극 충전 효과로 동일한 플로우를 확보하기 위한 소요 단위수량이 적어지는데 그 원인이 있다고 사료된다.

3.3 콘크리트 배합실험 결과

고강도혼합재가 콘크리트의 강도에 미치는 영향을 알아보기 위해 보통강도(210강도) 및 고강



〈그림 2〉 고강도혼합재 치환율에 따른 모르타르 압축강도

〈표 4〉 콘크리트 실험배합비

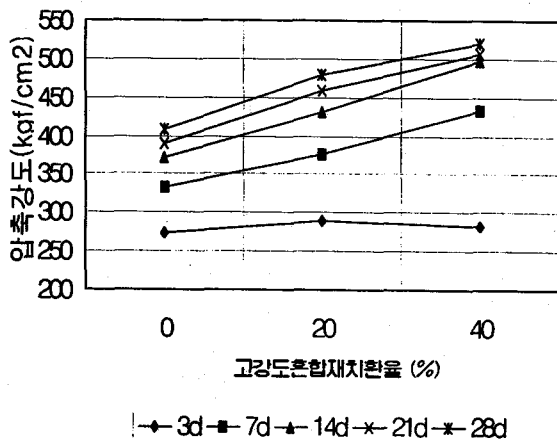
배합 번호	치환첨가량 (B×%)	W/B (%)	S/A (%)	단위재료량 (kgf/m ³)					
				W	C	C ₂	S	G	AD
400-0	0	35	42.0	175	500	-	708	977	2.14
400-20	20	35	42.0	175	400	100	708	977	2.14
400-40	40	35	42.0	175	300	200	708	977	2.14
210-0	0	55	49.5	182	331	-	865	914	1.99
210-20	20	55	49.5	182	265	66.2	865	914	1.99
210-40	40	55	49.5	182	199	132	865	914	1.99

도(400강도)로 구분하여 적용실험을 실시하였다. 고강도혼합재의 치환량은 모르타르 시험에서와 같이 0, 20, 40%로 하였으며 배합은 60ℓ 용량의 강제식 Pan 믹서를 사용하였다. 고강도혼합재의 투입은 시멘트 2차제품 공장의 조건과 맞추기 위해 시멘트와 함께 계량한 후 별도의 혼합없이 믹서에 바로 투입하였다. 이때의 실험배합비는 〈표 4〉와 같다.

400강도에서의 경우, 고강도혼합재의 치환 사용량이 늘어남에 따라서 슬럼프치가 15.5cm에서 19cm로 현저히 증가하였다. 즉, 고강도혼합재는

〈표 5〉 고강도콘크리트 배합실험 결과

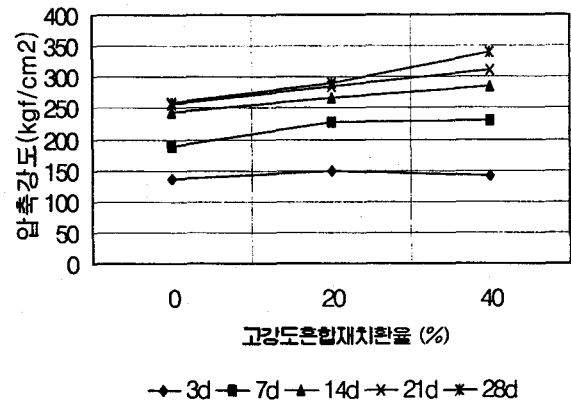
배합 번호	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도 (kgf/cm ²)					비고
			3d	7d	14d	21d	28d	
400-0	15.5	3.9	274	332	372	390	408	
400-20	19.0	3.7	290	376	432	458	480	
400-40	19.0	3.5	282	434	497	506	521	



〈그림 3〉 고강도혼합재 치환율에 따른 고강도콘크리트 실험 결과

〈표 6〉 보통강도콘크리트 배합실험 결과

배합 번호	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도 (kgf/cm ²)					비고
			3d	7d	14d	21d	28d	
210-0	14.0	5.8	135	188	242	256	260	
210-20	14.5	5.2	150	228	267	286	291	
210-40	16.0	5.2	140	231	286	311	339	



〈그림 4〉 고강도혼합재 치환율에 따른 보통강도콘크리트 실험 결과

콘크리트의 유동성을 개선시키는 것으로 나타났다. 공기량은 고강도혼합재의 치환량이 증가함에 따라서 약간 감소하는 경향을 보였다.

압축강도는 고강도혼합재의 치환량이 증가함에 따라서 3일 강도는 비슷한 수준을 유지하다가 7일강도 이후에서는 증가하였다. 재령 28일에서 치환율 0%인 플레인 배합에 비해 치환율 20%에서는 17.6%, 40%에서는 27.7% 압축강도가 증가하였다.

210강도의 경우는 고강도혼합재의 치환량이 늘어남에 따라서 슬럼프는 약간 증가하였고 공기량은 고강도에서와 마찬가지로 약간 감소하는 경향을 보였다. 압축강도 역시 고강도의 경우와 마찬가지로 7일강도 이후 압축강도가 증가하였는데 재령 28일의 경우 20% 치환시에는 11.9%, 40%

〈표 7〉 고강도혼합재를 사용한 고강도콘크리트 현장 적용 실적

W/C (%)	S/a (%)	단위재료량 (kg/m ³)						슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도 (kgf/cm ²)	
		W	C	C ₂	S	G	AD			7일	28일
29	38	185	480	150	576	996	9.5	19	3.0	507	650

〈표 8〉 고강도파일 배합비

W/B (%)	S/a (%)	단위재료량 (kg/m ³)				
		W	B	S	G	AD
23.5	33	127	540	595	1263	9.72

치환시에는 30.4% 증가하였다.

공기량은 고강도혼합재의 치환량이 증가함에 따라서 약간 감소하는 경향을 보였다.

3.4 고강도혼합재를 사용한 고강도콘크리트 현장 적용

〈표 7〉은 고강도혼합재를 사용한 고강도콘크리트의 현장 적용 실적으로써 출하규격은 20-600-18이었으며 타설부위는 교량조인트부였다. 고강도혼합재의 치환율은 24%였는데 재령 28일에서 설계기준 강도인 600을 충분히 만족하였다.

3.5 고강도혼합재의 PHC적용 실험

PHC (Pretensioned High Spun Concrete) Pile이란 구조물의 하중을 지지하기 위해 지반에 박는 말뚝으로써 압축강도 800kgf/cm² 이상의 고강도말뚝을 말한다.⁴⁾ (이하 고강도파일이라 칭함)

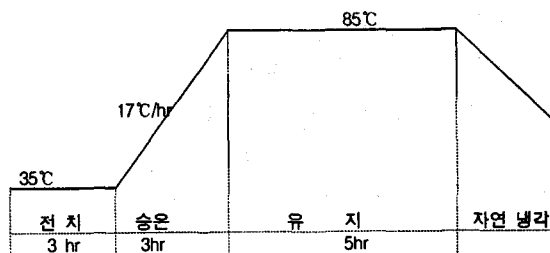
파일시장의 대부분을 차지하고 있는 고강도파일의 제조 방법은 Autoclave (고온고압양생)에 의한 방법과 상압증기양생에 의한 2가지 방법이 있다. Autoclave에 의한 방식은 시설투자비가 크고 공정이 복잡하여 생산효율이 떨어지는 등의 단점이 있어 근래들어서 파일 생산업체들은 상압증기양생에 의한 방식으로 전환하고 있는 추세이다.⁵⁾

한편, 상압증기양생 방식으로 고강도파일을 제조하기 위해서는 시멘트 이외에 고강도용 재료를 필수적으로 사용하여야만 기준강도를 만족하는 제품을 제조할 수 있다.

고강도혼합재의 고강도파일 적용 실험은 다음과 같은 방법으로 하였다.

〈표 9〉 원심공시체 성형조건

구분	초속	중속	고속	초고속
원심력 (g)	3	8	20	37
시간 (분)	3	1	1	5



〈그림 5〉 증기양생조건

〈실험재료 및 배합〉

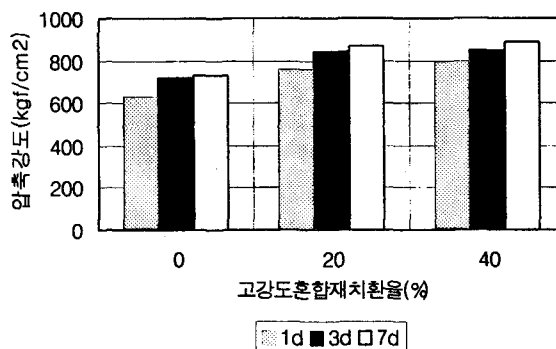
실험에 사용된 원재료는 앞서의 콘크리트 실험에 사용된 것과 동일하나 혼화제는 E사의 나프탈렌계 고성능 감수제를 사용하였다.

콘크리트 배합비는 〈표 8〉로써 고강도파일 제조공장에서 사용하고 있는 배합비를 그대로 사용하였다.

콘크리트 혼합은 펜타입 강제식 믹서를 사용하였는데, 잔골재, 굵은골재, 시멘트, 고강도혼합재를 먼저 믹서에 넣고 40rpm으로 30초간 검비빔한 후, 혼화제와 물을 투입하고 90초간 혼합하였다. 그후 믹서를 정지시키고 믹서에 붙은 콘크리트를 긁어내린 후 90초간 2차혼합하여 배출하였다. 이때의 콘크리트의 슬럼프는 2~5cm 정도

〈표 10〉 고강도파일 시험결과

고강도혼합재 치환첨가량 (B×%)	압축강도 (kgf/cm ²)			비고
	1 d	3 d	7 d	
0	630	720	730	
20	760	840	870	
40	790	850	890	



〈그림 6〉 고강도혼합재 치환율에 따른 고강도파일 실험결과

의 뒀배합콘크리트이었다.

〈공시체 제작 : 원심성형〉

공시체의 제작은 KS F 2454의 방법에 따라 실험실용 원심성형기를 이용하여 제작하였다. 이때의 원심성형 조건은 〈표 9〉와 같다.

〈공시체 양생〉

제작된 원심공시체는 실험실용 상압양생조에서 〈그림 5〉와 같은 조건으로 양생하였다. 이후, 공시체는 300톤 압축강도 시험기를 이용하여 압축강도를 측정하였다.

〈실험 결과〉

고강도파일의 압축강도 시험 결과는 〈표 10〉과 같다. 고강도혼합재의 치환량이 증가할수록 압축강도는 증가하여 고강도혼합재를 사용한 경우는 3일 이후에 기준강도를 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

무수석고계 고강도혼합재의 압축강도 발현 특성을 알아보기 위해 시멘트페이스트 분석 및 모르타르, 콘크리트 실험을 실시한 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

— 고강도혼합재를 시멘트와 치환사용하게 되면 에트링자이트 및 C-S-H 수화물을 생성함으로써 고강도화를 이룬다.

— 고강도혼합재는 모르타르 및 콘크리트의 유동성을 개선시킨다. 모르타르 실험에서 20% 치환사용시 약 5% 플로우가 증가되었다.

— 고강도혼합재는 콘크리트의 강도를 증진시키는데 20%, 40% 치환사용할 경우, 재령 28일 강도 비교시 고강도(400)에서는 각각 17.6, 27.7%, 보통강도(210)에서는 각각 11.9, 30.4%의 강도증진 효과가 있었다.

— 고강도파일의 경우는 20, 40% 치환사용시 재령 7일에서 각각 19.2, 21.9%의 강도증진 효과가 있었다.

〈참 고 문 헌〉

1. 大濱嘉顔 “手段をせばここまで高強度になる”, セメント・コンクリート, No. 546, 64~75, 1992.
2. 寺村悟 外, “高強度化のための混和劑の開発”, セメント・コンクリート, No. 546, 34~40, 1992.
3. 불산부생 II-형무수석고와 포졸란 미분체가 혼입된 시멘트·몰탈 유동성 및 압축강도 특성, 1996년도 가을 학술발표회 논문집, v. 8, n. 2, pp. 154~165, 1996. 11.
4. 한국공업규격 KS F 4306, 프리텐션방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝.
5. 프리텐션방식 원심력 고강도콘크리트파일, 콘크리트학회지 1994. 12, v. 6, n. 6, pp. 35~41.