

불산부생 II 형 무수석고와 포졸란 미분체가 혼입된 고강도콘크리트의 특성에 관한 연구

A Study on Properties of the High-Strength Concrete Admixed with II-Anhydrite and Pozzolanic Fine Powder

조민형*	길배수*	전진환*
Cho, Min Hyung	Khil, Bae Su	Jeon, Jin Hwan
김도수**	남재현***	노재성****
Kim, Do Su	Nam, Jae Hyun	Rho, Jae Seong

Abstract

The purpose of this study is to develop an alternative admixture for manufacture of PHC pile (compressive strength above 800kg/cm²). For the investigation, properties of alternative admixture admixed with II-anhydrite and pozzolanic fine powders (e.g., Fly-ash, Silica-Fume), the fluidity and viscosity in the cement pastes, the fluidity and compressive strength in mortars at steam curing condition, were respectively examined. Also, properties of compressive strength of concretes with existing admixture (specimen name SM) and alternative admixture (specimen name AP) for PHC pile, at steam and standard curing condition, were compared each other.

As a result of this experimental study, it was found that specimens admixed with II-anhydrite and pozzolanic fine powders had an increase on the fluidity of cement paste and mortar, and compressive strength of mortar and concrete was as good as concrete with SM.

Key-words : PHC pile, II-anhydrite, pozzolanic fine powder, steam curing, ettringite.

1. 서론

일반적으로 고강도용 콘크리트 제품들을 제조하기 위해서는 혼화재로서 포졸란활성 작용을 하는

* 정회원, 대전대학교 대학원 건축공학과

** 충남대학교 대학원 정밀공업외학과, 박사과정

*** 정회원, 대전대학교 건축공학과 교수

**** 충남대학교 정밀공학과 교수

Silica-Fume, Fly-ash, 高爐Slag 등이 주로 사용되고 고온고압 양생방법이 적용되어 왔으나, 제조 단가 상승과 초기 설비투자 비용의 증가 등이 문제점으로 제기되어 왔다.

외국에서는 석고계 첨가재에 의해 고강도를 발현하는 연구가 상당히 진행되고 있으며, slag시멘트 및 belite시멘트와 같은 특수시멘트에 무수석고를 첨가하고 상압증기양생에 의해 고강도를 발현하는 사례가 적지 않게 보고되고 있다. 국내의 경우 무수석고계나 SA계 시멘트 및 혼화재들이 상품화 단계에 있지만, 아직까지는 국외기술의 의존도가 높아 기술도입에 따른 비용절감의 문제를 안고 있다.

본 연구는 기존의 PHC 제품 생산용 에트링가이트(Ettringite)계 혼화재의 대체를 위해 불산제조 시 부생물인 II형 무수석고(II-Anhydrite)와 포졸란계 미분말인 Fly-ash, Silica-Fume등을 다양한 비율로 혼합한 각 시료 혼화재들을 혼합한 시멘트페이스트와 모르타의 재반물성을 비교한 후 콘크리트에 대한 적용 타당성을 검토하므로써, 기존의 고강도용 혼화재를 대체 할 수 있는 경제적인 고강도콘크리트 제품 생산을 위한 기초자료로 제시하고자 한다.

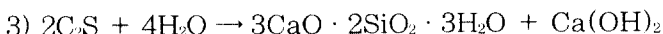
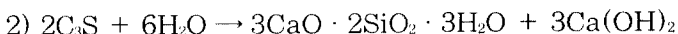
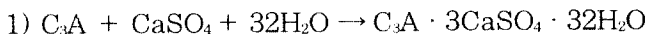
2. 시멘트계에서 석고계 첨가재에 의한 고강도발현기구

시멘트계에 있어서 석고는 주로 알루미늄산3칼슘(C₃A)과 반응에 의해 생성되는 에트링가이트(C₃A · 3CaSO₄ · 32H₂O)에 의해 응결을 조절하는 작용을 한다고 알려져 왔다. 석고의 응결조절 효과 메커니즘은 C₃A의 입자표면에 에트링가이트의 층이 형성됨으로써 이 층이 C₃A의 다음 수화를 지연시켜 시멘트의 응결이 주로 칼슘 실리케이트들(C₃S, C₂S)의 수화에 의해 일어나도록 하는 것으로 설명될 수 있다. 즉, 에트링가이트의 생성은 시멘트의 주요한 수경성 화합물인 C-S-H겔의 생성을 촉진한다고 볼 수 있다.

또한, 시멘트 매트릭스에 있어서 에트링가이트는 시멘트의 수화반응 속도와 에트링가이트계 수화물의 생성시기와 중요한 관련이 있으며, 시멘트 조성에 있어서 CaO-Al₂O₃-SO₃ 3성분중 각각의 성분 함량 비에 의한 특성의 변화에도 중요한 역할을 한다고 알려지고 있다. 이러한 에트링가이트의 반응특성에 따라 무수석고를 혼합한 시멘트는 성분의 조정과 에트링가이트의 생성시기의 조절에 의해서 속경성 시멘트, 팽창시멘트, 무수축재, 고강도시멘트로 이용되어지고 있다.

따라서, 에트링가이트가 시멘트경화체의 조직이 形成되기 전에 생성되었을 경우에는 급결성을 나타내며, 시멘트경화체의 조직이 형성되는 시기에 에트링가이트의 생성이 집중적으로 일어나면 경화체의 고강도화에 기여하게 되고, 한편으로 경화체 형성 후에 에트링가이트가 생성되면 에트링가이트 결정의 성장에 기인하여 팽창성을 띄거나 膨脹破壞를 일으키게 된다고 한다

또한 알루미늄네이트로부터 에트링가이트를 생성시키는 반응은 아래의 세 화학반응식에서 보여지는 것과 같이 실리케이트들의 수화 반응에 비하여 효과적으로 물을 고화시킬 수 있기 때문에 매트릭스내의 자유수를 결정수로 고정시켜 실질적인 물/시멘트 비의 감소효과에 기인하여 고강도콘크리트를 제조할 수 있게 된다.



3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

본 연구는 기존PHC Pile제조용 혼화재를 대체하기 위한 불산부생 II형 무수석고와 포졸란계 미분체가 혼입된 고강도콘크리트의 특성에 관한 연구로서 표 1은 본 연구의 실험요인과 수준을 보여주고 있다. 표 2에서는 기존 PHC Pile제조에 사용된 배합을 참고로 한 모르터와 콘크리트시험의 배합표를 보여주고 있다. 고강도용 혼화재로 시멘트 페이스트 및 모르터에 혼입한 불산부생 II형 무수석고 및 포졸란계 미분체의 혼합비 및 시료명은 표 3에 나타내었다.

표 1 실험계획

실험요인		실험수준	
물결합재비(%)		25	
혼화재 혼입율(* /wt)		10	
최대골재크기(mm)		25	
양생방법		증기/수증	
단위수량(ℓ/m ³)		143	
목표슬럼프(cm)		5±2	
고성능감수제투여량(%)		2.0	
세골재율(%)		37	
시험항목			
시멘트페이스트	모르터	콘크리트	
		굳지 않은 콘크리트	굳은 콘크리트(1,3,7,28일)
유동성변화 점성변화	플로우(비빔직후) 압축강도(1,3,7,28일) 표면조직관찰(SEM)	공기량,슬럼프 비빔온도,단위용적중량	압축강도, 단위중량

실험시 각 시료를 시멘트중량에 대해 10% 첨가하였다. 또한 비교용 시료로서 OPC, M은 제1종보통포틀랜드 시멘트와 무수석고 자체이고, 시료명 SM은 기존의 PHC Pile제조용 무수석고계 혼화재를 사용하였다. 콘크리트 시험에서는 SM과 실리카흙을 혼입한 콘크리트와 무수석고와 포졸란계 미분체를 혼입한 콘크리트(시료명AP)의 물/결합재비와 양생방법의 변화에 따른 강도발현 성상을 살펴보았다.

표 2 모르터 및 콘크리트 조합표

W/B (%)	Type of Aggregate	Target Flow (cm)	SP (%)	S/A (%)	Absolute Volume (ℓ/m ³)				
					Water	Cement	Sand	Aggregate	Admixture
25	표준사	20±2	2.2	37	143	181	246	-	Cement weight×10%
	쇄사 19mm쇄석	0~5	2.0	37	143	181	246	420	

표 3 실험에 사용된 시험체들의 원료 혼합비율

Mixing rate of raw materials	Specimen Name										
	OPC*	SM*	M*	SF	MF	MS	MFS-1	MFS-2	MFS-3	MFS-4	AP
II-Anhydrite.	-	-	10	-	7	7	7	7.5	7	7	7
Fly-Ash	-	-	-	-	3	-	2	2	1.5	1	-
Silica Fume	-	-	-	10	-	3	1	0.5	1.5	2	2
Blast Furnace Slag	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

시멘트 중량에 대한 혼합비율을 나타냄* 원료 자체를 시멘트 중량의 10% 혼입한 것을 나타냄.

3.2 사용재료

본 실험에서 사용된 1종 보통 포틀랜드시멘트의 물리·화학적 성질들은 표 4와 같고, II형 무수석고와 포졸란계 미분말들의 화학조성 및 물리적 성질은 표 5와 같다.

표 4 실험에 사용된 시멘트의 물리·화학적 성질

Chemical composition			CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	lg. loss
OPC			61.7	20.6	6.4	3.0	2.3	3.1	0.12	0.78	1.9
Properties	Specific gravity	Specific surface area(cm ² /g)	Stability(%)	Setting time		Compressive strength(kgf/cm ²)					
				Initial(min)	Final(hr:min)	1d	3d	7d	28d		
OPC	3.15	3,328	0.08	265	8:30	88	199	281	382		

표 5 혼화재로 사용된 원재료들의 물리·화학적 성질

Chemical Composition(%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Ig.loss	Mean Dia. (μm)	BET(cm ² /g)
II-Anhydrite	37.29	7.84	2.14	0.81	49.48	-	-	-	1.9	1.7	12,000
SM	30~40	12~22	8이하	3이하	30~48	-	-	-	-	-	5,000이상
Silica-Fume	0.26	92.36	0.63	0.73	-	0.99	0.36	1.08	2.15	0.15	200,000
Fly-Ash	4.7	54.7	28.2	6.3	-	0.40	0.99	0.8	2.6	5.0	3,200
Blast Furnace Slag	42	34	15	1.0	S(1.1)	4.7	-	-	-	-	2,800이상

모르터 시험에 사용된 세골재로는 주문진산 표준사를 사용하였고, 콘크리트 시험에 골재로 사용한 쇄사 및 쇄석의 물리적 성질은 표 6과 같다. 고성능감수제는 Mighty-150을 사용하였다.

표 6 실험에 사용된 골재의 물리적 성질

Kind of Aggregate	Max.Size (mm)	Specific Gravity	Unit Weight (kg/m ³)	Finess Modulus	Absorption (%)	Abrasion (%)
Standard Fine	0.3~0.6	2.55	1,530~1,560	-	-	-
Coarse(crushed)	19	2.65	1,581	6.46	1.25	29.4
Fine(crushed)	5	2.60	1,523	2.72	1.24	-

3.3 시멘트페이스트 및 모르터 시험

무수석고와 포졸란계 미분체를 시멘트중량의 일정비율 혼입시킨 시멘트페이스트의 유동성 변화를 관찰하기 위해 각 시료의 혼합직후 2, 3, 2 혼합방법(2분교반→3분정치→2분교반)에 따라 측정된 시멘트페이스트의 면적을 OPC 및 기존 고강도용혼화재(SM)를 혼입한 경우와 상호 비교하여 관찰하였고, 페이스트의 점성변화는 Brookfield사의 DV-II + Viscometer를 사용하여 각 시료가 혼입된 시멘트페이스트내의 torque저항값 변화로부터 2~60분까지 2분 간격으로 시간경과에 따른 점성변화를 측정하였다.

모르터 시험은 비빔직후 Flow(플로우) 및 50×50mm Cube 공시체를 사용하여 모르터에서의 압축강도시험을 증기양생후 재령 1, 3, 7, 28일에서 각각 측정하였으며, KS L 5105규준에 따랐다. 재령 28일 압축강도 측정후, 각 시험편들의 파단표면조직을 관찰하기 위해서 Scanning Electron Micrographics기술을 사용하여 배율 ×300으로 비교 관찰하였다.

3.4 비빔방법

본 실험에서 모르터와 콘크리트시험체를 만들기 위해 사용된 비빔방법은 그림 1과 같다. 콘크리트 시험에서는 모르터에서와는 달리 기존 Pile제조 조건을 고려하여, 시멘트와 골재 그리고 혼화재를 일괄 투입한 후 물과 고성능감수제를 동시에 투여하여 비빔시간을 단축하였다.

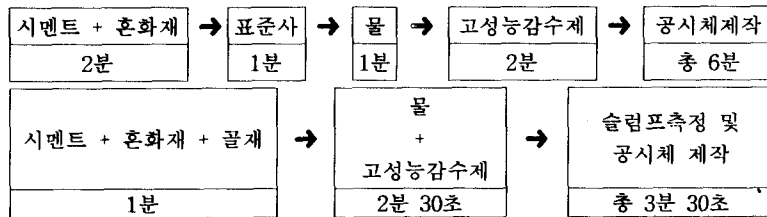


그림 1 비빔방법

3.5 양생방법

본 실험에서 성형한 모르터 및 콘크리트는 아래의 그림 2와 같이 증기양생을 한후, 각 측정재령까지 기건 양생하였다. 이와 같은 증기양생방법은 현재 Pile제조업체에서 사용하고 있는 것을 참고로 하였다.

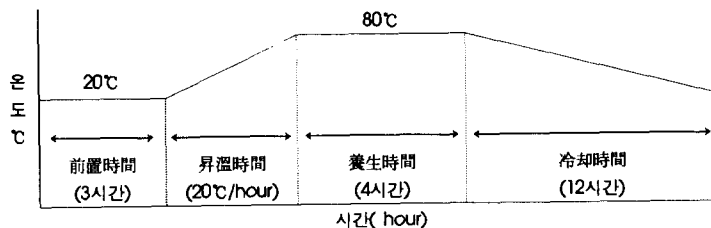


그림 2 증기양생방법

3.6 콘크리트 시험

굳지 않은 콘크리트에서는 비빔온도와 공기량 및 슬럼프를 KS F 2421, 2402에 따라 각각 측정하였고, 굳은 콘크리트 시험에서는 Silia Fume을 혼입한 콘크리트와 무수석고와 포졸란계 미분체를 혼입한 콘크리트를 물결합재비와 양생방법에 따른(W/B:25, 35%, 표준·증기양생) 콘크리트의 강도발현 성상을 살펴보았다. 압축강도의 측정은 $\phi 100 \times 200$ Cylinder형 공시체를 사용하여 재령 3, 7, 28, 56일에 KS F 2403, 2405에 따라 측정하였다.

4. 실험결과

4.1 시멘트페이스트 시험

4.1.1 페이스트 유동성 시험

무수석고 및 포졸란계 미분체를 일정비율 혼합하여 시멘트중량의 10%씩 첨가한 페이스트의 유동성 변화는 그림 3에서 보이는 것처럼 무수석고만 단독으로 첨가한 시험편 M의 유동성이 가장 우수했다. 또한, 일정비율의 무수석고 첨가범위(Cement content $\times 7.0 \sim 7.5\%$)에서 실리카흄의 혼입량이 증가할수록 유동성이 저하하는 현상을 보여주고 있다. 이것

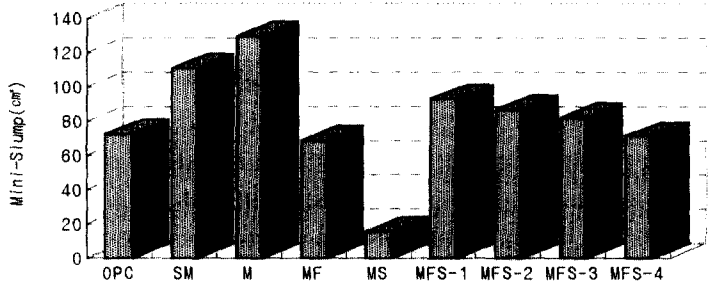


Figure 3 Type of Specimen
그림 3 각 시험체별 페이스트의 유동성

은 상대적으로 미립분이면서 비표면적이 큰 실리카흄의 양이 증가함에 따라 수분 흡수능력이 커지기 때문인 것으로 사료된다. 한편 실리카흄없이 무수석고와 플라이애쉬만 혼합된 시험편 MF의 경우에는 플라이애쉬의 종류에 따른 불균일성과 플라이애쉬가 구형입자임에도 불구하고 입자표면의 거칠기 때문에 유동성이 저하된다는 국내의 연구보고와 일치하는 결과를 보였다. 따라서, 각 시험체별 페이스트의 유동성 시험결과 무수석고 혼입량의 증가는 유동성의 개선을 가져와 혼합수의 감소 및 유동화제의 사용량을 저감시킬 수 있을 것으로 보인다.

4.1.2 페이스트의 점성변화 시험

그림 4는 각 시험체별 비빔후 경과시간에 따른 점성변화를 보여주고 있는데, 대체로 모든 시험체들의 점성이 증가하다가 30분 이후부터는 안정되는 경향을 보이는 있다. MFS-1의 점성변화는 OPC와 유사한 거동을 보였으나, MFS-4는 SM과 유사하였다. MFS-2는 초기점성이 급격히 상승하다 비빔 후 30분 이후 안정상태를 보이고 있고, M은 OPC 및 SM보다 30분 이전의 초기점성이 상당히 낮은 결과를 보여 페이스트내의 유동성 증진현상과 일치함을 확인할수 있었다. 점성변화시험결과 무수석고 및 플라이애쉬와 실리카흄이 모두 혼합된 페이스트들의 점성변화는 다소 hysteresis한 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다.

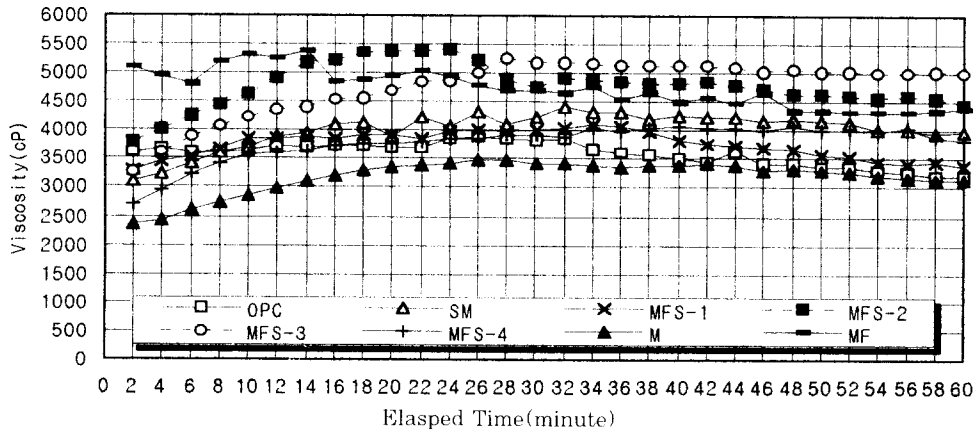


그림 4 각 시험체별 페이스트의 점성변화

4. 2 모르터 시험 결과

4.2.1 모르터의 플로우 시험

표 7에서는 각 시험체별 비빔직후의 비빔온도와 플로우시험의 결과를 보여주고 있는데, 페이스트에서처럼 유동성에서의 현저한 차이를 볼 수는 없으나, 무수석고만 첨가된 M에서는 다른 시험편들보다 높은 플로우치를 나타내었으며, SM과도 유사한 플로우값을 보여주고 있다. 구상입자의 ball-bearing작용에 기인하여 유동성향상에 기여할 것으로 예상되었던 플라이애쉬 및 실리카흙 첨가에도 플로우의 증가가 없었으며, 실리카흙의 첨가량이 증가함에 따라 플로우가 약간씩 저하하는 것을 보여주고 있어 페이스트에서의 유동성변화와 깊은 상관성을 보여주었다.

표 7 모르터시험 결과표

W/B	Specimen Name	Mix. Temp. (°C)	Mortar Flow (cm)	Compressive Strength (kgf/cm ²)			
				1일	3일	7일	28일
25	OPC	30	18	561	673(19.9)	730(8.5)	803(10)
	SM	28	24.5	702	789(12.4)	888(12.5)	1040(17.1)
	M	29	24.5	649	797(22.8)	882(10.7)	1030(16.8)
	SF	25	20	784	828(5.6)	840(1.4)	845(0.6)
	MF	29	22	691	821(18.8)	923(12.4)	1063(15.1)
	MS	29	20	772	862(11.6)	964(11.8)	984(2.1)
	MFS-1	28	19.5	736	846(14.9)	938(15.4)	1004(7.0)
	MFS-2	29	20	732	812(10.9)	942(14.2)	964(2.3)
	MFS-3	29	20.5	756	837(10.7)	953(13.8)	976(2.4)
	MFS-4	29	21	740	853(15.2)	939(10)	964(2.7)

*각 재령별 압축강도값 옆의 괄호 안의 숫자는 이전 재령에 대한 강도 증가를 백분율로 나타낸 것임.

4.2.2 모르터압축강도 시험

표 7에서는 재령에 따른 압축강도 시험결과와 각 재령에서의 강도증가율을 보여주고 있으며, 그림 5

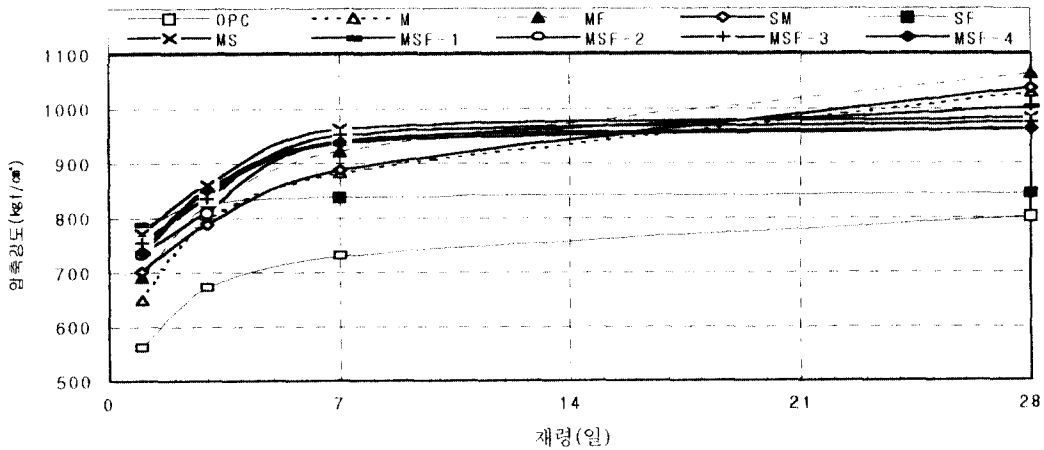


그림 5 재령에 따른 각 시험체별 압축강도의 변화

에서는 재령에 따른 시험체별 압축강도의 변화를 보여주고 있다. 무수석고와 포졸란계 미분말을 혼입한 시험체중에서 MFS1, MFS2, MFS3, MFS4, MS가 비교용으로 사용된 기존의 고강도용 혼화재 SM보다 재령 7일까지는 계속 높은 강도발현을 보이고 있으나, 재령 28일에서는 강도증가율이 급격히 떨어지는 것으로 나타났고, SM은 각 재령별 11% 이상의 강도 증가율을 보이고 있다. 무수석고와 플라이애쉬를 혼합한 MF와 무수석고와 실리카흄을 혼입한 MS는, 전자는 재령28일까지 꾸준히 10%이상의 증가율을 보인 반면에 후자는 재령28일에서 증가율이 감소하는 경향을 보였으나 목표강도 800kgf/cm²은 훨씬 상회하고 있다. 무수석고만 혼입한 시험체 M은 초기 재령에서는 강도발현이 저조하다가 재령7일 이후에서는 큰 폭의 강도증진을 보이고 있다.

표 8 콘크리트시험 결과표

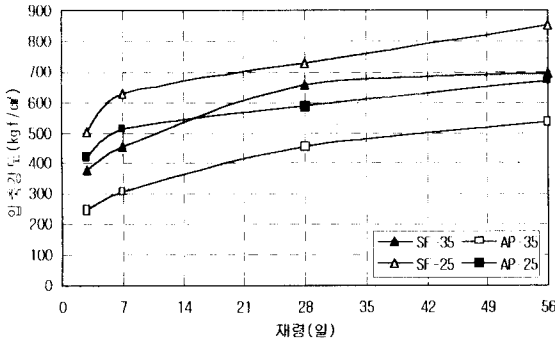
Specimen Name	Curing Method	Dosage of SP (C×%)	Fresh Concrete				Compressive Strength(kgf/cm ²)				
			Slump (cm)	Mix Temp. (°C)	Air Content (%)	Unit Weight (kg/l)	1일	3일	7일	28일	56일
SF-35	표준	2.0	9	23	1.6	2.414	-	377	454(20.4)	657(44.7)	694(5.6)
	중기						-	544	565(3.8)	597(5.7)	660(0.5)
AP-35	표준		12	22	1.4	2.439	-	250	305(22)	456(49.5)	534(17.1)
	중기						-	454	530(16.7)	632(19.2)	689(2.5)
SF-25	표준		4.5	23	1.9	2.443	-	501	626(24.9)	727(16.1)	853(17.3)
	중기						-	723	731(1.1)	761(4.1)	805(5.8)
AP-25	표준		6.5	23	1.6	2.451	-	420	511(21.6)	590(15.4)	669(13.4)
	중기						726	835(15)	897(7.4)	985(9.8)	-
SM-25	중기		2.0	22	2.3	2.460	711	859(20.8)	930(8.3)	1025(10.2)	-

*각 재령별 압축강도값 옆의 괄호 안의 숫자는 이전 재령에 대한 강도 증가를 백분율로 나타낸 것이다.

4.2.3 주사전자 현미경에 의한 파단면의 표면조직관찰

재령 28일 모르타 압축강도 시험후 각 시험체들의 파단면을 acetone에 침수시켜 수화를 정지한후 관찰한 SEM사진 분석에서는 SM, M, MF등에서 에트링가이트의 생성을 확인할 수 있었다.

-Standard Curing-



-Steam Curing-

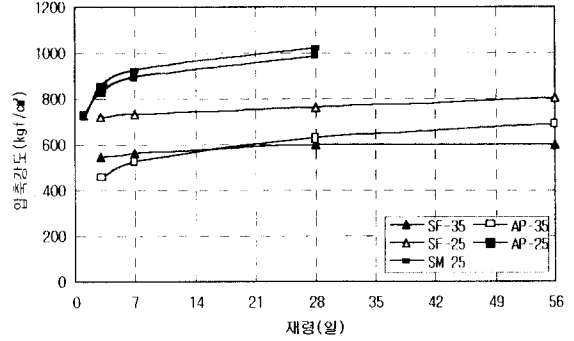


그림 6 재령에 따른 콘크리트의 압축강도 변화

4. 3 콘크리트 시험결과

표. 8에서는 본 연구의 굳지않은 콘크리트 시험결과와 굳은 콘크리트의 압축강도 시험 결과를 보여 주고 있다. 굳지 않은 콘크리트 시료들의 공기량은 물/결합재비가 감소함에 따라 증가하는 경향을 보였고, 슬럼프 시험에서는 시멘트페이스트의 유동성변화시험과 모르터 플로우시험들의 결과와 유사하게 무수석고와 포졸란계 미분체를 혼입한 시료AP가 기존 혼화재인 SM과 실리카흙보다 다소 높은 경향을 보였다.

굳은 콘크리트의 양생방법에따른 압축강도는 실리카 흙이 수중양생에서 각 재령별 큰 폭의 강도증가율을 보인 반면에 증기양생에서는 초기에 높은 강도를 발현한뒤에 소폭의 강도증가를 보였다. 그러나 AP는 수중양생과 증기양생 모두에서 재령에 따라 지속적으로 SF보다는 높은 강도발현율을 보여주었고, 기존 PHC Pile용 혼화재인 SM에 비해서는 초기(재령1일)에서는 다소 높았다가 재령 3일이 후에 역전되었지만 28일 압축강도강도가 985kg/cm²인 콘크리트를 제조할 수 있었다.

5. 결론

기존 PHC Pile제조용 혼화재의 대체를 위해 불산재조시 부생성물인 II형무수석고와 포졸란계 미분체를 혼합한 혼화재로 만든 시멘트페이스트, 모르터 그리고 콘크리트 시험들에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 시멘트페이스트의 유동성 시험에서 무수석고만 단독으로 첨가한 시료M이 가장 우수한 유동성을 나타냈으며, 모르터에서는 플로우값이 비교용 혼화재인 SM과 같은값을 나타내고 있어, 무수석고의 첨가로 혼합수의 감소 및 고성능감수제 사용량의 저감효과를 기대할 수 있다.
- 2) 무수석고의 단독 첨가나 무수석고와 플라이애쉬를 혼합하여 첨가한 M, MF는 무수석고에 플라이애쉬와 실리카흙을 동시에 혼입한 시험체들보다도 강도특성이 우수한 것으로 나타났다.
- 3) II형무수석고와 포졸란계 미분체를 혼입한 모르터들의 압축강도는 기대했던 포졸란계 재료의 포졸란활성 작용효과는 미비하였으나, 증기양생 초기에 에트링자이트의 생성에 의한 조직의 치밀

화에 기인하여 강도 개선을 한다는 기존의 연구결과들과 일치함을 보였다.

- 4) 콘크리트의 압축강도시험에서 무수석고와 포졸란계 미분체가 혼입된 콘크리트 시험체 AP는 기존 혼화재 SM에 비해 재령3일 이후의 강도가 다소 떨어졌지만 재령7, 28일 압축강도가 각각 897, 985kg/cm²에 달하는 고강도 콘크리트를 제조할 수 있었다.
- 5) 본 연구에서 시험적으로 혼합한 대체혼화재(시료명AP)로 만든 콘크리트는 상압증기양생만으로 재령 3일에 목표강도(800kg/cm²)의 획득은 가능하였으나, 내구성을 포함한 종합적인 검토가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 전용희, 김정환, 무수석고가 시멘트경화체의 강도특성에 미치는 영향, 제23회 시멘트 심포지엄, 1995, pp.156-164.
2. 이승환, 고강도콘크리트용 混和材를 사용한 콘크리트의 物性에 관한 研究, 콘크리트학회 논문집, 제7권 2호, 1995. 4., pp.155-164.
3. 박승범, 임창덕, 高黃酸鹽 시멘트를 이용한 高強度 콘크리트의 壓縮強度 特性에 關한 實驗的 研究, 콘크리트학회논문집, 제4권 3호, 1992. 9., pp.135-146.
4. 박승범, 임창덕, 高黃酸鹽 시멘트를 이용한 高強度 콘크리트의 水和 및 力學的 特性에 關한 實驗的 研究, 콘크리트학회논문집, 제5권 1호, 1993. 3., pp.129-138.
5. V.V.Mikhailov, "Stressing cement and the Mechanism of self stressing concrete Regulation," Proceedings of the 4th Int. Symposium on the Chemistry of Cement(Washington), 1960.
6. 김영수, 김정환, 시멘트 모르타르 硬化體의 高強度화 미치는 플라이애쉬 粒子크기의影響, 콘크리트학회논문집, 제6권 5호, 1994. 10., pp.131-139.