

포졸란계 미분말과 II형 무수석고 치환 시멘트 페이스트 유동성과 시멘트 모르타르의 유동성 및 압축강도

Fluidity of Cement Paste and Fluidity and Compressive Strength of Cement Mortar Substituted by Pozzolan Fine Powders and II-Anhydrite



노재성*

Rho, Jae Seong



이범재**

Lee, Beom Jae



김도수**

Kim, Do Soo



이병기**

Lee, Byoung ky

요 약

시멘트 모르타르의 압축강도 향상을 위하여 분말혼화재를 제조하였으며, 분말혼화재 사용에 따 르는 유동성 감소를 억제하고자 고유동화제를 사용하였다. 분말혼화재(FAS)는 불산부생 II형 무수석고와 플 라이애쉬 및 실리카흄을 혼합제조하여 시멘트 대신 각각 10, 20wt%씩 치환하였다.

물/고형분비(W/S)=0.40에서 FAS로 치환된 시멘트 페이스트의 유동성은 저하되었고, 유동성 저하의 억제를 위한 고유동화제는 NSF와 NT-2가 효과적이었다.

시멘트 모르타르의 유동성은 II형 무수석고의 분말도가 미세할수록 증가하였고, 유동성 저하는 FAS를 10wt% 치환하였을때 작게 나타났다. 압축강도는 FAS를 10wt% 치환한 공시체가 20wt% 치환한 것보 다 높게 나타났고, 특히 γ 를 10wt% 치환한 공시체(C1)에서 가장 높은 압축강도값을 나타내었다.

Abstract

In order to improve compressive strength of cement mortar, powder admixture(FAS) was manufactured by mixing fly ash, II-anhydrite and silica hume, and superplasticizer

* 정회원, 충남대학교 공과대학 정밀공업화학과, 교수

** 충남대학교 대학원 공업화학과

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 8월 30일까지 학회로 보내주 시면 1997년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

was used for the control of fluidity reduction with the use of this admixture. Cement was substituted by 10, 20wt% of FAS respectively.

At W/S=0.40, the fluidity of cement paste substituted by FAS was decreased, NSF and NT-2 were very effective for the control of fluidity reduction.

As the particle size of II-anhydrite was fine, the fluidity of cement mortar was increased. The fluidity reduction of cement mortar substituted by 10wt% of FAS was controlled. The compressive strength of cement mortar substituted by 10wt% of FAS showed higher value than that of 20wt%, especially specimen(C1) substituted by 10wt% of γ had the highest compressive strength value.

Keywords : Mini-slump, II-Anhydrite, Pozzolan materials, Fluidity, Superplasticizer
Ball-bearing effect, Ettringite

1. 서론

건설기술의 급속한 발전 및 다양한 시공기술의 보급에 따라 콘크리트 구조물에 대한 요구특성도 다양화, 고품질화 되고 있으며 이에 따라 콘크리트의 성능 및 기능을 향상시킴으로써 기존 콘크리트의 제물성을 모두 만족시키는 고성능콘크리트가 출현하게 되었다.

고성능콘크리트는 고강도화, 고유동성, 고내구성의 개선을 위하여 고로슬랙분말, 플라이애쉬, 실리카흄 등의 포졸란계 미분말을 고유동화제 혹은 고성능감수제와 함께 시멘트 및 콘크리트에 혼용하여 굳지 않은 콘크리트의 유동성과 경화 후 콘크리트의 강도 및 내구성을 크게 향상·개선시킨 콘크리트이다.⁽¹⁾

일반적으로 플라이애쉬는 다공성 혹은 단단한 구상입자로 시멘트와 골재 접촉면의 마찰저항을 감소시키는 볼베어링(ball-bearing) 효과로 작업성(workability)이 개선되고, 단위수량을 감소시켜 강도증진 효과를 나타내는 것으로 보고되고 있다.⁽²⁾ 실리카흄은 시멘트 비표면적의 50~80배(분말도 = 200,000m²/kg, 입경 = 0.1~1.0 μ m)에 이르는 고풍성 초미분체로 시멘트 입자사이의 공극 및 불연속영역을 충전하여 고밀도화하는 미세충진효과(micro-filler effect)와 시멘트수화시 발생하는 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과의 포졸란 반응으로 콘크리트

의 강도를 향상시키는 것으로 알려져 있다.⁽³⁾

그러나 다공성의 플라이애쉬는 수분을 흡착하고, 플라이애쉬에 함유된 미연탄소분은 고유동화제 및 고성능감수제를 흡착하므로 콘크리트의 유동성을 저하시킨다.⁽⁴⁾ 또한 실리카흄은 비표면적이 크고, 수산화칼슘과 단시간에 반응하여 겔상태의 불용성 규산칼슘수화물을 생성하기 때문에 유동성이 나빠질뿐만 아니라 시간에 따른 유동성 저하가 크게 된다. 따라서 작업에 필요한 유동성을 확보하기 위해서는 단위수량을 증가시켜야만 한다.⁽⁵⁾

따라서 단위수량을 증가시켜 유동성의 저하를 해결할 수 있으나, 단위수량의 증가는 강도, 내구성 등을 저하시키므로, 고유동화제 혹은 고성능감수제를 사용하여 콘크리트의 물성 저하없이 유동성을 충분히 향상시킬 필요가 있다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 플라이애쉬와 실리카흄 등의 포졸란계 미분말과 불산제조공정시 부산물로 발생하는 II형 무수석고(이하 무수석고라고 약함)를 혼합하여 제조한 분말혼화제(이하 FAS라 약함)로 시멘트를 10, 20wt% 치환한 시멘트 페이스트의 유동성과 시멘트 모르타르의 유동성 및 강도에 미치는 영향을 조사하였다. 이때 FAS의 치환에 따른 유동성저하를 감소시키기 위하여 3종류의 고유동화제를 첨가하였다.

2. 실험

2.1 실험 재료 및 특성

2.1.1 시멘트 및 모래

본 실험에서 시멘트는 3,320cm²/g의 비표면적을 가진 1종 보통 포틀랜드시멘트(국내 H社 시멘트)를 사용하였으며, 모래는 주문진 표준사를 사용하였다.

2.1.2 원료분말

FAS원료는 포졸란계 미분말로 플라이애쉬(국내 H社), 실리카흄(日産)을 사용하였고, 무수석고는 불산 제조공정(CaF₂+H₂SO₄→2HF+CaSO₄)시 부산물로 생성되는 불산부생 무수석고(국내 U社)를 사용하였다. Table 1에는 각 원료분말의 평균입도를 나타내었고, 여기에서 무수석고는 Jet mill로 분쇄한 무수석고-F(1.70μm) 및 막자사말로 분쇄한 무수석고-C(5.62μm)의 평균입도에 따라 2종류로 구분하였다. 각 원료분말의 평균입도는 MALVERN PARTICLE SIZE ANALYZER를 이용하여 습식법으로 측정하였다.

Table 1 Mean particle sizes of fly ash, II-anhydrite and silica fume

Raw materials	Fly ash	II-anhydrite		Silica fume
		Fine	Coarse	
Mean particle size(μm)	17.22	1.70	5.62	2.20

2.1.3 고유동화제

나프탈렌계 고유동화제인 NSF는 국내 J사 제품을 사용하였고, 무수말레인산계(MA)와 폴리카르본산계(PC)를 본 연구실에서 직접 합성하였고, NSF : MA = 8 : 2(NM-2), NSF : PC = 8 : 2(NT-2)의 비율로 혼합·제조하여 사용하였다. 각 시험체에 사용한 고유동화제의 첨가량은 1.2~3.0wt% 범위로 조정하였다. Table 2에 NSF, MA 및 PC에 대한 물리화학적 특성들을 나타냈다.

Table 2 Physical and chemical properties of superplasticizer

Properties	Specific gravity	pH	Viscosity (cP)	Solid content (wt%)	Appearance
Superplasticizer					
NSF	1.204	9.1	180	40.00	Dark brown liquid
MA	1.246	4.8	67	41.67	Transparent liquid
PC	1.238	7.8	320	42.05	Light brown liquid

2.1.4 FAS의 제조

FAS는 Table 3과 같이 각 원료분말의 혼합비에 따라 4종류(α, β, γ, δ)로 구분하여 제조하였다.

Table 3 Mixing ratios of the FAS

FAS type	Fly ash (wt%)	II-anhydrite(wt%)		Silica fume (wt%)
		Fine	Coarse	
α	40	45	0	15
β	40	30	15	15
γ	40	15	30	15
δ	40	0	45	15

2.1.5 시멘트 페이스트 및 모르타르의 배합비

Table 4와 같이 4종의 FAS를 시멘트에 각각 10wt% 치환한 시험체명을 A1, B1, C1, D1로 표기하였고, 20wt% 치환한 시험체명을 A2, B2, C2, D2로 표기하였다. 시멘트 페이스트의 실험결과로부터 Table 5와 같이 시멘트 모르타르를 배합하여 플로우 및 압축강도를 측정하였다.

Table 4 Mixing ratios of specimen and dosage of superplasticizer for cement paste

Specimens	Cement (wt%)	FAS(wt%)				Superplasticizer		
		α	β	γ	δ	NSF	NM-2	NT-2
A1	90	10						
B1			10			1.2	1.2	1.2
C1				10		2.0		
D1					10			
A2	90	20						
B2			20			2.0	2.0	2.0
C2				20		3.0		
D2					20			

Table 5 Mixing ratios of cement mortar for flow and compressive strength test

Specimen	Cement (wt%)	FAS (wt%)	NSF (wt%)	Sand/(Cement+FAS) (wt%)	W/(Cement+FAS) (wt%)
A1, B1, C1, D1	90	10	1.2	2.45	40
A2, B2, C2, D2	90	20	2.0		

2.2 실험방법

2.2.1 시멘트 페이스트의 초기 유동성

시멘트 페이스트의 초기 유동성은 Perenchio 등⁴⁾이 고안한 mini-slump법을 사용하였다. Mini-slump법은 높이(H) 57mm, 하부직경(DB) 38mm, 상부직경(DT) 19mm의 miniature cone을 이용하여 시멘트 페이스트의 흐름정도를 면적(cm²)으로 나타낸다.

Fig. 1과 같이 고유동화제와 물의 혼합액에 FAS와 시멘트의 혼합분말을 투입한 후 교반기(Hamilton Beach Model 34-1 Food Mixer)로 균일하게 혼합하여 물/고형분비(W/S)가 0.40인 시멘트 페이스트를 제조하였다. 혼합시간은 2분 교반 → 3분 정지 → 2분 재교반(2-3-2 혼합법)하였다. 교반 후 시멘트 페이스트를 cone에 채우고 1분 후 cone을 조심스럽게 들어 올렸다. 시멘트 페이스트의 흐름이 정지하였을 때 pat의 직경을 각각 다른 지점에서 6회 측정하여 평균직경을 계산하였고, 평균직경으로부터 계산한 pat의 면적을 mini-slump값으로 하였다.

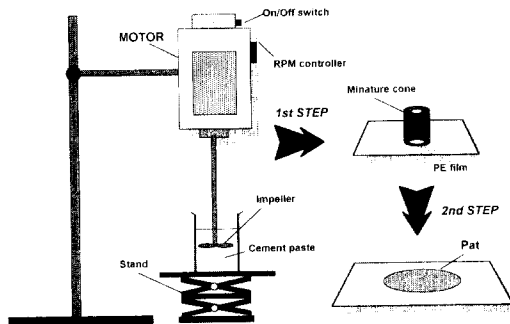


Fig. 1 Schematic diagram for the measurement of mini-slump

2.2.2 시멘트 모르타르의 유동성 및 압축강도

시멘트 모르타르의 유동성과 압축강도를 측정하기 위하여 Table 5와 같이 배합비를 설정하였으며, 시험방법은 KS L 5105(수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법)에 준하여 측정하였다.

압축강도값은 각 재령별로 공시체의 압축강도를 3개씩 측정한 후 이를 평균하여 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 FAS 치환 시멘트 페이스트의 초기 유동성

W/S=0.40에서 FAS를 치환한 시멘트 페이스트의 mini-slump는 측정이 곤란하였다. 따라서 유동성을 향상시키기 위해서 3종류의 고유동화제를 첨가하였다. 고유동화제를 1.2wt% 첨가하고, FAS로

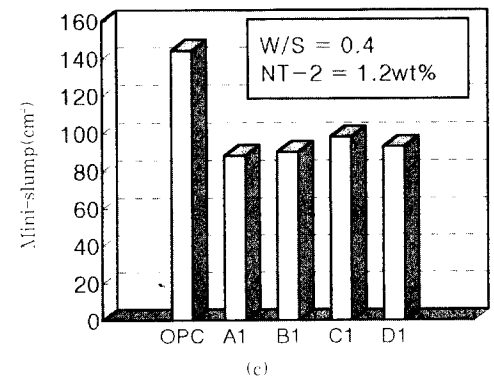
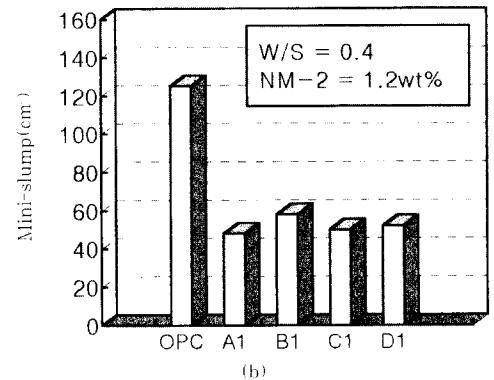
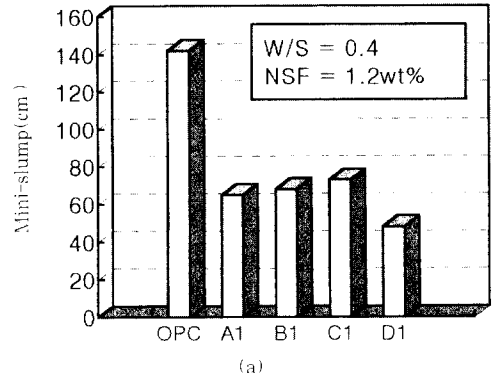


Fig. 2 Fluidity of cement paste substituted by 10wt% of FAS (Superplasticizer=1.2wt%)

10wt% 치환한 시멘트 페이스트의 초기 유동성 측정 결과는 Fig. 2와 같다. FAS로 치환한 시멘트 페이스트는 전반적으로 OPC보다 작은 mini-slump 값을 보임으로써 초기 유동성이 감소되는 결과를 보였다.

동일한 FAS의 치환율에서 NSF를 첨가한 A1, B1, C1의 mini-slump값은 비슷하였으나 D1은 이들보다 30% 정도 작은 값을 보였다. NM-2를 첨가하면 NSF 보다 전체적으로 시멘트 페이스트의 유동성 저하가 더 두드러지게 나타나 FAS로 치환된 시멘트 페이스트의 유동성 향상에는 유효하지 않은 것으로 판단된다. 한편 NT-2의 첨가로 시멘트 페이스트의 mini-slump값은 향상되었으나 OPC보다 작았다. 따라서 고유동화제 1.2wt% 첨가만으로는 FAS 10wt% 치환한 시멘트 페이스트의 유동성 저하를 억제하는데 효과적이지 못한 것으로 판단된다.

3종류의 고유동화제중 유동성 저하억제에 가장 효과적이지 못한 NM-2를 제외하고, NSF와 NT-2의 첨가량을 2.0wt%로 증가시켜 시멘트 페이스트의 mini-slump값을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

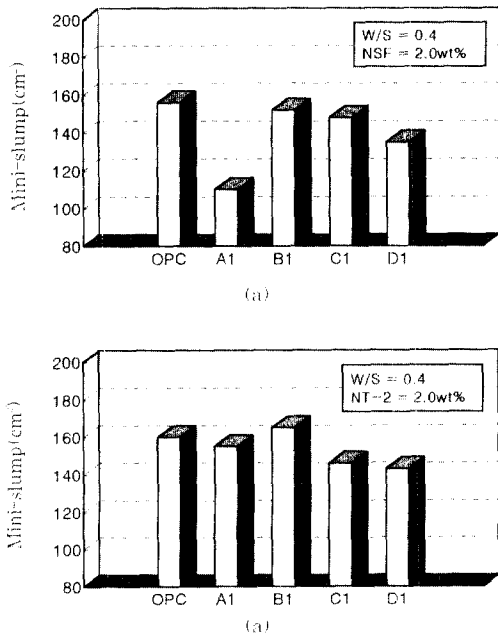


Fig. 3 Fluidity of cement paste substituted by 10wt% of FAS (Superplasticizer=2.0wt%)

NSF의 첨가량 2.0wt%에서는 A1을 제외하고 B1, C1, D1이 모두 OPC와 유사한 mini-slump값을 보였으며 1.2wt% 첨가시보다 2배 이상 유동성이 증가되는 결과를 보였다. NT-2의 첨가는 A1의 유동성을 현저하게 증가시켰으며, B1은 OPC보다 약 10% 정도 높은 mini-slump 값을 보임으로써, FAS로 10wt% 치환한 시멘트 페이스트의 유동성이

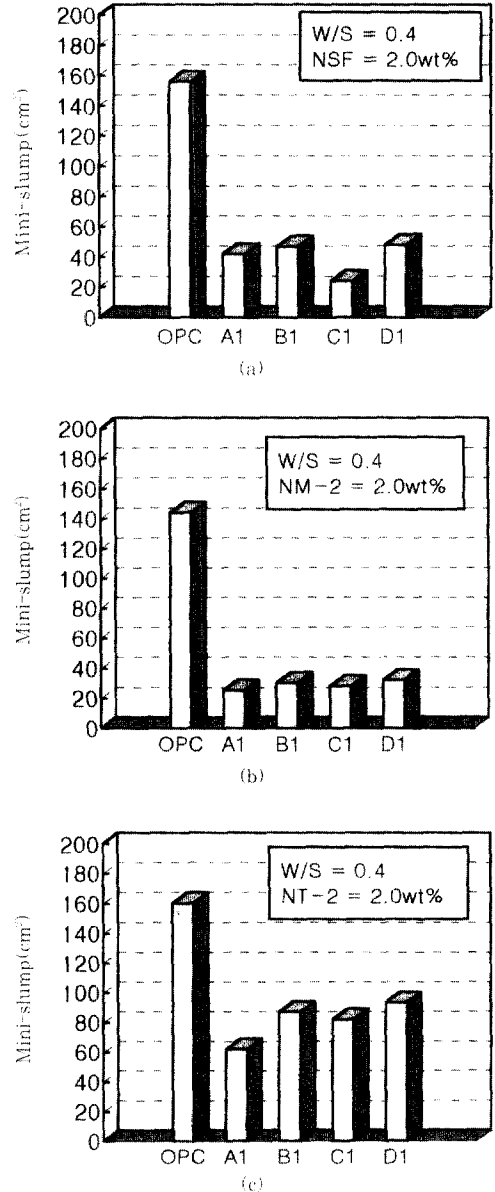


Fig. 4 Fluidity of cement paste substituted by 20wt% of FAS (Superplasticizer = 2.0wt%)

전반적으로 향상됨을 알 수 있었다.

그러나 고유동화제의 첨가량 2.0wt%에서 FAS로 20wt% 치환한 시멘트 페이스트의 유동성은 Fig. 4와 같이 현저하게 유동성이 저하함을 알 수 있었다. 이는 FAS의 분말도가 시멘트보다 미세하므로 치환을 증가에 따라 비표면적이 상승되어 단위수분의 흡수량이 증가되었기 때문으로 사료된다. 또한 FAS의 불용성 수화물이 시멘트 입자사이에 충전되어 입자간의 자유수이동을 억제¹³⁾하기 때문으로 사료된다. 이러한 경향은 Fig. 4와 같이 고유동화제를 2.0wt% 첨가해도 극히 낮은 mini-slump값을 나타내는 것으로부터 알 수 있다.

그러나 NSF, NT-2의 첨가량을 3.0wt%로 증가시키면 시멘트 페이스트의 유동성이 크게 개선되어 OPC와 비슷한 mini-slump값을 보여 FAS의 치환에 따른 유동성의 저하를 억제하는데 효과적이라고 생각된다.

이상의 실험결과를 통해 FAS로 10wt% 치환시 요구되는 NSF, NT-2의 첨가량은 2.0wt%가 적당하다고 생각되며, 20wt%로 치환시에는 3.0wt%가 적당하다고 판단된다.

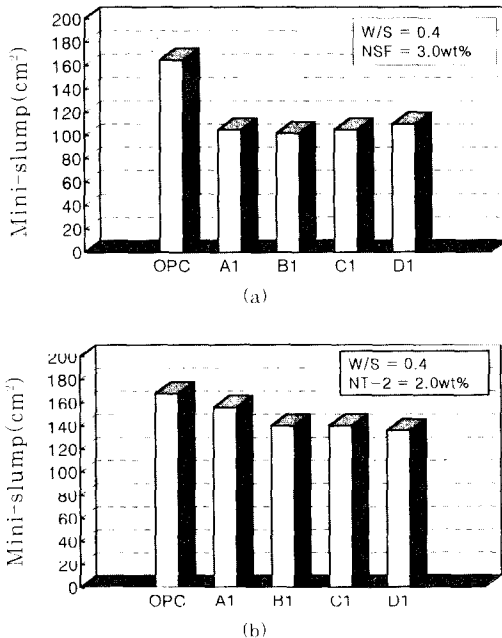


Fig. 5 Fluidity of cement paste substituted by 20wt% of FAS (Superplasticizer=3.0wt%)

그러나 FAS로 20wt% 치환한 시멘트 페이스트의 유동성을 향상시키기 위해서 고유동화제를 3.0wt% 이상 과량 첨가할 수 있으나, 이로인해 응결시간의 지연 혹은 연행공기량의 증가로 인한 강도저하 등의 악영향을 일으킬 가능성¹⁴⁾도 배제할 수는 없다

이상의 결과에서 고유동화제의 첨가량이 같아도 시멘트 페이스트가 다소 상이한 유동성을 보이는 것은 고유동화제의 화학종에 따른 입자표면에 대한 흡착성상 및 FAS 원료분말의 혼합비 차이에 기인한 물리·화학적 작용때문인 것으로 사료된다.

또한 FAS 치환율의 증감에 따른 수분흡수력의 차이 혹은 실리카흙의 강한 친수성으로 인한 물과의 반응으로 시멘트 입자 사이에 형성되는 gel 수화물층의 진행정도에 따라서도 유동성이 크게 영향을 받는 것으로 여겨진다.¹⁵⁾

3.2 FAS 치환 시멘트 모르타르의 flow 변화

FAS로 치환한 시멘트 모르타르도 시멘트 페이스트와 같이 유동성이 감소하여 고유동화제를 첨가하였다. 한편 FAS로 치환된 시멘트 페이스트의 유동성 저하를 억제하는 효과면에서 NSF와 NT-2가 큰 차이를 보이지 않았으므로 모르타르 실험에서는 범용적으로 사용되는 NSF를 선정하였다.

$W/(Cement+FAS)=0.40$ 에서 FAS로 치환된 시멘트 모르타르에 NSF를 각각 1.2wt%(A1~D1), 2.0wt%(A2~D2) 첨가하여 측정한 플로우값을 Fig. 6에 나타내었다. FAS로 치환된 시멘트 모르타르는 NSF를 첨가하지 않은 OPC에 비하여 플로우값이 증가하였으며, A1과 A2가 가장 높게 나타났다. 이와같은 요인은 NSF의 첨가로 FAS의 치환에 따른 유동성 저하가 억제되었기 때문으로 사료된다. 또한 FAS의 치환율을 10wt%에서 20wt%로 증가시켰을때 플로우값이 크게 변하지 않은 이유는 미분체인 FAS의 치환율을 10wt%에서 20wt%로 증가시키면서 NSF의 첨가량을 1.2wt%에서 2.0wt%로 증가시켰기 때문으로 생각된다.

이러한 결과는 일반적으로 동일한 물/시멘트비에서 시멘트보다 입도가 작은 미분체를 시멘트 모르타르에 혼합하면 비표면적의 증가로 다량의 혼합수를 흡착하게 되어 단위수량이 감소하기 때문에 플로우

값이 저하함으로써 유동성이 감소하게 된다는⁵⁹⁾ 村田浩三⁶⁰⁾과 大門 正機⁶¹⁾의 연구보고와 잘 일치한다.

또한 FAS의 배합비에서 입도가 미세한 무수석고 Fine의 혼입량이 증가됨에 따라 플로우값이 증가하는데 반해 입도가 큰 무수석고 Coarse의 혼입량이 증가되면 플로우값이 감소되는 경향을 보였다. 이는 무수석고의 입도가 크면 입형이 불규칙하기 때문에 수분 및 고유동화제를 다량 흡착하여 유동성의 감소를 초래하기 때문인 것으로 사료된다.⁶¹⁾

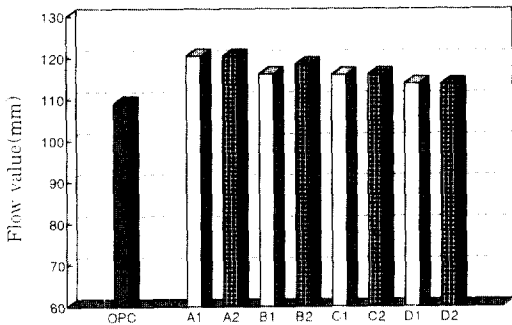


Fig. 6 Flow values of cement mortar specimens (NSF=0wt% for OPC, NSF=1.2wt% for A1~D1, NSF=2.0wt% for A2~D2)

3.3 FAS 치환 시멘트 모르타르의 압축강도 변화

Fig. 7에서 FAS로 치환된 시멘트 모르타르의 압축강도는 OPC보다 증가하였다. 특히 압축강도의 증가는 초기재령인 3, 7일에서 현저하게 나타나 FAS는 초기강도에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이러한 압축강도의 증가는 시멘트 입자보다 작은

미분체들의 충전효과와 실리카흙의 빠른 반응성 때문으로 사료된다. 즉, 실리카흙은 반응성이 높기 때문에 시멘트 성분과 빠르게 반응하여 강도발현을 촉진시킨 것으로 생각된다. 무수석고는 에트링자이트(ettringite)의 생성에 따른 감수효과와 침상결정인 에트링자이트가 시멘트 수화물 사이에 생성된 거대기공(macropore)을 물리적으로 충전시켰기 때문에 압축강도가 증가한 것으로 사료된다.^{61),62)}

이와 같은 실험결과는 大門正機⁶¹⁾등이 제시한 시멘트의 고강도화 방안중 무수석고를 주성분으로 한 혼화재 사용시 시멘트의 수화반응촉진에 따른 다량의 에트링자이트 생성 및 시멘트 경화체조직내 거대기공의 감소로 인해 시멘트의 강도를 증진시킬 수 있다는 보고⁶¹⁾와 잘 일치한다.

그러나 Fig. 7(b)과 같이 FAS를 치환율을 20wt%로 증가시키면 압축강도는 다소 감소되는 결과를 보였다. 일반적으로 시멘트 모르타르의 강도발현은 시멘트 수화시 생성되는 CSH(calcium-silicate-hydrate) gel에 의해 나타난다. 따라서 에트링자이트는 시멘트 수화시 생성된 기공을 충전시킴으로써 보조적인 역할을 하기 때문에 적절한 치환은 시멘트 모르타르의 압축강도를 증가시키지만, 시멘트에 대한 치환율이 과잉으로 높게되면 결과적으로 시멘트 수화에 의해 생성되는 CSH gel이 감소하여 시멘트 모르타르의 강도를 오히려 감소시키는 경향을 보이게 된다.⁶³⁾ 그러므로 시멘트 모르타르의 압축강도를 증가시키기 위한 FAS의 적절한 시멘트 치환율은 20wt%보다는 10wt%가 바람직한 것으로 판단된다.

또한 Fig. 7(a)에서 FAS의 치환율이 10wt%일

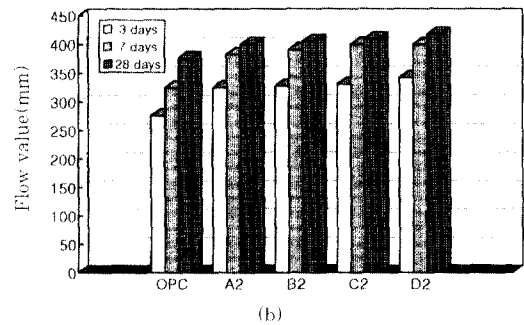
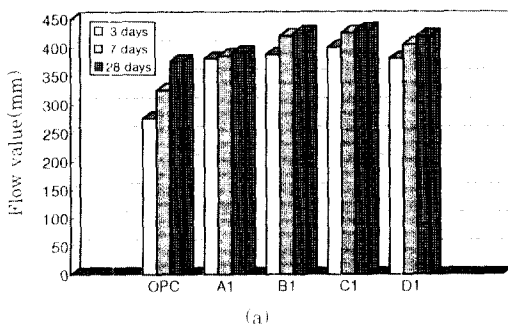


Fig. 7 Compressive strengths of cement mortar specimens (NSF=0wt% for OPC, NSF=1.2wt% for A1~D1, NSF=2.0wt% for A2~D2)

때 무수석고 Fine과 Coarse가 동시에 혼합된 공시체 B1, C1의 압축강도가 다른 공시체보다 높은 압축강도를 보였으나, Fig. 7(b)에서는 무수석고 Coarse의 혼합율이 증가할수록 압축강도가 약간씩 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 무수석고의 분말도가 FAS로 치환한 시멘트 모르타르의 압축강도에서 중요한 변수로 작용함을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 FAS는 시멘트 모르타르의 초기압축강도를 증진시키는데 기여하고, 이러한 압축강도 증진을 위해서는 γ 로 10wt% 치환한 공시체(C1)의 압축강도가 가장 높게 나타나 시멘트 모르타르의 강도를 증가에 기여하는 FAS의 혼합비는 γ 로 판단된다.

4. 결론

1. FAS의 치환을 증가는 OPC보다 시멘트 페이스트의 유동성을 현저하게 저하시켰으며, 고유동화제를 첨가한 결과 NSF 및 폴리카르본산계가 혼용된 NT-2가 유동성 저하에 대한 억제효과가 뛰어났다.

2. W/S=0.40에서 FAS를 10wt% 치환한 시멘트 페이스트의 유동성 저하를 억제하기 위한 NSF와 NT-2의 첨가량은 2.0wt%이었다.

4. 시멘트 모르타르에 FAS의 치환율이 증가함에 따라 요구되는 혼합수량이 증가하였고, 무수석 고의 분말도가 미세할수록 유동성이 증가하였다.

5. FAS로 치환한 시멘트 모르타르의 압축강도는 20wt% 보다 10wt% 일때 더 크게 나타났으며 γ 를 10wt% 치환한 공시체(C1)의 압축강도가 가장 높게 나타났으므로 압축강도 증진을 위한 효과적인 배합비는 γ 임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 충남대학교 공과대학 국책사업 학·연·산 공동계획에 의하여 시행되었으며 이에 감사 드립니다.

1. 박 승범, "섬유보강 콘크리트의 특성과 최근의 기술-섬유보강콘크리트의 관련이용 재료", 레미콘지 기술논문, 6, 1992.
2. N. Kouloumbi, G. Batis, "The Anticorrosive Effects of Fly Ash, Slag and a Greek Pozzolan in Reinforced Concrete", Cement and Concrete Composite, Vol. 16, 1994.
3. 김 형태, "실리카흙 및 실리카흙 콘크리트의 특성과 이용", 한국콘크리트 학회지, Vol. 3, No. 3, 1991.
4. 河野 清, "シリカ木粉木と赤泥との混合使用による高強度コンクリートの研究",セメント技術年譜, Vol. 42, 1988.
5. 노 재성, "고성능콘크리트 제조를 위한 국내의 혼화제 제조현황, 특성 및 반응기구", KCI. International Workshop on the Production Property and Application of High Strength Concrete using Superplasticizer, Oct. 1993, Seoul, Korea.
6. V. S. Ramachandran, "Superplasticizer-Rheology of Cement Paste-", CONCRETE ADMIXTURE HANDBOOK, pp. 415-421.
7. 오 병환, 정 법석, "플라이 애쉬 및 플라이 애쉬 콘크리트의 제반 특성 및 이용", 한국콘크리트 학회지, Vol. 3, No. 3, 1991.
8. 村田浩三 外 3人, "モルタル及びコンクリートの物性に及ぼすシリカフェームのキャラクターの影響", 第48回セメント技術大会講演集, No. 69, 1994.
9. 大門 正機, 坂井 悦郎, "カルシウムアルミネート系水和物の形態抑制", Inorganic Materials, Vol. 2, No. 258, 1995.
10. 深谷 泰文, "セメント・コンクリートの流動特性", セメント・コンクリート, No. 540, 1992. 2.
11. 박 춘근 外 3人, "고강도 발현 시멘트 재료", 요업재료의 과학과 기술, Vol. 9, No. 4, 1994.
12. 大門 正機, 坂井 悦郎, "高強度セメント", Inorganic Materials, Vol. 1, No. 252, 1994.
13. 三原 敏夫 外 3人, "エトリンカイト系混和材を用いた超早強コンクリートの性質", セメント・コンクリート, No. 548, 1992. 10.

(접수일자: 1997. 1. 13)