고강도 콘크리트 제조를 위한 시멘트 및 혼화제의 성능 비교 평가

송용순* · 강석화 · 이근성
<동양시멘트>

1. 서 론

90년대 후반부터 다양한 주거건물을 선호하는 수요자의 요구에 따라 콘크리트 구조물은 획일화된 구조물에서 초고층 주상복합건물 및 다양한 형태의 구조물을 설계, 구축되면서 기존의 콘크리트로는 시공이 불가하거나 시공비용이 상승하는 등, 많은 어려운 문제점을 갖고 있기 때문에 고유동, 고강도, 고내구성을 갖는 콘크리트의 개발 및 적용이 본격화되기 시작하였다.

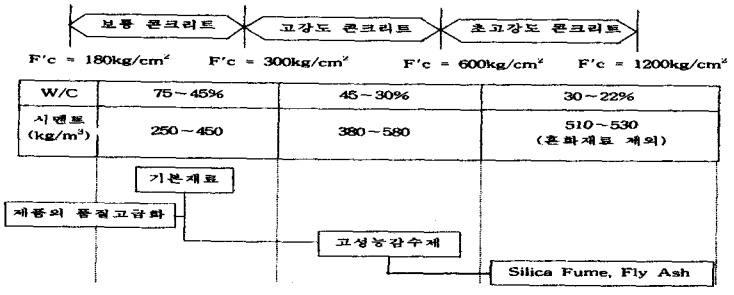
특히, 고강도 고유동 콘크리트의 경우 시멘트량이 많은 부배합 콘크리트에서는 시멘트의 유동성과 혼화제의 성능이 매우 중요한 역할을 하기 때문에, 강도뿐만 아니라 유동성 측면에서도 유리한 시멘트 및 고성능감수제의 적용은 더욱 증가할 것으로 예상되고 있다. 그러나, 혼화제의 종류가 다양화되면서 콘크리트의 유동성의 발현 특성이 다르게 나타나는 등, 이른바 시멘트와 혼화제와의 적합성이라는 새로운 범주의 문제가 대두되고 있다. 이러한 현상으로 인해 시멘트 및 혼화제의 최종 소비자인 건설 및 레미콘 업체에서는 고강도 콘크리트 제조시 성능을 자체적으로 비교 평가하고 이에 맞는 재료를 선정하기 위한 많은 노력이 이루어지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 고강도 및 고유동성 콘크리트 제조에 적합한 시멘트와 혼화제의 성능을 파악할 목적으로 시멘트와 혼화제의 종류를 변화시키면서 각 종류에 따른 성능을 비교하고 이를 사용한 고강도 콘크리트의 최적 배합 도출에 대해서 검토하였다.

2. 고강도 콘크리트의 분류 및 시험방법

2.1 고강도 콘크리트의 분류

고강도 콘크리트의 강도 수준은 건설교통부 제정 건축공사표준시방서 및 콘크리트 표준시방서에 의하면 종래에는 설계기준강도 360kgf/㎠



<그림 1> 고강도 콘크리트의 제조환경 분류

<표 1> 시멘트 및 고성능감수제의 유동특성 평가 방법

구분	W/C (%)	혼화제 종류	혼화제 첨가율 (%)	시멘트 종류	혼합방법	측정항목 (단위:㎜)
페이스트	30.0	NSF계 PC계	1.5	보통포틀랜드 시멘트 (2종류)	시멘트+물+혼화제 동시투입후 손비빔 2분	간이플로우
몰탈	32.0				콘크리트배합과 동일	미니슬럼프플로우

※ 몰탈배합은 고강도콘크리트 배합에서 굵은골재만을 제외한 원재료를 사용하여 평가 (잔골재는 표면건조 포화상태 유지)

이상을 고강도 콘크리트로 정의하였으나 1999년도에 전면적으로 개편되어 건축공사 및 토목공사에서 400kgf/㎠이상으로 상향조정되었다.

고강도 콘크리트는 재료적인 측면에서 <그림 1> 과 같이 분류되지만 일반 재료에 고성능 감수제를 사용하여 낮은 물시멘트비로 고강도 콘크리트를 제조하는 경우와, 특수한 재료나 기술을 사용하여 생산하는 고강도 콘크리트로 구별된다. 이러한 분류로서, 주로 600kgf/㎠ 이하에서는 고성능 감수제만을 사용하는 것으로 생산이 가능하고, 그 이상의 강도가 요구될 때는 특수한 재료나 기술이 필요하게 된다.

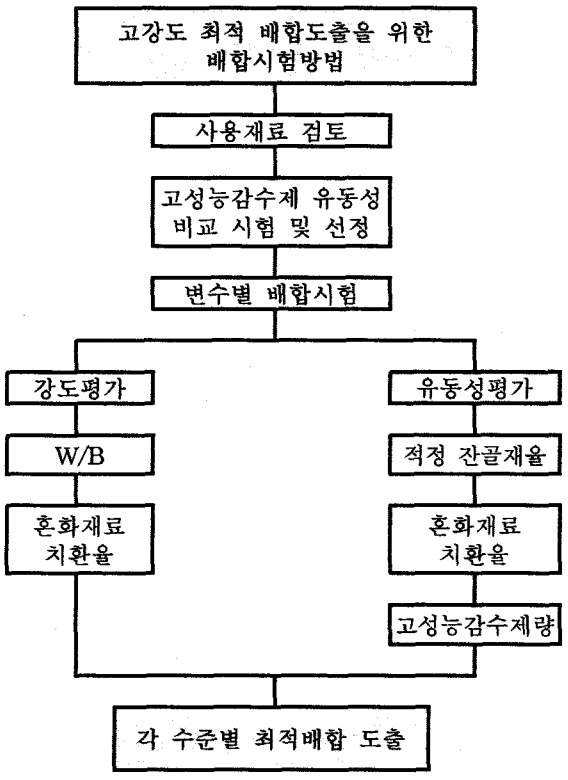
2.2 시험방법

2.2.1 시멘트 및 고성능감수제 종류별 유동 성능 비교

시멘트 및 고성능감수제의 유동 성능을 <표 -1> 및 <표 2> 와 같은 방법에 의해 간이적으로 상호 비교하였다. 특히, 몰탈에 의한 유동성능 평가방법은 고강도콘크리트 배합에서 굵은골재를 제외한 몰탈배합으로 콘크리트 배합시의 혼합방법 즉, 원재료 투입순서 및 혼합시간 등을 동일하게 하고 몰탈 미니 슬럼프 플로우에 의해 각 고성능감수제의 유동성능을 비교하였다.

2.2.2 고강도 콘크리트 최적 배합 도출 순서

본 연구에서는 설계기준강도별 및 유동성에 적합한 고강도 콘크리트의 최적 배합비 도출을



<그림 2> 고강도 콘크리트 배합 설계 순서도

<표 2> 몰탈 유동성을 평가하기 위한 고강도 콘크리트 배합

W/B (%)	S/a (%)	W (kg/m³)	단위재료량(kg/m³)				AD (B×%)
			C	FA	S	G	
32	41	170	478.1	53.1	676.1	1029.1	1.5

<표 3> 시멘트 물리·화학 분석 결과

시멘트	LSF	HM	SM	IM	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
A	92.29	2.10	2.44	1.60	51.82	19.82	8.24	9.86
B	87.09	1.97	2.40	1.54	39.97	31.83	8.45	10.77

시멘트	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	T.A	f-CaO	LOI
A	20.55	5.18	3.24	62.16	3.75	1.97	1.12	0.09	0.83	1.31	2.43
B	21.62	5.45	3.54	61.81	2.13	1.99	1.07	0.22	0.92	1.08	1.15

시멘트	Blaine	R45	주도	Flow	초결	종결	안정도	3일	7일	28일
A	3387	10.1	24.9	102	4:00	6:15	0.19	212	319	409
B	3160	11.3	24.3	103	4:35	7:05	0.04	199	289	391

위하여 <그림-2>와 같은 배합설계 순서로 고성능감수제 선정 및 첨가량, 플라이애시 및 실리카 흄의 최적 치환율 등을 결정하였다.

3. 사용재료

3.1 시멘트

본 연구에서는 시멘트 특성에 따른 명확한 차이를 비교하기 위하여 두 종류의 시멘트를 선정하여 시험에 사용하였으며 각 시멘트에 대한 물리·화학 분석 결과는 <표-3> 과 같다.

시멘트 A와 B는 광물조성 특히 C_3S 및 C_2S 함량이 크게 다르며, A에 비해 B의 Blaine값은 200㎠/g이상 낮고, 종결은 약 1시간 늦으며, 초기 3일 강도는 13kgf/㎠ 낮았다.

<표 4> 고성능감수제 종류 및 고형분량

제조사	주성분	고형분량 +(%)	비고
A	NSF계	41.8	○ 고형분량 범위 - 나프탈렌계 40~42% - 폴리카본산계 20~25% ○ 비중 ≒ 1.0.
	PC계	21.2	
B	NSF계	40.0	
	PC계	25.0	
C	NSF계	40.0	
	PC계	25.0	
D	PC계	20.0	
E	PC계	20.0	
F	NSF계	40.0	
	NSF계	40.0	

3.2 고성능감수제

혼화제는 고강도 콘크리트 제조에 주로 사용하고 있는 6개사의 나프탈렌계(이하 NSF계)와 폴리카본산계(이하 PC계) 고성능감수제를 입수하여 사용하였다. 입수한 고성능감수제의 종류 및 기본 물성은 <표-4>와 같다.

3.3 혼합재

혼합재는 콘크리트의 유동성 및 강도, 내구성을 향상시키기 위해 플라이애시와 실리카 흄을 사용하였다. 플라이애시는 비중 2.22, Blaine 값 4,808㎠/g의 보령산 제품을 사용하였고, 실리카 흄은 노르웨이산으로 비중 2.0, 비표면적은 200,000㎠/g이었다.

3.4 골재

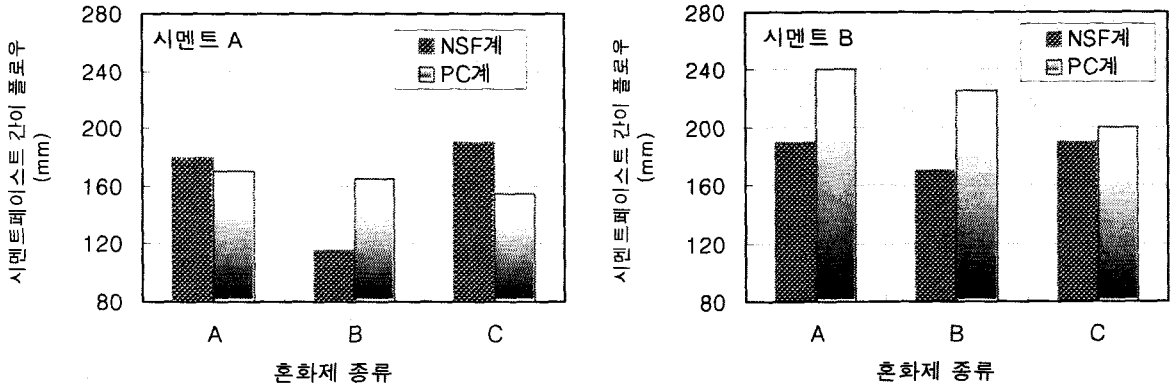
잔골재는 삼척 근덕 하천사로 비중 2.6, 흡수율 1.4, 조립율 2.58를, 굵은골재 25㎜는 비중 2.7, 조립율 7.08을, 19㎜의 경우 비중 2.7, 조립율 6.58의 쇄석을 사용하였다.

4. 시험결과 및 고찰

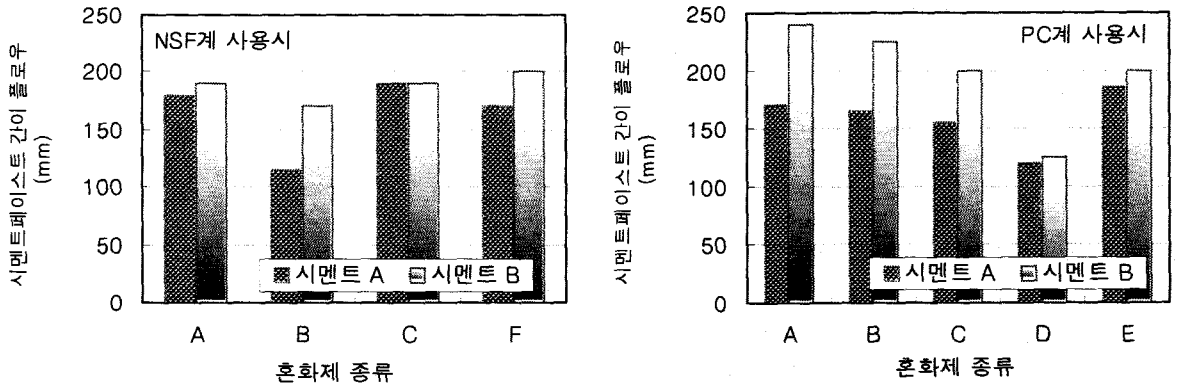
4.1 시멘트 페이스트에 의한 유동성능 평가

<그림 3>은 시멘트 및 고성능감수제 종류에 따른 페이스트의 플로우 변화를 나타낸 것으로 시멘트 A를 사용한 경우 혼화제 B의 경우를 제외하고 NSF계가 유동성이 높은 반면, 시멘트 B의 경우 혼화제 제조사와 관계없이 NSF계보다 PC계 고성능감수제 사용시 유동성이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 또한, NSF계 고성능감수제 사용시 시멘트 A와 B의 유동성은 비슷하게 나타난 반면, PC계 고성능감수제 사용시 시멘트 A보다 B의 유동성이 높게 나타나 전반적으로 시멘트 B가 유동성이 양호하게 나타났다. 따라서,고강도 콘크리트의 유동성에 영향을 미치는 요인중에는 클링커 광물조성, 블레인 및 입도분포, 석고존재형태, 수용성알칼리량, SO_3 함량 등 여러 가지가 있지만 본 연구의 검토범위에서는 광물조성 즉, C_2S, C_3S 차이와 블레인에 의한 유동성 차이가 가장 큰 것으로 추정된다.

또한, 시멘트 페이스트 유동성 시험시 작업성이 양호한 플로우의 범위는 180~210㎜로 이 범위에 속하지 못하는 혼화제도 있는 것으로 나타났다. 즉, 동일한 시멘트를 사용하더라도 고성능감수제의 감수율은 주성분 및 제조사별로 상이하게 나타나기 때문에, 결합재량이 증가함에 따라 고성능감수제 첨가량이 증가하는 고강도 콘크리트에서는 고성능감수제의 선정에 있어서 충분히 검토할 필요가 있을 것으로 사료된다. 이러한 결과로 보아, PC계에서 제조사별로 큰 차이를 보이는 이유는 범용적으로 제품을 제조하지

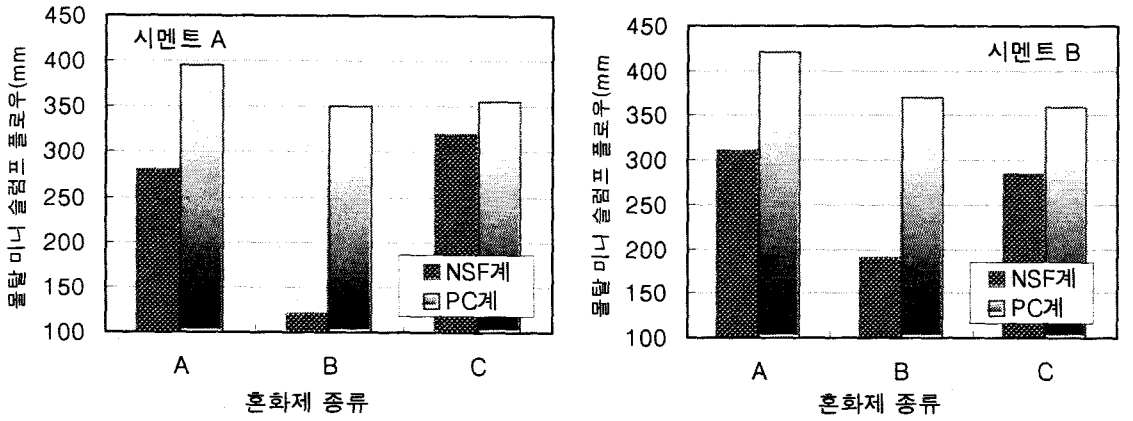


a) 시멘트 종류별 혼화제의 특성비교

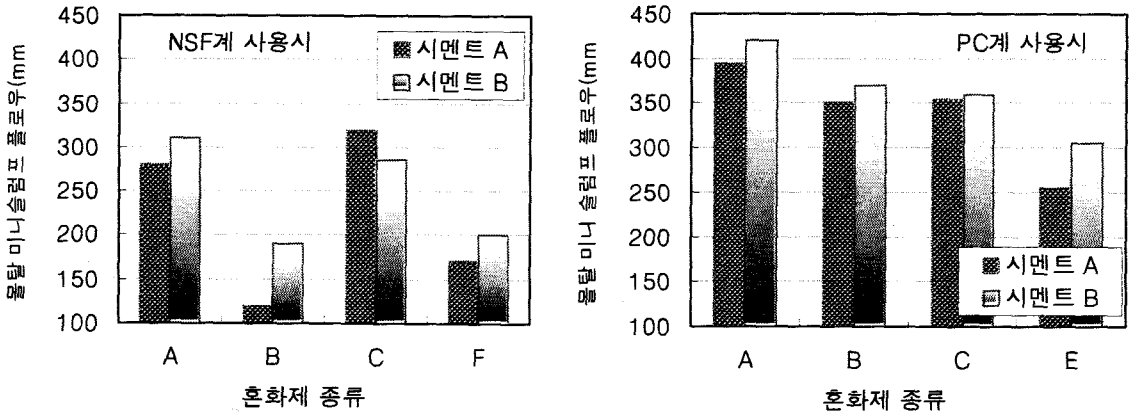


b) 혼화제 type별 시멘트 특성 비교

<그림 3> 페이스트 간이 플로우 시험 결과



a) 혼화제 종류별 혼화제 특성 비교



b) 혼화제 type별 시멘트 특성 비교

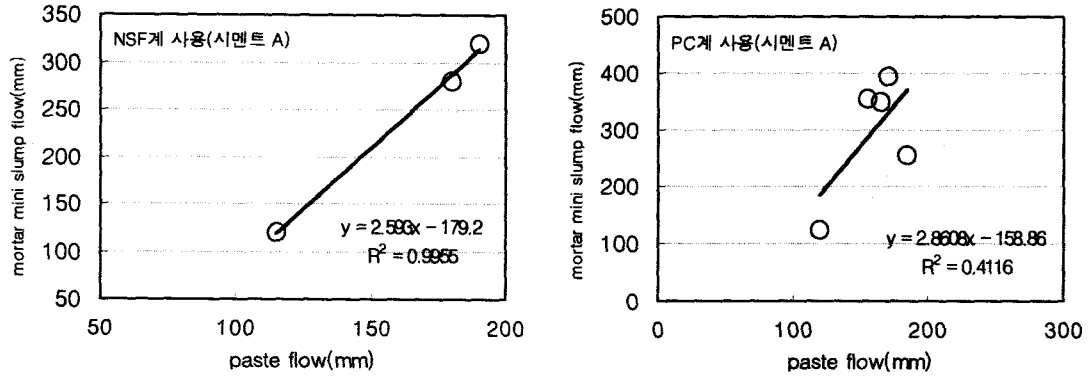
<그림 4> 몰탈 미니 슬럼프 플로우 시험 결과

않고 특정 현장별로 사용 원재료가 다른 점을 고려하여 원료 조합 및 고형분량을 달리하는 혼화제 업체의 특성 때문에 특정 제조사의 제품이 우수하다고 평가할 수 없으나 동일한 시멘트에서도 혼화제 종류별로 큰 차이를 나타내어 시멘트와 혼화제와의 상호 적합성이 존재하는 것으로 판단된다.

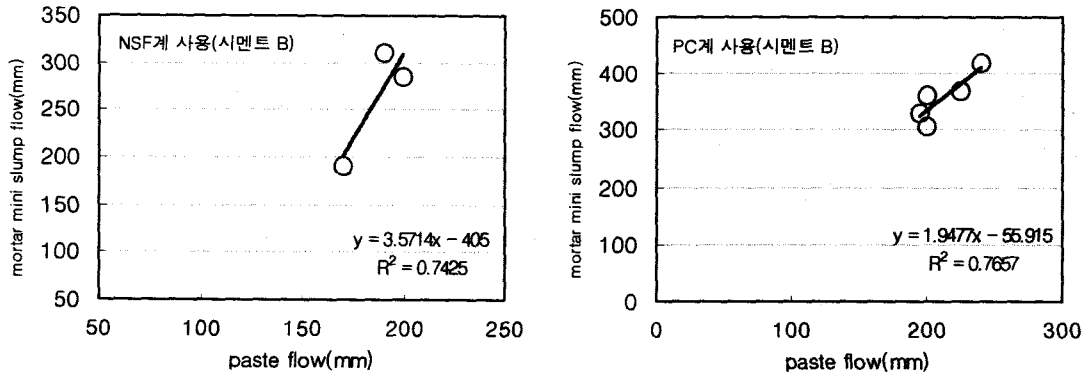
4.2 몰탈에 의한 유동성능 평가

고강도 콘크리트는 원재료 투입방법 및 순서, 혼합시간 등에 따라서 유동성의 차이를 보이기 때문에 시멘트 페이스트 유동성 시험에 의한 고성능감수제의 성능 평가와는 별개로 몰탈에 의한 유동성능 평가를 실시해 상호 비교 검토하였다.

<그림 4>는 혼화제 종류에 따른 몰탈의 유동성능 시험결과를 보여주는 것으로서 시멘트 페이스트에 의한 각 고성능감수제의 유동성 평가시와 다소 차이를 보이는 경향을 보였다. 즉, 시멘트 페이스트 시험에서는 시멘트 A 사용시 NSF계가 PC계보다 유동성이 양호한 경향을 보였으나, 몰탈 시험 결과는 전반적으로 PC계 혼화제가 더 우수한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 당초 예상했던 대로 PC계 고성능감수제 사용에 의한 고강도 콘크리트 배합시 혼합방법 및 시간, 모래 등에 따라서 유동성은 큰 차이를 나타낼 수 있다는 것과 시멘트 페이스트를 이용한 유동성의 평가는 몰탈과 콘크리트의 평가시와 차이가 있음을 확인할 수 있었다.



a) 시멘트 A



b) 시멘트 B

<그림 5> 페이스트 및 몰탈 유동성 상관 관계 비교

또한, 시멘트 페이스트 시험결과와 몰탈시험 결과의 상호관련성을 확인한 결과 <그림 5> 와 같이 시멘트 A의 경우 NSF계 사용시 매우 상관성이 높은 반면 시멘트 B의 경우 그 반대로 PC계가 상대적으로 더 상관성이 높은 것으로 나타났다. 따라서, 시멘트 A의 경우 앞서 언급한 것처럼 NSF계 혼화제와 상호 적합성이 높은 반면 PC계 사용시는 시멘트 B와 달리 상대적으로 비호환적인 것으로 나타나 시멘트의 특성에 의한 차이로 보여지며, 이에 대한 추가적인 검토가 필요한 것으로 사료된다.

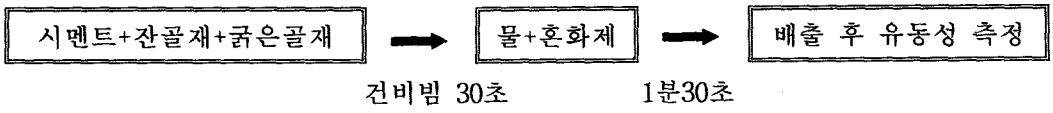
본 시험결과를 종합해 볼 때 시멘트의 종류에 상관없이 감수율이 가장 양호한 것은 PC계의 경우 혼화제 A, NSF계의 경우 C사의 제품으로 고강도 콘크리트 배합에 가장 적합한 것으로 판단되며, 이러한 결과를 바탕으로 고강도 콘크리트 제조시의 최적 배합을 도출하였다.

4.3 고강도 콘크리트 최적 배합비 도출 시험

시멘트 페이스트 및 몰탈시험결과 선정된 고성능감수제를 사용하여 물 결합재비, 실리카 흄 및 플라이애시 치환율, 굵은골재 최대 크기, 고성능감수제의 첨가량 등 주요 변수 등을 통해 최적 배합비를 도출하였으며, 그 결과를 바탕으로 고강도 및 유동성에 미치는 시멘트 및 고성능감수제의 영향을 검토하였다.

4.3.1 시험 및 양생방법

고강도 콘크리트 원재료의 혼합 순서는 <그림 6> 과 같으며, 혼합 직후 콘크리트 유동성 및 공기량을 측정하고 강도 측정용 몰드를 제조하였다. 혼화제의 투입시기 및 방법, 시멘트 페이스트 및 몰탈, 혼화제의 혼합 후 자갈 투입순서



<그림 6> 고강도 콘크리트 제조시의 혼합 방법

등 고강도 콘크리트의 제조 방법에 따라서 유동성 및 강도 발현 등에 영향을 미치는 요인은 있지만 본 시험에서는 동일한 방법으로 배합시험을 실시하였다.

양생은 콘크리트 공시체 제조후 2일후에 탈형하고 23±2℃의 수조에 침지 양생하였으며, 소요재령에서 연마기로 그라인딩한 후에 압축강도를 측정하였다.

4.3.2 유동성 및 압축강도에 미치는 각 요인 평가

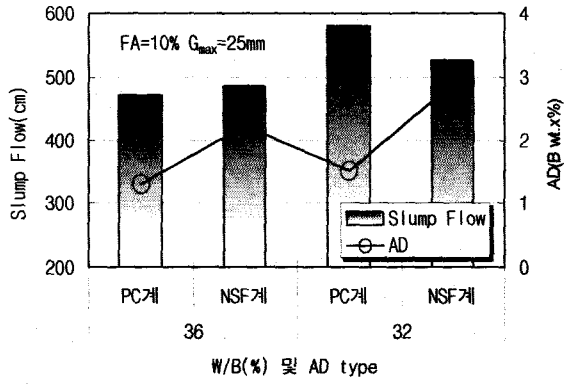
(1) 고성능감수제 종류

플라이애시 10%를 사용한 고강도 콘크리트 배합에서 고성능감수제의 주성분에 따른 첨가율과 슬럼프 플로우를 비교한 결과는 <그림 7>과 같다. 목표 유동성을 만족하기 위해 NSF계의 첨가율은 결합재 대비 2.0%이상으로 콘크리트 점성이 높은 경향을 보인 반면, PC계는 1.5%이하에서 충분한 유동성을 나타내었다. 이 결과는 몰탈 시험결과와 유사한 감수율 특성을 확인할 수 있었다.

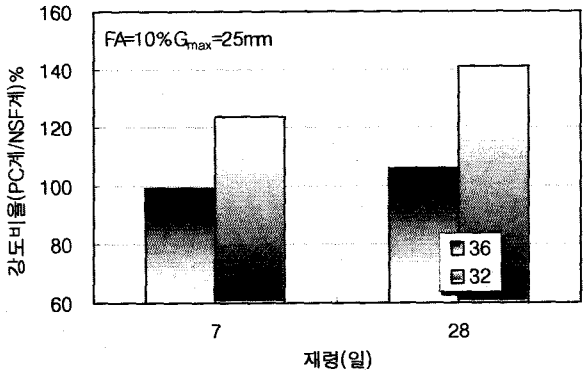
압축강도 시험결과를 보면, <그림-8> 과 같이 W/B=32%에서 NSF계 대비 PC계가 140%이상으로 매우 우수한 경향을 나타내었는데, 이는 NSF계 고성능감수제는 동일한 유동성을 나타내기 위한 첨가량이 2.8%이상으로 초기 경화 지연과 더불어 분산효과가 PC계에 비해 상대적으로 불리하고 과잉 점성으로 인한 다짐 불량 등에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 W/B=32%이하의 부배합 고강도 콘크리트에서 NSF계 고성능감수제의 사용은 유동성 저하와 더불어 강도 증진이 불리하기 때문에 부적절한 것으로 사료된다.

(2) 시멘트 종류

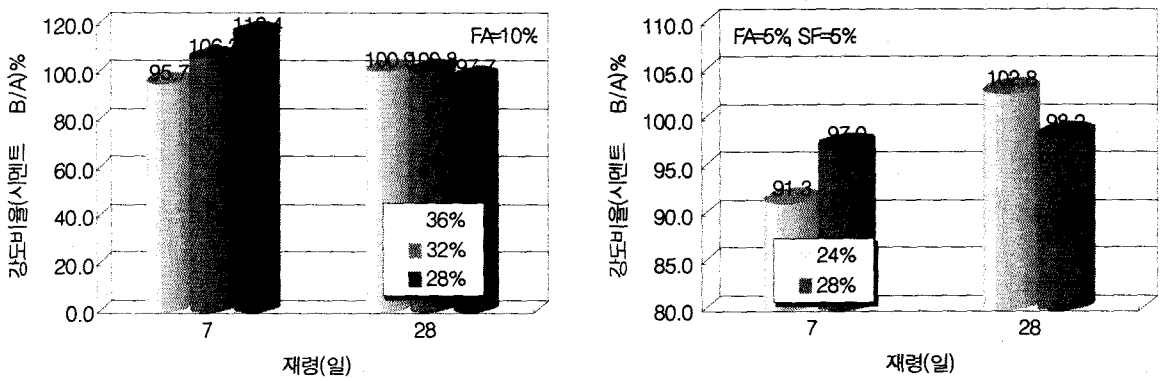
동일 배합에서 시멘트 A와 시멘트 B 사용에 따른 강도 차이를 비교한 결과는 <그림-9> 와 같다. 시멘트 A와 시멘트 B 사용에 따른 강도 차이는 초기 재령에서 시멘트 A가 다소 큰 경향을 보였으나 재령 28일 강도에서는 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 고강도 콘크리트의 강도발현은 시멘트의 K-강도보다는 물-시멘트비의 지배를 받기 때문에 시멘트 K-강도가 고강도 콘크리트의28일 강도발현에는 직접적인 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.



<그림 7> 고성능감수제 종류 및 첨가량별 유동성 비교



<그림 8> 고성능감수제 종류별 압축강도비교



<그림 9> (초)고강도 영역에서의 시멘트별 강도 비교

4.3.3 고강도 콘크리트 최적 배합비 도출

설계기준강도 400~700kgf/㎠에 적합한 배합비를 추정하기 위해 고성능감수제 종류, 혼합재 종류 및 치환율, 굵은골재 최대 크기 등 각 인자에 따른 변수별로 압축강도 결과를 분석하였으며, 그 결과를 토대로 <표 5> 와 같이 각 설계기준강도에 맞는 배합비를 추정하였다.

5. 결 론

고강도 및 고유동성 콘크리트 제조에 적합한 시멘트와 혼화제의 성능을 파악할 목적으로 시멘트와 혼화제의 종류를 바꾸어 가면서 각 종류에 따른 성능을 비교하고 이를 사용한 고강도 콘크리트의 최적 배합 도출에 대해서 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고성능감수제의 적합성 및 시험방법

고성능감수제의 종류 및 메이커별에 따라서 시멘트의 유동성(분산성)은 큰 차이가 있었으며, 주성분이 NSF계보다 PC계가 감수율이 크고, 고강도 콘크리트에 적합한 것으로 나타났다.

또한, 고성능 감수제의 종류에 따른 유동성 평가방법은 NSF계는 시멘트 페이스트에 의한 간이 유동성 방법이, PC계 고성능감수제의 유동성 평가는 현장 조건을 고려한 몰탈 시험에 의한 유동성 평가가 상대적으로 보다 정확한 평가방법인 것으로 판단된다.

<표 5> (초)고강도 콘크리트 배합 추정

설계기준강도 (kgf/㎠)	G_{max} (㎜)	W/B (%)	S/a (%)	W (kg/m³)	단위재료량(kg/m³)					AD (B wt.×%)
					C	FA	SF	S	G	
400	25	37	42.9	170	390.5	68.9(15%)	-	731	1010	1.0
500	25	32	41.0		478.1	53.1(10%)	-	676	1010	1.2
	19	34	42.0		450.0	50.0(10%)	-	704	1010	1.2
600	19	28	37.9		546.4	30.4(5%)	30.4(5%)	600	1021	1.6
	19	28	37.5		516.1	60.7(10%)	30.4(5%)	590	1021	1.5
700	19	24	33.9		616.3	35.4(5%)	56.7(8%)	504.5	1022	2.0
비 고	※용적 980ℓ, 공기량 3%이하, 고강도 슬럼프 플로우 55±5㎝, 초고강도 슬럼프 21.0㎝이상 ※AD PC계, 모래 F.M 2.58 ※배합강도=설계기준강도×할증계수 1.2 적용									

(2) 유동성에 미치는 시멘트의 특성

시멘트 A를 사용한 고강도 콘크리트 배합은 시멘트 B보다도 동일한 유동성을 확보하기 위한 고성능감수제의 첨가량은 결합재 중량대비 0.2~0.5% 추가해야 하는 것으로 나타나 시멘트 B보다 유동성 측면에서 불리한 것으로 나타났으며. 결합재량이 많은 초고강도 콘크리트일수록 그 경향은 뚜렷한 것으로 나타났다.

(3) 고강도 콘크리트 최적 배합 도출

현장에서 입수 가능한 재료를 바탕으로 시멘트의 특성에 맞는 고성능감수제의 선정과 원재료별 특성을 고려한 설계기준강도별 고강도 콘크리트 최적 배합 도출이 가능하였다.

(4) 향후 과제

향후 국내의 경우 고강도 및 초고강도 콘크리트 적용의 확대가 예상되고 있는 가운데 시멘트 및 특정 혼화제와의 적합성 등이 크게 거론되고 있는 추세이기 때문에 고강도·고유동 콘크리트 등 특수 콘크리트의 분야에서 사용되는 재료 특히 PC계 혼화제 등 혼화제의 종류, 시멘트의 물리화학적 성질에 따라서 유동성에 미치는 원인분석이 우선 실시될 필요가 있으며, 이와 더불어 시멘트 및 혼화제의 적합성을 고려한 배합 설계시 양자간의 상호 기술 협력이 절실히 필요한 것으로 판단된다.