산업부산물을 활용한 고유동화 초고강도 콘크리트의 기초물성 및 동결융해특성

A Fundamental Study on Very High Strength and High Flowable Concrete using Industrial By-products

김 병 권* 이 석 홍** 정 하 선*** 이 영 남**** 문 한 영*****

Kim, Byoung-Kwon Lee, Suck-Hong Jung, Ha-Sun Lee, Young-Nam Moon, Han-Young

ABSTRACT

This paper presents the fundamental study on rational manufacture of Very High Strength(VHS) concrete using industrial by-products as like silica fume, slag and fly ash.

In this study, we had tested various mixing cases to manufacture the VHS concrete(target compressive strength : over 1,000 kgf/cm^2) which is easily workable (target slump flow : 60± 10cm), The main variables studied are; 1) test variables to find the optimum replacement ratio of mineral admixture, 2) test variables to find a rational water-binder ratio, a proper binder content, 3) test variables to find the method for reduction of slump loss, 4) test variables to know the influence of air entrainment on frost resistance. From the test results, it is concluded that the rational mix design can be made by using 40% slag, 10% silica fume, and water reducing agent(slump loss reduction type). We found that it is unnecessary to entrain air for freeze-thawing resistance.

1. 서론

최근 콘크리트구조물의 초고층화, 장대화, 경량화 및 특수기능 등이 요구되고 있는 추세이므로 이러한 시대적 배경에 호응하기 위하여 콘크리트의 고강도, 초고강도 및 고성능화는 필요 불가결하다고 생각된다.

본 연구에서는 산업부산물을 혼화재로 활용한 초고강도콘크리트를 실용화하기 위한 기초단계 연구의 일환으로, 산업부산물인 실리카흄, 고로슬래그 및 플라이애시를 각각 시멘트와 몇 단계로 대체하여 제조한 모르타르의 재료특성에 대한 실험을 수행하여 비교분석하였으며, 초고강도콘크리트를 제조하기 위한 콘크리트의 배합은 물-결합재비가 상당히 낮고 단위결합재량이 크므로 시공성확보가 매우 중요하게 생각되어, 슬럼프플로우값이 큰 60±10cm정도의 고유동콘크리트를 목표로 제조하였고 유동성이 시간의 경과에 따라 변화가 큰 점을 고려하여 타설기간중 유동성 손실을 저감할 수 있는 방안을 마련하기 위한 실험을 수행한 결과에 대해서도 고찰하였다. 또한 혼화재료의 치환변수와 공기량의 변수에 따른 동결융해특성을 비교하였다.

* 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 주임연구원 ** 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 책임연구원
*** 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 연구위원 **** 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 연구소장
***** 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수

2. 실험개요

(1) 사용재료 : 본 실험에 사용된 재료의 물리적 성질은 표 1과 같으며, 고강도를 확보하기 위하여 굵은골재의 최대치수 13mm인 쇄석을 사용하였다.

표 1 사용재료의 물리적 성질

구 분	특 성
시멘트	비중 : 3.15, 분말도 : 3,366cm²/g
고로슬래그	비중 : 2.90, 분말도 : 4,500cm²/g
플라이애시	비중 : 2.18, 분말도 : 3,720cm²/g
실리카흄	비중 : 2.60, 분말도 : 260,000cm²/g
잔골재	비중 : 2.60, 흡수율 : 0.95, 조립률 : 2.80
굵은골재	비중 : 2.65, 흡수율 : 0.87, 조립률 : 6.33
유동화제	비중 : 1.05, Polycarboxylic
AE제	비중 : 1.02, Lignin sulphonate

(2) 모르타르의 제조 : 모르타르의 배합은 보통포틀랜드시멘트에 실리카흄의 대체율 3수준(결합재의 중량에 대하여 0%, 10% 및 20%), 고로슬래그 미분말 및 플라이애시의 대체율 각각 4수준(결합재의 중량에 대하여 0%, 10%, 20% 및 30%)으로 변화시켜 표 2와 같이 변수를 선정하였다. 이때 잔골재는 주문진산 표준모래를 사용하였다.

표 2 광물질혼화재의 선정을 위한 실험변수

Items / Replacement of SF	Replacement of SG				Replacement of FA			
	0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%
0%	SF_0SG_0	SF_0SG_{10}	SF_0SG_{20}	SF_0SG_{30}	SF_0FA_0	SF_0FA_{10}	SF_0FA_{20}	SF_0FA_{30}
10%	$SF_{10}SG_0$	$SF_{10}SG_{10}$	$SF_{10}SG_{20}$	$SF_{10}SG_{30}$	$SF_{10}FA_0$	$SF_{10}FA_{10}$	$SF_{10}FA_{20}$	$SF_{10}FA_{30}$
20%	$SF_{20}SG_0$	$SF_{20}SG_{10}$	$SF_{20}SG_{20}$	$SF_{20}SG_{30}$	$SF_{20}FA_0$	$SF_{20}FA_{10}$	$SF_{20}FA_{20}$	$SF_{20}FA_{30}$

(3) 콘크리트의 제조 : 물-결합재비, 단위결합재량, 각각 혼화재의 대체율, 잔골재율 및 고성능감수제의 사용량을 변수로 한 40배치의 예비실험을 수행하였으며, 이는 지면의 제약 관계상 생략하였다. 이 결과에서 도출된 초고강도콘크리트의 최적의 배합비를 토대로 하고, 고성능감수제 종류, 고로슬래그 미분말의 대체율, AE제의 사용량을 변수로 하여 표 3과 같이 실험배합을 실시하였다.

(4) 동결융해시험 : 동결융해시험은 KS F 2456(급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법)에 근거하여 실시하였으며, 75×100×400mm의 시편을 제작하여 재령 14일에 초기동탄성계수를 측정한 후 Marui회사의 전자동 동결융해 시험기내에 투입시켜 시편중심부의 온도를 최저 -18℃에서 최고 4℃로 반복시키면서 매 30사이클마다 동탄성계수를 측정하였고 아래와 같은 항목으로 콘크리트 시편의 동결융해작용에 의한 성능저하를 평가하였다.

상대동탄성계수 $P_C = (\frac{n_c^2}{n_o^2}) \times 100$

내구성지수 $DF = \frac{P \times N}{M}$

여기서, P_c, P : c 사이클 후, N 사이클 후의 상대동탄성계수(%)

n_o, n_c : 동결융해 개시직전, c 사이클 후의 일차공명 진동수

N : 시험 종료시의 사이클 수

M : 동결융해 목표 사이클 수

표 3 콘크리트의 배합표

No.	W/B (%)	Binder content (kg/m³)	SF (%)	SG (%)	S/a (%)	HRWR type	목표 Air량 (%)	Unit weight(kg/m³)						
								W	C	SG	SF	S	G	HRWR
O1	20	700	10	30	39	ORD	0~2	140	420	210	70	631	1007	25.9
A1	20	700	10	30	39	SLR	0~2	140	420	210	70	631	1007	17.5
A2	20	700	10	30	39	SLR	2~4	140	420	210	70	631	1007	17.5
A3	20	700	10	30	39	SLR	4이상	140	420	210	70	631	1007	17.5
B1	20	700	10	40	39	SLR	0~2	140	350	280	70	631	1007	17.5
B2	20	700	10	40	39	SLR	2~4	140	350	280	70	631	1007	17.5
B3	20	700	10	40	39	SLR	4이상	140	350	280	70	631	1007	17.5
C1	20	700	10	50	39	SLR	0~2	140	280	350	70	631	1007	17.5
C2	20	700	10	50	39	SLR	2~4	140	280	350	70	631	1007	17.5
C3	20	700	10	50	39	SLR	4이상	140	280	350	70	631	1007	17.5
D1	30	550	10	30	39	SLR	0~2	165	330	165	55	719	1146	11.0
E1	30	550	10	40	39	SLR	0~2	165	275	220	55	719	1146	11.0
F1	30	550	10	50	39	SLR	0~2	165	220	275	55	719	1146	11.0
E2	30	550	10	40	39	SLR	4이상	165	275	220	55	719	1146	11.0

3. 실험결과에 대한 고찰

(1) 모르타르의 강도특성

앞의 표 2에서 실리카흄의 대체율 0, 10 및 20%에 대한 고로슬래그미분말 및 플라이애시의 대체율을 각각 4 단계로 변화시켜 재령 3, 7 및 28일 모르타르의 압축강도를 정리한 것이 그림 1, 2 및 3이다.

그림 1에서 실리카흄을 대체하지 않은 모르타르(SF=0%)의 재령 28일 압축강도는 고로슬래그미분말 및 플라이애시의 대체율에 관계없이 최대값이 400kgf/cm^2 정도에 지나지 않았다. 그러나 그림 2와 그림 3에서 알 수 있듯이 실리카흄을 대체한 모르타르(SF=10, 20%)의 압축강도는 최대값은 500kgf/cm^2 정도로서 실리카흄을 대체하는데 따라 압축강도가 약 25%정도 향상되었다.

이들 그림에서 실리카흄의 대체율 10% 및 20%와 고로슬래그미분말을 대체한 모르타르의 압축강도가 가장 큰 값을 나타내는 반면 플라이애시를 대체한 모르타르의 압축강도는 대체적으로 강도발현 정도가 떨어지는 경향을 보였다.

실리카흄을 적절히 대체함에 따라 모르타르의 압축강도는 크게 증진되었으며, 특히 고로슬래그미분말의 대체율 10%에서 강도가 가장 향상되는 좋은 결과를 얻었다. 다시 말해서 모르타르의 강도증진을 위해서는 실리카흄이나 고로슬래그미분말의 효과가 클 뿐만 아니라 최적대체율이 존재함을 알 수 있었으며, 이러한 결과는 文 등[1]의 연구에서도 입증된 내용과 유사하다고 생각된다.

(2) 유동성손실(Slump loss)의 저감 방안

콘크리트 구조물의 현장타설 작업시 굳지 않은 콘크리트의 워커빌리티는 경화한 콘크리트의 강도 못지 않게 중요한 인자임은 두말 할 나위가 없다. 그러므로 초고강도콘크리트의 경우에도 일반적으로 펌프압송방법 또는 철근이 과밀배근된 현장이 많기 때문에 콘크리트의 타설작업이 진행되는 동안 굳지 않은 콘크리트는 양호한 유동성과 재료분리가 적은 물성을 유지해야함이 필요불가결하다[2]. 그래서 본 연구에서도 고성능감수제를 다량으로 사용하여 슬럼프플로우값이 큰 60±10cm정도의 고유동콘크리트를 목표로 제조하였다.

일반적으로 초고강도 콘크리트는 단위결합재량이 클 뿐만 아니라 화학혼화제의 과다사용, 적은 단위수량 및 매우 작은 물-결합재비 탓으로 슬럼프손실이 현저히 큰 문제점이 지적되고 있어 충분한 대책이 요망된다.

그래서 혼화제 분할 후 첨가방법이 동시첨가방법보다 슬럼프손실률을 감소시켰다는 연구결과[3]를 참고로 하여 고성능감수제의 분할첨가방법에 대해서도 실험을 실시하여 비교적 긍정적인 결과를 얻었으나 실제 현장적용시의 시공관리 등 문제점이 있어 본문에서는 생략하였다. 그리고 일반적으로 사용되고 있는 고성능감수제와 슬럼프 손실을 줄일 목적으로 제조된 고성능감수제를 사용한 콘크리트 배합 중 O1와 A1배합으로 굳지 않은 콘크리트의 경과시간에 따른 슬럼프플로우값을 측정하여 슬럼프플로우 손실률로 정리한 것이 그림 4이다.

초고강도콘크리트에 일반형 고성능감수제를 사용할 경우, 믹싱 후 경과시간 30분만에 슬럼프플로우 손실률이 46.2%정도로 급격히 떨어짐으로써 현장시공시의 큰 지장을 초래하는 문제점이 있음을 알 수 있다. 반면에 슬럼프 손실 저감형 고성능감수제를 사용한 콘크리트의 경우에는 경과시간 90분에서도 슬럼프플로우의 목표값 60±10cm범위 내에 있을 뿐만 아니라 슬럼프플로우 손실률이 15% 이내의 좋은 결과를 나타냄을 알 수 있다.

이는 시멘트 수화에 의하여 발생하는 알칼리 성분에 의하여 폴리칼본산계 슬럼프손실저감형 혼화제의 유효성분이 서서히 가수분해됨으로써 시멘트페이스트의 유동성이 지속적으로 공급되는 성질에 의하여 슬럼프의 안정성이 일정시간 유지되기 때문인 것으로 생각된다.

그래서 이들 두 종류 고성능감수제로서 제조한 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프플로우값 및 콘크리트 공시체에 의한 재령 3, 7 및 28일을 압축강도를 측정하여 정리한 것이 그림 5이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 두 종류 콘크리트의 슬럼프플로우값 및 재령별 압축강도도 거의 유사한 좋은 결과를 얻었다.

특히 슬럼프손실 저감형 고성능감수제를 사용한 콘크리트의 경우, 일반형 고성능감수제를 사용한 콘크리트와 비교하여 재령 7일 압축강도는 다소 떨어졌으나, 28일 압축강도는 오히려 약간 상회하는 결과를 나타내었다. 그러므로 초고강도콘크리트에서도 폴리칼본산계 슬럼프손실 저감형 고성능감수제의 사용은 유익하다고 판단되므로 초고강도용 콘크리트의 현장적용을 위해서는 예비실험 등을 통하여 고성능감수제의 성능에 대한 확인 검토가 요망된다.

(3) 동결융해저항성

보통강도 콘크리트는 동결융해저항성의 확보를 위해 4%이상의 공기연행을 권장하고 있지만, 초고강도콘크리트의 경우 동결융해저항성을 위해 공기연행이 필요한지에 대해서는 학자간의 이견이 많아 아직 정립되어 있지 않은 상태이다.

Okada et al.[4]은 물시멘트비가 0.35이하이고 압축강도가 80MPa보다 큰 모든 콘크리트는 동결에 대한 저항성이 확보된 것으로 간주한다고 보고하고 있는 반면, Malhotra et al.[5]은 물시멘트비가 0.25~0.35인 콘크리트는 동결융해저항성을 위해 여전히 공기연행이 필요하다고 주장하고 있으며, E. J. Sellevold et al.[5]에 의하면 공기연행을 하지 않은 140Mpa 고강도콘크리트는 ASTM C 666에 따른 동결융해시험결과 저항성이 떨어진다고 보고하고 있어 그 평가가 일정하지 않다. 또한 실리카 흄 및 고로슬래그를 대체한 고강도콘크리트의 동결융해저항성에 대해서는 충분한 실험결과가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 초고강도 및 고강도 콘크리트의 공기량 혼입율 및 혼화재료의 대체율에 따른 내동해성을 평가하기 위하여 표 3의 시편 No. A~E까지의 배합과 같이 공기량의 혼입율을 0~2%, 2~4%, 4%이상의 3단계의 수준, 고로슬래그미분말의 대체율을 30, 40, 50%로 정하여 실험을 수행하였다.

그림 6은 AE제를 사용하지 않은 경우의 슬래그대체율에 따른 콘크리트의 상대동탄성계수를 정리한 것으로 물-결합재비 20%로 제조한 초고강도콘크리트의 상대동탄성계수는 슬래그 대체율에 관계없이

동결융해 600사이클에서도 98%이상의 값을 나타내어 동결융해로 인한 동탄성계수의 변화가 거의 없었다. 반면 물-결합재비 30%로 제조한 콘크리트의 상대동탄성계수는 동결융해 300사이클 이전에 60% 이하로 떨어졌으며, 슬래그대체율이 증가할수록 상대동탄성계수는 작아짐을 알 수 있었다.

그림 7은 고로슬래그미분말을 40%만큼 시멘트와 대체한 콘크리트의 공기연행에 따른 상대동탄성계수를 정리한 것으로 물-결합재비 20%로 제조한 초고강도콘크리트의 600사이클에서의 동탄성계수는 연행공기 변화에 따라서도 초기동탄성계수와 거의 변화가 없는 우수한 내동해성을 나타내었다. 한편, 물-결합재비 30%로 제조한 콘크리트의 경우 AE제에 의한 공기연행으로 공기량을 4%이상으로 증가시킴으로써 동결융해 300사이클에서는 동탄성계수의 저하가 거의 없고, 동결융해 600사이클에서의 상대동탄성계수는 약 80%로 내동해성이 크게 향상됨을 알 수 있었다. 즉, 물-결합재비 30%로 제조한 콘크리트는 동결융해에 대한 내구성을 확보키 위해 AE공기연행이 필요하지만 물-결합재비 20%로 제조한 콘크리트는 AE제를 사용하지 않아도 내동해성이 우수하며, 이는 낮은 물-결합재비와 다량의 결합재의 사용으로 치밀한 구조를 가져, 강도특성이 향상되었기 때문인 것으로 생각된다.

그림 8은 물-결합재비가 20%인 경우의 AE제의 사용량과 굳지않은 콘크리트의 공기량의 관계를 나타낸 것으로 소요공기량을 얻기 위한 AE제의 사용량은 슬래그 대체율이 커짐에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 소요공기량을 4%이상으로 정한 배합의 경우, AE제의 사용량은 0.04%이상이 소요되었으며 슬래그대체율이 50%인 콘크리트의 AE제 사용량은 슬래그대체율이 30%인 콘크리트에 비해 2배 이상이 요구됨을 알 수 있었다.

그림 9와 그림 10은 동결융해실험변수에 따른 재령별 압축강도 및 슬럼프플로우값을 정리한 것이며, 연행공기량이 증가할수록 압축강도는 감소하고 있으며, 슬럼프플로우값은 크게 변화가 없었다.

이러한 일련의 실험결과에서 물-결합재비가 20%인 초고강도콘크리트에서는 공기연행으로 인하여 동결융해저항성 및 유동성에 미치는 영향이 미소하고, 공기량 증가에 따라 압축강도가 감소하는 경향을 보이므로, AE제에 의한 공기연행은 불필요한 것으로 판단된다.

5. 결론

(1) 실리카흄, 고로슬래그미분말 및 플라이애시의 대체율을 각각 변화시킨 모르타르시편의 압축강도를 측정한 결과, 실리카흄과 고로슬래그미분말을 대체한 모르타르의 압축강도는 500kgf/cm^{2}정도였다. 이때 모르타르의 강도증진을 위해서는 플라이애시보다 실리카흄이나 고로슬래그미분말의 효과가 클 뿐만 아니라 최적대체율이 존재함을 알 수 있었다.

(2) 일반적으로 통용되고 있는 고성능감수제를 사용한 굳지 않은 콘크리트의 믹싱 후 경과시간 30분만에 슬럼프플로우 손실률이 46.2%정도로 급격히 떨어지는 문제점이 있는 반면 슬럼프손실 저감형 고성능감수제를 사용한 콘크리트의 경우 경과시간 90분에서도 슬럼프플로우 손실률이 15% 이내의 좋은 결과를 나타내었다.

(3) 고유동초고강도 콘크리트의 동결융해저항성을 측정한 결과, 슬래그미분말의 대체율 및 연행공기량에 관계없이 동결융해저항성이 우수하였다. 반면에 연행공기량을 증가시킴에 따라 AE제 사용량이 많이 요구되었으며, 압축강도가 감소하였으므로 초고강도콘크리트의 내동해성을 확보하기 위해 공기연행을 시킬 필요는 없는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 文翰英, 崔然汪, "고로슬래그미분말을 혼화재로 사용한 고강도콘크리트의 강도특성에 관한 연구", ***대한토목학회논문집***, 제 16 권 1-4 호, 1996, pp.463~472.
2. 文翰英, 金基亨, "고성능감수제를 사용한 콘크리트의 유동성 손실을 저감시키기 위한 연구", ***대한토목학회논문집***, 제 12 권 3 호, 1992, pp.81~90.
3. 文翰英, 文大重, "굳지 않은 콘크리트의 슬럼프손실 저감을 위한 혼화재의 활용", ***한국콘크리트학회지***, 제 10 권 2 호, 1998, pp.155~165.
4. Okada, E. et al, "Freeze-thaw resistance of superplasticized concrete, in Development in the Use of Superplasticizers", ***ACI Special Publication SP-68***, ACI, Detroit, MI, 1981, pp. 215-233.
5. Malhotra, V.M. et al, "Mechanical properties and freezing and thawing resistance of high strength concrete incorporating silicafume", ***Cement, Concrete, and Aggregates***, 9(2), 1987, pp. 43-50.
6. E.J. Sellevold and J.A. Bakke (1997), "High strength concrete without air entrainment:effect of rapid temperature cycling above and below 0℃", ***Freeze-Thaw Durability of Concrete***, E&FN SPON, pp. 43-50.

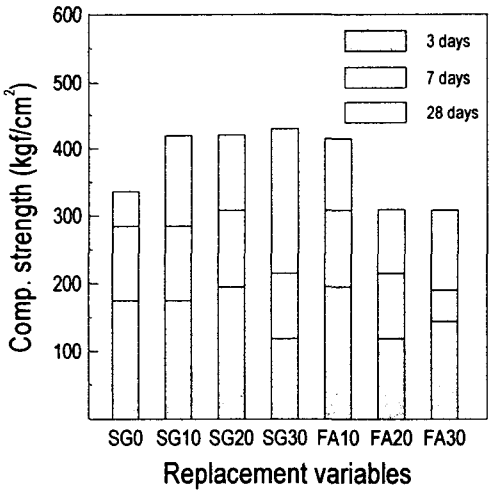

그림 1 혼화재료대체변수에 따른 모르타르의 압축강도(SF=0%)

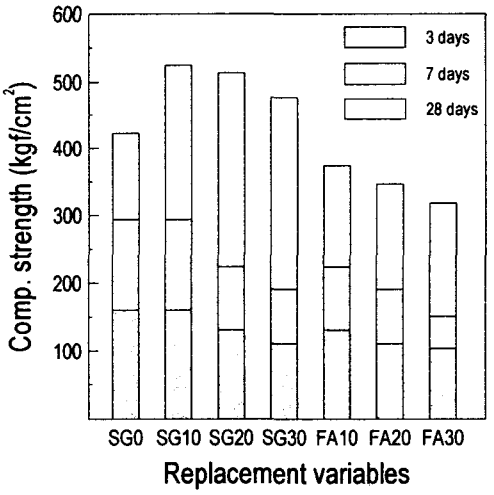

그림 2 혼화재료대체변수에 따른 모르타르의 압축강도(SF=10%)

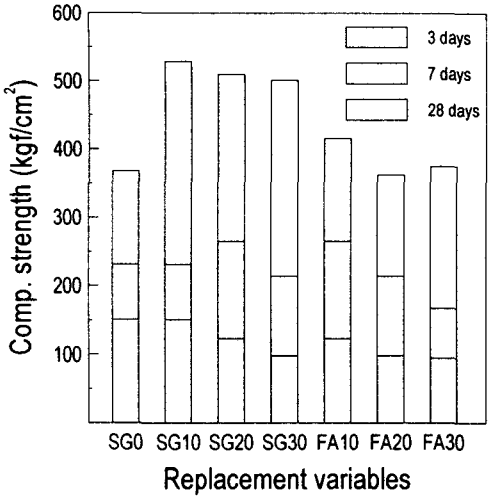

그림 3 혼화재료대체변수에 따른 모르타르의 압축강도(SF=20%)

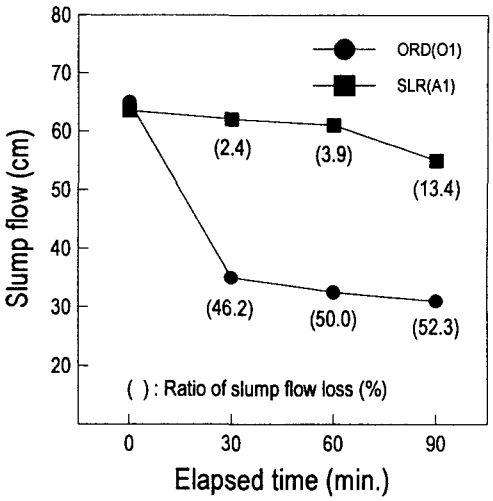

그림 4 경과시간에 따른 슬럼프플로값 및 슬럼프플로우손실율

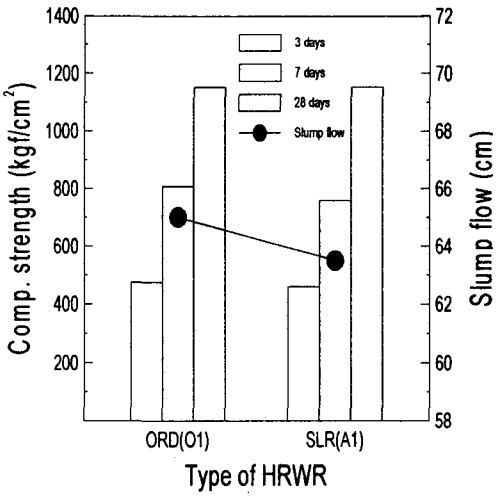

그림 5 고성능감수제 종류별 콘크리트의 압축강도

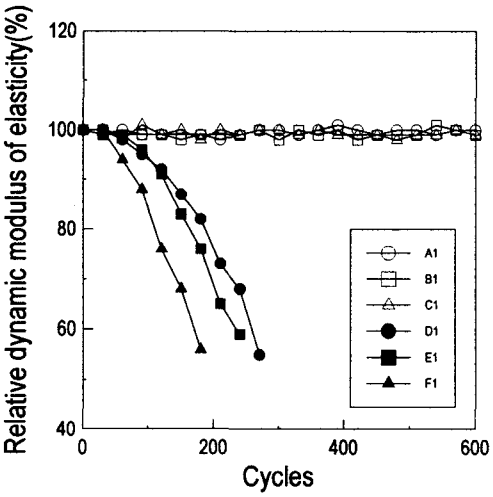

그림 6 혼화재료대체율 변수별 동탄성계수값의 변화

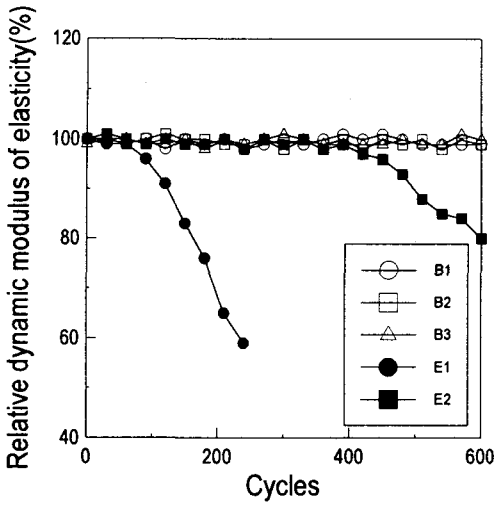

그림 7 공기량변수별 상대동탄성계수의 변화

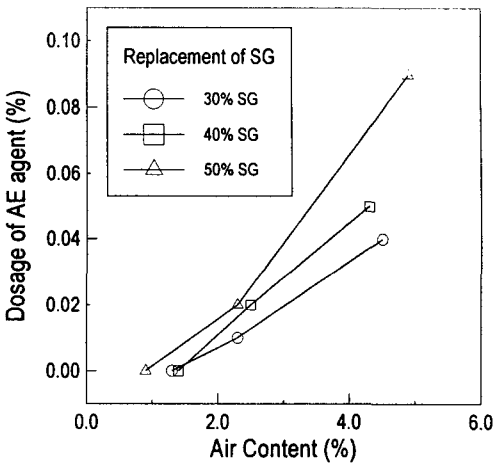

그림 8 소요공기량에 따른 AE제 사용량

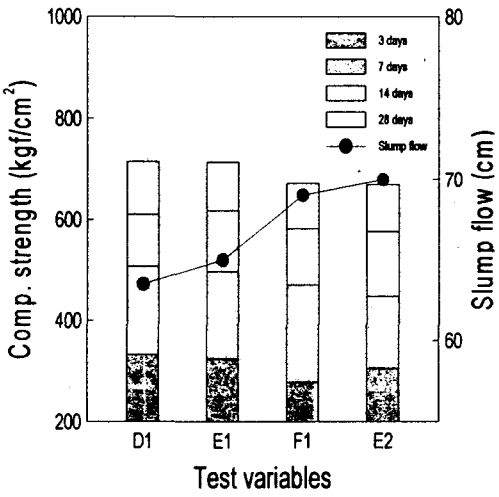

그림 9 재령별 압축강도 및
슬럼프플로우값(W/B=30%)

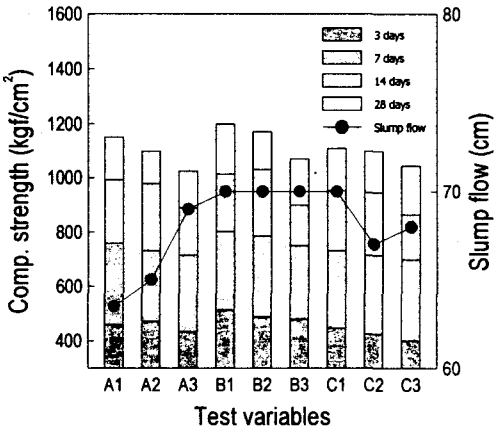

그림 10 재령별 압축강도 및
슬럼프플로우값(W/B=20%)