

수축저감제를 사용한 고성능 콘크리트의 수축특성

Shrinkage Properties of High Performance Concrete with Shrinkage Reducing Agent

고 경 택* 김 도 겸** 한 천 구*** 이 장 화****

Koh, Kyung-Taek Kim, Do-Gyeum Han, Cheon-Goo Lee, Jang-Hwa

Abstract

Generally, high performance concrete has characteristics such as low water-cementitious material ratio, lots of unit binder powder, thus the drying shrinkage and autogenous shrinkage are tend to be increased. The purpose of this study is to investigate the effect of the glycols based shrinkage reducing agent on the drying shrinkage and autogenous shrinkage of high performance concrete with 30% of water-cementitious material ratio as a study to develop the technology to reduce the concrete shrinkage. Test results show that the drying and autogenous shrinkage of high performance concrete are reduced by about 20~35% at the mixing ratio of shrinkage reducing agent of 0.5%, and 1.0%, compared with plain concrete. Therefore, it analyze that the using of shrinkage reducing agent is effective to reduce the drying shrinkage and autogenous shrinkage of high performance concrete.

요 지

고성능 콘크리트는 물-결합재비를 작게 하고, 단위 결합재량을 다량으로 사용하여 제조하므로 콘크리트의 건조수축 및 자기수축이 증대되는 경향이 있다. 본 연구에서는 고성능 콘크리트의 수축을 저감시키는 기술을 구축하는 연구의 일환으로 글리콜계 수축저감제가 물-결합재비 30%의 고성능 콘크리트의 수축특성에 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과, 건조수축과 자기수축은 수축저감제 혼입률 0.5%와 1.0%에서 플레인 콘크리트에 비교하여 20~35% 정도가 저감되었다. 따라서 수축저감제의 사용은 고성능 콘크리트의 건조수축 및 자기수축을 저감시키는 데 효과적으로 분석되었다.

Keywords : High performance concrete, shrinkage reducing agent, drying shrinkage, autogenous shrinkage

핵심 용어 : 고성능 콘크리트, 수축저감제, 건조수축, 자기수축

* 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원

** 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원

*** 청주대학교 건축공학부 교수

**** 한국건설기술연구원 기획조정실 실장

E-mail : ktgo@kict.re.kr 031-9100-537

• 본 논문에 대한 토의를 2005년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2005년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. Introduction

최근 고강도와 고유동성을 가진 고성능 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 사용 실적도 차츰 증가하는 추세에 있다. 이런 고성능 콘크리트의 요구성능을 만족시키기 위해서는 필연적으로 물-결합재비를 작게하고, 단위 결합재량을 다량으로 사용해야 한다⁽¹⁾. 그러나 이로 인해 콘크리트의 수화열, 건조수축 및 자기수축 등에 의한 균열 발생이 문제되고 있다. 이렇게 발생한 균열을 통해 염소이온, CO₂ 가스, 물과 같은 열화인자의 침투가 쉬워져 결과적으로 콘크리트 구조물의 내구성능이 저하될 우려가 높다^{(2),(4),(5)}. 따라서 고성능 콘크리트를 보다 많은 구조물에 안정적으로 적용하기 위해서는 수축에 의해 발생하는 균열 문제를 해결할 필요가 있다. 콘크리트의 균열을 저감시키는 방법으로는 팽창재를 첨가하는 방법과 수축저감제를 첨가하는 방법 등이 있다^{(3),(6),(7),(10)}. 그러나 국내에는 이런 재료의 사용에 의한 고성능 콘크리트의 수축저감에 대해 체계적으로 검토한 사례가 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고성능 콘크리트의 수축저감 기술을 구축하는 연구의 일환으로서 수축저감제 사용이 고성능 콘크리트의 건조수축 및 자기수축에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

실험에 사용한 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)이며, 혼화제는 플라이애쉬(FA), 고로슬래그 미분말(BS), 실리카폼(SF)의 포졸란계로 이들의 물리·화학적 성질은 Table 1과 같다. 수축저감제(SR)는 분말형 글리콜즈계(밀도 3.18g/cm³)를 사용하였으며 그 특성은 Table 2와 같다. 굵은 골재는 최대치수 20 mm인 부순돌을 사용하였고, 잔골재는 강모래를 사용하였으며 그 특성은 Table 3과 같다. 콘크리트의 소요 유동성을 확보하기 위해 나프탈렌계 고성능 감수제를 사용하였고, 소정의 공기량을 확보하기 위하여 AE제를 첨가하였다.

Table 1 시멘트 및 광물질 혼화제의 물리·화학적 성질

Type	Item	Surface Area (cm ² /g)	Density (g/cm ³)	Ig.loss (%)	Chemical composition (%)					
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
	OPC	3413	3.15	1.40	21.01	6.40	3.12	61.33	3.02	2.14
	FA	3850	2.13	3.82	65.3	16.6	5.58	-	0.82	0.51
	BS	4463	2.91	0.05	34.56	15.78	0.09	43.32	5.90	2.78
	SF	240000	2.10	1.50	96.00	0.25	0.12	0.38	0.1	-

Table 2 수축저감제의 물리·화학적 성질

Item	Main ingredient	Appearance	Colour	Density (g/cm ³)	Solubility in water
Shrinkage reducing agent	Glycols	Powder	White	3.18	Soluble in water

Table 3 골재의 물리적 성질

Type	Item	Density (g/cm ³)	F.M	Absorption (%)	Unit Weight (kg/m ³)	Abrasion (%)
	Fine aggregate	2.67	2.60	1.83	1,422	-
	Coarse aggregate	2.63	6.87	0.63	1,429	15.9

2.2 콘크리트 배합

콘크리트 배합은 Table 4와 Table 5에 나타난 바와 같이 두 가지로 구분하여 실험을 실시하였다. Series I에서는 결합재로서 OPC만을 사용한 물-시멘트비 30%의 콘크리트에 대해 수축저감제의 혼입률(0, 0.5, 1.0%)에 따른 효과를 검토하였다. Series II에서는 결합재로서 광물질 혼화제를 사용한 물-결합재비 30%의 콘크리트에 대해 수축저감제 사용에 따른 영향을 검토하였다. 목표 슬럼프 플로우인 60±5cm, 목표 공기량인 4.5±1.5%를 얻기 위해 고성능 감수제 첨가량 및 AE제량 등을 조절하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 압축강도

콘크리트의 압축강도는 $\phi 100 \times 200$ mm 원주 공시체를 제작하여 1일 후 탈형하고 온도 20±2°C의 수중에서 표준양생을 실시한 다음 재령 7일, 28일, 91일에 KS F 2405에 준하여 실시하였다. 압축강도의 값은 콘크리트 공시체 3개의 평균값이다.

2.3.2 건조수축

콘크리트의 건조수축은 KS F 2424에 준하여 다이얼게이지 방법으로 측정하였다. 건조수축에 의한 길

이변화 측정용 공시체는 100×100×400mm의 몰드를 이용하여 시편의 양단에 길이변화 측정용 게이지를 설치하여 제작하고 재령 7일까지는 수중양생을 실시한 다음, 기건상태(온도 20±2°C, 습도 65±10%)에 노출시켜 정해진 재령에서 측정하였다. 재령 7일까지의 길이변화 측정은 콘크리트 공시체를 수중에서 꺼내어 표면에 있는 수분을 닦아내어 신속하게 길이변화를 측정한다. 다음 곧바로 다시 수중에 시편을 넣었다. 건조수축 변형률은 콘크리트 시편 3개의 평균값이다.

2.3.3 자기수축

콘크리트의 자기수축 시험방법은 국내에 특별한 규정이 마련되어 있지 않아 일본 콘크리트공학협회(2002)의 자기수축 위원회⁽⁸⁾에서 제안한 방법에 따라 측정하였다. 시편 제작은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 양단 중심에 구멍이 뚫린 100×100×400mm의 철재 범몰드를 사용하였다. 게이지 플러그를 몰드 축에 일치하도록 설치하였고, 몰드의 바닥과 양단에 1mm 두께의 테프론 시트를 깔아서 공시체의 이동이 몰드에 의해

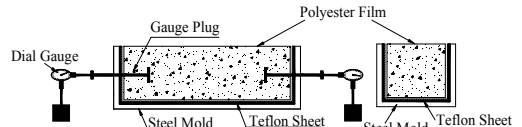


Fig. 1 자기수축 시험장치 개요

Table 4 콘크리트의 배합(Series I)

W/C (%)	S/a (%)	Target Slump Flow (cm)	Target Air Content (%)	Content of SR (%)	Unit content(kg/m ³)					SP (B×wt.%)	AE (B×wt.%)
					W	C	SR	S	G		
30	45	60±5	4.5±1.5	0	175	583.3	0	714.7	847.3	1.90	0.042
				0.5		580.4	2.9	714.7	847.3	2.10	0.028
				1.0		577.5	5.8	714.7	847.3	2.20	0.025

Table 5 콘크리트의 배합(Series II)

W/B (%)	S/a (%)	Content of SR (%)	W	Unit content(kg/m ³)						SP (B×wt.%)	AE (B×wt.%)	
				B				SR	S			G
				C	FA	BS	SF					
30	45	0	175	583.3	0	0	0	0	714.7	847.3	1.90	0.042
				492.9	87.5	0	0	2.9	700.7	830.7	1.90	0.030
		0.5		405.4	0	175.0	0	2.9	709.22	840.8	1.65	0.025
				536.7	0	0	43.8	2.9	707.5	838.8	2.20	0.020

구속을 받지 않게 하였다. 그 다음에 콘크리트를 타설하고 표면에서의 수분 증발 및 흡수를 막기 위해 폴리에스테르 필름으로 덮었다. 자기수축은 수화반응을 시작하면서 발생하므로 본 연구에서는 KS F 2436에 준하여 초결(initial set)시간에 도달하는 시점을 측정하여 이를 기준점으로 하였다. 콘크리트 시편을 탈형한 후, 온도 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, 습도 $65\pm 10\%$ 으로 조절되는 항온항습실에서 알루미늄 접착 테이프로 밀봉하여 건조되지 않도록 하였으며, 계획한 재령에서 길이변화 및 질량변화를 측정하였다. 자기수축에 의한 길이변화율은 콘크리트 시편 3개의 평균값이다. 그리고 JCI에 정한 질량변화율이 0.05% 이상 변화된 경우에는 자기수축 변형으로 취급하지 않았다. Fig. 2는 자기수축 시험을 실시하는 동안의 질량감소율을 측정된 결과이고, 본 시험에서 JCI 기준인 0.05% 이상 콘크리트 시편 질량감소는 발생하지 않았다.

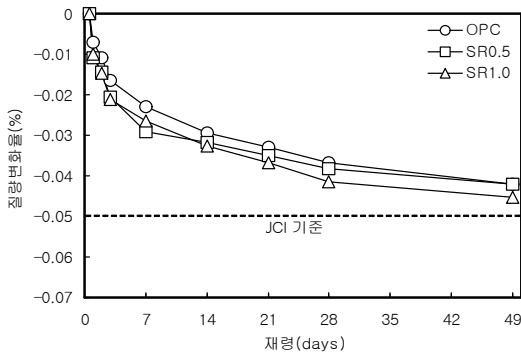


Fig. 2 자기수축 시험동안의 질량변화



Fig. 3 표면장력 측정기

2.3.4 표면장력

수축저감제 사용에 의한 콘크리트의 수축저감 메커니즘을 규명하기 위해 콘크리트 배합에서 골재부분을 제외하여 시멘트 페이스트 배합으로 비빈 다음 각각 10분, 6시간, 24시간이 지난 다음 거름종이로 시멘트 페이스트 액을 여과하여 액상을 채취하여 링법에 기초를 둔 Du Nouy 장력계를 사용하여 표면장력을 측정하였다(Fig. 3).

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

Table 6은 굳지 않은 콘크리트의 특성을 나타낸 것이다. SR를 사용한 콘크리트는 OPC 콘크리트와 동일한 유동성을 확보하기 위해서는 고성능 감수제의 양을 증가시킬 필요가 있다. 그리고 FA와 BS를 사용한 콘크리트의 유동성은 OPC 콘크리트와 큰 차이가 없으나, SF를 사용한 경우에는 OPC 콘크리트와 동일한 유동성을 확보하기 위해 고성능 감수제의 양을 증가시킬 필요가 있다. SR를 사용한 콘크리트는 OPC 콘크리트에 비해 초결이 빨리 발생하였다. 광물질 혼화제와 SR를 병용하여 사용한 경우, FA와 BS를 사용한 콘크리트의 초결시간은 OPC 콘크리트와 거의 차이가 없었으나, SF를 사용한 콘크리트의 초결이 빨리 발생하였다.

Table 6 굳지 않은 콘크리트의 특성

Items	Slump (cm)	Slump flow (cm)	Air (%)	Setting time (KS F 2436)		
				Initial (hr:min)	Final (hr:min)	
Series I	OPC	26.0	62.5	4.5	11:00	12:27
	SR0.5	26.0	62.0	5.0	9:31	11:30
	SR1.0	25.4	60.5	5.0	9:16	11:23
Series II	FA15:SR0.5	26.5	64.5	4.0	11:10	13:09
	BS30:SR0.5	27.0	67.5	3.8	11:20	13:20
	SF7.5:SR0.5	25.0	53.5	4.8	9:28	10:58

3.2 압축강도

Fig. 4는 SR의 혼입률이 압축강도에 미치는 영향이다. SR를 사용한 콘크리트는 혼입률이 증가함에 따라 압축강도가 저하되며, 재령 91일에서 수축저감제를 사용하지 않은 OPC 콘크리트에 비해 수축저감제를 사용한 콘크리트의 압축강도는 혼입률 0.5%, 1.0%에서 각각 4.6%, 9.2%가 저하되는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 광물질 혼화재와 SR의 병용 사용이 압축강도에 미치는 영향이다. FA 또는 BS와 병용하여 사용한 콘크리트의 강도는 OPC 콘크리트와 SR를 단독으로 사용한 콘크리트(SR-C)와 거의 차이가 없었으나, SF와 병용하여 사용한 경우에는 SR에 상관없이 초기 강도부터 OPC 콘크리트에 비해 압축강도가 증진되는 것으로 나타났다.

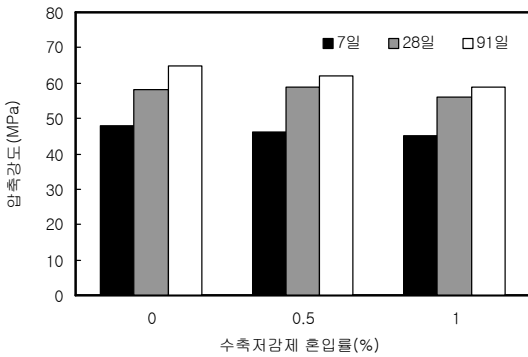


Fig. 4 SR이 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향

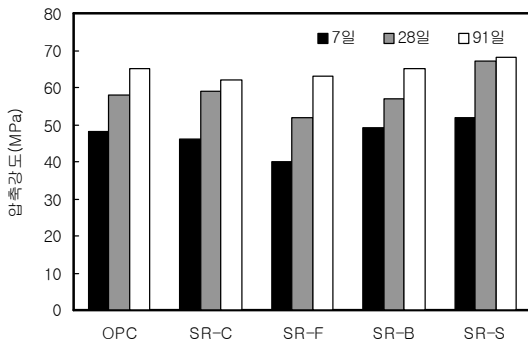


Fig. 5 광물질 혼화재와 SR의 병용사용이 압축강도에 미치는 영향

3.3 콘크리트의 건조수축 특성

Fig. 6은 SR의 혼입률이 건조수축에 미치는 영향이다. SR를 사용하지 않은 OPC 콘크리트의 건조수축 변형률은 재령 91일에서 약 600×10^{-6} 정도로 비교적 크게 수축이 발생하는 것으로 나타났다. SR를 혼입한 콘크리트는 탈형 후 수중양생 기간 동안에 OPC 콘크리트와 마찬가지로 수분흡수에 의해 콘크리트가 팽창하는 것으로 나타났다. 재령 7일 이후의 기건상태에서 건조되더라도 OPC 콘크리트에 비해 건조수축 변형률이 감소하였다. 이것은 SR를 사용함으로써 콘크리트 경화체 공극 내부에 존재하는 수분의 표면장력을 저하시키는 작용 때문으로 분석된다⁽¹⁰⁾. 재령 91일에서 SR를 혼입한 콘크리트의 건조수축 변형률은 OPC 콘크리트에 비해 혼입률 0.5%에서 20%, 혼입률 1.0%에서 30% 정도가 저감되었다.

Fig. 7은 광물질 혼화재와 SR의 병용사용이 콘크리트의 건조수축에 미치는 영향이다. FA를 사용한 콘크리트의 건조수축은 OPC 콘크리트에 비해 약간 증가하였으나, BS와 SF를 사용한 콘크리트는 OPC 콘크리트와 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 그리고 광물질 혼화재와 SR를 병용하여 사용한 경우, 혼화재 종류에 상관없이 건조수축 변형률이 크게 감소하며, SR를 단독으로 사용한 경우와 재령에 따라 다른 경향을 나타내지만, 재령 91일에서의 건조수축 변형률은 거의 동일한 것으로 나타났다.

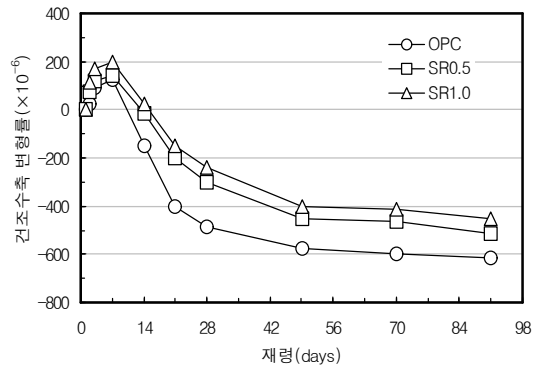


Fig. 6 SR이 콘크리트의 건조수축에 미치는 영향

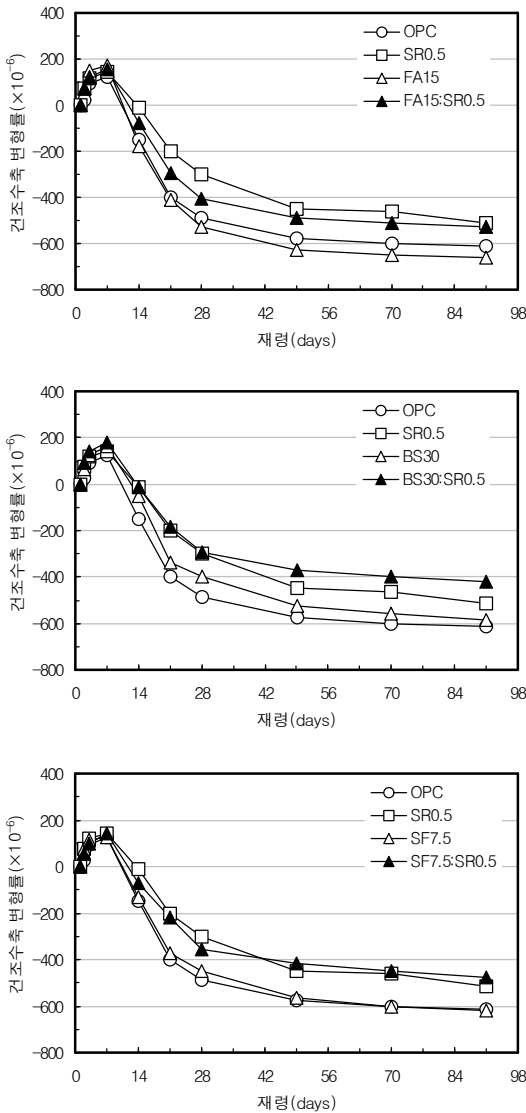


Fig. 7 혼화제와 SR의 병용 사용에 따른 건조수축

이상과 같이 고성능 콘크리트의 건조수축을 저감하기 위해 SR 사용을 검토한 결과, SR의 혼입률이 증가할수록 건조수축을 저감하는 데 효과가 뛰어난 것을 알 수 있었다. 그리고 광물질 혼화제와 SR를 병용 사용한 결과, SR를 단독으로 사용하는 경우와 거의 동일한 수준으로 건조수축을 저감하는 효과가 있는 것으로 나타났다.

3.4 콘크리트의 자기수축 특성

Fig. 8은 SR의 혼입률에 따른 콘크리트의 자기수축 측정결과이다. OPC 콘크리트의 자기수축 변형률은 재령 49일에서 -350×10^{-6} 정도로 비교적 큰 것으로 나타났으며, 대부분 재령 10일 이내에 수축이 발생하여 그 이후에 점점 수축량이 감소하였다. 이와 같이 자기수축이 크게 발생하는 콘크리트에 SR를 혼입한 결과, 콘크리트의 자기수축이 감소하며, SR 사용량이 많을수록 자기수축이 크게 감소하는 것으로 나타났다.

OPC 콘크리트에 비해 SR 혼입률 0.5%인 경우 18% 정도, 혼입률 1%인 경우 34% 정도의 수축을 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 SR를 사용함으로써 자기수축이 감소하는 것은 콘크리트 경화체 공극 내부에 존재하는 수분의 표면장력을 저하시키는 작용 때문으로 판단된다⁽⁹⁾.

Fig. 9는 광물질 혼화제와 SR의 병용사용이 콘크리트의 자기수축에 미치는 영향이다. 광물질 혼화제와 SR를 병용하여 사용한 콘크리트는 광물질 혼화제를 단독으로 사용한 콘크리트 또는 OPC 콘크리트에 비해 자기수축 변형률이 작게 발생하며, SR를 단독으로 사용한 경우와 거의 동일한 수준으로 자기수축을 저감하는 효과가 있는 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터, 광물질 혼화제 사용이 콘크리트의 자기수축을 저감시키는 SR의 효과를 억제시키는 영향은 거의 없는 것으로 분석되었다.

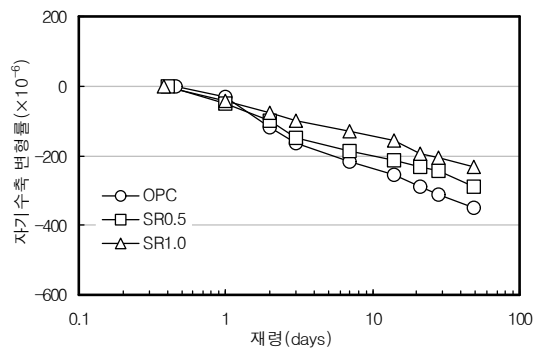


Fig. 8 SR가 콘크리트의 자기수축에 미치는 영향

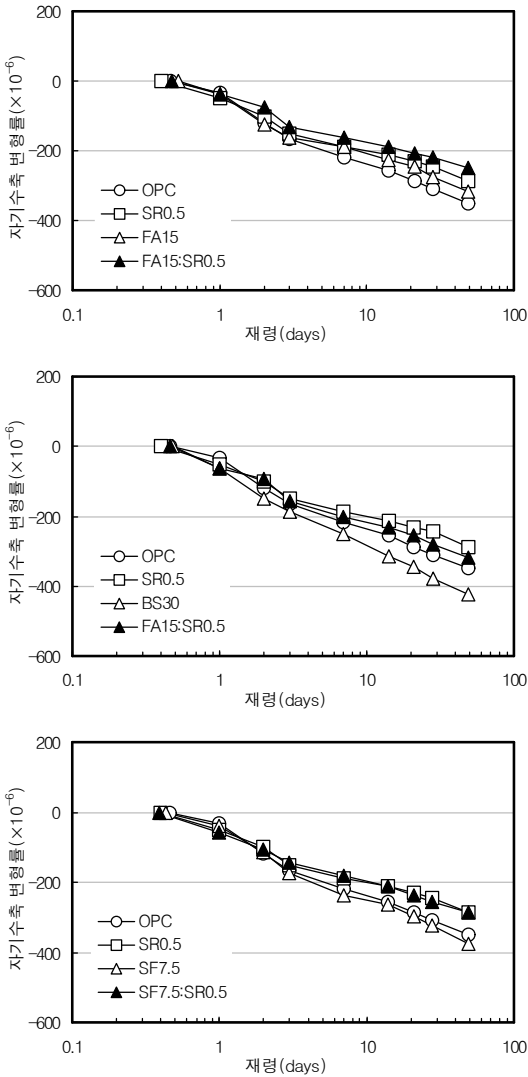


Fig. 9 혼화제와 SR의 병용 사용에 따른 자기수축

3.5 수축저감제를 사용한 콘크리트의 수축저감 메카니즘

Table 7은 배합별 표면장력을 측정된 결과이다. OPC 콘크리트는 재령에 상관없이 표면장력이 70dyne/cm 전후로 거의 유사하게 나타났다. 그러나 SR를 사용한 콘크리트는 표면장력이 저하되며 SR의 사용량이 증가할수록 표면장력은 더욱 저하되는 것으로 나타났다.

Table 7 표면장력 측정 결과

배합	표면장력(dyne/cm)		
	10분	6시간	24시간
OPC	66.7	69.3	71.5
SR0.5	55.3	53.1	51.6
SR1.0	47.2	45.2	43.2

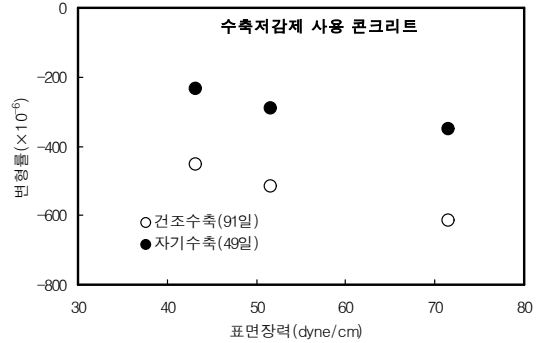


Fig. 10 수축변형률과 표면장력과의 관계

Fig. 10은 SR를 사용한 콘크리트의 표면장력과 건조수축 및 자기수축의 최종 변형률과의 관계이다. 여기서, 표면장력은 수축저감제 0, 0.5, 1.0%를 혼입한 시멘트 페이스트를 제조하여 24시간 지난 다음 측정된 값이다. 건조수축과 자기수축의 변형률은 표면장력이 저하될수록 작아지는 결과를 나타나고 있다. 이 결과로부터 수축저감제 사용에 의해 콘크리트의 수축이 저감된 것은 경화체 간극수의 표면장력이 저하되기 때문으로 사료된다.

이상과 같이 수축저감제 사용에 따른 콘크리트의 수축저감 효과는 경화체 공극내에 존재하는 간극수의 표면장력이 저하되는 모세관 장력으로 설명될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 수축저감제 사용이 고성능 콘크리트의 건조수축 및 자기수축에 미치는 영향에 대해 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수축저감제를 사용한 고성능 콘크리트는 수축저감제의 혼입률이 증가할수록 압축강도가 저하되며,

재령 91일에서 OPC 콘크리트에 비해 수축저감제를 사용한 콘크리트의 압축강도는 혼입률 0.5%, 1.0%에서 각각 4.6%, 9.2%가 저하되는 것으로 나타났다.

- 2) 수축저감제는 고성능 콘크리트의 건조수축 및 자기수축을 저감하는 데 효과가 뛰어나며, 혼입률에 따라서 20~35% 정도의 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 그리고 광물질 혼화제와 수축저감제를 사용한 경우에도 수축저감제를 단독으로 사용한 경우와 거의 동일한 수준으로 건조수축 및 자기수축을 저감하는 효과가 있었다.
- 3) 수축저감제를 사용함으로써 콘크리트의 표면장력이 저하되며, 이런 결과는 콘크리트의 건조수축과 자기수축이 저감되는 것과 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, “콘크리트 교량의 내구성 향상 기술 개발”, 2002. 12.
2. 고경택, 박정준, 이종석, 김성욱, “광물질 혼화제를 사용한 고성능 콘크리트의 수축특성”, 대한토목학회논문집 제23권 6A호, 2003. 11, pp.1133~1141.
3. 한천구, 김성욱, 고경택, 배정렬, “팽창제 및 수축저감제를 이용한 고성능 콘크리트의 수축특성”, 한국콘크리트

학회논문집 제15권 6호, 2003. 12, pp.785~793.

4. 고경택, 이종석, 김도겸, 이장화, “고성능 콘크리트의 자기수축에 미치는 광물질 혼화제의 영향”, 한국구조물진단학회 가을학술발표회 논문집, 2003.
5. 이회근, 이광명, 김병기, “플라이애시를 함유한 고성능 콘크리트의 자기수축”, 한국콘크리트학회논문집 제14권 2호, 2002. 4. pp.249~256.
6. 自己收縮研究委員, コンクリートの自己收縮研究委員會報告書, 日本コンクリート工學協會, 2002.
7. 谷村充, 兵頭彦次後, 佐藤達三, 佐藤良一, “高強度コンクリートの收縮低減化に關する一檢討”, 콘크리트工學年次論文集 Vol. 22, No. 2, 2000.
8. 梅本宗佐, 小林利充, 西林直洋, “乾燥收縮低減劑を用いた高耐久性コンクリートの開發と現場適用”, 콘크리트テクノ Vol. 21, No. 12, 2000. 12.
9. Berke, N.S., Dallarire, M.P., Hicks, M.C. and Kerkar, A. “New development in shrinkage-reducing admixtures”, Proceedings of Fifth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Rome, Italy, ACI SP-173, 1997, pp.971~998.
10. Shah, S.P., Karaguler, M.E. and Sarigaphuti, M. “Effects of shrinkage-reducing admixtures on restrained shrinkage cracking of concrete”, ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 3., 1992.

(접수일자 : 2004년 4월 6일)