

고강도 콘크리트의 자기수축 특성에 관한 연구 A Study on Characteristic of Autogenous Shrinkage of High Strength Concrete

이영재*

Young-Jae Lee *

<Abstract>

In case that W/B is 20%,30%,40% respectively, the effects of additive and shrinkage reducing agent on the autogenous shrinkage for high strengthen concrete through the substitution of FA and SF analysis were obtained as following conclusions. When the ratio of FA increased, the compressive strength of high strengthen concrete is decreased in the early times. As the ratio of SF increase, the compressive strength also increased. Comparing with PC(Portland Cement) for 7 days curing, the strength is 13.8% of FA10 + SR0.5 and 19.2% of FA15 + SR0.5 decreased when W/B is 20%, and 6.1% of SF7.5 + SR0.5, 4.8% of SF15 + SR0.5, the strength are increased. In case that W/B is 30%, 13.1% of FA10 + SR0.5 19.1% of FA15 + SR0.5 the strength is decreased and 4.1% of SF 7.5 + SR0.5, 7.2% of SF15 + SR0.5 the strength are increased. In case of W/B 40%, 4.3% of FA10 + SR0.5, and 8.7% of FA15 + SR0.5, the strength is decreased and 3.3% of SF7.5 + SR0.5, 6.3% SF15 + SR0.5 the strength is increased. When the ratio of SR is 0.5%, autogenous shrinkage strain of OPC concrete appeared -417×10^{-6} in 56days curing, the shrinkage strain is decreased 23.7%. The reducing effects of autogenous shrinkage when the mineral and shrinkage agent are used are the same as ones when only shrinkage agent used.

Keywords : *Autogenous shrinkage, Drying shrinkage, High strength concrete, Silica fume, Shrinkage reducing agent*

1. 서론

국민들의 경제수준 향상과 밀접한 관련이 있는 사회간접자본의 확장은 국민 복지에 미치는 영향이 지대하다. 최근 콘크리트 구조물의 고층화, 대형화 및 원자력 발전소와 같은 특수 구조물들의 증가에 따라 고강도 콘크리트의 사용이 빈번해지고 있다. 이런 고강도 콘크리트의 요구

성능을 만족시키기 위해서는 필연적으로 물-결합재비(W/B)를 작게 하고, 단위 결합재를 다량으로 사용해야 한다. 그러나 이로 인해 콘크리트의 수화열, 건조수축 및 자기수축 등에 의한 균열 발생이 문제되고 있다. 따라서 고강도 콘크리트를 보다 많은 구조물에 안정적으로 적용하기 위해서는 건조수축 및 자기수축에 의해 발생하는 균열 문제를 해결해야 할 과제이다.

*정회원, 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 교수, 工博
E-mail : yjlee01@knu.ac.kr

*Dept. Civil Eng, college of engineering Kyungpook
National University, Prof., Ph.D.

이미 일본 토목학회 1996년도 콘크리트표준 시방서에서는 균열발생 원인으로 자기수축을 고려할 필요성을 지적하고 있으며 콘크리트 자기수축에 관한 국제 워크샵도 개최되고 있다.¹⁾ 또한 콘크리트의 자기수축변형 및 응력예측방법에 관해서 최근까지 활발히 연구되고 있으며 Rilem에서도 자기수축 예측식을 제안하고 있다.^{2)~8)} Pailier 등⁹⁾ 은 W/B가 낮은 콘크리트는 자기수축이 구속되었을 때 2~3일 이내에 균열이 발생하는 것으로 보고하였다. Tazawa¹⁰⁾ 는 자기수축 발생의 가장 큰 영향 인자인 W/B에 따른 최대 자기수축 변형률과 시간에 따른 자기수축의 발현을 나타내는 계수, 그리고 시멘트 종류를 나타내는 계수의 곱으로 자기수축량을 구하였지만 W/B에 따른 자기수축의 최대값을 얻기 어렵고 특히 초결 이후의 자기수축을 고려하고 있으나 고강도 콘크리트의 초결 시간을 결정하기가 쉽지 않다.¹¹⁾

고강도 콘크리트의 제조 시 결합재로써 보통 포트랜드시멘트만을 사용하는 경우는 드물고 콘크리트의 유동성 증진, 수화열 감소, 품질향상 및 경제성 등을 고려하여 혼화재를 시멘트량에 일부 치환하여 사용하는 경우가 대부분이다. 국내에서는 이런 광물질 혼화재료를 사용한 고강도 콘크리트의 자기수축에 대한 체계적인 검토가 거의 없는 실정이다.¹²⁾

따라서 본 연구에서는 고강도 콘크리트의 수축저감 기술을 구축하는 연구의 일환으로서 혼화재와 수축저감제 사용이 고강도 콘크리트의 자기수축에 미치는 영향을 실험을 통해 측정하여 비교 분석하였다.

2. 실험 개요

2.1 사용 재료

본 실험에서 사용한 시멘트는 보통포트랜드시멘트(OPC로 약함)이며 혼화재는 플라이애쉬(FA로 약함), 실리카폼(SF로 약함)를 사용하고 이들의 물리·화학적 성질은 Table 1, Table 2와 같다. 콘크리트의 소요 유동성을 확보하기 위해 나프탈렌계 고성능 감수제(HRWR로 약함)를 사용하였으며 그 특성은 Table 3과 같다. 소정의

공기량을 확보하기 위하여 Air Entraining agent(AE로 약함)를 첨가하였다. Table 4는 분말형 글리콜계의 수축저감제(SR로 약함)사용에 따른 각각의 특성이다. 잔골재는 강모래를 사용하였으며, 굵은골재는 최대 치수 20mm의 부순 돌을 사용하였으며, 잔골재와 굵은 골재의 물리적 성질은 Table 5와 같다.

2.2 콘크리트의 배합

이 논문의 배합은 Table 6과 같으며 물-결합재비의 변수를 20%, 30%, 40%의 3개 변수로 하여 실시하였고 물-시멘트비별 수축저감제의 혼입률(0, 0.5%)에 따른 효과를 검토하였다.

이 때, 콘크리트 배합은 각 물-결합재비에 대하여 수축저감제를 혼합하지 않은 배합에서 목표 슬럼프 플로우 400mm, 목표 공기량 3.5%가 발휘되도록 단위수량, HRWR제 첨가량 및 AE제량을 결정한 다음 이를 전 배합에 동일하게 적용 하였다.

콘크리트 제조방법은 골재와 시멘트를 먼저 투입하여 30초간 건식 비비기를 실시한 후 혼합수, 고성능감수제, 수축저감제를 투입하여 150초 동안 비비기하였다.

Table 1. Physical & Chemical Properties of Cement

Chemical composition(%)						Ig.loss (%)	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)	Setting time(hr:min.)	
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃				Initial	Final
62.66	20.61	5.32	2.86	4.21	2.62	1.39	3.14	3462	3:50	6:40

Table 2. Physical & Chemical Properties of Fly ash and Silicafume

Items Types	Chemical composition(%)						Ig.loss (%)	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃			
OPC	62.45	25.55	5.62	2.88	4.16	2.72	1.41	3.15	3452
FA	3.41	61.21	26.16	4.28	0.86	0.38	2.86	2.41	3654
SF	0.29	97.8	0.46	0.13	0.10	0.28	0.18	2.21	27000

Table 3. Physical & Chemical Properties of Superplasticizer

Items Type	Main composition	Specific gravity	Appearance	Standard dosage (C×%)
HRWR	Polycarboxylic	1.05	Transparent liquid	0.5~3.0

Table 4. Physical Properties of Shrinkage Reducing Agent

Item	Main ingredient	Specific gravity	Appearance	Standard dosage (C×%)	color	Density (h/cm ²)	Solubility in water
Shrinkage reducing agent	Polypropylene glycol	1.11	Transparent liquid	2.0~4.0	White	3.18	Soluble in water

Table 5. Physical Properties of Aggregates

Types	Items	Max. size of coarse agg.	Specific gravity	Absorption (%)	Unit weight (kg/m ³)	Fineness modulus
Fine aggregate		-	2.59	1.81	1,566	2.77
Coarse aggregate		13.0	2.62	0.66	1,541	6.78

Table 6. Mix Proportions of Concrete per 1m³

Design strength (MPa)	W/B	S/a	Target Slump Flow (mm)	Target Air content (B*) (%)	HRWR (B*) (%)	SR (%)	Unit weight(kg/m ³)					AE (B*) (%)	
							W	B			S		G
								C	FA	SF			
80	20	41	400	3.5	2.4	0.0	875	0	0	0	524	746	0.52
						0.5	739.8	131.5	0	3.7	524	746	0.52
						0.5	783	88	0	4	524	746	0.52
						0.5	739.8	0	131.5	3.7	524	746	0.52
						0.5	805.3	0	65.6	4.1	524	746	0.52
						0.5	583	0	0	0	524	746	0.52
73	30	45	400	3.5	2.1	0.0	443	87.5	0	2.5	704	855	0.52
						0.5	522.1	58.3	0	0	704	855	0.52
						0.5	522.1	0	58.3	2.6	704	855	0.52
						0.5	466	0	87.5	2.5	704	855	0.52
						0.5	437.5	0	0	0	704	855	0.52
						0.5	509.9	65.7	0	1.9	704	855	0.52
43	40	49	400	3.5	1.8	0.0	391.7	43.8	0	2	842	872	0.52
						0.5	391.7	0	65.7	1.9	842	872	0.52
						0.5	402.7	0	32.8	2	842	872	0.52
						0.5	437.5	0	0	0	842	872	0.52
						0.5	509.9	65.7	0	1.9	842	872	0.52
						0.5	402.7	0	32.8	2	842	872	0.52

2.3 실험 방법

1) 슬럼프, 플로우, 공기량

굳지 않은 콘크리트의 성질들을 알아보기 위해, 공기량(KS F2421) 시험과 콘크리트 배합 직후부터 1시간까지 30분 간격으로 슬럼프 및 플로우(KS F2402) 시험을 실시하여 시간에 따른 변화를 조사하였다.

2) 압축강도

모르타르는 KSL 5105 시멘트 모르타르의 압축강도 시험 방법에 의하여 실시하였으며 콘크리트는 $\phi 100 \times 200$ mm 원주공시체를 제작하여 1일 후 탈형하고 온도 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 수중에서 표준양생을 실시한 다음, 재령 3일, 7일, 28일 압축강도를 KSF 2405에 의하여 측정하였다. 압축강도의 값은 콘크리트 공시체 3개의 평균값이다. 이때 압축강도용 시험기는 2000kN 만능시험기를 사용하였으며, 고강도콘크리트의 응결시간 측정은 KSF 2436의 관입저항침에 의한 콘크리트 응결시간 시험방법에 따라 측정하였다. 고강도 콘크리트의 공극률 측정은 ASTM C642-97 (Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete)의 시험 방법에 따라 측정하였다.

3) 자기수축

아직까지 자기수축 측정방법에 관한 표준화

가 이루어지지 않고 있어 연구자들마다 다소 상이한 방법으로 자기수축을 측정하고 있는 방법은 일본 콘크리트학회¹³⁾에서 제안한 방법 Fig. 1은 자기수축용 콘크리트 공시체 및 시험장치 개요를 나타낸 것이다. 길이변화 측정용 공시체는 $100 \times 100 \times 400$ mm 철재빔 몰드를 사용하였으며 몰드 중앙부에 게이지 거치를 위한 삼발이를 설치한 후 매립형 게이지를 매설하였다. 몰드 내부 면에 몰드와 시험편의 부착을 최소화하기 위해 테프론 시트를 부착하였으며, 오일을 면 전체에 도포하였다.

콘크리트 배합 후 3시간 후에 LVDT를 게이지 플러그의 축에 일치하도록 설치하고 길이변화 시험은 기건양생(온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도 $60 \pm 5\%$)한 경우와 수중양생을 행하지 않고 전기간 기중양생을 한 경우에 대해서 실시하였다.

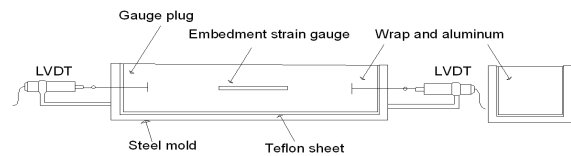


Fig. 1. Experimental setup for measuring length change of concrete.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

Table 7은 슬럼프, 플로우 및 공기량 등 굳지 않은 콘크리트의 성질을 나타낸 것이다. W/B가 20% 경우 초기 OPC의 슬럼프 250mm, 공기량 4.5%, FA10+SR0.5 경우 슬럼프 262mm, 공기량 4.0%, FA15+SR0.5 경우 슬럼프 278mm, 공기량 3.8%, SF7.5+SR0.5 경우 슬럼프 243mm, 공기량 4.7%, SF15+SR0.5 경우 슬럼프 237mm, 공기량 4.9%로 나타났다. 1시간 경과 후 콘크리트의 슬럼프 값과 공기량 값은 OPC 225mm, 4.3%, FA10+SR0.5 경우 247mm, 3.5%, FA15+SR0.5 경우 260mm, 3.4%, SF7.5+SR0.5 경우 235mm, 4.5%, SF15+SR0.5 경우 230mm, 4.6%로 나타났으며 W/B가 30%일 경우와 W/B가 40%일 경우의 슬럼프 값과 공기량의 변화와 비슷한 양상을 보였다.

Table 7에서 보듯이 W/B가 20% 경우 슬럼프는 OPC 25mm, FA10+SR0.5 15mm, FA15+SR0.5 18mm, SF7.5+SR0.5 8mm, SF15+SR0.5 7mm, W/B가 30% 경우 OPC 22mm, FA10+SR0.5 26mm, FA15+SR0.5 29mm, SF7.5+SR0.5 20mm, SF15+SR0.5 21mm, W/B가 40% 경우 OPC 34mm, FA10+SR0.5 35mm, FA15+SR0.5 33mm, SF7.5+SR0.5 29mm, SF15+SR0.5 29mm 손실이 발생하였다. 공기량은 W/B별로 FA는 OPC 보다 감소하고 SF는 증가하는 것으로 나타났다.

FA를 사용하면 OPC 만을 사용한 일반 콘크리트에 비해 슬럼프 및 플로우가 증가하여 작업성이 우수한 고성능 콘크리트의 제조가 가능할 것으로 사료되고 SF를 사용한 경우에는 OPC 콘크리트와 동일한 유동성을 확보하기 위해서는 고성능 감수제의 양을 증가시킬 필요가 있다.

Table 7. Properties of Fresh and Hardened Concrete

W/B (%)	Mix type (%)	Slump (Flow) (mm)		Air(%)		응결시간 (KS F 2436)	
		Initial	60min	Initial	60min	초결 (hr:min)	종결 (hr:min)
20	OPC	250	225	4.5	4.3	10:00	11:47
	FA10+SR0.5	262 (640*630)	247 (630*620)	4.0	3.5	9:21	11:25
	FA15+SR0.5	278 (670*650)	260 (630*610)	3.8	3.4	10:20	12:24
	SF7.5+SR0.5	243 (520*510)	235 (510*510)	4.7	4.5	9:27	10:57
	SF15+SR0.5	237 (510*520)	230 (480*500)	4.9	4.6	9:05	10:30
30	OPC	270	248	4.6	4.4	10:10	12:10
	FA10+SR0.5	281 (780*790)	255 (550*560)	4.4	3.8	11:30	13:31
	FA15+SR0.5	287 (800*790)	258 (570*570)	4.3	3.6	10:10	12:12
	SF7.5+SR0.5	261 (630*640)	241 (520*500)	4.6	4.5	10:40	13:20
	SF15+SR0.5	254 (540*530)	233 (490*500)	4.8	3.8	10:20	12:00
40	OPC	288	254	4.8	4.5	9:20	11:30
	FA10+SR0.5	295 (560*560)	260 (360*360)	4.6	4.4	11:15	13:25
	FA15+SR0.5	301 (570*570)	268 (410*380)	4.4	3.8	9:27	10:59
	SF7.5+SR0.5	279 (550*570)	250 (390*400)	4.7	4.6	9:31	11:13
	SF15+SR0.5	270 (540*560)	241 (370*360)	4.9	4.7	9:28	11:02

3.2 압축강도

Table 8은 재령별 압축강도를 나타내었고 Fig. 2와 같이 분석하였다. 재령 91일 경우 OPC 콘크리트 대비 FA10+SR0.5 0.98배,

FA15+SR0.5 0.95배, SF7.5+SR0.5 1.06배, SF15+SR0.5 1.08배 증가하였다.

Table 8. 재령별 압축강도(W/B=20%)

배합 재령	OPC	FA10+SR0.5	FA15+SR0.5	SF7.5+SR0.5	SF15+SR0.5
7	59.8	51.5	48.3	63.4	62.7
28	68.9	66	64.9	74.3	77.7
91	77	75.6	73.4	81.6	83.1

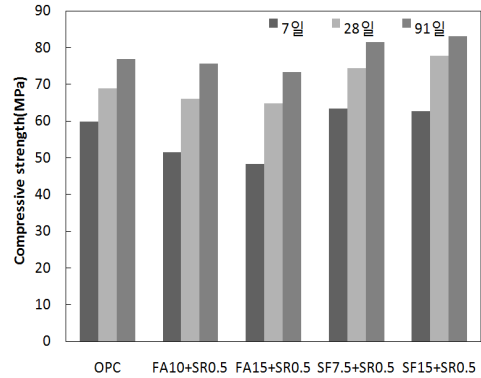


Fig. 2. 재령에 따른 압축강도(W/B=20%).

Table 9는 재령별 압축강도를 나타내었고 Fig. 3과 같이 분석하였다. 재령 91일 경우 OPC 콘크리트 대비 FA10+SR0.5 0.97배, FA15+SR0.5 0.96배, SF7.5+SR0.5 1.03배, SF15+SR0.5 1.06배 증가하였다.

Table 9. 재령별 압축강도(W/B=30%)

배합 재령	OPC	FA10+SR0.5	FA15+SR0.5	SF7.5+SR0.5	SF15+SR0.5
7	50	43.4	40.4	52	53.5
28	54	52.8	50.7	60.2	65
91	66	64.1	63.4	67.7	70.2

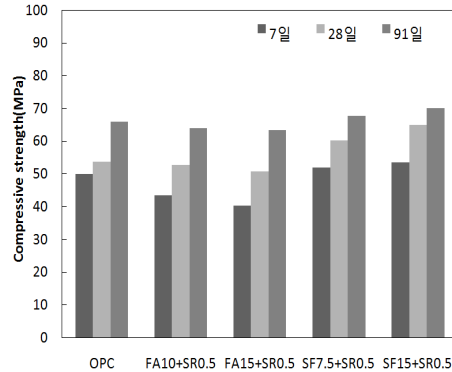


Fig. 3. 재령에 따른 압축강도(W/B=30%).

Table 10은 재령별 압축강도를 나타내었고 Fig. 4와 같이 분석하였다. 재령 91일 경우 OPC 콘크리트 대비 FA10+SR0.5 0.95배, FA15+SR0.5 0.92배, SF7.5+SR0.5 1.03배, SF15+SR0.5 1.05배 증가하였다.

Table 10. 재령별 압축강도(W/B=40%)

배합 재령	OPC	FA10+ SR0.5	FA15+ SR0.5	SF7.5+ SR0.5	SF15+ SR0.5
7	43.7	41.8	39.9	45.1	46.4
28	48.5	46.6	45.5	55.2	59
91	58.2	55.5	53.7	59.9	61.3

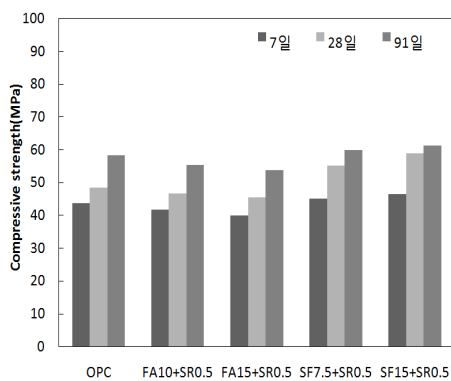


Fig. 4. 재령에 따른 압축강도(W/B=40%).

콘크리트의 압축강도는 W/B가 높을수록 낮아지는 경향을 보였고 혼화재를 치환하였을 때 보통강도 콘크리트에 비해 고강도 콘크리트의 압축강도가 더 빨리 발현됨을 알 수 있다. 이러한 실험결과로부터 재령 초기에 FA를 치환한 콘크리트의 강도 발현률이 낮으나 28일에서부터는 보통강도 콘크리트의 강도에 근사하거나 큰 강도를 나타내고 91일 강도에서는 콘크리트 강도가 더 크게 나타나는 것으로 알 수 있듯이 FA를 사용하여 고강도 콘크리트의 제조가 가능한 것으로 판단되고 수축저감제와 실리카폼을 병용하여 사용하였을 경우 콘크리트 강도가 크게 나타내었다.

3.3 콘크리트의 자기수축 특성

Fig. 5는 SR이 자기수축에 영향을 미치는 것을 측정한 결과이다. OPC 콘크리트의 자기수축 변형률은 56일에서 -417×10^{-6} 로 비교적 큰 것

으로 나타났으며, 대부분 재령 10일 이내에 수축이 발생하여 그 이후에는 점점 수축량이 감소하였다. 이와 같이 자기수축이 크게 발생하는 콘크리트의 SR을 혼입한 결과, 콘크리트의 자기수축이 크게 감소하는 것으로 나타났다.

OPC 콘크리트에 비해 SR 혼입률이 0.5%인 경우 23.7%의 수축을 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 SR을 사용함으로써 자기수축이 감소하는 것은 콘크리트 경화체 공극 내부에 존재하는 수분의 표면장력을 저하시키는 작용 때문으로 판단된다.^{14),15)}

Fig. 6은 W/B 별 광물질 혼화재와 SR의 병용 사용이 콘크리트의 자기수축에 미치는 영향을 비교하여 나타낸 것이다. W/B가 20%일 경우 OPC 대비 FA10+SR0.5 8.5%, FA15+SR0.5 15.25% 자기수축변형률이 감소한 반면 SF7.5+SR0.5 5.45%, SF15+SR0.5 10.89% 자기수축변형률이 증가하는 것으로 나타났고, W/B가 30%일 경우 OPC 대비 FA10+SR0.5 20.29%, FA15+SR0.5 30.43% 자기수축변형률이 감소한 반면 SF7.5+SR0.5 5.80%, SF15+SR0.5 11.59% 자기수축변형률이 증가하는 것으로 나타났고, W/B가 40%일 경우 OPC 대비 FA10+SR0.5 25.17%, FA15+SR0.5 47.55% 자기수축변형률이 감소한 반면 SF7.5+SR0.5 16.78%, SF15+SR0.5 37.06% 자기수축변형률이 증가하는 것으로 나타났다. W/B별 광물질 혼화재와 SR을 병용하여 사용한 콘크리트는 OPC 콘크리트에 비해 자기수축 변형률이 작게 발생하는 것으로 나타났다.

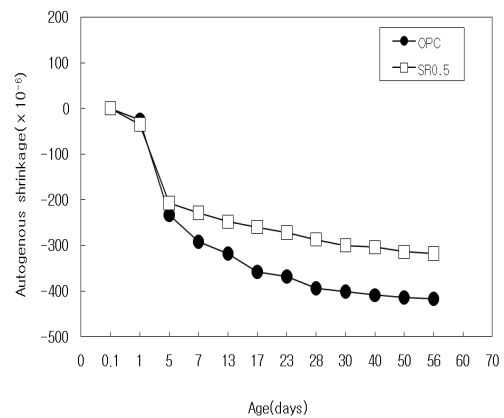
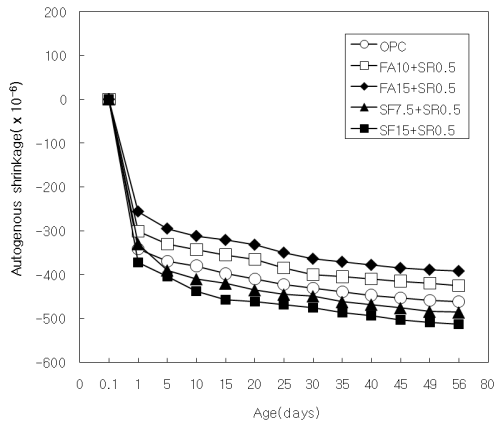
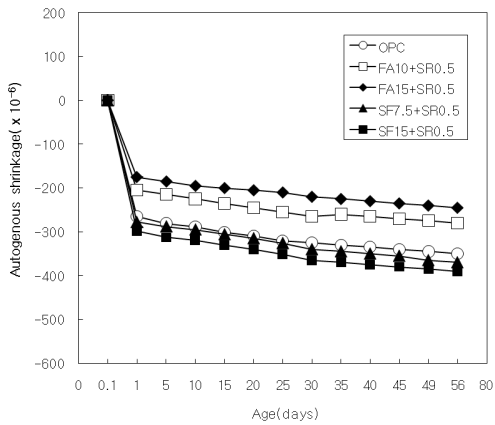


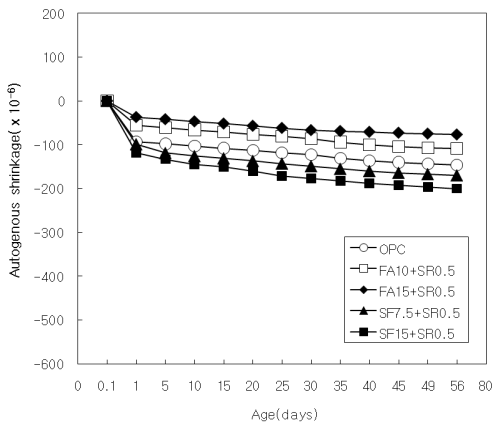
Fig. 5. SR effect of autogenous shrinkage.



(a) W/B=20%



(b) W/B=30%



(c) W/B=40%

Fig. 6. Effect of admixtures and SR use for autogenous shrinkage.

또한 W/B가 30% 이하인 고강도 콘크리트의 자기수축은 W/B가 낮을수록 크게 증가하였으며, 대부분의 자기수축이 콘크리트 타설 후 수

일 이내에 발생하여 초기 균열을 일으키는 원인이 될 수 있는 것으로 판단된다. 그리고 고강도 콘크리트의 경우, 자기수축량의 약 82% 이상이 재령이 4일 이내에 발생하였다. 또한 W/B가 낮을수록 보다 이른 재령에서 자기수축량이 많이 발생하는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 기존의 연구 결과와 일치한다.¹⁶⁾ 고강도 콘크리트의 자기수축은 콘크리트 타설 후 수일 이내에 발생하기 때문에 고강도 콘크리트의 초기재령에 품질관리가 중요함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 W/B 20%, 30%, 40%일 경우 FA와 SF의 치환에 따른 고강도 콘크리트의 자기수축에 미치는 영향을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) FA를 사용한 고강도 콘크리트는 혼입률이 증가할수록 초기 압축강도가 저하되며 SF의 혼입률이 증가할수록 압축강도는 커지는 것으로 나타났고, OPC 콘크리트에 비해 재령 7일의 콘크리트 압축강도는 W/B=20%일 때 FA10+SR0.5 13.8%, FA15+SR0.5 19.2% 감소하였고, SF7.5+SR0.5 6.1%, SF15+SR0.5 4.8% 증가, W/B=30%일 때 FA10+SR0.5 13.1%, FA15+SR0.5 19.1% 감소하였고, SF7.5+SR0.5 4.1%, SF15+SR0.5 7.2% 증가, W/B=40%일 때 FA10+SR0.5 4.3%, FA15+SR0.5 8.7% 감소하였고, SF7.5+SR0.5 3.3%, SF15+SR0.5 6.3% 증가되는 것으로 나타났다.
- 2) 자기수축변형률은 OPC콘크리트의 경우 재령 56일에서 -417×10^{-6} 로 나타났으며 OPC 콘크리트에 비해 SR의 혼입률이 0.5%일때 23.7%가 감소하였다.
- 3) 수축저감제는 고강도 콘크리트의 자기수축을 저감하는데 효과가 뛰어나며, 광물질 혼화제와 수축저감제를 사용한 경우에도 수축저감제를 단독으로 사용한 경우와 동일한 수준으로 자기수축을 저감하는 효과가 있었다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 경북대학교 학술 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Proceedings of International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete, Japan Concrete Institute, June 13-14, (1998), Hiroshima, Japan
- 2) J.H. Jonasson, P. Groth and Hedlund H. : Modeling of temperature and moisture field in concrete to study early age movement as a base for stress analysis, Proceedings of the International RILEM Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early ages, pp 45-52, (1994)
- 3) F.D. Larrard and R.L Roy : The influence of high-performance silica-fume concrete, 4th CANMET/ACI International Concrete of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI, SP-132, pp. 965-986, (1992)
- 4) F.D. Larrard, R.L. Roy and Pons,G : The after code type model for creep and shrinkage of high-performance concrete, Proceeding of the 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance Concrete, Paris, pp.387-396, (1996)
- 5) 田澤榮一, 宮澤伸吾, 佐藤剛: 自己收縮に及ぼすセメントの化學組成の影響, セメント・コンクリート論文集 No. 47, pp.528-533, (1993)
- 6) 田澤榮一 : 콘크리트의自己收縮ひすみの豫測法に關する研究, JCA Proceedings of Cement and Concrete, No.50, pp.47-55, (1996)
- 7) 日本コンクリート工學協會 : 自己收縮研究委員會 報告書, pp.117-118, (1996)
- 8) 山崎庸行, 橋田浩 : 自己收縮と水和膨脹による高強度コンクリートの連成ひすげみ特性に關する檢討, 콘크리트工學論文集, Vol. 13, No. 1, pp. 25-32, (2002)
- 9) Paillere, M., Buil, M., and Serrano, J. J., "Effect of Fiber Addition on the Autogenous Shrinkage of Silica Fume Concrete," ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 2, pp. 139-144, (1989)
- 10) Miyazawa, S. and Tazawa, E., "Prediction Model for Shrinkage of Concrete Including Autogenous Shrinkage, Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Other Quasi-Brittle Materials," Proceedings of Sixth International Conference, Elsevier Science Ltd., pp. 735-746, (2001)
- 11) 이희근, 이광명, 김우, "고강도 플라이 애쉬 콘크리트의 자기수축 예측 모델" 한국콘크리트학회 논문집, 제15권 1호, pp. 134-142, (2003)
- 12) 고경택, 박정준, 김성욱, 김방욱, 이장화, "광물질 혼화재료를 사용한 고성능 콘크리트의 자기수축", 대한토목학회 학술발표회, pp. 785-788, (2002)
- 13) Technical Committee Reports in Japan Concrete Institute, " Test Method for Autogenous Shrinkage and Autogenous Expansion of Cement Paste, Mortar, and Concrete," Autogenous Shrinkage of concrete, Ed. by Tazawa, E., E&FN Spon, London and New York, pp. 56-59, (1999)
- 14) Shah, S.P., Karaguler, M.E. and Sarigaphuti, M. ACI Materials Journal, Vol. 89, 3, (1992)
- 15) 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, pp.971-998 (1997)
- 16) 이희근, 이광명, 김병기, 한국콘크리트학회 논문집 14. 2, 249. (2002)
- 17) Tazawa, E. and Miyazawa, S Autogenous

- Shrinkage of Concrete and Its Importance in Concrete Technology, *Proceedings of the Fifth International Rilem Symposium, Barcelona*, pp. 159-168, (1993)
- 18) 한천구, 김성욱, 고경택, 배정렬, *한국콘크리트학회 논문집* 15, 6, 785 (2003)
- 19) 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)
- 20) 谷村充, 兵頭彦次後, 佐藤達三, 佐藤良一, *コンクリート工學年次論文集* 22, 2, (2000)
- 21) 고경택, 박정준, 김성욱, 이장화, *대한토목학회 논문집*, pp. 501-508, (2004)
- 22) 田澤榮一, 宮澤伸吾, *土木學會論文集* 第 571, 36, (1997)
- 23) ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, "Committee Report ACI 209, *American Concrete Institute*. (2003)
- 24) Nisbet, E. G. and Maitland, S. T., *Can. J. Civil Eng.* 3, 47, (1976)
- 25) RILEM TC 119-TCE Avoidance of Thermal Cracking in Concrete at Early Age-Recommendations, *Materials and Structures*, Vol. 30, No. 202, pp. 451-464, (1997)
- 26) 김진근, 이종대, *대한토목학회 논문집*, 14, 4, 771, (1994)
- 27) 홍상희, 전병채, 송명신, 한천구, 반호용, *콘크리트 학회 가을학술 발표회*, 10, 2, 386, (1998)
- 28) 이영재, *한국산업응용학회논문집* 13, 2, 99, (2010)
- 29) 박현, "초고강도 콘크리트의 자기수축 제어에 관한 연구", 단국대학교 대학원, 석사논문, (2010)
- 30) 신창룡, "혼화재료 혼입에 따른 콘크리트의 자기수축 제어를 위한 실험적 연구", 경북대학교 과학기술대학원, 석사논문, (2010)

(접수:2013.01.07, 수정:2013.02.15, 게재 확정:2013.02.22)