

팽창재와 수축저감제를 조합 사용한 고성능 콘크리트의 자기수축 해석

Estimation of the Autogenous Shrinkage of the High Performance Concrete Containing Expansive Additive and Shrinkage Reducing Agent

한 민 철*

Han, Min-Cheol

Abstract

This study investigated the fundamental properties and shrinkage properties of high performance concrete with water/binder ratio of 0, 30 and with combination of expansive additive and shrinkage reducing agent. According to the results, the fluidity of high performance concrete showed lower the using method in combination with expansive additive and shrinkage reducing agent than the separately using method of that, so the amount of superplasticizer increased when the adding ratio of expansive additive and shrinkage reducing agent increased. However the air content of concrete increased when used in combination with expansive additive and shrinkage reducing agent, so the amount of AE agent decreased. The compressive strength showed the highest at 5% of expansive additive, and decreased with an increase of the amount of shrinkage reducing agent. Furthermore, in order to reduce the shrinkage of high performance concrete, it was found that the using method in combination with expansive additive and shrinkage reducing agent was more effective than separately using method of that. Autogenous shrinkage was predicted using JCI model. Because JCI model is unable to consider the effect of EA and SRA, correction factor should be added to enhance the accuracy.

Keywords : High performance concrete, Drying shrinkage, Autogenous shrinkage, Expansive additive, Shrinkage reducing agent

1. 서 론

최근 고유동, 고강도 및 고내구성을 발휘하는 고성능 콘크리트에 대한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고, 또한 사용 실적도 점차 증가하는 추세에 있다.¹⁾

그러나, 이러한 고성능 콘크리트는 요구 성능을 만족시키기 위하여 필연적으로 물-결합재비(이하 W/B)를 작게 하고, 단위결합재량 및 고성능 감수제를 다량 사용하게 되는데, 이로 인해 고성능 콘크리트는 수화열에 의한 온도균열, 건조 및 자기수축에 의한 수축균열 및 비경제적인 문제점이 제기되고 있다.²⁾ 따라서, 최근의 고성능 콘크리트는 시멘트만으로 제조하기에는 많은 어려움이 따르게 되므로, 콘크리트 배합설계상 플라이 애쉬 및 실리카 폼 등 광물질 혼화제를 시멘트량에 일부 치환하여 사용하는 것이 기본이 되었고,^{3,4)} 또한 건조 및 자기수축 등 균열문제를 해결하기 위해 팽창재 및 수축저감제를 효율적인 비율로 조정하여 사용하는 것도 검토할 필요성이 제기되고 있다.⁵⁾

기존의 연구에 의하면 고성능 콘크리트의 수축을 저감하기 위해 팽창재와 수축저감제의 사용을 검토한 결과, 단독으로 사용하는 방법보다 두 재료를 조합하여 사용하는 방법이 더 효과적인 것으로 보고되고 있다.

자기수축의 평가와 관련하여 일본콘크리트 공학협회에서는 W/B가 콘크리트의 자기수축과 큰 연관이 있는 것으로 가정하여 지수함수형태의 식을 제안하였으며, CEB-FIP 모델의 경우 자기수축의 주된 요인으로 압축강도를 고려하였고, Jonasson과 Hedlund는 W/B를 고려하는 방법으로 1일 이후의 자기수축을 예측할 수 있는 식을 제안 한바 있다. 또한, Dilger와 Wang 등은 실리카 폼 유무에 따른 자기수축예측모델을 W/B요인을 고려하는 방법으로 제안한 바 있다.

한편, 팽창재와 수축저감제를 혼합사용하여 자기수축을 제어하는 연구와 관련하여는 한 등이 국내최초로 시도한 바 있는데, W/B 30%의 고성능 콘크리트에 팽창재 10%, 수축저감제 2.5%에서 최적의 수축저감효과를 얻을 수 있음을 보고한 바 있다.⁶⁾ 또한, 김 등은 팽창재와 수축저감제를 동시에 혼합한 콘크리트의 자기수축예측을 위한 방법으로 통계적 회귀모델을 이용하여 검토한 바 있다.

그러나 이러한 팽창재와 수축저감제를 동시에 사용한 경우 고성능 콘크리트의 자기수축저감에 미치는 영향을 정량적으로 평가한 연구는 국내외적으로 많이 보고되고 있지 않은 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 고성능 콘크리트의 건조 및 자기수축 저감을 위한 방안으로 팽창재와 수축저감제를 다양한 혼합비율로 병용하는 고성능 콘크리트를 대상으로 자기수축 해석 모델을 이용하여 자기수축 저감성능에 대한 해석을 실시하고자 한다.

* 정회원, 청주대학교 건축공학부 교수, 전임강사

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

표 1 실험계획

실험요인		실험수준	
배합요인	W/B* (%)	1	30
	슬럼프플로우 (cm)	1	60±10
	공기량 (%)	1	4.5±1.5
	팽창재혼입률 (%)	5	0.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0
	수축저감제 혼입률 (%)	5	0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
실험항목	굳지않은 콘크리트	5	· 슬럼프, 슬럼프 플로우 · 공기량, 단위용적질량 · 응결시간
	경화콘크리트	3	· 압축강도(7, 28, 91, 180일) · 쪼갬 인장강도(28일) · 자기수축 (초결, 1, 2, 3... 일)

* 결합재비율 [시멘트:플라이애시:실리카 흙 = 7:2:1]

본 연구의 실험계획은 표 1과 같다. 즉, 배합사항은 플라이 애시(FA) 20%와 실리카 폼(SF) 10%를 동시에 치환한 W/B 30%의 1수준에 대하여 팽창재(EA) 혼입률을 0, 2.5, 5.0, 7.5,

10.0%의 5수준, 수축저감제(SR) 혼입률을 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0%의 5수준간에 대한 조합으로 총 25배치를 실험계획 하였다. 이때, 각 배치는 목표 슬럼프 플로우 60±10cm, 목표 공기량 4.5±1.5%를 만족하도록 SP제 및 AE제량을 배합설계 하였다. 굳지않은 콘크리트와 경화 콘크리트의 실험항목은 표 1과 같고, 배합사항은 표 2와 같다.

2.2 사용재료

본 연구의 사용재료로써 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였는데, 그 물리적 성질은 표 3과 같다. 골재로써 잔골재는 강모래 (밀도:2.67g/cm³, 조립률:2.60), 굵은 골재는 25mm 부순 굵은 골재 (밀도: 2.59g/cm³, 조립률:6.87)를 사용하였다.

혼화제로써, 플라이 애시는 국내 보령 화력발전소산, 실리카 폼은 노르웨이산, 팽창재는 일본산 CSA계, 수축저감제는 독일산 글리콜계를 사용하였는데, 각각의 물리적 성질은 표 4~7과 같다.

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 콘크리트의 혼합은 강제식 팬 타입 믹서를 사용하였고, 굳지않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프는 KS F 2402, 슬럼프 플로우는 슬럼프 측정이 끝난 후 최대직경과 이에 직교하는 직경의 평균치로 하였으며, 공기량 및 단위용적 질량은 KS F 2421 및 KS F 2409의 규정에 의거 실시하였다.

표 2 콘크리트 배합사항

W/B (%)	단위수량 (kg/m ³)	S/a (%)	SP (B×%)	AE (B×%)	EA (%)	SRA (%)	질량배합 (kg/m ³)								
							C	S	G	FA	SF	EA	SR		
30	175	45	1.90	0.040	0.0	0.0	408	686	814	117	58	0	0		
							405	684	812	117	58	0	3		
							403	682	809	117	58	0	6		
							400	680	806	117	58	0	9		
							397	678	804	117	58	0	12		
			1.90	0.030	2.5	0.0	0.0	0.0	394	686	813	117	58	15	0
									391	684	811	117	58	15	3
									388	682	808	117	58	15	6
									385	680	806	117	58	15	9
									382	677	803	117	58	15	12
			1.90	0.025	5.0	0.0	0.0	0.0	379	686	813	117	58	29	0
									376	683	810	117	58	29	3
									373	681	808	117	58	29	6
									370	679	805	117	58	29	9
									367	677	803	117	58	26	12
			2.00	0.020	7.5	0.0	0.0	0.0	365	685	812	117	58	44	0
									362	683	810	117	58	44	3
									359	681	807	117	58	44	6
									356	679	805	117	58	44	9
									353	677	802	117	58	44	12
			2.10	0.018	10.0	0.0	0.0	0.0	350	685	812	117	58	58	0
									347	682	809	117	58	58	3
									344	680	807	117	58	58	6
									341	678	804	117	58	58	9
									338	676	801	117	58	58	12
2.20	0.015		0.0	0.0	0.0	350	685	812	117	58	58	0			
						347	682	809	117	58	58	3			
						344	680	807	117	58	58	6			
						341	678	804	117	58	58	9			
						338	676	801	117	58	58	12			

응결시간은 KS F 2436의 프록터 관입저항 시험방법에 의거 측정하였다.

경화 콘크리트의 압축 및 인장강도는 KS F 2403에 따라 공시체를 제작, 양생한 다음 계획된 재령에서 KS F 2405 및 2423의 규정에 따라 실시하였다.

한편, 자기수축 시험은 일본 콘크리트공학협회의 시험방법²⁾에 의거 실시하였는데, 시험체 제작 및 게이지 설치는 그림 1 및 그림 2와 같다.

표 3. 시멘트의 물리적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	안정성 (%)	응결시간 (min)		압축강도 (MPa)		
			초결	중결	3일	7일	28일
3.15	3,413	0.07	221	316	24.3	30.5	38.0

표 4. 플라이애시의 물리적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	강열감량 (%)	압축 강도비 (%)	SiO ₂ (%)	흡수율 (%)	단위 수량비 (%)
2.22	3,850	4.2	92	67.5	0.2	100

표 5. 실리카흙의 물리적 성질

밀도 (g/cm ³)	블레인 (cm ² /g)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	강열감량 (%)
2.10	240,000	90.0	0.12	0.25	0.38	0.56	1.50

표 6. 팽창재의 물리 화학적 성질

밀도 (g/cm ³)	블레인 (cm ² /g)	SiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	F-CaO (%)
2.90	3,117	3.80	28.66	13.55	51.35	0.56	16.02

표 7. 수축저감제의 물리적 성질

밀도 (g/cm ³)	주성분	미분함량 (%)	형태	색상
1.02	Glycol ether	40	분말	흰색

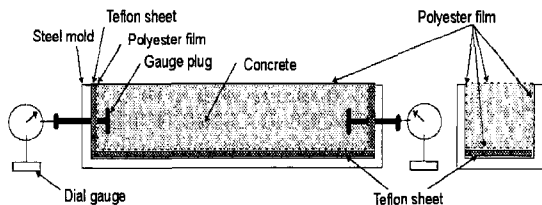


그림 1. 자기수축 측정장비

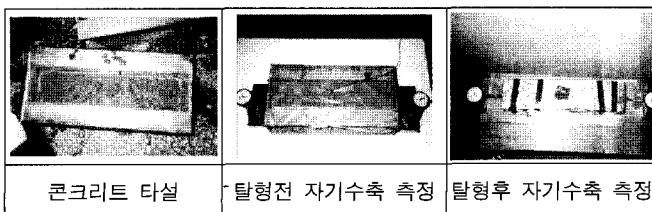


그림 2. 자기수축 시험체 사진

3. 이론적 고찰

3.1 자기수축 예측 모델

자기수축은 시멘트의 수화반응에 의해 내부에 새롭게 생성되는 공극에 외부 및 주변부에서 물의 보급이 없는 경우에 발생하는데, 물의 보급이 있는 경우라도 물의 침투속도가 공극형성에 따라가지 못하는 경우에 물이 부조하고 공극내를 물로 채울 수 없게 되어 공극내 상대 습도의 저하가 발생하게 된다.

이 경우 상대습도의 저하에 따른 자기건조가 발생하게 되고 이로 인한 자기수축이 일어나게 되며 수증양생으로 질량이 증가하여도 자기수축은 발생하게 된다. 이와 같이 시멘트 경화체중에 새롭게 생성된 공극내 상대습도의 저하에 의해 부압이 발생하고 수축이 일어나게 되는데, 이를 자기수축이라 한다.

3.1.1 일본 콘크리트 공학협회 자기수축위원회 모델

일본 콘크리트 공학협회의 자기수축위원회에서는²⁾ 재령에 따른 자기수축을 자기수축 최대값 ϵ_{∞} , W/B와 시간에 따른 자기수축발현정도를 나타내는 계수 $\beta(t)$ 의 곱으로 나타내고 있다. 표 8은 실험상수값을 나타낸 것이다.

$$\epsilon_{as}(t) = \gamma \cdot \epsilon_{\infty}(W/B) \cdot \beta(t) \dots\dots\dots (1)$$

$$\epsilon(W/B) = 3070 \exp(-7.2(W/B)) \dots\dots\dots (2)$$

$$\beta(t) = 1 - \exp[-a(t-t_0)^b] \dots\dots\dots (3)$$

여기서, γ : 시멘트와 혼화재 영향을 나타내는 계수
 $\epsilon_{\infty}(W/B)$: W/B에 따른 최대자기수축변형률
 a, b : 상수
 t_0 : 초결시간
 t : 재령

표 8. W/B에 따른 실험상수 a, b

W/B	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
a	1.2	1.5	0.6	0.1	0.03
b	0.4	0.4	0.5	0.7	0.8

이 모델식은 W/B가 0.2~0.56이고 일반 골재의 체적을 갖으며 콘크리트 주변 온도가 20~60°C인 경우에 적용될 수 있는 것으로 알려져 있다.

3.1.2 CEB-FIP 모델

CEB-FIP 모델에서는¹²⁾ 콘크리트의 자기수축에 미치는 주요 인자로서 압축강도를 고려한 식을 제안하였는데, 그 식은 식 (4)와 같다.

$$\epsilon_{as}(t) = -\alpha_{as} \left[\frac{f'_c(t)/10}{6 + f'_c(t)/10} \right]^{2.5} \cdot [1 - \exp(-0.2\sqrt{t})] \dots\dots (4)$$

여기서, $f'_c(t)$: 재령 t에서의 압축강도(MPa)
 α_{as} : 시멘트종류에 따른 계수
 t : 재령(일)

표 9. W/B에 따른 실험상수 a, b

시멘트 종류	a_{as}
· 낮은 경화성 시멘트	800
일반 혹은 급경 시멘트	700
급경고강도 시멘트	600

3.1.3 Jonasson과 Hedlund 모델

콘크리트의 자기수축은 재령 초기부터 발생하나, 재령초기 콘크리트는 소성상태이므로 공학적인 관점에서는 일반적으로 배합 후 24시간 이후부터의 응력과 변형이 유효하다고 보고 다음과 같은 식을 사용하여 재령 q일 이후의 자기수축을 예측하였다.

$$\epsilon_{as}(t) = [-0.65 + 1.3(W/B)]10^{-3} \cdot \exp\left[-\left(\frac{5}{t-1}\right)^{0.3}\right] \dots(5)$$

여기서, t : 재령(일)

3.1.4 Lee 모델

식 (1)의 일본 콘크리트 공학협회의 자기수축예측모델식에서 최종자기수축변형률이 아닌 28일 자기수축변형률을 사용하여 W/B가 0.27~0.42인 콘크리트의 유효 자기수축을 예측할 수 있는 모델을 제안하였다.11)

$$\epsilon_{as}(t) = \gamma \cdot \epsilon_{\infty}(W/B) \cdot \beta(t) \dots\dots\dots (6)$$

$$\epsilon(W/B) = 2180 \exp(-7.6(W/B)) \dots\dots\dots (7)$$

$$\beta(t) = \exp\left(a\left[1 - \left(\frac{28-t}{t-t_{1500}}\right)^b\right]\right) \dots\dots\dots (8)$$

여기서, $\epsilon_{as}(t)$: 재령 t에서 자기수축
 $\epsilon_{28}(t)$: 재령 28일 OPC콘크리트 자기수축변형률
 $\beta(t)$: 시간에 따른 자기수축 발현속도
 a, b : 상수
 t_{1500} : 초음파속도가 1500m/s에 도달시 시간(일)

4. 팽창제와 수축저감제가 콘크리트의 물성에 미치는 영향

4.1 굳지않은 콘크리트에 미치는 영향

표 10은 팽창제 및 수축저감제 병용에 따른 굳지않은 콘크리트의 특성을 나타낸 것이다.

전반적으로, 팽창제 및 수축저감제 병용에 따른 유동성 및 공기량은 모두 배합 설계로 결정하였으므로 고유동 콘크리트의 범위인 목표 슬럼프플로우 60±10cm 및 목표 공기량 4.5±1.5%를 만족하는 것으로 나타났다.

단, 본 항목은 배합 설계하여 얻어진 결과로써, 팽창제 및 수축저감제와 관련하여 분석하기에는 어려움이 있어, 그림 3, 4는 SP제 및 AE제량 배합사항을 분석한 것이다.

즉, 그림 3은 팽창제와 수축저감제의 혼입률 변화에 따른 SP제량을 나타낸 것이다. 먼저, 팽창제를 무혼입한 경우 수축저

감제 혼입률 변화에 따른 SP제량은 수축저감제 혼입률이 증가할수록 유동성이 저하하여 동일 유동성으로 배합설계 하기 위해 SP제량이 증가하였다. 또한, 수축저감제를 무혼입한 경우는 팽창제 혼입률 변화에 따라 유동성이 유사하게 나타나 SP제량을 동일하게 사용하는 것으로 배합설계 되었으나, 팽창제 및 수축저감제를 병용한 경우는 유동성이 많이 저하하여 SP제 사용량이 크게 증가하였다.

표 10. 굳지않은 콘크리트의 실험결과

배합 (EA-SR)	항목	슬럼프 (cm)	슬럼프 플로우 (cm)	공기량 (%)	단위용적 질량 (kg/m ³)	응결시간 (hr.)	
						초결	종결
0.0-0.0		26.8	65.8	4.8	2,337	22.9	24.3
0.0-0.5		26.1	59.7	4.9	2,323	22.1	23.5
0.0-1.0		26.0	59.2	5.0	2,307	20.2	22.7
0.0-1.5		26.3	59.6	5.2	2,295	20.0	21.8
0.0-2.0		25.6	53.9	4.1	2,330	17.7	19.3
2.5-0.0		26.6	65.4	5.7	2,299	18.5	20.3
2.5-0.5		26.5	64.3	6.0	2,286	17.7	19.8
2.5-1.0		25.8	58.5	5.3	2,318	16.7	19.0
2.5-1.5		25.4	52.7	4.3	2,328	14.7	16.8
2.5-2.0		25.5	56.1	3.6	2,349	13.0	15.2
5.0-0.0		27.0	67.3	4.0	2,368	18.3	22.3
5.0-0.5		26.5	60.3	5.4	2,289	17.8	19.5
5.0-1.0		26.6	60.2	4.5	2,313	17.2	19.2
5.0-1.5		25.4	54.6	4.0	2,322	16.7	18.1
5.0-2.0		25.8	55.2	3.8	2,329	19.3	23.5
7.5-0.0		26.8	64.5	5.6	2,278	18.7	21.5
7.5-0.5		26.5	62.9	4.1	2,347	17.3	20.8
7.5-1.0		26.3	60.1	4.2	2,327	16.2	19.7
7.5-1.5		25.5	53.0	3.6	2,365	16.3	20.7
7.5-2.0		25.6	56.8	4.5	2,342	17.0	21.3
10.0-0.0		27.0	65.7	4.0	2,323	13.7	15.3
10.0-0.5		25.6	58.7	3.5	2,363	11.3	14.5
10.0-1.0		26.0	59.4	4.3	2,333	10.3	13.7
10.0-1.5		24.9	51.5	3.5	2,318	10.0	13.2
10.0-2.0		25.3	52.4	3.2	2,336	15.5	18.3

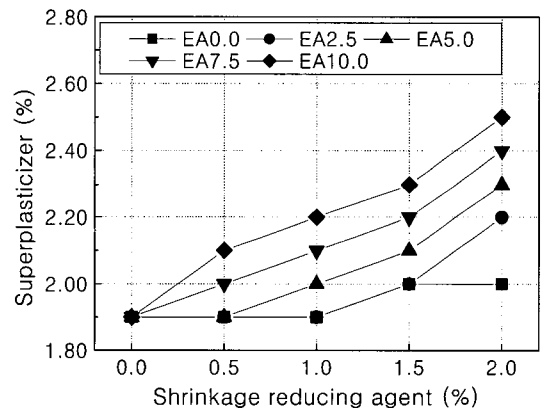


그림 3. 팽창제 및 수축저감제 혼입률 증가에 따른 SP제 사용량

그림 4는 팽창제와 수축저감제 혼입률 변화에 따른 AE제량을 나타낸 것이다. 팽창제를 무혼입한 경우, AE제량은 수축저감제 혼입률이 증가할수록 공기량 증가로 감소시켜주는 것으

로 배합설계 되었다. 단, 수축저감제를 무혼입한 경우 팽창재 혼입률 변화에 따라 공기량은 큰 영향이 없는 것으로 나타나 AE제량을 동일하게 사용하는 것으로 배합 설계 하였으나, 팽창재 및 수축저감제를 병용한 경우는 공기량이 증가하여 AE제의 사용량을 감소시켜주어야 할 필요가 있었다.

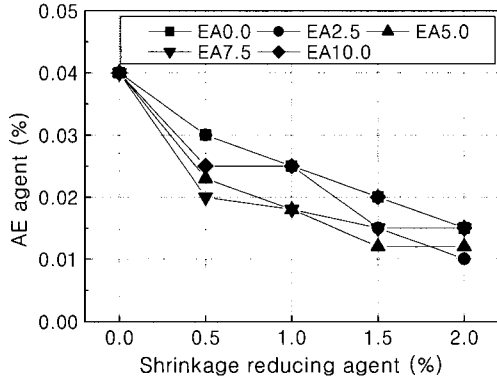


그림 4. 팽창재 및 수축저감제 혼입률 변화에 따른 AE제 사용량

표 10은 팽창재와 수축저감제의 혼입률 변화에 따른 초결 및 종결의 응결시간을 나타낸 것이다.

전반적으로, 팽창재 및 수축저감제 혼입률 증가에 따라 응결 시간은 플레인과 비교하여 촉진되는 것으로 나타났는데, 단 팽창재 혼입률 5.0, 7.5 및 10.0%에서 수축저감제를 2.0% 혼입할 경우는 응결이 오히려 지연되는 역전경향도 나타났다.

4.2 경화 콘크리트의 특성

4.2.1 압축강도 특성

그림 5는 재령별 팽창재와 수축저감제의 혼입률 변화에 따른 압축강도를 복합적으로 나타낸 것이다. 전반적으로, 팽창재와 수축저감제의 혼입률별에 상관없이 비교적 고강도 나타내었으며, 재령 28일의 경우는 모두 50MPa 이상의 고강도를 발휘하였다.

수축저감제 혼입률 증가에 따른 압축강도는 저하하는 것으로 나타났는데, 이는 수축저감제에 의한 모세관장력의 감소에 기인한 것으로 분석된다.⁵⁾ 또한, 팽창재 혼입률 증가에 따라서는 혼입률 5.0%에서 가장 크게 나타났고, 그 이상인 경우에는 전반적으로 저하하는 경향이었는데, 이는 팽창재 과다 첨가에 따른 콘크리트 조직의 이완에 기인한 것으로 분석된다.⁹⁾

이상과 같이, 고성능 콘크리트의 수축을 저감시키기 위해 사용되는 팽창재와 수축저감제는 압축강도에 미치는 영향이 크므로 이에 대한 주의가 필요할 것으로 사료된다.

4.2.2 쪼갬 인장강도 특성

그림 6은 재령 28일에서의 압축강도와 쪼갬 인장강도의 관계를 나타낸 것이다. 고성능 콘크리트의 압축강도와 쪼갬 인장강도는 비례적으로 증가하였는데, 쪼갬 인장강도는 압축강도와 비교하여 대략 1/10~1/12 정도로 나타났다. 이때 회귀식은 그림 6과 같고, 상관계수는 0.878로 비교적 양호한 것으로 나타났다.

5. 팽창재와 수축저감제 사용에 따른 자기 수축

5.1 자기수축 특성

그림 7은 팽창재 및 수축저감제 혼입률별 재령경과에 따른 자기수축 길이변화율을 나타낸 것이다.

전반적으로 수축저감제 혼입률이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 수축저감제가 물에 용해하여 그 표면장력을 저하시킬 뿐만 아니라 모세관 공간중에 발생하는 모세관장력을 완화시킴에 기인한 것으로 분석된다.

즉, 수축저감제는 액체의 표면장력을 작게 하고 이는 식 (9)에서 나타난 것처럼 모세관 장력을 작게 하여 수축을 작게 한다.

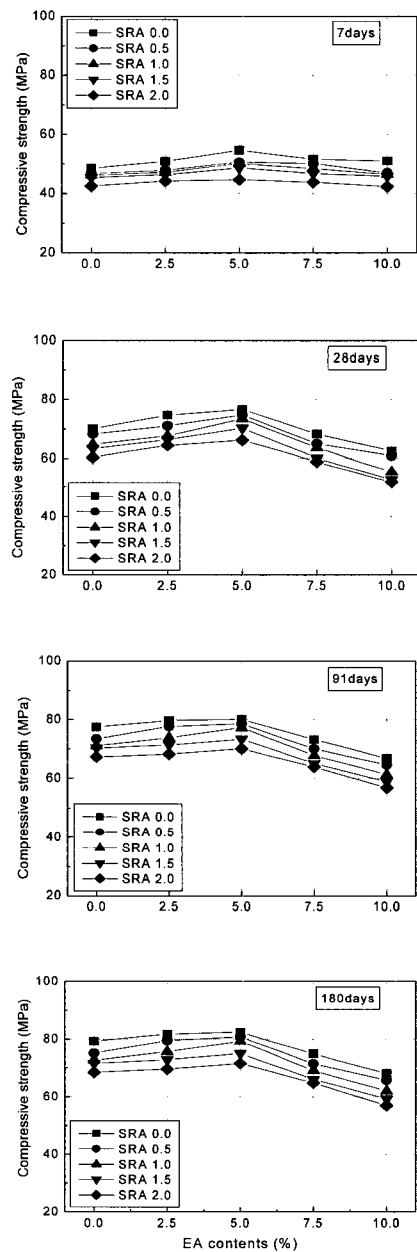


그림 5. 팽창재 및 수축저감제 혼입률 변화에 따른 압축강도

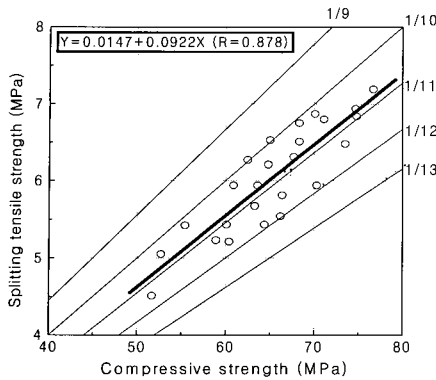


그림 6. 압축강도와 인장강도의 관계

$$P = 2\gamma/r \dots\dots\dots (9)$$

여기서, P : 모세관장력

γ : 세공용액의 표면장력

r : 미니스커스 반경

수축저감제 혼입률 증가에 따른 재령 49일의 자기수축은 플레인과 비교하여 12~52% 정도 저감하는 것으로 나타났다.

팽창제 혼입률에 따른 자기수축은 초기 7일 이내에 팽창을 보인 후 재령경과에 따라 감소하였는데, 이는 팽창제의 에트린자이트 생성에 의한 수축보상작용에 기인한 것으로 사료된다. 즉, 팽창제 혼입률 증가에 따라서는 자기수축량이 20~74% 정도 저감하였다.

한편, 팽창제와 수축저감제를 병용한 경우는 더욱 크게 저감하여, 일예로 팽창제 10.0%에 수축저감제를 1.0% 혼입한 경우는 오히려 체적이 팽창하는 것으로 나타났다.

따라서, 팽창제와 수축저감제의 혼입률이 증가할수록 당연히 자기수축은 작아지는데, 특히 수축저감 메커니즘이 서로 다른 팽창제와 수축저감제를 병용할 경우 그 효과는 더욱 커짐을 알 수 있었다. 이는 Maltesa 등에 의하면¹³⁾, 팽창제 및 수축저감제가 혼입된 수화생성물에서 관찰되는 다수의 긴 수화결정물이 대단위로 형성된 것에 기인한 것으로서 이러한 형태의 수화결정물은 시멘트의 초기팽창을 유도하는데, 이로 인해 수축을 억제하기 때문으로 사료된다. 그런데, 이러한 수화결정물은 대부분 포틀랜드아이트로 구성되어 있으며, 이와 관련하여 특히 Chatterji는 Ca(OH)₂의 용해도가 낮을수록 모르타의 팽창이 크게 나타나며 수축저감제는 물의 침입을 감소시키고 염을 녹이는 물의 효과를 저하시키게 된다. 이는 결국 수축저감제가 Ca(OH)₂의 용해도를 감소시키고 그로인해 재료의 팽창을 촉진시키면서 수축을 적절하게 보상시키기 때문이라고 설명하고 있다.¹⁴⁾

또한, 본 실험에서는 자기수축을 건조수축과 구분하기 위하여 자기수축 시험에서 시험체의 수분증발에 의한 질량감소율도 동시에 측정하였는데, 재령 49일까지 자기수축 시험체의 질량감소율은 모두 0.042~0.048%의 범위로서 일본 콘크리트공학협회의 자기수축 측정방법에서 제한한 범위인 0.05%이하의 규정치를 모두 만족하는 값을 나타내었다. 단, 49일 이후는 그 규정값을 초과하는 것도 존재하였으므로 본 분석에서는 49일 이후의 자기수축은 생략하였다.

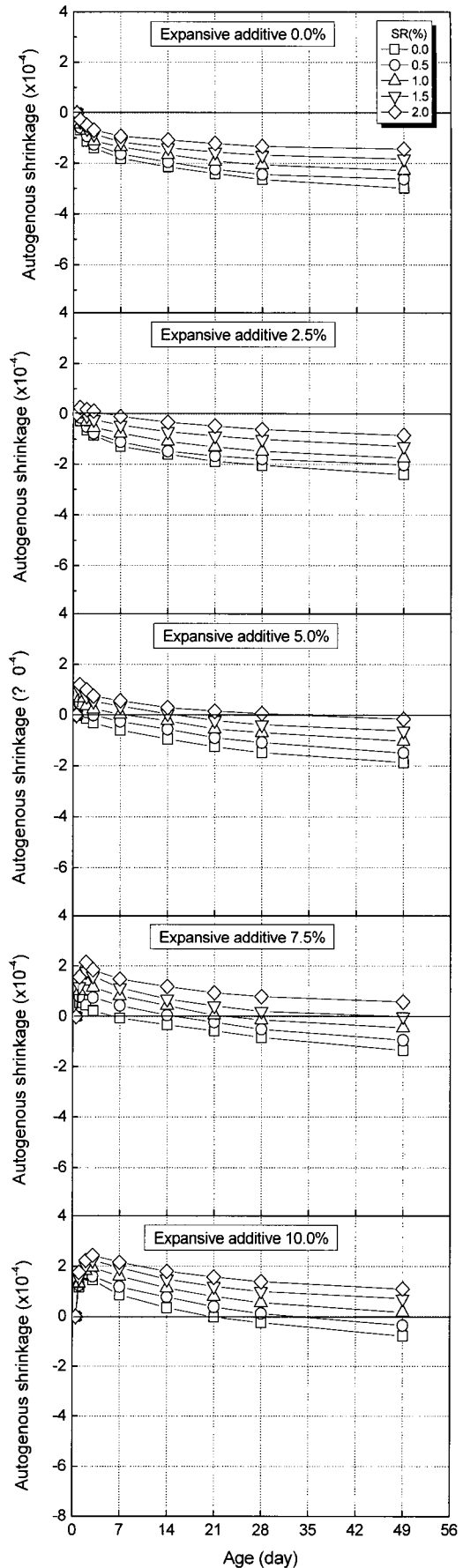


그림 7. 재령경과에 따른 자기수축

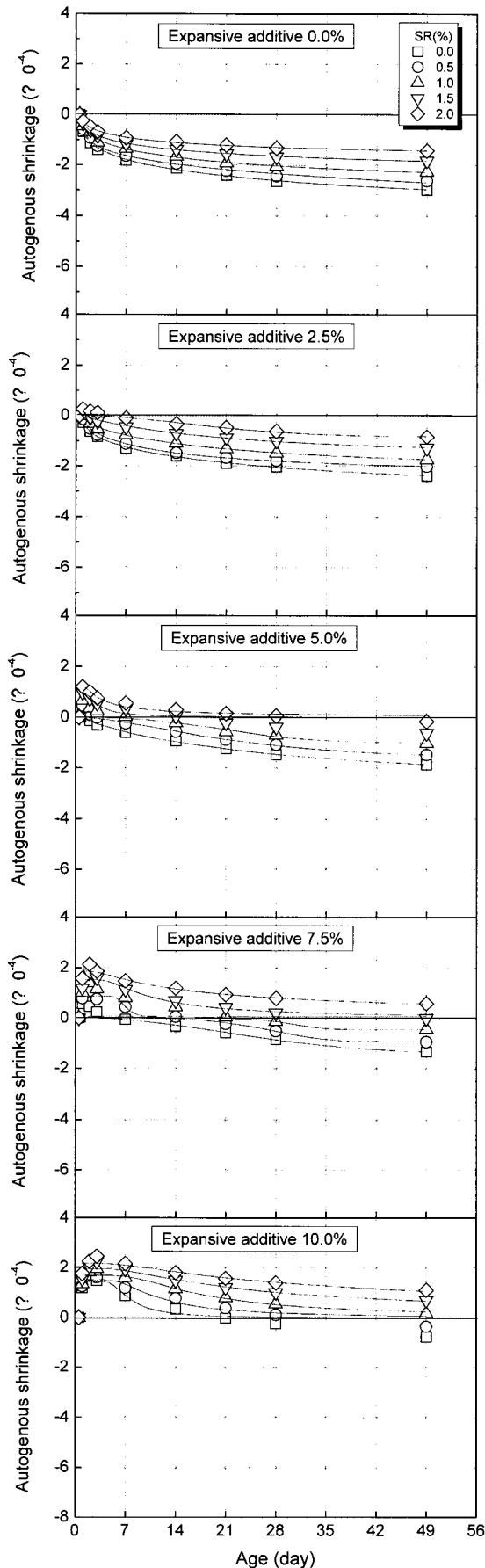


그림 8. 자기수축해석결과

표 11. 자기수축 모델식 실험상수

EA (%)	SRA (%)	γ	ϵ_{∞}	a	b
0	0	1.29	3.53	0.25	0.36
	0.5	0.73	3.53	0.23	0.45
	1.0	0.88	3.53	0.27	0.79
	1.5	0.70	3.53	0.31	0.37
	2.0	0.47	3.53	0.34	0.43
2.5	0	0.99	3.53	0.19	0.45
	0.5	0.62	3.53	0.24	0.58
	1.0	0.61	3.53	0.14	0.79
	1.5	0.41	3.53	0.06	0.88
5.0	2.0	0.23	3.53	0.004	1.77
	0	0.67	3.53	0.06	0.81
	0.5	0.43	3.53	0.009	1.47
	1.0	0.41	3.53	0.06	0.85
7.5	1.5	0.17	3.53	0.000006	4.31
	2.0	-0.33	3.53	2.15	-0.88
	0	0.39	3.53	0.0013	1.98
	0.5	0.26	3.53	0.0000003	4.47
10.0	1.0	0.12	3.53	4.8×10^{-14}	8.96
	1.5	-0.43	3.53	20.18	-1.41
	2.0	-0.52	3.53	6.87	-0.75
	0	-0.40	3.53	184	-2.83
	0.5	-0.42	3.53	70.56	-1.89
	1.0	-0.47	3.53	74.46	-1.60
	1.5	-0.54	3.53	20.82	-1.00
	2.0	-0.61	3.53	14.10	-0.78

5.2 자기수축해석

본 연구에서는 일본 콘크리트 공학협회 자기수축위원회에서 제안한 모델식(식 (6))을 이용하여 자기수축을 해석하였다.

그림 8 및 표 11은 팽창재 및 수축저감제를 사용한 콘크리트의 자기수축을 일본콘크리트 공학협회 모델식에 의하여 해석한 결과를 나타낸 것이다.

단, 이 모델식은 W/B와 시멘트의 종류에 따른 변수를 고려할 수 있을 뿐 팽창재와 수축저감제의 영향을 고려하는 변수는 없기 때문에 본 연구 범위에서는 팽창재와 수축저감제의 영향을 고려한 새로운 모델식 개발을 위한 기초적 연구로서 기존의 JCI 모델식의 실험상수값을 고정하지 않고 변동하여 비선형 회귀분석으로 구하는 것으로 결정하였다.

그림에서 보듯이 팽창재 치환률 5.0%이내에서는 대부분의 영역에서 해석치가 실험치를 양호하게 추정하는 것으로 나타났으나, 팽창재 치환률 5.0%이상에서는 일부의 수축저감제 치환률에서 실험치와 해석치간의 오차가 발생함을 알 수 있었다. 특히, 수축저감제 치환률이 증가할수록 오차는 커지는 것으로 나타났다.

또한, 초기 1일 재령이전 초기에서의 팽창거동은 JCI 모델을 이용한 경우 모사가 불가능한 것을 알 수 있었다.

궁극적으로 팽창재와 수축저감제를 사용한 경우 팽창재와

수축저감제 치환률이 증가할수록 해석의 정밀도가 저하하고, 초기재령에서의 팽창거동을 모사할 수 없어 이에대한 변수를 추가하여 수정된 모델이 제시되어야 할 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구에서는 고성능 콘크리트의 기초적 물성과 건조 및 자기수축 특성에 미치는 팽창제 및 수축저감제를 병용하여 사용시의 영향에 대하여 분석한 후, 이를 토대로 자기수축변형을 해석하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 굳지않은 콘크리트의 특성으로, 유동성은 수축저감제 혼입률 증가에 따라 저하하여 SP제량이 증가하였고, 팽창제 혼입률 변화에 따라서는 큰 차이가 없는 것으로 나타나 SP제량은 동일하였으나, 단 팽창제와 수축저감제를 병용한 경우는 혼입률 증가에 따라 유동성이 크게 저하하여 SP제량을 다량으로 증가시키는 것으로 나타났다.
- 2) 압축 및 인장강도는 수축저감제 혼입률 증가에 따라 저하하는 것으로 나타났고, 팽창제 혼입률 증가에 따라서는 혼입률 5.0%에서 가장 크게 나타났고, 그 이상인 경우는 전반적으로 저하하였으며, 팽창제 및 수축저감제를 병용한 경우는 서로 평균적인 경향이였다.
- 3) 자기수축 길이변화율은 팽창제 및 수축저감제 혼입률 증가에 따라 모두 감소하는 것으로 나타났는데, 단 팽창제 및 수축저감제를 병용할 경우에는 복합된 상승작용으로 더욱 크게 감소함을 확인할 수 있었다.
- 4) JCI에서 제안한 자기수축 모델을 이용하여 자기수축변형을 해석한 결과 팽창제 혼입률 5.0%까지는 해석치가 추정치를 양호하게 추정함을 알 수 있었으나, 팽창제와 수축저감제 사용량이 증가할수록 해석결과의 오차가 커지는 것을 확인할 수 있었으며, 팽창제와 수축저감제의 영향을 고려할 수 있는 변수가 추가되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 이광, 권기현, 이회근, 이승훈, 김규용, 고로슬래그를 함유한 콘크리트의 자기수축 특성, 한국콘크리트학회논문집, 16권 5호, pp.621-626
2. 한국건설기술연구원, 콘크리트 교량의 내구성 향상기술 개발, 2002.
3. 한천구, 김성욱, 고경택, 배정렬, 팽창제 및 수축저감제를 이용한 고성능 콘크리트의 수축특성, 한국 콘크리트학회논문집, Vol.15, No.6, 2003. 12, pp.785 ~793.
4. 한천구, 반호용, 윤기원, 이정희, 조병영, 고성능 콘크리트의 특성에 미치는 배합요인의 영향, 대한건축학회논문집, Vol.11, No.11, 1995, pp.293-301.
5. 한천구, 반호용, 전병채, 홍상희, CSA계 팽창제 및 무기질 혼화제를 이용한 고성능 콘크리트의 특성에 관한 연구, 콘크리트학회지, Vol.11, No.1, 1999, pp. 141-148.
6. CEB-FIP 2000, Structural concrete ; Text book on behaviour. "Design and performance, Vol.1, Sprint- Druck Stuttgart, pp.43-46, 1999
7. C. Maltese, C. Pistolesi, A. Lolli A.Bravo, Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortar. Cement and concrete research, Vol.35, PP.2244-2251, 2005
8. S. Chatterji, Mechanism of expansion of concrete due to the presence of dead burnt CaO and MgO, Cement and Concrete Research, Vol.25, pp.51-56, 1995
9. S.P. Shah, M.E. Karaguler, M. Sarighaputi, Effect of shrinkage reducing admixture on restrained shrinkage cracking of concrete, ACI Materials Journal, Vol.89, pp.289-295, 1992
10. 日本コンクリート工學協會, 自己收縮研究委員會報告書, 日本, 1996.
11. 近松龜一, 竹田宣典, 鎌田文男, 十河茂幸, 結合材の種類がコンクリートの硬化收縮に及ぼす影響, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.15, No.1, 1993, pp. 543-548.
12. 田中敏嗣, 杉山彰徳, 小川鑑, 富田六郎, 混和材料を組合せて使用したコンクリートの諸特性, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.17, No.1, 1995, pp.157-162.
13. 牧隆輝, 下山善秀, 榮川裕之, 收縮低減劑を用いたコンクリートのひび割れ調査, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1998, pp. 1085-1086.
14. 加藤淳司, 津崎淳一, 發泡劑および膨脹材を用いたコンクリートの膨脹性能および強度特性について, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 2001, pp.203-204.
15. 閑田徹志, 鈴木康範, 小田部裕一, 櫻本文敏 : ひび割れ低減コンクリートの開發, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 2003, pp.109-110.