

양생온도가 혼화재 치환 고강도 모르터의 응결 및 자기수축에 미치는 영향

Effect of the Curing Temperature on Autogenous Shrinkage of the High Strength Mortar incorporating Mineral Admixtures

(Received January 25, 2012 / Revised January 27, 2012 / Accepted January 27, 2012)

한민철^{1)*}

¹⁾청주대학교 건축공학과

Min-Cheol Han¹⁾

1)Department of Architectural Engineering Cheongju University, Cheongju, 360-764, Korea

Abstract

In this paper, tests were carried out to monitor the effect of the curing temperature on autogenous shrinkage of the high strength cement mortar incorporating silica fume, blast furnace slag and fly ash ranged from 10%~30% by mass of cement. The curing temperatures were varied from 5°C to 35°C, respectively. According to results, the setting time exhibited to delay with increase of admixture and drop of temperature. As for the effect of curing temperature on autogenous shrinkage, the increase of SF and BS resulted in an increase of autogenous shrinkage, while the use of FA decrease. The higher the curing temperature is, the greater the autogenous shrinkage is. This is due to the accelerated hydration rate of cement. It is found that the maturity does not consider the effect of curing temperature on autogenous shrinkage.

키워드 : 자기수축, 양생온도, 실리카흙, 혼화재료

Keywords : Autogenous Shrinkage, Curing Temperature, Silica Fume, Mineral Admixture

1. 서론

최근 도심지에는 토지의 효율적인 활용과 관련하여 건축물이 고층화 됨에 따라 고강도 콘크리트의 사용이 증대되고 있다.

그런데 이와 같은 고강도 콘크리트는 고강도화에 따른 부재단면 축소, 내구성 향상, 자중 경감 등 많은 이점이 있는 반면에 과도한 시멘트량에 의한 자기수축 현상이 문제로 대두되고 있다. 이러한 자기수축은 외부로부터의 수분 공급 없이 콘크리트 내부 모세관 공극들의 자기진조로 생기는 수축 현상으로써 물시멘트비가 낮고, 단위결합재량이 많은 고강도 콘크리트에서 주로 발생하게 되는데, 경우에 따라 자기수축 만으로도 콘크리트에 균열을 발생시킬

수도 있게 되고, 이와 같은 균열은 미관손상에 따른 신뢰도 하락 외에도 외부로부터 염소 이온, 탄산가스, 수분 등 유해 물질의 침투 경로를 제공하게 되어 콘크리트 구조물의 내구성을 저하시키고 수명을 단축시키는 원인이 된다.

이러한 자기수축은 현재까지 시멘트 경화체의 수화도와 직접적인 연계가 있는 것으로 알려져 있으나 최근의 연구 결과 자기수축은 온도이력에 의해서도 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.¹⁻⁵⁾ 즉, 특정 수화도에서 다른 양생온도 조건하의 시멘트 경화체는 동일한 수축을 발생시키지 않고 다르게 나타난다는 것이다. 결국 이러한 결과는 온도와 재령을 복합적으로 고려하는 적산온도를 고려하여 자기수축을 유효하게 평가할 수 있음을 시사하고 있다.

한편, 이와 관련하여 Turcry 등은⁶⁾ 10~40°C의 등온양생 조건에서 적산온도 개념에 의한 자기수축의 예측이 가능하다고 보고하고 있으며 실제온도 조건에서는 선평창계수

* Corresponding author

E-mail: twhan@cju.ac.kr

의 영향으로 등온양생조건에서 측정된 자기수축과 예측에 의한 자기수축이 차이를 보이는 것으로 보고하고 있다. Tazawa 등은⁷⁾ 수화온도와 자기수축의 상관성을 검토하고 다른 양생온도 조건에서 적산온도 방법에 의하여 콘크리트의 자기수축을 예측할 수 있다고 보고하고 있다. 또한 Loukli 등은⁸⁾ 양생온도가 자기수축에 영향을 미치며 초기재령에서 온도의 영향을 고려하지 않을 경우 자기수축을 잘못 평가할 수 있음을 지적하고 있다. 반면에 Jensen 등은⁹⁾ 전통적인 적산온도는 자기수축 변형 및 RH 변동을 평가하는데 적용하기 힘들다고 보고하는 등 양생온도 변화가 자기수축에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있는지의 여부에 대하여는 연구자 별로 차이를 보이고 있으나, 대체적으로 방법론의 차이가 있을 뿐 적용이 가능함을 보고하고 있다.

그러나 국내에서는 이와 관련한 연구는 극히 일부만 진행된 실정으로 건축공사 현장에서 고강도 콘크리트의 효율적인 품질관리를 위해 타설 혹은 양생기간동안 다양한 온도변화를 겪게 되는 조건하에서 자기수축의 정확한 평가와 효과적 제어방법은 매우 주요한 사안이다.

따라서 본 연구에서는 고강도 콘크리트 제조시 필수적으로 사용되는 제반 광물질 혼화재중 대표적으로 실리카흄(SF), 플라이애시(FA) 및 고로슬래그(BS)의 3종류를 사용한 시멘트 모르타르를 대상으로 이들의 치환률 변화와 양생온도변화에 따른 자기수축 특성을 분석하므로서 향후 실무조건에서 고강도 콘크리트의 자기수축 제어에 기여하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합사항은 Table 2와 같다.

먼저 실험요인으로 W/B는 고강도를 상정한 15% 1수준으로 계획하였고, 목표 플로 200±10 mm를 만족하도록 OPC 100%를 사용한 플레인 배합을 결정한 후 혼화재 종류 및 치환률에 따라 SP제 사용량을 변화시켜 목표 플로를 유지하도록 배합설계 하였다. 또한, 본 연구에서 사용한 혼화재로는 SF, BS 및 FA의 3종류로서 각각 OPC에 10, 20, 30%로 치환하여 총 10배치를 실험계획 하였다. 또한, 양생온도로서 우리나라 실무현장의 기상조건을 고려하여 5, 20 및 35°C의 3수준으로 계획하였다. 실험사항으로 양생온도

Table 1 Experimental Plan

Items		Variables	
Mixture	W/B(%)	15	
	Flow(mm)	200±10	
	Mineral admixture	Kinds	Silica fume (SF), Blast furnace slag (BS), Fly ash (FA)
		Contents (%)	10, 20, 30
Curing temperature (°C)	5, 20, 35		
Test	Fresh mortar	-Flow -Setting time subjected to temperature variation	
	Hardened mortar	-Autogenous shrinkage (1, 2...42 days)	

별 응결시간과 재령 42일까지의 자기수축을 측정하는 것으로 하였다.

Table 2 Mixture proportions of mortar

Mixture	W/B (%)	Weight (kg/m ³)						
		Water	Cement	Sand	Mineral admixture			SP
					FA	BS	SF	
OPC	15	174	1161	1161	0	0	0	20.9
FA10		171	1029	1143	114	0	0	18.8
FA20		169	901	1126	225	0	0	18.0
FA30		166	776	1108	332	0	0	18.2
BS10		173	1042	1158	0	115	0	20.8
BS20		173	923	1154	0	230	0	19.6
BS30		172	805	1151	0	345	0	17.8
SF10		172	1036	1151	0	0	115	20.7
SF20		168	896	1120	0	0	224	22.4
SF30		165	770	1100	0	0	330	22.0

2.2 사용재료

본 연구에 사용한 각 재료의 물리·화학적 성질은 Table 3~8과 같다.

본 연구의 사용재료는 실무 건설공사에서 활용할 수 있

는 일반적인 것을 사용하였는데, 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 그 물리적 성질은 Table 3과 같다. 골재로써 잔골재는 충북 청원군 옥산산 강모래를 사용하였고 그 물리적 성질은 Table 4와 같다.

혼화제로서 SF는 노르웨이산, FA는 충남 보령화력산을 사용하였는데, 그 물리적 성질 및 화학적 구성은 Table 5 및 6과 같다. 또한, BS의 경우 국내 P사 제품을 이용하였는데, 그 물리적 성질 및 화학적 구성은 Table 7과 같다. 혼화제로써 고성능 감수제는 국내 E사의 폴리칼본산계를 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 8과 같다.

Table 3 Physical properties of OPC

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Setting time(min.)		Compressive strength (MPa)			Soundness (%)
		Ini.	Fin.	3days	7days	28days	
3.15	3 265	210	300	22.0	28.9	38.9	0.15

Table 4 Physical properties of fine aggregates

Aggregates	Density (g/cm ³)	F.M	Absorption (%)	0.08 mm sieve
River sand	2.50	2.86	2.63	2.87
Crushed sand	2.65	2.62	1.42	3.00

Table 5 Physical properties and chemical composition of SF

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Chemical composition (%)							
		LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O
2.21	160000	1.38	96.65	1.87	0.03	0.38	0.19	0.32	0.56

Table 6. Physical properties of FA

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	LOI (%)	Ratio of comp.strength (%)	SiO ₂ (%)	Moisture (%)	Water content (%)
2.22	3850	4.2	92	67.5	0.2	100

Table 7. Physical properties of BS

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Alkali index	L.O.I (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)	Cl (%)
2.89	4254	1.91	0.23	5.26	1.95	0.002

Table 8. Physical properties of chemical agent

Item	Main ingredient	Appearance	Color	Density (g/cm ³)
Superplasticizer	Polycarboxylate	Liquid	Yellow	1.04

2.3 실험방법

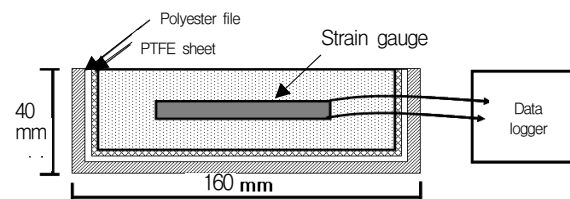
본 연구의 실험방법으로 모르타르의 혼합은 모르타르 전용 믹서를 사용해서 혼합하였다.

굳지 않은 모르타르의 실험으로 응결시간의 측정은 KS F 2436에 의거 실시하였는데, 몰드 성형후 5, 20, 35°C가 유지되는 챔버에서 양생후 초결 및 종결시간을 측정하였다.

자기수축 길이변화율은 일본콘크리트 공학협회의 시험방법에 의거 실시하였는데, Fig. 1과 같이 40×40×160 mm의 각주형 몰드의 바닥과 양단에 1 mm 두께의 테프론 시트(Teflon sheet)를 깔아서 시료의 자유로운 변형이 구속되지 않도록 하고, 중앙에 매립형 스트레인 게이지를 설치하여 공시체 제작 후 양생온도 5, 20 및 35°C가 유지되는 챔버에서 양생하였고, 데이터 로거에 의해 초결 이후의 자기수축 길이변화율을 측정하였다. 이때 자기수축 시험체는 제작 1일 경과 후 탈형하였으며, 보관시 발생할 수 있는 수분증발로 인한 건조수축 및 흡수로 인한 팽창을 막기 위해 폴리에스테르 필름(Polyester film) 및 알루미늄 은박지로 감싸주었다.



1) Data logger



2) Gauge embedding

Fig.1 Specimen set-up

3. 실험결과 및 분석

3.1 플로

혼화제 종류 및 치환률별 플로는 모든 배합에서 목표 플로우 200±10 mm를 만족하도록 SP제 사용량을 변화시

켰는데, 전반적으로 FA 및 BS를 치환한 경우 치환률이 증가할수록 Table 2에 나타난 바와 같이 SP제 사용량이 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 볼베어링 작용에 의한 효과로 판단된다. 그러나 SF 치환의 경우 치환률이 증가할수록 SP제 사용량은 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 극 미립자인 SF가 공극충전 및 점성증대를 유발하여 목표 플로를 만족시키기 위한 SP제 사용량이 증가하게 된 원인으로 판단된다.

3.2 양생온도별 응결시간

Fig. 2는 혼화재 종류 및 치환률 변화에 따른 양생온도별 초결 및 종결시간을 나타낸 것이다.

전반적으로 BS 및 FA의 경우 치환률이 증가할수록 응결시간은 다소 지연되는 것으로 나타났는데, 대략 18~20시간 전후에서 종결이 측정되었다. 이는 플레인 배합 설계 시 낮은 W/B를 갖는 시멘트 모르타르의 유동성 확보를 위해 사용한 SP제량이 과다하여 이로 인한 응결지연이 나타나 FA나 BS 치환률 증가에 따른 응결지연 폭이 크지 않았기 때문으로 사료된다. 또한 양생온도별로는 기존의 연구결과와 동일하게 FA 및 BS를 치환한 경우 저온조건인 양생온도 5℃에서는 20 및 35℃와 비교하여 10~15시간 정도의 응결지연이 나타나고 있음을 알 수 있었다.

반면에 SF 치환의 경우 SF 치환률이 증가하여도 플레인 배합에 비해 주목할 만한 응결지연은 나타나지 않았고 특히 저온조건인 5℃에서 양생된 경우 BS나 FA 치환의 경우보

다 응결지연이 거의 발생되지 않음을 알 수 있었다.

3.3 양생온도별 자기수축

Fig. 3은 혼화재 종류 및 치환률별 재령 경과에 따른 양생온도별 자기수축 길이변화율을 나타낸 것이다. 모든 배합에서 재령이 경과함에 따라 재령 3일 이전에 급속한 수축을 보이다가 이후 재령이 경과함에 따라 완만하게 수축하고 있었다.

먼저, 양생온도별 자기수축량으로 양생온도가 높아질수록 전재령에서 자기수축량은 커지는 것으로 나타났는데, 양생온도 20℃와 35℃의 경우는 초기재령에서는 자기수축량이 큰 차이가 없으나 이후 재령이 경과함에 따라 35℃의 경우가 20℃보다 큰 수축을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 이는 특정한 수화도에서 양생온도가 다를 경우 자기수축량이 다르게 나타난다는 Turcry의 결과와⁶⁾ 일치하는 것으로 결국 자기 수축은 수화도 뿐만 아니라 양생 온도에 의해서도 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다.

또한, 양생온도 5℃의 경우 20℃나 35℃의 경우에 비해 자기 수축량이 동일재령에서 낮게 나타나고 있음을 확인할 수 있는데, 양생온도 5℃, 20℃ 및 35℃에서 42일 자기수축량은 각각 -234×10^{-6} , -544×10^{-6} , -630×10^{-6} 로 나타났다.

한편, 결합재 종류별로는 SF의 경우는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 양생온도에 관계없이 FA나 BS의 치환에 비해 높은 자기수축을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 극미립자인 SF가 치환됨

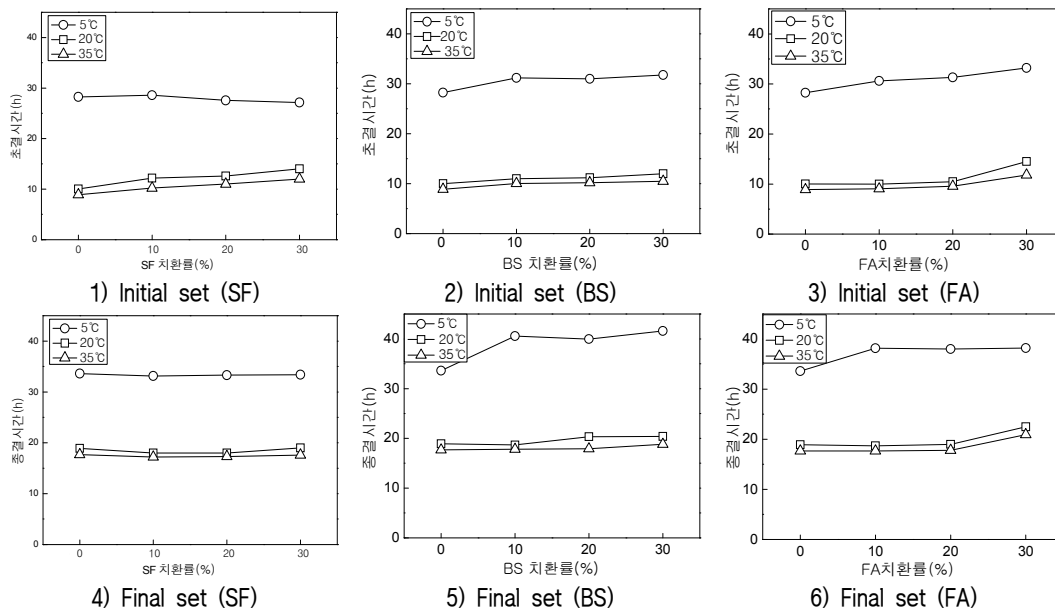
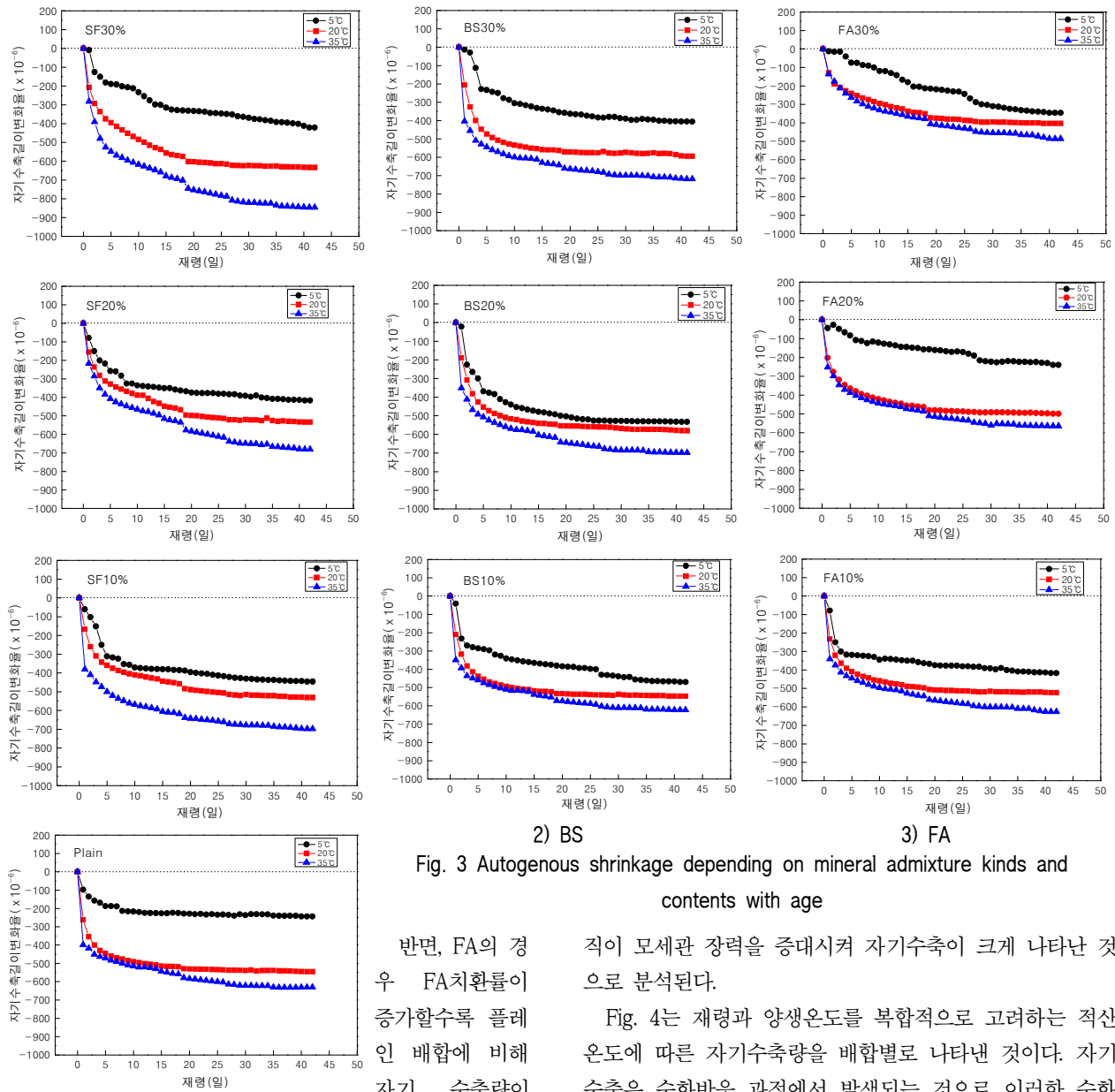


Fig. 2 Setting time of the mortar incorporating mineral admixtures

에 따라 경화구조체의 세공이 미세하게 형성되며 이로 인한 자기건조가 크게 발생하여 여타의 혼화재료를 사용한 경우보다 큰 자기수축을 보이고 있었다. 특히 양생온도 35℃의 고온에 이러한 경향이 크게 나타남을 알 수 있었다.



2) BS

3) FA

Fig. 3 Autogenous shrinkage depending on mineral admixture kinds and contents with age

1) SF

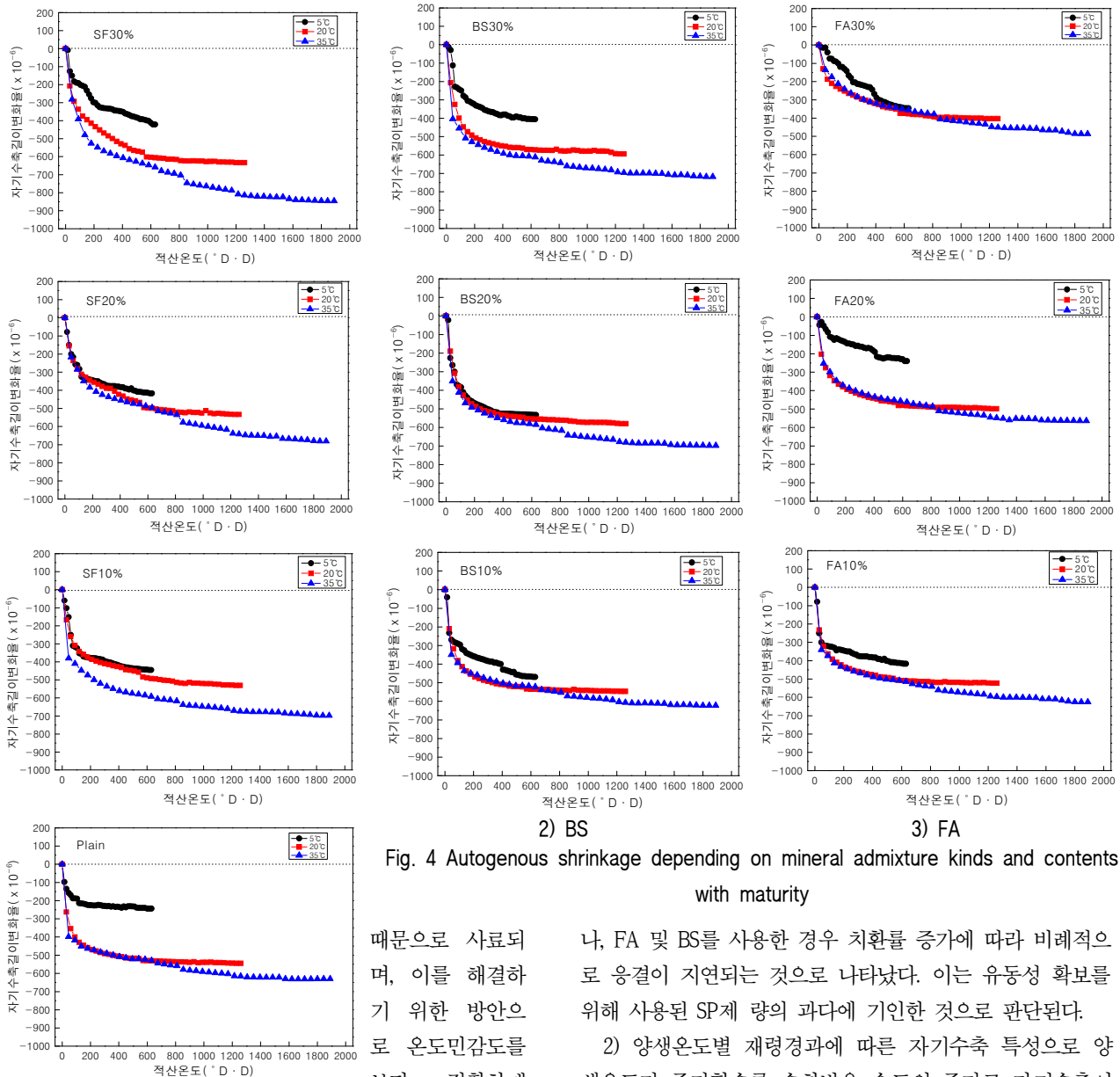
알 수 있는데, 이는 FA 치환률 증가에 따라 시멘트량이 비례적으로 감소하여 초기 수화반응이 지연되어 나타난 결과와 FA를 사용하여도 모세관 공극내의 상대습도가 거의 변하지 않아 재령이 경과하면서 수화반응이 진행되어도 자기건조가 크지 않기 때문에 수축량이 적어진 것으로 판단된다.

또한, BS를 사용한 경우 BS 치환률이 증가할수록 플레인 배합에 비하여 자기수축이 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 FA와 다르게 수화반응이 진행됨에 따라 모세관 내 상대습도가 크게 저하되어 자기건조가 크게 발생하고 아울러 BS의 잠재 수경성 반응에 의해 생성된 경화체 조

직이 모세관 장력을 증대시켜 자기수축이 크게 나타난 것으로 분석된다.

Fig. 4는 재령과 양생온도를 복합적으로 고려하는 적산온도에 따른 자기수축량을 배합별로 나타낸 것이다. 자기수축은 수화반응 과정에서 발생하는 것으로 이러한 수화반응은 온도에 영향을 받게 되며 이를 정량적으로 표현하기 위한 방법으로 적산온도를 이용하게 된다. 따라서 본 연구에서는 자기수축에 미치는 양생온도의 영향을 판단하기 위하여 적산온도에 따른 자기수축을 고찰하였다

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 100° D·D이하의 초기 적산온도에서는 양생온도별 자기수축량이 큰 차이를 보이지 않으나, 이후 적산온도가 증가함에 따라 양생온도별로 자기수축량이 큰 차이를 보이고 있는데, 특히 20°C 및 35°C의 자기수축량은 별다른 차이가 없는 것을 알 수 있으나, 5°C의 경우는 비교적 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 온도와 재령을 단순히 산술적으로 고려하는 적산온도방법으로는 온도의 민감도를 정확하게 모사할 수 없기



2) BS
3) FA
Fig. 4 Autogenous shrinkage depending on mineral admixture kinds and contents with maturity

1) SF
등가재령에 의한 자기수축의 평가에 대한 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 양생온도가 SF, BS 및 FA 치환 고강도 시멘트 모르타르의 응결 및 자기수축에 미치는 영향을 고찰하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 혼화제 종류별 양생온도에 따른 응결특성으로 SF를 치환한 경우 치환률 증가에 따라 응결지연은 크지 않았

때문에 사료되며, 이를 해결하기 위한 방안으로 온도민감도를 보다 정확하게 고려할 수 있는

나, FA 및 BS를 사용한 경우 치환률 증가에 따라 비례적으로 응결이 지연되는 것으로 나타났다. 이는 유동성 확보를 위해 사용된 SP제 량의 과다에 기인한 것으로 판단된다.

2) 양생온도별 재령경과에 따른 자기수축 특성으로 양생온도가 증가할수록 수화반응 속도의 증가로 자기수축이 증가하는 경향으로 나타났고 SF 및 BS를 치환한 경우 수화과정에서 경화체 내부 상대습도의 저하와 자기 건조로 인해 자기수축이 증가하는 것을 알 수 있었으나, FA를 치환한 경우 자기수축이 크지 않거나 오히려 감소하는 경향을 보였다.

3) 적산온도에 따른 자기수축은 전반적으로 적산온도가 증가함에 따라 자기수축은 증가하였고 동일적산온도에서 양생온도별 자기수축은 다르게 나타나 양생온도가 자기수축에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위한 방안으로 적산온도방법은 미흡할 것으로 판단되며 온도민감도를 보다 정확하게 고려할 수 있는 등가재령방법을 고려할 필요가 있을 것으로 사료된다.

1. 한천구, 김성욱, 고경택, 배정렬, 팽창재 및 수축저감제를 이용한 고성능 콘크리트의 수축특성, 한국콘크리트학회논문집, Vol.15, No.6, pp. 785~793, 2003
2. 한천구, 반호용, 전병채, 홍상희, CSA계 팽창재 및 무기질 혼화재를 이용한 고성능 콘크리트의 특성에 관한 연구, 한국콘크리트학회지, Vol.11, No.1, pp. 141~148, 1999
3. 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.
4. 都築正則, 一瀬賢一, 神代泰道, 川口徹, 超高強度コンクリートの自己收縮に及ぼす結合材の影響, コンクリート工學年次論文集, Vol.26, No.1, pp. 1299~1304. 1999
5. 今本啓一, 大谷 博, 高強度·超高強度コンクリートの收縮性狀に關する研究, コンクリート工學年次論文報告集 Vol. 17, No. 1, pp.1061 ~ 1066, 1995
6. Turcry P, Loukili A, Barcelo L, Casabonne JM, Can Maturity Concept be Used to Separate the Autogenous Shrinkage and Thermal Deformation of a Cement Paste at Early Age?, Cement and Concrete Research, Vol.32, pp.1443-1450, 2002
7. Tazawa E., Matuoka Y., Miyazawa S., Okamoto S., Effect of Autogenous Shrinkage on Self Stress in Hardening Concrete, Int. Symp. on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, Munchen, pp.221-228, 1994
8. Loukli A, Chopin D, Kheldj A, Touzo J, A New Approach to Determine Autogenous Shrinkage of Mortar at an Early Age Considering Temperature History, Cement and Concrete Research, Vol.30, pp.915-922, 2000
9. Jensen OM, Hansen P, Influence of Temperature on Autogenous Shrinkage Deformation and Relative Humidity Change in Hardening Cement Paste, Cement

양생온도가 혼화재 치환 고강도 모르타르의 응결 및 자기수축에 미치는 영향

본 연구에서는 양생온도가 혼화재 치환 고강도 모르타르의 자기수축에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 고찰하였다. 혼화재료는 실리카흙, 고로슬래그, 플라이애시의 3종류로서 치환율은 10, 20, 30%의 3수준으로 하였고 양생온도는 5, 20 및 35℃의 3수준으로 계획하였다. 연구결과 양생온도가 높아질수록 혼화재 치환율이 감소할수록 응결시간은 단축되는 것으로 나타났으며, 양생온도에 따른 자기수축의 경우 양생온도가 증가할수록 수화반응속도 증가에 의해 자기수축이 커지는 것으로 나타났다. 또한 SF나 BS를 사용한 경우 자기수축이 플레인보다 증가하는 것으로 나타났고, FA의 경우는 플레인과 큰차이가 없거나 약간 감소하는 경향을 보였다. 또한 적산온도에 의한 자기수축 평가결과 동일한 적산온도에서 양생온도별 자기수축량의 차이가 크게 나타나 온도민감도를 보다 정확하게 고려할 수 있는 방법이 요구되었다.