

알칼리 활성화 결합재 모르타르의 압축강도 특성 및 건조수축 추정식에 관한 연구

박광민^{1*}, 김형석², 조영근³

Characteristics of Compressive Strength and Drying-shrinkage Equation of Alkali-activated Mortar

Kwang-Min Park^{1*}, Hyung-Suk Kim², Young-Keun Cho³

Abstract: The purpose of this study is to understand a compressive strength and propose a dry shrinkage strain equation being able to predict dry shrinkage of alkali-activated materials(AAM) mortar samples manufactured using fly-ash(FA) and ground granulated blast furnace slag(GGBFS). The main parameters investigated were the GGBFS replace ratios(30, 50, 70 and 100%) and sodium silicate modules(M_s [SiO_2/Na_2O] 1.0, 1.5 and 2.0). The compressive strength of AAM increased with increases GGBFS replace ratios or M_s contents. The dry shrinkage strain of AAM decreased with increases M_s contents. But, the dry shrinkage strain of AAM increased as the GGBFS replace ratio increases. Therefore, the GGBFS replace ratio seems to have very significant and important consequences for the mix design of the AAM mortar. The results indicated the R-square of single regression analysis based on each mix properties was the highest value; 0.7539~0.9786(average 0.9359). And the presumption equation of dry shrinkage strain with all variables(GGBFS, M_s and material age) has higher accuracy and its R-square was 0.8020 at initial curing temperature 23 degrees Celsius and 0.8018 at initial curing temperature 70 degrees Celsius.

Keywords: Alkali-activated materials, Ground granulated blast furnace slag, Compressive strength, Drying shrinkage

1. 서 론

최근 친환경 및 저탄소 콘크리트에 대한 사회적 요구로 인해 보통 포트랜드 시멘트(ordinary Portland cement, OPC)를 대체할 결합재로서 산업부산물인 플라이애시(fly ash, FA)와 고로슬래그 미분말(ground granulated blast furnace slag, GGBFS)을 활용한 알칼리 활성화 결합재(alkali-activated materials, AAM)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

AAM은 알루미늄 규산염과 알칼리 용액과의 반응에 의해 응결 및 경화되는 재료를 말한다. 이러한 AAM에 사용되는 재료는 칼슘 함량과 반응생성물에 따라 2가지로 구분할 수 있다. AAM의 대표적인 재료 중 하나는 칼슘 함량이 높고 알칼리 활성화 반응에 의해 규산칼슘수화물(C-S-H, calcium silicate hydrate)을 생성하는 GGBFS이며, 다른 하나는 칼슘 함량이 낮고 반응생성물

로 지오폴리머 겔이라고 부르는 알칼리 알루미늄 실리케이트 겔(alkali alumino silicate gel)을 생성하는 FA로 구분할 수 있다.

GGBFS를 기반으로 하는 AAM의 특성은 OPC와 비교하여 반응생성물의 크기가 가장 큰 수산화칼슘(calcium hydroxide, $Ca(OH)_2$)이 없어서 일반 콘크리트보다 내구성이 우수하고 압축강도가 높은 것이 특징이다. 하지만 상대적으로 높은 건조수축은 대표적인 약점으로 지적되고 있다.

일반적으로 AAM의 건조수축은 GGBFS 분말도와 활성화제 농도 및 투입량의 증가와 함께 증가한다. 또한 활성화제에 포함된 실리카는 건조과정에서 증발하는 자유수를 많이 생성하는 실리카칼슘 비가 높은 칼슘 실리케이트 겔(calcium silicate gel)의 형성을 유발한다. 이로 인해 규산나트륨에 의해 활성화된 AAM 결합재는 OPC에 비해 높은 건조수축 변형률이 나타난다고 보고되고 있다.

그러나 AAM의 건조수축에 대한 실험자료는 매우 부족하며 장기 건조수축 거동을 예측하는 추정식도 아직 제시되지 않고 있다. 따라서 본 연구는 GGBFS 및 FA 혼합비율, M_s [SiO_2/Na_2O molar ratio] 및 초기양생온도에 따른 AAM 모르타르의 압축강도 및 건조수축의 영향을 확인하기 위한 기초 연구로서 재령별 압축강도 및 길이변화를 측정하였고, 다중 회귀분석을 통하여 AAM의 건조수축 추정식을 도출하였다.

¹정회원, (재)한국건설생활환경시험연구원 주임연구원, 교신저자

²정회원, (재)한국건설생활환경시험연구원 연구원

³정회원, (재)한국건설생활환경시험연구원 선임연구원

*Corresponding author: kmpark@kcl.re.kr

High-tech construction materials center, Korea Conformity Laboratories, 199, Gasan digital 1-ro, Geumcheon-gu, Seoul, 08503, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 실험 개요

2.1 실험 계획

2.1.1 배합

Table 1과 같이 배합을 수립하였으며, 모든 시험체는 KS L ISO 679에 따라서 물-결합재 비(W/B) 0.5, 결합재-잔골재비 1:3으로 모르타르 시험체를 제작하였다.

AAM 모르타르에 사용된 결합재는 GGBFS를 30, 50, 70 및 100%의 4수준으로 치환하여 사용하였으며, 알칼리 활성화제는 Na₂O를 결합재 질량대비 4%로 고정하고, Ms비는 1.0, 1.5 및 2.0의 3수준으로 배합을 실시하였다.

2.2.2 양생 방법

Table 1 Mix properties of AAM mortal specimens

Label	W/B (%)	Na ₂ O (%)	Ms	Binder(%)	
				GGBFS	FA
S30-1.0			1.0		
S30-1.5			1.5	30	70
S30-2.0			2.0		
S50-1.0			1.0		
S50-1.5			1.5	50	50
S50-2.0			2.0		
S70-1.0	0.5	4	1.0		
S70-1.5			1.5	70	30
S70-2.0			2.0		
S100-1.0			1.0		
S100-1.5			1.5	100	0
S100-2.0			2.0		

Table 2 Physical properties and chemical components of binder

Physical properties		
Type	FA	GGBFS
Specific gravity(g/cm ³)	2.32	2.89
Blaine(cm ² /g)	3 680	4 280
Ig.loss(%)	3.36	0.01
Chemical components(%)		
	FA	GGBFS
SiO ₂	52.3	34.3
Al ₂ O ₃	21.8	14.2
Fe ₂ O ₃	8.26	0.47
CaO	6.87	43.0
MgO	1.87	2.71
K ₂ O	1.03	0.50
Na ₂ O	1.46	0.20
SO ₃	0.59	3.64

배합 후 몰드에 타설하고 온도 23°C, 상대습도(RH) 90%의 항온항습양생 및 온도 70°C 오븐양생의 2가지 조건으로 24시간 초기양생을 실시하였다. 24시간 초기양생 후 온도 20±2°C, 상대습도(RH) 60±5%의 항온항습실에서 양생하였다.

2.2 사용 재료

본 연구에 사용된 결합재는 KS L 5405 2종 플라이애시(FA) 및 KS F 2563 3종 고로슬래그 미분말(GGBFS)을 사용하였으며, FA 및 GGBFS의 물리적 성질 및 화학성분은 Table 2와 같다. 또한, 잔골재는 KS L ISO 679를 만족하는 ISO 표준사를 사용하였다.

알칼리 활성화제로는 순도≥98%인 수산화나트륨(sodium hydroxide, NaOH)과 SiO₂ 28.2%, Na₂O 9.3% 및 H₂O 65.5%인 액상 규산나트륨(sodium silicate, Na₂SiO₃, water glass)을 사용하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 압축강도

KS L ISO 679에 준하여 40×40×160 mm 시험체를 제작하고 특정 재령별로 압축강도를 측정하였다. 압축강도 측정은 KS L ISO 679에 준하여 UTM (Model ; INSTRON 1 200 kN)을 사용하여 하중속도 2 400 N/s±200 N/s로 시험하였다.

2.3.2 길이변화

ASTM C 157에 따라 25.4×25.4×254.0 mm 공시체를 제작하고 타설 후 7일간 온도 23°C, 상대습도(RH) 90%의 습기함에서 초기양생을 실시하였다.

재령 7일에 측정된 시험체의 길이를 기준으로 선정하고, 이후 시험체를 2주간은 1일 간격으로 측정하고 그 이후는 1주 간격으로 측정하였으며, 길이변화율은 식 (1)과 같이 산출하였다.

$$Length\ change\ ratio(\%) = \frac{L_s - L_{ini.}}{L_{ini.}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, L_s : 시험체의 특정재령에서의 길이(mm)

$L_{ini.}$: 재령 7일 시험체 길이(mm)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 압축강도

Fig. 1은 AAM 모르타르의 재령별 압축강도, Fig. 2는 재령 91일 압축강도를 기준으로 재령별 압축강도 발현율을 나타낸다. 먼저, 초기양생 23°C에서의 GGBFS 30%의 경우 Ms비가

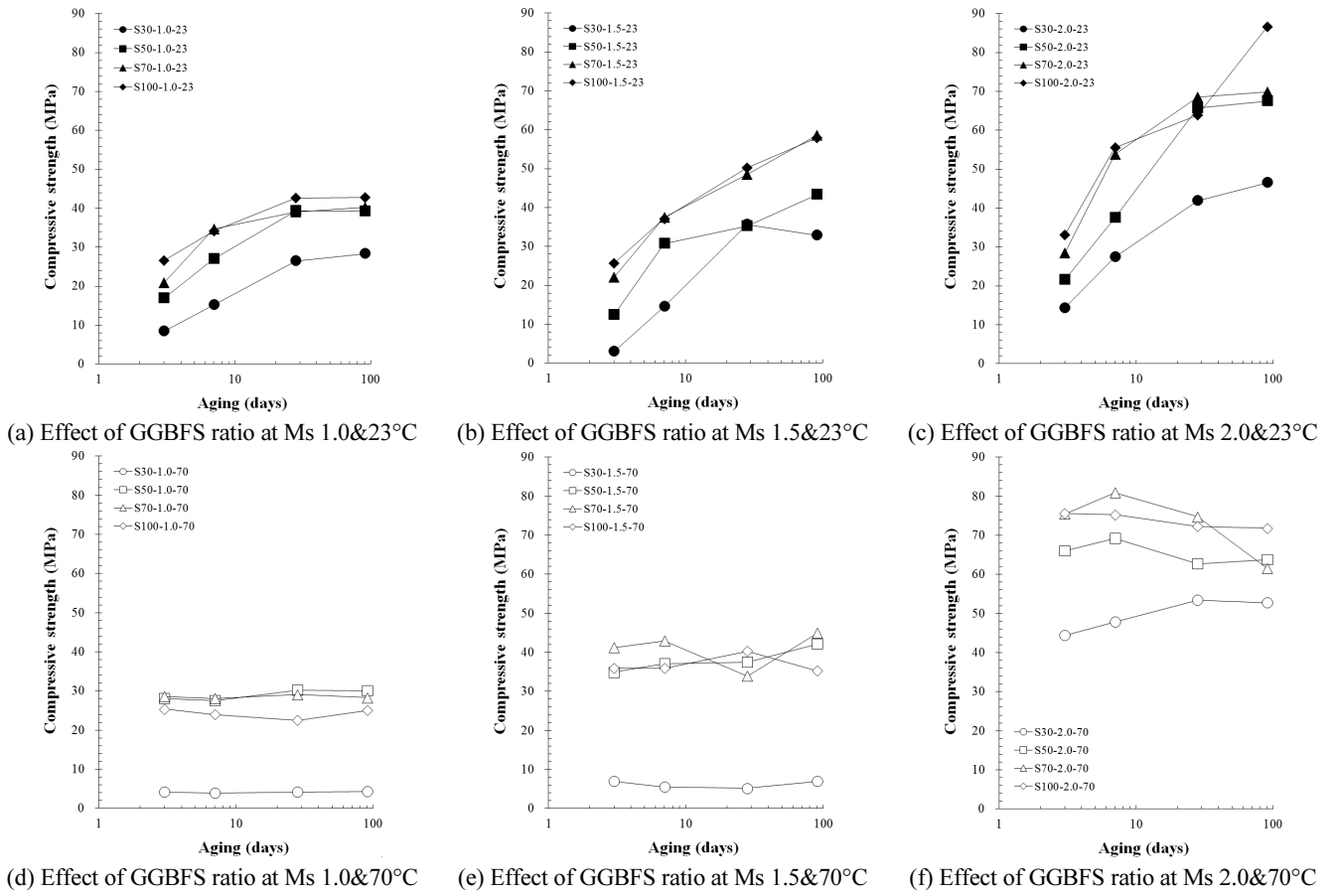


Fig. 1 Compressive strength of AAM mortars

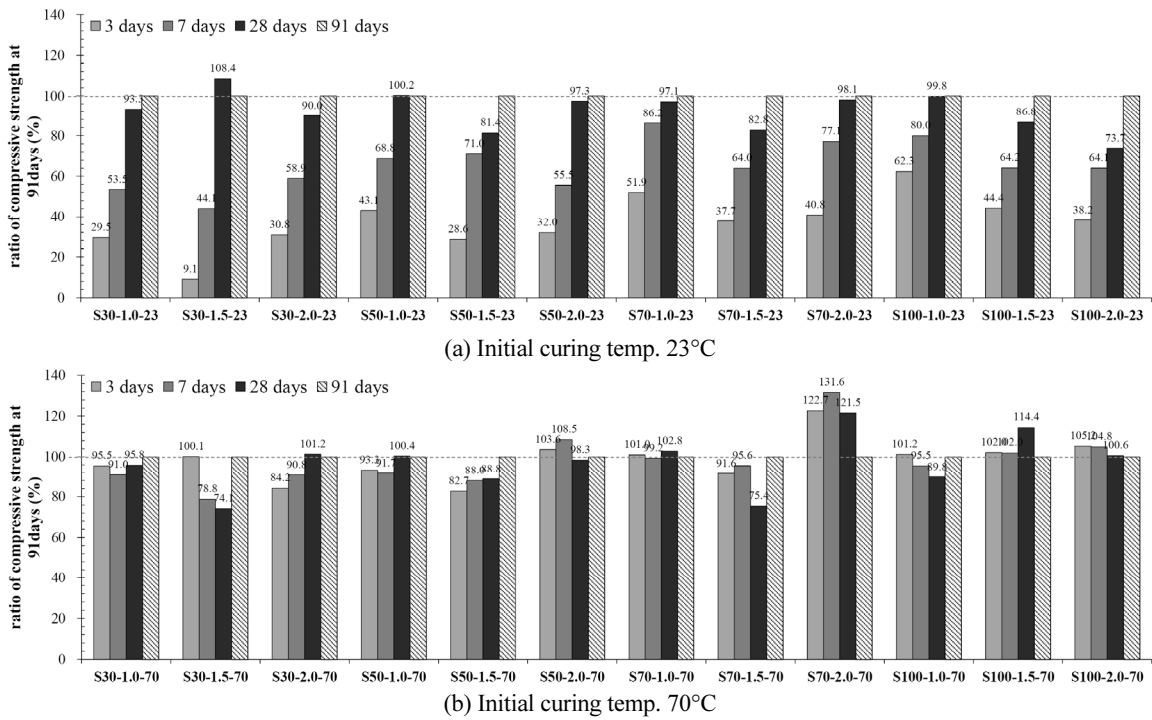


Fig. 2 Ratio of compressive strength of AAM mortars at 91 days

1.0, 1.5 및 2.0으로 증가할수록 재령 28일 압축강도는 26.5, 35.7 및 41.9 MPa, GGBFS 50%의 경우 39.4, 35.3 및 65.7 MPa, GGBFS 70%의 경우 39.1, 48.5 및 68.5 MPa, GGBFS 100%의 경우 42.7, 50.3 및 63.9 MPa로 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 초기양생 23°C에서의 Ms비 1.0의 경우 GGBFS가 30, 50, 70 및 100 %로 증가할수록 재령 28일 압축강도는 26.5, 39.4, 39.1 및 42.7 MPa, Ms비 1.5의 경우 35.7, 35.3, 48.5 및 50.3 MPa, Ms 2.0의 경우 41.9, 65.7, 68.5 및 63.9 MPa로 오차는 보이지만 대체적으로 증가하는 경향이 나타났다.

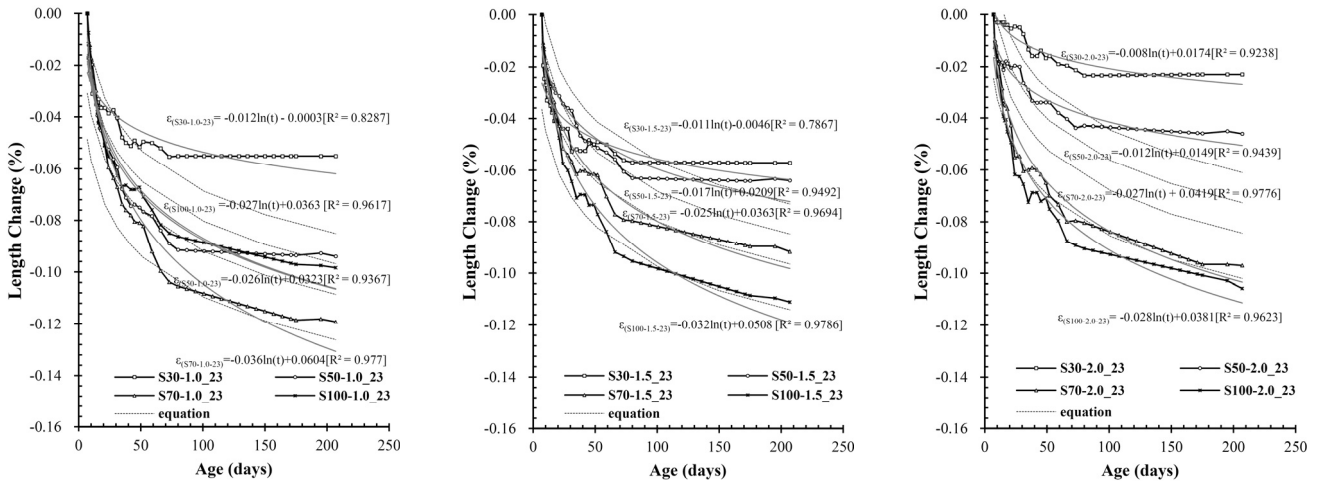
결론적으로 GGBFS 치환량 및 Ms비가 증가할수록 압축강도가 높은 경향이 나타났다. 이는, Ms비가 증가할수록 액상 규산나트륨으로부터 반응성 Si 공급량이 증가하여, OH⁻ 이온에 의해 GGBFS로부터 용출되는 Ca²⁺ 이온과 빠르게 반응하여 OPC 수화생성물과 유사한 C-S-H의 생성량이 증가되기 때문으로 생각된다. 그리고 초기양생 70°C의 경우에는 Ms비가 증가할수록 압축강도는 증가하는 경향이 나타났으나, GGBFS

증가에 따른 압축강도 증가는 Ms비 2.0의 경우에만 뚜렷한 경향이 나타났다. 또한, 초기 고온양생을 실시한 경우에는 재령 3일에서 재령 91일 압축강도의 82.7~122.7%(평균 98.6%)의 매우 빠른 강도발현이 나타났다

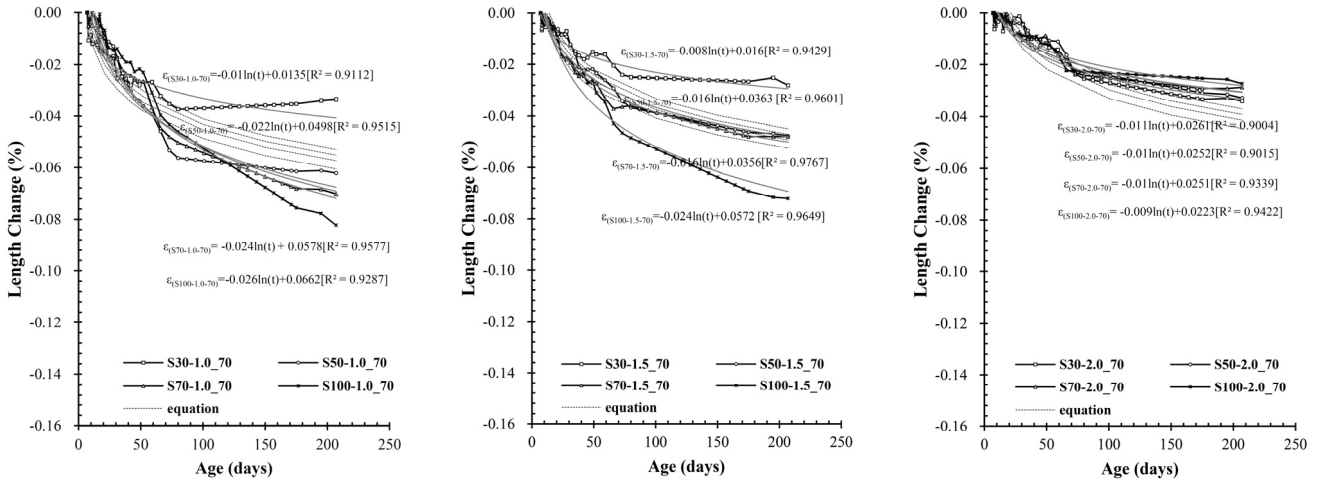
3.2 길이변화

Fig. 3는 GGBFS 치환율, Ms비 및 양생온도에 따른 AAM 모르타르의 길이변화율을 나타낸다. 전체적으로 약 재령 60 일부근까지는 길이변화율의 기울기가 급격하고, 약 재령 60 일 부근이후부터 기울기가 점차 완만해 지는 것을 알 수 있다.

길이변화는 동일한 Ms비의 경우에는 GGBFS 치환량이 증가할수록 길이변화가 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 동일한 GGBFS 치환량의 경우에는 Ms비가 증가할수록 길이변화는 감소하는 경향이 나타났다. 그리고 동일 배합 조건에서는 초기 양생온도가 높을수록 건조수축은 감소하는 경향이 나타났다.



(a) Effect of GGBFS contents at Ms 1.0&23°C (b) Effect of GGBFS contents at Ms 1.5&23°C (c) Effect of GGBFS contents at Ms 2.0&23°C



(d) Effect of GGBFS contents at Ms 1.0&70°C (e) Effect of GGBFS contents at Ms 1.5&70°C (f) Effect of GGBFS contents at Ms 2.0&70°C

Fig. 3 Length change of AAM mortar

초기양생 23°C에서의 Ms비 1.0의 경우 GGBFS가 30, 50, 70 및 100%로 증가할수록 재령 210일 길이변화율은 -0.055, -0.094, -0.119 및 -0.098%, Ms비 1.5의 경우 -0.057, -0.064, -0.092 및 -0.111%, Ms비 2.0의 경우 -0.023, -0.046, -0.097 및 -0.106%로 약간의 오차는 보이지만 대체적으로 길이변화율의 절대값이 증가하는 경향이 나타나, GGBFS 치환량이 증가할수록 건조수축이 커지는 것을 알 수 있다.

그리고 초기양생 23°C에서의 GGBFS 30%의 경우 Ms비가 1.0, 1.5 및 2.0으로 증가할수록 재령 210일 길이변화율은 -0.055, -0.057 및 -0.023%, GGBFS 50%의 경우 -0.094, -0.064 및 -0.046%, GGBFS 70%의 경우 -0.109, -0.092 및 -0.097%, GGBFS 100%의 경우 -0.098, -0.111 및 -0.106%로 약간의 오차는 보이지만 대체적으로 길이변화율의 절대값이 작아지는 경향이 나타나, Ms비가 증가할수록 건조수축이 작아지는 것을 알 수 있다.

초기양생 70°C에서의 Ms비 1.0의 경우 GGBFS가 30, 50, 70 및 100%로 증가할수록 재령 210일 길이변화율은 -0.034, -0.062, -0.070 및 -0.082 %, Ms비 1.5의 경우 -0.028, -0.048, -0.048 및 -0.072%, Ms비 2.0의 경우 -0.034, -0.033, -0.029 및 -0.027%로 Ms비 2.0을 제외하고는 대체적으로 길이변화율의 절대값이 증가하는 경향이 나타나, GGBFS 치환량이 증가할수록 건조수축이 커지는 것을 알 수 있다. 여기서, 초기양생 70°C 및 Ms비 2.0의 경우에는 초기에 C-S-H 등의 반응생성물이 생성됨에 따라 장기적인 차이점은 뚜렷하지 않은 것으로 생각된다.

그리고 초기양생 70°C에서의 GGBFS 30% 경우 Ms비가 1.0, 1.5 및 2.0으로 증가할수록 재령 210일 길이변화율은 -0.034, -0.028 및 -0.034 %, GGBFS 50 %의 경우 -0.062, -0.048 및 -0.033%, GGBFS 70%의 경우 -0.070, -0.048 및 -0.029%, GGBFS 100%의 경우 -0.082, -0.072 및 -0.027%로 약간의 오차는 보이지만 Ms비가 증가할수록 건조수축이 작아지는 것을 알 수 있다.

GGBFS, Ms비 및 재령에 따른 AAM 모르타르의 건조수축 추정식을 도출하기 위해 회귀분석을 실시하였다. Table 3은 배합조건별 단순회귀분석 및 GGBFS, Ms비 및 재령에 따른 다중회귀분석 결과를 정리한 표이다. 배합조건별 추정식의 유의성을 검토하기 위하여 단순회귀분석 결정계수(R²)를 검토한 결과 0.7867~0.9786(평균 0.9359)로 높은 상관관계를 보이고 있어서 추정식은 유효하다고 판단할 수 있다. 여기서 S30-1.5-23의 경우 결정계수가 0.7867로 낮은 이유는 측정과정의 오류로 판단되나, 실측값의 수정은 수행하지 않았다.

그리고 GGBFS, Ms비 및 재령을 독립변수로 설정하여 다중회귀분석을 실시한 결과, 초기양생온도 23°C 및 70°C에서 결정계수 0.8020 및 0.8018로 타당한 상관관계를 보이고 있으

며, 변수를 조합하여 얻어진 추정식은 식 (2), (3)와 같다. 또한, GGBFS, Ms비, 재령 및 초기온도를 독립변수로 설정하여 다중회귀분석을 실시한 경우의 결정계수는 0.8078로 타당한 상관관계를 보이고 있다. 단, 모든 추정식은 실제 측정범위를 고려하여 GGBFS 30~100%, Ms비 1.0~2.0 및 재령 10~210일까지 유효하다고 판단되며, 양생온도의 경우 독립변수의 관측

Table 3 Dry Shrinkage regression equations of AAM mortals

Label	Single regression equations (recommend t range(10 < t ≤ 210))	Coefficient of determination R ²
In case of initial temp. 23°C		
S30-1.0-23	$\epsilon_{(S30-1.0-23)} = -0.012\ln(t) - 0.0003$	0.8287
S30-1.5-23	$\epsilon_{(S30-1.5-23)} = -0.011\ln(t) - 0.0046$	0.7867
S30-2.0-23	$\epsilon_{(S30-2.0-23)} = -0.008\ln(t) + 0.0174$	0.9238
S50-1.0-23	$\epsilon_{(S50-1.0-23)} = -0.026\ln(t) + 0.0323$	0.9367
S50-1.5-23	$\epsilon_{(S50-1.5-23)} = -0.017\ln(t) + 0.0208$	0.9492
S50-2.0-23	$\epsilon_{(S50-2.0-23)} = -0.012\ln(t) + 0.0149$	0.9439
S70-1.0-23	$\epsilon_{(S70-1.0-23)} = -0.036\ln(t) + 0.0604$	0.9977
S70-1.5-23	$\epsilon_{(S70-1.5-23)} = -0.025\ln(t) + 0.0363$	0.9694
S70-2.0-23	$\epsilon_{(S70-2.0-23)} = -0.027\ln(t) + 0.0419$	0.9776
S100-1.0-23	$\epsilon_{(S100-1.0-23)} = -0.027\ln(t) + 0.0363$	0.9617
S100-1.5-23	$\epsilon_{(S100-1.5-23)} = -0.032\ln(t) + 0.0508$	0.9786
S100-2.0-23	$\epsilon_{(S100-1.5-23)} = -0.028\ln(t) + 0.0381$	0.9623
In case of initial temp. 70°C		
S30-1.0-70	$\epsilon_{(S30-1.0-70)} = -0.011\ln(t) - 0.0135$	0.9112
S30-1.5-70	$\epsilon_{(S30-1.5-70)} = -0.008\ln(t) + 0.0160$	0.9429
S30-2.0-70	$\epsilon_{(S30-2.0-70)} = -0.011\ln(t) + 0.0261$	0.9004
S50-1.0-70	$\epsilon_{(S50-1.0-70)} = -0.022\ln(t) + 0.0498$	0.9515
S50-1.5-70	$\epsilon_{(S50-1.5-70)} = -0.016\ln(t) + 0.0363$	0.9601
S50-2.0-70	$\epsilon_{(S50-2.0-70)} = -0.011\ln(t) + 0.0252$	0.9015
S70-1.0-70	$\epsilon_{(S70-1.0-70)} = -0.024\ln(t) + 0.0578$	0.9577
S70-1.5-70	$\epsilon_{(S70-1.5-70)} = -0.016\ln(t) + 0.0356$	0.9767
S70-2.0-70	$\epsilon_{(S70-2.0-70)} = -0.011\ln(t) + 0.0251$	0.9339
S100-1.0-70	$\epsilon_{(S100-1.0-70)} = -0.026\ln(t) + 0.0662$	0.9287
S100-1.5-70	$\epsilon_{(S100-1.5-70)} = -0.024\ln(t) + 0.0572$	0.9649
S100-2.0-70	$\epsilon_{(S100-2.0-70)} = -0.009\ln(t) + 0.0223$	0.9422
Lable	Multi Regression equations {recommend t range (10 < t ≤ 210)}	Coefficient of Determination R ²
temp. 23	$\epsilon_{sh(23)} = -0.00059(G) + 0.02413(M) - 0.02288\ln(t) + 0.0328$	0.8020
temp. 70	$\epsilon_{sh(70)} = -0.00011(G) + 0.01587(M) - 0.01623\ln(t) + 0.0210$	0.8018
collective equation	$\epsilon_{sh} = -0.00032(G) + 0.01849(M) - 0.01937\ln(t) + 0.00072(T) - 0.0081$	0.8078

수가 2가지인 것을 고려하여 개별 추정식도 같이 제안한다.

$$\varepsilon_{sh(23)} = -0.00059(G) + 0.02413(M) - 0.02288 \ln(t) + 0.0328 \quad (2)$$

$$\varepsilon_{sh(70)} = -0.00011(G) + 0.01587(M) - 0.01623 \ln(t) + 0.0210 \quad (3)$$

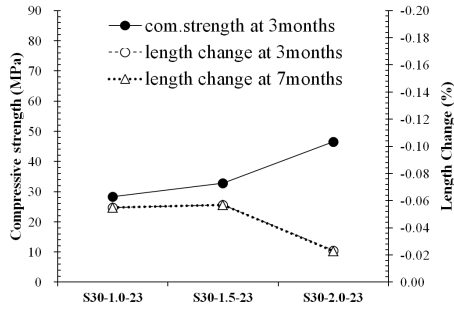
$$\varepsilon_{sh} = -0.00032(G) + 0.01849(M) - 0.01937 \ln(t) + 0.00072(T) - 0.0081 \quad (4)$$

여기서, G : GGBFS 치환량(%)

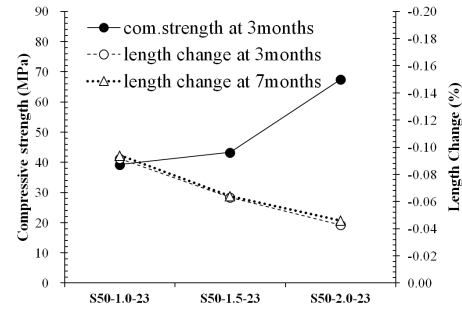
M : Ms [SiO₂/Na₂O molar ratio]

T : 초기양생온도(°C)

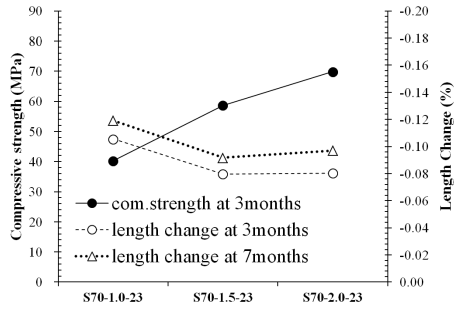
t : 모르타르 재령(일)



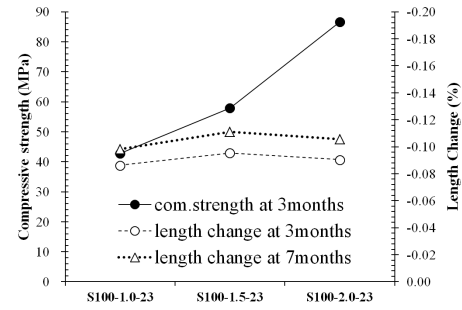
(a) GGBFS 30%(temp.23°C)



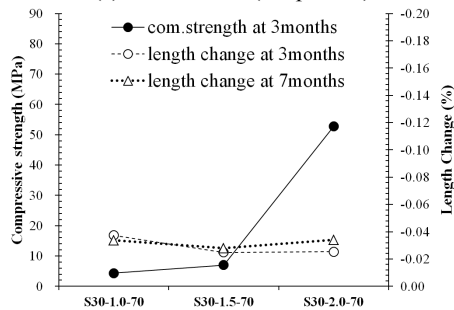
(b) GGBFS 50%(temp.23°C)



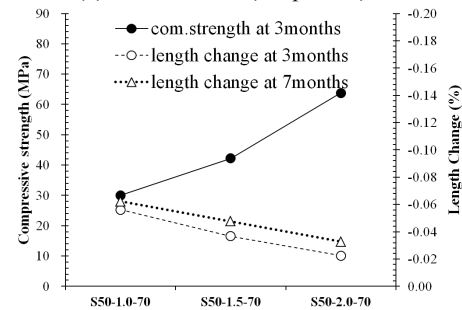
(c) GGBFS 70%(temp.23°C)



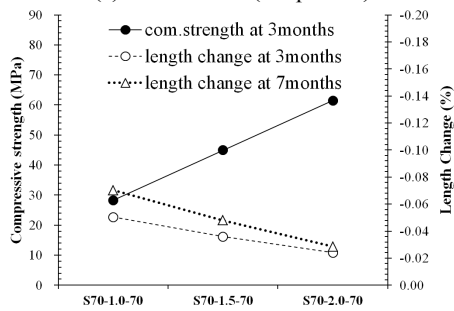
(d) GGBFS 100%(temp.23°C)



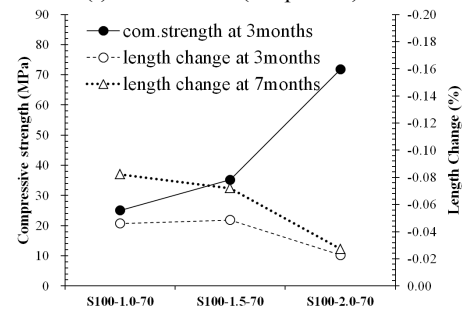
(e) GGBFS 30%(temp.70°C)



(f) GGBFS 50%(temp.70°C)



(g) GGBFS 70%(temp.70°C)



(h) GGBFS 100%(temp.70°C)

Fig. 4 Compressive strength and length change in relation to Ms ratio

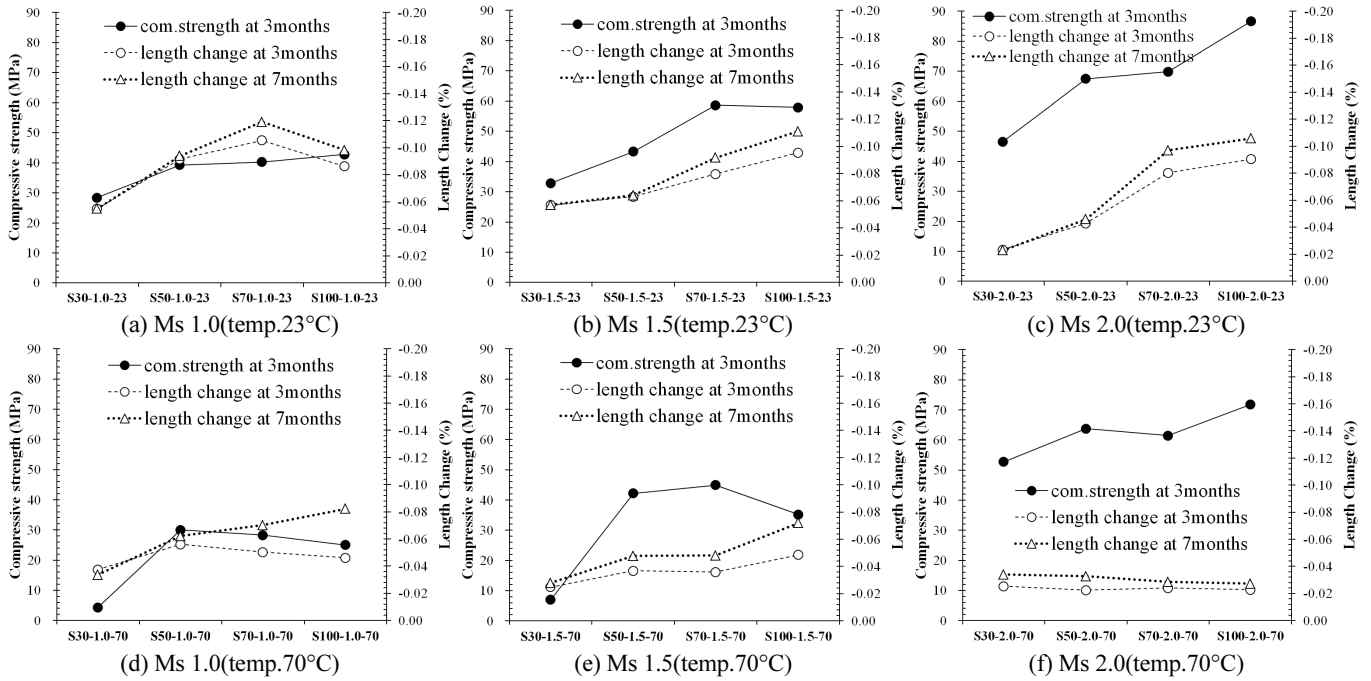


Fig. 5 Compressive strength and length change in relation to GGBFS ratio

독립변수별 유의성을 확인하기 위하여 변수별 |t-통계값| 을 분석하였다. 여기서 |t-통계값| 이 클수록 건조수축에 미치는 영향력이 크다고 볼 수 있다. 그 결과, 초기양생온도 23°C의 경우의 GGBFS, Ms비 및 재령의 |t-통계값| 을 보면 33.34, 22.05 및 54.61로서 재령 > GGBFS 치환량 > Ms비 순으로 건조수축에 영향력을 미치는 것으로 파악하였다. 그리고, 초기양생온도 70°C의 경우의 GGBFS, Ms비 및 재령의 |t-통계값| 을 보면 10.89, 25.96 및 64.38로서 재령 > Ms비 > GGBFS치환량 순으로 건조수축에 미치는 영향력의 상대적 차이를 파악하였다. 여기서, 양생온도 70°C의 경우 GGBFS보다 Ms비의 영향력이 상대적으로 큰 이유는 Fig. 3(f)와 같이 고온양생에서 Ms비 2.0의 경우에는 GGBFS에 의한 길이변화의 차이가 뚜렷하지 않은 것에 기인된 결과라고 생각된다. 모든 변수를 반영한 추정식의 경우 GGBFS, Ms비, 재령 및 초기양생온도 > GGBFS > Ms 순으로 영향력을 미치는 것으로 파악하였다.

3.3 압축강도 및 길이변화 다중분석

Fig. 4에 Ms비에 따른 압축강도 및 길이변화의 관계, Fig. 5에 GGBFS에 따른 압축강도 및 길이변화의 관계를 나타낸다. 그 결과, GGBFS가 동일할 경우 Ms비가 증가할수록 압축강도는 증가하고 길이변화(=건조수축)도 감소하는 것을 확인하였다. 반면, Ms비가 동일할 경우에는 GGBFS가 증가할수록 압축강도는 증가하지만 길이변화도 증가하는 경향을 확인하

였다. 따라서, GGBFS를 다량 치환한 AAM의 경우에는 건조수축에 대한 고려가 반드시 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

AAM 모르타르의 압축강도 및 건조수축의 내부적인 요인이 되는 GGBFS, Ms비 및 재령을 독립변수로 하여 압축강도를 평가하고 건조수축 변형률을 합리적으로 평가하기 위한 추정식을 제안하였다. 또한, 압축강도 및 건조수축에 영향을 미치는 활성화제 종류, 투입량 및 내부공극 등에 대한 변화를 파악하기 위하여 지속적인 실험 자료들을 구축해야 할 필요가 있다. 이 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) AAM 모르타르는 GGBFS 치환량 및 Ms비 [$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$] 비가 증가할수록 압축강도가 증가하였다. 이는, Ms비가 증가할수록 반응성 Si 양의 증가에 따라 규산칼슘수화물 (calcium silicate hydrates, C-S-H) 생성량이 증가되기 때문으로 판단된다.
- 2) AAM 모르타르는 GGBFS 치환량이 증가할수록 건조수축이 증가하고, Ms비가 증가할수록 건조수축이 감소하는 경향이 확인되었다.
- 3) AAM 모르타르의 건조수축을 평가하는 식을 유도하기 위하여 GGBFS, Ms비 및 재령을 독립변수로 선정하여 다중회귀분석을 수행한 결과 초기양생온도 23°C 및 70°C에서

결정계수 0.8020 및 0.8018 수준이었다.

4) 초기양생온도 23°C의 경우에는 재령 > GGBFS 치환량 > Ms비 순으로 건조수축에 영향력을 미치고 초기양생온도 70°C의 경우에는 재령 > Ms비 > GGBFS 치환량 순으로 건조수축에 영향력을 미치는 것으로 확인하였다. 또한, 양생 온도에 따라서 재령을 제외하고 건조수축에 미치는 영향력이 다른 것을 확인하였다. 모든 변수를 조합한 경우에는 재령 > 온도 > GGBFS > Ms비의 순으로 영향력을 미치는 것으로 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 2014 환경산업선진화기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제(2014000150002)입니다. 이에 감사드립니다.

References

Park, K. M, Cho, Y. K., and Lee, B. C. (2016), Sulfate Resistance of

Alkali-Activated Materials Mortar, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(2), 94-101.

Yang, K. H., Seo, E. A., (2013), Evaluation of Shrinkage Strain of Alkali-Activated Slag Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 25(6), 593-599.

Frank, C., and Jay, S. (2000), Effect of Pore Size Distribution on drying Shrinking of Alkali-Activated Slag Concrete, *Cement and Concrete Research*, 30, 1401-1406.

Caijun, S., Pavel, V. K., and Della, R. (2006), *Alkali-Activated Cements and Concretes*, Taylor & Francis.

Kutti, T., Berntsson, L., and Chandra, S. (1992), Shrinkage of Cements with High Content of Blast-furnace Slag in Malhotra, V.M.(Ed), *Proceedings of Fourth CANMET/ACI International Conference of Fly ash, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 615-625.

Christopher C., Farshad R., and Aleksandra R. (2015), Shrinkage Characteristics of Alkali-Activated Slag Cements, *J. Master Civ.Eng.*, 27(7), pp.B4014007-1~8

Hailong, Ye. (2016), Shrinkage Mechanisms of Alkali-activated Slag, *Cement and Concrete Research*, 88, 126-135.

Received : 11/29/2016

Revised : 12/09/2016

Accepted : 12/12/2016

요 지 : 본 연구는 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 알칼리 활성화 결합재로 활용하여 제조한 모르타르의 압축강도 특성을 파악하고 건조수축 예측 및 평가가 가능한 추정식을 제안하고자 한다. 이를 위하여 고로슬래그 미분말 치환량을 30, 50, 70 및 100%로 조정하고 규산나트륨 모듈 Ms비[SiO₂/Na₂O]은 1.0, 1.5 및 2.0으로 조정하여 압축강도 및 길이변화율을 측정하였다. 그 결과 알칼리 활성화 결합재 모르타르는 Ms비가 증가할수록 압축강도는 증가하고 길이변화율은 감소하였다. 그러나 고로슬래그 미분말의 경우에는 치환량을 증가할수록 압축강도는 증가하였으나 길이변화율도 증가하는 경향이 확인되었다. 따라서, 고로슬래그 미분말을 다량 치환할 경우에는 길이변화율을 고려하여 설계할 필요성이 있다고 판단되었다. 알칼리 활성화 결합재 모르타르의 건조수축을 평가하는 식을 유도하기 위하여 배합조건별 단순회귀분석을 수행한 결과 결정계수 0.7539~0.9786(평균 0.9359)수준의 유효한 추정식을 도출하였다. 또한, 고로슬래그 미분말, Ms비 및 재령을 독립변수로 선정하여 다중회귀분석을 수행한 결과 초기양생온도 23°C 및 70°C에서 결정계수 0.8020 및 0.8018 수준의 타당한 추정식을 제안하였다.

핵심용어 : 알칼리 활성화 결합재, 고로슬래그미분말, 플라이애시, 압축강도, 건조수축