

알칼리 활성화 슬래그 콘크리트의 시간의존적 변형에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Time-Dependent Deformation of the Alkali Activated Slag Concrete

이 영 준 권 은 희 박 동 천*

Lee, Young-Jun Kwon, Eun-Hee Park, Dong-Cheon*

Department of Architecture and Ocean Space, Korea Maritime and Ocean University, Yeongdo-Gu, Busan,
Korea

Abstract

The alternative material for cement has been attracting attention in construction projects. Especially, the alkali activated slag(hereafter, AAS) concrete is able to use for a structural vertical member because of 40MPa of compressive strength, However, the research about time-dependent deformation such as creep which is important to strength member is insufficient. Therefore, in this study, experiments were performed with respect to time-dependent deformation including the drying shrinkage and creep deformation of AAS concrete. The creep deformed ratio of AAS concrete was more than OPC concrete by approximately 4.3% and the dry shrinkage deformation of AAS concrete was more than OPC concrete by approximately 69%. The large amount of sodium silicate, alkali activator, is added causing temperature crack than promoted drying and drying creep which is confirmed by water ration test and SEM.

Keywords: alkali activated slag, time-dependent deformation, creep, drying shrinkage

1. 서 론

이산화탄소 절감을 위한 국제사회의 노력에도 불구하고 화석연료의 사용과 시멘트의 생산으로 인해 이산화탄소 배출량이 지속적으로 증가하는 추세이다. Friedlingstein, et al.[1]등의 연구를 통해 현재까지 전 세계에 걸쳐 배출된 이산화탄소의 양은 약 360억 톤이며 연 평균 2.5%씩 꾸준히 증가하고 있는 것으로 나타났다. 또한 국제사회에서 지정한 이산화탄소의 배출허용량은 전체 1조 2천억 톤이며 앞서 기술한 증가 추세대로 지속된다면 약 30년 뒤에는 모든 허용

량이 진될 것으로 추정된다. 이산화탄소의 배출허용량을 모두 소진할 경우, 지구의 온도는 산업혁명 이전보다 약 2℃ 이상 증가할 것으로 예측하였으며 이는 해수면 급상승과 폭염, 가뭄 등의 자연 재해를 유발하게 될 것이라 보고하였다.

따라서 건설업계에서도 이산화탄소 배출량을 저감시키기 위해 많은 노력을 하고 있으며, 특히 시멘트 산업에서는 시멘트 생산공정에서 다량의 이산화탄소를 배출하는 시멘트의 대체재료로 고로슬래그 등에 알칼리 활성화제를 첨가한 알칼리 활성화 슬래그 (Alkali Activated Slag, 이하 AAS로 칭함)를 활용하고자 하는 연구가 다수 수행되고 있다 [2,3,4]. 이 중 몇몇 연구자들을 통해 알칼리 활성화 슬래그 모르타르가 40MPa 이상의 고강도화가 가능한 것이 밝혀졌으며, 이는 AAS가 수직 구조용 부재로서 사용이 가능하며 초고층 구조물에 적용될 가능성이 높을 것으로 판단된다. 그러나 초고층 구조물의 경우, 구조물의 고정하중을 부담하는 기둥은 크리프와 건조수축, 탄성변형에 의해 수축이 발

Received : April 29, 2015
Revision received : June 15, 2015
Accepted : July 20, 2015

* Corresponding author : Park, Dong-Cheon
[Tel: 82-51-410-4587, E-mail: dcpark@kmou.ac.kr]
©2015 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

생하게 되며 이러한 현상은 부등수축, 외장재 탈락, 설비부착물 관련 문제, 수평부재의 부등침하 등의 문제를 유발하기 때문에 장기 지속하중을 받는 부재의 거동특성을 파악하는 것은 매우 중요함에도 불구하고 시간의존 변형 거동에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 OPC와 AAS를 이용한 콘크리트 시험체를 제작하여 크리프와 건조수축을 측정하고 도출된 결과값을 ACI 209R-92, CEB-FIP(1990)의 예측모델을 이용한 비선형 회귀분석을 통해 시간의존 변형 특성을 분석하였다. 각각의 열분석 및 SEM촬영을 통해 변형 발생 메카니즘을 규명하고자 하였다.

2. 실험 계획

2.1 실험 인자

본 연구는 알칼리 활성 슬래그(이하, AAS) 콘크리트의 크리프 특성을 파악하기 위한 것으로서 Table 1에 실험인자 및 수준을 나타내었다.

동일한 50MPa의 목표설계 압축강도로 제작된 OPC와 AAS 공시체의 알칼리 활성화제 첨가율에 따른 AAS의 역학적 물성분석을 위해 압축강도 및 탄성계수를 측정하였다. 또한, 시간 의존적 변형특성을 분석하기 위해 건조수축 및 크리프를 측정하였으며, 이를 통해 도출된 결과 데이터를 ACI 209R-92과 CEB-FIP(1990) 예측 모델에 적용하여 비선형 회귀분석을 통해 AAS 콘크리트의 극한 크리프 계수와 극한 건조수축 변형률을 산정하였다. 또한 이에 대한 변형 메카니즘 규명을 위해 시차 열중량 분석(TG/DTA) 및 미세구조 화상분석(SEM) 촬영을 실시하였다.

Table 1. Experimental factors and levels

Division	W/B	Alkali activator ratio	Target compressive strength (MPa)
OPC		-	50
G-13	40%	13%	40
G-18		18%	50

2.2 사용재료

본 연구에서는 주 재료로 KS 1 5201에 준하여 밀도 3.15g/cm³, 분말도 3,400cm²/g의 S사의 보통 포틀랜드 시멘트와 밀도 2.91g/cm³, 분말도 4,254cm²/g의 S사의 고로

슬래그 미분말 3종을 사용하였으며 Table 2에 각각의 화학적 조성을 나타내었다. 잔골재는 최대치수 5mm 이하의 세척사를 사용하였으며, 굵은 골재는 최대 치수 20mm 이하의 쇄석을 사용하였다. 알칼리 활성화제는 분말상태의 몰비 약 1.0 H사 메타 규산나트륨을 사용하였으며 화학 조성은 Table 3과 같다. 혼화제는 기존 연구사례[5]를 참고하여 염기 환경에서도 사용 가능한 나프탈렌계 고성능 AE 감수제를 사용하였다.

Table 2. Chemical composition of binder

Composition	Ratio(%)	
	OPC	GGBS
SiO ₂	20.88	32.75
Al ₂ O ₃	4.17	15.61
Fe ₂ O ₃	3.52	0.494
CaO	62.12	43.51
MgO	3.47	4.41
Na ₂ O	0.21	0.251
K ₂ O	1.01	0.492

Table 3. Chemical composition of sodium silicate

Composition	Ratio(%)
Na ₂ O	28.5~30.0
SiO ₂	27.5~29.0
Iron(Fe)	0.01 max

2.3. 시편 제작 및 양생

OPC와 AAS의 배합은 Table 4와 같다. 여기서 고로슬래그 미분말과 알칼리 활성화제는 바인더로 배합하였고 활성화제의 첨가율에 따라서 13%와 18%의 2가지 배합을 하였으며 OPC를 동일강도 기준으로 제작하여 참조 비교를 하였다. 공시체는 KS F 2403에 의거 압축강도 및 탄성계수 측정용 ϕ 100×200mm와 건조수축 및 크리프, SEM 촬영, 시차 열중량 분석을 위한 40×40×160mm의 공시체를 제작하였다. 몰드에 타설 후, 랩핑하여 양생하였고 재령 1일에 탈형하였다. Table 5는 각 배합마다 필요한 공시체의 개수를 나타내었다. AAS 콘크리트는 수중양생을 실시할 경우 알칼리 활성화제가 물에 녹아 용출될 우려가 있으므로 온도 20℃, 상대습도 70%의 항온항습실에서 기중양생을 실시하였다.

Table 4. AAS concrete mixing proportions

C	Binder(kg)			W/B (%)	S/a (%)	W (kg)	S (kg)	G (kg)	AE제 (%)	
	BS	NS	Sum							
OPC	494.8	-	-							
G-13	-	430.5	64.3	494.8	40	47	197.9	752.9	852.2	0.75
G-18	-	405.7	89.1							

Table 5. Number of specimens

Division	Compressive strength and modulus	Creep	Drying shrinkage and moisture content	SEM and TG/DTA
OPC				
G-13	φ100×200mm Each of 6	φ150×300mm Each of 3	φ15×30cm Each of 5	4×4×16cm Each of 2
G-18				

3. 실험 방법

3.1 압축강도 및 탄성계수 시험

압축강도는 φ 100×200mm의 공시체를 제작하여 KS F 2405[콘크리트의 압축 강도 시험 방법]에 따라서 재령 7일, 28일, 90일에 걸쳐 총 3회 측정하였다. 사용 장비는 100 ton 용량의 U.T.M(만능시험기)를 사용하였으며, 재하 시편심의 영향을 줄이기 위해 공시체의 상·하면을 연마기로 연마하였다. 시편 3개의 평균을 압축강도 결과 값으로 하였으며, 탄성계수는 압축강도 측정으로부터 얻어지는 응력-변형도 곡선을 이용하여 ACI 318 기준인 식(3-1)을 적용하여 계산하였다.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad \text{----- (1)}$$

여기서, E : 탄성계수 (kN/m²)

S₁ : 세로변형 0.000050에 대한 응력 (kN/m²) 값이 없을 경우, 변형률 0.000050에 상응하는 응력 근사값을 사용

S₂ : 극한 하중의 40%일 때의 응력 (kN/m²)

ε₂ : 응력 S₂로 인한 변형률

ε₁ : 변형률 0.000050 또는 근사값

3.2 크리프 시험

OPC 및 AAS의 압축크리프 시험은 KS F 2453[콘크리

트의 압축 크리프 시험 방법]에 따라 진행하였고 공시체는 φ 150×300mm를 사용하였으며 재령 28일 시점 압축강도의 30%의 하중을 재하하였다.

Figure 1은 크리프 시험을 실시하고 있는 모습을 나타낸 것이다. 실험인자에 따른 각각의 공시체별로 3개의 스트레인 게이지를 부착하였으며, 부착된 스트레인 게이지를 데이터 로거에 연결하여 시간당 데이터를 수집하였다.



Figure 1. Creep test

3.3 건조수축 시험

ACI 209, CEP/FIP, BS 8110, KCI, BP, AS3600 등의 각종 예측 모델에서 콘크리트 부재의 치수가 건조수축의 영향인자로 분류되고 있다. 또한 내부 깊이에 따라 공시체 내부의 습도가 다르기 때문에 수축량도 다를 것이라 추정된다. 건조수축 시험은 100×100×400mm의 시편에 다이얼 게이지와 스테드를 적용한 방법이 이론상 가장 적합하나 측정자의 정확도에 따라 매 회 측정할 때마다 실험오차가 심하게 발생한 사례가 있다. 그 외 측정방법으로는 매립형 스트레인게이지를 매설하거나 표면에 부착형 스트레인게이지 설치, 또는 데택 게이지와 게이지 플러그를 이용하는 방법이 있으나 이러한 측정방법은 세로 중심축에 대한 변형률을 측정하는데 한계가 있다. 이러한 까닭으로 본 저자는 기존의 방법을 사용할 경우, φ 150×300mm의 크리프 시험의 시편 변형률 측정방법과 시편 모양이 불일치하여, 크리프 시험에서 발생하는 정확한 건조수축 값을 도출하기가 어렵다고 판단하였다. 이에 Figure 2와 같이 크리프 변형률을 산정하기 위한 건조수축 측정방법을 고안하였다. 상·하면에 그리스를 칠하고 철판을 대어서 상·하면으로 작용하는 건조수축 현상을 제어하고 상면 철판위에 다이얼게이지를 고정하였다. 고정된 다이얼 게이지는 건조수축 시험이 끝날

때까지 위치하고 있으며 줄어드는 다이얼 게이지를 통해 매일 수축된 양을 기록하여 데이터를 수집하였다.

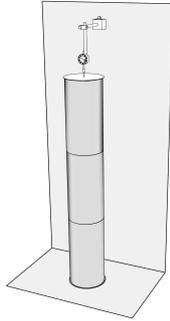


Figure 2. Shrinkage measurements method for creep

3.4 비선형 회귀분석

크리프와 건조수축의 변형은 일반적으로 시간이 지남에 따라 일정 값으로 수렴하는 특징을 보인다. 이 수렴 하는 값을 구하기 위해서는 장기간의 오랜 시간동안 실험을 진행하여야 하는데 이러한 점은 사실상 어려운 점이 많다. 때문에 본 실험에서는 초기 값을 근거로 비선형 회귀분석을 실시하여 수렴값을 예측 계산하는 방법을 이용하였다. 비선형 회귀분석에 사용된 식은 ACI-209R-92, CEB-FIP(1990) 예측모델의 식을 기본으로 하였으며 Table 6과 같다.

Table 6. Result of creep test regression analysis

	ACI-209R-92	CEB-FIP(1990)
Shrinkage	$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{(t-t_d)^\alpha}{f+(t-t_d)^\alpha} \varepsilon_{shu}$	$\varepsilon_{sh}(t, t_d) = \varepsilon_{sho} \cdot \beta_s(t-t_d)$
Creep	$\phi(t, t') = \frac{(t-t_f)^\psi}{d+(t-t_f)^\psi} \phi_u$	$\phi_0 = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_f)$

3.5 주사전자 현미경 분석(SEM)

수화에 따른 AAS 페이스트의 수화물인 C-S-H의 미세구조의 변화를 관찰하기 위해서 미세구조 화상분석을 실시하였으며 장비로서 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope : 이하 SEM)을 사용하였다. 시험은 재령 7일, 28일, 90일 총 3회에 걸쳐 실시하였고 페이스트로 제작된 시편을 측정 장비에 적당한 크기로 분쇄하여 사용하였다. 분쇄된 시료를 아세톤 용액을 사용하여 수화를 정지시킨

후, 건조를 위해 105℃의 건조로에 24시간동안 건조한 다음 상온에서 2시간동안 냉각시켰다. 시료는 SEM을 위해 표면을 연마하고 코팅을 하였다. 수화물의 화상 관찰시 분석조건은 가속전압 10~20kV, WD(Working Distance) 15mm에서 관찰하였다.

3.6 시차 열중량 분석(TG/DTA)

AAS의 수화생성물인 C-S-H는 CO₂와 반응하여 이산화규소와 탄산칼슘이 생성되는 탄산화 반응을 한다. 생성된 이산화규소는 열분석을 실시할 경우 500~650℃ 부근에서 이산화규소의 화학적 결합수가 탈수하여 중량변화가 발생한다. 이로 인해 탄산화가 된 알칼리 활성슬래그를 시차 열중량 분석을 하게 되면 C-S-H의 생성량을 정량적으로 계산할 수 있다[3].

본 연구에서는 크리프에 중요한 인자인 강도, 탄성계수 발현에 대한 분석의 필요로 시차 열중량 분석을 하였으며, 각각 다른 비율의 알칼리 활성화제를 첨가한 공시체의 강도 발현에 대한 C-S-H의 생성량을 도출하였다. 재령 3, 7, 28일의 AAS 페이스트를 분쇄하여 90µm 채를 통과시킨 미분말을 제조하였다. 제조된 미분말을 탄산화 촉진 시험장치에 CO₂ 농도 5%의 환경에서 72시간동안 노출시켜 탄산화를 유도한 후, 시차 열중량 분석을 실시하였다.

4. 실험 결과

4.1 압축강도 및 탄성계수

Figure 3은 콘크리트 압축강도 시험결과를 나타낸 것이다. 잠재수경성을 가지는 고로슬래그를 콘크리트의 주원료로 사용했음에도 불구하고 G-18의 경우 초기강도가 OPC보다 높은 것으로 나타났다. 이는 시멘트 수화반응에 의해 생성된 Ca(OH)₂의 고 알칼리도에 의해 불투과성 막이 깨지면서 포졸란 반응을 일으키는 고로슬래그에 대해 Na₂SiO₃를 첨가함으로써 경화시작 시점부터 혼합수가 고 알칼리도를 확보하여 시멘트 수화반응에 의한 Ca(OH)₂생성 소요시간이 생략되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 재령 28일의 압축강도는 OPC는 49.43MPa, G-13는 38.25MPa, G-18는 49.90MPa으로 측정되었다. 반면 장기강도의 경우 OPC의 압축강도가 G-18의 압축강도를 역전하는 것으로 나타났으며 이는 일반적으로 OPC와 비교하여 고로슬래

그가 초기강도에 대한 장기강도의 증가율이 크다는 것과 상이한 결과이다. 이는 AAS 콘크리트의 초기 알칼리화에 따라 재령 28일에 이미 포졸란반응이 모두 일어났기 때문인 것으로 추측된다.

Figure 4는 압축강도 시험과 더불어 측정된 탄성계수를 나타낸 것이다. 28일 기준으로 OPC, G-13, G-18의 탄성계수는 각각 34.43 GPa, 28.60 GPa, 33.39 GPa로 측정되었으며 이를 기존 규준식(ACI 313R-08, CEB-FIB)에 따른 계산값과 비교하였다. 그 결과 Table 6와 같이 ACI 313R-08과는 유사한 반면 CEB-FIB 예측모델의 경우에는 15~30% 낮은 결과 값을 보였다. 이는 예측모델을 구성하는 고유한 계수들의 차이에서 기인한다고 사료된다.

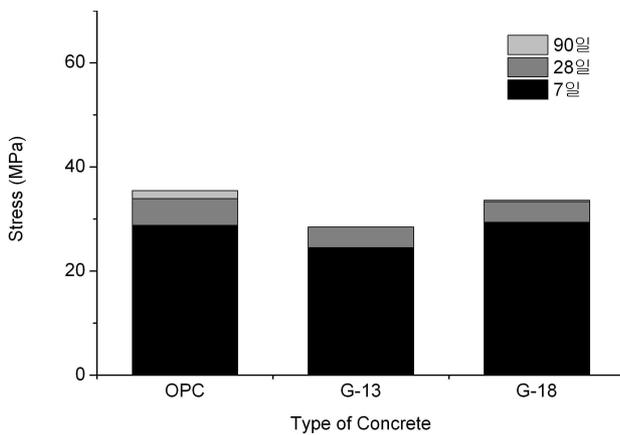


Figure 3. Result of compressive strength test

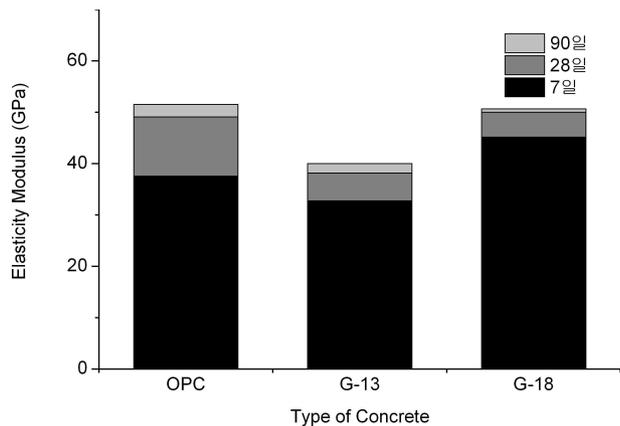


Figure 4. Result of elastic modulus test

4.2 크리프 특성

Table 8을 Figure 5, 6, 7의 크리프 시험결과를 ACI

209R-92, CEB-FIP(1990) 예측모델 식에 적용하여 비선형 회귀분석을 실시한 각 배합별 결과를 비교정리한 것이다. 전체적으로 크리프 시험결과는 크리프 계수 G-18 (2.07) > OPC(1.98) > G-13(1.34)의 순으로 G-18이 가장 많은 변형이 일어난 것으로 측정되었으며, 극한 특정 크리프는 OPC, G-13, G-18 각각 $-677.07 \mu\text{m}/\text{MPa}\cdot\text{m}$, $-787.78 \mu\text{m}/\text{MPa}\cdot\text{m}$, $-729.43 \mu\text{m}/\text{MPa}\cdot\text{m}$ 로 측정되었다. 이는 다량의 알칼리 활성화제 첨가로 인해 급격히 발생한 포졸란 반응에 의한 수화열 상승으로 미세균열 등이 발생한 것에서 기인한 것으로 생각된다. 또한, 실험결과를 ACI 209R-92, CEB-FIP(1990) 예측모델의 식으로 산정한 크리프 계수값의 경우 ACI-209R-92 예측모델이 CEB-FIP(1990) 예측모델보다 다소 높은 것으로 나타났으나 모두 결정계수 0.95 이상으로 높은 결정계수를 가지는 것으로 확인되었다.

이를 통해 도출한 극한 크리프계수 값(ϕ_u)과 극한 특정 크리프 값($C(t, t_u)$)은 Figure 8에 나타내었다. G-13이 다른 두 공시체 보다 낮은 크리프 변형으로 측정되었지만 변형과 단위응력의 개념이 적용되는 크리프 계수와 특정 크리프는 실질적으로 가장 낮은 값을 나타내었다.

Table 7. Contrast of result of elastic modulus test and normative values (28 day)

	F28 (Mpa)	E28 (Gpa)	Norms	Normative values (Gpa)	Compared to the norms (%)
OPC	49.43	34.43	ACI 318M-08	33.05	104.22%
			CEB-FIB	38.50	89.45%
G-13	38.25	28.60	ACI 318M-08	29.07	98.39%
			CEB-FIB	35.82	79.84%
G-18	49.90	33.39	ACI 318M-08	33.20	100.58%
			CEB-FIB	38.61	86.50%

Table 8. Regression analysis of creep test

	ACI 209R-92			CEB-FIP(1990)		
	ϕ_u	$C(t, t_u)$ ($\mu\text{m}/\text{MPa}\cdot\text{m}$)	C.D	ϕ_u	$C(t, t_u)$ ($\mu\text{m}/\text{MPa}\cdot\text{m}$)	C.D
OPC	2.033	-694.30	0.986	1.932	-659.83	0.955
G-13	2.296	-807.63	0.996	2.183	-767.83	0.972
G-18	2.126	-747.85	0.991	2.021	-711.01	0.968

* C.D : coefficient of determination

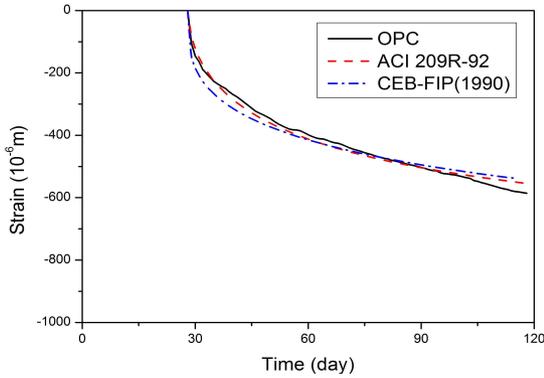


Figure 5. OPC creep regression analysis

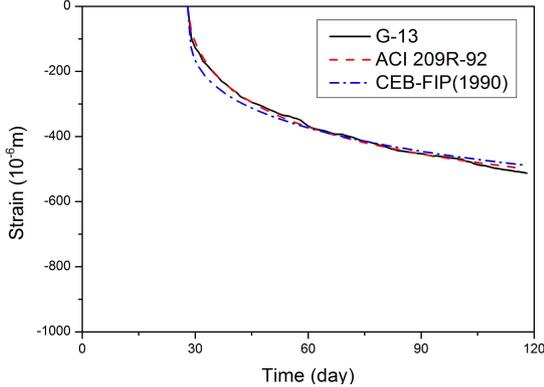


Figure 6. G-13 creep regression analysis

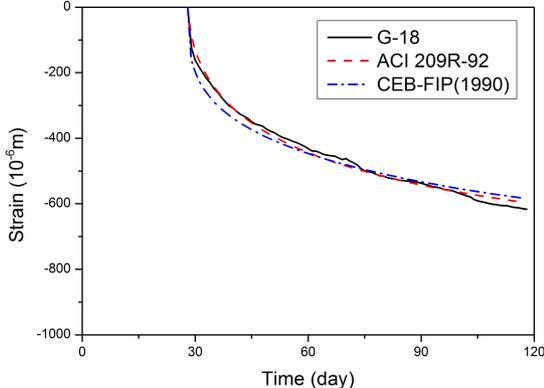


Figure 7. G-18 creep regression analysis

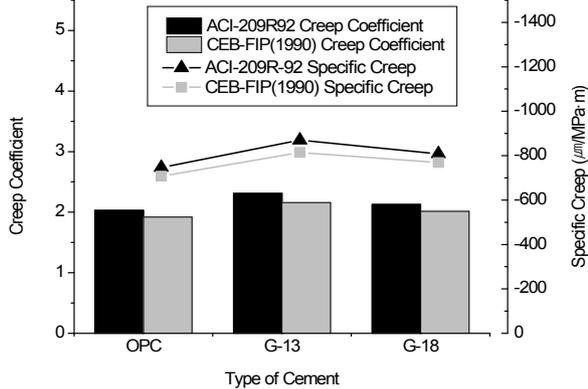


Figure 8. Creep coefficient and extreme specific creep

Table 9. Result of drying shrinkage test regression analysis

	ACI 209R-92		CEB-FIP(1990)	
	$\epsilon_{sh,u}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	C.D	$\epsilon_{sh,u}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	C.D
OPC	-654.20	0.954	-800.47	0.996
G-13	-854.40	0.980	-1044.31	0.994
G-18	-1057.91	0.975	-1294.39	0.989

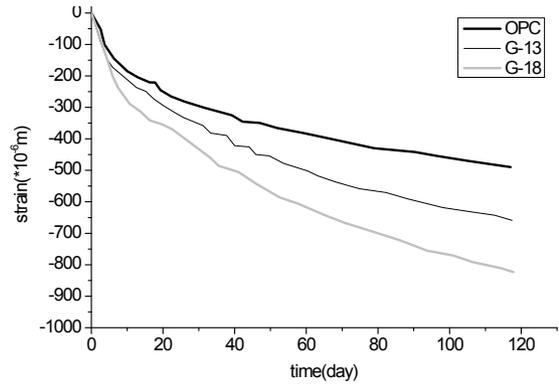


Figure 9. Result of drying shrinkage test

4.3 건조수축 특성

Figure 9는 다이얼 게이지로 측정된 건조수축 시험결과를 나타낸 것으로 G-18(-1176.15 $\mu\text{m}/\text{MPa}\cdot\text{m}$)>G-13(-949.36 $\mu\text{m}/\text{MPa}\cdot\text{m}$)>OPC(-727.34 $\mu\text{m}/\text{MPa}\cdot\text{m}$) 순으로 측정되었다. 측정된 데이터를 ACI 209R-92, CEB-FIP (1990) 예측모델의 식에 적용하여 극한 건조수축 변형률($\epsilon_{sh,u}$)을 측정된 결과 두 예측모델 모두 G-18이 OPC보다 약 62%높은 것으로 측정되었으며, G-13보다는 약 24% 높은 것으로 측정되었다. CEB-FIP(1990) 예측 모델은 상관도 0.98 이상으로 가장 높은 값을 나타내었으며 이를 Table 9에 나타내었다. 또, 각 배합별 데이터 값과 예측모델 계산값을 비교하여 Figure 10, 11, 12에 나타내었다.

4.4 시차 열중량 분석(TG/DTA)

Figure 13에 G-13과 G-18의 시차 열 중량 분석 그래프를 나타내었다. 여기서 좌측 y축에 DTA(μV)값으로 AAS 페이스트의 온도변화에 따른 전기적 화학반응을 피크를 통해 확인할 수 있는 값을 나타냈으며, 우측 y축에 온도변화에 따른 중량 감소율을 나타내었다. 탄산화 된 C-S-H의 생성물은 이산화규소를 주성분으로 하는 실리카 겔로써 약 500~650 $^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 이산화규소의 화학적 결합수가 탈수되어 중량변화를 일으킨다. 이러한 메커니즘을 토대로

계산된 실리카 겔의 양은 AAS 페이스트에서 생성된 C-S-H의 양과 비례한다. 실험결과 500~650°C에서의 중량감소율이 G-13은 10.05%, G-18은 12.97%로 G-18이 G-13에 비해 약 2.92% 많은 중량감소율을 가지는 것으로 측정되었다. 이에 따라 압축강도와 탄성계수 역시 G-18보다 G-13이 높게 측정된 것으로 사료되며 낮은 탄성계수를 가지는 G-13의 크리프 계수가 G-18보다 낮게 측정된 것으로 판단된다.

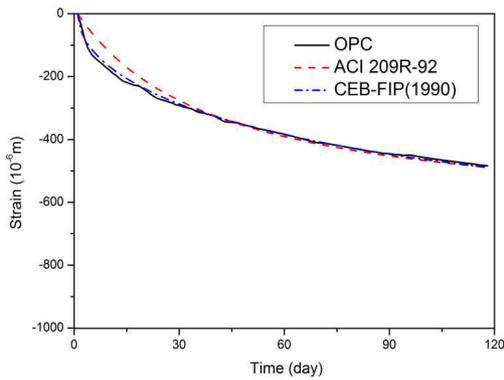


Figure 10. OPC dry shrinkage regression analysis using the codes

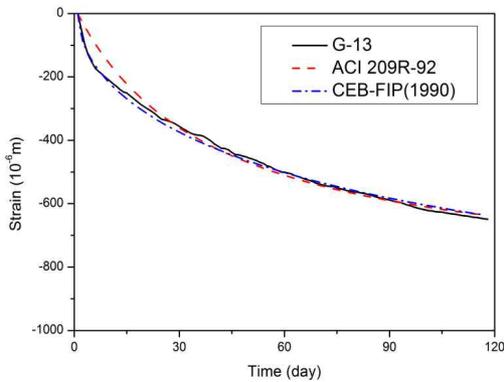


Figure 11. G-13 dry shrinkage regression analysis using the codes

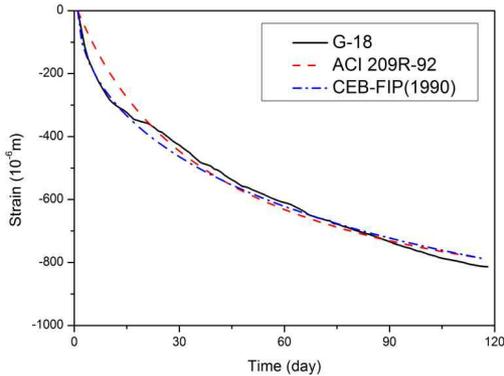


Figure 12. G-18 dry shrinkage regression analysis using the codes

4.5 미세구조 화상 분석(SEM)

Figure 14는 시험체의 SEM 촬영 사진들이며 OPC는 Figure 16(d)에서 표면이 미세구조의 균열이 없는 것을 확인하였지만 G-13과 G-18은 Figure 16(e)와 Figure 16(f)는 미세균열이 발생하였으며 그 균열정도는 G-18에서 더 두드러지게 나타났다. 이는 다량의 알칼리 활성화제 첨가로 인해 급격한 수화열의 상승으로 인한 균열이라고 판단된다.

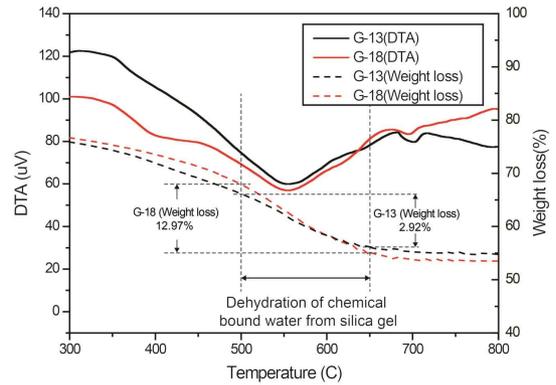


Figure 13. TG/DTA graph

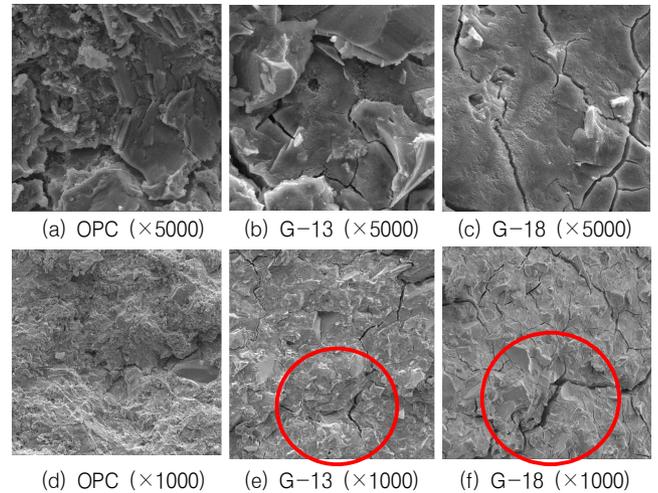


Figure 14. SEM Images of test specimen

5. 결 론

본 연구에서는 AAS 콘크리트의 시간 의존적 변형(건조 수축, 크리프) 특성에 관해 분석하였다. 공시체 제작에 사용된 알칼리 활성화제는 선행 연구사례들을 검토 및 참조하여 뛰어난 강도발현을 구현할 수 있는 규산나트륨 분말로 선정

하였다. 또한 활성화제 첨가량에 따라 AAS 콘크리트의 시간의존적 변형(건조수축, 크리프)을 확인하고자 첨가량을 13%, 18%로 하여 각각의 공시체를 제작, 시험에 사용하였다. 슬럼프 및 공기량 시험, 압축강도 및 탄성계수 시험, 크리프 시험 및 건조수축 시험, SEM 및 시차열중량 분석 등을 통해 도출된 결과를 일반적인 OPC를 기준으로 비교하였다. 도출된 결과를 정리한 내용은 다음과 같다.

- 1) 모든 배합조건에서 목표압축강도 50MPa에 오차율 1% 이내로 만족하는 것으로 나타났으며, 특히 G-18의 경우 초기 강도가 낮은 고로슬래그를 치환율 100%로 활용하였음에도 불구하고 포졸란반응이 가속화 되어 초기강도가 OPC보다 높은 값을 나타내었다.
- 2) 시간의존적 변형시험 결과 크리프는 G-18>OPC>G-13, 건조수축 G-18>G-13>OPC로 G-18이 가장 큰 변형을 가지는 것으로 나타났으며, 이는 SEM 분석에서 나타듯이 다량의 알칼리 활성화제 첨가량에 따른 높은 수화열 발생에 의해 미세한 온도균열이 증가하였기 때문인 것으로 추정된다.
- 3) 또한 시차 열중량 분석결과로 G-18이 G-13보다 C-S-H 생성량이 약 2.92% 높게 측정되었고, 이로 인해 G-18이 G-13보다 높은 압축강도 및 탄성계수를 나타낸 것으로 판단된다.

요 약

지속적으로 증가하고 있는 이산화탄소 배출량을 저감시키기 위한 국제사회의 노력과 더불어 건설업계, 특히 시멘트 산업에서 알칼리 활성화제를 첨가한 알칼리 활성화 슬래그를 활용하고자 하는 연구가 다수 수행되고 있다. 연구결과로 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 고강도화 가능성이 밝혀지면서 초고층 구조물에 대한 적용가능성이 검토되고 있다. 그러나 초고층 구조물의 부재로 사용되기 위해서는 시간의존 변형 거동에 관한 연구가 중요함에도 불구하고 굉장히 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 OPC와 AAS를 이용한 콘크리트 시험체를 제작하여 크리프와 건조수축을 측정하고 도출된 결과값을 ACI 209R-92, CEB-FIP(1990)의 예측모델을 이용한 비선형 회귀분석을 통해 시간의존 변형 특성을 분석하였다. 각각의 열분석 및 SEM촬영을 통해 변형 발생 메커니즘을 규명하고자 하였다.

키워드 : 알칼리 활성화 슬래그, 시간의존성 변형, 크리프, 건조수축

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MEST) (No. NRF-2014R1A1A2058264)

This research was supported by Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs through grant F02 of Construction Technology Innovation Program.

References

1. Friedlingstein P, Andrew RM, Rogelj J, Peters GP, Canadell JG, Knutti R, Luderer G, Raupach MR, Schaeffer M, Van Vuuren DP, Le Quéré C. Persistent growth of CO₂ emissions and implications for reaching climate targets. 2014 Sep;21(7):209-15.
2. Yang KH, Oh SJ, Song JG. Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag-Based Concrete Using Lightweight Aggregates, Journal of the Korea Concrete Institute, 2008 Jun;20(3):405-12.
3. Song GI, Sin GS, Gong MH, Song JG. Basic Research of Self Compacting Concrete Using Alkali-Activated Slag Binder, Journal of the Korea Concrete Institute, 2013 Dec;25(6):657-65.
4. Lee KM, Song JG. Evaluation of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Using Alkali Activated Slag Concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, 2015 Jun;27(3):307-13.
5. Oh SH. Study on compressive strength and flowing characteristics of alkali-activated mortar containing blast furnace slag [dissertation]. [Seoul (Korea)], Sungkyunkwan University; 2011. 57 p.
6. Yang WH. Properties of Alkali-Activated Portland Blast-furnace Slag Cement Concrete : Using Sodium Sulfate and Light-burnt Dolomite as Activators [dissertation]. [Seoul (Korea)], KonKuk University; 2014. 98 p.