

석고가 첨가된 슬래그 기반 알카리활성 모르터의 압축강도 및 건조수축 변형률

Compressive Strength and Shrinkage Strain of Slag-Based Alkali-Activated Mortar with Gypsum

양근혁*

Yang, Keun-Hyeok

심재일**

Sin, Jae-Il

Abstract

Twelve mortars were mixed and tested to explore the effect of gypsum on the compressive strength development and shrinkage strain of alkali-activated mortars. Powder typed sodium silicate and ground granulated blast-furnace slag were employed as alkaline activator and source material, respectively, to produce cementless mortar. The main variables investigated were alkali quality coefficient combining the concentration of activator and main compositions in source material, and the adding amount of gypsum ranged between 1 and 5% with respect to the weight of binder. Initial flow, compressive strength development, modulus of rupture, and shrinkage strain behavior of mortar specimens were measured. In addition, the hydration production of alkali-activated pastes with gypsum was traced using X-ray diffraction and energy-dispersive X-ray analysis combined with scanning electron microscope image. Test results showed that the initial flow of slag-based alkali-activated mortar was little influenced by the adding amount of gypsum. On the other hand, the effect of gypsum on the compressive strength of mortar specimens was dependent on the alkali quality coefficient, indicating that the compressive strength increased with the increase of the adding amount of gypsum until a certain limit, beyond which the strength decreased slowly. Shrinkage strain of mortar tested was little influenced by the adding amount of gypsum because no ettringite as hydration product was generated. However, the adding of gypsum had a beneficial effect on reducing the microcrack in the alkali-activated mortar.

키워드 : 알카리활성 모르터, 고로슬래그, 석고, 압축강도, 건조수축

Keywords : Alkali-activated mortar, Granulated blast-furnace slag, Gypsum, Compressive strength, Shrinkage

1. 서론

2007년도 시드니 선언 및 유엔 기후변화협약 총회로부터 모든 나라는 2013년부터 온실가스 방출 양을 저감해야만 하며 2030년까지 현재 수준의 25%를 감축해야만 한다. 이에 따라 콘크리트 산업에서도 이산화탄소 방출 양이 전 세계의 약 7%¹⁾에 해당하는 시멘트 사용량을 줄이기 위하여 고로슬래그나 플라이 애쉬가 치환된 시멘트의 사용이 증가하고 있다. 시멘트 사용 양을 줄이기 위한 더 적극적인 방안으로서 1960년대 이후부터 연구가 시작된 알카리 활성 결합재를 들 수 있다²⁾. 양근혁 등은 규산나트륨에 의해 활성화된 고로슬래그 또는 플라이 애쉬에 기반한 무 시멘트 결합재의 활용 가능성을 보였다³⁾. 특히 분말형 활성화제를 사용함으로써 다소 지연된 경화 및 취금상의 용이함으로 현장적용성이 높음을 보였다.

일반적으로 이수석고 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)는 시멘트의 응결시간을 조절할 목적으로 크링카 분쇄 시에 첨가된다⁴⁾. 또한 석고의 첨가는 경화 시멘트 페이스트에 에트링가이트를 생성시켜 체적의 증가를 통한 건조수축 균열제어에 효과적이다⁴⁾. 하지만 석

고의 첨가는 경화 페이스트에 팽창균열을 발생시키거나 노화를 가져올 수 있으므로 경화 페이스트의 최대 강도와 최소 수축량을 부여하는 최적 첨가량이 존재한다.

알카리활성 결합재를 이용한 모르터 및 콘크리트의 건조수축은 원재료 (source material)의 화학적 조성, 활성화제의 종류 및 첨가량, 물-결합재비, 양생온도 및 습도 등에 의해 영향을 받는다³⁾. 이에 따라 알카리활성 결합재를 이용한 모르터 및 콘크리트의 건조수축 특성에 대해서는 아직까지 논란이 많다. 본 연구에서는 석고의 첨가가 알카리활성 모르터의 유동성, 압축강도 발현, 파괴계수 및 건조수축에 미치는 영향이 평가되었다. 이를 위해 고로슬래그 기반 알카리활성 모르터 12배합이 실험되었다. 석고가 첨가된 알카리활성 모르터에서 에트링가이트의 생성이 XRF 및 EDX 분석에 의해 확인되었다.

2. 실험

2.1 배합상세

원재료와 알카리활성화제로서 각각 고로슬래그와 분말형 규산나트륨이 이용되었다. 양근혁 등³⁾은 알카리활성 모르터의 유

* 목포대학교 건축공학전공, 조교수

** 목포대학교 대학원 석사과정

동성과 압축강도는 원재료와 활성화제의 화학적 조성 및 활성화제 첨가량을 고려하는 알카리 품질계수 (QA)에 의해 결정될 수 있음을 보였다. 또한 고로슬래그 기반 알카리활성 모르터에서 알카리품질계수가 0.013과 0.024일 때 각각 20 MPa 수준의 보통강도와 50 MPa 수준의 고강도 모르터를 얻을 수 있음을 보였다. 따라서 본 연구에서는 표 1에 나타낸 바와 같이 알카리품질계수가 0.0131과 0.0245인 두 그룹으로 구별되었으며, 이에 따라 규산나트륨이 첨가되었다. 석고의 첨가는 슬래그와 규산나트륨으로 구성된 결합재 양 대비 5%까지 첨가되었다. 모든 모르터에서 물-결합재비는 50%이며, 잔골재-결합재비는 3.0이다.

2.2 재료특성

원재료로 이용된 고로슬래그의 분말도와 비중은 각각 4204 cm³/g과 2.9이었다. XRF 분석으로부터 얻은 고로슬래그와 규산나트륨의 화학적 조성이 표 2에 주어졌다. 고로슬래그의 주요 성분은 칼슘산화물 (CaO)과 실리온 산 (SiO₂)이다. 규산나트륨의 물비는 표 2에 나타낸 것처럼 약 0.9이며, 최대 입경크기는 약 0.5 mm이다. 석고의 비중과 최대입경은 각각 2.4와 150 μm이다. 최대직경 5 mm, 비중이 2.54, 그리고 조립률이 2.97인 천연 모래가 잔골재로서 이용되었다.

2.3 배합 및 측정요소

고로슬래그, 활성화제 및 잔골재가 30초간 건비빔되었으며, 물이 투입된 후 30초간 습비빔되었다. 비빔직후 플로우가 측정되었다. 압축강도는 50×50×50 mm 몰드를 이용하여 재령 1, 3, 7, 28, 56 및 91일에서 측정되었다. 모르터의 파괴계수는 재령 28일에서 150×150×550 mm 몰드를 이용하여 측정하였다. 플로우, 압축강도 및 파괴계수의 실험은 한국산업규격5)에서 제시된 절차를 따랐다. 건조수축 변형률은 75×100×450 mm의 몰드에 매립된 전기저항계이지 (wire strain gage)를 이용하여 측정되었다.

모든 시험체는 양생온도 21±1℃, 상대습도 75±5%의 양생실에서 대기양생되었다. 몰드는 재령 1일에서 제거되었으며 건조수축은 몰드의 제거와 함께 데이터로거 (TDS 303)에 자동저장 되었다.

표 1. 배합상세

Specimen*	QA	RG* (%)	Unit weight# (kg/m ³)				
			GGBS	S.S	W	S	GS
N0	0.013	0	457	29	243	1459	0
N1.0		1					4.6
N1.75		1.75					8.0
N2.5		2.5					11.4
N3.75		3.75					17.2
N5.0		5					22.9
H0	0.024	0	410	67	239	1432	0
H1.0		1					4.1
H1.75		1.75					7.2
H2.5		2.5					10.3
H3.75		3.75					15.4
H5.0		5					20.5

* RG : 결합재양에 대한 석고양의 비이다.

GGBS, S.S, W, S 및 GS는 각각 고로슬래그, 규산나트륨, 물, 잔골재 및 석고를 의미한다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 초기 플로우

표 3에는 알카리활성 슬래그 모르터들의 초기플로우 및 재령에 따른 압축강도를 나타내었다. 슬래그 기반 알카리활성 모르터의 초기 플로우는 알카리품질계수가 높을수록 약간 낮았다. 하지만 석고의 첨가량이 실험된 모르터의 초기 플로우에 미치는 영향은 표 3에 나타낸바와 같이 거의 나타나지 않았다.

3.2 28일 압축강도

그림 1에는 슬래그 기반 알카리활성 모르터의 28일 압축강도(fck)에 대한 석고 첨가율의 영향을 나타내었다. 실험된 모르터의 28일 압축강도는 N 시리즈에서는 20 MPa 수준을, 그리고 H 시리즈에서는 50 MPa 수준을 나타내었다. 석고 첨가에 따른 알카리활성 모르터의 압축강도 변화는 알카리품질계수에 의해 영향을 받았다. 알카리품질계수가 0.013일 때 슬래그기반 알카리활성 모르터의 28일 압축강도는 석고 첨가율이 3.75%일 때까지는 석고첨가율의 증가와 함께 증가하였지만 석고 첨가율이 5%에서는 감소하였다. 반면 알카리품질계수가 0.024일 때에는 석고첨가율이 1%를 넘으면 석고첨가율 증가와 함께 압축강도는 감소하였다. 28일 압축강도를 고려할 때 석고의 최적 첨가율은 알카리 품질계수가 0.013과 0.024일 때 각각 3.75%와 1%로 나타났다.

표 2. 사용재료의 화학적 조성 (%)

Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	LOI*
고로슬래그	31.55	13.79	0.53	44.38	5.2	0.18	0.98	2.79	0.6
규산나트륨	45	-	-	-	-	50.2	-	-	4.8

* Loss on ignition.

표 3. 실험결과

Specimen	Q _A	R _G (%)	Flow (mm)	Compressive strength (MPa)							
				1일	3일	7일	28일	56일	91일		
N0	0.013	0	217	5.6	12.1	15.0	20.3	21.4	25.9		
N1.0		1	194	4.5	11.6	15.7	22.2	23.2	28.0		
N1.75		1.75	194	3.8	12.1	18.1	25.2	25.4	28.0		
N2.5		2.5	197	3.4	12.3	18.5	24.5	26.4	28.4		
N3.75		3.75	195	4.9	15.7	20.9	27.5	30.0	30.5		
N5.0		5	195	5.2	12.7	17.7	25.2	27.5	28.2		
H0	0.024	0	200	16.2	38.3	44.9	51.5	54.6	65.4		
H1.0		1	190	17.5	36.2	46.9	53.4	56.7	65.0		
H1.75		1.75	192	19.2	34.9	45.9	51.6	55.7	66.3		
H2.5		2.5	192	18.8	35.8	44.0	49.2	54.6	65.9		
H3.75		3.75	195	16.8	31.3	38.0	50.4	52.7	63.3		
H5.0		5	190	18.5	34.3	38.8	49.5	51.9	61.8		

* 시험체명에서 처음 문자 N과 H는 각각 알카리품질계수(QA)가 0.013과 0.024를 의미하며 두 번째 숫자는 석고의 첨가율(RG)을 의미한다. 예를 들어 N1은 알카리품질계수가 0.013, 석고의 첨가율이 1%인 고로슬래그 기반 알카리활성 모르터를 의미한다.

3.3 압축강도 발현

그림 2에는 슬래그 기반 알카리활성 모르터의 압축강도 발현율을 나타내었다. 압축강도 발현율인 세로축은 각 재령에서의 압축강도(fck(t))를 28일 압축강도로 무차원화하였다. 슬래그 기반 알카리활성 모르터의 압축강도 발현은 포물선 형상으로

서 재령 28일 이후 강도발현 기울기는 완만하였다. 초기강도발현 및 장기강도 발현은 N 시리즈에서보다는 H 시리즈에서 높았다. 이는 알카리품질계수가 높을수록 수화반응속도가 빠르고 수화생성물이 치밀하기 때문이다⁶⁾. 게다가 석고의 첨가량이 증가할수록 초기 재령에서의 강도는 낮았지만 장기재령에서의 강도발현에는 거의 영향을 미치지 않았다.

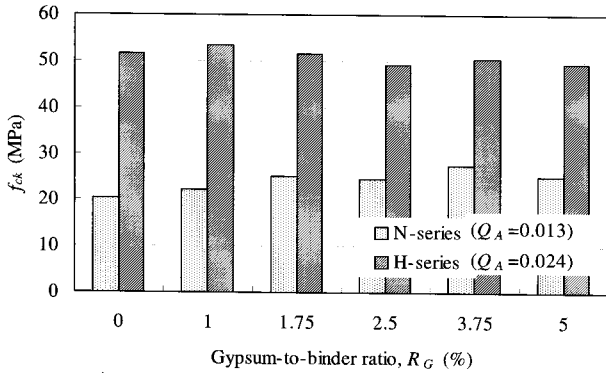
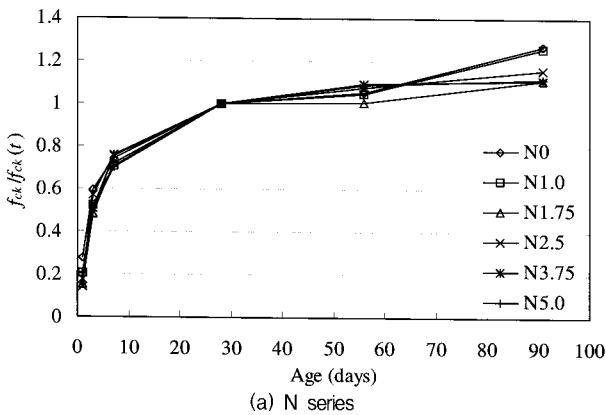
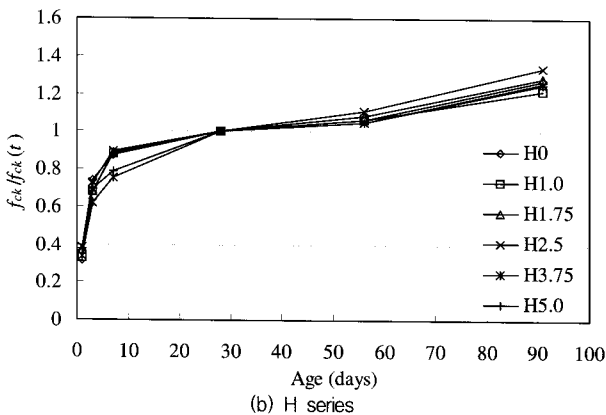


그림 1. 28일 압축강도에 대한 석고 첨가량의 영향



(a) N series



(b) H series

그림 2. 알카리활성 모르터의 압축강도 발현

ACI 209)는 재령에 따른 콘크리트의 압축강도를 다음 식과 같이 제시하고 있다.

$$f_{ck}(t) = \frac{t}{A_1 + B_1 t} f_{ck} \quad (1)$$

여기서 $f_{ck}(t)$ 는 재령 (일)에서 압축강도를 나타낸다. 상수 A_1 과 B_1 는 각각 초기재령과 장기재령에서의 강도발현과 관계되는 상수이다. 즉 A_1 이 낮을수록 초기 재령에서 강도발현

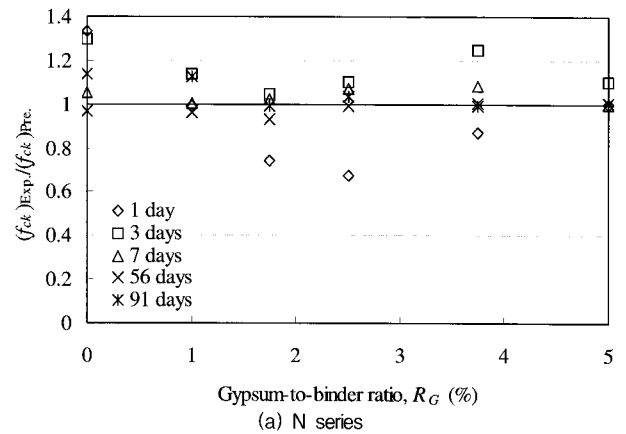
이 높으며, B_1 이 낮을수록 장기재령에서 강도발현이 높은 것을 의미한다. ACI 209는 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트에서 A_1 과 B_1 을 각각 4.0과 0.85로 제시하고 있다.

반면 EC 28)는 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 압축강도 발현을 다음 식과 같이 제시하고 있다.

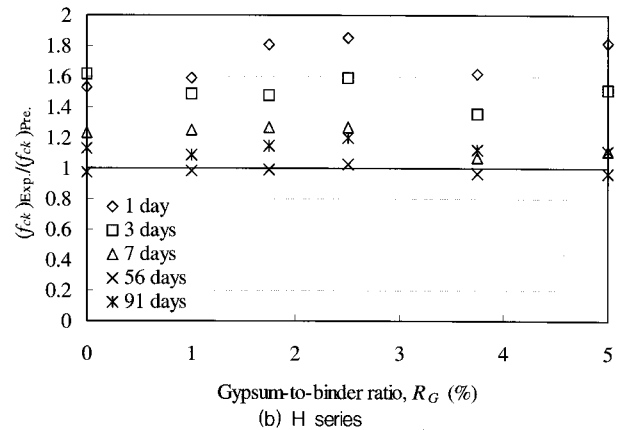
$$f_{ck}(t) = \text{Exp} \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^a \right] \right\} f_{ck} \quad (2)$$

보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트에 대해 s 와 a 는 각각 0.25와 0.5이다. 상수 a 는 초기재령과 장기재령에서의 강도발현을 결정한다. 즉 a 의 값이 클수록 재령 28일 이전의 압축강도발현은 낮게 있다.

그림 3과 그림 4에는 ACI 209 및 EC 2에 의해 예측된 알카리활성 모르터의 압축강도와 실험결과의 비교를 각각 나타내었다. 슬래그 기반 알카리활성 모르터의 압축강도는 N 시리즈의 재령 1일일 때를 제외하고는 ACI 209에 의한 예측값보다 컸다. 특히 H 시리즈에서 슬래그 기반 알카리활성 모르터의 압축강도는 석고 첨가율에 관계없이 ACI 209 예측값에 비해 평균 1.5 배 이상 크며 특히 초기재령에서 매우 안전측에 있었다. 반면 EC 2 기준에 의해 예측된 알카리활성 모르터의 압축강도는 N 시리즈일때에는 대부분 실험값에 비해 크지만 H 시리즈에서는 실험결과와 비슷한 수준이었다. 이와 같이 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 실험결과에 근거한 압축강도 발현 평가 모델을 알카리활성 모르터의 배합조건에 따라 실험결과와 큰 차이를 보이므로 알카리활성 모르터의 압축강도 발현을 평가할 수 있는 모델확립이 필요하다.



(a) N series



(b) H series

그림 3. 압축강도에 대한 ACI 209 기준과의 비교

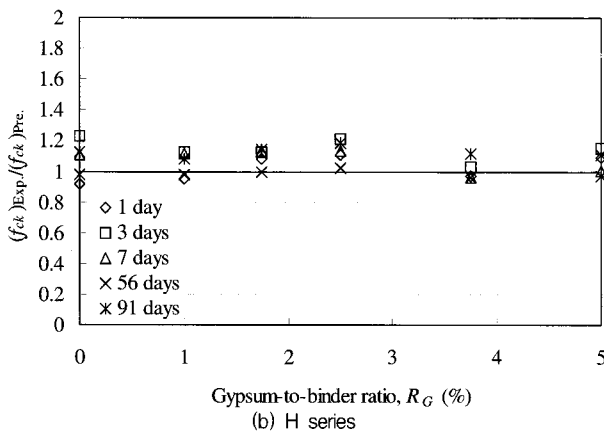
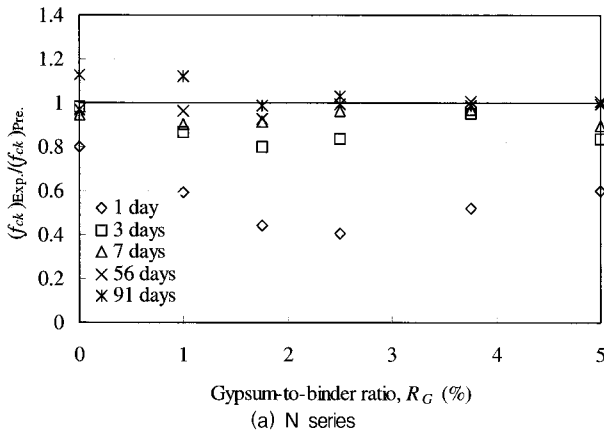


그림 4. 압축강도에 대한 EC 2 기준과의 비교

3.4 파괴계수

그림 5에는 슬래그 기반 알카리활성 모르터의 압축강도 루트승에 대한 파괴계수의 비 ($f_r/\sqrt{f_{ck}}$)와 석고 첨가율의 관계를 나타내었다. 슬래그 기반 알카리활성 모르터의 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$ 는 석고첨가율이 약 1.75~2.5%일 때 가장 높았지만 석고 첨가율에 따른 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$ 의 변화는 크지 않았다. ACI 318-059)는 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 파괴계수를 $0.62\sqrt{f_{ck}}$ 로 제시하고 있다. 슬래그 기반 알카리활성 모르터의 파괴계수는 알카리품질계수 및 석고 첨가율에 관계없이 ACI 318-05에서 제시하는 값보다 컸다.

3.5 건조수축 변형률

그림 6에는 슬래그 기반 알카리활성 모르터의 건조수축 변형률 거동을 나타내었다. 석고가 첨가된 알카리활성 모르터는 비록 재령 1일에서 팽창 변형률을 보이지만 재령의 증가와 함께 건조수축 변형률이 증가하였다. 재령 91일 건조수축 변형률의 약 70% 이상이 재령 20일에서 발생하며 재령 28일 이후 건조수축 증가기울기는 완만하였다. 재령 28일 이후 건조수축 변형률은 일반적으로 알카리품질계수가 0.013인 N 시리즈보다는 0.024인 H 시리즈에서 높게 나타났다. 비록 알카리활성 모르터의 건조수축에 대해서는 아직도 논란의 여지가 많지만 알카리활성화제의 농도 및 첨가량이 높을수록 건조수축 변형률이 증가하였다. 반면 석고가 건조수축 변형률에 미치는 영향은 뚜렷

하게 나타나지 않았다. 비록 보통 포틀랜드 시멘트에서는 석고가 증가할수록 건조수축 변형률이 작지만 알카리활성 모르터의 건조수축 제어에 석고는 효과적이지 않았다.

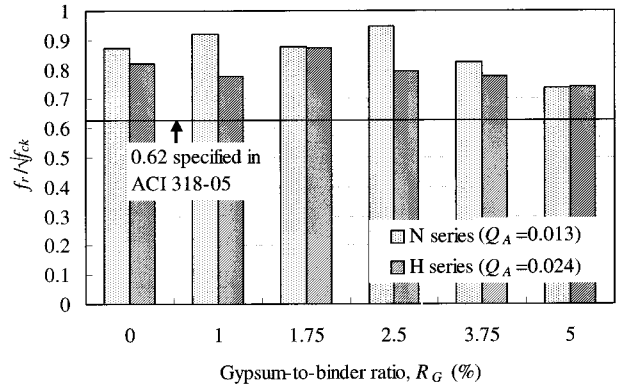


그림 5. 석고 첨가율과 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$ 의 관계

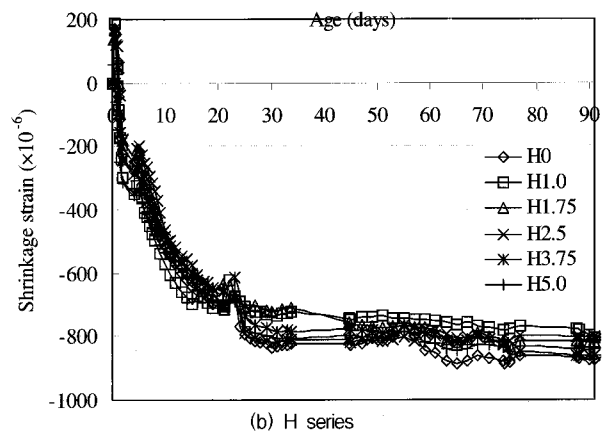
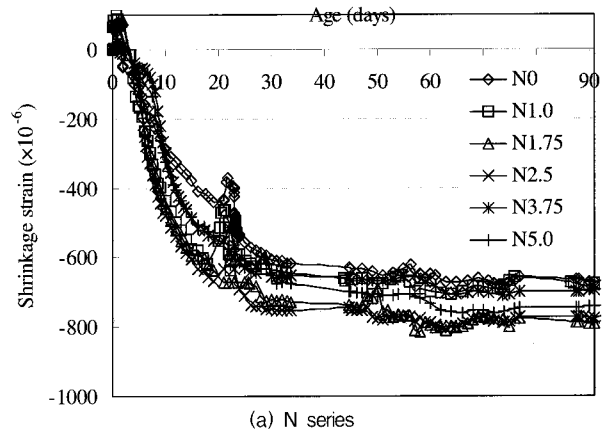


그림 6. 건조수축 변형률

3.6 수화생성물

그림 7은 알칼리 품질계수가 0.024인 H 시리즈에서의 석고 첨가율의 변화에 따른 수화생성물을 나타내었다. 알칼리활성 모르터의 수화생성물은 크게 4가지로 나타났다. 석고가 첨가되지 않은 알칼리활성 모르터의 수화생성물은 Quartz (SiO_2)가 대부분이었지만 석고가 첨가된 경우 Augite (CaFeO_6Si), Fayalite ($\text{Fe}_2\text{O}_4\text{S}$), Gismondine ($\text{Al}_2\text{CaH}_8\text{O}_{12}\text{Si}_2$) 등이 추가로 확인되었다. 그러나 석고가 첨가된 경화 시멘트 페이스트에서 확인되었던

에트링가이트는 생성되지 않았다. 에트링가이트 형성을 위해서는 알루미늄산 (Al_2O_3)의 첨가가 필요하다.

그림 8은 알칼리 품질계수가 0.024인 H-Setise에서의 석고 첨가율 변화에 내부 micro-structure를 나타내었다. 석고가 첨가되지 않은 알칼리활성 모르터의 내부에는 많은 균열을 발견할 수 있었다. 그러나 석고 첨가율이 2.5, 5%로 증가할수록 내부 균열이 감소하였다. 특히 2.5% 이상에서는 내부 균열의 분포가 거의 비슷하였다.

4. 결 론

석고가 알카리활성 모르터의 압축강도 발현 및 건조수축 제어에 미치는 영향을 파악하기 위해 12배합이 실험되었다. 무시멘트 결합재를 생산하기 위해 원재료와 알카리 활성화제로서 고로슬래그와 분말형 규산나트륨이 각각 선택되었다. 주요 변수는 알카리품질계수와 석고의 첨가량으로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 슬래그 기반 알카리활성 모르터의 초기 플로우는 알카리 품질계수가 높을수록 약간 낮았지만 석고의 첨가량에 의해서는 거의 영향을 받지 않았다.

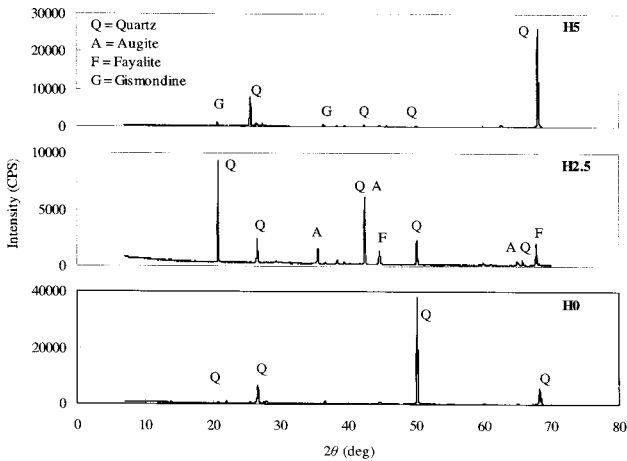
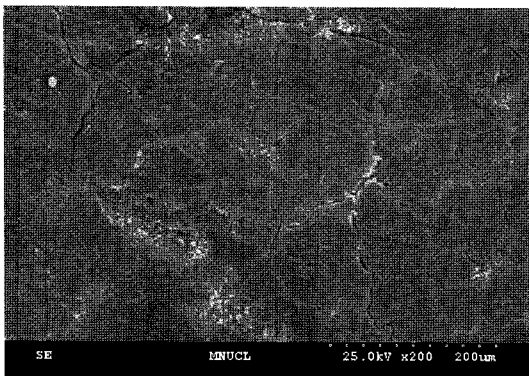
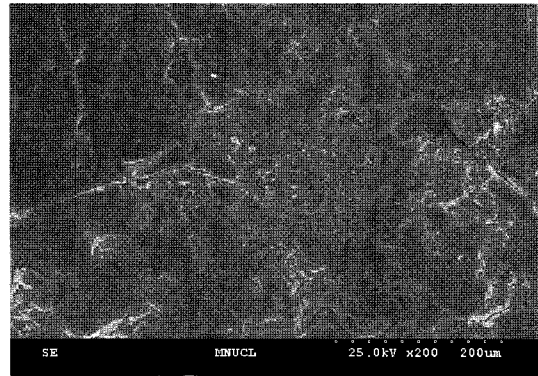


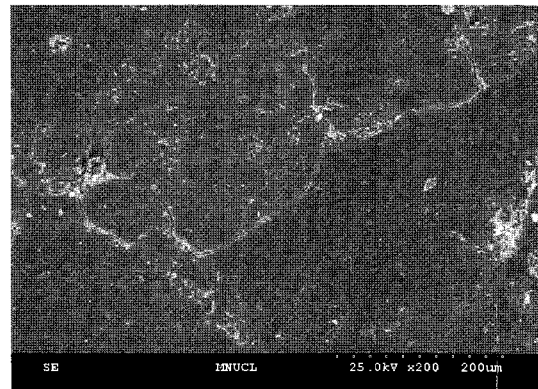
그림 7. 석고 첨가율에 따른 수화생성물 (XRD)



(a) 석고 첨가율 0% (RG = 0)



(b) 석고 첨가율 2.5% (RG = 2.5)



(c) 석고 첨가율 5% (RG = 5)

그림 8. 내부 micro-structure (SEM)

- 2) 슬래그 기반 알카리활성 모르터의 28일 압축강도를 고려할 때 석고의 최적 첨가율은 알카리 품질계수가 0.013과 0.024일 때 각각 3.75%와 1%로 나타났다.
- 3) 슬래그 기반 알카리활성 모르터의 압축강도 발현은 포물선 형상으로서 재령 28일 이후 강도발현 기울기는 완만하였으며, 석고의 첨가량이 증가할수록 초기 재령에서의 강도는 낮았지만 장기재령에서의 강도발현에는 거의 영향을 미치지 않았다.
- 4) 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 실험결과에 근거한 압축강도 발현 평가모델은 알카리활성 모르터의 배합조건에 따라 실험결과와 큰 차이를 보이므로 향후 알카리활성 모르터의 압축강도 발현을 평가할 수 있는 모델에 대한 연구가 필요하다.
- 5) 슬래그 기반 알카리활성 모르터의 파괴계수는 알카리품질계수 및 석고 첨가율에 관계없이 ACI 318-05에서 제시하는 값보다 컸다.
- 6) 보통 포틀랜드 시멘트에서는 석고가 증가할수록 에트링가이트의 생성으로 건조수축 변형률이 작지만 알카리활성 모르터에서는 에트링가이트의 생성이 확인되지 않았으며, 건조수축 제어에 석고는 효과적이지 않았다. 그러나 석고의 첨가로 인해 모르터 내부 균열은 감소하였다.

감사의 글

이 논문은 교육인적자원부 지방연구중심대학육성사업 (바이오하우징연구사업단) 및 국립문화재연구소 전통건축기술개발 연구사업의 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. 윤재환 역, 포틀랜드시멘트 및 콘크리트, 세진사, 1996.
2. 한국공업표준협회, 한국산업규격(KS) 기준, 2006.
3. ACI Committee 318: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05). American Concrete Institute, 2005.
4. ACI 209R-92, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures", ACI Manual of Concrete: Practice Part 1: Materials and General Properties of Concrete, 1994.
5. Malhotra, V. M., "Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology", Concrete International, V.24, No.7, 22 pp., 2002.
6. The European Standard EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2: Design of Concrete Structures, British Standards Institution, 2004.
7. Wang, S. D., Pu, X. C., Scrivener, K. L., and Pratt, P. L., "Alkali-Activated Slag Cement and Concrete: A Review of Properties and Problems", Advances in Cement Research, V. 7, No. 27, pp. 93-102, 1995.
8. Yang, K. H., and Song, J. K., "Workability Loss and Compressive Strength Development of Cementless Mortars Activated by Combination of Sodium Silicate and Sodium Hydroxide", Submitted for Publication to Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2007.
9. Yang, K. H., Song, J. K., Ashour, A. F., and Lee, E. T., "Properties of Cementless Mortar Activated by Sodium Silicate", Construction and Building Materials, doi:10 1016/J.conbuildmat. 2007.07.003., 2007.