

저온 소성한 MgO 분말을 함유한 플라이애시 콘크리트의 기본 물성

최슬우* · 장봉석** · 이광명***

Seul-Woo Choi*, Bong-Seok Jang**, Kwang-Myong Lee***

Fundamental Properties of Fly ash Concrete Containing Lightly Burnt MgO Powder

ABSTRACT

Although the lightly burnt MgO at 850 ~ 1000°C has expansibility, it does not lead to unsound concrete. The expansion of MgO could compensate for shrinkage of concrete for a long-term, because the hydration of MgO occurs at a slow pace. Recently, the study and application of mineral admixture such as fly ash and blast furnace slag have increased for the hydration heat reduction, durability improvement, and reducing CO₂ emission in the construction industry. Thus, it is necessary to research on the concrete that contains both a mineral admixture and MgO as an expansion agent. This study investigates fundamental properties of fly ash concrete with lightly burnt MgO through various experiments. The adiabatic temperature test results showed that the fly ash concrete with MgO of the 5% replacement ratio had the slower pace of the temperature rise and the lower final temperature than the fly ash concrete. The influences of MgO on long-term compressive strength varied depending on water-binder ratio, and the long-term length change test results indicated the expansion effects of the FA concrete containing MgO.

Keywords : MgO, FA Concrete, Compressive strength, Length change, Adiabatic temperature

초 록

850 ~ 1000°C 정도의 저온에서 소성한 MgO 분말을 적정량 치환한 콘크리트는 장기팽창성을 갖는다. 이러한 팽창성은 저온소성한 MgO 분말의 느린 수화반응을 통해 이루어지기 때문에 장기재령까지 수축을 보상하는 특성을 가진다. 최근 수화열 저감, 내구성 향상 등의 이유와 함께 건설 산업의 탄소저감을 위한 방안으로 플라이애시 및 고로슬래그 등과 같은 혼화재의 사용이 증가하고 있다. 따라서 저온소성한 MgO 분말을 팽창제로 사용하기 위해서는 이러한 혼화재와 MgO 분말을 함께 사용한 콘크리트의 특성 규명이 필요하다. 이 연구에서는 플라이애시 콘크리트에 저온소성한 MgO 분말을 치환한 콘크리트의 슬럼프, 공기량, 수화열뿐만 아니라 장기재령 압축강도 및 길이변화 등의 기본 물성을 실험을 통해 조사하였다. 단열온도 상승시험 결과, 5% 수준으로 MgO 분말을 치환한 콘크리트의 단열온도상승속도 및 최종온도가 플라이애시 콘크리트보다 다소 작게 나타났다. 또한 압축 강도 실험결과 물-결합재비에 따라 저온소성한 MgO 분말이 장기재령 압축강도에 미치는 영향이 다르게 나타났다. 장기적인 길이변화 실험 결과 저온소성한 MgO 분말을 치환한 콘크리트에서 큰 팽창효과를 확인할 수 있었다.

검색어 : 산화마그네슘(MgO), FA 콘크리트, 압축강도, 길이변화, 단열온도

* 정희원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (sinope16@skku.edu)

** 정희원 · 교신저자 · 한국수자원공사 K-water 연구원 책임연구원, 공학박사 (Corresponding Author · K-water · concrete@kwater.or.kr)

*** 정희원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수, 공학박사 (leekm79@skku.edu)

Received December 26 2012, Revised January 28 2013, Accepted March 7 2013

1. 서론

일반적으로 시멘트에 포함된 MgO 성분은 의도하지 않은 급격한 팽창을 유발하기 때문에 대부분의 규격에서 그 함유량을 제한하고 있다(KS L 5201, 2006; Du, C., 2005). 하지만 850~1000℃의 저온에서 소성한 MgO는 콘크리트에 장기 팽창성을 나타낸다고 알려져 있다(Du, C., 2005; Mo, L. 등, 2010). 저온 소성한 MgO는 느린 수화반응을 통해 장기재령에서도 그 팽창이 지속되는 특징이 있으며, MgO 분말 치환율과 양생온도를 통해 그 팽창량 및 팽창속도를 조절할 수 있다. 따라서 댐과 같이 장기재령까지 온도수축이 지속되는 매스콘크리트에 저온 소성한 MgO를 적용할 경우 효과적으로 수축을 보상할 수 있다(Mo, L. et al., 2010; Gao, P. et al., 2008; Jang et al., 2011).

최근 매스콘크리트 및 고강도 콘크리트가 널리 사용되면서 시멘트의 일부를 혼화재료로 치환한 콘크리트의 적용이 증가하고 있다. 특히 플라이애시나 고로슬래그 미분말을 사용하는 경우, 수화열 저감, 콘크리트의 내구성 향상 및 장기강도 증진과 함께 산업부산물을 활용하기 때문에 환경부하 저감효과와 경제적인 면에서 이점을 가지고 있다(Kim et al., 1991; Lee et al., 1999; Lee., et al, 2002; Leshchinsky et al., 1991; Naik et al., 1994). 또한 최근 알칼리 활성 콘크리트와 같이 혼화재를 다량으로 사용하는 연구가 활발히 진행되고 있어, 향후 플라이애시 등의 혼화재료의 사용이 증가할 것으로 사료된다. 따라서 저온소성한 MgO 분말을 팽창재료로 사용하기 위해서는 혼화재를 사용한 콘크리트에 대한 적용성 검토가 선행되어야 한다.

이 연구에서는 플라이애시 콘크리트에 저온소성한 MgO 분말을 치환한 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량과 경화콘크리트에 대하여 재령 360일까지의 압축강도 및 길이변화량을 측정하여 저온소성한 MgO 분말 적정량 치환에 따른 플라이애시 콘크리트의 강도 특성과 팽창 특성의 변화를 알아보았다. 그리고 수화발열 특성을 조사하기 위해 목표강도 12MPa 콘크리트에 대해 단열 온도 상승시험을 실시하였으며, 수화생성물 분석을 위해 재령에 따라 DSC(Differential Scanning Calorimeter) 분석을 수행하였다.

Table 1. Properties of binders

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	SO ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Insol. (%)	Density (g/cm ³)
Cement	21.60	6.00	3.40	61.40	2.50	3.10	0.21	3.14
Fly ash	67.80	18.27	0.80	3.17	2.40	2.40	-	2.20
MgO	1.56	0.34	93.58	1.21	0.08	0.40	7.80	3.56

2. 실험 연구

2.1 재료

이 연구에서는 KS L 5201(포틀랜드 시멘트)을 만족하는 국내 S사의 1종 시멘트와 국내 S사의 플라이애시, 중국의 료녕해성에서 수리구조물 전용으로 저온 소성한 MgO 분말을 결합재료로 사용하였으며, 그 화학조성 및 물리적 성질은 Table 1에 정리되어 있다.

잔골재로는 밀도가 2.60g/cm³인 해사를 사용하였으며, 압축강도 12MPa인 콘크리트에는 최대 치수 40mm인 굵은 골재(밀도: 2.73g/cm³)를 사용하였고 압축강도 24MPa와 45MPa인 콘크리트에는 최대 치수가 25mm인 굵은 골재(밀도: 2.70g/cm³)를 사용하였다. 화학 혼화제로는 유동성 확보와 공기량 조절을 위하여 국내 H사의 폴리카르본산계 고성능 AE 감수제를 사용하였다.

2.2 배합비

일반적으로 저온소성한 MgO 분말은 보통강도 이하의 매스콘크리트에 팽창재료로 적용된 사례가 많기 때문에, 이 연구에서는 목표강도에 따라 댐 콘크리트용 저강도 콘크리트 12MPa와 수리구조물용 보통강도 콘크리트 24MPa, 고강도 콘크리트 45MPa 총 3가지 배합을 기준으로 하였다. 각각의 배합은 플라이애시를 20% 수준으로 치환하였으며, MgO 분말은 시멘트 질량비 0, 5% 수준으로 치환하였다. 실험에 사용한 6 종류의 콘크리트 배합비는 Table 2와 같다.

2.3 실험 방법

2.3.1 슬럼프 및 공기량 측정시험

콘크리트의 슬럼프 시험은 KS F 2402(콘크리트의 슬럼프 시험 방법), 공기량 시험은 KS F 2421(압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험 방법)에 준하여 측정하였다.

Table 2. Mix proportions of concrete

Mix Type	G _{max} (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					
				W	C	FA	MgO	S	G
12-0	40	65	52	175.0	215.4	53.8	0	928.7	900.2
12-5				175.0	201.9	53.8	13.5	928.9	900.3
24-0	25	48	48	165.0	275.0	68.8	0	837.6	942.3
24-5				165.0	257.8	68.8	17.2	837.8	942.6
45-0	25	35	46	165.0	377.1	94.3	0	749.9	914.2
45-5				165.0	353.6	94.3	23.6	750.2	914.6

* AE HRWR : AE High Range Water Reducing Agent

2.3.2 단열온도상승시험

저온소성한 MgO 분말은 주로 댐과 같은 매스콘크리트의 온도 수축을 보상하는 팽창재료로 사용한 연구가 주로 진행되었다 (He et al., 2002; Xu et al., 2002; Wang et al., 2002; Shen et al., 2003; Zhou et al., 2003). 따라서 물-결합재비(W/B)가 높아 수화에 따른 발열량이 적어지기 때문에 MgO 분말의 치환에 따른 발열특성의 변화를 관찰하기 용이할 것으로 사료되는 댐 콘크리트용 배합인 12MPa 콘크리트에 대해 단열 온도 상승 시험을 실시하였다. 단열온도 상승시험기에 사용한 시료의 양은 50L로 하였으며, 타설 직후부터 30분 간격으로 재령 7일까지 측정하였다.

2.3.3 압축강도 시험

압축강도용 원주형 공시체($\phi 100 \times 200$ mm)는 KS F 2403(콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법)에 준하여 제작하였으며, 시험을 실시할 때까지 20, 50℃로 유지되는 항온수조에서 수중양생을 실시하였다.

압축강도 시험방법은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법)를 따랐으며, 재령 7, 28, 56, 91, 180, 360일에서 각 배합별로 압축강도를 측정하였다.

2.3.4 길이변화 시험

길이변화 시험은 100×100×400mm의 휨몰드를 사용하여 제작하였으며, 몰드의 바닥과 양단에 폴리스틸렌과 테프론시트를 깔아 시험이 몰드에 의해 구속받지 않게 하였다. 타설 후 24시간 이전에 몰드를 제거하고 시험을 알루미늄 테이프로 밀봉하여 시험으로부터 수분의 증발과 흡수를 방지하였다. 이때, 알루미늄 테이프가 시험을 구속하지 않도록 폴리스틸렌으로 콘크리트 시험을 감싼 뒤 알루미늄 테이프로 밀봉하였다. 그리고 온도가 20, 40℃, 상대습도 60%로 유지되는 항온항습기에서 양생하면서, 매립 게이지와 데이터로거를 사용하여 길이변화를 관찰하였다.

2.3.5 DSC (Differential Scanning Calorimeter) 분석

저온소성한 MgO 치환에 따른 수화생성물 분석을 위해 재령에 따라 DSC 분석을 실시하였다. 이를 위해 시멘트 질량비 20% 수준으로 플라이애시를 치환한 W/B 50%인 FA 페이스트를 제조하였다. 저온소성한 MgO 분말은 0, 5% 수준으로 치환하였으며, 각각 온도 20, 50℃에서 양생을 실시하였다. 분석 장비는 NET6SCH를 사용하였으며, 1000℃까지 10℃/min의 속도로 측정하였다. 측정을 위한 샘플은 막자사발에서 분쇄하여 이세톤과 혼합하면서 3회 증발시키고 밀봉하여 보관하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 슬럼프 및 공기량

콘크리트의 슬럼프 및 공기량 실험 결과가 Table 3에 정리되어 있다. 저온소성한 MgO 분말을 5% 치환한 콘크리트의 슬럼프는 플라이애시만을 치환한 콘크리트(FA 콘크리트) 대비 -10~+5mm를 나타내 저온소성한 MgO 분말 치환에 따른 유동성 증가 및 손실이 작은 것으로 나타났다. 공기량 역시 MgO 분말을 치환한 콘크리트와 FA 콘크리트가 근사한 결과를 나타내었다.

3.2 단열온도상승곡선

일반적으로 콘크리트의 단열온도 상승 특성은 시멘트의 종류, 단위시멘트량 및 콘크리트의 타설온도, 혼화재료, 시멘트의 분말도 등의 영향을 받는다(Kim et al., 1997). 목표강도 12MPa 콘크리트의 단열온도상승시험 결과를 Fig. 1에 나타내었으며, 수화열 특성을 예측하기 위한 단열온도 상승곡선의 모델식은 다음과 같다.

$$Q(t) = Q_7 \times (1 - e^{-\gamma(t-t_0)}) \quad (1)$$

여기서, Q_7 는 재령 7일까지 최대단열온도 상승량(℃), γ 는

Table 3. Test results of slump and air content

Mix Type	Slump (mm)	Air content (%)
12-0	135	3.8
12-5	130	3.7
24-0	150	4.2
24-5	140	4.4
45-0	140	4.6
45-5	145	4.2

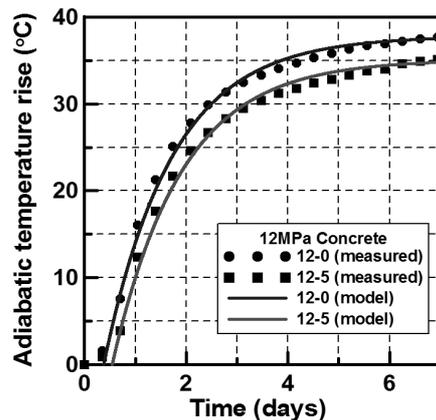


Fig. 1. Measured adiabatic hydration curve

Table 4. Q_7 and γ values of the concrete

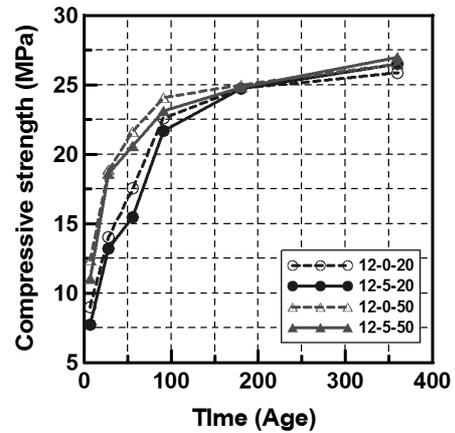
Mix Type	Q_7 (°C)	γ	t_0 (day)	Initial concrete temperature (°C)
12-0	37.8	0.745	0.375	14.5
12-5	35.1	0.735	0.542	13.9

단열온도 상승속도, t 는 콘크리트의 재령(일), t_0 는 초기 콘크리트 수화지연 시간(일)을 의미한다. 식 (1)의 계수값이 정리되어 있는 Table 4에서 알 수 있듯이 저온소성한 MgO 분말을 치환한 콘크리트의 경우 FA 콘크리트보다 낮은 단열온도 상승속도를 보였으며 초기 수화지연을 의미하는 t_0 가 다소 크게 나타났다. 이는 저온소성한 MgO 분말을 치환한 경우 수화열로 인한 최고 온도점이 일반 모르타르보다 늦게 나타난다는 기존의 연구결과(Liu et al., 1992)와 동일한 것으로, 이는 저온소성한 MgO 분말 치환에 따른 수화지연(Choi et al., 2011) 때문으로 사료된다.

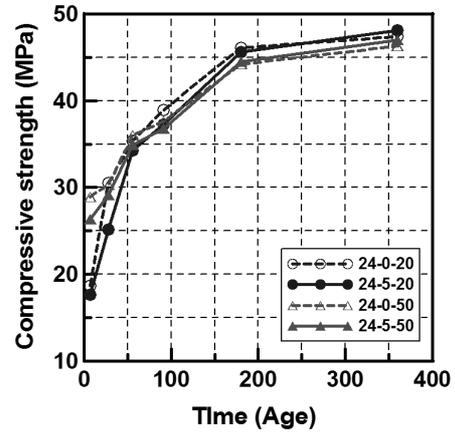
3.3 압축강도

Fig. 2는 저온소성한 MgO 분말의 치환 및 양생온도에 따른 콘크리트의 압축강도 결과를 나타내며, 각각의 시편은 목표강도-MgO 치환율-양생온도의 순서로 정리하여 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 저온소성한 MgO 분말의 치환과 상관없이 모든 배합이 재령 28일에서 목표 강도를 만족하였다. 하지만 저온소성한 MgO 분말 치환에 따른 초기 압축강도를 살펴보면, MgO 분말 치환에 따른 강도저하가 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 저온소성한 MgO 분말의 느린 수화반응(Du, 2005; Mo et al., 2010; Gao et al., 2008) 및 응결지연(Liu et al., 1992; Choi et al., 2011)으로 인해 결합체의 수화 저하에 따른 강도 저하로 판단된다.

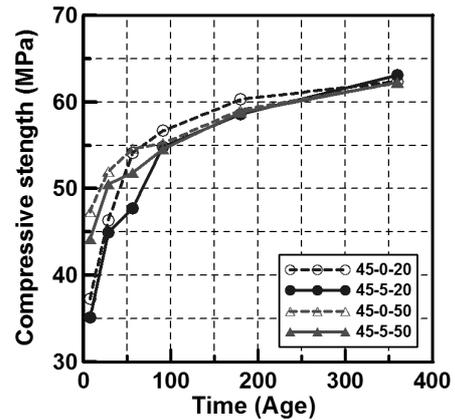
이후 재령이 증가할수록 저온소성한 MgO 분말 치환에 따른 강도 저하폭이 감소하는 경향을 보이는데 이는 MgO 분말의 수화가 느린 속도로 진행되면서 MgO 수화에 따른 강도 발현효과가 나타나기 때문으로 사료된다. 특히 재령 360일에서 12, 24MPa 콘크리트의 경우 MgO 분말을 치환한 콘크리트가 FA 콘크리트에 비해 다소 큰 압축강도를 보였다. 이는 콘크리트의 결합체를 저온소성한 MgO 분말로 2~5% 수준 치환하여 사용할 경우 압축강도 증진에 효과가 있다는 기존의 연구결과(Liu et al., 2005; Beaudoin et al., 1975)와 비슷한 경향을 보이는 것으로, MgO의 팽창으로 인한 공극충전효과(Jang et al., 2011; Salomao et al., 2007)에 기인한 것으로 사료된다. 하지만 45MPa 콘크리트의 경우 재령 360일에서 MgO 분말 치환 여부와 무관하게 비슷한 압축강도를 보였는데, 이는 45MPa 콘크리트의 경우 낮은 W/B로 인해 밀실한 미세구조를 가지고 있기 때문에 MgO의 팽창효과로 인한 공극 충전효과가 압축강도에 미치는 영향이 크지 않기 때문으로 판단된다.



(a) 12MPa



(b) 24MPa



(c) 45MPa

Fig. 2. Compressive strength of concrete (MPa)

일반적으로 고온에서 양생한 콘크리트의 압축강도는 초기재령에서 높게 나타나지만 장기재령에서 다소 낮은 강도를 보인다 (Metha et al, 2006). 하지만 12MPa의 경우 W/B가 높고 단위결합재량이 적기 때문에 고온양생에 따른 장기재령에서의 강도저하가

두르리지게 나타나지 않은 것으로 판단된다. 또한 50℃에서 양생한 경우 20℃에서 양생한 시편보다 MgO 치환에 따른 강도 저하폭이 초기재령에서 작게 나타났다. 특히 12MPa 콘크리트의 경우 50℃에서 양생한 MgO 콘크리트가 재령 360일에서 가장 높은 압축강도를 보였는데, 이는 고온에서 양생한 경우 MgO 분말의 수화반응이 촉진되기 때문으로 사료된다(Amaral et al., 2010).

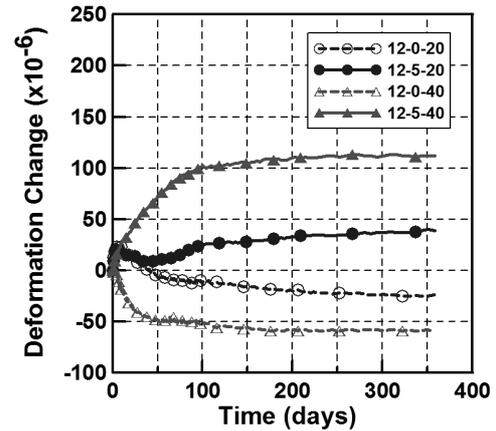
3.4 길이변화

Fig. 3에 저온소성한 MgO 분말의 치환 및 양생온도에 따른 콘크리트의 시편의 길이변화 결과를 나타내었다. MgO를 치환한 모든 시편에서 FA 콘크리트 시편에 대하여 상대적으로 큰 팽창효과를 나타내었으며, 장기재령으로 갈수록 팽창속도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 연구에서 OPC 콘크리트에 적정량의 MgO 분말을 치환하여 얻은 결과(Jang et al., 2011)와 동일한 것으로, 이를 통해 저온 소성한 MgO 분말이 FA 콘크리트에도 유해한 영향 없이 장기적인 팽창성을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

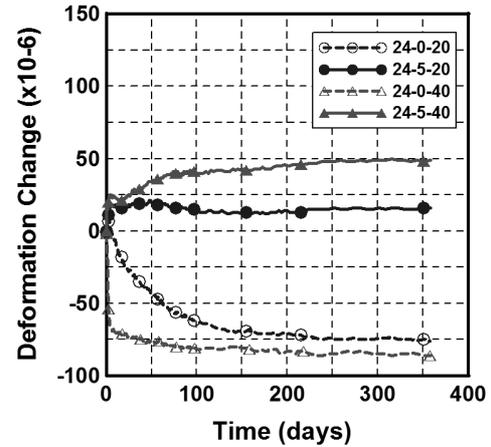
Table 5에는 재령에 따른 FA 콘크리트에 대한 MgO 콘크리트의 상대적인 길이변화 차이가 강도 및 양생온도에 따라 정리되어 있다. 20℃에서 양생한 시편의 재령 360일에서의 상대적인 팽창량은 각각 65, 100, 75×10⁻⁶로 24MPa 콘크리트에서 MgO 치환에 따른 팽창량이 가장 크게 나타났다. 특히 45MPa 콘크리트 경우, 재령에 따라 상대적인 팽창량이 증가하는 경향을 보이는 12, 24MPa 콘크리트와 달리 재령 28일에 가장 큰 상대 팽창량을 보이다가 재령이 증가할수록 그 값이 감소하는 경향을 보였다. 이는 45MPa의 경우 고강도 콘크리트이기 때문에 초기에 자기수축량이 크게 발생하는데 MgO 분말을 치환한 경우 MgO 분말이 시멘트의 수화를 지연시키기 때문에 상대적으로 자기 수축이 적게 일어나기 때문으로 판단된다(Liu et al., 1992; Choi et al., 2011).

목표 강도와 상관없이 고온에서 양생한 시편은 초기재령에서 큰 팽창을 보였으며, 빨리 팽창이 수렴하는 경향을 나타냈다. 이는 MgO 분말이 고온에서 수화 반응이 촉진되기 때문에 재령 초기에

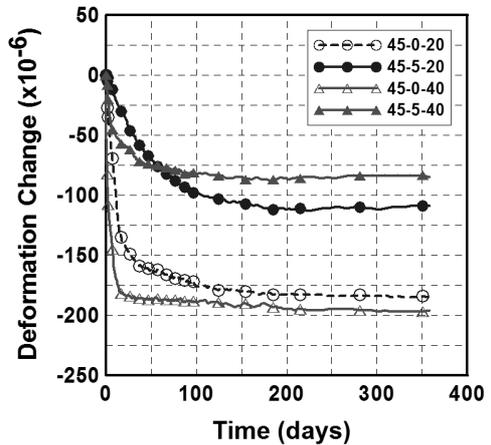
큰 팽창이 나타나지만 잔존하는 MgO 분말의 양이 적어짐에 따라 팽창속도가 빠르게 감소하기 때문으로 사료된다. 반면 20℃에서 양생한 시편은 초기에 적은 팽창을 보이나 장기 재령까지 그 팽창성이 유지되며, 재령 360일까지 팽창성이 유지되는 것은 저온소성한



(a) 12MPa



(b) 24MPa



(c) 45MPa

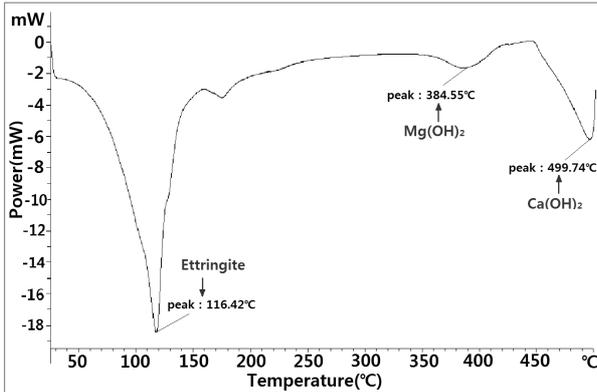
Table 5. Relative expansion of MgO concrete (×10⁻⁶)

Type						
Age (days)	12-5-20	12-5-40	24-5-20	24-5-40	45-5-20	45-5-40
7	0	30	20	90	55	100
28	3	90	45	100	100	125
56	16	125	65	115	90	110
90	35	145	75	120	80	110
180	50	165	85	125	70	115
360	65	170	100	135	75	115

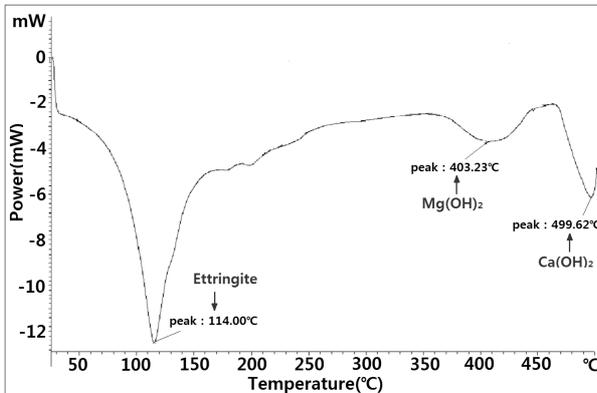
Fig. 3. Length Change of concrete

MgO 분말의 수화 반응이 장기재령에 걸쳐 느린 속도로 이루어지기 때문에 판단된다. 또한 고온에서 양생한 경우 재령 360일에서도 큰 팽창을 보였는데, 이는 양생온도가 MgO 분말의 수화 속도뿐만 아니라 반응성에도 영향을 미치기 때문에 MgO 분말의 치환율과 함께 양생온도에 대한 고려를 통해 MgO 분말의 팽창효과를 제어할 수 있을 것으로 사료된다.

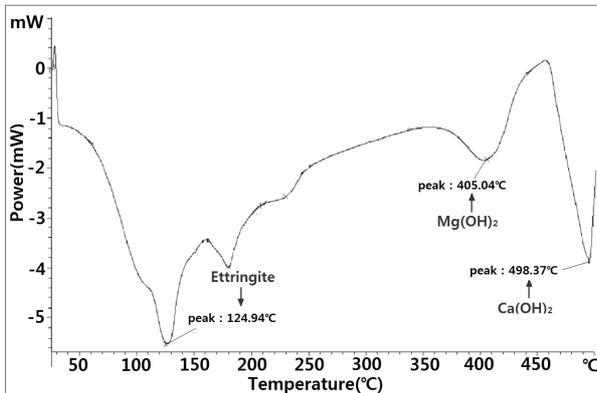
양생온도를 20℃에서 40℃로 증가시킬 경우 24, 45MPa의 콘크리트는 20℃와 비교하여 135, 155%의 팽창 효과가 나타난 반면, 12MPa의 콘크리트는 260%의 팽창 효과를 보였다. 이를 통해 저장도 콘크리트에서 양생온도가 MgO의 팽창에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다. 이는 콘크리트의 W/B에 따라 미세구조 및 공극구조가 다르기 때문에 MgO 치환에 따른 팽창이 콘크리트에 미치는 영향이 강도에 따라 상이하게 나타나는 것으로 판단된다.



(a) 28 days



(b) 91 days



(c) 360 days

Fig. 4. DSC curve for paste with MgO (curing at 20℃)

3.5 DSC 분석

20℃에서 양생한 저온소성한 MgO 분말을 치환한 시편의 DSC 분석 곡선을 재령에 따라 Fig. 4에 나타내었다. 수화생성물인 에트링자이트, Mg(OH)₂와 Ca(OH)₂는 서로 다른 열분석 곡선을 나타내는데 일반적으로 에트링자이트는 110℃에서 Mg(OH)₂와 Ca(OH)₂는 각각 370℃, 460℃ 근처에서 피크점이 발생한다 (Gao et al., 2008). 또한 CaO의 수화물(Ca(OH)₂)은 수화 시작 후 바로 생성되며 MgO의 수화물(Mg(OH)₂)은 느린 속도로 생성된다(Jang et al., 2011). Fig. 4를 살펴보면 재령 28, 180, 360일에서 Mg(OH)₂의 존재를 확인 할 수 있다. 이러한 결과는 플라이애시를 사용하지 않은 기존의 연구결과(Jang et al., 2011)와 유사한 경향을 보이는 것으로 이를 통해 플라이애쉬와 MgO를 함께 사용하여도 플라이애쉬가 Mg(OH)₂의 생성에 큰 영향을 끼치지 않는 것을 알 수 있다. 또한 MgO의 수화생성물인 Mg(OH)₂이 재령 360일까지 페이스트 내에 최종생성물로 존재하는 것을 확인 하였다.

4. 결론

이 연구에서는 저온 소성한 MgO 분말과 플라이애시를 치환한 콘크리트의 물성 규명을 위해 실험결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 저온소성한 MgO 분말을 치환한 콘크리트(12-5)에서 FA 콘크리트(12-0)보다 낮은 단열온도 상승속도 및 최대온도를 보였다. 따라서 MgO 분말 치환에 따른 콘크리트 수화열은 다소 감소하는 것으로 판단된다.
- (2) 압축강도를 측정된 결과, 저온소성한 MgO 분말 5% 치환으로 초기 압축강도는 다소 감소하였으나 장기재령에서 MgO 분말을 치환하지 않은 콘크리트와 다소 높거나 근사한 압축강도를 얻을 수 있었다. 또한 저강도에서 강도 증진효과가 크게 나타났으며 고온 양생을 통해 MgO 분말 치환에 따른 초기 강도 감소폭을 저감시킬 수 있는 것으로 사료된다.
- (3) 저온소성한 MgO 분말을 5% 치환한 콘크리트의 경우 FA 콘크리트에 대한 상대적으로 큰 팽창 효과를 확인할 수 있었으며, 물-결합재비 및 양생온도에 따라 그 팽창 효과가 다르게

나타났다. 따라서 MgO 분말 치환에 따른 팽창성을 효과적으로 활용하기 위해서는 콘크리트의 강도 및 양생온도에 대한 고려가 필요하다고 판단된다.

- (4) DSC 분석을 통해 MgO의 수화반응이 플라이애시에 큰 영향을 받지 않음을 확인하였으며, 수화생성물인 Mg(OH)₂가 재령 360일까지 최종생성물로 존재하는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업(09기술혁신F03)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- Amaral, L.F., Oliveira, I.R., Salomao, R., Frollini, E., Randolfelli, V.C. (2010) "Temperature and common-ion effect on magnesium oxide (MgO) hydration", *Ceramics International*, Vol. 36, No. 3, pp. 1047-1054.
- Beaudoin, J.J., Ranachandran V.S. (1975) "Strength development in magnesium oxychloride and other cements", *Cement and Concrete Research*, Vol. 5, No. 6, pp. 617-630.
- Choi, S.W., Oh, S.H., Kim, D.W., Lee, K.M., Jang, B.S. (2011) "A Study on the Early Hydration-Retarding of Cement Composites Containing MgO", *2011 Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, Vol. 23, No. 1, pp. 341-342 (in Korean).
- Du, C. (2005) "A Review of Magnesium Oxide in Concrete", *Concrete International*, Vol. 27, No. 12, pp. 45-50.
- Gao, P., Lu, X., Geng, F., Li, X., Hou, J., Lin, H., Shi, N. (2008) "Production of MgO-type expansive agent in dam concrete by use of industrial by-products", *Building and Environment*, Vol. 43, No. 4, pp. 453-457.
- He, Y.W., Huang, X.T. (2002) "Application of MgO Concrete to Promote Development of Dam Construction", *Guangdong Water Resources and Hydropower*, June 2002 (Supplement), pp. 3-4. (in Chinese)
- Jang, B.S., Kwon, Y.G., Choi, S.W., Lee, K.M. (2011) "Fundamental Properties of Cement Composites Containing Lightly Burnt MgO Powders", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 2, pp. 225-233 (in Korean).
- Kim, J.K., Yang, E.I. (1997) "Factors for Hydration Heat and Thermal Stress in Mass Concrete", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 9, No. 3, pp. 15-23 (in Korean).
- Kim, J.K., Park, Y.D., Sung, K.Y. (1991) "The Long-Term Strength and the Workability of High-Strength Fly Ash Concrete", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 3, No. 4, pp. 107-115 (in Korean).
- Korean Agency for Technology and Standards (2006) *KS L 5201 Portland cement*.
- Lee, C.Y., Choi, S.H., Kang, S.H., Lee, K.M. (1999) "Influence of Fly Ash Content with Respect to the Fresh and Mechanical Properties in Concrete", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 11, No. 6, pp. 25-33 (in Korean).
- Lee, H.K., Im, J.Y., Lee, K.M., Kim, B.G. (2002) "Autogenous Shrinkage of High Performance Concrete Containing Fly Ash", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 14, No. 2, pp. 249-256 (in Korean).
- Leshchinsky, M.Y., Velichko, V.A. (1991) "The use of fly ash in concrete subject to heat", *Cement and concrete research*, Vol. 21, No. 2/3, 1991, pp. 205-218.
- Liu, X., Li, Y. (2005) "Effect of MgO on the composition and properties of alite-sulphoaluminate cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 9, pp. 1685-1687.
- Liu, Z., Cui, X., Tang, M. (1992) "Hydration and Setting Time of MgO-type Expansive Cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-5.
- Metha, P.K., Monteiro, P.J. (2006) *Concrete : Structure, Properties, and Materials*, McGraw-Hill, USA.
- Mo, L., Deng, M., Tang, M. (2010) "Effects of calcination condition on expansion property of MgO-type expansive agent used in cement-based materials", *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 3, pp. 437-446.
- Naik, T.R., Singh, S.S., Hossain, M.M. (1994) "Permeability of concrete containing large amount of fly ash", *Cement and concrete research*, Vol. 24, No. 5, 1994, pp. 913-922.
- Salomao, R., Bittencourt L.R.M., Pandolfelli, V.C. (2007) "A novel approach for magnesia hydration assessment in refractory castables", *Ceramics International*, Vol. 33, No. 5, pp. 803-810.
- Shen, S.L., Zhu, G.B., Huang, X.T., Liu, J.H. (2003) "Construction Procedure for Arch Dams of MgO Concrete without Contraction Joints", *Guangdong Water Resources and Hydropower*, Dec 2003, pp. 1-4. (in Chinese)
- Wang, W.Q., Huang, X.T. (2002) "Quality Control for Construction of a Double-Arch Dam of MgO Concrete", *Guangdong Water Resources and Hydropower*, June 2002 (Supplement), pp. 10-12. (in Chinese)
- Xu, J.B., Huang, X.T. (2002) "Fast Construction Procedure for Arch Dams without Contraction Joints", *Guangdong Water Resources and Hydropower*, June 2002 (Supplement), pp. 8-9. (in Chinese)
- Zhou, R.M. (2003) "Profit Analysis of Arch Dam Construction Using MgO Concrete", *Guangdong Water Resources and Hydropower*, Dec 2003, pp. 5-7. (in Chinese)