

내부양생을 적용한 모르타르의 양생조건에 따른 압축강도 특성

The Characteristics of Compressive Strength in Mortar with Internal Curing According to Curing Condition

김주형^{1*} · 조영근² · 이광명¹Joo-Hyung Kim^{1*} · Young-Keun Cho² · Kwang-Myong Lee¹

(Received April 3, 2018 / Revised May 2, 2018 / Accepted May 2, 2018)

The use of high-strength concrete in construction have been increasing steadily. However, high-strength concrete has a low water-binder ratio, and the problems such as cracks due to hydration heat and shrinkage during the hydration process at the early age. Recently, as a method to reduce the shrinkage of concrete, study of internal curing has carried out according to increasing about interest about it. In this study, the effect of compressive strength on the curing condition(drying, moist, water) was investigated by using artificial lightweight aggregate(LWA) in high strength and high volume mortar. As a result of autogenous shrinkage, the effect of shrinkage reduction was enhanced depending on the increasing of LWA replacement. According to the curing condition, the results of compressive strength showed the different trend. The compressive strength has increased on the drying and moisture condition and decreased on the water condition.

키워드 : 내부양생, 양생조건, 압축강도, 자기수축, 인공경량골재

Keywords : Internal curing, Curing condition, Compressive strength, Autogenous shrinkage, Artificial lightweight aggregate

1. 서론

건설 구조물의 고강화·장대화에 따라 고강도 콘크리트 사용은 꾸준히 증가하고 있다. 이러한 고강도 콘크리트는 상대적으로 낮은 물-결합재비를 가지고 있어 초기 재령에서 수화과정에 발생하는 수화열 및 수축 등으로 인해 균열 등과 같은 문제점이 발생한다 (Persson 1998; Lura et al. 2003). 초기에 발생하는 수축으로 인한 균열은 구조물로서의 성능 및 내구성을 유지하는 데 중요한 요소이며, 이를 저감시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 수축에 의한 균열을 저감시키기 위한 방법으로 팽창성 광물질인 팽창제 분말 혼입, 수축저감용 화학혼화제 사용, 양생방법 조절을 통한 방법 등을 활용하여 콘크리트의 수축을 저하시키는 방법이 사용되고 있으나, 최근 들어 콘크리트 내부에 수분을 공급하는 내부양생에 대한 연구 및 활용이 진행되고 있다. 일반적으로 콘크리트의 양생은 외부 양생과 내부양생으로 나눌 수 있으며, 방법의 차이는 Fig. 1과 같다.

내부양생은 콘크리트 배합에 흡수율이 높은 재료를 혼입하여 콘크리트 내부에 공급하여 수화과정에 도움을 주거나 수축을 줄일 수 있는 양생방법이다. 특히 고강도 콘크리트 경우, 상대적으로 내부조직이 치밀하므로 외부로부터 수분공급이 어려우므로 이 방법이 효과적이다(Bentz and Weiss 2011). 내부양생 재료로는 주로 자연경량골재(pumice, zeolite 등), 인공경량골재, Super-Absorbent Polymer(SAP) 등이 있다. 내부양생의 효과는 Bentz(2011)에 의하면, 콘크리트 배합에 수분을 많이 가질 수 있는 경량골재 등과 같은 재료를 사용하여 추가 수분을 공급함으로써 바인더의 수화과정에 촉진시켜 수화도를 증가시킬 뿐만 아니라 자기건조(Self-desiccation) 현상을 줄여 수축을 저감할 수 있음을 증명하였다.

Cusson and Hoogeveen(2005)와 Dinghua and Weiss(2014)에 의하면 콘크리트 내 자기건조는 Kelvin-Laplace equation에 의해 내부 공극 구조가 작아지고 좁아지게 되어 capillary 응력이 증가한다. 고강도 콘크리트의 경우, 낮은 물-바인더비로 인해 그 양은

* Corresponding author E-mail: kjhmole@kcl.re.kr

¹성균관대학교 건설환경시스템공학과 (Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea)

²한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터 (Construction Technology Research Center, Korea conformity Laboratories, Seoul 08503, Korea)

더 커질 수밖에 없다. 이에 내부양생은 콘크리트 내부에 수분을 유지해줌으로써 응력을 줄여 수축을 줄이고 수화도 증가로 인해 강도를 증가하는 대안이 될 수 있다. 또한, Lgor et al.(2012)는 플라이애시를 혼입한 콘크리트에서도 내부양생 효과를 실험적으로 검증하고 분석하였다. Zhang and Gjrv(1992)와 Wasserman and Bentur(1996)은 경량골재를 사용한 내부양생으로 일반강도 콘크리트에서도 내구성 및 강도를 증가하게 하는 결과를 발표하였다. 미국에서는 실제 교량 상판에 적용하여 그 효과를 검증하고 현장 적용을 확대하고 있다(Cusson et al. 2010). 또한, Bentz and Synder(1999)는 내부양생을 위해 화학수축량, 수화도, 골재 포화도 및 흡수율 등을 고려한 배합설계 방법을 제시하였으며, 배합 조건 및 내부양생재료의 특성에 따라 투입량을 산정하였다. 이는 필요 이상의 투입량은 팽창과 강도 저하로 나타나 오히려 콘크리트에 영향을 미칠 수 있다는 연구 결과에 따른 것이다. 미국콘크리트학회에서는 ACI(308-213)R-13(2013)에서 내부양생 관련 보고서를 발간 및 배포하여 활용성을 증대하고자 하였다. 현장 적용을 위해 Weiss et al.(2017)에서는 현장 조건에 맞는 배합설계와 관리 방법에 대한 가이드라인을 제시하였다.

기존 연구에서 보는 바와 같이 내부양생 적용은 콘크리트 내부에 추가적인 수분공급을 통해 콘크리트 성능 및 내구성을 향상시킨다. 또한 외국에서는 현장적용과 가이드라인을 통해 활용성을 증대하고 있다. 앞으로 고강도 콘크리트가 사용이 확대되고 있는

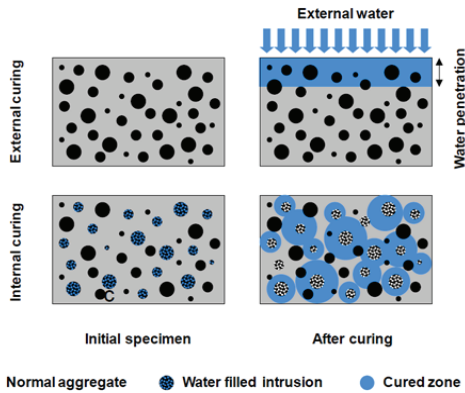


Fig. 1. The concept of external and internal curing(Castro 2010)

상황에서 활용성은 더욱더 높아질 것으로 기대된다. 그러나 콘크리트 내부의 수분 이동은 외부적인 환경조건, 즉 양생조건에 민감하게 나타날 것으로 판단되며, 건설 현장 조건에 따른 영향 분석이 필요할 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 내부양생재료 혼입률 및 양생조건을 변수로 하여 모르타르에 대한 내부양생 효과 검증과 역학적 특성(압축강도) 평가를 수행하였다. 또한 플라이애시를 혼입한 하이볼륨 모르타르에 대해서도 내부양생 영향을 평가하였다.

2. 실험 연구

2.1 사용재료

모르타르에 사용된 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC)을 사용하였으며, 플라이애시(Fly ash, FA)는 국내 화력발전소에서 생산되는 정제 플라이애시를 사용하였다. 보통포틀랜드시멘트와 플라이애시의 화학 및 물리적 특성은 Table 1에 나타내었다. 잔골재는 KS L ISO 679를 만족하는 ISO 표준사를 사용하였다.

배합에 사용된 내부양생재료로는 점토를 주성분으로 하여 원형 형태로 성형가공하여 1,100~1,200°C에서 소성한 혈암계 인공경량골재(LightWeight Aggregate, LWA)를 사용하였다. 밀도와 화학적 특성은 Table 1에 나타내었다. 흡수율은 내부양생에 가장 중요한 요소이며, 이를 평가하기 위해 LWA가 수분을 흡수하면서 부

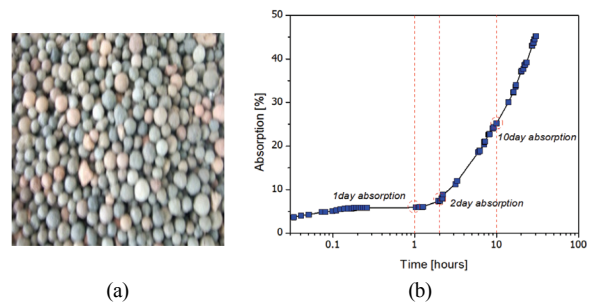


Fig. 2. Lightweight aggregate(a) & ratio of absorption(b)

Table 1. Chemical composition and physical properties of OPC and FA

Material	Chemical compositions(%)										Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LoI	Sum	Density	Blain(cm ² /g)
OPC	19.8	4.5	3.67	62.2	3.03	1.08	0.24	2.1	1.3	97.92	3.15 (g/cm ³)	3,568
FA	59.2	24.1	6.64	3.1	1.43	1.46	0.65	0.21	2.2	98.99	2.23 (g/cm ³)	3,890
LWA	65.4	23.7	1.32	2.35	1.8	2.15	1.56		0.98	99.26	1.67 (kg/m ³)	-

피변화를 이용한 피펫법을 통해 흡수율 측정을 실시하였다. 실험에 사용한 인공경량골재와 흡수율 시험 결과는 Fig. 2와 같다.

2.2 모르타르 배합

고강도 및 하이볼륨 콘크리트에서의 내부양생 영향을 알아보기 위해 본 연구에서는 모르타르 물-바인더비는 30%로 일정하게 하였으며, 플라이애시 혼입률은 35%로 하였다. LWA는 잔골재 대비 부피비로 0%, 10%, 20%로 하였으며, 2일 동안 침지시켜 흡수율이 7%가 되는 시점에 배합을 실시하였다. 모르타르의 배합비율은 Table 2와 같다.

2.3 실험방법

양생조건에 따른 영향을 알아보기 위해 기중(20°C, RH=60%, Drying), 습윤(20°C, RH≥90%, Moist), 수중(20°C, Water) 3가지 변수로 실시하였다. LWA 혼입에 따른 응결시간의 영향을 알아보기 위해 KS F 2436 ‘관입 저항침에 의한 콘크리트 응결 시간 시험 방법’에 의해 실시하였다. 압축강도는 재령에 따라 40×40×160mm 크기 몰드를 준비하여 KS L ISO 679 ‘시멘트의 강도 시험 방법’에 의해 측정하였다.

내부양생 효과를 확인하기 위해 ASTM C 1698 ‘Standard Test

Table 2. Mix proportions of mortars

Variables	Water/binder	Water [kg]	Cement [kg]	Fly ash [kg]	Fine aggregate [kg]	LWA replacement of fine aggregate [% , Vol]	
OPIC-0	0.3	0.3	1.0	-	1.5	0	
OPIC-10						10	
OPIC-20						20	
FAIC-0			0.65			0.35	0
FAIC-10							10
FAIC-20							20



Fig. 3. The measurement of autogenous shrinkage(ASTM C 1698)

Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar’에 의해 주름관을 이용하여 항온항습 조건(20°C, RH 60%)에서 Fig. 3과 같이 자기수축 실험을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 응결시간

Fig. 4는 모르타르 배합 변수의 시간에 따른 응결시간(초결, 종결) 실험 결과를 그래프로 나타내었다. 수화 초기에 LWA가 가진 수분이 방출되어 물-바인더의 증가시키면 전반적인 수화메커니즘에 영향을 주게 되므로 이를 증명하기 위해 실험을 실시하였다. 실험 결과에서 보는 바와 같이 OPIC 및 FAIC 시리즈에서 LWA를 혼입에 따른 초결과 종결의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 추가로 공급된 수분을 가진 인공경량골재가 바인더의 초기 수화반응에 거의 영향을 미치지 않았음을 의미한다.

3.2 자기수축

모르타르 내부에 수분을 가진 LWA에 따른 내부양생 효과를 알아보기 위해 자기수축 실험을 실시하였으며, 실험 결과는 Fig. 5와 같다. OPIC와 FAIC 시리즈에서 LWA 혼입률이 증가할수록 자기수축 저감효과가 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. FAIC 시리즈의 경우, 플라이애시 혼입에 따라 OPIC보다 상대적으로 자기수축량은 작으며, 이에 따른 저감효과도 적게 나타났다. LWA 20%

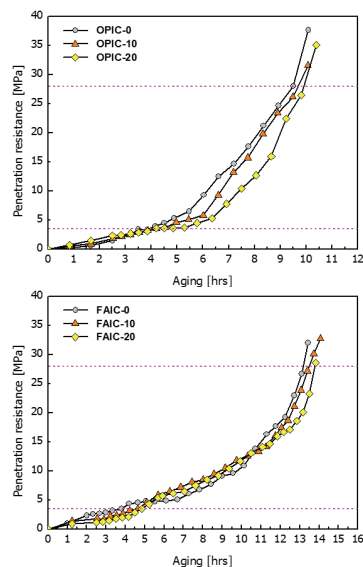


Fig. 4. The initial and final time of mortars

혼입의 경우, 두 시리즈 배합에서 오히려 초기에 비해 팽창하는 결과를 보이고 있다. 이는 일반적으로 시멘트와 물의 수화반응에 의해 팽윤현상이 발생하게 되는데(Bentur 2003), 상대적으로 본 연구에서 사용된 배합의 시멘트량이 많고 추가로 LWA의 수분 공급으로 인해 그 양은 커지게 되어 이후 수축 발생에 불구하고 초기에 비해 팽창하는 결과를 보인 것으로 판단된다.

3.3 압축강도

압축강도 실험은 3가지(기중, 습윤, 수중)에 양생된 시료를 재령에 따라 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 6, 7, 8과 같다.

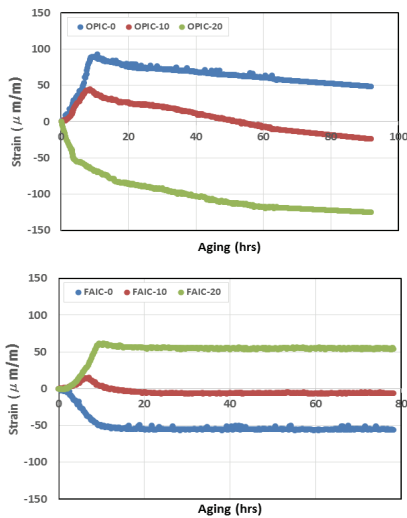


Fig. 5. The results of autogenous shrinkage of mortars

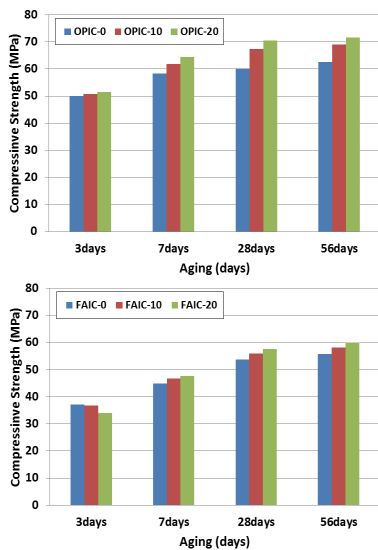


Fig. 6. Compressive strength of mortars(drying curing)

Fig. 6(기중양생)에서 OPIC 시리즈는 LWA 혼입률이 증가할수록 전체 재령에서 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 LWA의 수분이 추가 공급됨에 따라 모르타르 내부의 수화도 증가로 기인한 결과로 사료된다. FAIC 시리즈에서는 초기(3일) 재령에서 플라이애시 혼입에 따라 상대적으로 물-시멘트비가 증가되어 LWA 혼입률이 증가할수록 강도가 낮게 나타났으나, 7일 재령 이후 LWA 혼입률 증가에 따라 압축강도도 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 7(습윤양생)에서 OPIC 시리즈는 기중양생 조건과 같이 LWA 혼입률에 따라 압축강도는 증가하였으며, FAIC 시리즈는 기중양생 조건과 같은 양상을 보이는데, 7일 재령까지 LWA 혼입에

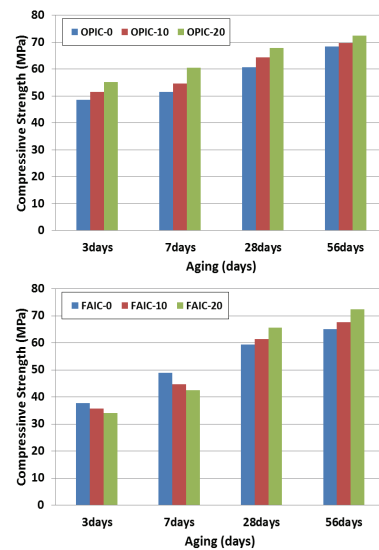


Fig. 7. Compressive strength of mortars(moist curing)

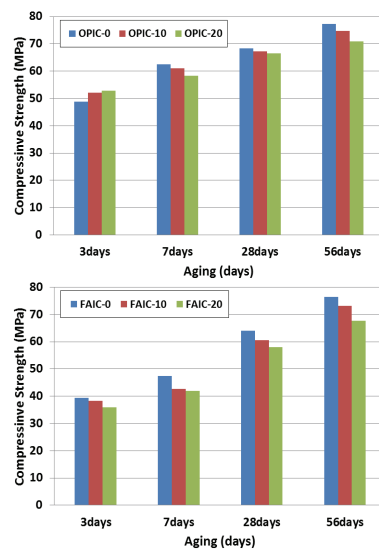


Fig. 8. Compressive strength of mortars(water curing)

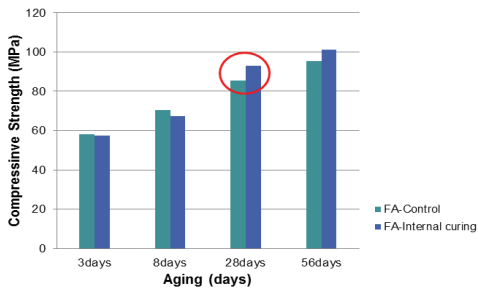
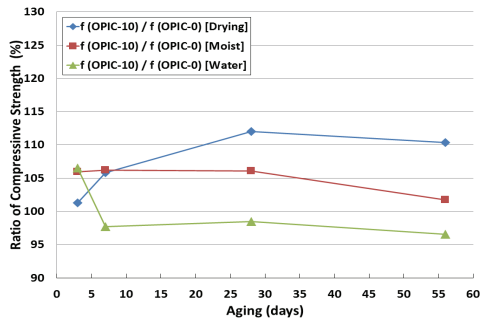
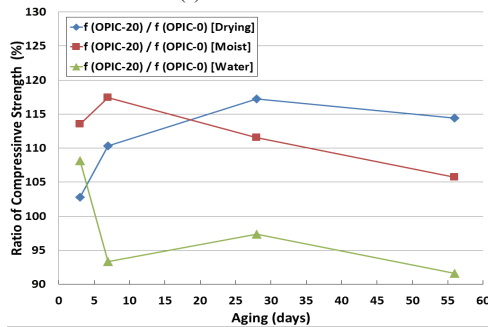


Fig. 9. The results of compressive strength(Bentz 2007)



(a) OPIC - 10%



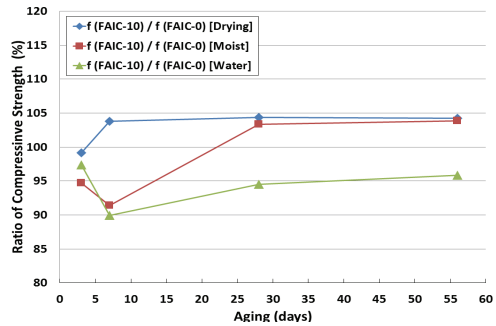
(b) OPIC - 20%

Fig. 10. Strength rate by curing condition(OPIC)

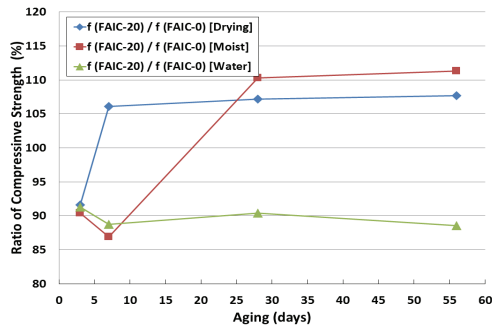
따라 압축강도가 낮게 나타났으나, 28일 재령에서부터 압축강도가 높게 나타났다. 이는 양생 조건, 즉 습도 조건에 따라 초기재령에서의 수분 조건이 압축강도에 영향을 준 것으로 판단된다. 이는 Bentz(2007)의 연구결과와 유사한 경향을 보이고 있다(Fig. 9).

Fig. 8(수중양생)에서 OPIC 시리즈는 초기에 LWA 영향으로 혼입률 증가에 따라 압축강도가 높게 나타나나, 7일 재령 이후 수중양생으로 인한 충분한 수분공급과 LWA 자체 강도로 인해 강도가 낮게 나타나고 있다. FAIC 시리즈는 초기재령에서부터 LWA 혼입 증가에 따라 압축강도는 낮게 나타나고 있다.

Fig. 10, 11은 양생조건에 따라 LWA 혼입률이 압축강도에 어떠한 영향을 미치는 알아보기 위해 압축강도 데이터를 이용하여 LWA를 혼입하지 않은 조건을 기준으로 강도 발현율을 그래프로



(a) FAIC - 10%



(b) FAIC - 20%

Fig. 11. Strength rate by curing condition(FAIC)

나타내었다. OPIC 시리즈에서 전체적으로 초기재령에서 LWA 수분영향으로 인해 압축강도는 증가하고 수중양생조건을 제외하고 기중 및 습윤양생 조건에서는 LWA 혼입이 압축강도가 증가하는 경향을 나타냈다.

FAIC 시리즈의 경우, 3일 재령에서 LWA 혼입이 강도를 저하시키는 경향을 보이고 있으나, 이후 OPIC와 같이 기중 및 습윤양생 조건에서 LWA 혼입이 강도를 증가시키는 결과를 보이고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 인공경량골재를 이용하여 고강도 모르타르에서의 내부양생을 이용한 수축저감 효과를 검증하고 압축강도 평가를 통해 양생조건에 따른 역학적 특성을 알아보았다.

1. LWA를 이용한 고강도에서의 내부양생 효과는 혼입률이 증가할수록 수축저감 효과가 커지는 것을 확인하였다. 그러나 필요 이상의 수분 공급은 수축 저감이 아닌 팽창하는 결과를 보일 수 있으므로 저감효과 극대화를 위한 배합 조건에 따른 내부양생 재료 사용이 필요하다.
2. 압축강도 실험결과, 기중 및 습윤 양생조건에서 고강도 모르타르(OPIC)는 LWA 혼입률이 증가할수록 압축강도는 증가하는 것으로 나타났다. 하이볼륨 모르타르(FAIC)는 초기 재

령에서 플라이애시 혼입이 물-시멘트비 증가로 이어져 강도가 저하되는 경향을 보이고 있으나, 이후 증가하였다. 이를 통해 내부양생 재료는 수분 공급을 통해 수화도를 증가시켜 초기 재령 이후 압축강도를 증가시키는 것을 확인하였다.

- 수중양생조건에서 전반적으로 LWA 혼입이 증가할수록 압축강도가 저하하였다. 이는 충분한 수분 공급으로 인해 내부양생재료로서 효과가 미미한 것으로 사료되며, 오히려 LWA의 자체강도로 인해 압축강도가 저하하는 것으로 판단된다.

실험 결과를 통해 내부양생은 낮은 물-바인더비를 사용하는 고강도 콘크리트 구조물에 충분한 효과를 볼 수 있는 방법이다. 또한, 실제 건설현장을 고려하면 더욱더 큰 효과를 기대할 수 있다. 그러나 내부양생 재료의 사용량에 따라 압축강도 저하나 팽창 결과가 나타나므로 사용에 신중을 기해야 한다. 이와 더불어 인공경량골재의 단입도 특성과 사용에 따른 경제적 부분도 고려해야 할 것이다. 추후 다양한 내부양생 재료에 대한 연구와 결과 분석을 통해 적절한 배합설계 및 현장적용성 평가가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 환경정책기반공공기술개발사업(과제번호 2016000700001)에서 지원받았습니다.

References

- ACI Committee 308. (2013). ACI(308-213) R-13 Report on Internally Cured Concrete Using Prewetted Absorptive Lightweight Aggregate, American Concrete Institute.
- ASTM C 1698-09. (2014). Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar.
- Bentur, A. (2003). Early Age Cracking in Cementitious Systems: Report of RILEM Technical Committee 181-EAS 'Early Age Shrinkage Induced Stresses and Cracking in Cementitious Systems', RILEM Publ, Bagnaux, France.
- Bentz, D.P. (2007). Internal curing of high performance blended cement mortars, *ACI Material Journal*, **104(4)**, 408-414.
- Bentz, D.P., Snyder, K.A. (1999). Protected paste volume in concrete: extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate. *Cement and Concrete Research*, **29(11)**, 1863-1867.
- Bentz, D.P., Weiss, W.J. (2011). Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review, US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology Internal Report NISTIR 7765.
- Castro, J., De la Varga, I., Golias, M., Weiss, W. (2010). Extending internal curing concepts to mixtures containing high volumes of fly ash, International Bridge Conference.
- Cusson, D., Hoogeveen, T. (2005). Internally-Cured High-performance Concrete under Restrained Shrinkage and Creep, CONCREEP 7 Workshop on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures, Nantes, France, 579-584.
- Cusson, D., Lounis, Z., Daigle, L. (2010). Benefits of internal curing on service life and lifecycle cost of high-performance concrete bridge decks—a case study. *Cement and Concrete Composites*, **32(5)**, 339-350.
- De la Varga, I., Castro, J., Bentz, D.P., Weiss, J. (2012). Application of internal curing for mixtures containing high volumes of fly ash, *Cement and Concrete Composites*, **34(9)**, 1001-1008.
- KS F 2436. Testing Method for Time of Setting of Concrete Mixture by Penetration Resistance [in Korean].
- KS L ISO 679. Methods of Testing Cements—Determination of Strength [in Korean].
- Lura, P., Jensen, O.M., van Breugel, K. (2003). Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: an evaluation of basic mechanisms, *Cement and Concrete Research*, **33(2)**, 223-232.
- Persson, B. (1998). Experimental studies on shrinkage of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, **28(7)**, 1023-1036.
- Wasserman, R., Bentur, A. (1996). Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength, *Cement and Concrete Composite*, **18(1)**, 67-76.
- Weiss, W.J., Montanari, L. (2017). Guide Specification for Internally Curing Concrete, National Concrete Pavement Technology Center Institute for Transportation.
- Zhang, M., GjØrv, O.E. (1992). Penetration of cement paste into lightweight aggregate, *Cement and Concrete Research*, **22(1)**, 47-55.
- Zou, D., Weiss, J. (2014). Early age cracking behavior of internally cured mortar restrained by dual rings with different thickness. *Construction and Building Materials*, **66**, 146-153.

내부양생을 적용한 모르타르의 양생조건에 따른 압축강도 특성

건설 구조물에서의 고강도 콘크리트 사용은 꾸준히 증가하고 있다. 그러나 고강도 콘크리트는 상대적으로 낮은 물-바인더비를 가지고 있어 초기 재령에서 수화과정에 발생하는 수화열 및 수축 등으로 인해 균열 등과 같은 문제점이 발생으로 인해 그 대책이 시급한 실정이다. 최근에 수축을 저감할 수 있는 방법으로 내부양생에 대한 관심이 대두되고 있으며 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 연구에서는 고강도 및 하이볼륨 모르타르에 대해 인공경량골재(LWA)를 이용하여 내부양생 효과를 검증하고 여러 현장조건을 고려하여 양생조건(기중, 습윤, 수중)에 따른 압축강도 영향에 대한 연구를 수행하였다. 자기수축 실험을 통해 고강도 및 플라이애시를 혼입한 하이볼륨 모르타르에서 인공경량골재 혼입률이 증가할수록 수축저감 효과가 커지는 것을 확인하였다. 양생조건에 따라 압축강도 영향은 조금씩 다른 경향을 보이고 있으며, 기중 및 습윤 조건에서는 일반적으로 강도를 증가시키고 수중조건에서는 감소하는 것으로 나타났다.