동결융해 저항성 시험방법에 따른 경량골재 콘크리트의 특성

Characteristics of Lightweight Aggregate Concrete according to Freezing and Thawing Resistance Test Methods

김 세 환¹

김 상 현^{2*}

이 수 형³

전 현 규⁴

서 치 호^{5*}

Kim, Se-Hwan¹ Kim, Sang-Heon^{2*} Lee, Soo-Hyung³ Jeon, Hyun-Kyu⁴ Seo, Chee-Ho^{5*}

Department of Architectural Engineering, KonKuk University, Gwangjin-Gu, Seoul, 143-130, Korea¹

The Academy of Applied Science and Technology, KonKuk University, Gwangjin-Gu, Seoul, 143-130, Korea²

Department of Research, Sunil Industrial Co., Bucheon-Si, Gyunggi-Do, 421-150, Korea³

Department of Research, GS E&C, Youngin-Si, Gyunggi-Do, 449-831, Korea⁴

Department of Architectural Engineering, KonKuk University, Gwangjin-Gu, Seoul, 143-130, Korea⁵

Abstract

The method used to test lightweight aggregate concrete for its resistance to freezing and thawing is different in each country. In Korea, the method of KS F 2456 on normal concrete is adopted for lightweight aggregate concrete, while the testing method of ASTM C 330 lightweight aggregates for structural concrete is used in the majority of overseas countries. In this study, we identified differences between KS F 2456 and ASTM C 330 in terms of the testing method for freezing and thawing resistance, and we studied the influence of this on the freezing and thawing resistance of lightweight aggregate concrete. The results of this study were as follows: Blocked lightweight aggregates had a slight collapse of shape and lost weight by repeated freezing and thawing, but unblocked lightweight aggregates were badly collapsed. And while the freezing and thawing resistance tests of normal concrete showed similar results despite the difference in the KS and ASTM testing method, the results for lightweight aggregate concrete were very different. So the KS test method shows evaluation results that are much lower than the ASTM test method.

Keywords : lightweight aggregate, lightweight aggregate concrete, freezing and thawing resistance test methods, contained water

1. 서 론

콘크리트 구조물이 다양화, 대형화 및 고층화 되어감에 따라 사용재료에 대한 성능도 다양하게 요구되고 있는 실정이다. 특히 콘크리트의 요구성능은 시공성, 경제성, 경량성,

단열성 등의 종합적이고 광범위한 성능이 점점 더 요구되어가고 있다[1,2].

이러한 요구를 충족시킬 방안으로 경량골재(Lightweight aggregate(LWA))의 사용을 들 수 있다. 경량골재의 사용은 콘크리트의 경량화, 단열 및 차음성능 향상 등 콘크리트의 다기능성을 가져오며, 구조물의 자중경감 효과로서 하부 구조에 대한 부담이 경감되고, 구조 부재의 단면적 감소, 그로 인한 내부 공간 확대 및 투입 재료량 감소 등으로 경제성 측면에도 이점을 가져 올수 있을 것으로 기대되고 있다[3,4,5,6]. 그러나 경량골재는 보통골재보다 빠르고 높은 흡수특성을 가지고 있어, 워커빌리티 및 동결융해 저항성 저하 등과 같이 품질관리에 매우 어려움을 겪고

Received : April 27, 2012

Revision received : March 27, 2013

Accepted : May 13, 2013

* Corresponding author : Kim, Sang-Heon, Seo, Chee-Ho

[Tel: 82-2-3436-7898, E-mail: granalma@hanmail.net,

chseo@konkuk.ac.kr]

©2013 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

있다[7,8]. 이러한 문제점은 다공질의 소성체 구조인 경량골재의 특성에 기인한 측면과 물리·화학적 특성이 다른 보통골재와 동일한 규정과 시험법이 적용되어 과도하게 평가되어 나타난 문제점이라 할 수 있다. 특히 KS F 2456 ‘급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법’은 보통골재와 같은 시험방법을 사용하고 있다.

이에 본 연구에서는 국내의 KS F 2456 ‘급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법’ (이하 KS)과 국외의 시험 방법인 ASTM C 330 ‘구조용 경량골재’ (이하 ASTM)의 시험방법의 차이가 있음을 확인하고 이러한 시험방법의 차이가 경량골재 콘크리트(Lightweight aggregate concrete, LWAC)의 동결융해 저항성에 미치는 영향에 대해 연구하고자 한다.

2. 실험 계획

2.1 실험개요

본 연구는 KS와 ASTM의 시험방법 차이가 경량골재 콘크리트의 동결융해에 따른 내구성지수에 미치는 영향과 W/B가 경량골재 콘크리트의 동결융해 저항성에 미치는 영향을 알아보고자 실험을 실시하였으며, 아울러 보통골재를 사용한 동일한 배합의 콘크리트와 비교 평가하였다.

또한 경량골재의 함수 및 수증융해에 따른 동결융해 특성을 알아보고자 경량골재만을 평가 하였으며, 경량골재 콘크리트의 동결융해 저항성 시험 결과와 비교 분석하였다.

경량골재의 종류는 H사, L사 및 A사 경량골재로 총 3종류를 사용하였다.

경량골재 콘크리트의 압축강도는 30 N/mm^2 을 목표로 배합설계하였고, 보통골재와 경량골재 콘크리트의 사용에 따른 내구성의 차이점을 파악하기 위해 44 %와 49 %의 W/B를 적용하였다. 시험 수준은 Table 1과 같다.

Table 1. Contents of experiment

Factor	Experimental methods	LWA	W/B(%)
factor	KS ASTM	H	44
		L	49
		A	
level	2	3	2

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트

본 시험에서는 KS L 5201 규정을 만족하는 H사 제품의 1종 보통 포틀랜드 시멘트로서 물리적 성질과 화학적 성질은 Table 2 및 3과 같다.

Table 2. Physical properties of cement

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Set time		Stability (%)	Com. Strength(MPa)		
		Ini. (Min)	Fin. (Min)		3Day	7Day	28Day
3.15	3,400	230	390	0.1	22.54	29.40	40.18

Table 3. Chemical properties of cement

Elements	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Ign. loss	Free CaO	Insol.
Contents (%)	61.3	21.1	5.2	4.0	2.8	2.4	2.0	0.6	0.2

2.2.2 플라이애쉬

플라이애쉬는 KS L 5405 규정을 만족하는 것으로 사용하였고 그 물리적 성질은 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Physical properties of fly ash

Blaine (cm ² /g)	Density (g/cm ³)	Ign. loss (Wt %)	Moisture (Wt %)	Com. Strength Rate (%)	Unit water rate (%)
3,501	2.22	4.7	0.2	89	97

2.2.3 경량굵은골재

H사, L사 및 A사의 경량골재는 팽창성 혈암 등을 주원료로 하며 인공적으로 소성하여 만든 구조용 인공경량골재로서 입형 및 입도의 조정이 가능하고, 실적률이 양호하며, 입형이 구형에 가깝고 입자표면 상태는 요철이 없이 매끄러운 상태를 지니고 있어 시공연도에 유리한 경량골재를 사용하였다.

Figure 1. Aggregate shape

Table 5. Physical properties of lightweight coarse aggregate

Type	Size (mm)	Unit weight (kg/m ³)	Surface density (g/cm ³)	Absorption ratio (%)	Porosity in Agg.(%)	F.M
H LWA	4~12	807	1.22	18	53.2	6.58
L LWA	8~12	713	1.21	16	52.3	4.99
A LWA	8~12	874	1.61	30	45.6	5.6

2.2.4 보통골재(잔골재 및 굵은골재)

잔골재는 인천산 세척사를 사용하였으며 굵은골재는 25mm이하의 쇄석을 사용하였다. 잔골재 및 굵은골재의 물리적 성질은 Table 6과 같다.

Table 6. Physical properties of fine aggregate

Type	Unit weight (kg/m ³)	Surface density (g/cm ³)	absorption ratio (%)	F.M
Sand(Sea)	1,576	2.6	1.03	2.57
gravel	1,595	2.62	0.84	7.54

2.2.5 고성능 감수제

혼화제는 폴리카보산계 고성능 감수제로 그 물리적 성질은 Table 7에 나타내었다.

Table 7. Physical properties of chemical admixture

Section	Main component	Color	Density (g/cm ³)	pH
High range water reducer	Polycarboxylate type	dark brown	1.07±0.02	6.5~7.5

2.3 실험방법

본 시험에서는 각 H, L, A사의 경량골재 3종류를 사용하였다. 경량골재에 함유된 수분 및 수증용해가 경량골재 콘크리트에 어떠한 영향을 미치는 지를 알아보고자 경량골재의 평가를 실시하였으며, W/B를 2종류로 하여 경량골재 콘크리트를 배합하고 물리적 특성 및 동결융해 저항성 평가를 실시하였다.

2.3.1 경량골재의 동결융해 저항성 평가

경량골재의 시험체 제작은 육안으로 판단하여 균열이 없고 입형이 고른 골재를 약 1,200개를 채취하여 시험체에 각각 골재 600개씩 2개의 시험체를 제작하였다. 2개의 시험체중 한 시험체는 경량골재가 수분을 공급받는 것으로 가정하여 골재를 망에 담아 시험하고, 한 시험체는 경량골재가

수분을 공급받지 못하는 것으로 가정하여 비닐에 담아 수분의 이동을 차단하여 시험을 실시하였다. 시험에서 사용된 시험기기는 전자동 동결융해시험기를 사용하였으며, 공시체의 온도는 동결시 -18 ℃, 융해시 +4 ℃가 되도록 1 Cycle을 설정하였고, 10 Cycle 마다 경량골재의 파괴정도를 육안으로 검토하는 방법으로 100 Cycle 까지 반복 실험하였다.

2.3.2 경량골재 콘크리트의 동결융해 저항성 평가

Table 8은 KS와 ASTM의 차이점을 나타낸 것이며, 가장 큰 차이점은 두 방법 모두 14일 습윤양생을 하지만 ASTM에서는 KS보다 14일 동안 기건양생을 추가하도록 규정하고 있다는 점이다[9,10].

Table 8. Difference between KS and ASTM

Section	KS	ASTM
1 Cycle Average time	2~4(time)	2~5(time)
Specimens	Width 76mm~127mm, Length 356mm~406mm	Width 75mm~125mm, Length 275mm~405mm
Curing conditions	Moist curing at an age of 14 days	Moist curing at an age of 14 days + dry in air for another 14days

이에 본 연구에서는 동결융해 저항성에 대하여 KS 시험방법과 ASTM 시험방법에 준하여 실시하였으며, 굳지 않은 콘크리트의 공기량 및 굳은 콘크리트의 압축강도를 KS 시험기준에 적합한 시험방법에 따라 실시하였다. Plain배합의 목표슬럼프 180±25 mm를 만족하기 위하여 고성능 감수제의 양을 조절하였으며 경량골재 콘크리트의 배합에서는 비교를 위해 혼화제의 양을 Plain배합과 동일하게 설정하였다. 배합설계는 Table 9와 같다.

Table 9. Mix proportions of concrete

Type	B	W/B (%)	S/a (%)	SP (%)	W (Kg/m ³)	Unit weight design(Kg/m ³)			
						C	FA	S	G
Plain-44	390	44	44	0.6	172	351	39	748	960
H LWA	390	44	44	0.6	172	351	39	748	447
L LWA	390	44	44	0.6	172	351	39	748	443
A LWA	390	44	44	0.6	172	351	39	748	591
Plain-49	390	49	44	0.4	191	351	39	726	931
H LWA	390	49	44	0.4	191	351	39	726	433
L LWA	390	49	44	0.4	191	351	39	726	430
A LWA	390	49	44	0.4	191	351	39	726	573

3. 실험결과 및 분석

3.1 경량골재 실험결과

경량골재를 24시간 침수하여 각 골재가 동일한 조건의 침수상태가 되도록 한 다음 동결융해 평가를 실시하였다.

H사, L사, A사 경량골재를 물에 직접 영향을 받는 실험과 물의 직접적인 영향을 받지 않는 실험방법으로 100 Cycle까지 실시한 결과, 물의 영향을 받지 않는 경량골재에 비해 물에 영향을 받는 H사, L사, A사 경량골재는 각각 19 %, 73 %, 92 % 더 많이 파괴를 보였다. Figure 2와 Figure 3은 물의 직접적인 영향을 받은 골재와 물의 영향을 받지 않은 골재의 Cycle당 골재 파괴를 나타낸 것이다.

Figure 2. Ratio of break (blocking absorbability of LWA)

Figure 3. Ratio of break (unblocking absorbability of LWA)

융해 시 물의 접촉을 차단한 경우 A사 경량골재는 30~40 Cycle에서 파괴가 많이 일어났다. H사, L사 경량골재보다 A사의 경량골재의 파괴 시점이 빠르고 파괴율이 높은 것은 단한공극구조로 제품 출하시 초기 30 %의 높은 흡수 조건으로 생산되어 내부 수분의 동결 시 팽창압에 의한 것으로 판단된다. H사, L사 경량골재의 경우 24시간 흡수율

은 각각 18 %, 16 %로 포화 흡수량에 비해 낮은 흡수량을 보여 동결 시 팽창압을 완충 시킬 수 있는 공극량이 많아 파쇄가 발생하지 않은 것으로 판단된다.

반면 융해 과정에서 물과 접촉이 되는 경우 실험횟수가 증가함에 따라 수분이 지속적으로 모든 골재의 내부 흡수율이 증가된다. 내부 흡수율이 30 %로 가장 큰 A사 경량골재의 경우 40~50 Cycle에서 급격히 파괴가 일어났으며 흡수율이 18 %인 L사 경량골재의 경우 Cycle이 증가함에 따라 파괴 비율로 증가하였다. H사 경량골재는 다른 경량골재에 비해 파괴가 크게 이루어지지 않았으나 융해 시 물을 차단한 상태에 비해 19 %정도 파괴가 증가한 것으로 나타났다.

Figure 4는 동결융해 과정에서의 각 골재의 파괴형상을 나타낸 것이다.

Figure 4. Fracture of LWA

3.2 경량골재 콘크리트 실험결과

3.2.1 공기량

Figure 5는 굳지 않은 콘크리트의 공기량 실험 결과이다.

Figure 5. Air content of LWAC

W/B 44 %에서 Plain과 H사, L사 및 A사의 경량골재를 사용한 콘크리트의 공기량은 각각 4.3 %, 5.6 %, 5.0 %, 6.0 %로 나타났으며 W/B 49 %의 공기량은 각각 4.1 %, 4.9 %, 4.2 %, 5.5 % 으로 나타났다. 골재 종류 및 W/B의

차에 따라 공기량은 오차범위 ± 1.5 %내에 있어 별 차이가 없는 것으로 판단된다.

3.2.2 압축강도

동결융해시험을 위해 제조된 콘크리트의 물성적인 성질을 파악하기 위한 콘크리트의 재령 3일, 7일, 28일의 압축강도를 측정한 결과 Figure 6과 같이 나타났다.

W/B 44%의 압축강도 실험결과 H사, L사, A사의 28일 압축강도는 각각 36, 35, 42 N/mm^2 으로 나타났으며, A사 경량골재 콘크리트의 강도가 가장 큰 것으로 나타났다.

W/B 49 %의 28일 압축강도 실험결과 H사, L사, A사 각각 34, 32, 36 N/mm^2 으로 나타났다. W/B 49 %에서도 A사 경량골재 콘크리트가 가장 강도가 큰 것으로 나타났다. 이는 경량골재의 파쇄강도와 연관이 있는 것으로 파쇄강도가 가장 큰 A골재는 Plain과 비슷한 강도 발현을 보였으며 골재의 파쇄강도가 작은 H, L 골재는 상대적으로 낮은 강도 발현을 나타낸 것으로 판단된다.

Figure 6. Compressive strength of LWAC (W/B 44%, 49%)

3.2.3 동결융해 저항성

1) 상대동탄성계수

외부에 노출된 콘크리트는 기온의 변화에 의해 동해를 받을 가능성이 있으므로 동결융해저항성(내구성지수)이 있어야 한다.

Figure 7과 Figure 8은 KS와 ASTM의 시험방법으로 실험한 시험체의 상대동탄성계수를 나타낸 그래프이다. KS에서 보통골재 콘크리트의 상대동탄성계수는 300 Cycle까지 모두 측정이 되었다. 반면 경량골재 콘크리트의 경우 W/B 44 %의 H사, L사, A사는 각각 45 Cycle, 6 Cycle, 15 Cycle에서 60% 이하의 상대동탄성계수가 나타났으며, W/B 49 %의 H사, L사, A사는 각각 6 Cycle, 3 Cycle, 5

Cycle에서 60 % 이하의 상대동탄성계수가 나타났다.

ASTM시험방법에서는 보통골재 콘크리트의 상대동탄성계수는 300 Cycle 까지 모두 측정이 되었다. 반면 경량골재 콘크리트의 경우 W/B 44 % H사, L사 경량골재 콘크리트는 300 Cycle 까지 모두 측정이 되었으며 A사는 270 Cycle에서 60 % 이하의 상대동탄성계수가 나타났다. W/B 49%에서는 H사, L사, A사는 각각 280 Cycle, 105 Cycle, 210 Cycle에서 60 % 이하의 상대동탄성계수가 나타났다.

KS 대비 ASTM의 보통골재 콘크리트는 비슷한 성향을 보이고 있다. 반면 경량골재 콘크리트는 ASTM 시험방법

Figure 7. Change of relative dynamic modulus of elasticity by KS test method KS of LWAC

Figure 8. Change of relative dynamic modulus of elasticity by test method ASTM of LWAC

이 KS 시험방법보다 상대동탄계수가 더 많은 Cycle에서 측정되었다.

2) 질량변화율

Figure 9와 Figure 10은 KS 시험방법과 ASTM 시험방

법의 질량변화율을 나타낸 그래프이다. KS 시험방법에서의 W/B 44 %의 H사, L사 경량골재의 경우 처음에는 동결융해가 반복됨에 따라 공시체의 표피에 있는 경량골재 콘크리트의 일부분이 박락현상에 의해 질량 감소가 되었다고 판단되며, 이후 반복되는 수분흡수가 일어나 미세균열이 발생하고 미세균열을 통하여 흡수되는 수량이 증가하고 이는 동결시 다시 미세균열을 증가시킴으로써 흡수량이 증가함에 따라서 질량이 증가하는 것으로 판단된다. W/B 49%의 질량 변화율은 내부수분에 의한 팽창이 진행됨에 따라서 미세균열이 더 빠르게 발생하여 질량이 증가한 것으로 판단된다.

Figure 9. Change ratio of weight by KS test method KS of LWAC and by ASTM test method of LWAC

Figure 10. Change ratio of weight by ASTM test method of LWAC

ASTM 시험방법에서의 W/B 44 %에서는 약 40 Cycle까지는 반복적인 수분흡수에 의하여 질량이 증가한 것으로 판단되며, 이후 경량콘크리트의 일부분에서 박락현상으로 인

하여 질량감소를 나타낸 것으로 판단된다. W/B 49 %에서의 질량변화율은 L사, A사 경량골재의 경우 반복흡수로 인하여 수분팽창 파괴가 계속적으로 일어남에 따라 계속적으로 질량이 증가한 것으로 판단된다. H사 경량골재의 경우 W/B 44 %와 동일한 성향을 보이고 있다. KS 시험방법에 비해 ASTM 시험방법이 질량증가가 작은 이유는 14일 기건양생 기간에서 좀 더 치밀한 시멘트 페이스트가 구성되어 수분흡수가 적어 팽창파괴가 적었기 때문으로 판단된다. 또한 W/B 44 % 배합의 질량이 W/B 49 %의 질량 증가보다 작은 이유는 상대적으로 W/B가 낮아 경화 후 콘크리트의 내부 자유수도 적기 때문인 것으로 판단된다.

3) 내구성지수

KS 시험방법과 ASTM 시험방법의 내구성지수는 Figure 11과 같다. 보통골재 콘크리트의 경우 KS 시험방법과 ASTM 시험방법에는 큰 차이를 보이지 않았다.

Figure 11. Durability index

하지만 경량골재 콘크리트의 경우 큰 차이를 보였다. KS 시험방법은 ASTM 시험방법 대비 W/B 44 %의 H사, L사, A사 경량골재 콘크리트의 내구성지수는 각각 91 %, 85 %, 53 % 더 높게 나타났다. W/B 49 %에서는 H사, L사, A사 경량골재 콘크리트의 내구성지수는 각각 47 %, 20 %, 41 % 더 높게 나타났다. KS 시험방법의 경우 W/B 44, 49 % 모두 낮은 내구성지수를 나타냈으나, ASTM 시험방법의 경우 W/B 49 %에서 내구성지수가 상대적으로 낮게 측정되어, W/B가 낮을수록 내구성지수의 차가 큰 것으로 나타났다. 이는 W/B가 높을수록 내부 자유수의 양이 증가하여 14 일 기건양생 후에도 내부 수분이 많아 두 시험법 모두 내구성지수가 낮게 측정되어 나타나는 것으로 판단된다.

5. 결 론

국내의 KS F 2456 ‘급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법’ 과 국외의 시험 방법인 ASTM C 330 ‘구조용 경량골재’ (이하 ASTM)의 시험방법으로 경량골재 콘크리트의 동결융해 저항성을 평가 비교한 결과는 다음과 같다.

- 1) 경량골재의 동결융해 평가 결과 공극형태 및 흡수율에 영향을 받는 것으로 나타났다. 열린 공극 구조보다는 닫힌 공극이 동결융해에 대한 파쇄가 많이 나타났으며 흡수율이 높은 골재 일수록 동결융해 저항성이 낮은 나타났다.
- 2) 경량골재 콘크리트의 동결융해 저항성 평가를 위해 측정한 상대동탄성계수에서는 KS 시험방법으로 시험한 결과 보통골재 콘크리트는 W/B의 차이에 따라 미비하게 변화는 있었으나, 300 cycle까지 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 경량골재 콘크리트는 모두 100 cycle 이전에 60 %이하로 나타났다.
- 3) ASTM 시험방법에서는 보통골재 콘크리트는 W/B와 상관없이 상대동탄성계수의 변화가 없었으며 경량골재 콘크리트의 경우 W/B 49 %의 L사의 배합을 제외한 모든 배합에서 200 cycle까지 60 %이상인 값으로 나타났다.
- 4) 보통골재 콘크리트는 골재 자체의 흡수율이 낮아 경화 후 내부 자유수의 양이 적어 두 시험방법 모두 90 % 이상의 내구성지수로 나타났으나, 경량골재 콘크리트의 경우 KS보다 ASTM의 내구성지수가 최대 91 %까지 높게 평가되었다. 이는 흡수율이 큰 경량골재의 원인으로 14일 수증양생만을 실시하는 KS 시험방법에서 내부의 높은 수분이 동결되면서 높은 팽창압이 발생되어 콘크리트 파괴로 이어진 것이 주 원인으로 판단되며 W/B가 낮을수록 두 시험방법에 의한 결과 값의 차이가 많은 것으로 나타났다.

이상과 같이 경량골재 콘크리트의 경우 시험방법에 따라 동결융해 저항성이 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 국내 기준인 KS 시험방법이 국외 기준인 ASTM 시험방법 보다 경량골재 콘크리트의 경우 동결융해 저항성이 저 평가 되는 것으로 나타났다. 이에 경량골재 콘크리트의 보다 정확한 평가를 위해 규정 및 시험 기준의 다각적인 검토가 필요한 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant(Code 11-Technology Innovation-F04) from Construction Technology Innovation Program(CTIP) funded by Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs(MLTM) of Korean government.

References

1. Kosmatka SH, Kerkhoff B, Panarese WC. Design and control of concrete mixtures, 15th ed, Skokie (IL): Portland Cement Association; 2011, Chapter2, Sustainability; p. 14-22.
2. Jeon HK, Kim DH, Lee JC, Ji SW, Yoo TD, Seo CH. A study of the characteristics of the high flowable concrete, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2003 Jun;3(2):129-34.
3. Seo CH. On study the properties of experimental to lightweight concrete [dissertation]. [Seoul (Korea)]: Hanyang University; 1985. 154 p.
4. Mindess S, Young JF, Darwin d. Concrete, 2nd ed. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall; 2003. p. 461-4.
5. Newman J, Choo BS. Advanced concrete technology; Processes, 1st ed. Oxford (UK): Elsevier Butterworth Heinemann; 2003. Chapter2, Porperities of lightweight concrete; p. 2/24.
6. So SY. A study on the thermal insulation property of concrete composites using lightweight aggregate, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2004 Sep;4(3):93-100.
7. Clarke JL. Structural lightweight aggregate concrete, 1st ed. Glasgow (UK): Blackie Academic & Professional; 1993. Chapter4, Construction; p. 51-2.
8. ACI Committee 213. Guide for structural lightweight aggregate concrete(ACI 213R-03). American Concrete Institute, Detroit, 2003.
9. Korea Standards Association, KS F 2456 Testing method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing, Korean Standards Association, 2008.
10. ASTM International, ASTM C 330 / C 330 M - 09 Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete, American Society for Testing and Materials, 2009.