

Research Paper

외기온도 및 시험체 크기를 고려한 콘크리트의 간이-단열온도 상승시험에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Semi-Adiabatic Temperature Rise Test of Concrete Considering Outside Temperature and Specimen Size

온정권¹ · 김영선² · 문형재² · 남정수³ · 김규용^{3*}

On, Jeong-Kwon¹ · Kim, Young-Sun² · Moon, Hyoung-Jae² · Nam, Jeong-Soo³ · Kim, Gyu-Yong^{3*}

¹Ph.D Course, Mooyong CM, 109 Jung-daero, Songpa-gu, Seoul, 05718, Korea

²Researcher, Research & Development Institute, LOTTE Engineering & Construction, Seoul, 06527, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34134, Korea

*Corresponding author

Kim, Gyu-Yong

Tel : 82-2-821-5623

E-mail : gyuyongkim@cnu.ac.kr

Received : September 29, 2021

Revised : November 19, 2021

Accepted : November 22, 2021

ABSTRACT

Recently, due to the increase in high-rise apartment and residential-commercial complex buildings, a number of mega-class mass concrete members with a thickness of 3m or more have been designed. As the construction of mass concrete such as transfer beam and slab is increasing not only in foundation members but also in special structures, research on reducing temperature cracks in mass concrete is being conducted. To review temperature cracks in mass concrete, it is important to review the thermal properties of concrete, but it is difficult to use an adiabatic temperature rise tester in the field, so the semi-adiabatic temperature rise test is mainly used. In this study, to improve the accuracy of the results of concrete heat characteristics gained by the semi-adiabatic temperature rise test, various factors affecting heat loss compensation and methods were reviewed and presented.

Keywords : adiabatic temperature rise test, heat lose compensation, mass concrete, specimen size

1. 서론

2000년 이후 국내 건설시장에는 초고층 아파트 및 주상복합 형태의 초고층 주택이 새로운 도시형 주택으로 자리잡아 왔으며[1], 지금은 전국 어디에서든 쉽게 접할 수 있을 정도로 증가하였다. 초고층 주상복합 건축물은 높은 자중으로 기초 부재 두께가 2.5m 이상인 경우가 다수이며, 특수한 구조형식으로 전이 보 및 슬라브(Transfer girder and slab) 등과 같은 매스형 부재가 다수 설계되고 있어 매스콘크리트 시공시 온도균열관리의 중요성은 더욱 높아지고 있다[2].

콘크리트는 경화과정에서 화학반응에 의한 수화열이 발생하며, 특히 매스콘크리트의 경우 열이 외부로 방출되지 못해 내부 온도가 높게 유지되지만, 외기와 맞닿은 부분은 열의 방출이 용이해 온도가 내부에 비해 낮은 현상을 보인다. 이로 인해, 내·외부의 온도차이에 따른 응력이 발생하여 콘크리트에 균열이 유발되고, 이로 인해 구조물의 내구성이 손상된다[3]. 내구적 관점에서 온도 균열을 제어하는 것은 매우 중요하기 때문에 콘크리트 내부의 온도분포와 이력을 예측해야 하며 이를 위해서는 콘크리트의 단열온도상승에 관한 열특성을 정확하게 검토해야 한다[4,5].

콘크리트의 단열온도상승량을 파악하기 위해서는 실제 배합조건과 동일한 콘크리트를 사용하여 단열온도상승시험(이하, 단열시험)을 실시할 필요가 있다. 콘크리트의 단열온도상승량을 구하는 방법으로는 (1) 실내 단열온도상승 시험기를 사



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

용, (2) 콘크리트의 배합에서 직접 계산에 의해 구함, (3) 간이-단열온도상승시험 (이하, 간이-단열시험)으로 추정 하는 방법이 있다[4]. 실내 단열온도상승 시험기 중 물 순환에 의해 단열환경을 구현하는 기기가 비교적 정확도가 높은 것으로 나타나고 있으나, 단열온도상승시험기에 의해 다수의 배합을 동시에 평가 할 수 있는 시험소도 부족하고 시험기가 대형이면서 고가이기 때문에 시공현장에서 간단히 사용할 수 있는 것은 아니다[6].

현장에서는 주로 간이-단열시험에 의해 얻어진 온도상승량으로 콘크리트의 열특성을 확인하고 있으며, 많은 연구자들은 간이 단열온도상승시험에 의해서 보다 정밀한 단열온도 상승량(Q_{∞}) 및 온도상승 속도계수(τ)를 예측하기 위해 시험체 크기, 단열재 두께, 타설온도 및 외기 온도 등을 고려한 다양한 열손실량 검토 연구를 진행하고 있다[6,7].

이에 본 연구에서는 현장에서 적용하기 쉽고 비교적 경제적인 발포 단열재를 활용하여 간이 단열온도상승시험을 실시하였으며, 시험체 크기, 단열재 두께, 외기환경 조건 및 콘크리트 배합조건 등이 단열온도상승량에 미치는 영향을 검토하여 현장에서 보다 정밀한 매스콘크리트의 열특성을 검토할 수 있는 시험방향을 제시하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1에 나타난 바와 같이 물결합재비(W/B), 시험체 용적(단열재 두께), 혼화재 치환율 및 외기 조건을 시험요인으로 설정하였다. 실내 조건 실험에서는 시험체 용적 25L 및 75L를 적용한 간이단열시험과 단열온도상승 시험기를 사용한 시험을 진행하여 간이-단열시험으로 도출된 콘크리트 열특성에 미치는 요인을 검토하였다. 실외 조건 실험에서는 25L, 75L, 1,000L 용적의 시험체를 활용하여 현장에서 간이단열시험에 의한 콘크리트의 열특성 검토시 시험체 용량 및 단열재 두께와 외기온도 조건이 미치는 영향을 검토하였다.

모든 외기 조건 실험에는 2종류의 물결합재비가 적용되었다. 실내조건에서는 명확한 단열온도상승량을 확인하기 위해 레미콘 호칭강도 40MPa 및 50MPa에 해당하는 W/B를 설정하였으며, 실외조건은 건설현장에서 가장 많이 사용하는 강도 수준인 24MPa와 30MPa의 W/B로 설정하였다. 혼화재 치환율에 대한 영향은 실내실험 조건에 적용하였으며 슬래그시멘트와 플라이애시를 결합재 총량의 (80:20)% 및 (75:25)%로 설정하였으며, 실외 조건에서는 구조물 골조용 콘크리트 배합에 주로 적용되는 (45:10)%를 적용하였다.

Table 1. Experimental plan

Curing condition	W/B ^a	Specimen Volume(Liter) [insulation thickness]	Dosage of binder (SC : FA, B×%) ^b	Evaluation item
Indoor laboratory (20±3°C)	0.33	25 [30mm]	80 : 20	- Adiabatic temperature rise by tester(°C) - Semi-adiabatic temperature rise(°C)
	0.36	75 [45mm]	75 : 25	
Outdoor warehouse storage (15±5°C)	0.43 0.47	25 [30mm]	45 : 10	- Maximum adiabatic temperature(°C)
		25+ [30+14(Air)+45mm]		- Coefficient of thermal properties(Q_{∞} , τ)
		75 [45mm] 1,000 [100mm]		- Coefficient of heat lose(λ)

^a Water to binder ratio

^b SC : Slag cement, FA : Fly ash, B×% : percentage of binder weight

2.2 사용재료 및 콘크리트 배합

본 연구에 사용된 콘크리트 재료는 부산지역 레미콘사에서 사용하는 재료를 적용하였다. 실외 조건 시험의 경우 레미콘

에 의해 시험체를 제작하였으며, 실내 조건은 콘크리트 비빔방법만 100L 강제식 팬타입 믹서를 사용하였을 뿐 실외조건과 동일한 재료를 사용하였다. 본 연구에 사용한 콘크리트 배합은 Table 2에 나타낸 바와 같다. 실험계획에서 기술한 바와 같이 실내조건 4종류, 실외조건 2종류로 총 6종류의 콘크리트 배합을 사용하였다.

Table 2. Concrete mix proportions

Mix No.	W/B (%)	S/a (%)	Water (kg/m ³)	Unit weight(kg/m ³)					Admixture (B×%)	
				Binder	OPC	Slag cement	Fly ash	Sand		Gravel
T1	33.0	48.0	158	479	0	383	96	819	896	1.0
T2	33.0	48.0	158	479	0	359	120	812	896	1.0
T3	36.0	49.0	158	439	0	351	88	854	899	1.0
T4	36.0	49.0	158	439	0	329	110	847	898	1.0
T5	42.5	50.0	165	388	175	175	39	847	891	0.8
T6	49.0	52.0	165	337	152	152	33	926	904	0.8

2.3 실험 방법

실내조건 및 실외조건에서의 간이 및 단열시험 전경은 Figure 1에 나타낸 바와 같다. 단열시험을 위한 시험기는 일본 Tokyo Riko사에서 제작한 “Adiabatic Calorimeter”를 사용하였다. 간이-단열시험을 위한 시험체는 총 4종류로 이중 3종류는 기성품 발포 단열 박스를 사용하였고, 1,000L 시험체는 유료품에 의해 1.2m의 정육면체 틀을 제작한 후 내부 6면에 100mm 단열재를 설치하였다. 사용된 발포 단열 박스의 내부 크기(시험체 크기)는 0.32×0.27×0.32m(25L), 0.44×0.44×0.39m(75L)이며 각 박스의 단열재 두께는 30mm 및 45mm이다. Table 1의 실험계획에서 실외조건 시험체 중 “25L[30+14(Air)+45mm]”의 경우 75L 단열재 박스에 25L 단열재 박스를 넣어 제작하였다.

간이-단열시험의 온도측정은 $\varnothing 0.65\text{mm}$ T-type 열전대를 사용하여 시험체 중심과 측면(단열재와 콘크리트 경계면)에서 실시하였다. 온도기록은 데이터로거를 사용하여 10분간격으로 7일간 진행하였다.

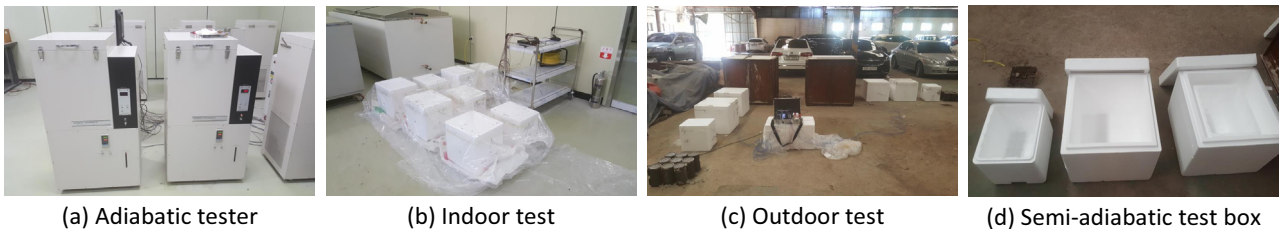


Figure 1. Adiabatic temperature rise apparatus and test view

2.4 간이-단열온도상승량 열손실 보정

간이-단열시험으로부터 얻어진 온도 데이터의 열손실 보정은 Ng et al.[8] 및 Ham et al.[9]의 연구를 참고하였다. 단열온도상승량은 콘크리트의 수화열로 인해 발생하는 열량과 외부로 손실되는 열량의 차이로서 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 V 는 단열재에 둘러싸여 있는 콘크리트 시험체 부피, T_v 는 실제 측정되는 콘크리트 평균온도, T_p 는 타설온도, T_G 는 단열온도상승량을 의미한다. 외부로 손실되는 열량은 외기 온도와 콘크리트 표면 온도의 차이에 비례한다고 알려진 푸리에 법칙(Fourier Law)을 이용하여 식 (1)을 식 (2)와 같이 바꿔 표현하여 최종 적용하였다. 시험체 온도는 현장 시험의 간소화를 위해 시험체 중심과 측면에서 측정한 2개소 온도 평균값을 콘크리트 평균온도로 하였다.

$$T_G = (T_V - T_P) + \frac{H_L}{V\rho c} \tag{1}$$

H_L : 열손실량

ρc : 콘크리트 밀도 및 비열

$$T_G = (T_V - T_P) + \lambda \int_0^t (T_S - T_A) dt \tag{2}$$

T_S : 콘크리트 표면온도

T_A : 간이-단열시험 주변 온도(외기온도)

t : 콘크리트 타설 후 시간

λ : $\frac{k}{V\rho c}$ (k : 단열재의 열관류율), 실험에 의한 계수

$$Q(t) = Q_\infty [1 - e^{-\tau(t-t_0)}] \tag{3}$$

간이-단열시험에 의한 온도곡선은 식 (2)를 통해 단열온도상승 곡선으로 보정할 수 있으며, 콘크리트의 열특성인 최종 단열온도상승량(Q_∞) 및 온도상승 속도계수(τ)는 콘크리트 시방서[10]에서 제시하는 식에 초기 응결에 의한 지연시간을 고려하여 제시한 식 (3)을 활용하고, 수식 계산을 통해 회귀 분석함으로써 도출하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실내조건에서의 간이 단열온도상승시험

Figure 2 및 Table 3은 시험기에 의한 단열시험 결과 및 간이-단열시험 결과를 나타낸 것이다. 간이-단열시험에서 시험체 용적 차이(75L 및 25L)에 따른 콘크리트 내부 평균온도는 최고온도 도달시점에서 약 1.2°C로 모든 시험조건에서 유사하게 나타났다. 단열시험의 최고온도값과 비교시 3.0~3.7%수준이다.

열보정을 실시한 간이단열온도상승 곡선은 75L 및 25L의 시험체 용적에 따라 육안 구분이 어려운 수준으로 거의 동일하게 나타났으나, 장비로 평가한 단열온도상승량과 비교시 75L시험체가 보다 유사한 것으로 나타났다. 간이단열온도상승시험은 시험체 용적이 크거나 단열재가 두꺼울수록 보다 정밀한 콘크리트의 열적특성을 도출할 수 있는 것으로 판단된다.

동일한 W/B 조건에서 혼화재 치환율이 높을수록 간이 및 단열온도상승량이 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 혼화재의 양이 증가함에 따라 수화반응에 의한 발열량이 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 또한 W/B 0.36의 T3 및 T4의 경우보다, W/B 0.33의 T1 및 T2의 간이 및 단열온도상승량이 더 크게 낮아지는 것으로 나타났다. W/B가 낮을 경우, 단위시멘트량이 증가한다. 높은 단위시멘트량의 조건에서 혼화재의 치환율 증가는 수화반응에 더 많은 영향을 미칠 것으로 판단된다.

Table 3에 나타난 열손실계수(λ)는 간이단열온도상승곡선이 시험장치로 도출한 단열온도상승곡선과 가장 유사하게 될 때의 값을 나타낸 것이다. 동일한 외기조건, 시험체 크기 및 단열재 두께를 적용한 시험체들의 열손실계수가 다른 것은 단열재의 열전도율, 대류열저항, 복사열저항 및 표면열전달저항 등을 고려하여 결정하는 열관류율의 차이가 주된 원인으로 판단되며, 부가적으로 콘크리트 비열 및 밀도차 등이 있다. 본 연구의 열손실계수는 시험체 용적이 클수록(또는 단열재 두께가 증가할수록) 작게 나타났으며, 단위결합재량이 낮거나 혼화재 치환율이 높을수록 열손실계수가 작게 나타났다.

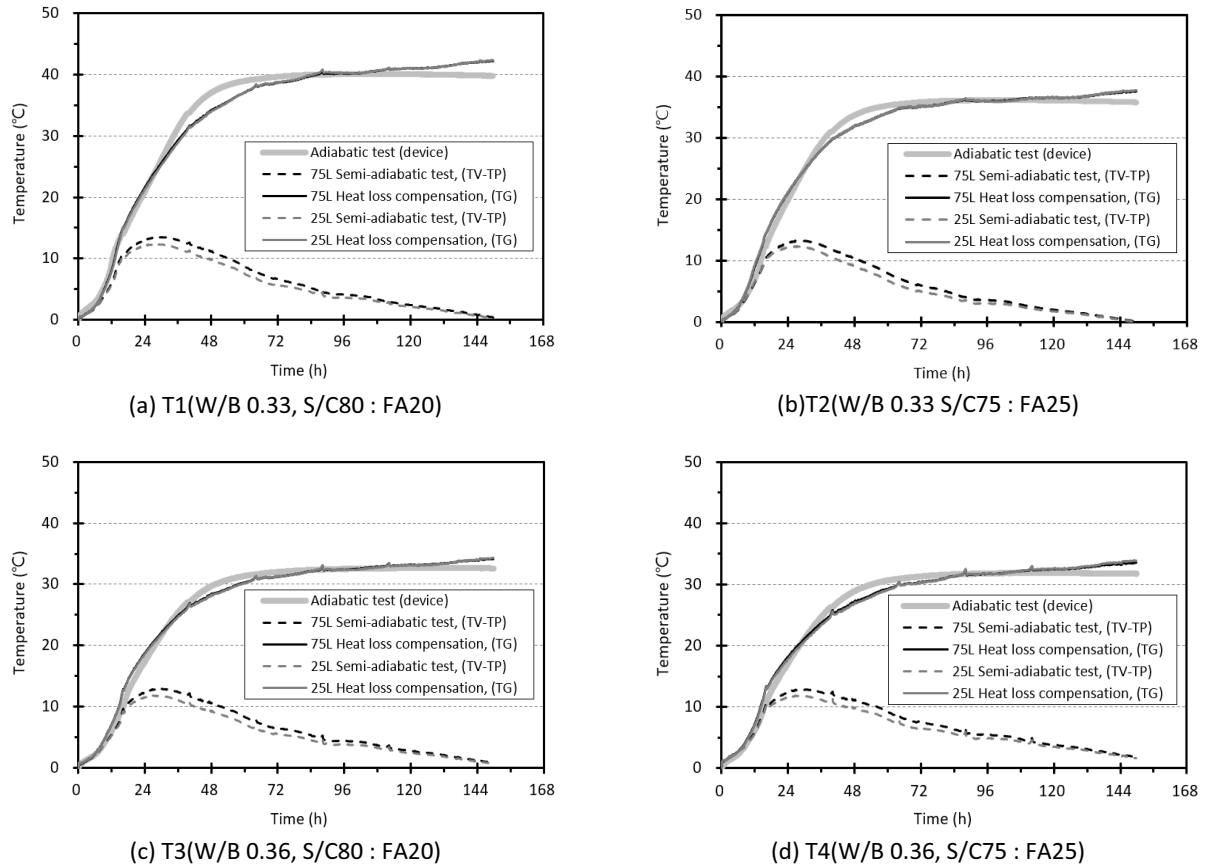


Figure 2. Results of semi-adiabatic and adiabatic temperature rise tests under indoor conditions

Table 3. Comparison of the results of semi-adiabatic and adiabatic temperature rise test of concrete under indoor conditions

Specimen No.	Adiabatic temperature rise (°C)	Semi-adiabatic temperature rise			
		without heat loss compensation(°C)	with heat loss compensation(°C)	Error(%)	λ -value
T1-75L	40.2	13.55	42.23	4.8	0.0508
T1-25L		12.40	42.37	5.1	0.0598
T2-75L	36.1	12.25	37.58	3.9	0.0474
T2-25L		12.25	37.72	4.3	0.0546
T3-75L	32.7	12.90	34.19	4.4	0.0429
T3-25L		11.90	34.36	4.8	0.0507
T4-75L	31.9	12.85	33.54	4.9	0.0418
T4-25L		11.80	33.92	6.0	0.0499

Figure 3은 T1 및 T2 시험체에 대하여 10시간 간격으로 120시간까지 간이 및 단열온도상승 결과값을 비교하여 나타내었다. 절편값을 0으로 취하여 추세선을 그리면 $y = 0.9866x$ 의 추세식이 도출되며, R^2 값은 0.9889로 상관관계가 매우 높음으로 나타났다.

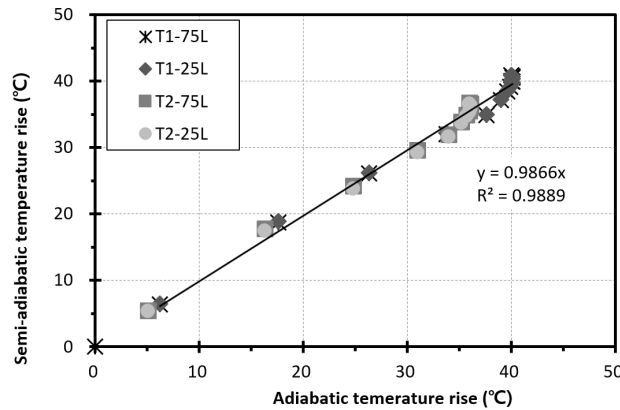


Figure 3. Correlation between adiabatic and semi-adiabatic temperature rise test results of T1 and T2

3.2 실외조건에서의 간이 단열온도상승시험

Table 4 및 Figure 4는 실외 조건에서 실시한 T5-콘크리트 시험체의 간이-단열시험 결과와 열손실 보정을 통한 단열온도 상승곡선을 나타낸 것이다. 간이-단열시험에 의한 온도곡선은 시험체 크기 및 단열재 두께에 따라 명확한 차이를 나타내고 있으며, 시험체 크기 1000L, 75L 및 25L에 따라 최고 온도는 26.75, 18.40 및 9.20°C로 시험체가 작을수록 최고온도는 낮게 나타났다. 75L 및 25L 시험체의 최고온도 편차를 비교시 실내조건에 비해 실외조건(타설온도보다 낮은 조건)에서 큰 것을 확인할 수 있으며, 콘크리트 온도와 외기온도편차가 커질 경우 작은 시험체일수록 열용량이 작기 때문에 상대적 열손실이 큰 것을 확인하였다. 이는 75L 및 25L 시험체의 열손실계수에서 정량적으로 나타나는데, 실내조건에서는 두 시험체의 열손실계수 편차가 0.01이하로 나타난 반면 실외조건에서는 약 0.02로 2배이상 차이가 확인된다. 따라서, 현장에서 외기온도가 낮은 시기에 간이-단열시험을 실시할 경우 시험체 크기와 단열재 두께가 클수록 열손실 보정에 대한 정확도는 높아질 것으로 판단된다.

한편, 간이-단열온도상승곡선의 열손실 보정은 온도하강 구간의 곡선이 그래프 x축과 수평으로 수렴할 때를 보정완료 시점으로 볼 때 Table 4와 같이 모든 시험체의 최종단열온도상승량(Q_{∞})은 매우 유사하게 나타났다. 그러나, 온도상승 속도계수(τ)는 시험체 체적에 따라 큰 차이를 나타내는 것으로 나타나고 있다.

Table 4. Results of comparison of semi-adiabatic temperature rise test of concrete under outdoor conditions

Specimen No.	Without heat loss compensation(°C)	With heat loss compensation				λ -value
		Q_{∞}	τ	Ratio based on 1000L(%)		
				Q_{∞}	τ	
T5-1000L	26.75	38.33	2.04	1.00	1.00	0.0073
T5-75L	18.40	38.34	1.36	1.00	0.67	0.0184
T5-25L+	16.25	38.54	1.14	1.01	0.56	0.0208
T5-25L	9.20	38.76	0.82	1.01	0.40	0.0389
T6-1000L	23.75	35.43	1.90	1.00	1.00	0.0085
T6-75L	17.25	35.43	1.35	1.00	0.71	0.0179
T6-25L+	15.60	35.39	1.13	1.00	0.59	0.0196
T6-25L	8.65	35.47	0.80	1.00	0.42	0.0372

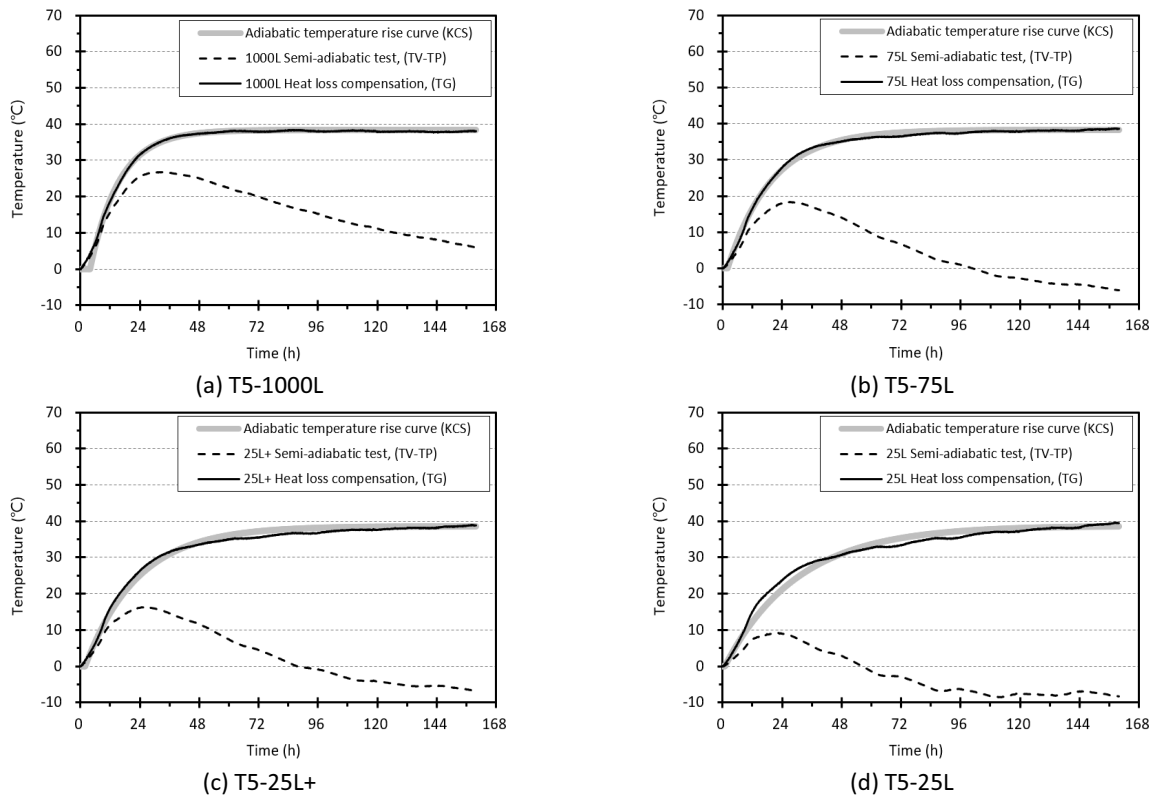


Figure 4. Semi-adiabatic temperature rise of T5-concrete before and after heat loss compensation under outdoor conditions

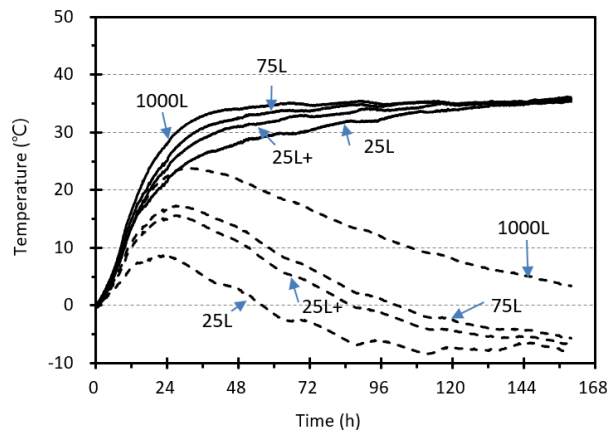


Figure 5. Semi-adiabatic temperature rise of T6-concrete before and after heat loss compensation under outdoor conditions

Figure 5는 T6-콘크리트 시험체의 열보정 전후의 단열온도상승곡선을 나타낸 것이다. 앞서 기술한 바와 같이 시험체 크기가 작을수록 온도 상승시의 기울기가 낮아지는 것으로 나타났다. 따라서 현장에서 간이-단열온도상승시험시 외기온도와 콘크리트 온도차가 심한 경우 온도상승 속도계수(τ)의 예측에 주의가 필요하다.

25L+시험체의 간이-단열시험은 단열재 두께에 따른 간이-단열온도상승량을 검토하기 위해 실시하였다. T5 또는 T6 25L+ 시험체는 25L시험체와 콘크리트 체적은 동일하나 30mm 기본 단열재에 공기층 14mm 및 45mm 두께의 추가 단열재를 적용하였다. 간이-단열시험결과 25L+시험체의 온도곡선은 25L시험체에 비해 1,000L 시험체의 온도곡선과 유사한 것

로 나타났다. 그러나, 75L 시험체와 비교시에는 온도상승 속도계수(τ)가 작게 나타나 최고온도 도달시간이 지연되는 결과를 나타냈으며, 열손실 계수값 또한 높게 나타났다. 한국 패시브 건축협회의 문헌[11]에 따르면 공기층은 복층유리사이의 공기층과 같이 완전 밀폐(진공)가 이루어지지 않는 경우에는 단열성이 무시될 수준으로 언급되어 있어, 결과적으로 추가된 단열은 시험체 체적을 50L 증가시키는 것보다 효과가 낮은 것으로 판단된다.

4. 결론

현장조건에서 간이-단열온도상승시험을 통한 매스콘크리트의 열적특성을 보다 정밀하게 평가하기 위해 외기 환경조건 별 시험체 크기, 단열재 두께 및 콘크리트 배합의 영향을 검토한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 발포단열재를 활용한 간이-단열온도상승시험은 외기온도와 시험체 온도차, 시험체 크기 및 단열재 두께 등을 고려한 열손실 보정을 통해 콘크리트의 열특성을 보다 정확하게 예측할 수 있었으며, 시험기 결과와의 상관성은 $y = 0.9866x$, R^2 값은 0.9889로 검토되었다.
- 2) 간이-단열온도상승시험 결과는 시험체 용적이 크고, 단열재 두께가 두꺼울수록 열특성 예측은 정밀한 것으로 나타났으며, 열손실계수는 시험체 용적이 클수록 작은 값을 나타내며 결합재량이 낮거나 혼화재 치환율이 높을수록 작은 값을 나타내었다.
- 3) 콘크리트 온도보다 낮은 외기 온도조건은 간이-단열온도상승시험 결과값을 변동시키는 주요 영향인자로서 콘크리트 표면온도와의 편차가 클수록 열손실계수가 크게 나타났으며, 최종단열온도상승량(Q_{∞})보다는 온도상승 속도계수(τ)의 정확도를 명확하게 저하시키는 것으로 확인되었다.
- 4) 간이-단열시험 결과의 정확도 향상을 위해 단열재 성능을 높이는 방안으로 실시한 공기층 적용은 시험체 크기를 증가시키거나 단열재두께를 증가시키는 방안에 비해 효과가 낮은 것으로 나타났으며, 이는 완전한 밀폐시에만 공기 단열층이 형성되기 때문으로 추측되었다.
- 5) 현장에서 간이-단열온도상승 시험에 의해 정확도 높은 콘크리트 열특성을 도출하기 위해서는 외기 온도 조건이 낮거나 발열량이 작은 배합일수록 단열재 두께와 시험체 크기를 증가시킬수록 유리하며, 본 연구에서는 온도편차가 작은 실내조건인 경우 단열재 50mm 이상, 시험체 크기 50L 이상, 외기조건인 경우 시험체 크기 1,000L 기준 단열재 100mm를 제안한다.

요약


최근 초고층 아파트 및 주상복합 건축물의 증가로 두께 3m 이상의 메가급 매스콘크리트 부재의 설계가 다수 수행되고 있다. 초고층 주상복합 건축물은 기초부재 뿐만 아니라 특수한 구조형태로 전이 보 및 슬라브 등과 같은 매스콘크리트 시공이 증가하고 있어 매스콘크리트의 온도균열저감에 관한 연구가 수행되고 있다. 매스콘크리트의 온도균열을 검토하기 위해서는 콘크리트 열특성 검토가 중요하나 현장에서 단열온도상승 시험기를 활용하기는 어렵기 때문에 간이-단열온도상승시험을 주로 활용한다. 본 연구에서는 간이-단열온도상승시험에 의한 콘크리트 열특성 결과의 정밀도를 향상시키기 위해 열손실을 보정하기 위한 방안과 열손실 보정에 미치는 다양한 요인을 검토하여 제시하였다.


키워드 : 단열온도상승시험, 열손실 보정, 매스콘크리트, 시험체 크기

Funding


This work was supported by a National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIT)(No. 2015R1A5A1037548).


ORCID

Jeong-Kwon On,  <http://orcid.org/0000-0002-1563-022X>

Young-Sun Kim,  <http://orcid.org/0000-0001-8119-2232>

Hyoung-Jae Moon,  <http://orcid.org/0000-0003-3965-919X>

Jeong-Soo Nam,  <http://orcid.org/0000-0002-9723-5994>

Gyu-Yong Kim,  <http://orcid.org/0000-0002-8662-8899>

References

1. Kwon YD. Policy guidelines of super high-rise apartment buildings in Seoul. Seoul Development Institute; 2007. 140 p.
2. Jaung JD, Cho HD, Park SW. Properties of hydration heat of high-strength concrete and reduction strategy for heat production. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2012 Apr;12(2):203-10. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2012.12.2.203>
3. Han CG, Kim MH. Reducing thermal cracking of mat-foundation mass concrete applying different mix designs for upper and lower placement lifts. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2017 Feb;17(1):39-46. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2017.17.1.039>
4. Asano I, Kohgo Y, Hayashida Y. Estimation of adiabatic temperature rise curves of concretes with simplified adiabatic apparatus. *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*. 2002 Apr;128:275-81.
5. Park CG, Kim BH, Lee, HS. Evaluation of hydration heat of mass concrete with capsulated slurry PCM and FEM study for analyzing thermal crack. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2014 Oct;14(5):379-88. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2014.14.5.379>
6. Jin EW, Kim CY, Kim JK. Equipment for measuring the adiabatic temperature rise of concrete by compensating heat loss. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2012 Oct;24(5):535-42. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.5.535>
7. Jeong SM, Kim SH, Yang WH, Kim YS, Ki JD, Lee GC. An experimental study on the hydration heat of concrete using phosphate based inorganic salt. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2020 Dec;20(6):489-95. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2020.20.6.489>
8. Ng PL, Ng IYT, Kwan AKH. Heat loss compensation in semi-adiabatic curing test of concrete. *Materials Journal*. 2008 Feb;105(1):52-61.
9. Ham EY, Kim GY, Koo KM, Kim HS, Lee EB, Yoo JK. Analysis on behavior of adiabatic temperature rise of concrete considering final setting time. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*. 2013 Dec;29(12):89-96. https://doi.org/10.5659/JAIK_SC.2013.29.12.89
10. KCS 14 20 42. Korea Concrete Standard, Mass Concrete. 2021. 14 p.
11. Passive House Institute Korea. 2-01 Regarding thermal conductivity, heat perfusion rate, and thermal resistance [Internet]. Seoul (Korea): Passive House Institute Korea; 2010 Jan 05. Available from: http://www.phiko.kr/bbs/board.php?bo_table=z3_01&wr_id=2