

극저온 조건에서 보온양생 방법 변화에 따른 콘크리트의 초기동해 방지

Prevention of Early Frost Damage of the Concrete under Severely Low Temperature according to Heat Curingmethods

한 민 철*

Han, min-Cheol*

Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Cheongwon-Gu, Cheongju, 360-764, Korea

Abstract

Concrete exposed to severely low temperature below -20°C should be provided with proper heat supplying curing to protect the concrete from early frost damage at the time of pouring. Meanwhile, so far, effective heat curing methods of the concrete under severely low temperature are not well established in Korea. For this reason, the objective of this paper is to provide effective heat curing method of concrete exposed to severely low temperature to protect early frost damage by varying the combination of heat curing material combinations. Temperature history, maturity development and core strength results are investigated. Four mock-up specimens simulating slab, wall and column were prepared and heat insulation, heat supplying and both were applied. Test results indicate that the combination of quadruple layer bubble sheet (4BS) and embedding of heating cable has desirable performance for a slab, and heat supplying curing inside heat enclosure and heat generation mat also shows desirable performance for a wall, and for a column, use of EPS heat insulation has proper performance against early frost damage, which reaches $45^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ and helps the concrete maintain above 0°C within 3 days. The methods mentioned above are believed to be optimum protection from early frost damage of the concrete under -20°C .

Keywords : heat curing methods, temperature history, quadruple layer bubble sheet, heating cable

1. 서 론

최근 국내 건설사들은 국내 건설사업의 수익성 악화로 인해 해외건설시장으로 사업을 확대하려는 시도가 빈번해지고 있다. 이와 관련하여 특히, 고위도 지역인 몽골, 러시아 및 우즈베키스탄 등의 국가를 중심으로 국내 건설사들이 활발한 건설공사를 수주하거나 수행중에 있다.

그런데, 전술한 국가들은 겨울철 외기온이 -20°C 이하로 저하하는 혹한의 기온이 빈번하여 건설공사 수행시 골조콘크리트공사의 동결기 시공이 곤란한 측면이 발생하고 있고 이로 인한 연중시공이 곤란해짐에 따라 공기 지연의 문제점이 대두되고 있다. 이러한 극저온 조건에서 시공되는 콘크리트는 우리나라에서 규정하고 있는 일평균기온 4°C 이하조건에 해당되는 한중콘크리트 시공보다 훨씬 강화된 배합, 타설 및 양생방법이 적용되어야 초기동해의 피해를 충분히 제어할 수 있다. 이는 -20°C 수준의 극저온 조건에서는 콘크리트 내부에 존재하는 수분의 동결이 작은 세공까지 더욱 심해짐으로 인하여 동결수분의 팽창으로 경화되기전 콘크리트 조직의 파괴를 더욱 가속시킬 수 있기 때문이다.

Received : December 14, 2015

Revision received : December 21, 2015

Accepted : December 29, 2015

* Corresponding author : Han, min-Cheol

[Tel: 82-43-229-8484, E-mail: twhan@cju.ac.kr]

©2016 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

그러나, 국내의 건설공사 현장은 강원북부 일부지역을 제외하고는 -20°C 이하의 온도조건에서 콘크리트를 시공한 사례가 극히 드물며 이러한 조건에서의 효율적인 초기동해 방지를 위한 보온양생 방법에 대하여 보고된 사례가 거의 없는 상황이다. Han et al.[1]은 국내의 동절기 온도조건에서 기존의 가열보온양생 방법을 보다 경제적이고 시공성이 양호한 방법인 단열보온양생방법으로 수행하는 것을 제안하고 에어캡을 이용한 보온양생 방법을 제안한 바 있다. 또한, Lee et al.[2]은 열선을 설치하여 국내의 한중 조건에서 콘크리트 타설후 열선의 발열을 이용하여 콘크리트를 보온하는 방법을 제안한 바 있고, 또한 Shim[3]은 공동주택용 갱폼에 발열 및 단열 시스템을 장착하여 동절기 시공을 실시한 사례를 보고한 바 있다.

반면에, 우리나라보다 더욱 열악한 기후조건을 갖는 북한을 포함한 몽골, 러시아 등의 극저온 조건 건설시장에서의 효율적인 동절기 콘크리트 보온양생 방법으로서 -20°C 이하의 극한조건에서 적절한 보온양생방법의 개발이 요구되는 시점이다.

따라서 본 연구에서는 극한의 온도조건에서 시공되는 콘크리트의 효과적인 초기동해 방지 방법을 제시하기 위하여 일평균 기온 -20°C 조건에서 기둥, 벽체 및 슬래브로 일체화된 mock-up 부재를 제작한 후 가열 및 단열방법이 조합된 보온양생방법을 적용하여 콘크리트의 온도이력, 적산온도, 등가재령 및 강도증진 성상을 고찰하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고 배합사항은 Table 2와 같다. 먼저, W/B는 실무조건에서 일반적으로 사용하는 강도수준을 반영하여 50% 수준에 플라이애시(FA)를 20% 치환한 배합의 콘크리트를 사용하였고, 극저온 환경으로 양생시 내부의 온도를 -20°C 의 일정온도 조건으로 유지하도록 하였다. mock-up 부재는 Figure 1~3에서 보는 바와 같이 슬래브, 벽체 및 기둥이 일체화된 4개의 부재를 제작하였는데, 슬래브의 경우 $1600 \times 800 \times 200\text{mm}$, 벽체의 경우 $800 \times 600 \times 200\text{mm}$ 그리고 기둥의 경우 $800 \times 600 \times 600\text{mm}$ 로 제작하였다.

본 연구에서 실험한 보온양생공법 조합은 Table 3에 제시된 바와 같다. 즉, -20°C 의 극한외기에 저항하기 위하여 단열보온양생과 가열보온양생을 조합하고자 하는데, 슬래브 부재의 보온양생은 4중 버블시트(4BS)와 열선(5W, 15W)을 조합하여 사용하였고 벽체 및 기둥의 수직재는 스티로폼 단열재를 기본으로 하고 발열매트를 적용하는 것으로 하였다. 실험사항으로는 부재의 각 부위별 온도이력 및 코어공시체 압축강도를 측정하는 것으로 계획하였다.

Table 1. Experimental plan

Factors		Levels
Mixture	W/B (%)	50
	Target slump (mm)	150 ± 15
	Air contents (%)	4.5 ± 1.5
	Binder composition	OPC 80% + FA 20%
Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)		-20
Experiment variable	Curing combination	· Slab(4BS+HC)+Wall(HE)+Column(HE) ^{a)}
		· Slab(4BS+HC)+Wall(HE)+Column(HE) ^{b)}
		· Slab(4BS+HC)+Wall(HE)+Column(HE) ^{c)}
		· Slab(4BS+Heater+Housing)+Wall(HM)+Column(HM) ^{d)}
Curing periods	· Initial curing : 7 days	
Specimen of member	· Slab+Wall+Column	
Experiment	Hardened concrete	· Temperature history(7 days)
		· Core strength (28 days)

a) 4BS+HC: Quadruple layer bubble sheet+5W heating cable, HE : Heating insulation with 50mm(Specimen 1)

b) 4BS+HC: Quadruple layer bubble sheet+15W heating cable(Specimen 2)

c) 4BS+HC: Quadruple layer bubble sheet+embedded 15W heating cable into concrete (Specimen 3)

d) 4BS+Heater+Housing: Quadruple layer bubble sheet+electrical heater+Housing (Specimen 4)

Table 2. Mix proportion of the concrete

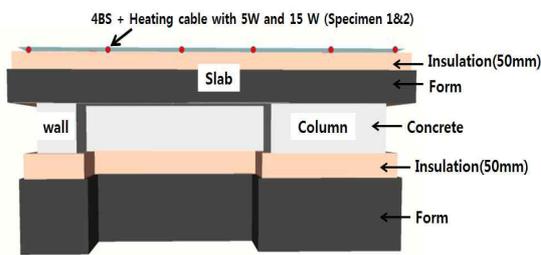
W/B (%)	S/a (%)	Weight(kg/m ³)						
		Water	Cement	Flyash	Gravel	Sand	WRA	AEA
50	46.7	162	260	64	938	822	2.083	0.208

2.2 부재별 보온양생 조합계획

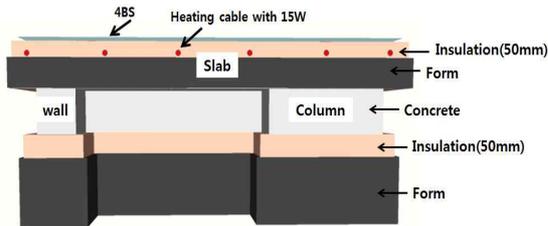
본 연구의 시험체 부재별 보온양생의 세부조합은 Figure 1과 같다.

2.2.1 Specimen 1 및 2의 보온양생 조합

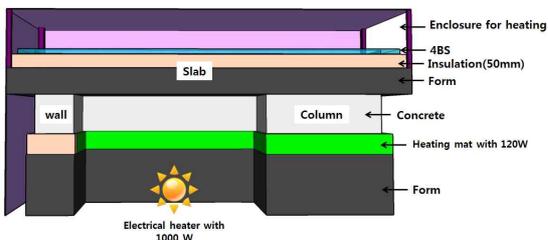
Specimen 1의 부재별 보온양생 방법은 Figure 1의 (a)와 같이 슬래브 부재의 경우 단면이 여타부재에 비해 가장 열악하여 가열 및 단열의 조합으로 4BS내에 5 W 열선을 적층하여 일체화한 패드를 적용하였고 벽체 및 기둥은 50mm 두께의 EPS 단열재를 적용하는 것으로 계획하였다. 한편, Specimen 2의 경우 Figure 1 (a)와 같이 기둥과 벽체는 Specimen 1과 동일한 방법을 적용하였으나, 슬래브의 경우 Specimen 1에 적용된 일체형 패드에 사용된 열선의 용량을 15 W로 상향시켜 적용하는 것으로 계획하였다.



(a) Heating combinations of specimens 1 and 2
Slab(4BS+heating cable)+Wall(Insulation)+column(Insulation)



(b) Heating combinations of specimen 3 Slab(4BS+heating cable embedding into concrete)+Wall(Insulation)+column(Insulation)



(c) Heating combinations of specimen 4 specimen : Heating enclosure+ Slab(4BS)+Wall(Heatingmat)+column(Heatingmat)
Figure 1. Heat curing combinations according to specimens

2.2.2 Specimen 3의 보온양생 조합

Specimen 3은 Figure 1 (b)와 같이 벽체 및 기둥의 경우 Specimen 1 및 2와 동일한 보온 양생방법을

적용하였으나, 슬래브의 경우 15 W 열선을 4BS에 적층시키는 대신 동일용량의 열선을 콘크리트 속에 매설하는 것으로 계획하였다.

2.2.3 Specimen 4의 보온양생 조합

Specimen 4는 Figure 1 (c)와 같이 통상적인 공간가열을 모사한 양생막을 시험체에 설치하고 1000 W급 전기열원을 하부에서 공급하는 방식을 기본으로 하여 슬래브의 경우 4BS 단독 포설, 기둥 및 벽체의 경우 발열매트를 설치하여 양생하는 것으로 계획하였다.

각 보온양생 방법별 양생기간은 Table 3과 같은데, -20℃ 극한 온도조건에서 콘크리트의 초기동해 방지를 위해 Table 3에 제시된 가열+단열 조합으로 초기양생을 7일간 계획하였다.

Table 3. Heat curing methods

Curing combin	Member	Curing materials	Temperature		Duration (days)
			Heating (°C)	Air (°C)	
Insulating+ Heating cable	Slab	4BS+ Heating cable(5, 15w)	5w:35°C 15w:65°C		7
	Wall	EPS insulation	-		
	Column	EPS insulation	-		
Insulation+ Heating enclosure	Slab	4BS+ Heating enclosure	-	-20	7
	Wall	Heatingmat	10		
	Column	Heatingmat	10		

2.3 사용재료

본 연구에서 사용한 재료로서 먼저 콘크리트는 상용 레미콘을 사용하였다.

단열보온 양생재료인 4BS는 Figure 2에서 보는 바와 같이 버블시트를 4중으로 적층한 후 내부에 열선을 매립한 적층형 일체 패드형태를 사용하는 것으로 하였는데, 이때 열선은 시중에 판매되는 콘크리트 매립용 열선을 사용하였고, 물리적 성질은 Table 4 및 5와 같다.

기둥 및 벽의 단열재로 사용되는 단열재는 50mm 두께의 EPS 단열재를 사용하였고, 발열매트는 거푸집 크기에 적합하도록 주문 제작하였는데, 그 제원 및 물리적 성질은 Table 6 및 7과 같다.

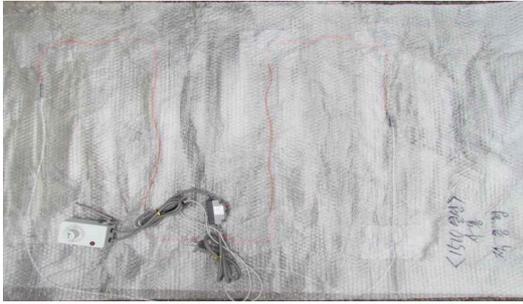


Figure 2. 4BS+heating cable combination

Table 4. Physical properties of bubble sheet

Surface curing material	Thickness (mm)	Air-cell volume (mm)	Heat conduction (W/m·K)
Bubble sheet	3	7	0.03

Table 5. Physical properties of heating cable

Diameter (mm)	Power consumption(W)	Maximum heat temperature (°C)
1~3	5	35
	15	65

Table 6. Physical properties of heat insulation

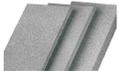
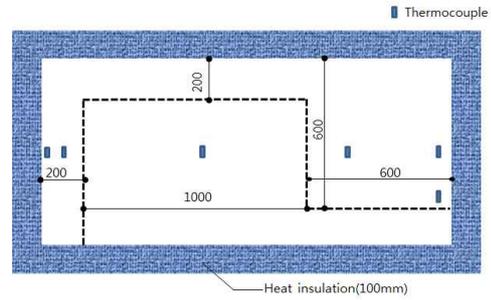
Appearance	Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Heat conductivity (W/m·K)
	50	over 1.5	less 0.043

Table 7. Physical properties of heatingmat

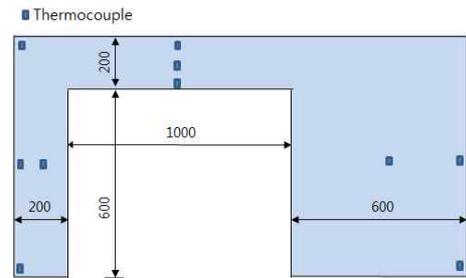
Appearance	Thickness (mm)	Power consumption(W)	Maximum heat temperature (°C)
	50	120	80

2.4 실험방법

본 연구의 실험 방법으로 부재별 온도측정은 Figure 3의 (a) 및 (b)와 같이 부재의 상부, 중앙부, 하부 및 모서리 부위에 T-type 열전대를 매립하고 Data logger를 이용하여 콘크리트 내부의 온도이력을 측정하였으며, 콘크리트에 매립되는 열선은 콘크리트 표면에서 50mm아래, 250mm 간격으로 설치한 후 전원을 공급하여 양생기간 동안 콘크리트 온도가 10°C로 유지되도록 하였다.



(a) Location of T Specimen thermocouple (slabmember)



(b) Location of T Specimen thermocouple (wall and columnmember)

Figure 3. Installment of thermocouple and heating cable arrangement

3. 실험결과 및 분석

3.1 보온양생방법별 온도이력 특성

Figure 4는 -20°C의 외기조건에서 Specimen 1~4 시험체의 재령경과에 따른 슬래브 부재의 위치별 온도이력을 나타낸 것이다.

먼저, Specimen 1 시험체의 경우 4BS+5 W 용량의 열선 적층형 일체 패드를 사용함에 따라 보온 효과에 기인하여 타설 후 다소 온도가 상승하다 24시간 이후부터 급속히 저하하여 72시간을 전후로 모든 단면에서 0°C이하로 저하되었고, 120시간 부근에서 -10°C의 온도를 유지하고 있음을 알 수 있었다.

Specimen 2 슬래브는 Specimen 1과 유사한 4BS+열선의 적층형 일체 패드를 사용하였는데, 보다 높은 열을 공급하기 위하여 열선의 용량을 15 W로 증가시켰다. 이에 따라 보다 높은 발열 성상을 보여 Specimen 1과 비교하여 24시간 이후 콘크리트의 온도하강 속도가 다소 완만하게 진행되는 것으로 나타났고, 이후 0°C이하 도달시간도 Specimen 1에 비하여 3~4시간 정도 지연되며 최저 온도의 경우도 -5°C정도로 유지됨을 알 수 있었다. 따라서 Specimen 2는 Specimen 1에 비하여 동일재령에서 다소

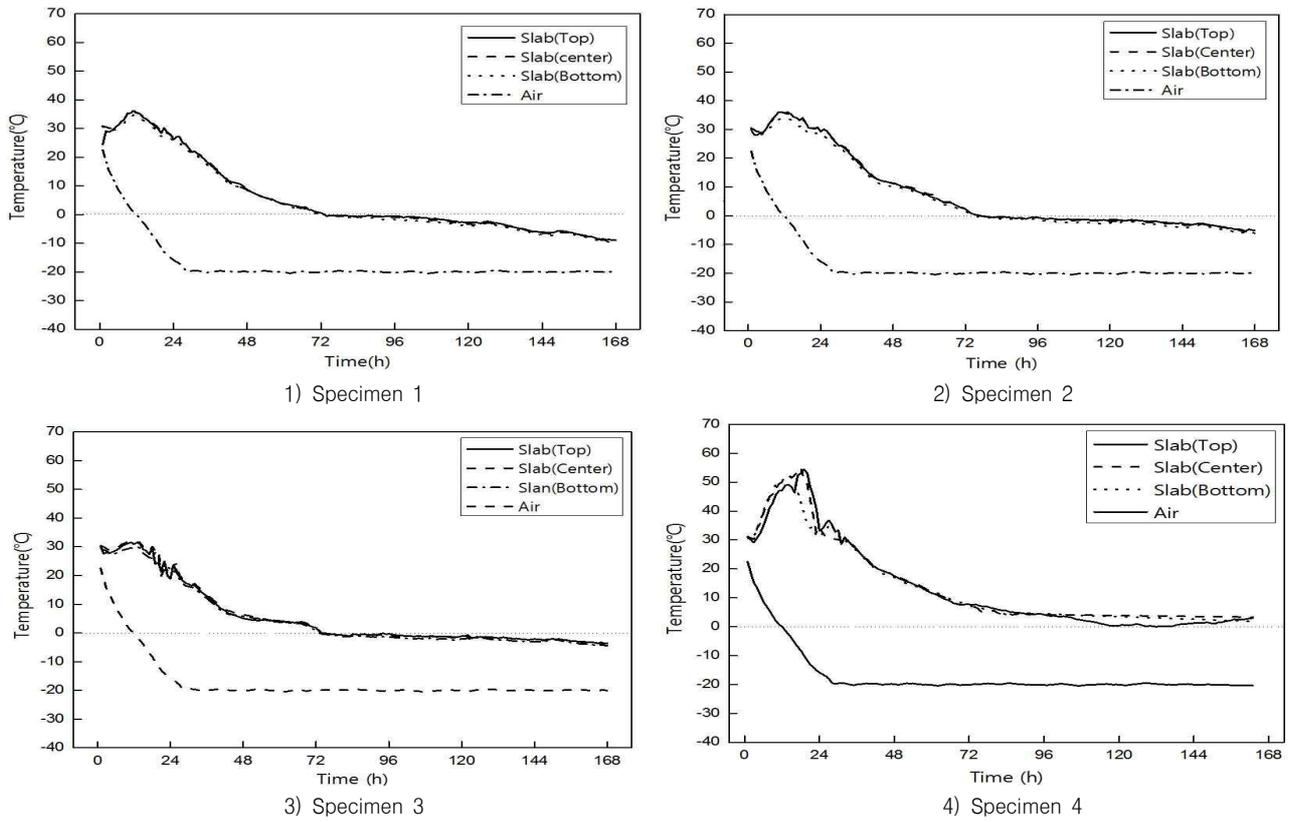


Figure 4. Temperature history of slabmember according to heating combinations

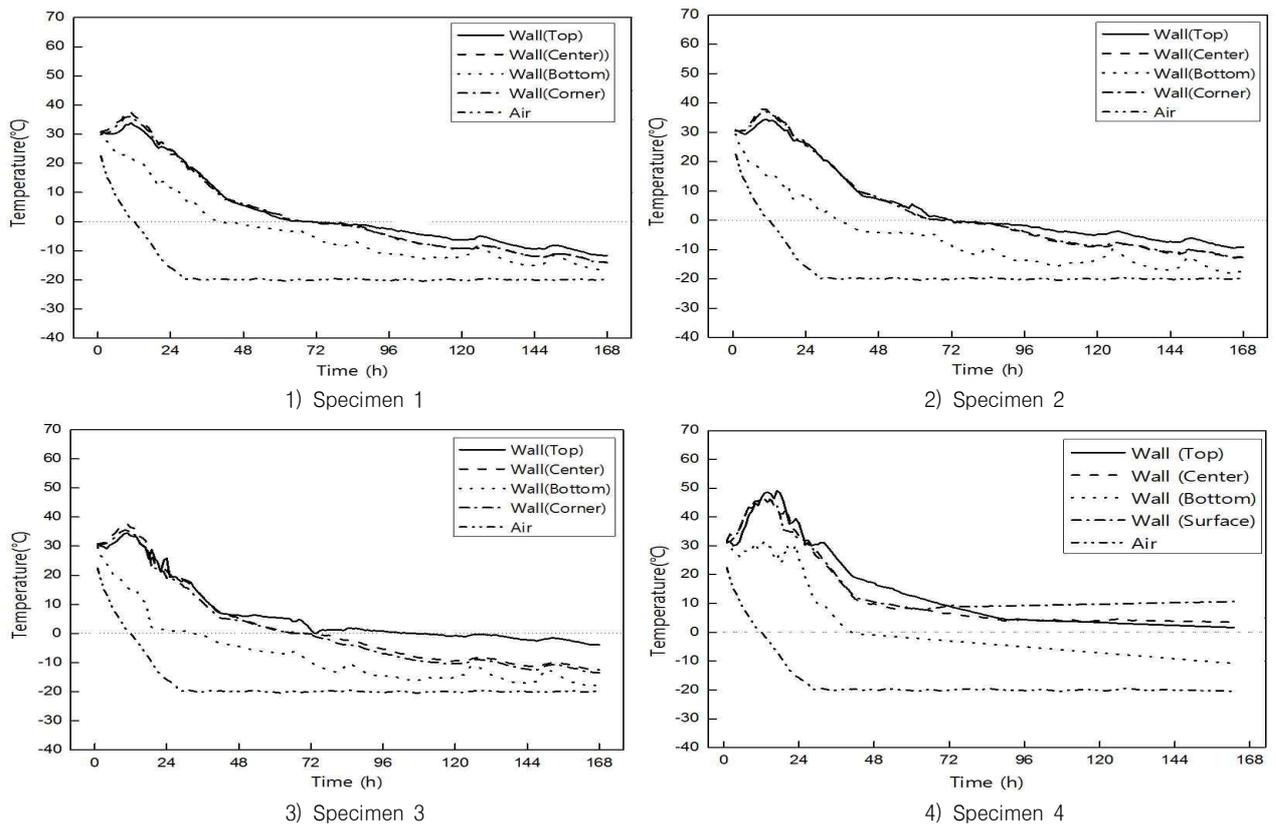


Figure 5. Temperature history of wallmember according to heating combinations

높은 적산온도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, Specimen 3 슬래브의 경우 4BS 포설+콘크리트 내 15 W열선을 매입한 경우로서 전반적으로 타설 후 Specimen 1 및 2와는 다소 다르게 초반 발열을 크게 하지는 않지만 이후의 온도이력은 Specimen 2 시험체와 유사한 온도이력을 갖고 있는 것을 확인 할 수 있다. 그러나, 시공상의 편의성을 생각할 경우 동일 외기온도조건에서는 Specimen 2의 방법이 보다 양호할 것으로 판단된다. 기존의 Han et al.[4] 등의 연구결과에서는, -10°C 의 온도에서 열선의 사용만으로도 슬래브 시험체가 0°C 이상을 유지할 수 있다고 보고하고 있으나, 본 연구의 -20°C 조건에서는 열선의 사용만으로는 슬래브 시험체의 온도를 0°C 이상으로 유지시킬 수 없는 것으로 나타나 보다 열저항 성능이 개선된 보온양생방법의 도입이 필요할 것으로 판단된다.

Specimen 4 슬래브의 경우 양생막을 설치하여 콘크리트 시험체를 보호하면서 하부에 급열을 실시하는 조건에서 4BS만을 포설한 경우로서 여타의 시험체와 비교하여 가장 높은 피크온도를 발휘하며 이후 온도하강속도도 완만하게 진행되어 측정기간 동안 0°C 이하의 온도로 저하되지 않는 것으로 나타났다. 이는 양생막과 히터의 급열에 의한 외기온도 차단 및 4BS의 단열효과가 복합되어 콘크리트의 수화발열을 충분히 유도하였기 때문으로 판단된다. 따라서 본 연구조건에서 온도이력을 중심으로 판단해보면 가장 효과적인 슬래브 부재의 보온양생 방법은 Specimen 4에 적용된 보온양생방법으로 사료된다.

Figure 5는 -20°C 조건에서 보온양생 조합별 벽체 시험체의 위치별 온도이력을 나타낸 것이다.

Specimen 1 및 Specimen 2의 경우 벽체에 50mm두께의 EPS 단열재를 공히 사용하였는데, 타설후 초기에 다소 발열을 보이나 이후 온도가 급속히 저하하여 벽체 하부는 24시간만에 0°C 이하로 온도가 저하하고 이후 144시간에서 외기온과 유사한 온도거동을 보이는 것으로 나타나 초기동해 발생의 우려가 제기되었으며, 중앙부 및 상부의 경우 60 시간을 전후로 0°C 이하로 저하함을 확인하였다. 특히 벽체 상부의 경우 슬래브부재와 인접해있고 하부의 수화열이 상부로 상승하는 이점 때문에 0°C 이하로 저하되는 시기가 하부에 비해 30시간정도 늦게 나타났다. 따라서 -20°C 조건에서 벽체의 양생 방법으로 50mm 단열재를 사용할 경우 벽체 하부에서 초기

동해의 피해가 발생할 수 있을 것으로 판단되어 보다 열저항 성능이 강화된 보온양생방법을 고려할 필요가 있을 것으로 사료된다.

Specimen 3의 경우 중앙부, 모서리 및 하부 등의 부분에서는 Specimen 1 및 2와 동일한 온도이력을 나타냈으나, 상부의 경우 120시간이 지나서야 0°C 이하로 저하하였는데, 이는 슬래브에 설치된 열선의 급열이 이 부분에 영향을 미쳐 나타난 결과로 판단된다.

Specimen 4의 경우 120 W 용량의 발열매트를 적용하였는데, 벽체 하부를 제외한 나머지 부위는 모두 0°C 이상의 온도를 유지하는 것으로 나타났다. 이는 발열매트의 발열효과에 기인된 결과로 판단되나, 하부의 경우 타설후 40시간을 전후로 0°C 이하로 저하되는 것으로 나타났다. 이는 벽체하부의 경우 부재단면두께가 200mm로 비교적 얇을 뿐만 아니라 수화발열시 발생한 열이 상부로 상승하여 비록 발열매트를 적용하였어도 충분한 급열이 이루어지지 않아 발생된 결과로 사료된다.

Figure 6은 보온양생조합별 -20°C 조건에서의 기둥부재의 온도이력을 나타낸 것이다. 기둥부재의 경우 단면두께가 600mm로 비교적 두꺼워서 슬래브나 벽체에 비해 타설후 온도저하가 비교적 완만하게 나타났다. Specimen 1, 2 및 3공히 50mm EPS 단열재를 사용함에 따라 유사한 온도이력을 나타내어 72~98시간 부근에서 0°C 이하로 저하하는 것으로 나타났다. 반면에 발열매트를 적용한 Specimen 4의 경우 기둥의 열용량 효과와 발열매트의 급열효과에 기인하여 타설후 72시간까지 온도가 저하하다가 이후부터는 10°C 의 온도로 유지됨을 확인할 수 있었다. 단, 기둥 하부의 경우 72시간을 전후로 0°C 이하로 저하하는 것으로 나타났다. 이 역시 벽체의 경우와 동일하게 수화발열에 의한 열이 상부로 상승하고 발열매트의 발열량이 -20°C 조건에서의 열손실을 상쇄하기에 다소 미흡하여 나타난 결과로 판단된다.

따라서 본 연구 범위에서 슬래브의 경우 공간가열 및 4BS 조합, 벽체 및 기둥의 경우 공간가열 및 발열매트 조합이 가장 우수한 온도이력 특성을 발휘함을 알 수 있었다.

3.2 보온양생방법별 적산온도 및 등가재령 발현 비교

콘크리트의 강도발현을 정량적으로 평가하기 위한 지표로서 재령과 온도민감도를 복합적으로 고려하는 방법으로 적산온도 방법(식 (1))과 등가재령 방법(식(2))이 주

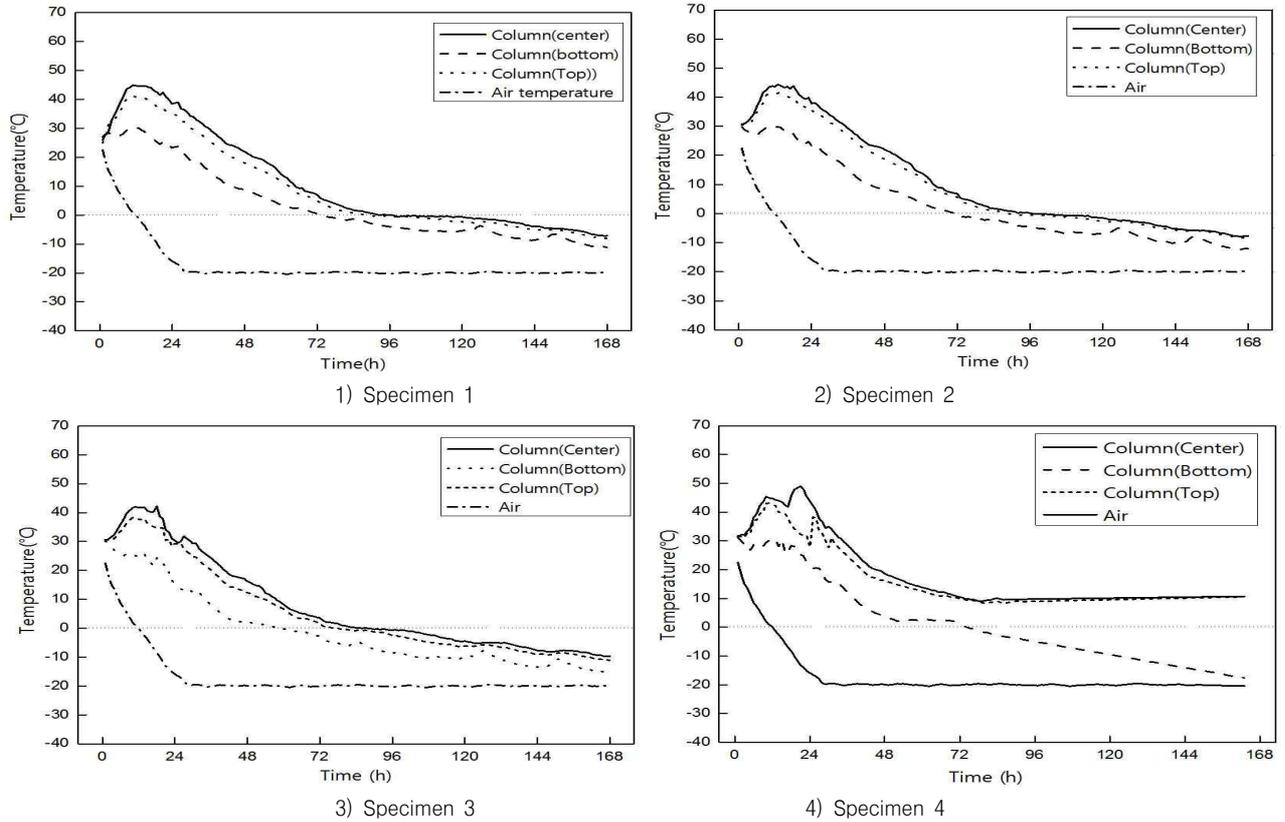


Figure 6. Temperature history of columnmember according to heating combinations

로 사용되고 있다.

$$M = \sum_{i=1}^t (\theta_i + 10) \text{-----} (1)$$

여기서, m : 적산온도($^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}$)

θ_i : 양생온도($^{\circ}\text{C}$)

$$t_e = \int_0^t \exp\left(\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right) dt \text{-----} (2)$$

여기서, t_e : 등가재령

E_a : 겉보기 활성화에너지, T : 양생온도($^{\circ}\text{K}$)

Figure 8은 Figure 5~7의 온도이력 결과치를 부재별 재령경과에 따른 적산온도 및 등가재령 발현치로 환산한 것이다. 여기서 등가재령을 산정하기 위한 E_a 값은 Han et al.[5]등의 연구결과를 참조하여 44.7 KJ/mol로 산정하였다. 한편, 일본건축학회의 한중콘크리트 시공지침 동해설에 따르면[6], 저온 환경하에서 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 초기동해 방지를 위한 압축강도 5mPa를 발휘하기 위한 최소적산온도는 45 $^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}$ 이상이 얻어질 것을 권장하고 있고, 등가재령에 의한 관리 방

법은 제시된 바 없다. 적산온도의 환산은 부재별로 가장 열악한 부위를 선정하였는데, 슬래브의 경우 단면하부, 벽체는 하부 그리고 기둥은 하부를 선정하여 적산온도로 환산하였다.

Specimen 1의 경우 모든 부재 공히 3일에서 적산온도가 45 $^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}$ 상회하는 것으로 나타나 Figure 4~6의 온도이력결과를 고려할 경우 슬래브는 4BS+5W 열선 매입 벽체 및 기둥은 50mm EPS 단열재의 사용으로도 초기동해를 면할 수 있을 것으로 사료된다. 반면에 가장 열악한 부재인 벽체는 이후 재령이 경과하여도 적산온도의 증진이 없어 강도발현이 미미할 것으로 판단된다. 한편, 재령경과에 따른 등가재령의 발현경향은 전반적으로 적산온도 발현과 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있었다.

Specimen 2의 경우 슬래브는 3일에서 45 $^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}$ 를 만족하고 있고, 온도이력의 결과도 0 $^{\circ}\text{C}$ 이상을 상회하여 초기동해를 면할 수 있을 것으로 판단되나, 재령 7일에서도 45 $^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}$ 를 하회하여 벽체의 경우는 초기동해를 입을 수 있을 것으로 사료된다. 기둥의 경우 Specimen

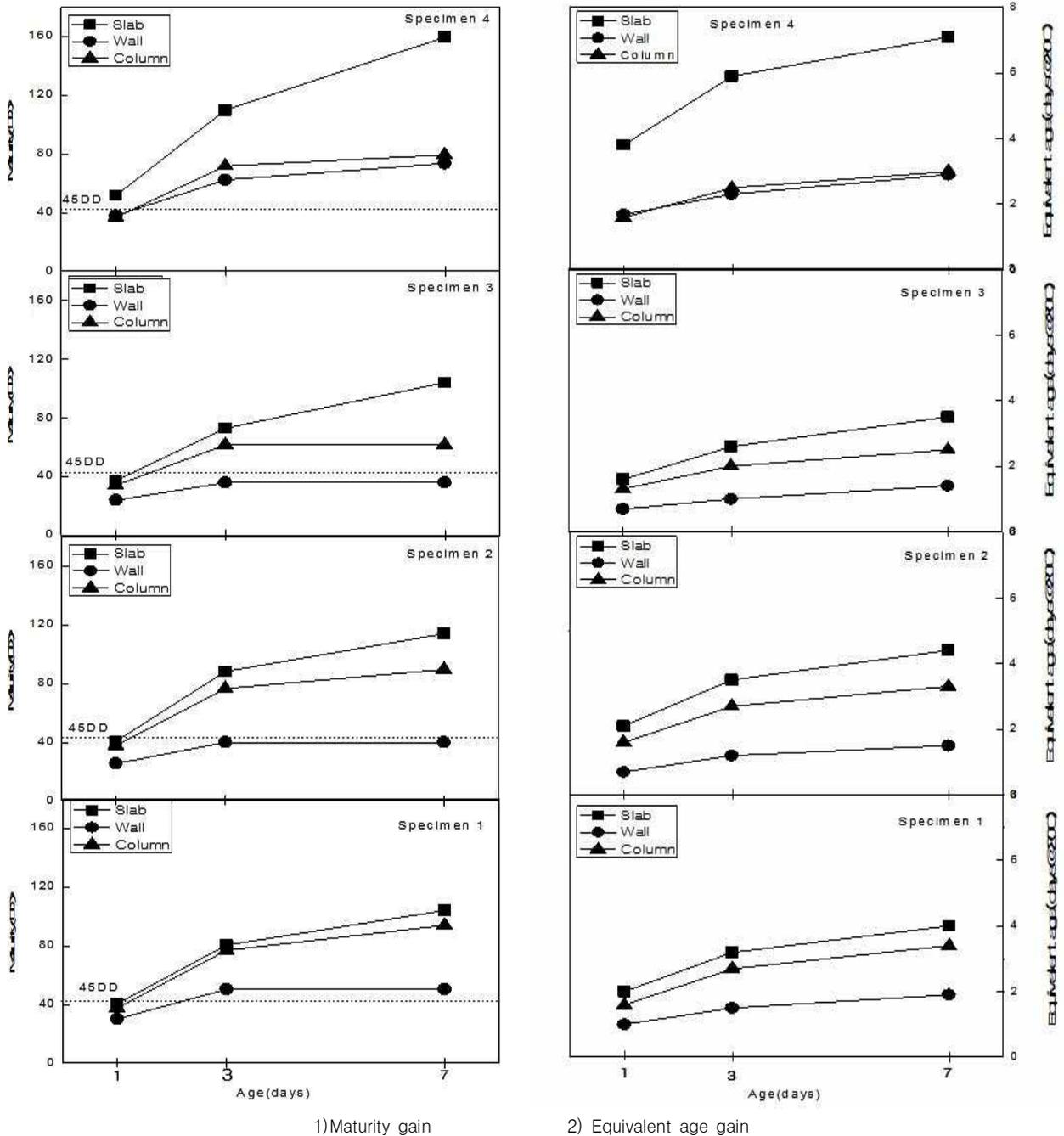


Figure 7. Gain of maturity and equivalent age with age

1의 경우와 동일한 보온양생을 적용하였으므로 재령 3일에서 초기동해를 면할 수 있을 것으로 사료된다. 등가재령의 발현경향은 역시 적산온도의 경향과 유사함을 확인 할 수 있었다.

한편, Specimen 3의 경우 슬래브는 적산온도 및 온도 이력 결과를 토대로 3일, 기둥의 경우도 3일에서 초기동

해를 면할 수 있을 것으로 판단되나, 벽체의 경우는 초기 동해의 위험이 있을 것으로 사료된다. Specimen 4의 경우는 공간가열 및 4BS 포설에 의한 단열로 슬래브는 1~3일전후로 45°D·D를 확보할 수 있으며, 벽체는 공간가열 및 발열매트의 급열로 인해 1~3일 사이에서 45°D·D를 확보함을 확인할 수 있었다. 또한, 기둥의

경우 공간가열 및 발열매트의 급열로 인해 벽체와 동일하게 1~3일 사이에 소요 적산온도를 확보함을 알 수 있었다.

3.3 부재별 코어압축 압축강도발현

Figure 8은 -20°C 조건에서 보온양생방법에 따른 재령 28일 코어압축강도를 나타낸 것이다. 초기보온양생 7일을 포함하여 28일간 -20°C 에 노출시킨 결과 Figure 12에서 보는 바와 같이 모든 시험체 및 부재에서 설계기준강도에 미치지 못하고 9~12mPa 수준의 강도를 발현함을 확인할 수 있었다. 동일배합조건의 표준양생 공시체의 28일 압축강도가 29.6mPa로 나타난 것과 비교해보면, 17~20mPa 정도 강도가 낮게 발휘되는 것을 알 수 있다. 이는 초기보온 양생기간 동안은 보온에 의한 소요 적산온도 발현이 가능하여 강도가 어느 정도 발현되나, 보온양생 종료 후에는 시험체가 -20°C 조건으로 노출됨에 따라 극저온에 의해 더 이상 강도발현이 이루어지지 않아 나타난 결과로 판단된다. 보온양생에 의한 급열이 양호하게 이루어진 Specimen 4 시험체에서 여타의 경우보다 다소 높은 코어 압축강도를 발휘하는 것으로 나타났다. 또한, Figure 9는 재령 28일 동안의 적산온도 및 등가재령과 코어 압축강도를 비교한 것으로 적산온도는 28일간 $150^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 수준으로 발현되어 20°C , 28일 양생시 얻어지는 $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 에서 표준양생 공시체가 29.6mPa가 발현된 점을 고려하면, 이후 지속적인 보온양생을 진행해야만, 적산온도의 발현이 지속되어 소정의 재령에서 목표로 한 설계기준강도를 확보할 수 있음을 시사해주는 것으로 판단된다.

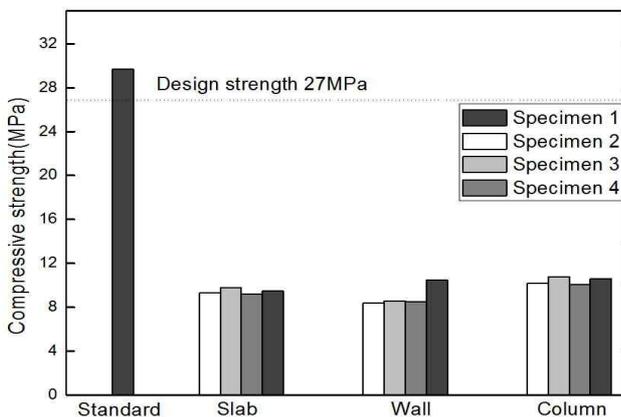


Figure 8. Compressive strength by core test at 28 days

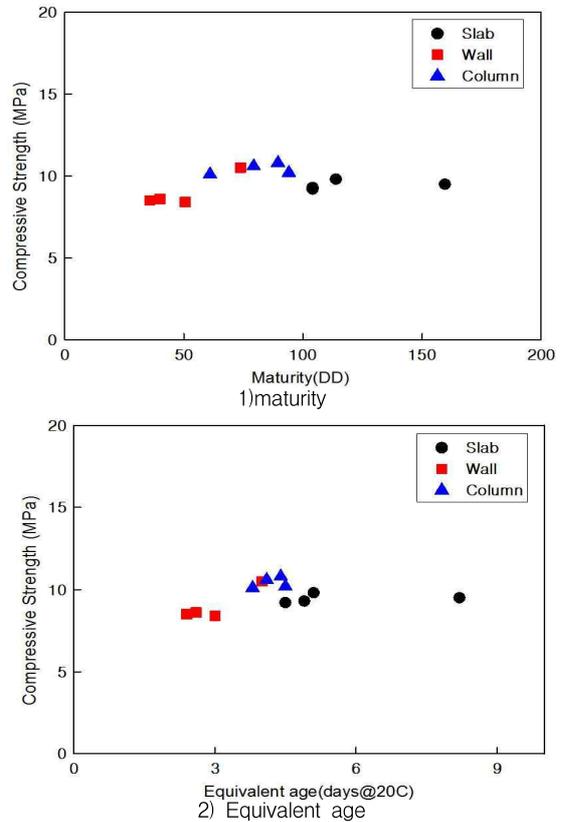


Figure 9. Relationship between core strength and maturity and equivalent age

또한 등가재령의 경우도 저온에 의한 등가재령의 발현이 이루어지지 않아 28일 재령에서 최대 8일 정도로 나타났다. 등가재령 8일의 의미는 20°C 양생조건으로 환산할 경우 8일정도의 기간에 해당되는 수치를 의미한다.

이상의 결과, 본 연구범위에서 -20°C 의 조건에서 시공되는 콘크리트는 초기보온양생으로 가장 열악한 조건인 슬래브의 경우 4BS+5W 열선양생이상의 조합이 적절할 것으로 판단되며, 벽체의 경우 공간가열+발열매트 조합, 그리고 기둥의 경우 50mm EPS 단열재 사용 및 공간가열+발열매트 조합이 적절할 것으로 판단된다. 단, 본 연구의 한계로서 -20°C 조건에서 초기보온양생기간을 가능한 최소화하기 위해 시방서에서 제시한 타설시 콘크리트의 타설온도 및 외기온도를 20°C 전후로 다소 높게 설정하였다. 다만, 향후 외기온도를 초기부터 -20°C 로 직접 노출시켜 최악의 조건에서 콘크리트의 온도이력 및 초기동해 방지방법에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 -20°C 조건에서 시공되는 콘크리트의 보온양생 방법별 온도이력, 적산온도발현 및 코어압축강도 측정을 통해 초기동해 방지효과를 고찰하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 온도이력 특성으로 슬래브 부재의 경우 타설후 72시간을 전후로 0°C 이하로 저하되는 것으로 나타났고, Specimen 4 시험체의 경우가 가장 양호한 온도이력 특성을 갖는 것을 확인하였다. 아울러 벽체의 경우 하부에서 EPS 단열재 사용시 30시간 전후에서 0°C 이하로 저하되며, 공간가열+발열매트를 적용한 경우에서 가장 양호한 온도이력 특성을 나타내었고, 기둥의 경우 여타부재보다 두꺼운 특성으로 인해 하부를 제외한 모든 부위에서 98시간 전후에 0°C 이하로 저하됨을 확인할 수 있었다.
- 2) 재령경과에 따른 적산온도 및 등가재령은 슬래브의 경우 모든 조합에서 초기동해 방지에 요구되는 적산온도를 확보할 수 있어 단열+표면가열 조합의 초기동해 방지효과를 확인할 수 있었고, 벽체의 경우는 공간가열+발열매트 조합, 기둥의 경우는 EPS 단열재 및 공간가열+발열매트 조합에서 소요적산온도인 $45^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}$ 를 1~3일 사이에 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다.
- 3) 코어공시체 압축강도 측정 결과, 모든 시험체에서 설계기준강도의 40~50%수준의 강도발현을 보였는데, 이는 추가적인 보온양생이 실시되지 않아 적산온도 및 등가재령의 발현이 부족하여 나타난 결과로 판단된다.

이상의 결과를 종합하면, 본 연구범위에서 -20°C 외기온 조건에서의 초기동해방지는 슬래브의 경우 4BS+열선조합, 벽체는 공간가열+발열매트, 기둥의 경우는 EPS 단열재조합이 적절할 것으로 판단된다.

요 약

-20°C 이하의 극저온조건에서 타설되는 콘크리트는 초기동해 방지를 위해 적절한 급열을 포함한 보온양생이 이루어져야 하는데, 현재까지 국내에서 극저온조건에서의 효율적인 보온양생 방법이 제시된 경우가 드문 실정이다. 따

라서 본 연구에서는 -20°C 의 극한조건에서 시공되는 콘크리트의 초기동해 방지를 위한 효율적인 보온양생방법을 제시하고자, 보온양생 재료의 조합 변화에 따른 콘크리트의 온도이력, 적산온도 및 코어강도 결과를 고찰하였다. 실험변수로서 보온양생방법 조합에 따라 기둥, 슬래브 및 벽체를 모사한 목업 시험체를 제작한 후, 단열, 가열 및 양자 병용방법을 적용하여 실험을 진행하였다. 연구결과에 따르면, 슬래브 부재의 경우 온도이력 및 적산온도 측정결과 4BS+열선조합, 벽체의 경우 가열양생+발열매트 그리고 기둥의 경우 EPS 단열재조합에서 3일 이내에 초기동해 방지에 요구되는 적산온도인 $45^{\circ}\text{D} \cdot \text{D}$ 를 상회하며 0°C 이하로 콘크리트 온도가 저하하지 않는 것으로 나타나 본 연구범위에서 최적의 조합으로 판단된다.

키워드 : 보온양생방법, 온도이력, 4중버블시트, 열선

Acknowledgement

This work was supported by the research grant of Cheongju University in 2014.

References

1. Han CG, HanmC, Baek DH, Son HJ, Hong SM, Temperature history of concrete according to the coveringmethod of double layer bubble sheet, Proceeding of Korea Institute of Building Construction; 2010 May 12; Seoul, Korea, Korea Institute of Building Construction; p. 71-72
2. Lee DB, Kim HR, Lee JW, ParkJH, Choi IH, A curingmethod of cold weather concreting using heating cable in winter construction, Journal of the Korea Concrete Institute, 2006 Dec;18(6):46-50.
3. Shim JH, Cold weather construction using outside heat insulation form, Proceeding of Recent Cold Weather Concreting Seminar of Korea Institute of Building Construction; 2014 Dec 12-13; Seoul, Korea. p. 105-18.
4. Jung EB, Shin HS, HanmC, The effect of heat curingmethods on the protection against frost damage at early age of the concrete under extremely cold climate, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2013 Dec.;13(6):513-21.
5. Han SH, Kim JK, Park YD, Prediction of compressive strength of fly ash concrete by a new apparent activation energy function, Journal of the Korea Concrete Institute, 2001 June;13(3):237-43.
6. Nakashimam, Recommendation for cold weather concreting, 5th ed, Tokyo: Architectural Institute of Japan; 2010. p. 1-25.