

# 복합보온양생 방법이 극저온 조건하 플라이애시 치환 콘크리트의 온도이력에 미치는 영향

## The Effect of Heat Curing Methods on the Temperature History of the Fly Ash Concrete Subjected to Extremely Low Temperature

(Received October 23, 2012 / Revised October 31, 2012 / Accepted October 31, 2012)

한민철<sup>1)</sup>, 손호정<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>청주대학교, 건축공학과

Min-Cheol Han<sup>1)</sup>, Ho-Jung Son<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Department. of Architectural Engineering, Cheongju University, Cheongju, 360-764, Korea

### Abstract

In this study, temperature profile of the fly ash concrete were studied in accordance with the change of heating curing method combination for the slab concrete in order to develop efficient protection method of the concrete subjected to  $-20^{\circ}\text{C}$ . The slab concretes with the size of  $1200\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 200\text{ mm}$  were fabricated with W/B of 50% and exposed to  $-20^{\circ}\text{C}$  for 7 days. Five different combinations of heat curing methods were applied to the slab concrete specimen: two combinations of heat supplying by electrical heater and surface heat insulation material such as polyethylene film and quadrupled layer bubble sheet based on heat enclosure installment; three combinations of heating coil embedment and surface heat insulation materials such as polyethylene film, sawdust and quadrupled layer bubble sheet based on heat enclosure installment. Test results showed that by applying both heating coil and bubble sheet and heat enclosure, the concrete exposed to  $-20^{\circ}\text{C}$  can be effectively protected from early-age frost damage.

**키워드 :** 한중 콘크리트, 양생방법, 온도이력

**Keywords :** Cold Weather Concrete, Curing method, temperature history

## 1. 서론

최근 국내의 건설공사현장에서는 건설공기의 중요성이 강조됨에 따라 4계절 시공이 점차 증가하고 있는 상황이다.

특히, 겨울철 혹한의 극저온 환경에서 사용되는 콘크리트의 경우 타설 후 적절한 보양이 이루어지지 않을 경우 극히 낮은 외기온으로 인해 콘크리트가 경화 전에 동결되는 초기동해가 발생할 수 있고, 이로 인해 강도증진에 악영향을 미칠 뿐만 아니라 장기적으로 콘크리트의 내구성을 심각하게 저하시키는 원인이 된다. 이러한 피해는 타설 시 외기온이 낮을수록 더욱 배가되는데, 실무에서 이러한

초기동해를 막기 위한 방법으로 열선, 열풍기 등을 이용한 가열보온 양생 혹은 단열재 등을 이용한 단열보온 양생 등의 방법을 이용하여 대응하고 있는 상황이나<sup>1)2)</sup>, 이러한 방법들은 대부분  $-10^{\circ}\text{C}$  내외의 온도조건에서 적용성을 인정받고 있다. 그러나 그 이하의 극한 온도조건에서 이들의 효과에 대한 충분한 연구나 시공실적이 보고되어 있지 않아 이에 대한 검토가 필요한 실정이다.

또한 최근들어 탄소발생량 저감 혹은 자원재활용 차원에서 혼화재료의 사용이 증가하고 있는데, 이러한 광물질 혼화재의 사용은 저온에서 초기강도 발현에 악영향을 초래하여 적절한 보양이 이루어지지 않으면 심각한 초기동해를 입거나 품질에 결함이 발생하게 된다.

따라서 본 연구에서는  $-20^{\circ}\text{C}$ 의 극저온 환경에서 타설되는 플라이애시 치환 콘크리트 구조물의 효율적인 양생방법

\* Corresponding author

E-mail: sonmr50@hanmail.net

개발을 위한 연구의 일환으로 -20°C 조건에서 구조부재 중 가장 열악한 조건에 노출되는 슬래브 부재를 모사한 목업 시험체를 제작한 후 다양한 복합 보온양생 공법에 따른 콘크리트의 온도이력 특성을 분석함으로써 초기동해 방지를 위한 효율적인 보온양생방법을 제안하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

보온양생방법 제안을 위한 실험계획은 Table 1과 같고, 배합사항은 Table 2와 같다. 배합사항은 원전 콘크리트 구조물을 대상으로 하는 레미콘 규격으로 플라이애시가 20 % 치환된 4,000 psi(약 28 MPa)급을 선정하여 주문 제작하였고, 저온 환경을 적용시키기 위하여 외기온을 -20°C 정온조건으로 선정하여 실험하였으며, 보온양생방법으로 가열보온양생을 기본으로 하여 하부공간 가열과 열선 가열에 추가적인 단열보온양생을 실시하는 것으로 계획하였다. 먼저, 가열보온양생+단열보온양생의 경우 하부공간가열을 기본으로 하였고, 콘크리트의 표면을 노출 1수준, 4중 버블시트 포설 1수준으로 2수준을 계획하

Table 1. Experimental plan

Factors		Levels		
Mixing factor	W/B (%)	50		
	Binder (%)	80(OPC):20(FA)		
	Target slump(mm)	120±15		
	Target air contents(%)	4.5±1.5		
Curing factor	Curing temperature and Curing method	-20°C	Slab1) 2	• Heat enclosure+exposure • Heat enclosure +Quadrupled bubble sheet on surface
			Slab2) 3	• Heating coil embedment + Surface exposure • Heating coil embedment + Sawdust on surface • Heating coil embedment + Quadrupled bubble sheet on surface
Test	Fresh concrete		3	• Slump • Air content • Unit volume weight
	Hardened concrete		1	Internal temperature profile

Table 3. Curing plan

Type of mock-up member	Heat curing method	Initial curing			subsequence curing			Exposure to air temperature		
		Target temperature (°C)	Number of curing days (Day)	Maturity (OD · D)	Target temperature (°C)	Number of curing days (Day)	Maturity (OD · D)	Target temperature (°C)	Number of curing days (Day)	Maturity (°D·D)
Slab	Space heating	201)	7	210	0	3	30	20	18	540
	Heating coil1)	102)	7	140						

1) Heat enclosure temperature  
2) Concrete temperature

Table 2. Mixture proportion of the concrete

W/B (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	S/a (%)	Weight (kg/m <sup>3</sup> )					
			C	FA	S	G	SP	AE
50	162	46.7	260	64	822	938	2.1	0.2

였으며, 열선매립+단열보온양생의 경우 콘크리트 내부에 열선을 매립하는 것을 기본으로 하여 콘크리트 표면 노출 1수준, 톱밥 살포 1수준, 4중 버블시트 포설 1수준으로 하여 총 5수준을 실험계획 하였다. 아울러 본 연구에서 수행한 보온양생계획은 Table 3과 같다.

실험 사항으로 굳지않은 콘크리트에서는 슬럼프,공기량 및 단위용적질량을 측정하는 것으로 하였고, 경화 콘크리트에서는 콘크리트의 내부온도이력 을 측정하는 것으로 실험계획 하였다.

### 2.2 사용재료

본 실험의 사용재료로 시멘트는 국내 A사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 결합재로서 플라이애시는 국내 S사의 3중 플라이애시를 사용 하였는데, 결합재의 물리·화학적 성질은 Table 4 및 Table 5와 같다. 잔골재는 해사골, 굵은골재는 20 mm 부순 굵은골재를 사용하였다. 혼화제로 감수제는 나프탈렌계, AE제는 음이온계를 사용하였는데, 각 재료의 물리적 성질은 Table 6~7과 같다.

또한, 단열보온을 위한 표면양생재 중 4중 버블시

Table 4. Physical properties of cement

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Stability (%)	Setting time (Minute)		Compressive strength (MPa)		
			Ini.	Fin.	3 days	7 days	28 days
3.15	3 303	0.08	226	409	23.1	30.8	41.0

Table 5. Physical properties of fly ash

Density (g/cm <sup>3</sup> )	fineness (cm <sup>2</sup> /g)	LOI(%)	Moisture contents (%)	SiO2
2.21	3 520	3.7	0.1	46.8

Table 6. Physical properties of aggregates

Classification	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Fineness modulus	Absorption (%)	Solid volume percentage for shape determination (%)
Fine agg.	2.53	2.55	1.94	-
Coarse agg.	2.62	6.48	0.84	56.5

Table 7. Physical properties of chemical agent

Classification	Main ingredient	Form	Color	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Water reducing agent	Naphthalene-based substance	Liquid phase	Dark brown	1.05
AE agent	Anion-based substance	Liquid phase	Thin yellow	1.04

Table 8. Physical properties of bubble sheet

Heat insulating material	Thickness (mm)	Size of bubble (mm)	Heat Conductivity (W/m·K)
Quadruple layer bubble sheet	6	7	0.03

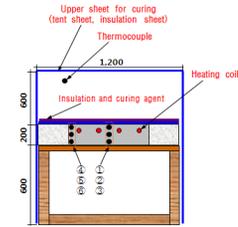
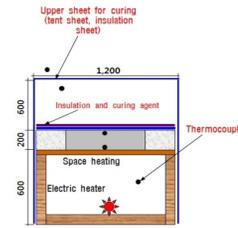
Table 9. Physical properties of heating coil

Shape	Diameter (mm)	Output Wattage (W)	Maximum heating temperature (°C)
	4	20	50

트 및 톱밥은 시중에서 판매되는 재료를 사용하였고, 가열을 위한 열선 역시 시중에 판매되는 제품을 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 8~9 및 Fig. 2와 같다.

### 2.3 시험체 제작

모의 부재의 구성은 Fig. 1과 같이 슬래브 부재로 가정하여 제작하였고, 연속성을 상징하여 슬래브 부재의 양쪽면에 100 mm의 단열재를 이용하여 밀봉하는 것으로 하였으며, 콘크리트의 온도 측정은 Fig. 1과 같이 중심부와 표면부에 열전대를 설치하는 것으로 하였다. 양생방법으로 하부 공간가열 + 표면 양생재 복합을 실시하는 경우에는 슬래브 부재를 중심으로 상부와 하부에 높이 600 mm의 단차를 두어 천막지를 이용하여 양생실을 설치하고, 하부 공간에는 전기히터를 이용하여 공간을 가열하는 것으로 하였다. 이때 하부 공간 가열을 위한 전기히터는 1000 W로 발열하는 제품을 사용하였다. 또한, 열선+표면양생재의 경우에는 Fig. 1 및 Photo 1과 같이 300 mm 간

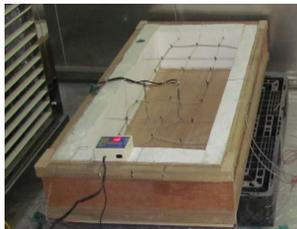


①②③④⑤⑥ Temperature

Fig. 1. Curing method



(a) Fabrication of test specimen



(b) Electrical heater below enclosure



(c) Concrete placing



(d) Curing



(a) Heating coil + Sawdust



(b) Heating coil + Quadrupled bubble sheet

Photo 1. Curing of the specimens

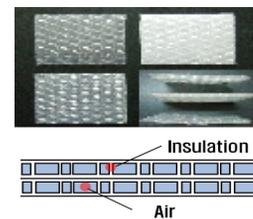


Fig 2. Composition of bubblesheet

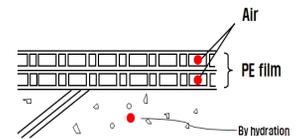


Photo 2. Refrigeration chamber container for curing of test specimen and measuring with data logger

격으로 콘크리트 내부에 열선을 설치하고 콘크리트 타설 후 콘크리트 온도가 10°C로 유지되도록 전원을 공급하였으며, 콘크리트 타설 후 상부표면에 계획된 표면 양생재를 설치하는 것으로 하였다.

## 2.4 실험방법

본 연구의 실험방법으로 시험체 제작용 콘크리트는 레미콘을 주문하여 제작하였고, 굳지않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프는 KS F 2402, 공기량 및 단위용적질량은 KS F 2421 및 2409의 규정에 따라 실시하였다.

양생실은 Photo 1 및 2와 같이 -20°C의 온도가 유지되는 냉동 컨테이너를 이용하였고, 콘크리트 내부의 온도이력은 시험체 내부에 온도측정용 열전대를 매립한 후 데이터로그를 이용하여 30분 간격으로 온도를 기록하여 양생 중의 콘크리트 내부 온도를 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 콘크리트의 기초적 특성

굳지않은 콘크리트의 특성으로 슬럼프, 공기량, 콘크리트 온도는 계획된 배합에 의해 모두 목표치를 만족하는 것으로 나타났고, 압축강도는 재령 28일에서 30.1 MPa를 발휘하였는데, 상세한 시험결과는 Table 11과 같다.

Table 11. Properties of concrete

Slump(mm)	Air contents(%)	Compressive strength standard curing (MPa)		
		7 days	14 days	28 days
120	4.8	22.3	27.8	30.1

### 3.2 양생방법 변화에 따른 콘크리트의 온도이력

#### 3.2.1 하부공간가열+표면양생공법 적용 콘크리트의 온도이력

Fig. 3은 하부 공간가열 및 표면양생 공법 변화에 따른 콘크리트의 온도이력을 나타낸 것이고, Fig. 4는 Fig. 3의 데이터 중 콘크리트의 중앙부 온도이력을 비교한 것이다. 전반적으로 -20°C의 낮은 외기온에도 불구하고 양생실 설치 및 하부 가열에 기인하여 양생실의 내부온도는 약 15°C~20°C의 상온을 유지하는 것으로 나타났고,

하부 공간가열을 실시하고 콘크리트의 표면을 노출시킨 시험체의 내부온도이력은 평균 5°C의 온도이력을 나타내어 외기온이 -20°C조건에서도 보온양생의 효과가 발휘됨을 알 수 있었다.

또한, 하부 공간 가열을 실시하고 콘크리트 표면에 4중 버블시트를 포설한 시험체의 경우는 4중 버블시트에서 콘크리트 내부 온도가 평균 17°C로 버블시트 자체의 단열 효과에 기인하여 영상의 온도를 유지할 수 있었고, 재료 자체 두께 증가에 따른 열저항이 상승하여 내부 온도 보존효과가 향상되는 것으로 판단된다. 한편, 콘크리트의 상부 표면 온도 이력은 콘크리트의 내부온도이력과 마찬가지로 4중 버블시트를 사용한 시험체의 경우가 평균 온도 17.6°C로 가장 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 5는 하부 공간가열 및 표면양생 공법 변화에 따른 콘크리트의 적산온도를 나타낸 것이고, Fig. 6은 양생방법별 적산온도를 재령 별로 표기하여 비교한 것이다. 먼저 양생방법 별 경과시간에 따른 적산온도는 재령이 경과함에 따라 증가하는 것으로 나타났고, 콘크리트의 내부온도이력과 마찬가지로 하부 공간가열+4중 버블시트를 사용한 경우 재령 7일에서 265 °D·D로서 가장 높은 것으로 나타났으며, 노출의 경우가 200 °D·D로 모두 양호한 결과를 나타내었다.

한편, 일본건축학회 시공지침 동해설에 따르면 플라이애시를 사용한 콘크리트의 저온환경에서 압축강도를 5 MPa를 발휘하기 위한 최적의 적산온도를 45° D·D 이상으로 권장하고 있는데, 양생방법 별 재령 경과에 따른 적산온도를 비교하였을 때 표면양생 공법 적용에 관계없이 재령 3일에 적산온도 45° D·D를 상회하는 결과를 나타내었고, 하부 공간가열을 하고 콘크리트의 상부면을 노출시킨 시험체 역시 콘크리트 타설 후 3일에서 최소 적산온도를 상회하는 것으로 나타나 -20°C 조건에서 공간가열 방법의 유효성이 확인되었다.

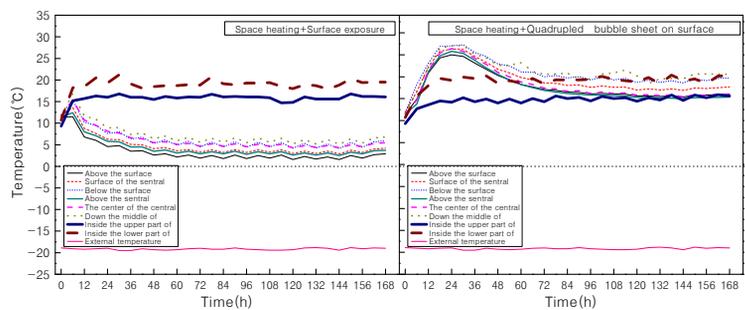


Fig. 3 Temperature profile of concrete in accordance with space heating and surface insulating

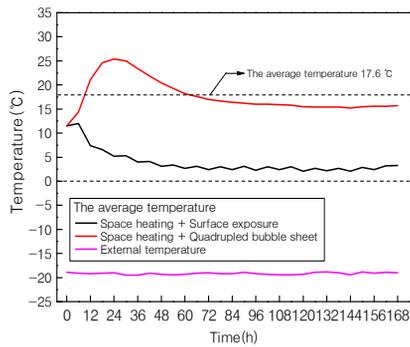


Fig. 4. Temperature profile of concrete's upper surface in accordance with space heating and surface curing method combination

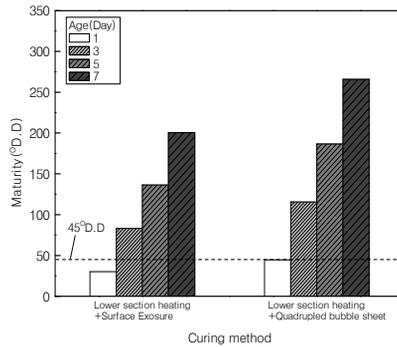


Fig 5. Maturity in accordance with change of space heating and surface curing method variation

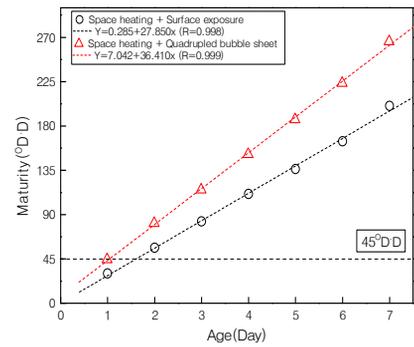


Fig 6. Maturity development for each curing method in accordance with elapsing of age

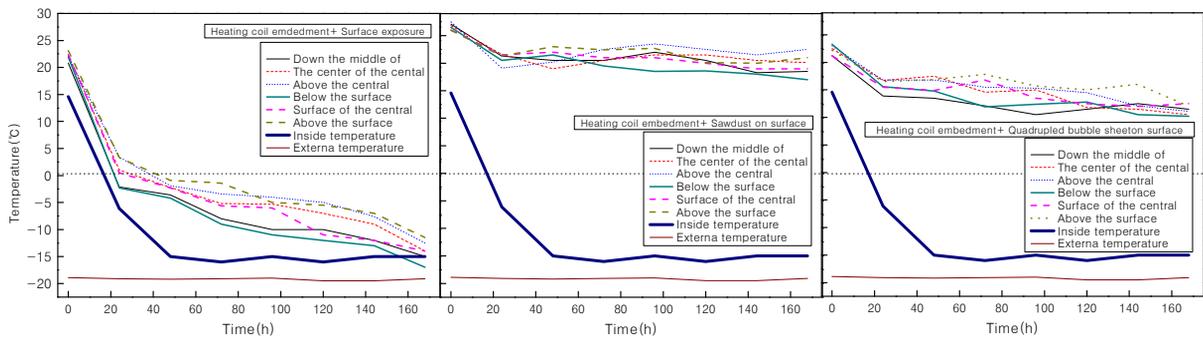


Fig 7. Internal temperature profile in accordance with change of heating coil and surface curing method combination

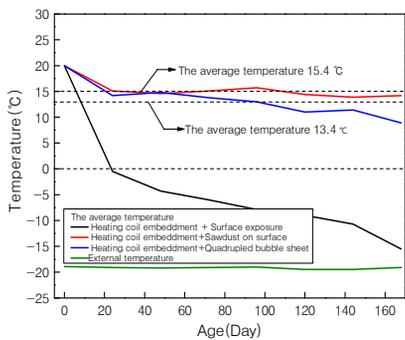


Fig. 8. Temperature profile of concrete's upper surface in accordance with change of heating coil and surface curing method

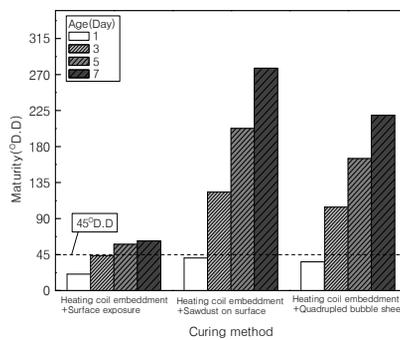


Fig 9. Maturity in accordance with change of heating coil and surface curing method combination

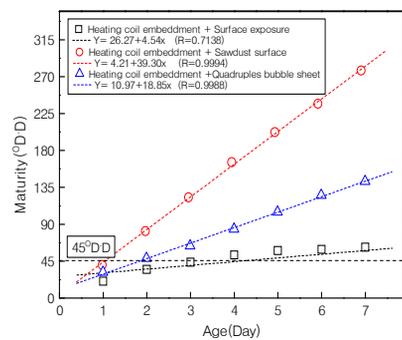


Fig. 10. Maturity in accordance with elapsing of age for each curing method

3.2.2 열선가열+표면양생공법 적용 콘크리트의 온도이력  
 Fig. 7은 콘크리트 내부에 열선 매립 및 표면 양생방법 변화에 따른 콘크리트의 내부온도이력을 나타낸 것이고, Fig. 8은 상부 표면온도를 비교한 것이다. 먼저, 콘크리트 내부에 열선을 매립하고, 상부 표면을 노출시킨 시험체의 내부온도이력은 콘크리트 내부에 매립된 열선에 의하여 콘크리트가 직접 가열되어도  $-20^{\circ}\text{C}$  극히 낮은 외기온의 영향으로 온도가 지속적으로 저하하여 평균  $-6^{\circ}\text{C}$  전후의 온도 범위를 나타내었고, 콘크리트의 내부에 열선을 매립

하고 상부에 톱밥 및 4중 버블시트를 포설한 시험체의 내부온도이력은 평균  $13^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 로 영상의 온도 범위를 나타내었다. 즉, 열선을 매립하고 톱밥 및 4중 버블시트를 적용한 시험체의 경우는 콘크리트 내부에 매설한 열선이 발열함에 따라 콘크리트의 온도를 상승시키고 톱밥 및 4중 버블시트의 높은 열저항에 기인하여 콘크리트가 외부의 찬기온에 영향을 받지 않게 차단함에 따라 영상의 온도 확보가 가능한 것으로 사료된다. 한편, 표면 양생재로 톱밥을 사용한 시험체의 경우는 본 실험조건

온도범위에서 가장 우수한 효과를 발휘하는 것으로 나타났으나 현장의 시공성 및 유지관리 측면을 고려할 경우 작업성이 매우 떨어짐으로  $-20^{\circ}\text{C}$  조건에서 콘크리트의 품질을 효율적으로 관리하기 위한 방법으로는 열선+4중 버블시트 조합이 가장 효율적인 것으로 판단된다.

재령 별 상부 표면 평균 온도를 비교한 결과 내부온도 이력과 마찬가지로 열선+툽밥을 적용한 시험체의 표면 온도가 평균  $15.4^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높은 온도 범위를 나타내었고, 다음으로 열선+4중 버블시트의 평균온도가  $13.4^{\circ}\text{C}$ , 열선+노출의 경우가 영하의 범위가 가장 낮은 범위를 나타내었다.

Fig. 9는 열선 가열 및 표면양생 공법 변화에 따른 적산온도를 나타낸 것이고, Fig 10은 양생방법 별 적산온도를 재령별로 표기하여 비교한 것이다. 양생방법 변화에 따른 적산온도는 재령에 증가함에 따라 증가하였고, 온도 이력과 마찬가지로 열선가열+4중 버블시트, 열선가열+툽밥 순으로 크게 나타났으며, 재령 3일 이상에서 전술한 초기동해 방지를 면할 수 있는 적산온도  $45^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$  이상 발휘하여  $-20^{\circ}\text{C}$  조건에서 초기동해를 방지하기 위한 복합양생 공법으로 적용이 용이하다는 것을 알 수 있었다. 즉, 열선가열+툽밥을 적용한 시험체의 경우 재령 7일에서  $277^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 로 가장 높은 것으로 나타났고, 열선가열+4중 버블시트가  $219^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 로 나타났다. 단, 열선가열+노출의 경우는 낮은 외기온에 의하여 초기동해 피해를 입어 재령 7일까지 적산온도가  $62^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$  전후로 얻어짐을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는  $-20^{\circ}\text{C}$ 의 극저온 환경에서 타설되는 플라이애시 치환 콘크리트의 초기동해 방지를 위해 보온양생 조합 변화에 따른 제반 온도이력 특성을 검토하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 하부 공간가열+표면양생재를 적용한 경우에는 낮은 외기온에도 불구하고 양생실 설치 및 하부 가열에 기인하여 표면양생재 변화에 관계없이 모두  $5^{\circ}\text{C}$  이상의 온도이력을 나타내었고, 표면 양생재 변화에 따라 노출, 4중 버블시트 순으로 높은 온도 범위를 유지하였다. 한편, 열선가열+표면양생방법 변화에 따른 내부온도이력은 열선+노출을 제외한 모든 배합에서 상온의 온도이력을 나타내었고, 특히 열선가열+툽밥의 경우가 가장 높은 온도이력을 보였으나, 시공성 및 경제성 측면을 고려할 경우

열선가열+4중 버블시트를 적용하는 것이 가장 효율적인 것으로 나타났다.

2) 복합양생방법에 따른 콘크리트의 적산온도는 내부 온도이력과 마찬가지로 양호한 결과를 나타내어 하부공간가열+표면양생재 변화에 관계없이 재령 3일에서 일본 건축학회 시공지침 동해설에서 지정하고 있는 적산온도  $45^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 를 상회하는 것으로 나타났고, 열선가열+표면양생 공법 변화에 따른 적산온도는 열선가열+노출을 제외한 모든 배합에서 재령 3일에  $45^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 를 상회함을 알 수 있었다.

이상을 종합하면 본 연구 범위에서  $-20^{\circ}\text{C}$ 의 극저온 환경에서 플라이애시를 사용한 콘크리트에 복합 양생 공법을 적용할 경우 재령 3~5일 정도에서 초기동해 방지가 가능할 것으로 사료되며, 특히 시공성 및 경제성을 고려할 경우 하부 공간가열+버블시트 포설 공법과 열선가열+버블시트 포설공법을 적용하는 것이 가장 효율적인 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. 日本建築學會 ; 寒中コンクリート施工指針・同解説, 2010
2. 한천구, 오선교, 신동안, 전충근, 김종, 2중 버블시트를 이용한 한중 콘크리트의 단열보온양생 공법, 한국콘크리트학회지, Vol.18, No.6, pp.51 ~ 59, 2006
3. 한민철, 한천구, 기온과 콘크리트, 기문당, 2002
4. 한천구, 김성수, 임춘근, 김종백, 한중시공시 표면단열양생법 변화에 따른 테크플레이트 슬래브 콘크리트의 온도이력 및 강도발현 특성, 대한건축학회 논문집, Vol.23, No.2, pp.67 ~ 74, 2007
5. 한천구, 한민철 ; 한중콘크리트의 초기동해방지를 위한 초기양생기간의 산정, 한국콘크리트학회논문집, Vol.12, No.3, pp.47~55, 2000
6. 고경택, 김성욱 ; 단열재 거꾸집을 이용한 콘크리트의 특성에 관한 기초적 연구, 한국 구조물진단학회 학술 발표 논문집, Vol.4, No.2, 2000