

---

## 얼음과 냉각수를 이용한 콘크리트의 프리쿨링에 관한 연구

Study on Precooling of Concrete Using Ice and Cooling Water



정철현\*



박장호\*\*



이순환\*\*

Chung, Chul-Hun Park, Jang-Ho Lee, Soon-Hwan

---

### ABSTRACT

Crack control due to temperature is an important factor for the mass concrete structure. Pre-cooling is the effective system to reduce the highest temperature of mass concrete. In this study, for pre-cooling, cooling water, cooling water with ice flake are used. The results of a series of experimental studies indicate that the changes in properties of fresh concrete after cooling are of low degree, and compressive strength of concrete is changed very little by cooling. The adiabatic temperature rise is also measured with pre-cooling concrete specimens. It is shown that hydration heat characteristics of cement and concrete were largely affected by pre-cooling.

Keywords : pre-cooling, properties of fresh concrete, compressive strength of concrete, Adiabatic temperature

---

\* 정희원, 대우건설기술연구소, 책임연구원

\*\* 정희원, 대우건설기술연구소 선임연구원

· 본 논문에 대한 토의를 2000년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2000년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

# 1. 서 론

근래들어 국내에서 장대교량의 하부공, LNG지하 저장탱크의 기초슬래브 및 벽체, 원자력발전소 격납구조물의 기초슬래브등과 같이 콘크리트 구조물의 대형화가 증가하고 있다. 이와같은 매스콘크리트에서는 시멘트의 수화열로 인한 콘크리트의 온도균열 제어가 구조물의 안전성, 내구성 등의 관점에서 중요한 과제로 대두되었다. 매스콘크리트에 있어서 수화열에 의한 온도균열의 제어방법에는 설계에서 시공단계까지 각 단계에서 각종의 방법이 제안되고 있으며<sup>(1)</sup>, 이 중에서 콘크리트구성재료의 일부 또는 전부를 냉각하여 콘크리트의 반죽온도를 저감시키는 프리쿨링 공법이 가장 일반적인 방법이다. 프리쿨링 방법에는 배합수로 냉수를 이용하는 방법, 배합수의 일부를 얼음으로 치환하는 방법, 냉풍 및 냉수를 이용해 조골재를 냉각하는 방법, 또는 이러한 방법을 조합해서 사용하는 방법등이 있다. 또한, 국내에서는 실구조물에 적용사례가 없지만, 국외에서는 -196°C의 액체질소를 이용한 프리쿨링 방법이 80년대 초부터 실시되고 있다<sup>(2)</sup>.

그동안 국내에서는 여러 연구자들의 노력으로 매스콘크리트의 온도균열에 대한 인식은 폭넓게 확산되어 수화열로 인한 온도 및 온도응력 해석분야<sup>(3,4,5,6)</sup>, 콘크리트의 단열온도특성<sup>(7,8,9,10)</sup> 등에서는 많은 발전이 있었지만, 경제성 및 시공성 등의 이유로 제어대책에는 큰 관심이 집중되지 못했다. 최근들어, 매스콘크리트 시공시 냉수 및 얼음 혼입에 의해 반죽온도를 저감하는 프리쿨링 방법, 콘크리트 타설후 실시되는 파이프쿨링 방법 등의 공법 적용이 증가하는 추세이나, 이러한 공법 적용시의 콘크리트의 재료 및 강도특성, 단열 온도 특성 등에 대한 분석이 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 매스콘크리트의 프리쿨링 공법 중 국내에서 사용실적이 증가하고 있는 배합수의

일부를 얼음 혼입으로 대체해 콘크리트의 반죽온도를 저감시키는 방법에 대해서 얼음 혼입량 증가에 따른 재료 및 강도실험, 단열온도상승시험을 수행하였다. 실험결과를 통해서 얼음 혼입에 의해 반죽온도를 저감시키는 경우, 얼음 혼입량의 증가에 따른 콘크리트의 재료 및 강도특성, 반죽온도의 저감효과, 단열온도특성등을 분석하였다.

## 2. 얼음 혼입량 증가에 따른 냉각콘크리트의 재료실험 및 단열온도상승시험

### 2.1 콘크리트의 배합

실험에 사용된 콘크리트의 배합은 1종류로 고정하였으며, 배합특성은 Table 1과 같다. 실험종류는 배합수를 상온상태로 한 경우(1 CASE), 배합수를 10°C로 냉각한 경우(1 CASE), 배합수의 일부를 얼음으로 치환한 경우(4 CASE) 총 6 CASE이다. 이 중에서 배합수의 얼음 치환율은 15%, 30%, 45%, 60%로 변화시켰다. 추가적으로 대기온도, 배합수, 각 재료의 온도, 건비빔 온도등이 거의 일정한 상태에서 얼음 혼입량 증가에 따른 반죽온도의 저감효과 및 블리딩 발생량을 확인하기 위해서 실험을 수행하였다. 이상에서 설명된 모든 실험 CASE에서 물-시멘트비는 일정하게 유지하였으며, 시멘트는 모두 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 실시공시 현장에서는 제빙플랜트를 설치하여 얼음을 제조하나, 본 실험에서는 각얼음을 자동빙삭기를 이용하여 제빙플랜트에서 생산되는 얼음의 두께와 유사한 두께 2mm, 길이 5mm 내외로 갈아서 사용하였다.

### 2.2 시험항목 및 시험방법

Table 1 Mix proportion of concrete

Max. Aggregate size (mm)	Slump (cm)	Air content (%)	W/C (%)	S/A (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				AE agents (g)
					W	C	S	G	
25	15	4.0	47	46.2	170	361.7	810.7	951.5	109

콘크리트 반죽시에는 강제식 팬 믹서(용량 60l)를 이용하였으며, 건비율이 완료된 후 약 1분간 반죽하였다. 측정항목은 슬럼프, 공기량, 블리딩양, 반죽온도, 압축강도, 단열온도상승시험등이다. 압축강도 측정을 위해서는 표준공시체를 제작하여 표준수중양생을 실시하였으며, 3일, 7일, 14일, 28일 재령별로 강도를 측정하였다. 얼음 혼입량 증가에 따른 단열온도 특성을 평가하기 위해 단열온도상승시험을 수행하였으며, 단열온도 측정기기는 CONTROL사에서 제작된 ADIABATIC CONCRETE CALORIMETER( C 2000)를 이용하였다. 단열온도상승시험은 각 CASE에 대해서 7일간씩 총 42일 동안 수행되었다.

### 3. 냉각콘크리트의 재료실험 결과

#### 3.1 얼음 혼입량에 따른 반죽온도의 저감량

배합수의 일부를 얼음 혼입으로 대체하는 프리쿨링을 실시하는 경우, 냉각 콘크리트의 반죽온도와 프리쿨링이 실시되지 않은 상온 콘크리트의 반죽온도를 비교하면 Table 2와 같다. Table 3은 배합수 온도, 대기온도, 각 재료의 온도등 가능한 한 모든 조건이 유사한 상태에서 수행된 얼음 혼입량에 따른 반죽온도의 저감효과이다.

대기온도가 변화(Table 2)할 때 얼음 혼입량 증가에 따른 콘크리트 반죽온도의 측정결과는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 보면, 얼음 혼입량 증가에 따른 반죽온도는 각 재료온도에 영향을 미치는 대기온도에 민감하게 반응하나, 반죽온도

의 저감효과는 대기온도를 기준으로 얼음 혼입량이 증가할수록 일정하게 증가하는 경향을 보인다.

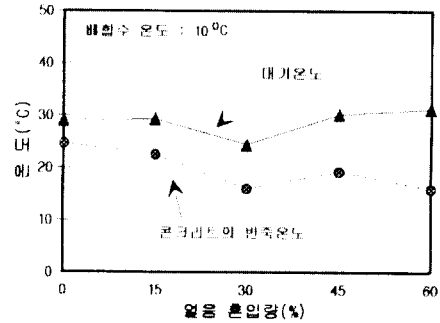


Fig. 1 Mixing temperature of concrete

Fig. 2는 대기온도 및 각 재료의 온도가 거의 일정한 수준(Table 3)의 조건에서의 얼음 혼입량에 따른 반죽온도의 변화로서 Fig. 1의 결과와 마찬가지로 얼음 혼입량이 0%인 경우를 기준으로 얼음 혼입량 증가에 따라 저감효과가 일정하게 증가함을 보여주고 있다.

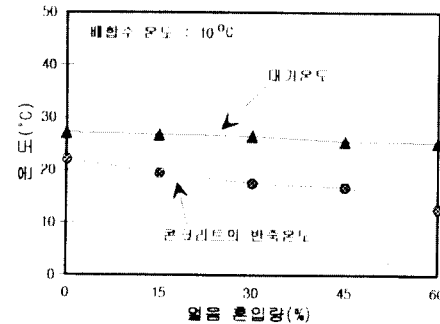


Fig. 2 Mixing temperature of concrete

Table 2 Mixing temperature according to precooling methods(case 1)

Precooling	CASE	Temp. of mixing water (°C)	Ice flake/water ratio (%)	Air temp. (°C)	Temp. of mixing concrete (°C)	Dry mixing temp. (°C)
Water	1	21	0	27.0	26.0	26.7
Cooling water	2	10	0	29.1	24.7	30.0
Ice flake	3	10	15	29.3	22.5	28.9
	4	10	30	24.5	16.1	23.8
	5	10	45	30.2	19.3	29.9
	6	10	60	31.3	16.0	30.4

Table 3 Mixing temperature according to precooling methods

Ice flake (%)	W/C (%)	Temp. of water (°C)	Temp. (°C)			Dry mixing temp. (°C)	Air temp. (°C)	Temp. of mixing concrete (°C)
			C	S	G			
0	47	10	26.3	26.9	26.4	25.6	27.2	22.0
15	47	10	26.4	27.9	27.0	24.5	26.8	19.5
30	47	10	27.0	27.6	27.5	25.0	26.5	17.5
45	47	10	26.5	26.5	28.0	26.2	25.5	16.8
60	47	10	26.8	27.8	27.5	25.6	25.0	12.7

참고로, Fig. 3(Table 3 참조)은 콘크리트의 각 재료온도와 얼음 혼입량에 따른 반죽온도의 변화이며, Fig. 4는 얼음 혼입량과 반죽온도 저감량의 관계로서 얼음 혼입량이 증가할수록 반죽온도의 저감량은 선형적으로 증가하며, 비교적 좋은 상관관계를 보임을 알 수 있다.

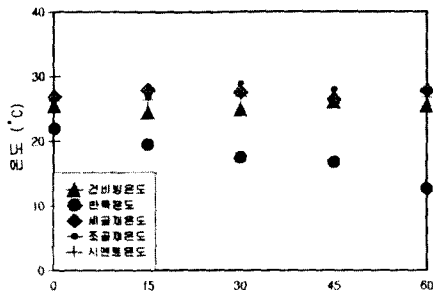


Fig. 3 Mixing temperature according to ice flake

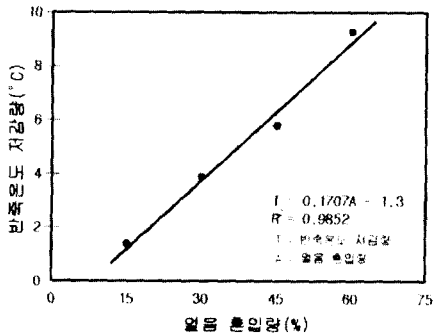


Fig. 4 Relation between ice and mixing temperature

### 3.2 굳지 않은 콘크리트

Table 2에 나타난 각 실험 CASE의 반죽직후 슬럼프의 측정결과는 Fig. 5와 같다(동일배합 3회 측정 평균값). 이 결과에서 보면, 상온콘크리트(CASE 1)에 비해 냉각콘크리트(CASE 2~CASE 6)의 슬럼프가 일정한 경향은 아니지만 약간 증가하는 경향을 보여주고 있다. 따라서 얼음 혼입에 의한 프리쿨링시 콘크리트의 유동성이 현저한 차이는 아니지만 약간 향상되는 것으로 판단된다. Fig. 6에서 보이는 공기량 변화(동일 배합 3회 측정 평균값)는 얼음 혼입량이 15%일 때 0%인 경우에 비해서 약간 감소하였으나, 전반적으로 얼음 혼입량이 증가할수록 약간 증가하는 경향을 보여주고 있다.

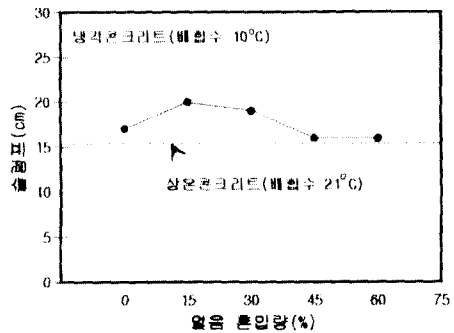


Fig. 5 Relation between ice and slump

대기온도, 배합수의 온도 및 각 재료의 온도등이 유사한 수준에서 얼음 혼입량 증가에 따른 블리딩량의 변화는 Fig. 7과 같다(1회 측정값).

실험결과에서 보면, 얼음 혼입량 증가와 블리딩 발생량이 비례관계에 있지는 않지만 얼음 혼입으로 인해 전반적으로 블리딩 발생량이 증가하

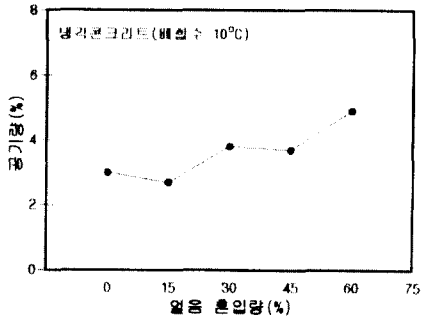


Fig. 6 Relation between ice and air content

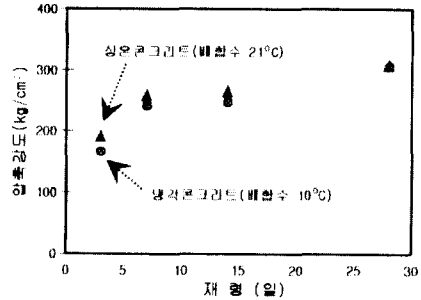


Fig. 8 Comparison of compressive strength using cooling water

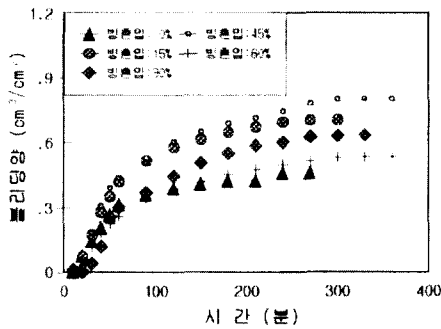


Fig. 7 Relation between ice and bleeding

는 경향을 보여주고 있다. 따라서, 얼음 혼입에 의한 프리쿨링 공법을 통해 매스콘크리트 구조물을 시공하는 경우에는 블리딩에 대한 대책이 검토되어야 할 것으로 판단된다. 한 예로 타설후 몇 시간 이내에 표면 고르기를 재실시하는 것도 효과적인 방법중 하나일 것으로 판단된다.

### 3.3 경화 콘크리트

채령별 압축강도의 측정결과는 Fig. 8, Fig. 9로서 측정값은 모든 경우 3개의 시편에서 측정된 값의 평균치이다. Fig. 8은 상온콘크리트와 냉수에 의해서 냉각된 콘크리트에 대한 측정결과로서 경화 초기에는 냉각콘크리트가 상온콘크리트에 비해서 약간 낮은 수준을 보이나, 28일 강도에서는 거의 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 따라서, 냉수에 의한 프리쿨링이 압축강도에는 별 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 얼음 혼입량(0%~60%) 증가에 따

른 압축강도 측정결과로 경화초기에 얼음 혼입량이 30%인 경우가 0%인 경우에 비해 약간 낮은 강도 수준을 보이나 28일 강도에서는 큰 영향을 미치지 않는다. 이상의 결과에서 얼음 혼입에 의한 프리쿨링을 통해서 매스콘크리트를 시공하는 경우, 얼음 혼입이 콘크리트의 강도에는 별다른 영향은 주지 않는 것으로 판단된다.

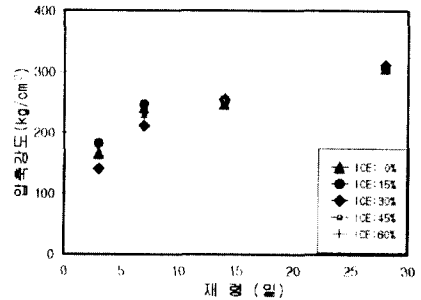


Fig. 9 Comparison of compressive strength using ice flake

## 4. 냉각 콘크리트의 단열온도상승시험 결과

### 4.1 냉수에 의한 프리쿨링

Table 2에서 설명된 실험 CASE중에서 미냉각 콘크리트(CASE 1)와 냉수에 의한 냉각 콘크리트(CASE 2)에 대한 단열온도상승시험 결과는

Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 보면, 미냉각 콘크리트(CASE 1)와 냉각 콘크리트(CASE 2)의 최대 단열온도상승량은 유사한 수준이나, 냉각콘크리트가 수화발열의 지연으로 온도응력에 큰 영향을 미치는 단열온도 상승속도가 낮아짐을 보여주고 있다.

단열온도상승시험을 통해 얻어진 시험결과를 식(1)과 같은 e함수 형태로 표현되어 수화열에 의한 온도해석시 입력치로 사용된다.

$$Q(t) = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

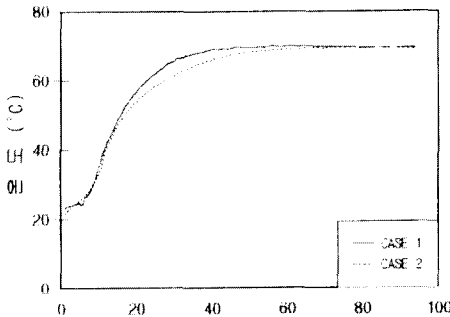


Fig. 10 Temperature rise of concrete using cooling water

여기서,  $Q(t)$ 는 재령  $t$ 일에서의 단열온도상승량,  $K$ 는 최고단열온도상승치,  $\alpha$ 는 단열온도 상승속도(실험정수),  $t$ 는 재령(일)이다.

식(1)은 재료의 반응속도와 온도의 관계에 대해서 제안된 Arrhenius Rule에 의거한 형태로 식의 형태가 매우 간단하여 수화열에 의한 온도해석시 가장 일반적으로 이용되고 있다. 그러나, 식(1)은 초기의 발열상태를 과도하게 평가함으로 인해 그 적합성이 떨어지는 것으로 알려져 있어 최근에는 식(2)와 같은 형태로 표현된 식을 많이 사용하고 있다.

$$Q(t) = K(1 - e^{-\alpha t^\beta}) \quad (2)$$

Fig. 10에 나타난 CASE 1, CASE 2에 대한 단열온도상승시험 결과를 식(2)와 같은 형태로

회귀분석한 결과는 Table 4와 같다. 회귀분석식이 초기 발열상태에서는 실험결과보다 약간 과다 평가되고 있으나, 전반적으로 실험결과를 잘 표현하였으며, 최고 단열온도상승량은 거의 유사한 수준이나, 단열온도 상승속도는 냉각 콘크리트가 낮음을 알 수 있다

Table 4 Results of regression

Precooling method	$K$	$\alpha$	$\beta$
CASE 1(water)	46.7°C	1.6	1.8
CASE 2(cooling water)	47.8°C	1.3	1.4

#### 4.2 얼음 혼입에 의한 프리쿨링

얼음 혼입량을 0%, 15%, 45%, 60%로 증가시켜 프리쿨링을 실시한 콘크리트 (Table 2에서 CASE 2~CASE 6)에 대한 단열온도 상승시험 결과는 Fig. 11과 같다. 얼음 혼입량이 30%인 경우는 단열온도상승시험시 전기 공급 문제로 실험이 완료되지 못했다.

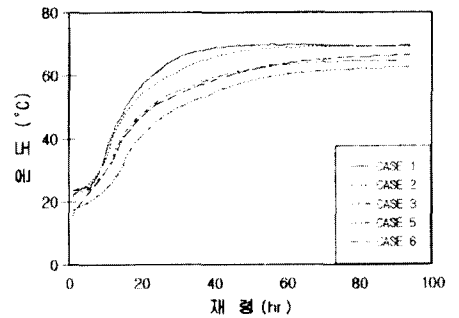


Fig. 11 Temperature rise of concrete using ice flake

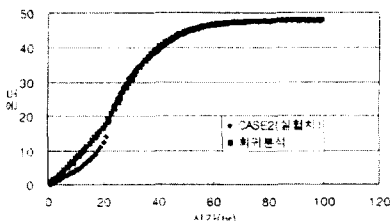
실험결과에서 보면, 최대 단열온도상승량은 대기온도와 반죽온도의 영향으로 얼음 혼입량 증가에 따라 일정하게 감소하는 경향을 보이지 않지만, 단열온도 상승속도는 크게 감소하는 경향을 보여주고 있다. 또한, 최대온도에 도달하는 시간도 얼음 혼입량이 증가할수록 수화반응의 지연으로 증가된다. 최대 단열온도상승량( $K$ )과 단열온도상승속도( $\alpha$ ,  $\beta$ )는 매스콘크리트 실 구조물에서의 발생온도 및 온도응력에 큰 영향을 미친다.

일반적으로  $K$ 와  $\alpha$ ,  $\beta$  값이 증가할수록 온도응력이 증가하고, 감소할수록 감소한다. 따라서, 얼음 혼입량에 의해 프리쿨링이 실시되는 매스콘크리트의 수화열에 의한 온도 및 응력해석시 보다 정확한 해석을 위해서는 반드시 얼음혼입량 효과가 고려된 단열온도 특성도 반영되어야 할 것으로 판단된다.

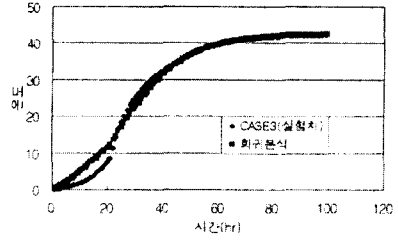
Fig. 11에 나타난 CASE 2~CASE 6에 대한 단열온도상승시험 결과를 식(2)와 같은 형태로 회귀분석한 결과는 Fig. 12와 같다. Fig. 12에서 보면 회귀분석식이 초기 발열상태에서는 실험 결과보다 대부분 약간 과다 평가되고 있으나, 전반적으로 실험결과를 잘 표현하고 있다. 얼음 혼입량을 0%, 15%, 45%, 60%로 증가시켜 프리쿨링을 실시한 콘크리트(Table 2에서 CASE 2~CASE 6)에 대한 단열온도 상승시험 결과를 식(2)에 의해 회귀분석한 결과는 Table 5와 같다. Table 5에서 보면,  $K$ 가 CASE 4~CASE 5에서 얼음 혼입량에 따라 일정하게 감소하지 않은 것은 콘크리트 반죽시 대기온도가 상대적으로 높은 것이 영향을 미친 것으로 판단된다. 그러나, 온도응력에 큰 영향을 미치는 단열온도 상승속도는 얼음 혼입량이 증가할수록 큰 폭으로 감소하였다.

Table 5 Temperature rise according to ice flake

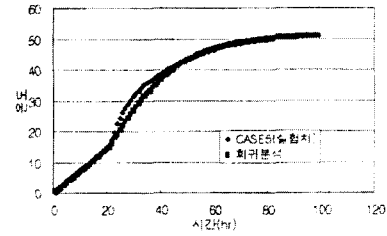
Ice flake	$K$	$\alpha$	$\beta$
0% (CASE 2)	47.8	1.35	1.40
15% (CASE 3)	42.5	1.00	1.40
45% (CASE 5)	51.1	0.95	1.30
60% (CASE 6)	45.4	0.90	1.30



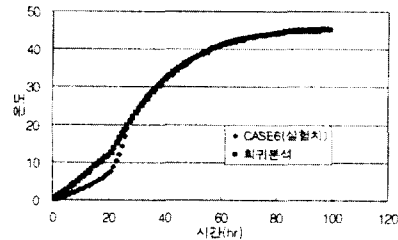
(a) CASE 2 (ice flake : 0%)



(b) CASE 3 (ice flake : 15%)



(c) CASE 5 (ice flake : 45%)



(d) CASE 6 (ice flake : 60%)

Fig. 12 Comparison of temperature rise

## 5. 결론

본 연구에서는 매스콘크리트의 온도상승 억제 를 주목적으로 배합수 대체로 냉수 및 얼음을 이용하여 프리쿨링을 실시하였으며, 얼음 혼입량 증가에 따른 냉각콘크리트의 반죽온도 저감량, 공기량, 슬럼프, 블리딩, 강도발현 및 단열온도 특성을 분석하였다. 본 연구에서 수행된 실험의 범위 내에서 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

1) 얼음 혼입에 의한 콘크리트 반죽온도의 저

감량은 얼음 혼입량 증가에 따라 거의 선형적으로 증가함을 보인다. 따라서, 실시공에서 얼음 혼입량을 조절함으로써 반죽온도의 목표치를 설정하는 것이 가능한 것으로 판단된다.

- 2) 굳지 않은 콘크리트의 성질로서 슬럼프는 냉수 및 얼음 혼입에 의해 다소 증가하지만 현저한 변화는 아니다.
- 3) 블리딩량은 얼음 혼입이 실시된 콘크리트가 미냉각 콘크리트에 비해 일정한 경향을 보이지는 않지만, 전반적으로 약간 증가하는 경향을 보여주었다. 따라서, 실시공시 이에 대한 영향을 반드시 고려하여야 할 것으로 판단된다.
- 4) 얼음 혼입에 의해 프리쿨링이 실시된 콘크리트의 압축강도는 경화 초기에는 미냉각 콘크리트에 비해 약간 낮은 강도발현 현상을 보이거나 28일 강도는 거의 동일한 수준을 보이는 것으로 나타났다.
- 5) 얼음 혼입에 의한 프리쿨링이 실시된 콘크리트의 단열온도특성중 최고 단열온도상승치는 얼음 혼입량 증가에 따라 일정한 경향은 아니지만 다소 감소하며, 단열온도상승속도는 얼음혼입량에 따라 수화반응의 지연으로 크게 감소한다. 따라서, 수화열에 의한 온도 및 응력해석시 이에 대한 영향을 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 小野 定 外 4名, “マスコン크리트の温度ひび割れ制御-低發熱型高爐セメントを使用したコン크리트の諸性質-”, セメント・コンクリート, No. 442, 1983. 12. pp.33-39.
2. ACI Manual of Concrete Practice Part I, ACI207, 4R-80, 207pp., 4R-12. 1983.
3. 김진근, 김국한, “크리이프와 건조수축을 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력해석”, 한국콘크리트학회 논문집, 제4권 3호, 1992. 9. pp.101-111.
4. 오병환, 백신원, “매스콘크리트 구조의 열응력 해석에서의 크리프 및 건조수축효과”, 대한토목학회 논문집, 제14권 제1호, 1995. 1. pp.1-12.
5. 김은경, 김래현, 신치범, “유한요소법에 의한 매스콘크리트 구조물의 온도해석 프로그램 개발”, 한국콘크리트학회 논문집, 제7권 6호, 1995. 12. pp167-175.
6. 강석화, 정철현, 정한중, 외 2명, “매스콘크리트 구조물의 온도응력 평가에 관한 연구”, 한국콘크리트학회논문집, 제7권 2호, 1995.4 pp.126-135.
7. 정철현 외 5명, “매스콘크리트의 온도분포에 영향을 주는 주요변수에 관한 연구”, 한국콘크리트학회논문집, 제6권 5호, 1994. pp.203-212.
8. 김진근, 노재호, 박연동 외 2명, “시멘트 및 콘크리트의 수화발열특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제7권 3호, 1995. 6. pp.211-219.
9. 강석화, 이용호, 정한중, 박칠림, “콘크리트의 단열 온도 상승량의 정량화에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제7권 6호, 1995. 12.
10. 문한영, 최연왕, “고강도용 콘크리트의 온도상승 억제를 위한 고로슬래그 미분말의 효과”, 한국콘크리트학회 논문집, 제10권 4호, 1998. 8. pp.195-204.

## 요 약

온도로 인한 균열제어는 매스콘크리트 구조물에서 중요한 인자이다. 프리쿨링은 매스콘크리트의 최대온도를 저감시키기 위한 효과적인 시스템이다. 본 연구에서는 콘크리트의 배합수를 냉각수와 얼음 혼입으로 대체하는 프리쿨링 시험을 실시하였다. 실험결과, 프리쿨링이 실시된 굳지 않은 콘크리트의 재료 및 강도 특성은 상온콘크리트에 비해 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한, 프리쿨링에 따른 단열온도상승을 측정하였으며, 시멘트 및 콘크리트의 수화열 특성은 프리쿨링에 의해서 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

(접수일자 : 2000. 2. 21)