

# 초기재령 콘크리트의 외기대류계수에 관한 연구

## A Study on the Convection Heat Transfer Coefficient in Concrete at Early Ages

김진근\*  
Kim, Jin-Keun

전상은\*\*  
Chun, Sang-Eun

양은익\*\*\*  
Yang, Eun-Ik

송영철\*\*\*\*  
Song, Young-Chul

방기성\*\*\*\*\*  
Pang, Gi-Sung

---

### ABSTRACT

8 The setting and hardening of concrete is accompanied by nonlinear temperature distribution caused by developing heat of cement hydration. Especially at early ages, nonlinear temperature distribution has a large influence on the crack evaluation. So the need to predict the exact temperature history in concrete has led to the examination thermal properties.

In this study, the convection heat transfer coefficient is experimentally investigated which is one of the thermal properties in concrete. Furthermore, the result of the experiment is compared with those of analysis by the program which is developed in KAIST. As a result of comparison, the analytical results are in good approximation with experimental data.

---

### 1. 서론

수화열에 관련된 문제가 매스콘크리트와 같은 대형구조물에 국한되었던 이전과 달리 현재는 단위시멘트량이 큰 고강도 구조물들이 증가함에 따라 그 범위가 확대되었다. 이로 인해 수화열에 의한 균열 발생을 예측하거나 이를 미연에 방지하고자 하는 노력이 일고 있다. 시공적인 측면에서는 파이프쿨링이나 프리쿨링을 이용한 수화열 저감 방안이 대두되고 있고, 재료적인 측면에서는 Belite 시멘트와 같은 저발열 시멘트의 개발이 진행 중에 있다. 또한 이러한 방법들을 검증하거나 수화열의 저감과 균열 발생 여부를 판단하기 위해서 여러 가지 해석 프로그램들이 개발되고 있다. 그러나, 기존의 해석 프로그램 대부분이 온도응력해석에 필수적인 열특성계수에 대한 검증을 하지 않은 채 주로 일본의 실험결과로 이를 대체하고 있다.

콘크리트의 열특성계수에 의한 온도분포를 정확히 예측하는 것은 콘크리트의 정확한 열응력 해석을 위해 기본적으로 필요한 과정이다. 따라서 이러한 열특성계수에 대한 실험이 수행되어야 한다. 열전도

---

\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 정교수  
\*\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 석사과정  
\*\*\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 연구원  
\*\*\*\* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원  
\*\*\*\*\* 한국전력공사 전력연구원 연구원

계수나 비열 등에 대한 실험방법은 구체적으로 제시되어 있고, 최근에는 이를 직접 측정하는 기기가 개발되었다. 반면, 유수대류계수나 의기대류계수에 대해서는 상용화된 실험법이 없고, 단지 일부 실험자의 논문이나 보고서에 발표되어 있는 실험결과를 이용하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 콘크리트의 열특성계수 중 의기대류계수에 대한 실험을 실시하여 기존의 실험결과와 비교하고, KAIST에서 개발된 수화열 해석 프로그램을 가지고 분석을 실시하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 실험 재료

표1.은 실험에 사용된 재료의 물리적 성질을 나타내었다. 굵은 골재의 최대치수는 19mm이고 매스 콘크리트 타설시 주로 쓰이는 5종 시멘트를 사용하였다.

표1. 실험재료의 물리적 성질

	5종 시멘트	잔골재(강모래)	굵은 골재(쇄석)
비표면적( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	3210	-	-
비중	3.15	2.55	2.58
조립률	-	2.95	7.23
28일 압축강도(MPa)	36	-	-

### 2.2 실험 변수

실험변수는 크게 풍속의 크기, 거푸집의 종류로 나눌 수 있다. 풍속의 크기는 바람이 불지 않는 경우인 0m/s와 1m/s, 2m/s, 5m/s를 기준으로 하였고, 콘크리트 표면에 덮인 거푸집의 종류는 거푸집이 없는 경우와 목재거푸집을 사용했을 경우로 나누었다. 표2.는 실험변수를 나타내었다.

표2. 실험변수

풍속(m/s)	거푸집 종류	거푸집 두께(cm)
0, 1, 2, 5	無	-
	목재	2cm

### 2.3 배합설계

표3.은 실험에 사용한 콘크리트의 배합설계표이다. 감수제는 Super-20을 사용하였다.

표3. 배합설계

물-시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위 사용량 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )					
		물	시멘트	잔골재	굵은 골재	혼화재료	
						AE제	감수제
50	42	181	362	707	989	0.018	1.81

### 2.4 실험방법

실험은 23°C의 항온조건에서 실시하였고, 온도측정장비로는 UCAM-70A를 사용하였다. 바람은 송풍기를 사용하여 한 방향으로만 불어주었고 이 때의 풍속은 실험체 개방면 바로 위의 풍속을 측정한 값이다.

실험체는 20×20×50cm의 직육면체로서, 이를 위하여 그림1.과 같은 80×80×80cm의 단열재(스티로

폼)와 20×20×50cm의 목재거푸집을 사용하였다. 단열재는 실험체의 윗면으로만 열전달이 일어나도록 윗면을 제외한 사방이 30cm의 두께로 이루어져 있다. 콘크리트의 온도이력을 알아보기 위하여 깊이 방향으로 K-type의 Thermo-couple을 매립하였다.

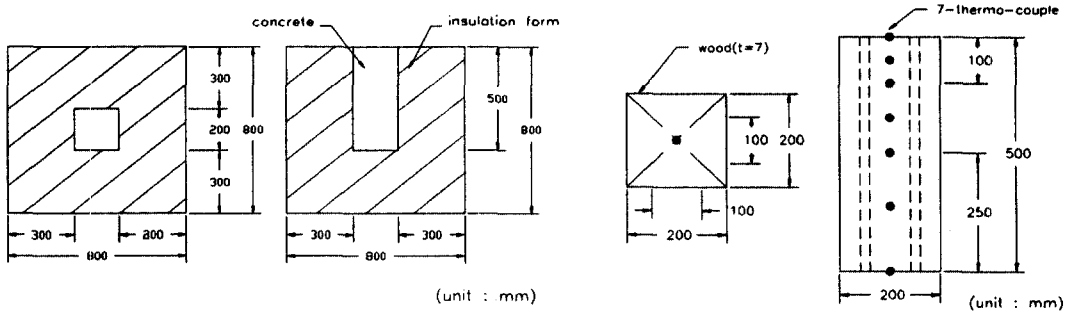
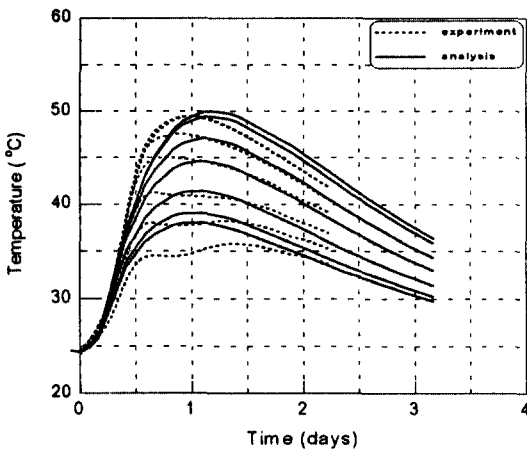


그림1. 공시체의 형상과 Thermo-couple의 매립위치

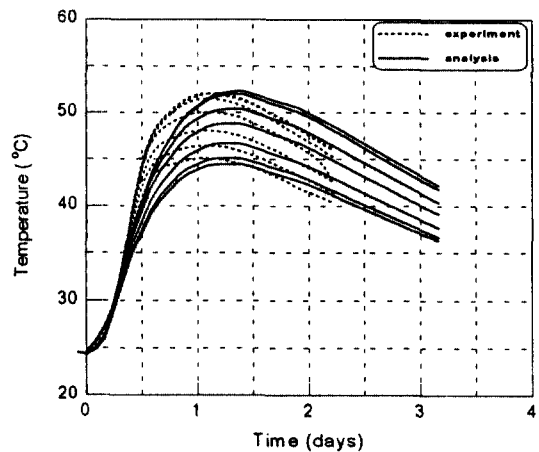
### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 실험결과

풍속과 거푸집의 종류에 따른 공시체의 온도이력곡선은 그림2와 같다. 실험결과에 의하면, 풍속과 거푸집의 종류에 따라서 최고상승온도와 온도분포가 변하는 것을 알 수 있다. 우선, 풍속에 따른 변화를 보면, 거푸집이 없는 경우인 그림2. a), c), e), g)를 통해서 풍속이 증가할수록 최고상승온도가 낮아지고 온도이력곡선의 기울기도 작아지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 심부에서보다 표면으로 갈수록 뚜렷이 나타나고 있다. 목재거푸집을 사용한 경우인 그림2. b), d), f), h)에서는 거푸집이 없는 경우와 마찬가지로 최고상승온도가 낮아지나 온도이력곡선의 기울기는 거푸집이 없는 경우에 비해 크게 영향을 받지 않고 있다. 특히, 거푸집이 없는 경우에는 전체온도곡선의 기울기가 크게 변하는 반면, 목재거푸집을 사용한 경우에는 온도상승부는 거의 변함이 없고 온도하강부에서만 이러한 현상을 볼 수 있다.

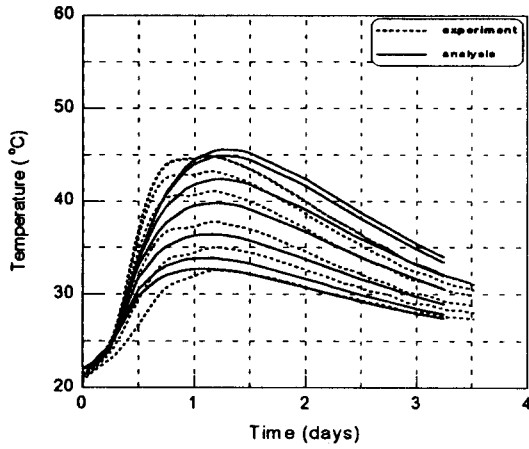


a) 풍속 0m/s(거푸집이 없는 경우)

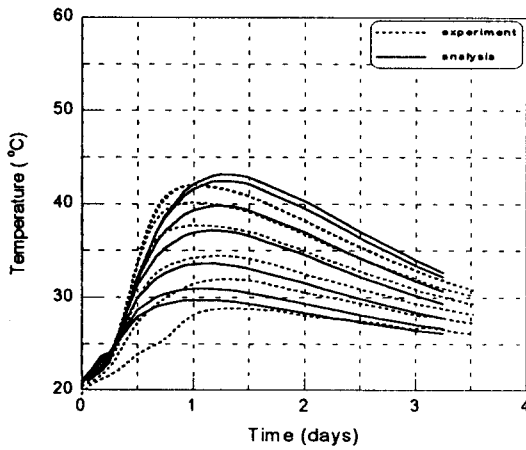


b) 풍속 0m/s(목재 거푸집의 경우)

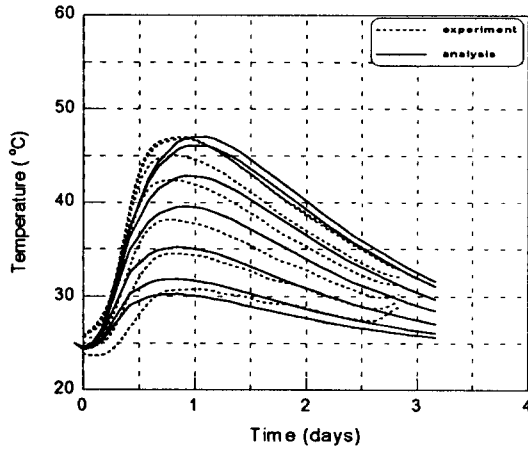
그림2. 실험결과 및 분석(계속)



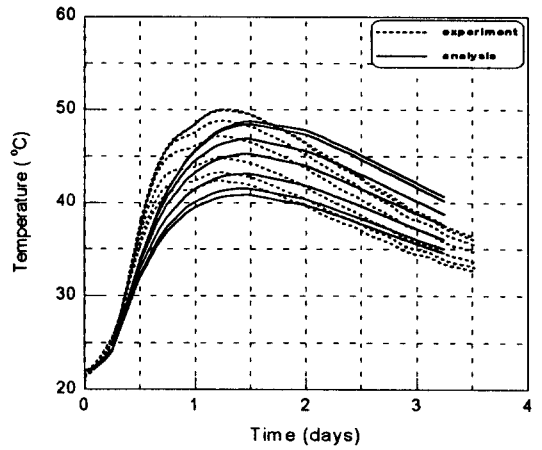
c) 풍속 1m/s(거푸집이 없는 경우)



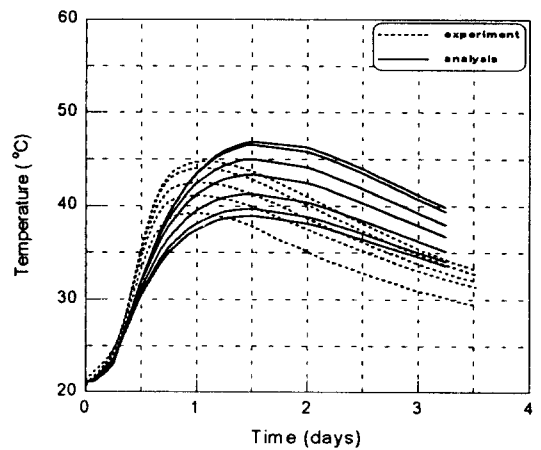
e) 풍속 2m/s(거푸집이 없는 경우)



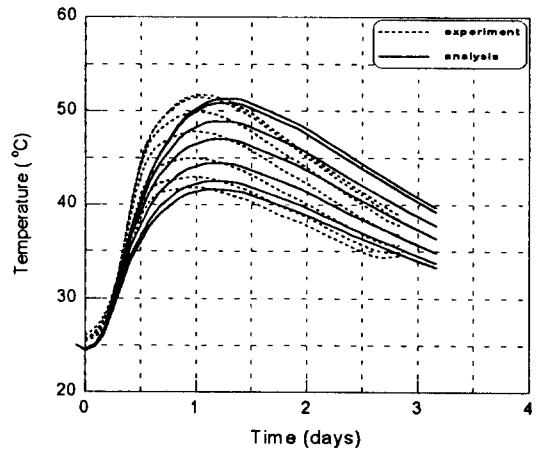
g) 풍속 3m/s(거푸집이 없는 경우)



d) 풍속 1m/s(목재 거푸집의 경우)



f) 풍속 2m/s(목재 거푸집의 경우)



h) 풍속 3m/s(목재 거푸집의 경우)

그림 2. 실험결과 및 분석

거푸집의 종류에 따른 변화를 보면, 각 풍속에 따라서 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 거푸집이 없는 경우에 비해서 목재거푸집을 사용한 경우는 최고상승온도가 높아지고 있으며, 온도분포의 폭이 좁아지고 있음을 볼 수 있다. 이러한 경향은 풍속이 낮을수록 커지고 있다.

### 3.2 결과분석

#### 3.2.1 해석프로그램의 개요

결과분석에 사용된 해석 프로그램은 KAIST에서 개발된 수화열 해석 프로그램으로서 크게 온도 해석 프로그램과 온도응력 해석 프로그램으로 이루어져 있다. 온도 해석에 관련된 프로그램의 주요기능은 표4.와 같다.

표4. 해석 프로그램의 종류와 각 프로그램의 주요기능

프로그램 명칭	주요 기능	비고
GEN.FOR	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 해석 대상 구조물중 3차원 Solid Element의 Mesh Generation 실시                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 절점의 좌표값</li> <li>- 3차원 Solid Element의 Node Connectivity 구성</li> </ul> </li> <li>○ 온도해석 프로그램(PIPHYD.FOR)에 소요되는 기억용량크기 계산                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- NN, NE, NS</li> <li>- NKMATR, NDMATR (Dynamic Array의 크기)</li> </ul> </li> </ul>	PIPHYD.FOR 및 STRESS.FOR 프로그램의 전처리 기능
GENP.FOR	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 해석 대상 구조물중 1차원 Line Element의 Mesh Generation 실시                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1차원 Line Element의 Node Connectivity 구성</li> </ul> </li> </ul>	
GENAIR.FOR	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 해석 대상 구조물중 3차원 Solid Element의 Mesh Generation 실시                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 3차원 Solid Element의 외기대류에 의한 Node Connectivity 구성</li> </ul> </li> </ul>	
PIPHYD.FOR	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Pipe-Cooling이 고려된 수화열에 의한 온도 계산</li> <li>○ 해석 대상 구조물의 각 절점의 온도이력을 YOUNG.FOR 및 STRESS.FOR 프로그램의 입력 데이터로 이용할 수 있도록 TEMPER.DAT를 생성</li> </ul>	온도이력해석 주프로그램

위의 프로그램 중 온도해석을 실행하는 주프로그램은 PIPHYD.FOR이다. PIPHYD.FOR 프로그램은 시간에 따른 온도해석이 가능한 비정상 열전달(Transient Analysis)을 고려한 프로그램이며, 전도 및 대류(외기 및 유수)에 의한 열전달 해석이 가능하다.

#### 3.2.2 해석방법

##### 1) 해석변수

대상 구조물의 수화열에 의한 온도이력을 계산하기 위해 사용된 재료의 열특성치들은 표5.와 같다. 또한 배합 설계된 콘크리트의 단열온도상승실험을 통하여  $K = 51.544^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha = 1.3$ 을 사용하였다.

표5. 열특성치의 입력 데이터

	콘크리트	스티로폼	목재
단위중량(kg/m <sup>3</sup> )	1900	25	720
비열(kcal/kg · °C)	0.230	0.289	0.300
열전도율(kcal/m · hr · °C)	2.000	0.025	0.138

##### 2) 해석방법

해석상의 변수는 총 12개로, 각 재료의 물성치 중 목재의 열전도율, 비열, 단위중량과 스티로폼의 비열은 일반적으로 사용되는 값으로 가정하였고, 나머지 물성치는 실험값을 이용하였다. 목재 거푸집을 사용한 경우는 목재의 물성치를 가정하였기 때문에 거푸집이 없는 경우와 동일한 외기대류계수를 가지고 해석하였고, 이는 콘크리트로 대체하여 목재 거푸집의 환산 외기대류계수를 구할 수도 있다. 스티로폼 단열재의 단열검증 실험을 통하여 단열재를 통해 외기로 빠져나가는 열량은 0으로 하였고, 외기대류는 단지 윗면으로만 일어난다고 가정하였다.

### 3.2.3 측정결과와 해석결과의 비교분석

프로그램 해석결과를 보면, 전반적으로 실험결과의 최고상승온도와 온도기울기는 거의 같은 경향을 보이고 있다. 그러나, 최고온도 도달시기와 온도상승부의 기울기에서 차이를 보이고 있는데, 이는  $\alpha$  값이 해석결과보다 크다는 것을 의미한다.  $\alpha$  값의 증가는 온도의 상승을 유발하기 때문에, 실제적으로 K와  $\alpha$ 의 실험이 제대로 이루어지지 못했다는 것을 의미한다. 또한, 실험결과에서 거꾸집이 없는 경우에 각 부분에서의 최고온도도달시점이 표면부로 갈수록 빨라지는 현상이 나타난다. 그러나 해석결과에 의하면 그 반대의 현상을 보이고 있다. 이것은 실험시 대기의 습도와 바람에 의해 표면부의 수분이 증발하여 콘크리트 표면부의 열전도율이 낮아졌기 때문이다.

해석을 통하여 얻은 외기대류계수에 관한 결과는 기존의 실험결과와 매우 다른 경향을 보이고 있다. 해석 결과와 大森川의 실험에서 제안된 외기대류계수의 값을 비교하면, 표6.과 같다.

표6. 풍속에 따른 외기대류계수

풍속(m/s)		0	1	2	3
외기대류계수 (kcal/m <sup>2</sup> · hr°C)	해석결과	6.9	14	28	36
	大森川	9.6	10.72	11.84	12.96

위의 결과를 비교해보면, 풍속이 0m/s일 때는 큰 차이가 없으나, 풍속이 증가할수록 해석결과의 값이 커지는 것으로 나타난다. 이러한 해석결과의 차이는 해석상의 오류와 실험 조건의 상이함 때문인 것으로 사료된다. 해석상의 오류는 해석시 외기대류계수의 산정을 위해 사용재료의 물성치를 가정하였기 때문에 가능하다. 그러나, 여기서는 모든 물성치를 고정하고 외기대류계수만을 변수로 해석하였기 때문에 큰 영향을 미치지 못한다. 실험조건의 상이함은 大森川님이 본 연구의 실험체와 비교할 때, 크기에서 큰 차이를 보이고 있음에서 비롯된다. 따라서, 모든 실험조건이 서로 다르고, 이로 인한 변수의 설정이 틀려질 수 있다.

해석에 의하면, 외기대류계수가 증가할수록 심부와 표면부의 최고온도도달시점은 빨라지고 심부와 표면부의 온도차는 벌어지게 되며, 온도하강부의 온도차는 상대적으로 줄어들게 된다. 또한, 외기대류계수의 증가에 따라 심부의 온도하강곡선의 기울기는 증가하고, 표면부에서는 감소하는 경향을 보이고 있다.

## 4. 결론

풍속이 증가할수록 외기대류계수는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 기존의 실험결과와 일치한다. 그러나 풍속 0m/s에서의 값과 그 기울기는 동일하지 않는 것으로 분석이 되었다. 이것은 해석시 사용된 변수의 부정확에서 비롯된 결과로 볼 수도 있고, 해석 프로그램이 외기대류계수에 대해 제대로 고려하지 못하고 있기 때문일 수 있다. 따라서, 앞으로 부정확한 해석변수에 대해 물성실험을 실시하고, JCI의 온도해석 프로그램을 이용한 해석 프로그램의 검증을 통하여, 실험결과의 보다 정확한 분석을 실시하는 것이 필요하다.

## 참고문헌

1. 김진근, 김국한, "크리이프와 건조수축을 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력해석", 한국 콘크리트학회 논문집, 제4권, 제3호, pp. 101-111, 1992.9
2. 日本コンクリート工學協會, "マスコンクリートの溫度應力發生メカニズムに 關すコロキウム", pp.112, 1982
3. 小澤章三, "マスコンクリートの初期ひび割れとそ防止對策に關する研( I )", 發電水力, No.57, 1962. 3.