

# 콘크리트의 열전도율에 관한 실험적 연구

## Experiments on Thermal Conductivity of Concrete

김진근 <sup>1</sup> Kim, Jin-Keun	전상은 <sup>2</sup> Jeon, Sang-Eun	양은익 <sup>3</sup> Yang, Eun-Ik
김국한 <sup>4</sup> Kim, Kook-Han	조명석 <sup>5</sup> Cho, Myung-Sug	방기성 <sup>6</sup> Pang, Gi-Sung

### ABSTRACT

In order to calculate the thermal stresses of massive concrete structures in non-steady state conditions the thermal properties of the materials have to be well known. Structural materials such as concrete, rock and soil are heterogeneous, damp and porous so that measurements of their thermal properties by conventional methods would result in large errors.

In this study, thermal conductivity was measured by the device, QTM-D3 which is usually used in Japan. Variables are chosen as age, water content, temperature, aggregate content, S/A ratio and type of cementitious materials. Finally a model for thermal conductivity was proposed.

### 1. 서론

콘크리트 구조물에 수화열이 발생하고 대류 경계면에서 온도구배가 발생하면 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 열전달이 이루어진다. 이와 같은 온도구배가 존재할 경우에는 진도에 의한 열전달이 이루어지며, 진도에 의한 열전달을 정확히 예측하기 위해서는 재료의 열전도율을 정확히 알고 있어야 한다. 콘크리트는 여러 재료에 의해 구성된 복합재료이므로 이들 구성재료의 열전도율과 구성비에 따라 콘크리트의 열전도율이 달라진다. 따라서 콘크리트의 열전도율은 일반재료의 경우보다 더 많은 영향인자들에 의해 영향을 받는다.

따라서, 이 연구에서는 콘크리트의 열전도율에 영향을 미치는 각종 요인에 대하여 실험을 수행하고 이들 실험결과를 이용하여 수화열에 의한 온도해석의 정확도를 높이는데 도움을 주고자 한다.

### 2. 실험개요

#### 2.1 실험재료

표 1은 실험에 사용된 재료의 물리적 성질을 나타내었다. 굵은 골재의 최대치수는 19mm이고 모두 국내에서 생산된 재료를 실험에 이용하였다. 사용된 고로슬래그의 비중은 2.9이다.

- 1) \* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수
- 2) \*\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
- 3) \*\*\* 정회원, 한국해양연구소 선임연구원
- 4) \*\*\*\* 정회원, 한국도로공사 선임연구원
- 5) \*\*\*\*\* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
- 6) \*\*\*\*\* 한국전력공사 전력연구원 연구원

표 1 실험재료의 물리적 성질

	1종 시멘트	5종 시멘트	플라이 애쉬	잔골재	굵은골재
종류				강모래	부순자갈
비표면적(cm <sup>2</sup> /g)	3315	3210	4300	-	-
비중	3.15	3.15	2.10	2.55	2.58
조립률	-	-	-	2.95	7.23
28일 압축강도(MPa)	40	36		-	-

### 2.2 실험변수

이 실험에서 규명코자 하는 콘크리트 열전도율의 영향인자는 크게 재령, 골재 사용량, 물/시멘트비, 시편온도, 함수상태, 결합재 종류 및 잔골재율 등이다. 이들 영향인자를 규명하기 위해 채택된 실험변수는 표 2와 같다. 표 2에서 알 수 있듯이 영향인자를 효율적으로 규명하기 위해 각 영향인자마다 콘크리트 또는 페이스트를 실험 공시체로 이용하였다. 실험에 사용된 콘크리트와 페이스트의 기준 배합비는 표 3과 같다.

표 2 실험변수

영향인자	실험변수	공시체 종류
재령	3, 7, 14, 28일	콘크리트외 3종류
골재사용량	0, 21, 35, 49, 57, 64, 71%	콘크리트, 페이스트
시편온도	20, 40, 60℃	콘크리트, 페이스트
함수상태	완전습윤, 완전건조상태	콘크리트, 페이스트
물/시멘트비	25, 30, 35, 40%	페이스트
결합재 종류	5종, 1종, 플라이애쉬, 고로슬래그	페이스트
잔골재율	39, 45, 50, 55%	콘크리트

표 3 콘크리트와 페이스트의 기준 배합비

구분	W/C (%)	S/A (%)	결합재 종류	배합비(kg/m <sup>3</sup> )					비고
				W	C	S	G	유동화제	
콘크리트	40	39	5종	181	452	630	989	2.26	
페이스트	40	-	5종	558	1394	-	-	-	

### 2.3 배합설계

표 4는 콘크리트 열전도율의 영향인자를 규명하기 위해 채택된 실험 배합비이다. 표 4의 각 배합비의 구분 기호에서 C는 콘크리트, P는 페이스트, M은 모르터를 나타낸다.

표 4 배합설계

규명 영향인자	구분	W/C (%)	S/A (%)	결합재 종류	배합비(kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	유동화제
재령	C-RE	40	39	5종	181	452	630	989	2.26
	P-RE	40	-	5종	558	1394	-	-	-
	M-S	40	-	5종	285	713	994	-	-
	M-G	26.7	-	5종	239	894	-	1304	-
골재량, 시편온도, 함수상태	C-GC1	40	39	5종	181	452	630	989	2.26
	C-GC2	40	39	5종	340	850	345	546	-
	C-GC3	40	39	5종	140	350	702	1103	1.75
	C-GC4	40	39	5종	220	550	559	880	1.10
	C-GC5	40	39	5종	260	650	490	768	-
	C-GC6	40	39	5종	420	1050	206	321	-
물/시멘트비	P-WC1	25	-	5종	440	1762	-	-	8.81
	P-WC2	30	-	5종	486	1619	-	-	8.10
	P-WC3	35	-	5종	524	1498	-	-	-
	P-WC4	40	-	5종	558	1394	-	-	-
결합재 종류	P-FL1	40	-	FL	558	973	-	-	8.81
	P-FL2	40	-	FL/5종	558	487/696	-	-	8.10
	P-SL1	40	-	SL	558	1282	-	-	-
	P-SL2	40	-	SL/5종	558	641/696	-	-	-
	P-1T1	40	-	1종	558	1394	-	-	-
잔골재율	C-SA1	40	45	5종	181	452	726	891	2.26
	C-SA2	40	50	5종	181	452	810	806	2.49
	C-SA3	40	55	5종	181	452	887	729	2.83

#### 2.4 실험방법

이 연구에서 이용된 열전도율 측정장비는 일본 KEM사에서 제작한 QTM-D3로서 과도 열선방식(transient hot wire method)을 변형한 프루브법(probe method)에 의해 열전도율을 측정하는 기기로서 일본 및 여러나라에서 그 신뢰성이 인정된 열전도율 측정장비이다. 이 장비의 특징은 열전도율 측정시간이 매우 짧고 열선이 가해지는 표면의 온도상승량이 20℃내외로서 온도의 영향을 최대한 줄였으며 정확도는 ±3% 이내이다. 이 장비의 열전도율 측정범위는 0.02 ~ 10.00 kcal/m · hr · ℃이다. 시편의 크기는 클수록 정확도가 증가하지만 열전도율이 3.00 kcal/m · hr · ℃ 정도일 때의 실험상 오차를 최소화할 수 있는 시편의 최소 치수는 2.5cm(H) × 6cm(W) × 10cm(L)이다. 이 연구에서 채택한 시편의 크기는 10cm(H) × 10cm(W) × 13cm(L)의 직육면체 형상이며, 시편의 윗면을 제외한 3면의 열전도율을 측정하여 이들의 평균치를 분석에 이용하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 실험결과

##### 3.1.1 재령의 영향

콘크리트, 페이스트 및 모르타의 열전도율이 재령에 따라 어떤 영향을 받는지 알아보기 위해 시편이 완전습윤 상태이고 온도가 20℃인 경우에 대해 실험을 실시하였다. 그림 1 (a)를 보면 각 시편의 종류에 따라 열전도율은 뚜렷한 차이를 보이지만 모든 시편에서 재령에 따른 열전도율의 변화는 뚜렷이 나타나지 않았다.

##### 3.1.2 골재량의 영향

콘크리트는 물, 시멘트, 잔골재 및 굵은골재의 복합체이다. 따라서 열전도율이 큰 골재량(굵은골재+잔골재)이 많을수록 콘크리트의 열전도율은 클 것으로 추정된다. 따라서 물/시멘트비, 잔골재율 및 시멘트의 종류를 일정하게 하고, 골재의 사용량, 건습상태 및 시편의 온도를 변화시켜 가며 실험을 실시하였다. 그림 1 (b)는 골재 사용량에 따른 열전도율 측정결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 콘크리트의 건습상태나 온도에 관계없이 골재의 사용량이 증가할수록 열전도율은 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 골재의 열전도율이 다른 콘크리트 구성재료보다 크기 때문이며, 골재의 열전도율에 따라서 콘크리트의 열전도율이 영향을 받을 수 있음을 알 수 있다.

##### 3.1.3 온도의 영향

그림 1 (c)는 시편이 습윤상태일 때의 시편의 온도에 따른 열전도율 실험결과이며, 그림 1 (d)는 시편이 건조상태일 때의 시편의 온도에 따른 열전도율 실험결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 건습상태에 관계없이 모두 시편의 온도가 증가할수록 시편의 열전도율이 줄어드는 경향을 보인다.

##### 3.1.4 함수상태의 영향

그림 1 (c), (d)의 콘크리트와 페이스트의 함수상태에 따른 결과를 보면 20℃의 시편온도일 경우 완전 습윤상태가 완전 건조상태인 경우보다 열전도율이 큰 것을 알 수 있다.

##### 3.1.5 그 외의 영향인자의 영향

결합재의 종류에 따른 열전도율의 변화를 알아보기 위해 결합재의 사용 부피가 일정한 페이스트를 이용하여 실험을 실시하였다. 실험은 완전 습윤 상태이고 20℃의 시편에서 이루어졌다. 실험결과에 의하면 1종 시멘트와 5종 시멘트를 사용할 경우 비슷한 열전도율을 보였다. 그러나 플라이애쉬나 고로슬래그를 사용할 경우에는 열전도율이 줄어들었다. 그리고 플라이애쉬와 고로슬래그의 사용량이 증가할수록 열전도율이 줄어들음을 알 수 있었다.

잔골재율에 따른 열전도율의 변화는 잔골재율이 증가하면 열전도율도 증가했다. 그러나 그 증가폭은 크지 않은 것으로 나타났다.

#### 3.2 열전도율에 대한 모델식

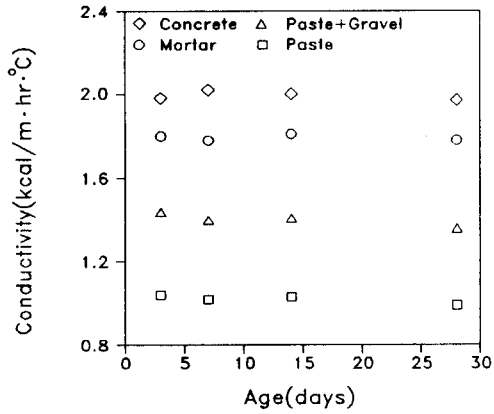
##### 3.2.1 골재 사용량에 따른 열전도율

골재 사용량에 따른 열전도율의 변화는 앞에서 언급한 바와 같이 골재 사용량이 증가함에 따라 열전도율이 커지는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과를 기준배합인 C-GC4의 열전도율에 대하여 정규화시키면 그림 2와 같다.

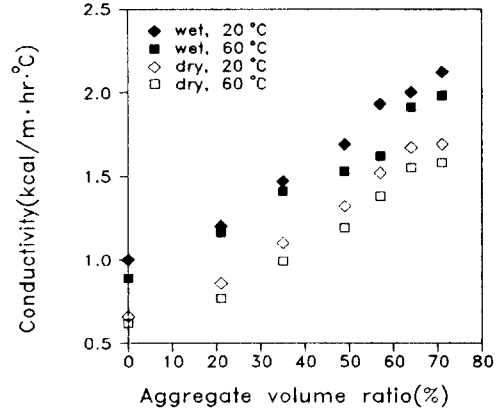
콘크리트의 열전도율을 예측하기 위한 모델식 세시를 위하여, 실험결과 중 콘크리트로 볼 수 있는 골재량(0.57이상)의 결과들만을 이용하였다. 그림 2에서 함수상태(습윤상태, 건조상태)에 따라 약간의 차이는 보이고 있지만 함수상태와 온도에 상관없이 아래식으로 골재 사용량에 따른 변화를 예측할 수 있다.

$$\lambda = 0.34 + 1.03AG$$

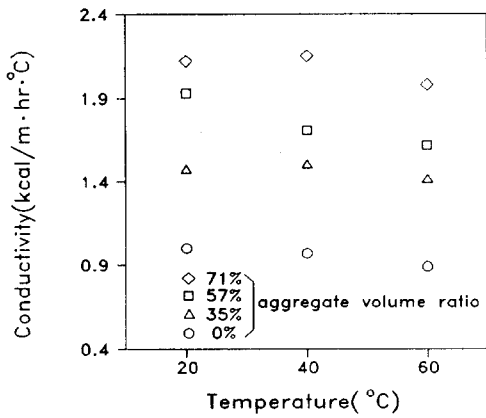
여기서,  $\lambda$ 는 콘크리트의 열전도율,  $AG$ 는 골재 부피비(골재량/전체량)이다.



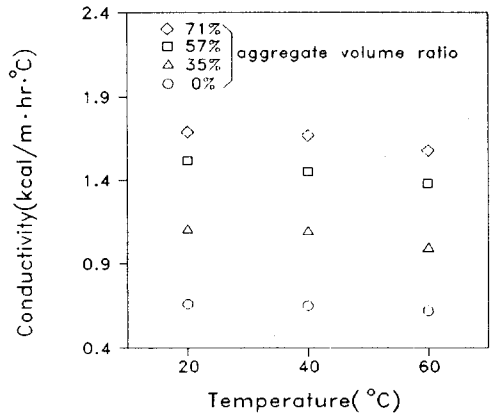
(a) 재령의 효과(습윤상태, 20°C)



(b) 골재 사용량의 효과(콘크리트)



(c) 온도의 효과(완전습윤)



(d) 온도의 효과(완전건조)

그림 1. 영향인자에 따른 실험결과

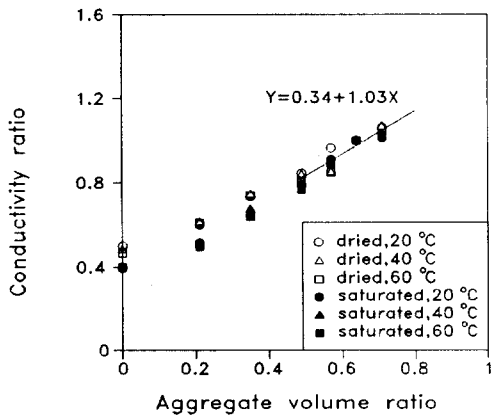


그림 2 골재 사용량에 따른 정규화 곡선

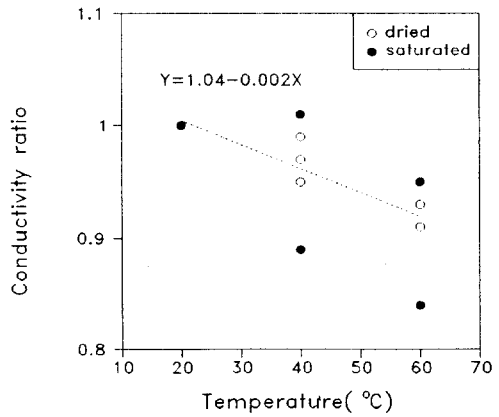


그림 3 온도에 따른 정규화 곡선

### 3.2.2 온도에 따른 열전도율

실험결과들을 20℃의 열전도율에 대해 정규화시키면 그림 3과 같고, 이를 통하여 20℃의 열전도율을 기준으로 온도에 따른 열전도율의 변화를 예측할 수 있다.

### 3.2.3 함수상태에 따른 열전도율

그림 1 (c), (d)를 보면 콘크리트의 함수량이 증가하면 열전도율이 커지는 것으로 나타났다. 따라서 실험결과를 동일한 골재량과 온도에 대하여 습윤상태와 기건상태의 열전도율비를 계산하면 표 5와 같다. 표 5에서 보는 바와같이 열전도율비는 골재 사용량과 온도의 함수이다. 여기서 골재 사용량에 따른 변화는 3.2.1에서 구한 식으로 예측할 수 있다. 따라서 함수상태에 따른 열전도율비는 콘크리트 배합 중 20℃ 실험결과들의 평균값인 0.8로 결정하였다.

표 5 습윤상태와 기건상태의 열전도율비

사용 골재량 (부피비)	기건상태/습윤상태		
	20℃	40℃	60℃
0.71	0.797	0.777	0.798
0.64	0.835	0.810	0.812
0.57	0.788	0.848	0.852
평균	0.807	0.812	0.821

### 3.2.4 열전도율 모델식

콘크리트의 열전도율에 미치는 영향인자는 앞에서 제시한 영향인자 외에 여러 가지가 있다. 그러나 실험결과에 의하면 재령, 물/시멘트비, 잔골재율 등의 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 따라서 콘크리트의 열전도율은 주요 영향인자인 골재의 사용량, 함수상태, 온도의 효과를 고려한 아래식으로 표현할 수 있다.

$$\lambda = \lambda_{ref}(0.34 + 1.03AG)(0.8 + 0.2R_h)(1.04 - 0.002T)$$

여기서,  $\lambda_{ref}$ 는 기준 열전도율로 골재 부피비(골재량/전체량) 0.64, 온도 20℃, 완전습윤상태인 콘크리트의 열전도율이다. 이 실험결과에 의하면 2.00이다.  $R_h$ 는 상대습도,  $AG$ 는 골재 부피비(골재량/전체량),  $T$ 는 온도(℃)를 나타낸다.

## 4. 결론

콘크리트의 열전도율 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 콘크리트의 열전도율은 여러 인자에 영향을 받는 것으로 나타났다. 이 중 주요 영향인자는 사용 골재량, 함수 상태, 온도였다.
- 2) 위의 주요 영향인자들을 고려한 열전도율 예측식을 제안하였다.

### 참고문헌

1. Paolo Morabito, "Measurement of the Thermal Properties of Different Concretes", High Temperature-High Pressures, Vol. 21, pp 51-59, 1989
2. Alessandro Lanciani, and Paolo Morabito, and Pio Rossi, "Measurement of the Thermophysical Properties of Structural Materials in Laboratory and in Site : Methods and Instrumentation", High Temperature-High Pressures, Vol. 21, pp 391-400, 1989