

콘크리트의 열전도율에 관한 실험적 연구

김국한¹⁾ · 전상은²⁾ · 방기성³⁾ · 김진근²⁾*

¹⁾한국도로공사 도로연구소 ²⁾한국과학기술원 토목공학과 ³⁾한국전력공사 전력연구원
(2000년 3월 11일 원고접수, 2001년 6월 18일 심사완료)

Experimental Study on Thermal Conductivity of Concrete

Kook-Han Kim¹⁾, Sang-Eun Jeon²⁾, Gi-Sung Bang³⁾, and Jin-Keun Kim²⁾*

¹⁾ Highway Research Institute, Korea Highway Cooperation, Seongnam, 461-703, Korea
²⁾ Department of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 305-701, Korea
³⁾ Korea Electric Power Research Institute, Korea Electric Power Corporation, Daejeon, 305-380, Korea

(Received on March 11, 2000, Revised on June 18, 2001)

ABSTRACT

Conductivity is an important thermal property which governs heat transfer in a solid medium. Generally, the determination of conductivity in concrete is very difficult, because concrete is a heterogeneous material composed of cement, water, aggregate, et cetera and time dependent material of which properties change with curing age.

In this study, influencing factors on thermal conductivity of concrete are quantitatively investigated by QTM-D3, a conductivity tester developed in Japan. Then, a prediction equation of thermal conductivity of concrete is suggested from the regression analysis of test results. To consider the factors influencing thermal conductivity of concrete, mortar, and cement paste, seven testing variables (age, amount of cement, types of admixtures, amount of coarse aggregate, fine aggregate ratio, temperature, and humidity condition) of the specimens are used.

According to the experimental results, the amount of coarse aggregate and humidity condition of specimen are the main factors affecting the conductivity of concrete. Meanwhile, the conductivity of mortar and cement paste is strongly affected by the amount of cement and types of admixtures. However, the curing age has minor effect on the conductivity variation. Finally, the prediction formula of concrete conductivity as a function of aggregate amount, fine aggregate ratio, specimen temperature, and humidity condition is developed.

Keywords : thermal property, thermal conductivity, amount of coarse aggregate, humidity condition

1. 서 론

콘크리트 구조물에 수화열로 인하여 온도차가 발생하면 콘크리트에 균열이 발생할 수 있다. 이와 같은 균열 발생을 미리 예측하고 적절한 제어대책을 마련하기 위해서는 열전달 해석 과정이 필수적이다. 왜냐하면 열전달 해석을 통해 구조물의 위치별, 시간별 온도 발생량을 구하고, 이를 입력변수로 하여 기존의 구조해석 프로그램들을 이용하면 온도응력을 구할 수 있기 때문이다. 그리고 열전달 해석이 정확해야 온도차나 수화열에 의한 균열발생 여부를 정확히 예측할 수 있다.

일반적으로 열전달 해석은 ABAQUS, ADINA-T 등과 같은 상용 프로그램을 이용할 수 있으며, 국내 연구기관들에서 개발된 유한요소법을 이용한 수화열 해석 프로그램을 이용할 수도 있다¹⁾. 그런데 파이프 쿨링을 실시하거나

다단단계 타설이 이루어지는 특수한 조건을 제외하고는 기존의 범용 프로그램이나 국내에서 개발된 해석 프로그램이나 거의 유사한 해석결과를 보이고 있는 것을 알 수 있다²⁾. 이것은 현재까지 개발된 유한요소법을 이용한 열전달 해석 프로그램의 해석 알고리즘이 비교적 안정적이라는 의미이다.

그러나 동일한 열전달 해석 프로그램을 이용한다고 하더라도 콘크리트의 열특성계수들의 변화에 따라 수화열에 의한 콘크리트의 온도는 달라진다. 열전달 해석의 주요 입력변수는 열전도율, 비열, 단위중량 및 외기대류계수 등이 있으며, 콘크리트의 열전도율과 외기대류계수는 구조물의 내외부 온도차에 영향을 미치고, 콘크리트의 비열 및 단위중량은 온도상승량에 주된 영향을 미친다. 그런데 일본의 자료에³⁻⁵⁾ 의하면 구조물에 주로 이용되는 콘크리트의 열전도율은 골재의 종류에 따라 2.15~2.51 kcal/m·hr·°C를 주로 이용하며, 미국의 자료에⁶⁾ 의하면 콘크리트의 온도가 38 °C일 경우 사용골재의 종류에 따라 콘크리트의 열전도율은 1.7~2.53 kcal/m·hr·°C의 범위에 있다.

* Corresponding author

Tel : 042-869-3614 Fax : 042-869-3610

E-mail : kimjinkeun@kaist.ac.kr

고 보고되어 있다. 이와 같이 평균적으로 이용되는 열전도율의 값이 나라마다 크게 다르게 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 콘크리트가 기본적으로 열전도율이 서로 다른 골재, 시멘트, 물 등의 복합재료로서 콘크리트의 열전도율이 콘크리트의 배합비, 사용골재의 압질 및 골재 원산지에 영향을 받을 뿐 아니라 함수량 및 건조단위중량에 의해 영향을 받기 때문이다⁷⁻⁹⁾. 콘크리트의 열전도율은 앞에서 언급한 영향인자 외에도 열전도율 측정장비에 따라서도 큰 값의 변화를 보이는 것으로 알려지고 있다⁸⁻¹⁰⁾.

본 연구의 주된 목적은 수화열에 의한 온도해석의 정확도를 제고키 위해 국내에서 사용되는 골재와 주로 5종 시멘트를 이용한 콘크리트의 열전도율에 영향을 미치는 각종 요인에 대하여 실험을 수행하여 기존의 연구결과와 비교하고, 각 요인에 따른 열전도율의 변화를 고찰하여 모델식을 제시하는데 있다.

2. 실험 개요

2.1 열전도율 측정장비

열전도율을 측정하는 실험장비는 매우 다양하며, 열전도율 계산방법도 실험장비에 따라 다르게 적용되고 있다. 콘크리트와 같은 건설재료의 열전도율을 측정하기 위해 사용되는 실험장비를 그 측정 방식에 따라 분류하면 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 가장 널리 이용되고 있는 측정 방식은 TLPP(two linear parallel probe)⁷⁾ 방식이다. 이것은 Carslaw¹¹⁾에 의해 제안된 방식으로 공시체의 형상은 직육면체나 원통형을 사용하고, 선택된 시편의 내부 한 쪽에는 열선을 설치하고 다른 한 쪽에는 온도계를 설치한다. 이때 열선에서 일정한 열을 가하게 되면 온도계 쪽의 온도는 Carslaw에 의해 제안된 식에 의해 계산이 가능하다.

콘크리트 열전도율을 측정하는 또 다른 방법은 PHS(plane heat source)⁸⁾ 또는 HGP(hot guarded plate) 방식이다. 이 방법도 기본 원리는 TLPP 방식과 동일하나, 실험시편을 얇게 절단하여 사용하여야 하고 실리콘을 사용하여 시편을 열판과 밀착시켜야 하는 어려움이 있다. 이 PHS 방식은 ASTM C 177의 시험법에 의해 실험을 실시할 수 있다. 열전달 특성에 의하지 않고 단열조건을 이용한 시험법은 일본¹⁰⁾에서 주로 이용되고 있으나 시험장비가 고가이고 이동하기가 힘든 단점이 있다.

본 연구에서 사용된 열전도율 측정장비는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 일본 KEM사에서 제작한 QTM-D3이다. 이 장비는 과도열선방식(transient hot wire method)을 변형한 프루브법(probe method)에 의해 열전도율을 측정하는 장비로 기본원리는 TLPP 방식과 동일하다. 이 장비의 특징은 열선과 K-type thermocouple이 내장된 probe를 이용하여 60초 이내에 측정이 가능한 것으로서, 측정온도의 증가량

이 크지 않고 빠른 시간 내에 측정이 가능하므로 열전도율의 온도의존성이 큰 재료에서도 사용할 수 있다는 것이다. 열전도율 측정범위는 0.02~10.00 kcal/m·hr·°C 이내이며, 이 측정범위 내에서의 측정오차는 ±3 % 이내이다.

2.2 시편 제원

본 연구에서 사용된 QTM-D3 측정장비는 시편의 크기가 클수록 열전도율의 측정 정확도가 증가한다. 그러나 무한정 시편을 크게 할 수 없으므로 측정오차를 최소화할 수 있는 최소 시편 크기를 제안하고 있으며, 본 연구에서 사용되는 열전도율 범위(3.0 kcal/m·hr·°C 이하)일 경우 최소 시편 크기는 가로×세로×두께가 8×6×2.5 cm이다.

따라서 본 연구에서는 사용 시편을 10×10×15 cm의 직육면체 형상으로 채택하였다. 이 시편에서 가로×세로가 15×10 cm가 되는 면은 모두 4면이 되지만, 시편의 윗면은 표면의 거칠기 때문에 측정하기가 곤란하였다. 따라서 시편의 윗면을 제외한 3면에서 열전도율을 측정하였고 이들의 평균치를 한 시편의 열전도율로 택하였다. 시편은 각 변수당 3개씩 제작하였으며, 재령에 관한 영향을 알아보는 조건 외에는 재령 7일 시점에 실험을 실시하였다.

2.3 실험 재료

2.3.1 콘크리트의 배합

본 연구에서 사용된 시멘트는 시중에서 구입한 보통 포틀랜드 시멘트(H사 제품)를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 Table 1과 같다. 일반적으로 포틀랜드 시멘트의 열전도율은 0.26 kcal/m·hr·°C으로 알려져 있다¹²⁾.

2.3.2 골재

본 연구에서 사용된 골재로서 잔골재는 금강(대전)산, 굵은골재는 영광(전라도)산을 이용하였으며, 이들의 물리

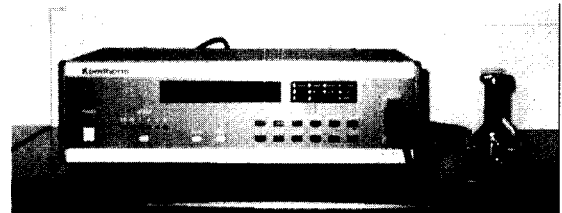


Fig. 1 Apparatus of conductivity tester

Table 1 Physical properties of cement

Classification	Specific gravity	Specific surface (m ² /kg)	Compressive strength (MPa)
Type I	3.15	331.5	40
Type V	3.15	321.0	36

적성질은 각각 Table 2와 같다. 일반적으로 골재의 열전도율은 0.2~3.0 kcal/m·hr·°C로 알려져 있다²⁾.

2.3.3 혼화제

콘크리트의 열전도율에 영향을 미치는 혼화제의 특성을 구명하기 위해 본 연구에서 사용된 혼화제는 플라이애쉬(FA) 및 고로슬래그 미분말(BFS)이며, 이들의 품질 특성은 Table 3과 같다.

2.4 실험변수 및 배합비

이 실험에서 구멍코자 하는 열전도율의 실험변수는 재령, 골재 함유량, 시멘트 함유량, 결합재 종류, 잔골재율, 시편의 온도 및 함수상태 등이다. 이들 실험변수의 영향도를 분석하기 위해 채택된 실험항목과 사용된 시편의 종류는 Table 4와 같다. 각각의 실험변수마다 그 영향도를 효율적으로 구명하기 위해 콘크리트 또는 페이스트 시편을 사용하였다. 콘크리트나 페이스트 시편의 크기는 10×10×15 cm의 직육면체 형상이다. 실험에 사용된 콘크리트와 페이스트 시편의 기준 배합비는 Table 5에 나타난 바와 같고, Table 6은 각 실험항목별 콘크리트와 페이스트의 배합비이며, Table 6의 구분 기호에서 C는 콘크리트, P는 페이스트, M은 모르타르, RE는 기준 배합비를 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험결과

3.1.1 재령의 영향

콘크리트, 페이스트 및 모르타르의 열전도율이 재령에 따라 어떤 영향을 받는지 알아보기 위해 시편이 완전습윤 상태이고 온도가 20 °C인 경우에 대해 재령 3, 7, 14, 28일에 실험을 실시하였다. Table 7 과 Fig. 2(a)의 실험결과를 보면 콘크리트, 페이스트 및 모르타르에 따라 열전도율은 뚜렷한 차이를 보이지만, 모든 시편에서 재령에 따른 열전도율의 변화는 나타나지 않고 있다. 이를 통해 콘크리트나 모르타르의 열전도율은 재령이나 강도증진에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 또한 Fig. 2(a)의 실험결과를 통해 알 수 있듯이 시멘트 페이스트의 열전도율이

가장 낮았고 콘크리트는 페이스트의 열전도율에 비해 두 배 가량 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 콘크리트나 페이스트의 구성재료의 열전도율이 각기 다르기 때문에 발생하는 현상으로, 콘크리트 구성재료의 열전도율 크기는 골재, 시멘트, 물의 순이다. 그러나 M-G의 골재량이 M-S 보다 많으나 열전도율이 오히려 작으므로 잔골재가 골고루 섞여있는 것이 열전도율을 증가시키는 것으로 보인다.

3.1.2 골재 함유량의 영향

콘크리트는 물, 시멘트, 잔골재 및 굵은골재의 복합체이다. 따라서 열전도율이 큰 골재의 함유량(굵은골재+잔골재)이 많을수록 콘크리트의 열전도율은 당연히 클 것으로 추정된다. 골재 함유량이 열전도율에 미치는 영향을 구명하기 위해 Table 8과 같이 물/시멘트비, 잔골재율 및 시멘

Table 2 Physical properties of aggregate

Type of aggregate		G _{max} (mm)	Specific gravity	Fineness modulus
Fine	River sand	-	2.55	2.95
Coarse	Crushed stone	19	2.58	7.23

Table 3 Physical properties of admixtures

Classification	Specific gravity	Specific surface (m ² /kg)	Place of production
FA	2.10	430	Boryung
BFS	2.90	450	Kwangyang

Table 4 Test parameters

Parameters	Variables for test	Mixture type
Age	3, 7, 14, 28 day	Concrete, Paste
Aggregate content	0, 21, 35, 49, 57, 64, 71 %	Concrete, Paste
Cement content	25, 30, 35, 40 %	Paste
Type of cementitious materials	Type I, Type V, Fly ash, Slag	Paste
S/A	39, 45, 50, 55 %	Concrete
Temperature	20, 40, 60 °C	Concrete, Paste
Humidity condition	Saturated, Dried	Concrete, Paste

Table 5 Mix proportions for reference specimen

Classification	W/C (%)	S/A (%)	Type of cementitious materials	Unit content(kg/m ³)				
				Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Admixture
Concrete	40	39	Type V	181	452	630	989	2.26
Paste	40	-	Type V	558	1394	-	-	-

트의 종류를 일정하게 하고, 골재의 부피비(0, 0.21, 0.35, 0.49, 0.56, 0.63, 0.70), 시편의 온도(20, 40, 60 °C) 및 함수 상태(완전습윤, 완전건조)를 변화시켜 가며 실험을 실시하였다. Table 8과 Fig. 2(b)는 이들 영향인자에 따른 콘크리트의 열전도율 실험결과이다. Fig. 2(b)를 보면 콘크리

트의 건습상태나 시편의 온도에 상관없이 골재의 사용량이 증가할수록 열전도율이 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 골재의 열전도율이 다른 콘크리트 구성재료보다 크기 때문이며, 골재의 열전도율이 콘크리트의 열전도율에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Table 6 Mix proportions

Parameters	Name of specimens	W/C (%)	S/A (%)	Type of cementitious materials	Unit content(kg/m ³)				
					Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Admixture
Age	C-RE	40	39	Type V	181	452	630	989	2.26
	P-RE	40	-	Type V	558	1394	-	-	-
	M-S	40	-	Type V	285	713	994	-	-
	M-G	26.7	-	Type V	239	894	-	1304	-
Aggregate content, Temperature, Humidity condition	C-GC1	40	39	Type V	140	350	702	1103	1.75
	C-GC2	40	39	Type V	181	452	630	989	2.26
	C-GC3	40	39	Type V	220	550	559	880	1.10
	C-GC4	40	39	Type V	260	650	490	768	-
	C-GC5	40	39	Type V	340	850	345	546	-
	C-GC6	40	39	Type V	420	1050	206	321	-
Cement content	P-WC1	25	-	Type V	440	1762	-	-	8.81
	P-WC2	30	-	Type V	486	1619	-	-	8.10
	P-WC3	35	-	Type V	524	1498	-	-	-
	P-WC4	40	-	Type V	558	1394	-	-	-
Type of cementitious materials	P-FL1	57	-	Fly ash	558	973	-	-	8.81
	P-FL2	47	-	Fly ash/TypeV	558	487/696	-	-	8.10
	P-BFS1	44	-	Slag	558	1282	-	-	-
	P-BFS2	42	-	Slag/TypeV	558	641/696	-	-	-
	P-1T	40	-	Type I	558	1394	-	-	-
S/A	C-SA1	40	45	Type V	181	452	726	891	2.26
	C-SA2	40	50	Type V	181	452	810	806	2.49
	C-SA3	40	55	Type V	181	452	887	729	2.83

Table 7 Ageing effect for thermal conductivity

Items	W/C (%)	S/A (%)	Type of cementitious materials	Thermal conductivity(kcal/m·hr·°C)			
				3 day	7 day	14 day	28 day
C-RE	40	39	Type V	1.98	2.02	2.00	1.97
P-RE	40	-	Type V	1.04	1.02	1.03	0.99
M-S	40	-	Type V	1.80	1.78	1.81	1.78
M-G	26.7	-	Type V	1.43	1.39	1.40	1.35

Table 8 Effects of aggregate content, temperature and humidity condition

Items	W/C (%)	S/A (%)	Type of cementitious materials	Aggregate volume ratio	Thermal conductivity(kcal/m·hr·°C)					
					Wet condition			Dry condition		
					20°C	40°C	60°C	20°C	40°C	60°C
C-GC1	40	39	Type V	0.70	2.12	2.15	1.98	1.69	1.67	1.58
C-GC2	40	39	Type V	0.63	2.00	2.02	1.91	1.67	1.62	1.55
C-GC3	40	39	Type V	0.56	1.93	1.71	1.62	1.52	1.45	1.38
C-GC4	40	39	Type V	0.49	1.69	1.69	1.53	1.32	1.27	1.19
C-GC5	40	39	Type V	0.35	1.47	1.50	1.41	1.10	1.09	0.99
C-GC6	40	39	Type V	0.21	1.20	1.23	1.16	0.86	0.83	0.77
P-WC4	40	-	Type V	0.0	1.00	0.97	0.89	0.66	0.65	0.62

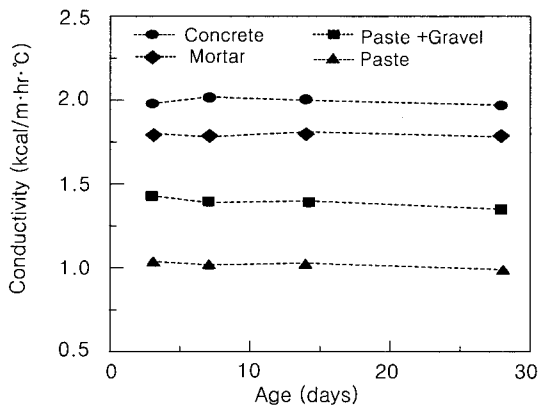
3.1.3 시멘트 함유량의 영향

콘크리트 구성재료 중 시멘트가 물보다 열전도율이 크다. 따라서 골재의 영향을 무시한다면 시멘트 함유량이 많을수록(물/시멘트 비가 낮을수록) 열전도율이 증가하게 될 것이다. 시멘트 함유량에 따른 열전도율 변화를 알아보기 위해 Table 9와 같이 시멘트의 종류를 일정하게 하고, 함수상태(완전습윤, 완전건조)와 시편의 온도(20, 40, 60 °C)를 변화시켜 가며 페이스트 시편을 이용하여 실험을 실시하였다. 페이스트를 이용한 이유는 콘크리트의 물/시

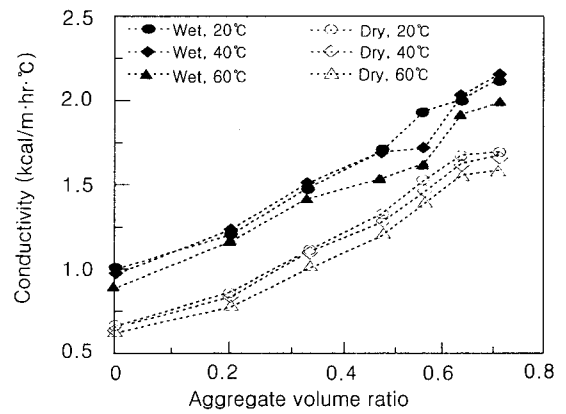
멘트 비를 변화시키면 골재의 사용량이 변하기 때문에 시멘트 함유량에 따른 변화를 효율적으로 고려할 수 없기 때문이다. Table 9와 Fig. 2(c)는 이에 대한 실험결과로서 시편의 온도나 페이스트의 함수상태에 관계없이 물/시멘트 비가 증가할수록 열전도율이 줄어드는 것을 알 수 있다.

3.1.4 결합재 종류의 영향

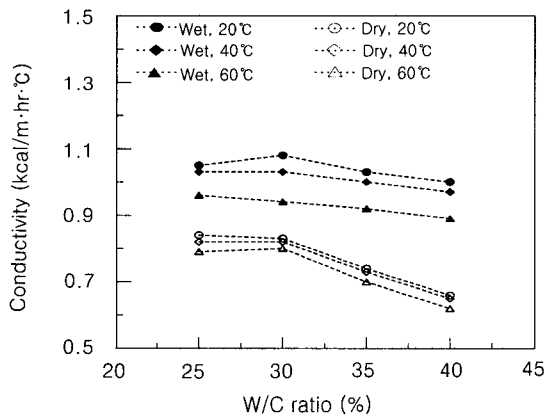
결합재의 종류에 따른 열전도율의 변화를 알아보기 위해 Table 10과 같이 결합재의 부피비가 일정한 페이스트



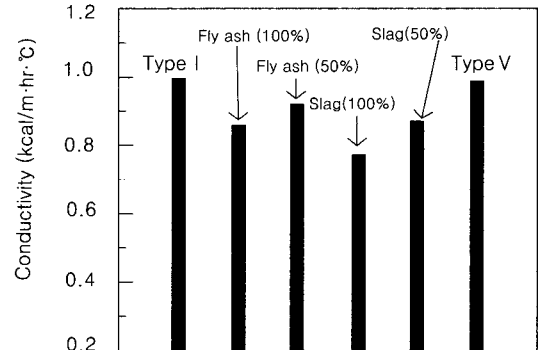
(a) Age



(b) Aggregate content



(c) W/C ratio of paste



(d) Type of cementitious materials

Fig. 2 Experimental results for thermal conductivity

Table 9 Effects of cement content and temperature

Items	Type of cementitious materials	W/C (%)	Thermal conductivity(kcal/m·hr·°C)					
			Wet condition			Dry condition		
			20°C	40°C	60°C	20°C	40°C	60°C
P-WC1	Type V	25	1.05	1.03	0.96	0.84	0.82	0.79
P-WC2	Type V	30	1.08	1.03	0.94	0.83	0.82	0.80
P-WC3	Type V	35	1.03	1.00	0.92	0.74	0.73	0.70
P-WC4	Type V	40	1.00	0.97	0.89	0.66	0.65	0.62

트를 이용하여 실험을 실시하였다. 실험은 완전 습윤상태인 20 °C의 시편에 대해 실시하였다. Table 10과 Fig. 2(d)의 실험결과에 의하면 1종 시멘트와 5종 시멘트를 사용할 경우 비슷한 열전도율을 보였다. 그러나 플라이애쉬와 고로슬래그의 사용량이 증가할수록 열전도율이 줄어드는 것을 알 수 있다.

3.1.5 잔골재율의 영향

잔골재율에 따른 열전도율의 변화를 알아보기 위해 Table 11과 같이 골재 함유량이 일정한 콘크리트를 이용하여 실험을 실시하였다. 실험은 완전 습윤상태인 20 °C의 시편에 대해 이루어졌다. Table 11의 실험결과에 의하면 큰 변화는 아니지만 잔골재율이 증가할수록 콘크리트의 열전도율이 증가함을 알 수 있다. 이는 잔골재 자체의 열전도율이 굵은골재 보다 클 경우에 나타날 수도 있고, 잔골재의 사용사용량이 증가하면 골재의 분포가 콘크리트내에서 균질하게 분포하기 때문에 발생할 수도 있다.

3.1.6 시편온도의 영향

콘크리트와 페이스트의 온도가 열전도율에 미치는 영향을 알아보기 위해 실험을 하였고, 콘크리트에 대한 실험결과는 Fig. 2(b)에, 페이스트에 대한 실험결과는 Fig. 2(c)에 각각 나타내었다. Fig. 2(b)의 콘크리트에 대한 실험결과 골재 함유량이나 건습정도에 상관없이 시편의 온도가 증가할수록 열전도율이 줄어드는 경향을 보인다. 이와 같은 결과는 Fig. 2(c)의 페이스트에 대한 실험결과에서도 동일하게 나타나고 있다. 다른 연구자⁽¹²⁾의 연구결과에서도 이와 같은 경향이 나타나고 있으며, 이는 시편의 온도

가 증가할수록 콘크리트의 열전달 능력이 떨어지는 것을 의미한다.

3.1.7 함수상태의 영향

콘크리트와 페이스트의 열전도율의 주요 영향인자 중 하나가 바로 함수상태이다. 콘크리트와 페이스트에서의 함수상태에 대한 실험결과는 Fig. 2(b)과 Fig. 2(c)을 통해 알 수 있다. 실험은 시편의 온도가 20, 40, 60 °C일 때 실시하였으며, Fig. 2(b)과 Fig. 2(c)의 결과에서 알 수 있듯이 완전 습윤상태일수록 열전도율이 상당히 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 콘크리트나 페이스트의 공극이 공기보다 열전도율이 큰 물로 채워지기 때문이다. 따라서 콘크리트나 페이스트의 공극량에 따라 건습여부에 따른 영향도가 결정될 것이다.

3.2 콘크리트의 열전도율 모델식

3.2.1 골재 함유량에 따른 열전도율

골재 함유량에 따른 열전도율의 변화는 앞에서 언급한 바와 같이 골재 함유량이 증가함에 따라 열전도율이 커지는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과를 Table 8의 C-GC1의 열전도율에 대하여 정규화시키면 Fig. 3(a)와 같다. 콘크리트의 열전도율을 예측하기 위한 모델식 제시를 위하여, Table 8의 실험결과 중 콘크리트로 볼 수 있는 골재 함유량이 0.56 이상이고 완전 습윤상태인 결과만을 이용하였다. Fig. 3(a)에서 알 수 있듯이 함수상태(습윤상태, 건조상태)에 따라 약간의 차이는 보이고 있지만 함수상태와 온도에 상관없이 아래 식 (1)로 골재 함유량에

Table 10 Effects of cementitious materials

Items	W/C (%)	Volume ratio of cementitious materials	Type of cementitious materials	Thermal conductivity (kcal/mhr·°C)	Replacement ratio
P-WC4	40	0.44	Type V	1.00	-
P-FL1	57	0.44	Fly ash	0.86	100 %
P-FL2	47	0.44	Fly ash/Type V	0.92	50 %
P-BFS1	44	0.44	Slag	0.77	100 %
P-BFS2	42	0.44	Slag/Type V	0.87	50 %
P-1T	40	0.44	Type I	0.99	-

Table 11 Effects of S/A ratios

Items	W/C (%)	Type of cementitious materials	Aggregate volume ratio	S/A (%)	Thermal conductivity (kcal/mhr·°C)	Note
C-GC1	40	Type V	0.63	39	2.00	
C-SA1	40	Type V	0.63	45	2.06	
C-SA2	40	Type V	0.63	50	2.09	
C-SA3	40	Type V	0.63	55	2.10	

다른 변화를 예측할 수 있다.

$$\lambda_{ag} = 0.28 + 1.03AG \quad (1)$$

여기서, λ_{ag} 는 골재함유비 보정계수, AG 는 골재함유비 (골재부피/콘크리트부피)이다.

그러나 콘크리트에 사용되는 골재마다 서로 다른 열전도율을 갖기 때문에 본 실험에서 사용된 골재를 가지고 이를 대표하기에는 부족하다. 골재의 열전도율은 모암의 성질에 의해 결정되기 때문에 모암의 종류에 따른 열전도율을 알게 된다면 위의 변화량을 가지고 콘크리트의 열전도율을 보다 정확히 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2.2 콘크리트 온도에 따른 열전도율

콘크리트 온도에 따른 열전도율의 변화는 앞에서 언급한 바와 같이 콘크리트의 온도가 증가할수록 열전도율이

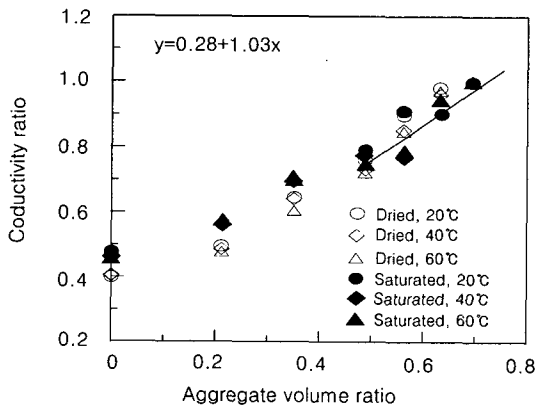
줄어드는 것으로 나타났다. 이러한 변화는 시멘트 페이스트의 열전도율 변화에 기인한 것이기 때문에 Table 9의 실험결과를 이용하였다. Table 9의 결과 중 물/시멘트비가 0.4인 완전 습윤상태의 결과를 20°C의 열전도율에 대하여 정규화시키면 Fig. 3(b)와 같다. 이를 통하여 20°C의 열전도율을 기준으로 콘크리트의 온도에 따른 열전도율의 변화는 식 (2)를 이용하여 예측할 수 있다.

$$\lambda_T = 1.05 - 0.0025T \quad (2)$$

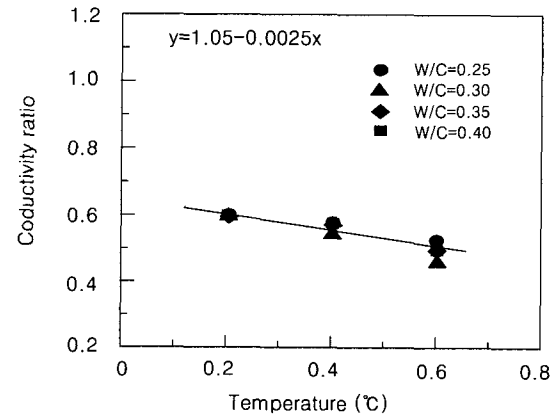
여기서, λ_T 는 콘크리트 온도의 보정계수, T 는 콘크리트의 온도(°C)이다.

3.2.3 함수상태에 따른 열전도율

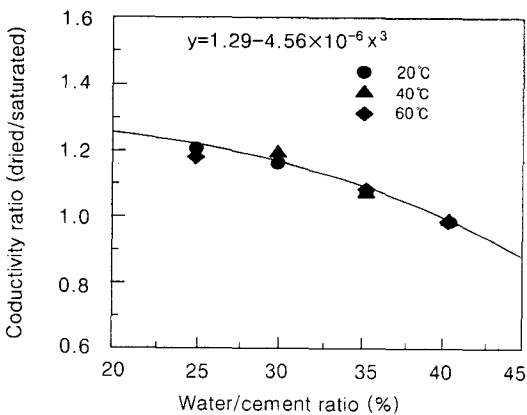
본 연구에서 실시한 실험결과를 분석한 결과 콘크리트의 함수량이 증가하면 열전도율이 커지는 것으로 나타났다. 이 또한 온도에 대한 모델식과 마찬가지로 Table 9의



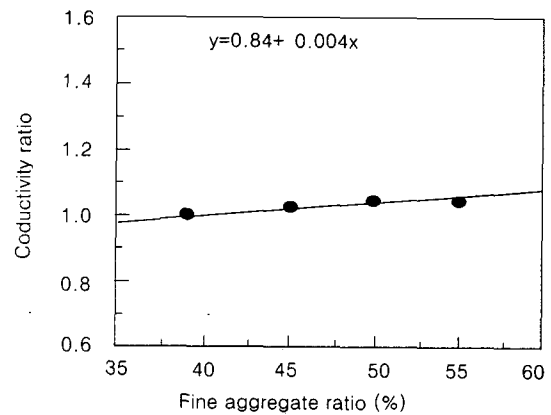
(a) Aggregate content



(b) Temperature



(c) Water/cement ratio



(d) Fine aggregate ratio

Fig. 3 Normalization curve

실험결과를 이용하였다. Table 9의 결과에서 W/C 에 따른 습윤상태와 기건상태의 열전도율비를 계산하여 정리하면 Table 12와 같다. Table 12에서 보는 바와 같이 열전도율비는 W/C 의 함수이다. Table 9의 결과를 W/C 가 0.4에 대하여 정규화시키면 Fig. 3(c)와 같다. Fig. 3(c)에서 보는 바와 같이 습윤상태와 기건상태의 열전도율비는 W/C 와 비선형 관계를 갖는다. 그리고 완전 습윤상태와 기건상태 사이의 상대습도 변화에 따른 열전도율의 변화를 선형으로 가정한다면, 식 (3)과 같은 관계식을 구할 수 있다. 식 (3)에서 0.8과 0.2는 Table 8의 콘크리트에 대한 열전도율비를 적용한 것이다.

$$\lambda_R = 0.8[1.29 - 4.56 \times 10^{-6}(W/C)^3] + 0.2R_h \quad (3)$$

여기서, λ_R 는 콘크리트 함수상태의 보정계수, R_h 는 콘크리트의 평균 상대습도이다.

3.2.4 잔골재율에 따른 열전도율

잔골재율에 따른 열전도율의 변화를 고려하기 위하여 Table 11의 결과를 이용하였다. Fig. 3(d)는 S/A 가 0.4인 경우에 대한 정규화 곡선을 나타낸다. 일반적인 콘크리트에서의 S/A 는 0.4에서 0.5 사이의 값을 가지므로 Fig. 3(d)와 같은 선형 관계를 취할 수 있으며, 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{S/A} = 0.84 + 0.004(S/A) \quad (4)$$

3.2.5 콘크리트의 열전도율 모델식

콘크리트의 열전도율에 미치는 영향인자는 앞에서 제시한 영향인자 외에 여러 가지가 있다. 그러나 실험결과에 의하면 재령의 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 따라서 콘크리트의 열전도율을 주요 영향인자인 골재의 함유량, 잔골재율, 콘크리트의 온도 및 함수상태를 이용하여 표현할 수 있으며, 이들의 영향을 고려하여 콘크리트의 열전도율을 구하는 모델식은 앞의 분석결과를 이용하여 다음 식 (5)와 같이 제안할 수 있다.

$$k_c = k_{ref}[0.28 + 1.03AG] \times [0.8(1.29 - 4.56 \times 10^{-6}(W/C)^3) + 0.2R_h] \times [1.05 - 0.0025T] \times [0.84 + 0.004(S/A)] \quad (5)$$

여기서, k_c 는 콘크리트의 열전도율, k_{ref} 는 골재 함유비 0.70, W/C 0.4, S/A 0.4, 온도 20°C 및 완전습윤상태인 콘크리트의 기준열전도율이다. 따라서 본 연구의 C-GC1 조건의 열전도율로서 실험결과에 의하면 2.12이다. AG 는 골재 함유비(골재부피/콘크리트부피), W/C 는 물/시멘트비(%), R_h 는 상대습도, T 는 온도(°C), S/A 는 잔골재율(%)을 나타낸다.

본 연구에서 제안한 식 (5)의 콘크리트 열전도율 모델식의 정밀도를 알아보기 위하여 본 연구의 열전도율 실험결과와 제안식을 이용한 열전도율 예측값과의 상관관계를 구하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 실험값과 예측값의 상관관계수(r)가 0.93으로서 비교적 높은 정확도를 보였다. 위의 식 (5)의 콘크리트 열전도율 모델식을 이용하면 콘크리트 구조물의 수화열 해석시 재령에 따른 온도와 함수상태의 변화를 고려할 수 있으며, 유한요소법을 이용한 수화열 해석을 할 경우 각 요소마다의 변화된 열전도율을 고려할 수 있으므로 보다 정확한 온도 해석을 할 수 있을 것으로 판단된다.

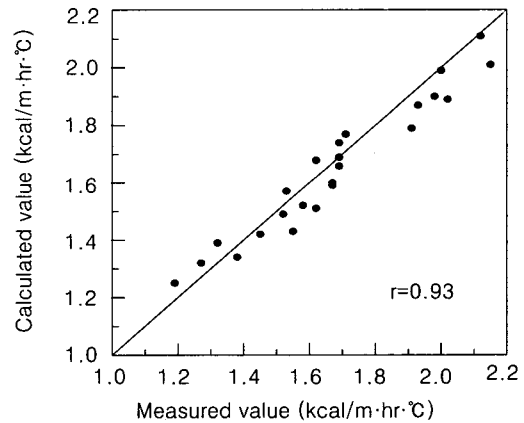


Fig. 4 Comparison of the measured and calculated values

4. 결 론

본 연구에서는 5종 시멘트 콘크리트의 열전도율에 미치는 영향인자에 대하여 실험을 실시하였고, 이들 실험결과를 이용하여 콘크리트의 열전도율을 예측하는 모델식을 제안하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 콘크리트, 모르타르 및 페이스트의 열전도율에 미치는

Table 12 Conductivity ratio with different water contents

W/C (%)	Conductivity ratio (dried/saturated)		
	20°C	40°C	60°C
25	0.800	0.796	0.823
30	0.769	0.796	0.851
35	0.718	0.730	0.761
40	0.660	0.670	0.697

는 주요 영향인자를 구명하기 위해 본 연구에서 선택된 실험변수는 재령, 골재 함유량, 시멘트 함유량, 결합재 종류, 잔골재율, 시편의 온도, 함수상태로 총 7가지이었다. 이 중에서 골재 함유량과 함수상태가 콘크리트 열전도율의 주요 영향인자임을 알 수 있었다.

2) 시멘트 사용량이 많은 페이스트나 모르타르의 경우 시멘트 함유량이나 결합재 종류에 의해서도 열전도율이 영향을 받고 있다.

3) 재령은 콘크리트의 열전도율에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

4) 콘크리트 열전도율에 주요 영향인자인 골재 함유량, 잔골재율, 시편의 온도, 함수상태를 이용하여 콘크리트의 열전도율을 계산할 수 있는 모델식을 제안하였다. 제안된 모델식의 상관계수는 0.93으로 비교적 높은 정확도를 보이고 있으나 보다 많은 실험 값을 이용하여 보다 정확한 열전도율의 예측 모델식의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

5) 본 연구에서 제안한 콘크리트 열전도율 모델식을 이용하면 콘크리트 구조물의 수화열 해석시 재령에 따른 온도와 함수상태의 변화를 고려할 수 있으며, 유한요소법을 이용한 수화열 해석을 할 경우 각 요소마다의 변화된 열전도율을 고려할 수 있으므로 보다 정확한 온도 해석을 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국전력공사 전력연구원, “콘크리트 구조물에서의 수화열 저감 방안 연구,” 전력연-단714, 1998.

2. 김국한 외 2인, “Double-T Beam 교량의 수화열 저감에 관한 연구,” 한국도로공사 중간보고서, 1998, p.106.
 3. 川口 徹, 乞田佳寛, “コンクリートの熱傳導率,熱擴散率,比熱の測定方法とその應用,” マスコンクリートの溫度應力發生メカニズムに關するコロキウム論文集, 日本コンクリート工學協會, 1982, pp.11~14.
 4. 徳田 弘, 伊藤 勉, “コンクリートの熱擴散率,熱傳導率および比熱について,” 電力中央研究所報告(土木63014), 1964.
 5. 社團法人 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研究委員會報告書,” 1985, p.98.
 6. ACI Committee 207, “Mass Concrete,” ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 207.1, 1994, p.21.
 7. Morabito, P., “Measurement of the Thermal Properties of Different Concretes,” *High Temperature - High Pressures*, Vol. 21, 1989, pp.51~59.
 8. Lanciani, A., Morabito, P. and Rossi, P., “Measurement of the Thermophysical Properties of Structural Materials in Laboratory and in Site : Methods and Instrumentation,” *High Temperature - High Pressures*, Vol. 21, 1989, pp.391~400.
 9. Neville, A. M., “*Properties of Concrete*,” Longman, United Kingdom, 1995, pp.374~380.
 10. 笠井芳夫, 池田尚治, “コンクリートの試験方法(上),” 技術書院, Part IV, 1993, pp.229~235.
 11. Carslaw H. S. and Jaeger, J. C., “*Conduction of Heat in Solids*(3rd edition),” Clarendon Press, Oxford, 1959.
 12. Bejan, A., “*Heat Transfer*,” Wiley, Canada, 1993.

요 약

본 연구에서는 콘크리트 열전도율의 영향인자에 대하여 TLPP원리를 응용한 QTM-D3 장비를 이용하여 실험을 실시하였고, 이들 실험결과를 이용하여 콘크리트의 열전도율을 예측하는 모델식을 제안하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다. 콘크리트, 모르타르 및 페이스트의 열전도율에 미치는 주요 영향인자를 구명하기 위해 본 연구에서 선택된 실험변수는 재령, 골재 함유량, 시멘트 함유량, 결합재 종류, 잔골재율, 시편의 온도 및 함수상태로 총 7가지이다. 이 중에서 골재 함유량과 함수상태가 콘크리트 열전도율의 주요 영향인자임을 알 수 있었다. 그리고 시멘트 사용량이 많은 페이스트나 모르타르의 경우 시멘트 함유량이나 결합재 종류에 의해서도 열전도율이 영향을 받고 있다. 그러나 재령은 콘크리트의 열전도율에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 콘크리트 열전도율에 주요 영향인자인 골재 함유량, 잔골재율, 시편의 온도 및 함수상태를 이용하여 콘크리트의 열전도율을 계산할 수 있는 모델식을 제안하였다.

핵심용어 : 열전도율, 골재 함유량, 함수상태