

콘크리트의 열적 특성에 관한 실험적 연구

손명수*, 송용순, 강석화

<동양시멘트(주) 연구개발팀>

1. 서 론

콘크리트 구조물의 정확한 온도해석을 위해서는 각 부위마다 실제와 동일한 상태에서 실험을 실시하고 그 결과를 해석에 이용하여야 한다. 그러나 구조물의 모든 부위의 환경조건에 대하여 실험을 실시하기 어렵고, 특히 수화열 뿐만 아니라 강도와 내구성 등을 함께 고려하여야 하는 배합 설계 단계에서의 모든 배합에 대하여 실험을 실시하는 것은 현실적으로 불가능하다. 즉, 콘크리트의 배합 및 열적특성과 온도의존성을 고려하여 수화발열특성을 예측함으로써, 배합설계 단계에서부터 구조물의 강도와 내구성을 고려할 수 있는 수화발열모델과 해석프로그램이 필요하다.

기존의 콘크리트 온도해석에서는 배합특성에 관계없이 일정한 범위 안의 값으로 두고 수화열 해석을 실시하였지만, 최근, 고로슬래그 미분말이나 플라이애쉬와 같은 혼합재를 많이 사용하고, 고강도·고유동 콘크리트를 많이 사용하는 추세에 따라, 보다 정확한 해석을 위해서는 콘크리트의 열적 특성을 보다 정확히 파악하여 해석시의 입력자료로 사용할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 배합특성에 따른 콘크리트의 수화발열예측과 온도해석에 필요한 열특성 인자 중에 열전도율 및 비열을 대상으로 각 콘크리트 배합인자별로 실험을 수행하고 이를 예측하는 모델을 개발하고자 하였다⁰⁾.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 콘크리트의 열특성계수

열전도율은 어떠한 물체에 단위길이(m)당 단위온도(°C)의 차이가 존재할 때 이 물체를 통해 단위시간(h)에 이동되는 일량(Kcal/h)의 크기이다. 이를 달리 표현하면, 일정한 일량을 물체에 가할 경우 단위길이당의 온도차이로 표현이 가능하다. 즉 일정한 일량을 물체에 가할 경우, 단위길이당 온도차이가 적으면 열전도율이 크고, 단위길이당 온도차이가 크면 열전도율이 적어지게 된다. 은(silver)수저의 경우 일반수저보다 열전도율이 크므로, 은수저의 위치에 상관없이 비슷한 온도를 보인다.

콘크리트의 구성재료의 열전도율의 크기는 골재, 시멘트, 물의 순이며, 강재 파이프나 철근의 경우 콘크리트의 열전도계수보다 30~60배 정도 크다. 일반적으로 사용하는 골재의 열특성치와 각 골재를 사용한 콘크리트의 열특성치의 예를 나타내면 각각 표 1과 같다.

비열은, 어떠한 물체에 단위무게(kg)당 단위온도(°C)를 올리는데 필요한 일(kcal)의 크기이다. 비열의 경우 열전도계수와 달리 매질 내의 온도분포에 의해 결정되는 것이 아니고, 매질의 평균온도에 의해 결정된다. 비열이 크다는 것은 단위무게의 매질을 단위온도 상승하는데 많은 에너지가 필요하다는 의미이다.

표 1. 각종 골재를 사용한 콘크리트의 열적 특성치⁽²⁾

골재 종류	밀도 (kg/m ³)	열전도율 (kcal/m · hr · °C)	비열 (kcal/kg · °C)
경암	2,430	3.0 ~ 3.1	0.21 ~ 0.23
석회암	2,450	2.7 ~ 2.8	0.22 ~ 0.24
백운암	2,500	2.8 ~ 2.9	0.23 ~ 0.24
화강암	2,420	2.2	0.22 ~ 0.23
파문암	2,340	1.8	0.22 ~ 0.23
현무암	2,510	1.8	0.23
강자갈	2,300	1.3	0.22

2.2 열특성실험 변수

표 2에 나타낸 것과 같이, 물-결합재비(W/B), 잔골재율(S/A), 페이스트의 단위용적(PV) 및 고로슬래그(SG)와 플라이애쉬의 치환율(FA) 등을 영향 인자로 하여, 사용재료 및 배합특성에 따라 변화하는 콘크리트의 열전도율을 측정하였다. 각 변수에 대하여 설정한 배합은 표 3에 나타나 있으며, 기준배합은 NC배합이다. 열전도율 측정에 사용한 실험기기는 Probe method를 사용하여 고체 표면에서의 열전도율을 측정하는 Kemterm QTM-D3 이다⁽³⁾.

열전도율 실험에 사용된 공시체는 $\phi 150 \times 75$ mm로, 각 배합에 대하여 제작한 $\phi 150 \times 300$ mm 공시체를 3개로 절단하여 제작하였다. 콘크리트 공시체 제작시 내부의 갇힌 공기에 의하여, 절단된 단면에서 기공이 나타나게 된다. 공기의 열전도율은 콘크리트 보다 매우 낮아 표면에서의 열전도율을 측정하는 경우 많은 오차를 발생시킬 수 있으므로, 표면에 발생한 기공을 몰탈로 채워 측정오차를 줄였다. 또한, 절단한 3개의 공시체 각각을, 10, 23, 40°C의 항온조에 보관하여, 온도에 따른 콘크리트 열전도율의 변화도 함께 측정하였다.

2.3 열전도율 실험방법

열전도율의 측정방법은 그림 1에 나타내었다. 측정기기는 실험을 실시하기 하루 전에 측정장소로 옮겨 온도를 안정시킨다. 실험을 실시하기 전, 측정기기를 약 30분 동안 가동시킨 다음, 항온조에 보관되어 있는 공시체의 표면에 Probe를 올려놓고 열선에서의 가열량(HEAT current)을 콘크리트 열전도율 범위의 적절한 값으로 설정한다. 적정 가열량은, 열전도율 측정을 위해 콘크리트 공시체의 표면부에 가해지는 임의의 가열량에 의해 발생하는 온도상승으로부터 설정하여, 온도상승값이 10 ~ 30°C 범위 내에 존재할 때의 가열량을 적정 가열량으로 한다.

표 2. 열전도율 실험 변수

영향 인자	물-결합재비 (W/B)	잔골재율 (S/A)	페이스트 부피비 (PV)	플라이애쉬 치환율(FA)*	슬래그 치환율(SG)*	온도 (°C)
실험 변수	33, 50, 79	35, 46, 57	25, 29, 34	0, 20, 40, 60	0, 20, 40, 60	10, 23, 40

* 시멘트에 대한 치환율(부피비)

표 3. 열전도율 실험에 사용한 콘크리트의 배합

기 호	W/B (%)	S/A (%)	페이스트 부피비 (%)	단 위 량 (kg/m ³)					
				물	시멘트	FA	SG	잔골재	굵은골재
NC	50	46	29	180	360	0	0	806	950
WB1	33	46	29	150	454	0	0	806	950
WB2	79	46	29	210	266	0	0	806	950
SA1	50	57	29	180	360	0	0	1006	750
SA2	50	35	29	180	360	0	0	606	1150
PV1	50	46	25	150	300	0	0	865	1019
PV2	50	46	34	210	420	0	0	747	881
FA1	50	46	29	175	301	49(20%)*	0	805	950
FA2	50	46	29	169	236	102(40%)	0	806	950
FA3	50	46	29	163	165	161(60%)	0	806	950
SG1	50	46	29	179	290	0	69(20%)	805	950
SG2	50	46	29	178	219	0	137(40%)	806	950
SG3	50	46	29	177	147	0	207(60%)	806	950

* ()안의 %값은 시멘트에 대한 치환율(부피비)

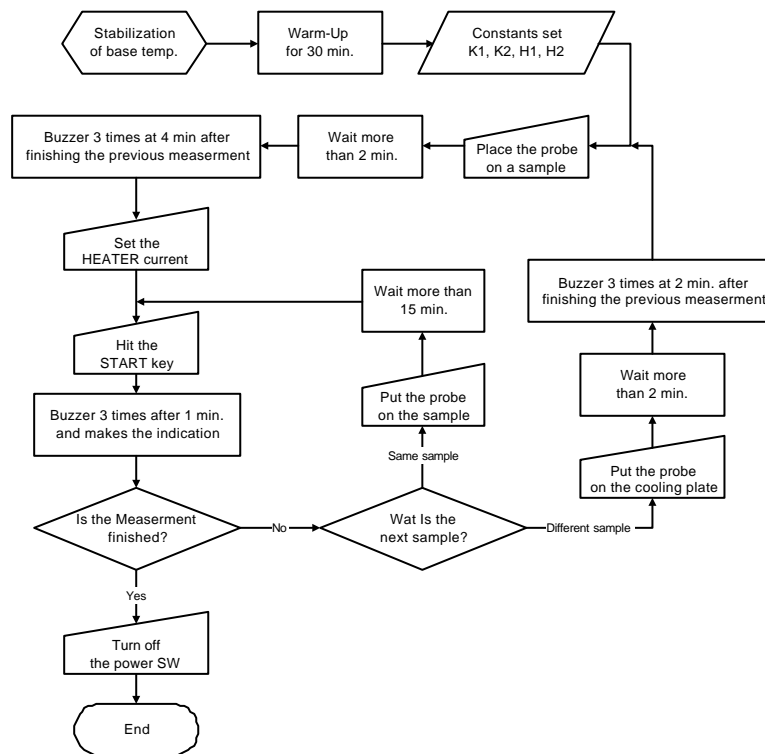


그림 1. 콘크리트 열전도율 실험방법

적정 가열량의 설정이 끝나면 본격적인 실험을 시작한다. 1분 동안 콘크리트의 표면부에 가해진 열량에 의해 열선 주위의 온도가 상승한 후, 열전달 현상에 의해 인접 부위로 열량이 빠져나가 열선 주위의 온도가 일정하게 유지되는 시점에 도달하게 된다. 바로 이 때의 열이동 속도가 콘크리트의 열전도율이다.

같은 공시체를 반복 실험할 경우에는 공시체와 Probe의 온도 평형이 이루어지도록 15분 동안 기다린 후 다시 측정한다. 다른 공시체를 측정할 경우에는, Probe를 냉각판 위에 올려 놓고 2분 동안 기다린 다음, 부저가 3번 울리면 측정할 공시체 위에 다시 올려놓는다. 그 이후에는 앞서 실행한 방법과 동일하게 측정한다.

2.4 열전도율 실험결과 및 분석

그림 2~6에 콘크리트 열전도율 실험결과와 중량비 및 부피비로 예측한 값을 나타내었다. 사용 재료의 특성 및 배합특성에 따른 영향은 나타났으나, 온도(10~40℃)의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 식 (1)와 (2)는 중량비와 부피비에 의한 열전도율 예측식이며, 표 4는 예측에 이용된 각 사용재료의 열전도율이다. 전체적으로 부피비에 의한 예측식이 중량비에 의한 예측식보다 실험값과 근사한 값을 계산하고 있는 것으로 나타나, 부피비에 의한 예측이 적절함을 알 수 있다.

$$\lambda_{\text{con},w} = \sum \omega_i \cdot \lambda_i \quad (1)$$

$$\lambda_{\text{con},v} = \sum v_i \cdot \lambda_i \quad (2)$$

여기서, $\lambda_{\text{con},w}$: 중량비에 의한 콘크리트 열전도율 예측값, $\lambda_{\text{con},v}$: 부피비에 의한 콘크리트 열전도율 예측값, λ_i : 각 재료의 열전도율, ω_i : 각 사용 재료의 중량비, v_i : 각 사용 재료의 부피비이다.

콘크리트의 열전도율은 물-시멘트비가 증가함에 따라 감소하고, 잔골재율이 증가함에 따라 증가하며, 페이스트 부피비에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 또한, 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다.

물-시멘트비와 잔골재율의 영향을 분석하여 보면, 열전도율이 치밀도의 영향을 받음을 알 수 있다. 또한 혼합재의 치환율이 크게 증가함에 따라, 열전도율이 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 콘크리트의 비중과 치밀도가 감소함에 따른 결과로 판단된다. 즉, 부피비에 의한 열전도율 예측법에 콘크리트 치밀도의 영향을 추가로 고려하면, 보다 정확한 열전도율 예측이 가능할 것이다.

표 4. 예측에 이용된 각 사용 재료의 열전도율^{(2), (4)}

사용 재료	열전도율(kcal/m/hr/°C)
물	0.430
시멘트	1.307
슬래그	1.096
플라이애쉬	1.401
잔골재	3.658
굵은골재	2.384
공기	0.0258

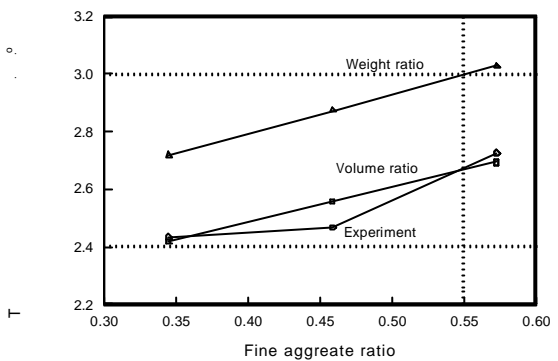


그림 2. 물-시멘트비에 따른 열전도율

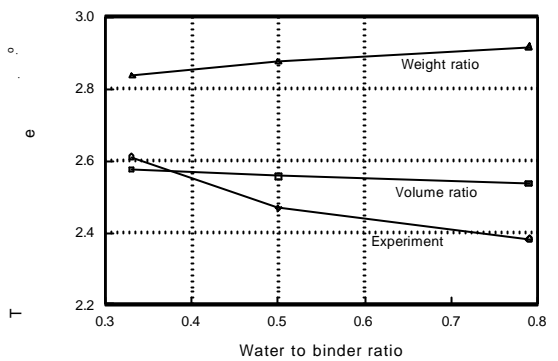


그림 3. 전골재율에 따른 열전도율

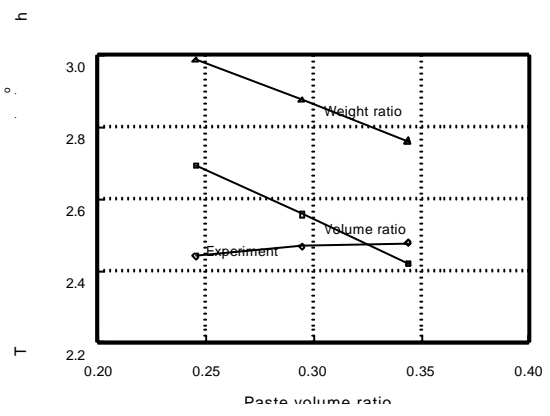


그림 4. 페이스트 부피비에 따른 열전도율

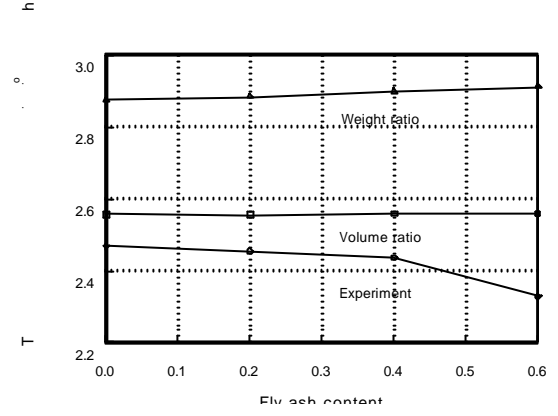


그림 5. 플라이애쉬 치환율에 따른 열전도율

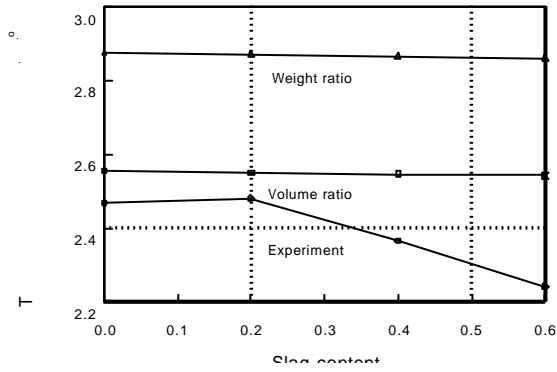


그림 6. 슬래그 미분말의 치환율에 따른 열전도율

3. 비열 측정

3.1 실험방법

비열을 구하기 위해서는 다음과 같은 예비실험과 본 실험을 수행한다.

• 예비실험

- ① 무게를 측정한 물과 시편을 같이 넣어 약 65℃까지 가열한다.
- ② 단열이 잘된 용기에 넣어 교반하면서 온도를 약 1분 간격으로 측정한다.
- ③ 1분마다 약 40분 동안 온도변화를 측정한다.
- ④ 온도 vs 시간 그래프를 그린다.

• 본 실험

- ① 무게를 측정한 물을 약 65℃까지 가열한다.
- ② 예비실험에서 사용한 것과 같은 상온 시편의 무게와 정확한 온도를 측정
- ③ 위의 물과 시편을 단열 용기에 같이 넣어 교반하면서 1분마다 40분 동안 온도변화를 측정한다.
- ④ 온도 vs 시간 그래프를 그린다.

예비실험과 본 실험이 끝나면 예비실험과 본 실험의 data 값에서 기울기가 똑같은 점을 평형 온도로 잡는다. 즉 초기에 물과 시편이 서로 다른 온도에서 열전달이 이루어질 때는 물의 온도는 시편과 용기외부로 전달되는 열에 의해 빨리 감소하나 물과 시편의 온도가 같으면(평형온도) 예비 실험과 같이 용기 외부로만 열전달이 이루어져 시간에 따른 온도변화(기울기)가 예비실험결과와 같게 된다. 이때 주의할 것은, 예비실험과 본 실험에서 사용한 물(약 2000g)과 시편(약 1000g)의 무게가 각각 비슷하면 더 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것이다.

각 시편의 비열(열용량)은 식 (3)의 열용량공식에 온도변화를 대입하여 구한다.

$$C_{water} * M_{water} * (T_3 - T_1) = C_{sample} * M_{sample} * (T_3 - T_2) \quad (3)$$

$$C_{sample} = \frac{C_{water} * M_{water} * (T_3 - T_1)}{M_{sample} * (T_3 - T_2)} \quad (4)$$

여기서, T_1 은 물의 처음온도, T_2 는 sample의 처음온도, T_3 는 나중온도로 실험에서 측정한 온도 vs 시간 그래프에서 찾은 기울기가 같은 점이며, C_{sample} 은 sample의 열용량 M_{sample} 은 sample의 무게이다.

3.2 실험결과

콘크리트의 비열을 물-시멘트비, 잔골재율 및 페이스트 부피비 등의 구성재료 비율의 변화에 따라 시험하고 그 결과를 표 5, 그림 7~9에 나타내었다. 물-시멘트비, 잔골재율 및 페이스트 부피비의 변수에 대하여 3종류의 콘크리트를 제조하여 재령 28일에 각 시험체의 열전도율을 측정하였다.

또한, 각 구성재료의 비열 및 중량비를 이용하여 비열 예측을 시도하였다. 콘크리트의 비열은 단위중량을 단위온도 상승시키는데 필요한 열량이므로 중량비에 의한 예측이 물리적으로 타당한 것으로 판단되었다.

표 5. 비열의 실험값 및 예측값

배합종류	물-시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	페이스트 부피비 (%)	단위량(kg/ m ³)				비열(kcal/kg · °C)	
				물	시멘트	잔골재	굵은골재	실험값	중량비*
W1	33	46	29	150	454	806	950	0,214	0,2104
W2	50			180	360	806	950	0,224	0,2249
W3	79			210	266	806	950	0,237	0,2402
S1	50	35	29	180	360	606	1150	0,227	0,2252
S2		46		180	360	806	950	0,224	0,2249
S3		57		180	360	1006	750	0,220	0,2245
P1	50	46	25	150	300	866	1019	0,210	0,2148
P2			29	180	360	806	950	0,224	0,2249
P3			34	210	420	747	881	0,231	0,2352

* 각 구성재료의 비열(물:1.0, 시멘트:0.109, 잔골재:0.167, 굵은골재:0.171) 및 중량비를 이용한 예측값

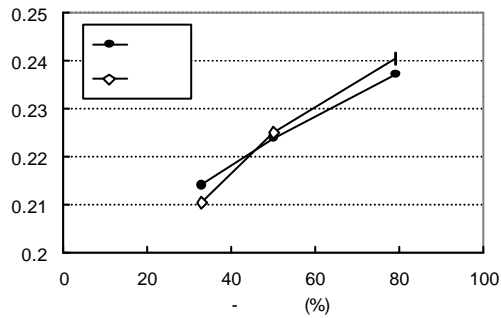


그림 7. 물-시멘트비와 비열

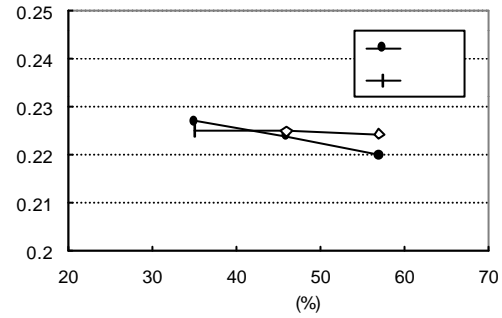


그림 8. 잔골재율과 비열

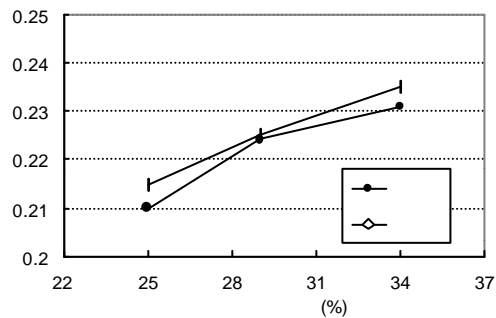


그림 9. 페이스트 부피비와 비열

4. 결 론

- (1) 콘크리트의 배합에 따른 중량비와 부피비에 의한 열전도율 예측식을 도출했다. 전체적으로 부피비에 의한 예측식이 중량비에 의한 예측식보다 실험값과 근사한 값을 계산하고 있는 것으로 나타나, 부피비에 의한 예측이 적절함을 알 수 있다.
- (2) 콘크리트의 열전도율은 물-결합재비가 증가함에 따라 감소하고, 잔골재율이 증가함에 따라 증가하며, 페이스트 부피비에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 또한, 플라이애쉬와 슬래그의 치환율이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 각 구성재료의 비열 및 중량비를 이용하여 비열 예측을 시도하였다. 콘크리트의 비열은 단위 중량을 단위온도 상승시키는데 필요한 열량이므로 중량비에 의한 예측이 물리적으로 타당한 것으로 판단되었다.

<참고문헌>

1. 과학기술부, "수화반응모델과 미세구조의 상관관계 연구", 과학기술부, pp85~100, 2001.
2. U.S. Bureau of Reclamation, "Thermal Properties of Concrete," Boulder Canyon Project Final Reports, Part VII-Cement and Concrete Investigations, Bulletin 1, U. S. Bureau of Reclamation, 1949, pp. 29-59.
3. Kyoto Electric Company, "Principle of measurement Thermal Conductive Meter", Kyoto Electric Company.
4. Breugel, V.K., "Simulation of Hydration and Formation of Structure in Hardening Cement-based Materials," PhD, TU-Delft, 1991.