

콘크리트 수화발열 및 자기수축 특성의 정량적 분석을 위한 통계적 방법

The statistical method for quantitative analysis of hydration heat and autogenous shrinkage of concrete

이 의 배** 이 형 준* 구 경 모* 나 철 성** 김 규 용*** 김 무 한****
Lee, Eui Bae Lee, Hyung Jun Koo, Kyung Mo Na, Chul Sung Kim, Gyu Yong Kim, Moo Han

ABSTRACT

In this study, to evaluate the correlation between hydration heat and autogenous shrinkage of high strength concrete in early age, statistical method present numerically hydration heat and autogenous shrinkage was studied. First of all, hydration heating velocity and autogenous shrinking velocity as quantitative coefficients which represent the main properties of hydration heat and autogenous shrinkage were proposed. Two coefficients were calculated by statistical analysis and were equal with the regression coefficient.

To verify the validity of the proposed statistical analysis method, data of hydration heat and autogenous shrinkage gathered by a real experiment were analyzed by it. In results, properties of hydration heat and autogenous shrinkage of high strength concrete in early age were analyzed quantitatively. Also evaluation and comparison of the correlation between hydration heat and autogenous shrinkage with numerical value were possible.

요 약

본 연구에서는 초기재령 고강도 콘크리트의 수화발열 특성 및 자기수축 특성의 직접적인 상관관계를 분석하기 위한 기초연구로서, 우선 초기재령 콘크리트의 수화온도와 자기수축의 발현 특성을 정량적으로 표현할 수 있는 통계적 방법에 대해 고찰하였다. 우선 수화발열 특성 및 자기수축 특성을 표현할 수 있는 정량적인 계수로서 수화온도와 자기수축이 급격하게 증가하는 구간의 기울기인 수화발열상승속도와 자기수축증가속도를 설정하였으며, 이 두 계수는 통계적 수법을 활용하여 일정범위의 결정계수를 갖는 회귀계수로 산정하는 것으로 제안하였다.

또한 설정된 통계적 분석방법의 유효성을 검증하기 위해 실제 측정된 수화온도 및 자기수축 데이터를 분석하였으며, 그 결과 초기재령 고강도 콘크리트의 수화발열 특성 및 자기수축 특성을 보다 정량적으로 분석할 수 있었으며, 두 가지 특성의 상관관계를 정량적인 수치로 비교·분석하는 것이 가능하였다.

* 정회원, 충남대학교 대학원 건축공학과, 석사과정
** 정회원, 충남대학교 대학원 건축공학과, 박사과정
*** 정회원, 충남대학교 건축학부, 조교수, 공학박사
**** 정회원, 충남대학교 건축학부, 명예교수, 공학박사

1. 서론

콘크리트의 주요 재료인 시멘트와 물이 서로 접하게 되면 수화반응이 개시되며, 그 결과물로서 수화물이 생성되고 수화열과 체적변화가 발생한다. 수화물의 생성은 시멘트가 교착재로서의 특성을 발현하는 과정으로, 구조체로 활용되는 콘크리트의 기본 성능인 강성 및 강도를 발현하는 가장 중요한 반응이다.

이에 반해 수화열 및 체적변화는 수화반응으로 인해 2차적으로 발생하는 물리·화학적 현상으로, 콘크리트의 성능을 저해하는 요인으로 작용하는 경우가 많다. 특히 시멘트가 다량 사용되는 고강도 콘크리트의 경우 초기에 높은 수화열이 발생함과 동시에 체적변화, 특히 자기수축이 크게 발생하며, 이 두 현상은 고강도 콘크리트의 초기특성 및 품질을 평가하는데 있어 매우 중요한 인자로 작용한다.

이와 같이 수화열 및 자기수축은 고강도 콘크리트의 초기 특성을 나타내는 기본적인 성질이며, 동일한 수화반응에 의해 필연적으로 발생하는 현상으로서 서로 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 초기재령 고강도 콘크리트의 수화발열 특성과 자기수축 특성의 직접적인 상관관계를 검토하기 위한 기초연구로서, 우선 초기재령 콘크리트의 수화온도와 자기수축의 발현 특성을 정량적으로 표현할 수 있는 통계적 방법에 대해 고찰하였다.

2. 수화발열 및 자기수축 특성의 통계적 분석방법

수화온도와 자기수축의 발현형태에 있어 가장 큰 비중을 차지하는 부분은 수화온도 및 자기수축이 급속히 상승하는 구간이며, 두 구간이 발현되는 시간도 유사한 점을 고려한다면 매우 높은 상관관계가 존재할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 수화발열 특성과 자기수축 특성을 대표적으로 표현하기 위한 계수로서 수화온도 및 자기수축이 급속히 상승하는 구간의 직선 기울기를 의미하는 수화발열상승속도와 자기수축증가속도를 설정하였다.

우선 수화발열상승속도를 산출하기 위해 본 연구에서는 그림 1과 같은 방법을 사용하였다. “실제 수화온도 이력곡선의 수화온도 급속 상승구간 시점에서 최고온도 지점까지의 형태는 단열온도상승곡선의 시점과 최고온도 지점까지의 형태와 동일하다.”라는 가정 하에 단열온도상승식을 통해 각 조건별 단열온도상승곡선을 유추한 후 통계프로그램(MINITAB)을 활용한 회귀분석을 실시하여 수화발열상승속도구간의 종점 산정방법을 결정하였다. 이 종점 산정방법을 기준으로 실제 온도이력곡선 데이터에 대한 회귀분석을 실시하여 일정 결정계수 범위의 회귀직선식을 유추하게 되며, 이때 구해진 회기계수가 수화발열상승속도가 된다. 이와 같은 산정방법을 요약하면 다음과 같다.

- ① 수화발열속도 산정구간의 종점 설정 (최고온도의 79% 시점)
- ② 종점을 기준으로 회귀분석 및 결정계수 검토
- ③ 수화발열속도 산정구간의 시점 설정 및 수화발열속도(회기계수) 도출

한편 자기수축증가속도의 경우는 자기수축 형태를 표현할 수 있는 전형적인 곡선이 부재한 실정이며,

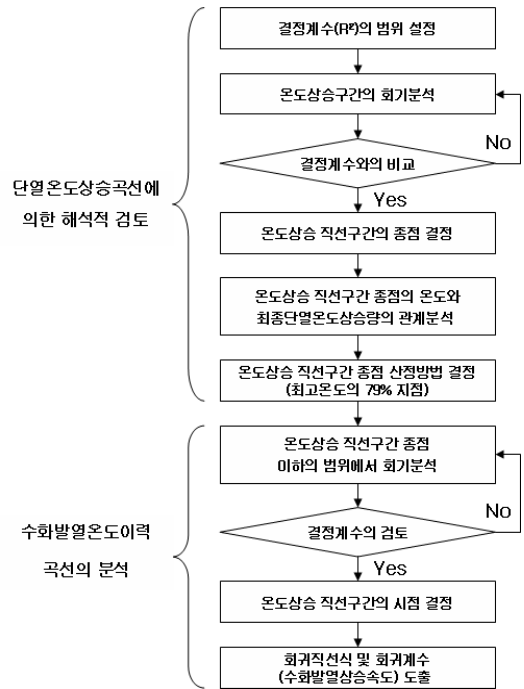


그림 1 수화발열상승속도의 산정 플로우

수화온도 급속상승구간과 자기수축 급속증가구간의 시간이 유사한 점을 감안하여, 본 연구에서는 수화발열상승속도 산정시 구해진 종점시간을 동일한 기준으로 정한 후 회귀분석을 실시하여 일정한 결정계수 범위를 갖는 회귀계수를 자기수축증가속도로 설정하였다.

3. 실험에 의한 통계적 분석방법의 검증

3.1. 실험계획 및 방법

상기와 같이 설정된 통계적 계수와 분석방법의 유효성을 검증하기 위해 앞서 실제 실험을 실시하여 얻어진 실측 데이터를 분석하고자 하였으며, 실험에 적용된 콘크리트의 배합은 표 1과 같다.

콘크리트의 수화열과 자기수축을 측정하기 위한 시험방법은 기존의 간이단열온도상승시험방법을 보완하여 콘크리트 부재의 크기 30×30×30cm, 단열거푸집의 두께 10cm 및 외기온도 20℃의 조건을 설정하였으며, 모식도는 그림 2와 같다. 콘크리트의 수화온도와 자기수축은 매립형 게이지(KM-100BT)를 사용하여 측정하였으며, 측정간격은 10분으로 설정하였다.

3.2. 실험결과 및 고찰

그림 3은 수화온도와 자기수축 측정값을 동시에 나타낸 것이다. 전환점 이후 자기수축이 급속히 증가하는 구간의 시간과 형태는 수화온도가 급속히 증가하는 구간과 유사한 형태를 보이고 있으며, 특히 직선의 기울기가 서로 유사한 것을 확인할 수 있다.

수화온도와 자기수축이 급속히 증가하는 구간의 특성을 보다 정량적으로 분석하기 위해 앞서 고찰한 통계적 분석을 실시하여 수화발열상승속도와 자기수축증가속도를 산출하였으며, 이에 대한 결과는 표 2에 나타낸 바와 같다.

수화발열상승속도 및 자기수축증가속도 산정구간의 종점은 타설 후 9.2시간이며, 그때의 수화온도 및 자기수축은 각각 58.2℃, -438×10^{-6} 로 산정되었다. 종점을 기준으로 구간의 시점을 각 결정계수 범위로 산정하게 되면, 수화발열상승 구간의 시점시간은 5.8~6.8시간이 되며, 수화온도는 26.3~29.7℃ 범위가 된다. 또한 자기수축증가 구간의 시점은 5.0~7.2시간이 되고 자기수축은 -135×10^{-6} ~ -235×10^{-6} 의 범위가 되며, 수화발열상승 구간의 시점과 최대 0.8시간의 차이를 보였다.

회귀분석을 통해 유추된 수화발열상승속도는 10.3℃/hr.~12.9℃/hr., 자기수축증가속도는 -76.0×10^{-6} /hr.~ -108.0×10^{-6} /hr.로 나타났으며, 결정계수 범위가 0.95에서 0.99로 증가할수록 수화발열상승속도 및 자기수축증가속도도 증가하는 것으로 나타났다.

수화발열상승구간이 차지하는 온도상승률은 결정계수 범위에 따라 실측값의 경우 39.3%~43.9%, 회

표 1 콘크리트의 배합

W/C (%)	Slump-flow (cm)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)			
			W	C	S	G
20	65±5	0.47	160	800	781	664

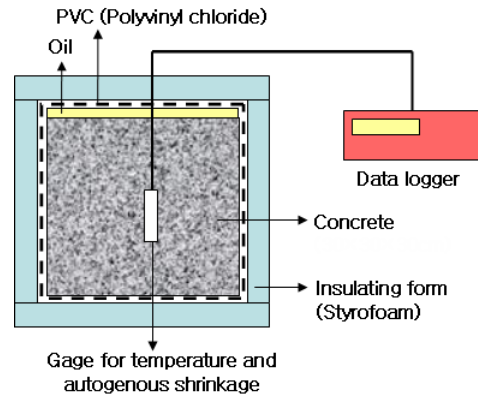


그림 2 시험방법의 모식도

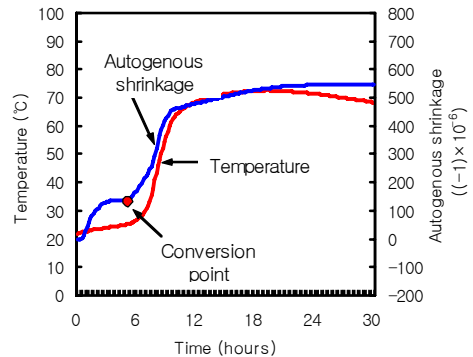


그림 3 수화발열온도 및 자기수축 측정결과

표 2 수화발열상승속도 및 자기수축증가속도 분석결과

결정계수 (R ²)	종점			수화온도					자기수축				
				시점			회귀직선식	수화발열상승속도 (°C/hr.)	시점			회귀직선식	자기수축증가속도 (×10 ⁻⁶ /hr.)
	시간 (hr.)	온도 (°C)	자기수축 (×10 ⁻⁶)	시간 (hr.)	시간차 (hr.)	온도 (°C)			시간 (hr.)	시간차 (hr.)	자기수축 (×10 ⁻⁶)		
0.95	9.2	58.2	-438	5.8	3.4	26.3	y=-38.4+ 10.3x	10.3	5.0	4.2	-135	y=287-76.6x	-76.6
0.96				6.0	3.2	26.7	y=-42.4+ 10.8x	10.8	5.3	3.9	-143	y=322-81.1x	-81.1
0.97				6.2	3.0	27.2	y=-46.2+ 11.2x	11.2	5.8	3.4	-162	y=380-88.4x	-88.4
0.98				6.5	2.7	28.2	y=-53.9+ 12.2x	12.2	6.5	2.7	-194	y=472-99.5x	-99.5
0.99				6.8	2.4	29.7	y=-60.2+ 12.9x	12.90	7.2	2.0	-235	y=547-108x	-108.0

귀식에 의한 경우 42.6%~48.2%의 범위를 나타내고 있다. 회귀식에 의해 산출된 온도상승률은 실측값에 의해 산출된 온도상승률에 비해 약 3.4%~4.3% 정도 높게 평가되었다. 또한 결정계수가 높아질수록 온도상승률은 감소하는 것으로 나타났다. 또한 자기수축증가구간의 자기수축 증가율은 결정계수의 범위에 따라 실측값의 경우 34.5%~51.5%, 회귀식에 의한 경우 36.7%~54.7%의 범위를 나타내고 있다. 회귀식에 의해 산출된 자기수축증가율은 실측값에 의해 산출된 자기수축 증가율에 비해 약 2.2%~4.2% 정도 높게 평가되었다.

한편 각 결정계수 범위에 따른 수화발열상승속도와 자기수축증가속도의 관계를 살펴본 결과, 본 배합의 경우 자기수축증가속도의 절대값은 수화발열상승속도의 약 7.4~8.3배에 해당하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 초기재령 콘크리트의 수화온도와 자기수축의 발현 특성을 정량적으로 표현할 수 있는 통계적 방법에 대해 고찰하였다. 우선 초기재령 고강도 콘크리트의 수화발열 및 자기수축 특성을 표현할 수 있는 계수로서 수화온도 및 자기수축이 급격히 증가하는 구간의 기율기인 수화발열상승속도와 자기수축증가속도를 설정하였으며, 이를 산정할 수 있는 통계적인 방법을 제시하였다. 또한 설정된 통계적 분석방법을 활용하여 실측 데이터를 분석한 결과, 초기재령 고강도 콘크리트의 수화발열 특성 및 자기수축 특성을 보다 정량적으로 분석할 수 있었으며, 두 가지 특성의 상관관계를 정량적인 수치로 비교·분석하는 것이 가능하였다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(R01-2007-000-11142 -0)이며, 연구자의 일부는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받은 바, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. E. Tazawa, Y. Matuoka, S. Miyazawa, S. Okamoto, "Effect of Autogenous Shrinkage on Self Stress in Hardening Concrete", Int. Symp. On Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, Munchen, 1994, pp.221~228
2. 今本 啓一, 大谷 博, "超高強度コンクリートの自己収縮性状に関する研究", 콘크리트工学年次論文集, Vol, 18, No. 1, 1996, pp.225~230