



초기재령 고강도콘크리트의 수화발열과 자기수축 특성의 상관관계에 관한 기초적 연구

김규용¹⁾ · 이의배^{1)*} · 구경모¹⁾ · 최형길¹⁾

¹⁾충남대학교 건축학부

A Fundamental Study on the Correlation between Hydration Heat and Autogenous Shrinkage of High Strength Concrete at an Early Age

Gyu-Yong Kim,¹⁾ Eui-Bae Lee,^{1)*} Kyung-Mo Koo,¹⁾ and Hyeong-Gil Choi¹⁾

¹⁾Div. of Architecture Engineering, College of Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT In this study, to analyze the correlation between hydration heat and autogenous shrinkage of high strength concrete at an early age, 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. The complemented semi-adiabatic temperature rise test as test method to evaluate the hydration heat and autogenous shrinkage of concrete were proposed. In results of proposed test and analysis method, it was possible that early age properties of hydration heat and autogenous shrinkage of concrete were expressed numerically, and autogenous shrinkage was represented by equation with coefficients of hydration heat.

Keywords : early age, high strength concrete, heat of hydration, autogenous shrinkage, regression analysis

1. 서 론

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 고강도콘크리트의 경우 초기에 높은 수화열이 발생함과 동시에 체적변화, 특히 자기수축이 크게 발생하며, 이 두 현상은 고강도콘크리트의 초기특성 및 품질을 평가하는데 있어 매우 중요한 인자로 작용한다.

이와 같이 수화열 및 자기수축은 고강도콘크리트의 초기 특성을 나타내는 기본적인 성질인 동시에 동일한 수화반응에 의해 필연적으로 발생하는 현상으로서 서로 밀접한 관계가 있을 것으로 판단되며, 두 특성의 관계가

정량적으로 규명된다면 고성능 콘크리트의 초기성능 분석 및 제어 분야에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

이미 宮澤¹⁾ 등은 시험체의 크기가 클수록 초기 자기수축속도가 크게 발생하고, 자기수축 변형의 크기는 작지만 시험체 크기에 따라 변형의 차가 발생한다고 보고하였다. 堀田²⁾ 등은 시멘트페이스트의 초기 수축 및 팽창은 내부온도의 상승과 매우 유사한 경향을 보이며, 시멘트의 수화반응이 지연되는 경우에도 이러한 경향은 나타나는 것으로 보고하였다.

또한 Loukili³⁾ 등은 상면을 제외한 모든 면을 간이단열 처리한 모르타르 시험체를 대상으로 위치에 따른 내부온도와 자기수축을 측정하였으며, 그 결과 표면부에 비해 중앙부는 수화온도 뿐만 아니라 자기수축도 크게 증가함을 보였다. 즉, 상면부와 중앙부가 균질한 조건의 시험체라면 상면부와 중앙부의 차이점은 표면과의 거리차에 의한 단열 정도, 그리고 그에 따른 온도차를 조건의 차이점으로 제시할 수 있으며, 이러한 점을 고려하여 모르타르의 자기수축 크기는 온도이력의 영향을 크게 받고 보고하는 등 수화온도이력과 자기수축의 깊은 상관성을 언급하였다.

나아가 Tazawa⁴⁾ 등과 今本⁵⁾ 등은 수화온도와 자기수축의 상관성을 응용하여 온도조건이 다른 상황에서 자기수축은 콘크리트의 성숙도 (maturity)에 의해 평가가

*Corresponding author E-mail : mir2468@cnu.ac.kr

Received February 27, 2008, Revised May 30, 2008, Accepted July 25, 2008

©2008 by Korea Concrete Institute

가능함을 보고하였다.

본 연구에서는 수화온도와 시간의 함수로 산정되는 성속도가 아닌 수화온도 자체의 특성과 자기수축과의 상관관계를 구명하고자 하며, 이를 위한 기초 연구로서 우선 초기재령 고강도콘크리트의 수화발열 특성과 자기수축 특성의 상관관계 분석을 위한 시험 방법 및 통계적 분석 방법에 대해 고찰하고자 한다.

2. 분석 방법 및 시험 방법의 설정

2.1 분석을 위한 범위 및 계수의 설정

다른 형태로 발현되는 특성들에 대한 서로의 상관관계를 정량적으로 분석하기 위해서는 각각의 특성을 표현할 수 있는 수치적인 계수가 필요하다. 초기재령 고강도콘크리트의 특성인 수화온도와 자기수축의 상관관계를 분석하기 위해서도 두 가지의 발현 특성을 표현할 수 있는 수치적인 계수가 필요하다.

수화온도를 표현하기 위해 이제까지 가장 대표적으로 사용해 온 계수는 최고온도와 최고온도 도달시간 정도이며, 자기수축의 경우도 장기적인 측면에서 궁극적으로 수렴되는 최대 수축량이 전부인 실정이다. 이와 같이 기존에 사용해 온 몇몇의 계수로는 초기재령의 수화온도와 자기수축 특성의 상관관계를 정량적으로 분석하기에는 한계가 있다.

Fig. 1은 초기재령 콘크리트의 일반적인 수화온도 및 자기수축 발현곡선을 나타낸 것이다.

본래 콘크리트의 자기수축은 3차원적인 체적수축을 의미하지만 주로 1차원적인 선형수축 평가가 주를 이루고 있다. 자기수축 측정 방법에 있어서도 여러 측정 방법들

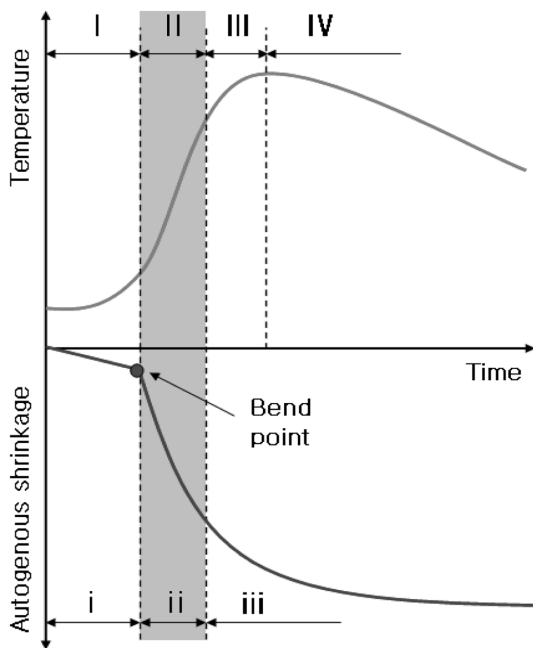


Fig. 1 Curves of hydration heat and autogenous shrinkage of concrete

이 제안되어 왔으며, 동일한 배합 및 치수의 시험체라 하더라도 측정 방법 및 환경조건의 미묘한 차이에 의해 그 발현형태 및 절대값이 다르게 되는 경우가 많다.

최근에는 변형 측정 센서 혹은 매립형 게이지 및 변형계를 사용하여 자기수축을 실시간으로 측정할 뿐만 아니라 초기재령시 자기수축 특성에 대한 평가가 가능하게 되었다.

초기재령시 콘크리트의 자기수축 발현형태를 살펴보면, 타설 직후부터 굴곡점까지 자기수축이 증가하는 구간 i, 굴곡점 이후 자기수축이 급속히 증가하는 구간 ii, 그리고 자기수축 증가량이 점차 감소하여 일정값으로 수렴하는 구간으로 구분될 수 있다. 구간 i에서는 자기수축 증가량이 점차 감소하다가 일시적으로 수축이 정지하는 구간이 발생하는 경우도 있으며, 팽창이 나타나는 경우도 있다.^{2,6)}

한편 수화온도는 콘크리트의 다른 물리·화학적 특성들에 비해 매우 용이하게 측정될 수 있으며, 정확도에 있어서도 매우 신뢰도가 높다. 그 발현형태에 있어서도 온도가 점차 상승하는 구간 I, 급속히 상승하는 구간 II, 최고온도까지 수렴하는 구간 III, 서서히 하강하는 구간 IV의 4구간으로 뚜렷하게 구별된다.

이상의 검토 결과를 토대로 본다면, 수화온도와 자기수축의 발현형태에 있어 가장 큰 비중을 차지하는 부분은 수화온도 및 자기수축이 급속히 상승하는 구간 (구간 II와 구간 ii, 이하 수화발열상승구간 및 자기수축증가구간)이며, 두 구간이 발현되는 시간도 유사한 점을 고려한다면 매우 높은 상관관계가 존재할 것으로 사료된다.

이에 본 연구에서는 초기재령 콘크리트의 수화발열 특성과 자기수축 특성을 대표적으로 표현하기 위한 계수로서 수화발열상승구간과 자기수축증가구간, 그리고 구간의 직선 기울기를 의미하는 수화발열상승속도와 자기수축증가속도를 설정하였으며, 두 계수를 중심으로 수화온도와 자기수축의 상관 관계를 분석하고자 한다.

2.2 수화발열상승속도 및 자기수축증가속도 산정 방법

실제 수화온도 이력곡선상에서 온도상승구간의 직선기울기를 구하기 위해서는 일정구간에 포함되어 있는 측정값들이 일직선상으로 나열되어 있지 않은 이상, 통계적 방법으로서 회귀분석을 실시하여 일차식의 회귀선을 추정하게 되며, 그때 구해진 회귀계수가 추정된 직선의 기울기가 된다. 그러나 회귀분석을 실시하게 될 구간이 명확하게 설정되어 있지 않거나 기준점이 정해져 있지 않다면, 작업 자체가 난이하게 되며 모든 온도이력곡선에서 수화발열상승속도를 구하는 산정방법의 일관성이 결여되게 된다. 즉 수화발열상승속도를 산정하게 될 구간 양단 지점 중 어느 한 점을 고정하게 되면 일정한 결정계수의 확률로 회귀선을 추정하기가 용이해진다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 단열온도상승곡선식을 활용하여 수화발열상승구간 (구간 II)을 결정하는

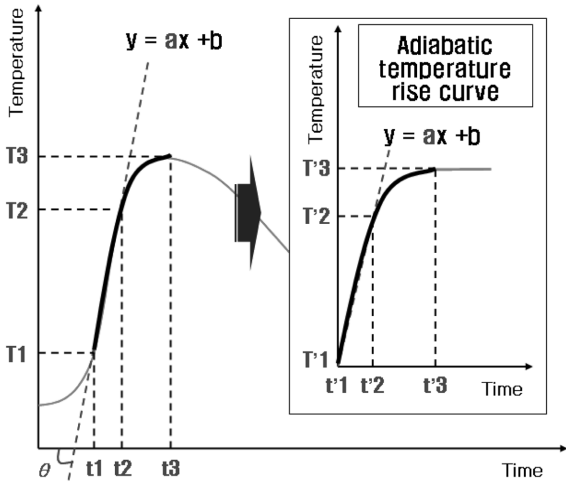


Fig. 2 Application of adiabatic temperature rise curve for calculation of hydration heating velocity section

방법을 유추하였다. 단열온도상승식에 의해 산출된 온도 곡선은 처음부터 수화온도 급속상승구간 (구간 II)이 나타나며, 최고온도 수렴구간 (구간 III)을 지나 최고온도가 일정하게 유지되는 형태를 나타낸다. 즉, 일반적인 수화온도 이력곡선 중 구간 II, III의 전형적인 형태를 단열온도상승곡선에서 유추할 수 있으며, 이 곡선의 해석적 검토를 통해 일정한 결정계수 범위를 갖는 수화발열상승구간의 종점을 산정할 수 있다.

본 연구에서는 “실제 수화온도 이력곡선 중 수화발열상승구간 시점 (t1, T1)에서 최고온도 지점 (t3, T3)까지의 형태는 단열온도상승곡선의 원점 (t'1, T'1)과 최고온도 지점 (t'3, T'3)까지의 형태와 동일하다”라는 가정 하에, Table 1과 같은 조건하에서 총 24개의 단열온도상승곡선을 유추한 후, 원점부터 데이터를 회귀분석하여 결정계수가 0.95 이상이 되는 종점 (t'2, T'2)을 산출하였다. 회귀분석을 위한 통계프로그램으로는 범용 통계프로그램인 MINITAB을 사용하였다.

또한 산출된 종점의 온도 (T'2)와 최종단열온도 (T'3)의 관계를 분석해 본 결과, Fig. 3과 같이 종점온도/최종단열온도 (T'2/T'3) 값이 0.67~0.81의 범위를 나타내었으며, 결정계수 0.95에 해당하는 종점온도/최종단열온도 (T'2/T'3)를 유추한 결과 그 값이 0.80으로 산정되었다. 즉, 상기 조건의 단열온도상승곡선에서 원점부터 회귀분석하여 유추

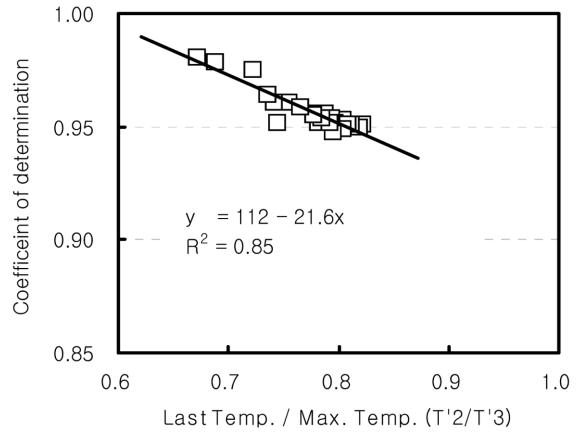


Fig. 3 Correlation between last temperature / max. temperature (T'2/T'3) and coefficient for determination

된 회귀직선식이 데이터를 95% 이상의 정확도로 대표할 수 있는 구간의 종점은 최고온도의 80% 되는 지점이다.

실제 수화온도이력곡선에서 결정계수 0.95 이상의 수화발열상승구간 및 수화발열상승속도를 산정할 시에는 상기와 같은 단열온도곡선 분석원리를 역으로 적용하게 되며, 요약하면 다음과 같다.

- ① 수화발열상승구간의 종점 (t2, T2) 설정 (최대 온도상승량의 80% 지점)
- ② 종점을 기준으로 회귀분석 및 결정계수 검토
- ③ 수화발열상승구간의 시점 (t1, T1) 및 수화발열상승 속도 (회기계수) 도출

또한 결정계수의 범위에 따라 종점의 위치는 변경되며, 결정계수 0.96 이상, 0.97 이상, 0.98 이상, 0.99 이상의 범위에서 종점은 각각 최대 온도상승량의 75%, 70%, 60%, 50% 지점이 된다.

한편 자기수축의 경우 굴곡점을 자기수축증가구간의 시점으로 설정한 후 회귀분석을 실시하여 각 결정계수 범위의 자기수축증가속도를 산정하였다.

2.3 수화발열특성 및 자기수축특성 평가를 위한 시험 방법

콘크리트의 수화발열특성과 자기수축특성의 상관관계를 분석하기 위해서는 수화온도 및 자기수축의 평가가 같은 시험체에서 동시에 측정되어야 한다.

본 연구에서는 수화열의 상대적 평가를 위해 기존에 실시하고 있는 간이단열시험 방법을 보완하여 수화발열 및 자기수축 특성을 동시에 평가할 수 있는 시험 방법으로 활용하였으며, 시험 방법의 개략적인 모식도는 Fig. 4에 나타낸 바와 같다.

단열체인 발포폴리스티렌 보드를 활용하여 거푸집을 제작하고 콘크리트와 거푸집과의 마찰을 줄이기 위한 폴리염화비닐을 내부에 설치하였다. 폴리염화비닐 내에 콘크리트를 타설한 후 콘크리트 상면에 일정량의 오일을 부어넣어 층을 형성시켜 수분의 이동을 방지하도록 하였다. 사용된 오일은 비중 0.91, 증발률 $6.6 \times 10^{-4} \text{kg/m}^2\text{h}$ 의 물

Table 1 Analogy conditions of adiabatic temperature rise curves

Adiabatic temperature equation ¹⁾	Type of cement	Unit weight of cement (kg/m ³)	Placement temperature (°C)	Measurement intervals (minutes)
$Q(t) = Q_8(1 - e^{-\alpha t})$	OPC	300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000	10, 20, 30	10

Note 1) Q(t): Adiabatic temperature at age t
 Q_8 : Maximum adiabatic temperature rise (°C)
 α : Coefficient for adiabatic temperature rise velocity
 t: Age (days)

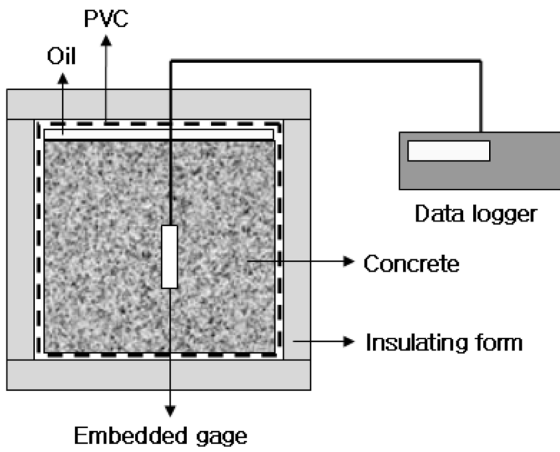


Fig. 4 Schematic of test method

성을 갖는 식물성 오일로, 오일 내에서 양생한 콘크리트 시험체의 1일, 3일, 7일, 14일 및 28일 압축강도를 측정 한 결과 표준양생한 시험체에 비해 98~104% 수준의 압축강도를 나타내어, 본 실험시 오일 사용에 따른 콘크리트에 대한 영향은 거의 없는 것으로 판단되었다.

또한 온도와 자기수축의 측정은 허용용량 $\pm 5,000 \times 10^{-6}$, 허용온도범위 $-20 \sim +80^\circ\text{C}$, 저항값 350Ω 의 4계이지법을 사용하는 매립형 게이지 (KM-100BT)를 사용하였다.

한편 간이단열온도상승시험의 경우 현재 시험 방법이 정형화되어 있지 않으며, 연구자에 따라서 시험부재의 크기, 단열재의 종류 및 두께 등의 시험조건을 달리하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 정형화되어 있지 않는 간이단열온도상승시험의 조건을 결정하기 위해 수화열 유한해석프로그램인 MIDAS GEN⁷⁾을 활용하여 각 조건에 따른 수화온도이력 특성을 비교·평가함으로써 본 연구에서 적용할 간이단열온도상승시험의 조건을 사전에 검토하였으며, 해석을 위한 간이단열온도상승시험의 조건의 종류 및 수준은 Table 2에 나타난 바와 같다.

각종 조건에 따른 간이단열온도상승시험의 해석적 검토의 과정을 살펴보면 Fig. 5에 나타난 바와 같이 우선 해석을 수행할 간이단열온도상승시험의 조건을 설정하게 된다. 이후 해석을 수행하기 위해 시험체의 적정 크기, 위치 등에 관한 모듈화 작업을 실시하고 해석을 수행하게 된다. 수화온도의 해석은 Fig. 5(c)에 나타난 바와 같이 콘크리트 시험체의 중심부, 콘크리트와 단열재의 경계부 및 단열재 중심부의 3곳을 설정하였다.

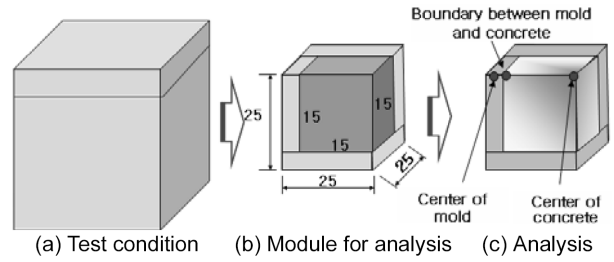


Fig. 5 Analysis process of semi-adiabatic temperature rise test

그 결과 단열재 두께에 따른 온도이력의 경우 Fig. 6과 같이 단열재가 없는 경우에는 콘크리트 내부 최고온도가 단열재가 있는 경우의 약 1/2 수준을 보였으나, 단열재가 있는 경우 단열재 두께 50, 100, 150 mm에 따른 온도는 각각 77.6°C , 78.1°C , 78.2°C 로 나타나 매우 유사한 온도이력을 보였다.

또한 콘크리트 부재 크기 $300 \times 300 \times 300 \text{ mm}$, $500 \times$

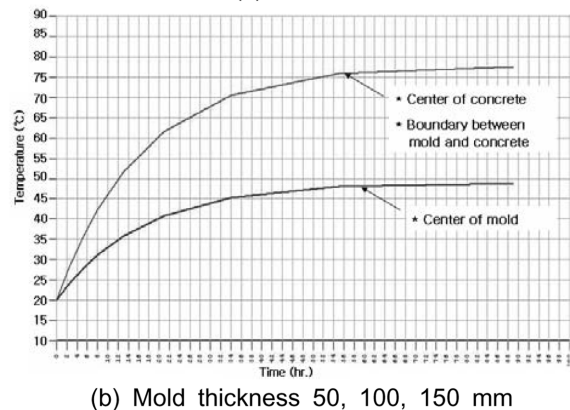
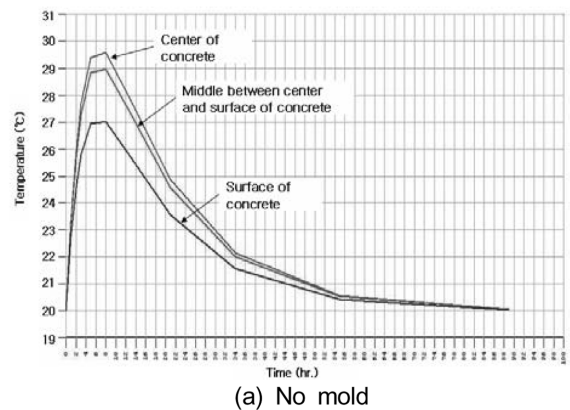


Fig. 6 Analysis results of semi-adiabatic temperature rise test according to mold thickness

Table 2 Conditions of semi-adiabatic temperature rise test

	Unit weight of cement (kg/m^3)	Insulating mold		Specimen size (mm)	Air temperature ($^\circ\text{C}$)
		Material	Thickness (mm)		
I	400	Styro-foam	0, 50, 100, 150	$300 \times 300 \times 300$	20
II			100	$300 \times 300 \times 300$ $500 \times 500 \times 500$ $800 \times 800 \times 800$	20
III			100	300×300	0, 10, 20

500 × 500 mm, 800 × 800 × 800 mm에 따라 중심의 최고온도는 각각 78.1°C, 78.4°C, 78.6°C, 외기온도 0°C, 10°C, 20°C에 따라 각각 77.8°C, 77.9°C, 78.1°C로 나타나 부재 크기 및 외기온도에 따른 차이는 매우 미약한 것으로 나타났다.

이상의 결과를 토대로 본 연구에서는 간이단열온도상승시험의 조건으로서 콘크리트 부재의 크기 300 × 300 × 300 mm, 단열거푸집의 두께 100 mm 및 외기온도 20°C의 조건을 설정하였다.

3. 실험 계획

상술한 바와 같이 초기재령 고강도콘크리트의 수화발열 특성과 자기수축 특성의 상관관계를 분석하기 위해 본 연구에서는 수화발열상승속도와 자기수축증가속도라는 새로운 계수를 설정한 후, 두 계수를 산정하는 통계적 방법을 고찰하였다. 이와 같이 설정된 통계적 계수와 분석 방법의 유효성을 검증하기 위해 앞서 설정한 시험 방법으로 기초적인 실험을 실시하였으며, 이를 통해 얻어진 실측 데이터를 분석하였다. 실험에 적용된 콘크리트의 배합 및 사용재료는 Tables 3 및 4에 나타난 바와 같다.

한편 콘크리트의 비빔은 잔골재와 결합재를 투입하여 30초간 건비빔을 실시한 후 예비시험에 의해 미리 정해진 고성능감수제 사용량의 1/2과 물을 투입하여 5분간 비빔을 실시하였다. 이후 굵은골재를 투입하여 비빔을 실시하였으며 목표 슬럼프-플로우를 만족시키기 위해 남은 고성능감수제를 투입·조절하였다. 비빔이 완료된 콘크리트로 시험체를 제작하였으며, 온도 및 자기수축은 10분 간격으로 측정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 수화온도 및 자기수축

Fig. 7은 초기재령 30시간까지 콘크리트의 수화온도이

Table 3 Mix of concrete

W/C (%)	Slump-flow (mm)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)			
			W	C	S	G
20	650 ± 50	0.47	160	800	664	781

Table 4 Materials

Materials	Physical and chemical properties
Cement	· Ordinary portland cement · Density : 3.15 g/cm ³ , Fineness : 3,770 cm ² /g
Fine aggregate	· Desalting sand · Max size : 5 mm, Density : 2.54 g/cm ³ , F.M. : 3.05, Absorption ratio : 1.01
Coarse aggregate	· Crushed aggregate · Max size : 20 mm, Density : 2.65 g/cm ³ , F.M. : 6.02, Absorption ratio : 1.39
Admixture	· Polycarboxylic acid type

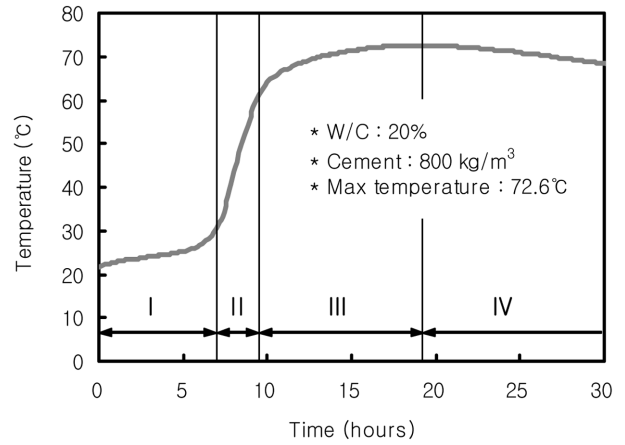


Fig. 7 Hydration temperature

력을 나타낸 것이다. 타설 직후 콘크리트의 온도는 21.6°C로 약 7시간까지는 콘크리트의 온도가 서서히 증가하였으며, 약 7시간부터 약 9시간까지는 수화온도가 직선적으로 급속히 증가하는 형태를 나타내었다. 그 후 온도증가량은 감소하여 약 19시간에 이르러 최고온도인 72.6°C를 나타내었으며, 그 후에는 점차 감소하는 형태를 나타내었다.

Fig. 8은 초기재령 30시간까지 콘크리트의 자기수축을 나타낸 것으로 온도의 영향을 배제하여 산출한 것이다. 콘크리트 타설 후 약 5시간까지 수축이 증가하다가 다시 감소하여 일정하게 수렴하는 형태를 보이고 있으며 이때의 자기수축 값은 약 -140×10^{-6} 정도였다. 그 후 다시 자기수축이 급속히 증가하며 약 10시간 후에는 다시 감소하여 수렴하는 형태를 보이고 있다.

이와 같이 자기수축 발현곡선 중 굴곡점이 나타나는 현상, 즉 타설 후 자기수축이 일차적으로 종료되거나 감소하는 것은 시멘트 수화반응에 의해 견고한 골격이 형성되고 에트린자이트에 의한 팽창에 기인한 것으로 사료되며, 다시 자기수축이 증가하는 것은 시멘트 내 석고가 변환점 시기에 모두 소비되어 시멘트 수화물의 구조 형성에 중요한 역할을 담당하는 에트린자이트가 형태 변화를 일으키기 때문이라 사료된다.⁶⁾

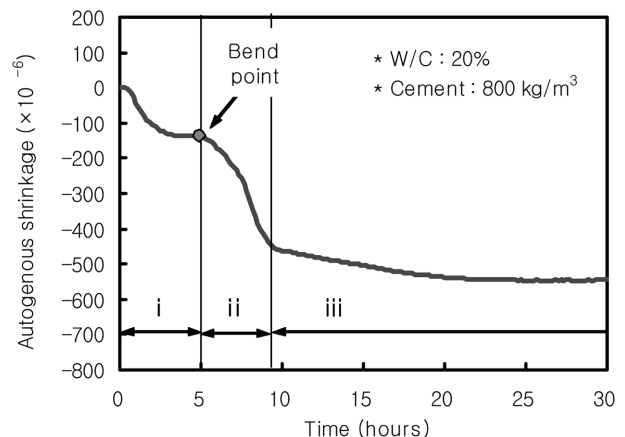


Fig. 8 Autogenous shrinkage

4.2 수화온도 및 자기수축의 통계적 분석

Fig. 9는 초기재령 30시간까지 수화온도와 자기수축의 발현 형태를 비교한 것으로, 굴곡점 이후 자기수축이 급속히 증가하는 구간의 시간과 형태는 수화온도가 급속히 증가하는 구간과 매우 유사한 형태를 보이고 있다.

수화온도와 자기수축이 급속히 증가하는 구간의 특성을 보다 정량적으로 분석하기 위해 앞서 고찰한 통계적 분석을 실시하였으며, 그 분석 결과는 Tables 5 및 6에 나타낸 바와 같다.

먼저 각 결정계수 범위로 수화발열상승구간의 종점을 산정한 결과 타설 후 8.3시간~9.2시간이며, 수화온도 48.0°C~62.5°C였다. 종점을 기준으로 구간의 시점을 산정하게

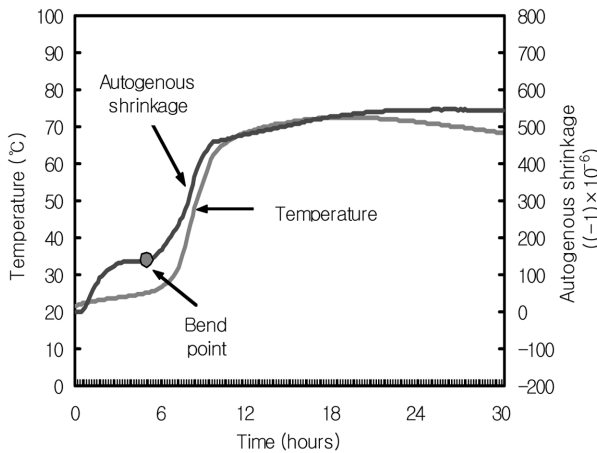


Fig. 9 Hydration temperature and autogenous shrinkage

Table 5 Analysis results of hydration temperature

R ²	Initial point		Last point		Max. of temperature rise (°C)	Regression analysis										
	Time (hr)	Temp. (°C)	Time (hr)	Temp. (°C)		Regression equation	Hydration heating velocity (°C/hr.)	DF ¹⁾			SS ²⁾			MS ³⁾		F ⁴⁾
								R ⁵⁾	E ⁶⁾	T ⁷⁾	R	E	T	R	E	
Over0.95	5.5	25.8	9.7	62.5	51.0	y = -34.7 + 9.90x	9.90	1	24	25	3984.70	203.20	4187.9	3984.7	8.50	470.64
Over0.96	5.8	26.3	9.3	60.0		y = -39.8 + 10.5x	10.5	1	20	21	2705.90	124.80	2830.8	2705.9	6.20	433.54
Over0.97	6.2	27.2	9.2	58.2		y = -46.2 + 11.2x	11.2	1	9	10	445.99	14.40	460.39	445.99	1.60	278.76
Over0.98	6.7	28.8	8.7	52.2		y = -56.5 + 12.5x	12.5	1	8	9	377.39	10.67	388.06	377.39	1.33	283.00
Over0.99	7.0	30.7	8.3	48.0		y = -67.1 + 13.8x	13.8	1	7	8	311.81	4.78	316.59	311.81	0.68	456.40

Note 1) DF : the degree of freedom, 2) SS : sum of squares, 3) MS : mean of SS, 4) F = MSR/MSE, 5) R : regression, 6) E : error, 7) T : total

Table 6 Analysis results of autogenous shrinkage

R ²	Initial point		Last point		Shrinkage at 28 days (×10 ⁻⁶)	Regression analysis										
	Time (hr)	Shrink -age (×10 ⁻⁶)	Time (hr)	Shrink -age (×10 ⁻⁶)		Regression equation	Autogenous shrinking velocity (×10 ⁻⁶ /hr)	DF ¹⁾			SS ²⁾			MS ³⁾		F ⁴⁾
								R ⁵⁾	E ⁶⁾	T ⁷⁾	R	E	T	R	E	
Over0.95	5.0	-137	11.3	-475	-598	y = 210 - 65.7x	-65.7	1	37	38	592460	32179	624639	592460	870	681.21
Over0.96			11.0	-472		y = 232 - 68.8x	-68.8	1	35	36	554051	24666	578717	554051	705	786.19
Over0.97			10.5	-467		y = 262 - 73.2x	-73.2	1	32	33	487125	16585	503710	487125	518	939.89
Over0.98			7.7	-75		y = 133 - 51.5x	-51.5	1	15	16	30063	634	30696	30063	42	711.62
Over0.99			6.7	-205		y = 74.2 - 41.2x	-41.2	1	9	10	5196.7	73.4	5270.2	5196.7	8.2	636.90

Note 1) DF : the degree of freedom, 2) SS : sum of squares, 3) MS : mean of SS, 4) F = MSR/MSE, 5) R : regression, 6) E : error, 7) T : total

되면, 시점시간은 5.5시간~7.0시간이 되며, 수화온도는 25.8°C~30.7°C가 된다. 또한 회귀분석을 통해 유추된 수화발열 상승속도는 9.90°C/hr.~13.8°C/hr로 나타났으며, 결정계수가 증가할수록 수화발열상승속도는 증가하는 것으로 나타났다.

한편 자기수축증가구간의 시점은 타설 후 5.0시간이며, 자기수축은 -137 × 10⁻⁶이었다. 시점을 기준으로 구간의 종점을 각 결정계수 별로 산정하게 되면, 시점시간은 6.7시간~11.3시간이 되며, 자기수축은 -205 × 10⁻⁶~ -475 × 10⁻⁶ 범위가 된다. 또한 회귀분석을 통해 유추된 수화발열상승속도는 -41.2 × 10⁻⁶/hr.~ -65.7 × 10⁻⁶/hr로, 6시간 정도에 약간의 변곡이 발생하여 결정계수 0.98 이상에서는 자기수축증가속도 절대값이 오히려 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 실측 및 회귀식에 의한 최대 온도상승량 대비 수화발열상승구간의 온도상승률을 나타낸 것이다. 이 구간의 온도상승률은 실측값의 경우 33.9%~72.0%, 회귀식에 의한 경우 36.1%~80.9%의 범위를 나타내고 있다. 회귀식에 의해 산출된 온도상승률은 실측값에 의해 산출된 온도상승률에 비해 약 2.2%~8.9% 정도 높게 평가되었으며, 결정계수가 높아질수록 온도상승률은 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 실측 및 회귀식에 의한 28일 자기수축 대비 자기수축증가구간의 자기수축 증가율을 나타낸 것으로, 실측값의 경우 11.4%~56.6%, 회귀식에 의한 경우 11.5%~36.9%의 범위를 나타내고 있다. 회귀식에 의해 산출된 자기수축증가율은 실측값에 의해 산출된 자기수축 증가율에 비해 약 0.1%~13% 정도 낮게 평가되었으며, 결정

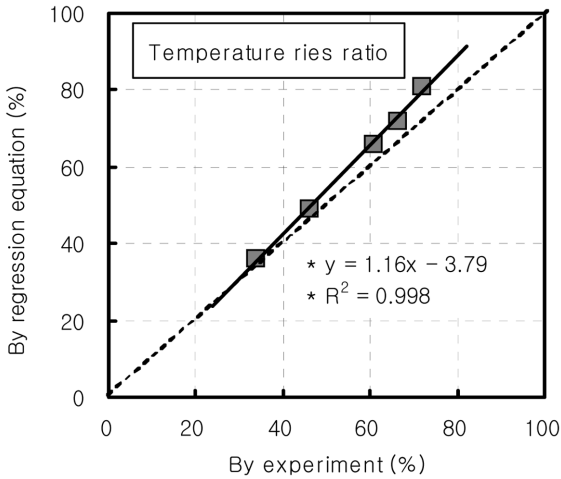


Fig. 10 Temperature rise ratio

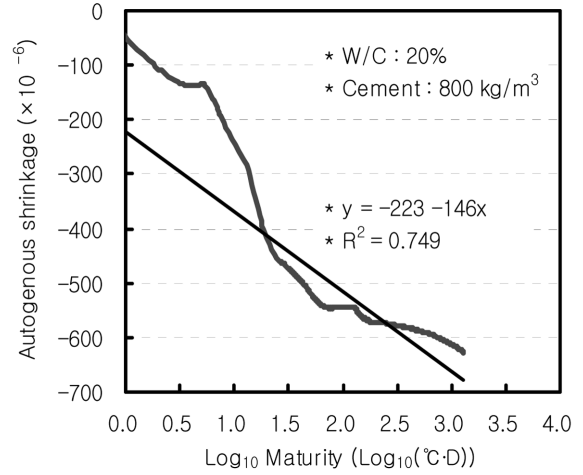


Fig. 12 Correlation between maturity and autogenous shrinkage

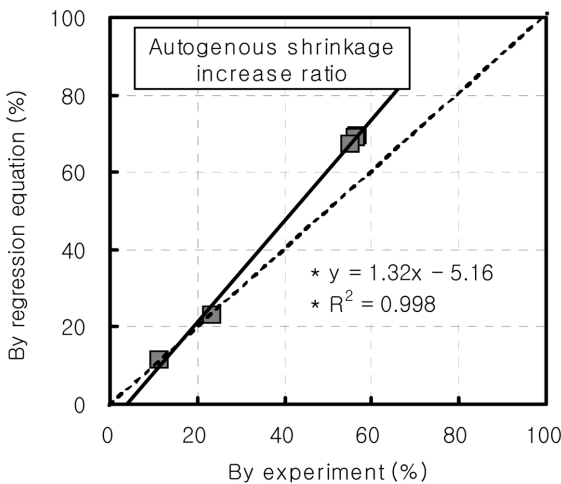


Fig. 11 Autogenous shrinkage increase ratio

계수가 높아질수록 온도상승률은 감소하는 것으로 나타났다.

4.3 수화온도 및 자기수축의 상관관계

Tazawa⁴⁾ 등은 콘크리트의 자기수축이 성숙도 (maturity) 로 표현될 수 있음을 보고하였다. 본 연구에서도 성숙도와 자기수축을 비교하였으며 그 결과는 Fig. 12에 나타낸 바와 같다. 이를 다시 정리하면 본 연구의 범위에서 자기수축은 식 (1)과 같이 성숙도의 함수로서 표현될 수 있다.

$$\varepsilon = -223 - 146 \text{Log}M \quad (1)$$

여기서 ε : 자기수축량 ($\times 10^{-6}$)
M: 성숙도 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{D}$)

한편, 본 연구에서도 재령 28일 자기수축을 초기 자기수축 및 수화온도의 발현특성의 상관관계를 활용하여 함수식으로 표현하고자 하였다. 우선 통계분석에 의해 산출한 자기수축증가구간의 시간과 증가율, 그리고 자기수축증가속도를 사용하여 28일 자기수축량은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{28} = V_a \cdot T_a \cdot \frac{100}{R_a} \quad (2)$$

여기서 ε_{28} : 재령 28일 자기수축량 ($\times 10^{-6}$)
 V_a : 자기수축증가속도 ($\times 10^{-6}/\text{hr}$)
 T_a : 자기수축증가구간의 시간 (hr)
 R_a : 자기수축증가구간의 자기수축 증가율 (%)

또한 수화발열상승속도와 수화발열상승구간의 시간을 사용하면 식 (2)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{28} = -V_h A \cdot T_h B \cdot \frac{100}{R_a} \quad (3)$$

여기서 V_h : 수화발열상승속도 ($^{\circ}\text{C}/\text{hr}$)
 T_h : 수화발열상승구간의 시간 (hr)
A: 속도 보정계수 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
B: 시간 보정계수

물론 이상과 같은 함수식을 도출하기 위해서는 수화발열상승구간 및 자기수축증가구간의 시간, 온도상승률 및 자기수축 증가율, 그리고 수화발열상승속도와 자기수축증가속도의 상관관계가 보다 명확해야 하며, 이를 위한 지속적인 데이터의 축적이 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 초기재령 고강도콘크리트의 수화온도와 자기수축 특성의 상관관계를 분석하기 위한 시험 방법 및 통계적 분석 방법에 대해 고찰하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 상관관계 분석을 위해 수화발열상승구간 및 자기수축증가구간, 그리고 이 구간의 직선 기울기인 수화발열상승속도 및 자기수축증가속도를 설정하고 이를 산정할 수 있는 통계적인 방법을 제시하였다.
- 2) 설정된 시험 방법을 통해 실험을 실시하여 실측데

이터를 분석한 결과, 설정된 분석 방법으로서 고강도콘크리트의 수화발열 및 자기수축에 대한 초기재령 특성을 수치적으로 표현하는 것이 가능하였다.

- 3) 초기 수화발열 및 자기수축 발현특성의 상관관계 분석에 관한 지속적인 데이터의 축적에 의해, 자기수축을 초기 수화발열 특성을 나타내는 계수의 함수식으로 표현하는 것이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 宮澤 伸吾, 黒井 登起雄, 松村 仁夫, “高强度콘크리트

の収縮に及ぼす供試體寸法の影響,” 콘크리트工年次論文集, Vol. 22, No. 2, 2000, pp. 613~618.

2. 堀田 知明, 名和 豊春, “セメント系材料の自己縮にする究,” 日本建築構造系論文集, 第542, 2001, pp. 9~15.
3. Loukili, A., Chopin, D., Khelidj, A., and Touzo, J. L., “A New Approach to Determine Autogenous Shrinkage of Mortar at an Early Age Considering Temperature History,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp. 915~922.
4. Tazawa, E., Matuoka, Y., Miyazawa, S., and Okamoto, S., “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.
5. 今本 啓一, 大谷 博, “超高强度콘크리트の自己縮性狀にする究,” 콘크리트工年次論文集, Vol. 18, No. 1, 1996, pp. 225~230.
6. 高橋 俊之, 中田 英喜, 吉田 孝三郎, 後藤 誠史, “セメントの自己縮測定置の試作,” 콘크리트工年次論文集, Vol. 18, No. 1, 1996, pp. 621~626.
7. MIDAS GEN, (주)마이다스아이티.

요 약 본 연구에서는 초기재령 고강도콘크리트의 수화발열 및 자기수축 특성의 상관관계를 분석하기 위해 수화발열 및 자기수축의 초기특성을 대표할 수 있는 계수로서 수화발열상승구간 및 자기수축증가구간의 직선 기울기인 수화발열상승속도 및 자기수축증가속도를 설정하였으며, 이 두 계수는 통계적 수법을 활용하여 일정 범위의 결정계수를 갖는 회귀계수로 산정하였다. 또한 수화발열 특성과 자기수축 특성을 동시에 평가하기 위한 시험 방법으로서 기존의 간이단열온도상승시험을 보완한 시험 방법을 제안하였으며, 본 시험 방법을 통해 실험을 실시하여 실측데이터를 분석한 결과, 고강도콘크리트의 수화발열 및 자기수축에 대한 초기재령 특성을 수치적으로 나타내는 것이 가능하였으며 자기수축을 수화발열 특성을 나타내는 계수의 함수식으로 제시하는 것이 가능하였다.

핵심용어 : 초기재령, 고강도콘크리트, 수화열, 자기수축, 회귀분석