Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 21, No. 4, pp. 481~488, August, 2009

시험체 크기 및 수화지연 효과에 따른 초기재령 수화발열 및 자기수축 특성 분석

김규용[1] · 구경모[1] · 이형준[1] · 이의배[1]*

[1]충남대학교 건축공학과

The Analysis of Early Age Properties of Hydration Heat and Autogenous Shrinkage according to Specimen Size and Retardation of Hydration

Gyu-Yong Kim,[1] Kyung-Mo Koo,[1] Hyoung-Jun Lee,[1] and Eui-Bae Lee[1]*

[1]Dept. of Architectural Engineering, College of Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT It has been reported that the magnitude and the development rate of autogenous shrinkage of cement paste, mortar and concrete were affected by history and magnitude of inner temperature at an early age. But it was not enough to explain the relation between hydration heat and autogenous shrinkage at an early age, because there was no certain analysis on histories of hydration heat and autogenous shrinkage in previous studies. In our prior study, to understand the relationship between hydration heat and autogenous shrinkage of concrete at an early age, the analysis method for histories of hydration heat and autogenous shrinkage was suggested. Based on this method, early age properties of hydration heat and autogenous shrinkage of high strength concrete with different sizes and hydration retardation were investigated in this study. As a result of the study, properties of hydration temperature and autogenous shrinkage were different according to specimen size and hydration retardation. However, there was a close relationship between hydration temperature and autogenous shrinkage at an early age, especially between HHV and ASV as linear slopes of the sections where hydration temperature and autogenous shrinkage increase rapidly; the higher HHV, the higher ASV and the greater ultimate autogenous shrinkage. And it was found that, among the setting time, bend point and temperature increasing point, they were close relationship each other on cement hydration process.

Keywords : early age, hydration heat, autogenous shrinkage, specimen size, retardation of hydration

1. 서 론

수화열 및 자기수축은 고강도콘크리트의 기본적인 초기재령 특성이며, 동일한 수화반응에 의해 발생되는 현상으로서, 서로 밀접한 관계가 존재한다. 또한 콘크리트 부재가 매스화될 경우 수화열은 내부온도를 상승시켜 수화반응을 촉진시키게 되고, 결국 자기수축에도 영향을 미치게 된다.

기존 연구에 의하면, 시멘트페이스트, 모르타르 및 콘크리트에서 발생하는 자기수축의 크기 및 발현율은 초기재령시 내부온도의 이력과 크기에 의해 영향을 받는다고 보고된 바 있다.[1-4] 또한 물시멘트비가 낮은 고강도콘크리트의 경우 타설 후 수일 이내에 자기수축의 대부분이 발현되는 것을 고려하면,[5,6] 초기재령 수화열과 자기수축의 특성 및 관계는 고강도콘크리트의 자기수축을 이해하는데 있어 매우 중요할 것으로 판단된다.

그러나 기존연구의 경우 초기재령 수화열의 개략적인 이력형태와 값으로 자기수축과의 관계를 평가하였기 때문에 초기재령의 수화열과 자기수축의 관계를 정량적으로 제시하는 데에는 한계가 있다. 만약 초기재령 수화열 및 자기수축의 거동특성에 대한 구체적인 분석방법이 제시된다면, 수화열 및 자기수축 각각에 대한 초기특성은 물론 두 특성에 대한 정량적인 관계를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 선행연구[7]에서는 초기재령 수화온도 및 자기수축의 거동특성을 수치적으로 분석할 수 있는 방안을 제시하였다. 이 논문에서는 선행연구를 기초로 하여 시험체 크기 및 수화지연 효과에 따른 고강도콘크리트의 초기재령 수화열과 자기수축의 거동특성 및 상관관계를 분석하였다. 또한 자기수축에 의한 균열평가시 유효자기수축의 기준이 되는 응결시간[5]과 수화온도 및 자기수축의 이력과의 관계도 검토하였다.

*Corresponding author E-mail : mir2468@cnu.ac.kr
Received February 9, 2009, Revised March 12, 2009
Accepted April 17, 2009
ⓒ2009 by Korea Concrete Institute

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 계획

Table 1은 본 연구를 위해 제작된 시험체의 조건을 나타낸 것이다. 초기재령 고강도콘크리트의 수화열 및 자기수축에 미치는 시험체 크기의 영향을 검토하기 위해 100 × 100 × 400 mm 시험체($100^2 \times 400$)를 기준으로 시험체의 두께와 길이를 1.5배 증가시킨 150 × 150 × 600 mm 시험체($150^2 \times 600$)와 고강도콘크리트의 매스부재를 고려한 300 × 300 × 300 mm 간이단열시험체($300^2 \times 300$)를 제작하였다. 또한 수화지연 효과에 따른 영향을 검토하기 위해 응결지연제를 0.3% 혼입한 300 × 300 × 300 mm 간이단열시험체($300^2 \times 300$R)도 제작하였다.

한편 응결시간과 수화온도 및 자기수축 이력과의 관계를 검토하기 위해 150 × 150 × 600 mm 모르타르 시험체를 제작하였으며, 이 시험체를 대상으로 수화온도, 자기수축 및 응결시간을 측정하였다. 또한 동일크기의 시멘트페이스트 시험체를 제작하였으며, 초결시간 및 종결시간, 비빔 후 1일되는 시점에 시료를 채취하여 XRD분석을 실시함으로써, 시멘트 성분 및 수화물의 변화를 검토하였다.

2.2 사용 재료 및 배합

Table 2는 이 연구에 사용된 콘크리트 재료의 종류 및 특성을 나타낸 것이며, Table 3은 콘크리트의 배합을 나타낸 것이다. 이 연구에서 설정한 고강도콘크리트(28일 강도 80 MPa)의 배합으로는 물시멘트비 20%와 단위시멘트량 800 kg/m^{3}을 설정하였다. 또한 수화지연 효과에 따른 초기재령 수화발열 및 자기수축 특성 평가를 위한 시험체의 배합은 기본배합에서 응결지연제를 시멘트 질량대비 0.3%를 혼입하였다.

Table 1 Conditions of specimen

	100^2×400	150^2×600	300^2×300	300^2×300R
Size (mm)	100×100×400	150×150×600	300×300×300	
Curing	In the air (20°C)		Semi-adiabatic	
Addition of retarder	-			0.3%
Type	Concrete	Concrete mortar[1] paste[2]	Concrete	

Note [1]Specimen for setting time test
[2]Specimen for XRD analysis

Table 2 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
Retarder	Gluconic acid type
Admixture	Polycarboxylic acid type

2.3 시험체 제작 및 시험 방법

수화온도 및 자기수축 측정을 위한 시험체의 제작 및 시험 모식도는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 300^2 × 300 시험체는 두께 100 mm의 발포폴리스틸렌을 이용하여 간이단열처리하였으며, 거푸집 탈형없이 지속적으로 내부온도와 자기수축을 측정하였다. 100^2 × 400 시험체와 150^2 × 600

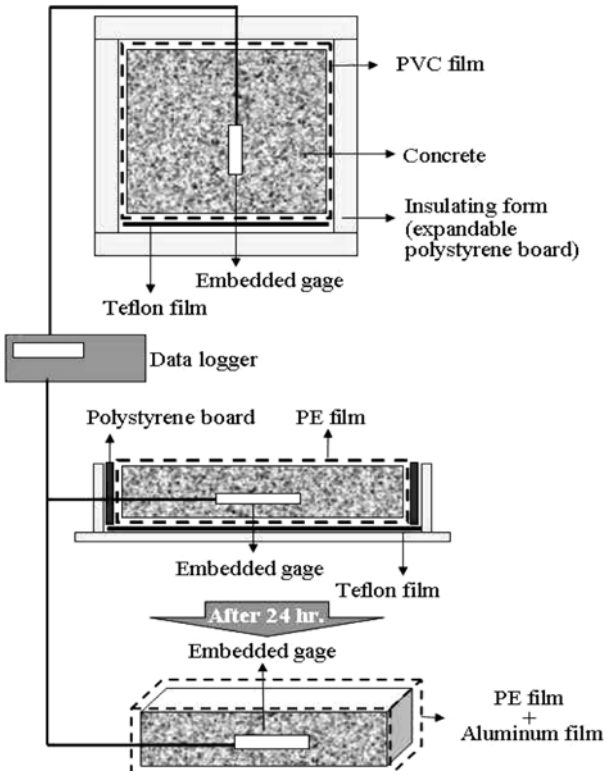

Fig. 1 Schematic of test method for hydration temperature and autogenous shrinkage

Table 3 Mixture proportion

W/C (%)	Slump-flow (mm)	S/a (%)	Unit weight (kg/m^3)				Retarder (C×w%)	HRWR (C×w%)
			W	C	S	G		
20	650±50	47	160	800	664	781	-	1.0
							0.3	1.1

시험체는 비빔 후 24시간 경과한 후에 몰드를 탈형하였으며, PE 필름과 알루미늄접착테이프를 사용하여 밀봉하였다. 시험체의 내부온도와 자기수축은 써머커플과 매립형 게이지를 사용하여 측정하였으며, 측정시간은 10분 간격으로 설정하였다.

한편 $100^2 \times 400$ 시험체와 $150^2 \times 600$ 시험체의 경우 준등온이라는 가정하에 열팽창을 배제하고 자기수축을 측정하는 것이 가능하다.[8,9] 그러나 $300^2 \times 300$ 시험체의 경우 내부온도가 높게 상승하기 때문에 열에 의한 팽창을 고려해야 한다. 이에 다음의 식 (1)을 사용하여 자기수축에 대한 열팽창보정을 실시하였다.

$$\varepsilon_f = \varepsilon_i \times C_\varepsilon + (C_\beta - \gamma) \times \Delta_t \quad (1)$$

여기서, ε_f : 열팽창을 제거한 자기수축 ($\times 10^{-6}$)
ε_i : 초기 변형 ($\times 10^{-6}$)
C_ε : 게이지의 교정계수 ($\times 10^{-6}/1\times 10^{-6}$)
C_β : 게이지의 온도보정 계수 ($\times 10^{-6}/^oC$)
γ : 시험체의 열팽창계수 ($\times 10^{-6}/^oC$)
Δt : 온도변화 (^oC)

콘크리트의 열팽창계수(TEC, γ)는 각 배합 및 골재 특성에 따라 달라지기 때문에 실측값을 대입해야 한다. 특히, 초기재령 콘크리트의 경우 수화반응이 진행되고 있는 상태이기 때문에 그 값은 시간에 따라 변한다.

이 연구에서는 콘크리트의 온도를 일시적으로 급상승시키면 온도에 의한 변형을 구할 수 있다고 가정한 후 초기재령 열팽창계수를 도출한 기존연구[3]를 기초로, Fig. 2와 같이 써머커플과 매립형 게이지를 매입한 Φ 100 × 200 mm 시험체을 제작한 후, 수조 안의 물의 온도를 10분간 약 15°C 상승시켜 타설 후 시간에 따른 초기재령 콘크리트의 열팽창계수를 도출하였다.

2.4 초기재령 수화열 및 자기수축 거동특성 분석 방법

초기재령 수화온도와 자기수축의 이력에 있어 가장 큰 비중을 차지하는 부분은 수화온도 및 자기수축이 급속히 상승하는 구간(수화발열상승구간 및 자기수축증가구간)이다. 선행연구에서는 Fig. 3과 같이 두 구간과 특성계수에 대한 정의 및 산정방법을 제시하였다.[7]

이 논문에서도 선행연구를 기초로 초기재령 수화온도와 자기수축 이력의 거동특성을 분석하여 각각의 특성 및 관계를 검토하였다.

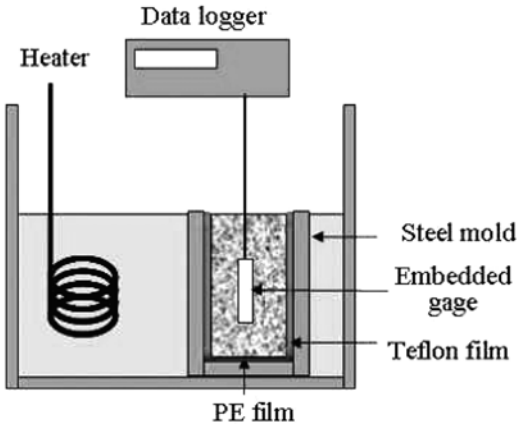

Fig. 2 Schematic of test method for thermal expansion coefficient of concrete

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 열팽창계수

Fig. 4는 초기재령 콘크리트의 열팽창계수 측정 결과

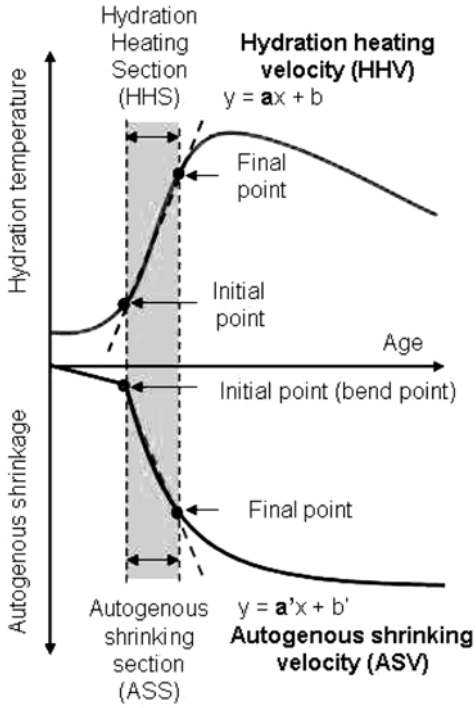

Fig. 3 Schematic of analysis method for histories of hydration heat and autogenous shrinkage

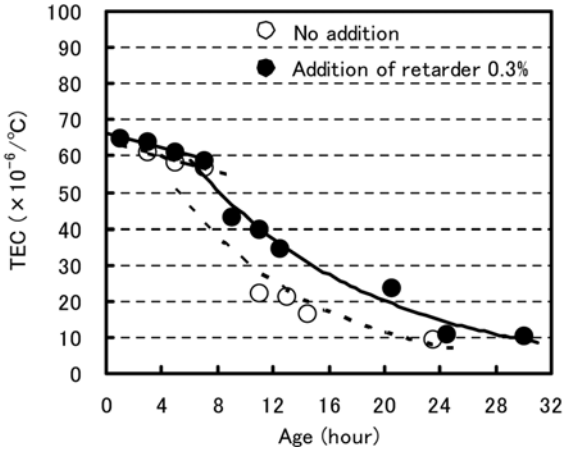

Fig. 4 Measurement results of TEC

를 나타낸 것으로, 초기재령시 열팽창계수는 일정치 않은 형태를 나타내었다.[3)]

지연제를 혼입하지 않은 콘크리트의 열팽창계수는 시험체 제작 후 서서히 저하하다가 약 7시간부터는 급속히 저하하여 약 24시간 이후부터는 9.5×10^{-6}/°C로 수렴하는 형태를 보였다. 지연제를 혼입한 콘크리트도 혼입하지 않은 경우와 유사한 경향을 보였으며, 약 30시간 이후부터는 약 10.2×10^{-6}/°C로 수렴하는 것으로 나타났다.

이 연구에서는 실측값에 의해 유추된 추세식을 활용하여 경과시간에 따른 열팽창계수를 산출하였으며, 그 결과는 Table 4에 나타낸 바와 같다. 또한 산출된 열팽창계수를 활용하여 측정된 자기수축에 대해 열팽창보정을 실시하였다.

3.2 열팽창 보정된 자기수축 및 수화온도 이력

Fig. 5는 열팽창 보정을 실시한 자기수축과 수화온도의 이력을 나타낸 것이다. 또한 일본콘크리트공학협회 자기수축위원회에서는 결합재의 종류, 물결합재비 및 응결시간 등을 고려한 자기수축변형 예측식을 제안하였으며,[5)] 이 연구의 콘크리트 배합을 적용한 예측식 결과도 Fig. 5에 나타내었다.

$100^2 \times 400$ 시험체의 최고수화온도 및 재령 91일 자기수축은 각각 32°C, -308×10^{-6}였으며, $150^2 \times 600$ 시험체는 각각 34°C, -336×10^{-6}로 나타나, $100^2 \times 400$ 시험체 및 $150^2 \times 600$ 시험체의 수화발열 및 자기수축 특성은 비교적 유사하게 나타났다. 반면 $300^2 \times 300$ 시험체는 $100^2 \times 400$ 시험체에 비해 수화온도는 2.3배인 73°C, 자기수축은 약 7배인 -2260×10^{-6}로 나타나, 시험체가 매스화되어 내부온도가 증가되면 자기수축도 증가하는 경향을 보였다. 지연제를 혼입한 시험체는 혼입하지 않은 시험체

Table 4 Calculation results of TEC

Mixture	Time	TEC ($\times 10^{-6}$/°C)
No. addition	Before 7 hours	$y = -1.06x + 64.1$
	7 hours ~ 24 hours	$y = 83.23e^{-0.099x}$
	After 24 hours	9.5
Addition of retarder 0.3%	Before 8 hours	$y = -1.03x + 66.4$
	8 hours ~ 30 hours	$y = 93.55e^{-0.0768x}$
	After 30 hours	10.2

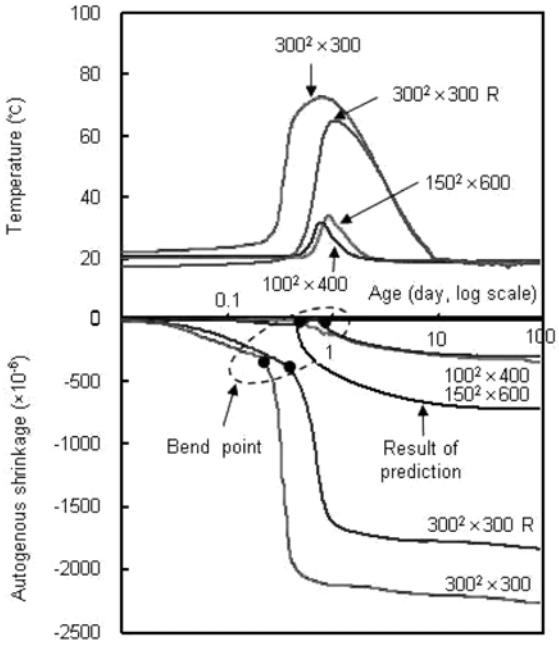

Fig. 5 Histories of hydration temperature and autogenous shrinkage

에 비해 최고 수화온도는 약 7% 감소한 67.7°C, 재령 91일 자기수축은 약 15% 감소한 $-1{,}830 \times 10^{-6}$로 나타났다. 예측식에 의한 자기수축도 초결 이후 급속히 증가한 후 종국값으로 수렴하는 형태를 보였으며 재령 91일 자기수축은 -727×10^{-6}로 예측되어, $100^2 \times 400$ 시험체 실측값의 약 2.4배 높게 나타났다.

한편 모든 자기수축 이력에서 시험체 제작 후 약 5~17시간 이내에 변곡점이 나타났으며, 이 변곡점이 나타나는 시각과 수화온도가 상승하는 시각은 유사하였다. 특히, $300^2 \times 300$ 시험체의 경우 수화온도와 자기수축이 급속히 증가하는 이력의 형태도 매우 유사한 것으로 나타나, 초기 수화온도와 자기수축 사이에는 높은 상관성이 존재할 것으로 판단되었다.

3.3 초기재령 수화발열 및 자기수축 거동특성

3.3.1 수화발열 특성

Table 5는 수화온도가 급속이 증가하는 수화발열상승구간의 거동특성을 분석한 결과를 나타낸 것이며, Fig. 6은 수화발열 상승구간의 수화온도 상승량과 최대 수화온

Table 5 Analysis results of hydration heating section (HHS)

	Hydration heating section							Maximum temperature rise (°C)
	Initial point		Last point		Regression equation	HHV (°C/hr)	Length of time (hr)	
	Time (hr)	Temperature (°C)	Time (hr)	Temperature (°C)				
$100^2 \times 400$	11.5	21.3	16.7	29.7	$Y = 1.91 + 1.59X$	1.59	5.2	10.7
$150^2 \times 600$	13.0	20.7	19.5	31.1	$Y = -2.07 + 1.63X$	1.63	6.5	13.7
$300^2 \times 300$	5.5	25.8	9.7	62.5	$Y = -34.7 + 9.90X$	9.90	4.17	51.0
$300^2 \times 300$ R	8.7	25.0	13.3	58.8	$Y = -50.2 + 8.01X$	8.01	4.67	47.1

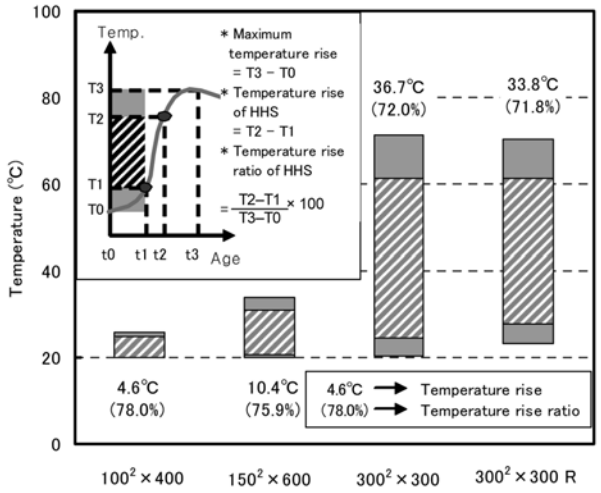

Fig. 6 Hydration temperature rise of HHS and rise ratio to maximum temperature rise

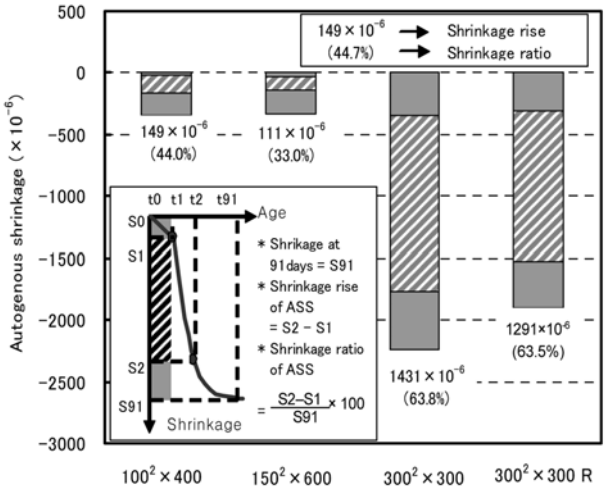

Fig. 7 Autogenous shrikage rise of ASS and rise ratio to autogenous shrikage at 91 days

도상승량에 대한 구간의 온도상승률을 나타낸 것이다.

이 연구의 범위에서 수화온도상승률은 시험체의 크기와 지연제의 혼입 여부에 따라 다소 차이는 있으나, 전반적으로 70~80% 수준으로 나타났다. 최대 수화온도상승량과 수화발열상승구간의 수화온도상승량은 시험체가 매스화될수록 증가하는 것으로 나타났으며, 지연제를 혼입할 경우에는 그 값이 감소하는 것으로 나타났다.

수화발열 상승구간의 기울기인 수화발 열상승속도의 경우 $100^2 \times 400$ 시험체 및 $150^2 \times 600$ 시험체는 각각 1.59°C/hr 및 1.63°C/hr로 산정되었다. 반면 $300^2 \times 300$ 시험체는 $100^2 \times 400$ 시험체에 비해 약 6배인 9.90°C/hr로 산정되어, 시험체가 매스화될수록 수화발열 상승속도도 증가하는 경향을 보였으며, 지연제를 혼입한 경우에는 약 50% 감소한 4.73°C/hr로 나타났다.

3.3.2 자기수축 특성

Table 6은 변곡점 이후 자기수축이 급속히 증가하는 자기수축 증가구간의 거동특성을 분석한 결과를 나타낸 것이며, Fig. 7은 자기수축 증가구간의 자기수축량 및 재령 91일 자기수축에 대한 구간의 수축률을 나타낸 것이다.

구간 수축률의 경우 $300^2 \times 300$ 시험체는 약 64%의 수축률을 보이고 있는 반면 $100^2 \times 400$ 시험체 및 $150^2 \times 600$ 시험체는 $300^2 \times 300$ 시험체에 비해 낮은 33% 및 44%의 수축률을 보이고 있다. 또한 시험체가 매스화 될수록 재령 91일 자기수축과 자기수축증가구간의 수축량은 증가하는 경향을 보였다. 지연제를 혼입한 콘크리트의 구간 수축률은 63.5%로 나타났으며, 재령 91일 자기수축 및 구간의 자기수축 증가량은 혼입하지 않은 경우에 비해 감소하는 것으로 나타났다.

자기수축 속도의 경우 $100^2 \times 400$ 시험체 및 $150^2 \times 600$ 시험체는 각각 -9.4×10^{-6}/hr 및 -9.5×10^{-6}/hr로 유사하였다. $300^2 \times 300$ 시험체는 $100^2 \times 400$ 시험체에 비해 약 43배 증가한 -405.0×10^{-6}/hr로 산정되어, 시험체가 매스화 될수록 자기수축 속도는 증가하는 경향을 보였으며, 지연제를 혼입한 시험체는 약 30% 감소한 -283×10^{-6}/hr로 산정되었다.

3.4 수화발열 특성과 자기수축 특성의 상관관계

Fig. 8은 수화발열 상승구간과 자기수축 증가구간의 시간을 나타낸 것이다. $100^2 \times 400$ 시험체 및 $150^2 \times 600$ 시험체의경우 수화발열 상승구간과 자기수축 증가구간의 시점 시간은 다소 상이하였으며, 자기수축 증가구간이 수화발열 상승구간에 비해 장기적으로 나타났다. 반면 $300^2 \times 300$ 시험체의 경우 지연제의 혼합여부에 상관없이 수화발열 상승구간과 자기수축 증가구간의 시간은 매우 유사하였다.

Fig. 9는 자기수축 속도와 재령 91일 자기수축의 관계

Table 6 Analysis results of autogenous shrinking section (ASS)

	Autogenous shrinking section							Shrinkage at 91 days ($\times 10^{-6}$)
	Initial point		Last point		Regression equation	ASV ($\times 10^{-6}$/hr)	Length of time (hr)	
	Time (hr)	Shrinkage ($\times 10^{-6}$)	Time (hr)	Shrinkage ($\times 10^{-6}$)				
$100^2 \times 400$	16.7	−17	31.8	−166	Y = 117 − 9.40X	− 9.4	15.2	− 308
$150^2 \times 600$	10.5	−25	23.2	−136	Y= 70.3 − 9.54X	− 9.5	12.7	− 336
$300^2 \times 300$	5.3	−343	9.2	−1774	Y= 2024 − 405X	− 405.0	3.8	− 2244
$300^2 \times 300$ R	8.5	−314	13.2	−1523	Y = 2275 − 283X	− 283.0	4.7	− 1906

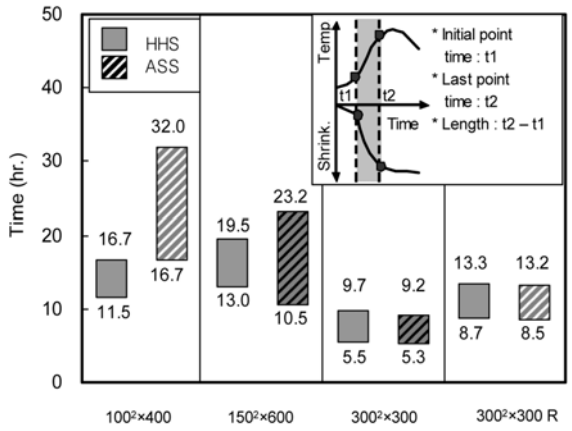

Fig. 8 Comparison of times of HHS and ASS

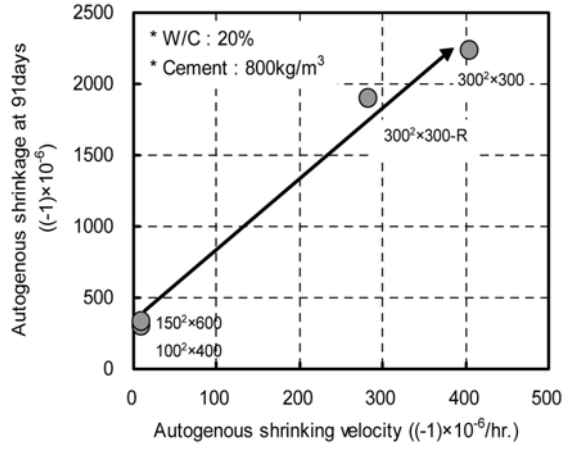

Fig. 9 Relation between ASV and autogenous shrinkage at 91 days

를 나타낸 것으로, 이 연구의 범위에서는 자기수축 속도가 증가할수록 재령 91일 자기수축도 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 Fig. 10은 수화발열 상승속도와 자기수축 속도의 관계를 나타낸 것으로 수화발열상승속도가 증가할수록 자기수축 속도가 증가하는 경향이 매우 뚜렷하게 나타나고 있다.

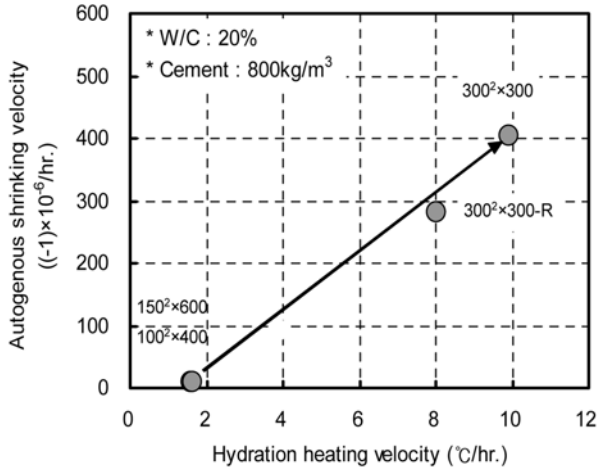

Fig. 10 Relation between HHV and ASV

Figs. 9와 10의 결과를 종합해 보면, 초기재령 콘크리트의 수화발열 상승속도가 증가하면 자기수축 속도는 증가하며, 이와 더불어 재령 91일 자기수축도 증가한다라는 경향의 유추가 가능하다. 즉 종국적인 자기수축은 초기재령 수화발열 상승속도에 의해 영향을 받을 수 있을 것으로 판단되며, 고강도콘크리트의 경우 초기재령의 수화발열특성을 제어함으로써 종국적인 자기수축의 제어가 가능할 것으로 사료된다.

3.5 응결시간과 수화온도 및 자기수축 이력의 상관관계

Fig. 11은 $150^2 \times 600$ 모르타르 시험체의 수화온도, 자기수축 및 응결시간의 측정 결과를 나타낸 것으로, 수화온도가 상승하는 시점과 자기수축이 급속히 증가하는 시점인 변곡점이 초결과 종결시간 사이에 위치하고 있다.

본 연구에서는 수화반응에 의한 시멘트의 성분 및 수화물의 변화를 정밀하게 분석하기 위해 비빔 전 시멘트, 초결시, 종결시, 1일후의 시료를 채취하여 XRD분석을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 12에 나타낸 바와 같다.

비빔전 시멘트에서는 석고의 피크가 높게 나타났다. 그러나 초결시에는 석고의 피크가 감소하고 에트린자이트의 생성이 관찰되었으며, 종결시에는 석고가 관찰되지 않고 에트린자이트의 피크가 높게 나타났다.

즉, 비빔 후 석고와 수화물이 반응하여 에트린자이트가 생성되고 이로 인해 팽창이 야기된다. 그리고 초결 및 종결시간 사이에 석고가 모두 소비되면 에트린자이트가 형태변형을 일으키게 되며, 수화반응이 활성화되어 수

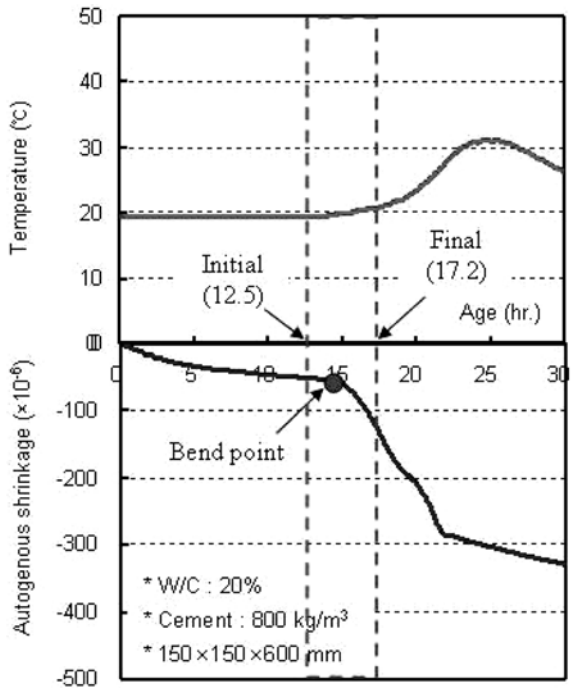

Fig. 11 Measurement results of hydration temperature, autogenous shrinkage and setting time

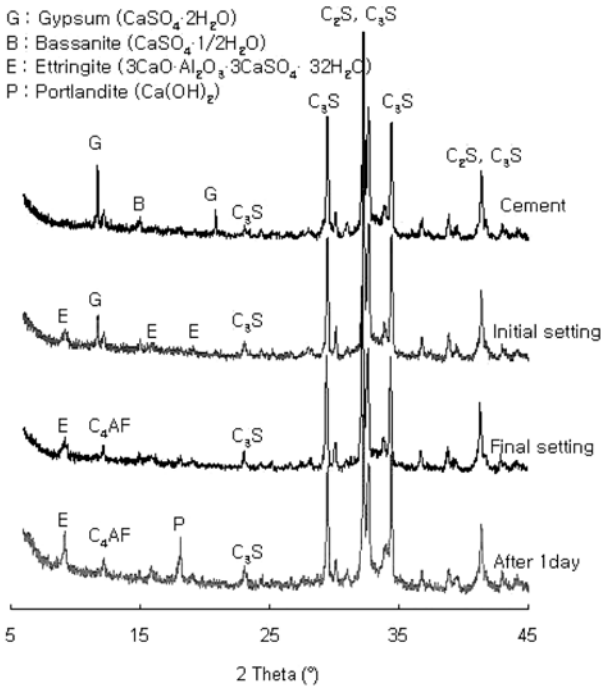

Fig. 12 XRD analysis results

화온도 및 자기수축이 급속히 증가하게 된다. 그 결과 자기수축 이력곡선에서 변곡점 현상이 나타나며, 자기수축과 수화온도가 상승하는 시점이 유사하게 나타난다.

한편, 최근 일본콘크리트공학협회에서는 자기수축의 기점을 응결의 초결로 정의하고 있다.[5] 이는 자기수축을 콘크리트의 균열요인으로서 평가하기 위해서는 유동성을 동반하는 굳지않은 콘크리트의 체적변화를 제거해야 하며, 그 판단기준을 응결시간으로 하고 있다. 몇몇 연구자들은 콘크리트의 액성과 소성의 경계를 보다 정확하게 판별하기 위해 초음파속도를 응용한 방법도 제시하고 있다.[10,11]

이 연구의 분석 결과를 종합하여 본다면, 굳지않은 콘크리트의 액성상태가 소성상태로 변하는 시점, 응결시간, 자기수축의 변곡점 및 수화온도 상승시점은 시멘트의 수화반응 과정에 있어 서로 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

이 논문에서는 수화온도 및 자기수축 이력특성 분석방법을 제시한 선행연구를 기초로, 시험체 크기 및 수화지연 효과에 따른 고강도콘크리트의 수화발열 및 자기수축의 초기재령 거동특성을 분석하고, 서로의 관계를 검토하였다. 또한 응결시간과 초기 수화온도와 자기수축 이력과의 관계를 검토하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 이 연구 범위에서 초기재령 콘크리트의 열팽창계수는 타설 후 서서히 감소하다가 어느 시점을 기준으로 급속히 저하하여 일정값으로 수렴하는 형태를 나타내었다.
2) 수화온도 및 자기수축 이력곡선에서 변곡점이 나타나는 시점과 온도가 상승하는 시점의 시각은 유사하였으며, 특히 300 × 300 × 300 mm 간이단열 시험체의 경우 이력의 형태 또한 매우 유사하였다.
3) 수화발열 상승구간의 특성분석 결과, 구간의 수화온도상승량은 전반적으로 70~80% 범위로 나타났다. 또한 시험체가 매스화될수록 구간의 수화온도상승량 및 수화발열 상승속도는 증가하는 경향을 보였으며, 지연제를 사용한 경우 그 값은 감소하였다.
4) 자기수축증 가구간의 특성분석 결과, 시험체가 매스화될수록 구간의 수축률, 수축증가량 및 자기수축속도는 증가하는 경향을 보였으며, 지연제를 사용한 경우 그 값은 감소하는 것으로 나타났다.
5) 초기재령 콘크리트의 수화발열 상승속도가 증가하면 자기수축속도는 증가하며, 이와 더불어 재령 91일 자기수축도 증가하는 경향의 유추가 가능하였다.
6) 자기수축에 의한 콘크리트 균열평가시 유효자기수축의 기준이 되는 응결시간과 변곡점 및 수화온도 상승시점은 시멘트의 수화반응 과정에 있어 서로 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(R01-2007-000-11142-0, 2009-0052476)이며, 연구자의 일부는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받은 바, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bjøntegaard, Ø., Sellevold E. J., and Hammer, T. A., "High Performance Concrete at Early Ages: Selfgenerated Stresses Due to Autogenous Shrinkage and Temperature," *In the Int. Semina : Self-Desiccation and its Importance in Concrete Technology*, Lund, Sweden, 1997, pp. 1~7.
2. 堀田 知明, 名和 豊春, "セメント一系材料の自己収縮に関する研究," 日本建築学会構造系論文集, 542号, 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, No. 6, 2000, pp. 915~922.
4. Shima, T., Matsuda, T., Koide, T., Kawakami, H., Suzuki, Y., and Nishimoto, Y., "Autogenous Shrinkage Characteristic of Ultra High-Strength Concrete Cured under High Temperature (Part1. Experimental Result and Shrinkage Decrease Effect by Expansive Admixture)," *Proceeding of the Architechtural Research Meetings of AIJ*, 2006, pp. 69~70.
5. コンクリート工学協会, "自己収縮研究委員会報告書," 1996, pp. 114~122.
6. Principigallo, A., Lura, P., Breugel, K. V., and Levita, G.,

"Early Development of Properties in a Cement Paste: A Numerical and Experimental Study," *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 7, 2003, pp. 1013~1020.
7. 김규용, 이의배, 구경모, 최형길, "초기재령 고강도콘크리트의 수화발열과 자기수축 특성의 상관관계에 관한 기초적 연구," 콘크리트학회 논문집, 20권, 5호, 2008, pp. 593~600.
8. Atcin. P. C., "Autogenous Shrinkage Measurement, Autogenous Shrinkage of Concrete," *Ed. E. Tazawa, E&FN Spon*, 1999, pp. 257~268.
9. 이회근, 임준영, 이광명, 김병기, "플라이애쉬를 함유한 고성능 콘크리트의 자기수축," 콘크리트학회 논문집, 14권, 2호, 2002, pp. 249~256.
10. 이광명, 권기현, 이회근, 이승훈, 김규용, "고로슬래그를 함유한 콘크리트의 자기수축 특성," 콘크리트학회 논문집, 16권, 5호, 2004, pp. 621~626.
11. Lee, H. K., Lee, K. M., Kim, Y. H., Yim, H., and Bae, D. B., "Ultrasonic In Situ Monitoring of Setting Process of High-Performance Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 4, 2004, pp. 631~640.

요 약 시멘트페이스트, 모르타르 및 콘크리트의 자기수축의 크기 및 발현율은 초기재령 내부온도의 이력과 크기에 의해 영향을 받는다고 보고된 바 있으나, 초기재령 수화열과 자기수축에 대한 구체적인 관계분석은 아직 미흡한 실정이다. 이 연구에서는 초기재령 수화온도 및 자기수축의 이력특성에 대한 분석방법을 제시한 선행연구를 기초로, 시험체 크기 및 수화지연 효과에 따른 고강도콘크리트의 초기재령 수화열과 자기수축의 거동특성 및 상관관계를 분석하였다. 또한 자기수축에 의한 균열평가시 유효자기수축의 기준이 되는 응결시간과 수화온도 및 자기수축의 이력과의 관계도 검토하였다. 그 결과, 시험체가 매스화될수록 초기재령 수화발열 상승구간의 수화온도 상승량 및 수화발열 상승속도, 자기수축 증가구간의 자기수축 증가량 및 자기수축 속도는 증가하는 것으로 나타났으며, 지연제를 사용할 경우 그 값은 감소하는 것으로 나타났다. 초기재령 콘크리트의 수화발열 상승속도가 증가하면 자기수축 속도는 증가하며, 이와 더불어 재령 91일 자기수축도 증가하는 것으로 나타나, 종국 자기수축은 초기재령 수화발열상승 속도에 의해 영향을 받을 수 있을 것으로 사료된다. 한편, 콘크리트 균열평가시 유효자기수축의 기준이 되는 응결시간과 변곡점 및 수화온도 상승시점은 시멘트의 수화반응 과정에 있어 서로 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 초기재령, 수화열, 자기수축, 시험체 크기, 수화지연