

초기수화발열이 고강도콘크리트의 자기수축특성에 미치는 영향

Effect of Hydration Heat Evolution on Autogenous Shrinkage of High Strength Concrete

정 해 문* 渡 辺 博 志** 河 野 廣 隆***
Cheong, Hai-moon Watanabe, Hiroshi Kawano, Hirotaka

ABSTRACT

The shrinkage of high strength/high performance concrete is very important property for the good working of a structure since it very often generates early age cracking due to thermal and autogenous shrinkage. Autogenous shrinkage occurs as a result of internal moisture depletion due to hydration and temperature-induced effects. The level of autogenous shrinkage occurring due to hydration also depends on temperature history at very early age. It is necessary that effect of temperature on autogenous shrinkage is investigated since the stress generated due to autogenous shrinkage is quantified. In this study, Effect of hydration heat evolution on autogenous shrinkage of high strength concretes with W/C=25~40% was investigated.

1. 서 론

고강도 콘크리트는 부재 단면적 축소 및 경량화, 역학적인 고성능화가 가능하고, 물/시멘트비 저감에 따른 치밀한 경화체 조직으로 인해 구조물의 내구성이 향상되는 등의 장점을 지니고 있으나, 단위시멘트량이 높기 때문에 시멘트 수화발열로 인한 온도응력 및 자기수축에 의한 응력발생으로 인해 초기재령에서 균열발생의 위험성이 높아, 이와 관련하여 최근 연구가 활발하게 진행되고 있다.

자기수축에 관한 연구¹⁾는 1990년대 이후로 일본을 비롯하여 유럽 등지에 많이 행해져, 재료, 배합 등이 자기수축 특성에 미치는 영향에 대해서 많은 데이터 축적이 이루어진 상태이다. 고강도 콘크리트는 구조물의 부재레벨에서 초기 재령에 수화열에 의한 고온의 온도 상승을 보이게 되고, 동일한 초기 재령에서 자기수축도 무시하지 못할 정도로 많이 발생되므로 초기재령 균열발생 방지를 위해서는 자기수축과 초기수화발열의 상관관계를 명확하게 할 필요가 있다. 이전의 몇몇의 연구결과들을 정리해 보면 자기수축의 온도의존성은 있는 것으로 보이나, 온도와의 상관성을 정량화하기 위해, 시멘트의 수화반응의 온도의존성을 나타내 주는 성숙도(Maturity) 개념을 적용하여 성숙도 함수로 표현가능하다는 보고와 함께, 표현이 불가능하다는 서로 상반되는 보고가 있어 아직도 이에 대한 논의가 계속 진행중이다²⁻⁵⁾.

* 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원

** 일본 독립행정법인 토목연구소 구조물메니지먼트기술팀 주임연구원

*** 일본 독립행정법인 토목연구소 구조물메니지먼트기술팀 팀장

본 연구에서는 물-시멘트비가 25~40% 정도의 고강도콘크리트를 제조하여, 초기수화발열이 자기수축특성에 미치는 영향을 검토하였고, 자기수축의 온도 의존성을 정량화하기 위해 기존의 성숙도 함수로서 적용이 가능한지에 대해서도 고찰하여 보았다.

2. 실험방법

2.1 사용재료 및 콘크리트 배합

시멘트는 보통포틀랜드시멘트(비중 3.15g/cm³, 비표면적 3,210cm²/g), 세골재는 하천사(표건비중 2.62, 흡수율 1.24%, 조립율 2.99), 조골재는 20mm 쇄석(표건비중 2.66, 흡수율 0.84%, 조립율 6.5, 실적율 60.9%)의 것을 사용하였으며, 혼화제로는 폴리카본산계 고성능AE감수제를 사용하였다.

콘크리트 배합은 단위수량을 160kg/m³로, 물/시멘트비를 25, 30, 40%, 조골재 겉보기용적비를 0.59(m³/m³)로 하였고, 슬럼프는 21±2.5cm를 목표로 고성능AE감수제의 양을 조절하여 시방배합을 정하였다(표 1). 고강도 콘크리트는 단위시멘트량이 많고, 혼화제의 사용량이 많아 콘크리트 점도가 일반 강도 콘크리트에 비해 매우 높으므로, 일반적인 믹싱방법으로 콘크리트를 제조하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 믹싱효율을 높이기 위해, 믹싱효율이 높은 강제식 2축믹서(twin shaft 형태)를 이용하였고, 믹싱순서와 시간을 조절하였다. 먼저, 시멘트와 세골재를 넣고 15초간 건비빔을 행하고, 혼화제를 넣은 물을 투입하여 2분간 몰탈을 유동화시킨 다음, 조골재를 투입하여 2분간 더 믹싱을 하였다. 그리고, 통상적으로 고성능AE감수제는 시간이 경과됨에 따라 그 성능을 발휘하므로, 믹싱시간이 짧은 경우 유동성을 맞추기 위해 과도한 사용량을 첨가할 수 있다. 따라서 적정 첨가량을 선정하기 위해, 건비빔을 포함하여 4분 15초간 믹싱이 끝난 후 바로 배출하지 않고, 4분 30초간 그대로 방치시킨 후, 다시 30초간 믹싱한 다음 배출하였다.

표 1 콘크리트 배합

배합명	W/C (%)	조골재겉보기용적비	S/a(%)	SP (C×%)	단위재료량(kg/m ³)				슬럼프 (cm)	공기량 (%)	온도 (°C)
					W	C	S	G			
N25	25	0.59	41.8	2.6	160	640	675	956	22.1	1.6	22.3
N30	30		44.8	1.8	160	533	763	956	22.0	1.6	21.5
N40	40		48.2	2.0	160	400	874	956	20.3	1.4	20.5

2.2 자기수축변형 측정

각 배합의 콘크리트를 20°C에서 제조한 다음, 20°C의 일정한 온도를 유지시킨 시험실에서 항온 양생 시킨 것과, 간이 단열 조건을 만들어 수화열에 의한 고온의 온도이력을 나타내는 양생을 실시하였다. 20°C 일정한 온도 양생 공시체는 10×10×40cm의 크기로 제작하였으며, 고온 이력 양생 공시체는 40×40×40cm의 크기의 블록 형태로 하여, 두께 40cm의 발포스티로폼로 형틀을 만들어 사용하였다. 콘크리트 공시체 제작시 콘크리트 변형이 구속되는 것을 방지하기 위해 바닥면에 테프론테이프를 깔고, 콘크리트와 형틀이 접촉되는 것을 피하기 위해 폴리에스테르제 필름을 형틀 전체면에 부착하였으며, 수분 증발을 막기 위해 플라스틱 슈트로 형틀 전면을 감쌌다.

변형 측정은 매입형 변형계이저를 사용하여 타설시점부터 측정하였으나, 초결시간을 자기수축변형의 출발점으로 산정하였다. 온도변형에 대한 보정은 콘크리트 온도를 계측하여 콘크리트의 열팽창계수를 10×10⁻⁶/°C로 가정하여 보정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

제조한 콘크리트의 응결특성과 경화콘크리트의 28일 압축강도 및 탄성계수 결과를 표 2에 나타내었다. 고성능AE감수제의 첨가량이 N25의 경우 2.6%로 다량이었음에도 불구하고, 응결지연현상은 나타나지 않았다. 28일 압축강도는 물/시멘트비에 따라 650~900kgf/cm² 정도의 고강도를 발현하였다.

표 2 본 연구에 사용한 콘크리트의 물성

배합명	응결시간(시간:분)		28일 압축강도 (kgf/cm ²)	28일 탄성계수 (×10 ⁵ kgf/cm ²)
	초결(Initial Setting)	종결(Final Setting)		
N25	7 : 35	10 : 30	917	4.19
N30	9 : 00	11 : 45	818	4.00
N40	9 : 50	12 : 20	661	3.92

그림 1은 20℃ 일정온도에서 양생한 콘크리트 공시체의 자기수축변형 결과를 나타낸 것이다. 변형특성이 극초기 재령에서 급격하게 변화하므로 횡축의 시간축을 로그스케일로 나타내었다. 본 그래프에서 재령은 표 2에서 나타낸 콘크리트 초결시간을 0으로 하여 나타낸 것으로, 지금까지 알려진 바대로 물/시멘트비가 작을수록 자기수축변형이 컸고, 재령 30일 정도에서 N25는 600×10⁻⁶, N30 공시체가 400×10⁻⁶, N40 공시체가 200×10⁻⁶ 정도의 변형값을 나타내고 있다. 대체로 10일 이내의 초기재령에서 변형이 거의 발현됨을 알 수 있다.

그림 2는 고온이력을 받은 공시체의 온도변형 보정하기 전의 측정된 변형을 나타낸 것으로, 자기수축변형과 온도변형이 함께 나타난 것이다. 그림 3은 블록 공시체의 온도상승 발현 곡선을 나타낸 것이다. N25 공시체가 최고온도 90℃정도, N40 공시체가 70℃ 정도의 온도상승을 보여주고 있다. 그림 2의 자기수축과 온도변형이 포함된 전체변형결과와 그림 3의 온도상승 곡선을 비교해서 보면, 최고온도에 도달하기 이전에 체적변화가 수축변형으로 변환된 것을 보아, 자기수축변형이 온도상승과 더불어 발현되는 것을 알 수 있다.

그림 4는 블록공시체에 대한 자기수축변형을 나타낸 그래프이다. 물/시멘트비가 낮을수록 자기수축변형 최종값이 큰 것을 알 수 있고, 20℃ 일정온도 양생 공시체보다 고온이력을 받은 블록공시체가 재령초기에 자기수축발현이 더 빨리 진행됨을 알 수 있다. 그림 5는 블록공시체의 자기수축변형과 온도상승과의 관계를 나타낸 그림이다. 배합에 따라 정도의 차이는 있지만, 모든 공시체에서 온도가 상승하면서 자기수축이 계속 발현되다가, 최고점에 도달한 이후에 온도가 하강하면서 거의 일정하게 되는 것을 볼 수 있다.

그림 6은 자기수축변형의 변화값인 자기수축변형속도를 나타내었다. 자기수축 측정결과 1일 이내의 극초기재령에서의 변화가 컸으므로, 재령 1일(초결시간을 0로 하였을 때)까지의 결과만 나타내었다. 측정시점으로부터 수축변형이 일어나는 패턴은 두 단계의 피크가 관찰되었는데, 배합과 관계없이 거의 비슷한 시기에 나타났으나, 수축속도량은 물/시멘트비가 작을수록 크게 나타났으며, 고온이력을 받을수록 피크시간이 앞당겨지는 것이 관찰되었다. 자기수축변형이 가장 활발하게 일어나는 시기는 초결 후 0.2일(5시간정도) 전후로서, 물과 접촉 후 12~15시간 정도로, 시멘트 수경성 주화합물이 alite의 수화반응 시기와 거의 일치하는 것으로 나타나, 초기 시멘트 수화반응과 밀접한 관계가 있는 것으로 보인다. 따라서 자기수축변형의 온도에 대한 의존성도 시멘트 수화반응의 온도의존성과 매우 밀접한 관계가 있을 것으로 추론된다. 단열조건에서의 블록공시체의 경우, 시멘트 수화열의 축적에 의해 콘크리트 온도가 상승하므로, 일반적으로 초결시간 이후에 급격한 온도상승을 보인다.

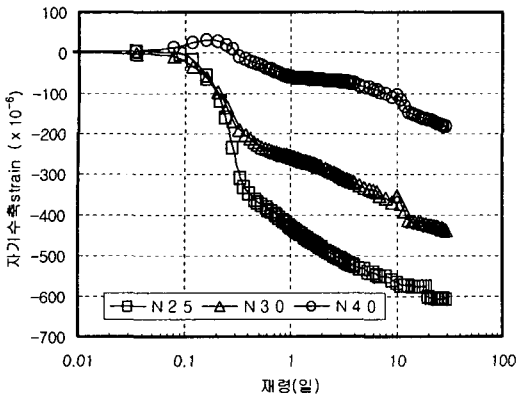


그림 3 20°C 일정한 온도에서 양생한 공시체의 자기수축변형 측정 결과

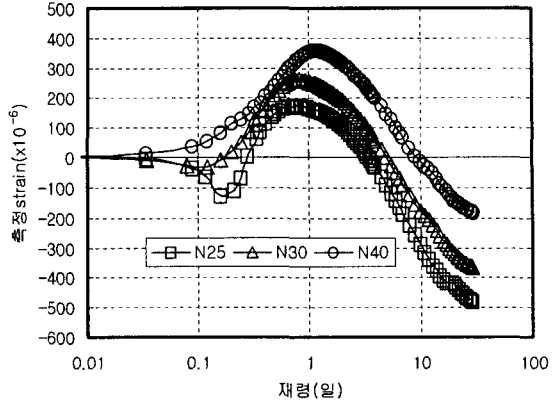


그림 4 블록공시체의 측정된 변형 결과

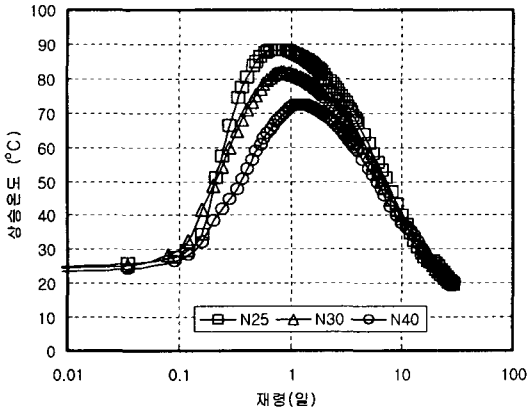


그림 5 블록공시체의 온도 측정 결과

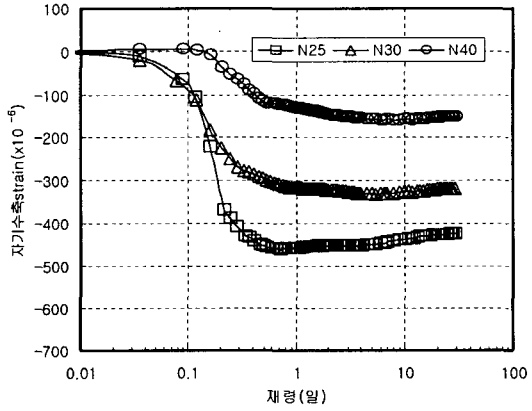


그림 6 블록공시체의 자기수축 변형 결과

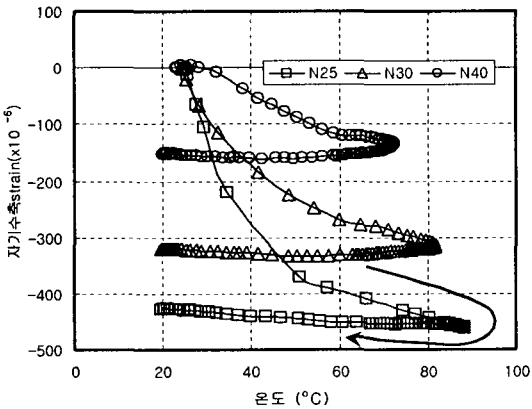
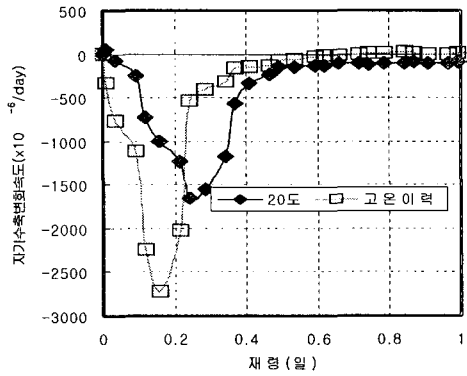


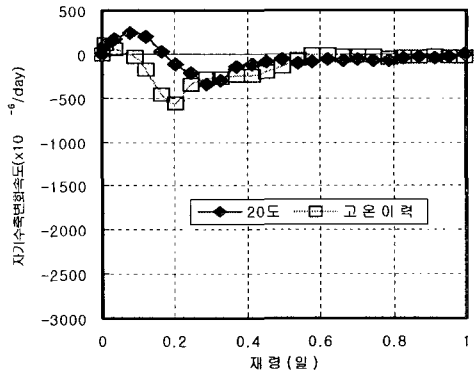
그림 7 고온이력을 받은 블록공시체의 자기수축변형과 온도와의 관계

따라서 블록공시체의 경우, 초결시간 이후의 수화발열에 의한 고온이력이 시멘트 수화반응을 촉진시켜 자기수축변형도 증가되는 것으로 보이며, 재령 30일에서의 최종 변형값은 20°C 일정한 온도 양생 공시체에 비해 다소 작은 것으로 나타났는데, 이는 고온이력에 의해 초기 수화반응이 급격히 일어나, 시멘트 입자 표면에 수화물이 급격하게 다량 생성되어 입자내부로의 반응을 억제하기 때문에 최종수축변형값이 작게 나타난 것으로 보인다.

지금까지의 결과로부터 자기수축변형은 초기재령에서 온도에 따른 의존성이 있는 것으로 나타났다. 이러한 온도의 의존성을 정량적으로 표현

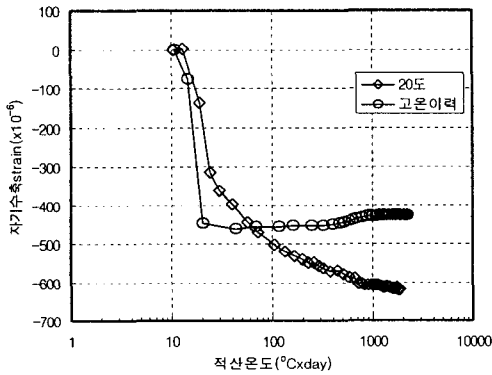


(a) N25

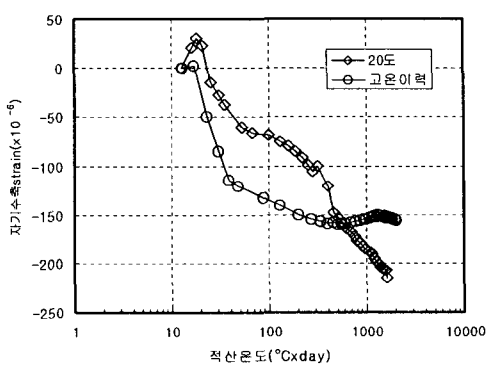


(b) N40

그림 6 재령 1일(초결=0) 이내의 극초기 재령에서의 자기수축변형의 시간에 따른 변화량

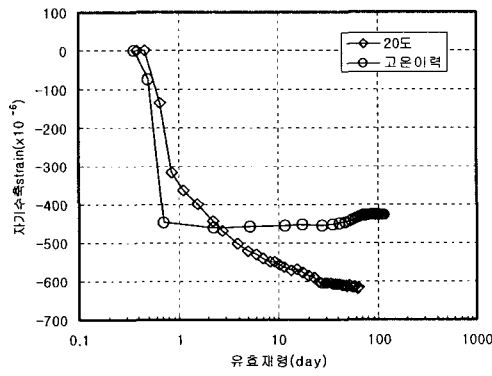


(a) N25

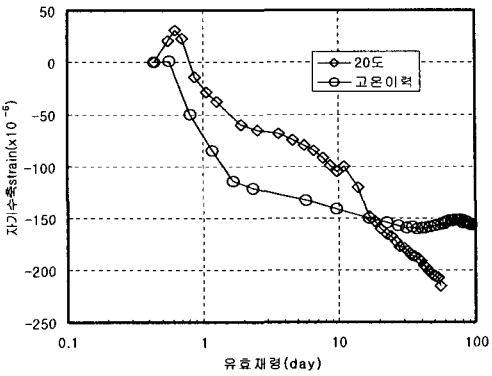


(b) N40

그림 7 자기수축변형과 적산온도와의 관계



(a) N25



(b) N40

그림 8 자기수축변형과 유효재령과의 관계

하는 것이 중요하므로, 성숙도 함수인 적산온도와 유효재령으로 자기수축변형을 표현해 보았다. 적산온도는 -10°C 를 기준으로 하는 일반적인 식을 이용하였고, 유효재령은 MC 90의 아레니우스식을 이용한 식을 이용하였다. 그림 7과 8에 각각 적산온도와 유효재령으로 자기수축변형 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 20°C 일정양생 공시체와 고온이력을 받은 블록 공시체에 대해서 성숙도 함수를 적용해 본 결과, 두 양생조건에 따라 오차가 크며 잘 맞지 않는 것으로 나타났다. 성숙도의 개념은 시멘트 수화반응의 온도의존성을 이용해 시멘트 경화체의 물성을 평가하는 것인데, 자기수축변형이라는 물성은 시멘트 수화반응과 밀접한 관계가 있지만, 나타나는 결과인 체적변화는 콘크리트의 탄성계수와도 관계가 있어, 현재 알려진 성숙도 함수로 표현하는 것은 다소 무리가 있다고 보여진다. 자기수축 발생 메커니즘은 시멘트 수화반응으로 내부 건조상태가 조성되고, 건조로 인해 모세관 공극 중에 존재하는 수분의 매니스커스가 발생해 콘크리트에는 (-)의 압력 발생으로 인한 것인데¹⁾, 극초기 재령에서는 콘크리트 자체의 탄성계수도 변화하므로 단순하게 표현하는 것은 어렵다고 생각된다. 따라서 현재 제안되어 있는 압축강도특성의 온도의존성을 나타내는 성숙도 함수를 그대로 적용하는 것은 어렵고, 시멘트 수화반응속도와, 시간 경과에 따른 콘크리트의 탄성계수 변화를 함께 나타낼 수 있는 새로운 함수를 제안할 필요가 있다고 보여진다.

4. 결 론

- 1) 자기수축변형의 온도의존성을 조사하기 위해, 20°C 일정온도양생과 간이단열조건의 블록형태 공시체에 의한 수화열에 의한 고온이력 양생조건으로 자기수축변형을 측정 한 결과, 초기재령에 고온이력을 받은 공시체가 자기수축변형이 더 많이 발현되어, 온도의존성이 있는 것으로 나타났다.
- 2) 자기수축변형의 온도의존성을 성숙도 함수로 표현하여 보았으나, 물-시멘트비가 낮고 자기수축변형이 클수록 잘 맞지 않는 것으로 보이는데, 이는 자기수축변형이 시멘트 수화반응 뿐만 아니라, 콘크리트의 탄성계수와도 밀접한 관계가 있어 현재 제안된 성숙도 함수로는 표현하기 힘들다고 보여진다.

참 고 문 헌

1. 일본콘크리트공학협회, 자기수축위원회보고집, 1996.
2. E.Tazawa, Y.Matsuoka, S.Miyazawa and S.Okamoto, "Effect of Autogenous Shrinkage on Self Stress in Hardening Concrete, Proceedings of Thermal Cracking in Concrete at Early Age", 1994. pp.221 ~ 227.
3. 古閑 俊一, 河野 廣隆, 渡辺 博志, 狩野 敏也, "コンクリートの自己収縮における温度依存性に関する研究", 第50回セメント技術大会講演集要旨, 1996, pp.364 ~ 365.
4. 竹田 宣永, 松永 薦, 米田 俊一, 十河 茂幸, "水和熱による高温履歴がコンクリートの自己収縮応力に及ぼす影響", 콘크리트工学年次論文報告集, Vol.19, 1997, pp.1417 ~ 1422.
5. O.M.Jensen and P.F.Hansen, "Influence of Temperature on Autogenous Deformation and Relative Humidity Change in Hardening Cement Paste, Cement and Concrete Research", Vol.29, 1999, pp.567 ~ 575.
6. P.Turcry, A.Loukili, L.Barcelo and J.M.Casabonne, "Can the Maturity Concept Be Used to Separate the Autogenous Shrinkage and Thermal Deformation of a Cement Paste at Early Age?", Cement and Concrete Research, Vol.32, 2002, pp.1443 ~ 1450.