

고강도콘크리트의 자기수축

정 해 문 (한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원)

1. 서 론

콘크리트는 토목, 건축 등 건설사업에 불가결한 기간재료로서 현대계에서는 대체할만한 재료가 당분간은 없을 것으로 예상되는 중요한 재료이다. 콘크리트의 주된 장점으로는 경제적이고, 자유로운 형상의 구조물의 제조가 용이하며, 강도를 조정할 수 있고, 내구성이 우수하다. 반면 단점으로는 무겁고, 인장강도가 낮아 균열발생이 쉬우며, 구조물 완성후의 품질관리가 쉽지 않아 보수 및 보강이 용이하지 않다는 점들을 들 수 있다. 이와 같은 장점을 살리고, 단점을 극복하기 위한 많은 연구와 기술개발이 진행되고 있다.

최근 들어 구조물의 대형화, 초고층화, 특수화 등의 경향에 따라 고성능의 건설용 재료가 필요하게 되었는데, 콘크리트의 고성능화는 일반 콘크리트와 비교해 강도, 내구성, 시공성 등을 향상시키는 것이라고 할 수 있다. 고강도콘크리트는 부재의 단면적 감소에 의한 경량화, 우수한 역학적 특성에 의한 고성능화, 우수한 내구성을 갖고 있는 등 많은 장점을 가지고 있어, 실용화를 위한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 특히 최근 들어 콘크리트 구조물의 내구성에 대한 관심이 높아지면서 우수한 내구성을 가지고 있는 고강도콘크리트의 실용화에 대한 기대가 한층 고조되고 있는 가운데, 많은 연구들로 인해 고강도콘크리트 배합기법, 고성능 펌프 등이 개발되어, 실용화를 위한 길은 점점 가까워지고 있다.

그러나, 고강도콘크리트의 실용화를 위해서 해결해야 할 과제가 아직 많이 남아있는데, 그중에서도 고강도콘크리트는 단위시멘트량이 많아 시멘트 수화발열로 기인한 온도균열 발생 가능성을 가지고 있어 내구성에 큰 영향을 미치게 되므로 매우 중요하다. 온도균열을 예측하는데 있어, 초기재령에서 자기수축(Autogenous Shrinkage)에 의한 변형이 온도변화에 의한 변형과 함께 나타나므로, 온도균열 발생을 검토할 때 반드시 자기수축의 영향을 함께 검토하지 않으면 안된다. 본고에서는 고강도콘크리트 적용시 큰 영향을 미치는 자기수축 특성에 대해서 검토한 결과를 서술하도록 한다.

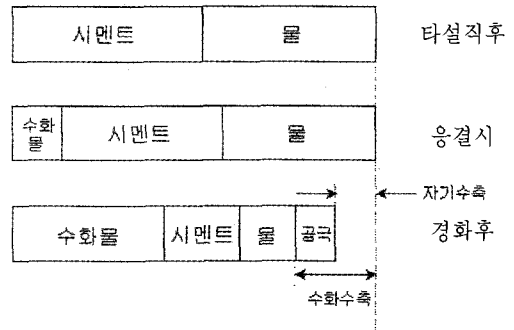
2. 고강도콘크리트의 자기수축 (Autogenous Shrinkage)

가. 콘크리트의 수축

콘크리트의 길이(체적)변화 특성은 균열발생 측면에서 매우 중요하다. 콘크리트는 일반적으로 타설 초기에 침하, 소성수축, 수화반응 진행에 따른 수화수축, 자기수축, 경화후의 건조수축 등의 수축현상이 주로 나타난다. 이중에서 콘크리트 경화후에 나타나는 건조수축은 아직도 알려지지 않은 점들이 남아있기는 하지만, 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되었다. 그러나, 재령초기에 일어나는 자기수축에 대해서는 여러 물리적 성질이 급격하게 변화하는 초

기재령의 특성상 연구의 대상이 되기 시작한 것은 최근의 일이다.

자기수축 현상은 예전부터 알려져 왔으나, 보통강도의 콘크리트에서는 건조수축에 비해 한 Order 정도 작기 때문에 그다지 중요한 고려의 대상이 아니었지만, 결합재의 함량이 높고 W/C가 낮은 고강도, 고유동콘크리트에서는 무시할 수 없을 만큼의 변형이 발생된다는 사실이 보고되면서 최근 활발하게 연구가 진행되어 오고 있다.



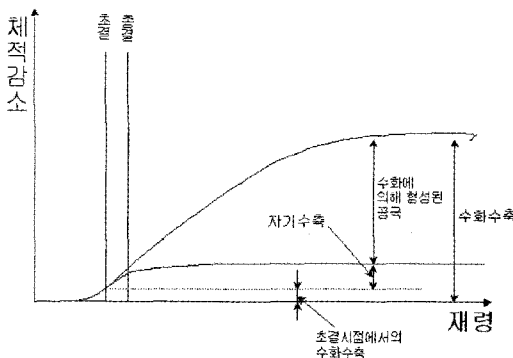
〈그림-2〉 수화수축과 자기수축과의 관계(2)

나. 자기수축

(1) 정의

자기수축현상이란 ACI에서는 “외력이나 열적 습도 등과 관계없이 계속적인 시멘트 수화에 의해 생기는 체적변화 현상”, 일본콘크리트공학협회에서는 “시멘트 수화에 의해 응결과정 혹은 응결 이후에 거시적으로 생기는 체적감소 현상으로서, 물질의 침입이나 이탈, 온도변화, 외력, 외부구속 등에 기인하는 체적변화는 포함하지 않는 것”이라고 정의하고 있다. 즉 우리에게 익숙한 일반적인 체적변화현상은 수분증발, 온도변화, 구속 등의 외부요인에 의해 발생하는데 반해, 자기수축이란 외부요인의 영향없이 시멘트의 수화에 의해 생기는 현상으로, 초기재령에 거시적으로 생기는 부분을 구분해서 정의한다.

여기에서 수화수축과 자기수축의 차이를 구분할



〈그림-1〉 수화수축과 자기수축과의 관계(1)

필요가 있다. 수화반응에 의해 생기는 총체적 변화를 수화수축(Cheical Shrinkage)이라고 하는데, 수화반응에 수반되어 생성되는 수화물의 체적이 수화이전의 시멘트와 물이 차지하는 체적보다 작아지게 되므로 발생하는 현상이다. 수화수축과 자기수축과의 관계를 〈그림-1〉과 〈그림-2〉에 나타내었다. 다시말해 수화수축 중에서 초기재령에 거시적으로 나타나는 큰 체적변화를 자기수축으로 구분하여 나타내는 것이다. 자기수축에 의한 변형이 응결시간 직후 특히 크게 나타나는 것은 강도발현 이전단계인 극초기 재령에서는 콘크리트 Stiffness가 매우 작으므로 자기수축 발생 구동력에 의한 변형이 매우 쉽기 때문이다.

(2) 메카니즘

시멘트의 수화반응에 수반해 간극수가 소비되면서 경화체 내부가 실질적으로 건조상태가 되는 현상을 자기건조(Self Desiccation)라고 일컫는다. 보통강도의 콘크리트는 작업성 확보를 위해 이론적으로 필요한 수량보다 많은 물이 존재하므로 콘크리트 내부의 상대습도가 100% 이하로 떨어지는 경우는 거의 없다. 그러나, 고강도콘크리트와 같이 이론적으로 필요한 수량보다 훨씬 낮은 W/C를 갖는 경우, 콘크리트 내부는 초기재령에서부터 상대습도가 낮아져 자기건조상태에 있게 된다. 이와 같이 자기건조상태에 놓이는 과정중에, 일반적인 건조수축 메카

니즘과 동일하게, 시멘트 입자사이에 존재하던 모세관수가 비증발성수분과 겔수로서 소비되면서 내부에 공극이 생성되게 된다. 이때문에 공극중의 수분에 메니스커스가 형성되어 음(-)의 압력차의 발생으로 인해 콘크리트는 수축하게 되는데, 자기수축에 의한 변형이 일어나는 가장 중요한 구동력으로 알려져 있다. 즉, 건조수축과 달리 외부로부터 건조가 생가지 않아도 압력차가 발생한다는 점이다.(<식-1>)

$$\Delta P = 2\gamma \cos\alpha / r \dots\dots\dots \langle \text{식-1} \rangle$$

ΔP : 압력차, γ : 공극수의 표면장력,
 α : 접촉각, r : 모세관 공극의 반경

한편, 이러한 수축에 의한 길이변화는 L'Hermite는 아래와 같은 식으로 나타내었다. 즉, 공극크기에 의존하는 모세관장력과 탄성계수와와의 관계로서 나타내었는데, (e/V)는 메니스커스를 형성하는 물의 체적분율이다.(<식-2>)

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right) = \gamma \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n}\right) \left(\frac{e}{V}\right) \left(\frac{1}{E}\right) \\ = \gamma \left(\frac{4}{d}\right) \left(\frac{e}{V}\right) \left(\frac{1}{E}\right) \dots\dots\dots \langle \text{식-2} \rangle$$

$\Delta L/L$: 길이변화율 γ : 물의 표면장력
 e: 물의 체적 E: 탄성계수
 V: 경화체의 체적 d: 공극직경
 R1, R2: 물의 주곡률반경

(원통형태의 공극이라면 $r1=r2=d/2$)

Tazawa 등은 물시멘트비 30%의 시멘트페이스트 경화체에 대해, 직경 15~30 Å의 겔공극에 메니스커스가 형성된다고 가정하고, 탄성계수와 겔수의 체적(e/V)을 실험치를 이용해 계산해본 결과, 계산치와 실험치가 잘 맞아, 수화수축에 의한 매크로한 체적감소(자기수축)는 모세관장력이론에 의해 설명이 가능하다고 하였다.

수화반응의 진행과 함께 에트링자이트로부터 모노설페이트 수화물 전이에 의한 영향이라는 주장도

있는데, 이는 간극상, 즉 알루미늄이네이트상의 함량이 자기수축과 밀접한 관계가 있다는 실험적 통계로 설명한다. 그러나 에트링자이트로부터 모노설페이트로 전이되는 시기 이전에도 자기수축 현상이 발생하므로, 이러한 현상이 수축의 일부일 뿐이라고 간주되고 있다.

(3) 자기수축에 영향을 미치는 요인

자기수축은 초기재령에서의 수화반응과 밀접한 관계가 있으므로, 수화반응에 영향을 미치는 시멘트, 혼화재료, 배합, 양생방법 등의 여러 요인이 영향을 미친다. 이들 요인 각각의 영향에 대해서는 많은 연구가 진행되어, 재료측면에서의 자기수축 저감방법이 제안될 정도로 현상론적인 연구가 매우 많이 이루어져 왔다.

시멘트 종류에 따른 영향을 살펴보면, 조강>보통>중용열>저열시멘트의 순서로 자기수축이 많이 발생하고, 무기계 혼화재료로서는 슬래그와 실리카 폼을 혼입하면 자기수축이 커지나, 플라이 애쉬를 혼입하면 감소된다고 알려져 있다. 포틀랜드시멘트 중에서 저열시멘트의 자기수축이 작은 이유는 C₃A와 C₄AF(특히 C₃A)가 자기수축을 크게 일으키는 경향을 보이고, C₂S와 C₂S(특히 C₂S)는 자기수축을 억제하는 경향을 보여, 보통시멘트에 비해 C₃A의 함량이 작고, C₂S의 함량이 많은 저열시멘트가 자기수축 감소에 매우 유효하다고 알려져 있다. 한편 배합상으로 보면 물시멘트비의 영향이 가장 큰데, 물시멘트비가 작을수록 자기수축이 커진다.

3. Belite계 시멘트를 이용한 고강도콘크리트의 자기수축 특성

가. 개요

앞서 설명한 바대로, 물시멘트비가 낮고 시멘트량이 많은 고강도콘크리트 제조시 균열제어 측면에서

〈표-1〉 사용시멘트의 물성

구 분	비중	비표면적 (cm ² /g)	응결(h:m)			압축강도(N/mm ²)			수화열(J/g)		화 학 성 분(wt%)				
			초결	중결	3일	7일	28일	7일	28일	SO ₃	IgLoss	C ₂ S	C ₃ S	C ₄ A	C ₄ AF
보 통	3.15	3,210	2:35	3:40	29.2	44.3	58.2	-	-	2.0	1.9	60	15	8	9
Belite계	3.20	4,000	2:10	3:30	23.6	35.2	61.8	260	302	2.7	0.6	35	47	3	8

자기수축의 영향을 검토해야 한다. 자기수축을 저감시키기 위한 가장 적극적인 방안으로는 자기수축 발현이 작은 시멘트를 사용하는 것이다. 본 논문에서는 고강도 콘크리트의 자기수축을 저감시키기 위해 시멘트재료로서 Belite계 저열시멘트를 사용하여 자기수축 특성을 실험적으로 검토하였다. 실험요인으로는 물시멘트비와 양생조건 차이에 따른 자기수축 변형 특성을 파악하였고, 자기수축의 온도의존성을 정량적으로 표현할 수 있는지 여부에 대해 검토하여 보았다.

나. 실험방법

(1) 사용재료 및 콘크리트 배합

시멘트는 보통포틀랜드시멘트와 Belite 함량이 47%인 Belite계 시멘트를 사용하였다. 본 연구에서는 교량용 PSC 콘크리트를 타겟으로 하여 초기강도발현이 중요하므로, KS 규격의 4종 저열시멘트보다 Belite 함유량이 다소 작고 분말도가 큰 시멘트를 사용하였다. 〈표-1〉에 사용한 시멘트의 물성을 나타내었다. 세골재는 하천사(표건비중 2.62, 흡수

율 1.24%, 조립율 2.99), 조골재는 19mm 쇠석(표건비중 2.66, 흡수율 0.84%, 조립율 6.5, 실적율 60.9%)의 것을 사용하였으며, 혼화제로는 폴리카본산계 고성능 AE감수제를 사용하였다.

콘크리트 배합은 단위수량을 160kg/m³로, 물/시멘트비를 25, 30, 40%, 조골재 겉보기용적비를 0.59(m³/m³)로 하였고, 슬럼프는 21±2.5cm를 목표로 고성능 AE감수제의 양을 조절하여 시방배합을 정하였다.(〈표-2〉)

본 실험에서는 공기량의 확보가 영향을 크게 미치지 않으므로, 공기연행을 시키지는 않았다. 고강도 콘크리트는 단위시멘트량이 많고, 혼화제의 사용량이 많아 콘크리트 점도가 일반강도 콘크리트에 비해 매우 높으므로, 일반적인 믹싱방법으로 콘크리트를 제조하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 믹싱 효율을 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 물탈을 유동화시킨 다음, 조골재를 투입하여 2분간 더 믹싱을 하였다. 그리고, 통상적으로 고

〈표-2〉 콘크리트 배합

배합명	사용 시멘트	W/C (%)	조골재 겉보기 용적비	s/a (%)	SP (C×%)	단위재료량(kg/m ³)				슬럼프 (cm)	공기량 (%)
						W	C	S	G		
N25	보통	25	0.59	41.8	2.6	160	640	675	956	21 ± 2.5	2 ± 1
N30		30		44.8	1.8	160	533	763	956		
N40		40		48.2	2.0	160	400	874	956		
L25	Belite계	25		42.1	1.8	160	640	683	956		
L30		30		45.0	1.3	160	533	770	956		
L40		40		48.3	1.5	160	400	880	956		

성능 AE감수제는 시간이 경과됨에 따라 그 성능을 발휘하므로, 믹싱시간이 짧을 경우 유동성을 맞추기 위해 과도한 사용량을 첨가할 수 있다. 따라서 적정 첨가량을 선정하기 위해, 건비율을 포함하여 4분 15초간 믹싱이 끝난 후 바로 배출하지 않고, 4분 30초간 그대로 방치시킨 후, 다시 30초간 믹싱한 다음 배출하였다.

(2) 자기수축변형 측정

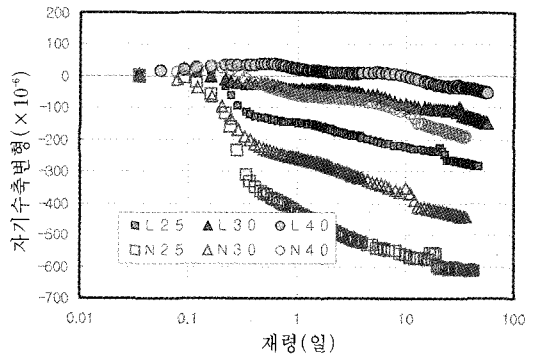
고강도콘크리트 부재제작시 수화발열을 보이는 초기재령에서 자기수축도 발현되므로, 본 연구에서는 자기수축의 온도에 대한 의존성을 검토하여 보았다. 양생조건 변화에 따른 자기수축의 영향을 보기 위해, 20°C로 양생온도를 일정하게 한 경우와 실제 부재사이즈를 상정하여 고온의 온도이력을 받았을 때로 하여 실험하였다. 20°C 일정온도 양생의 경우, 10×10×40cm의 사이즈로 공시체를 제작하였고, 고온이력 양생의 경우에는 공시체를 40×40×40cm의 크기의 블록형태로 하여 발포스티로폼의 거푸집을 이용해 간이단열조건을 만들어 수화열에 의한 고온의 온도이력을 받도록 하였다.

콘크리트 공시체 제작시 콘크리트 변형이 구속되는 것을 방지하기 위해 바닥면에 테프론테이프를 깔고, 콘크리트와 형틀이 접촉되는 것을 피하기 위해 폴리에스테르제 필름을 형틀 전체면에 부착하였으며, 수분증발을 막기 위해 플라스틱 슈트로 형틀 전면을 감쌌다.

변형의 측정은 매입형 변형게이지를 사용하여 타설시점부터 측정하였으나, 초결시간을 자기수축변형의 출발점으로 산정하였다. 온도변형에 대한 보정은 콘크리트 온도를 계측하여 콘크리트의 열팽창계수를 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 가정하여 보정하였다.

다. 결과 및 고찰

20°C 양생조건에서 측정한 자기수축변형 결과를 <그림-3>에 나타내었다. 시멘트 종류에 따른 차이

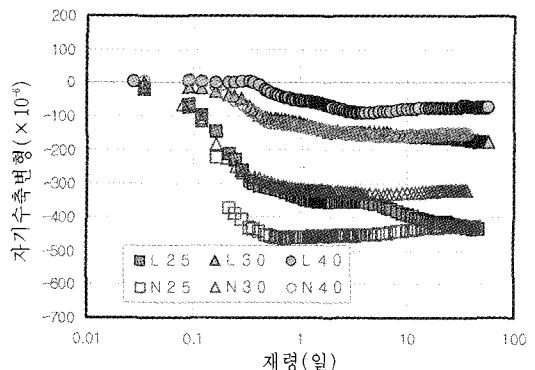


<그림-3> 20°C에서 양생한 공시체의 자기수축

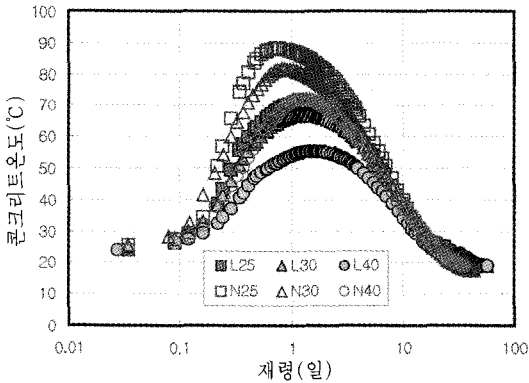
를 보면, 이전의 다른 연구결과에서도 보고된 바 있듯이 보통시멘트에 비해 Belite시멘트의 자기수축이 훨씬 작게 발현되는 것을 알 수 있다. Belite계 시멘트를 사용하게 되면 보통포틀랜드시멘트를 사용할 경우에 비해 1/3~1/2 정도 자기수축이 감소되는 것으로 나타나, 자기수축 저감에 매우 효과적인 것을 알 수 있다. 물시멘트비의 영향을 보면, 물시멘트가 작으면 작을수록 자기수축도 커지는 것을 볼 수 있다.

<그림-4>는 블록형태의 공시체로 간이단열조건을 만들어 초기재령에서 고온의 온도이력을 보였을 때의 자기수축변형 결과를 나타낸 것이다.

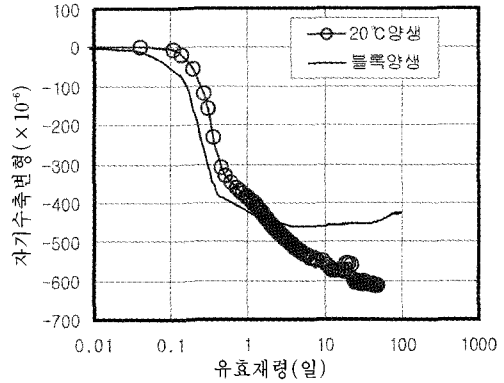
<그림-5>에는 각 배합별 콘크리트 온도를 나타내었는데, 각 배합별로 최고온도가 55°C~90°C 정도



<그림-4> 블록공시체에 의한 간이단열양생조시 자기수축 결과



〈그림-5〉 블록공시체의 콘크리트 온도

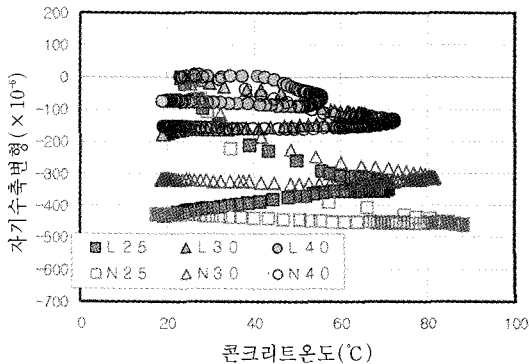


〈그림-7〉 자기수축과 유효재령과의 관계

까지 상승하였다.

〈그림-6〉은 콘크리트온도와 자기수축과의 관계를 나타내었다. 온도가 상승하면서 자기수축이 발생하여 온도가 피크치에 도달한 후에는 일정하게 되었다. 이러한 양상은 배합별, 최고온도가 55°C 혹은 90°C이건 동일한 패턴을 보여주고 있다.

20°C 양생시와 비교를 해보면, 20°C 양생시가 블록양생시에 비해 자기수축 최종값은 더 작은 양상을 보여주나, 블록양생시의 경우가 초기재령에서 자기수축이 더 급속하게 발현되는 것을 확인할 수 있다. 이는 블록양생에 의한 수화발열의 영향으로 볼 수 있는데, 블록양생조건인 경우 20°C에 비해 양생온도가 높아 수화반응이 촉진되므로 시멘트 수화반응에



〈그림-6〉 블록공시체의 콘크리트온도와 자기수축과의 관계

영향을 받는 자기수축의 발현도 빠르게 나타나는 것으로 보이고, 시멘트 입자의 표면에 급속한 수화물 생성으로 인해 입자내부의 반응을 억제하기 때문에 빨리 일정하게 둔화되는 경향을 보이는 것으로 생각된다.

자기수축이 콘크리트 온도가 고온이 되었을 경우 급속하게 발현되어, 온도에 따른 의존성이 있는 것으로 나타났으므로, 온도에 대한 의존성을 정량적으로 나타내어 보고자 머츄리티 개념으로 표현하여 보았다. 〈그림-7〉은 보통시멘트를 사용한 W/C 25%의 고강도콘크리트에 대하여 20°C의 일정 양생조건 공시체와 약 80°C까지 초기에 고온이력을 보인 블록공시체에 대하여 MC 90에서 제안하는 유효재령(등가재령, Equivalent Age)으로 나타낸 결과이다. 결과에서 보이듯이 자기수축발현을 유효재령으로 표현하기는 어려운 것으로 나타났다. 자기수축의 머츄리티 함수 표현에 대해서 표현가능하다는 보고도 있고, 가능하지 않다는 보고도 있는데, 본 논문에서는 가능하지 않은 것으로 나타났다.

현재 사용되고 있는 머츄리티 함수의 적용이 가능하지 못한 이유는, 재령 초기에서는 시멘트 수화반응과 함께 경화작용에 의한 강도나 탄성계수의 발현이 매우 활발하게 진행되므로, 자기수축 변형의 정확한 출발점(Zero Point)을 선정하기가 어렵다는 점(일본에서는 통상 응결시간을 출발점으로 정함),

시멘트 수화반응률만으로 연관이 잘 안된다는 점 등 때문이라고 생각되어진다. 머쥬리티 함수가 본래 시멘트 수화반응의 온도의존성 함수를 압축강도를 비롯한 콘크리트 물성에 대입한 개념인데, 길이변화라고 하는 물성은 단순히 시멘트 수화반응만이 아니라 콘크리트가 지니고 있는 강성과도 관련이 있어 탄성계수의 발현이 활발한 초기재령에서는 간단히 예측하기 힘들다. 초기재령에서 콘크리트 균열 발생 예측을 위해서는 자기수축의 온도의존성에 대한 정량적인 평가가 반드시 파악되어야 하므로, 더 깊고 많은 검토가 이루어져야 하리라 생각된다.

4. 결 론

(1) 최근 들어 고강도 콘크리트의 온도균열 발생 가능성 예측시 자기수축이 온도변화에 의한 변형과

함께 나타나는데, 무시하지 못할 정도로 크게 발현되므로, 온도균열 발생을 검토할 때 반드시 자기수축의 영향을 함께 검토하지 않으면 안된다.

(2) 고강도콘크리트의 자기수축을 저감시키기 위해 Belite계 시멘트를 사용하여 자기수축 특성을 검토한 결과, 보통포틀랜드시멘트 사용대비 1/3~1/2 정도 감소되어 자기수축 저감을 위해 효과적인 결과를 얻었다.

(3) 양생온도 조건에 따른 영향을 검토한 결과, 재령 초기에 고온의 온도이력을 받을 경우 콘크리트 온도상승과 함께 자기수축도 급속하게 발현되어 온도에 따른 의존성을 보여주었다. 그러나, 온도의존성을 정량적으로 나타내보고자 하였으나, 머쥬리티 함수로 표현되기 힘든 것으로 나타나, 더 많은 검토가 이루어져야 할 것으로 보인다. ▲

시사 용어 해설

▶ 차세대 인터넷(NGI)

미국 정부가 추진하고 있는 새로운 인터넷 프로젝트이다. 기존의 인터넷보다 100~1,000배 가량 빠르다. 또한 포화상태에 있는 인터넷 주소의 수도 거의 무한대까지 늘릴 수 있어 이를 이용하면 PC는 물론 가전제품까지도 인터넷으로 원격조정 할 수 있게 된다. 1996년 10월 10일 미국의 클린턴 대통령이 발표한 이 정책은 미국 대학들을 중심으로 추진되고 있는 인터넷 II 계획을 포괄하고 있다. 대통령을 의장으로 하고 부통령이 직접 추진하고 있으며 연간 1억달러 이상의 예산이 투입된다. 미국 정부와 각 대학들이 주도하고 있는 이 계획은 상업적인 요소를 배제한 순수 학술 연구망을 표방하고 있으나 실제로는 그렇지 않다. IBM, 시스코라우터, 쓰리콤 등 미국의 주요 네트워크 업체들이 장비 기증을 명목으로 NGI 프로젝트에 관여하고 있으며 여기에서 얻어진 기술을 상품화할 계획을 가지고 있다. 미국 정부 역시 이 계획을 통해 전세계 정보통신 분야의 우위를 지키려는 의도를 가지고 있다. 또한 기존 인터넷과 달리 데이터 전송 속도와 보안을 높이기 위해 폐쇄적으로 운영되기 때문에 언제 어디서든 원하는 사이트에 접속하여 정보 찾기를 원하는 사용자들의 비판을 받고 있다.