

## 홍상희

공학박사

(주)원건축사 사무소 김리본부

### 1. 서론

3월초 레미콘 품질관리실 담당자가 고강도 콘크리트의 품질결함으로 문의를 해온적이 있다. 고강도 콘크리트를 납품하는 레미콘사로는 아주 심각한 고민이 아닐 수 없었다. 납품된 레미콘에서 비교적 크지 않은 균열이 발생되었는데, 콘크리트에 문제점이 있을까? 라는 궁금증과 함께 시공사는 레미콘사에게 책임을 전가하려고 하는데, 도대체 무엇인지 알 수가 없어 고민하던 차에 고성능(고강도, 고유동, 고내구성 콘크리트) 콘크리트에서 많이 발생하는 자기수축 균열에 대하여 고찰하고자 한다.

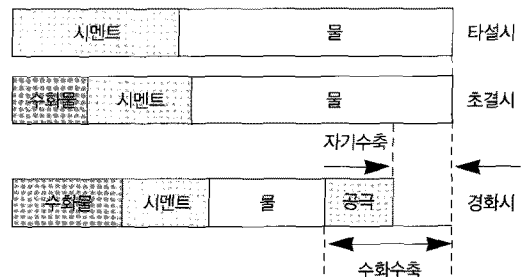
### 2. 자기수축이란?

#### 2.1 정의

콘크리트의 자기수축(Autogenous shrinkage)은 예전부터 알려져 왔지만, 일반 콘크리트에서는 건조수축의 1/10 정도 밖에 되지 않아 균열제어 및 설계에 있어

고려의 대상으로 문제시되지 않았다. 그러나 고강도 콘크리트, 고유동 콘크리트 등 물결합재비가 작고, 단위결합재량이 많은 콘크리트에서는 자기수축에 의한 변형이 현저하며, 경우에 따라 자기수축만으로도 균열발생의 가능성이 지적되고 있다.

자기수축현상이란 ACI에서는 “외력이나 열적요인, 습도 변화 등과 관계없이 계속적인 시멘트 수화에 의해 생기는 체적변화 현상”, 일본 콘크리트공학협회에서는 “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 외부요인의



[그림 1] 수화수축과 자기수축의 관계

영향 없이 시멘트의 수화에 의해 생기는 현상으로 초기 재령에 거시적으로 생기는 부분을 구분해서 정의한다.

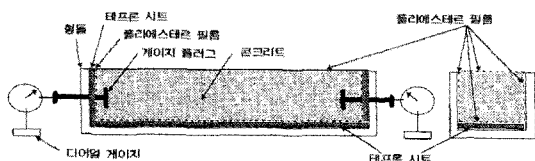
자기수축은 수화수축과 구분하여야 한다. 수화반응에 의해 생기는 총체적 변화를 수화수축(Chemical Shrinkage)이라고 하는데, 수화반응에 수반되어 생성되는 수화물의 체적이 수화 이전의 시멘트와 물이 차지하는 체적보다 작아지게 되므로 발생하는 현상이다. 수화수축과 자기수축과의 관계는 [그림 1]과 같다.

## 2.2 자기수축의 시험방법

자기수축을 측정하는 시험 방법은 일반적인 건조수축의 측정방법(KS F 2424)과는 다르다. 자기수축에 의한 수축변형의 측정방법으로는 국내에서는 특별한 규정이 없지만, 일본의 경우는 콘크리트공학협회(JCI)에서 다음과 같이 규정하고 있다.

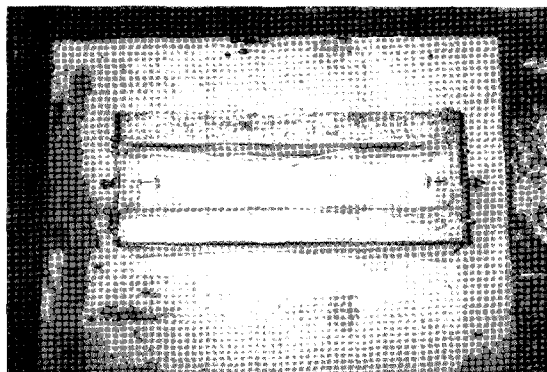
### (1) 공시체 제작

자기수축실험에 사용되는 거푸집은 강성이 있는 강재 거푸집(100×100×400mm)으로써 길이측정을 위한 게이지플러그(Gauge plug)를 설치할 수 있는 것이어야 한다. 또한, 몰드의 바닥과 양단에는 1mm 두께의 테프론 시트(Teflon sheet)를 깔아서 시료의 자유수축 변형이 구속되지 않도록 하여야 하고, 콘크리트 타설 후 시료표면에서의 수분 증발 및 흡수를 막기 위해 폴리에스테르 필름(Polyester film)으로 외기와 격리시켜야 한다. [그림 2]

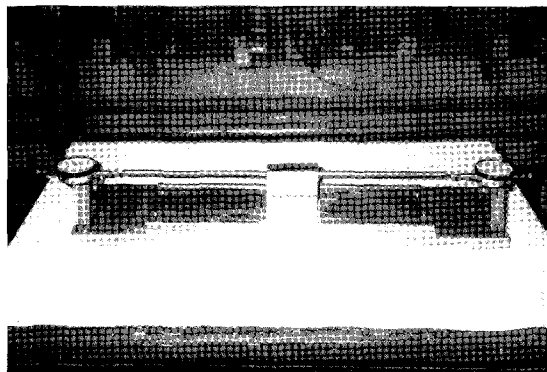


[그림 2] 자기수축 시험장치 개요

림 2]는 자기수축 시험체의 개요를 나타낸 것이고, [사진 1]은 자기수축 시험용 공시체를 나타낸 것이다.



[사진 1] 자기수축 시험용 공시체



[사진 2] 자기수축 시험 측정 장치

### (2) 길이변화 측정장치

자기수축 길이변화 측정장치는 다이얼 게이지(Dial gauge, 정확도: 0.001mm)가 설치된 강성이 있는 것으로 한다. [사진 2]는 자기수축 길이변화 측정용 장치의 모습을 나타낸 것이다.

### (3) 탈형이전의 시험방법

자기수축은 수화반응의 시작과 동시에 발생하므로 시료의 초결시점(Initial setting time)을 기준시점으로 하여 길이변화율을 측정하고, 또한 온도를 측정하여 선펡

장계수( $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ )에 의한 길이를 보정한다.

**(4) 탈형이후의 시험방법**

공시체 탈형 후, 온도  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , 상대습도 60~80%의 실내에서 전혀 건조되지 않도록 밀봉양생하며, 계획한 재령에서 길이변화 및 질량변화를 측정한다. 단, 질량변화율이 0.05% 이상 변화된 경우에는 자기수축 변형으로 취급하지 않는다. [사진 3~8]은 자기수축 시험의 진행 과정을 나타낸 것이다.

**(5) 자기수축 변형률 계산**

자기수축 변형률( $\Delta L$ )은 3개의 공시체 길이변화율을 측정하여 평균값을 이용하며, 다음과 같이 계산한다.

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2$$

$$\Delta L_1 = \frac{(X_{ia} - X_{0a}) + (X_{ib} - X_{0b})}{L}$$

여기서  $\Delta L_1$ : 탈형이전의 길이변화율

$\Delta L_2$ : 탈형이후의 길이변화율

$L$ : 게이지 플러그 사이의 거리

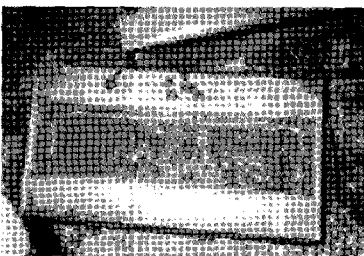
$X_{0a}, X_{0b}$ : 기준시점에서의 측정값

$X_{ia}, X_{ib}$ : 시점  $i$ 에서의 측정값

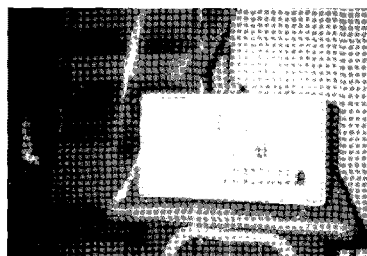
**3. 자기수축에 미치는 영향요인**

**3.1 시멘트의 영향**

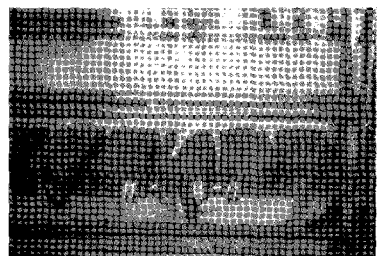
시멘트의 종류 및 그 분말도에 따라 자기수축에 미치는 영향은 상이하다. 알루미늄시멘트, 조강시멘트는 조기에 큰 자기수축이 발생하며, 장시간에 걸쳐 수축양도 크게 된다. 반대로, 중용열 포틀랜드시멘트, 벨라이트계 시멘트는 자기수축이 작다. 또한 고로시멘트 B종은 재령에 따라 수축양이 증가한다. 또한, 시멘트의 분말도도 자기수축에 영향을 미치는데 시멘트의 분말도가 클수록 응결후의 수축양이 크나, 재령 1일 이후의 변형 증가율



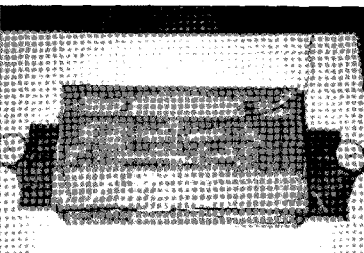
[사진 3] 시험체 제작



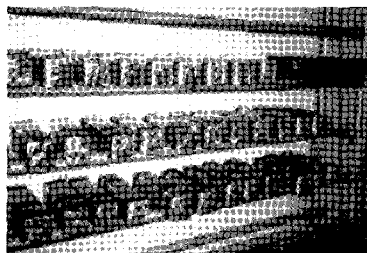
[사진 4] 황온습실



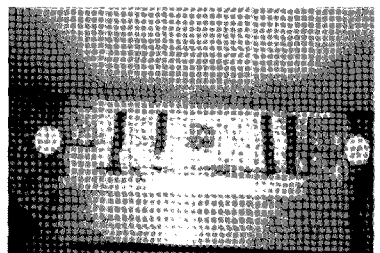
[사진 5] 탈형전 양생



[사진 6] 탈형전 측정



[사진 7] 탈형후 양생



[사진 8] 탈형이후의 측정

은 거의 일정하게 된다.

### 3.2 혼화제의 영향

고성능 콘크리트에 사용하는 혼화제 중 고로슬래그, 실리카흙은 시멘트로 치환할 경우에 자기수축량은 증가하지만, 플라이애시, 팽창재 등의 경우에는 그 치환률에 따라 수축저감 효과를 나타낸다.

### 3.3 혼화제의 영향

고성능감수제의 첨가에 따라 자기수축은 저감되는 경향은 있으나 그 정도는 미미하며, 종류에 따른 차이도 미세하다.

### 3.4 배합요인의 영향

자기수축에 미치는 배합요인의 영향으로는 주로 물시멘트비, 단위수량, 공기량, 골재크기, 혼화제의 치환량 및 혼화제의 첨가량 등을 들 수 있다.

물시멘트비가 작을수록, 단위수량이 많을수록 자기수축 변형은 크게 되며, 단위수량이 일정한 경우에는 단위분체양이 많을수록 자기수축은 커진다. 즉, 단위페이스트 양이 많을수록 자기수축은 증가한다. 단, 단위분체량과 자기수축의 관계는 분체의 종류 및 조성의 영향을 크게 받는다. 또한, 반대로 골재체적의 증가에 따라 단위페이스트 양의 저감과 골재의 탄성변형을 동반한 구속효과에 의해 자기수축은 감소한다.

## 4. 자기수축 저감대책

고강도 콘크리트의 자기수축 문제는 수축저감을 위한 방안으로 재료적인 측면에서 팽창재 및 수축저감제를

사용하는 방법이 유효할 것으로 판단된다.

### 4.1 팽창재 사용

팽창재는 콘크리트 경화과정에서 팽창성의 수화물을 형성하는 것으로서 에트린자이트( $3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ )와 수산화칼슘( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )의 생성에 의한 팽창력을 이용하는 것이다.

팽창재 종류는 현재 ASTM에서 K, S, M형의 3가지로 분류하고 있는데, 이중에서 가장 많이 사용되고 있는 K형 팽창재는 칼슘설포알루미네이트( $3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4$ )와 무수석고 및 석회로 구성되어 있으며, S형은 시멘트의 C3A의 구성비를 높이고 석고를 첨가한 형태, 그리고 M형은 알루미네이트 시멘트(주성분은  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ )와 석고가 주요 팽창성분으로 구성되어 있다.

미국, 일본에서는 팽창재의 콘크리트 수축보상 기능을 이용하여 콘크리트 구조물의 균열을 방지하는 수단으로 적용하고 있으나, 수화가 끝난 다음 팽창이 지속되는 문제점이 완전히 해결되지 않아 적극적으로 사용하지 못하는 실정이다. 그러나 최근 고강도 콘크리트가 보편화됨에 따라 자기수축에 의한 균열이 문제시 되어 이를 해결하려는 노력으로 팽창재 자체의 성능개선, 팽창 콘크리트의 내구성 향상 및 현장에서의 신뢰성 확보 연구가 활발히 이루어지고 있다.

국내에서는 시멘트 회사를 중심으로 CSA(Calcium sulfate aluminate)계 팽창재를 사용한 팽창 콘크리트를 개발하여 콘크리트의 수축을 저감시키기 위해 시도를 하고 있다.

### 4.2 수축저감제 사용

콘크리트의 경화과정에서 팽창성의 수화물을 형성하

여 수축을 보상하는 팽창재와 달리 수축저감제는 콘크리트가 경화 된 후에 경화체로부터 수분이 증발할 경우 표면장력을 저하시키는 물리작용으로 콘크리트의 수축을 저감시킨다.

미국, 일본 등지에서 콘크리트의 수축을 저감시키는 혼화재료에 대한 개발연구가 1960년대부터 시작되어 1970년대 후반에 유기계 합성물이 개발되어 시판된바 있다. 그 후 많은 종류의 수축저감제가 시판되고 있으며, 현재 시판되는 수축저감제는 기본적으로 알키렌옥시드 중합물에 저급 알코올, 페놀, 아미노 결합물을 부가시킨 것이다.

수축저감제의 효과는 경화된 후 건조조건에 폭로된 시점부터 발휘되기 때문에 콘크리트 타설시 혼화재로 사용하는 방법뿐만 아니라 경화된 후 외부로부터 도포시켜 사용하는 방법 등도 있다.

## 5. 자기수축의 고려가 필요한 콘크리트

자기수축이 고려가 필요한 콘크리트에는, 고유동 콘크리트, 고강도 콘크리트, 매스 콘크리트, 경화 콘크리트

[표 1] 자기수축의 고려가 필요한 콘크리트의 배합과 사용재료의 특징

고유동 콘크리트	결합재량 (400~600kg/m <sup>3</sup> ), 물결합재비 (30~40%), 광물질혼화재(고로슬래그 미분말, 석회석분말, 플라이애쉬 등), 화학혼화재(고성능 AE감수제, 분리저감제 등)
고강도 콘크리트	결합재량(450~650kg/m <sup>3</sup> ), 물결합재비(20~40%), 광물질혼화재(실리카 흙, 고로슬래그 미분말 등), 화학혼화재(고성능 AE감수제 등)
매스 콘크리트	결합재량(250~350kg/m <sup>3</sup> ), 물결합재비(45~60%), 저발열형 시멘트, 광물질혼화재(고로슬래그 미분말, 플라이애쉬 등), 2성분·3성분계 시멘트
경화 콘크리트	단위결합재량(150~350kg/m <sup>3</sup> ), 물결합재비 (작은범위), 플라이애쉬 및 고로슬래그 미분말의 첨가(絛縮된 상태의 개선을 위해)

등이 있다.

그러한 것들의 콘크리트의 자기수축에 미치는 배합요인 중에서는 결합재량, 물결합재비, 광물질 혼화재의 종류와 그의 치환율 및 화학혼화제의 종류와 그의 첨가율 등이 중요하게 되고 콘크리트의 자기수축은 각 배합요인 및 그러한 것들의 상호효과부터 이해하는 것이 필요하다.

자기수축의 고려가 필요한 콘크리트의 배합 및 사용재료의 특징을 [표 1]에 나타낸다.

## 6. 고성능 콘크리트의 품질관련 시험

고유동 콘크리트에서 아직 굳지 않은 콘크리트의 유동성은 슬럼프 플로우 값으로 표현한다. 기준은 60±10cm(50~70cm)를 목표로 한다. 70cm를 초과하면 압송중 또는 타설중에 재료분리가 발생할 가능성이 있고, 반대로 50cm이하가 되면 타설시에 충전성에 지장을 초래할 가능성 있다.

따라서 충전성 시험에는 다양한 방법이 있지만, 현장을 고려하여 본다면 슬럼프 플로우 시험으로 대부분 평가하고, 이를 활용하면 될것이다.

특히, 주의할 점은 슬럼프 플로우 시험을 실시한 후 콘크리트의 중앙부에 잔골재가 편재되어 있지는 않은지? 콘크리트 주변부에 페이스트와 분리된 혼합수가 편재되어 있지 않은지?를 잘 관찰하는것이 무엇보다도 중요하다.

아직 굳지 않은 콘크리트 상태에서 재료분리 저항성을 알아보고 싶다면, 슬럼프 플로우의 속도로 평가할 수 있다. 즉 콘크리트의 넓이가 50cm에 도달까지의 시간을 측정하고, 유동거리 15cm를 유동시간으로 나눈 값을 기

준으로 한다.

그러면 슬럼프 플로우 속도가 빨라질수록 유동성은 좋지만, 너무 빠르면 재료분리가 발생할 가능성이 있다.

이처럼 정량적으로 평가하는 시험방법이 많지만 무엇보다 현장에서 많은 경험을 한 기술자의 육안관찰을 통하여 확인 하는것이 가장 중요하다.



[사진 9] 슬럼프 플로우



[사진 10] 충전성 시험

## 7. 맺음말

최근의 건축구조물은 점점 대형화, 고층화의 추세에 따라 고성능 콘크리트의 사용이 증가되고 있다. 이러한 고성능 콘크리트에 있어서는 특히 고성능 감수제 사용에 따른 결합재의 수화활성의 향상으로 인하여, 자기수축 변형에 기인된 균열발생이 새로운 문제점으로 제기되고 있다.

고성능 콘크리트 제조에 있어 낮은 W/B와 다량의 결합재와 다양한 혼화재료들이 사용되는 고강도, 고성능, 고유동과 같은 고기능의 콘크리트를 사용하는 현장에서 근무하는 기술자의 경우는 품질관리에 있어 일반 콘크리트에 비해 다소 어려움이 따르지만, 콘크리트의 품질이 안정적이고 고품질의 콘크리트를 얻기 위해서는 자기수축 뿐만 아니라 다양한 문제점에 대한 검토가 반드시 필요하며, 사전에 충분한 계획을 수립한 후 품질관리에 만전을 기하여야 될 것이다.

특히, 기술자는 과거의 경험으로 업무에 임한다면 어려운 문제로 야기될 수 있으므로 최근에 많이 소개되는 신기술·신기능 콘크리트에 적극적인 관심을 갖고 현장 품질관리에 노력하지 않으면 안되는 시대에 있다고 해도 과언이 아니다.