

# 철근구속을 받는 고강도 콘크리트의 자기수축응력에 관한 실험연구

## An experimental study on the measurement of stress due to autogenous shrinkage of high strength concrete with bar restraint

최진영\*      박신일\*      전철송\*\*      임병호\*\*\*      김화중\*\*\*\*  
Choi, jin young      Park, Shin Il      Tian, Zhe Song      Lim, Byung Ho      Kim, Wha Jung

### ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate on the measurement of stress due to autogenous shrinkage of high strength concrete according to the W/C ratio at early age. The main parameters are as follows W/C ratio is 25, 30, 40%. The size of specimen is 10×10×150cm and the autogenous shrinkage strain is measured by the bonded strain gauge at the inside of the specimens. From the test, it is suggested that the autogenous shrinkage stress increased as W/C ratio decreased.

### 1. 서론

고성능 콘크리트를 이용한 구조물에 있어서는, 초기재령에서의 균열가능성이 지적되고 있으며, 기존의 보고<sup>1)</sup>에서 초기재령에서의 균열은 자기수축에 의해 많이 좌우된다고 하고 있다.

자기수축은 콘크리트 중앙의 물 침입 및 분산이 없는 상태에서, 모세관 공극 내의 물이 시멘트의 수화에 의하여 흡수되면서 자기건조되면서 일어나는 현상이며, 단위 시멘트량이 많을 경우, 고로슬래그분말과 실리카흄등의 혼화재를 많이 사용한 경우에 그 변형량이 크게 되는 것으로 알려져 있다.

고강도 콘크리트는 단위 분체량이 높고, 수화조직이 치밀하여, 자기수축이 많이 일어나는 것으로 지적되고 있다. 또한 외부구속을 받는 자기수축에 따른 수축응력은 콘크리트의 균열발생의 원인으로 작용할 가능성이 높다고 보고<sup>2)</sup>되고 있지만 이에 대한 명확한 해명자료는 부족한 실정이다. 그러므로, 고강도 콘크리트에서 자기수축에 기인하는 균열의 제어방법 및 응력을 해명할 수 있는 자기수축응력 기구 및 그 예측 방법의 확립이 중요한 과제로 대두되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 고강도 철근콘크리트 부재의 초기재령에서의 자기수축응력 발현 양상과 부재의 역학적 특성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 물시멘트비를 변화에 따른 고강도 콘크리트의 자기수축응력을 고찰하기 위하여 매입철근의 구속을 받는 서로 다른 물시멘트비를 가지는 세 개의 시험체에서 자

\* 경북대학교 건축공학과 석사과정

\*\* 경북대학교 건축공학과 박사과정

\*\*\* (주)화성산업 PC구조팀

\*\*\*\* 경북대학교 건축공학과 교수, 공학박사

기수축에 의하여 발생하는 철근의 압축스트레인을 측정함으로써 간접적으로 콘크리트의 자기수축 응력에 대한 연구를 진행하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 실험에서는 고강도 콘크리트의 자기수축응력의 검토를 위해 주요인자로서 물시멘트비 25%, 30%, 40%로 계획하고, 사용된 매입철근은 D22로 하여 그 수축응력을 검토하고자 하였다. 한편, 시험체의 형상, 길이, 철근의 양단부 구속길이의 변화를 고려하여 자기수축응력을 측정할 수 있지만 본 실험에서는 시험체 형상 10cm×10cm×150cm에 철근 양단부 구속길이는 60cm로 계획하였다.

콘크리트 제작 시 굳지 않은 상태의 특성을 파악하기 위해 슬럼프 값을 측정하였고 경화상태에는 콘크리트 타설 24시간 후를 기점으로 하여 48시간까지 상온에서 자기수축응력을 측정하였으며, 3일, 28일 재령 압축강도 및 인장강도를 검토하였다. 본 실험에서의 인자 및 측정항목을 표 1에, 배합계획을 표 2에 나타내었다. 또한 사용재료의 특성과 실험에 사용된 철근의 기계적 성질을 표 3, 4에 각각 나타내었다.

표 1 실험인자 및 측정항목

| 실험인자  | 실험수준        | 조 건     | 측정항목                         |
|-------|-------------|---------|------------------------------|
| 물시멘트비 | 25, 30, 40% | 굳지않은 상태 | 슬럼프                          |
|       |             | 경화상태    | 철근변형(3일), 압축강도 및 인장강도(3,28일) |

표 2 배합계획

| 시험체명  | 조건      |         | 단위 재료량(kg/m <sup>3</sup> ) |       |       |       |         |
|-------|---------|---------|----------------------------|-------|-------|-------|---------|
|       | W/C (%) | S/a (%) | 물                          | 시멘트   | 잔골재   | 굵은골재  | 혼화제 (%) |
| P1-25 | 25.0    | 44.4    | 162.0                      | 648.0 | 706.8 | 895.3 | 2.7     |
| P2-30 | 30.0    | 44.2    | 180.0                      | 600.0 | 700.4 | 894.5 | 1       |
| P3-40 | 40.0    | 41.9    | 220.0                      | 550.0 | 637.7 | 894.5 | 0       |

표 3 사용재료의 성질

| 재료         | 종류·산지         | 물성  |
|------------|---------------|---|
| 시멘트        | 보통포틀랜드        | 비중: 3.15, 분말도: 3,318(cm <sup>2</sup> /g)                          |
| 잔골재        | 경기도 안양        | 표건비중: 2.6 흡수율: 1.17%, 조립율: 2.80<br>단위용적중량: 1,622kg/m <sup>3</sup> |
| 굵은골재       | 경기도 안양        | 표건비중: 2.63 흡수율: 0.62%, 조립율: 6.90,                                 |
| 실리카흄       | 체코            | 비중: 2.2   |
| 플라이애쉬      | 충남 보령산        | 비중: 2.22 분말도: 3,850(cm <sup>2</sup> /g)                           |
| 고성능 AE 감수제 | FLOWMIX 2000H | 나프탈렌계 고성능 AE감수제, 감수율: 23%   |

표 4 강재의 인장강도 시험 결과

| 구분  | $\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{max}$ (t/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_y/\sigma_{max}$ | elo(%) |
|-----|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|--------|
| D22 | 4.563                           | 6.257                               | 0.729                   | 21.6   |

## 2.2 실험체의 제작 및 실험방법

### 2.2.1 자기수축응력

자기수축응력은 일본건축학회 자기수축위원회에서 제안한 철근구속시험방법에 의하여 측정하였다. 시험체 사이즈는 10cm×10cm×150cm이고, 형틀조립시 결합부에 누수가 없도록 그리스를 도포하였다. 공시체의 자유변형이 구속되는 것을 방지하기 위해서, 조립형틀 저면 내측에 테프론시트를 삽입하고, 형틀 내측의 측면, 단면 및 저면에 공업용 랩을 넣어 콘크리트와 형틀이 접촉되지 않도록 했다.

형틀의 양 단판은 철근을 설치하기 위해, 중앙부에 직경 25mm의 구멍을 설치하였다. 철근은 형틀의 양단판의 구멍에 통하게 해서, 철근중심과 형틀의 중심이 일치되도록 하였으며, 철근과 구멍사이는 유점토로 구멍을 처리하였다.

철근은 공칭직경 22.2mm의 이형봉강(호칭:D22)을 이용하고, 철근의 길이를 160cm로 하였다. 철근 중심부 30cm의 리브와 마디를 제거하고  $\Phi 22$ 의 원단면으로 하였다. 철근 중심부에 변형게이지를 부착해서 공업용 랩을 이용하여 방수처리를 행한 후, 철근의 원단면 부분(길이 30cm)과 콘크리트와의 부착을 없애기 위해, 테프론시트를 원단면 부분에 3중으로 감았다. 테프론 시트와 철근부 정착부 경계에는 비닐테이프 등으로 씌 처리를 행하였다.

타설종료와 동시에, 표면고르기를 행하고, 콘크리트의 수분분산을 방지하기 위해, 공업용 랩으로 표면을 덮고 그 위에 젖은 걸레를 덮었다. 타설 후 재령 24시간에서 공시체를 탈형하고, 바로 공시체 전면을 알루미늄박으로 된 접착테이프로 감쌌다. 공시체 보존은 가로로 두는 것을 원칙으로 하였고, 공시체 저면과 바닥면과의 마찰이 생기지 않도록 롤러 등을 이용해서 공시체 양단에서부터 약 40cm 위치 2개소에 지지하였다. 철근의 변형은 중앙부 대면하는 위치의 2개소에서 측정하였으며 콘크리트 온도는 공시체 중심부 1개소에서 DATA LOGGER를 이용하여 재령 3일까지 측정하였다. 그림 1은 자기수축 측정장치 개요도이며, 그림 2는 자기수축을 측정장면이다.

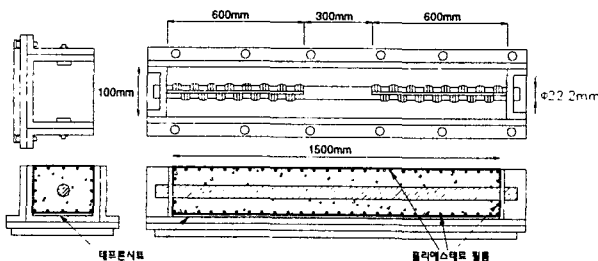


그림 1 자기수축응력 시험체 개요

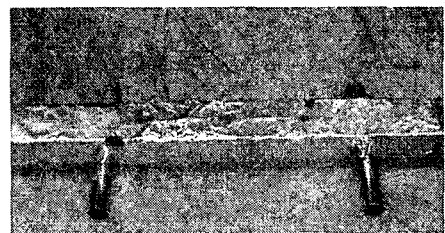


그림 2 자기수축응력 측정장면

### 2.2.2 온도 측정

열전대를 이용하여 콘크리트 내부온도와 표면온도를 측정하여 비교하였다. 중심부와 표면부의 온도차

는 1℃정도였으며, 단면내부의 온도구배는 작았다. 본 연구에 사용된 시험체는 단면크기가 작아서 수화열에 의한 팽창이 적으므로 결과분석에서 온도에 따른 영향이 없다고 가정하고 실험을 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

측정시간에서의 철근 스트레인값을 표 5에 나타내었다.

표 5 실험결과

| 시험체명  | 균치않은 상태<br>Slump<br>(cm) | 경화 상태                      |     |                            |    |                            |      |      |      |       |       |
|-------|--------------------------|----------------------------|-----|----------------------------|----|----------------------------|------|------|------|-------|-------|
|       |                          | 압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> ) |     | 인장강도(kgf/cm <sup>2</sup> ) |    | 철근 스트레인(10 <sup>-6</sup> ) |      |      |      |       |       |
|       |                          | 재령(Day)                    |     | 재령(Day)                    |    | 시간(Hour)                   |      |      |      |       |       |
|       |                          | 3                          | 28  | 3                          | 28 | 0.5                        | 2    | 4    | 8    | 16    | 48    |
| P1-25 | 25                       | 490                        | 674 | 35                         | 42 | 05                         | 70   | 70.4 | 86.4 | 103.3 | 127.2 |
| P2-30 | 18                       | 501                        | 606 | 36                         | 39 | 75                         | 30.0 | 46.9 | 53.5 | 64.8  | 90.1  |
| P3-40 | 19                       | 306                        | 433 | 28                         | 33 | -0.5                       | -0.9 | 0.5  | 5.6  | 16.0  | 33.3  |

#### 3.1 콘크리트 압축강도 및 인장강도

그림 3과 4는 물시멘트비의 변화에 따른 압축강도 및 인장강도 특성을 나타내고 있다. 물시멘트비가 높아질수록 압축강도 및 인장강도는 저하하는 것으로 나타났다.

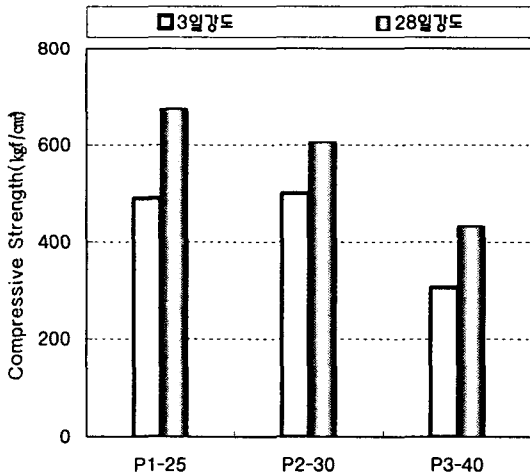


그림 3 물시멘트비 변화에 따른 압축강도 특성

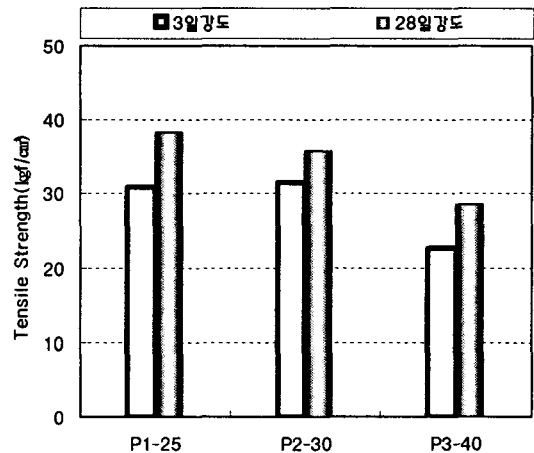


그림 4 물시멘트비 변화에 따른 인장강도 특성

#### 3.2 철근 스트레인

콘크리트 매입철근의 스트레인을 그림 5에 나타내었다. 물시멘트비가 낮을수록 스트레인은 높게 나타나는 경향을 보여주고 있다.

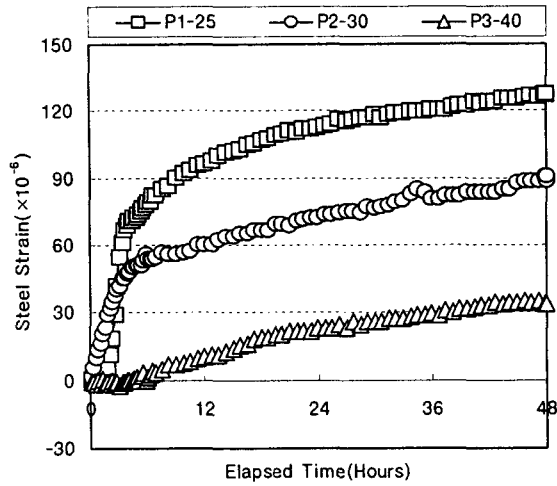


그림 5 실측된 초기재령에서의 철근스트레인

### 3.3 자기수축응력

콘크리트의 양단의 철근 정착부에서의 철근이 받는 압축력과 콘크리트가 받는 인장력이 평형하다는 원리를 이용하여 아래식으로 콘크리트의 인장응력을 산출하여 그 경향을 그림6에 나타내었다. 이 식에서 철근 중앙부에서 측정된 스트레인값이 철근 전체에 동일하게 발생한다고 가정하였다. 시험체별 인장강도와 콘크리트 자기수축에 의한 콘크리트에 발생하는 인장응력을 표6에서 비교하였다.

$$\sigma_c = (E_s \times \epsilon_s \times A_s) / A_c$$

여기서,  $\sigma_c$ : 콘크리트의 자기수축 응력(kgf/cm<sup>2</sup>)

$E_s$ : 콘크리트의 탄성계수(kgf/cm<sup>2</sup>)

$\epsilon_s$ : 실측된 철근의 스트레인

$A_s$ : 철근 공칭 단면적(cm<sup>2</sup>)

$A_c$ : 콘크리트의 순단면적(cm<sup>2</sup>)

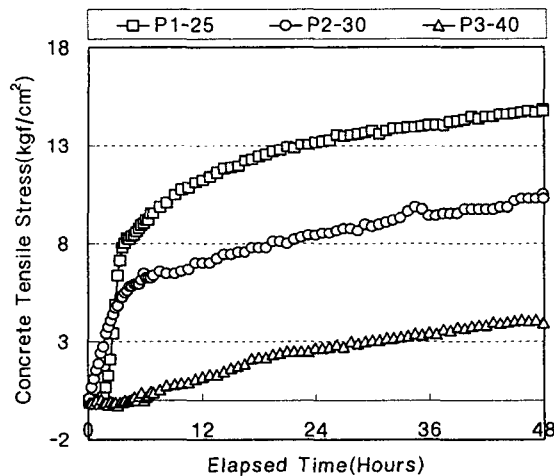


그림 6 물시멘트비 변화에 따른 콘크리트 수축응력 특성

표 6 시험체별 인장강도와 콘크리트 수축응력비교

| 시험체명  | 인장강도<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 콘크리트 수축응력(kgf/cm <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |      |
|-------|--------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|
|       |                                | 시간(Hour)                        |      |      |      |      |      |
|       | 재령3일                           | 0.5                             | 2    | 4    | 8    | 16   | 48   |
| P1-25 | 35                             | 0                               | 1.3  | 8.3  | 10.1 | 12.2 | 14.9 |
| P2-30 | 36                             | 1.1                             | 3.7  | 5.6  | 6.5  | 7.6  | 10.5 |
| P3-40 | 28                             | -0.2                            | -0.2 | -0.1 | 0.8  | 1.9  | 3.9  |

#### 4. 결론

철근구속을 받는 고강도 콘크리트의 자기수축응력 평가 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 콘크리트의 자기수축응력은 물시멘트비가 작아질수록 높아지는 경향을 나타내었다.
- 2) 재령 3일에서의 콘크리트 자기수축응력과 3일 재령에서의 인장강도비는 P1-35, P2-30, P3-40 시험체에서 각각 43%, 29%, 14%로 나타났으며, 따라서 P1-25 시험체가 자기수축응력의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 3일 재령까지는 자기수축응력이 콘크리트 인장강도를 초과하지 못하였으므로 내부인장균열이 생기지 않을 것으로 사료된다.

이상의 결과를 바탕으로 추후 철근구속을 받는 고강도 콘크리트의 자기수축응력에 대한 이론적 예측 연구를 진행하고자 한다.

#### 참 고 문 헌

1. E.Tazawa, Y.Matsuoka, S.Miyazawa, S.Okamoto "Effect of Autogenous Shrinkage on Self Stress in Hardening Concrete," int. RILEM sym, Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, pp.221~228, 1994.
2. Report, Autogenous Shrinkage Research Committee of Japan Concrete Institute, pp.81~90, 1996.
3. Ohno, Y., Nakagawa, T., and Yamamoto, S., "Investigation of test method of self stress due to autogenous shrinkage in concrete," Proceeding of Cement Concrete, No.51, pp.630~635.
4. A.M Nevile, "Properties of concrete," Wiley Fourth Edition.