

# 철근콘크리트 보에서 자기수축응력

## Autogenous Shrinkage Stress in Reinforced Concrete Beams

최익창\* 김대웅\*\*

Choi, Ik Chang Kim, Dae Ung

---

### ABSTRACT

This study is to capture autogenous shrinkage in reinforced concrete. The experiment was carried out on total 13 beams. The experiment parameters are a method of curing and reinforcement ratio. Autogenous shrinkage in reinforced concrete beam was experimentally measured. Also, the distribution of autogenous shrinkage and self stress on cross section in reinforced concrete beams were calculated. The experimental results showed that autogenous shrinkage of high strength concrete were significantly higher than that of normal strength concrete.

---

#### 1. 서론

근년 고강도 콘크리트를 실용화하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 연구중에 고강도화가 됨에 따른 콘크리트 부재의 내하력 저하의 문제점이 제기되었다. 이러한 문제점은 콘크리트 경화(硬化) 후 양생과정에서 발생하는 수축변화에 의한 잔유응력이 원인으로 생각된다. 그러므로 양생과정에서 발생하는 수축변화의 정량적 평가와 잔유응력 발생 메커니즘을 명확히 규명하는 것은 매우 중요하며, 고강도 콘크리트의 실용화를 위해 선행되어야 한다.

콘크리트는 제조과정에서 여러종류의 수축변화를하며 경화수축, 건조수축(Dry Shrinkage) 등이 알려져 있다. 양생과정중의 수축변화에 의해 발생하는 잔유응력은 철근콘크리트 구조물에 있어서 균열의 발생시킬뿐만 아니라 부재의 내하력을 저하시키는 중요한 원인이다. 이러한 잔유응력의 발생은 경화수축과 건조수축이 주된 원인으로 생각되었다. 그러나 고강도 콘크리트에서는 자기수축(Aotogenous Shrinkage)이 매우 큰 값을 보이는 것으로 알려져 있다. 자기수축은 콘크리트의 경화후 지속적으로 발생하는 수화반응에 의해 미수화수가 반응하여 내부의 공극을 형성하며, 내부 공극에 부압이 발생하여 수축하게되는 현상이다.

---

\* 정희원, 목포해양대학교 해양토목공학과 조교수

\*\* 정희원, 목포해양대학교 해양토목공학과 석사과정

자기수축은 보통강도 콘크리트에서는 건조 수축에 비하여 작기 때문에 무시되었으나, 물-시멘트비가 작은 고강도 콘크리트에서는 건조 수축은 현저하게 감소하고 자기수축량은 매우 크다는 것이 많은 연구결과에서 보고되었다<sup>1)2)</sup>.

콘크리트의 양생중에 발생하는 자기수축은 콘크리트의 자신 및 보강철근의 구속에 의해서 자기응력을 발생시키며, 이것은 철근콘크리트 구조물의 내하력 저하를 초래하는 중요한 원인이 된다. 그러나 자기수축에 관한 연구는 주로 시멘트 페이스트(Cement Paste), 모르타르(Mortar), 철근을 보강하지 않은 콘크리트 보에 대하여 주로 되었으며, 철근을 보강한 실물 크기의 콘크리트부재에 대한 자기수축에 의한 자기응력에 관한 연구보고가 거의 없다.

본 연구는 철근콘크리트 보에서 발생하는 자기수축의 경시변화를 실측하고, 자기수축에 의해 발생하는 자기응력 발생 메커니즘을 명확히 밝히며, 콘크리트의 단면에 발생하는 자기응력 분포를 도식화하는 것이 목적이다. 즉 물-시멘트비, 철근비, 양생방법을 실험 파라메타로 하여 콘크리트 양생중에 발생하는 자기수축변형의 경시변화를 측정하여, 단면 내부에 발생하는 수축변형을 산출하고, 그 결과를 이용하여 단면 내부에 발생하는 자기응력 발생 메커니즘을 명확히 하여 단면에 발생하는 자기응력분포도를 도식화한다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 실험부재의제원

본 실험에서 행한 철근콘크리트보의 제원 및 형상은 그림 1에 나타내고 있다. 철근콘크리트 보의 실험체는 총13개이고, 단면의 폭은 14 cm, 높이는 22cm,전장은 190 cm이다.

실험변수는 표 1에 나타낸것처럼 물-시멘트비(W/C=20%, 30%, 53%), 인장철근비

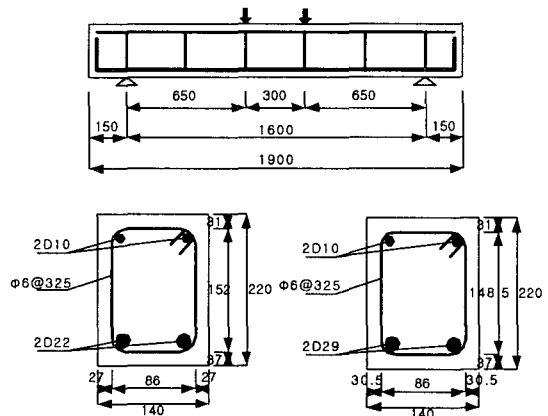


그림 1 RC보의 형상 및 크기

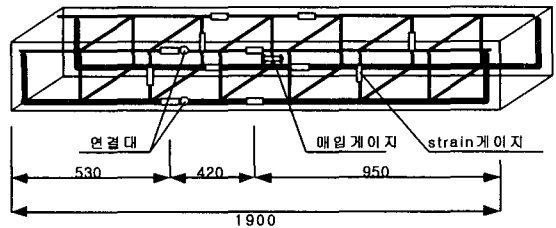


그림 2 변형 게이지의 측정 위치

표 1 공시체 일람

공시체명	물-결합재비(%)	인장철근비pw(%)	양생방법
20W-d22	20	3.02	수중양생
20S-d22			밀봉양생
20W-d29		5.02	수중양생
20S-d29			밀봉양생
20S-d00		0	밀봉양생
20W-d22		30	3.02
20W-d29	수중양생		
20S-d29	5.02		밀봉양생
20D-d29			건조양생
20S-d22	53	3.02	밀봉양생
20W-d29			수중양생
20S-d29		5.02	밀봉양생
53D-d29			건조양생

표 2 콘크리트 배합

W/C	S/a	단위량 (kg/m <sup>3</sup> )						
		W	C	S	G	F	Ad	
							감수제	AE감수제
53	42	177	334	757	1059	-	1.8	-
30	38	165	275	612	1038	275	-	1.27
20	31	160	400	442	1022	400	-	3.6

(Pw=0%, 3.02%, 5.02), 양생방법(수중양생, 밀봉양생, 건조양생)이다. 여기서, 물-시멘트비를 변화시킨 것은 보통강도와 고강도콘크리트의 자기수축량의 변화를 비교하기 위한 것이며, 인장철근비를 변화시킨 것은 자기수축이 철근량에 따른 구속 정도를 평가하기 위한 것이다. 양생방법을 변화시킨 것은 건조수축과 자기수축을 명확히 구분하여 자기수축 변화를 평가하기 위해서이다.

양생방법은 콘크리트 타설후 24시간후에 거푸집을 제거하고, 각각의 양생방법에 의해 재령28일까지 양생하였다. 수중양생은 20 °C의 항온의 수조내에서 양생시켰고, 밀봉양생은 알루미늄 접착 테이프를 이용하여 밀봉하였으며 항온20 °C, 습도50%의 실내에서 양생을 하였다.

본 실험에서는 콘크리트의 타설 24시간후부터 콘크리트 보의 양생과정중에 발생하는 수축변형은 변형게이지를 이용하여 측정하였으며, 그림 2는 변형게이지의 위치를 나타내고 있다. 콘크리트의 변형을 측정하기 위하여 보의 중앙 단면에 게이지 길이 100mm의 매설게이지를 매설하였으며, 보강철근의 변형을 측정하기 위하여 주방향 철근과 스티럽에 변형게이지를 부착시켰다.

## 2.2 사용재료 및 배합

실험에서 사용한 재료는 조강 포틀랜드시멘트를 이용하였고, 고강도 콘크리트에 대해서는 고로슬래그미분말(분말도 8010cm<sup>2</sup>/g), 고성능감수제 및 고성능AE감수제등을 사용하였으며, 굵은 골재의 최대치수는 20mm이다. 콘크리트배합은 표 2에 나타낸 것과 같다. 보강철근은 휨인장보강에 D22와 D29, 압축부에 D10, 스티럽에는 φ6를 사용하였다(그림1 참조).

## 3. 철근콘크리트 보에서 자기수축의 경시변화

### 3.1 콘크리트에서 수축의 경시변화

그림 3~5는 그림 2에 나타낸 100mm의 매설게이지에 의한 응결후(타설24시간후)부터 재령28일까지의 콘크리트의 수축의 경시변화를 나타내고 있다. 여기

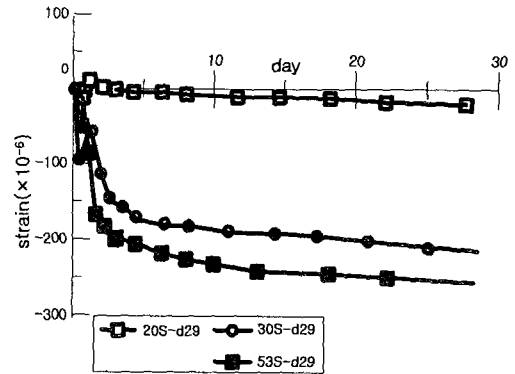


그림 3 물-시멘트비에 따른 콘크리트의 자기수축의 경시 변화

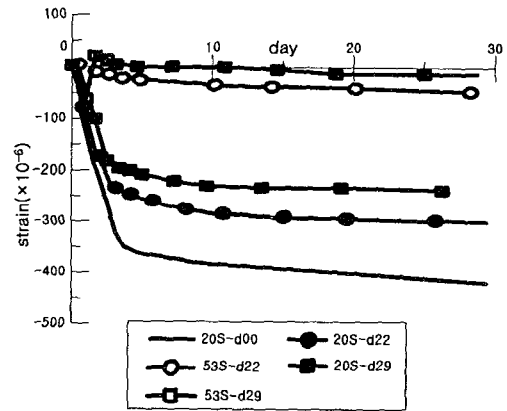


그림 4 양생 방법에 따른 콘크리트의 자기수축의 경시변화

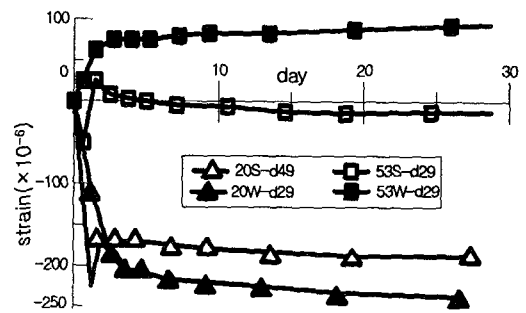


그림 5 철근비에 따른 콘크리트의 자기수축의 경시변화

에서 양생중의 온도변화를 측정하여 온도변화에 따른 수축 및 팽창의 변화는 제거하였다.

그림 3은 물-시멘트비가 다른 밀봉양생한 콘크리트 보의 중앙단면에서 콘크리트의 자기수축의 경시변화를 나타내고 있으며, 밀봉양생은 건조수축은 발생하지 않고 자기수축만 발생한다. 실험결과에 나타난 것처럼, 물-시멘트비가 작을수록 수축변형률이 크게되는 것을 나타내고 있다. 이것은 실물크기의 철근콘크리트 보에서도 콘크리트가 고강도일수록 자기수축 변형률은 증가한다는 것을 보여준다.

그림 4는 W/C=20%의 철근콘크리트 보에서 수중양생과 밀봉양생한 콘크리트 보의 자기수축 변형률을 나타내고 있으며, 밀봉양생뿐만이 아니라 수중양생을 한 부재에서도 자기수축은 발생함을 나타내고 있다. 그러나, 수중양생보다 밀봉양생이 자기수축이 크게 생기는 것을 나타내고 있으며, 이것은 자기수축의 발생 메커니즘에서 알 수 있듯이 수중양생에서는 콘크리트의 응결 후에 수분이 어느 정도는 콘크리트의 내부에 침투되어 공급되기 때문이다.

그림 5에서는 보강근의 구속이 철근콘크리트 보에서 자기수축에 미치는 영향을 조사하기 위한 것이며, 밀봉양생의 W/C=20%의 무근 및 철근콘크리트 보, W/C=53%의 철근콘크리트 보에서의 자기수축 변형률의 경시변화를 나타낸 것이다. W/C=20%의 보의 경우, 무근콘크리트 보보다 철근보강의 콘크리트 보에서 수축변형률이 작게 나타내고 있다. 이것은 자기수축이 철근의 구속에 의해 감소했기 때문이고, 그 차이가 콘크리트 단면에 자기응력으로 존재한다는 것을 의미한다.

그러나, 철근비의 차에 의한 영향은 거의 나타나지 않고 있으나, 이것은 보강철근비의 차가 작았기 때문으로 생각된다.

### 3.2 보강근의 변형률의 경시변화

그림 2에서 나타난 측정위치에서 보강근의 변형률의 경시변화를 실측하였다. 그림 6~7은 밀봉양생한 콘크리트 보에서 경시변화에 따른 보강근의 변형률을 나타낸 것이다.

그림 6은 철근콘크리트 보에서 W/C비가 작으면 작을수록 보강근의 변형률은 크게된다. 그러나, W/C=53%의 보에서는 그림 3에 나타난 것처럼 콘크리트의 자기수축이 거의 생기지 않았기 때문에 보강근의 변형률도 작은 값을 보인다.

그림 7에는 밀봉양생한 콘크리트 보의 축방향 변형률을 나타내고 있으며, 그림3~6과 같이 단면의 높이 방향의 수축변형률도 같은 경향을 나타내고 있다. 즉, 단면의 높이방향에 대해서도 W/C비가 작

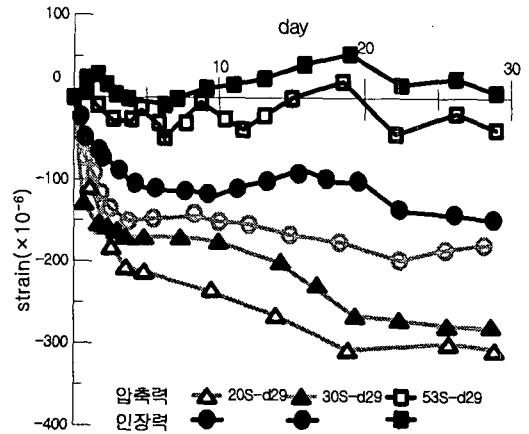


그림 6 보강근의 수축변형의 경시변화

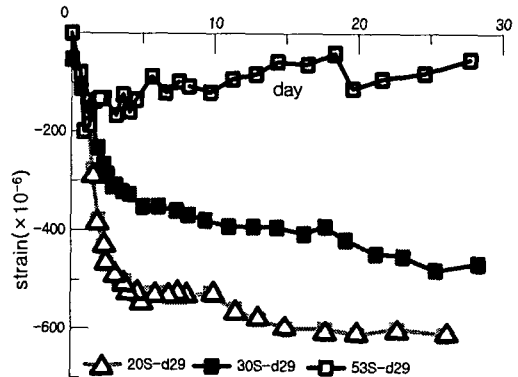


그림 7 전단보강근 수축변형의 경시변화

을수록 자기수축 변형률은 크게 된다.

#### 4. 자기수축에 의한 콘크리트의 단면에서의 자기응력의 분포

##### 4.1 단면내의 변형률 분포

콘크리트 보의 단면내에 자기수축이 일정하게 생긴다고 하면, 콘크리트 보에 불균일하게 보강된 철근의 구속에 의해서 단면에 발생하는 자기수축의 분포는 선형으로 가정하여 그림 8과 같이 생각할 수 있다. 즉, 철근보강량이 많은 인장부에서 자기수축량이 작고, 철근보강량이 적은 압축부에서는 상대적으로 자기수축량이 큰 것으로 가정하였다.

인장 및 압축 철근의 수축에 의한 변형률은 실측한 값을 이용하고, 다음과 같은 가정 “1)같은 위치에 있는 콘크리트와 철근의 변형률이 같고, 2) 단면에서 수축이 직선 분포한다” 을 하면, 그림 8에 나타난 상연, 하연의 변형률은 식(1), 식(2)로 유도할 수 있다.

$$\epsilon_u = \frac{(\epsilon_{sc} - \epsilon_{st})}{(h - (d_1 + d_2))} \times d_1 + \epsilon_{sc} \quad \text{식(1)}$$

$$\epsilon_d = \frac{(\epsilon_{st} - \epsilon_{sc})}{(h - (d_1 + d_2))} \times d_2 + \epsilon_{st} \quad \text{식(2)}$$

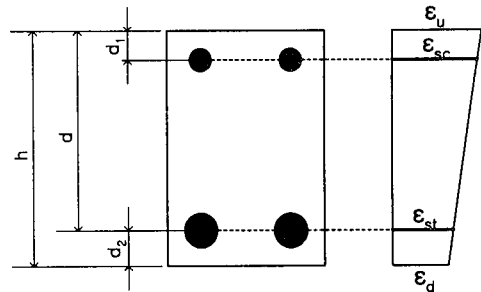


그림 8 보의 단면내의 변형률 분포

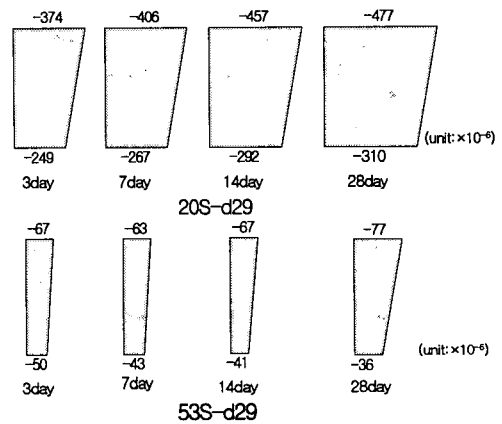


그림 9 보의 단면에서 자기수축률 분포

그림 9는 식(1)과 식(2)를 이용하여 콘크리트 보의 단면에 발생하는 자기수축변화를 나타낸 것이며, 고강도 콘크리트에서 자기수축량이 크게 나타나며, 재령에 따라 자기수축량을 증가함을 알 수 있다.

##### 4.2 보의 단면에 발생하는 자기응력

철근콘크리트보에서 발생한 자기수축이 내부철근의 구속에 의해 발생한 자기응력을 그림 10에 나타난 것과 같은 선형응력분포를 한다고 가정하여, 힘의 평형조건을 이용하여 상연과 하연에 발생하는 응력을 산출한다. 이 때, 자기응력은 전단면적에 일정하게 작용한다고 가정하며, 단면 자신에 의해 발생하는 자기응력은 무시한다.

콘크리트 및 철근의 작용력

$$C = bh(f_u + f_d)/2 \quad \text{-----} \quad (3)$$

$$T_c = E_{sc} \epsilon_{sc} A_{sc} \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$T_t = E_{st} \epsilon_{st} A_{st} \quad \text{-----} \quad (5)$$

단면에서 힘의 평형조건으로부터

$$C = T_c + T_t \quad \text{----- (6)}$$

$$T_t + T_c d_1 - C(\sigma_u + 2\sigma_d)h/3(\sigma_u + \sigma_d) = 0 \quad \text{-(7)}$$

식(3)~식(7)을 정리하면,

$$\sigma_u = \frac{(4h-6d)}{bh^2} T_t + \sigma_u = \frac{(4h-6d_1)}{bh^2} T_c \quad \text{-(8)}$$

$$\sigma_d = \frac{(6d-2h)}{bh^2} T_t + \frac{(6d_1-2h)}{bh^2} T_c \quad \text{-- (9)}$$

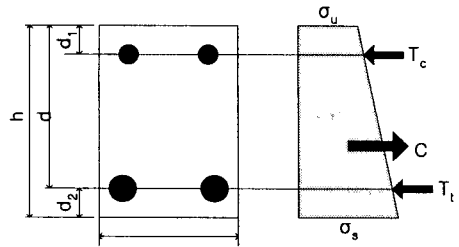


그림 10 보의 단면에서 자기응력 분포 개념도

그림 11는 식(8) 및 식(9)를 이용하여 콘크리트 보에 작용하는 자기응력의 분포의 경시변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 것처럼 콘크리트 보의 작용하는 자기응력의 크기는 상연과 하연에서 큰 차이를 보인다. 이것은 본 실험부재의 인장축 철근량이 압축축 철근량에 비해 매우 많이 배근하였기 때문으로 판단된다. 또한, 상연에서 미소하지만 압축응력이 발생하는 것으로 계산된 결과는 콘크리트 보의 내부에 발생하는 자기응력 분포를 선형으로 가정하였기 때문이다.

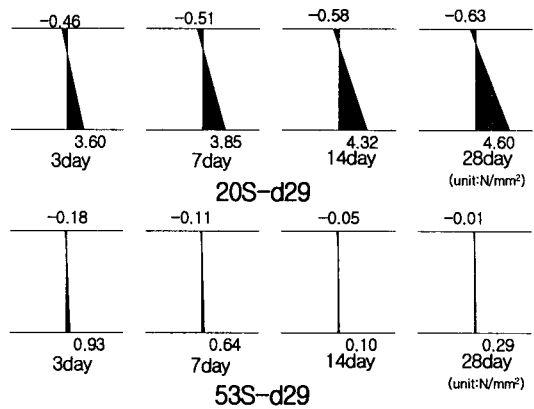


그림 11 보의 단면에서 자기응력 분포

## 5. 결 론

본 연구에서는 고강도 콘크리트를 이용한 실물크기의 콘크리트 보에 대한 실험을 통하여, 콘크리트 보에 발생하는 자기수축의 경시변화를 측정하였다. 또한 실험에서 실측된 자기수축률을 이용하여 콘크리트 단면에 발생하는 자기응력을 산출하여 평가하였다.

본 연구에서 얻어진 연구결과를 다음과 같다.

1. 실물크기의 콘크리트 보에서도 콘크리트의 압축강도가 증가하면 자기수축이 증가하는 것이 실측을 통해서 확인되었다. 특히 수중양생한 콘크리트 보에서는 보통강도의 보에서는 팽창하지만, 고강도 콘크리트 보에서는 수축하는 것이 확인되었다.
2. 콘크리트 보에서 철근비가 증가하면 자기수축은 감소하고, 자기응력은 증가한다.
3. 전단철근에 부착한 변형 게이지의 측정결과, 보의 높이 방향으로도 자기수축이 발생한다는 것이 밝혀졌다.
4. 콘크리트 보에 발생한 자기수축에 의해 콘크리트 단면에 발생한 자기응력의 분포를 산출하였다.

## 참고문헌

1. 田澤榮一, “水和反應—によるセメントペーストの自己收縮”, セメント・コンクリート, No.565, 1994.
2. Nilson, A.H, “High Strength Concrete: An Overview of Research”, prochSymp. On Utilization of high Strength Concrete, Stavanger, Norway, 1987. pp.27~38.