

콘크리트 보의 깊이에 따른 건조수축의 변화

글 김승규 / 토목기술팀 대리
전화 02-3433-7771 E-mail sgkim89@ssyenc.com



01. 서론

콘크리트는 수화작용에 필요한 수량보다 많은 물을 사용하여 배합한다. 수화하고 콘크리트 내부에 남은 물을 자유수라 하며, 이 물은 콘크리트가 대기 중에 방치될 때 증발한다. 그 결과 콘크리트는 건조수축을 일으킨다. 건조수축 변형률에 영향을 주는 인자로는 물-시멘트 비와 같은 배합특성과 부재의 크기 및 주변의 상대습도 등이 있다. 콘크리트의 건조수축을 예측하는 모델 중 가장 많이 사용되는 모델은 ACI모델, CEB-fib 모델 등이 있다. 각 모델들은 물/시멘트비와 같은 배합특성과 부재의 크기, 상대습도, 양생조건 등을 고려하여 건조수축을 예측할 수 있다. 예측모델들은 조건에 따라 수축 변형률 곡선이 결정되면 모든 부재단면 내에서 균일하게 발생하는 것으로 가정한다. 하지만 실제 보의 건조수축은 보 구조물 전체에 균일한 품질의 콘크리트를 타설하고 전단면(상부, 중앙부, 하부)에서 동일한 대기조 건에 노출되어도 보의 상단에서 가장 크고 하단으로 갈수록 건조수축량이 줄어든다.

본 고에서는 콘크리트 보 실험체의 단면 깊이에 따른 콘크리트 보의 건조수축 변형률 실험결과를 소개한다. 실험을 통해 변형률 변화의 발생원인에 대해 콘크리트 구성성분의 반응과정을 고려하는 미시적 관점이 아닌 골자체적 집중 및 블리딩 현상과 관련된 거시적 관점에서 보의 깊이 내 건조수축 변형률의 분포 발생원인을 알아본다. 추가적으로 발생원인을 고려하여 건조수축량을 예측하는 방법에 대해 소개하고자 한다.

02. 콘크리트 보의 건조수축 실험

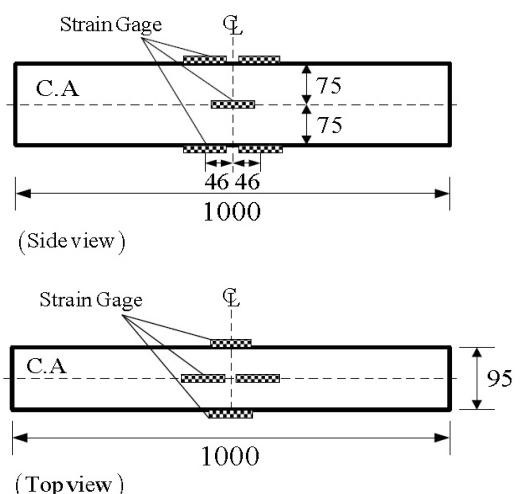
단면 깊이에 따른 콘크리트 보의 건조수축 변형률의 변화를 알아보기 위해 총 3번의 실험을 수행하였다. 첫번째 실험(실험A)과

두번째(실험B) 실험의 경우 각각 4개의 보 실험체를 제작하였고 세번째 실험(실험C)의 경우 6개의 보 실험체를 제작하였다. 실험 A, B 및 C의 실험기간은 재령 85, 63, 100일까지 계측을 수행하였다.

2.1 실험계획

보 실험체는 [그림 1]과 같이 폭 95mm, 높이 150mm, 길이 1,000mm의 제원을 갖도록 제작하였고 단면 깊이에 따른 변형률의 변화를 달라지는 것을 확인하기 위해서 상면, 중앙면 및 하면에 각각 2개씩 총 6개의 변형률 게이지를 부착하여 변형률을 계측하였다. 변형률 게이지는 굵은 골재의 최대치수인 20mm보다 2~2.5배 이상의 차이를 갖는 길이 60mm인 변형률 게이지를 사용하였다. 이는 불균질한 콘크리트의 굵은 골재 등에 의해 발생하는 응력집중으로 인한 특이 변형률 데이터를 최소화하고 계측 데이터의 신뢰도를 높일 수 있기 때문이다.

[그림 1] 무근 콘크리트보의 제원 및 변형률 게이지 부착위치



2.2 실험수행

모든 실험은 [표 1]과 같이 28일 강도 28MPa, 슬럼프 180mm의 배합강도로 설계하였다. 굵은 골재는 최대 치수는 20mm의 자연석(강자갈)을 사용하였다.

[표 1] 콘크리트 보 실험체의 배합

Test sets	Max. size of aggr., (mm)	W/C ratio (%)	Slump (mm)	Unit Weight, (N/m ³)			
				Water	Cement	Fine aggr.	Coarse aggr.
A	20	57	200	2,116	3,720	9,447	7,608
B	20	54	180	2,072	3,837	9,615	7,647
C	20	55	150	2,005	3,714	9,771	7,771

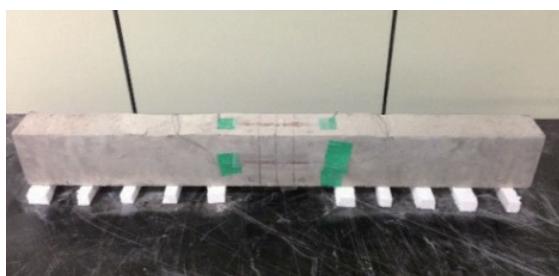
타설을 위해 보 실험체의 재원을 내경으로 갖는 합판 거푸집을 [그림 2]와 같이 제작하고 내부에는 틸형을 용이하게 하기 위해 박리유로 도포하였다. 타설 시에는 동일한 다짐효과를 위해 모든 실험체마다 동일한 전동 다짐기를 활용하여 7~8초의 시간으로 다짐작업을 수행하였다.

[그림 2] 합판거푸집



양생 2일 후 거푸집을 틸형하여 실험체의 표면에 수분이 날아갈때까지 항온항습실에서 건조하고 실험 A, B와 C 각각 재령 8, 9 및 7일에 [그림 3]과 같이 변형률 계이지를 부착하여 계측을 시작하였다.

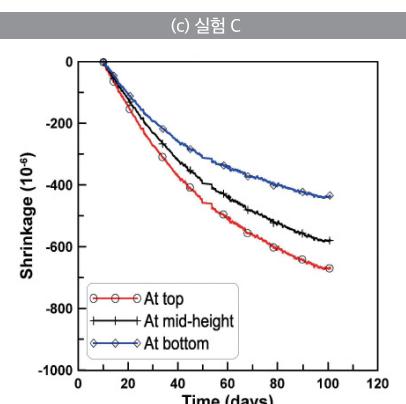
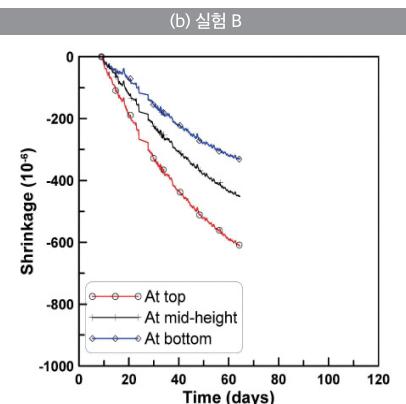
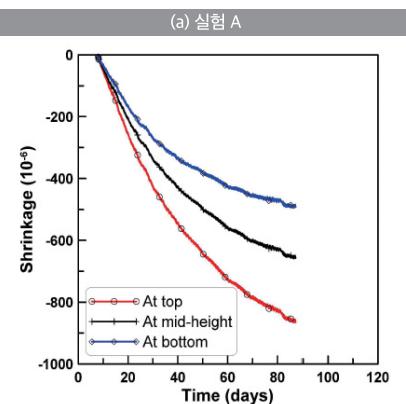
[그림 3] 변형률 계측



2.3 실험결과

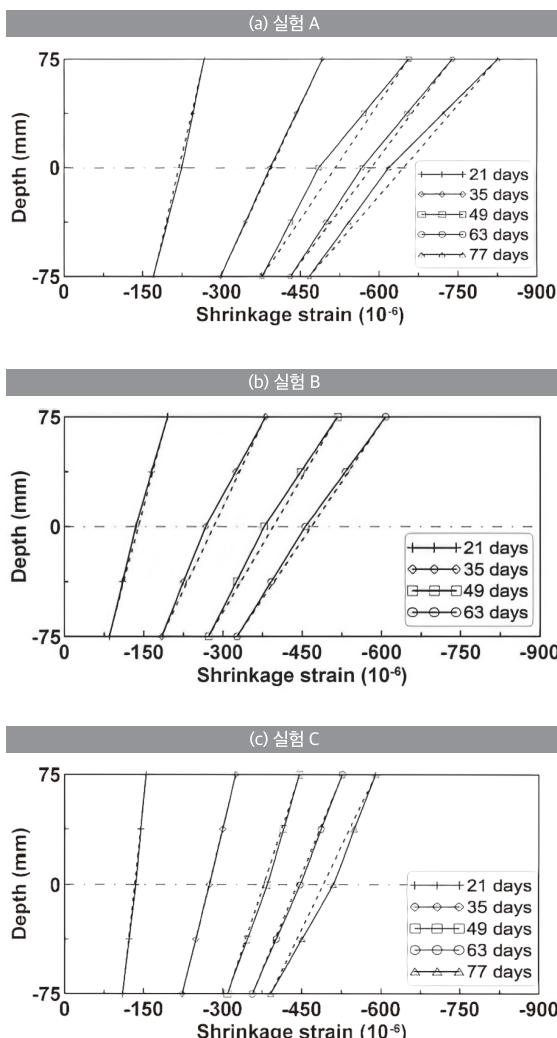
[그림 4]의 (a), (b) 및 (c)는 각각 콘크리트 보 실험 A, B 및 C의 평균 건조수축 변형률을 나타낸다. 모든 실험에서 상면의 건조수축이 가장 크고 중앙, 하면 순으로 건조수축 변형률이 깊이에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다.

[그림 4] 콘크리트 보의 건조수축 변형률:



[그림 5]의 (a), (b) 및 (c)는 실험 A, B 및 C에 대해 각기 다른 재령에서 상면, 중앙면 및 하면에서의 계측된 건조수축 변형률을 나타낸다. 세 위치의 건조수축 변형률을 연결하여 선으로 이어보면 이 선들의 기울기는 점점 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 콘크리트 보 단면의 깊이에 따른 변형률의 변화가 시간에 따라 점점 커지는 것을 나타내고 이는 보의 양쪽 끝단이 위로 밀려올라가는 곡률을 발생시킨다.

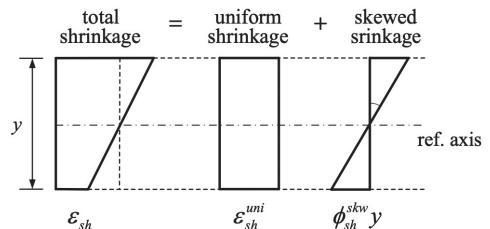
[그림 5] 콘크리트 보의 깊이에 따른 건조수축



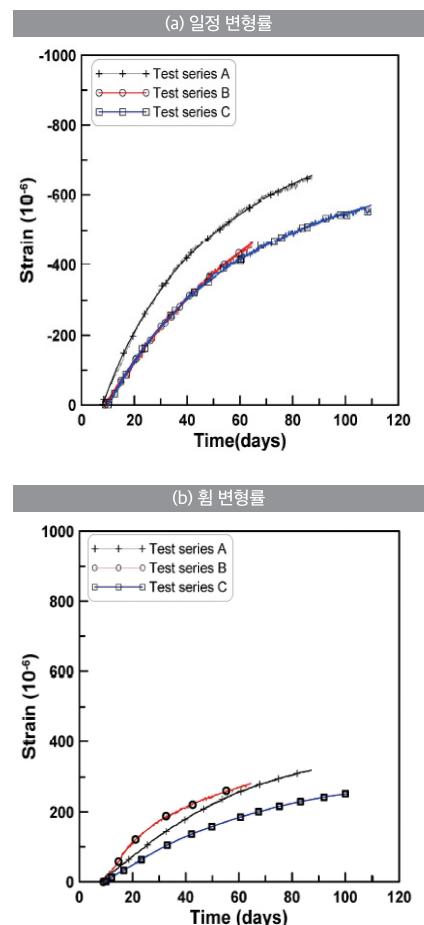
그동안 예측모델에서 고려되지 않았던 보의 깊이에 따른 건조수축 변형률의 변화를 수학적 모델로 고려하기 위해서 [그림 6]과 같이 단면전체에서 일정하게 작용하는 일정 변형률 성분

과 상면과 하면의 건조수축 변형률 차이에 의해 발생하는 흔변형률 성분으로 구분하여 [그림 7]에 나타내었다.

[그림 6] 콘크리트 보 건조수축 변형률의 구분



[그림 7] 콘크리트 보 건조수축 변형률의 구분결과



2.4 실험결과의 평가

콘크리트 보의 실험결과에서 볼 수 있는 보의 깊이에 따른 건조수축 변형률 변화는 기존의 콘크리트 보의 장기거동 해석에

서 고려되지 않았다. 이를 고려하고 일정 변형률과 흔 변형률을 간단히 비교, 분석하기 위해서는 수학적 모델이 필요하다. 가장 많이 활용되는 건조수축 예측식은 ACI 모델로 식 (I)과 같다.

식 (I)

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{(t - t_0)^\alpha}{\beta + (t - t_0)^\alpha} \times \varepsilon_{shu}$$

[그림 7]의 일정 변형률 데이터와 흔 변형률 데이터를 각각 회귀분석하여 ACI 모델식에서 권장하는 분수 함수의 형태로 정의하여 나타내었다. 여기서 ε_{shu} 은 극한 건조수축값으로 $0.78 \times 10^{-3} \text{mm/mm}$ 의 변형률을 가진다. 회귀분석으로 구한 식 (I)의 계수 α, β 의 값은 [표 2]와 같다.

[표 2] 일정 및 흔 변형률 건조수축의 α, β

Coefficient	Test A	Test B	Test C
β	β_{uni}	39.4	73.7
	β_{skew}	180.4	133.6
α	1.13		

모든 실험에서 β_{skew} 값이 β_{uni} 값 보다 큰 값을 나타내었다. 정량적으로 비교하면 실험 A와 B에서는 4.5배였고 실험C에서는 1.8배로 나타났다. 이는 일정 변형률이 흔 변형률 보다 보의 건조수축 변형률에 지배적인 것을 나타낸다.

이는 기존의 콘크리트 보의 장기거동 해석방법에서 흔 변형률을 무시하여 검토되었을 때 실제 거동과 비교적 큰 차이를 갖지 않았던 이유가 될 수 있다. 그러나 시간에 따라 흔 변형률이 증가하고 이에 따라 장기거동 해석의 정확도가 무시할 수 없는 오차를 발생 시킬 수 있다.

03. 보의 깊이에 따른 건조수축 변형률 변화 원인

3.1 단면 내 골재의 농도 분포

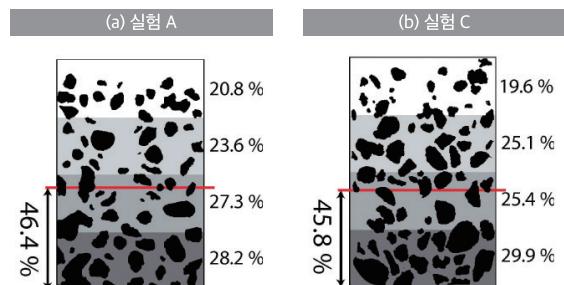
실험이 종료되고 1,000mm 길이의 실험 A, C의 실험체를 임의로 선정하여 각 250mm 길이로 총 4등분하여 절단하였다. 절단된 단면을 높이 37.5mm, 폭 95mm의 동일한 4개의 영역으로 구분하고 각 영역의 골재 농도를 측정하였다. 각 영역의 골

재농도는 [표 3]에 나타내었고 [그림 8]에서 평균 골재 농도와 골재영역의 도심축의 위치를 나타내었다. 골재영역의 도심축은 각 절단면의 골재 면적의 단면 1차모멘트를 통해 계산하였다.

[표 3] 골재의 영역별 농도

Test sets	Percentage ratio (%)							
	Test A				Test C			
	A-1	A-2	A-3	Aver.	C-1	C-2	C-3	Aver.
top	21.5	21.3	18.9	20.8	21.8	19.8	17.4	19.6
Top-mid	26.1	23.2	24.0	23.6	21.1	27.0	30.3	26.1
Bot-mid	34.6	26.8	24.4	27.3	26.6	21.8	27.8	25.4
bottom	33.1	28.6	32.8	28.2	30.5	31.4	27.8	29.9
G_{area}	47.8	46.8	44.8	46.4	46.0	46.3	45.1	45.8

[그림 8] 영역별 골재의 농도 및 골재영역의 도심



4개의 영역에서 상단영역에서 골재의 농도가 가장 낮으며 하단으로 갈수록 증가하였고 절단면에서 골재영역의 도심축은 실험 A와 C에서 각각 하단의 46.4%, 45.8% 위치로 계산되었다.

일반적으로 골재집중도와 골재강성의 변화가 건조수축량의 변화를 일으키는 것으로 알려져 있는데 이는 골재강성에 따라 콘크리트가 수축할 때 콘크리트의 수축이 골재입자에 의해 억제되기 때문이다. 따라서 보의 단 깊이에 따라 상부에는 상대적으로 건조수축 변형률에 저항하는 골재량이 작고 하부에는 많아 건조수축 변형률에 변화가 발생한 것을 확인할 수 있었다.

3.2 골재의 농도 분포 원인

실험체의 절단면을 통해 골재 농도의 단면 깊이에 따른 변화는 타설 시에 발생하였다는 것을 알 수 있다. 타설 시 골재 농도의 변화는 물의 블리딩(bleeding)현상과 다짐작업의 2가지 원인으로 설명할 수 있다.

먼저 블리딩은 골재가 침강하고 물이 상승하여 상면에 모이는 현상으로 단면 내 불균일한 물-시멘트 비율과 골재농도 변화를 발생시킨다. 이는 보 실험체의 상부 영역에서 골재농도를 낮추게 되고 상부에는 물-시멘트 비율이 늘어 건조수축 변형률이 증가하게 된다.

단면 깊이에 따른 골재농도 변화의 2번째 원인은 다짐작업이다. 타설 시 다짐봉과 바이브레이터 등의 물리적작용에 의해 상대적으로 크고 무거운 골재가 하부로 이동하게 되는 것이다. 다짐작업은 특히 골재의 침강과 상호 관련있는 물의 블리딩 현상을 더더욱 증가시킬 수 있다.

04. 보의 깊이에 따른 건조수축 변형률 예측

보의 깊이에 따른 건조수축 변형률의 예측은 건조수축 변형률에 대한 골재 체적 집중도의 영향을 고려하는 식 (2)의 Hobbs의 방정식을 활용하였다.

식 (2)

$$C_c = C_m \left[\frac{1 - D_a}{1 + D_a} \right]$$

여기서 C_c , C_m 및 D_a 은 각각 일정 건조수축 변형률, 시멘트 페이스트 부분의 건조수축 변형률, 골재체적의 집중도를 나타낸다.

C_m 은 실험결과의 일정 건조수축 변형률 C_c 와 [표 1] 배합설계의 골재체적 집중도 D_a 값을 각각 대입하여 계산하였다.

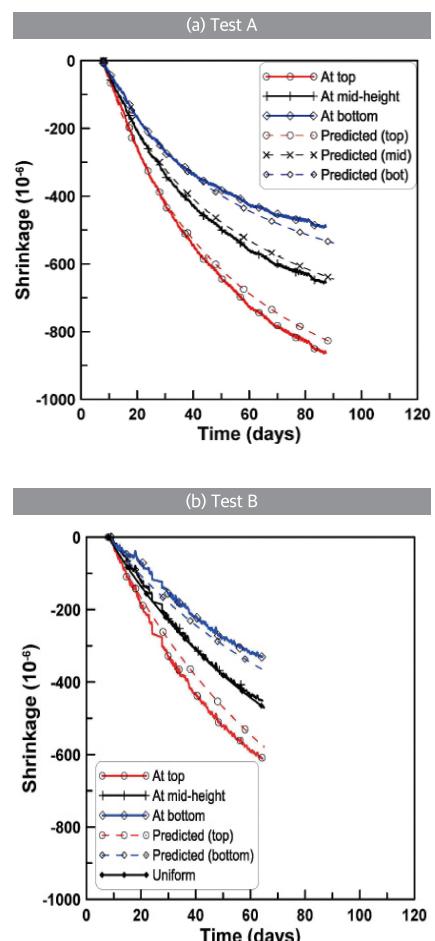
계산한 C_m 값은 각 영역에서 같은 값을 사용하고 실험 A, B 및 C의 각 4개 영역에 대한 D_a 는 배합설계에서 결정된 전체 골재체적에서 [표 3]에 정리한 골재 농도에 해당하는 체적 집중도로 환산하여 계산하였다. 각 영역의 골재 체적(V_a)과 4개 영역에 대한 D_a 를 [표 4]에 나타내었다. 실험 B의 경우 골재의 농도가 측정되지 않았기 때문에 중앙을 기준으로 상위영역과 하위영역 2개의 영역으로 구분하고 D_a 값을 상위에는 -5%, 하위에는 +5%의 변동폭을 임의로 적용하였다.

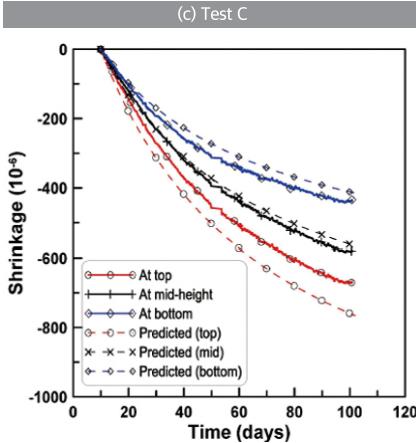
[표 4] 실험들의 골재 체적 집중도(D_a)

Test sets	Test A		Test B		Test C	
	V_a	D_a	V_a	D_a	V_a	D_a
Top	6,340	0.69	-	0.70	5,950	0.68
Top-mid	7,190	0.73	-		7,620	0.75
Bot-mid	8,320	0.78	-	0.80	7,710	0.76
Bottom	8,590	0.79	-		9,070	0.81
Average	-	0.75	-	0.75	-	0.75

[그림 9]에서 상면, 중앙면 및 하면의 위치에서 계측된 건조수축 변형률을 실험결과와 Hobbs의 방정식을 기반으로 예측된 건조수축 변형률을 비교하였다.

[그림 9] 보 건조수축 변형률 실험결과와 예측결과의 비교





05. 결론

콘크리트 보의 깊이에 따라 건조수축 변형률이 변화하는 현상을 소개하고자 하였다. 콘크리트 보 실험체의 실험결과와 변형률 변화의 발생원인 및 예측방법에 대해 정리하면 다음과 같다.

- ① 보 실험체에 대한 실험결과 보의 깊이에 따른 건조수축 변형률은 상면에서 가장 크고 하면에서 가장 작은 것을 확인하였다.
- ② 변형률 변화의 발생원인은 보의 단면 깊이에 따라 균일하지 않은 골재 농도 분포로 확인하였다.

③ 콘크리트 보의 단면을 따라 골재 농도가 균일하지 않은 이유는 콘크리트 타설 시 블리딩 현상 및 다짐작업 등의 영향으로 판단되고 골재농도는 보 단면의 상부에서 하부로 갈수록 증가하는 것을 확인하였다.

④ 보의 깊이에 따른 건조수축 변형률을 골재 농도의 변화를 고려할 수 있는 Hobbs의 방정식으로 예측하였다. 예측된 건조수축 변형률과 측정된 건조수축 변형률의 비교결과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이를 통해 골재 농도 분포가 건조수축 변형률의 변화에 많은 영향이 있다고 판단할 수 있었다.

※ 참고문헌

01. Jeong, J. H., Park, Y. S., & Lee, Y. H. Variation of shrinkage strain within the depth of concrete beams. *Materials*, 2015, 8(11): 7780-7794.
02. ACI Committee 209. Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete (ACI 209R-92); ACI: Farmington Hills, MI, USA, 2008.
03. Hobbs, D.W. The dependence of the bulk modulus, Young's modulus, creep, shrinkage and thermal expansion of concrete upon aggregate volume concentration. *Mater. Struct.* 1971, 4, 107-114.
04. Hobbs, D.W. Influence of aggregate restraint on the shrinkage of concrete. *ACI 1974*, 71, 445-450.

