

# 건조수축에 의한 철근콘크리트 부재의 곡률과 처짐

## Curvature and Deflection of Reinforced Concrete Member Due to Shrinkage

김진근\*      이상순\*\*      김민수\*\*\*      신병천\*\*\*\*  
Kim, Jin-Keun    Lee, Sang-Soon    Kim, Min-Su    Shin, Byung-Chun

### ABSTRACT

Deflections due to warping are frequently ignored in design calculation. For thin member, shrinkage deflection results in important and objectionable additions to the dead load deflection. Thus it may be desirable to consider warping effects due to shrinkage for thin member.

Some methods for computing shrinkage curvature have been proposed by many researchers. The approximate methods widely used in the recent years are the equivalent tensile force method, Miller's method and Branson's method (an empirical method based on Miller's approach extended to include doubly reinforced beams). These methods were somewhat oversimplified and could be too conservative in the case of well cured concrete structure.

In this paper, the approximate methods for computing shrinkage curvature are reviewed and new approximate method based on the Age-Adjusted Effective Modulus method is proposed.

### 1. 서론

설계시에는 일반적으로 건조수축에 의한 처짐을 무시하나, 슬래브와 같은 얇은 부재의 경우에는 건조수축에 의한 처짐은 결코 무시할 수 없는 값이며 별도로 고려하여야 한다. 일반적으로 건조수축이 발생하더라도 무근콘크리트 부재의 경우에는 뒤틀림(warping)이 발생하지 않는다. 그러나 철근콘크리트 부재의 경우에는 철근에 의한 내부구속으로 인하여 뒤틀림이 발생하고, 뒤틀림의 정도는 철근의 배근상태, 부재의 형상과 크기, 사용된 콘크리트의 재료적 특성 및 환경조건에 따라 달라진다.

부재의 길이방향으로 배근이 일정한 경우의 뒤틀림에 의한 처짐은 식(1)에 의해 계산할 수 있다.

$$a_{sh} = \xi_w x_{sh} l^2 \quad (1)$$

여기서,  $x_{sh}$ 는 수축에 의해 발생한 곡률이며,  $\xi_w$ 는 부재의 지지조건에 관계되는 계수로서 단순지지인 경우는 0.13이고 캔티레버인 경우는 0.5이다.

기존의 건조수축에 의한 곡률산정방법은 등가인장용력법(equivalent tensile force method), Miller의 방법 및 Branson의 방법 등이 있다. Miller의 방법과 Branson의 방법은 모두 제한된 실험결과를 바탕으로 제안된 식들이다.

\*정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

\*\*정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

\*\*\*정회원, 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

\*\*\*\*정회원, 한국기계연구원 책임연구원

본 연구에서는 먼저 기존의 건조수축에 의한 곡률산정방법을 검토하고, 수정유효탄성계수법(age-adjusted effective modulus method)에 근거한 새로운 곡률산정방법을 제시하고자 한다. 그리고 Miller의 실험결과와도 비교하여 제안식의 타당성을 검토하였다.

## 2. 기존의 방법

본 장에서는 철근콘크리트 보나 1방향 슬래브에 대하여 기존의 건조수축에 의한 곡률산정방법에 대하여 가략히 기술하였다.

### 2.1 등가인장응력법<sup>(1,5)</sup>

등가인장력법에 의하면 건조수축에 의한 곡률은 식(2)와 같다. 이 식은 철근이 콘크리트의 건조수축 변형을 억제하는 효과를 고려하기 위하여 철근에 건조수축량에 비례하는 인장응력이 작용하는 것으로 간주하여 유도한 식이다. 그리고 크리프 효과를 고려하기 위하여 단면의 휨강성을 50% 감소시켜 사용하였다.

$$x_{sh} = \frac{T_s e_g}{E_c I_g / 2} \quad (2)$$

여기서  $T_s = (A_s + A_s') \epsilon_{sh} E_s$ 이고,  $e_g$ 는 철근의 중심이 단면의 도심으로부터 떨어진 거리이며,  $I_g$ 는 철근을 무시하고 계산한 콘크리트의 단면2차모멘트이다. 이 방법은 단면의 형상과 철근의 배근상태에 관계없이 적용될 수 있으나, 콘크리트의 크리프 특성을 적절히 고려하지 못하고 있다.

### 2.2 Miller의 방법<sup>(6)</sup>

이 방법은 단철근보에서만 적용되며, 압축부 연단의 변형도를  $\epsilon_{sh}$ 로 가정하여 유도한 식이다.

$$x_{sh} = \frac{\epsilon_{sh} - \epsilon_s}{d} = \frac{\epsilon_{sh}}{d} \left[ 1 - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{sh}} \right] \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon_s$ 는 건조수축에 의한 철근의 변형도이며, Miller는 실험을 통하여 ( $\epsilon_s / \epsilon_{sh}$ )를 구하였다. 철근 배근이 많은 경우에는 0.1이고 적당한 경우에는 0.3이다.

### 2.3 Branson의 방법<sup>(2)</sup>

이 방법은 Miller의 방법에 기초를 둔 실험식이며, Miller의 방법은 단철근보에 한정된 것에 비하여 이 식은 단철근과 복철근보에 모두 적용된다.

$$x_{sh} = A_{sh} \frac{\epsilon_{sh}}{h} \quad (4)$$

$$(\rho - \rho') < 3\% \text{인 경우} \quad A_{sh} = 0.7(\rho - \rho')^{1/3} \left[ \frac{\rho - \rho'}{\rho} \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$(\rho - \rho') > 3\% \text{인 경우} \quad A_{sh} = 1 \quad (6)$$

여기서  $\rho$ 와  $\rho'$ 는 압축철근비와 인장철근비이며, 단위는 %이다. 그림 1은 철근량에 따른 계수  $A_{sh}$ 값을 나타낸 것이며, 압축철근량이 증가할수록 곡률이 감소함을 알 수 있다. 위 식에서 계수  $A_{sh}$ 는 철근비만의 함수로 표현되어 있으며, 건조수축에 의한 곡률은 철근의 배근상태, 부재의 형상과 크기, 사

용된 콘크리트의 재료적 특성, 양생기간 등의 함수이나 이를 적절히 고려하지 못하고 있다.

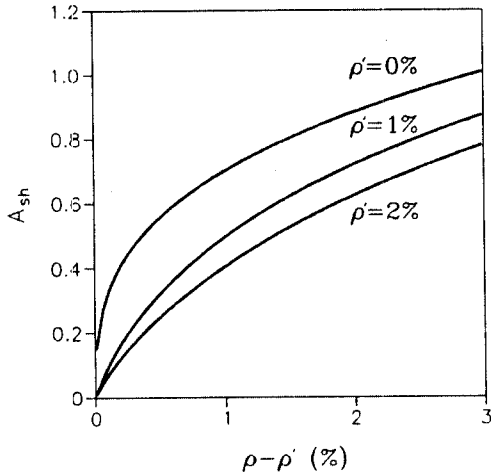


그림 1 계수,  $A_{sh}$

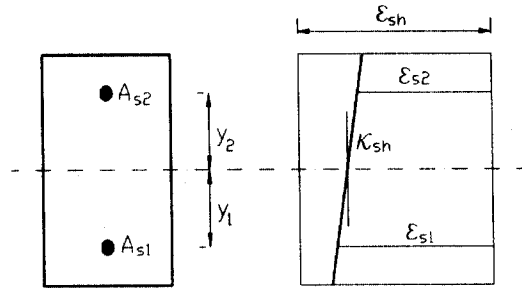


그림 2 복철근 직사각형 단면

### 3. 제안된 방법

복철근 철근콘크리트 보는 내부적으로 2차 부정정이다. 즉 철근은 건조수축에 의한 콘크리트의 수축을 억제시키며, 재령이 증가함에 따라 콘크리트에는 인장응력이 철근에는 압축응력이 발생한다. 복철근 보에서 건조수축에 의한 압축철근과 인장철근에서의 변형도 변화  $\epsilon_{s1}$ ,  $\epsilon_{s2}$ 는 식(7)로부터 계산할 수 있다. 이 식은 수정유효탄성계수법에 근거하여 평형조건과 적합조건을 사용하여 유도한 식이다.<sup>(4)</sup>

$$\begin{aligned}\epsilon_{s1} &= \beta_D [1 + \beta_{22} - \beta_{21}] \epsilon_{sh} \\ \epsilon_{s2} &= \beta_D [1 + \beta_{11} - \beta_{12}] \epsilon_{sh}\end{aligned}\quad (7)$$

여기서  $\epsilon_{sh}$  : 내외부 구속이 없는 경우의 자유건조수축량(free shrinkage)

$$\begin{aligned}\beta_D &= \frac{1}{(1 + \beta_{11})(1 + \beta_{22}) - \beta_{21}\beta_{12}} \\ \beta_{11} &= \rho n^* (1 + y_1^2/r^2) & \beta_{12} &= \rho n^* (1 + y_1 y_2/r^2) \\ \beta_{22} &= \rho' n^* (1 + y_2^2/r^2) & \beta_{21} &= \rho' n^* (1 + y_1 y_2/r^2)\end{aligned}$$

건조수축에 의한 곡률은 식(8)로부터 계산할 수 있다.

$$\kappa_{sh} = -\frac{\epsilon_{s1} - \epsilon_{s2}}{y_1 - y_2} = \beta_D \frac{\beta_{11} - \beta_{22} - \beta_{12} + \beta_{21}}{y_1 - y_2} \epsilon_{sh}\quad (8)$$

일반적으로 직사각형 복철근 보에서 철근의 피복 두께는 같으므로  $y_1 = -y_2 = y$ 이며, 이를 식(8)에 대입하여 정리하면 식(9)와 같다.

$$\kappa_{sh} = \beta_D n^* (\rho - \rho') 2 \frac{y^2}{r^2} \frac{\epsilon_{sh}}{\eta h} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \beta_D &= 1 / [1 + (n^* \rho + n^* \rho') (1 + y^2/r^2) + (n^* \rho)(n^* \rho') 4y^2/r^2] \\ \eta &= 2y/h \end{aligned}$$

$\beta_D$ 는 식(10)과 같이  $\overline{\beta}_D$ 로 단순화시킬 수 있으며, 이로 인한 오차는 압축철근비가 1%이고 인장철근비가 2%인 경우 3% 정도이다( $n^*=25$ ,  $y^2/r^2=2$ ). 그리고 그림 3은  $y^2/r^2=2$ 인 경우의  $\overline{\beta}_D/\beta_D$ 를 나타낸 것으로, 오차가 10%미만인 것을 알 수 있다.

$$\overline{\beta}_D \doteq \beta_D = \frac{1}{[1 + n^* \rho' (1 + y^2/r^2)][1 + n^* \rho (1 + y^2/r^2)]} \quad (10)$$

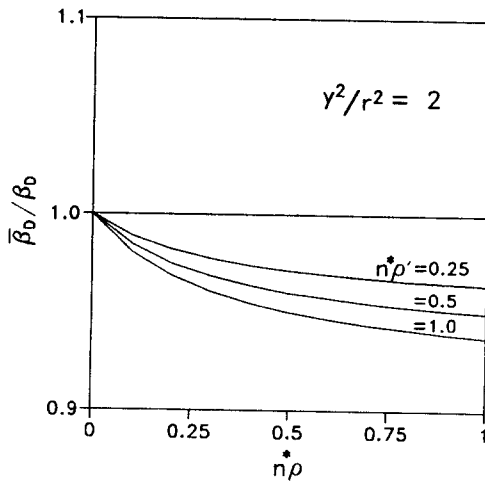


그림 3  $y^2/r^2=2$ 인 경우의  $\overline{\beta}_D/\beta_D$

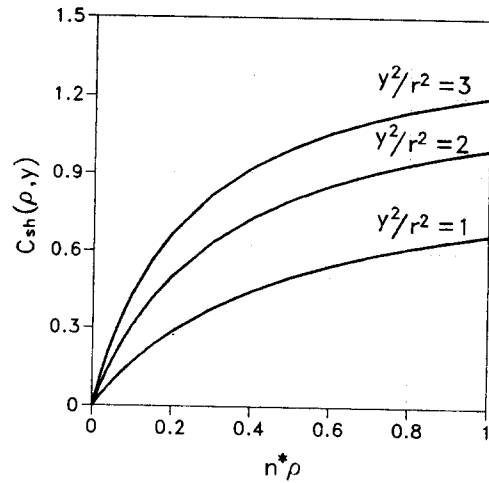


그림 4 계수  $C_{sh}(\rho, y)$

식(10)을 식(9)에 대입하여 정리하면 식(11)과 같다.

$$\kappa_{sh} = \overline{C}_{sh} \frac{\epsilon_{sh}}{\eta h} = [C_{sh}(\rho, y) - C_{sh}(\rho', y)] \frac{\epsilon_{sh}}{\eta h} \quad (11)$$

$$C_{sh}(\rho, y) = \frac{2n^* \rho (y^2/r^2)}{1 + n^* \rho (1 + y^2/r^2)} \quad (12)$$

표 1은  $n^*=25$ ,  $\rho=0.02$ ,  $\rho'=0$ 인 경우에 부재두께에 따른 곡률을 나타낸 것이다. 철근의 피복두께는 4cm로 가정하였으며, 건조수축량은 배합조건과 외기조건이 표준상태인 경우에 대하여 ACI 모델식을 사용하여 계산하였다. 부재두께가 크짐에 따라  $y^2/r^2$ 은 증가하며, 따라서 계수  $\overline{C}_{sh}$ 가 증가됨을 알 수 있다. 그러나 부재두께가 크짐에 따라 자유건조수축량(free shrinkage)은 급격히 감소하며, 곡률이 부재의 두께에 반비례하므로 부재두께가 증가할 수록 곡률이 급격히 감소하는 경향을 보인다. 따라서 건조수축에 의한 휘어짐(warping)은 부재가 두꺼운 경우에는 크지 않음을 알 수 있다.

표 1 부재두께에 따른 곡률

h (cm)	$\gamma_{is}$	$y^2/r^2$	$\overline{C}_{sh}$	$\kappa^{sh} (\times 10^{-6} \text{rad/cm})$	
				proposed method	Branson's method
20	0.95	1.0	0.50	30.9	32.7
40	0.75	1.8	0.75	13.7	12.9
80	0.47	2.3	0.87	4.4	4.0

표 2  $y_1 \neq -y_2$  인 직사각형 단면의 경우

$\rho'$	$\kappa^{sh} (\times 10^{-6} \text{rad/cm})$	
	proposed method	exact
0	34.8	34.8
0.005	25.2	25.4
0.010	18.2	18.6

앞에서는  $y_1 = -y_2 = y$ 인 직사각형 단면에 한정하여 언급하였다.  $y_1$ 과  $-y_2$ 의 차이가 큰 경우에는 식 (13)에 의하여 건조수축에 의한 곡률을 계산할 수 있다.

$$\kappa_{sh} = C_{sh}(\rho, y_1) \frac{\epsilon_{sh}}{2y_1} + C_{sh}(\rho', y_2) \frac{\epsilon_{sh}}{2y_2} \quad (13)$$

표 2는  $h=20$ ,  $n^*=25$ ,  $y_1=7$ ,  $y_2=-4$ ,  $\rho=0.02$ ,  $\rho'=0\sim 0.02$ 인 직사각형 단면에서 건조수축에 의한 곡률을 계산한 값이며, 건조수축량은 배합조건과 외기조건을 표준상태로 가정하였다. 단면해석알고리즘<sup>(4)</sup>을 사용하여 계산한 결과를 정해로 간주할 때, 제안된 식은 비교적 정확한 것으로 판단된다.

#### 4. 기존의 방법과 제안된 방법의 비교

Miller는 단철근 직사각형 보에 대해서 철근비와 단면의 크기를 변수로 하여 건조수축에 의한 곡률을 측정하는 실험을 실시하였다.<sup>(6)</sup> 표 3은 실험결과와 기존의 방법 및 제안된 방법을 비교한 것이다. Branson의 방법이 Miller의 방법보다 실험값에 근접함을 알 수 있으며 Branson의 방법은 실험값보다 대체적으로 약간 작은 값을 보였다. 반면에 제안된 방법은 실험값보다 대체적으로 약간 큰 값을 보였으며 비교적 잘 맞는 것으로 판단된다. 그런데 이 실험에서는 1일이 지난후에 거푸집을 제거하고 측정을 시작하였는데, 일반적으로 양생기간이 1일 이상인 점을 감안한다면 Branson의 방법과 Miller의 방법은 상당히 안전측임을 알 수 있다. 그림 6은 제안된 방법을 사용하여 양생기간에 따른 곡률을 비교한 것이다. 양생기간이 7일인 경우는 1일인 경우에 비하여 약 60%정도임을 알 수 있다. 그리고 건조수축량이 동일한 경우 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 콘크리트의 탄성계수가 증가하고 크리프 계수가 감소한다. 결과적으로 건조수축에 의한 뒤틀림도 감소하게 될 것이다. 그림 6은 콘크리트의 압축강도가 20MPa인 경우와 40MPa인 경우를 비교하여 나타낸 것이다. 기존의 방법들은 보통강도 콘크리트에 한정되어 제안되었으며, 따라서 고강도 콘크리트 부재의 경우에는 건조수축에 의한 곡률을 과대평가하는 경향이 있다.

표 3 실험값과 계산값의 비교

		$f'_c$ (MPa)	$\epsilon_{sh}(120, 1)$ ( $\mu\epsilon$ )	h (cm)	$\rho$ (%)	curvature ( $\times 10^{-6} \text{rad/cm}$ )			
						Measured $\chi_{sh, m}$	$\chi_{sh, c}$		
							proposed method	Miller's method	Branson's method
series 1	s1-1	20	662	7.62	3.31	91	96	104	91
	s1-2			10.16	2.23	62	69	72	60
	s1-3			12.70	1.68	46	52	55	43
	s1-4			15.24	1.34	39	41	45	34
series 2	s2-1	27	697	7.62	3.31	96	91	104	91
	s2-2			10.16	2.23	62	66	72	60
	s2-3			12.70	1.68	43	49	55	43
	s2-4			15.24	1.34	30	38	45	34
series 3	s3-1	20	591	7.62	1.66	61	71	81	72
	s3-2			10.16	1.12	51	51	56	47
	s3-3			12.70	0.84	36	38	43	34
	s3-4			15.24	0.67	29	29	35	27

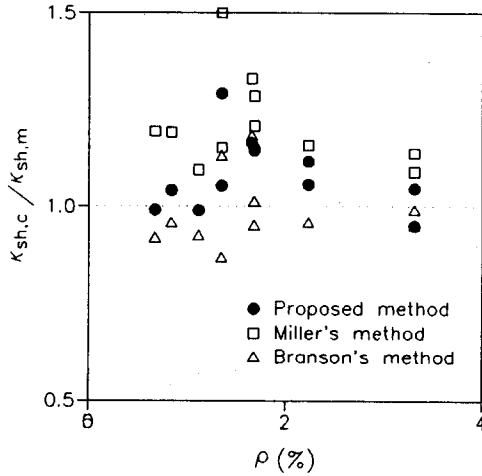


그림 5 실험값과 계산값의 비교

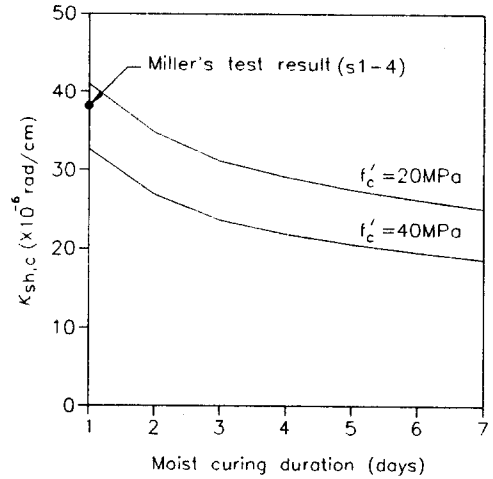


그림 6 양생기간에 따른 곡률

#### 4. 결론

- 1) Miller의 실험결과와 비교해볼 때, Branson의 방법이 Miller의 방법보다 실험값에 근접함을 알 수 있으며 Branson의 방법은 실험값보다 대체적으로 약간 작은 값을 보였다. 반면에 제안된 방법은 실험값보다 대체적으로 약간 큰 값을 보였으며 비교적 잘 맞는 것으로 판단된다.
- 2) 양생기간이 길어지면 건조수축량이 감소하고, 건조가 시작될때의 콘크리트 강도가 증가됨으로 인하여 건조수축에 의한 곡률이 크게 감소한다. Miller의 방법과 Branson의 방법은 이를 고려하지 못하고 있으며 1일 이상의 양생이 이루어진 부재의 곡률을 과대평가할 수 있다.
- 3) 향후 콘크리트의 강도 및 양생기간이 건조수축에 의한 뒤틀림에 미치는 영향은 실험적으로 규명되어야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술처의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures," American Concrete Institute, Detroit 1992.
2. ACI Committee 435, "Deflections of Reinforced Concrete Flexural Members," ACI Journal, Proceedings V.63, No. 6, June, 1966, pp.637-674. Also, ACI Manual of Concrete Practice, Part 2.
3. Branson, Dan E., "Instantaneous and Time Dependent Deflections of Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams," Report No. 7, Part I, Alabama Highway Research Department, Bureau of Public Roads, Aug. 1963 (1965), pp 1-78
4. Neville, A.M., Dilger, W.H. and Brooks, J.J., Creep of Plain and Structural Concrete, Construction Press, London and New York, 1983, 267pp.
5. Ferguson, P.M., Discussion of "Warping of Reinforced Concrete Due to Shrinkage" by A.L. Miller, ACI Journal, Proceedings, V.54, No.6, Dec. 1958, pp1393-1402
6. Miller, Alfred L., "Warping of Reinforced Concrete Due to Shrinkage," ACI Journal Proceedings V.54, No. 11, May 1958, pp939-950.