

# 附着되지 않은 軸方向 프리스트레스트 콘크리트 部材의 비틀 龜裂幅 推定式에 關한 研究

A Study on Torsional Crack Width in Ungouted Axial Prestressed Concrete Members

○고원준\* 박선규\*\* 전찬기\*\*\* 이인원\*\*\*\*

## 1. 서론

현재, 프리스트레스트 콘크리트(PSC)의 사용증가 및 곡선적 구조물과 대형구조물의 설계와 시공의 증가로 부재단면이 작아지고 설계방법도 정밀해지면서 비틀에 의한 균열 추정에 관한 문제를 중요하게 다루게 되었다. 특히 PSC부재에서의 균열은 PS긴장재 부식에 대한 위험성때문에 더욱 효과적인 균열폭 제한과 이를 위한 예측치가 필요하다. 그러나 각국 시방서에서는 비틀 균열에 대한 경우 명확한 기준이 미흡하고, 이에 대한 균열폭 산정식이 거의 없는 상태이다. 기존의 비틀 균열 추정식들은 평균값을 구한 후, 설계 시 확률적 방법으로 얻어진 수치를 적용하여 최대값을 추정함으로써 정확한 최대 균열폭을 얻을 수 없기 때문에 한계 균열폭 설정의 난점이 있었다. 1994년 박<sup>[6]</sup>은 균열각을 고려한 PSC구조에서 부착 전달길이의 이론을 이용해서 탄성과 소성에 대한 미분방정식을 유도 및 고안하여 비틀 최대 균열폭을 계산할 수 있었다. 본 논문은 CEB-FIP Model Code 1990(MC 90)<sup>[1]</sup>, Eurocode 2(EC2)<sup>[2]</sup>에서 부착전달길

이와 철근과 콘크리트사이의 변형률관계를 이용하여 비틀에 대한 축방향 프리스트레싱 영향과 최대 비틀 균열폭을 직접적으로 구해 평균값을 얻고자 한다.

## 2. 비틀을 받는 PSC부재의 철근응력

축방향 프리스트레싱이 작용하는 비틀 부재의 균열연구를 위하여 Specht<sup>[7]</sup>이론에 의한 비틀 균열각( $\theta$ )을 입체 유효트러스 모델에 적용하면 다음과 같은 철근의 인장응력을 구할 수 있다.

(1) Specht-축방향 프리스트레싱에 의한 균열각  $\theta$

1)  $0 < \sigma_p < 7.0 \text{ N/mm}^2$  일 때

$$\theta = 20 + 2.5 \times [10 - \sqrt{100 - (1.43 \times \sigma_p - 10)^2}] \quad (1)$$

2)  $\sigma_p > 7.0 \text{ N/mm}^2$  일 때 :  $\theta = 20^\circ$  (일정)

(2) 축방향 프리스트레싱이 작용하는 RC부재에서 종방향 철근의 인장응력  $\sigma_{sl}$

\* 성균관대학교 토목공학과 석사과정  
\*\* 정희원, 성균관대학교 토목공학과 조교수  
\*\*\* 정희원, 인천전문대학 토목과 부교수  
\*\*\*\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

$$\sigma_{sl} = \frac{U_k \times M_T}{2 \sum A_{sl} \times A_{k \times} \tan \theta} \quad (2)$$

(3) 축방향 프리스트레싱이 작용하는 RC부재에서 횡방향 철근의 인장응력  $\sigma_{ss}$

$$\sigma_{ss} = \frac{a_{ss} \times M_T \times \tan \theta}{2 \times A_{ss} \times A_k} \quad (3)$$

여기서,  $A_{sl}, A_{ss}$ : 횡,종방향 철근의 단면적

$a_{sl}, a_{ss}$ : 횡,종방향 철근의 배근간격

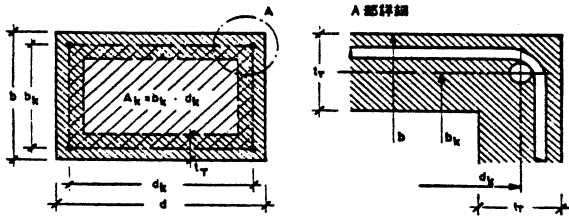


그림 1 비틀림에 대한 가상중공단면의 단면상수  
 $U_k = 2(b_k + d_k), A_k = b_k \times d_k$

### 3. 최대 비틀림 균열폭 산정방법

본 논문은 Specht의 비틀림균열각 이론과 휨부재에 관한 Fisher의 유효단면적 이론을 비틀림에 대해 적용하였다. Leonhardt<sup>[5]</sup>의 주인장강도식을 고려하여 균열폭추정식에 이용하였다. 휨에 대해서 König<sup>[4]</sup>의 이론이 제시하는  $\lambda$ 를 비틀림에 대해 새로이 수정·계산하였다. MC 90은 철근과 콘크리트사이의 부착응력  $\tau$ 와 상대슬립량  $S$ 의 실험식을 제시한다.

$$\tau(x) = C \cdot S^a(x) \quad (4)$$

$\alpha$ : 철근의 위치에 따른 콘크리트와 철근의 부착상태를 나타내는 상수

$C$ : 콘크리트의 압축강도와 철근종류에 관련된 상수

König는 식 4의  $\alpha$ 를 이용한  $\lambda$ 의 관계식과 MC 90

에서의 유효 부착전달길이의 관계를 이용하여 새로운  $\tau_{sm}$ (평균부착응력)- $S$ 의 관계를 제시하였다.

$$F_s \leq F_r, \quad \lambda = \frac{2}{1-\alpha} \quad (5)$$

$$F_s \geq F_r, \quad \lambda = \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \left( \frac{F_r}{F_s} \right)^{1.5} + 1.0 \quad (6)$$

여기서  $F_r$ = 콘크리트 균열발생 인장력

$F_s$ = 인장철근의 인장력

$$\tau_{sm} = \frac{C}{(1+\lambda\alpha)} \left( \frac{W_{max}}{2} \right)^a \quad (7)$$

여기서,  $C = c \times 0.85 \times \sigma_{ck} = 0.15 \times 0.85 \times \sigma_{ck}$

본 논문은 이전의 제시된 식과 이론을 정리·종합하여 다음 중·횡방향 최대균열폭 추정식을 제시한다.

$$W_{max i} = \frac{\sigma_{ct} \cdot d_{si}}{2 \cdot \tau_{sm} \cdot E_s \cdot \mu_{ei}} \times \left[ \sigma_{ss} - \frac{(1+\lambda\alpha) \cdot \sigma_{ct}}{(2+\lambda\alpha) \cdot \mu_{ei}} (1+n \cdot \mu_{ei}) \right] \quad (8)$$

여기서,  $\mu_e$ : 유효철근비,  $n = E_s/E_c$

$d_{ss}, d_{sl}$ : 횡,종방향 철근의 지름

아래첨자  $i$ 는 종방향 성분  $l$ 이거나 횡방향성분  $s$ 이다.

### 4. 비틀림균열폭 계산을 위한 파라미터 연구

#### 4.1 콘크리트의 유효단면적

Fischer<sup>[3]</sup>가 FEM해석과 실험을 통하여 제안한 휨부재의 콘크리트 유효단면적은 다음과 같다

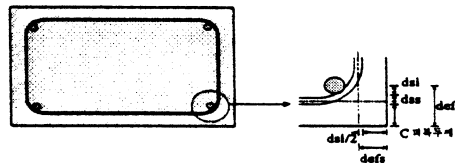


그림 2 Fisher의 콘크리트 부재 유효단면적

유효두께  $d_{ef}$ :

$$d_{efs} = \left(c + \frac{d_{ss}}{2}\right) \times 2.5, \quad d_{efl} = \left(c + d_{ss} + \frac{d_{sl}}{2}\right) \times 2.5 \quad (9)$$

유효단면적  $A_{ef}$ :

$$A_{efs} = a_{ss} \times d_{efs}, \quad A_{efl} = a_{sl} \times d_{efl} \quad (10)$$

유효철근비  $\mu_e$ 는 다음과 같다.

$$\mu_{el} = A_{sl} / A_{efl}, \quad \mu_{es} = A_{ss} / A_{efs} \quad (11)$$

## 4.2 콘크리트의 인장강도

콘크리트 부재에 비틀림이 작용하면 주인장응력 방향으로 균열이 발생하며 단면형태에 따라 다른 주인장응력이 발생한다. Leonhardt의 단면형태상수  $\delta$ 를 변수로 하는 주인장강도 실험식은 다음과 같다.

$$\sigma_{ct} = \delta \times (f_{cm})^{\frac{2}{3}} = \delta \times (\sigma_{ck} + 8)^{\frac{2}{3}} [N/mm^2] \quad (12)$$

## 4.3 유효 부착전달길이

MC90에서 설명하는 균열형성 과정은 균열폭 제한식들의 기본개념으로, 부착 전달길이의 산정에 중요한 역할을 한다. 균열발생 전 RC부재의 응력이 낮은 경우에는 양재료는 거의 탄성상태를 나타내고 하중증가에 의해 균열발생 전 상태의  $\sigma_c$ 가 콘크리트 인장응력  $\sigma_{ct}$ 에 도달하는 위치에서 최초의 균열이 발생하며, 균열점에서 부재는 균열발생 후 상태가 되며 이때 전달길이  $l_e$ 는 유효 부착전달길이  $l_{es}$ 와 같다.

$$l_{es} = \frac{\sigma_{ct} \cdot A_{ce}}{\tau_{sm} \cdot u_s} = \frac{\sigma_{ct} \cdot d_s}{4 \cdot \tau_{sm} \cdot \mu_{es}} \quad (13)$$

## 4.4 기하학적 특성

횡, 종방향철근이 배근된 RC보에 비틀림이 작용하여 발생한 균열폭 계산은 균열면에서 직각으로 산정한다. 따라서 최대 균열폭은 종방향철근과 횡방향철근에 의한 균열폭은 식 1의  $\theta$ 를 고려하여 계산한다.

$$W_{max} = \frac{1}{2} (W_{max,s} \sin \theta + W_{max,l} \cos \theta) \quad (14)$$

균열폭의 최대 값과 평균값의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{W_m}{W_{max}} = \frac{K - 0.33(3r - r^2)}{K - 0.67} \quad (15)$$

$r = S_{rm} / S_{rmax}$ : 평균균열간격과 최대균열간격 비

$K = \sigma_s / \sigma_{sr}$ ,  $\sigma_{sr} = 0.2 \times (\sigma_{ct} / \mu_e)$ : EC 2가 제시

## 5. 제안식과 실험결과의 비교 · 분석

횡 균열폭 계산식을 수정한 비틀림균열폭 추정식의 계산 결과는 Technical University of Berlin<sup>[6]</sup>(TU Berlin)에서 실시한 균열폭 실험에서 얻어진 수치와 비교하였다. 식 12에서  $\delta$ 는 모든 적용단면에 대해서 0.26을 사용하였고 식 1에서  $\theta$ 는 45°로 가정했다. 식 7에서의  $\alpha$ 는 0.34로 적용하여 계산하였다.

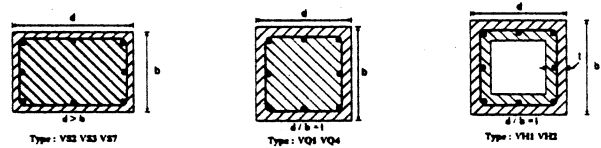


그림 3 TU Berlin 비틀림 균열폭 실험단면

E(experiment), C(calculation)의 비 C/E 계산결과

표 1. C/E의 평균과 표준편차

$W_{max-av}$	$W_m-av$	$W_{tot-av}$
0.789871	1.1261	0.988551
$W_{max-stdv}$	$W_m-stdv$	$W_{tot-stdv}$
0.198401	0.257273	0.287303

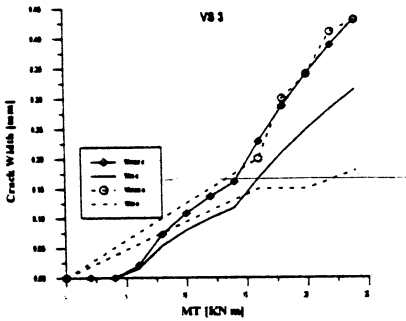


그림 4 단면에 따른 이론치와 계산치의 비교

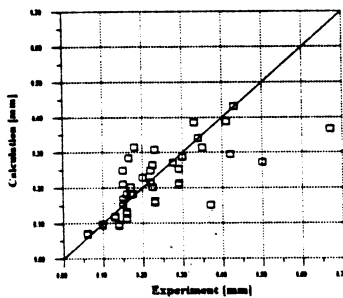


그림 5 이론치와 실험치비교

이론치와 실험치를 통계적인 수치로 나타내면 전체적인 평균값( $W_{tot-av}$ )은 0.988로 1.0에 상당히 근사하며, 표준편차( $W_{tot-stdv}$ )는 28.7%를 보여주고 있다. 비틀 평균균열폭( $W_{m-av}$ )은 계산치가 실험치보다 12.6% 크게 나왔으며 표준편차( $W_{m-stdv}$ )는 19.8%를 나타내고 있다. 또한 비틀 최대 균열폭( $W_{max-av}$ )은 계산치가 21%정도 적게 나타나고 있고 표준편차( $W_{max-stdv}$ )는 25.7%를 보이고 있다. 휨균열에 대해 EC2가 제시하는 전체 평균값이 0.94, 표준편차가 36%이며, 1994년 박은 비틀에 대해 전체 평균값이 1.049, 표준편차로는 34.7%를 보이고 있다. 위의 결과와 비교할 때, 본 논문의 이론식은 균열폭 계산방법으로 타당함을 보여주고 있으며 보다 간략화된 계산 과정을 통해 비틀 최대 균열폭을 추정할 수 있다.

## 6 결론

1. 본 논문의 이론식은 RC 및 PSC에 대해 비틀 최대 균열폭 계산방법으로 타당함을 보여주고 있다.
2. 최대 균열폭을 직접 얻기 때문에 이전에 제시된 식과 비교할 때 상대적으로 정확하며 설계 시 기준이 되는 최대값을 얻을 수 있는 있다.

## 7. 참고문헌

- [1] CEB-FIP ModelCode 1990, CEB-Bulletin d'Information, N° 203-205, Lausanne, 1991
- [2] Design aids for EC2, The Concrete Society Deutscher Beton, ENV 1992-1-1 EC2 1997
- [3] Fisher, A. : Modelluntersuchungen zur Ermittlung des Rißabstandes dicker Bauteile aus Stahlbeton, Reihe 4, Nr. 118, VDI-Verlag, 1993
- [4] König, G. and Tue, N. : Grundlagen und Bemessungshilfen für die Riß-breitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton, Beuth, 1996
- [5] Leonhardt, F. and Schelling, G. : Torsionsversuche an Spannbetonbalken, Heft 239 der Schriftenreihe des DAfStb, Berlin, W. Ernst u. Sohn, 1974
- [6] Park S.K. : Zur Rissbildung Von Stahlbeton-traegern unter reiner Torsionsbeanspruchung, T.U. Berlin, 1994
- [7] Specht, M. : Grundlagen der Dauerhaftigkeit von Stahlbeton, Berichte aus dem Institut für Baukonstruktionen und Festigkeit Fachgebiet Stahlbetonbau TU Berlin, 1990