

# 트러스 모델에 의한 고강도 재료가 사용된 철근콘크리트 부재의 전단강도 예측

## Prediction of Shear Strength of Reinforced Concrete Members with High-Strength Materials using Truss Models

김 상 우<sup>\*</sup>                      이 정 윤<sup>\*\*</sup>  
Kim, Sang-Woo                Lee, Jung-Yoon

### ABSTRACT

This study is to propose a truss model which is able to reasonably predict the shear strength of reinforced concrete (RC) members with high-strength materials. The shear strengths of 107 RC test beams with high-strength steel bars reported in the technical literatures were compared to those obtained from proposed model, TATM, and existing truss models. The shear strength of reinforced concrete beams obtained from test was better predicted by TATM than other truss models. Also, the theoretical results by TATM were almost constant regardless of yield strengths and steel ratios of tension and shear reinforcements.

### 1. 서론

초고층 철근콘크리트 건물의 저층부 구조물은 수평하중과 연직하중을 크게 받으며, 이러한 큰 하중에 효과적으로 저항하기 위하여 강도가 높은 콘크리트와 철근을 일반적으로 사용하고 있다. 그러나 대부분의 현행 전단설계 규준은 보통강도 재료가 사용된 실험결과에만 근거하고 있으므로, 고강도 재료와 같이 적용 범위를 벗어날 경우 실제 구조물의 거동을 정확하게 예측하지 못한다. 따라서 고강도 재료가 사용된 철근콘크리트 부재의 전단거동을 타당하게 예측할 수 있는 해석모델의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 고강도 철근이 사용된 철근콘크리트 부재의 전단강도에 대한 본 연구에서 제안된 변형각 트러스 모델<sup>1)</sup>(이하 TATM)의 적용성을 검증하기 위하여 총 107개의 기존 실험결과를 수집하였으며, ACI 318-02 규준, 수정 압축장 이론<sup>2)</sup>(이하 MCFT), 회전각 연화 트러스 모델<sup>3)</sup>(이하 RA-STM) 및 고정각 연화 트러스 모델<sup>4)</sup>(이하 FA-STM)의 해석결과와 비교하였다.

### 2. 변형률 적합조건을 고려한 트러스 모델의 철근구성법칙

#### 2.1 수정 압축장 이론

Collins와 Vecchio는 매립되지 않은 철근의 인장응력-변형률 관계를 MCFT에 사용하였다.

\* 정회원, 성균관대학교 건축공학과 박사후 연구원

\*\* 정회원, 성균관대학교 건축공학과 조교수

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (1)$$

여기서  $f_s$ 는 철근의 응력,  $E_s$ 는 철근의 탄성계수,  $\varepsilon_s$ 는 철근의 변형률,  $f_y$ 는 철근의 항복응력이다.

## 2.2 회전각 및 고정각 연화 트러스 모델

Belarbi와 Hsu<sup>5)</sup>는 철근의 구성법칙에 평균응력 개념을 도입하기 위하여 그림 1과 같이 콘크리트에 매립된 철근의 평균응력-변형률 관계를 유도하였으며, 이를 RA-STM과 FA-STM에 적용하였다.

$$\varepsilon_s \leq \varepsilon_n' \text{ 일 때, } f_s = E_s \varepsilon_s \quad (2a)$$

$$\varepsilon_s > \varepsilon_n' \text{ 일 때, } f_s = f_y \left[ (0.91 - 2B) + (0.02 + 0.25B) \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{sy}} \right] \quad (2b)$$

여기서  $\varepsilon_n' = \varepsilon_{sy}(0.93 - 2B)$ ,  $B = (1/\rho_s)(f_{cr}/f_y)^{1.5}$ ,  $\varepsilon_{sy}$ 는 철근이 항복할 때의 변형률이다.

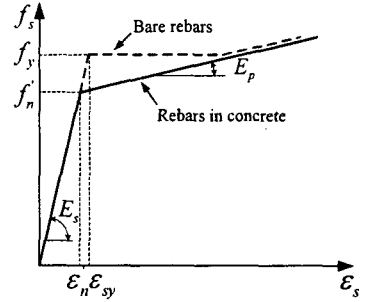


그림 1 RA-STM과 FA-STM의 철근 평균응력-변형률 관계

## 2.3 변환각 트러스 모델

Hsu 등이 제안한 철근의 응력-변형률 관계는 철근비가 0.5% 이상인 경우에만 적용이 가능한 것으로,<sup>6)</sup> 횡방향(t-방향) 철근비가 대부분 0.5% 이하인 보와 기둥에 대해서는 실험결과를 과대평가할 수 있다. 따라서, TATM에서는 그림 2와 같이 철근과 콘크리트의 인장응력 합이 철근의 항복강도를 넘지 않는 다음 식을 사용하였다.

$$f_s = E_s \varepsilon_s + \frac{\sigma_c^f}{\rho_s} \leq f_y \quad (3)$$

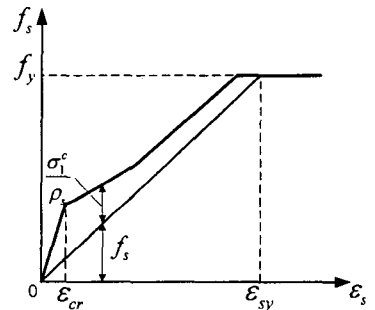


그림 2 TATM의 철근 평균응력-변형률 관계

## 3. TATM의 고강도 철근을 사용한 철근콘크리트 보에 대한 검증

본 연구에서는 TATM이 고강도 철근을 사용한 철근콘크리트 보의 전단강도를 타당하게 예측하는 지 검토하기 위하여 총 107개의 보<sup>1)</sup>를 수집하였다. 수집된 보의 콘크리트 압축강도는 38MPa 이하이며, 인장철근의 항복강도는 514.7~1028.4MPa, 전단철근의 항복강도는 257.8~1431.4MPa이다.  $l$ 과  $t$ -방향 철근능력비  $\eta (= (\rho_t f_{yt}) / (\rho_l f_{yl}))$ 는 0.015~0.57이며, 보의 전단경간비는 1.8~7.2이다. 여기서 추력의 효과를 고려하여야 하는 지점형태를 가진 경우에는 전단경간비가 2.5이상인 보만 선택하였다.

실험결과와의 비교를 위하여 TATM과 함께 사용된 해석모델에는 ACI 318-02 기준, MCFT, RA-STM 및 FA-STM이 있다. 여기서 MCFT는 Bentz와 Collins가 MCFT에 바탕을 두어 개발한 Response-20000 프로그램<sup>7)</sup>으로 수행하였다.

ACI 318-02 기준과 FA-STM은 그림 3(a)와 (d)에서와 같이 실험결과를 각각 평균 1.54와 1.48, 변동계수 15.5%와 19.1%로 크게 과소평가하였으며, 따라서 고강도 철근이 사용된 철근콘크리트 보의 전단강도 해석에 적용하기 어려울 것으로 판단된다.

MCFT와 RA-STM은 그림 3(b)와 (c)로부터 실험결과를 각각 평균 1.10과 0.97, 변동계수 15.4%와 13.5%로 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 특히, RA-STM은 전단철근의 철근비와 항복강도에

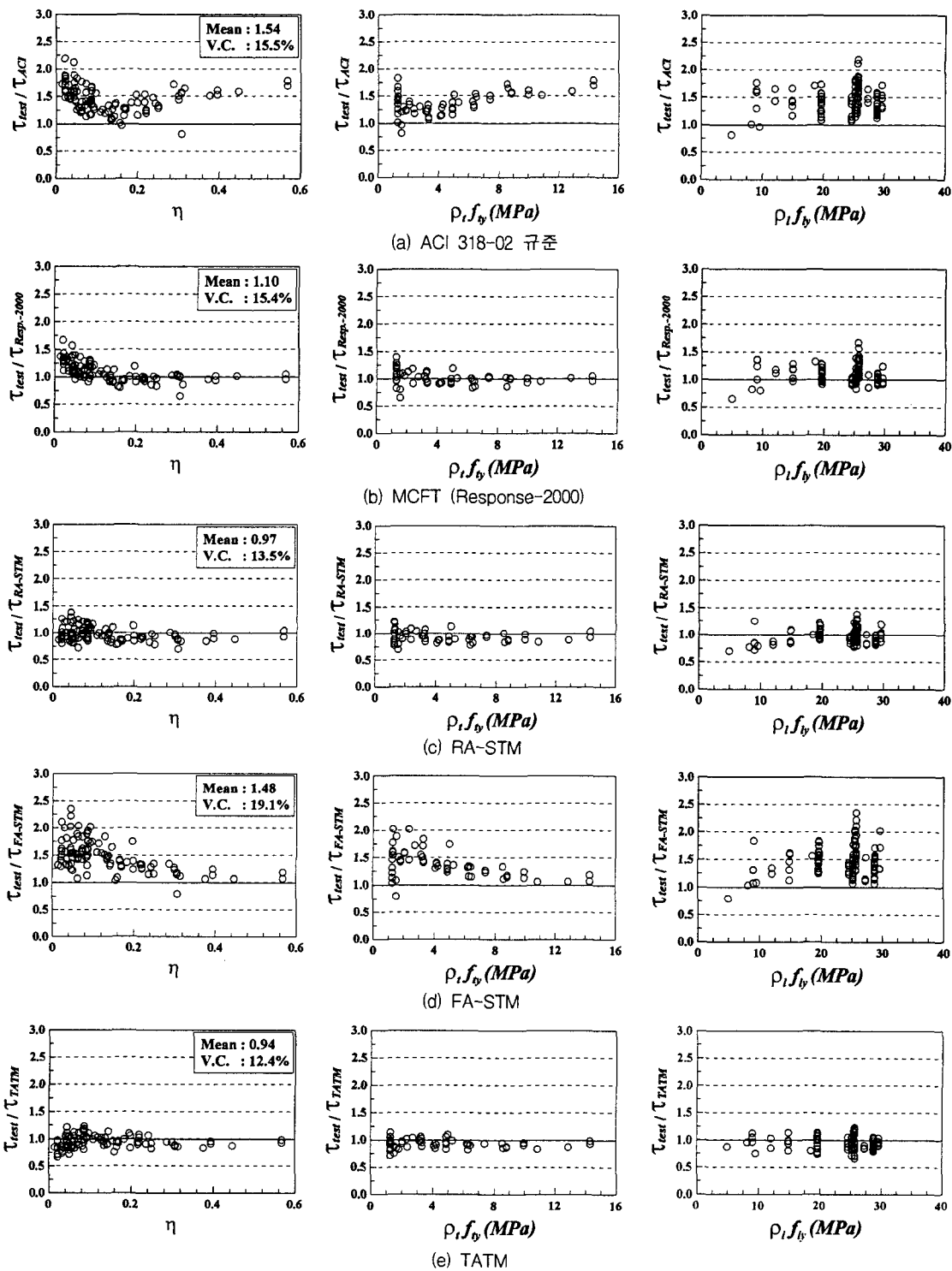


그림 3 실험결과와 해석결과의 비교

큰 영향을 받지 않았는데, 이것은 고강도 철근을 사용한 보가 최대강도에 도달할 때 철근의 변형률이 낮아 실험결과를 과대평가하지 않았기 때문이다. 그리고 MCFT의 경우에는  $n$ 가 0.1 이하인 경우 실험결과를 최대 1.7배까지 과소평가하므로 이에 대한 주의가 필요하리라 판단된다.

본 연구에서 제안된 TATM은 그림 3(e)에서와 같이 평균 0.94와 변동계수 12.4%로 실험결과를 가장 잘 예측하였으며, 철근의 항복강도와 철근비에 거의 영향을 받지 않았다. 따라서 TATM은 고강도 철근이 사용된 철근콘크리트 보의 전단강도 예측에 적용 가능한 해석모델이라 판단된다.

#### 4. 결론

- (1) 고강도 철근을 사용한 107개 철근콘크리트 보의 전단강도 실험결과와 해석결과를 비교한 결과, 본 연구에서 제안된 TATM은 기존 해석모델보다 철근강도와 철근비에 거의 영향을 받지 않고 실험결과를 잘 예측하였다. 그러므로 TATM은 고강도 철근을 사용한 철근콘크리트 보의 전단강도 예측에 적용 가능한 해석모델이라 판단된다.
- (2) MCFT와 RA-STM은 고강도 철근을 사용한 철근콘크리트 보의 전단강도를 비교적 잘 예측한 반면, ACI 318-02 규준과 FA-STM은 실험결과를 과대평가하였다. 그러므로 고강도 철근을 사용한 철근콘크리트 보의 전단강도 해석에 ACI 318-02 규준과 FA-STM을 적용하기에는 어려울 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술 연구개발사업(03산학연C04-01) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. 김상우, "적합조건을 고려한 트러스 모델에 의한 철근콘크리트 부재의 전단거동 예측," 성균관대학교, 박사학위논문, 2003.
2. Collins, M. P. and Mitchell, D., "Prestressed Concrete Structures," Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1991, 766pp.
3. Hsu, T. T. C., "Nonlinear Analysis of Concrete Membrane Elements," *ACI Structural Journal*, Vol.88, No.5, Sep.-Oct. 1991, pp.552~561.
4. Hsu, T. T. C. and Zhang, L. X., "Nonlinear Analysis of Membrane Elements by Fixed-Angle Softened-Truss Model," *ACI Structural Journal*, Vol.97, No.5, Sep.-Oct. 1997, pp.483~492.
5. Belarbi, A. and Hsu, T. T. C., "Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol.91, No.4, July-Aug. 1994, pp.465~474.
6. Zhu, R. R. H., Hsu, T. T. C., and Lee, J.-Y., "Rational Shear Modulus for Smear Crack Analysis of Reinforced Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol.98, No.4, July-Aug. 2001, pp.443~450.
7. Bentz, E. C. and Collins, M. P., "http://www.civ.utoronto.ca/sect/streng/index3.html," Web address of Response-2000, Mar. 2005.