

# 콘크리트의 극한변형률 수정모델

## Modified model of ultimate concrete compression strain

고성현\*                      이재훈\*\*

Ko, Seong Hyun          Lee, Jae Hoon

---

### ABSTRACT

The purposes of this study are to verify a reasonable model of material characteristic and to propose a rational model of reinforcement characteristic considering monotonic and cyclic loading about manufactured reinforcing steel in Korea. Longitudinal reinforcements of the plastic hinge region were behaved tensile deformation and compressional deformation by direction of lateral loading. However Confinement steels were behaved only tensile deformation by lateral loading. Transverse steels were laid the state of tension in the lateral loading of time, and they were laid state that stress is zero when it was removed lateral load. The tests for cyclic tension loading were performed for test variable as yield strength and reinforcement bar sizes. It was estimated that the total strain energy per unit volume was  $74 \text{ MJ/m}^3$ . The modified ultimate concrete compression strain model was proposed based on experimental study of cyclic tension test for manufactured reinforcing steel in Korea.

---

### 1. 서론

철근콘크리트 교량 교각의 만족할만한 내진성능은 지진 하중에서도 하중성능의 손실없이 큰 비선형 거동 능력, 즉 연성거동을 보이는 것이다. 이것은 일반적으로 에너지 소산과 같은 소성힌지의 비탄성 휨응답과 같은 연성에 의존한다. 축방향철근 또는 횡방향철근의 저주파 피로는 피할 수 없는 파괴유형이고, 따라서 바람직하지 않은 파괴로 소성힌지는 파괴된다(Mander and Cheng, 1995). 횡철근 파단에 기초한 저주파 피로는 축방향철근의 저주파 피로의 경우보다 콘크리트 강도와 철근상세에 따라 높게 나타날 수 있다. 횡철근의 파단에 대한 중요한 연구들은 계속되어 왔으며 피로의 개념이 다소 포함되어 있다. Baker(1964)와 Corley(1966)는 철근콘크리트 보부재에서 콘크리트 극한 압축변형률( $\epsilon_{cu}$ )에 대한 연구를 수행하여 경험식을 제안하였다. Priestley 등(1982)은 축력과 휨이 조합된 기둥부재에서는 기존의 식들이 보수적으로 평가된다고 주장하였으며 기둥의 편심하중에 대한 압축실험을 수행하여 횡방향철근의 파단에 대한 유효 최대 압축변형률(maximum available compressive strain)을 예측할 수 있는 식을 제안하였다. Mander 등(1984, 1988a, 1988b)은 횡철근의 최초 파단이 횡구속된 콘크리트 기둥의 한계와 관계된다는 이론을 수립하여 축압축에서의 기둥의 횡철근 파단을 예측하는 에너지 평형 이론(energy balance theory)을 제안하였고, 연성부재는 파괴 이전에 변형 에너지를 소산시킬 수 있는

---

\* 정회원, 제주산업정보대학 토목과 전임강사

\*\* 정회원, 영남대학교 토목공학과 교수

능력이 탁월하여 하중-변형 특성을 연장시키며 특히, 연성은 횡구속된 단면에서 유효하므로 변형에너지는 횡철근에 저장된다고 보고하였다.

## 2. 에너지 평형이론

에너지 균형 이론(energy balance theory)은 콘크리트 기둥의 외부 비탄성 일(external work done 또는 inelastic work done)과 내부(횡철근)의 에너지 소산 성능(energy absorption capacity)은 일치한다는 것에 기초한다. Mander 등이 제안한 에너지 평형이론은 식 (1) ~ (7)로 표현되며 내부일(*IWD*)은 횡방향철근의 변형에너지( $U_{sh}$ )와 비구속콘크리트의 파괴에너지( $U_{co}$ )로 구성되고, 외부일(*EWD*)은 축방향철근의 에너지( $U_s$ )와 구속콘크리트의 에너지( $U_{cc}$ )로 구성된다.

Mander 등은 식 (6)의 횡방향철근의 에너지를 철근의 단조인장 실험으로부터  $110 \text{ MJ/m}^3$ 로 제안하였다.

$$EWD = U_s + U_{cc} \quad (1)$$

$$IWD = U_{sh} + U_{co} \quad (2)$$

$$EWD = IWD = U_{sh} + U_{co} = U_s + U_{cc} \quad (3)$$

$$U_s = \int_0^{\epsilon_{cr}} A_{st} f_s d\epsilon \quad (4)$$

$$U_{cc} = \int_0^{\epsilon_{cr}} A_{cc} f_c d\epsilon \quad (5)$$

$$U_{sh} = \rho_s A_{cc} \int_0^{\epsilon_{sf}} f_s d\epsilon \quad (6)$$

$$U_{co} = A_{cc} \int_0^{\epsilon_{spall}} f_c d\epsilon = 0.017\sqrt{f_{c'}} \text{ MPa in MJ/m}^3 \quad (7)$$

## 3. 콘크리트 극한변형률 제안

횡방향철근에 대한 반복인장 실험을 수행하였으며 항복강도 355 ~ 542 MPa 범위에서 식 (8)과 같이 에너지의 평균은  $73.82 \text{ MJ/m}^3$ 로 계측되었다.

$$U_{sh} = \rho_s A_{cc} \int_0^{\epsilon_{sf}} f_s d\epsilon = 73.82 \text{ MJ/m}^3 \quad (8)$$

Mander 등(1988a, 1988b)은 원형단면과 직사각형 기둥에 대한 실험을 수행하여 콘크리트 극한 변형률을 예측할 수 있는 식 (9) ~ (11)을 제안하였다. 식 (12)와 그림 1의  $\epsilon_{su}$ 는 국내 현장에서 사용되는 철근에 대한 실험에서 얻은 결과이다.

$$U_{sh} = U_s + U_{cc} - U_{co} \quad (9)$$

$$\rho_s A_{cc} \cdot \int_0^{\epsilon_{sf}} f_s d\epsilon = A_{cc} \cdot \int_0^{\epsilon_{cu}} f_c d\epsilon + \rho_{cc} A_{cc} \cdot \int_0^{\epsilon_{cu}} A_{st} f_s d\epsilon - A_{cc} \cdot \int_0^{\epsilon_{spall}} f_c d\epsilon \quad (10)$$

$$\rho_s \cdot \int_0^{\epsilon_{sf}} f_s d\epsilon = \int_0^{\epsilon_{cu}} f_c d\epsilon + \rho_{cc} \cdot \int_0^{\epsilon_{cu}} A_{st} f_s d\epsilon - \int_0^{\epsilon_{spall}} f_c d\epsilon \quad (11)$$

$$\epsilon_{su} = 0.17 - 0.0002 f_y \quad (12)$$

국내의 자료에 대한 콘크리트의 극한변형률을 파악하기 위하여 표 1에 나타난 변수들을 토대로 해석적 연구를 수행하였다. 횡방향철근비는 도로교설계기준에서 요구하는 심부구속철근량에 대한 비율로 선정된 후 식 (11)을 이용하여 위에서 Mander 등의 실험결과를 토대로 수행한 방법과 동일하게 해석을 수행하였다. 각 변수들과 도로교설계기준에서 요구하는 심부구속 나선철근비와의 비율에 대한 해석결과 그림 2에 나타난 바와 같이 Mander 등의 실험결과를 토대로 한 해석결과보다 다소 작은 값들을 나타내기는 하나 극한변형률 분포의 경향은 일치하게 나타났다.

심부구속철근의 에너지가 작게 예측되었기 때문에 동일한 x축 상에서 극한변형률은 작게 산정되어 Mander 등의 값들보다 원점에 근접한 값들을 나타내었다. 극한 변형률에 대한 Mander 등의 제안식을 수정하여 식 (13)과 같이 제안하였으며  $k_{cus}$ 는 철근의 에너지를 고려하기 위한 계수이다. 국내에서 사용되는 철근을 적용할 경우, 원형단면에 최적인 상관식(correlation curve)의  $k_{cus}$ 의 값은 2.0(실선)이었다. 실험 및 해석적 연구결과에서 국내에서 사용되는 철근을 적용할 경우, 원형단면만을 위해서는  $k_{cus}$ 의 값은 합리적이고 적절하다고 판단되는  $k_{cus}$ 의 값으로 2.0을 제안하였다.

표 1. 국내 심부구속철근 규정에 따른 해석 변수

변수 종류	변수 선택 값
축방향철근비, $\rho_l$	0.01, 0.02
축방향철근 및 횡방향철근의 설계기준항복강도, $f_y$	300, 400 MPa
콘크리트의 설계기준압축강도, $f_{ck}$	20, 30, 40, 50, 60 MPa
횡방향 철근비 (도로교설계기준의 심부구속 나선철근비와의 비율)	0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + k_{cus} \frac{\rho_s f_y \epsilon_{su}}{f_{cc}'} \quad (13)$$

여기서,  $k_{cus}$  : 콘크리트 극한변형률 계수 (국내 철근의 경우  $k_{cus} = 2.0$ )

동일한 심부구속철근비( $\rho_s$ )와 구속콘크리트의 최대 응력( $f_{cc}'$ )에 대하여 Mander 등이 제안한  $k_{cus}$  및  $\epsilon_{su}$  값들과 본 연구에서 제안한  $k_{cus}$  및  $\epsilon_{su}$  값들을 비교하여 그림 3과 4에 나타내었다. Mander 등은 식 (13)에서  $k_{cus}$ 의 값으로 1.4,  $\epsilon_{su}$ 의 값으로 Grade 275인 경우 0.14를 사용하고 Grade 380의 경우에 0.11을 제안하면서 매우 안전측인 구속콘크리트의 극한변형률 값을 예측한다고 설명하였다. 본 연구에서  $k_{cus}$ 의 값으로 2.0,  $\epsilon_{su}$ 의 값으로 식 (13)을 제안하였다. 그림 3은 Mander 등과 본 연구에서 제안된  $\epsilon_{su}$ 의 값을 철근의 항복강도에 대하여 나타낸 것으로 제안된  $\epsilon_{su}$ 의 값은 항상 Mander 등의

제안 값보다 작다.

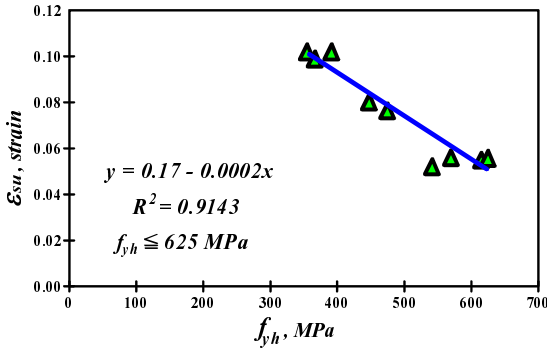


그림 1. 횡방향철근의 파단변형률 제안식

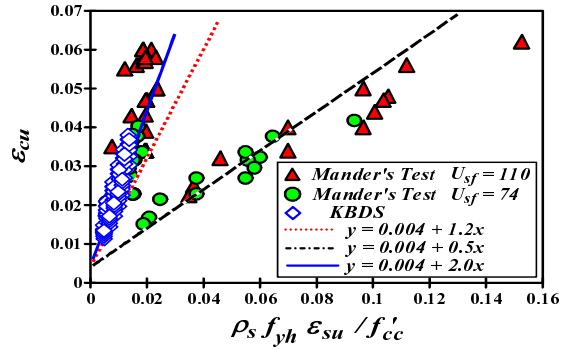


그림 2. 콘크리트 극한 변형률 비교

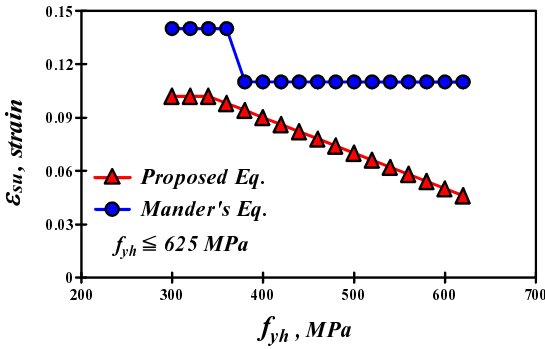


그림 3. 철근의 항복강도에 따른  $\epsilon_{su}$ 의 값 비교

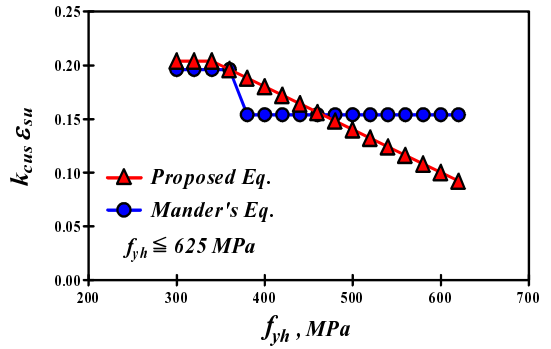


그림 4. 철근의 항복강도에 따른  $k_{cus} \cdot \epsilon_{su}$ 의 값 비교

#### 4. 결론

국내에서 사용되는 심부구속철근에 대한 반복실험을 수행하였고, 응력-변형률 곡선에 의한 에너지를 산정하였으며 항복강도 355 ~ 542 MPa 철근의 경우에 에너지의 평균은 약 74 MJ/m<sup>3</sup>로서 Mander 등이 제안했던 110 MJ/m<sup>3</sup>의 67%정도를 나타낸다. 실험결과를 근거로 철근의 파단변형률을 예측할 수 있는 모델을 제안하였으며 실험 및 해석적 연구를 통하여 콘크리트의 압축변형률 수정모델을 제안하였다.

#### 참고문헌

1. Mander, J. B., Priestley, M.J.N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804-1826.
2. Mander, J. B., Panthaki, F.D., and Kasalsanati, A., "Low Cycle Fatigue Behavior of Reinforcing Steel," ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 6, No. 4, 1994, pp. 453-468.