

# 고강도 재료를 사용한 철근콘크리트 보 단면의 곡률연성지수 예측

이형준\*

Lee, Hyung Joon\*

## Predictions of Curvature Ductility Factor of Reinforced Concrete Beam Sections Used High Strength Concrete and Steel

### ABSTRACT

The high strength materials have been more widely used in a large reinforced concrete structures. It is known that the use of high strength material in RC structures give the benefits of the mechanical and durable properties, but the ductility decreases with an increase in the strength of the materials. In the design of a reinforced concrete beam, both the flexural strength and ductility need to be considered. So, it is necessary to assess accurately the ductility of the beam with high strength materials in order to ensure the ductility requirement in design. In this study, the effects of the material strength on the flexural behavior and curvature ductility factor of reinforcement concrete beam sections with various reinforcement conditions have been evaluated and a newly prediction formula for curvature ductility factor of RC beam has been developed considering the stress of compression reinforcement at ultimate state. The proposed predictions for the curvature ductility factor which is applicable to both singly and doubly reinforced concrete beam are verified by comparisons with other prediction formulas and the proposed formula offers fairly accurate within 9% error and consistent predictions for curvature ductility factor of reinforced concrete beam.

**Keywords :** RC beam, High strength material, Flexural behavior, Numerical analysis, Prediction formula for curvature ductility factor

### 초 록

콘크리트 구조물의 대형화에 따라 고강도를 갖는 재료가 최근에 많이 사용되고 있는 추세이다. 고강도 재료의 사용은 역학적 성질 또는 내구성에 있어서는 장점이 있으나 구조물의 연성 거동에는 불리한 것으로 알려져 있다. 철근콘크리트 부재는 강도뿐만 아니라 적절한 연성이 확보되도록 설계가 되어야 하기 때문에 철근콘크리트 보의 연성을 적절하게 평가할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 고강도 재료를 사용한 철근콘크리트 보 부재의 곡률연성지수의 예측식을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 고강도 콘크리트 및 철근을 사용한 직사각형 단면 RC 보의 모멘트-곡률 관계를 해석적 방법으로 계산하여 다양한 철근 배치 조건하에서 콘크리트 및 철근의 강도가 부재의 휨거동 및 곡률연성지수에 미치는 영향을 분석하였고, 단철근 및 복철근 보에 모두 적용할 수 있는 극한상태에서의 압축철근의 응력을 고려한 새로운 곡률연성지수 예측식을 도출하였다. 제안한 곡률연성지수 예측식은 기존의 식과 비교분석하였으며, 단철근 및 복철근 보에서 예측식에 의해 계산된 곡률연성지수는 수치해석에 의해 얻은 곡률연성지수 값을 오차 범위 9% 내에서 예측하는 것으로 나타났다.

**검색어 :** 철근콘크리트 보, 고강도 재료, 휨거동, 수치해석, 곡률연성지수 예측식

## 1. 서론

철근콘크리트 보 부재의 연성(ductility)은 강도와 함께 구조물을 설계할 때 고려해야 할 중요한 요소이다. 특히, 지지하중을 받

\* 정희원 · 한밭대학교 건설환경공학과 부교수 (Corresponding Author · Hanbat National University · leehj@hanbat.ac.kr)

Received November 27 2012, Revised February 20 2013, Accepted March 7 2013

는 경우에는 보나 기둥부재는 충분한 연성이 확보되어 급격한 저항력의 감소가 없이 변형을 허용하는 소성힌지(plastic hinge)가 형성되도록 설계하고 있다. 철근콘크리트 부재의 연성은 재료의 강도를 비롯하여 철근의 배근량 및 배치 상태, 횡방향 구속도 등 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는다. 최근 대형의 철근콘크리트 구조물이 건설됨에 따라 고강도 재료의 사용이 늘어나고 있는 추세이며, 철근의 경우 중전에는 항복강도가 400MPa 이하인 것을 주로 사용하였으나, 최근에는 유럽의 설계기준을 비롯하여 국내 콘크리트구조설계기준, 미국의 ACI 등에서는 항복강도가 550~600MPa인 고강도 철근을 사용할 수 있도록 하고 있다(EC2, 2004; ACI, 2008; KCI, 2008). 일반적으로 고강도 재료를 사용하면 부재의 연성이 감소하는 것으로 알려져 있기에 고강도 재료를 사용한 RC 휨부재의 연성을 정확하게 평가하는 것이 필요하다.

콘크리트 구조설계기준을 비롯한 각 설계기준에서는 철근콘크리트 휨부재를 설계할 때 부재가 적절한 연성을 갖도록 하는 규정을 두고 있다. 유럽통합기준에서는 휨강도를 계산할 때 콘크리트 압축 응력-변형률의 중립축의 위치(c/d)를 제한함으로써 적절한 연성이 확보되도록 하고 있으며(EC2, 2004), ACI 설계기준이나 콘크리트 구조설계기준에서는 휨강도를 계산하는 극한상태에서 인장축 가장 바깥에 배치된 철근의 변형률이 최소한 0.004 또는 철근 항복변형률의 2배 이상이 되도록 함으로써 적절한 연성을 확보하도록 하고 있다(ACI, 2008; KCI, 2008).

고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 연성지수(ductility factor)를 평가하는 연구는 다양하게 진행되어 왔다. Jang 등(2008)은 콘크리트 압축강도가 40, 60, 70MPa인 콘크리트로 제작한 23개의 보에 대해 휨 실험을 수행하여 콘크리트 압축강도, 인장철근비, 복부 철근량, 전단 지간비(a/d) 등이 보의 연성에 미치는 영향을 분석하였다. Pam 등(2001a)은 압축강도가 30~100MPa인 보통 및 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 단철근 직사각형 보에 대한 휨강도 및 연성특성을 분석하였고, 연성지수(ductility factor)를 계산하는 식을 식 (1)과 같이 제시하였다.

$$\mu_{\phi} = 9.5(f_{cu})^{-0.30}(\rho/\rho_b)^{-0.75} \quad (1)$$

여기서,  $f_{cu}$ 는 콘크리트 압축강도(cube compressive strength, MPa),  $\rho$  및  $\rho_b$ 는 인장철근 및 균형철근비이다.

Ho 등(2003)은 압축강도가 40~100MPa인 철근콘크리트 보 단면의 연성지수를 해석적으로 계산하여 철근콘크리트 보의 연성지수에 콘크리트 압축강도가 미치는 영향을 분석하였으며, Bai와 Au(2011)는 콘크리트 압축강도가 30~90MPa인 철근콘크리트 보에 대한 해석적 연구를 통해 콘크리트 압축강도, 인장철근비, 압축철근비 등이 연성지수에 미치는 영향을 분석하였다. Arslan과 Cihanli(2010)는 콘크리트 압축강도 50~110MPa, 철근의 항복강

도 220, 420, 530MPa인 단철근 보에 대한 연성지수를 해석적으로 계산하여 콘크리트 압축강도 및 철근의 항복강도, 인장철근비에 따른 연성지수 예측식을 식 (2)와 같이 제시하였다.

$$\mu_{\phi} = 40(\rho/\rho_b)^{-1.18}(f_{ck})^{-0.17}(f_y)^{-0.42} \quad (2)$$

여기서,  $f_{ck}$ 는 콘크리트 압축강도(MPa),  $f_y$ 는 철근의 항복강도(MPa),  $\rho$  및  $\rho_b$ 는 인장철근 및 균형철근비이다.

Hong(2011)은 고강도 콘크리트와 고강도 철근을 사용한 RC보의 휨성능을 평가하는 실험적 연구를 수행하여, 고강도 철근을 사용하면 강성이 감소하고, 고강도 콘크리트를 함께 사용하면 강성의 감소가 둔화된다고 보고하고 있다. 이 연구에서는 콘크리트 압축강도 28, 38, 68MPa, 철근의 항복강도 400, 600, 700MPa인 재료를 사용하였다.

Pam 등(2001b)은 콘크리트 압축강도가 30~100MPa, 철근의 항복강도가 460 MPa인 철근콘크리트 복철근 보에 대해 거동특성을 분석하였고, 연성지수를 계산하는 식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\mu_{\phi} = 10.7(f_{ck})^{-45} \times \left(\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}\right)^{-1.25} \times [1 + 95.2(f_{ck})^{-1.1} \times (\rho'/\rho)^3] \quad (3)$$

여기서,  $f_{ck}$ 는 콘크리트 압축강도(MPa),  $f_y$ 는 철근의 항복강도(MPa),  $\rho$  및  $\rho'$ 는 인장철근비 및 압축철근비이고,  $\rho_b$ 는 균형철근비이다.

철근콘크리트 보 부재의 연성지수에는 콘크리트의 강도, 철근의 항복강도, 인장철근량, 압축철근량 등 다양한 요소가 영향을 주고 있다. 기존에 제시되어 있는 연성지수 예측식은 단철근 보와 복철근 보에 대하여 별도의 식으로 제시되고 있으며, 연성지수에 영향을 미치는 주요 요소를 반영하지 못하고 있는 상태로 식 (1)과 식 (3)은 철근의 항복강도를 고려하지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 고강도 재료를 사용한 철근콘크리트 부재의 연성지수에 영향을 미치는 각 요소들에 대해 해석적 방법으로 매개변수 해석을 수행하고, 수치해석 결과를 바탕으로 회귀분석을 수행하여 단철근 보 및 복철근 보에 함께 적용할 수 있는 보다 합리적인 곡률연성지수 예측식을 제시하고자 하였다.

## 2. 모멘트-곡률 관계 및 곡률연성지수

### 2.1 재료의 응력-변형률 관계

철근콘크리트 보의 모멘트-곡률 관계와 같은 휨거동 특성을 해석적 방법으로 얻기 위해서는 재료의 응력-변형률 관계를 사용해야 한다. 본 연구에서는 콘크리트는 Figure 1(a)와 같은 응력-변형률

관계곡선을 이용하였다. 콘크리트 응력-변형을 관계곡선의 상승곡선 부분은 널리 적용되고 있는 Hognestad가 제시한 식 (4)와 같은 곡선으로 가정하였고, 최대 응력 이후 하강곡선과 최대 응력점에서의 변형률( $\epsilon_{co}$ )은 콘크리트 압축강도 범위 20~130MPa에서 실제 거동을 잘 묘사하는 것으로 알려진 Attard와 Setunge(1996)가 제시한 식 (5)로 모델링 하였다.

- 상승곡선,  $\epsilon_c \leq \epsilon_{co}$

$$f_c = f_{ck} \left\{ 2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

- 하강곡선,  $\epsilon_c > \epsilon_{co}$

$$f_c = f_{ck} \left\{ \frac{A \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right) + B \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2}{1 + (A-2) \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right) + (B+1) \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2} \right\} \quad (5)$$

여기서,  $\epsilon_{co}$ 는 최대 응력에서의 변형률( $=4.11(f_{ck})^{0.75}/E_c$ ),  $E_c$ 는 콘크리트 탄성계수,  $A$ 는 콘크리트의 압축강도에 따른 값이며,  $B$ 는 0이다(Attard와 Setunge, 1996). 이와 같은 콘크리트의 응력-변형을 관계를 이용하여 콘크리트의 압축강도에 따라 나타내면 Figure 1(b)와 같다. 인장응력상태에서의 콘크리트의 응력-변형을 관계는

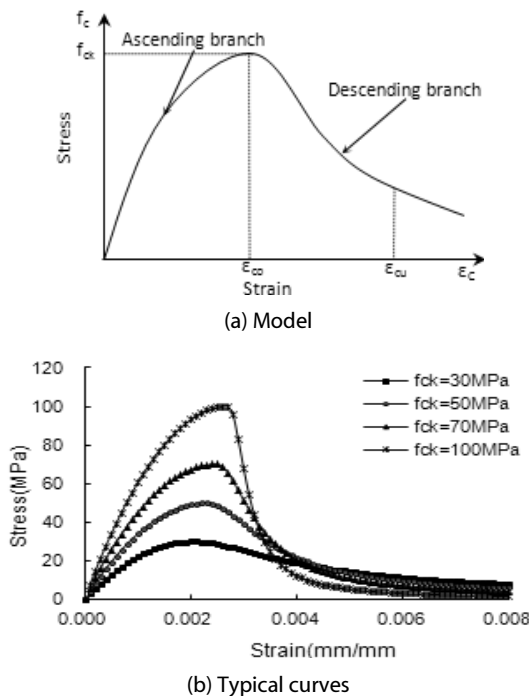


Fig. 1. Stress-strain curves of concrete

인장응력이 인장강도에 도달할 때까지는 탄성계수를 기용기로 하는 직선의 관계, 균열발생 이후에는 무시하는 것으로 가정하였다.

철근의 응력-변형을 관계는 대해 완전 탄-소성 거동을 하는 것으로 가정하여 Figure 2와 같은 응력-변형을 관계곡선을 이용하였으며, 탄성계수( $E_s$ )는 200GPa을 사용하였다.

2.2 모멘트-곡률 관계 계산

철근콘크리트 보 단면의 모멘트-곡률 관계는 휨강도를 계산할 때 적용하는 기본가정을 적용한 후 평형조건, 적합조건 및 재료의 응력-변형을 관계를 이용하여 해석적으로 계산할 수 있다(Park and Paulay, 1975). 단면은 하중을 받기 전·후에 평면상태를 유지하고, 철근과 콘크리트의 응력-변형을 관계를 알고 있는 상태이며, 콘크리트의 인장응력은 균열이 발생한 이후에는 무시하는 것으로 가정한다. Figure 3은 모멘트를 받고 있는 철근콘크리트 직사각형 보 단면의 변형을 및 응력 분포를 나타내고 있다. 철근콘크리트 보 단면의 모멘트-곡률 관계의 계산은 다음과 같은 과정에 의해 이루어진다. 압축연단에서의 임의의 콘크리트 변형률  $\epsilon_{cm}$ 에 대해 중립축 위치  $c$ 를 가정한 후 적합조건에 의해 각 철근 및 임의 위치에서의 콘크리트 변형률( $\epsilon_c, \epsilon_s, \epsilon_{cs}$ )을 계산한 후 각각의 변형률에 해당하는 응력을 각 재료의 응력-변형을 관계로부터 계산한다. 응력을 계산한 후 각 재료에 의한 단면력 즉, 콘크리트에 의한 압축력( $C_c$ ), 압축철근에 의한 압축력( $C_s$ ) 및 인장력( $T$ )을 계산한다.

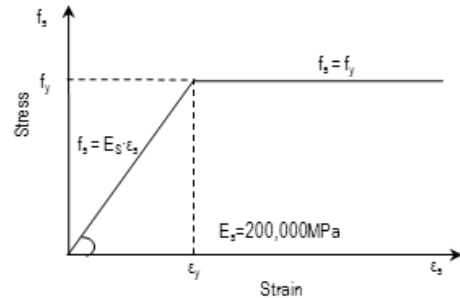
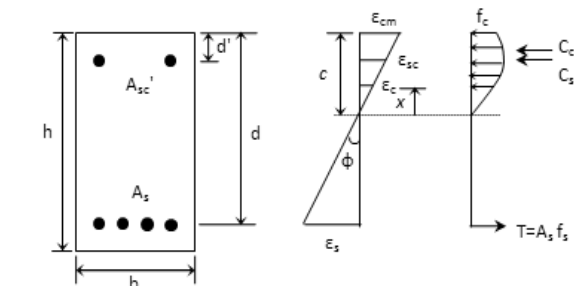


Fig. 2. Stress-strain curves of steel



(a) Cross section of RC beam (b) Strain (c) Stress and forces

Fig. 3. Strain and stress in RC beam section

단면내의 평형조건이 만족할 때까지 중립축을 변화시키면서 위의 과정을 반복계산을 한다. 압축연단에서 임의의 콘크리트 변형률  $\epsilon_{cm}$ 에 대해 평형조건이 만족되면, 저항모멘트는 식 (6)과 같이 계산한다.

$$M = \int_0^c f_c b x dx + A_{sc} f_{sc} (c - d') + A_s f_s (d - c) \quad (6)$$

여기서,  $c$ 는 중립축 깊이(mm),  $d'$ 는 인장철근의 유효깊이(mm),  $d'$ 는 상연에서 압축철근까지의 거리(mm)이다.

저항모멘트  $M$ 에 대응되는 곡률  $\phi$ 는 식 (7)과 같이 계산한다.

$$\phi = \epsilon_{cm} / c \quad (7)$$

여기서,  $\epsilon_{cm}$ 은 압축연단에서의 콘크리트 변형률,  $c$ 는 중립축 깊이(mm)이다.

본 연구에서는 압축연단에서의 콘크리트 변형률  $\epsilon_{cm}$ 을 0 부터 0.01 까지 0.0001씩 증가 시키면서 위의 과정을 반복 계산하여 철근콘크리트 보 단면의 모멘트-곡률 관계 곡선을 얻었다.

### 2.3 곡률연성지수

철근콘크리트 보 부재의 연성(ductility)은 극한하중에 도달한 이후 하중저항능력(load-carrying capacity)의 급격한 감소가 없이 변형이 증가하는 능력을 나타내는 것으로 휨부재를 설계할 때 고려해야 하는 중요한 요소 중의 하나이다. 일반적으로 단면의 연성은 처짐 또는 곡률을 토대로 계산되며, 처짐을 토대로 계산되는 부재 연성(member ductility)은 곡률을 토대로 계산되는 단면 연성(curvature ductility)보다 정확하게 계산하는 것이 어렵다(Park and Paulay, 1975). 본 연구에서는 앞서 기술한 방법에 의해 계산한 고강도 재료를 사용한 RC보 단면의 모멘트-곡률 관계를 이용하여 단면(곡률) 연성 특성을 고찰하였으며, 곡률연성지수(curvature ductility factor)  $\mu_\phi$ 는 식 (8)과 같이 계산하였다.

$$\mu_\phi = \phi_u / \phi_y \quad (8)$$

여기서,  $\phi_y$ 는 인장철근이 항복할 때의 항복곡률이고,  $\phi_u$ 는 극한 상태에서의 극한곡률이다.

철근콘크리트 휨부재의 곡률연성지수는 재료의 강도, 압축철근을 포함한 배근된 철근의 양, 콘크리트의 횡방향 구속여부 등에 영향을 받으며, 또한 극한상태를 어떻게 정의하느냐에 의해서도 다른 값을 가지게 된다. 본 연구에서는 항복곡률은 인장철근이 항복할 때의 곡률로 정의 하였고, 극한곡률은 콘크리트 구조설계기

준에서 공칭 휨강도를 계산할 때 기준이 되는 압축연단에서의 콘크리트 변형률이 콘크리트의 압축강도에 관계없이 0.003에 도달 했을 때의 곡률로 정의하였다.

## 3. 곡률연성지수 해석결과 및 분석

### 3.1 해석 단면 및 매개변수

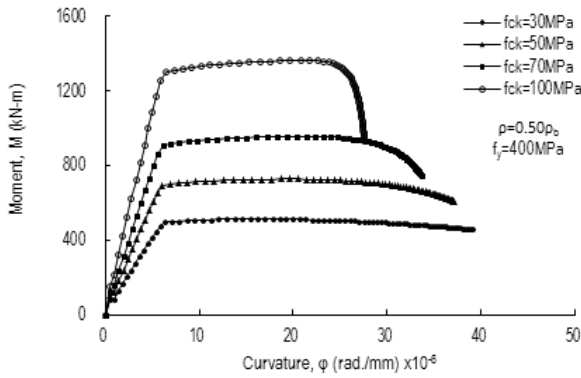
철근콘크리트 보의 모멘트-곡률 관계 및 곡률연성지수는 Figure 3과 같은 직사각형 단면에 대해 계산하였다. 철근콘크리트 보 단면은 폭  $b = 300\text{mm}$ , 높이  $h = 600\text{mm}$ , 유효깊이  $d = 550\text{mm}$ 이며, 복철근 보에서는 압축철근의 위치( $d'$ )를 압축연단으로부터 50mm 떨어진 것으로 하였다.

철근콘크리트 보의 곡률연성지수에 콘크리트와 철근의 강도 및 철근 배치조건이 미치는 영향을 분석하기 위해 콘크리트는 보통 강도와 고강도 콘크리트를 모두 고려하여 압축강도를 30~100MPa, 철근의 항복강도는 300~600MPa인 경우로 하였고, 인장 철근비( $\rho$ )는 균형철근비( $\rho_b$ )의 10~100%, 압축철근비( $\rho'$ )는 인장철근비의 0~100%로 하였다. 콘크리트 압축강도는 10MPa, 철근의 항복강도는 50MPa씩 증가시켰으며, 인장철근비 및 압축철근비는 각각 10%씩 증가시켰다.

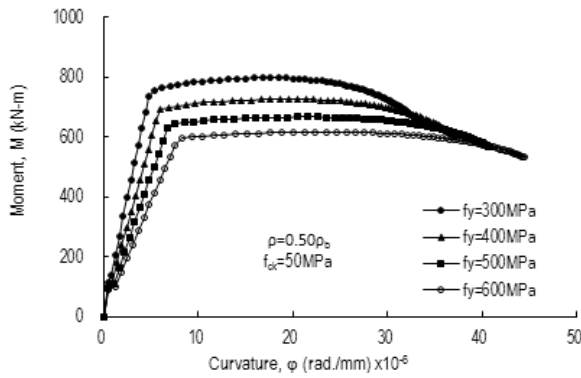
### 3.2 모멘트-곡률 관계

Figure 4는 인장철근비( $\rho$ )가  $0.50\rho_b$ 인 단철근 보 단면의 모멘트-곡률 관계를 보여주고 있다. Figure 4(a)는 인장철근의 항복강도가 400MPa인 경우에 콘크리트 압축강도에 따른 모멘트-곡률 곡선으로 콘크리트의 압축강도가 증가하면 초기 강성이 증가하고, 최대 모멘트에 도달할 때의 곡률은 차이가 없음을 보여주고 있고, 또한, 최대 모멘트에 도달한 후 소성거동 구간은 짧아지고 저항모멘트의 급격한 감소가 일어나는 것을 보여주고 있다. Figure 4(b)는 콘크리트 압축강도가 50MPa인 경우에 철근의 항복강도에 따른 모멘트-곡률 곡선으로 철근의 항복강도가 증가하면 초기 강성이 감소하고 최대 모멘트에 도달할 때의 곡률은 증가한다. 또한 최대 모멘트에 도달한 후 소성거동 구간은 길어지고 저항모멘트는 점차적으로 감소하는 것을 보여주고 있다. 항복강도가 작은 철근을 사용한 경우에 초기강성 및 최대 모멘트가 더 큰 것은 항복강도가 작으면 균형철근비가 크게 되어 사용되는 철근비가 상대적으로 커지기 때문이다.

Figure 5는 콘크리트 압축강도 50MPa, 철근의 항복강도 400 MPa이고 인장철근비가 균형철근비의 75%인 복철근 보 단면에서 압축철근비에 따른 모멘트-곡률관계를 나타낸 것으로 인장철근비에 관계없이 압축철근비가 증가하면 강성이 증가함을 보여주고 있다. 또한, 압축철근비가 인장철근비의 10%일 때에는 단철근



(a)  $\rho=0.50\rho_b, f_y = 400\text{MPa}$



(b)  $\rho=0.50\rho_b, f_{ck} = 50\text{MPa}$

Fig. 4. Typical moment-curvature curves of singly RC beam sections

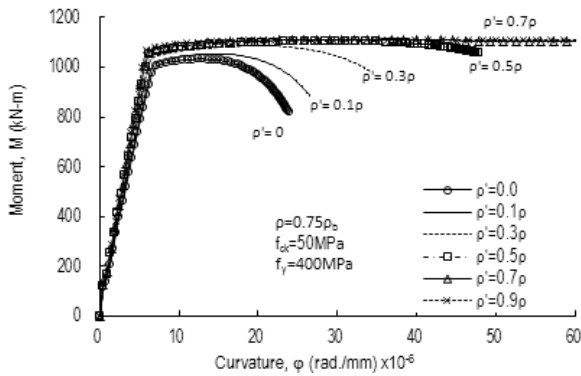


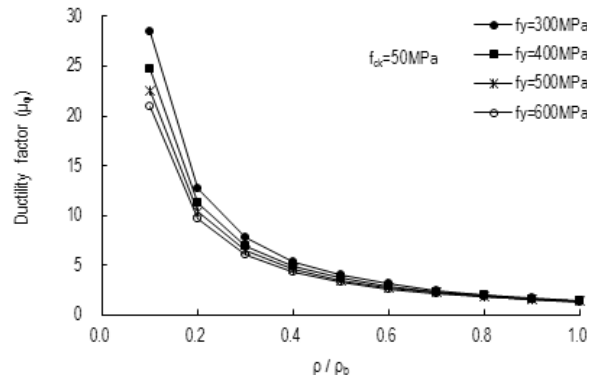
Fig. 5. Typical moment-curvature curves of doubly RC beam sections

보와 큰 차이가 없어 압축철근 배치에 따른 연성의 증가가 매우 작고, 압축철근비가 인장철근비의 50% 이상이면 연성이 많이 증가함을 보여주고 있다.

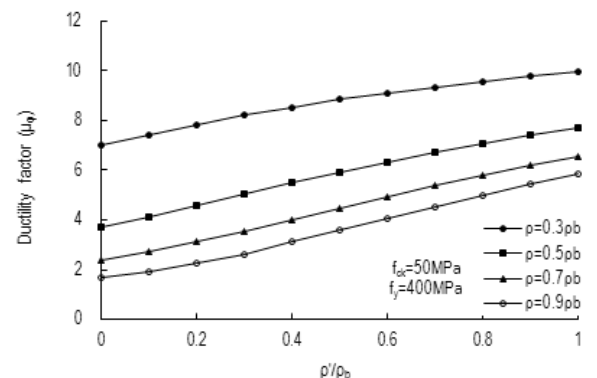
### 3.3 곡률연성지수

#### 3.3.1 철근량의 영향

Figure 6은 철근콘크리트 보에서 인장 및 압축 철근량이 곡률연



(a) Tension reinforcement ( $f_{ck} = 50\text{MPa}$ )



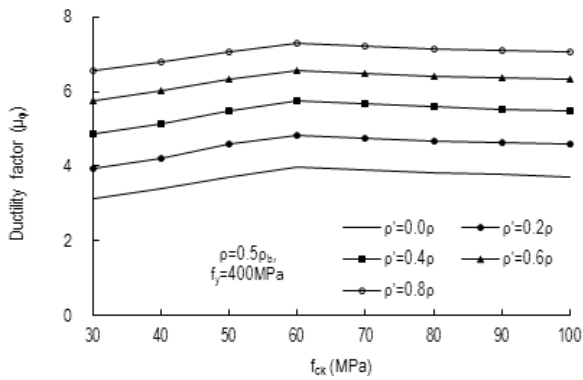
(b) Compression reinforcement ( $f_{ck} = 50\text{MPa}, f_y = 400\text{MPa}$ )

Fig. 6. Variation of curvature ductility factor of RC beam sections with reinforcement

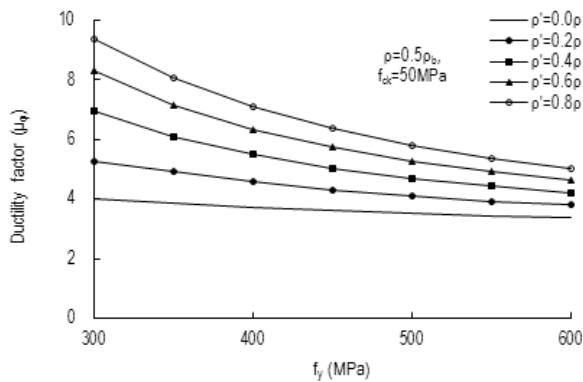
성지수에 미치는 영향을 나타낸 것이다. Figure 6(a)는 콘크리트 압축강도가 50MPa인 단철근 보에서 인장철근비에 따른 곡률연성지수의 변화를 나타낸 것으로 철근비가 증가하면 연성지수가 감소하고, 특히 철근의 항복강도가 상대적으로 작은 보에서 철근량 증가에 따라 연성지수 변화가 크게 나타남을 보여주고 있다. Figure 6(b)는 콘크리트 압축강도 50MPa, 철근의 항복강도 400MPa인 복철근 보에서 압축철근비에 따른 곡률연성지수의 변화를 나타낸 것으로 압축철근비가 증가하면 곡률연성지수는 압축철근비의 증가에 거의 비례하여 증가하는 것을 보여주고 있다. 콘크리트 강도와 철근 항복강도의 다른 조합에서도 철근의 배치에 따른 영향은 위에서와 같은 경향을 보였다.

#### 3.3.2 재료 강도의 영향

Figure 7(a)는 콘크리트 압축강도가 철근콘크리트 보의 곡률연성지수에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 콘크리트 압축강도 60MPa까지는 압축강도가 증가하면 연성지수가 증가하며, 그 이상의 강도에서는 콘크리트 압축강도가 증가하면 연성지수는 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 다른 연구자(Pendyala 등, 1996 ; Rashid



(a) Concrete strength ( $f_y = 400\text{MPa}$ ,  $\rho = 0.5\rho_b$ )



(b) Steel yield strength ( $f_{ck} = 50\text{MPa}$ ,  $\rho = 0.5\rho_b$ )

Fig. 7. Variation of curvature ductility factor of RC beam sections with strength of materials

등, 2005)에 의한 결과와 비슷한 경향을 보이거나 최대 연성지수를 갖는 콘크리트 압축강도는 다소 차이를 보였다. Rashid 등(2005)에 의하면 콘크리트 압축강도 100MPa 까지는 압축강도 증가에 따라 연성지수가 증가하고 그 이상의 강도에서는 연성지수가 작아지는 것으로 보고하고 있다.

Figure 7(b)는 콘크리트 압축강도가 50MPa이고 인장철근비( $\rho$ )가  $0.50\rho$ 인 경우에 철근의 항복강도에 따른 연성지수의 변화를 나타낸 것으로 철근의 항복강도가 증가하면 연성지수는 감소하며, 그 감소폭은 철근의 항복강도가 클수록 약간 작아지는 것으로 나타났다. 또한, 압축철근비가 클수록 철근의 항복강도 증가에 따른 연성지수의 감소폭이 큰 것으로 나타났다.

철근의 배치 조건이 다른 철근콘크리트 보에서도 콘크리트 강도 및 철근 항복강도가 곡률연성지수에 미치는 영향은 앞에서 설명한 것과 같은 경향을 보였다.

### 3.3.3 곡률연성지수와 철근비 및 압축철근 응력과의 상관 관계

철근콘크리트 보의 곡률연성지수를 예측하는 기존의 공식들은 앞서 기술한 바와 같이 철근량의 변수를 단철근 보에서는  $\rho/\rho_b$ 로,

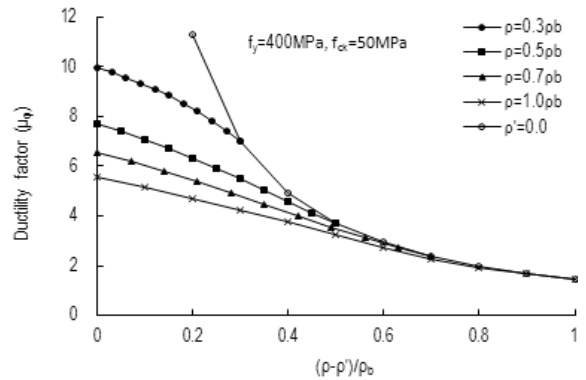


Fig. 8. Relations between curvature ductility factor and  $(\rho - \rho')/\rho_b$  in RC beam sections

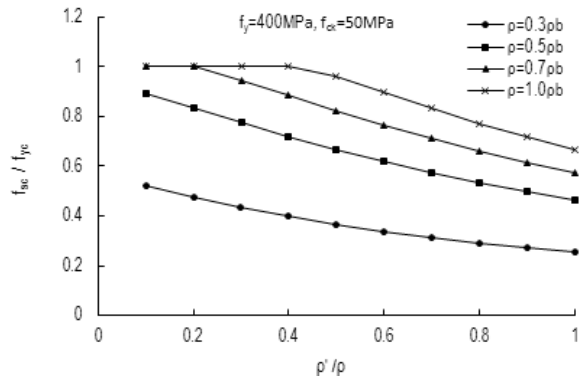


Fig. 9. Variation of stress of compression steel with  $\rho' / \rho$  in RC beam sections

복철근 보에서는  $(\rho - \rho')/\rho_b$ 로 하고 있다. 콘크리트 압축강도가 50MPa이고 철근의 항복강도가 400MPa인 단철근 보에서 인장철근비( $\rho/\rho_b$ )에 따른 곡률연성지수는 Figure 6(a)와 같고, 복철근 보에서 압축철근을 고려한 철근변수  $(\rho - \rho')/\rho_b$ 와 연성지수의 관계를 나타내면 Figure 8와 같으며, 복철근 보에서는 인장철근비에 따라 각각 다른 추세선 보이고 있다.

일반적으로 복철근 보에서 극한상태에서의 압축철근의 응력은 인장 및 압축 철근량에 따라 다르게 분포되고, 압축철근이 항복하지 않는 경우가 많다. Figure 9는 콘크리트 압축강도 50MPa, 인장 및 압축 철근의 항복강도가 400MPa인 경우에 임의의 인장철근비에서 압축철근량에 따른 극한상태에서의 압축철근의 응력( $f_{sc}$ )과 항복강도( $f_{yc}$ )의 비를 보여주고 있다. 인장철근비가 균형철근비의 50%보다 작은 경우에는 압축철근량을 인장철근량의 10%만 사용하여도 압축철근은 항복하지 않는 것으로 나타났고, 인장철근비가 균형철근비의 70%인 경우에는 압축철근량이 인장철근량의 20% 이하인 보에서만 압축철근이 항복하는 것으로 나타났다. 또한, 인장철근비가 균형철근비와 같은 경우에 압축철근이 인장철근의

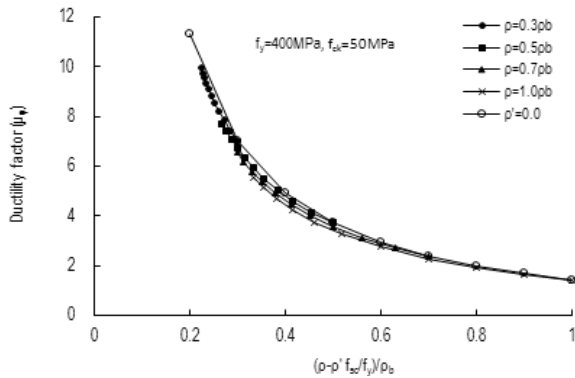


Fig. 10. Relations between curvature ductility factor and  $(\rho - \rho' f_{sc} / f_{yc}) / \rho_b$  in RC beam sections

40% 이상이면 압축철근은 항복하지 않는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 재료의 다른 강도 조합에서도 유사한 경향을 나타냈고, 압축철근의 항복강도가 인장철근의 항복강도와 다른 경우에도 유사하게 나타났다.

Figure 8과 같은 조건에서 극한상태에서의 압축철근의 응력( $f_{sc}$ )과 압축철근의 항복강도( $f_{yc}$ )의 비를 철근비의 변수  $(\rho - \rho') / \rho_b$ 에  $(\rho - \rho' f_{sc} / f_{yc}) / \rho_b$ 와 같은 형태로 고려하여 곡률연성지수와와의 관계를 그림으로 나타내면 Figure 10과 같다. 임의의 콘크리트 강도와 철근의 항복강도 조합을 갖는 복철근 보에서 극한상태에서의 압축철근 응력을 철근변수에 고려하면 철근변수와 연성지수와와의 관계를 단철근 보에서와 같이 한 개의 추세선으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

지금까지는 제안된 곡률연성지수 예측식은 단철근 보와 복철근 보에 대해서 서로 다른 형태로 제안되었으나, 극한상태에서의 압축철근의 응력을 철근변수에 고려하면 단철근 보와 복철근 보에 모두 적용이 가능하고 각 변수와의 상관관계가 우수한 곡률연성지수 예측식을 도출할 수 있다. 이와 같은 결과를 토대로 본 연구에서는 극한상태에서 압축철근의 응력을 고려하여 모든 철근콘크리트 보에 적용이 가능한 새로운 곡률연성지수 예측식을 도출하였다.

#### 4. 곡률연성지수 예측식 제안 및 검증

##### 4.1 곡률연성지수와 변수와의 상관 관계

철근콘크리트 보 단면의 곡률연성지수는 콘크리트강도, 철근의 항복강도, 압축철근을 포함한 철근량에 크게 의존하고, 압축철근의 응력도 상관관계에 영향을 주고 있음을 앞 절에서 살펴보았다. 따라서 철근콘크리트 보 단면의 곡률연성지수( $\mu_\phi$ )는 식 (9)와 같이 콘크리트 압축강도( $f_{ck}$ ), 인장 및 압축 철근의 항복강도( $f_y, f_{yc}$ ), 배근한 철근량의 변수  $(\rho - \rho' f_{sc} / f_{yc}) / \rho_b$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\mu_\phi = f [f_{ck}, f_y, (\rho - \rho' \frac{f_{sc}}{f_{yc}}) / \rho_b] \tag{9}$$

여기서,  $\rho, \rho'$  및  $\rho_b$ 는 각각 인장철근비, 압축철근비 및 단철근보의 균형철근비이며,  $f_{sc}$ 는 극한상태에서 압축철근의 응력이다.

Figure 7(b)와 Figure 10에 나타난 바와 같이 철근의 항복강도와 철근량 변수  $(\rho - \rho' f_{sc} / f_{yc}) / \rho_b$ 는 증가할수록 곡률연성지수가 감소하는 경향을 나타내므로 이들 변수와 곡률연성지수와와의 관계는 지수함수 형태로 나타낼 수 있고, Figure 7(a)에 나타난 바와 같이 콘크리트 압축강도는 약 60MPa까지는 곡률연성지수가 증가하고 그 이상의 강도에서는 곡률연성지수가 감소하는 경향을 나타내므로 콘크리트 압축강도와 곡률연성지수와와의 관계는 다항식의 형태로 나타낼 수 있다. 따라서 철근콘크리트 보 단면의 곡률연성지수( $\mu_\phi$ )는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu_\phi = \alpha_1 \left( (\rho - \rho' \frac{f_{sc}}{f_{yc}}) / \rho_b \right)^{\alpha_2} (f_y)^{\alpha_3} \{ \alpha_4 (f_{ck})^2 + \alpha_5 f_{ck} + \alpha_6 \} \tag{10}$$

여기서,  $\alpha_i$ 는 상수로서 곡률연성지수와 각 변수들에 대해 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 수행하여 얻을 수 있다.

##### 4.2 연성지수 예측식 제안

철근콘크리트 보 단면의 곡률연성지수 예측식을 회귀분석을 수행하여 도출하기 위해 각 변수에 따른 곡률연성지수는 앞에서 기술한 해석적 방법에 의해 계산하였다. 3.1절에 기술한 매개변수의 변수들의 조합에 대해 계산된 4,928개의 곡률연성지수에 대한 자료를 가지고 아래와 같이 다중회귀분석을 수행하여 곡률연성지수와 각 변수들과의 관계를 얻었다.

곡률연성지수와 철근량 변수  $(\rho - \rho' f_{sc} / f_{yc}) / \rho_b$ 와의 관계를 나타내면 Figure 11과 같다. 곡률연성지수와 철근량 변수와의 관계는 회귀분석에 의해 식 (11)과 같이 얻을 수 있으며, 상관계수( $R^2$ )는 0.962이었다.

$$\mu_\phi = 1.405 \left[ (\rho - \rho' \frac{f_{sc}}{f_{yc}}) / \rho_b \right]^{-1.279} \tag{11}$$

철근의 항복강도가 RC 보의 곡률연성지수에 미치는 영향은 연성지수를  $[ (\rho - \rho' f_{sc} / f_{yc}) / \rho_b ]^{-1.279}$ 로 나눈 값과 철근의 항복강도의 관계로 표현할 수 있으며, 이들 관계는 Figure 12와 같다.  $\mu_\phi / [ (\rho - \rho' f_{sc} / f_{yc}) / \rho_b ]^{-1.279}$  값과 철근의 항복강도의 관계는 회귀분석에 의해 식 (12)와 같이 얻을 수 있으며, 이 때 상관계수( $R^2$ )는 0.263으로 나타났다.

$$\mu_\phi / \left[ (\rho - \rho' \frac{f_{sc}}{f_{yc}}) / \rho_b \right]^{-1.297} = 5.198 f_y^{-0.215} \quad (12)$$

RC 보의 곡률연성지수에 대한 콘크리트 압축강도의 영향은 연성지수를  $[(\rho - \rho' f_{sc}/f_{yc})/\rho_b]^{-1.279} \times f_y^{-0.215}$ 로 나눈 값과 콘크리트

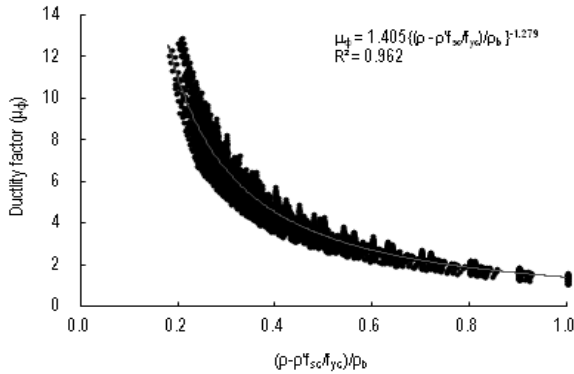


Fig. 11. Relations between curvature ductility factor  $\mu_\phi$  and  $[(\rho - \rho' f_{sc}/f_{yc})/\rho_b]$  in RC beam sections

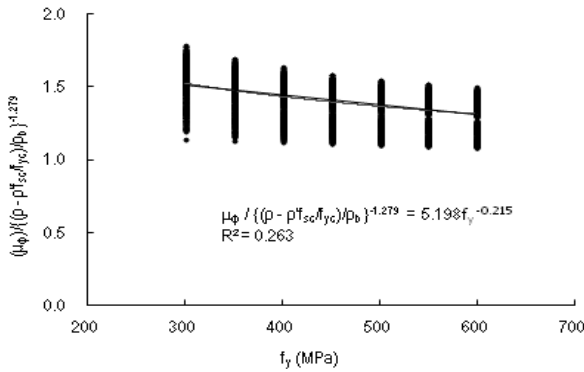


Fig. 12. Relations between  $\mu_\phi / [(\rho - \rho' f_{sc}/f_{yc})/\rho_b]^{-1.279}$  and steel yield strength  $f_y$  in RC beam sections

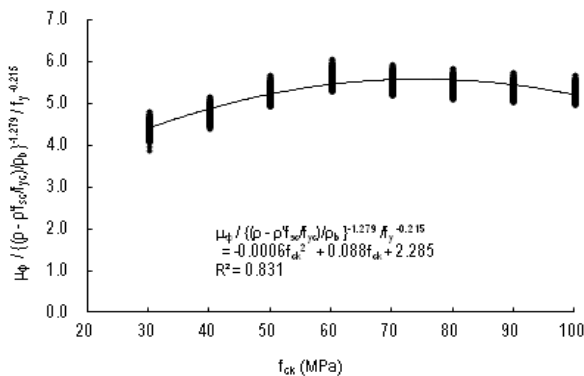


Fig. 13. Relations between concrete strength  $f_{ck}$  and  $\mu_\phi / [(\rho - \rho' f_{sc}/f_{yc})/\rho_b]^{-1.279} / f_y^{-0.215}$  in RC beam sections

리트 압축강도의 관계로 표현할 수 있으며, 이를 관계를 그림으로 나타내면 Figure 13과 같다.

$\mu_\phi / [(\rho - \rho' f_{sc}/f_{yc})/\rho_b]^{-1.279} / f_y^{-0.215}$  값과 콘크리트 압축강도의 관계는 회귀분석에 의해 식 (13)과 같이 얻을 수 있으며, 이 때 상관계수( $R^2$ )은 0.831로 나타났다.

$$\mu_\phi / \left[ (\rho - \rho' \frac{f_{sc}}{f_{yc}}) / \rho_b \right]^{-1.279} / f_y^{-0.215} = -0.0006 (f_{ck})^2 + 0.088 f_{ck} + 2.285 \quad (13)$$

따라서 단철근 및 복철근 보에 모두 적용할 철근콘크리트 보 단면의 곡률연성지수 예측식은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_\phi = \left[ (\rho - \rho' \frac{f_{sc}}{f_{yc}}) / \rho_b \right]^{-1.279} \times f_y^{-0.215} \times [-0.6 (f_{ck})^2 + 88 f_{ck} + 2,285] \times 10^{-3} \quad (14)$$

여기서,  $f_{ck}$ 는 콘크리트 압축강도(MPa),  $f_y$  및  $f_{yc}$ 는 각각 인장 및 압축철근의 항복강도(MPa),  $\rho$  및  $\rho'$ 는 인장철근 및 압축철근비,  $\rho_b$ 는 단철근 보의 균형철근비,  $f_{sc}$ 는 극한상태에서 압축철근의 응력(MPa)이다.

### 4.3 곡률연성지수 예측식의 검증

콘크리트 압축강도  $f_{ck}=30\sim 100$ MPa, 철근의 항복강도  $f_y=300\sim 600$ MPa, 인장철근비( $\rho$ )=(0.3~1.0) $\rho_b$ , 압축철근비( $\rho'$ )=(0.0~1.0) $\rho$ 이고, 압축철근과 인장철근의 항복강도가 같은 경우에 대하여 본 연구에서 제안한 철근콘크리트 보 단면의 곡률연성지수 예측식인 식 (14)에 의해 계산한 곡률연성지수와 수치해석에 의해 계산한 곡률연성지수를 비교한 것은 Figure 14와 같다. 식 (14)에 의해 계산한 곡률연성지수는 수치해석에 의해 구한 곡률연성지수

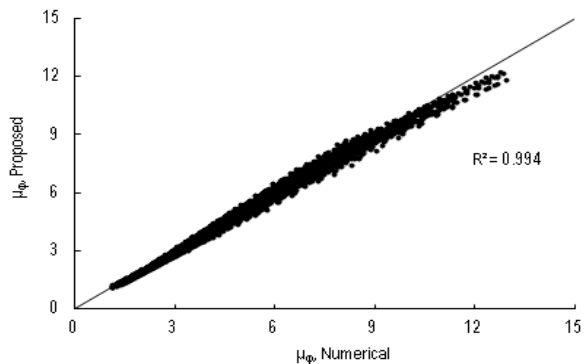


Fig. 14. Verification of proposed equation for curvature ductility factor  $\mu_\phi$  in RC beam sections



와 거의 같은 값을 보이고 있으나, 인장철근비가 매우 작은 경우에는 예측값이 수치해석 결과보다 약간 작은 값을 나타냈다. 예측한 곡률연성지수와 수치해석에 의해 구한 곡률연성지수 비의 평균값 및 표준편차는 각각 0.992, 0.033으로 나타났으며, 상관계수( $R^2$ )는 0.994로 나타났다. 본 연구에서 고려한 변수의 범위 안에서는 예측식이 수치해석에서 얻은 곡률연성지수 값의 최대 9% 오차 범위 내에서 계산되는 것으로 나타났다.

단철근 직사각형 보에 대해 제안한 곡률연성계수 예측식의 적용성을 검토하기 위해 단철근 보에 대해 기존에 제안된 Arslan과 Cihanli(2010)의 예측식 식 (2)와 Pam 등(2001b)의 예측식 식 (3)에 의한 결과를 비교분석하였다. 콘크리트 압축강도  $f_{ck}=30\sim 100\text{MPa}$ , 철근의 항복강도  $f_y=300\sim 600\text{MPa}$ , 인장철근비( $\rho$ )= $(0.3\sim 1.0)\rho_b$ 인 단철근 보에 대해 수치해석에 의해 구한 곡률연성지수와 본 연구에서 제안한 예측식, Arslan과 Cihanli의 예측식 및 Pam 등의 예측식에 의한 계산된 곡률연성지수를 비교한 것은 Figure 15와 같으며, 본 연구에서 제시한 예측식이 수치해석 결과와 매우 일치하고 있음을 알 수 있다. Table 1은 각 예측식에 의한 계산결과와 수치해석결과와의 비의 평균값 및 표준편차를 나타낸 것으로 본 연구의 예측식, Arslan의 예측식 및 Pam 등의 예측식에

의해 의한 평균값은 각각 0.985, 1.021 및 1.204로 나타났고, 표준편차는 각각 0.061, 0.170 및 0.335로 나타났다. 본 연구에서 제시한 예측식은 재료의 모든 강도 범위 및 인장철근비 영역에서 연성지수의 예측값이 수치해석에 의한 결과와 거의 같은 값을 나타냈으나, Arslan의 예측식은 콘크리트 강도가 작은 경우에는 수치해석결과보다 다소 크게 예측되고, 고강도 콘크리트에서는 작게 예측되는 것으로 나타났다. 또한, Pam 등의 예측식에 의한 결과는 전체적으로 수치해석 결과보다 크게 나타났으며, 저강도 콘크리트에서는 크게, 고강도 콘크리트에서는 작게 예측되는 것으로 나타났다. Pam 등의 예측식은 철근의 항복강도가 460MPa인 경우에 대해 도출되었기에 철근의 항복강도 크기의 영향은 반영되지 않고 있다. Pam 등의 예측식이 도출된 철근의 항복강도가 460MPa인 경우에 대해 비교하기 위해 철근의 항복강도가 400~500MPa인 범위로 축소하여 예측식에 의한 계산 결과와 수치해석 결과를 비교하였으며, 예측식에 의한 결과와 수치해석 결과와의 비에 대한 평균 및 표준편차는 Table 1에 나타났다. 철근의 항복강도가 300~600MPa인 경우와 비슷한 결과를 보이고 있다.

복철근 직사각형 보에 대해 제안한 곡률연성계수 예측식의 적용성을 검토하기 위해 복철근 보에 대해 기존에 제안된 Pam 등(2001b)의 예측식 식 (3)의 결과를 비교분석하였다. Pam 등이 제안한 식 (3)은 콘크리트 압축강도 30~100MPa, 철근의 항복강도 460MPa, 인장철근비 1~6%, 압축철근비 1~1.5% 범위에 대한 수치해석 결과를 토대로 얻어진 곡률연성지수 예측식이므로 콘크리트 압축강도  $f_{ck}=30\sim 100\text{MPa}$ , 철근의 항복강도  $f_y=450\text{MPa}$ , 인장철근비( $\rho$ )= $(0.3\sim 1.0)\rho_b$ , 압축철근비( $\rho'$ )= $(0.1\sim 0.5)\rho$ 인 복철근 보를 대상으로 비교분석하였다. Figure 16은 복철근 보 단면에 대해 수치해석에 의해 얻은 연성지수와 각 예측식에 의해 계산한 연성지수를 비교한 것을 보여주고 있다. Table 2는 예측식에 의한 계산 결과와 수치해석 결과와의 비의 평균값 및 표준편차를 나타낸 것으로 본 연구의 예측식과 Pam 등의 예측식에 의해 의한 연성지수와 수치해석에 의한 연성지수의 비의 평균값은 각각 0.981과 1.391, 표준편차는 각각 0.022와 0.424로 나타났다. 본 연구에서 제시한 예측식의 계산결과는 전체적으로 수치해석 결과와 거의 같은 값을

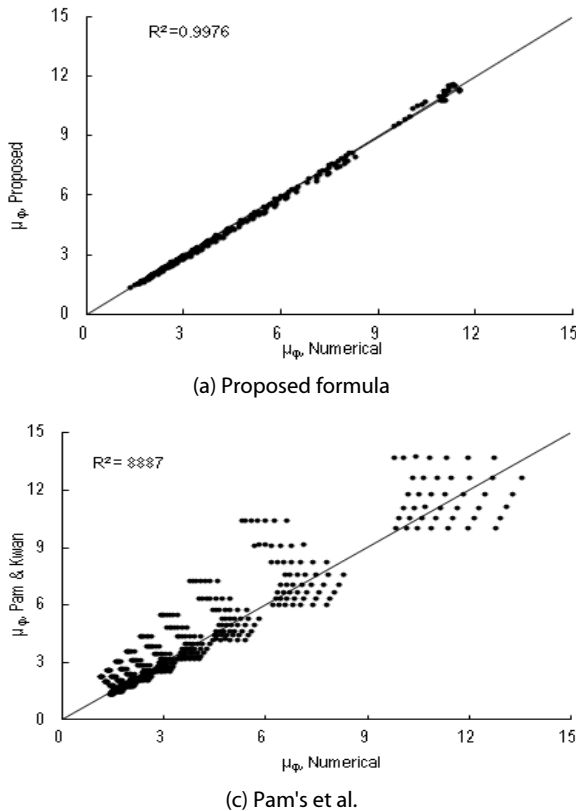


Fig. 15. Comparison of predicted  $\mu_\phi$  and numerical results in singly RC beam sections

Table 1. Verification of predicting equation of  $\mu_\phi$  in singly RC beam sections

	$f_{ck}=30\sim 100\text{MPa}$ $f_y=300\sim 600\text{MPa}$		$f_{ck}=30\sim 100\text{MPa}$ $f_y=400\sim 500\text{MPa}$	
	MV	SD	MV	SD
Proposed./Num.	0.985	0.061	0.987	0.058
Arslan/Num.	1.021	0.170	1.019	0.161
Pam' etc/Num.	1.204	0.335	1.209	0.329

Note: MV=mean value, SD=standard deviation

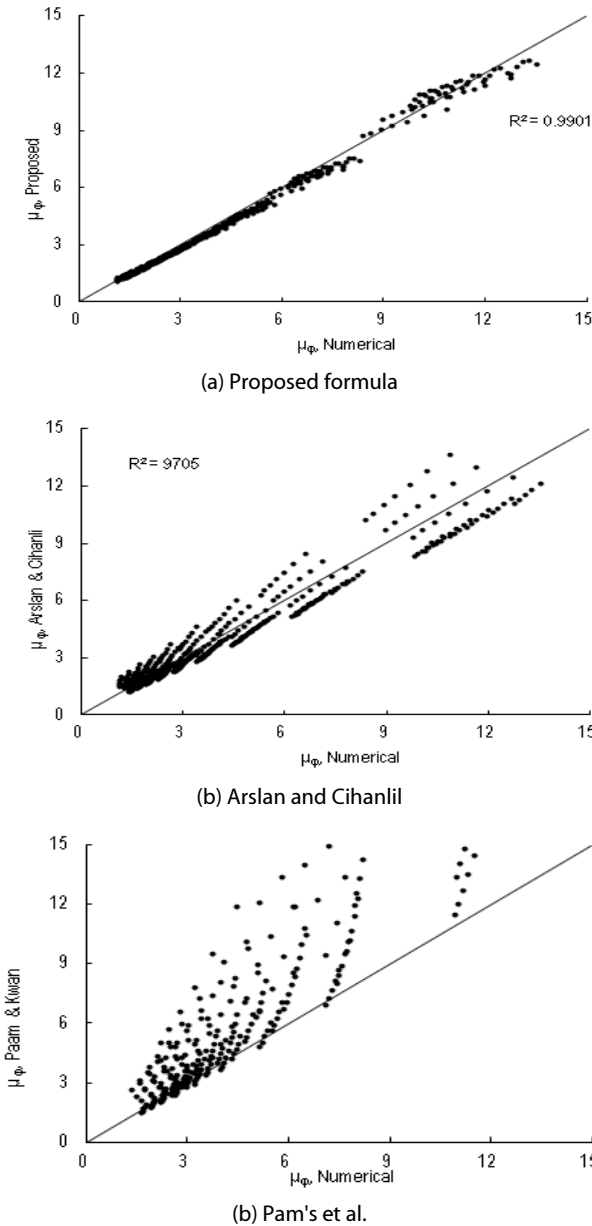


Fig. 16. Comparison of predicted  $\mu_\phi$  and numerical results in doubly RC beam sections

보이는데 비해 Pam 등의 예측식에 의한 결과는 수치해석에 의한 값보다 전체적으로 크게 계산되었다. 고강도 콘크리트인 콘크리트의 압축강도가 60~100MPa인 범위에서도 비슷한 결과를 보이고 있다. 이와 같이 Pam 등의 예측식에 의한 계산 결과와 수치해석에 의한 결과가 차이가 많이 나는 것은 곡률연성지수를 계산할 때 사용되는 항복곡률 및 극한 곡률의 정의가 2절에서 설명한 것처럼 본 연구에서 정의한 것과 다른 것도 한 가지 요인이 될 수 있다.

Pam 등(2001b)은 극한곡률은 모멘트-곡률관계에서 최대모멘

Table 2. Verification of predicting equation of  $\mu_\phi$  in doubly RC beam sections

	$f_{ck}=30\sim100\text{MPa}$ $f_y=450\text{MPa}$		$f_{ck}=60\sim100\text{MPa}$ $f_y=450\text{MPa}$	
	MV	SD	MV	SD
Proposed./Num.	0.981	0.022	0.976	0.023
Pam' etc./Num.	1.391	0.424	1.144	0.329

Note: MV=mean value, SD=standard deviation

트에 도달한 후 모멘트가 최대모멘트의 80%로 떨어지는 점에서의 곡률, 항복곡률은 증가의 탄소성 거동(equivalent elasto-plastic system)으로 가정하여 탄성영역에서 최대모멘트의 75%인 점에서의 곡률로 정의하고 있다.

극한상태에서 압축철근의 응력을 고려하여 도출된 철근콘크리트 보의 곡률연성지수 예측식은 단철근 및 복철근 보 모두에 적용할 수 있으며, 본 연구에서 제안된 예측식은 기존에 제안된 예측식보다 수치해석에 의해 얻은 곡률연성지수와 거의 같은 값을 예측하고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 고강도 재료를 사용한 철근콘크리트 보의 휨거동 및 곡률연성지수 특성을 분석하고, 다중회귀분석을 수행하여 합리적인 곡률연성지수 예측식을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 콘크리트 압축강도가 30~100MPa, 철근의 항복강도가 300~600MPa 이고, 인장철근비가 균형 철근비의 10~100%, 압축철근비가 인장 철근비의 0~100%인 RC 보 단면에 대해 모멘트-곡률 관계와 연성지수를 해석적으로 계산하여 RC 보의 휨거동 및 곡률연성지수에 각 재료의 강도가 미치는 영향을 분석하였고, 재료의 강도와 극한상태에서 압축철근의 응력을 고려한 철근변수를 이용하여 단철근 및 복철근 보에 함께 적용할 수 있는 곡률연성지수 예측식을 도출하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 콘크리트 압축강도 60MPa까지는 압축강도가 증가하면 연성지수가 증가하고 그 이상의 강도에서는 콘크리트 압축강도가 증가하면 연성지수는 감소하는 것으로 나타났으며, 철근은 항복강도가 증가하면 곡률연성지수는 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 복철근 보에서 극한상태에서 압축철근의 응력을 철근변수에 고려하면 철근변수와 연성지수와의 관계를 단철근 보에서와 같이 단일 추세선으로 나타낼 수 있다.
- (3) 본 연구에서 제안한 곡률연성지수 예측식은 단철근 및 복철근 보 단면 모두에 적용이 가능하며, 예측식에 의한 곡률연성지수

는 수치해석에 의해 구한 곡률연성지수를 최대 오차범위 9% 이내에서 계산되는 것으로 나타났다.

- (4) 본 연구에서는 극한상태를 콘크리트구조설계기준에서 정의하고 있는 압축연단의 변형률이 0.003에 도달했을 때로 규정하고 곡률연성지수를 계산하였기 때문에 실제 실험에서 얻은 처짐으로부터 측정된 연성지수(연구자에 따라 극한 상태의 정의가 다름)와 일치하지는 않으며, 철근의 배근조건, 재료의 강도 등에 따라 극한상태에서의 콘크리트 변형률이 다르기 때문에 이를 고려하면 실제 부재의 연성지수를 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서 제시한 연성지수 예측식은 콘크리트구조설계기준에 규정된 극한상태에 따라 철근콘크리트 휨 부재의 설계 또는 해석할 때 부재의 곡률연성지수를 계산하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- American Concrete Institute (ACI) (2008), *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary*, Farmington Hills, Detroit, USA. 473pp.
- Arslan, G., and Cihanli, E. (2010), "Curvature Ductility Prediction of Reinforced High-Strength Concrete Beam Sections", *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 16, No. 4, pp. 462-470.
- Attard, M.M., and Setunge, S. (1996), "The Stress-Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete", *ACI Materials Journal*, ACI. Vol. 93, No. 5, pp. 432-444.
- Bai, Z.Z., and Au, F.T.K. (2011), "Flexural Ductility Design of High-Strength Concrete Beams", *The Structural Design of Tall Special Buildings*, <http://dx.doi.org/10.1002/tal.714>.
- European Committee for Standardization (EC2) (2004), *Eurocode 2 : Design of Concrete Structures, Part1-1 : General Rules and Rules for buildings(EN 1992-1-1:2004)*, Brussels, 227pp.
- Ho, J.C.M., Kwan, A.K.H., and Pam, H.J. (2003), "Theoretical Analysis of Post-Peak Behavior of Normal and High Strength Concrete Beams", *The Structural Design of Tall Special Buildings*, pp.109-125, <http://dx.doi.org/10.1002/tal.216>.
- Hong, G.-H. (2011), "Flexural Performance Evaluation of Reinforced Concrete Beams with High-Strength Concrete and Reinforcing Bars", *Journal of Architectural Institute of Korea*, Architectural Institute of Korea, Vol. 27, No. 6, pp. 49-56 (in Korean).
- Jang, I.Y., Park, H.G., Kim, S.S., Kim, J.H., and Kim, Y.G. (2008), "On the Ductility of High-Strength Concrete Beams", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Korea Concrete Institute, Vol. 2, No. 2, pp. 115-122.
- Korea Concrete Institute (KCI) (2008), *Design standard for concrete structures and commentary*, Kimoonang, 523pp. (in Korean).
- Pam, H.J., Kwan, A.K.H., and Islam, M.S. (2001a), "Flexural Strength and Ductility of Reinforced Normal-and High-Strength Concrete Beams", *Proceedings of the ICE-Structures and Buildings*, Vol. 146, No. 4, pp. 381-389.
- Pam, H.J., Kwan, A.K.H., and Ho, J.C.M. (2001b), "Post-Peak Behavior and Flexural Ductility of Doubly Reinforced High-Strength Concrete Beams", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 12, No. 5, pp. 459-74.
- Park, R., and Paulay, T. (1975), *Reinforced Concrete Structures*. Wiley, New York, 769pp.
- Pendyala, R., Mendis, P., and Patnaikuni, I. (1996), "Full-Range Behavior of High-Strength Concrete Members: Comparison of Ductility Parameters of High and Normal-Strength Concrete Members", *ACI Structural Journal*, ACI. Vol. 93, No. 1, pp. 30-35.
- Rashid, M.A., and Mansur, M.A. (2005), "Reinforced High-Strength Concrete Beams in Flexure", *ACI Structural Journal*, ACI, Vol. 102, No. 3, pp. 462-471.