



고강도 재료를 사용한 철근콘크리트 보의 모멘트-곡률관계 및 곡률연성지수 평가

이형준 ^{1)*}

¹⁾한밭대학교 건설환경공학과

Evaluation on Moment-Curvature Relations and Curvature Ductility Factor of Reinforced Concrete Beams with High Strength Materials

Hyung-Joon Lee ^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

ABSTRACT The high strength materials have been more widely used in reinforced concrete structures, specially, the reinforcing steel is permitted to be used in RC structures up to yielding strength of 600 MPa. The strength of materials in RC beam section affects the behavior and ductility of the RC members. In this study, the numerical analysis has been conducted to obtain the complete moment-curvature relation and the curvature ductility factor for the rectangular RC beam sections under the various reinforcement conditions and the effects of concrete strength, yield strength of reinforcement steel on the behavior and the curvature ductility factor of RC beam sections have been evaluated. The compressive strength of concrete and yield strength of steel have effected in various manner on the behavior and the curvature ductility factor of RC beam sections under reinforcement conditions. In the case of beam sections with equal resisting moment, the curvature ductility factor of RC beam section decreased with an increase in the yield strength of steel and increased with an increase in the concrete strength. When the yield strength of steel increased from 400 MPa to 600 MPa, the curvature ductility factor reduced about 30% and as the concrete strength increased from 30 MPa to 70 MPa, the curvature ductility factor of RC beam section increased about 3 times.

Keywords : RC beam section, moment-curvature relation, numerical analysis, reinforcement condition, curvature ductility factor

1. 서 론

최근 대형의 철근콘크리트 구조물이 건설됨에 따라 높은 강도를 갖는 재료의 사용이 늘어나고 있는 추세이며, 콘크리트의 경우 설계기준강도가 100 MPa 이상인 고강도 콘크리트가 사용되고 있고, 철근의 경우에는 종래에는 항복강도가 400 MPa 이하인 것을 주로 사용하였으나, 최근에는 유럽의 설계기준을 비롯하여 국내 설계기준, 미국의 ACI 등에서는 항복강도가 550~600 MPa인 고강도 철근을 사용할 수 있도록 하는 추세이다.¹⁻³⁾ 고강도 콘크리트를 사용하면 역학적 특성을 활용하여 단면을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 내구성이 뛰어난 고품질 콘크리트 구조물을 건설할 수 있다. 하지만 일반적으로 고강도 재료는 연성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 철근콘크리트 구조물의 설계는 강도뿐만 아니라 적절한 연성을 갖

도록 설계해야 하며, 특히 내진설계에서는 충분한 연성을 갖도록 설계해야 할 필요성이 있다.

콘크리트 구조설계기준을 비롯한 각 설계기준에서는 철근콘크리트 휨부재를 설계할 때 부재가 적절한 연성을 갖도록 하는 규정을 두고 있다. 유럽통합기준 Eurocode¹⁾에서는 공칭휨강도 계산시 콘크리트 압축응력 블록의 중립축의 위치(c/d)를 제한함으로써 적절한 연성이 확보되도록 하고 있으며, ACI²⁾나 콘크리트구조기준³⁾에서는 공칭휨강도를 계산하는 극한상태에서 인장측 가장 바깥에 배치된 철근 변형률의 최소값을 0.004 또는 철근 항복변형률의 2배 이상으로 함으로써 적절한 연성이 확보되도록 하고 있다.

고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보부재의 연성특성에 대한 연구는 다양하게 진행되어 왔다. Shin 등⁴⁾은 콘크리트 압축강도가 27.6~103.4 MPa인 12개의 RC 보 부재에 대한 휨 실험을 수행하여 고강도 콘크리트 부재의 휨연성 특성을 실험적으로 분석하였고, 이재훈⁵⁾은 콘크리트 압축강도가 28, 35, 42 MPa, 철근 항복강도가 300, 400, 500 MPa인 보부재에 철근량을 변수로 하여 해석적인 방법으로 휨연성지수를 구하여 공식으로 계산한

*Corresponding author E-mail : leehj@hanbat.ac.kr
 Received October 23, 2012, Revised February 5, 2013,
 Accepted March 29, 2013
 ©2013 by Korea Concrete Institute

값과 비교 하였고, Jang 등⁶⁾은 콘크리트 압축강도가 40, 60, 70 MPa인 콘크리트로 제작한 23개의 보부재에 대해 실험을 수행하여 콘크리트 압축강도, 인장철근비, 복부철근량, 전단지간비(a/d) 등이 보의 연성에 미치는 영향을 분석하였다. Pam 등⁷⁾은 압축강도가 30~100 MPa인 보통 및 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보 단면의 휨강도 및 연성특성을 분석하였고, Ho 등⁸⁾은 압축강도가 40~100 MPa인 철근콘크리트 보 단면의 연성지수를 해석적으로 계산하여 철근콘크리트 보의 연성지수에 콘크리트 압축강도가 미치는 영향을 분석하였으며, Bai와 Au⁹⁾는 콘크리트 압축강도가 30~90 MPa인 철근콘크리트 보에 대한 해석적 연구를 통해 콘크리트 압축강도, 인장철근비, 압축철근비 등이 연성지수에 영향을 분석하였다. 또한, Au 등¹⁰⁾은 RC 및 PSC 단면에 대해 콘크리트 압축강도에 따른 연성 및 변형특성을 분석하였고, Arslan과 Cihanli¹¹⁾는 콘크리트 압축강도 50~110 MPa, 철근의 항복강도 220, 420, 530 MPa인 단철근 보에 대한 연성지수를 해석적으로 계산하여 콘크리트 압축강도 및 철근의 항복강도, 인장철근비에 따른 연성지수 예측식을 제시하였다. 홍건호¹²⁾는 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, 68 MPa, 철근의 항복강도 400, 600, 700 MPa인 재료를 사용하였다. Ashour¹³⁾는 콘크리트 압축강도가 43~102 MPa인 보의 휨거동 특성을 콘크리트 압축강도와 철근비를 변수로 하여 실험적으로 분석하였으며, Rashid 등¹⁹⁾은 콘크리트 압축강도가 43~126 MPa, 철근의 항복강도가 460 MPa인 보의 균열하중, 균열폭, 극한하중, 연성지수 등 휨거동 특성을 콘크리트 압축강도와 철근비를 변수로 하여 실험적으로 분석하였다.

철근콘크리트 보의 연성특성에 대한 연구는 실험적 또는 해석적 방법으로 이루어 졌으며, 연성지수에 영향을

미치는 여러 요인들 중에서 콘크리트의 강도, 인장철근비, 압축철근량 등에 대해서 주로 연구가 이루어 졌고, 철근의 항복강도 크기나 철근배근 조건에 따른 연성지수 특성을 체계적으로 분석한 해석적 연구는 많지 않은 실정이다.

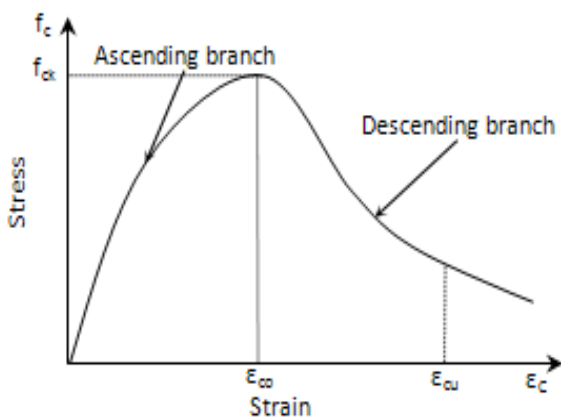
따라서, 이 연구에서는 콘크리트 압축강도 및 철근의 항복강도가 철근콘크리트 보의 연성특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 이를 위하여 콘크리트 구조설계 기준에서 적절한 연성확보를 위해 규정하고 있는 휨부재의 최소 허용변형률 조건, 연속휨부재의 모멘트 재분배가 허용되는 조건, 동일한 공칭모멘트를 갖는 단면, 철근비가 동일한 단면 등 다양한 철근배근 조건에서 콘크리트 압축강도 및 철근의 항복강도가 모멘트-곡률관계 및 곡률연성지수에 미치는 영향을 해석적 방법으로 분석하였다.

2. 모멘트-곡률관계 및 곡률연성지수

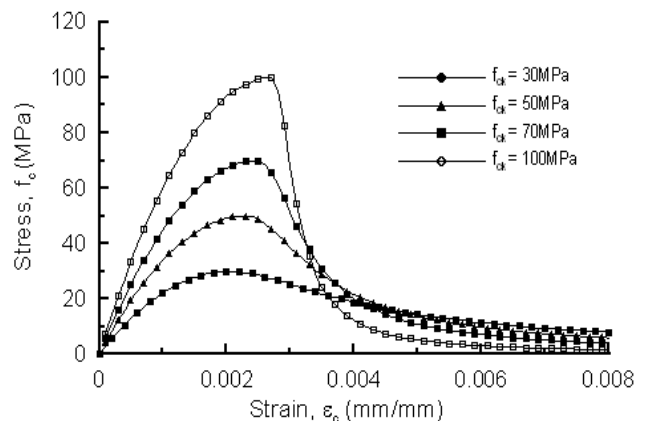
2.1 재료의 응력-변형률 관계

2.1.1 콘크리트

철근콘크리트 보의 모멘트-곡률 관계와 같은 휨거동 특성을 해석적 방법으로 얻기 위해서는 콘크리트의 응력-변형률 관계를 사용해야 한다. 콘크리트의 응력-변형률 관계는 콘크리트의 압축강도의 크기, 횡방향 구속력 등 여러 가지 조건하에서 많은 연구자들에 의해 제시되어 왔다.¹⁴⁻¹⁶⁾ 이 연구에서는 보통 강도의 콘크리트와 고강도 콘크리트에서 모두 적용할 수 있는 Fig. 1(a)와 같은 응력-변형률 관계곡선을 이용하였다. 콘크리트의 응력-변형률 관계의 상승곡선부분은 널리 적용되고 있는 Hognestad가 제시한 식 (1)과 같은 곡선으로 가정하였고, 최대 응력 이후 하강곡선과 최대응력점에서의 변형률은 콘크리트 압축강도 범위 20~130 MPa에서 실제거동을 잘 묘사하는 것으로 알려진 Attard와 Setunge¹⁴⁾가 제시한 식 (2)로 모델링 하였다.



(a) Model of stress-strain curve



(b) Typical stress-strain curves

Fig. 1 Stress-strain curves for concrete in compression

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

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

- 하강곡선, $\epsilon_c > \epsilon_{co}$

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

여기서,

$$\epsilon_{co} = 4.11 (f_{ck})^{0.75} / E_c$$

$$E_c = 4,370 (f_{ck})^{0.52}$$

$$A = \frac{f_{ci} (\epsilon_{ci} - \epsilon_{co})^2}{\epsilon_{co} \epsilon_{ci} (f_{ck} - f_{ci})}, B = 0$$

$$f_{ci} = f_{ck} \{ 1.41 - 0.17 \ln (f_{ck}) \}$$

$$\epsilon_{ci} = \epsilon_{co} \{ 2.50 - 0.30 \ln (\epsilon_{co}) \}$$

f_{ck} 는 콘크리트 압축강도(MPa)이다.

이와 같은 콘크리트의 응력-변형률 관계를 이용하여 콘크리트의 압축강도에 따른 응력-변형률 관계곡선을 나타내면 Fig. 1(b)와 같다.

2.1.2 철근

철근의 응력-변형률 관계는 해석에 사용한 모든 범위의 항복강도에 대해 완전 탄-소성 거동을 하는 것으로 가정하여 Fig. 2와 같은 응력-변형률 관계곡선을 이용하였으며, 탄성계수(E_s)는 200000 MPa를 사용하였다.

2.2 모멘트-곡률관계의 계산

철근콘크리트 보 단면의 모멘트-곡률 관계는 휨강도를 계산할 때 적용하는 기본가정을 적용한 후 평형조건, 적

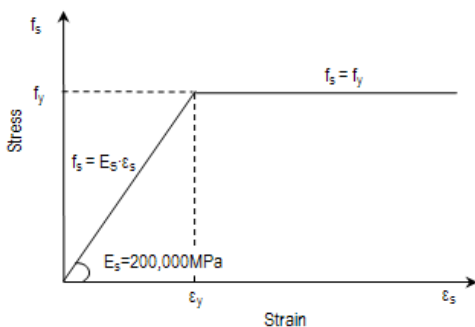


Fig. 2 Stress-strain curves for reinforcing steel

합조건 및 재료의 응력-변형률 관계를 이용하여 해석적으로 계산할 수 있다.¹⁷⁾ 단면은 하중을 받기 전-후에 평면상태를 유지하고, 철근과 콘크리트의 응력변형을 관계를 알고 있는 상태이며, 콘크리트의 인장강도는 균열이 발생한 이후에는 무시하는 것으로 가정한다. Fig. 3은 모멘트를 받고 있는 철근콘크리트 직사각형 보 단면의 변형률 및 응력 분포를 나타내고 있다. 철근콘크리트 보 단면의 모멘트-곡률 관계의 계산은 다음과 같은 과정에 의해 이루어진다. 압축연단에서의 콘크리트 변형률 ϵ_{cm} 에 대해 중립축 위치 c 를 가정한 후 적합조건에 의해 각 철근의 변형률 및 임의 위치에서의 콘크리트 변형률을 계산한 후 각각의 변형률에 해당하는 각각의 응력을 계산하고, 균열이 발생한 이후에는 계산된 응력으로부터 콘크리트와 각 철근에 의한 힘을 식 (3)과 같이 계산한다. 균열이 발생하기 전에는 인장측 콘크리트에 의한 인장력은 인장응력이 직선분포를 하는 것으로 하여 추가로 고려하였다.

$$C_c = \int_0^c f_c b dx \quad (3a)$$

$$C_s = A_{sc} f_{sc} \quad (3b)$$

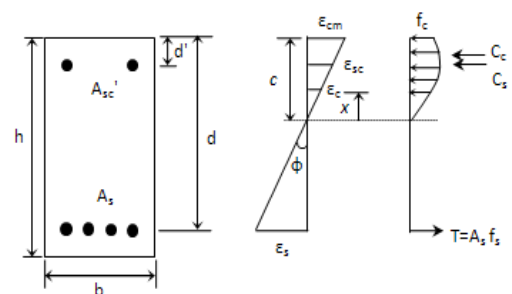
$$T = A_s f_s \quad (3c)$$

여기서, f_c 는 중립축에서 x 만큼 떨어진 점에서의 콘크리트 응력(MPa), f_s 는 인장철근의 응력(MPa), f_{sc} 는 압축철근의 응력(MPa), A_s 는 인장철근의 단면적(mm²), A_{sc} 는 압축철근의 단면적(mm²), b 는 단면의 폭(mm)이다.

평형조건에 의한 식 (4)를 얻을 수 있고, 평형조건이 만족할 때까지 중립축을 변화시키면서 반복계산을 한다.

$$\int_0^c f_c b dx + A_{sc} f_{sc} - A_s f_s = 0 \quad (4)$$

압축연단에서의 임의의 콘크리트 변형률 ϵ_{cm} 에 대해 평형조건이 만족되면, 저항모멘트는 식 (5)와 같이 계산한다.



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

Fig. 3 Theoretical moment-curvature determination

$$M = \int_0^c f_c b x dx + A_{sc} f_{sc} (c - d') + A_s f_s (d - c) \quad (5)$$

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

저항모멘트 M 에 대응되는 곡률 ϕ 는 식 (6)과 같이 계산한다.

$$\phi = \frac{\epsilon_{cn}}{c} \quad (6)$$

여기서, ϵ_{cn} 은 압축연단에서의 콘크리트 변형률, c 는 중립축 깊이(mm)이다.

이 연구에서는 압축연단에서의 콘크리트 변형률 ϵ_{cn} 을 0 부터 0.01 까지 0.0001씩 증가 시키면서 앞의 과정을 반복계산하여 직사각형 철근콘크리트 보 단면의 모멘트-곡률 관계 곡선을 얻었다.

2.3 연성지수

철근콘크리트 보 부재의 연성(ductility)은 극한하중에 도달한 이후 하중저항능력(load-carrying capacity)의 급격한 감소없이 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.¹⁷⁾ 이 연구에서는 앞서 기술한 방법에 의해 계산한 고강도 재료로 만들어진 단면의 모멘트-곡률 관계를 이용하여 단면(곡률) 연성 특성을 고찰하였다. 단면의 연성특성은 곡률연성지수(curvature ductility factor)를 가지고 분석하였으며, 곡률연성지수 μ_ϕ 는 식 (7)과 같이 계산하였다.

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (7)$$

여기서, ϕ_y 는 인장철근이 항복할 때의 항복곡률이고, ϕ_u 는 극한상태에서의 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. Pam 등⁷⁾과 Ho 등⁸⁾은 극한곡률은 모멘트-곡률관계에서 최대 모멘트에 도달한 후 모멘트가 최대모멘트의 80%로 떨어지는 점에서의 곡률, 항복곡률은 등가의 탄소성 거동(equivalent elasto-plastic system)으로 가정하여 탄성영역에서 최대모멘트의 75%인 점에서의 곡률로 정의하여 연성지수를 구했으며, Bai와 Au⁹⁾는 극한곡률은 모멘트-곡

률관계에서 최대 모멘트에 도달한 후 모멘트가 최대모멘트의 85%로 떨어지는 점에서의 곡률, 항복곡률은 등가의 탄소성 거동(equivalent elasto-plastic system)으로 가정하여 탄성영역에서 최대모멘트의 75%에 도달했을 때의 곡률로 정의하였다. Arslan과 Cihanli¹¹⁾는 보 단면의 극한곡률 ϕ_u 는 보의 압축연단에서의 콘크리트 변형률이 식 (8)과 같은 값에 도달했을 때의 곡률, 항복곡률은 인장철근이 항복했을 때의 곡률로 정의하여 연성지수를 계산하였다.

$$\epsilon_{cu} = 0.003 + 1.44 \frac{1}{f_{ck}^2} + 0.00054 \left(\frac{\rho'}{\rho} \right) \quad (8)$$

이 연구에서는 항복곡률은 인장철근이 항복할 때의 곡률로 정의하였고, 극한곡률은 콘크리트 구조설계기준에서 공칭모멘트를 계산할 때 기준이 되는 압축연단에서의 콘크리트 변형률이 콘크리트의 압축강도에 관계없이 0.003에 도달했을 때의 곡률로 정의하였다. 또한 유럽설계기준에서는 공칭모멘트를 계산할 때 압축연단에서의 콘크리트 압축변형률은 콘크리트의 강도에 따라 식 (9)와 같이 정의하고 있으며, 이 연구에서는 이를 기준으로 극한곡률을 계산하여 구한 곡률연성지수도 비교검토 하였다.

$$\epsilon_{cu} = 0.0035, \quad \text{for } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (9a)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.0026 + 0.035[(90 - f_{ck})/100]^4, \quad \text{for } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (9b)$$

2.4 해석 결과와 실험 결과 비교

앞에서 기술한 해석적 방법으로 계산한 극한하중과 곡률연성지수를 실험에서 얻은 결과들과 비교한 것은 Table 1과 같다. 극한하중의 해석값은 해석적 방법으로 극한모멘트를 계산 한 후 실험의 지간 및 전단지간 조건에 따라 하중으로 변환한 값이며, 연성지수는 압축연단의 콘크리트 변형률이 0.003, 0.005일 때를 기준으로 계산하였으며, 또한 극한상태에서 콘크리트 압축 변형률을 측정할 경우에는 이에 대해서도 연성지수를 계산하였다.

Jang 등⁶⁾은 폭 $b=140$ mm, 유효높이 $d=195 \sim 210$ mm, 지간 $L=1350$ mm 인 단순보에 대해 전단지간 $a=525$ mm 로 하여 4점 재하시험을 수행하여 극한하중과 연성지수를 측정하였다. 극한상태는 최대하중에 도달한 후 최대하중의 80%로 떨어지는 지점으로 정의하였으며, 연성지수는 인장철근이 항복할 때의 처짐과 극한상태에서의 처짐의 비로 계산하였다. 극한하중에 대한 해석값은 실험값과 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 측정된 연성지수는 압축연단의 콘크리트 변형률이 0.003일 때를 기준으로 계산한 연성지수보다 큰 것으로 나타났고, 콘크리트 압축변형률 0.005일 때를 기준으로 계산한 연성지수는 실험값과 유사한 결과를 보이고 있다. 또한, 극한상태에서 측정된 압축연단에서의 콘크리트 변형률을 기준으

Table 1 Predictions of ultimate load and ductility factor for test beams

Researcher (s) (sections)	f _{ck} (MPa)	f _y (MPa)	ρ	ρ / ρ _b	ρ'	Experimental results			Numerical results				Exp. result/Num. result			
						P _u (kN)	μ ¹⁾	ε _{cu}	P _u (kN)	μ _{u3}	μ _u	μ _{u5}	$\frac{P_{u,e}}{P_{u,n}}$	$\frac{\mu_{exp.}}{\mu_{um.}}$	$\frac{\mu_{exp.}}{\mu_{um.}}$	$\frac{\mu_{exp.}}{\mu_{um.}}$
									ε _{cu} = 0.003	ε _{cu} = 0.003	ε _{cu} = exp.	ε _{cu} = 0.005	ε _{cu} = 0.003	ε _{cu} = 0.003	ε _{cu} = exp.	ε _{cu} = 0.005
Jang etc ⁶⁾ Section : b=140 mm h=260 mm d=195~ 210 mm	41.0	435	0.020	0.55	0	177.4	4.16	0.0051	176.8	2.92	4.38	4.34	1.00	1.42	0.95	0.96
	61.0	435	0.020	0.43	0	189.5	4.97	0.0047	184.1	4.61	6.16	6.30	1.03	1.08	0.81	0.79
	71.0	450	0.026	0.53	0	251.1	5.10	0.0028	252.5	3.51	3.24	4.61	0.99	1.45	1.57	1.11
	41.0	450	0.026	0.78	0	137.3	2.41	0.0050	146.3	1.82	2.69	2.69	0.94	1.33	0.90	0.90
	41.0	450	0.026	0.78	0.005	140.9	3.22	0.0045	147.3	2.04	3.00	3.26	0.96	1.58	1.07	0.99
	41.0	450	0.026	0.78	0.009	143.9	3.83	0.0039	147.7	2.20	2.90	3.64	0.97	1.74	1.32	1.05
	71.0	450	0.042	0.84	0	184.3	2.54	0.0070	219.6	1.89	2.67	2.48	0.84	1.34	0.95	1.02
	75.0	450	0.042	0.80	0.008	185.2	3.21	0.0037	221.9	2.20	2.63	3.14	0.83	1.46	1.22	1.02
	75.0	450	0.042	0.80	0.014	185.9	3.17	0.0036	221.9	2.33	2.75	3.49	0.84	1.36	1.15	0.91
Average												0.93	1.42	1.11	0.97	
Hong, G. H. ¹²⁾ Section : b=250 mm h=350 mm d=300 mm	27.8	468	0.017	0.71	0.003	294.0	1.09	-	295.2	2.21	-	3.80	1.00	0.49	-	0.29
	27.8	669	0.010	0.73	0.003	229.0	1.31	-	259.1	2.01	-	3.47	0.88	0.65	-	0.38
	27.8	707	0.008	0.61	0.003	217.0	1.50	-	215.5	2.45	-	4.17	1.01	0.61	-	0.36
	38.0	508	0.011	0.43	0.003	230.7	1.85	-	228.6	4.09	-	6.53	1.01	0.45	-	0.28
	38.0	669	0.010	0.58	0.003	244.2	1.42	-	266.8	2.71	-	4.38	0.92	0.52	-	0.32
	38.0	707	0.008	0.49	0.003	210.6	2.01	-	221.1	3.21	-	5.11	0.95	0.63	-	0.39
	68.0	508	0.015	0.38	0.003	295.0	1.46	-	311.4	5.11	-	7.24	0.95	0.29	-	0.20
	68.0	669	0.010	0.39	0.003	266.0	1.77	-	279.5	4.50	-	6.36	0.95	0.39	-	0.28
	68.0	707	0.011	0.43	0.003	271.8	1.56	-	301.2	3.99	-	5.64	0.90	0.39	-	0.28
Average												0.95	0.49		0.31	
Rashid etc ¹⁹⁾ Section : b=250 mm h=400 mm d=345 mm	42.8	460	0.022	0.66	0.003	461.3	2.39	0.0033	443.9	2.69	3.00	4.08	1.04	0.89	0.80	0.59
	73.6	460	0.022	0.42	0.003	500.9	2.82	0.0034	465.8	4.96	5.57	6.89	1.08	0.57	0.51	0.41
	72.8	460	0.035	0.70	0.003	752.0	1.59	0.0036	699.7	2.66	3.11	3.53	1.07	0.60	0.51	0.45
	77.0	460	0.035	0.66	0.006	765.1	2.22	0.0036	709.2	3.08	3.65	4.17	1.08	0.72	0.61	0.53
	72.8	460	0.035	0.70	0.009	772.8	1.64	0.0033	709.6	3.15	3.51	4.53	1.09	0.52	0.47	0.36
	77.0	460	0.047	0.90	0.003	807.8	1.97	0.0039	921.0	1.84	2.21	2.38	0.88	1.07	0.90	0.83
Average												1.04	0.73	0.63	0.53	

¹⁾Calculated based on deflection (=deflection at ultimate state/deflection at steel yielding)

로 계산한 연성지수는 실험값보다 다소 크게 나타났다.

홍건호¹²⁾는 폭 b=250 mm, 유효높이 d=300 mm, 지간 L=2700 mm인 단순보에 대해 전단지간 a=1050 mm로 하여 4점 재하시험을 수행하여 극한하중과 연성지수를 측정하였다. 연성지수의 실험값은 최대하중에 도달했을 때의 처짐과 철근이 항복할 때의 처짐 비로 계산하였으며, 연성지수는 1.5~2.0으로 작게 측정되었다. 극한하중은 실험값과 해석 결과가 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 연성지수의 실험값은 압축연단의 콘크리트 변형률이 0.003일 때를 기준으로 계산한 연성지수의 50% 정도로 나타났다. 이것은 실험연구에서 극한상태를 최대 하중에 도달했을 때로 정의하여 극한상태에서의 처짐이 적게 평가되었기 때문이다.

Rashid 등¹⁹⁾은 폭 b=250 mm, 유효높이 d=345 mm, 지

간 L=3400 mm 인 단순보에 대해 전단지간 a=1200 mm로 하여 4점 재하시험을 수행하여 극한하중과 연성지수를 측정하였다. 극한상태는 최대하중에 도달한 후 최대하중의 90%로 떨어지는 지점으로 정의하여, 연성지수는 인장 철근이 항복할 때의 처짐과 극한상태에서의 처짐의 비로 계산하였다. 극한하중은 실험값과 해석 결과가 거의 일치하는 것으로 나타났으나, 연성지수의 실험값은 압축연단의 콘크리트 변형률이 0.003일 때를 기준으로 계산한 연성지수보다 작게 나타났다. 또한, 극한상태에서 측정된 압축연단에서의 콘크리트 변형률을 기준으로 계산한 연성지수도 실험값보다 큰 것으로 나타났다.

연구자에 따라 극한상태를 다르게 정의하고 있어 비슷한 철근배근 조건을 갖는 보에 대해서도 실험에서 얻은 부재 연성지수(처짐)는 다르게 평가되고 있으며, 해석적

방법에 의해 계산한 곡률연성지수와 차이점을 보이고 있다. 따라서 이 연구에서 적용한 해석적 방법에 의한 곡률연성지수 평가는 부재의 실제 연성지수를 평가하는데 있어 어려움이 있으나, 압축연단의 콘크리트 변형률이 0.003일 때를 기준으로 계산한 곡률연성지수는 최대하중의 90%인 점에서의 처짐과 80%인 점에서의 처짐을 기준으로 계산한 부재 연성지수의 사이 값으로 평가하는 것으로 나타났다.

3. 해석 결과 및 분석

3.1 해석단면 및 매개변수

3.1.1 해석단면

철근콘크리트 보의 모멘트-곡률 관계 및 곡률연성지수는 Fig. 3과 같은 직사각형 단면에 대해 계산하였다. 보의 폭 $b=300\text{ mm}$, 높이 $h=600\text{ mm}$, 유효깊이 $d=50\text{ mm}$ 이며, 복철근보의 경우에 압축철근의 위치(d')는 압축연단으로부터 50 mm 떨어진 것으로 하였다.

3.1.2 매개변수

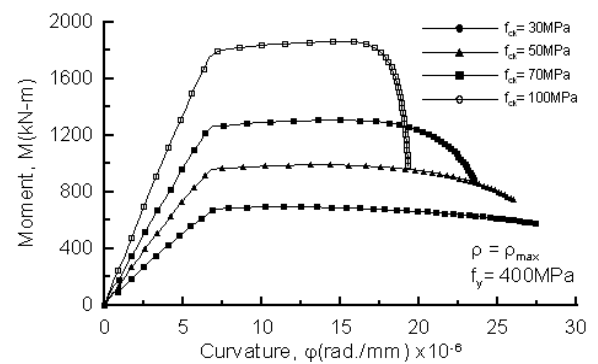
콘크리트 및 철근의 강도에 따른 연성특성을 분석하기 위해 콘크리트는 보통 강도와 고강도 콘크리트를 모두 고려하여 압축강도를 20 MPa 에서 100 MPa , 철근은 항복강도를 300 MPa 에서 600 MPa 인 경우에 대해 모멘트-곡률 관계를 계산하였으며, 철근의 사용량에 따른 연성특성은 철근을 콘크리트 설계기준에 제시되어 있는 최대철근량을 사용한 단면(힘부재의 최소 허용변형률 조건을 만족하는 경우), 연속 힘부재에서 부모멘트 재분배가 허용되는 조건을 만족할 때의 철근량을 사용한 단면, 동일한 저항모멘트(공칭모멘트)를 갖도록 한 단면($M=600\text{ kN}\cdot\text{m}$), 콘크리트와 철근의 강도에 관계없이 동일한 인장철근비를 사용한 단면($\rho=0.02$) 등에 대해서 매개변수 해석을 수행하였다. 또한 복철근보에 대해서는 압축철근의 양에 따른 연성 특성도 함께 분석하였다. 동일한 저항모멘트(공칭모멘트)를 갖도록 한 단면에서 저항모멘트로 $M=600\text{ kN}\cdot\text{m}$ 를 적용한 것은 해석에 사용된 단면크기와 재료의 강도 조합에서 설계기준에 규정된 최소철근량 조건과 최대철근량 조건을 만족시키는 범위내에서 얻을 수 임의의 저항모멘트이다.

힘부재의 최소 허용변형률 조건은 최외단 인장철근의 순장변형률이 0.004 또는 항복변형률의 2배로 규정되어 있고, 연속힘부재에서 부모멘트의 재분배를 허용하는 것은 최외단 인장철근의 변형률이 0.0075 이상인 경우이므로 각각 이에 해당하는 철근비를 계산하여 철근을 배치하였다.³⁾

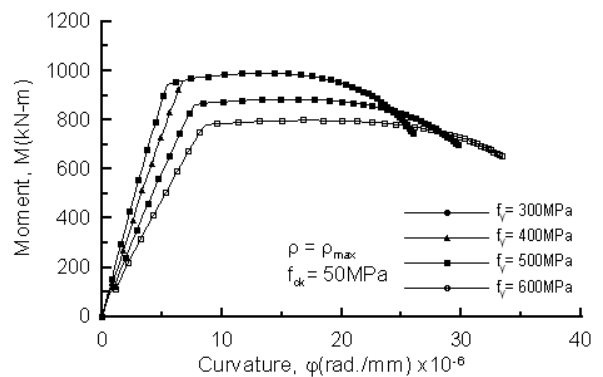
3.2 모멘트-곡률관계

Fig. 4는 힘부재의 최소 허용변형률 조건을 만족하는

최대 철근비를 사용한 단면의 모멘트-곡률 관계를 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 인장철근의 항복강도가 400 MPa 인 경우에 콘크리트 압축강도에 따른 모멘트-곡률 곡선으로 콘크리트의 압축강도가 증가하면 초기 강성 및 저항모멘트가 증가하고 최대 모멘트에 도달할 때의 곡률이 작아지는 것을 보여주고 있고, 또한, 최대 모멘트에 도달한 후 소성거동 구간은 짧아지고 저항모멘트의 급격한 감소가 일어나는 것을 보여주고 있다. Fig. 4(b)는 콘크리트 압축강도가 50 MPa 인 경우에 철근의 항복강도에 따른 모멘트-곡률 곡선으로 철근의 항복강도가 증가하면 초기 강성 및 저항모멘트가 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 작을수록 최소 허용변형률 조건을 만족시키는 철근비가 크기 때문에 사용되는 철근이 상대적으로 많기 때문이다. Fig. 5는 공칭모멘트가 $600\text{ kN}\cdot\text{m}$ 로 동일한 단면에서 콘크리트 압축강도와 철근의 항복강도에 따른 모멘트-곡률 관계를 나타낸 것으로, Fig. 5(a)는 철근의 항복강도가 400 MPa 인 경우에 콘크리트 강도에 따른 모멘트-곡률 관계를 나타낸 것으로 최대하중에 도달할 때까지 거동에는 콘크리트 압축강도가 미치는 영향이 매우 작으며, 최대 하중에 도달한 이후에는 콘크리트의 압축강도가 큰 경우에 많은 변형이 발생한 후에 저항력의



(a) Steel yield strength 400 MPa

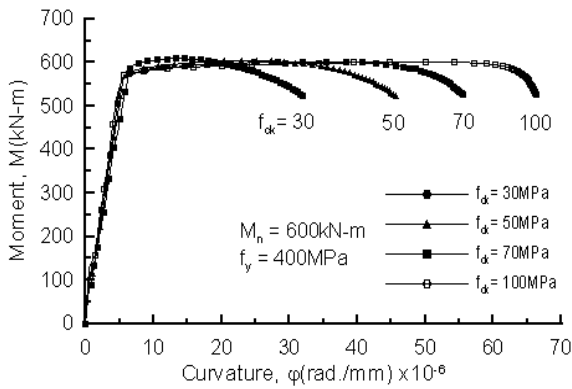


(b) Concrete strength 50 MPa

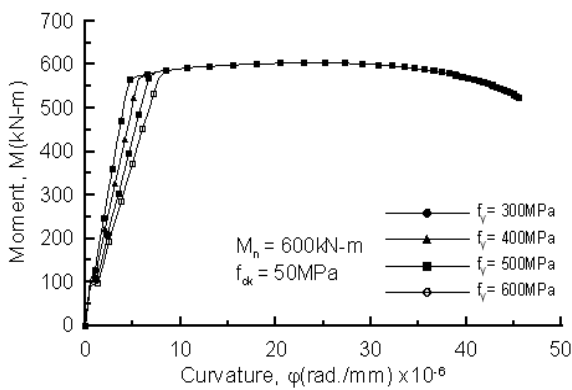
Fig. 4 Moment-curvature curves when $\rho=\rho_{max}$

감소가 일어나는 것으로 나타났다. 또한 최대하중에 도달한 후 저항력의 감소는 콘크리트 강도가 클수록 급격히 일어나는 것으로 나타났다. Fig. 5(b)는 콘크리트 압축강도가 50 MPa인 경우에 철근의 항복강도에 따른 모멘트-곡률 관계를 나타낸 것으로 최대하중에 도달하기 전 단계에서의 거동은 철근의 항복강도에 영향을 받으나 최대하중에 도달한 이후 파괴까지의 거동은 철근의 항복강도 크기에 영향을 거의 받지 않음을 보여주고 있다. 최대하중에 도달하기 전 단계에서는 철근의 항복강도가 클수록 강성이 작아지는데 이것은 항복강도가 크면 사용되는 철근량이 적어지기 때문이다.

Fig. 6과 7은 단면의 인장철근비(ρ)가 0.02인 경우에 콘크리트 압축강도와 철근의 항복강도에 따른 모멘트-곡률 관계를 보여주고 있다. Fig. 6(a)와 (b)는 콘크리트 강도가 30 MPa과 70 MPa인 경우에 철근의 항복강도에 따른 모멘트-곡률 관계를 각각 나타낸 것으로 최대하중에 도달할 때까지 부재의 강성에는 철근의 항복강도 크기가 거의 영향을 미치지 않으며, 최대하중에 도달한 이후에는 철근의 항복강도가 작은 경우에 많은 변형이 발생한 후에 저항력의 감소가 일어나는 것으로 나타났다. 특히, 콘크리트 압축강도가 작은 경우(30 MPa)에는 철근의 항복강도가 500 MPa 이상이면 최대하중에 도달한 직후부터 저항력의 감소가 일어나며, 항복강도 600 MPa에서는 저항력의 감소가 급격히 일어나는 것으로 나타났다. Fig. 7(a)

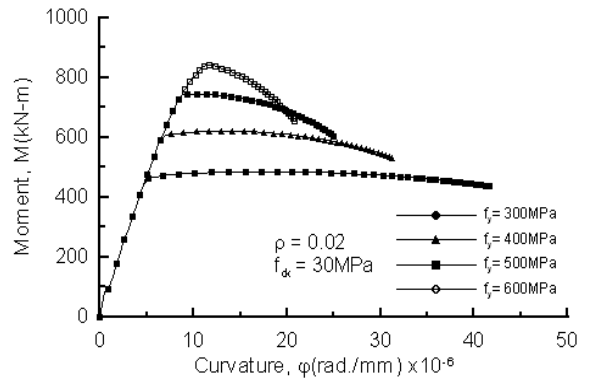


(a) Steel yield strength 400 MPa

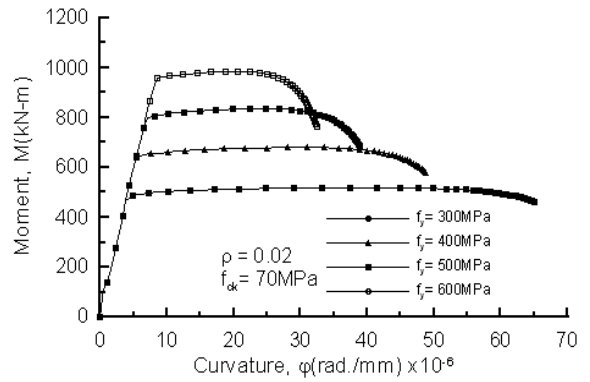


(b) Concrete strength 50 MPa

Fig. 5 Moment-curvature curves when $M=600 \text{ kN} \cdot \text{m}$

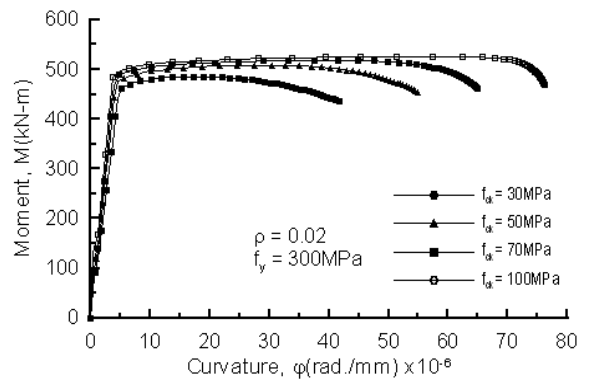


(a) Concrete strength 30 MPa

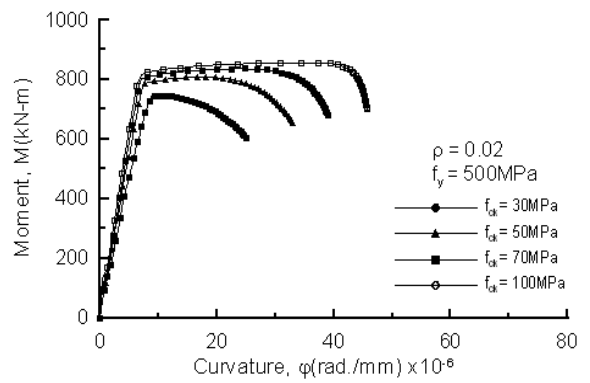


(b) Concrete strength 70 MPa

Fig. 6 Moment-curvature curves with different steel yield strength when $\rho=0.02$



(a) Steel yield strength 300 MPa

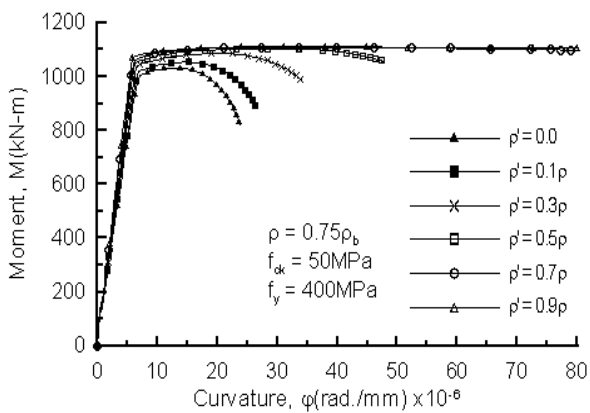


(b) Steel yield strength 500 MPa

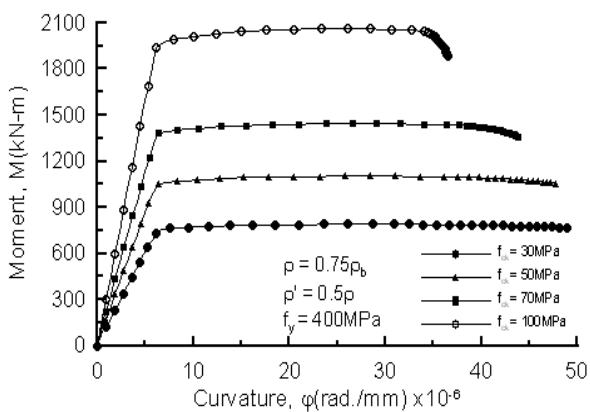
Fig. 7 Moment-curvature curves with different concrete strength when $\rho=0.02$

와 (b)는 철근의 항복강도가 각각 300 MPa 및 500 MPa인 경우에 콘크리트 압축강도에 따른 모멘트-곡률 관계를 나타낸 것으로 철근의 항복강도가 300 MPa인 경우에는 최대하중에 도달하기 전 단계에서의 부재 강성에는 철근의 항복강도에 영향을 크게 주지 않으나, 항복강도가 500 MPa인 경우 콘크리트 압축강도 30 MPa에서는 부재의 강성이 많이 작은 것으로 나타났다. 또한, 최대하중에 도달한 이후 파괴까지의 거동은 콘크리트 강도가 클수록 더 연성 거동을 하고 있음을 알 수 있으며, 연성거동의 특성은 철근의 항복강도가 크면 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 복철근보의 모멘트-곡률 관계를 보여주고 있다. Fig. 8(a)는 콘크리트 압축강도 40 MPa, 철근의 항복강도 400 MPa이고 인장철근비가 균형철근비의 75%인 경우에 압축철근비에 따른 모멘트-곡률관계로 압축철근비가 인장철근비의 10%일 때에는 압축철근 배치에 따른 연성의 증가가 매우 작고, 인장철근비의 50% 이상이면 연성이 많이 증가함을 보여주고 있다. Fig. 8(b)는 철근의 항복강도 400 MPa이고 인장철근비가 균형철근비의 75%, 압축철근비가 인장철근의 50%인 경우에 콘크리트 강도에 따른 모멘트-곡률 관계를 나타낸 것으로 콘크리트의 압축강도가 크면 초기 강성이 커지고, 최대하중에 도달한 후 저항력의 감소가 발생할 때까지의 변형이 적게 일어남을 보여주고 있다.



(a) $\rho=0.75\rho_b$, $f_{ck}=50$ MPa, $f_y=400$ MPa



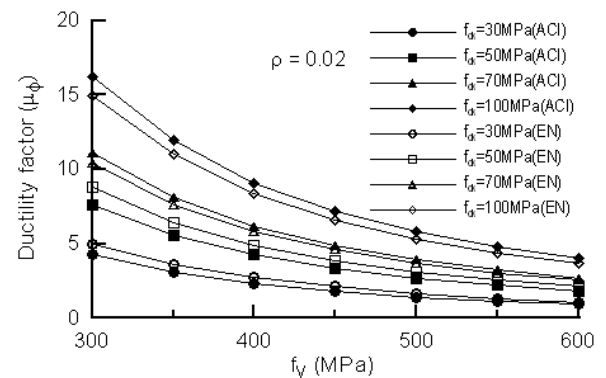
(b) $\rho=0.75\rho_b$, $\rho'=0.5p$, $f_y=400$ MPa

Fig. 8 Moment-curvature curves for doubly RC beam sections

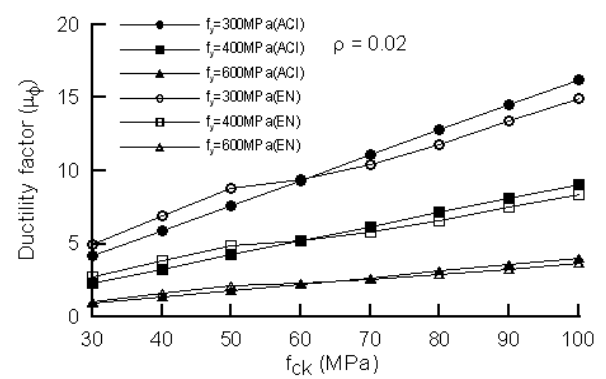
3.3 곡률연성지수

보 단면의 곡률연성지수는 식 (7)에 의해 계산하였으며, 극한곡률 ϕ_u 는 콘크리트설계기준 및 ACI 기준에서 극한상태로 규정하고 있는 압축연단의 콘크리트 변형률이 0.003에 도달했을 때와 유럽코드에서 극한상태로 규정하고 있는 압축연단의 콘크리트 변형률이 식 (9)에 도달했을 때에 모두 계산하였다. Fig. 9는 보의 인장철근비가 0.02인 경우에 ACI 기준과 유럽기준에 따라 계산된 곡률연성지수를 비교한 것으로 콘크리트 압축강도가 60 MPa보다 작은 경우에는 유럽기준에 의한 연성지수가 더 크고, 콘크리트 압축강도가 60 MPa를 초과하면 ACI 기준에 의한 연성지수가 더 크게 계산된다. 이것은 극한상태에서의 변형률이 ACI 또는 콘크리트설계기준은 0.003으로 일정하나 유럽기준은 작은 강도에서는 0.003보다 크고, 압축강도 60 MPa 이상에서는 0.003보다 작기 때문이다. 다른 철근 배치 조건에서도 같은 결과를 보이며, 이 연구에서는 콘크리트 설계기준에 의한 결과에 대하여 철근의 배근조건에 따라 콘크리트 압축강도 및 철근의 항복강도가 연성지수에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 10은 휨부재의 최소 허용변형률 조건을 만족하는 최대 철근비를 사용한 단면에 대한 곡률연성지수를 콘크리트 압축강도와 철근 항복강도의 크기에 따라 곡률연성지수 값을 비교한 것이다. 최대 철근비를 사용한 단면의 연성지수는 2~3 사이의 값을 가지며, 그 크기는 콘크리트



(a) Steel yield strength



(b) Concrete strength

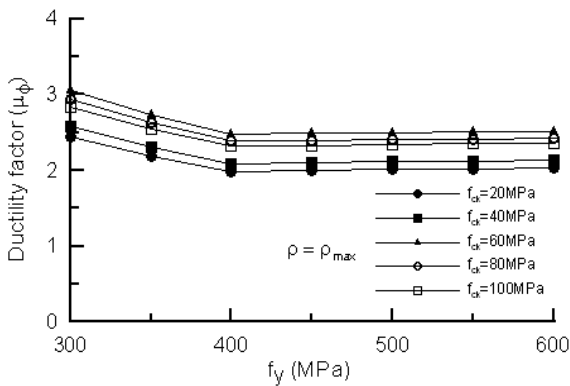
Fig. 9 Curvature ductility factor when $\rho=0.02$

트 압축강도와 철근 항복강도의 조합에 따라 변하는 것으로 나타났다. Fig. 10(a)는 철근의 항복강도에 따른 연성지수의 변화를 나타낸 것으로 철근의 항복강도가 400 MPa까지는 항복강도가 증가하면 연성지수는 감소하고 그 이상의 항복강도에 대해서는 콘크리트의 강도에 관계 없이 연성지수의 크기 변화가 거의 없이 동일한 연성지수를 갖는 것으로 나타났다. Fig. 10(b)는 콘크리트 압축강도 변화에 연성지수를 나타낸 것으로 콘크리트 압축강도가 20 MPa에서 30 MPa로 증가하면 연성지수가 감소하고 콘크리트 압축강도가 60 MPa이 될 때까지는 압축강도가 증가하면 연성지수가 증가하며, 그 이상의 강도에서는 콘크리트 압축강도가 증가하면 연성지수는 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 연구자^{18,19)}에 의한 결과와 비슷한 경향을 보이나 최대 연성지수를 갖는 콘크리트 압축강도는 다소 차이를 보였다. Rashid 등¹⁹⁾에 의하면 콘크리트 압축강도가 100 MPa될 때까지는 압축강도 증가에 따라 연성지수가 증가하고 그 이상의 강도에서는 연성지수가 작아지는 것으로 나타났다.

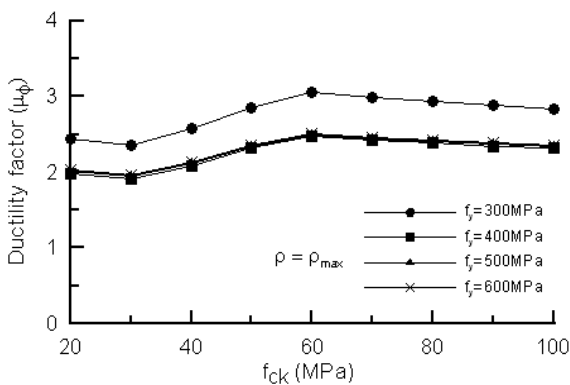
Fig. 11은 철근비가 균형철근비의 75%인 단면에 대한 곡률연성지수를 콘크리트 압축강도와 철근 항복강도의 크기에 따라 비교한 것이다. 종전의 설계기준에 의한 최대 철근비를 사용한 경우에는 연성지수가 약 1.7~2.3 사이의 값을 가지며, 현행 콘크리트구조 설계기준에 의한 최대 철근비를 사용했을 때 보다 약 15% 정도 작게 평가

되었다. Fig. 11(a)는 철근의 항복강도에 따른 연성지수의 변화를 나타낸 것으로 철근의 항복강도가 증가하면 연성지수가 거의 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 11(b)는 콘크리트 압축강도 변화에 연성지수를 나타낸 것으로 콘크리트 압축강도에 따른 영향은 휨부재의 최소허용변형률 조건을 만족시키는 단면에서와 같은 경향을 보였다.

Fig. 12는 연속 휨부재에서 부모멘트의 재분배가 허용되는 조건을 만족하는 최대의 철근을 배치한 단면에 대한 곡률연성지수를 콘크리트 압축강도와 철근 항복강도에 따라 비교한 것이다. 연속 부재에서 모멘트의 재분배가 허용되는 단면의 연성지수는 콘크리트 압축강도와 철근의 항복강도의 조합에 따라 2.5~5.2 범위에 있는 것으로 평가되었다. 콘크리트 압축강도가 30 MPa이고 철근의 항복강도가 600 MPa인 경우에 연성지수는 약 2.5로 최소 값을 보이고, 콘크리트 압축강도가 60 MPa이고 철근의 항복강도가 300 MPa인 경우에 연성지수는 약 5.2로 최대 값을 나타냈다. Fig. 12(a)는 철근의 항복강도에 따른 연성지수의 변화를 나타낸 것으로 철근의 항복강도가 증가하면 연성지수는 항복강도의 증가에 따라 거의 비례하여 감소하는 것으로 나타났다. 콘크리트 압축강도가 같은 경우 철근의 항복강도가 300 MPa일 때와 600 MPa일 때의 연성지수의 차이는 약 2.2 정도이며, 모든 콘크리트 강도에 대해 거의 같은 차이를 보였다. Fig. 12(b)는 콘크리트 압축강도 증가에 따른 연성지수의 변화를 나타낸 것으로 최소 허용변형률 조건을 만족하는 단면에서 마찬

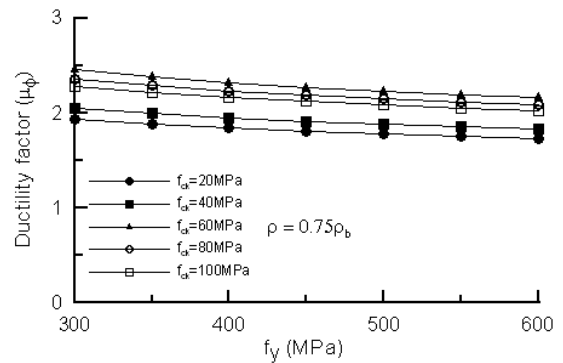


(a) Steel yield strength

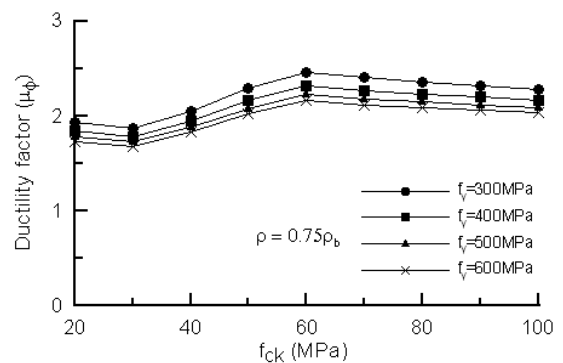


(b) Concrete strength

Fig. 10 Variations of curvature ductility factor with strength of materials when $\rho = \rho_{max}$



(a) Steel yield strength



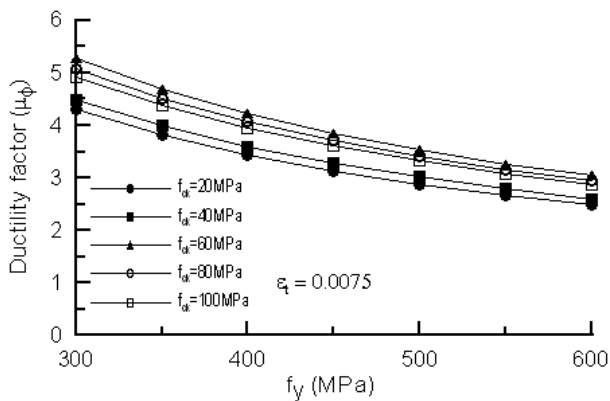
(b) Concrete strength

Fig. 11 Variations of curvature ductility factor with strength of materials when $\rho = 0.75\rho_b$

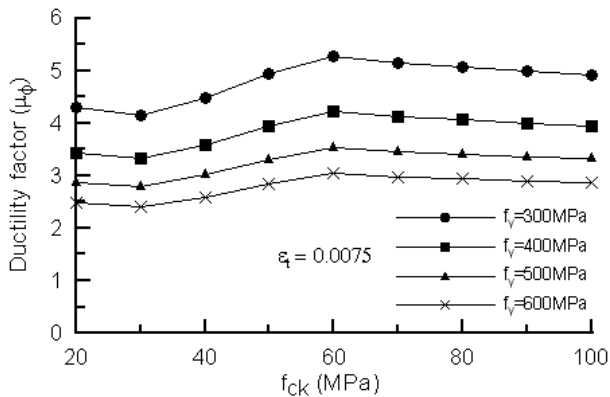
가지로 콘크리트 압축강도가 20 MPa에서 30 MPa로 증가하면 연성지수가 감소하고 콘크리트 압축강도가 60 MPa 될 때까지는 압축강도가 증가하면 연성지수가 증가하며, 그 이상의 강도에서는 콘크리트 압축강도가 증가하면 연성지수는 감소하였다.

Fig. 13은 보의 공칭모멘트가 600 kN·m인 단면에서 곡률연성지수를 콘크리트 압축강도와 철근 항복강도에 따라 비교한 것이다. Fig. 13(a)는 철근의 항복강도에 따른 연성지수의 변화를 나타낸 것으로 철근의 항복강도가 증가하면 연성지수는 감소하며, 그 감소폭은 철근의 항복강도가 증가할수록 약간 작아지는 것으로 나타났다. Fig. 13(b)는 콘크리트 압축강도 증가에 따른 연성지수의 변화를 나타낸 것으로 동일한 공칭모멘트를 갖는 단면에서는 철근의 항복강도가 일정한 경우 콘크리트 압축강도가 증가하면 연성지수는 압축강도의 증가에 비례하여 증가하며, 연성지수의 증가폭은 철근의 항복강도가 클수록 작아지는 것으로 나타났다. 철근의 항복강도가 300 MPa인 경우 콘크리트 압축강도가 30 MPa에서 100 MPa로 증가하면 연성지수는 2.9에서 13.8로 증가하는데 비해 철근의 항복강도가 600 MPa인 경우에는 1.7에서 7.7로 증가하였다.

공칭모멘트가 동일한 단면에서 철근의 항복강도가 600 MPa인 단면의 곡률연성지수는 항복강도가 300 MPa 및 400



(a) Steel yield strength



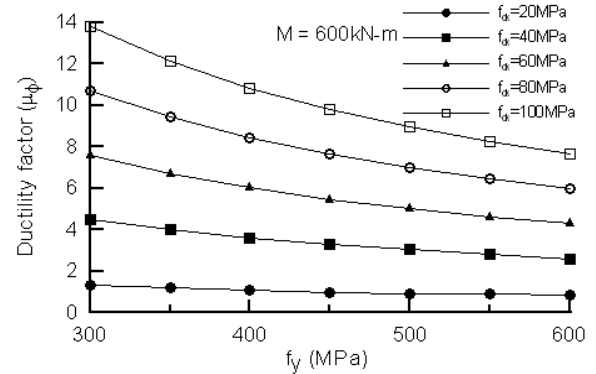
(b) Concrete strength

Fig. 12 Variations of curvature ductility factor with strength of materials when $\epsilon_t=0.0075$

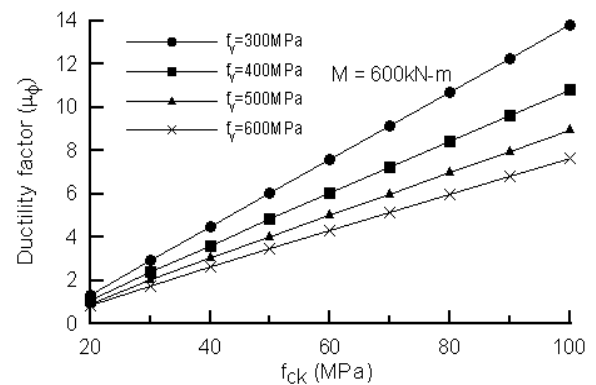
MPa인 단면에 비해 콘크리트 압축강도와 관계없이 각각 45% 및 30% 감소하였고, 또한, 콘크리트 압축강도가 30 MPa에서 70 MPa 및 100 MPa로 증가하면 곡률연성지수는 각각 약 3배 및 4.2배 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 14는 인장철근비(ρ)가 0.02인 단면에 대한 곡률연성지수를 나타낸 것이다. Fig. 14(a)는 철근의 항복강도에 따른 연성지수의 변화를 나타낸 것으로 철근의 항복강도가 증가하면 곡률연성지수는 감소하며, 그 감소폭은 철근의 항복강도가 증가할수록 작아지는 것으로 경향을 보였다. 또한, 철근의 항복강도 증가에 따른 연성지수의 감소폭은 콘크리트 압축강도가 클수록 더 크게 나타났다. 콘크리트 압축강도가 30 MPa인 경우에 철근의 항복강도가 300 MPa에서 600 MPa로 증가하면 연성지수는 4.2에서 0.93으로 감소하고, 콘크리트 압축강도가 100 MPa인 경우에 철근의 항복강도가 300 MPa에서 600 MPa로 증가하면 연성지수는 16.3에서 4.0으로 감소하였다. 철근비가 동일한 경우에는 철근의 항복강도가 300 MPa에서 600 MPa로 증가되면 연성지수는 약 1/4로 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 14(b)는 콘크리트 압축강도 증가에 따른 연성지수의 변화를 나타낸 것으로 인장철근비가 0.02인 단면에서는 콘크리트 압축강도가 증가하면 연성지수는 압축강도의 증가에 선형으로 비례하여 증가하며, 곡률연성지수는 콘크리트 압축강도가 30 MPa에서 100 MPa로 증가하면

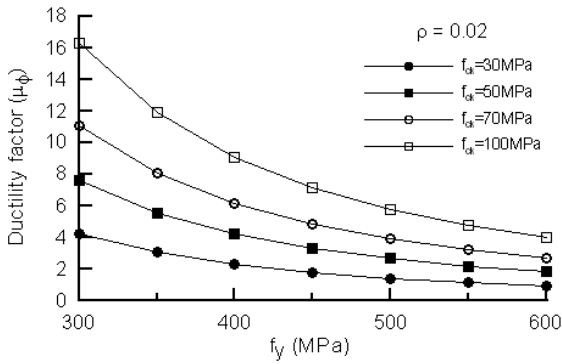


(a) Steel yield strength

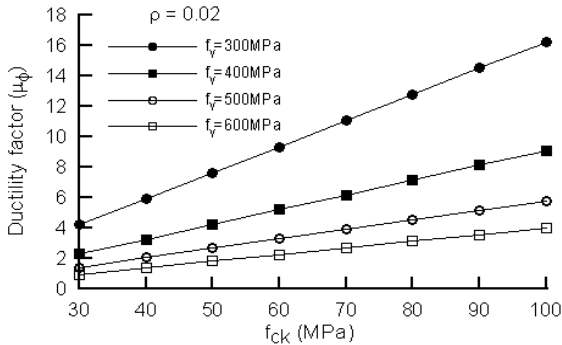


(b) Concrete strength

Fig. 13 Variations of curvature ductility factor with strength of materials when $M=600 \text{ kN} \cdot \text{m}$



(a) Steel yield strength



(b) Concrete strength

Fig. 14 Variations of curvature ductility factor with strength of materials when $\rho=0.02$

철근의 항복강도에 관계없이 약 4배 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 항복강도가 큰 고강도 철근을 사용하는 경우에는 일정 이상의 압축강도를 갖는 콘크리트를 사용하여 적절한 연성을 확보할 것으로 사료된다.

4. 결 론

이 연구에서는 고강도 콘크리트 및 고강도 철근을 사용한 철근콘크리트 보 단면의 모멘트-곡률관계와 곡률연성지수에 각 재료의 강도가 미치는 영향을 해석적으로 분석하였다. 이를 위해 다양한 철근의 배근 조건을 갖는 직사각형 단면 철근콘크리트 보에 대해 해석을 수행하였고, 극한상태는 보의 압축연단에서의 콘크리트 변형률이 0.003에 도달했을 때로 정의하였다. 해석 결과에 따르면 철근콘크리트 부재의 모멘트-곡률 관계는 기존 문헌에 알려진 것과 유사한 결과를 보이고 있으며, 철근의 배근 조건에 따른 모멘트-곡률 관계 및 연성지수 특성을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 휨부재의 최소 허용변형률 조건을 만족하는 단면에서는 콘크리트의 압축강도가 증가하면 초기 강성이 증가하고, 최대 모멘트에 도달한 후 소성거동 구간은 짧아지고 저항모멘트의 급격한 감소가 일어나며, 철근의 항복강도가 증가하면 초기 강성 및 저항모멘트가 감소하고 최대 모멘트에 도달할 때의 곡률은 증가한다.

- 2) 공칭모멘트가 동일한 단면에서는 콘크리트 압축강도의 크기는 부재의 초기 거동에 미치는 영향은 매우 작고 최대 하중에 도달한 이후에는 콘크리트의 압축강도가 큰 경우에 많은 변형이 발생한 후에 저항력의 감소가 일어나며, 철근의 항복강도가 증가하면 부재의 강성이 감소하나 최대하중 이후 파괴까지의 거동은 철근의 항복강도에 영향을 거의 받지 않는다.
- 3) 인장 철근비(ρ)가 동일한 단면에서는 최대하중에 도달할 때까지 부재의 강성에는 철근의 항복강도의 크기가 거의 영향을 미치지 않고, 최대하중에 도달한 이후에는 철근의 항복강도가 작은 경우에 큰 변형이 발생한 후 저항력의 감소가 일어나며, 파괴까지의 거동은 콘크리트 강도가 클수록 더 연성 거동하는 것으로 나타났다.
- 4) 이 연구에서 적용한 해석적 방법에 의한 곡률연성지수 평가는 부재의 실제 연성지수를 평가하는데 있어 어려움이 있으나, 압축연단의 콘크리트 변형률이 0.003일 때를 기준으로 계산한 곡률연성지수는 최대하중의 90%인 점에서의 처짐과 80%인 점에서의 처짐을 기준으로 계산한 부재 연성지수의 사이 값으로 평가하는 것으로 나타났다.
- 5) 휨부재의 최소 허용변형률 조건에 해당하는 철근을 사용한 단면의 곡률연성지수는 2~3이고, 철근의 항복강도가 400 MPa까지는 항복강도가 증가하면 연성지수는 감소하고 그 이상의 항복강도에서는 연성지수가 일정한 것으로 나타났고, 콘크리트 압축강도가 60 MPa까지는 압축강도가 증가하면 연성지수가 증가하고 그 이상의 강도에서는 콘크리트 압축강도가 증가하면 연성지수는 감소하는 것으로 나타났다.
- 6) 연속 부재에서 모멘트의 재분배가 허용되는 단면의 연성지수는 2.5~5.2 사이의 값을 가지며, 철근의 항복강도가 증가하면 연성지수는 감소하고 콘크리트 강도에 의한 영향은 최대 철근량을 사용한 단면에서와 같다.
- 7) 보의 공칭모멘트가 동일한 단면 및 인장철근비가 동일한 단면($\rho=0.02$)에서의 곡률연성지수는 철근의 항복강도가 증가하면 감소하고, 콘크리트 압축강도가 증가하면 강도증가에 비례하여 증가하며, 철근의 항복강도가 400 MPa에서 600 MPa로 증가하면 연성지수는 30% 이상 감소하고 콘크리트 압축강도가 30 MPa에서 70 MPa로 증가하면 연성지수는 약 3배 증가하였으며, 항복강도가 600 MPa 고강도 철근을 사용하는 경우에 적절한 연성을 확보하기 위해서는 일정 이상의 강도를 갖는 콘크리트를 사용할 필요가 있는 것으로 사료된다.

References

1. European Committee for Standardization, *Eurocode 2, Design of Concrete Structures, Part1-1, General Rules and Rules for Buildings (EN 1992-1-1:2004)*, European Committee for Standardization, Brussels, 2004, 227 pp.
2. Korea Concrete Institute, *Concrete Design Code and Commentary*, Kimoon dang Publishing Company, Seoul, Korea, 2012, 599 pp.
3. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-08)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Detroit, 2008. 473 pp.
4. Shin, S. W., Ghosh, S. K., and Moreno, J. "Flexural Ductility of Ultra-High-Strength Concrete Members," *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 4, 1989, pp. 394-400.
5. Lee, J. H., "Analytical Study on Ductility Index of Reinforced Concrete Flexural Members," *KSCE, Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 14, No. 3, 1994, pp. 391-402 (in Korean).
6. Jang, I. Y., Park, H. G., Kim, S. S., Kim, J. H., and Kim, Y. G., "On the Ductility of High-Strength Concrete Beams," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 2, No. 2, 2008, pp. 115-122.
7. Pam, H. J., Kwan, A. K. H., and Islam, M. S., "Flexural Strength and Ductility of Reinforced Normal-and High-Strength Concrete Beams," *Proceedings of the ICE-Structures and Buildings*, Vol. 146, No. 4, 2001, pp. 381-389.
8. Ho, J. C. M., Kwan, A. K. H., and Pam, H. J., "Theoretical Analysis of Post-Peak Behavior of Normal and High Strength Concrete Beams," *The Structural Design of Tall Special Buildings*, 2003, pp. 109-125. (doi: <http://dx.doi.org/10.1002/tal.216>)
9. Bai, Z. Z. and Au, F. T. K., "Flexural Ductility Design of High-Strength Concrete Beams," *The Structural Design of Tall Special Buildings*, 2011, pp. 521-542. (doi: <http://dx.doi.org/10.1002/tal.714>)
10. Au, F. T. K., Leung, C. C. Y., and Kwan, A. K. H., "Flexural Ductility and Deformability of Reinforced and Prestressed Concrete Sections," *Computers and Concrete*, Vol. 8, No. 4, 2011, pp. 473-489.
11. Arslan, G. and Cihanli, E., "Curvature Ductility Prediction of Reinforced High-Strength Concrete Beam Sections," *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 16, No. 4, 2010, pp. 462-470.
12. Hong, G. H., "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, 2011, pp. 49-56 (in Korean).
13. Ashour, S. A., "Effect of Compressive Strength and Tensile Reinforcement Ratio on Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams," *Engineering Structures*, Vol. 22, No. 5, 2000, pp. 413-423.
14. Attard, M. M. and Setunge, S., "The Stress-Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 5, 1996, pp. 432-444.
15. Wee, T. H., Chin, M. S., and Mansur, M. A., "Stress-Strain Relationship of High-Strength Concrete in Compression," *ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 8, No. 2, 1996, pp. 70-76.
16. Razvi, S. and Saatcioglu, M., "Confined Model for High Strength Concrete," *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No. 3, 1999, pp. 281-289.
17. Park, R. and Paulay, T., *Reinforced Concrete Structures*, Wiely, New York, 1975, 769 pp.
18. Pendyala, R., Mendis, P., and Patnaikuni, I., "Full-Range Behavior of High-Strength Concrete Members: Comparison of Ductility Parameters of High and Normal-Strength Concrete Members," *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 1, 1996. pp. 30-35.
19. Rashid, M. A. and Mansur, M. A., "Reinforced High-Strength Concrete Beams in Flexure," *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 3, 2005, pp. 462-471.

요 약 콘크리트 및 철근의 강도는 철근콘크리트 부재의 휨거동 및 연성에 많은 영향을 주며, 설계기준에서는 항복강도가 600 MPa인 고강도 철근의 사용이 허용되고 있다. 고강도 콘크리트가 RC부재의 휨거동에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 진행되었으나, 고강도 철근에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다. 이 연구에서는 고강도 콘크리트 및 철근을 사용한 직사각형 단면 RC 보 단면의 모멘트-곡률 관계를 해석적 방법으로 구하여 다양한 철근 배치 조건하에서 콘크리트 및 철근의 강도가 부재의 휨거동 및 곡률연성지수에 미치는 영향을 분석하였다. 부재의 철근 배치조건에 따라 콘크리트와 철근의 강도가 부재의 휨거동 및 연성지수에 미치는 영향은 다르게 나타났다. 공칭모멘트가 동일한 단면에서는 철근의 항복강도가 400 MPa에서 600 MPa로 증가하면 연성지수는 30% 이상 감소하고, 콘크리트 압축강도가 30 MPa에서 70 MPa로 증가하면 연성지수는 약 3배 증가하였다.

핵심용어 : RC보 단면, 모멘트-곡률관계, 해석적 방법, 철근배치 조건, 곡률연성지수