

# 크기효과가 고려된 철근콘크리트 휨 부재의 최소철근비 제안

유성원<sup>†</sup> · 허 윤<sup>\*</sup>

우석대학교 토목환경공학과 · \*한국건설생활환경시험연구원  
(2010. 8. 5. 접수 / 2010. 10. 28. 채택)

## A Proposal of Minimum Steel Ratio Considering Size Effect for Flexural Reinforced Concrete Member

Sung Won Yoo<sup>†</sup> · Yoon Her<sup>\*</sup>

Department of Civil and Environmental Engineering, Woosuk University

\*Korea Conformity Laboratories

(Received August 5, 2010 / Accepted October 28, 2010)

**Abstract** : In according with concrete structural design standard, it is common designing flexure reinforcement concrete to induce tension failure. So reinforcing ratio is limited to inducing tension failure. And maximum reinforcing ratio is regulated to protecting concrete compression strength caused by over reinforced building. Minimum reinforcing ratio is also limited in designing standard to protecting brittle failure as extremely using less reinforcing bar. But in minimum reinforcing ratio it is extremely conservative or it is sometimes impossible to induce stable tension-failure because they are depending on yield failure and experienced method and concrete designing standard strength. Therefore the purpose of the present paper is to evaluate the flexural behavior of minimum steel ratio of reinforced concrete of beams and to propose the guide-line of equation of minimum steel ratio by performing static flexural test of 16 beams according to size effect, number of steel, yielding stress of steel, and concrete compressive strength which are presumed effective variables. From experimental results, the equation of minimum steel ratio was newly proposed considered size effect.

**Key Words** : reinforced concrete, minimum steel ratio, flexural behavior, size effect

### 1. 서론

철근콘크리트 휨부재는 인장파괴(Tensile Failure)를 유도하도록 설계되어지는 것이 일반적인 경향이다. 이러한 인장파괴 유도를 위하여 현재의 설계기준 등에서는 철근비를 제한하고 있다. 즉, 인장철근의 과다 배근으로 인한 압축파괴를 방지하기 위하여 최대철근비 규정을 모든 설계기준에서 제시하고 있다. 또한 인장파괴 유도를 위한 지나치게 적은 철근을 배근함으로 인하여 발생될 수 있는 급작스러운 파괴를 방지하기 위하여 설계기준에서는 역시 최소철근비 규정을 제시하고 있다.

최대철근비 규정의 경우, 2007년도에 개정된 “콘크리트 구조설계기준”<sup>1)</sup>에서는 기존의 임의적이고 경험적인 방법에서 적절한 최연단 철근의 변형률

기준을 제시하여 상당한 이론적인 근거를 갖춘 것으로 평가되고 있다. 그러나 최소철근비 규정의 경우, 여전히 임의적이고 경험적인 방법에 의존하고 있는 실정이다.

따라서 이러한 국내의 설계기준에서 제시하고 있는 최소철근비 규정을 좀 더 이론적이고 역학적인 근거가 뒷받침되는 규정의 개정이 절실한 실정이다. 특히, 현재 설계기준에 제시되어져 있는 규정은 단순히 철근의 항복강도와 콘크리트의 설계기준강도만을 가지고 경험적으로 제시된 식으로는 안정적인 인장파괴 유도가 불가능한 경우도 종종 발생되거나, 또는 지나치게 보수적인 경우도 있는 것으로 평가된다. 따라서 본 논문에서는 최소철근비에 상당한 영향인자로 추정되는 콘크리트 단면부재의 크기효과, 철근 가닥수, 철근의 항복강도 및 콘크리트의 설계기준강도 등을 실험변수로 하는 휨부재 16개를 제작하여 정적 휨실험을 수행하고 그

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
imysw@woosuk.ac.kr

결과를 이용하여 크기효과가 고려된 새로운 최소철근비의 제안을 하고자 한다.

## 2. 최소철근비 영향인자

### 2.1. 현행 설계기준의 분석

현행 설계기준<sup>(2)</sup>에서 제시하고 있는 최소철근비 규정은 다음 식 (1)과 같다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 영향인자는 철근의 항복강도와 콘크리트 설계기준강도만을 변수로 가지고 있다.

$$\rho_{\min} = \frac{0.25 \sqrt{f_{ck}}}{f_y} \geq \frac{1.4}{f_y} \quad (1)$$

여기서,  $\rho_{\min}$  : 최소철근비,  $f_{ck}$  : 콘크리트 압축강도 및  $f_y$  : 철근 항복강도이다.

상기 식 (1)은 폭  $b$ , 높이  $h$  그리고 유효깊이  $d$  를 가지는 직사각형 단면에 대해, 인장을 받는 부위의 단면계수는  $bh^2/6$ 이며,  $h/d=1.1$ , 내부 모멘트 팔이 휨파괴 시  $0.95d$ 라고 가정할 때, 파괴계수  $f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}}$  를 사용하면 얻을 수 있는 경험식이라 말할 수 있다. 또한 제한식  $1.4/f_y$  은 단지 역사적인 이유로 사용되어지고 있는 규정으로, 초기 ACI기준에서 보통강도의 철근(280MPa)에 대하여 요구된 것과 동일한 0.5%의 최소철근비를 보장하기 위하여 유도된 것이다<sup>(3)</sup>.

또한 콘크리트의 설계기준강도와 무관하게 철근의 항복강도에 반비례하며, 콘크리트 설계기준강도는 약 31MPa 이하에서만 영향을 미치며, 그 이상의 강도에서는 철근의 항복강도에만 영향을 받는다.

### 2.2. 최소철근비와 크기효과

1984년 Carpenteri 등<sup>(4)</sup>은 최초로 철근콘크리트 휨 부재에서의 연성정도를 평가할 수 있는 취성도를 다음과 같은 식으로 제안하였으며, 식에서 알 수 있듯이 취성도는 부재가 커지거나, 철근비가 감소할수록 증가하는 것으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

$$N_p = \frac{f_y h^{1/2}}{K_{IC}} \left[ \frac{A_s}{A} \right] \quad (2)$$

여기서,  $K_{IC}$  : 콘크리트 파괴 정도,  $h$  : 단면 높이,  $A_s$  : 철근량 및  $A$  : 단면적이다.

1992년 Baluch 등<sup>(5)</sup>은 다음 식 (3)과 같은 불안정

한 균열을 피할 수 있는 최소 철근비 식을 제안하였는데, 이 식은 철근콘크리트 보에서의 최대모멘트 값이 같은 무근콘크리트 보의 균열모멘트보다 크다는 개념으로 제안된 식이다.

$$\rho_{\min} = \frac{1.9134 K_{IC}^{0.82}}{f_y^{0.9922} (1.7 - 2.6 c_s / d)} \quad (3)$$

여기서,  $c_s$  : 중립축 깊이이다.

또한 1992년 Gerstle 등<sup>(6)</sup>은 이론적인 균열 모델을 이용하여 다음 식 (4)와 같은 식을 제안하였으나, 철근 항복강도가 빠진 형태의 식이다.

$$\rho_{\min} = \frac{E_c}{E_s} \left( \sqrt{0.0081 + 0.0148 \frac{f_t d}{E_c \omega_c}} - 0.0900 \right)^{1/2} \quad (4)$$

여기서,  $E_c$  : 콘크리트 탄성계수,  $E_s$  : 철근 탄성계수,  $f_t$  : 인장응력 및  $\omega_c$  : 콘크리트 단위중량이다.

## 3. 정적 휨거동 실험

### 3.1. 실험변수 및 부재 형상

전 절에서 기술한 바와 같이, 최소철근비는 기존 연구 결과를 고찰한 결과, 단면 크기, 콘크리트 강도, 철근비 및 철근 가닥수 등의 변수에 대하여 큰 영향을 받는 것으로 나타나 본 연구에서는 이들 변수에 대한 정적 실험을 수행하기로 결정하였고 선정된 실험 변수 세부 내용은 다음 Table 1에 나타내었다. 실험 부재의 지간길이/유효깊이 비는 5로 고정한 후, 단면 크기를 2 경우로 하였고, 콘크리트 강도는 21, 28MPa로 철근 항복강도 역시 300, 400MPa로 결정하여 각각 2 경우가 되도록 하였다.

또한, 철근비도 현행 설계기준의 최소철근비, 최소철근비의  $\pm 0.1\%$ 로 결정하여 3 경우가 되도록 하였다. 이러한 변수들로 총 16개의 부재를 제작하였다. 전체적으로 본 연구에서 제작된 실험 부재는 RC 보 16개이다. 이들의 세부 내용은 Fig. 1~2에 나타내었다. 한편, 제작된 실험 부재들은 휨파괴를 유도하기 위하여 설계기준에서 제시하는 전단철근을 100% 배근하여 전단파괴를 방지하였다. 한편 제작된 부재의 시험 장면은 다음 Fig. 3에 나타내었다.

### 3.2. 사용재료의 물성

사용된 콘크리트는 레미콘을 이용하였으며, 콘크리트의 압축강도는 다음 Table 2와 같다. 또한 항

Table 1. Design detail according to chosen test variables

ID	b (mm)	h (mm)	d (mm)	L (mm)	$f_{ck}$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	minimum steel ratio by present code	steel area(mm <sup>2</sup> )	steel ratio
M21D1	150	300	270	1500	21	300	0.0047	189.00	0.0047
S21D1	75	150	135	750	21	300	0.0047	47.25	0.0047
M21D2	150	300	270	1500	21	300	0.0047	148.50	0.0037
S21D2	75	150	135	750	21	300	0.0047	37.13	0.0037
M21H2	150	300	270	1500	21	400	0.0035	101.25	0.0025
S21H2	75	150	135	750	21	400	0.0035	25.31	0.0025
M21H3	150	300	270	1500	21	400	0.0035	182.25	0.0045
S21H3	75	150	135	750	21	400	0.0035	45.56	0.0045
M28D1	150	300	270	1500	28	300	0.0035	189.00	0.0047
S28D1	75	150	135	750	28	300	0.0047	47.25	0.0047
M28D2	150	300	270	1500	28	300	0.0047	148.50	0.0037
S28D2	75	150	135	750	28	300	0.0047	37.13	0.0037
M28H2	150	300	270	1500	28	400	0.0047	101.25	0.0025
S28H2	75	150	135	750	28	400	0.0035	25.31	0.0025
M28H3	150	300	270	1500	28	400	0.0035	182.25	0.0045
S28H3	75	150	135	750	28	400	0.0035	45.56	0.0045

- \* Concrete compressive strength : 21, 28
- \*\* Member size : M(middle), S(small)
- \*\*\* Yielding strength of steel : D(300 MPa), H(400MPa)
- \*\*\*\* Difference of steel ratio with present code : 1(same), 2(-0.1%), 3(+0.1%)

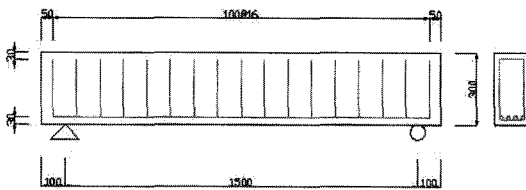


Fig. 1. Reinforcing detail of M-Series test member.

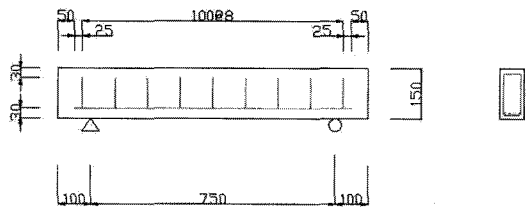


Fig. 2. Reinforcing detail of S-Series test member.

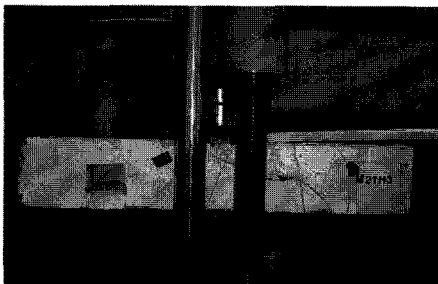


Fig. 3. Test member and loading frame.

Table 2. Test result of concrete

ID	$f_{ck}$ (MPa)		slump(cm)	air(%)
21	28 day	test	13	2.6
	21.2	22.7		
28	28 day	test	14	4.1
	28.2	29.3		

복강도가 300, 400 MPa 인 철근 및 철선을 사용하였다. 콘크리트 압축강도는 재령 7일, 28일, 하중재하 실험을 수행하기 직전에 실시하였다.

### 3.3. 측정 센서의 설치

제작된 부재에는 인장 철근 중앙부 및 지간의 1/3 지점에 각 1개씩 총 2~8개, 위험단면의 전단철근에 2개의 철근 게이지를 부착하였으며, 콘크리트에는 지간 중앙부 상연 및 지간 1/3부 상연에 각 2개씩, 그리고 로제트 변형률 게이지 3개 등 총 11~17개의 변형률 게이지를 부착하였다. 한편 중앙부의 하단에 LVDT를 설치하였고, 균열폭 게이지를 설치하여 실험을 수행하였다.

### 3.4. 하중재하 방법

실험 부재들의 하중재하는 콘크리트에 휨균열이

Table 3. Cracking, yielding and ultimate load of test members

ID	Crack Load(kN)	Yield Load(kN)	Ultimate Load(kN)	Pyield / Pcrack	failure Pattern
M21D1	24.5	64.5	77.6	2.6	ductile
M21D2	30.1	40.9	76.0	1.4	brittle
M21H2	24.1	30.7	42.5	1.3	brittle
M21H3	24.5	55.3	80.9	2.3	ductile
M28D1	25.8	68.1	74.0	2.6	ductile
M28D2	27.2	54.9	57.8	2.0	brittle
M28H2	33.1	45.8	46.7	1.4	brittle
M28H3	25.4	75.0	86.7	3.0	ductile
S21D1	4.84	14.7	16.1	3.0	ductile
S21D2	4.92	11.3	12.3	2.3	ductile
S21H2	4.82	10.7	16.6	2.2	ductile
S21H3	4.92	13.6	16.6	2.8	ductile
S28D1	6.88	15.2	15.7	2.2	brittle
S28D2	6.86	20.2	21.5	2.9	ductile
S28H2	5.35	16.2	18.6	3.0	ductile
S28H3	8.78	14.2	14.7	1.6	brittle

발생하기 전에는 2kN씩 증분하여 하중제어방법에 의해서 가력하였으며, 휨균열 발생 후부터 철근 항복하기 전까지는 5kN씩 증분하여 역시 하중제어 방법으로 가력하였으며, 그 이후부터는 0.5mm씩 증분하여 변위제어방법으로 가력하였다.

#### 4. 실험 결과 분석

##### 4.1. 균열, 항복 및 극한하중

정적 하중에 의한 실험 부재들의 균열, 철근 항복 및 파괴 하중 그리고 파괴 형태는 다음 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 알 수 있듯이 모든 철근 콘크리트 보에서 휨 파괴가 발생되었다. 한편 균열하중, 철근항복 하중 및 파괴하중의 경우, 균열 하중은 콘크리트 압축강도에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 철근 항복하중 및 극한하중은 부재가 큰 경우(M-Series), 철근량에 의존하고 있는 것으로 나타났으나, 부재가 작은 경우(S-Series)의 경우에는 철근량에 의존하지 않는 것으로 나타났다. 또한 철근의 항복강도는 철근의 항복하중과 극한하중 크기에 반비례하게 나타났다.

##### 4.2. 하중-처짐, 변형률 관계

M-Series( $b=150, h=300\text{mm}$ )의 정적 실험 결과 중 하중 - 중앙 처짐, 하중 - 콘크리트 변형률 및 하중 - 철근 변형률 관계는 다음 Fig. 4-6과 같다. 또한 S-Series( $b=75, h=150\text{mm}$ )의 정적 실험 결과 중, 하

중 - 콘크리트 변형률 및 하중 - 철근 변형률 관계는 다음 Fig. 7~9와 같다.

앞의 Fig. 4-9의 결과를 종합하면, 콘크리트 압축강도에도 영향을 받지만 그 크기차이는 상대적으로 작게 나타났다. 또한, M-Series 및 S-Series의 경우, 철근량(비)의 영향이 구조 거동에 절대적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나, S-Series의 경우에는 그 영향이 다소 작게 나타났다.

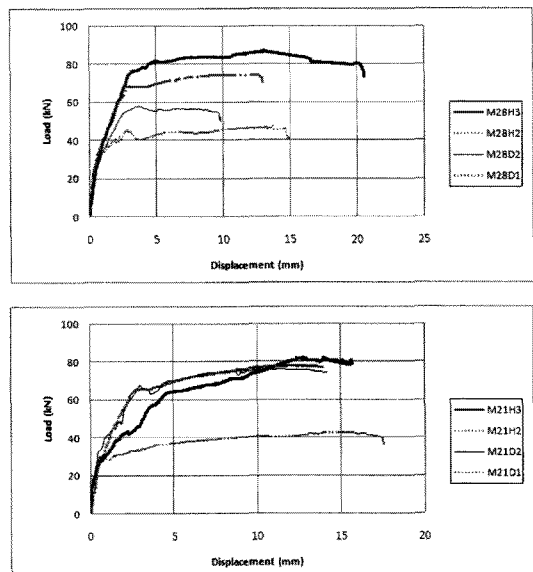


Fig. 4. Load - deflection of M-Series.

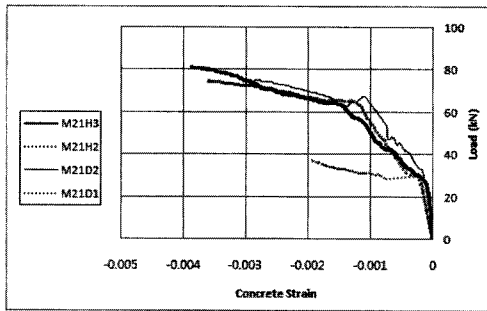
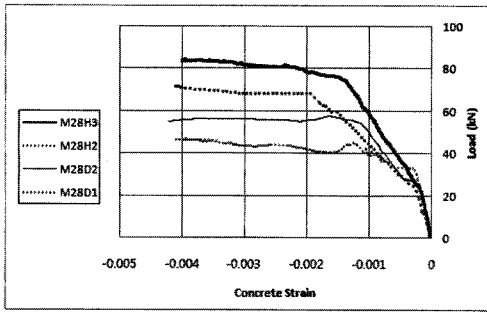


Fig. 5. Load - concrete strain of M-Series.

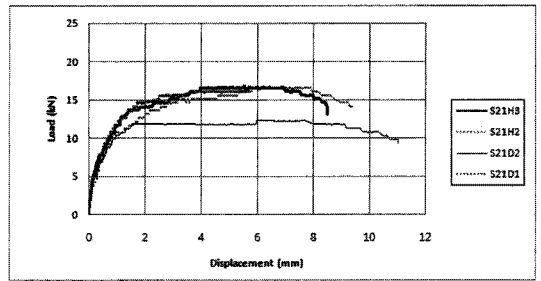
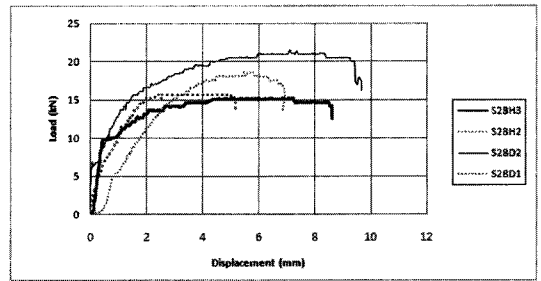


Fig. 7. Load - deflection of S-Series.

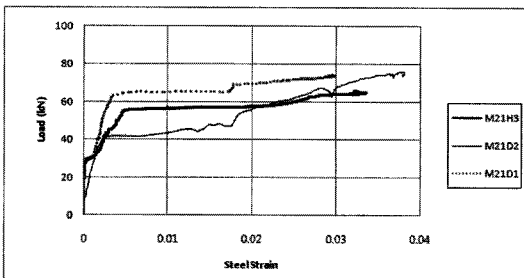
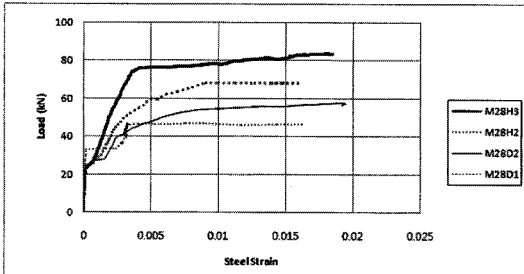


Fig. 6. Load - steel strain of M-Series.

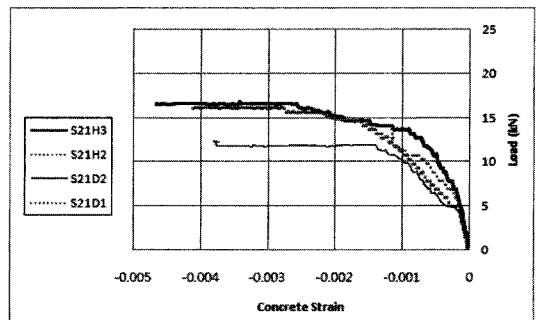
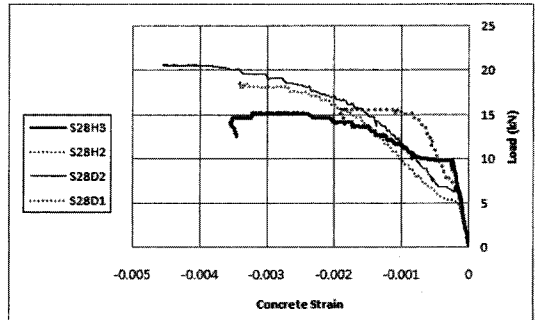


Fig. 8. Load - concrete strain of S-Series.

한편, M-Series의 경우, 실험결과에서 알 수 있듯이 전반적인 구조거동이 균열발생 이후 어느 정도의 저항이 있는 후 철근이 항복하는 등의 연성거동을 보이고 있으나, S-Series는 실험결과, 전반적으로 구조거동이 균열발생 이후 얼마 지나지 않아 곧바로 철근이 항복하는 형태 즉, 연성거동이 상대적으로 부족한 현상으로 나타나고 있다.

이러한 사실들로 볼 때, 현행 최소철근비 규정은 M-Series의 경우, 어느 정도의 취성과파 방지에 효과가 있기는 하지만 현행 최소철근비 이상으로 배근되었을 때의 연성거동에 대한 정확한 설명의 근거가 되지 못하고 있다. 또한, S-Series 정도의 크기 부재에 대해서는 구조거동이 연성거동보다는 취성

거동으로 나타나 어느 정도의 취성파괴 방지에 효과가 있기는 하나, 현행 최소철근비 규정 값이 다소 부족한 것으로 나타났다.

### 4.3. 연성확보를 위한 최소 조건

앞의 Table 3에 나타낸 16개 부재들의 실험 결과를 고찰해보면 콘크리트가 어느 정도 하중을 부담한 후에 철근이 항복하여야만 급작스러운 취성 파괴를 방지할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 균열 발생 후 어느 정도의 하중을 부담한 후 철근이 항복하여야만 연성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 즉, 현행 시방서<sup>1)</sup>의 최대철근비 규정(콘크리트 극한변형률: 0.003, 철근 극한변형률:  $2.5\epsilon_y$  이상)과 유사한 비율로 콘크리트와 철근이 파괴에 도달하여야 충분한 연성을 확보할 것으로 판단되며, 또한 인도의 설계기준<sup>7,8)</sup>에서는 철근 항복모멘트와 균열 모멘트의 비율이 무조건 1.0 이상으로 제한하고 있는데, 본 연구에서는 실험결과와 고찰 및 안전율을 고려하여 이 비율이 2.5 정도 이상은 되어야 연성 확보를 할 수 있는 것으로 판단되어 철근콘크리트 부재에서 연성확보를 위한 최소 조건을 다음과 같이 결정하였다.

- 1) 콘크리트 압축변형률이 0.001에 도달한 후에 철근이 항복한다.
- 2) 균열모멘트와 항복모멘트의 비율이 2.5 이상이어야 한다.

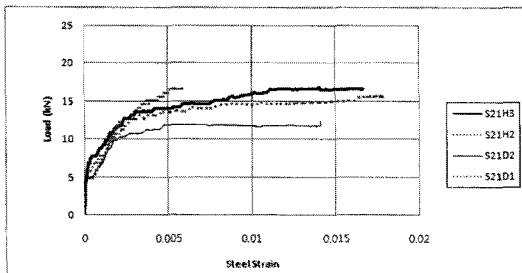
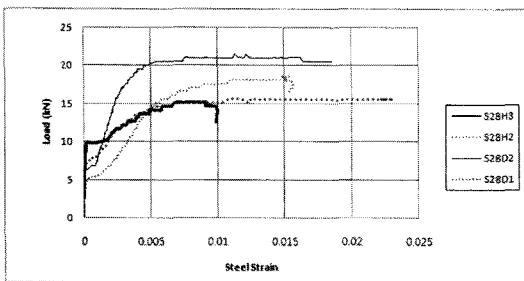


Fig. 9. Load - steel strain of S-Series.

### 4.4. 크기효과 영향

본 논문에서는 실험결과를 이용하여 크기효과와 최소철근비의 상관성을 분석하여 보았다. 일반적으로 단면 폭과 높이는 일정한 비율을 유지하며, 지간길이/높이 비보다는 단면 크기의 영향이 클 것으로 평가되므로 본 논문에서는 단면 높이의 영향을 비교 분석하였다. 분석결과는 Fig. 10에 나타내었으며, 그 상관성은 매우 우수한 것으로 나타났다.

한편 상관 분석에 이용된 시험 부재는 앞의 4.3절에서 언급한 연성 확보를 위한 최소 조건을 만족하는 부재들 즉, M21D1, M21H3, M28D1, S21D2, S21H2 및 S28D2 등 6개의 부재들에 대해서만 실시하였다.

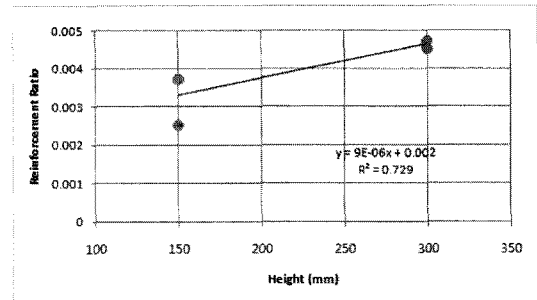


Fig. 10. Height - steel ratio relationship by using test results.

## 5. 크기효과를 고려한 최소철근비의 제안

### 5.1. 이론적 유도

본 절에서는 단면의 변형도 적합조건에 의한 최소철근비를 유도하고자 하였다. 앞의 4.3절에서 제시된 연성확보를 위한 최소 조건을 이용하여 이론적 최소철근비를 유도하였다<sup>1,7,8)</sup>.

4.3절의 조건 1)을 만족하는 경우로 Fig. 11에서 다음의 식들을 유도할 수 있다.

상기 변형률 삼각형에서  $\epsilon_c = 0.001$ ,  $\epsilon_c = \epsilon_y$ 이므로 비례식을 적용하면 다음과 같은 식 (5), (6)을 얻을 수 있다.

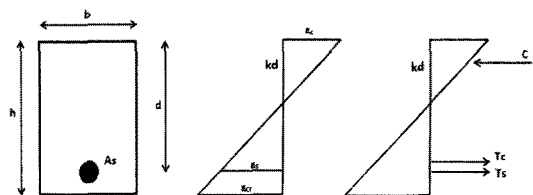


Fig. 11. Strain compatibility of section for deriving minimum steel ratio.

$$\epsilon_y : 0.001 = d - c : c \quad (5)$$

$$\frac{c}{d} = \frac{0.001}{0.001 + \epsilon_y} \quad (6)$$

또한 4.3절의 조건 2)을 만족하는 경우로 다음의 식들을 유도할 수 있다.

$$M_y \geq 2.5M_{cr} \quad (7)$$

$$M_y = A_s f_y (d - \frac{a}{2}) \quad (8)$$

이때,  $a = \beta_1 c$ 이므로 식 (8)에 식 (6)을 대입하면 다음 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$M_y = A_s f_y d (1 - \frac{\beta_1}{2} \frac{0.001}{0.001 + \epsilon_y}) \quad (9)$$

한편 균열모멘트  $M_{cr}$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M_{cr} = f_r \times Z = 0.63 \sqrt{f_{ck}} \times \frac{bh^2}{6} \quad (10)$$

여기서,  $f_r$  : 파괴계수 ( $=0.63 \sqrt{f_{ck}}$ ),  $Z$  : 단면계수 ( $=bh^2/6$ , 직사각형 단면)

식 (9)와 (10)을 식 (7)에 대입하면, 식 (11)과 같은 이론적인 최소철근비를 도출할 수 있다.

$$\rho_{min} = \frac{0.32 \sqrt{f_{ck}}}{f_y (1 - \frac{\beta_1}{2} \frac{0.001}{0.001 + \epsilon_y})} \quad (11)$$

### 5.2. 단면의 크기효과의 고려

앞서 4.4절에서 기술한 바와 같이 실험결과를 이용하여 크기효과와 최소철근비의 상관성을 분석하여 보았다. 상관성 분석을 위한 실험결과 세부 내용은 다음 Table 4와 같다. Table 4의 실험결과를 앞서 언급한 최소철근비 충족조건을 만족하는 실험부재는 전체 16개 중에서 6개 부재이다.

따라서, 최소철근비 충족조건을 만족하는 실험 부재 6개에 대하여 상관성 분석을 하였으며, 그 결과는 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 1차 함수보다는 지수함수 혹은 2차함수로의 상관성이 더 우수하게 나타나고 있으나, 향후 작성된

Table 4. Test result satisfying the necessary condition of minimum steel ratio

ID	Height (mm)	steel ratio	Pyield / Pcrack	derived $\rho_{min}$	
				no size effect	with size effect
M21D1	300	0.0047	2.6	0.0059	1.770
M21H3	300	0.0045	2.3	0.0043	1.290
M28D1	300	0.0047	2.6	0.0068	2.040
S21D2	150	0.0037	2.3	0.0059	0.885
S21H2	150	0.0025	2.2	0.0043	0.645
S28D2	150	0.0037	2.9	0.0068	1.020

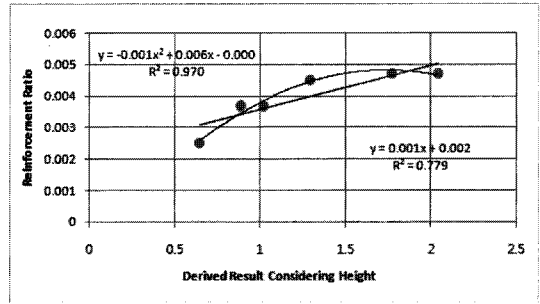


Fig. 12. Correlation analysis between test result and proposed equation.

최소철근비 식의 사용 등을 고려하면 다소 상관성이 떨어지지만 1차 함수 형태의 식을 사용하는 것이 더 좋을 것으로 판단되어 1차 함수형태로 회귀 분석 하였다. 회귀분석 결과, 이론적으로 유도된 최소철근비 식에 단면크기 효과를 고려하여 일반적인 형태로 식 (11)을 수정하면 다음 식 (12)와 같다.

$$\rho_{min} = \alpha + \beta h \frac{0.32 \sqrt{f_{ck}}}{f_y (1 - \frac{\beta_1}{2} \frac{0.001}{0.001 + \epsilon_y})} \quad (12)$$

이때  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 실험 등을 통해서 얻어진 결과를 통계적 처리를 통하여 구할 수 있다. 식 (12)에서의 계수  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 회귀분석으로 구한 결과,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 0.0022과 0.0014일 때 실측값과 예측값 간의 상관성이 가장 좋은 것으로 나타났으며, 이때의 상관계수는 약 0.73 정도로 나타났다.

### 5.3. 제안된 식과 기존 규정과의 비교

제안된 예측식, 콘크리트 구조설계기준에 의한 최소철근비 값과의 비교 결과는 Table 5에, 각각의 콘크리트 압축강도 및 철근의 항복강도를 이용하여 구해진 최소철근비휨모멘트의 비교 결과는 Fig.

Table 5. Comparison of minimum steel ratio with code, proposed equation and test result

ID	minimum steel ratio by present code	steel ratio	proposed minimum steel ratio	failure Pattern	decision	
					present code	proposed
M21D1	0.0047	0.0047	0.0047	ductile	O.K	O.K
M21D2	0.0047	0.0037	0.0047	brittle	N.G	N.G
M21H2	0.0035	0.0025	0.0040	brittle	N.G	N.G
M21H3	0.0035	0.0045	0.0040	ductile	O.K	O.K
M28D1	0.0047	0.0047	0.0050	ductile	O.K	N.G
M28D2	0.0047	0.0037	0.0050	brittle	N.G	N.G
M28H2	0.0035	0.0025	0.0042	brittle	N.G	N.G
M28H3	0.0035	0.0045	0.0042	ductile	O.K	O.K
S21D1	0.0047	0.0047	0.0034	ductile	O.K	O.K
S21D2	0.0047	0.0037	0.0034	ductile	N.G	O.K
S21H2	0.0035	0.0025	0.0031	ductile	N.G	N.G
S21H3	0.0035	0.0045	0.0031	ductile	O.K	O.K
S28D1	0.0047	0.0047	0.0036	brittle	O.K	O.K
S28D2	0.0047	0.0037	0.0036	ductile	N.G	O.K
S28H2	0.0035	0.0025	0.0032	ductile	N.G	N.G
S28H3	0.0035	0.0045	0.0032	brittle	O.K	O.K

13~14에 나타내었다.

Table 5에서 보듯이 본 연구에서 유도 제안된 식이 실험결과와 잘 맞고 있는 것을 볼 수 있으며 기존 시방서 식은 실험 결과보다 더 큰 경우 혹은 더 작은 경우 등 일관성이 부족하고 또한 안전측에 들지 않는 경우도 있음을 알 수 있다. 이를 구체적으로 설명하면 M28D1 부재의 경우 현재 설계식으로는 최소 철근비 규정을 만족하나, 제안된 식으로는 만족하지 못하는 것으로 나타났으며, 실험결과는 취성파괴가 발생하는 것으로 나타나 제안된 식의 우월성을 보여주고 있다. 반면에 S21D2 및 S28D2 부재들은 그 반대의 결과를 보임을 알 수 있다.

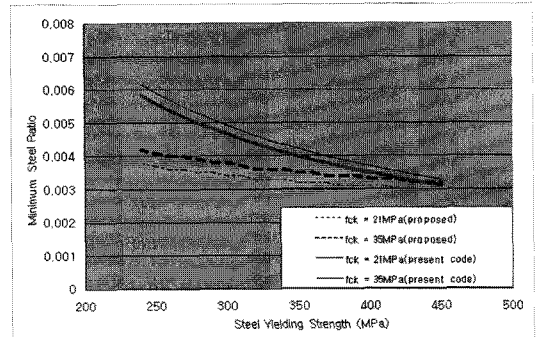


Fig. 14. Comparison of minimum steel ratio between present code and proposed equation according to steel yielding strength.

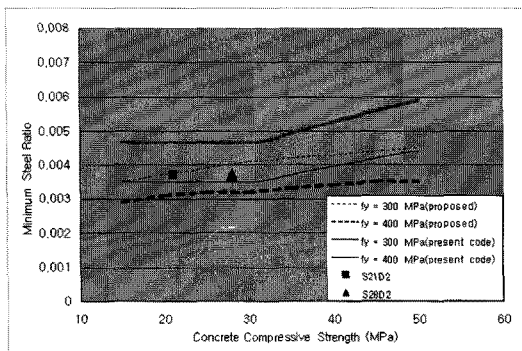


Fig. 13. Comparison of minimum steel ratio between present code and proposed equation according to concrete compressive strength.

또한 Fig. 13~14에서 알 수 있듯이 기존의 시방서 식에서는 콘크리트 압축강도에 의해서 불연속적인 결과가 발생되며 앞서 언급한 바와 같이 콘크리트 압축강도가 32MPa 이상에서는 그 효과가 나타나지 않는 문제가 있음을 재확인할 수 있었다. 특히 Fig. 15에는 Table 5에서 현재 설계기준식은 만족하나, 제안된 최소철근비를 만족하지 못하는 S21D2 및 S28D2 부재들을 그림 내에 표기하여 기존 식과 제안된 식의 차이를 명확히 나타내었다.

## 6. 결론

본 논문에서는 국내의 설계기준에서 제시하고 있



는 최소철근비 규정을 좀 더 이론적이고 역학적인 근거가 뒷받침되는 규정의 개정이 절실하여, 16개의 철근 콘크리트 휨부재를 제작하여 휨거동을 수행하였고, 실험결과를 이용하여 크기효과를 고려한 새로운 최소철근비 식을 제안하였다. 이러한 일련의 과정에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 휨거동 실험결과를 이용한 상관 분석 결과, 단면의 크기효과는 최소철근비에 비례하는 것으로 나타났다.

2) 최소철근비 제안식을 위한 필요 조건을 제시하였다.

3) 단면의 변형도 적합조건에 의하여 다음과 같은 이론적인 최소철근비 식을 유도하였고, 이론적으로 유도된 최소철근비 식에 단면크기 효과를 고려한 일반적인 형태의 최소철근비 식을 제안하였다.

$$\rho_{\min} = \alpha + \beta h \frac{0.32 \sqrt{f_{ck}}}{f_y \left(1 - \frac{\beta_1}{2} \frac{0.001}{0.001 + \epsilon_y}\right)}$$

( $\alpha=0.0022$ ,  $\beta=0.0014$ )

감사의 글 : 이 논문은 2010학년도 우석대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- 1) 한국콘크리트학회, “콘크리트 구조설계기준 해설”, 기문당, pp. 123, 2008.
- 2) 대한토목학회, “도로교 설계기준 해설”, 기문당, pp. 427, 2008.
- 3) 김우 외 4인, “콘크리트구조설계”, 동화기술, pp. 109~110, 2005.
- 4) Carpinteri, A., “Stability of Fracturing Process in RC Beams”, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 110, No. 3, pp. 544~558, 1984.
- 5) Baluch, M. H., A. K. and Ashmawi, W., “Fracture Mechanics Application to Reinforced Concrete Members in Flexure”, Proc. Int Workshop on Application of Fracture Mechanics to Reinforced Concrete, Italy, pp. 413~436, 1992.
- 6) Gerstle, W. H., Dey, P. P., N. N. V., Rahulkumar, P. and Xie, M., “Crack Growth in Flexural Members - A Fracture Mechanics Approach, Concrete”, ACI Structure Journal, Vol. 89, No.6, pp. 617~625, 1992.
- 7) Bosco, C., Carpinteri, A. and Debernardi, P.G., “Minimum Reinforcement in High Strength Concrete”, Journal of Structural Engg, Vol. 116, No. 2, pp. 427~437, 1990.
- 8) Bosco, C., Carpinteri, A. and Debernardi, P.G., “Fracture of Reinforced Concrete : Scale Effects and Snap-Back Instability”, Engg. Frac Mech, Vol. 35, No.4/5, pp. 665~677, 1990.