

## 높은 마디면적 고강도 철근의 부착강도에 관한 실험적 연구

홍건호<sup>1)\*</sup> · 최동욱<sup>2)</sup> · 최완철<sup>3)</sup> · 홍기섭<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> 호서대학교 건축공학과 <sup>2)</sup> 한경대학교 건축학부 <sup>3)</sup> 숭실대학교 건축학부 <sup>4)</sup> 홍익대학교 건축학과

(2004년 10월 20일 원고접수, 2005년 4월 15일 심사완료)

### An Experimental Study on Bond Strength of High-Strength Reinforcing Bars with High Relative Rib Area

Geon-Ho Hong<sup>1)</sup>, Dong-Uk Choi<sup>2)</sup>, Oan-Chul Choi<sup>3)</sup>, and Gi-Suop Hong<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Architectural Engineering, Hoseo University, Chungnam-Do, Korea

<sup>2)</sup> Dept. of Architecture, HanKyong National University, Gyeonggi-Do, Korea

<sup>3)</sup> Dept. of Architectural Engineering, Soong-Sil University, Seoul, Korea

<sup>4)</sup> Dept. of Architecture, Hong-Ik University, Seoul, Korea

(Received October 20, 2004, Accepted April 15, 2005)

#### ABSTRACT

The effects of bar deformation properties on bond of steel reinforcing bars to concrete are experimentally studied to predict the bond strength. Based on the previous research about high relative rib area, bond strength between reinforcing bars and concrete can be improved by the control of rib height and spacing. But, the equations in Korean code provisions to estimate development and splice length do not include these specifications of reinforcing bars. So, the purpose of this paper is to determine the effect of relative rib area to the bond strength.

This paper describes 2 kinds of experimental researches. Thirty beam-end specimens were tested to investigate the effects of bar size and relative rib areas ranging from 0.112 to 0.162. And, twelve lap-splice beam specimens were tested to the same variables. Each test results are normalized and compared with the proposed equations of ACI 408 committee. The results show that bond strength is increased as bar size and the relative rib area( $R_r$ ) increase. The distribution of flexural cracks and failure aspect do not appear to be affected by  $R_r$ .

**Keywords :** relative rib area, bond strength, development, lap-splice, high strength reinforcing bars

## 1. 서 론

철근콘크리트 구조에서 철근과 콘크리트 두 이질재료 사이의 부착은 구조물이 성립하기 위한 기본 조건 중의 하나이다.

근래 건축물 설계개념의 변화로 사용응력 수준이 높아지고, 시공 및 경제성의 이유로 고강도재료의 활용이 증가되고 있으며, 특히 고층의 주상복합 건물 등의 사례에서는 콘크리트의 품질이 저하될 정도로 과도한 배근이 적용되고 있다는 점은 이미 여러 차례 문제점으로 제기된 바 있다. 이를 위한 해결책으로 고강도 철근(SD500)이 제시되고 있으나, 현 설계기준에 의하면 기존 철근(SD400)에 비해 정착 길이가 25% 증가되어야 하고, 압축 이음길이의 경우 최대 42%가 증가되어야 하는 등 상세 설계상의 상당한 문제점이 제기<sup>1)</sup>되고 있

어 고강도 철근의 부착성능 개선이 요구되고 있다.

이러한 요구에 따라 1990년대 중반 이후 북미지역을 중심으로 높은마디면적 철근에 대한 효과가 실험적으로 연구되어 왔으며<sup>2,6)</sup>, 상대마디면적을 반영한 설계기준이 제안되기에 이르렀으나, 아직까지 실무에 적용하기에는 미흡한 단계이며, 정착설계식에 사용되는 여러 가지 변수에 대한 지속적인 연구가 필요한 것이 사실이다.

이에 따라, 본 연구에서는 상대마디면적의 변화에 따른 부착성능의 개선효과를 실험적으로 연구하여 향후 고강도 철근의 현장적용을 위한 기초연구를 수행하도록 하였다.

## 2. 기존 연구 고찰

이형 철근을 사용하면서 많은 연구자들은 철근의 마디형태 개발을 시도하게 되었고, 당연히 마디각의 역할에 관심이 높아 있었다.

1979년 Skorobogato와 Edwards<sup>9)</sup>는 45.8°에서 57.8°의 마

\* Corresponding author

E-mail : honggh@office.hoseo.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

다각의 변화는 부착강도에 큰 영향이 없는 것으로 분석하였다. 1990년대에 예폭시 도막 철근을 사용하게 됨으로써 부착강도 감소효과와 더불어 부착계면 특성의 연구가 이루어지게 되었고, 마디형태에 따라 부착강도가 다르게 감소함을 실험으로 관찰하게 되면서 마디형태에 대한 관심이 다시 제기되었다. 그 후 고강도 콘크리트와 고강도 철근이 개발되어 사용함에 따라 고부착 성능의 철근에 대한 연구가 활기를 띠게 되었고, 높은마디면적 철근에 대한 연구가 수행되었다.

높은마디면적 철근이란 상대마디면적이 0.10이상인 철근을 의미하며, 여기서 기준이 되는 상대마디면적( $R_r$ )은 Fig. 1과 같이 피복의 쪼갬과피와 철근의 뺨힘과피에 영향을 미치게 되는 마디의 지압면적과 마디 사이 콘크리트의 전단면적의 비율을 의미한다. 기존의 철근을 상대마디면적으로 표시하면 일반적으로 0.060~0.085 정도의 값을 갖게 된다.<sup>4)</sup>

Darwin(1993, 1996)<sup>6,7)</sup>의 연구에 의해 횡구속이 있는 경우 상대마디면적의 증가에 따라 부착강도가 커짐이 알려지게 되었으며, 이러한 연구 결과에 근거하여 ACI 408위원회(2001)에서는 상대마디면적이 큰 철근을 사용할 때의 정착길이 설계 기준을 식(1)과 같이 제시<sup>4)</sup>하였다.

$$\frac{l_d}{d_b} = \frac{\left(\frac{f_y}{f'_c} - 1900w\right)\alpha\beta\lambda}{72\left(\frac{cw + K_{tr}}{d_b}\right)} \quad (1)$$

단,  $K_{tr} = C_r(0.72d_b + 0.28)\frac{A_{tr}}{sn}$

$C_r = 44 + 330(R_r - 0.10)$

$c = c_{min} + 0.5d_b$

$w = 0.1\frac{c_{max}}{c_{min}} + 0.9 \leq 1.25$

위의 식에서 특이한 사항으로는 횡방향 철근지수  $K_{tr}$  계산 시 횡방향 구속력과 상대마디면적을 동시에 고려하도록 제안하고 있는 점이며, 제한된 연구 성과로 인하여 다음과 같은 사항을 만족하는 경우에만 적용하도록 규정하고 있다.

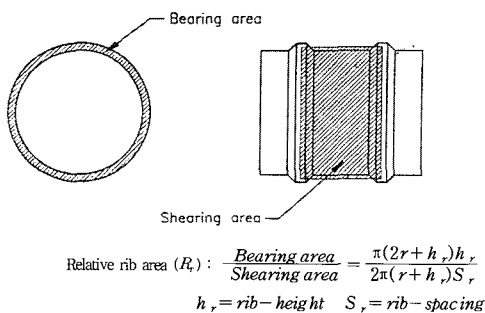


Fig. 1 Relative rib area ( $R_r$ )

- 1)  $0.10 \leq \text{상대마디면적}(R_r) \leq 0.14$
- 2) 마디각도 :  $45^\circ$  이상  $60^\circ$  이하
- 3) 마디형태 : X형과 다이아몬드형은 제외
- 4) 마디간격 :  $0.44d_b$  이상
- 5) 마디폭 : 평균마디 간격의 1/3 이하
- 6) 철근 직경 : No.11(D35) 이하

ACI 408에서 제안한 식<sup>4)</sup>에 의하여 산정된 정착길이를 기존 ACI 318-02 규준과 비교하여 도식하면 다음의 Fig. 2와 같다. 그림에서 나타나듯이 ACI 408 위원회의 제안식을 따르면 철근의 직경이 클수록 또한 상대마디면적이 커질수록 정착 길이를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

### 3. 실험계획 및 방법

본 연구에서는 철근의 부착성능을 실제에 근접하게 관찰할 수 있도록 보 형태 실험체를 사용하되, 그 크기와 비용을 줄이기 위한 보 단부형 실험체를 제작하여 높은마디면적 철근의 부착강도를 실험하도록 하였다.<sup>5)</sup> 또한, 단순보 실험체를 제작하여 상대마디면적과 직경 변화에 따른 결합 이음성능을 실험하도록 하였다. 실험에 사용된 재료의 성능은 다음의 Tables 1, 2 및 Fig. 3과 같다.

#### 3.1 보 단부 부착실험

부착실험에서는 철근의 상대마디면적(0.112 ~ 0.162)과 직경(D19, D25) 등 2가지의 실험변수에 대하여 보 단부형 실험체를 사용하여 실험하였다.

실험체의 크기는 D19의 경우  $200 \times 300 \times 470$  mm, D25는  $230 \times 310 \times 550$  mm로 제작하였으며, 콘크리트의 쪼갬강도에 직접관계가 있는 콘크리트의 피복두께는  $2d_b$ 로 계획하였다. 또한 부착길이 확보를 위해 매립 철근 양단에 P.V.C. 파이프를 삽입하였고, 접합부내 보조철근으로 4-D13을 배근하였다. 부착 구간 내 스티럽은 200 mm 간격으로 배치하였다 (Fig. 4).

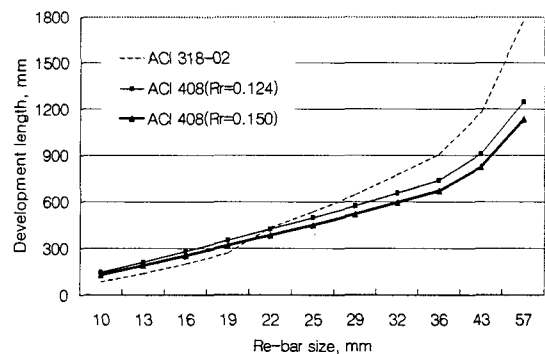


Fig. 2 Development length vs. rebar size

**Table 1** Concrete mixing proportions

Nominal strength (MPa)	Air (%)	W/C (%)	S/A (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )			
				Water	Cement	Sand	Gravel
30	4.5	49.6	47.8	172	347	858	938

**Table 2** Strength of concrete and rebar

Material	Description	Strength(MPa)	
Concrete	$f_{28}$	27	
	$f_{60}$	34	
Rebar	Yield strength	D19	563
		D25	582

기존 철근을 사용한 D19와 D25 실험체를 각각 기준 실험체로 제작하였으며, 철근의 마디높이와 간격을 변수로 하는 실험체는 4개의 그룹으로 형성하여, Table 4와 같이 총 30개의 실험체를 제작하였다.

본 실험의 재하방법은 Fig. 5와 같다. 하중은 200 kN 용량의 증공 유압식 오일잭 2개를 사용하여 가력하였으며, 이 하중은 강봉(steel rod)과 재하판(yoke)을 통하여 실험체에 매립된 철근에 인장력을 작용시키게 된다. 2개의 오일잭을 이용하는 방법은 실험체에 매립된 철근의 직접 인장 시 발생될 수 있는 편심을 최소화하기 위한 방법이다. 실험 시 철근의 미끄럼량은 하중단과 자유단에서 측정하였으며 실험체의 하중-미끄럼 관계는 자유단의 변위를 사용하였다.

**3.2 이음 실험**

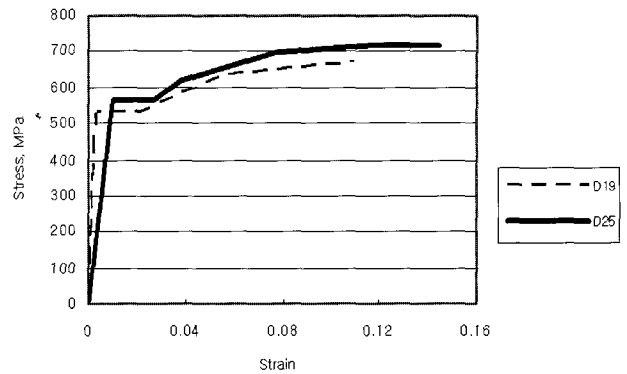
이음실험에서의 주 실험 변수는 보 단부 부착실험과 동일한 2가지 변수에 대한 실험을 실시하였다.

실험체의 크기는 D19의 경우 240×320×3000 mm, D25는 300×400×4000 mm로 제작하였으며, 이음길이는 기존의 연구결과<sup>7)</sup>를 분석하여 철근의 항복이전에 실험체의 부착 파괴를 유도하기 위해 D19는 13d<sub>b</sub>, D25는 15d<sub>b</sub>로 하였다. 재하 하중은 보 철근의 겹침 이음부분에 일정한 휨모멘트가 작용되도록 4점 재하로 하였으며, 이음 구간 내 균열의 진행상황 및 파괴형태의 관찰을 위하여 Fig. 7과 같이 제작된 실험체를 뒤집어서 실험하였다.

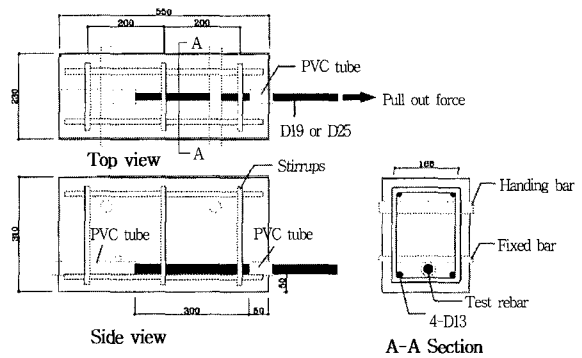
하중에 따른 변위를 측정하기 위해 실험체의 중앙부와 양단부에 LVDT를 설치하여 수직 처짐을 측정하였다. 철근

**Table 3** Rebar details

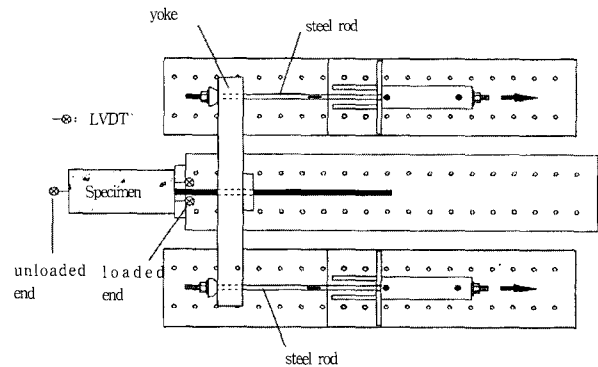
Index(R <sub>r</sub> )	CV(0.112)	MR(0.123)	LS(0.136)	HR(0.140)	MS(0.162)
D25					



**Fig. 3** Stress-strain curve for rebar



**Fig. 4** Specimen details (beam end test)



**Fig. 5** Test setup (beam end test)

게이지는 이음부위 철근의 응력 및 변형률의 변화를 측정하기 위해 기준 실험체에 대하여 겹침 이음 구간을 4등분하여 설치하였으며, 콘크리트 변형률의 측정위치는 Fig. 6과 같다.

**Table 4 Specimen details**

Test type	Specimen index	$h_r$ (mm)	$S_r$ (mm)	$R_r$	Specimen dimensions $W \times H \times L$ (mm)	Rebar	Stirrups	Embedded or splice length (mm)	Number of specimens	
Beam end	BE19-CV	1.65	12.5	0.115	200×300×470	D19	D10@200	220	3	
	BE19-MR	1.65	13.35	0.124					3	
	BE19-LS	1.27	9.9	0.128					3	
	BE19-HR	2.0	13.45	0.150					3	
	BE19-MS	1.70	10.0	0.157					3	
	Beam end	BE25-CV	2.1	16.0	0.112	230×310×550	D25	D13@200	300	3
		BE25-MR	2.15	17.45	0.123					3
		BE25-LS	1.80	13.25	0.136					3
		BE25-HR	2.40	17.25	0.140					3
		BE25-MS	2.25	12.8	0.162					3
Lap splice	SP19-CV	1.65	12.5	0.115	240×320×3000	D19	D10@200	247(13db)	1	
	SP19-MR	1.65	13.35	0.124					1	
	SP19-LS	1.27	9.9	0.128					1	
	SP19-HR	2.0	13.45	0.150					1	
	SP19-MS	1.70	10.0	0.157					1	
	Lap splice	SP25-CV	2.1	16.0	0.112	300×400×4000	D25	D13@200	375(15db)	1
		SP25-MR	2.15	17.45	0.123					1
		SP25-LS	1.80	13.25	0.136					1
		SP25-HR	2.40	17.25	0.140					1
		SP25-MS	2.25	12.8	0.162					1

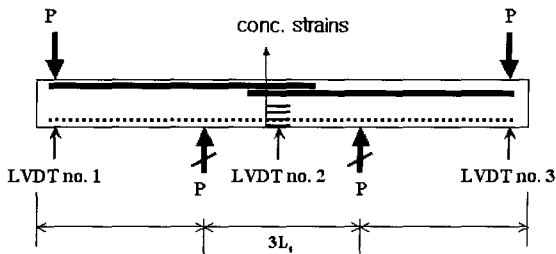
SP25-CV CV : Conventional HR : High rib height, MR : Medium rib height,  
 MS : Medium Spacing, LS : Low Spacing  
 Rebar size  
 SP : Splice beam BE : Beam end

#### 4. 실험결과 및 분석

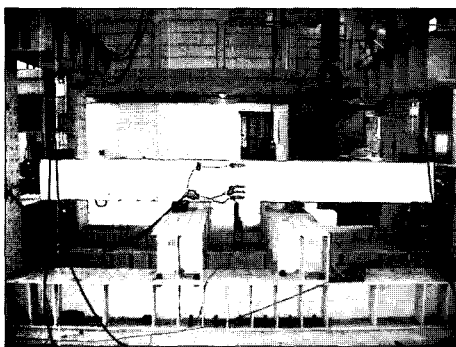
##### 4.1 하중-미끄럼(처짐) 곡선

부착 실험체의 대표적인 하중-미끄럼 곡선은 Fig. 8과 같다. 모든 실험체는 대부분 0.1 mm 이내의 미끄럼량에서 최대강도에 도달하며, 최대강도 이후 급격한 변위의 증가를 나타내며 저항내력이 떨어지는 취성적인 부착파괴의 양상을 보였다. Fig. 8에서는 하중-미끄럼 곡선의 초기 기울기를 비교하기 위하여 미끄럼량 0.3 mm까지만 도식하도록 하였다. 상대마디면적의 변화에 따른 하중-미끄럼 곡선을 비교하여 보면, 최대강도에 도달하는 미끄럼량과 최대강도 이후의 거동은 유사하나, 하중-미끄럼 곡선의 초기 기울기는 상대마디면적이 큰 MS 실험체가 기준실험체의 경우보다 크게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 상대마디면적이 큰 경우에는 철근마디에 의한 콘크리트의 지압면적이 증가함에 따라 하중-미끄럼의 콘크리트에 의한 초기강성이 증가함에 기인하는 것으로 분석된다.

그러나, 최대부착강도 이후 철근의 뺄힘파괴가 발생하는 단계에서는 더 이상 마디에 의한 지압효과가 발생하지 않으므로, 최대강도 이후의 거동에서는 상대마디면적에 의한 영향이 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다.



**Fig. 6 Test setup (lap splice test)**



**Fig. 7 Photo of test setup (lap splice test)**

이음 실험결과에 나타난 보 중앙점의 하중-처짐 곡선은 Fig. 9와 같다. 그림을 살펴보면, 철근의 직경과 상관없이 마디 높이와 마디간격을 달리한 각 변수에 대하여 각각의 기준 실험체와 유사한 형태의 하중-처짐곡선을 나타내고 있다. 즉, Fig. 9 (b)에서 D25의 경우를 살펴보면, 상대마디면적이 큰 MS와 LS 시험체의 최대내력 및 최대변위는 증가하였으나, 곡선의 기울기는 기준실험체의 경우와 유사한 것으로 나타나고 있으며, 최대내력 이후 실험체의 파괴거동의 형태도 큰 변화가 없는 것으로 분석되었다.

이와 같은 부착 및 이음실험에 대한 결과를 종합할 때, 상대마디면적의 증가는 지압면적의 증가에 따라 초기부착

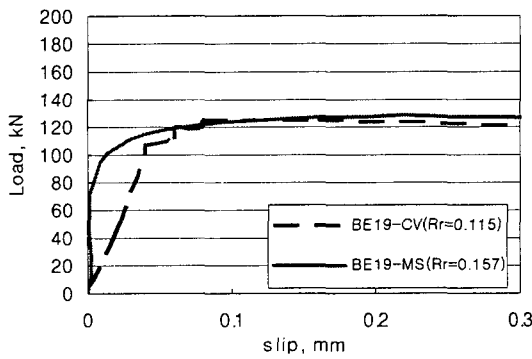
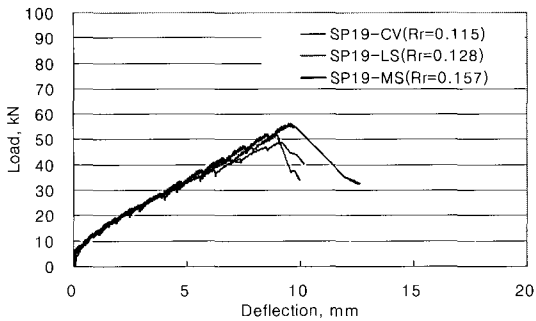
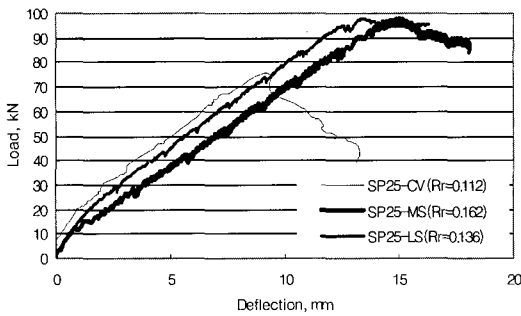


Fig. 8 Load-slip relationship : beam-end test



(a) D19



(b) D25

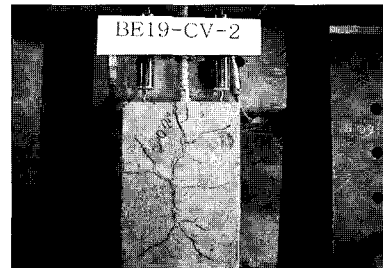
Fig. 9 Load-deflection curve: Lap -splice test

강성을 약간 증가시킬 수 있으나, 전체적인 부착거동의 변화에는 크게 기여하지 않는 것으로 판단할 수 있다.

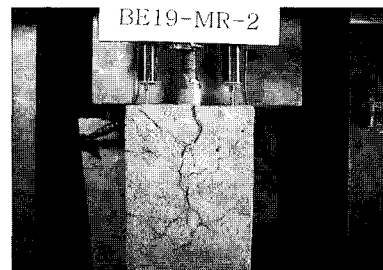
## 4.2 파괴 양상

본 연구에서 실험한 보 단부형 부착 실험체의 전체적인 파괴형태는 Fig. 10과 같다. 그림에서 나타나듯이 균열의 전체적인 형태는 거의 모든 실험체에서 동일하게 주근방향의 활열균열과 이에 직각으로 발생하는 방사균열로 구성되었으며, 부착이 끝나는 가력부 단부에서는 부착력의 방사방향 응력으로 인한 콘 형태의 균열이 나타나고 있다.

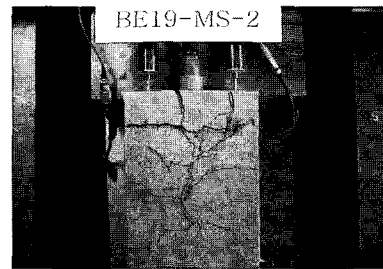
상대마디면적이 증가된 MR 및 MS 실험체의 균열형태를 기준 실험체의 경우와 비교하여 보면, 주근과 직각방향의 균열이 많아지며, 균열의 간격이 좁아짐을 알 수 있었다. 이와 같은 파괴 형태는 앞 절의 하중-미끄럼 곡선에 대한 강성을 약간 증가시킬 수 있으나, 전체적인 부착거동의 변화에는 크게 기여하지 않는 것으로 판단할 수 있다.



(a) BE19-CV( $R_r=0.115$ )



(b) BE19-MR( $R_r=0.124$ )



(c) BE19-MS( $R_r=0.157$ )

Fig. 10 Specimens after completion of beam-end test

## 4.2 파괴 양상

본 연구에서 실험한 보 단부형 부착 실험체의 전체적인 파괴형태는 Fig. 10과 같다. 그림에서 나타나듯이 균열의 전체적인 형태는 거의 모든 실험체에서 동일하게 주근방향의 활열균열과 이에 직각으로 발생하는 방사균열로 구성되었으며, 부착이 끝나는 가력부 단부에서는 부착력의 방사방향 응력으로 인한 콘 형태의 균열이 나타나고 있다.

상대마디면적이 증가된 MR 및 MS 실험체의 균열형태를 기준 실험체의 경우와 비교하여 보면, 주근과 직각방향의 균열이 많아지며, 균열의 간격이 좁아짐을 알 수 있었다. 이와 같은 파괴 형태는 앞 절의 하중-미끄럼 곡선에 대한 분석에서 언급하였듯이, 상대마디면적의 증가가 콘크리트의 지압면적을 증가시키고, 이와 같은 지압면적의 증가는 하중-미끄럼 관계의 초기 강성을 증가시킴으로써 일정한 값의 변위가 발생하기 이전에 응력의 분산을 유도함에 따른 것으로 판단된다. 이음 실험결과, 기준 실험체와 높은마디면적 철근을 사용한 실험체의 균열 양상을 분석하여 보면 Table 5와 같다. Table 5에서 실선으로 표시된  $\pm 563\text{mm}$  부분은 실험체에서 철근의 이음구간을 의미하며, 이 이음구간 내에서 발생한 균열의 개수 및 평균 간격을 변수별로 분석하도록 하였다. 실험체에 발생한 균열의 전체적인 형태는 모든 실험체에서 휨모멘트 구간 내에 전형적인 수직방향의 휨균열로 발생하였으며, 파괴 시 이음구간 내에서의 균열 개수는 대체적으로 5~7개로 나타나 상대마디면적의 변수에 따른 변화가 크게 관찰되지 않았다.

## 4.3 부착 강도

본 연구에서는 상대마디면적에 따른 부착강도의 증감효과를 실험하고, 그 결과를 ACI 408에서 제시한 정착 설계

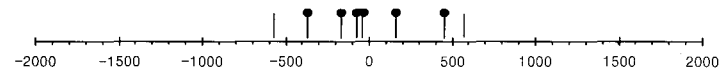

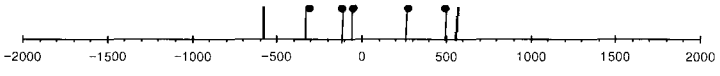
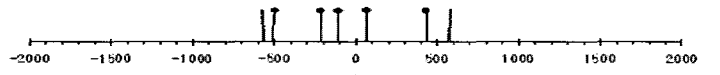
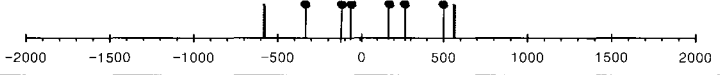
식에 의한 예상하중과 비교하여 보았다. ACI 408에 의한 예상 파괴하중의 계산은, 식 (1)을  $f_y$ 에 대하여 정리하고, 정리한 식에서 사용되는 우항의 정착길이  $l_d$ 를 실험에서 사용한 부착 및 이음길이로 대체하여 철근의 응력  $f_s$ 를 산정한 후, 이러한 철근의 응력을 발생시킬 수 있는 하중의 값을 산정하도록 하였다. 보 단부형 실험체에 의한 부착실험은 3개의 실험체에 대한 실험을 수행하여 그 평균값 및 표준편차를 분석함으로써 실험의 신뢰성을 평가하도록 하였으며, 그 결과는 Table 6에서 나타나듯이 대체적으로 모든 실험의 결과가 5% 내외의 표준편차를 보임으로써 실험 결과에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.

부착 및 이음강도에 대한 실험결과를 상대마디면적에 대하여 도식하면 다음의 Figs. 11 및 12와 같으며, 각 경우를 기준 실험체의 부착 및 이음강도에 대한 상대적인 비율로 표시하면 Figs. 13 및 14와 같다. Fig. 13에서 실험체의 부착강도는 D19의 경우 상대마디면적의 변화에 따라 기준 실험체보다 최소 4%(MR)에서 최대 15%(LS, HR)까지 증가하였으며, D25의 경우에는 최소 17%(MR)에서 최대 27%(MS)까지 증가되었다.

이음실험의 결과는 Fig. 14에서 나타나듯이 상대마디면적의 변화에 따라 D19의 경우에는 기준 실험체에 대하여 최소 6%(LS)에서 최대 19%(HR)까지 증가하였으며, D25 실험체는 최소 19%(HR)에서 최대 25%(LS)까지 증가되었다.

이와 같은 결과를 종합할 때, 철근의 상대마디면적은 부착 및 이음강도의 개선에 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며, 그 영향성은 각 실험에서 공히 상대마디면적 0.13까지는 대체적으로 상대마디면적에 비례하고, 그 이후에는 강도증가량이 둔화되는 것으로 분석할 수 있다. 또한, 부착 및 이음실험의 결과로부터 상대마디면적의 영향은 철근의 직경이 큰 경우가 철근의 직경이 작은 경우보다 더 유리함을 알 수 있다.

Table 5 Results of crack analysis

Specimen	Rr	Crack locations	Number of cracks	Crack spacing (mm)
SP25-CV	0.112		6	161
SP25-MR	0.123		7	141
SP25-LS	0.136		5	188
SP25-HR	0.140		6	161
SP25-MS	0.162		6	161

**Table 6** Summary of test results : beam-end test

Rebar	Specimen	Relative rib area	ACI 408 eq.		Experimental results				Bond stress (MPa)	(2)/(1)
			Predicted load(1) (kN)	Ratio to CV	Failure load (kN)	Average load(2) (kN)	Standard deviation	Ratio to CV		
D19	BE19-CV	0.115	96.00	1.00	125.36	117.99	7.77	1.00	8.99	1.23
					109.87					
					118.73					
	BE19-MR	0.124	99.05	1.03	125.64	125.46	5.82	1.04	9.56	1.27
					131.18					
					119.55					
	BE19-LS	0.128	100.71	1.05	121.03	138.71	16.76	1.15	10.57	1.38
					140.74					
					154.36					
	BE19-HR	0.150	102.19	1.06	135.90	138.18	2.15	1.15	10.53	1.35
					140.16					
					138.48					
BE19-MS	0.157	104.74	1.09	138.83	132.67	5.61	1.10	10.11	1.27	
				127.86						
				131.33						
D25	BE25-CV	0.112	182.40	1.00	235.78	213.60	22.69	1.00	9.07	1.17
					214.59					
					190.43					
	BE25-MR	0.123	191.82	1.05	257.32	250.47	8.80	1.17	10.64	1.31
					253.54					
					240.54					
	BE25-LS	0.136	198.49	1.09	282.73	265.48	21.67	1.24	11.27	1.34
					241.16					
					272.54					
	BE25-HR	0.140	198.01	1.09	243.94	255.33	11.01	1.20	10.84	1.29
					256.15					
					265.91					
BE25-MS	0.162	206.63	1.13	281.56	272.06	12.17	1.27	11.55	1.32	
				258.34						
				276.29						

**Table 7** Summary of test results : lap-splice test

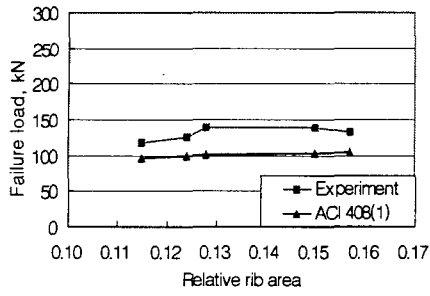
Rebar	Specimen	Relative rib area	ACI 408 eq.		ACI 318 eq.	Experimental results		Bond stress (MPa)	(2)/(1)
			Predicted load(1) (kN)	Ratio to CV	Predicted load (kN)	Failure load(2) (kN)	Ratio to CV		
D19	SP19-CV	0.115	31.49	1.00	21.05	48.9	1.00	7.85	1.55
	SP19-MR	0.124	31.75	1.00		56.0	1.15	8.99	1.76
	SP19-LS	0.128	31.87	1.01		51.7	1.06	8.30	1.62
	SP19-HR	0.150	32.52	1.03		58.0	1.19	9.31	1.78
	SP19-MS	0.157	32.72	1.03		56.0	1.15	8.99	1.71
D25	SP25-CV	0.112	57.49	1.00	38.22	78.5	1.00	6.31	1.37
	SP25-MR	0.123	57.58	1.00		95.6	1.22	7.69	1.65
	SP25-LS	0.136	58.63	1.02		97.9	1.25	7.87	1.67
	SP25-HR	0.140	58.99	1.03		93.4	1.19	7.51	1.58
	SP25-MS	0.162	60.82	1.06		97.7	1.24	7.86	1.61

한편, ACI 408 위원회에서 제시한 정착길이 설계식<sup>5)</sup>은 상대마디면적의 효과를 어느 정도 반영하고 있으나, 본 실험의 결과와 비교할 때 지나치게 안전측으로 평가하고 있음을 알 수 있다

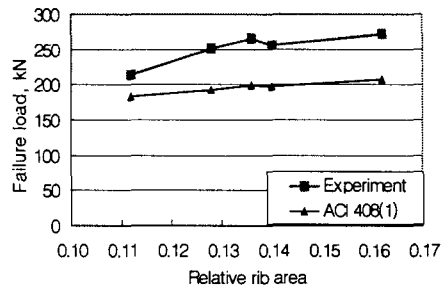
철근의 이음구간 내에서 부착응력의 변화를 관찰하기 위해 Fig. 15와 같이 이음 구간을 4개의 등간격으로 구분하여 철근의 변형률을 측정하였다.

실험 하중 단계별로 측정된 철근의 변형률은 Fig. 16과 같다. 그림에서 철근의 변형률은 직경과 상관없이 하중이 증가함에 따라 이음구간 내에서 선형으로 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이와 같은 결과는 철근의 부착응력이 이음길이를 따라 균등하게 분포하고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 분석을 바탕으로, 본 연구의 실험결과를 부착응력으로 환산하여 도식하면 다음의 Fig. 17과 같다.

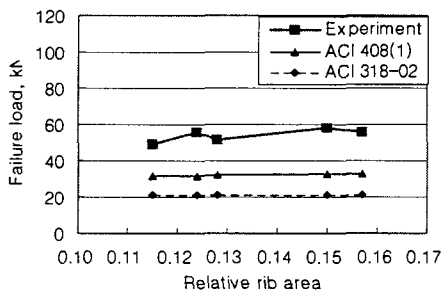


(a) D19

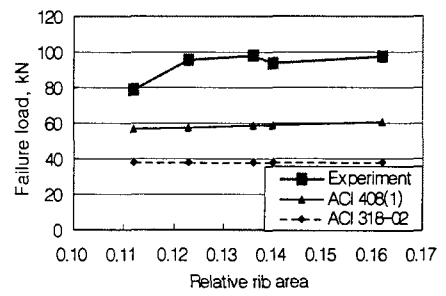


(b) D25

Fig. 11 Failure load vs. relative rib area : beam-end test

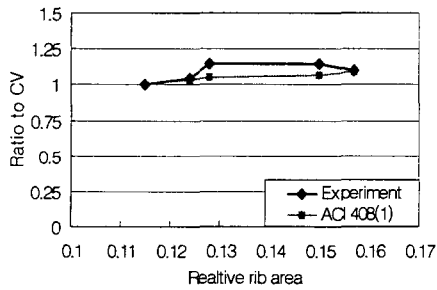


(a) D19

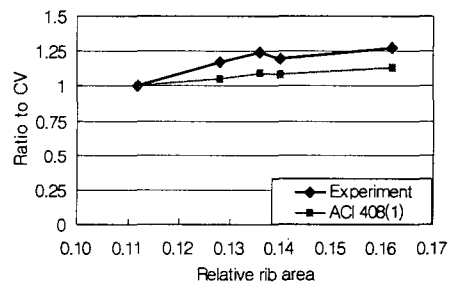


(b) D25

Fig. 12 Failure load vs. relative rib area : Lap-splice test

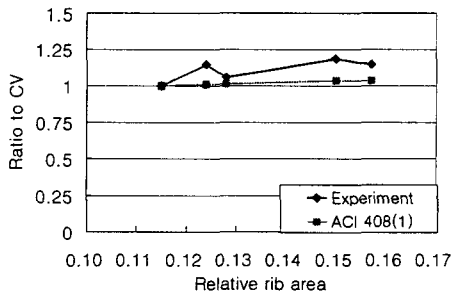


(a) D19

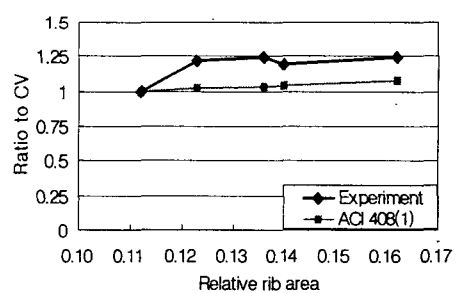


(b) D25

Fig. 13 Comparison between conventional and high relative rib area bars in terms of failure load : beam-end test



(a) D19



(b) D25

Fig. 14 Comparison between conventional and high relative rib area bars in terms of failure load : lap-splice test



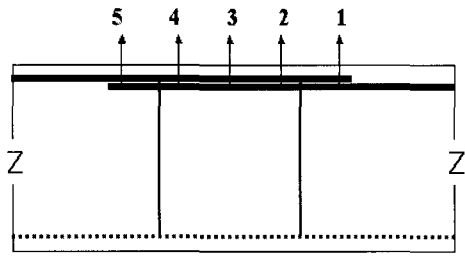


Fig. 15 Position of strain gages on rebar

그림에서 철근의 상대마디면적에 따른 부착응력 및 이음응력의 변화는 앞서 논의한 바와 마찬가지로 상대마디면적 0.13까지는 대체적으로 상대마디면적에 비례하여 증가하며, 그 이후에는 증가량이 둔화되는 양상을 나타내었다. 또한, 보 단부형 부착실험체에 의한 부착응력은 8.99 ~ 11.55 MPa, 이음실험에 의한 부착응력은 6.31 ~ 8.99 MPa로 분포되었으며, 이음실험에 의한 부착응력이 적게 나타나는 이유는 겹침이음에 따른 부착면적의 감소에 기인하는 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

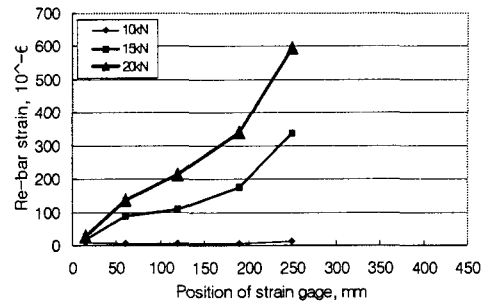
- 1) 상대마디면적의 증가는 고강도철근의 부착강도를 개선시킬 수 있다. 이때, 상대마디면적 0.10 ~ 0.13까지는 상대마디면적에 비례하여 부착강도의 증가가 나타나며, 그 이후에는 강도의 증가량이 둔화된다.
- 2) 철근의 직경이 클수록 상대마디면적 증가에 따른 부착 및 이음강도의 효율성이 높아진다.
- 3) 높은마디면적 고강도철근을 사용한 실험체의 파괴양상을 살펴볼 때, 보 단부 실험체의 경우에는 기준 실험체에 비해 상대마디면적이 증가할수록 주근 직각방향의 균열이 많아졌으나, 이음 실험체는 기준 실험체의 파괴양상과 거의 유사한 형태를 나타내었다.
- 4) 보통강도의 콘크리트에 대한 높은마디면적 고강도철근의 부착응력은 부착구간 내에서 균등하게 분포하며, 그 값은 8~12MPa 정도의 값을 갖는다.

## 감사의 글

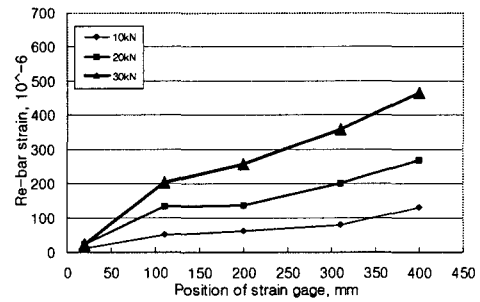
본 연구는 한국과학재단의 특정기초 연구(R01-2003-000-10606-0) 지원에 의하여 시행되었으며, 이에 대해 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 김중수, 김대영, 은성운, 김용남, “고강도 철근(SD500)의 실용화에 관한 연구”, 콘크리트학회지, 2003. 2, pp.86~89.

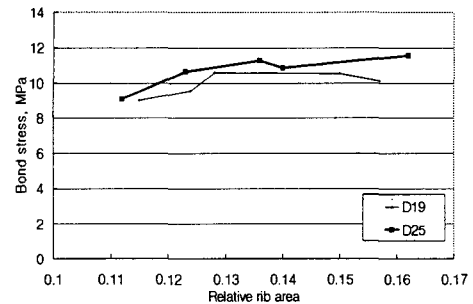


(a) D19

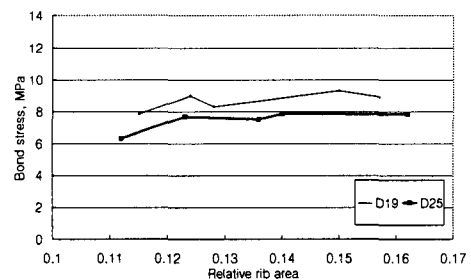


(b) D25

Fig. 16 Rebar strain vs. position of strain gage : lap-splice specimen



(a) Beam-end specimen



(b) Lap-splice test

Fig. 17 Bond stress vs. relative rib area

2. 이재열, 김병국, 홍기섭, 최완철, “반복하중시 철근마디높이에 따른 부착 손상특성”, 콘크리트학회논문집, 15권 1호, 2003, pp.17~24.

3. 홍건호, 최완철, “이형철근의 부착강도에 대한 마디형태의 영향”, 콘크리트학회지, 16권 4호, 2004, pp.95~99.
4. ACI Committee, “Splice and Development of High Relative Rib Area Reinforcing Bars in Tension(ACI 408.3-01) and Commentary(ACI 408.3R-01),” ACI, Farmington Hills, 2001, 6pp.
5. Choi, O. C. et al., “Bond of Epoxy-Coated Reinforcement to Concrete : Bar Parameter,” *ACI Materials Journal*, Vol.88, No.2, Mar.-Apr. 1991, pp.207~217.
6. Darwin, D. and Graham, E. K., “Effect of Deformation Height and Spacing on Bond Strength of Reinforcing Bars,” *ACI Structural Journal*, Vol.90, No.6, Nov.-Dec. 1993, pp.646~657.
7. Darwin, D. et al., “Splice Strength Of High Relative Rib Area Reinforcing Bars,” *ACI Structural Journal*, Vol.93, No.1, Jan.-Feb. 1996, pp.95~107.
8. Tefers, R., “Cracking of Concrete Cover Along Anchored Deformed Reinforcing Bars,” *Magazine of Concrete Research*, Vol.31, No.106, Mar. 1979, pp.3~12.
9. Skorbogotov, S. M. and Edwards. A. D., “The Influence of Geometry of Deformed Steel Bars on Their Bond Strength in Concrete: Bar Parameters,” *ACI Materials Journal*, Vol.88, No.2, Mar.-Apr. 1979, pp.207~217.

## 요 약

본 논문에서는 철근과 콘크리트 사이의 부착강도에 영향을 미치는 철근 마디의 효과를 실험적으로 연구하였다. 높은 마디면적 철근에 관련된 기존 연구결과에 따르면, 철근과 콘크리트 사이의 부착강도는 철근 마디의 높이와 간격을 조정함으로써 향상시킬 수 있는 것으로 나타나고 있다. 그러나, 정착 및 이음길이 산정과 관련된 현행 국내 설계기준에서는 이러한 철근 마디모양의 효과를 반영하고 있지 못하다. 따라서, 본 연구에서는 철근의 상대마디면적이 부착강도에 미치는 영향을 분석하는 것을 목적으로 하였다.

본 논문에서는 크게 2 종류의 실험적 연구를 실시하였다. 철근의 직경과 상대마디면적(0.112~0.162)의 효과를 분석하기 위하여, 30개의 보단부형 부착시험체와 12개의 단순보형 겹침 이음 시험체에 대한 실험을 수행하였다. 각 실험의 결과는 변수의 일반화과정을 통하여 ACI 408 위원회의 제안식과 비교·분석하였다. 본 연구의 실험결과, 철근과 콘크리트 사이의 부착강도는 철근의 직경과 상대마디면적에 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 휨균열의 발생이나 부재의 파괴양상에는 상대마디면적의 효과가 거의 없는 것으로 분석되었다.

**핵심 용어 :** 상대마디면적, 부착 강도, 정착 길이, 겹침 이음, 고강도 철근