

철근 마디형상에 따른 부착특성에 관한 해석적 연구

A FEA Study on the Bond Property according to the Rib-Shape of Reinforcement

민준수¹⁾ 홍건호^{2)*}
Joon-Soo Mihn Geon-Ho Hong

Abstract

Effects of various parameters on bond property between reinforcing bar and concrete are investigated in many researchers, and various study is on going to improve the bond strength. Properties of interface between reinforcement and concrete is important role in bond property. This study analyzed the interfacial bond mechanism between deformed bar and concrete by finite element analysis (FEA) to evaluate the effect of rib shape. The FEA model in this study is simplified 2D plane stress model. The variables of analysis are selected by rib angle, rib height, rib spacing and relative rib area. From the results of analysis, reinforcing bars with rib angle 30~60° showed better bond strength than the others. Bond strength ratio following to the rib height is proportionally increased up to the 0.12d_b, but rib spacing has little effect on bond strength. The results also indicated that relative rib area can be efficiently represented the properties of deformed shape in reinforcing bars, and zigzagged rib height shape showed excellent bond strength increase.

Keywords : Bond Stress, Rib Shape, Relative Rib Area, FEA

1. 서론

철근콘크리트 구조에서 철근과 콘크리트 두 재료 사이의 부착은 구조물이 성립하기 위한 기본 조건이다. 부착파괴는 쐐기작용 (wedge action)에 의한 피복 콘크리트의 쪼갬파괴 (splitting failure)와 철근마디의 콘크리트 국부지압에 의한 뽑힘파괴 (pull-out failure)로 구분되며, 이러한 파괴거동에 대해 철근의 마디형태가 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 즉, 마디형태를 이루고 있는 마디각, 마디높이, 마디와 마디 사이의 폭이 부착강도에 미치는 영향에 대한 연구가 요구되며, 특히 최근 고강도 강재 및 콘크리트가 개발되어 사용됨에 따라 부착성능을 개선하기 위한 연구가 필요한 것으로 나타나고 있다. 이에 많은 연구자들이 기존 이형철근의 부착성능을 향상시키기 위한 철근의 마디형태 개발 및 마디각의 역할에 관해 연구하였다 (Darwin et al., 1993(a); Darwin et al., 1996(b); Hamad, 1995; Hong et al., 2004, 2012).

부착특성은 철근과 콘크리트 사이의 계면 (interface)조건이 지배적이다. 이 중에서 철근의 마디 형태는 계면거동에 매우 민감한 영향을 미치게 된다. 계면거동이 갖는 민감성 때문에 계면의 거동현상 파악을 위한 실험은 매우 정교함을 요구하며, 실험 결과의 분석 또한 복잡하고 난해하여 제한적 범위 내에서 연구되어 왔다. 따라서, 본 연구에서는 철근마디형상이 부착강도에 미치는 영향에 대해 비선형 유한요소 해석을 이용하여 부착성능에 관한 철근 형상의 기초연구에 기여할 수 있도록 하였다.

2. 기존 연구 고찰

1980년대 이후 철근마디로부터 쐐기작용에 의해 발생하는 응력을 3차원으로 해석하고 이론적으로 규명하기 시작하였고, 이에 철근마디 및 마디각도의 중요성이 확인되었다. 그러나, 부착강도에 지배적인 영향을 가진 계면특성과 관련된

1) 정회원, 호서대학교 건축공학과 박사과정
2) 정회원, 호서대학교 건축공학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : honggh@hoseo.edu

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2014년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

마디각, 마디면적비 등에 대한 이론적 근거가 제시되지 못하였고 제한적 실험 위주의 연구가 시행되어 왔다.

Darwin (1993, 1996)의 연구는 ASTM 규격의 철근 직경 No.5, No. 8, No. 11를 사용하여 부착이음 실험을 하였다. 실험에 사용된 철근의 마디면적비는 0.065~0.140의 범위를 변수로 산정하였으며, 이때 마디면적비 (relative rib area, R_r)란 철근 축에 대한 수직면적을 철근의 마디와 마디 중심 간 거리에 둘레를 곱한 면적을 나눈 비로 나타낸 값을 의미한다. 즉, 철근의 지압면적을 전단면적으로 나눈 것으로 다음과 같이 산정할 수 있다. 지압면적이란, 철근에 인장력이 작용할 때 뽑힘파괴에 저항하는 면적이며, 전단면적은 쪼갬 파괴에 저항하는 면적을 말한다 (식 (1), Fig. 1).

$$R_r = \frac{\text{Bearing Area}}{\text{Shearing Area}} \approx \frac{h_r \pi d_b}{S_r \pi d_b} = \frac{h_r}{S_r} \quad (1)$$

여기서 d_b 는 철근의 공칭지름

횡구속이 되지 않은 시험체에서 이음, 부착강도는 이형철근의 마디형태에 따라서 별다른 차이를 보이지 않았으나, 횡구속된 시험체에서 이음, 부착강도는 마디면적비가 클수록 증가하는 것으로 나타났다. 마디면적비의 평균값인 $R_r=0.12$ 을 사용한 시험체는 기존 철근을 사용한 것에 비해 26% 정도의 이음길이 감소 효과를 나타냈다.

Hamad (1995)의 연구는 철근의 마디형상을 새롭게 제작하여 짧은 정착길이에 큰 부착력을 얻고, 정착길이가 짧아짐에 따른 시공성의 확보와 구조적인 안전성을 확보하는 것이다. 주요 변수는 철근의 마디각과 마디높이, 그리고 마디간격이다. 마디각의 효과에 대해 마디각이 45°일 때 보다 60°일 때 7% 정도의 부착강도 증가를 보였으나, 마디각이 90°일 때는 증가세가 감소하는 양상을 보였다. 마디간격의 효과

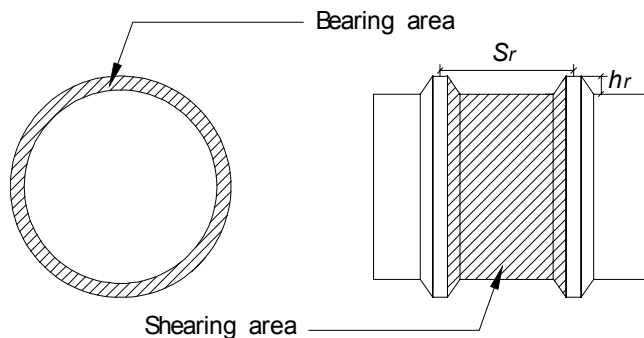


Fig. 1 Relative rib area (R_r)

는 이음길이 보 시험체에서 부착강도의 증감에 대한 영향은 나타나지 않았다. 마디높이의 효과는 마디높이가 $0.10d_b$ 인 시험체가 $0.05d_b$ 인 것에 비해 24%의 부착강도 증가를 보였다. 최적의 마디형태는 마디각 60°, 마디간격 $0.5d_b$, 마디높이 $0.10d_b$ 로 제안하였다.

ACI 408위원회 (2001)에서는 Darwin (1993, 1996) 등의 실험결과를 바탕으로 정착식을 제안하였으며, 여기서 마디면적비는 0.10~0.14, 철근축선과 마디의 각도는 45~60° 이하, 마디간격은 $0.44d_b$ 이상으로 규정하였다.

Choi (2002, 2006)는 계면부착에 대한 이론적 해석을 수행하였으며, 마찰계수, 점착력, 횡구속력, 마디면적의 역할을 밝혔다. 횡구속이 적어 쪼갬 파괴가 지배될 때에는 마디면적비가 부착강도에 대한 영향이 없음을 검증하였고, 반면에 실제 구조물에서 횡구속이 큼을 이용함으로써 높은 마디면적 철근의 개발이 가능함을 인지하였다. 또한, 실험을 통해 마디면적비가 부착강도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 특히 마디면적비가 0.10~0.12범위를 가지는 시험체의 부착강도가 가장 크게 증가하는 것으로 나타났다.

Hong and Choi (2012)는 기존 연구자들의 실험내용을 연구하여 철근 마디형상이 부착강도에 미치는 영향을 분석하고, 이를 고려하여 ACI 408 위원회 제안식을 기반으로 수정 정착설계식을 제안하였다.

3. 해석 방법

3.1 해석모델 및 방법

철근마디형상이 부착강도에 미치는 영향을 해석적으로 규명하기 위해 우수한 비선형해석 능력을 가지고 있는 FEA 프로그램인 ABAQUS 6.5를 이용하였다. 경계면에 대해서는 비교적 단순한 구성모델을 사용하고, 시험체의 형상효과를 유한요소모델이라는 방법을 고정시킨 후 재료모델을 반복해석하게 되면, 시험체의 형상과는 독립된 단순한 해를 유도할 수 있다. 철근요소모델은 철근 마디형상을 상세히 적용한 리브스케일 (Rib scale) 모델을 사용하였다. 철근과 콘크리트 형상 모델은 축대칭 해석을 고려하여 일정한 응력도를 가정하며, 요소의 두께는 단위두께 (1mm)를 사용하였으며, 평면응력 (Plane Stress) 요소를 적용하였다. 접촉면 (Contact) 요소는 ABAQUS에서 제공하는 접촉면의 부착형식, 접촉면에서 슬립 (Slip)의 유무에 따라 표면요소와 계면요소가 있다. 본 해석에서는 화학적 부착 (chemical adhesion)과 물리적

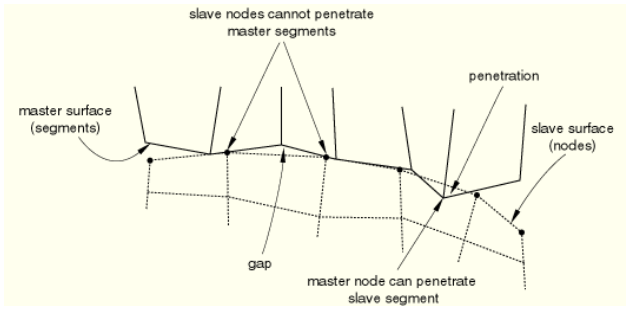


Fig. 2 Outline of the master-slave contact algorithm

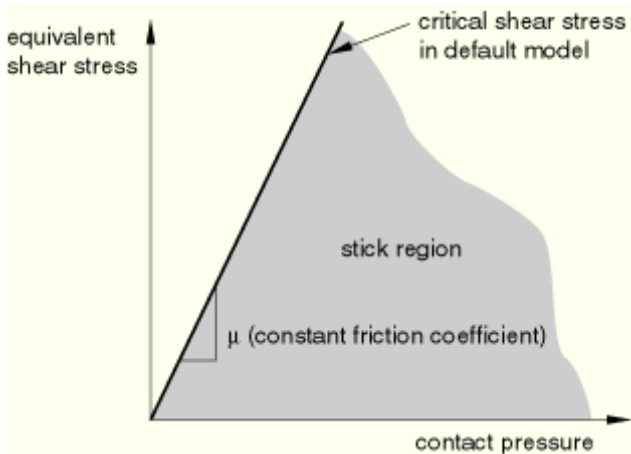


Fig. 3 Slip regions for the basic Coulomb friction model

부착을 고려해야 하고 접촉면에서 슬립 (slip)이 발생하므로 접촉면 거동을 직접 전달하는 표면요소를 이용하여 접촉 옵션 (Contact Pair Option)에 의해 한 점에 두 개의 절점을 부여하여 접촉면을 모델링하였다. 접촉면에서 주와 종속의 알고리즘 (master and slave algorithm)을 가지게 된다 (Fig. 2). 즉, 두 개의 요소는 각각 주 표면과 종속표면으로 구성되며, 이때 주절점은 종속 표면내로의 변형이 가능하나, 종속 절점의 경우에는 주 표면 내로의 이동이 불가능하게 되며, 접촉방향은 항상 주 표면에 대하여 수직을 유지하게 된다. 계면요소의 마찰모델은 경사면에서 계면마찰 미끄러짐 이론에 따라 마찰력과 점착력이 압축력크기에 의해 결정되며, 경사면의 전단력은 Mohr-Coulomb 계면마찰이론에 따라 마찰력과 점착력의 조합에 의해 결정된다.

이 방법은 주로 마찰에 의한 변형량이 크지 않은 경우에 일반적으로 사용된다 (Fig. 3).

본 연구에서 사용한 평면 해석모델의 기하학적 형태는 피복의 영향이 없도록 하고 짧은 부착길이 (100mm)를 가진 부착인발 시험체 (pull-out specimen)를 평면모델로 변형시킨 것으로 적용하였다 (Fig. 4). 철근 및 콘크리트는 기하학

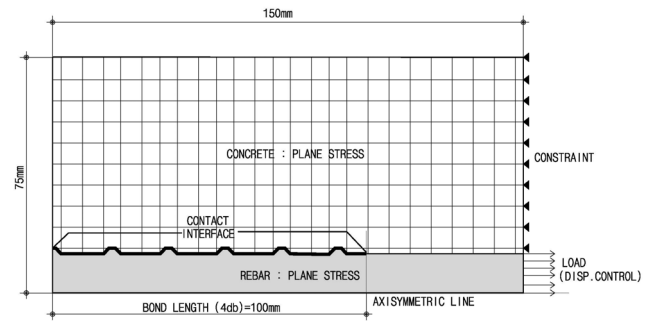


Fig. 4 Applied axisymmetric FE model for simulation of pull-out test

적 형상을 실제와 유사하게 모델링한 2차원 평면모델요소 (4 절점요소)를 사용하였으며, 하중측 선단길이 부분에 사용된 계면요소는 철근과 콘크리트 사이의 부착력이 없도록 하였으며, 단지 콘크리트 부분이 후면 접촉부분에서 전달되는 사선방향의 응력만을 부담하도록 하였다. 부착길이 부분에 대한 계면요소는 마찰계수 0.5를 갖는 계면요소를 사용하여 마찰력과 마디의 지압력에 의해 부착력을 발휘하도록 하였으며, 두 재료 사이의 점착력은 1 MPa로 적용하였다 (Cho, 1994). 해석에 사용된 비선형 콘크리트모델은 Popovics (1973)의 제안식을 이용하였으며, 복잡하게 거동하는 콘크리트 및 철근과 콘크리트의 미끄러짐에 대해서 콘크리트의 비선형만 고려하였다. 해석은 일정한 하중의 증분없이 철근의 변위만 증가하게 되는 시점까지 수행하였다.

3.2 해석변수

철근마디형상이 부착성능에 미치는 영향을 해석적으로 분석하기 위해 사용된 주요변수는 마디각, 마디높이, 마디간격 및 마디면적비이다.

사용된 철근은 D25이형철근으로 항복강도는 $f_y=500$ MPa, 철근의 탄성계수는 200,000 MPa, 콘크리트 압축강도는 24 MPa로 고정하였다. 철근의 포아송비 0.3, 콘크리트 포아송비 0.167를 사용하였다.

철근 마디각은 리브와 접촉되는 콘크리트의 지압형상이 차이가 발생되므로, 하중의 전달형태에 상당한 영향이 있는 것으로 알려져 있다. 마디각에 대한 변수는 15~90° (15, 30, 45, 60, 75, 90°)로 정하여 콘크리트 파괴 양상에 따른 부착성능을 구현할 수 있도록 하였다. 철근 마디높이는 한국 산업규격 (KS D 3504)에서 D19 이상 철근 마디 최소 높이는 공칭 지름의 5%, 최대는 10%로 규정하고 있으며, 철근 굵기에 따라 최소치와 최대치를 제시하고 있다. 따라서, 마디높

이변수는 D25 철근의 공칭지름 5~14% (1.2, 1.6, 1.8, 2.1, 2.4, 2.7, 3.0, 3.3, 3.6mm)로 해석변수를 정하였다. 철근 마디간격은 ACI 408 위원회에서 $0.44d_b$ 이상으로 제한하고 있는데, 이는 마디 사이의 콘크리트 전단파괴로 인하여 부착강도가 낮아지는 경우를 피하기 위함이다. 따라서 본 연구에서는 마디간격은 $0.40d_b \sim 0.84d_b$ (10, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30mm)로 변수를 정하였다. 국내 정착설계식에서는 철근 마디면적비 (R_r)에 대한 기준은 없으며, ACI 408위원회 식에는 R_r 이 높은 철근을 이용할 경우의 정착 및 이음길이 설계식을 제시하고 있다. 일반적으로는 기존 철근의 R_r 은 0.06~0.085 범위이지만, 철근 마디형상을 변형시킨 철근은 0.10~0.14 사이의 범위로 제한하고 있다.

교차마디 (대형마디)를 가지고 있는 철근은 기존 연구 결과 (Hong et al., 2012)를 통해 향상된 부착강도를 얻을 수 있었다. 이러한 교차마디의 형상과 마디면적비의 상관관계를 알아보기 위해 변수로 설정하였다.

제한적인 R_r 값에 대하여 해석을 통해 그 효율성을 확인하고자 0.133~0.200 범위로 변수를 산정하였다. 본 연구의 해석모델 변수에 대한 사항을 정리하면 Table 1과 같다.

4. 해석 결과 및 분석

각 모델들의 유한요소해석을 수행한 결과, 철근과 콘크리트의 응력분포는 다음 Fig. 5~6과 같다. 콘크리트의 응력분포는 철근과 콘크리트 계면 전면부에서 압축응력이 발생하였으며, 지점부분으로 전달되는 사선방향의 응력 양상이 나타났다.

철근 주변의 콘크리트에서 발생하게 되는 주응력도는 Fig. 7~8과 같다. 철근 마디 앞부분의 계면에서 콘크리트는 철근 마디의 형상에 따라 마디축에 직각방향의 큰 압축응력을 받게 되며, 이와 동시에 철근 상부 및 후면의 콘크리트는 인장 응력 상태가 나타났다. 대형마디 철근인 경우, 전면 마디의 큰 강성으로 주응력이 크게 나타났으며, 국부응력이 발생하지만 큰 강성을 가진 마디간격이 두 배 늘어남으로써 높은 마디만 가진 철근에 비해 상대적으로 전단파괴면에서 유리한 측면이 나타났다.

4.1 마디각도에 따른 결과

마디각도에 따른 부착응력 해석결과를 정리하면 Table 2와 같다. 부착강도는 철근의 마디각 15~30°에서는 증가가

Table 1 Analysis variable design

Item	Model name	h_r	s_r	A_r	R_r
Conventional Bar	CV1	1.6	18	46°	0.089
Rib Angle	AR15	1.8	17	15°	0.106
	AR30	1.8	17	30°	0.106
	AR45	1.8	17	45°	0.106
	AR60	1.8	17	60°	0.106
	AR75	1.8	17	75°	0.106
	AR90	1.8	17	90°	0.106
Rib Height	HR12	1.2	18	55°	0.067
	HR16	1.6	18	55°	0.089
	HR18	1.8	18	55°	0.100
	HR21	2.1	18	55°	0.117
	HR24	2.4	18	55°	0.133
	HR27	2.7	18	55°	0.150
	HR30	3.0	18	55°	0.167
	HR33	3.3	18	55°	0.183
	HR36	3.6	18	55°	0.200
Rib Spacing	SR10	1.8	10	55°	0.180
	SR12	1.8	12	55°	0.150
	SR15	1.8	15	55°	0.120
	SR18	1.8	18	55°	0.100
	SR21	1.8	21	55°	0.086
	SR24	1.8	24	55°	0.075
	SR27	1.8	27	55°	0.067
	SR30	1.8	30	55°	0.060
	Wide Rib Area (zigzagged rib height)	WRA1	3.2,1.6	36	55°
WRA2		3.6,1.6	36	55°	0.144
WRA3		4.2,1.6	36	55°	0.161
WRA4		3.2,1.8	36	55°	0.139
WRA5		3.6,1.8	36	55°	0.150
WRA6		4.2,1.8	36	55°	0.167
WRA7		3.2,2.0	36	55°	0.144
WRA8		3.6,2.0	36	55°	0.156
WRA9		4.2,2.0	36	55°	0.172

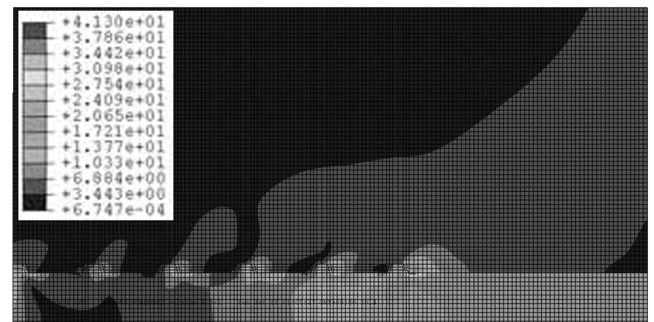


Fig. 5 Stress contour of analysis result (HR21)

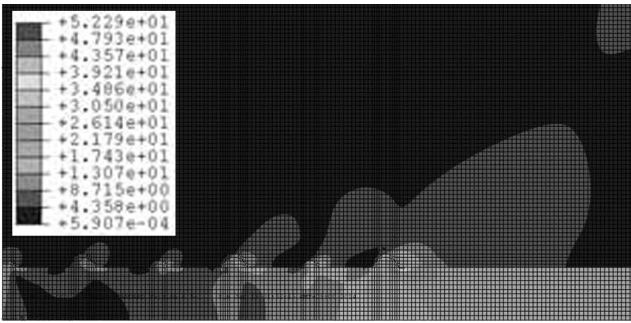


Fig. 6 Stress contour of analysis result (WRA1)

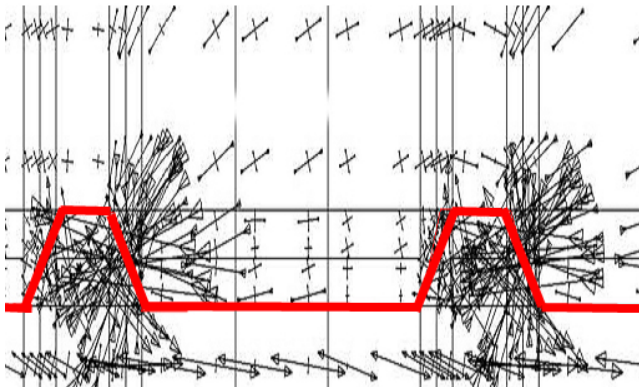


Fig. 7 Principal stress vectors of analysis result (HR21)

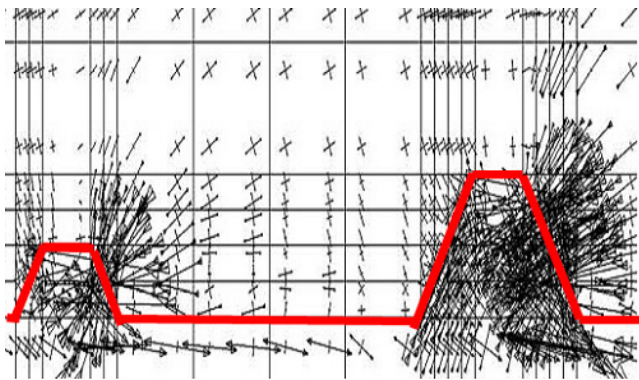


Fig. 8 Principal stress vectors of analysis result (WRA1)

미비하나, 30~60° 범위일 때 부착응력이 우수한 것으로 나타났다. 철근 마디각이 75° 이상이 되면 철근의 형상으로 인해 파괴형상모드가 전단파괴 (shear off)형상으로 부착응력이 감소하는 양상을 나타낸다. 즉, 마디각이 75° 이상인 경우 수직면에 대한 강성이 우수하여 응력집중현상이 발생되어 취성적인 형상을 나타내는 것으로 판단된다.

Choi (2002)는 계면조건을 Mohr-Coulomb 마찰조건으로 철근마디에 작용하는 췌기작용 (wedge action)을 고려한 평형방정식을 산정하여, 콘크리트의 이론적인 췌기부착강도를

Table 2 Results according to rib angle

MODEL	FE Analysis results	
	Bond Stress (MPa)	Ratio with AR15
AR15	1.254	1.00
AR30	1.267	1.01
AR45	2.088	1.66
AR60	2.311	1.84
AR75	1.555	1.24
AR90	1.387	1.11

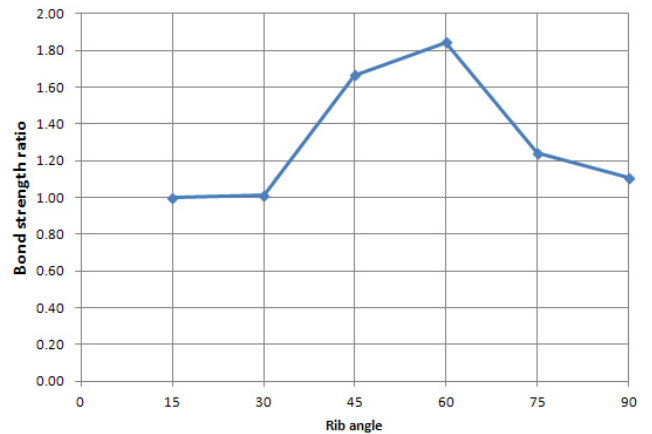


Fig. 9 Results according to rib angle

제시하였다 (식 (2)).

$$T_{split} = \pi d_b l_b c + F_x \pi \tan(\alpha) \frac{(1 + \mu \cot \alpha)}{(1 - \mu \tan \alpha)} + A_r \frac{l_b}{s_r} \frac{c}{\sin(\alpha)(\cos(\alpha) - \mu \sin(\alpha))} \quad (2)$$

상기 식은 마디각이 50~60° 사이에서 급격한 부착강도 증가 현상이 나타나며, 마디각이 약 68° 이상이면 tan 함수로 인해 췌기부착강도가 급격히 변화하는 양상을 나타낸다. 해석결과에서 마디각이 60°까지는 부착응력이 증가하는 추세를 보이나 75°에서는 감소하는 양상이 나타나며, 이는 60° 이상에서 부착강도가 감소되는 것으로 Choi (2002)의 이론 사항과 유사한 것으로 판단된다.

또한 ACI 408에서 제한한 마디각 제한 40~60°범위는 부착강도 증진에 바람직한 것으로 사료된다.

4.2 마디높이에 따른 결과

마디높이에 따른 부착응력 해석결과를 정리하면 Table 3

Table 3 Results according to rib height

MODEL	FE Analysis results	
	Bond Stress (MPa)	Ratio with HR12
HR12	1.88	1.00
HR16	2.21	1.18
HR18	2.30	1.23
HR21	2.36	1.26
HR24	2.10	1.12
HR27	2.25	1.20
HR30	2.86	1.53
HR33	1.70	0.91
HR36	1.28	0.69

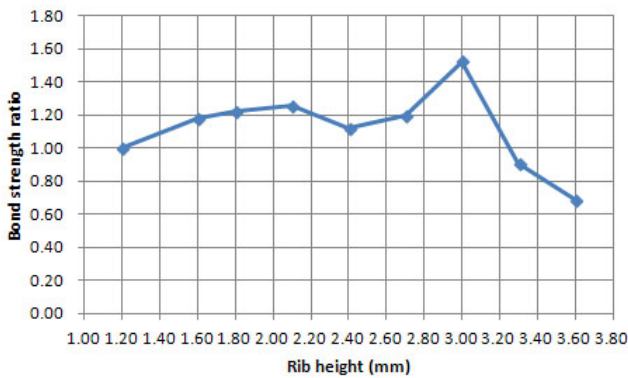


Fig. 10 Results according to rib height

와 같다. 마디높이가 증가할수록 부착응력은 대체적으로 증가하는 양상을 나타내며, HR12 대비 HR24와 HR30은 각각 부착응력이 약 12%, 53% 증가하였다. HR33 이상이 되면 마디의 강성의 증가와 높이와 간격비의 영향으로 부착강도가 저감되는 것으로 판단된다.

Choi (2002)는 전단마찰이론을 근거로 하여 뿔힘과괴강도에 대한 이론적인 식을 제시하였다 (식 (3)).

$$T_{shear} = \chi_1 \chi_2 \frac{0.2f_{ck} \pi d_b h_r}{\sin \alpha} \quad (3)$$

여기서, χ_1, χ_2 은 3축 응력 매개변수는 압축강도 매개변수로서 해석 또는 실험으로 결정될 수 있다. 전단파괴의 지배적인 요소를 보면 마디높이와 마디각이다. 따라서 마디 높이만 단순히 높이기만 한다면 전단파괴의 가능성이 높으므로 부착성능의 한계를 알 수 있으며, 해석결과가 이를 나타내고 있으며, 마디높이는 철근직경의 12% 이하 ($3.0/25\text{mm} = 0.125, 0.12d_b$)로 제한하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

Table 4 Results according to rib spacing

MODEL	FE Analysis results	
	Bond Stress (MPa)	Ratio with SR10
SR10	2.46	1.00
SR12	2.32	0.95
SR15	2.25	0.91
SR18	2.30	0.94
SR21	2.09	0.85
SR24	1.99	0.81
SR27	1.87	0.76
SR30	1.85	0.75

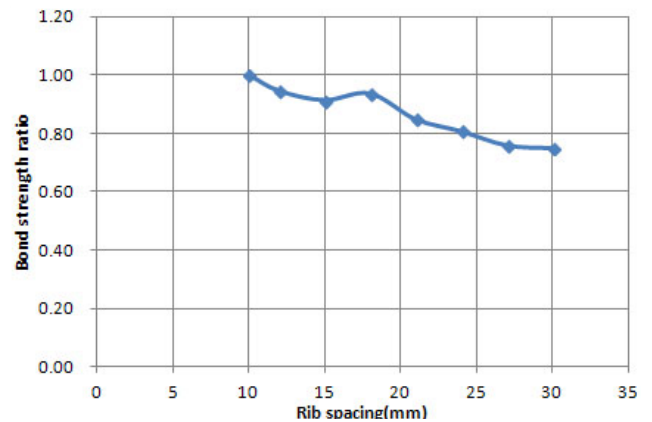


Fig. 11 Results according to rib spacing

4.3 마디간격에 따른 결과

마디간격에 따른 부착응력 해석결과는 다음의 Table 4와 같다. 부착강도는 부착길이가 100mm로 고정되어 있어 마디간격이 길어질수록 유효마디의 개수가 줄어들므로 간격이 넓은 경우 부착강도가 감소하는 것으로 나타났다. SR18 이하의 구간에서는 마디 간격의 효과가 부착강도의 증감에 미치는 효율성은 크지 않은 것으로 나타났다. SR21 이상부터 SR10 대비 15% 이하로 저감되는 것으로 나타나 마디간격은 직경의 5~10%로 제한하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 마디 간격의 하한선을 정하는 이유는 리브가 높고 간격이 너무 좁으면 전단응력은 그 거동에 지배적이고 콘크리트가 국부전단파괴가 되어 뿔힘과괴가 유도될 수 있기 때문이다. 즉, 부착강도에 대한 변수 (지수)로 마디높이 대비 마디간격으로 표기하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 즉 마디면적비 (R_r)로 나타내는 것이 합리적인 방법으로 판단된다.

4.4 마디면적비 및 교차마디에 따른 결과

마디면적비 및 교차마디에 따른 부착응력에 대한 해석결과를 정리하면 다음의 Table 5와 같다.

그룹1은 낮은마디를 1.6mm로 고정시키고 높은마디를 3.2, 3.6, 4.2mm로 교차하여 변화시킨 경우이며, 그룹2는 낮은마디 1.8mm 고정으로 높은마디 3.2, 3.6, 4.2mm, 그룹3은 낮은마디 2.0mm 고정으로 높은마디 3.2, 3.6, 4.2mm를 교차하여 배치한 결과이다. 그룹1~3에서 마디면적비가 0.13~0.15 범위에서 부착응력은 비례적으로 증가하는 추세를 나타냈으나, 그 이상이 될 경우는 마디면적비가 증가하였지만, 부착응력은 오히려 일부 감소하는 추세를 나타냈다 (Fig. 12~14).

이를 종합하면, Fig. 15와 같이 마디면적비에 대한 부착응력은 0.15 이하 구간에서는 비례적으로 증가하는 추세를 나

타내고 있으나, 0.15 이후 구간에서는 부착응력에 영향이 없는 것으로 평가할 수 있다.

Table 5 Results according to relative rib area

MODEL		FE Analysis results
		Bond Stress (MPa)
Group1	WRA1	2.55
	WRA2	2.73
	WRA3	1.20
Group2	WRA4	2.41
	WRA5	2.71
	WRA6	1.46
Group3	WRA7	1.29
	WRA8	2.60
	WRA9	2.39
Group4	CV	1.90
	HR24	2.10
	WRA1	2.55

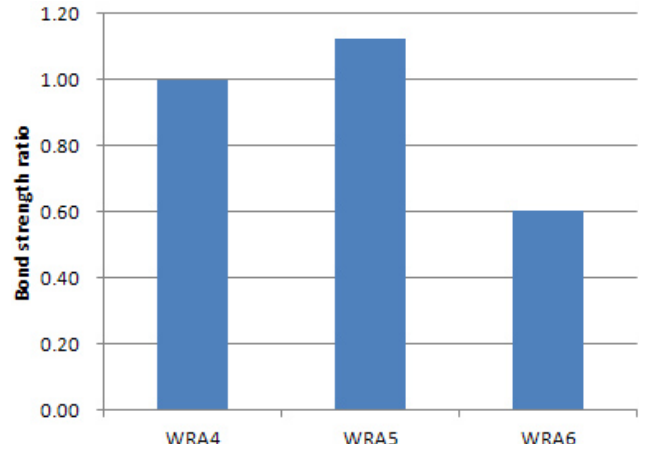


Fig. 13 Bond strength ratio according to relative rib area (Group2)

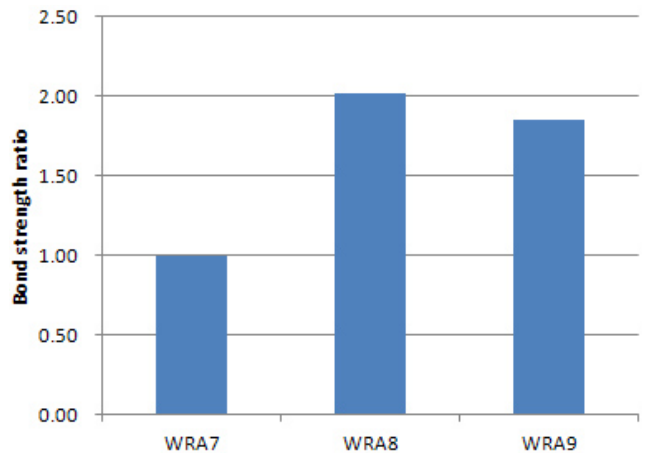


Fig. 14 Bond strength ratio according to relative rib area (Group3)

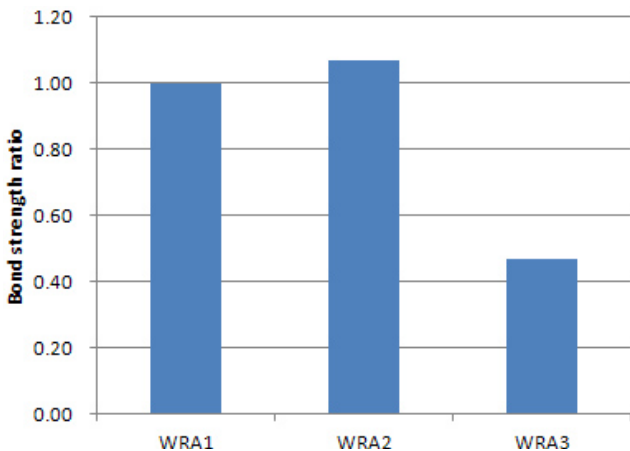


Fig. 12 Bond strength ratio according to relative rib area (Group1)

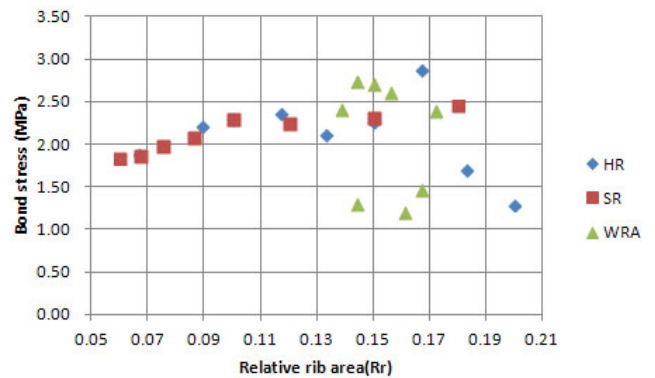


Fig. 15 Bond stress results according to Rr (overall)

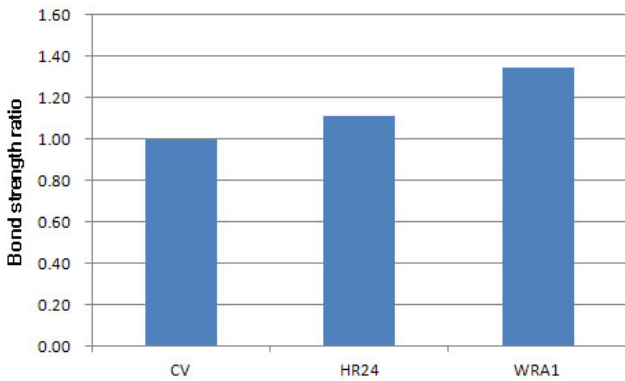


Fig. 16 Bond strength ratio according to CV, HR24, WRA1

이러한 결과는 ACI 408 위원회에서 규정하고 있는 마디면적비의 제한값인 0.10~0.14의 범위가 해석적으로 타당할 것으로 분석된다.

4.5 대형마디 철근의 효과

Table 5의 그룹4 및 Fig. 16은 일반철근 (CV), 높은마디철근 (HR24)과 교차마디 (대형마디)철근 (WRA1)의 부착응력을 비교한 결과이다. 일반철근 기준으로 높은마디철근과 대형마디철근 (wide rib area, 교차마디철근)은 각각 11%와 34%의 부착강도 증가를 보였다. 상대마디면적비에 따른 부착강도는 마디면적비 (Rr)값이 증가할수록 부착강도가 증가하는 경향을 나타내었으나, HR24와 WRA1은 Rr이 같음에도 20%에 가까운 부착강도의 차이를 나타내었다. 이는 마디면적비가 동일하여도 마디 높이나 간격 등의 마디 형상에 따라 부착강도에 차이가 있을 수 있음을 알 수 있다. 즉, 대형마디철근은 부착강도 증진에 영향이 있는 것으로 나타났다. 마디형상에 대한 사항 (마디높이, 마디간격, 교차마디)을 횡보강철근과 같은 다른 변수와의 조합으로 재구성하면 해석결과에서 나타난 것처럼 부착응력 증가에 크게 영향을 미칠 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 철근과 콘크리트 사이의 부착특성에 대한 철근 마디형상의 영향을 비선형 유한요소해석프로그램인 ABAQUS를 이용하여 분석하였다. 철근의 마디각, 마디높이 및 마디폭의 변화에 따른 부착성능에 대하여 해석적 연구를 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 철근 마디각도의 범위는 30~60° 범위에서 부착성능향상이 우수한 것으로 나타났으며, ACI 408위원회에서 제안한 45~60°는 타당한 것으로 판단된다.
- (2) 철근 마디높이에 대한 영향은 마디높이가 높아질수록 강성이 증가하여 부착강도가 증가하는 추세를 나타내었지만, HR33 이상인 경우에는 마디 사이 콘크리트의 응력증가로 주응력 방향이 바뀌면서 부착강도가 감소하는 것으로 평가된다. 이에 따라, 철근의 마디높이는 직경의 12% (0.12d_b) 이하가 바람직한 것으로 판단된다.
- (3) 철근 마디간격에 대한 부착강도의 영향은 크지 않은 것으로 나타났으며, 마디간격이 좁으면 전단파괴의 우려가 있으므로, 철근 마디간격은 직경 5~10% 범위면 부착성능확보에 문제가 없을 것으로 판단된다.
- (4) 마디면적비와 부착강도의 추세를 살펴보면 마디면적비 (R_r)가 커질수록 부착강도는 증가하였으나, 마디면적비가 0.15 이상인 경우에는 그 영향이 감소하는 것으로 나타났다. 이에 따라 마디면적비와 부착강도는 상관관계가 있는 것으로 분석할 수 있으나, 그 한계는 마디면적비 0.15로 제한하는 것이 타당할 것으로 판단된다.
- (5) 국내 철근의 정착설계식은 마디형상에 대한 영향을 반영하지 않고 있으므로, 마디형상을 고려한 새로운 설계식 제안이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 철근의 마디형상이 부착성능에 미치는 상대적 영향성을 해석적으로 연구하였으며, 향후 실험 연구결과와의 비교, 분석 및 다양한 변수 (철근 크기, 횡보강근, 콘크리트 강도, 철근 강도, 에폭시도막 등)에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 : 2012-0286).

References

1. ABAQUS Analysis User's manual version 6.5.
2. ACI Committee 408 (2001), Splice and Development Length of High Relative Rib Area Reinforcing Bars in Tension and Commentary, ACI Manual of Concrete Practice, 408.3-1-408.3-3.
3. Cho (1994), A Study on the Interfacial Shear Transfer Characteristics of Precast Concrete Joint (Focused on the

- Cohesion and Friction), Department of Architecture Master Course in Graduate School Seoul National University, 29-43.
4. Choi, O. C., and Lee, W. S. (2002) Interfacial Bond Analysis of Deformed Bars to Concrete, *ACI Structural Journal*, Nov.-Dec., 750-756.
 5. Darwin et al. (1993), Effect of deformation height and spacing on bond strength of reinforcing bars, *ACI Structural Journal*, Nov.-Dec., 646-656.
 6. Darwin et al. (1996), Development length criteria for conventional and high relative rib area reinforcing bars, *ACI Structural Journal*, May-June, 347-358.
 7. David Darwin et al. (1996), Development Length Criteria for Conventional and High Relative Rib Area Reinforcing Bars, *ACI Journal*, 93(3), 347-358.
 8. Hamad (1995), Bond strength improvement of reinforcing bars with specially designed rib geometries, *ACI Structural Journal*, Jan.-Feb., 3-13.
 9. Hong and Choi (2004), Effects of Deformation properties on the Bond of Reinforcing Bars, *KCI Journal*, 16(4), 95-99.
 10. Hong and Chol (2012), Modified Development Design Equation Proposal on the Rib-Shape of Reinforcement, *AIK Structural Journal*, 28(6).
 11. Popovics, S. (1973). A Numerical Approach to Complete Stress-Strain Curve of Concrete, *Cement and Concrete Research*, 3, 583-595.

Received : 11/27/2013

Revised : 12/13/2013

Accepted : 01/24/2014

요 지

기존의 많은 연구자들이 철근과 콘크리트 사이의 부착특성에 영향을 주는 다양한 변수에 대하여 연구해왔으며, 특히 최근에는 고강도철근의 등장과 더불어 부착강도의 증진을 위한 연구가 다수 진행 중이다. 철근과 콘크리트 사이의 부착특성은 두 이질재료 사이의 계면조건이 중요한 역할을 하게 되는데, 이 중에서 특히 철근의 마디형상은 계면조건에 가장 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 철근과 콘크리트 사이의 부착거동을 분석할 수 있는 상용 비선형 유한요소프로그램을 사용하여 철근의 마디형상에 따른 부착특성에 대하여 연구하였다. 해석에 사용된 부착모델은 2차원 평면응력요소를 사용하였으며, 주요 해석변수로는 마디각, 마디높이, 마디간격 및 마디면적비이다. 해석결과, 마디각은 30~60도인 범위에서 부착력이 우수한 것으로 나타났으며, 마디높이는 일정구간까지는 부착강도가 증가하나 철근직경의 12%를 초과하면 전단파괴를 유발하여 오히려 부착강도가 감소되고, 마디간격에 대한 효과는 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다. 마디의 높이와 간격을 하나의 지표로 제시할 수 있는 마디면적비는 부착강도의 변화를 효과적으로 나타낼 수 있는 것으로 분석되었으며, 마디면적비는 0.15 이하에서 최대의 효율을 나타내는 것으로 분석되었다. 특히 대형마디(교차마디형상)를 가진 철근인 경우, 타 변수보다 우수한 효율을 나타내어 부착강도 증진효과가 커지는 것으로 평가되었다.

핵심 용어 : 부착응력, 마디형상, 마디면적비, 유한요소해석