

고강도 콘크리트에 매립된 철근의 부착특성

Bond Characteristics of Reinforcing Bars Embedded in High Strength Concrete

최종수* 유석형* 안종문* 이광수** 신성우***
Choi, Jong-Soo Yoo, Suk-Hyung Ahn, Jong-Mun Lee, Kwang-Soo Shin, Sung-Woo

ABSTRACT

Bond test was carried out to assess the effect of several variables on bond characteristics between reinforcing bar and concrete. Key variables are concrete compressive strength(low, medium, high, and ultra-high), bar diameter(13mm and 22mm), and concrete cover(25mm;1-inch, 38mm;1.5-inch, and 51mm;2-inch). Confining effect and bar spacing are not taken into account. Thirty-two specimens subjected to uniaxial tension were tested under hypothesis uniform bond stress distribution along the reinforcing bar embedded in concrete. Test results(ultimate bond stress) were compared with bond and development provisions of the ACI Building Code(ACI 318-89) and local bond stress versus slip relationship diagram represented to show effect of the above variables.

1. 서론

철근 콘크리트 구조물에서 철근과 콘크리트 간의 부착력은 전체 구조물의 안정성 측면에서 매우 중요한(critical) 부분으로서 구조부재의 설계나 해석에서 기본이 된다. 철근 콘크리트 구조물에서의 부착력은 철근의 직경, 철근의 형상, 구속철근의 유무, 철근의 매설간격 및 매설 위치 그리고 콘크리트의 압축강도, 콘크리트의 피복두께 등에 따라 크게 영향을 받는다. 기존에 이러한 변수를 중심으로 많은 연구가 있어 왔지만 콘크리트의 압축강도가 큰 영역에서는 근거가 될 만한 자료가 크게 부족한 실정이다. 또한, 1994년에 개정된 국내 극한강도 설계법¹⁾이나 기존 ACI 규준²⁾에는 콘크리트의 압축강도 상한선을 $700\text{kg}/\text{cm}^2$ ($10,000\text{psi}$)로 설정하여 이 한계를 초과하는 부분에 관하여는 명확한 규정이 설정되지 않은 상태이며, 국내에서는 구조부재를 대상으로 고강도 콘크리트를 사용한 연구가

아직 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 철근의 직경과 콘크리트의 압축강도를 중심으로 변수를 설정하여 부착력을 비교 고찰하였으며, 초고강도 영역에서의 부착력이 기존의 부착력을 산정하는 방법과 어느 정도의 상관성이 있는지를 규명하여 이에 대한 기초자료를 제공함에 그 목적이 있다.

2. 실험

2.1 실험체 계획

본 연구에서는 철근의 직경, 콘크리트의 압축강도 및 피복두께를 주요 변수로 하였으며, 고강도 콘크리트에서는 철근의 재하단 측에 응력 집중 현상이 나타나므로³⁾ 하중재하에 따라 매립된 철근의 전 길이에 걸쳐 응력이 일정하다는 가정(uniform bond stress)^{4,5)}을 만족시키고, 철근의 항복을 피하고 콘크리트의 부착파괴를 유도하기 위하여 매립길이를 $5d_b$ (13mm철근의 경우 6.5cm, 22mm철근은 11cm)로 하여 총 32개의 실험체를 계획하였다. 계획된 실험체의 크기는 13mm 철근을 사용한 경우는 $23\text{cm}\times 23\text{cm}\times 23\text{cm}$ 이며, 22mm 철근을 사용한 경우는 $23\text{cm}\times$

* 한양대학교 대학원

** 여주전문대 전임강사

*** 한양대학교 부교수

표 1 각 실험체별 특성

구분 실험체	f'_c (kg/cm ²)	d_b (mm)	l_d (mm)	cover (mm)	구분 실험체	f'_c (kg/cm ²)	d_b (mm)	l_d (mm)	cover (mm)	
SLA-1	340	13	65	25	SHB-1.5	650	22	110	38	
SLA-1.5				38	SHB-2				51	
SLA-2				51	SUHA-1				25	
SLB-1		22	110	25	SUHA-1.5		904	13	65	38
SLB-1.5				38	SUHA-2					51
SLB-2				51	SUHB-1					25
SMA-1	460	13	65	25	SUHB-1.5	340		22	110	38
SMA-1.5				38	SUHB-2					51
SMA-2				51	PLA					13
SMB-1		22	110	25	PLB		460	13	65	105
SMB-1.5				38	PMA					110
SMB-2				51	PMB					105
SHA-1	650	13	65	25	PHA	650		22	110	110
SHA-1.5				38	PHB					105
SHA-2		22	110	51	PUHA			904	13	65
SHB-1				25	PUHB		105			

* f'_c : 콘크리트 압축강도, ** d_b : 철근의 공칭직경, *** l_d : 철근의 묻힘길이
여기서 SLA-1은 다음을 의미한다.

S : Splitting test (P: Pull-out test), L : Low strength (M: Medium, H: High, UH: Ultra-High)

A : 13mm bar (B: 22mm bar), 1 : 1inch(25mm) concrete cover(1.5: 1.5-inch(38mm), 2: 2-inch(51mm))

23cmx32cm로 하였다. 실험체 상세는 그림 1에, 그리고 각 실험체별 특성은 표 1에 각각 나타나 있다.

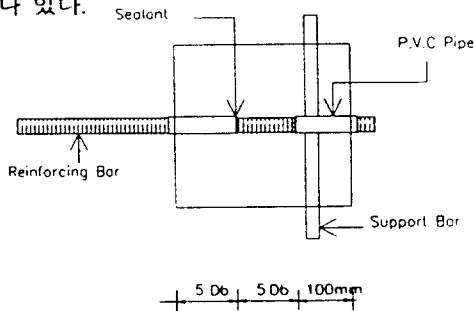


그림 1 실험체 상세도

2.2 재료

본 연구에 사용된 시멘트는 1종 포틀랜드시멘트로 비중이 3.14, 분말도가 3,117cm²/g로 나타났으며, 모래는 세척사로 비중이 2.62, 조립율이 2.85로 측정되었다. 일반적으로 콘크리트 압축강도가 높아질수록 조골재의 최대치수가 작

은것을 사용한다. 그러나 부착력의 메카니즘(mechanism)이 화학적 부착(chemical adhesion)에서 마찰(friction)로, 마지막 단계인 골재와 철근마디 사이의 맞물림작용(aggregate interaction)으로 전개되므로 골재의 크기는 부착력에 영향을 미치게 된다.⁷⁾ 따라서 조골재의 최대치수를 강도에 상관없이 일정하게 19mm로 하여 영향이 적도록 하였다. 조골재는 쇄석으로 비중이 2.69, 조립율이 6.67로 나타났다. 그리고 고강도와 초고강도 콘크리트에는 실리카흄(micro silica fume)을 사용하였으며 고강도에는 단위시멘트량의 4%, 초고강도에는 10%를 사용하였다. 실험체 제작에 사용된 철근은 SD40의 D13과 D22를 사용하였다. 철근의 인장시험 결과는 표 2에 나타나 있으며 강도별 배합은 표 3에 나타나 있다.

표 2 철근의 인장강도 시험결과

구분 종류	E_s (kg/cm ²)	σ_y (kg/cm ²)	ϵ_y (x10 ⁻⁶)	σ_u (kg/cm ²)	신율 (%)
D13	1988x10 ³	4,800	2,414	6,556	26.1
D22	2378x10 ³	4,100	1,724	6,051	21.5

표 3 콘크리트 배합 설계표

구분	W/C (%)	시멘트 (kg/m ³)	자갈 (kg/m ³)	모래 (kg/m ³)	silica-fume (%-kg/m ³)
LOW	50	360.0	974	841	-
MEDIUM	36	530.0	996	647	-
HIGH	33	518.4	1035	645	4 - 21.6
U- HIGH	28	585.0	1002	598	10 - 65.0

2.3 실험체 제작 및 양생

실험체는 코팅처리된 거푸집에 철근을 수평으로 배근하여 문힘길이 이내의 철근 마디수가 일정하게 되도록 하였으며 철근이 매설되는 앞뒤로 p.v.c.파이프를 설치하여 가력시에 일어날 수 있는 콘 파괴(pull-out cone failure)를 방지하고 가력 반대편의 미끄러짐(slip) 측정이 용이하도록 하였다. p.v.c. 파이프와 철근 사이에는 콘크리트 페이스트 유입을 방지하기 위하여 방수용 sealant로 처리하였다. 콘크리트는 2단으로 타설하였으며, 다짐의 영향⁹⁾을 고려하여 일정한 다짐 간격과 횡수로 조절하였다. 제작된 실험체는 흙손 마감후 수분증발을 방지하기 위하여 비닐로 덮어 제작된 공시체와 함께 자연양생하였다.

2.4 실험체 설치 및 실험

실험체는 가력골조위에 수평으로 설치하였으며 Hydraulic Jack과 Load Cell을 철근에 연결하여 인장력을 가하였다. 가력시 실험체가 자유단으로 이동하는 것과 들리는 것을 방지하기 위하여 보조철물로 고정하였다. 재하단에서는 2개의 다이얼 게이지(dial gauge)로 철근의 변위를

측정하고 콘크리트면에 상대적인 변위측정을 위한 1개의 다이얼 게이지를 설치하였다. 자유단에는 철근과 실험체의 상대변위 측정을 위하여 각각 1개씩의 다이얼 게이지를 설치하였다. 하중은 재하단의 철근 미끄러짐(slip)이 0.25mm, 가력 반대편의 철근 미끄러짐이 0.051mm까지 측정될 때까지 하중 조절로 그 다음은 변위조절 방식으로 각각의 하중단계마다 측정하였으며 임계 미끄러짐(critical slip)이후 시험체가 파괴에 이르기까지 가력하였다. 초기의 하중은 약 500(kg/분)씩 증가시키며 단계별로 재하하였다. 실험체 설치상황은 그림 2에 나타나 있다.

3. 실험결과

3.1 일반적 파괴양상

부착파괴는 두가지 형태^{9),10)}를 나타내는데 쪼개짐 파괴(splitting failure)는 콘크리트의 피복이 쐐기작용(wedge action)에 의하여 맞물림 작용력을 잃어 균열이 발생하는 파괴이며, 뽑힘파괴(pull-out failure)는 철근마디 앞부분의 콘크리트가 파괴되어 철근이 뽑혀나오는 파괴형태를 보인다. 하중의 재하에 따라 최초의 균열은 최대 하중에 근접하였을 때 재하단의 철근부위에서 발생하여 철근의 매설위치를 따라 실험체의 윗면과 재하면의 양옆으로 진전하였으며 이후 최대하중에서 급작스런 파괴양상을 보였다. 따라서 하중재하 단계에 따른 균열의 진전 추이를 일정하게 관찰하기는 어려웠다. 콘크리트의 강도가 상부영역 즉, 초고강도($f_c=904\text{kg/cm}^2$)일 때에는 부착응력이 크게 증가하여 일부 실험체의 경우 부착파괴가 아닌 철근이 절단되는 현상을 보였다.

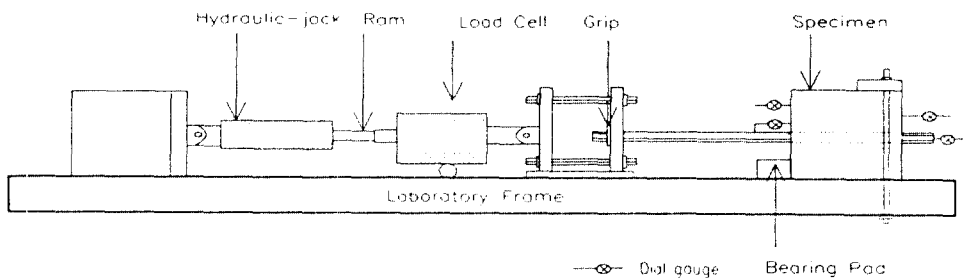


그림 2 실험체 설치상황

3.2 부착응력의 산정

철근과 콘크리트 사이의 부착응력(μ)의 산정은 하중재하시 철근에 발생하는 응력(f_b)으로부터 계산되거나 재하된 하중(P)을 부착면적으로 나누어 계산된다. 즉,

$$\mu = A_b f_b / \Sigma_o L, \quad \mu = P / \Sigma_o L$$

(Σ_o : 철근의 주장, L : 부착길이)

본 실험에서는 철근의 매설길이에 따라 응력이 일정하다는 가정하에 철근에 변형 계이저를 부착하지 않았으므로 최대하중에 의한 부착응력의 산정식을 적용하였다. ASTM의 규정에 의하면 철근이 인장력을 받을 때 재하단 철근의 미끄러짐(slip)이 0.25mm 발생하였을 때와 자유단의 미끄러짐이 0.051mm 일어났을 때를 임계 미끄러짐(critical slip)으로 보고 그 때의 응력을 임계부착응력(critical bond stress)으로 산정한다. 미끄러짐이 0.25mm를 초과하면 구조체의 사용성 측면에서 피해의 기대치가 너무 크므로¹¹⁾ 이 값을 수용 가능한 한계치로 설정한 것이다. 따라서 본 실험에서는 최대 하중시와 재하단의 철근 미끄러짐이 0.25mm 발생하였을 때의 응력을 각 변수에 따라 비교 검토 하였다. 최대 부착응력의 산정은 ACI 318-89 12.2절의 정착길이 산정식인 다음의 두 식에 의하였으며, 콘크리트 압축강도의 상한선(700kg/cm²)은 고려하지 않았다.

$$l_{db} = 0.02 A_b f_y \sqrt{f'_c} (\text{mm}) \Rightarrow \mu = 5.35 \sqrt{f'_c} / d_b \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$l_{db} = 3 d_b f_y / 8 \sqrt{f'_c} (\text{mm}) \Rightarrow \mu = 2.204 \sqrt{f'_c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

3.3 부착응력과 미끄러짐(slip)의 관계

철근의 미끄러짐은 화학적 부착력이 더이상 부착에 영향을 주지 못하고 마찰의 단계로 넘어갈 때 크게 증가하기 시작하며(재하단의 미끄러짐이 0.25mm 발생하는 단계) 이후 미끄러짐이 급격히 증가하는 것으로 알려져 있으며, 본 실험에서도 유사한 응력-미끄러짐 양상을 보였으나 각 변수별로 임계미끄러짐이 일어나는 단계는 일정하지 않은 것으로 나타났다. 그림 3의 (a)~(b)에 철근의 미끄러짐과 응력의 관계가 나타나 있다.

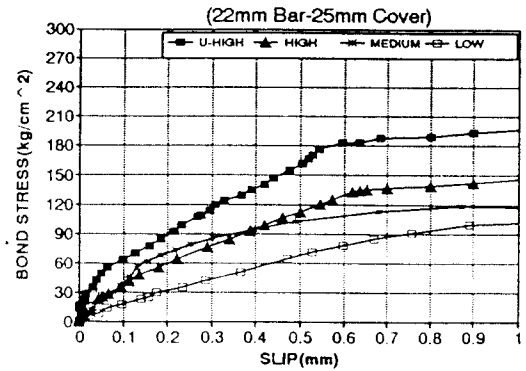


그림 3(a) 부착응력-변위 관계

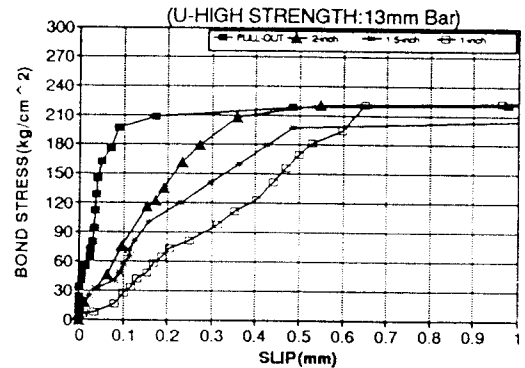


그림 3(b) 부착응력-변위 관계

3.4 콘크리트 압축강도의 영향

철근의 직경과 콘크리트의 피복두께가 일정할 때 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 최대 부착응력과 임계미끄러짐(critical slip)이 발생하는 순간의 부착응력은 강도증가에 따라 함께 증가하는 양상을 보였으며 그림 4에 압축강도에 따른 최대부착응력이 비교되어 있다.

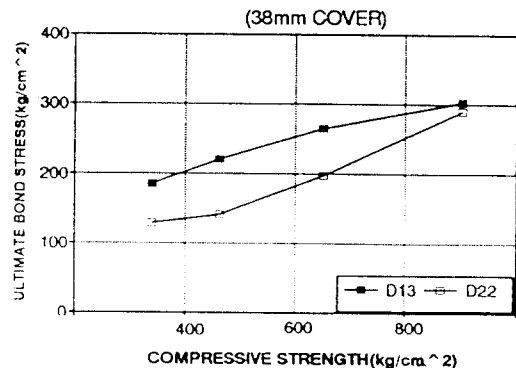


그림 4 최대 부착응력-압축강도 관계

3.5 콘크리트 피복두께의 영향

콘크리트 피복두께의 변화에 따른 부착응력은 피복두께가 증가함에 따라 최대부착 응력 및 임계 부착응력이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 콘크리트의 압축강도가 고강도와 초고강도 영역으로 갈수록 피복두께는 최대 부착응력에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 그리고 ACI 318-89에 규정된 피복두께 40mm와 비교하여 볼 때 강도 증가에 따른 최대 부착응력 비교시 모든 변수의 피복두께에서 실험결과가 2.0~4.2배 크게 나타났다. 그림 5와 표 5에 실험결과가 비교되어 있다.

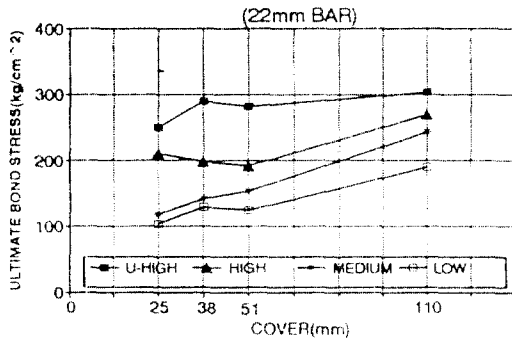


그림 5 최대부착응력-피복두께관계

표 5 각 실험체의 실험결과

Specimen	f'c	f'sp	μ _{ac}	μ _{0.25}	μ _{ult}	μ _{ult} μ _{ac}	Failure Mode	Specimen	f'c	f'sp	μ _{ac}	μ _{0.25}	μ _{ult}	μ _{ult} μ _{ac}	Failure Mode
SLA-1	340	32.4	50.80	88.6	176.6	3.4	P*	SHB-1.5	650	50.7	70.24	85.1	198.1	2.8	S
SLA-1.5				108.4	184.9	3.6	P	SHB-2				46.2	190.9	2.7	S
SLA-2				109.9	216.1	4.2	S**	SUHA-1				98.3	315.2	3.8	S
SLB-1				37.3	103.7	2.0	S	SUHA-1.5				126.4	302.4	3.6	Y***
SLB-1.5				63.7	129.0	2.5	S	SUHA-2				170.0	304.8	3.6	Y
SLB-2				36.1	124.0	2.4	S	SUHB-1				103.2	250.0	3.0	S
SMA-1	460	40.8	59.09	36.8	142.2	2.4	P	SUHB-1.5	904	56.1	82.83	105.0	289.5	3.4	S
SMA-1.5				101.3	220.5	3.7	S	SUHB-2				42.4	281.6	3.4	S
SMA-2				87.9	180.9	3.0	P	PLA				114.9	176.6	3.4	P
SMB-1				78.5	118.6	2.0	S	PLB				60.4	190.1	3.7	P
SMB-1.5				56.6	141.3	2.3	S	PMA				48.1	200.6	3.3	P
SMB-2				33.6	154.0	2.6	S	PMB				39.3	243.5	4.1	S
SHA-1	650	50.7	70.24	75.2	241.3	3.4	S	PHA	904	56.1	82.83	190.9	296.9	4.2	P
SHA-1.5				95.2	264.5	3.7	P	PHB				72.4	269.8	3.8	P
SHA-2				63.9	281.3	4.0	P	PUHA				211.0	308.3	3.7	P
SHB-1				68.9	210.6	2.9	S	PUHB				128.3	302.7	3.6	Y

* P : pull-out failure, ** S : splitting failure, *** Y : bar failure

3.6 철근 직경의 영향

철근의 직경에 따른 부착응력의 비교에서 철근의 직경이 D13일때 D22인 경우보다 큰 임계부착 응력 및 최대부착응력을 나타냈으며, 철근의 직경은 고강도일 경우보다 저강도일때 최대 부착응력에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 철근직경에 따른 부착응력이 그림 6에 비교되어 있다.

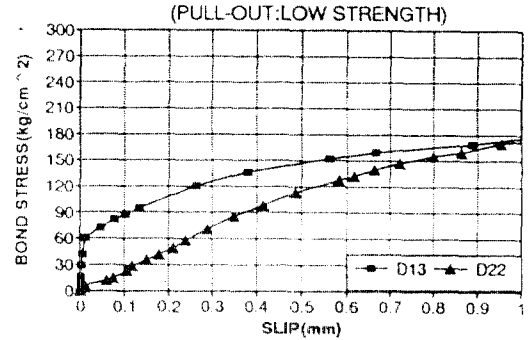


그림 6 최대부착응력-철근직경 관계

3.7 기존 ACI식과의 비교

ACI 318-89에 의한 최대 부착응력과 실험결과를 비교하여 볼 때 ACI식에 의한 부착응력이 충분한 안전치를 확보하고 있는 것으로 나타났으며 각 실험체에 대한 결과는 표 5에 요약되어 있다.

3.8 회귀분석에 의한 제안식

실험결과를 토대로 하여 콘크리트 압축강도를 독립변수로 하고 응력을 매개변수로 하여 회귀분석한 결과, 콘크리트의 압축강도가 주어질 때 부착응력은 다음의 식으로 예측 가능하다.

$$\mu = 0.21f'_c + 121.9 \quad (\text{Err. : } 0.022, R : 4.0)$$

(pull - out test ; D22mm철근)

$$\mu = 0.28f'_c + 6.0 \quad (\text{Err. : } 0.048, R : 4.0)$$

(splitting test ; D22mm철근)

회귀분석에서 콘크리트의 압축강도를 실험변수 범위내로 제한하였고, 제안식에는 안전율이 고려되지 않았다. 따라서 압축강도가 주어질 때 회귀식에 의하여 최대 부착응력의 예측이 가능하다. 실험결과와 회귀식, 그리고 ACI 318-89에 의한 최대부착응력의 비교가 그림 7에 나타나 있다.

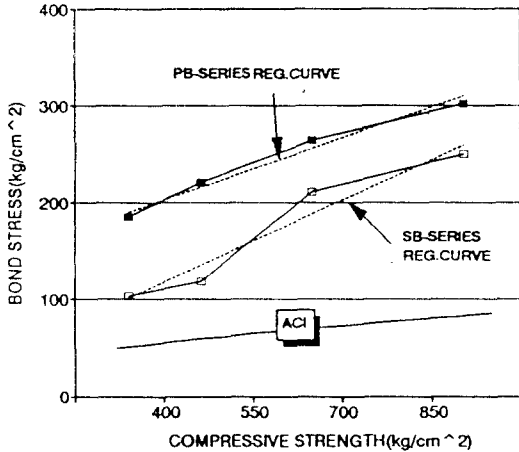


그림 7 실험결과, 회귀식, ACI식에 의한 최대부착응력 비교

4. 결론

콘크리트의 압축강도, 철근의 직경, 콘크리트 피복두께를 변수로 하여 콘크리트에 매설된 철근의 부착성능 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 콘크리트의 압축강도가 약 2.7배 증가할 때 최대 부착응력은 1.8~2.3배 증가하였다.
2. 철근의 직경이 클 때 최대 부착응력은 감소하는 현상을 보였으며, 특히 저강도영역에서 철근직경의 영향이 큰 것으로 나타났다. $f'_c = 340 \text{ kg/cm}^2$ 일때 D13이 D22보다 약 60% 높게 나타났다.
3. $f'_c = 340 \text{ kg/cm}^2$ 일때 매립된 철근위의 피복두

께가 51mm 인 경우 25mm에 비하여 약 21% 높게 나타났으며, $f'_c = 460 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우에는 약 28% 높게 나타났다. 그러나 초고강도 영역에서는 피복두께의 영향이 크게 나타나지 않았다.

4. 콘크리트의 압축강도가 증가할 수록 파괴모드는 취성적인 경향을 보였다.
5. 기존의 ACI 318-89의 최대 부착응력과 비교하여 볼 때 실험에 의한 최대 부착응력이 약 2.0~4.2배 높게 나타났다.
6. 실험자료를 회귀분석하여 콘크리트 압축강도가 주어질 때 최대 부착응력을 추정하는 것이 가능하였다.

참고 문헌

1. 대한건축학회, "철근콘크리트 구조계산 기준 및 해설", 1994.
2. ACI Committee 318-89, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", American Concrete Institute.
3. Atorod Azizinamini, Mark Stark, John J. Roller, and S.K. Ghosh, "Bond Performance of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete", ACI Structural Journal, Sep.-Oct. 1993, pp. 554-561.
4. Craig R. Clark and David W. Johnston, "Early Loading Effects on Bond Strength", ACI Journal, Nov.-Dec. 1983, pp. 532-539.
5. Homayoun H. Abrishami and Denis Mitchell, "Simulation of uniform Bond Stress", ACI Materials Journal, March-April 1992, pp. 161-168.
6. L. Javier Malvar, "Bond of Reinforcement Under Controlled Confinement", ACI Materials Journal, Nov.-Dec. 1992, pp. 593-601.
7. David Drawin, Steven L. McCabe, Emmanuel K. Idun, and Steven P. Schoenekase, "Development Length Criteria: Bars Not Confined by Transverse Reinforcement", ACI Structural Journal, Nov.-Dec. 1992, pp. 709-720.
8. Wisam A.K. Altowaiji, David Darwin, and Rex C. Donahey, "Bond of Reinforcement to Revibrated Concrete", ACI Journal, Nov. - Dec. 1986, pp. 1035-1042.
9. Keivan Noghabai, Ulf Ohlsson and Thomas Olofsson, "Bond Properties of High Strength Concrete", High-Strength Concrete 1993 Proceedings, 20-24 June Lillehammer NORWAY, pp. 1169-1176.
10. LeRoy A. Lutz, S. Ali Mirza, and Narendra K. Gosain, "Changes to and Applications of Development and Lap Splice Length Provisions for bars in Tension (ACI 318-89)", ACI Structural Journal, Jul.-Aug. 1993, pp. 393-401.
11. Avi Mor, "Steel-Concrete Bond in High-Strength Lightweight Concrete", ACI Materials Journal, Jan.-Feb. 1992, pp. 76-82.