

측압을 받는 철근의 부착거동

Bond Behavior of Reinforcing Bars Subject to Lateral Pressure

김 강 수* 김 상 식**
Kim, Kang Su Kim, Sang Sik

ABSTRACT

In this study the influence of the lateral pressure on bond behavior of reinforcing bars has been investigated experimentally. A total of 36 specimens has been tested at the laboratory. The tests have been carried out for the uniaxial and biaxial pressures of the intensities of 0, 5, 10, 20 and 40 kg/cm². The compressive strengths of the specimens are either 360 or 520 kg/cm², and two kinds of bars, round and deformed, have been used.

Based on the test results, linear regression equations have been proposed, and the comparisons between test results and the regression calculations have been made.

1. 머리말

철근과 콘크리트의 부착거동은 철근의 형상, 지름, 피복두께, 간격, 콘크리트의 압축강도 및 측압 등의 요인에 의하여 좌우된다. 철근콘크리트 구조물에서는 단순보나 연속보의 지점, 깊은보, 기둥이나 벽체와 슬래브의 접합부, 파일 캡 등에서 많은 부재가 측압을 받는 상태로 설계 시공되며, 이러한 부재에서 한 방향 혹은 두 방향으로 작용하는 측압은 철근과 콘크리트의 부착력을 크게 증가시킨다.

철근의 부착에 영향을 끼치는 측압의 효과에 대하여서는 Untrauer 와 Henry⁽¹⁾ 등에 의하여 많은 연구가 이루어져왔으나, 지금까지의 연구는 측압이 한 방향으로 작용하

는 경우가 대부분이고 두 방향으로 측압을 받는 경우에 대하여는 많은 연구가 이루어지지 않고 있으며, 실제로 설계기준에 측압의 효과는 반영되지 않고 있다.

따라서, 이 연구에서는 측압을 받는 철근과 콘크리트의 부착거동에 대한 기초 연구로서, 한 방향 및 두 방향으로 작용하는 측압과 콘크리트 압축강도, 철근의 종류를 주요 변수로 부착실험을 하였으며, 그 결과에 대한 회귀 분석식을 제안하고 있다.

2. 시험체 및 시험장치

2.1 시험체 계획

시험체는 미국재료시험기준(ASTM C234)의 표준 인발 부착실험에 따라 그림 1과 같이 15 cm × 15 cm × 15 cm의 블록형태로 모두 36개를 제작하였다. 시험체의 제작에는 치수의 정확성과 면의 평활성을

* 인하대 대학원 건축공학과 석사과정

** 정희원, 인하대 건축공학과 교수

유지하기 위하여 강제 거푸집이 사용되었으며, 철근의 항복을 피하고 콘크리트의 부착파괴를 유도하기 위하여 일본재료학회(JMC)규준에 정한 바와 같이 철근의 매립 길이를 $4d_b$ 인 10 cm로 조절하였다. 매립 철근은 SD40재질의 D25와 이와 유사한 SM45C 재질의 $\phi 25$ 이며, 이형철근의 매립 길이 10 cm 내에는 6개의 리브가 매립되도록 하였다. 매립철근의 항복강도와 인장강도 및 탄성계수는 표 1에 나타낸 바와 같다. 강도별 콘크리트의 배합비는 표 2와 같고, 콘크리트의 탄성계수는 F360은 $2.74 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, F520은 $2.57 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 로 측정되었으며, 굵은 골재는 지름 25 mm 이하의 쇄석이 사용되었다. 시험체는 표 3에 보이는 바와 같이 네 자리의 기호로 표시되어 있다. 첫째자리는 콘크리트의 압축강도로 A, B는 각각 360, 520 kg/cm^2 의 압축강도를 가지며, 둘째자리는 철근의 종류를 나타내는 기호로 X는 $\phi 25$, Y는 D25를 나타낸다. 셋째자리는 시험체 옆면에 가해지는 축압의 수를 가리키는 것으로 O는 축압이 없는 경우, U는 한 방향 축압을 받는 경우, V는 두 방향 축압을 받는 경우를 나타내며, 넷째자리는 시험체면에 가해진 압축응력을 나타내는 것으로서 0은 축압이 없고 1, 2, 4, 8은 각각 5, 10, 20, 40 kg/cm^2 의 축압이 작용하는 경우를 의미한다.

표 1. 철근의 인장강도 실험결과

구분 종류	탄성계수 (kg/cm^2)	항복강도 (kg/cm^2)	항복 변형도 ($\times 10^{-6}$)	인장강도 (kg/cm^2)
$\phi 25$	2.04×10^6	4,417	2,165	6,983
D25	2.46×10^6	4,406	1,792	7,406

표 2. 콘크리트 배합비

압축강도 (kg/cm^2)	물 (kg/m^3)	시멘트 (kg/m^3)	모래 (kg/m^3)	자갈 (kg/m^3)	혼화제* (kg/m^3)
360	182.3	371	822	897	1.11
520	175.8	643	658	853	1.92

*마이타 150

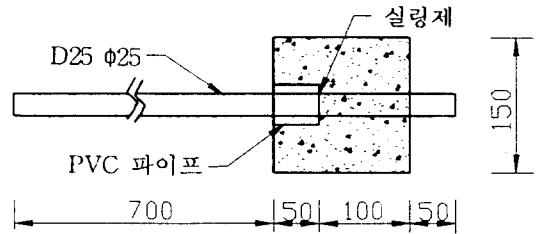


그림 1 시험체의 형태

표 3. 시험체의 형태

시험체	콘크리트 압축강도 (kg/cm^2)	철근 종류	가로축압 (kg/cm^2)	세로축압 (kg/cm^2)
AXO0	360	$\phi 25$	0	0
AXU1	"	"	5	0
AXU2	"	"	10	0
AXU4	"	"	20	0
AXU8	"	"	40	0
AXV1	360	$\phi 25$	5	5
AXV2	"	"	10	10
AXV4	"	"	20	20
AXV8	"	"	40	40
AYO0	360	D25	0	0
AYU1	"	"	5	0
AYU2	"	"	10	0
AYU4	"	"	20	0
AYU8	"	"	40	0
AYV1	360	D25	5	5
AYV2	"	"	10	10
AYV4	"	"	20	20
AYV8	"	"	40	40
BXO0	520	$\phi 25$	0	0
BXU1	"	"	5	0
BXU2	"	"	10	0
BXU4	"	"	20	0
BXU8	"	"	40	0
BXV1	520	$\phi 25$	5	5
BXV2	"	"	10	10
BXV4	"	"	20	20
BXV8	"	"	40	40
BYO0	520	D25	0	0
BYU1	"	"	5	0
BYU2	"	"	10	0
BYU4	"	"	20	0
BYU8	"	"	40	0
BYV1	520	D25	5	5
BYV2	"	"	10	10
BYV4	"	"	20	20
BYV8	"	"	40	40

2.2 실험방법 및 실험장치

시험체의 양 면에 가해지는 측압은 그림 2, 3과 같이 특수 제작된 실험장치를 이용하여 가력하였다. 이 측압 가력장치에는 50 톤 용량의 단동식 오일잭과 압축용 로드셀이 장착되어 있으며, 오일펌프를 이용하여 오일잭에 하중이 가해지면, 로드셀에서 가해진 하중을 자동변형을 측정기를 통하여 자동적으로 컴퓨터에 수록되도록 하였다. 시험체와 로드셀 및 오일잭 사이에는 두께 22 mm, 크기 150 mm × 160 mm인 가력판을 설치하고 힌지 모양의 로드셀을 사용하여 측압 가력시 하중이 시험체 전 면적에 분포되도록 하였다. 또한 이 측압 가력장치의 가력프레임의 뒷 면에는 스티프너로 보강하여 측압에 견딜 수 있도록 하였고, 두 방향으로 측압을 가할 때 두 방향의 하중이 서로 독립적으로 작용하도록 정밀하게 설계되었으며, 시험체의 하중 단 면에는 힌지를 설치하여 부착철근에 인발하중이 작용할 때 생길 수 있는 편심의 영향을 최소화 할 수 있도록 하였다. 부착철근에 직접 작용하는 인발하중은 200톤 용량 만능시험기의 척을 이용하여 시험체에서 돌출된 철근을 고정한 후, 상부 가력판을 이용하여 인장력을 매회 0.5톤의 증분으로 분당 약 2톤의 재하속도로 부착변위가 약 7 - 8 mm에 이르기까지 가력하면서 부착변위를 측정하였으며, 시험체의 파괴형태를 조사하였다. 변위 측정에는 자유단 및 하중단에 각각 2개씩의 LVDT를 사용하여 1/1000 mm까지 측정하였다.

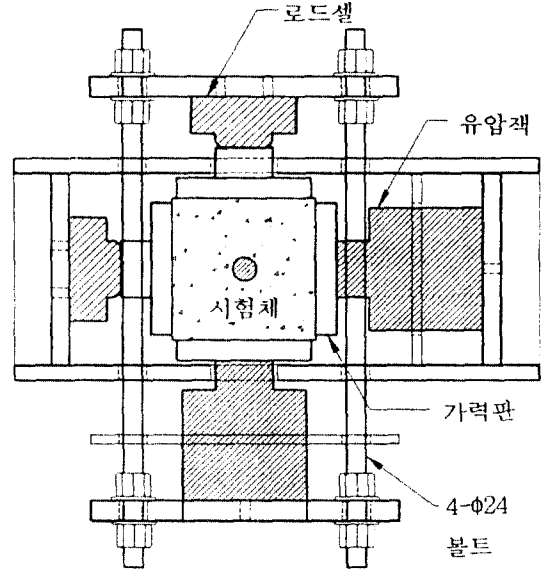


그림 2. 가력 및 측정장치 (평면)

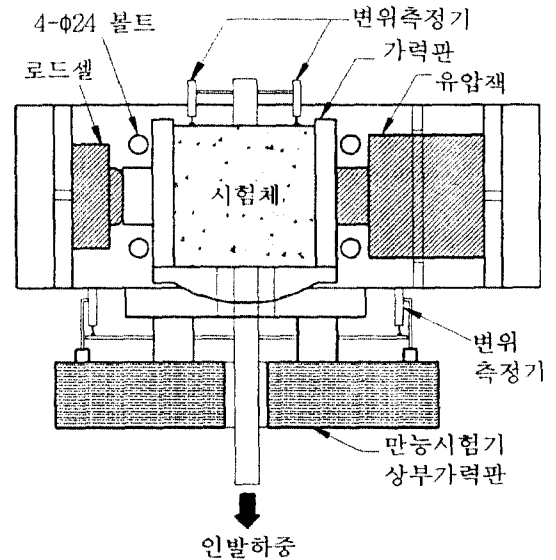


그림 3. 가력 및 측정장치 (단면)

3. 실험결과

3.1 부착응력-변위 관계

부착실험에서 측정된 각 시험체의 최대 부착응력 및 변위와 변위 0.1 mm에서의 부착응력 등을 표 4에 요약하여 나타냈으며, 부착응력-변위 관계는 그림 4와 같다.

파괴시 시험체의 부착응력은 예상한 바와 같이 측압의 증가에 따라 큰 값으로 나

타나고 있으며, 특히 이축 측압을 받는 시험체는 그 증가폭이 최고 110 퍼센트에 달했다. 또한, 측압이 없는 시험체는 부착-변위 관계가 매우 선형적이고 낮은 변위에서 파괴에 이르지만, 일축 혹은 이축 측압을 받는 U, V계열 시험체는 측압이 증가함에 따라 파괴시 더욱 높은 변위를 동반하

였다. D25 철근을 사용한 Y계열 시험체의 경우 변위 0.1 mm에서의 부착응력은 콘크리트 강도와 축압이 증가함에 따라서 대체로 높아지고 있으나 큰 산발도를 보였다. 그러나, $\phi 25$ 를 사용한 X계열 시험체의 경우는 파괴시 변위가 0.01 - 0.05 mm로 거의 변위가 없으며, 이는 원형철근의 부착저항이 점착력과 매우 낮은 마찰력으로 인한 것임을 잘 나타내주고 있다.

3.2 균열 및 파괴 형태

1) X계열 시험체

$\phi 25$ 원형철근을 사용한 X계열 시험체에서는 균열을 찾아볼 수 없었다. 원형철근에 존재하는 미세공에 충전된 시멘트 페이스트의 점착력과 미소한 전단저항이 낮은 인장력하에서 파괴되면 콘크리트와 철근 사이에는 곧바로 미끄럼 작용이 일어나며

표 4. 부착응력과 변위

시험체	U _{0.1} (kg/cm ²)	U _{ult} (kg/cm ²)	변위 (mm)	시험체	U _{0.1} (kg/cm ²)	U _{ult} (kg/cm ²)	변위 (mm)
AXO0	-	26	0.009	BXO0	-	38	0.011
AXU1	-	27	0.011	BXU1	-	40	0.010
AXU2	-	34	0.009	BXU2	-	43	0.010
AXU4	-	45	0.009	BXU4	-	51	0.018
AXU8	-	50	0.018	BXU8	-	58	0.015
AXV1	-	29	0.009	BXV1	-	45	0.012
AXV2	-	38	0.051	BXV2	-	50	0.023
AXV4	-	49	0.027	BXV4	-	54	0.013
AXV8	-	55	0.036	BXV8	-	74	0.013
AYO0	111	126	0.151	BYO0	121	154	0.199
AYU1	102	127	0.215	BYU1	100	161	0.655
AYU2	135	141	0.130	BYU2	109	174	0.419
AYU4	128	159	0.244	BYU4	111	180	0.418
AYU8	119	195	0.586	BYU8	142	216	0.868
AYV1	113	147	0.346	BYV1	116	176	1.204
AYV2	144	159	0.450	BYV2	138	188	0.322
AYV4	124	186	1.094	BYV4	123	240	1.115
AYV8	141	268	1.796	BYV8	246	312	1.230

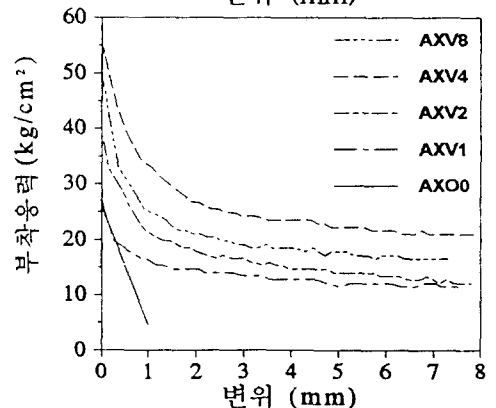
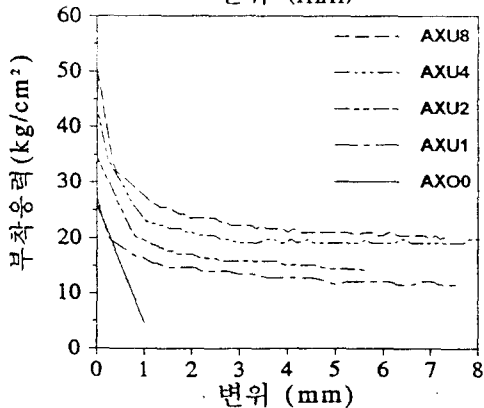
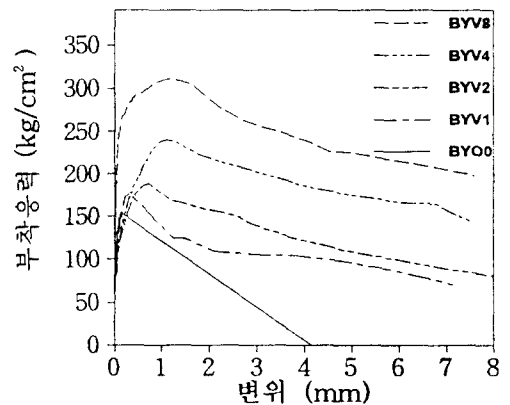
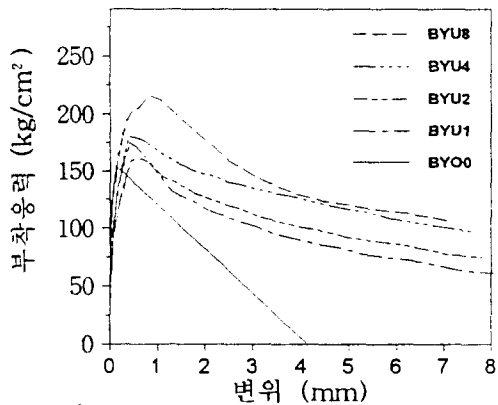


그림 4. 부착응력-변위 곡선

그 이후의 부착작용은 전적으로 마찰작용에 의존하게 되는데, 이형철근에서 나타나는 리브의 썬기작용으로 인한 방사성분의 지압력이 원형철근의 경우 나타나지 않기 때문에 균열이 없이 뽑힘파괴(pull-out failure)에 이르게 된다.

2) Y계열 시험체

D25 를 사용한 Y계열 시험체에서는 시험체의 하중단 및 자유단 면에 철근을 중심으로 방사균열이 뚜렷이 나타났다. 축압이 없는 O계열 시험체는 방사균열이 시험체의 옆면에 이룬후 쪼개지는 스플릿팅 파괴(splitting failure)를 보였으며, 매우 갑작스럽게 파괴되는 취성적인 거동을 보였다. 따라서 이 경우에는 쪼개진 콘크리트 시험체에 철근의 리브 자국이 선명하게 남아 있음을 볼 수 있다.

일축 및 이축 압축력을 받는 시험체는 대체로 비슷한 파괴양상을 보이나 이축 압축하에서는 더 높은 변위가 발생할 때까지 하중의 증가를 보이며, 최고하중 이후에도 일축 압축하의 시험체에 비해 더욱 완만한 부착-변위 곡선을 가진다. 축압이 높은 경우에는 뽑힘파괴(pull-out failure)의 양상이 가까우며, 시험체를 쪼개어보면 철근이 매립된 위치에서 리브와 콘크리트의 썬기작용(wedging action)으로 인하여 리브자국이 거의 사라졌거나 흔적만 남아 있을 정도로 파쇄되어 있다. 또한 이축 축압을 받는 V계열 시험체는 하중단 및 자유단 면에 네 방향으로 면 끝까지 혹은 조금 못미치게 방사균열이 나타나 있으며, 일축 축압을 받는 U계열 시험체는 가력면에 수직으로 시험체 옆면에 까지 균열이 전파되었다.

4. 실험결과의 분석 및 고찰

4.1 축압의 영향

그림 5와 같이 X, Y 계열 모두 축압의 증가에 따라 부착응력은 크게 증가하고 있다. 축압이 한 방향으로 작용하는 U계열 시험체에 비해 축압이 두 방향으로 작용하는 V계열 시험체의 경우에 부착응력의 증가

폭은 매우 크며, 대체로 선형적인 증가를 보이고 있다. 축압이 없는 시험체에 비해 XV 및 YV 계열 시험체의 경우 모두 부착응력이 최고 110 %까지 증가했음을 알 수 있다. 그러나 최대 부착응력에 달했을 때 대변형이 동반되었음을 잘 인지해야만 한다.

그림 6는 한 방향으로 축압을 받는 YU 계열 시험체에 대한 부착응력과 축압의 관계를 나타낸 것으로 u_{ult} 는 파괴시 최대 부착응력, $\sqrt{f_c'}$ 는 콘크리트의 압축강도의 제곱근, σ_1 은 축압을 나타낸다. 그림 6에서 실선은 Untrauer 와 Henry의 제안식

$$u_{ult} = (4.76 + 0.45\sqrt{\sigma_1})\sqrt{f_c'} \quad (1)$$

에 의한 곡선이며, 이 실험에 의한 부착응력-축압은 Untrauer 와 Henry의 제안식에 비하여 다소 높게 나타나고 있으며, 축압에 선형적인 비례를 보이고 있다.

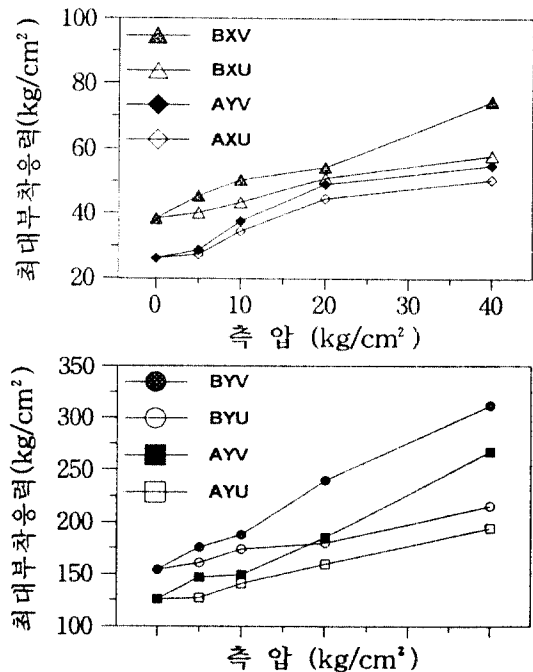


그림 5. 축압의 영향에 대한 그래프

4.2 철근 종류에 따른 비교

D25철근을 사용한 Y계열 시험체는 $\phi 25$ 철근을 사용한 X계열 시험체에 비해 약 4 - 5 배의 부착응력을 가진다. 축압의 크기

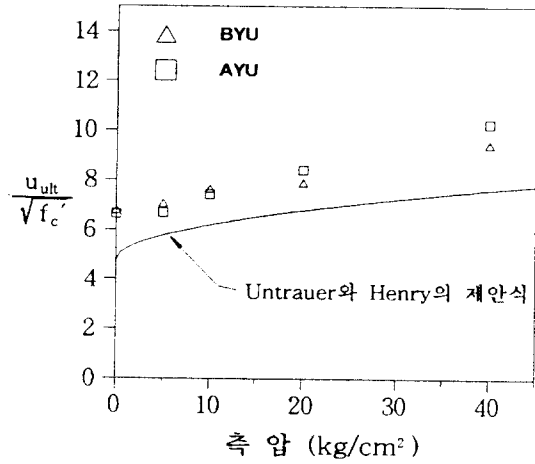


그림 6. 부착응력-축압 곡선

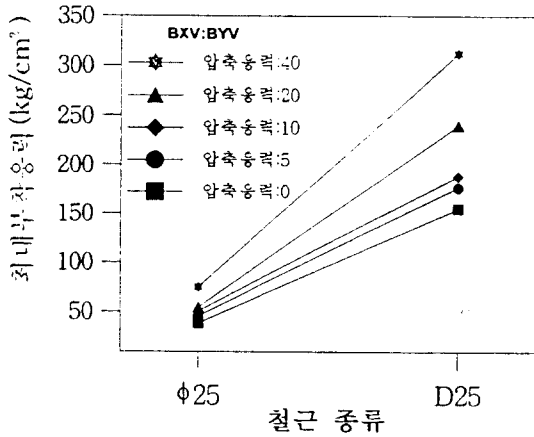


그림 7. 철근 종류에 따른 비교

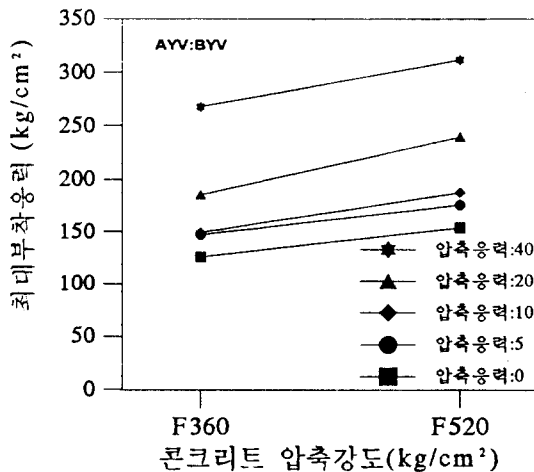


그림 8. 콘크리트 강도에 따른 비교

나 강도에 무관하게 그 차이는 거의 같은 비율을 보이며, 이것은 철근의 매립길이 10 cm내에 있는 6개의 리브가 4 - 5배의 부착 증가를 가져오는 효과를 정량적으로 표현해주고 있다. 그림 7은 BXV와 BYV계열의 최대 부착응력을 비교한 그래프이다.

4.3 콘크리트 강도에 따른 비교

최대 부착응력은 콘크리트 압축강도의 제곱근, 즉 콘크리트의 인장강도에 비례한다는 사실은 기존의 연구결과에 의해 잘 나타나 있다. 그림 8은 AYV와 BYV계열의 콘크리트 강도에 따른 최대 부착응력을 비교한 것이며, 축압의 크기에 관계없이 일정한 기울기의 증가폭을 가지는 것을 알 수 있다.

4.4 회귀분석

원형철근과 콘크리트의 부착기구는 점착력과 마찰에 의하여 이루어지며, 이형철근의 경우에는 여기에 철근 리브와 콘크리트의 기계적인 맞물림 작용이 추가되어 나타난다. 이러한 부착기구에 영향을 미치는 여러가지 요인중에서 콘크리트의 압축강도에 의한 부착응력은 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 알려져 있다. 이 연구에서 실험된 모든 계열의 시험체에 대하여 최대 부착응력을 $\sqrt{f'_c}$ 로 나눈 값과 축압의 합을 $\sqrt{f'_c}$ 로 나눈 값을 비교해 보면 그림 9에 나타난 바와 같이 거의 선형 증가를 보인다.

phi 25를 사용한 X계열 시험체와 D25를 사용한 Y계열 시험체를 회귀분석한 결과 축압이 작용하는 상태에서 철근과 콘크리트의 부착응력에 대한 회귀 방정식은 각각

$$\phi 25 : u_{ult} = 1.66\sqrt{f'_c} + 0.40I_1(\sigma) \quad (2)$$

$$D25 : u_{ult} = 6.59\sqrt{f'_c} + 1.83I_1(\sigma) \quad (3)$$

으로 유도되었다. 이 식에서 f'_c 는 콘크리트의 압축강도, $I_1(\sigma)$ 는 두방향의 축압의 합이며, 그림 9는 시험체의 최대 부착응

력과 회귀식 (2), (3)의 값을 비교하여 나타낸 것이다. 식 (2)의 측압에 대한 상수 0.4는 원형철근의 매끈한 면과 콘크리트와의 마찰계수를 의미하는 것으로 해석된다. 또한 이형철근의 경우에도 큰 범위에서 극한 부착저항은 쿨롱 마찰형태(The Coulomb Friction Type)로 나타나며, 따라서 식 (3)의 1.83은 이형철근의 리브와 콘크리트의 마찰계수로 해석할 수 있다.

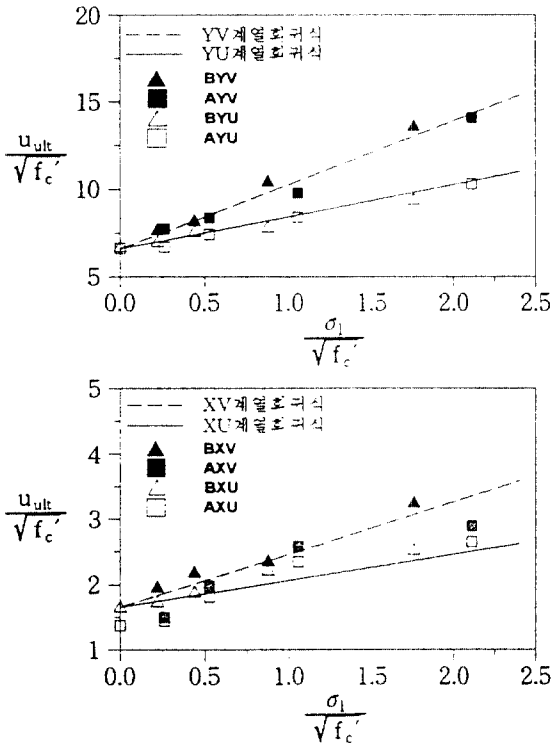


그림 8. 실험값과 회귀식값의 비교 그래프

5. 맺음말

이 연구는 철근의 부착강도에 대한 기초적 연구로서 ASTM 및 JMC 규준에 의한 표준 인발 시험체에 철근의 종류, 콘크리트 압축강도 및 측압을 변수로 하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 측압이 증가함에 따라 부착강도는 증가하며, 그 증가량은 일축 측압이 작용하는 경우 측압에 비례하고, 동일한 측압이 두방향으로 작용하는 경우 측압의

합에 거의 선형적으로 비례한다.

- (2) 측압이 증가함에 따라 파괴시 최대 부착응력과 함께 변위도 크게 증가하며, 이때 부착저항은 쿨롱 마찰형태로 나타난다.
- (3) 측압이 0 - 40 kg/cm²의 범위로 가해졌을 때 $\phi 25$ 와 D25를 사용한 시험체 모두 약 110 퍼센트의 부착강도 증가를 보였다.
- (4) 회귀분석 결과 $\phi 25$ 및 D25의 최대 부착강도는 콘크리트의 압축강도에 대하여 각각 $1.66 \sqrt{f'_c}$, $6.59 \sqrt{f'_c}$, 측압에 대하여 각각 $0.4 I_1(\sigma)$, $1.83 I_1(\sigma)$ 의 비례상수로 분석되었다.
- (5) 콘크리트의 압축강도나 측압에 관계없이 D25의 리브 6개는 $\phi 25$ 에 비해 4 - 5배로 동일한 부착응력 증가의 효과를 가진다.

참고 문헌

1. Untrauer, R. E., and Henry, R. L., "Influence of Normal Pressure on Bond Strength," ACI Journal, V. 62, No. 5, May, 1965, pp. 577-586.
2. Robins, P. J., and Standish, I. G., "Effect of Lateral Pressure on Bond of Reinforcing Bars in Concrete," Bond in Concrete, Scotland, Applied Science Pub., Essex, 1982, pp. 262-272.
3. Gambarova, P., and Karakoc, C., "Shear Confinement Interaction at the Bar to Concrete Interface," Bond in Concrete, Scotland, Applied Science Pub., 1982, pp. 82-96.
4. Navaratnarajah, V., and Speare, P. R., "A Theory of Transfer Bond Resistance of Deformed Reinforcing Bars in Concrete under Lateral Pressure," Mag. of Conc. Res., V. 39, No. 140, Sept. 1987, pp. 161-168.
5. Malvar, L. J., "Bond of Reinforcement Under Controlled Confinement," ACI Materials Journal, V. 89, No. 6, Nov.-Dec., 1992, pp. 593-601.