

# 고장력 철근을 사용한 RC부재의 부착특성에 관한 해석 및 실험

## Analysis and Environment on Bond Characteristic of High-Strength Steel RC Members

곽성태<sup>\*</sup>      윤영수<sup>\*\*</sup>      송영철<sup>\*\*\*</sup>      우상균<sup>\*\*\*\*</sup>  
Kwak, Sung Tae    Yoon, Young Soo    Song, Young Chul    Woo, Sang Kyun

### ABSTRACT

This paper presents a bond characteristics of high strength steel reinforced concrete members. High strength steel is what yield strength is higher than that of normal strength steel. So, the amount of flexural steel needed in R.C. members can be decreased. In result, it is expected that the workability and structure quality can improve and man power can minimize. For this purpose, specimens were made and tested with experimental parameters, such as concrete strength, steel diameter and yield strength. The result showed that under same tensile force of steel, in case of substituting normal strength steel with high strength steel, maximum bond stress increased and development length didn't almost change.

In addition, the governing equation of bond and bond stress verse slip relationship were derived and compared with test values such as maximum bond stress, slip and bond stiffness.

### 1. 서론

최근 10여년 동안에 콘크리트 구조물의 비약적인 발전과 더불어 고강도-고성능 콘크리트에 대한 상당히 많은 연구가 진행되어 왔고 고강도 콘크리트를 사용함으로써 얻는 장점 또한 실험적으로 증명되고 있다. 그러나 구조적으로 증대된 콘크리트의 압축력에 상응하는 철근의 인장력에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 또한, 현재 시공에 적용되는 일반강도 철근을 사용하게 되면 고강도 콘크리트를 적용하기 위해서는 과밀한 철근 구조를 갖게 되고 이에 따른 시공성 감소 및 구조물의 품질이 저하되는 문제점을 갖게 된다.

이에 본 연구에서는 고강도 콘크리트의 구조성능 향상을 위한 고장력 철근의 활용에 대해 현재 국내에서 제작되고 있는 고장력 철근을 사용하여 R.C. 부재에서 가장 기본적인 부착특성에 대해 철근의 강도 및 직경, 콘크리트의 강도를 주변수로 하여 각각의 부착응력-변위관계 차이점을 분석하고 부착응력과 철근변위 거동을 정량화하기 위하여 부착에 관한 기본 방정식과 함께 부착응력-철근변위 관계식을 수학적으로 유도하였다.

- \* 정회원, (주)한석엔지니어링 구조부 사원
- \*\* 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수
- \*\*\* 정회원, 한국전력연구원 수석연구원
- \*\*\*\* 정회원, 한국전력연구원 일반연구원

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 기본물성시험

#### 2.1.1 콘크리트

배합강도는 250 kg/cm<sup>2</sup>와 400 kg/cm<sup>2</sup>을 목표로 하였으며 콘크리트 압축강도 시험을 위해 KS F 2405에 따라 150mm×300mm의 공시체를 제작하였다. 또한, 재하시 응력-변형도 곡선을 구하기 위해 공시체 표면에 Strain Gauge를 부착하였다. 압축강도 시험 결과는 Table 1에 나타나 있다.

#### 2.1.2 철근

부착력은 철근마디(rib)와 콘크리트의 지지력 및 골재의 맞물림 작용 등에 크게 영향을 받으며 철근의 마디 형상 및 강도에 의해서 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 사용한 철근은 공칭 직경이 16, 19, 25, 29mm 인 이형철근으로 항복강도가 3000, 5000 kg/cm<sup>2</sup>인 것을 사용하였다. 인장강도 시험 결과는 Table 2에 나타나 있다.

Table 1 Test results of compressive and splitting tensile strength

	Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Modulus of elasticity (×10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup> )
NSC(250kg/cm <sup>2</sup> )	280.11	21.11	2.760
HSC(400kg/cm <sup>2</sup> )	401.78	27.64	2.943

Table 2 Test results of tensile stress of steel

	$\sigma_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_s$ (×10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_y$ (×10 <sup>-6</sup> )	$\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )
D16	3470	1.793	1.935	4830
	6000	2.056	2.918	7200
D25	3550	2.018	1.759	4620
	5720	2.003	2.856	6810
D19	3670	1.937	1.895	5060
D29	3540	2.000	1.77	4820

Table 3 Variables of bond test

Specimen	Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Tensile strength of steel (kg/cm <sup>2</sup> )	Diameter of steel
NA-250	250	3000	D16
NC-250			D25
NA-400	400	3000	D16
NC-400			D25
NB-400			D19
ND-400			D29
HA-400		5000	D16
HC-400			D25

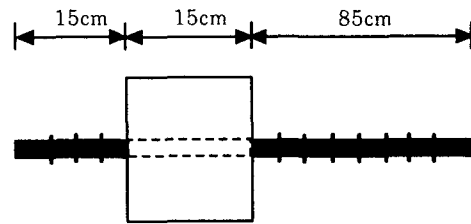


Fig.1 Test specimen

N = Normal strength steel (3000kg/cm<sup>2</sup>)

H = High strength steel (5000kg/cm<sup>2</sup>)

A=D16, B=D19, C=D25, D=D29

250 = Normal strength concrete (250kg/cm<sup>2</sup>)

400 = High strength concrete (400kg/cm<sup>2</sup>)

## 2.2 실험계획 및 방법

본 논문에서는 콘크리트의 압축강도, 철근의 항복강도 그리고 철근의 직경을 변수로 하여 총 24개의 시험체를 제작하였다. 시험 시편의 크기는 KS F 2441의 규정에 따라 150×150×150mm로 하여 각 변수의 평균부착응력을 분석하였으며 시험 시편 모두 쪼개짐 파괴를 유도하여 수학적 모델과 비교해 보았다.

시험체는 U.T.M.에 설치하고 0.5ton마다 슬립량을 측정하고 문힘길이에 따른 부착응력의 차이를 고려하기 위해 철근의 양쪽에 다이얼 게이지를 설치하였다. 시험체 상세 및 변수표는 Fig.1와 Table 3에 나타나 있다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 부착응력-변위관계

각 변수에 따른 부착응력을 정량적으로 산정하고 변수간의 상관관계를 고찰하는데 있어서 부착응력-변위관계는 부재의 성능을 평가하는 지표가 되며 그 시험결과가 Table 4에 나타나 있다.

#### 3.1 콘크리트 압축강도에 따른 관계

본 실험에서 설계압축강도는 250, 400 kg/cm<sup>2</sup>를 목표로 배합, 제작하였고 공시체 시험 결과에서 각각 280, 402 kg/cm<sup>2</sup>로 평균하여 측정되었다.

Fig.2에서 보는 바와 같이 일정한 철근 직경하에서 압축강도가 증가할수록 극한부착응력은 증가하지만 최대변위와 극한부착응력이 발생하는 시점에서의 변위량이 작고 또한 극한부착응력이 발생하기까지의 상승부분과 발생한 후의 하강부분에서의 기울기가 급격해짐을 알 수 있다.

그러므로 콘크리트가 고강도화됨에 따라 부착응력은 증가하고 변위량은 작으나 취성파괴가 발생할 수 있음을 나타내고 있다.

Table 4 Max. bond stress of each specimen

Specimen	Maximum Loading (ton)	Bond area (cm <sup>2</sup> )	Slip at max. bond stress (mm)	Max. bond stress (kg/cm <sup>2</sup> )
NA-250	6.75	75.40	0.31	90.09
NC-250	6.3	117.81	0.20	52.63
NA-400	8.95	75.40	0.27	119.45
NC-400	8.9	117.81	0.19	74.36
NB-400	8.7	89.54	0.28	96.66
ND-400	7.85	136.66	0.12	58.25
HA-400	9.95	75.40	0.065	128.79
HC-400	9.4	117.81	0.064	78.53

#### 3.1.2 철근 직경에 따른 관계

철근 직경에 따른 인발시험은 D16, D19, D25, D29 네가지 종류의 철근을 사용하였으며 콘크리트 강도는 400kg/cm<sup>2</sup>로 일정하게 하였다.

Fig.3에서 보는 바와 같이 철근의 직경이 증가할수록 극한부착응력, 최대변위 및 그 시점에서의 변위량은 감소한다. 또한, 극한부착응력까지의 상승부분의 기울기는 증가하나 하강부분의 기울기는 완만해짐을 알 수 있다.

#### 3.1.3 철근의 항복강도에 따른 관계

동일한 콘크리트의 압축강도와 철근 직경하에 철근의 항복강도에 대한 영향을 비교해 보면 Fig.4과 같이 극한부착응력에 대한 차이는 거의 없었다. 그러나 D16의 경우 3000급 철근의 인장실험 결과 6.9ton에서 항복을 하게 되고 그 결과 부착응력이 85kg/cm<sup>2</sup>일 때부터 철근의 Strain이 증가하여 결국 급격한 슬립량이 발생함으로써 부착응력이 5000급과 비교해 볼 때 저하되는 것으로 나타났다.

또한 고장력 철근의 장점중인 시공성 향상을 위해 3000급 철근을 5000급 철근으로 대체했을 경우에 대해서 비교해 보았다. 비슷한 인장력을 발휘하는 3000급 D19, D29와 5000급 D16, D25의 비교에서 Fig.5에서 보는 바와

같이 5000급을 사용하였을 경우 극한부착응력은 철근의 직경이 감소하여 상당히 증가하였다. 그러나 극한부착응력에 도달 후의 하강부의 기울기가 급격함으로 취성적인 파괴가 나타남을 알 수 있다.

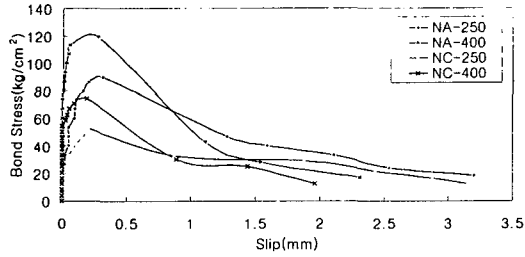


Fig.2 Bond stress-slip relationship according to concrete strength

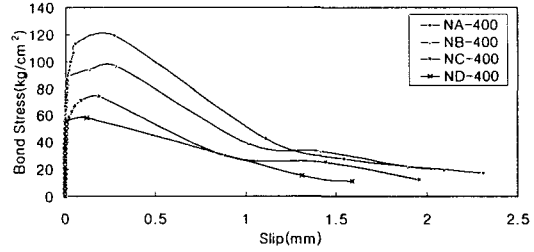


Fig.3 Bond stress-slip relationship according to steel diameter

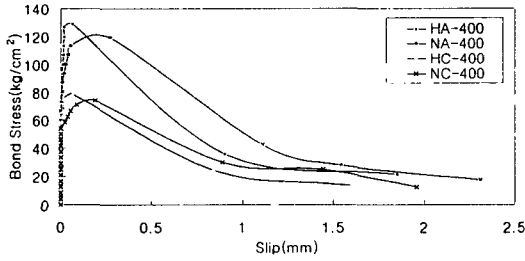


Fig.4 Bond stress-slip relationship according to tensile strength of steel

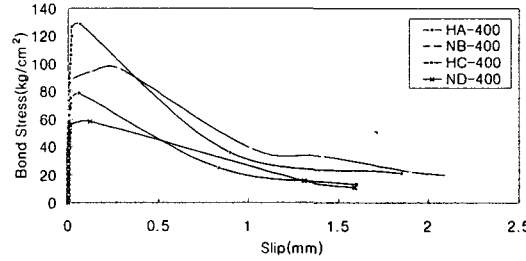


Fig.5 Bond stress-slip relationship according to replacement of steel

#### 4. 부착에 대한 수학적 해석

##### 4.1 부착에 대한 지배방정식

부착응력,  $u$ 와 콘크리트와 철근 사이의 상대변위,  $\delta$  사이의 관계는 상이한 두 재료간의 복잡한 상호 관계를 예측하는데 가장 기본이 된다.

자유물체도로부터 유도된 부착에 대한 지배방정식은 식(1)와 같다.

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} - k_s u = 0 \quad (1)$$

여기에서  $k_s = 4(1 + n\rho)/(d_b E_s)$ 이다.

##### 4.2 쪼개짐 파괴의 수학적 예측식

쪼개짐에 의해 파괴되는 시험체의 거동을 예측하는 수학적 모델이 Fig.6에 나타나 있으며 이로부터 부착응력은 다음과 같이 세구간으로 나타낼 수 있다.

$$u = E_b \delta \quad 0 \leq \delta \leq \delta_{sf} \quad (2)$$

$$u = E_d \delta + E_b \delta_{sf} - E_d \delta_{sf} \quad \delta_{sf} \leq \delta \leq \delta_{sr} \quad (3)$$

$$u = u_{sr} \quad \delta > \delta_{sr} \quad (4)$$

#### 4.2.1 균열전의 거동

상승부의 부착 지배방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} - k_s E_b \delta = 0 \quad 0 \leq \delta \leq \delta_{sf} \quad (2)$$

인장력  $P$ 에 대해서 나타내면 다음과 같다.

$$P = \left[ \frac{2k(e^{k\ell} - e^{-k\ell})}{2 + e^{k\ell} + e^{-k\ell}} \left( \frac{E_s A_s}{1 + n\rho} \right) \right] \delta_{av} \quad (3)$$

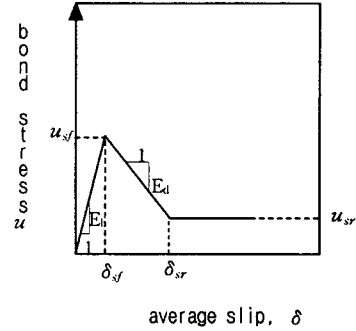


Fig.6 Analysis model of splitting failure

#### 4.2.2 균열후의 거동

하강부의 부착 지배방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} - k_s E_d \delta = k_s E_b \delta_{sf} \left( \frac{E_b}{E_d} - 1 \right) \quad \delta_{sf} \leq \delta \leq \delta_{sr} \quad (4)$$

인장력  $P$ 에 대해서 나타내면 다음과 같다.

$$P = \left[ \frac{-2k \sin(k\ell)}{1 + \cos(k\ell)} \left( \frac{E_s A_s}{1 + n\rho} \right) \right] (\delta_{av} + m) \quad (5)$$

여기에서,  $m = \delta_{sf}(E_b/E_d - 1)$ 이다.

### 4.3 수학적 해석 결과

#### 4.3.1 부착강성

앞에서 말했듯이 쪼개짐 파괴는 상승부와 하강부로 나눌 수 있다.  $E_b$ 는 부착응력-변위관계 곡선에서 최대극한부착응력까지의 상승부 기울기로서 단위변형을 일으키기 위한 평균부착응력의 증가량을 의미하며  $E_d$ 는 하강부의 기울기이며 균열발생 이후의 단위변형을 일으키기 위한 부착응력의 감소량을 말한다.

또 하나의 의미로는 부착강성은 그래프의 기울기로서 취성적인 파괴를 나타내는 척도로서 나타낼 수 있다. 부착강성이 증가하면 단위변형을 일으키기 위한 평균부착응력이 증가하고 그로 인해 최대극한부착응력에 도달하기까지 철근의 슬립이 거의 발생하지 않는 취성적인 파괴양상을 보여준다.

#### 4.3.2 부착응력-변위 관계식

4.2.1과 4.2.2에서 수학적으로 유도한 부착응력-변위 관계식은 Table 6과 같다. Table 6에서의 관계식으로 그래프를 그릴 수 있으며 그 그래프로 실험치와 비교해 본 결과 탄성영역에서는 거의 일치하였으나 탄성영역에 비해 소성부분을 표현하는데 있어서는 미흡하였다. 그 원인으로는 소성영역까지 직선으로 가정했기 때문으로 사료된다.

Table 5 Bond stiffness of each specimen

Specimen	Slip at max. bond stress (mm)	Max. bond stress (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_b$ (kg/cm <sup>2</sup> /mm)	$E_d$ (kg/cm <sup>2</sup> /mm)
NA-250	0.31	90.09	290.06	-44.72
NC-250	0.2	52.63	263.17	-29.93
NA-400	0.27	119.45	442.41	-91.36
NC-400	0.19	74.36	391.35	-63.26
NB-400	0.28	96.66	345.21	-79.14
ND-400	0.12	58.25	485.38	-35.86
HA-400	0.065	128.79	1981.42	-111.09
HC-400	0.064	78.53	1227.08	-69.44

Table 6 Relationship of bond stress-slip

Specimen	Ascending branch	Descending branch
NA-250	$u = 290.06\delta_{av}$	$u = -44.11(\delta_{av} - 2.2460)$
NC-250	$u = 261.99\delta_{av}$	$u = -29.94(\delta_{av} - 1.9588)$
NA-400	$u = 430.55\delta_{av}$	$u = -90.22(\delta_{av} - 1.5775)$
NC-400	$u = 388.77\delta_{av}$	$u = -63.32(\delta_{av} - 1.3655)$
NB-400	$u = 342.59\delta_{av}$	$u = -79.27(\delta_{av} - 1.5014)$
ND-400	$u = 481.69\delta_{av}$	$u = -35.88(\delta_{av} - 1.7442)$
HA-400	$u = 1862.89\delta_{av}$	$u = -109.73(\delta_{av} - 1.2244)$
HC-400	$u = 1202.01\delta_{av}$	$u = -69.52(\delta_{av} - 1.1949)$

## 6. 결론

고장력 철근의 부착특성을 규명하기 위해 수행한 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 압축강도가 증가할수록, 철근의 직경이 작을수록 극한부착응력은 상승하지만 동일한 철근의 직경 하에서 철근의 항복강도 증가는 극한부착응력에 거의 영향을 끼치지 못한다.
- 2) 동일한 인장강도 하에서 일반장력 철근을 고장력 철근으로 대체했을 경우 극한부착강도는 증가하였으나 극한부착응력에 도달 후의 하강부의 기울기가 급격함으로 취성적인 파괴가 나타남을 알 수 있다.
- 3) 수학적 해석을 통해 실험치와 비교해 본 결과 극한부착응력 및 부착응력-변위 곡선도 거의 일치함을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정 연구실(NRL)과 기초전력공학 공동연구소의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다. 또한 실험부재 제작 시 많은 도움을 주신 인천제철(주) 관계자 및 VSL KOREA(주) 신단양대교 현장 직원께도 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 정현수, "고강도 철근 콘크리트 구조", 태림문화사, 1994.
- (2) 장일영, "고강도 콘크리트의 부착할렬기구에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회, 콘크리트논문집, 제11권 4호, 1998.8, pp. 129-136
- (3) Sebastien Bernardi, Bruno Mesureur and Philippe Rivillon, "Study of High-Strength Concretes Reinforced with High-Strength Reinforcement: Study of Bonding Laws and Cracking in Static System", ACI Materials Journal, V.96, NO. 4, July-August 1999, pp. 491-499.
- (4) ASTM Designation C 234: Standard Test Method for Comparing Concrete on the Basis the Bond Developed with Reinforcing Steel.
- (5) Homayoun H. Abrishami and Denis Mitchell, "Simulation of Uniform Bond Stress", ACI Materials Journal, V. 89, No. 2, March-April 1992