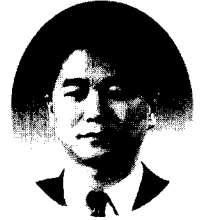


---

# 고강도 콘크리트의 부착할렬기구에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Bond Split Mechanism of High Strength Concrete



장 일 영\*

Jang Il-Young

---

### ABSTRACT

For the prediction of concrete-steel bond ability in reinforced concrete, many countries establish specifications for the pullout test. But these methods hardly to consider many parameters such as strength, shape, diameter and location of steel, concrete restrict condition by loading plate, strength of concrete and cover depth etc, and it is difficult to solve concentration and disturbance of stress. The purpose of this study is to propose a New Ring Test method which can be rational quantity evaluations of bond splitting mechanism.

For this purpose, pullout test was carried out to assess the effect of several variables on bond splitting properties between reinforcing bar and concrete. Key variables are concrete compressive strength, concrete cover, bar diameter and rib spacing. Failure mode was examined and maximum bond stress-slip relationships were presented to show the effect of above variables. As the result, it appropriately expressed general characteristics of bond splitting mechanism, and it proved capability for standard test method.

Keywords : bond split mechanism, high-strength concrete, New-Ring Test

---

\* 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 부교수

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2000년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

# 1. 서 론

콘크리트와 철근간의 부착문제는 주로 정착길이 확보측면에서만 생각하기 쉬우나 구조물의 내구성능저하, 전단균열의 원인제공 측면에서 부착할렬 파괴특성이 규명되어 설계시 반영 되어야 한다. 특히 기둥 및 보에서의 부착할렬 균열로 인한 전단파괴는 반복하중을 받는 경우에 매우 심각한 취성적 거동을 나타내는 것으로 알려져 있다<sup>1)</sup>. 철근과 콘크리트의 상대적 부착성능을 파악하기 위하여 각국에서는 인발시험(pullout test) 규정을 제정하고 있으며 이 시험방법을 통하여 콘크리트의 할렬균열에 대한 예비정보를 얻고 있다. 최근에는 보 시험(beam test), 편심하중보(cantilever beam test) 등을 통하여도 철근과 콘크리트의 상대적 부착강도(엄밀히 말하면 할렬 부착강도)를 구하고 있으며 실험적, 해석적 연구성과도 괄목할 만하다<sup>2)-5)</sup>. 그러나 이러한 시험 방법들은 철근의 강도와 형상, 직경, 철근의 위치, 콘크리트 재하판의 구속조건, 콘크리트강도, 콘크리트의 피복두께 등의 많은 인자를 고려하기 어려우며, 특히 가장 큰 변수중의 하나인 철근직경과 콘크리트 피복두께에 대한 고려를 정량화할 수 없으므로 기존의 시험방법으로는 다양한 부착성능을 평가하기 어렵다. 다만 동일 부재군에 대한 상대적인 평가만 가능할 뿐이다. 또한 기존 시험법들의 일반적 재하방법 및 공시체 규격으로는 응력집중 또는 교란상태를 해결할 수 없으며 따라서 부착성능의 정량화란 의미가 없다. 즉 불균등한 응력분포로 인해 철근과 콘크리트의 상호거동과 응력상태 및 변형을 엄밀하게 파악하는 것은 매우 어렵다. 이상의 사정을 근거로 본 연구에서는 새로운 부착시험법(이하 New Ring Test로 명명함)을 제안하며, 부착할렬특성을 정량적으로 파악하고자 한다.

본 연구에서 제안한 New Ring Test 기법과 현재 행해지는 기존의 부착시험법들의 비교를 Fig. 1 에 나타냈다. 여기서 기존의 시험법들을 살펴보면 이형철근의 부착특성상 철근 마디로부터 전달되는 힘은 약 45~60°로서 재하단의 반력

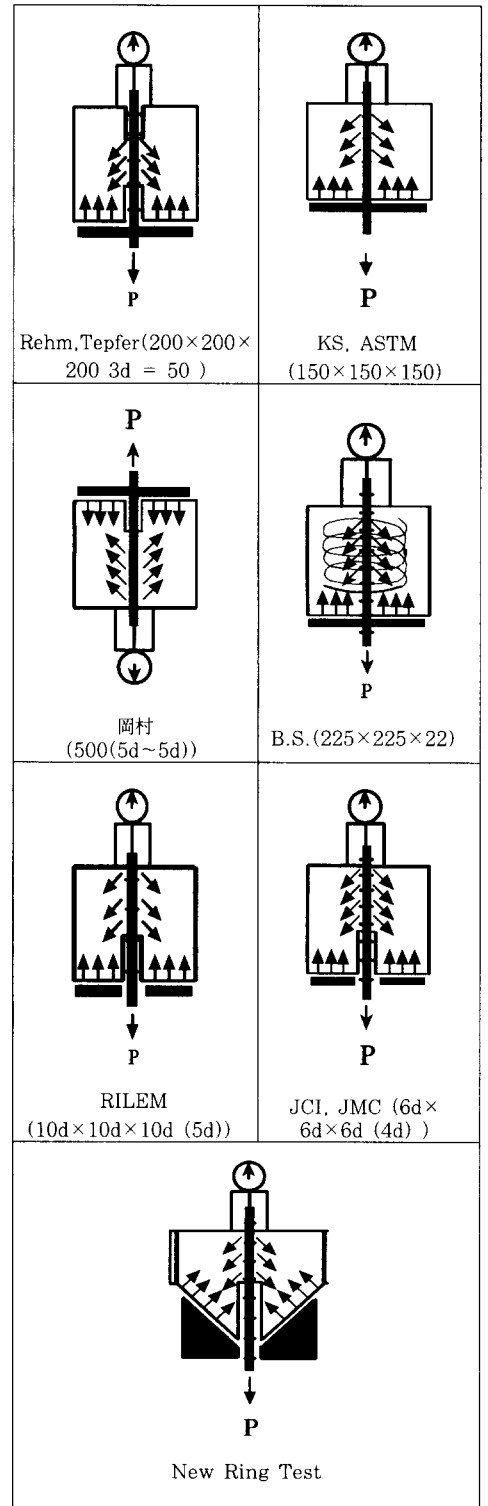


Fig. 1 Loading methods of pullout test and New Ring Test

방향과 불일치하며 결국 콘크리트 내부에 응력 취약점이 발생하게 된다. 이것을 보완하기 위해서 Rehm, 岡材, RILEM, JCI 등의 시험법은 KS, ASTM이나 BS방법에서 발생하는 재하단의 응력 집중 현상을 피하기 위한 방법으로 비부착구간을 두었으나 하중재하단에서의 응력집중을 완전히 극복할 수는 없는 것으로 판단된다<sup>6)~11)</sup>. 그러나 본 New Ring Test 기법은 위의 인발시험법에 비해 응력상쇄효과로부터 응력집중 및 교란 현상을 피하고 보다 정량적이며 정성적인 연구자료를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서의 실험변수와 연구목적은 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 콘크리트의 압축강도, 부착길이, 철근의 직경, 콘크리트의 피복두께, 철근의 마디간격을 실험체에 대한 실험변수로 설정하여 36개의 실험체에 대한 실험으로부터 실험변수가 각 실험체의 부착강도에 주는 영향을 비교·분석한다.

(2) 할렬균열의 발생형태에 있어 원통공시체의 콘크리트에 대한 구속효과를 파악한다.

(3) (1)로부터 얻어진 실험 값으로부터 각 철근의 부착능력 평가에 의한 표준시험방법으로 New Ring Test의 가능성을 검토하고, 고강도 콘크리트에서의 새로운 부착강도 시험방법을 모색한다.

## 2. 실험

### 2.1 사용재료 및 배합설계

본 실험에 사용된 시멘트는 국내 S사 제품인 1종 보통포틀랜드시멘트이며, 최대치수가 19mm인 굵은 골재를 사용하였다. 실험에 사용된 고강도 콘크리트의 배합비는 Table 1과 같다.

Table 1 Mix proportion of high-strength concrete

f <sub>c</sub> '	W/B (%)	S/A (%)	F/B (%)	Unit weight( kg/m <sup>3</sup> )					
				W	C	FLY ASH	C. AGG	F. AGG	AD. SP (%)
400	43	54	10	185	387.0	43.0	720	860	0.69
500	32	53	10	180	506.7	56.3	742	827	1.39
700	28	52	10	175	562.5	52.5	760	780	2.24

### 2.2 콘크리트 및 철근의 제강도 특성

콘크리트의 강도특성을 파악하기 위하여 압축강도 시험 및 할렬인장강도용으로  $\phi 10 \times 20$ cm인 공시체를 제작하였으며,  $15 \times 15 \times 55$ cm의 휨인장강도용 공시체를 제작하여 습윤양생하였다.

본 실험에 사용된 철근은 SD 40의 D16, D22 및 D29를 사용하였다. 압축강도 시험은 KS F 2405에 의해 실험하였으며 할렬인장강도 시험과 휨인장강도 시험은 KS F 2423과 KS F 2408에 의해 시험하였다.

콘크리트의 압축강도, 휨인장강도 및 할렬인장강도에 대한 평균강도 및 철근인장시험의 결과는 Table 2 및 Table 3과 같다.

Table 2 Properties of high-strength concrete

f <sub>c</sub> '	compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	strength of splitting (kgf/cm <sup>2</sup> )	modulus of rupture (kgf/cm <sup>2</sup> )
400	405	34	47
500	516	39	48
700	729	59	51

Table 3 Properties of steel

class	$\sigma_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_y$ ( $\mu$ )	$\sigma_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	elongation (%)
D16	3729	2401	6150	30.1
D22	4092	2718	6200	29.8
D29	4173	2536	6356	34.1

### 2.3 New Ring Test의 개요 및 방법

본 연구에서는 함석판재 Ring을 이용한 콘크리트 인발시험 방법을 제안하며 압축강도, 부착길이, 철근직경, 철근마디간격 등에 따른 최대부착강도, 부착응력-변위관계 및 인장응력(ring tension)를 파악하였다. 또한 비부착구간을 두어 불균일한 응력집중현상을 피하였으며 하중선단의 반력을 측정하였다. 자유단의 슬립량이 0.01~0.1 mm간격에서 측정되는 하중값으로부터 슬립에 따른 부착응력을 계산하였다. Table 1의 고강도 콘크리트의 배합비에 따라 각 변동인자별 36개의 실험체를 제작하였다.

각 시험체는 두께 0.65mm의 함석판을 이용하였으며 3cm정도의 겹이음을 용접 가공하여 잘대기와 같은 형상으로 제작하여 28일 습윤 양생을 실시하였다. PVC파이프를 이용하여 철근과 콘크리트 사이의 비부착구간을 유지하였으며, 콘크리트 타설을 위하여 비부착구간에는 비교적 마찰이 없도록 비닐과 실리콘을 이용하여 채움 하였다.

New Ring Test의 제원 및 재하방법은 Fig. 2, Fig. 3과 같으며 본 실험에 사용된 실험체의 제원 및 변동인자는 Table 4와 같다. 여기서 철근마디의 간격을 조절하기 위하여 그라인더를 이용 횡마디 1개를 절삭하여 마디간격을 2배로 한 것이 2db이다.

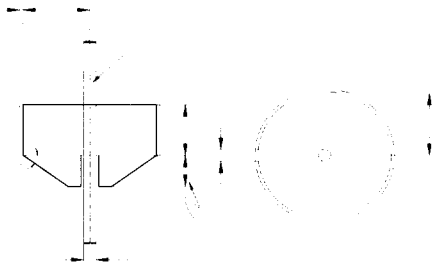


Fig. 2 Overview of New ring test

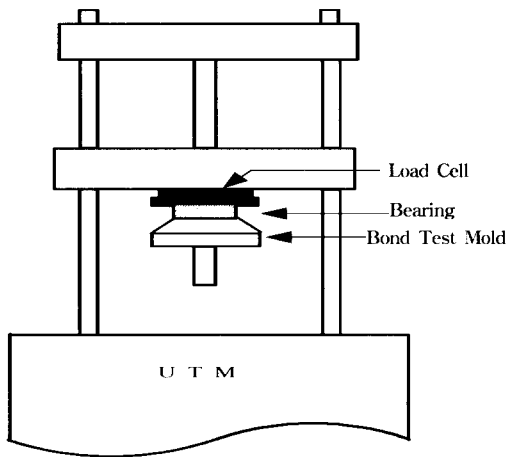


Fig. 3 Loading diagram

### 3. 실험결과 고찰

#### 3.1 일반적인 파괴양상

일반적인 부착파괴의 양상은 인발파괴와 할렬파괴의 두 가지 형태를 나타낸다. 할렬파괴시에는 콘크리트

Table 4 Test parameter

No	specimens	rib space	steel	$f_c$	C (mm)	D (mm)	C/D	bond length (mm)	
1	1 DN-1	1db	D16	405	86.6	15.9	5.4	135.1	
2	1 DN-2				56.2	15.9	3.5	102.8	
3	1 DN-3				38.1	15.9	2.4	70.7	
4	1 EN-1				86.6	22.2	3.8	135.1	
5	1 EN-2				56.2	22.2	2.4	102.8	
6	1 EN-3				38.1	22.2	1.6	70.7	
7	2 EN-1	2db	D22		80.2	22.2	3.8	135.1	
8	2 EN-2				49.7	22.2	2.4	102.8	
9	2 EN-3				31.7	22.2	1.6	70.7	
10	1 FN-1	1db	D29		516	86.6	28.6	2.8	135.1
11	1 FN-2					56.2	28.6	1.7	102.8
12	1 FN-3					31.7	28.6	1.1	70.7
13	1 DM-1			86.6		15.9	5.4	135.1	
14	1 DM-2			56.2		15.9	3.5	102.8	
15	1 DM-3			38.1		15.9	2.4	70.7	
16	1 EM-1	2db	D22	86.6		22.2	3.8	135.1	
17	1 EM-2			56.2		22.2	2.4	102.8	
18	1 EM-3			38.1		22.2	1.6	70.7	
19	2 EM-1			80.2		22.2	3.8	135.1	
20	2 EM-2			49.7		22.2	2.4	102.8	
21	2 EM-3			31.7		22.2	1.6	70.7	
22	1 FM-1	1db	D29	729	80.2	28.6	2.8	135.1	
23	1 FM-2				49.7	28.6	1.7	102.8	
24	1 FM-3				31.7	28.6	1.1	70.7	
25	1 DU-1	1db	D16		86.6	15.9	5.4	135.1	
26	1 DU-2				56.2	15.9	3.5	102.8	
27	1 DU-3				38.1	15.9	2.4	70.7	
28	1 EU-1				86.6	22.2	3.8	135.1	
29	1 EU-2				56.2	22.2	2.4	102.8	
30	1 EU-3				38.1	22.2	1.6	70.7	
31	2 EU-1	2db	D22		80.2	22.2	3.8	135.1	
32	2 EU-2				49.7	22.2	2.4	102.8	
33	2 EU-3				31.7	22.2	1.6	70.7	
34	1 FU-1	1db	D29	80.2	28.6	2.8	135.1		
35	1 FU-2			49.7	28.6	1.7	102.8		
36	1 FU-3			31.7	28.6	1.1	70.7		

1: rib spacing 1db , 2: rib spacing 2db

D: diameter of steel D16 , E: diameter of steel D22 , F: diameter of steel D29

N: compressive strength of concrete 400kgf/cm<sup>2</sup> ,

M: compressive strength of concrete 500kgf/cm<sup>2</sup> ,

U: compressive strength of concrete 700kgf/cm<sup>2</sup>

-1: cover 80.2mm, bond length 135mm

-2: cover 49.7mm, bond length 103mm

-3: cover 31.7mm, bond length 71mm

리트 피복이 철근의 쐐기작용(wedge action)에 의한 방사력과 이것에 대응하는 콘크리트의 인장응력(ring tension)이 인장강도를 초과하여 균열이 발생하며, 대부분의 시험방법들에서 보여지는 파괴형식이다. 그러나 BS규준과 같이 나선근이 보강된 경

우나, 매시브 콘크리트 속에 매입된 철근의 경우에는 인발파괴 또는 철근항복현상이 나타난다. 인발파괴 시에는 철근마디사이의 콘크리트가 전단파괴되어 철근이 뽑혀 나오는 형태를 보인다. 본 실험에서는 깔대기모양의 합석판이 어느 정도 구속력을 유지하여 합석판의 파단은 없었으며, 활렬파괴와 인발파괴의 두가지 양상을 동시에 보여주었다. Table 5에 나타난 바와 같이 철근직경에 대한 피복두께비 (C/D)가 크고 강도가 낮을수록 인발파괴 양상을 나타냈으며 강도가 증가할수록 취성적 파괴양상을 나타내었다.

### 3.2 부착강도

콘크리트에 대한 부착-슬립량은 0.01~0.1mm의 범위로 적당한 간격에서 측정되는 하중값을 부착면으로 나누어 부착강도를 산정하였으며 각 실험체에 대한 부착강도는 Table 5와 같다.

$$\tau = P / \pi d_b L_d \quad (1)$$

여기서,  $\tau$  = 부착응력,  $P$  = 인장력,  $d_b$  = 철근 공칭 직경,  $L_d$  = 철근의 부착길이 이다.

철근과 콘크리트사이의 슬립은 부착기구를 정의하는데 중요한 영향을 준다. 부착응력은 화학적 점착과 마찰 및 철근과 콘크리트사이의 기계적 상호작용 등에 의한 세가지 구성성분에 의해 영향을 받으나 이형철근의 경우 철근마디의 형상과 콘크리트 키(key)와 같은 철근과 콘크리트사이의 슬립량은 철근과 콘크리트의 상호작용력을 잃은 단계부터 큰 폭으로 증가하는 것으로 알려져 있다. 본 실험의 부착응력-슬립관계는 대부분 재하단에서의 슬립이 0.4mm 발생하는 단계에서 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

### 3.3 콘크리트 압축강도의 영향

콘크리트 압축강도에 따른 최대부착강도의 변화는 Fig. 4~Fig. 6과 같다.

콘크리트 피복두께와 부착길이가 일정할 경우, 콘크리트 압축강도 증가에 따라 최대부착강도 또한 약간 증가하는 현상을 나타내었다. 그러나 증가경향은 매우 완만하였다. 마디간격이 2db인 경우, 부착강도가 다소 크게 나타났으며 이러한 현상은 방사력이 작아져서 나타나는 효과로 분석된다.

Table 5 Test results

classify		$f_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	bond strength $\tau_{ult}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	failure mode
rib space	specimens			
1db	1DN-1	405	165	pull-out
	1DN-2		159	"
	1DN-3		111	"
	1EN-1		121	"
	1EN-2		117	"
	1EN-3		92	"
2db	2EN-1		144	splitting
	2EN-2		123	"
	2EN-3		78	"
1db	1FN-1	129	"	
	1FN-2	93	"	
	1FN-3	58	"	
1db	1DM-1	516	178	pull-out
	1DM-2		165	splitting
	1DM-3		118	"
	1EM-1		132	"
	1EM-2		111	"
	1EM-3		91	"
2db	2EM-1		161	"
	2EM-2		132	"
	2EM-3		91	"
1db	1FM-1	137	"	
	1FM-2	134	"	
	1FM-3	76	"	
1db	1DU-1	729	182	pull-out
	1DU-2		164	splitting
	1DU-3		129	"
	1EU-1		143	"
	1EU-2		119	"
	1EU-3		101	"
2db	2EU-1		178	pull-out
	2EU-2		130	splitting
	2EU-3		95	"
1db	1FU-1	145	"	
	1FU-2	122	"	
	1FU-3	70	"	

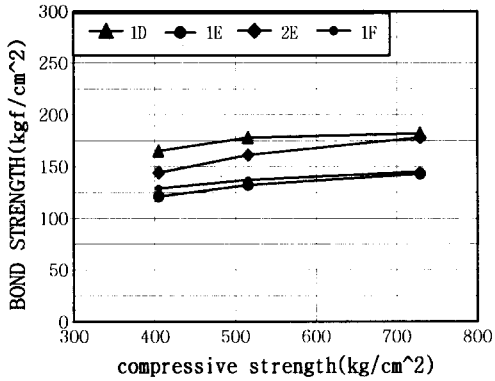


Fig. 4 Bond strength vs. Compressive strength (C=86.6mm Ld=135.1mm)

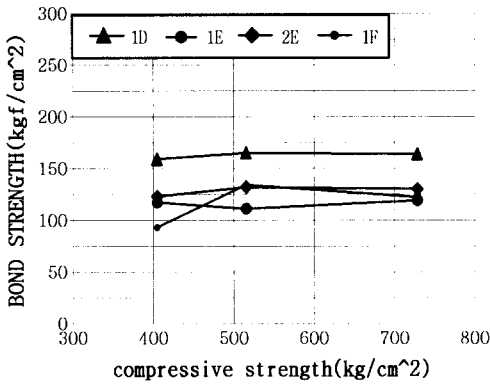


Fig. 5 Bond strength vs. Compressive strength (C=56.26mm Ld=102.8mm)

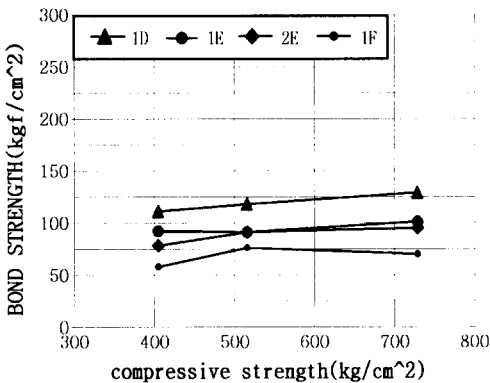


Fig. 6 Bond strength vs. Compressive strength (C=38.1mm Ld=70.1mm)

### 3.4 콘크리트 피복두께의 영향

피복두께에 따른 최대부착강도의 비교는 Fig. 7~ Fig. 9와 같다. 철근직경에 대한 콘크리트 피복두께의

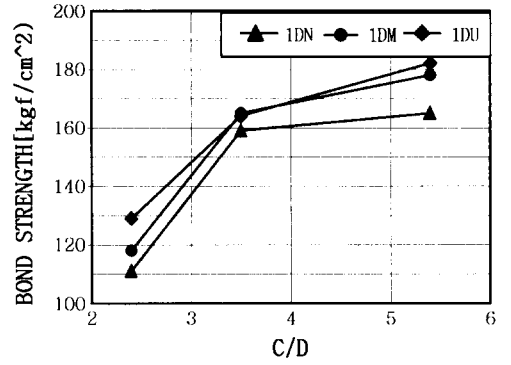


Fig. 7 Bond strength vs. C/D (D16)

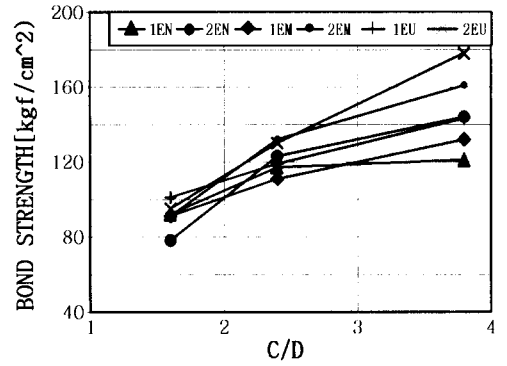


Fig. 8 Bond strength vs. C/D (D22)

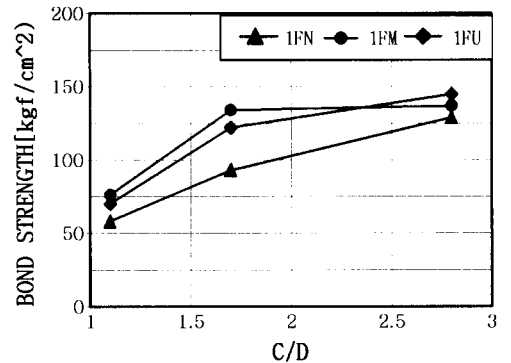


Fig. 9 Bond strength vs. C/D (D29)

증가에 따라서 최대부착강도가 증가하는 것으로 나타났고, 콘크리트 압축강도가 고강도화 될수록 피복두께의 증가와 더불어 최대부착강도의 증가를 보이나 저강도에서는 피복두께에 따라서 최대부착강도의 감소를 보였다. 또한 철근의 마디간격을 조절 한 경우, 콘크리트 피복두께가 최대부착응력에 미치는 영향은 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

C/D가 크고 압축강도가 클수록 최대부착강도는 크게 나타났다.

### 3.5 부착길이의 영향

부착길이에 대한 영향을 Fig. 10~Fig. 12에 나타내었다. 일반적으로 알려진 것과 같이 부착길이가 증가할수록 최대부착강도가 커짐을 나타내고 있다.

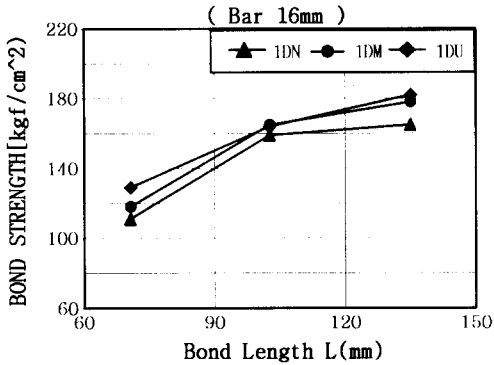


Fig. 10 Max. Bond strength vs. Bond length

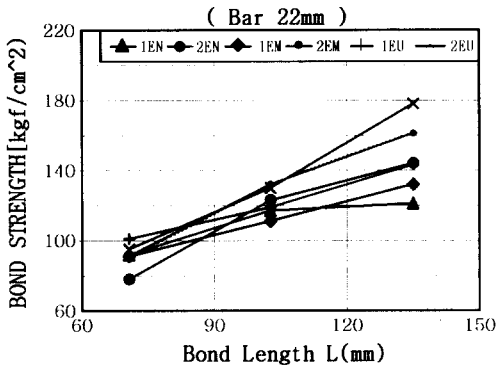


Fig. 11 Max. Bond strength vs. Bond length

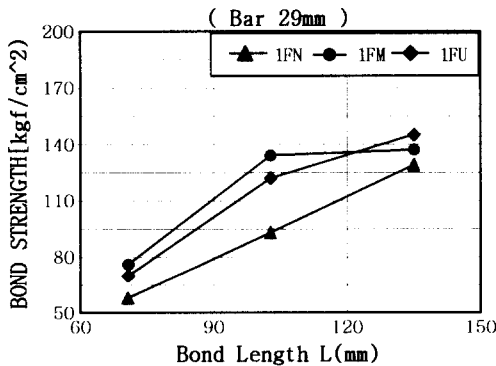


Fig. 12 Max. Bond strength vs. Bond length

### 3.6 기존의 시험방법 및 부착강도식의 비교

본 연구의 실험결과를 평가하기 위하여 Fig. 1의 시험방법중 비교적 일반적으로 사용되는 ASTM C-234<sup>8)</sup> 및 BS(CP-114)<sup>11)</sup>규준에 준한 부착시험의 결과와 ACI-318<sup>12)</sup>, 대한건축학회의 단기허용 부착강도식<sup>13)</sup> 및 小倉<sup>13)</sup>이 제시한 최대 부착응력 산정식과의 비교를 다음 Fig. 13과 같이 수행하였다.

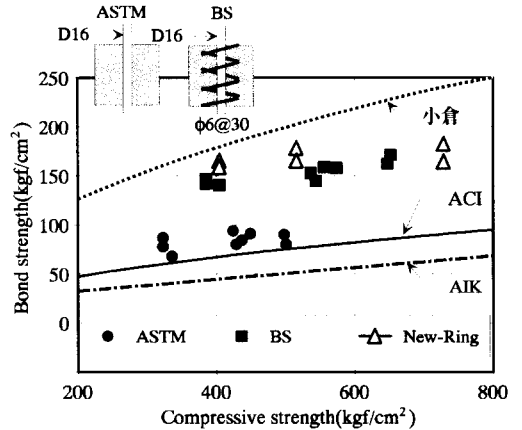


Fig. 13 Comparison of predicted and measured  $\tau_{max} - f_c$  relation

시험방법에 따른 비교를 위하여 콘크리트 압축강도 350~650kg/cm<sup>2</sup>범위에서 ASTM, BS규준에 따라 각 9개의 시험체를 제작하였으며, D16의 철근을 사용하였다. 이들 시험법과 비교적 변수가 동일한 1DN-1, 1DN-2, 1DM-1, 1DM-2, 1DU-1, 1DU-2시험체의 결과를 비교하였다.

Fig. 13에서 New-Ring Test의 결과가 BS규준에 의한 최대부착강도에 가깝고, ASTM에 비해서는 안전율이 2배이상 확보됨을 알 수 있다. 또한 ACI규준식은 ASTM에 의한 시험결과와 거의 일치하며, New-Ring Test의 결과에 대해서는 2이상의 안전율을 가짐을 알 수 있다.

### 4. 결 론

본 연구는 새로운 부착시험법인 New Ring Test를 이용해, 콘크리트의 압축강도, 피복두께,

철근마디간격, 부착길이 등을 변수로 하여 콘크리트와 철근의 부착성능실험을 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 콘크리트 압축강도가 증가할 경우 최대부착응력은 완만히 증가하는 경향을 나타내었다.
- 2) 철근직경에 대한 콘크리트 피복두께비가 증가할수록 최대부착강도는 증가하였다.
- 3) 부착길이가 클수록 최대부착강도는 증가하였다.
- 4) 이상과 같이 New Ring Test의 실험결과는 부착할렬기구의 일반적 특성을 잘 나타내고 있으며 각 실험변동인자와의 관계를 명확히 나타내는 것으로 보이며 심층적인 실험적, 이론적 연구를 통하여 일반적이며 정량적 의미의 부착시험법이 될 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 藤井榮, "鐵筋コン크리트部材の附着, 割裂破壊", 日本コン크리트工學論文集, Vol 36, No.2, 1998.2,

- pp.10~16
2. 오병환, "철근콘크리트부재의 뽑힘 부착 특성 연구", 한국콘크리트학회지, Vol.4, No.3, 1992. 9, pp.113~121
3. 신성우, 최종수, 이광수, "철근콘크리트의 부착특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회지, Vol.7, No.1, 1995. 2, pp.117~125
4. 홍건호, 신영수, 정일영, "고강도 콘크리트의 부착특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회지, Vol.8, No.5, 1996. 10, pp.155~162
5. 김상준, 조필규, 허준, 최완철, "고성능 Belite 시멘트 콘크리트의 철근부착성능", 한국콘크리트학회지, Vol.10, No.6 1998. 12, pp.169~178
6. 村田二郎, 河合樹彦, "引き試験による異形鐵筋の附着強度に關する研究", 日本土木學會論文集, Vol.348, No-1, 1984. 8, pp.113-122
7. 한국공업규격(KS), 철근의 부착에 의한 콘크리트 비교시험방법 F2441, 1990.
8. ASTM Designation C 234: Standard Test Method for Comparing Concrete on the Basis the Bond Developed with Reinforcing Steel.
9. RILEM Recommendation 7-11-28 "Bond Test for Reinforcing Steel" 2. Pull-out Test
10. Rehm, G. "The Fundamental Law of Bond" Proceeding Symposium on Bond Crack Formation in Reinforced Concrete. Stockholm, 1957.
11. B.S. Code of Practice for Reinforced Concrete CP 114, 1972.
12. ACI-318-89, "Building Code-Requirements of Reinforced Concrete", ACI, Detroit, 1989.
13. 정헌수, "고강도 철근 콘크리트 구조", 태림문화사, 1994.

## 요 약

철근과 콘크리트의 상대적 부착성능을 파악하기 위하여 각국에서는 인발시험규정을 제정하고 있으며 이 시험방법을 통하여 콘크리트의 할렬균열에 대한 예비지식을 얻고 있다. 그러나 이러한 시험 방법들은 철근의 강도와 형상, 직경, 철근의 위치, 콘크리트 재하판의 구속조건, 콘크리트강도, 콘크리트의 피복두께 등의 많은 변동인자를 고려하기 어려우며, 또한 기존 시험법들의 일반적 재하방법 및 공시체 규격으로는 응력집중 또는 교란상태를 해결할 수 없으며, 따라서 부착성능의 정량화란 의미가 없다. 본 연구에서는 새로운 부착시험법을 제안하며, 부착할렬 특성을 정량적으로 파악하고자 한다. 콘크리트의 압축강도, 부착길이, 철근의 직경, 콘크리트의 피복두께, 철근의 마디간격을 실험체에 대한 변동인자로 설정하여 36개의 실험체에 대한 실험으로부터 변동인자가 각 실험체의 부착강도에 주는 영향을 비교·분석하였다. 그것과 일반적으로 알려진 부착할렬기구의 특성을 잘 나타내어 표준적 시험법으로서의 가능성을 입증하였다.

(접수일자 : 1999. 4. 21)