

# 고강도 콘크리트 휨부재의 정착 및 겹침이음길이에 관한 실험적 연구

## Experimental Research on Development and Splices Length in High-Strength Concrete Flexural Members

이 기 열\*  
Lee, Ki Yeol

김 우\*\*  
Kim, Woo

정 기 오\*\*\*  
Jung, Ki Oh

### ABSTRACT

This paper presents the test results of 24 beam-end specimens to investigate the effect of concrete strength and cover thickness on the development resistance capacity in tensile lap splice length regions. The results showed that as higher strength concrete was employed, not only development resistance capacity was influenced by cover thickness, but also more sufficient safety factor reserved shorter than the lap splice length provision in current design code. From experimental research results, high-strength concrete development length was not inverse ratio of  $\sqrt{f_{ck}}$  but directly inverse of  $f_{ck}$ , and it is also said that there is a certain limit length of the embedded steel over which the assumption of uniform bond stress distribution is valid specially for high-strength concrete not having a same embed length such as normal-strength concrete in current design criteria hypothesis.

### 1. 서론

현행 콘크리트구조설계기준에서 제시하는 정착길이에 대한 개념은 극한상태에서 콘크리트에 매립되어 있는 철근에 발생하는 부착응력의 분포가 균등하게 된다는 평균부착응력 가정을 기초로 한다.

그러나 Azizinamini et al(1993)와 Hungspreug(1981)의 연구결과에 의하면 콘크리트 강도가 약 600 kgf/cm<sup>2</sup> 이상인 고강도 콘크리트에서는 극한상태에서 보통강도 콘크리트와는 달리 부착응력분포가 균등하지 않고, 오히려 하중단쪽으로 부착응력이 집중된다고 하였다. 또한 김우 등(2001)은 고강도 영역 콘크리트에서 피복두께가 얇아질수록 조갠균열의 취성적인 발생과 진행, 부착전달길이 감소 등과 같은 현상이 보통강도 콘크리트에 비해 상대적으로 증가한다는 것을 실험적으로 확인하였다.

본 연구에서는 정착저항 능력에 가장 큰 영향을 주는 인자들인 콘크리트 강도, 피복두께 및 겹침이음길이를 변수로 하는 beam-end 실험을 수행한 후, 이 실험으로 구한 결과를 이용하여 각 변수들에

\* 정회원, 전남대학교 토목공학과 박사과정

\*\* 정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

\*\*\* 정회원, 전남대학교 토목공학과 석사

따른 정착저항능력을 비교·분석하고, 설계기준에서 제시하는 겹침이음길이의 안전성을 변위-연성 관계에 의한 연성지수(ductility index)로서 평가하였다. 그리고 이 결과들을 근거로 하여 정착 및 겹침이음길이 계산에 관한 설계기준 식 및 규정에 고강도 콘크리트를 사용한 구조물의 안전을 확보할 수 있도록 콘크리트 강도와 피복두께의 영향이 반영하도록 하였다.

## 2. Beam-end 실험

본 연구에서는 그림 1과 같이 길이가 110cm인 총 24개의 beam-end 시험체로서, 2개의 D16(SD40) 이형철근을 인장부에 배치하였으며, 그 결과를 시험체별로 표 1에 나타내었다.

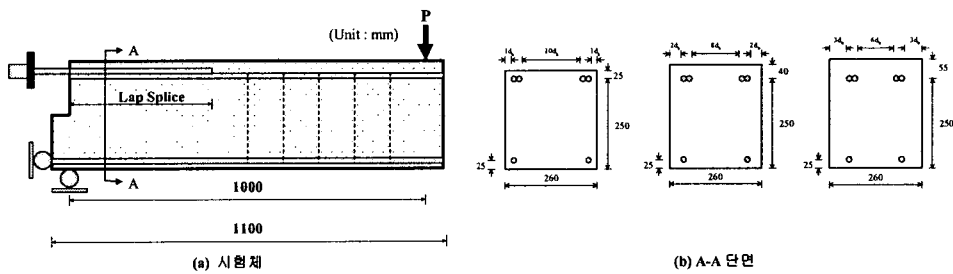


그림 1 시험체 단면 및 제원

표 1 시험체 제원 및 실험결과

Specimen	Splice Length (cm)	Cross Sectional Dimensions $b \times h$ (mm)	Cover Thickness Ratio ( $c/d_s$ )	Concrete Strength $f_{ck}$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Cracking Load (kgf)		$P_{max}$ (kgf)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_{max}$ (mm)	Failure Type
					Transverse crack	Splitting crack				
N1L40	40	260 x 275	1.0	300	850	1050	2601	12	12.8	Splitting
N1L55	55				950	950	4497	21	32.4	Splitting
N1L70	70				900	900	4057	15.85	17.8	Splitting
N1L85	85				800	850	3606	14.01	15.57	Splitting
N2L40	40	260 x 290	2.0		950	1650	4449	24.34	28.32	Shear
N2L55	55				1500	2050	5167	20.17	60.87 이상	Yielding
N2L70	70				1450	2200	5023	19.8	66.23 이상	Yielding
N2L85	85				1500	1800	5247	19.45	66.22 이상	Yielding
N3L40	40	260 x 305	3.0		1150	3000	4444	21.24	30.31	Shear
N3L55	55				1150	2400	5354	21.24	62.76 이상	Yielding
N3L70	70				1250	4250	5502	21.78	62.49 이상	Yielding
N3L85	85				800	2950	5549	21.3	65.58 이상	Yielding
H1L25	25	260 x 275	1.0	800	1700	900	3154	12.88	13.67	Splitting
H1L40	40				1900	1050	4599	18.7	28.1	Splitting
H1L55	55				1400	1050	4902	16.87	62.75 이상	Yielding
H1L70	70				1950	1200	4629	15.86	57.97 이상	Yielding
H2L25	25	260 x 290	2.0		2350	1050	5032	18.53	51.66	Splitting
H2L40	40				3200	1850	5002	14.55	51.12	Shear
H2L55	55				2500	1650	5292	17.34	65.11 이상	Yielding
H2L70	70				2700	1900	5339	16.55	62.95 이상	Yielding
H3L25	25	260 x 305	3.0		2700	2250	5367	15.23	65.39 이상	Yielding
H3L40	40				3050	1700	5459	17.73	64.45 이상	Yielding
H3L55	55				2650	2150	5642	16.03	61.55 이상	Yielding
H3L70	70				2500	2450	5544	15.41	64.91 이상	Yielding

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 피복두께의 영향

겹침이음길이에 따른 피복두께의 변화의 영향을 살펴보기 위하여 실험을 통해 구한 NSC와 HSC 시험체의 하중-변위 곡선을 그림 2에 정리하였다.

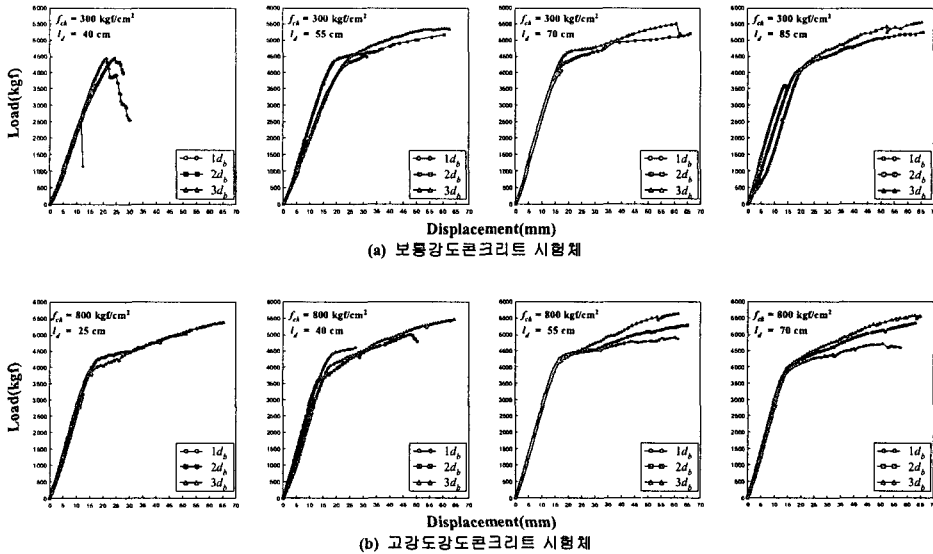


그림 2 피복두께에 따른 하중-변위 곡선

그림 2를 살펴보면, 보통강도 콘크리트 시험체에서 겹침이음길이가 짧은 경우( $l_d=40\text{cm}$ )에는 피복두께에 상관없이 모든 시험체에서 항복 이전에 파괴되는 현상을 보이고 있으며, 겹침이음길이가 길어지고, 피복두께가  $2.0d_b$  이상 확보가 된 경우에는 모든 시험체에서 항복 이후에도 충분한 변위가 발생하는 연성파괴를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와는 반대로, 피복두께가  $1.0d_b$  인 경우에는 겹침이음길이에 상관없이 항복 이전에 시험체가 파괴되는 것으로 나타났다. 고강도 콘크리트 시험체에서 겹침이음길이가 짧은 경우( $l_d=25\text{cm}$ )에 피복두께가 얇은 시험체에서는 항복이전에 파괴가 발생하였지만, 피복두께가  $2.0d_b$  이상 확보된 시험체에서는 보통강도 콘크리트와는 달리 연성파괴가 발생하였고, 겹침이음길이가 길어질수록 대부분의 시험체가 연성파괴를 나타내고 있다.

이상과 같은 결과를 종합하면, 정착 및 겹침이음길이에 대한 현행 설계기준의 규정은 피복두께 및 콘크리트 강도에 대한 영향을 적절히 반영하지 못하고 있으며, 정착저항능력을 발휘하는데 있어서 그 길이보다는 피복두께의 영향을 더 크게 받는다고 할 수 있을 것이다.

#### 3.2 콘크리트 강도의 영향

보통강도 콘크리트 시험체의 겹침이음길이를 기준으로 하여 현행 콘크리트구조설계기준에서 제시하는 고강도 콘크리트의 해당 겹침이음 및 콘크리트 강도 증가에 따른 정착저항능력과 피복두께의 영향 정도를 알아보기 위하여 보통강도와 같거나 설계기준보다 작은 겹침이음길이를 갖는 시험체의 하중-변위 곡선을 피복두께별로 비교하여 그림 3에 나타내었다.

설계기준에 의한 NSC와 HSC의 겹침이음길이는 피복두께에 상관없이 각각 약 55cm와 40cm이다. 그

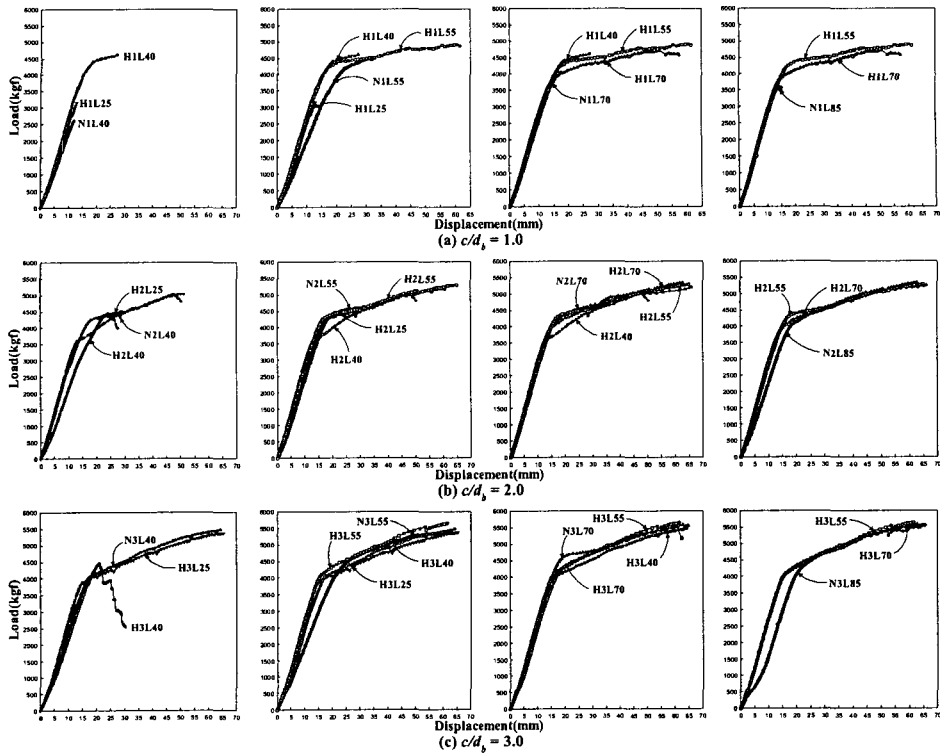


그림 3 콘크리트 강도에 따른 하중-변위 곡선

런데 피복두께가 얇은  $c/d_b=1.0$ 인 그림 3(a)을 살펴보면, 콘크리트 강도에 따라서 연성거동을 나타내는 겹침이음길이가 설계기준과는 차이가 있음을 알 수 있다. 보통강도 콘크리트의 경우에는 설계기준에서 제시하는 길이뿐만 아니라 50%이상 증가시킨 시험체에서도 취성과파괴가 나타남을 확인할 수 있지만, 고강도 콘크리트 경우에는 설계기준 값 이상만 된다면 연성과파괴를 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 피복두께가 어느 정도 확보된  $c/d_b=2.0$ 인 그림 3(b)에서는 설계기준에서 제시하는 값보다 짧은 겹침이음길이를 갖는 보통강도 콘크리트 시험체에서는 시험체 항복 후 연성을 다소간 보이다가 취성과파괴를 나타냈으며, 고강도 콘크리트에서도 이러한 현상은 동일하였다. 피복두께가 충분히 확보되었다고 할 수 있는  $c/d_b=3.0$ 인 그림 3(c)에서는 모든 시험체에서 충분한 연성과파괴를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 정착저항능력에 있어서 피복두께의 영향이 크게 작용한다는 것을 의미하는 것이라 할 수 있으며, 고강도 콘크리트 사용시 현 설계기준에서 제시하는 압축강도 제공근에 반비례하여 줄어드는 겹침이음길이보다 훨씬 더 감소시킬 수 있음을 나타내는 것이라 하겠다.

### 3.3 변위 연성도 평가

연성(ductility)이란 구조부재가 외력을 받았을 때 어느 정도의 변형이 일어난 후 파괴에 이르는가를 판단하는 부재의 변형성능으로서, 구조물의 파괴 시 붕괴의 위험을 인지시키는데 기준이 되는 값으로 주로 이용되고 있다. 구조물의 연성을 비교적 정확하게 평가하는 방법으로서 대부분의 연구에서는 항복변위( $\delta_y$ )와 파괴변위( $\delta_u$ )의 비로 나타내는 연성지수(ductility index)로 주로 이용한다.

$$Ductility\ Index = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (1)$$

본 연구에서는 파괴시의 변위를 결정할 때, 취성파괴의 경우에는 파괴 직전에 측정된 값을 택하였고, 연성파괴의 경우에는 항복시의 3배 이상 변위가 발생할 때까지 실험을 하고, 그 값을 파괴시의 변위라 하였으며, 그 결과를 피복두께별로 그림 4에 나타내었다.

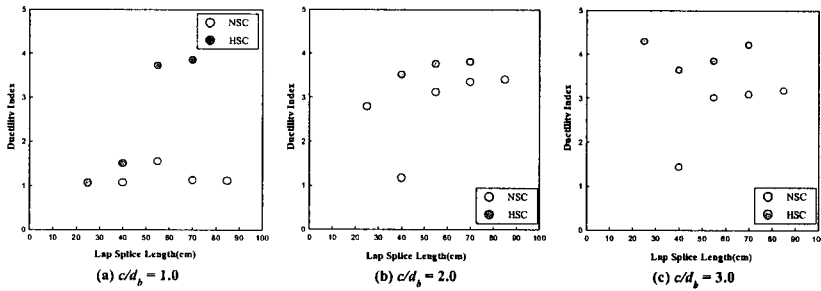


그림 4 콘크리트 강도에 따른 연성지수

그림 4를 살펴보면 겹침이음길이가 짧은 경우에는 피복두께가 충분하다라도 연성파괴를 보장할 수 없으며, 특히 보통강도 콘크리트에서 피복두께의 영향을 더 크게 받고 있음을 확인하는 결과라 하겠다. 또한 고강도 콘크리트의 겹침이음에 대해서 현행 설계기준에서 제시하는 압축강도 제곱근에 반비례하는 길이보다 훨씬 더 작은 경우에 있어서도 피복두께만 충분히 확보된다면 정착저항능력이 증가되어서 연성파괴를 보장할 수 있는 것으로 나타났다.

위와 같은 결과는 콘크리트 강도에 상관없이 피복두께에 따른 정착저항능력의 차이가 있음을 확인하였으며, 고강도 콘크리트일수록 정착저항길이가 보통강도 콘크리트에 비해 훨씬 짧아진다는 것과 그 한계길이에 대한 새로운 정의가 필요함을 나타내는 결과라고 하겠다.

### 3.4 정착 및 겹침이음길이 식 수정

본 연구에서는 피복두께 및 콘크리트 강도의 변화에 대한 겹침이음길이의 관계를 그림 4에서 보인 연성지수에 대해서 안전율을 고려한 3.0을 기준값으로 산정하여 각각의 경우에 대한 회귀분석을 통하여 상관관계를 유도하고, 그 결과를 이용하여 설계기준 식을 수정하고자 하였다. 콘크리트 강도에 따른 연성지수와 겹침이음길이의 상관관계 회귀분석 결과를 피복두께별로 그림 5에 나타내었다.

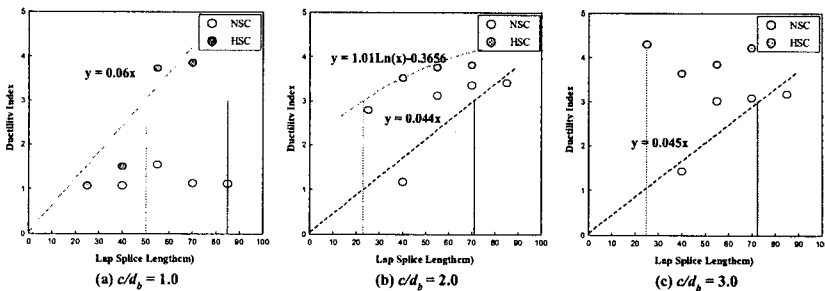


그림 5 피복두께에 따른 연성지수와 겹침이음길이 상관관계 회귀분석

그림 5와 같이 회귀분석을 통하여 얻어진 피복두께에 따른 겹침이음길이와 현행 콘크리트구조설계기준에서 제시하는 기본정착길이 식에 의한 계산 값을 콘크리트 강도에 따라서 표 2에 정리하였다. 회귀분석을 통하여 구한 한계길이를 살펴보면, 피복두께의 영향을 상당히 크게 받고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 콘크리트 강도 증가에 따른 겹침이음길이가 감소 또한 피복두께에 따라서 그 변화의 폭이 상당히 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 피복두께의 영향을 반영할 수 있는 어떠한 계수가 필요하게 되는데 본 연구에서는 콘크리트 강도와 피복두께의 영향을 동시에 반영할 수 있는 방법을 도입하여 설계기준식을 수정하고자 하였다.

표 2 겹침이음길이에 대한 설계기준과 실험결과 비교

		$c/d_b=1.0$	$c/d_b=2.0$	$c/d_b=3.0$	비 고
$l_{d,KCI}$	NSC	55cm	55cm	55cm	피복두께
	HSC	40cm	40cm	40cm	영향이 없음
	$\left(\frac{f_{ck,NSC}}{f_{ck,HSC}}\right)^k$	0.5	0.5	0.5	$k=\text{constant}$
$l_{d,test}$	NSC	85cm	68cm	65cm	피복두께
	HSC	50cm	28cm	25cm	영향이 있음
	$\left(\frac{f_{ck,NSC}}{f_{ck,HSC}}\right)^k$	0.58	0.96	1.06	$k=\text{variable}$

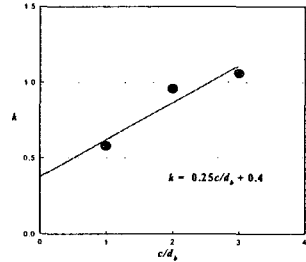


그림 6 피복두께에 따른 콘크리트 강도영향 계수  $k$  회귀분석

따라서, 정착 및 겹침이음길이에 대한 현행 설계기준 식에 대해서 콘크리트 강도에 대한 상대적 변화율에 대한 지수와의 관계를 알아보기 위하여 다음과 같은 형태로 변형하였다.

$$l_{d,HSC} = l_{d,NSC} \left( \frac{f_{ck,NSC}}{f_{ck,HSC}} \right)^k \quad (2)$$

식 (2)에 대해서 현행 콘크리트구조설계기준에서는 콘크리트 압축강도 제공근에 반비례하여 감소하므로 우변 지수  $k$ 는 0.5라는 일정한 값을 갖는다. 그러나 본 연구의 실험결과는 고정된 값이 아닌 피복두께에 따라 변화한다고 앞 절에서 이미 밝힌바있다. 따라서 식 (2)의 우변 지수  $k$ 의 변화를 계산하기 위하여 표 2에 정리한 한계겹침이음길이를 콘크리트 강도별로 대입하고, 각 피복두께별로 계산하여 구한 결과에 대해서 상관관계 및 회귀분석을 실시하여 그림 6에 정리하였다. 그림 6에 나타난 바와 같은 피복두께의 영향이 반영된 콘크리트 강도특성지수를 이용하여 현행 설계기준 식을 수정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$l_{d,HSC} = 0.152 \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_{ck,NSC}}} \left( \frac{f_{ck,NSC}}{f_{ck,HSC}} \right)^{0.25c/d_b + 0.4} \quad (3)$$

여기서 일반적인 콘크리트 강도의 함수로 나타내기 위하여 보통강도 콘크리트 압축강도  $f_{ck,NSC}$ 을  $300 \text{ kgf/cm}^2$ 로 가정하여 식 (3)에 대입하고, 다시 정리하면 다음과 같은 콘크리트 강도변화가 반영된 정착 및 겹침이음길이 제안식을 유도할 수 있다.

$$l_d = 0.0085 d_b f_y \left( \frac{300}{f_{ck}} \right)^{0.25c/d_b + 0.4} \quad (4)$$

#### 4. 결론

본 연구는 고강도 콘크리트 휨부재의 정착 및 겹침이음길이에 관한 설계기준 규정의 검토 및 보완을 위하여 콘크리트 강도와 피복두께 및 겹침이음길이를 변수로 하는 총 24개의 beam-end 실험을 수행하고 그 결과를 설계기준과 비교 및 그 차이를 분석한 것으로서, 콘크리트 강도와 피복두께에 따른 정착저항능력과 현행 설계기준 규정에 대해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 정착 및 겹침이음길이에 대한 현행 설계기준의 규정은 피복두께 및 콘크리트 강도에 대한 영향을 적절히 반영하지 못하고 있으며, 정착저항능력을 발휘하는데 있어서 그 길이보다는 피복두께의 영향을 더 크게 받고 있음을 확인하였다.
- (2) 고강도 콘크리트를 사용한 구조물의 정착 및 겹침이음에서는 현 설계기준에서 제시하는 정착 및 겹침이음길이 규정보다 훨씬 더 감소시킬 수 있을 것이다.
- (3) 콘크리트 강도에 상관없이 피복두께에 따른 정착저항능력의 차이가 있음을 확인하였으며, 고강도 콘크리트일수록 정착저항길이가 보통강도 콘크리트에 비해 훨씬 짧아진다는 것과 등분포부착응력을 적용시킬 수 있는 한계매입길이에 대한 새로운 정의가 필요할 것이다.

#### 감사의 글

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 R01-2002-000-00592-0) 지원으로 수행된 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 김 우, 이기열, 염환석 (2001) 고강도 콘크리트 인장부재의 부착특성과 균열거동에 관한 연구(1), **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제 21권, 제 5-A호, pp.687-698.
2. 김 우, 이기열, 문 인 (2001) 고강도 콘크리트 인장부재의 부착특성과 균열거동에 관한 연구(2), **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제 21권, 제 5-A호, pp.699-706.
3. 한국콘크리트학회 (1999) **건설교통부 제정, 콘크리트구조설계기준**, 한국콘크리트학회.
4. Azizinamini, A., Stark, M., Roller, J.J., and Ghosh, S. k., (1993) Bond Performance of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete, *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 5, pp.554-561.
5. Hungsprung, S., (1981) *Local Bond Between a Reinforced Bar and Concrete under High Intensity Cyclic Load*, Structural Engineering Report No. 81-6, Cornell University, Ithaca, N.Y.
6. Tepfers.R, (1979) Cracking of Concrete Cover Along Anchored Deformed Reinforcing Bars, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 31, No. 106, pp.3-12.