

# 집중하중을 받는 철근콘크리트 깊은 보의 전단강도 평가에 관한 연구

## A Study on the Shear Strength Evaluation of Reinforced Concrete Deep Beams subject to Concentrated Loads.

양 준 호\*      이 진 섭\*\*      김 상 식\*\*  
Yang, Joon Ho      Lee, Jin Seop      Kim, Sang Sik

### ABSTRACT

This study is aimed to evaluate the shear strength of reinforced concrete deep beams subject to concentrated loads, using a simplified strut-tie model. For the shear strength prediction of deep beams, it is prerequisite to evaluate the effective width of strut and to verify the efficiency factors proposed by MacGregor et al.. The results analyzed by truss models have been compared with those calculated by domestic code for the existing data of 90 deep beam specimens. The shear strength of deep beams were reviewed with respect to concrete strength, the shear span-depth ratio, and the ratio of web reinforcements. The results showed that the shear strength of the proposed model gave a better agreement than the domestic code approach.

### 1. 서 론

깊은 보는 철근콘크리트 건물에 있어서 기둥 열이 바뀌거나 상부 층의 하중 전달이 불연속적인 경우, 상부 연직하중을 인접한 하층부에 효과적으로 전달하기 위하여 설치되는 층높이 보의 형태가 주류를 이루며, 이러한 깊은 보는 통상 상부의 기둥 위치에서 집중하중을 받게 된다. 현행 콘크리트 구조 설계기준에서 깊은 보는 지점사이의 순경간이 보의 유효깊이의 5 배 이하이고 하중점과 지지점 사이에 경사진 압축대에 의해 힘이 전달되는 부재로 정의되고 있다. 하지만 철근콘크리트 깊은 보는 구조 및 재료의 비선형성 및 균열발생 후 응력의 재분배 등으로 인하여 구조거동에 대한 정확한 이론해석방법이 확립되어 있지 않은 상태이며 대부분의 설계공식들은 실험에 그 근거를 두고 있다. 이러한 관점에서 이 연구에서는 양단이 단순지지 되어있고 집중하중을 받는 철근콘크리트 깊은 보를 대상으로 하여 단순화된 스트럿-타이 모델을 통한 전단강도의 예측에 대해 고찰하였으며, 이 경우 스트럿-타이 모델을 이용한 깊은 보의 전단강도 산정에 있어 가장 기본적인 요소는 경사 압축대의 폭과 압축대의 유효 압축강도 결정이라고 할 수 있다. 이 연구에서는 경사압축대의 폭을 제안하고, Zhang과 Hsu(1998)의 연화계수, MacGregor 및 Warwick과 Foster(1993)의 효율계수를 적용하여 압축대의 유효 압축강도를 평가하고, 이를 통해 깊은 보의 전단강도를 예측하는 데 필요한 기초자료를 제시하고자 한다.

\* 정회원, 인하대학교 공과대학 건축공학과 석사과정

\*\* 정회원, 인하대학교 공과대학 건축공학과 강사

\*\*\* 정회원, 인하대학교 공과대학 건축공학과 교수

## 2. 단순화된 스트럿-타이 모델에 의한 전단강도 예측

### 2.1 전단저항 메커니즘 및 압축대의 면적 산정

그림 1은 Hwang et al.(2000)에서 제시된 대각, 수평, 수직 메커니즘으로 구성된 스트럿-타이 모델이다. 대각 메커니즘의 경사 압축대의 경사각  $\theta$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{jd}{a}\right) \quad (1)$$

압축대의 유효 면적  $A_{str}$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_{str} = a_s \times b_s \quad (2)$$

여기서  $a_s$ 는 경사 압축대의 너비이고,  $b_s$ 는 압축대의 폭으로서, 일반적인 경우 보의 폭으로 적용된다.

Hwang et al.(2000)에서는  $a_s = \sqrt{(kd)^2 + a_b^2}$ 로 하고 있으나, 보의 압축축 선형 분포 응력의 압축력 작용점을 감안하여

$$a_s = \sqrt{\left(\frac{2}{3}kd\right)^2 + a_b^2} \quad (3)$$

로 적용하는 것이 적합하며, 이 연구에서는 위와 같이 수정된 압축대 너비를 사용하여 압축대 면적을 산정한다.

그림 1은 깊은 보의 전단 저항 메커니즘으로서, 수평 또는 수직 웨브 보강근이 없는 경우의 깊은 보의 대각 메커니즘과 수직 메커니즘의 합, 또는 대각 메커니즘과 수평 메커니즘의 합으로 전단력을 지지할 수 있다.

### 2.2 힘의 평형조건

그림 2는 스트럿-타이에 의한 깊은 보의 전단강간에서의 힘의 평형조건을 나타내고 있다. 수평 전단력과 수직 전단력에 대한 저항내력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{bv} = -D \sin \theta + F_h \tan \theta + F_v \quad (4)$$

$$V_{bh} = -D \cos \theta + F_h + F_v \cot \theta$$

여기서  $D$ 는 경사 압축대의 압축력이고,  $F_h$ 는 수평 인장재의 인장력,  $F_v$ 는 수직 인장재의 인장력으로서 Hwang et al.(2000)에 의해  $V_{bv}$ 의 함수로 유도되고, 세 개의 압축대

의 중첩에 의하여 절점영역의 최대 압축응력  $\sigma_{dmax}$ 는 식 (5)와 같이 유도된다.

$$\sigma_{dmax} = \frac{1}{A_{str}} \left\{ D - \frac{\cos\left(\theta - \tan^{-1}\left(\frac{jd}{2a}\right)\right)}{\cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{jd}{2a}\right)\right)} F_h - \frac{\cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{2jd}{a}\right) - \theta\right)}{\sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{2jd}{a}\right)\right)} F_v \right\} \quad (5)$$

해석절차는 압축대 면적을 산정하고  $V_{bv}$ 를 가정한 후 그에 따라 최대 압축응력  $\sigma_{dmax}$ 을 계산하고 유효 압축강도  $f_{ce}$ 에 도달시까지 반복계산을 수행하여  $V_{bv}$ 를 구하게 된다.

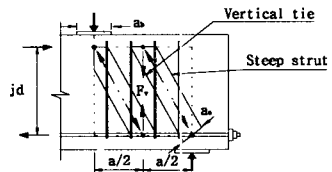
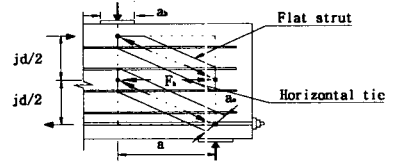
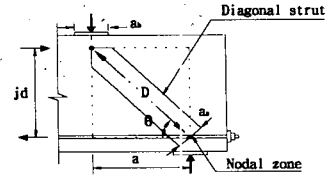


그림 1 깊은 보의 전단 저항 메커니즘

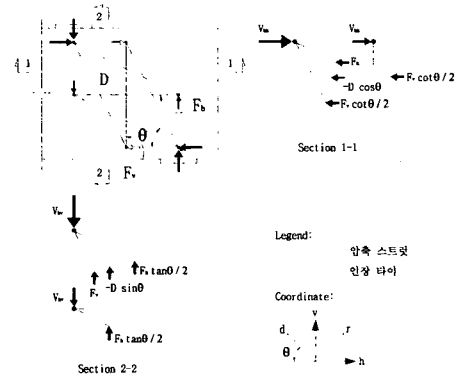


그림 2 깊은 보의 단순화된 스트럿-타이 모델

### 2.3 연화계수 적용

Zhang과 Hsu(1998)는 균열된 콘크리트의 연화 응력-변형률 관계를 다음과 같이 제시하였다.

$$\sigma_d = -\zeta f_{ck} \left[ 2 \left( \frac{-\varepsilon_d}{\zeta \varepsilon_0} \right) - \left( \frac{-\varepsilon_d}{\zeta \varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad \text{단, } \frac{-\varepsilon_d}{\zeta \varepsilon_0} \leq 1$$

$$\zeta = \frac{5.8}{\sqrt{f_{ck}}} \frac{1}{\sqrt{1+400\varepsilon_r}} \leq \frac{0.9}{\sqrt{1+400\varepsilon_r}} \quad (6)$$

여기서  $\sigma_d$ 는 콘크리트의 d방향 평균 주응력으로서 허용 응력  $f_{ce}$ 의 의미를 갖고,  $\zeta$ 는 연화계수,  $f_{ck}$ 는 콘크리트 공시체 압축강도(단위는 MPa),  $\varepsilon_d$ 와  $\varepsilon_r$ 는 각각 d방향과 r방향의 평균 주변형률, 그리고  $\varepsilon_0$ 는 콘크리트 공시체 압축강도와 대응하는 최대 변형률이고 다음과 같이 압축강도에 관한식으로부터 구할 수 있다.

$$\varepsilon_0 = 0.002 + 0.001 \left( \frac{f_{ck} - 20}{80} \right) \quad \text{단, } 20 \leq f_{ck} \leq 100 \text{ MPa} \quad (7)$$

철근의 응력-변형률 관계에 기초하여 인장재의 내력과 변형률사이의 관계는

$$F_h = A_{th} E_s \varepsilon_h \leq F_{yh}, \quad F_v = A_{tv} E_s \varepsilon_v \leq F_{yv} \quad (8)$$

이 되고, 여기서  $A_{th}$ 와  $A_{tv}$ 는 각각 수평 및 수직 인장재의 유효 단면적이고,  $F_{yh}$ 와  $F_{yv}$ 는 각각 수평 및 수직 인장재의 항복력을 나타낸다. 변형률의 적합조건은 식 (9)와 같이 2차원 평면요소의 모어의 원에서 제 1 변형률 불변수 관계를 사용한다.

$$\varepsilon_r + \varepsilon_d = \varepsilon_h + \varepsilon_v \quad (9)$$

식 (9)는 콘크리트의 연화계수 산정을 위한 주인장 변형률을 계산하는데 사용된다.

### 2.4 기존 연구자의 효율계수 적용

연화계수의 적용에 있어서 경사각이  $1/2 < \tan \theta < 2$ 의 범위를 벗어나 수평 또는 수직 보강근의 영향이 무시되는 경우, 또는 웹 보강철근이 배근되지 않은 경우에는 수직·수평 변형률을 적절히 나타 내지 못하고 있어 압축대에 대한 횡방향 인장변형률의 함수인 연화계수의 도입에 의문이 제기 된다. 따라서, 앞 절에서 제시된 단순화된 트러스 모델에 연화계수 대신 기존 연구자의 효율계수를 적용하여 전단강도를 예측한 결과와 비교 검토함으로써 전단강도에 영향을 미치는 변수별로 적절한 유효 압축 강도 산정방법을 찾을 수 있을 것으로 판단된다. 이 연구에서는 MacGregor의 효율계수와 Warwick과 Foster(1993)의 효율계수를 적용한다.

#### 1) Warwick과 Foster(1993)의 효율계수

Warwick과 Foster(1993)는 20~100 MPa (204~1020 kgf/cm<sup>2</sup>)의 압축강도를 갖는 콘크리트에 대한 효율계수에 관하여 연구를 수행하였고, 그 결과 효율계수에 영향을 미치는 주요 변수는 콘크리트의 강도와 전단경간비로 나타나 다음과 같은 관계식을 제안하였다.

$$f_{ce} = \nu f_{ck}$$

$$\nu = 1.25 - \frac{f_{ck}}{500} - 0.72 \left( \frac{a}{d} \right) + 0.18 \left( \frac{a}{d} \right)^2 \leq 0.85 \quad \frac{a}{d} < 2 \text{ 의 경우} \quad (10)$$

$$\nu = 0.53 - \frac{f_{ck}}{500} \quad \frac{a}{d} \geq 2 \text{ 의 경우}$$

여기서,  $\nu$ 는 효율계수이고,  $f_{ck}$ 의 단위는 MPa이다.

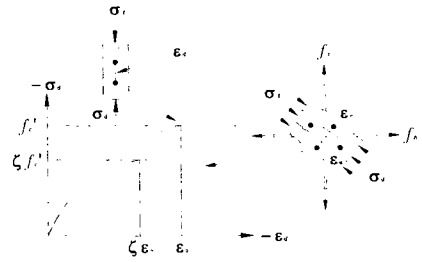


그림 3 주인장변형률에 의한 연화 응력-변형률관계

## 2) Macgregor의 효율계수

Macgregor가 제안한 유효 압축강도와 효율계수는 다음과 같다.

$$f_{ce} = \mu_1 \mu_2 f_{ck}, \quad \mu_2 = 0.55 + \left( \frac{4}{\sqrt{f_{ck}}} \right) \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (11)$$

이 연구에서는 하부 절점영역의 압축파괴를 가정하여 CCT 절점에 사용되는 계수  $\mu_1 = 0.85$  를 적용한다.

## 3. 해석결과의 비교 분석

이 연구에서 제시된 해석방법을 검증하기 위해 총 90 개의 깊은 보 시험체 실험결과가 인용되었다. 시험체는 김상식, 이진섭(1999)의 일반강도 시험체 27 개 및 고강도 시험체 15 개, Kong et al.(1970)의 일반강도 시험체 35 개, Foster와 Gilbert(1998)의 고강도 시험체 13 개로 해석 결과는 표 1 및 그림 4 ~ 8 에 나타나있다.

### 3.1 콘크리트 압축강도의 영향

일반강도 시험체에 단순화된 스트럿-타이 모델에 연화계수를 적용한 경우와 MacGregor의 효율계수를 적용한 경우는 해석결과가 실험값에 매우 근접하게 나타나는 반면, Warwick과 Foster(1993)의 효율계수를 적용한 경우는 다른 경우와 비교시 실험값보다 전단강도를 높게 예측하는 결과를 보였다.

고강도 시험체에서는 연화계수를 적용한 경우 비교적 안전측으로 나타나는 반면 편차가 다소 크게 나타났다. Warwick과 Foster(1993)의 효율계수를 적용한 경우는 일반강도 시험체의 해석결과보다 실험값에 더 근접한 결과를 보였고, MacGregor의 효율계수를 적용한 경우가 실험값에는 가장 근접한 결과를 보여 고강도 시험체의 해석에 효과적인 방법으로 판단된다.

### 3.2 전단경간비의 영향

스트럿-타이 모델에서 전단경간비는 압축대의 경사각을 결정하기 때문에 제시된 해석방법은 전단스팬비에 따라 민감하게 변화하며, 전단경간비가 작을수록 높게 전단강도를 예측하는 결과를 보이나, 국내규준에 의한 해석결과는 전단경간비가 작을수록 보수적인 결과를 나타내고 있다. Warwick과 Foster(1993)의 효율계수는 전단경간비(a/d)를 변수로 하고 있으며, 전단경간비가 작은 경우 실험값보다 전단강도를 높게 예측하고 있고, 전단경간비가 비교적 큰 경우에는 전단강도를 상대적으로 낮게 예측하고 있다. Zhang과 Hsu(1998)의 연화계수를 적용한 방법과 MacGregor의 효율계수를 적용한 방법이 전단경간비의 영향이 적절히 반영되어 있어 실험값과 유사한 해석결과를 보였다.

표 1 해석결과의 실험값 및 국내규준과의 비교

실험자 (시험체수)		전단경간비 (a/d)의 범위	트러스 모델						국내규준	
			Zhang & Hsu(98)의 연화계수 적용		Warwic & Foster(93)의 효율계수 적용		MacGrego:의 효율계수 적용			
			$\frac{V_{test}}{V_{calc}}$	표준 편차	$\frac{V_{test}}{V_{calc}}$	표준 편차	$\frac{V_{test}}{V_{calc}}$	표준 편차	$\frac{V_{test}}{V_{calc}}$	표준 편차
일반강도 시험체	이진섭(27개)	0.43~1.30	1.15	0.13	1.08	0.27	1.08	0.18	1.91	0.53
	Kong et al.(35개)	0.30~1.18	1.12	0.20	0.97	0.23	1.07	0.21	1.69	0.21
고강도 시험체	이진섭(15개)	0.43~1.30	1.14	0.15	1.03	0.27	1.07	0.12	2.41	0.60
	Foster & Gilbert(13개)	0.76~1.88	1.31	0.31	1.18	0.15	0.90	0.16	1.56	0.27

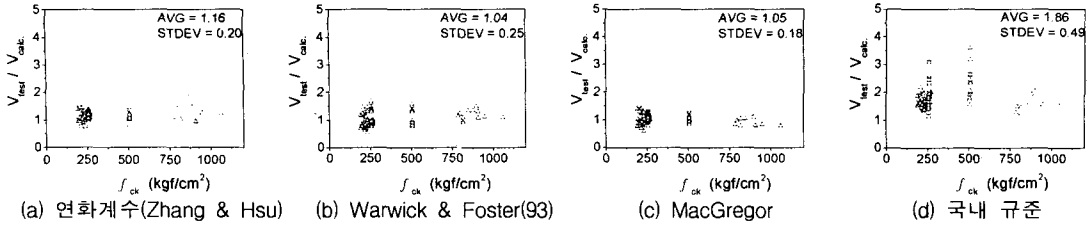


그림 4 콘크리트 압축강도에 따른 해석결과 비교

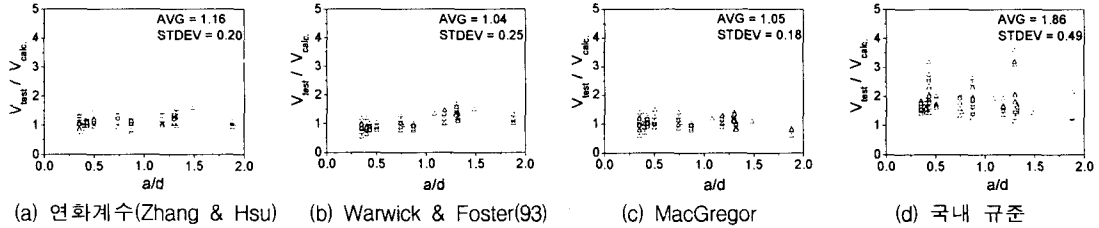


그림 5 전단경간비에 따른 해석결과 비교

### 3.3 웨브 보강근의 영향

웨브 보강근의 철근비는 해석의 정도(精度)에 큰 영향을 줄 정도는 아니나, 그림 6에서 보이는 바와 같이 전반적으로 트러스 모델에 의한 방법은 웨브 보강철근의 영향을 효과적으로 반영하고 있어 규준에 의한 계산값에 비해 실험값에 근접한 결과를 나타내고 있다. 그러나 보강철근이 배근되지 않은 일부 시험체는 연화계수를 적용한 경우 주인장변형률이 낮게 산정되어 연화계수를 높게 평가하였고, MacGregor의 효율계수를 적용함으로써 일부 시험체의 경우에는 이를 개선한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 그림 7 및 8과 같이 국내규준에 의해 계산된 깊은 보의 전단강도는 웨브 보강 철근비가 작은 경우 콘크리트에 의한 지지성능이 다소 작게 평가되고 있는 것으로 나타났다.

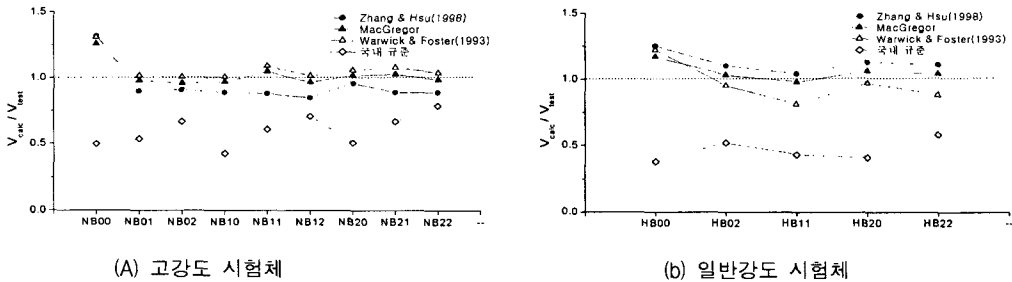


그림 6 보강근 배근 상황에 따른 해석결과 비교

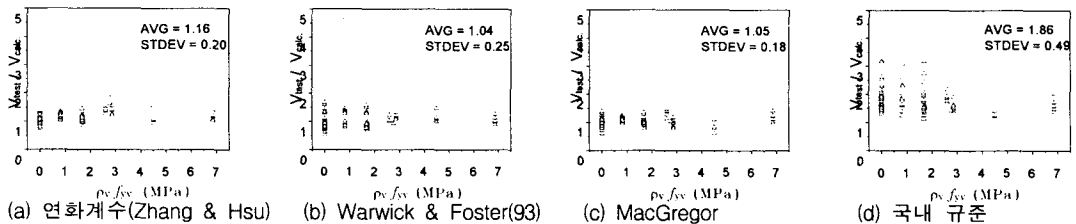


그림 7 수직 웨브 보강근의 양에 따른 해석결과 비교

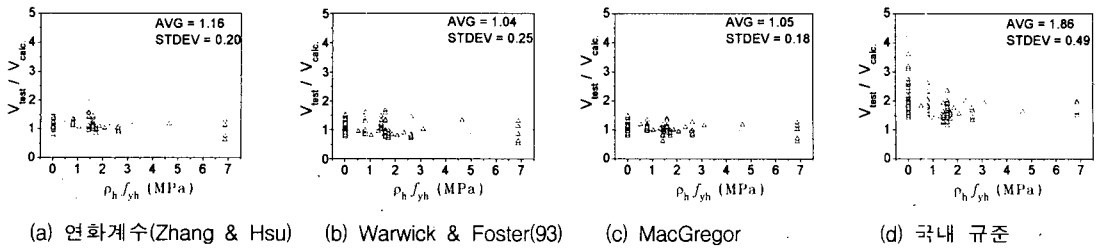


그림 8 수평 웹 보강근의 양에 따른 해석결과 비교

#### 4. 결 론

이 연구는 양단이 단순지지인 집중하중을 받는 철근콘크리트 깊은 보를 대상으로, 단순화된 스트럿-타이 모델을 이용하여 전단강도를 예측하는 방법에 대해 고찰하였으며, 이를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 깊은 보의 단순화된 스트럿-타이 모델에서 유효 압축대의 너비를  $a_s = \sqrt{\left(\frac{2}{3} kd\right)^2 + a_b^2}$  로 수정하여 계산한 전단강도는 Hwang et al.(2000)이 제안한 유효 압축대의 너비  $a_s = \sqrt{(kd)^2 + a_b^2}$  를 적용하여 산정된 전단강도에 비해 실험값에 근접한 결과를 나타내고 있다.
- 2) 수정된 유효 압축대 너비를 적용하여 계산된 해석값에 대한 실험값의 비는, Zhang과 Hsu(1998)의 연화계수를 적용한 경우는 평균 1.16, 표준편차 0.20, Warwick과 Foster(1993)의 효율계수를 적용한 경우는 평균 1.04, 표준편차 0.25로 나타났다. MacGregor의 효율계수를 적용한 경우는 평균 1.05, 표준편차 0.18로 계산되어 전체적으로 볼 때 MacGregor의 효율계수를 적용한 방법이 실험값에 가장 근접하였다.
- 3) 전단경간비가 작고 전단보강근이 배근되지 않은 경우, 국내 표준식에 의한 깊은 보의 전단강도는 다른 산정방법에 비해 낮은 값으로 계산되고 있는데, 이는 깊은 보의 전단강도에 대한 콘크리트의 기여도가 다소 낮게 평가되고 있기 때문으로 판단된다.
- 4) 연화계수를 적용한 경우와 MacGregor의 효율계수를 적용한 경우는 깊은 보의 전단강도에 미치는 전단경간비의 영향을 적절히 반영하는 것으로 보이나, Warwick과 Foster(1993)의 효율계수를 적용한 경우는 전단경간비의 영향을 다소 과대평가하고 있는 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. Kong, F. K., Robins, P. J., and Cole, D.F., "Web Reinforcement Effects in Deep Beams," *ACI Journal, Proceedings* Vol. 68, No. 12, Dec. 1970, pp. 1010-1017.
2. MacGregor, G. J., *Reinforced Concrete Mechanics and Design*, Prentice Hall, 1988.
3. Foster, S. J. and Gilbert, R. I., "Experimental Study on High Strength Concrete Deep Beams," *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 5, July-August 1998, pp. 382-390.
4. Hwang, S. J., Lu, W. Y., Lee, H. J., "Shear Strength Prediction for Deep Beams," *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 3, May-June 2000, pp. 367-376.
5. 이진섭, "철근콘크리트 깊은 보의 전단 거동에 미치는 구조 변수의 영향," 인하대학교 박사학위 청구논문, 1999. 8
6. 이진섭, 김상식, "집중하중을 받는 깊은 보의 전단거동에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회지, Vol. 11, No. 1, 1999. 2., pp. 191-200.