

## 크기효과를 고려한 복부보강이 없는 고강도 콘크리트 보의 전단강도 예측식의 제안

배영훈<sup>1)</sup> · 윤영수<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup> 금호엔지니어링 부설 건설기술연구소 <sup>2)</sup> 고려대학교 토목환경공학과

(2003년 5월 9일 원고접수, 2003년 9월 19일 심사완료)

## Prediction of Shear Strength in High-Strength Concrete Beams without Web Reinforcement Considering Size Effect

Young-Hoon Bae<sup>1)</sup> and Young-Soo Yoon<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup> Research Institute of Construction Technology, Kumho Eng. Anyang, 431-060, Korea

<sup>2)</sup> Dept. of Civil & Environmental Engineering, Korea University, Seoul, 136-701, Korea

(Received May 9, 2003, Accepted September 19, 2003)

### ABSTRACT

Recent research has indicated that the current ACI shear provision provides unconservative predictions for large slender beams and beams with low level of longitudinal reinforcement, and conservative results for deep beams. To modify some problems of ACI shear provision, ultimate shear strength equation considering size effect and arch action to compute shear strength in high-strength concrete beams without stirrups is presented in this research. Three basic equations, namely size reduction factor, rho factor, and arch action factor, are derived from crack band model of fracture mechanics, analysis of previous some shear equations for longitudinal reinforcement ratio, and concrete strut described as linear prism in strut-tie model deep beams. Constants of basic equations are determined using statistical analysis of previous shear testing data. To verify proposed shear equation for each variable, effective depth, longitudinal reinforcement ratio, concrete compressive strength and shear span-to-depth ratio, about 300 experimental data are used and proposed shear equation is compared with ACI 318-99 code, CEB-FIP Model code, Kim & Park's equation and Zsutty's equation. The proposed shear equation is not only simpler than other shear equations, it is but also shown to be economical predictions and reasonable safety margin. Hence proposed shear strength equation is expected to be applied to practical shear design.

**Keywords :** shear strength equations, reinforced concrete beams, size effect, arch action, regression analysis

### 1. 서 론

최근 건설 현장에서는 콘크리트 구조물의 대형화, 장대화 그리고 고강도화가 이루어지고 있다. 그러나 건설 현장의 현 추세에서는 구조물 크기의 증가에 따른 사인장 균열폭의 증대와 콘크리트 강도의 증가에 따른 취성적 특성이 콘크리트 구조물의 전단강도를 감소시켜 전단파괴를 야기할 수 있다. 따라서 콘크리트 구조물의 대형화, 장대화 그리고 고강도화에 따른 전단강도의 예측은 중요한 문제이지만 현행 ACI 318-99 code<sup>1)</sup>의 전단강도 예측식은 다음과 같은 문제점으로 인해 전단강도의 합리적인 예측이 어렵다<sup>2)</sup>.

하기 위한 전단지간비 향을 기존의 실험데이터를 이용한 선형 및 비선형 회귀분석을 통해 결정하고 이를 ACI 318-99 code의 전단강도 예측식에 포함시킴으로써 크기효과를 비롯한 여러 문제점이 개선된 실무적용성이 가능한 전단강도 예측식을 제안하고자 한다.

### 2. 전단강도 예측식의 제안

ACI 전단강도 예측식을 수정한 복부보강이 없는 고강도 콘크리트 보의 전단강도 예측식의 제안을 위해 기존의 실험 데이터를 이용하여 비선형 회귀분석을 실시하였다. 비선형 회귀분석시 실험값만을 사용하지 않고 실험값과 ACI 전단강도 예측식 값의 비율을 이용한 잔차보정 방식을 채택하였다. 일반적으로 잔차라고 하면 실험값과 예측값의 차를 의미하지만 반응변수의 단위에 따라 잔차의 값

\* Corresponding author

Tel : 02-3290-3320 Fax : 02-928-7656

E-mail : ysyoon@korea.ac.kr

변화가 민감하기 때문에 잔차를 무차원화 할 필요가 있다. 따라서  $[\frac{v_{exp}}{v_{ACI}} = \text{무차원 값}]$ 이 오차항이 되며 이 오차항의 보정을 통해 ACI 전단강도 예측식을 수정하였으며, 제안식의 기본 형태는 식 (1)과 같다.

$$v_{proposed} = v_{ACI} f_{sr}(d) f_{si}(\rho) (a/d > 2.5) \quad (1.a)$$

$$v_{proposed} = f_{aa}(a/d) v_{ACI} f_{sr}(d) f_{si}(\rho) (a/d \leq 2.5) \quad (1.b)$$

### 2.1 Size reduction factor의 결정

크기효과란 구조물의 크기가 커지면서 구조물이 저항할 수 있는 능력이 크기에 비례하지 못하고 평균 저항력은 떨어진다 것을 의미한다<sup>3)</sup>. 즉, 구조물의 크기가 증가함에 따라 휨 균열 이후에 발생하는 사인장 균열의 폭은 증가하며 균열폭의 과다한 증가로 인해 구조물이 저항할 수 있는 능력이 구조물의 크기에 비례하여 커지지 못하고 전단강도의 감소로 이어지는 것이다. 콘크리트 재료는 상당히 취성적인 재료이므로, 콘크리트의 내부에는 재료 자체가 이미 많은 미세균열을 포함하고 있으며 비록 육안으로 식별할 수 있는 균열이 없더라도 하중이 작용하면 미세균열단에서 응력집중 현상이 발생하고, 취성재료이므로 균열은 곧 진전되기 때문에 콘크리트는 항상 크기효과를 나타낸다. 따라서 토목 구조물이 대형화, 장대화 되면서 크기 효과에 대한 고려가 필수적이라 할 수 있으나, 현행 ACI 전단강도 산정식에는 크기효과를 반영할 수 있는 인자가 포함되어 있지 못하므로 기존의 ACI 전단강도 산정식에 크기효과를 반영할 수 있는 인자, 즉 유효깊이 항을 포함시키고자 하며, size reduction factor라고 명명한다.

Size reduction factor의 제안을 위해 Collins 등의 실험체를 선택하였으며, Table 1에 제시되어 있다<sup>4)</sup>.

이 실험체를 선택한 이유는 콘크리트 보의 유효깊이를 제외한  $f_{ck}$ ,  $\rho$ ,  $a/d$ 가 고정되어 있어서 콘크리트의 고강도화에 따른 크기효과에 대한 취약성, 즉 전단강도 감소 경향에 대한 파악이 용이할 것으로 판단하였기 때문이다. Size reduction factor의 기본형태는 파괴역학의 균열띠 모델에서 도입하였다.

Bazant와 오병환<sup>5)</sup>은 일정한 폭과 연속적으로 균일하게

**Table 1** Testing data for proposition of size reduction factor

Specimen	$f_{ck}$ (MPa)	$\rho$	$a/d$	d (mm)	$\frac{v_{exp}}{v_{ACI}}$
BRL100	94.0	0.0050	3	925	0.36
BH100	98.0	0.0076	3	925	0.42
BH50	98.0	0.0081	3	450	0.59
BH25	98.0	0.0089	3	225	0.76

분포된 미세균열이 띠를 형성하는 파괴진행대를 이상화하여 에너지 개념에 근거한 파괴응력을 유도하였으며 그 기본식은 식 (2)와 같다.

$$\sigma_N = \frac{Bf_t}{\sqrt{1 + b/b_0}} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } B = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{E}{E_t}\right)}, \quad b_0 = \frac{md_a}{2} \cdot \frac{b}{a}$$

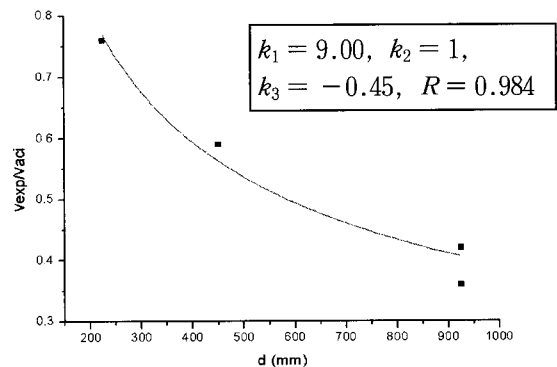
식 (2)에서 분모항이 크기효과가 고려된 부분으로 size reduction factor의 기본식을 균열띠 모델의 분모항에서 착안하여  $k_1(1 + k_2d)^{k_3}$ 으로 설정하였으며 상수  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 는 비선형 회귀분석을 통해 결정하였다. 비선형 회귀분석을 위해 사용된 프로그램은 OriginLab 통계 프로그램이며, 300번 반복을 통한 회귀분석 결과는 Fig. 1에 나타나 있다.

비선형 회귀분석의 결과 얻어진 상수 값들을 size reduction factor 기본식에 대입하게 되면 식 (3)과 같은 size reduction factor를 얻을 수 있다.

$$f_{sr}(d) = 9.00 \times (1 + d)^{-0.45} \quad (3)$$

### 2.2 $\rho$ factor의 결정

인장철근은 장부작용(dowel action)을 통해 횡 전단력에 저항할 수 있을 뿐만 아니라, 크기효과를 줄여주기도 한다. 주균열이 생성되기 전에 콘크리트 내부의 미세균열 영역이 넓으면 응력의 고른 분포로 인한 응력집중 현상을 방지할 수 있으므로 크기효과는 줄어들고, 미세균열 영역이 좁으면 크기효과는 늘어나게 된다. 인장철근을 배근하게 되면 크기효과를 현저하게 줄여주는 철근 자체의 효과와 더불어 콘크리트의 미세균열 영역도 넓혀주기 때문에



**Fig. 1** Result of size reduction factor by OriginLab

크기효과는 줄어든다<sup>3)</sup>. 따라서 휨-전단 균열의 시발점이라 할 수 있는 초기 휨 균열 및 2차 균열의 발생을 제어하고 크기효과를 감소시키는 인장철근 양은 이러한 측면에서 전단강도 산정시 중요하게 고려해야 할 인자라고 할 수 있다. CEB-FIP Code나 Zsutty 식<sup>6,7)</sup> 등과는 달리, ACI 상세식은 인장철근비의 영향을 과소평가 하였으며, 단순식의 경우  $f_{ck}$ 의 영향을 과대평가한 나머지 인장철근비에 대한 변수는 포함되어 있지 않다. 따라서 장부 작용 및 크기효과 측면에서 인장철근비의 중요성을 적절히 반영할 수 있는 인장철근비 항을 포함하고자 하며, 이 인장철근비에 의한 전단강도 증가분을  $\rho$  factor로 명명한다.

$\rho$  factor의 제안을 위해 Angelakos 등의 실험체를 선택하였다<sup>8)</sup>. 이 실험체를 선택한 이유는 기하학적 유사성을 지니면서 동일하거나 비슷한 범위의  $a/d$ 와  $f_{ck}$  값을 나타내고 있으며, 1% 이하로 설정된 인장철근비를 통해 취약한 상황에서 재현된  $\rho$  factor는 설계 측면에서 안전율을 부여할 것으로 판단하였기 때문이다. Angelakos 등의 실험체는 Table 2에 제시되어 있다.

$\rho$  factor의 기본형태는 CEB-FIP Code나 다른 제안식<sup>6,7,9)</sup>에서 표현되는 것과 유사한  $\rho$ 의 누승 형태인  $k_4 \rho^{k_5}$ 이다. 상수  $k_4$ ,  $k_5$ 는 OriginLab 통계 프로그램을 이용하여 결정하였으며, 500번 반복을 통한 회귀분석의 결과는 Fig. 2에 나타나 있다.

Table 2 Testing data for proposition of  $\rho$  factor

Specimen	$f_{ck}$ (MPa)	$\rho$	$a/d$	d (mm)	$\frac{v_{exp}}{v_{ACI}}$
DB120	21	0.0101	3	925	0.84
DB130	32	0.0101	3	925	0.71
DB140	38	0.0101	3	925	0.63
DB230	32	0.0209	3	925	0.93
DB0.530	32	0.0050	3	925	0.63

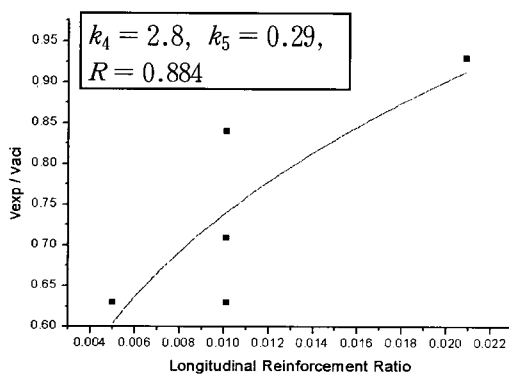


Fig. 2 Result of  $\rho$  factor by Origin Lab

비선형 회귀분석의 결과 얻어진 상수 값들을  $\rho$  factor의 기본식에 대입하면 식 (4)와 같은  $\rho$  factor를 얻을 수 있다.

$$f_{si}(\rho) = 2.8 \rho^{0.29} \quad (4)$$

### 2.3 Slender beam에서의 전단강도 예측식의 결정

Size reduction factor와  $\rho$  factor가 서로 독립이라고 가정했을 때의 제안식의 형태가 식 (1.a)에 제시되었고, 위에서 유도된 size reduction factor와  $\rho$  factor를 대입하면 식 (5)와 같은 전단강도 제안식을 얻을 수 있다.

$$(v_{proposed})_{cr.} = 4.21 \frac{\sqrt{f_{ck}} \rho^{0.289}}{(1+d)^{0.45}} \quad (5)$$

위의 제안식은 cracking strength 값인데 크기효과는 균열거동에 바탕을 두었으며 초기 사인장 균열이 발생하기 전까지는 크기효과에 의한 전단강도 감소는 미미하거나 거의 발생하지 않으며, 복부 부분에 최초의 사인장 균열이 발생할 때의 시점에 대한 인지와 균열하중에 대한 정의는 관찰자의 판단에 따라 다를 수 있다. 따라서 ultimate failure보다 오히려 crack initiation에 대한 설계는 균일한 안전율을 확보할 수 없기 때문에 전단강도 산정식은 cracking strength이기 보단 ultimate strength이어야 한다<sup>10)</sup>. RC. 보에서 보유전단내력이란 처음 사인장균열이 발생하였을 때 전단에 의한 취성파괴를 어느 정도 연장해 주는 가 하는 능력을 말하며, Johnson과 Ramirez는 이러한 보유전단내력을 극한전단강도  $v_u$ 와 처음 사인장균열을 야기하는 전단강도  $v_{cr}$ 의 차인 ( $v_u - v_{cr}$ )과 같은 양적인 개념으로 정의하였다<sup>11)</sup>. 전단철근이 없는 보에서  $v_u$ 와  $v_{cr}$ 을 동시에 측정된 Kani, Thurston 과 Mphonde 등의 실험결과<sup>12-14)</sup>를 통해서 이러한 보유전단내력 관점을 적용하면 cracking strength에서 ultimate strength를 얻기 위해서는 대략 10%를 증진시킬 필요가 있다. 따라서 식 (5)는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(v_{proposed})_{ul.} = 4.63 \frac{\sqrt{f_{ck}} \rho^{0.29}}{(1+d)^{0.45}} \quad (6)$$

제안식이 보유하여야할 요건 중에서 중요하게 고려할 부분이 단순성과 안전율이다. 따라서 실무 적용을 위한 단순성과 안전율을 고려하면 각 factor는 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$(1+d)^{-0.45} \rightarrow (1+d)^{-0.4}, \quad \rho^{0.29} \rightarrow \rho^{0.25}, \\ 4.63 \rightarrow 4.65$$

따라서  $a/d > 2.5$ 인 범위에서 복부보강이 없는 고강도 콘크리트 보의 전단강도 예측식은 최종적으로 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(v_{proposed})_{final} = 4.65 \frac{\sqrt{f_{ck} \cdot \rho^{0.5}}}{(1 + d)^{0.4}} \text{ (MPa, mm)} \quad (7)$$

## 2.4 깊은 보에서의 전단강도 예측식의 결정

깊은 보에서 만약 철근이 부착되어 있지 않기 때문에 전단흐름이 전달될 수 없거나, 또는 전단흐름의 전달이 하중 작용점에서 지점부까지 뺀은 사균열에 의해서 방해받는 경우 보작용(beam action)보다는 아치작용(arch action)에 의해 전단력은 전달된다. 이러한 경우 경사 스트럿의 압축력은 추가하중을 지지할 수 있게 되며, 결국 slender beams에 비해 깊은 보는 큰 값의 전단강도를 가지게 된다. 따라서 식 (7)을 전단지간이 2.5 이하인 깊은 보에 사용하게 되면 전단강도의 예측이 지나치게 보수적이게 된다. ACI 전단강도 식뿐만 아니라 Zsutty 식, Kim & Park 식에는 깊은 보의 전단강도 증가분을 고려한 항이 곱해져 있다. 따라서 식 (7)에 아치작용을 고려한 항이 곱해질 필요가 있고, 이 항을 arch action factor라고 명명한다.

Arch action factor의 제안을 위해 신성우 등의 실험체를 선택하였으며, 실험체는 Table 3에 제시되어 있다<sup>15)</sup>. 이 실험체를 선택한 이유는 고강도 콘크리트 보에서 동일한  $\rho$ 와  $f_{ck}$  값을 가질 때, 1.5에서 2.5의 전단지간을 가지는 깊은 보의 전단강도 증가 경향을 파악하기가 용이할 것으로 판단했기 때문이다. 여기서  $\frac{v_{exp}}{v_{ACI}}$ 의 값을 사용하여 회귀분석을 할 때,  $v_{ACI}$  값은 slender beams일 경우의 값을 사용하였다. 왜냐하면  $v_{ACI}$  산정시  $a/d$ 가 2.5 이하인 경우에  $(3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d})$ 을 곱하도록 규정하고 있지만, 경제적이면서도 적절한 안전율을 확보할 수 있는 새로운 arch action factor의 도출을 위해서는 실험값과 slender beams에 대한 전단강도 값의 간차를 보정하여야 의도하는 바의 arch action factor를 얻을 수 있기 때문이다.

전단지간 내에서 압축력의 궤도를 어떻게 볼 것인가 하는 것은 매우 중요한 사항이다. 왜냐하면 이 압축력의 궤도에 따라 콘크리트 보 내부의 모멘트 팔 길이가 변화하기 때문이다. 모멘트 팔 길이,  $jd$ 는 깊은 보에서 전단지간비와 관련이 있다. 김대중 등은  $jd$ 를 전단지간비의 지수승으로 표현하였으며<sup>16)</sup>, 아치의 형상을 반영하기 위해 2차함수로 표현할 수도 있겠으나 여기서는 해석의 간편함을 위해 Strut-Tie Model의 프리즘 스트럿과 같은 일차함수,  $k_6 + k_7(a/d)$ 로 가정하여 회귀분석을 실시하였다. OriginLab 통계 프로그램을 이용하여 200번의 반복을 거

Table 3 Testing data for proposition of arch action factor

Specimen	$f_{ck}$ (MPa)	$\rho$	$a/d$	d (mm)	$\frac{v_{exp}}{v_{ACI}}$
MHB1.5-0	52	0.0377	1.5	215	3.49
MHB2.0-0	52	0.0377	2.0	215	2.72
MHB2.5-0	52	0.0377	2.5	215	1.74
HB1.5-0	73	0.0377	1.5	215	3.70
HB2.0-0	73	0.0377	2.0	215	2.59
HB2.5-0	73	0.0377	2.5	215	2.09

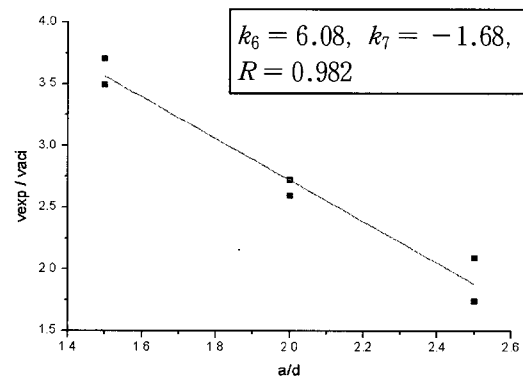


Fig. 3 Result of arch action factor by OriginLab

쳐 상수  $k_6$ 와  $k_7$ 을 결정하였다. 회귀분석의 결과는 Fig. 3에 나타나 있다.

10%의 안전율과 실무 적용을 위한 단순성을 고려하면 회귀분석에 의해 얻어진 상수의 값은 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$k_6 = 6.08 \rightarrow 5.5, \quad k_7 = -1.68 \rightarrow -1.5$$

따라서  $a/d \leq 2.5$ 인 범위에서 고강도 콘크리트 보의 전단강도 산정식은 최종적으로 식 (8)과 같다.

$$v_{proposed} = \left(5.5 - 1.5 \frac{a}{d}\right) 4.65 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck} \rho^{0.5}}}{(1 + d)^{0.4}} \quad (8)$$

## 3. 제안식의 검증

크기효과와 아치작용을 반영할 수 있는 세 개의 factor를 유도하기 위해 선형 및 비선형 회귀분석을 실시하였으며, 이를 통해 도출된 제안식의 통계적 검증 및 4개의 전단강도 예측식과의 비교를 위해 고강도 콘크리트 보에 대한 데이터 136개<sup>17)</sup>를 수집하였다. 또한 저강도 콘크리트 보에 대한 적용성을 평가하기 위하여 저강도 콘크리트 보와 관련된 데이터 160개<sup>17)</sup>를 수집하였으며, 5개의 전단강

**Table 4** Empirical equations and code provisions for shear strength of concrete beams

Code or investigator	Predictive equation (MPa, mm unit)
Proposed equation	$v_u = 4.65 \frac{\sqrt{f_{ck} \rho^{0.5}}}{(1+d)^{0.4}} (a/d > 2.5), v_u = \left(5.5 - 1.5 \frac{a}{d}\right) 4.65 \frac{\sqrt{f_{ck} \rho^{0.5}}}{(1+d)^{0.4}} (a/d \leq 2.5)$
ACI 318-99 (simplified) ( $f'_c \leq 68.6\text{MPa}$ )	$v_c = 0.167\sqrt{f_{ck}} (a/d \geq 2.5), v_c = \left(3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d}\right) 0.167\sqrt{f_{ck}} (a/d \leq 2.5)$
CEB-FIP Model code	$v_{cr} = 0.15 \left(3 \cdot \frac{d}{a}\right)^{\frac{1}{3}} (100 \cdot f_{ck} \cdot \rho)^{\frac{1}{3}} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right)$
Kim & Park's equation	$v_u = 3.5 f_{ck}^{\frac{4}{3}} \rho^{\frac{3}{8}} \left(0.4 + \frac{d}{a}\right) \left(0.18 + \frac{1}{\sqrt{1+0.008d}}\right)$ ( $\alpha = 1$ for $a/d \geq 3$ , $2 - (a/d)/3$ for $1 \leq a/d < 3$ )
Zsutty's equation	$v_u = 2.1746 \left(f_{ck} \rho \frac{d}{a}\right)^{\frac{1}{3}} (a/d \geq 2.5), v_u = \left(\frac{2.5}{a/d}\right) 2.1746 \left(f_{ck} \rho \frac{d}{a}\right)^{\frac{1}{3}} (a/d \leq 2.5)$

**Table 5** Comparison of statistical analysis for 5 equations in high and low strength concrete slender beams

Method	Test / Predicted Ratio (T.O.P.R.) in slender beams						No. of data between 1 and 1.5 in T.O.P.R.
	High strength concrete beams (97)			H.S. & L.S. concrete beams (241)			
	Mean	S.D.	R	Mean	S.D.	R	
Proposed eq.	1.085	0.167	0.831	1.163	0.164	0.902	204
ACI 318-99 simplified eq.	1.393	0.356	0.489	1.379	0.328	0.673	128
CEB-FIP model code	1.188	0.158	0.876	1.212	0.140	0.926	221
Kim & Park's eq.	0.941	0.136	0.835	0.985	0.121	0.912	116
Zsutty's eq.	1.065	0.177	0.806	1.071	0.180	0.862	156

도 식은 Table 4에 요약되어 있다. 통계분석은 SPSS ver. 10.0을 이용하였으며, 평균(M), 표준편차(S.D.), 표본상관계수(R)을 도출하였으며 그 결과는 Table 5와 6에 제시되었다. 깊은 보에서 ACI 318-02 규준과 CEB-FIP Model code는 특별한 전단강도 산정식을 규정하기보다는 truss model을 기초로 한 Strut-Tie Model을 적용하여 깊은 보에 대한 응력 검토를 하기 때문에, 깊은 보에 대한 전단강도 산정식의 검증에서는 이 두 규준을 제외하고 깊은 보에서 전단강도 산정을 수식으로 규정하고 있는 ACI 318-99 규준과 제안식을 포함한 4개의 전단강도 산정식에 대해서만 통계적 검증을 수행하였다.

Table 5와 6에서 알 수 있듯이, 제안식은 김진근 식이나 CEB-FIP Model code와 비교해서 식이 단순하지만 통계결과는 두 전단강도 예측식과 거의 유사한 것으로 나타났다. 고강도 콘크리트 보에 대해서 제안식, 김진근 식, CEB-FIP Model code는 표준편차와 표본상관계수 값이 거의 비슷하며 특히 깊은 보의 경우 표본상관계수 값이 제안식에서 가장 크게 나타났다.

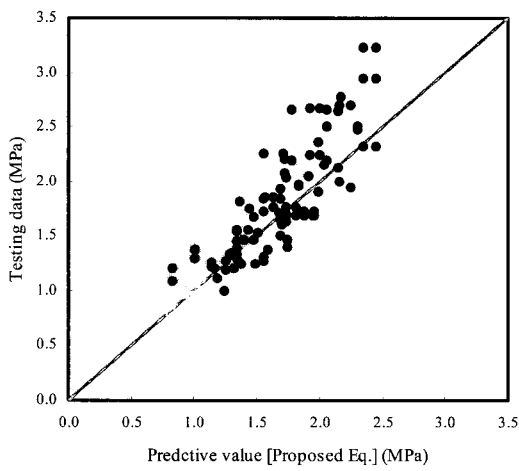
Slender beams에 대한 실험값과 계산값을 비교한 결과는 Fig. 4에 제시되어 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 제안식과 CEB-FIP Model code는 고강도 및 저강도 콘크리트

트 보에서의 전단강도 예측시 다른 전단강도 예측식에 비해 경제성과 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

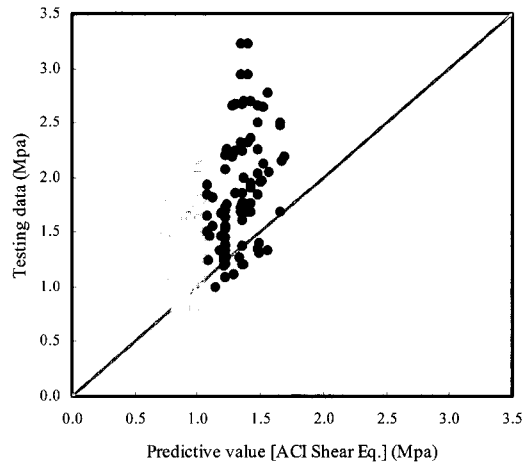
제안식에 대한 변수별 검증을 수행한 결과가 Fig. 5에 제시되어 있다. 검증을 위해 선택된 변수는 유효깊이( $d$ ), 인장철근비( $\rho$ ), 콘크리트 압축강도( $f_{ck}$ ) 그리고 전단지간비( $a/d$ )이다. 전단강도 예측식을 이용하여 콘크리트 보 파괴시 전단강도를 예측할 때, 정확한 전단강도를 예측하는 것이 중요할 수 있으나 예측한 값보다 작은 값에서 파괴가 일어나서는 안된다. 따라서 [실험값/예측값]은 전단강도 예측의 경제성과 안전성을 확보하는 지표라고 할 수 있으며 [실험값/예측값]이 1과 1.5 사이에 존재할 경우 예측의 안전성과 경제성을 반영한다고 할 수 있다. Fig. 5에서, 유효깊이에 대한 검증결과를 살펴보면 유효깊이가 증가할수록 ACI 318 규준은 비보수적인 전단강도 예측을 보이는 것으로 알려져 있지만 제안식은 전단강도 예측의 안전성을 확보하고 있음을 알 수 있다. 제안식은  $a/d$ 가 2.5를 초과할 경우  $a/d$ 에 대한 항을 포함하고 있지 않으나  $a/d$ 가 증가함에 따라 균일한 전단강도 예측을 하고 있는 것으로 나타났다. 또한 제안식은 인장철근이 저보강된 콘크리트 보에서도 경제적이면서도 안전한 전단강도 예측을 보이고 있다.

**Table 6** Comparison of statistical analysis for 4 equations in high and low strength concrete deep beams

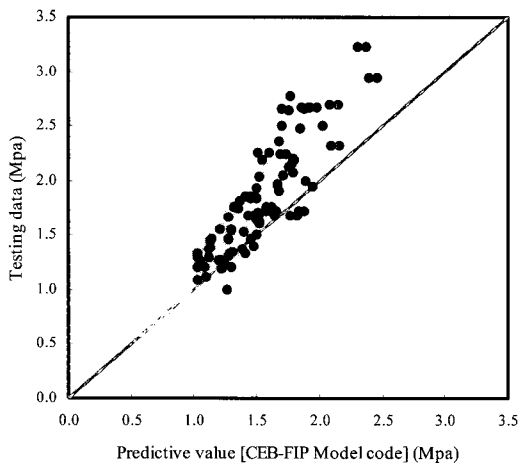
Method	Test / Predicted Ratio (T.O.P.R.) in deep beams						No. of data between 1 and 1.5 in T.O.P.R.
	High strength concrete beams (39)			H.S. & L.S. concrete beams (55)			
	Mean	S.D.	R	Mean	S.D.	R	
Proposed eq.	1.157	0.211	0.906	1.153	0.205	0.937	37
ACI 318-99 simplified eq.	2.015	0.448	0.867	1.888	0.507	0.887	11
Kim & Park's eq.	0.905	0.183	0.904	0.894	0.178	0.922	15
Zsutty's eq.	1.386	0.293	0.897	1.319	0.299	0.913	37



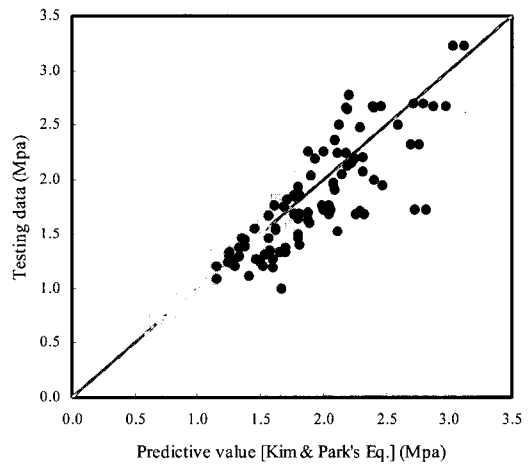
(a) Proposed Equation



(b) ACI 318-99 Code

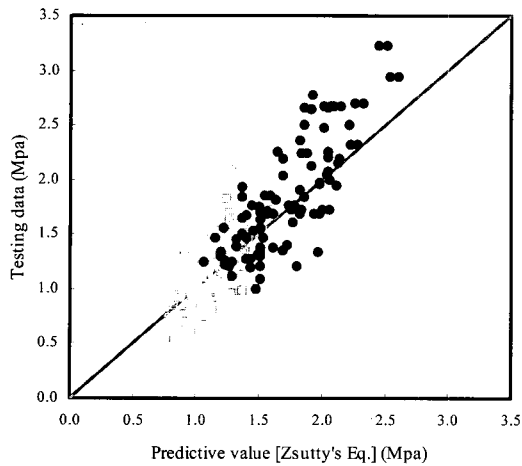


(c) CEB-FIP Model Code



(d) Kim & Park's Equation

● : High strength concrete beams, □ : Low strength concrete beams



(e) Zsutty's Equation

Fig. 4 Comparison of the design formulas with experimental data in 241 slender beams

#### 4. Response 2000을 이용한 크기효과 예

압축장 이론(CFT)이 균열발생 이후 콘크리트의 주인장 응력을 0으로 가정한 반면, 수정 압축장 이론(MCFT)은 평균응력개념과 국부응력개념을 이용하여 사방향으로 균열간 콘크리트의 인장응력을 고려하고 있으며, 실험으로도 입증되고 있다. 이 수정 압축장 이론을 근간으로 하는 단면해석 프로그램인 Response 2000<sup>19)</sup>은 토론토 대학에서 개발된 것으로 휨과 전단에 대한 비교적 정확한 해석결과를 보여주고 있다.

Response 2000을 이용하여 해석을 실시한 이유는 대형 구조물의 구조적 안전성을 평가하기 위하여 크기효과가 고려된 기준식들을 사용하고 있으나, 구조물의 규모가 점점 초대형화 됨에 따라 실험이 어려워 실험에 근거한 경험식이 존재하지 않거나 얻기도 어려운 실정이므로 이러한 대규모 철근 콘크리트 구조물에 대하여 전단거동에서 실제 존재하는 크기효과를 재현할 수 있는 검증된 해석적 방법은 매우 중요하다고 할 수 있다.

Table 7에서는 Collins<sup>48)</sup>, 윤영수<sup>18)</sup>, Thorenfeldt<sup>17)</sup> 등에 의해 수행된 유효깊이가 400 mm 이상인 고강도 콘크리트 보와 관련한 표본 실험체 10개를 채택한 뒤 Response 2000을 이용하여 전단해석을 수행한 결과와 제안식을 포함한 5개의 전단강도 산정식에 의한 전단강도 예측값, 그리고 통계분석결과가 제시되어 있다.

#### 5. 결 론

본 연구의 목적은 ACI 318-99 전단 규준이 지니고 있는 문제점들을 개선하여 실무에서 전단설계시 경제성과

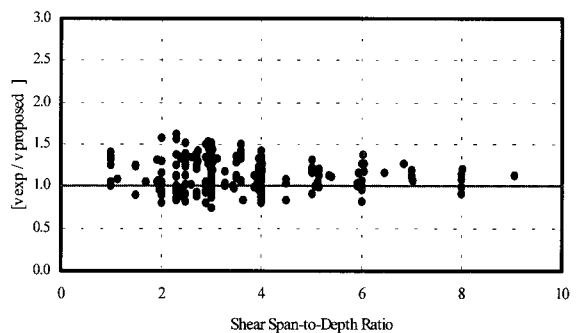
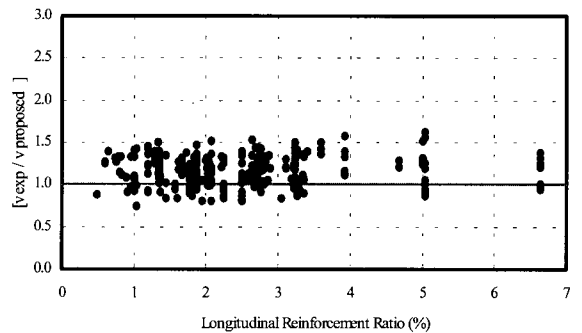
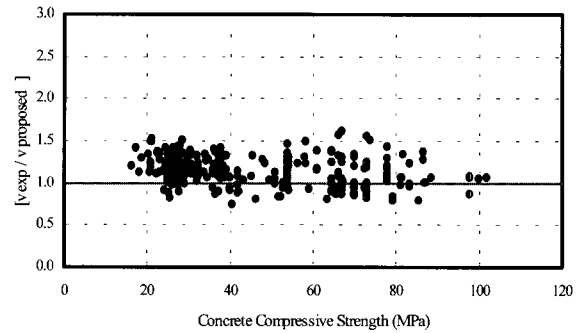
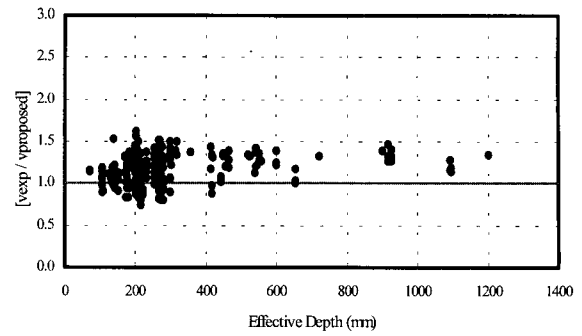


Fig. 5 Verification for 4 variables in proposed equation with 296 testing data

안전성을 확보할 수 있는 전단강도 예측식을 제안하는 것이다. 이를 위해 과학적 이론 및 분석에 근거를 둔 유효 깊이, 인장철근비, 전단지간비에 대한 기본식을 설정하고 기본식의 상수들을 비선형 회귀분석을 통해 결정하여 크기효과와 아치작용이 고려된 고강도 콘크리트 보의 전단

**Table 7** Shear analysis with response 2000 and comparison of 6 predictive results in sample H.S.C. beams

Specimen	b (mm)	d (mm)	$f_{ck}$ (MPa)	$\rho$ (%)	a/d	$v_{exp}$ (MPa)	$\frac{v_{exp}}{v_{Res.}}$	$\frac{v_{exp}}{v_{Pro.}}$	$\frac{v_{exp}}{v_{ACI}}$	$\frac{v_{exp}}{v_{CEB}}$	$\frac{v_{exp}}{v_{Kim}}$	$\frac{v_{exp}}{v_{Zsutty}}$
B100H	300	925	98.0	1.01	2.92	0.695	0.744	0.732	0.420	0.678	0.594	0.458
BH100	300	925	98.8	0.76	2.92	0.695	0.767	0.783	0.419	0.743	0.659	0.503
BH50	300	425	98.8	0.81	2.92	0.978	0.910	0.813	0.589	0.900	0.736	0.692
BRL100	300	925	94.0	0.50	2.92	0.587	0.795	0.753	0.363	0.734	0.663	0.496
DB165	300	925	65.0	1.01	2.92	0.667	0.809	0.863	0.495	0.746	0.656	0.504
DB180	300	925	80.0	1.01	2.92	0.620	0.709	0.723	0.415	0.647	0.568	0.438
M1-S	375	655	67.0	2.80	3.28	1.200	0.915	1.032	0.878	0.927	0.789	0.665
H1-S	375	655	87.0	2.80	3.28	1.330	0.998	1.004	0.854	0.942	0.801	0.675
B61	300	442	77.7	1.81	3.00	1.350	1.006	1.028	0.917	1.035	0.854	0.799
B63	300	414	77.7	3.23	4.00	1.840	1.281	1.181	1.250	1.263	1.038	0.988
Mean							0.894	0.891	0.660	0.861	0.736	0.622
S.D.							0.171	0.159	0.297	0.191	0.141	0.176
R							0.954	0.969	-0.300	0.948	0.959	0.856

강도 예측식을 제안하였으며, 약 300여 개의 기존 실험 데이터를 이용한 고강도 및 저강도 실험데이터를 이용하여 검증 수행하였다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 실험데이터의 분석을 통해서 알 수 있는 바와 같이, 콘 크리트 보의 전단강도 산정시 크기효과에 대한 고려를 반드시 해야하며, ACI 318 code는 전단강도 산정시 크기효과를 고려하지 못한다.
- 2) 제안식은 비선형 파괴역학의 균열 띠 모델에서 유도된 size reduction factor와 균열제어 및 dowel effect와 관련된  $\rho$  factor가 도입이 되어서 전단강도 산정시 크기효과에 대한 고려를 하고 있다. 또한 깊은 보에서 콘 크리트 스트럿을 선형으로 이상화 한 arch action factor 또한 포함하고 있다.
- 3) 제안식을 포함한 5개의 전단강도 산정식의 통계적 분석결과, 제안식의 통계적 결과는 김진근 식, CEB-FIP Model code와 유사하며, 기존의 고·저강도 콘크리트 보 실험데이터에 대해서 합리적인 안전율을 보이고 있다. 또한 Fig. 5에서 알 수 있듯이 [실험값/계산값]의 데이터가 대부분 1과 1.5사이에 포함되고 있다.
- 4) 크기효과와 아치작용을 고려하고 있는 극한강도 개념의 제안식은 다른 전단강도 산정식에 비해 간단한 형태를 지니고 있지만, 합리적으로 전단강도를 예측하고 있어 실무에서 콘크리트 구조물의 전단설계에 적용 가능할 것으로 판단된다.
- 5) MCFT에 근간을 둔 Response 2000을 이용하여 크기효과에 대한 예측해석을 수행하였으며, 콘크리트 보의 크기가 커짐에 따라 크기효과로 인한 전단강도 감소의 경향을 파악할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정 연구실(NRL)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-99) and Commentary (318R-99)," American Concrete Institute, Detroit, 1999, pp.133~180.
2. Rebeiz, K. S., "Shear Strength Prediction for Concrete Members," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.125, No.3, 1999, pp.301~308.
3. 강성후, 박선준, "콘크리트 파괴역학," 제1판, 구미서관, 2002, pp.105~160
4. Collins, M. P. and Kuchma, D., "How Safe Are Our Large, Lightly Reinforced Concrete Beams, Slabs, and Footings," *ACI Structural Journal*, Vol.96, No. 4, 1999, pp.482~490.
5. Shah, S. P.; Swartz, S. E., and Ouyang, C., "Fracture Mechanics of Concrete," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995, pp.120~123.
6. Comite Euro-International du Beton (CEB), "CEB-FIP Model Code 1990," 1990, pp.145~240.
7. Zsutty, T.C., "Beam Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data," *ACI Journal, Proceedings* Vol.65, No.11, 1968, pp.943~951.
8. Angelakos, D., et al., "Effect of Concrete Strength and Minimum Stirrups on Shear Strength of Large



- Members," *ACI Structural Journal*, Vol.98, No.3, 2001, pp.290~299.
9. Kim, J. K. and Park, Y. D., "Prediction of Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement," *ACI Material Journal*, Vol.93, No.3, 1996, pp.213~222.
  10. Bazant, Z. P. and Kim, J. K., "Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Concrete Beams," *ACI Journal, Proceedings* Vol.81, No.5, Sep.~Oct. 1984, pp.456~468.
  11. Johnson, M. K. and Ramirez, J. A., "Minimum Shear Reinforcement in Beams with Higher Strength Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No.4, 1989, pp.376~382.
  12. Kani, G. J., "How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams," *ACI Journal, Proceedings* Vol. 64, No.3, March 1967, pp.128~141.
  13. Thurston, C. W., et al. "Studies of the Shear and Diagonal Tension Strength of Simply Supported Reinforced Concrete Beams," *ACI Journal, Proceedings* Vol.63, No.4, April 1966, pp.451~476.
  14. Mphonde, A. G., et al. "Shear Tests of High-and Low-Strength Concrete Beams without Stirrups," *ACI Journal, Proceedings* Vol.81, No.4, Jul.~Aug. 1984, pp.350 ~357.
  15. Shin, S. W., et al. "Shear Strength of Reinforced High-Strength Concrete Beams with Shear Span-to-Depth Ratios between 1.5 and 2.5," *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.4, 1999, pp.549~556.
  16. Kim, D. J., et al. "Arch Action in Reinforced Concrete Beams - A Rational Prediction of Shear Strength," *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.4, 1999, pp.586~593.
  17. Kuchma, D., 2000, <http://www.ce.uiuc.edu/kuchma/sheardatabank>.
  18. Yoon, Y. S., et al. "Minimum Shear Reinforcement in Normal, Medium, and High-Strength Concrete Beams," *ACI Structural Journal*, Vol.93, No.5, 1996, pp.576~584.
  19. Response 2000, <http://www.ecf.utoronto.ca/~bentz>.

## 요 약

최근의 연구를 통해서, ACI 전단 규준은 크기가 크고 인장철근비가 낮은 보에서 비보수적 예측을 보이는 반면 깊은 보에 대해서는 보수적 예측을 보임을 알 수 있다. 이러한 ACI 전단 규준이 가지고 있는 문제점을 수정하기 위해, 본 연구에서는 스티럽이 없는 고강도 철근 콘크리트 보의 전단강도 계산시 크기효과와 아치작용을 고려한 극한 전단강도 예측식을 제안하였다. ACI 전단 규준의 수정을 위해 포함될 항은 과학적 이론 및 분석에 근거한  $f_{sr}(d)$ ,  $f_{si}(\rho)$ 와  $f_{aa}(a/d)$ 항이며, 선형 및 비선형 회귀분석을 통해 도출되었다. 기존의 실험 데이터 약 300여 개를 이용하여 각각의 변수에 대한 제안식의 검증 및 제안식과 ACI 318-99 code, CEB-FIP model code, Kim & Park 식 및 Zsutty 식과의 비교를 수행하였다. 제안식은 간단한 형태를 지니고 있지만, 경제적이면서도 합리적인 안전율을 확보할 수 있는 전단강도를 예측한다. 따라서 제안식은 실무에서 콘크리트 구조물의 전단설계에 적용 가능할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 전단강도식, 철근 콘크리트 보, 크기효과, 아치작용, 회귀분석