



스터럽이 없는 고강도 콘크리트 보의 전단강도 예측을 위한 새로운 예측식의 제안

최정선¹⁾ · 이창훈²⁾ · 윤영수³⁾*

¹⁾청석엔지니어링, ²⁾코넬대학교 토목환경공학과, ³⁾고려대학교 사회환경시스템공학과

New Approach for Shear Capacity Prediction of High Strength Concrete Beams without Stirrups

Jeong-Seon Choi¹⁾, Chang-Hoon Lee²⁾, and Young-Soo Yoon³⁾*

¹⁾Chung Suk Engineering, Seoul 138-802, Korea

²⁾School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, USA

³⁾Dept. of Civil Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

ABSTRACT In the shear failure mechanism of a beam, beam and arch actions always exist simultaneously. According to the shear span to depth ratio, the proportion between these two actions is varied and the contribution of these actions to shear capacity is changed. Moreover, the current codes provide recommendations based on experimental results of normal strength concrete, so the application range of concrete strength must be extended. Based on this mechanism and new requirement, a simplified analytical equation for shear capacity prediction of reinforced high strength concrete beams without stirrups is proposed. To reflect the change in the contribution between these actions, stress variation in the longitudinal reinforcement along the span is considered by use of the Jenq and Shah Model. Dowel action with horizontal splitting failure and shear friction between cracks are also taken into account. Size effect is included to derive a more precise equation. Regression analysis is performed to determine each variable and simplify the equation. And, the formula derived from theoretical approaches is evaluated by comparison with numerous experimental data, which are in broad range of concrete strength (especially in high strength concrete), shear span to depth ratio, geometrical size and longitudinal steel ratio. It is shown that the proposed equation is more accurate and simpler than other empirical equations, so a wide range of a/d can be considered in one equation.

Keywords shear strength, shear span depth ratio, high strength concrete, nonlinear regression analysis

1. 서 론

대부분의 경험적으로 제안된 전단강도 예측식들은 전단경간비(shear span to depth ratio; a/d) 2.5를 기준으로 전단강도 예측을 나누어 하고 있으며, 따라서 식의 형태도 이를 기준으로 구분되어 있다. 이는 a/d 를 따라 보의 전단 거동을 지배하는 메커니즘이 변화하여, 깊은 보의 경우 아치 작용으로 인해 발생하는 압축 스트럿이 전단력에 저항하는 반면, a/d 가 큰 세장한 보의 경우 보 작용이 보다 지배적으로 작용하게 되기 때문이다. 이 두 작용은 그 성격이 매우 다르기 때문에 기존의 경험적으로 제안되었던 식들은 이를 동시에 고려하는 데 한계점을 지니고 있었다. 보 작용과 아치 작용은 a/d 에 따라 그 존재 비율만 변화할 뿐 언제나 공존하고 있으므로, 단순

히 $a/d=2.5$ 를 기준으로 두 작용을 구분하여 강도를 예측한다는 것은 구조물의 실제 거동에 반하는 불합리한 방법이라 할 수 있다.

또한 기존의 제안식들은 이론에 바탕을 두기 보다는 경험적으로 제시된 것들이 많아 콘크리트의 압축강도, a/d 등 적용하는 데 있어서 부재의 재료와 형상에 따른 제약을 가진다(예 : ACI, Zsutty 등). 따라서 전 세계적으로 그 적용과 연구가 활발해지고 있는 고강도 콘크리트의 경우, 기존의 경험적 제안식들로는 강도 예측에 대한 일정한 안전율을 보장할 수 없는 실정이다. 따라서 이론에 바탕을 두고 기존의 제안식들의 한계를 합리적으로 보완할 수 있는 새로운 전단 강도 예측식이 필요하다.

본 연구에서는 간단한 전단 모델을 제시하고, 이를 바탕으로 외부 하중에 의해 발생하는 모멘트로부터 전단 응력을 산출하여 a/d 의 제약 없이 적용할 수 있는 예측식을 제안했다. 부재의 전단강도 중 대부분을 인장부의 철근, 장부 작용, 전단 마찰(shear friction)이 분담하는 것

*Corresponding author E-mail : ysyoon@korea.ac.kr

Received December 7, 2005, Accepted August 31, 2006

©2006 by Korea Concrete Institute

에 착안하여³⁾, 콘크리트의 압축력과 철근의 인장력의 평형 작용에 의해 저항되는 모멘트로부터 전단력을 유도해 이를 철근이 분담하는 것으로 보고 1차적인 전단력으로 간주하였다. 그리고 그 이외의 장부 작용이나 전단 마찰을 2차적인 메커니즘으로 고려하여 전단강도 예측에 반영하였다. 이러한 가정을 바탕으로 기존의 실험 자료를 이용하여 폭 넓은 콘크리트 강도에서 균일한 안전율을 가지는 예측식을 이끌어내어 기존의 식들이 가지는 단점을 보완하였다. 또한 고강도 콘크리트의 취성적인 전단 파괴 경향 및 크기 효과를 반영하여 보다 합리적인 예측식을 도출하였다.

2. 전단 예측식의 기본 형태 제안

2.1 예측식을 위한 기본 모델의 제안

전단 보강이 되지 않은 단순보에 외부 하중이 Fig. 1과 같이 주어졌을 때, 압축 응력은 지점부로 갈수록 분포가 균일해지고 그 분포 면적이 넓어지는 양상을 보인다. 이는 압축력의 관점에서 본다면 조금씩 감소하는 결과를 낳는다. 철근에 작용하는 인장력의 경우 역시, 지점부로 갈수록 감소하는 것을 확인할 수 있으나⁴⁾, 이는 모멘트 감소 이외에 부차적인 전단 메커니즘에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 실제 철근에 작용하는 인장력은 균열이 발생하기 전에 나타나는 분포 양상과는 차이를 보이며, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_{total} = T_{steel} + T_{\alpha} \quad (1)$$

여기서, T_{total} : 부재의 인장부에 작용하는 모든 인장력의 합

T_{steel} : 철근에 작용하는 인장력

T_{α} : 철근 이외의 인장부에 작용하는 인장력

식(1)을 바탕으로 어떠한 단면의 모멘트를 표현하면,

$$M_{total} = M_{steel} + M_{\alpha} = T_{steel}(x) \cdot z(x) + T_{\alpha}(x) \cdot z'(x) \quad (2)$$

여기서, M_{total} : 부재의 어떠한 단면에 작용하는 전체 모멘트

M_{steel} : T_{steel} 에 의해 유발되는 모멘트

M_{α} : T_{α} 에 의해 유발되는 모멘트

$z(x)$, $z'(x)$: 어떠한 단면에서 각각에 해당되는 인장력이 모멘트를 유발하는 데 필요한 팔길이

이를 다시 전단력으로 나타낸 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{total} &= \frac{dM_{total}}{dx} = \frac{d}{dx}(M_{steel} + M_{\alpha}) \\ &= \frac{d}{dx}(T_{steel}(x) \cdot z(x)) + V_{\alpha} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 M_{α} 를 위해 $z(x)$ 를 이론적으로 밝혀내기란 어렵고 도 복잡한 작업이 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 이를

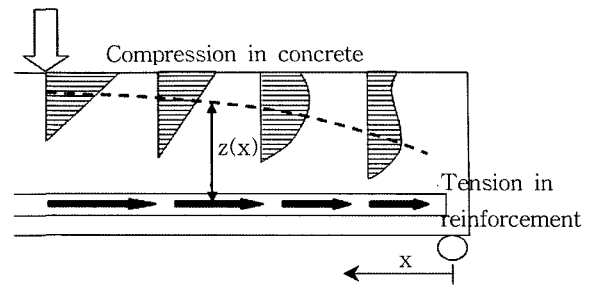


Fig. 1 Stress distribution in simply supported beam without stirrups⁴⁾

직접적으로 유도하기 보다는 $\frac{d}{dx}(T_{\alpha}(x) \cdot z'(x)) = V_{\alpha}$ 로 표현하고 이차적인 전단력(secondary shear force)으로 정의하였다. 이제, 식(3)의 $z(x)$, $T_{steel}(x)$, M_{α} 가 구명된다면 합리적인 전단 강도 예측이 가능해질 것이다.

2.2 축방향에 따른 철근의 인장력 변화

파괴역학을 기초로 제안된 Jenq 및 Shah^{1,2)}의 전단 강도 예측 모델은 철근과 콘크리트의 전단 저항 성능을 각각 구분하여 예측한다. 그 중 중앙 구간에서 발생하는 철근의 최대 인장력과 그 인장력이 축방향에 따라 변화하는 부분을 살펴보면 다음과 같다.

$$T_{steel, max} = 2.509 S f_t \left(\frac{\rho}{h} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$T_{steel}(x) = T_{steel, max} \left(\frac{2x}{S} \right)^N \leq f_y A_s \quad (5)$$

여기서, $T_{steel, max}$: 중앙 구간에 발생하는 철근의 최대 인장력

S : 전체 스패 길이, h : 보의 높이

f_t : 콘크리트의 인장강도, ρ : 철근비

N : 부차 응력에 따라 철근 내부의 인장력의 분포를 결정짓는 지수

f_y : 철근의 항복강도, A_s : 철근의 단면적

그러나 식(4)는 $a/d = 2.0$ 을 기준으로 제안되어 폭 넓은 범위의 a/d 에 적용하기에는 부족하며, Jenq 및 Shah는 $N = 2.5$ 를 권장하였으나 이 값은 실제의 철근의 인장력 분포와는 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다. 또한 N 은 a/d 에 따라 그 값이 변화하기 때문에 상수로 간주하기 어렵다³⁾. 이러한 부분에 대한 수정 및 보완은 식의 구체화 및 간략화 부분에서 다시 논의하기로 한다.

2.3 축방향에 따른 모멘트 팔길이의 변화

보 작용과 아치 작용은 a/d 에 따라 그 비율이 변화하며 부재의 최대 모멘트 성능에 근접할수록 각 단면의 두 성분의 비율이 일정한 값으로 수렴하는 것으로 나타났다. D. J. Kim과 Woo Kim⁴⁾은 실험을 통해 이러한 사실을

밝혀내고, 그 비율을 산정하여 a/d 에 따른 모멘트 팔길이를 다음과 같이 산출해내었다.

$$z(x) = \left(\frac{x}{a}\right)^r z_0 \quad (6)$$

$$r = k\left(\frac{d}{a}\right)^s (\rho)^t \leq 1 \quad k=1.0, s=0.6, t=-0.1 \quad (7)$$

여기서, z_0 : 보이론에 따른 단면의 모멘트 팔길이

위의 식은 전단 보강이 되지 않은 단순 지지보를 위한 것이다. 단면에 따른 모멘트 팔길이의 예측이 가능하다면 2.2에서 밝힌 철근의 인장력과 함께 단면의 모멘트 산정 역시 가능해지며, 이로부터 전단력을 도출할 수 있다. 2.2에서 제시된 철근의 인장력 변화 분포가 본 절에서 인용한 식의 근거인 실제 철근의 인장력 분포와는 다소 차이가 있으나, 두 식 모두 이차적인 전단력을 제외하고 유도되었으며 사용된 주요 변수들이 유사하다. 2.2의 식(5)의 형태에 가장 큰 영향을 미치는 지수 N 을 실험값을 바탕으로 수정하여 실제 철근의 인장력 분포 양상에 근접시키는 것이 가능하므로, 두 식을 조합하는 것에 무리가 없다고 판단하였다.

식(7)의 상수 결정에 사용된 기존의 실험 자료가 한정적이었으므로 보다 많은 자료를 바탕으로 식(6), (7)을 수정, 보완하여 제안식에 적용하였다. 그 자세한 내용은 뒷부분에서 밝히기로 한다.

2.4 이차적인 전단력

V_α 는 이론적인 유도나 실험을 통해 정량적으로 구명하기 매우 어려운 부분이다. 따라서 본 연구에서는 이를 2차적인 전단 메커니즘으로 보고, 여기에 1차적인 전단력으로 구분하기에는 다소 모호한 장부 작용 및 전단 마찰을 포함시켜 제안식에 반영하였다.

2.4.1 장부 작용(Dowel action)

장부 작용과 관련되어 수행된 기존의 연구 중, Helen Dulácska에 의해 이론적으로 제안된 식⁵⁾은 압축 강도가 75 MPa 정도의 고강도 콘크리트에서도 비교적 그 예측이 정확한 것으로 판명되었다. 철근의 방향과 수직하게 장부 작용이 일어난다는 가정 아래, 식을 보다 간단히 정리하면 다음과 같다^{6,7)}.

$$V_d = 1.267 d_b^2 \sqrt{f_y f'_c} = 1.613 \rho (f'_c)^{0.5} (f_y)^{0.5} b d \quad (8)$$

여기서, d_b 는 철근의 직경, f'_c 은 콘크리트의 압축강도, b 는 보의 폭, $A_s/bd = d_b^2 \pi / 4bd = \rho$ 이다.

2.4.2 전단 마찰(Shear friction)

골재 맞물림 작용은 일반 강도에 비해 고강도 콘크리

트에서는 그 정도가 현저히 떨어진다. 이는 시멘트페이스트의 강도가 높아져 균열이 오히려 골재를 가로질러 발생하며, 균열 면이 일반 강도에 비해 매끄럽기 때문이다. 따라서 기존의 2상 모델(two phase model)을 통해서는 고강도 콘크리트의 골재 맞물림 작용을 합리적으로 모사할 수 없으며, ‘골재 맞물림 작용’보다는 ‘전단마찰’이라는 표현이 더욱 적합하다고 판단된다. Joost C. Walraven 및 J. Stroband⁸⁾는 이러한 고강도 콘크리트에서의 전단 마찰이 일반 강도 콘크리트와 비교하여 55~75% 정도 감소하는 것을 밝혀내고, Mau, S. T와 Hsu, T. T⁹⁾에 의해 제안된 식(9)의 상수를 그만큼 낮추어 사용할 것을 권장하였다. 이를 바탕으로 상수를 65% 감소시키면 식(10)과 같다.

$$\frac{v_f}{f'_c} = 0.66 \sqrt{\frac{\rho f_y}{f'_c}} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} V_f &= 0.66(1-0.65) \sqrt{\rho f_y f'_c} b(d-c) \\ &= 0.23 \sqrt{\rho f_y f'_c} b(ad) \\ &= c_1(\rho)^{0.5} (f_y)^{0.5} (f'_c)^{0.5} b d \end{aligned} \quad (10)$$

전단 마찰은 대부분 중립축 이하에서 일어나므로 $b(d-c) = b(ad)$ 를 통해 인장부의 면적을 표현하였으며, c 는 중립축을 나타낸 것이다.

2.4.3 V_α 로의 표현

앞선 수식의 유도를 통해, 이차적인 전단력을 구성하는 두 작용을 나타내는 수식의 주요 변수들이 서로 같음을 알 수 있다. 두 작용을 포괄적으로 반영할 수 있는 일반적인 이차적 전단력의 형태를 이끌어내기 위해, 주요 변수들을 이용하여 다음과 같은 기본 식을 도출하였다.

$$V_\alpha = c_2(\rho)^{c_3} (f'_c)^{c_4} (f_y)^{c_5} b d \quad (11)$$

여기서 $c_2 \sim c_5$ 는 수식의 일반화를 위해 도입된 상수이다.

2.5 기본 식의 제안

앞서 구명된 제안식을 구성하는 세 가지 인자, 축방향에 따른 철근의 인장력 변화 $T_{steel}(x)$, 축방향에 따른 모멘트 팔길이의 변화 $z(x)$, 이차적인 전단력 V_α 를 제안된 기본 모델(식(3))에 각각 대입하여 정리하면 다음과 같다. 단 $S=2a\alpha$, $h \approx d$ 를 가정하였다.

$$\begin{aligned} V_{total} &= \frac{d}{dx} (T_{steel}(x) \cdot z(x)) + V_\alpha \\ &= \frac{d}{dx} \left\{ 2.509 S f'_t \sqrt{\frac{\rho}{h}} \left(\frac{2x}{S}\right)^N \left(\frac{x}{a}\right)^r z_0 \right\} \\ &\quad + c_2(\rho)^{c_3} (f'_c)^{c_4} (f_y)^{c_5} b d \end{aligned}$$

$$= \frac{d}{dx} \left\{ c_6 a f'_t \sqrt{\frac{\rho}{d}} \left(\frac{x}{a} \right)^{N+r} z_0 \right\} + c_2 (\rho)^{c_3} (f'_c)^{c_4} (f_y)^{c_5} b d \quad (12)$$

본 연구에서 제안된 예측식은 단면의 모멘트로부터 유도된 것이므로, 인장 철근의 항복이 중앙 구간에서부터 지점부로 진행된다고 본다. 또한 지점부에서 d 만큼 떨어진, 단순보가 전단에 가장 취약하다고 일반적으로 알려진 단면을 예측 기준으로 삼아²¹⁾, 대부분의 파괴가 인장 철근의 항복이 이 지점까지 진행되기 전에 발생한다고 가정하였다. 따라서 식(5)에 나타난 것과 같은 인장 철근의 항복 여부를 크게 고려하지 않았음을 밝혀둔다.

3. 제안식의 구체화

제안된 식의 기본 형태만으로는 현실적인 전단 강도 예측이 어렵다. 콘크리트의 인장강도 f'_t , 보이론에 따른 모멘트 팔길이 z_0 , 그리고 철근의 인장력 변화에 영향을 미치는 지수 N 을 전단 강도 예측에 필요한 기초적인 변수들의 함수들로 표현하여, 식을 보다 명료하게 구체화하는 작업이 필요하다.

3.1 콘크리트의 인장강도

CEB-FIP Model Code(MC90)¹⁰⁾는 다음 식(13)과 같은 콘크리트 인장강도 예측식을 제안하고 있다. 이 식은 다른 예측식들에 비해 고강도 콘크리트(100 MPa)까지도 그 정확도가 입증되어, 폭 넓은 강도 범위에서 신뢰성 있게 적용할 수 있는 것으로 알려져 있다.

$$f'_t = 0.30 (f'_c)^{0.67} \quad (13)$$

3.2 N 값

2.2에서 간략히 언급했던 것처럼, 철근의 인장력 변화에 영향을 미치는 지수 N 은 a/d 에 따라 값이 변화한다. 또한 권장된 $N=2.5$ 라는 수치는 실제 철근의 인장력 분포를 반영하기에는 다소 부족하기 때문에, 정확한 전단 강도의 예측을 위해서는 N 을 a/d 의 함수로 표현하는 것이 보다 합당할 것이다. 따라서 K. O. So와 B. L. Karihaloo³⁾의 연구 결과를 바탕으로 간단한 수치해석을 실시하여 N 을 다음과 같은 함수로 나타내었다(Fig. 2).

$$N = 0.7936 \frac{a}{d} - 0.1651 \approx 0.80 \frac{a}{d} \quad (14)$$

3.3 보이론에 따른 단면의 모멘트 팔길이

a/d 에 따라 부재의 파괴 양상은 변화한다. 세장한 보의 경우 공칭 휨 모멘트 강도에 근접하여 파괴가 발생하는 반면, 깊은 보의 경우에는 그에 훨씬 미치지 못한 상태에서 전단 파괴가 일어난다. 그러므로 폭 넓은 a/d 를 고

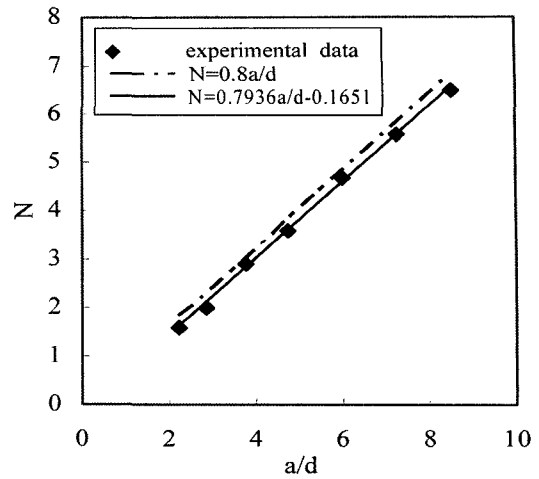


Fig. 2 Relationship between N and a/d

려하기 위해 이에 따른 파괴 양상의 변화를 예측식에 반영하려면, 탄성 이론 혹은 소성 이론 한 가지 만으로는 충분한 설명이 어렵다. Woo Kim과 Richard N. White¹¹⁾는 이러한 사실을 근거하여 다음과 같은 모멘트 팔길이의 예측식을 제안했다.

$$z_0 = (1 - \sqrt{\rho}) d \quad (15)$$

위의 식은 순수 모멘트 구간의 팔길이를 예측하기 위한 것으로 집중 하중을 받는 단순 보의 경우 중앙 구간을 의미한다. 즉, 보이론에 의해 도출되었다고 볼 수 있다. 식(15)를 통해 탄성 이론과 소성 이론의 절충적인 예측값 z_0 를 얻는 것이 가능하다.

3.4 제안식의 구체화

구체적으로 밝혀진 부분들을 식(12)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$V_{total} = \frac{d}{dx} \left[c_7 a (f'_c)^{0.67} \left(\frac{x}{a} \right)^{N+r} (1 - \sqrt{\rho}) \times \sqrt{\rho} d \right] + c_2 (\rho)^{c_3} (f'_c)^{c_4} (f_y)^{c_5} b d \quad (16)$$

완성된 식을 도출하기 위해서는 위의 식을 미분하는 과정이 필요하다. 그러나 식의 형태가 매우 복잡하므로, 보다 효율적으로 설계에 반영하기 위해서는 식의 형태를 간략화 하는 과정이 필수적이라고 판단된다.

4. 제안식의 간략화

다음의 간략화 과정은 실질적으로 사용되고 있는 부재의 범위를 고려하여, 제안식의 양상을 크게 변화시키지 않는 오차 범위 내에서 타당하게 이루어졌다.

4.1 지수 $N+r$

지수 $N+r$ 을 식(7)과 식(14)를 이용하여 표현하면 다

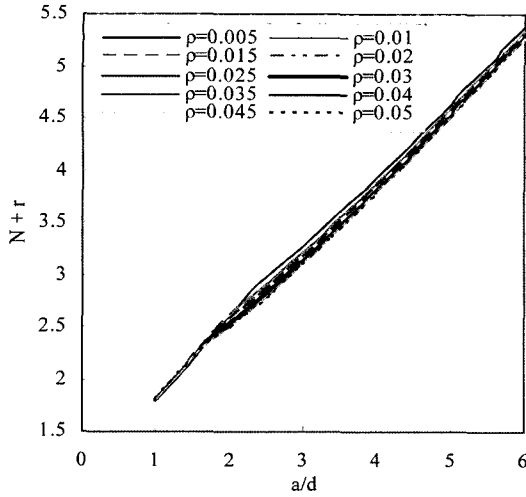


Fig. 3 Variation of $N+r$ with a/d ratio and ρ

음과 같다.

$$N+r = 0.80 \frac{a}{d} + \left(\frac{d}{a}\right)^{0.6} (\rho)^{-0.1} \quad (17)$$

$N+r$ 은 제안식의 미분 시 수식의 형태 변화에 직접적인 영향을 미치는 부분이므로, 이 값이 간단해질수록 전체적인 수식의 형태도 간단해진다. 따라서 식(17)의 간략화 가능 여부를 판단하기 위해 $1 \leq a/d \leq 6$, $0.005 \leq \rho \leq 0.05$ 의 범위 내에서 $N+r$ 값의 변화를 도식화 하였다(Fig. 3).

그 결과, ρ 가 증가하고 a/d 가 감소함에 따라 $N+r$ 값이 감소하며 수렴하였다. 또한 ρ 가 증가함에 따라 $N+r$ 값이 감소하기는 하였으나, a/d 에 의한 변화에 비해서는 매우 미미한 것으로 판명되었다. 분석된 결과를 바탕으로 ρ 를 배제하고 a/d 만을 변수로 삼아 $N+r$ 을 선형 함수로 다음과 같이 표현하였다. Fig. 4의 해석 결과를 통해 a/d 만으로도 양상의 변화 없이 $N+r$ 에 대한 충분한 설명이 가능함을 알 수 있다.

$$N+r \approx 0.6845 \frac{a}{d} + 1.1361 \quad (18)$$

4.2 ρ 함수

$0.005 \leq \rho \leq 0.05$ 의 범위 내에서 ρ 함수를 해석한 결과, 보다 간단한 형태를 통해서도 원래의 식과 거의 일치하는 정확한 예측이 가능함이 판명되었다.

$$\sqrt{\rho}(1-\sqrt{\rho}) \approx 0.6155\rho^{0.4175} \quad (19)$$

4.3 이차적인 전단력

부재의 전단 저항 성능 중에서 장부 작용이 차지하는 비율은 약 20% 미만인 것으로 알려져 있으며, 압축강도의 증가에 비해 인장강도의 증가는 미미한 고강도 콘크리트의 특성 상, 콘크리트의 강도가 높아질수록 인장 강도와 직접적인 관련이 있는 장부 작용의 비율은 더욱 낮아질 것으로 판단된다. 또한 2.4에서 언급한 바와 같이,

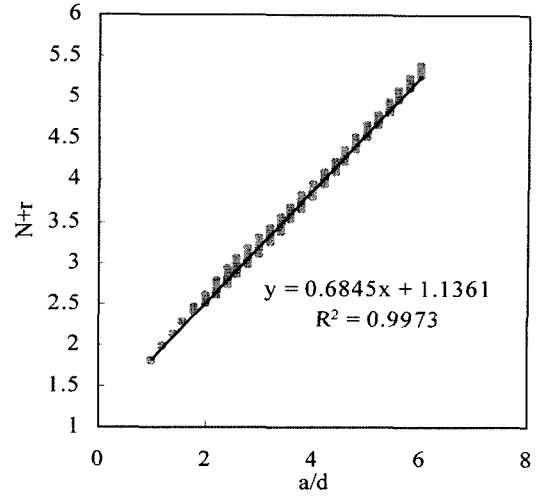


Fig. 4 Simplification of $N+r$

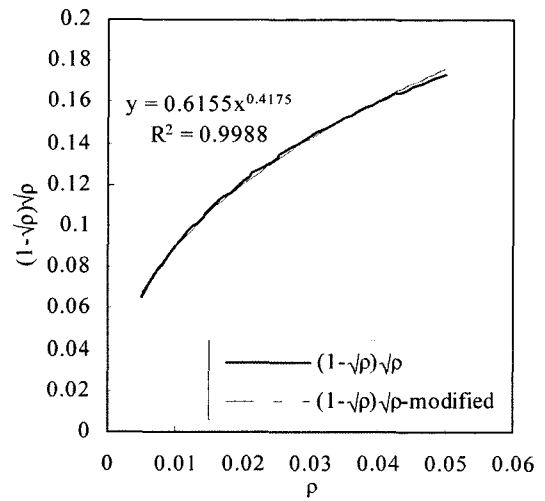


Fig. 5 Simplification of ρ

전단 마찰 역시 고강도로 갈수록 그 비율이 현저히 낮아짐이 연구를 통해 확인되었다. 이는 일반 강도 콘크리트 부재의 전단 강도 중 전단 마찰이 차지하는 비율을 고려해볼 때, 매우 낮은 수치이다. 따라서 이차적인 전단력이 제안식에서 차지하는 비중이 낮음을 알 수 있다. 이와 같은 사실을 바탕으로, 구체화된 식(16)을 앞서 제시된 간략화 과정에 따라 수정한 후, 1차적인 전단력을 모사한 식의 앞 항에 보다 초점을 맞추어 다음과 같이 유도하였다.

$$V_{total} = [c_8 a (f'_c)^{0.67} (\rho)^{0.4175} \sqrt{d} \times \left(0.6845 \frac{a}{d} + 1.1361\right) \left(\frac{x}{a}\right)^{0.6845 \frac{a}{d} + 0.1361}] + c_2 (\rho)^{c_3} (f'_c)^{c_4} (f_y)^{c_5} b d \approx c_9 (f'_c)^{c_{10}} (\rho)^{c_{11}} \sqrt{d} \times \left\{ a \left(c_{12} \frac{a}{d} + c_{13}\right) \left(\frac{x}{a}\right)^{c_{12} \frac{a}{d} + c_{13} - 1} + c_{14} (f_y)^{c_{15}} b \sqrt{d} \right\} \quad (20)$$

5. 크기 효과의 고려

부재의 크기가 커질수록 즉, 유효 깊이 d 가 길어질수록 휨 성능은 향상되기 때문에 그 제어가 비교적 용이하다. 그러나 전단 성능은 더욱 복잡한 메커니즘을 가질 뿐만 아니라, 전단 응력의 경우 부재의 단면 크기에 오히려 반비례하는 경향을 보여 휨 강도에 비해 정확한 예측이 어렵다. 또한 콘크리트의 강도가 높아질수록 파괴는 더욱 취성적으로 일어나므로 전단 파괴에 대한 안전을 확보가 보다 절실히 요구된다. 제안식에 앞서 도입된 Jenq와 Shah 모델이 $1/\sqrt{h}$ 의 항목을 가지고 있어, 이것이 크기 효과를 반영하는 역할을 하는지의 여부를 해석 과정에서 확인하였으나 결과는 부정적이었다. 따라서 본 연구에서는 Bažant 및 Kazemi¹²⁾에 의해 제안된 크기 효과의 기본 식(21)을 제안식에 도입하였다.

$$\sigma_{N_c} = \frac{Bv}{\sqrt{1+D/D_0}} \quad (21)$$

여기서, σ_{N_c} : 크기 효과의 영향을 받은 전단응력
 D/D_0 : 취성지수(brittleness number)
 D_0, B : 경험적 상수
 D : 부재의 유효 깊이

이를 식(20)에 대입하여 $x=d$ 단면을 기준으로 하여 응력의 형태로 정리한 결과, 최종적으로 도출된 제안식은 다음과 같다.

$$v_{total} = \frac{c_{16}(f'_c)^{c_{10}}(\rho)^{c_{11}}}{b\sqrt{d(1+c_{17}d)}} \times \left\{ a \left(c_{12} \frac{a}{d} + c_{13} \right) \left(\frac{d}{a} \right)^{c_{12} \frac{a}{d} + c_{13} - 1} + c_{14}(f_y)^{c_{15}} b \sqrt{d} \right\} \quad (22)$$

크기 효과는 재료와 형상에 매우 민감하게 영향을 받아 부재에 따라 식(21)에서 제시된 상수들의 변화 폭이 매우 크다. 이에, 그 반비례하는 정도를 쉽게 예측할 수 없으며 기존의 연구 결과 역시 이를 뒷받침 해주고 있다¹³⁾. 따라서 부재의 다양한 크기와 재료에 적용 가능한 특정 상수를 찾아내는 것은 상당히 난해한 작업이 될 것이다. 본 연구에서는 이러한 한계를 염두에 두고, 골재의 최대 치수와 같은 재료적 성질보다는 부재의 형상에 의한 크기 효과를 규명하는 것에 목적을 두었다.

6. 제안식의 해석 및 검증

6.1 제안식의 상수 결정

이처럼 도출된 제안식을 범용 통계처리 프로그램을 이용하여 기존의 연구 결과로부터 수집된 200개의 실험 자료^{14,17)}를 바탕으로 상수 도출을 위한 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 변수의 범위는 약 $1 \leq a/d \leq 8$, $140 \leq d \leq$

$1,100(\text{mm})$, $20 \leq f'_c \leq 130(\text{MPa})$, $330 \leq f_y \leq 850(\text{MPa})$, $0.5 \leq \rho \leq 7.0(\%)$ 이다. 해석 결과, 본 연구에서 제안하는 식의 최종 형태는 다음과 같다.

$$v_{total} = \frac{9.0(f'_c)^{0.28}(\rho)^{0.27}}{1,000b\sqrt{d(1+0.02d)}} \times \left\{ a \zeta \left(\frac{d}{a} \right)^{\zeta-1} + 0.002b\sqrt{df_y} \right\} \quad (\text{MPa}) \quad (23)$$

$$\zeta = 3.14 - 0.04 \frac{a}{d}$$

식에 사용된 변수들의 단위는 f'_c, f_y 는 MPa, ρ 는 %, b, d 는 mm이다.

6.2 실험 자료와 제안식의 양상 비교 검증

제안식의 정확성을 기존의 식들과 비교하기에 앞서 변수에 따른 식의 거동을 보다 엄밀히 판단하기 위해, 비교의 대상이 되는 변수를 제외한 나머지 변수 값은 동일하거나 유사한 일련의 실험 자료¹⁴⁻¹⁷⁾를 이용하여, 제안식에 의한 예측값과 실험값의 양상을 비교하였다. 또한 검증의 타당성을 확보하기 위하여 각각의 변수별로 데이터를 바꾸어 여러 번의 해석을 실시하였다.

그 결과, 제안식은 모든 변수에 대하여 실험값과 매우 유사한 양상을 나타내었으며, Fig. 6에 이를 입증할 수 있는 대표적인 결과를 도식화하였다. a/d 의 경우, 특히 아치 작용과 보 작용의 존재 비율이 역전되는 $2 \leq a/d \leq 4$ 의 구간에서 실제 거동과 매우 흡사한 경향이 나타나, 하나의 식으로도 두 작용을 동시에 합리적으로 예측할 수 있음이 판명되었다. 기존의 제안식들이 대체적으로 고강도 콘크리트의 전단 강도를 과대평가하였던 것에 비해 제안식은 적절한 예측 양상을 보였으며, ρ 에 대해서도 무난한 예측 결과를 나타내었다.

크기 효과와 관련이 있는 변수인 d 에 따른 전체적인 양상은 실험값과 유사하였으나, 고강도로 갈수록 부재의 성능을 다소 과대평가하는 경향이 나타났다. 또한 Fig. 6에서는 나타나지 않았으나 부재의 d 가 200 mm 미만이면 제안식의 예측 정확도가 감소하여, 크기 효과의 반영에 한계를 드러냈다. 제안식이 크기 효과를 반영하는데 이와 같은 한계를 보이는 것은, 앞서 밝힌 크기 효과 고유의 특성과 더불어 부재의 재료 성질을 변수에서 제외시켰기 때문으로 여겨진다. 이는 실제로 사용되는 부재의 크기 범위를 고려해볼 때, 적용 시 크게 문제가 되지 않을 것으로 판단되나, 크기 효과를 보다 정확히 반영하기 위한 추가적인 연구가 요구된다.

마지막으로 기존의 제안식에서는 다루어지지 않았던 변수 f_y 에 대한 분석 결과, 항복 강도가 증가함에 따라 미미하지만 전단 강도 역시 증가하였으며¹⁷⁾ 제안식 역시 이러한 경향을 합리적으로 반영하는 것으로 나타났다.

6.3 기존 제안식과의 비교 검증

제안식의 상수 결정 시 사용된 데이터와 동일한 범위를 가지는 284개의 새로운 실험 자료¹⁴⁻¹⁷⁾를 바탕으로 기

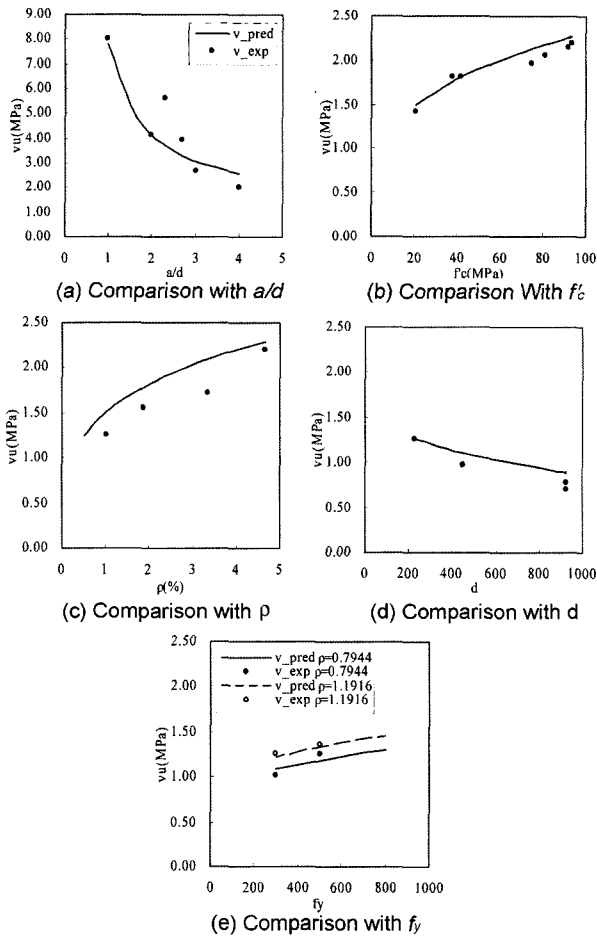


Fig. 6 Comparison of predicted and experimental data for each parameter

Table 1 Analyzed equations for comparison¹⁸⁻²⁰⁾

Researcher	Equations(MPa)
Bae & Yoon ¹⁸⁾	$v_u = 4.65 \frac{\sqrt{f'_c \rho}^{0.5}}{(1+d)^{0.4}} \quad (a/d \geq 2.5)$ $v_u = \left(5.5 - 1.5 \frac{a}{d}\right) (eq. (a/d \geq 2.5)) \quad (a/d < 2.5)$
ACI 318-99 ¹⁹⁾	$v_c = 0.1578 \sqrt{f'_c} + 17.25 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \quad (a/d \geq 2.5)$ $v_c = \left(3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d}\right) \times (eq. (a/d \geq 2.5)) \quad (a/d < 2.5)$
Kim & Kim & White ²⁰⁾	$v_u = 0.2(1 - \sqrt{\rho}) \left(\frac{d}{a}\right)^r \left[(f'_c)^{0.5} + 1,020 \rho^{0.9} \left(\frac{d}{a}\right)^{0.6} \right]$ $r = (d/a)^{0.6} (\rho)^{-0.1}$

존의 식들과 제안식을 비교하여 정확성을 검증하였다. 검증에 위해 사용된 식들은 Table 1과 같다. 분석 결과, 제안식이 가장 높은 예측 정확도와 함께, 제안식에 포함된 $f'_c, f_y, a/d, \rho, d$ 의 모든 변수에 대하여 균일한 예측 정확도를 보였으며, 그 중 제안식에서 가장 큰 비중을 차지하는 변수인 a/d 와 d, f'_c 에 대한 결과를 Figs. 7, 8 및 9에 수록하였다. ACI 318-99와 Bae & Yoon은 a/d 에 따라 예측식을 다르게 제안하고 있음에도 불구하고 정확도 및 그 분포가 제안식에 미치지 못했으며 특히 ACI 318-99의 경우, 깊은 보의 전단 저항 성능을 과소평가하는 경향이 강하게 나타났다. 제안식과 같이 단일한 식으로 전 범위의 a/d 에 대한 예측을 하는 Kim, Kim & White는 비교적 균일한 예측 정확도를 보여 주었으나, 정확도 자체와 분포 집중도가 제안식에 비하여 다소 낮은 것으로 판명되었다. 크기 효과를 고려하지 않은 ACI 318-99와 Kim, Kim & White는 작은 부재에 대해서는 과소평가를 하였으며, 부재가 점점 커질수록 그 성능을 과대평가하는 경향을 두드러지게 나타냈다. 또한 크기 효과를 고려한 Bae & Yoon 조차도 유효 깊이에 대해 균일하지만 제안식에 비하여 산만한 분포를 보였다. 고강도 콘크리트에 대한 적용성을 평가하기 위해 실시한 f'_c 에 대한 분석에서도 역시, 고강도로 갈수록 제안식이 가장 균일하면서도 정확한 예측도를 가지는 것으로 판명되었다.

강도의 관점에서 해석한 결과, 비교 검증을 위해 사용된 식들은 모두 부재의 전단 강도가 높아질수록 성능을 과소평가하고, 그 예측 분포가 점차 산만해지는 것으로 나타났다. 반면에 제안식은 균일하며 좁은 분포를 보여, 폭 넓은 전단 강도에 대하여 일정한 안전율을 가지는 것으로 밝혀졌다(Fig. 10).

Table 2 Statistical results for comparison

Researcher	Mean	S.D.	C.O.V.	r
Bae & Yoon	1.1455	0.2981	0.2602	0.9030
ACI 318-99	1.3964	0.4241	0.3037	0.8860
Kim & Kim & White	1.0249	0.3246	0.3167	0.8550
Proposed eq.	1.0292	0.2058	0.2000	0.9380

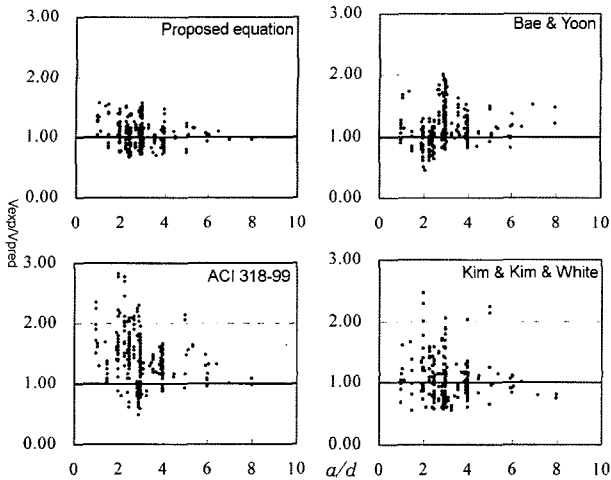


Fig. 7 Comparison for verification with a/d ratio

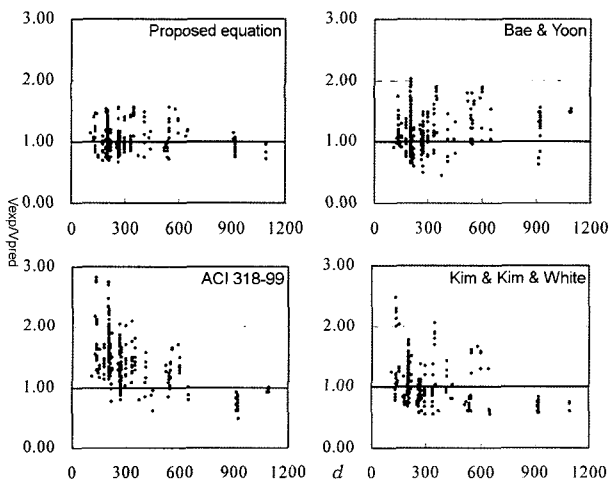


Fig. 8 Comparison for verification with d

7. 결 론

기존의 예측식들은 실험값을 통해 경험적으로 제안되었기 때문에 적용 시 한계가 많았으며, 아치 작용과 보 작용은 언제나 공존함에도 불구하고 $a/d=2.5$ 를 기준으로 예측을 위한 식의 형태가 나뉘어져 있었다. 이러한 불합리성을 보완하고 극복하기 위해 간단한 전단 모델에 선행된 연구 결과들을 적용하여 예측식을 제안하였으며, 다양한 실험 자료들을 이용하여 이를 검증하고 다른 기존의 제안식과 비교하였다. 구체적인 결과는 다음과 같다.

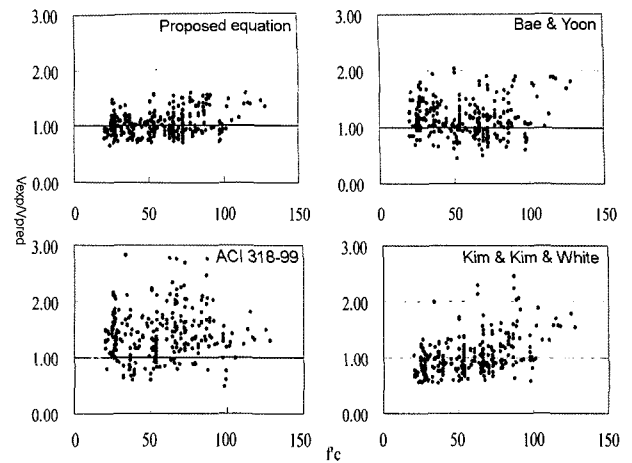


Fig. 9 Comparison for verification with f'_c

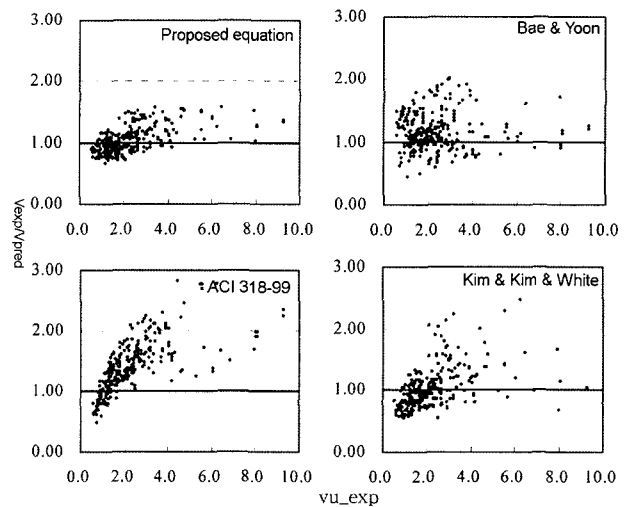


Fig. 10 Comparison for verification with margin of safety

- 1) 본 연구를 통해 제안된 전단 강도 예측식의 최종 형태는 다음과 같으며, 제안식은 기존의 식들보다 합리적이고 정확한 예측 결과를 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 v_{total} &= \frac{9.0(f'_c)^{0.28}(\rho)^{0.27}}{1,000 b \sqrt{d}(1 + 0.02d)} \\
 &\times \left\{ a \zeta \left(\frac{d}{a} \right)^{\zeta-1} + 0.002 b \sqrt{d} f_y \right\} \text{ (MPa)} \\
 \zeta &= 3.14 - 0.04 \frac{a}{d}
 \end{aligned}$$

- 2) 제안식은 고려한 모든 변수들에 대하여 비교적 균일한 예측 안전율을 나타내었으며, 특히 a/d 와 유효 깊이, f'_c 에 대해서 그러한 경향을 보여 기존의 식들이 가지고 있었던 한계점을 합리적으로 보완하였다고 판단된다. 또한 제안식은 변수별 거동 양상 역시 실험값과 매우 유사한 것으로 판명되었다.
- 3) 실험값들의 직접적인 회귀분석을 통해 경험적으로 제시되었던 기존 식들의 한계를 극복하고, 이론적

모델들과 구체적인 변수 분석에 바탕을 둔 체계적이고 합리적인 제안식을 도출하였다.

- 4) 제안식은 예측 정확도에 초점을 맞추어 제시된 것이므로, 설계에 반영하기 위해서 강도 감소 계수를 적용한다면 보다 실질적이고 안전한 예측이 가능할 것이라 판단된다. 또한 식의 상수 도출 및 검증에 사용 실험 값의 범위 중 값의 수가 적었던 $d > 600(\text{mm})$, $a/d > 4$, $f_y > 600(\text{MPa})$, $\rho > 4(\%)$, $f'_c > 100(\text{MPa})$ 는 제안식의 실제 적용 가능 범위라고 보기 어려우므로 추가적인 연구가 요구된다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설핵심기술연구개발사업(Center for Concrete Corea, 05-CCT-D11)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Jenq, Y. S. and Shah, S. P., *Shear Resistance of Reinforced Concrete Beam-A Fracture Mechanics Approach*, Fracture Mechanics: Application to Concrete, SP-118, ACI, Detroit, 1989, pp.237~258.
2. Shah, S. P., Swartz, S. E., and Ouyang, C., *Fracture Mechanics of Concrete*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.
3. So, K. O. and Karihaloo, B. L., "Shear Capacity of Longitudinally Reinforced Beams-A Fracture Mechanics Approach", *ACI structural journal*, Nov.~Dec., 1993, pp.591~600.
4. Kim, D. j., Kim, W., and White, R. N., "Prediction of Reinforcement Tension Produced by Arch Action in RC Beams", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, June, 1998, pp.611~622.
5. Dulácska, H., "Dowel Action of Reinforcement Crossing Cracks in Concrete", *ACI Journal*, Dec., 1972, pp.754~757.
6. Poli, S. D., Prisco, M. D., and Gambaro va, P. G., "Cover and Stirrup Effects on the Shear Response of Dowel Bar Embedded in Concrete", *ACI Structural Journal*, July~Aug., 1993, pp.441~450.
7. Poli, S. D., Prisco, M. D., and Gambaro va, P. G., "Shear Response, Deformations, and Subgrade Stiffness of a Dowel

- Bar Embedded in Concrete", *ACI Structural Journal*, Nov.~Dec., 1992, pp.665~675.
8. Walraven, J. C. and Stroband, J., "Shear Friction in High-Strength Concrete", *ACI International Conference on High Performance Concrete*, SP 149-17, ACI, Singapore, 1994, pp.311~330.
9. Mau, S. T. and Hsu, T. T., "Discussion of Paper by Walraven, J. C., Fréney, J., and Pruijssers, A.: Influence of Concrete Strength and Load History on the Shear Friction Capacity of Concrete Members", *PCI Journal*, Jan.~Feb., 1988, pp.166~170.
10. Comité Euro-International du Béton(CEB), *CEB-FIP Model Code 1990*, Switzerland, 1991.
11. Kim, W. and White, R. N., "Initiation of Shear Cracking in Reinforced Concrete Beams with No Web Reinforcement", *ACI Structural Journal*, May~June, 1991, pp.301~308.
12. Bažant, Z. P. and Kazemi, M. T., "Size Effect on Diagonal Shear Failure of Beams without Stirrups", *ACI Structural Journal*, May~June, 1991, pp.268~276.
13. Bažant, Z. P. and Planas, J., "Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasi brittle Materials", CRC Press, 1998.
14. *Shear Databank*, <http://cee.ce.uiuc.edu/kuchma/sheardatabank/>
15. Mphonde, A. G. and Frantz, G. C., "Shear Test of High and Low Strength Concrete Beams without Stirrups", *ACI Structural Journal*, July~Aug., 1984, pp.350~357.
16. Yang, K. H., Chung, H. S., Lee, E. T., and Eun, H. C., "Shear Characteristics of High-Strength Concrete Deep Beams without shear reinforcements", *Engineering Structures*, Vol.25, 2003, pp.1343~1352.
17. 손영무, 윤영수, "고장력 주인장 철근을 사용한 전단보강이 없는 보의 전단성능에 관한 연구", *한국구조물진단학회*, Vol.6, No.2, 2002, pp.203~210.
18. 배영훈, 윤영수, "크기효과를 고려한 복부보강이 없는 고강도 콘크리트 보의 전단강도 예측식의 제안", *콘크리트학회 논문집*, Vol.15, No.6, 2003, pp.820~828.
19. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI, Farmington Hills, Michigan, 1999.
20. Kim, D. J., Kim, W., and White, R. N., "Arch Action in Reinforced Concrete Beams-A Rational Prediction of Shear Strength", *ACI Structural Journal*, July~Aug., 1999, pp.586~593.
21. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준 및 해설", *한국콘크리트학회*, 2003, 152pp.

요 약 보의 전단 메커니즘을 구성하는 보 작용과 아치 작용은 전단경간비(a/d)에 따라 그 존재 비율이 바뀔 뿐, 항상 공존한다. 그러나 대부분의 제안식들은 이를 함께 고려하지 않으며, 단순히 $a/d=2.5$ 를 기준으로 식의 형태를 나누어 제시하는 것에 그치고 있다. 또한 현 설계 기준은 과거의 일반 강도 콘크리트를 기준으로 설립되었기 때문에, 현재 사용 추세가 점차 증가하고 있는 고강도 콘크리트에 적용하기에는 다소 한계점이 있다. 이러한 문제점을 보완하고자, 본 연구에서는 a/d 의 범위에 구애받지 않으며 고강도의 콘크리트에서도 사용이 가능한 전단 강도 예측식을 제안하였다. 보 작용과 아치 작용을 동시에 고려하기 위해 Jenq와 Shah 모델을 바탕으로 축방향에 따른 철근의 응력 변화를 산정하여, 단면의 모멘트로부터 전단 강도를 산출하였다. 보다 정확한 예측식의 제안을 위하여 장부 작용과 전단 마찰과 같은 2차적인 작용들 역시 제안식에 포함시켰으며, 크기 효과도 반영하였다. 식의 상수를 결정하고 식의 형태를 간략화하기 위해 다량의 실험 자료를 이용하여 회귀분석을 실시하였다. 제안식을 콘크리트의 압축강도(f'_c), 전단경간비(a/d), 철근비(ρ), 보의 유효 깊이(d), 철근의 항복강도(f_y)의 변수를 기준으로 기존의 식들과 비교 검증한 결과, 제안식이 보다 정확하고 합리적인 예측을 하는 것으로 판명되었다. 또한 제안식의 변수별 거동 양상 역시 실험값과 비교적 일치하는 것으로 나타났다.

핵심용어 전단강도, 전단경간비, 고강도 콘크리트, 비선형 회귀분석