

# 전단스팬비가 작은 철근콘크리트 부재의 전단내력평가에 관한 해석적 연구

An Analytical Study on the Shear Capacity of  
Reinforced Concrete Member with Small Shear Span Ratio

강석화\*

Kang, Suck Hwa

---

## 요 약

본 연구에서는 전단스팬비가 작은 철근콘크리트부재를 대상으로, 기존에 주로 실험치에만 의존하여 제안되었던 전단내력식에서 탈피하여 극한해석법중의 하계정리를 이용하여 이론적으로 제안하였다. 본 연구에서 제안한 모델에서는 아치기구와 트러스기구를 동시에 고려할 수가 있고 각각의 기구에서 분담하는 힘의 크기를 알 수 있다. 또한, 외부에서 가해진 힘이 어떻게 지점에 전달되고 있는가 시각적으로 이해할 수가 있으며, 전단스팬비( $a/d$ ), 전단보강근비, 인장철근비 등의 영향을 정량적으로 고려할 수가 있다.

본 연구에서 유도한 전단내력식을 기존의 실험치와 비교한 결과, 본 연구에서 제안한 식은 실험치와 대체로 일치하며, 다른 연구자에 의해 제안된 전단내력평가식에 손색이 없음을 알았다.

## Abstract

In this study, an equation for modelling the shear strength of reinforced concrete member with web reinforcement is proposed. Although the general formulas for shear strength of reinforced concrete member with small  $a/d$  are obtained based on the experimental results, the proposed equation herein is derived from lower bound theorem of limit analysis.

The proposed model takes into account arch mechanism and truss mechanism. And it provides the values of divided shear strength ratio of each mechanism as well as visual understanding of the mechanism on how the given load is transferred to the support.

Also, the model takes into account the effect of  $a/d$ , longitudinal reinforcement ratio, and web reinforcement ratio quantitatively. Based on the comparisons of the result of this model with previous test results, it shows good agreements.

**keywords** : shear capacity, arch mechanism, truss mechanism, web reinforcement, limit analysis, plastic theory, lower bound theorem

---

\* 정회원, (주)대우건설기술연구소, 선임연구원, 공학박사

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 12월 31일까지 학회 사무국으로 보내주시면 1995년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

전단력이 작용하는 철근콘크리트부재(이하 RC부재로 약칭)의 내력평가에 관한 문제는 과거 40년동안 연구의 주요대상이 되어 왔고, 이에 관한 실험보고도 수없이 많다. 그러나 이러한 많은 연구에도 불구하고 전단거동은 여러가지의 다른 현상을 동반하는 대단히 복잡한 파괴기동을 나타내기 때문에, 전단력의 작용을 받는 RC부재의 기동을 설명할 수 있는 이론이나 모델은 아직 확립되어 있지 않은 실정이다.

또한, 기존의 전단내력평가는 주로 전단스팬비( $a/d$ )가 2.5이상인 부재를 대상으로 연구되어 왔고,  $a/d$ 가 작은 Deep Beam형태의 부재에 대해서는 상당히 연구가 미비하다고 할 수 있겠다. 제외국에서도 Deep Beam에 관한 연구가 시작된 것이 지난 60년대말로서 ACI시방서에도 70년대초에야 비로소 규정에 포함되었다. 이와 같이 Deep Beam형태의 구조물에 관한 연구가 진척되지 않은 주요원인은 첫째, 현행의 보이론은 부재의 높이가 지간에 비해 충분히 작다고 가정한데서 유도되었는데 반해 Deep Beam과 같이 부재의 높이를 무시할 수 없는 경우에는 여러가지 면에서 보이론의 적용이 곤란하다는 것, 둘째, 통상의 보 부재보다는 전단에 영향을 주는 요인이 더 많아 기동이 더욱 복잡하다는 것, 그리고 셋째로 현행의 RC보의 설계방법에 의해 설계할 경우 전단에 대해서는 충분히 안전측인 것으로 평가되어 연구자체에 대한 긴박성이 적었던 점을 들 수 있다.

그러나 최근 콘크리트 구조물의 대형화, 상대화 추세에 따라  $a/d$ 가 작은 Deep Beam형태의 구조물이 앞으로 더욱 늘어날 것으로 예상이 되나, 우리나라의 경우 Deep Beam에 관한 설계방법이 아직 명확하게 정해져 있지 않은 상태이고, 또한 연구보고도 거의 없는 상태라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는  $a/d$ 가 작은 RC부재를 대상으로, 현행의 전단내력식처럼 기존에 주로 실험자료에만 의존하여 제안되었던 전단내력식에서 탈피하여 명확히 이론적인 근거를 가진 새로운 전단내력식을 이론적으로 유도하고, 기존의 실험자료와의 비교를 통하여 제안식의 적용성을 검토해

보고자 한다.

## 2. RC부재의 전단내력평가에 대한 이론적인 고찰

휨과 전단이 동시에 작용하는 RC부재에 대한 전단저항기구를 모델화하는데 있어서 기존에는 통상 힘의 흐름을 간략히 이상화시킨 트러스모델이나 아치모델등 마크로모델이 많이 제안되었다. 그러나 마크로모델은 해석이 간단한 대신에 가정사항이 많고 가설이 대담하기 때문에 모델의 정밀함보다는 오히려 얼마나 가정이 합리적이고 실구조물의 기동과 잘 대응하는가가 그 모델의 성패를 좌우한다고 할 수 있다.

지금까지 제안된 많은 모델들은 사용상에 큰 문제는 없지만, 대부분 실험자료를 회기분석하여 얻어진 것들이기 때문에 역학적인 의미가 불분명하고, 또한 회기분석에 사용한 자료의 적용범위를 넘는 경우에는 대응이 곤란하다는 단점을 가지고 있다.

RC부재의 전단내력을 이론적으로 평가하려는 시도는 1970년대에 들어서 활발히 진행되어 왔다. 이러한 연구는 다음과 같이 크게 세가지로 분류할 수가 있다.

① 소성재료에 관한 극한해석법의 상계·하계 정리를 이용하여 내부의 변형에너지가 최소가 되는 조건으로부터 트러스의 형상을 결정하는 방법.<sup>(1)</sup>

② 콘크리트의 응력·변형률관계를 고려하여 그 제약조건으로부터 트러스의 형상을 결정하는 방법.<sup>(2)</sup>

③ 소성재료에 대하여 최소일의 원리를 적용하여 부재가 가지는 내력을 최소화시키는 사인장균열의 각도를 결정하는 방법.<sup>(3)</sup>

첫번째의 극한해석법을 이용한 방법은 이미 유럽콘크리트위원회(CEB)가 1978년에 발표한 모델 코드의 전단설계조항에도 일부 포함되어 있으며<sup>(4)</sup>, 현재 일본건축학회에서도 南<sup>(5)</sup>에 의해서 제안된 아치기구와 트러스기구가 혼합되어 있는 모델을 기초로 하여 기존의 실험치에 의존한 식에서 탈피한 전혀 새로운 형태의 전단내력식을 사용하

고 있는 실정이다.

두번째의 방법은 트러스기구에 있어서 압축사재의 각도와 압축주변형률의 방향이 일치한다는 가정하에 이론을 전개하여 전단내력값을 반복계산에 의해 계산하도록 되어 있다. 이 방법도 실험치와의 적합성이 매우 좋은 것으로 알려져 있으나, 전단내력식을 단일형태로 제시한 것이 아니라 컴퓨터를 이용해서 최대내력을 계산해야 되는 번거로움이 있고, 또한 모델개발이 근본적으로 면내전단력이 작용하는 부재를 대상으로 이루어졌기 때문에 부재가 아치적인 내하거동을 나타내는 경우에는 추정정도가 떨어진다는 문제점을 가지고 있다.

한편 세번째 방법은 Lessig에 의해 제안된 극한 평형법을 전단력이 작용하는 경우에 적용한 방법으로서, 부재에 배근된 철근은 모두 항복한 상태라는 기존의 전단에 대한 개념과는 약간 다른 개념을 적용하여 전단보강근이 배근되어 있는 경우에 대해서 최소일의 정리를 적용하여 전단내력식을 제시하고 있다.<sup>(6)</sup> 이 방법은 실험자료와의 적합성면에서 기존의 전단내력식들에 비해서 결코 손색이 없을 정도로 매우 좋은 정도로 평가하고 있으며, Fig. 1과 같이 전단력에 영향을 미치는 주요 인자의 영향을 합리적으로 평가하고 있다.<sup>(7)</sup>

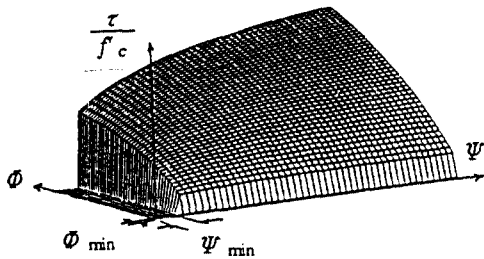


Fig. 1 Shear capacity of RC member

그러나 모델이 최소전단보강률 이상이 배근된 부재에만 적용되도록 되어 있기 때문에, 전단보강근이 전혀 배근되어 있지 않은 부재에 대해서는 모델의 적용이 곤란하다는 적용상의 제한사항을 가지고 있다. 앞으로 이 부분에 대해서는 모델의 확장이 요망된다.

### 3. 전단내력식의 유도

본 장에서는 Nielsen이 전단내력의 유도시에 사용했던 도해적인 방식과 유사한 방식을 사용하여 RC부재의 전단내력을 유도한다. 본 연구에서 유도하는 전단내력식은 하계정리, 상계정리의 쌍방에 대응하는 해가 아니고, 재료의 항복조건과 힘의 평형조건만으로부터 정해지는 하계치이기 때문에 본 연구에서 구한 해가 정해에 가깝다는 것은 이론적으로는 보증되지 않는다.

#### 3.1 적용범위

본 연구에서는 기본적으로 부재내에 인장철근이 배근되어 있고, 콘크리트에 균열 발생시 해방되는 힘을 재분배하는 것이 가능하도록 필요최소 전단보강률량이 배근되어 있는 것을 적용대상으로 한다.

또한, 극한상태에 있어서는 콘크리트와 철근의 소성화와 더불어 재료내에서 응력의 재분배가 일어나고, 최후에는 양자가 항복강도에 도달하여 최대내력을 발휘하게 되므로, 사인상파괴와 같이 응력의 재분배가 충분히 이루어지지 않은 상태에서 파괴가 일어나는 파괴등은 고려하지 않는다.

그리고 본 연구에서 제안하는 방법은 극한해석의 하계정리를 적용하여 부재의 최대내력만을 구하는 방법으로 전단균열이나 휨균열이 발생할 때의 내력이나 부재의 변형에 대해서는 언급을 하지 않는다.

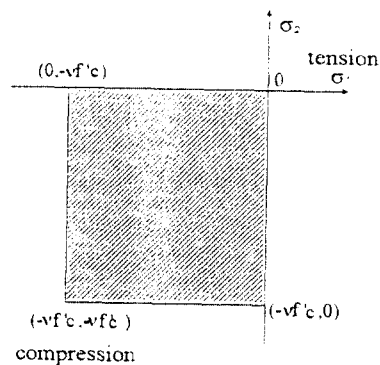


Fig. 2 Failure criterion for concrete in plane stress state

### 3.2 모델의 특징 및 가정사항

#### 1) 재료강도에 관한 가정

콘크리트의 파괴조건은 평면응력에 대해 정의한다. 그리고 부재가 최대내력에 도달시 콘크리트는 인장력을 부담하지 않는 것으로 생각하여 인장강도는 무시한다. 즉, 파괴곡면은 Fig. 2와 같이 주응력의 평면상에서 간단히 장방향으로 나타내진다.

또한 변형률연화에 따른 강도저하외에 주압축응력과 직교하는 방향의 균열의 열림이나 구속근에 의한 구속효과, 부재내 초기응력, 재료의 강성, 크기효과의 유무에 따른 영향등을 고려하기 위해, 콘크리트의 압축강도  $f'_c$ 에 유효저감계수  $\nu$ 를 곱해 강도를 저감시킨  $\nu f'_c$ 를 콘크리트의 파괴기준으로 삼는다.

#### 2) 철근의 항복유무에 대한 가정

본 연구에서 제안한 모델은 인장철근은 항복하지 않는다고 하는 기본가정에 이론을 전개시키고 있는 기존의 전단내력평가방식과는 달리 전단보강근뿐만 아니라 인장철근도 항복하는 것으로 가정하여 부재가 최대내력을 발휘할 수 있도록 하였다.

#### 3) 철근과 콘크리트 사이의 힘의 전달에 관한 가정

인장부에 배근되어 있는 인장철근 및 복부에 배근된 전단보강근은 항복이 일어나도 충분히 정착이 되어 있는 것으로 가정한다. 즉, 정착부가 약해서 발생하는 정착부파괴는 고려하지 않는다.

### 3.3 전단내력식의 유도

부재내에는 힘의 평형조건을 만족시키면서 재료의 파괴조건을 만족하는 응력장이 무수히 존재하지만, 그 중에서 부재의 실거동에 가장 가까운 응력분포를 가지고 있으면서 최대의 하중을 주는 응력장을 찾는 것이 중요하다.

Fig. 3은 전단보강근이 배근되어 있는 RC부재에 하중을 재하했을 때의 사인장균열 발생 및 철

근의 정착부에서의 힘의 전달관계를 나타낸 그림으로서, 본 연구에서는 이와같은 부재의 균열형상 및 배근상태를 참고로 하여 Fig. 4와 같이 대각선 방향의 균열에 의해 형성되는 아치형의 콘크리트와 인장력을 부담하는 철근으로 힘의 평형관계를 유지하는 모델을 구상하였다.

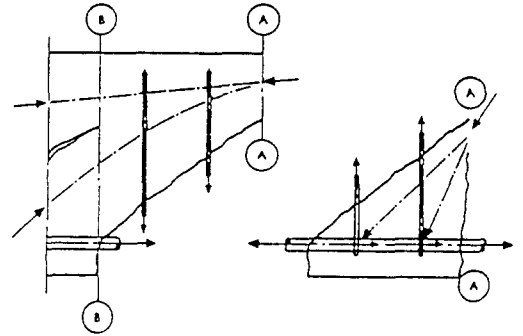


Fig. 3 Detail and crack pattern at RC member

또한 본 연구에서는 모델의 간략화를 위해 전단보강근이 전단스팬의 1/2 위치에 집중 배치되어 있는 것으로 간략화시켰으며, 또한 외력이 대각선 방향에 놓여있는 두개의 콘크리트 사재를 통하여 지지점에 전달되는 메카니즘을 편의상 아치기구조라 부르고, 외력이 사인장균열에 의해 형성된 콘크리트사재와 전단보강근을 통해 지지점에 전달되는 메카니즘을 트러스기구조로 부르기로 한다.

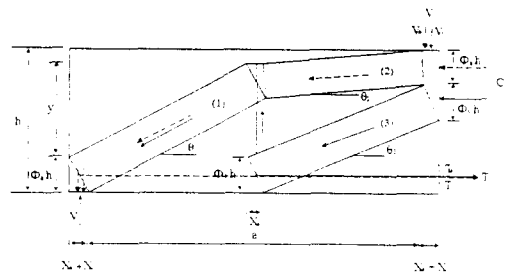


Fig. 4 Macro model for shear

$$x_t = \frac{V_t}{bf'_c} \quad (3)$$

또한 전단스팬구간내에 n개의 전단보강근이 일

Fig. 4에 있어서 연직방향으로 작용하는 전단력  $V$ 는 식 (1)과 같이 아치기구에 의해 부담되는 전단력  $V_a$ 와 트러스기구에 의해 부담되는 전단력  $V_t$ 로 나누어진다.

$$V = V_a + V_t \quad (1)$$

식 (1)에 있어서 각각의 항을 콘크리트강도  $f'_c$ 와 부재두께  $b$ 를 이용해 길이차원의 항으로 표현하면 각각 식 (2)와 식 (3)과 같이  $x$ 방향의 길이로 나타내진다.

$$x_a = \frac{V_a}{bf'_c} \quad (2)$$

정한 간격  $s$ 로 배근되어 있다면 트러스기구가 부담하는 전단력은 다음과 같이 표현할 수가 있다.

$$V_t = A_w f_{wy} n = A_w f_{wy} \frac{a}{s} \quad (4)$$

여기서  $f_{wy}$ 는 전단보강근의 항복강도 식 (3)과 식 (4)로부터 식 (5)와 같이 된다.

$$x_t = \frac{A_w f_{wy}}{bf'_c} \frac{a}{s} \quad (5)$$

또한 이 값을 전단보강근에 대한 무차원량을 이용하여 다시 쓰면 식 (6)과 같이 표현된다.

$$x_t = \psi a \quad (6)$$

$$\text{여기서 } \psi = \frac{A_w f_{wy}}{bs f'_c}$$

따라서 전단력을 콘크리트의 압축강도를 이용해 무차원화시키면 식 (7)과 같이 된다.

$$\frac{\tau}{f'_c} = \frac{V}{bhf'_c} = \frac{V_a + V_t}{bhf'_c} = \frac{x_a}{h} + \psi \frac{a}{h} \quad (7)$$

식 (7)에 있어서  $x_a$ 를 제외한 나머지 값들은 부재에 주어진 값들로서, 전단내력을 유도하기 위해서는  $x_a$ 의 값을 알아야 한다.

한편, 압축부에 작용하는 힘  $C$ 는 아치기구에 대응하는 힘  $C_a$ 와 트러스기구에 대응하는 힘  $C_t$ 와의 합으로 나타내어지며, 인장부에 작용하는 힘도  $T_a$ ,  $T_t$  등 두 성분의 합으로 나타내어진다. 이때 압축부에 작용하는 힘을  $b$ 와  $f'_c$ 를 이용해서 마찬가지로  $y$ 방향의 길이차원의 항  $y_a$ ,  $y_t$ 로 나타내면 식 (12), 식 (13)과 같이 된다.

$$C = C_a + C_t \quad (8)$$

$$\text{여기서 } C_a = by_a f'_c, C_t = by_t f'_c$$

$$T = T_a + T_t \quad (9)$$

$$\text{여기서 } T_a = A_{sa} f_y, T_t = A_{st} f_y$$

$f_y$  : 인장철근의 항복강도

수평방향의 힘의 평형조건에 따라 인장력과 압축력은 동일해야 하므로

$$C_a = T_a \quad (10)$$

$$C_t = T_t \quad (11)$$

따라서

$$y_a = \frac{A_{sa} f_y}{bf'_c} \quad (12)$$

$$y_t = \frac{A_{st} f_y}{bf'_c} \quad (13)$$

이 값을 인장철근량을 나타내는 무차원량으로 표시하면 다음과 같이 된다.

$$y_a = \Phi_a h \quad (14)$$

$$y_t = \Phi_t h \quad (15)$$

$$\text{여기서 } \Phi_a = \frac{A_{sa}}{bh} \frac{f_y}{f'_c}, \Phi_t = \frac{A_{st}}{bh} \frac{f_y}{f'_c}$$

먼저, 아치기구에 의한 힘의 전달경로를 나타내는 콘크리트사재(1)과 사재(2)에 대하여 기하학적인 조건을 적용하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\tan \theta_1 = \frac{x_a + x_t}{\psi h} = \frac{y}{\frac{a}{2} - \frac{x_t}{2} + x_a} \quad (16)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{x_a}{\Phi_a h} = \frac{h - y - \psi_a h}{\frac{a}{2} - \frac{x_t}{2}} \quad (17)$$

윗식으로부터 미지수를  $x_a$ 로 하여 연립으로 풀면

$$x_a = \frac{-a(1+\psi)}{2} + \sqrt{a^2(1+\psi)^2 + 4h^2\Phi_a(1-\Phi_a) - 2\psi a^2(1+\psi)} \quad (18)$$

그러나 식 (18)에 있어서  $\Phi_a$ 의 값이 결정되어 있지 않기 때문에, 이 식만으로는 RC부재의 전단내력을 평가할 수가 없고 또 하나의 조건이 필요하다. 또 하나의 조건은 트러스기구에 의해 외부에서 작용하는 전단력을 전단보강근이 부담하는 힘을 나타내는 콘크리트 사재(3)에 대하여 기하학적인 조건으로부터 유도해 낼 수가 있다.

$$\tan \theta_3 = \frac{x_a}{\Phi_t h} = \frac{h - \Phi h}{\frac{a}{2} - \frac{x_t}{2} + x_a + x_t} \quad (19)$$

이상의 식들을 제약조건으로 하여  $x_a$ 에 관해서 정리하면, 식 (20)과 같은 2차방정식이 얻어진다. 여기서 2차방정식의 계수 A, B, C는 구조물의 계수로부터 정해지는 계수로서 그 값들은 각각 다음과 같다.

$$Ax_a^2 + Bx_a + C = 0 \quad (20)$$

$$\text{여기서, } A = \left(1 + \frac{1 + \psi^2 a^2}{h^2(1 - \Phi)^2}\right)$$

$$B = a + a\psi + \frac{a^3\psi^2(1+\psi)}{h^2(1-\Phi)^2} - \frac{2a\Phi\psi}{1-\Phi} + \frac{a\psi}{1-\Phi}$$

$$C = \frac{a^2\psi}{2} + \frac{a^2\psi^2}{2} + \frac{a^4\psi^2}{4h^2(1-\Phi)^2}(1+\psi^2+2\psi) - a^2\frac{\Phi\psi(1+\psi)}{(1-\Phi)} + \Phi^2 h^2 - \Phi h^2$$

윗 식을 풀면 아치기구에 부담하는 전단력을 길이차원으로 나타낸  $x_a$ 의 값을 유도해 낼 수 있다.

$$x_a = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (21)$$

따라서 이 값을 식 (7)에 대입하게 되면 비로소 전단보강근이 배근되어 있는 RC부재의 전단내력식을 유도할 수가 있다.

이 식은 아치기구와 트러스기구가 각각 부담하는 힘의 크기를 명확하게 구분할 수가 있으며, 또한 전단내력에 커다란 영향을 미치는 인장철근량, 전단보강근량, 그리고  $a/d$ 의 영향을 모두 평가할 수가 있다는 특징을 가지고 있다.

단, 기존의 전단내력식은 인장철근이 항복되기 전에 사인정균열의 발생에 의해 갑자기 발생하는 사인장파괴를 주요대상으로 삼고 있으나, 본 제안식은 인장철근의 항복이 일어난 부재를 대상으로 하고 있다는 점을 주의해야 한다.

또한 식 (7)에서 전단보강근에 관련된 항인  $\psi$ 를 0으로 놓으면 식 (22)와 같이 전단보강근이 배근되지 않은 부재의 전단내력식이 유도된다.

$$\frac{\tau}{f_{ck}} = -\frac{a}{2} + \frac{\sqrt{a^2 + 4h^2\Phi(1-\Phi)}}{2h} \quad (22)$$

다시 말하자면 트러스기구의 부담전단력은 전혀 없어지고 아치기구의 부담전단력만 남게되어, 본 제안식은 전단보강근이 배근되지 않은 부재부터 배근된 부재까지, 그리고 전단스팬이 작은 경우보다 큰 경우까지 일관되게 설명을 할 수 있다.

## 4. 본 제안식에 대한 평가

### 4.1 전단내력에 영향을 미치는 인자

RC부재의 전단파괴에 영향을 미치는 인자는 상당히 많은 것으로 알려져 있지만, 그 중에서 비교적 영향이 큰 것으로서 알려져 있는 인장철근비( $\rho_s$ ), 전단보강근비( $\rho_w$ ) 및 전단스팬비( $a/d$ )에 대해서 검토를 하였다.

### 1) 인장철근비 및 전단보강근비의 영향

일반적으로 RC부재에 있어서 인장철근량이 증가하면 균열발생시 균열폭이 줄어들어 골재의 Interlocking 작용이 증가하고 철근의 Dowel 작용 또한 증가하기 때문에 RC부재가 가지는 전단내력은 증가하는 것으로 알려져 있다. 또한, 그 영향은 사인장균열발생전단력 또는 콘크리트가 부담하는 전단력의 항에만 관여되고, 사인장균열이 발생한 이후에는 전혀 영향을 미치지 않는 것으로 규정하고 있다.

한편 전단보강근의 경우에는 사인장균열이 발생한 이후 모든 하중을 전적으로 전단보강근에서 부담하도록 되어 있고, 증가분 또한 배근량에 직선적으로 변화하도록 되어 있다.

그러나 전단보강근이 배근되어 있는 부재에 있어서 보강근량이 증가할수록 전단내력의 증가분이 점차로 감소한다는 사실은 실험적으로도 판명되고 있고,<sup>(8)</sup> 일부에서는 전단보강근에 의한 배근효과를 전단보강근비의 평방근이나 5/8승의 형태로 감소시켜 평가하는 경우도 있다.<sup>(9)</sup>

이와같이 전단보강근량과 내력의 증가분이 직선적으로 변화하지 않는 것은 사인장균열 발생 이후 부재내에 응력의 재분배현상이 일어나 인장철근을 포함한 각 철근에서 부담하는 힘도 달라지기 때문으로 사료된다. 따라서 현행의 전단설계방식과 같이 트러스기구에만 의존하여 전단보강근량과 내력의 증가분을 직선적으로 평가하는 문제에 대해서는 검토의 여지가 남아있다.

본 연구에서 제안한 모델에서도 내력평가지 이와 유사한 경향을 나타내 인장철근량이나 전단보강근량의 증가에 따라 그 부분이 곧바로 내력의 증가분으로 나타나는 것이 아니라, 부재에 배근된 철근량 및 전단스팬비등 인자 상호간의 영향을 받아 달라지도록 되어 있다. 따라서 내력의 증가량은 일률적이라고 할 수는 없고, 대략 인장철근량 및 전단보강근량의 증가에 따라 전단내력이 증가하는 것으로 나타났다.

식 (7)을 이용하여  $a/d$ 를 1.0으로 일정하게 놓았을 때, 무차원인장철근비( $\Phi$ ) 및 무차원전단보강근비( $\psi$ )를 증가시켰을 때의 무차원전단내력( $\tau/f'_{ck}$ )의 변화를 무차원량으로 표시된 3차원공간

에 나타내면 Fig. 5와 같다.

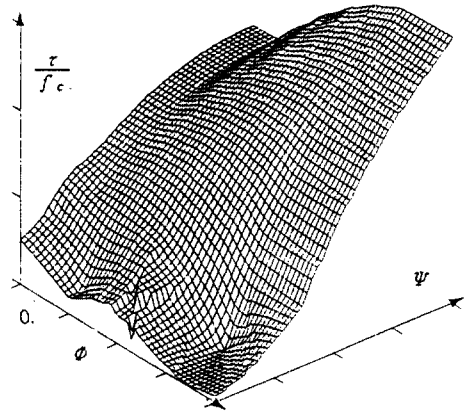


Fig. 5 Effect of longitudinal and web reinforcement on shear capacity

### 2) 전단스팬비의 영향

부재에 외력이 작용할 경우  $a/d$ 가 작아지게 되면 지점반력 혹은 하중에 의한 연직압축응력의 영향을 무시할 수 없게 되기 때문에 전단스팬비가 작아질수록 부재의 전단내력은 증가하는 것으로 알려져 있다.

본 제안식에서도 기존의 다른 평가식과 마찬가지로  $\Phi$ 를 일정하게 놓았을 때  $a/d$ 의 증가에 따라 전단내력값이 증가하는 것으로 평가하고 있다 (Fig. 6 참조).

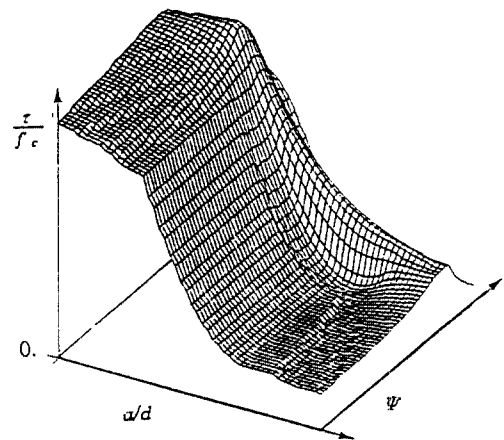


Fig. 6 Effect of  $a/d$  on shear capacity

한편 콘크리트 압축강도의 영향에 대해서는 본 모델은 근본적으로 철근량 및 전단스팬비가 주요 변수로 되어 있고 콘크리트압축강도의 영향은 철근량에 대한 무차원화에 간접적으로만 사용이 되기 때문에 강도증가에 따른 내력변화는 직접적으로 평가가 곤란하다.

### 4.3 기존의 실험자료와의 비교검토

본 연구에서는 제안식의 유용성을 검토하기 위해 Smith<sup>(10)</sup>가 47개의 Deep Beam에 관해서 수행한 실험결과와 비교검토를 행하였다. 여기서 콘크리트의 강도저감을 위해 유효강도저감계수  $\nu$ 는 일반적으로 0.85의 값을 사용하였다. 비교에 사용한 실험자료의 범위는 Table. 1과 같다(실험자료에 대한 자세한 사항은 참고문헌(10)을 참고하기 바란다).

Table 1 Experimental data used to compare with calculated shear capacity

Influence Factor	Range
a/h	0.86~1.79
$\rho_s$	0.0218~0.0267
$\rho_w$	0.00857~0.0186
$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	164~231

또한 본 제안식을 기존의 연구자에 의해서 제안된 식들과 동일한 실험자료에 대하여 비교를 행하였다. Deep Beam의 전단내력평가에 관해서는 ACI, CIRIA<sup>(11)</sup> 등 몇몇 시방서상에도 규정이 포함되어 있지만, 적용상의 어려움때문에 본 비교에서는 제외하였다. 비교에 사용한 제안식은 각각 식 (23), 식 (24)와 같다.

$$V_u = \frac{1}{2} [K(\omega_t + 0.03) + \sqrt{K^2(\omega_t + 0.003)^2 + 4(\omega_t + 0.03)(\omega_t + 0.03)}] b d f'_c \quad (23)$$

$$V_u = \frac{1}{2} b v f'_c [-a + \sqrt{a^2 + 4y_0(h - y_0)}] + b a r f_y \quad (24)$$

Table 2 Mean value and variation coefficient of various formula

Shear Capacity Eq.	Mean Value	Variation Coeff
the proposed Eq.	1.02	29.91
Mau's Eq. <sup>(12)</sup>	0.76	21.28
Nielsen's Eq. <sup>(13)</sup>	0.95	31.34

본 제안식을 이용하여 계산한 값과 실험치와 비교한 값의 분포를  $\psi$ 의 값별로 분포시키면 Fig. 7과 같다.

실험치와의 비교결과, 본 제안식은 실험치와 해석치와의 비의 평균치, 즉  $V_{exp}/V_{cal}$ 는 1.02으로서 비교적 좋은 결과가 얻어졌으나, 해석치의 분산정도를 나타내는 변동계수의 값은 29.91%로서 만족할 만한 결과가 얻어졌다고 보기는 곤란하고, 나머지 두 식의 경우도 해석치에 대한 변동계수가 20%를 넘어서 현재로서는 실험자료를 어느정도 적절하게 평가하는 식은 없다고 할 수 있다. 이는 a/d가 1.5이하인 부재의 경우는 연직으로 배치되는 전단보강근외에 수평방향으로도 다량의 수평보강근이 배근되지만, 상기의 세 식에서는 수평보강근의 배근효과에 대한 평가가 곤란하고, 또한 세 식 모두 인장철근이 항복이 일어난 것을 전제 조건으로 하여 유도된 것이기 때문에 실제의 거동과 일치하지 않기 때문으로 사료된다.

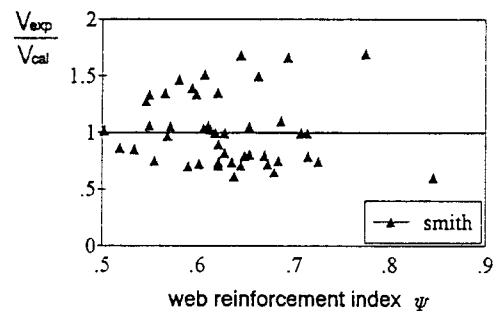


Fig. 7 Comparison of proposed formula with tests

### 4.2 아치기구와 트러스기구의 전단력의 분담

본 연구에서 제안한 모델의 특징은 부재의 전단 저항기구를 형성하는 아치기구와 트러스기구의



전단력의 분담비율을 도해적으로 구할 수 있다는 것이다. 즉, Fig. 4에서 폭  $x_a$ 를 통해 전달되는 힘(그림상에 점선으로 표시되어 있는 힘)과 폭  $x_t$ 를 통해 전달되는 힘(실선으로 표시되어 있는 힘)을 식 (21)을 이용해 각각 구할 수 있다.

Fig. 8에서 사선으로 그려진 선을 중심으로 아랫방향의 값은 전체 전단력중 아치기구가 부담하는 양이고, 윗 부분의 값은 트러스기구가 부담하는 양이다. 이 해석결과에 의하면  $a/d$ 가 작을수록 많은 양의 전단보강근이 배근되어 있음에도 불구하고 전단력의 대부분을 아치기구에서 부담하여 전단보강근의 배근효과가 크지않음을 알 수 있다. 또한  $a/d$ 가 커지게 되면 아치기구의 부담분은 거의 없어지고 대부분의 전단력을 트러스기구에서 부담하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 기존의 실험을 통해서도 정성적으로 확인된 사실로, 본 제안식은 각 기구의 분담분도 잘 평가하고 있음을 알았다. 그러나, 그 비율은 전단보강근량과 인장철근량등의 상대적인 크기에 따라 변화하기 때문에 정량적인 파악에는 이르지 못했다.

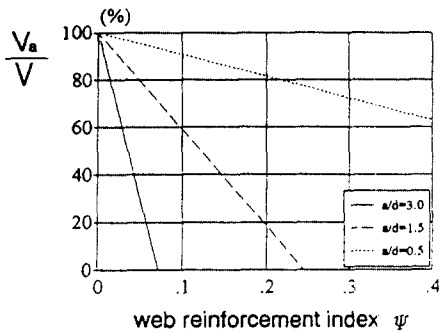


Fig. 8 Variation of  $V_a$  and  $V_t$

## 5. 결 론

본 연구에서는 비교적 전단스팬비가 작은 RC부재를 대상으로 Nielsen이 전단내력의 유도시에 사용했던 도해적인 방식과 유사한 방법으로 전단내력식을 유도하였다. 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

1) 본 연구에서는 인장철근량과 전단철근량 및 전단스팬비등 RC부재의 전단내력에 커다란 영향

을 미치는 제인자들의 영향을 평가할 수 있으며, 또한 아치기구와 트러스기구를 동일한 모델하에서 일관되게 설명할 수 있는 모델을 제안하였다.

2) 본 연구에서 제안한 모델은 외부에서 작용한 힘이 어떻게 지점에 전달되고 있는가 쉽게 이해할 수가 있으며, 전단스팬비( $a/d$ ), 전단보강근비, 인장철근비등의 영향을 정량적으로 고려할 수가 있다.

3) 본 연구에서 유도한 전단내력식은 실험치와 비교검토한 결과, 실험치를 비교적 잘 평가하고 있다는 것을 알았다.

4) 본 제안식을 이용해 아치기구와 트러스기구의 전단력 분담비율을 검토한 결과,  $a/d$ 가 작은 경우에는 아치기구가 탁월하고  $a/d$ 가 큰 경우에는 트러스기구가 탁월하다는 것을 알았다.

본 연구에서는 전단내력식을 단일식의 형태로 제시하고는 있으나, 식이 매우 복잡하므로 손계산에 의하기는 약간 번거로움이 있다. 본 연구에서 제시한 모델은 아치기구와 트러스기구를 동시에 고려할 수 있다는 장점은 있으나,  $a/d$ 가 3이상인 트러스작용이 두드러진 부재에 대해서는 적용상에 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 모델을 모든 경우에도 적용가능하도록 하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다 하겠다.

## 참 고 문 헌

1. M. P. Nielsen, Limit Analysis and Concrete Plasticity, Van Nostrand, New York, 1984, pp.281-329
2. Collins, M. P. "Towards a Rational Theory for RC Members in Shear", Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 104, No. ST4, 1978, pp.649-666
3. 姜錫和, 鐵筋콘크리트部材의せん斷耐力評價に關する研究, 東北大學學位論文, 1991, pp. 70-71
4. Model Code for Concrete Structure, CEB-FIP International Recommendations, Third edition, CEB-FIP, 1978
5. 南宏一, "せん斷を受ける鐵筋콘크리트部材の極限解析について", RC構造のせん斷問題に對

- する解析的研究に関するコロキウム論文集,  
JCI-C1, 日本コンクリート工学協会, 1982, 6.  
pp.1-16
6. 鈴木基行, 姜錫和, 尾坂芳夫, “せん断補強筋を有する鉄筋コンクリートばりのせん断耐力評価に関する解析的研究”, 土木學會論文集, 第426號, V-14, 1991. 2., pp.111-120
  7. 鈴木基行, 姜錫和, 尾坂芳夫, “曲げ・せん断および軸力を受けるRC部材のせん断設計法に関する研究”, 土木學會論文集, 第433號, V-15, 1991 8., pp.129-138
  8. Leonhardt, F. “Shear in Concrete Structure”, CEB Bulletin D'information, No. 126, 1978, pp.67-124
  9. 六車熙, 渡邊史夫, “鉄筋コンクリート柱のせん断抵抗機構に関する研究—その2, 付着割裂破壊におけるせん断補強筋の効果”, 日本建築學會論文集, 第341號, 1984. 7., pp.11-18
  10. Smith, K. N., Vantoise, A. S. “Shear Strength of Deep Beam”, ACI Journal, Proceeding V. 79, No. 3, May-June, 1982, pp. 201-213
  11. Construction Industry Research and Information Association, The Design of Deep Beams in Reinforced Concrete, CIRIA Guide 2. Ove Arup & Partnera and CIRIA, London, 1977
  12. Mau, S. T. and Hsu, T.T.C. “Shear Strength Prediction for Deep Beams with Web Reinforcement”, ACI Journal, V. 79, No. 5, 1987, pp.513-523
  13. Braestrup, M. W. and Nielsen, M. P., “Plastic Methods of Analysis and Design”, In Handbook of Structural Concrete Ch. 20, Pitman, London, 1983

(접수일자 : 1994. 8. 17)