

## 철근의 배근 위치가 다른 철근콘크리트 부재의 거동 분석

이정윤<sup>1)\*</sup> · 김지현<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>성균관대학교 건축공학과

## Behavior of Reinforced Concrete Members Having Different Steel Arrangements

Jung-Yoon Lee<sup>1)\*</sup> and Ji-Hyun Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

**ABSTRACT** When the shear force governs the response of an RC element, as in the case of a low-rise shear wall, the effect of shear on the element's response is thought to be responsible for the 'pinching effect' in the hysteretic loops. However, it was recently shown that this undesirable pinching effect can be eliminated in the hysteretic load-deformation curves of a shear-dominant element if the steel grid orientation is properly aligned in the direction of the applied principal stresses. In this paper, the presence and absence of the pinching mechanism in the hysteretic loops of the shear stress-strain curves of RC elements was explained rationally using a compatibility aided truss model. The analytical results indicate that the pinching effect of the RC elements is strongly related to the direction of the steel arrangement. The area of the energy dissipation does not increase proportionally to the difference between the direction of the principal compressive stress and the direction of the steel arrangement.

**Keywords :** pinching effect, reinforced concrete elements, compatibility aided truss model, direction of steel arrangement, energy dissipation

### 1. 서 론

지진하중을 받는 철근콘크리트 부재의 내진설계는 부재의 에너지소산 능력 및 연성과 밀접한 관계가 있다. 철근콘크리트 구조물을 성능 기초 설계에 근거하여 설계할 경우에 소성힌지가 보의 양단부에 선행 발생하며 보·기둥 접합부 및 기둥은 보의 변형 능력이 설계변형 능력에 도달할 때까지 내력이 저감되지 않아야 한다. 보에 발생하는 소성힌지는 일반적으로 지배하중의 종류 (휨모멘트, 전단력, 부착력 등)와 철근의 양 및 배근 방향에 따라 상이한 하중이력곡선 및 에너지소산을 나타낸다. 전단경간비가 커서 휨이 지배하는 보의 소성힌지는 에너지소산이 큰 이력곡선을 나타내는 반면에 전단경간비가 짧은 연결보 (coupling beams)의 경우는 에너지소산이 매우 작은 이력곡선을 보인다. Fig. 1은 전단보강철근의 배근 방향이 다른 철근콘크리트 부재의 전단응력-전단변형을 곡선<sup>1)</sup>을 나타낸다. Fig. 1(a)는 전단보강철근이 주응력 방향과 일치되게 배근된 철근콘크리트 판 요소의 전단응력-전단변형을 곡선을 나타낸다. 그림에서 지진하중에 의하여 철근이 항복한 이후에 부재의 하중-변형을 곡선은 에너지

소산이 매우 큰 곡선임을 알 수 있다. 이와 같이 큰 에너지소산은 전단경간비가 비교적 커서 부재가 휨모멘트에 의하여 지배받는 부재나 전단경간비가 작지만 대각선 전단보강철근이 배근된 부재의 거동에서도 나타난다. Fig. 1(b)는 전단보강철근이 주응력 방향과 45°로 배근된 철근콘크리트 판 요소의 전단응력-전단변형을 곡선을 나타낸다. Fig. 1(b)에서 철근이 45°로 배근된 부재에서 철근이 항복한 후에 부재의 응력-변형을 곡선은 핀칭 효과에 의하여 에너지소산이 매우 작음을 알 수 있다. 이와 같이 작은 에너지소산은 연결보와 같이 전단경간비가 작아 전단하중에 의하여 지배받는 부재나 전단보강철근이 부재축과 수직하게 배근되며 전단경간비가 짧은 부재의 하중-처짐 곡선에서도 나타난다. 또한 부재의 연성 능력은 철근의 배근과 밀접한 관계가 있어서, 철근 배근 방향이 주응력 방향과 일치하거나 전단경간비가 긴 부재의 연성 능력은 핀칭 효과가 나타나지 않으며 철근이 주응력 방향과 45°로 배근된 부재의 연성 능력보다 일반적으로 크다.

이와 같이 철근의 배근 위치에 따라서 부재의 이력곡선의 에너지소산이 달라짐과 함께 부재의 연성 능력도 달라질 수 있다. 몇몇 연구자의 실험 결과에 의하면 벽체나 연결보에 철근을 부재축과 수직 또는 경사지게 배근할 경우에 각 부재의 연성 능력에는 큰 차이가 나타났다.

\*Corresponding author E-mail : jylee@skku.ac.kr

Received November 22, 2006, Accepted September 28, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

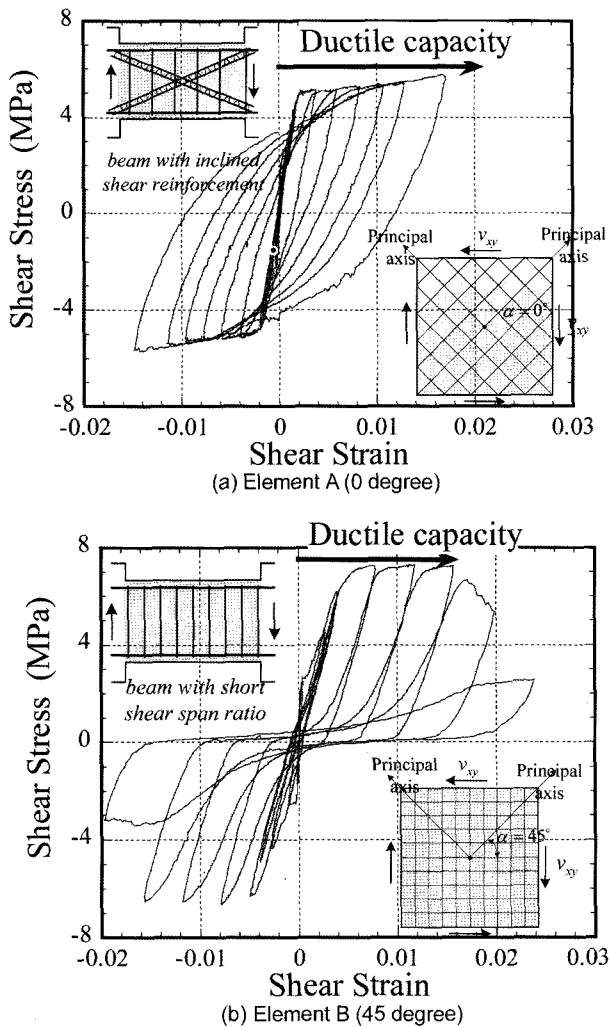


Fig. 1 Shear stress-strain curves of RC elements

이 연구에서는 철근의 배근 위치에 따라서 달라지는 펀칭 효과를 구명하고 이를 이용하여 배근에 따라서 달라지는 부재의 연성을 예측하였다.

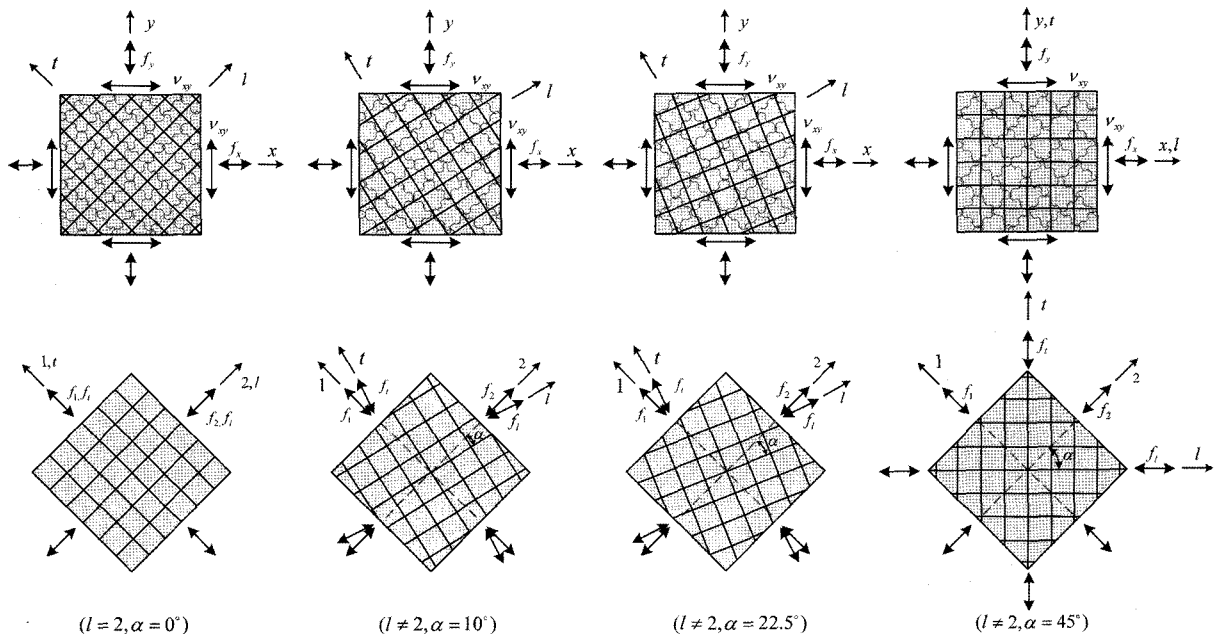


Fig. 2 RC elements subjected to in-plane stresses

## 2. 변형률의 적합 조건을 이용한 트러스 모델

지진하중을 받는 철근콘크리트 원통셀, 전단벽, I형보 등의 비선형거동을 평가하기 위한 방법으로 각 구조물의 임의의 요소를 절단하여, 그 요소의 거동을 예측함으로써 전체 구조물의 성능을 평가할 수 있다. 이러한 면내 응력을 받는 철근콘크리트 막 요소에 대한 연구는 Collins 등<sup>2)</sup>, Hsu 등<sup>3)</sup>에 의하여 활발히 이루어졌다. Collins 등은 순수전단을 받는 철근콘크리트 막 요소의 전단응력-전단 변형률 관계를 수정압축장이론 (modified compression field theory, MCFT)에 의하여 예측하였고, 이를 철근 및 프리스트레스 콘크리트 보의 전단강도 예측<sup>4)</sup>에 적용하였다. Hsu 등은 회전각연화트러스모델 (rotated angle softened truss model, RASTM)을 제안하여 철근콘크리트 막 요소의 전단 거동을 예측하였다.

이 연구에서는 기존 연구자가 제안한 변형률의 적합 조건을 이용한 트러스 모델에 반복하중을 받는 경우의 재료의 구성 법칙을 이용하여 부재의 거동을 예측하였다. Fig. 2는 면내 응력  $f_x, f_y, v_x, v_y$ 를 받아 균열이 발생한 철근 콘크리트 판 요소를 나타낸다. 철근은  $l$ 방향과  $t$ 방향에 배근 되어 있으며 콘크리트 판 요소의 주응력 방향은 1과 2방향이다. 변형률의 적합 조건을 이용한 트러스 모델에서는 외력에 의한 주압축 응력 각도가 균열 각도  $\alpha$ 와 일치한다고 가정한다. Fig. 2의 응력 상태로부터 다음과 같은 평형 조건식을 구할 수 있다.

$$[f_{lt}] = [R][f_{21}^c][R]^T + [\rho_s f_{lt}] \quad (1)$$

여기서  $l$ 방향과  $t$ 방향의 철근콘크리트 요소의 직응력 및 전단 응력 매트릭스  $[f_{lt}] = \begin{bmatrix} f_l & v_{lt} \\ v_{lt} & f_t \end{bmatrix}$ , 1과 2방향의 콘크리트 주응력

$$\text{매트릭스 } [f_{21}^c] = \begin{bmatrix} f_2^c & 0 \\ 0 & f_1^c \end{bmatrix}, \text{ 회전 매트릭스 } [R] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix},$$

$$l \text{ 방향과 } t \text{ 방향의 철근의 응력 매트릭스 } [\rho f_{it}] = \begin{bmatrix} \rho_i f_i \\ \rho_t f_t \\ 0 \end{bmatrix}, \rho_b, \rho_t$$

는  $l$ 과  $t$ 방향의 철근비이다. 또한  $l$ 방향과  $t$ 방향의 철근콘크리트 요소의 변형률은 콘크리트의 주응력 변형률을 변환하여 다음과 같이 계산한다.

$$[\varepsilon_{it}] = [R][\varepsilon_{21}][R]^T \quad (2)$$

여기서  $l$ 방향과  $t$ 방향의 철근콘크리트 요소의 변형률 매트릭스  $[\varepsilon_{it}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_l & \gamma_{lt}/2 \\ \gamma_{lt}/2 & \varepsilon_t \end{bmatrix}$ , 1과 2방향의 콘크리트 변형률 매트릭스  $[\varepsilon_{21}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & \varepsilon_1 \end{bmatrix}$ , 회전 매트릭스  $[R] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$ 이다.

식 (1)과 (2)를 이용하여 철근의 배근 방향과 무관하게 요소의 최대 전단력을 콘크리트의 주응력 및 주변형률을 변환하여  $x, y$  방향의 최대 전단력 및 전단변형률을 예측하였다.

식 (1)과 (2)를 이용하여 최대 전단력과 전단변형률 관계를 구하기 위해서는 반복하중을 받는 콘크리트와 철근의 응력-변형률 관계가 필요하다. Collins 등의 MCFT와 Hsu 등의 RASTM에서는 단조하중을 받는 콘크리트와 철근의 응력-변형률 관계를 적용하였기 때문에 지진하중을 받는 철근콘크리트 막 요소의 거동을 예측할 수 없었다. 근년 Mansour 등<sup>5)</sup>은 철근콘크리트 패널 실험에 근거하여 반복하중을 받는 철근과 콘크리트의 응력-변형률 관계를 제안하였다. 이 연구에서는 Mansour 등<sup>5)</sup>이 제안한 반복하중을 받는 재료의 응력-변형률 곡선에 Zhu 등<sup>6)</sup>이 제안한 확장계수비를 적용하였다. Zhu는 철근콘크리트 요소 실험을 통하여 하중의 변화에 따라서 달라지는 확장계수비를 계측하였고, 이에 대한 모델을 다음과 같이 제안하였다.

수비를 0으로 한 경우의 1과 2방향의 콘크리트의 주변형률,  $E_c^1, E_c^2$ 는 1과 2방향의 콘크리트의 탄성계수,  $E_s^l, E_s^t$ 는  $l$ 과  $t$ 방향의 철근의 탄성계수  $\varepsilon_b, \varepsilon_s$ 는  $l$ 과  $t$ 방향의 변형률,  $\gamma_{lt}$ 는  $l$ 과  $t$ 방향의 전단 변형률,  $\varepsilon_y$ 는 확장계수비를 고려하여 먼저 항복하는 철근의 평균 인장 변형률, 확장계수  $k_{12}$  및  $k_{21}$ 은 다음과 같다.

$$k_{12} = 0.2 + 850\varepsilon_{sf} \quad \varepsilon_{sf} \leq \varepsilon_y \quad (5a)$$

$$k_{12} = 1.9 \quad \varepsilon_{sf} > \varepsilon_y \quad (5b)$$

$$k_{12} = 0 \quad (5c)$$

$$k_{12} = 0 \quad (5c)$$

제안된 철근의 응력-변형률관계에서는 콘크리트에 묻혀있는 철근의 평균응력-평균변형률의 개념이 적용되었고, 균열수직 방향에서의 콘크리트 변형률에 의한 강도 연화 효과가 고려되었다. 또한, 이 연구에서는 균열이 발생한 콘크리트에 압축력이 작용할 경우 콘크리트의 압축 강도 및 변형률은 1축 압축응력을 받는 콘크리트 공시체의 압축강도 및 변형률과 큰 차이를 나타내며, 이와 같은 현상을 연화 효과에 의한 콘크리트의 압축강도 및 변형률의 변화라 한다. Robinson과 Demorieux<sup>7)</sup>, Collins 등<sup>2)</sup>, Hsu 등<sup>3)</sup>은 실험을 통하여 연화 효과는 균열 수직 방향의 콘크리트의 변형률과 밀접한 관계가 있음을 지적하였다. Mansour 등<sup>5)</sup>은 균열 수직 방향의 변형률이 상이한 철근콘크리트 패널 실험에 근거하여 반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형률 모델을 제안하였다. 모델은 7단계의 압축응력-변형률 곡선과 6단계의 인장응력-변형률 곡선으로 구성되어 있다.

콘크리트 안에 배근되어 인장력을 받는 철근은 철근과 콘크리트의 부착작용 (tension stiffening effect)에 의해 보통 철근과 상이한 응력-변형률 관계를 나타낸다. 콘크리트 안에 배근된 철근의 응력은 균열면에서 최대가 되지만, 균열 중간에서 최소가 된다. 따라서 콘크리트에 의해 구속된 철근의 평균 항복응력  $f_n$ 은 보통 철근의 항복응력  $f_y$ 보다 작으며 철근의 평균 응력-변형률 관계는 균열 사이의 철근 응력 및 변형률의 평균값에 의하여 정해져야 한다. Belarbi 등<sup>8)</sup>의 실험 결과에 의하면  $f_n$ 값과  $f_y$ 값의 차이는 철근비  $\rho$ , 콘크리트 균열강도  $f_{cr}$ , 주응력 방향과 철근 방향과의 각도에 좌우된다. Mansour 등<sup>5)</sup>에 의하여 제안된 반복하중을 받는 철근의 평균 응력-변형률 관계는, 탄성영역, 인장 항복 영역, 압축 항복 영역, 제하 (除荷) 영역, 재(再)가력 영역의 4단계로 구별할 수 있다. 반복하중을 받는 콘크리트 및 철근의 응력과 변형률 곡선에 대한 상세한 내용은 [참고문헌 5]를 참고하기 바란다.

본 논문에서는 해석 부재의 경계조건 및 부재의 형상을 최대한 단순화하여 철근의 배근 방향과 주응력 방향과의 각도의 차이가 부재의 거동에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하고자 함을 목적으로 하고 있으며, 일반 부재 (벽체, 보 등)의 전체 거동을 예측하고자 함이 아니다.

$$\begin{Bmatrix} f_c^1 \\ f_c^2 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_c^1}{1-k_{12}k_{21}} & \frac{k_{12}E_c^1}{1-k_{12}k_{21}} & 0 \\ \frac{k_{21}E_c^2}{1-k_{12}k_{21}} & \frac{E_c^2}{1-k_{12}k_{21}} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} \rho_l f_l \\ \rho_t f_t \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_l E_s^l & 0 & 0 \\ 0 & \rho_t E_s^t & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_l \\ \varepsilon_t \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} k_{12}(\rho_l E_s^l \bar{\varepsilon}_2 \sin^2 \alpha) + k_{21}(\rho_t E_s^t \bar{\varepsilon}_1 \cos^2 \alpha) \\ k_{12}(\rho_t E_s^t \bar{\varepsilon}_2 \cos^2 \alpha) + k_{21}(\rho_l E_s^l \bar{\varepsilon}_1 \sin^2 \alpha) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $f_1^c, f_2^c$ 는 1과 2방향의 콘크리트의 주응력,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 는 1과 2방향의 콘크리트의 주변형률,  $\bar{\varepsilon}_1, \bar{\varepsilon}_2$ 는 확장계

제안 해석법을 일반 부재에 적용하기 위해서는 각각의 부재의 경계조건 및 복합 응력을 정확하게 해석에 적용하여야 할 것으로 판단된다.

### 3. 단조하중을 받는 요소의 연성 평가

이 연구에서는 2장의 변형률 적합 조건을 이용한 트러스 모델을 이용하여 단조하중을 받는 세 요소의 응력-변형률 관계를 해석적으로 계산하였다. 해석에서는 철근의 배근 각도를 0° (콘크리트 주응력 방향=철근 배근 방향)에서부터 90°로 변화시키며 각각의 각도에서의 부재의 최대 전단력 및 최대 전단력에 상응하는 전단변형률을 계산하였다.

Table 1은 해석에 사용된 부재의 재료적 특징을 나타낸다. Table 1에는  $\alpha$ (철근의 배근과 콘크리트의 주압축 응력 방향과의 차이 각도)를 0° (콘크리트 주응력 방향 = 철근 배근 방향), 10°, 22.5°, 45°로 구분한 4개의 실험체 명과 변수를 표시하고 있다. 해석에서는 이들 4개의 실험체 외에도 각도를 0.001 radian으로 증분하면서 각도의 변화에 따라서 달라지는 부재의 거동을 예측하였다.

Fig. 3은 해석에서 계산된 전단강도비와 각도 및 전단 변형률비와 각도의 관계를 나타낸다. 그림의 전단강도비 ( $v_a/v_{45}$ )란 각각의 각도에서 계산된 전단강도를 철근이 45°로 배근되었을 때의 전단강도로 나눈 값을 의미한다. 전단 변형률비 ( $\gamma_a/\gamma_{45}$ )도 이와 유사하게 각도가 변화하는 부재의 전단강도에 상응하는 변형률을 45°로 철근이 배근된 부재의 전단변형률로 나눈 값이다. 그림에서 전단

Table 1 Specification specimens and material properties

Specimen	$f_{ck}$ (MPa)	$\rho_t$	$f_{fy}$ (MPa)	$\rho_l$	$f_{fy}$ (MPa)	$\alpha$ (degree)
S00	45.14	0.007	431.56	0.007	431.56	0
S10	45.14	0.007	431.56	0.007	431.56	10.0
S23	45.14	0.007	431.56	0.007	431.56	22.5
S45	45.14	0.007	431.56	0.007	431.56	45.0

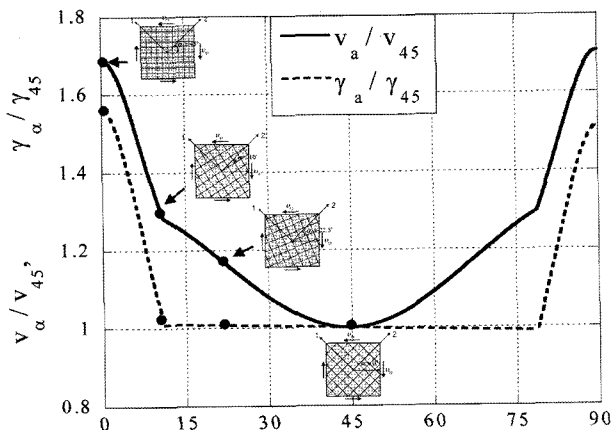


Fig. 3 Shear strength and strain corresponding shear strength vs angle between steel direction and principal stress direction

강도 및 최대 변형률은 철근의 배근 각도가 콘크리트의 주응력 방향 (0°나 90°)에 가까워짐에 따라서 증가함을 알 수 있다. 철근이 주응력방향에 배근된 경우의 전단강도 및 전단변형률은 철근이 주응력 방향과 45° 각도로 차이가 있는 경우보다 약 1.5배 크다는 것을 알 수 있다. 전단강도 및 전단변형률의 증가하는 비율은 각도에 따라서 선형적으로 증가하거나 감소하는 것이 아니라 45°로부터 약 25° 전후에서는 증가 비율이 매우 작지만 그 이후에는 증가 비율이 급속하게 커짐을 알 수 있다. 이와 같은 현상을 보다 명확히 구명하기 위하여 이 연구에서는 각각 0°, 10°, 22.5°, 45°로 철근이 배근된 부재의 거동을 비교·분석하였다.

Fig. 4에서 전단강도와 전단변형률이 큰 실험체 (S00와 S10)와 작은 실험체 (S23와 S45)의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

1) S00과 S10 실험체의 경우 철근이 주응력 방향에 가까운 쪽에 배근됨으로써 양 방향 철근이 각각 인장과 압축을 저항하였다. 따라서 압축력은 콘크리트와 철근이 함께 부담하게 되므로 콘크리트가 저항하는 압축응력 ( $f_2$ )은 Fig. 4(a)와 같이 상대적으로 작았다. 반면에 S23과 S45 실험체의 경우는 철근이 전부 인장만을 저항함으로써 압축력을 콘크리트가 전부 저항해야 하므로 콘크리트가 부담하는 압축응력은 상대적으로 크게 작용하였다.

2) 적합 조건을 이용한 트러스 모델에서 부재는 철근이 항복한 이후에 콘크리트의 압축응력 ( $f_2$ )이 유효압축강도 ( $v_{fck}$ )에 도달할 때 파괴된다. Fig. 4(b)와 같이 콘크리트가 부담하는 압축응력이 S23과 S45 실험체의 경우는 크기 때문에 S00과 S10 실험체보다 빠른 단계에서 유효압축강도에 도달하였고, 따라서 S00과 S10 실험체의 파괴시의 전단변형률이 S23과 S45 실험체의 전단변형률보다 컸다.

3) Fig. 3에서 전단변형률과 전단응력이 갑자기 변화하는 이유는 철근의 항복 여부로 설명할 수 있다. Fig. 4 (c)에서 실험체 S00과 S10의 경우는 양 방향 철근 중에서 한 쪽 방향 철근만이 인장 항복하여 (다른 쪽 철근은 압축이나 탄성 상태) 콘크리트의 부담 응력이 작은 반면에 실험체 S23과 S45의 경우는 양 방향 철근이 모두 항복함으로써 콘크리트의 부담 응력이 커지고 이에 따라서 전단강도와 전단변형률도 현저하게 감소됨을 알 수 있었다.

### 4. 반복하중을 받는 요소의 연성 평가

단조하중을 받는 경우와 함께 반복하중이 작용할 경우의 부재의 거동을 해석적으로 계산하여 부재의 핀칭 효과와 연성 능력을 평가하였다. 해석에 사용된 실험체의 변수는 Table 1과 같이 철근 방향과 주응력 방향과의 차이이며, 해석에서는 철근이 주응력 방향과 0°, 10°, 22.5°, 45°로 배근된 4개의 부재를 해석하였다. 각 부재의 재료 특성은 Table 1과 동일하지만 철근비는  $\rho_l = \rho_t = 0.17$ 인 부재를 해석하였다.

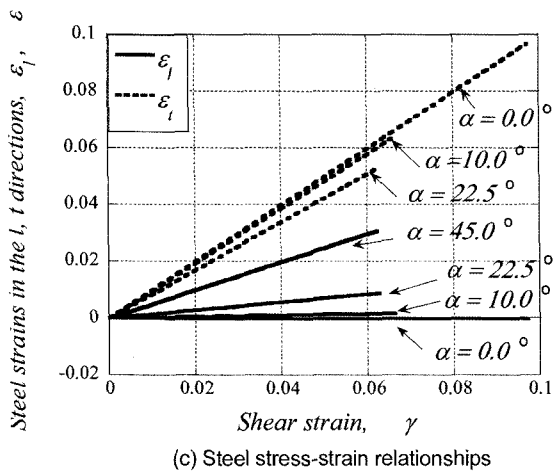
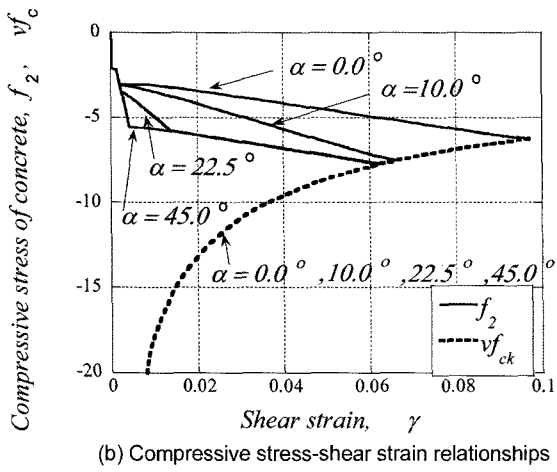
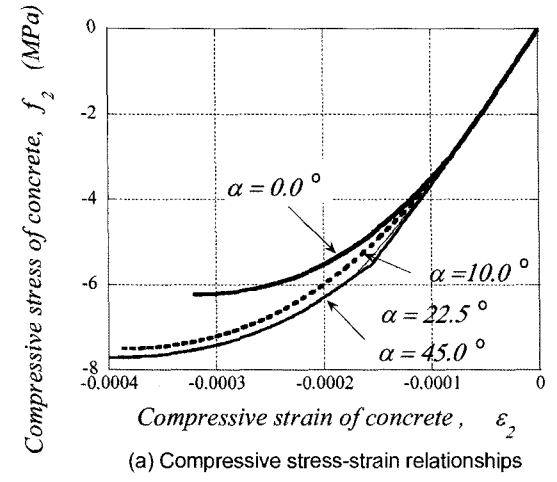


Fig. 4 Analytical results of specimens under monotonic load

#### 4.1 전단응력-전단 변형을 관계

Fig. 5는 S00, S10, S23, S45 실험체의 전단 응력-변형을 곡선을 나타낸다. 해석에서는 철근 방향과 주응력 방향과의 차이가 45°인 실험체 S45를 기준으로 철근이 항복할 때의 전단변형률 ( $\gamma_y$ )을  $2\gamma_y$ ,  $3\gamma_y$ ,  $4\gamma_y$ 로 증가시켜 부재의 응력 및 변형을 상태를 해석하였다. Fig. 5(a)에서 콘크리트 주응력 방향과 철근의 배근 방향이 일치하는 실험체 S00의 이력곡선은 펀칭 효과가 거의 없이 높은 에너지소산 성능을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 콘크리트 주응력 방향과 철근의 배근 방향이 45°를 이루

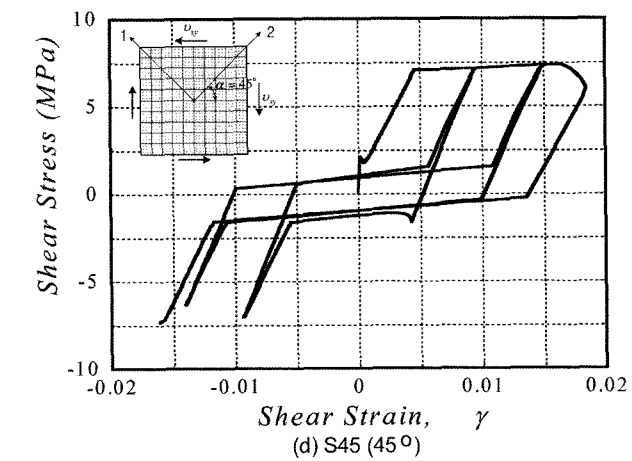
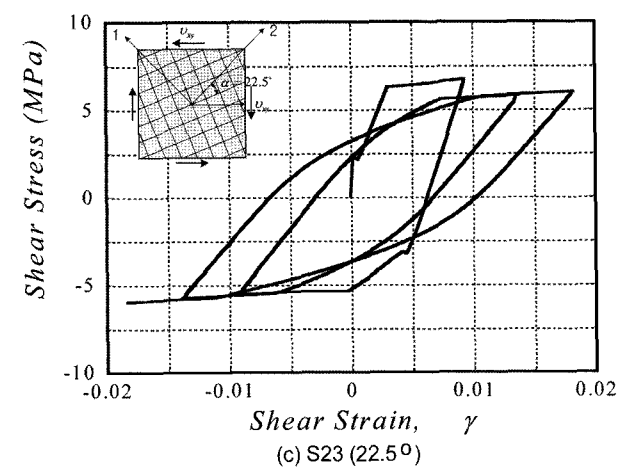
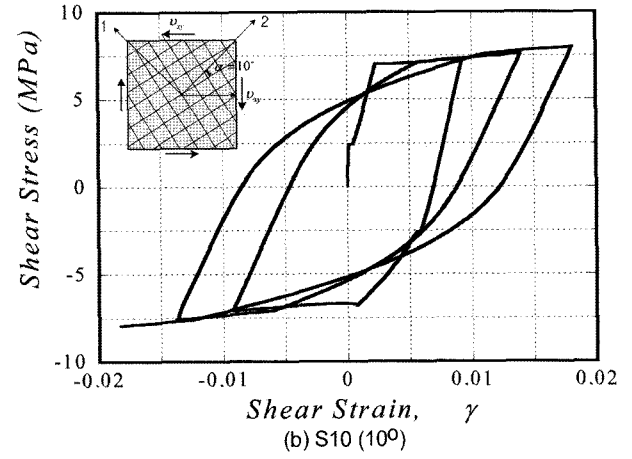
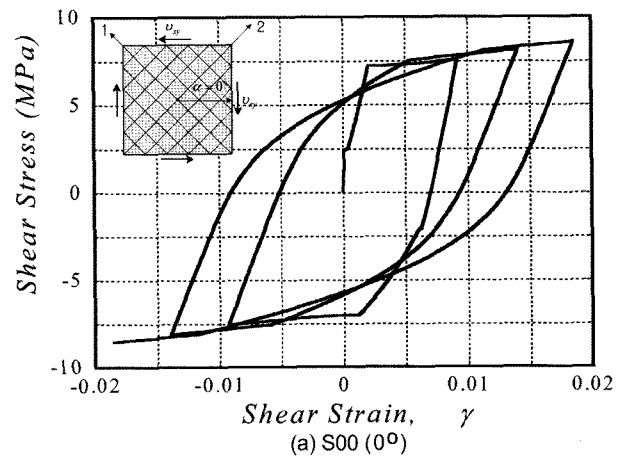


Fig. 5 Predicted cyclic shear stress-strain curves of RC elements

는 실험체 S45의 이력곡선은 Fig. 5(d)와 같이 반복하중을 받을 경우에 펀칭 효과가 매우 크며 에너지소산 성능이 작았다. 철근이 주응력 방향과 각각 10°와 22.5°로 배근된 실험체 S10와 S23은 실험체 S00과 S45의 중간 정도의 에너지소산 성능과 펀칭 효과를 나타내었다.

실험체의 변형 능력은 전단변형률 ( $\gamma$ )이 0.016에 도달하였을 때 실험체 S45의 전단응력은 감소하기 시작하였지만, 실험체 S00, S10, S23은 전단변형률이 0.016에 도달하였을 때도 전단내력을 그대로 유지하였다. Fig. 5를 통하여 콘크리트 주응력 방향과 철근이 이루는 각도가 작을수록, 즉 실험체 S45에서 실험체 S00으로 갈수록, 이력곡선의 펀칭 효과가 줄어들고 에너지소산 성능이 커지며 연성이 커지는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 반복하중을 받는 부재의 펀칭 효과

이 연구에서는 철근의 배근 각도에 따라서 달라지는 펀칭 효과를 명확히 구명하기 위하여 부재에 사용된 재료의 응력과 변형률 관계를 조사하였다. Fig. 6은 각 실험체의 에너지소산 성능을 철근의 각도가 45°로 배근된 실험체와 비교하여 나타내었다. Fig. 6에서는 에너지소산 성능을 Fig. 5의 전단응력-전단변형률 관계의 한 주기의 면적으로 계산하였다. Fig. 6의 y축에 표시된 에너지소산 성능비 ( $A_{\alpha}/A_{45}$ )는 각각의 부재의 전단응력-전단변형률 곡선에서 계산된 에너지소산 성능을 철근이 45°로 배근된 실험체 S45의 전단응력-전단변형률 곡선의 에너지소산 성능으로 나눈 값을 의미한다. 그림에서 에너지소산 성능은 철근의 배근각도가 콘크리트의 주응력 방향 (0°나 90°)에 가까워짐에 따라서 증가함을 알 수 있다. S00의 경우 에너지소산 성능이 S45보다 약 2.8배 크게 나타났고 S10의 경우는 약 2.4배, S23의 경우는 약 1.4배 크게 나타났다. 이와 같은 차이가 발생하는 이유를 보다 명확히 구명하기 위하여 S00, S10, S23, S45 실험체 각각의 철근의 거동을 비교·분석하였다.

Fig. 7은 S00, S10, S23, S45 실험체의 철근의 응력-변형률 곡선을 나타낸다. 그림에 표시된 지점은 펀칭 효

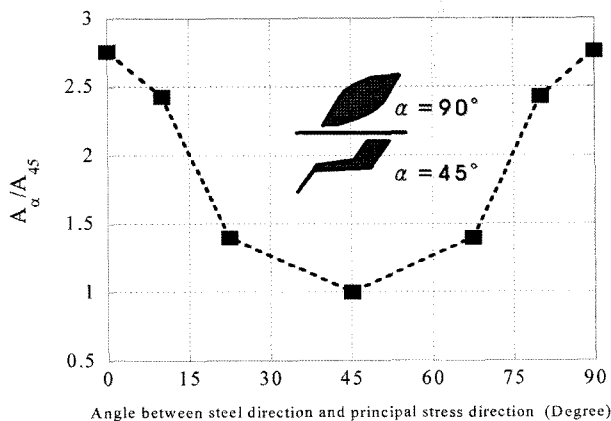


Fig. 6 Shear energy dissipation ratio of S00, S10, S23, S45

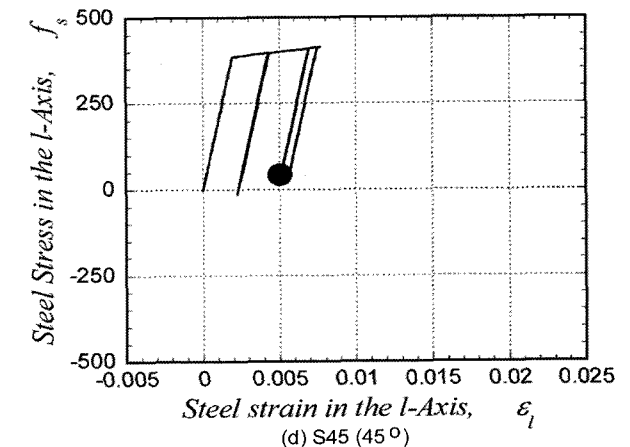
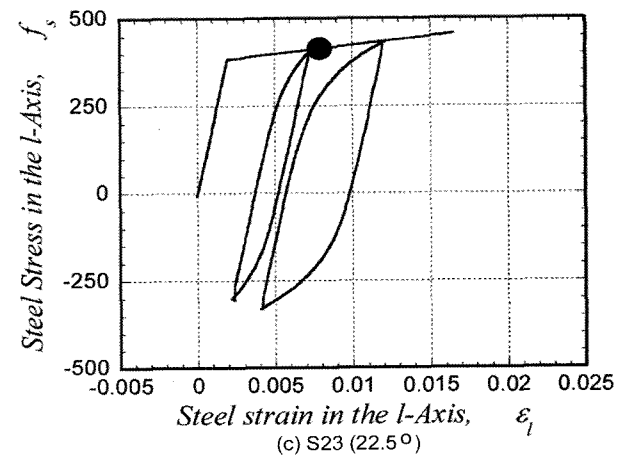
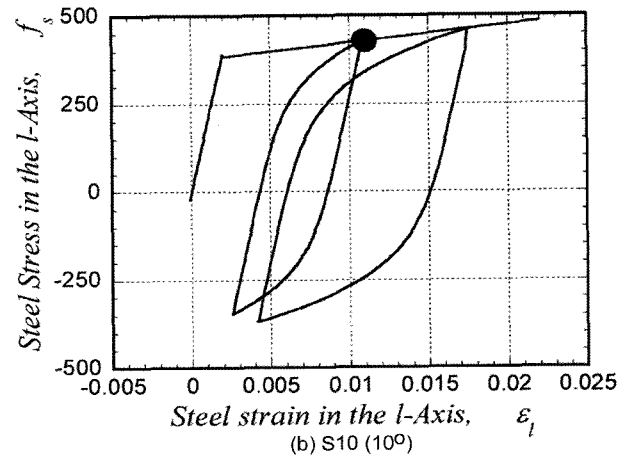
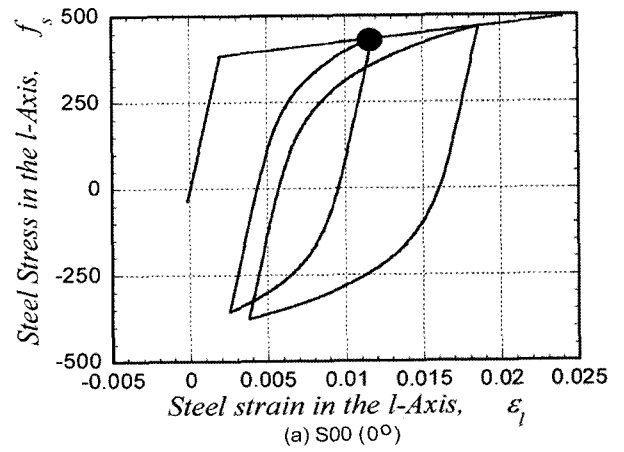


Fig. 7 Predicted cyclic stress-strain curves of steel bars

과가 나타나는 전단변형률이  $-0.0053$ 일 때 S00, S10, S23, S45 실험체의 철근의 응력-변형률 값이다. 그림에서 펀칭 효과가 크게 나타나는 실험체 S45의 경우 전단변형률이  $-0.0053$ 일 때 철근이 저항하는 응력값이 다른 실험체에 비하여 매우 작음을 알 수 있다. 그러나 펀칭 효과가 거의 없는 S00 실험체의 철근 응력은 거의 450 MPa에 도달하였다. 전단변형률  $-0.0053$ 에서의 철근 응력을 Fig. 8에 정리하였다. Fig. 8에서 콘크리트 주응력 방향과 철근 배근 방향이 이루는 각도가 작아지는 실험체일수록 철근이 저항하는 응력이 커지는 것을 알 수 있다. 즉, 실험체 S00, S10, S23은 콘크리트가 부담하는 힘이 상대적으로 작고 철근이 부담하는 힘이 크지만 펀칭 효과가 나타나는 S45는 콘크리트가 부담하는 힘이 크고 철근이 부담하는 힘이 작았다. 따라서 펀칭 효과는 철근의 배근 방향에 따라서 달라지며 특히 콘크리트가 부담하는 힘은 크고 철근이 부담하는 힘이 적어질수록 크게 나타남을 알 수 있었다.

### 4.3 반복하중을 받는 부재의 연성

철근의 배근 각도에 따른 연성능력을 명확히 구명하기 위해 실험체 S00과 실험체 S45의 연성 능력을 비교해 보면 콘크리트 주응력 방향과 철근의 배근 방향이 일치한 S00 실험체의 경우 철근이 주응력 방향과  $45^\circ$ 로 배근된 S45 실험체 보다 큰 연성 능력을 나타냄을 알 수 있었다. 이와 같이 연성의 차이가 발생하는 이유를 구명하기 위해 S00, S45 실험체의 콘크리트의 거동을 비교·분석하였다.

Fig. 9 (a)와 (b)는 실험체 S00과 S45의 콘크리트 응력-변형률 곡선이다. 그림에 표시된 지점은 전단변형률이  $0.016$ 인 지점에서 S00, S45 실험체의 콘크리트의 응력-변형률 값이다. 전단변형률이  $0.016$ 인 지점은 실험체 S45의 전단 응력이 감소하는 지점이다. 두 실험체의 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 비교해 보면 S45 실험체는 콘크리트가 부담하는 압축응력이 S00 실험체보다 큼을 알

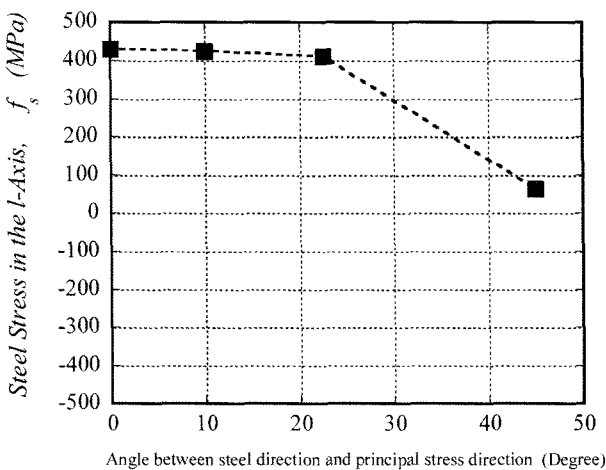


Fig. 8 Steel stresses at the shear strain of 0.0053

수 있다 (S45 실험체  $-14$  MPa, S00 실험체  $-2$  MPa).

Fig. 10은 전단변형률이  $0.016$ 인 지점에서 두 실험체의 콘크리트 주압축응력 ( $f_2^c$ )과 유효압축강도 ( $\nu f_{ck}$ )를 나타낸 그래프이다. 실험체 S00의 경우 2방향 콘크리트 응력과 유효 압축강도가 많은 차이가 나지만 실험체 S45의 경우는 콘크리트 응력과 유효 압축강도에 도달한 것을 알 수 있다.

이를 통하여 콘크리트 주응력 방향과 철근의 배근 방향이 가까울수록 콘크리트가 부담하는 압축응력이 작아져 유효압축강도에 늦게 도달하여 연성이 증가하는 것을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 철근 배근 위치에 따른 펀칭 효과를 구명하고 이를 이용하여 배근에 따라서 달라지는 부재의 연성을 예측하였다. 단조하중을 받는 요소의 연성과 반복하중을 받는 요소의 연성을 유사한 실험체에 대하여 각각 평가하였다.

- 1) 단조하중을 받는 실험체의 전단강도 및 최대 변형률은 철근의 배근각도가 콘크리트의 주응력 방향에

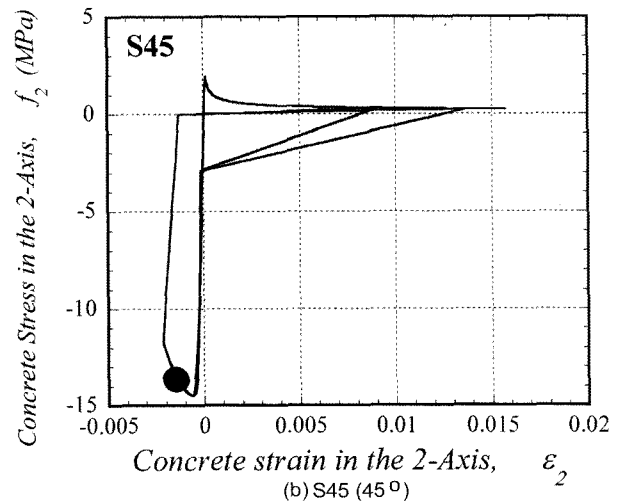
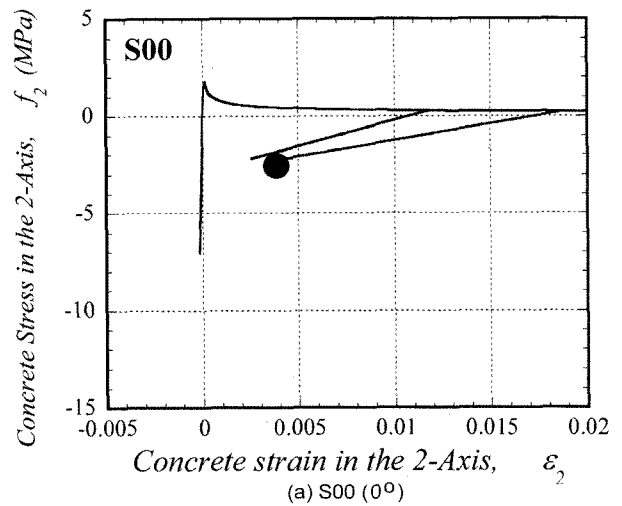


Fig. 9 Predicted cyclic stress-strain curves of concrete in the direction

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 2003 연구개발사업의 연구비지원 (03산C04-01)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 깊이 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Mansour, Mohamad Y., Lee, Jung-Yoon, and Hindi, R., "Analytical Prediction of the Pinching Mechanism of RC Elements under Cyclic Shear Using a Rotation-Angle Softened Truss Model", *Engineering Structures*, Vol.27, 2005, pp.1138~1150.
2. Vecchio, F. J. and Collins, M. P., "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear", *ACI Structural Journal*, Vol. 83, No.2, 1986, pp.219~231.
3. Hsu, T. T. C., "Softened Truss Model Theory for Shear and Torsion", *ACI Structural Journal*, Vol.85, No.6, 1988, pp.624~635.
4. Vecchio, F. J. and Collins, M. P. "Predicting the Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear Using Modified Compression-Field Theory", *ACI Structural Journal*, Vol.85, No.3, 1988, pp.258~268.
5. Mansour, Mohamad, Lee, Jung-Yoon, and Hsu, Thomas T. C., "Cyclic Stress-Strain Curves of Concrete and Steel Bars in Membrane Elements", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.127, No.12, 2001, pp.1402~1411.
6. Hsu, Tomas T. C. and Zhu, Ronnie R. H., "Softened Membrane Model for Reinforced Concrete Elements in Shear", *ACI Structural Journal*, Vol.99, No.4, 2002, pp.460~469.
7. Robinson, J. R. and Demorieux J. M., "Sais de Traction-Compression sur Modeles D'ame de Poutre en Beton Arme", IRABA Report, Institute de Recherches Appliquees du Beton de l'Ame, Part 1, Jun. 1968, 44pp.; Esistance Ultime du Beton de L'ame de Poutres en Double te en Beton Arme Part 2, May 1972, 53pp.
8. Belarbi, A. and Hsu, T. T. C., "Constitutive Laws of Softened Concrete in Biaxial Tension-Compression", *ACI Structural Journal*, Vol.92, No.5, 1995, pp.562~573.

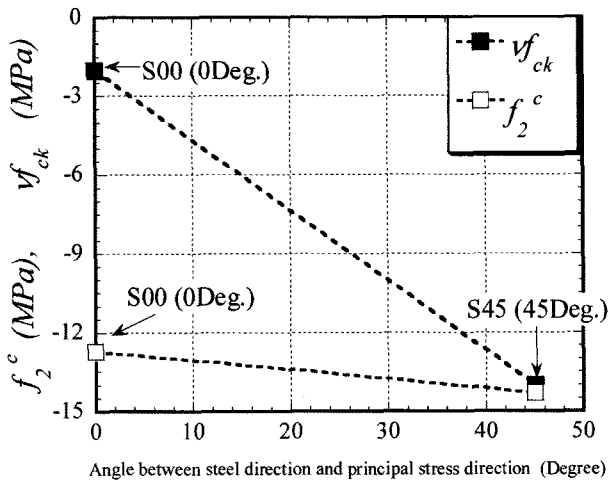


Fig. 10 Analytical results of specimens under cyclic load

가까워짐에 따라서 증가함을 알 수 있었다. 또한 전단강도 및 전단변형률의 증가하는 비율은 각도에 따라서 선형적으로 증가하거나 감소하는 것이 아니라 45°로부터 약 25° 전후에서는 증가 비율이 매우 작지만 그 이후에는 증가 비율이 급속하게 커짐을 알 수 있었다.

- 2) 반복하중을 받는 실험체의 경우 콘크리트 주응력 방향과 철근이 이루는 각도가 작을수록, 즉 실험체 S45에서 실험체 S00으로 갈수록, 이력곡선의 핀칭 효과가 줄어들고 에너지소산 성능이 커지며 연성이 커지는 것을 알 수 있었다. 철근콘크리트 부재의 핀칭 효과는 철근의 저항력과 밀접한 관계가 있어 45° 배근과 같이 콘크리트가 부담하는 힘이 크고 철근이 부담하는 힘이 적어질수록 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한 부재의 연성은 0° 배근과 같이 콘크리트가 부담하는 하중이 적어 유효압축강도에 늦게 도달할수록 커짐을 알 수 있었다.
- 3) [참고문헌 5]에서는 0° (90°) 및 45°로 배근된 RC 판 요소의 이력 거동과 본 논문에서 제안한 해석법과 유사한 변형률의 적합 조건을 이용한 트러스 모델을 비교하여 해석의 정확성을 검증하였지만, 이 논문에서 해석한 0°와 45° 사이의 해석에 대해서는 실험적 검증이 이루어지지 않았다. 따라서 추후의 연구로써 배근 각도가 다양한 부재와 해석 결과에 대한 실험적 검증이 필요할 것으로 판단된다.

**요약** 낮은 전단벽과 같이 전단력에 의하여 지배 받는 철근콘크리트 부재의 경우, 전단력은 부재의 응력-변형률 이력곡선에서 핀칭 효과에 영향을 미친다. 그러나 최근의 연구에 따르면 철근의 배근 방향이 주응력 방향과 일치할 경우 철근콘크리트 부재의 응력-변형률 이력곡선에서 핀칭 효과가 없어지는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 철근콘크리트 부재의 응력-변형률 이력곡선에서 핀칭 효과의 발생 유무를 변형률의 적합 조건을 고려한 트러스 모델을 이용하여 이론적으로 설명하였다. 해석 결과는 철근콘크리트 부재의 핀칭 효과가 철근의 배근 방향에 큰 영향을 받는 것을 보여준다. 또한 에너지소산 성능은 외력의 주응력 방향과 철근의 배근 방향 사이의 각도 차이에 따라 선형적으로 증가하지 않았다.

**핵심용어** : 핀칭 효과, 철근콘크리트 부재, 변형률의 적합 조건을 고려한 트러스 모델, 철근의 배근 위치, 에너지소산 성능