

## 단부 RC조와 중앙부 철골조로 이루어진 RS 보의 전단강도에측을 위한 해석모델

김욱중<sup>1)\*</sup> · 문정호<sup>2)</sup> · 이리형<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>한양대학교 건축공학부 <sup>2)</sup>한남대학교 건축공학과  
(2001년 6월 18일 원고접수, 2001년 10월 8일 심사완료)

### Analytical Model for Shear Strength of RS Hybrid Steel Beams with Reinforced Concrete Ends

Ook-Jong Kim<sup>1)\*</sup>, Jeong-Ho Moon<sup>2)</sup>, and Li-Hyung Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

<sup>2)</sup> Dept. of Architectural Engineering, Hannam University, Daejeon, 300-791, Korea

(Received on June, 18, 2001, Revised on October, 8, 2001)

#### ABSTRACT

A strut-and-tie model was proposed to predict the shear strength of RS beam which is a hybrid steel beam with reinforced concrete ends. The proposed model is capable of considering the concrete softening effects due to diagonal shear cracks at the embedded area of steel in concrete. It can predict the failure strength of RS beam from the mathematical formulations which are based on equilibrium, compatibility, and the constitutive laws of cracked reinforced concrete. The previous experimental results of 15 RS beams were analyzed with the proposed model and the analytical results were also compared with formulas currently available. The comparison revealed that the proposed model can predict the strength of RS beam better than the others. The average ratio of experimental strengths to analytical results was 1.02 and the standard deviation was 0.126.

**Keywords :** RS hybrid beam, shear strength, strut-and-tie model, softening effects

#### 1. 서 론

최근 철골구조와 철근콘크리트구조를 혼용하여 보다 우수한 구조성능을 가질 수 있는 혼합구조를 개발하기 위한 연구가<sup>1-4)</sup> 활발히 이루어지고 있다. 이들 혼합구조는 철골구조나 철근콘크리트구조의 단점을 상호 보완하여 필요한 요소 및 부위에서 우수한 성능을 얻을 수 있다는 점에서 많은 주목을 받고 있다.

본 연구의 대상인 단부 RC조와 중앙부 철골조의 혼합구조 보(이하 'RS 보'라 칭함)는 RC조의 높은 강성과 철골조의 장스팬 확보라는 장점을 적절히 활용하면서, RC기둥과 효과적으로 접합할 수 있는 이상적인 구조이다. 특히 공기단축, 구조물의 고품질화, 인력절감 등의 효과로 복합화공법에서의 기반기술인 PC화가 가능한 특징을 가지고 있다. 그러나 이들 혼합구조 보 공법에 대한 연구는 매우 부족한 실정이며, 특히 RS 보의 강재매입구간에서의 전단거동은 RS 보의 구조적 안전성 검토에 필수적인 중요한 요소이다.

일반적으로 RC와 철골로 이루어진 혼합구조에서 전단변

형이 발생하면, 변형능력이 상대적으로 취약한 콘크리트에서 균열이 먼저 발생하게 된다. 그리고 이로 인한 내력저하가 발생하면서 최종파괴에 이르게 된다. 그러나 현재까지 혼합구조의 전단파괴거동을 예측할 수 있는 해석 모델에 대한 연구는 전무한 실정이다. 다만 철골 보-RC 기둥으로 이루어진 혼합구조(RCS 구조)의 접합부에 대한 연구는 몇몇 연구자에 의해 진행되어 왔다. Dierlein 등(1988)<sup>5,6)</sup>은 혼합구조 보-기둥 접합부의 전단응력 전달기구를 철골웨브, 콘크리트의 압축 스트러트, 콘크리트의 압축장 등의 3가지의 저항기구로 분리하고, 각각의 요소의 합으로 부재의 전단강도를 표현하는 것을 제안하였다. 또한, 이 연구는 ASCE 제안설계법의 제정에 많은 영향을 미치게 되었다. 그리고 일본에서는 최근 사카구치 및 노구치 등에 의해 혼합구조 접합부의 응력전달기구에 대한 연구가 진행되고 있다.

순수철근콘크리트 보의 전단모델에 대한 연구는 최근까지 매우 많은 발전된 이론들이 제시되고 있다. 그 결과 Mitchell 등(1996)<sup>7)</sup>은 기존의 Truss Model 이론을 발전시켜 균열이 발생한 철근 콘크리트 보의 전단강도를 예측할 수 있는 모델을 제안하였다. 또한, Hsu 등(1996)<sup>8)</sup>은 철근 콘크리트 패널을 이용하여 철근콘크리트부재에서의 고정 각 연화 트러스 모델(fixed angle softening truss model)

\* Corresponding author

Tel : 02-2170-7204 Fax : 02-2170-7276

E-mail : kimoj@dic.co.kr

을 제안하였다. 이는 전단균열이 발생하는 철근콘크리트 부재의 전단강도에 트러스 모델을 확장하여 적용할 수 있음을 제안한 모델이다.

Lee 등(1998)<sup>9)</sup>은 RC보에서 트러스 모델을 기초로 하여, 보의 전단균열 발생 후 콘크리트의 압축파괴 및 철근의 항복이 동시에 발생하지 않고 시간차를 가지고 일어나는 현상을 고려하였다. 따라서 철근의 변형도에 따라 파괴영역을 구분하고, 재료의 구성방정식과 적합방정식을 이용하여 철근콘크리트 보의 전단강도를 예측할 수 있는 전단강도식을 제안하였다. Hwang 등(1999)<sup>10)</sup>은 RC 접합부 및 깊은 보에 Softened Strut-and-Tie 모델을 적용하여 접합부에서의 콘크리트파괴와 수직, 수평철근의 항복에 따른 파괴를 고려할 수 있는 전단내력 해석모델을 제안하였다. 그리고 이를 실험 결과에 적용하여 좋은 대응을 보임을 확인하였다.

본 연구에 앞서 본 연구자들은 RS 보의 강재매입구간에서의 전단내력실험을 통하여 기존 혼합구조의 내력식들이 실험결과와 거동 및 내력의 전달에 차이가 발생함을 확인한 바 있다<sup>11,12)</sup>. 그리고 본 해석적 연구에서는 RS보의 전단강도를 보다 정확하게 예측하기 위하여, 중앙부 철골 보에서 RC보로의 응력전달기구 및 저항메커니즘에 초점을 맞추어 RS 보의 강재매입구간의 전단강도를 예측할 수 있는 강도예측모델을 제안하고자 한다. 예측모델의 주된 특징은 보의 전단균열 발생 후 콘크리트의 압축파괴 및 철근의 항복이 동시에 발생하지 않고, 시간차를 가지고 일어나는 현상을 고려할 수 있도록 하는 것이다.

## 2. 해석모델

RS 보의 일반적인 형상은 Fig. 1과 같이 중앙부의 철골 보가 단부의 RC보에 매립된 형상으로 이루어진다.

RS 보에서 중앙부 철골 보에 하중이 작용하면, 단부 RC보로 전단력 및 휨모멘트가 전달된다. 이 때의 응력전달 메커니즘을 분석하면 Fig. 2(a)와 같이 가정할 수 있다. RC보로 전달된 전단력에 의해 콘크리트부에 전달되는 응력은 Fig. 2(b) & (c)와 같은 매립된 철골보의 내외부로 구분되는 4개의 저항 스트러트를 형성하게 된다. 그리고 수평방향으로는 Fig. 2(d)에서 볼 수 있듯이 인장철근과 철골플랜지가 콘크리트의 스트러트와 힘의 평형을 이루는 역할을 한다. 또한 수직방향으로는 전단보강근 및 전단집중보강근이 인장재로서 작용함으로써 전체적으로 RS 보에 대한 Layered Strut-and-Tie Model을 형성하게 된다.

### 2.1 평형방정식

Fig. 2의 (d)와 같이 형성된 Layered Strut-and-Tie Model에 대한 힘의 평형방정식을 세우고 조건에 따라 변

수들을 정리하면 아래와 같은 3개의 식으로 간단하게 정리될 수 있다.

$$S_1 \sin \theta_1 + S_2 \sin \theta_2 + S_3 \sin \theta_3 + S_4 \sin \theta_4 = -r Q_u \quad (1)$$

$$A_{vl} f_{v13} + S_1 \sin \theta_1 + S_2 \sin \theta_2 = -r Q_u \quad (2)$$

$$A_{vs} f_{v22} = -(S_2 \sin \theta_2 + S_4 \sin \theta_4) - (r Q_u - s Q_u) \quad (3)$$

Fig. 2의 (d)에서 식 (1)~(3)에 나타내지 않은 변수들은 평형방정식에서 RS 보의 전단강도를 결정하는 데 영향을 미치지 않거나 응력이 0로 나타나 생략한 것이다.

상기의 식에서 스트러트( $S_1 \sim S_4$ )는 각각의 형상에 따라 주응력 방향이 정해진다. 이 경우 각각의 스트러트에서의 주응력은 전단균열이 발생한 후 응력의 연화효과를 고려하여야 한다. 그리고 콘크리트의 전단균열은 일정한 각도로 발생한다고 가정하였다.

상기의 식에서 스트러트가 부담하는 강도( $S_1 \sim S_4$ )는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_i = K_i \times \sigma_{di} \quad (4)$$

여기서,  $K_i$ 는 스트러트 계수이며,  $i$ 는 스트러트의 구분 번호( $i=1 \sim 4$ )이다. 스트러트 계수는 다음과 같다.

$$K_1 = \frac{1}{2} L_2 \sin \alpha_1 \cos(\alpha_1 - \theta_1) b_i \quad (5a)$$

$$K_2 = \frac{1}{2} L_2 \sin \alpha_2 \cos(\alpha_2 - \theta_2) b_i \quad (5b)$$

$$K_3 = \frac{1}{2} L_2 \sin \alpha_3 \cos(\alpha_3 - \theta_3) b_i \quad (5c)$$

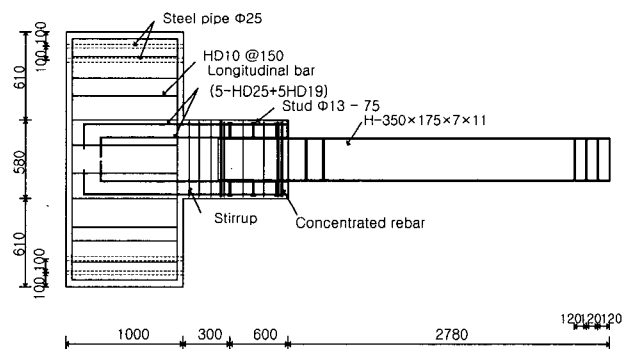
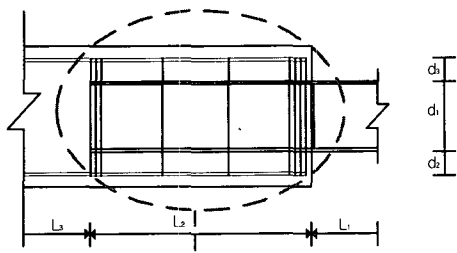
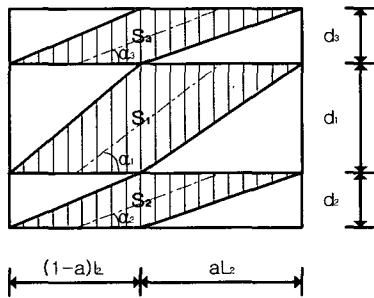


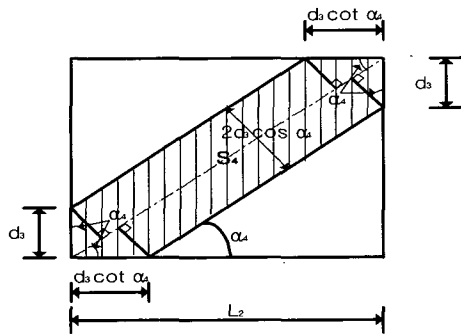
Fig. 1 Details of specimen



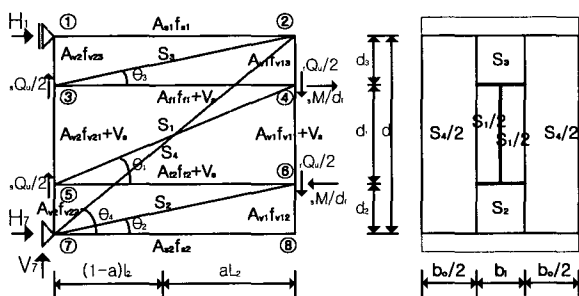
(a) Stress transfer concept



(b) Inner strut



(c) Outer strut



(d) Strut-and-Tie model

Fig. 2 Layered Strut-and-Tie model

$$K_4 = 2 d_3 \cos \alpha_4 b_o \quad (5d)$$

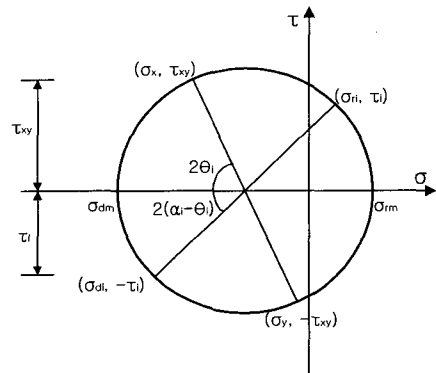
부재가 전단력을 받아 경사방향으로 전단균열이 발생하게 되면, 균열이 발생한 부재의 내부 응력성분은 균열의 발생각에 의해 주변형 및 주응력방향이 결정된다. 이에 따른 응력의 방향변환은 Mohr의 응력원에 평형조건으로 정리할 수 있다(Fig. 3 참조).

$$\sigma_{di} = \sigma_{dm} \cos^2 \phi_{i,m} + \sigma_{rm} \sin^2 \phi_{i,m} + \tau_c 2 \sin \phi_{i,m} \cos \phi_{i,m} \quad (6a)$$

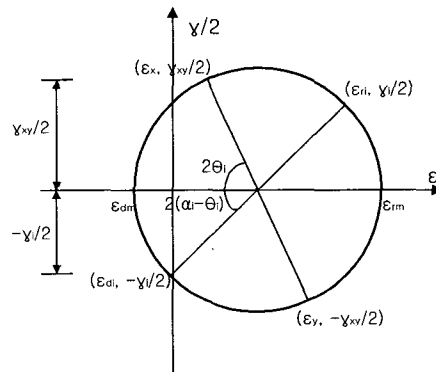
$$\sigma_{ri} = \sigma_{dm} \sin^2 \phi_{i,m} + \sigma_{rm} \cos^2 \phi_{i,m} + \tau_c 2 \sin \phi_{i,m} \cos \phi_{i,m} \quad (6b)$$

여기서,  $\sigma_{di}, \sigma_{ri}$ 는 각각 스트러트  $i(i=1\sim 4)$ 에 형성되는 압축 및 인장응력,  $\sigma_{dm}, \sigma_{rm}$ 은 각각 균열발생후 주압축 및 주인장응력이다. 또한,  $\phi_{i,m}$ 은 콘크리트의 주응력방향  $m$ 과 스트러트  $i$ 와의 사이각이다.

상기의 주응력의 방향변환을 이용하여 각각의 스트러트



(a) Mohr stress circle for concrete



(b) Mohr strain circle for concrete

Fig. 3 Mohr circle for concrete

러트에 형성되는 응력을 계산할 수 있다. 식 (4)와 식 (6)을 전체의 평형방정식인 식 (1)~(3)에 대입하면, 아래의 식으로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sigma_{dm}[K_1 \cos^2 \varphi_{1,m} \sin \theta_1 + K_2 \cos^2 \varphi_{2,m} \sin \theta_2 \\ & + K_3 \cos^2 \varphi_{3,m} \sin \theta_3 + K_4 \cos^2 \varphi_{4,m} \sin \theta_4] \\ & + \sigma_{rm}[K_1 \sin^2 \varphi_{1,m} \sin \theta_1 + K_2 \sin^2 \varphi_{2,m} \sin \theta_2 \\ & + K_3 \sin^2 \varphi_{3,m} \sin \theta_3 + K_4 \sin^2 \varphi_{4,m} \sin \theta_4] = -r Q_u \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} A_{vl} f_{vl3} + \sigma_{dm}[K_1 \cos^2 \varphi_{1,m} \sin \theta_1 \\ + K_2 \cos^2 \varphi_{2,m} \sin \theta_2] + \sigma_{rm}[K_1 \sin^2 \varphi_{1,m} \\ \sin \theta_1 + K_2 \sin^2 \varphi_{2,m} \sin \theta_2] = -r Q_u \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} A_{vl} f_{vl2} = -\sigma_{dm}[K_2 \cos^2 \varphi_{2,m} \sin \theta_2 \\ - K_4 \cos^2 \varphi_{4,m} \sin \theta_4] + \sigma_{rm}[K_2 \sin^2 \varphi_{2,m} \\ \sin \theta_2 + K_4 \sin^2 \varphi_{4,m} \sin \theta_4] - (r Q_u - s Q_u) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (7)~(9)에서 주응력의 방향을 외부의 스트러트인 S4의 응력방향과 동일하다고 가정하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\sigma_{dm} = \sigma_{d4} \quad (10a)$$

$$\sigma_{rm} = \sigma_{r4} \quad (10b)$$

그리고 식 (10)을 이용하여 식 (7)~(9)를 간단한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$A \cdot \sigma_{d4} + B \cdot \sigma_{r4} = -r Q_u \quad (11)$$

$$A_{vl} f_{vl3} + C \cdot \sigma_{d4} + D \cdot \sigma_{r4} = -r Q_u \quad (12)$$

$$A_{vl} f_{vl2} = -(E \cdot \sigma_{d4} + F \cdot \sigma_{r4}) - (r Q_u - s Q_u) \quad (13)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A &= K_1 \cos^2 \varphi_{1,4} \sin \theta_1 + K_2 \cos^2 \varphi_{2,4} \sin \theta_2 \\ &+ K_3 \cos^2 \varphi_{3,4} \sin \theta_3 + K_4 \sin \theta_4 \\ B &= K_1 \sin^2 \varphi_{1,4} \sin \theta_1 + K_2 \sin^2 \varphi_{2,4} \sin \theta_2 \\ &+ K_3 \sin^2 \varphi_{3,4} \sin \theta_3 \\ C &= K_1 \cos^2 \varphi_{1,4} \sin \theta_1 + K_2 \cos^2 \varphi_{2,4} \sin \theta_2 \end{aligned}$$

$$D = K_1 \sin^2 \varphi_{1,4} \sin \theta_1 + K_2 \sin^2 \varphi_{2,4} \sin \theta_2$$

$$E = K_2 \cos^2 \varphi_{2,4} \sin \theta_2 + K_4 \sin \theta_4$$

$$F = K_2 \sin^2 \varphi_{2,4} \sin \theta_2$$

## 2.2 구성방정식

### 2.2.1 콘크리트

전단력을 받는 RS보에서 RC부위에 균열이 발생하면, 콘크리트의 압축강도 및 변형률이 연화효과에 의해 변하게 된다. 전단균열의 발생 후 부재에 작용하는 응력을 파악하기 위하여, 균열후 변형특성을 고려한 Hsu 등<sup>7)</sup>의 다음의 식을 적용할 수 있다.

$$\sigma_{dm} = \zeta f_{ck} [2(\frac{\varepsilon_{dm}}{\zeta \varepsilon_o}) - (\frac{\varepsilon_{dm}}{\zeta \varepsilon_o})^2] \quad (14a)$$

$$\text{for } \frac{\varepsilon_{dm}}{\zeta \varepsilon_o} \leq 1$$

$$\sigma_{dm} = \zeta f_{ck} [1 - (\frac{\varepsilon_{dm}/\zeta \varepsilon_o - 1}{2/\zeta - 1})^2] \quad (14b)$$

$$\text{for } \frac{\varepsilon_{dm}}{\zeta \varepsilon_o} > 1$$

$$\zeta = \frac{5.8}{\sqrt{f_{ck}}} \frac{1}{\sqrt{1 + 400 \varepsilon_{rm}}} \leq \frac{0.9}{\sqrt{1 + 400 \varepsilon_{rm}}} \quad (14c)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \varepsilon_o &= -0.002 - 0.001(\frac{f_{ck} - 20}{80}) \\ &\text{for } 20 \leq f_{ck} \leq 100 \text{ Mpa} \end{aligned} \quad (14d)$$

여기서,  $\zeta$ 는 연화효과에 의한 강도저감계수,  $\varepsilon_{dm}$ ,  $\varepsilon_{rm}$ 은 각각 균열발생후 주압축 및 주인장변형률,  $\varepsilon_o$ 는 일축 압축강도에 의한 주압축 변형률이다.

식 (14)에 의한  $\zeta$ 가 Fig. 4(a)에서처럼 다음의 식을 만족할 때 RS 보의 강재매입구간의 콘크리트 부위에서 전단강도에 도달한 것으로 가정한다.

$$\sigma_{dm} = \zeta \cdot f_{ck} \quad (15a)$$

$$\varepsilon_{dm} = \zeta \cdot \varepsilon_o \quad (15b)$$

또한, 균열발생후 콘크리트에 발생하는 주인장응력  $\sigma_{r4}$ 는 주인장변형  $\varepsilon_{r4}$ 와의 관계에 따라 Hsu 등의 다음과 같은 식을 적용하였다(Fig. 3(b) 참조).

$$\sigma_{\mathcal{M}} = E_c \varepsilon_{\mathcal{M}} \quad \varepsilon_{\mathcal{M}} \leq 0.00008 \quad (16a)$$

$$\sigma_{\mathcal{M}} = f_{cr} \left( \frac{0.00008}{\varepsilon_{\mathcal{M}}} \right)^{0.4} \quad \varepsilon_{\mathcal{M}} > 0.00008 \quad (16b)$$

여기서,  $f_{cr}$ : 균열발생응력( $0.31\sqrt{f_{ck}}$  Mpa)

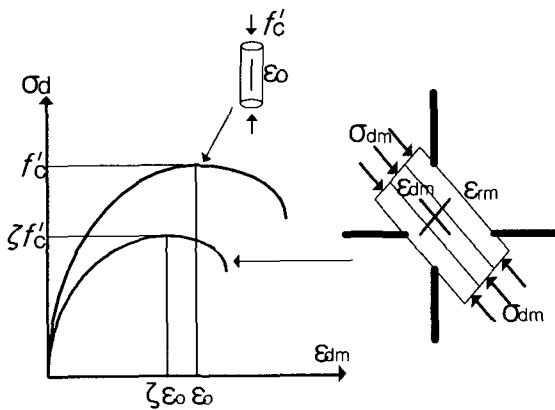
### 2.2.2 철근

철근의 변형률은 평형방정식 및 적합조건에 의해 구할 수 있으며, 이때의 철근의 변형률에 따른 재료의 특성은 완전탄소성 재료로 가정하였다. 따라서 철근의 평균 응력-변형의 관계는 다음과 같다.

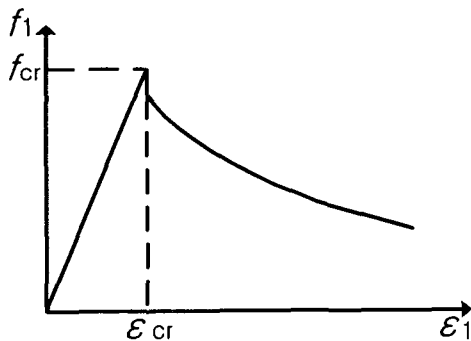
$$f_{vij} = E_s \varepsilon_v \quad \varepsilon_v \leq \varepsilon_y \quad (17a)$$

$$f_{vij} = f_y \quad \varepsilon_v > \varepsilon_y \quad (17b)$$

식 (17)에서  $\varepsilon_v \leq \varepsilon_y$ 인 경우, 전단보강근의 응력 ( $f_{vij}, i=1\sim 2, j=1\sim 3$ )은 식 (2)~(3)에서 구할 수 있다. 또한 전단보강근의 항복변형률을 초과하는 경우( $\varepsilon_v > \varepsilon_y$ ), 철근의 강도는 항복강도를 유지하면서 변형률만 증가하는 것으로 하였다.



(a) Softening of compress stress-strain curve due to transverse tensile strain



(b) Average tensile stresses in cracked concrete

Fig. 4 Stress-strain relationships for cracked concrete

### 2.2.3 적합방정식

Mohr의 평균변형원리(Fig. 3(b) 참조)에 대한 관계로부터 아래와 같은 균열발생후의 변형률의 적합조건식을 구할 수 있다.

$$\varepsilon_{rm} = \varepsilon_x + (\varepsilon_x - \varepsilon_{dm}) \cot^2 \theta \quad (19a)$$

$$\varepsilon_{rm} = \varepsilon_v + (\varepsilon_v - \varepsilon_{dm}) \tan^2 \theta \quad (19b)$$

## 3. 전단강도의 계산방법

본 연구에서 제안하는 Strut-and-Tie 모델에서 tie 역할을 하는 전단철근은 RS보의 집중보강근 뿐 만 아니라 내부구간에 배근되는 철근도 철골보의 매립양단부로 나누어 부담하는 것으로 하였다. 제2장에서 유도한 평형방정식, 구성방정식 및 적합방정식을 이용하여 Fig. 5의 절차를 따른다.

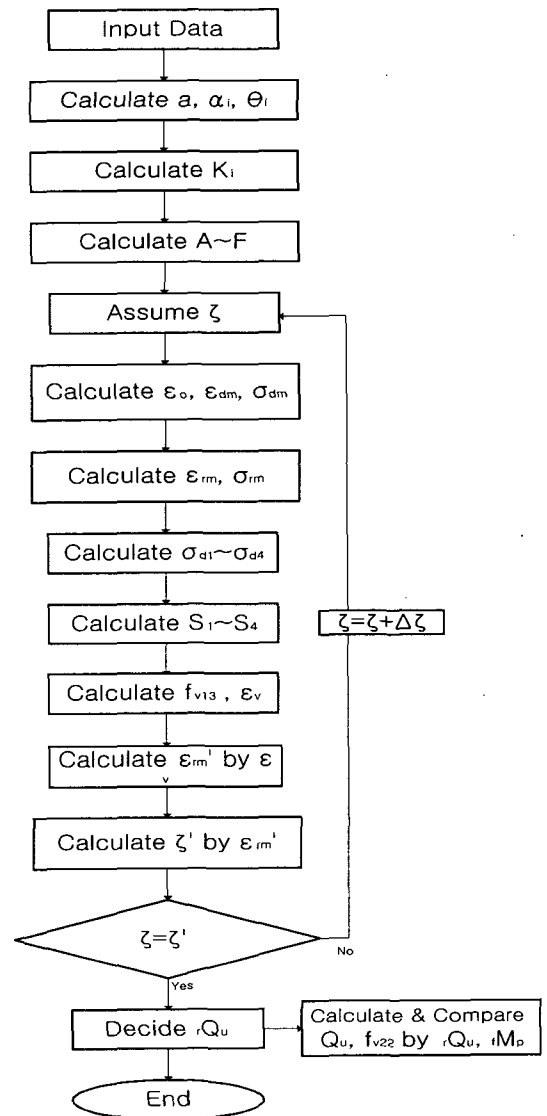


Fig. 5 Flow chart for calculation

면 RS보의 전단강도를 구할 수 있다.

특히 본 연구에서는 RS보의 강재매입구간에서 콘크리트 보에 균열이 발생하게 되면, 콘크리트의 압축강도가 저하되는 연화효과(softening effects)를 고려하기 위하여 식 (14)~(15)에서 도입한  $\xi$ 를 사용하였다. 즉  $\xi$ 를 가정하고 이에 따른 각 부위에서의 응력 및 내력을 변형을 적합조건에 따라 구하게 된다. 그리고 콘크리트의 압축강도와 철근의 항복강도 중에서 먼저 도달하는 쪽에서 파괴되는 것으로 가정하였다. 이 과정을 수행하면 RS보의 혼합구조 보 구간인 L2구간에서의 전단강도인  $Q_u$ 의 값을 얻게 된다. 여기서 계산한 구간전단강도를 RS보 전단강도로 환산하기 위해서는 RS보의 내부 구속조건을 고려하여 식 (19)를 이용한 부가적인 계산을 진행하여 구할 수 있다. 이때 사용한 식 (19)는 기존연구의 역학적 모델에서 유도한 식<sup>11)</sup>을 적용하였다.

$$Q_u = \frac{[r Q_u \times l_2 + r M_p]}{l_1 + l_2} \quad (19)$$

여기서,  $Q_u$ 는 RS 보의 전단강도

$r Q_u$ 는 RS보의 강재매입구간의 전단강도

$l_1, l_2$ 는 RS보의 구간길이(Fig. 1, 2 참조)

$M_p$ 는 내부구속조건에 의한 철골 보의 구속  
우력모멘트

#### 4. 실험결과와 해석결과의 비교분석

이상과 같이 제안한 해석모델을 이용하여 기존의 시험 결과<sup>12,11,12)</sup>를 적용하여 이론적인 전단내력을 산정하였다. 기존 시험체의 제원은 Table 1과 같고 해석모델을 적용하여 구한 전단내력은 Table 2와 같다. Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 기존식<sup>11)</sup>의 경우, 예상전단강도는 실험값의 1.19~2.67배의 범위값을 나타내었다. 그리고 평균값도 1.72를 나타내 RS보의 전단강도를 상당히 과소평가하고 있다. 그리고 ACI 기준식<sup>13)</sup>을 사용한 경우에는 실험값의 0.61~1.11배의 범위값을 보였다. 그리고 평균값은 0.87의 값을 나타내 RS보의 전단강도를 다소 과대평가하는 결과로 나타났다.

본 연구에서 제안한 해석모델의 경우, 실험값의 0.81~1.26배의 범위값을 나타내었고, 평균값도 1.02로 기존식이나 ACI 기준식에 비해 매우 양호한 예측결과를 보였다. 본 연구에서 제안한 모델의 결과를 기존식 및 ACI 기준식과 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 기존식 및 ACI 기준에 비해 매우 정확하게 전단내력 예측모델임을 확인할 수 있다. 또한 ACI 및 기존식에서 고려하지 못한 콘크리트의 보의 사인장 균열에 따른 콘크리트의 압축강도의 연화효과를 고려할 수 있으며, 또한 기존식에서 고려하지 않고 있는 콘크리트의 기여효과를 전단강도에 반영하였다. PC 강봉을 전단보강근으로 사용한 A3 시험체와 C2 시험체의 경우, 최대전단강도시 PC강봉이 항복하지 않았기 때문에

Table 1 Specifications of specimens in RS beam<sup>12,11,12)</sup>

Specimen	Lengths (cm)			Depths (cm)			Widths (cm)		Stirrup areas (cm <sup>2</sup> )		Concrete strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Bar yield strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Confining moment (t · m)
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	b <sub>i</sub>	b <sub>o</sub>	A <sub>v1</sub>	A <sub>v2</sub>	f' <sub>c</sub>	f <sub>vy</sub>	fM <sub>p</sub>
A1	260	60	30	35	7.5	7.5	17.5	15.5	7.1	5.68	423	3030	8.3
A2	260	60	30	35	7.5	7.5	17.5	15.5	7.1	5.68	403	3030	8.3
A3	260	60	30	35	7.5	7.5	17.5	15.5	3.6	3	429	13900	9.45
A4	260	60	30	35	7.5	7.5	17.5	15.5	7.1	5.68	429	3030	8.3
B1	260	60	30	35	7.5	7.5	17.5	15.5	7.1	5.68	454	3030	8.3
C1	260	60	30	35	7.5	7.5	17.5	15.5	4.26	3.41	425	3030	8.3
C2	260	60	30	35	7.5	7.5	17.5	15.5	2.31	1.71	413	13900	8.3
C3	260	60	30	35	7.5	7.5	17.5	15.5	6.03	5.00	413	4200	8.3
D1	260	60	30	35	7.5	7.5	17.5	15.5	7.1	5.68	473	3030	8.3
D2	260	60	30	35	7.5	7.5	17.5	15.5	5.68	4.26	473	3030	8.3
D3	260	60	30	35	7.5	7.5	17.5	15.5	4.26	2.84	448	3030	8.3
E1	260	60	30	35	7.5	7.5	17.5	15.5	7.1	5.68	423	3030	8.3
E2	260	60	30	35	7.5	7.5	17.5	15.5	7.1	5.68	423	3030	9.45
G1	202.5	70	27.5	40	6.8	6.8	15	15	3.6	3	302	13400	15.5
G2	105	45	25	30	6	6	10	20	6.88	5.16	503	14200	8.4

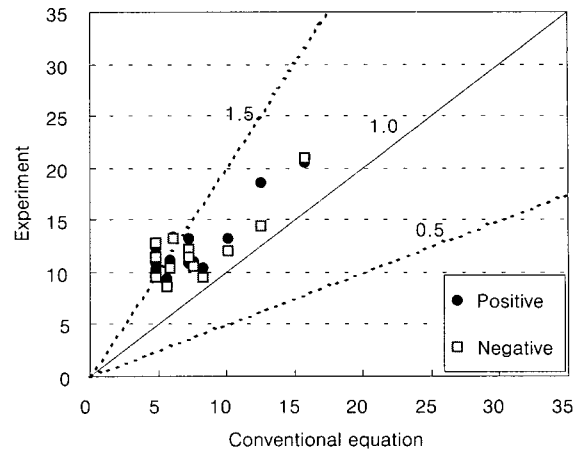
**Table 2** Comparisons of experimental and analytical results

Specimen	Ex. Value		Conven. Eq. (1)	ACI Code Eq. (2)	Proposed model (3)
	Positive	Negative			
A1	11.8	11.8	7.2	13.5	11.9
A2	10.8	12.2	7.2	13.4	11.5
A3	13.2	12	10.1	13.5	10.6
A4	13.2	-	7.2	13.6	11.9
B1	11.2	11.5	7.2	13.6	12.4
C1	9.4	8.7	5.6	10.7	10.8
C2	10.4	9.5	8.3	10.4	9.0
C3	11	10.6	7.6	14.9	11.3
D1	12.4	12.8	4.8	13.7	12.6
D2	10.9	11.4	4.8	12.1	11.8
D3	10.3	9.5	4.8	10.4	10.7
E1	11.1	10.5	5.9	13.5	12.0
E2	13.4	13.3	6.1	13.9	12.3
G1	18.6	14.5	12.5	19.4	13.8
G2	20.5	21	15.7	32.2	17.0

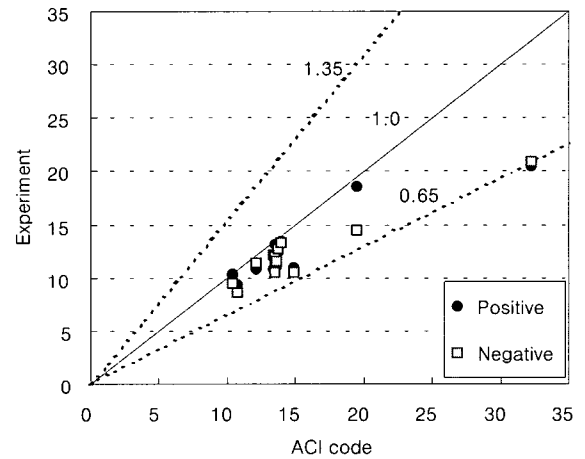
  

Ex./(1)		Ex./(2)		Ex./(3)	
Positive	Negative	Positive	Negative	Positive	Negative
1.64	1.64	0.87	0.87	0.99	0.99
1.50	1.69	0.81	0.91	0.94	1.06
1.31	1.19	0.98	0.89	1.25	1.13
1.83	-	0.97	-	1.11	-
1.56	1.60	0.82	0.85	0.90	0.93
1.68	1.55	0.88	0.81	0.87	0.81
1.25	1.14	1.00	0.91	1.16	1.06
1.45	1.39	0.74	0.71	0.97	0.94
2.58	2.67	0.91	0.93	0.98	1.02
2.27	2.38	0.90	0.94	0.92	0.97
2.15	1.98	0.99	0.91	0.96	0.89
1.88	1.78	0.82	0.78	0.93	0.88
2.20	2.18	0.96	0.96	1.09	1.08
1.49	0.96	0.75	0.72	1.35	1.05
1.31	1.34	0.64	0.65	1.21	1.24

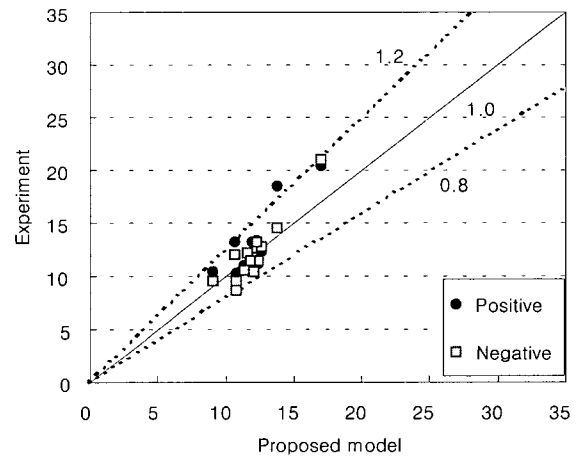
기존모델의 부적합성도 알 수 있었다. 그러나 본 제안모델에서는 PC 강봉이 항복하기 이전에 콘크리트의 파괴로 최대내력에 도달함을 예측할 수 있었으며, 구성재료의 파괴모드도 잘 예측하고 있음을 확인하였다.



(a) Conventional equation



(b) ACI code equation



(c) Proposed model

**Fig. 6** Comparisons of predicted shear strength

## 5. 결 론

철골과 철근콘크리트의 혼합구조로 이루어진 RS 보의 전단강도 예측모델을 제안하고, 이를 시험체에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서는 RS보의 전단강도를 예측하기 위하여 힘의 평형조건, 재료의 성질, 그리고 적합조건을 이용하여 Strut-and-Tie 모델을 개발하였다.

2) 제안모델은 구성요소 중 한쪽의 파괴에 의한 전단내력을 규명할 수 있어 보다 정확하게 전단내력을 예측할 수 있다.

3) 본 연구의 예측모델은 예측전단강도에 대한 실험 강도비의 평균값이 1.02이고, 표준편차 0.126을 나타내고 있다. 따라서 기존식에 비하여 전단강도를 매우 양호하게 예측할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 한양대학교 초대형구조시스템연구센터 및 삼성물산의 연구비 지원에 의한 것으로, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 川端一三, 成原弘之, 官崎直志, “端部RC造中央部S造の複合構造梁構造實驗と設計・施工,” 混合構造の力學的學動と設計・施工に関するシンポジウム論文集, 1992. 12.
2. 淺山長生, 泉滿, 川端一三, 成原弘之, 田中國彦, 川又康博, “端部RC造中央部S造の複合構造梁の實驗” -その1. 實驗の概要, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1993. 9, pp.1867~1868.
3. 網于眞一, 淺山長生, 泉滿, 川端一三, 成原弘之, 田中國彦, “端部RC造中央部S造の複合構造梁の實驗” -その2. 應力傳達機構, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1993. 9, pp.1869~1870.
4. 田中國彦, 泉滿, 川端一三, 成原弘之, 淺山長生, 網于眞一, “端部RC造中央部S造の複合構造梁の實驗” -その3. 슬라브의 합성效果, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1993. 9, pp.1871~1872.
5. Sheikh, T. M., Deierlein, G. G., Yura, J. A., and

- Jirsa, J. O., “Beam-Column Moment Connections for Composite Frames : Part 1,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 115, No. 11, November, 1989, pp.2858~2876.
6. Deierlein, G. G., Sheikh, T. M., Yura, J. A., and Jirsa, J. O., “Beam-Column Moment Connections for Composite Frames : Part 2,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 115, No. 11, November, 1989, pp.2877~2895.
7. Collins, M. P., Mitchel, D., Adebar, P., and Vecchio, F. J., “A General Shear Design Method,” *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 1, Jan.-Feb. 1996, pp.36~44.
8. Xiaobo, D. P., Hsu, T. T. C., “Fixed Angle Softened Truss Model for Reinforced Concrete,” *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 2, Mar.-Apr. 1996, pp.197~207.
9. Lee, J. Y., Watanabe, F., “Shear Design of Reinforced Concrete Beam with Shear Reinforcement Considering Failure Modes,” *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 3, May-Jun. 2000, pp.477~4849.
10. Hwang, S. H., Lee, H. J., “Analytical Model for Predicting Shear Strengths of Exterior Reinforced Concrete Beam-Column Joints for Seismic Resistance,” *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 5, Sep.-Oct. 1999, pp.846~857.
11. 김옥중, 문정호, 이리형, “단부 RC조와 중앙부 철골조로 이루어진 RS 보의 전단내력에 관한 연구,” 대한건축학회 논문집, 제17권 5호 통권 151호, 2001. 5.
12. 김옥중, 최종권, 문정호, 이리형, 이동렬, “단부 RC조와 중앙부 철골조로 이루어진 RS보의 전단집중보강근의 효과에 관한 연구,” 대한건축학회 논문집, 제17권 6호 통권 152호, 2001. 6.
13. ACI Committee 318, “*Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-95) and Commentary(318R-95)*,” American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1995, p.134

### 요 약

중앙부 철골조와 단부 RC조로 이루어진 혼합구조보인 RS보의 전단강도를 예측하기 위한 해석모델로서 Strut-and-Tie Model을 개발하였다. 또한 제안된 모델은 강제매입구간에서의 RC부위에 발생한 전단균열에 의한 콘크리트의 강도저하를 고려하기 위하여, 콘크리트의 연화효과를 고려할 수 있는 모델로 제안되었다. 제안모델은 전단균열이 발생된 혼합구조 보에서 평형방정식, 적합방정식, 구성방정식을 이용하여 전단강도를 구할 수 있으며, 이에 따라 구성재료의 파괴를 예측할 수 있다. 따라서 기존의 식에서 예측하지 못한 콘크리트의 파괴에 의한 전단강도를 예측할 수 있음을 확인하였다. 해석결과 예측전단강도대비 실험강도의 비가 평균 1.02, 표준편차 0.126의 매우 만족스러운 결과를 보였다.

**핵심용어 :** RS 보 ; 철근콘크리트 ; 전단강도 ; strut-and-tie model ; 연화효과