

# 전단보강철근이 없는 RC보의 수직변형을 평가를 통한 전단강도 산정

## Shear Strength Prediction of RC Beams without Stirrup using Transverse Strain Evaluation

신근옥\*      이창신\*\*      정제평\*\*\*      김우\*\*\*\*  
Shin, Geun Ok   Rhee, Chang Shin   Jeong, Jae Pyong   Kim, Woo

### ABSTRACT

This paper presents a model for evaluating the contribution by arch action and frame action to shear resistance in shear-critical reinforced concrete beams without stirrup. The rotating angle softened truss model is employed to calculate the shear deformation of the web and the relative axial displacement of the compression and tension chord by the shear flow are also calculated. From this shear compatibility condition in a beam, the shear contribution by the arch action is numerically decoupled. The transverse strain obtained from the proposed model is selected for shear failure criterion. Using the failure criterion, shear strength of RC slender beams without stirrup is predicted.

### 1. 서론

휨과 전단이 작용하는 철근콘크리트 부재는 콘크리트의 재료적 인장과 압축거동의 큰 차이 및 균열발생, 철근과의 합성작용 등의 이유로 그 해석과 설계가 간단하지 않다. 조합 하중을 받는 철근콘크리트 부재의 거동을 규명하기 위해 지금까지 많은 연구가 수행되었으며, 모든 경우에 일반적으로 적용할 수 있는 해석 모델로 현재까지 그 합리성을 인정받고 있는 역학적 모델이 트러스 모델이다. 그런데 대부분의 기존 트러스 모델은 베르누이 적합조건을 적용하기 때문에 보의 콘크리트 기여전단강도를 설명할 수 없는 논리적인 한계를 가지고 있고, 전단이 지배하는 보에서 중요한 저항 성분으로 알려진 아치작용과 골조작용을 효과적으로 고려하기 어렵다. 또한, 전단보강철근이 없는 보의 경우 트러스의 수직재에 해당하는 스티럽이 없어 트러스 형태 구성에 논리적인 모순을 가지고 있다.

이 논문에서는 전단보강철근이 없는 보에 대한 기존 트러스 모델이 갖는 한계성을 극복하기 위하여, 아치작용과 보작용의 구성비인 아치계수- $\alpha$ 를 도입하고, 골조작용을 고려한 새로운 트러스 모델을 제안하였다. 제안된 트러스 모델을 이용하여, 전단 파괴기준을 마련하고 전단강도를 예측하였다.

### 2. 기본개념

이 논문에서는 단면의 전단 저항력을 보작용과 아치작용이 저항한다는 배경에 기반하여, 두 전단 저항 성분의 구성비를 아치계수로 정의하고 식 (1)과 같이 표현하였다.

$$\alpha = \frac{\text{Shear resisted by ArchAction}}{\text{Total Shear}} \quad (1)$$

단면의 휨인장력은 주철근이 모두 저항하고, 콘크리트 휨압축 영역을 압축 합력이 작용하는 1축 압축부재로 이상화하는 트러스 모델링 기법을 적용한다면, Fig. 1에 나타난 것과 같이 경사 상현재, 하현

\*정회원, 전남대학교 토목공학과 석사과정  
\*\*정회원, 전남대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\*정회원, 세이프콘 엔지니어링 대표  
\*\*\*\*정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

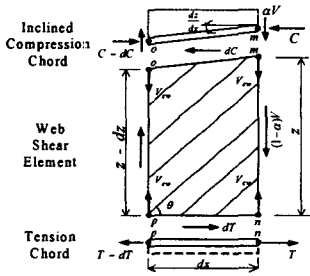
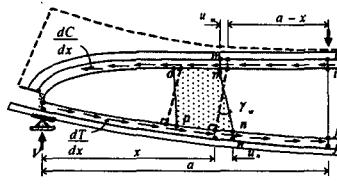
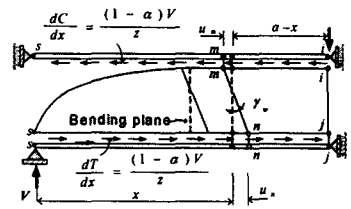


Fig. 1 Smearred truss idealization



(a) Idealized beam and its deformation



(b) Compatibility of deformation between web and chords

재와 면전단요소의 3요소로 구성된 분산트러스로 이상화 할 수 있다. 복부의 면전단 요소는 등분포 전단응력이 작용하는 상태로 간주하기 때문에, 응력과 변형을 해석이 간단해진다. 기존의 트러스모델이 고려하지 못한 전단강도 기여 성분인 골조작용(frame action)- $V_{cw}$  를 가상의 트러스 수직저항 성분으로 공급시킴으로서 골조작용을 고려함과 동시에 기존 트러스모델에서 수직재의 부재로부터 오는 트러스 형태 구성의 논리적 모순을 해결할 수 있다. Fig. 2a는 Fig. 1의 경사 상현재를 갖는 트러스 모델을 보의 전단경간에 적용한 상태를 보인 것이다.

타이드-아치가 형성된 보의 전체적인 변형적합 상태는 Fig. 2b와 같이 곡선형 아치 부분을 직선형의 1축 부재로 표현하면 쉽게 알 수 있으며, 1축부재로 이상화한 상·하현재에는 각각  $dC/dx$ 와  $dT/dx$ 가 분포 축력으로 작용하는 상태가 된다. 받침점  $s$ 와 하중점  $i, j$ 는 각각 구속과 대칭성에 의해 변형 후에도 수평변위가 발생하지 않기 때문에 이 점을 기준으로 받침점에서  $x$ 만큼 떨어진 위치의 타이와 아치의 상대적 수평 변위량  $u_m$ 과  $u_n$ 은 각 부재의 축 변형량에 해당한다. 실제로는 상·하현재와 복부 요소가 서로 연결되어 있기 때문에 상·하현재의 수평 변위량은 복부요소  $m$ 과  $n$ 의 상·하부 수평 변위량과 같아야 하고, 따라서 복부의 평균 전단 변형률  $r_w$ 와 수평 변위량  $u_m$ 과  $u_n$ 으로부터 발생한 전단 변형률이 같다는 전단변형적합 조건식(gross compatibility condition)을 만족해야 한다. 이 적합조건식으로부터 아치와 복부전단력의 분담비율인 아치계수가 결정된다.

### 3. 아치계수- $a$ 결정

이 모델을 실제 보에 적용하기 위해 선행되어야 할 것은  $V_{cw}$ 의 평가이다. 골조작용에 의한 저항성분을 정확하게 평가하기는 실질적으로 매우 어려우므로 간단하면서도 기존 실험 결과 및 설계기준의 접근 방법과 일관성을 확보하기 위한 실제적 대안이 필요하다. 따라서 이 논문에서는 수많은 실험결과를 토대로 작성된 미국 ACI 설계기준에서 사용하고 있는 다음의 최소 전단력 값을  $V_{cw}$ 로 간주하였다.

$$V_{cw} = 0.16\sqrt{f_{ck} b_w d} \quad (2)$$

복부 면전단 요소는 아치작용 성분을 제외한 등분포 전단응력만이 복부에 작용하는 2축인장-압축장(biaxial tension-compression field)으로 이상화하고, 응력과 변형 해석을 위해 RA-STM을 적용하였다.

앞에서 언급한 것처럼, 아치계수- $a$ 의 값은 복부요소와 상·하현재의 상호변형적합 조건식을 만족하도록

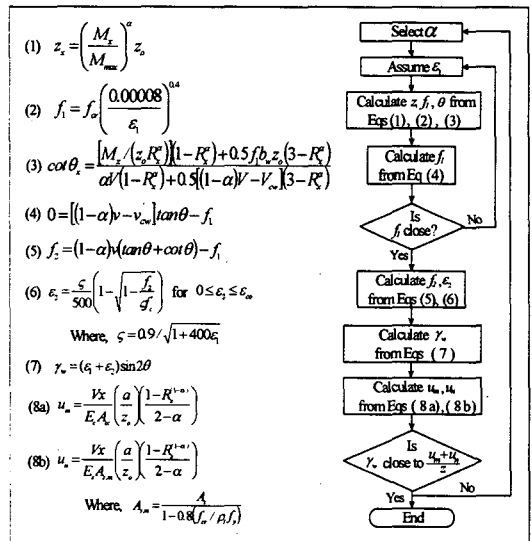


Fig. 3 A flow chart of solution algorithm

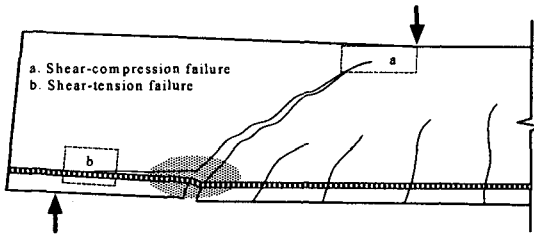


Fig. 4 Development of flexure-shear crack

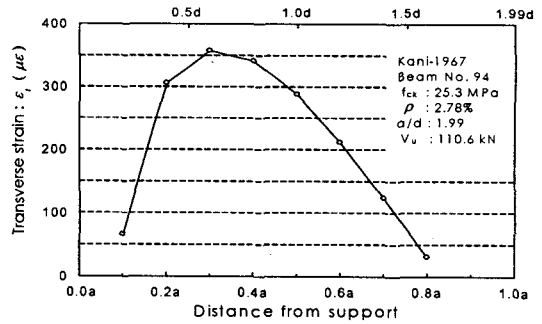


Fig. 5 Distribution of transverse strain over the shear span at the ultimate load stage

록 결정되어야 하며, 이 조건식을 완성하기 위해서는 복부, 아치 및 타이의 각 평형조건과 적합조건이 모두 포함된 연립방정식을 풀어야만 한다. 부재의 제원과 작용력이 주어진 보의  $a$  값을 시산법에 의해 결정하는 순서도를 Fig. 3에 나타냈다.

#### 4. 파괴기준 선정

이 논문에서는 짧은 보의 전단 파괴형태인 전단압축파괴와 전단인장파괴를 다루고자 한다. Fig. 4에 서와 같이 보에 휩균열이 발생한 후 하중이 증가하면, 발생한 휩균열은 전단응력의 영향으로 경사를 이루며 하중점과 받침점쪽으로 확장된다. 이때 하중점으로 확장된 경사균열은 압축대의 면적을 감소시켜 전단압축파괴를 일으키고, 받침점으로 확장된 경사균열은 주철근을 따라 수평균열로 발전하여 파괴되는 전단인장파괴를 일으킨다. 이 두 가지 파괴형태는 경사균열이 하중점과 받침점으로 확장되는 정도에 따라 결정된다. Fig. 4에서처럼 실제 파괴는 가장 발달한 경사균열에 의해 발생되는데, 음영진 부분으로 나타낸 임계경사균열의 최대 균열폭에 의해 경사균열의 확장정도를 파악할 수 있고, 최대 균열 폭은 복부요소 해석을 통해 얻어진 수직변형률( $\epsilon_t$ )을 통해 간접적으로 평가할 수 있다.

제안한 모델로 기존 실험 자료를 해석하여 얻은 시간에 따른 수직변형률의 분포를 Fig. 5에 나타냈다. 그림에서와 같이 최대 수직변형률은 보의 전단경간 중앙점과 받침점 사이에서 나타났고, 기존 문헌에 발표된 다른 실험 자료에 적용한 결과 최대 수직변형률이 발생한 위치에는 미소한 차이가 있었으나 경향은 동일하게 나타났다. 임계 수직변형률을 선정하기 위해 전단파괴로 판명된 78개의 기존 실험자료를 파괴하중 단계에서 해석하여 수직변형률을 산정하였다. 계산의 편의를 위해 전단경간 중앙에서 해석하였고, 해석으로 얻어진 수직변형률 분포를 Fig. 6에 나타냈다. 전단경간 중앙에서 수직변형률이 임계값( $300\mu\epsilon$ )에 도달할 때를 파괴기준으로 선정하였다.

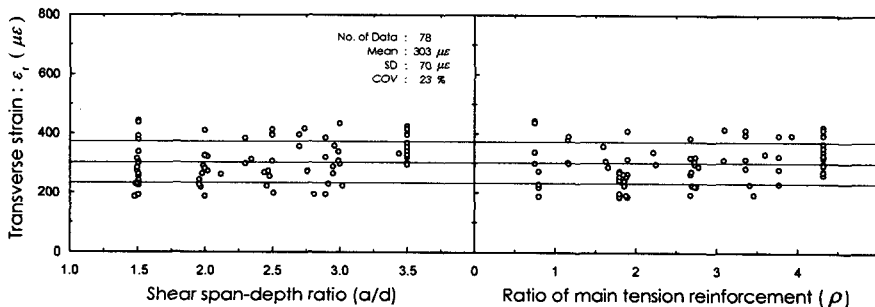


Fig. 6 Transverse strain at the ultimate load stage

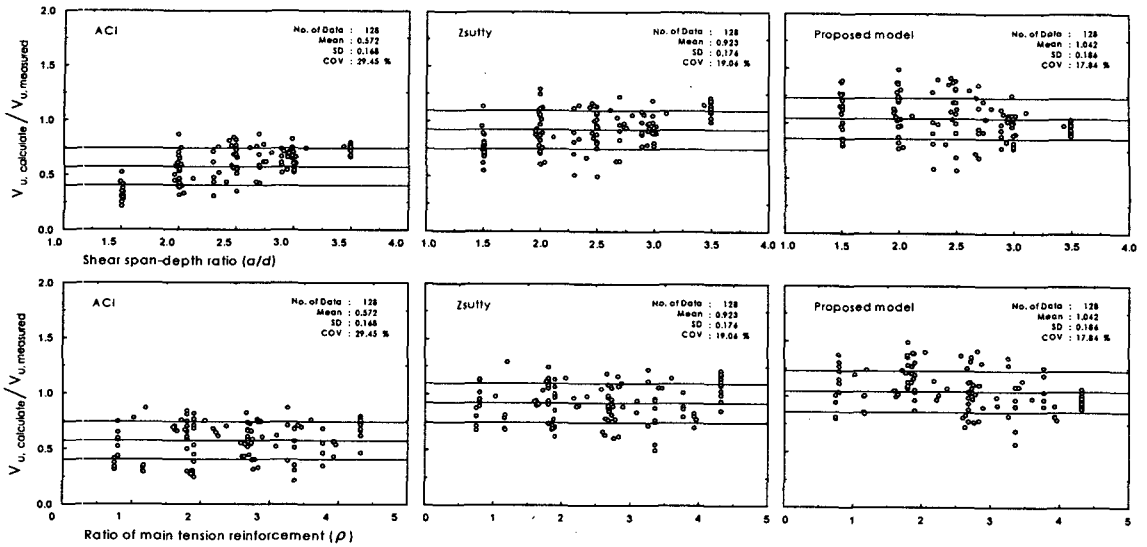


Fig. 7 Ratio of prediction to experimental results

## 5. 강도예측

Fig. 7은 기존 문헌의 실험자료 중에서 전단파괴로 판명된 128개의 자료에 대해 ACI 설계기준, Zsutty 전단강도식 및 제안 모델을 이용하여 전단강도를 예측한 결과이며, 비교·분석한 결과 제안 모델을 이용한 강도 예측이 다른 방법에 비해 개선된 효과를 나타냈다.

## 6. 결론

이 논문은 전단보강철근이 없는 보에 대한 기존트러스 모델이 갖는 한계성을 극복할 수 있는 새로운 트러스 모델을 제안하기 위해 수행되었다. 아치작용을 효과적으로 고려하기 위해 아치계수를 도입하였고, 골조작용력을 가상의 트러스 수직저항력으로 공급시켰다. 복부요소는 아치작용 성분을 제외하든 분포 전단응력만이 작용하는 2축인장-압축장(biaxial tension-compression field)으로 이상화하고, 응력과 변형 해석을 위해 RA-STM을 적용하였다. 또한, 상·하현재와 복부요소의 전단변형적합조건을 만족시키도록 해를 결정함으로써 아치와 복부전단력의 분담비율이 결정되는 트러스모델을 제안하였다.

제안 모델로 기존 전단실험 자료를 해석하여 얻은 전단경간 중앙에서의 수직변형을 짧은 보의 전단 파괴형태인 전단압축파괴와 전단인장파괴에 대한 파괴기준으로 선정하였다. 선정한 파괴기준을 바탕으로 기존 전단실험 자료의 강도를 예측한 결과, 제안 모델이 ACI 설계기준에 비해 상당한 개선효과를 나타냈다. Zsutty의 전단강도식에 대하여는 다소의 개선된 경향을 나타냈으나, 제안 모델은 해석단계에서 보의 내력상태를 평가할 수 있다는 이점이 있다.

## 감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirement for Reinforced Concrete and Commentary", ACI, Detroit, M.I, 1995.
2. 김우, 정계평, 김대중, "전단이 지배하는 RC 부재의 새로운 트러스 모델링 기법 연구(전편)-기본 개념 유도를 중심으로-", 콘크리트학회논문집, 16권, 6호, 2004, pp.785~794.