

Stuttgart 콘크리트 보 전단실험의 재해석을 통한 합리적 전단모델 연구

A Study on the Rational Shear Model by interpretation of Stuttgart Beam Shear Test

김 우* 모 귀 석** 정 제 평***
Kim, Woo Mo, Gui Suk Jeong, Jae Pyong

ABSTRACT

Based on the reinterpretation of the well-known relationship between shear and the rate of change of bending moment in a reinforced concrete beam subject to combined shear and moment loads, the shortcomings of present truss models are discussed. The core of the theory is that a new perspective on the shear strength can be gained by viewing the internal stress field in terms of the superposition of two basic components of shear resistance ; arch action and beam action. The arch action can be designed using the simple truss having curved compression chord, while the beam action between the two chords can be modeled using a parallel chord truss with MCFT or RA-STM. The compatibility of deformation associated to the two action is taken into account by employing a characteristic factor α . The new model was examined by the Stuttgart beam shear tests, and the results show that the present approach provides good estimates of stirrup contribution and concrete contributions.

Keyword ; Arch action , Beam action, Truss model, Stuttgart beam shear test

1. 서 론

휨, 전단, 비틀림 및 축력 등 복합하중이 작용하는 철근콘크리트 부재는 콘크리트의 재료적 인장과 압축거동의 큰 차이 및 균열발생, 철근과의 합성작용 등에 의해 그 해석과 설계가 간단하지 않다. 복합하중을 받는 철근콘크리트 부재의 거동을 규명하기 위해 지금까지 많은 연구가 수행되었으며, 탄성 이론(elastic theory), 치아유사론(tooth analogy), 아치유사론(arch analogy), 트러스유사론(truss analogy), 전단압축이론(shear compression theory) 등의 많은 해석 이론 및 모델들이 제안되었다(ASCE-ACI Committee 426,1973;ASCE-ACI Committee 445, 1998)^{2) 3)}. 이 연구는 철근콘크리트 부재에서 전단력 V 는 모멘트 M 의 변화율($V=dM/dx$)이라는 관계식이 갖는 물리적 의미를 기존의 트러스모델링 기법으로 복제하여 보작용(beam action)과 아치작용(arch action)으로 기본 전단저항인자를 구분하였다. 이러한 두 기구에 의한 각각의 전단력 분담량은 상호변형적합조건에 따라 달라지기 때문

* 정희원, 전남대학교 토목공학과 교수

** 정희원, 대불대학교 토목공학과 교수

*** 정희원, 전남대학교 토목공학과 박사과정

에 이를 포괄적으로 표현하기 위해 미지 계수 α 를 도입하였다. 이러한 이론적 내용을 가장 정밀하게 실험되었다고 평가받고 있는 Stuttgart 대학 Leonhardt(1965)의 실험자료⁴⁾에 검증하였다.

2. 제안모델

단면내의 콘크리트 휨인장응력을 무시하면, 단면의 휨모멘트 M 은 보 내부에 유발된 C 와 주철근 인장력 T 의 짝힘에 의해 저항하며, 철근콘크리트 보의 전단저항은 휨모멘트의 변화량 식(1)과 같이 보작용(V_b)과 아치작용(V_a)으로 구분된다.⁵⁾

$$V = \frac{dM}{dx} = \frac{d}{dx}(T \cdot z) = z \frac{dT}{dx} (= V_b) + T \frac{dz}{dx} (= V_a) \quad (1)$$

하지만, 식(1)은 T 와 z 함수는 시간 내의 무수히 많은 조합을 가질 수 있기 때문에, 그 평형조건을 만족하기가 쉽지 않다. 또한 특기할 것은 이 두 전단저항기구는 역학적으로 서로 다른 부위에 의한다는 것이다. 즉, 보작용에 의한 전단작용은 보의 복부에서 담당하고, 아치작용에 의한 전단저항은 휨균열이 발생한 보의 휨 저항기구와 동일하게 콘크리트 휨 압축영역과 종방향 주철근이 담당한다. 이러한 현상을 Leonhardt(1965)는 그림 1과 같이 전단력 분담력 관계로 잘 설명하고 있다.

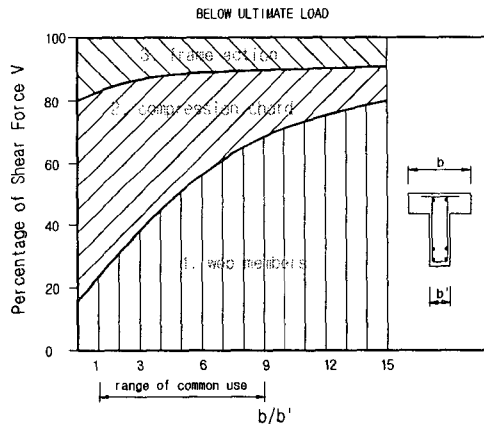


그림 1. 복부폭비(b_f/b_w)에 따른 전단분담력

2.1 상호변형적합조건

식(1)로 표현된 서로 다른 두 전단저항 메커니즘의 각 변형 특성과 그 적합조건을 고려하면 각 전단저항 성분의 구성비를 파악할 수 있고, 각 전단저항 성분의 상대적 크기는 해당 메커니즘의 상대적 강성비에 영향을 미치는 부재의 형상과 보강철근량에 따라 달라질 것이다. 이러한 상대 강성비를 정량적으로 정확하게 파악하는 것은 쉬운 작업이 아니기 때문에, 본 연구에서는 변형적합조건을 포괄적으로 표현하기 위해 다음과 같이 전체 전단력 대 아치전단력의 비로 정의한 미지의 매개변수 α 를 도입하였다.

$$\alpha = \frac{V_a}{V} \quad (2)$$

2.2 전단-모멘트 상호작용

철근콘크리트 보의 복부에 휨과 전단에 의한 경사균열이 발생하면 그림 2와 같이 복부에 압축과 인장응력이 발생하는 압축장이 형성되며, 이러한 상태의 전단응력 분포를 일직선으로 가정하여 유도한 이론이 수정압축장이론(MCFT)⁶⁾나 연성트러스모델(STM)이다. 그러나 실제 전단응력 분포는 그림

2(b)와 같이 비선형으로 발생하기 때문에 본 연구에서는 전단응력의 분포가 비선형으로 가정하였고 기타 기본조건과 유도과정은 MCFT을 그대로 적용하였다. 즉 전단응력분포는 선형분포하지 않고 비선형 분포한다. 또한 전단응력의 작용범위는 내부모멘트팔길이 z_0 내에 존재 한다. 그림 2(b)의 경사 압축장 형성 후 단면에 발생하는 수평력 성분을 아치압축재에 의해 발생하는 수평력 H_a 와 복부 보작용에 의한 수평력 H_b 로 구분 할 수 있고 내력의 분배는 기존 트러스모델과 같이 재분배 된다. 이때 복부 보작용에 의한 수평력 H_b 를 제외한 모든 압축력의 작용점은 $z = (\frac{x}{a})^\alpha z_0$ 에 작용한다. 즉 그림 2(c)와 같이 수평력 H_a 는 z_a 에 작용하며 수평력 H_b 는 $z/2$ 에 작용한다. 이때 z_a 는 z 에 매우 근접한 값이 된다.

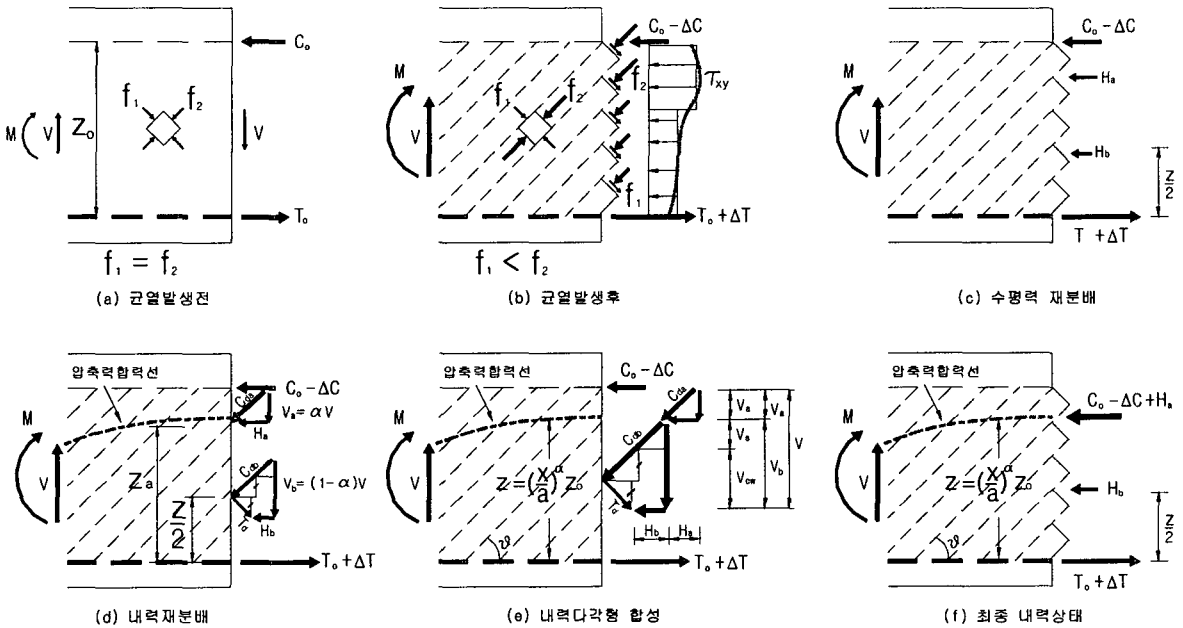


그림 2. 균열전후 단면내력변화

그림 2(c)에 작용하는 H_a 와 H_b 는 ΔT 와 ΔC 를 발생시키며, 모멘트평형에 의한 내력재분배에 의해 식(3)과 식(4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta T = \frac{1}{z_0} (H_a z_a + 0.5 H_b z) \quad (3)$$

$$\Delta C = \frac{1}{z_0} [H_a (z_0 - z_a) + H_b (z_0 - 0.5 z)] \quad (4)$$

감소된 휨모멘트 압축력 $C_0 - \Delta C$ 와 수평력 H_a 는 모두 압축력으로 그림2(f)에 나타난 것과 같이 $C_0 - \Delta C + H_a$ 의 크기를 갖는 합력 C 로 표현할 수 있으며, 이때의 합력 작용점 z 는 식(5)와 같다.

$$z = \frac{(C_0 - \Delta C) \times z_0 + H_a \times z_a}{T_0 + \Delta T} \quad (5)$$

이때, 철근인장력이 ΔT 만큼 증가되었기 때문에 단면의 작용모멘트 M 과 평형을 이루기 위해서 팔 길이가 감소하여야만 한다. 결국 재분배가 된 단면의 모멘트 평형조건에 의해 콘크리트 압축합력 C

와 주철근인장력 T 는 다음과 같게 된다.

$$C = C_o - \Delta C = \frac{M}{z} - \frac{1}{2} H_b \quad (6)$$

$$T = T + \Delta T = \frac{M}{z} + \frac{1}{2} H_b \quad (7)$$

위의 식(3)부터 식(7)에 포함된 H_a 와 H_b 는 그림2(e)의 내력다각형으로부터 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$H_a = \alpha V \cot \theta \quad (8)$$

$$H_b = (1 - \alpha) V \cot \theta - \frac{V_{cw}}{2} (\cot \theta + \tan \theta) \quad (9)$$

여기서 중요한 사실은 주철근인장력 함수 T 만 알고 있으면, 위의 조건식 (5)와 (7)로부터 각단면의 보작용에 의한 복부 콘크리트 전단기역도 $V_{cw} = f_1 \sin 2\theta b_w z$ 를 대입하여 α, θ 로 구성된 해를 계산할 수 있게 되며 전단저항 메커니즘을 수치적 복제(numerical duplication)가 가능해 진다.

3. Stuttgart Beam Test 재해석

3.1 검증과정

Stuttgart Beam은 전단지간비(a/d)가 3.5인 스테리이 배치된 보를 대상으로 집중하중과 등분포하중을 작용하였다. 공칭휨강도가 같은 4가지 단면형태로 직사각형 1개와 복부복이 변화하는 T형단면 3개로 구성되어 있다. 콘크리트 강도와 철근 등의 제원을 콘크리트 비선형해석프로그램인 ATENA(V.Cervanka)를 사용하여 제원과 재료특성을 동일하게 부여한 후 주철근의 인장력을 해석하였다. 이때 측정된 주철근의 인장력 값을 그림 3에 도시화하였다.

3.2 주철근 인장력분포와 복부균열각 θ 변화

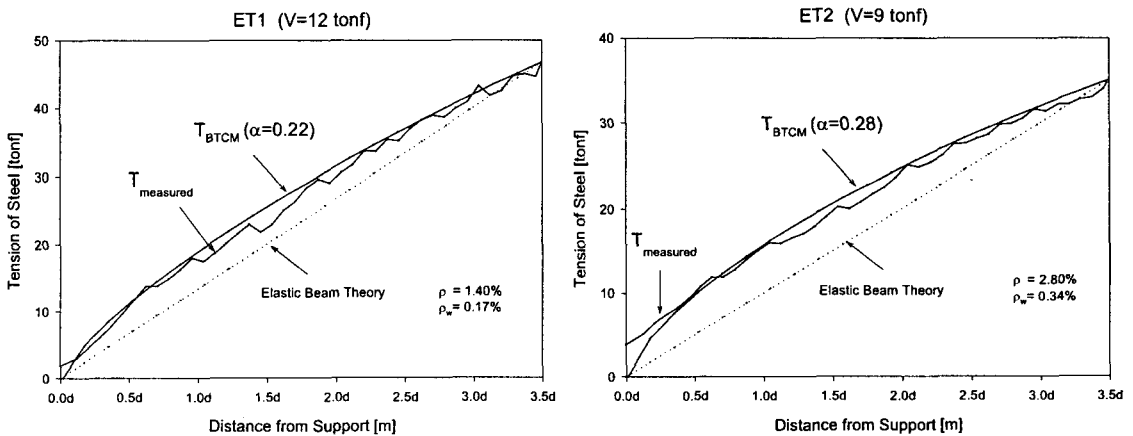
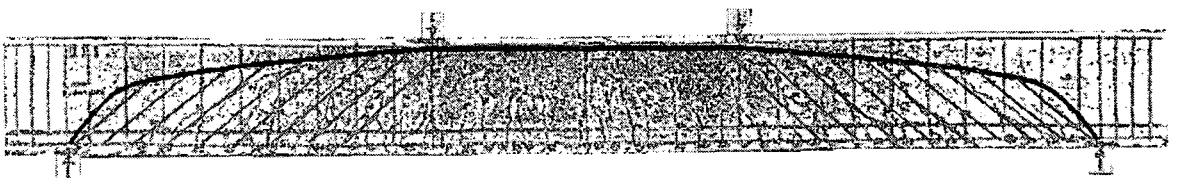
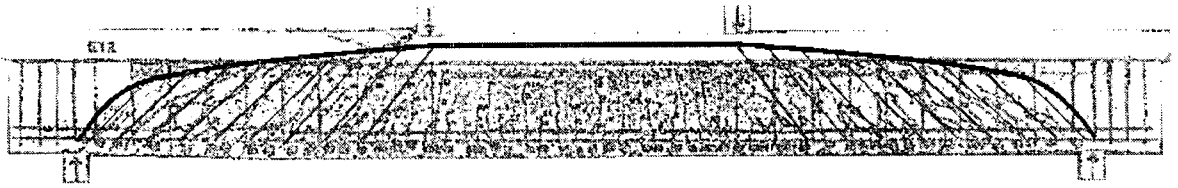


그림 3. 비선형해석에 의한 주철근분포



(a) ET1 압축재 형상과 균열각 예측



(b) ET2 압축재 형상과 균열각 예측
그림 4. 균열각 θ 비교

3.3 내력상태계수 α

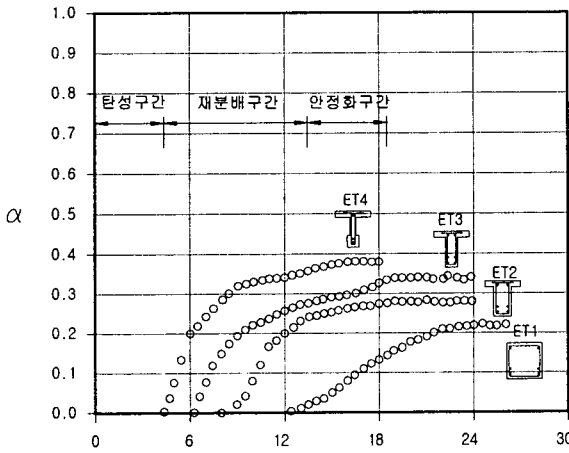


그림 5. 하중단계별 α

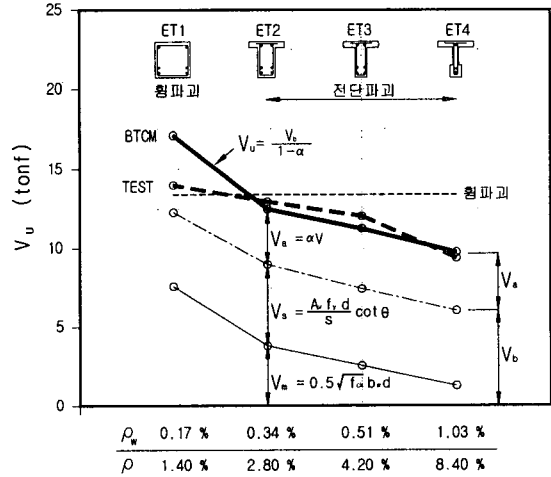


그림 6. 극한전단력 예측

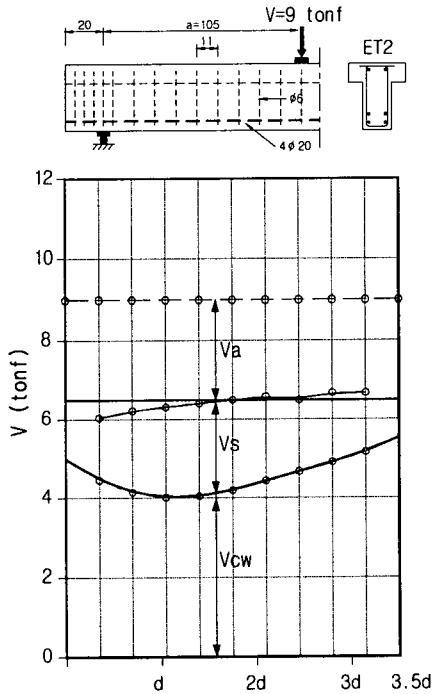


그림 7. ET2 보(V=9 tonf)의 전단력 분담

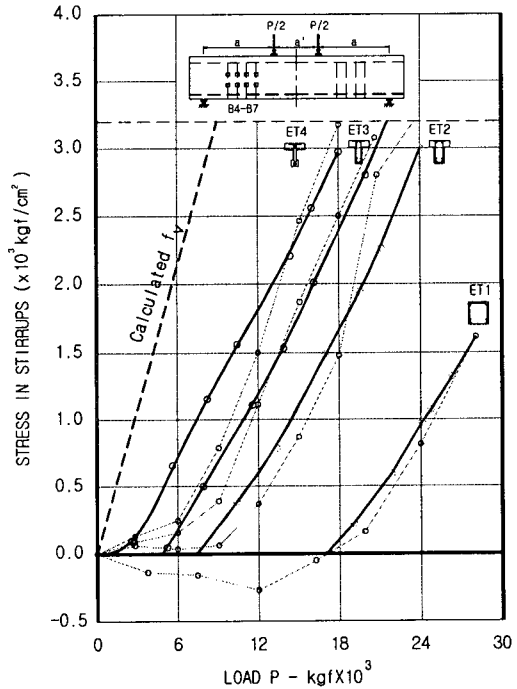


그림 8. 하중단계별 스테리핑 응력

4. 결 론

이 논문은 철근콘크리트 부재에서 전단력 V 는 모멘트 변화율이라는 기본 관계식이 갖는 전단저항의 물리적 의미를 표현 할 수 있는 새로운 트러스 모델링 기법의 개념 도출과 그의 정식화를 통해 Stuttgart 보 실험에 적용한 내용이다. 그러나 본 연구의 모델 이론을 적용하기 위해서는 변형적합 조건을 반영하는 계수 α 를 규명하기 위해 주철근인장력 T 값을 기지력으로 알아야 하기 때문에 비선형유한요소해석을 통한 T 값을 사용하였다. V_{cw} 또는 f_1 의 크기는 기존 보 전단실험자료의 통계분석을 통해 결정한 값이다. 본 연구검증 내용을 정리하면 다음과 같다.

가. 집중하중을 받는 ET 계열의 보는 그림 5와 같이 하중 증가에 따라 α 의 크기가 변화하면 안정화 현상이 발생한다. 이는 경사 압축장이 형성되면 일정한 구조계에 의해 저항한다는 의미로 볼 수 있다.

나. 유한요소법에 의한 주철근인장력과 비교한 그림 3의 결과를 볼때, 보 전지간에 사용한 $\alpha = \frac{V_d}{V}$ 값은 일정하다. 이는 보 전 단면에서 아치저항기구와 보저항기구에 의한 전단력 분담량이 일정하다는 것을 의미한다.

다. 극한전단강도와 스테럽의 응력을 분석한 그림 6, 그림 7의 결과에서 보듯이 본 모델 이론에 의한 예측 전단강도와 하중단계별 스테럽의 응력이 상당히 잘 예측하고 있을 볼 수 있다.

라. 변형적합조건을 반영하는 계수 α 와 안정화 현상 그리고 콘크리트 전단기여도 성분인 V_{cw} 또는 f_1 의 크기에 대한 보완연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 R01-2002-000-00592-0) 지원으로 수행된 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. ACI Committee 318 (1995), "Building Code Requirement for Reinforced concrete and Commentary", ACI, Detroit, M.I.
2. ASCE-ACI Committee 426 (1973), "The shear strength of reinforced concrete members", *Journal of Structural Division*, ASCE, 99(6), pp. 1091-1187.
3. ASCE-ACI Committee 445 (1998), "Recent approaches to shear design of structural concrete", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 124(5), pp. 1375-1417.
4. Leonhardt, F. (1965), "Reducing the shear reinforcement in reinforced concrete beams and slabs", *Magazine of Concrete Research*, 17(53), pp. 187-198.
5. Park, R., and Paulay, T. (1975). "Reinforced concrete structures", Wiley, New York, pp.270-345
6. Vecchio, F. J., Collins, M. P. (1986), "The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear", *ACI Journal*, 83(2), pp. 219-231.