

전단보강철근이 없는 RC보의 트러스 해석기법 연구

Development of A New Truss Model for RC Beams without Web Reinforcement

김 지 훈*
Kim, Jee Hoon

정 제 평**
Jeong, Jae Pyong

김 우***
Kim, Woo

ABSTRACT

This paper describes an attempt to develop a new truss model for reinforced concrete beams failing in shear based on a rational behavioral model. The key idea incorporated with truss model is the internal force state factor which is able to express global state of internal force flow in cracked reinforced concrete beams subjected to shear and bending. A new truss model using internal force state factor may provide a comprehensive result of shear strength in reinforced concrete beams without web reinforcement.

1. 서 론

현재까지 전단분야에 많은 연구자들이 각자의 전단저항기구(mechanism)을 이용하여 많은 사실을 설명하여 왔다. 철근콘크리트 보의 전단강도에 영향을 주는 인자로 기하학적 형상비 a/d , 휨철근비 ρ , 수직스터럽비 ρ_w , 단면형태(직사각형보, T형보, I형보 등), 콘크리트 압축강도 f_c , 축력(인장, 압축), 크기효과(size effect)등을 들수 있다. 이러한 많은 변수에 영향을 받는 전단거동을 쉽게 설명하기 위해 Ritter(1899)와 Mörsch(1902)에 의해 철근 콘크리트 보의 해석과 설계에서 개념적인 도구로 트러스 모델이 사용되기 시작하였다. 이러한 초기 연구상태로부터 1960년대부터 1980년대에 이르러 전단과 비틀림을 받는 트러스 모델에 관한 연구가 수행되어져 수정 트러스 모델까지 완성되었으며, 이후 소성이론의 발전과 더불어 Nielsen and Braestrup(1975), Muller(1978), Marti(1980), Schlaich et al(1987)등에 의해 스트럿-타이 모델(Strut-Tie Model)등의 소성 트러스 모델로 발전하였다. 이러한 해석 기구학적 전단저항이론과 더불어 실험에 의한 전단연구가 진행되었는데, Kani(1964,1966)는 Shear Vally를 통해 전단경간비(a/d)에 따라 전단강도를 평가하였으며, Park and Paulay(1975)는 이러한 전단저항 기구를 보작용(beam action)과 아치작용(arch action) 형태로 구분하여 확장하였는데 철근과 콘크리트의 부착활동(bond slip) 상실이 아치저항 기구(arch resistance)의 원인이라고 설명하였다. 이를 고려한 아치작용에 의한 전단 트러스 모델은

* 정회원, 전남대학교 토목공학과 석사과정

** 정회원, 전남대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

Leondardt(1965), Kuper and Gerstle(1973), Ramirez and Breen(1991), Karl-Heinz Reineck(1991), Al-Nahlawi and K.Wight(1992) 등에 연구되었다. 또한, Ngo and Scordelis(1967)는 콘크리트와 철근에 삼각형 요소와 부착 연결요소를 사용한 유한요소해석을 통하여 균열보에서 아치현상의 현저함을 지적하였다. 이러한 아치현상은 최근 Kim et al(1999)에 의해 정량화 되었는데, 내부모멘트 팔길이 합수 지수를 내력상태계수(α)로 표현하고 아치작용의 중요성을 지적하였다. 본 연구는 철근 콘크리트 보의 아치현상의 정도를 나타내는 내력상태계수(α)를 이용하여 보의 내력상태를 반영할 수 있는 트러스 모델을 제안하고자 한 것이다.

2. 아치현상과 내력상태계수

철근 콘크리트 보에 균열이 발생한 이후에는 보 이론으로 설명하기 힘든 내력상태가 나타난다. 그중 대표적인 현상이 하중 재하점에서 지점으로 갈수록 내부 모멘트 팔길이가 줄어드는 아치작용(arch action)이 현저해지는 거동이 나타나는데 이러한 내력상태를 해석하기 위한 이론으로 탄성보이론, 치아유사론, 아치유사론, 압축장이론, 트러스유사론, 전단압축이론 등이 있으며, 대부분 탄성 보이론과 실험적 자료를 근거로 구성되어있다. 보는 일반적으로 휨과 전단에 저항하는 부재로서 경간이 상대적으로 긴 보에서는 주로 휨에 의해 지배되며, 탄성이론과 소성이론을 적절히 조합하여 만족할 만한 해석과 설계를 할 수 있지만, 경간이 상대적으로 짧은 보의 경우에는 단면이 변형전 단면이 변형 후에도 유지된다는 통상의 가설이 성립하지 않으며, 현저한 변형이 발생한다. 따라서, 탄성 응력 범위 안에서조차도 휨 응력은 선형으로 분포하지 않으며, 휨 균열이 발생하면 그림 1(a)와 같은 비 선형적 휨 응력 분포가 나타나기 때문에 단면 성질이나 응력을 계산하는 방법으로 탄성보 이론을 적용할 수 없게 된다. 이러한 아치현상을 최근에 Kim et al(1998)이 실험적 연구를 통해 철근콘크리트 단순보의 콘크리트 압축력선의 궤적을 정량화한 아치모델을 발표하였다. Kim et al (1998)의 실험결과에 의하면, 철근 콘크리트 단순보의 전단경간 중간에서 실제 철근 인장력은 보 이론으로 계산한 값보다 20%~100%정도 더 크게 나타났으며, 그림 2에 나타낸 것과 같이 보작용에 의한 철근 인장력 T_B 와 아치작용에 의한 철근 인장력 T_A 두 성분으로 구분하였다. 실험을 통하여 아치작용에 의한 철근 인장력은 단면에 균열이 발생되어 안정된 이후부터는 보작용에 의한 철근 인장력의 일정값을 나타냄을 보이고, 각 단면에서의 실제 내부모멘트 팔길이 $j_{(x)}$ 를 유도하여 실험상수 r 와 $j_{(x)}$ 를 다음과 같은 식으로 구하였다.

$$j_{(x)} = \frac{1}{1+r} j_0 \quad (1)$$

그리고, 철근콘크리트 단순보의 전단경간에서 내부 모멘트 팔길이 변화를 그림 2(b)와 같이 아치형태로 가정하여 다음과 같은 지수함수 형태의 아치모델을 제안하였다.¹⁾

$$j_{(x)}d = \left(\frac{x}{a}\right)^\alpha j_0 d \quad (2)$$

여기서, $j_{(x)}d$ 와 j_0d 는 각각 지점에서 x 만큼 떨어진 단면의 실제 내부모멘트 팔길이와 선형탄성이론으로 계산된 값이며, a 는 전단경간, d 는 유효깊이이며, α 는 내력상태계수이다. 내력상태계수 α 는 그림 3(a) 나타낸 바와 같이 0과 1.0사이의 값을 갖는데, 아치현상의 정도를 나타내 주는 상태지수의 역할을 하고 있다. 만약 $\alpha=0$ 이면 전체 경간에서 $j_{(x)} = j_0$ 가 되는데, 이것은 선형 탄성 보 이론을 적용한 결과와 같으며, 이 때의 철근 인장력 분포는 비 균열단면과 균열 단면으로 구분하여 해석하기 때문에 그림 3(b)에 표시한 것과 같이 비균열 구역과 균열 구역 사이가 불연속으로 나타나며, 현재 사용하는 대부분의 설계기

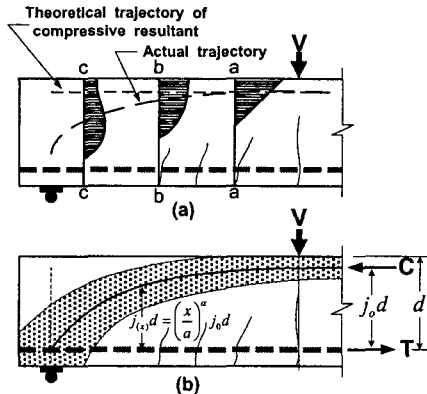


그림 1 휨균열이 발생한 철근콘크리트 보의 내력분포
(a) 압축응력 실제 분포와 압축 합력점의 궤적,
(b) 아치 모델 (Kim et al, 1998)

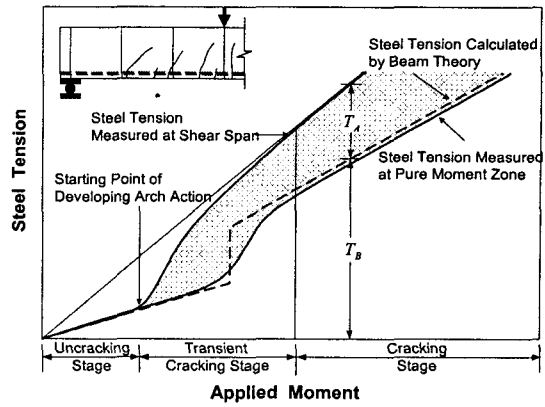


그림 2 보작용과 아치작용에 의한 주철근 인장력 (Kim et al., 1998)

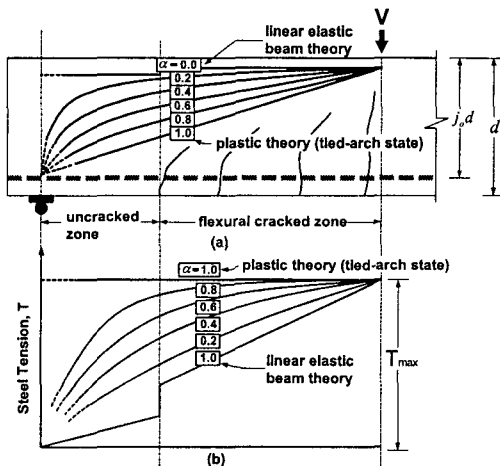


그림 3 철근 인장력에 따른 내력상태계수의 변화

준에서 채택하고있는 해석과 설계방법에 해당한다. 반면에 $\alpha=1.0$ 인 경우는 내력이 하중점에서 지점을 직선으로 연결한 경사 압축대(diagonal strut)를 통해 전달되는 상태를 의미하는데, 경간이 짧은 보에서 주철근의 부착이 모두 손실되고 단부만 정착되어 완전 타이드-아치 거동을 하는 소성상태에 해당하며, 이때의 철근 인장력 분포는 전 경간에서 일정한 값을 갖는다(그림 3(b)). 실제 철근콘크리트 보의 거동은 경간길이, 단면형상, 휨균열 정도 등에 따라 위 두 경우(탄성상태와 소성상태)의 중간 상태에 해당한다. Kim et al.(1998)은 실험에서 측정된 철근 인장력 값을 이용하여 전단 보강 철근이 없는 직사각형 단면 보의 최종 하중 단계에서 내력상태계수 α 값을 산정할 수 있는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\alpha = (d/a)^{0.6} \rho^{-0.1} \quad (3)$$

여기서, a/d 는 전단경간-유효깊이의 비이고, ρ 는 주철근 비이다.

3. 기존 트러스 모델과 내력상태계수를 이용한 트러스 모델

3.1 트러스 모델과 파괴기준

트러스 모델은 초기 설계자들이 구조물의 거동을 쉽게 이해하고 전단철근의 배치위치 등을 파악하기 위해 고안되었다. Ritter 와 Morsch는 전단과 휨을 받는 철근콘크리트보의 거동을 압축을 받는 스트럿과 인장을 받는 타이, 그리고 부재들을 연결하는 절점으로 표현한 트러스와 유사하다고 하였다. 철근콘크리트 보에 균열이 발생하면, 균열과 균열사이의 콘크리트는 압축력을 전달하는 스트럿이 되고 철근은 인장력을 받는 타이가 된다고 하였다. 이후 여러 연구자들이 초기 트러스 모델을 이용한 다양한 트러스 모델을 제안했는데 아치현상을 고려한 여러 연구자들이 제안한 트러스 모델들을 그림 4에 요약 정리하였다. 전단 경간이 긴 보에서는 복부내의 압축응력의 궤적을 경사하게 만들고, 수직 성분

여러 형태의 모델을 제시하였다. 그림 5는 앞서 설명한 내력상태계수와 전단경간의 변화에 따른 표현 가능한 트러스 모델을 나타낸다. 본 연구에서는 압축 스트럿의 각 및 모델링 위치를 철근콘크리트 보의 아치현상의 정도를 나타내 주는 내력상태계수 α 에 따라 결정하였다. 따라서 압축 스트럿은 아치작용 정도에 따라 위치 및 각이 변화하게 된다. 압축 스트럿의 위치는 그림 6과 같이 내력상태계수 α 를 이용하여 압축응력 궤적을 따라 연속적으로 결정되므로 기존의 트러스 모델처럼 B또는 D영역의 구분 없이 모델링이 가능하며, 기존의 트러스 모델이 갖는 많은 가정들로부터 비교적 자유롭다. 또한, 실제 내부 모멘트 팔길이를 사용하므로, 주인장철근의 인장력을 보다 정확히 계산할 수 있다. 제안한 트러스 모델의 파괴기준은 전단보강철근이 없는 보에 대해 콘크리트 인장타이가 파단되는것을 기준으로 하였으며, 이때 콘크리트 타이의 제원 및 파괴기준은 Al-Nahlawi et al 이 제안했던 방법과 동일하게 적용하였으며, 보통강도 콘크리트에 대해서 적용한 a/d 에 따른 트러스 형태와 모델링 방법을 다음 그림 6과 표 1에 나타내었다.

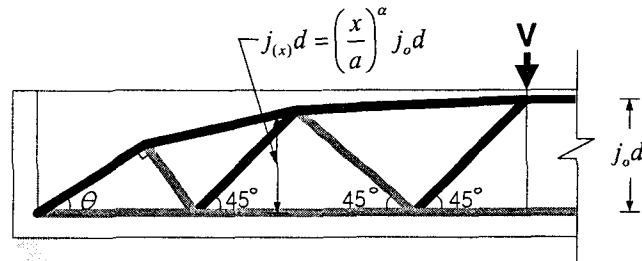


그림 6 내력상태계수를 이용한 트러스 모델 ($a/d=4$)

표 1 α -TRUSS MODELING PROCESS

	$a/d = 2\sim 3$	$a/d = 4\sim 5$
Truss Model using internal force state factor (α)		
Determine Joint ① ($b, 0$)	$j_0 d = d - a/2 (=0.875d), b = a - j_0 d$	$j_0 d = d - a/2 (=0.875d), b = a - j_0 d$
Determine Joint ② (x_1, y_1)	$x_1 : x_1 + j_0 d^2 (1/a)^{\alpha} x_1^{(2-\alpha)} - c = 0$ $y_1 = j_0 d (x_2/a)^{\alpha}$	$x_1 : j_0 d (x_1/a)^{\alpha} = (b - x_1), y_1 = j_0 d (x_1/a)^{\alpha}$
Determine Joint ③ ($c, 0$)	.	$c = x_1 - j_0 d$
Determine Joint ④ (x_2, y_2)	.	$x_2 : x_2 + j_0 d^2 (1/a)^{\alpha} x_1^{(2-\alpha)} - c = 0$ $y_2 = j_0 d (x_2/a)^{\alpha}$
Determine 전단강도 V_u	$F_t = h t \cos \theta \cdot b \cdot 4 \sqrt{f_c}$	$V_u = \frac{F_t}{\beta} \cdot 2$

단, β 는 트러스에 단위하중을 제하했을 경우 콘크리트 인장타이 부재력

3.3 전단강도 평가

표 2 Compare of Predicted Failure Load Applying Truss and α -Truss Model

시험체	a/d	f_c (psi)	ρ %	Measured	35-Truss	α -Truss		Error(%)	
				P_u (kips)	P_{cat} (kips)	α	P_{cat} (kips)	35-Truss	α -Truss
f7	4	3000	0.6	15	15	0.23	16	0	-7
f11	4	3000	1.2	20	15	0.28	18	-25	+11
f12	4	3000	2.5	24	15	0.38	23	-37	+4
f8	4	5800	1.0	20	21	0.24	20	+5	0
f13	4	5800	1.2	20	21	0.28	24	+5	-16
f14	4	5800	2.5	29	21	0.36	28	-28	+4
								17	7

표 2에서 기존 트러스 모델에 의한 계산값은 Al-Nahlawi et al 가 제안한 트러스 모델을 이용하여 계산값이며, 측정값은 Elzanty의 실험값이다.

4. 결론

본 연구는 균열이 발생한 철근콘크리트보의 아치현상의 정도를 나타내 주는 내력상태계수(internal state factor) α 를 이용하여 전단보강이 없는 철근콘크리트보에 적용할 수 있는 트러스 모델을 제안하였다.

- (1) 아치작용에 의한 내부 모멘트 팔길이 감소현상을 반영할 수 있는 내력상태계수를 이용하여 압축계적을 따라 상현재를 배치하고 트러스 모델링 후 해석한 결과, 실제거동과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.
- (2) 표 2에서 보인바와 같이 보통강도 콘크리트에서 Al-Nahlawi et al 이 제안한 트러스 모델과 내력상태계수를 이용한 트러스 모델을 이용, 전단강도 평가를 수행해 본 결과 내력상태계수를 이용한 트러스 모델이 실험값을 잘 예측하는 것을 알 수 있다.
- (3) 향후에는 보의 재원에 따른 내력상태계수에 대한 명확한 정의가 필요하며, 이에 대한 콘크리트 강도, 전단보강철근이 있는 경우에 대한 트러스 형태 변화 등 후속연구가 필요하겠다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 R01-1999-00312)지원으로 수행된 결과의 일부이며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Kim,DJ., Kim, W., and White, R. N., "Prediction of Reinforcement Tension Produced by Arch Action in RC Beams" *ASCE Journal of Structural Engineering*, V.124 No. 6, Jun. 1988 pp. 611 - 622.
2. Khaled A. Al-Nahlawi and James K. Wight "Beam Analysis Using Concrete Tensile Strength in Truss Models" *ACI Structural Journal* V. 89, No. 3, May-June 1992, pp. 284-289.