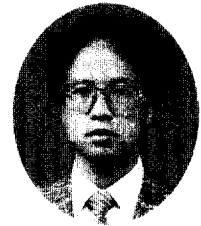


철근 콘크리트 구조물의 설계와 해석을 위한 트러스모델

철근 콘크리트 구조물에 대한 트러스 모델 적용의 허와 실

Truth and Fallacy of Truss Models



강원호*

1. 머리말

철근 콘크리트 부재의 트러스 모델은 좁은 의미에서는 주로 보부재의 전단 구간의 해석 모델을 지칭하는 것이나, 넓은 의미에서는 2차원 이상의 부재를 1차원 부재인 뼈대 부재로 모델링 하는 것을 말한다.

이중에는 요즘 자주 논의되는 스트럿-타이 모델 뿐만 아니라, 소성이론의 일부도 포함된다. 트러스 모델은 좀 더 넓은 범주로 사용 되는 역학적 모델 (Mechanical Model)의 일부로, 철근 콘크리트 부재의 해석과 설계를 위해서 우리가 사용하는 다른 도구들, 예를 들어서 실험적 방법, 비선형 유한 요소등의 수치해석적인 방법과 더불어 이전부터 꾸준히 발전 했던 방법이다.

트러스 모델은 다른 두가지의 유력한 해석 도구와 마찬가지로 전능하지도, 무능하지도 않다. 이 방법은 잘 쓰기만 하면 생각보다 유용한 결과를 얻을수 있다.

이 글은 트러스 모델이 어떻게 발전해 왔는지를 소개하여 트러스 모델에 대한 근거없는 기대는 지양하되 이 방법이 가지는 장점을 취하고자 한다.

2. 전단 트러스 모델의 발전

2.1 고전 트러스 이론

철근 콘크리트 부재의 해석에 있어서 트러스 모델은 개념상의 중요한 발전으로 평가할 수 있다. 부재의 해석에 있어서 트러스 모델 이전에 우리가 취한 방법은 단면법으로, 일반적으로는 부재축에 수직인 단면의 응력 또는 강도를 구하였다. 이는 휨 부재의 경우 뿐만 아니라 전단 부재의 해석에 있어서도 마찬가지로, Mörsch는 휨 균열이 발생한 단면의 전단 응력을 탄성이론에 의해 구하고, 중립축 이하의 전단응력이 일정한 값을 가짐을 보였다.

철근 콘크리트 보 부재를 1차원의 선 부재가 아니

* 정회원, 동아대학교 공과대학 토목공학과 부교수

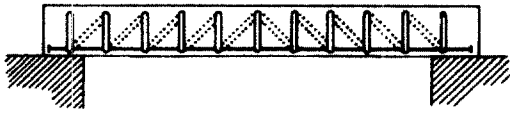


그림 1 Ritter의 트러스 모델

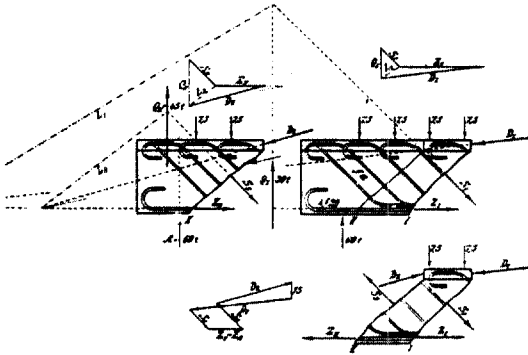


그림 2 Morsch의 트러스 부재력 계산

라 2차원의 평면 부재로 인식하고, 전단 구간에 거의 일정한 간격의 경사 균열이 발생하는 것을, 마치 여러개의 선부재가 모여서 힘을 분담하는 것 처럼 생각한 사람은 Ritter였다. (그림1) 우수한 기술사이기도 했던 Ritter의 직관은 당대의 탁월한 학자인 Mörsch에 의해 체계화 됨으로써 트러스 모델이 탄생하였다.²⁾ Mörsch는 트러스 모델의 중요한 가정들을 확립하는데, 이를테면 트러스 모델을 장역학적인 정장구조로 가정하며, 콘크리트의 인장강도는 인정하지 않고, 균열 단면에서 전단 철근의 함력이 중립축에 작용한다는 것이다. Mörsch는 도해법으로 트러스의 각 부재력을 구하여 전단철근의 설계가 가능함을 보였다. (그림2)

2.2 수정 트러스 이론

트러스 모델은 철근콘크리트 전단 부재의 실험이 집중되었던 1960년대에 비판적으로 검증되는데, Leonhardt, Kani와 Illinois대학의 실험 결과는 트러스 모델이 사실을 지나치게 단순화 하였다는 것을 보여 주었다. 즉 고전적 트러스 모델에 의해 구한 전단 철근의 응력은 실험 결과와 상당한 차이를 보인다. 예를 들어서 그림3은 철근 콘크리트 T형 부재를 전단 실험한 것인데, 실험 부재에는 거의 평행한 경사 균열이 전단 구간의 복부에 많이 발생하고, 전단

구간의 주철근의 응력이 휨이론에 의해 계산한 값보다 크게 나타나는 등 고전 트러스 이론에서 예측한 것과 같은 거동을 보인다. 그러나 전단 철근의 응력은 고전 트러스 이론에서 계산한 값보다 훨씬 작은 값을 보인다.³⁾ (그림3)

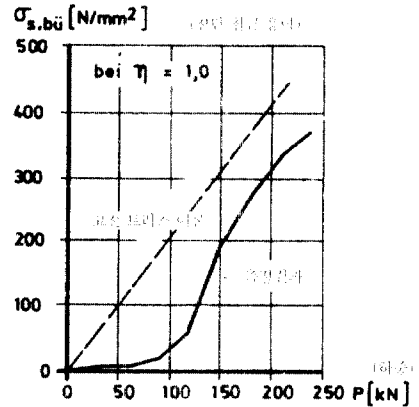


그림 3 철근 콘크리트 T형 부재의 전단 전단 철근의 응력 (실험결과와 고전 Truss 이론의 계산결과와의 비교)

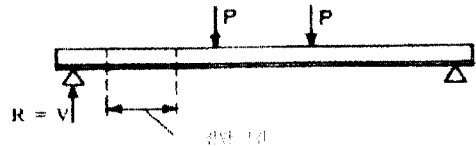
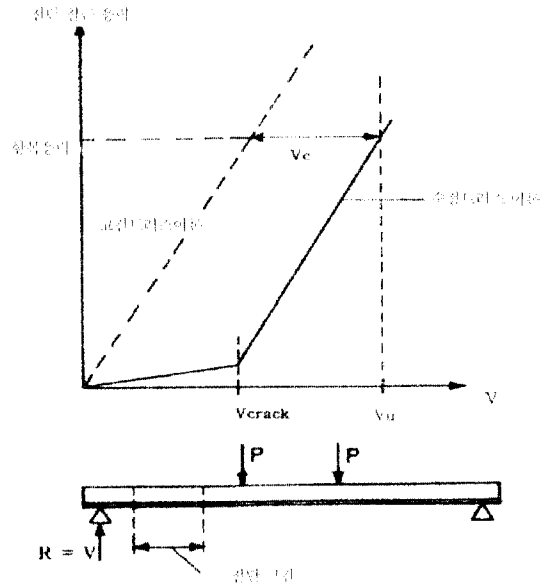


그림 4 수정 Truss이론

이러한 불일치는 전단 설계에 있어서 '콘크리트가 부담하는 전단력'이란 항목을 고려하게 하는 주요한 원인이다. 즉 실험 결과를 보장하기 위한 '수정트러스' 이론이 제안되었다. 이는 그림 4와 같이 전단력의 일

부는 트러스 모델이 부담하며, 또다른 일부는 '그 외의 무엇'이 부담 한다는 것이다. 많은 학자들은 실험치와 트러스 모델의 계산치의 차이를 균열이 발생하지 않은 콘크리트의 전단력 부담 골재의 맞물림, 철근의 상부작용에 기인하는 것으로 간주하였다. 이어서 Taylor같은 학자들은 이들의 영향 정도를 정량적으로 밝히기 위해서 노력하였으나, 결국에는 콘크리트가 부담하는 전단력을 전단철근이 배근되지 않은 부재의 실험으로부터 구하고, 이를 트러스 모델이 부담하는 전단력에 더하는 방법이 겹침의 정리에 익숙한 학자들에 의해 선택되었다. 이 방법은 실험 결과와의 타협일 뿐 올바른 역학적 모델이라 할 수 없다. 즉 전단철근이 배근되지 않은 보의 전단 파괴 거동은 전단 철근으로 보강된 보의 전단파괴 거동과 같지 않다. 겹침의 정리가 성립한다는 타당한 근거는 없으나, 실험 결과는 '수정 트러스' 이론을 지지하는 것처럼 보였다.

2.3 빗구조 해석 모델

수정 트러스 이론에 반대하여, 좀 더 합리적인 모델로 이 문제를 해결하려 시도하는 사람들이 나타났다. 부재의 전단지간과 플랜지/복부폭 비에 따라서 트러스의 형태가 바뀐다고 생각한 이들(Kani의 아

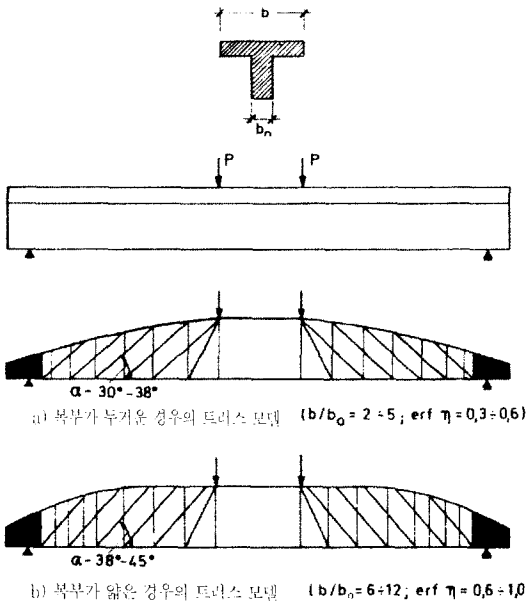


그림 5 Leonhardt의 트러스 모델

치 모델, Leonhardt의 수정트러스 모델 (그림5)은 부재의 거동을 이해하기 위한 개념적 모델로서 트러스 모델을 수정하였으나, 전자 계산기의 발전에 따라서 부정정 뼈대 구조 해석이 자유롭게 되자, 문명의 이기를 이용하여 직접구조 계산을 시행하려는 이들도 있었다.

Jungwirth는 Rüsch의 모델을 (그림6) 프레임 요소로 이상화하여 휨강성을 갖는 뼈대 구조 모델에 대하여 구조해석하였다.⁶⁾ '빗구조' 모델이라 부르는 이 해석 모델은 Moosecker, Mallée등에 의해 계속하여 연구되었다. '빗구조' 모델은 트러스 모델로부터 시작 하였으나, 휨강성을 고려하고, 부정정 구조 해석을 행함으로써 트러스 모델이 갖던 장점을 잃게 된다. 즉 수치 해석의 문제가 됨으로써 트러스 모델이 갖던 장점인 설계를 위한 정식화가 불가능 하게 된다. 유한요소법의 발전이후 이 방법이 더 이상 연구되지 않는 것은 여러 가지를 시사한다. 즉, 수치 해석의 문제에 역학적 모델이 장점을 가지기는 힘들다. 역학적 모델은 2차원 부재를 1차원 부재로 모델링 하거나, 3차원 부재를 2차원 부재로 모델링 하는 등 실제 부재 거동을 이해 가능한 단순한 구조 거동으로 이상화 하는 것이다. 이로서 얻을 수 있는 이점은 부재 거동에 대한 이해가 깊어지고, 단순화된 부재 해석으로 전단력과 전단 철근 응력사이의 대수식을 유도할 수 있는 것이다.

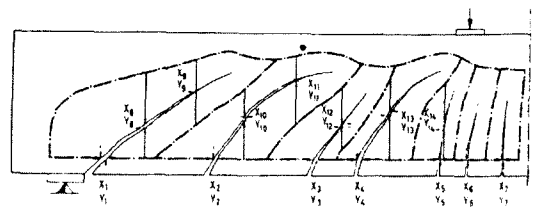


그림 6 Rüsch의 '빗구조' 모델

트러스 모델의 단순성을 잃지 않도록 실제 부재 거동을 합리적으로 반영하려는 노력은 다른 측면에서도 시도 되었다. Kupfer는 에너지 방법으로 트러스 모델의 기하학적인 형태를 개선하려 하였으며, 사압축대와 스테리움 사이의 변형 적합 조건을 고려 하였다.⁷⁾

2.4 압축장 이론

그러나 평형조건에 의해서만 정해지는 고전 트러스 이론을 복부의 적합 조건식을 고려하여 근본적인 수정을 가한 것은 Collins와 Mitchell의 압축장 이론 (Compression Field Theory)이다.⁸⁾ 압축장 이론은 박판 복부의 후좌굴 전단 강도를 구하기 위한 Wagner의 인장대 이론(Tension Field Theory)로부터 착안된 모델이다. 균열이 발생한 후 콘크리트는 인장력을 부담할 수 없으며 전단력은 사압축장에 의해 부담된다는 가정으로 평면내의 변형사이에서 다음과 같은 관계식을 유도 하였다.(그림 7)

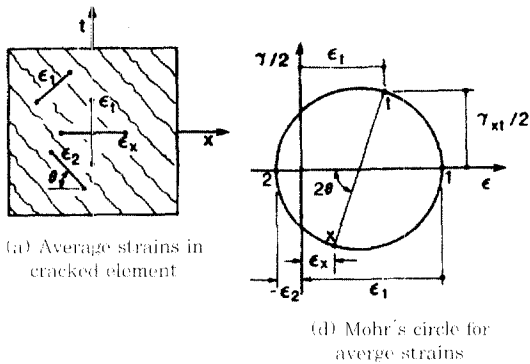


그림 7 Compression Field Theory의 변형관계

$$\tan^2 \theta = \frac{\epsilon_y - \epsilon_x}{\epsilon_t - \epsilon_z}$$

여기서 ϵ_x = 복부의 부재축 방향 변형

ϵ_t = 횡방향 변형

ϵ_z = 주압축 응력

압축장 이론은 트러스 모델의 구성에 있어서 중요한 두가지 발전을 가져왔다. 그 첫째는 정역학적 평형 뿐만 아니라 적합 조건식이 고려 되어 트러스 모델의 기하학적 형태를 결정 하였다. 즉 사압축장(트러스 모델에서의 사압축재)의 경사는 Mörsh가 45°로 가정 한 이후 계속하여 시뒀 거리가 되어 왔으나 압축장 이론에서 적합 조건식에 의해 비로소 선명 하게 정의 되었다. 둘째는 철근과 콘크리트의 비선형 적인 재료 성질을 고려한 것이다.

압축장 이론은 실제 측정 결과에 비하여 받을 수 있는 전단력을 과소 평가하게 되어 제안자들 스스로

에 의하여 수정된다.¹⁰⁾ 수정 압축장 이론은 전단 균열 발생 이후에도 전단 균열에 수직한 방향의 인장 응력이 존재함을 고려하였다.¹¹⁾ 즉 그림8과 같이 균열 사이의 콘크리트는 tension stiffening 효과에 의하여 인장의 일부를 부담하여 변형에 영향을 미치게 된다. 수정 압축장 이론은 실험 결과로부터 균열발생 이후의 콘크리트 응력을 다음과 같은 식으로 구하였다.

$$f_1 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 f_{cr}}{1 + \sqrt{500 \epsilon_1}}$$

여기서 f_1 은 균열에 수직한 방향의 인장응력

f_{cr} 은 콘크리트 인장강도

ϵ_1 은 균열에 수직한 방향의 변형

α_1, α_2 는 철근의 부차 특성과 하중의 종류에 따른 보정계수이다.

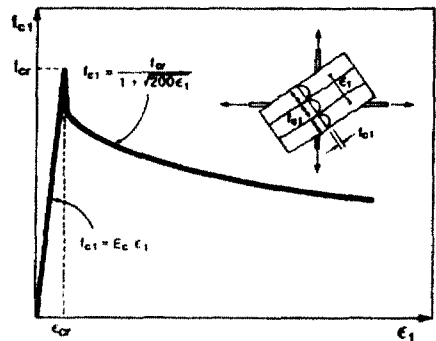


그림 8 Modified Compression Field theory의 인장응력-변형관계

이 매력적인 방법은 이제까지 철근 콘크리트 부재의 설계에 있어서 의도적으로 무시했던 콘크리트의 인장 강도를 고려하였다. 콘크리트의 인장강도는 그 값이 작은 뿐만 아니라, 건조 수축등에 의하여 하중을 받기전에 상실될지 모르는 불확실한 값으로 설계에 있어서 무시하였다. 그러나, 콘크리트의 인장 강도가 0이면 철근 콘크리트 부재의 거동을 제대로 설명할 수 없는 경우가 있으며, 심지어는 이를 인정하지 않으면 설계가 불가능한 경우도 있다. 다른 측면에서 압축장 이론의 기여 중의 하나는 사압축장의 콘크리트 압축 강도를 균열에 수직한 방향의 주인장 변형에 따라서 다른 값으로 고려하는 것이다.

즉 균열이 발생한 사압축장의 압축 강도를 다음과 같이 구하였다.

$$\frac{f_{2\max}}{f_c} = \frac{1}{0.8 + 170\varepsilon_1} \leq 1.0$$

여기서 $f_{2\max}$ 는 사압축장의 압축강도

f_c 는 1축 압축강도

ε_1 은 균열에 수직한 방향의 인장 변형

2.5 그외의 트러스 모델

다른 한편에서 트러스 모델을 개선하려 노력한 사람들 중에는 Thürlimann, Marti 등의 학자가 있다. 이들은 Nielsen과 Braestrup등이 제안한 소성구조 모델을¹⁰⁾ 철근 콘크리트 트러스의 극한 상태 모델로 적용하였다.¹¹⁾ 소성구조모델은 역학적으로 완전하며 실제 부재의 거동을 잘 대변한다. 소성모델에서 제시하는 1축응력장의 개념은 실제로 복부가 얇은 1형부재 또는 상자형 부재에서는 매우 잘 관찰된다. Thürlimann 은 콘크리트 사압축장의 경사각이 고전적트러스 이론과 다름을 보이고, 이러한 모델을 변각트러스 이론이라 하였다. Marti가 밝힌 바와 같이 변각트러스 이론은 압축장이론(Compression Field Theory)와 근본적으로 같다. 소성모델의 약점은 소성파괴 메카니즘에서 고려하지 않은 2차효과에 있다. 2차효과는 트러스 각 부재의 휨 강성 효과, 균열사이의 골재맞물림 효과, 장부 작용등이 있다. 일단의 유럽학자들은 골재 맞물림 효과를 고려하지 않는 트러스 이론과 이를 고려하는 트러스 이론으로 트러스 모

델을 구분한다.(표1.) 골재 맞물림은 Warlaven이 이를 정량적으로 규명하기 이전에는 고려하기 힘들었다. Warlaven은 실험결과를 바탕으로 골재 맞물림시의 균열간격, 균열 미끄러짐(slip)과 균열을 가로질러 전달되는 전단력과 인장력사이의 구성방정식이 제안하였다.¹²⁾ Kupfer, Kirmair, Reineck등의 독일 학자들과, Gambarova등의 이탈리아 학자들은 그들의 모델을 균열마찰을 고려한 트러스모델로 구분해 주기를 원한다. 균열사이의 골재 맞물림(또는 마찰)을 고려하면 이제껏 트러스 모델에서 당연시되던 분산 트러스 모델(smearred truss model)을 사용하는 것이 불가능하게 된다. 왜냐하면 균열폭과 미끄러짐은 응력과 비선형 관계를 가지므로 해당구간내에 단위길 이당의 균열폭은 성립할 수 없기 때문이다. 따라서 실제의 균열상태를 있는 그대로 모델에 반영할 필요가 있는데, 이는 변형적합조건식을 포기해야 하는 것이다. Gambarova는 균열 변형과 응력사이의 관계식을 단순화하여 이론제를 해결하였으나,¹³⁾ Reineck는 트러스 모델의 변형을 해석적으로 구하고 실제의 균열 변형에 대한 구성 방정식을 사용하였다.¹⁴⁾

3. 스트럿-타이 모델

3.1 스트럿-타이 모델의 발전

스트럿-타이 모델은 트러스 모델을 일반적인 평면 구조에 대하여 적용한 것이다. 스트럿-타이 모델의 독일어 이름은 Stabwerkmodell인데 직역하면 뼈대 구조모델이다. 즉 스트럿-타이 모델의 기본적인 생각은 2차원적인 문제를 1차원 선부재로 이상화 하는데 있다. 벽체등의 평면요소의 실험에서 극한상태의 부재에는 일정한 방향의 나란한 균열들이 형성되고 이들을 1축응력상태의 부재요소로 가정할 때 평형조건에 의하여 각 요소에 작용하는 힘을 구하는 것은 어려운 일이 아니다. Nielsen, Braestrup, Thürliman, Marti등의 소성모델을 연구한 학자들이 스트럿-타이로 구성된 모델로 극한상태 거동을 설명한 것은 놀라운 일이 아니다. 뿐만아니라 유럽의 많은 설계기술자들이 스트럿-타이 모델의 개념으로 철근베근상세를 결정해온 것은 시방서 규정이 해결할 수 없는 틈새를 훌륭하게 메운 것이었다. 그러나, 이를 정리하고 공식적인 설계방법으로 지위를 높인 것은 Schlaich등의

표 1 Smearred Truss모델과 균열 고려한 Truss모델의비교

	Smearred truss model, compression field theory	Truss model with crack friction	
Analytical procedure	Kinematic condition		- friction law - cracks: $\beta_r, \Delta s_r$
	$\tan^2 \theta = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$	crack opening $W \perp \theta$	
slip Δs θ of σ_2 φ_2 of ε_2 ε_{cr} strut	$\Delta s = 0$ $\theta = \beta_r$ $\varphi_2 = 0$ $\varepsilon_{cr} = \varepsilon_2$	$\Delta s \neq 0$ $\theta < \beta_r$ $\varphi_2 \neq 0$ $\varepsilon_{cr} \neq \varepsilon_2$	slip considered - crack incl.
Strength criteria	empirical effect, strength $f_{cr} = \nu f_c$ (“softening of concrete”)		- solid concrete: $f_{cr} = 0.85f_c$ to $0.80f_c$ - friction often limits shear capacity
Authors	Morsh, Thürliman Baumann-Potucek Collins/Mitchell/Vecchio Hst.	Hardjiasaputra	Kupfer, Kirmair, Mang Bulicek, Gambarova, dei Poli, Karakoc Reineck

학자들의 공이다. 1983년에 Schlaich와 Weischede는 CEB Bulletin에서 배근상세를 위한 방법으로 스트럿-타이 모델을 제안하였다.⁵⁹⁾ 이후에 Schlaich가 이끈 Stuttgart대학에서 Schäfer, Jennewein 등에 의해 다양한 경우에 대한 스트럿-타이 모델이 제안되고 정리 되었다.⁶⁰⁾ 이후 유럽시방서에서 스트럿-타이 모델이 설계방법으로 정착되고, 스트럿-타이 모델을 개선하기 위한 많은 연구자들의 노력으로 이 방법은 일반에게도 널리 알려지게 되었다. 1995년에는 미국의 도로교 시방서에 스트럿-타이 모델에 의한 설계방법이 포함되고, 이를 바탕으로한 1996년의 한국 도로교 표준시방서(부록)에도 포함되어 있으므로 이제 설계 실무자들도 스트럿-타이 모델을 이용하여 배근상세를 결정할 수 있게 되었다.

3.2 스트럿-타이 모델에 대한 반론

한편으로는 스트럿-타이 모델에 대한 반론도 만만찮은데 다음과 같은 것들이 대표적인 것이다.

- 스트럿-타이 모델의 기하학적인 구성은 정식화 되어 있지 않다. 기술자들이 주어진 경우에 대하여 어떻게 스트럿-타이 구조를 구성해야 하는가는 전적으로 기술자의 손에 달려있다. 이렇게 자의적인 설계방법은 잘못 쓰일 위험이 있다.
- 부재 실험결과와 비교할 때, 실험적인 방법과 비선형 유한요소해석등의 정밀한 해석 방법에 비하여 스트럿-타이 모델의 정도(精度)는 낮은 편이다.
- 탄성해석에 의하여 스트럿-타이 구조의 기하학적 형태를 정하는 것은 이론적으로는 이치에 맞지 않다.
- 스트럿-타이 모델의 요소강도, 절점의 모델링 및 강도평가등은 실재부재의 거동과 비교할 때 허구인 것처럼 보인다.

이론적인 성과를 기대한 많은 학자들은 스트럿-타이 모델을 일시적인 유행으로 간주하고, 이를 이미 절지단 상품으로 간주하기도 한다. 그러나 이 방법을 많은 실무기술자들이 사용하여 왔고, 많은 시방서에서 채택하고 있다는 것은 이러한 반론을 재고할 충분한 이유가 된다. 이 문제에 대하여 설계와 해석의 분명한 차이를 인식할 필요가 있다. 무수한 반복계산을 전제

로 하는 설계기술자들은 주어진 강도에 대한 변수들이 대수식으로 정식화 되기를 바란다. 또는 최소한 각 변수의 영향이 예측가능하기를 바란다.

비선형유한요소해석은 아무리 뛰어난 정도를 갖는다 해도, 주어진 수치 입력 결과에 대해 하나의 답을 줄 뿐이다. 예를 들어서 어떤 부분에 철근을 더 많이 배근하거나, 부재 단면을 줄이면 어떤 결과를 주는지는 바뀌진 조건에 대하여 다시 한번 해석할 수밖에 없다. 매개 변수 연구로 이러한 단점을 다소간 극복할 수 있으나, 근본적인 해결방법은 아니다. 실험은 주어진 조건에 대해서만 확실한 결과를 제공한다. 콘크리트 구조물과 같이 크기효과(Size effect)를 고려해야 하는 실험의 경우 결과의 효용성은 제한적일 수밖에 없다. 스트럿-타이 모델은 소성이론에 근거를 두고 있다. 평형조건만을 고려할 경우 그 해는 하한해(Lower bound solution)이다. 해석의 정도를 보장할 수 없으나, 안전측의 결과를 주는 것은 보장할 수 있다. 소성이론에서 파괴기구(Failure Mechanism)은 실제 부재의 기동을 염두에 두지 않으면, 자의적으로 가정된 것 처럼 보인다. 여러개의 파괴기구가 있다고 해서 소성이론의 타당성이 문제가 되는 것은 아니다. 좀더 큰 값을 주는 파괴기구가 사실에 더 가까울 뿐이다.

일반 기술자에게 아무런 힌트도 없이 스트럿-타이 모델을 구성하도록 하는 것은 맨몸의 병사를 전선에 투입하는 것과 같다. Schlaich등은 탄성해석을 근거로 하여 스트럿-타이 모델을 구성한 결과들을 체계적으로 정리하였는데 실무의 기술자들에게는 큰 도움이 된다. 실제로 파괴 상태의 Failure Mechanism은 이와 크게 다르지 않다.

스트럿-타이 모델의 요소강도, 절점의 모델링등은 평면 부재를 1차원 부재로 단순화 한데 따른 한계를 내포하고 있다. 실제로 이 값들은 경험적으로 정해지고 있다.

4. 결론

트러스 모델은 전단 트러스 모델에서부터 출발하여 스트럿-타이 모델에 이르기까지 점차로 그 영역을 넓혀 왔다.

그 거동에 대해 이해가 어려운 평면 부재를 익히 잘 알고 있는 1차원 부재로 대체하는 것은 많은 기술

자들에게 매력적인 일일 것이다.

스트럿-타이 모델에 대한 비난의 일부는 해석 모델과 설계 모델의 차이를 구분하지 않은데서 비롯된 점이 있다. 이 글에서 전단트러스 모델의 역사를 장황하게 반추한 이유는 스트럿-타이 모델을 어떻게 개선해야 할 것인지를 역사로부터 배우기 위해서이다. 전단트러스 모델은 고전트러스 모델부터 출발하는데 이는 스트럿-타이 모델의 일부이다. 구조역학의 역사를 돌이켜 보면 matrix 구조 해석 방법이 나오기 전에 교묘하게 부정적 구조를 해석하는 방법들은 전자 계산기가 발전함에 따라서 자리를 잃었다. 전단 트러스 모델에서도 빗구조해석과 같은 방법은 오늘날 논의조차 되지 않는다.

해석 모델로서 스트럿-타이 모델은 그 발전 전망이 밝지않다. 수치해석적인 방법(비선형 유한 요소법등)의 최근의 연구 결과는 눈부신 것으로 스트럿-타이 모델과 같은 단순하게 이상화된 모델로서 이들과 경쟁하는 것은 무리인 것으로 생각된다. 2차원 문제에 있어서는 정교한 2차원 해석이 가장 좋은 결과를 줄 것이다. 그러나 Schlaich가 일찌감치 지적한 대로 스트럿-타이 모델은 유한 요소법의 보완책이 될 수 있다.

스트럿-타이 모델을 개선하기 위하여 복잡한 변형 조건을 고려하거나 비선형 해석등을 추가하여 해석의 정도를 높일 수는 있으나, 설계 도구로서의 장점을 상실하게 된다. 그러나 2차원 응력 상태의 합리적인 강도 평가, 균열의 골재 맞물림 효과 고려등은 적절하게 고려된다면 이 방법의 정도(精度)를 만족할수 있는 수준으로 높일수 있음을 전단트러스 이론의 발전으로부터 짐작 할수 있다.

스트럿-타이 모델의 무엇보다 큰 장점은 부재의 극한 거동에 관한 유용한 통찰을 준다는 것이다. 스트럿-타이 모델은 설계에서 주의 깊게 사용한다면 현재의 제한적인 시방서 규정을 보완 할 수 있다. 그러나 성능이 좋은 도구는 쓰는 이의 능력에 따라 좋은 도구가 되기도 하고 형편없는 도구가 되기도 한다. 기계적인 시방서 규정의 적용만을 능사로 생각하는 기술자들에게는 스트럿-타이 모델을 이해할 수 없는 방법이다. 구조물의 거동에 대한 깊은 이해를 바탕으로 하여 스트럿-타이 모델을 사용하는 사람에게는 이 방법을 기대보다 큰 만족을 준다.

참고 문헌

1. Ritter, W., 'Die Bauweise Hennebique', Schweizerische Bauzeitung, Bd. XXXIII, Nr. 7, Jan., 1988
2. Mörsch, E., 'Der Eisenbetonb. seine Theorie und Anwendung', Verlag Konrad Witterwer, Stuttgart, 1912
3. Leonhardt, F. und Walther, R., 'Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung', DAFStb. H.151, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin, 1962
4. Taylor, H.P.J., 'The fundamental behavior of reinforced concrete beams in bending and shear', Special Publication SP-42, Vol.1, ACI, Detroit, 1974
5. Rüschi, H., 'über die Grenzen der Anwendbarkeit der Fachwerkanalogie bei der Berechnung der Schubfestigkeit von Stahlbetonbalken', Festschrift F. Campus Amici et Alumni, Université de Liège, 1964
6. Jungwirth, D., 'Elektronische Berechnung des in einem Stahlbetonbalken im gerissenen Zustand auftretenden Kräftezustandes unter besonderer Berücksichtigung des Querkraftbereiches', DAFStb. H.217, Berlin, 1972
7. Kupfer, H., 'Erweiterung der Mörsch'scheren Fachwerkanalogie mit Hilfe des Prinzips von Minimum der Formänderungsarbeit', CEB-Bulletine No. 40, Paris, 1964
8. Collins, M.P., 'Toward a Rational Theory for RC Members in Shear', Proceeding, ASCE, V.104, ST4, Apr. 1978, pp.649-666
9. Vecchio, F.J. and Collins, M.P., 'The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear', ACI Journal, March-April, 1986
10. Nielsen, M.P. and Bracstrup, M.W., 'Concrete Plasticity', Danish Society for Structural Science and Engineering, December 1976 (extract CEB Bulletin 126)
11. Marti, P., 'Zur plastischen Berechnung on Stahlbeton', Institut für Baustatik, ETH Zürich, Oktober 1980

12. Warlaven, J.C., 'Aggregate interlock : a theoretical and experimental analysis', Dr.-Thesis, Delft Univ. Press, 1980, pp1-197
13. Gambarova, P.G., 'On aggregate interlock mechanism in reinforced concrete plates with extensive cracking', IABSE Coll. , Delft 1981, pp.105-134
14. Reineck, K-H., 'Mechanical Model for the behavior of reinforced concrete members in shear', Dr.Thesis, Univ. Stuttgart, Feb. 1990., pp.1-273
15. Schlaich, J. and Weischede, D., 'Ein prktisches Verfahren zum methodischen Bemessen und Konstruieren im Stahlbetonbau', CEB-Bulletin No. 150, CEB, Paris, March 1982
16. Schlaich, J. , Schäfer, K., 'Konstruieren im Stahlbetonbau', Betonkalender 1984, PartII, W.Ernst & Sohn, Berlin-M nchen., pp.787-1005
17. Schlaich, J. , Schäfer, K. and Jennewein, M., 'Toward a consistent design for strurete', PCI-Journal 32, 1987, No.3, pp.75-150 