

비선형 스트럿-타이 모델을 이용한 PSC 구조물의 정착부 설계

Design of Anchorage Zone in Prestressed Concrete Structure
Using Nonlinear Strut-and-Tie Model



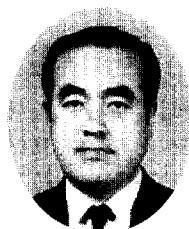
배한욱*

Bae, Han-Ug



송하원**

Song, Ha-Won



변근주***

Byun, Keun-Joo



변윤주****

Byun, Yoon-Joo

ABSTRACT

In this paper, design and analysis of anchorage zone in prestressed concrete structure using nonlinear strut-and-tie model is presented. Anchorage zone of prestressed concrete girder is a critical zone where large concentrated force due to prestressing by tendons is introduced. The design of the anchorage zone has been mainly based on experience and the analysis of the anchorage zone for the design also take lots of times and efforts for the computation .

Nonlinear strut-and-tie model is an analysis and design model which constructs strut and tie based on nonlinear analysis considering the nonlinear behavior of concrete. Based on the nonlinear strut-and-tie model, the design is performed for the anchorage zone having singular concentric tendons, singular eccentric tendons and multiple tendons and ultimate strengths are predicted. For the verification of the analysis results, comparisons are made with experimental results and results by the linear strut-and-tie models. From the comparisons, it is shown that the design of the anchorage zone by the nonlinear model is still economical without losing the degree of safety and the prediction of the ultimate strength by the nonlinear model gives better accuracy than that by the linear one.

Keywords : anchorage zone, prestressed concrete girder, nonlinear strut-and-tie model, analysis and design

- * 정회원, 롯데건설 기술연구소 연구원
- ** 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수
- *** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수
- **** 정회원, 신성 엔지니어링 기술연구소 소장

- 본 논문에 대한 토의를 1999년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 1999년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 건설되고 있는 콘크리트 교량은 교량의 시간이 길어짐에 따라 대부분이 프리스트레스트 콘크리트 교량으로 시공되고 있다. 프리스트레스트 콘크리트 교량의 구성부재중 긴장장치를 사용하여 프리스트레싱 강재에 긴장력을 도입할 때 정착장치의 주위와 하단에 집중하중이 발생하여 응력상태가 교란된 영역을 정착부(anchorage zone)라 한다. 이 정착부에는 구조물의 단면에 비하여 매우 큰 집중하중이 발생하므로 이로 인해 콘크리트에 균열이 발생할 수 있으며, 정착부에 대한 합리적인 설계와 시공이 이루어지지 못하는 경우에는 바로 구조물의 치명적인 파괴로 이어지게 된다.^{(1),(2)} 그러므로 정착부는 프리스트레스트 콘크리트 교량의 설계시에 반드시 검토되어야 하는 영역이다.

프리스트레스트 콘크리트 교량은 기존이론으로 정확한 해석이 가능한 B영역(Beam or Bernoulli region)과 기하학적 또는 역학적 불연속성이 존재하여 해석에 어려움이 있는 D영역(Discontinuity or Disturbance region)으로 나눌 수 있다.⁽³⁾ 정착부는 집중하중의 도입으로 인해 응력상태가 교란되는 D영역에 해당된다. D영역에 대해 유한요소법등에 의한 해석과 이를 근거로한 설계는 최근에 컴퓨터의 발달과 더불어 널리 행해지고 있으나, 철근 콘크리트부재가 갖는 재료의 특성과 비선형성으로 인하여 정확한 해를 구하기가 쉽지 않고 만족할만한 해를 구할 수 있다 하더라도 많은 계산량과 시간이 소요된다. 따라서 B영역과 D영역을 포함하는 구조물에 대하여 간단하면서도 정확도를 갖는 해석방법과 설계개념이 필요한 실정인데, 이 방법으로 제시되고 있는 것이 스트럿-타이 모델이다.⁽⁴⁾

최근 대부분의 콘크리트 및 도로교 표준 시방서는 스트럿-타이 모델을 정착부의 설계에 사용하도록 권장하고 있고, 일부 연구자들이 그 응용방법을 제시하고는 있으나, 모두 선형해석을 기초로 하고 있으므로 실제 구조물의 비선형거동을 반영하지 못하는 단점이 있다. 본 논문은 이러한 선형 스트럿-타이 모델의 단점을 개선한 비선형 스트럿-타이 모델에 관한 연구이다. 이를 위해

먼저 소위 비선형 스트럿-타이 모델⁽⁵⁾을 이용하여 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 정착부의 설계를 수행하였으며, 비선형 스트럿-타이 모델에 의하여 극한하중을 구하여 선형 스트럿-타이 모델에 의한 결과와 비교하였고, 실험결과치와의 비교를 통하여 비선형 스트럿-타이 모델을 검증하였다.

2. 정착부의 설계 및 해석

정착부는 설계상의 편의를 위해 발생하는 응력의 형태에 따라 Fig. 1과 같이 정착판의 폭 a와 정착부의 폭 d의 크기에 관계되게 국소구역(local zone)과 일반구역(general zone)으로 나눌 수 있다.

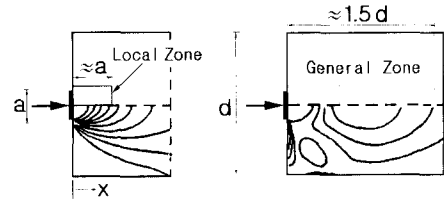


Fig. 1 Local zone and general zone

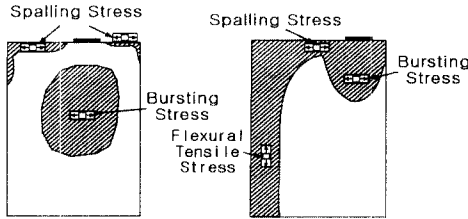
국소구역은 긴장력으로 인한 압축력이 콘크리트에 바로 전달되어 높은 지압응력(bearing stress)이 발생하는 정착구 주변과 하단의 영역에 해당된다. 이 영역에서의 응력의 상태는 매우 복잡하고 비선형적이며 3차원 거동을 한다. 일반적으로 정착부의 국소영역에는 횡방향 구속철근을 사용하여 이 영역에서 발생하는 응력에 대한 보강을 한다. Bergmeister등은 식 (1)과 같이 국소구역에서 발생하는 지압응력에 대한 설계에 사용되도록 극한긴장력 예측식을 제안하였다.⁽⁶⁾

$$F_u = 0.7\sigma_{ck}\sqrt{\frac{A}{A_g}} A_b + k\sigma_y \frac{A_s}{sD} A_{core} \left(1 - \frac{s}{D}\right)^2 \leq 3\sigma_{ck}A_b \quad (1)$$

여기서, σ_{ck} = 콘크리트의 일축압축강도, A = 지지면의 유효면적, A_b = 지압면적(정착판의 면적), k = 유효계수(정착부의 국소구역에 대하여 0.7), A_s = 원형철근 또는 미철근의 단면적, A_g = 정착판

의 전체면적, σ_y =원형철근 또는 띠철근의 항복응력, A_{core} =원형철근 또는 띠철근 내의 구속을 받는 콘크리트의 단면적, s =원형철근 또는 띠철근의 간격, D =원형철근 또는 띠철근의 지름이다.

일반구역은 Fig.2에서 보여주는 것처럼 할렬응력(spalling stress)과 파열응력(bursting stress)이 발생하는 영역에 해당되며 이 영역을 벗어나면 선형적인 응력분포를 가지게 된다.



(a) Load within the kern (b) Load outside the kern
Fig. 2 Tensile stresses in anchorage zones.

할렬응력은 큰 압축응력이 작용하는 정착판 하단의 영역과 응력을 받지 않는 정착판 주위의 영역간의 변형율의 불일치로 인해 발생하는 인장응력으로 정착구가 있는 표면에서 최대값을 갖고 부재의 내부로 들어갈수록 급격히 감소한다. 이 응력의 합은 단면의 중앙에 하나의 정착구가 존재하는 경우에는 파열응력의 합에 비하여 작은 값을 가지므로 실제 실험에서 할렬응력에 의한 부재의 파괴는 거의 발생하지 않는다. 그러나 Fig. 2(b)와 같이 편심 긴장력이 도입되거나 간격이 넓은 두 정착구에 긴장력이 도입되는 경우에는 휨인장응력과 결합하여 균열이 발생하게 되므로 이러한 경우에는 이에 대한 고려가 필요하다. Guyon은 휨인장력과 결합되지 않는 할렬응력에 대하여 긴장력의 4%에 해당하는 인장력에 대하여 철근보강을 할 것을 제안하였고,⁽⁷⁾ Breen 등은 실험결과를 통하여 이 값을 2%로 줄여도 할렬응력에 대한 안전한 보강이 됨을 밝혔다.⁽⁸⁾

파열응력은 작용하는 집중하중이 부재의 내부로 부재끝의 형태로 확산됨에 따라 수평방향의 평형조건을 만족시키기 위하여 긴장력 도입방향의 수직방향으로 발생하는 인장응력으로 정착판의 크기와 도입되는 하중의 크기에 따라 발생하는 영역의 분포가 달라진다. 이 파열응력은 프리

스트레스트 콘크리트 구조물에서 문제가 되고 있는 콘크리트의 균열 발생의 주요한 원인이 되며 철근의 배근, 횡방향 긴장력 등을 통하여 조절되어야 한다. Breen등은 직사각형 단면에 1개의 정착구가 있는 경우에 파열철근의 설계에 사용할 수 있는 긴장력 F 에 따른 파열력 T 를 구하는 식을 제안하였다.⁽⁸⁾

$$T = 0.25(1 - \frac{a}{d})F \quad (2)$$

Stone과 Breen은 철근 또는 횡방향긴장 등의 보강이 없는 단일 정착구가 있는 두께가 얇은 직사각형 단면을 가진 부재에 대하여 긴장재의 편심률과 경사, 정착판의 크기와 단면의 폭을 변수로 하여 실험과 그 결과를 바탕으로 한 해석적 연구를 실시하여 균열하중을 예측하는 제안식을 구성하였고, 그 결과를 확장하여 정착구의 종류, 지압응력을 받는 정착판 하단에 대한 원형철근보강, 횡방향으로 보강된 철근량, 횡방향긴장등에 따른 극한하중의 예측방법과 정착부의 설계에 대한 실험식을 도출하였다.⁽⁹⁾ Breen등은 스트럿-타이 모델을 이용한 정착부에 대한 설계와 이에 대한 실험을 통하여 스트럿-타이 모델이 정착부의 설계에 유용하게 사용될 수 있음을 밝혔다. 그러나 극한하중의 예측시 선형해석을 기초로 하여 스트럿-타이 모델을 구성하였고, 구성된 모델에 선형 해석을 사용하였으므로 실제 실험결과와는 다소 오차가 발생하였다.⁽⁸⁾

3. 비선형 스트럿-타이 모델

스트럿-타이 모델은 종래에 균열이 발생한 철근 콘크리트 구조물에 사용하던 트러스 모델을 확장하여 구조물의 기하학적 또는 역학적 불연속성으로 인하여 기존의 이론 또는 유한요소해석으로 설계가 난해한 영역에 대하여 구조물 내부의 응력흐름에 맞추어 가상의 트러스를 구성하고 이를 해석하여 구성요소의 압축·인장력과 치수를 산정하고 이에 따라 철근의 위치 및 철근량을 계산하는 방법이다.⁽⁴⁾ 트러스 모델로부터 출발한 스트럿-타이 모델의 전개과정은 Table 1과 같다.⁽³⁾

Table 1 Evolution of strut-and-tie model

Researcher	Year	Model	Description
Ritter	1899	Truss	for beams in shear and torsion
Mörsch	1912	Truss	for beams in shear and torsion
Kupfer	1964	Truss	for special problems e.g. corbels, etc.
Leonhardt	1965	Truss	for special problems e.g. corbels, etc.
Collins	1973	Mohr Compatibility Truss	derived Mohr compatibility equation
Thurlimann	1983	Plasticity Truss	verified by the lower bound theorem
Marti	1985	Plasticity Truss	verified by the lower bound theorem
Schlaich, Schafer, and Jennewein	1987	Strut-and-Tie	generalization for all reinforced concrete structures

비선형 스트럿-타이 모델에 의한 설계 및 해석은 대상 콘크리트 구조물에 대하여 비선형 유한요소해석을 실시하고 그 결과로 얻은 압축주응력과 그 흐름을 바탕으로 하여 스트럿-타이 모델을 구성하고 반복계산에 의한 비선형 해법에 의하여 구성된 모델의 각 스트럿과 타이의 단면적을 결정하며 단면적이 결정된 스트럿-타이 모델에 대하여 부재의 파괴가 발생할때까지 하중을 일정한 단계로 증가시켜 가며 비선형 해석을 다시 수행하여 콘크리트 부재의 거동과 강도를 평가하고 절점영역의 강도를 검토하며 부재의 설계를 위한 스트럿과 타이부재의 부재력을 구하는 방법이다. 실제의 많은 콘크리트 구조물은 균열, 재료성질, 하중조건, 콘크리트와 보강재의 상호작용 등의 원인으로 인해 비선형적으로 거동하므로 비선형 스트럿-타이 모델은 선형 스트럿-타이 모델에 비하여 구조물의 실제적인 비선형거동의 반영이 가능하게 하여 더 정확한 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다.⁽⁵⁾

비선형 스트럿-타이 모델에서의 주응력계적법은 하중경로법만으로 모델을 구성하기 어려운 복잡한 구조물에 대하여 콘크리트의 비선형성을 고려한 비선형 유한요소해석을 통하여 콘크리트에서 인장력에 의해 파괴가 일어나는 하중단계에서 얻어진 주응력계적선과 응력도를 사용하여 모델을 구성하는 방법으로 스트럿의 방향은 주응력계적선중 평균 주압축응력 방향으로 구성하고 절점에서 스트럿의 방향변화에 따라 이 절점에서 평행이 성립되도록 타이를 배치시키는 방법이다.

4. 설계 및 실험결과와의 비교

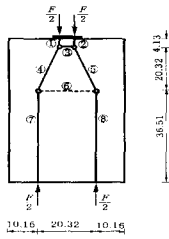
Table 2 Details of B1, E6, M1, M4 specimens

specimen	σ_{ck}	spiral reinforcement	anchor plate
B1	5380psi (379kg/cm ²)	#4(H13), D=7"(17.78cm), s=1.25"(3.175cm), 7 turns	6.5" × 6.5" × 1" (16.51cm × 16.51cm × 1cm)
E6	5650psi (398kg/cm ²)	#3(H10), D=8"(20.32cm), s=2"(5.08cm), 4 turns	6.5" × 6.5" × 1" (16.51cm × 16.51cm × 1cm)
M1	5940psi (418kg/cm ²)	#4(H13), D=6"(15.24cm), s=1.5"(3.81cm), 4 turns	6" × 6" × 1" (15.24cm × 15.24cm × 1cm)
M4	6620psi (466kg/cm ²)	#4(H13), D=6"(15.24cm), s=1.5"(3.81cm), 4 turns	6" × 6" × 1" (15.24cm × 15.24cm × 1cm)

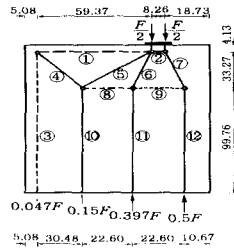
D = Diameter of Reinforcing Bar.

s = Spacing of Spiral rebars.

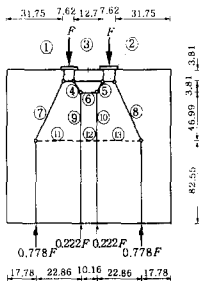
본 논문에서는 Breen등⁽⁸⁾이 실험한 정착부시편에 대하여 설계를 수행하였고 실험결과와 비교하였다. 대상시편은 직사각형 정착부와 긴장력이 중앙에 도입되는 정착부 시편(B1시편), 긴장력이 편심되게 도입되는 정착부 시편(E6시편), 중앙 두 지점에서 근접하게 도입되는 정착부 시편(M1), 긴장력이 중앙 두 지점에서 간격을 두고 도입되는 정착부 시편(M4) 등 이다. Fig3~Fig6은 각각 정착부 시편 B1, E6, M1, M4의 치수와 배근상세를 보여준다. 4가지 정착부 시편의 재료와 배근상세는 Table 2와 같다.



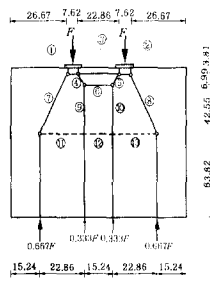
unit : cm
Fig.11 Nonlinear STM for B1 specimen



unit(cm)
Fig.12 Nonlinear STM for E6 specimen



unit : cm
Fig. 13 Nonlinear STM for M1 specimen



unit : cm
Fig. 14 Nonlinear STM for M4 specimen

발생되는 값으로 산정하였다. 선형 스트럿-타이 모델과 비선형 모델에 의한 비선형 유한요소해석 결과 얻어진 배근철근량과 실험결과와의 비교는 Table 3과 같다.

Table 3 Design results and reinforcement of tested specimen

Specimen	Design member	A_s by linear STM	A_s by nonlinear STM	A_s (tested specimen)
B1	⑥	0.972 in ² (6.271cm ²)	0.847 in ² (5.460cm ²)	0.800 in ² (5.160cm ²)
E6	⑧, ⑨	0.665 in ² (4.290cm ²)	0.628 in ² (4.050cm ²)	0.489 in ² (3.510cm ²)
M1	⑪, ⑫, ⑬	1.048 in ² (6.790cm ²)	0.971 in ² (6.260cm ²)	0.880 in ² (5.680cm ²)
M4	⑪, ⑫, ⑬	1.116 in ² (7.200cm ²)	0.945 in ² (6.100cm ²)	0.880 in ² (5.680cm ²)

Table 3에서 보는 것과 같이 실제배근된 철근량보다 선형 또는 비선형 모델을 사용하여 설계된 철근량이 많으므로 스트럿-타이 모델을 이용한 설계가 안전측임을 알 수 있다. 또한 두 모델

중 비선형 모델의 비선형 해석을 통한 설계가 실제 배근된 철근량과 비교할 때 선형 모델에 의한 설계보다 경제적임을 알 수 있다. 결정된 스트럿-타이 모델에 대해 B1, E6, M1, M4시편에 대하여 비선형 유한요소해석을 수행하여 극한하중을 구하였다. 이 시편들에 대하여 모델을 구성하여 해석한 결과, 모두 좌역응력에 의한 수평방향의 철근의 항복 즉, 인장타이에 의한 파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 선형 스트럿-타이 모델에 의한 해석결과, 비선형 스트럿-타이 모델에 의한 해석결과 그리고 실험결과와의 비교는 Table 4와 같다.

Table 4 Comparison of ultimate loads

Specimen	Linear STM	Nonlinear STM	Test ^(a)	Test	
				Linear STM	Nonlinear STM
B1	301kips (137ton)	345kips (157ton)	366kips (166ton)	1.22	1.06
E6	256kips (116ton)	271kips (123ton)	348kips (158ton)	1.36	1.28
M1	255kips (116ton)	276kips (125ton)	304kips (138ton)	1.19	1.10
M4	324kips (147ton)	383kips (174ton)	411kips (187ton)	1.27	1.07

Table 4에서 보여주듯이 선형 모델에 의한 극한하중은 실험결과로부터 얻어진 극한하중의 평균 1.26배, 비선형 모델에 의한 극한하중은 실험 극한하중의 평균 1.13배정도의 하중이었다. 네 가지 시편에 의한 설계철근량과 극한하중의 추정 결과로 볼때 비선형 스트럿-타이 모델에 의한 설계 및 해석은 선형 스트럿-타이 모델을 이용한 경우보다 더 정확하게 철근량을 산정할 수 있고 극한하중을 추정할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 프리스트레스트 구조물 정착부의 합리적인 설계가 가능하도록 첫 단계에서 무근 콘크리트 정착부의 비선형 유한요소해석 결과로부터 응

력계적을 도출하고, 두번째 단계에서 응력계적에 근거한 스트럿-타이 모델을 구성하고, 세번째 단계에서 모델의 비선형 구조해석으로부터 철근량의 설계 및 극한하중을 해석하는 비선형 스트럿-타이 모델해법을 적용하였다.

- 2) 프리스트레스트 콘크리트 구조물에서 정착부 단면 중앙에 긴장력이 도입되는 경우, 편심으로 긴장력이 도입되는 경우, 2개의 정착구가 존재하는 경우에 대하여 비선형 스트럿-타이 모델에 의하여 해석 및 설계를 수행하였으며 그 결과를 선형모델에 의한 결과와 실험결과와 비교하여 비선형 스트럿-타이 모델의 타당성을 검증하였다.
- 3) 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 정착부 보강철근의 설계 및 극한하중의 해석에 비선형 스트럿-타이 모델을 사용하는 것은 선형모델의 사용보다 좀 더 합리적이고 경제적인 설계방법임을 규명하였다.

감사의 글

본 연구 수행중 많은 조언과 활발한 토의를 기꺼이 해주신 경북대학교 토목공학과와 윤영목 교수께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 임동환, 오병환, "프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량부재의 정착부 균열하중 및 극한하중의 예측", 한국콘크리트학회 논문집 제16권 15호, 1994. 10, pp. 171-182.

- (2) 임동환, 오병환, "프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량부재의 정착부 응력분포 특성과 균열제어 연구", 대한토목학회 논문집 제15권 2호, 1995. 3, pp. 325-336.
- (3) Schlaich, J., Schafer, K. and Jennewein, M., "Towards a Consistent Design of Structural Concrete", Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol. 32, 1987, pp. 74-150.
- (4) 홍성길, 트러스 모델을 통해 본 철근콘크리트 구조 설계 방법론, 도서출판 발언, 1996.
- (5) 윤영목, "스트럿-타이 모델에 의한 콘크리트 부재의 해석 및 설계", 콘크리트 학회지특집, Vol. 10, No. 1, 1998.2, pp. 20-31.
- (6) Bergmeister, K., Breen, J. E., Jirsa, J. O., and Kreger, M. E., "Detailing for Structural Concrete", Research Report 1127-3F, Center for Transportation Research, May, 1993, pp. 1-300.
- (7) Guyon, Y., Limit-State Design of Prestressed Concrete, Applied Science Publishers LTD, 1974.
- (8) Breen, J. E., Burdat, O., Robert, C., Sanders, D., and Wollmann, G., "Anchorage Zone Reinforcement for Post-Tensioned Concrete Girders", Report of Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, August, 1991.
- (9) Stones, W. C. and Breen, J. E., "Design of Post Tensioned Girder Anchorage Zones", Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol. 29, No. 2, 1984, pp. 28-61.
- (10) TNO Building of Construction Research, Nonlinear Analysis, DIANA User Manual, 1996.

요 약

본 논문은 비선형 스트럿-타이 모델에 의한 프리스트레스트 콘크리트 정착부의 거동해석 및 설계에 관한 연구이다. 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 정착부는 긴장재의 인장력 도입으로 인해 비교적 작은 단면에 큰 집중하중이 발생하는 매우 중요한 구조부위이며, 기존의 설계가 비교적 다른 구조부위의 설계에 비하여 경험적으로 이루어지고 있을 뿐만 아니라 해석에도 많은 시간과 계산량이 소요되는 단점이 있다.

비선형 스트럿-타이 모델은 대상 정착부의 비선형 거동을 반영하기 위하여 비선형 유한요소해석을 기초로 하여 스트럿-타이 모델을 구성하고 구성된 모델이 비선형 재료거동을 따르도록 비선형 해석을 실시하여 설계를 수행하고 구조물의 극한하중을 추정하는 방법이다. 본 논문에서는 긴장력이 정착부의 중앙에 도입되는 경우, 편심으로 도입되는 경우, 다중 정착구가 존재하는 경우에 대하여 선형과 비선형 스트럿-타이 모델을 구성하여 정착부의 역학적 거동을 고찰하였고 실험결과와 비교하였다. 비교로부터 비선형 모델을 사용한 경우 선형 모델을 사용한 경우보다 안전성을 유지하면서 경제적인 설계가 가능하고 추정극한강도도 실험결과에 더욱 근접함을 알았다.

(접수일자: 1997.12.21)