



## 외부후긴장을 이용한 트러스교의 보강 방법에 관한 연구



정 배 근\*



박 선 규\*\*

### 1. 서 론

교량은 시간이 경과함에 따라 교통환경변화 등 여러 원인에 의해서 손상을 받게 되고 구조적 기능이 약화되기 때문에 건설 후 적절한 보수·보강을 하여 수명을 연장하고 안전성과 사용성을 확보하여야 한다. 강연선을 이용하여 강교량에 외부 긴장하는 기술은 새로운 교량을 신설할 경우나 기존 교량의 내하력 증진과 보강하는데 쓰일 수 있다.

외부 후긴장의 기술적, 경제적 유용성은 콘크리트에 도입하면서 폭넓게 발전되었다. 그러나 프리스트레스트 스틸 교량은 상대적으로 더딘 발전을 보였다. 긴장력이 도입된 강구조물의 유용성은 주로 새로운 교량의 건설시 재료의 절감 뿐만 아니라 노후화된 교량의 보강에 있다. 인장응력에 취약한 콘크리트 부재 단면과 달리, 강부재 단면은 특별한 응력 분포가 필요하지 않다. 또한 강구조물에서는 강연선이 프리스트레스트 콘크리트 구조물에서 발생하는 큰 마찰손실을 일으키지 않는다. 그러나 프리스트레스트 콘크리트의 발전은 프리

스트레스트 강교량에도 유사한 해석 방법을 적용시킬 수 있다는 것을 보여주고 있다<sup>1)~3)</sup>. 후긴장에 의한 보강방법은 구조해석이 비교적 명확하고 그 적용범위가 매우 넓으며 특히, 중 장지간의 교량의 보강에 탁월한 효과를 보이고 있다. 본 연구에서는 외부 긴장된 평면 트러스의 해석과 설계를 위한 일반적인 방법을 개발하는 것 뿐만 아니라 부재력 감소측면에서 외부긴장의 잠재력을 설명하려 한다.

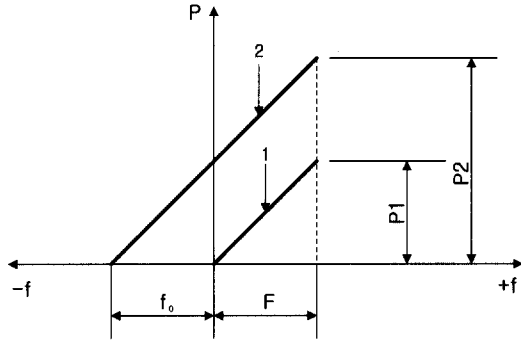
### 2. 이론적 배경

#### 2.1 강재 프리스트레스의 기본개념

프리스트레스는 강구조물이나 구조부재에 작용 하중에 의한 응력과 반대의 응력을 인위적으로 도입시키는 것이다. Fig. 1과 같이 구조물에 재하 작용에 의한 응력과 반대방향의 응력을 갖는 프리스트레스  $f_0$ 를 도입하면 재료의 탄성일의 범위는 증가한다.

\* 성균관대학교 토목환경공학과, 석사과정

\*\* 본 학회 편집위원 · 성균관대학교 토목환경공학과, 부교수



1 : without prestressing, 2 : with prestressing  
Fig. 1 A diagram of the work of a bar

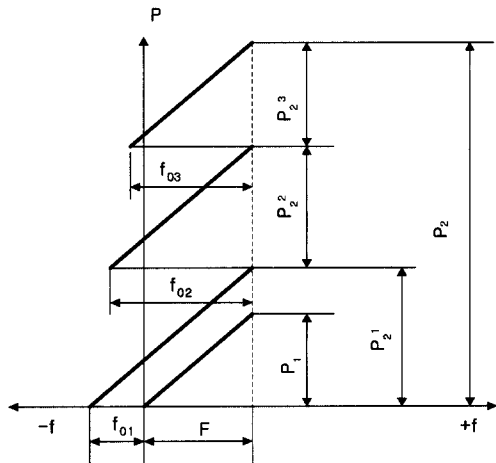


Fig. 2 Scheme of multistep prestressing

프리스트레스를 도입하면, 초기응력이  $f_0$ 이 생성되고, 하중  $P$ 가 작용해서 바(bar)의 응력은 허용응력  $F$ 에 도달한다. 프리스트레스 바(bar)가 지닌 인장력은 프리스트레스를 도입하지 않은 바(bar)가 가진 인장력보다  $f_0 \cdot A$ 만큼 더 커진다.

또한, 다단계 프리스트레스를 가함으로써, 내력을 점차적으로 증가시킬 수가 있는데 Fig. 2와 같이 몇 회의 사이클로 프리스트레스와 구하고자 하는 하중을 얻을 수 있다. 변화하는 작용하중  $P_1$  하에서, 초기응력  $f_0$ 은 한계값  $F$ 에 도달할 때까지 바(bar)에 작용한다. 두 번째 사이클에서, 획득된 응력과 작용하중  $P_2$ 를 감소시키는 초기응력  $f_{02}$ 가 다시 주어진다.

몇 번의 사이클 후에, 하중의 합  $\sum P_2$ 는 프리스트레스를 도입하지 않은 구조물이 받을 수 있는

$P_1$ 보다 몇 배가 더 크게 된다. 일반적으로 구하고자 하는 하중은 3~4번의 사이클로 얻을 수 있다.

케이블이나 텐던의 가격은 일반 강재보다 2~3배 비싸지만 강도가 4~6배 더 크기 때문에 이러한 형태의 프리스트레스를 적용함으로써, 고강도 재료를 효과적, 경제적으로 구조물에 사용할 수 있다.

프리스트레스 강구조물의 거동을 이해하기 위해, 하중 작용상태하에서 각형 단면의 바(bar)와 같은 단순 모델을 예로 들었다. 단면적이  $A$ 인 바(bar)와 단면적인  $A_t$ 인 고강도 텐던을 Fig. 3(a)와 같이 프리스트레스를 도입하여 바(bar)에서의 허용응력  $F$ 보다 다소 작은 최대 압축응력  $f_{0t}$ 를 얻는다면, 텐던은 한계 저항력  $F_t$ 보다 작은 프리스트레스를 가하기 위한 상태의 인장응력  $f_{0t}$ 에 있게 된다. 그 후 외력에 의해 바(bar)는 인장되어 강재와 텐던의 저항력을 완전히 이용할 수 있다.

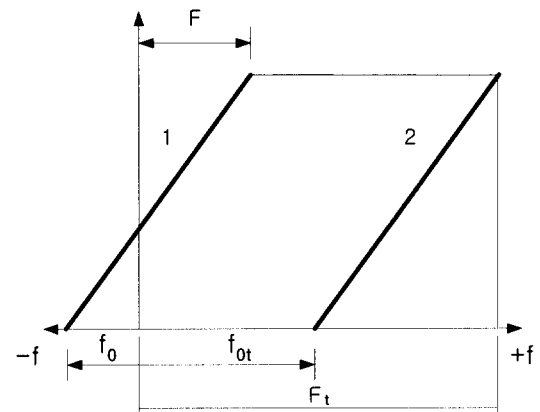
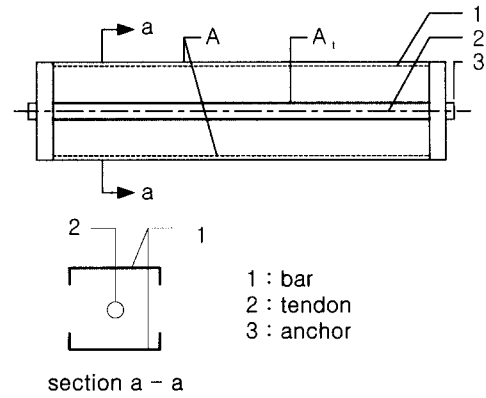


Fig. 3 The work of prestressed hybrid-type structures

프리스트레스  $f_0$ 를 받은 텐던에, 바(bar)의 응력에 해당하는 인장응력도( $F_t - f_0$ )가 추가되거나,  $(F + f_0) \frac{E_t}{E}$  과 같게 된다. 여기서 E와  $E_t$ 는 각각 바(bar)와 텐던의 탄성계수를 나타낸다. 바(bar)는 인장변형을 받고, 응력은  $(F + f_0)$ 에 대응한다. 사용하중에서 바(bar)는  $(F + f_0)$ 의 응력을 받을 수 있으며 와이어는  $(F_t - f_0)$ 의 응력을 받게 된다. 평형조건을 만족하는 단면적을 선택함으로써 한계응력은 바(bar)와 와이어에서 동시에 얻어진다. 이 경우, 합성 부재가 갖는 전체 저항력은 다음과 같다.

$$P = AF + A_t \cdot F_t = AF(1 + \alpha \cdot \beta) \quad (1)$$

여기서,  $\alpha = \frac{A_t}{A}$ ,  $\beta = \frac{F_t}{F}$  이다.

괄호 안의 수치는 고강도 재료를 이용한 프리스트레스시, 바(bar)의 내력의 증가를 의미한다. 하중을 받는 바(bar)의 전체 변형은 다음 식과 같다.

$$\Delta_t = \frac{(f_0 + F)l}{E} = \frac{(F_t + f_0)l_t}{E_t} \quad (2)$$

## 2.2 트러스 긴장방법

트러스에 긴장하는 방법은 긴장재를 이용하는 것과, 또는 연속 트러스 경우에는 수직 변위를 주는 방법이 있다. 가장 널리 쓰이는 방법은 고강도 재료의 긴장재를 쓰는 방법이다. 긴장재는 최대 인장력이 발생하는 부재의 인장력을 가장 효과적으로 감소시켜주는 형태로 배치되어야 한다. 긴장재 배치 형태는 긴장력과 트러스의 성능의 특성을 결정짓는다. 외부긴장된 트러스의 효율성은 트러스의 형태, 긴장재 배치, 그리고 긴장순서에 영향을 받는다. 긴장재의 배치형태와 트러스의 구조적 성능에 미치는 영향으로부터 외부긴장된 트러스는 다음의 두가지 기본적인 형태로 나눌 수 있다.

- (1) 최대 인장력을 받는 부재에만 긴장재를 배치하는 트러스
- (2) 긴장재를 전 지간에 배치하여 모든 트러스 부재 또는 몇 개의 부재에 긴장하는 트러스

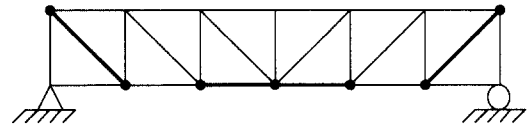


Fig. 4 The prestressed single members of a truss

### 2.2.1 각각의 인장부재에 대한 긴장

외부하중 하에서 트러스의 각각의 인장부재에 압축력을 주기 위해 긴장재가 설치된다. 이들 부재는 현장에서 제작 또는 조립되는 동안에 긴장된다. 이러한 형태의 트러스는 설계과정이 복잡하고 많은 정착장치가 필요하다. 이러한 형태로 외부긴장된 트러스는 장지간 트러스나 큰 하중을 받을 경우에만 효과적이다. 이러한 트러스는 정정 구조물로 설계되어진다. Fig. 4에서 인장부재를 각각 긴장한 형태를 보여주고 있다. 이러한 트러스 형태는 약 10-15%의 강재를 절약할 수 있다.

### 2.2.2 부분 또는 전체 트러스 경간 긴장

이러한 형태는 다양한 긴장재 배치를 할 수 있다. Fig. 5에서는 트러스 내부에 긴장재 배치된 형태를 보여주고 있다. 가장 간단한 방법은 Fig. 5(a)에서와 같이 인장을 받는 부재를 따라서 경간 길이만큼 일직선으로 배치하는 방법이다. 이러한 일직선 배치는 긴장재가 배치된 부재에만 긴장하게 되고 다른 부재는 긴장력을 받지 않게 된다. 장지간의 경우 인장부재들 부재력 차이는 상당히 크게 된다. 그러므로 두 개 또는 그 이상의 긴장재를 배치하면 된다. Fig. 5(b),(c),(d)에서와 같이 긴장재가 다각형 형태로 배치되었을 때 현재와 사재에도 긴장력을 줄 수 있다.

Fig. 6과 같이 긴장재가 트러스 외부에 배치되었을 때 트러스의 보강방법 뿐만 아니라 새로운 트러스에 적용될 수 있다. 또한 약 25-30%의 강재를 절약할 수 있다. 그러나 이러한 외부 긴장재 배치는 트러스 형상이나 설계 조건을 고려하기 때문에 항상 이용되지는 않는다. 그리고 하현재에 연결되지 않은 긴장재의 안정성 손실을 보장할 수가 없다. 긴장하는 동안 트러스부재에서 발생할 수 있는 안정성 손실을 제거하기 위해서 안정성 손실에 대한 트러스 구조물을 보강할 수 있는 브

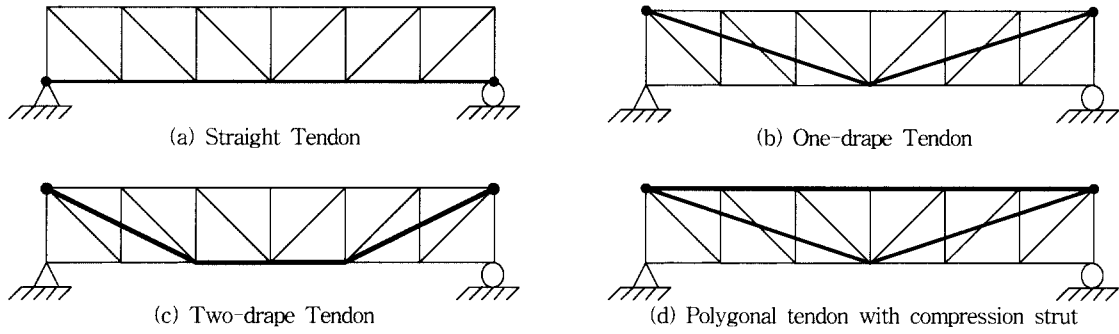


Fig. 5 Trusses having internally located tendons

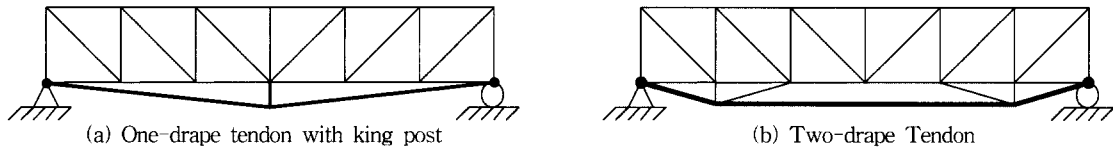


Fig. 6 Trusses having externally located tendons

레이싱이 설치된 후에 조립하는 중에 긴장하는 것이 필수적이다.

외부 긴장된 트러스의 효율성(The effective performance)은 긴장재의 배치형상, 현재의 기울기, 트러스 형태, 그리고 긴장력크기에 달려있다. 1차 긴장단계(single-stage prestressing)의 긴장력은 압축받는 부재의 안정성에 의해서 제한되어진다. 그러므로 가장 경제적인 트러스 설계는 긴장을 순차적으로 함으로써 이루어질 수 있으나 건설 현장 조건에 따라 항상 사용될 수 있는 것이 아니다.

### 3. 외부 긴장된 트러스의 해석

외부 긴장된 평면 트러스의 해석은 다음의 세 가지 가정하에 수행된다. 첫째, 강연선의 재료는 선형탄성이다. 둘째, 트러스의 전체 치수를 포함하는 모든 계산은 트러스의 원래 치수를 바탕으로 계산된다. 셋째, 강연선의 축력은 강연선의 길이에 따라 일정하다. 즉, 강연선과 그 경로사이에서의 마찰은 무시한다<sup>1)</sup>. 본 연구에서, 외부 긴장된 트러스의 해석은 세 단계로 나눌 수 있다.

- 1단계, 고정하중이 작용할 때 부재력 계산
- 2단계, 긴장력과 고정하중이 작용할 때 부재력 계산

3단계, 활하중, 충격하중, 기타하중이 작용할 때 부재력 계산

최종부재력은 2단계와 3단계를 중첩함으로써 구할 수 있다. 모든 강연선은 다른 트러스 부재처럼 독립된 부재로 취급된다. 강연선의 배치형태가 일직선이던 절곡되었던 간에 강연선은 트러스 부재와 일치할 필요는 없다.

외부 긴장효과는 트러스 형태, 강연선의 배치, 긴장력의 크기의 함수이다. 정정트러스일 경우, 만약 강연선배치가 하나 또는 그 이상의 트러스 부재와 일치한다면 긴장력의 영향을 받는 것은 단지 일치하는 트러스 부재들만이다. 부정정트러스일 경우, 강연선의 배치에 상관없이 만약 강연선이 균부재(redundant member)를 지나면 외부 후긴장에 의해 영향을 받는다. 부재들에 미치는 긴장력의 효과는 트러스 형태, 부재간 연결관계(connectivity), 강연선의 배치형태에 따라 다르다

#### 3.1 유효 프리스트레스 산정

설계단계에서 정확한 유효 프리스트레스력 결정은 중요하다. 외부 긴장된 트러스의 초기 긴장력은 PS 긴장재의 릴랙세이션, 정착단에서의 슬립, 편향

부에서의 마찰 등으로 감소하며 긴장력 도입 후 작용하는 하중에 의하여 증가한다. 정착단에서의 슬립, 강재의 릴랙세이션은 초기 긴장을 overstressing함으로써 보상된다. 절곡된 강연선의 경우 편향부에서의 마찰손실은 두 단계로 나누어 고려된다. 즉 초기 긴장력 도입시와 긴장력 도입 후 프리스트레스 증가력 산정시이다<sup>2)</sup>. 하지만 마찰에 의한 손실도 양단긴장 또는 마찰이 없는 편향부를 이용하여 크게 줄일 수 있다. 유효 프리스트레스력은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$FPF = IPF + PFI - PLS \quad (3)$$

여기서 FPF는 유효 프리스트레스력, IPF는 초기 프리스트레스력, PFI는 프리스트레스력 증가량, PLS는 프리스트레스력 손실이다.

PS긴장재의 릴랙세이션, 정착단의 슬립은 프리스트레스트 콘크리트에서 사용된 방법을 사용하여 산정할 수 있다. PFI의 양은 트러스부재와 강연선의 단면제원, 하중조건 등에 의해 결정되어지며, 초기 긴장력과는 무관하다.

### 3.2 강연선 응력 증가량(Analytical method)

편향부에서 마찰이 없을 경우 다음의 방법으로 구할 수 있다. 정정 트러스 하현재를 사다리꼴 긴장재로 긴장하였을 때 강연선의 긴장력 증가는 여력(redundant force)으로 외부 긴장된 트러스는 내적 1차 부정정 구조물이다.

프리스트레스력 증가량은 변형일치의 방법으로 유도할 수 있으며 트러스의 치짐은 가장 일반적으로 사용되는 가상일의 원리를 이용한다. 사다리꼴 긴장재로 긴장된 트러스의 프리스트레스 증가량의 계산과정은 Fig. 7에서 보여지고 있다. 이러한 트러스 해석을 위해서 Fig. 7(a)에서 강연선을 제거하면 Fig. 7(b)와 같은 정정트러스로 된다. Fig. 7(a)에서 프리스트레스 증가량을 ΔX라 하고, 인장력으로 가정한다. 강연선을 절단하면 Fig. 7(c)의 상태로 될 것이다. 따라서, Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)를 겹친 것은 Fig. 7(a)의 트러스와 동가이다.

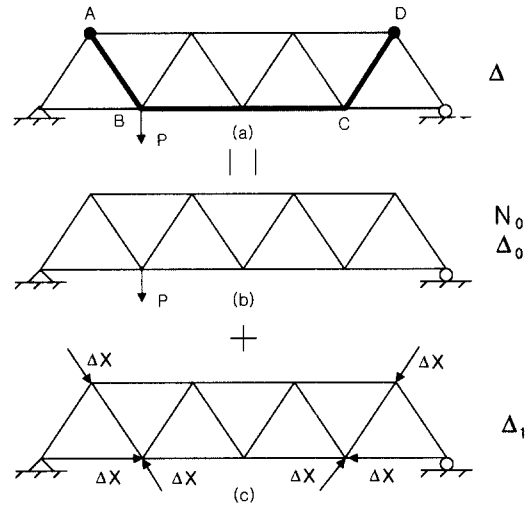


Fig. 7 Method of consistent deformation

Fig. 7(a), (b) 및 (c)의 각 트러스의 절점 A와 B와 C와 D의 상대변위를 각각 Δ, Δ₀, Δ₁이라 하면 Δ는 다음 식과 같다.

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta_1 \quad (4)$$

미소변형의 가정에 따라 Δ=0으로 보면 식(4)는 다음과 같다.

$$\Delta_0 + \Delta_1 = 0 \quad (5)$$

Fig. 7(c)와 같이 절점 A, B, C 와 D에 ΔX대신 단위하중이 작용할 때의 각 부재력을 F<sub>i,X=1</sub>라 하면, 이 경우의 A, B, C와 D의 상대변위 δ<sub>11</sub>은 다음과 같다.

$$\delta_{11} = \sum_i \frac{F_{i,X=1}^2 l_i}{EA} + \frac{l_t}{E_t A_t} \quad (6)$$

Fig. 7(c)와 같이 ΔX가 작용할 때의 A, B, C 와 D의 상대변위 Δ₁는 다음과 같다.

$$\Delta_1 = \delta_{11} \Delta X = \Delta X \left( \sum_i \frac{F_{i,X=1}^2 l_i}{EA} + \frac{l_t}{E_t A_t} \right) \quad (7)$$

Fig. 7(b)에서 A와 B의 상대변위  $\Delta_0$ 는 하중 P가 작용할 때의 각 부재력을  $F_{i,tot}$ 이라 하면 다음과 같다.

$$\Delta_0 = \sum_i \frac{F_{i,X=1} F_{i,tot} \times l_i}{EA} \quad (8)$$

식(7)와 식(8)을 식(6)에 대입하면 마찰을 무시할 경우의 사다리꼴 긴장재의 응력 증가량은 다음 식과 같다.

$$\Delta X = \frac{\sum_i \frac{F_{i,X=1} F_{i,tot} \times l_i}{EA}}{\sum_i \frac{F_{i,X=1}^2 l_i}{EA} + \frac{l_t}{E_t A_t}} \quad (9)$$

### 3.3 긴장력 결정 및 응력 검토

#### 3.3.1 긴장력 결정

긴장력의 크기는 긴장재 배치 형상, 트러스 부재의 단면, 외부하중 조건 등에 의해 결정된다. 트러스 부재에 적용할 긴장력의 결정은 긴장력 도입시 트러스 부재의 허용압축응력과 좌굴을 고려해야 한다. 이에 따라 구한 긴장력은 활하중에 의한 긴장력 증가량을 고려하여 적절하게 설정해야 한다.

긴장력의 산정시 초기조건은 다음 식과 같다.

$$F_{i,X} \leq f_{ca} A_i \quad (10)$$

여기서  $F_{i,X}$ 는 긴장력 도입시 임의의 트러스 부재에 발생하는 부재력,  $f_{ca}$ 는 허용축방향 압축응력,  $A_i$ 는 임의의 트러스 부재의 단면적이다.

두 번째 조건은 다음 식과 같다.

$$X + \Delta X \leq f_t A_t \quad (11)$$

여기서  $X$ =초기 긴장력,  $\Delta X$ =긴장력 증가량,  $f_t$ =강연선의 허용인장응력,  $A_t$ =강연선의 단면적이다.

#### 3.3.2 최종응력 검토

위 단계에서 구한 응력의 합이 긴장재 또는 트러스 부재의 허용응력보다 작아야 한다. 트러스 부재의 응력검토는 다음 세 가지 경우로 나누어 실시한다.

(a) 압축부재에 긴장력이 인장력으로 작용시

1.  $F_{i,q} > F_{i,X} (X + \Delta X)$  일 경우  
 $F_{i,q} - F_{i,X=1}(X + \Delta X) \leq f_{ca} A_g \quad (12)$

2.  $F_{i,q} < F_{i,X} X + \Delta X$   
 $F_{i,X=1}(X + \Delta X) - F_{i,q} \leq f_{ta} A_n \quad (13)$

(b) 압축부재에 긴장력이 압축력으로 작용시

$$F_{i,q} + F_{i,X=1}(X + \Delta X) \leq f_{ca} A_g \quad (14)$$

(c) 인장부재에 긴장력이 인장력으로 작용시

$$F_{i,q} + F_{i,X=1}(X + \Delta X) \leq f_{ta} A_n \quad (15)$$

(d) 인장부재에 긴장력이 압축력으로 작용시

1.  $F_{i,q} > F_{i,X}(X + \Delta X)$  일 경우  
 $F_{i,q} - F_{i,X=1}(X + \Delta X) \leq f_{ta} A_n \quad (16)$

2.  $F_{i,q} < F_{i,X}(X + \Delta X)$  일 경우  
 $F_{i,X=1}(X + \Delta X) - F_{i,q} \leq f_{ca} A_g \quad (17)$

여기서,

$F_{i,q}$  : 긴장재가 배치되지 않은 트러스에 외부 하중 q가 작용시 임의의 트러스 부재 I에서 발생한 부재력

$F_{i,X=1}$ : 긴장력을 단위하중을 주었을 때 임의의 트러스 부재 i에서 발생한 부재력

$f_{ca}$  : 허용압축응력

$f_{ta}$  : 허용인장응력

$A_g$  : 압축부재의 총단면적

$A_n$  : 인장부재의 순단면적

#### 4. 수치계산 및 고찰

다음 그림에서 보인 강연선배치가 이 연구에서 다루어졌다. 절곡되어진 형태에 따라 각각 직선 긴장재, 삼각형 긴장재, 사다리꼴 긴장재라고 부르겠다. 절곡되어진 강연선의 배치는 트러스 조인트에 편향부를 뒀으므로 각변화를 줄 수가 있다.

이상의 연구내용을 바탕으로 두 가지 경우의 트러스 교량에 대하여 후긴장을 적용하여 보강효과를 검토하였다. 우선 첫번째 경우는 정정 트러스 교량 내부에 긴장재가 배치되었을 때이고 두번째는 트러스 교량 외부에 긴장재가 배치되었을 때이다. 트러스 외부에 긴장재 배치된 경우 편향길이  $h$ 를 0.6, 0.9, 1.2m로 변화시킴으로써 편향길이

의 효과도 검토하였다. 다양한 긴장재 형상이 트러스 교량을 후긴장하는데 사용되었으며 부재력 감소면에서 긴장재 배치 형상에 따른 효과도 검토하였다.

긴장재 배치 형상에 따른 효과를 보기 위해 동일한 도입긴장력을 주었으며(60tonf) 이는 강연선 항복강도의 40%이다. 트러스 부재의 제원과 하중 조건은 다음과 같다

Table 1 Section properties

부재	단면적(m <sup>2</sup> )	탄성계수(kgf/cm <sup>2</sup> )
상현재	$7.986 \times 10^{-3}$	$20.4 \times 10^6$
하현재	$7.986 \times 10^{-3}$	$20.4 \times 10^6$
경사재	$5.404 \times 10^{-3}$	$20.4 \times 10^6$
강연선	$9.375 \times 10^{-4}$	$20.0 \times 10^6$

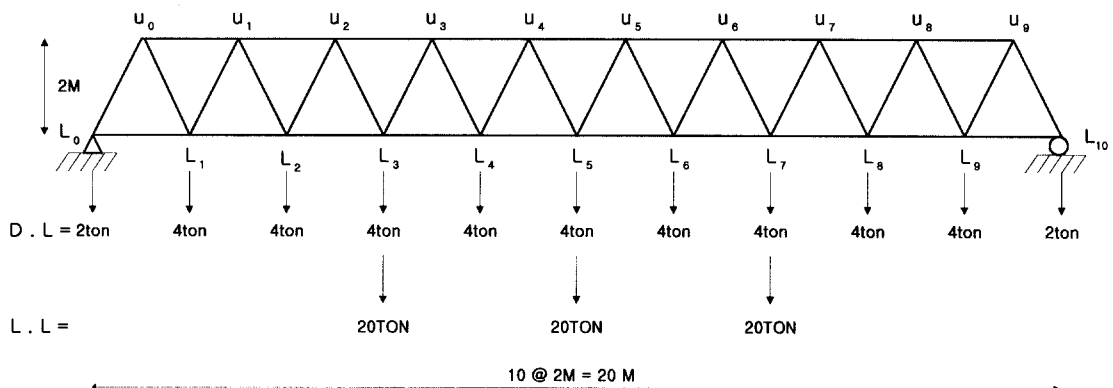


Fig. 8 Statically determinate symmetrical truss

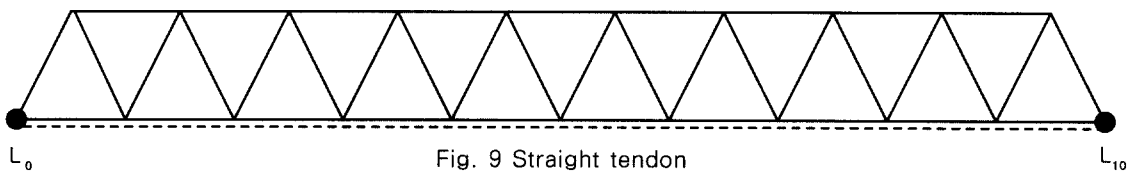


Fig. 9 Straight tendon

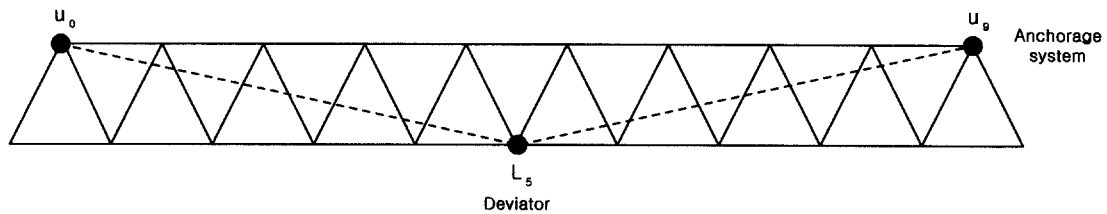


Fig. 10 One-drape tendon

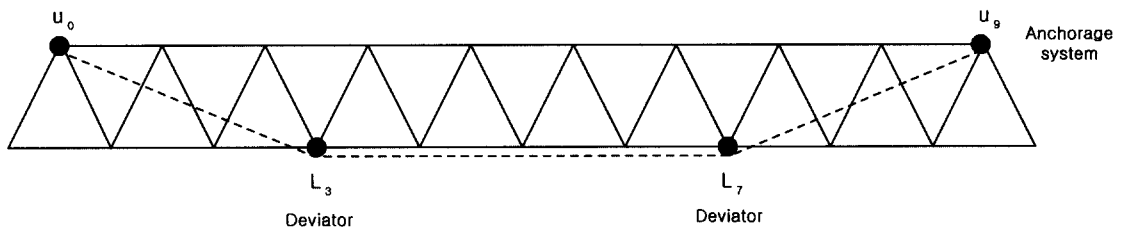


Fig. 11 Two-drape tendon

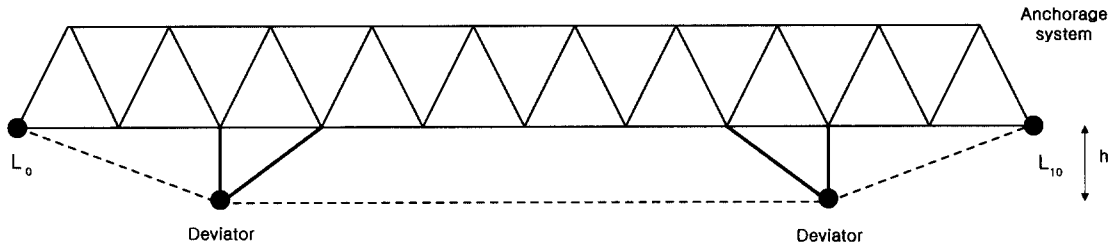


Fig. 12 External tendon

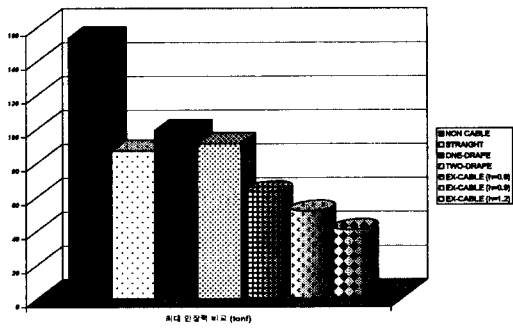


Fig. 13 Max tension(Lower member)

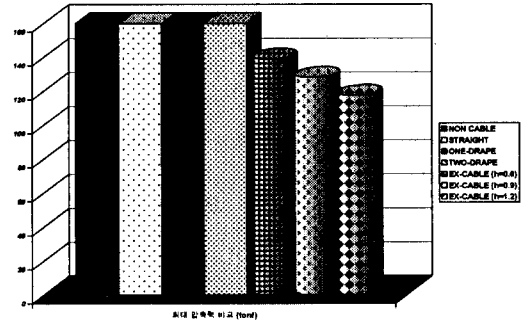


Fig. 14 Max compression(Upper member)

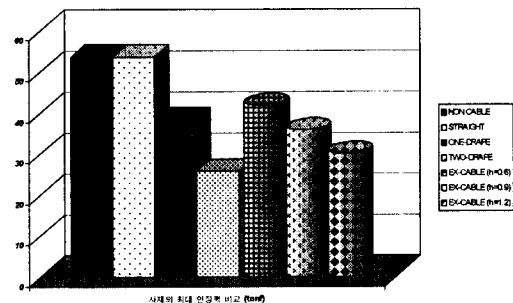


Fig. 15 Max tension(Diagonal member)

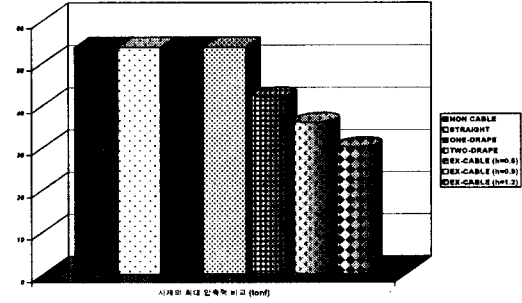


Fig. 16 Max compression(Diagonal member)



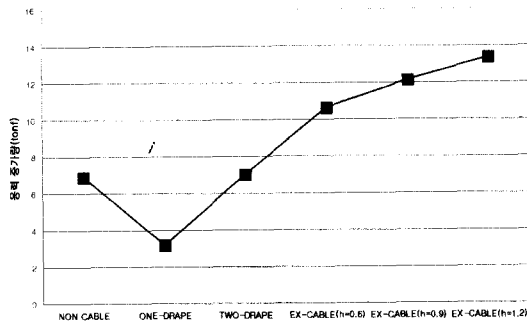


Fig. 17 Incremental prestressing force

### 5. 결 론

본 연구는 이론적으로 강연선 증가량을 유도하였으며, 외부 긴장된 평면 트러스의 긴장력 효과와 하중분배효과를 보여주었다. 다양한 긴장재 배치형상에 따른 부재력 감소효과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 긴장재가 트러스 내부에 배치된 경우 트러스의 인장부재에서만 부재력 감소 효과가 있었다. 최대 인장력의 경우 직선 긴장재는 43.5%, 삼각형 긴장재는 35.7%, 사다리꼴 긴장재는 40.7%의 감소효과가 있었다. 특히 삼각형 긴장재 형태는 와렌트러스의 경우에는 압축력을 증가시키는 악영향을 주고 있다. 트러스 형태, 긴장재의 배치형상, 긴장력이 부재력 감소면에서 주요인

자임을 알 수 있었다.

- 2) 긴장재가 트러스 외부에 배치된 경우 트러스의 인장부재 뿐만 아니라 압축부재의 부재력 감소 효과가 있었다. 최대 인장력의 경우 편향길이  $h=0.6m$ 일 때 59.1%,  $h=0.9m$ 일 때 66.5%,  $h=1.2m$ 일 때 73.6%의 감소효과가 있었으며 최대 압축력의 경우 각각 13.1%, 19.9%, 26.6%의 감소효과가 있었다. 특히 편향길이가 길수록 부재력 감소효과가 큼을 알 수 있었다.
- 3) 제한된 범위내에서 수행된 본 연구결과 트러스 부재의 단면력 감소효과는 트러스 외부에 강연선이 배치되었을 때 가장 효율적이었으며 압축력 감소효과도 있으므로 장시간화도 가능하다고 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. Bilal M. A., Ahmed I., and David S., Post-tensioned truss: Analysis and Design, *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol 116, No. 6, 1990, pp.1491~1506
2. Troitsky, M. S, Zielinski, Z. A., and Rabbani, N. F., "Prestressing force increment of two-span steel girder," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 18, 1991, pp.163~170
3. Troitsky, M. S., *Prestressed steel bridges*, Van Nostrand Co., New York, N.Y., 1990