

# PS 긴장재의 마찰손실량에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on The Frictional Loss of Stress in The Prestressing Tendons

정배근\*  
Jeung, Bae Keun

한경봉\*\*  
Han, Kyung Bong

박선규\*\*\*  
Park, Sun Kyu

### ABSTRACT

In prestressed concrete structures, determining serviceability and safety it is important to exactly calculate effective prestress force acting on structures. For the determination of effective prestress force, friction loss of the prestressing tendon should be decided exactly, but it is very difficult to measure the exact prestress force on the site and there is no actual field data. Therefore the friction loss coefficient recommended by the specification is not verified. In this paper, the friction loss of standard PSC-Beam will be investigated, and it will be found what kind of relationship between the specification and the site. The results from this study can be summarized as follows. For jacking at both ends, actual initial prestress force in the center section of PSC-Beam was about 1.61% larger than theoretical initial prestress force and for jacking at one end, actual initial prestress force was approximate 4.9% lower than theoretical initial prestress force. Thus, for the exact calculation of friction loss, friction coefficient should be modified according to jacking methods

### 1. 서론

근래에 들어 프리스트레스트 콘크리트(Prestressed Concrete; 이하 PSC)를 사용한 대형 구조물과 곡선교량 등 특수 구조물의 설계와 시공이 증가하고 있으며, 특히 콘크리트를 주재료로 사용하여 장경간·다경간의 장대교량을 만들기 위해서는 프리스트레스의 도입이 필수적이다

본 논문에서 다루고자하는 포스트텐션 공법의 경우에 프리스트레스를 도입하기 위하여서는 쉬스(Theath) 속에 미리 배치된 PS 강연선을 긴장장비를 이용하여 긴장하여 정착하여야 하는데, 도입 중, 혹은 도입 후에는 프리스트레스의 손실이 발생하기 마련이다. 이렇게 프리스트레스를 도입할 때 일어나는 손실은 즉시손실(Instantaneous Loss)이라 하며, 프리스트레스 도입 후에 일어나는 손실을 시간적 손실(Time Dependent Loss)이라 한다.

포스트텐션 방식으로 제작된 PSC-Beam에 발생하는 프리스트레스의 즉시 손실의 대부분은 다음 세 가지 원인에 의하여 동시에 일어난다. 즉, 정착장치의 활동(Anchorage slip), PS 강재와 쉬스 사이의 마찰

\* 학생회원 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정

\*\* 학생회원 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정

\*\*\* 정회원 성균관대학교 토목환경공학과 부교수

(Friction), 콘크리트의 탄성변형(Elastic Shortening)으로 인한 손실이다. 이 중에서 최종적으로 긴장재에 작용하는 유효 프리스트레스트력에 절대적인 영향을 끼치는 손실은 PS 긴장재의 마찰손실이다. 포스트텐션 보에 있어서는 플라스틱 쉬스에 수용된 강연선의 경우와 긴장재의 곡률이 작은 경우 이외는 정착장치 활동의 영향은 정착장치 근처에 국한되며, 경간 중앙단면에서의 인장력 손실은 극히 미소하다고 할 수 있다. 또한, 콘크리트의 탄성변형으로 인한 손실도 PS 긴장재의 마찰손실에 비하면 극히 작은 값이며, 긴장방법을 적절히 조정하면 손실량을 최소화할 수 있다. 그러므로, 본 연구에서는 PSC-Beam의 손실중 즉시손실에 절대적인 영향을 미치는 마찰손실 거동을 실험적으로 규명하고자 한다.

구조물의 초기 사용성과 안정성을 결정하기 위해서는 구조물에 작용하는 유효 프리스트레스트력을 정확히 산정하는 것이 매우 중요하다. 특히 휨 모멘트가 크게 발생하는 PS 강연선 중간 부분에서는 도입 프리스트레스트가 설계치보다 작은 경우에는 구조물의 내하력이 충분히 확보되지 않음에 유의해야 한다. 도입 프리스트레스트를 확인하기 위해서는 정밀한 계측장치와 실험이 요구되나, 현재 PS 강연선 중간 부분에서의 즉시 손실량 실측 자료도 거의 전무한 상태이다.

PS 강연선 중간 부분에서 설계치의 도입 프리스트레스트값과 실제 도입 프리스트레스트값이 상이한 이유는 주로 PS 강연선의 이론적인 선형이 시공시 정확히 유지되기 어렵고 긴장시 강연선과 쉬스 사이의 실제 마찰계수가 설계치의 적용값과 상이하여 마찰에 의한 실제의 손실량은 설계값과 다소의 차이가 발생할 수 있기 때문이다.

따라서, 본 논문에서는 경간길이 30m 표준단면 PSC-Beam의 PS 강연선 중간 부분에서 마찰손실량을 현장실측하여 현재 적용하고 있는 마찰손실에 대한 설계기준의 적합성을 실험적으로 규명하였으며, 긴장재를 양단긴장할 때와 한단긴장할 때에 대한 마찰손실량을 측정하여 각각의 효율성을 비교, 검토하였다.

## 2. 마찰손실의 이론적 배경

포스트텐션공법에서 PS 강연선과 쉬스관 사이의 마찰로 인한 PS 강연선의 인장력은 긴장재를 재깎하는 곳으로부터 멀어질수록 작아지며, 이를 마찰에 의한 손실이라고 한다. 일반적으로 보다 효율적인 프리스트레싱을 위하여 PS 강연선은 곡선배치를 하게 되며, 이로 인하여 PS 강연선의 곡률에 의한 마찰손실이 발생하게 된다. PS 강연선과 쉬스관 사이의 곡률마찰로 인한 인장력 감소의 이론적인 계산식은 그림 1로부터 유도되며 식(1)과 같다.

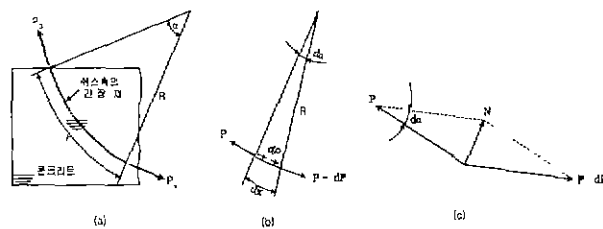


그림 1 곡률마찰에 의한 힘의 자유물체도

$$P_x = P_0 \cdot e^{-\mu\alpha} \quad (1)$$

여기서  $P_x$  : 인장단에서  $x$ 만큼 떨어진 곳의 긴장재의 인장력

$P_0$  : 인장단에서의 긴장재의 인장력

$\mu$  : 각변화 1 radian에 대한 곡률마찰계수

$\alpha$  : 각변화(radian)

또한, 직선배치의 쉬스관을 사용할 경우에 PS 강연선과 쉬스관이 완전히 직선일 수는 없으므로 현장시공에서 PS 강연선의 파상의 영향을 피할 수가 없다. 따라서 긴장재를 직선이나 곡선으로 배치할 때 각변화로 인한 마찰손실이 발생하게 된다. 이러한 인장력의 손실을 긴장재 길이의 영향 또는 파상의 영향으로 인한 손실이라고 한다. 파상효과에 따른 마찰손실을 고려하기 위하여 식 (1)에  $\mu\alpha$  대신에 인장단에서 거리  $x$ 에 단위길이 당 파상마찰계수를  $k$ 배 한  $kx$ 로 치환하면 식 (2)와 같다.

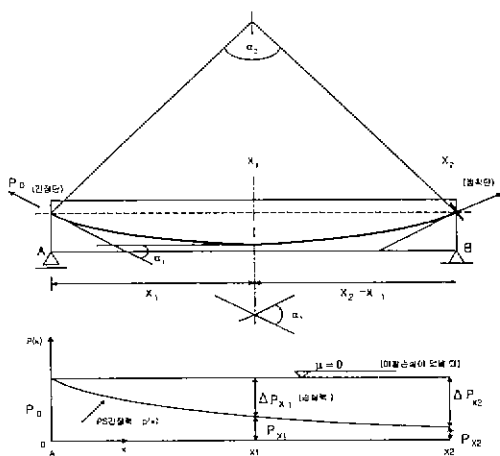


그림 2 마찰로 인한 PS 인장력의 손실량 ( $\Delta P$ )

$$P_x = P_0 \cdot e^{-kx} \quad (2)$$

여기서,  $k$  : 긴장재 길이 1 m에 대한 파상마찰계수

일반적으로 곡선으로 배치된 PS 강연선의 경우에 이러한 두 가지 영향을 동시에 받으므로 마찰손실의 총합은 식(3)과 같다.

$$P_x = P_0 \cdot e^{-(\mu\alpha + kx)} \quad (3)$$

PS 강연선을 긴장할 때 긴장단에서 멀어질수록 PS 긴장력이 감소하고 있는 것을 그림 2에서 알 수 있다. 따라서 정착단과 긴장단에서의 PS 긴장력은 상당한 차이가 나므로 이에 대한 정확한 계산이 필요하다.

### 3. 현장 마찰 측정 실험

#### 3.1 시험체 선정

본 실험에서 사용한 시험체는 한국도로공사 표준설계도에 의해 제작된 30m PSC-Beam 2개를 사용하였다. 각각의 PSC-Beam에 사용된 PS 강연선은 국내 건설현장에서 가장 많이 사용되고 있는  $\phi 12.7$  mm 저이완 PS 강연선이다. PS 강연선에는 보통이완 강연선과 저이완 강연선으로 나눌 수 있다. 일반적으로 PSC 구조물에서의 프리스트레스 손실은 정착장치에서의 활동, 콘크리트의 탄성수축, 긴장재의 곡률과 길이에 의한 파상 마찰, 크리프, 건조수축 및 PS 강재의 이완 등의 원인으로 발생한다. 이러한 저이완 PS 강연선의 손실율은 보통 5% 내외이며, 보통이완 강연선 비해 4배 이상 감소시킬 수 있는 장점을 지니고 있다. 실험에 사용된 PSC-Beam의 표준도는 그림 3 같다.

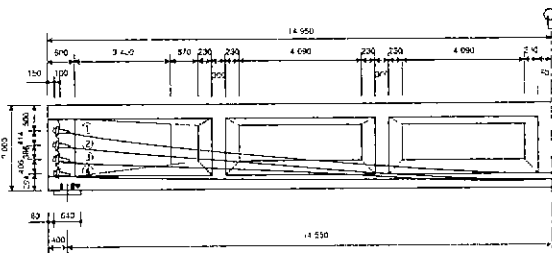


그림 3 PSC-Beam 표준도

#### 3.2 시험체 분류 및 실험방법

본 연구에서 실시한 PSC-Beam 마찰손실에 대한 현장측정 실험은 한국도로공사 PSC-Beam 표준 설계도에 의해 현장에서 제작된 30m PSC-Beam 2개를 대상으로 하였다. 2개의 PSC-Beam을 시험체 1과 시험체 2로 나누어 시험체 1은 긴장재 ③번을 양단 긴장, 시험체 2는 긴장재 ①번을 한단 긴장하였다. 본 논문에서는 시험체 1을 FTOE, 시험체 2를 FTBE로 칭하기로 한다.

긴장하는데 사용된 유압잭의 압력단위는  $40 \text{ kgf/cm}^2$ 로 하였다. 각각의 PSC-Beam은 긴장재의 탄성 한계를 고려하여 시험체 FTOE는 130tonf, 시험체 FTBE는 100tonf 까지 12.156tonf씩 단계별로 긴장하였다. 각각의 시험체에서는 한 개의 긴장재만을 긴장하였고 긴장완료 후 정착단에 정착하지 않음으로써 PS 강연선과 쉬스 사이의 마찰만을 고려하게 하였다. 긴장단에서의 긴장력 측정은 유압잭에 설치된 압력 게이지에 나타나는 압력계수에 유압단면적을 곱하여 구하였다. PS 강연선 증앙의 마찰손실량을 측정하기 위하여 각 시험체 당 2개의 변형율게이지(Steel Strain Gauge)를 부착하였다 PSC-Beam

중앙 단면의 마찰에 의한 도입력 손실은 변형률계이기로 측정된 변형율을 이용하여 응력을 산정함으로써 구할 수 있다. 하중 단계별 PS 강연선의 변형율은 변형률 측정장치인 EDX-1500A로 측정하였다.

PSC-Beam의 경간 중앙 단면에 변형률계이기를 부착할 수 있는 공간을 만들어주기 위하여 PSC-Beam 콘크리트 타설전 20×20×60 cm의 박스를 제작, 측정대상 긴장재 위치에 맞게 거치시켰으며, 쉬스관도 20×20 cm 크기로 절개하여 변형률계이기를 12개의 강연선 중 외부 강연선에 부착시킬 수 있도록 하였다. 변형률계이기의 부착위치는 그림 4와 그림 5와 같다.

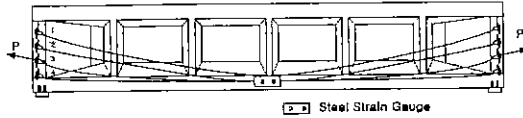


그림 4 시험체 FTBE의 변형률계이거 부착위치

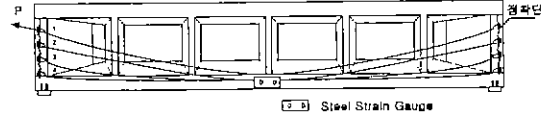


그림 5 시험체 FTOE의 변형률계이거 부착위치

#### 4. 실험결과 및 분석

##### 4.1 PSC-Beam 중앙부의 이론적 마찰손실량

PSC-Beam 중앙단면의 마찰손실에 대한 이론값과 실측값의 관계를 비교하기 위하여 현재 국내에서 사용하는 설계기준에 의거하여 이론적 손실량을 산정하였다. 곡률마찰계수  $\mu$ 와 파상마찰계수  $k$ 는 PSC-Beam설계에 사용된 값을 사용하였다. 마찰계수 값은 시험에 의하여 구하는 것이 원칙이지만 긴장재의 종류가 PS 강연선이고 덕트의 종류가 아연도금 쉬스일 경우 도로교시방서에서 적용하고 있는 값 ( $\mu=0.25$ ,  $k=0.005$ )을 사용하였다.

실측값과 이론값을 비교하기 위하여 시험체 FTOE의 긴장재 ①번과 시험체 FTBE의 긴장재 ③번에 대해서 이론적 마찰손실값을 구하였으며 그 결과는 표 1, 2와 같다.

표 1 긴장재 ①의 초기 프리스트레스력과 마찰손실량

긴장부 인장력(tonf)	PSC-Beam 경간 중앙 인장력(tonf)	손실량(tonf)
10	8.891627	1.1083726
20	17.78325	2.2167452
30	26.67488	3.3251178
40	35.56651	4.4334904
50	44.45814	5.541863
60	53.34976	6.6502356
70	62.24139	7.7586082
80	71.13302	8.8669808
90	80.02465	9.9753534
100	88.91627	11.083726

표 2 긴장재 ③의 초기 프리스트레스력과 마찰손실량

긴장부 인장력(tonf)	PSC-Beam 경간 중앙 인장력(tonf)	손실량(tonf)
10	9.1023725	0.897628
20	18.204745	1.795255
30	27.307117	2.692883
40	36.40949	3.59051
50	45.511862	4.488138
60	54.614235	5.385765
70	63.716607	6.283393
80	72.81898	7.18102
90	81.921352	8.078648
100	91.023725	8.976275
110	100.1261	9.873903
120	109.22847	10.77153
130	118.33084	11.66916

##### 4.3 이론치와 실측치 비교

그림 6과 그림 7에서는 하중단계별로 경간 중앙 단면에 도입되는 현장실측 긴장력을 PSC-Beam 표

준단면 설계시 사용된 곡률마찰계수와 파상마찰계수를 이용한 이론적 도입 긴장력과 비교하였다. 양단 긴장일 경우, 긴장이 완료된 후 PSC-Beam의 경간 중앙 단면의 도입력은 긴장부 도입력에 대하여 FTBE 1은 92.76%, FTBE 2는 92.5%이었다. 이론적 도입력은 91.02%로서 실제 도입되는 프리스트레스력은 평균 1.61% 정도 상회하였다. 한단 긴장일 경우 FTOE 1은 85.7%, FTOE 2는 82.35%이었다. 이론적 도입력은 88.94%로서 실제 도입되는 프리스트레스력은 평균 4.92% 정도 낮았다. 시험체 FTBE와 시험체 FTOE의 이론적 도입력이 서로 다른 이유는 곡률변화가 다른 긴장재 ③번과 긴장재 ①번에 대해서 측정하였기 때문이라고 판단된다.

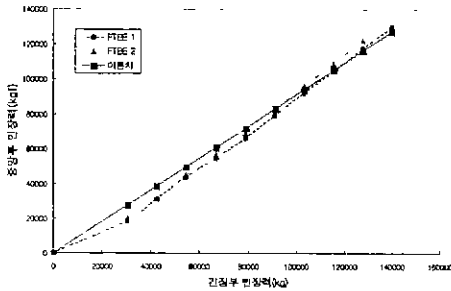


그림 6 시험체 FTBE의 긴장부 인장력과 중앙부 인장력의 비교

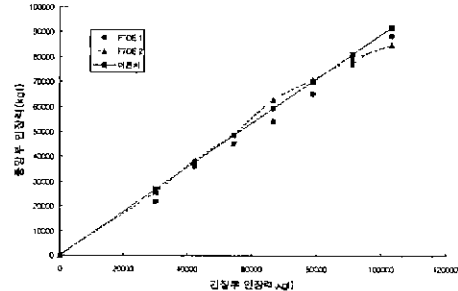


그림 7 시험체 FTOE의 긴장부 인장력과 중앙부 인장력의 비교

그림 8과 그림 9에서는 시험체 FTBE와 시험체 FTOE에 대해서 PSC-Beam 경간 중앙단면의 실측 마찰손실량과 이론적 손실량을 비교하였다.

양단긴장일 경우, 긴장이 완료된 후 경간 중앙 단면에서 발생하는 마찰손실값은 이론적인 마찰손실량보다 평균 18.3% 정도 낮았다. 한단긴장일 경우, 긴장이 완료된 후 마찰손실값은 이론적인 마찰손실량보다 44% 크게 나타났다. 이로부터 PSC-Beam을 긴장하는 동안은 실측치가 이론적 즉시손실량보다 값이 크게 나오고, 긴장이 완료되는 구간에서는 손실량이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 초기 긴장시에는 긴장력이 경간 중앙 단면까지 완전히 전달되지 못하다가 긴장력이 커지면서 긴장력이 중앙 부분까지 도달되기 때문으로 판단된다.

FTBE와 FTOE를 비교할 때 FTOE의 각변화량이 크므로 FTOE의 마찰손실량의 값이 상대적으로 크게 나타났고, 이론적 마찰손실과의 오차도 적음을 알 수 있었다.

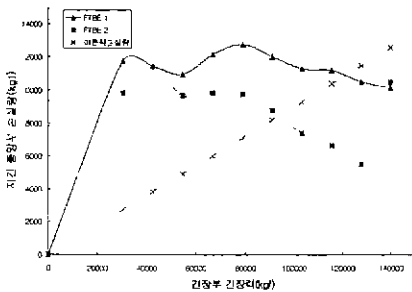


그림 8 시험체 FTBE의 이론적 마찰손실량과 실측치의 비교

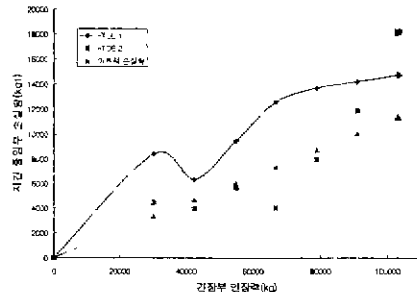


그림 9 시험체 FTOE의 이론적 마찰손실량과 실측치의 비교

## 5. 결 론

PSC-Beam의 부재력을 산정하는데 절대적인 영향을 미치는 요소는 PS 강연선 긴장 후 잔류하는 유효프리스트레스력이다. 초기 유효 프리스트레스력을 결정하는 데 큰 영향을 미치는 요소는 PS 강연선 긴장 도중에 발생하는 마찰손실이다.

본 연구에서는 현장에서 시공되고있는 30m 표준단면 PSC-Beam을 이용하여 마찰손실량을 실험적으로 구하였다. 그리고, 도로교 시방서에서 제시한 곡률마찰계수  $\mu$ 와 파상마찰계수  $\kappa$ 를 사용하여 이론적인 마찰손실량을 산정하였으며 그 결과를 실험치와 비교하였다.

본 연구의 제한적 범위하에서 도출한 결과는 다음과 같다.

(1) 양단 긴장 시험체의 경우 긴장이 완료된 후 마찰손실량이 이론치에 비하여 18.3% 정도 낮았고, 한단 긴장 시험체의 경우는 44% 정도 상회하였다.

(2) 긴장력 산정시 양쪽을 동시에 긴장을 할 경우 경간중앙의 PS 강연선은 초과긴장을 하게 되므로 설계시 실제 긴장력을 작게 하고, 한쪽을 긴장할 경우 계산한 값보다 초과긴장을 하는 것이 바람직 하다고 판단된다.

(3) 현재 프리스트레스력 손실량 계산시 각각의 긴장방법, 즉 한쪽에서 긴장했을 때와 양쪽에서 동시에 긴장했을 때에 대해서 구분 없이 같은 마찰계수를 사용하여 손실량을 산정하고 있다. 비록 곡률 마찰계수와 파상마찰계수는 PS 강연선과 쉬스관의 재료적 특성이지만 각각의 긴장방법에 대해 마찰계수를 보정하여 보다 정밀한 손실량을 계산하는 것이 타당하다고 판단된다.

## 참고 문헌

1. 건설교통부, 도로교표준시방서, 1996.
2. 건설교통부, 콘크리트표준시방서, 1996.
3. 문제길, 이재형, "PS 콘크리트 구조물에서 마찰손실을 고려한 긴장력 결정에 관한 연구," 대한토목학회논문집, 제17권, 제 I-1호, 1997, pp. 89-99.
4. 박선규, "프리스트레스트 콘크리트 구조물의 해석 및 설계," 한국전산구조공학회, 1998.
5. 신현목, "프리스트레스 콘크리트. 동명사," 1993.
6. 藤井"コンクリート構造用鋼材の種類とその性能プレストレストコンクリート用鋼材", 콘크리트工学, Vol. 17, No. 7, 1979, pp.26-30.
7. Collins, M . P and Mitchell, D., "Prestressed concrete structures," Prentice-Hall, Inc., 1991.
8. Naaman, A . E ., "Prestressed concrete analysis and design," McGraw-Hill Book Company, New York, N. Y., 1982.
9. Nawy, E .G ., "Prestressed concrete," Prentice-Hall, Inc., 1996.