

# P.C. 박스 교량의 긴장력 손실에 관한 연구

## A Study on the Prestress Losses of the P.C. Box Girder Bridge

이 성우\*      이 지영\*\*      지 기환\*\*\*  
Lee, Sung Woo   Rhee, Ji Young   Jee, Kee Hwan

---

### ABSTRACT

Until now, the evaluation of prestressing force during the service state has received limited attention. Only initial prestressing force is estimated by reading the pressure values of a hydraulic jack or by observing the initial elongation of tendons. In this study, the initial losses and time dependent losses of prestressing force have been monitored by installing 12 vibrating wire-type load cells at the part of P.C. box bridge of Gangbyun Riverside Highway. Also comparative study was made for measured prestressing losses and estimated values. 2-dimensional analysis was performed to see the trend of prestressing losses, and the results was compared with measured ones.

---

### 1. 서론

공용상태에서의 P.C. 교량의 긴장력은 최초에 긴장장치에서 측정된 긴장력과 다르며 여러 가지 영향에 의해 감소한다. 현재까지 국내에 시공된 P.C. 박스 교량의 경우, 재료에 대한 품질관리는 이루어졌으나 긴장력은 유압잭의 압력계나 긴장재의 신장량만으로 평가하였을 뿐, 실제 손실이나 과정에 대한 연속적인 관리는 이루어지지 않고 있는 실정으로 이에 대한 연구의 필요성이 대두되었다. 따라서 본 논문에서는 서울 도시고속화도로 강변북로 제 1-2공구 일부 구간에 로드셀을 설치하여 긴장단계에서부터 이후 공용상태까지 시간에 따른 긴장력 변화를 계측하여 이를 국내의 시방 규정과 비교·평가한 연구<sup>1)</sup>의 주요부를 수록하였다.

### 2. 대상 교량 및 로드셀 설치

본 연구 대상 교량은 서울시 내부순환고속도로의 일부 구간으로 국내에서 처음 시공되는 외부긴장방식 프리캐스트 세그멘탈 공법을 이용하여 건설되었다. 이 교량은 한 경간의 길이가 50m 이고 17개의 분절로 이루어졌으며 내부에 지름이 13mm 스트랜드 27가닥으로 구성된 14개의 외부 긴장식 텐던을 이용하여 압착시켜 놓은 교량이다. 본 교량의 텐던 내부 배치 모습은 그림 1에 나타나 있으며 그림 2~4에는 각 세그의 단면도로 텐던의 정착위치를 보여주고 있다.

대상교량에 대해 긴장력을 측정하기 위한 로드셀의 설치 위치는 표 1과 그림 5~6에 나

- 
- \* 국민대학교 토목환경공학부 교수
  - \*\* 한국도로공사 연구원
  - \*\*\* 인프라구조안전연구소 연구원

타난 바와 같다. 로드셀은 그림 7과 같이 하중 방향에 직교 방향으로 설치하였다. 로드셀은 초기 긴장 단계에서부터 계측하였으며, 판독을 위해서는 MB-6T가 사용되었다. 계측 횟수는 설치 하루 후부터 1주일간 하루에 1회, 1주일 후 한달간 1주일에 1회, 1달 후 6개월간은 2주일에 1회씩을 원칙으로 하였다.



그림 1. 외부긴장식 텐던 단면

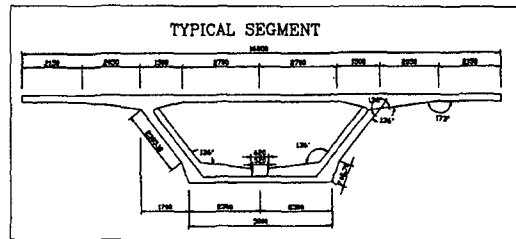


그림 2. 표준 세그 단면도

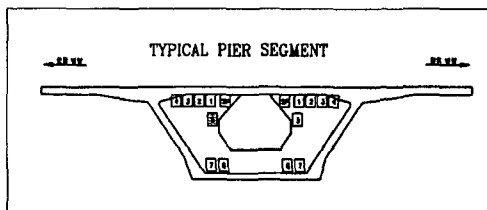


그림 3. 피어 세그 단면도

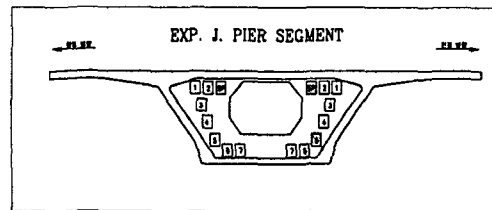


그림 4. 신축이음부 세그 단면도

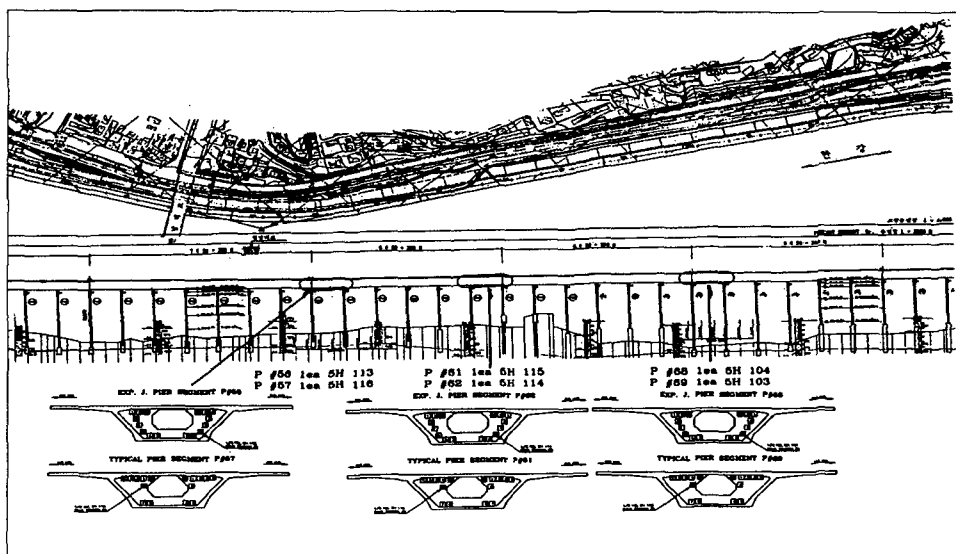


그림 5. 외부긴장식 텐던에 대한 로드셀 설치위치도

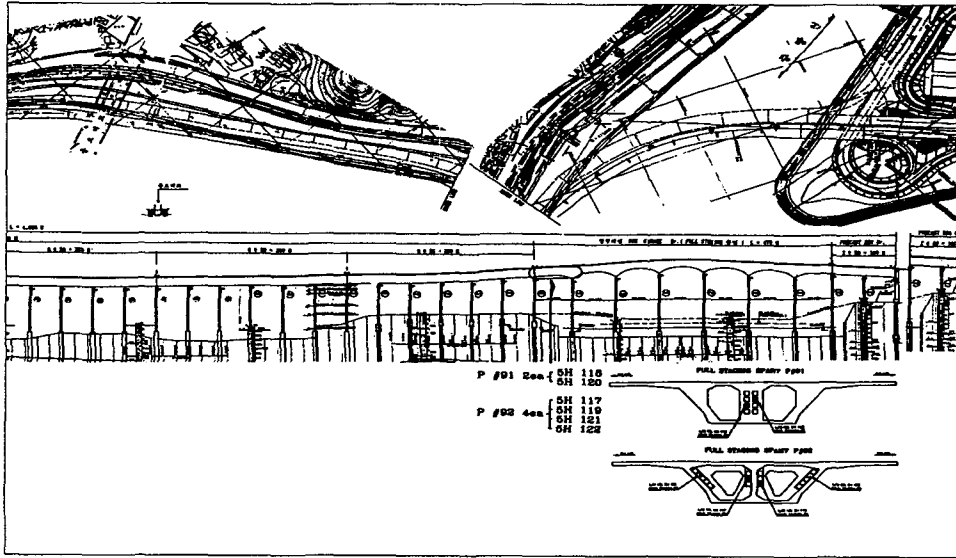


그림 6. 내부긴장식 텐던에 대한 로드셀 설치위치도

표 1. 로드셀 설치 위치

설치위치	로드셀 no.(피어 no.)		설치 텐돈 no.
	긴장단	고정단	
스팬 #28	5H103(P69)	5H104(P68)	#5
스팬 #35	5H115(P61)	5H114(P62)	#5
스팬 #40	5H116(P57)	5H113(P56)	#5
스팬 #7	5H119(P92)	5H120(P91)	#122(한강측)
	5H117(P92)	5H118(P91)	#125(철도측)
	5H121(P92)	-	#105(한강측)
	5H122(P92)	-	#105(철도측)

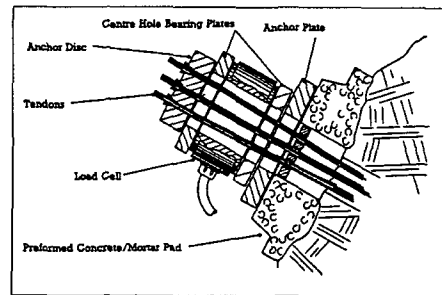


그림 7. 로드셀 설치 상세도

### 3. 긴장력 손실

초기 긴장력 손실 계산은 PCI 추천 기준을 이용하여 실시하였다.<sup>2)</sup> 손실계산시 외부긴장방식인 경우는 파상마찰계수  $K=0.00066$ , 곡률마찰계수  $\mu=0.25$ , 내부긴장방식의 경우 파상마찰계수  $K=0.0024$ , 곡률마찰계수  $\mu=0.2$ 로 가정하였다. 정착부 슬립은 6mm를 적용하였다. 표 2는 각 텐던의 긴장단과 고정단에 대한 초기 손실 계산치를 수록하였다. 스팬 7번은 곡선부인 판계로 텐던 #122와 #125는 단면에 대칭으로 위치해 있으나 초기 손실은 서로 1톤 정도 차이가 난 것으로 계산되었다.

시간에 따른 긴장력의 손실은 도로교시방서 (1996)<sup>3)</sup>, AASHTO LRFD (1994)<sup>4)</sup>와 ACI-209 (1982)<sup>5)</sup>, CEBS-FIP (1978)<sup>6)</sup>에서 제시된 식을 이용하였다. 그림 8에는 스팬 28에 대해서 계산된 결과치로 상대 습도는  $H=70\%$ 로 가정하였고 각 세그는 24시간 스팀 양생 후 28일 강도를 보유한 후에 시공된 것으로 가정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 총손실에서 도로교시방서는 AASHTO에 근접하는 형태를 나타냈으며 ACI에 따른 계산이 손실을 가장 많이 평가하는 것으로 나타났다.

표 2. 시방 규정에 의한 초기 손실 계산 결과

스팬 no.	$\Delta P_{Total}$ (ton)		비고
	긴장단	고정단	
스팬 #28	87.21	98.14	#5
스팬 #35	85.20	96.26	#5
스팬 #40	85.98	97.10	#5
스팬 #7	86.94	100.49	#122(철도측)
	87.60	101.13	#125(한강측)
	87.52	-	#105(철도측)
	87.43	-	#105(한강측)

법례 : — AASHTO LRFD    - - 도로교시방서  
 - · - ACI-209        — CEB-FIP

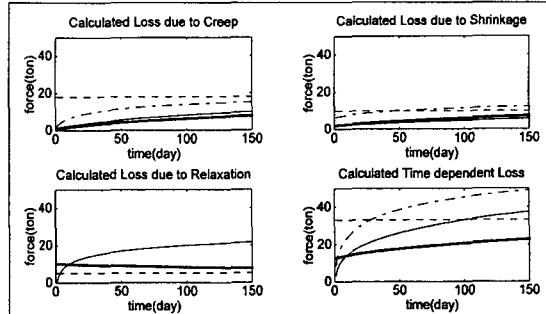


그림 8. 스팬 #28 시간의존적 손실 계산 결과 비교

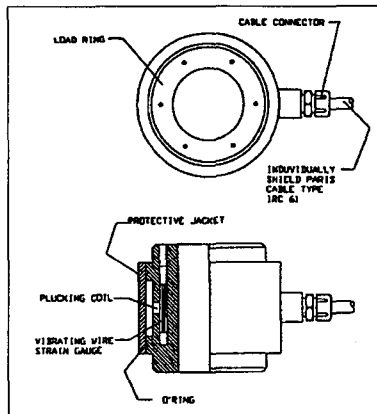


그림 9. VH 로드셀의 개략도

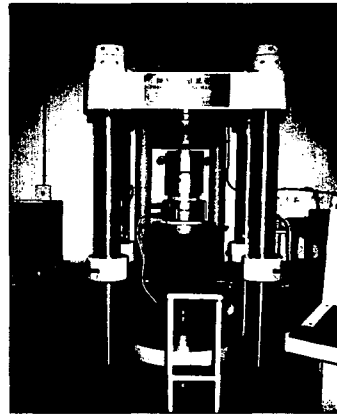


그림 10. 로드셀 보정실험 모습

#### 4. P.C. 박스 교량의 긴장력 계측

##### 4.1 진동현식 로드셀

진동현식 VH 로드셀은 초기에는 Rock Bolting이나 Tie-back system 같은 전기 저항식 변형 게이지 로드셀이 부적절한 환경 상태에 쓰이기 위해 설계되었다. 본 연구에 사용된 VH 로드셀의 그림 9와 같이 400ton용으로 몸체는 강체로 만들어졌으며 60° 위치로 6개의 진동식 변형 게이지가 위치한다. 각 게이지는 전원이 들어오면 전자석 코일에 의해 진동되고 게이지들의 평균 변형을 각 로드셀의 수식에 대입하여 하중으로 환산된다.

로드셀의 보정실험은 그림 10에 나타난 바와 같이 표준과학연구소에서 실시하였다. 실험 결과, 각 로드셀은 적용된 하중에 대해서 선형성을 잘 나타내는 것으로 밝혀졌다. 로드셀이 로딩-프레임의 플레튼과 슈비벨의 크기에 따라 보정계수가 달라지는 것이 이미 알려져 있었으며<sup>7)</sup> 본 실험을 통해 확인되었다. 본 연구에서는 긴장단에 설치되는 로드셀에 대해서는 각각 정착구 헤드 크기의 림(∅188-220)과 로딩 잭의 크기와 같은 림 크기의 림(∅245-320)을 사용하여 보정계수를 구하였고, 정착단의 로드셀에 대하여 정착구 헤드 크기의 림을 이용하여 실험하였다.

표 3. 초기 손실 비교 (ton)

스팬 no.	도입 긴장력 ( $P_i$ )	긴장시 계측값		정착직후 계측값( $P_j$ )		손실량 ( $\Delta P = P_j - P_i$ )		비고
		긴장단	고정단	긴장단	고정단	긴장단	고정단	
스팬 #28	413.53	385.23	274.69	291.15	274.71	122.38	138.82	#5
스팬 #35	413.53	359.10	289.71	290.06	289.16	123.47	124.27	#5
스팬 #40	413.53	390.93	288.57	313.65	288.53	99.88	125.00	#5
스팬 #7	405.87	397.07	305.72	350.05	305.24	55.82	100.63	#125(한강측)
	405.87	396.26	288.41	295.61	287.92	110.26	117.95	#122(철도측)
	405.87	391.15	-	334.19	-	71.68	-	#105(한강측)
	405.87	385.40	-	285.65	-	120.22	-	#105(철도측)

#### 4.2 계측 결과 분석

##### (1) 초기 손실 계측 결과

긴장력은 각 로드셀을 이용하여 긴장단계부터 계측하였다. 표 3에는 각 긴장재의 정착 전후의 손실값을 수록하였고 4.3에서 계산결과와 비교·분석하였다. 표에서 보는 바와 같이 외부정착 방식의 경우(스팬 #28, #35, #40), 잭의 긴장시 긴장단의 로드셀에 의한 값은 유압잭보다 3~13%의 낮은 값을 보이는데 이는 여러 가지 원인에 의한 피스톤과 실린더 사이의 마찰로 볼 수 있다.<sup>8)</sup> 내부정착방식(스팬 #7)인 경우, 곡률을 가지고 있어서 단면에 대칭으로 설치된 텐던의 계측값이 초기 손실 후에 최대 50ton 차이를 보였으며 곡률의 안쪽인 한강측의 텐던이 손실이 작게 나타났다.

##### (2) 시간의존적 손실 계측 결과

그림 11~13에는 로드셀을 이용하여 긴장력 변화를 계측한 결과를 수록하였다. 그림에 보이는 바와 같이 긴장단의 로드셀은 긴장 직후에는 심한 손실을 나타내며 약 50일 후에는 안정된 값을 보여주고 있다. 그러나 각 게이지별로 편차가 많이 나타났으며 이는 로드셀이 설치된 텐던 #5는 정착구에 대해 25%의 기울기로 인한 영향과 앵커부의 복잡한 응력분포로 인한 편차가 있을 것으로 사료되므로 이에 관한 연구가 더 필요할 것으로 보인다.

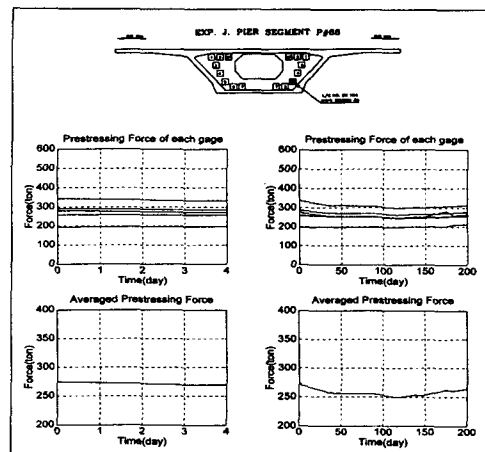
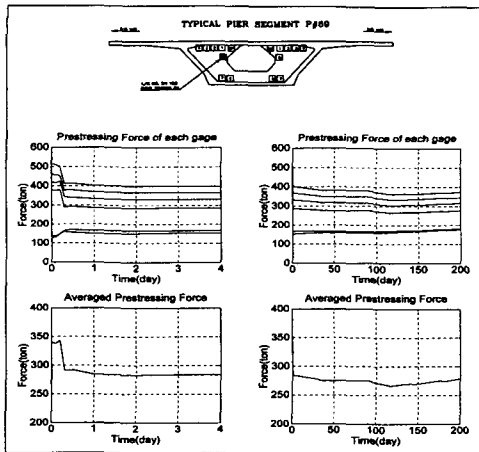
#### 4.3 시방 규정 비교 분석

##### (1) 초기 손실 비교 분석

표 4는 정착 직후의 긴장력 계측값과 시방 규정에 의해 계산된 초기 손실값을 비교한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 외부정착방식 텐던의 긴장력은 시방서에 의한 계산값과 0~9%의 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 그러나 내부정착방식의 경우 곡률의 안쪽에 대해서는 긴장력이 과대평가되거나 대칭부는 과소평가되는 것으로 곡선교의 경우 시방서에 의한 손실 계산시에는 특별한 고려를 해야할 것으로 사료된다.

##### (2) 시간의존적 손실 비교 분석

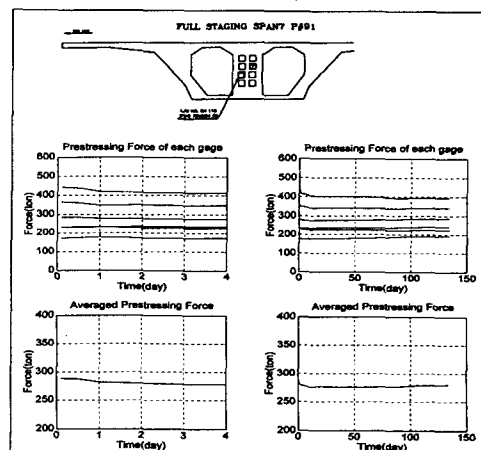
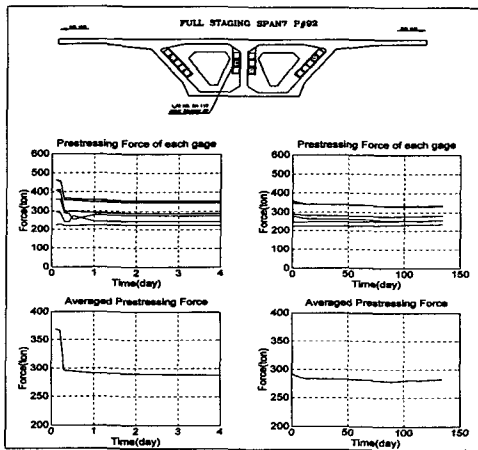
그림 14~16은 시간에 따른 긴장력의 변화를 각종 시방 규정과 비교한 것으로 첫번째 그래프는 도로교시방서와 비교한 결과로 계측값은 일괄적으로 평균값을 사용하였다. 그림 14에 나타난 바와 같이 외부긴장방식은 계측치와 시방서에 의한 계산치가 긴장단과 고정단 모두 근접한 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며 CEB-FIP 규정에 의한 손실 계산이 가장 근접한 것을 보여주고 있다. 그림 15와 16은 내부긴장방식을 단면에 대칭인 텐던의 계측값과 비교한 것으로 계측에 의한 결과는 서로 20~50ton의 차이가 나는 반면, 시방 규정에 의한 결과는 이러한 특성을 반영하지 못한 것으로 나타났다.



(a) 긴장단 5H103

(b) 고정단 5H104

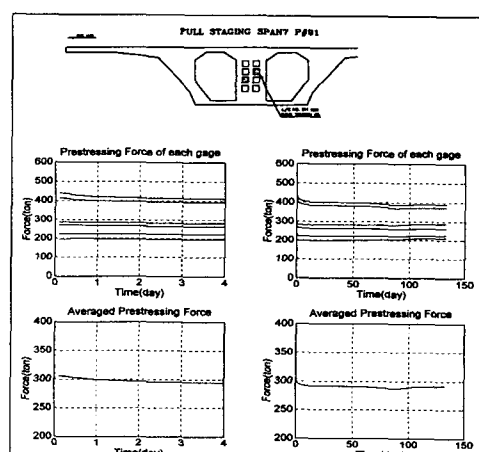
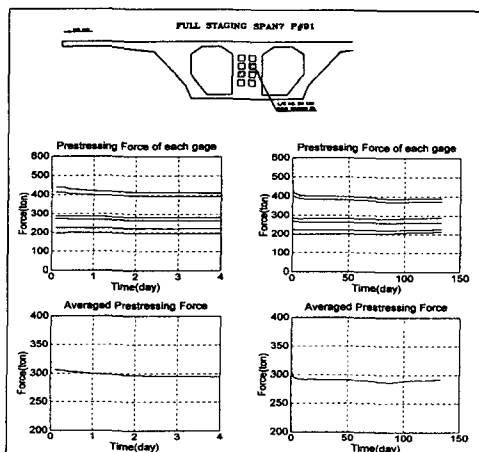
그림 11. 스팬 #28 긴장력 계측 결과



(a) 긴장단 5H117

(b) 고정단 5H118

그림 12. 스팬 #7, 텐던 125 긴장력 계측 결과



(a) 긴장단 5H119

(b) 고정단 5H120

그림 13. 스팬 #7, 텐던 122 긴장력 계측 결과

표 4. 정착 직후 긴장력 비교 (ton)

스팬 no.	로드셀 계측 결과		시방 규정 적용		비고
	긴장단	고정단	긴장단	고정단	
스팬 #28	303.24	284.79	312.79	301.86	#5
스팬 #35	290.06	289.16	314.80	303.74	#5
스팬 #40	313.65	288.53	314.02	302.90	#5
스팬 #7	350.05	305.24	313.06	299.51	#125(한강측)
	295.61	287.92	312.40	298.87	#122(철도측)
	334.19	-	312.48	-	#105(한강측)
	285.65	-	312.57	-	#105(철도측)

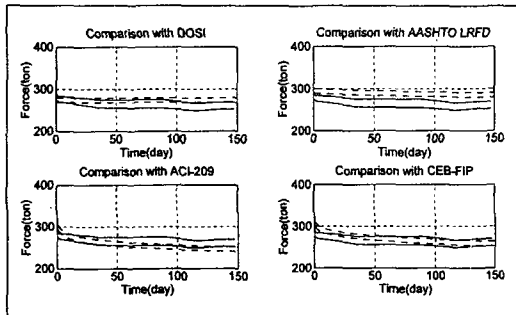


그림 14. 스팬 #28 긴장력 변화 비교

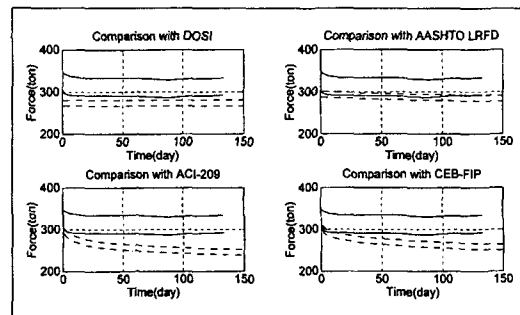


그림 15. 스팬 #7 텐던 #122 긴장력 변화 비교

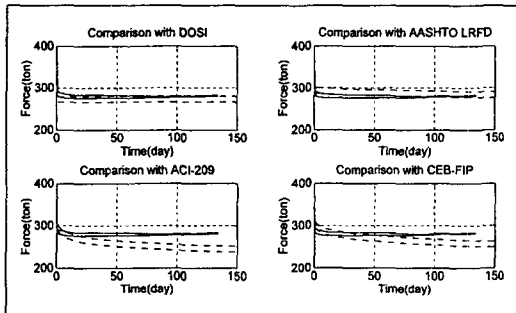


그림 16. 스팬 #7 텐던 #125 긴장력 변화 비교

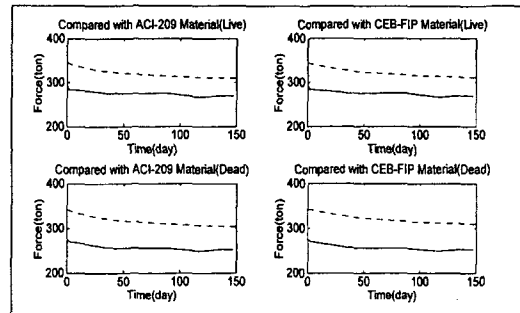


그림 17. 시간에 따른 텐던의 긴장력 변화

## 5. 구조 해석을 통한 손실 분석

### 5.1 구조 해석 모델 개요

긴장력의 손실 변화와 수치해석에 의한 결과와의 비교를 위해서 외부긴장방식인 6스팬에 대하여 2차원 구조 해석을 실시하였다. 시간에 따른 손실을 고려하기 위하여 시간 의존 해석이 가능한 ADAPT-ABI를 사용하였다. 외부긴장방식인 연속 6스팬의 경계조건은 모두 롤러이고 중앙부만 한지기로 가정되었다. 거더는 프레임 요소를 이용하였고, 텐던 역시 휨강성을 고려할 수 있는 프레

임 요소로 두 부분은 강성 요소로 연결하였다. 각 스패는 14일 주기로 완성된 후 외부식 텐던을 이용하여 긴장한 것으로 가정하였다. 총 6스패이 완성된 후 긴장력 손실의 시간의존적 요소로는 크리프, 건조 수축, 콘크리트 재령, 그리고 긴장재의 릴랙세이션을 고려하였고 온도에 의한 영향은 무시하였다.

## 5.2 해석 결과

사용된 콘크리트 모델은 위에서 언급한 ACI-209(1982)와 CEB-FIP(1978) 두 가지의 경우로 나누어 해석을 수행하였다. 계수는 정착단 슬립이 7mm, 최종 건조수축계수 3.5, 최종 크립계수 0.0008, 파상마찰계수  $0.00067m^{-1}$ , 그리고 곡률마찰계수  $0.257rad^{-1}$ 로 가정하였다. 그림 17에는 각 경우에 따른 구조 해석상 예측된 긴장력을 스패 #28의 계측값과 비교한 것이다. 예측된 긴장력의 손실 경향은 유사하게 보이나 계측값에 비해 전체적으로 10~20% 정도 크게 나타났다. 이는 2차원 구조해석시 텐던의 횡방향 곡률 손실이 고려되지 않았으며 기타 시공오차 등이 상세히 반영되지 않은 영향이 있을 것으로 판단되며 긴장력이 다소 과대평가될 우려가 있음을 알 수 있었다.

## 6. 결론

본 연구에서는 서울 도시고속화도로 강변북로 제 1-2공구 일부 구간에 진동현식 로드셀을 설치하여 긴장단계에서부터 이후 공용상태까지 시간에 따른 긴장력을 계측하여 이를 국내의 시방 규정과 비교·평가하고자 하였다. 연구 결과, 정착 전후 책의 압력계와 실 하중계의 긴장력은 5~10%의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 초기 손실과 시간에 따른 손실에 대한 도로교시방서, AASHTO LRFD, ACI-209, CEB-FIP의 규정에 따른 계산치와 외부긴장방식의 긴장정착단 3곳, 고정정착단 3곳의 설치된 계측값의 비교 결과 외부정착방식인 경우 CEB-FIP 규정이 가장 근접한 곡선을 보여주었다. 그러나 곡선교인 내부긴장방식으로 긴장된 텐던에 대해서는 곡률의 안과 밖의 계측값이 약 50ton까지 나타났으며 손실 계산시 특별한 고려가 필요한 것으로 사료된다. 또한 2차원 구조해석 결과 예측된 긴장력의 손실 경향은 계측치와 비슷하게 나타났으나 전체적으로 10~20% 정도 크게 나타나는 것으로 보아 긴장력이 다소 과대평가될 우려가 있음을 알 수 있었다.

## 7. 참고 문헌

1. 이지영, "P.C. 박스 교량의 긴장력 손실에 관한 연구", 석사학위논문, 국민대학교, 1997.
2. PCI Committee on Prestress Losses, "Recommendations for Estimating Prestress Losses," PCI Journal, Vol. 20, No. 4, July-August 1975, pp. 43-75.
3. 건설부, "도로교표준시방서", 대한토목학회, 1996.
4. AASHTO, "LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS," AASHTO, Washington, D.C., 1994.
5. ACI-209, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, Designing for Creep and Shrinkage in Concrete Structure," ACI publication SP-76, American Concrete Institute, Detroit, 1982, pp. 193-300.
6. CEB, "CEB-FIP Model-Code for Concrete Structures," Bulletin d' Information, 124/125E, Comite' Euro-International du Beton, Federation International de la Precontrainte, Paris, 1978, 348 pp.
7. Barrie Sellers, "Load Cell Calibrations," Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance.
8. John Dunncliff, "Calibrated Hydraulic Jack," Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. 557 pp.