

# 잔존프리스트레스 측정을 위한 새로운 접근법 제안

## A Suggestion of New Approach for Measurement of Remaining Prestress

이창수<sup>\*</sup>  
Lee, Chang Soo

김승익<sup>\*\*</sup>  
Kim, Seung Ik

김현겸<sup>\*\*\*</sup>  
Kim, Hyeon Kyeom

---

### ABSTRACT

The new approach is a kind method of restoring temporary defect. Here, it is important for the defect not to occur problems of both local effect and global system. A basic concept is that it measures remaining prestress of PSC structures during the defect is restored.

This study suggested new approach for measurement of remaining prestress. Two important results are obtained. First, safety problems, local stress concentration and global system, are very satisfied. Second, measurement value exists within error bound  $\pm 1\%$  in comparison with known value.

---

### 1. 서론

공용중인 수많은 프리스트레스트 콘크리트(이하 PSC) 구조물들은 다양한 원인에 의한 프리스트레스 힘의 손실로 지속적인 내하성능저하가 진행되고 있다. 하지만, 현재 이에 관한 진단평가방법의 발전은 전혀 이루어지지 않고 있다.

콘크리트와 긴장재의 장기효과에 의한 손실은 재료특성과 주변환경 변화에 의하여 상당한 영향을 받으므로, 장기효과를 항목별로 정확히 분석하는 것은 거의 불가능하다. 이러한 효과들 때문에 PSC 구조물들의 잔존프리스트레스 예측이 어려우며, 동시에 필요한 것이다. 하지만, 현재로서는 그렇다할 예측기법이 소개된 적이 없었으며, 단지 모멘트-곡률 사이의 상관관계를 이용한 방법이 소개된 적이 있었으나 기대되는 성과를 거두지 못하였다.

- 
- \* 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수
  - \*\* 정회원, 후레씨네 코리아 기술부 상무이사
  - \*\*\* 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

본 연구에서는 공용중인 PSC 구조물의 잔존프리스트레스를 예측하기 위한 새로운 기법을 제시하고 이를 이용한 방법의 이론적인 근거자료를 마련하였다.

## 2. 측정기법의 원리

전체 구조계뿐만 아니라 국부적인 문제도 발생시키지 않는 미소한 손상을 생성시킨 후, 이 손상이 회복되는 과정을 통하여 현재 공용중인 PSC 구조물의 잔존프리스트레스를 측정하고자 하는 것이다 이에 대한 개념도를 (Fig. 2.1)로 나타내었다.

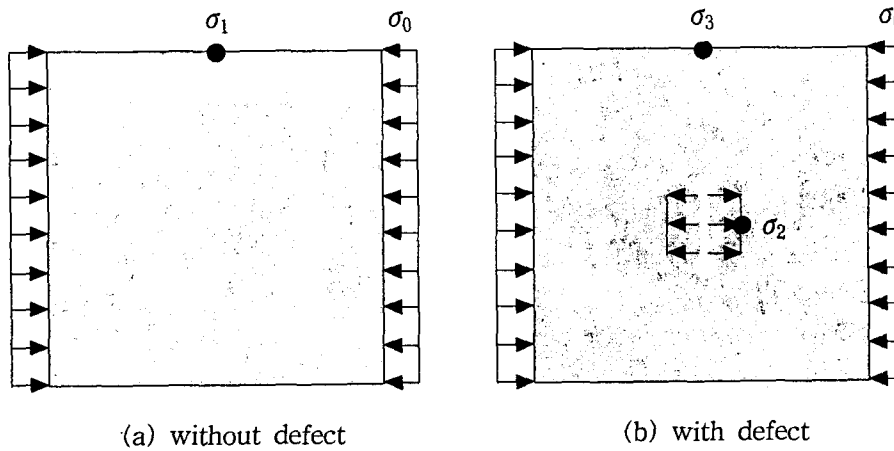
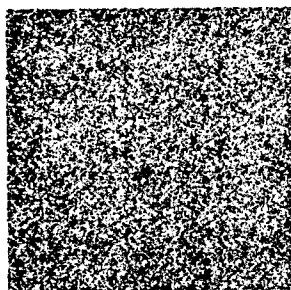


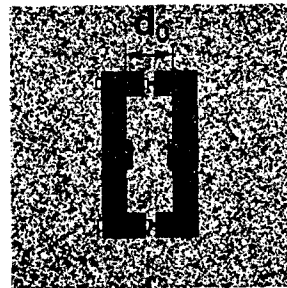
Fig. 2.1 Basic concept

(Fig. 2.1)에서 (a)와 (b)에 동일한 응력  $\sigma_0$ 를 가하고 있다. 미세손상을 발생시킨 후, 손상복원하중을 작용시키지 않더라도, (a)에서의  $\sigma_1$ 과 (b)에서의  $\sigma_3$ 는 같다. 즉, 미세손상에서 어느 정도 멀어지면, 그 영향은 없다는 것을 알 수 있다. 그리고, 손상복원하중을 점진적으로 작용시켜 변위복원이 정확히 이루어질 때, 손상복원하중에 의한 응력  $\sigma_2$ 는 작용하중에 의한 응력  $\sigma_0$ 와 같아진다. 즉, 정확한 변위 복원이 만족되었을 때, 미지의 잔존프리스트레스는 응력  $\sigma_2$ 가 된다.

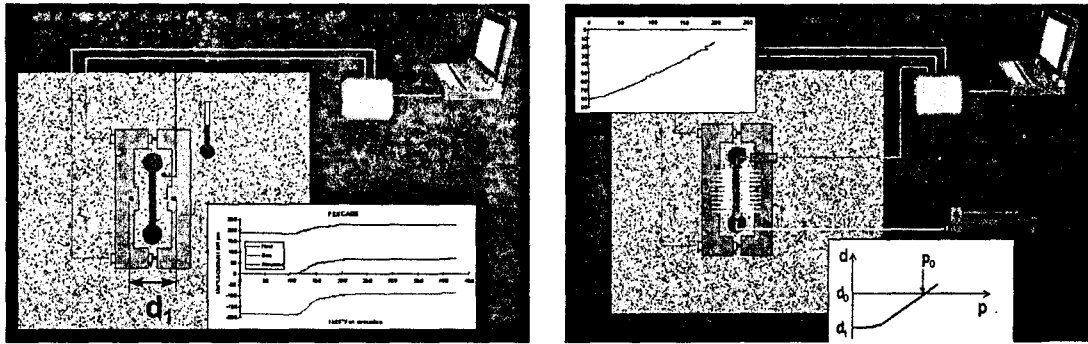
이러한 원리에 따른 일련의 측정절차를 (Fig. 2.2)로 나타내었다.



(a) Measurement 2 points



(b) Installation of jig + 2 sensors



(c) Displacement change by generating defect (d) Applying by restoring force using flat jack

· Fig. 2.2 A series of measuring procedure

상기한 기본원리의 타당성을 검증하기 위하여 ¼모델(quarter model)을 구성하여 해석하였다. 이에 대한 유한요소모델을 (Fig. 2.3)에, 해석결과를 (Table. 2.1)에 나타내었다.

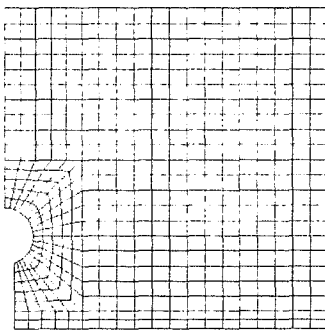


Fig. 2.3 FE model for analysis about basic concept

Table 2.1 The result of analysis about basic concept

w/o defect model		
displ. of ref. pt.	-6.840 $\mu\text{m}$	load : -24.120 ton.f stress : -40.2 kg.f/cm <sup>2</sup>
w/ defect model		
displ. of ref. pt.	n=0 ; -30.048 $\mu\text{m}$	load : -24.120 ton.f restoring force : 1.230n ton.f
	n=1 ; -26.036 $\mu\text{m}$	
	...	
	n=5 ; -9.979 $\mu\text{m}$	
	n=6 ; -5.965 $\mu\text{m}$	
equilibrium force and stress : -7.112(ton.f) and -41.2(kg.f/cm <sup>2</sup> )		

(Table 2.1)에서 작용하중에 따른 응력은 40.2kg.f/cm<sup>2</sup>이고, 본 연구에 의해 얻은 평형상태의 응력은 41.2kgf/cm<sup>2</sup>으로 실제 작용하는 응력의  $\pm 2.5\%$ 의 오차를 갖는 것을 알 수 있다.

### 3. 해석예제

본 연구에서는 프리스트레스를 받는 콘크리트는 선형탄성거동을 한다는 가정에 따라 범용유한요소 해석 프로그램 GT STRUDL을 사용하였다. 프리스트레스를 받는 경간장이 15m, 단면은 폭  $b=0.3\text{m}$ , 높이  $h=1.2\text{m}$ 의 직사각형 단면인 가상의 단순보를 대상구조로 하였다. 해석대상의 기본설계자료를 (Table 3.1)로 정리하였다.

Table 3.1 Basic design datum

CONCRETE		
design strength	$f_{ck}=400 \text{ kgf/cm}^2$	
elastic modulus	$E_c=280000 \text{ kgf/cm}^2$	
creep coefficient	$\phi=2.5$	reducing factor $\lambda=0.8$
drying shrinkage strain	$\epsilon_{sh}=-20.0 \times 10^{-3}$	
elastic modulus (long)	$E_{c,long}=93333 \text{ kgf/cm}^2$	$E_{c,long} = \frac{E_c}{1+\lambda\phi_{creep}}$
TENDON		
type of cable	SWPC 7B	low relaxation
rupture strength	$f_{pu}=19000 \text{ kgf/cm}^2$	
yield strength	$f_{py}=16000 \text{ kgf/cm}^2$	
jacking stress	$f_{pj}=13600 \text{ kgf/cm}^2$	admissible stress $f_{a,pj}=13300 \text{ kgf/cm}^2$
elastic modulus	$E_c=2000000 \text{ kgf/cm}^2$	

상기한 자료들을 토대로 경간이 15m인 양단긴장의 단순보를 설계하였다. 또한, 유한요소모델의 단 순성을 확보하기 위하여 긴장재를 직선배치 하였고, 정착장치의 썩기작용에 의한 변위는 1mm로 가정 하였다. (Table 3.1)에서 제시한 자료들에 근거하여 콘크리트의 크리프는 탄성계수를 감소시키는 것으 로 적용하였고, 건조수축은 온도하중으로 변환하여 적용하였다. 또한, 긴장재의 응력이완현상은 3%를 고려하여 프리스트레스 힘을 감소시키는 것으로 적용하였다. 사용하중들은 보의 자중, 프리스트레스 힘, DL24 차량하중으로 기본적인 연직하중을 적용하였다.

해석예제는 횡방향 응력분배를 무시할 수 있는 평면응력문제이므로, 2차원 유한요소모델을 구성하여 해석하였다. 본 해석에 사용된 요소들은 2종류로 절점당 자유도가 2개인 3절점 삼각형 평면응력요소와 마찬가지로 절점당 자유도가 2개인 4절점 사각형 등매개변수(isoparametric) 평면응력요소를 사용하였다.

#### 4. 해석결과

##### 4.1 안전성

공용중인 구조물에 일종의 결함을 발생시키는 본 방법은 일반인들의 관점에서 볼 때, 매우 위험할 것이라 생각될 것이다. 하지만, 본 연구에서 제시하고 있는 방법은 전체 구조계에 거의 감지하기도 어 려울 정도의 손상을 가하는 안전한 방법이다. 또한, 응력집중현상을 최소화하기 위해 미세손상 양단에 원형의 코어링을 생성한 이후에 미세손상을 생성하도록 되어있다.

본 연구에서는 명확하게 언급하고 있지는 않았지만, 파괴역학분야의 여러전문가들은 응력집중으로 발생한 국부응력은 대략 항복응력의 3배 이하에서는 균열을 진전시킬만한 에너지를 갖고 있지 않다고 제시하고 있다. 본 연구에서 사용한 콘크리트는 설계기준강도가  $400 \text{ kgf/cm}^2$ 이고 40% 할선탄성계수를 사용하므로, 항복응력을  $160 \text{ kgf/cm}^2$ 이라고 한다면 응력집중으로 인해 균열이 발생할 수 있는 최대의 허용값은 대략  $480 \text{ kgf/cm}^2$ 이나, DL24 차량하중이 재하된 상태에서 최대  $208.8 \text{ kgf/cm}^2$ 을 발생시키고 있다. 따라서, 국부응력집중으로 인한 문제는 거론할 여지가 없는 것으로 판단되며, 설계기준강도의

52.2%로 콘크리트 내부팽창에 의한 부수적인 균열(secondary crack)이 발생하는 설계기준강도의 70%에도 미치지 않는 상태를 나타내고 있다.

#### 4.2 정밀도

(Fig. 4.1)은 모든 사용하중과 손실이 고려된 응력상태로 상하연 각각  $-94\text{kgf/cm}^2$ ,  $+25\text{kgf/cm}^2$ 이며, 실제 공용중의 응력 값들이다. 그리고, 중앙단면의 처짐은 12.4mm이다. 해석모델인 (Fig. 4.2)는 모든 사용하중이 작용할 때의 응력상태로 상하연 각각  $-95\text{kgf/cm}^2$ ,  $+25\text{kgf/cm}^2$ 이다. 그리고 중앙단면의 처짐은 12.5mm이었다. (Fig. 4.3)은 미세손상이 있는 중앙부를 확대한 것이다.



Fig. 4.1 Stress status of model without defect (known values)



Fig. 4.2 Stress status of model with defect (unknown values)

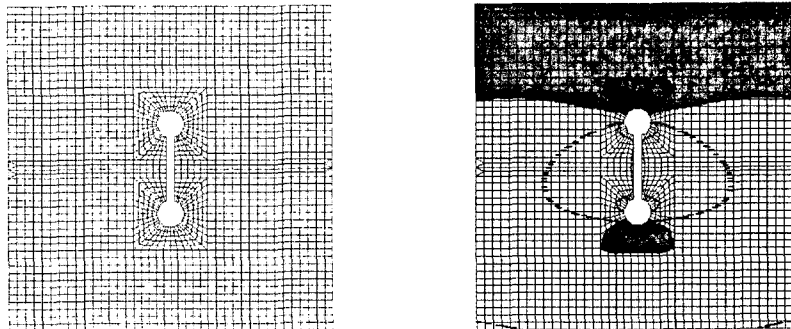


Fig. 4.3 Detailed stress contour of surrounding defect

Table 4.1 The result of slot stress analysis

w/o defect model		
distance of ref. pts.	36 $\mu\text{m}$	prestressing force : 126ton.f (known value)
w/ defect model		
distance of ref. pts.	n=0 ; 127 $\mu\text{m}$	restoring force : 3.523n ton.f
	n=1 ; 100 $\mu\text{m}$	
	n=2 ; 74 $\mu\text{m}$	
	n=3 ; 47 $\mu\text{m}$	
	n=4 ; 21 $\mu\text{m}$	
equilibrium force and stress : -12.174(ton.f) and -35(kg.f/cm <sup>2</sup> )		

(Table 4.1)에서 미세손상이 없는 상태의 프리스트레스 힘은 126ton.f인 것으로 계산되었다. 본 연구에 의해 얻은 평형상태의 도심(c.g.s)에서의 응력은  $-35\text{kgf/cm}^2$ 으로 단면적을 곱하여 힘으로 환산하면, 126ton.f가 된다. (Fig. 4.4)는 (Table 4.1)을 도식화 하고있다.

초기 긴장력이 161ton.f이므로, 모든 즉시효과와 장기효과에 의해 35.0ton.f의 손실이 발생한 것으로 78%의 잔존프리스트레스가 있는 것으로 계산되었다. 또한, 본 연구에 의해 측정된 손실도 35.0ton.f로 78%의 잔존프리스트레스가 있는 것으로 측정되었다. 오차범위  $\pm 1\%$ 에도 미치지 않는 아주 우수한 결과를 나타내주고 있다.

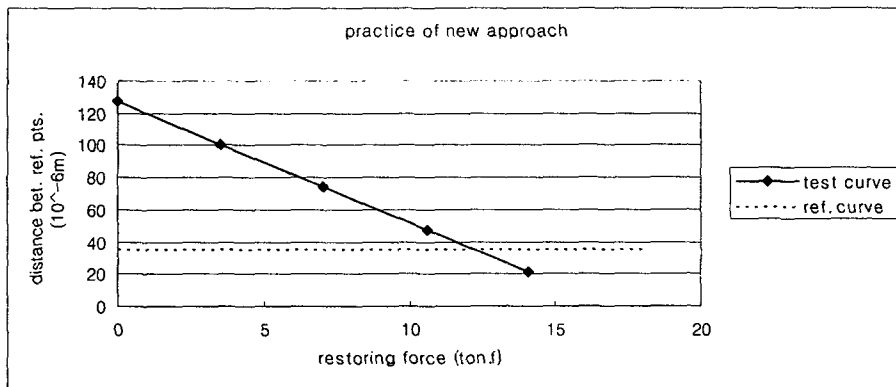


Fig. 4.4 Result for practice of new approach

## 5. 결론

본 연구는 잔존프리스트레스 예측을 위한 새로운 접근방법을 제시하고, 이에 대한 이론적인 근거를 마련하기 위하여 수행되어졌다. 본 연구에서 얻어진 결론들은 다음과 같다.

1. 미세손상에 의한 국부적인 응력집중효과는 모든 사용하중이 재하되었을 경우에 최대로 발생하였고, 이 때의 값은 설계기준강도의 52.2%에 불과하였다. 즉, 국부적인 응력집중으로 인한 균열발생에 대해 안전한 것으로 판단되었다.
2. 미세손상 유무에 무관하게 부재 상하연의 응력과 변위는 일정하였다. 따라서, 미세손상에 의한 전체 구조계는 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있었다. 또한, 미세손상에 작용하는 복원하중을 점진적으로 증가시켜도 전체 구조계의 영향은 거의 없는 결과를 나타내었다.
3. 모든 종류의 손실 유무에 무관하게 현재 상태의 잔존프리스트레스를 오차범위  $\pm 1\%$  이내의 값으로 측정할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Bathe, "Finite Element Procedures," Prentice-Hall, Inc., 1996.
2. Collinse, Mitchell, "Prestressed Concrete Structures," Prentice-Hall, Inc., 1991.
3. 한국콘크리트학회, "콘크리트의 파괴역학 제3회 기술강좌," 2001.
4. 한국콘크리트학회·대한건축학회, "콘크리트 구조설계기준," 1999.