

# PSC 부재의 유효 프리스트레스력 평가를 위한 실험적 연구

정철현 · 박재균<sup>†</sup> · 김광수<sup>\*</sup>

단국대학교 토목환경공학과, <sup>\*</sup>현대건설기술연구원  
(2008. 1. 30. 접수 / 2008. 3. 17. 채택)

## An Experimental Study to Determine the Effective Prestress Force of PSC Beam

Chul-Hun Chung · Jaegyun Park<sup>†</sup> · Kwang-Soo Kim<sup>\*</sup>

Civil Environmental Engineering, Dankook University

<sup>\*</sup>Hyundai Institute of Construction Technology

(Received January 30, 2008 / Accepted March 17, 2008)

**Abstract** : To evaluate the structural integrity of the NPP containment building more rigorously, the effective prestress, which is one of the most affecting elements, needs to be estimated exactly. This paper presents the results of an experimental study to determine the effective prestress force in prestressed concrete beams. It is possible to improve the effective prestress measuring method by test beam, which is being applied for the investigation of the nuclear power plant in operation. If experimentally evaluated Lift-Off method in this study can be coupled with test beam test currently being used in in-service nuclear power plant, it is possible to measure prestress loss of the tendon and the level of the effective prestress load.

**Key Words** : rear-end collisions, delta-V, change of velocity, extent of vehicle damages, severity of injuries, barrier equivalent velocity, impact acceleration, biomechanical limit harmless

### 1. 서 론

프리스트레스 콘크리트 구조물에 대한 평가를 위해서는 공용 중 잔존하는 유효프리스트레스력에 대한 가정이 필요하다. 유효프리스트레스력은 건조수축, 크리프, 릴랙세이션 등 시간의존적인 현상과 밀접한 관련이 있기 때문에 이에 대한 평가는 매우 어려운 문제이다. 특히, 반복하중을 받는 경우 릴랙세이션에 의한 프리스트레스력의 손실은 균열 및 피로손상의 원인이 될 수 있으며, 결국에는 일정 시간 경과된 프리스트레스 콘크리트 부재의 극한거동에도 영향을 미친다. 프리스트레스 텐던의 유효프리스트레스력을 평가하기 위하여 여러 방법이 제안되었으나, 사용성이나 정확성 측면에서 일반화 된 측정 방법은 극히 드물다.

대부분의 구조물에 사용되는 콘크리트는 우수한 내압축력에 비하여 인장력에 쉽게 파괴되기 때문에

이를 보강하기 위하여 철근이나 프리스트레스 텐던을 사용한다. 특히, 원자력발전소 격납건물과 같은 주요 구조물에서 인장방향의 하중에 저항하는 프리스트레스 텐던의 역할은 절대적이다. 프리스트레스 텐던에 의해 콘크리트에 도입되는 압축력은 여러 가지 요인에 의해 손실이 발생하는데 긴장하중 도입 당시에 발생하는 손실을 평가하는 것은 기술적 문제가 없으나, 시간경과와 함께 발생하는 손실량 평가는 평가방법이나 평가자에 따라 큰 오차가 존재한다. 원전 격납건물의 공용 중에 존재하는 유효프리스트레스력은 내압(internal pressure), 온도하중 등 사용하중에 의해 발생하는 인장응력을 상쇄시켜 격납건물의 건정성에 큰 영향을 미치기 때문에 공용 중인 원전 격납건물의 유효프리스트레스력은 보다 정확히 평가되어야 한다.

현재 국내에서 가동 중인 원전의 가동기간이 설계수명에 가까워짐으로써 가동 중인 원전의 계속운전에 대한 관심이 증가되고 있다. 가동 중인 원전의 수명증가 여부는 국가 경제적인 측면에서도 매우

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
jpark@dankook.ac.kr

중요하다. 가동 중인 원전의 수명증가 여부에 영향을 미치는 요인이 여러 가지 있지만, 이 중에서 텐던의 유효프리스트레스력이 미치는 영향이 매우 크다. 국내에서 가동 중인 원전에서 텐던의 유효프리스트레스력을 평가하기 위해서 간접적인 방법(Dynamometer Block)에 의한 측정과 직접적인 방법(Lift-Off-Test)이 적용되고 있다(한국전력공사, 1999, 2003).

가동중 검사에서 수행되는 직접적인 측정방법은 일부 결과를 제외하면 유효프리스트레스력의 하중 수준은 가동년수 별로 이론적인 산정되는 경향과는 약간의 차이를 보이지만 합리적인 수치를 보이는 것으로 평가되고 있다(원자력안전기술원, 2005). 그러나, 이 방법은 시험대상 텐던이 비부착식에서만 가능하기 때문에 비부착식 텐던이 적용되는 격납건물에서는 유효하게 적용이 가능하지만, 부착식 텐던이 적용되는 격납건물에는 직접적인 적용이 어렵다.

간접적인 방법은 격납건물 시공시의 동일한 재료로 제작하고, 동일한 환경에서 보관된 프리스트레스 콘크리트 보(이하, 보 시험체) 부재에 대해서 정해진 년차별로 실시되고 있다(한국원자력안전기술원, 2005). 이 측정방법에서는 Dynamometer Block에 의해서 텐던의 유효프리스트레스력을 측정하는데 재인장시 기기의 정확한 작동이 어렵고, 측정결과와의 분산정도가 큰 것으로 나타나고 있다(한국원자력안전기술원, 2005). 또한, 이 방법은 비부착식 텐던이 적용된 보 시험체를 대상으로 유효프리스트레스력을 측정하여 그 결과를 부착식 텐던에 적용하는 간접적인 방법으로 보다 정확한 유효프리스

트레스력 측정을 위해서는 부착식 텐던이 적용된 보 시험체에 대해서 유효프리스트레스력을 측정할 수 있는 측정방법의 개선이 필요하다. 이외에도 가동년차별로 보 실험을 통해서 처짐, 균열하중, 파괴하중 등을 측정하고 있지만, 이 실험결과는 유효프리스트레스력을 평가하는데 이용하지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 부착식 텐던이 적용된 프리스트레스 콘크리트 보 시험체를 제작하여 3점 휨 실험을 실시하여 감압하중(decompression load)을 측정하고, 이를 통해서 유효프리스트레스력을 평가하기 위한 실험적 연구를 실시하여, 그 결과로부터 격납건물에 대해서 실시되고 있는 보 시험체에 대해서 효과적인 유효프리스트레스력을 평가하기 위한 측정방법에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. PSC 보의 설계 및 제작

유효프리스트레스력을 평가하기 Fig. 1과 같은 PSC 보를 실험부재 1개를 제작하였다. Fig. 1에서 프리스트레스 텐던은 보의 하단부에 편심을 주어 배치하였다. PSC 보의 설계단면의 주요특성은 다음과 같다.

시험체 제작과정은 Fig. 2로서 먼저 철근을 조립, 계측위치에 측정게이지의 부착, 강재거푸집에 조립된 철근을 설치한 후, 콘크리트를 타설하여 시험체를 제작하였다.

PSC 보의 콘크리트 양생이 완료된 후에 Fig. 3에서와 같이 쉬스관에 배치된 텐던을 긴장한 후, 쉬스

$$f_{ck} = 40\text{MPa}, b = 60\text{cm}, h = 80\text{cm}, e = 25\text{cm}$$

$$SWPC \Phi 12.7\text{mm}, 7EA, A_{ps} = 6.909\text{cm}^2, P_i = 457.2\text{kN}$$

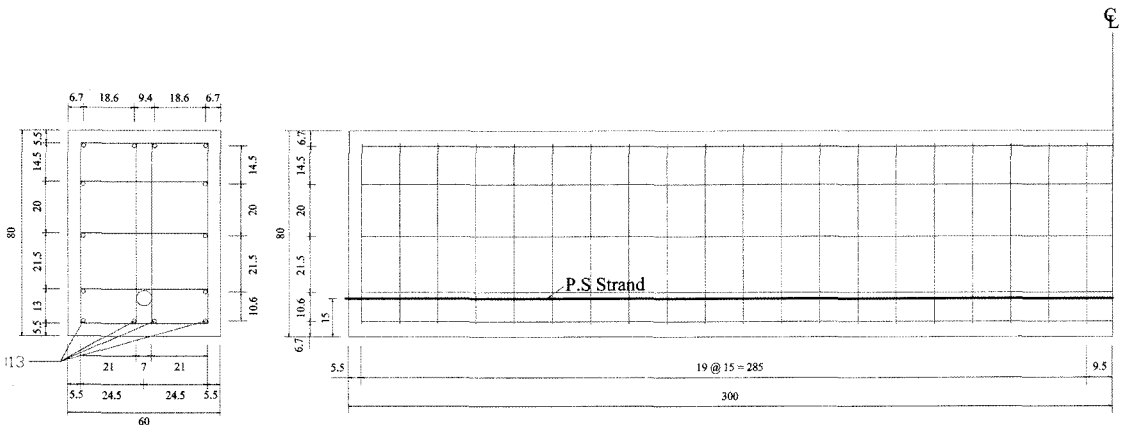
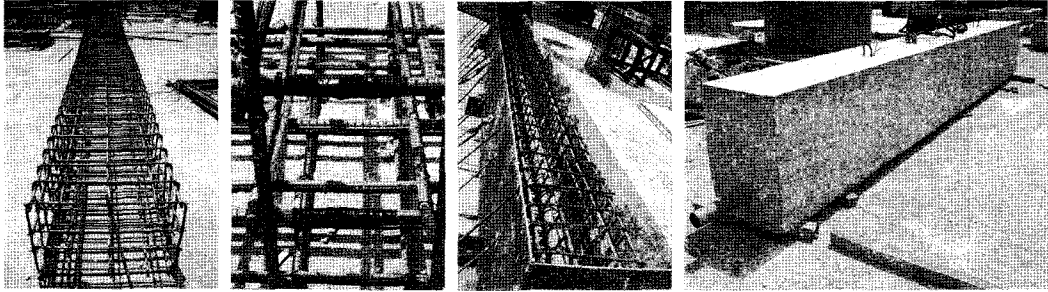
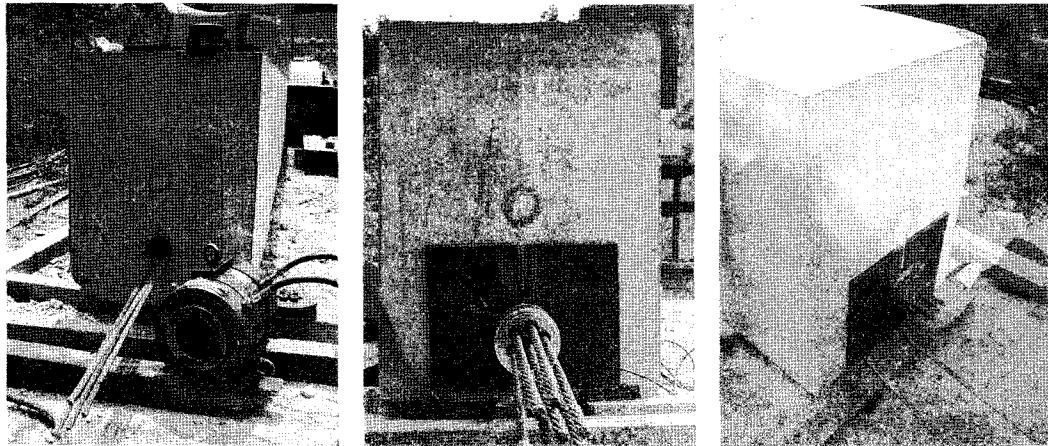


Fig. 1. PSC beam specimen.



(a) rebar assemble (b) rebar gauge attachment (c) steel matrix (d) beam specimen  
 Fig. 2. Manufacturing process of the PSC beam specimen.



(a) location of tendon & load-cell (b) anchorage installation (c) prestressing & fixing  
 Fig. 3. Installation and prestressing of tendon

판에 그라우팅을 실시하여 PSC 보의 제작을 완료하였다. 프리스트레스 텐던의 초기 긴장하중 및 정착하중과 향후 PSC 보의 휨 실험 과정에서 텐던의 긴장력 변화를 측정하기 위하여 시험체에 100tonf 용량의 로드셀을 설치하였다.

### 3. 감압하중 측정을 위한 휨 실험

#### 3.1. 초기 표면균열 확인을 위한 휨 실험

감압하중 측정을 위한 PSC 보의 휨 실험으로부터 하중-처짐, 하중-균열폭 및 하중-변형률 관계를 측정하고, 이 결과로부터 감압하중을 결정하고 감압하중으로부터 유효프리스트레스력과 손실량을 산정하게 된다. 그러나, 감압하중을 결정하기 위한 휨 실험을 수행하기 위해서는 하중-균열폭 및 하중-변형률 관계를 측정하기 위한 초기 표면균열 위치를 확인하여야 한다.

따라서, 감압하중 측정을 위한 휨 실험에 앞서 Fig. 4와 5에서와 같이 초기 표면균열 발생위치를 확인

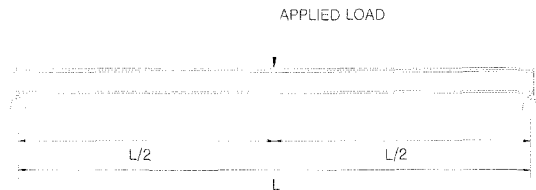


Fig. 4. Bending experiment of the prestressed concrete beam.

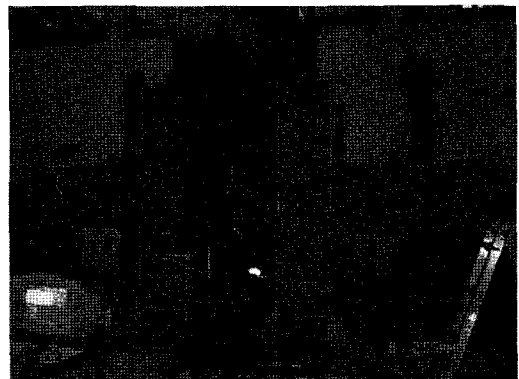


Fig. 5. Scene of the bending experiment.

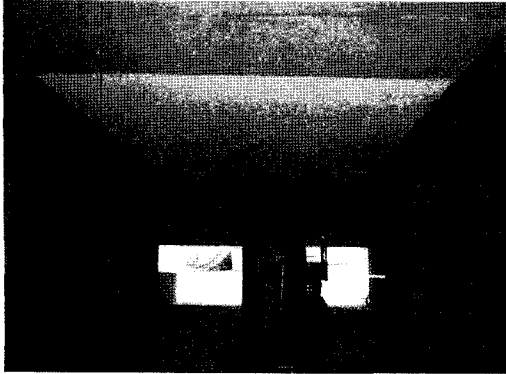


Fig. 6. Low section shape of the pre-loading status.

하기 위한 휨 실험을 실시하여 PSC 보의 하단면에서의 최초 표면 균열발생 위치를 확인한다. 휨 실험에서 보의 하단면에서 발생하는 초기 표면균열이 확인되면 하중을 제거하여 비 재하 상태로 회복시킨다.

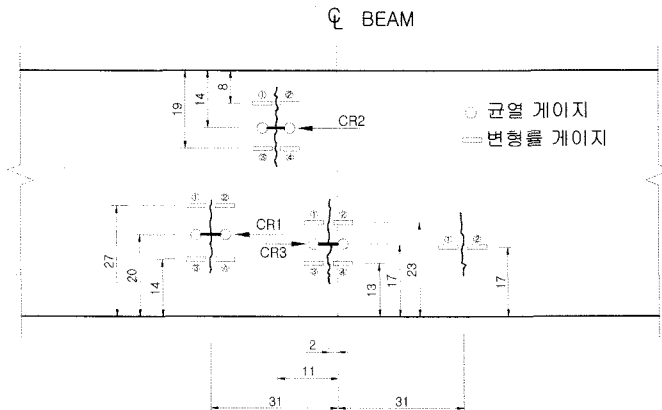
초기 표면균열의 위치를 확인하기 위해 재하하중을 서서히 증가시키면서 정적실험을 수행하였다. 이

단계에서의 PSC 보 하단면의 형상은 Fig. 6으로서 이때는 초기 표면균열의 발생위치가 확인되기 전이기 때문에 측정기기의 설치가 되지 않은 상태이다.

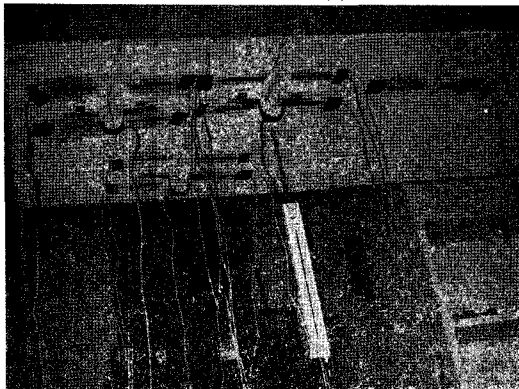
휨 실험을 통해서 PSC 보의 하단면에서 최초 표면균열이 확인된 후, 균열부위를 표시하고 재하하중을 제거하였다. 하중제거 후 PSC 보의 하단면에 균열개이지는 표면균열 발생위치 3개소, 변형률개이지는 표면균열 발생위치 4개소에 Fig. 7과 같이 설치하고, 경간 중앙부에서의 처짐 측정을 위해 LVDT를 설치하였다.

### 3.2. 감압하중 평가를 위한 휨 실험

측정기기의 설치가 완료된 후, 감압하중을 측정하기 위한 휨 실험을 수행하여 PSC 보의 파괴가 발생할 때까지 재하하중을 가하였다. 이 실험을 통해서 하중-균열폭, 하중-변형률, 하중-처짐 곡선을 측정하였다. PSC 보의 휨 실험 전경은 Fig. 8과 같고, 파괴 직전의 균열발생 현황은 Fig. 9와 같다.



(a) Initial surface crack and the gauge location



(b) Gauge installation status of the initial surface crack area

Fig. 7. strain gauge, crack gauge, LVDT installation status.

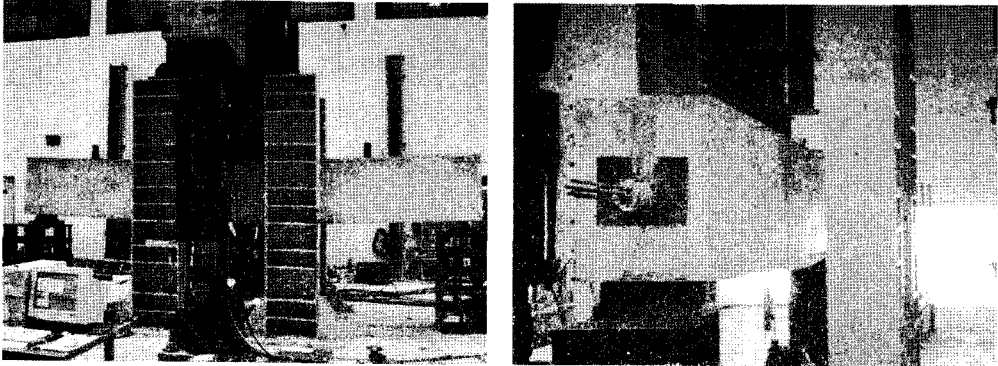


Fig. 8. Bending experiment scene of the PSC beam,



Fig. 9. Bending crack status at the time of imminent failure,

PSC 보의 휨 실험동안 보의 중앙부(1/2지점)에서 측정된 하중-처짐 곡선은 Fig. 10과 같고, 휨 균열이 발생하는 시점에서의 곡선을 확대한 것이 Fig. 11이다. Fig. 11에서 보면 하중-처짐 곡선의 기울기가 변하는 시점에서의 휨 균열하중은 약 250-260kN 수준에 해당한다.

PSC 보에 배치된 텐던을 긴장하여 정착직 후 일정 시간동안 Fig. 12의 로드셀에서 측정된 텐던의

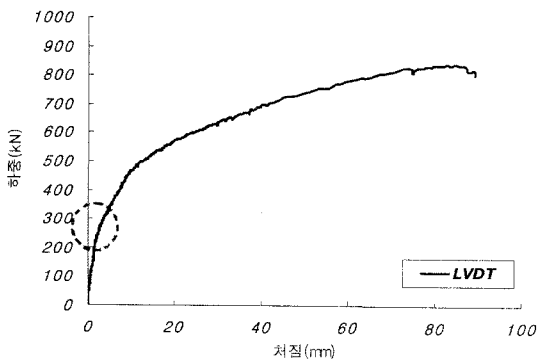


Fig. 10. Load-deflection curve,

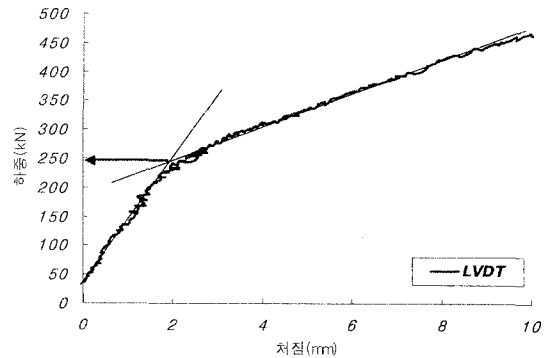


Fig. 11. Enlarged initial crack area of the load-deflection curve,

긴장력은 Fig. 13과 같다. PSC 보의 휨 실험동안 로드셀에서 측정된 재하하중에 따른 프리스트레스 텐던의 긴장력 변화는 Fig. 14와 같다. Fig. 14에서 보면 휨 실험이 수행되는 시점에서 텐던의 긴장력은 약 427.7kN에 해당한다. Fig. 13에서 나타난 최초 긴장력에서 즉시손실이 발생한 후의 정착직 후 긴장력(433kN) 측정 당시에서 휨 실험시까지의 시간적 손실이 발생한 이후의 긴장력에 해당한다.

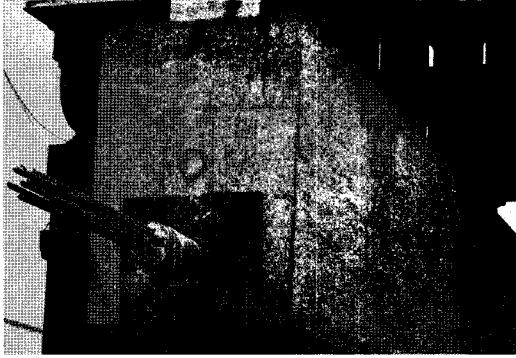


Fig. 12. Load-cell at the tendon fixing area,

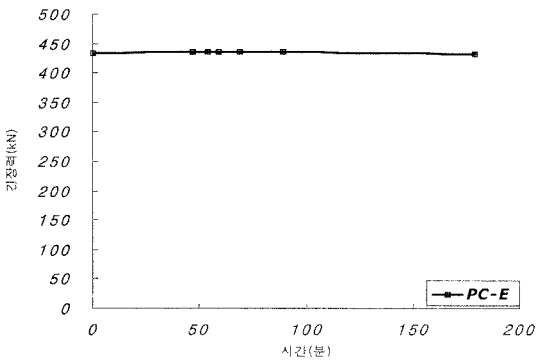


Fig. 13. Prestress force after the installation of the tendon,

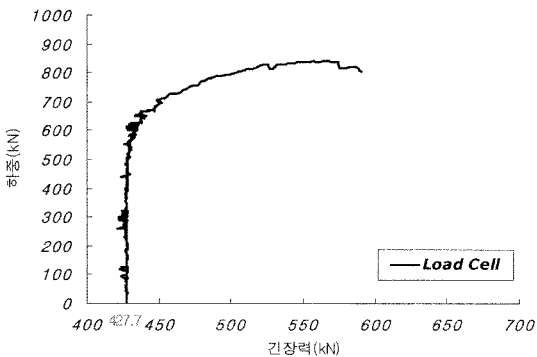


Fig. 14. Load-prestress curve of the tendon,

휨 실험동안 PSC 보의 하단면 초기 표면균열 발생부위에 부착된 3개소의 균열게이지에서 측정된 하중-균열폭 곡선은 Fig. 15와 같고, 이 그림에서 기울기가 완전하게 변하는 시점이 작용하중에 의한 응력이 콘크리트의 허용인장강도를 초과하여 휨 균열이 발생하는 시점에 해당한다. 이 휨 균열이 발생하는 시점에서의 재하하중(감압하중)의 크기를 확인하기 위하여 각 균열개소에서 상세 하중-균열폭 관계를 Fig. 16에 나타내었다. 균열발생하중이 약간

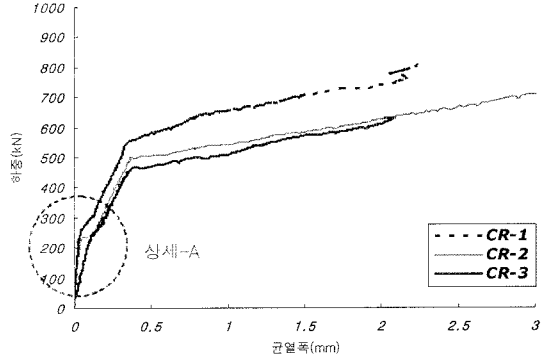


Fig. 15. Load-crack width curve,

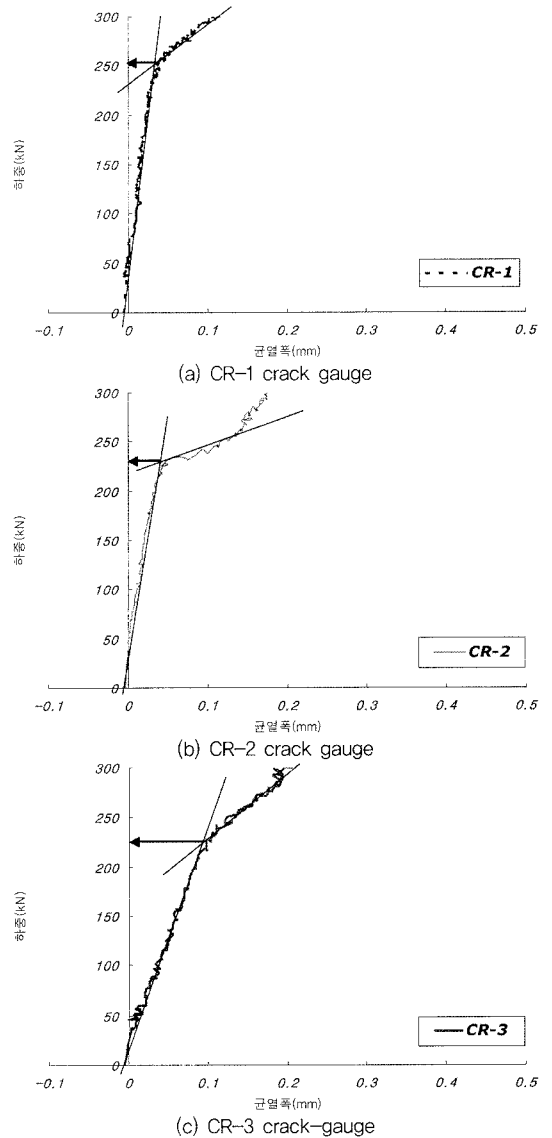


Fig. 16. Detailed load-crack curve at each crack gauge,

Table 1. Decreasing pressure load for each crack area

균열위치	감압하중(kN)	감압모멘트(kN-m)
CR-1	250	359.2
CR-2	230	355.4
CR-3	225	356.4

씩 차이가 있는 것은 Fig. 7에서 보면 PSC 보에서 각 균열의 위치가 다른 것이 주원인이다. Fig. 16에 나타낸 하중-균열폭 곡선에서 감압하중을 평가하면 Table 1과 같다.

Fig. 15의 하중-균열폭 곡선을 모멘트-균열폭 관계로 나타내면 Fig. 17과 같고, 감압모멘트를 확인하기 위해 이 부분을 확대한 그림이 Fig. 18이다. Fig. 18에서 결정된 각 균열개소별 감압모멘트는 Table 1에 감압하중과 함께 나타내었다.

각 균열발생 위치에 Fig. 7에서와 같이 균열선을 중심으로 양쪽으로 4개의 콘크리트 변형률게이지를 부착하여 PSC 보의 휨 실험 동안 하중-콘크리트의 변형률 관계를 측정하였다. 이 하중-변형률 곡선은 bilinear 곡선 형태를 보이게 되는데(Stephen 등, 1996) 첫 번째 단계에서는 하중증가에 비례해서 변형률이 증가하다가 초기 표면균열이 완전하게 열리는 시점이 되면 Fig. 19에서와 같이 변형률이 하중증가에 비례하지 않는다. 본 실험에서는 이 기울기가 급격히 변화 될 때의 하중(감압하중)을 측정하고자 하였다. 실험에서 측정된 하중-변형률 곡선은 전반적으로 이러한 경향을 뚜렷이 보여주지 못하고 있다. 따라서, 하중-콘크리트 변형률 곡선을 통해서 감압하중을 정확히 평가하는 것이 어려운 것으로 나타났으며, 이는 콘크리트 변형률게이지 자체의 특성과 오차가 주원인 인 것으로 판단된다.

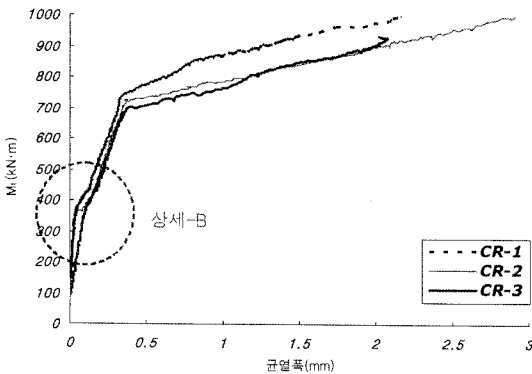


Fig. 17. Moment-crack width curve.

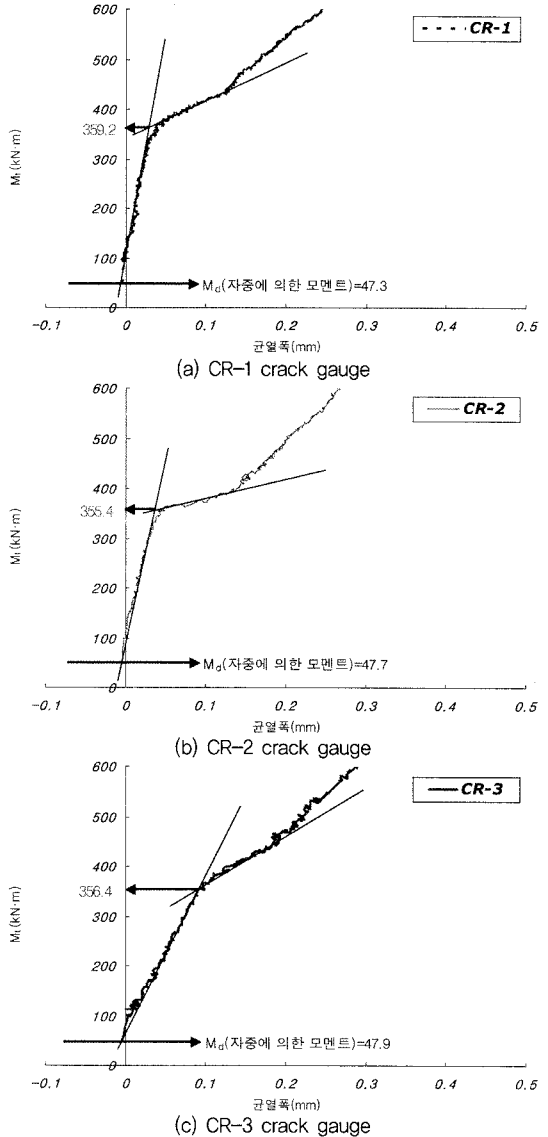


Fig. 18. Detailed action moment-crack width curve for each crack gauge.

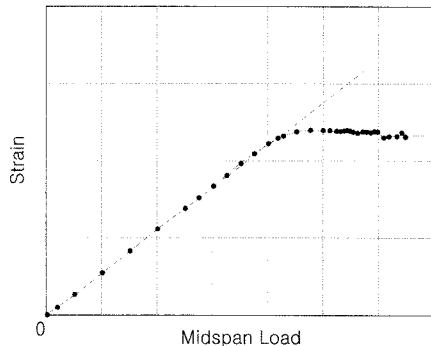


Fig. 19. Load-strain curve at initial surface crack areas.

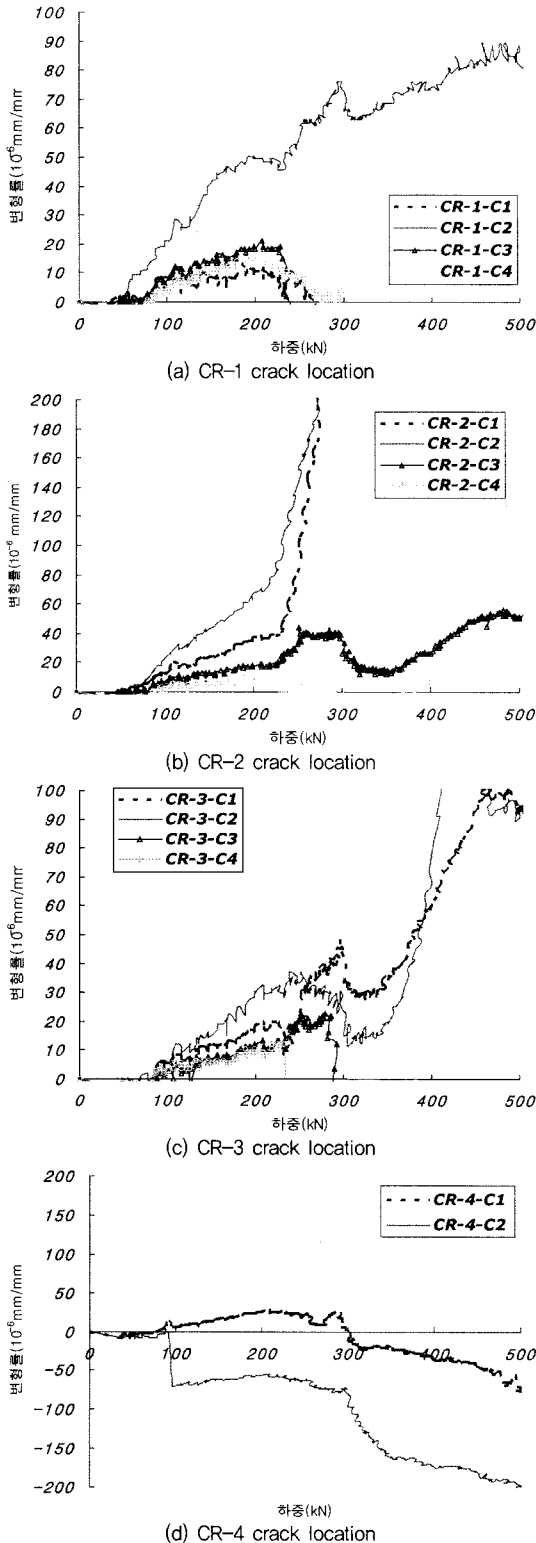


Fig. 20. Load-concrete strain curve at each crack location.

#### 4. 유효프리스트레스 하중 및 손실량 평가

PSC 보의 휨 실험으로부터 결정된 감압하중 및 감압모멘트는 Table 1로서 이 감압하중으로부터 식 (1)(Nawy, 2006)에 의해서 유효프리스트레스 하중을 산정하였다.

$$f = -\frac{P_e}{A} \left(1 + \frac{e \cdot y_t}{r^2}\right) + \frac{M_t \cdot y_t}{I_x} = f_r \quad (1)$$

$f$  : 보의 하단면(균열발생위치)에서의 인장응력

$f_r$  : 콘크리트의 허용인장응력

$A$  : 프리스트레스 콘크리트 보의 단면적

$P_e$  : 유효프리스트레스 하중

$I_x$  : 단면2차모멘트

$e$  : 최초 표면균열위치에서의 프리스트레스 텐던의 편심거리

$r$  : 단면의 회전반경

$y_t$  : 중립축에서 인장단까지의 거리

식 (1)에서  $M$ 는 PSC 보 자체의 고정하중과 감압하중의 합에 의해서 발생하는 모멘트로서 식 (2)-(4)에 의해서 결정되며, 균열위치별로 그 결과는 Table 1과 같다.

$$M_t = M_d + M_{dec} \quad (2)$$

$$M_d = \frac{1}{2} w_d x (l - x) \quad (3)$$

$$M_{dec} = \frac{1}{2} P_{dec} x \quad (4)$$

$M_d$  : 최초 표면균열발생 지점에서의 자중에 의한 고정하중 모멘트

$M_{dec}$  : 최초 표면균열발생 위치에서의 감압하중에 의한 모멘트

$w_d$  : 프리스트레스 콘크리트 보의 자중

$x$  : 지점에서 최초 표면균열발생 위치까지의 거리

$l$  : 프리스트레스 콘크리트 보의 경간장

$P_{dec}$  : 감압하중시험에서 측정된 감압하중(decompression load)

식 (1)에 의해서 유효프리스트레스 하중을 결정하고, 식 (5)에 의해서 프리스트레스 텐던의 손실율을 평가하였다.



Table 2. Decreasing pressure load and effective prestress at each load-cell and crack location

로드셀 및 균열위치	감압하중(kN)	유효프리스트레스(kN)
CR-1	250	415.6
CR-2	230	411.3
CR-3	225	420.2
로드셀		427.7

Table 3. Evaluation result of the prestress loss

평가방법	유효프리스트레스(kN)	손실량(kN)	손실율(%)
감압시험	411.3~420.2	12.8~17.4	3~5
로드셀	427.7	5.3	1.3
도로교설계기준	408.4	24.6	5.7

$$\text{프리스트레스 손실율} = \frac{(P_i - P_e)}{P_i} \times 100 \quad (\%) \quad (5)$$

이상의 실험결과와 도로교설계기준(2005)에 의해서 프리스트레스 장기손실량을 평가하면 Table 3과 같다. 도로교설계기준(2005)에 의해서 손실량을 산정하면 크리프 손실량은 2.3kN, 건조수축 손실량은 2.8kN, 릴렉세이션 손실량은 19.5kN으로 총 손실량이 24.6kN(5.7%)이다.

Table 3에서 보면, 도로교설계기준이 장기손실량을 과다 평가하고 있음을 알 수 있고, 감압시험을 통해 균열개이지에서 측정된 유효프리스트레스력 및 장기손실량은 로드셀에 의한 측정결과보다는 크지만 도로교설계기준보다는 보다 정확하게 측정 가능함을 보여주고 있다.

## 5. 결론

현재 국내 가동 중 원전 격납건물에서는 텐던의 유효프리스트레스력 및 손실량 측정을 위하여 간접적인 방법으로 test beam 실험을 실시하고 있다. 이 방법은 비부착식 텐던이 적용된 보 시험체를 대상으로 유효프리스트레스력을 측정하여 그 결과를 부착식 텐던에 적용하는 간접적인 방법이다. 이 측정 방법에서는 Dynamometer Block에 의해서 텐던의 유효프리스트레스력을 측정하는데 재인장시 기기의 정확한 작동이 어렵고, 측정결과의 분산정도가 큰 것으로 나타나고 있다. 따라서, 부착식 텐던의 보다 정확한 유효프리스트레스력 측정을 위해서는 부착식 텐던이 적용된 보 시험체에 대해서 직접적으로 유효프리스트레스력을 측정할 수 있는 측정방법이 필요하다.

본 연구에서는 부착식 텐던이 적용된 PSC 보에서 휨 실험을 통해 감압하중을 측정하고 이로부터 직접적으로 유효프리스트레스력 및 손실량을 평가하는 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 부착식 텐던이 적용된 PSC 보 시험체의 휨 실험을 통해서 감압하중을 측정하고 이로부터 부착식 텐던의 유효프리스트레스력 및 손실량을 산정할 수 있음을 확인하였다.

2) 실험결과, 감압시험에 의해 결정되는 텐던의 장기손실량은 로드셀에 의해서 측정된 결과보다는 약간 크게 평가되었다.

3) 본 감압하중 실험에서 균열개이지, 콘크리트 변형률개이지를 이용하여 감압하중을 측정하고자 하였다. 그 결과, 균열개이지는 정확하게 감압하중을 평가하는 것이 가능하지만, 본 실험에서 적용한 콘크리트 변형률개이지는 자체 특성과 오차로 인해 감압하중의 명확한 평가가 어려웠다. 따라서, 변형률개이지를 이용하는 경우에는 보다 정밀하고 내구성이 우수한 제품을 선정하여야 하고, 변형률개이지 부착위치에 대한 분석이 이루어져야 한다.

## 참고문헌

- 1) 건설교통부, 도로교설계기준, 한국도로교통협회, 2005.
- 2) 한국전력공사, 월성 1호기 격납건물 포스트텐션닝 계통 가동중 검사, 최종보고서(10년차, 15년차, 20년차), 1999.
- 3) 한국전력공사, 월성 3호기 격납건물 포스트텐션닝 계통 가동중 검사, 최종보고서(1년차, 2년차, 5년차), 2003.
- 4) 한국원자력안전기술원, 격납건물 텐던 유효응력 평가방법 및 콘크리트 비선형 재료 모델 정립, KINS/HR-706, 2005.
- 5) Stephen Pessiki, Mark Kaczinski, Herbert H. Westcott, Evaluation of Effective Prestress Force in 28-Year-Old Prestressed Concrete Bridge Beams. PCI Journal, November-December, Vol. 29, No. 1, pp. 78~89, 1996.
- 6) Edward G. Nawy, Prestressed Concrete, A Fundamental Approach, Fifth Edition, 2006.