

# 콘크리트 크리프 및 건조수축에 의한 프리스트레싱 손실량 예측

## Prediction of Prestressing Losses by Concrete Creep and Shrinkage

송영철<sup>\*</sup>      조명석<sup>\*\*</sup>      우상균<sup>\*\*\*</sup>      이태규<sup>\*\*\*\*</sup>  
Song, Young-Chul    Cho, Myung-Sug    Woo, Sang-Kyun    Lee, Tae-Kyu

---

### ABSTRACT

In this study, the personal-computer program was developed to predict prestressing losses of containment structures of Nuclear Power Plants by concrete creep and shrinkage. This program is constituted of three parts, which are pre-processor, calculation module and post-processor. Input data for this program are : material properties of concrete, rebar, liner and duct, test results of concrete creep and shrinkage, relative humidity, dimension of containment structures, and the number of prestressing tendon related in containment structures. To obtain better results, this program was made to reflect the prestressing losses due to influence that occurred after prestressing each tendon, thus it can predict prestressing losses and allowable prestressing forces of each tendon.

As a case study, this program was applied to containment structures of Youngkwang 3 & 4 NPP's and analytical result was compared with test results in In-Service Inspection of containment structures. From this comparison, it was proved that this program could well predict prestressing losses by concrete creep and shrinkage.

---

#### 1. 서론

원자력발전소 격납건물은 냉각재 상실사고시 내부압력에 저항하기 위해 콘크리트내의 텐던에 인장력을 가한 프리스트레스트 콘크리트(Prestressed Concrete) 구조로 되어 있다. 콘크리트는 타설후 Creep 및 건조수축 등에 의한 변형이 발생되어 텐던의 인장력에 손실을 일으키므로 원전수명기간(40년)중의 변형을 사전예측하여 설계·시공시 반영하고 가동중검사(ISI)를 통해 실측치와 이론치를 비교함으로써 구조물의 건전성을 평가해야 한다. 따라서 원전 수명기간중 텐던의 손실량을 정확히 예측할 수 있는 프로그램을 개발하여 향후 지속적으로 활용함은 매우 중요하다.

- 
- 1) \*정회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원
  - 2) \*\*정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
  - 3) \*\*\*정회원, 한국전력공사 전력연구원 일반연구원
  - 4) \*\*\*\*정회원, 우송대학교, 토목공학과, 교수

따라서 본 연구에서는 원전 수명기간중 격납건물 포스트텐션닝 시스템의 프리스트레싱 손실량을 정확히 예측하여 가동중검사시 현장 실무자들이 보다 쉽고 효율적으로 활용할 수 있는 프로그램을 개발·제시 하였다.

## 2. 텐던 인장력 손실량 산정

### 2.1 초기 손실량의 산정

원자력발전소의 포스트텐션닝 시스템은 초기에 텐던의 긴장시 앵커의 미끄러짐(anchorage slip), 탄성 손실(elastic shortening), 국부적 파단(wire breakage) 등이 발생한다. 이중 앵커의 미끄러짐이나 국부적 파단같은 것은 텐던의 초기정착시 고려된 것으로 보아도 무방하기 때문에 별도의 고려가 필요없지만, 탄성 손실은 텐던의 긴장순서에 의한 영향이므로 별도로 고려하여야 한다. 임의의  $n$ 번째 텐던의 초기정착력(initial seating force)으로 인한 탄성손실량은 그 방향으로의 변위가 일정하다는 가정하에 (식1)을 사용한다.

$$F_{loss}^n = \frac{A_p E_p}{A_{cn} E_c + A_s E_s + A_p E_p + A_l E_l + A_d E_d} \times F_o^n \quad (식1)$$

여기서,  $F_o^n$  :  $n$  번째 텐던의 초기정착력(kips),  $A_d$  : 덕트의 단면적

$F_{loss}^n$  :  $n$  번째 텐던의 초기정착력으로 인한 탄성손실량(kips)

$E_c$  : 콘크리트의 탄성계수,  $E_s$  : 철근의 탄성계수,  $E_p$  : 텐던의 탄성계수

$E_l$  : 라이너 탄성계수,  $E_d$  : 덕트의 탄성계수,  $A_s$  : 철근의 단면적

$A_{cn}$  : 콘크리트의 순단면적,  $A_p$  : 텐던의 단면적,  $A_l$  : 라이너 단면적

매번 텐던의 긴장시마다 그 이전에 긴장했던 텐던은 손실이 발생된다. 또한 콘크리트 구조물은 수평과 수직방향의 상호연관성(poisson ratio)에 의한 lengthening 효과를 고려하여야 한다. 만약 수평으로  $h_1$  번, 수직으로  $v_1$  번까지 긴장된 후, 수직으로  $v_1+1 \sim v_2$  번을 긴장할 경우 손실량은 (식2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} - \text{for } k = 0 \sim v_1 : F_{les, v}^k &= F_{les, v}^k + \sum_{i=v_1+1}^{v_2} F_{loss, v}^i \\ - \text{for } k = 0 \sim h_1 : F_{les, h}^k &= F_{les, h}^k - \nu \sum_{i=v_1+1}^{v_2} F_{loss, v}^i \\ - \text{for } k = v_1+1 \sim v_2 : F_{les, v}^k &= F_{les, v}^k + \sum_{i=k}^{v_2} F_{loss, v}^i \end{aligned} \right\} \quad (식2)$$

여기서,  $les$  : The loss of prestressing force from elastic shortening(kips)

그러나, horizontal tensioning의 경우 임의의 텐던을 긴장한 후 그 인장력이 영향을 미치는 범위까지만 손실을 고려해야 한다. 손실이 영향을 미치는 범위는 범용 프로그램인 SAP90에 의한 해석결과 약  $\pm R$ (격납건물 반지름) 정도의 범위인 것으로 나타났다. 그러므로  $n$ 번째 텐던의 탄성손실을 고려한 최종 인장력은 (식3)과 같다.

$$F_i^n = F_o^n - F_{les}^n \quad (식3)$$

여기서,  $F_i^n$  : Initial prestressing force(kips),  $F_o^n$  : Seating force(kips)

울진 원자력 발전소 3,4호기의 텐던 긴장순서는 <표 1>과 같으며, 각 텐던의 긴장순서에 따른 총 손실량은 <표 2> 및 <표 3>과 같다.

표 1. 울진 원자력 발전소 3,4호기 텐던 긴장순서

구 분		Stage I	Stage II	Stage III	총갯수
3호기	기 간	'96.1.26 ~ '96.3.14	'96.6.5 ~ '96.9.23	'96.10.21 ~ '96.11.20	
	긴장갯수	수직 48개	수평 165개	수직 48개	수직 96개 수평 165개
4호기	기 간	'96.12.20 ~ '97.1.28	'97.2.24 ~ '97.5.23	'97.6.17 ~ '97.9.26	
	긴장갯수	수직 48개	수평 165개	수직 48개	수직 96개 수평 165개

표 2. 울진 원자력 발전소 3호기 텐던 긴장순서에 따른 총 손실량

손 실 량	텐던번호(k)	Stage I	Stage II	Stage III
$F_{les, h}^k$	1 ~ 165	-	$\sum_{i=k+1}^{165} F_{loss, h}$	$-\nu \sum_{i=49}^{96} F_{loss, v}$
$F_{les, v}^k$	1 ~ 48	$\sum_{i=k+1}^{48} F_{loss, v}$	$-\frac{1}{3} \nu \sum_{i=1}^{165} F_{loss, h}$	$\sum_{i=49}^{96} F_{loss, v}$
	49 ~ 96	-	-	$\sum_{i=k+1}^{96} F_{loss, v}$

표 3. 울진 원자력 발전소 4호기 텐던 긴장순서에 따른 총 손실량

손 실 량	텐던번호(k)	Stage I	Stage II	Stage III
$F_{les, h}^k$	1 ~ 165	-	$\sum_{i=k+1}^{165} F_{loss, h}$	$-\nu \sum_{i=49}^{96} F_{loss, v}$
$F_{les, v}^k$	1 ~ 48	$\sum_{i=k+1}^{48} F_{loss, v}$	$-\frac{1}{3} \nu \sum_{i=1}^{165} F_{loss, h}$	$\sum_{i=49}^{96} F_{loss, v}$
	49 ~ 96	-	-	$\sum_{i=k+1}^{96} F_{loss, v}$

## 2.2 Creep 에 의한 손실

원자력발전소의 프리스트레싱 시스템에서 시간의존성에 의한 효과를 고려할 때, 가장 크게 영향을 미치는 부분이 콘크리트의 Creep 이다. Creep 는 콘크리트의 배합조건, 초기하중재하시간, 재하하중의 크기, 온도 등에 따라 그 차이가 크게 나타나게 된다.

표 4. 울진 원자력 발전소 3,4호기 콘크리트 배합표

Strength (psi)	W/C (%)	S/A (%)	Water (lb)	Cement (lb)	Sand (lb)	Gravel (lb)	WRA (oz)	AEA (oz)
5,500	44.5	38.0	288	647	1097	1791	41.41	0.62

표 5. 콘크리트 타설 및 텐던 긴장 시점

호기	콘크리트 타설	텐던 긴장		
		Stage	수직 개수	시점
3호기	'94.04.29 ~ '95.10.31	Stage I	수직 48개	'96.01.26 ~ '96.03.14
		Stage II	수평 165개	'96.06.05 ~ '96.09.23
		Stage III	수직 48개	'96.10.21 ~ '96.11.20
4호기	'94.09.11 ~ '96.08.16	Stage I	수직 48개	'96.12.20 ~ '97.01.28
		Stage II	수평 165개	'97.02.24 ~ '97.05.23
		Stage III	수직 48개	'97.06.17 ~ '97.09.26

<표 5> 및 시공자료를 분석하여 보면 모든 텐던이 콘크리트 타설시점으로부터 평균 1.5년후에 긴장작업이 수행되었으므로  $t_0$  를 548 days 로 계산(텐던 벽체의 평균 양생일 고려)하였으며, Dome 텐던의 경우  $t_0$  를 365 days 로 계산(돔 텐던의 평균 양생일 고려)하였다. <표 4>와 같이 주어진 콘크리트 배합조건에서 시간에 따른 Creep 의 양을 산정하기 위하여 (식4)의 Hansen 모델을 사용하였다.

$$\frac{\epsilon_c}{f_c} = A \left[ 1 - e^{-\frac{1}{30}(t-t_0)} \right] + B \log_{10} \frac{t}{t_0} \quad (\text{식4})$$

여기서,  $f_c$  : 콘크리트의 응력(ksi),  $\epsilon_c$  : 시간에 따른 콘크리트 변형률

$t$  : 콘크리트 타설이후의 경과시간(days),  $t_0$  : 콘크리트 타설이후의 하중재하시간(days)

$A, B$  : 실험적으로 구해지는 상수

A와 B 값을 구하기 위하여 올진 3,4호기 콘크리트 장기거동 특성시험 보고서의 Creep 실험값을 근거로 A와 B 값을 결정하였다(<표 6> 참조).

표 6. 올진 3,4호기 Creep 실험값

구분	A기율기	A <sub>min</sub>	B
실험값	-0.02203	$0.2656 \times 10^0$	$0.1555 \times 10^0$

위의 Creep 량을 임의의 텐던에 작용하는 Creep 변형률로 환산하면 (식5)와 같다.

$$\epsilon_{creep} = \frac{\epsilon_c}{f_c} \times f_{cr} \times \frac{E_{ps}}{f_{ps}} (\%) \quad (\text{식5})$$

여기서,  $f_{cr}$  : 실제 구조물에 작용되는 평균 콘크리트 응력,  $E_{ps}$  : 텐던의 탄성계수

$$f_{cr} = \frac{\text{avg modified seating force}}{A_{cn}}, \quad f_{ps} : n\text{번째 텐던의 응력} = \frac{F_i^n}{A_p}$$

### 2.3 건조수축에 의한 손실

콘크리트의 건조수축은 상대습도와 밀접한 관계가 있으며, 건조수축으로 인한 프리스트레싱 손실은 Baldwin의 모델을 사용하였다(<표 7 >참조).

표 7. 상대습도와 건조수축과의 관계

Mean daily relative humidity (annual %)	40 year shrinkage strain $\epsilon_{s,40} (\times 10^{-6})$
under 40 %	130
40 to 80 %	100
above 80 %	50

건조수축량은 시간에 따라 직선적으로 변화한다고 가정하여 계산한다(식6 참조). 단, 10일일 경우  $\epsilon_s = 0$  로 가정한다.

$$\epsilon_s = \frac{\ln(t/10)}{\ln(14600/10)} \epsilon_{s,40} \quad (\text{식6})$$

위의 건조수축량을 텐던에 작용하는 변형률로 환산하면 (식7)과 같다.

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_s \times \frac{E_{fs}}{f_{fs}} \times 100 (\%) \quad (\text{식7})$$

#### 2.4 강제 Relaxation에 의한 손실

강제 Relaxation의 경우 설계시 40년후의 양을 4%로 가정하여 고려하였기 때문에 이 값을 사용하였으며, 시간에 따른 변화량은 직선적으로 변화한다고 가정하여 (식8)을 사용하였다.

$$\epsilon_{re} = \frac{\ln t}{\ln 14600} \times 0.04 \quad (\text{식8})$$

#### 2.5 불확실성에 대한 고려

실제 구조물에서 발생하는 인장력의 손실은 Creep, 건조수축, 강제 Relaxation이 주원인이지만 이외에도 기타 현장에서 발생할 수 있는 여러 가지의 불확실한 요인이 있으며, 또한 위의 세가지 요인에 대해서도 완벽하게 고려되었다고는 볼 수 없다. 따라서 이러한 불확실성을 고려하기 위하여 <표 8>과 같이 USNRC Regulatory Guide 1.35.1의 규정에 근거하여 상한치와 하한치를 설정하여 이를 각 해당 변형률에 곱하여 주었다.

표 8. 불확실성에 의한 허용범위의 설정

구 분	Creep	건 조 수 축	Relaxation
상 한 치	+25%	+20%	+15%
하 한 치	-15%	-20%	-15%

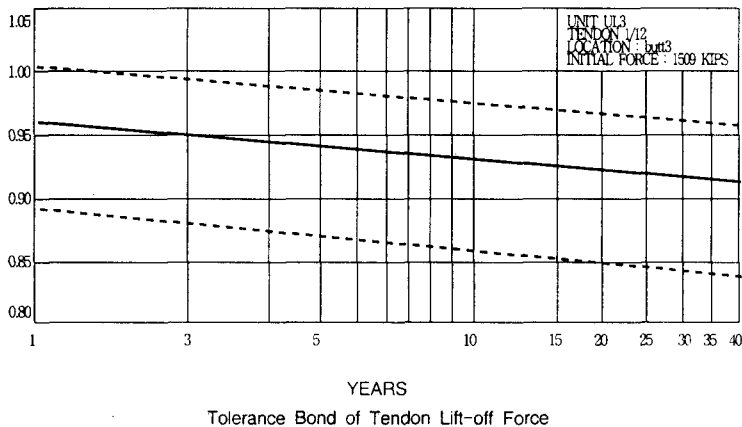
#### 3. 텐던 손실량 계산 결과

본 연구에서는 제2절에서 언급한 텐던 인장력 손실 인자(factor)를 고려하여 원전 수명기간중 격납 건물 텐던의 인장력 손실량을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램을 이용하여 울진 3,4호기 격납건물 텐던별 손실량을 계산하였으며, 그 예를 <표 9>에 나타내었다. 아울러 초기손실, 시간의존성에 의한 손실 및 불확실성에 의한 영향을 고려하여 발전소 가동후 40년 까지의 텐던별 인장력 허용범위를 <그림 1>에 나타내었다. <그림 1>에서 수직축은 검사시 실측되는 텐던의 인장력을 텐

던 최초 정착시의 인장력(Elastic Shortening 값을 고려한 값임)으로 나눈비율, 수평축은 가동중 검사 해당년도를 나타낸다. 실선은 불확실성을 고려하지 않은 손실로 인한 이론적인 텐던 인장력의 시간에 따른 감소추세를, 상하 점선은 검사시점에서 실측될 텐던 인장력이 가져야 할 허용범위를 나타낸다.

표 9. 울진 3호기 수평텐던 1/12(2번측 정착단) 손실량 계산결과

<UL3>		Normalized Remaining Prestressing Force in Horizontal Direction										
No.	Fo(kips)		1	3	5	10	15	20	25	30	35	40
1/12 B2	1467.01	max	0.970	0.960	0.955	0.949	0.945	0.943	0.941	0.939	0.937	0.936
		mean	0.930	0.918	0.912	0.904	0.900	0.896	0.894	0.892	0.890	0.889
		min	0.864	0.848	0.841	0.831	0.825	0.821	0.818	0.815	0.813	0.811
1/12 B3	1508.80	max	0.970	0.960	0.956	0.949	0.946	0.943	0.941	0.940	0.938	0.937
		mean	0.931	0.919	0.914	0.906	0.901	0.898	0.896	0.894	0.892	0.891
		min	0.867	0.851	0.844	0.834	0.829	0.825	0.822	0.819	0.817	0.815



<그림 1> 울진 3호기 수평텐던 허용인장력 도표

#### 4. 결 론

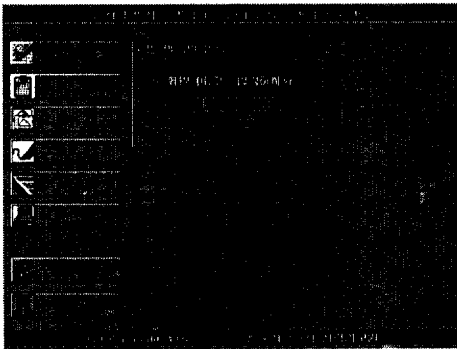
본 연구에서는 원전 수명기간중 격납건물의 프리스트레싱 손실량을 예측할 수 있는 “원자로 격납건물 텐던 인장력 손실량 예측 프로그램”을 개발하였으며, 본 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 격납구조물의 콘크리트, 철근, Liner 및 Duct의 재료성질, Creep 시험값, 상대습도, 격납건물 제원, 텐던 긴장순서 및 긴장력 등을 반영하여 일정시간 경과후의 텐던 손실량 및 허용 인장력을 예측할 수 있으며, 특히 연도별 각 텐던의 허용인장력과 손실량을 도표화함으로써 원전 가동중 검사시 현장 실무자들이 편리하게 사용할 수 있는 프로그램을 개발하였다.
- (2) 본 프로그램은 GUI(Graphic User Interface) System을 적용하여 현장 실무자들이 쉽게 접근할 수 있는 전처리 기능(Pre Processor), Calculation Module 및 모든 결과를 텐던 번호별로 그래프(Graph)로 출력함으로써 가동중검사시 편리하게 활용할 수 있는 후처리 기능(Post Processor)으로 구성되어 있다. 아울러 본 프로그램은 선형호기(영광 3,4호기) 및 '98년 10월 수행된 울진 3호기 격납건물 가동중검사에 적용하여 그 결과를 비교·검증하였다.

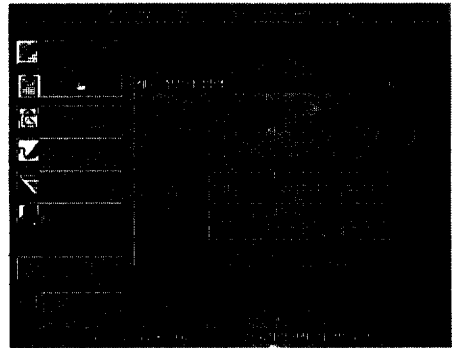
(3) 본 프로그램은 원전수명기간중 격납건물 포스트텐션닝 시스템의 프리스트레스 손실량 예측, 가동중 검사시의 텐던 인장력 검사 및 검사결과 평가 등 일련의 과정을 현장에서 편리하게 활용할 수 있으며 아울러 향후 후속기에도 적용이 가능하도록 개발되었으므로 그 활용도와 경제적 효과가 높을 것으로 기대된다.

참고문헌

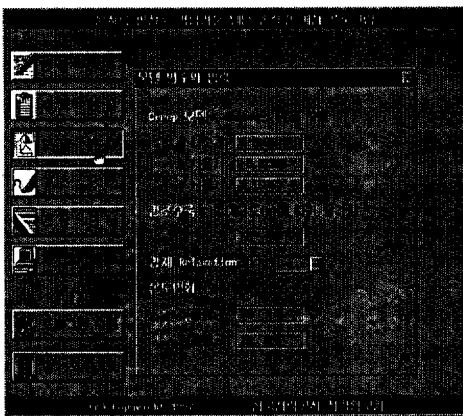
1. 한국전력공사, “영광 3,4호기 격납건물의 포스트텐션닝 시스템 가동중 검사를 위한 기술시방서 및 절차서”, 1994. 8.
2. 한국전력공사, “울진 3,4호기 격납건물 포스트텐션닝 시스템 가동중 검사를 위한 절차서 및 기술시방서”, 1998.4.
3. USNRC Regulatory Guide 1.35, Rev. 0, “Determining Prestressing Forces for Inspection of Prestressed Concrete Containments”, July, 1990.
4. ACI 201.1R-68, “Guide for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, Requirements for class CC Concrete Components of Light-Water Cooled Plants, 1994.



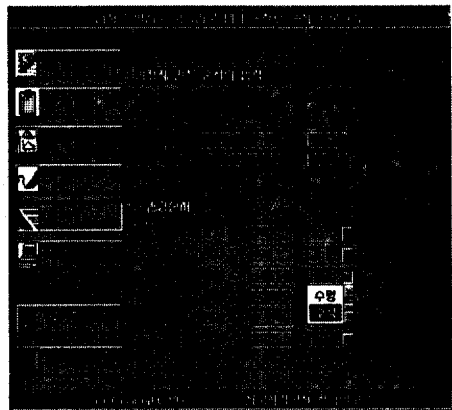
<그림 2> 격납건물 텐던 손실량 예측 프로그램 초기 화면



<그림 3> 격납건물 재료물성 입력화면



<그림 4> 모델번호 입력 화면



<그림 5> 텐던관련 자료 입력 화면