

# 원전 부착식 텐던 격납건물의 구조거동 분석기법 개발 I - CANDU형

## Development of Analysis Technique for Structural Behavior of Containment with Bonded-Type Tendons (CANDU Type)

이 상 근\*   박 상 순\*\*   이 상 민\*\*\*   조 명 석\*\*\*   송 영 철\*\*\*\*  
Lee, Sang Keun   Park, Sang Soon   Lee, Sang Min   Cho, Myong Seok   Song, Young Chul

### ABSTRACT

The posttensioning system of nuclear containment have to be verified its structural integrity by the periodic inspection because the structural behavior of the containment is changed by the variation of the physical property of concrete and tendon as time passes. In this study a program 'SAPONC-CANDU' which is able to monitor and analysis the micro structural behavior of the domestic CANDU type containment at all times was developed. The readings of vibrating-wire strain gauges embedded into the concrete of containment were used as input data for operating the program. This program provides the long-term prediction values and bands of the concrete strain due to the time dependent factors of the concrete and tendon of the domestic CANDU type containment.

### 1. 서론

일반적으로 비부착식 텐던 격납건물의 경우에는 텐던의 유효용력(lift-off force)을 직접적으로 측정하여 포스트텐셔닝 계통의 구조건전성 평가를 수행하고 있으나, CANDU형 부착식 텐던 격납건물은 텐던의 직접적인 유효용력 측정이 불가능하므로, 별도 제작·보관된 시험보(test beam)와 가동전 검증 압력시험(pre-operational proof pressure test)을 위해 콘크리트내에 매설된 변형률게이지를 활용하여 구조건전성을 평가하고 있다.

이때, CANDU형 부착식 텐던 격납건물의 기초, 벽체 및 돔 콘크리트에 매설된 변형률게이지는 크리프, 건조수축, 프리스트레스 손실 및 텐던 릴락세이션 등의 시간중속성 영향인자들과 더불어 온도변화에 의한 격납건물의 미세한 구조거동을 대변할 수 있기 때문에 구조건전성 평가에 매우 중요한 요소가 된다. 그러나, 현재 국내의 가동중인 CANDU형 부착식 텐던 격납건물의 구조건전성을 평가하는데 있어서 격납건물 콘크리트 내에 매설된 변형률게이지를 활용할 경우, 변형률게이지를 활용한 계측 자

\*정회원, 비엔티엔지니어링(주) 기술연구소 소장

\*\*정회원, 비엔티엔지니어링(주) 기술연구소 부장

\*\*\*정회원, 비엔티엔지니어링(주) 대표이사

\*\*\*\*정회원, 한전전력연구원 선임연구원

\*\*\*\*\*정회원, 한전전력연구원 책임연구원

료의 체계적인 분석 및 합리적인 판단 기준이 마련되어 있지 않아 포스트텐서닝 계통의 구조건전성을 평가하는데 많은 어려움을 겪고 있다.

따라서, CANDU형 부착식 텐던 격납건물 구조건전성 평가기법의 신뢰성 향상을 위해 변형률게이지의 계측현황 및 계측자료에 대한 정밀한 분석 그리고 이에 대한 합리적인 이론적 예측값과 예측범위를 설정하였으며, 이를 토대로 변형률 계측값을 모니터링하고 판단할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

## 2. CANDU형 격납건물의 계측시스템

### 2.1 현황

국내 CANDU형 격납건물 중 월성 1호기에는 총 118개의 변형률게이지가 설치되어 있으며, 월성 2,3,4호기에는 벽체와 기초가 만나는 힌지(hinge)부에 6개를 추가한 총 124개의 변형률게이지가 설치되어 있다. 현재 이들 게이지 중 작동하지 않는 불량게이지가 일부 포함되어 있으며, 불량게이지의 수는 호기별로 차이가 있다. 이러한 불량게이지는 콘크리트 타설 과정에서 손상이나 게이지 자체의 결함 및 노후화, 콘크리트의 미세균열 발생 또는 케이블, 접합기(junction box) 및 전환배전반(switching panel)의 손상 등이 원인으로 작용하여 발생할 수 있다.

### 2.2 변형률게이지 매설위치

국내 CANDU형 격납건물에 매설된 변형률게이지는 격납건물의 전반적인 구조거동을 평가하기 위해 기초와 벽체 그리고 돔부분에 고르게 분포되어 있으며(그림 1 참조), 표 1과 같이 동일 레벨 상에서 온도의 영향을 배제할 경우 동일한 거동을 하는 게이지들로 그룹화가 가능하다.

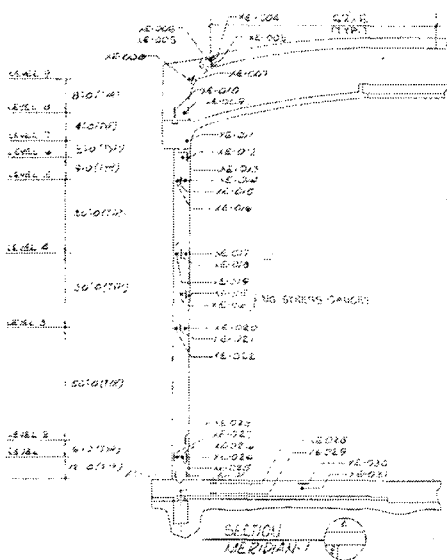


그림 1 변형률게이지 매설위치(Meridian-1)

표 1 변형률게이지 그룹

Group	Strain Gauge	Group	Strain Gauge
1	XE-024, XE-063, XE-097	18	XE-029, XE-068, XE-102, XE-041, XE-078, XE-112
2	XE-026, XE-065, XE-099	19	XE-030, XE-069, XE-103
3	XE-026, XE-065, XE-099	20	XE-031, XE-070, XE-104
4	XE-023, XE-062, XE-096	21	XE-003, XE-044
5	XE-020, XE-059, XE-093	22	XE-004, XE-045, XE-079
6	XE-021, XE-060, XE-094, XE-075, XE-038, XE-109	23	XE-005, XE-042
7	XE-022, XE-061, XE-095	24	XE-006, XE-043, XE-080
8	XE-017, XE-056, XE-090	25	XE-007, XE-046
9	XE-018, XE-057, XE-091	26	XE-008, XE-047, XE-081
10	XE-019, XE-058, XE-092	27	XE-009, XE-048, XE-082
11	XE-014, XE-053, XE-087	28	XE-010, XE-049, XE-083, XE-036, XE-073, XE-107
12	XE-015, XE-054, XE-088, XE-074, XE-037, XE-108	29	XE-011, XE-050, XE-084
13	XE-016, XE-055, XE-089	30	XE-034, XE-071, XE-105
14	XE-012, XE-051, XE-085	31	XE-035, XE-072, XE-106
15	XE-013, XE-052, XE-086	32	XE-125, XE-127, XE-129
16	XE-076, XE-039, XE-110	33	XE-126, XE-128, XE-130
17	XE-028, XE-067, XE-101, XE-040, XE-077, XE-111	34	XE-025, XE-064, XE-098

## 3. 상시계측을 활용한 구조거동분석 알고리즘

### 3.1 가동중 장기 변형률 변화의 예측

CANDU형 격납건물은 프리스트레스 콘크리트 구조물로서 초기 구조물에 도입된 유효 프리스트레스력이 탄성수축 이외에 시간의 경과와 함께 감소하게 되는데, 이것은 콘크리트의 건조수축과 크리프에 의한 체적변화, 그리고 프리스트레싱 텐던의 응력이완(stress relaxation) 등의 시간종속성 영향인자와 온도변화 등의 상호작용으로 발생한다. 본 연구는 시간종속성 영향인자들 중 건조수축과 크리프의 산정은 독일 시방서 DIN 4227-1988에 근거하고 있으며, 가동중 변형률 변화의 모니터링을 위한 기준 시점(reference time)은 각 호기별 SIT(가동전 검증압력시험)직전에 계측한 날(1200일)로 정하였다.

#### 3.1.1 온도변화

격납건물 콘크리트는 주변환경조건에 의해 내·외부의 온도가 계속적으로 변화하며 이것은 온도하중으로 인한 변형률의 변화를 발생시킨다. 햇빛을 받는 위치에 따른 영향을 고려하기 위해 6개의 자오선별로 격납건물 단면을 8개의 온도영역으로 분할하였으며, 반복적인 온도해석을 피하고자 가상일의 원리를 적용하여 단위온도에 대한 변형률계이지 위치에서의 변형률 변화를 구하였다.

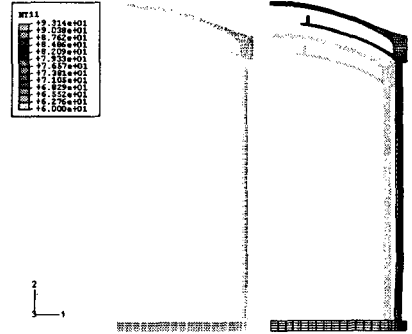


그림 2 격납건물 열응력해석

$$\Delta \epsilon_T^j = \sum_{n=1}^8 [(U_n^{0t} \times \epsilon_{U_n}^j) + (D_n^{0t} \times \epsilon_{D_n}^j)] \quad \text{식(1)}$$

여기서,  $\Delta \epsilon_T^j$ 는 j번째 계이지에서의 온도변화에 따른 변형률 변화량이다.

#### 3.1.2 건조수축

초기 기준점인  $t_0=1200$ 일과 함께 수렴단계에 접어드는  $t=3500$ 일 그리고 장기시점인  $t=10,000$ 일의 3시점을 고려하여  $t=3500$ 일과  $t_0=1200$ 일 사이를 중기(mid-term)로  $t=10,000$ 일과  $t_0=1200$ 일 사이를 장기(long-term)로 하는 bilinear 형태의 건조수축 변형률 변화 예측값을 제시하였다.

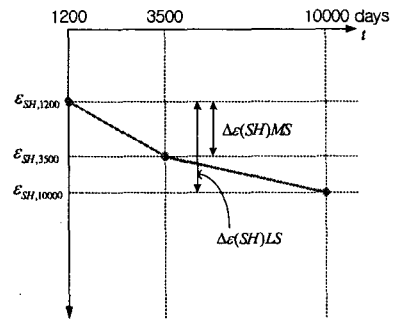


그림 3 건조수축 변형률 변화 개념도

건조수축 변형률은 8개의 온도영역 별로 DIN 4227에 의거 계산하였으며 계산된 변형률을 콘크리트 열팽창계수로 나눈 일정 온도하중을 8개 온도영역의 콘크리트에 부과하여 온도해석을 수행함으로써 대표 계이지들에 대한 주어진 시점에서의 건조수축 변형률  $\epsilon_{SH,t}$ 를 얻었다. 이때 j번째 변형률계이지의 1200일과

3500일 사이, 그리고 3500일과 10,000일 사이의 임의시점  $t_i$ 에서의 건조수축 변형률 변화량  $\Delta \epsilon(SH)_i^j$ 를 계산할 경우 내삽법을 사용하면 간단히 계산할 수 있다. 즉, 그림 2와 같이 이들 두 시간간격 사이의 변형률 변화를 각각 직선으로 가정하면 식(2)와 같은 1차방정식 형태로 표현이 가능하다. 여기서, m은 직선의 기울기를 의미하며 b는 상수이다.

$$\Delta \epsilon(SH)_i^j = m \cdot t_i + b \quad \text{식(2)}$$

#### 3.1.3 크리프

하중의 재하이력을 통한 각 재하단계별 유한요소해석을 수행하여 모든 대표 계이지 위치에서의 탄

성변형률을 구한 후, 이에 상응하는 재하기간별 크리프계수를 구하고, 이들 탄성변형률과 상응 크리프 계수의 곱으로부터 얻어진 크리프 변형률들의 중첩을 통해 임의의 게이지 위치에서의 크리프 변형률을 얻을 수 있다. 크리프에 의한 변형률 변화량  $\Delta\epsilon(CR)_t^i$  역시 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

### 3.1.4 프리스트레스트력 감소

프리스트레스트력 감소에 따른 변형률 변화량은 기준일인 SIT직전(1200일)과 10,000일 시점에 해당하는 장기(long-term)의 이상화된 프리스트레스트력 각각에 대해 유한요소해석을 수행하여 그립 대표 게이지들에 대한 탄성변형률  $\epsilon_{PR,t}$ 를 산정하여 두 시점 간의 차를 구하면 얻을 수 있다. 프리스트레스트력 감소에 따른 변화량  $\Delta\epsilon(PR)_t^i$  역시 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

### 3.1.5 변형률의 총 변화량

상기에서 계산된 각각의 변형률 변화량을 이용하여 임의의 계측시점 t에서 기준시점  $t_0$  이후로 발생한 j번째 변형률게이지의 총 변형률 변화량  $\Delta\epsilon_j$ 는 다음식에 의해 계산 할 수 있다.

$$\Delta\epsilon_j = \Delta\epsilon_t^i + \Delta\epsilon(SH)_t^i + \Delta\epsilon(CR)_t^i + \Delta\epsilon(PR)_t^i \quad \text{식(3)}$$

## 3.2 가동중 장기 변형률 변화의 예측범위 산정

격납건물 콘크리트 속에 매립된 변형률 게이지의 실측값에 대한 판단을 가능케하는 예측범위의 산정은 여름철 및 겨울철 그리고 가동중 및 shut-down(또는 start-up)시 격납건물 내·외부 평균온도와 탄성계수  $\pm 10\%$ 의 변화를 동반한 임의의 한 시점에서의 격납건물 자중, 프리스트레스트력, 건조수축, 그리고 크리프 하중조건에 대한 유한요소해석에 의해 얻어졌다. 이 때 이들 모든 가능조합으로부터 얻어진 변형률 중 가장 큰 값을 하한선, 가장 작은 값을 상한선으로 설정하였다.

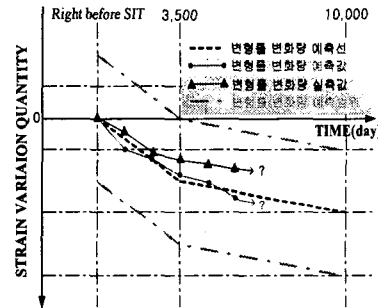


그림 4 변형률 분석 그래프 형태

## 4. 결론

상기의 CANDU형 격납건물 구조계 동분석 알고리즘을 토대로 격납건물 포스트텐서닝계통의 구조건전성을 평가할 수 있는 프로그램 "SAPONC-CANDU"를 개발하였다. 프로그램은 게이지 위치정보 및 기준시점의 변형률 계측값, 변형률 예측범위 등 기초

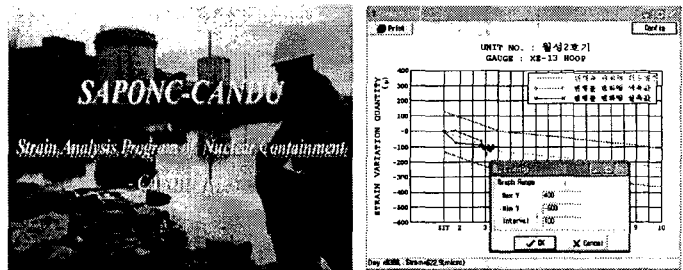


그림 5 SAPONC-CANDU 프로그램

입력자료 DB와 함께 주기적으로 계측되는 변형률 게이지의 실측값과 온도정보를 활용하여 변형률 변화상태 및 예측값을 제공함으로써 포스트텐서닝계통의 구조건전성을 평가할 수 있는 도구를 제공한다.

### 참고문헌

1. CANATOM Wolsong-2,3,4 NPP T.S., "Integrity Surveillance of the Prestressing System by Strain Gauges for the Containment Structure of the Reactor Building", 1996.