원전 부착식 텐던 격납건물의 구조거동 분석기법 개발II - FRANCE형

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

이 상 근* 박 상 순** 이 상 민*** 우 상 균*** 송 영 철****
Lee, Sang Keun Park, Sang Soon Lee, Sang Min Woo, Sang Kyun Song, Young Chul

ABSTRACT

In this study a program 'SAPONC-FRANCE' which is able to evaluate and analysis the elastic behavior property of the domestic FRANCE type containment under pressurization and depressurization in periodic structural integrity test (SIT) was developed. The readings of EAU system that is composed of the pendulum, invar-wire, leveling-pot, bench-mark, thermocouples and acoustic strain gauges were used as input data for operating the program. This program provides the prediction lines and bands of the pressure-strain(or displacement) relationship of concrete due to the changing of inner volume under pressurization and depressurization in SIT of the domestic FRANCE type containment.

1. 서론

원자로 격납건물의 경우 안전성 확보를 위해 냉각재 상실사고(LOCA)시에 발생하는 온도와 압력이 방사능의 최종 차폐인 격납건물에 구조적 영향을 미치게 됨으로 LOCA와 동일한 가상상태(설계압력 상태)에서 건물의 저항능력을 확인할 필요가 있다. FRANCE형 부착식 텐던 격납건물인 울진 1,2호기의 경우 관련 규정인 RCC-G Part III에 따라 격납건물 건전성시험(Structural Integrity Test: SIT)을 수행하고 있는데, 가동전 최초 SIT에서는 설계압력의 1.15배(4.83 bar)까지 가압하고, 가동중 10년 주기로 시행하는 SIT의 경우는 설계압력(4.2 bar)까지 가압하면서 격납건물의 탄성거동을 측정하고 있다. 이 때 종합누설율시험(ILRT)이 SIT와 동반 수행되고 있다(그림 1 참조).

현재 울진 1,2호기의 주기적 SIT는 격납건물에 매설된 변형률게이지(ASG)를 포함한 EAU시스템을 활용하여 그 계측값의 분석을 통해 격납건물의 탄성거동을 평가하고 있는데, 평가기준으로서RCC-G 3.2.1.4의 선형성(linearity)과 보완적 측면에서 ASME III CC-6213의 회복율(recovery rate)기준을 함께 병용하고 있다. 그러나, 선형성의 경우, 재료가 탄성거동을 할 때에 탄성한도 내에서 직선변화 하는 것

*정회원, 비앤티엔지니어링(주) 기술연구소 소장
**정회원, 비앤티엔지니어링(주) 기술연구소 부장
***정회원, 비앤티엔지니어링(주) 대표이사
****정회원, 한전전력연구원 선임연구원
*****정회원, 한전전력연구원 책임연구원

이 원칙이지만, SIT나 ILRT 처럼 시험압력을 한 번에 부과하지 않고 여러 단계를 거쳐 장시간동안 부과하기 때문에 단계에서 단계로 전환되는 과정에서 온도에 의한 영향을 받을 수 밖에 없으며, 압력이 일정하게 유지되는 단계에서 변형의 재배열(콘크리트가 완전한 탄성체가 아닌 것으로 인한 현상)이 발생하여 그래프가 선형성을 보이기가 사실상 매우 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 SIT 수행시 온도영향과 재령에 따른 탄성계수의 변화가 고려된 변형률 변화 예측선 및 예측범위를 산정함으로써 기존의 선형성 및 회복율 기준과는 별도로 보다 합리적인 판단기준을 제시하였다. 이 때 실측값의 변화와 예측선, 그리고 예측범위의 산정 및 회복율 계산과 예측범위에 따른 1차적 판단이 가능한 변형률 분석 프로그램을 실무자의 편의성을 고려하여 개발하였다. 개발된 프로그램은 변형률게이지(ASG) 이외의 변위를 계측하는 모든 EAU시스템을 대상으로 변형률게이지와 동일한 분석이 가능하도록 구성되었다.

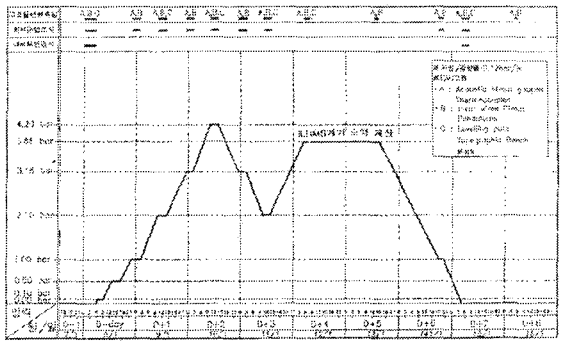


그림 1 울진 1,2호기 SIT 및 ILRT시 가압 및 감압 과정

2. FRANCE형 격납건물의 계측시스템

2.1 현황

EAU시스템 중 ASG(Acoustic Strain Gauge)는 진동식 와이어형 게이지로 격납건물 콘크리트의 변형률을 측정하며, 기타 Thermo-couple을 제외한 나머지 계측기들은 모두 변위를 측정하기 위해 매설 또는 부착되어 있다.

본 연구는 이들 계측기 중 ASG를 주 대상으로 하며, 나머지 계측기들은 ASG와 함께 본 연구의 개발 프로그램에 포함되기는 하나 보조적 판단자료로만 활용하도록 하였다.

표 1 울진 1,2호기의 EAU시스템 현황

EAU system	울진 1호기		울진 2호기		목적
	수량	설치위치	수량	설치위치	
ASG (Acoustic Strain Gauge)	52	Base:16 Gusset: 16 Wall:16 Dome:4	24	Base:4 Gusset:- Wall:16 Dome:4	격납건물 변형률 측정
Thermo-couple	36	Base/ Gusset/ Wall/ Dome	21	Base/ Wall/ Dome	온도
Pendulum	12	Wall (EL. 10, 26, 42)	12	Wall (EL. 10, 26, 42)	벽체변위
Invar Wire	3	Base (EL. -4.52)	3	Base (EL. -4.52)	내공 및 수직변위
Leveling Pot	13	Base (EL. -5.60)	9	Base (EL. -5.60)	수직변위
Bench Mark	12	Tendon Gallery Slab	12	Tendon Gallery Slab	수직변위

2.2 변형률게이지 매설위치

울진 1,2호기에 설치된 EAU시스템은 격납건물의 전반적인 구조거동을 평가하기 위해 기초, 거싯(gusset), 벽체 그리고 돔부분의 특정 대표위치에 설치되어 있다. 그림 2는 울진 1호기에 대한 EAU 시스템의 위치도면을 보여준다. 울진 2호기의 경우 ASG와 Leveling Pot의 개수가 울진 1호기의 52개와 13개에서 24개와 9개로 각각 줄었으며, 계측기들의 설치 자오선이 달라진 것을 제외하고는 설치방법은 울진 1호기와 동일하다

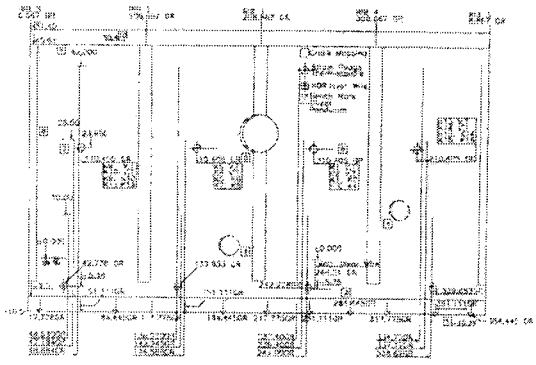
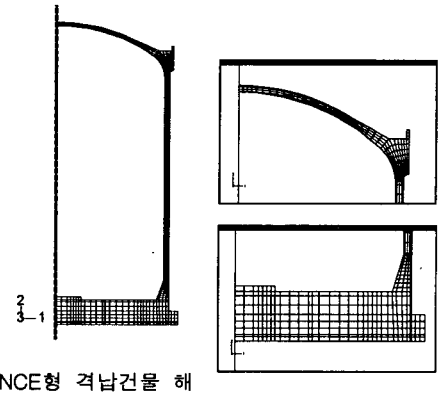


그림 2 EAU시스템 총괄 위치도(울진 1호기)



FRANCE형 격납건물 해

그

림 3
석모델링

3. SIT를 활용한 구조거동분석 알고리즘 개발

3.1 해석 모델링

울진 1,2호기의 압력-변형률 관계에 대한 예측선 및 예측범위를 산정하기 위해서는 수차례의 내압해석 및 열응력해석이 필요하며, 이와 같은 유한요소해석을 위해 2차원 축대칭 유한요소 해석모델링을 수행하였다(그림 3참조).

해석은 범용구조해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 내압해석시 원통형벽체, 돔 및 기초 슬래브는 4절점 고체요소(CAX4R)를, 열응력해석에는 4절점 온도-변위 결합요소(CAX4T)를 사용하였으며, 유한요소망은 816개의 절점과 683개의 요소로 구성하였다. 기초 바닥의 경계조건은 설계보고서에서 사용하고 있는 울진 1,2호기 지반특성을 고려한 탄성스프링으로 처리하였다.

3.2 압력-변형률(or 변위) 관계 예측선 산정

울진 1,2호기 EAU시스템의 압력-변형률(or 변위) 관계 예측선은 시험내압(4.2 bar)하의 내압해석을 통해 EAU시스템의 계측기 설치위치에 따른 정점변형률(peak strain)을 구함으로써 결정될 수 있다.

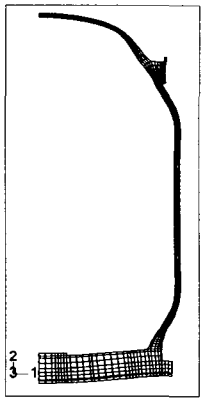


그림 4 내압해석

3.3 압력-변형률(or 변위) 관계 예측범위 산정

예측범위는 콘크리트 강도의 불확실성을 고려한 탄성계수 ±10%의 변화와 SIT 수행기간 동안의 격납건물 내외 온도변화를 고려하여 결정된다. 여기서, 온도변화는 격납건물이 압력시험동안 다양한 온도조건하에 놓이고, 특히 무더운 낮과 추운 밤의 경우엔 온도영향이 내압에 의해 발생된 변형률에 크게 영향을 미칠 수 있기 때문에 중요 고려인자가 된다. 따라서, 모든 계측기에 대해 내부온도의 범위는 설계온도인 운전정지시 여름철과 겨울철 내부 평균온도의 차(difference)의 절반(1/2)으로 고려하였고, 외부온도의 범위는 설계온도가 울진 1,2호기 실제 외부 평균기온과 상당한 차가 있는 매우 큰 값을 제시하고 있어 현재 울진 3,4호기의 설계온도인 여름

철 평균기온 29℃(84.2°F)와 겨울철 평균기온 -2 ℃(28.4°F)를 적용하여 이들 온도차의 절반(1/2)으로 고려하였다. 따라서, 이들 이상화된 온도범위와 상응하는 변형률(or 변위)들을 온도해석에 의해 계산한 후, 만일 게이지 "j"에서의 변형률(or 변위)이 Δj라면 그 때 0.5Δj를 압력에 의해 발생된 변형률(or 변위)로부터 가감하였다.

결국, 가압 시작점의 예측범위는 온도변화에 의한 변형률(or 변위)의 절대값이고, 정점에서의 예측범위는 온도와 탄성계수 변화에 의한 변형률(or 변위)의 절대값들의 합이 된다.

본 연구는 내압 및 열응력해석 결과를 이용하여 EAU시스템들의 각 계측기 설치위치에서의 정점변형률(or 정점변위) 및 예측범위를 제시하였으며, EAU시스템의 예측선 및 예측범위 일반도는 그림 5와 같다.

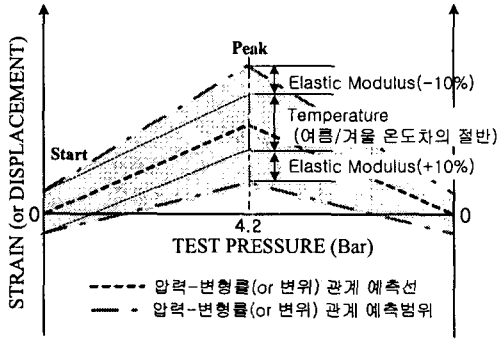


그림 5 EAU시스템의 예측선 및 예측범위 일반도

3.4 콘크리트 탄성계수 변화를 고려한 예측선의 수정

가동중 SIT가 10년 주기로 수행되고 있는 점을 감안할 때, 최초 SIT 이후 콘크리트 강도가 재령에 따라 미소하게 변화하므로 가동중 SIT시점에 따라 새롭게 수정할 필요가 있다. 이를 위해 최초 SIT시점을 기준시점(약1600일)으로 하여 CEB-FIP code 1990에서 제공하는 재령에 따른 탄성계수식에 의해 장기 재령에 따른 탄성계수의 변화값을 고려하여 내압해석을 수행함으로써 압력-변형률 관계 그래프의 기울기를 SIT 시점에 따라 탄력적으로 변화하도록 하였다.

4. 결론

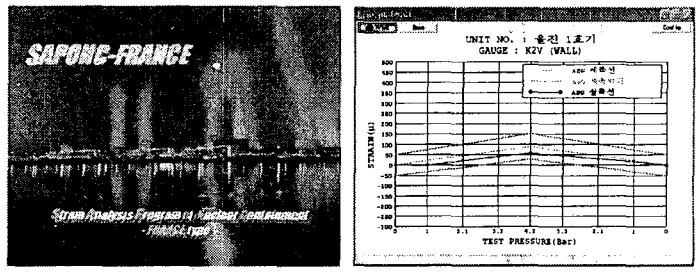


그림 5 SAPONC-FRANCE 프로그램

상기의 FRANCE형 격납건물 구조거동분석 알고리즘을 토대로 가압 및 감압에 따른 울진 1,2호기 격납건물의 장기 탄성거동을 평가할 수 있는 프로그램 "SAPONC-FRANCE"를 개발하였다. 프로그램은 EAU시스템 위치정보 및 SIT 시점에 따른 압력-변형률(or변위) 관계 예측선, 예측범위를 제공함과 동시에 EAU 시스템의 실측값과의 비교를 통해 구조건전성을 평가할 수 있도록 판단도구를 제공한다.

참고문헌

1) France EDF, "Strength and Leak Tightness Testing of the Prestressed Concrete Containment with a Leaktight Liner," RCC-G PartIII, 1980.

2) COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON, "CEB-FIP model code", 1990.

3) CEB KU 01 06 C 012/NE, "Results of Raft Stress Analysis," 1983.