

## 월성 3호기 격납건물 압력시험을 통한 구조건전성 평가

백 용 락, 이 성 규, 이 상 국

한국원자력안전기술원

신 재 철  
충남대학교

### 요 약

원자로 격납건물은 그 기능적 중요성 때문에 건설종료후 반드시 원자로 가상사고를 가정한 조건에 대해 구조적 건전성을 입증하여야 한다. 본 논문은 이러한 요건에 따라 수행된 월성 3호기 원자로 격납건물 구조건전성 시험(SIT : Structural Integrity Test)의 개요와 결과를 분석한 것으로 시험결과 월성 3호기는 설계시 고려한 허용범위내에서 거동하였으며 사고시 압력하중이 큰 경수로형 원자로와 달리 시험기간중 외기 온도 변화에 민감한 변화를 보인 것으로 확인되었다. 아울러 시험결과에 정확한 평가를 위해서는 시험전 충분한 기간동안 온도변화가 계속되어야 하며, 계측기 출력의 안정화가 계측성과의 신뢰도를 높이는 필수인 자임이 확인되었다.

### 1. 서 론

원자로 격납건물은 원자로 냉각수 상실사고 (LOCA)와 같은 설계기준사고시 방사능 물질의 외부 누출을 차단하는 최종방벽 역할을 담당한다. 따라서 이같은 기능적 중요성 때문에 건설종료 후 또는 운영기간중 반드시 설계기준사고를 가정한 조건에 대해 그 구조적 건전성의 입증을 요구받고 있다.<sup>[1]</sup> 이러한 요건의 충족을 위해 수행되는 격납건물 구조건전성시험(SIT)은 격납건물의 해석 및 설계의 타당성 검증은 물론 시공상태 및 가동이력에 따른 구조적 상태가 실증적으로 검증된다는 측면에서 그 의의와 중요성이 매우 큰 시험이다. 본 논문은 CANDU형 원자로인 월성 3호기 격납건물의 구조설계 특성과 SIT 수행내용을 소개하였다. 또한 시험결과에 분석을 토대로 월성 3호기 격납건물 구조거동 특성을 논하였으며 시험결과에의 신뢰도 제고 방안을 제안하였다.

### 2. CANDU 형 격납건물의 구조설계 특성

월성 3호기는 CANDU형 원자로로써 국내 표준형 원전인 가압경수로(PWR)형 격납건물과 달리 내부에 비상 살수용 용수를 저장하는 저장조(Dousing Water Reservior)를 구성하기 위한 2중의 Dome 구조를 가지며 원통형 벽체와 돔사이에 텐돈정착을 위한 Ring Beam 이 배치되어 있다. 또한 CANDU형 격납건물은 기초스래브까지 Prestress를 도입한 독특한 구조설계 특성을 갖고 있다. 그림 1에서와 같이 격납건물의 제원은 높이 51.2m, 직경 41.46m에 이르며 기초슬래브의 두께는 1.68m로서 두께 3.37m의 하부 콘크리트 Base 위에 얹어져 있다. 원통형 벽체의 두께는 1.07m 이며 상부돔의 두께는 0.61m이다. 설계기준사고시 방사능 물질의 외부

누출을 제한치 이내로 방지하기 위해 격납건물의 내부에 비금속 라이너 시스템을 도입하고 있다.

### 3. 월성 3호기 격납건물 구조건전성 시험(SIT) 개요

#### 3.1 시험개요

월성 3호기 격납건물 구조건전성시험(SIT)은 97. 6. 3부터 6. 15일 까지 종합누설시험 (ILRT) 과 병행하여 수행되었으며 도입국 기준인 CSA<sup>[2]</sup> 요건에 따라 수행되었다. 시험압력은 설계압력(124 KPa)의 1.15배인 143KPa(21 psig) 까지 증가·감소시키면서 격납건물의 구조거동 (변형율, 변위)을 계측 하여 해석시 예상한 구조거동과의 일치여부를 평가하며 아울러 시험압력에 의해 영구변형과 같은 구조적 손상이 없는 경우 건전성이 입증된다.

#### 3.2 계측기의 설치

SIT 수행시 격납건물의 구조거동을 위한 계측은 변형율 측정과 변위 측정으로 구분되며 추가로 SIT 수행기간 동안 압력의 증감에 따른 구조물의 결합 여부를 확인하기 위해 응력집중 부위를 포함 약 10여 개소를 선정하여 균열의 진전 여부를 관찰하게 된다. 변형율 측정을 위한 계측기는 건설시 격납건물 내부에 총 118개의 Strain Gauge를 매설하였으며 이들 분포는 그림 2 와 같이 구조물의 거동을 대표하는 주요위치에 배치되었다. 또한 격납건물의 전반적인 거동을 확인하기 위해 변위 측정을 위한 25개의 Deformation Meter가 설치되었다.(표 1)

#### 3.3 구조해석

월성 3호기 격납건물에 설치된 Strain Gauge 각각의 이론적 거동은 그림 3과 같은 2차원 축대칭 유한요소 모델의 해석결과 얻어진 응력을 토대로 압력하중에 의한 변형율값이 도출되었으며, 추가로 격납건물 콘크리트 표면의 응력이 외부 기온의 영향을 지속적으로 받아 변화하므로 격납건물 부위별 동절기와 하절기의 온도에 의해 발생하는 변형율을 반분하여 계측기 위치별 발생가능한 상.하한치를 설정하였다.<sup>[3]</sup> 추가로 콘크리트의 물성치의 불확실성을 고려하여 탄성계수의 10 %를 각각 상하한치에 가감하여 변형율의 이론적 허용범위를 설정하였다 (표2)

## 4. 결과분석

### 4.1 변형율 측정결과

표 1의 계측기 설치계획에서 나타낸 바와 같이 격납건물의 거동을 평가하기 위해서 총 118개의 Strain Gauge가 매설되었다 이중 시험 착수전 교장이 확인된 7개와 시험 진행중 출력이상 확인된 4개의 계기를 제외한 총 107개의 계기의 측정결과를 분석하였는 바 분석내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기초슬래브에서의 실측 변형율은 압력의 증감에 따라 큰 변화가 없는 미세한 변화를 나타내었는 바 이는 예상 변형율이 7-15  $\mu\text{s}/\text{m}$  정도임을 고려할 때 예상된 결과이다.
- 2) 원통형 벽체의 경우 벽체하단부(EL. 97.6m)에서부터 벽체 상단 (EL. 136.65m)까지 55개의 계기가 설치되었다 전반적인 벽체에서의 변형율값은 예상거동 범위내에서 거동하였으며, 부위별 거동경향 예상거동과 잘 일치하였다. 부위별 거동을 살펴보면 전형적인 벽체단면인 EL.114m-132.9m의 구간에서는 압력의 증감에 따라 수직방향(meridional) 응력은 미소한 변화를 나타낸 반면, 원환 방향에는 상대적으로 큰 인장응력이 유발됨을 확인되었다. 또한 벽체의 최상단인 EL. 136.65m

는 상부의 Ring Beam과의 연결부(junction)로써 벽체 내외부의 응력상태가 바뀌는 변곡부위이다. 이부위 벽체내측에서 측정된 변형율이 원환방향과 수직방향 모두 인장응력이 발생됨이 확인되어 예상거동과 일치됨을 확인하였다. 특히 벽체의외곽부에 설치된 계기의 거동은 압력에 의한 변화외에 시험기간중의 일교변화 등 외부기온 변화에 매우 민감한 변화를 나타내었는 바(그림 4) 압력하중만에 의한 격납건물의 거동을 정확히 평가하기 위해서는 시험기간중 격납건물 부위별 온도를 계측하여야 하며, 시험전,후 일정기간 동안 외기온도를 기록하여 온도 변화에 따른 영향을 보정하여야 할 것으로 판단된다.

- 3) Ring Beam에서의 변형을 변화는 하부(EL.137.7m)에서는 압력의 증감에 따른 변화가 뚜렷히 나타나지 않은 반면 상부(EL. 140.2m)에서는 변형율의 증감현상이 뚜렷이 나타났으며 특히 수직방향의 경우가 더욱 뚜렷한 바 이는 상부 Ring Beam과 연결된 돔의 거동과 관련이 큰 것으로 판단된다.
- 4) Dome의 거동은 압력의 증감에 따라 응력의 변화가 가장 뚜렷히 나타나는 부위로써 시험 결과 예상거동과 잘 일치하고 있으며 예상된 허용 범위내에서 거동하고 있음을 확인하였다. 특히 원통형 벽체 외곽부와 마찬가지로 돔 전단면에 설치된 Strain Gauge의 거동이 시험기간중의 일교변화 등 외기온도의 영향에 민감한 반응을 나타내었다.(그림 5)

#### 4.2 변위 측정결과

압력하중에 의한 격납건물의 전반적인 거동을 확인하기 23개의 반경방향 변위와 2개의 돔 수직 변위를 측정하였다. 시험결과 실측변 변위는 표 3 에서와 같이 비교적 발생변위가 작은 것으로 예상된 벽체 하단부의 발생변위가 예상변위의 약 52 %로 비교적 작은 변위를 유발한 것으로 확인되었으며 전형적인 원통형 벽체의 경우 예상변위의 78-90 %의 거동을 나타내어 전반적으로 해석결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 변위측정 성과의 특이사항으로서 부벽(Buttress)에서의 변위가 일반벽체 부위(typical wall section)의 60-80% 정도로 매우 작은 변위를 나타내었는 바 이에대한 보다 심도있는 검토가 필요한 것으로 판단된다. 또한 돔 정점에서의 수직변위는 예상변위의 77 % 정도로 벽체의 경우와 동일한 경향을 나타내었다.

ASME<sup>[4]</sup> 요건을 적용하여 해석이론에 부합된 탄성거동 여부를 판단하기 위해 검토된 부위별 회복율이 80 %에 미치지 못한 부위는 모두 햇빛에 의한 직사광선이나, 외기온도에 직접 노출된 부위로 시험기간중 온도가 상승할 경우 온도상승에 의한 변위의 증가분이 감압후에도 잔류하기 때문인 것으로 시험초기와 말기의 온도상승에 따른 영향을 보여주는 예는 그림 6과 같다. 특히 부벽의 경우 타부위에 비해 현저히 회복율이 낮은바 이는 부벽의 발생변위가 작으므로 온도상승에 의한 변위의 잔류량이 상대적으로 큰데 기인하는 것으로 판단되며 이경우와 반대로 돔의 수직방향 변위가 벽체의 반경변위에 비해 크므로 외기의 영향에 의한 변위의 잔류량이 상대적으로 작게 나타난 것으로 설명이 가능하다. 따라서 이와같은 외기온도 영향을 배제하기 위해서는 시험기간을 단축하여야 하는 바 시험기간이 장시간 소요되는 종합누설을 시험과 분리하여 시행하는 것이 바람직하며 시험기간중 외기온도와 부위별 세밀한 온도측정 자료를 누적하여 평가에 활용하여야 할 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

월성 3호기 원자로 격납건물 구조건전성 시험(SIT) 결과 얻어진 구조거동의 분석결과 도출된 사항은 다음과 같다.

- (1) 시험결과 얻어진 월성 3호기 전반적인 구조거동은 설계개념에 부합된 탄성거동을 보였으며, 사고 조건을 가산한 시험압력에 의해 균열의 증가나 외적인 영구결함 징후가 나타나지 않아 그 구조적 건전성이 확인되었다.

- (2) 원통형 벽체의 외측부위나 상부돔에서 측정된 변형율의 추이는 압력의 영향외에 일교변화, 직사광선과 같은 외기온도의 영향에 매우 민감한 것으로 나타났으며, 반경방향 변위도 계측기 설치부위 외부의 조건 즉 외기에 노출 또는 비노출에 따라 감압후 회복정도가 영향을 받는 것으로 확인되었다.
- (3) (2)항과 같은 외기온도의 영향은 CANDU형 원자로 격납건물의 설계압력은 18 psig로서 다른 가압경수로형 격납건물에 비해 약 30 % 정도이므로 압력하중에 의한 변형율 및 변위 발생량이 매우 작은 관계로 시험기간중의 외기온도, 일교변화, 직사광선의 영향에 의한 영향정도가 비교적 크게 나타나는 것으로 판단되며 이러한 영향을 배제하여 압력의 증감에 따른 격납건물의 구조거동을 정확히 평가하기 위해서는 시험전 및 시험중 외부온도 및 격납건물 부위별 온도변화에 대한 Baseline Data가 충분히 확보되어야 할 것으로 판단된다. 아울러 시험기간의 장기화에 따른 온도 변화의 영향을 배제한다는 차원에서 철저한 사전준비 및 종합누설을시험과의 분리를 통한 시험기간의 단축이 필요한 것으로 판단된다.
- (3) 부위별 변형율 측정성과 및 변위측정 성과중 일부가 시험기간중 불안정한 상태를 나타내거나 고장으로 확인된 계기는 모두 시험전 출력상태가 불안정하였던 계측기이므로 계측기 설치후 충분한 기간동안 계기출력의 안정화가 반드시 확인되어야 한다.

#### 참고문헌

- [1] 원자력법 시행령 제 92조 2항 (격납시설)
- [2] CSA/ CAN3-N287.6, "Pre-Operational Proof and Leakage Rate Testing Requirements for Concrete Containment Structures for CANDU Nuclear Power Plants", CSA, 1984
- [3] Wolsong Design Report 8634-21012-0002-00-DR-A, "Reactor Building Containment Prediction of Upper and Lower Limits of Strain Gauge Readings During the Pressure Test", AECL
- [4] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec.III Div 2. Article CC-6000 "Structural Integrity Test of Concrete Containment Structures", American Society of Mechanical Engineers, 1989, 1992

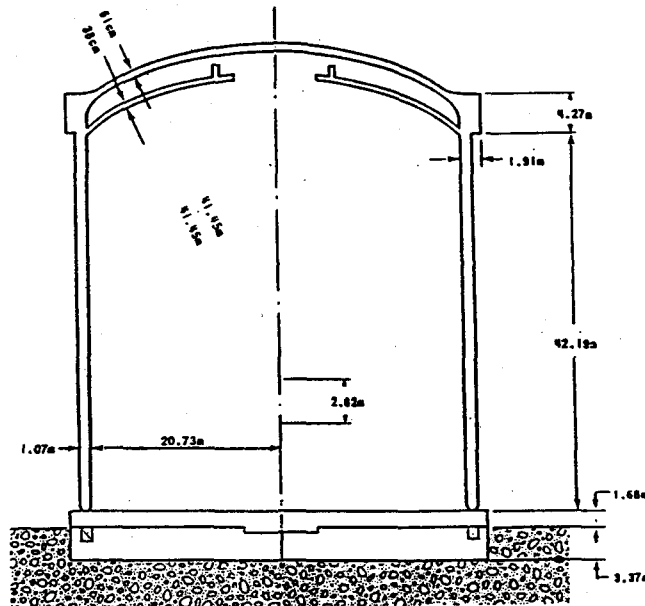


그림 1. CANDU형 격납건물의 설계계원

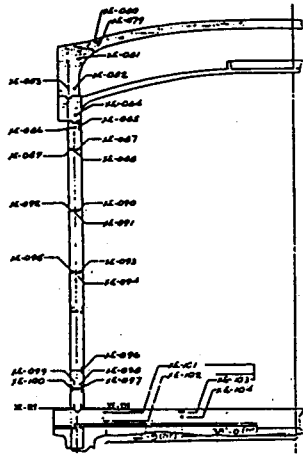


그림 2. Strain Gauge 배치형태

표 1. 계측기 설치계획

계측기 구분	계측기 수	방향	배치내용	계측기 종류	
Strain Gauge (118 EA)	Dome	18	수평	-16 Level at 6 Meridian -3 or 6 Gauge each Level	ROCTEST C110 S.G (Vibrating Wire Strain Gauge)
	Ring Beam	17			
	Wall	63	수직		
	Basemat	20			
Deformation Meter (25EA)	Wall	23	반경	-4 Level at 6(5) Meridian	ROCTEST DF-20(Convergence Meter)
	Dome	2	수직	-Dome Apex	

표 2. 구조해석 조건

구분	내용	변형을 허용범위 결정
전산 Code	ANSYS	- Test Pressure : 143KPa
Model	2-D Axi-Symmetric FEM	- 1/2 of Temp. Variation between Summer and Winter
Material Properties	$E_c = 4.77 \times 10^4 \text{ psi} \pm 10\%$	* Wall : 16.65 °C
	Poisson Ratio = 0.15	* Dome: 18.9 °C
	Thermal Expansion = $9.36 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	- Add. $\pm 10\%$ Variation of Elastic Modulus

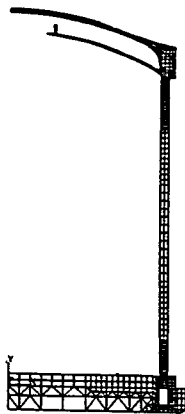


그림 3. 구조해석 모델

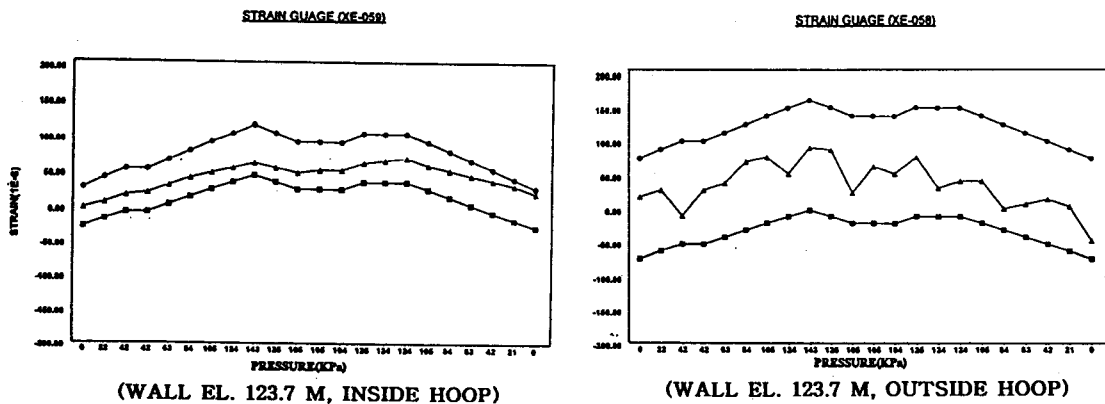


그림 4. 변형을 측정값에 대한 외부기온 영향에 (원통형 벽체)

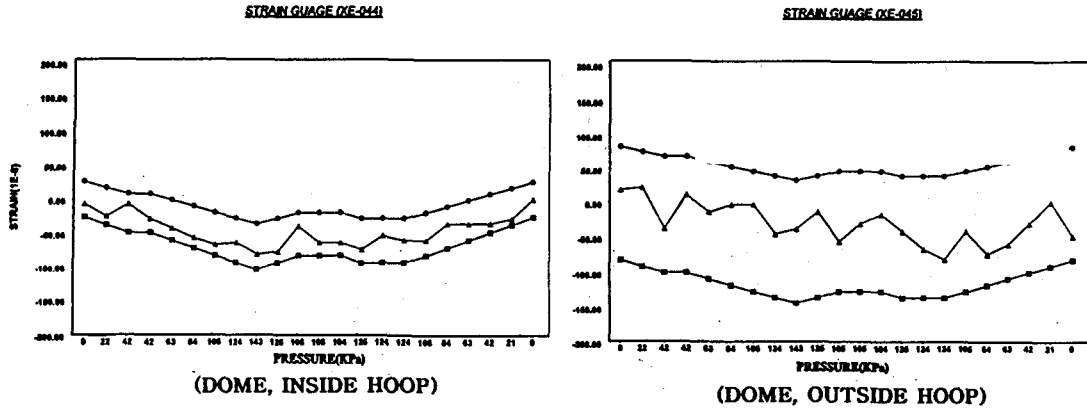


그림 5. 변형을 측정값에 대한 외부기은 영향에 (상부돔)

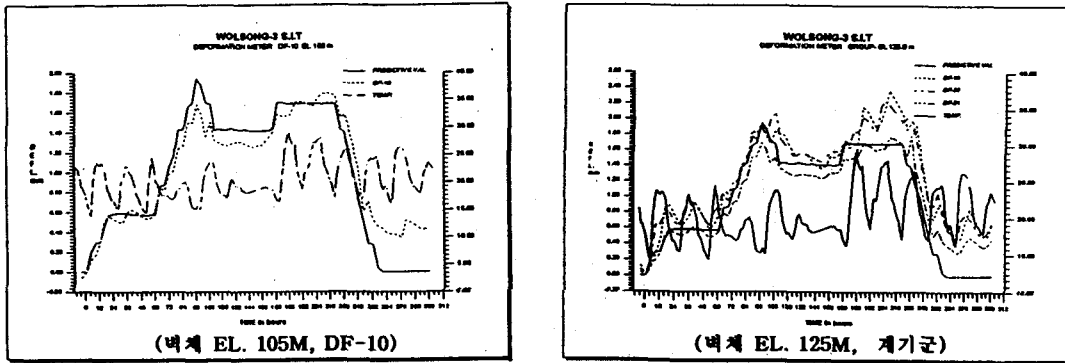


그림 6. 압력 및 외기은도 영향에 의한 반경방향 변위 변화 예

표 3 변위측정 결과

계기위치	계기번호	예상변위 <sup>(1)</sup> mm	실측변위		* of (2) (1)	회복율 <sup>*</sup>	평균회복율
			개별변위	평균 <sup>(2)</sup>			
EL 97.5	DF-1	1.18	0.71	0.61	51.7	95.3	82.6
	DF-2		-				
	DF-3		0.52				
	DF-4		0.76				
	DF-5*		0.46				
	DF-6*		0.58				
EL. 105	DF-7	1.94	1.60	1.75	90.2	92.1	82.0
	DF-8		2.37				
	DF-9		2.22				
	DF-10		1.68				
	DF-11*		1.27				
	DF-12*		1.34				
EL. 114.5	DF-13	1.86	1.47	1.45	78.0	91.0	79.0
	DF-14		1.56				
	DF-15		1.83				
	DF-16		1.42				
	DF-17*		0.95				
	DF-18*		-				
EL. 125	DF-19	1.95	1.95	1.59	81.5	83.5	70.5
	DF-20		1.91				
	DF-21		1.70				
	DF-22*		0.89				
	DF-23*		1.48				
수직 (Dome Apex)	DF-24	13.5	10.49	10.41	77.1	92.6	91.8
	DF-25		10.32				

\*: 최대발생 변위에 대한 회복율      \*: Buttress 부위