

가상사고 조건을 고려한 울진 5호기 원자로 격납건물 구조건전성 평가

Structural Integrity Test of Prestressed Containment Structure at Ulchin Unit 5

백 용 락, 정 연 석, 진 소 범, 최 강 룡
한국원자력안전기술원

요 약

원자로 격납건물은 그 기능적 중요성 때문에 건설종료 후 반드시 원자로 가상사고를 가정한 조건에 대해 구조적 건전성을 입증하여야 한다. 본 논문은 이러한 요구조건에 따라 수행된 울진 5호기 원자로 격납건물 구조건전성시험 (SIT : Structural Integrity Test)의 개요와 결과를 분석한 것이다. 시험결과, 울진 5호기 격납건물의 거동은 설계개념에 부합된 탄성거동을 나타내 원자로 가상사고 조건에서도 그 구조적 건전성이 유지될 수 있음이 확인되었으며 장비출입구 주변의 미소변위 발생 부위에 대해서는 계측시스템에 대한 개선이 필요한 것으로 확인되었다.

ABSTRACT

This study describes structural integrity test (SIT) on the prestressed concrete containment structures of Ulchin NPP unit 5. This test is carried out after completion of the construction works in order to demonstrate the structural capability of containment structure under the reactor postulate accident condition. Based on the test results and evaluations, it was verified that the containment can withstand the applied pressure with no damages, acceptable maximum crack width, and deformations compatible with design calculations generally. Furthermore, it was confirmed that the instrumentation system at around the equipment hatch is needed to improve.

1. 서론

원자로 격납건물은 원자로 냉각수 상실사고 (LOCA)와 같은 설계기준사고 시 방사능 물질의 외부누출을 차단하는 최종방벽 역할을 담당한다. 따라서 이 같은 기능적 중요성 때문에 건설종료 후 또는 운영기간 중 반드시 설계기준사고를 가정한 조건에 대해 그 구조적 건전성의 입증을 요구받고 있다.^[1] 이러한 요건의 충족을 위해 수행되는 격납건물 구조건전성시험(SIT)은 격납건물의 해석 및 설계의 타당성 검증은 물론 시공 상태에 따른 구조적 상태가 실증적으로 검증된다는 측면에서 그 의의

와 중요성이 매우 큰 시험이다. 본 논문에서는 울진 5호기 격납건물의 구조설계 특성과 SIT 수행내용을 소개하였다. 또한 시험결과의 분석을 토대로 울진 5호기 격납건물 구조거동 특성을 논하였으며 시험결과의 신뢰도 제고 방안을 제안하였다.

2. 격납건물의 구조설계 특성

울진 5호기 격납건물은 표준형 가압경수로(PWR)형 격납건물로서 반구형 돔과 수평 P.S 텐던 정착을 위한 3개의 부벽 (Buttress)을 갖는 원통형 셸 구조의 전형적인 프리스트레스 콘크리트 격납건물이다. (그림 3(a) 참조) 격납건물은 원자로, 증기발생기, 원자로 냉각계통, 및 공학적 안전설비계통을 수용하며 가상사고시의 조건에서도 규정된 제한치 이내로 방사능 물질이 외부환경으로 누출되지 않도록 설계되어 있다. 셸 구조를 갖는 격납건물은 두께 3.66m의 기초슬래브에 정착되어 있으며 벽체 직경이 높이는 66.8m이다. 원통형 벽체의 두께는 1.22m, 돔의 두께는 1.07m이고 가상사고 시 방사능 물질의 외부 누출을 제한치 이내로 방지하기 위해 격납건물의 내부에 두께 6 mm의 라이너 플레이트가 피복되어 있다.

3. 격납건물 구조건전성 시험(SIT) 개요

3.1 시험개요

울진 5호기 격납건물 구조건전성시험(SIT)은 03년 4월15일 23:35 부터 4월 19일 11: 38까지 약 84시간 동안 관련 기술기준인 ASME^[2] 요건에 따라 수행되었다. 시험압력은 그림 1과 같이 설계압력 (57 psig)의 1.15배인 65.6 psig 까지 압력을 증가 · 감소시키면서 격납건물의 구조거동(변위)을 측정하여 설계개념에 부합된 탄성거동 여부와 해석 시 예상한 구조거동과의 일치여부를 평가한다. 아울러 SIT 수행기간 동안 압력의 증감에 따른 구조물의 결함 여부를 확인하기 위해 응력집중 부위를 포함 약 10여 개소를 선정하여 균열의 진전 여부를 관찰하고 시험압력에 의한 구조적 손상이 유무를 평가하게 된다.

3.2 구조거동 측정

SIT 수행 시 격납건물의 구조거동을 위한 측정을 위해서 총 47개의 변위계 (LVDT : Linear Variable Differential Transducer)가 사용된다(그림 2). 측정기의 설치 위치는 격납건물의 구조거동을 대표하는 부위 및 다른 부위와 거동이 다른 대형개구부 주변을 포함하여 격납건물 내부에는 총 45개의 측정기가 설치되며 격납건물 외부에는 장비 출입구 슬리브의 수평 및 수직거동을 확인하기 위해 2개소가 설치된다. (그림 3) 모든 측정기들은 자동 자료수집 장치 (DAS)와 연결되어 실시간으로 측정을 수행하게 되며 측정자료는 분석용전산기와 연결되어 사전 입력된 변위산정 Algorithm에 의해 압력 단계별 변위로 환산된다. 아울러 온도변화에 따른 변위 환산 시 온도보정이 가능토록 격납건물 내부의 대표적인 위치에 온도측정 센서를 설치하였다.

4. 결과분석

4.1 변위 측정결과

4.1.1 원통형 벽체 반경방향

150 ft 이하의 원통형 벽체를 3등분 하여 Level별 구조거동을 측정하였다. 시험결과 실측 변위는 표 1 에서와 같이 예상변위의 92-94%를 나타내 해석결과와 잘 일치함을 보여주고 있다.

또한 Level별 발생 변위를 살펴보면, 기초슬래브와 연결되어 압력에 의한 외벽의 반경방향 변위 발생이 상대적으로 억제되는 Level 1의 경우가 가장 작은 변위를 나타내었으며 나머지 Level 2, 3의 경우는 해석 시 예측한 거동과 매우 근접한 결과를 보여주고 있다. 아울러 계측기가 설치된 각각의 위치의 기하학적 형상에 따른 영향으로 장비출입구 (Equipment Hatch) 주변의 보강단면과 2번 부벽 (Buttress) 사이의 일반단면 (R-3, R-7, R-11)에서 최대변위가 발생하는 것으로 나타나 구조해석 결과^[3] 와 일치된 결과를 보여주고 있다.

4.1.2 원통형 벽체 직경방향

원통형 벽체의 상부위치에 해당하는 직경방향 변위는 표 2에서와 같이 각 Level별 평균 실측변위가 예상변위의 약 80%를 나타내 비교적 구조해석 결과와 잘 일치됨을 알 수 있다. 특이사항으로서, 직경방향의 변위가 하부의 반경방향 변위의 2배의 값과 비교하여 상대적으로 작은 변위를 나타내고 있다. 이러한 현상은 선행호기의 시험결과에서도 동일한 경향을 나타내는데 이는 압력에 의한 격납건물 거동에 직접적인 영향을 주는 장비출입구의 영향에 의해 원통형 벽체 상부에 비해 152 ft 하부에서의 발생변위가 상대적으로 큰데 기인하며 직경방향의 계측부위가 그림 3(d)에서와 같이 강성이 상대적으로 큰 부벽이 포함된 위치라는 기하학적 영향에 기인한 것으로 판단된다.

4.1.3 벽체 및 돔 수직방향

그림 3(a)에서와 같이 시험압력에 의한 격납건물의 수직방향 거동을 검증하기 위해 돔 부위에 6개소, 기초슬래브와 원통형 벽체 상단인 스프링라인 사이에 4개소에 계측기를 설치하였다. 시험결과 원통형 벽체의 수직변위 측정값이 예상거동을 상회하여 예상변위의 118%를 나타내었다. 이는 압력에 의해 격납건물의 거동 시 원통형 벽체와 연결된 기초슬래브의 들림효과의 영향도 한 요인으로 추정되나 영향정도에 대해서는 검증이 필요한 것으로 판단된다. 돔의 수직변위는 계측결과의 신뢰도가 떨어지는 V-6를 제외하고 예상변위의 약 74-88%의 거동을 나타내었으며, 거동 경향 또한 돔의 정점으로부터 멀어 질수록 변위 발생이 작아지는 경향을 나타내어 구조해석 결과와 잘 일치됨을 보여주고 있다. (표 3)

4.1.4 장비출입구 주변 반경방향 변위

대형 개구부는 격납건물의 거동에 지대한 영향을 주는 부위이며 개구부 주변의 일정 면적은 일반단면의 두배인 8 ft의 두께를 갖게 되며, 복잡한 철근과 텐돈의 배치, 보강 등 구조적 거동에 대한 해석상의 영향 요인이 다양한 부위이다. 특히 장비출입구 중심으로 상하단의 미소변위 발생 부위에 대해서는 실측변위와 해석상의 차이가 크며, 미소변위에 대한 계측시스템의 영향인자로 인하여 계측값에 대한 신뢰성 문제 등 전통적으로 많은 논란이 제기되어 온 부위이다.

울진 5호기의 경우도 선행 원전의 시험결과와 유사한 패턴을 갖는데 표 4에서와 같이 장비출입구 수평 중심선 방향으로 측정된 반경방향 변위를 살펴보면 출입구 중심으로부터 멀어 질수록 변위가 증가하는 경향은 해석내용과 일치하나 예상변위에 대한 실측변위의 비를 살펴보면 출입구 중심축의 좌측(E-1,2,3)의 경우 우측(E-4,5,6)에 비하여 저조한 것으로 나타났다. 특히 장비출입구 중심선 상하단으로 설치된 미소변위 발생 부위들의 경우, 계측기의 탈락으로 계측이 되지 않았거나 (E-7,8) 계측기 설치조건 등 제반 요인으로 인하여 그림 4와 같은 이상거동을 나타내는 등 계측 값 간에 편차가 커 해당부위의 계측신뢰도에 문제가 있음을 보여주고 있다. 이는 실제 발생하는 변위에 비하여 계측 오차가 크며, 계측시스템 구성에 있어 오차 요인이 다양하게 내재되어 있기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 장비 출입구 주변의 미소변위 발생부에 대해서는 계측신뢰도 확보를 위한 개선방안이 적극 모색되어야 한다.

4.2 잔류변위

가상사고 조건을 고려한 압력의 증가 및 감소에 따른 격납건물의 건전성 입증 기준은 각 부위별 거동이 설계개념에 부합된 탄성거동 여부와 시험 후 구조물에 항복의 징후 또는 구조적 결함 유무가 가장 중요한 판단기준이 된다. 울진 5호기는 시험결과 표 1~표 4에 보인 바와 같이 감압 직후의 잔류변위가 허용변위 요건을 만족하였다. 추가로 보다 엄격하였던 89년 Code의 합격기준인 회복율 (Recovery Rate : 최고압력에서의 발생변위에 대한 회복변위의 비) 또한 대부분 감압 직후 합격기준을 만족하였으며, 일부 부위의 경우 요건인 감압 후 24시간 이내의 조건을 모두 만족하여 설계개념에 부합된 탄성거동 범위내의 거동을 나타내었다.

4.3 외부 표면의 균열 및 구조물 상대 잔류변위

격납건물의 거동을 대표하는 부위, 시험하중에 의해 응력유발 특성이 일반단면과 다른 부위 및 국부적으로 인장응력이 발생할 수 있는 부위 등 10개소를 선정하여 압력의 증감에 따른 균열의 발생 및 발달상태를 점검하였다. 시험결과 전 부위에서 균열의 성장 징후가 확인되지 않았으며 가압 전 기 발생되었던 균열도 최대 0.015 inch의 미세균열로 허용 균열 폭 0.040 inch임을 고려할 때 철근의 항복징후 또한 없는 것으로 확인되었다. 또한 시험 후 고 응력 부위, 라이너플레이트 후면의 공극부위 등 가압착수 전 점검부위에 대한 육안점검을 실시한 결과 격납건물의 구조건전성에 영향을 미치는 손상징후도 확인되지 않았다.

5. 결 론

원자로 가상사고 조건을 모의하여 수행한 울진 5호기 원자로 격납건물 구조건전성시험 (SIT) 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 울진 5호기 원자로 격납건물의 전반적인 구조거동은 설계개념에 부합된 탄성거동을 보였으며, 사고조건을 가상한 시험압력에 의해 균열의 증가나 외적인 영구결함 징후가 나타나지 않아 그 구조적 건전성이 확인되었다.
- (2) 장비출입구 주변의 일부부위의 거동을 제외한 격납건물의 거동을 대표하는 각 부위별 거동계측 결과가 구조해석결과 얻어진 예상거동과 잘 일치하여 해석 및 설계, 시공품질 등이 적합하게 이루어 졌음을 입증하였다.
- (3) 선행원전의 시험사례에서도 확인된 바와 같이 울진 5호기 장비출입구 중심선 상 하단의 미소 변위가 발생하는 부위들은 실제 발생하는 변위에 비하여 계측시스템이 갖는 다양한 오차요인으로 인한 영향이 큰 것으로 판단되므로 장비 출입구 주변의 미소변위 발생부에 대해서는 계측신뢰도 확보를 위한 개선방안이 적극 모색되어야 한다.

참고문헌

- [1] 과학기술부령 제 31호, “원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제 23조 제1항 제 3호
- [2] 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, 1992
- [3] 백용락 외, “원자로 격납건물 기하학적 특성을 고려한 내압해석”, 한국원자력학회 ‘95 춘계학술발표회 논문집, 1995. 5.26- 27, 울산대학교
- [4] CSA/ CAN3-N287.6, “Pre-Operational Proof and Leakage Rate Testing Requirements for Concrete Containment Structures for CANDU Nuclear Power Plants”, CSA, 1984

표 1. 원통형 벽체 반경방향 변위

계측기	시 험 압 력				압 력 제 거			비 고
	예상변위 (in)	측정변위 (in)	측정/예상 (%)	허용변위 (in)	잔류변위 (in)	허용잔류 변위 (in)	회복율* (%)	
R-1	0.149	0.192	128.86	0.194	0.011	0.048	95.0	Level 1 (EL. 106'-00'')
R-2	0.204	0.174	85.29	0.265	0.006	0.051	96.9	
R-3	0.295	0.222	75.25	0.384	0.006	0.069	98.2	
R-4	0.193	0.188	97.41	0.251	0.007	0.049	96.4	
평균	0.210	0.194	92.27	0.273	0.008	0.052	96.6	
R-5	0.193	0.212	109.84	0.251	0.013	0.052	94.3	Level 2 (EL. 128'-00'')
R-6	0.261	0.216	82.76	0.339	0.005	0.062	97.6	
R-7	0.393	0.396	100.76	0.511	0.022	0.089	95.5	
R-8	0.313	0.250	79.87	0.407	0.003	0.073	98.9	
평균	0.290	0.269	92.59	0.377	0.011	0.068	96.6	
R-9	0.155	0.210	135.48	0.202	0.017	0.052	92.5	Level 3 (EL. 150'-00'')
R-10	0.252	0.230	91.27	0.328	0.008	0.060	96.7	
R-11	0.394	0.359	91.12	0.512	0.023	0.089	94.4	
R-12	0.333	0.277	83.18	0.433	0.009	0.077	97.2	
평균	0.284	0.269	94.89	0.369	0.014	0.067	95.2	

표 2 원통형 벽체 상부 직경방향 변위

계측기	시 험 압 력				압 력 제 거			비 고
	예상변위 (in)	측정변위 (in)	측정/예상 (%)	허용변위 (in)	잔류변위 (in)	허용잔류 변위 (in)	회복율* (%)	
D-1	0.361	0.292	80.89	0.469	0.042	0.082	86.3	Level 4 (EL. 177'-00'')
D-2	0.540	0.425	78.70	0.702	0.047	0.118	89.0	
D-3	0.458	0.368	80.35	0.595	0.035	0.102	91.2	
평균	0.453	0.362	79.84	0.589	0.041	0.101	88.8	
D-4	0.379	0.313	82.59	0.493	0.038	0.086	89.2	Level 5 (EL. 203'-00'')
D-5	0.501	0.405	80.84	0.651	0.022	0.110	95.3	
D-6	0.446	0.333	74.66	0.580	0.023	0.099	93.2	
평균	0.442	0.350	79.26	0.575	0.028	0.098	92.6	
D-7	0.369	-	-	0.480	-	-	-	Level 6 (EL. 216'-00'')
D-8	0.463	-	-	0.602	-	-	-	
D-9	0.430	0.352	81.86	0.559	0.077	0.096	78.3	
평균	0.430	0.352	81.86	0.559	0.077	0.096	78.3	

*주) : 회복율은 감압 직후의 값을 토대로 계산한 값임.(합격기준은 감압후 24시간 이내)

표 3. 돔 및 벽체의 수직변위

계측기	시 험 압 력				압 력 제 거			비 고
	예상변위 (in)	측정변위 (in)	측정/예상 (%)	허용변위 (in)	잔류변위 (in)	허용잔류 변위 (in)	회복율* (%)	
V-1	0.413	0.363	87.89	0.537	0.036	0.093	90.7	Dome Apex
V-2	0.413	0.365	88.38	0.537	0.044	0.093	88.7	
평균	0.413	0.364	88.14	0.537	0.040	0.093	89.7	
V-3	0.400	0.304	76.00	0.520	0.027	0.090	91.5	Dome Offset (25 feet)
V-4	0.406	0.326	80.30	0.528	0.034	0.091	90.0	
평균	0.403	0.315	78.16	0.524	0.031	0.091	90.8	
V-5	0.367	0.271	73.84	0.477	0.029	0.083	89.4	Dome Offset (50 feet)
V-6	0.385	0.140	36.36	0.501	0.014	0.087	90.1	
평균	0.376	0.206	54.65	0.489	0.022	0.085	89.8	
V-7	0.162	0.206	127.16	0.211	0.042	0.051	81.1	벽체 수직변위 (Basemat to Springline)
V-8	0.161	0.203	126.09	0.209	0.033	0.051	84.0	
V-9	0.157	0.156	99.36	0.204	0.016	0.041	94.5	
V-10	0.125	0.149	119.20	0.163	0.012	0.040	92.0	
평균	0.151	0.179	118.02	0.197	0.026	0.046	87.9	

표 4 장비출입구(Equipment Hatch) 주변 반경방향 변위

계측기	시 험 압 력				압 력 제 거			비 고
	예상변위 (in)	측정변위 (in)	측정/예상 (%)	허용변위 (in)	잔류변위 (in)	허용잔류 변위 (in)	회복율* (%)	
E-1	0.410	0.252	61.46	0.533	0.016	0.092	94.7	E/H 주변 EL.152'-10'' 수평방향
E-2	0.279	0.132	47.31	0.363	0.022	0.066	84.3	
E-3	0.156	0.111	71.15	0.203	0.024	0.041	79.4	
E-4	0.112	0.171	152.68	0.146	0.010	0.044	94.6	
E-5	0.211	0.282	133.65	0.274	0.009	0.066	97.5	
E-6	0.322	0.316	98.14	0.419	0.000	0.074	100	
E-7	0.028	-	-	0.036	-	0.027	-	E/H 상하단 (EL.122'-3'' to EL.182'-4'')
E-8	0.031	-	-	0.040	-	0.022	-	
E-9	0.033	0.008	24.24	0.043	0.002	0.017	79.0	
E-10	0.042	0.047	111.9	0.055	0.000	0.018	100	
E-11	0.047	0.055	117.0	0.061	0.015	0.023	77.1	
E-12	0.091	0.008	8.79	0.118	0.000	0.028	100	

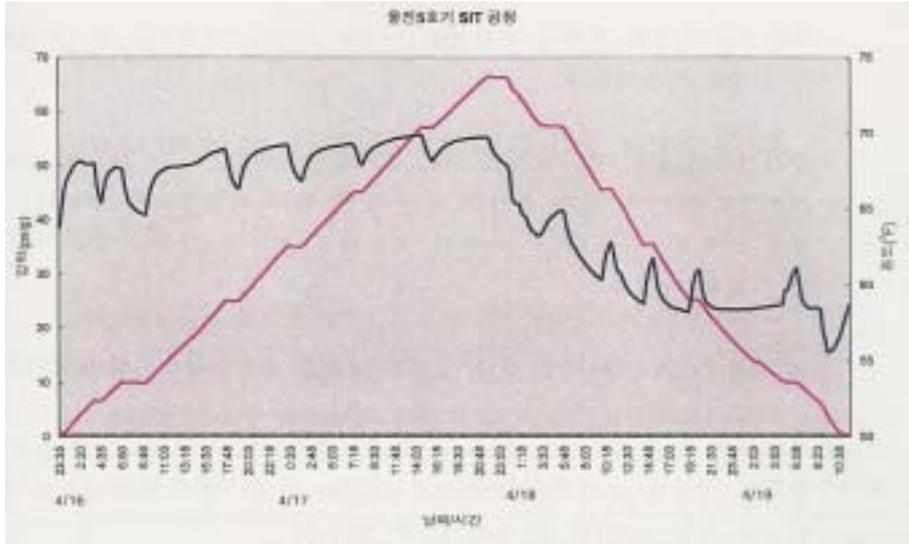
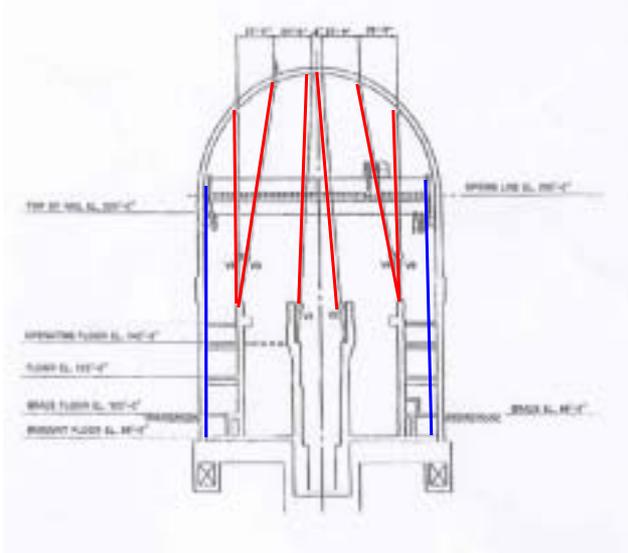


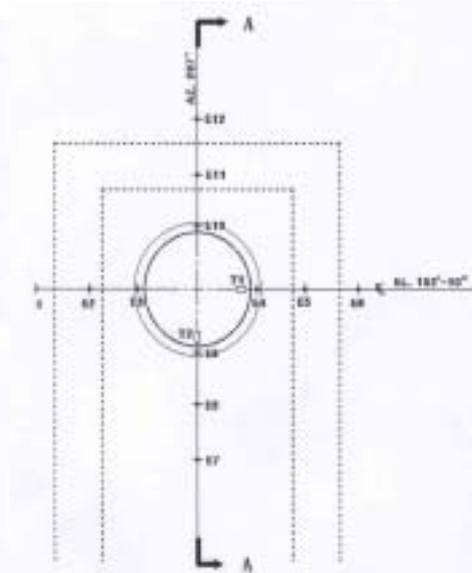
그림 1. 울진 5호기 SIT 수행 공정도



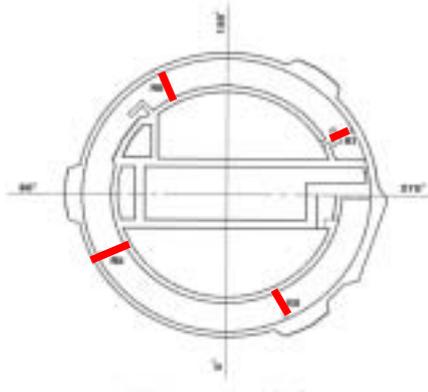
그림 2 SIT 변위 계측용 LVDT



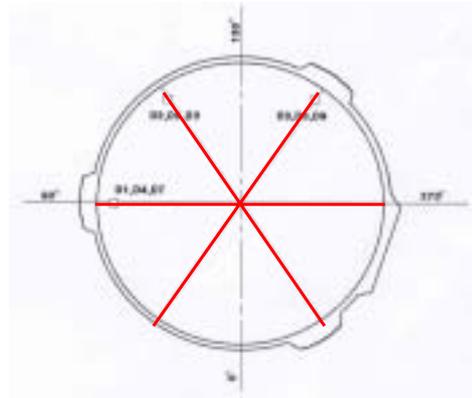
(a) 벽체 및 돔 수직변위 계측기 배치



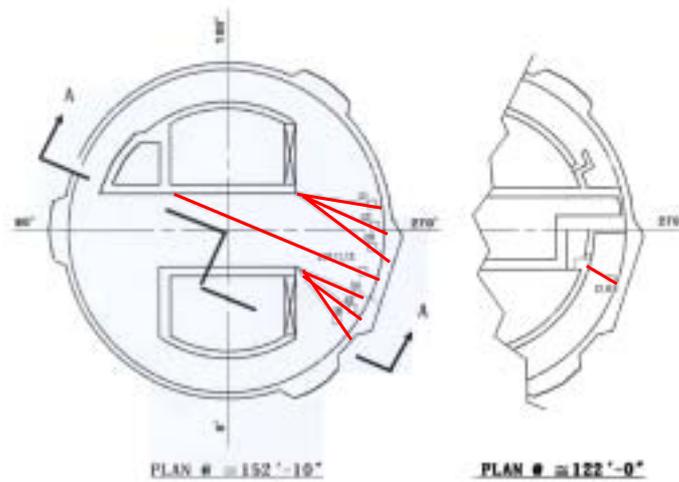
(b) 장비출입구 주변 계측기 배치



(c) 벽체 반경변위 계측기 배치
(EL.106'/128'/150'X4EA=12EA)



(d) 벽체 직경변위 계측기 (EL.177' /203'/216' X 3 EA=9 EA)



(d) 장비출입구 주변 계측기 배치 (내측에서 밖 주시)

그림 3 구조거동 측정용 계측기 설치위치

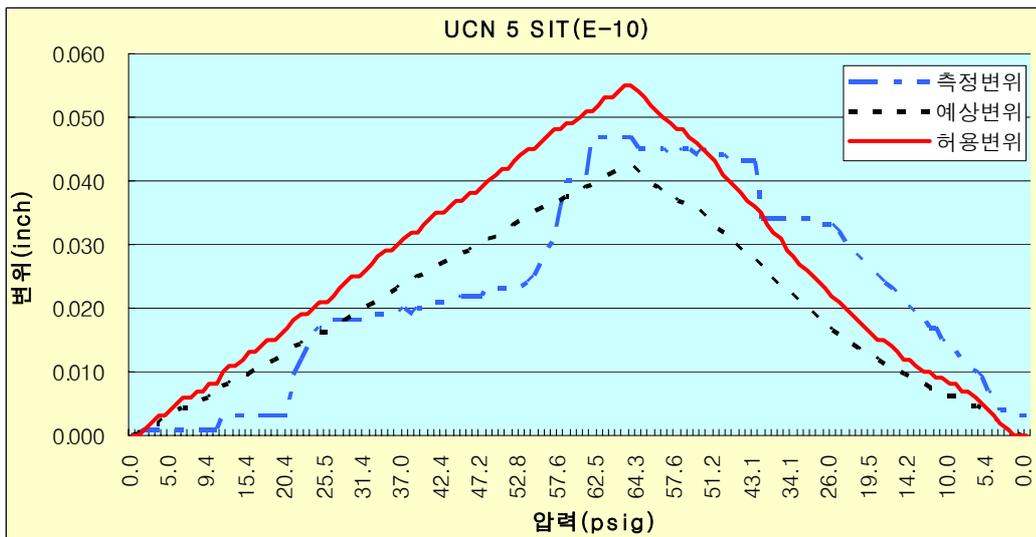
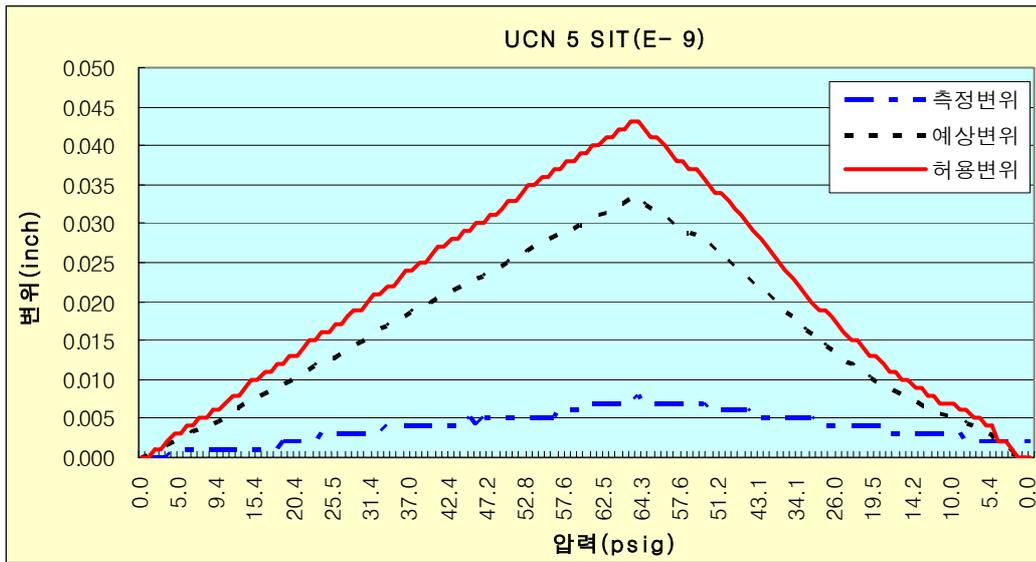


그림 4 장비출입구 주변 이상 계측 예(E-9/E-10)