

**압력시험을 통한 부착식 텐돈이
설치되는 울진 2호기 격납건물의 구조건전성 평가**

**Structural Integrity Test
of Ulchin Unit 2 Containment Structure with Grouted Tendon**

백 용 락, 이 상 국, 이 성 규
한국원자력안전기술원

신 재 철
충남대학교

요 약

포스트텐션 방식으로 프리스트레스를 도입한 격납건물은 구조물 설계시 고려된 안전여유도가 운전 및 환경조건에 따라 감소되지 않음을 주기적으로 입증하기 위한 가동중검사(Inservice Inspection : ISI)가 요구된다. 본 논문은 부착식 텐돈을 채택한 울진 2호기 격납건물의 10년차 구조건전성시험(SIT : Structural Integrity Test)의 결과를 분석한 것이다. 시험결과 울진 2호기 격납건물은 설계시 고려한 예상범위내에서 거동하였으며 설계시 고려된 탄성거동을 나타내어 그 건전성이 확인되었다. 또한 향후 격납건물 장기가동에 따른 건전성 입증을 위한 추가적인 검토와 개선방안이 제안되었다.

ABSTRACT

Inservice inspection of prestressed concrete containment structures with grouted tendons is needed to verify at specific intervals that the safety margins provided in design of containment structure have not been reduced as a result of operating and environmental effects. This study discuss the results of 10-year periodic structural integrity test of the Ulchin Unit 2 containment structure. The results indicate that the actual behaviors of containment structure showed reasonably well agreement with predicted behaviors. The elastic reponse of containment made proof of its structural integrity. Furthermore, additional study items and recommendations are proposed for reliable evaluation of structural integrity considering long-term effects.

1. 서 론

원자로 격납건물은 원자로 냉각재 상실사고 (LOCA)와 같은 설계기준사고시 방사능 물질의 외부 누출을 차단하는 최종방벽 역할을 담당한다. 따라서 이같은 기능적 중요성 때문에 격납건물은

설비의 안전기능에 상응한 주기적인 시험이 가능하도록 설계되어야 한다.^[1]

포스트텐션 방식으로 프리스트레스를 도입한 격납건물은 구조물 설계시 고려된 안전여유도가 운전 및 환경조건에 따라 감소되지 않음을 주기적으로 입증하기 위한 가동중검사(Inservice Inspection : ISI)가 요구된다. 국내 격납건물의 가동중검사는 비부착식 텐돈(Ungrouted Tendon)의 경우는 규제지침(Reg. Guide) 1.35.^[2]의 요건을, 부착식 텐돈(Grouted Tendon)을 도입한 월성 원자력 1,2,3,4호기 및 울진 1,2호기는 각각 도입국의 기술기준인 CSA N 287.6^[3] 및 RCC-G Part III^[4] 요건에 따라 가동중 검사를 수행하여 오고있다.

부착식 텐돈이 설치된 격납건물의 가동중검사는 격납건물 콘크리트 단면에서 프리스트레스 크기를 확인하는 방법과 다른 방법으로는 압력시험을 실시하여 압력하에서의 구조물의 거동을 측정하여 평가하는 방법이다. 본 논문에서는 부착식 텐돈이 채택된 울진 2호기의 압력시험을 통한 10년간 가동중검사의 내용을 소개하였으며 시험결과와 분석을 통하여 부착식 텐돈이 설치된 격납건물의 가동중 점검 및 신뢰도 제고방안을 제안하였다.

2. 부착식 텐돈이 도입된 격납건물 가동중검사 개요

부착식 텐돈이 도입된 격납건물의 구조적 상태를 점검하는 방식으로 미국 원자력 규제위원회(US NRC) 규제지침 1.90^[5]에서는 크게 2가지 방법을 제시하고 있다. 첫째는 격납건물 콘크리트내의 계획 단면에서 프리스트레스 크기를 확인하는 것이며 다른 수단으로는 압력시험을 실시하여 압력하에서의 거동을 측정하는 방법이다.

2.1 프리스트레스 크기의 측정에 의한 가동중검사

긴장작업후 프리스트레스 힘의 감소는 대체로 텐돈의 응력이완, 콘크리트의 체적변화, 텐돈과 그라우트, 콘크리트간의 부등온도팽창 또는 수축 그리고 강선의 파손가능성을 포함한 부식의 의한 강선 단면의 감소가 주요인이 된다.

격납건물의 프리스트레스 크기는 구조물내에 설치한 계기의 위치에서 측정되므로 계기 설치 단면 부근에서의 열화정도를 계측한 결과를 평가하는 방식이다. 따라서 계측기 설치단면에서 멀리 떨어진 지점에서 열화가 발생할 경우에는 계측이 어려우며 계측부위까지 영향을 미치지 전에 광범위한 열화가 발생되게 된다. 또한 수명기간중 계측기기의 동작상태나 계측값의 충분한 신뢰성이 입증되야 한다.

부착식 텐돈이 설치된 격납건물의 프리스트레스 크기는 다음같은 내용에 대한 적절한 조합에 의해 평가될 수 있다.

- (1) 텐돈 인장변형률 측정
- (2) 콘크리트 단면에 설치한 변형률/응력 측정기의 계측값으로부터 단면의 프리스트레스 크기 평가

텐돈의 인장변형률 측정방법은 텐돈의 프리스트레스 힘을 직접적으로 측정하는데 유용하나 이 방법에서 요구되는 계기의 작동성을 위해서는 텐돈의 설치와 그라우트 동안에 세심한 주의가 요구된다. 또한 텐돈에 설치되는 변형률계이지는 강선의 이완으로 인한 힘의 손실을 직접 측정할 수 없으므로 설치된 텐돈의 이완데이터를 이용하여 이를 추정하여야 한다.

변형률이나 응력측정기의 계측값을 평가하는 데에는 측정값에 포함된 변수들인 탄성변형, 크리이프, 열변형률이나 응력방향성분 등에 대한 깊은 이해를 필요로 하고 콘크리트의 프리스트

레스값에 상응하는 탄성변형률과 콘크리트의 크리이프 및 건조수축에 의한 영향정도 평가가 따라야 한다. 따라서 이러한 요인에 대한 세부적인 평가를 위해서는 비 부착식 텐돈에서 측정된 시간이력 손실을 이용하여 크리이프와 건조수축의 평균변형률을 계산하거나 변형률게이지가 설치된 지점의 응력측정, 콘크리트의 체적변화와 온도변화만에 의한 변형률을 측정하는 특수변형률 게이지 사용 등 별도의 사전조치가 필수적이다.

2.2 압력시험하의 변형측정에 의한 가동중검사

격납건물 가동중검사의 다른 방법은 격납건물 설계기준사고 조건을 가정한 압력시험하에서 격납건물의 변형을 측정하여 설계개념에 따른 탄성응답을 평가하는 것이다. 압력시험시의 탄성응답은 주로 구조물 강성도의 함수이다. 프리스트레스 손실에 의한 구조물 강성도 감소가 큰 경우는 구조물의 균열발생에 기인한다. 프리스트레스 힘과 구조물의 탄성응답간의 관계는 민감하지 않고 직접적이지 않기 때문에 각종 단면에서 작용되는 프리스트레스 크기를 측정하는데 사용될 수는 없다. 그러나 초기 구조건전성 시험시(ISIT : Initial Structural Integrity Test) 측정된 변형과 가동중 압력시험시의 조건 및 변형을 비교함으로써 구조물의 기능유지 상태를 평가할 수 있게 된다. 의미있는 변형비교를 위해서, 변형 측정위치는 설계기준 사고시의 최대 계산압력하에서 비교적 큰 변형(약 1.5mm 이상)이 발생하는 지점으로 선정하고, 이 위치는 ISIT와 ISI시에 동일하여야 한다.

또한 측정위치는 구조적 불연속면에서 떨어진 지점이어야 한다. 실린더와 돔의 변형측정을 위한 지점의 수는 ASME, Sec. III Div.2, CC-6000^[6]의 요건보다 많은 점을 선정하여야 한다. 프리스트레스 힘의 정상적인 손실, 재령에 따른 콘크리트 탄성계수의 증가 및 각 압력시험 동안의 온도차이 등의 영향을 분석한 결과가, 이들이 선정된 지점의 변형에 영향을 미치는 것으로 판정된 때에는 각 압력시험중의 변형을 비교하는 데에 이 변수들을 고려하여야 한다.

이 방법은 격납건물이 보수적으로 설계되어 최고시험 압력하에서도 균열이 발생되지 않거나 불연속점에서 미세한 균열만이 발생한다는 조건에 의해 허용된다. ASME, Sec. III^[7]에서는 시험조건시 철근의 허용인장응력의 33⅓% 증가를 허용하고 있다. 이는 1회의 구조건전성 시험이 수행된다는 가정에 따라 허용되었다. 그러나 이러한 압력시험이 격납건물의 사용기간중 여러번 수행될 경우에는 연속되는 압력시험동안 균열의 점진적인 진전을 피하거나 최소화하기 위하여 허용응력의 증가를 적용하지 않아야 한다.

3. 울진 1,2호기 격납건물(프랑스 900 Mw급 경수형 원자로)의 구조설계 특성

울진 1,2호기는 프랑스의 900 Mw급 가압경수로(PWR)형 원전으로 국내 표준형 원전과 달리 그림 1과 같이 부분반구형 (Torispherical) 돔과 벽체상단에 돔텐돈 정착을 위한 Ring Beam이 배치되어 있다. 또한 수평텐돈의 정착을 위한 부벽(Butress)이 90도 간격으로 4개가 배치된 구조형태를 취하고 있다. 이러한 구조형태는 돔의 형태가 완전한 반구형돔을 가지며 Ring Beam을 제거하고, 부벽갯수를 3개로 줄인 최근의 격납건물 구조설계 형태와 달리 한세대 이전의 구조설계 형태이다.

격납건물의 제원은 내부높이 61.2m, 내부직경 37m에 이르며 기초슬래브의 두께는 5.5m이다. 또한 원통형 벽체의 두께는 0.9m 이며 돔의 두께는 0.8m이다. 설계기준사고시 방사능 물질의 외부 누출을 제한치 이내로 방지하기 위해 격납건물의 내부에 6mm두께의 철재 라이너 시스템을 도입하고 있다.

4. 울진 2호기 10년차 격납건물 구조건전성 시험(SIT) 개요

4.1 시험개요

울진 2호기의 격납건물 가동중 점검은 도입국 요건인 RCC-G에 따라 압력시험에 의한 격납건물의 건전성 평가방식을 채택하고 있다. 울진 1, 2호기의 격납건물 구조건전성 확인시험 요건인 RCC-G Part III는 프랑스내 초기 원자력 발전소인 Fessenheim 1, 2호기 및 Bugey 2호기의 격납건물 성능시험으로부터 얻어진(당시에는 미국규정을 따랐음) 경험과 기술자료를 바탕으로 독자적으로 작성되어 시험방법에 있어 측정장비의 종류, 관련규정, 건전성 판단기준 및 시험주기 등에서 그동안 국내 타원자력발전소에서 시행한 격납건물 구조건전성 시험과는 다소 상이하다. RCC-G에서는 동 시험을 건설직후 시험하는 "Acceptance Strength Test"와 가동중 주기적으로 수행하는 "Periodic Strength Test"로 구분하여 기술하고 있으나 시험내용은 냉각재 상실사고(LOCA)와 같은 설계기준사고시를 가상하여 격납건물의 구조건전성을 확인하는 ASME Sec. III Div. 2 CC-6000에 따른 격납건물 구조건전성시험(SIT) 내용과 동일한 개념의 시험이다. 따라서 본 논문에서는 선행 원전에서 표준적으로 사용해온 SIT라는 용어를 사용하였다.

또한 시험주기는 최초 격납건물 구조건전성시험(ISIT) 이후 첫 핵연료 장전, 그리고 그 이후 매 10년 마다 수행하여 ISIT 1년후, 이후 매 5년마다 실시를 요구하는 규제지침 1.90과 크게 다르다. 또한 시험 최대압력은 ISIT시와 달리 설계압력(Pd)으로만 수행한다.

울진 2호기 10년차 가동중 구조건전성시험은 그림 2와 같이 00. 1. 16일 부터 1. 25일 까지 종합 누설율시험(ILRT)과 병행하여 수행되었으며 시험압력을 설계압력인 4.2 bar(60.9 psig)까지 증가·감소시키면서 격납건물의 구조거동(변형율, 변위)을 계측하여 해석시 예상한 구조거동과의 일치여부를 평가하며 아울러 설계시 고려한 탄성거동 여부를 확인하게 된다.

4.2 계측기의 설치

SIT 수행시 격납건물의 구조거동을 위한 계측은 표 1에서와 같이 변형율과 변위 측정으로 구분되며 이를 위해 다양한 계측기 사용되었다. 변형율 측정을 위한 Strain Gauge는 건설시 격납건물에 24 개를 매설하였으며 온도보정을 위한 Thermocouple도 같이 설치되었다 이들 분포는 그림 3 과 같이 구조물의 거동을 대표하는 주요 위치에 배치되었다. 또한 격납건물의 전반적인 거동을 확인하기 위해 변위 측정을 위한 12개의 Pendulum이 설치되었다. 그 외에도 RCC-G에서는 기초슬래브의 거동 평가를 위한 다양한 계측기 설치를 요구하고 있으나 기초슬래브의 거동이 매우 작은 반면 계측기 자체의 계측오차가 상대적으로 큰 관계로 기초슬래브의 거동을 평가하는데 직접적인 자료로의 활용은 미흡한 것으로 판단된다. 콘크리트내에 설치된 Strain Gauge 및 Thermocouple은 매 3개월 주기로 측정하여 계측기 동작상태의 신뢰도를 점검하였다.

추가로 SIT 수행기간 동안 압력의 증감에 따른 구조물의 결함여부를 확인하기 위해 응력집중 부위를 포함 약 10여 개소를 선정하여 균열의 진전 여부를 관찰하였다.

4.3 구조해석

울진 2호기 격납건물에 설치된 Strain Gauge 및 Pendulum의 이론적 거동은 시험조건의 하중조합에 대하여 2차원 축대칭모델의 해석결과 얻어진 각 부위에서의 응력을 토대로 변형율과 변위량을 산정하였다. 변형율 계산시에는 설계시 가정한 콘크리트 재료특성(탄성계수, Poisson 비)을 실측 재료 특성값을 이용하여 보정하였다.

4.4 구조건전성 평가기준

구조물의 건전성과 설계의 타당성에 대한 기본적인 개념은 다음과 같다. 설계의 타당성은 구조물을 여러 하중조건에서도 설계에 의한 예상응답(응력, 변위 등)이 실제 구조물 거동과 동일 또는 유사한 경우를 말한다. 그러나 격납건물과 같이 각종 단면 변화부 및 개구부의 영향등으로 구조물 자체가 복잡하여 해석시 정확하게 모델링 하지않고 충분히 실용적인 결과를 얻을 수 있도록 구조물을 간단하게 모델링하며 해석조건도 단순화하므로 예상응답과 실측응답이 같아지는 경우가 드물다.

구조물의 건전성은 재료의 탄성이론에 기초하여 구조물이 외력에 대하여 선형변형을 하고 외력을 제거하였을 때 변형이 원위치로 회복되는 것(탄성 변형)을 의미한다고 할 수 있다. 구조물의 건전성을 정의하면, 구조물의 거동이 탄성거동이어야 하고 변형량이 설계에서 예측한 값의 어느 일정범위를 초과하지 않을 때 구조물의 건전성이 유지된다고 볼 수 있다.

울진 1,2호기에서는 RCC-G(선형성)와 ASME(회복율)의 기준을 모두 택하여 건전성 기준을 정하였다.

- 가압, 감압시 매 압력단계별 구조물의 변형은 선형성을 유지하여야 한다.
- 변형의 회복율은 일반적인 경우 80% 이상이어야 한다.
- 실측변형은 예상변형을 30%이상 초과하여서는 안된다. 그러나 초과시 완전 감압 후 24시간 이내의 회복율이 90%를 초과할 때는 허용된다.
- 시험압력으로 인하여 콘크리트에 폭 0.20mm, 길이 150mm보다 큰 균열이 발생하지 않아야 한다. 그러나 이보다 큰 균열이 발생 하더라도 감압후 잔류균열의 크기가 이보다 작을 경우 허용된다.

5. 결과분석

5.1 변형을 측정결과

표 1의 계측기 설치계획에서 나타난 바와 같이 격납건물의 거동을 평가하기 위해서 총 24개의 Strain Gauge가 매설되었다. 이중 시험 착수전 고장이 확인된 2개를 제외한 22개의 변형을 측정결과를 분석하였으며 아울러 그동안 수행된 선형 2회의 시험결과와도 비교하여 가동이력에 따른 구조거동 상태도 분석하였다.

1) 기초슬래브 거동

기초슬래브에서의 변형을 측정은 슬래브 중앙 상하단에 2개소에 4개의 계측기만이 설치되고 계측값도 20 μ/m 에 불과해 계측기 오차(최대 10 μ/m)를 고려할 때 전반적인 기초슬래브의 거동을 평가에는 의미를 부여하기가 어려운 상태이다.

2) 원통형 벽체

원통형 벽체에는 그림 3에서와 같이 거의 동일한 Level(EL. 24 m)의 벽체단면에 4방위각별로 16개의 계측기가 설치되어 있으며 고장이 확인된 2개소(K2T, K2V)를 제외한 14개의 계측결과를 분석하면 다음과 같다.

- 표 2에 나타난 바와 같이 벽체단면에서의 실측거동은 원환방향(Tangential)의 응력이 수직 방향(Vertical)의 응력보다 크게 나타나 이론적인 거동을 잘 나타내고 있으며 벽체 각 부위에서 실측변형율값은 예상거동과 대비해서 원환방향의 경우 81~122%, 평균 102%를 나타내었으며 수직방향의 변형율의 경우, 예상거동과 큰 차이를 보인 2개소를 제외한 나머지 부위도 70~106

%, 평균 94 %를 나타내어 비교적 예상거동과 잘 일치하고 있다.

- 회복율도 평균적으로 감압직후 평균 83.4 %를 나타내어 동일 Level의 평균값 요건인 80%를 만족하고 있으나 방향별로 나누어 고려하면 수직방향의 경우 4개소가 회복율 요건을 만족시키지 못하였으며 평균 회복율도 76 %정도이다. 이러한 요인으로는 첫째, ILRT와 동시에 수행되는 관계로 설계압력에 준하는 압력(3.86 bar)이 약 4일간 지속적으로 부과된데 따른 영향으로 잔류 변형의 증가를 가져왔으며(그림 2 시험 진행현황 참조), 둘째, 감압단계인 1.0 bar의 계측시점(1월 25일 00:30-02:00)과 0 bar의 계측시점(1월 25일 12:00-13:40)의 온도차이로 인한 수직방향 변형감소 효과가 반영되지 않았기 때문에 상대적으로 발생변위가 1/2에 불과한 수직방향에 더 큰 영향을 미친 것으로 추정된다. 이러한 일교변화나 시험기간중 외부기온에 따른 회복율 영향은 월성 2호기 및 3호기 사례^{[7][8]}에서도 확인할 수 있다. 따라서 차기 시험시는 ILRT와 분리하여 시험이 실시되어야 하며 시험기간중 일교변화나 평균온도 변화에 따른 구조물 변화 정도에 대한 평가방안이 모색되어야 할 것으로 검토되었다.
- 그림 4에서와 같이 벽체에서의 변형은 전반적으로 선형적 거동을 한것으로 평가되었다
- 1988, 1991, 2000년에 수행된 3회의 시험결과를 비교한 결과 그림 5에서와 같이 일부 부위에서 가동년수 증가에 따른 변형이 증가하는 경향을 보여주고 있으나, 현행 시험체계로는 격납건물 사용년수에 따른 상태판단이 불가하다. 따라서 향후 시간이력에 따른 구조물의 상태판정과 내구년수 증가에 따른 계측기 신뢰도 저하에 대한 보완방안 등에 검토와 연구가 필요한 것으로 판단된다.

3) Dome의 거동

돔 정점(Apex) 인근에 설치된 4개의 계측결과는 표 2에서와 같이 실측변형이 예상변형의 103~106% 범위로 잘 일치하고 있으며 회복율도 약 90 %에 이르고 있으나 압력단계별 거동이 1개소에서 선형거동을 나타내지 못하고 있다.

5.2 변위 측정결과

압력하중에 의한 격납건물의 전반적인 거동을 확인하기 위해 12개의 Pendulum(4개 방위별 각 3개)을 설치하여 원통형 벽체의 전반적인 반경방향 변위를 측정하였다. 시험결과 각 위치별(EL.10m/ EL.26m/ EL.42m) 실측 변위는 표 3에서와 같이 예상변위 대비 평균 78%~117 %로서 예상거동과 비교적 잘 일치하고 있다. 또한 위치별 측정변위 경향도 예상변위의 경향과 일치하고 있다 또한 회복율도 평균 99 %까지 완전한 회복을 보여주고 있다. 또한 표 5와 같이 유사위치에서 변형율과 변위 측정결과의 비교결과도 그 비가 92%~107% 범위에 있어 계측결과가 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

한편 그림 6에서와 같이 1988, 1991, 2000년에 수행된 3회 시험결과가 유사하며 압력단계별 거동도 선형성을 유지하고 있다.(그림 7)

5.3 균열 점검결과 및 구조물 상태 육안점검 결과

격납건물의 외부 균열조사 결과 가압 단계에서 일부 미세한 균열이 발생하였으나 대부분 감압후 사라졌다. 감압후 잔류한 변형 또한 규준에서 정하고 있는 폭 0.2mm, 길이 150mm 이하의 미세한 균열 (0.1mm 이하)로 격납건물 구조건전성에 영향을 미치지 않는 것으로 파악되었다. 또한 시험으로 인한 격납건물 내외부에 구조적 결함이나 영구변형 징후가 확인되지 않았다.

6. 결 론

울진 2호기 10년차 가동중검사로 수행된 격납건물 구조건전성시험(SIT) 결과 얻어진 구조거동 및 시험수행결과의 분석결과 도출된 사항은 다음과 같다.

- (1) 시험결과 얻어진 울진 2호기 격납건물의 구조거동은 설계개념에 부합된 탄성거동을 보였으며, 사고조건을 가정한 시험압력에 의해 균열의 증가나 외적인 영구결함 징후가 나타나지 않아 그 구조적 건전성이 확인되었다.
- (2) 격납건물의 전반적인 구조건전성은 입증되었으나 국부적으로 연차별 변형의 증가, 비선형거동, 회복율 불만족 및 계측시스템의 신뢰도 저하 등 가동년수의 증가에 따른 열화 현상으로 추정되는 현상이 확인되어 향후 격납건물 장기가동에 따른 건전성 입증을 위한 다음과 같은 내용에 대한 개선방안이 모색되어야 한다.
 - 구조물의 가동이력에 따른 열화정도에 대한 평가방안
 - 계측기 신뢰도 확보를 위한 유지관리 강화 및 신뢰도 저하시 대체방안
 - 시험결과 평가시 구조거동에 대한 제반 영향요인을 적절히 평가할 수 있도록 추가계측 방안(외기 및 일교변화 등 영향보정을 위한 계측보완)
 - 시험기간 장기화에 따른 잔류변형 증가요인 배제를 위한 종합누설율시험(ILRT)과 분리 시행 방안
 - 울진 1,2호기와 동일한 형태의 선행원전 가동중검사 결과 입수 및 분석을 통한 평가

참고문헌

- [1] 10 CFR50 App. A GDC, Criterion 53, "Provisions for Containment Testing and Inspection"
- [2] U.S.Nuclear Regulatory Commission, "Inservice Inspection of UngROUTED Tendons in Prestressed Concrete Containment Structures," Regulatory Guide 1.35 Rev.3, 1990
- [3] CSA/ CAN3-N287.6, "Pre-Operational Proof and Leakage Rate Testing Requirements for Concrete Containment Structures for CANDU Nuclear Power Plants", CSA, 1984
- [4] RCC-G Part III, "Strength and Leaktightness Testing of the Prestressed Concrete Containment with a Leaktight Liner",EDF, 1980
- [5] U. S. NRC Reg. Guide 1.90, "Inservice Inspection of Prestressed Concrete Containment Structures with Grouted Tendons"
- [6] 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,
- [7] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec.III. Div 2, "Code for Concrete Reactor Vessel and Containments",American Society of Mechanical Engineers, 1989, 1992
- [8] Y.L. Paek, Y.S. Kim, G. Hollo, "Structural Integrity Test of CANDU 600 Reactor Building of Wolsong Unit 2 ", SMiRT 14, Div. H, June 1997,
- [9] 백용락, 이성규, 이상국, 신재철, "월성3호기 격납건물 압력시험을 통한 구조건전성 평가", 원자력학회 '98 춘계학술발표회 논문집, 1998.5.29-30, 경희대학교, pp.831-836.

표 1. 울진 2호기 격납건물 구조변형 측정용 계측기 설치현황

구분	수량	설치 위치	설치 목적	구분	수량	설치 위치	설치 목적
Acoustic Strain Gauge (ASG)	24	Base Mat : 4 Wall : 16 Dome : 4	각 부분의 변형을 측정	Invar Wire Horizontal Vertical	2 1	Base Mat (EL. -5.60)	격납 건물의 내경변위 및 수직변위 측정
Thermo-couple(T/C)	21	Base Mat : 3 Wall : 16 Dome : 2	위치별 온도를 측정 ASG값 계산시온도에 대한 변형보정에 사용	Levelling Pot	9	Base Mat (EL. -5.60)	C/W의 수직 변위 측정
Pendulum	12	C/W 외벽 EL. 10, 26, 42	C/W의 기울기, 변형측정	Bench Mark	12	Tendon Gallery Slab	C/W의 수직 변위 측정

표 3. 반경방향 변위 (Direct Pendulum) 측정성과 분석

(단위 : mm)

구 분	EL. (m)	예상치 (4.2 bar)	측정치 (4.2 bar)			측정/예상 비율(%) (10년차)	감압직후 측정변위	감 압 직 후 회복율(%)	비 고
			최 초	1 년차	10 년차				
V1	10	4.19	3.96	3.52	3.81	91	-0.44	100	
	26	4.73	5.13	5.23	5.96	126	+0.10	98	
	42	4.37	5.47	5.23	5.26	120	-1.24	100	
V2	10	3.55	2.82	2.65	2.15	61	-0.48	100	
	26	4.00	3.92	4.06	3.62	91	+0.54	85	
	42	4.00	3.42	4.12	4.22	106	-0.46	100	
V3	10	3.55	3.00	2.48	2.61	74	-0.03	100	
	26	3.91	5.42	4.25	3.39	87	-0.32	100	
	42	3.82	5.12	4.87	4.16	109	-0.81	100	
V4	10	3.64	4.11	3.43	3.09	85	-0.45	100	
	26	5.64	6.68	6.89	6.76	120	0	100	
	42	4.28	5.16	5.45	5.51	129	+0.13	98	

표 4 Acoustic Strain Gauge와 Direct Pendulum 비교

(단위 : micron/m)

계 기	압 력			비 고
	2.1 bar	4.2 bar	2.1 bar	
Acoustic Strain Gauge ¹⁾ (A)	113.0	240.1	133.4	
Direct Pendulum ²⁾ (B)	106.1	255.6	122.2	
B/A × 100 (%)	93.9	106.5	91.6	

¹⁾ Wall의 Tangential 방향 변형의 평균치 (micron/m)

²⁾ 26 Level의 Radial 방향의 평균 변위/ 격납건물 반경 R (19.3) (micron/m)

표2. 격납건물 변형율 측정결과 분석

구 분	해석응력 (MPa)	예상 변형치 (4.2 bar)	측정변형치 (4.2 bar)	측정치/예상치 × 100	감압종료후 변형치	감압종료후 24시간후 변형치 ⁽¹⁾	회복율		비 고
							감압직후 ⁽²⁾	24시간후 ⁽¹⁾	
벽 체 (Wall)									
K1T	9.41	251	247	98	10	22	96	91	
K1V	5.53	139	97	70	17	27(6)	82	72(94)	90%이상
K2T	7.89	계 측 기 고 장							
K2V	4.18	계 측 기 고 장							
K5T	8.86	237	290	122	10	26	97	91	
K5V	4.69	117	124	106	12	21	90	83	
K6T	8.91	238	192	81	32	11	83	94	
K6V	4.72	117	55	47	26	12(4)	53	78(93)	90%이상
K9T	8.74	234	244	104	4	26	98	89	
K9V	4.40	109	99	91	36	18	64	82	
K10T	8.50	228	215	94	33	20	85	91	
K10V	4.34	108	108	100	26	32(12)	76	70(89)	80%이상
K13T	8.75	234	263	112	17	28	94	89	
K13V	4.39	109	176	161	9	30(10)	95	83(94)	90%이상
K14T	8.49	227	235	104	36	24	85	90	
K14V	4.33	107	91	85	27	17	70	81	
(측정치/예상치) × 100 평균(T방향/V방향)				102/94	회복율 평균 (%)		83.4	86	
돔 (Dome)									
N1M	5.92	132	160	121	8	13	95	92	
N1T	5.92	132	151	114	27	25	82	83	
N2M	6.56	147	135	92	17	3	87	98	
N2T	6.56	147	135	92	10	8	93	94	
(측정치/예상치) × 100 평균(T방향/M방향)				103/107	회복율 평균 (%)		89	92	

(1) : 감압후 24시간 이후 측정성과 / (2) : 회복율 = (4.2bar 측정치 - 0 bar 측정치) / 4.2 bar 측정치 × 100

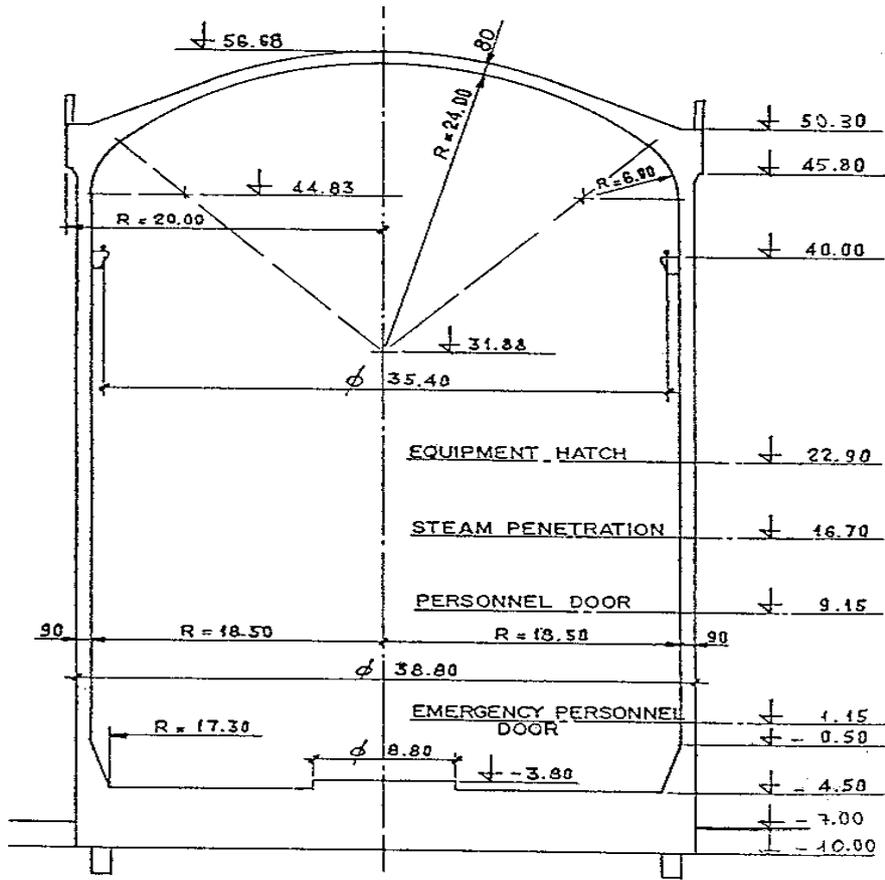


그림 1 울진 1,2호기 격납건물 구조설계 특성

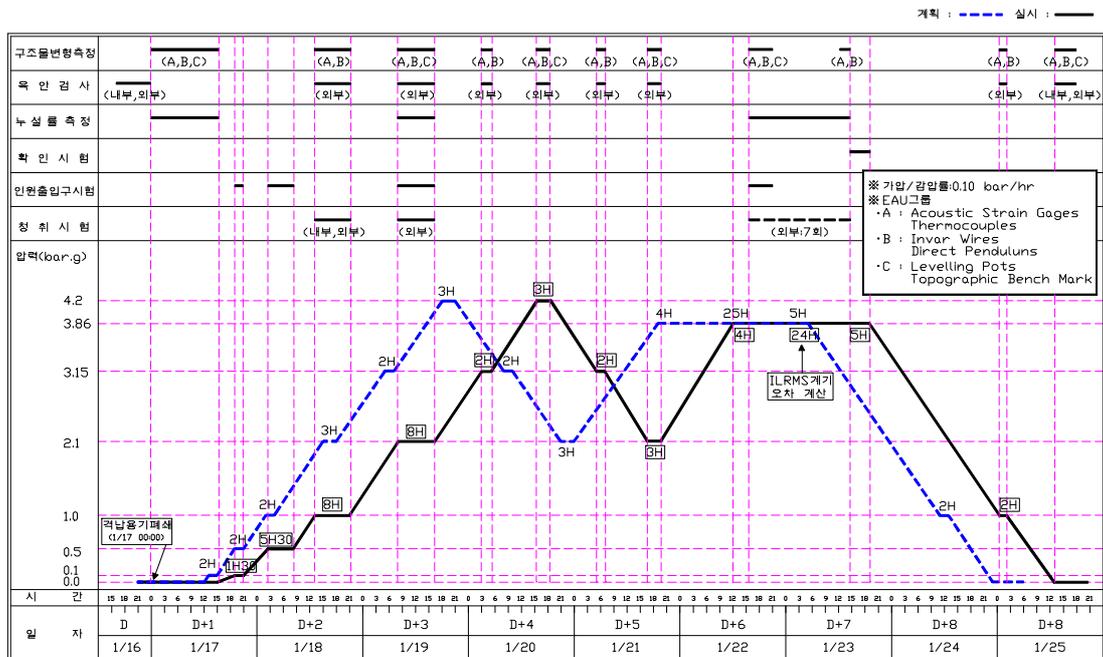
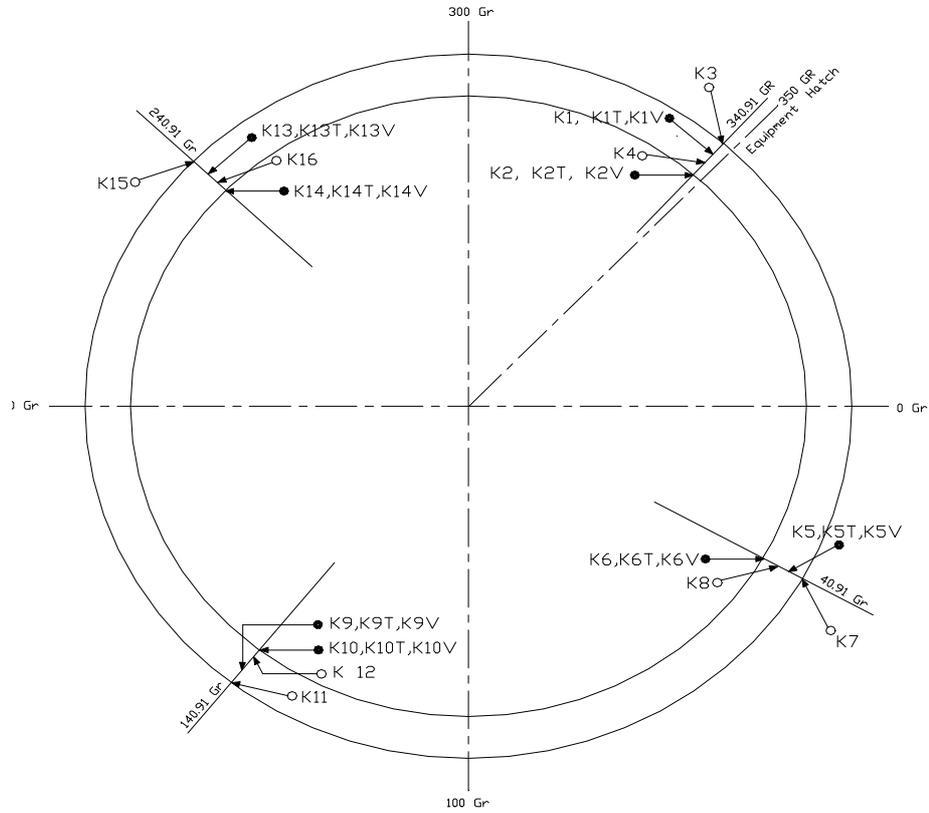


그림 2 울진 2호기 10년차 원자로 격납건물 구조건전성 시험



Grade Elevation	R = 18.65 (Intrados)	R = 18.95 (Middle)	R = 19.15 (Intermediate)	R = 18.35 (Extrados)
310.405 Gr EL.= 26.01 m	K2V, K2T, K2	K4	K1V, K1T, K1	K3
240.91 Gr EL.= 24.03 m	K6V, K6T, K6	K8	K5V, K5T, K5	K7
110.405 Gr EL.= 24.03 m	K10V, K10T, K10	K12	K9V, K9T, K9	K11
210.405 Gr EL.= 24.03 m	K14V, K14T, K14	K16	K13V, K13T, K13	K15

그림 3 Wall에 설치된 A.S.G 와 TC 위치

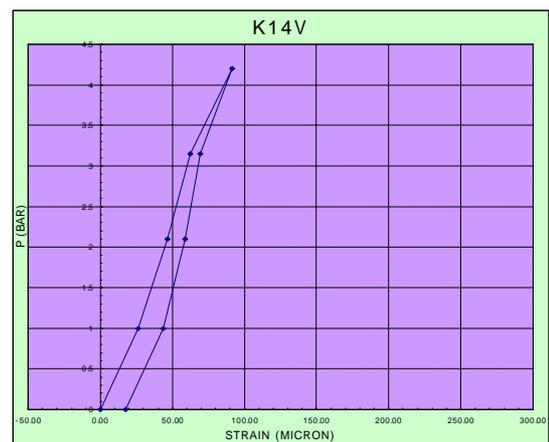
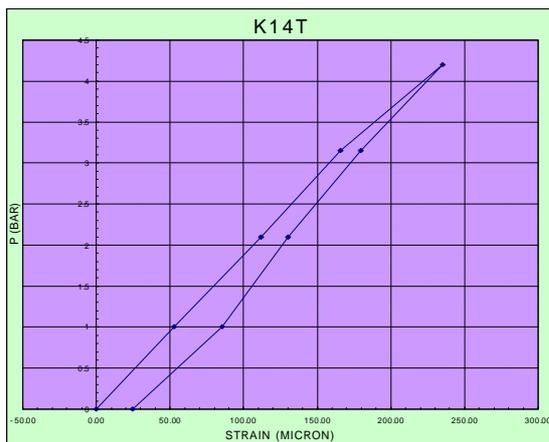
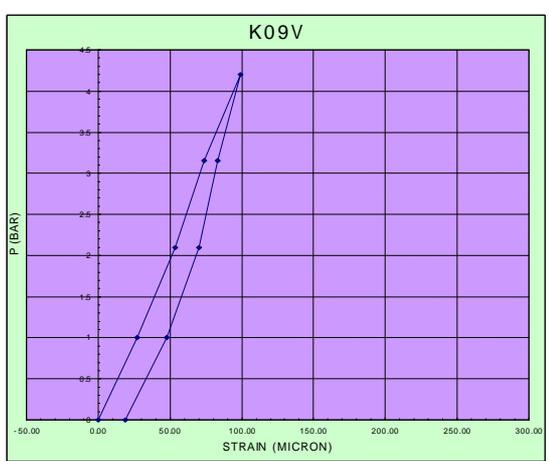
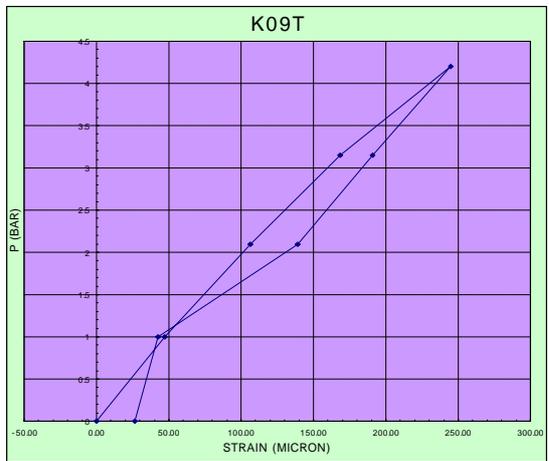
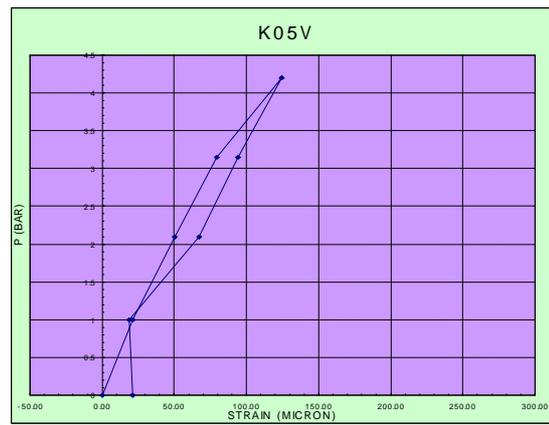
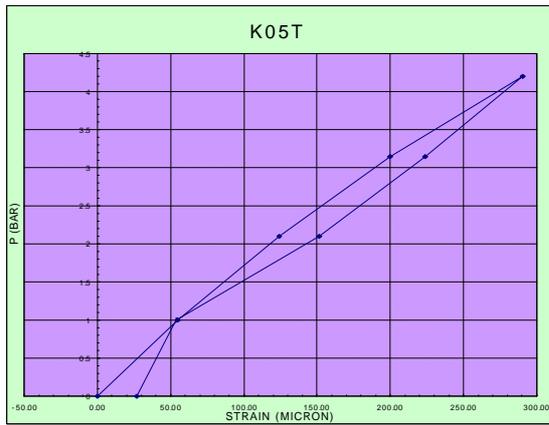


그림4. 벽체 압력-변형 선도

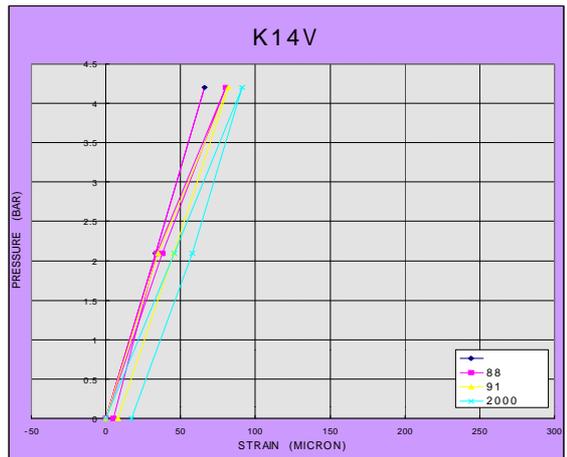
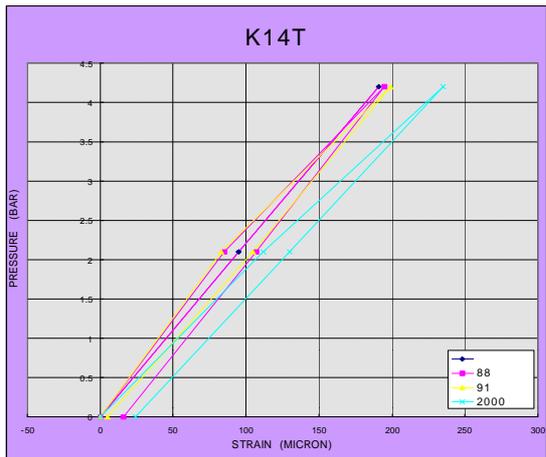
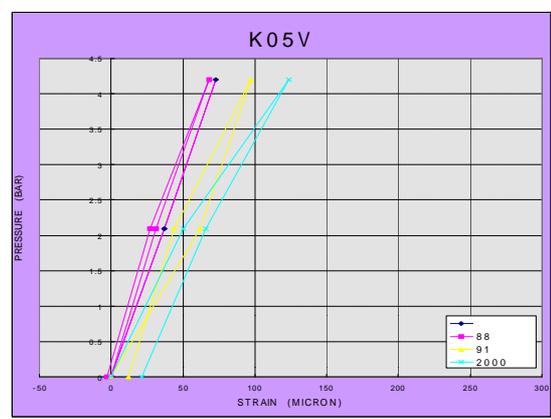
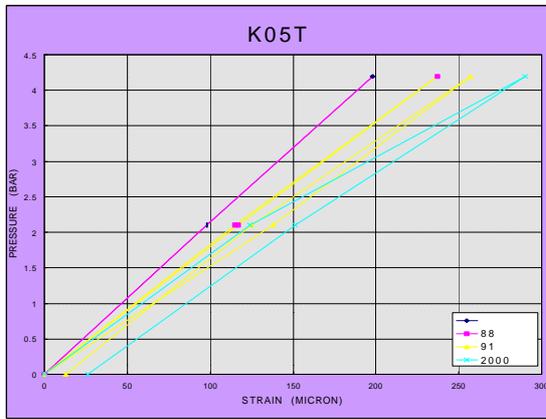
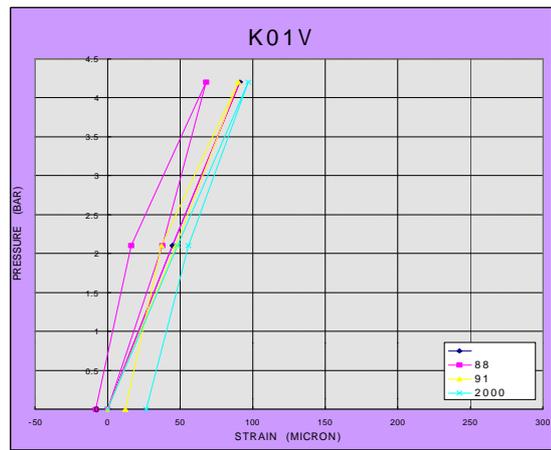
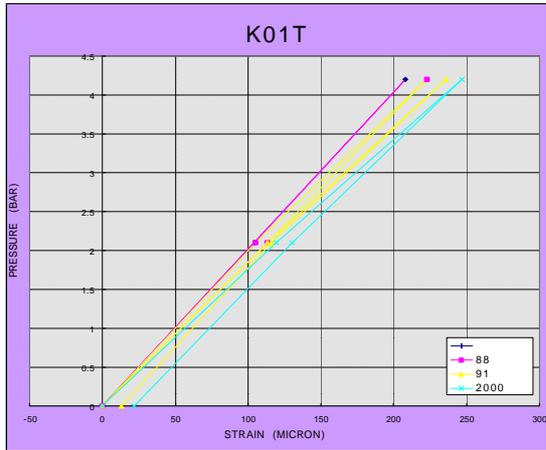


그림 5 Acoustic Strain Gauge 압력 -변형 선도 비교 (이론치/ 최초/ 1년차/ 10년차)

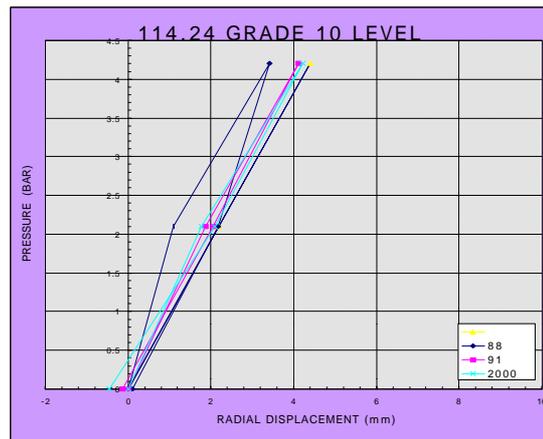
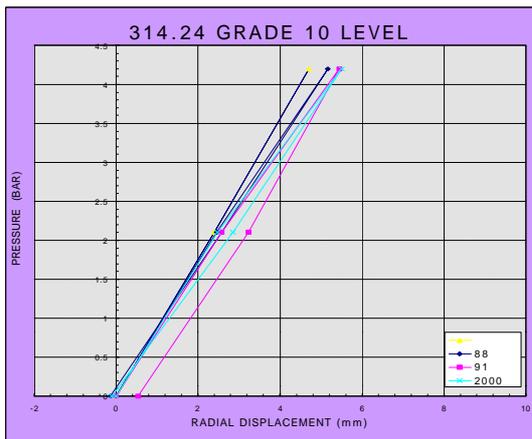
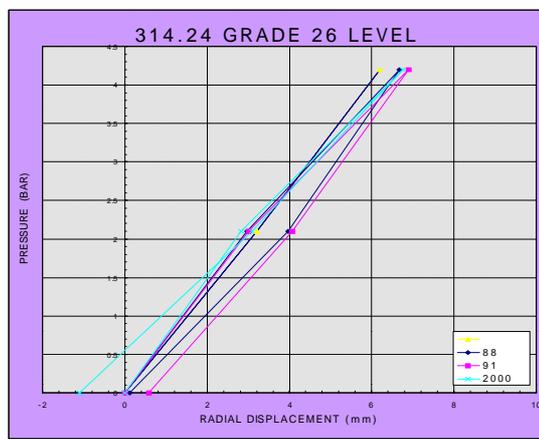
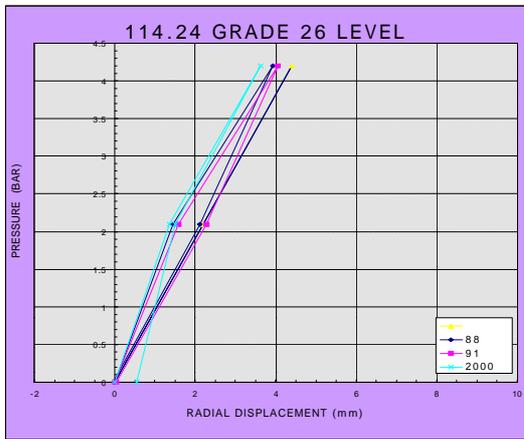
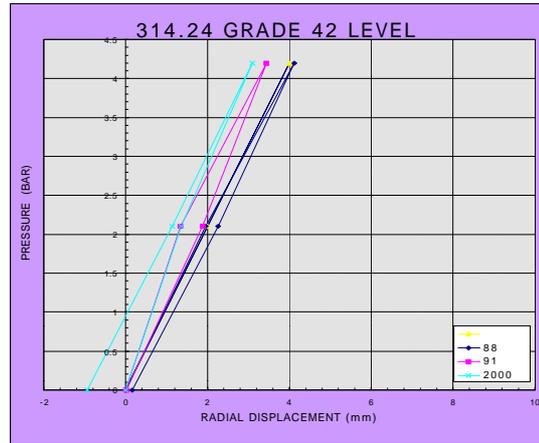
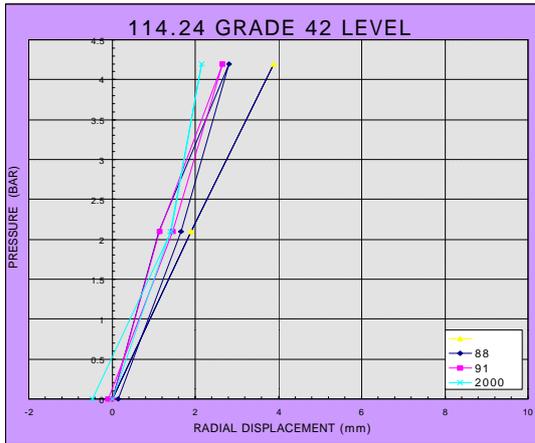


그림 6 Direct Pendulum 압력-변위 선도 비교 (이론치/ 최초/ 10년차)

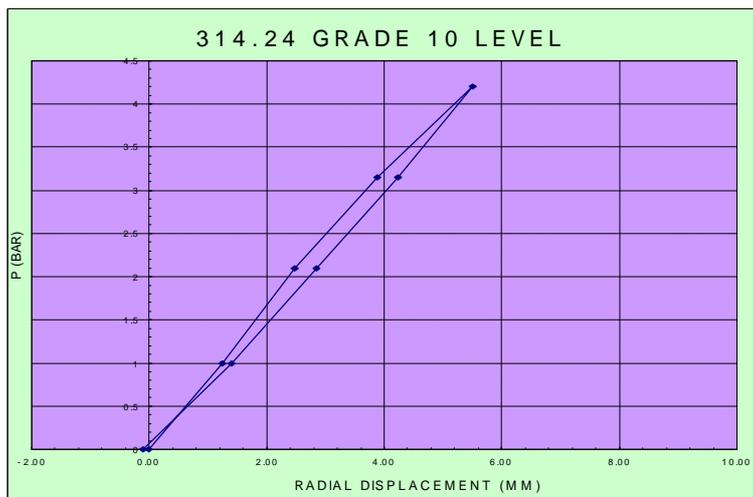
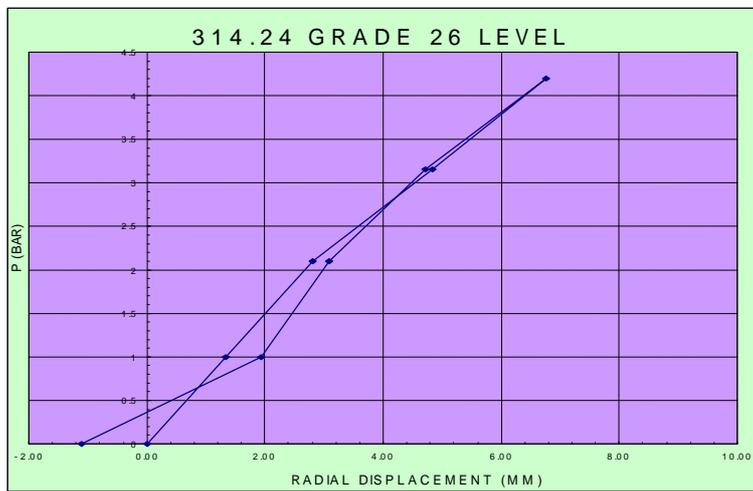
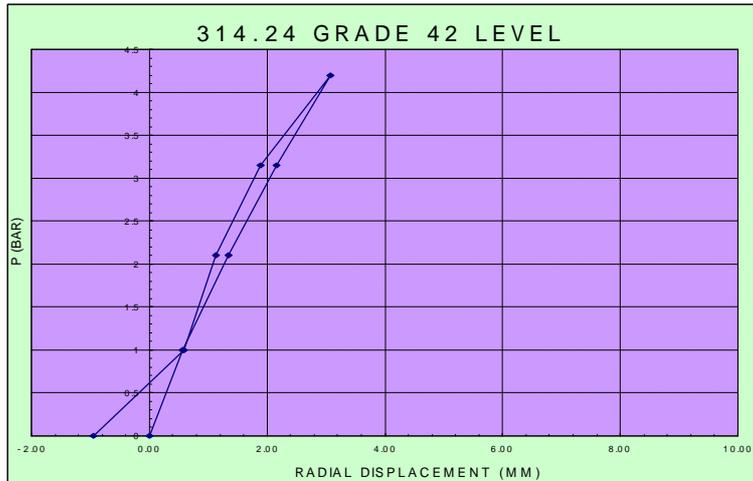


그림 7 Direct Pendulum 압력-변위 선도