'00 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원전 격납건물의 프리스트레스 손실에 따른 거동영향 평가

Prestress Loss Effects on the Behavior of Containment Structures in NPP

김 현 아, 배 인 환, 최 인 길
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105호

요 약

본 연구에서는 원전 격납건물의 가동중 검사 기준에서 제시하고 있는 긴장력 손실 허용범위에 대한 분석과 이러한 손실에 따른 거동특성을 분석 평가하였다. 격납건물에 적용된 프리스트레스를 외부하중 및 초기조건 입력으로 해석을 수행하여 두 결과를 비교하였다. 또한 건설직후 및 5, 10, 20, 40년 후의 허용범위 하한치의 프리스트레스력을 갖는 격납건물의 거동 특성 변화를 분석하였다. 그 결과 외부하중 및 초기조건 입력으로 해석한 경우는 선형구간에서는 유사한 거동을 보이지만, 균열시점에서 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 사용연한에 따른 프리스트레스력 손실을 고려한 해석결과는 변형율이 0이 되는 시점과 균열이 발생하는 시점이 선형적으로 감소하는 것으로 나타났으나, 균열강도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

In this study, nonlinear analysis of containment structures in NPP with prestressing losses in accordance with the inservice inspection guides are presented.

For the nonlinear finite element analysis, an initial prestress as initial condition and applied effective prestress are used, and prestressing losses with time are considered. The containment structure is idealized as an axisymmetric model with axisymmetric solid and shell elements. The material nonlinearities of concrete, rebar and prestressing steel are used in this analysis. To reduce the numerical stability with respect to the used finite element mesh size, the tension stiffening effect has been considered. Based on the results of analysis, prestressing losses directly affect the crack capacity of the containment structure.

1. 서론

원전 격납건물은 방사성 물질의 외부누출을 방지하는 최종 방벽구실을 하는 구조물로 사고 시 격납건물의 구조적 안전성은 매우 중요하다. 사고 시 격납건물은 내부압력 및 온도에 저항할 수 있어야 하며 누출에 대한 건전성을 확보할 수 있어야 한다.

격납건물에 프리스트레싱을 도입하는 주요 목적은 사고압력 하에서 격납건물에 발생하는 일차 막인장응력을 제거하기 위한 것이며[1], 도입된 프리스트레싱 시스템은 격납건물의 누출건전성을 높이는 역할을 한다. 긴장력은 콘크리트에 압축응력 상태를 유지시켜줌으로써 균열억제 효과를 높이고 이에따라 철근의 부식을 지연시키는 효과를 제공한다. 또한 격납건물내 여러방향으로 설치된 프리스트

레싱 시스템은 국부적인 파괴시 갑작스런 구조물의 붕괴를 방지하기 위한 여유를 제공하는 역할을 한다.

격납건물에 도입된 긴장력은 시간에 따라 손실되어 내부 압력 하에서 균열발생 가능성이 증가하게 된다. 현재까지의 연구결과로부터 텐돈 이완, 콘크리트의 크리프 및 건조수축, 그리고 텐돈 부식에 의한 프리스트레스 저하는 격납건물의 누출 건전성에 가장 크게 영향을 미치는 요인으로 알려져 있다[1]. 따라서 격납건물의 누출건전성과 구조안전성을 확보하기 위하여 주기적인 가동중검사를 관련 기준 및 규준에 따라 수행하여 시간에 따른 긴장력의 손실을 모니터링하고 평가한다.

본연구에서는 먼저 원전 격납건물의 가동중 검사 기준에서 제시하고 있는 긴장력 손실 허용범위에 대한 관련 기준 및 규준을 검토하고 이러한 손실에 따른 거동특성을 분석 평가하기 위하여 비선형 극한 내압해석을 수행하였다. 비선형 극한 내압해석에서는 격납건물에 적용된 긴장력을 외부하중 및 초기조건 입력으로 각각 해석을 수행하여 두 결과를 비교하였다. 그리고 긴장력을 초기조건으로 적용하는 해석방법을 이용하여 시간에 따른 긴장력의 손실을 고려한 비선형 극한 내압해석을 수행하고, 이를 통하여 긴장력 손실에 따른 격납건물의 거동특성을 분석하였다.

2. 격납건물 텐돈 배치 및 긴장력 허용범위

2.1 격납건물내 텐돈 배치

그림 1은 해석대상 격납건물의 텐돈의 배치상태를 보여주고 있다. 벽체와 돔에 긴장된 수평 및 수직텐돈은 냉각재상실사고(LOCA), 시험압력하중 및 지진하중 등의 사고설계하중 상태하에서 격납건물을 평형상태로 유지시키기 위하여 설치된다. 그러나 텐돈정착시 탄성손실과 시간에 따른 손실로 긴장력이 저하되며, 일정 시간 후에는 이와 같은 손실이 발생된 후의 유효 긴장력을 얻게 된다. 텐돈은 1.6GPa(230 ksi)이상의 고강도이며 단면적이 작은 여러개의 와이어나 스트랜드로 되어 있으며, 초기 긴장력은 텐돈 극한강도의 80%이며, 텐돈은 극한강도의 70%±3% 범위내에서 정착된다.

2.2 긴장력 허용범위

원전운전기간 동안 격납건물의 건전성을 확보하기 위하여 관련된 규준 및 기준에 따라 프리스트레싱 시스템에 대한 가동중 검사를 주기적으로 실시하고 있다. 우리나라의 경우 주로 U.S. NRC의 Regulatory Guide에 따라 가동중 검사를 실시하고 있다. Regulatory Guide 1.35.1[2]의 가장 우선적인 목적은 텐돈의 lift-off력과 예측한 텐돈력을 비교하여 안전성을 검토하는 것이다. 텐돈의 유효인장력은 유압장치로 텐돈을 긴장시켜 정착장치에서 shim이 떨어질 때의 인장력(lift-off력)으로서 feeler gage를 사용하여 측정한다. Regulatory Guide 1.35 Rev.2[3]에서는 lift-off력의 허용범위를 규정하고 있다. 검사결과 임의 텐돈이 하한치 이하인 경우, 인접한 두 텐돈의 lift-off력을 측정하고, 만일 인접한 텐돈 역시 하한치 이하인 경우는 기록조건이며, 인접한 두 텐돈이 허용범위 이내인 경우에는 그 텐돈 만의 문제로서 허용된다. 그러나 Rev. 2에서는 lift-off력에 대한 정의를 언급하지 않았으며, 시간에 따른 프리스트레스력의 허용범위를 결정하기 위한 절차(guideline)를 제시하지는 않았다.

Regulatory Guide 1.35 Rev.3[4]는 텐돈 모니터링 결과에 대한 해석 및 평가를 Rev.2 보다 명확하

게 하였다. Rev.3는 Rev.2보다 다소 완화된 허용기준을 제시하고 있으나, 허용기준인 텐돈의 하한치는 시간에 따른 긴장력 손실을 보수적으로 적용한 Regulatory Guide 1.35.1에 따라 계산되므로 실제로 Rev.2보다 크게 완화된 것은 아니다.

Regulatory Guide 1.35.1을 제안한 목적은 격납건물의 수명동안 시간에 따른 텐돈의 유효 긴장력을 예측하는데 있다. Regulatory Guide 1.35.1은 그림 2와 같이 텐돈의 (1)즉시 손실량 (2)콘크리트 크리프, (3)콘크리트 건조수축, (4)텐돈 이완(relaxation) 및 (5)온도변화 등의 손실인자로 인해 수명 40년까지 감소하는 텐돈 인장력과 허용범위를 제시하였다. 즉시 손실은 정착부 슬립(slip), 탄성손실, 와이어 파단 등에 의하여 발생한다. 초기 긴장력 이후 가동중검사 1차년과 수명 40년에서 텐돈의 허용범위(상한치, 하한치)를 결정하기 위하여 적용된 각 손실인자의 허용범위는 콘크리트 건조수축의 경우 ±20%, 크리프 변형율의 대하여 +25%와 -15%, 강재 이완의 경우 ±15%이다. 이때 초기 긴장력 측정시의 오차는 무시하는 것으로 가정하였다. Regulatory Guide 1.35.1은 기존 격납건물에 적용되지 않으며, 계획단계의 격납건물이나 이 규정에 따라 긴장력 손실량이 계산된 격납건물에 적용된다. Rev.2에서는 오직 개별 텐돈력만을 평가하였으나, Rev.3은 개별 텐돈력과 평균 텐돈력을 모두 고려하여 격납건물의 안전성을 평가하도록 규정하였다.

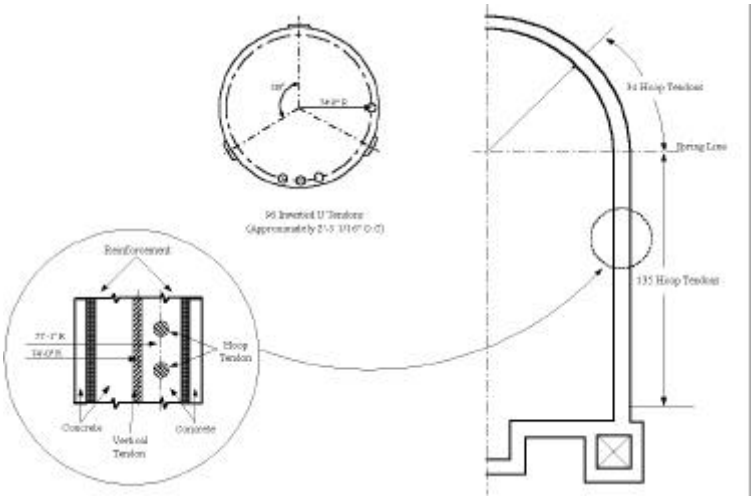


그림 1. 격납구조물 텐돈의 상세

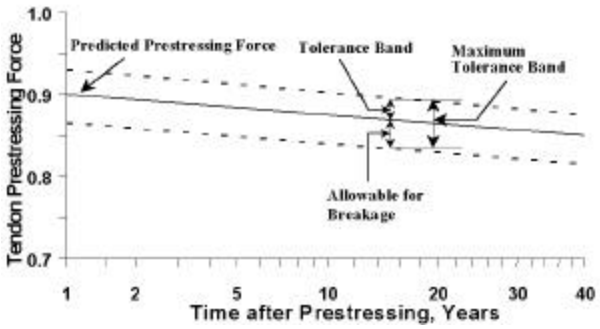


그림 2. 시간에 따른 텐돈력의 허용범위

3. 유한요소 모델링

3.1 격납건물의 제원 및 해석모델

해석대상 격납건물은 현재 가동중인 영광 3, 4호기로 원통모양의 벽과 반구형 돔, 보강 기초 슬래브로 구성된 프리스트레스 콘크리트 건물이다. 격납구조물의 원통형 부분은 수평 및 수직 텐돈으로 구성된 포스트텐션 시스템에 의해 긴장되어 있다. 격납건물의 포스트텐션 계통은 VSL시스템으로서 135개의 수평 텐돈이 격납구조물 주위에 균등하게 위치해 있는 3개의 부벽에 고정되어 있다. 텐돈은 중간 부벽을 우회하면서 원통형 실린더 주위를 240˚로 둘러싸고 있고 96개의 수직 텐돈은 약 2'5 1/6" 격으로 기초 슬래브 하부에 정착된다. 돔 수평텐돈은 스프링라인에서 돔 정점을 향하여 45˚높이까지 34개가 설치되어 있다.

기초슬래브는 고강도 철근으로 시공되어 있다. 기초슬래브의 바깥 가장자리 근처에 수직텐돈의 설치와 검사를 위하여 접근 갤러리가 있다. 격납건물 내부의 바닥 표면에 누출방지를 위해 철판으로 감싸고 있으며 3'두께의 콘크리트가 그 위를 덮고 있다. 대상 격납건물의 형상과 제원은 다음 그림 3과 같다.

본연구에서는 이러한 격납건물을 상용해석 프로그램인 ABAQUS/STANDARD Ver. 5.8-14를 사용하여 적용하중 형태 및 긴장력 손실에 따른 비선형 거동을 해석하였다. 개구부 등의 구조적 불연속을 고려하지 않은 2차원 축대칭 모델이 사용되었다.

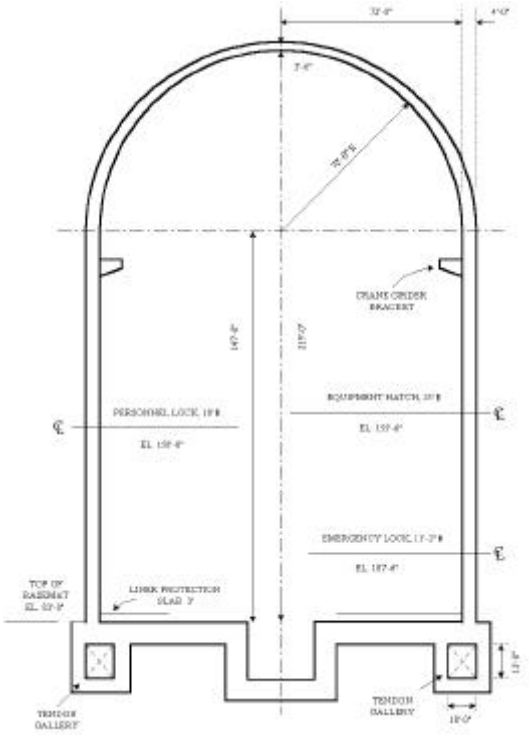


그림 3. 대상 격납건물의 형상

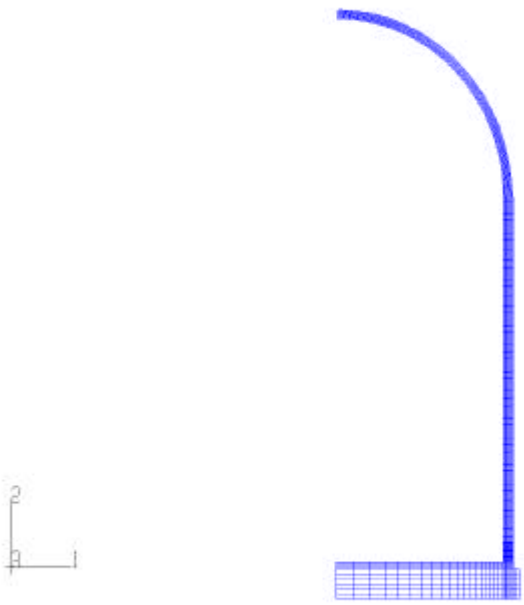


그림 4. 전체 유한요소 모델링

콘크리트는 2차원 4절점 축대칭 solid 요소로 모델링하였다. 스틸 라이너의 경우 앵글 스티프너로 콘크리트에 정착되어져 있는데, 앵글 스티프너는 모델링에서 고려하지 않았다. 라이너는 콘크리트와 공유절점을 갖는 2절점 축대칭 shell 요소로 모델링하였다. 기초 슬래브는 들림현상이 발생하지 않는 것으로 가정하여 기초의 하단이 고정된 것으로 모델링하였다. 내압의 경우 돔과 벽체, 기초부분에 등분포로 적용하였다. 그림 4는 전체 유한요소 모델링이며, 전체 절점수는 3126개이고 전체 요소수는 3111개이다.

3.2 재료모델 및 파괴기준

1) 콘크리트

압축측의 응력-변형율 곡선은 그림 5에서 보는 바와 같다. 이 모델은 Kent와 Park에 의해 제안된 구속전 콘크리트 압축 응력-변형율 관계로 Scott 등에 의해 수정된 모델이다[5]. k는 철근비(ρ_s)의 함수이고, f'_c는 콘크리트의 압축강도이다.

그림 6은 전형적인 인장측 응력-변형율 곡선을 나타낸다. 균열이 발생하기 전의 응력-변형율 관계는 완전한 선형적으로 변화하고 균열이 발생한 후에는 오목한 형태로 감소된다. 균열이 발생된 후인 감소되는 부분의 인장응력 σ_r과 인장변형율 ε_r은 균열이 발생전의 개념과는 전혀 다르다. 이부분에서의 σ_r은 평균인장응력으로 정의 되고 ε_r은 평균콘크리트 인장변형율로 표현된다[6]. 그림 6에서 A 곡선은 Hsu와 Pang에 의해 제안된 식이며 B는 Vecchio 와 Collins에 의해 제안된 식이다. 본 연구에서는 Hsu와 Pang에 의해 제안된 A 곡선을 사용하였다.

2) 철근, 텐돈 및 라이너

철근과 라이너의 비선형 거동을 나타내기 위해 Von-Mises 파괴기준이 적용되었다. 인장측과 압축측에서 동일한 응력-변형율 관계를 가진다. 본 연구에서 적용된 모델은 그림 7과 같다.

텐돈의 응력-변형율 관계는 일반 철근과는 달리 압축을 고려하지 않으며 뚜렷한 항복응력을 나타내지 않는다. 항복이후 인장 응력-변형율 관계는 Mattock과 Ramberg-Osgood 등이 제안하였다.

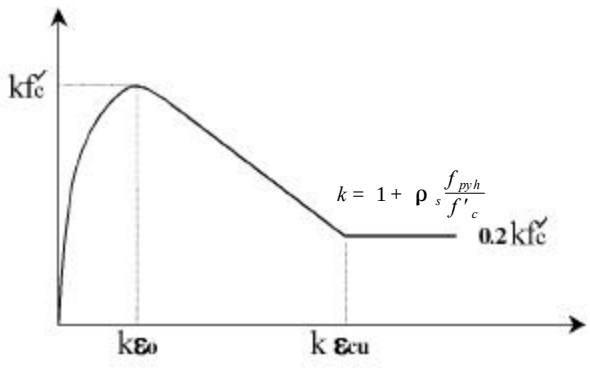


그림 5. 압축측 응력-변형율 곡선

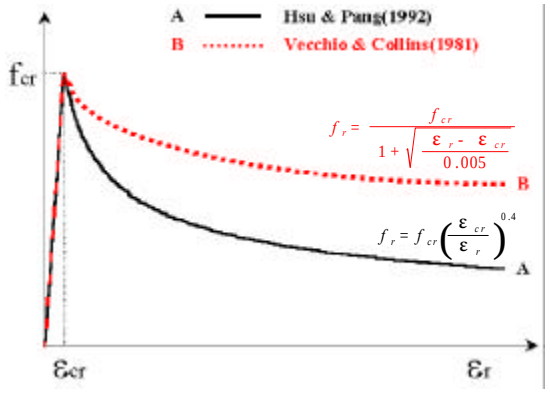


그림 6. 인장측 응력-변형율 곡선

다. 본 연구에서는 실제 스트랜드 재료실험과 잘 일치하는 $0.8f_{pu}$까지 선형거동하는 것으로 가정한 Mattock의 식을 사용하였다. $0.8f_{pu}$ 이후의 거동은 Mattock이 제안한 식 $f_P = \varepsilon_p E_p \left[Q + \frac{1-Q}{(1+\varepsilon^{*R})^{1/R}} \right] \leq f_{pu}$이다. 여기서, $\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_p E_p}{K f_{pu}}$, $Q = \frac{f_{pu} - K f_{py}}{\varepsilon_{pu} - E_p - K\varepsilon_{py}}$이고, f_{py}는 스트랜드의 항복응력을 나타내며, K는 항복응력을 정의하기 위한 극한응력 대한 상수이다[6].

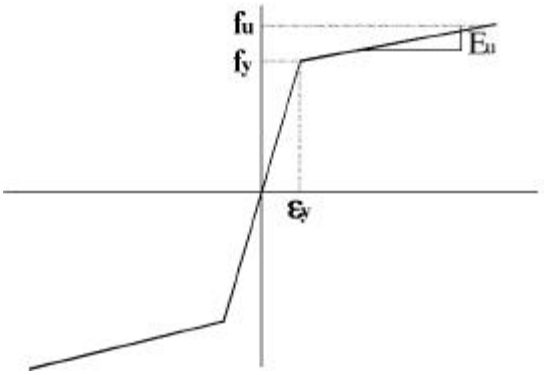


그림 7. 철근의 응력-변형율 관계

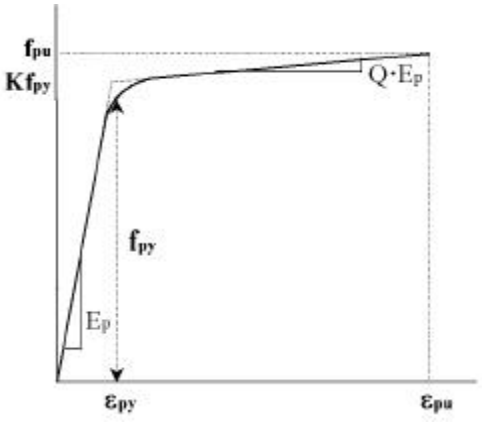


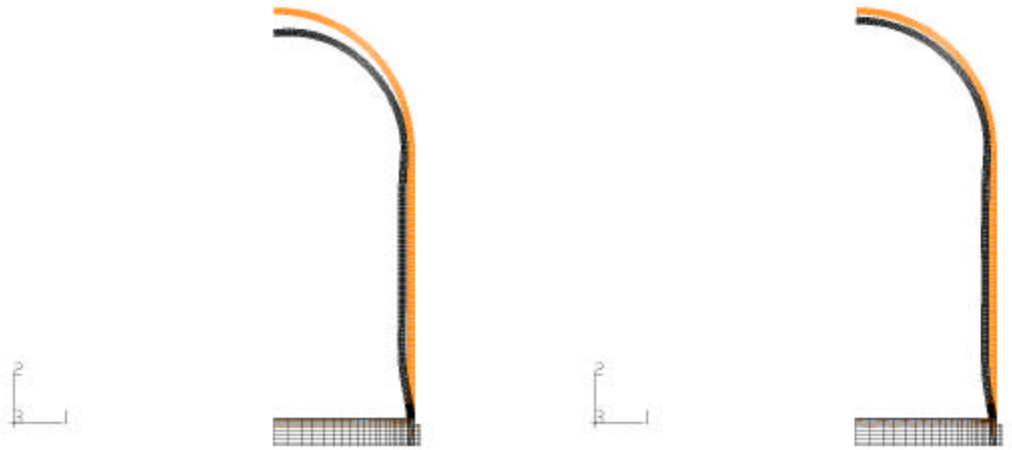
그림 8. 스트랜드의 응력-변형율 곡선

4. 비선형 해석결과

4.1 프리스트레스 하중 형태에 따른 거동

구조해석시 긴장력을 적용하는 방법에는 초기조건으로 응력을 적용하는 방법과 외부압력으로 환산하여 적용하는 방법이 있는데, 각각의 경우를 해석하여 그 결과를 분석하였다. 먼저 초기조건으로 응력을 적용하는 경우 텐돈 극한응력의 67%를 초기응력으로 텐돈요소에 적용하였다. 외부압력으로 해석한 경우 유효긴장력을 먼저 구하고 힘의 평형조건을 이용하여 외부압력을 계산하였다. 유효긴장력은 초기긴장력에서 설계수명상태의 elastic shortening에 의한 손실량, creep/shrinkage에 의한 손실량과 강재의 릴렉세이션에 의한 손실량을 고려하여 구할 수 있다. 이러한 방법으로 계산된 유효긴장력은 외부압력으로서 77psig이다[7]. 그림 9는 긴장력만이 가해진 상태의 변형된 격납건물의 형상을 나타낸 것이다. 텐돈의 긴장력에 의한 변형형상은 실제 변위값의 200배 확대한 것으로 전체 거동이 유사하게 나타났으나, 돔 정점 및 벽체 등에서 전반적으로 초기응력조건을 사용한 모델의 변형이 더 크게 발생함을 알 수 있다.

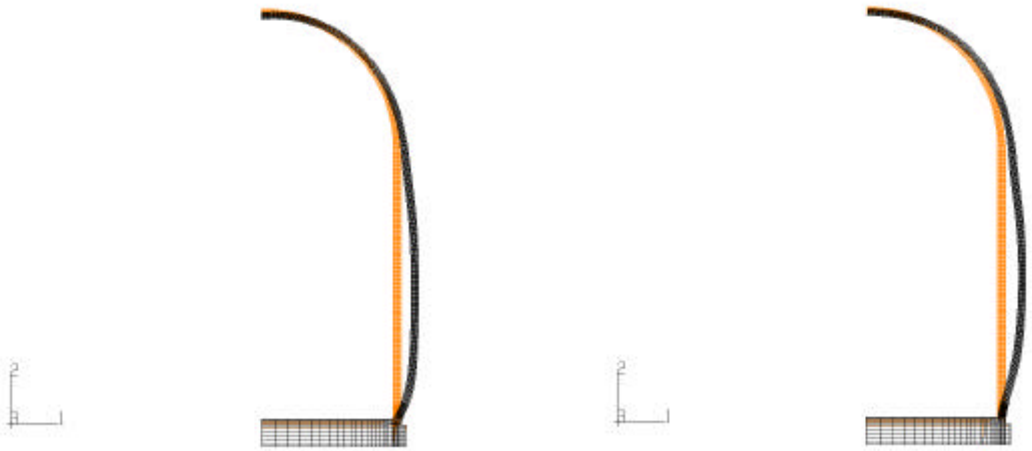
그림 10은 극한내압 작용시의 원환방향 변형형태로 서로 유사한 변형형상을 나타내고 있다. 원환방향 변형형상은 실제 변위값을 100배 확대한 것이다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 벽체의 중간높이 부분에서 가장 큰 변위가 나타났다.



(a) 초기조건 (b) 외부 압력

그

림 9. 긴장력이 가해진 직후의 변형도



(a) 초기조건 (b) 외부 압력

그림 10. 극한내압 작용시 변형도

그림 11은 벽체의 최대변위 부분에서의 긴장력을 초기조건과 외부하중으로 적용하여 해석한 하중-변위 관계를 나타낸 것이다. 선형구간에서는 거의 유사한 거동을 하였고, 콘크리트 균열발생 후 거동도 유사한 경향을 보여주고 있으나 균열발생 시점에서 차이가 발생하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 각 경우의 균열발생시 내압은 초기조건의 경우는 138psig, 외부압력의 경우는 111psig로서 초기조건의 약 80%수준으로 나타났다.

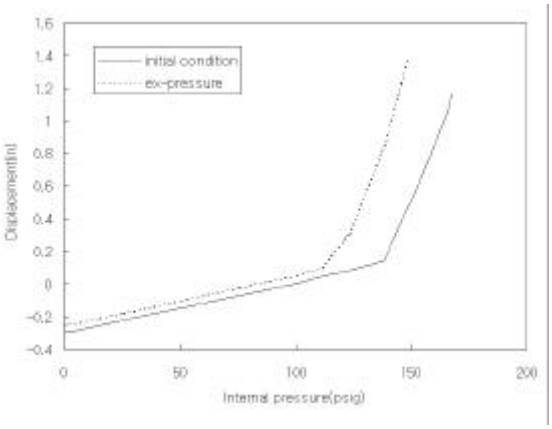


그림 11. 벽체 최대변위 발생 부분의 원환방향 변위도

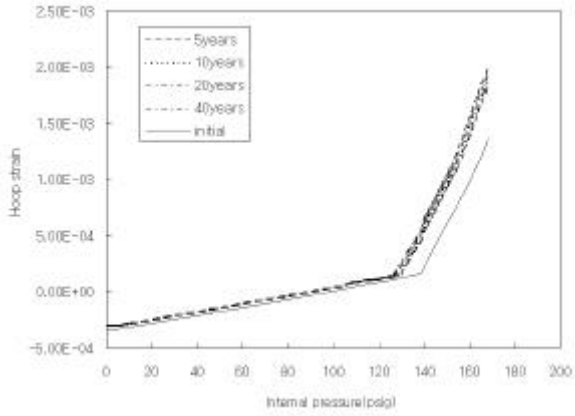


그림 12. 벽체 최대변위 발생 부위에서의 콘크리트의 원환 방향 변형율 변화

4.2 긴장력 손실에 따른 영향 평가

콘크리트의 열화에 비해 긴장력 손실은 콘크리트의 균열 및 막변형율(membrane strain)이 0이 되는 시점에 영향을 미친다. 이를 검토하기 위해 긴장력을 초기조건으로 적용하여 건설직후, 5, 10, 20 그리고 40년에서의 거동을 고찰하였다. 이를 위하여 가동중 검사 결과로부터 얻은 시간에 따른 텐돈 긴장력 감소식을 사용하여 유효긴장력을 구하였다(표1.). 적용한 감소모델식은 $y = -0.0143675 \ln(x) + 0.9138$ 이다.[7]

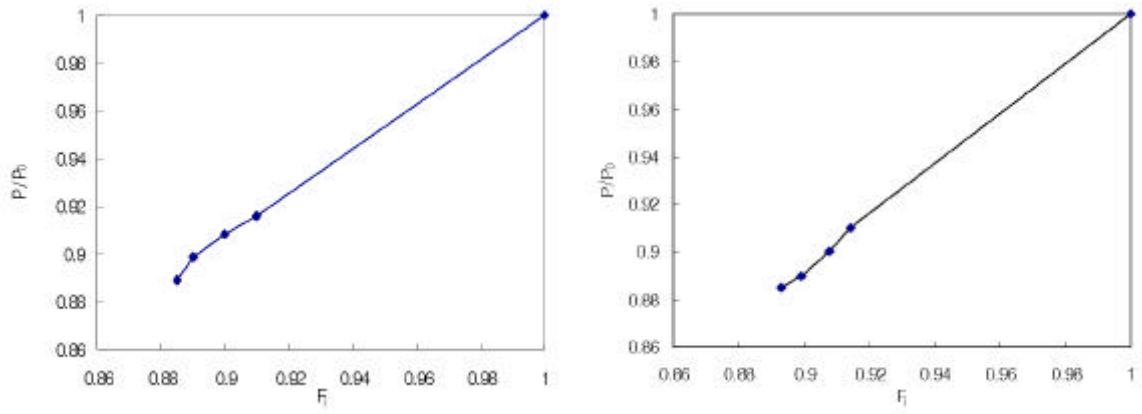
표 1. 사용연수에 따른 긴장력

	초기	5년	10년	20년	40년
긴장력	$0.67 F_{pu}$ (F_i)	$0.914876 F_i$	$0.904918 F_i$	$0.894959 F_i$	$0.885 F_i$

그림 12에 내부압력의 증가에 따른 벽체 최대변위 발생 부위에서 콘크리트의 원환방향 변형율을 나타내었다. 초기조건 이후 시간에 따라 균열발생 전까지는 거의 동일한 선형 거동을 보이고 있으나, 긴장력의 손실에 따라 균열이 발생되는 시점이 저하되었으며 그 이후 거동은 유사하게 나타났다.

긴장력 손실에 따른 벽체 최대 변위 발생 부위에서 원환방향 콘크리트 변형율이 0가 될 때의 내압을 검토하면 그림 13 (a)와 같다. 긴장력 손실이 증가함에 따라서 변형율이 0가 되는 시점이 선형적으로 감소하는 것으로 고찰되었다.

긴장력 손실에 따른 무차원화한 콘크리트 균열발생 하중수준을 비교하면 그림 13 (b)와 같다. 그림으로부터 긴장력 손실이 증가함에 따라 균열강도 역시 감소한 것으로 나타났다.



(a) 벽체 원환방향 변형율이 0가 되는 시점 (b) 균열발생 시점

그림 13. 긴장력 손실에 따른 벽체 원환 방향의 하중의 변화

5. 결론

원전 격납건물은 운영 중에 각종 열화요인으로 인해 구성재료의 성능이 저하된다. 재료성능저하는 격납건물의 구조적 거동과 장기적인 안전성에 영향을 미친다. 격납건물의 구성재료인 콘크리트, 철근 및 텐돈 중에서 텐돈의 긴장력 이완이 격납건물의 전체적인 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해서 사용연수에 따른 긴장력 손실에 의한 구조물의 극한내압 작용시의 거동을 분석하였다.

1. 극한내압 작용시의 원환방향 변형은 벽체의 중간높이 부분에서 가장 큰 것으로 나타났다.

2. 초기조건 및 외부압력으로 환산한 긴장력에 따라 구조해석을 수행한 결과, 선형구간에서는 거의 유사한 거동을 보였지만, 균열시점에서 차이가 발생하였다. 그 원인에 대해서는 추후 검토가 필요하다.

3. 긴장력 손실에 따른 격납건물 거동의 변화를 고찰한 결과, 긴장력 손실에 따라서 변형율이 0가 되는 시점과 균열이 발생하는 시점이 선형적으로 감소하였으며, 긴장력 손실은 균열강도에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Naus,D.J.,"An Evaluation of the Effectiveness of Selected Corrosion Inhibitors for Protection of Prestressing Steels in PCPVs, "ORNL/TM-6470, March 1979.
2. U.S. Nuclear Regulatory Commission,"Determining Prestressing Forces for Inspection of Prestressed Concrete Containments," Regulatory Guide 1.35.1, 1990
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission,"Inservice Inspection of Ungrouted Tendons in Prestressed Concrete Containment Structures," Regulatory Guide 1.35(Proposed Rev.2) 1976
4. U.S. Nuclear Regulatory Commission,"Inservice Inspection of Ungrouted Tendons in Prestressed Concrete Containment Structures," Regulatory Guide 1.35(Proposed Rev.2) 1990
5. Scott, B.D., Park, R., and Priestley, M.J.N., "Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates", ACI, Vol.79, No.1, 1982, pp.13 27.
6. **배인환, 최인길, 서정문**,"CANDU**형 원전** PSC Test Beams**의 비선형 해석**," **한국원자력학회 추계학술발표회 논문집**, 1999.
7. **이홍표**, "**텐돈의 긴장력 변화에 따른 프리스트레스 콘크리트 격납건물의 거동해석**," **충남대학교 석사학위논문**, 2000.
8. Hsu,T.C.,"Unified Theory of Reinforced Concrete," CRC, pp.204 205