

차세대 원자로 격납건물의 극한하중 저항능력 분석

Analysis of The Ultimate Pressure Capacity of The Containment of  
The Korea Next Generation Reactor(KNGR)

손성호<sup>1)</sup>, 황운봉, 김무환, 김원배

포항공과대학교

경북 포항시 남구 효자동 산 31번지

요약

차세대 원자로 격납건물의 극한하중 저항능력을 분석하였다. 구조해석을 위해서 개구부를 고려한 3차원 격납건물을 고려했으며, ABAQUS 코드를 이용하여 비선형 구조해석을 수행하였다. 이 결과로부터 내압증가에 따른 각 격납건물의 재료들의 응력 및 변형을 변화를 알아보았으며 극한하중 저항능력을 계산하였다. 원환텐돈이 항복할 때의 압력을 극한하중 저항 능력이라 하였을 때 개구부를 고려하지 않았을 때는 198.0psi이고 개구부를 고려하였을 때는 151.0psi였다.

Abstract

This report is to present the analysis details and the ultimate pressure capacity of the containment of Korea next generation reactor(KNGR). The KNGR containment structure is a cylindrical concrete shell holding the opening. Nonlinear analysis of this containment for the three dimensional finite element model is performed by using ABAQUS. From the analysis, the changes of stress and strain of each element are obtained and inner containment ultimate pressure capacity(ICUPC) are calculated. If we let the ICUPC when the hoop tendon are yielded, containment has the ICUPC 198.0psi when considering no opening, and 151.0psi when considering the opening.

1.서론

원자로의 격납건물은 내부 가스압력의 증가, 고온, 지진 등의 하중에 저항하도록 설계되지만 설계시 고려한 내부 압력과 온도보다 훨씬 심각한 상황이 발생하면 격납건물의 건전성을 보장할 수 없다. 이미 미국 원자력 규제 위원회(NRC)는 1981년 격납건물의 극한하중 저항능력을 계산하도록 SRP(Stand Review Plan)에 명시하였다. 극한하중 저항능력이란 격납건물의 가장 취약한 파손형태에 의한 파손압력을 나타내는 것으로 격납건물이 내부압력을 지탱하는 능력을 상실하는 상태를 의미한다. 이에 따라 선진 외국에서는 전산 해석뿐만 아니라 실제 축소 모델로 실험을 수행하는 등 원자로 격납건물의 극한하중 저항능력에 대한 실제적인 연구가 이루어지고 있다. 우리 나라에서는 영광 원자력 발전소 3호기 및 4호기에 대한 극한하중 저항능력을 분석한 바가 있다. 하지만 이전까지의 경험과 기술 부족으로 그 해석은 아직 어려운 과제로 남아 있다. 나아가 우리 나라가 원자력에 있어서 기술자립은 물론 기술 수출까지 하기 위해서는 차세대 원자로 격납건물에 대한 극한하중 저항능력 분석이 필수적이다. 이 분석 결과로부터 설계자에게 건설될 격납건물에서 발생할 수 있는 문제점을 검토할 수 있는 기회를 제공하게 된다.

---

1) 현 대우자동차

## 2.본론

일반적으로 동일한 격납건물에 대해서 각 해석기관에 따라 서로 상이한 결과를 보여주는 경우가 많다. 이것은 해석시 구조모델, 재료모델 등에 따른 차이로 분석된다. 이와 같은 결과로 볼 때 격납건물의 극한하중 저항능력 분석은 상당한 변수가 많아서 복잡하며 난해하다.

지금까지는 격납건물을 간단한 축대칭 모델을 많이 사용하여 해석했으나 차세대 원자로 격납건물의 구조해석에서는 3차원 모델을 해석하고자 한다.

### 2.1. 차세대 원전 격납건물의 구조

원자로 격납건물의 가장 중요한 설계사항중의 하나는 구소련의 체르노빌 사고에서도 알 수 있듯이 설계기준사고시 및 중대사고시 수소폭발, 노심용융, 고압용융분출등에 의한 고온과 고압에 의해 격납건물이 파손되지 않아야 한다. 격납건물의 구조는 기본적으로 기초슬래브와 실린더 벽체 및 반구형 돔으로 구성되어 있다. 격납건물은 원통형 벽체와 돔에 수평과 수직의 포스트텐션드 텐돈으로 프리스트레스를 받게되는 압축 상태의 콘크리트 구조물이며, 반면 기초슬래브는 일반적인 철근 콘크리트 구조물로서 원자료를 위한 공간과 계기터널이 있으며, 수직텐돈을 정착시키고 건설시 및 운전시 접근할 수 있는 텐돈 갤러리를 포함하고 있다. 장비의 보수와 이동을 위한 장비운반구와 인원출입구 및 연료통로 등 크고 작은 개구부들이 벽체에 놓인다. 격납건물의 내부표면에는 밀폐기능을 위하여 1/4in 두께의 라이너를 설치하고 보강판이나 매입판, 폴라 크레인 브라켓 등이 라이너에 용접된다. 격납건물의 개구부나 구조적 특성이 변하는 불연속 지점에는 국부적인 모멘트나 전단력에 저항하도록 추가로 철근이 보강된다.

포스트텐션닝 계통의 VSL E5-55 고강도 텐돈을 사용하며, 100개의 역 U형 수직텐돈을 두 방향으로 배치하여 기초슬래브에 정착된다. 원통형 벽체는 기초슬래브와의 접합부 12.5ft 이상부터 1ft 간격으로 165개의 원환텐돈이 설치되고 돔 부에는 벽체의 연결부로부터 45' 까지 1.5' 씩 30개의 원환텐돈이 설치된다. 이때 원환텐돈은 각 텐돈이 240° 씩 엇갈리게 배치하여 세 개의 부벽에 정착되도록 한다.

격납건물 벽체를 관통하는 관통부는 대관통부로서 장비운반구, 인원출입구, 비상출입구 등이 있으며, 소관통부로는 배관과 전기관 들로 형성된다. 이들 관통부 부근의 단면에는 철근을 격자형으로 보강되며 강재 라이너를 용접하여 방사능 물질이 누출되지 않도록 마무리한다. 한편, 격납건물에서 장비 반입구를 비롯하여 인원 출입구와 연료통로 등의 개구부가 있다. 그리고 개구부 주위에는 더욱 복잡한 구조의 철근으로 보강되어 있으나 본 연구에서는 개구부의 구조해석상의 중요성(응력 집중현상)을 보이기 위해 개구부를 고려한 3차원 1/4 격납건물을 유한요소 모델링하였다. 고려된 개구부는 장비 반입구로서 다른 부위보다 두꺼운 콘크리트 층을 가지도록 모델링하였다. 격납건물의 주재료는 콘크리트로 이루어져 있으며 건물내부에는 사고 시 방사능 유출을 막기 위해 강철 라이너 플레이트로 덮여 있다. 그리고 콘크리트 내부에는 철근으로 보강되어 있으며 텐돈으로 격납건물을 프리스트레스(압축) 상태로 유지하게 된다.

### 2.2. 하중 및 경계조건

LOCA(Loss of coolant accident) 발생시 격납건물 내부가 고온 및 고압 상태가 된다. 그러나 온도 하중은 격납건물의 극한하중 저항능력 결정에 큰 영향을 미치지 않는다고 알려져 있으므로 본 연구에서는 온도 하중은 무시하였다. 그리고 격납건물의 자중에 의해서 발생하는 하중을 고려하였다. 또한 원환방향 텐돈의 프리스트레스 영향을 고려하기 위해서 격납건물에 등가의 외압을 가하였다. 이렇게 프리스트레스싱된 격납건물 내에 압력하중을 텐돈이 항복할 때까지 계속 증가시켰다. 이에 따른 격납건물의 변형 및 콘크리트, 라이너 플레이트, 철근, 텐돈 등의 응력해석을 하였으며 격납건물의 극한하중 저항능력을 분석하였다.

### 2.3. 전산해석 프로그램

본 연구에서는 Pre-processor로서 SDRC사의 I-DEAS를 사용하였다. 하중의 변화에 따른 구조 해석은 철근 및 텐돈에 대한 유한요소 모델링이 편리하며 콘크리트의 비선형 해석이 타 범용패키지에 비해 신뢰도가 뛰어난 ABAQUS를 사용하였다.

#### 2.3.1. 구조모델

본 연구에서는 개구부를 고려하지 않은 격납건물과 보강하지 않은 개구부를 고려한 격납건물의 극한내압해석을 수행하였다. 내압 발생시 기초슬래브의 들림 현상이 비교적 작기 때문에 기초슬래브를 무시하고 기초슬래브와 접하고 있는 원통형 단을 완전 고정된 경계조건을 사용하였다. 그림(1)은 각각 개구부를 무시한 차세대 원자로 격납건물과 개구부를 고려한 격납건물의 구조해석을 위해서 가장 큰 개구부인 장비운반구를 고려한 3차원 1/4 모델을 사용하였다. 그림(2)는 철근 및 텐돈 배치 상황도이다. 본 연구에서는 격납건물의 원통형 벽체에서 장비운반구는 두께 방향으로 원통형 벽체보다 2배 두껍게 하였다. 한편 개구부 주위 철근의 추가 배치는 고려하지 않았으나 이에 대한 극한하중 저항능력 예측결과는 안전측의 경향을 가지므로 유효하다고 본다. 그리고 내압 발생시 기초슬래브의 들림 현상이 비교적 작기 때문에 기초슬래브를 무시하고 기초슬래브와 접하고 있는 원통형 단을 완전 고정된 경계조건을 사용하였다.

그림(3)은 격납건물에 대한 유한요소 모델을 나타낸다. 반구형 돔의 정점 부분에는 6절점 삼각 쉘요소(6-node triangular thick shell element)를 사용하였으며, 그 외 부분은 8절점 사각 쉘요소(8-node rectangular thick shell element)를 사용하여 총 658개의 요소와 2069개의 절점이 사용되었다. 위의 요소들은 콘크리트와 라이너의 결합 및 두께 방향의 전단변형을 고려하게 된다. 개구부를 고려한 유한요소 모델로 요소는 754개이고 절점은 2388개이다.

기존의 축대칭 모델의 경우 반구형 돔에서의 직교격자 철근배치를 정확히 모형화할 수 없었다. 본 연구에서는 3차원 모델을 사용함으로써 돔 부위의 텐돈을 직교격자 모양으로 배치시켰다. 그림(4)는 개구부 주위의 철근 및 텐돈에 대한 유한요소 모델을 보인 것이다.

## 2.4 재료

### 2.4.1 콘크리트

해석에 사용된 콘크리트의 물성은 다음과 같다.

- 압축강도 :  $41.4 \times 10^6$  Pa
- 인장강도 :  $0.1 f_c'$
- 탄성계수 :  $57000 \sqrt{f_c'}$
- 포아송 비 : 0.17
- 밀도 :  $2400 \text{ kg/m}^3$

### 2.4.2 라이너 플레이트

라이너 플레이트는 SA 516, Grade 60을 만족하는 탄소성 강재이다.

- 항복강도 :  $2.07 \times 10^8$  Pa
- 극한인장강도 :  $3.79 \times 10^8$  Pa
- 탄성계수 :  $2.0 \times 10^{11}$  Pa
- 포아송 비 : 0.3
- 밀도 :  $7840 \text{ kg/m}^3$

### 2.4.3 철근

사용된 철근은 이형철근으로서 ASTM A615, Grade 60을 만족한다.

- 항복강도 :  $4.14 \times 10^8$  Pa
- 탄성계수 :  $2.0 \times 10^{11}$  Pa
- 밀도 :  $7840 \text{ kg/m}^3$
- 극한인장강도 :  $6.21 \times 10^8$  Pa
- 포아송 비 : 0.3
- 단면적 :  $2.58 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

#### 2.4.4. 프리스트레스싱 텐돈

텐돈은 ASTM A416 Grade 270을 만족한다.

- 인장강도 :  $1.90 \times 10^9$  Pa
- 탄성계수 :  $1.90 \times 10^{11}$  Pa
- 포아송 비 : 0.3
- 밀도 :  $7840 \text{ kg/m}^3$
- 단면적 :  $5.43 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

#### 2.6 하중모델

해석시 고려한 하중으로는 격납건물 자중에 의해 발생하는 하중 및 텐돈에 의한 프리스트레스 하중을 고려하였다. 그리고 사고시 증가하는 내압을 고려하였다. 한편, 온도하중은 극한하중 저항 능력에 큰 영향을 주지 않다고 알려져 있으므로 무시한다. 텐돈의 프리스트레스에 의한 하중은 등가의 외부 압력하중으로 환산하여 격납건물의 외부에 작용하도록 하였다. 이렇게 프리스트레스싱된 격납건물 내부에 내압을 텐돈이 항복할 때까지 점차적으로 증가시킨다.

### 3. 결론

본 연구에서는 개구부를 무시한 경우와 보강되지 않은 개구부를 고려한 경우의 차세대 원자로 격납건물 극한하중 저항능력을 분석하였다. 개구부를 무시한 경우 사고로 인해 발생한 내압이 93.2psi에서 콘크리트 인장파손이 일어나기 시작했으며, 118.8psi에서 라이너 플레이트 항복이 일어났다. 최종적으로 198.0psi에 도달하면 벽체부위의 원환텐돈이 항복하였다. 따라서 격납건물의 극한하중 저항능력은 198.0psi(3.30Pa)로 판단된다. 개구부를 고려한 경우에는 내압이 80.2psi에서 콘크리트 균열이 발생되며, 109.3psi에서 라이너 플레이트가 항복하였다. 나아가 151.0psi에 이르면 최종적으로 개구부 부위의 원환텐돈이 항복하였다. 이렇게 보강하지 않은 개구부를 고려한 격납건물의 극한하중 저항능력은 151.0psi (2.52Pa)로 판단된다. 한편, 개구부 주위의 추가 철근 보강효과를 고려하면 더욱 높은 저항능력을 가지는 결과가 나올 것으로 기대된다.

차세대 원자로 격납건물의 보다 정확한 극한하중 저항능력 분석을 위해서는 기초슬래브와 개구부를 고려한 3차원 해석이 좋을 것이라고 본다. 뿐만 아니라 온도하중은 일반적으로 격납건물의 극한하중 저항능력 결정에 큰 영향을 미치지 못하나 철근과 텐돈의 배치 상황은 많은 영향을 미치게 되므로 더욱 정확하게 모델링해야 한다. 특히 개구부 주위에서 파손이 일어나므로 추가 철근 보강모델을 고려해야 할 것이다. 그리고 재료거동에 대한 정확한 모델링도 필요하다. 또한 콘크리트의 건조수축과 프리스트레스 텐돈의 응력이완 등의 원인에 의한 프리스트레스 손실을 결정하는 일도 중요하다. 이와같이 격납건물의 정확한 건전성 평가를 위해 지속적인 연구개발이 필요할 것으로 본다.

#### 참고문헌

- [1] Phil M. Ferguson, Reinforced Concrete Fundamentals, Wiley,1981
- [2]Hibbit, Karlsson and Sorensen, "ABAQUS User's Manual", HKS,Inc.,1995
- [3]KOPEC, "Inner Containment Ultimate Pressure Capacity Analysis", Technical report, Document No. N-316-ECD425-010 Rev.0, 1998

[4] KOPEC, Technical report, Document No. N-316-ECD318-001 Rev.0, 1998

[5] 이이환, 배관철, 이기성, "원자력 격납건물의 극한하중저항능력 분석", 한국전력, 기술개발최종 보고서, 1991

[6] Jofriet, J.C., and McNeice, G.M. (1971) "Finite element analysis of reinforced concrete slabs" J. Struct. Div., ASCE, 97(3), 785-806

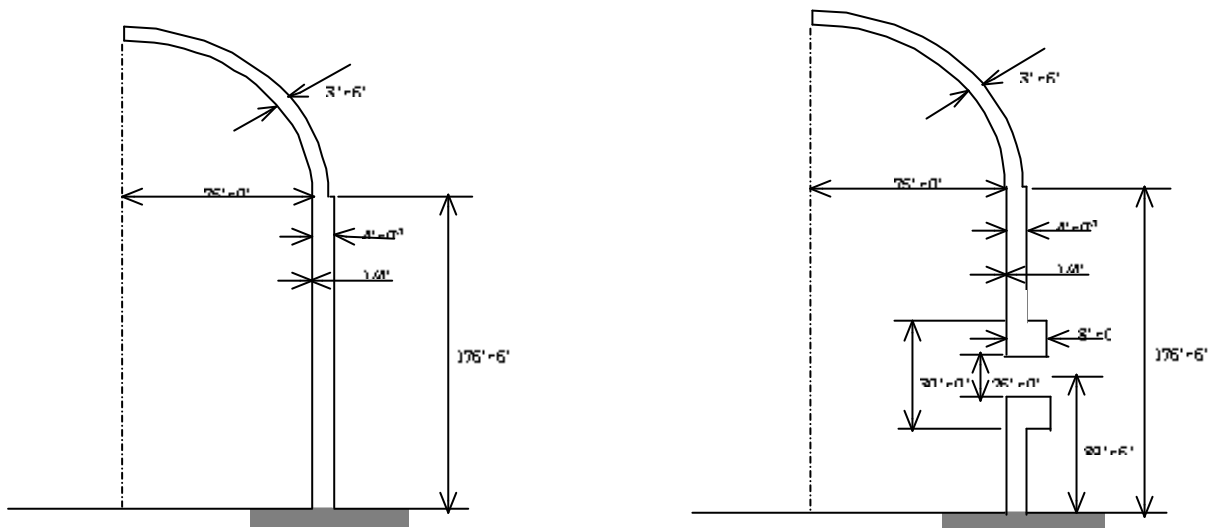
[7] Owen, D.R.J., and Figueras, J.A., and Damjanic, F. (1983) "Finite element analysis of reinforced and prestressed concrete structures including thermal loading." Computer Method Appl. mech. Engrg., 41, 323-366

[8] Shenglin Di, Y.K. Cheung (1993) "Nonlinear Analysis of RC Shell Structures Using Laminated Element I", J. of Structural Eng., Vol.119, No.7, 2059-2073

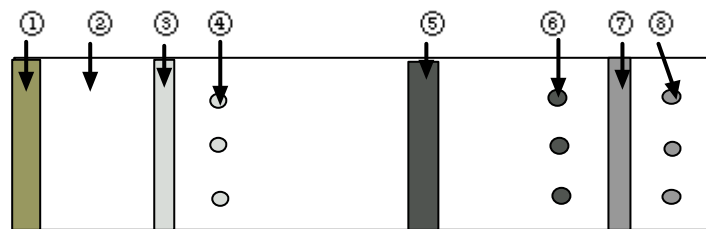
[9] Gilbert, R.I., and Warner, R.F. (1978) "Tension stiffening in reinforced concrete slabs." J. Struct. Div., ASCE, 104(12), 1885-1900

[10] Kupfer, H.B., and Gerstle, K.h. (1973) "Behavior of concrete under biaxial stress." J. Engrg. Mech. Div., ASCE, 99(4), 853-866

[11] Cedolin, L., Crutzen, Y.R.J., and Deipoli, S. (1977) "Triaxial stress-strain relationship for concrete." J. Strut. Div., ASCE, 103(3), 423-439

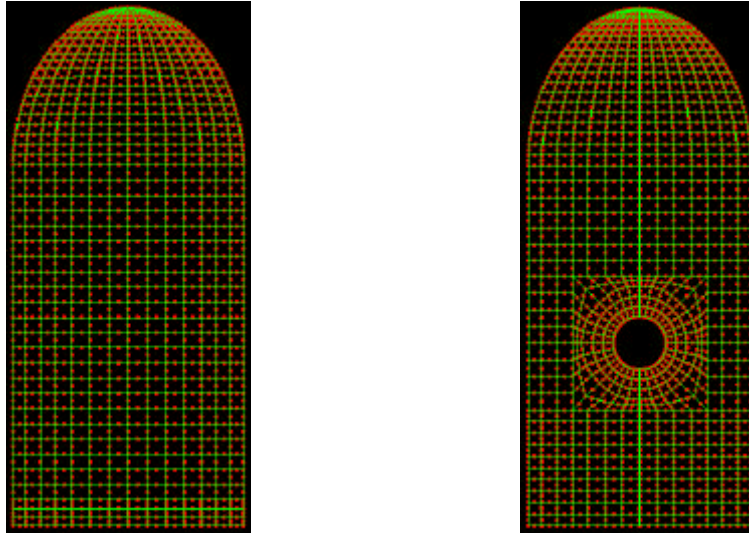


그림(1) 원자로 격납건물의 개략도

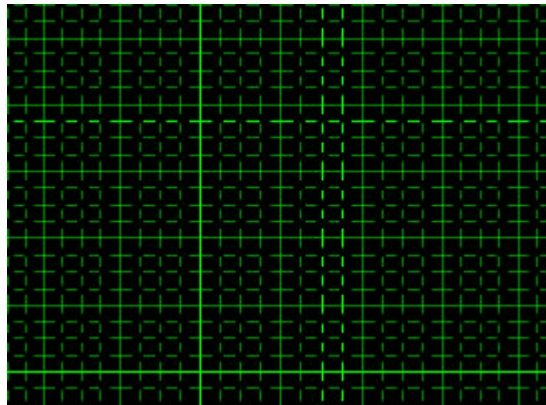


- ① Liner
- ② Concrete
- ③ Inner inverted U-rebar(urebin)
- ④ Inner H-rebar(hrebin)
- ⑤ inverted U-tendon(utend)
- ⑥ H-tendon(htend)
- ⑦ Outer inverted U-rebar(urebout)
- ⑧ Outer H-rebar(hrebout)

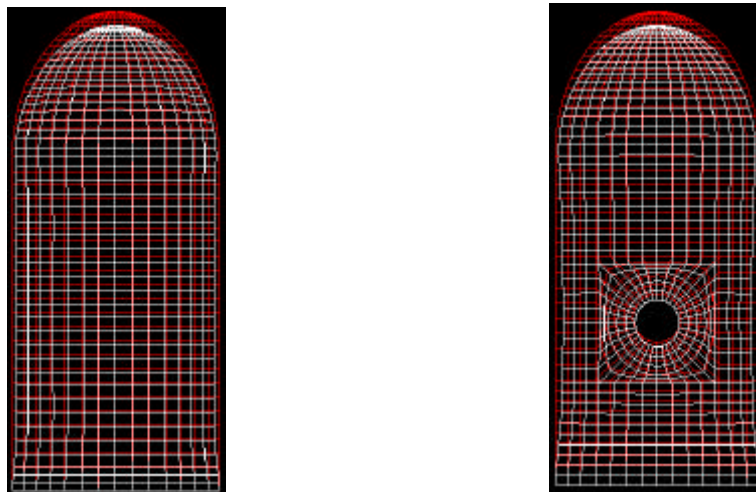
그림(2) 격납건물의 철근 및 텐돈 배치도



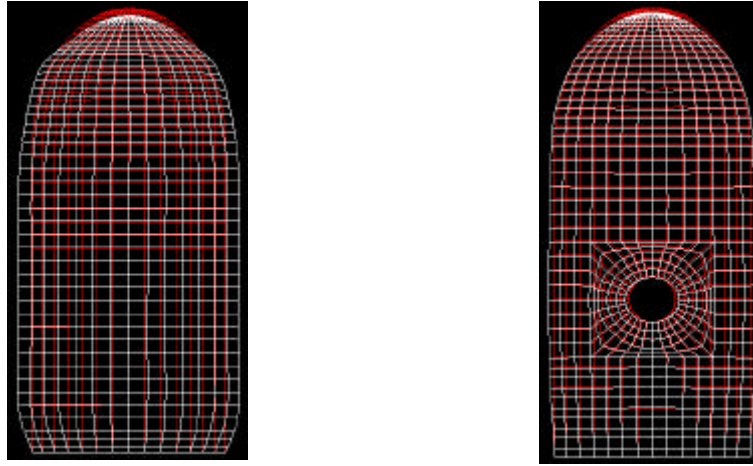
그림(3) 격납건물의 유한요소 모델



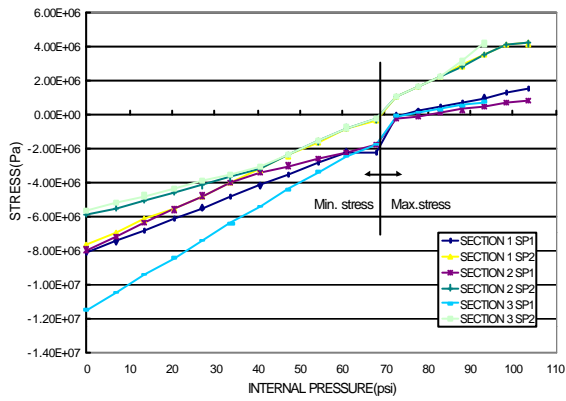
그림(4) 철근 및 텐돈 유한요소 모델



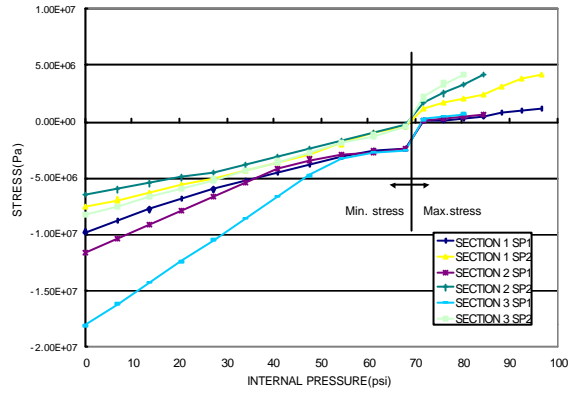
그림(5) 격납건물의 초기변형(Mag.×200)



그림(6) 격납건물의 극한내압에서의 변형(Mag.×30)

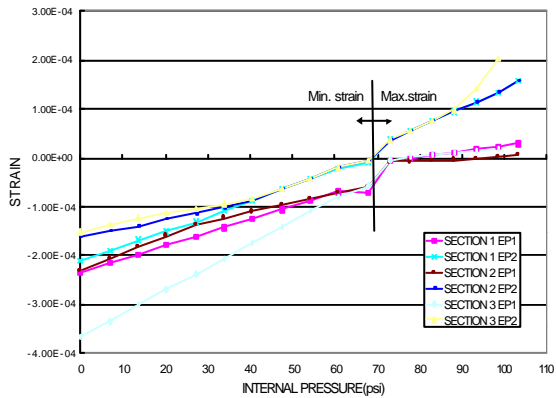


(a) 개구부 고려 안 함

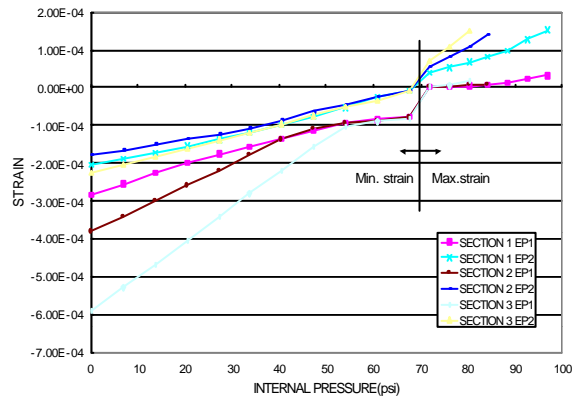


(b) 개구부 고려

그림(7) 내압에 따른 콘크리트의 응력

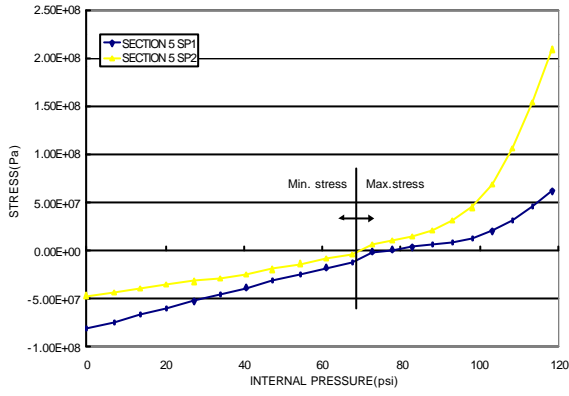


(a) 개구부 고려 안 함

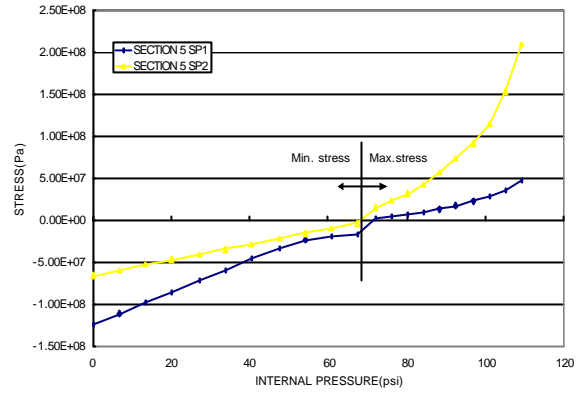


(b) 개구부 고려

그림(8) 내압에 따른 콘크리트의 변형률

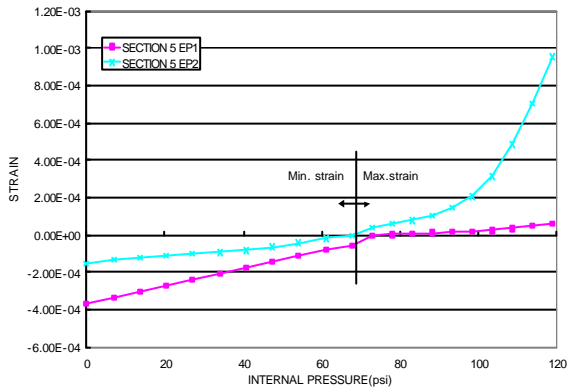


(a) 개구부 고려 안 함

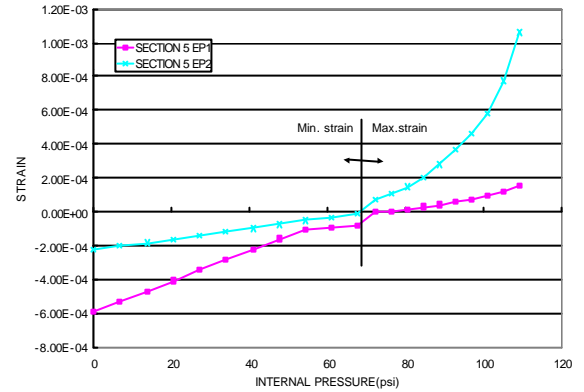


(b) 개구부 고려

그림(9) 내압에 따른 라이너 플레이트의 응력

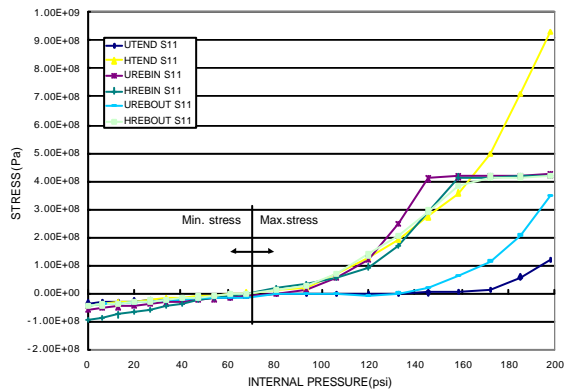


(a) 개구부 고려 안 함

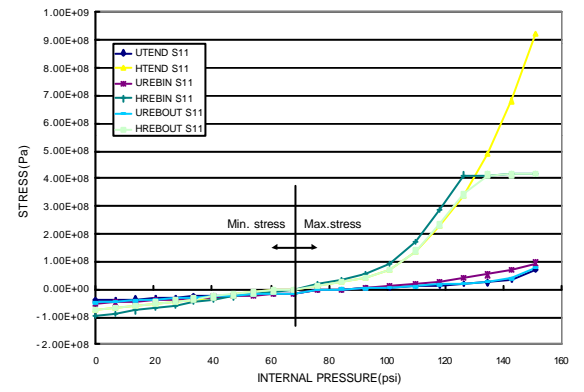


(b) 개구부 고려

그림(10) 내압에 따른 라이너 플레이트의 변형률



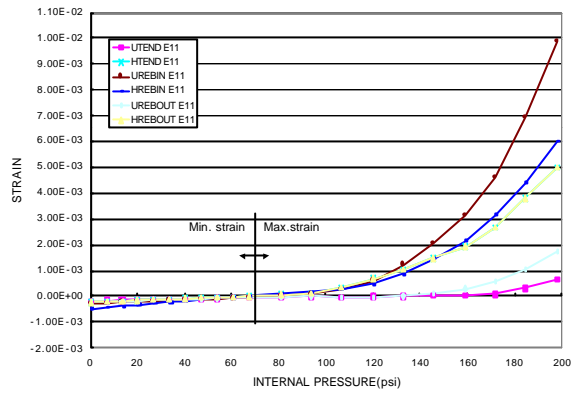
(a) 개구부 고려 안 함



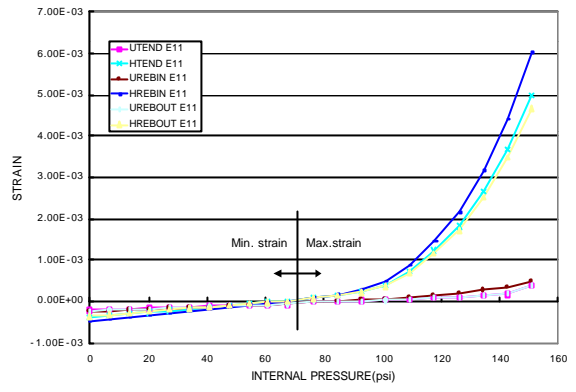
(b) 개구부 고려

그림(11) 내압에 따른 철근 및 텐돈의 응력





(a) 개구부 고려 안 함



(b) 개구부 고려

그림(12) 내압에 따른 철근 및 텐돈의 변형률