

96춘계학술발표회논문집  
한국원자력학회

PS 텐던의 단면적변화를 고려한 원전 격납구조물의 유한요소해석

정철현\*, 장성욱, 조경태, 정한중, 박철림  
(주)대우 건설기술연구소

요 약

원전 격납구조물의 구조해석에 대한 대부분의 연구에서 격납구조물을 축대칭으로 모델하고 있다. 따라서 격납구조물에 배근된 강재도 축대칭으로 가정하는 것이 일반적이며, 유한요소모델 구성시 강재는 2절점 트러스나 1절점 링 트러스요소에 의해서 모델한다. 이때 유효철근비는 트러스요소의 단면적에 의해서 표현되며, 원통형 벽체에서는 높이에 따라 배근된 강재량이 일정하므로 실제와 근접한 모델이 가능하다. 그러나, 상부돔의 축대칭모델시 돔의 자오선 방향으로 규정된 강재량이 일정치 않고, 변화하게 된다. 기존에 연구에서는 이러한 강재량의 변화를 고려하지 못하고 반경방향으로 일정한 것으로 가정하여 구조해석을 수행하여 왔다. 이와같은 모델상의 제약으로 인해서 철근이나 텐던의 조기항복, 돔 정상부 부근에서의 부 정확한 변형특성을 보이고 있다. 본 연구에서는 실제 규정된 강재량을 유한요소모델에 반영하기 위해 정점부에서 자오선 방향으로 변화되는 강재량을 모델할 수 있는 기법에 대해서 연구하였으며, 연구결과를 바탕으로 격납구조물의 극한 내압해석을 수행하여 기존 모델방법에 의한 해석결과와 비교하였다.

1. 서 론

특별하중을 받는 원전 격납구조물에 대한 안전성 평가시에는 콘크리트, 철근 및 텐던의 균열 및 항복후 거동을 평가하기 위해서 재료-비선형 특성을 고려한 2차원 축대칭 쉘요소<sup>(1)</sup>와 축대칭 SOLID요소<sup>(2)</sup>등이 많이 이용된다. 철근과 프리스트레스 텐던을 축대칭 쉘요소에서는 분포된 판으로 이상화시켜며, 축대칭 SOLID요소에서는 트러스요소로 모델하는 것이 일반적이다. 그러나, 원전 격납구조물의 기초슬래브는 원형, 돔은 반구형 또는 부분 구형의 형상을 갖고 있기 때문에 철근이나 프리스트레스 텐던 배치시 제한된 단면 두께로 인하여 방사형을 이루지 못하고 3-4 방향의 격자형상을 이루고 있다. 따라서 기초슬래브나 돔에 배근된 강재는 중심부에서 반경 방향으로 강재량이 변화하게 된다. 기존 연구에서는 이들 강재량의 변화를 고려하지 못하고 반경 방향으로 일정한 것으로 모델하여 구조해석을 수행하여 왔다. 따라서, 본 연구에서는 정점부에서 반경 방향으로 변화되는 강재량을 모델할 수 있는 기법을 개발하였으며, 이를 이용하여 격납구조물의 극한 내압해석을 수행하여 기존 모델방법에 의한 해석결과와 비교하였다.

2. 격납구조물의 형상

본 연구의 대상 구조물인 CANDU형 원전 격납구조물의 전체적인 형상은 그림 1과 같이 원통형 벽체, 링빔, 하부돔 및 상부돔, 그리고 기초슬래브로 구성되어 있으며, 벽

체와 링빔에는 원환텐던, 벽체와 상부돔에는 수직텐던, 기초슬래브에는 2층의 수평텐던이 배치되어 있다. 기초슬래브의 수평텐던은 각 방향 21개씩 3방향(120° 간격)으로 배치되었으며, 각 텐던당 스트랜드는 55개 이다. 상부돔에는 각 방향 47개씩 3방향으로 총 141개의 텐던이 배치되어 있으며, 모든 텐던은 링빔의 바깥면에 정착되었고, 각 텐던당 스트랜드는 37개 이다.

### 3. 축대칭모델을 위한 PS 텐던 배치의 이상화

#### 3.1 기초슬래브

그림 2는 기초슬래브의 텐던 배치형상과 축대칭요소로 모델하기 위한 이상화된 텐던 배치도이다. 그림 2의 (b)에서 텐던의 단면적은 반경방향에 대해 일정하나, 그림 2.(a)의 실제 배치상태에서는 반경 방향으로 변화를 보이는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 3방향으로 직선 배치된 텐던을 방사선 형태의 텐던으로 이상화 시키면서 발생하는 단면적 변화식을 유도하여 유한요소모델에 반영할 수 있도록 하였다. 3방향 배치 텐던중 1방향 텐던만을 나타내면 그림 3과 같다. 1방향 텐던의 갯수를  $n$ 개, 기초슬래브의 반경을  $R$ , 텐던간의 간격은  $2R/(n+1)$ 이라 하면  $(n-1)/2$ 번째 텐던까지의 거리는  $(n-1)R/(n+1)$ 과 같다. 3방향으로 직선 배치된 텐던은 기초슬래브 단면내에서 일정한 밀도를 갖고 있으므로, 일정한 두께를 갖는 분포된 판으로 이상화시키는 것이 가능하다. 그림 3에서 각 텐던의 단면적은  $A_p$ 로 동일하므로 각 텐던의 길이를 합하여 체적을 구하면 다음과 같다.

$$V_1 = \sum_{m=1}^n A_p \times (\text{length of each tendon})$$

$$= A_p \left\{ 2R + 4 \sum_{m=1}^{\frac{n-1}{2}} \frac{2R}{n+1} \sqrt{\left(\frac{n+1}{2}\right)^2 - m^2} \right\} \quad (n \geq 3 \text{인 홀수}) \quad (1)$$

$$V_3 = 3V_1 \quad (2)$$

여기서,  $V_1$ 은 1방향으로 배치된 텐던의 총 체적,  $V_3$ 는 3방향으로 배치된 텐던의 총 체적으로서 일정한 두께  $t$ 를 갖는 등가의 분포된 판으로 이상화시키면 식(3)과 같다.

$$t = \frac{6A_p}{\pi R} \left\{ 1 + \frac{4}{n+1} \sum_{m=1}^{\frac{n-1}{2}} \sqrt{\left(\frac{n+1}{2}\right)^2 - m^2} \right\} \quad (3)$$

식(3)에 의해서 두께  $t$ 를 갖는 등가의 판으로 나타내면 그림 4.(a)와 같고, 이를 그림 4.(b)와 같은 Lumped Tendon으로 환산하면  $x$ 에 따른 텐던의 단면적과 반경은 식(5)와 식(6)과 같다.

$$\{\pi(x+dx)^2 t - \pi x^2 t\} / 2\pi \approx x t dx \quad (dx \text{의 2차항 무시}) \quad (4)$$

$$A_p' = x t \quad (5)$$

$$r_e = \sqrt{\frac{x t}{\pi}} \quad (6)$$

#### 3.2 상부돔

상부돔의 텐던배치는 그림 5.(a)와 같이 상부돔 곡면의 곡률원점을 중심으로 일정한 각도로 배치되어 있으며, 방사선형태로 이상화시키면 그림 5.(b)와 같다. 상부돔

의 투영 평면상에서 3방향중 1방향 텐던만을 나타내면 그림 6과 같으며, 배치형태를 보면 중심을 지나는 텐던은 직선이나 외측부로 갈수록 곡선형태를 갖게 된다. 기초슬래브에서와 마찬가지로 상부돔 텐던은 그 밀도가 상부돔 전체에 대해 일정하므로 곡면 형상의 일정한 두께를 갖는 분포된 셸로 이상화시키는 것이 가능하다. 그림 6에서 곡선 배치된 각 텐던의 단면적( $A_p$ )은 동일하므로 각 텐던의 길이가 결정되면 텐던의 체적 계산이 가능하다. 그림 6에서  $m$ 번째 텐던의 투영평면상의 직선거리  $m'm'$ 와 곡률 원점에 대한 각도( $\theta_m$ )에 의해서 텐던의 곡면거리  $mm'$ 가 결정되고, 이를 이용해서 곡면 배치된 텐던의 체적을 계산하면 식(7)과 같다.

$$V_1 = \sum_{m=1}^n A_p \times (\text{length of each tendon})$$

$$= 2A_p R' \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{R}{R'} \right) + 2 \sum_{m=1}^{\frac{n-1}{2}} \sin^{-1} \left( \frac{2R}{(n+1)R'} \sqrt{\left( \frac{n+1}{2} \right)^2 - m^2} \right) \right\} \quad (7)$$

여기서,  $R$ 은 투영 평면상 상부돔의 반경,  $R'$ 은 돔의 곡률반경,  $V_1$ 는 1방향 배치된 텐던의 총체적이며,  $n$ 은 1방향만을 고려한 텐던의 갯수로서 3방향 배치된 텐던의 총체적  $V_3$ 는 식(2)와 같다. 식(2)에 의해서 계산된 텐던의 총체적을 곡면 형상의 일정한 두께  $t$ 를 갖는 등가의 분포된 셸로 이상화시킨후,  $t$ 를 산정하면 식(8)와 같다.

$$t = \frac{3A_p}{\pi h} \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{R}{R'} \right) + 2 \sum_{m=1}^{\frac{n-1}{2}} \sin^{-1} \left( \frac{2R}{(n+1)R'} \sqrt{\left( \frac{n+1}{2} \right)^2 - m^2} \right) \right\} \quad (8)$$

식(8)에서 계산된 두께  $t$ 를 갖는 곡면 형상의 등가의 셸은 그림 7.(a)와 같고, 등가의 셸을 그림 7.(b)와 같은 Lumped 텐던으로 이상화시킬 경우 텐던의 단면적과 반경은 다음과 같다(그림 8 참조).

$$A_p' = xt = R't \sin \left( \frac{x'}{R'} \right) \quad (9)$$

$$r_e = \sqrt{\frac{xt}{\pi}} = \sqrt{\frac{R't}{\pi} \sin \left( \frac{x'}{R'} \right)} \quad (10)$$

#### 4. PS 텐던 배치 이상화에 따른 정착하중

원전 격납구조물의 기초슬래브 및 상부돔의 텐던배치를 이상화시키는 과정에서 텐던의 정착하중도 축대칭모델과 이상화된 방사선 형태의 텐던배치에 맞게 하중의 크기를 결정하여야 한다. 그러나, 기존 연구에서는 해석모델에 맞는 정착하중에 작용방향을 무시하고 설계시에 명시된 크기를 축대칭모델에 그대로 적용하여 구조해석을 수행하여 왔다. 따라서, 본 연구에서는 해석모델과 이상화된 방사선 형태의 텐던배치에 따른 반경 방향의 정착하중 크기를 산정할 수 있는 식을 유도하였다. 3방향 직선 배치된 텐던중 1방향 텐던의 갯수는  $n$ 개이고, 기초슬래브의 반경을  $R$ 이라 하면 그림 9에 나타난 텐던간의 간격은  $2R/(n+1)$ 이며,  $m$ 번째 텐던까지의 거리는  $2mR/(n+1)$ 과 같다. 프리스트레스 하중( $P$ )이 가해지는 지점까지의 거리( $om'$ )는  $R$ 이므로 임의의 방사선 배치 텐던까지의 각도는 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_m = \sin^{-1} \left( \frac{om'}{R} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{2m}{n+1} \right) \quad (1 \leq m \leq \frac{n-1}{2} \text{인 정수}) \quad (11)$$

그림 10에서 프리스트레스 정착하중  $P$ 는 기초슬래브 원주면에 수직으로 작용하지 않

기 때문에 반경방향 분력( $P_r$ )과 접선방향 분력( $P_t$ )으로 분리된다. 이 분력중 기초슬래브에서 응력을 유발시키는 하중은  $P_r$ 이고,  $P_t$ 는 3방향 배치텐던의 분력을 고려하면 상쇄된다(그림 9 참조). 따라서 3방향 직선배치 텐던을 축대칭모델로 해석하기 위해서 방사선 형태로 텐던을 이상화시키는 경우에는 정착하중의 분력중  $P_r$ 만 작용하게 된다. 그림 9와 그림 10에서 정착하중의 분력은 식(12)와 식(13)과 같이 결정되며, 1방향 텐던의 분력( $P_r$ )들의 합은 식(14)와 같다.

$$P_{r,m} = P \cos \theta_m = P \cos \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{2m}{n+1} \right) \right\} \quad (12)$$

$$P_{t,m} = P \sin \theta_m = P \left( \frac{2m}{n+1} \right) \quad (13)$$

$$S_1 = P (\text{center tendon}) + 2 \sum_{m=1}^{\frac{n-1}{2}} P_{r,m} \quad (14)$$

식(14)에 의해 3방향 텐던 분력( $P_r$ )의 합은 식(15)와 같이 결정되며, 각 텐던의 양쪽에 가해지는 정착하중을 고려하여 총 반경 방향의 프리스트레스 하중의 합은 식(16)과 같다.

$$S_3 = 3S_1 = 3P + 6 \sum_{m=1}^{\frac{n-1}{2}} P \cos \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{2m}{n+1} \right) \right\} \quad (15)$$

$$S = 2S_3 = 6P + 12 \sum_{m=1}^{\frac{n-1}{2}} P \cos \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{2m}{n+1} \right) \right\} \quad (16)$$

식(16)의  $S$ 를 방사선형태로 이상화시킨 텐던 정착단의 총수로 나누면, 각 방사선 배치 텐던의 등가 프리스트레스하중( $P_{eq}$ )은 식(17)과 같다.

$$P_{eq} = \frac{S}{(3n \times 2)} = \frac{P}{n} \left[ 1 + 2 \sum_{m=1}^{\frac{n-1}{2}} \cos \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{2m}{n+1} \right) \right\} \right] \quad (n \geq 3 \text{인 홀수}) \quad (17)$$

식(17)를 이용해 CANDU형 원전 격납구조물의 기초슬래브와 상부들에 작용하는 등가 프리스트레스하중을 산정하면, 0.81438P 와 0.79956P 이다.

## 5 기존 모델방법과의 비교분석

극한내압해석을 위해 CANDU형 원전 격납구조물을 2차원 축대칭요소로 모델하였으며, 콘크리트는 2-D SOLID요소로 원환철근 및 원환텐던은 1절점 트러스요소, 수평방향과 meridional 방향의 철근과 텐던은 2절점 트러스요소로 모델하였다. 그림 11에서 보여주는 유한요소모델의 총 절점수는 4,127개이며, 콘크리트의 균열후 거동을 평가하기 위해서 벽체는 두께방향으로 12개 층, 기초슬래브는 8개 층, 상부들은 6개의 층, 하부들은 4개의 층으로 표현하였다. 콘크리트의 재료모델에서는 다축 응력상태하에서 일축 응력-변형관계를 도출할 수 있는 콘크리트 모델을 적용하였으며<sup>(7)</sup>, 철근 및 텐던은 항복후 소성상태 거동의 평가가 가능한 탄-소성모델(bilinear 응력-변형)에 의해서 표현하였다.

극한해석은 본 연구에서 유도한 프리스트레스 텐던 모델방법과 기존 연구에서 수행되어 온 모델방법 각각에 대해서 수행함으로써, 각 모델방법에 따른 격납구조물의 구조거동을 비교 분석하였으며, 텐던모델에 따른 해석조건은 3가지로서 다음과 같다.

- CASE 1 : 텐던 단면적 변화(본연구) + 정착하중( $P_{oa}$ , 본연구)  
CASE 2 : 텐던 단면적 일정(기존연구) + 정착하중( $P_{oa}$ , 본연구)  
CASE 3 : 텐던 단면적 일정(기존연구) + 정착하중( $P$ , 기존연구)

3가지 해석조건에 대해서 극한 내압해석을 수행한 결과, 그림 12에서 보면 상부들에서는 콘크리트의 균열발생 이후의 거동에서 원환균열 및 meridional 균열의 발생 면적이 차이가 있음을 보여주고 있다. 상부들에서의 텐던 단면적변화 및 정착하중의 작용방향을 고려하는 경우(CASE 1)가 이들을 고려하지 않는 경우(CASE 3)에 비해서 균열발생 범위가 큰 차이가 있음을 알 수 있으며, 이로인해 CASE 3와 같은 해석에서는 상부들의 파괴시 극한 내압능력도 과다하게 산정되는 결과를 초래하고 있다.

그림 13은 내압증가에 따른 상부들의 안쪽과 바깥쪽 부근의 최대응력이 발생하는 지점에서의 meridional 철근의 응력으로서, CASE 2의 경우가 CASE 1의 경우보다 철근이 조기에 항복함을 보여주고 있으며, CASE 3의 경우에는 실제보다 철근의 발생응력이 상당히 작았음을 알 수 있다. 그림 14는 내압증가에 따른 상부들 바깥쪽 원환철근의 응력으로서 단면적변화에 따른 응력차이는 보이지 않으나, 정착하중의 작용방향을 고려하지 않는 경우(CASE 3)는 원환철근의 응력이 낮게 나타나는 것을 알 수 있다.

## 6 결론

본 연구에서는 원전 격납구조물의 원형 기초슬래브나 부분 구형인 돔 구조의 정점부에서 반경 반향으로 변화되는 강재량을 모델할 수 있는 기법을 개발하였으며, 이를 이용한 극한 내압해석을 수행하여, 기존의 모델 방법에 의한 해석결과와 비교하였다. 본 연구에서 유도된 단면적 변화식과 기존 방법에 의해서 CANDU형 원전 격납구조물의 기초슬래브와 상부들에 배근된 텐던의 단면적을 산정하면 기존 방법에 의한 텐던의 단면적이 중심부에서는 과다하고, 바깥면에서는 과소하게 평가되는 결과를 초래하고 있다. 또한, 기존 방법에서는 텐던의 축대칭모델로 인해서 발생하는 정착하중의 작용방향을 고려하지 못함으로 인해 정착하중이 과다하게 산정되는 것으로 나타났다.

본 연구에서 제안된 텐던 모델방법과 기존 방법에 의해서 격납구조물에 대한 극한 내압해석을 수행한 결과, 극한 내압하중 작용시 상부들의 균열거동이 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 철근 및 텐던의 응력도 실제 단면적을 고려한 경우가 조기항복에 가까워지는 것으로 나타났다. 따라서, 원형 및 부분 구형의 형상을 갖는 구조물을 축대칭으로 모델하는 경우에는 이 부분에 배근된 강재량을 합리적으로 고려함으로써, 보다 정확한 구조물의 비선형거동을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Sharma, S., Wang, Y.K. and Reich, M.(1985). "Ultimate pressure capacity of reinforced and prestressed concrete containments." Report No. NUREG/CR-4149, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., BNL.
2. Shunmugavel, P. and Gurbuz, O.(1987). "An evaluation of structural failure modes for prestressed concrete containments." Nuclear Engineering and Design 104, North-Holland. Amsterdam, pp.349-355.
3. ADINA R & D, Inc.(1995). "Theory and Modeling Guide", Report ARD 95-8, February 1995.

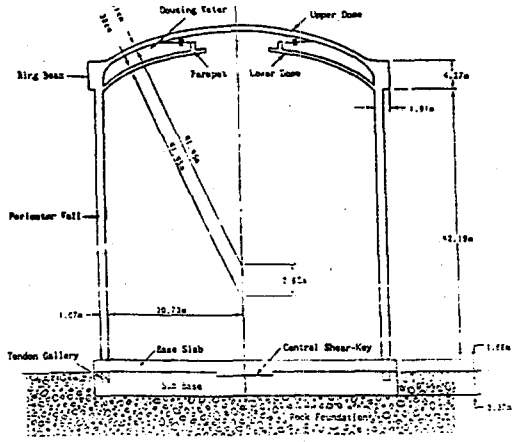


그림 1. CANC형 원천 적남구조물의 형상

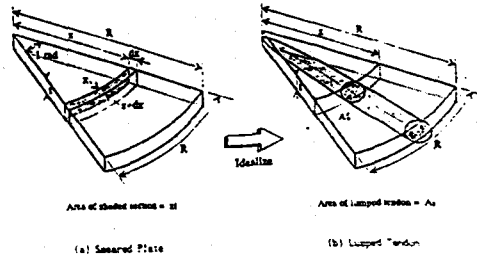


그림 4. 기조슬라브 원천 단면의 이상화

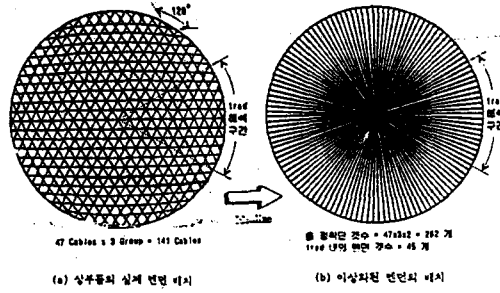


그림 5. 상부돔에 배치된 현면의 이상화

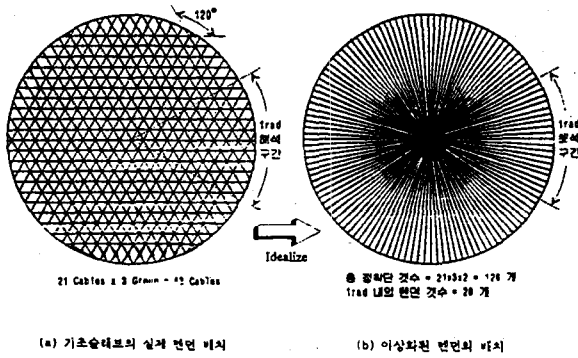


그림 2. 기조슬라브에 배치된 현면의 이상화

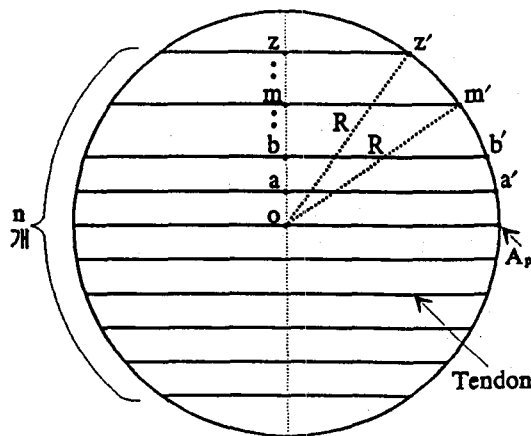


그림 3. 3방향 현면중 1방향 현면의 배치형상

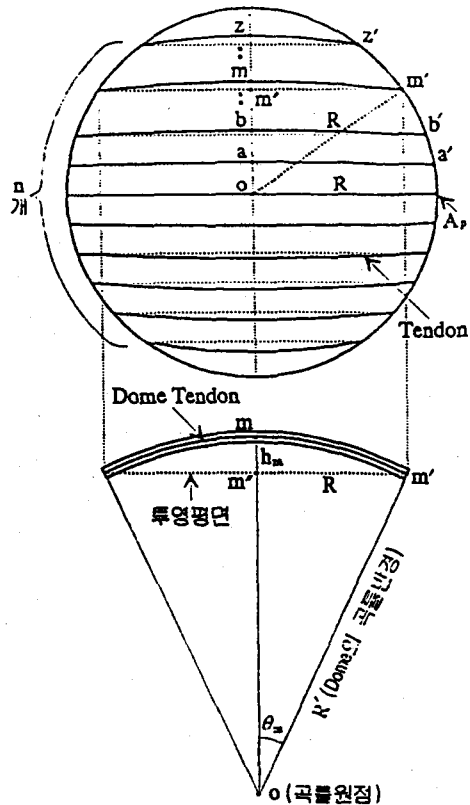


그림 6. 상부돔 현면중 1방향 현면의 배치형상

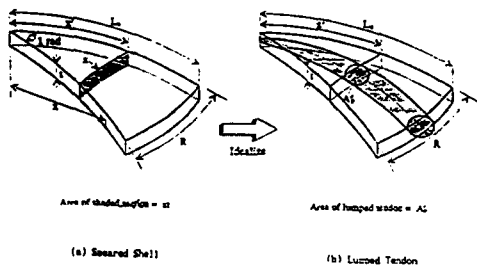


그림 7 상부등 변형 단면의 이상화

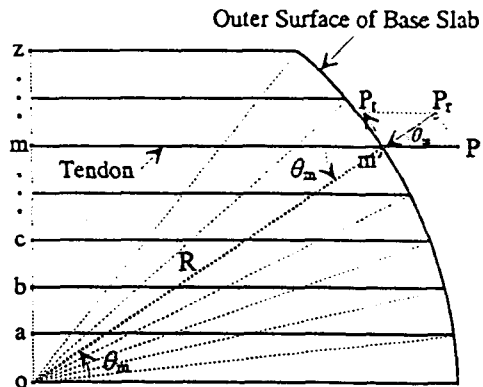


그림 10. 정착이음의 분해

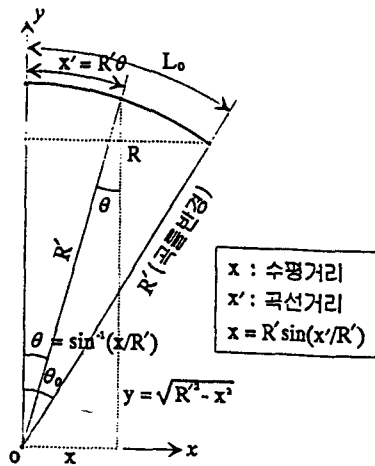


그림 8 수평거리와 곡선거리와의 관계

P : Prestress Force  
 P<sub>r</sub> : Radial Prestress Force  
 P<sub>t</sub> : Tangential Prestress Force

Distribution of Radial Prestress Force

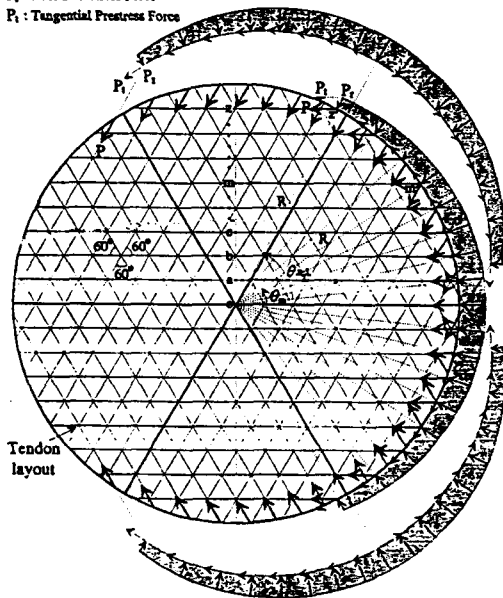


그림 9. 3방향 이차 변형의 양상면에서 정착이음의 분포형상

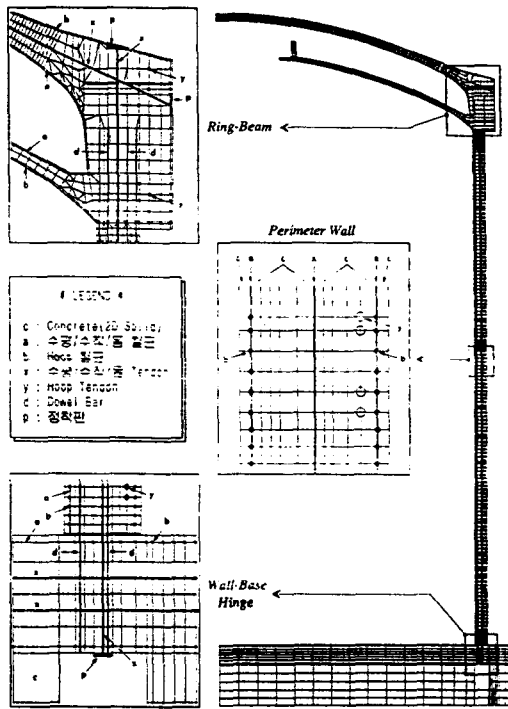


그림 11. 수반교스프링의 형상

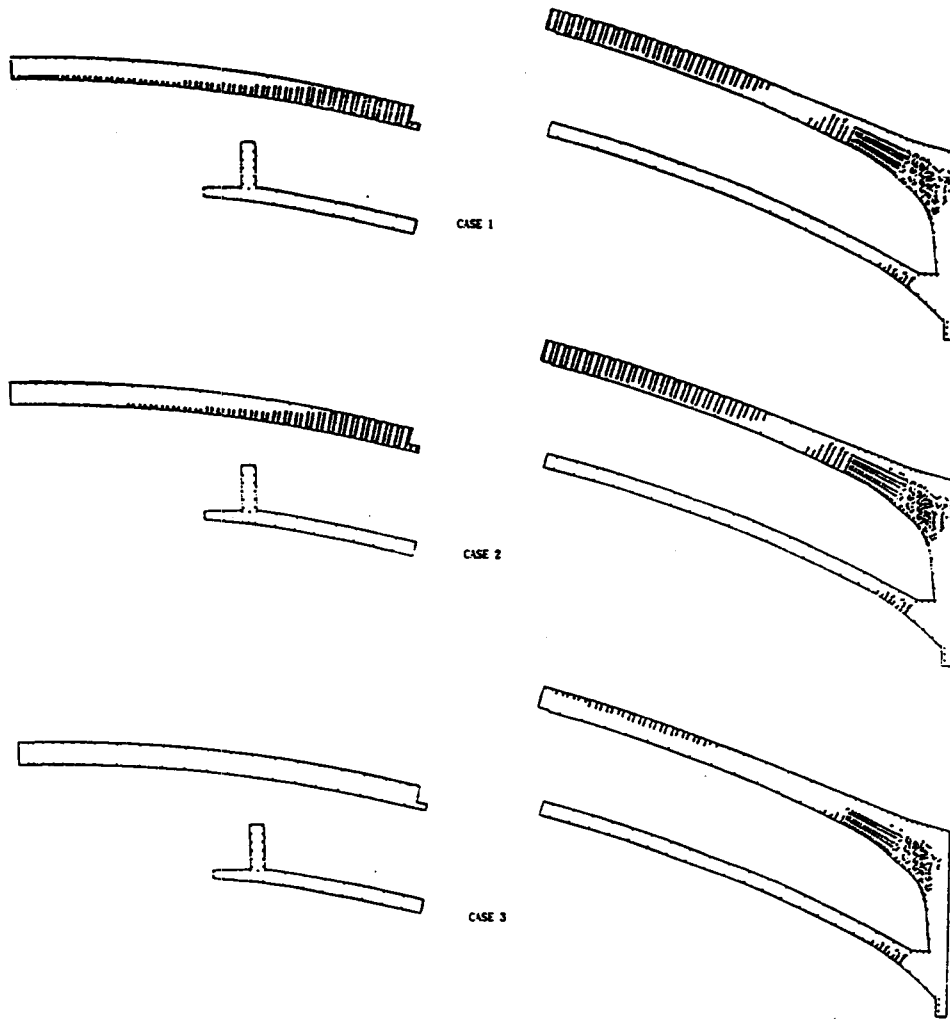


그림 12 상부돔에 발생한 균열상상

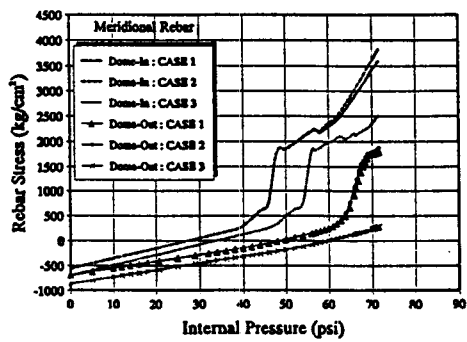


그림 13. 내압용기에 따른 상부돔 meridional 철근의 응력증가

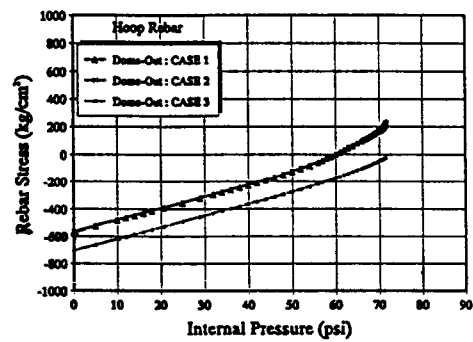


그림 14. 내압용기에 따른 상부돔 hoop 철근의 응력증가