

‘95 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

축대칭 PC탱크의 유한요소 해석

이이환, 김동인
한국전력기술주식회사

요 약

이 논문의 목적은 축대칭 프리스트레스트 콘크리트 탱크의 시간의존성 유한요소해석법을 제안하는 것이다.

오늘날 PC구조물은 교량, 포장판, 해상구조물, 원자로 격납구조물, 대규모 액체저장용 탱크 등 여러 형태의 구조물에서 그 사용 예를 쉽게 찾아볼 수 있다. 특히 본 논문에서 고려하고자 하는 압력용기나 액체 저장용 탱크의 경우 유체압력등의 내부압력에의해 발생하는 균열은 프리스트레스트를 도입함으로써 매우 효과적으로 제어할 수 있기 때문에 상당히 유리한 구조형식이 된다. 그러나 이러한 구조물의 해석과 설계에 있어서 균열의 예측과 더불어 콘크리트의 크리이프, 건조수축 및 PC강재의 리락세이션 등과 같은 시간 의존성 변형으로 인한 프리스트레스트의 손실, 여러 단계의 긴장력을 도입함으로써 발생하는 순간변형인 탄성단축및 이로인한 긴장력 감소 등을 정확히 계산하는 일은 매우 복잡하고 어려운일이다.

본 논문에서는 크리이프, 건조수축 및 리락세이션 등과 같은 시간의존성 변형과 순차적으로 다 단계의 프리스트레스트 도입으로 인한 순간변형 및 탄성단축의 영향을 고려한 축대칭 PC 탱크 구조물의 시간에따른 거동 및 긴장력의 변화를 유한요소법을 적용하여 해석할 수 있는 해법체계를 정리하고 이를 전산 프로그램화 하여, 축대칭 PC탱크 구조물의 시간 의존성 거동에 대한 보다 정밀한 해석을 수행 하였다.

1. 서 론

일반적으로 축대칭 셸 구조는 평면곡선을 동일평면내에 있는 회전축 주위로 회전시켜 얻어지는 회전곡면을 중앙면으로 하는 곡면 판구조로 정의하고있다. 축대칭 셸의 역학적인 특성은 응력과 변형률이 두께방향으로 선형분포한다고 가정하는 것은 평판과 동일하지만 외력을 지지하는 방식에 있어서 횡방향하중이 작용할때 휨모멘트와 전단력 등으로 그 외력을 지지하는 평판과 주로 막응력에의해 외력을 지지하는 축대칭 셸과는 서로 다르다. 그러나 원형탱크의 측벽과같이 기초에 의하여 반경방향의 변형이 구속되어있을 경우 경계면에 발생하는 휨응력과 전단응력이 교란되기 때문에 막응력 이론만으로는 정당한 해석이 어렵다.

셸 구조에대한 지배미분방정식은 형상, 외력의 작용상태, 경계조건 등이 복잡해질 때는 사실상의 정확해를 구할 수 없게된다. 따라서 본 연구에서는 그 지배미분방정식을 유한요소법의 근사해로 해석하였다.

2. 유한요소의 정식화

프리스트레스드 콘크리트 구조물의 경우 철근과 PC 강재는 균질재료로써 그 특성을 정의하기가 용이한 반면, 콘크리트는 시멘트, 모래, 그리고 골재 등으로 구성된 복합재료이기 때문에 그 특성들을 쉽게 정의하기가 어렵고, 단지 통계학적인 바탕위에서 거시적으로 그것의 평균적인 특성으로 정의된 균질재료로써 간주하고 있다¹⁾.

액체저장용 탱크, 압력용기 그리고 원자로 격납건물과 같은 구조물의 경우, 사용하중하에서 균열이 생기면 사용성에 커다란 손상을 입게 된다^{2) 3)}. 따라서, 본 연구에서는 구조물에 발생하는 응력의 크기가 허용응력을 넘지 않는다고 보고 각 재료의 응력-변형률 관계를 철근은 선형탄성으로, 긴장재와 콘크리트는 점탄성으로 가정한다.

본 논문에서 고려하는 PC 탱크의 상부구조는 2 차원 8 절점 축대칭 환 요소로 이상화된 콘크리트, 응력의 분배가 용이하도록 하기 위하여 배치된 연직방향철근 및 원주방향철근으로 이루어져 있다. 원주방향 인장력(hoop tension) 을 받는 원주방향의 철근은 점요소로, 연직방향의 휨 모멘트에 의해 발생하는 축력만을 받는 연직방향철근은 트러스요소로 각각 이상화 되며, 이들 각각의 강성행렬은 직접 중첩되어서 전체강성행렬을 구성하게 된다⁴⁾.

3. 유효 프리스트레스의 계산

프리스트레스의 손실을 일으키는 주요 원인들은 콘크리트의 건조수축 및 크리프 와 같은 시간적손실과, PC 강재와 쉬스 사이의 마찰, 콘크리트의 탄성변형 등에 의한 즉시 손실이 있다.

ACI Committee 209⁵⁾ 는 콘크리트의 건조수축과 크리프로 인한 손실의 계산을 위한 식들을 제안하고 있으며, Magura, Sozen, Siess⁶⁾ 등은 많은 실험을 통해서 긴장재의 리락세이션으로 인한 손실을 계산하는 식을 제안하였는데, 본 연구에서는 이 식들을 사용하였다. 포스터텐셔닝(post-tensioning) 방식에서 긴장횟수가 두 번 이상인 경우에는 콘크리트의 탄성변형으로 인한 손실이 발생하는데 이것은 긴장재가 있는 지점에서의 콘크리트 변형들에 의해 계산되어 질 수 있다. PC 강재와 쉬스사이의 마찰에 의한 손실과 정착장치의 활동에 의한 손실은 위치에 따라 달라지므로 이것을 고려하게 되면 축대칭성을 상실하게 되어 문제가 복잡해진다. 따라서, 본 연구에서는 이들을 미리 계산하여 평균적인 값으로 취급하였다.

위에서 설명한 프리스트레스의 손실을 계산하기 위하여 고려되는 시간영역을 임의의 시간간격을 갖는 N 개의 구간으로 분할한다. PC 강재에 도입된 긴장력은 등가의 작용외력으로 환산되고, 앞에서 설명된 비역학적인 변형률항들은 등가절점력으로 환산된다. 따라서, 임의시간 t_{i-1} 에서 t_i 사이의 일반적인 계산과정은 다음과 같다.

- 1) 임의의 시간단계 t_{i-1} 에서 계산된 $\sigma_0(t_{i-1})$ 로부터 리락세이션에 의해 발생한 응력손실 증분 $\Delta\sigma_p^r(t_{i-1}, t_i)$ 를 계산한다.
- 2) 역학적인 변형률 $\epsilon^m(t_{i-1})$ 로부터 크리프 변형률 증분을 다음식으로 계산한다.

$$\Delta\epsilon_c^{nm}(t_{i-1}, t_i) = \phi(t_{i-1}, t_i) \epsilon^m(t_{i-1})$$
 여기서, $\phi(t_{i-1}, t_i)$ 는 크리프 계수이다.
- 3) 건조수축 변형률증분 $\Delta\epsilon_s^{nm}(t_{i-1}, t_i)$ 를 계산한다.
- 4) $\Delta\epsilon^{nm}(t_{i-1}, t_i) = \Delta\epsilon_c^{nm}(t_{i-1}, t_i) + \Delta\epsilon_s^{nm}(t_{i-1}, t_i)$ 를 계산한다.
- 5) 크리프 및 건조수축에 의해 발생한 응력손실 $\Delta\sigma_p^{nm}(t_{i-1}, t_i)$ 과 손실력 계산

5) 크리이프 및 건조수축에 의해 발생한 응력손실 $\Delta\sigma_p^{nm}(t_{i-1}, t_i)$ 과 손실력 계산

6) 비 역학적 변형률에 의한 등가절점력 계산

$$\Delta R^{nm}(t_{i-1}, t_i) = \int_V B^T D \Delta \epsilon^{nm}(t_{i-1}, t_i) dV$$

$\Delta R^{nm}(t_{i-1}, t_i)$: 비 역학적 변형률에 의한 등가절점력

7) 도입순서 j 번째 긴장재의 시간단계 t_i 에서의 긴장력은 다음식으로 계산된다.

$$P_j(t_i) = P_j(t_{i-1}) - \Delta P_j(t_{i-1}, t_i)$$

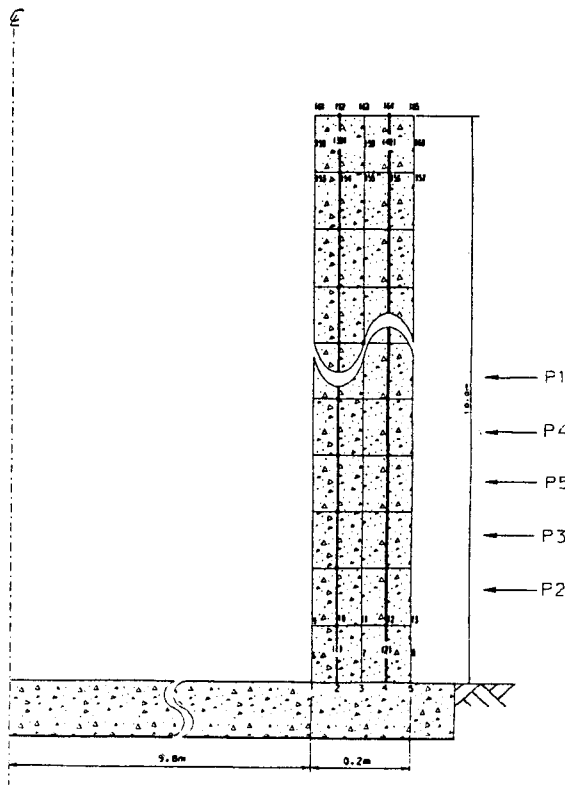
8) 7)의 경우 다음단계의 긴장력 도입으로 인한 순간변형을 일으키는 탄성단축의 영향을 고려 할 경우 $P_j(t_i)$ 는 또 한번의 순간적인 긴장력감소가 발생한다. 따라서 시간 t_i 에서의 j번째 긴장재의 실질적인 유효긴장력은 다음과 같다.

$$P_j(t_i)' = P_j(t_i) - \Delta P_j^e(t_i)$$

여기서 ; $\Delta P_j^e(t_i)$ 는 시간 t_i 에서의 탄성단축으로 인한 j번째 긴장재의 긴장력 감소량.

9) 1)에서 8)까지의 과정으로부터 계산된 긴장재의 인장력 $P_j(t_i)$ 는 다음 시간단계의 손실계산을 위한 등가의 작용외력하중이 되며, 이러한 과정을 고려하고자 하는 임의의 시간 구간까지 반복하여 계산한다.

4. 예제 해석



측벽의 하단이 저판에 고정된 PC 탱크의 유한요소해석모델이 그림1.에 나타나 있다. 긴장재의 위치는 임의로 선정되었고, 긴장 순서는 침자의 순서와 같이 도입되며 (표1. 참조), 내압은 없는 것으로 가정한다. 프리스트레스의 도입에 따른 측벽의 변위, 긴장재가 있는 위치에서의 시간에 따른 변위 그리고 각 긴장재의 시간에 따른 인장력의 변화를 표시한 것이 각각 그림2, 그림3, 그림4 에 주어져 있다.

표 1. PC 탱크에 도입된 긴장력

* 여기서 시간은 Conc.타설후경과시간.

긴장순서	도입절점	긴장력	시간
1	205번	50 t	30일 후
2	45번	50 t	31일 후
3	85번	50 t	32일 후
4	165번	50 t	33일 후
5	125번	50 t	34일 후

그림 1. PC 탱크 구조의 해석 모델

(1) 콘크리트

$$E_0 = 2.1 \times 10^6 \text{ t/m}^2$$

$$\nu = 0.17$$

$$\sigma_{ck} = 3,500 \text{ t/m}^2$$

(2) 철근

$$E_s = 2.04 \times 10^7 \text{ t/m}^2$$

$$A_s = 5.07 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ (D-25)}$$

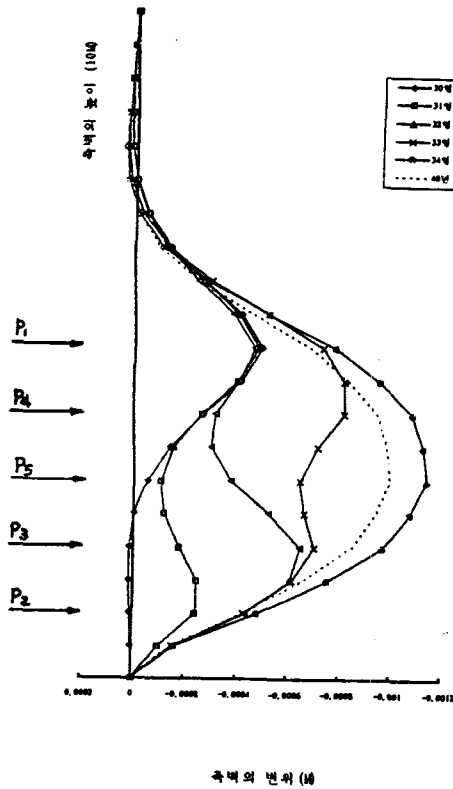


그림 2. PC탱크 측벽 중립면의 변위

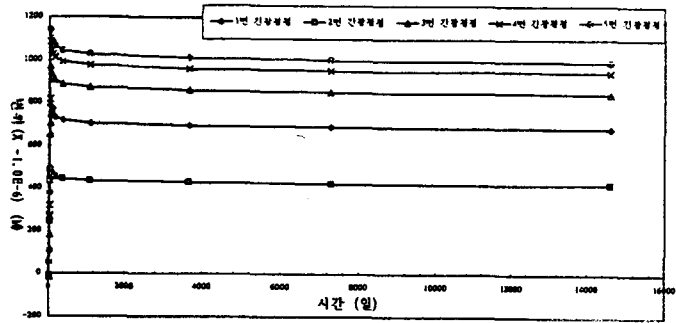


그림 3. 긴장절점의 시간에 따른 변위변화

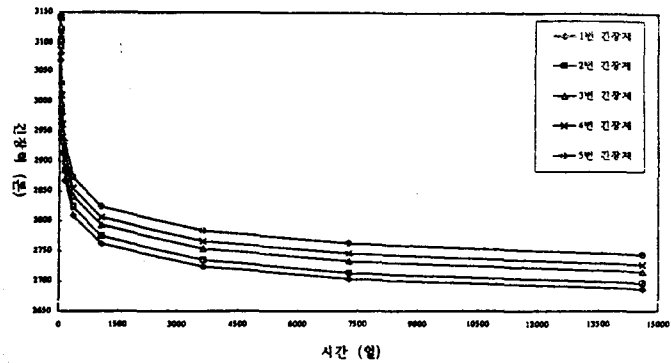


그림 4. 각 긴장재의 긴장력 변화

그림5. 는 대표적으로 1번긴장재를 선택하여 크리이프(Creep), 건조수축(Shrinkage) 및 리락세이션(Relaxation) 으로 인한 긴장력 감소량을 시간에 따른 누계값으로 나타내고 있으며 2번에서 5번까지의 나머지 긴장재들도 역시 같은 경향으로 긴장력이 감소한다. 그림6. 은 그림5. 에서 보는 감소 경향에 따라서 각 긴장재가 시간에 따라 그 긴장력이 감소되는 모습을 보여주고 있다. 그림7. 은 긴장력이 도입된 각각의 절점에서 긴장력 변화로 인한 시간에 따른 변위변화를 보여주고 있다.

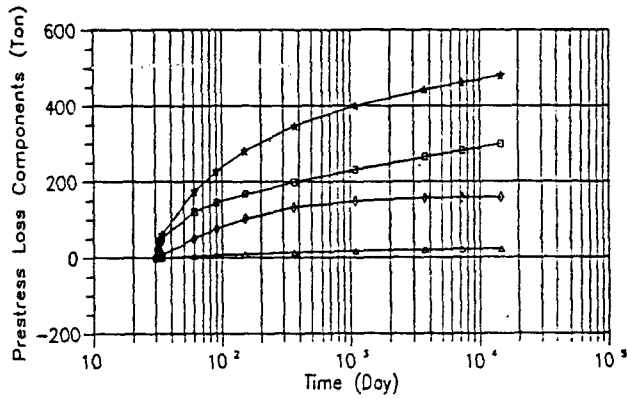


그림5. 시간에 따른 긴장력 손실
누계 (1번 긴장재)

- ① Creep로 인한 손실누계
- ② Shrinkage로 인한 손실누계
- ③ Relaxation로 인한 손실누계
- ④ ①+②+③ 합계

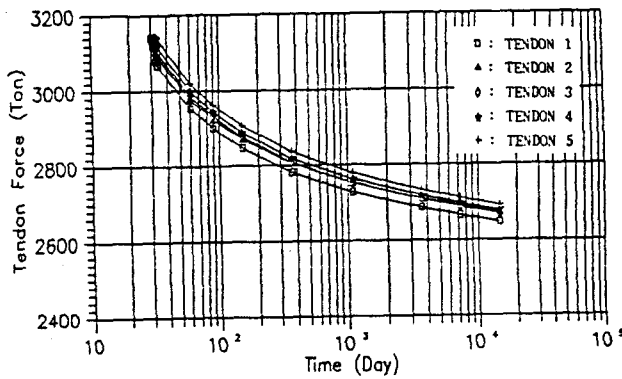


그림6. 각 긴장재의 시간에 따른
긴장력 변화.

여기서,

- Noad 85 : Tendon 1
- Noad 69 : Tendon 4
- Noad 53 : Tendon 5
- Noad 37 : Tendon 3
- Noad 21 : Tendon 2

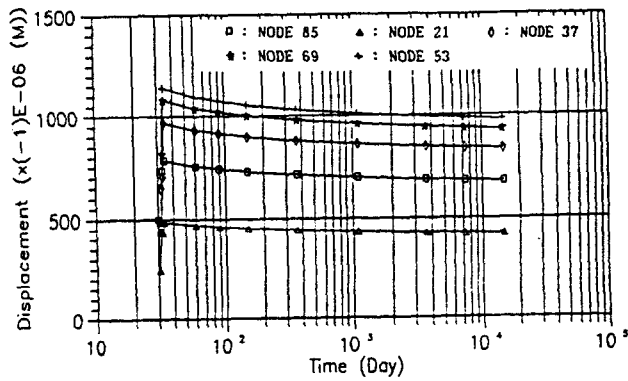


그림7. 각 긴장절점에서의 긴장
력 손실로 인한 시간에
따른 변위변화

5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 축대칭 프리스트레스트 콘크리트 탱크의 크리프, 건조수축, 리락세이션과 같은 시간의존성 문제와 다단계 프리스트레스 도입에 따른 순간변형인 탄성단축의 영향을 고려한 해석 체계를 정리하여 이러한 구조물의 시간에 따른 거동을 비교적 세밀하게 파악할 수 있게 되었으며, 예제해석에 대한 결론은 다음과 같다. - 985 -

- 1) 프리스트레스의 도입에 따른 측벽부의 반경방향 변위는 그림2. 에서 보는 것과 같다. 이들 프리스트레스를 동시에 도입할 때의 탄성변형은 일정한 시간 간격을 두고 순차적으로 도입한 프리스트레스에 의한 변위 보다 크다는 것을 알 수 있었으며 또한 그 변위차이 만큼 이미 프리스트레스의 손실이 발생되었다는 사실을 알 수 있었다.
- 2) 프리스트레스가 도입된 절점 변위의 변화는 그림3. 에서 보는 바와 같이 초기의 긴장력을 도입하는 동안에는 큰 변화를 보인 후 더이상의 긴장력의 도입이 없으면 일정한 시간이 지난 뒤에는 사용 수명 동안 변화의 정도가 미소함을 보이고 있다.
- 3) 긴장력의 손실은 사용 수명에 비해 상대적으로 짧은 기간 동안에 대부분이 일어나며 따라서 유효 긴장력은 그림4. 에서 보는 것처럼 초기에 급격히 감소하다가 어느 정도 시간이 지나면서 사용 수명 동안 완만하게 감소한다.
- 4) 시간이 경과함에 따라 변위가 감소하는 것은 긴장력 상실로 인한 복원변위가 크리이프, 건조수축에 의한 변위보다 작기 때문이다.
- 5) "4. 예제해석"의 주어진 조건하에서 5단계의 프리스트레스 도입으로 인한 순간변형의 영향을 고려할 때 탄성단축으로 인한 긴장력의 감소량과 대상기간(40년)동안 발생한 총 손실 긴장력은 아래 표2. 과 같다.

표 2. 총긴장력 손실량과 탄성단축으로 인한 긴장력 손실량

긴장재번호 구분	1	2	3	4	5
총 손실 긴장력(톤)	480.21	459.57	458.55	452.35	449.20
탄성단축손실 긴장력(톤)	12.51	9.46	13.10	10.98	0.
탄성단축 손실률(%)	2.6	2.06	2.86	2.43	0.

참 고 문 헌

1. KANG, Y. J. , " Nonlinear Geometric, Material and Time Dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Frames ". Univ. of California, Berkely. 1977.
2. 이 진 우, " 크리이프, 건조수축, 리락세이션을 고려한 축대칭 프리스트레스트 셸의 유한요소 해석" 석사학위 논문, 부산대학교, 1988.
3. Lin, T. Y. and Burns, N. H. , " Design of Prestressed Concrete Structures" 3rd Ed., John Wiley & Sons, 1981.
4. 정 창 화, " 철근요소를 고려한 축대칭 콘크리트 셸의 유한요소해석", 석사학위논문, 부산대학교, 1988.
5. ACI COMMITTEE 209, " Prediction of Creep, shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures ", ACI 209 R-82.
6. Magura, D. D. ,Sozen, M. A. and Siess, C. P., " A Study of Stress Relaxation in Prestressing Reinforcement". PCI, 9. 2, April , 1964