

PSC 보의 긴장력 평가를 위한 유한요소해석

Finite Element Analysis for Prestressed Force Evaluation of PSC Beam

이 홍 표¹⁾ · 장 정 범²⁾ · 황 경 민³⁾ · 송 영 철⁴⁾

Lee, Hong-Pyo · Jang, Jung-Bum · Hwang, Kyeong-Min · Song, Young-Chul

요 약

이 논문에서는 부착식 텐던 격납건물의 유효긴장력 평가를 위해서 제작된 테스트 빔에 대한 고유진동수 해석을 수행하였고, 그 결과를 기술하였다. 제작된 테스트 빔은 원전 격납건물의 1/5 축소모형으로 설계하였고, 긴장력 수준을 5가지로 분류하여 실험에 의한 고유진동수와 SI(System Identification)기법을 위하여 모델링한 3차원 유한요소해석에 의한 고유진동수를 비교·분석하였다.

keywords : 격납건물, 유한요소해석, 고유진동수, 부착식 텐던

1. 서 론

원자력발전소 격납건물은 기능적인 측면에서 사고 발생시 방사능 물질의 외부 유출을 차폐하는 최후의 방벽 역할하고 있으며, 그 구조형태에 따라서 경수형과 중수형 격납건물로 구별될 수 있다. 중수형 격납건물의 포스트텐서닝 시스템은 부착식(bonded-type) 형태를 가지고 있기 때문에 건설 당시에 제작된 테스트 빔을 이용하여 가동 중 검사 시 간접적인 방법을 유효긴장력을 평가하고 있다. 월성 1호기의 경우 계속운전을 위하여 구조물 관점에서 시간제한 경년열화 분석을 수행해야 하는데, 이를 위한 평가 항목 중에서 부착식 텐던의 유효긴장력을 정량적으로 평가해야 한다.

이러한 맥락에서, 월성 1호기 벽체의 1/5축소 모델 테스트 빔을 제작하였고, SI기법을 이용하여 테스트 빔의 유효긴장력을 정량적으로 평가하기 위한 방법의 일환으로 3차원 유한요소 해석에 의하여 고유진동수를 평가하고 그 결과를 실험결과와 비교 분석 하였다.

2. 테스트 빔

대상 격납건물인 월성 1호기의 벽체 높이는 51.43m이고, 벽체 두께는 1.07m 이다. 제작된 1/5 축소모형 테스트 빔은 월성 1호기 벽체 부분을 모사하였고, 그림 1과 같이 총 6개의 시험체를 제작하였으며, 각 시험체의 크기는 길이 8.0m, 단면적 0.3m×0.3m 이다. 콘크리트의 압축강도는 35MPa이고, 한쪽 단부에 로드셀을 매설하여 도입된 긴장력을 측정하였다. 격납건물의 철근비를 준용하여 직경 16mm 철근 2개가 테스트 빔의 상부와 하부에 각각 배근되었고, 전단파괴를 방지하기 위하여 10mm 철근 60개를 스트립 형식으로 배근하였다. 그리고, 매립된

* 정희원 · 한국전력공사 전력연구원 선임보연구원 hplee@kepri.re.kr

** 정희원 · 한국전력공사 전력연구원 책임연구원 jbjang@kepri.re.kr

*** 한국전력공사 전력연구원 선임보연구원 hkm316@kepri.re.kr

**** 한국전력공사 전력연구원 수석(갑)연구원 ycsong@kepri.re.kr

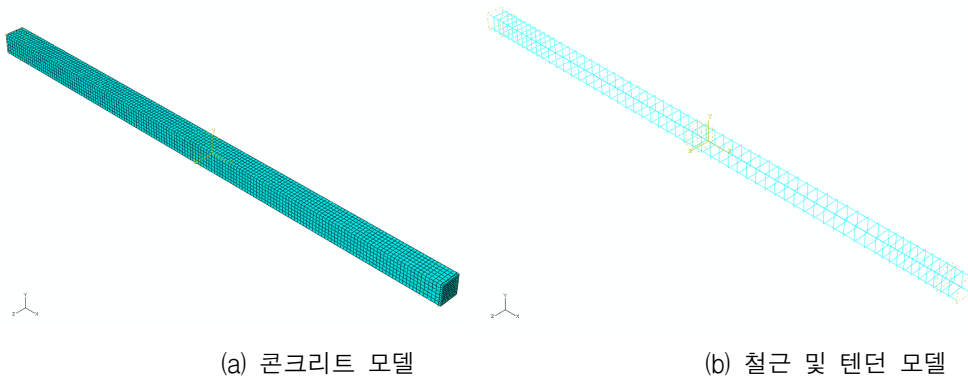
강연선은 VSL Type P를 사용하였고, 각각의 시험체에 동일하게 15.2mm 3개의 텐던을 사용하였다. 이들 시험체에 도입된 긴장력은 월성 1호기의 초기 긴장력을 기준으로 축소모델에 맞도록 0kN, 146kN, 264kN, 356kN, 465kN, 523kN 그리고 465kN의 힘으로 각각 긴장하였다.



그림 1 테스트 빔의 전경

3. 해석 모델 및 결과

그림 2에 도시한 바와 같이 고유진동수 측정을 위하여 ABAQUS Ver. 6.9를 이용하여 유한요소 해석모델을 구축하였다. 이때 콘크리트는 3차원 고체요소를 사용하였고, 철근과 텐던은 트러스 요소를 사용하였다.



(a) 콘크리트 모델

(b) 철근 및 텐던 모델

그림 2 3차원 유한요소 해석 모델

고유진동수 평가시 긴장력은 유효강성 개념으로 변환하여 입력자료로 활용하였다. 즉, 아래 식과 같이 이론적으로 균질한 보에 도입된 축방향력은 압축연화효과(compression softening effect)로 빔의 고유진동수 (Timoshenko, 1974)를 변화시킨다.

$$\omega_n^2 = -\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \frac{N}{m} + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^4 \frac{EI}{m} \quad (1)$$

여기서, n : 모드 수, L : 지간, N : 축방향력, m : 보의 단위길이 당 질량, E : 탄성계수, I : 보의 단면 2차 모멘트이다.

위 식을 유효강성(EI)항으로 변환하여 각각 시험체의 E값을 산정한 후 그 값을 해석에 반영하였다.

$$EI = \left(\frac{L}{n\pi}\right)^2 N + \left(\frac{L}{n\pi}\right)^4 m \omega_n^2 \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 각 시험체의 긴장력 수준에 따른 유효탄성계수를 계산하면 표 1과 같다.

표 1 테스트 빔의 유효탄성계수

유효탄성계수	Beam #1 (0kN)	Beam #2 (146kN)	Beam #3 (264kN)	Beam #4 (356kN)	Beam #5 (465kN)	Beam #6 (523kN)
E(MPa)	29,179	35,558	39,339	41,747	42,954	44,107

제작된 테스트 빔은 고유진동수의 변화를 분석하기 위하여 SIMO sweep test 및 Impact Hammer Test에 의하여 Experimental Modal Test가 수행되었다(이홍표 등, 2009). SIMO sweep test와 Impact Hammer Test 및 3차원 유한요소 해석에 의한 결과를 표 2에 나타내었다. 표 2 나타난 바와 같이 긴장력이 증가할수록 고유진동수 값도 점차적으로 증가함을 알 수 있었다. 따라서, 고유진동수 측정에 의하여 부착식 텐던의 긴장력 평가에 대한 타당성을 알 수 있었다.

표 2 실험 및 해석에 의한 고유진동수 비교

시험체 종류(긴장력)	SIMO sweep test	Impact Hammer Test	해석결과
Beam #1 (0kN)	7.567	7.513	7.642
Beam #2 (146kN)	8.19	8.216	8.420
Beam #3 (264kN)	8.50	8.539	8.612
Beam #4 (356kN)	8.67	8.724	9.102
Beam #5 (465kN)	8.69	8.697	9.202
Beam #6 (523kN)	8.76	8.794	9.367

4. 결론

이 논문에서는 월성 1호기와 같이 부착식 텐던 격납거물의 유효긴장력을 평가하기 위하여 5/1 축소모델 테스트

트 빔을 제작하였고, experimental modal test와 3차원 유한요소 해석에 의한 고유진동수를 비교 하였다. 부착식 텐던의 긴장력은 고유진동수 해석시 영향을 미치지 않기 때문에 유효탄성계수값으로 치환하여 반영하였고, 그 결과로부터 해석적인 방법으로 부착식 텐던의 유효긴장력이 예측가능함을 알 수 있었다. 향후 변위 계측 결과를 토대로 동일한 테스트 빔에 SI기법을 적용한 결과를 도출하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 원전기술 혁신사업으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사드립니다.

참고문헌

- Timoshenko, S., Young, D.H., Weaver, W.J.R. (1974) Vibration Problems in Engineering, Wiley.
- 이홍표, 장정범 (2009) PSC Beam의 긴장력 변화에 따른 Modal Test, 한전 전력연구원, TC.G01.P2009.0847.
- Simulia Inc. (2009) ABAQUS users manual ver. 6.9.