

부착식 텐던의 유효 긴장력 평가를 위한 최적의 매개변수 결정에 관한 연구

A Study on the Determination of the Optimal Parameter for the Evaluation of the Effective Prestress Force on the Bonded Tendon

장정범* · 이홍표** · 황경민*** · 송영철****

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

Abstract

The bonded tendon was adopted to the reactor building of some operating nuclear power plants in Korea and the assessment of the effective prestress force on the bonded tendon is being issued as an important pending problem for continuous operation beyond their design life. The sensitivity analysis of various parameters was carried out to evaluate the effective prestress force using the system identification technique and the optimal parameters were determined for SI technique in this study. The 1/5 scaled post-tensioned concrete beams with the bonded tendon type were manufactured and in order to investigate the relationship of the natural frequency and the displacement to the effective prestress force, impact test, SIMO sine sweep test and bending test using the optical fiber sensor and the compact displacement transducer were carried out. As a result of tests, both the natural frequency and the displacement show the good relationship with the effective prestress force and both parameters are available for the SI technique to estimate the effective prestress force.

Keywords : bonded tendon, effective prestress force, SI technique, natural frequency, displacement

요 지

국내 가동 중 일부 원전의 원자로건물에 부착식 텐던이 설치되어 있고, 부착식 텐던에 대한 유효 긴장력 평가는 이들 원전의 계속운전을 위한 주요 현안으로 부각되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 System Identification 기법을 이용한 부착식 텐던의 유효 긴장력 평가를 위하여, SI 기법에 유효한 주요 매개변수의 영향 평가를 수행하고 최적의 매개변수를 도출하였다. 본 연구를 위하여, 원자로건물 벽체의 1/5 축소모형 시험체를 제작하였고, 유효 긴장력과 고유진동수 및 변위와의 상관성을 분석하기 위하여 Impact test, SIMO sine sweep test 및 광섬유센서와 변위계에 의한 휨시험을 수행하였다. 시험결과, 고유진동수와 변위 모두 유효 긴장력과 좋은 상관성을 지니는 것으로 나타나, 이들 매개변수 모두 SI 기법의 입력자료로 활용되어 부착식 텐던의 유효 긴장력 예측이 가능한 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 부착식 텐던, 유효 긴장력, SI 기법, 고유진동수, 변위

1. 서 론

국내 가동 중 중수로 및 일부 경수로 원전의 원자로건물에 부착식 텐던이 설치되어 있고, 부착식 텐던에 대한 유효 긴장력 평가는 이들 원전의 계속운전을 위한 주요 현안으로 부각되고 있다. 부착식 텐던은 텐던을 둘러싸고 있는 쉬스관 내부를 시멘트 그라우트로 채우는 형식으로서 현재 월성 1, 2, 3, 4 호기와 울진 1, 2 호기가 부착식 텐던을 채택하고 있다(통상산업부 1994). 현재 이들 부착식 텐던의 유효 긴장력은 건설 당시 제작된 테스트 빔을 이용하여 가동 중 검

시 휨시험, 파괴시험 및 Lift-Off Test를 수행하여 간접적으로 평가되고 있다(한국수력원자력(주) 2006). 그러나, 이들 테스트 빔은 원자로건물에 설치된 부착식 텐던의 실제 응력 상태를 동일하게 표현할 수 없다는 간접적인 평가방법의 한계를 지니고 있으며, 특히 월성 1 호기의 경우 2012 년 계속운전을 위하여 시간제한 경년열화 분석이 수행되어야 하는데 이를 위한 평가항목 중 구조물과 관련하여 유일하게 부착식 텐던의 유효 긴장력을 평가하여야 한다. 따라서, 원자로건물에 설치된 실제 부착식 텐던을 대상으로 유효 긴장력을 정량적으로 평가할 수 있는 기술 개발이 시급한 실정

*한국전력공사 전력연구원 책임연구원 (E-mail : jbjang@kepri.re.kr)

**정희원 · 교신저자 · 한국전력공사 전력연구원 선임보안연구원 (E-mail : hplee@kepri.re.kr)

***정희원 · 한국전력공사 전력연구원 선임보안연구원 (E-mail : hkm316@kepri.re.kr)

****한국전력공사 전력연구원 수석연구원 (E-mail : ycsong@kepri.re.kr)

이다.

부착식 또는 비부착식 텐던에 도입된 유효 긴장력을 평가하기 위하여 초음파 탐사, Pulsed eddy current 등 많은 비파괴 기술의 적용방안이 평가되었으나, 콘크리트 및 그라우팅 재료에 의한 신호 감쇠와 이미 구조물내에 매입된 텐던 내 센서 설치 상의 어려움 등으로 인하여 기존 비파괴 기술은 많은 문제점을 지니는 것으로 나타났다(NCHRP 1999). 그래서, 유효 긴장력의 변화에 따른 구조물의 동특성, 변형률 또는 변위 등의 변화를 이용한 System Identification(SI) 기법을 통하여 유효 긴장력을 예측하거나, 프리스트레싱 시스템의 긴장력 손실을 분석하는 기술이 개발되고 있다(Abraham 등 1995; Hamed 등 2006; Kim 등 2003; Law 등 2005; Lu 등 2006; Maaskant 등 1997; Saiidi 등 1994; Unger 등 2006).

따라서, 본 연구에서는 기존의 간접적인 부착식 텐던의 유효 긴장력 평가 방법을 개선하기 위하여 SI 기법을 이용한 부착식 텐던의 유효 긴장력 평가기술을 개발하고 있으며, 그 연구의 첫 번째 단계로서 유효 긴장력 평가 시 SI 기법에 유효한 주요 매개변수의 영향 평가를 수행하고 최적의 매개변수를 도출하였다.

2. 축소모형시험

2.1 축소모형 시험체

중수로 원전의 원자로건물에 설치된 부착식 텐던의 유효 긴장력에 의하여 원자로건물의 거동이 크게 변화하는 정적·동적 특성을 검토한 결과, 원자로건물의 고유진동수와 변위가 가장 대표적인 특성으로 나타났다. 즉, 원자로건물에 설치된 부착식 텐던의 유효 긴장력의 크기에 따라 원자로건물의 고유진동수와 변위가 가장 크게 변화할 것으로 검토되었다. 따라서, 본 연구에서는 이들 매개변수를 대상으로 유효 긴장력과의 상관성을 분석하였다.

부착식 텐던의 유효 긴장력과 주요 매개변수와의 상관성을 분석하기 위하여 원자력 발전소 내 원자로건물 수직 벽체와 포스트텐서닝 시스템을 모사한 부착식 텐던 형식의 1/5 축소 모형 시험체를 제작하였다. 축소모형 시험체의 기준이 되는 원자로건물은 원통형 벽체의 높이가 51.28 m이고 벽체 두께는 1.07 m 이다. 그림 1과 같이 총 6개의 축소모형 시험체가 제작되었으며, 이들 시험체의 길이는 8.0 m 이고 단면적은 0.09(0.3×0.3 m) m² 이다. 축소모형 시험체의 콘크리트 압축강도는 35.0 MPa 이고, 시험체에 도입되는 유효 긴장력을 측정하기 위하여 그림 1에서 보는 바와 같이 시험체 한 끝단에 로드셀을 설치하였다. 또한, 시험체에는 직경 16



그림 1. 축소모형 시험체

mm 철근 2 개가 단면 상, 하부에 각각 종방향으로 설치되었고, 강연선을 둘러싸고 그라우팅 재료가 주입되는 쉬스관의 위치 고정을 위하여 직경 10 mm 철근 60 개가 스테럽 형식으로 설치되었다. 강연선의 인장 정착구로서는 VSL Type P 가 사용되었고, 긴장력 도입을 위하여 직경 15.2 mm의 강연선 3 개가 사용되었다. 이들 축소모형 시험체에 도입된 최종 유효 긴장력은 실제 원자로건물의 부착식 텐던에 도입된 초기 긴장력을 기준으로 1/5 축소모형 시험체에 맞게 0%, 25%, 50%, 75%, 100% 및 최대값의 비율로 긴장력을 도입하였다. 그 결과, 일단 긴장방식으로 각 축소모형 시험체에 도입된 최종 유효 긴장력은 0 kN, 146 kN, 264 kN, 356 kN, 465 kN 및 523 kN 이며, 465 kN 이 실제 원자로건물의 부착식 텐던에 도입된 초기 긴장력을 의미한다.

2.2 시험방법

부착식 텐던의 유효 긴장력과 축소모형 시험체의 고유진동수 및 변위와의 상관성을 분석하기 위하여 Modal test 와 휨시험을 수행하였다. 고유진동수를 위하여 Modal test 로서 Impact test와 SIMO(Single Input Multiple Output) sine sweep test가 수행되었고, 변위를 위하여 광섬유센서(OFS, Optical Fiber Sensor)와 변위계(CDP, Compact Displacement Transducer)를 이용한 휨시험이 수행되었다.

2.2.1 Modal test

유효 긴장력과 고유진동수와의 상관성을 분석하기 위하여 Modal test가 수행되었다. Modal test로서 Impact test 와 SIMO sine sweep test 가 수행되었고, 시험 중 발생하는 가속도 응답신호를 계측하기 위하여 그림 2와 같이 Piezo-electrical 형식의 가속도계 9 개를 시험체에 설치하였다.

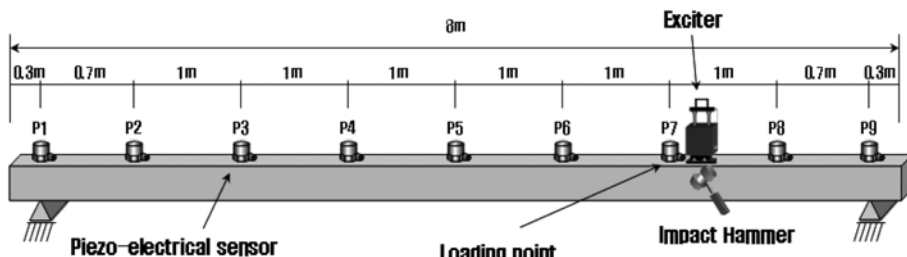
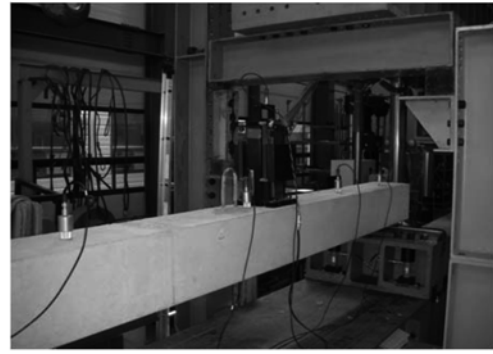


그림 2. Modal test



(a) Impact test



(b) SIMO sine sweep test

그림 3. Impact test 와 SIMO sine sweep test

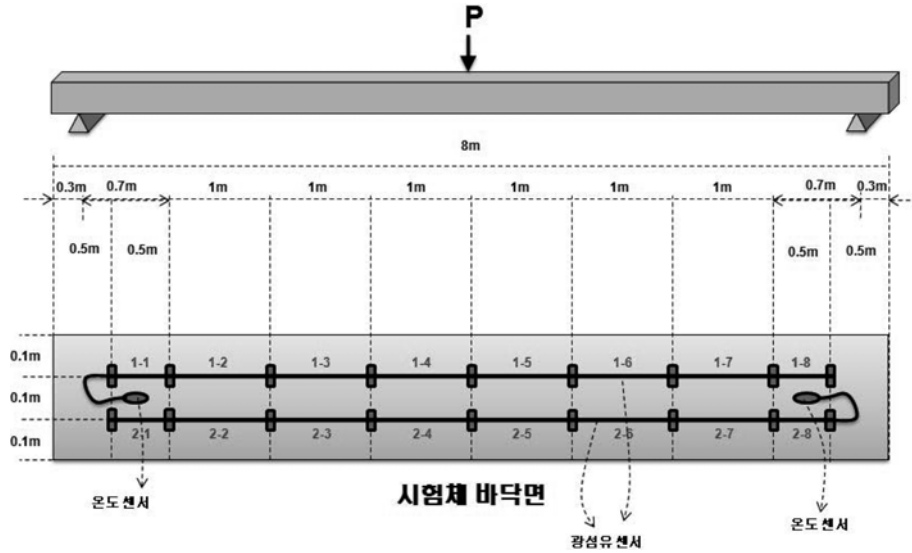


그림 4. 광섬유센서를 이용한 휨시험



(a) 광섬유 센서



(b) 하중 가력장치

그림 5. 광섬유센서와 하중 가력장치

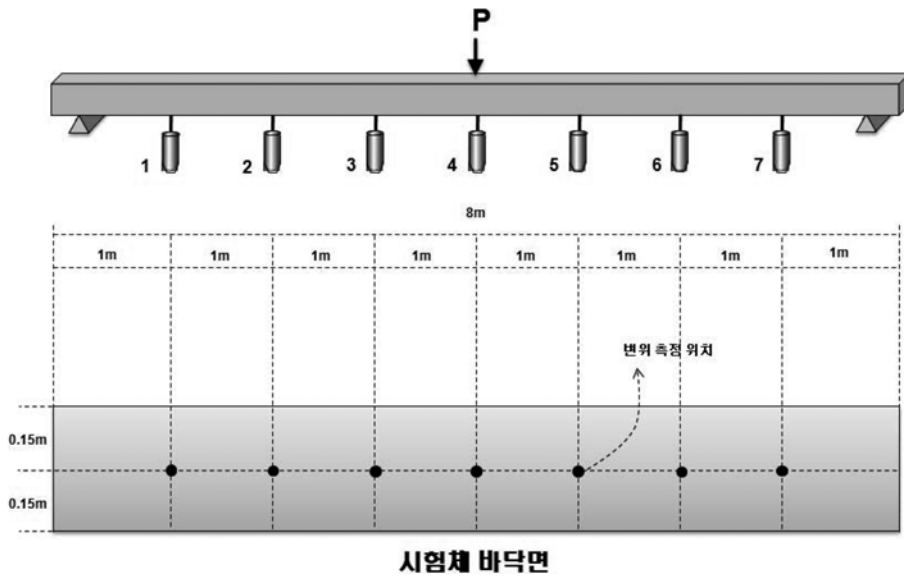
다양한 모드형상을 얻기 위하여 사전에 수행한 모드해석 결과를 근거로 그림 2의 P7 지점에 Impact hammer와 가진기를 이용하여 하중을 가진하였고, Impact test는 각 시험체 당 5회 시험을 수행하고 그것을 평균한 Frequency response function을 사용하였다. Impact test의 측정 주파수 범위는 0~256 Hz이며, 충격하중의 최대값은 약 2,500 N이다. 또한, 가진기는 2~150 Hz의 주파수 범위를 20 N으로 가진하였으며, 이때 가진 주파수 증가율은 0.05 Hz/s 이다.

2.2.2 광섬유센서에 의한 휨시험

유효 긴장력과 변위의 상관성을 분석하기 위하여 광섬유센

서를 축소모형 시험체에 설치하고 휨시험을 수행하였다. 본 시험에서 변위 계측센서로서 광섬유센서를 적용한 이유는 광섬유센서가 전자기적 노이즈가 없고, 전자식 센서에 비하여 정확도 및 신호 안정성이 우수하며, 소형 경량으로 구조물에 결함 없이 설치 가능하기 때문이다. 또한, 전력연구원에서 수행한 연구결과에 의하면 광섬유센서를 이용하여 원전 원자로건물의 건전성 평가 시 신뢰성, 경제성 및 시공성이 확보되는 것으로 나타났다(산업자원부 2005).

본 시험에서 사용한 광섬유센서는 FBG(Fiber Bragg Grating)를 이용하여 제작되었으며, 광섬유 센서의 주요 특성 으로서는 중심파장이 1,550 nm이고 FBG 센서의 길이는



시험체 바닥면

그림 6. 변위계를 이용한 휨시험

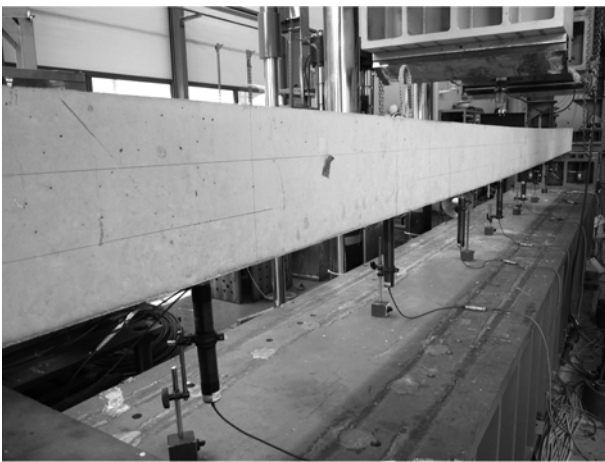


그림 7. 변위계

20 mm 이다. 광섬유센서에 의하여 계측되는 변위의 신뢰성을 분석하기 위하여 그림 4와 같이 2 set의 광섬유센서를 시험체에 평행하게 설치하였으며, 또한 온도보정을 위하여 양단에 온도센서를 설치하였다. 하중은 시험체 중앙부에 재하하였으며, 그 크기는 9.8 kN~24.5 kN 이다. 그림 5는 시험체에 설치된 광섬유 센서와 하중 가력장치를 보여주고 있다.

2.2.3 변위계에 의한 휨시험

유효 긴장력과 변위의 상관성을 분석하기 위하여 그림 6과 같이 7 개의 변위계를 축소모형 시험체 하부에 설치하고 휨시험을 수행하였다. 이때 사용된 변위계 형식은 CDP-50과 100이며, 하중 재하위치 및 크기는 광섬유센서에 의한 휨시험과 동일하다. 그림 7은 시험체에 설치된 변위계를 보여주고 있다.

3. 시험결과

3.1 Modal test

그림 8은 Impact test 에서 나타난 충격신호를 보여주는 것으로 본 연구의 관심 주파수 구간인 최대 200 Hz 까지

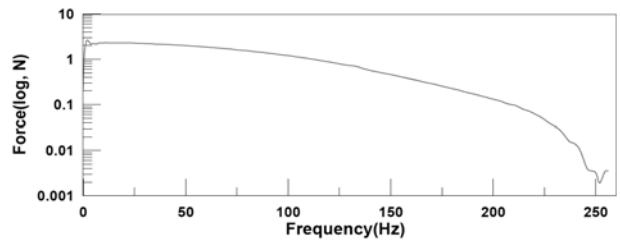


그림 8. Impact test의 충격신호

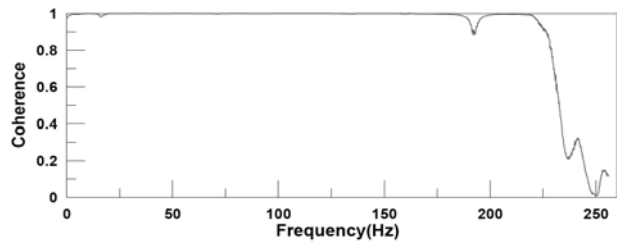


그림 9. 입력신호와 응답신호의 상관성 (Coherence)

신호가 잘 발생하는 것으로 나타났으며, 특히 그림 9에서 알 수 있는 바와 같이 Coherence가 관심 주파수 구간에서 거의 1.0으로 입력신호와 응답신호가 거의 선형관계를 보이며 매우 상관성이 높은 것으로 나타났다.

그림 10은 Impact test 의 결과로서, 6 개의 축소모형 시험체에서 발생한 가속도 응답신호를 분석한 Frequency response function 을 보여주고 있으며, 모달변수 추출기법으로는 Total weighted least square complex frequency domain 방법을 적용하였다. 표 1은 유효 긴장력에 따른 각 모드에서의 고유진동수를 보여주는 것으로 유효 긴장력이 증가할수록 고유진동수도 그에 비례하여 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

SIMO sine sweep test 에서도 Impact test와 유사한 가속도 응답신호와 모드형상이 나타났으며, 유효 긴장력이 증가할수록 고유진동수도 그에 비례하여 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 표 2는 SIMO sine sweep test 에 의한 유효 긴장력에 따른 각 모드에서의 고유진동수를 보여주고 있다.

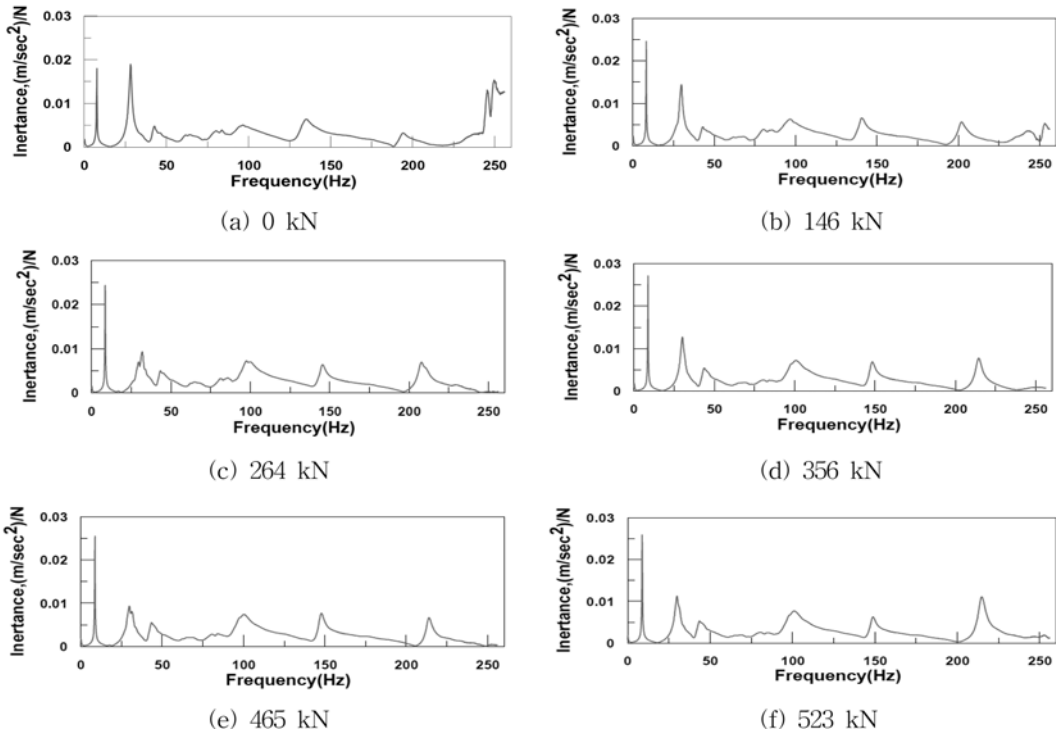


그림 10. Impact test에 의한 Frequency response function

표 1. Impact test에 의한 고유진동수

유효 긴장력 (kN)	1 st Mode (Hz)	2 nd Mode (Hz)	3 rd Mode (Hz)	4 th Mode (Hz)
0	7.513	28.183	94.876	132.999
146	8.216	29.399	95.052	140.023
264	8.539	30.976	97.334	145.087
356	8.724	29.997	99.418	147.913
465	8.697	30.126	98.812	147.480
523	8.794	29.850	99.466	148.334

표 2. SIMO sine sweep test에 의한 고유진동수

유효 긴장력 (kN)	1 st Mode (Hz)	2 nd Mode (Hz)	3 rd Mode (Hz)	4 th Mode (Hz)
0	7.567	28.223	101.095	133.812
146	8.190	26.609	100.727	135.912
264	8.498	29.583	102.160	145.208
356	8.672	30.269	102.814	144.053
465	8.690	30.331	104.474	144.280
523	8.757	30.241	103.231	144.522

Impact test와 SIMO sine sweep test에 의하여 측정된 고유진동수의 신뢰도를 분석하기 위하여 두 시험에 의하여 나타난 고유진동수를 그림 11과 같이 비교, 분석하였다. 그림 11에서 알 수 있는 것처럼 두 시험에 의하여 측정된 고유진동수의 차이가 1차 모드의 경우 최대 0.7%, 2차 모드의 경우 최대 10.5%, 3차 모드의 경우 최대 6.2%, 4차 모드의 경우 최대 3.0% 로서 두 시험에 의하여 측정된 고유진동수가 매우 유사한 것으로 나타나 측정자료가 높은 신뢰도를 지니는 것으로 판단된다. 특히, Saiidi 의 연구결과에 따르면 저차모드의 고유진동수가 유효 긴장력과 상관성이 매우 높은 것으로 나타났기 때문에(Saiidi 등 1994), 본 시험

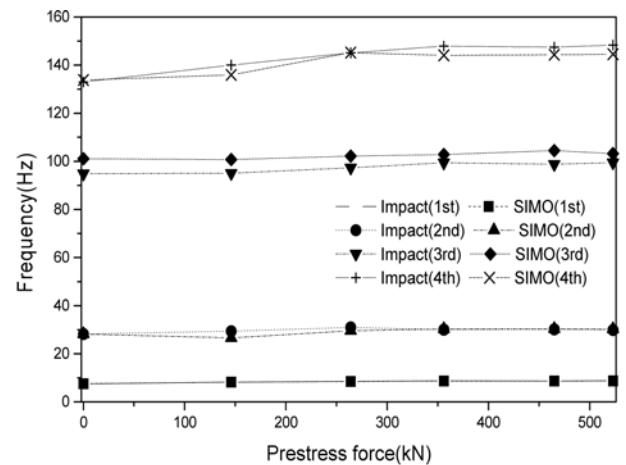
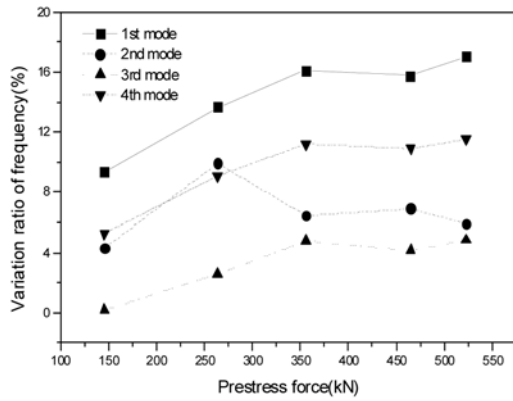


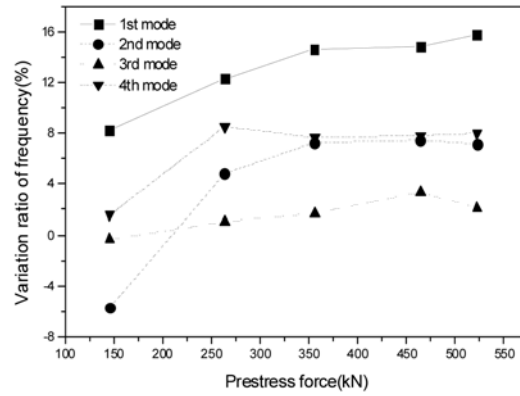
그림 11. 고유진동수의 비교분석

에서 측정된 1차 모드의 고유진동수를 적용하여 부착식 텐던의 유효 긴장력을 예측하는 경우 신뢰성이 높은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

그림 12는 유효 긴장력에 따른 고유진동수의 변화율을 보여주는 것으로 변화율은 유효 긴장력 0 kN에서의 고유진동수를 기준으로 다른 유효 긴장력에서의 고유진동수의 변화율을 보여준다. 앞서 설명한 바와 같이 유효 긴장력에 따른 고유진동수는 유효 긴장력의 크기에 비례하여 고유진동수가 증가하는 것으로 나타났고, 또한 유효 긴장력 356 kN을 기준으로 그 이상의 유효 긴장력에서는 고유진동수의 증가 기울기가 완만하게 변화하는 것으로 나타났다. 이는 유효 긴장력이 시험체의 구조 강성에 영향을 미쳐 고유진동수의 변화를 발생시키는 것을 고려할 때 유효 긴장력이 시험체의 구조강성에 영향을 미치는 범위에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 그러나, 유효 긴장력에 따라 고유진동수의 변화가 발생하기 때문에 고유진동수를 이용하여 부착식 텐던의 유효 긴장력을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Impact test



(b) SIMO sine sweep test

그림 12. 유효 긴장력에 따른 고유진동수의 변화율

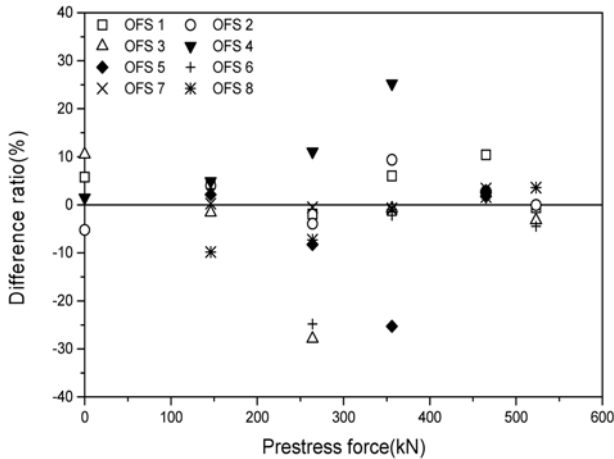


그림 13. 광섬유센서 간의 계측차

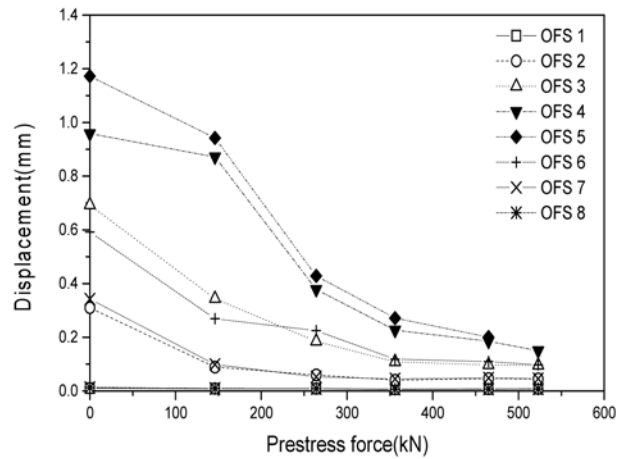


그림 14. 유효 긴장력에 따른 광섬유센서의 변위량

3.2 광섬유센서에 의한 휨시험

광섬유센서에 의하여 계측된 변위에 대한 신뢰도를 분석하기 위하여 시험체에 설치된 2 set의 광섬유센서에서 발생한 변위 간의 계측차를 그림 13과 같이 비교, 분석하였다. 그림 13에서 알 수 있는 것처럼 유효 긴장력 264 kN과 356 kN에서 계측된 4 개의 변위를 제외하고는 모두 10% 이내의 오차를 보여 광섬유센서에 의하여 계측된 변위가 상호 유사하게 발생한 것으로 나타나 계측결과가 높은 신뢰도를 지니는 것으로 판단된다.

그림 14와 15는 유효 긴장력에 따른 광섬유센서로부터 측정된 변위량과 변화율을 보여주는 것으로 변화율은 유효 긴장력 0 kN에서의 변위를 기준으로 다른 유효 긴장력에서의 변위 변화율을 보여준다. 그림 14에서 알 수 있는 바와 같이 변위는 유효 긴장력의 크기에 반비례하여 감소하는 것으로 나타났고, 또한 고유진동수에서 분석된 결과와 마찬가지로 유효 긴장력 356 kN을 기준으로 그 이상의 유효 긴장력에서는 변위의 감소 기울기가 완만하게 변화하는 것으로 나타났다. 또한, 광섬유센서의 변위를 이용하여 SI 기법에 의해 유효 긴장력을 예측할 때 최상의 광섬유센서 위치를 분석한 결과, 그림 15에서 알 수 있는 것처럼 유효 긴장력에 대하여 가장 큰 변화율을 보이는 광섬유센서 4와 5의 변위를 활용하는 것이 가장 바람직한 것으로 나타났다. 또한, 본 시험결과에서 나타난 바와 같이 유효 긴장력에 따라 광섬유센서에 의한 변위의 변화가 발생하기 때문에 이를 이용하여 유효 긴장력의 예측이 가능한 것으로 판단된다.

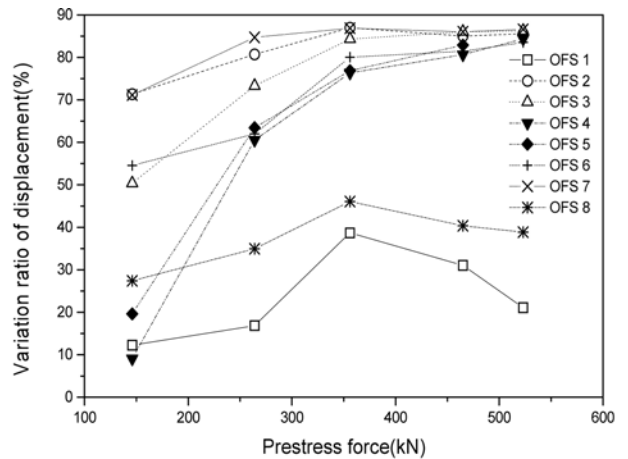


그림 15. 유효 긴장력에 따른 광섬유센서의 변위 변화율

3.3 변위계에 의한 휨시험

그림 16과 17은 유효 긴장력에 따른 변위계로부터 측정된 변위량과 변화율을 보여주는 것으로 변화율의 작성기준은 광섬유센서와 동일하다. 그림 16에서 알 수 있는 바와 같이 유효 긴장력과 변위계의 변위에 대한 상관성은 광섬유센서와 유사한 경향을 보여주는 것으로 나타났다. 그러나, 그림 17에서 보여주는 바와 같이 변위계는 광섬유센서와는 달리 모든 위치에서의 변위계가 유효 긴장력에 대해 유사한 변화율을 보여 변위계를 이용하여 유효 긴장력을 예측할 때는 모든 위치의 변위계가 적용 가능한 것으로 판단된다. 본 시험결과에서 나타난 바와 같이 유효 긴장력에 따라 변위계에 의한

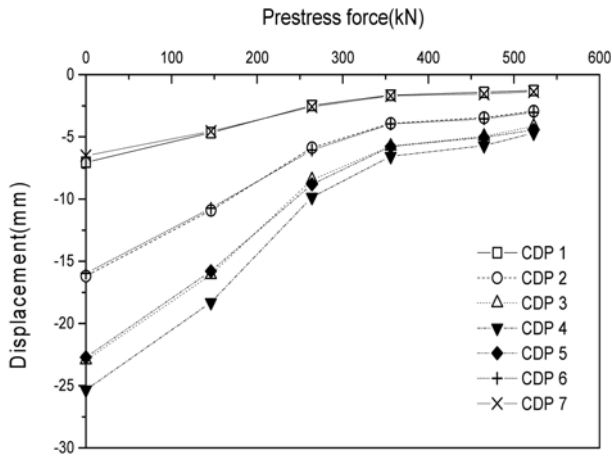


그림 16. 유효 긴장력에 따른 변위계의 변위량

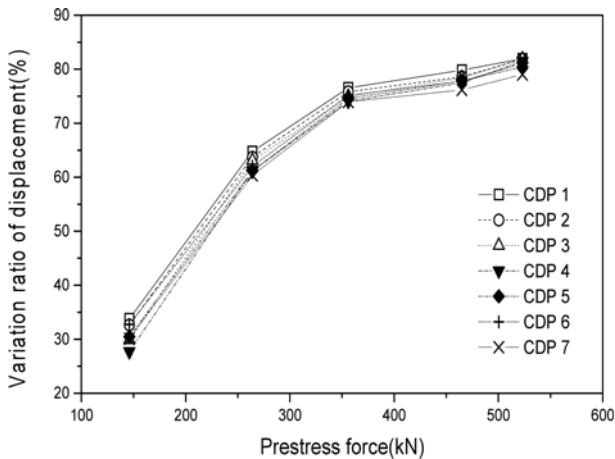


그림 17. 유효 긴장력에 따른 변위계의 변위 변화율

변위의 변화가 발생하기 때문에 이를 이용하여 SI 기법에 의해 유효 긴장력의 예측이 가능한 것으로 판단된다.

4. 최적의 매개변수

Modal test 와 휨시험에서 나타난 바와 같이 고유진동수와 변위 모두 유효 긴장력의 크기에 따라 변화하며, 좋은 상관성을 지니는 것으로 나타났다. 따라서, 이들 매개변수 모두 SI 기법의 입력자료로 활용되어 부착식 텐던의 유효 긴장력 예측이 가능한 것으로 분석되었다. 그러나, SI 기법을 이용하여 부착식 텐던의 유효 긴장력을 예측할 때, 유효 긴장력에 대해 상관성이 높은 매개변수 즉, 유효 긴장력에 따라 변화율이 가장 큰 매개변수가 SI 기법의 입력자료로 활용되는 것이 바람직하다.

따라서, 상기의 시험결과를 기초로 각 시험결과 중에서 유효 긴장력과 높은 상관성을 보이며, 일관된 계측결과를 보여주는 계측자료를 선별하였다. 즉, Modal test는 Impact test 와 SIMO sine sweep test 중 유효 긴장력과 일관성 있는 계측자료를 제공하는 SIMO sine sweep test 를 선정하고, 1차 모드에서 4차 모드의 고유진동수 중 가장 높은 상관성을 보이는 1차 모드의 고유진동수를 표 3에 도출하였다. 또한, 광섬유센서에 의한 휨시험에서는 8 개의 광섬유센서 중 모든 유효 긴장력에 대해 일관성이 있고, 가장 높은 상관성을 보여주는 4번 센서의 계측자료를 표 3에 도출하였다. 마

표 3. 유효 긴장력에 따른 각 매개변수의 변화율

유효 긴장력 (kN)	고유진동수 (Hz)		광섬유센서의 변위 (mm)		변위계의 변위 (mm)	
	크기 (Hz)	변화율 (%)	크기 (mm)	변화율 (%)	크기 (mm)	변화율 (%)
0	7.567	0.0	0.959	0.0	25.33	0.0
146	8.190	8.2	0.872	9.1	18.31	27.7
264	8.498	12.3	0.379	60.5	9.84	61.2
356	8.672	14.6	0.227	76.4	6.56	74.1
465	8.690	14.8	0.186	80.7	5.70	77.5
523	8.757	15.7	0.150	84.4	4.69	81.5

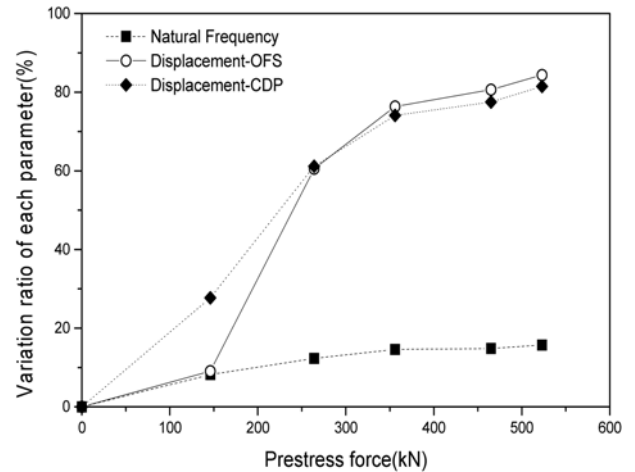


그림 18. 유효 긴장력과 각 매개변수의 상관성

지막으로, 변위계에 의한 휨시험에서도 광섬유센서와 동일한 기준으로 4 번 변위계의 계측자료를 표 3에 도출하였다.

그림 18은 표 3의 결과를 도시한 것으로, 유효 긴장력에 따른 광섬유센서와 변위계에 의한 변화율이 고유진동수에 비하여 매우 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 그리고, 광섬유센서와 변위계에 의한 변화율은 매우 유사한 것으로 나타났다. 이중 유효 긴장력 146 kN에서 광섬유센서의 변화율이 변위계에 비하여 작게 나타나며, 큰 차이를 보이는 것으로 나타났지만, 그림 14에서 알 수 있는 바와 같이 광섬유센서 4 번과 5 번이 본 시험에서 동일한 시험결과를 발생시키는 것을 고려할 때, 그림 15에서 광섬유센서 5 번에서의 변화율이 19.6% 인 점을 고려하면 광섬유센서와 변위계는 유효 긴장력에 대하여 거의 동일한 수준의 상관성을 지니는 것으로 판단된다.

그림 18에서 알 수 있는 바와 같이 광섬유센서 및 변위계의 변위가 고유진동수에 비하여 유효 긴장력과 높은 상관성을 보이는 것으로 나타나, 향후 SI 기법을 이용하여 부착식 텐던의 유효 긴장력을 예측할 때 이들 변위를 활용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

5. 결 론

국내 일부 가동 중 원전의 원자로건물에 설치된 부착식 텐던의 유효 긴장력 평가가 이들 원전의 계속운전을 위한 주요 현안으로 부각됨에 따라, 이를 위한 기술 개발이 시급

한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 부착식 텐던의 유효 긴장력 평가를 위한 SI 기법에 유효한 주요 매개변수의 영향 평가를 수행하고, 최적의 매개변수를 도출하였다. 본 연구를 위하여, 실제 원자로건물을 모사한 부착식 텐던 형식의 1/5 축소모형 시험체를 제작하였고, 이를 이용하여 유효 긴장력과 고유진동수 및 변위와의 상관성을 분석하기 위해 Modal test 와 휨시험을 수행하였다. Modal test로서 Impact test 와 SIMO sine sweep test 가 수행되었고, 광섬유센서와 변위계를 이용한 휨시험이 수행되었다.

시험결과, 고유진동수와 변위 모두 유효 긴장력의 크기에 따라 변화하며, 좋은 상관성을 지니는 것으로 나타나, 이들 매개변수 모두 SI 기법의 입력자료로 활용되어 부착식 텐던의 유효 긴장력 예측이 가능한 것으로 분석되었다. 그러나, 광섬유센서 및 변위계의 변위가 고유진동수에 비하여 유효 긴장력과 높은 상관성을 보이는 것으로 나타나, 향후 SI 기법을 이용하여 부착식 텐던의 유효 긴장력을 예측할 때 이들 변위를 활용하는 것이 보다 바람직할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 원전기술 혁신사업으로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

산업자원부(2005) 광섬유를 이용한 원전 격납건물 변형량 계측기술 및 변형 특성, 최종보고서.
장정범, 이홍표, 황경민, 송영철(2009) 부착식 텐던의 유효 긴장

력 예측을 위한 매개변수 연구, 한국원자력학회 2009 추계 학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
통상산업부(1994) 차세대 원자로 기술개발(I), 최종보고서.
한국수력원자력(주)(2006) 월성 1 호기 수명관리 연구(II), 중간보고서.
Abraham, M.A., Park, S.Y., and Stubbs, N. (1995) Loss of prestress prediction on nondestructive damage location algorithms, SPIE, Smart Structures and Materials 2446, pp. 60-67.
Hamed, E. and Frostig, Y. (2006) Natural frequencies of bonded and unbonded prestressed beam-prestress force effects, Journal of Sound and Vibration 295, pp. 28-39.
Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M., and Stubbs, N. (2003) Damage Identification in beam-type structures : frequency - based method vs mode - shape - based method, Engineering Structures 25, pp. 57-67.
Law, S.S. and Lu, Z.R. (2005) Time domain responses of a prestressed beam and prestress identification, Journal of Sound and Vibration, pp. 1011-1025.
Lu, Z.R. and Law, S.S. (2006) Identification of prestress force from measured structural responses, Mechanical Systems and Signal Processing 20, pp. 2186-2199.
Maaskant, R., Alavie, T., Measures, R., Tadros, G., Rizkalla, S., and Guha-Thakurta, A. (1997) Fibre-optic bragg grating sensors for bridge monitoring, Cem. Concr. Compos. Vol. 19, pp. 21-23.
NCHRP (1999) Nondestructive Methods for Condition Evaluation of Prestressing Steel Strands in Concrete Bridges, Final report.
Saiidi, N., Douglas, B., and Feng, S. (1994) Prestress force effect on vibration frequency of concrete bridges, Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 7, pp. 2233-2241.
Unger, J.F., Teughels, A., and Roeck, G.D. (2006) System identification and damage detection of a prestressed concrete beam, Journal of Structural Engineering, ASCE, pp. 1691-1698.

(접수일: 2009.8.21/심사일: 2009.11.9/심사완료일: 2010.1.21)