

부착식 PSC 텐던의 도입 긴장응력이 종진동 메카니즘에 미치는 영향

Effect of Applied Tensile Stress of Bonded PSC Tendon on Longitudinal Vibration Mechanism

김 병 화* · 김 수 진** · 여 금 수*** · 조승제****

Kim, Byeong Hwa · Kim, Soo Jin · Yeo, Keum Soo · Cho, Seung Je

요 약

본 논문은 부착식 PSC 텐던에 도입된 긴장응력이 종진동 메카니즘에 미치는 영향을 소개한다. 텐던의 종방향 변형과 비틀림 변형은 상호 연동하여 거동하고, 텐던에 도입된 긴장응력은 축강성과 비틀림 강성에 영향을 미친다. 따라서 텐던의 탄성과 속도는 도입된 긴장응력의 크기에 따라서 변한다. 실험적 검증을 위하여 도입 긴장응력이 다른 6개의 부착식 PSC 시험체에 대한 종진동 실험이 수행되었다. 실험결과로부터 도입 응력과 탄성과 속도와의 역학적 관계를 확인하였으며, 기존 문헌의 실험결과와 비교하였다.

keywords : 텐던, 장력, 종진동, 프리스트레스 콘크리트, 탄성과속도

1. 서 론

PSC(Prestressed Concrete)는 고강도 긴장재를 이용한 구조용 부재로써, 평상시에도 매우 높은 응력상태에 있기 때문에 주기적인 응력상태의 관리가 필요하다. 비부착식 PSC 텐던의 경우에는 Chen and Wissawapaissal (2001)이 제안한 초음파 방법을 이용하여 텐던의 도입장력을 추정 할 수 있다. 그러나 부착식 PSC 텐던의 경우에는 텐던 주변이 시멘트 그라우팅으로 처리되어 초음파와 같은 고주파는 에너지 감쇠가 커서 긴장재의 반대편 단부에서 구조응답을 계측할 수 없다. 그러므로 현재까지 부착식 PSC 텐던의 긴장력을 추정 할 수 있는 방법은 없는 실정이다. 반면, 김병화 등(2010)은 부착식 PSC 텐던의 종방향 고유진동수와 도입장력 사이에 높은 상관성이 있음을 보고하였다. 그러나 현재까지 부착식 PSC 긴장재의 종진동 메커니즘이 명확히 규명되지 못하였다. 본 연구에서는 와이어로프(wire rope)의 지배방정식이 부착식 PSC 긴장재의 종진동 메커니즘을 설명할 수 있는지 여부를 검토하고, 부착식 PSC 텐던에 대한 종진동 실험결과를 이용하여 검증 한다.

2. 텐던의 종진동 메카니즘

Samras 등(1974)은 최초로 와이어로프의 종진동 특성에 있어서 종축방향 직선변위(extensional

* 정회원 · 경남대학교 토목공학과 조교수 bhkim@kyungnam.ac.kr

** 경남대학교 대학원 첨단공학과 석사과정 pw2408k@naver.com

*** 경남대학교 대학원 첨단공학과 석사과정 yks4749@naver.com

**** 경남대학교 대학원 첨단공학과 석사과정 dynamicsj@hanma.kr

displacement)와 종축을 중심으로 하는 비틀림 각(torsional angle) 사이에 서로 상관성이(coupling) 있음을 밝혔다. 강연선은 와이어로프의 기하형상 중에 한 형식이기 때문에 다음과 같은 종진동 지배방정식을 가정하자.

$$A_1 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + A_2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$A_3 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + A_4 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (2)$$

여기서, u 와 θ 는 각각 종방향인 z 축의 직선변위와 회전각을 나타낸다. m 과 I 는 각각 와이어의 단위길이당 질량과 질량 관성모멘트이다. A_1, A_2, A_3, A_4 는 와이어의 강성계수를 나타낸다. 식(1)과 (2)에 대한 탄성과 속도(m/s)는 경계조건에 무관하게 다음 식과 같이 강성계수의 함수이다.

$$c_{1,2} = \frac{2(A_1 A_4 - A_2 A_3)}{(A_1 I + A_4 m) \pm \sqrt{(A_1 I - A_4 m)^2 + 4m I A_2 A_3}} \quad (3)$$

여기서, 탄성과속도 c_1 과 c_2 두 개가 나오는데, 하나는 비틀림 진동에 관한 것이고, 다른 하나는 종방향 직선 진동에 관한 것이다. 경계조건이 양쪽고정일 경우 탄성과 속도와 고유진동수와의 관계는 다음과 같다.

$$c_{1,2} = 2L \frac{f_n^{1,2}}{n} \quad (4)$$

여기서, L 은 텐던의 길이이고 n 은 모드수이다. 또한 f_n^1 과 f_n^2 는 각각 비틀림 진동수와 종진동수를 나타낸다. 강성계수 A_1 은 종방향 축강성의 영향이 지배적이며, 도입장력이나 와이어의 꼬임각의 변화에 둔감하다. 반면, 강성계수 A_4 는 와이어의 비틀림 강성이 지배적이다. 강성계수 A_2 와 A_3 는 장력과 비틀림 모멘트의 상관 강성으로써 Maxwell의 상반정리(reciprocal theorem)에 의해서 동일하다. 또한, 양의 에너지 함수 정의의 갖기 위해서 강성변수들은 식(6)과 같은 부등식을 만족하여야 한다.

$$A_2 = A_3 \quad (5)$$

$$A_1 A_4 \pm A_2 A_3 > 0 \quad (6)$$

와이어의 슬립이 완전히 허용되는 조건(full slip condition)에서 $A_1 \sim A_4$ 에 대한 이론적 값들은 많은 연구자들에 의해서 제안되었다(Ghoreishi 등, 2007). 반면, 와이어의 슬립이 완전히 허용되지 않는 조건(no slip condition)에서 $A_1 \sim A_4$ 에 대한 연구는 매우 미미하다. Raof and Kraincamic (1995)는 슬립이 허용되는 조건과 허용되지 않은 극한 조건들에서 와이어의 꼬임각 변화에 따른 강성변수 $A_1 \sim A_4$ 의 추정 실험식을 제안하였다. 그러나 도입 장력의 크기 변화에 따른 강성변수들의 이론적 해는 아직까지 제안되지 못하였다.

종진동 실험을 통하여 텐던의 고유진동수 f_n^1 과 f_n^2 를 추출하면, 시스템인식 이론을 적용하여 식(3), 식(5)

그리고 식(5)로부터 강성계수 $A_1 \sim A_4$ 를 추정할 수 있다.

3. 실험결과

부착식 PSC 텐던의 종진동 거동을 와이어로프의 지배방정식으로 설명할 수 있는지 여부를 실험적 검증을 수행하였다. 실험은 김병화 등(2010)의 8m 부착식 PSC 텐던 시험체에 대하여 그림 1과 같은 종진동 실험이 반복 수행되었다. 시험체에 사용된 강연선의 최대 인장응력이 $f_u = 1860$ MPa인 SWPC 7B가 사용되었으며, 도입장력이 다른 5개의 시험체에 대하여 고유진동수를 측정하고 식(4)를 이용하여 표 1과 같이 탄성과속도를 추정 하였다. Samras 등(1974)의 연구에는 19mm 6×19(7×7 IWRC) 와이어로프가 사용되었는데, 종방향과 비틀림 탄성과속도가 각각 3597m/s 와 323m/s 였다. Samras 등(1974)의 연구에서는 도입장력에 대한 영향이 고려되지 않았다. 표 1에 보이는 실험결과와 비교해보면, 종방향 및 비틀림 탄성과 속도는 각각 최대 15% 및 28%이내의 차이로 매우 유사하다.

표 2에 보이는 탄성과 속도에 시스템인식 알고리즘을 적용하여 강성변수 $A_1 \sim A_4$ 를 추정하였다. 도입 긴장 응력의 변화에 따른 강성변수의 변화가 그림 2에 보인다. 강성변수 A_1 은 도입응력이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하였으며, A_4 는 반대로 도입응력이 증가함에 따라서 비선형적으로 감소한다. 반면, A_2 와 A_3 는 도입응력이 작을 때는 A_1 의 경향을 따르고, 도입응력이 클 때는 A_4 의 경향을 따른다. 이는 도입응력이 작을 때는 와이어의 슬립이 허용되어서 비틀림 거동의 크기를 무시 할 수 없지만, 도입응력이 증가 되어 와이어의 슬립이 불가능하게 되면 비틀림 거동의 상대적으로 작아지게 되는 것을 의미한다.

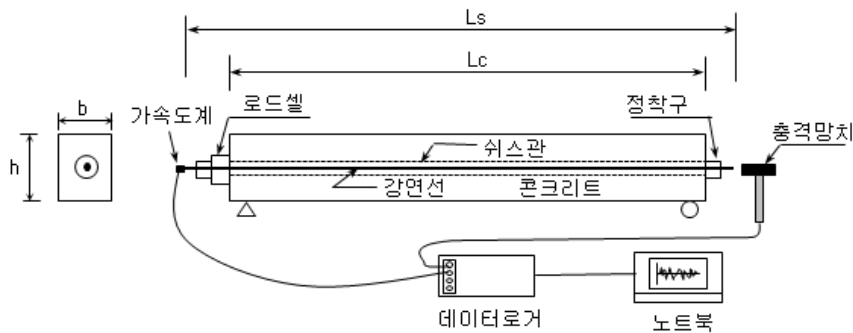


그림 1 PSC 종진동 실험 개요

표 1. 탄성과속도

PSC No.	도입 응력(MPa)	토크방향 c_1^2 (m/s)	종방향 c_n^2 (m/s)						
			1차	2차	3차	4차	5차	6차	평균
1	0	303.1	2930.4	3031.4	3132.4	3107.1	3112.2	3082.2	3066.0
2	350.0	309.0	3502.2	3605.1	3605.7	3605.6	3605.1	3606.3	3588.3
3	694.4	360.7	3813.3	3814.2	3813.9	3813.7	3813.3	3830.8	3816.5
4	853.8	411.7	3911.2	3912.1	3877.5	3885.9	3892.7	3876.4	3892.6
5	1117.5	411.8	3912.2	3913.0	3878.4	3912.6	3913.8	3894.2	3904.0
6	1255.8	411.7	3911.2	3912.1	3911.8	3911.6	3912.9	3912.9	3912.1

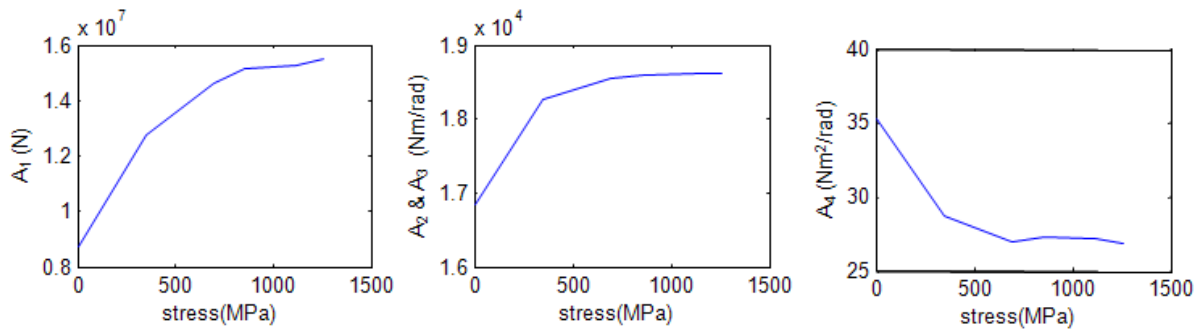


그림 2 텐던의 도입응력과 강성계수 관계

4. 결 론

강연선의 종진동은 종방향 직선변위와 비틀림 변위가 상호 연동되어 거동한다. 특히 도입응력이 작을수록 강연선의 와이어들 사이에 슬립이 허용되고 비틀림 거동의 영향이 크게 된다. 반면, 도입응력이 크면 와이어들 사이의 슬립이 불가능해져서 비틀림 거동의 영향이 작아지게 된다.

와이어로프의 종진동 지배방정식은 분산특성이 고려되지 않았기 때문에 이론적으로 모드 별 탄성파의 속도가 동일하다. 그러나 부착식 PSC의 종진동 시험결과를 살펴보면, 모드 별 탄성파속도가 3.5% 정도 편차가 있다. 이는 부착식 PSC 강연선의 시멘트 그라우팅 효과 때문이다. 모드 별 탄성파 속도의 편차가 미미하기 때문에, 부착식 및 비부착식 PSC 강연선의 종방향 거동은 상기 와이어로프의 지배방정식을 따른다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 원전기술 혁신사업으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김병화, 장정범, 이홍표 (2010) 종진동 특성을 이용한 부착식 텐던의 긴장력 추정 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 30(2A), pp. 103-111.
- Chen, H.L. and Wissawapaisal, K. (2001) Measurement of tensile forces in a seven-wire prestressing strand using stress waves, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, .127(6), pp. 599-606.
- Ghoreishi, S.R., Messenger, T., Cartraud, P. and Davies, P. (2007) Validity and limitations of linear analytical models for steel wire strands under axial loading using a 3D FE model, *International Journal of Mechanical Sciences*, 49, pp. 1251-1261.
- Raoof, M. and Kraincanic, I. (1995) Simple derivation of the stiffness matrix for axial/torsional coupling of spiral strands, *Computers & Structures*, 55(4), pp. 589-600.
- Samras, R.K., Skop, R.A. and Milburn, D.A. (1974) An analysis of coupled extensional-torsional oscillations in wire rope, *Journal of Engineering for Industry*, ASME, pp. 1130-1135.