

부착식 PSC 텐던의 종진동 메카니즘

Longitudinal Vibration Mechanism of Grouted PSC Tendon

김병화* · 장정범** · 이홍표***

Kim, Byeong Hwa · Jang, Jung Bum · Lee, Hong Pyo

Abstract

This study reveals the longitudinal vibration mechanism of tendon embedded in a prestressed concrete. The extensional and torsional displacements of the strand are coupled, and the applied prestress level of tendon affects not only axial rigidity but also torsional rigidity. Measuring the elastic wave velocity of tendon, the applied prestress level of tendon could be evaluated. This is because the elastic wave velocity is a function of extensional and torsional rigidity. Using the experimental results for the six prestressed concrete beams with different prestress levels, the longitudinal vibration mechanism and the effect of prestress level have been examined. To estimate the system rigidities of tendon, a system identification algorithm has been newly developed. The estimated system rigidities have been compared with the available results of related previous study.

Keywords : tendon, tension, axial vibration, prestressed concrete, elastic wave velocity

요 지

본 연구는 부착식 PSC 텐던에 도입된 긴장응력이 종진동 거동에 미치는 메카니즘을 규명한다. 텐던의 종방향 직선변형과 비틀림변형은 상호 연동하여 거동하고, 텐던에 도입된 긴장응력은 축강성과 비틀림강성에 영향을 미친다. 그러므로 텐던의 탄성과 속도를 계측함으로써 텐던에 도입된 긴장응력을 추정 할 수 있다. 이는 텐던의 탄성과속도가 축강성과 비틀림강성의 함수이기 때문에 가능하다. 도입 긴장력이 다른 6개의 PSC 보 시험체에 대한 종진동 실험결과를 이용하여 텐던의 종진동 특성과 도입 긴장응력 사이의 역학적 메카니즘이 검증되었다. 이를 위하여, 탄성과 속도로부터 텐던의 시스템 강성을 추정할 수 있는 시스템인식 이론이 적용 되었다. 추정 결과는 기존 문헌의 연구결과와 비교 검토되었다.

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

1. 서 론

최근 고강도 긴장재의 개발에 따라 PSC(Prestressed Concrete)의 이용이 증가하고 있다. PSC 구조물은 인장에 약한 콘크리트의 단점을 보완하기 위하여, 고강도 긴장재를 이용하여 콘크리트에 미리 압축력을 도입시키는 구조 시스템이다. 그러므로 PSC 구조물의 긴장재는 상시에도 매우 높은 응력상태를 유지하고 있으며, 과도한 긴장력 손실은 PSC 전체 구조계의 안정성에 치명적인 영향을 미친다. 그러나 PSC의 긴장력은 도입시 즉시손실 외에도 시간의 경과와 더불어 여러 가지 원인에 의해서 시간적 손실이 발생한다 (Tadros 등 2001). 그러므로 PSC 구조계의 상시 긴장력에 대한 주기적 모니터링이 필요하다. 그러나 PSC 구조계의 상시 긴장력에 대한 비파괴적 검사기술에 대한 연구는 최근 들어 주목을 받고 있으며, 실무에 적용하기에는 아직 해결되어야 할 많은 문제점들이 있다.

PSC 구조계의 상시 긴장력을 추정할 수 있는 기술은 부착식 PSC와 비부착식 PSC로 구분되어 연구되었다. 부착식 PSC는 긴장재와 덕트(duct)사이에 긴장재의 부식방지를 위하여 시멘트 그라우팅(cement grouting)을 처리하는 형식이고, 우리나라에 많이 적용되었다. 반면 비부착식 PSC는 그라우팅처리를 하지 않은 형식으로써 미국 및 유럽 등 외국에 많이 적용되었다. 이러한 이유로 미국 및 유럽 중심으로 비부착식 PSC에 대한 상시 긴장력 평가 기술이 우선 연구되었다.

Saiidi 등(1994) 등은 비부착식 PSC 거더의 긴장력 변화에 따른 휨진동수의 변화 현상을 보고하였으며, 김정태 등(2005)은 비부착식 PSC 거더의 휨진동수와 긴장력의 손실을 고려할 수 있는 환산탄성계수를 도출하고 긴장력 손실 추정 방법을 제안하였다. 또한 Law 등(2005) 및 Lu 등(2006)은 비부착식 PSC 거더의 처짐과 변형률을 계측하여 긴장력과 휨강성을 추정하는 방법을 제안하였다. 그러나 휨진동수, 처짐 및 변형률 등과 같은 PSC 구조계의 전체 구조응답을 이

*정회원 · 교신저자 · 경남대학교 토목공학과 조교수 (E-mail : bhkim@kyungnam.ac.kr)

**한국전력공사 전력연구원 책임연구원

***정회원 · 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

용하는 방법들은 PSC 긴장재의 개별 긴장력 추정에는 한계가 있기 때문에 복잡한 실무 구조계에 적용하기에는 다소 회의적이다. 반면, PSC 긴장재의 개별 긴장력 추정이 가능한 방법도 연구되었는데, PSC 긴장재의 한쪽 단부에서 종방향으로 초음파를 입사시키고, 긴장재의 반대편 단부에서 초음파의 도달시간을 측정하는 방법이다. Chen and Wissawapaissal(2001, 2002)는 비부착식 PSC 긴장재에 150 kHz~350 kHz의 초음파를 입사시키고, 반대편에서 초음파의 도달시간을 측정하였다. 실험결과를 살펴보면, 초음파의 도달시간이 긴장재에 도입된 긴장력의 크기와 선형 비례한다. 이는 탄성체 내부의 응력상태에 따라서 탄성파의 속도가 달라지는 물리적 현상에 근거를 두고 있다. 유사 연구가 Washer 등(2002), Scalea 등(2003), Rizzo(2006), 및 Chaki and Bourse(2009)의 의해서 수행되었다. 그러므로 탄성파의 도달 시간을 측정하여 비부착 PSC 텐던의 긴장응력 상태를 추정할 수 있다.

그러나 부착식 PSC 시스템과 같이 긴장재 주변이 시멘트 그라우팅으로 처리된 경우에는 초음파와 같은 고주파는 에너지 감쇠가 커서 긴장재의 반대편 단부에서 구조응답을 측정할 수 없다(Chaki and Bourse; 2009). 이에 대해 Beard 등(2003)은 부착식 PSC 긴장재의 경우에 초음파를 이용한 최대 진단범위는 대략 1.5 m 정도라고 보고하였다. 국내 PSC 구조물의 대부분이 부착식 PSC형식이고, 길이가 25 m 이상이기 때문에, 비부착식 PSC형식에 적용 가능한 초음파 방법을 부착식 PSC 구조계의 상시 긴장력 추정에 적용하기는 어렵다. 이러한 측면에서 부착식 PSC 구조물의 상시 긴장력 평가기술에 대한 연구는 매우 도전적이라 할 수 있다.

국내에서는 부착식 PSC 긴장재의 상시 긴장력 추정을 위한 연구가 최근 2건이 수행되었다. 2006년 건설핵심기술연구개발사업의 일환으로 수행된 긴장재 비파괴 진단기술 개발연구(성택룡 등, 2009)와 2008년 원전기술혁신사업의 일환으로 수행된 부착식 텐던의 비파괴 긴장력 평가 기술개발 연구(장정범, 2010)이다. 두 개의 연구 모두 휨 진동수와 도입 긴장력 사이의 관계를 도출하기 위한 실험적 연구가 수행되었다. 도입 긴장력이 다른 여러 가지 PSC 보 시험체에 휨 진동 실험 및 정재하 실험이 수행되었고, 휨 진동수와 도입 긴장력 사이의 상관성 및 처짐과 도입 긴장력 사이의 상관성을 도출되었다. 실험결과를 살펴보면, 휨 진동수와 도입 긴장력 사이에 상관성이 있는 것으로 나타났으나, 휨 진동수의 도입 긴장력에 대한 민감도가 높지 않아서 측정오차 수준이다. 더욱이, 휨 진동수는 경계조건의 변화에 민감하기 때문에 실무차원에서 적용하기에는 아직 해결해야 할 많은 문제가 있다. 반면, 처짐 변위의 도입 긴장력에 대한 민감도는 매우 높게 나왔다. 이는 현행 실무규모 정재하 실험을 통한 PSC 거더의 내하력 추정방법이 유효하다는 것을 반증한다.

반면, 김병화 등(2010)은 부착식 PSC 긴장재의 종방향 고유진동수와 도입장력의 상관성에 대한 연구를 수행하였다. 실험결과를 살펴보면, 긴장재의 도입 긴장력과 종진동수 사이에 높은 상관성이 있음을 알 수 있다. 그러나, 아직까지 부착식 PSC 긴장재의 종진동 메커니즘이 명확히 규명되지 못하였다. 본 연구에서는 부착식 PSC 긴장재의 종진동 메커니즘을 설명할 수 있는 이론을 도출하고, 긴장재에 도입된 긴장응력이 종진동 거동에 미치는 영향을 검토한다. 이를

위하여, 와이어로프의 종진동 지배방정식을 검토하고 부착식 PSC의 종진동 실험결과와 비교한다. 실험결과와 비교분석을 위하여 시스템인식이론을 적용한 종진동 강성변수의 추정 알고리즘을 제시하고, 추정된 결과와 기존 문헌의 결과와 비교 분석한다.

2. 텐던의 종진동 메커니즘

PSC텐던을 이루는 스트랜드(strand)는 기하학적으로 개별 와이어들이 꼬여 있기 때문에 종방향 거동에 있어서 꼬임형상의 영향을 무시할 수 없다. 이는 스트랜드에 도입되는 장력이 증가함에 따라서 스트랜드의 종축을 중심으로 하는 비틀림 강성이 증가되기 때문이다. 스트랜드에 도입된 긴장력이 작을 때는 개별 와이어의 슬립(slip)이 허용되지만, 강연선에 도입장력이 증가함에 따라서 와이어들의 슬립이 어렵게 되고 결국에는 스트랜드가 하나의 충실 단면 봉처럼 거동하게 된다.

Samras 등(1974)은 최초로 와이어로프(wire rope)의 종진동 특성에 있어서 종축방향 직선변위(extensional displacement)와 종축을 중심으로 하는 비틀림 각(torsional angle) 사이에서 상관성(coupling) 있음을 밝혔다. 그리고 Randow and Gazonas(2009)는 직선변위와 회전변위가 상호 연동되는 시스템에 대하여 일반화된 지배방정식을 제안하였다. 그림 1에 보이는 7연선 스트랜드는 와이어로프의 기하형상중의 한 형식이기 때문에 다음과 같은 종진동 지배방정식을 따른다고 가정하자.

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

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

여기서, u 와 θ 는 각각 종방향인 z 축의 직선변위와 회전각을 나타낸다. m 과 I 는 각각 와이어의 단위길이 당 질량과 질량 관성모멘트이다. 시스템 상수, A_1, A_2, A_3, A_4 는 와이어의 강성을 나타낸다. 상기 지배방정식은 Jiang 등(1991), Raof 등(1994) 및 Yen 등(2009)와 같은 다른 연구자들에 의해서도 재확인되었다.

식 (1)과 (2)에 대한 탄성파 속도(m/s)는 경계조건에 무관하게 다음 식과 같이 강성변수 A_1, A_2, A_3, A_4 의 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, 탄성파속도 c_1 과 c_2 두 개가 나오는데, 하나는 비틀

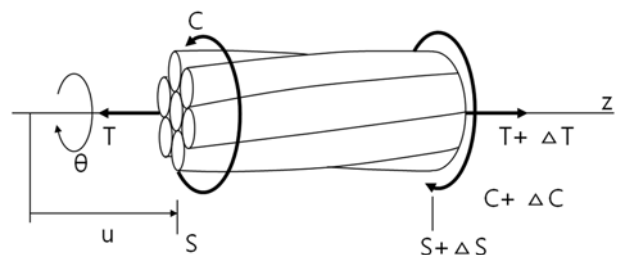


그림 1. 스트랜드 구조요소

림 진동에 관한 것이고, 다른 하나는 종방향 직선 진동에 관한 것이다. 반면, 종방향 고유진동수(Hz)는 탄성과 속도의 함수로써 경계조건에 따라서 다르다. 양단고정인 경우에는 다음과 같다.

$$f_n^1 = \frac{n}{2L}c_1 \quad (4)$$

$$f_n^2 = \frac{n}{2L}c_2 \quad (5)$$

여기서, n 과 L 은 각각 모드 수와 와이어의 길이를 나타낸다. f_n^1 와 f_n^2 는 각각 n 번째 비틀림 모드와 종모드를 나타낸다. 식(4)와 (5)를 살펴보면, 와이어의 종방향 진동수는 종방향 순수진동과 비틀림 진동이 동시에 나타나게 된다.

종진동수를 예측하였을 때, 탄성과 속도는 양단고정의 경우에 식 (4)와 (5)를 이용하여 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$c_1 = 2L \frac{f_n^1}{n} \quad (6)$$

$$c_2 = 2L \frac{f_n^2}{n} \quad (7)$$

탄성과 속도는 식 (3)과 같이 와이어 강성들 A_1, A_2, A_3, A_4 의 함수인데, 도입장력이 T 이고 비틀림 모멘트가 C 인 와이어의 구성방정식은 다음과 같다.

$$T = A_1\varepsilon + A_2\tau \quad (8)$$

$$C = A_3\varepsilon + A_4\tau \quad (9)$$

여기서, ε 과 τ 는 각각 와이어의 종방향 변형률과 비틀림 각의 변형률을 나타낸다. 강성 A_1 은 종방향 축강성의 영향이 지배적이며, 도입장력이나 와이어의 꼬임각의 변화에 둔감하다. 반면, A_4 는 와이어의 비틀림 강성이 지배적이다. A_2 와 A_3 는 장력과 비틀림 모멘트의 상관 강성으로써 Maxwell의 상반정리(reciprocal theorem)에 의해서 다음 식 (10)과 같이 서로 동일하다. 또한, 양의 에너지 함수 정의를 갖기 위해서 강성변수들은 식 (11)과 같은 부등식을 만족하여야 한다.

$$A_2 = A_3 \quad (10)$$

$$A_1A_4 \pm A_2A_3 > 0 \quad (11)$$

와이어의 슬립이 완전히 허용되는 조건(full slip condition)에서 $A_1 \sim A_4$ 대한 이론적 값들은 많은 연구자들에 의해서 제안되었다(Ghoreishi 등, 2007). 반면, 와이어의 슬립이 완전히 허용되지 않는 조건(no slip condition)에서 $A_1 \sim A_4$ 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.

3. 시스템 인식 알고리즘

PSC 긴장재의 종진동 메커니즘을 나타내는 식 (1)과 (2)에서 긴장재의 단위길이당 질량 및 관성모멘트는 기지의 상수로 가정하면, 4개의 시스템 변수들 A_1, A_2, A_3, A_4 은 미지수들로 정의 될 수 있다. 그러므로 시스템 변수들의 인식을

위해서는 4개의 독립된 방정식이 필요하다. 종진동 실험을 통하여 탄성과속도 c_1 과 c_2 의 계측이 가능하므로 식 (3)을 이용하면 2개의 독립된 방정식이 도출될 수 있다. 또한 시스템 변수들의 조건식 (10)을 이용하면, 1개의 독립 방정식이 추가로 도출된다. 그러나 식 (11)은 조건부등식이기 때문에 직접적으로 적용하기 어렵다. 다만, 시스템인식 알고리즘을 이용하여 수렴된 변수들의 적합성을 검토하는데 이용될 수 있다. 이는 조건식 (11)이 최적해에 영향을 주지 않는다는 가정에 근거하고 있다(Rao, 1996).

비틀림 및 종방향 탄성과속도 c_1, c_2 를 계측하고 조건방정식 (10)과 (11)를 만족시키는 강성변수 $A_1 \sim A_4$ 을 추정 하는 시스템인식 문제를 고려해보자. 시스템인식론은 매개변수 최적화 이론의 일종으로써 구조물의 손상도 추정분야(Stubbs, 1985) 및 수치모델의 최적화(Mottershead and Friswell, 1993)에 최초로 적용된 후에 알고리즘의 효율성이 탁월하여 다양한 분야(Kim 등, 2007)에서 적용되고 있다. 조건방정식 (10)을 적용하면 인식해야 할 강성변수는 A_1, A_2, A_4 이다. 그리고 최종적으로 수렴해야 할 목적함수는 비틀림 및 종방향 탄성과속도 c_1, c_2 이다. 인식하고자 하는 변수들의 집합인 인식벡터 \mathbf{A} 및 탄성과속도 벡터 \mathbf{c} 는 각각 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\mathbf{A} = [A_1 \quad A_2 \quad A_4]^T \quad (12)$$

$$\mathbf{c} = [c_1 \quad c_2]^T + \mathbf{b} \quad (13)$$

여기서 2×1 벡터 \mathbf{b} 는 기지의 시스템 상수로써 수렴과정에서 탄성과 속도가 0일 경우에 차후 정규화 과정에서 0으로 나누어지는 것을 피하기 위하여 도입된 임의의 상수벡터이다. n 번째 탄성과 속도 c_n 은 인식변수 벡터의 함수로 나타낼 수 있고, Taylor 급수 전개는 다음과 같다.

$$\mathbf{c}_n(\mathbf{A} + d\mathbf{A}) = \mathbf{c}_n(\mathbf{A}) + \nabla \mathbf{c}_n(\mathbf{A}) \cdot d\mathbf{A} + O^2(d\mathbf{A}) \quad (14)$$

그러므로 n 번째 탄성과 속도의 변화량 $\delta \mathbf{c}_n$ 은 고차항을 무시하였을 때 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\delta \mathbf{c}_n = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \mathbf{c}_n}{\partial A_i} dA_i \quad (15)$$

여기서, \mathbf{A}_i 는 인식변수 벡터의 i 번째 항을 나타낸다. 계산의 효율성을 높이기 위하여 식 (15)을 정규화(normalization)를 하면 다음과 같다.

$$\frac{\delta c_n}{c_n} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial c_n A_i}{\partial A_i c_n A_i} dA_i \quad (16)$$

그러면 식 (16)은 다음과 같이 간단한 선형 민감도 행렬 방정식으로 기술할 수 있다.

$$\mathbf{z} = \mathbf{F}\boldsymbol{\alpha} \quad (17)$$

여기서, 2×1 벡터 \mathbf{z} 는 탄성과 속도의 변화율을 나타내며, 다음과 같이 정의 된다.

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \frac{\delta c_1}{c_1} & \frac{\delta c_2}{c_2} \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

또한, 3×1 벡터 $\boldsymbol{\alpha}$ 는 인식 변수들의 변화율을 나타내며, 다음과 같이 정의 된다.

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \frac{dA_1}{A_1} & \frac{dA_2}{A_2} & \frac{dA_3}{A_3} \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

마지막으로, 2×3 벡터 F 는 민감도 행렬(sensitivity matrix)로써, 인식 변수들에 대한 탄성과속도의 변화율을 나타내며, 다음과 같이 정의된다.

$$F = \begin{bmatrix} \frac{\partial c_1 A_1}{\partial A_1 c_1} & \frac{\partial c_1 A_2}{\partial A_2 c_1} & \frac{\partial c_1 A_3}{\partial A_3 c_1} \\ \frac{\partial c_2 A_1}{\partial A_1 c_2} & \frac{\partial c_2 A_2}{\partial A_2 c_2} & \frac{\partial c_2 A_3}{\partial A_3 c_2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

반복법을 이용하여서, 민감도 방정식 (17)의 해를 구하는 순서는 다음과 같다. 우선, 식 (12)에 정의된 인식 변수들을 임의로 가정한다. 이때 완전 슬립조건의 강성변수를 초기값으로 선택하면 알고리즘의 수렴속도를 개선할 수 있다. 와이어로프의 완전슬립 조건상태에서 강성변수들의 주요 이론적 공식은 Ghoreishi 등 (2007)이 정리한 결과를 이용할 수 있다. 다만, 가정된 인식변수들이 조건 부등식(11)를 만족하는지를 검토해야 한다.

다음은 가정된 인식 변수벡터 초기치에 대해서, 식(3)을 이용한 탄성과 속도들을 산정한다. 그리고, 식(20)에 정의된 민감도 행렬 F 의 산정이 필요하다. 여기서, 민감도 행렬은 인식변수의 단위 변화에 따른 탄성과 속도의 변화로써 근사적으로 계산한다. 다음은 탄성과속도 변화율벡터 Z 를 다음 식으로 구한다.

$$Z = \begin{bmatrix} \frac{c'_1 - c_1}{c_1} & \frac{c'_2 - c_2}{c_2} \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

여기서, c'_n 는 n 번째 계측 탄성과 속도이고, c_n 는 가정된 인식변수 벡터를 이용하여 산정한 n 번째 탄성과 속도이다. 그러면, 식 (17)을 이용하여서 인식변수 벡터의 변화율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = F^{-1} Z \quad (22)$$

여기서, F^{-1} 는 F 의 역행렬(Pseudo Inverse Matrix)이다. 따라서 인식변수 벡터는 다음 반복단계에서 다음과 같이 갱신된다.

$$A'_i = (1 + \alpha_i) A_i \quad (23)$$

여기서, A'_i 는 다음 반복단계에서 갱신되는 인식 변수벡터의 i 번째 항이다. 그리고, α_i 는 인식변수의 변화율벡터의 i 번째 항이다. 그러면, 새롭게 갱신된 인식변수벡터에 대해서 다시 식 (3)을 이용하여 탄성과 속도들을 산정하고, 식 (20)부터 식 (23)까지를 각 인식변수의 변화율 α 가 영으로 수렴할 때까지 반복한다. 수렴된 인식변수들이 조건 부등식 (11)의 만족 여부를 확인하고 알고리즘을 종결한다.

4. 실험적 검증

표 1과 같이 김병화 등(2010)의 연구에 사용된 직사각형 단면의 부착식 PSC 보 6개가 고려되었다. 강연선은 KSD 7002의 7연선 B종 SWPC 7B가 적용되었다. 강연선의 표준 지름, 공칭단면적, 그리고 최대인장하중(Tu)은 각각 15.2 mm, 138.7 mm², 그리고 260.68 kN 이다. 강연선은 콘크리트 단면적의 도심에 직선 배치되었다. 정착구는 썸기형식

표 1. 시험체 제원

PSC No.	콘크리트				강연선	
	길이 Lc(m)	폭 b(m)	높이 h(m)	압축강도 (MPa)	길이 Ls(m)	도입장력 T(kN)
1	7.999	0.302	0.302	37.08	8.278	0.0
2	8.000	0.303	0.301	37.08	8.439	145.6
3	7.995	0.300	0.300	37.08	8.444	263.8
4	7.994	0.302	0.301	37.08	8.433	355.8
5	7.998	0.303	0.299	37.08	8.435	465.0
6	7.993	0.303	0.302	37.08	8.433	522.5

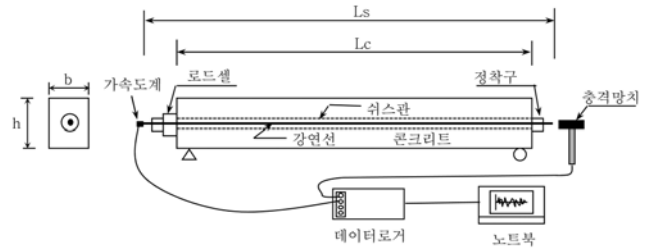


그림 2. 종진동 실험 개요

VSL Type P 6-3이 사용되었다. 여기서 P 6-3은 강연선 세가닥을 정착시킬 수 있는 방식이다. 쉬스관은 내경과 외경이 각각 51 mm와 54 mm가 적용되었다. 강연선은 긴장 후에 쉬스관 내부는 압축강도가 71.6 MPa인 시멘트 그라우팅재로 충전되었다. 도입장력의 계측을 위하여 정격용량 100톤의 ZIS사 모델 ELC-100S 로드셀(load cell)이 PSC No.1 시험체를 제외하고 나머지 5개 PSC 시험체에 각각 영구설치되었다. 강연선의 긴장력은 일단 긴장법에 의해서 로드셀 반대편에서 도입되었으며, 계측된 최종 도입장력은 표 1에 보인다.

종진동 실험은 그림 2와 같이 강연선의 한쪽 단부를 PCB사 모델 086C04 충격망치를 이용하여 종방향으로 가진하고, PCB사 가속도계 모델 352B10을 반대편 강연선에 부착하여 종진동 가속도응답을 계측하였다. 충격망치의 충격신호와 가속도 응답신호의 계측을 위하여 NI사의 모델 CRIO 9073 및 9233을 조합한 데이터 로거(data logger)가 사용되었다. 각 시험체당 200회 이상의 종방향 가진이 수행되었으며, 이때 샘플링 주파수는 25000 Hz로 설정하였다.

그림 3은 각 시험체에 대한 종진동 가속도 스펙트럼(spectrum)을 보여준다. 종방향 진동수는 식 (4)과 (5)처럼 n 배씩 증가하는 것이 명확히 관찰되지만, 비틀림 진동수는 종방향 1차 진동수의 10분의 1수준으로써 신호의 크기가 작아서 2차 모드 이상의 계측은 어렵다. 이는 충격망치를 이용한 가진 성분이 대부분 종방향이기 때문이다. 침두 추출법으로 추출된 종진동수는 표 2에 보인다. 긴장력 증가에 따른 종진동수의 비선형적 증가가 확인된다.

식 (6)과 (7)를 이용하여 계측 종진동수로 부터 산정된 탄성과 속도는 표 3에 보인다. Samras 등(1974)은 정재하 실험에 통해서 의해서 $A_1 \sim A_4$ 을 산정하였고 식 (3)을 이용하여 탄성과 속도를 추정하였다. Samras 등(1974)의 연구에는 19 mm 6×19(7×7 IWRC) 와이어로프가 사용되었는데, 종방향과 비틀림 탄성과속도가 각각 3597 m/s와 323 m/s 였다.

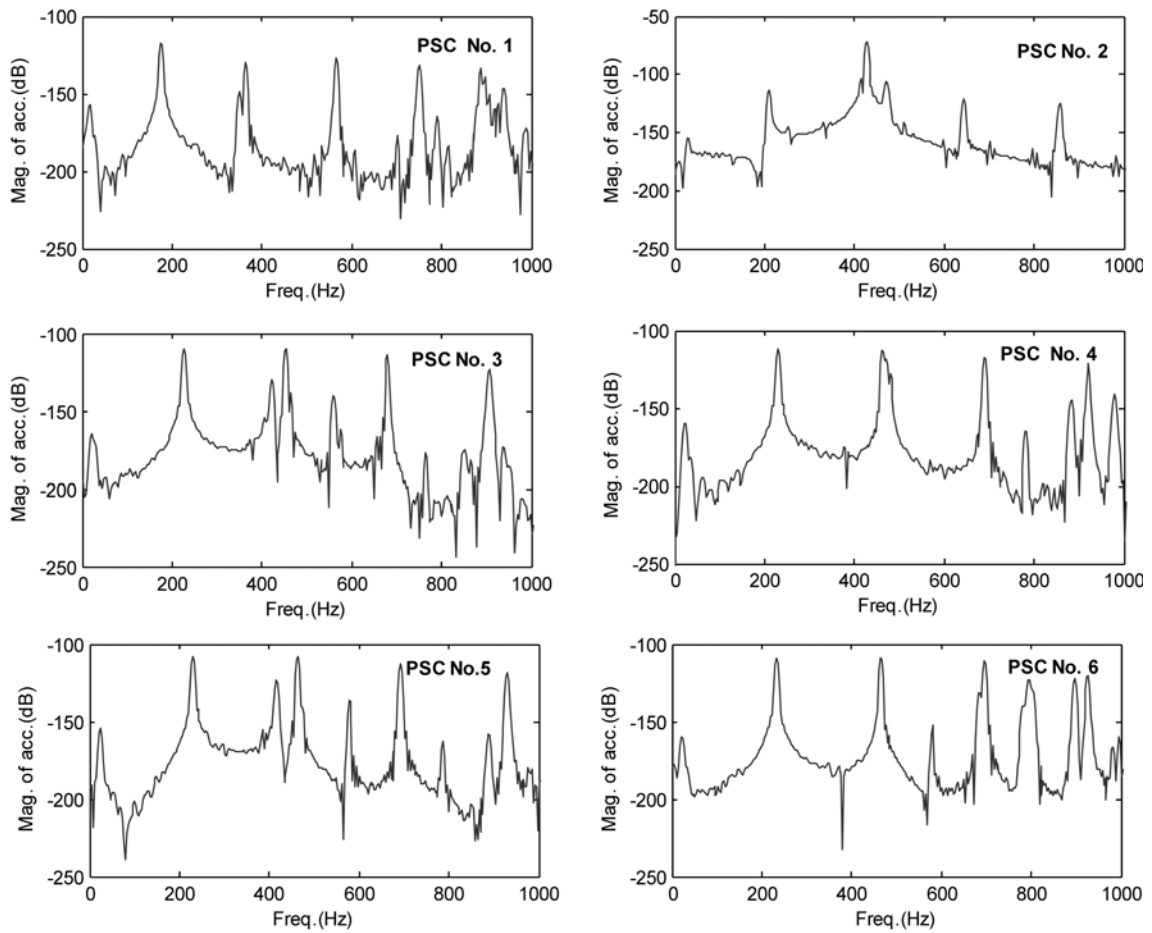


그림 3. 종진동 계측 스펙트럼

표 2. 계측 고유진동수

PSC No.	토크모드	종모드 f_n^2 (Hz)					
	f_1^1 (Hz)	1차	2차	3차	4차	5차	6차
1	18.31	177.0	366.2	567.6	750.7	939.9	1117
2	18.31	207.5	427.2	640.9	854.5	1068	1282
3	21.36	225.8	451.7	677.5	903.3	1129	1361
4	24.41	231.9	463.9	689.7	921.6	1154	1379
5	24.41	231.9	463.9	689.7	927.7	1160	1385
6	24.41	231.9	463.9	695.8	927.7	1160	1392

표 3. 탄성파속도

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

Samras 등(1974)의 연구에서는 도입장력에 대한 영향이 고려되지 않았다. 표 3에 보이는 실험결과와 비교해보면, 종방향 및 비틀림 탄성과 속도는 각각 최대 15% 및 28%이내의 차이로 매우 유사하다. 또한, 표 3에 보이는 탄성과 속도는 모드 별로 다소 차이가 있다. 이러한 모드 별 탄성과

속도의 차이는 텐던의 그라우팅 효과로 인한 분산 특성(dispersion characteristic)때문인 것으로 추정된다. 지배방정식 (1)과 (2)에는 분산특성이 발생되는 미분 항이 고려되지 않았다. 그러나 표 3에서 모드 별 차이는 최대 3.5% 정도 밖에 되지 않기 때문에 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

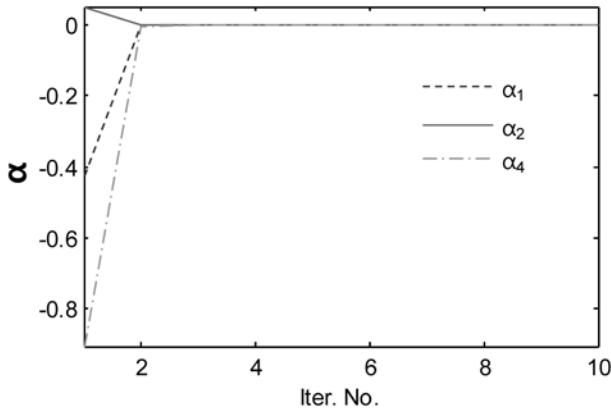


그림 4. 인식변수의 변화율

표 4. 추정 시스템 강성변수

긴장응력 (MPa)	A_1 ($\times 10^7$ N)	A_2 ($\times 10^4$ Nm/rad)	A_3 ($\times 10^4$ Nm)	A_4 (Nm ² /rad)
0	0.8704	1.6835	1.6835	35.1886
350.0	1.2754	1.8268	1.8268	28.7158
694.4	1.4640	1.8556	1.8556	26.9336
853.8	1.5151	1.8598	1.8598	27.1012
1117.5	1.5272	1.8608	1.8608	27.1012
1255.8	1.5489	1.8625	1.8625	26.8134

이는 비부착식 PSC의 강연선의 종진동 지배방정식도 식 (1) 과 (2)로 설명될 수 있음을 의미한다.

계측된 강성변수 $A_1 \sim A_4$ 의 인식을 위하여 3절의 시스템인 식기법이 적용되었다. 종방향 탄성과 속도는 표 3에 보이는 평균값이 적용되었으며, 비틀림 탄성과 속도는 1차 모드만 이용되었다. 시스템인식 알고리즘의 초기값은 와이어들의 완전 슬립조건 에서 유도된 Machida and Durelli(1973)의 모델이 이용되었다. 그림 4는 각 반복단계에서 식 (22)을 이용하여 인식변수의 변화율을 산정한 것으로서 인식변수의 수렴 특성을 나타낸다. 모든 인식변수들이 2번의 반복계산에서 수렴함을 알 수 있다.

시스템인식기법을 이용하여 최종 수렴된 강성변수 $A_1 \sim A_4$ 는 표 4에 보인다. Samras 등(1974)의 연구에서 정재하 실험으로 산정된 강성계수는 $A_1=1.976 \times 10^7$ N, $A_2=2.6218 \times 10^4$ mN/rad, $A_3=2.6710 \times 10^4$ mN, $A_4=40.9947$ m²N/rad이다. 표 4에 보이는 추정결과와 비교해보면, 와이어의 슬립이 완전히 허용되지 않는 조건에서 강성변수 A_1, A_2, A_3, A_4 는 각각 27.4%, 29.0%, 30.6%, 34.6% 이내의 차이로 매우 유사하다.

그림 5는 시스템인식 알고리즘을 이용하여 추정된 강성변수 $A_1 \sim A_4$ 의 도입 긴장력에 따른 변화를 나타낸다 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 6은 종방향 탄성과 속도에 대한 시스템 강성변수의

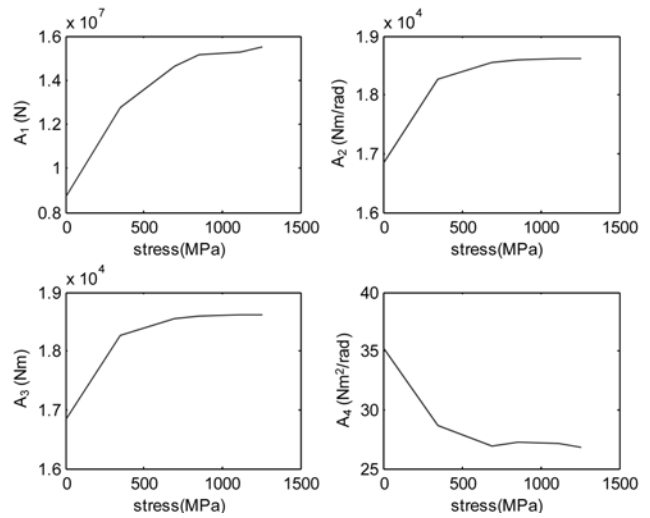


그림 5. 도입 긴장응력과 시스템 강성변수

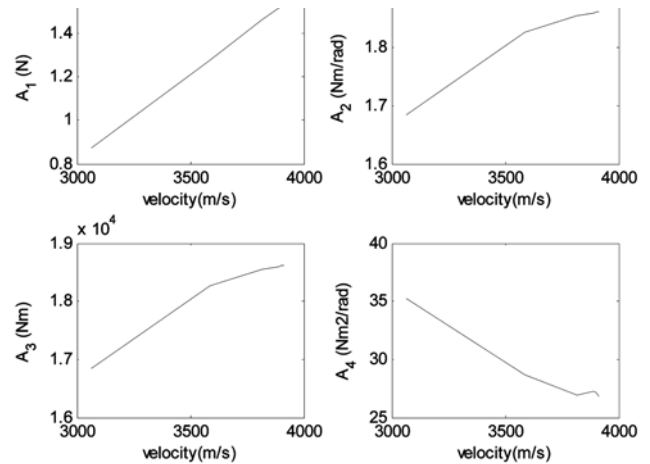


그림 6. 종방향 탄성과 속도와 시스템 강성변수

변화를 나타낸다. 종방향 강성변수 A_1 은 종방향 탄성과속도와 선형 비례하고 있으나, 비틀림 강성변수는 선형 반비례하는 경향이 관찰된다. 반면, 강성변수 A_2 와 A_3 은 종방향 강성변수 A_1 의 경향과 비틀림 강성변수 A_4 의 경향이 합성된 것처럼 보인다.

5. 요약과 결론

부착식 PSC 강연선의 종진동 거동 메커니즘을 규명하기 위하여, 기하학적 특성이 유사한 와이어로프의 지배방정식이 검토되었다. 도입 긴장력이 다른 6개의 부착식 PSC 시험체에 대하여 종진동 실험이 수행되었고, 종진동수의 계측을 통한 탄성과 속도가 산정되었다. 탄성과 속도로부터 지배방정식의 강성변수를 인식하기 위하여 시스템인식 알고리즘이 적용되었다. 추정된 강성변수의 분석결과로부터 적어도 다음 네 가지의 결론에 이른다.

1. 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.
2. 와이어로프의 종진동 지배방정식은 분산특성이 고려되지 않았기 때문에 이론적으로 모드 별 탄성과의 속도가 동일

하다. 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.

3. 강연선의 시스템 강성변수 계측을 위하여 정재하 실험을 수행하는 것보다 본 연구에서 제안한 시스템인식 기법을 적용하면, 계측이 용이한 종진동수를 이용하여 강연선의 강성변수를 추정 할 수 있다.
4. 강연선의 도입응력이 증가함에 따라 탄성파속도가 비선형적으로 증가하였다. 이는 강연선의 탄성과 속도를 계측하여 PSC 긴장재의 도입응력을 추정 할 수 있음을 의미한다. 추가연구를 통하여 PSC에 도입된 응력과 탄성파 속도 사이의 정량적 관계의 정립이 시급하다.

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, 제30권 제2A호, pp. 103-111.

김정태, 박재형(2005) PSC 보의 동적 모드정보를 통한 긴장력 감소 식별, **한국전산구조공학회지**, 한국전산구조공학회, 제18권, 제3호, pp. 39-45.

장정범, 이홍표, 황경민, 송영철(2010) 부착식 텐던의 유효 긴장력 평가를 위한 최적의 매개변수 결정에 관한 연구, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제30권 제2A호, pp. 161-168.

성택룡 등(2009) **정착부를 포함한 긴장재의 비파괴 안전진단기술 개발 및 실용화**. 건설기술혁신사업 최종연구보고서, 과제번호 1615000067, 포항산업과학연구원.

Beard, M.D., Lowe, M.J.S., and Cawley, P. (2003) Ultrasonic guided waves for inspection of grouted tendons and bolts, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 15, No. 3, pp. 212-218.

Chaki, S. and Bourse G. (2009) Stress level measurement in prestressed steel strands using acoustoelastic effect, *Experimental Mechanics*, Vol. 49, pp. 673-681.

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, Vol. 127, No. 6, pp. 599-606.

Chen, H.L. and Wissawapaisal, K. (2002) Application of wigner-Villw Transform to evaluate tensile forces in seven-wire prestressing strands, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 128, No. 11, pp. 1206-1214.

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*, Vol. 49, pp. 1251-1261.

Jiang, W., Wang, T.L., and Jones, W.K. (1991) Forced vibration of coupled extensional-torsional systems, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, No. 5, pp. 1171-1190.

Kim, B.H. and Park, T. (2007) Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 304, pp. 660-676.

Law, S.S. and Lu, Z.R. (2005) Time domain responses of a prestressed beam and prestress identification, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 228, pp. 1011-1025.

Lu, Z.R. and Law, S.S. (2006) Identification of prestress force from measured structural responses, *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 20, pp. 2186-2199.

Machida S. and Durelli A.J. (1973) Response of a strand to axial and torsional displacements, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 15, pp. 241-251.

Mottershead, J.E. and Friswell, M.I. (1993) Model updating in structural dynamics: a survey, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 167, No. 2, pp. 347-375.

Randow, C.L. and Gazonas, G.A. (2009) Transient stress wave propagation in one-dimensional micropolar bodies, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, pp. 1218-1228.

Rao, S.S. (1996) *Engineering Optimization: Theory and Practice*, 3rd Ed. A Wiley-Interscience Publication, New York, NY.

Raouf, M., Huang, Y.P., and Pithia, D. (1994) Response of axially preloaded spiral strands to impact loading, *Computers & Structures*, Vol. 51, No. 2, pp. 125-135.

Raouf, M. and Kraincanic, I. (1995) Simple derivation of the stiffness matrix for axial/torsional coupling of spiral strands, *Computers & Structures*, Vol. 55, No. 4, pp. 589-600.

Rizzo, P. (2006) Ultrasonic wave propagation in progressively loaded multi-wire strands, *Experimental Mechanics*, Vol. 46, 297-306.

Saiidi, M., Douglas, B., and Feng, S. (1994) Prestress force effect on vibration frequency of concrete bridges, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 7, pp. 2233-2241.

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.

Scalea, F.L., Rizzo, P., and Seible, F. (2003) Stress measurement and defect detection in steel strands by guided stress waves", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 15, No. 3, pp. 219-227.

Stubbs, N. (1985) A general theory of non-destructive damage detection in structures, in: H.H.H. Leipholz (Ed.), *Proceedings of the Second International Symposium on Structural Control*, University of Waterloo, Ontario, Canada, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 694-713.

Tadros, M.K., Omaishi, N.A., Seguirant, S.J., and Gallt, J.G. (2001) *Prestress Losses in Pretensioned high-strength concrete bridge girders*, Transportation Research Board, NCHRP Report No. 496.

Washer, G.A., Green, R.E., and Pond, Jr. (2002) Velocity constants for ultrasonic stress measurement in prestressing tendons, *Res. Nondestr. Eval.*, Vol. 14, pp. 81-94.

Yen, J.Y.R., Chen, C.H., and Chung, S.C (2009) Coupling behavior of wire ropes subjected to tensile impulse, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 135, No. 8, pp. 796-801.

(접수일: 2011.2.15/심사일: 2011.3.17/심사완료일: 2011.3.17)