부착식 PSC 텐던의 종진동 탄성과 속도의 추정 방법

Estimating Longitudinal Elastic Wave Velocity of Bonded PSC Tendon

김병화* · 김수진** · 이도형***

Kim, Byeong Hwa · Kim, Soo Jin · Lee, Do Hyung

Abstract

This study proposes a most effective way to estimate longitudinal elastic wave velocity of bonded PSC tendon. Various longitudinal vibration tests are conducted for bonded prestressed concrete beams with different applied prestress levels. To estimate elastic wave velocity from measured structural responses, the various estimation techniques are examined such as utilization of acceleration time history, velocity time history, reflected acceleration time history, measured frequency, etc. The comparison results show that the utilization of filtered acceleration is most effective way in practice to estimate elastic wave velocity in an impact-echo test.

Key words : Prestressed concrete, Tension force, Tendon, Longitudinal vibration, Elastic wave velocity

요 지

본 연구는 부착식 PSC 텐던의 종진동 탄성과속도를 정확히 추출하기 위한 가장 효율적인 방법을 제안한다. 도입 긴장력이 다른 부착식 PSC 시험체에 대하여 종진동 실험이 수행되었다. 계측된 구조응답으로부터 탄성과속도를 추정하기 위하여 필터링된 가속도 신호를 이용한 방법, 속도 신호를 이용한 방법, 반향파를 이용한 방법, 그리고 주파수를 이용한 방법 등이 비교 검토되었다. 비교 분석결과를 살펴보면, 가속도 신호를 이용하는 방법이 실용적인 측면에서 가장 효율적임을 알 수 있다.

핵심용어 : 프리스트레스트 콘크리트, 긴장력, 텐던, 종진동, 탄성과 속도

1. 서 론

최근 PSC(Prestressed Concrete) 부재는 여러 분야에 널리 사용되고 있다. 특히, PSC 교량 거더나 PSC 원전 격납건물과 같은 대형 구조물에 대한 활용이 확대되어가고 있는 추세이다. 이러한 PSC구조물의 긴장재는 공용 중에도 매우 높은 응력상태이기 때문에 긴장재에 대한 주기적 모니터링의 필요성이 커지고 있는 실정이다.

PSC 교량거더의 경우에는 재하능력 추정을 위하여 실규모 재하시험이 수행되고 있다. 원전 격납건물의 경우에는 건설시 제작된 테스트 빔의 파괴시험과는 별도로 구조물 전체에 대한 압력시험을 수행하여 재하능력을 추정하고 있다. 그러나 상기 실규모 재하시험들은 고가의 비용과 높은 위험성을 감수하여야 할 뿐 만아니라, 긴장재의 긴장력을 간접적으로 평가하는 방법이다. 그러므로 긴장재의 긴장력을 직접적으로 평가할 수 있는 기술의 개발이 필요하다.

김병화 등(2010, 2011)과 장정범 등(2011)은 부착식 PSC

텐던의 긴장력이 증가함에 따라서 종진동 탄성과의 속도가 비선형적으로 증가한다고 보고하였다. 그러나 종진동 특성을 이용한 부착식 PSC 텐던의 긴장력을 평가하기 위해서는 우선적으로 탄성과의 속도를 정확히 추출할 수 있어야 한다. 탄성과는 탄성 매질 내에서 매질의 교란 상태 변화로 인하여 에너지가 전달되는 역학적인 파동을 말한다. 탄성과는 일반적으로 자원탐사나 지질특성을 평가하기 위하여 널리 사용되고 있다. 또한, 탄성과 속도를 이용하여 구조물의 관리 및 평가에도 적용이 되고 있다. 탄성체 내부 응력 상태에 따라 탄성과 속도가 달라지는 물리적 현상에 근거를 둔 구조물에 대한 유사 연구는 다음과 같다.

Chen and Wissawapaissal(2001)은 유도초음파를 이용하여 긴장재의 초음파 도달시간을 계측하고 결과를 비교분석하였다. 강연선에 다양한 응력수준을 도입하고 탄성과의 도달시간 변화를 계측하는 실험이 수행되었다. 탄성과의 도달시간은 강연선에 도입된 응력과 선형관계가 있다고 보고하였다. Washer 등(2002)은 긴장된 7연선에 대하여 초음파의 탄성과 속도를

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

**경남대학교 대학원 첨단공학과 석사과정

***정회원 · 배재대학교 건설환경철도공학과 교수(교신저자)

이용하여 도입응력의 모니터링할 수 있는 장비의 개발이 가능하다는 것을 주장하였다. 또한, 탄성파의 속도를 추정하기 위하여 세 개의 EMAT(Electromagnetic Acoustic Transducer)를 사용하였다. Rizzo(2006)는 강연선에 도입된 응력의 상태를 평가하기 위하여 초음파 속도와 도입 응력 사이의 관계를 규명하는 연구를 수행하였다. 반면에 Chaki and Bourse(2009)는 유도초음파를 이용하여 비부착 PSC 강연선의 응력 모니터링은 가능하지만, 그라우팅 처리된 부착식 PSC 강연선 모니터링은 어렵다고 보고하였다. 이유는 부착식 PSC 강연선의 계측 길이가 길면, 초음파의 응답을 측정하기 어렵기 때문이다.

이와 같이, 탄성파의 속도를 이용하는 방법은 대부분 유도초음파를 이용하는 방법이 주로 연구되었다. 그러나 초음파는 부착식 PSC처럼 그라우팅 처리된 경우에는 에너지의 감쇠가 크기 때문에 구조응답의 계측이 쉽지 않다. 이에 대하여 Kim 등(2010)은 파장이 길고 에너지가 큰 저주파의 종방향 탄성파를 이용하는 것이 유리하다고 제시하였다. 또한, 부착식 텐던에 도입된 응력이 증가할수록 탄성파의 속도가 비선형적으로 증가하며 탄성파 속도를 계측함으로써 도입응력의 추정이 가능하다고 보고하였다. 그러나 탄성파 속도와 도입응력은 비선형적 비례관계이기 때문에 계측 탄성파 속도에 오차가 발생하게 되면 추정 도입응력은 크게 달라진다. 따라서 정확하게 탄성파의 속도를 계측하는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 종방향 탄성파의 속도를 추정할 수 있는 여러 가지 방법들을 제시하고, 비교 분석을 통하여 가장 효율적인 방법을 제안한다.

2. 이 론

2.1 가속도 신호 적분

탄성파의 도달시간은 종진동 실험에서 획득한 가속도 신호 및 속도 신호의 시간이력으로부터 계측이 가능하다. 속도 신호는 가속도 신호를 시간영역에서 적분을 하면 구할 수 있다. 계측한 가속도 신호로부터 속도 신호를 얻기 위해서는 가속도 신호의 적분이 필요하다. 계측된 가속도 시간응답을 $a(t)$ 라고 할 때, 속도 시간응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다(양정택 1998).

$$\begin{aligned} v(t) &= v(0) + \int_0^t a(\tau) d\tau \\ &= v(0) + \int_0^t \frac{d^2x(\tau)}{d\tau^2} d\tau \end{aligned} \quad (1)$$

가속도 신호를 적분하여 속도 신호를 구하면, 초기조건의 불확실성에 의한 오차가 발생하게 된다. 그러나 이 오차는 속도 신호의 크기에 영향을 미치지만 시간상 침투의 위치에는 영향을 미치지 못한다. 속도 신호로부터 얻고자 하는 것은 탄성파가 도달한 시간이므로 가속도 신호의 시간영역에서 적분한 속도 신호를 사용할 수 있다.

2.2 탄성파 속도

가속도 신호 및 속도 신호로부터 계측 가능한 탄성파의 속

도는 길이와 시간의 함수이며, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{L}{T} \quad (2)$$

여기서, L 은 긴장재의 길이이고, T 는 탄성파의 도달 시간이다. 따라서 탄성파의 도달 시간을 계측한다면, 탄성파 속도의 추정이 가능하다. 탄성파의 도달 시간은 텐던의 종방향 가진으로 인하여 발생하는 충격신호의 침투와 충격파가 원단에 도달하였을 때의 침투를 획득하여 두 침투들 사이의 시간 차이다.

반향파는 종방향으로 가진된 충격파가 가속도계가 설치된 원단에 도착한 후에 다시 반사되어 충격위치 단부까지 돌아와서 다시 가속도계 설치 위치까지 반사될 때의 응답신호이다. 반향파로부터의 탄성파의 속도 계측은 식 (3)을 이용한다.

$$V = \frac{2L}{T} \quad (3)$$

여기서, 탄성파의 도달시간(T)는 탄성파를 감지한 후 탄성파가 원단으로부터 반사되어 되돌아오는 시간이다. 또한, 계측길이(L)를 2배 해주는 이유도 탄성파의 이동거리가 2배로 늘어나기 때문이다.

또한, 탄성파의 속도는 고유진동수의 계측을 통하여 추정이 가능하다. 양단 경계조건이 자유단인 균질 축부재의 n 번째 고유진동수와 탄성파 속도(c_0) 사이의 관계는 다음 식 (4)와 같다.

$$c_0 = \frac{2L}{n} f_n \quad (4)$$

여기서, n 과 L 은 각각 모드수와 긴장재의 길이를 나타내며, f_n 은 n 번째 종진동수(Hz)를 나타낸다.

이와 같이, 탄성파의 속도는 종방향 탄성파의 도달시간 및 종진동수를 이용하여 계측 가능하다. 따라서 탄성파 속도를 계측하기 위하여 다음과 같이 종진동 실험이 수행되었다.

3. 종진동 실험

3.1 실험개요 및 방법

표 1과 같은 도입 긴장력이 다른 6개의 부착식 PSC 보에 대하여 그림 1과 같은 종진동 실험이 수행되었다. 각 시험체의 정착구는 콘크리트 면적의 도심에 위치하고 있으며, 세 가닥의 강연선이 정착되었다. 시험체에 정착된 강연선은 최대 인장응력(f_u)가 1,860 MPa인 KSD 7002 SWPC 7B가 사용되었다. 강연선을 정착시키기 위하여 VSL Type P6-3 정착구가 사용되었다. 각 시험체에 도입된 응력은 표 1에 보인다. 시험체 PSC1을 제외한 모든 시험체에는 도입응력의 계측을 위하여 ZIS사의 모델 ELC-100S 로드셀(load cell)이 설치되었다. PSC1에는 긴장력이 도입되지 않았으며, 로드셀이 설치되지 않았으므로 긴장력을 10 MPa로 가정하였다. 또한, 강연선의 긴장이 완료된 후에 쉬스관 내부를 시멘트 그라우팅 처리하여 부착식 PSC 텐던을 구성하였다.

표 1. 시험체 제원

PSC No.	콘크리트			강연선		
	Lc(m)	b(m)	h(m)	Ls(m)	응 력 (MPa)	정착구
1	7.999	0.302	0.302	8.278	10.0	P6-3
2	8.000	0.303	0.301	8.439	349.9	P6-3
3	7.995	0.300	0.300	8.444	634.0	P6-3
4	7.994	0.302	0.301	8.433	855.1	P6-3
5	7.998	0.303	0.299	8.435	1117.5	P6-3
6	7.993	0.303	0.302	8.433	1255.7	P6-3

그림 1. 종진동 실험 개요

그림 2. 종진동 실험

종진동 응답신호 계측을 위하여 NI사 모델 C-Rio 9073과 4채널 모델 NI 9233이 조합된 데이터로거를 사용하였다. 강연선의 가진을 위하여 PCB사의 모델 086C04 충격망치가 사용되었으며, 가속도 응답신호의 획득을 위하여 PCB사 모델 352B10 가속도계가 사용되었다. 계측된 응답신호의 저장을 위하여 노트북 컴퓨터가 사용되었으며, 응답신호의 노이즈 혼입을 최소화하기 위하여 노트북의 자체 배터리가 사용되었다. 데이터로거의 전원은 12V 자동차 배터리 2개가 직렬로 연결되어 사용되었다.

그림 2a와 같이 PSC 시험체의 로드셀이 설치된 정착단부의 강연선 중앙강선을 임팩트해머를 종방향으로 가진하였다. 또한, 그림 2b와 같이 가속도 시간응답의 획득을 위하여 가진 반대방향 강연선의 중앙강선에 가속도계가 종방향으로 부착되었다. 표 1에 보이는 6개의 시험체 각각에 대하여 200회의 종진동 실험이 반복 수행되었다. 획득한 신호응답은 50 kHz로 샘플링되었다.

3.2 탄성파 도달속도 계측

3.2.1 가속도신호를 이용한 탄성파속도 추정

가속도 신호를 이용하는 방법은 충격망치 및 가속도계로부터 획득한 시간이력에서 탄성파의 도달시간을 계측하고 식 (2)를 이용하여 탄성파의 도달속도를 산정하는 방법이다. 그림 3은 시험체 PSC3으로부터 획득한 충격신호와 가속도 응답신

그림 3. 시험체 PSC3의 탄성파 도달시간 'Ta'

표 2. 가속도 시간이력을 이용한 추정 탄성파속도

PSC No.	1	2	3	4	5	6
도달시간, T_a ($\times 10^{-3}$, sec)	2.6252	2.3160	2.1802	2.1406	2.1317	2.1244
도달속도, V (m/s)	3153.3	3643.9	3873.0	3939.0	3957.1	3969.6

호의 상세이다. 도달시간 T_a 는 충격망치를 이용하여 가진하였을 때에 발생하는 충격신호의 침투와 탄성파가 가속도계에 도달하였을 때 발생하는 신호의 침투 사이의 시간차이다. 여기서, 계측된 순수 가속도 시간이력은 노이즈의 혼입으로 인하여 침투의 추출에 어려움이 있다. 이에 획득한 가속도 신호를 Butterworth 3차 저주파 통과 필터를 이용하여 6 kHz 이상의 고주파는 필터링한 후에 침투를 추출하였다.

계측된 탄성파의 속도는 식 (2)와 같이 표 1에 보이는 센서간의 거리(L_s)를 탄성파의 도달시간 (T_a)로 나누어서 산정하였다. 계측된 탄성파 도달시간과 산정된 탄성파 속도는 표 2에 보인다.

3.2.2 속도신호를 이용한 탄성파속도 추정

식 (1)과 같이 가속도 시간응답신호를 수직 적분하면 속도 시간응답 신호를 획득할 수 있다. 속도 신호는 가속도 신호

그림 4. 시험체 PSC3의 탄성파 도달속도 'Tv'

표 3. 속도 시간이력을 이용한 추정 탄성파속도

PSC No.	1	2	3	4	5	6
도달시간, T_v ($\times 10^{-3}$, sec)	2.7478	2.3911	2.2506	2.2120	2.2051	2.1980
도달속도, V (m/s)	3012.6	3529.3	3752.0	3812.4	3825.3	3836.7

그림 5. 시험체 PSC3의 탄성파 도달속도 'Tr'

표 4. 반향파 시간이력을 이용한 추정 탄성파속도

PSC No.	1	2	3	4	5	6
도달시간 ($\times 10^{-3}$, sec)	5.3629	4.7387	4.4233	4.3514	4.3084	4.3365
도달속도 (m/s)	3087.2	3561.8	3818.0	3876.0	3915.9	3889.3

보다 첨두를 추출하기가 쉬운 장점이 있다. 이는 적분을 통하여 혼입 노이즈가 상쇄되기 때문이다. 그림 4b는 그림 3b에 보이는 가속도 시간이력을 적분하여 획득된 속도 시간이력 상세이다. 충격 신호와 속도 응답 신호의 첨두 사이에 탄성파의 도달시간(T_v)이 발생함을 알 수 있다. 탄성파의 도달속도를 추정하는 방법은 가속도신호를 이용하는 방법과 동일하다. 산정된 탄성파 속도는 표 3에 보인다.

3.2.3 반향파를 이용한 탄성파속도 추정

반향파를 이용하는 방법은 탄성파가 다시 되돌아오는 시간(Tr)을 이용한 방법이다. 가속도 신호에서는 노이즈의 혼입 등으로 반향파를 구분하기가 쉽지 않다. 그렇기 때문에 속도 신호의 반향파를 이용하였다. 그림 5는 PSC3의 속도신호의 반향파 상세이다. 탄성파가 되돌아오면서 발생하는 시간(Tr)을 확인할 수 있다. 계측된 탄성파의 도달시간(Tr)과 센서 간의 거리(L_s)를 식 (3)에 대입하면 표 4와 같이 탄성파의 속도를 추정할 수 있다. 반향파를 이용하는 방법은 계측 길이가 길어지면 에너지 감쇠로 인하여 반향파의 감도가 작아지기 때문에 반향파의 첨두를 구분하기가 쉽지 않은 단점이 있다.

3.2.4 종진동수를 이용한 탄성파속도

계측된 가속도의 스펙트럼 분석을 통하여 종진동수를 추출할 수 있다면, 식 (4)을 이용하여 탄성파 속도의 추정이 가능하다. 그림 6은 가속도 시간응답에 대한 스펙트럼을 보여준다. 종진동수는 첨두추출법(peak picking technique)을 이용하여 추출할 수 있다. 각 시험체에 대하여 계측 종진동수를 6차 모드까지 추출하였다. 표 5의 n 차 종진동수(f_n)와 길이(L_s)를 식 (4)에 대입하면, 표 5와 같이 탄성파의 속도를 추정할 수 있다.

3.3 결과비교

총 네 가지의 방법으로 부착식 PSC 시험체에 대한 탄성파의 속도를 추정하였다. 그림 7은 각 방법들을 이용하여 추정

그림 6. 계측 가속도신호의 스펙트럼

표 5. 계측 주파수와 추정 탄성파속도

PSC No.	mode No.						Velocity (m/s)
	1	2	3	4	5	6	
1	170.9	366.2	561.5	756.8	927.7	1123	3043.7
2	207.5	427.2	647.0	854.5	1062	1282	3590.7
3	219.7	451.7	683.6	903.3	1135	1355	3805.6
4	231.9	463.9	695.8	915.5	1147	1379	3890.1
5	231.9	463.9	695.8	927.7	1160	1379	3906.9
6	231.9	463.9	695.8	927.7	1160	1392	3912.1

그림 7. 추정 탄성파속도의 비교

된 도달속도 결과를 도시화한 것이다. 모든 결과에서 도입응력이 증가할수록 탄성파의 도달속도가 비선형적으로 증가하는 경향이 관찰된다. 그러나 반향파를 이용한 추정 결과에서 시험체 PSC6의 탄성파속도가 감소하는 것이 관찰된다. 이는 노이즈의 혼입으로 인하여 반향파의 부정확한 첨두 추출에서 발생한 문제일 것으로 판단된다.

그림 7에서 추정된 탄성파 속도를 비교해 보면, 가속도 시

간이력을 이용하여 추정된 탄성과 속도는 다른 방법들보다 가장 크게 나오는 경향이 확인되고, 속도 시간이력을 이용한 방법의 추정 탄성과 속도는 가장 작게 나오는 경향이 관찰된다. 반면, 진동수를 이용한 방법과 반향파를 이용하는 방법의 결과 값은 모두 중간값 정도이다. 가장 크게 나오는 가속도 신호 이용 방법과 가장 적게 나오는 속도 신호를 이용 방법 사이의 절대 최대오차는 4.67%이다. 일반적인 신호계측의 오차가 $\pm 5\%$ 정도임을 감안한다면, 탄성과 추정에 있어서 제시한 어떤 방법을 사용하여도 정밀도에는 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 다만, 실용적인 측면에서 가속도를 이용하는 방법이 가장 간편하고 효과적인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 종진동 특성을 이용하여 탄성과의 속도를 추정할 수 있는 방법들을 제시하였다. 제안된 모든 방법들은 계측오차 수준에서 탄성과 속도의 추정이 가능한 것으로 확인되었다.

반향파를 이용하는 방법은 신호의 침투추출에 어려움이 발생하기 때문에 실용적인 측면에서 다소 회의적이다. 또한, 종진동수를 이용하는 방법은 일일이 종진동수를 추출해야 하는 번거로움이 있으며, 노이즈가 혼입될 시 종진동수를 추출하는데 어려움이 발생할 수 있다. 그러므로 가속도 및 속도 신호를 이용하는 것이 비교적 쉽게 탄성과 속도를 추정할 수 있다. 특히, 필터링한 가속도 신호를 이용하는 것이 가장 편리한 것으로 판단된다. 왜냐하면, 속도 신호와 같이 가속도 신호를 적분해야 하는 과정을 거치지 않고 순수 신호를 필터링을 통하여 쉽게 탄성과의 도달시간의 계측이 가능하기 때문이다.

감사의 글

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2011-0014524).

참고문헌

- 김병화, 장정범, 이홍표 (2010) 종진동특성을 이용한 부착식 텐던의 긴장력 추정 타당성 연구, **대한토목학회 논문집**, 제30권, 제2A호, pp. 103-111
- 김병화, 장정범, 이홍표 (2011) 부착식 PSC 텐던의 종진동 메카니즘, **대한토목학회 논문집**, ISSN 1015-6348, 제31권, 제3A호, pp. 261-267.
- 양경택 (1998) 이동하중을 받는 보의 변위응답 산정을 위한 가속도신호의 적분상 문제점, **한국전산구조공학회 논문집**, 제11권, 제4호, pp. 135-146.
- 장정범, 김병화 (2011) 부착식 텐던의 비파괴 긴장력 평가기술 개발, **한국강구조학회** 2월호 특집기사, pp. 9-12.
- Kim, B.H., Jang, J.B., Lee, H.P. and Lee, D.H. (2010) Effect of pre-stress force on longitudinal vibration of bonded tendons embedded in a nuclear containment, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, No. 6, pp. 1281-1289.
- 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.
- Washer, G.A., Green, R.E. and Pond Jr, R.B. (2002) Velocity constants for ultrasonic stress measurement in prestressing tendons, *Res Nondestr Eval*, Vol. 14, pp. 81-94.
- Rizzo, P. (2006) Ultrasonic wave propagation in progressively loaded multi-wire strands, *Experimental Mechanics*, Vol. 46, pp. 297-306.
- Chaki, S. and Bourse, G. (2009) Stress level measurement in pre-stressed steel strands using acoustoelastic effect, *Experimental Mechanics*, Vol. 49, pp. 673-681.

◎ 논문접수일 : 12년 03월 20일

◎ 심사의뢰일 : 12년 03월 22일

◎ 심사완료일 : 12년 04월 04일