

# 중진동특성을 이용한 부착식 텐던의 긴장력 추정 타당성 연구

## Feasibility Study of Estimating Prestress Force of Grouted Tendons

김병화\* · 장정범\*\* · 이홍표\*\*\*

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

### Abstract

A feasibility study for nondestructively estimating prestress force of a grouted tendon using axial vibrations has been investigated. Total eight prestressed concrete beams with different stress levels have been specially designed and constructed for this investigation. The various axial vibration tests have been conducted in order to extract the dynamic characteristics of the prestressed concrete beams. It turns out that the axial frequency, elastic wave velocity and elastic modulus are nonlinearly increased as the prestress force level increases. It seems that the axial vibration characteristics of the existing grouted tendons are a feasible indicator for the identification of their tensile force.

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

### 요 지

본 연구는 부착식 텐던의 중진동수를 이용하여 텐던의 장력을 추정할 수 있는지 여부를 알아보는 타당성 연구이다. 본 연구를 위하여 총 8개의 프리스트레스 콘크리트 보 시험체가 특수 제작되었다. 각각의 시험체는 도입장력이 다른 부착식 텐던이 설치되었다. 부착식 텐던의 중진동 특성을 파악하기 위하여 다양한 중진동실험이 반복 수행되었다. 실험결과를 살펴보면, 텐던에 도입된 장력이 증가함에 따라서 중진동수, 탄성파속도 및 탄성계수가 비선형적으로 증가하였다. 그러므로 중진동 특성을 이용한 부착식 텐던의 장력평가는 가능 할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 장력, 텐던, 중진동, 프리스트레스 콘크리트, 탄성파속도

### 1. 서 론

최근 재료기술의 급속한 발전에 따라, 구조용 부재로써 고강도 긴장재의 이용이 급증하고 있다. 케이블을 이용한 장대교량이나, 텐던(tendon)의 긴장을 이용한 PSC(Prestressed Concrete) 교량 거더 및 원자력발전소 원자로건물 등이 그 좋은 예이다. PSC구조물의 긴장재는 평상시에도 매우 높은 응력상태에 있기 때문에 긴장재의 응력상태를 주기적으로 모니터링 할 필요성이 대두되고 있다. 사장교 케이블이나 현수교 행어등의 장력은 휨진동수를 측정하여 추정하는 방법(박대효 등 2005; 김병화 등 2005; 박대효 등 2007; 김병화 등 2007; Kim 등 2007a; Kim 등 2007b; 장한택 등 2008; 박규식 등 2009)이 실용화 수준에 이르고 있다. 그러나 PSC 교량 거더나 원자력발전소 원자로건물의 경우에는 아직까지 실용화 수준의 방법이 개발되지 못하였다. 그래서 PSC교량 거더의 재하능력을 추정하기 위해서 PSC교량 전체에 대한 재하시험을 수행하고, 원자력발전소 원자로건물에 설치된 부착식 텐던의 긴장력을 평가하기 위하여 건설시 제작된 테스트빔을

이용하는 등 간접적인 방법이 실무에 적용되고 있는 실정이다. 이와 같이, 대형 PSC구조물에 대한 구조물 전체의 재하시험이나 테스트빔을 이용한 간접적인 방법은 안정성 및 경제성 그리고 신뢰성 측면에서 회의적이기 때문에, 직접적이고 실용화 가능한 긴장재의 긴장력 추정기술의 개발이 시급한 실정이다.

PSC 텐던의 경우에는 긴장 후에 텐던 덕트(duct)를 그라우팅(grouting)을 하는 부착식 PSC 텐던과 그라우팅을 하지 않은 비부착식 PSC텐던으로 구분하여 연구가 진행되었다. 비부착식 PSC 텐던의 장력 추정연구는 휨진동을 이용하는 방법, 고주파의 종방향 응력파를 이용하는 방법, 그 밖의 방법 등으로 세분할 수 있다. 우선, 휨진동을 이용한 비부착식 PSC 텐던의 장력추정관련 연구현황을 살펴보면 다음과 같다. Saiidi 등(1994)은 비부착식 PSC텐던을 갖는 PSC구조물의 압축력이 감소함에 따라서 휨진동수가 증가하는 현상을 보고하였는데, 이는 압축력 감소에 따라서 보의 미세균열의 열림이 커지고, 보는 'Soften' 해진다고 설명하였다. Law 등 (2005)와 Lu 등(2006)은 비부착식 텐던을 가지는 PSC보의

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

\*\*한국전력공사 전력연구원 책임연구원

\*\*\*정회원 · 한국전력공사 전력연구원 연구원

하중과 처짐 또는 변형률의 시간응답으로부터, 직교다항식 분해를 통하여 속도응답과 가속도응답을 추출하고 주파수영역에서 최적화 이론을 적용하여 텐던의 긴장력과 휨강성을 동시에 추정하는 이론을 제안하였다. 그러나 Hamed 등(2006)은 축하중을 받는 보에 대하여 대변형시를 고려한 지배방정식을 부착식 및 비부착식 PSC 텐던 모두에 대하여 도출하였고, 이론적으로 텐던의 그라우팅에 상관없이 긴장력 크기는 PSC보의 휨진동수에 영향이 없음을 보였다. 즉 Lu 등(2006)의 연구결과와 Hamed 등(2006)의 연구결과는 서로 상충되고 있다. 또한 김정태 등(2005)은 Saïidi 등(1994)의 연구결과에 근거로하여, 비부착식 PSC 보의 휨진동수와 긴장력의 손실을 고려한 PSC보 전체의 환산탄성계수와의 관계를 도출하여 긴장력 손실을 추정하는 방법을 제안하였다. 그러나 제안기법의 최대 오차는 70%정도에 이르기 때문에 아직 실무에 적용하기에는 어려움이 있고, Hamed 등(2006)의 연구결과와는 상충되는 면이 존재한다. 고주파의 종방향 응력파를 이용한 대표적인 연구는 Chen 등(2001,2002)이 제시한 방법으로써, 긴장재에 작용하고 있는 응력상태에 따라서 응력파의 탄성파속도가 달라지는 물리적 성질을 이용하는 방법이다. 비부착식 PSC 텐던 단부에 종방향으로 응력파(150 kHz~350 kHz)를 입사하고 반대쪽 단부에서 응력파의 도달 속도를 측정함으로써 텐던의 긴장력을 추정하였다. 또한, Kwun 등(1998)은 자기유도파(Magnetostrictive wave)를 이용하였는데, 스트랜드(strand)에 긴장력이 도입되면 강선들 사이에 발생하는 상호작용에 의해서 사라지는 주파수(75 kHz~110 kHz)가 존재하며, 사라지는 주파수는 도입장력의 로그에 선형관계가 있는 것을 보고하였다. 그밖에 비부착 텐던의 장력추정 방법으로는 지광습 등(2006)이 제안한 금속계열의 고저항전도체를 긴장재에 부착시켜서 전도체의 전기기계적 저항을 측정함으로써 장력변화를 추정하는 방법 등이 있다.

부착식 PSC 텐던의 경우에는 장력추정연구는 보고된 바 없고, 그라우팅의 결합추정연구가 활발하게 진행되었다. Beard 등(2003)등 유도초음파(ultrasonic guided wave)를 부착식 텐던의 단부에 종방향으로 입사하고 반향파를 측정하여 부착식 텐던 시스템 내부의 결합유무를 추정하였다. 그러나 부착식 텐던의 경우에 고주파를 이용하는 방법들은 그라우팅에 의한 감쇠가 심하여 단부에서 응답을 감지할 수 없는 근본적인 문제점을 가지고 있다. 일반적으로 유도초음파의 최대 진단범위는 1.5 m로 알려져 있다. 이러한 문제를

해결하기 위하여 입사파의 에너지가 최소로 분산되는 최적의 입사파의 주파수범위를 찾는 노력(Pavlovic 등, 2001)이 진행되었다.

이와 같이, PSC 텐던의 장력추정연구들은 주로 비부착식 PSC 텐던 위주로 진행되었다. 부착식 PSC 텐던의 경우는 유도초음파를 이용한 결합추정연구에 관한 것이고, 부착식 PSC 텐던에 대한 긴장력 평가 연구는 현재까지 보고된 바 없다. 부착식 PSC 텐던의 긴장력을 추정하기 위해서는 기존의 휨진동수를 이용하는 방법과 고주파 종방향 응력파를 이용하는 방법을 고려해 볼 수 있다. 그러나, 앞서 언급한 것과 같이, 휨진동수를 이용하는 방법은 긴장재의 도입장력과 휨진동수와의 관계가 아직까지 학계에 논란이 있으며, 휨진동수는 경계조건에 극히 민감하기 때문에 실무에 적용하기에는 다소 회의적이다. 반면, 고주파의 종방향 응력파를 이용하는 방법은 그라우팅 및 강연선 상호작용에 의한 감쇠 때문에 진단 가능 길이가 너무 짧다. 대부분의 PSC 구조물의 길이는 30 m~40 m 정도이기 때문에 고주파를 이용하는 방법으로는 반향 응답파를 측정할 수 없다. 이러한 문제점에 대한 대안으로써 텐던의 저주파 종진동을 고려해 볼 수 있다. 왜냐하면, 저주파 진동은 파장이 길고 에너지가 커서 진단 가능 길이가 매우 길기 때문이다.

국내에 설치된 PSC 구조물의 대부분은 텐던의 부식방지를 위하여 그라우팅 처리하고 있기 때문에, 본 연구에서는 실용성 측면에서 PSC 텐던의 종진동응답을 이용하여 부착식 텐던의 긴장력을 평가할 수 있는지 여부를 다양한 실험적 연구를 통하여 도출하고자 한다.

## 2. 종진동실험 개요

### 2.1 시험체

표 1 과 같이 직사각형 부착식 PSC 보가 제작되었다. 표준지름 15.2 mm, 공칭단면적 138.7 mm<sup>2</sup>, 최대 인장하중 Tu=260.68 kN인 KSD 7002의 7연선 B종 SWPC 7B가 사용되었다. 원전 원자로건물의 수직텐던을 모사하기 위하여 강연선은 그림 1과 같이 콘크리트 단면적의 도심에 직선 배치되었다. 8 m 시험체의 제원은 월성 원자력발전소의 격납구조물 내부의 수직텐던을 모사하기 위하여 축소모형으로 제작되었다. 정착구는 쉐기형식 VSL Type P 6-1과 P 6-3이 사용되었다. 여기서 P 6-1과 3은 각각 강연선 한 가닥과 세

Table 1. Test Specimens

PSC No.	콘크리트				강연선			Remark
	길이 Lc(m)	폭 b(m)	높이 h(m)	입축강도 (MPa)	길이 Ls(m)	정착구 (VSL Type)	도입장력 T(kN)	
1	3.000	0.202	0.302	22.65	3.368	P 6-1	76.4	29% Tu
2	3.003	0.201	0.297	21.37	3.368	P 6-1	114.7	44% Tu
3	7.999	0.302	0.302	37.08	8.278	P 6-3	0.0	0
4	8.000	0.303	0.301	37.08	8.439	P 6-3	145.6	19% Tu
5	7.995	0.300	0.300	37.08	8.444	P 6-3	263.8	34% Tu
6	7.994	0.302	0.301	37.08	8.433	P 6-3	355.8	46% Tu
7	7.998	0.303	0.299	37.08	8.435	P 6-3	465.0	59% Tu
8	7.993	0.303	0.302	37.08	8.433	P 6-3	522.5	67% Tu

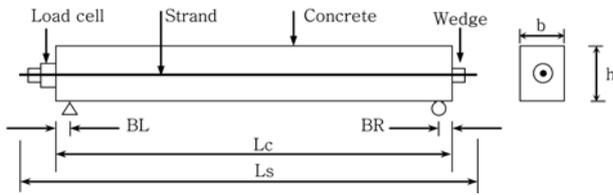


그림 1. 시험체 제원

가닥을 정착시킬 수 있는 방식이다. 슈스관은 내경과 외경이 각각 51 mm와 54 mm가 적용되었으며, 강연선 긴장 후에 슈스관 내부는 시멘트 그라우팅으로 충전시켜서 부착식 텐던을 구성하였다. 그라우팅제의 압축강도는 3개 시편의 실험 결과 평균 71.6 MPa였다. 길이 8 m 시험체의 콘크리트시편 3개에 대한 재료특성시험 결과로써 평균 콘크리트 탄성계수와 포아송비는 각각 32,644 MPa과 0.22이다.

각각의 PSC시험체는 도입장력의 계측을 위하여 로드셀(load cell)이 영구설치 되었다. CASKOREA사의 정격용량 40톤 모델 CCHE-40TCK이 길이 3 m PSC시험체 PSC1과 PSC2에 부착되었으며, 8 m PSC시험체의 경우에는 정격용량 100톤의 ZIS사 모델 ELC-100S이 도입장력 계측을 위하여 영구 설치되었다. 강연선의 장력은 일단긴장법에 의해서 로드셀 반대편에서 도입되었으며, 계측된 최종 도입장력은 표 1에 보인다. 표 1의 도입장력은 PSC시험체에 부착한 로드셀을 통하여 판독된 도입장력으로써 긴장후 손실이 모두 반영된 장력이다.

본 연구는 부착식 텐던이 설치된 원자력발전소 원자로건물의 수직텐던의 장력을 추정하기 위한 기초연구로써, 연구결과 적용을 목표로하는 대상구조물은 원자력발전소 원자로 건물의 수직텐던이다. 원자로건물의 수직텐던은 텐던의 편심이 없고 단면 중앙부에 텐던이 배치되어 있다. 그러므로 제작된 8 m 시험체의 제원은 원자로건물의 수직벽에 대한 축소모형으로써 콘크리트와 텐던이 받는 응력이 실제구조물의 응력과 동일하게 되도록 단면을 결정하였다. 그러나, 실제 원자로건물의 높이는 40 m이지만 실험여건 및 여러 가지 연구 환경이 허락되지 못하여 길이만 8 m로 축소 시켰다.

## 2.2 종진동 실험 시나리오

종진동 실험의 기본 개요는 그림 2에 보인다. 강연선의 종방향가진을 위하여 PCB사 모델 086C04 충격망치가 이용되었다. 종진동 응답신호는 PCB사 가속도계 모델 352B10이 사용되었으며, 응답신호계측을 위하여 데이터로거는 NI사의 모델 CRIO 9073과 4 채널 모델 NI 9233의 조합이 사용되었다. 응답신호는 노트북 컴퓨터의 하드디스크에 수집되었

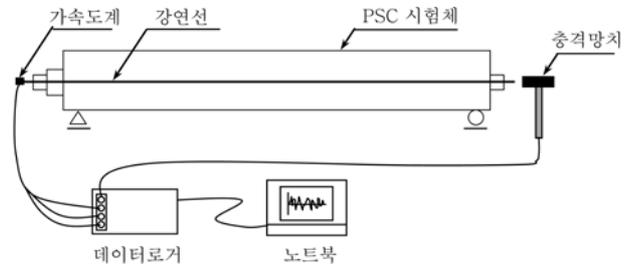


그림 2. 종진동실험 개요

다. 응답신호에 전원 노이즈의 혼입을 방지하기 위하여 데이터로거는 12V 자동차 배터리 2개를 직렬연결하여 사용하였으며, 노트북은 자체 전원을 사용하였다.

표 2와 같은 종진동 실험이 고려되었다. Test No.1~3은 3 m인 시험체를 이용한 기초실험이고, 기초실험에서 도출된 결과를 근거로하여 8 m 시험체에 대한 본시험이 Test No.4와 같이 계획되었다. 첫 번째 실험은 최적의 가속도계 위치를 찾기 위한 기초 실험으로써, 그림 3과 같이 좌측 강연선의 중앙강선과 우측 강연선의 외곽강선에 각각 가속도계  $a_1$  과  $a_2$ 를 부착하였다. 표 2의 경계조건 기호들은 그림 1에 정의되어 있다. 우측 강연선의 중앙강선을 가진함에 따라 가진신호  $f$ 와 두개의 가속도신호가 기록되었다. 가속도계의 지름이 강선의 지름보다 다소 크기 때문에 가속도계를 중앙강선에 부착시키기 위해서는 중앙강선과 주변강선들 사이에 약간의 틈을 유지할 필요가 있다. 이를 위해서 줄갈을 이용한 주변강선의 단면정리가 수행되었다.

두 번째 실험은 중앙강선과 외곽강선의 응답신호 비교를 위하여 계획되었다. 그림 4a와 같이 좌측 외곽강선 3개에 가속도계( $a_1, a_2, a_3$ )를 부착하고 우측 강연선의 중앙강선을 그림 4b와 같이 가진 하였다. 이때 가속도계들이 중앙강선과 접촉하지 않도록 가속도계의 종축을 외곽강선의 종축 바깥쪽에 위치하도록 부착시켰다. 계측된 외곽강선의 가속도 응답신호와 첫 번째 실험의 중앙강선 응답신호가 비교 분석 되었다. 세 번째 실험은 시험체의 지점조건 변화에 따른 종진동수의 민감도를 분석하기 위하여 Test No. 2의 시험체 PSC2의 좌측 경계조건을 그림 5와 같이 이동시켜서 두 번째 실험과 동일하게 종진동 실험을 수행하였다. 마지막으로 네 번째 실험에서는 길이 8 m인 시험체에 대한 본 실험이 수행 되었다. 8 m 시험체들은 세 가닥의 강연선들이 설치 되었기 때문에 그림 6b와 같이 각각의 강연선 중앙강선에 가속도계( $a_1, a_2, a_3$ )가 부착되었다. 8 m 시험체의 지점조건은 그림 6a의 단부와 같이 임의조건으로 설정하였다.

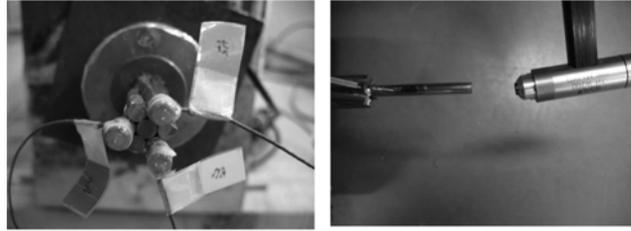
Table 2. Test Cases

Test No.	PSC No.	가속도계 위치 및 번호		충격위치 (우측)	경계조건 (m)	
		좌측	우측		BL	BR
1	1, 2	중앙강선( $a_1$ )	외곽강선( $a_2$ )	중앙강선( $f$ )	0.05	0.05
2	1, 2	외곽강선 $a_1, a_2, a_3$		중앙강선( $f$ )	0.05	0.05
3	2	외곽강선 $a_1, a_2, a_3$		중앙강선( $f$ )	0.25	0.05
4	3,4,5,6,7,8	중앙강선 $a_1, a_2, a_3$		중앙강선( $f$ ) $f$	-	-



(a) 좌측 중앙강선 (b) 우측 외곽강선

그림 3. Test No.1: 기초 종진동 실험



(a) 좌측 외곽강선 (b) 우측 중앙강선 가진

그림 4. Test No.2: 외곽 강선의 종진동 실험



(a) BL=0.05m  
경계조건(변경전) (b) BL=0.25m  
경계조건(변경후)

그림 5. Test No.3: 경계조건의 민감도 실험



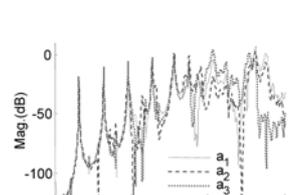
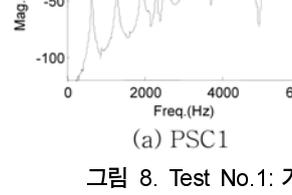
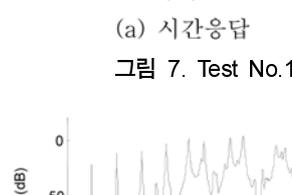
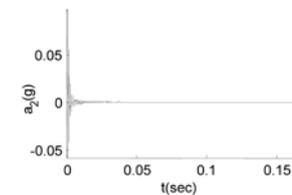
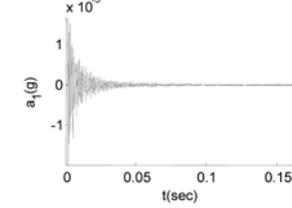
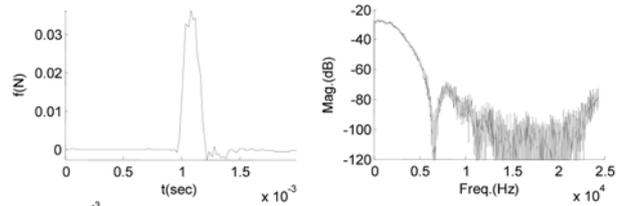
(a) 8m 시험체 전경 (b) 중앙강선에 부착된  
가속도계

그림 6. Test No.4: 8 m 시험체 종진동 실험

### 3. 실험결과

#### 3.1 Test No.1

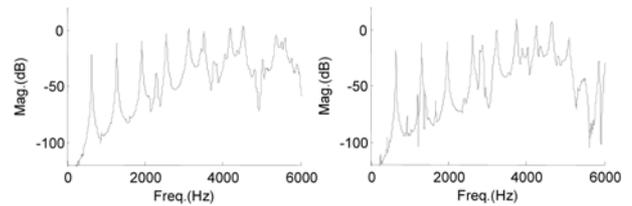
충격망치를 이용하여 시험체 PSC1과 PSC2에 대하여 70회의 종방향 가진이 반복 수행되었다. 두 개의 가속도응답( $a_1$ ,  $a_2$ ) 및 가진신호( $f$ )가 50 kHz로 샘플링 되었다. 그림 7은 PSC1에 대한 전형적인 가속도 시간응답과 충격신호를 보여준다. 가진신호의 주파수응답으로부터 6 kHz까지만 가진된 것을 알 수 있다. 그림 7b의 주파수 응답의 해상도는 1.526 Hz이고 Hanning window를 사용한 스펙트럼이다. 가속도계의 시간응답을 살펴보면  $a_2$ 의 크기가  $a_1$ 보다 매우 큰데, 이는 가속도계  $a_2$ 의 위치가 충격위치와 인접하기 때문이다. 또한 가속도의 주파수응답들을 살펴보면, 가속도  $a_1$ 의 주파수는 일정한 간격을 유지하고 있으며 양단이 자유단인 축



(a) 시간응답

(b) 주파수응답

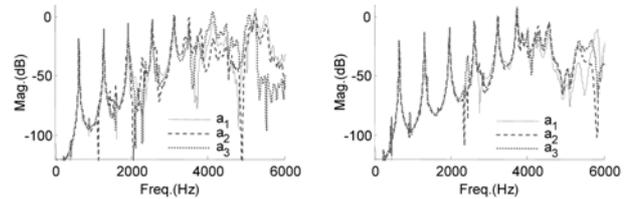
그림 7. Test No.1, 시험체 PSC1의 응답



(a) PSC1

(b) PSC2

그림 8. Test No.1: 가속도  $a_1$ 의 평균 전달함수



(a) PSC1

(b) PSC2

그림 9. Test No.2: 가속도 평균 전달함수

부재의 이론적 고유진동수의 경향과 일치한다. 반면 가속도  $a_2$ 의 주파수는 단부의 국부모드가 가진되어서 전체 종모드와의 구분이 어렵다. 그러므로 충격위치로부터 근단보다는 원단의 가속도 응답신호 계측이 효과적인 것을 알 수 있다.

시험체 PSC1과 PSC2의 가진신호  $f$ 에 대한 가속도응답  $a_1$ 의 70회 평균 전달함수(transfer function)가 그림 8에 보인다. PSC 시험체의 전체 종모드가 명확히 관찰되며, 종모드들 사이에 국부적 모드들이 불규칙하게 발견된다.

#### 3.2 Test No.2

세 개의 가속도계( $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ )를 왼쪽 강연선 단부의 외곽 강선들에 부착하고 반대편 강연선의 중앙강선을 67회 가진하였다. 그림 9는 가진신호에 대한 외곽강선의 평균 전달함수를 보여준다. 외곽강선들의 종진동수 및 크기는 6차 저차 모드까지는 동일하다. 그러나 6차모드 이후의 고차모드에서는 모드의 크기 및 진동수가 약간의 차이를 보인다. 또한, 그림 8a에 보이는 중앙강선의 평균 전달함수와 그림 9a의

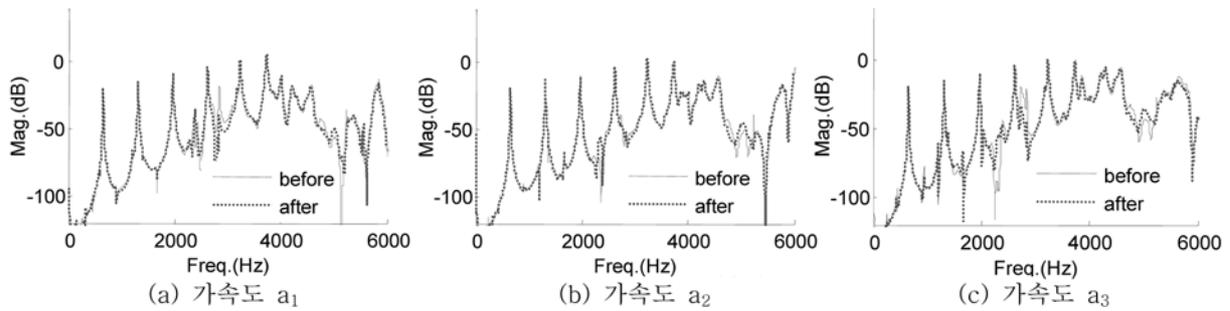


그림 10. Test No.3: 경계조건 변화에 따른 PSC2의 가속도 평균 전달함수

전달함수를 비교해보면, 중앙강선은 최대 8차모드까지 구분이 가능하지만, 외곽강선은 최대 6차모드까지만 구분이 가능하다.

### 3.3 Test No.3

중진동수의 지점조건에 대한 민감도를 분석하기 위하여, Test No. 2의 시험체 PSC2의 경계조건을 표 2와 같이 변경시켰다. Test No. 2와 동일한 조건으로 총 61회의 실험이 반복 수행되었다. 그림 10은 외곽강선에 부착된 가속도의 평균 전달함수를 나타낸다. 지점위치 변경에 따른 종모드의 변화는 무시 할 정도인 것을 알 수 있다. 즉, 시험체의 지점 위치 변경은 휨모드에는 영향을 줄 수 있으나 종모드의 자유단조건에는 영향을 미치지 못한다.

### 3.4 Test No.4

첫 번째 및 두 번째 실험의 결과로부터 충격위치로부터 원단에 있는 중앙강선에 가속도계를 부착하는 것이 효과적이라는 사실을 알 수 있었다. 또한 세 번째 실험의 결과로부터 시험체의 지점변경 영향은 종모드에 영향이 없다는 것을 알 수 있었다. 네 번째 본 실험에서는 8 m 시험체에 대하여 세 개의 가속도계를 충격위치로부터 원단에 있는 세 개의 강연선 중앙강선들에 각각 부착시키고, 각 시험체당 160회 이상의 중진동 가진이 반복 수행되었다. 그림 11은 시험체들의 평균 전달함수를 보여준다. 도입장력이 증가함에 따라서 4 kHz~5 kHz의 중진동 모드가 명확히 나타남을 알 수 있다. 또한 도입장력이 0 kN인 시험체 PSC3의 경우에는 식별 가능한 주파수가 겨우 8개인 반면, 최대긴장 시험체인 PSC8의 경우에는 식별 가능한 주파수가 30개에 이른다.

그림 12는 그림 11로부터 추출한 중진동수를 보여준다. 양단 경계조건이 자유단인 균질 축부재의  $n$ 번째 중진동수 (Hz)는 다음과 같다.

$$f_n = \frac{nc_0}{2L} \quad (1)$$

여기서,  $L$ 는 축부재의 길이이고,  $c_0$ 는 탄성파속도로써 다음과 같다.

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

여기서,  $E$ 와  $\rho$ 는 탄성계수 및 질량 밀도를 나타낸다. 그림 12에서 이론 중진동수는 식 (1)에 도입장력이 0 kN인 PSC3의 1차 중진동수와 표 1의 강선 길이를 대입하여 산정된

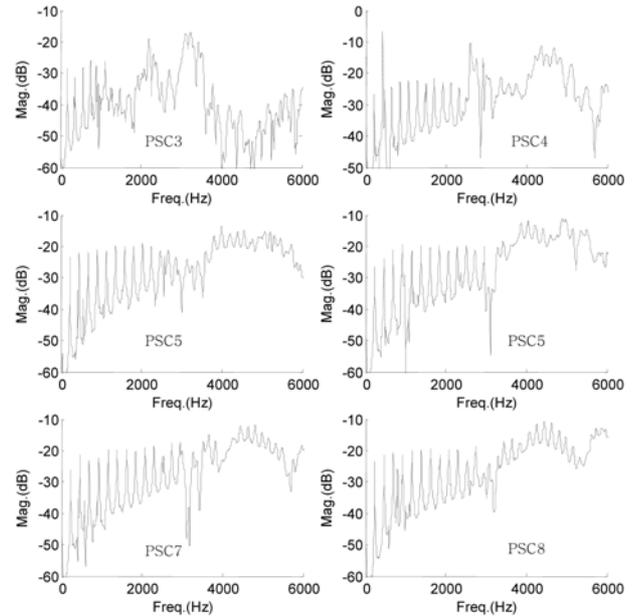


그림 11. Test No.4: 가속도  $a_3$ 의 평균 전달함수

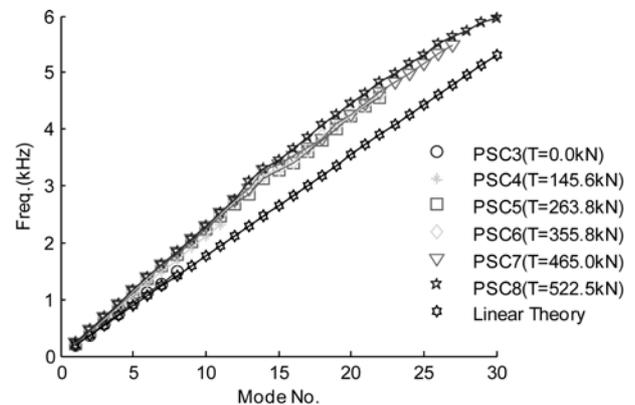


그림 12. Test No.4: 추출된 중진동수

이론적 탄성파속도는 2930.4 m/s의  $n$ 배를 도기한 결과이다. 도입장력이 없는 경우 PSC3 시험체의 8개모드가 이론치와 잘 일치하는 것이 관찰된다. 이는 선형탄성이론에서는 중진동수 및 탄성파속도가 장력에 무관하다는 가정을 근거로 하고 있기 때문에 모두수와 중진동수가 선형관계에 있다. 그러나 그림 12로부터 도입장력이 증가함에 따라서 모드수와 중진동수사이의 관계가 선형관계로부터 이격되는 경향이 뚜렷이 나타난다. 그러므로 도입장력과 중진동수 사이에 일련의 함수관계가 있음을 알 수 있다.

## 4. 토 론

### 4.1 도입장력과 종진동수 관계

각각의 실험에서 획득된 평균 전달함수로부터 첨두추출법 (Peak-picking technique)을 이용하여 추출된 종진동수가 표 3에 보인다. 도입 긴장력이 증가함에 따라서 종진동수가 증가하는 경향을 모든 실험결과에서 확인이 된다.

추출된 종모드로부터 도입장력 대비 종진동수의 변화를 살펴보면 그림 13과 같다. 전반적으로 도입 긴장력의 크기가 작은 구간에서는 도입장력에 대한 종진동수의 민감도가 크지만, 도입 긴장력의 크기가 증가할수록 종진동수의 민감도가 낮아지는 경향이 관찰 된다. 특히 저차모드는 강연선의 긴장력이 인장강도의 60%이상이 되면 민감도가 없는 것을 알 수 있다. 반면, 고차모드는 도입긴장력이 60%이상인 경우에도 민감도가 있음을 알 수 있다. 현장실무에서 적용되는 PSC의 긴장력은 최대인장강도의 60%~70% 정도이기 때문에 종진동수를 계측하여 긴장력을 추정 할 수 있을 것으로 기대된다.

### 4.2 도입장력과 탄성파속도 관계

표 3에 보이는 각 시험체의 계측 종진동수와 표 1에 보이는 각 실험체의 강연선 길이를 식(1)에 대입하여 각 모드별 탄성파속도를 산정한 후에, 그림 14와 같이 도입장력이 0 kN인 시험체 PSC3의 탄성파속도를 기준으로 하는 탄성파속도의 변화율을 살펴보았다. 최대 인장력의 67% 긴장력 도입에 따른 탄성파속도의 변화는 1차 모드가 최대 33.5% 증가가 있으며, 3차 모드에서 최소 24.9% 증가가 관찰된다. 만약 PSC 시험체의 도입 긴장력이 최대 인장력의 67%에서 46%로 감소했을 경우에 1차 모드의 탄성파속도는 변화가 없고, 8차 모드는 겨우 1.24% 감소하게 된다. 이는 도입장력이 30% 정도 감소할 때까지는 탄성파속도의 변화율이 계측 오차 수준이기 때문에 종진동을 이용한 긴장력추정이 어렵다고 할 수 있다. 그러나 도입 긴장력이 최대인장력의 67%에서 19%로 감소되었을 경우에는 1차 모드가 13.96% 감소하고 8차 모드의 경우는 10.38% 감소하게 된다. 이는 도입 긴장력이 71.64% 감소시 탄성파속도의 변화율을 계측하여 긴장력 수준을 추정 할 수 있다는 것을 의미한다. 그러므로 PSC 긴장재의 탄성파 속도변화율의 계측을 통한 긴장력추정은 긴장력이 30%이상의 감소가 진행되었을 경우에 가능할 것으로 판단된다.

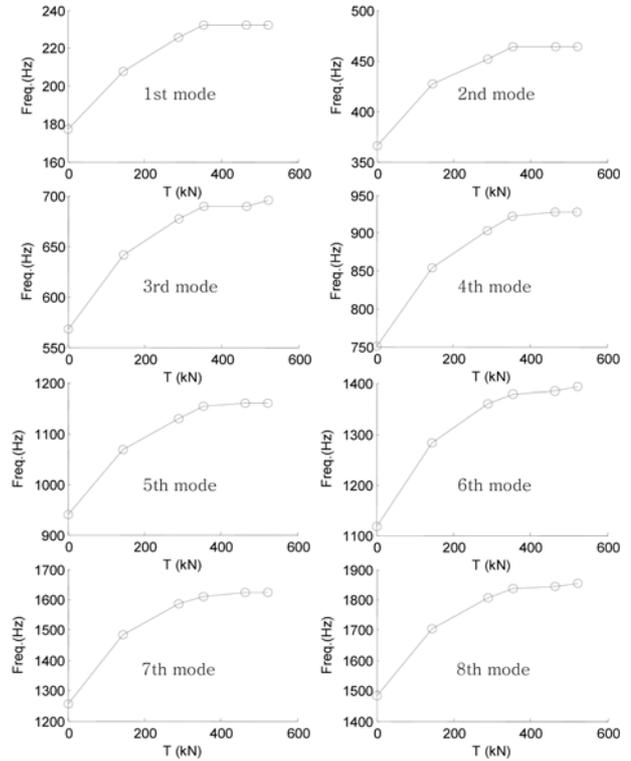


그림 13. Test No.4: 종진동수와 도입장력 사이의 관계

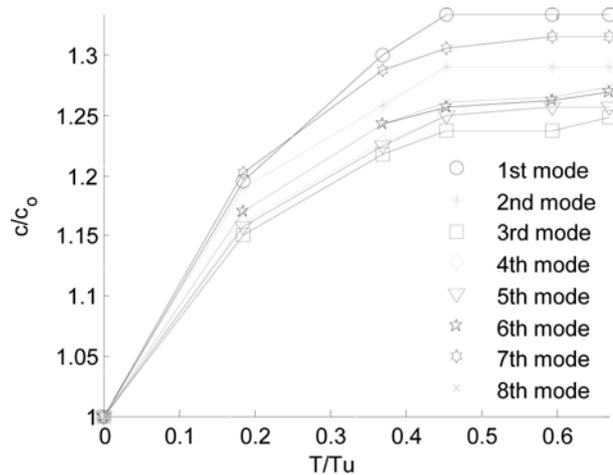


그림 14. Test No.4: 탄성파 속도변화율과 도입장력 사이의 관계

### 4.3 도입장력과 탄성계수 관계

선형탄성이론에서는 식 (1)과 같이 도입장력에 따른 종진동수 및 탄성파속도가 변화하지 않는다는 가정에 근거하고 있다. 그러나 실험결과를 살펴보면 도입장력의 증가에 따라서

Table 3. Extracted Natural Frequencies

PSC No.	Frequency (Hz)								도입장력 (kN)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	640.9	1282	1929	2557	3131	3522	4199	4529	76.4
2	659.2	1318	1971	2631	3241	3754	4260	4627	114.7
3	177.0	366.2	567.6	750.7	939.9	1117	1257	1483	0.0
4	207.5	427.2	640.9	854.5	1068	1282	1483	1703	145.6
5	225.8	451.7	677.5	903.3	1129	1361	1587	1807	263.8
6	231.9	463.9	689.7	921.6	1154	1379	1611	1837	355.8
7	231.9	463.9	689.7	927.7	1160	1385	1624	1843	465.0
8	231.9	463.9	695.8	927.7	1160	1392	1624	1855	522.5

Table 4. Estimated Equivalent Elastic Modulus (GPa) of Strand

PSC No.	Mode No.								평균
	1	2	3	4	5	6	7	8	
3	66.38	71.03	75.84	74.63	74.87	73.43	68.32	72.81	72.16
4	94.81	100.5	100.5	100.5	100.5	100.5	98.83	99.78	99.48
5	112.4	112.5	112.4	112.4	112.4	113.4	113.3	112.5	112.7
6	118.2	118.3	116.2	116.7	117.1	116.1	116.5	115.9	116.9
7	118.3	118.4	116.3	118.3	118.4	117.2	118.4	116.8	117.8
8	118.2	118.3	118.3	118.3	118.3	118.3	118.3	118.2	118.3

Table 5. Estimated Equivalent Elastic Modulus (GPa) of Concrete

PSC No.	Mode No.								평균
	1	2	3	4	5	6	7	8	
3	19.6	21.0	22.4	22.1	22.2	21.7	20.2	21.5	21.4
4	27.0	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6	28.2	28.4	28.3
5	31.9	32.0	31.9	32.0	31.9	32.2	32.2	32.0	32.0
6	33.7	33.7	33.1	33.2	33.4	33.1	33.2	33.0	33.3
7	33.7	33.7	33.1	33.7	33.7	33.4	33.7	33.3	33.6
8	33.7	33.7	33.7	33.7	33.7	33.7	33.7	33.7	33.7

종진동수가 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하고 탄성계수에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$E = \rho \left( \frac{2Lf_n}{n} \right)^2 \quad (3)$$

시험체의 제원 및 질량밀도의 변화를 무시한다면, 탄성계수는 모드수와 종진동수에 의존한다. 종진동수는 그림 13과 같이 도입장력에 따라서 비선형적으로 증가하기 때문에 탄성계수는 도입장력과 모드수에 의존한다고 할 수 있다.

전자저울을 이용하여 계측된 강연선의 질량밀도 7729.779 kg/m<sup>3</sup>, 표 3의 계측 종진동수 그리고 표 1의 강연선 길이를 식 (3)에 대입하여 탄성계수를 추정하면 표 4와 같다. 식(3)의 탄성계수는 균질 축부재의 탄성계수이다. 반면, PSC 실험체는 콘크리트, 철근 및 강연선으로 이루어진 비균질 재료이며 더욱이 구조적으로 부정구조물이다. 물론 PSC를 비균질 부정구조물로 정밀 모델링하여 종방향 거동을 추정할 수 있지만, 실용성을 고려하여 가능하면 단순화된 모델을 사용한다. 그러므로 식 (3)을 이용하여 산정된 강연선의 탄성계수는 균질 축부재 시스템에 대한 등가탄성계수(equivalent elastic modulus)로써 부착식 텐던의 경우에 철근콘크리트와 강연선이 일체로 거동하기 때문에 어느정도 대표성이 있다. 이에 대한 실험적 증거로서 그림 12을 살펴보면, 도입장력이 0 kN인 PSC No.3 시험체의 경우에 식 (1)을 이용한 선형 이론치와 계측치가 매우 잘 일치하였다.

표 4에 추정된 강연선의 등가탄성계수는 모드수에 따른 변화는 무시할 정도인 것을 알 수 있다. 반면, 등가탄성계수가 도입장력에 민감하게 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 긴장력평가를 위하여 탄성파속도 및 종진동수를 지표로 사용하는 것보다는 등가탄성계수를 지표로 사용하는 것이 효과적이라는 것을 의미한다.

철근콘크리트의 질량밀도를 2450 kg/m<sup>3</sup>로 가정하고, 표 3의 계측 종진동수와 표 1의 콘크리트의 길이를 식 (3)에 대

입하여 콘크리트의 등가탄성계수를 산정하면 표 5와 같다. 추정된 콘크리트의 등가탄성계수도 모드수에 대하여 민감도가 낮은 반면, 도입장력에 따라서 비선형적으로 증가하는 경향이 관찰된다.

그림 15는 표 4와 5에 보이는 평균 등가탄성계수의 변화율을 도시한 것이다. 여기서 평균 등가탄성계수의 변화율은 긴장력이 0 kN인 PSC3 시험체의 평균 등가탄성계수를 기준으로 하였을 때 추정된 평균 등가탄성계수들의 변화율을 나타낸다. 최대 인장하중의 67%가 긴장된 PSC 시험체의 장력이 최대 인장하중의 59%, 46%, 34%, 19%로 감소하였을 때, 강연선의 평균 등가탄성계수는 각각 0.5%, 1.2%, 4.8%, 15.9%, 39% 감소하고, 콘크리트의 평균 등가탄성계수는 각각 0.4%, 1.2%, 5.0%, 15.9%, 37% 감소하게 된다.

텐던의 장력증가에 따라서, 종진동수가 비선형적으로 증가한다는 것이 본 실험의 첫 번째 핵심 연구결과이다. 둘째는, 장력변화를 관찰하는데 있어서 다른 여러 가지 변수들 중에서 등가탄성계수의 변화를 관찰하는 것이 가장 효과적이다. 종진동수는 탄성파속도(식 (1)참조) 및 탄성계수(식 (3)참조)와 직접적인 관련이 있기 때문에, 텐던의 장력변화에 따라서 탄성파속도 및 탄성계수가 변화한다. 종진동수 자체는 모드수에 따라서 민감도가 각기 다르지만(그림 13참조), 탄성파속도 및 탄성계수는 모드수에 대한 민감도가 낮다. 왜냐하면, 식 (1) 및 식 (3)을 살펴보면, 탄성파속도 및 탄성계수는 종진동수를 모드수로 나누어준 값에 각각 선형비례 및 제곱비례 관계가 있기 때문이다. 그러므로 종진동수 자체를 이용하여 장력을 추정하는 방법보다는 탄성파속도 또는 등가탄성계수와 같이 종진동수를 모드수로 나누어진 지표로 사용하는 것이 보다 적절하다고 판단된다. 게다가, 식 (1)과 식 (3)을 자세히 비교해보면, 탄성파속도는 종주파수를 모드수로 나눈 값에 선형비례하지만, 탄성계수는 종주파수를 모드수로 나눈 값에 제곱비례한다. 그러므로 계측된 종진동수를 이용

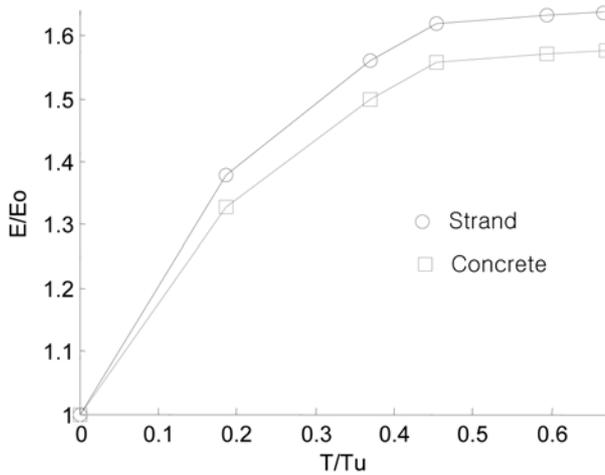


그림 15. Test No.4: 등가 탄성계수변화율과 도입장력 사이의 관계

하여 산정된 탄성과속도보다는 민감도가 큰 탄성계수를 이용하는 것이 효과적이라고 판단된다.

## 5. 요약과 결론

중진동수를 이용한 부착식 PSC 텐던의 긴장력평가 타당성이 실험적으로 검토되었다. 3 m PSC 시험체를 통하여 세 종류의 기초시험이 수행되었다. 첫 번째 및 두 번째 기초시험 결과로부터 가속도계의 최적위치는 충격위치로부터 원단 중앙강선에 설치하는 것이 가장 효과적이라는 사실을 얻었다. 세 번째 기초시험으로부터 종방향 가속도응답은 시험체의 지점위치 변화에 영향을 받지 않는다는 사실을 알 수 있었다. 기초시험의 결과를 토대로 하여 도입장력이 다른 6개의 8 m PSC 시험체가 제작되었다. 가속도계는 충격위치로부터 원단 중앙강선에 부착되었으며, 시험체의 지지조건은 임의로 설정되었다. 각각의 PSC 시험체에 대한 다수의 중진동 실험이 반복 수행되었으며, 수집된 신호들의 시간응답, 주파수응답 및 전달함수 등이 검토되었다.

실험결과의 분석으로부터 적어도 다음과 같은 세 가지 결론이 도출된다. 첫째, PSC 텐던의 긴장력이 증가함에 따라서 중진동수, 탄성과속도 그리고 탄성계수가 비선형적으로 증가한다. 선형탄성이론은 부착식 PSC 경우에는 텐던의 긴장력 크기는 중진동수, 탄성과속도 및 탄성계수 등에 의존하지 않는다. 그러나 본 연구의 실험결과에 의하면 텐던의 긴장력 크기와 중진동수, 탄성과속도 및 탄성계수 사이에 함수관계가 있다는 것이 증명되었다. 둘째, PSC 텐던의 긴장력 변화를 관찰하기 위하여 등가탄성계수를 지표로 사용하는 것이 가장 효과적이다. 왜냐하면, 중진동수는 모드수에 민감하지 않지만 탄성과속도 및 탄성계수는 모드수에 민감하지 않기 때문이다. 또한, 탄성과속도는 중진동수를 모드수로 나눈값에 선형비례하지만, 탄성계수는 중진동수를 모드수로 나눈값에 제곱비례하기 때문에 장력변화 관찰을 위해서는 계측된 중진동수로부터 등가탄성계수를 산정하여 관찰하는 것이 가장 효과적이다. 최종 결론으로써, 부착식 PSC 텐던의 중진동응답을 계측 분석함으로써 텐던의 긴장력 평가가 가능할 것으로 판단된다. 이는 도입장력이 증가함에 따라서 중진동수가 증가하였기 때문이다. 다만, 도입장력에 대한 중진동수의 민감

도가 비선형성을 가지고 있기 때문에 중진동수를 이용한 추정 장력의 정확도는 한계가 있어 보인다. 그러므로 중진동 계측을 통한 추정 장력의 정확도에 대한 신뢰성을 확보하기 위해서는, 향후 보다 정밀한 이론 및 실험연구를 통하여 부착식 PSC 중진동에 대한 역학적 메커니즘이 우선 규명되어야 할 것이다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

- 김병화, 박대호(2005) 시스템 인식기법을 이용한 케이블의 장력 추정 :I. 실험 및 적용. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제 25권, 제4A호, pp. 669-675.
- 김병화, 문석용, 배인환, 박대호(2007) 진동기반 SI기법을 이용한 현수교 행어의 장력 추정 :I. 현장적용. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제27권, 제2A호, pp. 173-179.
- 김정태, 박재형(2005) PSC 보의 동적 모드정보를 통한 긴장력 감소 식별. *전산구조공학*, 한국전산구조공학회, 제18권, 제3호, pp. 39-45.
- 박규식, 이정휘, 성택룡, 윤태양, 김병화(2009) 유한요소모델 기반 장력추정 기법의 비교 연구. *한국강구조학회논문집*, 한국강구조학회, 제21권, 제2호, pp. 165-173.
- 박대호, 김병화(2005) 시스템 인식기법을 이용한 케이블의 장력 추정 :I. 이론. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제25권, 제 4A호, pp. 661-668.
- 박대호, 문석용, 주환중, 김병화(2007) 진동기반 SI기법을 이용한 현수교 행어의 장력 추정 :I. 이론. *대한토목학회논문집*, 대한 토목학회, 제27권, 제2A호, pp. 165-172.
- 장한택, 김병화, 박대호(2008) 진동기반 SI기법을 이용한 현수교 행어의 장력 추정 :I. 실험적 검증. *대한토목학회논문집*, 대한 토목학회, 제28권, 제2A호, pp. 215-222.
- 지광습, 전기우(2006) 고저항 전도체의 전기기계적 상관작용과 작용응력 예측이 가능한 긴장재의 제안. *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제26권, 제2호, pp. 363-370.
- 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*, Vol. 15, No. 3, pp. 212-218.
- 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-ville Transform to evaluate tensile forces in seven-wire prestressing strands. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 128, No. 11, pp. 1206-1214.
- Hamed, E. and Frostig, Y. (2006) Natural frequencies of bonded and unbonded prestressed beams-prestress force effects. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 295, pp. 28-39.
- Kim, B.H. and Park, T. (2007a) Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 204, pp. 660-676.
- Kim, B.H. Park, T., Shin, H., and Yoon, T. (2007b) A comparative study of the tension estimation methods for cable supported bridges. *International Journal of Steel Structures*, Vol. 7, No. 1, pp. 77-84.
- Kwun, H. Bartels, K.A., and Hanley, J.J. (1998) Effects of tensile loading on the properties of elastic-wave propagation in a strand.

- Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 103, No. 6, pp. 3370-3375.
- Law, S.S. and Lu, Z.R. (2005) Time domain responses of a prestressed beam and prestress identification. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 288, 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.
- Pavlakovic, B.N., Lowe, M.J.S., and Cawley, P. (2001) High-frequency low-loss ultrasonic modes in imbedded bars. *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol. 68, pp. 67-75.
- 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.

(접수일: 2009.7.21/심사일: 2009.9.3/심사완료일: 2010.2.1)