

부착식 텐던의 도입 긴장응력과 탄성파속도와의 실험적 관계

Experimental Relationship between Applied Stress and Elastic Velocity of Bonded Tendon

김 병 화* · 김 수 진** · 여 금 수***
Kim, Byeong Hwa · Kim, Soo Jin · Yeo, Keum Soo

요 약

본 연구는 부착식 PSC 텐던의 긴장력을 비파괴적인 방법으로 추정하기 위한 방법을 소개한다. 제안기법은 텐던 정착단 양쪽 단부에 가속도계를 부착하고, 가속도신호의 도달 속도를 계측함으로써 텐던의 긴장력을 추정하는 방법이다. 가속도신호의 도달속도를 산정하기 위하여 신호의 상호상관을 이용하는 방법을 제안한다. 제안기법은 도입장력이 다른 6개의 8m 부착식 PSC 시험체를 통하여 검증되었다.

keywords : 긴장력, 프리스트레스 콘크리트, 텐던, 종진동, 탄성과 도달속도, 상호상관

1. 서 론

PSC(Prestressed Concrete)구조물에서 긴장재는 전체 구조시스템의 안정을 지탱하는 주요 구조부재로써 상시에도 높은 응력상태에 있다. 그러므로 PSC 텐던의 긴장력에 대한 주기적 모니터링과 관리는 매우 중요한 실무 현안이다. 긴장재의 응력상태를 추정하는 연구는, 텐던을 긴장한 후에 덕트(duct)에 그라우팅(grouting)을 하는 부착식 텐던(bonded tendon)과 그라우팅을 하지 않는 비부착식 텐던(unbonded tendon)으로 구분되어 수행되었다. 비부착식 PSC 텐던의 장력추정에 대한 연구는 고주파의 종방향 응력파를 이용하는 방법(Chen 등, 2001)과 횡진동을 이용하는 방법 등이 포함된다. 반면에 부착식 PSC 텐던에 대한 연구로는 주로 그라우팅의 결함 추정에 대한 연구가 진행되었고, 직접적으로 긴장력을 추정할 수 있는 연구는 김병화 등 (2010)이 유일하다. 국내의 PSC구조물은 대부분 부식방지를 위하여 그라우팅 처리하고 있기 때문에 부착식 텐던의 긴장력 추정방법의 개발 필요성이 대두되고 있다.

김병화 등(2010)은 도입 긴장력이 다른 6개의 8m 부착식 PSC시험체에 대하여 최초로 종진동 실험을 수행하였다. 실험결과를 살펴보면, PSC의 도입 긴장력이 증가 할수록 종진동수가 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 계측된 종진동수를 이용하여 텐던의 모드별 등가 탄성파속도와 탄성계수를 산정해보면, 등가 탄성계수가 도입장력에 가장 민감하다.

본 연구는 김병화 등(2010)의 연속된 연구로써 PSC 텐던의 도입장력과 가속도의 도달속도에 대한 실험적 관계를 도출하고, 이를 이용하여 부착식 PSC텐던의 긴장력을 추정할 수 있는 방법을 제안한다.

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

** 경남대학교 대학원 첨단공학과 석사과정 pw2408k@naver.com

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

2. 탄성파속도를 이용한 도입응력 추정

선형 탄성 균질 직선 봉의 종방향 응력과 속도는 기 작용된 응력장과 무관하다. 그러나 응력-변형률의 2차 항까지 고려해보면, 봉에 작용된 응력장이 비균질성을 갖게 함으로써 종방향 응력과 속도 V 와 기 도입된 응력 σ 사이에는 다음 식(1)과 같은 관계가 성립 한다 (Hughe and Kelly, 1953).

$$\rho_o V^2 = \lambda + 2\mu - \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left[2l + \lambda + \frac{\lambda + \mu}{\mu} (4m + 4\lambda + 10\mu) \right] \quad (1)$$

여기서 ρ_o 는 강선의 질량밀도, λ 과 μ 는 Lamé의 탄성계수, 그리고 l, m, n 은 Murnaghan의 3차 탄성계수이다. 또한 봉의 주변에 수압 p 가 작용할 경우에 수압이 응력과 속도에 미치는 영향은 다음 식(2)와 같다.

$$\rho_o V^2 = \lambda + 2\mu - \frac{p}{3\lambda + 2\mu} [6l + 4m + 7\lambda + 10\mu] \quad (2)$$

강연선의 중앙강선은 주변강선처럼 꼬여있지 않고, 주변강선으로부터 횡방향 압축력을 나선분포로 받고 있다. 그러므로 강연선의 중앙강선에서 전파하는 종방향 응력파의 속도는 식(1) 및 (2)를 이용하여 모델링 될 수 있다. 그러나 강연선 시스템의 Murnaghan 3차 탄성계수 및 주변강선이 중앙강선에 작용하는 등가 압축 분포 등은 미지수이다. 반면, 식(1)과 식(2)는 모두 다음 식(3)의 형식을 보인다.

$$V^2 = h + g\sigma \quad (3)$$

여기서 h 와 g 는 상기 재료상수($\rho_o, \lambda, \mu, l, m, n$)와 임의의 시스템상수 c 의 함수이다. 여기서 주변강선이 중앙강선에 가하는 압력은 종방향으로 도입되는 응력에 선형비례($p = c\sigma$)한다고 가정되었다.

부착식 PSC텐던 실험체의 실험을 통하여, 다양한 도입응력 σ 에 대한 탄성과 속도 V 를 측정할 수 있다면, 식(3)의 미지수 h 와 g 는 선형보간법을 이용하여 추정될 수 있다. 그러면 임의의 부착식 PSC 구조물의 텐던이 갖는 긴장응력 상태는 탄성과 속도 V 를 측정하여 다음 식(4)를 이용하여 추정이 가능하다.

$$\sigma = \frac{V^2 - h}{g} \quad (4)$$

3. 가속도 상호상관을 이용한 탄성파속도 추정

Chen 등(2001)은 응력파의 시간이력 샘플들의 침투로부터 응력파의 도달시간을 측정함으로써 응력파의 속도를 산출했다. 그러나 신호에 잡음이 존재할 경우에 필터링에 따른 오차가 스며들 수 있으며, 입사파와 응답파의 파형이 다를 경우 적용이 힘들다. 상기 문제점은 PSC 정착구 양쪽 단부에 위치한 강연선의 중앙강선에 가속도신호를 측정하고 다음 식(5)에 보이는 가속도신호들의 상호상관(cross correlation) R_{xy} 를 산정함으로써 해결될 수 있다.

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x(j)y(j-k) \quad (5)$$

여기서 $x(j)$ 와 $y(j)$ 는 정차단에서 계측된 두 개의 가속도신호를 나타내고, N 은 계측 샘플수를 나타낸다. 상호상관이 가장 클 때의 시간지연(time lags)이 가속도 신호의 도달 시간이다.

4. 종진동 실험

본 연구를 위하여 제작된 PSC 시험체는 원전 격납구조물의 부착식 수직 텐던을 모사하기 위한 축소모형이며, 김병화 등(2010)에서 사용한 시험체와 동일하다. 그러나 김병화 등(2010)의 실험 이후, 각 실험체에 대한 휨재하실험이 수행되었고, 일부 시험체에 손상이 발생하였다. 본 연구에서는 표 1과 같이 재하실험 후의 PSC시험체에 대하여 그림 1과 같은 종진동 실험이 수행되었다. 시험체에 사용된 강연선의 최대 인장응력이 $f_u = 1860$ MPa인 SWPC 7B가 사용되었다. 재하실험 후의 계측된 도입장력은 표 1에서 보인다.

표 1 시험체 제원

PSC No.	콘크리트				강연선			Remark
	Lc(m)	b(m)	h(m)	강도(MPa)	Ls(m)	정착구	응력(MPa)	
1	7.995	0.302	0.302	37.08	8.274	P 6-3	0.0	0
2	7.998	0.303	0.301	37.08	8.431	P 6-3	180.2	9.7% f_u
3	7.995	0.300	0.300	37.08	8.438	P 6-3	522.3	28.1% f_u
4	7.987	0.302	0.301	37.08	8.424	P 6-3	781.3	42.0% f_u
5	7.998	0.303	0.299	37.08	8.434	P 6-3	974.7	52.4% f_u
6	7.992	0.303	0.302	37.08	8.431	P 6-3	1112.8	59.8% f_u

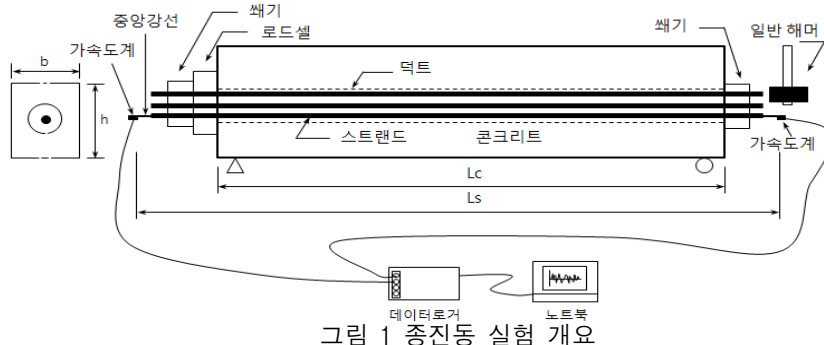


그림 2 PSC 종진동 실험 현황

가속도계는 그림 2와 같이 PSC 양쪽 정착단부의 강연선 중앙강선들에 부착되었다. 종방향 가진은 그림 2와 같이 세 개의 강연선 중에서 가속도계가 부착되지 않은 강연선에 대하여 일반 망치를 이용하여 수행되었다. 표 1에 보이는 6개의 시험체에 대하여 다수의 종방향 충격실험이 반복 수행되었다. 각 시험체 별로 측정된 가속도신호에 식(5)를 적용하면 탄성과 속도 V 를 추정할 수 있다. 추정된 탄성과 속도와 표 1에 보이는 시험체의 도입응력 σ 을 식(3)에 대입하고, 선형보간법을 적용하면 재료상수는 $h = 8.5173 \times 10^6$ 와 $g = 1.0938 \times 10^4$ 이다. 그림 3a에 보이는 원들은 도입 긴장응력과 측정 탄성과속도의 관계를 나타내고, 실선은 식(3)를 이용한 추정 보간식이다. 그림 3b는 식(4)를 이용하여 추정된 부착식 PSC텐던의 도입 긴장응력 추정식을 보여준다.

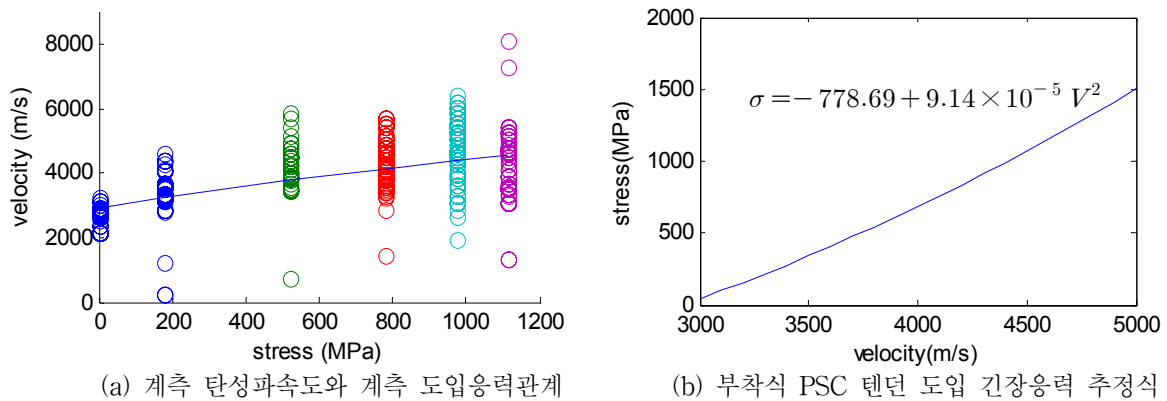


그림 3 텐던의 도입응력과 탄성과속도관계

4. 결 론

부착식 PSC텐던의 긴장력을 추정을 위한 비파괴 진단방법을 제안하였다. 제안기법은 가속도신호의 상호상관을 이용하여 탄성과의 도달속도를 추정하고, 추정된 탄성과속도와 긴장응력 사이의 역학적 관계로부터 긴장재의 긴장력을 추정한다. 실험결과 추정된 탄성과속도의 분산이 생각보다 크게나왔다. 이에 대한 원인분석과 상응하는 보완이 향후 필요하다.

감사의 글

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

참고문헌

김병화, 장정범, 이홍표 (2010) 종진동특성을 이용한 부착식 텐던의 긴장력 추정 타당성 연구, 대한토목학회 논문집, 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.

Hughes, D.S., and Kelly, J.L. (1953) Second-order elastic deformation of solids, *Physical Review*, 92(3), pp.1145~1149.