

AE기법을 이용한 PSC보의 음파속도 및 음원위치 산정

Evaluation of Velocity and Source Locations of Acoustic Signals in PSC Beam

윤석구*

김은겸**

최민석***

Youn, Seok Goo

Kim, Eun Keum

Choi, Min Seok

ABSTRACT

In this paper experimental tests were performed to evaluate velocities of the acoustic waves through prestressed concrete beam and source locations using AE technique. Seven AE sensors are mounted on the surface of 5m length test beam with equal spacing and using Schmidt Hammer AE events are made 18 locations. The velocities of AE signals are evaluated using the time differences of arrival times and the distances between the AE source locations and the AE sensor locations. In addition, using the Least Square Method, the AE source locations are re-evaluated reversely using both of the arrival times and the velocities of AE signals. Test results show the average velocity of the AE signals is about 4,000m/sec and the velocity decreased with the increase of the travelling times due to the effect of attenuation. Based on the estimation of the source locations, it is observed that the accuracy of source location is increased when the velocity of each AE sensor used rather than the average velocity.

1. 서론

프리스트레스트 콘크리트에서 PS 강선 또는 PS 강연선은 부식이 발생하면 강선의 단면적이 감소되기 시작하는데, 고응력 상태이기 때문에 일정정도 이상의 단면적 감소시 급작스런 파단이 발생한다. 강선 파단시 강선 내부의 에너지가 음파로 방출되며 이때 발생하는 음파를 음향방출(AE; Acoustic Emission) 기법을 통해 감지할 수 있으며, PS 강선은 한 가닥씩 파단되기 때문에 연속적인 음향모니터링 기법을 적용하는 경우 강선의 파단음파 횟수를 토대로 PS 강재의 단면적 감소를 간접적으로 예측할 수 있게 된다. 또한 여러개의 AE센서 이용시 음파의 도달시간 차이를 이용해 음원위치를 산정할 수 있다. 또한, 음향방출기법을 이용한 PSC구조물의 유지관리시 강선의 파단횟수 및 파단위치를 평가해야 한다.

본 연구에서는 PSC보 부재에 대한 음파의 전달속도와 음원위치 산정방법의 타당성을 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 이를 위하여 길이가 5m인 PSC보를 제작하고 표면에 부착된 7개의 AE 센서를 이용하여 외부에서 인위적으로 가해진 음파를 감지하였으며, 이 때 AE 센서로 감지한 음파의 도달시간 차이를 분석하여 산술평균방법과 최소제곱법을 이용하여 음파의 전달속도를 평가하였다. 또한 음파의 전달속

* 정희원, 서울산업대학교 토목공학과 조교수

** 정희원, 서울산업대학교 토목공학과 교수

*** 정희원, 서울산업대학교 토목공학과 석사

본 연구에서는 PSC보 부재에 대한 음파의 전달속도와 음원위치 산정방법의 타당성을 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 이를 위하여 길이가 5m인 PSC보를 제작하고 표면에 부착된 7개의 AE 센서를 이용하여 외부에서 인위적으로 가해진 음파를 감지하였으며, 이 때 AE 센서로 감지한 음파의 도달시간 차이를 분석하여 산술평균방법과 최소제곱법을 이용하여 음파의 전달속도를 평가하였다. 또한 음파의 전달속도를 이용하여 역으로 음원위치를 산정하고, 실제 음원발생 위치와의 비교를 통해 음원위치 산정시 오차를 평가해보았다.

2. 음파전달속도 실험

2.1 실험 방법

실험부재는 그림 1과 같이 5m 크기로 단면 중앙부에는 강연선(SWPC 7A, 12.7mm) 2개를 배치하고 긴장시킨 후 그라우팅하여 PSC 실험부재를 제작하였다. 또한, 그림 2와 같이 콘크리트 표면에 5개의 AE 센서(A1~A5)를 부착하였으며, 양쪽 정착부에 각 1개의 AE 센서(A0, A6)를 부착하였다. 이후 실험부재 표면에 총 18개소의 타격점(S01~S18)을 만들고 타격점에 일정한 크기의 충격음파를 유도하기 위해 Schmidt hammer를 이용하여 각각의 타격점에 3회씩 타격을 실시하였으며, 이때 발생한 AE 신호를 이용하여 데이터를 분석하여 음파전달속도를 산정하였다. 실험에 사용된 음향신호 분석 장비는 캐나다 Pure Technology사의 SoundPrint 시스템을 사용하였다.

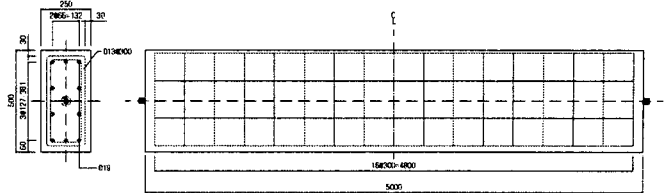


그림 1 실험체 제원 (단위 : mm)

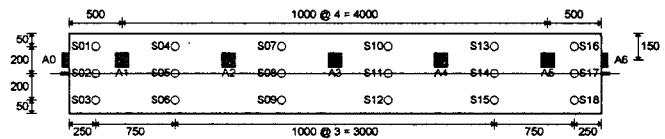


그림 2 센서 부착위치 및 타격을 발생위치 (단위 : mm)

2.2 음파전달속도 산정 방법

실험 데이터에 대한 음파전달속도 계산에는 각각의 센서와 타격점간의 좌표값을 이용하여 식(1)과 같은 산술평균방법과 식(2)를 이용한 최소제곱법을 사용하여 계산하였다.

$$V = \left\{ \sqrt{(X_a - X_n)^2 + (Y_a - Y_n)^2 + (Z_a - Z_n)^2} - \sqrt{(X_a - X_{n-1})^2 + (Y_a - Y_{n-1})^2 + (Z_a - Z_{n-1})^2} \right\} / \Delta t_n \quad \text{식(1)}$$

$$t_i = \text{dist}_{ia} / V + t_o, \quad F = t_i - t_o - \text{dist}_{ia} / V = 0 \quad \text{식(2)}$$

여기서, X_a, Y_a, Z_a : 타격점 a의 X, Y, Z축 좌표값, X_n, Y_n, Z_n : 각 AE센서의 X, Y, Z축 좌표값

Δt_n : n번 AE센서와 n-1번 AE센서간의 음파도달시간차

dist_{ia} : $\sqrt{(X_a - X_i)^2 + (Y_a - Y_i)^2 + (Z_a - Z_i)^2}$ 타격점과 센서와의 거리

t_i : 음향센서 i에 대해 측정된 음파도달시간 (sec, 관측값)

t_o : 타격시간 (sec, 미지계수), V : 음파전달속도 (m/sec, 미지계수)

3. 실험결과

모든 타격점에서 Schmidt hammer를 이용하여 발생시킨 타격음파는 7개의 AE센서 모두에서 감지할 수 있었으며, 타격점과 센서간의 거리차로 인해 음파의 도달시간에 조금의 차이를 보임을 확인할 수 있었다. 음파의 도달시간 기준은 그림 3에서 보듯이 각 AE 센서가 충격파를 감지하여 급격한 신호변화를 보이는 시간을 초기 음파도달시간으로 하였다. 또한 그림 4와 같이 각 센서에서는 센서간의 거리차와 콘크리트의 음파 감쇄효과, 내부의 공극, 균열, 철근 및 쉬스판의 존재 등 다양한 조건에 의해 도달시간의 차이를 보였다.

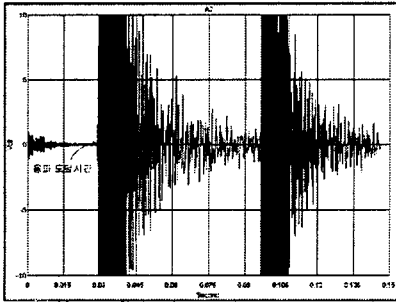


그림 3 음파도달시간 기준의 한 예

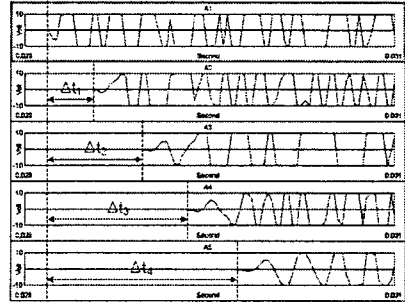


그림 4 각각의 AE 센서에 감지된 음파 도달시간의 차

표 1에는 산술평균 계산식에 의해 구한 실험 데이터에 대한 음파전달속도의 한 예를 나타내었다. 그 결과 산술평균으로 산정된 음파의 평균전달속도는 대략 3.6km/sec에서 4.4km/sec 정도로 차이를 보였다. PSC 실험체의 양 단부에 부착한 AE센서 A0과 A6로부터 산정한 음파의 전달속도는 각각 4,235m/sec와 4,423m/sec로 콘크리트 길이방향으로 표면에 부착된 AE센서로부터 산정한 음파의 전달속도보다 빠르게 산정되었으며, PSC 실험체의 길이방향으로 표면에 부착된 AE센서들(A1, A2, A3, A4, A5)로부터 산정된 음파의 평균전달속도는 대략 4,000m/sec로 평가되었다.

표 1 타격점 S04, S17에서의 타격실험에 따른 음파의 산술평균속도 계산 예

음원 번호	타격점 좌표(cm)			센서 번호	센서 좌표(cm)			음파도달시간 (sec)	시간차 (sec)	음파전달속도 (m/sec)	평균속도 (m/sec)
	X_a	Y_a	Z_a		X	Y	Z				
S04-3	100	20	0	A0	0	10	-10	0.029218	0.000110	4,546	4,058
	100	20	0	A1	50	10	0	0.029129	0.000021	-	
	100	20	0	A2	150	10	0	0.029108	0.000000	-	
	100	20	0	A3	250	10	0	0.029366	0.000258	3,850	
	100	20	0	A4	350	10	0	0.029603	0.000495	4,024	
	100	20	0	A5	450	10	0	0.029883	0.000775	3,860	
	100	20	0	A6	500	10	-10	0.029979	0.000871	4,010	

음파의 전달속도는 매질의 상태, 음파의 전달경로, 음파의 도달시간 측정오차 등에 의해 오차가 발생할 수 있기 때문에 보다 정확한 평가를 위해서는 여러 가지 요인에 의해 발생할 수 있는 오차를 고려해야 한다. 본 연구에서는 여러 가지 오차발생 요인들 중에서 음파의 도달시간 측정오차에 의한 영향을 고려하여 최소제곱법을 이용한 음파의 전달속도를 평가해보았다. 최소제곱법에 의한 음파전달속도 산정은 음파속도를 상수로 가정한 경우와 음원과 센서와의 거리에 대한 선형으로 가정한 경우, 또한 각각에 대해 센서별 위치에 관계없이 산정한 경우와 측면과 양단부에 부착된 센서를 구별하여 산정한 경우 등 모두 4가지 경우에 의해 수행하였으며, 최종적으로는 각 센서별 음파전달속도를 선형으로 가정하여 수행하

였다. 각각의 경우에 대한 속도산정 방법 및 산정 결과는 표 2와 같다.

표 2 최소제곱법에 의해 산정된 음파속도 및 음원위치 산정 결과

최소제곱법에 의한 음파속도	산술평균치에 의한 음파속도를 이용하는 경우		최소제곱법에 의한 음파속도를 이용하는 경우	
	표준편차	평균 오차	표준편차	평균 오차
전체 센서에 도달되는 음파속도를 상수로 가정한 경우	5.27cm	3.36cm	4.51cm	3.31cm
전체 센서에 도달되는 음파속도를 거리에 대한 선형함수로 가정한 경우	4.70cm	3.49cm	4.40cm	3.23cm
센서 부착위치 차이를 고려하여 음파속도를 상수로 가정한 경우	4.50cm	3.34cm	4.56cm	3.26cm
센서 부착위치 차이를 고려하여 음파속도를 선형함수로 가정한 경우	6.21cm	3.53cm	4.80cm	3.63cm
각 센서별 속도를 선형함수로 고려하는 경우	3.64cm	-0.41cm	3.06cm	0.09cm

음파속도를 산술평균치를 이용하는 경우와 최소제곱법을 이용해 산정한 음파속도를 이용하는 경우에 대해 각각 음원위치 산정결과에 대한 오차를 나타내었다. 먼저 음파속도를 산술평균치를 이용하는 경우보다 최소제곱법에 의한 음파속도를 이용하는 경우 표준편차가 작아 정확도가 높다는 것을 알 수 있다. 센서위치 차이를 고려하고 음파속도를 선형함수로 고려하는 경우 평균오차가 0에 근접되는 것을 알 수 있으며, 이를 토대로 음원위치 산정시 각 AE센서로부터 산정된 음파속도를 선형함수로 가정하는 방법이 가장 정확도가 높다는 것을 확인할 수 있었다. 이 경우 음원위치 산정결과에 대한 표준편차가 3.06cm로 평가되었으며 이 정도 오차는 실무적으로 매우 유용한 수치라 판단된다.

4. 결론

실험을 통해 전체 AE센서로부터 산정한 음파의 평균전달속도는 약 4,000m/sec로 평가되었으며, 음파의 전달속도는 AE센서가 음원위치로부터 멀어질수록 감쇄현상에 의해 감소되는 현상을 보이는데, 음파의 측정오차를 고려하고 최소제곱법에 의해 산정한 음파 전달속도의 감소 정도는 1m당 약 86m/sec 정도로 평가되었다. 음파의 도달시간과 음파의 전달속도를 이용하여 음원위치를 역으로 산정할 때에는 산술평균방법에 의한 음파의 전달속도를 이용하는 경우보다는 최소제곱법에 의한 음파의 전달속도를 이용하는 방법을 통해 표준편차와 평균오차를 감소시킬 수 있었다. 본 연구에서는 AE센서들의 조합에 의한 음파의 평균전달속도를 이용하는 경우 평균오차는 대략 33mm 정도로 평가되었다. 이상과 같은 실험결과를 토대로 연속적인 AE모니터링 기법을 이용하는 경우 최소제곱법을 이용하여 프리스트레스트 콘크리트교량의 텐던 파단 위치를 실무에 적용할 수 있을 정도로 정확히 산정할 수 있다고 평가된다.

참고문헌

1. 윤석구, 박영하, 김은겸, (2003) "후긴장된 텐던의 파단 감지를 위한 음향모니터링 방법의 평가", 대한토목학회, '03정기학술대회 논문집, pp.1398~1403
2. D.W. Cullington, D. MacNeil, P. Paulson and J. Elliott, (2001) "Continuous acoustic monitoring of grouted post-tensioned concrete bridges", NDT&E International, No.34, pp.95~105
3. Halsall, A. P. Welch, W. E. and Trepanier, S. M. (1996) "Acoustic Monitoring Technology for Post-Grouted Structures", FIP Symposium on Post-tensioned Concrete Structures, pp. 295-304.
4. Ohtsu M. (1987) "Acoustic emission characteristics in concrete and diagnostic applications", Journal of Acoustic Emission. 6(2). pp.99-108.