

AE기법을 이용한 PSC보의 음파속도와 음원위치 산정방법

Estimation of Velocities of Acoustic Signals and Source Locations in PSC Beam by Acoustic Emission

윤석구* · 이창노** · 김은겸***

Youn, Seok-Goo · Lee, Changno · Kim, Eun-Kyum

Abstract

Experimental tests were performed to estimate velocities of the acoustic signals through prestressed concrete beam and source locations using acoustic emission (AE) techniques. Seven AE sensors are mounted on the surface of 5m length test beam with equal spacing and using Schmidt Hammer AE events are made at 18 locations. The velocities of AE signals are estimated using the time differences of arrival times and the distances between the 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 4,000 m/sec and the velocity decreased with the increase of the distance from source locations to AE sensors due to the effect of attenuation. Based on the estimation of the source locations, it is observed that the errors of source locations are decreased when the velocities of each AE sensor are used rather than the average velocity.

Keywords : *acoustic emission, prestressed concrete, source location, wire fracture*

요 지

AE기법을 이용하여 PSC보부재에 대한 음파의 전파속도와 음원위치 산정방법의 타당성을 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 이를 위해 길이가 5m 인 PSC보 콘크리트 표면에 7개의 AE센서를 부착하였으며, 슈미트 햄머를 이용하여 콘크리트 표면에 인위적인 충격을 가하였다. 음파의 전파속도는 각각의 AE센서로부터 감지된 음파의 도달시간 차이와 음원과 센서와의 거리 차이를 이용하여 산정하였다. 또한 각 AE센서로부터 감지된 음파의 도달시간과 음파의 전파속도를 토대로 최소제곱법을 이용하여 역으로 음원 발생위치를 산정해 보았다. 실험결과 프리스트레스트콘크리트 매질에 대한 음파의 평균전파속도는 대략 4,000 m/sec 정도이며, 음원과 AE 센서 사이의 거리가 길어짐에 따라 음파의 감쇠현상에 의해 속도가 감소되었다. 최소제곱법을 이용한 음원위치 산정결과, 음파의 전파속도를 전체 AE센서의 평균전파속도를 이용하는 경우보다, 각 AE센서로부터 산정된 음파의 전파속도를 이용하는 경우 오차가 감소되는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 음향방출, 프리스트레스트 콘크리트, 음원, 강선파단

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트(이하 PSC)는 PS강선 또는 PS강연선과 같은 고강도 PS강재를 이용하여 프리스트레스를 미리 도입된 구조한 말하며 설계시 요구되는 안전성을 만족시키기 위해서는 PS강재의 단면적이 감소되지 말아야 한다. 하지만 PS강재는 높은 인장응력이 작용하고 있어 응력부식 뿐만 아니라 수분 또는 염소이온과 접촉하는 경우 쉽게 부식되고 파단된다. 실제 포스트텐션공법으로 시공된 경우 부적절한 그라우팅에 의해 PS강선이 부식된 사례가 보고되고 있으며(Halsall 등, 1996; The Concrete Society, 1996), 프리캐스트 PSC교량의 경우에는 PS강재의 파단에 의한 붕괴

사고가 발생하기도 하였다(Woodward 등, 1988; Mathy 등, 1996). 포스트텐션공법으로 시공된 PSC교량의 안전성 평가시 부식과 파단에 의한 PS강재의 단면적 감소를 산정해야 하지만, PS강재가 콘크리트 내부에 매립된 쉬스 안에 있어 유지관리를 육안관찰이 불가능하며 이를 위한 마땅한 비파괴검사방법이 개발되어 있지 못한 상태이다.

최근 비파괴검사방법의 일종인 음향방출(AE; Acoustic Emission)기법을 적용하여 PSC교량의 PS강선 파단시 방출되는 음파를 감지하여 PS강선의 파단위치와 단면적 감소량을 평가하려는 연구들이 진행되고 있다(Cullington 등, 2001; Youn 등, 2005). PSC교량과 같이 대규모 콘크리트 구조물에 AE기법을 적용하기 위해서는 콘크리트 매질의 높은 감

*정회원 · 서울산업대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사(E-mail : sgyoun@snut.ac.kr)
**정회원 · 서울산업대학교 토목공학과 전임강사 · 공학박사(E-mail : changno@snut.ac.kr)
***정회원 · 서울산업대학교 토목공학과 교수 · 공학박사(E-mail : ke6507@snut.ac.kr)

회현상을 극복할 수 있는 저주파 AE센서가 필요하다 (Minemura 등, 1998; Yuyama 등, 1999). 또한 콘크리트 내부의 여러 위치에 수많은 PS강재가 배치되어 있기 때문에 음원위치 표정시 보다 높은 정확도가 요구되며, 이를 통해 AE센서의 사용 개수를 감소시킬 필요성이 있다. 일반적으로 고주파 AE 센서를 적용하는 경우 음원의 위치 표정시 여러 개의 AE센서로 감지한 음파의 도달 시간차 Δt 와 음파속도 V 을 상수로 가정한 상태에서 최소제곱법 등을 이용하여 오차를 감소시키고 있다 (Baron 등, 1987; Venkatesh 등, 1996; Landis 등, 1992). 하지만 PSC교량은 콘크리트, 철근 그리고 PS강재가 복합된 대규모 구조이기 때문에 음파의 진행경로뿐만 아니라 음파의 감쇠 정도가 AE센서 부착위치에 따라 달라질 수 있다. 따라서 음원위치 표정시 음파의 도달 시간을 일정한 문턱전압값(threshold voltage)을 초과하는 수치로 산정시 음파속도 V 을 상수로 가정하는 경우 음원위치 오차가 커질 수 있다.

본 연구에서는 길이가 5m인 PSC보부재의 콘크리트 표면에 인위적인 충격파를 가한 후 7개의 AE센서들에 감지된 음파의 도달시간차를 이용하여 음파속도와 음원위치를 산정하였다. 음파속도 V 는 산술평균방법과 최소제곱법을 이용하여 각각 상수와 일차함수로 산정하였으며, 각 센서들로부터 측정된 음파속도를 개별적으로 이용하는 경우와 평균치를 적용하는 경우에 대한 음원위치 산정오차를 비교분석하였다. 연구결과를 토대로 PSC부재에 대한 음원위치 표정시 오차를 감소시키기 위한 방법을 제안하였다.

2. 음파속도 및 음원위치 산정방법

2.1 음파속도 산정방법

2.1.1 산술평균방법

음파속도 V 는 음파의 진행거리 L 을 진행 시간 t 로 나누는 수치를 나타내지만, 음원위치와 음파 발생시간은 미지의 값이기 때문에, AE기법 적용시 음원으로부터 AE센서들까지의 거리차와 음파의 도달 시간차 ΔD 을 이용하여 아래 식과 같이 산정할 수 있다.

$$V = \frac{\Delta D}{\Delta t} \quad (1)$$

여기서, V 는 음파속도 (m/sec)

ΔD 은 음원으로부터 AE센서들까지의 도달 거리차 (m)

Δt 는 AE센서로부터 측정된 음파의 도달 시간차 (sec)

1차원 부재의 경우 음파의 진행경로가 명확하여 식 1에서 ΔD 는 AE센서들의 배치간격이 되나, PSC보는 3차원 부재이며 매질이 불균질하기 때문에 음파의 전파경로는 음원으로부터 AE센서들까지 최단경로를 따라 직선으로 움직인다고 가정하였다. 인위적인 충격실험을 수행하면 음원위치가 기지의 값이 되어 식 1의 ΔD 을 계산할 수 있기 때문에 음파속도 V 을 산정할 수 있다. 이때 음파속도 V 는 실험횟수만큼 얻을 수 있으며 산술평균방법을 이용하여 음파속도 평균치를 산정할 수 있다. 또한 음원위치와 음파속도 평균치를 이용하여 음파속도를 음원으로부터 AE센서까지의 거리차에 대한 일차함수로 나타낼 수 있다.

2.1.2 최소제곱법

AE센서에 의해 감지되는 음파의 측정시간 t_i 은 음원발생시간 t_0 로부터 음원으로부터 AE센서까지의 음파의 진행시간 D_i/V 이 더해진 수치를 나타내며 아래 식 2와 같이 표현할 수 있다.

$$t_i = D_{ia}/V + t_0 \quad (2)$$

여기서, $D_{ia}; \sqrt{(X_a - X_i)^2 + (Y_a - Y_i)^2 + (Z_a - Z_i)^2}$, 타격점과 센서와의 거리

X_a, Y_a, Z_a : 타격점 a의 X, Y, Z 좌표(m)

X_i, Y_i, Z_i : 센서 i의 X, Y, Z 좌표(m)

t_i : 음향센서 i에서 측정된 음파 도달시간 (sec)

t_0 : 타격시간(sec)

식 2는 음파속도 및 음원위치에 대해 비선형식이므로 뉴턴법을 적용하기 위해 함수의 형태로 다시 정리하면 식 3과 같이 표현할 수 있다.

$$F = t_i - t_0 - \frac{D_{ia}}{V} = 0 \quad (3)$$

하지만 음파의 도달시간 측정시 오차가 포함되어 있다면, 식 3은 성립하지 않는다. 따라서, 식 3의 음파도달시간(t_i)과 미지계수에 의해 계산된 음파도달시간($t_0 + D_{ia}/V$)의 차의 제곱합이 최소가 되도록 식 4와 같이 최소제곱법에 의해 미지계수를 결정하여야 한다.

$$\sum_{i=1}^n \left(t_i - t_0 - \frac{D_{ia}}{V} \right)^2 \rightarrow \text{minimum} \quad (4)$$

식 3은 미지계수에 대해 비선형이므로 미지계수를 구하기 위해서는 먼저 테일러급수의 1차항까지 고려하여 선형화한 후, 미지계수에 대한 초기값을 설정하여 반복법에 의해 해를 구한다. 음파도달시간 측정시 오차를 적용하여 식 3을 선형화 하면 식 5와 같다.

$$e + B\Delta = f \quad (5)$$

여기서, e : 측정된 음파도달시간(t_i)과 미지계수에 의해 계산된 음파도달시간($t_0 + D_{ia}/V$)의 차, $n \times 1$ 벡터

B : 식(3)의 F 의 미지계수에 대한 편미분 값, $n \times u$ 행렬

Δ : 미지계수에 대한 보정량, $u \times 1$ 벡터

f : 현재의 갱신된 미지계수를 사용하여 구한 $-F$ 값, $n \times 1$ 벡터

n : 관측값의 총수

u : 미지계수의 총수

식 5에서 각 센서의 도달시간(t_i)들은 독립적으로 측정되었으므로 서로 상관관계가 없고 측정 정확도가 동일하다고 볼 수 있으며, 따라서, 미지계수의 보정량 Δ 은 최소제곱법에 의해 식 6으로부터 계산될 수 있다 (Mikhail, 1976).

$$\Delta = (B^T B)^{-1} (B^T f) \quad (6)$$

먼저, 미지계수에 대한 초기값을 설정하고 식 6에 의해 보정량을 계산한 후 초기값에 더하여 미지계수를 갱신하고, 갱신된 미지계수에 대해 보정량을 계산하여 다시 미지계수를 갱신하는 반복적인 절차에 의해 최적해를 계산하였다. 이

와 같이 음파속도가 계산되면 식 3으로부터 음원위치와 타격시간을 미지계수로 하고, 음파속도 및 그 외의 값들은 상수로 하여 음파속도 계산에서와 같이 최소제곱법에 의해 반복적인 방법으로 미지계수를 계산할 수 있다.

(1) 전체 센서에 도달되는 음파속도를 상수로 가정하는 경우
전체 센서에 도달되는 음파속도를 상수로 가정하는 경우, 관측방정식은 다음 식 7과 같다.

$$F_{a,j,i} = t_{a,j,i} - t_{0,a_j} - D_{id}/V = 0 \quad (7)$$

여기서, a : 타격점 번호($a=1, \dots, 18$)
 j : 반복실험 횟수($j=1, 2, 3$)
 i : 센서 번호($i=1, \dots, 7$)

각각의 관측방정식에 관련된 미지계수는 음파속도 V 와 해당 실험에 대한 타격시간 t_{0,a_j} 으로 먼저 속도에 대한 편미분값은 다음 식 8과 같다.

$$B_V = \frac{\partial F_{a,j,i}}{\partial V} = D_{id}/V^2 \quad (8)$$

또한, 타격시간에 대한 편미분값은 다음과 같다.

$$B_{t_{0,j}} = \frac{\partial F_{a,j,i}}{\partial t_{0,a_j}} = -1 \quad (9)$$

위와 같은 방법에 의해 각 관측방정식으로부터 미지계수에 대한 편미분값을 구한 후, 식 6에 의해 보정량이 계산되면 반복적인 방법에 의해 미지계수를 갱신한다.

(2) 전체 센서에 도달되는 음파속도를 거리에 대한 선형함수로 가정하는 경우

전체 센서에 도달되는 음파속도를 음원과 AE센서 사이의 거리 D 에 대한 선형함수로 가정하는 경우 속도 V 는 식 10과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = V_0 + V_1 \times D \quad (10)$$

타격시간에 대한 편미분값은 식 9와 동일하며, 상수항 V_0 과 1차항 계수 V_1 에 대한 편미분값은 다음과 같다.

$$B_{V_0} = \frac{\partial F_{a,j,i}}{\partial V_0} = D_{id}/V_0^2 \quad (11)$$

$$B_{V_1} = \frac{\partial F_{a,j,i}}{\partial V_1} = D_{id}^2/V_1^2 \quad (12)$$

(3) 부재길이 방향의 측면에 부착된 센서와 양 단부에 부착된 센서를 구분한 경우

가. 음파속도를 상수로 가정하는 경우

양단부에 부착된 센서(A0, A6)에 대한 속도를 V_1 , 측면에 부착된 센서에 대한 속도를 V_2 라 하면 식 7은 다음 식 13과 같이 쓸 수 있다.

$$F_{a,j,i} = t_{a,j,i} - t_{0,a_j} - D_{id}/V_k = 0 \quad (13)$$

여기서 V_k 는 센서가 양 단부에 부착된 센서일 경우, $V_k=V_1$
센서가 측면에 부착된 센서일 경우, $V_k=V_2$

미지계수에 대한 편미분값은 (1) 전체 센서에 도달하는 음파속도를 상수로 가정하는 경우에서와 같은 방법으로 구한다.

나. 음파속도를 선형함수로 가정하는 경우

센서(A0, A6)에 대한 속도를 V_1 , 센서(A1~A5)에 대한 속도를 V_2 라 하면 식 13에 다음 식 14를 적용한다.

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{10} + V_{11} \times D \\ V_2 &= V_{20} + V_{21} \times D \end{aligned} \quad (14)$$

미지계수에 대한 편미분값은 (2) 전체 센서에 도달되는 음파속도를 거리에 대한 선형함수로 가정하는 경우에서와 같은 방법으로 구한다.

(4) 모든 센서별 음파속도를 별도로 계산한 경우

가. 음파속도를 상수로 가정하는 경우

n 개의 센서별 속도를 상수로 가정하여 별도로 산정한 경우로 (1) 전체 센서에 도달하는 음파속도를 상수로 가정하는 경우에서와 같은 방법으로 편미분값을 구한다.

나. 음파속도를 선형함수로 가정하는 경우

n 개의 센서별 속도를 선형으로 가정하여 별도로 산정한 경우로 (2) 전체 센서에 도달되는 음파속도를 거리에 대한 선형함수로 가정하는 경우에서와 같은 방법으로 편미분값을 계산한다.

2.2 음원위치 산정방법

각 타격실험에 대해 n 개의 센서로부터 측정된 도달시간의 오차의 제곱 합이 최소가 되도록 미지계수, 즉, 타격시간(t_0)과 음원의 X 좌표를 반복법에 의해 계산하였다. 최소제곱법에 의한 음파속도 산정방법과의 차이점은 속도 대신 음원의 좌표가 미지계수이며, 각 타격실험이 음원의 X 좌표를 산정하기 위해 독립적으로 다루어진다는 것이다. 즉, 각 타격실험에 대해 n 개의 센서에 의한 도달시간을 이용하여 2개의 미지계수, 타격시간과 음원의 X 좌표를 계산한다. 음원의 X 좌표의 초기값으로는 도달시간이 가장 빠른 센서의 X 좌표를 이용하였으며, 편미분값은 센서별 구분에 관계없이 속도가 상수인 경우는 식 15에 의해 계산할 수 있으며,

$$B_{X_a} = \frac{\partial F_{a,i}}{\partial (X_a)} = - \frac{(X_a - X_i)}{D_{ia} V_i} \quad (15)$$

여기서, V_i : 센서 i 에 대한 음파전파속도(m/sec)

속도가 거리에 대한 선형함수일 때는 식 16에 의해 계산한다.

$$B_{X_a} = \frac{\partial F_{a,i}}{\partial (X_a)} = - \frac{(X_a - X_i) V_{i0}}{D_{ia} V_i^2} \quad (16)$$

여기서, $V_i = V_{i0} + V_{i1} \times D_{ia}$, 센서 i 에 대한 음파속도(m/sec)

3. 음향방출 실험

길이가 5m이고 콘크리트 설계압축강도 f_{ck} 가 40 MPa인 PSC보를 제작하였다. PSC보 단면 중앙부에 지름 12.4 mm 인 PS강연선 SWPC 7A를 2개 배치한 후 긴장하였으며, 긴

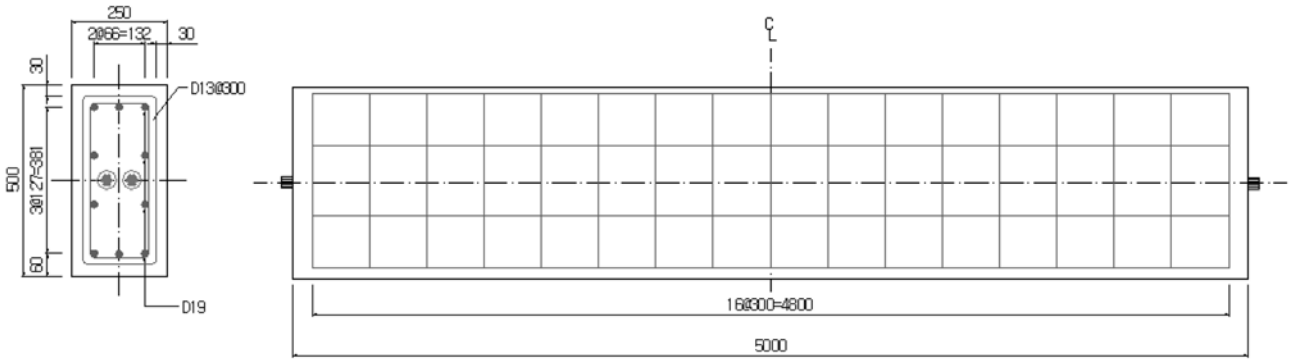


그림 1. PSC보부재 단면 제원 (단위 : mm)

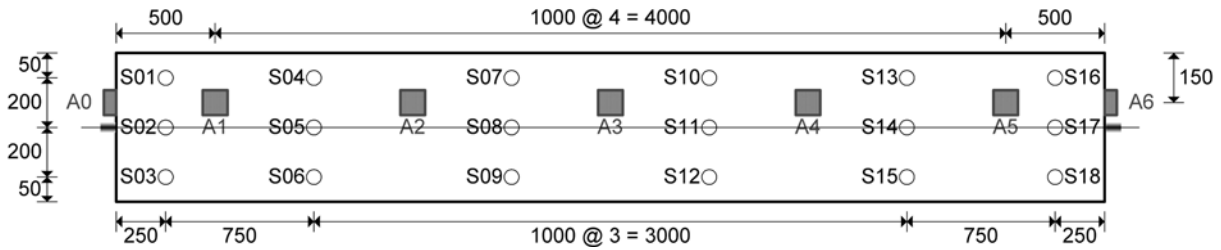


그림 2. 센서 부착위치 및 슈미트 햄머 타격 위치 (단위 : mm)

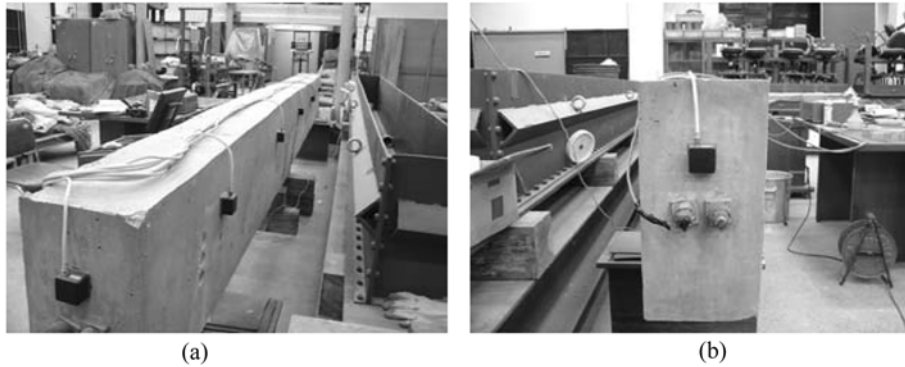


그림 3. PSC 보에 부착된 AE센서의 사진

장 후 바로 그라우팅을 실시하여 콘크리트와 PS강선을 부착시켰다. 그림 1에 PSC보부재의 제원을 나타내었으며, 그림에서 보부재 제작시 사용된 종방향철근, 수직 스트립 그리고 PS강연선의 배근위치 상세를 확인할 수 있다. 실험시 발생할 수 있는 외부로부터의 잡음에 대한 영향을 감소시키기 위해 지지대 위에 고무 패드를 설치한 후 PSC보를 단순지지시켰다.

단순지지된 PSC보에 5개의 AE센서(A1~A5)를 부재길이 방향으로 콘크리트 표면에 1m씩 등간격으로 부착하였으며, 2개의 AE센서(A0, A6)는 양 단부 긴장재 정착부에 1개씩 부착하였다(그림 2 참조). 그림 3(a)에 AE센서가 부착된 PSC 실험체의 전경을 나타내었으며, 그림 3(b)은 정착장치와 AE센서가 부착된 단부의 전경을 나타낸다. 음파방출실험에 사용된 AE센서는 22 kHz까지의 주파수 대역을 갖는 저주파 센서를 사용하였으며 AE시스템은 캐나다 PureTechnology사의 Soundprint 시스템을 사용하였다.

그림 4에는 PSC보 실험체에 인위적으로 만든 드릴 구멍들을 보여주고 있으며 그림 3(a)에서도 A1센서의 옆에 있는 드릴구멍을 확인할 수 있다. 드릴 구멍의 지름은 30 mm, 깊이는 100 mm이며, 실구조물에 발생할 수 있는 균열 등의 손상은 음파의 전파속도에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 실

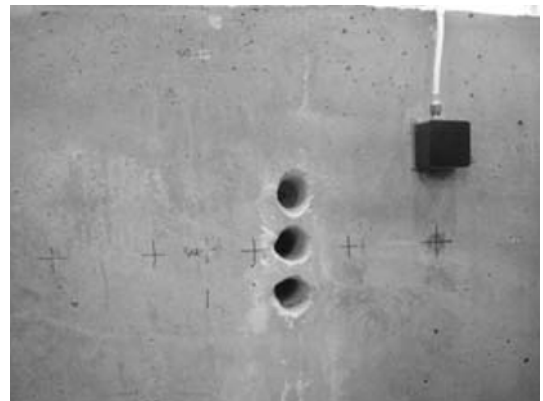


그림 4. PSC 실험체의 A1센서 왼쪽에 만든 인위적인 드릴 구멍들

험체의 인위적인 손상에 의해서도 음파의 전파속도에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

음파의 전파속도를 측정하기 위한 인위적인 충격과 발생은 슈미트 햄머를 이용하였다. 슈미트 햄머를 이용한 충격과 발생시 통상 콘크리트의 압축강도 측정시 적용하고 있는 실험 방법을 준용하였다. 그림 2에 나타낸 18개소(지점 S01~지점

S18) 표면에 각각 3회씩 타격을 실시하였다.

4. 실험결과

4.1 음파의 도달시간 측정결과

슈미트 햄머를 이용해 발생시킨 충격음파는 5m의 PSC보부재에 부착된 전체 AE센서에 의해 감지되었으며, 음파의 도달시간은 각 AE센서가 충격파를 감지하기 시작한 초기시간으로 하였다. 그림 5에 A2센서에 의해 감지된 충격파의 한 예를 나타내었는데 슈미트 햄머에 의해 2개의 충격파가 연속해서 발생되었다. 음파의 도달시간차는 최초로 음파를 감지한 AE센서의 도달시간을 기준으로 나머지 AE센서들의 도달시간 차이로부터 산정하였으며, 한 예로 타격위치가 S01인 경우에 대해

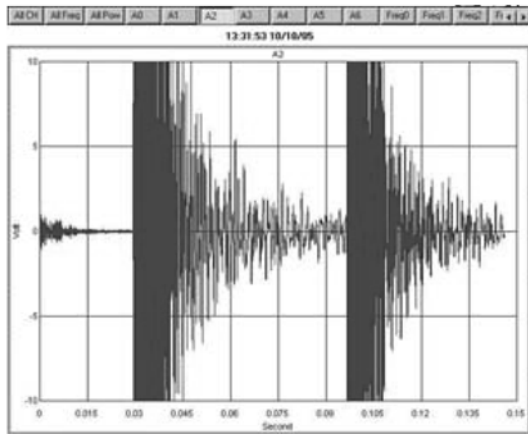


그림 5. A2센서로 감지된 슈미트 햄머의 충격파형

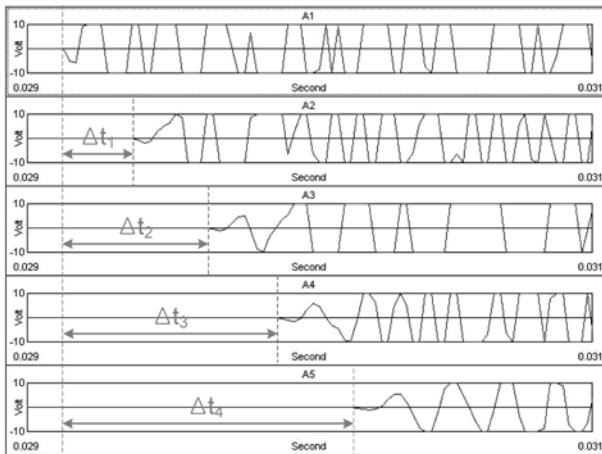


그림 6. AE센서에 감지된 음파의 도달시간 차

음파의 도달시간차를 산정하는 방법을 도식적으로 그림 6에 나타내었다. 이상과 같은 방법으로 타격위치 S01인 경우에 대해 수행한 3번의 타격실험중에서 음파의 도달시간, 도달시간차, 그리고 타격위치와 AE센서들의 거리차를 토대로 음파속도를 산정한 한 예(S01-1)를 표 3에 나타내었다.

4.2 산술평균에 의한 음파속도 산정결과

4.2.1 음파속도를 상수로 가정하는 경우

음파의 진행경로는 음원위치로부터 각 AE센서들까지 직선으로 최단경로를 따라 움직인다는 가정 하에 식 1을 이용하여 음파속도를 산정하였으며, 산술평균방법을 이용한 평균음파속도를 표 4에 나타내었다. 각 AE센서로부터 산정된 평균음파속도는 3,567 m/sec에서 4,423 m/sec까지 편차가 있었다. 실험체의 길이방향으로 표면에 부착된 AE센서들(A1, A2, A3, A4, A5)로부터 산정된 음파의 평균속도는 3,918 m/sec 이었으나, A1센서의 경우 3,567 m/sec로 다른 센서에 비해 음파의 평균속도가 낮게 평가되었다. 양 단부에 부착한 AE센서 A0과 A6로부터 산정한 음파속도는 각각 4,235 m/sec와 4,423 m/sec로 PSC보부재 길이방향으로 콘크리트 표면에 부착된 AE센서들로부터 산정된 음파속도보다 빠르게 평가되었다. 이는 양 단부에 부착된 AE센서들의 경우 길이방향으로 표면에 부착한 AE센서들에 비해 종파의 영향이 크기 때문이라 판단된다.

4.2.2 음파속도를 선형함수로 가정하는 경우

음파속도(표 3 참조)를 음원으로부터 AE센서까지의 도달

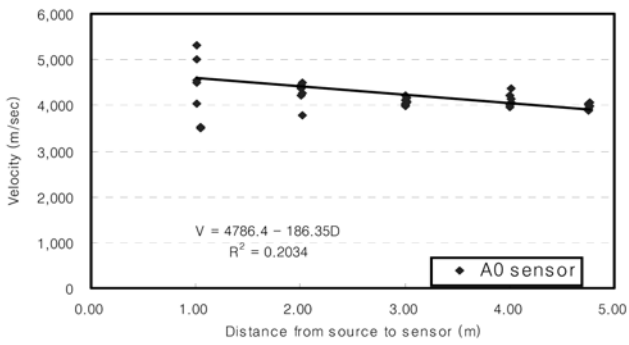
표 4. 산술평균방법에 의한 음파속도

센서번호	음파속도 (m/sec)	
	상수로 가정한 경우	선형함수로 가정한 경우
A0	4,235	$V = 4786.4 - 186.35 D$
A1	3,567	$V = 3177.5 + 132.42 D$
A2	4,021	$V = 4397.4 - 167.65 D$
A3	3,938	$V = 3870.2 + 35.88 D$
A4	4,055	$V = 4242.7 - 88.06 D$
A5	4,008	$V = 4128.3 - 40.90 D$
A6	4,423	$V = 4622.8 - 113.65 D$
A0, A6	4,329	$V = 4709.1 - 151.17 D$
A1~A5	3,918	$V = 4063.8 - 60.60 D$
A0~A6	4,050	$V = 4192.4 - 62.93 D$

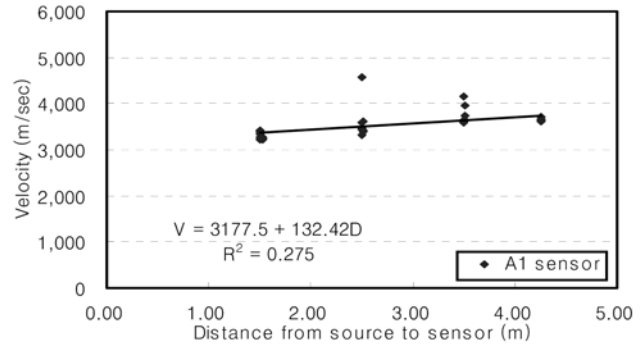
표 3. 타격위치 S01에 대한 음파의 도달시간, 시간차, 거리차 및 속도

타격위치	센서번호	도달시간 t_i (sec)	시간차 Δt (sec)	타격위치와 센서와의 거리차 (m)	음파속도 (m/sec)	평균음파속도 (m/sec)
S01-1*	A0	0.028951	0.000000	0.00	-	4,077
	A1	0.028951	0.000000	-0.02	-	
	A2	0.029183	0.000232	0.97	4,167	
	A3	0.029426	0.000475	1.96	4,137	
	A4	0.029670	0.000719	2.96	4,123	
	A5	0.029974	0.001023	3.96	3,875	
	A6	0.030045	0.001094	4.46	4,081	

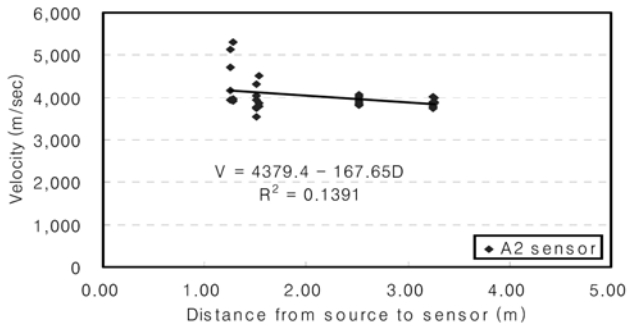
* : S01-1은 타격위치 S01에 대한 3번의 충격실험중에서 첫 번째 실험을 의미함.



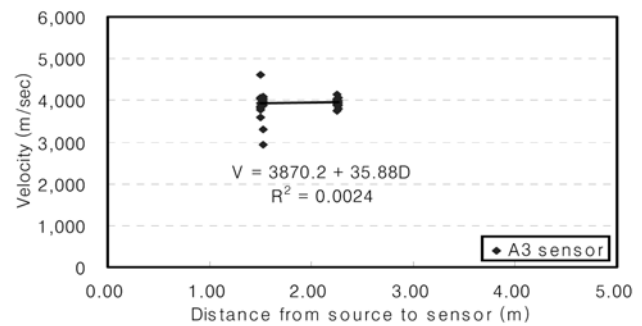
(a) A0센서의 경우



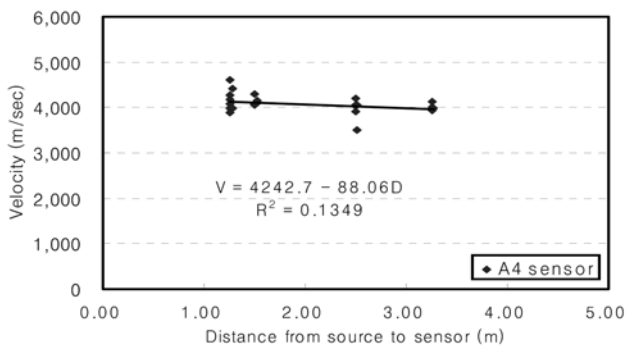
(b) A1센서의 경우



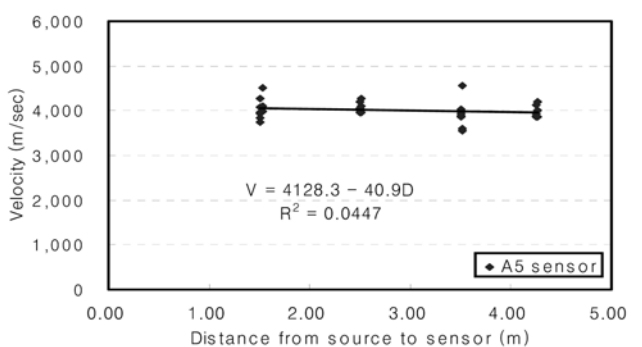
(c) A2센서의 경우



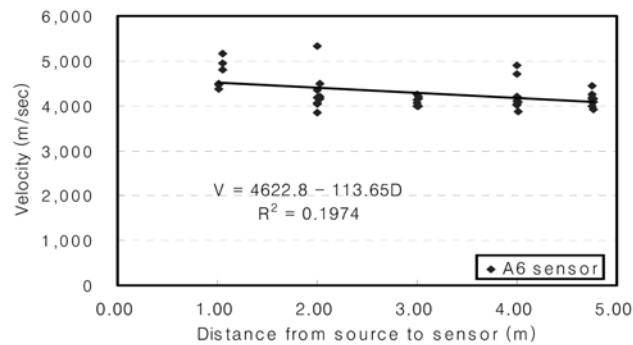
(d) A3센서의 경우



(e) A4센서의 경우



(f) A5센서의 경우



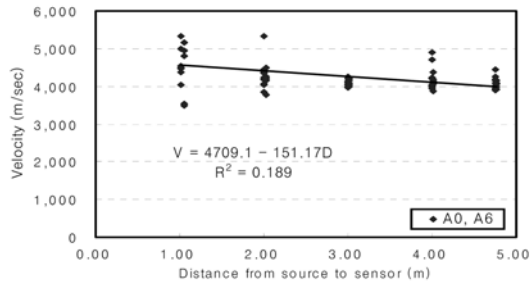
(g) A6센서의 경우

그림 7. 각 AE센서들에 의해 산정된 음파의 전파속도 변화

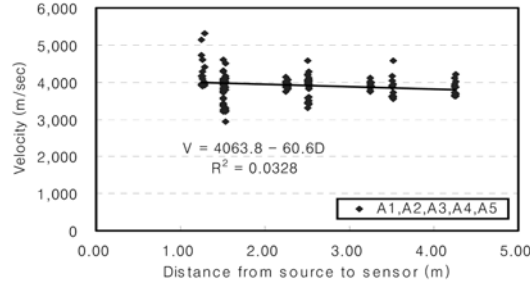
거리 D 에 대해 선형함수로 회귀분석한 결과를 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 그림 7에는 각 AE센서의 음파속도 변화, 그림 8에는 AE센서들의 조합에 의해 산정된 음파속도 변화를 나타내었다. 그림 7(a)은 A0센서에 의해 산정된 음파속도 변화를 나타내는데, 음파의 전파길이가 증가할수록 음파속도가 1m당 약 186 m/sec 감소되었으며, 음파의 전파길이가 짧은 경우 음파속도 편차가 크게 발생하였다. 음파속도는 식 1과 같이 음원에서 AE센서까지의 음파의 진행거리

차 ΔD 를 도달시간차 Δt 로 나눈 수치이기 때문에, 음원이 AE센서와 가까운 경우 상대적으로 음파의 도달 시간차 Δt 의 수치가 작아져 측정오차에 의한 영향이 커질 수 있다. 반대의 경우에는 음파의 도달시간차 Δt 에 대한 측정오차의 비율이 감소되기 때문에 음파속도 변동폭이 감소되는데 그림 7(a)에서 이러한 경향을 확인할 수 있었다.

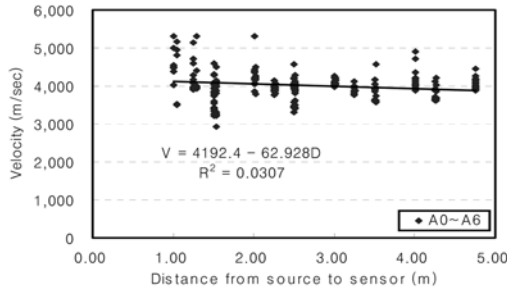
A1센서에 의해 산정된 음파속도(그림 7(b) 참조)는 다른 센서와 달리 음파속도가 작고, 음파의 전파길이가 증가됨에



(a) 단부에 부착된 센서 A0과 A6의 조합



(b) 길이방향 표면에 부착된 센서 A1, A2, A3, A4, A5의 조합



(c) 전체 AE센서의 조합

그림 8. AE센서들의 조합에 의해 산정된 음파의 전파속도 변화

따라 오히려 증가되는 경향을 보였다. 일반적인 음파의 감쇠 현상과 반대되는 결과에 대해 그 원인을 명확히 분석하기 어려웠지만 A1센서 자체의 결함, 도달시간 측정오차 그리고 A1센서 바로 옆에 형성된 3개의 인위적인 손상 등이 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. A1센서와 대칭인 위치에 있는 A5 센서(그림 7(f) 참조)뿐만 아니라 A2센서와 A4센서의 경우에도 음파의 전파길이가 증가됨에 따라 음파속도가 감소되는 경향을 보였다. 실험부재의 중앙에 위치한 A3센서(그림 7(d) 참조)의 경우 음파의 전파길이가 다른 센서에 비해 상대적으로 짧아 음파속도의 변화는 작았다.

그림 8에는 여러 AE센서들의 조합에 의해 산정된 음파속도 변화를 나타내었다. 여러 개의 AE센서들의 조합에 의해 산정된 음파속도 변화를 살펴보면 음파의 전파길이가 증가됨에 따라 음파속도가 감소되며, 전체 AE센서의 조합에 의해 산정된 음파속도는 1m당 약 63 m/sec 정도 감소되었다.

이상과 같이 각각의 AE센서와 AE센서들의 조합에 의해 산정된 음파속도를 음원에서 AE 센서까지의 전달길이 D에 따른 선형함수로 나타내었으며 그 결과를 표 4에는 정리하였다.

4.3 최소제곱법에 의한 음파속도 산정결과

최소제곱법에 의한 음파속도 산정도 산술평균에 의한 경우와 마찬가지로 음파속도를 상수로 가정한 경우와 음원과 센서와의 거리에 대한 선형으로 가정한 경우, 또한 각각에 대

표 5. 최소제곱법에 의한 음파의 전파속도

AE센서	음파의 전파속도 (m/sec)	
	상수로 가정한 경우	선형함수로 가정한 경우
A0	4,036	$V = 4457.2 - 95.57 D$
A1	3,677	$V = 3684.4 + 9.27 D$
A2	3,920	$V = 4287.9 - 117.64 D$
A3	3,937	$V = 4169.2 - 83.38 D$
A4	3,994	$V = 4276.3 - 83.98 D$
A5	3,969	$V = 4269.7 - 71.15 D$
A6	4,148	$V = 4399.7 - 51.92 D$
A0, A6	4,071	$V = 4489.7 - 87.57 D$
A1~A5	3,847	$V = 4195.9 - 85.75 D$
A0~A6	3,983	$V = 3912.4 + 15.64 D$

해 센서별 위치에 관계없이 산정한 경우, 측면과 양단부에 부착된 센서를 구별하여 산정한 경우, 각 센서별 속도를 산정한 경우 모두 6가지 경우에 대해 수행하였다. 실험을 통해 얻어진 전체 도달시간 측정값의 수는 모든 경우에 대해 동일하게 $18 \times 3 \times 7 = 378$ 개이며, 각각의 측정값에 대해 하나의 관측방정식을 형성할 수 있으므로, 전체 378개의 관측방정식이 만들어진다. 각각의 경우에 대한 음파속도 산정방법은 앞의 2장에 자세히 설명하였으며, 산정결과는 표 5에 나타내었다.

전체적으로 산술평균방법에 의한 경우와 비교해 보면 그 값에는 차이를 보이지만 거의 동일한 경향을 보였다. 즉, 산술평균방법의 경우에서와 같이 센서 A2~A5의 속도는 센서 A0과 A6에 비해 작은 값을 가지며 서로 큰 차이가 없으며, 센서 A1의 속도는 다른 센서에 비해 매우 느린 것을 알 수 있다. 각각의 센서별 속도를 거리에 대한 선형으로 가정한 경우, 센서 A1을 제외하면 모두 감소효과를 보였다. 전체 센서에 대한 속도를 선형으로 가정한 경우에 대해서는 산술평균의 경우와는 달리 거리가 증가함에 따라 오히려 속도가 증가한 것은 최소제곱법의 경우 A1센서에 의한 과대오차에 보다 민감하게 반응하기 때문인 것으로 판단된다.

4.4 최소제곱법에 의한 음원위치 산정 결과

AE센서를 이용해 산정한 음파속도 V 와 음파의 도달시간을 이용하여 역으로 음원위치를 산정하였다. 본 연구에서 실험체에 부착한 AE센서는 직선으로 1차원적으로 배치되어 있기 때문에 Y 축과 Z 축 좌표는 기지 값으로 하고, 실험부재 길이방향 X 만을 미지수로 가정하여 음원위치를 산정하였다. 음원위치 산정시 산술평균방법과 최소제곱법에 의해 산정한 음파속도를 각각 적용해 보았다.

2장에 나타난 음원위치 산정방법에 따라 전체 $54 (=18 \times 3)$ 개의 타격실험에 대한 음원의 좌표를 계산하였으며, 평가를 위하여 실제 음원위치와 비교하여 오차를 계산한 후, 각각의 경우에 대해 평균제곱근오차 RMSE(Root Mean Square Error)와 평균오차를 계산하였다(표 6 참조).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum e^2}{n}} \quad (17)$$

표 6. 음원위치 산정결과

(단위 : mm)

음파속도 산정방법	산술평균방법		최소제곱법			
			전체 센서 이용		A1센서 제외	
	RMSE	평균 오차	RMSE	평균 오차	RMSE	평균 오차
CASE1	52.7	-33.6	45.1	-33.1	30.5	-4.1
CASE2	46.2	-35.2	44.0	-32.3	30.4	-3.7
CASE3	45.0	-33.4	45.6	-32.6	35.5	-13.0
CASE4	58.2	-35.8	48.0	-36.3	35.7	-17.9
CASE5	40.5	8.3	30.6	-0.9	28.5	1.5

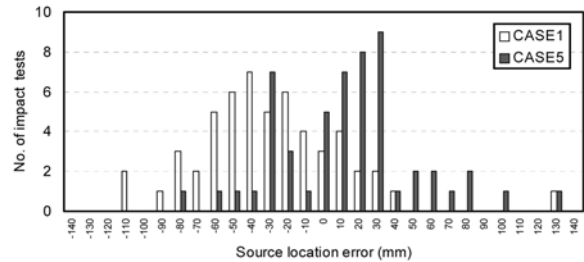
CASE1 : 전체 센서에 도달되는 음파속도를 상수로 가정
 CASE2 : 전체 센서에 도달되는 음파속도를 거리에 대한 선형함수로 가정
 CASE3 : 센서 부착위치 차이를 고려하여 음파속도를 상수로 가정
 CASE4 : 센서 부착위치 차이를 고려하여 음파속도를 선형함수로 가정
 CASE5 : 각 센서별 속도를 선형함수로 고려하는 경우

여기서 e : 오차(실제 음원의 X 좌표 - 계산된 음원의 X 좌표),
 $n \times 1$ 벡터
 n : 전체 타격수($18 \times 3 = 54$)

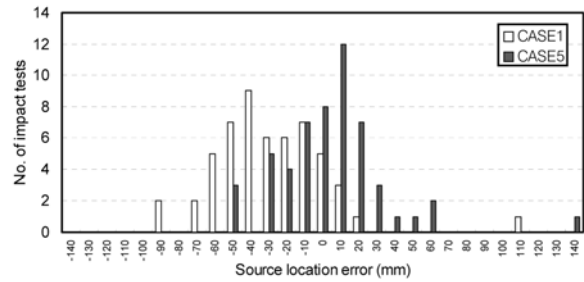
표 6에 음파속도를 산술평균방법과 최소제곱법에 의해 산정한 음파속도를 이용하는 경우에 대해 각각 음원위치 산정 결과를 나타내었다. 먼저 음파속도를 산술평균치를 이용하는 경우보다 최소제곱법에 의한 음파속도를 이용하는 경우 RMSE가 작아 정확도가 높다는 것을 알 수 있다. 하지만 두 방법 모두 평균오차가 0보다 작기 때문에 실제 음원위치 보다 다소 오른쪽으로 치우치는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 다만, 각 센서별 음파속도를 선형함수로 고려하는 CASE5의 경우 평균오차가 0에 근접되는 것을 알 수 있다. 이를 토대로 음원위치 산정시 본 연구에서 적용한 방법들 중에서 각 AE센서로부터 산정된 음파속도를 선형함수로 가정하는 방법이 가장 정확도가 높다는 것을 확인할 수 있었다. 이 경우 음원위치 산정결과에 대한 RMSE가 30.6mm로 평가되었으며 이 정도 수치는 실구조물 적용시 매우 유용한 수치라 판단된다.

AE센서 중에서 A1센서의 경우 음파속도가 상대적으로 다른 센서와 차이를 보이기 때문에 음원위치 산정시 A1센서가 미치는 영향을 알아보기 위해 A1센서를 제외한 상태에서 음원위치를 산정해보았다. 표 6에 음원위치 산정결과를 나타내었는데 A1센서의 영향을 배제하는 경우 음원위치 산정시 RMSE와 평균오차가 동시에 감소됨을 확인할 수 있었다.

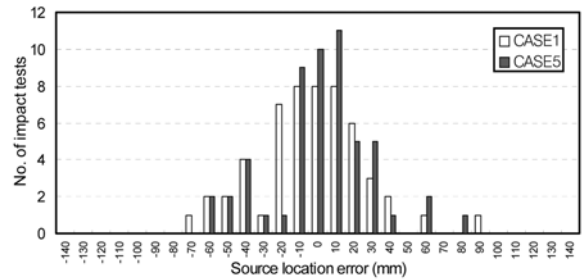
그림 9에 음원위치 산정결과중에서 상대적으로 오차가 큰 CASE1과 오차가 작은 CASE5에 대한 오차분포도를 나타내었다. 그림에서 (a)는 산술평균방법으로 산정한 음파속도를 이용한 경우이며 (b)는 최소제곱법으로 산정한 음파속도를 이용한 경우 그리고 (c)는 A1센서를 배제한 경우에 해당한다. 그림에서 CASE5의 경우가 CASE1보다는 평균오차가 작음을 알 수 있으며, 최소제곱법으로 산정한 음파속도를 이용하는 경우 산술평균방법으로 구한 음파속도를 이용하는 경우보다 오차가 감소함을 알 수 있다. 하지만 두 방법 모두 최대오차가 130 mm 정도 되었다. A1센서의 영향을 배제한 경우에는 음원위치 최대오차도 80 mm 정도로 크게 감소됨을 확인할 수 있었다.



(a) 산술평균방법으로 산정한 음파속도를 이용한 경우



(b) 최소제곱법으로 산정한 음파속도를 이용한 경우



(c) A1센서를 배제하고 최소제곱법으로 산정한 음파속도를 이용한 경우

그림 9. 음원위치 산정결과에 대한 오차 분포도

5. 결 론

본 연구에서는 AE기법을 이용하여 PSC보에 대한 음파속도와 음원위치 산정방법에 대해 알아보았으며, 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 길이가 5m인 PSC보를 매질로 하는 음파의 평균속도는 산술평균방법을 이용하는 경우 4,050 m/sec, 최소제곱법을 이용하는 경우 3,983 m/sec로 평가되었으며, 각 AE센서로부터 산정된 음파속도는 음파의 도달시간 측정시 오차가 포함되기 있기 때문에 산술평균방법보다는 최소제곱법을

- 이용하는 경우 음파속도 편차를 감소시킬 수 있다.
2. PSC보의 음파속도는 AE센서의 부착위치에 따라 변화되며, 본 연구에서는 PSC보의 단부에 붙인 AE센서의 음파속도가 PSC보의 길이방향을 따라 표면에 부착한 AE센서의 음파속도보다 약 200~400 m/sec 정도 빠르게 평가되었다.
 3. 음파속도는 감쇠현상에 의해 AE센서가 음원위치로부터 멀어질수록 감소되며, 음파속도를 음원과 센서간의 거리에 따른 선형함수로 가정하는 경우, 단부에 설치된 AE센서의 경우 1m당 88~143 m/sec, 길이방향 표면에 부착한 AE센서의 경우 1m당 50~86 m/sec 정도 감소되었다.
 4. 음원위치 산정시 음파속도는 산술평균방법보다는 최소제곱법, 전체 AE센서들로부터 산정한 수치보다는 각각의 AE센서로부터 산정된 수치를 독립적으로 이용하는 경우 오차 특히 평균오차를 감소시킬 수 있는 방법으로 판단된다. 부재 길이가 5m이고 AE센서 간격이 1m인 PSC보에 대해 음파의 평균속도를 이용하는 경우 평균오차는 약 33 mm이었으며, 각각의 AE센서들로부터 산정한 음파속도를 독립적으로 이용하는 경우에는 평균오차가 0.9 mm이었다.
 5. 본 연구에서 사용된 PSC보 실험체의 길이는 5m로 실제 PSC교량의 지간장에 비해 매우 짧기 때문에 연구결과 특히 음파속도 감소량을 실제 교량에 바로 적용하기에 불충분하다. 따라서 실험체의 길이와 AE센서 간격에 변화를 준 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2004년 건설교통부 건설기술기반구축사업(과제 번호:04기반구축 A05-01)의 재정적 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며, 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

Baron, J.A., and Ying, S. (1987) Acoustic emission source loca-

tion, *Nondestructive Testing Handbook, Vol. 5, Acoustic Emission Testing, Section 6*, ASNT, Columbus, OH, pp. 135-154.

Cullington, D.W., MacNeil, D., Paulson, P., and Elliot, J. (2001) Continuous acoustic monitoring of grouted post-tensioned concrete bridges, *NDT&E International*, Vol. 34, pp. 95-105.

Halsall, A.P. Welch, W.E., and Trepanier, S.M. (1996) Acoustic monitoring technology for post-tensioned concrete structures, *FIP Symposium 1996 on Post-tensioned Concrete Structures*, The Concrete Society, pp. 483-491.

Landis, E., Ouyang, C., and Shah, S.P. (1992) Automated determination of first p-wave arrival and acoustic emission source location, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 10, pp. 97-103.

Mathy, B. Demars, P. Roisin, F. and Wouters, M. (1996) Investigation and strengthening study of twenty damaged bridges: a belgium case history, *Bridge Management: Inspection, Maintenance and Repair*, Proceedings of the 3rd International Conference, University of Surrey, pp. 658-666.

Mikhail, E.M. (1976) Observations and least squares, *University Press of America*, New York, NY, pp. 497.

Minemura, O., Sakata, N., Yuyama, S., Okamoto, T., and Maruyama, K. (1998) Acoustic emission evaluation of an arch dam during construction cooling and grouting, *Construction and Building Materials* 12, pp. 385-392.

The Concrete Society, (1996) Durable bonded post-tensioned concrete bridges, *Concrete Society Technical Report 47*, TR047.

Venkatesh, V. and Houghton, J.R. (1996) Neural network approach to acoustic emission source location, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 14, No. 2, pp. 61-68.

Woodward, R.J. and Williams, F.W. (1988) Collapse of ynys-s-gwas bridge, West Glamorgan, *Proceedings of Institute of Civil Engineers*, Part 1, Vol. 84, pp. 635-669.

Youn, S.G., Cho, S.K., and Kim, E.K. (2005) Acoustic emission technique for detection of corrosion-induced wire fracture, *Key Engineering Materials*, Vols. 297-300, pp. 2040-2045.

Yuyama, S., Okamoto, T., Shigeishi, M., Ohtsu, M., and Kishi, T. (1999) a proposed standard for evaluating structural integrity of reinforced concrete beams by acoustic emission, *Acoustic Emission: Standards and Technology Update, ASTM STP 1353*, ASTM, pp. 25-40.

(접수일: 2006.2.20/심사일: 2006.3.28/심사완료일: 2006.7.5)