

최소제곱법에 의한 PSC보의 음향방출파원 위치결정

Location of Acoustic Emission Sources in a PSC Beam using Least Squares

이창노¹⁾

Lee, Changno

Abstract

Acoustic Emission (AE) technology is an effective nondestructive testing for continuous monitoring of defect formation and failures in structural materials. This paper presents a source location model using Acoustic Emission (AE) sensors in a Pre-Stressed Concrete (PSC) beam and the evaluation of the model was performed through lab experiments. 54 AE events were made on the surface of the 5 m-PSC beam using a Schmidt Hammer and arrival times were measured with 7 AE sensors. The source location for each event was estimated using least squares. The results were compared with actual positions and the RMSE (Root Mean Square Errors) was about 2 cm.

Keywords : Acoustic Emission, Source Location, PSC, Least Squares

초 록

음향방출(AE: Acoustic Emission) 기법은 구조물 내부에서 발생하는 균열을 연속적으로 모니터링 할 수 있는 효과적인 비파괴검사법이다. 본 논문에서는 AE 센서를 이용하여 PSC 보에서의 파원위치를 결정하기 위한 수학적 모델을 제시하고 실험을 통해 제시된 모델을 평가하였다. 실험을 위해 제작된 5m-PSC보의 표면에서 인위적으로 슈미트해머의 타격에 의해 탄성파를 발생시켰으며 1m 간격으로 선형으로 배치된 7개의 AE센서에 의해 탄성파의 도달시간이 측정되었다. 최소제곱법에 의해 측정된 도달시간의 잔차의 제곱합이 최소가 되도록 파원의 위치를 구한 후, 실제 타격위치와 비교하여 추정된 위치결정방법의 정확도를 평가하였다. 54개의 타격실험을 통해 얻어진 파원위치의 평균제곱근 오차는 약 2cm 이었다.

핵심어 : 음향방출, 파원위치결정, 프리스트레스트 콘크리트, 최소제곱법

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트(PSC: Pre-Stressed Concrete)는 PS강재를 사용하여 프리스트레스를 도입한 철근콘크리트로서, PS강재는 응력부식을 받기 쉬운 고응력하에 있으므로 응력부식을 방지하기 위해 PS강재를 그라우트에 의해 완전히 감싸는 방법을 주로 사용한다. 그러나 그라우팅이 불충분하여 PS강재 주변에 공극이 발생하여 물이 공급되거나, 공극사이로 제설제에 의한 염소이온이 침투하여 PS강재가 부식하고 파단되어 PSC구조물이 갑작스럽게 붕괴하는 사고가 발생하기도 한다(Woodward 등,

1988 ; Halsall 등, 1996 ; The Concrete Society, 1996 ; Mathy 등, 1996). PSC구조물 내부에서 발생하는 PS 강재의 파단은 외관상으로는 전혀 식별할 수 없으므로 일반적인 비파괴검사법에 의존할 경우 많은 시간과 비용이 소요된다. AE(Acoustic Emission)기법은 구조물 내부의 균열 또는 파단으로 인해 방출되는 탄성파를 외부에 부착된 음향센서로 감지하여 구조물 내부의 결함을 탐지하고 파원의 위치를 결정하는 비파괴검사법으로 구조물의 기능을 유지하면서 내부의 균열 발생 및 성장을 연속적으로 감시할 수 있으므로 외관상으로는 식별할 수 없는 구조물 내부의 결함을 초기에 탐지하여 정확히 위치를 결정하는

1) 정회원 · 서울산업대학교 공과대학 토목공학과 전임강사(E-mail:changno@snut.ac.kr)

효과적인 기법이라 할 수 있다(권오양, 2001).

AE기법은 PS강재의 파단을 초기에 발견하고 그 위치를 결정하는 가장 효과적인 수단으로 평가되어 1990년대 말 영국 도로국(the Highways Agency)에서는 Lab 실험을 거친 후 실제 교량에 AE시스템을 설치하여 적용하고 있으며, 이어서 프랑스, 네덜란드, 벨기에 등에서도 실제 교량에 설치되어 모니터링하고 있다(Cullington 등, 2001).

국내에서도 이미 오래 전부터 대부분의 교량에 PSC구조물이 사용되어 왔으므로 외국에서와 같은 PS강재의 파단으로 인한 교량의 급작스런 붕괴 가능성이 있지만 AE기법을 적용하여 이와 같은 결함을 초기에 탐지하고 위치를 결정하기 위해 시도는 거의 이루어지지 않고 있다. 최근 Youn 등(2005)은 PS강재의 파단에 따른 탄성파를 AE센서로부터 검출하는 실험을 수행하였으나, AE기법을 실제 교량에 적용하기 위해서는 먼저 파원의 위치결정(source location) 기술이 확보되어야 한다. AE기법에 의한 파원의 위치결정방법은 교량과 같은 토목 구조물 모니터링에 사용되는 GPS 측량기법과 기본적인 원리는 같지만(Meng 등, Roberts 등), AE기법의 경우 사용되는 파동이 다르며 구조물 내부를 통해 탄성파가 전파되므로 구조물의 재질이나 형상과 같은 구조물 특성의 큰 영향을 받는다.

본 연구에서는 교량과 같은 토목구조물에 많이 사용되는 프리스트레스트 콘크리트 보를 대상으로 AE기술에 의한 결함의 위치결정기술을 확립하기 위하여 실제 실험부재를 제작하여 실험을 실시하였다. 인위적인 슈미트해머의 타격에 의해 실험부재 표면에 탄성파를 발생시켰으며, 센서에서 측정된 탄성파의 도달시간으로부터 최소제곱법에 의해 파원의 위치를 구한 후, 실제 타격위치와 비교하여 위치결정방법의 정확도를 평가하였다.

2. AE 센서에 의한 파원위치 결정

파원에서 발생한 탄성파가 매질을 따라 다양한 경로로 전파되어 음향센서에 감지되면 센서는 이를 전기신호로 바꾸어 시간에 따른 탄성파의 강도가 기록된다(그림 1). 기록된 파형으로부터 처음으로 도달된 탄성파의 도달시간을 측정할 수 있으며, 여러 센서에서 탄성파가 감지되면 파원의 위치를 계산할 수 있다. 파원의 위치는 대상체에 따라 1차원, 2차원, 3차원 위치산정으로 구분되며, 본 연구에서는 최종적으로 선형 PS강재의 판단위치 산정이 그 목적이므로 1차원적 파원위치 결정만을 고려한다.

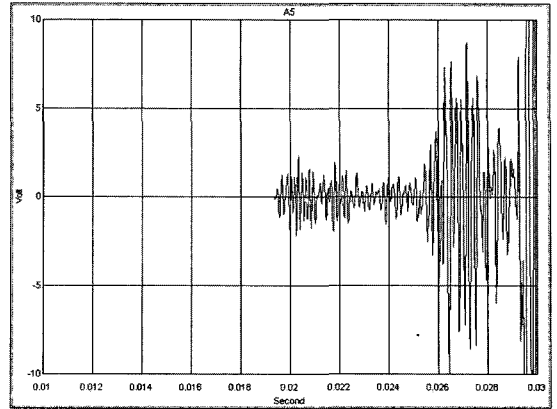


그림 1. 센서에 의해 기록된 탄성파

2.1 AE 센서로부터 파원 위치결정을 위한 수학적 모델

각 센서에 대해 측정된 도달시간은 동일 시점을 기준으로 하고 있지만 탄성파가 발생한 시점을 알 수 없으며, 매질이 균질하다고 가정하면 최초로 센서에 도달하는 탄성파는 파원과 센서를 직선으로 연결한 경로를 따라 전달된다고 볼 수 있다. 따라서 탄성파의 도달시간은 탄성파의 발생시간, 파원과 센서간의 직선거리, 탄성파의 전달 속도에 대한 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$t_i = t_o + \text{dist}_{ia} / V \quad (1)$$

여기서, $\text{dist}_{ia} = \sqrt{(X_a - X_i)^2 + (Y_a - Y_i)^2 + (Z_a - Z_i)^2}$

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 음파도달시간(sec)

t_o : 탄성파의 발생시간(sec)

V : 전달속도(m/sec)

식 (1)에서 탄성파의 전달속도는 매질에 다르며, 콘크리트의 경우 약 3000-4500m/sec의 크기를 갖는다. 일반적으로 대상체가 결정되면 캘리브레이션을 통해 음파의 전달속도를 미리 정할 수 있다. 즉, 위치를 알고 있는 지점에서 탄성파를 인위적으로 발생시켜 탄성파 전달속도를 계산한다. 탄성파의 도달시간은 파원위치결정에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 요소이며, 일반적으로 탄성파의 강도는 파원으로부터 멀어짐에 따라 감쇠효과에 의해 도달시간이 지연되는 경우가 발생할 수 있다. 즉, 탄성파가 매질을 따라 전파됨에 따라 그 강도가 약해지게 되어 첫 번째 신호의 최고점이 기준 값 이하로 감쇠되어 두 번

째 또는 그 이후에 감지된 신호에 의해 도달시간이 정해지는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 경우 도달시간이 지연되는 결과가 발생하며 특히 콘크리트에 대한 감쇠효과가 큰 것으로 알려져 있다(Landis 등, 1993).

본 연구에서는 먼저 타격점의 위치를 이용하여 탄성파의 전달속도를 추정한 후, 그 전달속도를 이용하여 파원의 위치를 추정하였다. 식 (1)의 경우 속도 뿐 아니라 탄성파의 발생시간 역시 미지계수로 포함시켜야 하므로, 센서 간의 도달시간의 차를 이용하여 탄성파의 발생시간을 소거하면 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$F = t_i - t_j - (dist_{ia} - dist_{ja}) / V = 0 \quad (2)$$

여기서, t_i : 센서 i에서의 도달시간(sec)
 t_j : 센서 j에서의 도달시간(sec)
 $dist_{ia}$: 타격점 a와 센서 i와의 거리(m)
 $dist_{ja}$: 타격점 a와 센서 j와의 거리(m)

2.2 최소제곱법에 의한 전달속도 및 파원위치 추정

각 센서에서 측정된 음파도달시간에는 오차가 포함되어 있으며, 일반적으로 관측값의 수는 미지계수를 결정하기 위해 필요한 최소 관측값의 수보다 많으므로 측정된 도달시간을 사용할 경우, 식 (2)는 성립하지 않으며 조정이 필요하다.

식 (2)는 미지계수에 대해 비선형이므로 미지계수를 구하기 위해서는 먼저 선형화하여야 한다. 식 (2)를 테일러 급수에 의해 일차항까지만 고려하여 선형화하면 식 (3)과 같다.

$$Av + B\Delta = f \quad (3)$$

여기서, A : 함수 F 의 도달시간에 대한 편미분 행렬
 B : 함수 F 의 미지계수에 대한 편미분 행렬
 v : 잔차
 Δ : 미지계수에 대한 보정량
 f : 현재의 미지계수에 대한 함수값에 -1를 곱한 값(- F)

선형화된 식 (3)으로부터 각 센서에서 측정된 음파도달시간을 이용하여 미지의 음파 전달속도 또는 음원 위치에 대한 최적해를 구하기 위해 도달시간의 잔차의 제곱합이 최소가 되도록 최소제곱법(least squares)에 의한 조정을 하였다.

미지계수(전달속도 또는 음원의 위치)를 결정하기 위해서는 먼저 미지계수에 대한 초기값을 설정하고, 설정된 초기값을 기준으로 최소제곱법에 의해 보정량을 계산한 후 초기값에 더하여 미지계수를 갱신하고, 다시 갱신된 미지계수에 대해 보정량을 계산하여 미지계수를 갱신하는 반복적인 방법에 의해 미지계수의 최적해를 계산하였다.

3. 실험

3.1 실험 방법

실험을 위하여 단면중앙부에 지름 12.4mm PS 강연선이 긴장·부착된 길이 5m의 PSC보를 제작하였다. 그림 2와 같이 PS강연선의 파단 시 1차원 파단위치결정의 정확도를 높이기 위하여 전체 7개의 AE센서(A0~A6)를 PS강연선을 따라 선형으로 배치하였으며 그 중 5개는 부재 길이 방향의 콘크리트 표면에 1m 간격으로, 나머지 2개는 양 단부 긴장재 정착부 주변에 배치하였다.

PS강연선의 파단으로 인한 탄성파를 AE센서에 의해 탐지하여 파단위치를 결정하는 실험을 위해서 콘크리트 표면으로부터 드릴구멍을 만들어 PS강연선을 강제적으로 부식시켜야 하며, 이 경우 한번 PS강연선이 파단되면 다른 지점에서 추가적으로 부식실험을 하기 어려우므로 충분한 실험 데이터를 생성하는 것이 어렵다. 따라서 부식실험 이전에 실험체의 파원위치 결정방법을 평가하기 위하여 여러 지점에서 인위적으로 슈미트해머를 이용한 타격실험을 실시하였다. 그림 3에서와 같이 5개의 AE센서가 부착된 부재 길이 방향의 콘크리트 표면 18지점(S01~S18)에서 각 3회 반복해서 슈미트 해머에 의한 탄성파를 발생시켰으며,

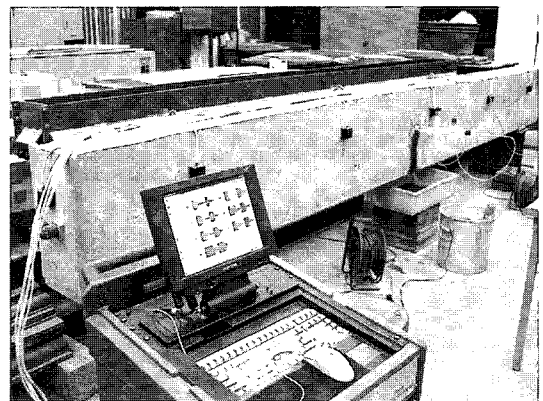


그림 2. PSC 보에 부착된 AE 센서

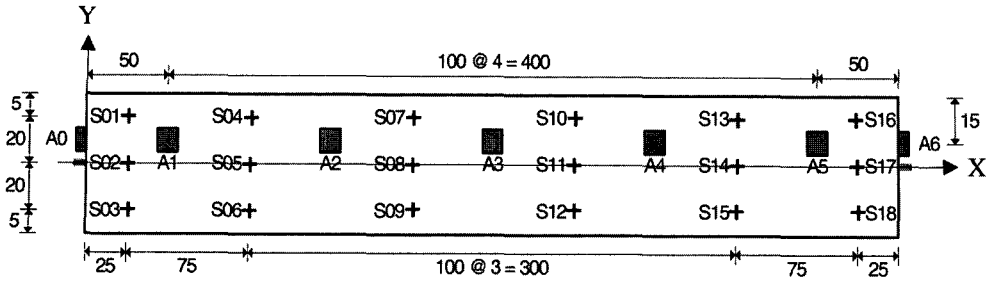


그림 3. 센서 부착위치 및 타격 위치 (단위: cm)

AE센서와 장비는 캐나다 PureTechnology의 SoundPrint® 시스템을 사용하였다.

전체 54회의 타격실험 각각에 대해 7개 AE센서 모두에서 탄성파가 감지되었으며 처음으로 도달된 탄성파의 도달시간이 측정되었다. 센서 별로 신호의 강도가 다소 차이가 있었으며 측정된 도달시간에도 어느 정도 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

먼저 타격위치를 기지값으로 하여 탄성파의 전달속도를 최소제곱법에 의해 추정된 후, 도달시간 측정 오차에 대한 자세한 분석은 최소제곱법에 의한 조정 후 오차 분석을 통해 수행되었다. 전달속도가 정해진 후, 타격위치를 최소제곱법에 의해 추정하였으며, 실제 위치와 비교하여 최소제곱법에 의한 파원위치 추정의 정확도를 평가하였다.

3.2 최소제곱법에 의한 탄성파 전달속도 추정 및 분석

음향방출 기법에서 탄성파의 전달속도는 도달시간과 함께 음원위치의 추정에 가장 큰 영향을 미치는 오차요인이다. 일반적으로 탄성파의 전달속도는 전달거리에 관계 없이 상수로 가정되어 왔으나, 콘크리트의 경우 매질의 특성 상 감쇠의 영향이 크고 토목구조물은 그 규모가 크므로 센서와 파원과의 거리가 상당히 떨어져 있다. 따라서 탄성파의 전달속도는 상수뿐 아니라 탄성파의 감쇠 효과를 고려하여 전달거리에 대한 선형함수로 가정하여 추정하였다.

3.2.1 속도를 상수로 가정한 경우

먼저 각 센서에 대한 탄성파 전달속도가 일정하다고 가정하여 탄성파의 전달속도를 최소제곱법에 의해 추정하였다. 전체 타격실험에 대해 총 관측값의 수는 $378(=18 \times 3 \times 7)$, 관측방정식의 수는 $324(=18 \times 3 \times 6)$, 미지수는 하나의 속도(V)이다.

초기값(4,000m/sec)으로부터 최소제곱법에 의해 보정량(Δ)을 계산하여 반복적으로 갱신하였으며, 최종적으로 추정된 탄성파 전달속도는 3983.05m/sec이었다.

최소제곱법을 통해 탄성파 전달속도를 추정하는 것 뿐 아니라, 측정된 도달시간의 잔차를 분석하는 것도 매우 중요하다. 측정값의 잔차분석을 통하여 최소제곱법에 의한 조정 이전에 제거되어야 할 과대오차(gross error)와 기계오차(systematic error)가 측정값에 포함되어 있는지를 확인할 수 있다.

계산결과 추정된 관측값의 분산은 $1040.3\mu\text{sec}^2$ 이었으며 표준편차는 $32.25\mu\text{sec}$ 이었다. 표준편차를 거리로 환산하면 약 12.8cm이다.

추정된 미지계수로부터 각 센서에서 측정된 도달시간에 대한 잔차가 계산되었으며, 분석결과 일부 센서에 대해서는 잔차의 RMS가 크게 나타나며 평균 역시 크게 편되어 있는 것을 알 수 있었다(표 1, 그림 4).

표 1에서 잔차의 평균이 양의 부호를 갖는 것은 도달시간의 관측값이 추정값보다 작은 경우이며, 따라서 추정된 속도보다 빨리 센서에 도달했다는 의미이다. 즉, 센서 A2~A5에 대해서는 잔차의 RMS와 평균이 작으므로 기계오차(systematic error)가 없다고 볼 수 있으며, 반면에 센서 A0와 A6에 대해서는 기계오차가 있으며 다른 센서에 비해 속도가 빠르고, 센서 A1 또한 기계오차가 있으나 다른 센서에 비해 속도가 크게 느린 것을 알 수 있다. 센서 A0와 A6의 경우 PS강연선 주위에 부착되었으므로 최초로 도달된 탄성파는 콘크리트에 비해 전달속도가 빠른 PS강연선을 따라 전달된 것으로 생각되며, 실험 이전에 미리 예측된 결과였다. 잔차의 RMS와 평균의 편이량이 가장 큰 A1은 센서A2 방향으로 PS강제 부식실험을 위해 인위적으로 만든 드릴구멍이 있어 탄성파의 감쇠로 인하여 도달시간이 지연된 것으로 추측되었다.

따라서 센서에 따른 영향을 분석하기 위해 센서를 세

표 1. 속도를 상수로 가정한 경우 각 센서별 잔차의 RMS 및 평균 (단위: μsec)

센서	센서에 관계없이 동일 속도로 가정한 경우(CASE1)		센서 그룹별 속도를 구분한 경우(CASE2) (과대오차 제거 전)		센서 그룹별 속도를 구분한 경우(CASE3) (과대오차 제거 후)	
	RMS	평균	RMS	평균	RMS	평균
A0	22.7	14.8	19.2	-5.0	15.9	0.0
A1	54.1	-45.0	25.6	-5.2	14.3	-4.6
A2	16.8	-1.7	17.5	-1.9	10.8	-3.0
A3	15.6	-2.1	13.8	-2.6	8.8	-2.6
A4	14.5	3.7	13.0	3.4	10.5	5.3
A5	20.8	0.9	19.9	1.4	12.9	0.6
A6	40.1	29.5	28.0	9.8	12.4	4.3

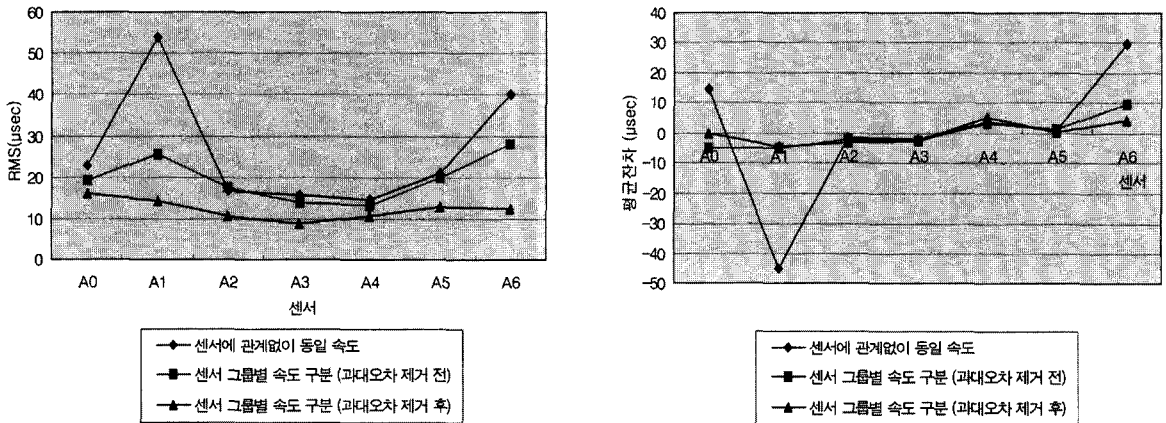


그림 4. 속도를 상수로 가정한 경우 각 센서별 잔차의 RMS 및 평균

그룹((A1), (A0, A6), (A2, A3, A4, A5))으로 나누어 별도로 속도를 추정하였다. 추정된 그룹별 전달속도와 관측값의 표준편차는 다음과 같다.

- $V_0 = 3686.1\text{m/sec}$, A1에 대한 속도
- $V_1 = 4092.7\text{m/sec}$, (A0, A6)에 대한 속도
- $V_2 = 3958.0\text{m/sec}$, (A2, A3, A4, A5)에 대한 속도
- $\hat{\sigma}_n = 21.95\mu\text{sec}$

센서 그룹별 속도가 상당히 차이가 있었으며 추정된 관측값의 표준편차는 약 66%로 줄었다. 센서에 관계없이 동일 속도로 가정한 경우에서와 같은 방법으로 센서별 잔차의 RMS와 평균을 구하였으며(표 1), 그 결과 잔차의 RMS와 평균 모두 크게 향상된 것을 알 수 있었다.

센서 그룹별 속도를 고려하므로 써 기계오차가 제거된 것으로 가정하고 과대오차에 대한 분석을 하였다. 잔차의

분산은 식 (4)에 의해 계산할 수 있으며(Mikhail, 1976), 과대오차에 대한 판단은 식 (5)에서와 같이 잔차의 절대값이 잔차에 대한 표준편차의 추정값의 3배 이상인 경우 과대오차로 가정하여 관측값에서 제외하였다(Mikhail 등, 2001).

$$\sum_{vv} = \hat{\sigma}_o^2 [A^T W_e A - A^T W_e B (B^T W_e B)^{-1} B^T W_e A] \quad (4)$$

여기서, $W_e = (AA^T)^{-1}$

$$v_i \geq 3 \sum_{vv} (i, i) \quad (5)$$

과대오차가 제거되면 다시 조정하여 동일한 방법에 의해 과대오차를 순차적으로 제거하였으며, 전체 378개의 관측값 중 22개의 과대오차가 제거되었다. 과대오차 제거 후 계산된 잔차의 RMS와 평균을 표 1에 정리하였다. 센서별 잔차의 RMS와 평균은 과대오차 제거 전에 비해 크

게 향상되었으며, 센서별 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다. 과대오차 제거 후 추정된 그룹별 전달속도와 관측값의 표준편차는 다음과 같다.

- $V_0 = 3650.1\text{m/sec}$, A1에 대한 속도
- $V_1 = 4055.2\text{m/sec}$, (A0, A6)에 대한 속도
- $V_2 = 3952.3\text{m/sec}$, (A2, A3, A4, A5)에 대한 속도
- $\hat{\sigma}_u = 13.54\mu\text{sec}$

과대오차 제거 후, 센서 그룹별 속도 변화는 크지 않았지만 추정된 관측값의 표준편차는 약 62%로 줄었다.

이상의 결과를 그림 4에 나타냈으며, 그림 4에서 센서 그룹별 속도를 구분하고 과대오차를 제거함으로써 센서 A0, A1, A6에 대한 잔차의 RMS와 평균편차가 크게 향상되었으며, 센서 별 차이가 크게 준 것을 알 수 있다.

3.2.2 속도를 거리에 대한 선형함수로 가정한 경우

속도를 상수로 가정한 경우에서와 마찬가지로 먼저 각 센서에 대한 탄성파 전달속도를 동일한 선형함수로 가정하여 탄성파의 전달속도를 최소제곱법에 의해 추정하고 측정된 도달시간의 잔차를 분석하였다.

추정된 전달속도와 관측 값의 표준편차는 다음과 같았다.

- $V = 3912.4 + 15.6 \times D$ (m/sec)
- $\hat{\sigma}_u = 32.26\mu\text{sec}$

감쇠효과에 의해 센서와 파원간의 거리(D)가 증가함에 따라 속도가 감소하여야 하지만 오히려 속도가 증가한 것은 센서 A0의 영향 때문으로 생각된다. 추정된 미지계수로부터 각 센서에서 측정된 도달시간에 대한 잔차가 계산

되었으며, 속도를 상수로 가정한 경우와 별 차이가 없는 것을 알 수 있다(표 2).

센서에 따른 영향을 분석하기 위해 센서를 세 그룹((A1), (A0, A6), (A2, A3, A4, A5))으로 나누어 별도로 속도를 추정한 경우, 추정된 그룹별 전달속도와 관측값의 표준편차는 다음과 같다.

- $V_0 = 3557.3 + 43.7 \times D$ (m/sec), A1에 대한 속도
- $V_1 = 4330.1 - 54.0 \times D$ (m/sec), (A0, A6)에 대한 속도
- $V_2 = 4098.6 - 38.5 \times D$ (m/sec), (A2, A3, A4, A5)에 대한 속도
- $\hat{\sigma}_u = 21.25\mu\text{sec}$

A1센서를 제외한 모든 센서에서 감쇠효과가 나타났으며, A0와 A6센서의 경우 센서와 파원의 거리에 따라 약 250m/sec 정도의 속도차이가 있는 것을 알 수 있다. 하지만 센서별 잔차의 RMS와 평균은 상수로 가정한 경우와 별 차이가 없었다(표 2).

속도를 상수로 가정한 경우에서와 같은 방법으로 과대오차를 제거하였으며, 전체 378개의 관측값 중 30개의 과대오차가 제거되었다. 과대오차 제거 후 추정된 그룹별 전달속도와 관측값의 표준편차는 다음과 같다.

- $V_0 = 3474.4 + 56.0 \times D$ (m/sec), A1에 대한 속도
- $V_1 = 4336.1 - 68.9 \times D$ (m/sec), (A0, A6)에 대한 속도
- $V_2 = 4109.6 - 45.6 \times D$ (m/sec), (A2, A3, A4, A5)에 대한 속도
- $\hat{\sigma}_u = 10.20\mu\text{sec}$

과대오차 제거 후, A1센서를 제외한 모든 센서에서 감

표 2. 속도를 선형함수로 가정한 경우 각 센서별 잔차의 RMS 및 평균 (단위: μsec)

센서	센서에 관계없이 동일 속도로 가정한 경우(CASE4)		센서 그룹별 속도를 구분한 경우(CASE5) (과대오차 제거 전)		센서 그룹별 속도를 구분한 경우(CASE6) (과대오차 제거 후)	
	RMS	평균	RMS	평균	RMS	평균
A0	22.5	14.1	17.2	-7.0	10.6	-0.5
A1	54.2	-45.2	23.7	-1.2	7.4	0.3
A2	17.0	-1.2	16.8	-2.3	9.1	-3.7
A3	15.8	-1.4	14.7	-4.0	9.3	-4.0
A4	15.0	4.1	12.1	3.0	9.0	4.9
A5	20.9	0.6	19.7	3.8	9.6	2.1
A6	39.5	28.9	27.8	7.8	9.6	0.8

최소값이 증가하였으며, 추정된 관측값의 표준편차는 속도를 상수로 가정한 경우($\hat{\sigma}_u = 13.54\mu\text{sec}$)에 비해 약 75%로 줄었다.

또한 잔차의 RMS와 평균편차도 속도를 상수로 가정한 경우에 비해 향상되었으며, 센서 별 차이가 감소한 것을 알 수 있다.

3.3 최소제곱법에 의한 파원의 위치추정 및 분석

3.2에서 구한 탄성파의 전달속도를 기지값으로 하여 최소제곱법에 의해 파원의 위치를 추정된 후, 추정된 파원의 위치와 실제 파원의 위치를 비교하여 정확도를 평가하였다.

전달속도를 추정하는 경우와는 달리 파원의 위치를 추정할 때에는 각 타격실험 별로 조정하여야 한다. 즉, 각 타격실험에 대해 센서에 의해 측정된 7개의 관측값만을 이용하여, 전달속도를 추정할 때와 같은 방법으로 최소제곱법에 의해 파원의 위치를 추정하였다. 본 실험의 최종 목적은 선형으로 배치된 PS강연선의 파단을 탐지하고 그 위치를 추정하는 것이므로 센서 역시 PS강연선을 따라 선형으로 배치되었으며 이 경우 1차원 선형위치만을 정확히 측정할 수 있다. 그러므로 그림 3에서 파원의 Y 및 Z좌표는 실제 파원의 Y 및 Z좌표로 고정하고 X좌표만을 미지계수로 하여 추정하였다.

파원 위치를 추정하기 위해 사용된 전달속도는 추정 값이므로 다음과 같이 통계적 제약식(stochastic constraints)으로 사용되었다. 먼저, 전달속도를 파원의 위치와 함께 미지계수로 포함시켜 다시 추정하였으며, 이때 전달속도의 추정 값(\hat{x})은 다음 식 (6)에서와 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{x} = x^o + \Delta = x + v_x \quad (6)$$

여기서, x^o : 근사값으로 계속 갱신되며 초기에는 x와 동일
 Δ : 보정량

x : 3.2에서 추정된 속도

v_x : 잔차

식 (3)과 같이 보정량과 잔차에 대한 식으로 변환하면,

$$v_x - \Delta = f_x \quad (7)$$

여기서, $f_x = x^o - x$

식 (7)에 대한 가중치는 3.2에서 구한 속도의 분산으로부터 계산되었다.

탄성파의 전달속도 추정 시 적용된 6가지 경우에 대해 전체 54개의 파원의 위치가 추정되었으며 오차(= 실제 값 - 추정 값)에 대한 RMS, 평균, 최대 절대값오차를 표 3에 정리하였다.

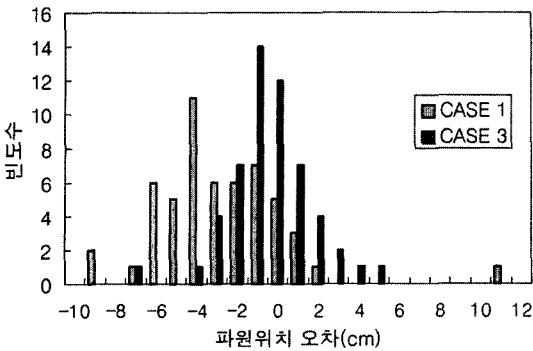
속도를 거리에 대한 선형함수로 가정한 경우 파원의 위치오차는 상수로 가정한 경우보다 대체적으로 좋은 결과를 보이지만 큰 차이는 보이지 않았다. 하지만, 센서그룹별 속도를 구분하고 과대오차를 제거함으로써 위치추정 오차 뿐 아니라 편의량도 크게 향상된 것을 알 수 있다 (그림 5).

센서에 관계없이 동일 속도로 가정한 경우 오차의 평균은 약 -3.2cm로 RMS가 약 4.4cm인 것을 고려하면 추정 값이 X축의 양(+)의 방향으로 상당히 편의 되어 있는 것을 알 수 있다. 센서에 관계없이 동일 속도로 가정한 경우 오차가 크게 편의 된 주 원인은 중앙의 왼쪽에 위치한 A1센서에 대한 전달속도가 다른 센서에 비해 크게 작기 때문인 것으로 판단된다.

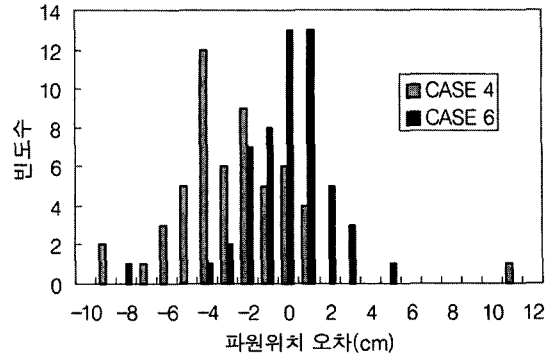
센서 그룹별 속도를 구분하고 과대오차를 제거한 경우 오차의 RMS는 속도를 상수로 가정한 경우 2.18cm, 속도를 거리에 대한 선형으로 가정한 경우 2.10cm로 크게 줄었으며 평균 역시 -0.91cm로 정확도가 크게 향상되었다. 오차의 최대 절대값은 센서 그룹별 속도를 구분하여도 줄어들지 않았으며, 과대오차를 제거하므로써 다소 감소하

표 3. 파원위치오차의 RMS, 평균, 절대값 최대오차 (단위: cm)

구 분	속도를 상수로 가정			속도를 선형함수로 가정		
	RMS	평균	최대 절대값	RMS	평균	최대 절대값
센서에 관계없이 동일 속도	4.47	-3.26	10.65	4.33	-3.15	10.69
센서 그룹별 속도 구분 (과대오차 제거 전)	3.19	-1.35	11.71	3.21	-1.23	11.91
센서 그룹별 속도 구분 (과대오차 제거 후)	2.18	-0.91	7.76	2.10	-0.91	7.76



속도를 상수로 가정한 경우



속도를 거리에 대한 선형으로 가정한 경우

그림 5. 파원위치 추정오차에 대한 히스토그램

였다.

주의하여야 할 점은 본 실험에서는 과대오차를 제거하기 위해 파원의 실제 위치를 이용하여 전체 54회의 타격 실험의 결과를 동시에 조정하였다는 사실이다. 실제적으로는 미지의 파원위치에서 한번의 탄성과 발생에 대해 얻어진 센서들의 도달시간만을 이용하여 과대오차를 판별하여야 하므로 과대오차를 제거하는 것이 어려울 것으로 생각된다. 본 연구에서는 타격실험 별 과대오차 제거는 포함시키지 않았으나, 추후 연구가 필요할 것으로 생각된다.

본 실험을 통해 얻어진 파원위치 정확도는 실무에 적용하기에 충분하지만 본 실험만으로 실제 PSC보에 적용할 경우 얼마나 정확히 파원위치를 추정할 수 있을지는 알 수 없으며, 따라서 다른 크기의 실험부재나 실제 PSC보에 대한 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 AE기술에 의한 결함의 위치결정기술을 확립하기 위하여 실제 실험부재를 제작하여 인위적인 쉬미트해머의 타격에 의해 실험부재 표면에 탄성파를 발생시켰으며, 센서에서 측정된 탄성파의 도달시간으로부터 최소제곱법에 의해 파원의 위치를 구한 후, 실제 타격위치와 비교하여 위치결정방법의 정확도를 평가하였다. 이와 같은 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 5m PSC보를 대상으로 최소제곱법에 의해 추정된 탄성파 전달속도는 모든 AE센서에 대해 동일한 상수로 가정한 경우 3983.05m/sec이었으며, AE센서에 의해 측정된 탄성파 도달시간의 표준편차는 32.25 μ sec로 거리로 환산하면 약 12.8cm이었다.

둘째, 센서별 탄성과 전달속도의 차이를 고려하고 상수로 가정한 경우 센서의 부착위치에 따라 큰 차이를 보였으며, PSC보 양단면에 부착된 AE센서에 대한 전달속도는 부재의 길이 방향으로 부착된 AE센서에 비해 약 100~140m/sec 정도 빠르게 추정되었으며, 주변에 드릴구멍이 있는 A1센서의 경우 약 270~300m/sec 정도 느리게 추정되었다.

셋째, 모든 AE센서에 대해 동일 속도로 가정한 경우 파원위치오차의 RMS는 약 4.4cm이며, 평균값은 -3.2cm 정도로 크게 편의되어 있었으나, 센서의 부착위치를 고려하고 과대오차를 제거하므로써, 오차의 RMS는 2.1~2.2cm, 평균은 -0.9cm로 크게 향상되었다.

넷째, 음향방출 신호의 감쇠 효과를 고려하여 탄성파의 전달속도를 거리에 대한 선형으로 가정한 경우 A1센서를 제외한 모든 센서에 대해 탄성파의 전달속도가 센서와 파원간의 거리에 따라 크게 감소하였지만, 실제적으로 파원위치 추정의 정확도는 별 차이가 없었다.

본 실험을 통해 얻어진 파원위치 정확도는 실무에 적용하기에 충분하지만 5m PSC부재에 의한 실험만으로 실제 PSC보에 적용할 경우 얼마나 정확히 파원위치를 추정할 수 있을지는 알 수 없으며, 따라서 다양한 크기의 실험부재나 실제 PSC보에 대한 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 권오양 (2001), 음향탐상(AE)기술의 현황과 활용방안, 안전기술지, <http://home.kosha.net/~ndetteam/data/data13.hwp>
- 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. N. and Shah, S. P. (1993), Signal analysis for quantitative AE testing, *Nondestructive Testing from Structures Congress'93*, Irvine, Calif., pp. 45-56.
- 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.
- Meng, M., Roberts, G. W., Dodson, A. H., Cosser, E., Barnes, J. and Rizos, C. (2004), Impact of GPS satellite and pseudolite geometry on structural deformation monitoring: analytical and empirical studies, *Journal of Geodesy*, Vol. 77, pp. 809-822.
- Mikhail, E. M. (1976), *Observations and least squares*, University Press of America, New York, NY, pp. 110-118.
- Mikhail, E. M., Bethel, J. S. and McGlone, J. C. (2001), *Introduction to modern photogrammetry*, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 414-422.
- Roberts, G. W., Meng, X. and Dodson, A. H. (2004), Integrating a Global Positioning System and Accelerometers to Monitor the Deflection of Bridges, *ASCE Journal of Surveying Engineering*, Vol. 130, No. 2, pp. 65-72.
- The Concrete Society (1996), *Durable bonded post-tensioned concrete bridges*, Concrete Society Technical Report 47, TR047.
- 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, Seok-Goo, Cho, Sun-Kyu and Kim, Eun-Kyum (2005), Acoustic emission technique for detection of corrosion-induced wire fracture, *Key Engineering Materials*, Vol. 297-300, pp. 2040-2045.

(접수일 2006. 4. 20, 심사일 2006. 5. 22, 심사완료일 2006. 6. 2)