

## 50m PSC박스거더를 이용한 1차원과 2차원 음원위치 산정 실험

윤석구\* · 이창노\*\*

Youn, Seok-Goo\*, Lee, Changno\*\*

### Experimental Tests for the Evaluation of One-dimensional and Two-dimensional Acoustic Source Locations with 50m length of a PSC Box Girder

#### ABSTRACT

This paper presents experimental research work for the evaluation of one-dimensional and two-dimensional acoustic source locations with 50m length of a precast prestressed concrete box girder. Acoustic events are generated by the impacts of Schmidt Hammer and the impact signals are detected by acoustic emission sensors mounted on the concrete web surface of PSC box girder with the average spacing of 9.34m. Based on the amplitude of detected acoustic signals, considering the noises developed in PSC box girder bridges, the arrival times of acoustic signals are estimated by the first arrival times of 0Volt, 0.5Volt, and 1.0Volt amplitude in each signal. Using Least Square Method, the velocities and the source locations of acoustic signals are evaluated. Based on the test results, the spacing of AE sensors and the AE sensor networks are discussed to reduce the source location errors.

**Keywords :** Bridges, Prestressed concrete, Wire fracture, Acoustic emission, Source location, Corrosion

#### 초록

이 논문에는 길이가 50m인 프리스트레스트 콘크리트 박스거더를 이용한 1차원, 2차원 음원위치 산정을 위한 실험연구 내용을 수록하였다. 슈미트 햄머를 이용하여 콘크리트 표면에 타격하여 충격음파를 발생시켰으며 PSC박스거더 복부관에 평균 9.34m 간격으로 부착한 AE센서를 통해 충격 음파를 감지하였다. 공용중인 PSC박스거더 교량에 발생할 수 있는 잡음을 고려하여 음파의 도달시간을 음파의 세기가 0Volt, 0.5Volt, 그리고 1.0Volt일 때를 기준으로 산정하였다. 음파의 도달시간들에 대한 측정결과를 토대로 충격음파의 음원위치를 최소제곱법을 이용해 산정하였다. 실험결과를 토대로 2차원 음원위치 산정시 오차를 최소화하기 위해 필요한 음향센서 간격과 음향센서의 네트워크에 대해 고찰하였다.

**검색어 :** 교량, 프리스트레스트 콘크리트, 강선파단, 음향방출, 음원, 부식

## 1. 서론

프리스트레스트 콘크리트(이하 PSC) 구조물은 PS강재를 이용해 콘크리트에 미리 소정의 압축력을 작용시켜 콘크리트에 균열이 발생하지 않도록 만든 구조물로서 PS강재를 알카리 성분인 콘크리트가 감싸고 있기 때문에 부식이 발생하지 않는다는 가정 하에 설계되고 있다. 하지만 긴장된 PS강재는 콘크리트 내부로 침투한 물과 염소이온 등에 의해 부식 또는 파단이 종종 발생하기 때문에, 유지관리시 PS강재의 상태를 파악하는 것이 PSC구조물의 안전성 확보에 매우 중요하다(Halsall 등, 1996; The Concrete Society,

\* 정희원 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 부교수 (sgyoun@seoultech.ac.kr)

\*\* 정희원 · 교신저자 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 부교수 (Corresponding Author · Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Associate Professor · changno@seoultech.ac.kr)

Received October 27 2012, Revised January 30 2013, Accepted March 7 2013

1996; Woodward 등. 1988; Mathy 등. 1996; Harding 등 1996). PSC교량에는 주로 7연선 PS강연선이 사용되며, 부식에 의해 PS강 선들이 한가닥씩 파단될 때 높은 에너지를 갖는 파단음파가 방출되기 때문에, 연속 음향감지기법(AE; Acoustic Emission)으로 파단되는 음파를 감지해 PS강재의 부식과 파단을 예측하고 파단위치를 파악하고 있다(Cullington 등. 2001; Fricker 등 2006).

연속 음향감지기법은 PSC구조물 콘크리트 표면에 부착한 음향 센서를 이용하여 PS강선 파단시 발생하는 음파를 감지하고 또한 음파의 도달시간을 분석하여 PS강선의 파단위치, 즉 음원위치를 찾아내는 비파괴검사 방법이다. PSC거더와 같이 PS강재가 선형으로 배치된 경우는 일차원 음원위치 산정 기법(Youn 등 2006)을 적용할 수 있다. 하지만, PSC박스거더는 PS강재가 박스 거더의 상부와 하부에 분포하기 때문에 PSC슬래브 교량과 유사하게 평면에서 음원위치를 찾을 필요가 있다. 이차원 평면에서 음원위치를 산정하기 위해서는 음향센서가 이차원 평면을 포함하도록 평면의 외곽과 내부에 골고루 설치되어야 한다. PSC박스거더교는 길이가 길기 때문에 콘크리트 매질의 높은 음파 감쇠현상에 의해 음파가 전달거리가 길어지면 음파의 세기가 많이 감소된다. 또한, 음파 속도는 음향센서들이 감지한 음파의 도달시간 차를 이용해 산정하는데, 감쇠현상으로 인한 음파의 세기 감소는 음파의 도달시간 측정시 많은 오차가 포함되게 만드는 요인으로 작동되며, 결국 음원과 음향센서 사이의 거리가 멀어질수록 측정오차가 증가되어 음파 속도가 낮게 평가된다(Youn 등 2006; Youn 등 2010). 따라서, 이차원 음원위치 산정도 일차원 음원위치 산정 방법과 동일하게 음파의 도달시간 측정오차가 발생하기 때문에 최소제곱법을 이용해 오차를 최소화할 필요가 있다.(Baron 등, 1987; Venkatesh 등 1996; Landis 등 1992)

이 연구에서는 길이가 50m PSC박스거더를 이용하여 음향센서의 길이방향 간격이 10m인 경우에 대해 음파속도와 1차원과 2차원 음원위치 표정을 위한 실험을 수행하였다. 길이 방향 음향센서의 간격은 10m로 설계하였으며, 수직 방향 음향센서는 PSC박스 거더 내부 복부판의 상·하부에 부착하는 방법을 적용하였다. 2차원 음원위치 표정 실험에는 음향센서를 두 가지 서로 다른 배치 형태를 적용해 보았다. 음원 방출은 슈미트 햄머를 콘크리트 표면에 타격하는 방법을 이용하였다. 음향방출실험을 통해 얻은 음파들을 이용하여 콘크리트를 매질로 하는 음파의 감쇠현상을 분석하였으며, 음파의 속도와 음원위치 산정 방법에 대해 분석하였다.

## 2. 음파속도 및 음원위치 산정방법

### 2.1 음파속도 산정방법

#### 2.1.1 산술평균방법

음파속도  $V$ 는 식 1과 같이 음원으로부터 AE센서들까지의 거리

차  $\Delta D$ 와 음파의 도달 시간차  $\Delta t$ 을 이용해 산정할 수 있다.

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

여기서,  $V$ 는 음파속도 (m/sec)

$\Delta D$ 은 음원으로부터 AE센서들까지의 도달 거리차 (m)

$\Delta t$ 는 AE센서로부터 측정된 음파의 도달 시간차 (sec)

PSC박스거더는 3차원 부재이기 때문에 음파의 전파경로는 음원으로부터 AE센서들까지 최단경로를 따라 직선으로 움직인다고 가정하였다. 인위적인 충격실험은 음원위치가 기지의 값이므로 식 1의  $\Delta D$ 을 계산할 수 있으며, AE센서에 도달된 음파들의 시간차  $\Delta t$ 를 이용해 음파속도  $V$ 를 산정할 수 있다. 이때 음파속도  $V$ 는 충격실험횟수만큼 얻을 수 있으며 산술평균방법을 이용하여 음파속도 평균치 또는 일차함수로 표현할 수 있다.

#### 2.1.2 최소제곱법

음파의 전파속도 산정시 음파의 도달시간은 측정오차가 발생하기 때문에 이를 최소화하기 위한 방법으로 최소제곱법을 적용할 필요가 있다. AE센서에 의해 감지되는 음파의 측정시간  $t_i$ 은 음원발생시간  $t_0$ 로부터 음원으로부터 AE센서까지의 음파의 진행시간  $D/V$ 이 더해진 수치를 나타내며 식 2와 같이 표현할 수 있다(Youn 등 2006).

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

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 식 3과 같이 나타낼 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 제곱 합이 최소

가 되도록 최소제곱법에 의해 미지계수를 결정하여야 한다.

도달거리가 증가함에 따라 음파신호의 감쇠에 의한 영향으로 계산된 음파의 전파속도가 감소하게 된다. 따라서 음파의 전파속도  $V$ 가 상수인 경우 뿐 아니라 음파신호의 감쇠를 고려하여 식 4와 같이 거리에 따른 선형함수로 가정하여 추정하였다.

$$V = V_0 + V_1 \times \Delta D \quad (4)$$

여기서,  $V_0$  : 거리와 관계없는 상수항 (m/sec)

$V_1$  : 단위길이당 음의 부호를 갖는 계수값 (m/sec/m)

계산된 음파의 전파속도는 음파의 도달거리가 증가함에 따라 신호의 감쇠영향으로 계산된 전파속도가 감소할 뿐 아니라, 각 센서에서 측정된 시간의 정확도 역시 저하된다. 이 경우 도달거리가 증가함에 따라 AE센서로부터 측정된 음파의 도달 시간차의 변동성 즉, 분산도 증가하므로, 최소제곱법에 의한 전파속도 추정 시 도달거리가 증가할수록 가중치를 감소시켜야 한다.

음파의 도달 시간차의 분산에 대한 모델로는 식 5와 같이 AE기법과 측정원리가 유사한 광파거리측정기에 널리 사용되어 온 2-분산 요소 모델을 사용하였다(Fotopoulos, 2003).

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 D^2} \quad (5)$$

여기서  $\sigma_D$ 는 도달거리가  $D$ 인 도달시간에 대한 분산이고,  $\sigma_1$ 은 상수항,  $\sigma_2$ 는 거리에 영향을 받는 항이다.

또한, 2차원 음원위치 추정 of 경우 PSC박스거더 형상에 의한 영향을 고려하여 상·하부 센서를 구분하여 선형함수로 가정된 음파의 전파속도를 추정하였다. 정리하면 다음과 같다.

- (1) 전체 센서에 대해 음파속도를 상수로 가정하는 경우( $V_1=0$ )
- (2) 전체 센서에 대해 음파속도를 거리에 대한 선형함수로 가정하는 경우
- (3) 상·하부 센서를 구분하여 음파속도를 거리에 대한 선형함수로 가정하는 경우

## 2.2 음원위치 산정방법

음파의 전파속도가 최소제곱법에 의해 결정되면, 위에서 설명한 각 경우에 대해 식 6에 의해 음원위치가 최소제곱법에 의해 결정된다.

$$\Delta t = \frac{\sqrt{(X_a - X_i)^2 + (Y_a - Y_i)^2 + (Z_a - Z_i)^2}}{-V_0 + V_1 \sqrt{(X_a - X_i)^2 + (Y_a - Y_i)^2 + (Z_a - Z_i)^2}} \quad (6)$$

여기서,  $X_a, Y_a, Z_a$  : 타격점 a의 X, Y, Z 좌표(m)

$X_i, Y_i, Z_i$  : 센서 i의 X, Y, Z 좌표(m)

1차원 음원표정의 경우 타격점의 Y, Z좌표는 알고 있는 값이 사용되고 X만 미지수로 추정하며, 2차원 음원표정의 경우 Z좌표는 알고 있는 값이 사용되고 X, Y가 미지수로 추정된다. 음파속도 추정에서와 마찬가지로 음파의 도달거리가 증가함에 따라 신호의 감쇠영향으로 계산된 전파속도가 감소할 뿐 아니라, 각 센서에서 측정된 시간의 정확도 역시 저하된다. 따라서 도달거리가 증가함에 따라 측정된 음파의 도달 시간차의 변동성 즉, 분산도 증가하므로, 최소제곱법에 의한 위치 추정 시 도달거리가 증가할수록 가중치를 감소시켜야 한다.

## 3. 음향방출실험

### 3.1 음향센서 부착위치 및 타격위치

음향방출실험은 인천대교 PSC박스거더교 건설을 위해 PC공장 에서 프리텐선공법으로 제작한 50m 세그를 이용하였다(Fig. 1 참조). 음향센서(AE센서)의 간격이 10m가 되어도 긴장력이 감소된 PS강선의 파단음파를 감지할 수 있다는 연구결과(Youn 등, 2010)를 토대로 프리캐스트 PSC박스거더 단면의 격벽 두께 등을 고려해 AE센서 간격은 평균 9.34m로 정하였으며, 이차원 음원위치 산정시 수직방향 AE센서는 PSC박스거더 내부 북부판의 상·하부에 밀착시키고 상·하부 음향센서를 길이방향 동일한 위치에 부착시키는 경우(이차원-1)와 번갈아서 부착(이차원-2)하는 두 가지 방식을 택하였다. 음향방출실험에 필요한 충격음파는 콘크리트 표면에 슈미트 해머를 타격하는 방법을 적용하였다. 슈미트 해머 타격에 의해 방출되는 충격음파는 부식에 의한 PS강선 파단 시 방출되는 음파의 특성과 유사하기 때문에 음향방출실험에 주로



Fig. 1. 50m PSC box-girder

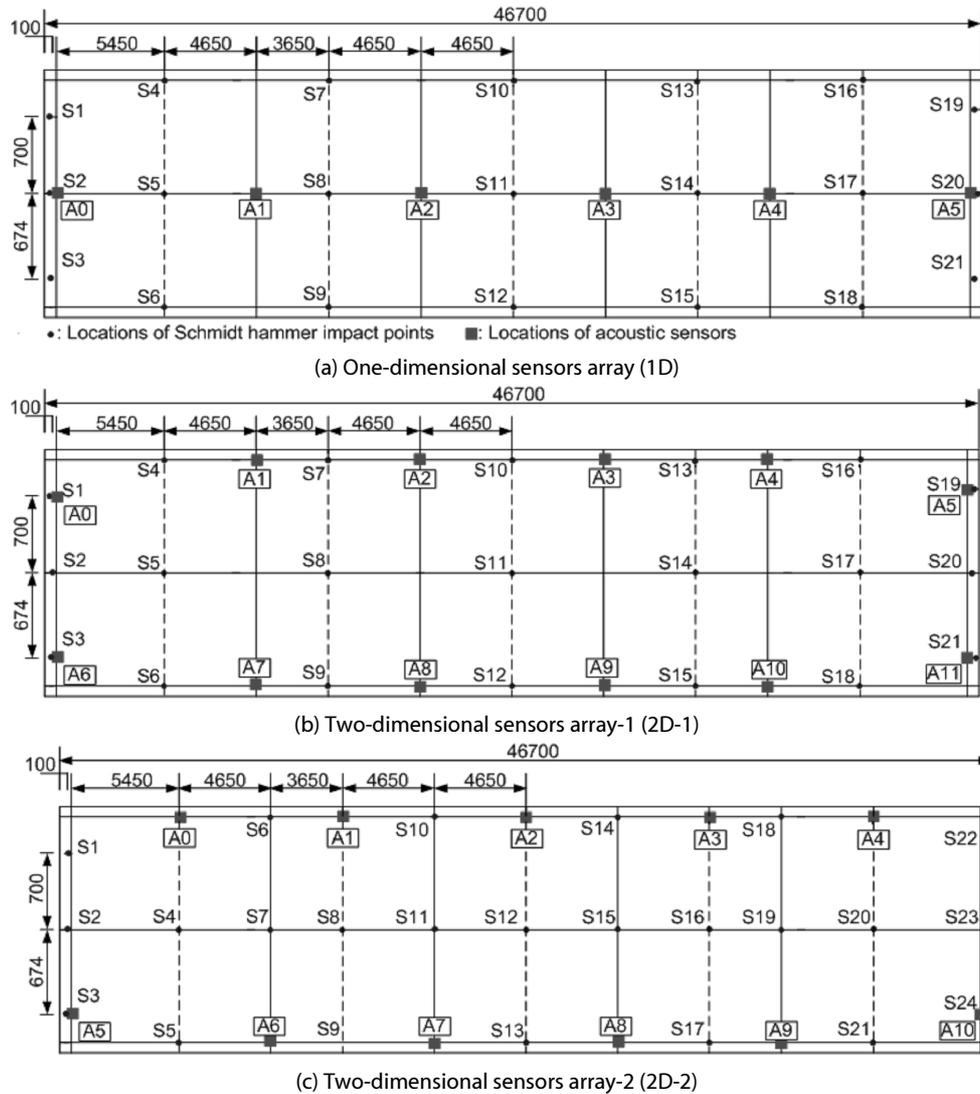


Fig. 2. Locations of acoustic sensors and Schumidt Hammer impact points on the web surface of 50m PSC box-girder

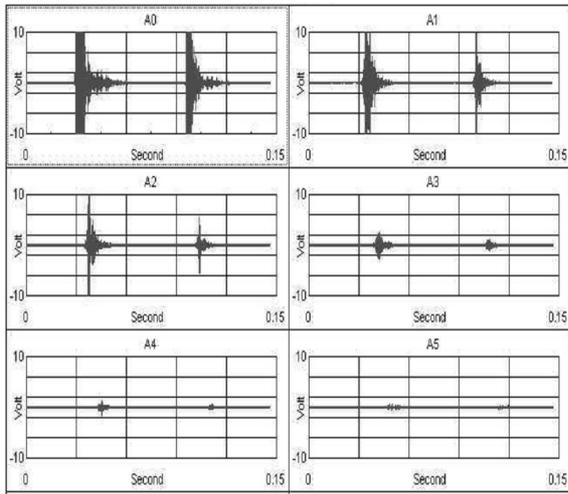
이용되고 있다(Youn 등, 2005; Youn 등, 2006). 음원위치를 표정하기 위해 부착한 음향센서들의 위치와 슈미트 햄머의 타격위치는 Fig. 2에 나타내었다. 격벽에 가까운 단부의 경우 복부판과 상·하부 플랜지가 두꺼워 AE센서와 타격위치의 수직 방향 간격을 좁혔다. 음파방출실험에 사용된 AE센서는 10Hz~22kHz까지의 주파수 대역을 갖는 저주파 센서이며, AE시스템은 Soundprint 시스템을 사용하였다(Cullington 등 2001; Youn 등 2006).

### 3.2 충격실험

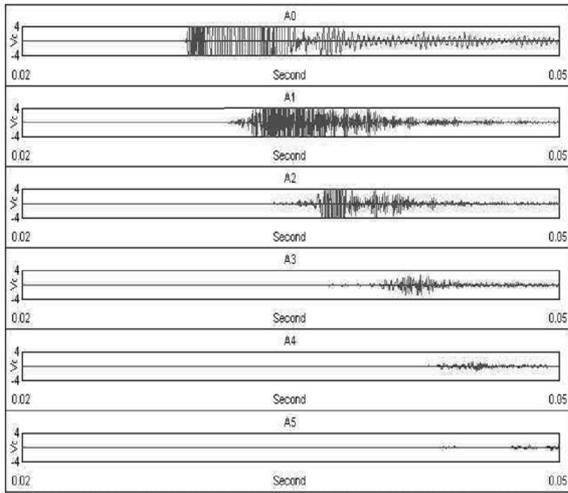
실험대상 구조물인 50m PSC박스거더 내부에서 슈미트 햄머를 이용한 충격실험 전경을 Fig. 3에 수록하였다. Fig. 2에 나타낸 타격위치에 대해 각각 3회씩 슈미트 햄머를 이용해 충격음파를 생성시켰다.



Fig. 3. View of the impact test conducted in the 50m PSC box-girder



(a)



(b)

Fig. 4. Time-Volt graph obtained from S1 impact signal

## 4. 실험결과 분석

### 4.1 음파의 감쇠 현상

일차원 음원 위치 산정을 위해 수행한 실험에서 S1 타격시 6개의 AE센서로 감지된 음파의 파형들과 음파의 도달시간을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)에서 슈미트 햄머의 타격시 두 개의 강한 음파가 연속으로 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(a)에서 센서 A0, A1, A2의 경우 음파의 세기가 모두 10Volt를 초과하였으나 AE센서의 부착위치가 타격위치로부터 멀어짐에 따라 음파의 진폭이 작아지고 있음을 알 수 있다. 또한 음향센서 A0에 감지된 음파의 경우 초기 음파가 감지된 이후 바로 음파의 세기가 10Volt를 초과하는 형태를 보이나, 다른 센서로 감지한 음파의 경우 음파의 세기가 최고치에 도달하는 시간이 증가되는 경향을 보였다. Fig.

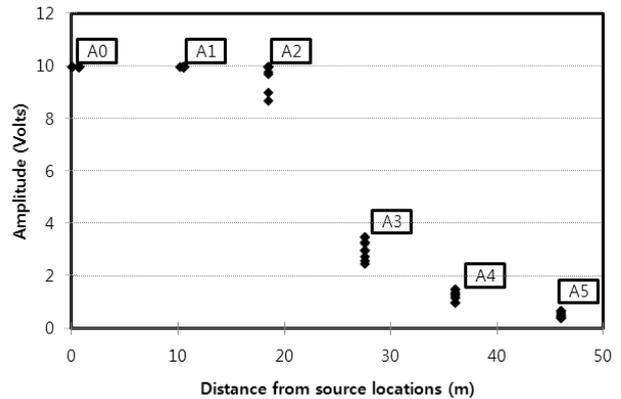


Fig. 5. Amplitude of acoustic signals according to the distance from source locations

4(b)에는 음파의 세기를 4Volt로 축소시킨 상태에서 음파의 시간축을 확대시킨 그래프를 나타내었는데, 그림에서 음원과 AE센서 사이의 거리가 커질수록 음파 도달시간이 늦어지고 있음을 확인할 수 있다.

콘크리트를 매질로 하는 음파의 감쇠현상에 대한 경향을 알아보기 위해 타격위치 S1, S2, S3에 대한 음파의 최대 세기를 음파의 도달거리에 대한 관계그래프를 Fig. 5에 나타내었다. 그림으로부터 음파의 세기는 음파의 도달거리가 약 20m 부근까지 10Volt 수준을 보이며, 20m 부근부터 음파의 세기가 급격히 감소됨을 알 수 있다. 음파의 도달거리가 20m 이내의 경우 음파의 감쇠 현상이 나타나지 않은 이유는 실험시 사용한 장비의 음파 최대치가 10Volt로 고정되어 있기 때문이다.

이상과 같은 음파의 감쇠현상으로 음파의 도달거리가 먼 AE센서의 경우 감지되는 음파의 세기가 약해 실제 구조물에 평상시 발생하는 잡음(noise)의 크기보다 작을 수 있다. 따라서 이 연구에서는 음파속도와 음원위치 산정시, AE센서로 감지한 음파의 도달시간을 처음 도착하는 음파의 세기가 0Volt인 시간을 기준으로 산정하는 경우와 음파의 세기가 0.5Volt인 시간 또는 1.0Volt인 시간을 기준으로 산정하는 총 3가지 방법을 적용하였다. 이후부터 0Volt, 0.5Volt 또는 1.0Volt는 각각 처음 도달하는 음파의 세기가 0Volt인 시간, 0.5Volt인 시간 또는 1.0Volt인 시간을 나타낸다.

### 4.2 음파의 전파속도

#### 4.2.1 산술평균방법

각 타격실험에 대해 신호가 가장 먼저 도달한 센서와 다른 센서와의 도달시간차와 도달거리차를 이용하여 각각의 속도를 계산하였다. 이때 도달거리차가 일정값 이하인 경우(이 연구에서는 2m)에는 도달시간 측정 오차에 의한 영향을 고려하여 속도계산에서 제외시켰다. 계산된 음파의 전파속도는 감쇠 현상으로 도달거리차

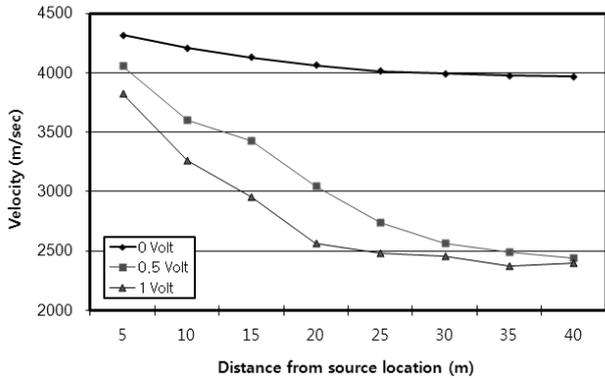


Fig. 6. Mean velocity of acoustic signals according to the distance from source locations

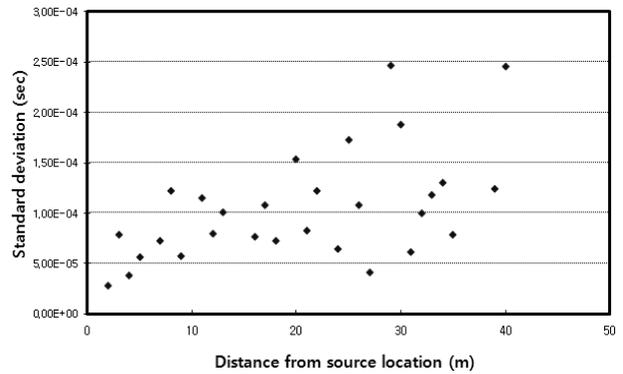


Fig. 7. Standard deviation of the arrival times according to the distance from source locations (2D-2, 0V)

Table 1. Estimated velocity obtained from Least Square Method (m/sec, velocity=constant)

Magnitude of initial acoustic signal	1D	2D-1	2D-2
0Volt	3978.7	3889.2	3964.9
0.5Volt	2502.3	2461.0	2532.2
1Volt	-	2287.0	2355.5

가 증가함에 따라 감소되었는데, 전체적인 경향을 파악하기 위해 전파속도를 도달거리차 5m간격으로 평균하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 음파의 도달시간을 0Volt가 아닌 0.5Volt와 1.0Volt를 이용하는 경우 측정된 음파의 전파속도가 감소됨을 확인할 수 있었다.

#### 4.2.2 최소제곱법

##### (1) 상수

산술평균방법과 달리 음파의 도달시간은 측정오차가 발생하기 때문에 오차를 최소화하는 최소제곱법(Least Square Method) (Youn 등 2006)을 이용하여 음파의 평균전파속도를 산정하였으며 그 결과를 Table 1에 정리하였다.

##### (2) 선형함수

계산된 음파의 전파속도는 도달거리가 증가함에 따라 콘크리트의 감쇠 영향으로 음파의 진폭이 작아져 AE센서에서 측정된 시간의 정확도 역시 나빠질 것으로 판단된다. 이 경우 도달거리가 증가함에 따라 각 AE센서에서 측정된 도달시간의 분산도 증가하므로, 최소제곱법에 의한 조정 시 도달거리가 증가할수록 가중치를 감소시켜야 한다.

신호의 감쇠가 각 AE센서에서 측정된 시간의 정확도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 앞에서와 마찬가지로 도달거리차를 기준

Table 2. Estimated velocity obtained from Least Square Method (velocity=linear function, estimated variance,  $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 d^2$ , weight =  $\frac{1}{\sigma^2}$ )

Magnitude of initial acoustic signal	Estimated velocity (m/sec)		
	1D	2D-1	2D-2
0Volt	V = 4255.5 -7.2270 D	V = 4282.4 -10.1324 D	V = 4297.2 - 9.5180 D
0.5Volt	V = 3899.8 -36.9147 D	V = 4114.4 -43.5591 D	V = 4095.0 - 45.2007 D
1Volt	-	V = 3408.4 -29.6934 D	V = 3539.1 - 34.6012 D

Table 3. Estimated velocity obtained from Least Square Method (upper sensors and lower sensors separately, velocity=linear function, estimated variance,  $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 d^2$ , weight =  $\frac{1}{\sigma^2}$ )

Magnitude of initial acoustic signal	Estimated velocity (m/sec)			
	2D-1		2D-2	
	upper sensors	lower sensors	upper sensors	lower sensors
0Volt	V=4246.9 -10.2D	V=4315.1 -10.0D	V=4218.6 -8.3D	V=4378.4 -11.3D
0.5Volt	V=4010.0 -41.4D	V=4235.9 -46.2D	V=3856.2 -42.9D	V=4346.1 -49.8D
1Volt	V=3308.5 -27.2D	V=3522.1 -32.6D	V=3231.8 -27.8D	V=3813.1 -41.0D

으로 측정된 도달시간을 집단화하였다. 이때 도달거리차가 1m이내 인 경우는 같은 집단에 포함시켰다. 각각의 집단에 대해 표준편차를 계산하였으며 Fig. 7에는 이차원 위치표정2에 대해 음파의 도달시간 산정을 음파의 세기가 0Volt인 시간으로 판정한 경우 거리차별로 계산된 표준편차를 나타내었다.

Fig. 7에서와 같이 거리차가 증가함에 따라 표준편차가 증가하

였다. 거리차가 가장 작은 경우와 가장 큰 경우의 표준편차 비는 각각의 실험에서 약 10배 정도였으며 이에 대한 최소제곱법에서의 가중치(weight)는 약 100배에 해당된다.

이상과 같은 음파의 도달시간의 오차를 고려하여 음파의 속도를 선형함수로 산정한 결과를 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 이차원 음원속도 산정시 음향센서의 배치 위치에 따라 속도 차가 커서 상·하부 센서에 대해 각각 산정한 결과를 나타내었다.

### 4.3 음원위치 표정 결과

#### 4.3.1 일차원 위치 표정 결과

(1) 음파속도를 상수로 가정한 경우

음파속도가 일정하다고 가정한 경우 일차원 위치 결정에 필요한 센서의 수는 2개이며, 그 이상인 경우 최소제곱법에 의해 음원의 위치를 계산하였다. 위치결정에 사용된 센서는 가장 먼저 신호가 감지된 센서를 사용하였으며 Table 4에서 나타나 있듯이 센서의 수가 2개일 때 평균제곱근오차(Root Mean Square Error; RMSE)가 제일 작고 센서의 수가 늘어감에 따라 평균제곱근오차가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 센서의 수가 2개일 때 결과를 보면 0Volt 경우 0.036m, 0.5Volt 경우 0.12m로 음파의 도달시간을 측정하는 음파의 세기(Volt)에 따라 큰 차이가 있었다.

(2) 음파속도를 선형함수로 가정한 경우

속도를 선형함수로 가정한 경우에는 음원과 센서 사이의 거리에 따라 가중치를 다르게 고려하였다. 즉 거리가 먼 경우 음파 신호의 감쇠 현상으로 인해 정확도가 저하되므로 가중치를 작게 주고 반대로 거리가 가까운 센서에 대해서는 가중치를 크게 하였다. Table 4에서 나타나 있듯이 센서의 수에 따른 평균제곱근오차가 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 오차의 크기는 속도가 일정하다고 가정한 경우 정확도가 가장 좋았던, 센서의 수가 2개일 때와 비슷한 정확도를 보였다.

#### 4.3.2 이차원 위치 표정 결과

(1) 음파속도를 상수로 가정한 경우

속도가 일정하다고 가정한 경우 이차원 위치 결정에 필요한 센서의 수는 3개이며, 그 이상인 경우 최소제곱법에 의해 음원의 위치를 계산하였다. 일차원에서와 마찬가지로 위치결정에 사용된 센서는 가장 먼저 신호가 감지된 센서를 사용하였으며 센서의 배치를 Fig. 2에서 설명한 것과 같이 2가지 형태로 실험하였다.

Fig. 8에 나타나 있듯이 센서의 수가 3개일 때 평균제곱근오차가 제일 작고 센서의 수가 늘어감에 따라 평균제곱근오차가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 첫 번째 배치(2D-1)의 경우 센서의 수가 3개일 때 거리오차가 0Volt 경우 약 0.23m, 0.5Volt 경우

Table 4. RMSE of one-dimensional source locations obtained from Least Square Method

No. of sensors	velocity=constant		velocity=linear function	
	RMSE (m, 0Volt)	RMSE (m, 0.5Volt)	RMSE (m, 0Volt)	RMSE (m, 0.5Volt)
	X	X	X	X
2	0.036	0.120	0.040	0.116
3	0.151	0.645	0.045	0.137
4	0.111	0.464	0.042	0.120
5	0.128	0.472	0.042	0.112
6	0.587	0.587	0.043	0.142

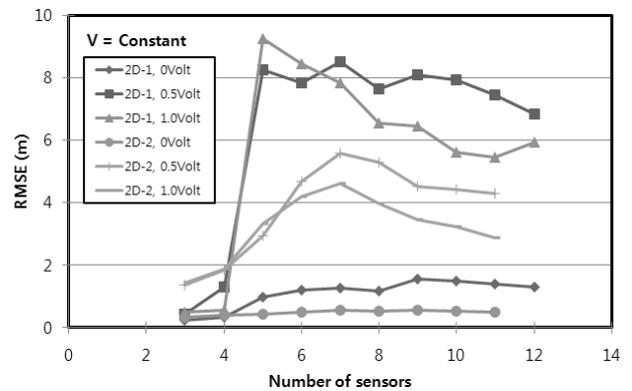


Fig. 8. RMSE of two-dimensional source locations obtained from Least Square Method (velocity=constant)

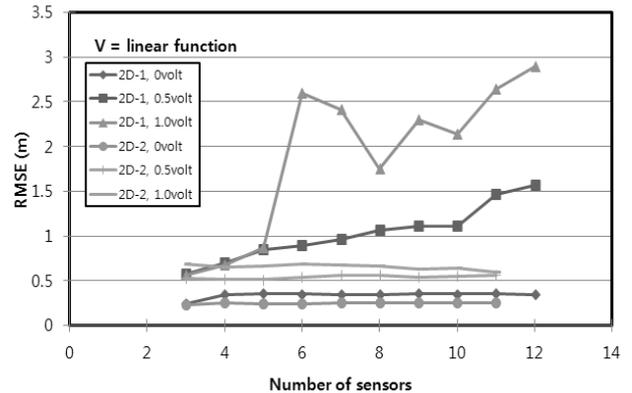


Fig. 9. RMSE of two-dimensional source locations obtained from Least Square Method (velocity=linear function)

0.42m, 0.5Volt 경우 0.50m로 Volt에 따라 차이가 있었다. 두 번째 배치(2D-2)의 경우 센서의 수가 3개일 때 거리오차가 0Volt 경우 약 0.34m, 0.5Volt 경우 1.38m, 1.0Volt 경우 1.42m로 음파의 도달시간을 측정하는 음파의 세기(Volt)에 따라 큰 차이가 있었으며, 첫 번째 배치(2D-1)에 비해 오차가 크게 증가한 것을 알 수 있다.

또한 두 경우 모두 보의 길이방향(X방향)의 정확도가 보의 높이 방향(Y방향)의 정확도보다 크게 좋았으며 이는 센서들이 보의 길이 방향으로 더 많이 배치되었기 때문이라 판단된다. 이러한 영향으로 센서의 수가 늘어감에 따라 Y방향의 오차가 X방향에 비해 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

(2) 음파속도를 선형함수로 가정한 경우

속도를 선형함수로 가정한 경우에는 일차원에서와 마찬가지로 음원과 센서 사이의 거리에 따라 가중치를 다르게 고려하였다. Fig 9에 나타나 있듯이 속도를 상수로 가정한 경우에 비해 평균제곱근오차가 크게 줄었지만 센서의 수가 증가함에 따라 평균제곱근오차가 증가하는 것을 알 수 있다.

(3) 상·하부 음향센서를 분리하고 음파속도를 선형함수로 가정한 경우

PSC박스거더 상·하부가 유지관이용 외부 텐드의 정착부 등 (Fig. 3 참조)으로 인한 형상 차이로 인해 속도에도 영향을 미칠 수 있으므로 상·하부 음향센서를 분리하여 선형으로 속도를 가정한 후, 2차원 위치를 추정하였다. Table 5와 Table 6에서 나타나 있듯이 상·하부 음향센서를 분리하지 않은 경우에 비해 평균제곱근오차가 크게 줄어든 것을 알 수 있다. 또한 두 번째 배치(2D-2)의 경우 센서의 수에 따른 평균제곱근오차가 거의 차이가 없음을 알 수 있었다(Fig. 10 참조).

Fig. 11에는 음향센서를 상하부로 분리한 경우와 분리하지 않은 경우에 대해 음파의 도달시간을 0.5Volt로 이용한 경우 음원위치 표정 결과를 나타내었다. 그림에서 음향센서 배치를 Fig. 2(c)의 2D-2와 같이 상하부 음향센서를 서로 엇갈리게 배치하고 상부와 하부의 음향센서 속도를 따로 따로 고려한 경우가 음원위치 평균제곱근오차가 가장 작음을 확인할 수 있다.

Table 5. RMSE of two-dimensional source locations obtained from Least Square Method, 2D-1 (velocity=linear function, upper sensors and lower sensors separately)

No. of sensors	RMSE ( m, 0Volt )			RMSE ( m, 0.5Volt )			RMSE ( m, 1.0Volt )		
	X	Y	R	X	Y	R	X	Y	R
3	0.081	0.124	0.148	0.054	0.352	0.356	0.108	0.479	0.491
4	0.054	0.208	0.215	0.050	0.293	0.298	0.117	0.410	0.426
5	0.053	0.213	0.220	0.062	0.331	0.336	0.143	0.511	0.531
6	0.055	0.211	0.218	0.075	0.458	0.464	0.143	0.688	0.703
7	0.055	0.205	0.212	0.059	0.360	0.365	0.121	0.506	0.521
8	0.054	0.202	0.210	0.083	0.390	0.399	0.126	0.379	0.399
9	0.054	0.208	0.215	0.109	0.462	0.474	0.120	0.889	0.897
10	0.054	0.207	0.214	0.118	0.468	0.482	0.125	1.383	1.389
11	0.055	0.206	0.214	0.115	0.494	0.507	0.180	2.206	2.214
12	0.055	0.205	0.212	0.113	0.442	0.456	0.235	2.466	2.477

Table 6. RMSE of two-dimensional source locations obtained from Least Square Method, 2D-2 (velocity=linear function, upper sensors and lower sensors separately)

No. of sensors	RMSE ( m, 0Volt )			RMSE ( m, 0.5Volt )			RMSE ( m, 1.0Volt )		
	X	Y	R	X	Y	R	X	Y	R
3	0.153	0.104	0.185	0.166	0.244	0.295	0.196	0.455	0.495
4	0.171	0.107	0.201	0.161	0.255	0.302	0.206	0.476	0.519
5	0.174	0.101	0.201	0.176	0.268	0.321	0.206	0.485	0.527
6	0.175	0.107	0.205	0.187	0.275	0.332	0.211	0.484	0.528
7	0.172	0.105	0.201	0.194	0.252	0.318	0.222	0.466	0.517
8	0.170	0.107	0.201	0.189	0.264	0.324	0.221	0.463	0.513
9	0.170	0.112	0.203	0.167	0.267	0.315	0.214	0.415	0.467
10	0.167	0.116	0.203	0.174	0.263	0.315	0.216	0.403	0.457
11	0.167	0.116	0.203	0.181	0.259	0.316	0.223	0.389	0.448

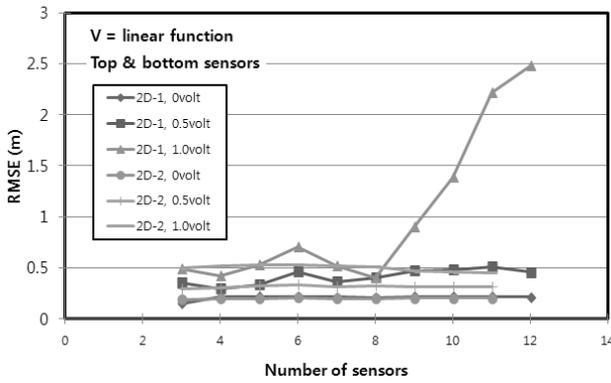


Fig. 10. RMSE of two-dimensional source locations obtained from Least Square Method (velocity=linear function, upper sensors and lower sensors separately)

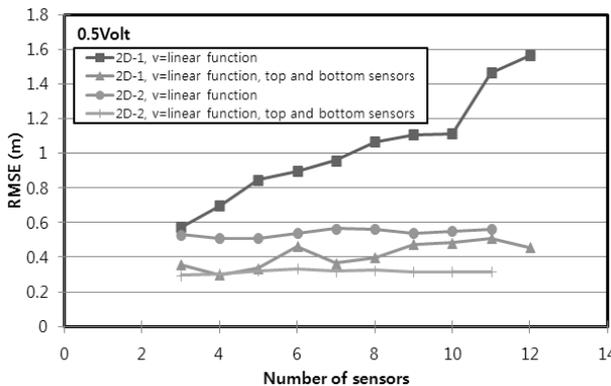


Fig. 11. Comparison of the RMSE of two-dimensional source locations obtained from Least Square Method (velocity=linear function, 0.5Volt)

## 5. 결론

이 연구에서는 길이가 50m PSC박스거더를 이용하여 1차원과 2차원 음원위치 표정을 위한 충격실험을 수행하였다. 길이 방향 음향센서의 간격은 10m로 설계하였으며, 수직방향(Y방향) 음향센서는 PSC박스거더 복부판의 상·하부에 부착하는 방법을 적용하였다. 음향방출실험 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 콘크리트를 매질의 높은 감쇠현상으로, 음파는 전달길이가 증가함에 따라 음파의 세기가 감소하기 때문에, 음향센서에 감지되는 음파의 도달시간 측정치의 오차가 커져 음파의 도달 시간차를 이용해 산정하는 음파의 전파속도 계산치도 함께 감소된다.
- (2) 일차원 음원위치 표정시 음파속도를 상수가 아닌 선형함수로 가정하는 것이 평균제곱근오차가 감소되며, 음파의 도달시간

을 음파의 세기가 0Volt로 산정한 경우 약 0.036m, 0.5Volt로 가정하는 경우는 0.12m 수준이었다. 이때 음파속도를 선형함수로 가정하는 경우에는 음원위치 표정시 사용된 센서의 숫자가 증가되어도 표정오차는 비슷한 수준을 유지하였다.

- (3) 이차원 음원위치 표정시 음파속도를 상수로 가정하는 경우보다 선형함수로 가정하는 경우 평균제곱근오차가 크게 감소되었다. 하지만 음파의 도달시간을 음파의 세기가 0Volt가 아닌 0.5Volt 또는 1.0Volt를 기준으로 산정하는 경우 산정된 음원위치의 평균제곱근오차가 증가되었다.
- (4) 이차원 음원위치 표정을 위한 음향센서는 PSC박스거더 복부판 상·하부에 서로 엇갈리게 부착하는 방법이 평면내에서 음향센서들간의 간격을 좁힐 수 있기 때문에 표정오차를 감소시킬 수 있다.
- (5) PSC박스거더의 경우 음파의 속도를 상부와 하부에 부착한 음향센서들의 음파속도를 별도로 산정하여 음원위치를 표정하는 결과 평균제곱근오차를 감소시킬 수 있었다. 이 경우 음원위치 표정에 적용된 음향센서의 개수가 증가되어도 표정위치 오차가 증가되지 않았으며, 소음을 고려한 음파의 세기가 0.5Volt를 음파의 도달시간으로 가정하는 경우에도 평균제곱근오차가 약 0.30m 수준의 수치를 얻을 수 있었다.

## 감사의글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 일부 지원으로 수행되었습니다.

## References

Baron, J. A., and Ying, S. (1987). "Acoustic Emission Source Location," *Nondestructive Testing Handbook*, Vol. 5, Acoustic Emission Testing, Section 6, ASNT, Columbus, O.H., 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.

Fotopoulos, G. (2003). *An analysis on the optimal combination of geoid, orthometric and ellipsoidal height data*, Ph.D. Dissertation, Univ. of Calgary, Canada.

Fricker, S., and Vogel, T. (2006). "Site Installation and Testing of a Continuous Acoustic Monitoring," *Construction and Building Materials*, 21, pp. 501-510.

Harding, J., Parke, G., Ryall, M., and Matthews, J. (1996). "Special inspection of post-tensioned concrete bridges on the M4 motorway in Berkshire," *Bridge Management 3*, E&FN Spon, London, UK, pp. 684-695.

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* 3, E&FN Spon, London, UK, pp. 658-666.
- The Concrete Society, (1996). *Durable Bonded Post-tensioned Concrete Bridges*, Concrete Society Technical Report 47, TR047, England.
- 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.
- Youn, S. G., Kim, E. K., Choi, M., and Kim, H. (2005). "Analysis of Acoustic Signals of Tendon Fractures," *Proceedings of the Korea Concrete Institute, KCI*, Vol. 17, No. 2, pp. 243-246 (in Korean).
- Youn, S. G., Lee, C., and Kim, E. K. (2006). "Estimation of Velocities of Acoustic Signals and Source Locations in PSC Beam by Acoustic Emission," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 26, No. 5A, pp. 917-925 (in Korean).
- Youn, S. G., and Lee, C. (2010). "Detection of Fracture Signals of Low Prestressed Steel Wires in a 10m PSC Beam by Continuous Acoustic Monitoring Techniques," *Journal of the Korea Concrete Institute, KCI*, Vol. 22, No. 1, pp. 113-122 (in Korean).