



## 연속음향감지기법을 이용한 긴장력이 감소된 10 m PSC보의 PS 강선 파단음파 감지

윤석구<sup>1)\*</sup> · 이창노<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>서울산업대학교 건설공학부

## Detection of Fracture Signals of Low Prestressed Steel Wires in a 10 m PSC Beam by Continuous Acoustic Monitoring Techniques

Seok-Goo Youn<sup>1)\*</sup> and Changno Lee<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>School of Civil Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

**ABSTRACT** Corrosion of prestressing tendons and wire fractures in grouted post-tensioned prestressed concrete bridges have been considered as a serious safety problem. In bridge evaluation the condition of prestressing tendons should be inspected, and if corroded tendons are found, the loss of tendon area should be included when we calculate the ultimate strength. In the previous study, it was evaluated that continuous acoustic monitoring techniques could be considered as a reliable non-destructive method for detecting wire fractures of fully grouted post-tensioned prestressing tendons. In the present study, an experimental test was performed for detecting wire fractures of post-tensioned prestressing tendons which are prestressed lower than current design level. A 10 m prestressed concrete beam was fabricated, which included two tendons prestressed 66 percentage and 40 percentage of tensile strength, respectively. The corrosion of two tendons was induced by an accelerated corrosion equipment and the test beam was monitored by using seven acoustic sensors and a continuous acoustic monitoring system. From each prestressing tendon, two acoustic signals of wire fractures were successfully detected and source locations were estimated within 20 mm error. Based on the test results, it is considered that continuous acoustic monitoring techniques can be applied to detect low-prestressed wire fracture in fully grouted post-tensioned prestressed concrete beams.

**Keywords** : prestressed concrete, corrosion, wire fracture, non-destructive method, acoustic emission

### 1. 서 론

후긴장된 PSC 교량 유지관리시 PS 강재의 부식 여부를 확인하는 것은 매우 중요한 사항중의 하나이다. PS 강재는 PSC 교량에서 인장력을 담당하는 구조 요소이며 부식이 발생하여 단면적이 감소되면 교량 전체 안전에 커다란 문제가 발생한다. 하지만 후긴장된 PS 강재는 덕트 내부에 존재하고, 또한 시멘트 그라우트가 PS 강재를 감싸고 있기 때문에 통상적인 외관 조사를 통해 PS 강재의 부식을 발견하기 어렵다.<sup>1)</sup> 실제 정기적인 외관 조사를 통해 특별한 문제점이 발견되지 않았던 유럽의 몇몇 PSC 교량들은 PS 강재의 부식과 파단에 의해 급작스럽게 붕괴되기도 하였다.<sup>2,3)</sup>

현재까지 후 긴장된 PS 강재의 부식과 파단 여부를 확인할 수 있는 방법으로 연속음향감지기법(continuous acoustic

monitoring techniques)이 유효한 방법으로 평가되고 있다. 높은 인장력이 도입된 PS 강재는 부식에 의해 강재 단면적이 감소되면 급격한 파단이 발생하며, 이때 PS 강재 내부에 축적된 변형 에너지가 음파로 방출된다. 이 음파들을 파단음파라 하며, 콘크리트 표면에 부착시킨 여러 개의 음향 센서(acoustic sensor 또는 AE sensor)들을 이용해 감지한 후 PS 강재의 부식 여부 및 파단 위치를 평가한다. PSC 구조물에 국한하면, 연속음향감지기법은 초기에 비부착 PS 강선의 파단을 감지하는데 주로 적용되었는데, Halsell 등<sup>4)</sup>은 1996년 이 방법을 이용하여 콘크리트 슬래브 내부에 위치한 비부착 PS 강선의 파단을 감지하였다고 보고하였다. 부착된 PS 강선은, 비부착 PS 강선과 달리, 강선을 둘러싸고 있는 시멘트 그라우트에 의해 파단 후 바로 재정착되기 때문에 강선 일부에 축적된 변형에너지만 음파로 방출된다. 하지만, Cullington 등<sup>5)</sup>과 Youn 등<sup>6)</sup>은 부착된 PS 강선도 부식에 의해 급격히 파단되며, 연속음향감지기법을 적용할 수 있을 정도로 파단음파의 세기가 크다는 것을 실험을 통해 증명하였다. Fricker 등<sup>7)</sup>은 파괴 검사 방법인 육안 조사를 통해

\*Corresponding author E-mail : sgyoun@snut.ac.kr

Received August 28, 2009, Revised November 13, 2009,

Accepted December 24, 2009

©2010 by Korea Concrete Institute

PS 강선의 부식과 파단, 그리고 커다란 공극이 확인된, 후 긴장된 PSC 슬래브 교량에 연속음향감지기법을 적용하여 수차례 PS 강선의 파단음파를 감지하였다고 보고하였다. 최근에 Yuyama 등<sup>8)</sup>은 PSC 거더 교량에 부착시킨 PS 강재를 이용하여 부식 촉진 실험을 수행하였으며, PS 강재 파단시 발생하는 파단음파를 연속음향감지기법을 이용하여 감지하였다고 보고하였다.

하지만 아직까지 부착되고 후긴장된 PS 강선의 긴장력 자체가 크게 감소된 경우에 대한 연구는 부족한 상태이다. 긴장력 감소가 큰 경우 PS 강선 파단시 방출되는 변형에너지의 크기가 작기 때문에 음파의 세기가 크게 감소될 것으로 예상되며, 이 경우 음향센서를 이용해 방출되는 파단음파를 감지하는 것이 어려워질 수 있다. 실제 PSC 교량에서 PS 강재에 도입되는 긴장력의 크기는 인장강도의 70% 수준이지만, 긴장력 도입시 마찰, 탄성수축, 그리고 정착 슬립 등에 의한 즉시 손실과 콘크리트의 건조수축, 크리프 그리고 긴장재의 이완에 의한 장기손실에 의해 PS 강재에 도입된 긴장력의 크기는 감소된다. 또한 초기 시공오류 등에 의해 긴장재에 도입된 초기 프리스트레스의 크기가 매우 작을 수 있다.

이번 연구에서는 PS 강선에 도입된 프리스트레스가 크게 감소된 경우, PS 강선이 부식에 의해 파단이 발생하는지, 또한 음향센서가 파단음파를 감지하고 감지된 음파의 도달시간을 이용해 산정한 음원 위치가 신뢰할만한 수준인 가를 확인하기 위한 실내 실험을 수행하였다. 이를 위하여 길이가 10 m인 PSC 보를 제작한 후, 인장강도의 66%와 40%로 각각 긴장된 PS 강연선을 인위적으로 부식시켜 PS 강선의 파단을 유도하였다. 부식 실험을 진행하는 동안 PSC 보부재의 콘크리트 표면에 2m 등간격으로 부착시킨 5개의 음향센서와 부재 양단에 부착된 2개의 음향센서를 이용하여 실험 부재에서 발생하는 음파를 감지하였다. 실험 결과들을 토대로 실제 긴장력이 감소된 후긴장 PSC 교량에 연속음향감지기법을 적용하기 위해 필요한 기술적인 사항들을 정리하였다.

## 2. 연속음향감지기법

높은 인장력이 도입된 PS 강선의 경우 부식에 의해 단면적이 감소되면 갑작스런 파단이 발생하며, 이때 PS 강선 내부의 변형 에너지가 음파로 방출된다. 비파괴검사 방법인 연속음향감지기법은 AE기법의 일종으로 PS 강선 파단시 방출된 음파를 콘크리트 표면에 부착시킨 여러 개의 음향센서를 통해 연속적으로 감지하여 PS 강재의 부식 여부 및 부식 위치를 확인하는 기법이다. 음향센서로 감지된 음파의 세기, 에너지, 주파수 등에 대한 분석을 토대로 PS 강선의 파단 여부를 판단하며, 잡음이라 판단되는 음파는 버리고 PS 강선의 파단음파라 판단된 경우에는 음파의 도달시간과 음향센서의 좌표 등을 이용하여 음원위치, 즉 PS 강선의 파단위치를 표정한다.

Fig. 1에 후 긴장된 PSC 교량에 대해 PS 강선 파단음

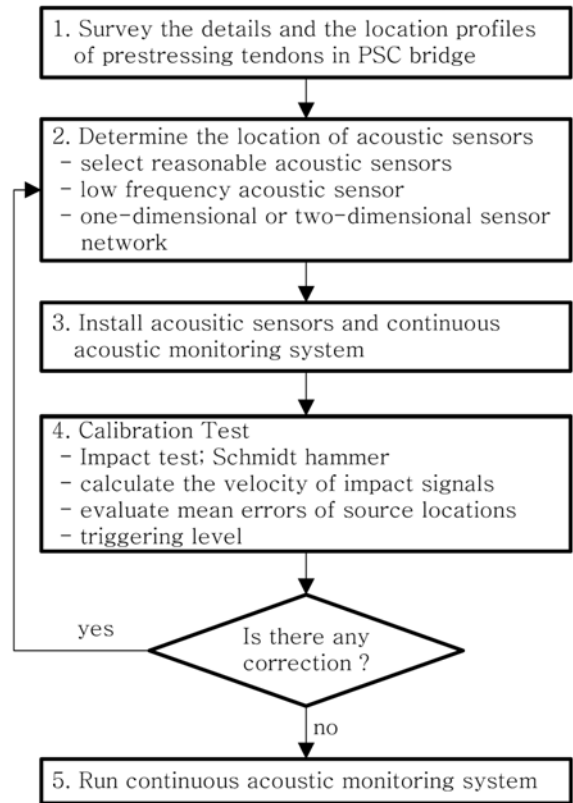


Fig. 1 Application procedure for continuous acoustic monitoring techniques

파를 감지하기 위한 연속음향감지기법의 적용 순서를 나타내었다. 먼저 (1) PS 강재의 부식이 우려되는 PSC 교량에 대해 PS 강재 위치를 설계자료 또는 현장 조사를 통해 상세히 파악해야 한다. 이를 통해 PS 강재의 부식이 교량의 안전에 치명적인 영향을 미칠 수 있는지 여부를 분석한다. 만약 PS 강재의 부식으로 인한 붕괴 유발 부재로 변화될 수 있는 부재가 존재하는 경우 이를 음향센서 부착 위치 선정시 고려해야 한다. (2) PS 강선 파단시 예상되는 음파의 전파 경로를 바탕으로 음향센서의 부착 위치와 간격을 결정한다. 음향센서의 부착 위치는 Fig. 2에 나타낸 예와 같이 PS 강선의 파단위치 표정이 일차원인 경우에는 선형으로 배치하며, 이차원인 경

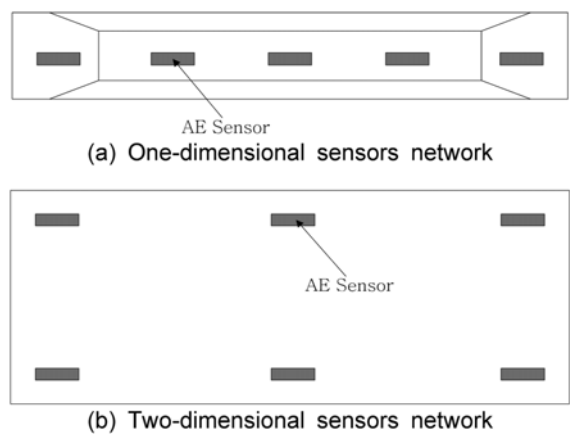


Fig. 2 Examples of acoustic sensor network for PSC bridges

우에는 이차원 평면에 음향센서망이 구성되도록 배치할 수 있다. 음향센서의 간격은 음향센서의 특성, 예상되는 PS 강선 파단음파의 세기, 그리고 콘크리트 매질의 감쇠 현상 등을 고려해 결정한다. 콘크리트를 매질로 하는 음파는 고주파 영역 음파의 경우 에너지 감쇠가 매우 크기 때문에 음파의 전파거리가 매우 짧아진다. 따라서 콘크리트 매질을 통해 충분한 거리까지 전파되는 저주파 영역의 음파를 감지할 수 있는 음향센서를 사용해야 한다. 이 연구에서 사용된 음향센서는 주파수 영역이 10 Hz~22.5 kHz 정도인 저주파 음향센서를 사용하였으며, 연속음향감지장치는 앞서 언급된 연구자들이 사용한 장비와 동일한 Soundprint System을 이용하였다.<sup>4,9)</sup> (3) 음향센서와 연속음향감지장치를 설치한 후 음파 감지가 제대로 작동되는 지 확인하기 위한 사전 충격 실험(calibration test)을 수행한다. (4) 콘크리트 표면에 인위적인 충격을 가하는 사전 충격실험을 통해 음향센서로 감지된 충격파(impact signal)를 토대로 음향센서 및 연속음향감지장치가 올바르게 작동되는 지 분석한다. 충격파 발생에 사용되는 도구는 PSC 교량에 상시적으로 발생하는 잡음을 무시할 수 있도록 연속음향감지장치에 미리 설정된 음파 감지 triggering level 이상의 충격파를 발생시킬 수 있는 도구를 이용해야 한다. 이 연구에서는 콘크리트 압축강도 측정시 사용되는 슈미트 해머를 이용하였다. 발생하는 충격파의 세기, 에너지, 지속시간, 그리고 주파수 등의 특성이 PS 강선 파단시 발생하는 파단음파의 특성과 유사한 도구일수록 효과적이다. 만약 음향센서로 감지되는 음파의 세기가 너무 약하거나 또는 음파 도달 시간을 토대로 표정된 음원 위치의 오차가 매우 크다면, 이에 대한 원인을 분석한 후 음향센서 간격과 부착 위치 재조정 등 필요한 조치를 취해야 한다. 선행 연구<sup>9)</sup>에서 음파속도와 음원 위치 표정은 산술평균방법과 최소제곱법<sup>10)</sup>을 적용하였는데, 최소제곱법을 이용하는 경우 음원 위치 표정 오차가 감소됨을 알았다. 또한 음파 에너지의 감쇠 현상을 고려하여 음파속도를 음파의 전파거리이에 따른 일차함수로 가정하는 경우, 일정한 상수로 가정한 경우보다 음원 위치 표정 오차가 감소된다. (5) 사전 충격 실험을 수행한 후 연속적으로 음향감지장치를 구동하여 PS 강선의 파단음파를 감시한다.

### 3. 실내 실험

#### 3.1 실험부재

PS 강연선에 도입된 긴장력이 감소된 경우 부식에 의해 PS 강선 파단시 방출되는 음파를 감지하기 위한 실내 실험을 계획하였다. 먼저 실험 부재의 길이는 음향센서의 최대 간격을 10 m로 설치할 수 있도록 10 m로 설정하였다. 음향센서의 간격이 10 m인 경우에도 긴장력이 감소된 PS 강선 파단음파의 감지가 가능하다면, PSC 교량에 연속음향감지기법 적용시 소요되는 음향센서의 개

수가 많이 감소될 수 있다. 이 경우 지간이 30 m인 PSC 거더 교량에 거더 당 4개씩의 음향센서만 설치해도 된다. PSC 보부재의 단면은 Fig. 3(a)에 나타내었는데, 250 × 500 mm인 직사각형 단면으로, 지름이 15.2 mm인 SWPC7A PS 강연선 6개를 이용하여 프리스트레스를 도입하도록 설계하였다. 단면 상부 2개의 PS 강연선에 대해 부식 실험을 수행하기 위하여 두 강연선에 도입되는 긴장력의 크기는 각각 인장강도의 70%(B-B 단면)와 50%(A-A 단면)로 설계하였다.

길이가 10 m인 PSC 보 부재는 Fig. 3과 같이 6개의 PS 강연선에 프리스트레스를 도입하는 경우, 긴장력 도입 순서와 정착슬립에 의해 긴장력 크기가 민감하게 변화된다. 따라서 PSC 거더 단면 하부와 중앙부에 위치한 4개의 PS 강연선에 프리스트레스를 도입하고 시멘트 그라우팅한 보를 먼저 제작하였다. 그 후 철근 게이지를 부착한 2개의 PS 강연선을 단면 상부 덕트에 삽입한 후, 먼저 A-A 단면에 위치한 PS 강연선을 인장강도의 50%로 긴장하고 정착하였다(Fig. 4 참조). B-B 단면에 위치한 PS 강연선은, A-A 단면 PS 강연선의 정착슬립에 의한 긴장력 감소량을 고려하여, 두 차례의 긴장을 통해 인장강도의 77%까지 긴장한 후 정착하였다. 정착슬립에

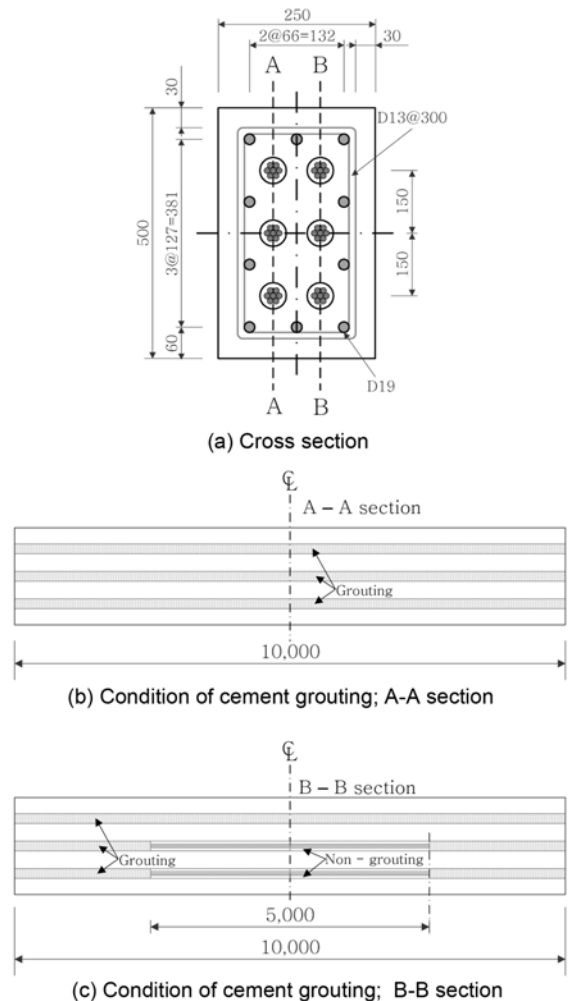
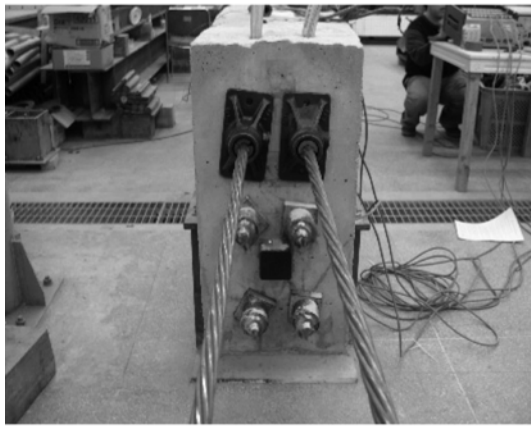


Fig. 3 Details of test beam



(a) End view



(b) Top view

Fig. 4 View of test beam before prestressing

의해 감소된 긴장력의 크기는 목표 긴장력까지 단계적으로 도입된 유압의 크기와 PS 강선의 변형을 변화량을 토대로 산정하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 PS 강연선에 도입된 최종 프리스트레스의 크기는, A-A 단면의

Table 1 Material properties

Material	Property
Concrete	average compressive strength, $f_{ck} = 35$ MPa
Rebar	longitudinal rebar : (SD40) D19 transverse rebar : (SD40) D13
Sheeth	$\phi$ 50 mm stainless steel
PS Strand	SWPC7B strand, diameter 15.2 mm cross section area, $A_p = 138.7$ mm <sup>2</sup> tensile strength, $P_u = 266$ kN or high 0.2% yield strength, $P_y = 226$ kN or high

Table 2 Initial prestress

Location of PS strand	Initial design jacking force (kN)	Jacking force (kN)	Measured strain and prestress	Initial prestress (kN)
A-A section	$0.5 P_u$ 133	130	Jacking : strain = 3,870 $\mu$ m/m after anchoring : strain = 3,170 $\mu$ m/m	$0.40 P_u$ 106
B-B section	$0.7 P_u$ 186	1st jacking 186	Jacking : strain = 6,500 $\mu$ m/m after anchoring : strain = 5,580 $\mu$ m/m	$0.66 P_u$ 176
		2nd jacking 205	No measurement	

PS 강연선의 경우 인장강도의 40%, B-B 단면의 PS 강연선의 경우 인장강도의 66%였다. 정착슬립에 의한 긴장력 감소가 크게 발생하여 PS 강연선에 도입된 긴장력의 크기가 초기 계획치(인장강도의 50%와 70%)보다 모두 작았지만, 이 연구의 목적이 긴장력이 감소된 PS 강연선의 부식에 의한 파단 실험이기 때문에 연구목적에 더욱 부합되는 것이라 판단되었다.

A-A 단면의 경우 덕트 내부 전체를 그라우팅하였으나, B-B 단면의 경우 실험부재 중앙을 기준으로 양방향으로 2.5 m까지는 그라우팅을 실시하지 않았다(Fig. 3(b), (c) 참조). PSC 보부재 일부분에 그라우팅을 실시하지 않은 이유는 부적절한 그라우팅이 PS 강선 파단에 따른 음파의 전파 경로에 미치는 영향을 모사하기 위해서이다.

Table 1에 PSC 보부재 제작시 사용된 재료들의 물성치를 나타내었는데, PSC 보부재에 제작시 사용된 콘크리트의 28일 평균압축강도는 35 MPa이었다.

### 3.2 AE센서 부착 위치

AE센서 부착 위치는 Fig. 5에 나타내었는데, 부재 중앙부가 그라우팅되지 않은 B-B 단면에서 가까운 콘크리트 표면에 PSC 보부재의 길이 방향으로 2 m 등간격 일차원 선형으로 5개(A1~A5)의 음향센서를 부착하였으며, 부재의 양 단부에도 각각 1개(A0, A6)씩 부착하였다. 이 연구에 사용된 AE센서는 Piezo-electric accelerometer이며, 감지할 수 있는 음파의 주파수 영역은 10 Hz~22.5 kHz이다.

길이가 5 m인 PSC 보부재를 이용한 선행 연구<sup>9)</sup>에서 음향센서의 간격이 5 m 정도 떨어져 있어도 충분히 충격음파와 PS 강선의 파단음파를 감지할 수 있었다. 하지만 이 연구에서는 긴장력이 감소된 PS 강선에 대한 파단 실험이기 때문에 파단시 방출되는 음파의 에너지가 작을 수 있다는 점을 고려하여 음향센서를 2 m 간격으로 배치하였다. 또한 음향센서 A0과 A6의 최대 간격이 10 m이기 때문에 사전 충격 실험과 PS 강선 파단 실험을 통해 양 끝에 부착된 음향센서로부터 음파를 감지할 수 있는 경우 최대 10 m까지 음향센서 간격을 넓힐 수 있을 것이라 판단되었다.

### 3.3 사전 충격 실험(calibration test)

길이가 10 m인 PSC 보부재의 콘크리트 표면에 Fig. 5

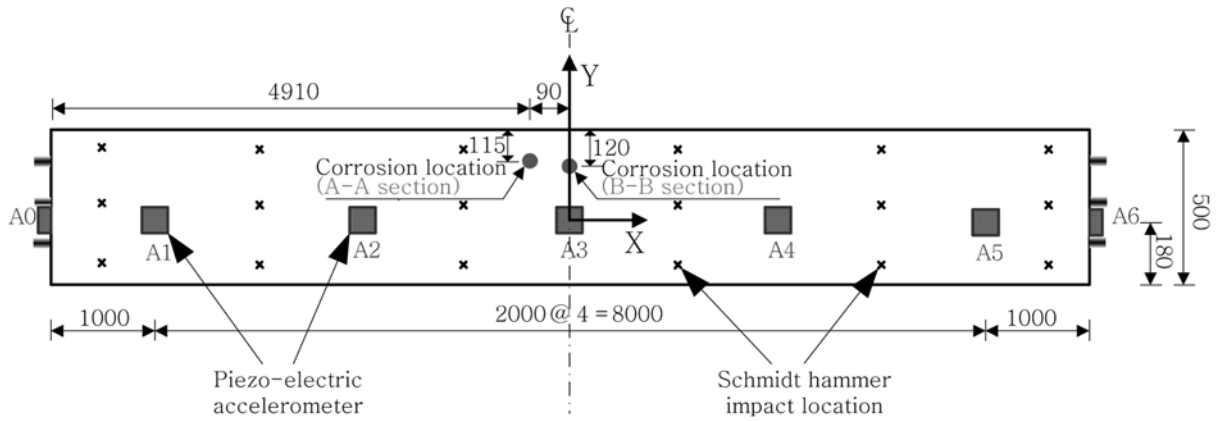


Fig. 5 Locations of acoustic sensors, impact positions, and accelerated corrosion tests

에 나타난 바와 같이 음향센서 사이의 부재 상부, 중앙부, 그리고 하부의 총 18곳에 대해 각각 3회씩 슈미트 해머를 이용한 충격을 가한 후 각 음향센서에 도달하는 충격파를 측정하였다.

### 3.4 부식 촉진 실험(accelerated corrosion test)

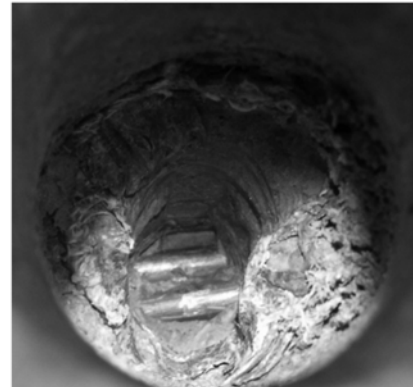
연속음향감지기법을 이용하여 인장강도의 40%와 66%로 긴장된 PS 강연선이 부식에 의해 파단이 발생하든지, 또한 파단시 발생된 음파를 음향센서를 통해 감지할 수 있는지를 확인하기 위하여 부식 촉진 실험을 수행하였다. 부식에 의한 PS 강선의 파단을 모사하기 위하여 PS 강연선의 일부를 외부로 노출시킨 후 부식 촉진 장치를 이용하여 인위적으로 부식을 촉진시켰다.

먼저 지름이 25 mm인 드릴을 이용하여 PS 강연선에 손상이 발생하지 않도록 PS 강선들을 외부로 노출시킨 후 부식 촉진 장치를 설치하였다. 인위적인 전식을 위해 PS 강선이 노출된 부식부에 염화칼슘용액을 채운 후 전압계를 이용하여 부식부에 전위차 10 Volt를 가해 전식시켰다. Fig. 5에 부식 촉진 실험을 수행한 위치를 나타내었다.

부식 촉진 실험을 수행하기 전 육안관찰 결과 인장강도의 66%로 긴장시킨 PS 강연선(B-B 단면)의 경우 덕트 내부의 시멘트 그라우트가 밀실되지 않아 일부 공극을 육안을 통해 발견할 수 있었다(Fig. 6(a) 참조). 이에 반해 인장강도의 40%로 긴장시킨 PS 강연선(A-A 단면)의 경우 덕트 내부의 시멘트 그라우트가 밀실되어 육안으로 공극을 발견할 수 없었다(Fig. 6(a) 참조). 하지만 부식 촉진 실험을 수행하는 동안 부식 용액이 실험부재 단부 정착부로 흘러나오는 것을 두 번의 실험을 통해 모두 다 발견할 수 있었다. 부식 촉진 실험을 수행하는 동안 연속음향감지기장치를 이용하여 실험체에서 발생하는 음파를 감지하였으며, 수시로 부식 촉진 장치를 제거하고 부식부를 깨끗이 청소한 후에 육안관찰을 실시하였다. Fig. 7은 부식 촉진 실험이 진행되고 있는 10 m PSC 보부재에 대한 실험 전경을 나타낸다.



(a) Exposed wires prestressed 66% of tensile strength



(b) Exposed wires prestressed 40% of tensile strength

Fig. 6 Close views of the exposed PS strands before accelerated corrosion test

## 4. 실험 결과

### 4.1 사전 충격 실험

길이가 10 m인 PSC 보부재의 콘크리트 표면 18곳(Fig. 5 참조)에 대해 각각 3회씩 슈미트 해머를 이용해 발생시킨 충격파를 감지하기 위한 사전 충격실험을 수행하였다. 총 54회 발생된 충격파는 모든 음향센서를 통해 감지할 수 있었으며, 감지된 음파의 세기는 모두 10 Volt 이상으로 일반 잡음과 뚜렷하게 구별될 수 있는 크기였다. 음파속도는 7개 음향센서의 좌표와 음파의 도달시간을

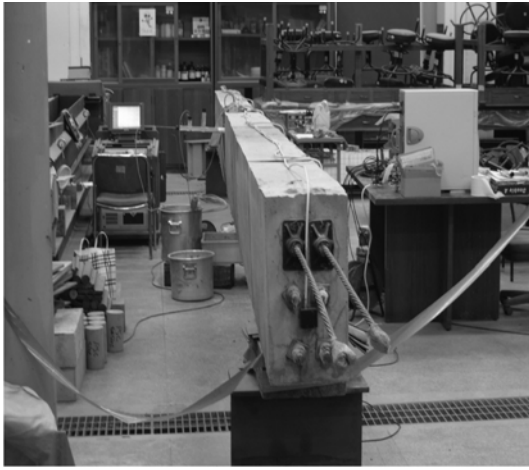


Fig. 7 View of 10 m test beam during the accelerated corrosion test

토대로 최소제곱법<sup>10)</sup>을 이용해 산정하였다. Table 3에 산정된 음파의 평균속도를 상수와 선형함수로 각각 나타내었는데, 각각의 음향센서에 의해 산정되는 음파속도뿐만 아니라 전체 음향센서(A0~A6)에 의해 산정된 평균 음파속도도 나타내었다. 전체 음향센서에서 측정된 음파의 평균속도는 3,923 m/sec이었으며, 이 수치는 5 m PSC 보부재를 이용한 선행 연구 결과<sup>9)</sup> 3,983 m/sec보다 1.5% 작았다. PSC 보부재의 양 단부에 부착한 음향센서(A0, A6)에서 측정된 음파속도 3,964 m/sec는 PSC 보부재의 측면에 부착한 음향센서(A1~A5)에서 측정된 음파속도 3,859 m/sec보다 2.7% 큰 수치를 나타냈다. 또한 각 음향센서에 도달하는 음파의 속도를 선형함수로 나타낸 결과 음파속도는 음파의 전파길이 D가 증가함에 따라서 감소되었다.

Table 3에 나타낸 음파의 평균속도, 7개의 음향센서의 좌표와 음파의 도달시간을 토대로 최소제곱법을 이용하여 음원의 X 좌표를 표정하였다. 최소제곱법을 이용한 음원위치 표정시 음파 속도는 다양한 방법으로 가정할 수 있는데, 이 연구에서는 다음과 같이 5가지 방법을 적

Table 3 Average velocity of impact signals obtained from calibration test

Sensors	Average velocity (m/sec)	
	Constant	Linear function
A0~A6	① 3922.6	② $V = 3896.0 + 2.97 D$
A0, A6	③ 3963.7	⑤ $V = 4069.7 - 8.01 D$
A1~A5	④ 3858.8	⑥ $V = 4131.6 - 35.49 D$
A0	3921.7	⑦ $V = 4088.4 - 17.38 D^*$
A1	3815.9	⑧ $V = 4119.5 - 38.27 D$
A2	3878.0	⑨ $V = 4025.7 - 13.20 D$
A3	3922.1	⑩ $V = 4070.8 - 23.82 D$
A4	3895.0	⑪ $V = 4206.1 - 39.22 D$
A5	3885.3	⑫ $V = 4067.0 - 0.62 D$
A6	4022.2	⑬ $V = 4243.6 - 55.72 D$

\* : D is the path length of acoustic signal

용하였다. CASE3과 CASE4의 경우 PSC 보부재의 양 단부에 부착한 음향센서(A0, A6)와 PSC 보부재 옆면에 부착한 음향센서(A1~A5)를 구분하여 음파속도를 가정한 경우를 나타낸다.

CASE1 = 전체 센서에 도달되는 음파속도를 상수로 가정한 경우; Table 3에서 ①

CASE2 = 전체 센서에 도달되는 음파속도를 거리에 대한 선형함수로 가정한 경우; Table 3에서 ②

CASE3 = 센서 부착위치 차이를 고려하여 음파속도를 상수로 가정한 경우; Table 3에서 ③, ④

CASE4 = 센서 부착위치 차이를 고려하여 음파속도를 선형함수로 가정한 경우; Table 3에서 ⑤, ⑥

CASE5 = 각 센서별 음파속도를 선형함수로 가정한 경우; Table 3에서 ⑦~⑬

Table 4에 음파속도 가정 방법에 따른 음원위치의 평균제곱근 오차(root mean square error)와 평균 오차(mean error)를 나타내었다. 평균제곱근 오차 RMSE는 식 (1)에 따라서 계산하였는데, 5가지 경우 모두 약 54 mm 정도로 비슷한 수치를 보였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{e^T e}{n}} \quad (1)$$

여기서  $e$ 는 실제 음원의 X좌표에서 계산된 음원의 X좌표를 뺀 수치로  $n \times 1$  벡터이며,  $n$ 은 전체 타격수( $18 \times 3 = 54$ )이다.

평균 오차는 산정된 음원위치와 슈미트 해머를 이용해 실제 타격한 위치와의 평균오차를 의미한다. 평균 오차에서 - 기호는 음원 표정위치가 Fig. 5에 나타낸 타격위치보다 왼쪽에 있음을 의미한다. 평균오차의 경우 음파속도를 각 센서로부터 측정된 선형함수로 가정한 경우인 CASE5가 3.6 mm로 가장 작았다.

이상과 같이 사전 충격실험을 통해 얻은 음파의 세기, 음파속도, 그리고 음원위치의 산정오차에 대한 분석을 통해 음향센서와 연속음향감지장치가 올바르게 작동하고 있음을 확인할 수 있었다.

#### 4.2 부식 촉진 실험

부식 촉진 실험은 먼저 인장강도의 66%로 긴장시킨

Table 4 RMSEs and mean errors of the source locations of impact signals

Assumed velocities of impact signals	RMSE* (mm)	Mean error (mm)
CASE1 (① in Table 3)	54.0	33.7
CASE2 (② in Table 3)	53.2	-17.0
CASE3 (③, ④ in Table 3)	53.5	-16.7
CASE4 (⑤, ⑥ in Table 3)	56.1	-18.2
CASE5 (⑦ ~ ⑬ in Table 3)	55.5	3.6

\* : root mean square error

PS 강연선(B-B 단면)에 대해 실시하였으며, 2회의 PS 강선 파단음파를 감지하였다. 인장강도의 40%로 긴장시킨 PS 강연선(A-A 단면)에 대해서도 부식 촉진 실험을 동일한 방법으로 수행하였으며, 2회의 PS 강선 파단음파를 음향센서를 통해 감지할 수 있었다. 모든 경우 파단음파라고 판단되는 음파가 감지되면, 바로 부식 촉진 실험 장치를 실험 부재에서 제거한 후 육안관찰을 통해 PS 강선의 파단을 확인할 수 있었다.

4.2.1 인장강도의 66%로 긴장시킨 PS 강연선(B-B 단면)

인장강도의 66%로 긴장시킨 PS 강연선(B-B 단면)에 대한 부식 촉진 실험을 통해 총 2회의 PS 강선 파단음파를 감지한 후 부식 실험을 종료하였다. 음향센서들에 감지된 PS 강선 파단음파는 세기와 지속시간이 매우 커서 실험 중에 발생하는 잡음과 확연히 구분할 수 있었다. Fig 8에 음향센서를 통해 감지한 1차 PS 강선의 파단음파를 나타내었다. PSC 보부재의 양 단부에 부착된 음향센서 A0과 A6에서 감지된 음파의 세기와 지속시간이 실험 부재 옆면에 부착된 음향센서 A1-A5에서 감지한 음파의 세기와 지속시간보다 크고 길게 나타났다. 음향센서 A0과 A6의 부착 위치가 PS 강연선 정착부 부근이기 때문에 종방향으로 PS 강연선을 따라 음파가 전달되어 음파의 감쇠 정도가 작아 음파의 세기와 지속시간이 크고 길게 감지된 것으로 판단된다. 이러한 음파 감지 결과는 강케이블의 파단음파와 매우 유사한 형태로 강선 파단 후 파단된 강선이 시멘트 그라우트의 부착력에 의해 재정착될 때까지 음파의 지속시간이 길었다고 예상되었다. 실험 결과로부터 인장강도의 66%로 긴장시킨 강연선(B-B 단면)의 경우, 덕트 내부의 공극으로 인해 PS 강선이 파단된 후 파단된 강선이 재정착되는 위치가 파단위 치로부터 멀리 떨어져 있기 때문에, 파단시 방출된 PS 강선의 변형에너지가 매우 컸다고 판단된다. 이러한 결과는 Fig 9에서 확인할 수 있듯이 파단된 PS 강선의 이격거리가 선행 연구<sup>9)</sup>에서 얻은 이격거리보다 매우 크다는 사실에서도 유추할 수 있다.

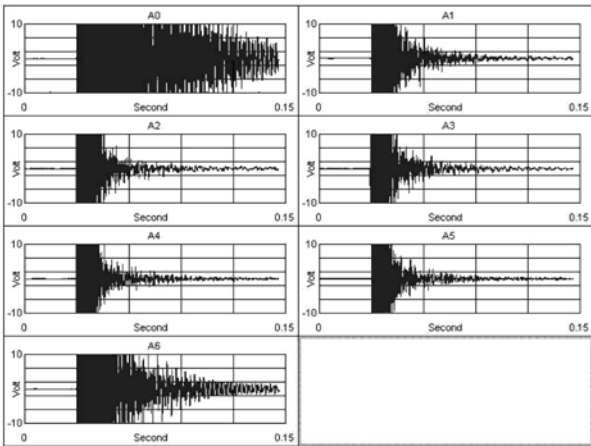
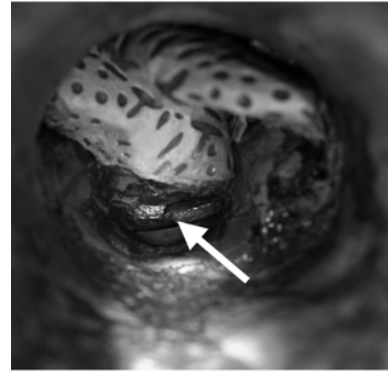
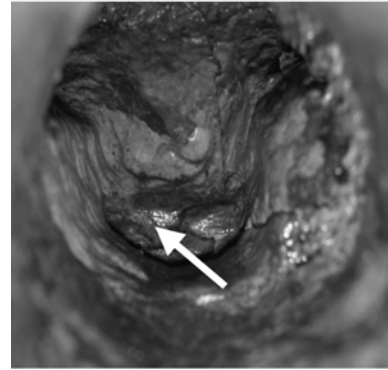


Fig. 8 Acoustic signals obtained from the 1st wire fracture of 66% prestressed PS strand



(a) 1st wire fracture



(b) 2nd wire fracture

Fig. 9 Close view of disconnected wires prestressed 66% of tensile strength (B-B section)

4.2.2 인장강도의 40%로 긴장시킨 강연선(A-A 단면)

부식 촉진 실험을 통해 인장강도의 40%로 긴장시킨 강연선(A-A 단면)에 대해서도 PS 강선의 파단음파를 음향 감지 장비를 통해 감지할 수 있었으며, 총 2회의 PS 강선 파단음파를 감지한 후 부식 촉진 실험을 종료하였다. 음파의 세기는 실험 전에 예상한 바와 같이 인장강도의 66%로 긴장시킨 강연선(B-B 단면)에서 얻은 음파보다 작았으며 음파의 지속시간도 짧았다(Fig. 10 참조). 하지만 PS 강선을 부식시킨 위치에서 5m 떨어져 있는 음향센서 A0과 A6에 의해서도 일반 잡음과 확연히 구

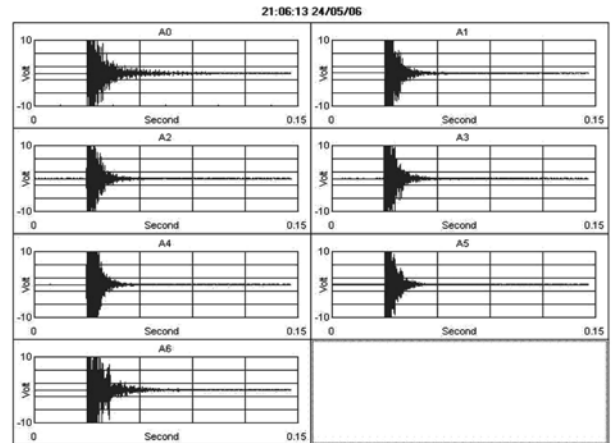


Fig. 10 Acoustic signals obtained from the 1st wire fracture of 40% prestressed PS strand

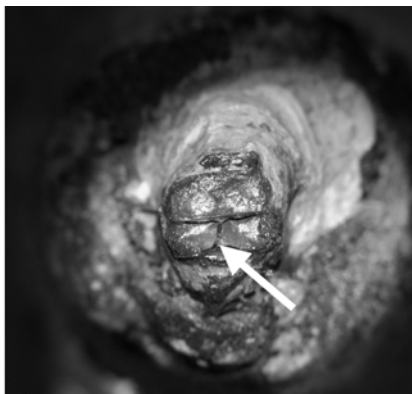
분할 수 있을 정도로 충분한 세기의 파단음파를 감지할 수 있었다. 또한 PS 강선 파단음파가 감지된 후 실시한 육안조사 결과를 통해서 PS 강선의 파단을 재확인할 수 있었다.

Fig. 11에 PS 강선 파단음파를 감지한 후 수행한 육안조사 결과를 나타내었다. Fig. 10 (a)에 1차 파단음파를 감지한 후에 바로 육안조사한 PS 강선의 파단부를 나타내었는데, 부식에 의해 단면적이 감소된 PS 강선이 파단되어 있음을 쉽게 확인할 수 있다. 파단된 PS 강선들의 이격거리가 Fig. 9(a)에 비해 매우 좁기 때문에 파단 후 빠르게 재정착되었음을 예상할 수 있으며, 이는 덕트 내부에 시멘트 그라우팅이 보다 충실히 되었다는 것을 의미한다. 또한 PS 강선파단시 방출된 변형에너지가 인장강도의 66%로 긴장시킨 강연선(B-B 단면)의 경우에 비해 작았다는 것을 의미한다.

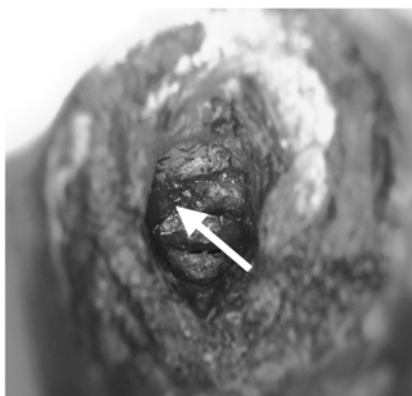
이상과 같이 인장강도의 40% 정도까지 프리스트레스가 감소되어도 부식에 의해 PS 강선이 파단되고, 또한 5m 정도 떨어진 음향센서를 이용해 파단음파를 감지할 수 있다는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

#### 4.2.3 PS 강선 파단시 음파속도 및 음원위치

10 m PSC 보부재에 부착된 7개의 음향센서를 통해 감지한 총 4회 PS 강선 파단음파의 도달시간을 이용하여



(a) 1st wire fracture



(b) 2nd wire fracture

**Fig. 11** Close view of disconnected wires prestressed 40% of tensile strength (A-A section)

음파속도와 음원위치를 최소제곱법을 이용해 산정하였다. 인장강도의 66%로 긴장된 PS 강선의 1차와 2차 파단시 발생한 음파의 전달속도는 각각 4,154 m/sec와 4,142 m/sec로 측정되었다. 이 속도는 슈미트 해머를 이용한 사전 충격실험을 통해 얻은 음파의 평균속도 3,923 m/sec보다 약 5.7% 큰 수치였다. 인장강도의 40%로 긴장된 PS 강선의 경우 1차와 2차 파단시 측정된 음파속도는 각각 4,151 m/sec와 4,083 m/sec이었다. 이 수치도 사전 충격 실험을 통해 얻은 음파의 평균속도 3,923 m/sec보다 약 5.0% 큰 수치였다. PS 강선 파단시 방출되는 음파는 콘크리트뿐만 아니라 PS 강연선을 통해 바로 전파될 수 있다. 이 경우 콘크리트보다 PS 강연선의 밀도가 높기 때문에 강연선을 통한 음파의 속도는 콘크리트를 매질로 하는 음파의 속도보다 빠를 수 있다. 이러한 요인에 의해 PS 강선 파단시 측정된 음파속도가 사전충격실험을 통해 얻은 음파속도보다 크게 산정된 것으로 판단된다.

최소제곱법을 이용한 PS 강선 파단시 음원위치 표정을 위해 두 가지 방법을 이용하였다. 첫 번째는 음원위치 산정시 요구되는 음파속도에 슈미트 해머를 이용한 사전 충격 실험을 통해 얻은 음파속도를 이용하는 경우이고 두 번째는 PS 강선 파단시 방출되는 음파의 도달시간을 바로 이용하는 경우이다.

첫 번째 사전 충격 실험을 통해 산정한 다섯 가지의 음파속도를 토대로 음원 위치를 표정하였으며 그 결과를 Table 5에 정리하였다. Table 5에서 오차는 부식 축진을 위해 노출시킨 PS 강연선 부식부의 중앙 위치에 대한 음원 표정 위치와의 차를 나타낸다. 오차의 크기가 0.2~24.1 mm 사이로 비교적 음원 위치가 정확하게 표정되었음을 알 수 있다. 또한 사전 충격 실험에서 얻은 결과와 유사하게 각 음향센서별 음파속도를 선형함수로 고려하는 경우인 CASE5가 다른 경우에 비해 음원위치 표정오차가 가장 작았다.

두 번째 방법으로 PS 강선 파단시 방출된 음파의 도달시간을 토대로 산정한 음파속도를 이용해 음원 위치를 표정하였으며, 그 결과를 Table 6에 정리하였다. PS 강선 파단시 감지한 음파의 도달시간을 이용하여 음파속도 산정시 CASE4(센서 부착 위치 차이를 고려하여 음파속도를 선형함수로 가정)의 경우 7개 AE센서의 측정 시간으로

**Table 5** Errors of the source locations of wire fracture signals calculated by using the velocities obtained from the calibration tests(unit: mm)

Assumed velocities of impact signals	PS strand prestressed 0.66 P <sub>u</sub> (B-B section)		PS strand prestressed 0.4 P <sub>u</sub> (A-A section)	
	1st wire fracture	2nd wire fracture	1st wire fracture	2nd wire fracture
CASE1	-10.7	-19.8	-13.5	-17.5
CASE2	-10.1	-19.3	-13.6	-17.6
CASE3	-10.6	-19.8	-13.5	-17.6
CASE4	-15.6	-24.1	-13.1	-17.1
CASE5	0.8	-7.7	4.0	-0.2



**Table 6** Errors of source locations of wire fracture signals calculated by using the velocities obtained from the accelerated corrosion tests (unit: mm)

Assumed velocities of wire fracture signals	PS strand prestressed 0.66 P <sub>u</sub> (B-B section)		PS strand prestressed 0.4 P <sub>u</sub> (A-A section)	
	1st wire fracture	2nd wire fracture	1st wire fracture	2nd wire fracture
CASE1	-15.8	-24.2	-13.0	-17.0
CASE2	-20.6	-28.4	-12.4	-16.0
CASE3	-16.0	-24.5	-13.0	-16.9
CASE4(*)	-	-	-	-
CASE5(**)	-	-	-	-

\* : From each wire fracture event, calculating six unknowns from seven arrival times is no practical meaning

\*\* : Unknowns are greater than measured data

로 6개의 미지수(4개의 음파속도 계수, 음파 발생 시간, 음원 위치)를 구하는 것은 의미가 없으며, CASE5(각 센서별 속도를 선형함수로 고려하는 경우)의 경우 미지수가 관측 값보다 많기 때문에 산정이 불가능하다.<sup>9)</sup> 따라서 이 두 가지 경우에 대한 음파속도는 산정하지 않았다. Table에서 오차의 크기를 살펴보면 1차 파단시보다 2차 파단시 음원 위치 오차가 크게 평가되었다. 음원 위치 오차 산정시 초기 부식 위치를 기준으로 평가하였기 때문에 실제 PS 강선의 파단 위치 변화는 고려하지 않았다. 따라서 실제 파단되는 PS 강선의 위치가 PS 강연선 부식 범위 내에서 변화될 수 있기 때문에 오차 크기가 변화될 수 있을 것이라 판단된다. 하지만 오차의 절대 최대치가 28.4 mm이기 때문에 PS 강재의 파단 위치 평가시 충분한 정확도를 가진 기술적 자료로 활용할 수 있다고 판단된다. 또한 음원위치 산정결과 B-B 단면과 같이 PSC 보 일부 구간에 시멘트 그라우팅이 실시되지 않은 경우에도 음원 위치 산정오차가 작다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 일부 구간 덕트 내부 시멘트 그라우트가 불충실한 경우에도 PS 강선 파단위치를 일정 오차 이내로 표정할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

이 논문은 PS 강선에 도입된 긴장력의 크기가 설계시 가정된 수치보다 작게 도입된 경우 또는 초기 도입된 프리스트레스의 감소량이 큰 경우에도 PS 강선이 부식에 의해 급작스런 파단이 발생하는지, 또한 PS 강선 파단시 발생하는 음파를 음향센서가 감지하고 표정된 음원 위치가 신뢰할만한 수준인 가를 확인하기 위한 실내 실험을 수행하였다. 이를 위하여 인장강도의 66%와 40%로 각각 긴장된 PS 강연선이 있는 10 m PSC 보를 제작한 후, PS 강선을 인위적으로 파단시키기 위해 부식 촉진 실험을 수행하였으며, 파단음파 감지는 PSC 보의 콘크리트 표면에 부착한 7개의 음향센서를 이용하였다. 이상과 같은 실내 실험 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 10 m PSC 보에 인장강도의 66%와 40%로 긴장된 PS 강연선에 대한 부식 촉진 실험을 통해 각각 2회씩 총 4회의 PS 강선 파단음파를 연속음향감지기법을 이용하여 감지할 수 있었다.
- 2) 인장강도의 66% 수준으로 긴장된 PS 강선의 경우 불충분한 그라우팅에 의해 커다란 공극이 있었기 때문에 PS 강선 파단시 방출되는 음파의 세기와 음파의 지속시간이 매우 크게 감지되었다.
- 3) 인장강도의 40% 수준으로 긴장된 PS 강선의 경우도 시멘트 그라우팅이 충실히 되었음에도 불구하고 PS 강선 파단시 방출되는 음파는 다른 잡음과 확연히 구분할 수 있을 정도로 음파의 세기가 컸다.
- 4) 10 m 보부재의 양단에 부착시킨 음향센서의 경우 음원 위치로부터 약 5 m 떨어진 위치임에도 불구하고 인장강도의 40%로 긴장시킨 PS 강선의 파단음파를 충분히 감지할 수 있었다. 이러한 실험 결과로부터 음향센서의 간격이 약 10 m인 경우에도 PS 강선의 파단음파를 감지할 수 있을 것이라 판단된다.
- 5) 10 m PSC 보부재를 매질로 하는 콘크리트 표면 충격파의 평균 전달 속도는 3,920 m/sec 정도로 평가되었으며, PS 강선의 파단시 전파되는 음파속도는 약 4,132 m/sec로 콘크리트 표면 충격파보다 약 5% 정도 크게 평가되었다.
- 6) 10 m PSC 보부재의 PS 강선 파단시 발생하는 음파의 음원 위치는 대략 20 mm 정도 오차를 보일 정도로 표정되었으며, 특히 각 음향센서로부터 산정된 음파속도를 선형함수로 가정한 경우 음원 위치 산정오차가 가장 작았다.

## 참고문헌

1. The Concrete Society, "Durable Bonded Post-tensioned Concrete Bridges," *Concrete Society Technical Report 47*, TR047, 1996, 64 pp.
2. Woodward, R. J. and Williams, F. W., "Collapse of Ynys-s-Gwas Bridge," *Proceedings of Institute of Civil Engineers*, Part 1, Vol. 84, 1988, pp. 635-669.
3. Mathy, B., Demars, P., Roisin, F., and Wouters, M., "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, 1996, pp. 658-666.
4. Halsall, A. P., Welch, W. E., and Trepanier, S. M., "Acoustic Monitoring Technology for Post-tensioned Concrete Structures," *FIP Symposium 1996 on Post-tensioned Concrete Structures*, The Concrete Society, 1996, pp. 483-491.
5. Cullington, D. W., MacNeil, D., Paulson, P., and Elliot, J., "Continuous Acoustic Monitoring of Grouted Post-tensioned Concrete Bridges," *NDT&E International*, Vol. 34, 2001, pp. 95-105.
6. Youn, S. G., Cho, S. K., and Kim, E. K., "Acoustic Emission Technique for Detection of Corrosion-induced Wire Fracture," *Key Engineering Materials*, Vols. 297-300, 2005,

- pp. 2040~2045.
7. Fricker, S. and Vogel, T., "Site Installation and Testing of a Continuous Acoustic Monitoring," *Construction and Building Materials*, Vol. 21, Issue 3, 2007, pp. 501~510.
  8. Yuyama, S., Yokoyama, K., Niitani, K., Ohtsu, M., and Uomoto, T., "Detection and Evaluation of Failure in High-strength Tendon of Prestressed Concrete Bridges by Acoustic Emission," *Construction and Building Materials*, Vol. 21, Issue 3, 2007, pp. 491~500.
  9. 윤석구, 이창노, 김은겸, "AE기법을 이용한 PSC 보의 음파속도와 음원 위치 산정 방법," *대한토목학회논문집*, 26권, 5A호, 2006, pp. 917~925.
  10. Mikhail, E. M., *Observations and Least Squares*, University Press of America, New York, 1976, 497 pp.

**요 약** 후 긴장된 PS 강재의 부식과 파단은 프리스트레스 콘크리트 교량의 안전에 매우 심각한 문제를 발생시키고 있다. 따라서 교량의 내하력 평가시 PS 강재의 부식 상태를 조사해야 하며, 부식된 PS 강재가 발견되는 경우, 부식에 의한 강재의 단면적 감소량을 극한강도 평가시 고려해야만 한다. 선행 연구에서는 연속음향감지기법을 그라우팅되고 후 긴장된 PS 강연선의 부식과 파단을 감지할 수 있는 신뢰할 만한 비파괴검사방법으로 평가하였다. 이 연구에서는 긴장재에 도입된 응력 수준이 현행 설계기준에 제시된 수준보다 낮게 도입된 PS 강연선에 대해 부식에 의한 강선 파단을 감지하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위해 프리스트레스의 크기가 각각 인장강도의 66%와 40%로 도입된 PS 강연선이 포함된 길이 10m의 PSC 보를 제작하였다. 부식 촉진 장비를 이용하여 긴장재를 인위적으로 부식시켰으며, 7개의 음향센서와 연속음향감지장치를 이용하여 실험부재를 모니터링하였다. 부식 촉진 실험 동안 각 PS 강연선으로부터 2번의 강선 파단음파를 성공적으로 감지하였으며, 또한 오차범위 20mm 이하로 음원 위치를 표정할 수 있었다. 이상의 실험 결과를 토대로 그라우팅되고 후 긴장된 PSC 보에서 발생하는 PS 강선 파단을 감지하는데 연속음향감지기법을 적용할 수 있다고 판단된다.

**핵심용어** : 프리스트레스 콘크리트, 부식, 강선 파단, 비파괴검사방법, 음향방출