

# 유도초음파를 이용한 외부 강선의 긴장력 평가기법 개발

Development of Evaluation Method of External Tendon Force  
by Using the Deriving Ultrasonic Pulse

박 승 범\*  
Park, Seung-Bum

홍 성 수\*\*  
Hong, Sung-Su

유 성 원\*\*\*  
Yoo, Sung-Won

## Abstract

In domestic case, there are no results of corresponding researches for measuring external tendon force. The purpose of the present paper is therefore to measure external tendon force by using deriving ultrasonic method. For this purpose, we designed and manufactured wedges and test system, and measured ultrasonic pulse velocity and pulse amplitude. By using measured data, we tried to analyze the characteristics of tendon force, and to derive the relationship between tendon force and ultrasonic pulse velocity, finally to develop the technic of measuring system using ultrasonic pulse velocity. So tendon force-velocity relationship was proposed by equations, and those equations of which errors were 3.92~8.77% will be possible to adapt in-site.

## 요 지

외부 강선의 긴장력 측정 기법은 국내의 경우, 거의 전무한 연구 실적을 가지고 있는 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 강선의 긴장력을 유도 초음파법을 이용하여 측정하는 것으로 이를 위하여 시험용 웨지 및 측정 시스템을 설계·제작하여 강선에 가하여지는 긴장력 변화에 따른 초음파의 특성을 분석하여 그 상관관계를 도출하고, 이를 기반으로 초음파 특성 변화로부터 강선에 가하여지는 긴장력을 측정할 수 있는 기법을 개발하고자 한다. 이에 긴장력-속도변화의 관계식들을 구하여 제시하였으며, 제시된 식들의 오차는 약 3.92~8.77%로 나타나 현장적용이 가능할 것으로 판단된다.

**Keywords :** External tendon, Deriving ultrasonic pulse, Tendon force, Measure

**핵심 용어 :** 외부 강선, 유도초음파, 긴장력, 계측

\* 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수

\*\* 정희원, 한국시설안전기술공단 진단1본부 과장

\*\*\* 정희원, 우석대학교 토목공학과 부교수

E-mail : park\_sb@cnu.ac.kr 011-451-7290

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

최근 들어 상대적으로 시공이 간편하고, 유지관리가 손쉬운 장점을 가지고 있는 외부 비부착 강선을 갖는 부재가 장대 교량의 신설이나 기존 교량의 보강공사 등에 자주 이용되고 있다. 재진장이 용이한 장점이 있으므로 외부 강선에 작용하는 현재의 긴장력 측정이 가능하다면 외부 강선의 재진장 여부 및 구조거동 평가 등이 용이할 것이다.<sup>(5)(6)</sup> 그러나 외부 강선의 긴장력을 측정하는 기법은 장력법 및 진동법<sup>(1)-(4)</sup>이 사용되고 있으나 오차범위가 크고 측정조건에 제약이 많아 외부강선의 긴장력 측정에는 적용하기 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 아직까지 국내 건설 분야에 적용된 적이 없는 유도초음파를 이용하여 외부 강선의 긴장력을 추정하고자 시도하였다.

한편 해외에서는 Rizzo, Beard, Washer 등의 연구자가 초음파를 이용하여 15.2mm 직경의 강선에 대하여 긴장력 추정 연구를 2006년에 수행하였다. 이 연구는 측정 시스템의 특성상 현장적용이 불가능한 단점이 있다. 즉, 강선에 직접 부착할 수 있는 탐촉자를 사용하지 않고 긴장 그림 끝단에 탐촉자를 부착하도록 고안되어 긴장 시에만 측정할 수 있는 단점을 가지고 있다.<sup>(10)</sup>

## 2. 유도초음파이론

### 2.1 개요

유도초음파는 구조물의 기하학적인 구조를 따라 길이방향으로 전파하는 파로서 종파와 횡파가 구조물의 벽면사이에서 수많이 반사되어 중첩됨으로 형성된다.

이때 유도초음파는 일반적인 체적파(bulk wave : 무한매질을 진행하는 파)와는 매우 다른 특성을 가지는데, 그 대표적인 차이점으로 무한개의 유도초음파 모드가 존재한다는 점과 대부분의 모드는 진동수와 구조물 벽의 두께에 따라 전파속도가 변화하는 특성 즉 분산특성을 갖는다는 것이다. 그래서 유도초음파를

이해하고 비파괴탐상에 적용하기 위해서는 이론적으로 주어진 진동수영역에서 존재 가능한 모드를 찾고 각 모드의 분산특성을 예측하는 것이 우선적으로 행하여져야 한다. 이는 탄성과 이론에 대상구조물의 경계조건을 고려함으로 구할 수 있다. 유도초음파를 발생하기 위해 현재 많이 사용되는 방법은 초음파의 수직 및 사각 입사법과 comb transducer 법, 그리고 자왜(Magnetostriction)를 이용한 방법들이 있다.<sup>(7)-(9)</sup>

이론적으로 예측된 무수히 많은 모드들 중에서 원하는 모드를 찾는 것 또한 중요한 연구자의 하나인데, 이는 각 모드의 분산특성과 산란특성 그리고 발생법 등을 고려하여 주어진 피검체의 비파괴탐상에 가장 적합한 특성을 가진 모드를 이론 및 실험적으로 연구함으로 선택할 수 있다.

그렇게 되면 선택되어 발생된 유도초음파모드의 전파경로에 있는 결함으로부터 반사된 신호를 분석함으로 그 위치를 파악할 수 있게 되는데 탐상할 수 있는 결함의 크기와 종류 그리고 거리는 모드선택과정에서 고려된 모드의 전파특성과 결함에 대한 민감도에 의해 결정되어 진다. 이와 같이 이론과 실험적인 방법이 주어져 있음에도 불구하고 유도초음파의 적용에 어려움이 있는데 이는 주로 분산성이 있는 여러 개의 모드가 동시에 수신될 때 신호해석과 모드확인(Mode Identification)의 어려움 때문에 기인된다.

수신신호해석의 어려움을 극복하기 위해 실험적으로는 위상속도와 진동수의 범위를 제한함으로 분산성이 적은 단일모드를 사용할 수 있는 방법이 제안된바 있다. 그리고 유도초음파를 진동수-시간 영역에서 분석하는 Wavelet Transform나 Short Time Fourier transforms와 같은 신호해석기법을 이용하여 수신신호를 해석하는 방법이 최근에 제안되고 있다.

유도초음파는 Fig. 1에 보인바와 같이 종파와 횡파가 구조물의 벽면사이에서 수많이 반사되어 중첩됨으로 형성되어 진다.

초음파는 벽면에서 반사될 때 마다 횡파(점선)와 종파(실선)로 나누어지고 이들의 중첩되어 유도초음파를 형성한다.

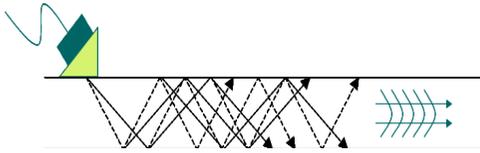


Fig. 1 파유도체에서 유도초음파의 형성과정

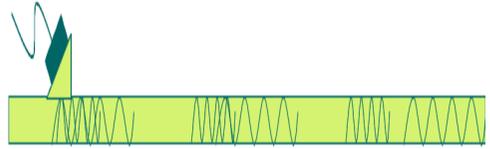


Fig. 2 유도초음파의 분산성

## 2.2 유도초음파모드의 분산성

유도초음파는 대부분의 경우 Fig. 2에 보인 바와 같이 같은 매질을 통과할 경우에도 진동수에 따라 전파하는 속도가 다르다. 이와 같은 특성을 분산성(Dispersion)이라 하는데 이 분산성을 나타낸 것이 분산선도(Dispersion curves)이다. 유도초음파의 위상속도와 군속도는 서로 다르므로 위상속도분산선도(Phase velocity dispersion curves)와 군속도 분산선도(Group velocity dispersion curves)를 각각 구할 수 있다. 여기서 군속도는 에너지가 전파하는 속도로 실험적으로 측정되어지는 유도초음파의 속도에 해당한다.

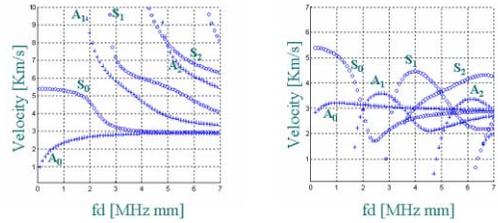
유도초음파모드는 파가 파유도체의 벽 속에서 진동하는 양상, 즉 파형구조(Wave structure)에 따라 구분되어지는데 박판의 경우와 배판과 같은 실린더의 경우 서로 다르게 정의되어져 있다. 박판의 경우가 비교적 간단함으로 알루미늄 판에 대한 설명을 먼저하고, 배판 또는 세판과 같은 실린더의 경우를 설명하도록 하겠다.

### (1) 박판에서 유도초음파의 모드와 분산

파유도체가 박판인 경우 유도초음파는 판파 또는 Lamb waves로 알려져 있는데, 크게 대칭모드(Symmetric mode)와 비대칭모드(Antisymmetric mode) 두 종류로 구분되어 진다. 이 때 대칭모드와 비대칭모드를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (\text{대칭모드}) \quad (1)$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad (\text{비대칭모드}) \quad (2)$$



(a) 위상속도

(b) 군속도

Fig. 3 알루미늄 판에 대한 유도초음파 분산선도

판파의 파형구조를 살펴보면 대칭모드의 경우에는 유도초음파의 진행방향으로 진동하는 파의 성분이 박판의 두께 중심선에 대해 대칭이나, 비대칭모드의 경우에는 비대칭이다. Fig. 3에 알루미늄 판에 대한 판파의 각 모드별 위상속도( $V_{ph}$ ) 분산선도와 군속도( $V_g$ ) 분산선도를 제시하였다. 세로축은 속도를 나타내고 가로축은 진동수( $f$ ) 곱하기 알루미늄 판의 두께( $d$ )를 나타낸다. 일반적으로 대칭모드는  $S_0, S_1, S_2, S_3, \dots$ 로 나타내고 비대칭모드는  $A_0, A_1, A_2, A_3, \dots$ 로 나타낸다.

이러한 분산선도는 각 모드별 분산특성을 보여줄 뿐만 아니라 유도초음파모드가 존재할 수 있는 조건을 나타내는데, 예로써  $f_0$ 값이 커질수록 더 많은 모드가 존재하고 같은  $f_0$ 값에서 여러 개의 모드가 존재하고 있음을 분산선도를 통해 알 수 있다. 특히 위상속도 분산선도는 실험적으로 유도초음파모드의 발생조건을 찾는데 사용되어 진다. 유도초음파를 사각입사법으로 발생할 경우 Snell의 법칙에 따라 위상 속도와 입사각은 식(3)과 같은 관계를 가진다.

$$V_{ph} = \frac{V_{shoe}}{\sin \theta_i} \quad (3)$$

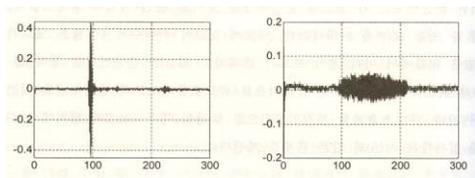
여기서  $V_{shoe}$ 는 초음파 센서에 부착된 웨지의 종파 속도이고  $\theta_i$ 는 웨지에서 입사각이다. 일단 입사각이 결정되면 위상속도가 결정됨으로 위상속도 분산선도를 통해 발생도리 수 있는 모드들의  $f_d$ 값을 찾을 수 있다. 그렇게 되면 실험 시스템에서 진동수를 조절함으로 원하는 모드를 발생하는 조건을 만들 수가 있다. 이론적으로는 단일진동수와 단일위상속도를 결정하여 위상속도분산선도상의 특정지점의 모드를 발생 할 수 있으나, 실질적으로는 가진하는 신호의 시간적인 길이와 센서의 크기 제한으로 인하여 단일 진동수와 단일 위상속도를 가진 유도초음파를 발생할 수가 없다. 따라서 실험적으로 발생하는 유도초음파는 시스템과 센서의 특성에 의해 결정되어지는 진동수 대역과 위상속도의 대역을 가지고 있다.

실험적으로 관측되는 유도초음파의 분산성은 군속도 분산선도에 의해 예측되어진다. 예로서 Fig. 4에 1 mm 알루미늄 판에서 pitch-catch 실험을 한 결과를 제시하였다. Fig. 4(a)의 경우에는 비교적 분산성이 작은 모드이며, Fig. 4(b)의 경우에는 이 모드는 분산성이 큰 모드이다.

군속도가  $f_d$ 값의 변화에 따라 급격히 변화하는 모드는 분산성이 높아 시간축에서 유도초음파의 신호가 넓게 퍼져서 나타나고, 분산성이 작은 모드는 좁게 나타났다. 이와 같은 점을 고려하면 유도초음파를 실험적으로 이용할 때 군속도 분산선도로부터 실험적으로 얻어지는 파형의 분산정도는 어느 정도는 예측 할 수 있게 된다.

(2) 탄성판에서 유도초음파의 전파

유도초음파의 진행방향이 관의 길이방향인 경우 유



(a) 분산성이 작은 모드 (b) 분산성이 큰 모드

Fig. 4 분산성이 작은 모드와 큰 모드의 비교

도초음파 모드를 나타내기 위해서 두 개의 첨자  $M$  (Circumferential order)과  $n$ (Mode number)을 사용하고 있다.  $M=0$ 인 경우에는 관의 축에 대해 대칭이고  $M=1, 2, 3, \dots$  인 경우에는 축 대칭이 아니다. 그래서  $M=0$ 인 경우에는 축 대칭인 모드 (Axisymmetric modes)를 나타내는데, 축 대칭인 모드는 다시 Longitudinal 모드와 Torsional 모드로 파가 관의 벽속에서 진동하는 양상에 따라 구별되어 진다. Longitudinal 모드는 파의 진동하는 성분이 관의 길이방향과 반경방향으로만 있는 경우로서  $L(0, n)$ 으로 나타내며, Torsional 모드는 파의 진동성분이 원주방향으로만 있을 경우로서  $T(0, n)$ 으로 나타낸다.

그리고  $m=1, 2, 3, \dots$  인 경우에는 비축대칭인 모드 (Non-axisymmetric modes)를 나타내며 Flexural 모드로 부르며  $F(M, n)$ 으로 표시한다. Flexural 모드의 경우에는 관의 벽 속에서 파의 진동성분이 세 방향 (반경, 원주 그리고 길이방향)으로 모두 존재한다.

Longitudinal modes :  $L(0, n)$

Axisymmetric modes

Torsional modes :  $T(0, n)$

Axisymmetric modes

Flexural modes :  $F(M, n)$

Non-axisymmetric modes

Longitudinal 모드와 Torsional 모드는  $M=0$ 에서 무한한 수의 모드를 가지고 있고,  $M=1, 2, 3, \dots$  에서 Circumferential order  $M$ 에 대해 무한한 수의 Flexural 모드의 수를 가지고 있다.

유도초음파가 관을 전파할 때 Longitudinal 모드, Flexural 모드, Torsional 모드의 세 종류의 모드가 존재할 수 있다. 일반적으로 실험적으로 주로 사용되는 모드는 축 대칭인 Longitudinal 모드이다. 그 이유는 일반적인 초음파 센서로 잘 발생될 수 있으면, 축 대칭이기 때문에 분석이 간단하기 때문이다. 그러나 비축대칭 센서의 사용 또는 비축대칭 결함으로부터의 반사등으로 인하여 실험적으로 비축대칭인 모드, 즉 Flexural 모드가 생성될 수 있기 때문에 비축대칭 모드에 대한 연구가 필수적이다. 그리고 Torsional

모드는 실험적으로 발생시키고 수신하는데 있어서 일반적인 초음파 센서로는 효율이 떨어져서 잘 사용되지 않고 있다.

진동수식으로 불리어지는 식으로부터 위상속도 분산선도를 구할 수 있다. 몇 가지의 경우를 제외하고는 같은 진동수에서 서로 다른 몇 가지 위상속도를 가질 수 있다. 이와 같은 특성은 유도초음파의 분산 특성과 잘 일치한다. 위상속도 분산선도는 유도초음파를 가진 시킬 수 있는 조건을 찾는 데 사용되는데 식 (4)에 나타난 Snell의 법칙을 사용하여 유도초음파의 위상속도와 입사각의 관계를 구할 수 있다.

$$\frac{v}{\sin \theta} = c_{ph} \quad (4)$$

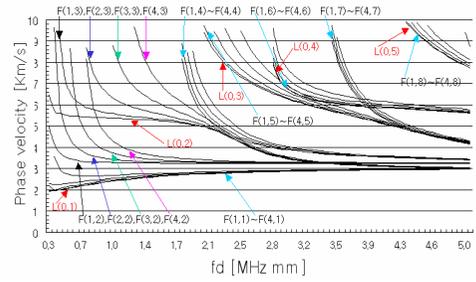
여기서  $v$ 는 초음파 센서에 부착된 웨지의 종파속도,  $\theta$ 는 웨지에서의 입사각, 그리고  $c_{ph}$ 는 유도초음파의 위상속도이다.

일단 입사각이 결정되면 위상속도가 결정됨으로 위상속도 분산선도를 통해 발생 될 수 있는 모드들의  $f_d$  값을 찾을 수가 있다. 그렇게 되면 실험 시스템에서 진동수를 조절함으로써 원하는 모드를 발생시키는 조건을 만들 수가 있다. 이론적으로는 단일진동수와 단일위상속도를 결정하여 위상속도 분산선도 상의 특정지점의 모드를 발생 할 수 있으나, 실질적으로는 가진하는 신호의 시간적인 길이와 센서의 크기 제한으로 인하여 단일 진동수와 단일 위상속도를 가진 유도초음파를 발생 할 수가 없다. 그래서 실험적으로 발생하는 유도초음파는 시스템과 센서의 특성에 의해 결정되어지는 진동수 대역과 위상속도의 대역을 가지고 있다.

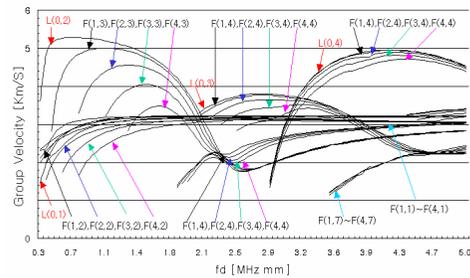
에너지 전파속도는 위상속도와는 다르다는 것은 잘 알려져 있다. 음향학적으로 에너지 속도는 군속도와 같다. 군속도 분산선도는 식(5)의 관계식을 이용하여 위상속도로부터 구할 수 있다.

$$V_g = \frac{dw}{dk} \quad (5)$$

여기서,  $\omega$ 는 각 진동수이고,  $k$ 는 파수인데 이는  $\omega/c_{ph}$ 와 같다. 식(6)을 식(7)로 표현할 수 있다.



(a) 위상속도 분산선도



(b) 군속도 분산선도

Fig. 5 탄소관에서의 유도초음파 분산선도

$$\begin{aligned} V_g &= \frac{dw}{d(w/c_{ph})} \\ &= \frac{dw}{dw} \frac{dw}{c_{ph} - w \frac{dc_{ph}}{dw}} \\ &= \frac{c_{ph}}{c_{ph} - w \frac{dc_{ph}}{dw}} \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서,  $\omega$ 대신  $f_d$ , 즉 주파수와 파유도체 두께의 곱으로 표시하면 군속도를 구할 수 있다.

$$V_g = \frac{c_{ph}^2}{c_{ph} - (fd) \frac{dc_{ph}}{d(fd)}} \quad (7)$$

군속도를 아는 것은 모드확인파와 반사파로 거리를 측정함에 있어서 유용하게 사용될 수 있다. 예를 들어 반사파를  $2D = V_g \times t$  ( $D$ : 결함과 탐촉자간의 거리,  $t$ : 신호전달 시간) 라는 식으로 결함이 위치한 거리를 찾을 수 있다.

### 3. 초음파법을 이용한 강선긴장력 측정

#### 3.1 긴장력 측정용 초음파 웨지 제작

본 연구에서는 외부강선에 대표적으로 사용되고 있는 A, B 두 강선을 대상으로 초음파법을 이용한 하중 측정 실험을 위하여 초음파 탐상 시험용 웨지를 설계·제작하였다. 여기서 A는 12.7 mm의 지름의 단면적이 0.9871 cm<sup>2</sup>인 강선을 말하며, B는 15.2 mm의 지름, 단면적 1.387 cm<sup>2</sup>인 강선을 나타낸다 (Table 1 참조). 일반적인 초음파법에 의해서 PS 강선을 측정하기는 용이하지 않기 때문에 강선의 표면에 초음파 탐촉자의 접촉면을 높여 S/N비 효율을 높이고 신호의 분해능을 높이려 A, B 강선에 맞는 웨지를 제작하였다. Fig. 6은 제작된 웨지의 설계이며 Fig. 7는 제작된 웨지와 강선에 체결된 사진이다.

Table 1 강선의 특성

	A(Φ12.7 m)	B(Φ15.2 mm)
재질	steel	steel
단면적	0.9837 cm <sup>2</sup>	1.387 cm <sup>2</sup>
탄성계수(E)	2×10 <sup>5</sup> MPa	2×10 <sup>5</sup> MPa

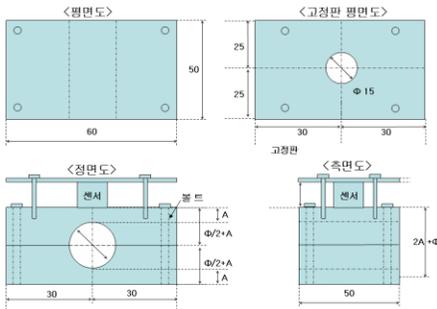


Fig. 6 초음파법을 위한 웨지 설계도



Fig. 7 초음파법을 위한 웨지 제작

#### 3.2 초음파 탐촉자

본 연구에서는 유도초음파를 Pitch-Catch 방법으로 측정하기 위해 저주파 대역인 (중심주파수 : 0.5 MHz, 제작사 : Panametrics, 진동자 크기 : 0.3×1.0) 사각탐촉자를 선정하였다. Fig. 8(좌)는 실험에 사용된 탐촉자를 나타내고 있으며 Fig. 8(우)는 강선에 탐촉자와 웨지를 부착한 사진을 나타낸다. 또한 탐촉자의 움직임을 고정하기 위한 고정판을 탐촉자 위에 부착하여 실험을 실시하였다.



Fig. 8 초음파 시험에 이용된 탐촉자 및 부착된 구성

#### 3.3 초음파 측정 장치 제작

강선의 긴장력 측정을 위한 초음파 발생/수신 장비인 초음파 펄서/리시버를 설계·제작하였다. 그림 9는 펄서/리시버 장치의 내부에 설치되는 회로를 보여주고 있으며 제작된 초음파 펄서/리시버의 사양은 다음과 같다.

- 최대 펄스 전압: - 300 V
- 주파수 대역 : 300 KHz ~ 30 MHz
- 펄스폭, 리시버 Gain, High/Low pass 필터 등

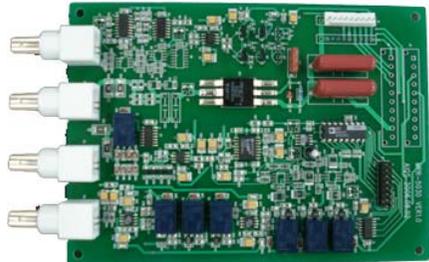


Fig. 9 Pulser/Receiver 회로

### 3.4 초음파 탐상실험

#### (1) 초음파 탐상실험 내용

본 연구에서는 수신된 신호의 속도변화 값과 하중과의 상관관계를 분석하여 초음파법에 의한 하중의 측정 방법에 접근하고자 하였다. 그리하여 하중의 증가에 따른 초음파 신호를 Pitch-Catch 방식을 이용하여 20 cm의 비행거리로 측정되었고 Fig. 10에 나타낸 것과 같다. 왼쪽의 탐촉자에서 펄스를 가진하게 되며 오른쪽의 탐촉자에서 가진된 탐촉자 신호를 수신하게 되는 방식을 말한다. 제작된 웨지를 강선에 연결하여 긴장력의 증가에 따른 초음파 신호를 측정하기 위한 탐상 시험 실험구성은 Fig. 11과 같다. 이때 강선에 가해지는 긴장력을 약 10 kN 단위로 증가시킨 후 초음파 신호를 측정 및 수신하였고 이때의 긴장력의 변화값은 로드셀에 의해 각각 측정되었다.

본 논문에서 측정점간의 길이를 20cm로 결정한 것은 사전 예비 실험 등에서 수 차례 반복 실험해본 결과, 측정점의 간격이 10~30 cm 정도에서 가장 명확한 결과를 얻을 수 있었던 이유로 결정된 값이다.

#### (2) 강선A( $\phi 12.7$ mm)의 초음파 탐상 신호

강선 A의 경우 긴장력은 0~50 kN로 10 kN씩 증가시키면서 초음파 신호를 수집하였다. Fig. 12는 강



Fig. 10 Pitch-catch 방법



Fig. 11 초음파 탐상 실험구성

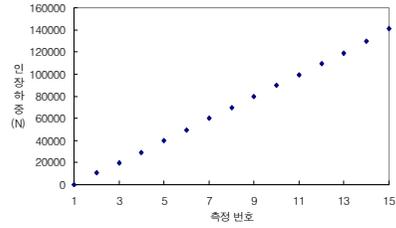


Fig. 12 강선 A의 긴장력 증가량 변화도

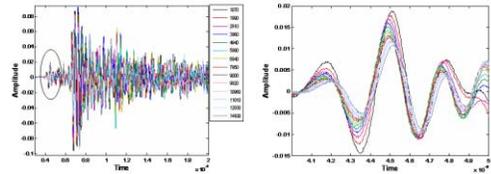
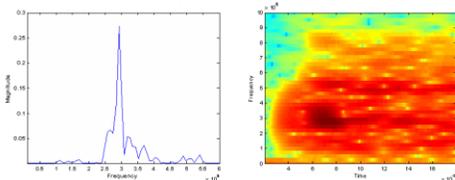


Fig. 13 강선A의 긴장력에 따른 유도초음파 수신신호

선 A에 가한 긴장력의 증가량 변화 그래프를 나타내며, Fig. 13은 증가된 긴장력에 대한 각각의 수신신호이다. Fig. 13에서 보듯이 유도초음파는 다양한 모드의 발생으로 인해 분산성이 있는 것이 그 특징이다. 본 실험에서는 긴장력에 의해 미소 길이변화에 대한 속도 변화량을 측정하여야 하기 때문에 가장 민감하고 분해능이 높은 유도초음파의 첫 번째 모드신호를 분석함으로써 하중에 대한 속도 변화값을 측정하고자 하였다.

Fig. 14(a)는 강선 A에 전파되는 유도초음파의 주파수 대역을 나타낸 것이며, Fig. 14(b)는 강선 A의 분산적 특징을 나타낸 모드의 특성을 나타낸 것이다. 본 실험에서는 0.5 MHz의 중심주파수를 사용하였지만, 유도초음파의 특성상 모드의 속도는 주파수와 재질의 두께에 의존하게 되어 다중모드가 발생하고 분산성을 지니게 되어 각 모드의 속도가 다르게 전파되어진다. 이러한 이유로 인해 신호의 주파수 대역을 확인한 결과, 0.2~0.5 MHz의 분포로 나타나고 있음을 Fig. 14(a)의 FFT(Fast Fourier Transform)를 통해 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 14(b)의 STFT(Short Time Fourier Transform)에서 보이는 것과 같이 그 주파수 대역에 두 가지 이상의 유도초음파 모드가 발생되고 있음을 확인할 수 있었고, 첫 번째 모드의 신호의 특성이 가장 빠르게 강선 A에 전파되고 있음을 확인하였다. 따라서 본 실험에서는 다중모드



(a) 주파수 스펙트럼 (b) 유도초음파의 분산모드

Fig. 14 강선 A의 주파수 스펙트럼과 유도초음파의 분산모드

중의 첫 번째 모드의 속도 변화값과 초음파의 음압세기를 이용하여 하중과의 상관관계를 분석하였다.

### (3) 강선B( $\phi 15.2$ mm)의 초음파 탐상 신호

앞서 수행한 (2)항의 강선 A에 적용한 방법을 강선 B 실험에도 같은 방식으로 수행하였다. Fig. 15는 강선 B에 가한 긴장력의 변화량 그래프를 나타내고 있으며, Fig. 16은 강선 B의 수신신호이다. 수집된 신호에서 나타나는 것과 같이 강선 B의 실험에서도 다중모드가 발생되고 있고 본 실험에서도 가장 빠른 유도초음파의 첫 번째 모드신호를 분석함으로 하중에 대한 속도 변화 값을 측정하여 보았다.

Fig. 17(a)는 강선 B에 전파되는 유도초음파의 주파수 대역을 나타낸 것이며, Fig. 17(b)는 강선 B의 분산적 특징을 나타낸 것이다. 앞서 설명한 유도초음파의 속도변화는 주파수와 재료의 두께에 의존적으로 변화하기 때문에 주파수 대역을 확인할 필요가 있고 그 결과, 강선 A와 마찬가지로 0.2~0.5 MHz의 분포를 이루고 있음을 Fig. 17(a)의 FFT를 통해 확인할 수 있었다. 긴장력에 따른 속도변화의 측정을 첫 번째 모드로 이용하게 된 것은 Fig. 17(b)의 STFT에 보여주는 것과 같이 처음의 모드가 강선 B에 가장

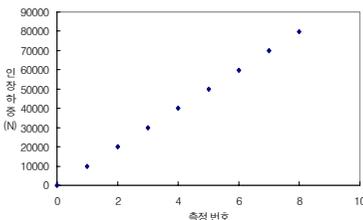


Fig. 15 강선 B의 긴장력 증가량 변화도

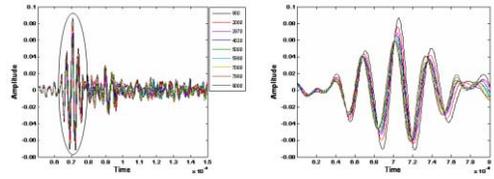
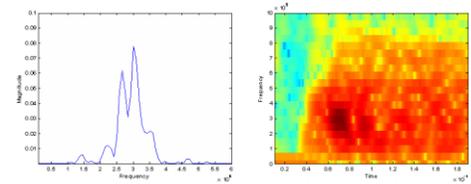


Fig. 16 강선 B의 긴장력에 따른 유도초음파의 수신신호



(a) 주파수 스펙트럼 (b) 유도초음파의 분산모드  
Fig. 17 강선 B의 주파수 스펙트럼과 유도초음파의 분산모드

빠르게 전파되고 있기 때문이다. 그리하여 본 강선 B의 실험에서도 강선 A의 실험과 같이 첫 번째 모드의 속도변화 값과 초음파의 음압세기를 이용하여 하중과의 상관관계를 분석하였다.

### 3.5 습도와 온도에 의한 초음파 속도변화

본 실험에서는 습도와 온도의 변화에 따른 초음파 속도변화를 측정하기 위하여 강선이 수중에 있을 때와 공기 중에 노출되어 있을 때, 상온(20℃)과 30℃에서의 신호를 수집하였다. Fig. 18에 나타난 것과 같이 하중에 따른 유도초음파의 신호 측정과 같은 방식의 Pitch-Catch 방법을 이용하여 수중에서 강선 A를 이용하여 측정하였고 그때의 초음파의 비행거리는 20 cm로 구성하였다. Fig. 19는 수중에 있을 때와 공기 중에 있을 때의 수신된 유도초음파 신호를 나타낸다. Fig. 19에서 보여주는 것과 같이 첫 번째 모드를 기준으로 속도의 차이를 측정하였다.

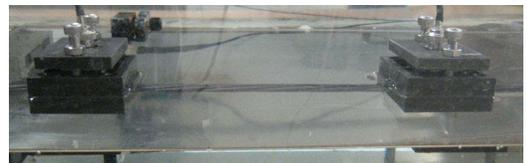


Fig. 18 수침탐상을 위한 실험구성

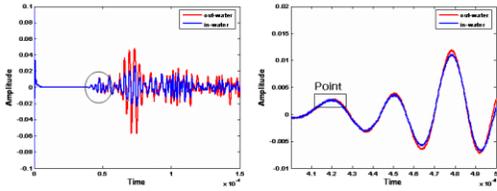


Fig. 19 수중, 공기 중에서 측정된 유도초음파 수신신호

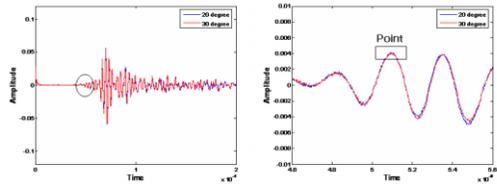


그림 20 상온 20 °C, 30 °C의 유도초음파 수신신호

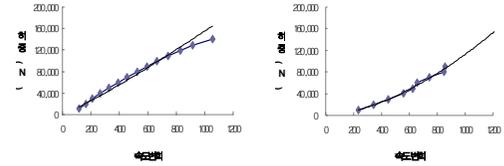
수중에 강선이 노출되어 있을 경우 초음파의 속도는 4759.6 m/s로 측정되었고 공기 중에 노출되어 있을 경우 4760.7 m/s로 측정되어 속도의 변화가 0.02 %로 속도의 변화가 거의 없음을 확인하였다. 한편, 신호의 세기가 수중에 있을 때 작아지는 것은 초음파의 특성상 Leaky Wave가 발생하여 수중으로 모드가 감소되어 발생하기 때문에 낮아지게 된다.

Fig. 20은 상온(20°C)과 30°C에서 Pitch-Catch 방식으로 측정된 신호이며, 비행거리 20cm이고 강선 B로 신호를 수집하였다. 수중에 의한 측정 방식과 동일하게 첫 번째 모드의 신호로 속도의 변화를 측정하였다. 20°C의 상온의 경우 초음파 속도가 3928.5 m/s로 측정되었고 30°C의 경우 20°C에서 측정된 속도와 같게 측정되어 그 차이가 없음을 확인하였다.

### 3.6 강선의 긴장력과 초음파 신호와의 관계

#### (1) 긴장력과 초음파 속도와의 관계

강선 A와 B의 긴장력의 증가함에 따라 유도초음파 신호를 각각 수신하였고 그 결과를 분석하였다. 3.4 절에서 언급한 바와 같이 가장 빠른 모드의 유도초음파 전파속도의 변화값을 측정하였다. 강선 A의 경우 초기 속도는 4312 m/sec 이며 강선 B는 초기속도가



(a) 강선 A (φ12.7 m) (b) 강선 B (φ15.2 m)

Fig. 21 강선 A와 B의 긴장력에 대한 초음파 속도변화량

2798m/sec 이다. 강선 A와 B의 초기 속도가 차이가 나는 이유는 강선 A와 B의 강선의 직경이 서로 달라 속도변화를 위해 측정된 해당 유도초음파의 모드의 군속도가 서로 다르기 때문이다. 또한 이러한 초기값은 50gil 이상 반복 실험한 결과로 거의 일정한 결과를 나타내고 있고, 앞의 3.5절의 내용과 같이 온도 및 습도 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. Fig. 21(a)는 강선 A에 대한 긴장력 변화에 따른 속도변화의 결과를 나타내고 있으며, Fig. 21(b)는 강선 B에 대한 긴장력 변화에 따른 속도변화의 관계를 나타내고 있다. Fig. 21에 보인바와 같이 두 강선 모두 긴장력이 증가함에 따라 속도의 변화량도 증가되고 있음을 확인하였다.

Fig. 21에서 직경이 다른 강선 A, B의 변화 양상이 상이한 이유는 큰 직경의 항복이후의 데이터가 부족하여 회귀분석을 하는 과정에서 발생된 것이나, 실제의 구조물에서는 탄성 영역의 긴장력이 주로 작용하는 점을 고려하면 실용적으로 사용하는 데에는 큰 무리가 없을 것으로 판단된다

긴장력과 속도변화 관계 그래프로 부터 강선 A의 긴장력과 초음파속도 변화값의 관계식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P = 66.151 \times \Delta v^{1.1236} \quad (8)$$

$$P = 66.151 \times (v - 4,312)^{1.1236} \text{ (kN)}$$

: φ12.7 mm 강선의 경우

여기서  $P$ 는 긴장력을 나타내며  $\Delta v$ 는 초음파 속도 변화량을 나타낸다. 또한, 강선 B의 긴장력에 대한 초음파속도 변화와의 관계도 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$P = 1.1960 \times \Delta v^{1.6561} \quad (9)$$

$$P = 1.1960 \times (v - 2,798)^{1.6561} \text{ (kN)}$$

:  $\phi 15.2$  mm 강선의 경우

(2) 긴장력과 초음파 음압세기와의 관계

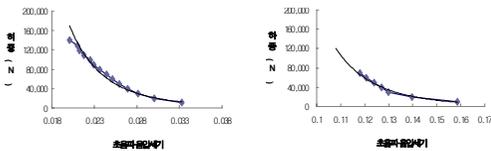
앞의 (1)항에서 긴장력과 초음파 속도변화에 대한 상관관계를 분석함으로써 초음파법에 대한 긴장력 측정방법을 제시하였다. 강선에 긴장력이 가해지게 됨에 따라 초음파의 전파속도뿐만 아니라 전파된 초음파의 세기도 달라지기 때문에 본 연구에서는 초음파 속도를 이용한 강선의 긴장력 평가방법 이외에도 초음파세기와 긴장력과의 관계를 분석하여 접근하여 보았다. Fig. 22(a)는 강선 A에 대한 긴장력에 따른 초음파 신호의 전압세기를 보이고 있으며, Fig. 22(b)는 강선 B에 대한 초음파 신호의 세기와 긴장력의 변화 선도이다. Fig. 22에서 보인바와 같이 두 강선에서 모두 긴장력이 증가함에 따라 음압의 전체적인 세기가 낮아지고 있음을 확인하였다.

긴장력과 음압세기의 변화량에 따르는 상관관계를 분석한 결과 강선 A에 대한 긴장력과 음압세기는 다음의 수식으로 나타 낼 수 있다.

$$P = 0.002710 \times V^{-5.1842} \text{ (kN)} \quad (10)$$

여기서  $P$ 는 긴장력을 나타내며  $V$ 는 초음파 음압세기를 나타낸다. 또한, 강선 B의 긴장력에 대한 초음파 음압세기와의 관계도 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$P = 0.036670 \times V^{-6.7427} \text{ (kN)} \quad (11)$$



(a) 강선 A ( $\phi 12.7$  m)      (b) 강선 B ( $\phi 15.2$  m)

Fig. 22 강선 A와 B의 긴장력에 대한 초음파 음압세기 변화량

3.7 개발된 기법의 정밀도

본 연구에서는 초음파법을 이용하여  $\phi 12.7$ ,  $\phi 15.2$  mm 강선에 대하여 긴장력을 측정하는 평가 기법을 개발하였고 초음파 속도변화에 따르는 긴장력을 측정하는 방법과 초음파 음압세기 변화에 따른 긴장력 측정방법을 제시하였다. Table 2는 강선 A( $\phi 12.7$  mm)에 대한 초음파 속도변화에 대한 긴장력 오차와 초음파 음압세기 변화에 대한 긴장력 오차를 나타내고 있으며, 초음파 속도변화에 의한 하중측정결과 평균 측정오차가 8.77 %로 산출되었고, 초음파 음압세기 변화에 의한 하중측정결과 평균 측정오차가 7.9 %로 산출되었다. 여기서 평균오차는 다음의 식(5)에 의해 계산되었다.

$$A.E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|N_f - N_{f(cad)}|}{N_f} \right) \times 100 \quad (5)$$

또한, Table 3은 강선 B( $\phi 15.2$  mm)에 대한 초음파 속도변화에 대한 긴장력 오차와 초음파 음압세기 변화에 대한 긴장력 오차를 나타내며, 초음파 속도변화에 의한 하중측정결과 평균 측정오차가 3.92 %로 산출되었고, 초음파 음압세기 변화에 의한 하중측정결과 평균 측정오차가 6.56 %로 산출되었다.

Table 2 강선 A( $\phi 12.7$  mm)에 대한 긴장력의 측정오차

측정하중 (N)	초음파 속도변화		초음파 음압세기 변화	
	예측하중	Error (%)	예측하중	Error (%)
10700	13780.4	-28.79	12393.7	-13.66
19900	20644.8	-3.74	21100.0	-5.68
29100	27107.8	6.84	29729.7	-2.12
39600	34938.5	11.77	37509.2	5.57
49400	44139.4	10.65	45219.2	9.24
59900	54022.6	9.81	53391.7	12.19
69400	63739.7	8.15	61841.6	12.22
79500	75336.9	5.23	73199.9	8.6
90000	86604.8	3.77	85584.1	5.16
99200	98042.5	1.16	94215.6	5.29
109600	111308.6	-1.55	111841.9	-2
119100	125974.1	-5.77	128251.8	-7.13
129300	140316.8	-8.52	135368.5	-4.48
141000	164919.4	-16.96	170577.1	-17.34
평균오차(%)		8.77		7.9

Table 3 강선 B(φ15.2 mm)에 대한 긴장력의 측정오차

인장하중 (N)	초음파 속도변화		초음파 음압세기 변화	
	예측하중	Error (%)	예측하중	Error (%)
9800	10188.8	-3.96	9071.5	7.43
20000	19019.0	4.90	21310.5	-6.55
29700	29345.6	1.19	34599.3	-16.5
40200	42432.7	-5.55	40597.4	-0.99
50000	50823.7	-1.65	47836.5	4.33
59900	55343.3	7.60	56868.8	5.06
70000	68181.2	2.60	66436.3	5.09
평균오차(%)	3.92		6.56	

본 절에서는 긴장력에 대한 두 가지 평가방법의 결과에 대하여 오차율을 측정하였지만 현장적용하기 위한 높은 정밀성과 신뢰도가 떨어진다. 그러나 이러한 결과를 통해 초음파법을 이용한 긴장력 측정에 대한 평가 방법을 제시함으로써 그 가능성을 확인하였으며 향후 추가적인 긴장력 평가를 위한 제시된 방법의 알고리즘 보완과 초음파 탐상 시스템의 보완을 통해 정밀도와 신뢰성이 높은 연구를 통해 접근하는 시도가 필요할 것이다.

#### 4. 결론

외부 강선의 긴장력 측정 기법은 국내의 경우, 거의 전무한 연구 실적을 가지고 있는 실정으로 본 연구의 목적은 강선의 긴장력을 유도 초음파법을 이용하여 측정하는 것이다. 이를 위하여 시험용 웨지 및 측정 시스템을 설계·제작하여 강선에 가하여지는 긴장력 변화에 따른 초음파의 특성을 분석하여 그 상관관계를 도출하고, 이를 기반으로 초음파 특성 변화로부터 강선에 가하여지는 긴장력을 측정할 수 있는 기법을 개발하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 외부강선 전용의 긴장력 측정이 가능한 초음파 탐촉자 및 측정 시스템 제품을 개발 및 제작하였다.
- 2) 제작된 시스템을 이용하여 긴장력과 속도변화값의 관계식을 다음과 같이 구하였다.

$$P = 66.151 \times (v - 4,312)^{1.1236} \text{ (kN)}$$

: φ12.7 mm 강선의 경우

$$P = 1.1960 \times (v - 2,798)^{1.6561} \text{ (kN)}$$

: φ15.2 mm 강선의 경우

- 3) 제작된 시스템을 이용하여 긴장력과 음압의 관계식을 구하였으나, 음압은 미세한 온도와 습도에 대해서도 변동 폭이 크게 나타난 이유로 현장 적용성이 떨어지는 것으로 판단된다.
- 4) 강선 A(φ12.7 mm)에 대한 초음파 속도변화에 대한 긴장력 오차는 약 8.77 %로 산출되었고, 강선 B(φ15.2 mm)에 대한 긴장력 오차는 약 3.92 %로 산출되어 어느 정도의 현장 적용성을 가지고 있는 것으로 사료된다.

#### 감사의글

본 연구의 일부는 SISTeC(R11-2002-101-01005-0)의 지원에 의하여 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 신주환, 박준상, 이민구, 김상효, 황학주, "케이블의 장력측정에 관한 연구", 대한토목학회 1993년도 학술발표회 개요집(I), 1993.
2. 김기영, 고만기, 이인원, "주파수 분석을 이용한 케이블의 장력 측정", 대한토목학회 1999년도 학술발표회 개요집(I), 1999.
3. 윤자걸, 손진, 장승필, "교량 케이블의 장력 측정에 관한 연구", 대한토목학회 1999년도 학술발표회 논문집(I), 1999.
4. 이정석, 김도균, 박광림, "진동법을 이용한 케이블장력 산정사례", 대한토목학회 2001년도 학술발표회 논문집, 2001.
5. Harajli, "Strengthen of Concrete Beams by External Prestressing", PCI, Structural Journal, Nov.-Dec., 1993, pp. 76-88.
6. Muller, J. and Gautier, Y., "Ultimate Behavior of Precast Segmental Box Girders with External Tendons", ACI SP-120: External Prestressing in Bridges, ACI, Detroit, Mich., 1990, pp. 355-374.
7. Sung Jin Song, Young H. Kim, Joon Soo Park, Hyung Ju Yu, Yong Moo Cheong, Hyun Kyu Jung and Dong Hun Lee, "Prediction of Ultrasonic Guided Wave Dispersion in Bent

- 
- Pipes Using Finite Element Analysis and 2-D Fourier Transform”, Key Engineering Materials, Vol. 297-300, November 2005, pp. 2065-2070.
8. Young H. Kim, Sung-Jin Song and Jeong-Ki Lee, “Technique for Measurements of Elastic Wave Velocities and Thickness of Solid Plate from Access on Only One Side”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 44, No. 8, 2005, pp. 5240-5243.
9. Sung-Jin Song, Hyeon Cho, Joon-Soo Park, Young H. Kim, Soo Yong Lim, Nam-Gyun Yun and Young Joo Park, “Ultrasonic Measurement of Gap Size in an Epoxy Layer Between a Steel Sheet and Fiber Reinforced Plastics”, Key Engineering Materials, Vols. 270-273 2004, pp. 314-319.
10. P. Rizzo, “Ultrasonic Wave Propagation in Progressively Loaded Multi-Wire Strands”, Springer Boston, Vol. 46, No. 3, 2006. 6, pp. 297-306.
- 금행 (접수일자 : 2007년 5월 29일)