

마그네토스트릭션 센서를 이용한 굽힘파의 비접촉 측정 및 이상 진단

Diagnosis and Non-contact Measurement of Bending Waves by Magnetostrictive Sensors

김익규*·김윤영**

Ik Kyu Kim and Yoon Young Kim

Key Words : magnetostriction(마그네토스트릭션), non-contact(비접촉), bending wave(굽힘파), diagnosis(진단), Timoshenko, CWT(연속웨이블렛변환)

ABSTRACT

This work is concerned with the damage size estimation by using propagating bending wave signals in a beam. For the accurate estimation, we apply the continuous wavelet transforms to the incident waves and the reflected waves from a small damage in a long cylindrical beam. In particular, we propose to use the ratio of the magnitude of the incident and reflected waves along the ridges in the wavelet-transformed time-frequency plane. This technique is applied to the signals measured by non-contact magnetostrictive sensors. Experimental results indicate that the present method using the magnetostrictive sensor can be quite effective for accurate damage size estimation with simple measurements.

이러한 방법으로 결함의 크기를 추정할 수 있다는 타당성을 제시하기 위해 1 차원 Timoshenko 보 이론을 이용하여 굽힘파의 전달, 반사 현상을 모델링 하였다.

1. 서론

구조 결함 진단을 위해서 여러 방법이 사용되어 왔는데, 각 방법 마다 고유한 장단점을 갖고 있다.⁽¹⁾ 본 논문에서는 근래 각광 받고 있는 마그네토스트릭션 센서의 비접촉 특성을 이용하여 굽힘파를 측정하고, 측정된 신호로부터 결함을 진단하는 기법을 연구하고자 한다.

마그네토스트릭션 센서는 다른 비접촉 방식과 마찬가지로 고온의 물체나 회전체 등에서도 이용할 수 있다는 장점 이외에 제작이 용이하다는 장점을 갖는다. 예를 들어, 본 연구에서 대상으로 하고 있는 보 구조물의 경우에는 원형 코일과 편향 자석만으로 마그네토스트릭션 센서의 주요부를 구성할 수 있다.

본 연구의 실험 및 분석 절차는 다음과 같다. 먼저 보에 충격을 가하여 굽힘 탄성파를 발생시키고, 이 파가 결함에 부딪히기 전후의 신호를 마그네토스트릭션 센서로 계측한다.^(2,3) 이렇게 측정된 신호를 웨이블렛 변환한 후, 시간-스케일(또는 시간-주파수)공간에서 능선 해석을 함으로써 결함의 위치와 결함의 크기를 추정하고자 한다. 특히 이 센서에 의해 검출된 신호가 스트레인지지에 의해 검출된 신호보다 결함진단을 하기에 더 용이하다는 사실을 보이고자 한다.

2. 굽힘파의 측정

빌라리 효과(Villari effect)란 자성재료가 힘을 받을 때 자기적인 상태가 변화하는 현상⁽⁴⁾을 말하고, 자성재료 내부의 자속 밀도의 변화에 의해 기계적 변형이 생기는 현상을 주울 효과(Joule effect)라고 하는데, 통상 이 두 현상을 합쳐 마그네토스트릭션 효과라고 한다.⁽⁵⁾

본 연구에서 Lee⁽⁶⁾가 제시한 측정 방법을 이용하여 원형 단면을 갖는 보에서 마그네토스트릭션 센서(여기서는 보를 감싸는 코일 센서)를 이용하여 굽힘 탄성파를 측정한다.

2.1 측정원리

센서가 설치되는 보 위치에 응력이 발생하면 그 부근에 자기적인 상태가 변하게 된다. 이러한 자기장의 변화는 보에 감긴 원형 코일의 양단에서의 전압차 V 로 측정할 수 있는데, 이것을 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁷⁾

$$V(x,t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -N\frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : kik@idealab.snu.ac.kr
Tel : (02)880-1688, Fax : (02)872-5431

** 서울대학교 기계항공공학부 교수, 멀티스케일설계연구단장

여기서 x 는 보의 길이 방향의 좌표이며, t 는 시간을 나타낸다. 그리고 Φ 는 측정하고자 하는 보의 단면에서의 자속을 나타낸다. 자속밀도 ϕ 는 $\int BdA$ 로 쓸 수 있으므로, 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$V(x,t) = -N \frac{d}{dt} \int_A BdA \quad (2)$$

식 (2)에서 B 는 유도자기장의 자속밀도이며, A 는 코일내부의 단면적, N 은 코일이 감긴 횟수이다.

응력과 자기장의 변화의 관계를 나타내는 빌라리 효과는 다음과 같은 간단한 모델로 기술할 수 있다.⁽⁸⁾

$$B = \mu^\sigma H + q\sigma \quad (3)$$

식(3)에서 μ^σ 는 일정한 응력에서의 투자율이며, q 는 마그네토스트릭션 효과를 나타내는 계수이며 H 와 σ 는 가해지는 자기장의 세기, 그리고 응력을 나타낸다.

얇은 보에서 굽힘파가 진행하는 경우, 축의 단면방향으로 응력분포가 다음과 같이 선형적으로 분포한다고 가정할 수 있다.

$$\sigma_x = -Ey \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} \quad (4)$$

여기서 E 는 종탄성계수, θ 는 보의 단면의 법선이 회전하는 각을 나타내고, y 는 x 에 수직인 단면 방향의 좌표이다.

굽힘파를 측정하기 위해서는 q 의 y 에 대한 분포가 식(4)처럼 선형적이 되도록 외부에서 자기장 H 가 가해져야 한다. 비선형성과 히스테리시스를 무시할 수 있다고 보고 q 를 다음과 같이 y 의 함수로 놓으면

$$q(x,y) = c_0(x) + c_1(x)y + c_2(x)y^2 + \dots \quad (5)$$

$V(x,t)$ 가 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$V(x,t) \approx EIc_1(x) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t \partial x} = c_1(x) \frac{\partial M}{\partial t} \quad (6)$$

식(6b)에서 M 은 $EI \frac{\partial \theta}{\partial x}$ 로 보에 걸리는 굽힘모멘트를 나타낸다.⁽⁹⁾ $I = \int_A y^2 dA$ 로 단면의 관성모멘트이다.

2.2 실험장치 개요

Fig. 1은 본 연구의 대상인 결함 있는 보에 대한 실험 장치의 개략도이다. 보의 측면을 압축공기를 이용하여 발사체로 가격하여 굽힘파를 발생시킨다. 이렇게 발생한 굽힘파가 센서 방향으로 전달되고, 또한 결함에서 반사되어 돌아오는 신호를 측정한다. 실험에 사용한 원형 보의 지름은 10 mm, 길이는 2000 mm이고 재질은 SM45C이다. 결함의 깊이는 세가지 경우($h = 1.5$ mm, 3 mm, 4.5 mm)에 대해 실험을 하였다. 결함의 폭 d 는 2 mm이다. 충격을 가한 지점과 센서의 거리 L_i , 센서와 결함이 있는 지점과의 거리 L_c 가 모두 150 mm이다. 그리고 압축공기를 이용하여 발사체가

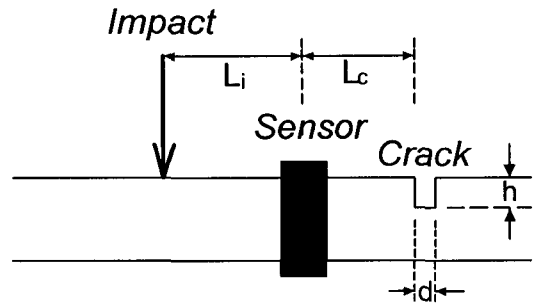


Fig. 1 Configuration of the cracked beam

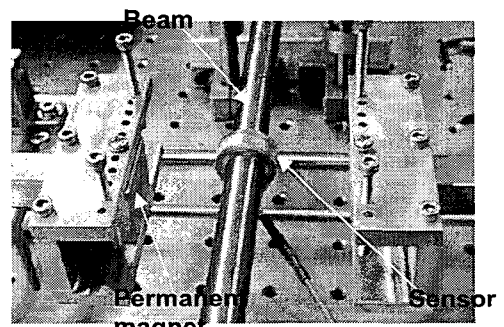


Fig. 2 Experimental arrangement

보의 측면을 타격함으로써, 굽힘파가 발생되도록 하였다.

Fig. 2 는 마그네토스트릭션 센서의 코일 및 편향자기장을 보여주고 있다. 앞서서도 설명하였듯이, 외부에서 가해지는 자기장 H 에 의한 $q(x,y)$ 의 y 분포가 $c_1(x) \neq 0$ 가 되어야만 굽힘파를 측정할 수 있다. Fig. 2 에 있는 편향자기장 장치에 대한 자세한 설명과 타당성은 참고문헌 [6]을 참조하기 바란다.

이 센서 코일에서 측정된 신호는 Stanford Research System 사의 SR560 예증폭기(Preamplifier)에서 증폭된 후 Lecroy 사의 3910 오실로스코프를 거쳐 PC 로 저장된다. 신호의 증폭 대역폭은 0.1k~300kHz 이며 20Ms/s 로 샘플링 하였다.

2.3 굽힘파의 측정

Fig. 3 은 Fig. 1 에 있는 결함이 있는 보에서 충격에 의해 발생된 탄성파가 센서를 통과하여 결함에 의해 일부 파가 반사된 신호를 보여 주고 있다. (이것에 대한 자세한 설명은 3.2 절에서 수행함). 이것은 식(6)로 주어지는 전압에 해당하는 신호로 물리적으로는 스트레인을 시간에 대해 미분한 것과 같은 형태를 갖게 된다.

Fig. 4 는 Fig. 3 에서 사용된 것과 동일한 실험 조건과 위치에서 스트레인게이지로 측정된 스트레인 신호를 보여 주고 있다. 향후, Fig. 3 의 신호와 Fig. 4 의 신호를 이용하여 결함 진단을 수행해 보고, 그 결과를 통해 마그네토스트릭션 센서가 결함 진단에 더욱 유용하다는 사실을 보이도록 한다.

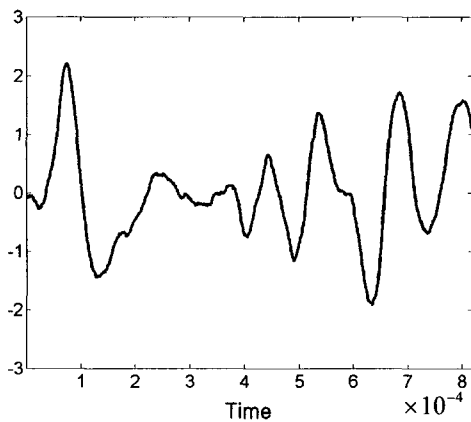


Fig. 3 The direct measurement of an impact-excited bending wave by the magnetostrictive sensor in a beam shown in Fig. 1 with $d=10$ mm, $h=3$ mm

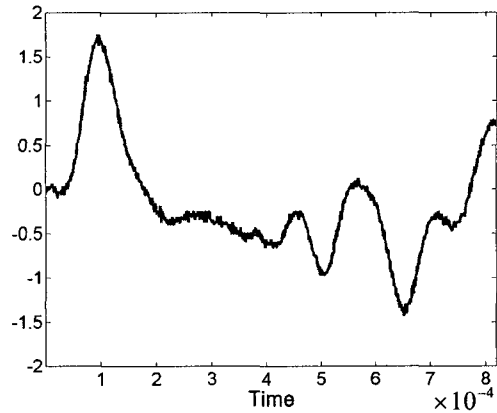


Fig. 4 The measurement of the strain wave signal at the same location in the same test beam used for Fig. 3

3. CWT 를 이용한 결함 신호 분석

3.1 연속웨이블릿(CWT)

이 절에서는 마그네토스트릭션에 의해 측정되는 신호를 분석하는 방법에 대해 간단히 설명하고자 한다.

본 실험에서 측정되는 신호는 짧은 시간 동안 주파수 성분이 빠르게 변화하는 특성을 갖고 있기 때문에 가보(Gabor)웨이블릿을 모웨이블릿 $\psi(t)$ 로 하는 연속웨이블릿 변환기법을 신호 분석 도구로 사용하고자 한다. 이 방법에 대한 이론적인 배경은 Mallet⁽¹⁰⁾를 참고하고, 보 등과 같은 구조물에서 가보웨이블릿을 사용해야 하는 이론적 근거에 대해서는 Kim 등⁽¹¹⁾을 참고하기 바란다.

어떤 신호 F 가 주어졌을 때, 이를 모웨이블릿 ψ 로 연속 변환하는 연속웨이블릿(CWT)⁽¹⁰⁾은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$WF(u,s) = \langle F, \psi_{u,s} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt \quad (7)$$

여기서 $\psi_{u,s}$ 는 모웨이블릿을 시간축상에서 u 만큼 이동하고, 크기를 s 만큼 증폭시킨 함수이다.

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left(\frac{t-u}{s} \right) \quad (8)$$

본 연구에서 사용하는 가보 웨이블릿 ψ 는 다음과 같이 정의되며,

$$\psi(t) = g(t)e^{i\pi t} \quad (9)$$

$$g(t) = \frac{1}{(\sigma^2\pi)^{1/4}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

여기서 가보형상지수 $G_s = \eta\sigma$ 가 $G_s = 3.5$ 인 가보웨이블릿을 본 연구에서는 사용하였다.⁽¹¹⁾ 참고로 스케일 s 와 주파수 f 와의 관계는 다음과 같다.

$$f = \frac{5f_s}{2\pi s} \quad (11)$$

식(11)에서 f_s 는 샘플링주파수이다.

3.2 결함 신호 분석

Fig. 3 의 신호에 대한 연속웨이블릿 변환 결과를 시간-스케일 공간에서 등고선으로 나타낸 것이 Fig. 5 이다. 그리고 Fig. 5 에서 각 스케일에서 극대값들을 연결하여 구한 능선을 R_1 과 R_2 으로 표시하였다. 여기서 R_1 은 충격에 의해 발생한 굽힘파가 센서를 통과할 때 계측된 신호에 의한 능선이며, R_2 는 결함에 의해 되돌아 온 반사 굽힘파 신호에 의한 능선이다.

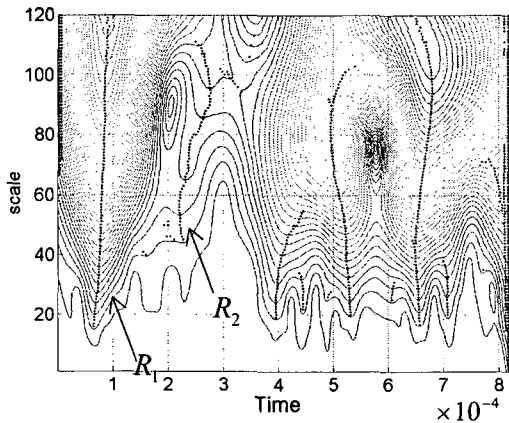


Fig. 5 The contour plot of CWT for the signal shown in Fig. 3

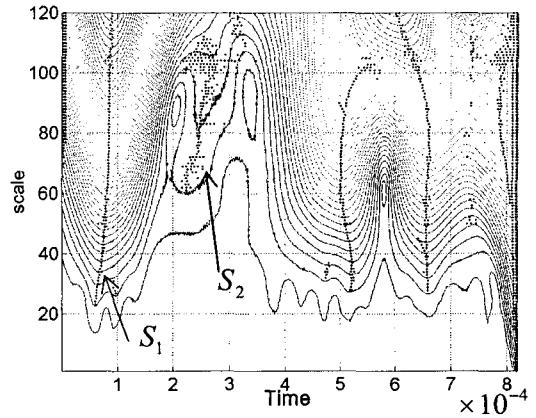


Fig. 6 The contour plot of CWT for the signal shown in Fig. 4

Fig. 5 와 Fig. 6 은 각각 마그네토스트릭션 센서에서의 신호, 스트레인게이지에서의 신호를 CWT 한 결과이다. Fig. 5 와 Fig. 6 에서 보는 것과 같이 마그네토스트릭션 센서에서의 신호의 시간-주파수 분석 결과도 탄성과 측정에 있어서 검증된 센서인 스트레인게이지에서의 결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

Fig. 6 은 Fig. 4 에 있는 스트레인 신호를 CWT 한 후, 그 능선을 찾아 본 결과를 보여 주고 있다. S_1 은 R_1 과 마찬가지로 충격에 의해 센서 쪽으로 전파한 굽힘파에 대한 능선을 잘 보여 주고 있다. 하지만 결함에 의해 반사된 파에 대한 능선 S_2 를 R_2 만큼 명확히 찾아 내기 어렵다. 이것은 마그네토스트릭션 센서가 스트레인게이지보다 노이즈에 덜 민감하기 때문에, 이와 같은 종류의 진단 문제에서는 마그네토스트릭션 센서가 훨씬 효과적이라는 사실을 보여주는 것이다.

Fig. 5 와 Fig. 6 에 있는 능선 정보를 이용하여 결함의 위치를 찾아 내는 방법은 Kim 등⁽¹¹⁾에 의해 제시된 바 있다. 지면상, Fig. 5 와 Fig. 6 의 결과로부터 결함의 위치를 추정하는 것은 생략한다.

이제 마그네토스트릭션 센서 신호를 이용하여 결함의 크기를 평가할 수 있는 가능성을 살펴보고자 한다. 이를 위해 결함의 깊이 h 가 1.5 mm, 3 mm, 4.5 mm 인 보를 대상으로 충격 실험을 하여 마그네토스트릭션 센서로 굽힘파를 측정하였다. 결함의 크기와 계측된 신호의 특성 관계를 규명하기 위해, 계측된 신호를 CWT 한 $WF(u, f)$ 의 크기를 시간 u 와 주파수 f 의 평면 위에 3 차원으로 그려보았다. (Fig. 7 참조) Fig. 7 은 $h = 4.5$ mm 인 경우에 대한 결과이다. 또한 능선의 위치를 구하여 그림에 R_1 과 R_2 로 표시하였다.

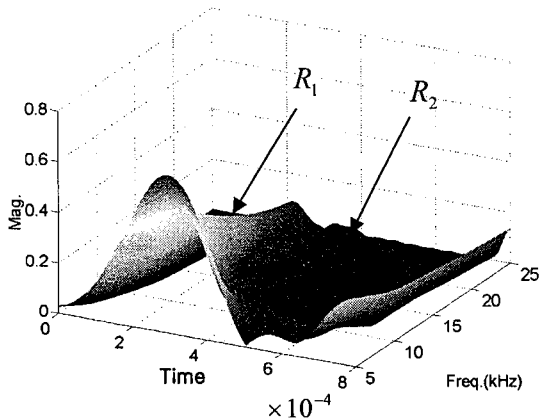


Fig. 7 The time-frequency plot of $|WF(u,s)|$, where F is the measured signal by the magnetostrictive sensor for $h=4.5$ mm

Fig. 7의 두 능선인 R_1 과 R_2 를 따라 구한 주파수별 $|WF|$ 의 크기는 측정된 신호 F (여기서는 전압 출력 V)의 크기에 비례한다. 따라서 R_1, R_2 상의 특정 주파수 \hat{f} 에서의 WF 의 크기는 굽힘 모멘트의 시간 변화율이 된다(식 (6)참조). 그러므로 $WF_{R_1}|_{at f=\hat{f}}$ 와 $WF_{R_2}|_{at f=\hat{f}}$ 의 비는 충격 점에서 센서로 전파하는 입사파 성분의 크기와, 결함에서 센서로 반사되어 돌아오는 반사파 성분의 크기 사이의 비가 된다. Fig. 8에서 여러 h 값을 갖는 보에서 측정된 신호를 연속웨이블렛 변환을 하고, 그 결과로부터 $|WF|_{R_2}/|WF|_{R_1}$ 를 주파수 f 의 함수로 그려 보았다.

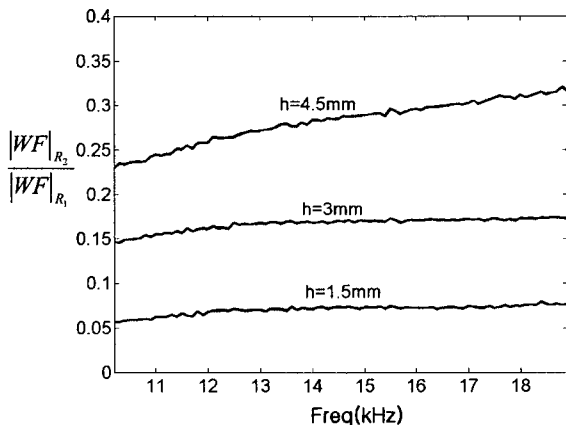


Fig. 8 The ratio of $|WF|_{R_2}$ to $|WF|_{R_1}$ as a function of frequency for different value of h

Fig. 8의 결과를 통해 결함의 크기가 작아짐에 따라 돌아오는 반사파의 크기가 줄어든다는 것을 확인할 수 있고, 비율 $|WF|_{R_2}/|WF|_{R_1}$ 이 주파수에 대해 일정하지 않다는 사실을 알 수 있다.

4. $|WF|_{R_2}/|WF|_{R_1}$ 에 대한 타당성 검증

Fig. 8의 타당성을 확인하기 위해서는 3차원 탄성 이론을 적용해야 하지만, 수치계산 과정이 그리 용이하지 않다. 더욱이 Fig. 8에서 나타난 현상을 물리적으로 쉽게 파악하기 위해서는 3차원 탄성이론 보다는 1차원 Timoshenko 보 이론을 이용하는 것이 좋다.

지금부터 1차원 Timoshenko 보 이론을 이용하여 $|WF|_{R_2}/|WF|_{R_1}$ 를 근사적으로 평가해 보고자 한다. 이 평가의 주 목적은 i) Fig. 8의 $|WF|_{R_2}/|WF|_{R_1}$ 의 주파수에 따른 거동이 타당한지, ii) 그리고 Fig. 8과 같은 $|WF|_{R_2}/|WF|_{R_1}$ 를 이용하여 과연 결함의 크기 h 를 평가할 가능성이 있는지를 밝히는 것임을 다시 한번 강조하고자 한다.

Fig. 9는 결함이 있는 보에서 굽힘파가 입사, 반사하는 파동을 개념적으로 표시한 것이다.

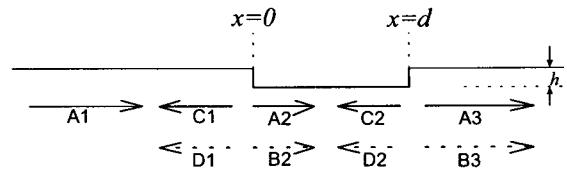


Fig. 9 Incident, reflected and transmitted waves in a beam with a crack of length d and depth h

Fig. 9에서 A_1 은 충격에 의해 발생되어 균열 부위로 입사하는 굽힘파를 나타낸다. 그리고 A_2 와 A_3 는 오른쪽으로 전달되는 이동파(traveling wave)를, B_2 와 B_3 는 오른쪽으로 소멸하는 소멸파(evanescent wave)를, 그리고 C 와 D 는 각각 왼쪽으로 반사해 나가는 이동파와 소멸파를 나타낸다.

Fig. 9에 있는 보를 대상으로 Doyle⁽¹²⁾의 분석 절차를 적용하여(지면상 자세한 과정은 생략함) 입사하는 파와 결함에 의해 반사되는 파의 크기의

비 $|WF|_{R_2}/|WF|_{R_1}$ 를 이론적으로 구해서 그 결과를 Fig. 10 에 제시하였다.

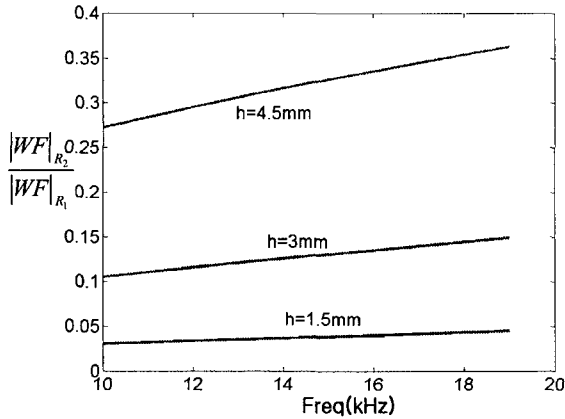


Fig. 10 The theoretical ratio of $|WF|_{R_2}$ to $|WF|_{R_1}$ by the Timoshenko beam theory

Fig. 8 과 Fig. 10 의 결과를 비교해 보면 주파수에 대한 비율의 거동이 간단한 1 차원 보 이론에 의한 것과 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 그리고 결함의 크기가 커짐에 따라 돌아오는 반사파의 비율이 커진다는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 8 에 있는 결과가 물리적으로 타당한 현상임을 확인할 수 있다. 또한, 향후 신경망이론 등과 같은 판별 이론을 본 연구 기법에 결합하면 여러 종류의 결함을 효과적으로 진단할 수 있는 가능성이 충분히 있다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 마그네토스트릭션 센서를 통해 비접촉으로 측정된 굽힘파를 이용하여 보의 결함을 찾아내는 연구를 수행하였다. 측정된 마그네토스트릭션 센서의 신호는 접촉식 스트레인 게이지 신호에 비해 노이즈에 덜 민감한 것으로 나타나, 작은 결함에 의한 탄성파의 반사도 잘 찾아낼 수 있었다. 측정된 신호를 가보 연속 웨이블릿으로 변환하고 변환된 시간-주파수 공간에서의 능선의 크기를 이용하여 결함의 크기도 평가할 수 있음을 제시하였다.

본 연구의 대상인 굽힘파 분석 기법은 종파, 비틀림파를 보와 같은 웨이브 가이드를 입사시킬 때, 임의 형상에 결함에서 반사될 수 있는 굽힘파를

분석하는데 매우 유용할 것이다. 본 연구 결과를 확장하여 종래의 종파/비틀림파를 이용하는 진단 방법과 결합시키면, 임의의 결함의 형상을 유도 초음파를 이용하여 잘 평가할 수 있는 방법을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) H. Kwun and K. A. Bartel, 1998, "Magnetostrictive sensor technology and its application", *Ultrasonics* 36, pp. 171~178
- (2) H. Kwun and K. A. Bartel, 1995, "Experimental observation of wave dispersion in cylinder shell via time-frequency analysis", *J. Acoust. Soc. Am.* 97, pp. 3905~3907.
- (3) H. Kwun and C. M. Teller, 1994, "Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional, and flexural waves in a rod", *J. Acoust. Soc. Am.* 96, pp. 1202~1204.
- (4) E. Villari, 1865, "Change of magnetization by tension and by electric current", *Ann. Phys. Chem.* 126, pp. 87~122
- (5) D. C. Jiles, 1995, "Theory of magnetomechanical effect", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.28, pp. 1537~1546
- (6) H. Lee, 2001, "Design and Analysis of a Mode Selectable stress wave sensor using the Villari effect", Ph. D. thesis, Seoul National University.
- (7) R. C. Williams, 1959, "Theory of magnetostrictive delay lines for pulse and continuous wave transmission", *IEEE Trans. on Ultrason. Eng.* UE-7, pp. 16~38
- (8) D. Jiles, 1991, Introduction to magnetism and magnetic materials, *Chapman & Hall*, London
- (9) Y. Y. Kim, S. H. Cho and H. Lee, 2001, "Application of magnetomechanical sensors in modal testing" *J. of Sound and Vibration*, submitted
- (10) S. Mallat, 1998, A wavelet tour of signal processing, *Academic press*, London.
- (11) Y. Y. Kim, E. H. Kim, 2001, "Effectiveness of the continuous wavelet transform in the analysis of some dispersive elastic waves", *J. Acoust. Soc. Am.* 110(1), pp. 86~94
- (12) J. F. Doyle, 1997, Wave propagation in structures, *Springer*, New York.
- (13) M. T. Martin and J. F. Doyle, 1996, "Impact force identification from wave propagation response", *Int. J. Impact Engng.* Vol18, pp. 65~77