

〈 논문 〉

자기변형 패치 배열을 이용한 회전축에서의 비틀림파 발생 및 감지

조승현* · 한순우** · 박찬일* · 김윤영†

(2005년 12월 1일 접수, 2006년 2월 8일 심사완료)

Generation and Detection of Torsional Waves in a Rotating Shaft Using a Magnetostrictive Patch Array

Seung Hyun Cho, Soon Woo Han, Chan Il Park and Yoon Young Kim

Key Words : Torsional Wave(비틀림파), Rotating Shaft(회전축), Patch Array(패치 배열)

Abstract

A new magnetostrictive patch array transducer for the generation and detection of torsional waves is developed for the on-line health monitoring of rotating shafts. Even though the torsional wave is useful in nondestructive evaluation due to its non-dispersive property, a transducer generating torsional waves in rotating shafts has not been developed so far. In this research, a torsional wave transducer using the magnetostrictive effect is newly developed. By bonding an array of magnetostrictive rectangular patches on the outer surface of the shaft at an oblique angle of 45° and encircling the array by a solenoid coil, we have successfully generated and measured torsional waves by the developed transducer. Several experiments were carried out to check the transducer performance.

1. 서 론

회전축에 존재하는 결함을 회전 중에 검출하는 것은 매우 어렵지만 중요한 과제이다. 축의 결함 진단을 위한 지금까지의 연구를 요약해 보면, 근접 센서(proximity sensor)등을 사용하여 축의 회전 궤적(orbit)을 측정하고 이로부터 결함 유무를 판별하는 방법,^(1,2) 축계의 베어링 하우징 등에 가속도계 등을 부착하여 신호의 주파수 특성을 분석하는 방법^(3,4) 등을 들 수 있다. 그러나 기존의 방식을 이용하는 경우에는 측정 신호의 분석에 일정

수준 이상의 숙련도가 요구되며, 또 간접 측정 방식으로 인해 축에 존재하는 미소한 결함을 추출하기가 어렵다.

초음파 탐상 방식은 결함 검출에 있어서 가장 효과적인 방법이라 할 수 있다. 그러나 기존의 초음파 탐촉자(probe)는 측정 대상과 접촉해야 하므로 운전 중인 축의 결함 검출에는 적합하지 않다. 최근에는 레이저를 이용하여 회전축의 진동을 비접촉으로 측정하는 기술이 각광받고 있으나⁽⁵⁾ 아직 레이저나 다른 어떠한 방식으로도 회전축에서 초음파를 발생시킨 사례는 찾기 힘들다.

비접촉으로 초음파를 발생시키고 감지할 수 있는 다른 방식으로 자기 변형 현상(magnetostrictive effect)의 이용을 고려해 볼 수 있다. 이 현상은 철 니켈 등의 자성체에 적절한 자기장을 인가하면 자성체가 기계적 변형을 일으키는 현상, 또는 그 역현상을 의미한다.^(6,7) Kim 등⁽⁸⁾은 이러한 자기 변형 현상을 이용하여 회전 중인 축에 전파하는 종파(longitudinal wave)를 비접촉으로 검출하여 회전축

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부, 정밀기계설계공동연구소, 멀티스케일 설계연구단
E-mail : yykim@snu.ac.kr
TEL : (02)880-7130 FAX : (02)871-5431

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, 멀티스케일 설계연구단

에 존재하는 결함을 탐지해 낸 바 있다. 그러나 종파는 전파됨에 따라 일정 주파수 구간을 제외하고는 분산(dispersion) 현상에 의해 그 형상이 왜곡되므로,⁽⁹⁾ 결함에서 반사된 신호를 구별하기 위해 별도의 신호 처리가 필요한 경우가 많아서 분산이 없는 비틀림파를 사용하는 것이 더욱 바람직하다.

잘 알려진 바와 같이 비틀림파(torsional wave)의 첫 번째 모드는 전 주파수 구간에 걸쳐 파의 속도가 동일하여 분산 현상이 나타나지 않는다. 따라서 비틀림파를 결함 검출에 사용한다면 결함에서 반사된 초음파의 왜곡이 거의 나타나지 않으므로 효율적인 탐상이 가능해진다.⁽¹⁰⁾ 그러나 회전축에서 비접촉으로 비틀림파를 발생시킨 연구는 현재까지 전무한 실정이다.

최근 자기 변형 현상을 이용하여 배관에서 비틀림파를 발생시키고 감지하는 연구 결과가 제시되었다. Kwun⁽¹¹⁾은 니켈 스트립(strip)을 배관의 원주 방향으로 부착하고 스트립에 자석을 문질러 예자화(pre-magnetization)시킨 후, 축 방향으로 자기장을 인가하여 비틀림파를 발생시키고 감지하는 연구 결과를 제시한 바 있으며, 최근 Kim 등⁽¹²⁾은 예자화가 필요 없이 비틀림파를 발생시킬 수 있는 새로운 방식을 제안하였다. 그러나 기존의 방법은 속이 찬 실축 등에서는 충분한 출력을 발생시키지 못하기 때문에 주로 배관류의 초음파 탐상에 적합하다.

본 논문에서는 Kim 등에 의해 제시된 방식을 개선하여 회전중인 축에서도 비틀림파를 발생시키고 감지할 수 있는 고효율 비틀림 초음파 트랜스듀서 구성을 제안하고자 한다. 본 연구에서 제시하고자 하는 방식은 종파, 굽힘파 등의 다른 초음파 모드를 배제한 채 비틀림파만을 발생시킬 수 있으며 실축에서도 전과 가능한 큰 크기의 비틀림파를 효율적으로 발생시킬 수 있다는 특징이 있다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 본 연구에서 제안하는 방식의 이론적인 배경을 설명하고 실험 장치 및 방법에 대해 기술한 후 기존의 방식과 비교하여 제안된 방식의 타당성을 검증하였으며, 이를 바탕으로 회전축에서 비틀림파를 발생시키고 감지한 결과를 제시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 비틀림파의 전파 양상

외경 a 인 실축에서 비틀림파가 전파할 경우, 이 비틀림파의 각주파수(angular frequency) ω 와 파수(wavenumber) k 는 특정한 관계를 갖는다. 실

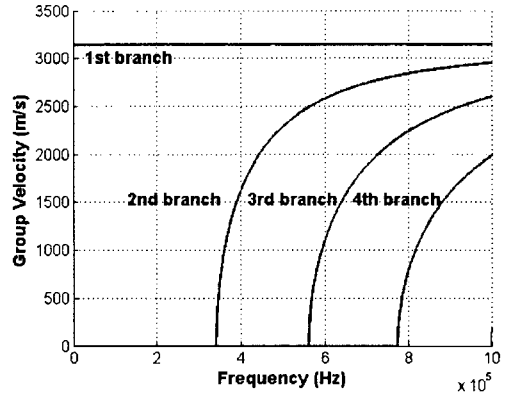


Fig. 1 Group velocity profile for a solid steel shaft ($a=15$ mm)

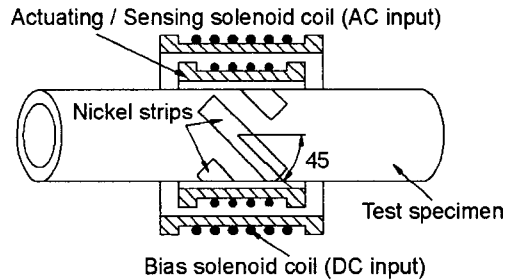


Fig. 2 The method suggested by Kim *et al.*⁽¹²⁾ for the generation and detection of torsional waves in pipes

축의 전단계수를 G , 밀도를 ρ 라 할 때 전단파 속도 c_T 는 $c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ 로 결정되며, ω 와 k 는

$\beta = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2$ 의 관계를 갖는다. 외경 a 인 실축에서 β 는 다음의 식으로부터 구할 수 있다.⁽¹³⁾

$$\beta a J_0(\beta a) - 2J_1(\beta a) = 0 \quad (1)$$

여기에서, J_0 및 J_1 은 각각 1 종 0 차 및 1 차 베셀(Bessel) 함수이다. 식 (1)에서 βa 의 값을 구할 수 있으며 이 값과 실축의 외경 a 로부터 ω 와 k 의 관계식을 구할 수 있다. 비틀림파의 주파수에 따른 전파속도인 군속도(group velocity) c_g 는

$c_g = \frac{d\omega}{dk}$ 와 같이 계산할 수 있다. 식 (1)에 따른 외경 15 mm 인 강(steel)축에서의 비틀림파 군속도

는 다음 Fig. 1 에 주어지 있다. 여기에 나타난 바와 같이 비틀림파는 그 첫 번째 모드의 전파 속도가 주파수에 관계없이 동일하므로 첫 번째 모드만이 존재하는 340 kHz 이하의 주파수 대역을 가진 신호를 탐상에 적용하면 왜곡이 거의 없는 결합 신호를 얻을 수 있다.

2.2 니켈 스트립을 이용한 비틀림파의 발생 및 감지

Kim 등⁽¹²⁾에 의해 제안된 비틀림파 발생 방식은 Fig. 2 에 도시되어 있다. 비자성 배관의 원주를 따라 일정 각도로 경사지게(여기서는 45°) 니켈 스트립을 수 개 부착한 후(이하 경사 패치), 솔레노이드 형태의 전자석을 경사 패치의 주변에 설치하고 전류를 흘려 축 방향으로 정적 자기장을 발생시킨다. 이후 전자석의 내부와 배관 사이에 설치된 별도의 솔레노이드에 원하는 비틀림파의 파형에 상응하는 전류 신호를 입력하여 경사 패치 주변에 동적 자기장을 형성시킨다. 이에 따라 경사 패치의 각각의 니켈 스트립이 길이 방향으로 기계적 변형을 일으킨다. 패치의 변형은 그것이 부착된 배관의 변형을 발생시켜 배관에 비틀림파가 전파된다. 이와는 반대로, 배관의 변형은 부착된 패치의 변형을 유발한다. 니켈 등의 강자성체 패치가 기계적으로 변형될 경우, 자기 변형 현상의 역현상으로 인해 패치 주변의 자기장의 변화를 일으킨다. 이러한 변화는 패치를 둘러 싸고 있는 솔레노이드에 유도 기전력을 발생시키므로 배관에 전파하는 비틀림파의 감지가 가능하다.

본 연구에서 제안하는 방식은 이러한 구성에서 나아가 경사 패치들을 축 방향으로 다중 배열하여 비틀림파를 집중적으로 발생시키고자 하는 것이다. 만일 시편에 여러 개의 패치를 등간격 d 로 부착하고(Fig. 3 참조) 이 패치들에 동일한 신호를 입력하면 d 와 동일한 크기의 파장 λ 를 가진 초음파가 발생한다. λ 와 d 의 상관성에 대한 연구는 이미 유사 연구^(14,15)에 보고된 바 있으므로 여기서는 자세한 설명은 생략한다. 발생된 초음파의 파장과 주파수 f 는 다음 식 (2)와 같은 관계가 있으므로 주파수를 적절하게 선택하면 여러 가지 초음파 모드가 혼재되어 있는 경우에도 파장과 주파수에 의해 결정되는 속도에 부합하는 초음파 모드만을 선택적으로 발생시킬 수 있다.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

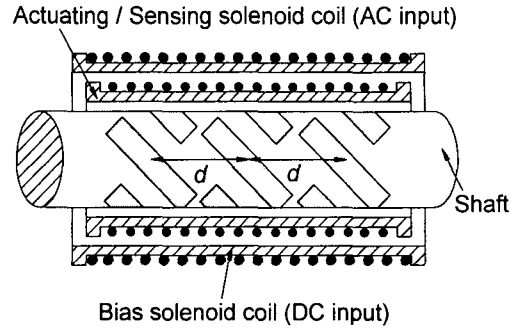


Fig. 3 Schematic diagram of the patch array for the suggested method

이와 같은 원리로 경사 패치를 수 개 배열한 후 패치 간의 간격과 비틀림파의 첫 번째 모드의 전파 속도로부터 주파수를 산출하여 이 주파수를 중심 주파수로 갖는 신호를 입력하면 다른 초음파 모드를 배제한 채 비틀림파만을 선택적으로 발생시킬 수 있다. 또한 여러 개의 패치를 배열 형태로 부착함으로써 비틀림 감성이 큰 축(예를 들어 회전하는 실축)에서도 비틀림파를 효과적으로 발생시킬 수 있다.

Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 제안한 방식은 축 및 자기변형 패치와 솔레노이드 간에 직접적인 접촉이 불필요하다. 축이 회전하더라도 솔레노이드로부터 유도된 자기장을 자기변형 패치에 공급할 수 있으므로 회전축에 비접촉으로 비틀림파를 발생시킬 수 있다. 마찬가지로, 축이 회전하는 경우에도 패치의 변형으로부터 유도된 자기장을 솔레노이드가 탐지할 수 있어, 축에 전달되는 비틀림파의 탐지가 가능하다. 따라서, 제안한 트랜스듀서를 이용하면 비틀림파의 비접촉 발생 및 탐지가 가능하므로 회전하는 축에 무리 없이 적용이 가능하다.

3. 실험 결과

3.1 실험 장치의 개요 및 제안된 방식의 검증

위에서 제안된 초음파 발생 방식을 검증하기 위해 Fig. 4 와 같은 실험 장치를 구성하였다. 길이 1000 mm, 외경 15 mm 의 강축을 제작하여 양단을 레이디얼 볼 베어링으로 지지하고 축의 한쪽은 커플링(coupling)을 이용하여 1800 rpm 으로 정속 회전하는 전기 모터와 연결하였다. 축의 중앙부에는 경사패치를 22.5 mm 의 등간격으로 3 열 부착하였다. 각 패치에 사용된 스트립은 두께 0.15 mm 의

하이퍼코(Hiperco) 50HS 박판을 23 mm × 2 mm 의 직사각형 형태로 가공한 것인데, 이 재질은 코발트와 철의 합금으로서 포화 자기 변형량이 니켈의 약 2 배이므로⁽¹⁶⁾ 본 연구에서와 같이 크기가 큰 신호를 발생시키기에 적합하다.

경사 패치가 배열되어 있는 곳에는 전자석을 설치하여 코일 내부에 정적인 자기장을 형성하도록 하였으며 전자석과 축 사이에는 직경 0.3 mm 의 코일을 200 회 감아서 축에 닿지 않도록 설치하였다. 이후 함수 발생기(Agilent 33250A)를 이용하여 기준 신호를 생성하고, 파워 앰프(Ritec RAM 5000)를 통하여 증폭시킨 후 코일에 입력하여 축에 비틀림파를 발생시켰다. 축에서 전파하는 비틀림파는 2.2 절에서 언급한 바와 같이 자기 변형 현상의 역현상에 의해 다시 코일에서 감지된다. 감지된 신호는 파워 앰프 및 오실로스코프(Lecroy LT354M)를 거쳐서 PC 에서 분석된다.

Fig. 5 에는 함수 발생기에서 생성한 기준 신호를 나타내었는데 이는 다음의 식으로 표현되는 가보 (Gabor) 함수이다.

$$f(t) = \frac{1}{(\pi\sigma)^{1/4}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \cos \eta t \quad (3)$$

여기에서 η 는 가보 함수의 중심 주파수이며 σ 는 신호의 분산도를 나타낸다. 이러한 가보 함수를 사용하면 초음파의 에너지 대부분이 중심 주파수 부근에 밀집되어 보다 효율적으로 초음파를 발생시킬 수 있기 때문에 초음파를 이용한 이상진단에 많이 사용되고 있다.⁽¹⁷⁾

제안한 방법에 의해 강축에서 비틀림파가 발생될 수 있는지 확인하기 위해 우선 축이 정지되어 있는 상태에서 비틀림파를 발생시키고 감지하였으며 감지된 신호는 Fig. 6 에 나타내었다. 이 때 신호의 샘플링 주파수는 5 Ms/s 이다. 코일이 축의 중간에 위치하므로 초음파가 한번 감지되고 다음 감지될 때까지는 총 1m를 진행한다. 실제 감지된 피크 간의 시간 간격(Fig. 6 의 t)은 3.13×10^{-4} (sec)로 식 (1)을 이용한 이론치인 3.18×10^{-4} (sec)과 거의 동일하고 또 각 피크마다의 시간 간격이 일정하므로 Fig. 6 에 나타낸 초음파 신호는 비틀림파임을 확인할 수 있다.

이러한 점은 시간-주파수 분석을 통하여도 잘 살펴볼 수 있다. Fig. 7 는 Fig. 6 의 감지 결과를 단 시간 푸리에 변환(Short-time Fourier Transform: 이하 STFT)한 결과인데 각 신호마다의 도달 시간이 주파수에 관계없이 동일하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 주파수에 관계없이 전파 속도가 동일

한 비틀림파의 첫 번째 모드 특성으로서 본 연구에서 제안한 방법에 의해서 실축에서 비틀림파를 성공적으로 발생시킬 수 있음을 의미하는 것이다.

가보 함수의 중심 주파수는 다음과 같이 선정하였다. 패치 간의 간격 d 가 22.5 mm 임을 고려하면 식 (2)에 의해 중심 주파수 η 는 143 kHz로 계산되므로 이를 중심 주파수로 갖는 신호를 함수 발생기에서 발생시켰다. 143 kHz 주변의 몇몇 중심 주파수에 대해서 실험을 수행한 결과 Fig. 6 및 Fig 7 에 있는 신호와 형태와 크기가 유사한 신호를 얻을 수 있었다.

제안한 방식은 기존의 방식⁽¹²⁾에 비해 비틀림파만을 선택적으로 발생시킬 수 있으며 실축에서 보다 큰 비틀림파를 발생시킬 수 있는 장점이 있다. 이러한 점을 확인하기 위해 기존의 방식에 의해 비틀림파를 발생시킨 결과와 제안된 방식에 의한 결과를 비교하여 보았다.

여타의 실험 조건은 전술한 바와 동일하게 유지

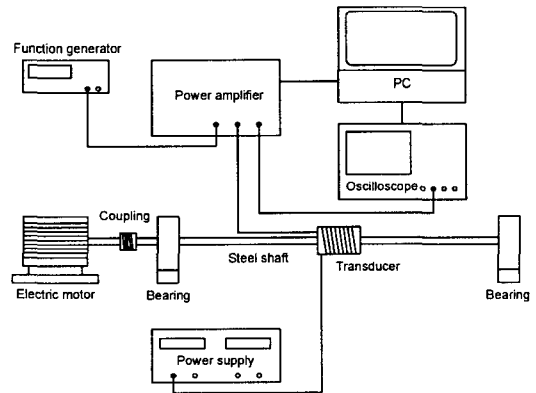


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup

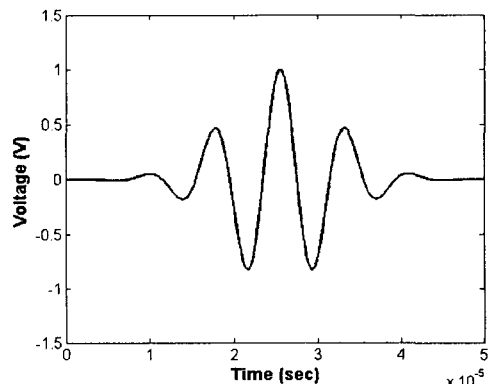


Fig. 5 Shape of the input signal; Gabor function

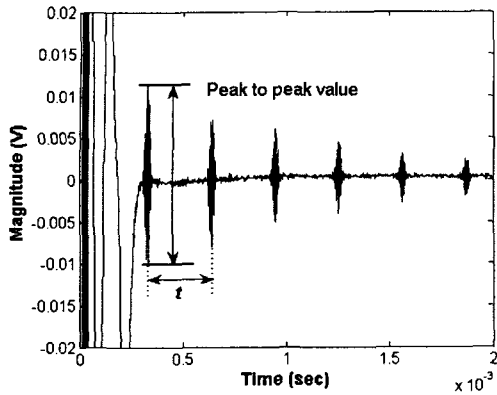


Fig. 6 Torsional waves in the stationary steel shaft

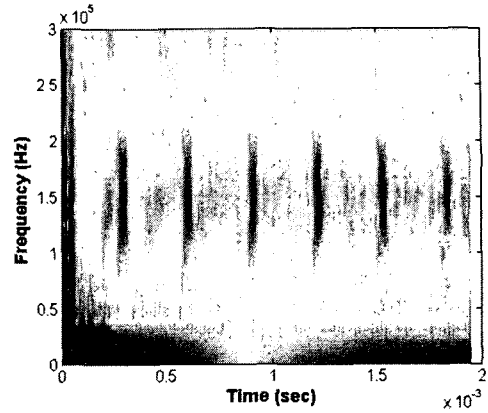


Fig. 9 STFT of the signal in Fig. 8

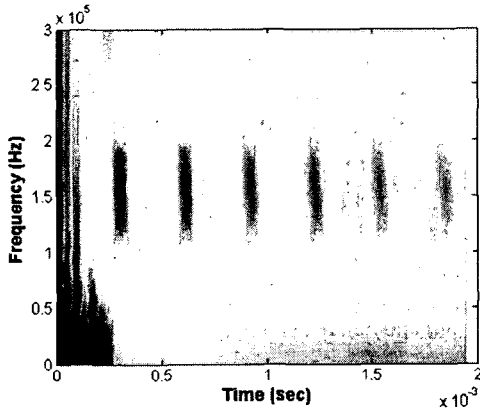


Fig. 7 STFT of the signal in Fig. 6

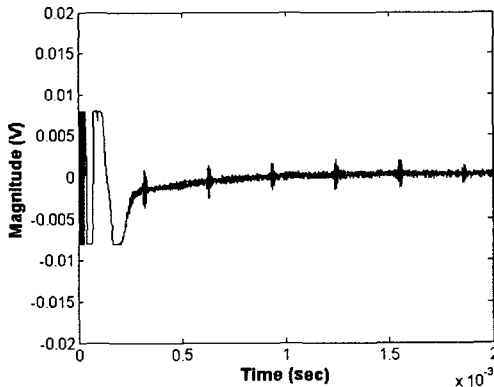


Fig. 8 Torsional waves generated by the method suggested by Kim et al.⁽¹²⁾

한 채 하나의 경사 패치만을 축의 중앙부에 부착하여 발생시킨 비틀림파를 Fig. 8 에, 그리고 이에 대한 STFT 결과는 Fig. 9 에 실어 놓았다. Fig. 6 과 Fig. 8 을 비교해 보면 본 연구에서 제안된 방식에 의해 발생된 비틀림파는 하나의 경사 패치만을 이용하여 얻은 비틀림파에 비해 그 크기가 거의 4.8 배 가량 증폭된 것을 확인할 수 있다.

또한 기존 방식에 의해 발생된 비틀림파의 STFT 결과(Fig.9 참조)를 보면 비틀림파 이외에도 L(0,1) 모드의 종파가 나타나고 있으나 Fig. 7 에 나타낸 바와 같이 제안된 방식에 의해서는 비틀림파만이 지배적으로 발생된 것을 알 수 있다.

이상의 실험 결과로부터 제안된 방식을 이용할 경우 특정 중심 주파수를 가진 비틀림파를 발생시킬 수 있을 뿐 아니라, 기존의 방법에 비해 다른 모드의 초음파를 배제하고 보다 큰 비틀림파를 발생시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.2 회전중인 축에서의 비틀림파의 발생 및 감지

정지된 축에서의 비틀림파 발생 실험 결과를 바탕으로, 동일한 조건 하에서 축을 회전시켜 가면서 비틀림파를 발생시키고 감지하였다. 그 결과를 Fig. 10 에, 그리고 그 신호의 STFT 결과는 Fig. 11 에 나타내었다. 그 결과, 정지 상태의 감지 결과인 Fig. 6 의 신호와 비교할 때 Fig. 10 의 신호는 그 크기와 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)에서 거의 변화가 없는 양질의 신호임을 확인하였다.

축의 회전에 수반되는 횡방향 진동이 감지 신호에 영향을 미치지 않는 것은 다음과 같이 해석할 수 있다. 코일 내부의 자기장이 불균일하게 형성되어 있고 그 내부에 자성체가 존재하면, 자성체의 횡방향 진동과 자기장의 상호 작용에 의한 전자기 유도 성분이 나타나서 횡방향 진동 성분이 신호에 포함될 가능성이 있다. 하지만 본 연구에서와 같이 솔레노이드 코일을 사용하는 경우에는 코일 내부의 자기장이 거의 균일하게 분포되기 때문에 자성체의 횡방향 진동에 의한 성분은 감지되지 않는다. 또한 축 회전에 의한 횡방향 진동 성분의 주파수가 30 Hz 및 그의 몇몇 조화 성분들로

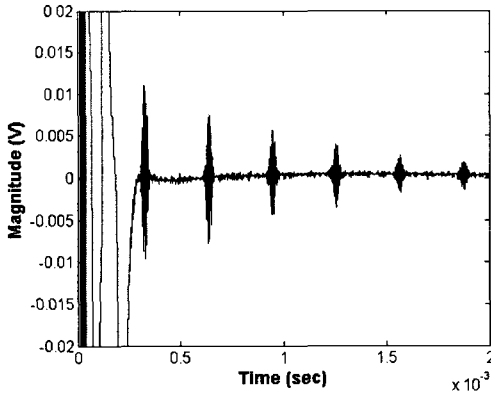


Fig. 10 Torsional waves in the rotating steel shaft

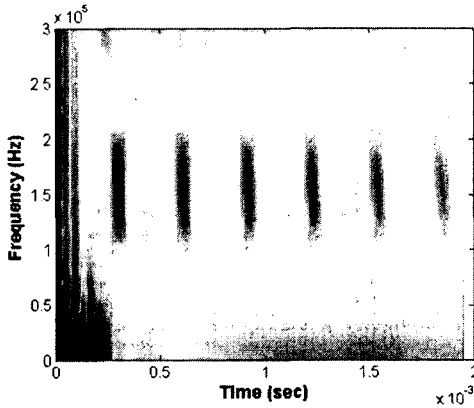


Fig. 11 STFT of the signal in Fig. 10

이루어져 있는데 비해, 실험에 사용된 신호의 중심 주파수는 145 kHz로서 신호간의 주파수 대역이 상이하하여 축의 회전이 거의 영향을 끼치지 않는다.

4. 결론

본 연구에서는 회전중인 축에서 비틀림파를 발생시키고 감지할 수 있는 트랜스듀서를 제안하였다. 제안된 트랜스듀서는 자기 변형 현상을 이용하여 분산 현상이 없는 비틀림파를 비접촉으로 발생시키고 감지할 수 있으며, 일정 간격으로 배열된 경사 형태의 강자성 패치를 이용하여 실축과 같이 비틀림 강성이 높은 부재에서도 비틀림파를 효율적으로 발생시킬 수 있다. 또한 패치 간의 간격을 조절함으로써 특정 중심 주파수를 갖는 비틀림파를 발생시킴으로써, 다른 초음파 모드를 배제할 수 있다.

제안된 트랜스듀서를 실축에 적용하여 성공적으로 비틀림파를 발생시키고 감지할 수 있었으며,

기존의 비틀림파 발생 방식에 의한 결과와 비교하여 큰 크기의 비틀림파를 집중적으로 발생시킬 수 있음을 확인하였다. 이 트랜스듀서를 회전축에 적용할 경우, 회전 중인 경우에도 정지 시와 같은 정밀도를 가진 신호를 발생시킬 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 회전 중인 축에서 비틀림파를 발생시키고 감지한 사례는 본 연구에서 처음으로 보고되는 것으로 판단되며, 향후 회전축의 이상 진단을 위해 제안한 트랜스듀서가 많이 활용될 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 사업의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Ha, K. H., Hong, J. P., Kim, G. T., Chang, K.C. and Lee, J., 2000, "Orbital Analysis of Rotor Due to Electromagnetic Force for Switched Reluctance Motor," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 36, No. 4, pp. 1407~1411.
- (2) Areny, R. P. and Webster, J. G., 2001, *Sensors and Signal Conditioning*, Wiley-Inter Science, New York.
- (3) Goodwin, M. J., 1989, *Dynamics of Rotor-Bearing Systems*, Unwin Hyman Ltd., London.
- (4) Bucher, I. and Ewins, D. J., 2001, "Modal Analysis and Testing of Rotating Structures," *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, Vol. A 359, pp. 61~96.
- (5) Rothberg, S. and Bell, J., 2004, "On the Application of Laser Vibrometry to Translational and Rotational Vibration Measurements on Rotating Shafts," *Measurement*, Vol. 35, No. 2, pp. 201~210.
- (6) Jiles, D. C., 1995, "Theory of the Magneto-Mechanical Effect," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 28, pp 1537~1546.
- (7) Kim, Y. Y., Cho, S. H. and Lee, H. C., 2003, "Application of Magnetomechanical Sensor in Modal Testing," *J. Sound and Vibration*, Vol. 268, No. 4, pp. 799~808.
- (8) Kim, Y. Y., Han, S. W. and Lee, H. C., 2002, "Non-Contact Damage Detection of a Rotating Shaft by Using the Magnetostrictive Effect," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 26, No. 8, pp. 1599~1607.
- (9) Graff, K. F., 1975, *Wave Motion in Elastic Solids*, Ohio State Univ. Press, Columbus.
- (10) Kwun, H. and Bartels, K. A., 1998, "Magneto-Strictive Sensor Technology and Its Applications," *Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 171~178.
- (11) Kwun, H., 2002, "Method and Apparatus Generating and Detecting Torsional Wave Inspection of Pipes or Tubes," United States Patent, Patent No:

- US 6429650 B1.
- (12) Kim, Y. Y., Park, C. I., Cho, S. H. and Han, S. W., 2005, "Torsional Wave Experiments with a New Magnetostrictive Transducer Configuration," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 117, No. 6, pp. 3459~3468.
- (13) Rose, J. L., 1999, *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge Univ. Press, New York.
- (14) Rose, J. L., Pelts, S. P. and Quarry, M. J., 1998, "A Comb Transducer Model for Guided Wave NDE," *Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 163~169.
- (15) Kim, I. K. and Kim, Y. Y., 2005, "Wireless Frequency-Tuned Generation and Measurement of Torsional Waves Using Magnetostrictive Nickel Gratings in Cylinders," *Sensors and Actuators A*, In Press.
- (16) www.carttech.com
- (17) Hong, J. C. and Kim, Y. Y., 2004, "Determination of the Optimal Gabor Wavelet Shape for Best Time-Frequency Localization Using the Entropy Concept," *Experimental Mechanics*, Vol. 44, pp. 387-395.