배관에서의 특정 비틀림 초음파 모드 송수신을 위한 합성 위상 조절 기법

Synthetic Phase Tuning Technique for the Transduction of a Specific Ultrasonic Torsional Mode in a Pipe

김 회 웅*. 권 영 의**. 주 영 상*. 김 종 범*. 김 윤 영†
Hoe Woong Kim, Young Eui Kwon, Young Sang Joo, Jong Bum Kim
and Yoon Young Kim

(Received December 7, 2012 ; Revised January 23, 2013 ; Accepted January 23, 2013)

Key Words : Synthetic Phase Tuning(합성 위상 조절), Guided Torsional Wave(비틀림 유도초음파), Higher Torsional Mode(고차 비틀림 모드), Magnetostrictive Patch Transducer(자기변형 패치 트랜스듀서)

ABSTRACT

This study newly presents a synthetic phase tuning technique to suppress the unwanted torsional mode while enhancing the desired torsional mode in a pipe. Specifically, we aim at the enhancement of the first torsional mode and the suppression of the undesired, second torsional mode. Earlier efforts were to enhance the desired wave mode only in the hope that the enhancement results in the suppression of the unwanted wave mode. Unlike these efforts, the suggested technique makes the complete cancellation of the unwanted wave mode but it is shown to enhance the desired first mode for torsional wave problems. In the present study, the synthetic phase tuning is developed for the cancellation of the unwanted wave mode, meaning that the number of necessary experimental equipments is reduced. Simulation and experiment were carried out to check the effectiveness of the proposed method. As an application of the suggested technique, we investigated the reflection and mode conversion characteristics of the first torsional mode according to the step thickness variation in a stepped pipe.

1. 서 론

유도초음파(guided wave)는 매질의 경계에 의해 형성되고 전파되는 파동으로써, 도파관(waveguide)을 따라 먼 거리까지 전파가 가능한 특징을 가지고

있어 배관과 같은 긴 구조물의 장거리 비파괴 검사에 널리 활용되고 있다^(1~3). 특히, 배관에서 종 방향으로 전파되는 유도초음파 중, 비틀림 유도초음파(guided torsional wave)는 그 첫 번째 모드가 비분산(non-dispersive) 특성을 가지고 있어, 배관의 건전성 평가에 매우 유용하게 사용되고 있다. 여기서,

† Corresponding Author ; Member, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University
E-mail : yykim@snu.ac.kr
Tel : +82-2-880-7154, Fax : +82-2-883-1513

* Fast Reactor Technology Demonstration Division, Korea Atomic Energy Research Institute

** School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

비분산 특성이라 함은 모든 주파수 성분이 동일한 속도를 가지고 전파되는 것을 의미하는데⁽⁴⁾, 이로 인해 구조물의 결함이나 이상으로부터 반사되어 돌아오는 신호의 형상 변화 없이 측정이 가능하여 복잡한 신호처리 과정 없이도 정확한 결함의 위치 판별이 가능하게 된다. 또한, 비틀림 유도초음파는 배관 내외부의 비점성 유체에 대해서 에너지 누출이 없어 보다 먼 거리까지 전파가 가능하고, 낮은 주파수대역에서는 첫 번째 모드만 존재하기 때문에⁽⁴⁾ 단일 모드를 사용함으로써 보다 효율적인 검사가 가능한 장점을 가지고 있다.

초음파를 이용하여 결함을 검출하는 경우, 보다 작은 결함의 검출 또는 인접한 결함들을 구분하기 위해서는 일반적으로 더 짧은 파장 즉, 보다 높은 주파수의 초음파가 필요하다. 하지만, 주파수를 높이면, 1차 비틀림 모드 이외에도 2차 비틀림 모드와 같은 고차 모드들이 발생되어 배관을 따라 함께 전파하게 된다. 이렇듯 다수의 모드가 동시에 존재하게 되면, 각 모드들에 의한 신호들로 인해 결함으로부터 반사된 신호의 구분이 어렵게 되고, 또한 고차 모드들은 1차 모드와는 달리 주파수에 따라 속도가 변하는 분산 특성을 가지고 있어 신호가 긴 시간 대역에 걸쳐 측정되기 때문에 결함으로부터의 반사 신호를 가릴 수 있다. 이와 같은 문제의 해결을 위해서는 다수의 모드가 존재하는 주파수 대역에서도 원하는 모드만을 잘 선별할 수 있는 모드 선별 기법이 필요하다.

현재까지 다양한 모드 선별 기법들이 개발되어 왔는데, 기존의 모드 선별 기법은 크게 파장 조절 기법^(5,6)과 위상 조절 기법⁽⁷⁾으로 구분할 수 있다. 파장 조절 기법은 다수의 트랜스듀서들의 간격을 발생하고자 하는 초음파의 파장이나 반 파장에 맞추어 설치한 후, 동일 위상 또는 정반대 위상으로 동시에 가진시킴으로써 보강 간섭에 의해 원하는 모드를 향상시키는 방법이다. 반면, 위상 조절 기법은 트랜스듀서들의 간격에 상관없이 각 트랜스듀서를 통과하는 초음파와 동일한 위상을 갖도록 각 트랜스듀서에서의 초음파 발생 시간에 시간 지연(time delay)을 적용함으로써 원하는 모드를 향상시키는 방법이다. 하지만, 이러한 기존의 모드 선별 기법들은 모두 원하는 모드의 향상에만 초점이 맞춰져 있기 때문에, 원치 않는 모드의 크기가 상대적으로 작아졌을 뿐,

여전히 측정되는 한계점을 가지고 있다.

한편, 위의 두 가지 기법을 동시에 적용한 기법도 사용되고 있는데, 원치 않는 모드는 파장 조절 기법을 이용하여 억제하고, 원하는 모드는 위상 조절 기법을 이용하여 향상시키는 방법으로 주로 원하는 모드와 원치 않는 모드의 파장 차이가 큰 종파(longitudinal wave) 모드 선별에 적용이 되고 있다^(8,9). 하지만, 종파와는 달리 원하는 모드와 원치 않는 모드의 파장이나 속도의 차이가 미미한 비틀림파의 경우에는 효율적인 적용이 어려운 문제를 가지고 있다.

최근 Kim 등⁽¹⁰⁾은 자기변형 패치 트랜스듀서를 이용하여 비틀림 유도초음파의 2차 모드의 차단 주파수보다 높은 주파수 대역에서도 1차 비틀림 모드만을 잘 선별하여 발생시킬 수 있는 기법을 제안하였다. 이 기법에서는 두 개의 트랜스듀서에 대하여 비틀림파의 군속도와 위상속도를 함께 고려한 시간 지연 및 두 트랜스듀서 사이의 간격을 적용함으로써, 원치 않는 2차 비틀림 모드는 거의 완전히 상쇄시킴과 동시에 원하는 1차 비틀림 모드는 향상을 시킨다. 하지만, 각 트랜스듀서에서의 시간 지연을 위한 다채널 함수 발생기와 다채널 파워 앰프 등 다수의 고가 장비를 필요로 한다는 단점을 가지고 있다.

이에, 이 연구에서는 앞서 Kim 등에 의해 제안된 1차 비틀림 모드 선별 기법에 합성 위상 조절 기법을 적용하여 다수의 고가 장비 없이도 비틀림 유도초음파의 2차 모드의 차단 주파수보다 높은 주파수 대역에서 1차 비틀림 모드만을 잘 선별할 수 있는 기법을 제안하고자 한다. 위상속도만을 고려하는 기존의 합성 위상 조절 기법과는 달리 제안된 기법은 비틀림 유도초음파의 위상속도뿐 아니라 군속도도 함께 고려하여 2차 비틀림 모드를 거의 완전히 상쇄시키면서 동시에 1차 비틀림 모드는 향상시킬 수 있는 기법이다. 이 논문의 2장과 3장에서는 각각 제안된 기법에 대한 상세한 설명과 제안된 기법의 성능 검증을 위한 유한요소 해석 및 실험을 수행하였고, 4장에서는 제안된 기법을 적용하여 단이 있는 배관에서 단의 두께 변화에 따른 1차 비틀림 모드의 반사와 2차 비틀림 모드로의 모드 변환 특성을 유한요소 해석 및 실험을 통하여 살펴보았다.

2. 제안된 기법

2.1 합성 위상 조절 기법

합성 위상 조절 기법(synthetic phase tuning technique)은 기존의 위상 조절 기법과 마찬가지로 다수의 트랜스듀서들을 사용하지만, 각 트랜스듀서에서의 위상 조절을 위한 시간 지연을 측정된 신호들을 이용한 신호처리 과정에서 적용한다⁽¹¹⁾. 따라서 다채널 함수 발생기나 다채널 파워 앰프와 같은 다수의 고가 장비 없이도 적용이 가능한 장점을 가지고 있다.

합성 위상 조절 기법의 개략적인 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 합성 위상 조절 기법에서는 다수개의 트랜스듀서들을 일정 간격(d_T)으로 설치하는데, 이때 설치 간격은 보다 간결한 신호처리를 위해 일정하게 유지하였을 뿐, 그 간격이 달라져도 무방하다. 설치된 다수 개의 트랜스듀서들 중, 하나의 트랜스듀서에서 초음파를 발생시키면 나머지 트랜스듀서들에서 측정하고, 모든 트랜스듀서가 한 번씩 초음파를 발생시킨다. 따라서 N 개의 트랜스듀서를 사용할 경우, 총 $N(N-1)$ 개의 측정 신호가 획득된다. 이렇게 측정된 신호는 각 트랜스듀서들에 대해서 동일한 위상을 갖도록 하는 시간 지연을 적용하게 되는데, 이는 신호처리 과정에서 수행된다. 원하는 모드를 선별하기 위한 시간 지연은 기준이 되는 트랜스듀서로부터 각 트랜스듀서들까지의 간격과 원하는 모드의 위상속도(c_p)를 이용하여 구할 수 있고, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$t_{d_{mn}} = \frac{(m+n-2)d_T}{c_p} \quad (1)$$

Fig.1 Schematic diagram of the synthetic phase tuning technique

식 (1)에서 m 은 트랜스미터의 번호를 나타내고 n 은 리시버의 번호를 나타낸다. 모든 트랜스미터와 리시버 조합에 대하여 식 (1)의 시간 지연을 적용하면, N 개의 트랜스듀서에 의해 측정된 $N(N-1)$ 개의 측정 신호가 하나의 리시버에 의해 측정된 것과 동일한 결과를 가지게 되고 이는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1, m \neq n}^N s_{mn}(t - t_{d_{mn}}) \quad (2)$$

식 (2)에 의해서, 측정된 신호들 중 원하는 모드의 위상속도와 동일한 위상속도를 갖는 성분들만 보강이 되어 원하는 모드를 선별할 수 있게 된다.

2.2 제안된 합성 위상 조절 기법

제안된 합성 위상 조절 기법에서는 선별하고자 하는 초음파 모드의 위상속도만을 고려하는 기존의 방법과는 달리 원하는 모드와 원치 않는 모드의 위상속도와 군속도를 모두 고려함으로써 원하는 모드의 향상과 원치 않는 모드의 상쇄를 동시에 수행한다. 따라서, 제안된 기법을 1차 비틀림 모드의 향상 및 2차 비틀림 모드의 상쇄에 적용하기 위해서는 먼저 배관에서의 비틀림 유도초음파의 분산 특성을 파악할 필요가 있다. 상용 분산 선도 프로그램인 Disperse⁽¹²⁾를 사용하여 구한 외경 70.3 mm, 두께 13.3 mm 알루미늄 배관에서의 1차 비틀림 모드와 2차 비틀림 모드의 분산 선도가 Fig. 2에 나타나있다.

Fig.2 Dispersion curves for the 1st and 2nd torsional wave modes in a test aluminum pipe

분산 선도로부터 1차 비틀림 모드는 위상속도와 군속도가 동일하고 모든 주파수 구간에서 일정한 비분산 특성을 갖는 반면, 2차 비틀림 모드는 위상속도와 군속도가 서로 다르고, 그 크기 역시 주파수에 따라 변하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 파동 시뮬레이션을 통해 구한 200 kHz 주파수에서의 1차 비틀림 모드와 2차 비틀림 모드의 전파 양상을 보여준다. 앞서 언급한 바와 같이 1차 비틀림 모드는 위상속도(c_{p1})와 군속도(c_{g1})가 동일하기 때문에 파형의 변화 없이 전파되는 반면, 2차 비틀림 모드는 두 속도의 차이로 인해 형상이 변하면서 전파되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 2차 비틀림 모드는 일정 시간 후에 다시 초기의 형상과 동일한 형상을 갖는 것을 볼 수 있는데, 이 시간을 인접한 두 트랜스듀서 사이의 시간 지연으로 이용하면 2차 비틀림 모드를 상쇄시킬 수 있게 된다. 이 시간 지연(t_d)은 2차 비틀림 모드의 위상속도(c_{p2})와 군속도(c_{g2})의 상대 속도로 2차 비틀림 모드의 한

파장(λ_2)을 이동하는데 걸리는 시간으로 다음의 식과 같이 구할 수 있다.

$$t_d = \frac{\lambda_2}{c_{p2} - c_{g2}} \quad (3)$$

제안된 기법은 인접한 두 개의 트랜스듀서에서 측정되는 두 2차 비틀림 모드를 상쇄하도록 구성되어 있다. 따라서 짝수 개의 트랜스듀서를 사용하고, 두 트랜스듀서의 간격을 정확히 설정할 필요가 있다. 두 트랜스듀서의 간격은 두 번째 트랜스듀서에서의 2차 비틀림 모드의 형상이 첫 번째 트랜스듀서에서 측정된 형상과 동일한 형상을 갖는 거리로 설정하고, 아래의 식과 같이 구할 수 있다.

$$d_T = t_d \times c_{g2} \quad (4)$$

식 (4)로부터 구해진 거리에 위치한 트랜스듀서에서의 측정 신호를 인접한 트랜스듀서의 측정 신호와 180° 의 위상 차이를 갖도록 한 후, 식 (3)의 시간 지연을 적용하여 두 신호를 합성하면 2차 비틀림 모드를 상쇄할 수 있다. 합성된 신호는 아래의 수식과 같이 표현된다.

$$s(t) = \sum_{n=1}^2 (-1)^{n-1} s_n [t - (n-1)t_d] \quad (5)$$

Fig. 4에 제안된 기법이 적용된 두 트랜스듀서의 측정 신호(s_1, s_2)를 나타내었다. 1차 비틀림 모드와

Fig. 3 Wave propagation of the (a) 1st and (b) 2nd torsional wave modes at 200 kHz in the test aluminum pipe

Fig. 4 The 1st and 2nd torsional wave signals measured by two transducers distanced by d_T at 200 kHz in the test aluminum pipe; signals measured by the second transducer were time-delayed by t_d

2차 비틀림 모드를 분리하여 파동 시뮬레이션을 수행하였고, 두 모드에 대해 동일한 트랜스듀서 간격 $d_T = 33.7 \text{ mm}$ 와 시간 지연 $t_d = 13.68 \mu\text{s}$ 를 적용하였다. Fig. 4의 결과로부터 두 2차 비틀림 모드는 서로 반대 위상이 되는 반면, 1차 비틀림 모드는 거의 동일 위상이 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 두 모드 간의 상이한 분산 특성에 의한 것으로, 두 1차 비틀림 모드 간의 시간 간격(Δt)은 아래의 식과 같이 표현되고 주파수가 높아질수록 1차 비틀림 모드의 반주기에 근접하여 동일 위상에 가까워진다.

$$\Delta t = \frac{c_{g1} - c_{g2}}{c_{p2} - c_{g2}} \times \frac{\lambda_2}{c_{p1}} \quad (6)$$

2개 이상의 트랜스듀서 배열에 제안된 기법을 적용할 경우, 식 (5)에 의해 구해진 신호들에 아래의 식과 같은 시간 지연을 다시 적용한다.

$$\hat{t}_d = \frac{2d_T}{c_{p1}} \quad (7)$$

즉, 식 (5)에 의해 합성된 신호는 2차 비틀림 모드 없이 1차 비틀림 모드만 존재하기 때문에, 각 합성 신호들에 트랜스듀서 사이의 거리와 1차 비틀림 모드의 위상속도를 이용한 시간 지연을 적용하여 최종 신호를 얻을 수 있다. 예를 들어, 4개의 트랜스듀서를 사용할 경우, 최종 합성 신호는 아래의 수식과 같이 구할 수 있다.

$$s(t) = \sum_{n=1}^2 \sum_{m=3}^4 (-1)^{m-1} s_{mn} [t - \hat{t}_d - (m-3)t_d] + \sum_{n=3}^4 \sum_{m=1}^2 (-1)^{m-1} s_{mn} [t - (m-1)t_d] \quad (8)$$

3. 제안된 기법의 검증

제안된 합성 위상 조절 기법의 성능을 검증하기 위해 유한요소 해석 및 실험을 수행하였다.

상용 유한요소 해석 프로그램인 Comsol Multiphysics(PDE modes: coefficient form)를⁽¹³⁾ 이용하여 Fig. 5에 나타난 해석 모델에 대해 최대 1 mm 간격으로 메쉬(mesh)를 설정하고 2차원 시간과도 해석(2D time transient analysis)을 수행하였다. 직경

70.3 mm, 두께 13.3 mm의 알루미늄 배관의 네 지점 중, 한 지점에서 중심 주파수 200 kHz의 비틀림 유도초음파를 발생시킨 후 나머지 지점에서 측정하였고, 나머지 세 지점에 대하여 동일한 과정을 수행하였다. 측정된 신호를 기존의 합성 위상 조절 기법과 제안된 합성 위상 조절 기법을 적용하여 신호처리를 수행한 후, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 기존의 합성 위상 조절 기법으로는 여전히 2차 비틀림 모드가 큰 비중으로 측정되는 반면, 제안된 기법을 적용하면 2차 비틀림 모드를 효과적으로 상쇄시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

해석 모델과 동일한 배관에 비틀림 유도초음파 발생 및 측정에 효과적인 자기변형 패치 트랜스듀서(magnetostrictive patch transducer)⁽¹⁴⁻¹⁶⁾를 사용하여 비틀림 유도초음파 발생 및 측정 실험을 수행하였다. 자기변형 패치 트랜스듀서는 자기장과 기계적 변형 사이의 연성효과인 자기변형현상⁽¹⁷⁾을 그 작동 원리로 하고 있는데, 이 자기변형 패치에 정자기장과 동자기장을 수직하게 형성해 줌으로써 간단히 전단 변형을 발생시킬 수 있다⁽¹⁸⁾. 자기변형 패치는 철-코발트 합금인 Hiperco® 50HS⁽¹⁹⁾를 사용하였고, 원주 방향으로 균일한 정자기장의 형성을 위해 자기변형 패치를 길이 25 mm, 너비 53 mm로 분절하여 배관에 원주 방향으로 부착한 후, 각 패치 사이에 영구자석을 설치하였다. 정자기장과 수직한 종 방향으로 동자기장을 형성해 주기 위해, 패치 위에 선 간격이 1차 비틀림 모드의 반파장에 해당하는 4-finger 미앤더 코일(meander coil)⁽¹⁰⁾을 설치하였다. 유한요소 해석과 동일하게 4개의 자기변형 패치 트랜스듀서와 파워 앰프(AG1017L, T&C power conversion) 및 프리 앰프(SR560, Stanford Research Systems)를 사용하여 중심 주파수 200 kHz의 비틀림 유도초음파를 발생

Fig. 5 Simulation model(aluminum pipe; outer diameter = 70.3 mm, thickness = 13.3 mm and $d_T = 33.7 \text{ mm}$)

Fig. 6 Simulation results: Phase-tuned signals by the (a) the existing synthetic phase tuning technique ($t_{d12} = 10.89 \mu s$) and (b) the proposed technique ($t_d = 13.68 \mu s$, $\hat{t}_d = 21.78 \mu s$) using 4 transducers

Fig. 7 Experimental results: Phase-tuned signals by the (a) the existing synthetic phase tuning technique and (b) the proposed technique using 4 transducers

및 측정하였고, 측정 신호들을 기존의 합성 위상 조절 기법과 제안된 합성 위상 조절 기법을 적용하여 신호처리를 수행한 후, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 실험 결과가 Fig. 6의 해석 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

이상의 유한요소 해석 및 실험 결과로부터 제안된 합성 위상 조절 기법이 2차 비틀림 모드의 차단 주파수(120 kHz) 이상에서도 효과적으로 1차 비틀림 모드만을 잘 선별할 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 제안된 기법의 적용

제안된 합성 위상 조절 기법을 적용하여 단이 있

는 배관에서 단의 두께 변화에 따른 1차 비틀림 모드의 반사 및 2차 모드로의 모드 변환 특성을 살펴 보았다. 제안된 기법을 적용하면, 2차 비틀림 모드의 차단 주파수 이상에서도 2차 비틀림 모드를 거의 완전히 상쇄시킬 수 있기 때문에 단의 두께 변화에 따른 1차 비틀림 모드만의 전파 특성을 명확히 파악할 수 있다.

단의 두께 변화에 따른 1차 비틀림 모드의 반사 및 2차 비틀림 모드로의 모드 변환 특성을 살펴보기 위해 유한요소 해석을 수행하였고, Fig. 8에 해석 모델의 구성을 나타내었다. 단의 두께(D_s)는 1 mm에서 12 mm까지 1 mm 간격으로 변화시켰고, 단으로부터 617.9 mm와 650 mm 떨어진 지점에서 각각 중심 주파수 200 kHz의 비틀림 유도초음파를 발생 시킨 후, 단으로부터 450 mm 떨어진 지점에서 신호를 측정하였다. 1차 모드의 반사뿐만 아니라 2차 모드로의 모드 변환 특성까지 살펴보기 위하여, 단으로 입사되는 2차 모드만 상쇄되고 모드 변환된 2차 모드는 측정이 되도록 두 개의 측정 신호만을 사용하였다. 측정된 신호는 제안된 합성 위상 조절 기법을 적용하여 신호 처리를 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 9(a)에 나타내었다. Fig. 9(a)로부터 단으로 1차 비틀림 모드만 입사되더라도 반사된 1차 비틀림 모드 외에 모드 변환된 2차 비틀림 모드가 함께 측정되는 것을 확인할 수 있다.

모든 신호 처리된 신호들에 대하여 단시간 푸리에 변환(short time Fourier transform)을 수행하여 가진 주파수에 해당하는 단으로부터 반사된 1차 모드와 모드 변환된 2차 모드의 에너지를 추출한 후, 입사된 1차 모드의 에너지로 나눈 결과를 Fig. 9(b)에 나타내었다. 단의 두께가 두께위침에 따라 반사된 1차 비틀림 모드의 에너지는 커지는 반면, 모드 변환된 2차 모드의 에너지는 일정 두께에서 최대값을 가지고 그 이상에서는 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 2차 비틀림 모드의 모드 형상에 기인한 것으로 2차 비틀림 모드의 노드(node)는 대략적으로 배관의 두께 방향으로 중앙에 위치하여 단의 두께가 이 노드 점에 가까워지면 2차 모드로의 모드 변환이 크게 발생하게 된다.

앞서의 해석과 동일한 사양의 배관에 대하여 비틀림과 측정 실험을 수행하였다. 단의 두께를 1 mm,

Fig. 8 Simulation model(aluminum pipe; outer diameter = 71 mm, thickness = 13 mm and $d_T = 32.1$ mm)

(a)

(b)

Fig. 9 (a) Phase-tuned signals centered at 200 kHz in a test pipe with 7 mm step thickness ($t_d = 13.18 \mu s$). (b) Reflection coefficients of the reflected 1st torsional mode and the mode-converted 2nd torsional mode to the incident 1st torsional mode according to the step thickness variation

3 mm 그리고 7 mm의 3가지 경우로 변화시키면서 2개의 단일선 코일 자기변형 패치 트랜스미터와 1개의 단일선 코일 자기변형 패치 리시버를 사용하여

중심 주파수 200 kHz의 비틀림 유도초음파를 발생 및 측정하였다. 넓은 주파수 대역폭을 갖는 단일선 코일을 사용함으로써 파장의 영향 없이 1차 비틀림 모드와 2차 비틀림 모드를 발생 및 측정하도록 하였다. 측정된 신호들은 유한요소 해석과 동일하게 제안된 합성 위상 조절 기법을 적용하여 신호처리를 수행하였고, 그 결과를 Figs. 9(a)와 9(b)에 표시하였다. 비록 감쇠나 측정 오차 등에 의해 절대적인 크기의 차이는 있으나, 유한요소 해석 결과와 실험에 의해 측정된 결과가 동일한 경향을 나타냄을 확인할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 배관에서 비틀림 유도초음파의 2차 모드의 차단 주파수 이상에서도 원하는 1차 비틀림 모드만을 효과적으로 선별할 수 있는 합성 위상 조절 기법을 제안하였다. 먼저, 지금까지의 대부분의 연구에서는 원하는 모드를 증폭시킴으로써 원하지 않는 모드의 크기를 상대적으로 줄이는 방법을 사용하였으나, 이 연구에서는 원하지 않는 모드를 완전히 상쇄할 수 있도록 하면 그 결과 원하는 1차 모드도 크게 증폭될 수 있다는 원리를 이용하였다. 이를 위해 1차 비틀림 모드와 2차 비틀림 모드의 군속도와 위상속도를 모두 고려하는 시간 지연 알고리즘을 채택하였다. 더욱이 이런 시간 지연 알고리즘을 다수 세트의 장비를 이용해서 구현하는 지금까지의 방식과는 달리, 한 세트의 장비만으로 구현할 수 있게 하는 합성 위상 조절 기법을 제안하였다. 원하지 않는 모드에 초점을 둔, 최초의 합성 위상 조절 기법을 구현하였다는 점에서, 이 연구의 의의가 있다. 유한요소 해석 및 실험을 통해 제안된 기법의 성능을 검증하였다. 제안된 기법을 사용하여 배관의 단 두께 변화에 따라 단에서 1차 비틀림 모드가 어떻게 반사하는지 그리고 2차 비틀림 모드도 어떻게 전환되는지를 효과적으로 분석할 수 있었다.

후 기

이 연구는 교육과학기술부 원자력연구개발사업(과제번호: 2012-0006397)의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Ditri, J. J., 1994, Utilization of Guided Elastic Waves for the Characterization of Circumferential Cracks in Hollow Cylinders, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 96, No. 6, pp. 3769~3775.
- (2) Lowe, M. J. S., Alleyne, D. N. and Cawley, P., 1998, Defect Detection in Pipes Using Guided Waves, *Ultrasonics*, Vol. 36, No. 1-5, pp. 147~154.
- (3) Demma, A., Cawley, P., Lowe, M., Roosenbrand, A. G. and Pavlakovic, B., 2004, The Reflection of Guided Waves from Notches in Pipes: A Guide for Interpreting Corrosion Measurements, *NDT & E International*, Vol. 37, No. 3, pp. 167~180.
- (4) Graff, K. F., 1991, *Wave Motion in Elastic Solids*, Dover Publications, NewYork.
- (5) Rose, J. L., Pelts, S. P. and Quarry, M. J., 1998, A Comb Transducer Model for Guided Wave NDE, *Ultrasonics*, Vol. 36, No. 1-5, pp. 163~169.
- (6) Hay, T. R. and Rose, J. L., 2002, Flexible PVDF Comb Transducers for Excitation of Axisymmetric Guided Waves in Pipe, *Sensors and Actuators, A*, Vol. 100, No. 1, pp. 18~23.
- (7) Li, J. and Rose, J. L., 2001, Implementing Guided Wave Mode Control by Use of a Phased Transducer Array, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 48, No. 3, pp. 761~768.
- (8) Cawley, P., Alleyne, D. N. and Chan, C. W., 2000, Inspection of Pipes, U.S. Patent 6148672.
- (9) Alleyne, D. N., Pavlakovic, B., Lowe, M. J. S. and Cawley, P., 2001, Rapid Long-range Inspection of Chemical Plant Pipework Using Guided Waves, *Insight*, Vol. 43, No. 2, pp. 93~96.
- (10) Kim, H. W., Kwon, Y. E., Lee, J. K. and Kim, Y. Y., Higher Torsional Mode Suppression in a Pipe for Enhancing the First Torsional Mode by Using Magnetostrictive Patch Transducers, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*(accepted).
- (11) Wooh, S. and Shi, Y., 2001, Synthetic Phase Tuning of Guided Waves, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 48, No. 1, pp. 209~223.
- (12) Pavlakovic, B. and Lowe, M., 2003, *Disperse User Manual: a System for Generating Dispersion Curves*, Imperial College, University of London.
- (13) Comsol Muliphysics, COMSOL Multiphysics Modeling Guide : Version3.5 (COMSOLAB, Stockholm, 2008).
- (14) Kwun, H., Kim, S. Y. and Crane, J. F., 2002, Method and Apparatus Generating and Detecting Torsional Wave Inspection of Pipes or Tubes, U.S. Patent 6429650.
- (15) Kim, Y. Y., Park, C. I., Han, S. W. and Cho, S. H., 2004, The Generation of Torsional Waves and the Pipe Diagnosis Using Magnetostrictive Transducers, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 144~149.
- (16) Kannan, E., Maxfield, B. W. and Balasubramaniam, K., 2007, SHM of Pipes Using Torsional Waves Generated by in Situ Magnetostrictive Tapes, *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 6, pp. 2505~2515.
- (17) Jiles, D. C., 1995, Theory of the Magnetomechanical Effect, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 28, No. 8, pp. 1537~1546.
- (18) Thompson, R. B., 1979, Generation of Horizontally Polarized Shear Waves in Ferromagnetic Materials Using Magnetostrictively Coupled Meander-coil Electromagnetic Transducers, *Applied Physics Letters*, Vol. 34, No. 2, pp. 175~177.
- (19) Carpenter Technology Corp. (2012, Nov. 30) Hiperc® 50HS Alloy. [Online]. Available: <http://www.cartech.com/ssalloysprod.aspx?id=2492>

Hoe Woong Kim received his PhD degree in Mechanical Engineering from Seoul National University, Seoul Korea in 2011. He currently works as a research associate at Fast Reactor Technology Demonstration Division, Korea Atomic Energy Research Institute. His research interest includes the design of ultrasonic mag-

netostrictive transducers, ultrasonic NDE, guided waves and in-service inspection.

Yoon Young Kim received his BS and MS degrees from Seoul National University and his PhD degree from Stanford University, 1989. He has been on the faculty of School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul

National University since 1991. His research interest includes the design optimization of multiphysics systems such as acoustostructural, structural-electromagnetic systems including the design of ultrasonic magnetostrictive transducers.