

## 자기변형 스트립 탐촉자에 의한 유도초음파 모드 변환에 대한 실험적 검증 및 해석

### Experimental Evidence and Analysis of a Mode Conversion of Guided Wave Using Magnetostrictive Strip Transducer

정용무

Yong-Moo Cheong

**초 록** 자기변형 탐촉자는 유도초음파를 적용한 장거리 배관 검사 시에 유용하게 사용되는데 특히 그 신호 패턴이 배열형 압전탐촉자를 사용한 유도초음파 신호보다 깨끗하고 단순하기 때문에 단일 결함에 의한 신호 패턴을 해석할 수 있을 뿐만 아니라 결함 신호의 진행 상황을 분석함으로써 배관의 구조 건전성 감시 (structural health monitoring)에도 사용되고 있다. 그러나 실제 현장 검사에서는 유도초음파의 방향성신호, 간향효과, 모드변환, 구조물 등에 의한 의사 신호 또는 거짓 신호가 나타나기 때문에 결함 평가 시에 주의를 요한다. 본 연구에서는 실제 상황을 모의한 장거리배관 mock-up에서 발생하는 모드변환 신호를 실험적으로 검증하고 해석하였다. 자기변형 스트립 탐촉자에서 발생한 비틀림진동 T(0,1) 모드와 휨진동 F(1,3) 모드 또는 종진동 L(0,2) 모드 간에 모드변환이 발생함을 확인하였고 이러한 모드변환이 발생하는 원인을 스트립 탐촉자 및 검사대상체의 전자기적 재료 특성 및 구조 측면에서 해석하였다.

**주요용어:** 유도초음파, 자기변형 탐촉자, 모드 변환

**Abstract** An advantage of a magnetostrictive strip transducer for a long-range guided wave inspection is that the wave patterns are relatively clear and simple when compared to a conventional piezoelectric ultrasonic transducer. Therefore, if we can characterize the evolution of defect signals, it could be a promising tool for a structural health monitoring of pipes for a long period of time as well as an identification of flaws. However, when evaluating a signal during a realistic field examination, it should be careful because of some spurious signals or false indications, such as signals due to a directionality, multiple reflections, mode conversion, geometrical reflections etc. Mode converted signals from a realistic piping mockup were acquired and analysed. We found mode conversions between a torsional guided wave T(0,1) mode and a flexural F(1,3) or longitudinal L(0,2) mode generated by a magnetostrictive strip transducer. Based on the experimental observations, an interpretation of the source of the mode conversion is discussed in a viewpoint of electromagnetic properties and structure of the strip transducer.

**Keywords:** Guided Wave, Magnetostrictive Transducer, Mode Conversion

#### 1. 서 론

열화손상이 예상되고 있다. 지난 40년간 세계적으로 약 4000건의 원전배관 손상과 누설이 보고되고 있으며 국내 원전에서도 고압터빈 배관의 손상, 원전의 가동기간이 증가함에 따라 각종 배관의

주중기 라인의 감육, 피더관의 감육 등 50여건이 보고되고 있다[1]. 원전 배관에 대한 비파괴검사서 안전 등급은 물론 비안전 등급 배관에서도 손상 및 누설이 발생하고 있는데, 대부분의 원전 배관은 구조적으로 복잡하고 보온재로 덮여져 있는 경우가 많으며 고방사능 지역에 위치할 경우 접근성이 제한된다. 이런 경우 전통적인 비파괴검사기술을 적용하기 어려워서 이에 대한 대안으로 유도초음파검사기술을 고려할 수 있다.

유도초음파검사기술은 스캐닝이 필요하지 않고, 초음파 감쇄가 작아서 장거리검사가 가능하므로 100% 체적검사가 가능하며 검사시간 및 비용이 절감되며 구조적으로 접근하기 어려운 부분의 검사도 가능하다는 장점이 있다. 그러나 해당 검사체에 대한 유도초음파 분산선도를 계산하고 검사 목적에 따른 최적 진동모드와 주파수를 선택해야 하며, 결함의 종류(corrosion, thinning, crack etc.)를 구분할 수 없고, 탐지능도 비교적 낮다는 단점을 갖는다.

현재 장거리 배관검사를 위해 상용화된 유도초음파 방식은 배열형 압전 세라믹 방식과 자기변형 특성을 가진 단일 스트립을 배관의 원주방향으로 감아서 유도초음파를 가진/수신하는 두 가지 방식이 있다. 이 중에서 자기변형 스트립 탐촉자 방식은 배열형 압전세라믹 탐촉자 방식에 비해 구조가 간단하고 가격이 저렴하다[2].

자기변형 스트립 탐촉자는 자기바이어스의 방향과 교류 자장의 방향을 선택함에 따라 비틀림진동 모드(torsional vibration mode  $T(0,n)$ ), 종진동 모드(longitudinal vibration mode  $L(0,n)$ ) 또는 휨진동 모드(flexural vibration mode  $F(m,n)$ ) 등 배관에서 가능한 모든 진동 모드의 유도초음파를 발생시킬 수 있다[3].

유도초음파 분산선도 상에 다양한 진동모드 가운데 특히 비틀림 진동모드 ( $T(0,1)$ )은 주파수의 변화에 따른 속도의 차이가 없는 즉 분산성이 없기 때문에 매우 날카로운 신호 형태를 얻을 수 있으며 물리적으로 평판에서 SH(shear horizontal) 진동모드처럼 반경방향으로의 변위가 없기 때문에 배관 내부에 물이 차있는 경우에도 감쇄가 적다는 장점이 있다[4]. 이러한 신호 특성을 이용하면 신호 진폭 및 위상 분석을 통하여 결함에 대한 특성 및 정량적 평가는 물론 구조 건전성 감시(structural health monitoring) 에도 활용 가능하다[5].

본 연구에서는 실제 원전 배관을 모의하는 장거

리 배관 mock-up 을 제작하여 자기변형 스트립 탐촉자에 의한 다양한 유도초음파 신호를 수집, 평가하였다. 직류 바이어스 자화된 Fe-Co-V 합금 스트립과 교류 코일을 사용하여 비틀림진동  $T(0,1)$  모드를 가진/수신하였으며 수집된 다양한 결함 신호를 평가하여 그 진행 경로 및 발생 원인을 설명하였다. 특히 다양한 의사 신호 또는 거짓 신호를 평가하는 과정에서 나타나는 모드변환 신호를 해석하고 그 발생 원인을 자기변형 스트립 탐촉자 및 검사대상 배관 재료의 전자기 특성 관점에서 해석하였다.

## 2. 자기변형 탐촉자에 의한 비틀림진동 $T(0,1)$ 모드 유도초음파 가진

비틀림진동  $T(0,1)$ 모드 유도초음파를 자기변형 탐촉자와 장치를 사용하여 가진 및 수신하였다. 비틀림진동  $T(0,1)$ 모드는 축대칭 모드이므로 축 방향으로 유도초음파를 진행시키기 위해서는 Ni 이나 Fe-Co-V 합금과 같이 자기변형 특성이 우수한 강자성 스트립을 에폭시 접착제를 사용하여 배관의 원주방향으로 감아서 접착시킨 뒤 원주 방향으로 직류 바이어스 자화 상태를 형성해야 한다. 직류 바이어스 자화 형성을 위해 다양한 방법이 가능하나 현장 검사의 편리성 및 효율성 측면에서 Fig. 1에 보인 바와 같이 영구자석을 자기변형 스트립의 원주방향으로 회전시킴으로서 자기변형 스트립에 직류 바이어스 자화가 유도되도록 한다. 여기에 교류 전류를 코일에 인가하여 발생하는 면 축방향 교류 자장과 원주방향 직류 바이어스 자화가 서로 작용하여 Fig. 2에 보인 바와 같이 전단 변위(shear displacement)가 발생하는 데 이러한 물리적 현상을 Wiedermann 효과라고 칭한다[6]. 이렇게 자기변형 스트립에 발생한 전단 변위가 에폭시접합을 통하여 배관으로 전달되어 비틀림진동  $T(0,1)$ 모드가 배관을 따라 전파하게 된다.

## 3. 장거리배관 Mock-up 제작

원전 배관에 대한 유도초음파 검사기술을 실증하기 위해 탄소강 및 스테인리스강 배관을 사용하여 실제 상황을 모의하는 장거리배관 mock-up을 제작하였다. 제작된 장거리배관 mock-up은 각각 공칭 직경 150 mm, 두께 11 mm (schedule No. 80), 총 길이 22 m 이다. 사용된 탄소강 배관 재료로는 원

전 제작 및 검사 관련 규정인 ASME 코드에 근거하여 ASTM A106/ASME SA106 seamless pipe, 스테인레스강 배관 재료로는 ASTM A312/ASME SA312 seamless pipe를 사용하였으며 Fig. 3에 보인 바와 같이 각각 butt weld 3개소와 elbow weld 1개소를 제작하였다. 원전 배관 제작시에 사용하는 용접 절차서 및 품질보증 절차서에 따라 TIG 용접 (tungsten inert gas welding)을 실시하였고 원전 가동중검사에 적용하는 침투탐상검사 및 방사선투과검사를 실시하여 모든 용접부에서 결함이 존재하지 않음을 확인하였다.

배관 끝단에서 7.5 m 위치에 Fe-Co-V 자기변형 스트립 탐촉자를 설치하였으며 이를 기준으로 +9.5 m 위치에 hole 결함, -5.5 m 위치에 crack 을 모사하는 원주 방향 notch, +3.5 m 및 -2.5 m 위치에 축 방향 notch, 그리고 elbow 위치에 감육을 모사하는 인공 결함을 가공하였다.



Fig. 1 DC bias magnetization of magnetostrictive strip by a permanent magnet

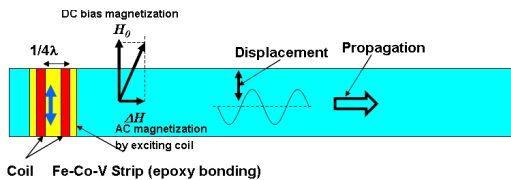


Fig. 2 Generation of torsional guided waves by a magnetostrictive strip transducer

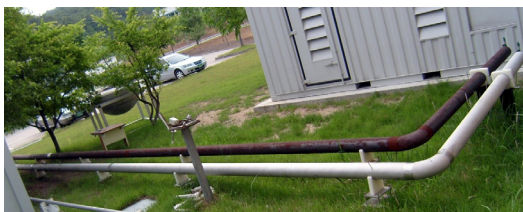


Fig. 3 A photo of a pipe mock-up with defects and an elbow

#### 4. 실험 결과 및 토의

##### 4.1. 비틀림 진동 모드변환 신호 및 해석

Fe-Co-V 자기변형 스트립 탐촉자를 사용하여 장거리배관 mock-up에서 수집된 전형적인 유도초음파 신호 사례를 Fig. 4에 보였으며 용접부, 방향성 효과, 잔향 효과 등과 같은 배관의 구조적 특성에 기인한 유도초음파 신호와 hole, notch, 감육 등과 같은 결함 신호를 해석하였다. 먼저 배관의 구조적 특성에 기인한 신호를 일일이 확인하여 이들을 배제한 나머지 신호에 대해 실제 결함 신호인지 거짓 신호 또는 의사 신호인지를 판명하였으며 이를 위해 각 신호의 파형 진폭과 위상을 분석하고 이를 실제 결함과 연관지었다.

여기서 특이한 사항의 하나로 소구경 튜브, 스테인리스강이나 알루미늄과 같이 비자성체 배관을 검사할 때 Fig. 5에 보인 바와 같이 그 진폭이 매우 큰 배관 끝단 신호의 전면에 결함이나 구조적 신호에 해당하지 않는 확인할 수 없는 신호가 나타나는 경우가 있다.

이러한 끝단 신호 앞에 나타나는 신호는 그 신호 패턴이 분산성을 보이므로 모드변환에 의한 신호인

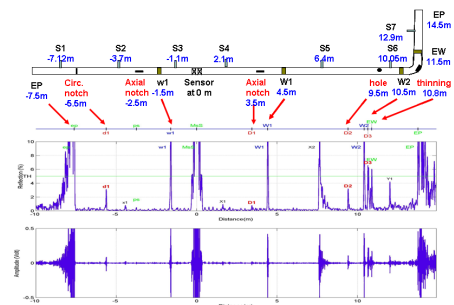


Fig. 4 Defect identification from a guided wave signal obtained from a carbon steel piping mock-up

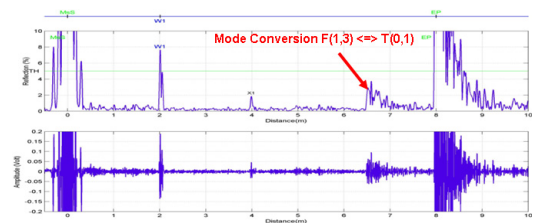


Fig. 5 An example of mode converted signal from the end of pipe

지를 확인하기 위해 우선 Fig. 6에 보인 탄소강 배관의 군속도 분산선도에서 가능한 진동모드를 고려한다.

Fig. 6에서 보인 바와 같이 주파수 64 kHz에서 가능한 진동 모드는 비틀림 진동 T(0,1) 모드, 종진동 L(0,2) 모드, 그리고 횡진동 F(1,3) 모드가 가능하며 이들 모드에 대한 음속은 각각 T(0,1) 모드에 대해 3,250 m/s, L(0,2) 모드 및 F(1,3) 모드의 경우 5200 m/s 임을 알 수 있다.

Fig. 5에서 횡축의 단위는 시간으로써 탐촉자로부터 반사체까지 왕복 비행시간을 의미하는데 배관 끝단 신호 전면에 해석할 수 없는 신호는 탐촉자에서 가진되어 T(0,1) 모드, 음속 3250 m/s 의 속도로 진행하다가 배관 끝단에서 반사할 때 F(1,3) 또는 L(0,2) 모드로 변환되어 5200 m/s 의 속도로 돌아온다고 가정할 경우, 계산된 비행시간과 정확히 일치하였으므로 Fig. 7에 보인 방식으로 모드변환된 신호로 간주할 수 있다.

여기서 발생하는 모드변환은 처음에 탐촉자에서 가진된 T(0,1) 진동모드가 배관 끝단에서 F(1,3) 또는 L(0,2) 모드로 변환되는 경우와 그 반대의 경우를 가정할 수 있다. 두 경우가 모두 가역적인 과정이므로 모두 가능하나 본 실험의 경우 실제로는 영구자석에 의해 자기변형 스트립에 유도된 직류 바이어스 자화가 완벽하게 원주방향으로 배열하지 않을 가능성과 종방향, 반경방향 및 원주방향의 변위 성분이 존재하는 횡진동 모드가 배관 끝단에서

모드변환될 가능성이 더 높아서 후자의 경우가 더 타당하다고 판단된다. 이에 대한 사항은 4.2절에서 자세히 다룬다.

또한 해당 주파수에서 L(0,2) 모드와 F(1,3) 모드의 음속이 같으므로 두 경우 모두 가능한데 실제로는 L(0,2) 모드는 축 방향을 기준으로 대칭 특성인 반면에 F(1,3) 모드는 비대칭 특성을 나타내므로 F(1,3) 모드일 가능성이 더 높다고 판단된다.

#### 4.2. 자기변형 스트립의 잔류자화 특성과 모드변환 모델

앞서 기술한 바와 같이 배관 끝단에서 F(1,3) 진동 모드에서 T(0,1) 진동모드로 모드변환이 발생하였다고 가정하면 그 비행시간이 정확히 일치하므로 모드 변환신호로 해석되는데 이렇게 되기 위해서는 자기변형 스트립에서 F(1,3) 진동 모드가 발생해야 한다.

자기변형 스트립에서 T(0,1) 모드를 가진하기 위해서는 스트립 내에 모든 자구(magnetic domain)가 배관의 원주방향으로 배열해야 하며 이를 위해 다양한 자화 방법을 사용할 수 있다. 본 경우에는 현장검사의 편리성 때문에 Fig. 1에 보인 바와 같은 영구자석을 이용한 자화법을 사용하였다. 탄소강과 같은 강자성체 배관에 대해 영구자석을 사용하여 직류 바이어스 자화시키면 Fig. 8(a)에 보인 바와 같이 두꺼운 강자성체 위에 얇은 자기변형 스트립을 배치한 경우이므로 영구자석을 제거하더라도

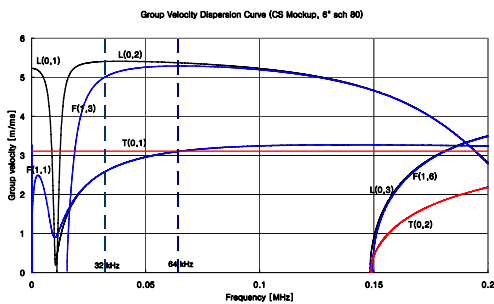


Fig. 6 A group velocity dispersion curves of a carbon steel piping mock-up with 6 inch diameter and schedule No. 80

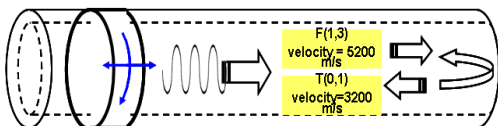
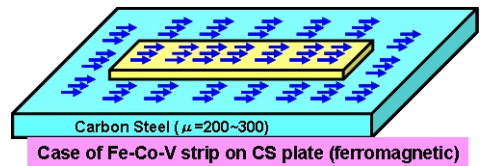
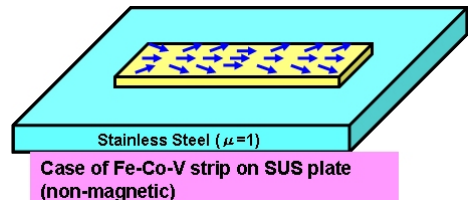


Fig. 7 Illustrations of a mode conversion from a F(1,3) mode to a T(0,1) mode at the end of pipe or vice versa



(a) case of ferromagnetic pipe



(b) case of non-magnetic pipe

Fig. 8 Illustrations of the case of (a) a magnetostrictive strip glued on a ferromagnetic plate and (b) a magnetostrictive strip glued on a non-magnetic plate

도 일단 자화된 자기변형 스트립 내에 자구의 방향은 열역학적으로 안정적이다.

그러나 스테인리스강과 같은 비자성체 배관을 검사할 경우에는 일부 자구의 자화 방향이 원주방향과 일치하지 않을 가능성이 있다. 즉 T(0,1) 모드를 발생시키기 위해서는 자기변형 스트립 내에 모든 자구(magnetic domain)들이 원주 방향으로 배열해야 하는데 단순히 영구자석을 사용하여 스테인리스강과 같이 비자성체 배관을 검사할 경우 Fig. 8(b)에 보인 바와 같이 일부 자구들이 원주방향과 평행하지 않게 배열될 수 있다. 이것은 상대적으로 두꺼운 비자성체 배관 위에 얇은 자기변형 스트립이 접촉된 상태로 자화시킬 경우 영구자석이 지나간 후 자기변형 스트립의 모서리나 테두리 부분에서는 열역학적인 안정성을 유지시키기 위해 자구 방향이 회전하거나 변형되어 원주 방향에 평행하지 않은 상태로 유지될 수 있기 때문이며 이런 상태로 코일에 의한 교류자화가 가해질 경우 F(1,3) 진동모드가 발생할 가능성이 가장 높다. 또한 T(0,1) 진동모드의 경우 변위벡터가 원주방향 성분만이 존재하는데 비해 F(1,3) 진동모드는 반경방향, 원주방향, 축방향의 모든 방향 성분이 존재하므로 Fig. 5에 보인 신호는 T(0,1) 모드에서 F(1,3) 모드로의 변환 가능성보다는 F(1,3) 모드에서 T(0,1) 모드로의 변환 가능성이 높다고 추론된다.

본 연구에서는 실험적으로 수집된 유도초음파를 분석하였고 이 가운데 일부 설명하기 어려운 신호에 대해 모드변환 모델을 제시하여 완벽하게 해석하였으며 현장 검사 측면에서 모드변환이 발생하는 이유를 추론하였다. 유도초음파의 모드변환 특히 비틀림 진동 모드의 변환에 대한 이론적 모델이나 수치해석적 기법으로 비틀림 진동 모드의 변환 해석을 통하여 본 연구에서 밝힌 실험적 현상을 정량적으로 해석할 수 있을 것이며 현장 검사에서 부딪히는 다양한 신호 해석상에 문제점을 해결할 수 있으리라 판단된다.

## 5. 결론

원전 배관에 대한 유도초음파 검사를 실증하기 위해서 실제 배관을 모의하는 장거리배관 mock-up을 제작하였다. 자기변형 스트립 탐촉자에 의한 유도초음파 신호가 상당히 깨끗하고 분명하기 때문에 진폭 및 위상 분석을 통하여 다양한 반사체, 즉 원주 방

향 notch, 축 방향 notch, hole과 같은 결합 신호는 물론 용접부, 방향성 효과, 잔향 효과 등과 같이 배관의 구조적 특성에 기인한 신호들을 해석하였다.

소구경 배관이나 스테인리스강 같은 비자성 배관을 검사할 때 흔히 나타나는 모드변환 신호를 F(1,3) 모드에서 T(0,1) 진동모드로 변환이 일어났다고 해석하였으며 이를 바탕으로 실험적으로 수집된 신호를 평가하였다. 또한 이러한 모드변환이 발생하는 원인으로 영구자석을 사용한 자기변형 스트립의 직류 바이어스 자화에서 자구들이 완벽하게 일방향성으로 배열하지 않음으로써 일부 자구에서 바이어스 자화 방향과 배관의 원주 방향이 평행하지 않게 되어 F(1,3) 모드가 발생하며 이 신호가 배관 끝단에서 T(0,1) 모드로 변환할 가능성에 대해 설명하였다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업 과제에서 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 정용무 외, "원전배관 손상사례 분석 및 유도초음파검사 적용 방안", KAERI/TR-3219/2006, 한국원자력연구원, (2006)
- [2] 정용무 외, "자재 유도초음파 기술에 의한 배관의 결함탐지", KAERI/TR-2927/2005, 한국원자력연구원, (2005)
- [3] J. L. Rose, "Ultrasonic waves in solid media," pp. 155-176, Cambridge University Press, (1999)
- [4] H. Kwun, K. A. Bartels and C. Dynes, "Dispersion of longitudinal waves propagating in liquid-filled cylindrical shells," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 105, No. 5, pp. 2601-2611, (1999)
- [5] H. Kwun, S. Y. Kim and G. M. Light, "The magnetostrictive sensor technology for long range guided wave testing and monitoring of structures," Materials Evaluation, Vol. 61, No. 1, pp. 80-84, (2003)
- [6] N. S. Tzannes, "Joule and Wiedermann effects - the simultaneous generation of longitudinal and torsional stress pulses in magnetostrictive materials," IEEE Sonics & Ultrasonics, Vol. SU-13, No. 2, pp. 33-41, (1966)