

## EMAT 비틀림 모드를 적용한 중수로 피더관의 균열 검출

### Detection of Cracks in PHWR Feeder Pipe Using an EMAT Torsional Guided Wave

정용무, 이동훈, 김상수, 정현규

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

중수로 피더관에서의 균열 탐지를 위해서 비틀림 모드 유도초음파 검사법을 적용하였다. 중수로 피더관에 대한 위상속도 및 군속도 분산선도를 정밀 계산하였으며 이중 비틀림 모드를 적용한 결함 탐지법을 개발하였다. 비틀림 모드의 생성 및 수신을 위하여 배열형 전자기음향 탐촉자 (EMAT, Electromagnetic Acoustic Transducer)를 설계, 제작하였다. 직경 2.5 인치의 배관에 대해 주파수 200 kHz의 비틀림 모드 유도초음파를 적용하였으며 가진용으로 4개의 배열형 EMAT를 제작하였으며, 별도의 수신용 EMAT를 설계 제작하였다. 실제 중수로 피더관 mock-up에 대해 곡관부에 다양한 깊이의 인공 결함을 가공한 뒤 약 2 m 거리에서 각각의 탐지능을 실험하였다. T(0,1) 비틀림 모드를 적용하여 그 깊이가 관 두께 대비 5% 인 결함의 경우에도 성공적으로 탐지할 수 있었으나 결함의 깊이와 신호 진폭과의 관계성은 나타나지 않았다.

#### Abstract

A torsional guided wave mode was applied to detect the crack in the PHWR feeder pipe. The dispersion curves of phase velocities and group velocities for the feeder pipe were calculated. An array of electromagnetic acoustic transducer(EMAT) for generation and reception of torsional guided ultrasound with the frequency of 200 kHz was designed and fabricated for a pipe diameter of 2.5 inch. Various artificial notches were fabricated in the bent feeder pipe and the detectability was examined from the distance of 2 m of the specimen. The axial notches with the depth of 5% of wall thickness were successfully detected by a torsional mode (T(0,1)) generated by the EMAT. However, it was found that the depth of defects was not related to the signal amplitudes.

## 1. 서론

중수로 피더관은 중수로 압력관에 원자로 냉각재인 중수를 공급하고 핵분열 반응에 의해서 가열된 중수를 증기발생기로 보내는 배관으로 600 MW급 가압중수로형 원자로에는 입구측 380개, 출구측 380 개의 배관으로 구성된다. 각각의 압력관 별로 중수를 공급해야 하므로 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 구조적으로 매우 복잡한 형상을 가지며 공간 문제로 인하여 2회 굽힘 부분이 존재한다. 중수로 피더관은 원래 초기 설계, 건설 시에는 특별한 검사 요구 사항이 필요치 않았는데 캐나다의 중수로 원전에서 1996년이래로 수차례에 걸쳐 곡관부 균열이 발생하고 누설 사고가 발생하였다. 이에 따라 피더관의 건전성을 확보하기 위한 비파괴검사가 필요하게 되었다. 그러나 대부분의 피더관에서 균열 발생 위치인 피더관 곡관부로의 접근이 거의 불가능하며 비록 검사자의 접근이 가능한 피더관이라 할지라도 고방사능 지역이라서 일반적인 비파괴검사 방법을 적용하기가 매우 어렵다.

이에 대한 대책으로 몇 가지 특수한 초음파 탐상 기술을 고려해 볼 수 있는데 본 논문에서는 앞서 발표한 휨 모드 유도초음파 기법 및 원주방향 유도초음파 검사기법[1-3]에 이어 피더관에서 특별히 문제가 되고 있는 곡관부 축방향 균열 탐지에 민감할 것으로 예측되는 비틀림 모드(torsional mode) 유도초음파를 적용하였다. 배관에서 비틀림 모드 유도초음파의 가진 및 신호수신을 위해서 배열형 전자기음향탐촉자 (EMAT; electromagnetic acoustic transducer)를 설계, 제작하였으며 실제 피더관 곡관부에 가공된 인공 결함에 대한 원거리 결함 탐지능을 실험하여 실제 가동중검사 현장에서의 적용 가능성을 타진하였다.

## 2. 중수로 피더관의 유도초음파 분산모드 계산

유도초음파는 배관이나 박판과 같이 구조물의 두께가 비교적 얇을 경우, 기하학적 구조를 따라 길이 방향으로 전파하는 파동으로써 종파와 횡파가 구조물의 벽면 사이를 수없이 반사하면서 중첩되어 나타나는 새로운 초음파이다. 유도초음파는 일반적인 체적파와는 매우 다른 특성을 가지게 되는데 특히 무한개의 파 모드가 광범위한 주파수 범위에 걸쳐 존재한다는 점과 주파수와 두께에 따라 전파 속도가 변화하는 분산 특성을 가진다. 따라서 주어진 주파수 영역에서 존재하는 유도초음파 모드의 분산 특성을 나타내는 분산선도를 계산하고 이를 고려한 검사 조건을 설정해야 한다. 배관의 유도초음파에 관한 연구는 1960년대에 기초적 연구[4]가 수행되다가 1990년대에 열교환기 튜브나 배관의 비파괴 검사에 적용하기 위한 이론적, 실험적 연구가 활발히 진행되었다[5-10]. 최근에 원자력발전소의 증기 발생기 전열관의 비파괴검사에 유도초음파를 응용하기 위한 시도가 있었으며 [11,12] 각종 석유화학 배관이나 박판의 비파괴검사에 다양하게 응용되고 있다.

본 연구에서는 피더관의 분산선도를 계산하기 위하여 분산선도 계산 프로그램을 자체 개발하였으며 이를 이용하여 피더관의 제원 및 음속을 입력하여 위상속도 및 군속도 분산선도를 구했다. 보통 압전형 초음파 탐촉자를 사용할 경우 Fig. 2와 같은 위상속도 분산선도를 기초로 하여 선정된 주파수 및 모드에 대한 초음파 탐촉자 입사 각도를 계산할 수 있으며 Fig. 3에서 군속도 분산선도를 이용하여 발생한 유도초음파 모드 및 해당 주파수에서의 음속을 알아낼 수 있다. Fig. 2 및 Fig. 3에 보인 바와 같이 수많은 진동 모드가 존재하는 데 크게 나누어 종 모드(longitudinal mode)  $L(0,n)$ , 휨 모드(flexural mode)  $F(m,n)$  및 비틀림 모드  $T(0,n)$  으로 대별한다. 여기서 종 모드는 주된 변위가 축 방향이며 휨 모드는 축 방향, 원주 방향 및 반경 방향인 데 반해 비틀림 모드는 원주 방향 변위를 가진다. 비틀림 모드는 평판에서의 SH (shear horizontal) 모드와 물리적으로 동일한 특성을 가지기 때문에

모드 변환이 없고 Fig. 2 및 Fig. 3에서 비틀림 모드 T(0,1)의 분산선도를 살펴보면 대략 200 kHz 이상에서 위상속도 및 군속도가 일정한 특성을 나타낸다. 즉 T(0,1) 모드는 분산성이 없는 진동 모드로 주파수가 변화하더라도 음속의 변화가 없이 일정하며 군속도는 횡파 속도와 같다. 배관에서의 비틀림 모드의 변위 및 진행 방향과 결합과의 관계를 Fig. 4에 나타냈다. 또한 비틀림 모드는 전통적인 압전형 초음파 센서를 배열하는 것보다는 진동 모드 제어가 용이한 전자기 음향파 센서 방식이 유리하다.

### 3. 비틀림 모드 유도초음파 가진을 위한 배열형 EMAT 설계 제작

EMAT는 영구자석 (또는 전자석)으로 자장을 가하고 코일에 교류 전류를 인가하여 시편 표면에서 초음파를 발생시키는 센서로써 전자기현상에 따른 로렌츠 힘(Lorentz force)과 자왜력(magnetostrictive force)을 이용한다. 시험체 재료가 비자성체인 경우에는 로렌츠 힘을 이용하고 강자성체인 경우에는 자왜력까지 이용할 수 있다. EMAT의 강점은 종래의 압전형 초음파 탐촉자와는 달리 접촉매질이 불필요하다는 점과 원하는 코일 및 자석의 배치에 따라 원하는 초음파 모드를 가진, 수신할 수 있을 뿐만 아니라 재료의 초음파 특성 평가시에 위상까지 고려한 정밀한 측정이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 전자기 에너지에서 음향에너지로의 변환 효율이 낮아서 신호대 잡음비가 나쁘다는 단점이 있으며 이를 극복하기 위하여 최근에는 펄스 에너지가 크고 주파수 폭이 좁은 tone burst 방식을 사용하여 유도초음파를 발생시키는 것이 일반적이다. 또한 EMAT 가진/수신 시에는 송수신 코일과 장비 사이의 임피던스 정합이 매우 중요하므로 실제 EMAT를 제작할 경우 이점을 매우 주의하여야 한다.

관재를 비파괴 검사할 경우 모드 변환이 없는 SH mode를 사용하면 용접부 내에서 빔의 skewing이 적고, 경계면에서 반사 시 모드 변환이 없는 특성을 가지므로 용접부 탐상에 매우 유리한 모드인데 EMAT를 사용하면 SH파를 비교적 쉽게 송수신할 수 있기 때문에 용접부 내에 결합 탐상에 유리하다. 강자성체 배관에 대해 적용하면 주된 변위는 자왜(magnetostriction)에 의해 발생하며 배관 표면에 대해 수평 방향으로 진동하는 비틀림 모드 또는 SH mode가 송수신되며 이때 유도초음파는 배관의 축방향으로 진행한다[17]. 또한 EMAT는 비접촉식이므로 가진 신호와 반사 신호의 위상 일치까지도 고려하면서 초음파 속도를 정밀하게 측정할 수 있다. 이런 점을 이용해서 재료 내부의 미세조직에 따른 특성을 분석할 수 있으며 재료의 잔류응력이나 집합조직을 측정할 수 있어서 재료물성 평가에 많은 응용이 이루어지고 있다. 한편 배관 결합 탐상을 위해서 EMAT를 이용한 유도초음파 검사법이 가능한 데 대구경 배관의 경우 배관의 원주방향으로 진행되는 유도초음파 EMAT 기술이 개발된 바 있고 소구경 배관의 경우에는 축방향으로 진행되는 원거리 유도초음파 기술을 적용하여 단시간 내에 많은 검사 범위를 소화해 낼 수 있다.

본 연구에서는 배관의 축방향으로 진행되는 비틀림 모드 유도초음파를 송수신하기 위하여 Fig. 5에 보인 바와 같은 배열형 EMAT를 설계, 제작하였다. 송신용 배열형 EMAT에서 발생된 T(0,1) 모드가 비틀림 모드로 배관을 진행하다가 곡관부 균열에서 되돌아오는 초음파 에너지를 수신용 EMAT에서 감지하도록 제작되었다.

### 4. 실험 방법

본 실험에서는 고출력 tone burst EMAT 장비를 사용하여 비틀림 모드 유도초음파를 발진하고 수신용 EMAT로 신호를 취득하였다. 피더관 재질은 ASTM A106 Grade B (Seamless carbon

steel pipe for high temperature service)이며 실험에 사용된 피더관은 Fig. 6 와 같이 실제 중수로에 사용되는 피더관과 형태와 동일하게 2회에 걸쳐 냉간 굽힘 가공을 한 뒤 2차 굽힘부에 EDM notch를 가공하였다. 가공된 인공 결함의 제원은 Table 1과 같다.

## 5. 실험 결과 및 고찰

제작된 배열형 EMAT를 사용하여 주파수 200 kHz에서 비틀림 모드로 다양한 notch 깊이에 대해 검사한 결과를 Fig. 7에 보였다. Fig. 5와 같은 형태의 배열형 EMAT를 피더관 시편 끝부분에 장착하고 신호를 수집할 경우에는 가진용 EMAT와 수신용 EMAT 간에 거리가 존재하므로 이에 따른 여러 가지 빔 경로가 존재하고, 일반적으로 하나의 결함에 대해서 소위 말하는 나비 형태(butterfly shape)의 약간 복잡한 신호가 나타난다. 그러나 T(0,1) mode는 앞서 Fig. 2 및 Fig. 3에 위상속도 및 군속도 분산선도에서 살펴본 바와 같이 분산성이 없기 때문에 음속이 일정하다.

Fig. 7(a)과 Fig. 7(b)~(e)를 비교해 보면 무결함 시편의 경우(Fig. 7(a))에서는 결함 거리=2.3 m에서 신호가 나타나고 있지 않으나 Fig. 7(b)~(e)에서 보인 바와 같이 각각 관벽 두께 대비 5%, 10%, 20%, 40% notch에 대한 결함 신호를 탐지할 수 있다. 한편 일반적으로 결함의 깊이가 깊어짐에 따라 수신신호의 진폭이 증가할 것으로 예측할 수 있는 데 본 실험의 경우, 동일한 검사 조건에서 결함 깊이와 수신 신호 진폭과의 연관성은 나타나지 않고 거의 일정한 진폭을 나타내고 있는 데 그 이유에 대해서는 향후 추가 실험 및 고찰이 필요하다고 판단된다. 그밖에 Fig. 7(a)~(e)에서 거리=3 m 부근에서 나타난 복잡한 신호들을 규명하기 위해서 단시간 푸리에 변환(STFT; Short Time Fourier Transformation)으로 분석해 본 결과 순수한 T(0,1) 모드로 판명되었다. 따라서 이들 복잡 신호는 송신 EMAT와 수신 EMAT 간에 거리 차이에 의한 다양한 빔 경로 또는 시간이 존재하기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

본 연구에서 실제 중수로 피더관과 동일한 시편에서 결함 깊이가 관벽 두께 대비 5%인 작은 결함도 뚜렷하게 탐지할 정도로 우수한 결함 탐지 능력을 보이는 바, 중수로 피더관의 제한된 접근성 및 고방사능의 열악한 검사 환경을 고려할 때 배열형 EMAT에 의한 비틀림 모드 유도초음파 검사 방법이 타당성이 있는 것으로 판단되며 향후 실증 실험, 검사절차서 작성 및 검증 과정을 거쳐 중수로 피더관의 가동중검사에 적용될 수 있을 것이다.

## 6. 결론

- 1) 피더관 곡관부 축방향 균열을 원거리에서 탐지하기 위해서 EMAT를 사용한 비틀림 모드 유도초음파 탐상법을 개발하였다. 피더관의 위상속도 및 군속도 분산선도를 계산한 뒤 이를 바탕으로 피더관 제원에 맞는 배열형 EMAT를 설계, 제작하였으며 tone burst 펄스 방식으로 주파수 200 kHz의 비틀림 모드 유도초음파를 가진한 뒤 별도의 수신 EMAT로 수신신호를 취득하였다.
- 2) 실제 피더관과 동일한 냉간 굽힘가공을 시행한 시험편에 축방향 notch를 가공하였으며 T(0,1) 모드로 실험한 결과, 결함 깊이가 관벽 두께 대비 5% 인 notch에 대해서도 검출할 수 있었으나 결함 깊이와 신호 진폭과의 연관성은 없었다.
- 3) 중수로 피더관의 열악한 검사 환경을 고려할 때 배열형 EMAT에 의한 비틀림 모드 유도초음파 검사법이 가장 타당성이 있는 것으로 판단되며 앞으로 실증 실험, 검사절차서 작성 및 검증 과정을 거쳐 중수로 피더관의 가동중검사에 적용할 수 있을 것이다.

## 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업 중 중수로 피더관 결함 검사 기술 개발 과제에서 수행되었습니다.

## 참고 문헌

1. Y. M. Cheong, D. H. Lee, S. S. Kim and H. K. Jung, "Analysis of circumferential guided wave for axial crack detection in a feeder pipe", 11th APCNDT, Jeju island, Korea, (2003.11)
2. 정용무, 이동훈, 김상수, 정현규, "배관의 축방향 균열 검사를 위한 원주 유도초음파 모드 해석", 한국원자력학회 2003 추계학술대회, 용평, (2003.10)
3. Y. M. Cheong, D. H. Lee and H. K. Jung, "Optimization of ultrasonic guided wave parameters for crack detection in feeder pipe of PHWR nuclear power plants", Ultrasonic International '03, Granada, Spain, (2003. 6)
4. D. C. Gazis, "Three dimensional investigation of propagation of waves in hollow circular cylinders. I. Analytical foundation", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 31 (5), pp.568-573, (1959)
5. J. L. Rose, Ultrasonic Waves in Solid Media, pp.96, Cambridge University Press, (1999)
6. J. J. Ditri and J. L. Rose, "Excitation of guided elastic wave modes in hollow cylinders by applied surface tractions", J. Appl. Phys. Vol. 72 (7), pp.2589-2597, (1992)
7. J. J. Ditri, "Utilization of guided elastic waves for the characterization of circumferential cracks in hollow cylinders", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 96, pp.3769-3755, (1994)
8. J. L. Rose, J. J. Ditri, A. Pilarski, K. M. Rajana, and F. Carr, "A guided wave inspection technique for nuclear steam generator tubing", NDT & E Int., Vol. 27 (6), pp.307-310, (1994)
9. H. Kwun and K. A. Bartels, "Experimental observation of elastic-wave dispersion in bounded solids of various configurations", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 99 (2) pp.962-968, (1996)
10. D. N. Alleyne and P. Cawley, "The excitation of Lamb waves in pipes using dry-coupled piezoelectric transducers", J. NDE, Vol. 15 (1) pp.11-20, (1996)
11. H. J. Shin and J. L. Rose, "Guided wave tuning principles for defect detection in tubing", J. NDE, Vol. 17 (1), pp.27-36, (1998)
12. 신현재, J. L. Rose, 송성진, "유도초음파를 이용한 열교환기 튜브 탐상", 비파괴검사학회지, Vol. 20 (1), pp.1-9, (2000)
13. 송성진, 박준수, 신현재, "폴리에틸렌 코팅 가스 배관의 광범위탐상을 위한 유도초음파 모드 선정 및 결함 검출", 비파괴검사학회지 Vol. 22 (4), pp.406-414, (2001)
14. Y. Cho and J. L. Rose, "Guided wave in water loaded hollow cylinder", Nondestr. Test Eval. Vol. 12, pp.323-339, (1996)
15. J. Li and J. L. Rose, "Excitation and propagation of non-axisymmetric guided waves in a hollow cylinder", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 109 (2), pp.457-464, (2001)

16. J. Qu and L. J. Jacobs, "Guided circumferential waves and their applications in characterizing cracks in annular components", Mater. Eval. Vol. 61(1), pp.85-93, (2003)
17. M. Hirao and H. Ogi, "An SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection", NDT&E International, Vol. 32, pp,127-132, (1999)

Table 1. Dimensions of artificial notches on bent feeder pipe (unit: mm)

Notch	Length	Depth	Width
#1 (axial)	25	0.33 (5%t)	0.15
#2 (axial)	25	0.65 (10%t)	0.15
#3(axial)	25	1.3 (20%t)	0.15
#4(axial)	25	2.5 (40%t)	0.15



Fig.1 Feeder pipes in pressurized heavy water reactor

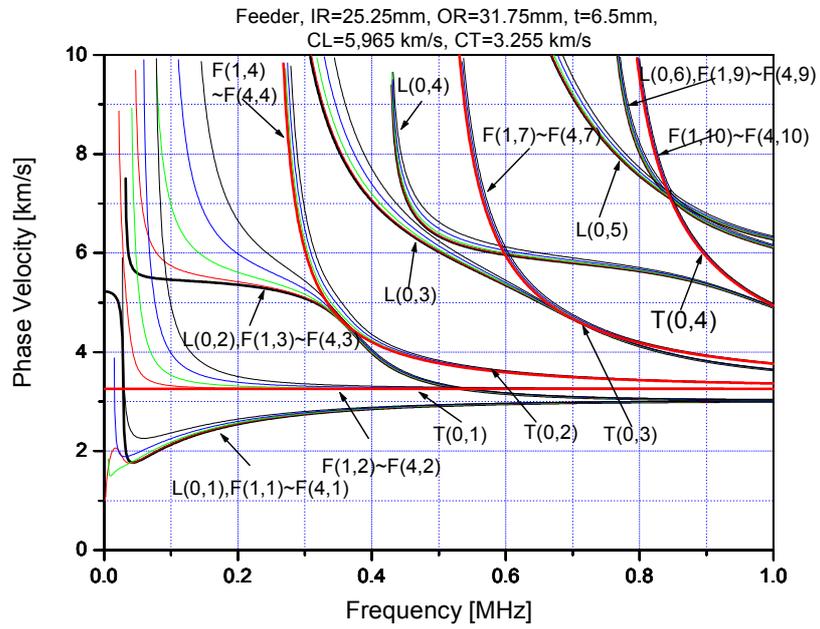


Fig.2 Phase velocity dispersion curve for feeder pipe

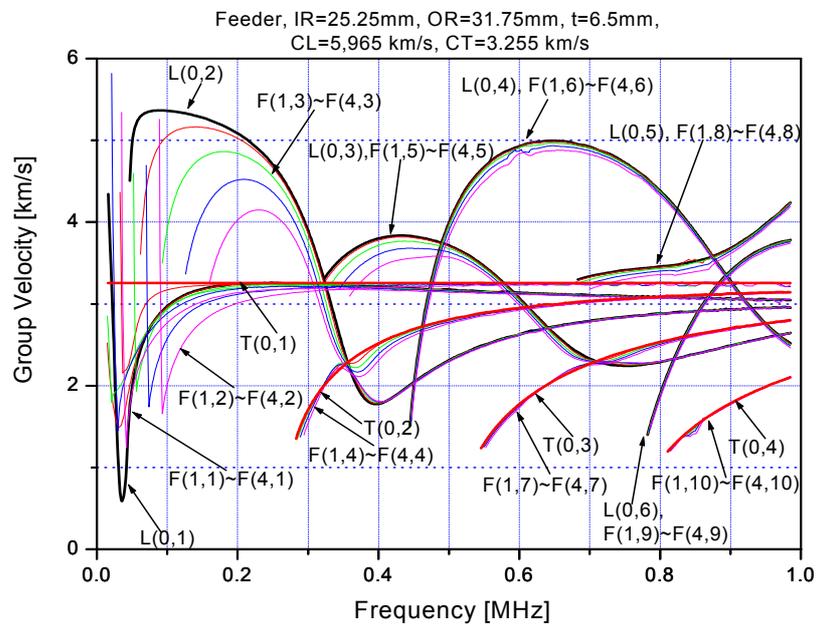


Fig. 3 Group velocity dispersion curve for feeder pipe

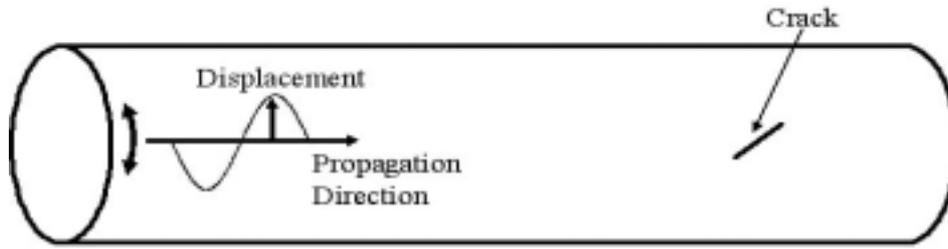


Fig. 4 Detection of crack in a pipe by a torsional mode

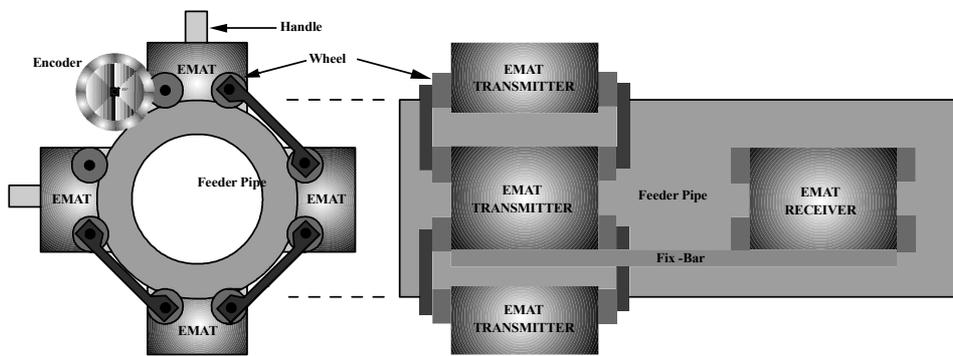


Fig. 5 Design of an array of EMAT for generation and reception of torsional guided wave

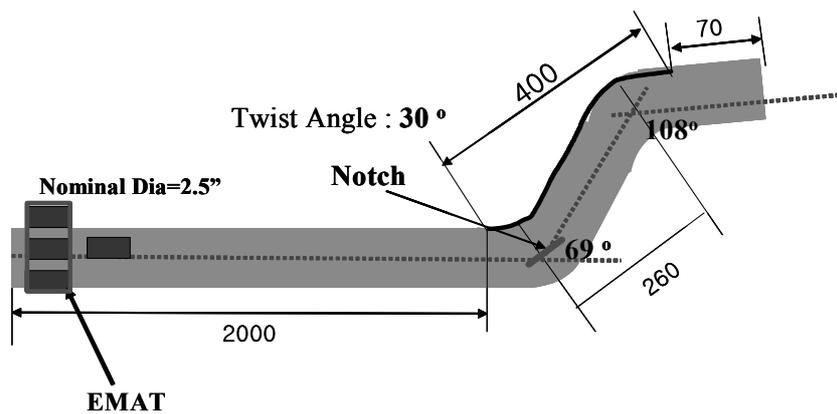
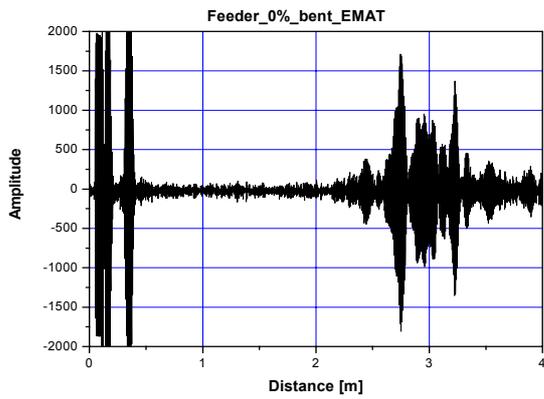
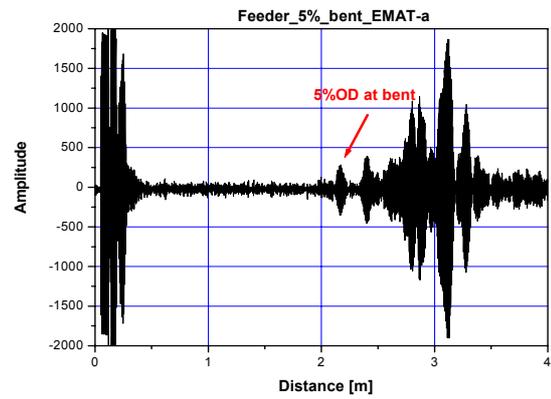


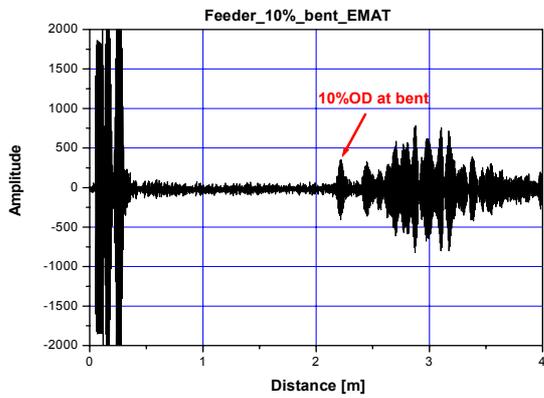
Fig. 6 Configuration of guided wave inspection of artificial notches in Feeder pipe (unit: mm)



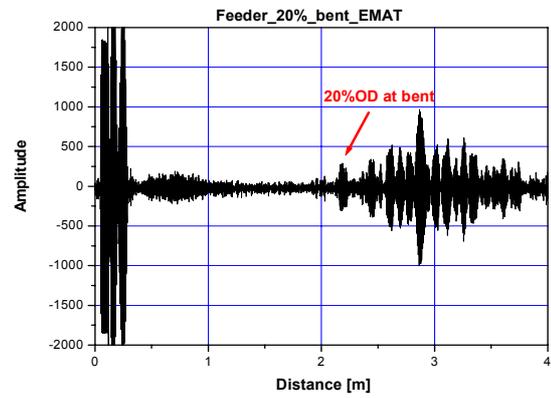
(a) Signal from bent pipe with no defect thickness



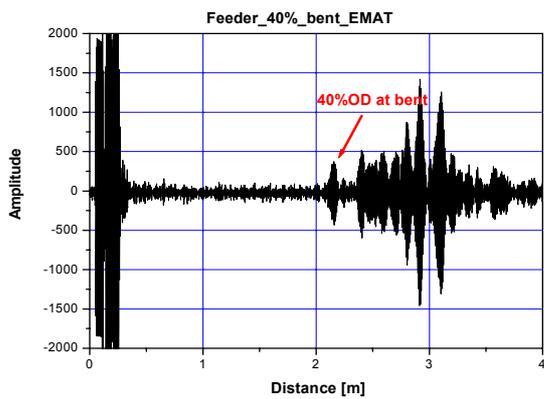
(b) Signal from a notch of 5% of wall of bent a pipe



(c) Signal from a notch of 10% of wall thickness of bent a pipe



(d) Signal from a notch of 20% of wall of a bent pipe



(e) Signal from a notch of 40% of wall thickness of a bent pipe

Fig. 7 Torsional guided wave signals from the axial notches of bent pipe