

유한요소법을 이용한 지상 파이프 반사계수 규명 Identification of Reflection Coefficients for Overground Pipes Using Finite Element Method

김영완 · 박경조 · 강우석
Y. W. Kim, K. J. Park and W. S. Kang

(접수일 : 2010년 11월 29일, 수정일 : 2011년 04월 12일, 채택일 : 2011년 04월 12일)

Key Words : Overground Pipes(지상파이프), FEM(유한요소법), Reflection Coefficient(반사계수), Defect(결함)

Abstract : In this study, the reflection of the L(0,2), axially symmetric guided elastic wave from defects in pipes above ground is examined using finite element method. Phase and group velocity dispersion curves for the pipe were presented for the selection of the excitation mode. Some simple signal processing was applied to determine the amplitude of each of the reflected waves and to calculate the reflection coefficient. The results show the reflection coefficient of this mode is very close to a linear function of the circumferential extent of the defect. The motivation for the work was the development of a technique for inspecting chemical plant pipelines, but the study addresses the nature of the reflection function and its general applicability.

1. 서 론

석유나 가스, 화학공장에서 사용되는 파이프에서 가장 주요한 문제점은 부식에 의한 구조물 결함이다. 전체적으로 두께가 얇아진대거나 국부적으로 부식에 의한 구멍이 발생하는 것은 파이프의 안쪽 또는 바깥쪽 모두에서 발생할 수 있다. 대부분의 파이프들은 매우 잘 절연되어 있기 때문에, 절연재를 제거하지 않는 한 통상적인 비파괴검사 방법을 사용해서는 바깥쪽에서 발생하는 결함조차 발견할 수 없다.

파이프 검사를 빠르게 수행할 수 있는 방법으로 유도파(guided wave) 검사방법이 새롭게 대두되고 있다^{1~4)}. 전통적인 피그(pig)를 사용하는 방법에 비해 탐사거리는 짧지만 탐촉자(probe)를 파이프 내부로 이송시킬 필요가 없고 상대적으로 검사비용이 싼 장점이 있다. 파이프가 절연재로 둘러싸여 있을 경우 신호변환기(signal transducer)를 설치할 매우 작은 부분만 절연재를 제거하면 되므로 유도파검사가 끝난 뒤 절연재 보수에 소요되는 시간 및 비용도 최소

화 할 수 있다.

최근 컴퓨터의 성능 향상과 계산속도가 빨라지면서 실험에 의한 유도파검사와 더불어 유한요소법을 이용하여 다양한 종류의 결함을 검출하려는 시도가 활발히 이루어지고 있다^{5~7)}. 유도파는 벌크파(bulk wave)와 달리 평판이나 파이프와 같은 제한된 형상을 갖는 유도관(wave guide)을 따라 탄성파(elastic wave) 또는 응력파(stress wave) 형태로 파동에너지가 전달된다. 파동방정식은 수학적으로 복잡한 경계치문제에 의해 기술되고 이 방정식에 대한 해는 과도응답해석(transient response analysis)에 의해 구할 수 있다. 탄성파는 기본적으로 초음파이기 때문에 상대적으로 고주파수로 파동이 전파되고 파장이 짧다. 이러한 짧은 파장을 갖는 탄성파를 충분히 묘사하기 위해서는 요소 크기가 매우 작아야 하고 따라서 과도응답을 계산하는데 소요되는 시간도 매우 증가하게 된다.

또한 유도파가 구조물의 불연속 부분과 만날 때 나타나는 현상은 매우 복잡한 양상을 갖기 때문에 실제 현장에서 발생할 수 있는 모든 경우에 대해 아직 충분한 설명이 이루어지고 있지 않다. 불연속 부분에서 입사파 외에 원하지 않는 모드가 발생하는 모드변환(mode conversion)이 가장 대표적인 예라 할 수 있다. 구조물에서 나타나는 불연속은 크게 구

박경조(교신저자) : 전남대학교 기계자동차공학부
E-mail : kjpark40@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-3221
김영완 : 전남대학교 기계자동차공학부
강우석 : 전남대학교 기계시스템공학부 대학원

조적 불연속과 재료 특성 변화에 의한 불연속으로 분류할 수 있다. 구조적 불연속에는 두 부분을 연결하는 용접부, 주 구조물에 연결된 곡선 파이프, 파이프의 끝단 그리고 부식에 의한 결함 등이 포함된다. 재료 특성 변화에 의한 불연속의 예로는 재질이 다른 두 재료가 용접으로 연결된 경우와 부분적으로 주변 매질에 매립되어 있는 구조물 등을 들 수 있다. 이러한 구조물의 불연속성을 검사하기 위한 시험계획을 효과적으로 수립하기 위해서는 수치해석을 통해 이에 의한 영향을 충분히 이해할 필요가 있다고 할 수 있다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용해 파이프에 원주방향으로 결함이 존재할 때 이 결함에 의해 유도파가 어떻게 반사되는가를 살펴보고자 한다. 이를 위해 먼저 분산선도(dispersion curve)를 이용하여 대상 파이프의 모드 특성을 살펴보고 가진 신호를 선정한다. 즉, 분산성이 적어 파동의 왜곡이 발생하지 않고, 전파속도가 빨라 수신기에 가장 먼저 도착하며, 내, 외부 결함에 민감하게 반응할 수 있는 모드 형상을 갖는 모드를 가진 모드로 선정한다. 가진 신호를 입사하였을 때 다양한 크기의 결함에 의한 반사 특성을 살펴보고 이를 통해 결함 크기와 반사 신호 진폭 사이의 상관관계를 규명하고자 한다. 그리고 용접부에 결함이 존재할 때의 반사 특성도 살펴보고자 한다.

2. 분산선도 및 유한요소 모델

본 연구에서 대상으로 선정한 파이프는 외경 114 mm, 두께 6 mm, 길이 1.2 m인 탄소강(carbon steel) 파이프이다. 전파 특성을 살펴보기 위해 영국 Imperial College에서 개발한 파동해석 프로그램인 Disperse[®]을 사용하였다.

파이프에서 나타나는 유도파의 전파 특성은 매우 복잡한 양상을 갖는다. 대상 파이프에 대한 0~100 kHz 주파수영역에서의 군속도(group velocity) 분산선도를 Fig. 1에 나타내었다. 분산선도는 주파수에 따라 파동이 전파되는 특성 즉, 개별 파동의 전파속도(위상속도) 그리고 개별 파동이 군(group)을 형성할 때 그 군의 속도(군속도) 그리고 각 파동의 감쇠, 에너지밀도 등을 표현하는 선도이다. Fig. 1은 그 중 군속도를 표시하는 선도로 개별 파동이 군을 구성하여 전파될 때 그 군의 속도를 나타낸다. 예를 들어 70 kHz에서 종파인 $L(0,2)$ 모드의 군속도는 5.4 km

/s 임을 알 수 있다. 쉘 형태의 구조물에서는 원주방향을 따라 n 개($n=0,1,2,3,\dots$)의 모드가 존재한다. $n=0$ 이면 파동은 축대칭 모드를 갖고 $n \geq 1$ 이면 전파되는 파동은 원주방향과 축방향 성분을 모두 갖는다. 모드는 Silk와 Bainton¹³⁾이 표시했던 것과 마찬가지로 $L(0,m)$, $T(0,m)$, $F(n,m)$ 으로 표시하였는데, 여기서 n , m 은 정수이고 L , T , F 는 각각 종방향, 비틀림, 휨 모드를 나타낸다. 0~100 kHz 사이에는 43개의 모드가 존재한다. 즉 종방향 모드는 $L(0,1)$, $L(0,2)$, 비틀림 모드는 $T(0,1)$, 휨 모드는 $F(n,1; n \leq 15)$, $F(m,2; m \leq 16)$, $F(k,3; k \leq 9)$ 이다.

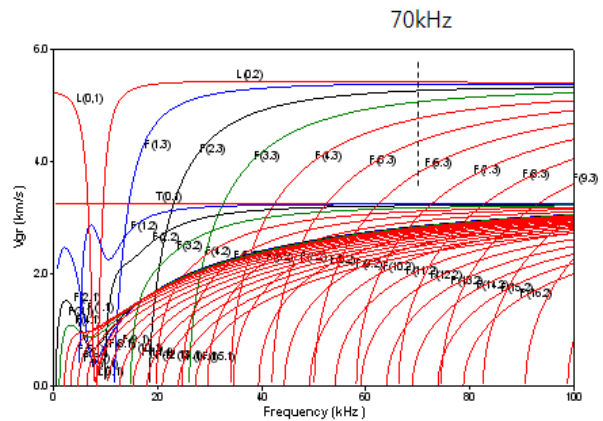


Fig. 1 Group velocity dispersion curves

군속도 분산선도에서 알 수 있듯이 70 kHz 부근의 $L(0,2)$ 모드는 비분산성을 갖고 가장 속도가 빠른 모드이기 때문에 장거리시험에 유리하다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 매질 내에서 전파되는 모드는 분산성을 갖는데 이는 파동이 전파됨에 따라 그 형태가 변한다는 것이다. 백색 광선이 프리즘을 통과하면 파장(wavelength)이 변하여 무지개 색깔로 변하는 현상도 분산성에 기인한 현상이다. 파장은 주파수에 따라 달라지고 군속도도 Fig. 1에서 보듯이 주파수에 따라 변하기 때문에 파동이 전파됨에 따라 군속도가 변하여 모드가 퍼져 보이는 분산현상이 발생하게 된다. 그런데 70 kHz 주변에서 $L(0,2)$ 모드는 일정한 군속도를 갖기 때문에 파동이 진행하면서 약간의 주파수변조가 발생하여도 군속도가 변하지 않게 되고 따라서 분산성이 거의 없는 모드라는 것을 알 수 있다. 즉 주파수가 증가하여도 군속도가 변하지 않기 때문에 장거리를 전파하여도 파동의 왜곡이 최소가 되리라는 것을 예측할 수 있다.

속도가 가장 빠르다는 것은 수신기에 가장 먼저 측정되는 신호라는 의미로 시간영역에서의 필터링에

의해 쉽게 다른 모드와 분리될 수 있다는 장점을 갖는다. 또한 모드형상은 평판의 내 모드와 비슷하기 때문에 입자의 운동은 축방향 성분이 우세하고 파이프 벽면의 전 두께에 걸쳐 변형률이 거의 일정하다고 할 수 있다(Fig. 2(a) 참조). 따라서 파이프의 안쪽 또는 바깥쪽에서 발생하는 결함을 쉽게 탐지할 수 있는 장점을 갖는다.

종방향 모드나 비틀림 모드와 같은 축대칭 파동이 파이프 끝단이나 용접부와 같은 축대칭 불연속 구간에서 반사될 때는 축대칭 모드만이 생성된다. 그러나 결함이나 부분절단 등과 같은 비축대칭 불연속 구간을 만나면 축대칭과 외에 비축대칭 모드인 F파가 생성된다. 결함의 크기는 입사파에 대한 반사파의 진폭 비로 구할 수 있는데 이때 반사파에는 모드변환(mode conversion)된 휨파가 포함되어 있으므로 이 모드를 분리할 수 있는 방법이 필요하다. 본 연구에서 대상으로 선정한 파이프의 경우, $L(0,2)$ 모드와 속도가 비슷한 $F(1,3)$, $F(2,3)$ 모드가 반사 신호에 생성될 가능성이 높다. 이 모드들의 모드형상을 Fig. 2(b), (c)에 나타내었는데 두께방향으로 변위분포가 $L(0,2)$ 모드와 매우 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 비축대칭 결함이 있는 파이프에서 결함에 의한 반사 신호에 $L(0,2)$ 모드뿐만 아니라 $F(1,3)$, $F(2,3)$ 모드도 동시에 나타나게 될 것이라는 것을 예측할 수 있다.

유도파가 결함과 반응하여 반사, 전파되는 현상을 해석하기 위해 상용 프로그램인 ANSYS(ver. 12)를 사용하였다. 이에 대한 유한요소 모델은 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 파이프는 축대칭이기 때문에 1.2 m 길이의 파이프의 절반만을 모델링하였다. 똑같은 크기의 선형 솔리드요소(Solid45)가 사용되었는데 원주방향을 따라 0~180°의 원주를 16개의 요소로 메쉬(mesh)를 나누었다. 각 요소의 축방향 길이는 6 mm로 15개의 요소 길이를 합하면 1과장(70 kHz에서 88 mm)이 되는데, 이는 1과장당 최소 8개 이상의 요소가 존재해야만 정확한 결과를 얻을 수 있다는 조건을 매우 잘 만족한다는 것을 알 수 있다⁹⁾. 실제의 경우 재료감쇠는 매우 작기 때문에 모델에서는 무시하였다. 결함은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 모델로부터 요소를 제거하는 방법을 사용하여 간단히 묘사하였다.

입사신호로는 Fig. 4와 같이 해닝윈도우(Hanning window)를 씌운 3 사이클, 70 kHz의 톤버스트(toneburst)를 사용하였다. 해닝윈도우는 가진 에너지의

누설을 방지하기 위해 사용하였으며, 유도파 검사 시 톤버스트의 사이클 수가 많으면 파동군(wave packet)의 전파를 보다 쉽게 판별할 수 있는 장점이 있지만 유한요소 해석 시 계산시간이 증가하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 파동군의 전파를 충분히 파악할 수 있으면서도 계산시간이 적게 소요되는 3 사이클 톤버스트를 사용하였다.

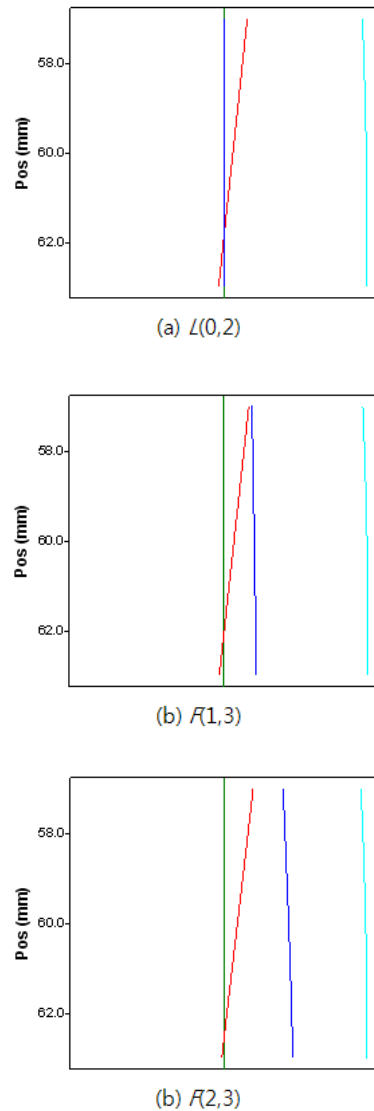


Fig. 2 Mode shapes at 70 kHz

$$F(t) = A(1 - \cos(2\pi f_c/p)) \cdot \sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

여기서 진폭 A 는 3 μm 이고 중심주파수 f_c 는 70 kHz, 정수 p 는 사이클 수인 3이다. 톤버스트는 모드형상에 따른 축방향 변위에 따라 구성하였고, 파이프 한 쪽 끝단의 모든 노드에서 동시에 가진되도록 하였다.

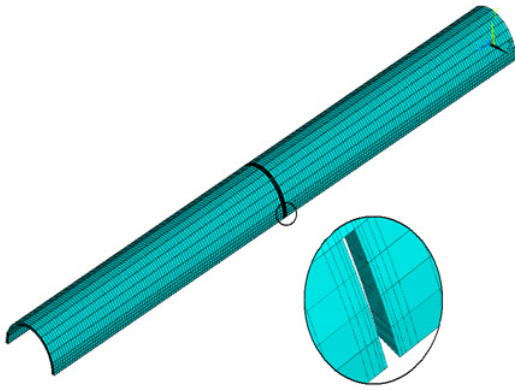


Fig. 3 Finite element model of defected pipe

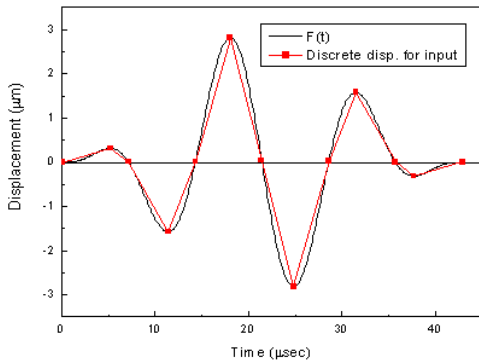


Fig. 4 Excitation signal of a 3 cycle, 70 kHz

유한요소법에서 과도진동을 해석하는 방법은 모드 중첩법(mode superposition)과 직접 적분법(direct integration) 두 가지 방법이 있다. 본 연구에서는 직접 적분법을 이용하여 과도 전파 현상을 해석하였다. 즉, 질량행렬이 대각선행렬이라 가정하고 시간영역에서 매우 짧은 시간간격마다 운동방정식을 만족하는 해를 구하고 이 해를 이용하여 다음 시간간격에서의 해를 구하는 시간행진(time marching) 방법을 적용하였다. 시간행진의 안정성을 만족하는 최대 시간간격은 L/c 에 의해 결정되는데 여기서 L 은 요소의 길이, c 는 존재하는 과도 중 가장 속도가 빠른 과동의 속도이다¹⁰⁾. 실제로 다른 연구자들의 경험에 따르면 $0.8L/c$ 가 가장 적당하다고 알려져 있다⁹⁾. 본 연구의 경우 파이프의 축방향 요소의 길이는 6 mm이고 가장 속도가 빠른 $L(0,2)$ 모드의 속도는 5,430 m/s이므로 시간 간격을 $0.8 \mu\text{s}$ 로 하면 위의 조건을 만족시킨다는 것을 알 수 있다. 반사파의 검출은 원주방향을 따른 모든 모드의 축방향 변위를 측정하여 수행하였다.

3. 해석결과 및 반사계수

결함이 없을 때의 해석결과를 Fig. 5(a)에 나타내

었다. 그림에서 왼쪽의 진폭이 큰 신호는 $L(0,2)$ 모드 입사파를 나타내고 오른쪽의 진폭이 상대적으로 작은 신호는 끝단에서 반사된 신호를 나타낸다. 모드변환은 파이프에 비대칭 불연속 구간이 존재할 때만 나타나므로 끝단에서 반사된 신호에는 $L(0,2)$ 모드만 나타나게 된다. 가진 모드가 입사되어 끝단에서 반사되고 다시 가진점까지 되돌아올 때까지 소요된 시간은 $\Delta t = 2l/c$ 이다. $L(0,2)$ 모드의 군속도(c)는 5,430 m/s이고 파이프의 길이(l)가 1.2 m 이므로 왕복에 소요된 시간은 0.43 ms 인데 이는 Fig. 5(a)의 끝단에서 반사된 신호가 나타나는 시간 0.425 ms와 정확하게 일치하는 것을 확인할 수 있다.

깊이 3 mm(파이프 두께의 50%), 원주방향으로 18 mm(파이프 원주의 10%)의 결함이 있을 때의 응답신호를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 결함은 가진점에서 0.6 m 떨어진 곳에 위치하고 있다. 반사 신호가 나타나는 시간은 0.22 ms로 끝단에서 반사된 신호가 나타나는 시간의 정확히 1/2임을 알 수 있다. 진폭은 끝단에서 반사된 신호 진폭의 18%임을 확인할 수 있다. 그러나 결함에서 반사된 신호는 상대적으로 분산성이 크게 나타나는데 이는 입사파가 비대칭 불연속 구간을 만나면서 비축대칭 파인 F 모드가 나타나게 되고, 군속도가 다른 $L(0,2)$, F 모드들이 서로 혼재되어 나타나기 때문에 시간영역에서 상대적으로 퍼져 보이는 분산 특성을 나타내게 된다.

결함의 위치는 반사 신호가 측정되는 시간으로부터 쉽게 알 수 있고 결함의 크기는 입사 신호의 진폭에 대한 결함 반사 신호의 진폭비로 정의되는 반사 계수(reflection coefficient)로부터 구할 수 있다. 그러나 결함에서 반사된 신호에는 모드변환에 의해 입사파인 $L(0,2)$ 모드 외에 F 파가 혼재되어 있으므로 정확한 결함 크기를 계산하기 위해서는 반사파에서 $L(0,2)$ 모드만을 추출할 수 있는 모드분리 방법이 필요하다.

파이프에서 나타나는 세 종류의 과도 중 횡파의 변위는 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned} u_r &= U(r)\cos(n\theta)e^{i(kz-\omega t)} \\ u_\theta &= V(r)\sin(n\theta)e^{i(kz-\omega t)} \\ u_z &= W(r)\cos(n\theta)e^{i(kz-\omega t)} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 u_r , u_θ , u_z 는 반경방향, 원주방향, 축방향 변위를 나타내고 n 은 원주방향을 따라 변하는 조화 차수(harmonic order)를 나타낸다. 또 k 는 파동수, ω

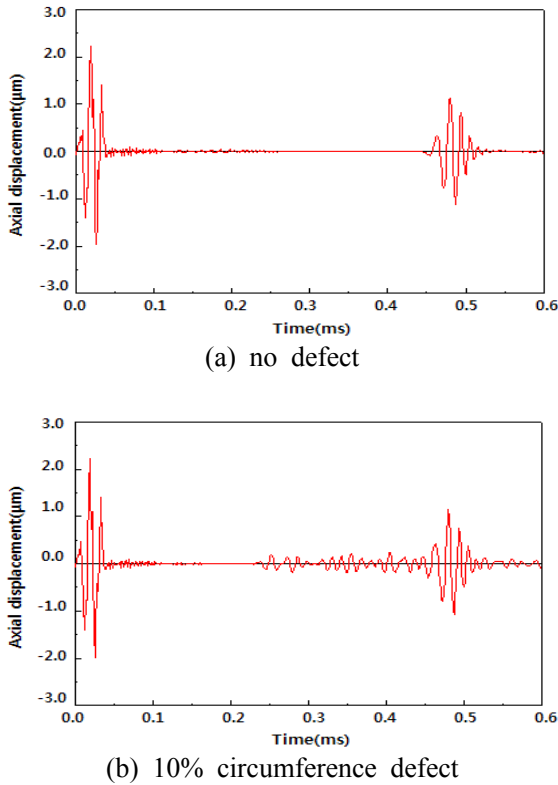


Fig. 5 Time history of simulated response

는 주파수를 나타낸다. 축대칭 모드인 경우 $n=0$ 인데 이때 휨파의 원주방향 변위 u_θ 는 0이 된다. 따라서 원주방향을 따라 각 절점에서의 측정된 변위를 모두 합하면 $L(0,2)$ 모드의 진폭을 구할 수 있다. $F(1,3)$ 모드의 경우 $n=1$ 이므로 각 절점에서의 신호에 $\theta/2\pi$ 만큼의 위상지연(phase delay)을 더한 다음 모든 신호를 합치면 $F(1,3)$ 모드의 진폭을 구할 수 있다. 여기서 θ 는 결함 중심에서 측정된 각변위(angular distance)이다. $F(2,3)$ 모드의 경우 $n=2$ 이므로 각 절점에서의 신호에 $2\theta/2\pi$ 만큼의 위상지연을 더한다. 원주방향으로 25%의 결함이 존재할 때 반사 신호로부터 모드를 분리하는 자세한 과정을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에 나타난 축대칭파인 $L(0,2)$ 모드를 추출하기 위해 수행한 0차 모드분리 결과에는 입사파와 결함에서 반사된 신호 중 $L(0,2)$ 모드 성분 그리고 끝단에서 반사된 신호가 모두 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 비축대칭파인 $F(1,3)$ 모드에 대한 1차 모드분리에는 입사파 신호는 전혀 나타나지 않고 결함에서 반사된 파동 중 $F(1,3)$ 모드 성분 그리고 반사된 신호만이 매우 작은 진폭을 갖고 나타나는 것을 알 수 있다. 이때 끝단에서 반사된 신호는 결함을 통과하여

끝단에서 반사된 것으로 생각할 수 있다. 1차 모드분리 신호가 0차 모드분리 신호에 비해 약간의 시간 지연을 갖는 이유는 $F(1,3)$ 모드의 속도가 $L(0,2)$ 모드보다 느리기 때문이다. 이로부터 간단한 모드분리 방법을 통해 측정된 신호로부터 L 파와 F 파를 정확하게 분리할 수 있음을 알 수 있다.

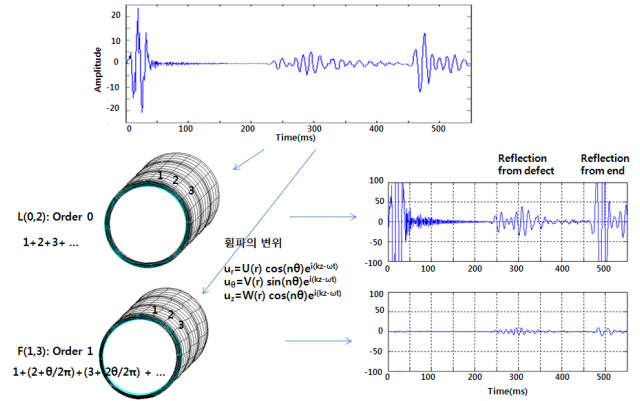


Fig. 6 Procedure for the mode extraction

이상의 방법을 이용하여 결함의 원주방향 크기가 변할 때 반사계수의 변화 경향을 구하고 이를 Fig. 7에 나타내었다. 이때 두께 방향 결함의 깊이는 파이프 전체 두께의 50%이다. 그림으로부터 $L(0,2)$ 모드 반사 신호의 크기는 결함의 원주방향 크기에 따라 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다. $F(1,3)$ 모드의 반사계수는 반정현파(half-sine) 형태를 갖는 것도 알 수 있다. 결함이 없을 때와 전 원주방향에 걸쳐 일정한 깊이의 결함이 존재할 때는 축대칭 구조를 가지므로 $F(1,3)$ 모드에 대한 반사계수가 0이 되는 것도 확인할 수 있다. $F(1,3)$ 모드의 반사계수는 원주방향 결함크기가 원주의 50%일 때 최대가 된다.

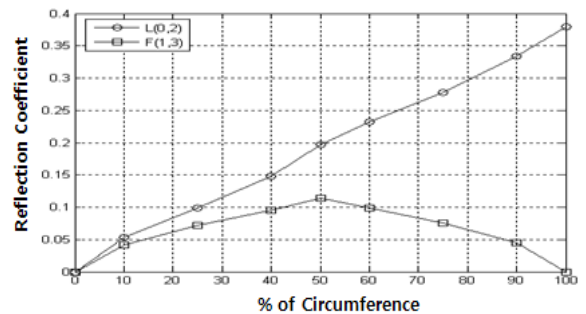


Fig. 7 Reflection coefficient for a half wall thickness deep defect at 70 kHz

Fig. 8은 결함 깊이를 변화시키면서 해석한 결과이다. 그림으로부터 결함 깊이의 비가 50%를 초과하면 반사계수는 급격히 증가하는 반면, 결함 깊이가 작을 때는 증가율이 작은 것을 알 수 있다. 즉 두께방향 결함 깊이에 따른 반사계수는 2차 곡선의 형태를 갖는다는 것을 알 수 있다.

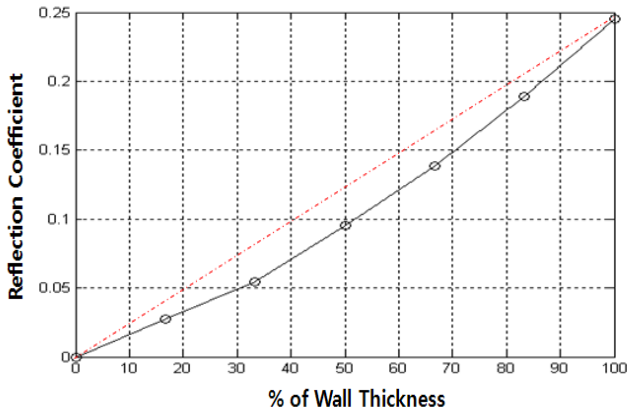
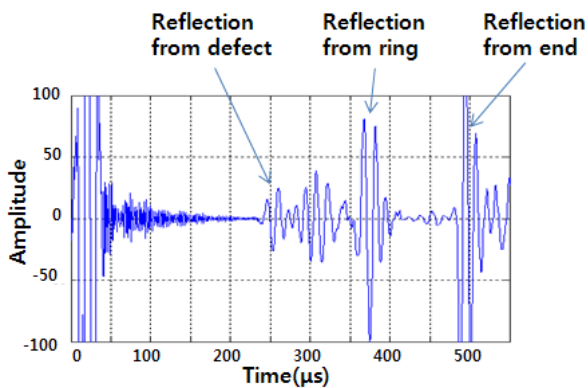
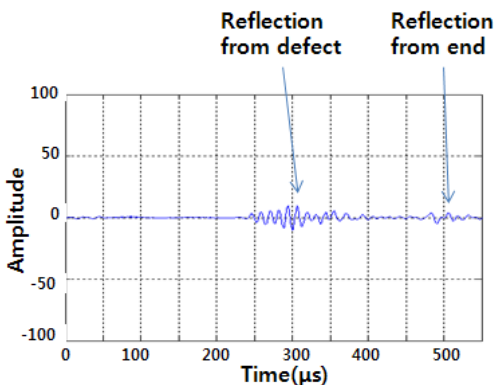


Fig. 8 Reflection coefficient for a defect extending over 25% of the circumference at 70 kHz



(a) order 0 processing



(b) order 1 processing

Fig. 9 Reflected signal from circumferential weld with 25% circumference defect

실제 현장에서 발생하는 결함 중 70% 이상은 용접부에서 발생하는 결함이다. 그러나 용접부와 같은 축대칭 불연속 구간 내에 결함과 같은 비축대칭 불연속 구간이 존재할 경우, 용접부에 의한 반사 신호에 결함에 의한 반사 신호가 묻히기 때문에 결함 유무 및 크기를 판별하기가 매우 어렵다. 이 경우에도 모드 분리에 의한 반사계수를 사용하면 결함 크기를 쉽게 예측할 수 있다. 이를 위해 용접부를 해석 모델에 포함시켰다. 용접부의 높이는 파이프 두께의 50%, 폭은 두께의 3배로 설정하였다. 또한 실제 현장에서 자주 사용되는 링(ring)도 모델에 포함하였다. 링은 가진점에서 파이프 길이의 3/4 지점에 위치하고, 길이의 1/2 지점에 용접부 및 두께의 50%, 원주의 25% 크기로 결함이 존재하는 경우에 대한 유한요소 해석을 수행하였다.

Fig. 9(a)에는 0차 모드분리에 대한 결과를, (b)에는 1차 모드 분리에 대한 결과를 제시하였다. 용접부 내의 결함에 의한 반사 신호는 용접부에 대한 반사 신호에 묻히기 때문에, 0차 모드를 분리한 신호에는 용접부와 결함에 의한 신호가 혼재되어 나타난다. 그러나 1차 모드 분리에 의한 신호에는 결함에 의한 반사 신호만이 나타나게 되고 이로부터 용접부 내에 결함이 존재한다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 파이프에 결함이 존재할 때 $L(0,2)$ 모드의 반사 특성을 정량적으로 살펴보았다. 이를 위해 먼저 분산선도를 이용하여 대상 파이프의 모드 특성을 살펴보고, 분산성이 적으면서 속도가 빠른 모드가 가진 모드로 유리함을 확인하였다.

유도파 해석에 적합한 유한요소 모델을 수립하고 과도응답을 해석하는 방법에 대해서도 기술하였다. 그리고 반사 신호로부터 모드분리에 의해 반사계수를 구하고 이를 이용하여 결함의 크기를 판별하는 방법을 제시하였다. 해석결과로부터 $L(0,2)$ 모드의 반사계수는 파이프 원주길이에 대한 결함의 원주방향 길이 비의 선형함수이고, 파이프 두께에 대한 결함 깊이 비의 2차 함수임을 알 수 있었다.

실제 실험을 수행하기 전에 본 연구에서 제시한 방법에 의해 유한요소 해석을 수행하면 결함과 반사 신호와의 상관관계를 미리 확인할 수 있으며 따라서 실험에 소요되는 시간 및 비용을 최소화 할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 2010년 지식경제부 지원 중화학설비 안전진단 지역혁신센터 일부 지원에 의해 수행되었음을 밝힙니다.

참고 문헌

1. D. N. Allene and P. Cawley, 1996, "The Effect of Discontinuities on the Long Range Propagation of Lamb Waves in Pipes", Proc. I. Mech. E., part E, v.210, pp. 217-226.
2. C. Aristegui, P. Cawley and M. Lowe, 1999, "Guided Waves in Fluid-Filled Pipes Surrounded by Different Fluids", Review of the Progress in Quantitative NDE, v.18A, pp. 159-166.
3. J. L. Rose and J. Barshinger, 1998, "Using Ultrasonic Guided Wave Mode Cutoff for Corrosion Detection and Classification", IEEE Ultrasonic Symposium, pp. 851-854.
4. A. Velichko and P. D. Wilcox, 2008, "Post-Processing of the Full Matrix of Ultrasonic Transmit-Receive Array Data for Guided Wave Pipe inspection", Review of the Progress in Quantitative NDE, v.28A, pp. 137-144.
5. Z. You, M. Lusk, R. Ludwig and W. Lord, 1991, "Numerical Simulation of Ultrasonic Wave Propagation in Anisotropic and Attenuative Solid Materials", IEEE Trans. Ultrasonic, Ferroelectric and Frequency Control, v.38, pp. 436-445.
6. G. Aiello, E. Dilettoso and N. Salerno, 2005, "Finite Element Analysis of Elastic Transient Ultrasonic Wave Propagation for NDT Applications", Proc. 5th WSEAS/IASME, pp. 114-119.
7. C. Shen, Y. Wang L. Shen and F. Sun, 2008, "Study on Simulation of Guided Wave Propagation in Pipes", 17th Conf. on NDT, pp. 25-31.
8. B. N. Pavlakovic, M.J.S. Lowe and P. Cawley, 1997, "DISPERSE: A General Purpose Program for Creating Dispersion Curves," Review of the Progress in Quantitative NDE, v.16A, pp. 185-192.
9. D. N. Alleyne, M.J.S. Lowe and P. Cawley, 1998, "The Reflection of Guided Waves From Circumferential Notches in Pipes", Trans. ASME, J. Applied Mech., V.65, pp. 635-641.
10. K. J. Bathe, 1982, Finite Element Procedure in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
11. K.J. Park, 2006, "Characteristics of Acoustic Waves That Propagate in Buried Steel Water Pipes", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 65-70.
12. K. J. Park, W. S. Kang and D. J. Kang, 2010, "Flaw Detection of Petrochemical Pipes Using Torsional Waves", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 46-51.
13. M. G. Silk and K. F. Bainton, 1979, "The Propagation in Metal Tubing of Ultrasonic Wave Modes Equivalent to Lamb Waves", Ultrasonics, pp. 11-19.