



단열된 배관의 유도초음파 최적 발생조건 선정에 관한 연구

†이동훈* · 조현준** · 강토*** · 박동준** · 김병덕* · 허윤실* · 이연재*

*한국가스안전공사, **품질안전기술원, ***한국원자력연구원
(2016년 10월 10일 접수, 2016년 12월 2일 수정, 2016년 12월 3일 채택)

A Study on the Optimum Generation Condition of Ultrasonic Guided Waves for Insulation Pipelines

†Dong-Hoon Lee* · Hyun-Joon Cho** · To Kang*** · Dong-Jun Park** ·
Byung-Duk Kim* · Yun-Sil Huh* · Yeon-Jae Lee*

*The Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation.

Wonjung-ro, Maengdong-myeon, Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do, 27738, Korea

**Institute of Safety And Quality, 209 Kyungsu-Daero, Uiwang 16076, Korea

***Nuclear Technology Convergence Division, Korea Atomic Energy Research Institute,
Daeduk-Daero 989 Beon-Gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34057, Korea

(Received October 10, 2016; Revised December 2, 2016; Accepted December 3, 2016)

요약

배관은 석유화학플랜트에서 가장 많은 구성요소이며, 주요설비들에서 생산된 물질을 수송하는 매우 중요한 역할을 수행한다. 특히, 저온 또는 고온의 물질을 수송하는 배관들의 경우 물질의 온도변화를 최소화하기 위해 보온재를 배관의 외면에 덮어 사용하는 경우가 다수이다. 그러나 이러한 보온재에 덮인 배관들에서 부식이 발생할 경우 보온재를 제거하지 않고서는 확인하기 어렵기 때문에 현장검사시 유도초음파를 이용한 비파괴적 방법이 사용되고 있다. 본 논문에서는 보온재 내부에서 발생하는 보온재하 부식(CUI : Corrosion Under Insulation)을 유도초음파를 사용하여 효과적으로 검출하기 위해서 유도초음파의 위상속도 분산선도와 파형구조의 이론적 해석을 통해 최적 발생조건을 선정하고자 하였다. 본 연구의 결과는 다양한 석유화학플랜트 배관의 보온재하 부식에 대한 유도초음파를 이용한 현장검출에 적용할 경우 매우 유용할 것이다.

Abstract - Pipeline is one of the most abundant components in petrochemical plant. It plays a critical role in transporting fluids. Some pipelines are thermally insulated by wrapping them with insulating materials to prevent the loss of energy. However, when corrosion begins under insulation, it cannot be easily seen without unwrapping the cover, and thus corrosion should be detected using a non-destructive ways such as ultrasound guided wave. In this paper, the piping where the CUI (Corrosion Under Insulation) which occurs in the insulation parts guided waves effectively the optimum condition which is theoretical for selected guided waves phase velocity dispersion curve and wave-structure. The results of this study are expected to be directly utilized for onsite inspection of pipeline's CUI in many petrochemical plants.

Key words : guided waves, mode selection, corrosion under insulation, dispersion curves, wave structure

†Corresponding author: yrkim@kimm.re.kr

Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

산업설비 배관의 건전성 평가를 위하여, 예전부터 많은 비파괴적 방법이 적용되어 왔으나 일반적인 비파괴 탐상 기법(초음파탐상 (UT), 방사선투과시험 (RT), 와전류탐상 (ECT), 자속누설탐상(MFL))들은 센서가 위치한 지점만을 검사(point by point inspection)할 수 있기 때문에 시간의 제약과 경비의 문제가 발생하며, 이런 해결점을 도출하기 위한 효과적인 검사방법의 개발이 절실히 요구되는 현실에서 대안으로 고려되고 있는 방법이 유도초음파 검사방법이다.

유도초음파 탐상은 단일 지점으로부터 멀리 검사할 수 있는 장점 때문에 세계 각국에서 유도초음파 장비 및 기술개발에 박차를 가하고 있다. 그러나 유도초음파를 국내에서 주기적으로 적용하여 배관의 건전성을 확보하는 수준은 아직 도입단계에 있다.

특히 유도초음파 기술의 특성상 배관의 벽면을 따라 에너지가 전파해 나가기 때문에 배관의 내면과 외면에 부식이나 도양, 단열재, 코팅과 같은 에너지 누수를 일으킬 수 있는 매질이 존재하는 경우에는 유도초음파를 통해 검사할 수 있는 배관의 길이가 확연하게 줄어 들 뿐만이 아니라, 수신되는 신호의 신호대 잡음비(SNR : Signal to Noise Ratio)가 떨어지는 현상이 발생하게 된다.

또한, 석유화학 플랜트 및 각종 저온 혹은 고온 수송배관들은 수송물질의 온도 변화를 최소화 하기 위하여 다양한 방법으로 단열을 하는 방식이다. 그 중에 가장 많고 일반적인 방식이 배관의 주위에 단열재로 주위와 배관의 온도차를 차단하여 열손실을 최소화 하고 있다. 그러나 이렇게 보온재로 차단하는 것은 수송의 관점에서는 유리할 수 있으나, 유지보수의 관점에서는 매우 곤란한 문제로 다가오게 된다. 본 논문에서는 단열재로 보온된 부분에 발생된 부식이 존재하는 배관에서 유도초음파를 효과적으로 발생시키기 위한 이론적 최적 발생조건을 선정하고자 하였다.

II. 유도초음파 적용 대상체의 선정

유도초음파 기술은 근래에 많은 검사분야에서 크게 각광을 받고 그 적용성을 평가 받고 있다. 유도초음파의 가장 큰 장점은 검사지점으로부터 먼 거리를 전파하여, 전파대상 내에 존재하는 결함을 탐지하기 위하여 활용되고 있다. 본 논문에서는 현재 국내에서 유도초음파 적용이 시도되고 있는 배관들에 대해 우선적으로 검토를 하였다.

2.1. 단열재로 보온되어 있는 배관

석유화학 플랜트등의 공정라인에 많은 보온배관들은 공정의 효율을 높이기 위하여 단열재로 보온이 유지되고 있다. 그러나 서론에서 언급한 바와 같이 이러한 보온재하 배관들은 검사가 매우 어려운 단점을 가지고 있다. 저온 배관의 경우 보온재가 완벽하게 배관과 주위를 차단하지 않은 경우에는 빗물 혹은 습기등에 의해 결로현상이 발생하여 배관 표면에 Fig. 1과 같이 표면에 부식이 발생하게 된다. 이렇게 보온재하 부식(CUI : Corrosion Under Insulation)이 발생한 배관은 표면전체에 부식이 발생하기 때문에 외부에서 발생시킨 유도초음파의 에너지가 표면의 불규칙한 미세부식에 의해 감쇄가 심하게 나타난다. 일반적으로 표면에 부식이 존재하는 경우 유도초음파 전파거리는 급격히 감소하게 된다.

2.2. 교량 통과 배관

도시가스 및 송유등의 목적으로 하천을 횡단하여야 하는 배관은 하천에 매몰하기도 하지만, 교량등의 하부등에 설치되어 통과하는 경우도 존재한다. 교량 통과 배관의 경우 배관의 전체를 검사하기 위해서는 배관을 둘러싸고 있는 코팅을 모두 제거하여야만 전수검사가 가능하기 때문에 일반적인 종래의 검사방법으로는 검사하기 곤란한 것이 현실이다. 유도초음파 진단보고서들에 따르면 이러한 코팅부가 존재하는 배관 역시 유도초음파의 전파에너지가 코팅이 되지 않은 나관에 비하여 표면의 코팅부에서 급격히 감소하는 현상을 보인다.



Fig. 1. Corrosion Under Insulation in petrochemical Pipeline.



Fig. 2. Guidedwaves Inspection on River Crossing Pipeline.

따라서, 본 논문에서는 유도초음파 검사대상중에 서 배관의 외부에 부식혹은 코팅등으로 배관의 외면 에 유도초음파의 감쇄의 요소가 기구학적으로 존재 하는 경우에 유도초음파의 에너지가 표면에 집중되 지 않아, 전파거리를 늘리면서, 에너지가 두께방향 중심에 집중되어 일정크기 이상의 결함을 탐지해낼 수 있는 유도초음파 모드의 선택하는 방법을 찾고자 하였다.

III. 배관을 전파하는 유도초음파 해석

3.1 배관을 전파하는 파동방정식의 해석

유도초음파는 검사지점으로부터 수에서 수십미 터 떨어진 지점에 있는 결함을 찾아낼 수 있는 기술 로 최근 많은 분야에서 다양하게 적용중에 있으나, 유도초음파는 사용하는 주파수에 따라 전파속도가 달라지는 분산성을 가지고 있어서 대상체에 적용하 기 전에 반드시 해당 대상체에 대한 분산선도를 도 해 하여야 한다. 분산선도는 크게 위상속도 분산선 도와 군속도 분산선도로 나뉘게 되며, 군속도 분산 선도는 실제로 전파하는 에너지전파속도를 나타내 고, 위상속도 분산선도는 유도초음파의 발진조건 및 전파하는 파형구조를 계산할 때 사용하게 된다.

그간 유도초음파의 분산선도 해석을 위한 전개식 을 나타낸 문헌들이 있으나, 원통형 좌표계에 대한 응력계수 행렬식에 오류가 있어[1], 유도초음파 분 산선도를 계산하는데 많은 어려움이 있었다. 이에 본 논문에서는 수학적 전개를 통한 수정된 유도초음 파 응력계수 행렬을 제시하고자 한다.

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) = \rho(\partial^2 \mathbf{u} / \partial t^2) \quad (1)$$

여기서 \mathbf{u} 는 입자의 변위 벡터, ρ 은 밀도, μ 와 λ 는 Lamé's 의 탄성 상수(elastic modulus)이다. Fig. 3과 같이 내경과 외경의 반지름이 a 와 b 이고 경계면이 자유로운 경우, 경계조건은 식(2)와 같이 쓸 수 있다.

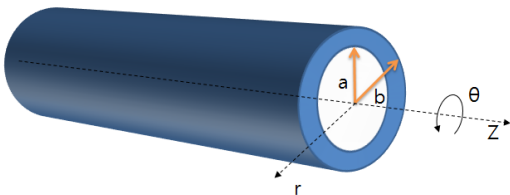


Fig. 3. A traction free infinitely long hollow cylinder with the inner radius a and the outer radius b .

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0 \quad \text{at } r = a \text{ and } r = b \quad (2)$$

여기서, σ_{rr} , σ_{rz} , $\sigma_{r\theta}$ 는 원통형 좌표계(cylindrical coordinator system)에서 수직응력과 전단응력을 나타내는 것이고, r 은 탄성관의 반경방향 위치를 나타낸다. 식(1)을 \mathbf{u} 에 대해 풀고 변위-변형을 관계를 이용하여 응력을 구한다. 여기에서, 스칼라 포텐셜 Φ 과 벡터 포텐셜 \mathbf{H} 항으로 변위를 표현한다면, 식(1)로부터 분산선도를 구하기 위한 계산을 좀더 간단히 수행할 수 있다.

$$\mathbf{u} = \nabla \Phi + \nabla \times \mathbf{H} \quad (3)$$

파동방정식을 만족하는 해를 식(4)의 형태로 D. C Gazis는 다음과 같이 가정하였다.[1]

$$\Phi = f(r) \cos(M\theta) \cos(\omega t + kz) \quad (4)$$

$$H_r = g_r(r) \sin(M\theta) \sin(\omega t + kz)$$

$$H_\theta = g_\theta(r) \cos(M\theta) \sin(\omega t + kz)$$

$$H_z = g_3(r) \sin(M\theta) \cos(\omega t + kz)$$

여기서 k 는 파수이고, 알려지지 않은 함수 f 와 g 의 일반적인 해는 다음과 같다.

$$f = AZ_M(\alpha_1 r) + BW_M(\alpha_1 r) \quad (5)$$

$$g_3 = A_3 Z_M(\beta_1 r) + B_3 W_M(\beta_1 r)$$

$$2g_1 = (g_r - g_\theta) = 2A_1 Z_{M+1}(\beta_1 r) + 2B_1 W_{M+1}(\beta_1 r)$$

$$2g_2 = (g_r + g_\theta) = 2A_2 Z_{M-1}(\beta_1 r) + 2B_2 W_{M-1}(\beta_1 r)$$

여기서, $\alpha^2 = \omega^2/v_1^2 - k^2$ 이고 $\beta^2 = \omega^2/v_2^2 - k^2$ 이다. 그리고, $\alpha_1 = |a r|$ 이며 $\beta_1 = |b r|$ 이다.

여기에서, Z_M 과 W_M 은 a 와 β 가 실수인가 허수인가에 따라 Bessel 함수 J_M 과 Y_M 으로 나타내거나, Modified Bessel 함수, I_M 과 K_M 이 된다. 식(4)를 식(3)으로 대입하여 각 방향의 변위를 구하면 식(6)과 같은 해를 얻을 수 있다.[2]

$$U_r = [f' + (M/r)g_3 + K_1 g_1] \cos M\theta \cos(\omega t + kz)$$

$$U_\theta = [-(M/r)f + k g_1 + g'_3] \sin M\theta \cos(\omega t + kz)$$

$$U_z = [-k f - g'_1 - (M+1)(g_1/r)] \sin M\theta \cos(\omega t + kz) \quad (6)$$

여기서, U_r 은 반경방향의 변위, U_θ 는 원주방향의 변위, U_z 는 축방향 변위이며, 원주방향 차수 (circumferential order) M 는 0, 1, 2, 3 ... 이고, 프라임은 반경 방향인 U_r , 원주방향인 U_θ , 그리고 축 방향인 U_z 를 r 에 대해 각각 미분한 것이다. 여기서 응력에 대한 식을 구한 후, 식(2)의 경계조건에 대해 정리하면 6개의 선형방정식을 얻을 수 있는데, 이를 행렬 형태로 나타내면 다음과 같다. [1]

$$C_{ij}X=0 \quad (7)$$

여기서, C_{ij} 는 선형탄성계수 행렬이고, X 는 6개의 미지상수를 이루는 벡터로 식(7)의 제차시스템 (homogeneous system)이 자명하지 않은 해 (non-trivial solution)를 가지기 위해서는 C_{ij} 인 행렬의 판별식이 0이 되어야 하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D = |C_{ij}| = 0 \quad (8)$$

식 (8)은 진동수식(frequency equation)으로 불리 어지는데, 이로부터 위상속도 분산선도를 구할 수 있다.[4][5]

3.2. 탄성관 내를 전파하는 유도초음파의 응력계수행렬의 계산

유도초음파는 원거리 탐상의 장점이 있지만 수많은 모드들이 존재하기 때문에 해석이 어려운 단점이 있다. 따라서 유도초음파의 분산선도에 대하여 이론적인 계산이 선행되어야만 수신된 신호가 어떠한 모드로 전파를 했는지 확인 할 수 있다. 이를 위하여 3.1절에서 수행된 변위식으로부터 원주방향 U_r , 원주방향인 U_θ , 그리고 축 방향인 U_z 의 변위식에 대한 탄성계수 행렬의 판별식이 0인 조건에 대한 주파수-위상속도 해를 도출 할 수 있다. 현재 많은 선행 연구에서 유도초음파의 전파 원리와 계산 방법이 제시되어 왔지만 모든 모드 Longitudinal, Torsional, Flexural 모드의 해석이 가능한 응력행렬의 요소를 나열한 적은 없다. 따라서 본 논문에서는 유도초음파의 분산선도 도출을 위한 응력계수 행렬의 함수를 상세하게 나타내고자 한다.

앞의 이론적 배경에서 관형 재료를 만족하는 파동방정식을 만족하는 Φ, H_r, H_θ, H_z 와 f, g_1, g_3 를 식 (4)와 식 (5)에 제시하였다.

이 복소 포텐셜(Φ, H_r, H_θ, H_z)과 관에서 대한 변위의 관계식 식(10)과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} U_r &= \frac{\delta\Phi}{\delta r} + \frac{1}{r} \frac{\delta H_z}{\delta \theta} - \frac{\delta H_\theta}{\delta z} \\ U_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\delta\Phi}{\delta \theta} + \frac{\delta H_r}{\delta z} - \frac{\delta H_z}{\delta r} \\ U_z &= \frac{\delta\Phi}{\delta z} + \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r}(r H_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\delta H_r}{\delta \theta} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에 식 (4)와 식 (5)를 대입하면 식(11)에 나타낸 바와 같은 변위에 대한 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} U_r &= [f' + (n/r)g_3 + kg_1] \cos n\theta \cos(\omega t + kz) \\ U_\theta &= [-(n/r)f + kg_1 + g'_3] \sin n\theta \cos(\omega t + kz) \\ U_z &= [-kf - g'_1 - (n+1)(g_1/r)] \sin n\theta \cos(\omega t + kz) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 f, g_1, g_3 는 식 (5)와 같은 일반해를 갖는다.

여기에서, 원통 좌표계에서 응력과 변위와의 관계식은 식(12)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \lambda \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r} \\ \sigma_{r\theta} &= \mu \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) \\ \sigma_{zr} &= \mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{u_z}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에, 식(11)로부터 구한 U_r, U_θ, U_z 를 전개 하여 대입하면, 식 (13)을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \left[\lambda \left(f'' + \frac{f'}{r} - \frac{n^2}{r^2} f - \zeta^2 f \right) + 2\mu \left(f'' - \frac{n}{r^2} g_3 + \frac{n}{r} g'_3 + \zeta g'_1 \right) \right] \cos(n\theta) \cos(\omega t + \zeta z) \\ \sigma_{r\theta} &= \mu \left[-\frac{2n}{r} \left(f' - \frac{f}{r} \right) - \frac{\zeta}{r} (n+1) g_1 + \zeta g'_1 - \left(g_3'' - \frac{1}{r} g_3' + \frac{n^2}{r^2} g_3 \right) \right] \sin(n\theta) \cos(\omega t + \zeta z) \\ \sigma_{zr} &= \mu \left[-2\zeta f' - g_1'' - \frac{(n+1)}{r} g_1' + \left(\frac{n+1}{r^2} - \zeta^2 \right) g_1 - \zeta \frac{n}{r} g_3 \right] \cos(n\theta) \sin(\omega t + \zeta z) \end{aligned} \quad (13)$$

여기에서 속도와 복소포텐셜의 관계식 (3)과 Gazis[1]가 가정한 식(4)을 연립하여 풀면 식 (14)과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 f'' + \frac{1}{r}f' - \frac{n^2}{r^2}f - \alpha^2f &= 0 \\
 \left\{ \beta^2 - \frac{(n+1)^2}{r^2} \right\} g_1 + g_1'' + \frac{1}{r}g_1' &= 0 \\
 g_3'' + \frac{1}{r}g_3' + \left\{ \beta^2 - \frac{n^2}{r^2} \right\} g_3 &= 0
 \end{aligned} \tag{14}$$

식 (14)를 식 (13)에 대입하면 식 (15)와 같이 응력에 관한 간편화된 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \sigma_{rr} &= \left\{ -\lambda(\alpha^2 + \zeta^2)f + 2\mu \left[f'' + \frac{n}{r} \left(g_3' - \frac{g_3}{r} \right) + \zeta g_1' \right] \right\} \\
 &\quad \cos n\theta (wt + \zeta z) \\
 \sigma_{r\theta} &= \mu \left\{ -\frac{2n}{r} \left(f' - \frac{f}{r} \right) - (2g_3'' + \beta^2 g_3) - \zeta \left(\frac{n+1}{r} g_1 - g_1' \right) \right\} \\
 &\quad \sin n\theta \cos (wt + \zeta z) \\
 \sigma_{rz} &= \mu \left\{ -2\zeta f' - \frac{n}{r} g_1' + \left[-\frac{n(n+1)}{r^2} + (\beta^2 - \zeta^2) \right] g_1 - \frac{n\zeta}{r} g_3 \right\} \\
 &\quad \cos n\theta \sin (wt + \zeta z)
 \end{aligned} \tag{15}$$

여기에 $f, f', f'', g_1, g_1', g_1'', g_3, g_3', g_3''$ 을 대입하고 경계조건 $r=a, b$ 에서 $\sigma_{rr} = 0, \sigma_{r\theta} = 0, \sigma_{rz} = 0$ 을 대입하면 응력계수 (A, B, A_1, B_1, A_3, B_3)에 대한 행렬을 얻을 수 있다. [2]

본 연구에서 계산한 응력 계수 행렬 $C_{i,j}$ 는 식(7)에서 대입하면 식 (16)과 식(17)과 같다.

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ A_1 \\ B_1 \\ A_3 \\ B_3 \end{bmatrix} = 0 \tag{16}$$

여기에 6X6 행렬의 구성요소 $C_{i,j}$ ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6, j=1, 2, 3, 4, 5, 6$)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= (2\alpha^2 a^2 + \xi^2 a^2 - \beta^2 a^2 - 2\alpha^2 a^2 \lambda_1 + 2(n^2 - n)) Z_n(\alpha_1 a) \\
 &\quad + 2\alpha_1 \lambda_1 a Z_{n+1}(\alpha_1 a) \\
 C_{12} &= (2\alpha^2 a^2 + \xi^2 a^2 - \beta^2 a^2 - 2\alpha^2 a^2 \lambda_1 + 2(n^2 - n)) W_n(\alpha_1 a) \\
 &\quad + 2\alpha_1 a W_{n+1}(\alpha_1 a) \\
 C_{13} &= 2\xi \beta_1 a^2 Z_n(\beta_1 a) - 2\xi(n+1)a Z_{n+1}(\beta_1 a) \\
 C_{14} &= 2\xi \beta_1 \lambda_2 a^2 W_n(\beta_1 a) - 2\xi(n+1)a W_{n+1}(\beta_1 a) \\
 C_{15} &= 2n(n-1) Z_n(\beta_1 a) - 2n\beta_1 \lambda_2 a Z_{n+1}(\beta_1 a) \\
 C_{16} &= 2n(n-1) W_n(\beta_1 a) - 2n\beta_1 a W_{n+1}(\beta_1 a) \\
 C_{21} &= -2n(n-1) Z_n(\alpha_1 a) + 2n\alpha_1 \lambda_1 a Z_{n+1}(\alpha_1 a) \\
 C_{22} &= -2n(n-1) W_n(\alpha_1 a) + 2n\alpha_1 a W_{n+1}(\alpha_1 a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{23} &= -2\xi(n+1)a Z_{n+1}(\beta_1 a) + \xi \beta_1 a^2 Z_n(\beta_1 a) \\
 C_{24} &= -2\xi(n+1)a W_{n+1}(\beta_1 a) + \xi \beta_1 \lambda_2 a^2 W_n(\beta_1 a) \\
 C_{25} &= (2\beta_1^2 \lambda_2 a^2 - \beta^2 a^2 - 2(n^2 - n)1) Z_n(\beta_1 a) \\
 &\quad - 2\beta_1 \lambda_2 a Z_{n+1}(\beta_1 a) \\
 C_{26} &= (2\beta_1^2 \lambda_2 a^2 - \beta^2 a^2 - 2(n^2 - n)1) W_n(\beta_1 a) \\
 &\quad - 2\beta_1 a W_{n+1}(\beta_1 a) \\
 C_{31} &= -2\xi n Z_n(\alpha_1 a) + 2\xi \alpha_1 \lambda_1 a Z_{n+1}(\alpha_1 a) \\
 C_{32} &= -2\xi n W_n(\alpha_1 a) + 2\xi \alpha_1 a W_{n+1}(\alpha_1 a) \\
 C_{33} &= -n\beta_1 Z_n(\beta_1 a) + b(\beta^2 - \xi^2) Z_{n+1}(\beta_1 a) \\
 C_{34} &= -n\beta_1 \lambda_2 W_n(\beta_1 a) + a(\beta^2 - \xi^2) W_{n+1}(\beta_1 a) \\
 C_{35} &= -n\xi Z_n(\beta_1 a) \\
 C_{36} &= -n\xi W_n(\beta_1 a) \\
 C_{41} &= (2\alpha^2 b^2 + \xi^2 b^2 - \beta^2 b^2 - 2\alpha^2 b^2 \lambda_1 + 2(n^2 - n)) Z_n(\alpha_1 b) \\
 &\quad + 2\alpha_1 \lambda_1 b Z_{n+1}(\alpha_1 b) \\
 C_{42} &= (2\alpha^2 b^2 + \xi^2 b^2 - \beta^2 b^2 - 2\alpha^2 b^2 \lambda_1 + 2(n^2 - n)) W_n(\alpha_1 b) \\
 &\quad + 2\alpha_1 \lambda_1 b W_{n+1}(\alpha_1 b) \\
 C_{43} &= 2\xi \beta_1 b^2 Z_n(\beta_1 b) - 2\xi(n+1)b Z_{n+1}(\beta_1 b) \\
 C_{44} &= 2\xi \beta_1 \lambda_2 b^2 W_n(\beta_1 b) - 2\xi(n+1)b W_{n+1}(\beta_1 b) \\
 C_{45} &= 2n(n-1) Z_n(\beta_1 b) - 2n\beta_1 \lambda_2 b Z_{n+1}(\beta_1 b) \\
 C_{46} &= 2n(n-1) W_n(\beta_1 b) - 2n\beta_1 b W_{n+1}(\beta_1 b) \\
 C_{51} &= -2n(n-1) Z_n(\alpha_1 b) + 2n\alpha_1 \lambda_1 b Z_{n+1}(\alpha_1 b) \\
 C_{52} &= -2n(n-1) W_n(\alpha_1 b) + 2n\alpha_1 b W_{n+1}(\alpha_1 b) \\
 C_{53} &= -2\xi(n+1)b Z_{n+1}(\beta_1 b) + \xi \beta_1 b^2 Z_n(\beta_1 b) \\
 C_{54} &= -2\xi(n+1)b W_{n+1}(\beta_1 b) + \xi \beta_1 \lambda_2 b^2 W_n(\beta_1 b) \\
 C_{55} &= (2\beta_1^2 \lambda_2 b^2 - \beta^2 b^2 - 2(n^2 - n)1) Z_n(\beta_1 b) \\
 &\quad - 2\beta_1 \lambda_2 b Z_{n+1}(\beta_1 b) \\
 C_{56} &= (2\beta_1^2 \lambda_2 b^2 - \beta^2 b^2 - 2(n^2 - n)1) W_n(\beta_1 b) \\
 &\quad - 2\beta_1 b W_{n+1}(\beta_1 b) \\
 C_{61} &= -2\xi n Z_n(\alpha_1 b) + 2\xi \alpha_1 \lambda_1 b Z_{n+1}(\alpha_1 b) \\
 C_{62} &= -2\xi n W_n(\alpha_1 b) + 2\xi \alpha_1 b W_{n+1}(\alpha_1 b) \\
 C_{63} &= -n\beta_1 Z_n(\beta_1 b) + b(\beta^2 - \xi^2) Z_{n+1}(\beta_1 b) \\
 C_{64} &= -n\beta_1 \lambda_2 W_n(\beta_1 b) + b(\beta^2 - \xi^2) W_{n+1}(\beta_1 b) \\
 C_{65} &= -n\xi Z_n(\beta_1 b) \\
 C_{66} &= -n\xi W_n(\beta_1 b)
 \end{aligned} \tag{17}$$

이 행렬의 해가 자명하지 않은 해(nontrivial solution)를 가지기 위해서는 응력계수 행렬의 판별식이 0이 되어야 한다.

따라서 6x6 행렬의 판별식을 도출해내고 circumferential order와 주파수에 따른 위상속도의 해를 각각 구하면 해 집단은 해당 circumferential order의 주파수에 따른 위상속도값을 가지게 된다.

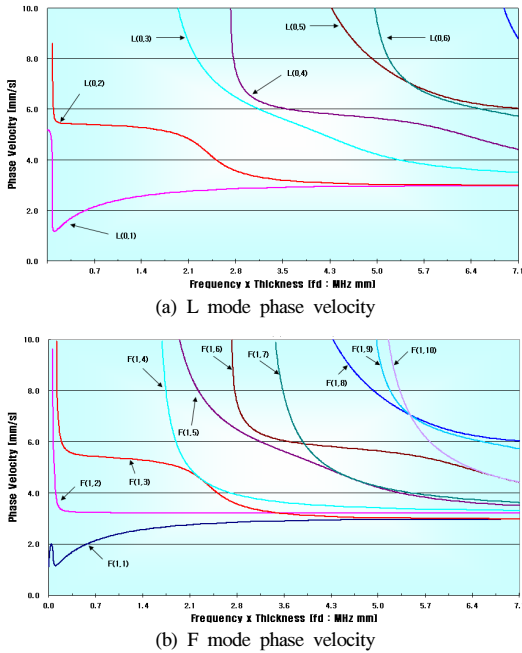


Fig. 4. Dispersion Curves of ASTM A106 6" sch 40 Pipeline.

3.3. 유도초음파의 분산선도 도해

본 논문에서는 2절에서 나타난 보온재하 부식배관의 조사에서 주로 사용된 6인치 스케줄번호 40인 배관에 대하여, 유도초음파 분산선도를 도해하였다. ASTM A106 6인치 배관의 위상속도분산선도는 KGS-GWDC (Korea Gas Safety - Guided Waves Dispersion Curve) 프로그램을 이용하여 계산하였으며, 위상속도의 속도정밀도는 0.001 mm/μs, 주파수 정밀도는 0.0002 MHz로 계산하고 그 결과를 Fig. 4에 도해하였다.

IV. 배관을 전파하는 유도초음파의 발진조건

4.1. 파형구조를 통한 전파특성 분석

본 논문에서 구한 분산선도를 계산하는 식으로부터 위상속도를 산출하고 변위와의 관계식에 대입하여 파형구조를 도해하여, 각 모드들이 관 내부를 전파할 때 어떠한 에너지 분포를 보이면서 전파하는지에 대한 확인을 가능케 할 수 있다. 이 파형구조(Wave Structure)는 유도초음파가 전파해갈 때 어떠한 형태의 변위값을 가지는지를 나타내고 있다. 이는 유도초음파의 변위량을 나타낸 것이지 절대적인 변화량 혹은 에너지량을 나타내지는 않는다. 다만 정성적인 에너지 분포를 도해하고자 하는 경우에는 구해지는

변위값의 절대치에 제곱을 하게 되면 에너지 분포와 유사한 결론을 얻을 수 있다. [5]

이러한 파형구조의 도해가 필요한 이유는 파형구조는 모드의 전파특성을 규명하는데 가장 중요한 근거이기 때문에 실험적인 가정을 뒷받침 해줄 수 있는 매우 중요한 방법이기 때문이다. 또한 대상체가 정해져 있고, 대상체에서 특정한 조건에 맞는 유도초음파를 발생 하여야 하는 경우에 파형구조를 도해하여 배관의 두께에 따라 어떠한 형태를 띠면서 전파하는지 확인 할 수 있다. 많은 부분의 산업설비 배관들이 배관외부에 부식 혹은 코팅되어 있으므로, 축방향 성분인 U_z 가 배관외부에 집중된 모드를 사용하게 되면, 에너지의 감쇄를 어느 정도 받게 된다. [7]

반대로 배관내부에 수송물질이 유체와 같은 에너지가 빠져나갈 수 있는 매질인 경우에는 유도초음파의 U_z 성분이 배관 내부에 집중되는 경우에는 에너지 손실을 야기할 수 있다. 따라서 외부의 영향을 적게 받으면서 어느정도 깊이에 따른 결함의 크기가 있는 경우에 검출을 하기 위해서는 유도초음파의 축방향 성분인 U_z 가 두께의 가운데 부분에 집중된 모드일 수록 유리할 것이다.

4.2. 변위방정식으로부터 파형구조의 계산

분산선도를 도출하기 위해서 응력계수 행렬의 판별식이 0이 되는 조건을 이용하였다. 여기에서 파형구조를 도해하기 위해서는 특정모드의 위상속도를 알아야 하고, $C_{ij} \times X = 0$ 에서 X행렬의 A, B, A_1 , B_1 , A_3 , B_3 값을 알면 변위의 식에 대입하여 변위를 계산할 수 있다.

그러나 이 응력식은 경계조건을 대입하였으므로 관의 내경, 외경부분에서 $\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0$ 가 된다. 이와 같은 경우에는 행렬 X의 값은 특정한 값으로 결정될 수 없으며, 단지 A, B, A_1 , B_1 , A_3 , B_3 의 상대적인 비로서 표현할 수 밖에 없는데, 본 연구에서는 가우스 소거법을 이용하여 B_3 의 값을 기준으로 하여 A, B, A_1 , B_1 , A_3 상대적인 비의 값으로 계산하여 파형구조를 도해하였다.

이러한 방법으로 식 (11)의 인자들은 모두 상수와 Bessel의 함수값을 가지게 된다. 여기에 r의 값을 내경부터 외경까지 변화시켜 가면서 각각의 변위량을 구하고 최대 변위량으로 일반화(Normalize)하여주면 U_r , U_θ , U_z 의 정규화된 값을 구할 수 있다.

Table 1은 ASTM A 106 sch# 40 배관을 전파하는 유도초음파의 특정지점에 대한 모드별 주파수별 위상속도 값이다. 이렇게 산출된 값으로부터 유도초음파 파형구조를 도해하여 우리가 활용할 때 가장 최적의 모드를 결정지을 수 있다. [3]

Table 1. Propagation modes and their phase velocities by frequency at ASTM A106 pipe-line

Mode	Frequency [MHz]	Phase Velocity [mm/μs]
L(0,2)	0.1	5.391
L(0,2)	0.2	5.277
L(0,2)	0.25	5.139
L(0,2)	0.3	4.829
L(0,2)	0.4	3.567
F(1,2)	0.1	3.231

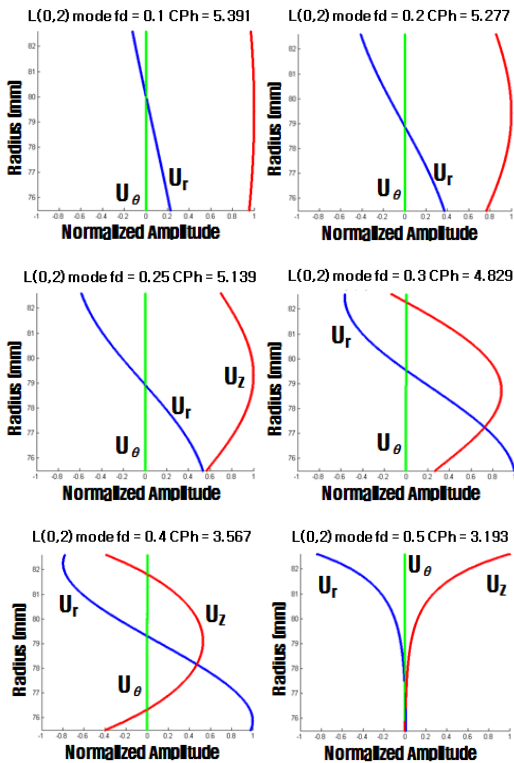


Fig. 5 Wave structure for each modes and frequencies.(ASTM A106)

Table 1.에 따라 위상속도와 선택된 주파수로부터 Wave structure를 도해한 결과는 Fig. 5와 같다.

4.3 분산선도 및 파형구조 분석을 통한 최적 발진조건 선정

Fig. 5에서 보는바와 같이 주파수가 바뀌면 전파하는 모드들의 파형구조가 변화하게 된다. 이때 전파능력을 크게 좌우하는 것은 U_z 값이며 이는 Z방향 즉, 배관의 축방향으로 유도초음파가 전파할 때 두께방향으로 전파하는 성분의 분포를 나타낸다. U_z 성분이 배관의 외면에 큰 분포를 가지는 경우에는 외면에 영향을 많이 받게된다. Fig 5에서는 0.1 MHz부터 0.4 MHz까지 주파수를 변화시키면서 변화하는 양상을 확인한 결과이다. 0.1MHz의 분포에서는 U_z 성분이 두께방향으로 고르게 분포되어 있으나 입사되는 에너지가 일정한 경우라면, 감쇄가 심해질 것이다. 따라서 배관의 외면에 고르게 분포하는 에너지 감쇠요소에는 덜 민감하고, 일정두께 이내로 들어오는 결함을 탐지하기 위해서는 배관의 외면에는 U_z 성분의 분포가 작으면서 중심에 집중되는 모드의 선택이 필요하게 된다.

이러한 양상을 보이는 주파수로는 0.3 MHz대역이 선택에 가장 좋을 듯 하나, 위상속도 분산선도의 0.3MHz ($fd=2.13$)에 해당되는 부위는 속도가 급변하는 분산성이 강한지역이다. 이 부분은 실험으로 신호를 받을 때 속도 분산성이 클 가능성이 있다. 따라서 최적의 주파수는 0.2MHz와 0.3MHz 사이의 0.25MHz로 예측되며, 이에대한 파형구조도 Fig. 5에 도해하였다.

또한 F(1,2)모드는 주파수가 0.1MHz 이상에서는 동일한 위상속도 값을 가지게 된다. 그의 파형구조는 U_z 성분보다는 U_θ 성분이 더 크기 때문에 상대적으로 전파에너지가 미약하게 된다.

이러한 파형구조와 분산선도의 분석으로 ASTM A106 스케줄번호 40인 배관에서 보온재 및 부식등 배관외면에 에너지 감쇠요소가 있는 배관의 유도초음파 탐상을 위한 최적의 발생모드는 L(0,2)모드의 주파수 0.25MHz로 선정할 수 있다.

IV. 결론

유도초음파 적용을 위한 대상체가 선정된 경우에는 해당 배관에 대한 유도초음파 분산선도를 도해하여, 유도초음파의 전파 특성을 반드시 분석해야 한다. 축대칭 모드인 L mode를 사용하고자 할지라도, 실제 적용시에는 탐촉자를 배관접촉면에 전체를 접촉하여 발생시킬 수 없을 뿐만 아니라, 결함등이 존재하는 경우에는 결함으로부터 반사되어 돌아올 때 결함이 대칭형 결함이라는 보장이 없으므로 반사시에 비축대칭형 모드인 F mode가 반드시 발생하게

된다. 유도초음파 분산선도를 도해하지 않은 상태에서 이러한 신호를 수집하고 분석하게 되면 모드변환된 신호에 대한 속도 정보가 없으므로, 결함이 아닌 구조물의 형상에 의해 반사된 신호를 결함신호로 잘못 판단할 수 있다. 따라서 어떠한 대상이 되더라도 유도초음파를 이용한 비파괴검사에는 반드시 적용대상 배관에 대한 유도초음파 분산선도는 필수적이다.

유도초음파의 실제전파속도인 군속도를 정확하게 산정하지 않은 상태에서 수행되는 유도초음파 비파괴검사는 결함의 위치를 정확하게 나타낼 수 없는 문제점이 있다. 하지만 이는 위치 결정에 오차를 야기할 뿐이지만, 유도초음파의 발생조건을 나타내는 위상속도분산선도를 계산하지 않고 임의의 조건에 따라 유도초음파를 발생시키면 유도초음파가 발생하지 않을 수도 있다.

따라서, 효율적인 유도초음파를 이용한 비파괴검사를 위해서는 위상속도 분산선도를 통해서 해당배관에 발생 가능한 모드들을 선정하고, 이렇게 선정된 모드들에 대한 파형구조를 도해함으로써 검사대상에 대한 최적의 모드를 선정 해야 한다. [8]

만일 검사대상 배관이 외부에 노출되어 표면에 부식이 전체적으로 발생하여 있는 경우에는 축방향으로 진행되는 변위성분인 U_z 의 분포가 표면에는 덜 집중되면서 중심과 내면에 집중이 되어 있는 모드를 선정하게 되면 효과적인 검사가 가능하고, 배관 내부에는 결함이 발생할 여건이 없는 배관인 경우에는 주로 확인하고 싶은 결함이 배관 외면에 발생하므로 배관 외면쪽으로 U_z 성분이 큰 모드를 선정하면 된다. 석유화학 플랜트의 공정라인배관과 같은 경우에는 내부에는 공정관리로 인해 부식이 발생할 경우가 없으나, 보온재로 쌓여 있는 배관과 같은 경우에는 CUI(Corrosion Under insulation)가 배관 외면에 어느 정도 발생하고 있다. 이러한 조건의 경우에는 앞절에서 선정한 바와 같이 배관의 외면과 내면보다 배관두께 중심부분에 에너지가 집중된 모드를 선정해야 유도초음파 검사를 효과적으로 수행할 수 있다.

본 논문에서는 배관의 외부에 보온재 및 부식등이 존재하여 유도초음파의 에너지를 감쇠시키는 요인이 있을 경우에 대한 유도초음파 발진조건을 결정하고자 하였다. 유도초음파는 배관의 형상(외경, 두께, 재질등)에 따라 각기 다른 분산성 및 전파양상을

가진다. 본 논문에서는 그중 일부분인 ASTM A106 스케줄번호 40 배관에 대해서 유도초음파 분산선도를 도해하고, 파형구조 해석을 통하여 외부에 영향을 적게 받으면서 중심부위에 에너지가 집중되는 모드를 찾고자 하였다. 그 결과 L(0,2)모드의 0.25MHz 대역이 가장 적절한 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 한국에너지기술평가원 에너지기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

REFERENCES

- [1] 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)
- [2] D.H. Lee, "A study on the Multi Channel Ultrasonic Guided Waves focusing method for enhancing crack detectability in long-range pipeline", Dr. Thesis, Sungkyunkwan University, (2011)
- [3] D.H. Lee, "Application of Guided Waves for Detection of Scale Inside Water Supply Pipes", Key Engineering Materials Vols. 270-273(2004)
- [4] Y.M Cheong, "Optimization of the ultrasonic guided wave parameters for crack detection in a feeder pipe of the PHWR power plants", Ultrasonic International'03 (2003)
- [5] J. L. Rose, Ultrasonic Waves in Solid Media, 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] 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)
- [8] Y. M. Cheong, D. H. Lee and H. K. Jung, "Ultrasonic guided wave parameters for detection of axial cracks in feeder pipes of PHWR nuclear power plants", Ultrasonics, Vol. 42, pp.883-888 (2004)