

스테인레스 316L강의 배관용접결함에 대한 유도초음파 특성 평가

Evaluation of Weld Defects in Stainless Steel 316L Pipe Using Guided Wave

이진경*, 이준현**†

Jin-Kyung Lee* and Joon-Hyun Lee**†

초 록 스테인레스강은 고온, 고압에서 부식에 효과적인 재료로써 액화수소, 가스 등을 저장하는 저장용기 및 고온의 유체들을 이송하는 배관재료로 널리 사용되고 있다. 일반적으로 스테인레스강의 용접은 TIG용접이 이용되어지고 있으며 용접후 용접부위에 발생하는 초기 용접결함 및 사용중 발생하는 열적 피로균열 등이 재료의 신뢰성을 저하하는 요인들로 지적되고 있다. 본 논문에서는 레이저 유도초음파를 이용하여 초기 용접결함에 대한 초음파 특성 규명을 위하여 스테인레스강의 용접부에 인공균열의 크기를 5 mm, 10 mm, 20 mm 길이로 가공후 유도초음파의 결함 길이 변화에 따른 특성을 평가하였다. 배관의 두께 등을 고려하여 L(0,1)모드와 L(0,2)모드를 이용하였으며 각각의 모드가 결함의 길이 변화에 따라 변화를 보였지만 L(0,2)모드가 L(0,1)모드보다 결함 길이에 더욱 민감하게 반응하였다. 본 연구에서는 L(0,1)모드와 L(0,2)모드의 진폭비를 구하여 결함과의 연관성을 평가한 결과 결함 길이와 선형적인 관계를 나타냄으로써 각 모드를 단독적으로 평가하는 것보다는 두 모드의 진폭비를 이용하여 결함을 평가하는 것이 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

주요용어: 스테인레스강, TIG 용접, 레이저 유도초음파, 분산성, 진폭비

Abstract Stainless steel is a popular structural materials for liquid-hydrogen storage containers and piping components for transporting high-temperature fluids because of its superior material properties such as high strength and high corrosion resistance at elevated temperatures. In general, tungsten inert gas (TIG) arc welding is used for bonding stainless steel. However, it is often reported that the thermal fatigue cracks or initial defects in stainless steel after welding decreases the reliability of the material. The objective of this paper is to clarify the characteristics of ultrasonic guided wave propagation in relation to a change in the initial crack length in the welding zone of stainless steel. For this purpose, three specimens with different artificial defects of 5 mm, 10 mm, and 20 mm in stainless steel welds were prepared. By considering the thickness of s stainless steel pipe, special attention was given to both the L(0,1) mode and L(0,2) mode in this study. It was clearly found that the L(0,2) mode was more sensitive to defects than the L(0,1) mode. Based on the results of the L(0,1) and L(0,2) mode analyses, the magnitude ratio of the two modes was more effective than studying each mode when evaluating defects near the welded zone of stainless steel because of its linear relationship with the length of the artificial defect.

Keywords: Stainless Steel, TIG Weld, Laser Generated Guided Wave, Dispersion, Magnitude Ratio

1. 서 론

최근 전 세계적으로 석유화학 및 원자력발전 플랜트 등과 같은 대형 발전설비의 건설 수요가 급격히 증가함에 따라 이들 대형 구조물에 필수

적인 배관부를 위한 적절한 재료 선정 및 설계 단계에 있어서의 선정 재료의 신뢰성 및 부재의 건전성 확보가 꾸준히 요구되고 있다. 스테인레스강은 고강도, 높은 내부식성 등의 우수한 재료 특성을 가지고 있어 액화수소, 가스 등을 저장하

[Received: January 25, 2015, Revised: February 23, 2015, Accepted: February 23, 2015] *동의대학교 기계공학과, **부산대학교 기계공학부, †Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea (E-mail: johlee@pusan.ac.kr)
© 2015, Korean Society for Nondestructive Testing

는 저장용기 및 고온 유체들을 이송하는 배관재 료로 널리 사용되고 있다. 특히 본 연구에 사용 된 오스테나이트계 스테인레스 316L강은 기존의 스테인레스강 316으로부터 탄소 함량을 줄임으로 서 내입계 부식성을 증가시킨 스테인레스강으로 원자력발전소 및 석유화학 플랜트 등과 같이 고 온, 고압 환경하에서 내부식성이 요구되는 부재 에 매우 효과적인 재료로 그 적용이 증가되고 있 는 재료이다[1-3].

배관부에 응용되는 스테인레스강의 용접은 일 반적으로 TIG용접이 널리 이용되어지고 있으며 용접후 용접부에 발생하는 용접결함은 중균열, 횡균열, 라미네이션 균열, 비드 밀균열 등 그 형태가 매우 다양한 형태로 나타난다[4-6]. 따라서 이와 같은 초기 용접결함들의 검출을 위하여 방 사선투과검사, 초음파검사 등을 이용한 각종 비 파괴검사가 수행되고 있으나, 오스테나이트계 재 료의 미세조직 특성상 검출에 어려움을 겪고 있 다. 특히 최근 고온, 고압환경의 원자력발전소의 배관부에서 사용중 발생하는 배관부의 열적 피로 균열 등은 재료의 신뢰성 저하는 물론 구조물의 건전성에도 영향을 주는 주요 요인들로 지적되고 있다. 일반적으로 초음파를 이용한 비파괴검사의 경우, 내부 불연속의 위치, 크기, 방향 및 모양을 정확하게 측정할 수 있고 시험 대상체의 재질과 주위 물체에 영향을 미치지 않고 즉시 검사할 수 있는 이점을 가지고 있어 방사선투과검사를 대체 할 수 있는 검사 기법으로 현장에서의 적용이 최 근 점차적으로 확대되고 있다. 초음파를 이용한 비파괴검사에는 검사체의 재질, 형상 등 여러 요 인을 고려해 종파, 횡파, 표면파 등 각종 초음파 모드를 이용하고 있었으나 최근에는 배관부와 같 이 두께에 비해 길이 방향이 증가하는 부재의 경 우 장거리 탐상에 용이한 유도초음파 적용에 관 한 연구가 활발히 진행되고 있다[7-10]. 그러나 유도초음파를 이용한 장거리 탐상의 경우 배관부 의 결함 유무 및 결함 위치 평가에는 검사 기법 의 유용함이 보고되고 있었으나 고온, 고압 환경 의 경우 검사를 위한 탐촉자의 설치 등 검사의 제약 요건이 수반되고 향후 비접촉 방식의 검사 기법의 필요성이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 배관부의 장거리 탐상이 아닌 용접부와 같은 사용중 열화요인이 많은 국 부적 취약 부분의 검사를 위하여 유도초음파를

활용하고자 하였다. 즉, 배관부 검사에 유용한 기 존의 유도초음파의 장점을 활용하면서 비접촉 방 식에 의한 용접부 주변의 국부적 검사를 위하여 배관 용접부에 인공균열을 가지는 배관 시험편에 레이저를 조사하여 재료의 열팽창에 의한 유도초 음파를 비접촉으로 발생시킨 후, 배관부를 전파 하는 다양한 모드의 유도초음파 특성을 분석, 활 용하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 비접촉 검 사 기법의 구축을 위한 첫 단계로서 배관부에 레 이저 유도초음파의 발생을 최적화하기 위하여 선 형 배열 슬릿을 사용하여 레이저 유도초음파의 파장을 변경함으로써 원하는 모드를 발생시킨 후 결함 검출에 적합한 모드를 선정하고자 한다. 나 아가 선정 모드를 이용하여 용접부내에 존재하는 인공균열의 길이 변화에 따른 유도초음파 전파 특성을 분석, 스테인레스강 용접 균열에 대한 정 량적 평가를 수행하였다.

2. 유도초음파 발생

2.1. 유도초음파 발생 원리

유도초음파는 다양한 형상과 탄성학적 경계 조 건하의 피검사체 내에서 그 기하학적 형상을 따 라 전파하는 모든 종류의 초음파 모드를 말한다. Fig. 1과 같이 배관부에 발생하는 유도초음파는 입사각, 매질의 두께 및 주파수에 따라 서로 다 른 입자 움직임을 갖는 다양한 모드로서 발생된 다. 배관내에서 운동방정식은 Navier's 방정식으 로부터 식(1)과 같이 유도된다[11]. 이 때 경계면이 자유로운 배관에서 유도초음파가 전파된다고 가 정하면 경계 조건을 식(2)로 정의할 수 있다.

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

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

각 방향의 응력에 식(2)를 대입하면 다음의 특 성방정식 (3)을 구할 수 있다.

$$|C_{ij}| = 0, \quad i, j = 1 \text{ to } 6 \quad (3)$$

이 행렬식을 통해 이론적인 분산곡선을 얻을 수 있고 배관내에 존재하는 모드들을 해석하여 용접부의 결함을 검출하는 것이 가능하다. 본 연

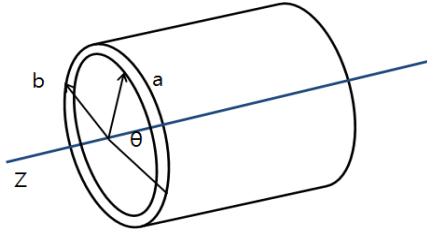


Fig. 1 A traction-free, infinitely long hollow cylinder with inner radius(a) and outer radius(b)

구에서는 레이저 발생기와 초음파 센서(PZT)를 이용하여 진동 방향이 배관의 길이 방향의 성분을 가지는 종파 모드(longitudinal mode)를 송수신하고자 한다.

2.2. 유도초음파 발생 및 방법

Fig. 2는 배관에서 유도초음파를 발생시키기 위한 실험장치의 개략도이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 레이저(Nd-YAG)와 초음파 센서를 배관의 동일 선상에 위치시키고 유도초음파를 송수신한다. 레이저 빔은 슬릿을 통해 라인 소스로서 배관에 유도초음파의 발생원으로 작용하고 발생한 유도초음파는 배관 및 용접부를 전파하며 웨지기를 이용하여 다양한 각도에서 유도초음파 신호를 수신한다. 본 연구에 사용된 레이저의 파장은 532 nm이고 최대 에너지는 31 mJ이며 발생된 유도초음파의 여러 모드 중 특정 모드를 수신하기 위하여 수신각 조절이 가능한 원형 웨지와 중심 주파수 1 MHz의 초음파 탐촉자를 사용하였다. 본 연구에 사용한 배관 용접부 시험편은 바깥 지름 104 mm, 두께 10 mm의 스테인레스강 316L 배관을 TIG 용접한 것으로 Fig. 2에 보여주는 바와 같이 배관 용접부내에 균열 길이가 5 mm, 10 mm, 20 mm로 서로 다른 배관 용접 시험편(깊이 2 mm, 폭 1 mm)을 사용하였으며 용접부는 레이저와 수신 센서의 중간에 위치하고 두 센서간의 거리는 200 mm로 고정하였다.

한편 식(3)을 통한 위상속도 분산선도와 스넬(Snell)의 법칙 (4)을 사용하여 유도초음파의 위상속도와 입사각의 관계를 구할 수 있다.

$$\frac{C_{wed}}{\sin\theta} = \frac{C_{ph}}{\sin 90^\circ} \tag{4}$$

Fig. 3을 통해 슬릿 간격에 따른 파장의 변화 ($v=f\cdot\lambda$)를 이용하여 각 모드의 위상속도와 수신각, 주파수의 변화를 알 수 있어 Table 1에 나타내었으며 특정 모드를 수신하기에 가장 적합한 슬릿을 선정하기 위하여 검출 신호가 이론 군속도와 근접하고, 선택 모드 수신이 뚜렷하게 나타

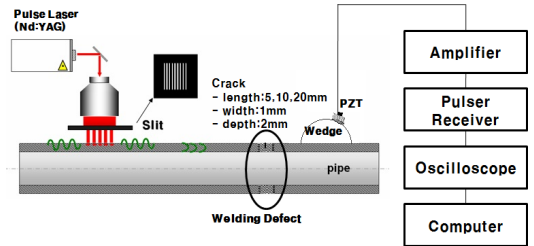


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

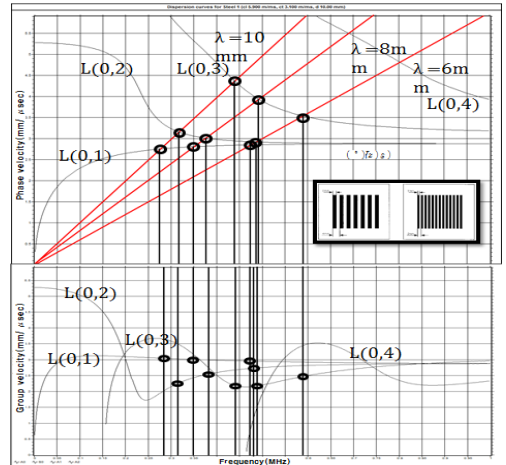


Fig. 3 Guided wave modes generated by the laser with slit of 6, 8, 10 mm in the phase and group dispersion curves for stainless steel pipe

Table 1 Theoretically predicted conditions such of velocities, frequency and receiving angle according to the change of slit gap

Slit gap	mode	phase velocity (mm/μs)	group velocity (mm/μs)	frequency (MHz)	receiving angle (°)
6 mm	L(0,1)	2.85	3.1	0.47	71.3
	L(0,2)	2.93	2.3	0.48	67.1
	L(0,3)	3.55	2.2	0.58	49.5
8 mm	L(0,1)	2.8	3.0	0.35	74.6
	L(0,2)	3.0	2.6	0.38	64.2
	L(0,3)	3.9	2.25	0.49	43.8
10 mm	L(0,1)	2.76	2.9	0.28	78.0
	L(0,2)	3.15	2.75	0.32	59.0
	L(0,3)	4.36	2.45	0.44	38.3

나는 슬릿을 결정하였다. 또한 용접 결함에 적합한 모드 선정을 위하여 선택한 슬릿을 통한 검출 신호를 비교하였다. 균속도 측정을 위해 음원으로부터 각각 50 mm와 100 mm의 떨어진 지점에서 수신하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 용접부에서의 유도초음파 특성

본 연구에서는 용접부가 있는 배관에서의 유도초음파의 특성을 평가하기 위하여 사용할 슬릿의 종류 및 특정 모드를 선정하기 위한 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결과를 나타내었다. Fig. 4에서는 슬릿 선정의 위하여 특정 모드를 수신하기 위한 수신각에서 각 슬릿 간격(파장)의 변화에 따라 유도초음파의 변화를 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 L(0,3)모드의 수신을 슬릿 간격 변화에 따라 비교한 시간-주파수 그래프를 통해 10 mm 간격의 슬릿에서 선택 모드가 가장 뚜렷하게 나타남을 확인하였다. 즉 시간-주파수 신호 특성 해석은 레이저 유도초음파의 다중 모드 해석 및 해석 분해능이 높다는 장점은 물론 균속도 분산선도와 비교함으로써 특정 모드의 확인 및 패턴을 알 수 있다. 한편 본 연구에서는 파장 10 mm의 슬릿을 이용하여 용접에 대한 유도초음파의 특성을 평가하였다. Fig 5는 10 mm간격의 슬릿을 사용하여 용접부 결함 검출에 적용할 모드를 결정하기 위해 수신각을 변경하며 신호를 검출한 결과를 나타낸 것이다. 수신각은 Table 1에서 10 mm의 파장에서 이론적인 각도인 38°, 59°와 78°로 고정해서 수신되는 유도초음파를 분석하였다. 실험 결과에서 수신각이 작아질수록 다양한 모드가 혼재되어 나타났다. 즉, 38°에서는 L(0,1), L(0,2)와 L(0,3) 모드가 나타났지만 59°에서는 L(0,1) 모드와 L(0,2) 모드만 나타나고 78°에서는 L(0,1) 모드만 발생하였다. L(0,1)모드의 경우 특정 모드 수신을 위한 수신각에 상관없이 모든 각도에서 검출됨을 확인하였다. 주파수 진폭 그래프 분석에서 78°에서는 L(0,1)모드만 신호 크기(magnitude)가 가장 크게 나타나며 59°에서는 L(0,1) L(0,2) 모드의 주파수 성분이 크게 나타남을 알 수 있었으며 38°에서는 L(0,1) L(0,2)모드의 신호 크기가

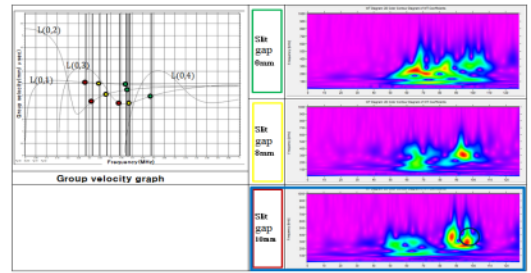


Fig. 4 Guided wave modes generated by the laser with slit of 6, 8, 10 mm in the time-frequency graph

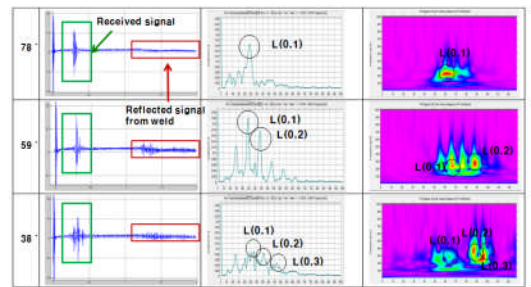


Fig. 5 Guided wave modes generated by the laser with angle of 38°, 59° and 78° in slit 10mm time - amplitude, frequency-amplitude, time-frequency graph

약해지고 L(0,3) 모드의 성분이 발생됨을 알 수 있었다. 이와 같이 용접된 배관에서의 유도초음파의 특성을 평가한 결과 수신각은 L(0,1) 모드와 L(0,2) 모드가 뚜렷이 발생하는 59°로 결정하여 균열이 있는 용접부에 대한 연구를 진행하였다.

3.2. 균열이 있는 용접부의 유도초음파 특성

본 연구에서는 용접부에 결함이 있는 배관에서의 유도초음파의 특성을 평가하기 위하여 앞의 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 용접부내에 유도초음파의 전파 방향과 수직 방향으로 인공균열을 도입하여 균열 길이 변화에 따른 레이저 유도초음파 모드 변화 특성을 평가하였다. Fig. 6에서는 10 mm의 파장을 가지는 슬릿과 수신각을 59°로 한 경우의 수신된 유도초음파를 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 균열 길이가 5 mm, 10 mm, 20 mm로 증가함에 따라 수신되는 파형의 진폭이 점차적으로 감소함을 알 수 있고 이는 균열 길이 증가에 따른 전파 초음파 에너지의 현저한 감쇄 효과에 기인하고 있다. 또한

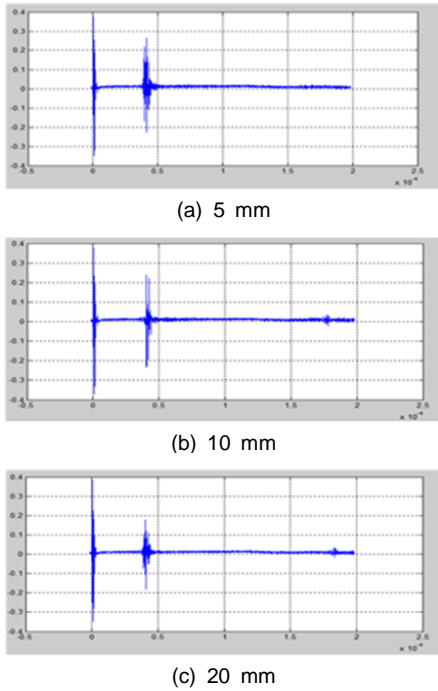


Fig. 6 Typical waveform of guided wave according to crack length of 5 mm, 10 mm and 20 mm

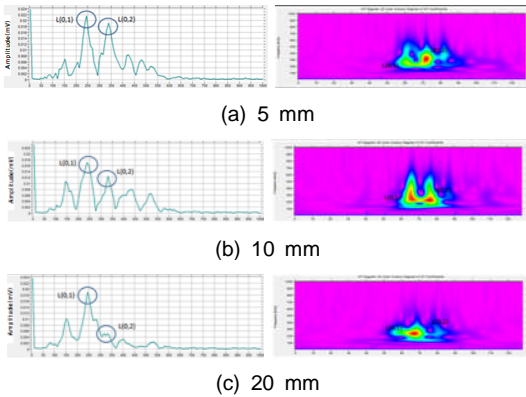


Fig. 7 Frequency analysis and wavelet transform of guided wave according to crack length

L(0,1) 모드와 L(0,2) 모드가 구별되지 않고 중첩되어 나타나 각 모드의 특징을 평가하기 어렵기 때문에 Fig. 7에 나타난 바와 같이 Fig. 6의 파형을 이용하여 주파수 분석 및 웨이블릿 변환시켜 그 결과를 나타내었다.

주파수 분석에서 L(0,1)모드와 L(0,2)모드의 신호 크기가 크게 발생하고 있으며 이들 신호는 결함의 크기가 변화할수록 신호 크기도 변화했다. 특히 L(0,2) 모드는 결함의 크기에 따라 현저히

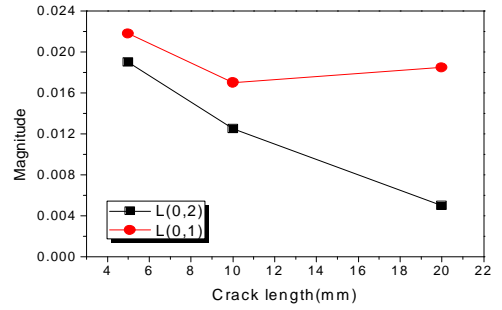


Fig. 8 Magnitudes of the modes vs. crack length

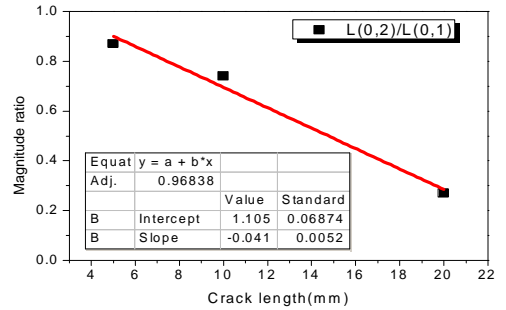


Fig. 9 Magnitude ratio of modes vs. crack length

신호 크기도 감소함을 알 수 있었다. 이와 같이 L(0,1) 모드는 용접부에 균열의 상태에 따라 큰 변화를 나타내지 않지만 L(0,2) 모드는 균열의 크기에 매우 민감하게 반응하기 때문에 균열 평가에는 효과적일 수 있다. 그러나 결함의 크기가 더 크게 되면 L(0,2) 모드가 거의 사라지기 때문에 균열의 크기에 따라 모드 선택에 주의할 기울여야 한다. 이와 같은 결과를 이용하여 Fig. 8에서는 결함 크기와 각 모드의 신호 크기와의 관계를 나타낸 것으로 L(0,1) 모드인 경우 결함이 10 mm인 경우 5 mm에 비해 신호 크기가 감소하였지만 20 mm로 결함 크기가 증가하면 역으로 신호 크기도 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 L(0,2) 모드의 신호 크기는 결함과 밀접한 관계를 나타내었다. 즉, 결함의 크기가 증가할수록 L(0,2) 모드의 신호 크기는 점차적으로 감소함을 알 수 있었다. 따라서 L(0,2) 모드가 L(0,1) 모드에 비하여 스테인레스 316L강 용접부에 대한 균열 평가에 더욱 효과적인 적용할 수 있는 모드임을 알 수 있었다. 한편 본 연구에서는 모드의 신호 변화를 이용하여 결함의 크기를 추정하는 방법을 조금 더 효과적으로 나타내기 위하여 L(0,1) 모드와 L(0,2) 모드와의 진폭비를 구하여

결함 크기와 비교하였다. Fig. 9에서는 결함 크기와 모드 진폭비와의 결과를 나타낸 것으로 결함의 크기가 증가함에 따라 모드 진폭비 역시 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 약 97% 정도의 표준편차를 나타내었으며, 유도초음파의 모드 진폭비를 이용하여 배관내의 결함 크기를 정량적으로 평가할 수 있는 가능성을 제시하였다.

4. 결론

본 연구에서는 스테인레스 316L강 배관의 용접부에 대한 결함 평가를 위해 유도초음파를 적용한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 슬릿 간격에 따른 신호 변화를 비교하여 특정 모드 수신에 적합한 10 mm 간격의 슬릿을 선택하였으며 59°의 수신각을 이용하여 결함 검출에 용이한 L(0,1)모드와 L(0,2)모드를 정량적으로 비교하여 용접부 균열에 따른 신호 변화를 확인하였다.
- 2) 용접 결함이 커짐에 따라 L(0,2) 모드의 수신된 신호 크기는 점차적으로 감소하였지만 L(0,1) 일정한 패턴을 보이지 않았다.
- 3) 용접부 배관에서 L(0,2) 모드와 L(0,1) 모드의 진폭비는 결함의 길이에 따라 비례적으로 감소함에 따라 정량적인 평가가 가능함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] Y. Cai and Y. Ben., "High temperature tests of cold-formed stainless steel double shear bolted connections," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 104, pp. 49-63 (2015)
- [2] R. T. Julian, S. Astri, K. S. Jan and G. S. Darl, "On the measurement of austenite in supermartensitic stainless steel by X-ray diffraction," *Materials Characterization*, Vol. 99, pp. 238-242 (2015)
- [3] Z. Xin, F. Lijun, X. Yulai, L. Jun, X. Xueshan and J. Laizhu, "Effect of aluminum on microstructure, mechanical properties and pitting corrosion resistance of ultra-pure 429 ferritic stainless steels," *Materials & Design*, Vol. 65, pp. 682-689 (2015)
- [4] Y. Zou, R. Ueji and D. Fujii, "Effect of oxygen on weld shape and crystallographic orientation of duplex stainless steel weld using advanced A-TIG (AA-TIG) welding method," *Materials characterization*, Vol. 91, pp. 42-49 (2014)
- [5] D. Li, S. Lu, W. Dong, D. Li and Y. Li, "Study of the law between the weld pool shape variations with the welding parameters under two TIG processes," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, Issue 1, pp. 128-136 (2012)
- [6] C. M. Branco, S. J. Maddox, V. Infante and E. C. Gomes, "Fatigue performance of tungsten inert gas (TIG) and plasma welds in thin sections," *International Journal of Fatigue*, Vol. 21, Issue 6, pp. 587-601 (1999)
- [7] S. Ruth, "A closed form solution method for rapid calculation of guided wave dispersion curves for pipes," *Wave Motion*, Vol. 53, pp. 40-50 (2015)
- [8] A. Farhidzadeh and S. Salamone, "Reference-free corrosion damage diagnosis in steel strands using guided ultrasonic waves," *Ultrasonics*, Vol. 57, pp. 198-208 (2015)
- [9] S. Sharma and A. Mukherjee, "Ultrasonic guided waves for monitoring the setting process of concretes with varying workabilities," *Construction and Building Materials*, Vol. 72, No. 15, pp. 358-366 (2014)
- [10] D.-J. Lee, Y. Cho, K.-W. Jang, S.-H. Cho and B.-Y. Ahn, "Measurement of Elastic Constants of Thin Metallic Foil by Guided Wave Dispersion Characteristics," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 1, pp. 41-46 (2012)
- [11] C. Dou, S. Jiang and Y. Ou., "Low mach number limit of full Navier-Stokes equations in a 3D bounded domain," *Journal of Differential Equations*, Vol. 258, Issue 2, pp. 379-398 (2015)