

유도초음파기술을 이용한 배관 감육 평가

Assessment of Pipe Wall Loss Using Guided Wave Testing

주경문*[†], 진석홍*, 문용식*

Kyung Mun Joo*[†], Seuk Hong Jin* and Yong Sig Moon*

초 록 원자력발전소 탄소강 배관의 유체가속부식은 주요 경년열화 현상이며 발전소의 성능 및 안전성을 저해할 수 있다. 유체가속부식 검사는 보온재 제거 및 설치로 상당한 비용이 수반되므로 최근에 보온재 제거가 필요 없고 원거리 검사가 가능한 유도초음파에 대한 관심이 점점 증가되고 있다. 유체가속부식 검출에 유도초음파 적용이 가능하다면 검사 비용 절감이 예상된다. 본 연구의 목적은 유체가속부식 손상 유무를 확인하고 결함 검출능을 결정하기 위함이다. 본 연구에서는, 실제 유체가속부식 손상 시험편의 엘보우 첫 번째 용접부와 두 번째 용접부의 진폭 감쇄비를 측정하기 위하여 3가지 검사 기법을 사용하였다. 연구 결과, 유체가속부식 손상을 검출하기 위한 최적의 검사 기법과 최소 결함 검출능을 도출하였다.

주요용어: 유체가속부식, 유도초음파, 주파수 레짐, 체적파, 데시벨, 톤버스트파, 단면손실률

Abstract Flow accelerated corrosion(FAC) of carbon steel pipes in nuclear power plants has been known as one of the major degradation mechanisms. It could have bad influence on the plant reliability and safety. Also detection of FAC is a significant cost to the nuclear power plant because of the need to remove and replace insulation. Recently, the interest of the guided wave testing(GWT) has grown because it allows long range inspection without removing insulation of the pipe except at the probe position. If GWT can be applied to detection of FAC damages, it will can significantly reduce the cost for the inspection of the pipes. The objective of this study was to determine the capability of GWT to identify location of FAC damages. In this paper, three kinds of techniques were used to measure the amplitude ratio between the first and the second welds at the elbow area of mock-ups that contain real FAC damages. As a result, optimal inspection technique and minimum detectability to detect FAC damages drew a conclusion.

Keywords: FAC(Flow Accelerated Corrosion,), Guided Wave Testing(GWT), Frequency Regime, Bulk Wave, dB(Decibel), Tone-Burst Wave, ECL(Estimated Cross-Section Loss)

1. 서 론

탄소강으로 제작된 배관은 유체 흐름과 접촉할 경우에는 유체가속부식(FAC)이라는 손상을 받아 두께가 감육되는 현상이 나타나고 결국에는 파단 되는 사고가 발생할 수 있다. 현재 발전소 배관 두께검사에 이용되고 있는 초음파검사(UT, ultrasonic

technique) 방법은 수직탐상을 이용한 두께측정 방식으로 검사 대상관의 보온재 제거 후 검사부위를 격자모양으로 분할하여 정밀하게 측정함으로써 배관 전체의 감육 정도와 형상을 비교적 정확히 구할 수 있는 장점이 있다. 그러나 발전소의 방대한 탄소강 배관을 이러한 방법으로 모두 검사하는 일은 많은 시간과 비용이 요구된다[1].

따라서 상용화된 감육 예측 프로그램을 사용하여 감육에 민감할 것으로 예측되는 배관을 선별하여 발전소 정비 기간에 초음파 두께검사를 개별적으로 수행하고 있으나 FAC 관리 대상 배관의 수도 지속적으로 증가되는 추세이다.

이러한 문제를 해결하고자 본 연구에서는 보온재 제거가 필요 없고 검사 부위를 한번에 탐상할 수 있는 비파괴검사 방법인 유도초음파 기술을 적용하여 FAC 손상 여부를 평가할 수 있는 가능성을 고찰하고 그 결과를 기술하였다.

2. 이론적 고찰

유도초음파검사 기법은 구조물의 기하학적 구조를 따라 전파하는 초음파를 이용한 방법으로써, 기존의 체적파(bulk wave)를 사용한 국부검사법에 비해 탐촉자 이동없이 고정된 지점으로부터 일정범위를 한번에 탐상할 수 있을 뿐만 아니라 절연체나 코팅재의 제거 없이 구조물이 설치된 상태로 검사를 수행할 수 있다[2-8].

Fig. 1은 기존 초음파검사와 유도초음파검사 기법을 비교하여 그림으로 나타내었다.

기존 초음파에서 사용하는 체적파(bulk wave)는 무한대의 사이클을 가진 연속파이며 단일 주파수를 갖지만, 유도초음파에 사용된 톤 버스트(tone-burst) 파는 파장 형태 및 사이클 수가 제한되어 있어 주파수 범위를 나타내는 밴드폭이 넓다[3]. 때문에 특정 검사 주파수를 적용하여 신호 수집 후 평가 시 주파수 증·감을 통해 신호 형상 및 진폭 크기를 비교하여 결함 크기를 분석할 수 있다[3]. Fig. 2는 톤 버스트파와 연속파의 주파수 폭을 비교하여 그림으로 보여주고 있다.

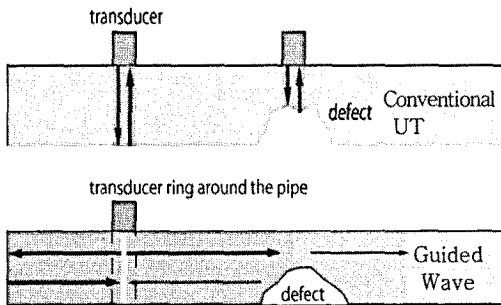


Fig. 1 Comparison between UT and guided wave

본 연구에서는 주파수 변화에 따른 파의 진행 속도가 일정하고 검사체 원주방향으로 파동변위를 가지면서 축 방향으로 진행되는 T(0,1) 모드를 발전 에너지로 사용했으며, 발전된 모드는 시험체의 단면 및 강성 변화에 의해 모드변환이 이루어져 축대칭은 T(0,1), 비축대칭은 F(1,2)모드로 수신되어 진다.

기존 초음파검사는 주파수에 관계없이 재질에 따라 속도가 일정하지만 유도초음파는 주파수에 따라 속도가 변화하는 특성을 가지고 있어 검사 주파수 설정 시 속도가 일정한 주파수 영역을 찾아 적용해야 하는데 이때의 주파수를 레짐(regime) "0" 이라 칭한다.

Fig. 3은 시험체에 존재하는 모드와 주파수에 따른 속도 변화를 분산곡선으로 나타냈다.

결합의 형상은 비축대칭이므로 F(1,2)모드로 수신되어 지는데 정확한 신호평가를 위해서는 탐촉자링의 수신 가능한 주파수 대역이 F(1,2) 모드 주파수 레짐 "0" 범위를 포함하고 있어야 한다. 분산곡선을 분석한 결과 F(1,2)의 주파수 레짐 "0"은 약 42 kHz로 나타났다.

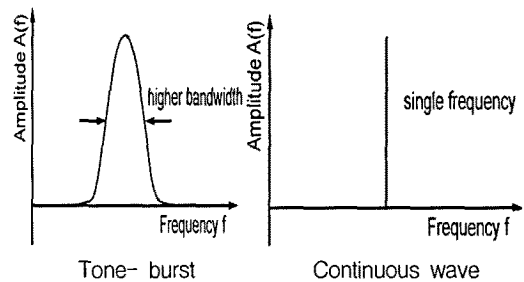


Fig. 2 Comparison between tone-burst and continuous wave

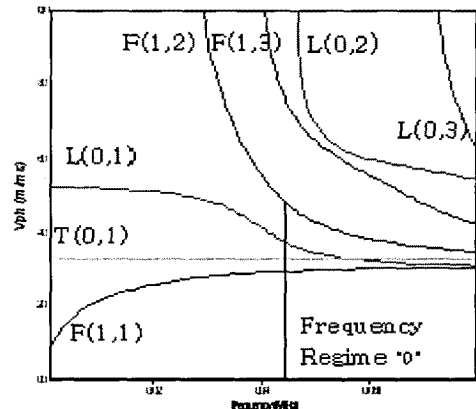


Fig. 3 Dispersion curves for the 3" pipe

3. 실험장치 및 방법

3.1. 실험장치 구성

본 연구에서 사용된 유도초음파탐상 시스템은 Guided Ultrasonics Ltd. 의 Wavemaker G3™으로 탐촉자 링을 시험체 외면에 부착시켜 배관의 원주 방향으로 진동하면서 축방향으로 파를 진행시키는 비틀림형 모드 T(0,1)를 사용하였다. 결합에서 반사되어 돌아오는 신호를 수신하여 소프트웨어를 통해 신호를 분석했다. Fig. 4는 유도초음파 발생 시스템 구성을 나타내고 있으며, 신호를 송·수신하는 장비와 이를 구동하기위한 제어 컴퓨터, 탐촉자 링으로 구성되어 있다.

본 시스템에서 사용되는 탐촉자링의 구성은 2개의 열과 4개 구역으로 나뉘어져 있으며, 한 구역에 6개의 진동자로 구성되어 총 24개의 진동자가 설치되어 있다. 진동자 간 거리에 의해서 중심 주파수가 결정되어 진다. 본 시험에서 사용된 진동자 간 거리는 24 mm이며, 시험체의 음속은 3210 m/s이다. 아래 식(1)을 통하여 중심주파수를 구할 수 있다.

$$fc = v/\lambda, \lambda = 4d \tag{1}$$

fc는 중심 주파수, v는 재질의 속도, λ는 파장, d는 진동자 간격이다. 식(1)에 의하여 중심주파수 fc는 33 kHz로 나타났다. 톤 버스파 특성상 중심주파수의 ±20 kHz 까지는 유효한 주파수로써 사용이 가능하므로 탐촉자 링의 주파수 대역이 F(1,2) 모드 주파수 레짐 "0" 범위를 포함하고 있음을 알 수 있다.

주파수 송·수신은 소프트웨어를 통하여 제어되며 송신기에서 전파된 에너지는 진동자를 통하여 배관

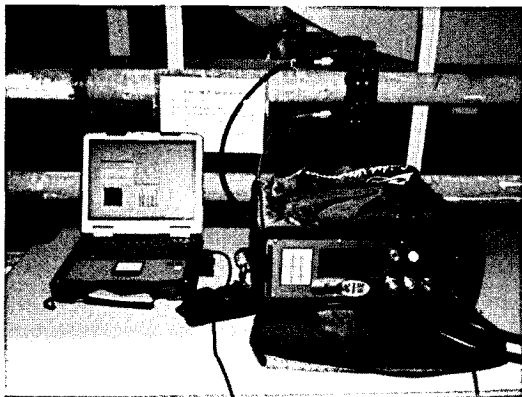


Fig. 4 GWT system

을 따라서 좌우로 전파되고 반사체를 만나면 모드 변환과 함께 에너지가 반사되어 수신기에 전달되어지며, 수신된 T(0,1)모드의 신호는 검정색, F(1,2)모드의 신호는 빨간색으로 표현되어 진다. 반사체의 형태에 따라 전달되어진 신호의 양상이 다르며 주파수를 변화시키면 신호의 크기 및 거동이 변화하는데 이것은 신호평가 분석기술의 중요한 요소이다.

3.2. 시험편

본 시험에서는 실험 결과의 현장 적용 실효성을 높이기 위하여 탄소강 엘보우 부위에서 유체가속부식으로 손상된 5개의 실제 결합 시험편과 결합이 없는 1개의 시험편을 배관에 용접하여 3개의 루프로 제작한 후 실험을 수행하였다. Fig. 5는 실험에 사용된 시험편을 보여주고 있으며, 시험편 사양은 Table 1과 같다.

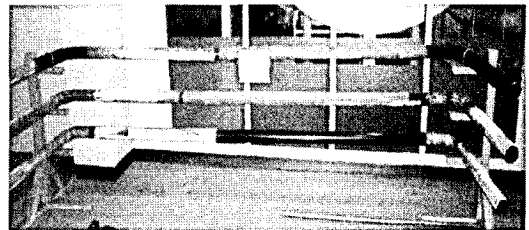


Fig. 5 Test loops

Table 1 Specification of the specimens

Pipe Material	Outside Diameter (mm)	Inside Diameter (mm)	Thickness (mm)
AL06 grade"B"	88.9	77.9	5.5

손상된 엘보우 부위의 정확한 배관 두께 측정을 위하여 Panametrics사의 초음파 두께측정기를 사용하여 측정하였다. Table 2는 시험편의 두께측정 결과를 나타내었다.

Table 2 Wall thickness of the specimens

TEST LOOP	specimen Number	Thickness (mm)	Wall Loss (%)
1	1	5.47	0.0
	2	4.68	14.4
2	3	4.18	23.6
	4	4.02	26.9
3	5	3.43	37.3
	6	3.03	44.6

3.3. 신호수집

신호 수집을 하기 전에 소프트웨어가 시스템의 모든 매개변수들을 제대로 탐지 하였는지 여부를 확인하였다. 또한 탐촉자의 정전용량(capacitance) 및 커플링을 점검함으로써 수집된 데이터에서 발생할 수 있는 오류를 사전에 제거하고자 하였으며, 탐촉자 각각의 세그먼트들이 제 기능을 적절히 수행하고 있는지 여부를 점검하였다. 점검결과 모든 시스템이 정상적임을 확인한 후 신호 수집을 수행하였다.

소프트웨어에 의한 가공전의 원 데이터 트레이스를 분석함으로써 취득된 데이터의 전기적 노이즈 및 주변소음에 의한 영향여부를 평가하여 취득된 데이터의 품질을 검증하였다. Fig. 6은 원 데이터의 트레이스를 보여주고 있다.

3.4. 신호평가

본 실험에 사용된 검사시스템은 직관 배관의 결함검출 및 평가 방법으로 ECL(estimated cross-section loss) 기법이 사용되고 있다. Fig. 7은 ECL 기법을 보여주고 있으며, ECL 기법은 결함 형상이

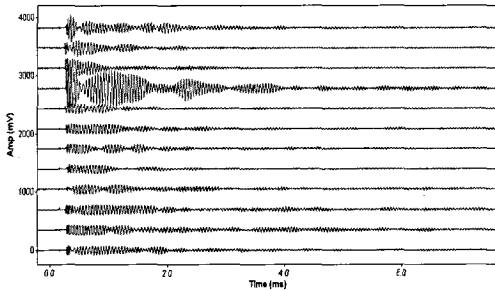


Fig. 6 Plot of the raw data traces

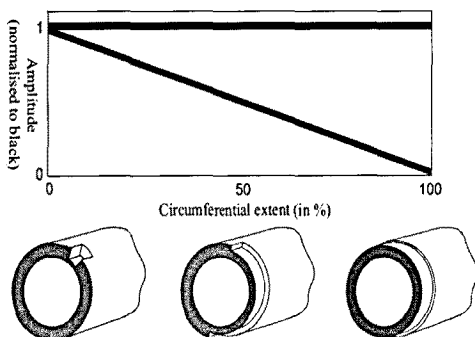


Fig. 7 ECL(estimated cross-section loss) technique

비축대칭이므로 비축대칭 모드를 관찰하여 축대칭 모드와의 진폭 비율을 비교하여 결함 손상 정도를 결정하는 기법이다.

그러나 배관 엘보우의 경우 두 번째 용접부 형상이 비축대칭이며 배관 곡관부에 의한 송신모드의 모드변환으로 노이즈 수준이 증가되어 ECL 기법을 적용하여 배관 감육 상태를 진단하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 감육이 없는 시험편과 자연 감육의 크기가 다른 5개 시험편을 이용하여 엘보우 용접부위의 T(0,1), F(1,2)모드의 에너지 감쇄비와 감육 크기와의 상호 연관성을 분석하여 최적의 검사 기법을 도출하고자 실증실험을 수행하였다.

신호 평가는 신호의 축대칭(axisymmetric) 및 비축대칭(non-axisymmetric) 분석, 주파수에 따른 신호 형상 및 진폭 변화를 관찰함으로써 엘보우 부위를 확인했으며, 실제 탐촉자 링으로부터 엘보우까지의 거리를 실측하여 검증을 하였다. Fig. 8은 감육이 없는 시험편 #1의 신호평가 화면을 보여주고 있으며, 엘보우 두 번째 용접부의 비축대칭 형상으로 인한 F(1,2)모드의 진폭크기를 분석한 결과 노이즈 수준의 진폭보다 약 0.25 dB 높게 나왔다.

엘보우 첫 번째 용접부 형상은 축대칭이고, 두 번째 용접부 형상은 비축대칭으로 T(0,1)과 F(1,2)모드가 혼재된 신호로 표현되어졌다. 각 시험편으로부터 취득된 데이터에서 엘보우 신호를 구분한 후, FAC에 의한 배관 손상을 진단할 수 있는 유효한 검사 기법을 도출하기 위하여 다음 3가지 기법을 적용하여 평가를 하였다.

기법 1은 유체가속부식에 의한 배관 손상형태가 엘보우 첫 번째 용접부와 두 번째 용접부 사이에서

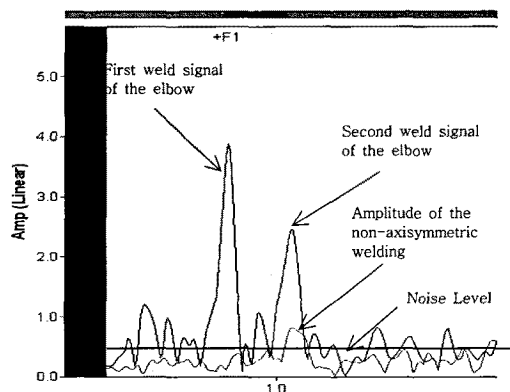


Fig. 8 Experimental result of specimen #1(without defect)

폭넓게 발생한다면 감육형상은 비축대칭 보다는 축대칭에 가까워 모드 영향은 F(1,2)모드 보다 T(0,1) 모드 영향을 더 받기 때문에 엘보우 첫 번째 용접부와 두 번째 용접부의 축대칭 신호를 보여준 T(0,1)모드 신호의 진폭차이를 분석하는 기법이다. 감육이 없는 시험편 #1에 대해 배관 곡관부위의 기본 에너지 감쇄율을 측정하였으며, 5개의 감육 시험편을 동일한 방법으로 진폭크기를 측정하였다. Fig. 9는 기법 1을 사용하여 시험편 #5를 평가한 화면을 보여주고 있다.

기법 2는 엘보우 부위의 유체가속부식은 유체흐름 방향으로 두 번째 용접부 부위에서 감육이 집중적으로 발생한다면 감육형상은 비축대칭에 가까워 F(1,2)모드 영향을 더 많이 받기 때문에 엘보우 첫 번째 용접부 신호 T(0,1)과 두 번째 용접부의 비축대칭을 보여준 F(1,2)모드 신호와의 진폭비를 측정하여 분석한 기법이다. 엘보우 두 번째 용접부와 감육 형상으로 인한 비축대칭 신호를 분석한 결과 F(1,2)모드의 신호의 크기는 감육이 없는 시험편보다 진폭이 0.2 dB 증가하였으며, 이는 배관 감육의 영향으로 분석되어 진다.

Fig. 10는 기법 2를 사용하여 시험편 #5를 평가한 화면이다.

기법 3은 기존 배관 직관부 결함 검출에 사용되고 있는 ECL평가 방법을 이용한 기법이다. 엘보우 두 번째 용접부의 축대칭신호를 보여준 T(0,1)모드 신호와 비축대칭 신호를 보이는 F(1,2)모드 신호와의 진폭비를 측정하였다. Fig. 11은 기법 3을 사용하여 시험편 #5를 평가한 화면이다.

4. 실험결과 및 고찰

기법 1을 사용하여 FAC 손상을 측정된 결과 배관 감육률이 14.4%인 시험편에서의 에너지 감쇄율은 감육이 없는 시험편의 에너지 감쇄율과 차이를 보이지 않고 있으며 감육률 23.6%이상 시험편에서는 감육 크기가 증가함에 따라 에너지 감쇄율도 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이를 통해 유도 초음파 기술을 적용하여 배관 감육 결함을 검출하기 위한 최소 검출 한계는 두께 감육 약 20%정도인 것으로 나타났다. Fig. 12은 기법 1을 이용하여 에너지 감쇄율을 측정된 값을 그래프로 보여주고 있다.

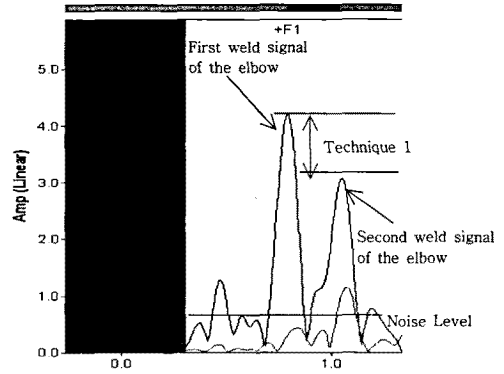


Fig. 9 Different in amplitude of the black signals between the first and the second welds

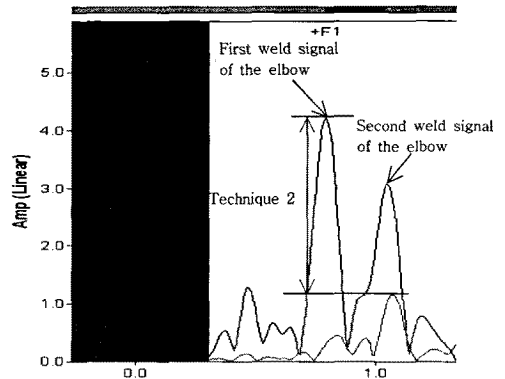


Fig. 10 Different in amplitude between black signal of the first and red signal of the second welds

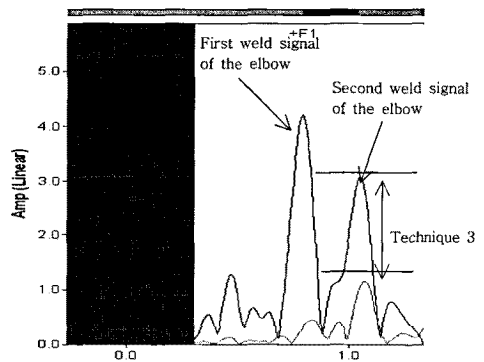


Fig. 11 Different in amplitude between the black and the red signals of the second weld

기법 2를 사용하여 FAC 손상을 측정된 결과 배관 감육률에 따른 에너지 감소율의 연관성을 보여 주지 못하고 있다. Fig. 13는 기법 2를 이용하여 에너지 감쇄율을 측정된 값을 그래프로 보여주고 있다.

기법 3을 이용한 실험 결과 값도 기법 2와 같이 배관 감육률에 따른 에너지 감소율의 연관성을 보여 주지 못하고 있다. Fig. 14은 기법 3을 이용한 에너지 감쇄율 측정값을 그래프로 보여주고 있다.

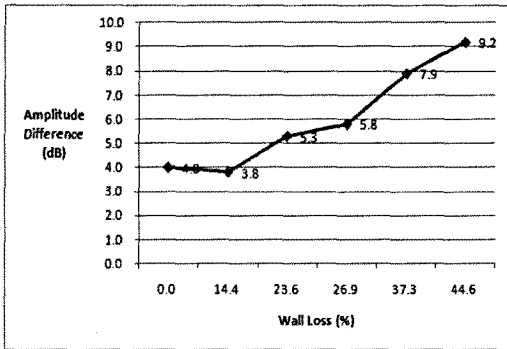


Fig. 12 Amplitude difference in dB using technique No. 1

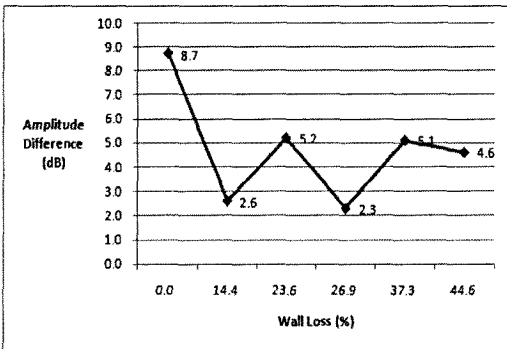


Fig. 13 Amplitude difference in dB using technique No. 2

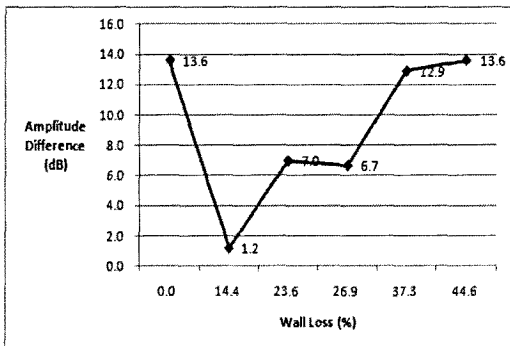


Fig. 14 Amplitude difference in dB using technique No. 3

5. 결론

본 연구에서 유체가속부식에 의해 손상된 시험편을 이용하여 유도초음파 기술에 대한 평가기법 및 검출능을 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 엘보우 첫 번째 용접부와 두 번째 용접부의 측대칭신호를 보여준 신호의 진폭차이로 분석한 기법 1이 두께 감육률에 따라 에너지 감쇄비가 선형적으로 증가함을 보여주고 있어 유체가속부식 손상 평가시 가장 유효한 기법임이 보여주고 있으며 이는 배관감육 형태가 엘보우 첫 번째 용접부와 두 번째 용접부 사이에서 폭넓게 발생함을 증명하고 있다.
- 2) 유도초음파 기술을 적용하여 배관 감육 결함을 검출하기 위한 최소 검출 한계는 두께 감육 약 20%이다.

본 연구를 통해 유도초음파 기술을 이용하여 FAC 손상을 평가 할 수 있는 기법 및 최소 감육 검출능을 제시하였다. 향후 본 기술을 현장에 적용하기 위해서는 분기관, 엘보우, 지지대 등에 의한 에너지 감쇄량을 분석하여 유효 검사거리를 결정하기 위한 추가 연구가 요구된다.

참고문헌

- [1] A. Machiels, "Recommendation for an effective flow-accelerated corrosion program (NSAC-202L-R3)," ERPI 1011838 Final Report, Electric Power Research Institute (2006)
- [2] D. N. Alleyne and P. Cawley, "The interaction of Lamb waves with defects," IEEE Trans Ultrason., Ferro. Freq. Cont. Vol. 39, No. 3, pp. 381-397 (1992)
- [3] P. Cawley, M. J. S. Lowe, D. N. Alleyne, B. Pavlakovic and P. Wilcos, "Practical long range guided wave testing: Application to pipe and rail," Material Evaluation, Vol. 6 No. 1, pp. 66-74 (2003)
- [4] S. J. Song, "Detection of scale inside of water supply pipes using guided waves," 9th

- Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, QNDE (2002)
- [5] J. L. Rose "Guided wave testing of water loaded structure," Materials Evaluation, Vol. 61, No. 1, pp. 23-24 (2003)
- [6] M. Lowe S, D. N. Alleyne and P. Cawley. "The reflection of guided waves from notches in pipes," NDT & E International. Vol. 37, No. 3, pp. 167-180 (2004)
- [7] 강토, 김학준, 송성진, 조영도, 이동훈, 조현준 "배관 원거리 진단을 위한 원주방향 배열 유도 초음파 집속기술 개발", 비파괴검사학회지, Vol. 29, No 2, pp. 114-121 (2009)
- [8] 송성진, 박준수, 신현재 "폴리에틸렌 코팅 카스 배관의 광범위 탐상을 위한 유도초음파 모드 선정 및 결합검출", 비파괴검사학회지, Vol. 21, No. 4, pp. 406-414 (2001)