

# 가압기 히터슬리브 용접부 PWSCC 검출을 위한 유도초음파 특성 평가

주경문<sup>†</sup>·문용식\*·정우근\*

## Guided Wave Characterization Assessment for PWSCC Detection of Pressurizer Heater Sleeve Weld

Kyung-Mun Joo<sup>†</sup>, Yong-Sig Moon\* and Woo-Geun Chung\*

(Received 22 MAR. 2011, Accepted 30 APR. 2011)

### ABSTRACT

Although many defects in PZR heater sleeve have been reported continually from operating experiences in oversea nuclear power plant, utilities get into difficulties in finding appropriate methods for diagnostics of the components due to the limited access or high radiation problems. Recently, as an alternative, diagnostics using Guided Wave Testing(GWT) are proposed and the attention of the methods has been growing gradually because of their long range inspection capability. This study is to investigate the effectiveness of GWT to detect PWSCC in welding points of PZR heater sleeve. Moreover, mode sensitivity analysis of GWT and optimal frequency for the diagnostics of PWSCC are presented by testing the mock-ups specimens that contain artificial flaws.

**Key Words :** PWSCC(일차수용력부식균열), Guided Wave Testing(유도초음파시험), Bulk wave(체적파), Tone-burst wave(톤 버스트), Frequency regime(주파수레짐), EDM(방전가공)

## 1. 서 론

현재 국내 원자력발전소의 압력유지 용접부는 원자력법 등 검사요건에 의해 주기적인 비파괴검사를 수행하여 기기 건전성을 확보하고 있으나 소구경 용접부는 검사 면제대상 품목으로 체적 검사를 하지 않고 있다.

가압기 히터 슬리브 용접부는 이종금속으로 이루어져 있어 PWSCC에 민감한 것으로 알려져 있으며 1987년 미국 ANO 2호기 용접부 축균열 발생 이후 많은 원자력발전소에서 결함이 발견되었다. 현재 개발된 비파괴 검사방법으로 가압기 히터 슬리브 용접

부를 검사하기 위해서는 관통관을 절단해야 하며 작업시 검사자의 피폭, 작업공정 지연등 제반 소요비용이 많이 요구된다. 또한, 기기 건전성 확인을 위한 주기적 예방검사가 어려운 문제점이 있다.<sup>1)</sup>

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 가압기 히터 슬리브 용접부의 PWSCC 검출을 위한 유도초음파 특성을 평가하고 그 결과를 기술하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

기존의 체적파(bulk wave)를 사용한 초음파검사법은 탐촉자 인접 부위만 검사가 가능하지만 유도초음파 검사방법은 구조물의 기하학적 구조를 따라 전파되므로 탐촉자 이동 없이 고정된 지점으로부터 원거리의 검사가 가능하다.<sup>2-5)</sup>

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원  
E-mail : kmjoo@khnp.co.kr

TEL : (042)870-5636 FAX : (042)870-5649

\* 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

Fig. 1은 기존초음파 검사와 유도초음파 검사 기법을 비교하여 그림으로 나타내었다.

기존 초음파에서 사용하는 체적파(bulk wave)는 무한대의 사이클을 가진 연속파이며 단일 주파수를 갖지만, 유도초음파에서 사용하는 톤 버스트(tone-burst) 파는 파장 형태 및 사이클 수가 제한되어 있어 주파수 범위를 나타내는 대역폭이 넓다<sup>6)</sup>. 따라서 특정 주파수로 신호를 수집한 후 주파수 증감을 통해 신호 형상 및 진폭 크기를 비교하여 결함을 평가할 수 있다<sup>4)</sup>. Fig. 2는 톤 버스트파와 연속파의 주파수 대역폭을 비교하여 그림으로 보여주고 있다.

본 연구에서는 유도초음파 모드 중 주파수 변화에 따른 파의 진행 속도가 일정하고 원주방향으로 진동하면서 축 방향으로 진행되는 T(0,1) 모드를 발진 에너지로 사용했으며, 발진된 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

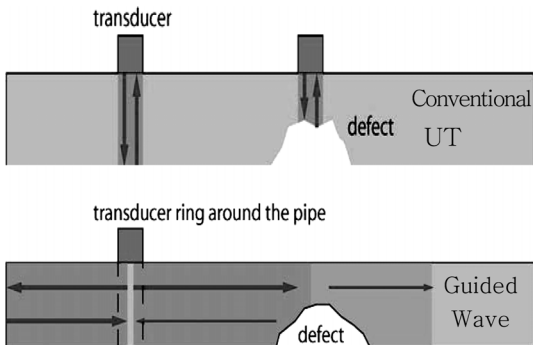


Fig. 1 Comparison between Conventional UT and Guided Wave

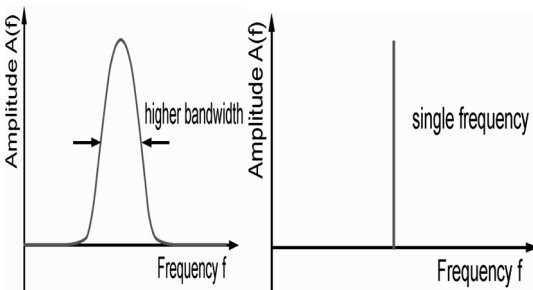


Fig. 2 Comparison between Tone-burst and Continuous wave

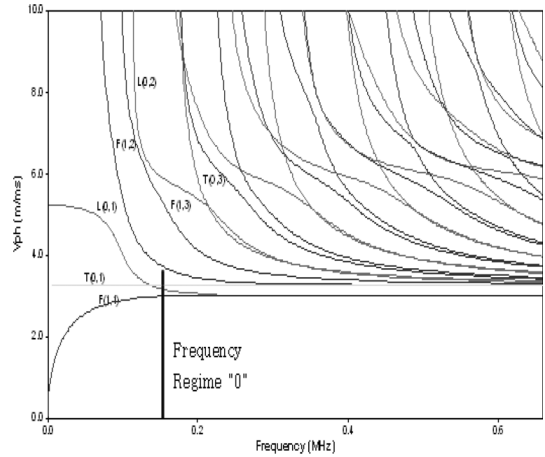


Fig. 3 Dispersion curves for the 1.25" pipe

속도가 변화하는 분산특성을 가지고 있어 검사 주파수 설정 시 속도가 일정한 주파수 영역을 찾아 적용해야 하는데 이때의 주파수를 레짐(regime) “0”이라 칭한다.

Fig. 3은 분산선도 해석프로그램을 이용하여 본 실험에 사용된 시험체에 존재하는 모드와 주파수에 따른 속도 변화를 분산 곡선으로 보여주고 있으며, F(1,2)모드의 레짐 “0”인 주파수 영역대를 알 수 있다.

결함은 비축대칭이므로 F(1,2)모드로 수신되어 지는데 정확한 신호평가를 위해서는 탐촉자 링의 수신 가능한 주파수 범위가 F(1,2) 모드 주파수 레짐 “0” 이상이어야 한다. Fig. 3의 분산곡선을 분석한 결과 F(1,2)의 주파수 레짐 “0”은 약 120kHz로 나타났다.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 실험장치 구성

본 연구에서 사용된 유도초음파탐상 시스템은 GUL (Guided Ultrasonics Ltd)사의 Wavemaker G3™으로 탐촉자링을 시험체 외면에 부착시켜 배관의 원주방향으로 진동하면서 축방향으로 파를 진행시키는 비틀림형 모드T(0,1)를 사용하였다. 결함에서 반사되어 돌아오는 신호를 수신하여 소프트웨어를 통해 신호를 분석했다. Fig. 4는 유도초음파 발생 시스템을 나타내고 있으며, 신호를 송·수신하는 장비와 이를 구동하기위한 제어 컴퓨터, 탐촉자링으로 구성되어 있다.

탐촉자링은 2개의 열과 4개 구역으로 나뉘어져 있으며, 한 구역에 6개로 총 24개의 진동자가 설치되어 있다. 송·수신은 소프트웨어를 통하여 제어되며 에너지는 진동자를 통하여 배관을 따라서 좌우로 전파되고 반사체를 만나면 모드 변환과 함께 반사되어 수신기에 전달되어 지며, 수신된 T(0,1)모드의 신호는 검정색, F(1,2)모드의 신호는 빨간색으로 스크린을 통해 표현된다. 반사체의 형태에 따라 전달되어진 신호의 양상이 다르며 주파수를 변화시키면 신호의 크기 및 거동이 변화하는데 이것은 신호평가 분석기술의 중요한 요소이다.

**3.2 시험편**

본 시험에 사용한 시험편은 가압기 히터슬리브와 동일한 재질, 외경 그리고 두께로 제작되었다. 결함이 없는 시험편과, PWSCC 결함을 모사하기 위하여 이중금속 용접부위 내면에 반경방향으로 인공결함(EDM

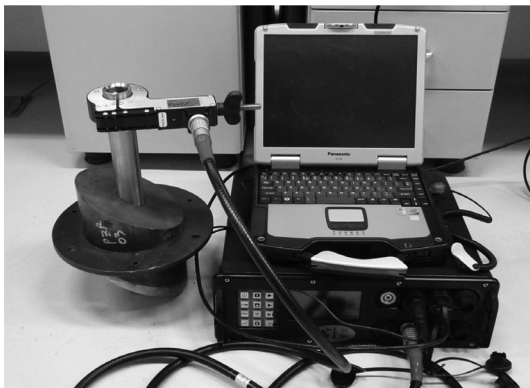


Fig. 4 GWT system

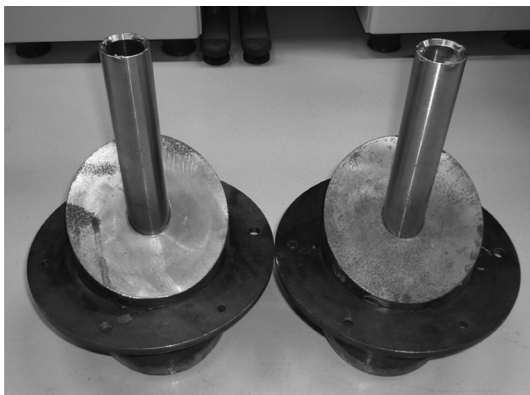


Fig. 5 Specimens

**Table 1** Specification of the Specimens

Specimen Number	Defect Length (mm)	Defect Depth (mm)	Defect Location & Orientation	Angle
1	-	-	-	16°
2	10	2.52	Inside/Cir.	16°

노치)을 삽입한 총 2개의 시험편으로 구성하였다. Fig. 5는 실험에 사용된 시험편을 보여주고 있으며, 시험편 사양은 Table 1과 같다.

**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.

신호 수집은 시험편 2개에 대하여 동일한 조건으로 Fig. 6과 같이 20kHz 간격으로 중첩시켜 120kHz에서부터 500kHz까지 총 4회에 걸쳐 신호를 수집하였다. Fig. 6은 신호수집시 주파수 설정화면을 보여주고 있다.

수집된 신호는 소프트웨어에 의해 가공전의 원 데이터 트레이스를 분석하여 취득된 데이터의 전기적 노이즈 및 주변소음에 의한 영향평가를 수행함으로

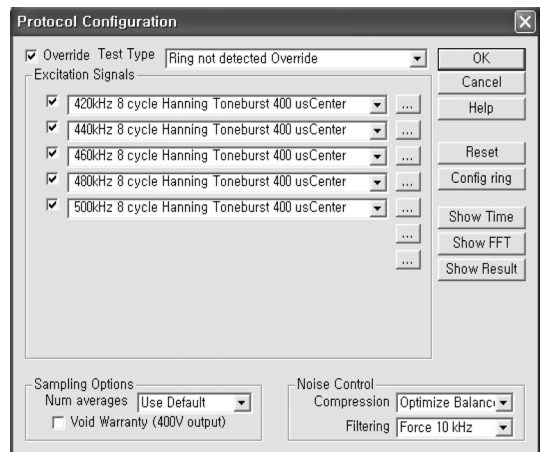


Fig. 6 Frequency setting for collecting the data

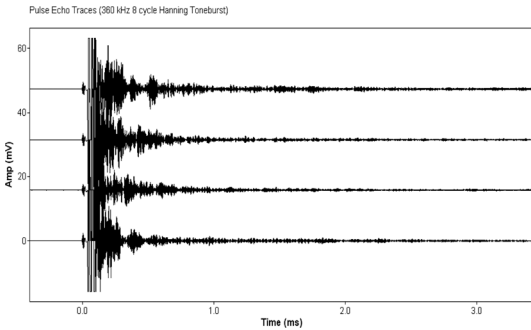


Fig. 7 Plot of the raw data traces

써 데이터의 품질을 검증하였다. Fig.7은 원 데이터의 트레이스를 보여주고 있다.

### 3.4 신호평가

본 실험의 PWSCC 검출을 위한 유도초음파 신호 평가기법은 무결함 시험편에서 주파수 대역별로 취득된 데이터를 평가하여 용접부 및 노즐 끝단 신호가 주변 노이즈 신호와 명확하게 구별이 되는 주파수 영역을 구한 후, 이 주파수 영역에서 결함 시험편의 결함발생 예상 부위인 이중금속 용접부의 신호형상과 진폭을 상호 비교 분석하였다.

Fig. 8은 용접부 및 노즐 끝단에 의한 신호가 주변 노이즈 및 왜곡 신호와 구별되는 주파수 영역을 찾기 위하여 시험편 1에 대한 주파수 150kHz~300kHz

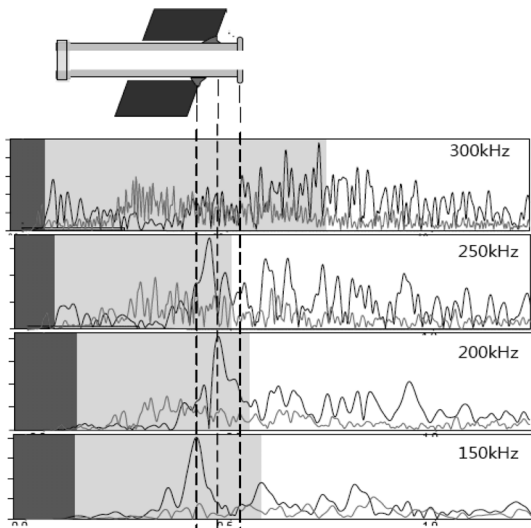


Fig. 8 Experimental result of collected data from 150 kHz to 300kHz

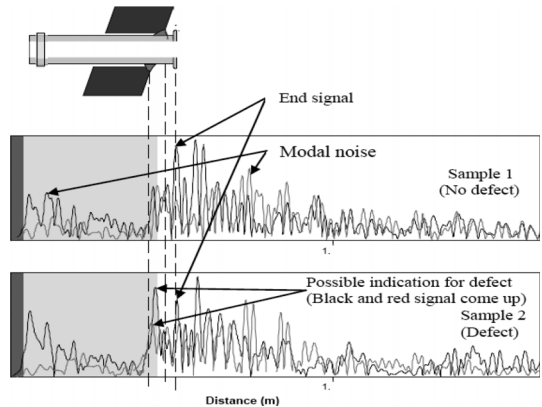


Fig. 9 Experimental result at the 500kHz

의 신호 평가 화면을 보여 주고 있으며, 평가결과 용접부 및 노즐끝단 신호는 노이즈 및 왜곡 신호와 구별이 어려웠다.

Fig. 9는 용접부 및 노즐끝단 신호가 주변 노이즈 신호와 구별이 되는 주파수 영역인 500kHz에서의 시편 1과 2의 신호형상 및 진폭을 상호 비교한 평가 화면을 보여주고 있다.

시험편2에서 취득된 데이터는 특정주파수 영역에서 밴드폭의 증가와 감소를 통하여 이중금속용접부 결함신호와 주변 노이즈 신호를 구별하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 10은 결함이 없는 시험편을 이용하여 주파수 영역별로 용접부의 축대칭 형상을 보여주는 T(0,1) 모드, 비축대칭 형상을 나타내는 F(1,2)의 진폭크기와 노즐 끝단 신호의 진폭크기 측정 결과를 그래프로 보여주고 있다.

주파수 영역 500kHz에서 용접부의 T(0,1), F(1,2) 모드와 노즐 끝단 신호의 진폭을 비교한 결과 노즐 끝단신호의 진폭크기가 상대적으로 크게 나타났다. 이것은 용접부를 통과한 유도초음파의 잔존 에너지가 상대적으로 많은 것으로 해석된다. 하지만, 저 주파수(500kHz 미만)의 경우 파장 길이가 길어 발전모드 T(0,1)의 일부 에너지가 가압기 용기 벽의 경사 영향으로 왜곡된 F(1,2)모드를 발생시켜 실제 용접부에 의한 F(1,2)모드와 중첩이 되면서 진폭이 증가하여 상대적으로 노즐 끝단 신호의 진폭크기는 작고, 용접부 F(1,2)모드의 진폭크기는 크게 나타났다.

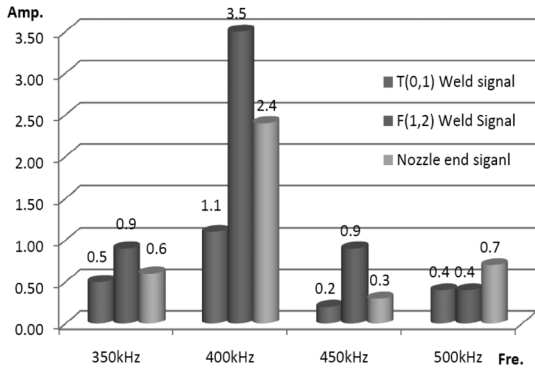


Fig. 10 Amplitude values about reflectors depending on frequency.

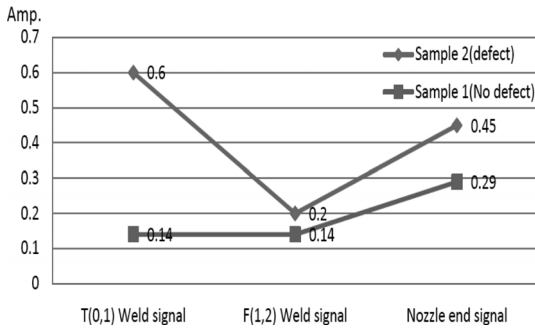


Fig. 11 Amplitude values about reflectors of sample 1 and sample 2

Fig. 11은 500kHz 영역에서의 결함이 가공된 시편 2와 결함이 가공되지 않은 시편1 용접부의 T(0,1)모드, F(1,2)모드의 진폭크기와 노즐끝단 신호의 진폭크기를 측정하여 상호 비교분석한 그래프이다.

시편1과 시편2에서 취득된 신호를 분석한 결과 시편2의 용접부의 T(0,1)모드 진폭의 크기는 시편 1에 비해 약 4.2배 크지만 비 축대칭 모드인 F(1,2)의 진폭은 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이것은 결함 길이와 깊이를 단면적으로 환산했을 때 결함으로 인한 단면적 감소율이 5.6%에 지나지 않아 비축대칭 모드를 나타내는 F(1,2)모드 보다는 축대칭 모드인 T(0,1)모드의 영향을 더 받는 것으로 보여진다. 또한 시험편 2의 노즐 끝단 신호의 진폭크기는 용접부 T(0,1)모드의 진폭크기 보다 작음을 알 수 있다. 이것은 결함 용접부로 부터의 반사에너지는 증가한 반면, 통과한 유도초음파 에너지는 감소되어 나타나는 현상으로 분석되어 진다.

## 5. 결론

본 연구에서는 가압기히터 슬리브 용접부의 PWSCC 검출을 위한 모드분석과 최적의 주파수 선정을 하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접부의 PWSCC 검출을 위한 지배 모드는 T(0,1)모드로 나타났으며, 용접부의 T(0,1)모드 진폭변화 관찰이 최적의 평가방법임을 확인하였다.

2) 결함 검출을 위한 최적의 주파수 영역대는 500kHz임을 알 수 있다.

3) 500kHz 미만의 저주파수에서는 가압기 외벽의 경사와 용접부에 의한 영향으로 노이즈 및 왜곡신호가 발생된다.

## 참고문헌

1. C.P. King, Materials Reliability Program PWSCC of Alloy 600 Type Materials in Non-Steam Generator Tubing Application - Survey Report Through June 2002(MRP-87), EPRI-1007832, Electric Power Research Institute,(2003).
2. P. Cawley, M. J. S. Lowe, D.N. Alleyne, B. Pavlakovic, P. Wilcox, "Practical Long Range Wave Testing: Application to Pipe Inspection", Material Evaluation, 61(1), pp. 66~74, 2003.
3. SJ Song, YH Kim, DH Lee, JS Park, HD Lee, Chul-Ho Bae, "Detection of Scale Inside of Water Supply Pipes using Guided Waves", 9th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, QNDE, 2002.
4. 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.
5. J.L.Rose "Guided Wave Testing of Water Loaded Structure." Materials Evaluation, Vol. 61, No. 1, pp. 23-24(2003).
6. M.J.S.Lowe, 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).