

다층구조인 노내 간극 측정을 위한 초음파 패턴 분석과 주파수 대역 분할 신호처리

The Ultrasonic Wave Pattern Analysis and The Frequency Diversity
Signal Processing in Multi-layered Gap Measurement for In-Vessel
Corium Retention

구길모, 김종환, 김상백, 김희동

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

당 연구소에서 수행하는 LAVA 실험 결과, 용융물과 반구사이의 간극은 구조적 복잡성 때문에 기본적인 초음파 검사방법으로는 한계가 있다. 검사체의 구조적 복잡성은 형상에 의한 외부 요소와 재료에 의한 내부 요소로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 검사체의 내부가 가지는 특성요소와 외부적 환경요소의 문제점들을 각각 분석하였다.

내부 재료적 특성 요소의 문제점은 다 산란이 발생하여 후방 산란 잡음 즉 시 불변성 잡음이 발생하게된다. 이러한 간섭성 잡음인 결정립 잡음을 억제하기 위해서 주파수 대역 분할 기술의 확률 처리 방법인 Polarity threshold 알고리즘을 일부 간극신호에 적용하여 신호대 잡음비를 개선하였다. 외적 환경요소로서 대표적으로 용융물 내부에서 불규칙 반사체는 진행파의 임계각에서 초음파의 모드변환이 일어나게 되며, 이러한 모드 변환의 가능성과 다층 구조에서 초음파 진행파의 굴절 및 반사가 분석되어야 한다. 간극 측정용 초음파 탐상장비 및 탐촉자의 중요한 파라미터들은 탐촉자의 크기, 주파수, 대역 등이다. 특별히 수직빔 다층구조 반향신호 해석을 위해서 반구와 용융물간에 액체를 투입한 후 전송신호의 고체-액체-고체 상태인 진행방향에 대한 반사모드를 분석하였고, 반사체 조건에 따라 반향파의 패턴을 구분하여 간극의 패턴을 분류하였다.

abstract

A gap between a molten material and a lower head vessel is formed in the LAVA experiment, a phase 1 study of SONATA-IV program. In this paper, the quantitative results of the gap measurement using an off-line ultrasonic pulse echo method by frequency diversity signal processing are presented. However, the gap measurement signal using an ordinary ultrasonic test would be lack of reliability due to the structural complexity of the specimen. The structural complexity may result from the external reason from the shape and the internal reason from the material characteristics. This paper aims at the development of an appropriate ultrasonic test method, by analyzing the problems from the internal characteristic reason.

In this test, the signal of the propagational direction and reflectional direction through solid-liquid-solid specimen was analyzed to understand the behavior of the reflectional signal in a multi-layered structure by filling the gap with water between the melt and the lower head vessel.

1. 서 론

원자로 용기 냉각 실험결과 노심용융물은 원자로 용기 하부 반구내로 재배치되어 하부 반구 내벽과 접촉할 때 용융물과 하부 반구 내벽 사이에 생길 수 있는 작은 간극으로 냉각수가 침투되면 노심용융물의 냉각이 이루어질 수 있다는 가정이 유력하게 제기되고 있다[1]. 본 논문에서는 노심용융물과 원자로 용기 하부 반구 사이의 간극을 통한 노심용융물의 냉각 특성을 규명하는 SONATA-IV 실험 연구와 연계하여 이상 유동이 존재하는 고온 표면에서 발생한 간극을 일차적으로 다층구조 초음파의 반사 패턴을 분석하여 정량적으로 측정하였으며, 이 초음파 탐상기술로 측정이 어려운 일부 신호에 대해서는 주파수 대역 분할 신호처리 기술을 적용하여 신호 대 잡음비를 개선하였다.

당 연구소에서 수행하는 LAVA 실험 결과, 용융물과 반구사이의 간극은 구조적 복잡성 때문에 기본적인 초음파 검사방법으로는 한계가 있다. 검사체의 구조적 복잡성은 형상에 의한 외부 요소와 재료에 의한 내부 요소로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 검사체의 내부가 가지는 특성요소와 외부적 환경요소의 문제점들을 각각 분석하였다.

내부 재료적 특성 요소의 문제점은 반구형 반응 용기 내부로 약 2300 °C 온도이상의 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물 및 Al_2O_3 Thermite 용융물이 주입될 때 용융물과 하부 반구사이에 간극 형성유무 및 하부 반구재료의 열적 거동을 가져온다. 하부반구 내부재료는 용융점 까지 상승되면 열영향 영역이 생성되고, 열영향 영역에서는 재료의 결정립의 크기가 변화하게 된다. 검사체의 내부 재료 입자인 결정립 크기가 변화할 경우 초음파의 진행파는 결정립 경계에서 반사 및 다 산란이 발생하여 후방 산란 잡음 즉 시 불변성(time invariant) 잡음이 발생하게된다[2]. 이로 인하여 초음파 탐상기의 수신 신호는 낮은 신호 대 잡음비의 결과로 나타나게 되며, 결과 적으로 측정될 간극 신호는 재료의 고유 간섭 신호 때문에 구분하기가 어렵게 된다. 따라서 이러한 간섭성 잡음인 결정립잡음을 억제하기 위한 기존의 신호처리 기술로서는 공간 평균 처리 방식[2], 주파수 평균 처리방식[3], 디콘볼루션 여파기법[4], 적응 여파기법[5], 디코렐레이션 처리법[6], 다중 대역 여파기를 이용한 주파수 대역 변화 기술[7]들이 있다. 본 논문에서는 주파수 대역 분할 기술의 확률처리 방법인 Polarity threshold 알고리즘을 적용하여 일부 간극신호에 적용하여 신호 대 잡음비를 개선하였다.

외적 환경요소로서는 검사체의 접근성을 개선하고자 표면 거칠기 및 곡률에 맞는 왓치를 설계 제작하였다. 또한 용융물 내부에서 불규칙 반사체는 진행파의 임계각에서 초음파의 모드변환이 일어나게 되며, 이러한 모드 변환의 가능성과 다층 구조에서 초음파 진행파의 굴절 및 반사가 분석되어야 한다. 또한 반구의 정확한 간극 위치 확인을 위해서 하부 반구는 위치 표시가 필요하였다.

간극 측정용 초음파 탐상장비 및 탐촉자의 중요한 파라미터들은 탐촉자의 크기, 주파수, 대역 등이다. 특별히 수직빔 다층구조 반향신호 해석을 위해서 반구와 용융물간에 액체를 투입한 후 전송신호의 고체-액체-고체 상태인 진행방향에 대한 반사모드를 분석하였고, 반사체 조건에 따라 반향파의 패턴을 구분하여 간극의 패턴을 분류하였다. 측정된 일부 간극 신호들은 거리 진폭의 크기와 측정 위치에 따라서 2차원 및 분포로 표현을 하였다.

2. 반구 간극 측정

2.1 세 개의 다층 구조에서 매질을 통과하는 음향 전달 이론

평면파가 첫째 매질 I을 지나 둘째 매질 II 그리고 셋째 매질 III로 전달된다는 것을 고려하면, 두께 : L , 매질의 특성 임피던스 : ν_1, ν_2, ν_3 라 하면 매질 I에서 매질 II사이의 경계면에 도착 할 때 에너지의 일부분은 반사되고 어떤 것은 두 번째 매질로 투과 된다. 전달된 파의 일부분은 매질 II를 통해서 진행할 것이며, 다시 에너지의 일부분은 반사되고 어떤 것은 투과 된다.

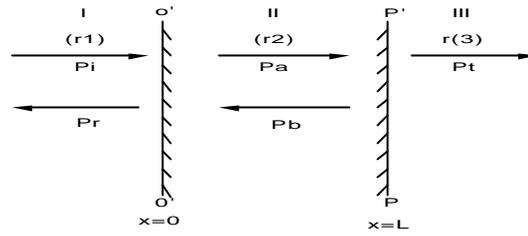


그림 2.1 세 개의 다층 구조에서 매질을 통과하는 음향 전달 방향

단일 주파수에서 연속 입사파가 $2L$ 과 비교하여 길다면,

$$P_i = \overline{P}_i e^{j(\omega t - k_1 x)} \quad (2.1a)$$

매질 I 에서 반사된 파는

$$P_r = \overline{P}_r e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad (2.1b)$$

매질 II에서 투과되고 반사된 파는

$$P_a = \overline{A}_i e^{j(\omega t - k_1 x)} \quad (2.2a)$$

$$P_b = \overline{B}_i e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad (2.2b)$$

매질 III 으로 전달되는 파는

$$P_t = \overline{P}_t e^{j(\omega t - k_1 x)} \quad (2.3)$$

고체 I 와 액체 II 사이의 경계면은 다음에 주어진 임피던스와 일치한다.

$$Z_2 = \frac{P_i + P_r}{U_i + U_r} \quad x=0 \text{ (경계면)} \quad (2.4)$$

P_i 에 의해서 분자, 분모를 나누면 $P = rU$ 의 관계를 사용하여 (2.5)식의 결과를 얻는다.

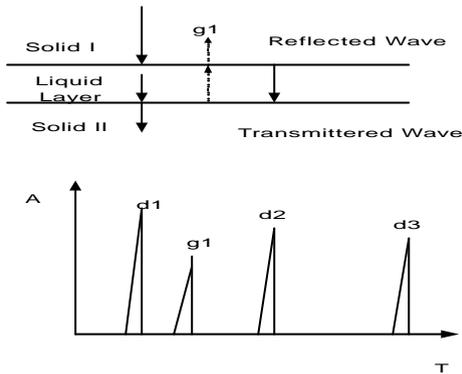
$$Z_2 = r_1 \frac{1 + \overline{R}}{1 - \overline{R}} \quad (2.5)$$

2.2 용융물 반사신호 패턴 분석

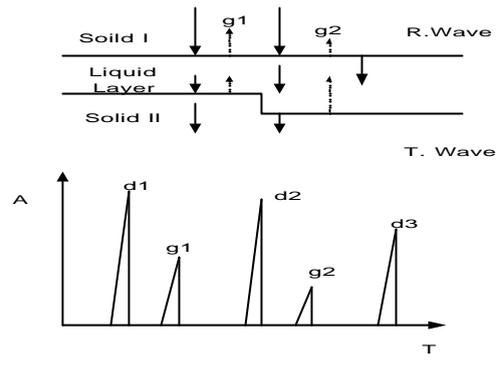
용융물의 반사체 조건에 따라서 초음파 간극 신호를 일반적인 초음파 측정법으로 정량적 분석이 용이한 경우와 난해한 경우로 분류할 수 있다. 간극 신호가 정량적 분석이 가능한 일곱 가지 신호 패턴들을 분류하였다. 그림 2.1은 한 개의 반사체 신호패턴이고, 이때 g 는 간극 반향신호이고, d 는 반구두께의 반복 신호이다. 그림 2.1a는 ID-001 반구의 간극 위치 L:3 W:4에서 한 개의 간극이 2.5mm 신호이다. 이 간극 신호는 간극 거리 측정이 용이한 신호 패턴이다. 그림 2.2는 두 개의 반사체 신호패턴이고 g_1 과 g_2 는 거리가 다른 간극 반향 신호이고, d 는 반구두께의 반복신호이다. 그림 2.2a는 ID-001 반구의 간극 위치 L:9 W:4에서 한 개의 간극이 2.4mm 신호이다. 이들 두 그림은 동시에 두 개의 간극 신호가 존재하나 간극 측정에는 한 개의 신호만 측정하였다. 그림 2.3은 세 개의 반사체 신호패턴이고 g_1 , g_2 , g_3 는 서로 거리가 다른 간극 반향신호이고, d 는 반구 두께의 반복신호이다. 그림 2.3a ID-002 반구의 간극 위치 L:17 W:8에서 세 개의 간극 신호이며, 첫 번째 신호의 간극 거리는 2.8mm 이다. 그림 2.4는 다수개의 반사체 신호패턴이고 g_1 , g_2 , g_3 , g_4 는 간극 반향신호이고, d 는 반구두께의 반복신호이다. 그림 2.4a ID-002 반구의 간극 위치 L:6 W:8에서 다수개의 간극 신호이고, 간극 신호는 패턴이 복잡하여 디지털 신호처리기술 분석을 적용하였다.

그림 2.5는 무 간극에서 음향임피던스가 비 정합일 경우 신호패턴이다. 그림 2.5a는 ID-001 반구의 간극 위치 L:15 W:6에서 무 간극 신호 패턴으로 간주할 수 있다. 그림 2.6은

무 간극에서 음향임피던스가 정합일 경우 신호패턴이다. 그림에서 간극은 없으나 반구로 침투한 입사 음향은 반구 뒷면에서 전반사가 발생하는 음향 임피던스가 비 정합 일 경우 신호 패턴이다. 그림 2.6a 는 ID-001 반구의 간극 위치 L:10 W:7에서 반구재료와 용융물 사이에 음향 에너지가 전달되어 음향 임피던스가 정합된 경우의 신호들이다. 그림 2.7은 간극이 존재하나 불규칙 반사영역 신호패턴이다. 그림 2.7a는 ID-002 반구의 간극 위치 L:4 W:4에서 간극이 존재하나 불규칙 반사영역 신호이다.



2.1



2.2

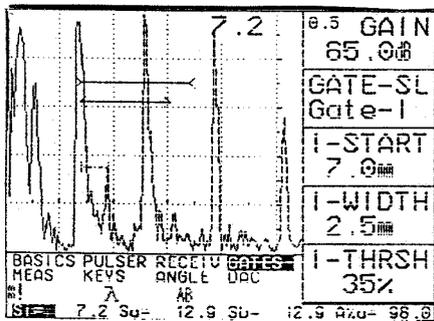


그림 2.1a ID-001 반구에서 실제 간극 신호(L:3, W:4 위치)

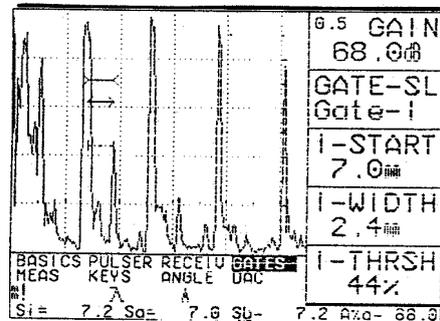
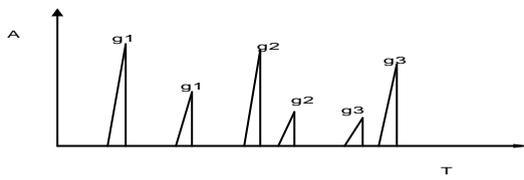
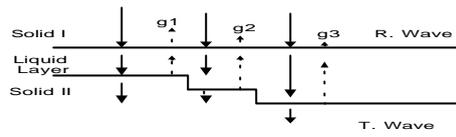
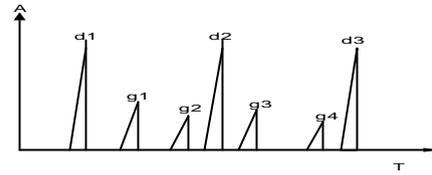
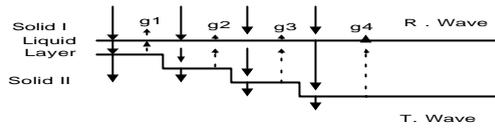


그림 2.2a ID-001 반구에서 실제 간극 신호(L:9, W:4 위치)



2.3



2.4

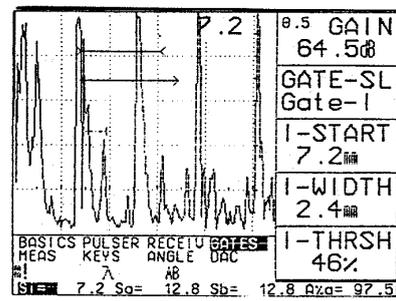
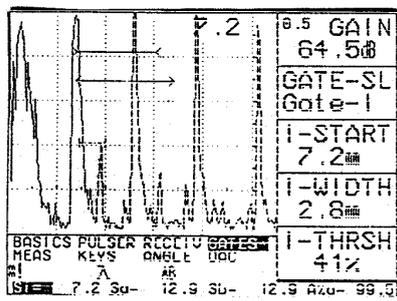
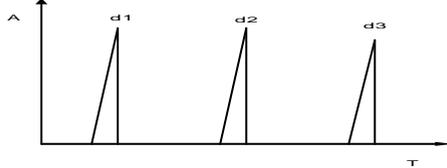
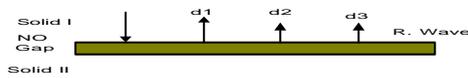
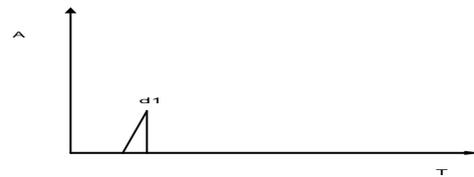
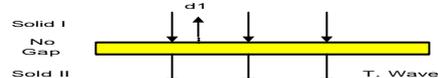


그림 2.3a D-002반구에서 실제 간극 신호(L:17, W:8 위치)

그림 2.4a ID-002 반구에서 실제 간극 신호(L:6, W:8 위치)



2.5



2.6

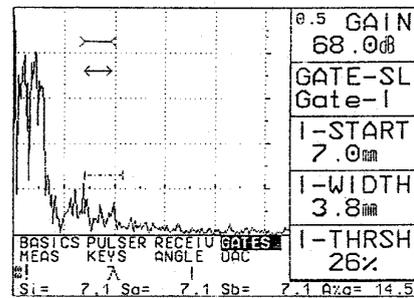
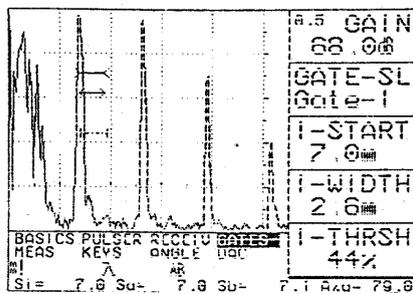
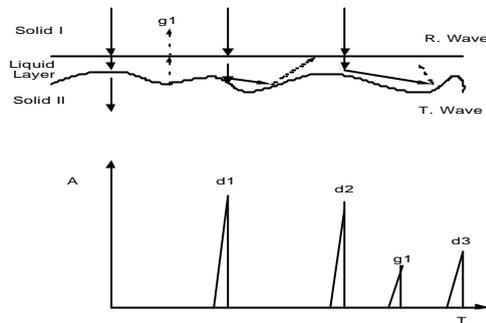


그림 2.5a ID-001 반구에서 실제 무간극의 비 정합 신호(L:15, W:6 위치)

그림 2.6a ID-001 반구에서 실제 무간극 정합 신호(L:7, W:6 위치)



2.7

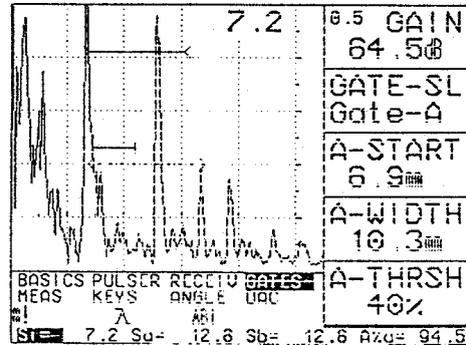


그림 2.7a ID-002 반구에서 실제 간극 신호(L5, W3 위치)

2.3 초음파 검사 준비

반구의 간극 측정 위치선정을 위해서 횡축 W, 종축 L 좌표를 하부 반구에 표시선으로 도시하였다. 초음파 탐촉자 접촉을 개선하기 위해서 용기하부 곡면에 맞는 웨지를 가공하여 초음파 에너지의 전달이 잘 되도록 설계 제작하였다. 이때 접촉 매질은 점성율이 좋은 젤리를 사용하였다. 탐촉자 최적 파라미터 도출을 위한 탐촉자의 특성은 3dB 대역폭이 약 1.5 MHz를 갖고 중심주 파수는 5 MHz인 K-B Aerotech사 감마 타입 탐촉자와 종파용 웨지를 사용하여 신호를 수집하였다. 탐촉자 분해능 조건은 1mm 간극 신호가 검출할 수 있도록 재료의 종파속도와 횡파속도에서 $f=5\text{MHz}$ 경우 파장 $\lambda = 1.112\text{mm}$, $f=10\text{MHz}$ 경우 파장 $\lambda = 0.0556\text{mm}$ 의 분해능 갖도록 선택하였다. 종파모드 입사각용 탐촉자 웨지의 재료는 루사이트를 사용하였으며, 웨지의 치수는 $0.5" \times 1"$ (사각), 그리고 직경 $0.5"$ (원통)의 두 종류로 가공하였으며, 이때 곡률 반지름은 $\varphi = 27.5\text{ cm}$ 이다. 보정용 시험편은 검사부와 동일치수에 근접하게 설계 제작하고, 물 거리인 간극 거리는 반사체 아크를 반사체 거리가 2, 4, 6, 8, 10mm의 단계로 가공하였고, 금속 재료는 Sus 304이고, 두께는 하반구의 동일한 치수인 250mm로 하였으며, 가공오차는 0.005mm이다. 탐촉자 야기 펄스는 수 ns펄스 폭을 갖는다. 경과시간 길이에 대한 시간 간격은 주어진 재질에 대한 속도를 고려하여 조정하였다. 전형적인 재질에서 음향 속도에 대한 근사치는 미국 비파괴 학회교본을 참조하였다. 균열, 혼입(inclusion), 다공성의 기공과 같은 불 연속체의 크기가 크면, 고주파수의 작은 탐촉자를 이용하면 좋은 결과를 가져온다. 그러나 불 연속체의 크기가 작을 경우에는 탐촉자가 작으면 상대적으로 초음파 출력이 작아서 신호의 크기가 작아지므로 감도가 떨어지게 된다. 반향된 반사신호는 광대역 RF 수신단에서 진폭한다. 펄스 반복률은 초당 0.5k회를 반복한다. 게이트 범위는 신호 처리를 위해서 반향된 신호를 부분 구역 분할을 한다. 측정 데이터는 AD 변환기에서 50 MHz 샘플링 주파수를 갖는다. 각 실험 데이터는 1024 포인트이고 20.24 μs 시간이다. 수신 신호의 신호 대 잡음비를 개선하기 위해서 전처리 평균을 취한다.

2.4 PC 제어 간극 초음파 신호 수집

신호수집 시스템은 초음파 탐상 장비와 PC의 인터페이스로 RS 232를 링크하여 데이터 수집하였고, 초음파 탐상기는 USD-15에 엮은 프린터를 접속하여 Video 신호를 얻었다. PC에서 신호수집 절차는 소프트웨어 중심으로 RS 232C의 9핀 입력과 출력을 연결하였고, HP 3481b BenchLink Scope 소프트웨어를 이용하여 PC 제어하여 데이터를 수집하였다. 이때 파일의 확장자는 wfx로 수집하였다. LeCroy super guide 소프트웨어를 이용하여 PC 제어 데이터 수집하였다. PC와 9350 Lecroy Scope를 이용 데이터 수집을 위해서 소프트웨어를 업그레이드하고, RS 232C 케이블 연결단자를 재조정하고, 신호수집 저장 장치는 오

실로스코프용 카드, 후로피 디스크, 하드디스크에 분산 저장된 것을 다시 집 드라이버에 통합저장 하였다. 파일의 확장자는 UDASP 코드적용에 편리성과 *Time Invariant* 신호들의 신호 대 잡음비 개선을 위해서 다른 코드와 신호 Import 와 Export가 용이하도록 LeCroy 9350 오실로스코프의 저장은 dat, file로 PC 에서는 txt, file로 수집하였다.

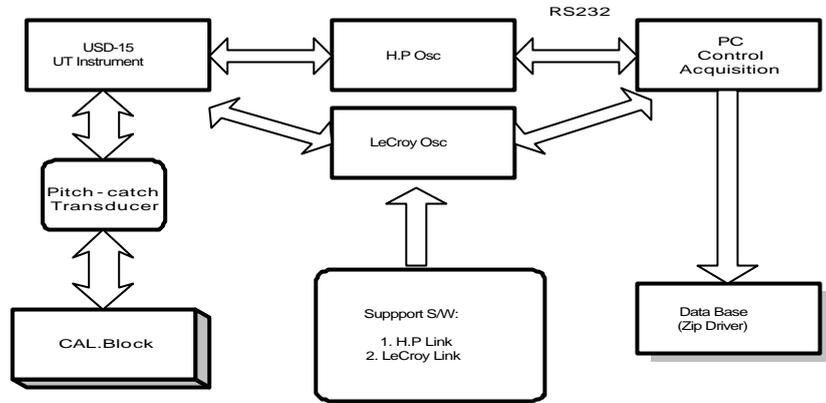


그림 2.8 초음파 간극신호 측정장치 시스템

2.5 간극 신호 측정결과

Off-line 초음파 펄스 반사법을 적용하여 간극의 측정결과 정량적 분석이 가능한 간극 신호는 한 개에서 세 개의 범위였으며, 동시에 세 개 이상의 신호가 발생하는 경우에 간극 신호는 구분이 어려웠다. 일부 간극 신호의 측정이 어려운 신호를 선택하여 신호처리 하였다. 그리고 반구와 용융물이 접합된 경우는 음향 임피던스가 정합상태와 비정합상태로 구분이 되었다. 그리고 간극에 물이 침투가 안된 상태의 간극 신호와 임피던스 비 정합 상태의 신호구분과 반구 자체내에 결함이 존재하는 경우는 지속적인 연구가 요구된다. 간극 신호 대 잡음신호의 비 산출 방법은 5MHz 대역주파수 범위에서 결함 신호와 잡음신호의 비를 구하는 식은 (2.6)식과 같다. SNR식은 상용 로그함수를 취하여 dB 단위로 변환하여 사용한다.

$$SNR = \frac{GPP}{NPP} \quad (2.6)$$

여기에서 GPP는 간극 신호의 최대값 Peak to Peak 진폭, NPP는 잡음의 최대 Peak to Peak 진폭이다. ID 001 반구의 초음파 간극 신호는 Raw 데이터 베이스 한 후 패턴별 분류 및 해석하였다. 검사 전에 보정 신호는 2mm, 4mm, 6mm, 8mm, 10mm 거리 및 진폭 보정을 하였다. 또한 Reference 신호는 절단된 실험 결과 용기로부터 신호 수집하여 실제 간극 신호와 비교할 수 있었다. 보정 시험편의 두 위치 Reference 신호를 잡기 위해 2-4mm, 4-6mm, 6-8mm, 8-10mm 중간위치에서 신호 수집하였다. 최종으로 간극 신호의 반구, 지역, 간극 신호별로 정리하였다. 반구의 70% 이상, 60% 이상, 50% 이상 간극 신호에 대한 간극 신호 분포와 무 간극 임피던스 비 정합(○: 표시)과 무 간극 임피던스 정합(x: 표시)에 대한 간극 신호 분포를 나타낸다. 표 3.1은 ID001 반구 의 전체 간극 신호의 거리 및 진폭 분포이며, 측정된 간극 신호 거리의 범위는 2mm 에서 2.9mm 범위가 다수를 차지하였고, 반구의 간극 신호 분포는 ID001 반구에서 수평축인 W4 위치에서 많은 분포로 나타났다. ID 002 반구의 초음파 간극 신호는 Raw 데이터 베이스 한 후 패턴별 분류 및 해석하였다. 검사 전에 보정 신호는 2mm, 4mm, 6mm, 8mm, 10mm 거리와 진폭을 보정하였다. 또한 Ref. 신호는 절단 실험 반구로부터 신호 수집하여 실제 간극 신호와 비교할 수 있었다. 보정시험편의 두 위치 Ref. 신호를 잡기 위해 2-4mm, 4-6mm, 6-8mm, 8-10mm 중간위치에서 신호 수집하였다. 최종으로 간극 신호의 반구, 지역, 결함 수별로 정리하였다. 반구의 70% 이상,

60%이상, 40%이상 간극 신호에 대한 간극 신호 분포와 무 간극 임피던스 비 정합 와 무 간극 임피던스 정합 간극에 대한 신호가 불분명하여 간극 분포를 나타내지 않았다. 표 3.2는 ID002 실험반구의 간극 신호 전체 신호를 L과 W에 해당하는 위치평균 분포로 나타내었다. 이때 간극 신호는 W 위치를 중심으로 W3 위치에서 5개, W4 위치에서 3개, W5 위치에서 1개, W8 위치에서 7개로 분포됨을 알 수 있었다. 측정된 간극 신호 거리의 범위는 2mm 에서 2.9mm 범위가 다수를 차지하였고, 반구의 간극 신호 분포는 ID002 반구에서 W8 위치에서 가장 많은 분포로 나타났다. 또한 그림 3.9는 ID 001 반구 간극 신호를 70% 이상, 60%이상, 50%이상 진폭의 크기로 분류하여 L과 W에 따라 3차원 Mapping 하였고, ID 002 반구 간극 신호도 진폭의 크기로 분류하여 L과 W에 따라 3차원 Mapping 하였다.

3. 초음파 주파수 분할 처리

3.1. 주파수 분할의 PT 알고리즘

PT 알고리즘에 대하여 이론적 분석과 수학적 표현을 위해서 초음파 신호를 확률 밀도 함수로서 모델링 한다. 이 밀도 함수를 통하여 PT 알고리즘을 전개할 수 있다. 초음파 신호의 수학적 모델링을 나타낸 전형적인 수식으로 표현하면 식(3.1)과 같다.

$$X(x_j) = m(x_j) + n(x_j) \quad x_0 \leq x_j \leq x_r \quad (3.1)$$

여기에서 $X(x_j)$ 는 지연시간 x_j 에서 신호진폭, $m(x_j)$ 는 지연시간 x_j 에서 평균값, $n(x_j)$ 는 지연시간 x_j 에서 결정립 잡음이다. 이들 신호들은 결정립 잡음을 포함한 두 개의 목표물 신호를 나타낸다. 평균값이 0 이 되는 가우시안 분포로서 결정립 잡음의 모델링은 통계적 처리된다. 그러나 목표물이 없을 경우($m(x_j)=0$)에 랜덤 변수의 집합은 지연 시간내에 동시 다중채널 또는 연속의 단일 채널에서 잡음의 통계적으로 σ_n^2 의 변수 및 평균값이 0을 갖게 된다.

목표물 신호가 없을 경우 지연 시간 x_1 에서 신호는 $X(x_1) = n(x_1)$ 이 되며, 이때 평균값은 0이고 분산은 σ_n^2 가 된다. 그러나 지연시간 x_2 에서 목표물 신호가 있을 경우에 신호는 $X(x_2) = m(x_2) + n(x_2)$ 로 표현한다. 동시에 각 분할된 채널의 x_2 에서 확률변수 집합의 평균은 $m(x_2)$ 가 된다. 또한 x_2 에서 변수는 부가된 잡음도 포함 되어 σ_n^2 가 된다. 잡음신호 $n(x)$ 을 n 으로 치환하면 식(3.2)으로 놓을 수 있다.

$$X(x_j) = m(x_j) + n \quad x_0 < x_j < x_r \quad (3.2a)$$

$$X(x_j) = n \quad \text{elsewhere} \quad (3.2b)$$

PT 알고리즘의 이론적 분석을 위하여 수신신호는 N대역 여파기를 사용하여 주파수 분할되며, N개의 주파수 분할은 주파수 영역 샘플링 이론으로 설명할 수 있다. $w_j(x_j)$, $j=1,2,\dots,N$ 은 $X(t) = m(t) + n$ 신호의 스펙트럼을 분할로서 얻게 되며, x_r 에서 스펙트럼 분할 구성원들이다. $t = x_j$ 에서 목표물이 없다면 $m(t)$ 는 0 이고, 목표물이 존재한다면 0 이 아니며, n 은 평균값이 0이고 분산 σ_n^2 의 가우시안 분포 랜덤 잡음이다. 스펙트럼 분할 처리된 결과는 식(3.3)과 같다.

$$w_j(x_j) = \mu(x_j) + n_j^* \quad j=1,\dots,N \quad (3.3)$$

여기에서 $\mu(x_j) = m(x_j)/N$ 이고, n_j^* 는 평균값이 0 이고 분산이 $\sigma_j^{*2} = \sigma_n^2/N$ 의 가우시안 분포 랜덤잡음이다. 수식적으로 간단히 하기 위해서 n_j^* , $j=1,\dots,N$ 의 통계식은 평균값이 0이고 분산이 σ^{*2} 의 상호 독립적 가우시안 분포로 가정하면 $\sigma_1^{*2} = \sigma_2^{*2} = \sigma_3^{*2} = \dots = \sigma_N^{*2} = \sigma^{*2}$ 로 가정하면, 식(3.3)은 식(3.4)으로 간단히 표현될 수 있다.

$$w_j(x_j) = \mu(x_j) + n^* \quad j=1,\dots,N \quad (3.4a)$$

(목표물 신호가 존재할 때)

$$w_j(x_j) = n^* \quad j=1,\dots,N \quad (3.4b)$$

(목표물 신호가 존재하지 않을 때)

(3.4a)과 식(3.4b)은 주파수 영역의 분할된 신호이며, 이때 $w_j(x_j)$ 는 결정립 경계에서 발생하

는 간섭패턴이 각각 다르게 되지만 목표물은 분산 성질이 없으며, 탐측자에 의해서 전송된 주파수 범위에서 독립적인 주파수 특성을 갖는다. $w_j(x_j)$ 의 μ^* 와 또다른 $w_j(x_j)$ 의 μ^* 는 독립적이므로 모든 $w_j(x_j)$, $j=1, \dots, N$ 는 N 의 함수에 따라서 양과 음수이든 간에 작은 확률 값을 갖게 된다. 따라서 임의의 지면 시간에서 목표물이 존재한다면 모든 원도 안에서 동일한 극점으로 나타나지만 목표물이 존재하지 않을 경우는 극점의 변화를 나타낸다. 이러한 성질을 이용하여 PT 알고리즘을 수식적으로 표현하면 식(3.5)와 같다.

$$\begin{aligned} Z(x_j) &= X(x_j) \text{ if all } w_j(x_j) > 0, j=1, \dots, N \\ &= X(x_j) \text{ if all } w_j(x_j) < 0, j=1, \dots, N \\ &= 0 \quad \textit{otherwise} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$X(x_j)$ 는 스펙트럼 분할 전 x_i 에서 처리 전 신호 진폭이고, $w_j(x_j)$, $j=1, \dots, N$ 는 x_i 에 해당하는 스펙트럼 분할 구성원이다.

PT의 밀도함수로 나타내면 식(3.5)에서 출력 Z 는 입력 진폭의 두 경우로서 조건확률 밀도 함수로 표현하면 식(3.6)과 같다.

$$f_z(z|x) = P(Z=x)\delta(z-x) + P(Z=0)\delta(z) \quad (3.6)$$

여기에서 $P(Z=0)$ 는 $Z=x$ 될 확률이며, $P(Z=0)$ 는 $Z=0$ 될 확률이고, $\delta(z-x)$ 와 $\delta(z)$ 는 각각 $Z=x$ 와 $Z=0$ 일 때의 델타함수이다. X 와 w_j 는 식(3.2)과 식(3.4)에서 가우시안 통계로서 가정하면 밀도함수는 식(3.7a)와 식(3.7b)으로 표현된다.

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (3.7a)$$

$$f_{w_j}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^*} \exp\left(-\frac{(w_j-\mu)^2}{2\sigma^{*2}}\right) \quad (3.7b)$$

$f_x(x)$ 와 $f_{w_j}(x)$ 는 X 와 스펙트럼 분할 구성원 w_j 의 밀도함수 이고 이때 $\mu = \mu_j/\mu_0$ 이고 $\sigma^{*2} = \sigma_x^2/N$ 이며, μ 는 x_i 에서 목표물의 신호가 없을 경우 0 이 된다. 식(3.6)으로부터 N 주파수 분할 신호로부터 임의의 주어진 지면시간 x_i 에서 $P(Z=x)$ 와 $P(Z=0)$ 일경우의 확률을 표현하면 다음과 같다.

$$P(Z=x) = [1 - P_{w_j}(w_j > 0)]^N + [P_{w_j}(w_j > 0)]^N \quad (3.8a)$$

$$P(Z=0) = 1 - P(Z=x) \quad (3.8b)$$

여기에서 $P_{w_j}(w_j > 0)$ 는 x_i 에서 j 번째 스펙트럼 분할 구성원이 0 보다 클 확률이다. 식(3.7a)과 식(3.7b)을 사용하면 이들 확률은 식(3.9)과 같다.

$$\begin{aligned} P(Z=x) &= \frac{[1 - \text{erf}\left(\frac{\mu}{\sqrt{2N}\sigma_x}\right)]^N + [1 + \text{erf}\left(\frac{\mu}{\sqrt{2N}\sigma_x}\right)]^N}{2^N} \\ &= A' \end{aligned} \quad (3.9a)$$

$$P(Z=0) = 1 - A' = B' \quad (3.9b)$$

여기에서 $\text{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y \exp(-t^2) dt$ 가 된다.

그리고 식(3.9)을 이용한 z 의 조건확률 밀도함수는 식(3.10)으로 된다

$$f_z(z|x) = A'\delta(z-x) + B'\delta(z) \quad (3.10)$$

공동 밀도 함수(joint density function) $f(z, x)$ 는 식(3.11)과 같다.

$$\begin{aligned} f(z, x) &= f(z|x)f(x) \\ &= [A'\delta(z-x) + B'\delta(z)] \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_x^2}\right) \right\} \end{aligned} \quad (3.11)$$

한계 밀도 함수(marginal density function)는 PT 알고리즘의 출력 Z 로서 다음 식들로 표현된다.

$$f(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(z, x) dx \quad (3.12)$$

$$f(x) = \frac{A'}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_n^2}\right) + B'\delta(x) \quad (3.13)$$

그러므로

$$E[Z] = \mu A' \quad (3.14a)$$

$$\sigma_z^2 = A' \left(\mu^2 + \sigma_n^2 \right) - (A' \mu)^2 \quad (3.14b)$$

목표물이 없을 경우 $m=0$ 일 때, (3.14a)와 (3.14b)는 식(3.15a)과 식(3.15b)으로 간단히 할 수 있다.

$$E[Z] = 0 \quad (3.15a)$$

$$\sigma_z^2 = A' \sigma_n^2 \quad (3.15b)$$

3.2 신호 처리 적용 및 순서

본 초음파 탐상 시스템을 이용하여 검사체로부터 간극 신호수집하고 검사 조건에 따른 주파수 분할방식인 SSP 처리 적용하고 이때 사용된 코드는 UDASP이다. 이때 Lecroy에서 수집한 txt 파일들의 길이가 약 20000개이고, UDASP에서 처리할 수 있는 dat 파일의 길이는 1024개이다. 결과적으로 txt 파일의 일부분만 적용하였다. 간극 신호의 종류 및 특성에 따라서 매개변수인 중심주파수, 대역폭, 여파기의 수, 소대역폭 등을 설정하였다. 초음파 탐촉자를 사용하여 종파 신호로 수집된 이들 간극 신호들은 신호처리 후 개선된 신호 대 잡음비를 얻을 수 있었다.

3.3 신호 처리 결과

그림 3.1은 ID-002반구의 L:14 ,W:8 위치에서 초음파 간극신호를 나타낸다. 위에 그림은 신호처리전 raw video signal이고 아래그림은 신호처리후 개선된 video signal이다. 간극신호 대 잡음성 신호의 비는 약 2.1배의 개선비를 얻을 수 있었다. 이때 SSP 방식은 매개변수 $Q=2$ 일때 가우시안 여파기의 수가 16개로 처리할 수 있었다. 이때 반구의 산란 영역은 레이리히 산란 조건으로 가정하였다.

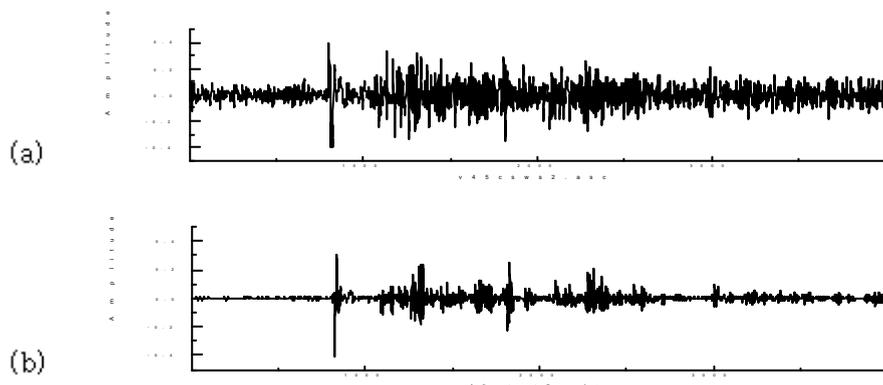


그림 3.1 검사체 위치(L:6, W:8) 에서 raw video signal(위 그림)과 신호처리된 video signal(아래 그림)

표 3.1 ID001 하부 반구의 50%간극신호의 거리 및 진폭 분포

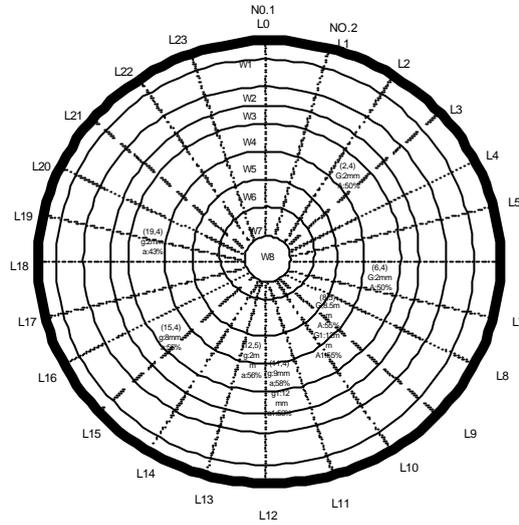
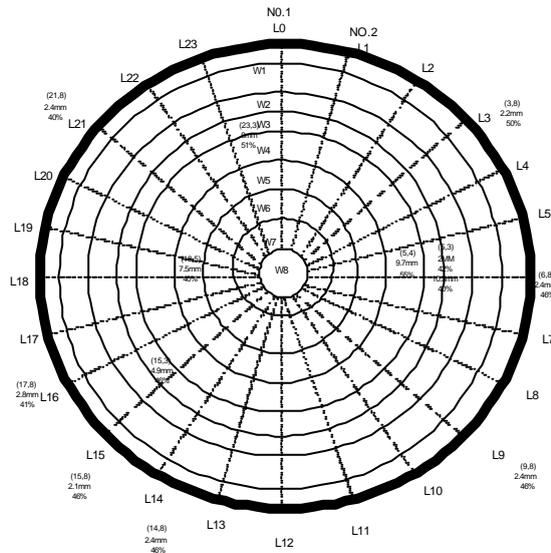


표 3.2 ID002 하부 반구의 40%간극신호의 거리 및 진폭 분포



4. 결론

노내 냉각실험결과 용융물과 용기면의 다층구조를 갖는 검사체의 구조적 복잡성 때문에 간극 측정은 어렵다. 검사체의 구조적 복잡성은 형상에 의한 외부 요소와 재료에 의한 내부 요소로 구분하였다.

외적 환경요소로서는 검사체의 접근 및 접촉 개선을 위해서 표면 거칠기를 좋게 처리하였고 왁지를 제작하였다.

특별히 본 측정에서는 평면파의 세 개의 매질에서 음향전달식을 이론적으로 검토하여 반구와 용융물간에 액체를 투입한 수직빔 다층구조 반향신호 해석하였다. 이 전송신호의 고체-액체-고체 상태인 진행방향과 반향파 모드를 분석하여 용융물의 반사체 조건에 따라서

초음파 간극 신호를 정량적 분석이 용이한 경우와 어려운 경우로 분류할 수 있었다. 간극 신호의 정량적 분석이 가능한 신호 패턴들은 7 가지 로 분류 할 수 있었다. 대부분 측정된 간극 신호 거리의 범위는 2mm 에서 2.9mm 범위였다. 측정이 가능한 간극 신호 분포 위치는 두개의 반구에서 수평축인 W4 위치 와 W8 위치에서 많은 분포로 나타났다.

2차원 도표를 이용하여 반구의 간극 위치에 해당하는 거리와 진폭의 크기를 나타내었다. 또한 측정 절차는 간극 신호를 패턴별로 구분한 후 측정이 난해한 합성 신호에 대해서 주파수 대역 분할 신호처리를 적용하였다. 이 신호 처리결과 랜덤한 잡음 뿐 만 아니라, 간극 신호와 재료 내부에 발생하는 결정립 잡음에 대해서 역제가 됨을 알 수 있었다. 신호처리결과 는 약 2.1배의 개선비를 얻게 되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 강경호외 4명 "노내 노심용융물 냉각과 관련한 실험연구 기술 보고서" KAERI/TR-1032/98, 1998
2. J. Krautkramer, " Ultrasonic Testing of Materials ", Springer-Verlag Press, 1990.
3. V. L. Newhouse, N. M. Bilgutay, J. Saniie, and E. S. Furgason, "Flaw-to-grain echo enhancement," Ultrason. Int., Graz, Austria, pp. 152-156, 1979.
4. N. M. Bilgutay, "Split spectrum processing for flaw-to-grain echo enhancement In ultrasonic detection," Ph.D.thesis, Purdue University, west Lafayette, IN, TR-EE 81-20, June 1981.
5. J. L. Rempe, " TMI-2 Vessel Investigation Project ", TMI V(93)-EG10, 1993
6. R. W. Nichols, " Nondestructive Examination in relation to Structural Integrity ", Appl. Sci. Publ, 1980
7. Digital Signal Acquisition & Processing for NDE & Plant Maintenance Workshop, Sponsored by EPRI & Hosted by the EPRI NDE Center, Jul 31-Aug 3, 1990, University Hilton, Charlotte, North Carolina, Published by the EPRI NDE Center.
8. P. M. Morse, K. V. Ingard, *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill Book Co. New York, NY 1968).
9. J. Saniie, N. M. Bilgutay, "Quantitative grain size evaluation using ultrasonic backscattered echoes," J. of the Acoustical Society of America, 80, 1816(1986).
10. J. L. Rose, J. B. Nestleroth, Y. H. Jeong, "Component identification using ultrasonic signature analysis," Materials Evaluation, 41, 315(1983).