[논 문] - 비 파 괴 검 사 학 회 지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 20, No. 4 (2000. 8)

초음파 반사 패턴과 주파수 대역 분할 신호처리를 이용한 다층구조인 노내 간극 측정

Multi-layered Gap Measurement on In-Vessel Corium Retention Using Ultrasonic Wave Reflective Pattern Analysis and Frequency Diversity Signal Processing

구길모*, 심철무*, 김종환*, 김상백*, 김희동*, 박치승**
Kil-Mo Koo*, Cheul-Mu Sim*, Jong-Hwan Kim*, Sang-Baik Kim*, Hee-Dong Kim* and Chi-Seung Park**

초 록 모의 원자로내 용융물 냉각 실증 실험 결과 용융물 Al_2O_3/Fe thermite 와 lower head vessel사이에 간극이 발생된다. 간극을 정량적으로 측정하기 위한 기존의 초음파 방법은 구조물의 복잡성과 2300° C 에서 용융되는 thermite Al_2O_3/Fe, Al_2O_3의 영향으로 발생되는 lower head의 열영향부위(HAZ)의 금속학적인 결정입자 크기의 변화로 결정 계면으로부터 발생되는 잡음신호와 초음파 산란, 감쇠, 모드 변환 등이 발생되어 신뢰성이 떨어지고 있다. 간극을 정량적으로 측정하기 위해서 thermite와 lower head 사이에 물이 채워진 형태의 즉 고체, 액체, 고체의 다층구조에서 초음파의 진행 및 반사 형태를 분류 및 분석하였다. 결정립의 잡음을 억제하기 위하여 주파수대역의 확률 처리 방식인 PT(polarity threshold) 알고리즘을 이용하여 약 6dB 신호 대 잡음비의 개선효과를 가져왔다.

주요용어: 용융물, 간극, 열영향부위, 결정입자, 초음파산란, 초음파감쇠, 모드변환

Abstract A gap between a Al_2O_3/Fe thermite and lower head vessel is formed in the lower-plenum arrested vessel attack(LAVA) experiment which is the 1st phase study of simulation of naturally arrested vessel attack in vessel(SONATA-IV). The gap measurement using a conventional ultrasonic method would be lack of a reliability due to the structure complexity and the metallurgical grain size change of the lower head HAZ occurred by a thermite Al_2O_3/Fe melt or a Al_2O_3 melt at 2300°C. The grain echoes having false signals and lower S/N ratio signals are detected due to a multiple scattering, a mode conversion and an attenuation of a ultrasonic resulted from at the interface of increased grain size zone. In this test, the signals pattern was classified to understand the behavior of the ultrasonic in a multi-layer specimen of solid-liquid-solid of assuming that the thermite and the lower head vessel is immersed. The polarity threshold algorithm of frequency diversity gives us the enhancement about 6dB of the ratio S/N.

Keywords: *thermite, gap, heat affect zone, grain size, ultrasonic scattering, ultrasonic attenuation, mode conversion*

1. 서 론

노내 노심 용융물과 원자로 용기 하부 반구사이의 간극을 통한 토심용융물의 냉각특성을 규명하는 sonata-Ⅳ연구의 1단계 원리 검증 실험으로 lava 실험을 수행하고 있다. 본 논문에서는 이 실험과 연계하여 이상 유동이 존

(접수 : 2000. 2. 7) * 한국원자력연구소(Korea Atomic Energy Research Institute, Teajon 305-353), ** (주) 카이텍

재하는 고온 표면에서 발생한 간극을 일차적으로 다층구조 초음파 반사 패턴을 분석하여 정량적으로 측정하고, 이 초음파 탐상기술로 측정이 어려운 일부 신호에 대해서는 주파수 대역 분할 신호처리 기술을 적용하여 신호 대 잡음비를 개선하였다. 그러나 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.

외부 환경요소의 문제점은 검사체가 하부 반구의 곡율을 가지며, 이를 개선하고자 곡율에 맞는 웨지 설계 제작이 요구된다. 또한 내부 용융물의 반사체 표면구조는 불규칙하여 진행파는 임계각에서 초음파의 모드변환이 일어나게 된다. 이러한 구조적 복잡한 다층 구조에서 초음파 진행파의 굴절 및 반사를 분석하기 위해서 검사체 조건과 유사한 치수를 가지는 다층 구조의 교정 시편을 제작하여 진폭과 거리에 따른 보정 간극 신호들을 미리 분석하였다. 간극 측정용 초음파 탐상장비 및 탐촉자의 중요한 파라메터들은 탐촉자의 크기, 주파수, 대역 등을 설정해야한다. 특별히 수직빔 다층구조 반향신호 해석을 위해서 반구와 용융물간에 액체를 투입한 후 전송신호의 고체-액체-고체 상태인 진행방향에 대한 반사모드를 분석하고 반사체 조건에 따라 반사파 패턴을 분류하였다. 두 반구 ID-001, ID-002 별로 측정이 가능한 간극 신호들은 검사 결과 간극 위치 표시를 하기위하여 반구 하부에 임의의 위치 설정이 필요하게 된다. 간극 신호는 간극 거리와 진폭 크기를 위치에 따라서 2차원 결함 분포로 표현을 하였다.

내부 재료적 특성 요소의 문제점은 반응 용기 내부로 약 2300° C 온도이상의 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물 및 Al_2O_3 Thermite 용융물이 주입될 때 용융물과 하부 반구 사이에 간극 형성 및 하부 반구재료의 열적 거동을 가져온다[1,2]. 하부반구 내부재료는 용융점까지 상승되면 열영향 영역이 생성되고, 열영향 영역에서는 재료의 결정립의 크기가 변화하게 된다. 검사체의 내부 재료 입자인 결정립 크기가 변화할 경우 초음파의 진행파는 결정립 경계면에서 반사 및 다 산란이 발생하여 후방 산란 잡음, 즉, 시 불변성(time invariant) 잡음이 발생하게 된다[3,9,10,11]. 이로 인하여 초음파 탐상기의 수신 신호는 낮은 신호 대 잡음비의 결과로 나타나게 되며, 결과적으로 측정된 간극 신호는 재료의 고유 간섭 신호 때문에 구분하기가 어렵게 된다. 따라서 이러한 간섭성 잡음인 결정립 잡음을 억제하기 위한 기존의 신호처리 기술로서는 공간 평균 처리 방식[3], 주파수 평균 처리방식[4], 디콘볼루션 여파기법[5], 적응 여파기법[6], 디코릴레이션 처리법[7], 다중 대역 여파기를 이용한 주파수 대역 변화 기술[7,8]들이 있다. 본 논문에서는 이러한 원인으로 신호 대 잡음비가 낮은 일부 간극 신호에 대해서 주파수 대역 분할 신호처리 기술의 확율처리 방법인 PT알고리즘을 적용하여 신호 대 잡음비를 약 6dB 개선하였다.

2. 반구 간극 측정

2.1. 다층 구조에서 매질을 통과하는 음향 전달 이론

평면파가 매질 I을 지나 매질 II 그리고 매질 III로 전달하면 두께 (L), 각 매질의 특성 임피던스(r_1, r_2, r_3), 매질 I에서 매질 II사이의 경계면에 도착 할 때 에너지의 일부분은 반사되고 어떤 것은 두 번째 매질로 투과 된다. 전달된 파의 일부분은 매질 II를 통해서 진행하고, 다시 에너지의 일부분은 반사되고 나머지는 투과 된다. Fig. 1은 다층 물질에서 음향파의 투과와 반사 현상을 나타낸다.

단일 주파수에서 연속 입사파가 2L과 비교하여 길다면, 입사파 P_i와 반사파 P_r은 식 (1)과 같다. 이때 k는 그 매질에서 주파수이고, x는 파의 진행 방향이다.

$$P_i = \overline{P_i}\, e^{j(wt - k_1 x)} \tag{1a}$$

매질 I 에서 반사파는

$$P_r = \overline{P_r}\, e^{j(wt + k_1 x)} \tag{1b}$$

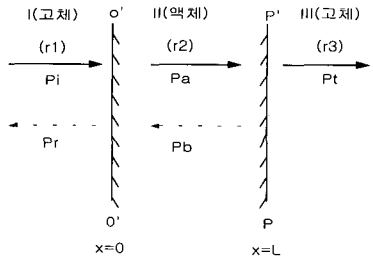


Fig. 1 Direction of acoustic transmission and reflection in the triple layers

매질 II에서 투과파와 반사파는 식 (2)와 같다.

$$P_a = \overline{A_i}\, e^{j(\omega t - k_2 x)} \tag{2a}$$

$$P_b = \overline{B_i}\, e^{j(\omega t + k_2 x)} \tag{2b}$$

매질 III 으로 전달되는 투과파는 식 (3)과 같다.

$$P_t = \overline{P_t}\, e^{j(\omega t - k_3 x)} \tag{3}$$

고체 I와 액체 II 사이의 경계면은 식 (4)에 주어진 임피던스와 일치한다. 여기에서 U_i는 고체 I에서 입사파의 속도, U_r는 고체 I에서 반사파의 속도이다.

$$Z_2 = \frac{P_i + P_r}{U_i + U_r} \quad x = 0 \text{ (경계면)} \tag{4}$$

P_i 에 의해서 분자, 분모를 나누면 $P = rU$ 의 관계를 사용하여 식 (5)을 얻는다. 여기에서 $\overline{R}$은 반사계수 이다.

$$Z_2 = r_1 \frac{1+\overline{R}}{1-\overline{R}} \tag{5}$$

식 (5)의 결과를 이용하면 액체 II와 고체 III 사이의 경계면에서 Z_3의 임피던스가 계산된다.

2.2. 초음파 검사 준비

초음파 탐촉자 접촉을 개선하기 위해서 용기하부 곡율에 맞는 웨지를 가공하여 초음파 에너지의 전달이 잘 되도록 설계 제작하였다. 이때 접촉 매질은 점성율이 좋은 젤리를 사용하였다. 탐촉자 최적 파라메터 도출을 위하여 탐촉자의 특성은 3dB 대역폭이 약 1.5 MHz 갖고 중심주파수는 5MHz인 $K-B$ *Aerotech*사 감마 타입 탐촉자와 종파용 웨지를 사용하여 신호를 수집하였다. 탐촉자 분해능 조건은 1mm 간극 신호가 검출할 수 있도록 재료의 종파속도와 횡파속도에서 f=5MHz 경우 파장 λ = 1.112mm, f=10MHz 경우 파장 λ = 0.0556mm의 분해능 갖도록 선택하였다. 종파모드 입사각용 탐촉자 웨지의 재료는 루사이트를 사용하였으며, 웨지의 치수는 0.5″ * 1″ 사각 모양과 직경 0.5″ 원통 모양의 두 종류로 가공하였으며, 이때 곡률 반지름은 φ = 275mm이다. 보정시편은 검사부와 동일치수에 근접하게 설계 제작하고, 물 거리인 간극 거리는 반사체 아크릴을 반사체 거리가 2, 4, 6, 8, 10mm의 단계로 가공하였고, 금속 재료는 Sus. 304이고, 두께는 반구와 동일한 치수 인 250mm로 하였으며, 가공오차는 0.005mm이다. Fig. 2에서는 초음파검사 전 보정을 위해서 제작된 보정시편의 개략도를 나타낸다. 또한 탐촉자 여기 펄스는 수 ns펄스 폭을 갖는다. 경과시간 길이에 대한 시간 간격은 주어진 재료의 속도를 고려하여 조정하였다. 일반적인 재질에서의 음향 속도에 대한 근사치는 ASNT VOL. 7 초음파 검사 교본을 참조하였다. 균열, 혼입, 다공성의 기공과 같은 불연속체의 크기가 크면, 고주파수의 작은 탐촉자를 이용하여 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그러나 불연속체의 크기가 작을 경우에는 탐촉자가 작으면 상대적으로 초음파 출력이 작아서 신호의 진폭 크기가 작아지므로 감도가 떨어지게 된다. 반향된 반사신호는 광대역 RF 수신단에서 증폭한다. 펄스 반복률은 초당 0.5k회를 반복한다. 측정 결과 S/N비가 낮은 일부 신호에 대해서 신호 처리를 위해서 게이트 범위를 설정하여 부분 구역 분할을 한다. 수집 데이터는 AD 변환기에서 50Mhz샘플링 주파수를 갖는다. 신호처리 데이터 구간은 1024 포인트이고 20.24 μs시간이다. 이들 신호는 신호 처리전 랜덤 잡음의 신호 대 잡음비를 개선하기 위해서 전처리 평균을 취한다.

2.3. 용융물 반사신호 패턴 분석

초음파 간극 신호는 용융물의 반사체 조건에 따라서 일반적인 초음파 측정법으로 정량적 분석이 용이한 경우와 복잡한 경우로 분류할 수 있다. 간극 신호가 정량적 분석이 가능한 경우는 일곱 가지 신호 패턴들로 분류하였다. Fig. 3a는 한 개의 반사체일 경우 신호패턴이고, 이때 g는 간극 반향신호이고, d는 반구 두께의 반복 신호

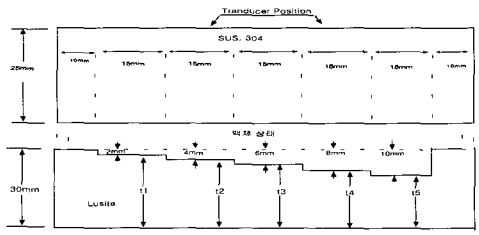
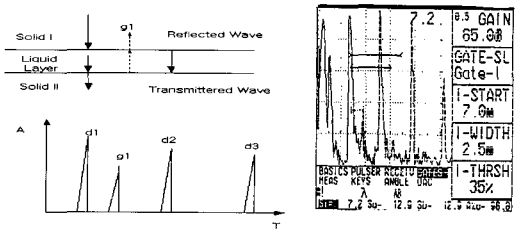


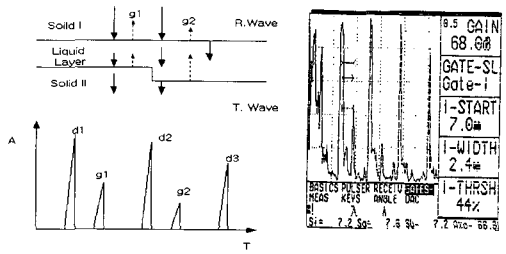
Fig. 2 Drawing of reference block

이다. Fig. 3b는 ID-001 반구의 경우 간극 위치 L: 3 W: 4에서 한 개의 간극 거리가 2.5mm인 신호이다. 이 간극 신호는 간극 거리 측정이 용이한 신호 패턴이다. Fig. 4a는 두 개의 반사체인 경우 신호패턴이고 g1과 g2는 거리가 다른 간극 반향신호이다.



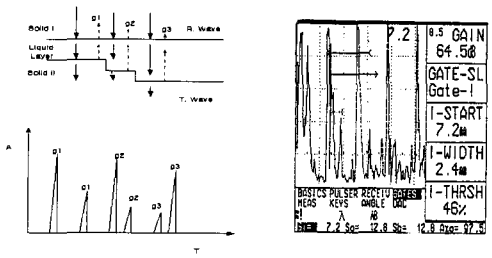
(a) (b)

Fig. 3 Gap signal from the ID-001 half sphere (gap position L: 3, W: 4)



(a) (b)

Fig. 4 Gap signal from the ID-001 half sphere (gap position L: 9, W: 4)



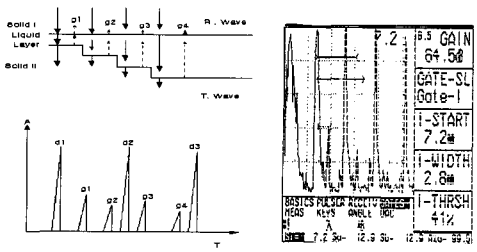
(a) (b)

Fig. 5 (a) Gap signal patterns for three reflections (b) Gap signal from the ID-002 half sphere(gap position L: 17, W: 8)

Fig. 4b는 ID-001 반구의 간극 위치 L: 9 W: 4에서 한 개의 간극 거리가 2.4mm인 신호이다. 이들 두 그림에서는 동시에 두 개의 간극 신호가 존재하나 간극 측정에는 한 개의 신호만 측정하였다. Fig. 5a는 세 개의 반사체 신호패턴이고 g1, g2, g3은 서로 거리가 다른 간극 반향신호이다.

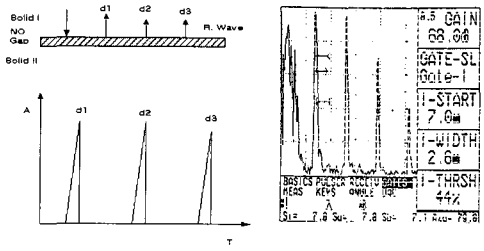
Fig. 5b는 ID-002 반구의 간극 위치 L: 17 W: 8에서 3세 개의 간극 신호이며, 첫 번째 신호의 간극 거리는 2.8mm이다.

Fig. 6a는 다수개의 반사체 신호패턴이고 g1, g2, g3, g4는 간극 반향신호이다. Fig. 6b는 ID-002 반구의 간극 위치 L: 6 W: 8에서 다수개의 간극 신호이고, 간극 신호는 패턴이 복잡하고 신호 대 잡음비가 낮게 나타내었다. 이와 같이 신호 대 잡음비가 낮은 경우 본 신호 처리기술을 적용하고자 하였다.



(a) (b)

Fig. 6 (a) Gap signal patterns for multi- reflections (b) Gap signal from the ID-002 half sphere (gap position L: 6, W: 8)



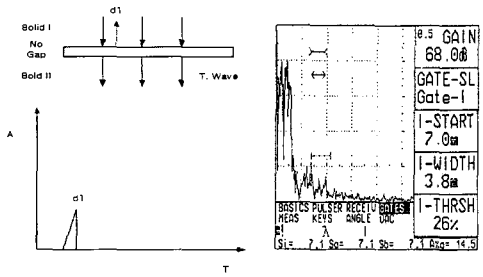
(a) (b)

Fig. 7 (a) No gap pattern for impedance mismatching (b) No gap signal in case of impedance mismatching from ID-001 half sphere (no gap position L: 15, W: 6)

Fig. 7a는 무간극에서 음향임피던스가 비정합일 경우 신호패턴이다. Fig. 7b는 ID-001 반구의 간극 위치 L:15 W:6에서 무간극 신호 패턴으로 간주할 수 있다.

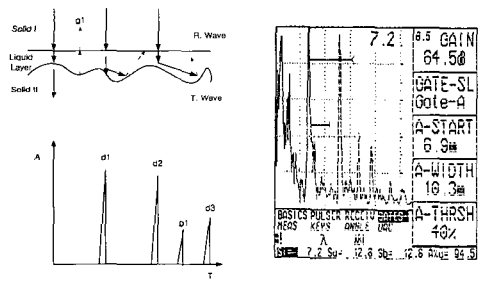
Fig. 8a는 무간극에서 음향임피던스가 정합일 경우 신호패턴이다. 그림에서 간극은 존재하지 않지만, 반구로 침투한 입사 음향은 반구 뒷면에서 전반사가 발생하는 음향 임피던스가 비정합일 경우 신호 패턴이다. Fig. 8b는 ID-001 반구의 간극 위치 L:7 W:6에서 반구재료와 용융물 사이에 음향 에너지가 전달되어 음향 임피던스가 정합된 경우의 신호들이다.

Fig. 9a는 간극이 존재하나 불규칙 반사영역 신호패턴이다. Fig. 9b는 ID-002 반구의 간극 위치 L: 4 W: 4에서



(a) (b)

Fig. 8 (a) No gap pattern for impedance mismatching
(b) No gap signal in case of impedance matching from ID-001 half sphere
(no gap position L: 7, W: 6)



(a) (b)

Fig. 9 (a) Gap signal pattern for complex reflection
(b) General gap signal from ID-002 half sphere
(gap position L: 4, W: 4)

간극이 존재하나 매우 불규칙 반사영역 신호이다. 이를 확인하기 위한 한 방법으로서 탐촉자의 미세 변위에 따라서 g1의 신호 진폭이 민감하게 변화를 나타낸다. ID-001 반구의 초음파 간극 신호는 raw 데이터 베이스로 구축한 후 패턴별 분류 및 해석하였다.

검사 전에 보정 신호는 2mm, 4mm, 6mm, 8mm, 10mm 거리 및 진폭 보정을 하였다. 또한 이 보정 신호는 실제 LAVA 실험 결과 부분 절단된 용기 시편을 사용하여 간극 신호로 비교할 수 있었다. 보정 시편을 사용하여 두 개의 간극 신호를 잡기 위해서 2-4mm, 4-6mm, 6-8mm, 8-10mm 중간위치에서 두 간극 신호를 동시에 신호를 수집하여 분석하였다. 이러한 분석 결과를 참고하여 실제 반구로부터 다수의 간극 신호를 패턴별로 구분하고 또한 반구, 지역, 간극 신호별로 정리하였다. 반구의 70% 이상, 60% 이상, 50% 이상 간극 신호에 대한 간극 신호 분포와 무간극 임피던스 비정합(o: 표시)과 무간극 임피던스 정합(x: 표시)에 대한 간극 신호 분포를 나타낸다.

Fig. 11은 ID-001 반구 의 전체 간극 신호의 거리 및 진폭 분포이며, 측정된 간극 신호 거리의 범위는 2mm에서 2.9mm 범위가 다수를 차지하였고, 반구의 간극 신호 분포는 ID-001 반구에서 수평축인 W4 위치에서 많이 나타났다. ID-002 반구의 초음파 간극 보정 및 측정 절차는 ID-001 반구 보정 및 측정 절차와 동일하다. 이 반구의 70% 이상, 60%이상, 40%이상 간극 신호에 대한 간극 신호 분포를 나타내었다. 그러나 무간극 임피던스 비정합과 무간극 임피던스 정합 간극에 대한 신호는 불분명하여 간극 분포에 나타내지 않았다. Fig. 12는 ID-002 실험반구의 간극 신호 전체 신호를 L 과 W에 해당하는 위치에 간극 신호 분포를 나타내었다. 이때 간극 신호는 W 위치를 중심으로 W: 3 위치에서 5개, W: 4 위치에서 3개, W: 5 위치에서 1개, W: 8 위치에서 7개가 분포함을 알 수 있었다. 측정된 간극 신호 거리의 범위는 2mm 에서 2.9mm 범위가 많았고, 반구의 간극 신호 분포는 W8 위치에서 가장 많이 나타났다.

3. 초음파 주파수 분할 처리

3.1. 주파수 분할 PT 알고리즘

PT 알고리즘에 대하여 이론적 분석과 수학적인 표현을 위해서 초음파 신호를 확률 밀도 함수로서 모델링한다. 이 밀도 함수를 통하여 PT 알고리즘을 전개할 수 있

다. 초음파 신호의 수학적 모델링을 나타낸 전형적인 수식으로 표현하면 식 (6)과 같다.

$$X(\tau_i) = m(\tau_i) + n(\tau_i) \qquad \tau_0 \le \tau_i \le \tau_r \tag{6}$$

여기에서 $X(\tau_i)$는 지연시간 τ_i에서 신호진폭, $m(\tau_i)$는 지연시간 τ_i에서 목표물 신호 평균값, $n(\tau_i)$는 지연시간 τ_i에서 결정립 잡음이다. 이들 신호들은 결정립 잡음을 포함한 한개의 목표물 신호로 나타낸다. 결정립 잡음의 모델링은평균값이 0 이 되는 가우시안 분포로서 통계 처리된다. 그러나 목표물이 없을 경우 랜덤 변수의 집합은 지연 시간내에 동시 다중채널 또는 연속의 단일 채널에서 잡음이 통계적으로 σ_n^2의 변수 및 평균값이 0을 갖게 된다.

목표물 신호가 없을 경우 지연 시간 τ_1에서 신호는 $X(\tau_1) = n(\tau_1)$이 되며, 이때 평균값은 0이고 분산은 σ_n^2가 된다. 그러나 지연시간 τ_2에서 목표물 신호가 있을 경우에 신호는 $X(\tau_2) = m(\tau_2) + n(\tau_2)$로 표현한다. 동시에 각 분할된 채널의 τ_2에서 확률변수 집합의 평균은 $m(\tau_2)$가 된다. 또한 τ_2에서 변수는 잡음도 포함되어 σ_n^2가 된다. 잡음신호 $n(\tau_i)$을 n으로 치환하면 식 (7)으로 놓을 수 있다.

$$X(\tau_i) = m(\tau_i) + n \qquad \tau_a < \tau_i < \tau_b \tag{7,a}$$

$$X(\tau_i) = n \qquad elsewhere \tag{7,b}$$

PT 알고리즘의 수신신호는 N대역 여파기를 사용하여 주파수를 분할하며, N개의 주파수 분할은 주파수 영역 샘플링 이론으로 설명할 수 있다.

$w_j(\tau_i),\ j = 1, 2, \ldots, N$은 $X(t) = m(t) + n$ 신호의 스펙트럼을 분할로서 얻게 되며, τ_i 에서 스펙트럼 분할 구성원들이다. $t = \tau_i$에서 목표물이 없다면 $m(t)$는 0 이고, 목표물이 존재한다면 0이 아니며, n 은 평균값이 0이고 분산 σ_n^2의 가우시안 분포 랜덤 잡음이다. 스펙트럼 분할 처리된 결과는 식 (8)과 같다.

$$w_j(\tau_i) = \mu(\tau_i) + n_j^* \qquad j = 1, \ldots, N \tag{8}$$

여기에서 $\mu(\tau_i) = m(\tau_i)/N$ 이고, n_j^*는 평균값이 0 이고 분산이 $\sigma_j^{*2} = \sigma_j^2/N$의 가우시안 분포 랜덤잡음이다.

수식적으로 간단히 하기 위해서 $n_j^*,\ j = 1, \ldots, N$의 통계식은 평균값이 0이고 분산이 σ^{*2}의 상호 독립적 가우시안 분포로 가정하여 $\sigma_1^{*2} = \sigma_2^{*2} = \sigma_3^{*2} = \ldots = \sigma_N^{*2} = \sigma^{*2}$이라 하면, 식(8)은 식(9)으로 간단히 표현될 수 있다.

$$w_j(\tau_i) = \mu(\tau_i) + n^* \qquad j = 1, \ldots, N \tag{9,a}$$

(목표물 신호가 존재할 때)

$$w_j(\tau_i) = n^* \qquad j = 1, \ldots, N \tag{9,b}$$

(목표물 신호가 존재하지 않을 때)

(9.a)과 식 (9.b)은 주파수 영역의 분할된 신호이며, 이때 $w_j(\tau_i)$는 결정립 경계에서 발생하는 간섭패턴이 각각 다르게 되지만 목표물은 분산 성질이 없으며, 탐촉자에 의해서 전송된 주파수 범위에서 독립적인 주파수 특성을 갖는다. $w_j(\tau_i)$의 n^* 와 또다른 $w_j(\tau_i)$의 n^*는 독립적이므로 모든 $w_j(\tau_i),\ j = 1, \ldots, N$는 N 의 함수에 따라서 양과 음수이든 간에 작은 확률값을 갖게 된다. 따라서 임의의 지연 시간에서 목표물이 존재한다면 모든 윈도 안에서 동일한 극점으로 나타나지만 목표물이 존재하지 않을 경우는 극점의 변화를 나타낸다. 이러한 성질을 이용하여 PT 알고리즘을 수식적으로 표현하면 식(10)와 같다.

$$\begin{aligned} Z(\tau_i) &= X(\tau_i) \quad \text{if } all\ w_j(\tau_i) > 0, j = 1, \ldots, N \\ &= X(\tau_i) \quad \text{if } all\ w_j(\tau_i) < 0, j = 1, \ldots, N \\ &= 0 \qquad otherwise \end{aligned} \tag{10}$$

$X(\tau_i)$는 스펙트럼 분할 전 τ_i에서 처리 전 신호 진폭이고, $w_j(\tau_i),\ j = 1, \ldots, N$는 τ_i에 해당하는 스펙트럼 분할 구성원이다.

3.2. 신호 처리 적용 및 결과

초음파 탐상 시스템을 이용하여 검사체로 부터 간극 신호수집하고 검사 조건에 따른 주파수 분할방식을 적용

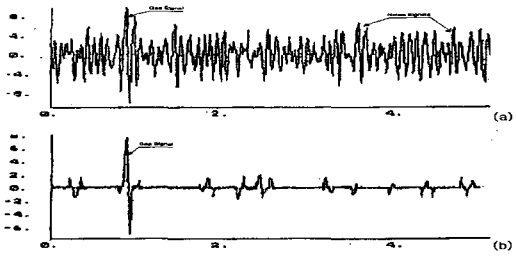


Fig. 10 (a) Raw video signal from half phere (gap position L:14, W:8) (b) Processed video signal from half sphere(gap position L:14, W:8)

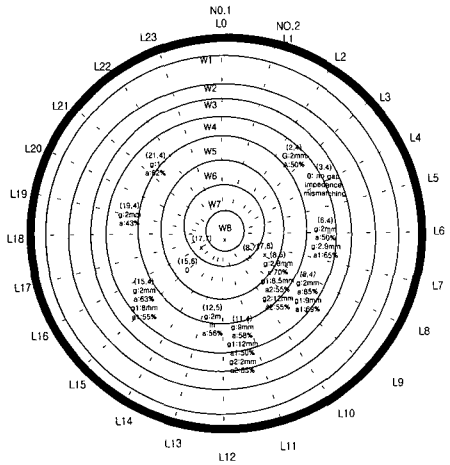


Fig. 11 Distance and amplitude map of the gap signals from ID-001 half sphere

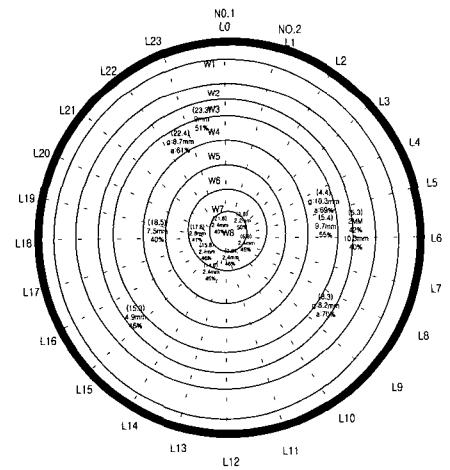


Fig. 12 Distance and amplitude map of the gap signals from ID-002 half sphere

하였다. 간극 신호의 종류 및 특성에 따라서 매개변수인 중심주파수, 대역폭, 여파기의 수, 소대역폭 등을 설정하였다. 초음파 탐촉자로 부터 수신된 종파 신호들은 PC보조 기억장치에 저장하였다. Fig. 10은 ID-002반구의 L: 14, W: 8 위치에서 초음파 간극신호이다. 위에 그림은 신호처리 전 비디오 신호이고 아래그림은 신호처리 후 개선된 비디오 신호이다. 간극신호 대 잡음성 신호의 비는 약 6dB의 개선비를 얻을 수 있었다. 개선비 산출식은 식 (11)에 상용로그를 취하였다. 여기에서 GPP는 간극 신호의 최대값 진폭, NPP는 잡음의 최대 진폭이다.

$$SNR = \frac{GPP}{NPP} \tag{11}$$

Fig. 11 과 Fig. 12 에서는 각각 ID-001, 002로부터 반향된 간극신호들의 거리, 진폭도를 나타낸다. 그림에서 초음파검사 위치선정을 위하여 횡축 W, 종축 L로서 나타내었다.

4. 결 론

노내 냉각실험결과 용융물과 용기면의 다층구조를 갖는 검사체의 구조적 복잡성을 형상에 의한 외부 요소와 재료에 의한 내부 요소로 구분하여 간극을 측정하였다. 외적 환경요소로서는 검사체인 하부 반구의 접근 및 접촉 개선을 위해서 웨지를 제작하였다. 수직 종파 탐촉자를 이용하여 다층구조의 매질에서 음향이 전달되도록 유사한 교정 시편을 제작하여 보정 신호를 분석한 후 반구와 용융물간에 액체를 투입하여 수직빔 반향신호의 간극 패턴을 분석하였다. 이 때 전송신호의 고체- 액체- 고체 상태인 진행과 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 7가지로 분류 할 수 있었다. 대부분 측정된 간극 신호의 간격은 2mm에서 2.9mm 범위였다. 그러나 액체인 간극 거리 $g1$이 6mm에서는 $g1$의 첫 번째 도착 시간과 고체인 반구 두께의 두 번째 반복시간 $d2$가 중첩되어 간극 신호는 반구신호와 구분이 어려웠다. 측정이 가능한 간극 신호 분포 위치는 두개의 반구에서 수평축인 W4 위치와 W8 위치 범위에서 대부분 나타났다. 이 결과는 LAVA실험의 이론적 해석과 파괴 시험 결과와도 일치함을 알 수 있었다. 이들 측정 결과는 2차원 도표를 이용하여 반구의 간극 위치에

해당하는 거리와 진폭의 크기로 나타내었다. 또한 패턴별로 구분한 후 측정이 복잡한 일부 신호에 대해서 주파수 대역 분할 신호처리를 적용하였다. 이 신호 처리결과 랜덤한 잡음뿐 만 아니라, 간극 신호와 재료 내부에 발생하는 결정립 잡음에 대해서도 억제가 됨을 알 수 있었다. 신호 대 잡음의 개선비는 약 6dB를 얻을 수 있었다.

후 기

이 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] J. L. Rempe, " TMI-2 Vessel Investigation Project ", TMIV(93)-EG10, (1993)

[2] 강경호외 4명 "노내 노심용융물 냉각과 관련한 실험 연구 기술 보고서" KAERI/TR-1032/98. (1998)

[3] J. Krautkramer, " Ultrasonic Testing of Materials ", Springer-Verlag Press. (1990)

[4] 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)

[5] 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)

[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)

[8] 구길모, 전계석, "SSP MPO 알고리즘을 이용한 초음파 결정립 잡음억제에 관한 연구", 한국음향학회지, 제15권, 제6호, pp. 81-89 (1996)

[9] P. M. Morse, K. V. Ingard, *"Theoretical Acoustics"*, McGraw-Hill Book Co. New York, NY (1968)

[10] J. Saiie, N. M. Bilgutay, "Quantitative grain size evaluation using ultrasonic backscattered echoes," J. of the Acoustical Society of America, 80, 1816 (1986)

[11] J. L Rose, J. B. Nestleroth, Y. H. Jeong, "Component identification using ultrasonic signature analysis," Materials Evaluation, 41, 315 (1983)