2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

유도초음파에 의한 SS 316L 원통구조물의 열라체팅 변형 측정

Measurement of Thermal Ratcheting Deformation for SS 316L Cylindrical Structure by Guided Ultrasonic Wave

주영상, 김석훈, 김종범, 이형연, 이재한
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150 번지

요 약

액체금속로 원자로 배플 및 상부 내부구조물 등은 고온소듐의 자유액면에 접하기 때문에 소듐 액면의 상하 이동으로 열라체팅 손상이 발생할 수 있다. 액체금속로 내부구조물의 가동중검사에서 소듐내부 가시화에 의한 원격육안검사와 함께 열라체팅 구조손상을 감지할 수 있는 검사 기법의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 유도초음파를 이용하여 원통 내부구조물의 열라체팅 변형 손상을 감지할 수 있는 검사 방법을 제시하였다. SS 316L 재료의 원통 시험편을 제작하고 550°C 이상의 급격한 열하중을 가하면서 냉각수의 자유액면의 상하 이동으로 열라체팅 변형 거동의 모사시험을 실시하였다. 스테인레스 강 재질의 박판에서의 유도초음파의 분산 특성을 분석하여 A_0 모드를 열라체팅 변형을 탐지할 수 있는 유효 모드로 선정하였다. 제작된 라체팅 원통 구조물에서 원주방향으로 반복하여 회전하는 A_0 모드의 전파시간차를 측정함으로써 열라체팅 변형 탐지 가능성을 확인하였다.

Abstract

The thermal ratcheting deformation at the reactor baffle and upper internal structure of the liquid metal reactor (LMR) can occur due to the moving of the hot sodium free surface. In the in-service inspection of reactor internals of LMR, the new inspection technique should be developed for the detection of the thermal ratcheting damage. In this study, the inspection technique using the ultrasonic guided wave is proposed for the detection of the thermal ratcheting damage of cylindrical vessels. The 316L stainless steel cylindrical shell specimen is manufactured. The thermal ratchet structural tests are cyclically performed by heat-up up to 550°C with steep temperature gradients along the axial direction after cool-down by cooling water. The ultrasonic guided wave propagation has been characterized by the analysis of dispersion curve of the stainless steel plate. The zero-order antisymmetric A_0 guided wave is selected for the optimal mode for the detection of the ratcheting deformation. It is confirmed that the thermal ratcheting deformation can be detected by the measurement of transit time difference of the circumferentially propagated A_0 guided waves.

1. 서 론

소듐을 냉각재로 사용하는 액체금속로는 500℃ 이상의 고온소듐 환경하에서 운전 되기 때문에 원자로 용기 및 노심을 비롯한 내부구조물 들은 고온 열변형 및 열손상의 발생 가능성이 크다.

특히 원자로용기와 용기 내의 원자로 배플 및 상부내부구조물(UIS) 원통 등은 고온소듐의 자유액면 상하 이동으로 인한 반복 열피로 하중으로 열라체팅과 같은 고온 구조손상이 발생할 수 있다. 라체팅(ratcheting)은 자중과 같은 일차응력 위에 높은 이차응력이 반복적으로 작용하여 각 하중 사이클에서 점진적으로 영구 변형량이 누적되는 진행성 비탄성 변형(progressive inelastic deformation) 현상을 말하며, 특별히 이차 응력이 열하중인 경우에 발생하는 라체팅을 열라체팅(thermal ratcheting)이라고 한다.[1] 고온 구조물에 유지하중과 반복하중이 조합하여 작용하면 라체팅 현상에 의한 크립-피로 손상이 발생할 수 있어 열라체팅의 발생을 조기에 탐지하는 것이 내부구조물의 건전성 확보를 위해 매우 중요하다. 열 라체팅은 고온 구조물의 과대변형에 따른 치수 불안전성(dimensional instability)을 야기시킬 수 있기 때문에 미국[1], 프랑스[2], 일본[3] 등의 액체금속로 설계관련 코드에서는 열 라체팅에 의한 변형률 제한치를 제시하고 있다. 미국의 고온 설계지침인 ASME-NH 는 라체팅 변형률의 제한치로서 수명기간 동안 변형률의 합이 모재에서는 1%, 용접재에서는 0.5%가 넘지 않을 것을 요구하고 있다.[1]

액체금속로 원자로계통의 주요 구조물의 구조적 건전성은 주기적으로 수행되는 가동중검사에 의해 검증된다. 액체금속로 가동중검사 코드인 ASME Sec. XI, Div. 3 에서는 원자로 내부구조물에 대해서 육안검사와 연속감시 또는 대체검사법에 의해 내부구조물의 손상을 탐지하여야 함을 요건화하고 있다.[4] 액체금속로 내부구조물의 손상탐지를 위한 가동중검사법으로 대부분 육안검사가 적용되고 있지만 소듐의 불투명성으로 인한 육안검사의 제한성과 구조변형 손상의 정밀 탐상을 위해서는 새로운 대체 검사법이 요구되고 있다. 초음파검사 기술은 소듐의 불투명성을 극복하기 위한 소듐내부 가시화 기법에 적용되어 왔으며 구조손상 탐지에 유용한 방법으로 응용되고 있다.[5,6] 액체금속로의 원자로 용기 및 내부구조물 들은 고온운전 환경으로 야기되는 열응력을 완화시키기 위해서 대부분 박판구조로 설계 제작된다. 이러한 박판 구조물에 초음파가 입사하게 되면 박판 구조물의 벽을 따라 유도초음파(guided ultrasonic wave)가 발생하여 전파하게 된다. 유도초음파는 파 유도체를 따라 멀리 전파하는 특성과 함께 두께와 기하학적 구조 및 입사 주파수에 따라 전파 양상이 크게 변화하는 특성이 있어 새로운 첨단 비파괴검사 방법으로 널리 응용되고 있다.[7] 본 논문에서는 소듐 액면 부근에서 발생하기 쉬운 내부구조물의 열 라체팅 구조변형 손상을 유도초음파를 이용하여 탐지할 수 있는 새로운 검사방법을 제시한다.

2. 열라체팅 구조시험, 해석 및 원통 시험편 제작

일차응력이 작용하는 구조물에 열응력이나 굽힘응력과 같은 이차응력이 반복적으로 작용하면 각 하중 사이클마다 변형량이 지속적으로 누적되는 진행성 비탄성 변형이 발생할 수 있다. 이와 같이 이차응력이 반복적으로 작용하여 톱니바퀴처럼 매 사이클마다 비탄성 영구변형이 누적되는 현상을 라체팅이라고 정의한다. 일차응력은 항복응력 이하로 제한되므로 구조물에서 불연속성으로 인한 소성변형이 부분적으로 생기더라도 계속 누적되는 진행성 변형을 일으키지는 않지만 일차응력에 부가적으로 이차 응력이 반복되는 경우에 변형이 점진적으로 누적되는 라체팅 현상이 발생할 수 있다. 특별히 이차 응력이 열하중에 기인할 때 열라체팅 현상이 발생한다.[1] 그림 1 은 원통구조물에서 고온의 자유액면이 상하이동을 되풀이하면 온도구배가 축방향으로 이동하게 되어 열 하중이 완전히 제거된 후에도 원통의 두께방향으로 잔류변형이 남는 전형적인 열라체팅 현상을 보여주고 있다. 잔류변형이 원통 안으로 누적되는 수축모드 변형이 발생할 수도 있고 열하중의 작용 방식 또는 용기의 두께에 따라 팽창모드의 변형이 발생할 수도 있다.

원통 박판구조물에 열라체팅을 구현하기 위하여 그림 2 에서와 같이 승강장비가 장착된 열 라체팅 구조시험장치를 구축하였다. 이 장치는 액체금속 원자로 배플의 자유액면 상하이동에 따른

축방향 온도분포의 이동으로 발생하는 라체팅 거동을 모사하기 위한 장치이다.[8] 구축된 구조시험장치의 실제 형상은 그림 3 과 같다. 여기서 라체팅 구조시험장치는 크게 고주파 가열기, 냉각시스템, 승강장비, 베드, 냉각수조, 센서 및 데이터 수집시스템으로 구성되며 고주파 유도가열기의 사양은 50KW 용량에 50KHz 이다. 라체팅 구조시험 장치의 승강장비에 부착되는 시험 원통은 원통의 바깥에 설치된 유도코일과 바로 밑의 냉각수조 사이에서 심한 축방향 열구배 하중을 받는다. 그림 4 에서와 같이 가열코일과 냉각수 사이에 구조시험 원통을 이동시킴으로써 축방향으로 급격한 열구배를 주면서 온도구배가 이동되도록 시험장치를 구성하였으며 시편은 하강시에만 가열하였다. 원통 구조시편의 제원은 그림 5 와 같이 외경 600mm, 높이 500mm, 두께 3mm 이며 재질은 316L 스테인리스강이다. 본 라체팅 구조시험에서는 열 하중 사이클을 9 회에 걸쳐 가했다. 원통구조물의 축 방향으로 설치된 열전대는 시편 하단에서 높이 90mm 부터 360mm 까지 10mm 간격으로 28 채널을 부착하였다. 온도데이터는 잔류변위 평가를 위한 열해석 입력데이터로 활용된다. 수집된 온도데이터는 그림 6 에서와 같이 시편이 아래로 이동함에 따라 온도분포가 일정한 틀을 유지하면서 우측으로 이동한다. 그림 6 에서의 수평축 0 은 실제 높이 500mm 의 구조시편에서 하단으로부터 90mm 떨어진 지점을 나타낸다.

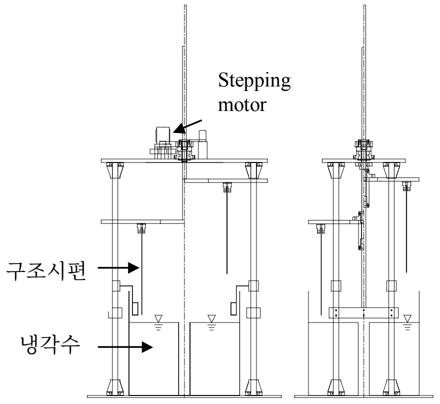


그림 2. 열라체팅 변형 발생 시험장치

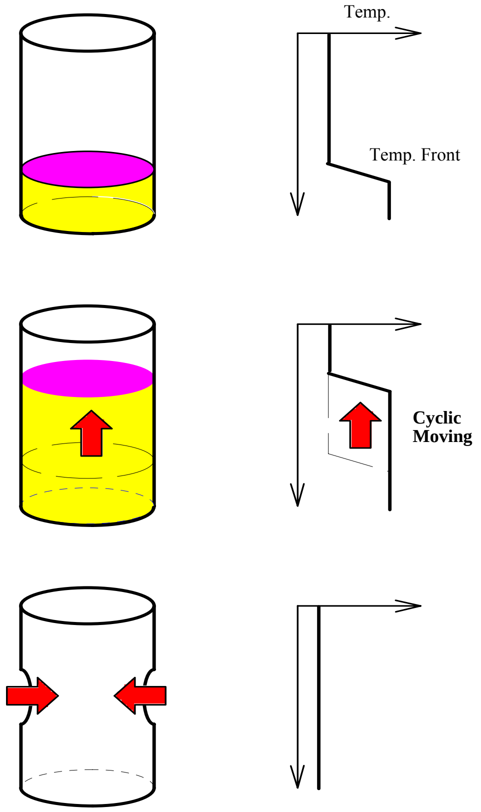


그림 1. 열라체팅 변형 현상

그림 3. 열라체팅 시험장치 실제 형상

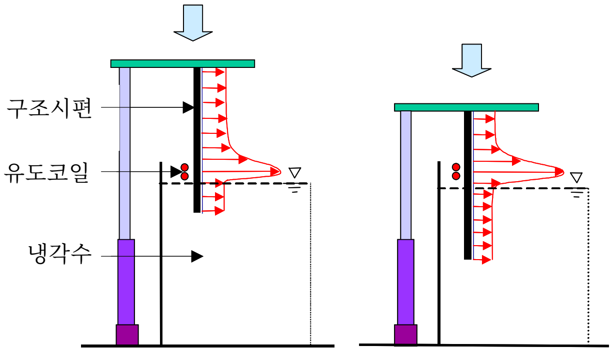


그림 4. 시험원통 축방향 온도분포의 이송

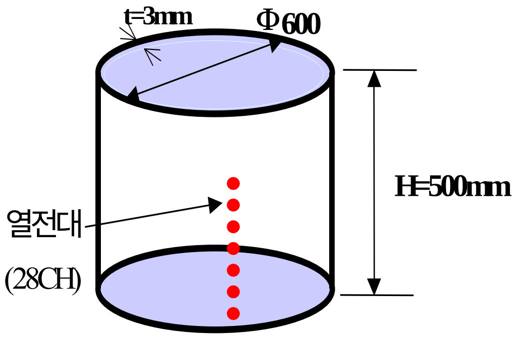


그림 5. 열라체팅 원통시험편과 열전대(28 Channels) 설치도

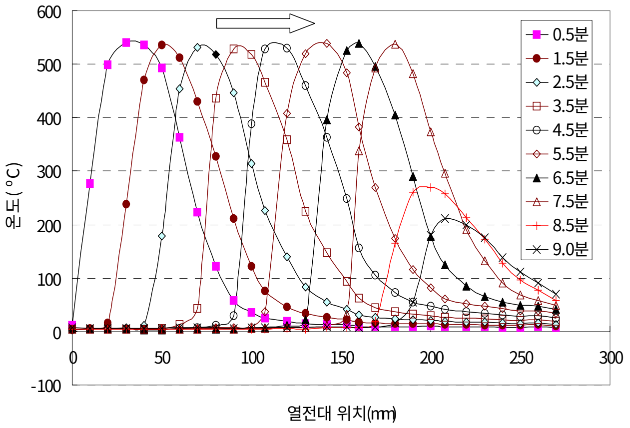


그림 6. 28 channel 열전대의 축방향 온도분포

구조시험원통의 열라체팅 거동을 모사하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소 모델은 8 절점 축대칭 요소 300 개와 987 절점으로 구성되며 경계조건으로서 시편 상단의 축 방향 변위를 구속시켰다. 구조시편에 작용하는 하중은 열과도 하중과 자중이지만 시편의 자중으로 인해 발생하는 응력은 0.02 MPa 수준이다. 본 해석에서는 구조시편의 축방향 열전대에서 수집된 천이 온도데이터를 유한요소 해석모델의 각 열전대 위치에서의 입력 열하중으로 사용하였다. 일정한 시간간격으로 수집한 28 채널의 온도데이터를 이용하였으며 각 라체팅 사이클에서도 온도구배 이동이 동일한 방식으로 반복되는 것으로 간주하고 동일한 천이온도 열 하중을 각 사이클에서 반복적으로 적용하였다. 액체금속로와 같은 고온구조물에 큰 이차응력이 반복적으로 작용할 경우 316L 스테인리스강에 대한 고전 소성경화 모델들은 실제의 구조물 거동을 정확히 모사하지 못하기 때문에 본 연구에서는 재료의 반복 소성경화거동을 모사하기 위해 비탄성 해석모델인 비선형 결합 경화모델[9]을 ABAQUS[10]의 사용자 부프로그램인 UMAT 으로 구현하여[11] 해석을 수행하였다. 이 결합 경화 모델은 항복 조건을 갖는 모델로서 동적 특성을 갖는 내부 변수들을 도입하여 재료의 시간에 따른 내부이력을 표현한다. 해석결과 열 라체팅 사이클이 반복됨에 따라 반경방향 잔류변위는 점진적으로 누적되는 양상을 보인다. 라체팅 사이클을 9 회 가한 후에 발생한 반경방향 누적변위는 시편의 바깥으로 팽창하였고 해석결과는 비슷한 변형모드를 보여주고 있다. 또한 잔류변위의 해석 및 시험 결과는 라체팅 사이클이 반복됨에 따라 잔류변위는 역시 팽창모드로 누적되는 것을 알 수 있다.

3. 유도초음파 분산선도 및 유효모드 선정

유도초음파는 구조물의 기하학적 구조의 경계를 따라 길이 방향으로 전파하는 탄성파로서 종파와 횡파가 구조물의 경계면에서 모드 변환과 함께 다중 반사되어 상호 간섭과 중첩됨으로써 발생하고 전파된다.[6] 유도초음파는 경계가 없는 무한 매질을 진행하는 체적파(종파와 횡파)와는 근본적으로 다른 특성을 가지고 있다. 유도초음파는 무한한 전파모드가 존재하며 각 모드마다 전파속도가 주파수와 구조물 벽 두께에 따라 변화하는 분산(dispersive) 특성을 갖는다.

판 형태의 구조물에서 판을 따라 전파하는 유도초음파를 특별히 판파(plate wave) 또는 Lamb wave 로 명명되는데 모드는 크게 대칭(symmetric) 모드와 반대칭(antisymmetric) 모드로 구분된다. 그림 7 와 같이 판에서의 대칭모드(symmetric mode)는 판 두께의 중심축에 대하여 그 변위가 서로 대칭인 분포를 가지며 판 두께에 대한 입자의 평균 변위는 x 축 방향만 존재하므로 extensional mode 라고도 하고 일반적으로 S_0, S_1, S_2,…로 표기한다. 반면에 반대칭모드(antisymmetric mode)는 판 두께의 중심축에 대하여 그 변위가 서로 반대칭인 분포를 가지며 입자의 평균 변위가 z 축 방향이므로 flexural mode 또는 transverse mode 라고도 하고 A_0, A_1, A_2,…로 표기한다.

판파의 분산 특성은 이론적으로 다음과 같이 구해진다.[6] 판의 평면경계에서 응력이 0 이어야 한다는 경계조건으로부터 대칭모드와 반대칭모드에 대한 판파의 위상속도를 구할 수 있는 Rayleigh-Lamb 주파수 방정식을 얻을 수 있다.

대칭모드의 경우

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \tag{1}$$

반대칭모드의 경우

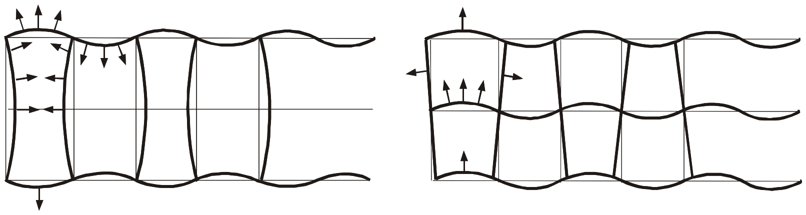
$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \tag{2}$$

여기서 p 와 q 는 두께방향의 파동벡터 성분이며 각각 $p = \sqrt{k_L{}^2 - k^2}$ 와 $q = \sqrt{k_T{}^2 - k^2}$ 이고, k 는 종방향 진행 파동성분의 파수(wave number)이며 하첨자 L 과 T 는 각각 종파와 횡파를 의미한다.

위의 식들로부터 판파는 그 위상속도가 주파수의 함수로 주어지는 분산 특성을 가짐을 알 수 있다. Rayleigh-Lamb 주파수 방정식을 수치해석법으로 주파수를 연속적으로 변화시켜가면서 계산하면 위상속도의 분산곡선을 구할 수 있으며 같은 주파수에서 서로 다른 모드가 나타난다. 그림 8 (a)는 스테인레스 강에서의 판파의 위상속도와 군속도 분산선도를 보여준다. 위상속도(C_p) 분산선도는 유도초음파의 모드 발생조건을 설정할 때 사용된다. 유도초음파의 에너지 전파속도는 위상속도와는 다른 군속도(C_g)로 나타내어 진다. 군속도는 실제검사에서 시간영역의 초음파 모드 확인과 반사파 거리 측정 등에 유용하게 사용된다. 군속도는 위상속도의 주파수에 대한 미분으로 다음 식과 같이 구해진다.

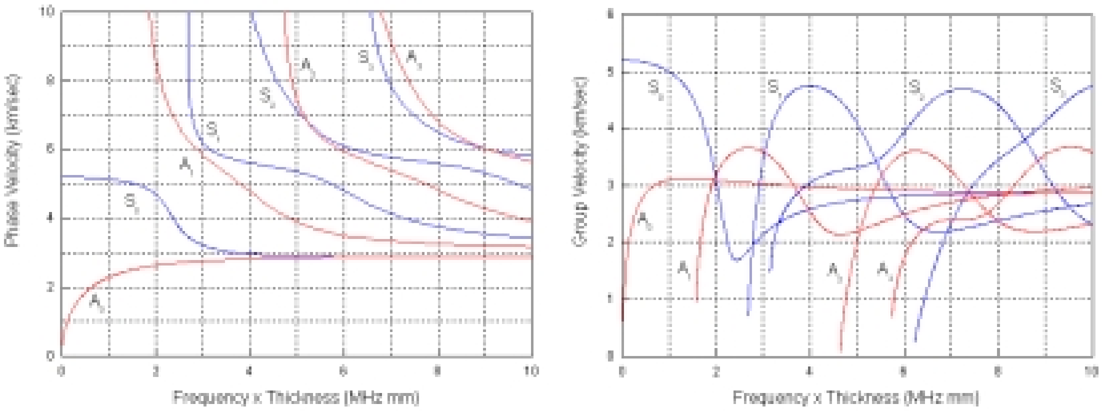
$$C_g = \frac{C_p}{1 - \dfrac{fd}{C_p}\dfrac{\partial C_p}{\partial (fd)}} \tag{3}$$

이 식으로부터 구해진 스테인레스 강에서의 판파의 군속도는 그림 8 (b)와 같다. 그림 8 의 분산선도에서 보는 바와 같이 판에서의 유도초음파는 여러 모드가 존재한다. 각 모드는 발생 및 전파 특성이 각기 다르기 때문에 적용 목적에 따라 유효 모드를 적절히 선정하여야 한다. 유도초음파의 모드를 선정하는데 있어서 다음의 사항들이 고려되어야 한다. 첫째, 위상속도와 군속도의 분산선도에서 속도가 비교적 완만한 부분 즉, 분산성이 적은 모드를 선정하여야 한다.



(a) S_0 대칭 모드 (b) A_0 반대칭 모드

그림 7. 0차 대칭 및 반대칭 판파의 변위 분포



(a) 위상속도 분산선도 (b) 군속도 분산선도

그림 8. 316L 스테인레스강 판에 대한 판파의 분산선도

속도가 완만하게 변화하는 부분은 분산성이 작기 때문에 유도초음파의 파형의 폭이 작아지고 신호크기는 커지게 되므로 탐지 분해능이 좋아진다. 둘째, 여러 모드가 발생하지 않는 주파수 영역을 설정한다. 분산선도에서 보는 바와 같이 *x* 축은 주파수와 두께의 곱으로 되어 있어 적용 시험체의 두께에 따라 적절한 주파수 범위를 선정할 수 있다. 그림 에서와 같이 주파수와 두께의 곱 *fd* 가 2 이상이 되면 1차 모드 이상의 판파가 여기되며 4 이상이 되면 2차 모드가 발생하기 시작한다. 고차 모드가 발생하면 저차 모드와 함께 여러 모드가 동시에 발생하므로 유도초음파의 송수신 신호가 복잡해 질 수 있으므로 가능한 *fd* 를 4 이하로 선정하며 0차 모드의 유도초음파를 발생시키기 위해서는 2 이하로 설정해야 한다.

원통 구조물의 라체팅 변형을 탐지하기 위해서는 여러 모드가 중첩되어 발생하지 않는 저차 모드를 선정하고 분산성이 적은 주파수 대역에서 송수신이 이루어져야 한다. 이러한 기준으로 라체팅 변형을 탐지할 수 있는 유효모드로 A_0 모드를 선정하였다. A_0 모드는 *fd* 변화에 대하여 군속도가 일정하여 분산성이 적으므로 초음파의 전달효율이 좋다. 두께가 3mm 인 원통 구조물에서 *fd* 가 2 이하인 영역의 A_0 유도초음파를 발진 시키기 위해서는 초음파 송수신 주파수를 0.5MHz 으로 선정하여야 한다.

유도초음파는 여러 가지 모드 들이 동시에 전파되기 때문에 수신신호의 모드를 확인하기 위하여 시간-주파수법에 의한 신호 분석 기법의 적용이 필요하다. Transient 신호를 일반적인 Fourier transform 을 적용하여 주파수 성분을 분석하면 시간에 대한 정보를 잃어버리는 문제점이 있다. 여러 모드가 동시에 전파되는 유도초음파의 신호분석을 위해서는 시간 정보를 함께 표현하는 시간-주파수 분석기법의 적용이 필요하다. 시간 주파수 기법으로는 STFT(Short Time Fourier Transform)과 Wavelet Transform 등이 있으며 유도초음파의 모드 분석으로 STFT 법이 널리 응용되고 있다. 시간영역의 신호 $f(t)$에 창문함수 *h* 를 씌워 주파수 변환을 하는 STFT 는 다음

식으로 정의된다.

$$STFT(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)h(t-\tau)e^{-i\omega t}\,dt \tag{4}$$

STFT 는 신호 *f*(*t*)에 대한 시간 τ 와 주파수 ω 근처에서의 정보를 제공하므로 주파수에 따른 transient 신호의 전파시간 정보가 함께 나타나 각 모드의 분산 특성을 명확히 구분할 수 있고 이론적으로 구한 분산선도와 비교함으로써 모드를 확인할 수 있게 된다.

4. 유도초음파 전파특성 시험 및 라체팅 변형 측정

열라체팅 구조시험을 거쳐 제작된 원통 구조물에 대하여 유도초음파 전파특성과 라체팅 변형 측정 가능성을 평가하기 위한 시험을 실시하였다. 그림 9 는 원통 구조물의 시험 block diagram 이며 그림 10 은 실제 수행한 실험 사진을 보여주고 있다. 실험에 사용된 초음파 송수신 장비는 JSR DPR50+ Pulser/Receiver 이고 LeCroy LC574A 오실로스코프에서 초음파신호를 관찰하였다. 초음파 탐촉자는 공진주파수가 0.5MHz 인 1/2”x1” 탐촉자(HaGi Sonic LVA0.5-A1)를 사용하였으며 가변각 웨지를 이용하여 입사각을 조절할 수 있게 하였다.

가변각 웨지(variable angle wedge)를 이용하여 유도초음파를 발생시킬 경우 입사각은 유도초음파 발생 모드의 위상속도에 따라 결정되며 Snell 의 법칙에 의해 입사각(α)은 다음 식으로 구해진다.

$$Sin\alpha = \frac{C_{Wedge}}{C_p} \tag{5}$$

여기서 C_L 은 웨지에서의 종파속도(2760m/s)이고 C_p 는 판에서 전파되는 유도초음파의 위상속도이다. 이론적으로 계산된 분산선도로부터 원하는 유도초음파를 발생 시키기 위하여 적절한 입사각을 결정할 수 있다. 원통 시험편이 두께가 3mm 이고 주파수가 0.5MHz 일 때(즉, *fd*=1.5) S_0 와 A_0 모드의 위상속도가 각각 4700m/s 와 3200m/s 이므로 웨지에서의 입사각은 각각 36 도와 60 도가 된다. 입사각을 조정함으로써 S_0 와 A_0 모드를 각기 따로 발진 시킬 수 있다.

본 실험에서는 그림 9 와 10 에서와 같이 같은 입사각을 갖는 두개의 센서를 서로 마주보고 설치하고 입사각을 적절히 조정하여 원통시험편에 원하는 유도초음파 모드를 발진 시켜 회전하여 돌아오는 초음파신호를 수신하게 하였다. 그림 11(a)는 입사각을 36 도로 하였을 때에 수신된 RF 신호와 STFT 결과를 보여준다. STFT 결과로부터 주로 S_0 모드가 발생하며 부분적으로 A_1 모드가 발생함을 알 수 있다. 이 모드들은 분산성이 커서 신호 펄스 폭이 크게 나타나 신호 분별이 어려울 뿐만 아니라 신호진폭이 급격히 감소하는 특성을 보이고 있어 적합한 모드가 아님을 알 수 있다. 그림 11(b)는 입사각을 60 도로 하였을 때에 수신된 RF 신호와 STFT 결과를 보여준다. STFT 신호처리결과로 A_0 유도초음파가 큰 신호 진폭을 가지고 나타나며 앞부분에 아주 작은 S_0 신호가 나타남을 알 수 있다. A_0 유도초음파는 신호 진폭의 감쇠가 적으며 원통시험편의 원주방향으로 여러 번 반복하여 회전하는 특성을 보이고 있어 원통 구조물의 열라체팅 변형 탐지에 매우 유효한 것으로 판단된다.

열라체팅 변형에 의해 손상된 열라체팅 시험 원통은 축방향에 따라 외경과 원주길이가 변화한다. 이러한 열라체팅 변형을 측정하기 위해서 초음파 센서를 원통 시험편의 축방향으로 스캐닝하면서 A_0 유도초음파의 반복 회전되는 신호의 시간차를 측정하였으며 그 결과를 표 1 에 나타내었다. 먼저 열라체팅 손상이 일어나지 않은 건전부에서 유도초음파 전파시간차를 측정하여 A_0 모드의 전파속도를 측정한다. 열라체팅이 발생한 영역에서 A_0 모드의 전파시간차를 측정하여 건전부에서 측정된 전파속도를 곱하면 원주길이를 추정할 수 있다. 표 1 에 열라체팅 변형이 일어난 부위에 대한 원주길이 측정 결과를 나타내었다. 원주길이 실측치와 유도초음파 전파시간에

의한 측정치의 오차는 약 1mm 이내인 것으로 나타났으며 매우 정확하게 원통구조물의 원주길이 변화를 측정할 수 있음을 확인하였다. 열라체팅 손상에 의해 변형된 원통 시험편을 축방향으로 스캐닝하면서 A_0 유도초음파의 반복 회전되는 신호의 시간차의 변화를 측정하면 열라체팅 변형 발생과 그 정도를 판별할 수 있다. 고출력 초음파 송수신 장치를 사용하여 A_0 모드를 발진 시킬 경우 수백미터 정도 전파가 가능하므로 액체금속로의 원자로 배플과 상부내부구조물은 두께가 25mm 정도이고 외경이 7m 정도인 박판 원통구조물로 이루어져 있으므로 100kHz 이하의 저주파 초음파센서를 이용할 경우 충분히 라체팅변형 탐지에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

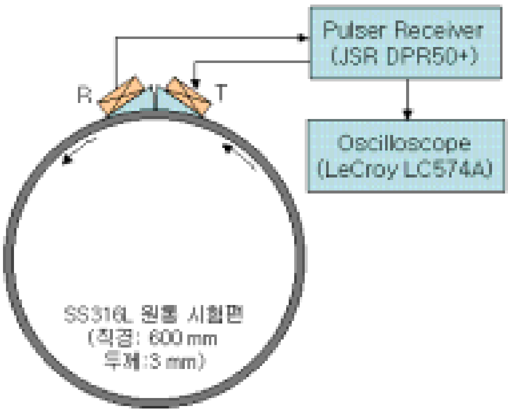


그림 9. 유도초음파 시험 Block Diagram

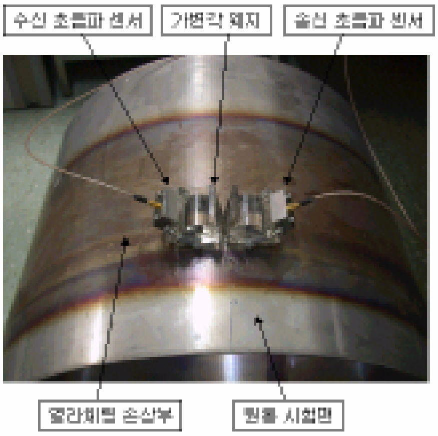
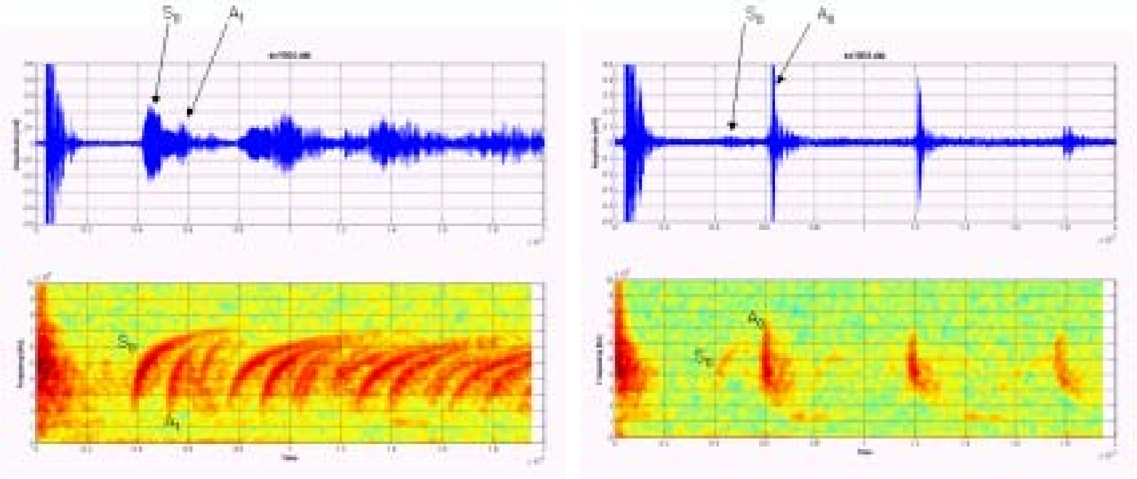


그림 10. 열라체팅 시험원통에서의 유도초음파실험



(a) 입사각 : 36 도

(b) 입사각 : 60 도

그림 11. 열라체팅 시험원통에서의 유도초음파 송수신 RF 신호 및 STFT 결과 (0.5 MHz)

표 1. 유도초음파를 이용한 열라체팅 변형 측정시험 결과

원통 시험편 상단으로부터 위치	원주길이 실측치	A_0 모드 신호 전파시간차	A_0 모드 전파 속도	A_0 모드에 의한 원주길이 측정치
70 mm	1882 mm	579.0 usec	3250.43 m/s	-
260 mm	1889 mm	580.9 usec	-	1888.2 mm
370 mm	1900 mm	584.5 usec	-	1899.6 mm
400 mm	1894 mm	582.5 usec	-	1893.3 mm

5. 결 론

액체금속로 원자로 내의 고온소듐 자유액면에 접하는 배플 및 상부 내부구조물 등은 고온소듐 액면의 상하 이동으로 열라체팅 손상이 발생할 수 있다. 원자로 내부구조물 가동중검사에서 원격 육안검사에 의해 내부구조물의 구조건전성을 주기적으로 점검하여야 하지만 소듐의 불투명성으로 인해 구조손상을 감지해 내기가 매우 어려워 불투명한 소듐 내에서 라체팅 변형을 탐지할 수 있는 검사 기법의 개발이 필요하다. 본 연구는 내부구조물의 열라체팅 구조손상을 감지할 수 있는 새로운 비파괴검사 기법을 개발하기 위하여 수행되었다. 먼저 열라체팅 원통 시험편 제작을 위하여 두께가 3mm 이고 직경이 600mm 인 SS 316L 재료의 원통용기 구조시편에 550°C 이상의 급격한 열하중을 가하면서 냉각수의 자유액면의 상하 이동으로 열라체팅 변형 거동의 모사시험을 실시하였다. 판형 구조물에서의 유도 초음파 발생 및 전파 특성을 분석하여 열라체팅 변형을 탐지할 수 있는 유효한 모드로 분산성이 적은 영차 반대칭 A_0 모드를 선정하였다. STFT 법을 이용하여 유도 초음파의 모드를 확인하였고 원통 구조물의 원주방향으로 반복하여 회전하는 A_0 모드의 전파시간차를 측정하여 열라체팅 변형을 탐지할 수 있는 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III Subsection NH, 1998.

[2] RCC-MR Code, Section I, Subsection RB-3000, AFCEN, 1985 edition & 1993 addenda, 1993.

[3] Wada,H., Otani,T., Fujioka,T., “The Ratcheting Evaluation Methods in Japanese Demonstration FBR Design,” *SMIRT 14, F04/2*, p.85-92, 1997.

[4] ASME B&PV Code, Section XI, Division 3, “Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Component,” 1992.

[5] J.A. McKnight and P. Fenemore, “Under-Sodium Ultrasonic Technology for LMFBRs,” Science and Technology for Fast Reactor Safety, BNES, London, pp. 585-590, 1986.

[6] 주영상 외, “액체금속로 소듐내부 가시화 기술”, 한국원자력연구소, KAERI/AR-684/2003, 2003.

[7] J.L. Rose, *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge University Press, 1999.

[8] 이형연 외, “고온구조 라체팅 시험장치 구축”, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1707/2000, 2000.

[9] Lemaitre, J., Chaboche, J-L., *Mechanics of Solid Materials*, Cambridge University Press, 1990.

[10] ABAQUS *Users manual,* Version 5.8, H.K.S., 2000

[11] Youn Samson, Lee Soon-Bok, Kim Jong Bum, Lee Hyeong-Yeon, Yoo Bong, 1998, “Implementation of visco-plastic constitutive equations into the finite element code ABAQUS,” *Proceedings of the Korean Nuclear Society*, 추계학술대회, pp.1-10, 1998.