

유도초음파를 이용한 원통형 셸의 열 라체팅 변형 탐지

Detection of Thermal Ratcheting Deformation for Cylindrical Shells by Ultrasonic Guided Wave

주영상*[†], 이형연*, 김종범*, 박창규*, 이재한*

Young-Sang Joo*[†], Hyeong-Yeon Lee*, Jong-Bum Kim*, Chang-Gyu Park* and Jae-Han Lee*

초 록 액체금속로 원자로베플 및 상부내부구조물 등은 고온소듐의 자유액면에 접하기 때문에 소듐액면의 상하 이동으로 열 라체팅 손상이 발생할 수 있다. 액체금속로 내부구조물의 열 라체팅 변형 손상을 감지할 수 있는 가동중검사 기법의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 유도초음파를 이용하여 원통형 내부구조물의 열 라체팅 변형 손상을 감지할 수 있는 검사 방법을 제시하였다. 원통형 구조물의 열 라체팅 변형 거동의 모사를 위해 SS 316L 재료의 원통 시험편을 제작하고 550°C 이상의 급격한 열하중을 가하면서 냉각수의 자유액면의 상하 이동 시험을 실시하였다. 스테인리스 강 재질의 박판에서의 유도초음파의 분산 특성을 분석하여 A₀ 모드를 열 라체팅 변형을 탐지할 수 있는 유효 모드로 선정하였다. 제작된 라체팅 변형 원통형 셸 구조물에서 원주방향으로 반복하여 회전하는 A₀ 모드의 전파시간차를 측정함으로써 열 라체팅 변형 탐지 가능성을 확인하였다.

주요용어: 액체금속로, 열 라체팅, 원통형 셸, 유도초음파

Abstract The thermal ratcheting deformation at the reactor baffle and upper internal structure of the liquid metal reactor (LMR) can occur due to movement of the hot sodium free surface. In in-service inspection of reactor internals of LMR, a new inspection technique should be developed for the detection of the thermal ratcheting damage. In this study, an inspection technique using ultrasonic guided wave is proposed for the detection of the thermal ratcheting damage of cylindrical vessels. A 316L stainless steel cylindrical shell specimen has been prepared. The thermal ratchet structural tests were cyclically performed by heat-up up to 550°C with steep temperature gradients along the axial direction after cool-down by cooling water. Ultrasonic guided wave propagation has been characterized by analysis of dispersion curve of the stainless steel plate. The zero-order antisymmetric A₀ guided wave has been selected as the optimal mode for detection of the ratcheting deformation. It is confirmed that the thermal ratcheting deformation can be detected by the measurement of transit time difference of circumferentially propagated A₀ guided waves.

Keywords: Liquid Metal Reactor, Thermal Ratcheting, Cylindrical Shell, Ultrasonic Guided Wave

1. 서 론

한국원자력연구소에서는 Fig. 1과 같은 원자로 계통 구조를 갖는 600 MWe급 풀형 액체금속로

KALIMER-600을 개발하고 있다[1]. 소듐을 냉각재로 사용하는 액체금속로는 500°C 이상의 고온소듐 환경하에서 운전되기 때문에 원자로용기 및 노심을 비롯한 내부구조물들은 고온 열변형 및 열손상이

발생할 가능성이 있다. 특히 원자로용기와 용기 내의 원자로배플 및 상부내부구조물(UIS) 원통 등은 고온소듐의 자유액면 상하 이동으로 인한 반복 열피로 하중으로 열 라체팅과 같은 고온 구조손상이 발생할 수 있다. 라체팅(ratcheting)은 자중과 같은 일차응력 상태에서 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 열 라체팅(thermal ratcheting)이라고 한다[2]. 고온 구조물에 유지하중과 반복하중이 조합하여 작용하면 열 라체팅 현상에 의한 크립-피로 손상이 발생할 수 있어 열 라체팅의 발생을 조기에 탐지하는 것이 내부구조물의 건전성 확보를 위해 매우 중요하다. 라체팅은 고온 구조물의 과대변형에 따른 치수 불안전성(dimensional instability)을 야기 시킬 수 있기 때문에 미국[2], 프랑스[3], 일본[4] 등의 액체금속로 설계관련 코드에서는 열 라체팅에 의한 변형을 제한치를 제시하고 있다. 미국의 고온 설계지침인 ASME-NH는 라체팅 변형률의 제한치로서 수명기간 동안 변형률의 합이 모재에서는 1%, 용접재에서는 0.5%가 넘지 않을 것을 요구하고 있다[2].

액체금속로 원자로계통의 주요 구조물의 구조적 건전성은 주기적으로 수행되는 가동중검사에 의해 검증된다. 액체금속로 가동중검사 코드인 ASME Sec. XI, Div. 3에서는 원자로 내부구조물에 대해서 육안검사와 연속감시 또는 대체검사법에 의해 내부구조물의 손상을 탐지하여야 함을 요건화하고 있다[5,6]. 액체금속로 내부구조물의 손상탐지를 위한 가동중검사법으로 대부분 육안검사가 적용되고 있지만, 소듐의 불투명성으로 인한 육안검사의 제한성과 구조변형 손상의 정밀 탐사를 위해서는 새로운 대체 검사법이 요구되고 있다. 초음파검사 기술은 소듐의 불투명성을 극복하기 위한 소듐내부 가시화 기법에 적용되어 왔으며 구조손상 탐지에 유용한 방법으로 응용되고 있다[7,8]. 액체금속로의 원자로 용기 및 내부구조물들은 고온운전 환경으로 야기되는 열응력을 완화시키기 위해서 대부분 박판구조로 설계 제작된다. 이러한 박판 구조물에 초음파가 입사하게 되면 박판 구조물의 벽을 따라 유도초음파(ultrasonic guided wave)가 발생하여 전파하게 된다. 유도초음파는 파 유도체를 따라 멀리 전파하는 특성과 함께 두께와 기하학적 구조 및 입사 주파수

에 따라 전파 양상이 크게 변화하는 특성이 있어 새로운 첨단 비파괴검사 방법으로 널리 응용되고 있다[9,10]. 본 논문에서는 소듐 액면 부근에서 발생하기 쉬운 내부구조물의 열 라체팅 구조변형 손상을 유도초음파를 이용하여 탐지할 수 있는 새로운 가능성을 제시한다.

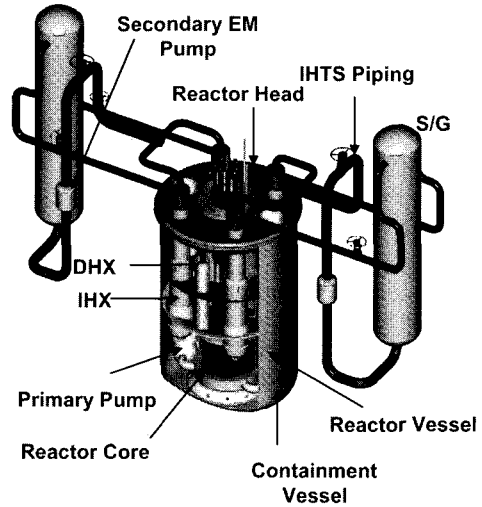


Fig. 1 KALIMER-600 reactor system

2. 열 라체팅 구조시험과 해석

2.1. 열 라체팅 현상

일차응력이 작용하는 구조물에 열응력이나 굽힘 응력과 같은 이차응력이 반복적으로 작용하면 각 하중 사이클마다 변형량이 지속적으로 누적되는 진행성 비탄성 변형이 발생할 수 있다. 일차응력은 항복응력 이하로 제한되므로 구조물에서 불연속성으로 인한 소성변형이 부분적으로 생기더라도 계속 누적되는 진행성 변형을 일으키지는 않지만 일차응력에 부가적으로 열하중에 기인한 이차 응력이 반복되는 경우에 변형이 점진적으로 누적되는 열 라체팅 현상이 발생한다[2]. Fig. 2는 원통구조물에서 고온의 자유액면이 상하이동을 되풀이하면 온도구배가 축방향으로 이동하게 되어 열하중이 완전히 제거된 후에도 원통의 반경방향으로 잔류변형이 남는 전형적인 열 라체팅 현상을 보여주고 있다. 잔류 변형이 원통 안으로 누적되는 수축모드 변형이 발생할 수도 있고, 열하중의 작용 방식 또는 용기의 두께에 따라 팽창모드의 변형이 발생할 수도 있다.

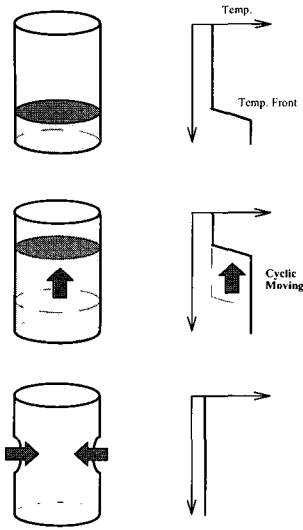


Fig. 2 Thermal ratcheting phenomenon

2.2. 열 라체팅 구조시험

열 라체팅 구조시험을 위해 구축된 구조시험장치 사진은 Fig. 3과 같다. 여기서 라체팅 구조시험장치는 크게 고주파 가열기, 냉각시스템, 승강장비, 베드, 냉각수조, 센서 및 데이터 수집시스템으로 구성되며 고주파 유도가열기의 사양은 50 kW 용량에 50 kHz 이다. Fig. 4에서와 같이 가열코일과 냉각수 사이에 구조시험 원통을 이동시킴으로써 축방향으로 급격한 열구배를 주면서 온도구배가 이동되도록 시험장치를 구성하였으며 시편은 하강시에만 가열하였다. 라체팅 구조시험 원통은 원통의 바깥에 설치된 유도코일과 바로 밑의 냉각수조 사이에서 심한 축방향 열구배 하중을 받는다. 액체금속로 원자로베플의 자유액면 상하이동에 따른 축방향 온도분포의 이동으로 발생하는 열 라체팅 거동을 모사하였다. 구조시편의 제원은 Fig. 5와 같이 외경 600 mm, 높이 500 mm, 두께 3 mm이며 재질은 316L 스테인리스강이다. 본 구조시험에서는 시험원통의 축방향으로 28채널의 열전대를 부착하여 가열기의 출력을 제어하고 레이저 변위센서를 이용하여 원통의 반경방향으로 누적되는 잔류 변위량을 측정하였다.

반경방향의 잔류변위 측정을 위한 변위센서는 Fig. 6에서와 같이 레이저 변위센서를 설치하였다. 여기서 레이저변위센서는 삼각 측량법 원리를 적용하여 변위를 측정하며 본 시험에서 사용한 센서의

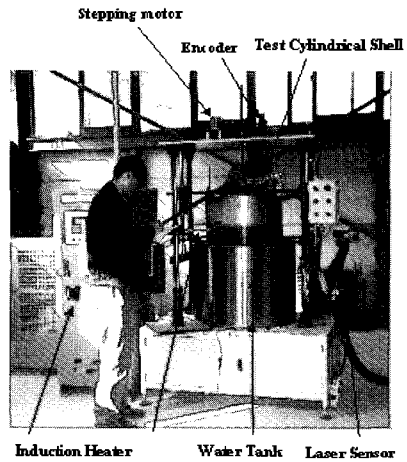


Fig. 3 Thermal ratcheting test facility

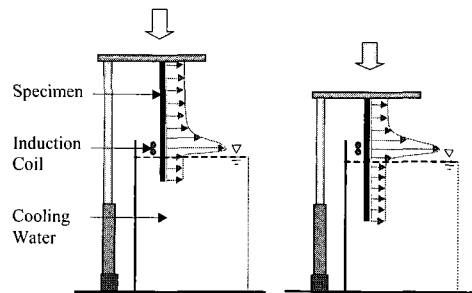


Fig. 4 Moving temperature distribution along the axial direction of the test cylinder

측정범위는 500 ± 20 mm이고 정밀도는 $20 \mu\text{m}$ 이다. 본 라체팅 구조시험에서는 열하중 사이클을 9회 반복하였다. 원통구조물의 축 방향으로 설치된 열전대는 Fig. 5의 시편 하단에서 높이 90 mm부터 360 mm까지 10 mm 간격으로 28채널을 부착하였다. 수집된 온도데이터는 Fig. 7에서와 같이 시편이 아래로 이동함에 따라 온도분포가 일정한 틀을 유지하면서 우측으로 이동함을 알 수 있다. Fig. 7은 부착된 28개 채널에서 측정된 온도를 편의상 30초 간격으로 그린 것이며 수평축 0은 실제 높이 500 mm의 구조시편에서 하단으로부터 90 mm 떨어진 지점을 나타낸다. Fig. 7의 각 온도선도에서 좌측부분이 축방향으로 온도구배가 심한 것으로 나타났는데 이는 구조시편이 가열된 후 유도코일로부터 약 30 mm 아래에 위치하고 있는 냉각수 안으로 시편이 잠기면서 급냉이 일어나기 때문이다.

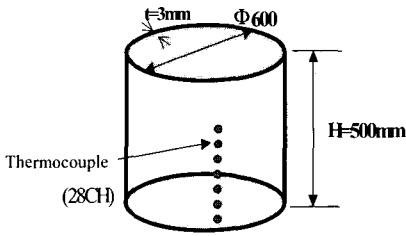


Fig. 5 Dimensions of test cylinder with thermocouples (28 Channels) attached along the axial direction

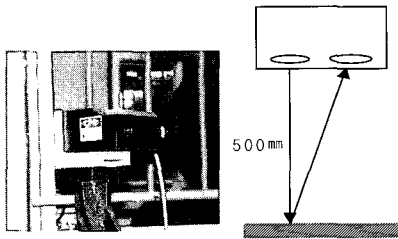


Fig. 6 Laser displacement sensor

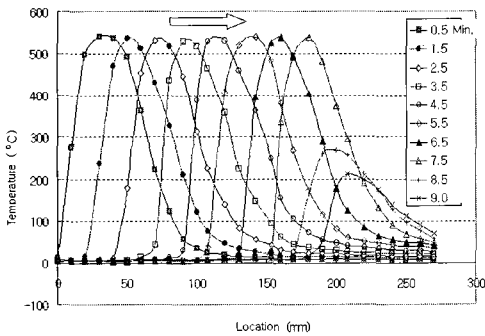


Fig. 7 Temperature profiles measured by 28 channel thermocouples

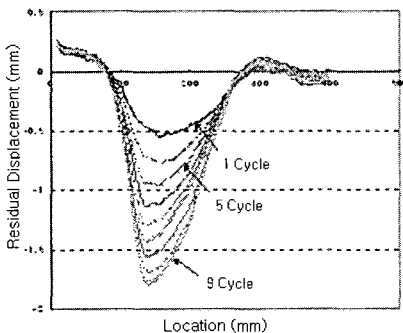


Fig. 8 Distribution of residual displacements along the radial direction measured by laser displacement sensor

본 구조시험에서는 잔류변위 측정을 위해 각 하중 사이클 후에 충분히 시편을 냉각시킨 후 레이저 변위센서로 시편의 반경방향 잔류변위를 측정하였고 구조시험 시편의 이동 가열구간이 하단으로부터 12 cm ~ 27 cm로 15 cm 구간일 때 라체팅 하중에 따른 잔류변위를 Fig. 8에 나타냈다. Fig. 8에서 수평축은 시험원통의 축방향 좌표이고 수직축은 레이저 변위센서로 측정한 잔류변위로서 ‘+’는 수축을, ‘-’는 팽창을 의미한다. Fig. 8로부터 이동 열하중 하에서는 팽창모드의 잔류변위가 발생하고 사이클이 반복됨에 따라 변위는 점진적으로 증가하며 하단으로부터 13 cm 위치에서 최대 변위가 발생하는 것으로 나타났다. 잔류변위 누적량은 5 사이클 후에 1.3 mm, 9 사이클 후에 1.79 mm 인 것으로 측정되었다.

2.3. 열 라체팅 해석

구조시험원통의 열 라체팅 거동을 모사하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소 모델은 8절점 축대칭 요소 300개와 987절점으로 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 축 방향 열전대에서 수집된 천이 온도데이터를 유한요소 해석모델의 각 열전대 위치에서의 입력 열하중으로 사용하였다. 일정한 시간간격으로 수집한 28채널의 온도데이터를 이용하였으며 각 라체팅 사이클에서도 온도구배 이동이 동일한 방식으로 반복되는 것으로 간주하고 동일한 천이온도 열하중을 각 사이클에서 반복적으로 적용하였다.

액체금속과 같은 고온구조물에 큰 이차응력이 반복적으로 작용할 경우 316L 스테인리스강에 대한 반복 소성경화거동을 모사하기 위해 비탄성 해석모델인 비선형 결합 경화모델을 ABAQUS의 사용자 부프로그램인 UMAT으로 구현하여 해석을 수행하였다[11,12]. 이 결합 경화 모델은 항복 조건을 갖는 모델로서 동적 특성을 갖는 내부 변수들을 도입하여 재료의 시간에 따른 내부이력을 표현한다. 이 구성식의 주요 수식은 다음과 같이 전개된다. 소성 변형률 속도의 방향은 overstress의 방향과 일치하며 크기는 등가 소성변형률 속도(equivalent plastic strain rate)와 같다.

$$(\dot{\epsilon}_p)_{ij} = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{s_{ij} - X_{ij}}{J(s - X)} \quad (1)$$

여기서 s_{ij} 는 편차응력, X_{ij} 는 이동성 경화 응력, \dot{p} 는 누적 소성변형을 속도, $J(s)$ 는 편차응력의 second invariant를 의미한다.

$$J(s - X) = \sqrt{\frac{3}{2} (s_{ij} - X_{ij}) : (s_{ij} - X_{ij})} \quad (2)$$

항복 조건은 $F = J(s - X) - R - \sigma_Y$ 이며 σ_Y 는 초기 항복응력이다.

이동경화(kinematic hardening) 응력의 발전식은

$$\dot{X}_{ij} = \frac{2}{3} C (\dot{\epsilon}_p)_{ij} - \gamma \dot{p} X_{ij} \quad (3)$$

이며 C, γ 는 이동경화 관련 재료상수이다.

등방경화(isotropic hardening) 응력의 발전식은

$$\dot{R} = b(Q - R)\dot{p} \quad (4)$$

이며 b 와 Q 는 등방경화 관련 재료 상수이다. 이 모델의 비탄성 재료 상수는 C, γ, b, Q 및 σ_Y 등 5개 이고, 재료상수의 결정과정 및 상수 값들은 참고문헌에 제시되어 있다[13,14]. 열 라체팅 하중의 작용에 따라 소성경화 거동을 보이는 스테인리스강 구조물의 비선형 결합 경화모델을 프로그래밍한 ABAQUS UMAT의 검증을 위해 단축시편이 반복경화(uniaxial cyclic hardening) 하중을 받을 때 시편거동에 대해 수치적으로 구한 엄밀해와 UMAT을 이용한 유한요소 해석해를 비교하였다. Fig. 9에서와 같이 엄밀해와 UMAT을 이용한 유한요소해석 결과는 잘 일치하는 것으로 나타났다. 라체팅 사이클이 반복됨에 따라 반경방향 잔류변위는 점진적으로 누적되는 양상을 보인다. 라체팅 사이클을 3회 실시한 후 상온에서 측정된 반경방향 누적변위는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 시편의 바깥으로 팽창하였고 계산결과와 해석결과는 비슷한 변형모드를 보여주고 있다. 또한 라체팅 사이클을 9회 가한 후에 발생한 잔류변위의 해석 및 시험 결과는 Fig. 11에 나타난 바와 같이 라체팅 사이클이 반복됨에 따라 잔류변위는 역시 팽창모드로 누적되는 것을 알 수 있다. Fig. 10과 Fig. 11을 비교해보면 라체팅 사이클이 누적되면서 해석결과와 시험결과의 차이가 점차 증가하는 것으로 나타났다. 각 사이클 이후

해석 및 측정 결과치는 3사이클까지는 비교적 잘 일치하였지만 이후 사이클에서는 차이가 조금씩 증가하는 것으로 나타났으며 해석결과는 실제 거동을 다소 과대평가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 차이가 발생한 주된 원인은 반복 소성경화 구성식 모델의 모사능력이 아직까지는 구조물의 실제 거동을 모사하는 데는 한계가 있기 때문이다.

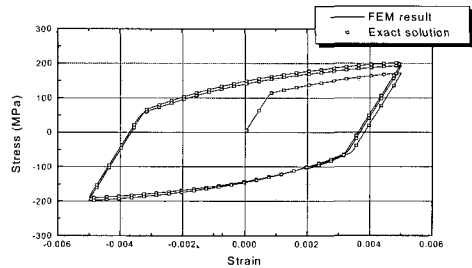


Fig. 9 Validation of exact solution and FEM result for uniaxial cyclic load

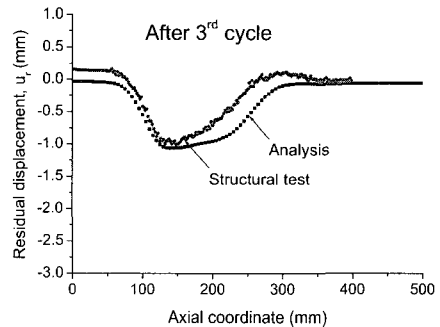


Fig. 10 Comparison of the residual displacements by test and analysis after 3 thermal ratcheting cycles

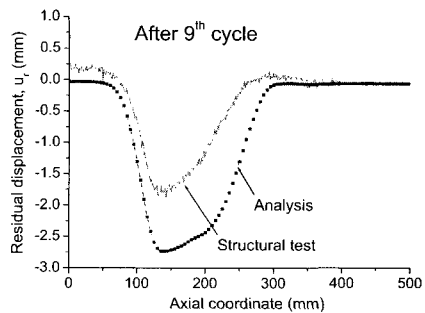


Fig. 11 Comparison of the residual displacements by test and analysis after 9 thermal ratcheting cycles

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[9,10]. 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.

판을 따라 전파하는 유도초음파를 특별히 판파(plate wave 또는 Lamb wave)라고 한다. 판파의 모드는 대칭(symmetric) 모드와 반대칭(antisymmetric) 모드로 구분된다. 판파의 분산 특성은 이론적으로 다음과 같이 구해진다[9]. 판의 평면경계에서 응력이 0이어야 한다는 경계조건으로부터 대칭모드와 반대칭모드에 대한 판파의 위상속도를 구할 수 있는 Rayleigh-Lamb 주파수 방정식을 얻을 수 있다.

대칭모드의 경우

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \tag{5}$$

반대칭모드의 경우

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = \frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \tag{6}$$

여기서 p 와 q 는 두께방향의 파동벡터 성분으로 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 L과 T는 각각 종파와 횡파를 의미한다.

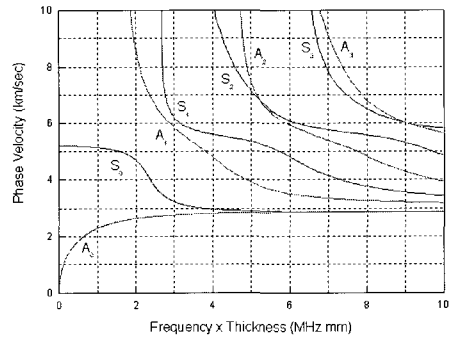
Rayleigh-Lamb 주파수 방정식으로부터 위상속도의 분산곡선을 구해보면 위상속도가 주파수의 함수로 주어지며 같은 주파수에서 서로 다른 모드가 나타남을 알 수 있다. Fig. 12 (a)는 스테인리스 강에 대한 판파의 위상속도 분산선도를 보여준다. 위상속도(C_p) 분산선도는 유도초음파의 모드 발생조건을 설정할 때 사용된다. 유도초음파의 에너지는 위상속도와는 다른 군속도(C_g)로 전파된다. 군속도는 실제검사에서 시간영역의 초음파 모드 확인과 반사파 거리 추정 등에 유용하게 사용된다. 군속도는 위상속도의 주파수에 대한 미분으로 다음 식과

같이 구해진다.

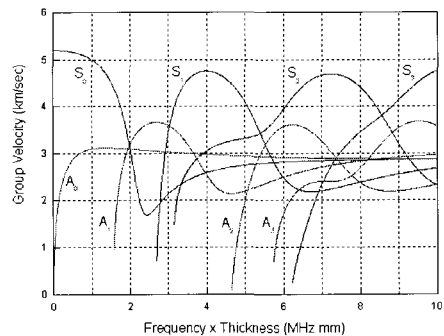
$$C_g = \frac{C_p}{1 - \frac{fd}{C_p} \frac{\partial C_p}{\partial (fd)}} \tag{7}$$

이 식으로부터 구해진 스테인리스 강에서의 판파의 군속도는 Fig. 12 (b)와 같다.

Fig. 12 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. 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.



(a) Phase velocity



(b) Group velocity

Fig. 12 Dispersion curves of Lamb waves for SS316L stainless steel plate

분산선도에서 보는 바와 같이 x 축은 주파수와 두께의 곱으로 되어 있어 적용 시험체의 두께에 따라 적절한 주파수 범위를 선정할 수 있다. Fig. 12 (a)에서와 같이 주파수와 두께의 곱 fd 가 2 이상이 되면 1차 모드 이상의 판파가 여기되며 4이상이 되면 2차 모드가 발생하기 시작한다. 고차 모드가 발생하면 저차 모드와 함께 여러 모드가 동시에 발생하므로 유도초음파의 송수신 신호가 복잡해 질 수 있으므로 가능한 한 fd 를 4이하로 선정하며 0차 모드의 유도초음파를 발생시키기 위해서는 2이하로 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 3 mm인 원통 구조물에서 fd 가 2 이하인 영역의 A_0 유도초음파를 발진시키기 위해서는 초음파 송수신 주파수를 0.5 MHz로 선정하여야 한다.

유도초음파는 여러 가지 모드들이 동시에 전파되기 때문에 수신신호의 모드를 확인하기 위하여 시간-주파수법에 의한 신호분석 기법의 적용이 필요하다. 과도 신호(transient signal)를 일반적인 푸리에변환(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 단시간 푸리에변환(STFT; short time Fourier transform)과 웨이블릿 변환(wavelet transform) 등이 있으며 유도초음파의 모드 분석으로 STFT 법이 널리 응용되고 있다. 시간 영역의 신호 $f(t)$ 에 창문함수 h 를 씌워 주파수 변환을 하는 STFT는 다음 식으로 정의된다.

$$STFT(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)h(t-\tau)e^{-i\omega\tau} dt \quad (8)$$

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

4. 유도초음파를 이용한 라체팅 변형 측정

열 라체팅 구조시험을 거쳐 제작된 원통 구조물에 대하여 유도초음파 전파특성과 라체팅 변형 측정 가능성을 평가하기 위한 시험을 실시하였다. Fig. 13은 원통 구조물의 열 라체팅 변형 탐지 시험 block diagram이며 Fig. 14는 실제 수행한 실험 사진을 보여주고 있다. 실험에 사용된 초음파 송수신 장비는 JSR DPR50+ pulser/receiver이고 LeCroy LC574A 오실로스코프에서 초음파신호를 관찰하였다. 초음파 탐촉자는 공진주파수가 0.5 MHz인 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 Snell의 법칙에 의해 입사각(α)은 다음 식으로 구해진다.

$$\sin \alpha = \frac{C_{wedge}}{C_p} \quad (9)$$

여기서 C_{wedge} 은 웨지에서의 종파속도 (2650 m/s)이고 C_p 는 판에서 전파되는 유도초음파의 위상속도이다. 이론적으로 계산된 분산선도로부터 원하는 유도초음파를 발생시키기 위하여 적절한 입사각을 결정할 수 있다. 원통 시험편이 두께가 3 mm이고 주파수가 0.5 MHz일 때(즉, $fd=1.5$) S_0 와 A_0 모드의 위상속도가 각각 4500 m/s와 2720 m/s이므로 웨지에서의 입사각은 각각 36도와 77도가 된다. 입사각을 조정함으로써 S_0 와 A_0 모드를 각기 따로 발진시킬 수 있다.

본 실험에서는 Fig. 13과 Fig. 14에서와 같이 같은 입사각을 갖는 두개의 센서를 서로 마주보고 설치하고 입사각을 적절히 조정하여 원통시험편에 원하는 유도초음파 모드를 발진시켜 회전하여 돌아오는 초음파신호를 수신하게 하였다. Fig. 15(a)는 입사각을 36도로 하였을 때에 수신된 RF신호와 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. Fig. 15(b)는 입사각을

77도로 하였을 때에 수신된 RF 신호와 STFT결과를 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 열 라체팅 변형 탐지에 매우 유효한 것으로 판단된다.

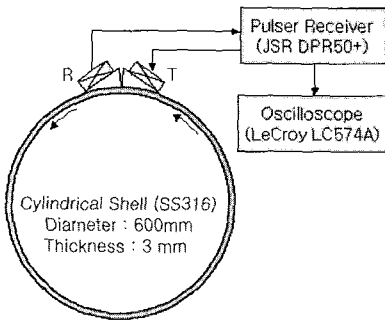


Fig. 13 Experimental setup for detecting thermal ratcheting deformation of cylindrical shell by ultrasonic guided wave

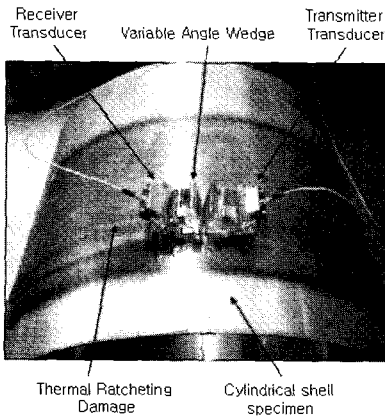
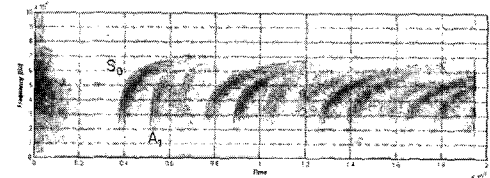
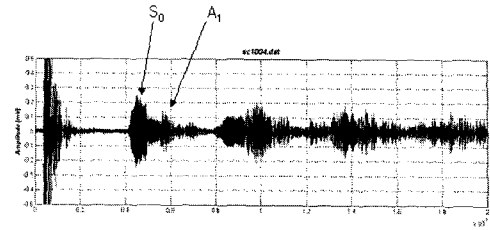


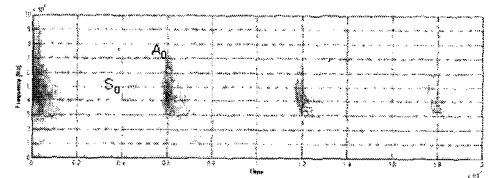
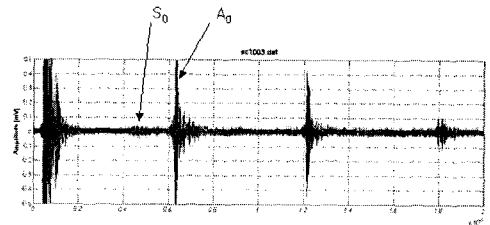
Fig. 14 Thermal ratcheting test structure and ultrasonic sensors arrangement

Table 1 Measurement results of thermal ratcheting deformation using ultrasonic guided wave

Axial location of shell	Actual circumference	Transit Time of A_0 Mode	Measurement results
100 mm	1894 mm	582.5 μ sec	1893.1 mm
130 mm	1900 mm	584.2 μ sec	1898.6 mm
240 mm	1889 mm	580.9 μ sec	1887.9 mm



(a) Incident angle : 36°



(b) Incident angle : 77°

Fig. 15 RF signals and STFT results of ultrasonic guided waves for thermal ratcheting shell structure

열 라체팅 변형에 의해 손상된 열 라체팅 시험 원통은 축방향에 따라 외경과 원주길이가 변화한다. 이러한 열 라체팅 변형을 측정하기 위해서 초음파 센서를 원통 시험편의 축방향으로 스캐닝하면서 A_0 유도초음파의 반복 회전되는 신호의 시간차를 측정하였다. 먼저 열 라체팅 손상이 일어나지 않은 건전부에서 유도초음파의 전파시간차를 측정된 결과 A_0 모드의 전파속도는 3250 m/s로 측정되었다. 열 라체팅이 발생한 영역에서 A_0 모드의 전파시간차를 측정하여 건전부에서 측정된 전파속도를 곱하면 원주길이를 추정할 수 있다. Table 1에 열 라체팅 변형이 일어난 부위에 대한 원주길이 측정 결과와 A_0 모드의 전파시간차를 이용한 측정치를 나타내었다. 원주길이 실측치와 유도초음파 전파시간에 의한 측정치

의 오차는 약 1~2 mm 정도인 것으로 나타나 매우 정확하게 원통구조물의 원주길이 변화를 측정할 수 있음을 확인하였다. 열 라체팅 손상에 의해 변형된 원통 시험편을 축방향으로 스캐닝하면서 A_0 유도초음파의 반복 회전되는 신호의 시간차의 변화를 측정하면 열 라체팅 변형 발생과 그 정도를 판별할 수 있다. 고출력 초음파 송수신 장치를 사용하여 A_0 모드를 발진 시킬 경우 수백미터 정도 전파가 가능하므로 액체금속로의 원자로베플과 상부내부구조물은 두께가 25 mm 정도이고 외경이 7 m 정도인 박판 원통구조물로 이루어져 있으므로 100 kHz 정도의 저주파 초음파센서를 이용할 경우 라체팅 변형 탐지에 유도초음파 기법을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

액체금속로 원자로 내의 고온소듐 자유액면에 접하는 원자로베플 및 상부내부구조물 등은 고온소듐 액면의 상하 이동으로 열 라체팅 손상이 발생할 수 있다. 원자로 내부구조물 가동중검사에서 원격 육안검사에 의해 내부구조물의 구조건전성을 주기적으로 점검해야 하지만 고온 소듐 환경에서 구조손상을 감지해 내기가 매우 어렵다. 본 연구는 내부구조물의 열 라체팅 구조손상을 감지할 수 있는 새로운 비파괴검사 기법을 개발하기 위하여 수행되었다. 먼저 열 라체팅 원통 시험편 제작을 위하여 두께가 3 mm 이고 직경이 600 mm인 SS 316L 재료의 원통용기 구조시험편에 550°C 이상의 급격한 열하중을 가하면서 냉각수의 자유액면의 상하 이동으로 열 라체팅 변형 거동의 모사시험을 실시하였다. 관형 구조물에서의 유도 초음파 발생 및 전파 특성을 분석하여 열 라체팅 변형을 탐지할 수 있는 유효한 유도초음파 모드로 분산성이 적은 영차 반대칭 A_0 모드를 선정하였다. STFT 법을 이용하여 유도 초음파의 전파 모드를 확인하였으며 원통 구조물의 원주방향으로 반복하여 회전하는 A_0 모드의 전파시간차를 측정하여 열 라체팅 변형을 탐지할 수 있는 새로운 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] D. Han et al., "KALIMER Conceptual Design Report," KAERI/TR-2204/2002, (2002)
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III Subsection NH, (1998)
- [3] RCC-MR Code, Section I, Subsection RB-3000, AFCEN, 1985 edition & 1993 addenda, (1993)
- [4] H. Wada, T. Otani, and T. Fujioka, "The ratcheting evaluation methods in Japanese demonstration FBR design," SMIRT 14, F04/2, pp. 85-92, (1997)
- [5] ASME B&PV Code, Section XI, Division 3, "Rules for in-service inspection of nuclear power plant component," (1992)
- [6] 주영상, 김석훈, 이재한, "액체금속로 KALIMER의 가동중검사 및 보수 개념설계," 비파괴검사학회지, 제24권, 제2호, pp. 171-179, (2004)
- [7] 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)
- [8] 주영상, 이재한, "액체금속로 소듐내부 가시화를 위한 초음파 웨이브가이드 센서 개발," 비파괴검사학회지, 제26권, 제1호, pp. 18-24, (2006)
- [9] J. L. Rose, Ultrasonic Waves in Solid Media, Cambridge University Press, (1999)
- [10] 조윤희, "유도초음파에 대한 이해와 응용," 비파괴검사학회지, 제21권, 제4호, pp. 446-460, (2001)
- [11] J. Lemaitre and J-L. Chaboche, Mechanics of Solid Materials, Cambridge University Press, (1990)
- [12] ABAQUS Users Manual, Version 5.8, H.K.S., (2000)
- [13] S. Youn, S.-B. Lee, J.-B. Kim, H.-Y. Lee and B. Yoo, "Implementation of visco-elastic constitutive equations into the finite element code ABAQUS," Proceedings of Autumn Conference of the Korean Nuclear Society, pp. 1-10, (1998)
- [14] I. Schwerteland and B. Schinke, "Automated valuation of material parameters of viscoplastic constitutive equations," J. Eng. Mat. Tech., Vol 118, pp. 273, (1996)