

원자로 용접부의 국부적 미세조직 변화에 따른 동적탄성계수 측정

Measurement of Dynamic Elastic Constants of RPV Steel Weld due to Localized Microstructural Variation

정용무*, 김주학*, 홍준화*, 정현규*

Yong-Moo Cheong*, Joo-Hag Kim*, Jun-Hwa Hong* and Hyun-Kyu Jung*

초 록 원자로 재료인 SA 508 Class 3 강용접부 및 열영향부 모사 시험편에 대해서 초음파공명분광법으로 동적탄성계수를 측정하였다. 등방성 탄성계수를 가정하여 초기 추정 탄성 계수, c_{11} , c_{12} 및 c_{44} 로부터 장방형 시편의 공명 주파수를 계산하였으며 계산된 주파수와 초음파공명분광법으로 측정된 주파수를 비교, 반복 수렴 절차를 거쳐 정밀한 탄성계수를 구했다. 열처리 조건의 차이 및 미세 조직의 차이에 따라 영률 및 전단 계수의 차이가 확실하게 나타났다. 미세한 베이나이트 조직에서의 영률 및 전단 계수는 조대한 마르텐사이트 조직보다 높았으며 이러한 경향은 미세 경도 시험 등의 다른 실험 결과와도 일치하였다.

주요용어: 탄성계수, 초음파공명분광, 원자로 재료

Abstract The dynamic elastic constants of the simulated weld HAZ (heat-affected zone) of SA 508 Class 3 reactor pressure vessel (RPV) steel were investigated by resonant ultrasound spectroscopy (RUS). The resonance frequencies of rectangular parallelepiped samples were calculated from the initial estimates of elastic stiffness c_{11} , c_{12} and c_{44} with an assumption of isotropic property, dimension and density. Through the comparison of calculated resonant frequencies with the measured resonant frequencies by RUS, very accurate elastic constants of SA 508 Class 3 steel were determined by iteration and convergence processes. Clear differences of Young's modulus and shear modulus were shown from samples with different thermal cycles and microstructures. Young's modulus and shear modulus of samples with fine-grained bainite were higher than those with coarse-grained tempered martensite. This tendency was confirmed from other results such as micro-hardness test.

Keywords: elastic constant, resonant ultrasound spectroscopy (RUS), nuclear material

1. 서론

원자로 압력용기는 원자력발전소의 수명을 결정짓는 핵심 부품으로 현재 국내외적으로 가장 많이 사용되고 있는 상용 원자로 압력용기 (reactor pressure vessel, RPV)는 ASME SA 508 Cl. 3 단조강(Mn-Mo-Ni 저합금강)을 용접하여 제작한다. 원자로 압력용기강의 용접부는 국부적으로 급격한 온도 변화를 겪음으로 인하여 복

잡한 물성 변화를 수반할 것으로 예상되며 이러한 국산 원자로 압력용기강의 실제 및 재현 용접 열 영향부 (heat affected zone, HAZ)에 대해 전반적인 미세 조직 및 기계적 성질에 대한 특성 평가가 이루어진 바 있다 [1,2]. 그러나 이러한 용접부 및 열 영향부 내에 국부적인 기계적 성질 변화를 측정하기 위해서 전통적인 초음파 특성 평가 기법을 적용할 경우 탄성 계수의 국부적인 변화를 측정하기 어렵다.

초음파공명분광법은 고체의 진동 모드, 또는 공명이 물질의 미시적, 거시적 특성에 대해서 대단히 민감하여 정밀한 탄성계수, 초음파 감쇠 등을 측정할 수 있으며 이러한 특성 때문에 1990년대에 들어오면서 재료 물성 평가, 비파괴검사에 적용되기 시작하였다[3]. 고체의 밀도, 치수, 탄성계수를 알고있는 고체의 공명 주파수를 계산하기 위해서 자유 진동 문제에 대한 완벽한 해석적인 해를 구하는 방법은 현재까지도 존재하지 않으며 비해석적인 방법으로 수치해석법 (유한 요소법)이나 에너지 최소화법을 사용하여 해를 구할 수 있다. 역사적으로 초음파공명분광 이론은 지질학에 근거를 두며 구형체의 자유 진동에 대한 연구에서 시작되었는 데 중심적인 이론은 J. D. Maynard[4] 의해서 전개되었다. Holland[5]와 Demarest [6]는 탄성적으로 등방성인 직육면체의 공명을 이론적으로 계산하고 이를 실험적으로 측정하였는데, 이 결과들은 Ohno[7]에 의해서 일반화되었다. 이러한 결과들을 종합하여 Visscher[8]가 고체물리 분야에서의 응용을 목적으로 완성하였다.

초음파를 이용한 탄성계수의 측정은 비파괴적인 측정이라는 점에서 유리한 데 여러 가지 초음파 방법 가운데 초음파 공명분광법 (resonant ultrasound spectroscopy ; RUS)는 특히 다른 초음파 방법에 비해서 여러 시편 형상(구형, 원통형, 장방형 등)에 대해서 적용 가능하며, 소형 시편 크기(1mm 정도)로도 측정 가능하여 작은 단결정 시편에도 적용할 수 있고, 단 한번의 측정으로 최대 21개의 이방성 탄성계수 텐서를 모두 구할 수 있다는 장점이 있다[9]. 이러한 장점 때문에 초음파 공명분광법을 적용하여 일반적인 등방성 금속은 물론 대칭성이 낮은 단결정이나 집합조직을 가진 다결정 재료의 이방성 탄성계수(anisotropic elastic constant)를 측정하는 것이 가능하며[10,11] 특히 소형 시편에서 탄성계수 측정법이 가능하기 때문에 용접부와 같이 국부적으로 물성 변화가 복잡한 부분의 탄성계수를 측정하는 것이 가능하다. 그러나 정밀한 탄성계수의 측정을 위해서는 시편의 크기 및 형상을 정밀 가공하여야 하고, 실제 값과 근접한 초기 추정 탄성계수를 미리 알아야 한다는 단점도 있다. 이것은 이 방법이 추정 탄성계수, 시편의 치수 및 밀도를 사용하여 계산된 공명모드 및 주파수와 실제 측정된 공명 주파수가 거의 정확히 일치해야만 반복 알고리즘에 의해서 탄성계수 값이 수렴하며 오차가 낮은 정밀한 탄성계수의 계산이 가능하기 때문이다.

본 연구에서는 원자로 압력용기강 용접부 및 열 영향부 영역에서의 국부적인 탄성계수의 변화를 초음파 공명

Table 1 Chemical composition of SA 508-3 steel

Elements	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
wt. %	0.19	0.08	1.35	0.006	0.002	0.82	0.17	0.51

Table 2 시편의 열처리 이력 및 미세 조직

시편 Identification	Thermal cycle simulation (1차 및 2차 thermal cycle 온도)	미세 조직*
S1	1350°C & 1350°C	CGTM
S2	1350°C & 950°C	(TM)+TB
S3	1350°C & 750°C	(TM)+TB+F
S4	900°C & 900°C	FGTB
S5	900°C & 700°C	FGTB+(TB+F)
S6	700°C & 700°C	TB+(F)+CC
S7	650°C & 680°C	TB+CC
S8	Base material	TB

*CGTM: Coarse Grained Tempered Martensite

*TM: Tempered Martensite

*TB: Tempered bainite

*F: Ferrite

*FGTB: Fine Grained Tempered bainite

*CC: Coarse Carbide

분광법으로 측정하였다. 용접부 각각의 위치를 재현하는 시편을 제작하였으며 등방성 탄성계수를 가정한 초기 추정 탄성계수를 계산한 뒤 이를 초음파 공명분광법으로 측정된 탄성계수와 반복 비교, 수렴과정을 거쳐서 정밀한 탄성계수를 구했으며 이를 미세 조직의 차이 및 다른 물성과 연관지어서 토의하였다.

2. 실험방법

2.1. 시편준비

본 실험에 사용된 시편은 원자로용 ASME SA 508 Cl. 3 급 Mn-Mo-Ni 계 저합금강으로 화학성분은 Table 1 과 같다[6]. 원자로용 저합금강 모재는 소입 및 소둔 (quenching & tempering)에 의해 모재는 tempered bainite 기지 조직을 갖는다. 한편 이의 용접부는 모재의 벽두께 220mm를 약 130 pass 이상 자동 용접하고 용접 후열 처리 (post weld heat treatment)를 거치는 동안 일

정한 온도분포의 열 영향부가 반복되는 것으로 볼 수 있으므로 이를 단위 열 영향부 (unit HAZ)로 설정하고 이러한 단위 열 영향부 내에서의 온도 분포를 해석하여 유사한 미세 조직과 기계적인 특성을 갖는 단위 열 영향부 모델을 설정할 수 있다. 이러한 모델 해석을 통하여 단위 열 영향부를 나타내는 일곱 종류의 재현 시험편 S1~S7을 제작하였다(Fig. 1). 각각 시험편의 미세 조직 사진을 Fig. 2에 보였으며 각각의 미세 조직을 Table 2에 정리하였다. 각각의 재현 시험편 S1~S7을 3.0mm×3.5mm×4.0mm 크기의 장방형 시험편으로 가공하여 초음파공명분광법을 적용한 동적 탄성계수 측정에 사용하였다.

2.2. 초음파공명분광법에 의한 탄성계수 측정

초음파공명분광법을 사용한 탄성계수 측정 과정은 우선 시험편의 치수, 밀도, 추정 탄성계수를 가지고 추정 고유주파수 또는 추정 공명 주파수를 계산한다[13]. 계산된 공

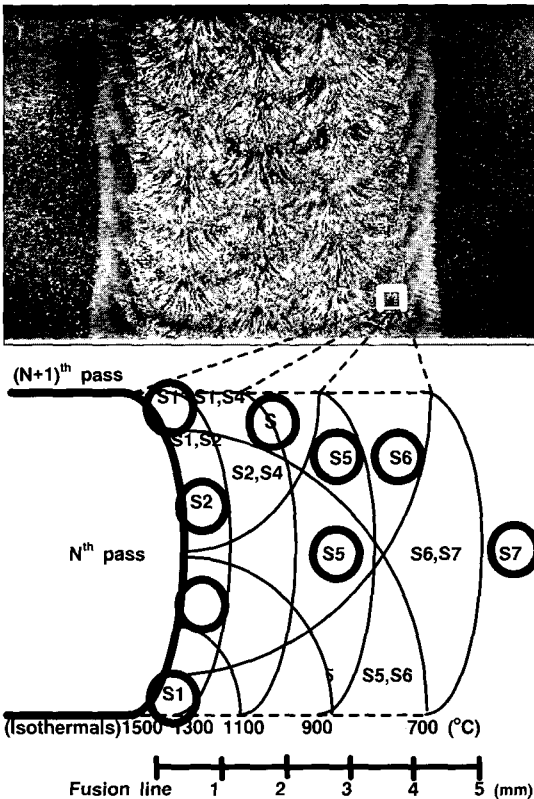


Fig. 1 Macrostructure of the actual weld HAZ and typical HAZ regions indicating simulation conditions

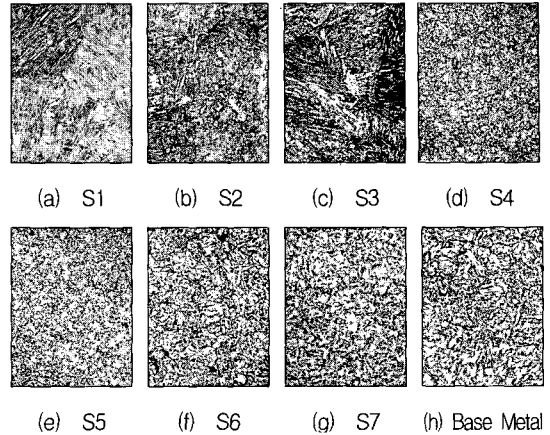


Fig. 2 Microstructures in various HAZ regions observed through optical microscope show coarse grained(CG) HAZs ((a), (b) and (c)), fine grained(FG) HAZs ((d) and (e)), inter-critically reheated(IR) HAZ (f) and sub-critically reheated (SR) HAZ (g). All of the HAZs were subjected to post-weld heat treatment(PWHT)

명 주파수를 기초로 하여 실제 측정된 공명 주파수와와의 비교를 통하여 정확한 탄성계수를 추출해야 하는 데 컴퓨터 수치해석에서 널리 사용되는 Levenberg-Marquardt 법을 사용하여 다차원 탄성계수 공간에서 figure of merit의 최소값을 결정한다. 여기서 탄성계수의 초기 추정값이 가능한 한 실제와 근접해야 반복 계산 시에 빠르게 참값에 수렴할 수 있으며 계산으로 추정된 값과 측정값을 비교하여 시험편의 탄성계수를 구하였다.

원자로 압력용기강의 탄성계수 초기 추정치는 다음과 같은 방법으로 계산하였다.

- 1) $E = 207.200 - 57.09 T$ (GPa, $T = ^\circ C$)를 적용하여 [14], 25° C에서의 Young's modulus를 구하면,

$$E = 205.77275 \text{ Gpa}$$

- 2) 등방성 탄성계수 및 poisson's ratio $\nu = 0.30$ 로 가정하고 각각 shear modulus G , Lamé constant λ , elastic stiffness c_{11} , c_{12} , c_{44} 를 계산하면,

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = 79.143 \text{ GPa},$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} = 118.715 \text{ Gpa},$$

$$c_{11} = 2G + \lambda = 277.001 \text{ Gpa},$$

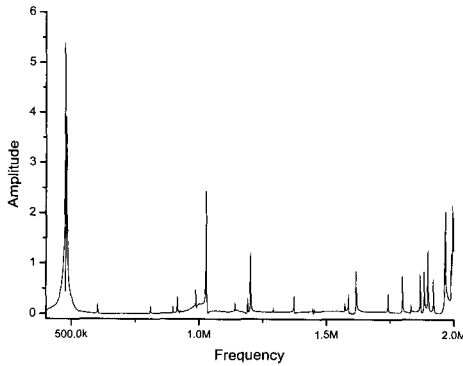


Fig. 3 Typical RUS Spectrum of SA508 Cl. 3 alloy

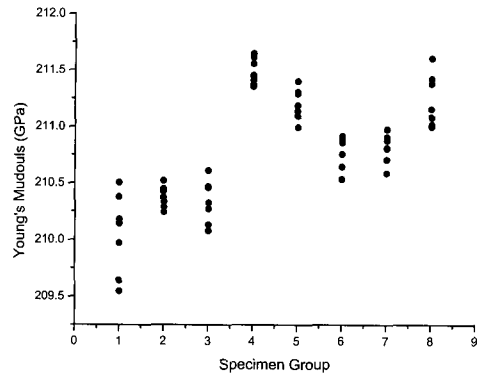


Fig. 4 Young's modulus of SA508 Cl. 3 alloy by RUS¹⁾

$$c_{12} = \lambda = 118.715 \text{ GPa},$$

$$c_{44} = \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) = 79.143 \text{ GPa}$$

이 되며 이 값들을 초음파공명분광법의 초기 추정 탄성계수로 입력하였다.

3. 실험결과 및 고찰

초기 추정 탄성계수 값을 기초로 초기 30개의 공명 주파수를 계산하였으며 이를 바탕으로 측정된 공명 주파수와 비교하여 각각의 공명 모드 (k) 및 공명 주파수를 일치시켰다. 계산된 공명 주파수와 상응하는 측정된 공명 주파수간의 오차를 최소화하기 위한 반복 계산을 통하여 정밀한 탄성계수, 시편 크기, 밀도 등을 구할 수 있다. SA 508 Cl. 3 장방형 재료에 대한 전형적인 초음파공명 분광 스펙트럼을 Fig. 3에 보였다. 모재를 포함하여 총 8 종류의 시편을 각각 4개씩 준비하여 상온에서 탄성 계수를 측정하였으며 계산된 공명 주파수와 측정된 공명 주파수간에 전체적인 평균 오차(RMS error)는 최소 0.07%, 최대 0.14%로 측정되었다. 일반적으로 평균 오차가 0.2% 이내이려면 신뢰성있는 데이터로 간주하는 데 비추어 본 실험 결과는 대단히 정밀한 측정이 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

Fig. 4 및 Fig. 5에 Young's modulus 및 shear modulus 값의 변화를 보였다. 각 시편에 대한 Young's modulus 와 shear modulus는 유사한 변화 양상을 보였다. 또한 Young's modulus의 초기 추정값과 실제 결과를 비교해 보면 205GPa 정도로 추정된 값이 초음파공명 분광법으로 측정된 경우에는 209~212GPa 정도로 약간

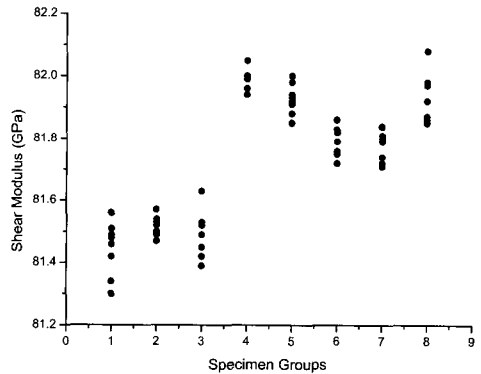


Fig. 5 Shear modulus of SA508 Cl. 3 alloy by RUS

높게 나타난다. 이것은 아마도 초음파를 사용하는 동적 탄성계수 값이 정적 기계 시험법으로 측정된 탄성계수 값보다 약간 높게 나타나는 일반적인 현상으로 해석할 수 있다.

한편 Fig. 4 및 Fig. 5에서 각각 시편에 대한 Young's modulus 및 shear modulus 결과를 분석해 보면 S1에서 S3까지 비슷하거나 약간 증가하는 경향을 보이며 S4에서 급격히 증가하고 S7까지 서서히 감소하다가 모재인 S8에서는 약간 증가하는 경향을 보이며 이 같은 경향은 Young's modulus나 shear modulus에서 모두 같은 경향이다. 여기서 S1~S3은 모두 1350℃에서 1차 열처리하여

- S 1: 1350C-1350C,
- S 2: 1350C-900C,
- S 3: 1350C-750C,
- S 4: 900C-900C,
- S 5: 900C-750C,
- S 6: 750C-750C,
- S 7: 680C-680C,
- S 8: raw material

결정립을 조대화시킨 뒤 2차 열처리에서 그대로 유지되거나(S1), 재변태(S2), 또는 일부 재변태된(S3) 조직이다. 한편 S4~S5는 900°C에서 1차 열처리하여 결정립을 미세화시킨 뒤 2차 열처리에서 그대로 유지되거나(S4), 부분 변태(S5)된 조직이며 S6~S7은 750°C에서 1차 열처리하여 부분 변태된 조직을 2차 열처리에서도 동일한 영향을 받거나(S6), 변태가 되지는 않았지만 tempering 등의 열 영향을 받은 조직 (S7)이다. 최종적인 미세 조직의 구성을 Table 2에 보인 바와 같다. 이러한 미세 조직의 차이를 탄성계수와 연관지어 보면 tempered martensite(S1

~S3) 보다는 tempered bainite(S4~S8)의 탄성계수 값이 높다. 또한 비슷한 tempered bainite 조직에서도 미세한 grain일수록 탄성계수 값이 높다. 즉 S4의 탄성계수가 가장 높고 S5, S6, S7 순으로 낮아진다. 한편 tempered martensite(S1~S3)의 탄성계수는 결정립 크기에 대해서 약간 변화가 있거나 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한 본 실험 결과는 철강 조직의 탄성 계수가 pearlite-bainite-martensite의 순서로 감소하며 tempered martensite에서는 다시 증가하나 pearlite의 경우를 증가하지 못한다고 보고된 것과[15] 일치한다.

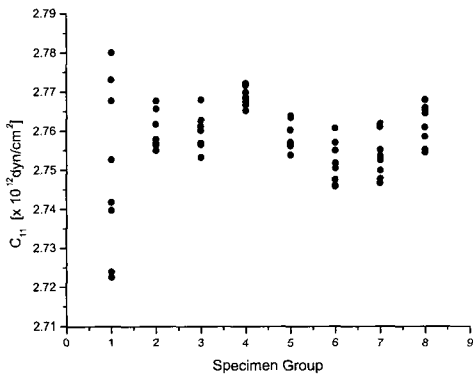


Fig. 6 Elastic stiffness (c_{11}) of SA508 Cl. 3 alloy by RUS/

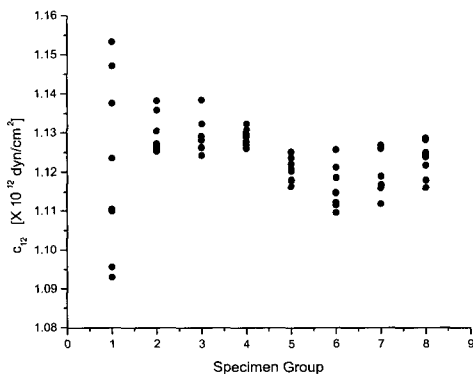


Fig. 7 Elastic stiffness (c_{12}) of SA508 Cl. 3 alloy by RUS

- S 1: 1350C-1350C,
- S 2: 1350C-900C,
- S 3: 1350C-750C,
- S 4: 900C-900C,
- S 5: 900C-750C,
- S 6: 750C-750C,
- S 7: 680C-680C,
- S 8: raw material

Fig. 6 및 Fig. 7에 각각 시편에 대한 c_{11} 및 c_{12} 값을 표현하였다. 여기서 특기할 만한 점으로 다른 시편들과는 달리 S1에 대한 c_{11} , c_{12} 값이 심하게 scattering하고 있는 데 이에 대한 원인은 분명치 않다. 또한 Young's modulus가 specimen group에 따라 뚜렷한 차이를 보이는 반면 이에 상응하는 c_{11} 은 다른 경향을 나타냈다. 이는 stiffness 행렬, c_{ij} 에서 off-diagonal 항인 c_{12} 의 영향 때문으로 Young's modulus, E는 c_{ij} 의 역행렬인 S_{ij} 를 계산한 뒤 $E=1/S_{11}$ 으로 계산하므로 만약 $c_{12} \neq 0$ 인 경우 c_{11} 과는 다른 값이 계산될 수 있다. c_{44} 는 shear modulus(Fig. 5)와 동일하므로 별도 그림으로 나타내지 않았다.

초음파 공명분광법으로 탄성계수의 측정 이외에도 공명 데이터를 이용하여 속도를 계산할 수 있는데 Fig. 8 및 Fig. 9에 각각 시편에 대한 종파 및 횡파 속도의 변화를 보였다. 앞서 c_{11} 및 c_{12} 에서와 유사하게 S1에서의 음속이 심하게 scattering하고 있는 데 이는 매질 내에서 초음파의 속도는 기본적으로 탄성계수, 밀도와 관련되기 때문이다. 한편 종파 속도는 각각 시편에 대해서 비교적 큰 변화가 없으나 횡파 속도는 시편 S1에서 S7으로 갈수록 속도가 증가하는 경향을 보였다. 열처리 정도에 따라 내부 응력이 이완되며 이에 따라 음속이 증가하는 데 이에는 1) martensite의 tetragonality의 감소 및 소멸, 2) 전위 감소, 3) carbide 입자의 성장 및 구상화 등을 고려할 수 있다[16]. 따라서 martensite 조직보다는 bainite 조직으로 갈수록, 결정립의 크기가 감소할수록 음속이 증가하였으며 모재인 S8은 S7과 유사한 tempered bainite 조직이지만 결정립이 약간 크기 때문에 음속이 감소하였다고 판단된다. 한편 종파 속도가 미세 조직의 차이에 대해서 민감하지 않은 것은 채택된 30개 공명 주파수가 대부분 c_{44} 에 민감한 주파수이기 때문이라고 판단된다.

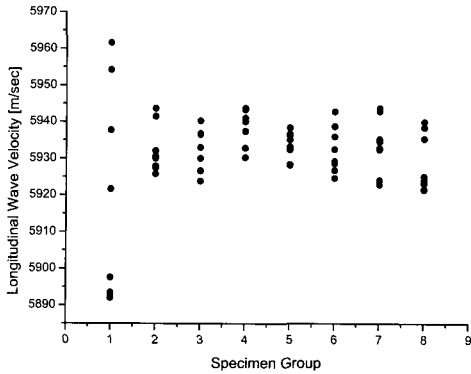


Fig. 8 Longitudinal wave velocity of SA508 Cl. 3 alloy by RUS²⁾

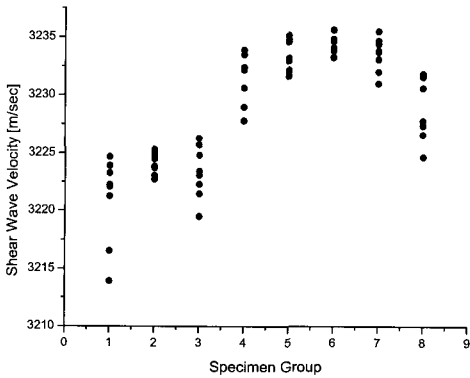


Fig. 9 Shear wave velocity of SA508 Cl. 3 alloy by RUS

초음파 속도는 재료의 미세 구조와 lattice distortion, 즉 결정립의 크기 및 형상, 잔류 응력 등에 관련된다. Palanichamy 등은[17, 18] 오스테나이트 스테인레스강을 냉간 가공한 뒤 이를 회복, 재결정 단계를 거치면서 종파와 횡파의 속도를 측정하고 회복 단계에서 재결정 단계로 넘어감에 따라 횡파 속도는 증가하고 종파 속도는 감소하며 여기서 횡파 속도 증가는 회복 단계에서 lattice distortion, 점 결함, 전위 등이 감소하기 때문이라고 보고하였다. 한편 Ahn 등은[19] 저탄소강에서 초음파 속도와 결정립 크기, 항복 강도 등과의 관계를 실험한 결과 특별한 관계를 발견할 수 없었는데 그 이유로 bainite나

martensite 계에서 결정립의 크기는 상변태 이전에 조대한 austenite 결정립 크기와 관련지을 수 있는 데 실제로 bainite나 martensite 조직은 내부에 수많은 sub-grain들로 구성되기 때문이라고 하였으며 따라서 결정립 크기를 고려하는 것보다는 각 조직에 따른 특성으로 해석하는 것이 타당하다고 하였다. 즉 저탄소강을 열처리할 경우 발생하는 ferrite+pearlite 조직, ferrite+pearlite+bainite 조직, bainite+martensite 조직 등과 같은 조직에 따라 우선적으로 구별하고 이차적으로 결정립 크기를 고려하는 것이 타당하다. 본 실험과 유사한 초음파 속도 실험[20]에서도 retained austenite+martensite 상에서 현저히 낮은 값을 나타내고 martensite 상, martensite +bainite 상, ferrite+pearlite+bainite 상, ferrite+pearlite 상의 순서로 증가한다고 보고하였는데 본 실험 결과도 유사한 경향을 보인다.

본 연구를 통하여 종래에는 불가능하였던 용접부의 국부적인 탄성계수의 측정이 초음파 공명분광법을 통하여 가능할 뿐만 아니라 탄성계수가 미세 조직의 차이에 대해서 대단히 민감함을 보여주었다. 앞으로 이 방법은 원자로 압력용기 재료의 중성자 조사에 의한 취화 현상을 규명하는 데 적용할 수 있을 것으로 기대되며 고온 및 저온 실험을 통하여 재료의 온도에 따른 탄성계수 변화, 온도에 따른 지르코늄 합금의 한계수소 고용도(Terminal Solid Solubility: TSS) 정밀 측정 등 다양한 응용이 가능할 것이다. 특히 기계시험법으로는 구할 수 없었던 국부적인 탄성계수 변화는 물론 이방성 재료의 방향에 따른 각종 이방성 탄성계수 및 각 방향에 따른 초음파 속도 등도 한꺼번에 구할 수 있으므로 원자로 압력용기 재료의 기본 물성, 특히 용접부의 위치에 따른 탄성계수는 향후 원자로 설계, 수명 예측 등에 기본 자료로 사용될 수 있을 것이다.

4. 결 론

1. 초음파 공명분광법을 적용하여 원자로 압력용기 재료인 SA 508 Cl. 3 용접부의 각 부분을 재현한 시험편에 대해서 등방성을 가정하고 동적 탄성계수를 측정하였으며 측정된 동적 Young's modulus 209~212GPa로 정적인 초기 추정값인 205GPa 보다 약간 높았다.

2. 초음파 공명분광법으로 측정된 탄성계수는 재료 미세 조직에 대단히 민감함을 보여주었으며 tempered martensite 조직보다 tempered bainite 조직의 탄성계수가 높았고, 유사한 미세 조직에서는 결정립이 작을수록 탄성계수가 증가하였다.

S 1: 1350C-1350C,
 S 2: 1350C-900C,
 S 3: 1350C-750C,
 S 4: 900C-900C,
 S 5: 900C-750C,
 S 6: 750C 750C,
 S 7: 680C-680C,
 S 8: raw material

3. 초음파 공명분광법으로 측정된 종파 속도는 시편의 차이에 대해서 큰 영향이 없었으나 횡파 속도는 결정립의 크기가 감소할수록, martensite 조직보다는 bainite 조직으로 갈수록 음속이 증가하였다.
4. 초음파 공명분광법을 이용하여 재료의 중성자 조사 취화 효과, 온도에 따른 탄성계수 변화, 지르코늄 합금의 온도에 따른 한계수소 고용도(Terminal Solid Solubility: TSS)의 정밀 측정 등 다양한 응용이 가능하며 특히 기계시험법으로 불가능한 국부적인 탄성계수 및 이방성 재료의 탄성계수를 쉽게 구할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력연구소 원자력기반연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 문종걸, 김주학, 홍준화, 이창희, "용접열 사이클 최고 온도가 원자로 압력용기강의 IRHAZ 의 미세 조직과 기계적 특성에 미치는 영향, 대한금속학회지, Vol. 37, No. 8, pp. 1000-1007, (1999)
- [2] 김주학, 윤의박, "SA 508 Cl. 3 원자로 압력용기강 단위 열 영향부의 노치 인성과 미세 조직 변화", 대한금속학회지, Vol. 36, No. 8, pp. 1329-1337, (1998)
- [3] A. Miglioli, W. M. Visscher, S. E. Brown, Z. Fisk, S. -W. Cheong, B. Alten, E. T. Ahrens, K. A. Kubat-Martin, "Elastic constants and specific-heat measurements on single crystals of La₂CuO₄", Phys. Rev. B, Vol. 41, No. 4, pp. 2098-2102, (1990)
- [4] J. D. Maynard, "The use of piezoelectric film and ultrasonic resonance to determine the complete elastic tensor in one measurement," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 91, No. 3, pp. 1754-1762, (1992)
- [5] R. Holland, "Resonant properties of piezoelectric ceramic rectangular parallelepipeds," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 43, No. 5, pp. 988-997, (1968)
- [6] H. H. Demarest, "Cube-resonance method to determine the elastic constants of solids," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 49, Vol. 3, Pt. 2, pp. 768-775, (1971)
- [7] I. Ohno, "Free vibration of a rectangular parallelepiped crystal and its application to determination of elastic constants of orthorhombic crystals," J. Phys. Earth, Vol. 24, pp. 355-379, (1976)
- [8] W. W. Visscher, A. Migliori, T. M. Bell, R. A. Reinert, "On the normal modes of free vibration of inhomogeneous and anisotropic elastic objects," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 90, No. 4, Pt. 1, pp. 2154-2162, (1991)
- [9] A. Migliori, J. Sarrao, "Resonant ultrasound spectroscopy," John Wiley & Sons Inc., (1997)
- [10] Y. -M. Cheong, S. -C. Kwon, H. -K. Jung, "Determination of anisotropic elastic moduli of Zr-2.5Nb CANDU pressure tube materials," J. Mater. Sci., Vol. 35, No. 5, pp. 1195-1200, (2000)
- [11] 정용무, 권상철, 김영석, 정현규, "초음파공명분광법을 이용한 Zr-2.5Nb 합금의 이방성 탄성계수 측정", 한국비파괴검사학회 '99춘계학술발표회 논문집 pp. 13 (1999.5.7)
- [12] ASME B & PV Code Sec. II, Part A, SA 508 (1995).
- [13] A. Migliori, J. Sarrao, "Resonant ultrasound spectroscopy," John Wiley & Sons Inc., (1997)
- [14] D. R. Ireland, W. L. Server, R. A. Wullaert, ETI Technical Report No. 75-43, pp.5-10, (1975)
- [15] E. P. Papadakis, "Ultrasonic attenuation and velocity in three transformation products in steel," J. Appl. Phys., Vol. 35, No. 5, pp. 1474-1482, (1964)
- [16] R. Prasad, S. Kumar, "An investigation into the ultrasonic behavior of cast and heat-treated structures in steel," British J. NDT, Vol. 33, No. 10, pp. 506-509, (1991)
- [17] P. Palanichamy, M. Vasudevan, T. Jayakumar, S. Venugopal, B. Raj, "Ultrasonic velocity measurements for characterizing the annealing behavior of cold worked austenitic stainless steel," NDT&E Int., Vol. 33, pp. 253-259, (2000)
- [18] P. Palanichamy, A. Joseph, T. Jayakumar, B. Raj, "Ultrasonic velocity measurements for estimation of grain size in austenitic stainless steel," NDT&E Int., Vol. 28, No. 3, pp.179-185, (1995)
- [19] B. -Y. Ahn, S. S. Lee, S. T. Hong, H. C. Kim, S. -J. L. Kang, "Application of the acoustic resonance method to evaluate the grain size of low carbon steel," NDT&E Int., Vol. 32, pp. 85-89, (1999)
- [20] 이승석, 안봉영, 민운식, 남영현, 이재열, "재료 물성의 비파괴 평가법", 한국표준과학연구원, 연구보고서 pp. 27, (1995)