

2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

초음파공명분광법을 적용한 SA 106 Gr. B 재료의 음속의 온도의존성

Temperature Dependency of Ultrasonic Velocity of SA 106 Gr. B Material Using Resonant Ultrasound Spectroscopy

정용무, 정현규

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

이경수

한국전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-17

요 약

중수로 피더관으로 사용되는 SA 106 Gr. B 재료의 고온 탄성계수 및 음속을 고온 초음파공명분광법으로 측정하였다. 소형 가열로에 알루미나 wave guide와 광대역 초음파 탐촉자를 사용하여 초음파 에너지를 시편에 가하고 시편의 공명 주파수를 측정하였다. SA 106 Gr. B 재료에 대해 등방성을 가정하고 c_{11} , c_{12} 및 c_{44} 의 초기 추정치를 계산하였으며 치수 및 밀도를 고려하여 장방형 시편의 공명주파수를 계산하였다. 상온~300°C 구간에서 초음파공명분광법으로 측정한 공명주파수와 비교, 수렴 과정을 거쳐서 정밀 탄성계수를 계산하였다. 탄성계수 텐서, c_{ij} 는 모두 온도가 증가함에 따라 선형적으로 감소하며 Young's modulus 와 shear modulus 의 온도 의존성을 정밀 계산하였다. 상온~300°C 구간에서 초음파 음속도 온도가 증가함에 따라 선형적으로 감소하였으며 종파 속도 및 횡파 속도의 온도 의존성을 정밀 계산하였다. 상온과 300°C 간에 3.1% 의 종파 속도 차이가 나타나므로 실시간 두께 측정 시 이를 보정해 주어야 한다.

Abstract

The dynamic elastic constants of the feeder pipe materials were determined by a high temperature resonant ultrasound spectroscopy (RUS). The resonance frequencies were measured using a couple of Alumina wave guides and wide-band ultrasonic transducers into a small furnace. The resonance frequencies of rectangular parallelepiped specimen 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 resonance frequencies with the measured frequencies by RUS, very accurate elastic constants of SA 106 Gr. B material were determined by iteration and convergence processes. As the temperature increases, the Young's modulus and shear modulus decreases linearly. The ultrasonic velocities also decreases as increasing temperature in the range of room temperature~300°C. The temperature dependency of longitudinal wave velocity and transverse wave velocity were calculated accurately. The difference of 3.1% of longitudinal wave velocity between room temperature and

300°C should be calibrated when measuring the thickness of the feeder pipe at 300°C.

1. 서론

중수로 원전의 피더관은 압력관의 형태로 원자로에 냉각수를 공급 및 회수하는 배관이다. 이 배관은 구조상 중수로 압력관에서 헤더관까지 3-4 차례의 곡관부가 존재하는 데 냉간 굽힘 처리된 곡관부 가운데 첫 번째 및 두 번째 곡관부에서 설계 예상치 보다 심한 감육이 진행되고 있음이 확인되었다. 출구 피더관 곡관부의 감육 현상은 1995년 캐나다 Gentely 원전과 Pt. Lepereau 원전에서 보고되기 시작하였고 1996년도에 월성 1호기도 두께 측정 결과 감육 현상이 확인되었다. 1996년 12월에는 Pt. Lepereau 원전의 출구 피더관 S-08의 첫 번째 곡관부에서 균열로 인해 냉각재가 누설되는 사건이 발생하였다.

중수로 원전의 가동중검사 요건인 CAN/CSA N285.4에는 가동중검사 대상으로서 원자로 냉각재 피더관을 포함하고 있으나 모든 중수로 원전이 '95년 이전까지는 입구 상부 피더관을 검사 대상으로 선정하고 출구 피더관에 대해서는 검사를 수행하지 않았다. 그러나 출구 피더관의 감육 현상이 보고된 이후 캐나다 원자력 공사(AECL)에서는 '96년도에 가동중인 중수로 원전에 대해서 원자로 냉각재 피더관 출구 곡관부에 대해 두께 측정을 권고하는 Information Bulletin 96-2를 발행하였다[1]. 피더관 곡관부의 두께는 초음파 검사법을 사용하여 측정하는 데 배관 내면과 외면에서 반복 반사하는 초음파 에코의 시간 차이를 측정한 뒤 초음파 속도를 고려하여 결정한다. 여기서 배관의 두께를 실시간에 측정하기 위해서는 정확한 음속을 알고 있어야 하는 데 운전 온도인 ~316°C 에서의 음속 정보가 사전에 필요하다. 그러나 이 온도는 압전 소자가 Curie 온도보다 높으므로 초음파 센서의 특징을 상실한다. 일반적으로 고온 초음파 실험을 위해서는 wave guide 를 사용하고 있으나 정밀도 측면에서 떨어지는 측면이 있다. 본 연구에서는 비교적 간단하게 고온에서 음속을 정밀하게 측정하기 위하여 최근에 개발된 초음파공명분광법을 적용하여 중수로 원전 피더관의 음속의 온도의존성을 측정하고자 한다.

초음파공명분광법은 1990년대에 재료의 탄성계수 및 비파괴검사를 위해서 개발된 기술인 데 특히 복합재료나 집합조직 (texture)를 갖는 금속과 같은 이방성 재료에 대한 탄성계수를 소형 시편을 사용하여 비교적 손쉽게 측정할 수 있다[2]. 이러한 장점 때문에 일반적인 등방성 금속은 물론 대칭성이 낮은 단결정이나 집합조직을 갖는 다결정 재료의 이방성 탄성계수를 측정하는 것이 가능하다. 그러나 정밀 탄성계수 측정을 위해서는 1) 시편의 크기 및 형상을 정밀 가공하여야 하고, 2) 실제 값과 근접한 초기 추정 탄성계수를 미리 알고 있어야 한다는 단점도 있다. 이것은 추정 탄성계수, 시편의 치수, 밀도를 사용하여 계산된 공명 모드 및 공명 주파수와 실제 측정된 공명 모드 주파수가 거의 일치하여야 반복 알고리즘에 의해서 탄성계수 값이 수렴하며 오차가 낮은 정밀 탄성계수의 계산이 가능하기 때문이다.

초음파 공명분광법으로 다양한 재료의 탄성계수를 측정한 바 있는 데[3-6] 본 논문에서는 고온 초음파공명분광 장치를 사용하여 온도에 따른 정밀 탄성계수 값을 측정하고 이를 바탕으로 온도에 따른 음속 변화를 정밀하게 계산하여 실제 중수로 피더관의 실시간 두께 감육 측정을 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1. 실험 재료

실제 중수로 원전 피더관 (ASTM A106 Grade B Seamless carbon steel pipe for high temperature service) 을 사용하였으며 합금의 화학성분 및 재료물성은 Table 1, 2와 같다.

2.3. 고온 탄성계수 및 음속 결정

초음파공명분광법은 고체의 진동 모드, 또는 공명이 물질의 미시적, 거시적 특성에 대해서 대단히 민감하여 정밀한 탄성계수, 초음파 감쇠 등을 측정할 수 있다는 특성 때문에 1990년대에 들어오면서 재료 물성 평가, 비파괴평가에 적용되기 시작하였다[7]. 밀도, 치수, 탄성계수를 알고 있는 고체의 공명주파수를 계산하기 위한 자유 진동 문제에 대한 완벽한 해석적 해는 아직까지 존재하지 않으며 비해석적인 방법으로 수치해석법 (유한요소법)이나 에너지 최소화법을 사용하여 근사 해를 구할 수 있다. 역사적으로 초음파공명분광 이론은 지질학에 근거를 두며 구형체의 자유 진동에 대한 연구에서 시작되었는데 중심적인 이론은 J. D. Maynard[8]에 의해서 전개되었으며 Holland[9]와 Demarest[10]는 탄성적으로 등방성인 직육면체에 공명을 이론적으로 계산하고 이를 실험적으로 측정하였으며 이 결과들은 Ohno[11]에 의해서 일반화되었다. 이와 같은 결과들을 종합하여 Visscher et al.[12]이 고체 물리 분야에서의 응용을 목적으로 완성하였다.

초음파공명분광법을 사용한 탄성계수 측정 과정은 우선 시편의 치수, 밀도, 추정 탄성계수를 가지고 추정 고유주파수 또는 공명주파수를 계산한다[1]. 계산된 공명주파수를 기초로 하여 실제 측정된 공명주파수와 비교를 통하여 정확한 탄성계수를 추출해야 하는 데 컴퓨터 수치해석에서 널리 사용되는 Levenberg-Marquardt법을 사용하여 다차원 탄성계수 공간에서 figure of merit가 최소화하도록 반복 계산하여 참값에 수렴하도록 하여 정밀 탄성계수를 구한다.

중수로 피더관 SA 106 Gr. B 재료의 탄성계수 초기 추정치는 다음과 같은 방법으로 구하였다. 등방성 탄성계수 $E = 203 \text{ GPa}$ 및 poisson's ratio $\nu = 0.30$ 으로 가정하고 각각 shear modulus G , Lamé constant λ , elastic stiffness, c_{11} , c_{12} , c_{44} 를 계산하면,

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 78.08 \text{ GPa}$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} = 117.12 \text{ GPa}$$

$$c_{11} = 2G + \lambda = 273.28 \text{ GPa}$$

$$c_{12} = \lambda = 117.12 \text{ GPa}$$

$$c_{44} = \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) = 78.08 \text{ GPa}$$

이 되며 이 값들을 초음파공명분광법에서 초기 추정 입력값으로 사용하였다. 초음파공명분광법으로 계산된 elastic stiffness, c_{11} , c_{12} , c_{44} 의 역행렬을 취하여 elastic compliance S_{11} , S_{12} , S_{44} 를 계산한 뒤 young's modulus $E = 1/S_{11}$, shear modulus $G = 1/S_{44}$ 로 계산한다.

한편 음속은 다음 식에 의해서 구할 수 있다.

$$v_L = \sqrt{c_{11} / \rho} \quad (1)$$

$$v_T = \sqrt{c_{44} / \rho}. \quad (2)$$

여기서 v_L , v_T 은 각각 종파 및 횡파의 음속이며 ρ 는 재료의 밀도이다.

고온 초음파공명분광 실험을 위하여 Fig. 1과 같은 장치를 제작하였다. 초음파 공명분광 시스템은 기본적으로 연속적인 주파수를 발생시키는 synthesizer, 발생된 신호를 초음파 에너지로 변환하여 시편에 가해주는 송신용 광대역 초음파 센서와 수신용 초음파 센서 및 제어용 PC로 구성된다. 여기에 고온 탄성계수를 측정하기 위하여 소형 가열로 및 온도 제어 장치를 부착하였다. 초음파 센서로 사용되는 압전 소자는 Curie온도 이상에서는 압전 성질을 잃어버리므로 Fig. 1과 같이 알루미늄나 봉을 wave guide로 사용하여 furnace 내에 시편에 초음파가 전달되도록 하였다. 시편을 지지하는 힘은 스프링으로 제어하도록 하였으며 자유로운 시편 진동을 유지하기 위하여 가능한 한 작은 힘 ($< 0.1N$) 이 시편에 가해지도록 하였다. 소형 가열로는 $1000^{\circ}C$ 까지 가열할 수 있도록 설계하였으나 원자로 운전 온도인 상온~ $300^{\circ}C$ 범위에서 동적 탄성계수 및 음속을 측정하였다.

사용된 시편은 $2.5\text{ mm} \times 3.0\text{ mm} \times 3.5\text{ mm}$ 크기의 장방형 시편을 정밀 가공하였다.

본 시편에 대한 초기 30개 공명주파수는 대략 $300\sim 900\text{ kHz}$ 에 존재하는 데 이들을 정밀 측정하여 탄성계수 계산에 사용하였다. Fig. 2에 전형적인 초음파공명분광 스펙트럼의 예를 보였다. 초기 30개의 계산된 공명 주파수와 측정된 공명 주파수 및 각각의 공명 모드 (k), 측정치와 계산치의 오차, 각 공명 주파수의 특정 모드 의존성, 탄성계수 텐서 값, 시편 크기, 무게, 밀도 등을 알 수 있으며 Table. 1에 계산 사례를 보였다. 보다 정밀한 계산을 위하여 온도에 따른 열팽창에 따른 치수 변화 및 밀도 변화를 반영하여 탄성계수를 계산하였다. 일반적으로 실험의 정밀도는 RMS error값으로 판정하며 보통 0.2% 이하라야 유효한 실험으로 간주하는 데 본 실험의 경우는 대부분 0.1% 이하로 계산되었으므로 매우 정밀한 결과로 받아들여진다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 중수로 피더관 재료의 탄성 계수의 온도 의존성

상온~ $300^{\circ}C$ 범위에서 SA 106 Gr. B 피더관 재료의 탄성계수를 측정하여 Figs. 3~4에 각각 c_{11} , c_{44} 의 온도 의존성을, Figs. 5~6에 각각 Young's modulus, E 와 shear modulus, G 의 온도 의존성을 표현하였다. 탄성계수는 온도가 증가함에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 나타냈으며 Fig. 5에서 Young's modulus의 온도 의존성은 $E(GPa) = 215.47 - 0.06598T(^{\circ}C)$ 로 계산되어 상온($25^{\circ}C$)에서 $E = 214\text{ GPa}$ 이고 $300^{\circ}C$ 에서 $E = 196\text{ GPa}$ 로 차이는 약 18 GPa 이다. Shear modulus의 온도 의존성은 Fig. 6에서 $G(GPa) = 83.68 - 0.0269T(^{\circ}C)$ 로 계산되며 상온에서 $G = 83\text{ GPa}$, $300^{\circ}C$ 에서 $G = 76\text{ GPa}$ 로 계산된다. 초기에 탄성계수 추정치와 비교해 보면 초기 Young's modulus 추정치 $E = 203\text{ GPa}$ 에 비해 높게 나타났다. 이것은 Shear modulus의 경우에도 유사하게 초기 추정치 $G = 78\text{ GPa}$ 에 비해 약간 높게 나타났는데 이렇게 된 이유는 초음파를 사용하여 측정한 동적 탄성계수 값이 물리적인 정의에 입각한 탄성계수를 의미하는 데 반해 초기 추정치로 사용한 정적 탄성계수는 약간의 소성이

포함된 상태로 측정된 탄성계수이기 때문이라고 판단된다.

3.2. 중수로 피더관 재료의 음속의 온도 의존성

초음파 공명분광법으로 탄성계수의 측정 이외에도 초음파 속도를 계산할 수 있다. 앞서 측정한 탄성계수 c_{11} , c_{44} 값을 기초로 상온~300°C 범위에서 SA 106 Gr. B 피더관 재료의 음속을 계산하여 Fig. 7에는 종파의 온도 의존성을 Fig. 8에는 횡파 속도의 온도 의존성을 보였다.

탄성계수의 경우와 마찬가지로 초음파 속도도 온도가 증가함에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 나타냈다. Fig. 7에서 초음파 종파 속도의 온도 의존성은 $v_L(m/sec) = 5981.93 - 0.67315T(^{\circ}C)$ 로 계산되어 상온(25°C)에서 $v_L = 5965 m/sec$ 인 데 반해 300°C에서 $v_L = 5780 m/sec$ 로 음속의 차이는 약 185 m/sec 이다. 횡파 속도의 온도 의존성은 Fig. 8에서 $v_T(m/sec) = 3267.22 - 0.48513T(^{\circ}C)$ 로 계산되어 상온(25°C)에서 $v_T = 3255 m/sec$ 인 데 반해 300°C에서 $v_T = 3122 m/sec$ 로 음속의 차이는 약 133 m/sec 이다.

피더관의 감속 상태를 연속 감시하기 위해서 초음파 방법으로 두께를 측정할 경우 운전 온도인 300°C에서의 정확한 음속 값을 알고 있어야 신뢰성있는 측정이 가능하다. 예를 들어 상온과 300°C에서의 종파 속도 변화율을 계산해 보면 약 3.1%가 변화하며 이것은 다시 말해서 고온 두께 측정 시에 상온 음속 값을 적용하면 약 3.1%의 측정 오차가 발생한다는 것을 의미한다. 이는 2.5 inch 피더관의 공칭 두께 = 5.73 mm[23] 에 대해서 0.18 mm 의 오차가 발생할 수 있음을 의미한다. 본 자료는 앞으로 설치될 예정인 중수로 피더관의 상시 두께 측정 시스템[24] 에서 유용한 기초 물성 자료로 활용될 것이다.

4. 결론

중수로 피더관의 동적 탄성계수 및 음속의 온도 의존성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상온~300°C 구간에서 탄성계수는 온도가 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 나타냈으며 Young's modulus 의 온도 의존성은 $E(GPa) = 215.47 - 0.06598T(^{\circ}C)$, shear modulus 의 온도 의존성은 $G(GPa) = 83.68 - 0.0269T(^{\circ}C)$ 로 계산되었다.
2. 상온~300°C 구간에서 초음파 음속도 온도가 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 나타냈으며 종파 속도의 온도 의존성은 $v_L(m/sec) = 5981.93 - 0.67315T(^{\circ}C)$ 로 횡파 속도의 온도 의존성은 Fig. 8에서 $v_T(m/sec) = 3267.22 - 0.48513T(^{\circ}C)$ 로 계산되었다.
1. 초음파공명분광법으로 비교적 간단하게 탄성계수 및 음속의 계산이 가능하며 특히 본 실험 결과 피더관 연속 감시를 위해서 초음파법으로 두께를 측정할 경우 상온과 300°C 간에 3.1% 의 차이가 나타나므로 신뢰성있는 측정을 위해서 본 자료가 유용하게 사용될 것이다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구소 원자력기반연구 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. CANDU-6 Station Information Bullitin, 96-2 Feeder wall thickness measurements.
2. A. Migliori and J. Sarrao, "Resonant ultrasound spectroscopy", John Wiley & Sons Inc. (1997).
3. Y. M. Cheong, S. C. Kwon, H. K. Jung, J. Mater. Sci., 35 (2000) 1195-1200.
4. 정용무, 김주학, 홍준화, 정현규, 비파괴검사학회지, 20 (5) (2000) 390-396.
5. 정용무, 김성수, 안상복, 김영석, "Zr-2.5Nb 압력관 재료의 이방성 탄성 특성의 온도의존성", 한국원자력학회 2001 춘계학술대회 논문집 (2001).
6. Y. M. Cheong, S. S. Kim, Y. S. Kim, Rev. Prog. In Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 21, Brunswick, Maine, July 29-Aug. 3, 2001 (to be published).
7. A. Miglioli et al., Phys. Rev., 41 (4) (1990) 2098.
8. J. D. Maynard, J. Acoust. Soc. Am., 91 (1992) 1754.
9. R. Holland, J. Acoust. Soc. Am., 43 (1968) 988.
10. H. H. Demarest, J. Accoust. Soc. Am., 49 (1971) 768.
11. I. Ohno, J. Phys. Earth, 24 (1976) 355.
12. W. W. Visscher et al., J. Acoust. Soc. Am., 90 (1991) 2154.
- 13.
14. H. Ledbetter, ASTM STP 1045 (1990) 135-148.
15. Y. S. Kim et al., Development of zirconium alloys for pressure tubes, Final report, KAERI/RR-1766-96, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea, 1997.
16. S. S. Kim et al., internal experimental results.
17. R. R. Hasiguti, N. Igata, G. Kamoshita, Acta Met. 10 (1962) 442-447.
18. J. E. Doherty and D. F. Gibbons, J. Appl. Phys., 42 (11) (1971) 4502-4503.
19. F. Povolo and E. A. Bisogni, J. Nucl. Mater., 29 (1969) 82-102.
20. V. Provenzano, P. Schiller and A. Schneiders, J. Nucl. Mater., 52 (1974) 75-84.
21. V. S. Postnikov, in Internal friction in metals and alloys", ed. V. S. Postnikov, F. N. Tavazde, and L. K. Gordienko, (Translated from Russian) Consultants Bureau, New York (1967) 1-13.
22. E. S. Fisher and C. J. Renken, Phys. Rev. 135 (2A) (1964) A482-A492.
23. U. C. Lee, "Findings and recommendations for Wolsong NPP from special inspection", Proc. 2000 KAIF/KNS/CAN CANDU Seminar, June 29, 2000, Seoul, Korea (2000) 115.
24. 이경수, 정일석, 홍승열, "원전 탄소강 배관의 두께 측정을 위한 연속감시장치 개발", 한국원자력학회 2000 추계학술발표회 논문집 (2000).

Table 1. Chemical composition of the Feeder Pipe (SA 106 Grade B)

Element	C	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	V
Wt%	0.3	0.4	0.4	0.29 ~ 1.06	0.15	0.40	0.048	0.058	0.10	0.08

Table 2. Mechanical properties of the Feeder Pipe (SA 106 Grade B)

Tensile Strength [MPa]	Yield Strength [MPa]	Ductility [%]	
		Long. direction	Radial direction
415	240	22	12

Table 3. A typical example of RUS calculation for SA 106 Gr. B feeder pipe material

Specimen No.: A1063025								
n	mode, k	harmonics, I	fr,calc, MHz	fr,meas MHz	%error	% of modulus contributing to mode		
						c11	c12	c44
1	4	1	0.35970	0.35961	0.02	0.00		1.00
2	1	1	0.48251	0.48268	-0.03	0.10		0.90
3	4	2	0.49533	0.49621	-0.18	0.00		1.00
4	7	1	0.51086	0.51135	-0.10	0.14		0.86
5	8	1	0.54232	0.00000	0.00	0.02		0.98
6	2	2	0.58664	0.58670	-0.01	0.02		0.98
7	5	1	0.60219	0.60289	-0.12	0.03		0.97
8	6	1	0.61536	0.61512	0.04	0.09		0.91
9	1	2	0.61685	0.61653	0.05	0.31		0.69
10	3	1	0.61842	0.61897	-0.09	0.01		0.99
11	3	2	0.65417	0.65405	0.02	0.14		0.86
12	5	2	0.65895	0.66001	-0.16	0.04		0.96
13	2	3	0.68958	0.69010	-0.08	0.15		0.85
14	5	3	0.70640	0.70588	0.07	0.04		0.96
15	3	3	0.74061	0.73950	0.15	0.02		0.98
16	7	2	0.75158	0.75134	0.03	0.23		0.77
17	6	2	0.78077	0.78064	0.02	0.27		0.73
18	8	2	0.79106	0.79074	0.04	0.15		0.85
19	5	4	0.80922	0.81047	-0.15	0.37		0.63
20	4	3	0.82144	0.82012	0.16	0.07		0.93
21	1	3	0.83703	0.00000	0.00	0.12		0.88
22	6	3	0.84006	0.83996	0.01	0.03		0.97
23	2	4	0.84123	0.00000	0.00	0.03		0.97
24	5	5	0.84525	0.84529	0.00	0.34		0.66
25	7	3	0.84906	0.84889	0.02	0.07		0.93
26	7	4	0.89019	0.88857	0.18	0.16		0.84
27	8	3	0.90345	0.90322	0.03	0.01		0.99
28	6	4	0.90366	0.90322	0.05	0.19		0.81
29	1	4	0.91627	0.91591	0.04	0.06		0.94
30	6	5	0.94847	0.94863	-0.02	0.10		0.90
Elastic moduli (dynes x 10**-.12 / cm**2)						c11	c12	c44
						2.77440	0.82570	0.82570
Dimensions (cm)				initial	adjusted			
d1				0.300500	0.300240			
d2				0.350000	0.349190			
d3				0.400000	0.401270			
Mass (gm):			0.328920					
Density (gm/cm**3):			7.818398					
Iteration:			6					
RMS error [%]:			0.090200					

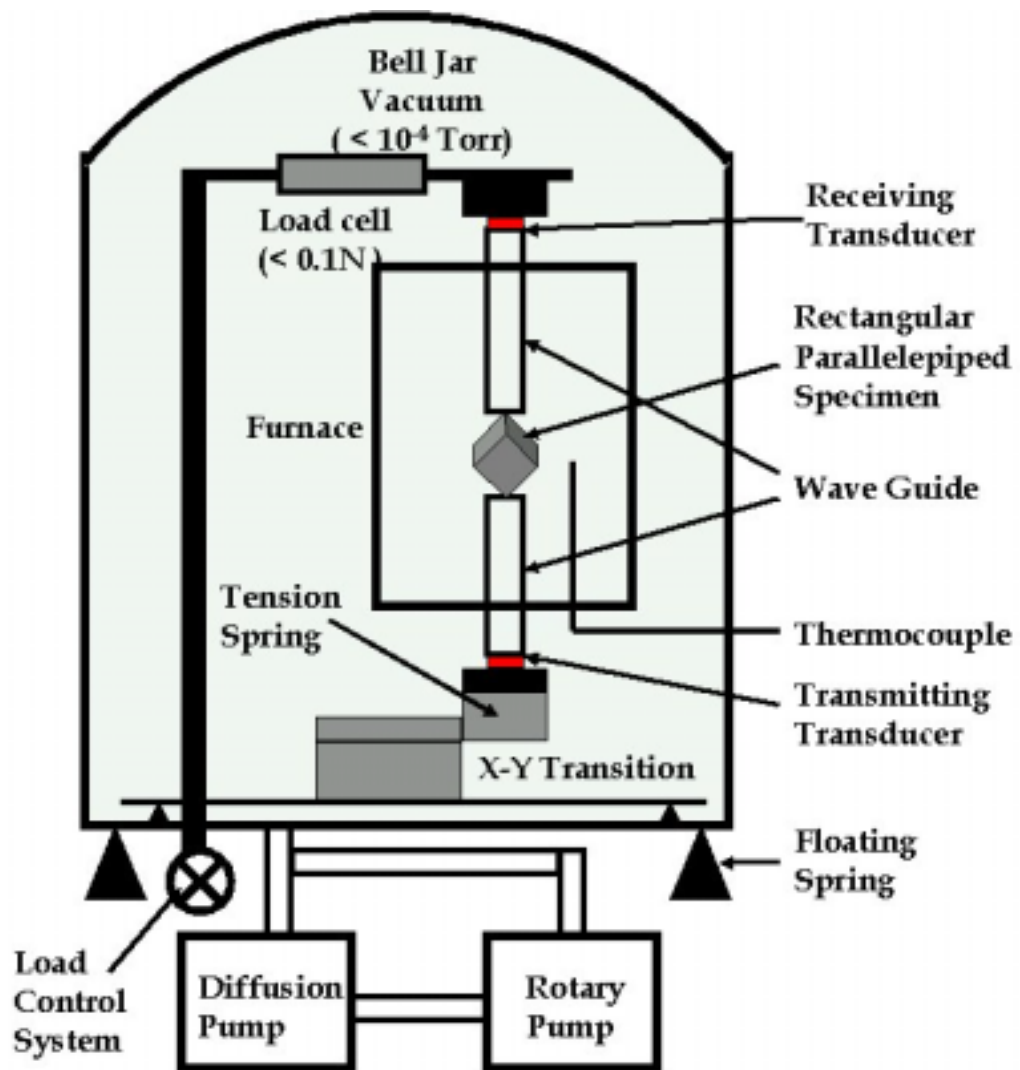


Fig. 1. A high temperature device for RUS experiment.

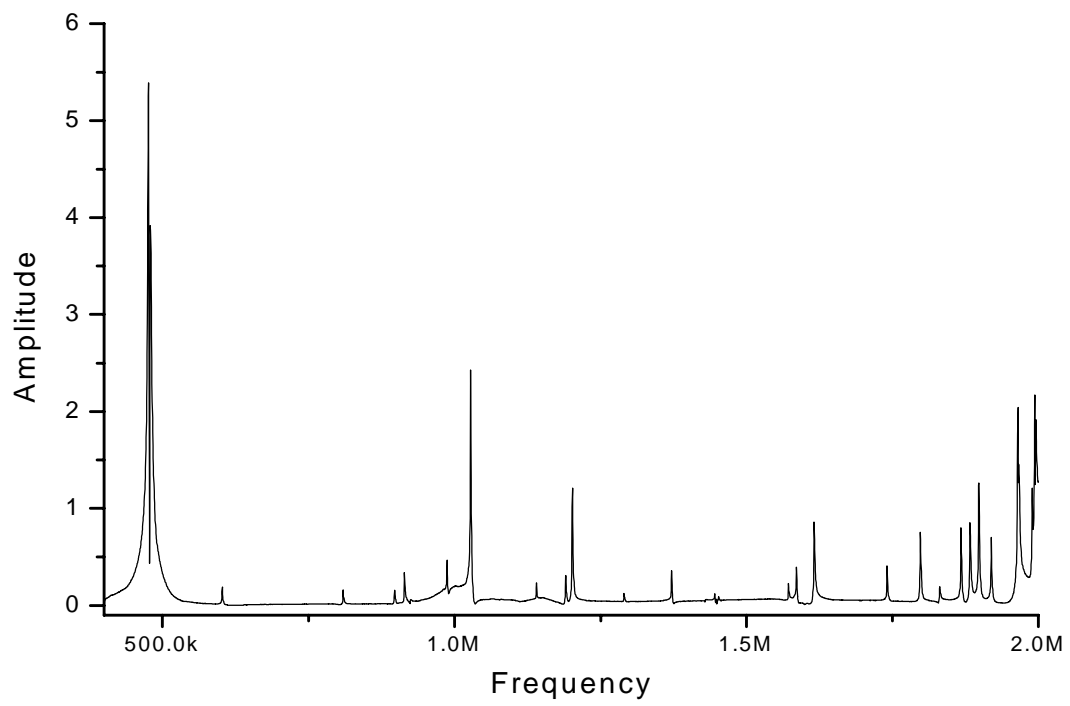


Fig. 2. Typical spectrum by resonant ultrasound spectroscopy.

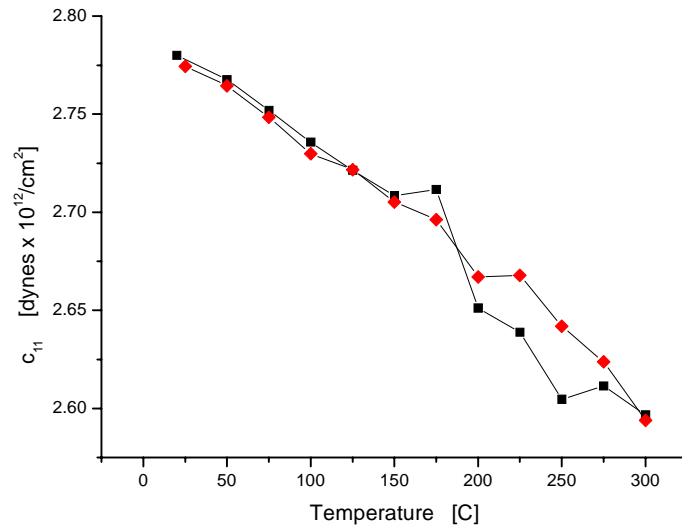


Fig. 3. Temperature dependence of elastic stiffness c_{11} of SA 106 Gr. B feeder pipe material.

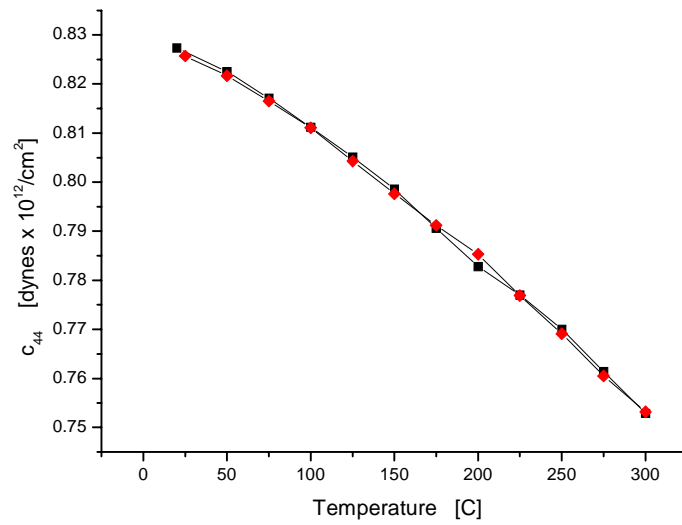


Fig. 4. Temperature dependence of elastic stiffness c_{44} of the SA 106 Gr. B feeder pipe material.

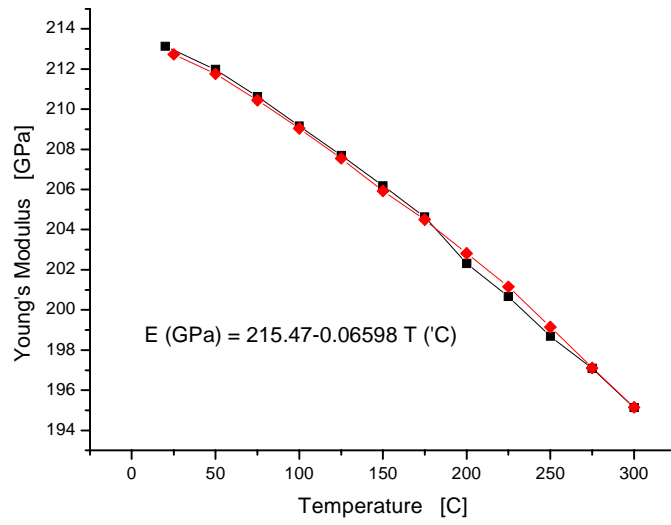


Fig. 5. Temperature dependence of Young's moduli of SA 106 Gr. B feeder pipe material.

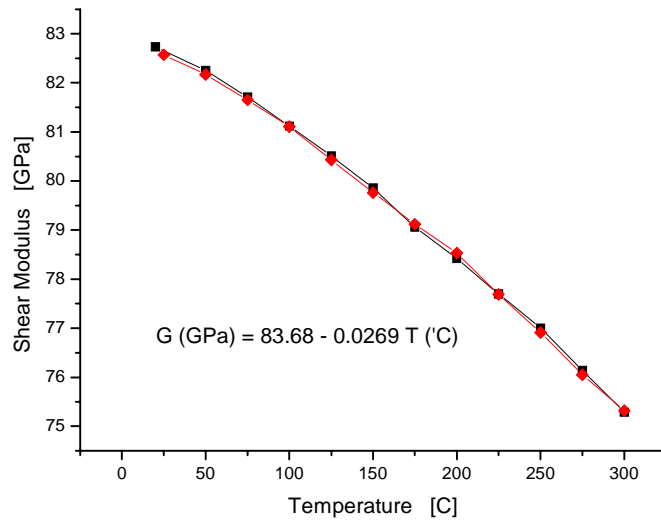


Fig. 6. Temperature dependence of shear moduli of SA 106 Gr. B feeder pipe material.

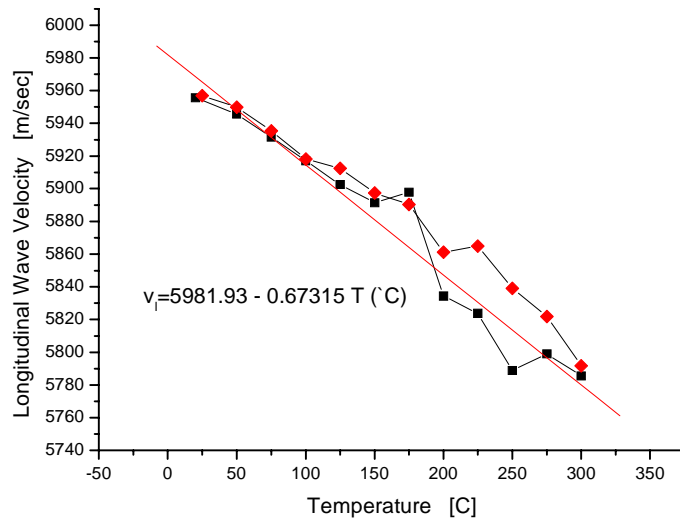


Fig. 7. Temperature dependence of longitudinal velocity of SA 106 Gr. B feeder pipe material.

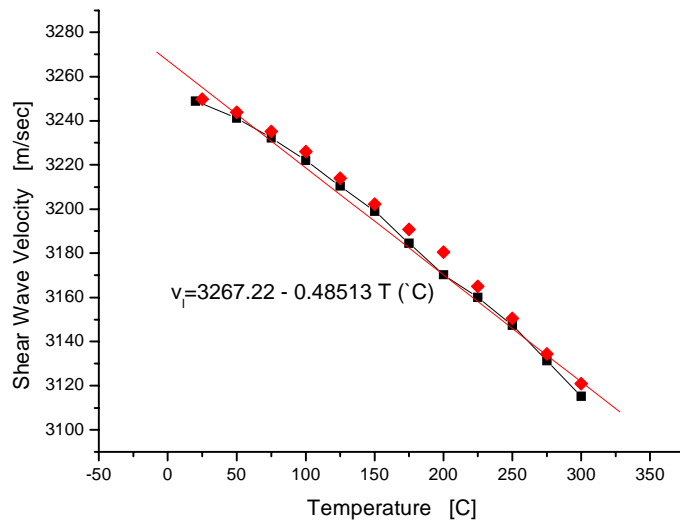


Fig. 8. Temperature dependence of longitudinal velocity of SA 106 Gr. B feeder pipe material.