



KR0100936

KAERI/RR-2077/2000

**초음파 공명분광법을 적용한 재료 물성 측정 기술
개발**

**Materials Characterization by Resonant Ultrasonic
Spectroscopy**

한국원자력연구소

32 / 48

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2000년도 “초음파공명분광법을 적용한 재료 물성 측정 기술” 과제의 연구보고서로 제출합니다.

2001. 1.

과 제 명 : 초음파공명분광법을 적용한 재료 물성 측정 기술

과 제 책 임 자 : 정 용 무

참 여 자 : 정 현 규

주 영 상

심 철 무

요 약 문

I. 제 목

초음파공명분광법을 적용한 재료 물성 측정 기술

II. 연구개발의 목적 및 필요성

초음파공명분광법은 다양한 응용 분야가 가능하며 특히 비파괴 재료 물성 평가는 물론 정밀 부품의 비파괴검사, 용기 내용물의 비파괴적 식별 등에 적용되고 있다. 특히 최근 수십 년간 원자력 재료의 비파괴적인 특성 평가, 특히 중성자 조사 취화에 의한 경년 열화 현상을 감시하기 위하여 모든 가능한 비파괴적인 기술이 시도된 바 있으나 어떤 방법도 만족할 만한 해답을 제시하지 못하고 있다. 따라서 종래의 전통적인 비파괴검사 기술을 적용하는 것은 이미 한계에 부딪혔다고 판단할 수 있으며 보다 민감한 비파괴 특성 평가기술을 개발할 필요성이 있다.

따라서 본 과제에서는 초음파공명분광법을 적용한 재료의 동적 탄성계수를 0.1% 이하로 정밀하게 측정하는 기술을 개발하며 기존 초음파공명분광시스템을 개선하여 고온 탄성계수 및 Q-factor를 측정할 수 있도록 함으로써 원자력 재료의 특성 평가 및 중성자 조사 취화를 비롯한 재료 내부의 미세적인 변화 및 열화 감시에 활용하고자 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 과제의 일차 년도에는 원자력 재료의 동적 탄성계수를 측정하기 위하여 열처리에 의해 다양한 미세 구조를 가진 원자로 용접부 재료들의 탄성계수를 측정하여 탄성계수가 미세 조직에 대해서 민감함을 확인하였으며 원자로 운전 환경에 대해서 고온 탄성계수 측정 장치를 개발하여 동적 탄성계수의 온도 의존성을 측정하였다.

IV. 연구개발 결과

고온 탄성계수 측정을 위한 초음파공명분광 시스템을 개발하였으며 이를 사용하여 다양한 미세 조직 변화를 갖는 원자로 용접부의 국부적인 동적 탄성계수를 측정하였다. 측정 결과는 대부분 RMS error가 0.07 - 0.10 %로써 이 방법의 신뢰성 한계인 0.2% 에 비교하면 매우 높은 신뢰성을 가진다고 판단된다.

V. 연구개발 결과의 활용 계획 및 건의 사항

초음파공명분광법으로 재료의 정밀 탄성계수 측정은 물론 미세적인 변화 (grain boundary, grain size, precipitation, defect, dislocation 등)를 감시하기 위한 Q-factor를 측정이 가능하다. 그러나 정확한 Q-factor 측정을 위하여 진공 시스템 및 초음파 센서 접촉 압력 측정 장치가 추가되어야 한다. 이러한 시스템이 완비되면 그 동안 어려웠던 이방성 재료의 탄성계수 측정은 물론 고온 탄성계수 및 Q-factor 측정을 통하여 원자력 재료의 중성자조사취화를 포함한 열화 감시에 활용될 수 있을 것이며 다양한 재료 물성 평가에 활용될 것이다.

S U M M A R Y

I. Project Title

Materials Characterization by Resonant Ultrasonic Spectroscopy Method

II. Objectives and Importance of the Project

For the several decades, various nondestructive methods have been applied to characterize microscopic variations in materials. However, it is not successful to give a satisfactory result to monitor the nuclear material degradation by neutron irradiation embrittlement. Therefore it is necessary to develop a more sensitive nondestructive characterization method. The resonant ultrasonic spectroscopy (RUS) can be a possible candidate for this purpose. The objective of the project is to develop the RUS technology to determine the dynamic elastic constants with an accuracy less than 0.1%. In addition, RUS technology can determine the high temperature elastic constant as well as Q-factor by an improvement of the present RUS system. This technology can also be applied to characterize the microstructural variations, such as material degradation including neutron irradiation embrittlement.

III. Scope and Contents of the Projects

The dynamic elastic constants of weld heat affected zone(HAZ) of SA 508 Class 3 reactor pressure vessel(RPV) steel, which has various different localized microstructures was investigated by RUS. A high temperature device for the RUS measurement was designed and fabricated. The high temperature elastic constants of the RPV steel was measured.

IV. Results and Proposal for Application

Through the measurement of elastic constants from the various localized microstructures we can confirm that the RUS method is very sensitive to the microstructure of the test materials. By comparing the RMS error of the range of 0.07 - 0.10 % for this measurement to the general limit of 0.2% for the effectiveness of the measurement, we can confirm the measurements were highly reliable.

RUS can also be used to measure Q-factor (mechanical damping) which related to the microstructural variations (grain boundary, grain size, precipitation, defects, dislocations etc.). In order to get an accurate measurement of Q-factor, environmental pressure and contact pressure between ultrasonic sensor and sample should be measured and controlled. Thus the vacuum system for the environment and a load cell to control contact pressure should be attached for accurate measurement of Q-factor. The complete RUS system can be used to determine the anisotropic elastic constant, temperature dependence and Q-factor. These capabilities will be useful to monitor the degradation of nuclear materials, including neutron irradiation embrittlement. In addition, RUS technology can be applied to various areas, such as the nondestructive identification of the fluid inside a vessel, nondestructive quality test for precision components as well as nondestructive materials characterization.

CONTENTS

Chapter 1 Introduction -----	1
Chapter 2 State-of-the-art -----	4
Section 1 State-of-the-art of similar research -----	4
1. Case of foreign countries -----	4
2. Case of domestic area -----	4
Section 2 Evaluation of the specific technologies -----	5
Section 3 Technical status of the Project -----	5
Chapter 3 Study results and discussion -----	7
Section 1 Theory of resonant ultrasound spectroscopy -----	7
1. Elastic constant of isotropic materials -----	7
2. Elastic constants of anisotropic materials -----	8
3. Calculation of resonance frequency -----	10
3.1 Minimization of the Lagrangian -----	12
3.2 Solution for rectangular parallelepiped shape -----	17
Section 2 Calculation of elastic constant -----	21
1. Levenberg-Marquardt algorithm -----	21
2. Consideration of Error bars and goodness-of-fit -----	25
Section 3 Measurement of ultrasonic resonance frequency -----	27
1. Ultrasonic transducer for resonant ultrasound spectroscopy -----	27
2. Q-factor in the resonant ultrasound spectroscopy -----	28
Section 4 High temperature for resonant ultrasound spectroscopy--	31
Section 5 Experiment of resonant ultrasound spectroscopy -----	35
1. Determination of dynamic elastic constants of RPV steel	

weld due to localized micro-structural variation -----	35
1.1. Introduction -----	35
1.2. Preparation of Specimen -----	36
1.3. Measurement of elastic constants by resonant ultrasound spectroscopy -----	40
1.4. Experimental results and discussion -----	42
1.5 Conclusion -----	56
Chapter 4 Accomplishment and contribution of the study -----	58
Section 1 Accomplishment of the study -----	58
Section 2 Contribution to technology development -----	58
Chapter 5 Application of the results -----	59
제 1 절 Necessity of additional study -----	59
제 2 절 Application to the other research -----	59
Chapter 6 References -----	60
Appendix	
1. Detail drawings of high temperature resonant ultrasound spectroscopy system -----	63

목 차

제 1 장 서론 -----	1
제 2 장 국내·외 기술개발 현황 -----	4
제 1 절 유사연구 사례에 대한 조사 현황 -----	4
1. 외국의 경우 -----	4
2. 국내의 경우 -----	4
제 2 절 세부 기술 사항의 검토 분석 결과 -----	5
제 3 절 본 과제의 기술적 위치 -----	5
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 -----	7
제 1 절 초음파공명 이론 -----	7
1. 등방성 고체의 탄성계수 -----	7
2. 이방성 고체의 탄성계수 -----	8
3. 공명주파수 계산 -----	10
3.1. Lagrangian 최소화 기법에 의한 공명주파수 계산 -----	12
3.2. 직육면체에 대한 초음파공명 해 -----	17
제 2 절 탄성계수 계산 -----	21
1. Levenberg-Marquardt 알고리즘 -----	21
2. Error bars 및 goodness-of-fit에 대한 고려 -----	25
제 3 절 초음파공명 주파수 측정 -----	27
1. 초음파공명분광법 측정을 위한 탐촉자 -----	27
2. 초음파공명분광법 측정에서의 Q-factor -----	28
제 4 절 고온 초음파공명분광 시스템 제작 -----	31
제 5 절 초음파공명분광 실험 -----	35
1. 원자로 용접부의 국부적 미세조직 변화에 따른 동적탄성계수 측정 -----	35
1.1. 서론 -----	35
1.2. 시편 준비 -----	36
1.3. 초음파공명분광법에 의한 탄성계수 측정 -----	40

1.4. 실험 결과 및 고찰 -----	42
1.5. 결론 -----	56
제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도 -----	58
제 1 절 단계별 연구개발 목표 달성도 -----	58
제 2 절 기술 발전의 기여도 -----	58
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 -----	59
제 1 절 추가 연구의 필요성 -----	59
제 2 절 타 연구에의 응용 -----	59
제 6 장 참고문헌 -----	60
부록	
1. 고온 초음파공명분광 시스템 설계도 -----	63

제 1 장 서 론

고체에 초음파가 가해질 경우 고체의 원자는 가해진 주파수에 따라 진동하면서 진행하게 되는 데 특정한 주파수에서 위상이 일치할 경우 공명이 발생하고 그밖에 다른 주파수에서는 서로 상쇄되어 잡음으로 나타난다. 기본적으로 공명 주파수는 고체의 제원, 밀도 및 탄성계수에 의해서 결정되므로 고체의 제원 및 밀도가 정해질 경우 공명주파수를 측정하면 탄성계수를 계산할 수 있고, 반대로 탄성계수를 알고 있으면 공명주파수를 계산할 수 있다. 초음파공명분광법 (RUS, Resonant Ultrasound Spectroscopy) 은 이와 같은 원리에 바탕을 두고 고체의 탄성계수를 정확히 측정하는 방법으로 개발되었다.

이처럼 그 원리가 비교적 간단함에도 불구하고 현재까지도 일반화된 고체 형상에 대한 공명 현상을 기술하고 그 해석적인 해를 구하는 것은 거의 불가능하고 구형, 장방형 등과 같이 수학적으로 다루기 쉬운 canonical geometry에 대해서만이 해석적인 근사 해 및 수치적인 근사 해가 가능할 뿐이다. 고체 내에서 음파의 전파 특성에 관한 이론은 이미 19세기말에 Lord Raleigh 가 정립해 놓은 상태이며 이후 다양한 형상에 대한 응용 이론들이 개발되어 공학적으로 사용되고 있다. 특히 1970년대 이후에 특정한 형상 (구형 및 장방형) 에 대한 공명 이론이 정립된 이래로 3 차원적인 고체에 대한 실제적인 응용 기술이 개발된 것은 PC에 의한 공학 계산이 널리 쓰이기 시작한 1980년대 이후이다. 1987년 미국 Los Alamos 국립연구소에 Dr. Migliori는 이렇게 수식적으로만 가능하였던 공명 이론을 PC 상에서 공명주파수를 측정할 수 있는 hardware와 고체의 탄성계수에서 공명주파수를 계산하는 software를 개발하여 초음파공명분광법 (RUS, Resonant Ultrasound Spectroscopy) 라고 명명하였으며 1990년대 이후에 고체물리, 재료공학, 지질학, 비파괴검사 등 다양한 분야에 응용되고 있다.

초음파공명분광법은 고체의 진동 모드, 또는 공명으로 물질의 미시적 또는 거시적 특성에 대단히 민감하므로 정밀 탄성계수를 측정할 수 있을 뿐만 아니라 초음파 감쇠, 물질의 거시적 특성, 모양을 측정할 수 있다. 기본적으로 초음파공명분광법에서는 고체의 탄성계수를 초기 추정하여 이에 따른 공명 모드 및 공명 주파수를 일차 계산한 뒤 측정에 의한 공명주파수와 비교하여 그 차이를 줄이는 방향으로 탄성계수를 재계산하고 측정된 주파수와 다시 비교하는 과정을 반복하

여 최종적으로 적어도 0.1% 이하의 오차를 갖는 정밀 탄성계수를 결정할 수 있다.

한편 초음파공명 신호에는 이러한 탄성계수 계산에 필요한 정보 이외에 재료의 미세적 변화에 따른 효과를 나타내는 정보가 포함되어 있다. 초음파가 고체 내부를 진행하면서 재료 내부에 존재하는 다양한 불균일성 (grain boundary, defect, dislocation, precipitation 등) 에 의한 산란으로 에너지의 손실이 발생하는 데 이러한 mechanical damping 현상을 측정함으로써 재료 내부의 미세적인 변화를 연관지을 수 있다. 이를 측정하기 위한 수단으로 종래의 전통적인 pulse echo 방식에 의한 초음파 감쇠 측정법과 공명 현상 측정에 의한 방법이 있다. 종래의 초음파 감쇠법은 주어진 주파수에 대해서 음파가 고체 내부를 진행하면서 발생하는 에너지의 손실을 스칼라적으로 측정하여 이를 재료의 미세적인 현상과 연관짓는 방식으로써 정의에 입각한 mechanical damping과는 약간 다르다. 반면에 초음파공명분광법에서는 공명주파수의 반가폭 (FWHM, Full Width Half Maximum)을 측정하여 이를 Q-factor로 표현하는 방식으로 정의에 가까운 측정법이며 벡터적인 Q-factor를 계산할 수도 있다. 다만 초음파공명분광법으로 측정되는 Q-factor에는 장방향 시편과 주변 분위기, 즉 공기와 접촉하는 초음파 센서에 의한 damping 효과가 포함되고 있으므로 이러한 점을 고려해야 한다. 이와같이 초음파공명분광법을 적용하여 정밀 탄성계수는 물론 Q-factor를 측정함으로써 미세 조직의 차이는 물론 중성자 조사취화 현상과 같이 극미세한 재료 내부의 변화를 감지하기 위한 수단으로 사용될 수도 있다.

본 과제 목적은 이와 같이 종래에 전통적인 초음파 기술과는 전혀 다른 원리에 근거를 둔 초음파공명분광기술을 재료 특성 평가에 적용하기 위한 것이다. 일차년도에는 원자력 재료의 동적 탄성계수를 측정하기 위하여 열처리에 의해 다양한 미세 구조를 가진 원자로 용접부 재료들의 탄성계수를 측정하여 탄성계수가 미세 조직에 대해서 민감함을 확인하였으며 원자로 운전 환경에 대해서 고온 탄성계수 측정 장치를 개발하여 동적 탄성계수의 온도 의존성을 측정하였다. 이차년도에는 고온 탄성계수 측정 시에 문제가 되는 시편의 산화를 방지하고, 재료의 미세 구조에 보다 민감하다고 판단되는 Q-factor를 정밀 측정하기 위하여, 초음파 에너지가 시편 표면을 통하여 대기로 방출되는 현상을 최소화하기 위한 진공 및 불활성 가스 시스템을 부착하고 초음파 센서와 시편과의 접촉 압력에 의한 영향을 정량화하기 위해서 접촉 압력 감지 장치를 부착할 예정이다. 가압 경수형 원자로 재료인 SA 508 Cl.3 강과 중수로 압력관 재료인 Zr-2.5Nb

합금에 대해서 온도에 따른 동적 탄성계수를 측정하고 시편 분위기 변수에 따른 Q-factor의 변화를 측정하여 향후 중성자 조사 취화를 포함한 재료의 미세 변화에 따른 특성 평가에 활용하고자 한다.

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제 1 절 유사 연구사례에 대한 조사 현황

1. 외국의 경우

초음파 공명분광법은 공명 산란 현상 이론과 더불어 1970년대 말부터 미국, 프랑스, 러시아 등에서 활발히 연구되고 있으며 1990년대에 미국 Los Alamos 국립연구소, 해군 무기연구소, 국립 표준연구소 등에서 다양한 형태의 공명 분광 스펙트럼을 해석, 유용한 정보 추출 연구가 수행되었다.

1991년 음향공명분광법을 적용하여 미국 Los Alamos 국립연구소에서 개발한 포탄 내용물 식별 시스템을 미군이 걸프전에서 성공적으로 사용하였으며 이후 1994년까지 장비 개선연구가 수행되었다. 이후 다양한 응용 연구가 행해지고 있으며 특히 미국 국립 표준연구소 (NIST)에서는 초음파공명분광법을 적용하여 복합재료와 같은 다양한 재료의 특성 평가 연구가 수행되고 있으며 특히 1998 - 1999년도에는 원자로 조사취화 현상에 이 방법을 적용하기 위한 타당성 연구가 수행된 바 있다.

2. 국내의 경우

국내에서는 1994-1996년에 한국원자력연구소에서 누설 핵연료봉의 비파괴검사를 위해 공명 산란을 적용하는 연구가 수행된 바 있다. 초음파 공명 산란 이론을 개발하고 해체된 단일 핵연료봉에 대한 누설 현상을 초음파 공명 산란 법으로 구분할 수 있었다. 이후 1998년에는 원전 연료봉 집합체에 대해 적용하기 위해서 박판형 초음파 공명 센서를 개발하여 연료봉 집합체에 대한 누설 연료봉 검출 기술을 개발하였고 아울러 연료봉 산화피막 두께 측정법도 개발하여 2편의 특허를 보유하고 있다.

1999년 한국원자력연구소에서 초음파공명분광법을 적용하여 방향 이방성이 심한 Zr-2.5Nb 중수로 압력관 재료의 동적 탄성계수를 정밀하게 측정하였다. 이와 같이 한국원자력연구소에서 초음파 공명이론, 누설 연료봉 검출 기술, 탄성계수 측정 기술 등 제반 초음파공명분광 기술을 확보하고 있다.

제 2 절 세부 기술사항의 검토 분석결과

	국내 기술 현황	국외 기술 현황
초음파공명분광 해석 기술	한원(연) 기술 보유	미국 Los Alamos 국립연구소, 해군연구소, Penn. State Univ. 등에서 개발됨.
초음파공명신호 수집 기술	외국 장비 도입하여 사용하나 필요시 국내기술로도 제작 가능함.	몇몇 업체서 상용제품 제작 판매중
초음파공명신호 처리/해석 기술	다양한 범용 신호 처리/해석 기술을 적용하여 개발 가능함.	다양한 범용 신호 처리/해석 기술이 응용되고 있음.
초음파공명법의 비파괴검사에서의 응용	현재로서는 제품 검사에 응용된 사례는 없으나 특정소재에 대한 품질 검사 요구사항이 주어지면 개발 가능함.	특정 소재 별로 적용하여 일부 산업 생산에서 활용 중임(자동차, 우주항공, 정밀기계 등).
초음파공명분광법의 재료 특성 평가에 응용	한원(연)에서 추진중.	미국, 일본, 프랑스 등에서 적용 시도 중임.

제 3 절 본 과제의 기술적 위치

초음파공명분광법은 다양한 응용 분야가 가능하며 특히 비파괴 재료 물성 평가는 물론 정밀 부품의 비파괴검사, 용기 내용물의 비파괴적 식별 등에 적용되고 있다. 특히 최근 수십 년간 원자력 재료의 비파괴적인 특성 평가, 특히 중성자 조사 취화에 의한 경년 열화 현상을 감시하기 위하여 모든 가능한 비파괴적인 기술이 시도된 바 있으나 어떤 방법도 만족할 만한 해답을 제시하지 못하고 있다. 따라서 종래의 전통적인 비파괴검사 기술을 적용하는 것은 이미 한계에 부딪혔다고 판단할 수 있으며 보다 민감한 비파괴 특성 평가기술을 개발할 필요성이 있다. 미국을 비롯한 선진국에서도 가능성이 있는 특수 비파괴 특성 평가 기술을 적용하여 원자로 재료의 미시적인 변화를 감시하고자 시도하고 있으며 그 중에 최근 미국 국립 표준연구소 (NIST)에서도 초음파

공명분광법을 선택하여 중성자 조사 취화 특성 평가에 적용하는 타당성 연구가 진행된 바 있다. 이러한 상황에 비추어 보아 본 연구 결과가 성공적이라면 선진국에서도 해결하지 못하고 있는 중성자 조사 취화 현상을 준비파괴적으로 감시하는 기술을 개발하여 기술적 우위를 차지할 수 있을 것이다.

아울러 본 연구의 결과는 각종 정밀 부품의 품질 검사를 위한 초음파 공명 기술, 신형 핵연료의 물성 평가, 파손 핵연료 검사, 용기 내용물의 비파괴적 식별, 포탄 내용물 인식 등에도 활용될 수 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 초음파공명분광 이론

1. 등방성 고체의 탄성계수

파동이 고체 내를 진행할 때의 상태 방정식은,

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \sum_{k,l,m} \lambda_{iklm} \frac{\partial^2 u_m}{\partial x_k \partial x_l} \quad (1)$$

인데 여기서 u_i 는 변위 텐서, ρ 는 고체의 밀도, t 는 시간이며 λ_{iklm} 은 4차원 탄성계수 텐서이다. 이 식의 해는 다음과 같은 형태로 나타나며,

$$u_i(\bar{x}, t) = u_i^0 e^{j(k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 - \omega t)} ; \bar{x} = (x_1, x_2, x_3), \quad (2)$$

결과식은,

$$\left| \sum_{q,l} \lambda_{iqlm} \vec{k}_q \vec{k}_l - \rho \omega \delta_{im} \right| = 0, \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 $i \neq m$ 이면 $\delta_{im} = 0$ 이며 $i = m$ 이면 $\delta_{im} = 1$ 이 되고 전체 matrix의 determinant=0 임을 의미하는 데 이 방정식을 분산방정식 (dispersion equation) 이라고 부르기도 한다. 등방성이 아닌 고체에서는 많은 해가 존재하며 원자의 방향이 수직 또는 수평이 아닌 다른 방향으로 변형하는 수많은 이상한 파가 존재한다. 또한 등방성 고체일지라도 순수한 종파나 횡파가 진행하다가 다른 파로 변환하기도 하므로 식 (3)이 성립하기 위해서는 고체의 자유 표면에 대한 평행 및 수직인 응력 성분은 0 이라는 조건이 필수적이다[1].

2. 이방성 고체의 탄성계수

응력이나 변위를 다루는 데 4차원 탄성계수 텐서를 간단히 하기 위하여 다음 규칙에 의해 2차원으로 단축한 뒤,

$$11 \Rightarrow 1 \quad 22 \Rightarrow 2 \quad 33 \Rightarrow 3$$

$$23 \Rightarrow 4 \quad 13 \Rightarrow 5 \quad 12 \Rightarrow 6$$

응력-변위 관계를 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{14} & c_{24} & c_{34} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{15} & c_{25} & c_{35} & c_{45} & c_{55} & c_{56} \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & c_{46} & c_{56} & c_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (4)$$

이것은 Hook's law를 triclinic 결정의 경우에 대해서 표현한 것인 데 21 개의 탄성계수가 존재하다.

많은 경우 탄성계수 텐서는 shear 성분이 0인 경우가 있는 데 orthorhombic 결정의 경우

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix} \quad (5)$$

으로 표현되며 9개의 탄성계수가 존재한다. 대칭성을 tetragonal로 증가시키면 여기서 1 과 2는 교환 가능하므로 $c_{44} = c_{55}$, $c_{13} = c_{23}$, $c_{11} = c_{22}$ 관계가 성립하고 따라서 탄성계수는 6개로 줄어들며 hexagonal 대칭을 도입하면 $\frac{c_{11} - c_{12}}{2} = c_{66}$

인 관계가 있으므로 5개로 줄어들고 1-2 면을 진행하는 파의 속도는 방향에 무관한 특성이 나타난다.

대칭성을 더욱 증가시켜서 cubic 결정이 되면 shear wave의 등방성이 발생하여 3개의 탄성계수, c_{11}, c_{12}, c_{44} 만이 필요하므로 Hook's law는

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (6)$$

이 되며 마지막으로 대칭성을 더욱더 증가시켜서 등방체가 되면 $\frac{c_{11}-c_{12}}{2} = c_{44}$ 인 관계가 있으므로 단지 2개의 탄성계수, c_{11}, c_{12} 만이 필요하다.

cubic 결정의 경우에 대해서 길이가 긴 봉의 탄성계수를 다루기 위해 길이 방향을 '1' 로 놓으면 $\sigma_1 \neq 0$ 이며 $\sigma_i = 0$, ($i = 2 \sim 6$) 이 된다. 따라서 식 (6)은,

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= c_{11}\varepsilon_1 + c_{12}(\varepsilon_2 + \varepsilon_3) \\ 0 &= c_{12}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) + c_{11}\varepsilon_2 \\ 0 &= c_{12}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) + c_{11}\varepsilon_3 \\ 0 &= c_{44}\varepsilon_4 = c_{55}\varepsilon_5 = c_{66}\varepsilon_6 \end{aligned} \quad (7)$$

이 되며 $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ 이므로,

$$E = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = c_{11} - \frac{2c_{12}^2}{c_{11} + c_{12}} \quad (8)$$

Poisson's ratio ν 는 방향 2 로의 변위에 대한 방향 1로의 변위의 비의 음의 값이므로,

$$\nu = \frac{1}{1 + (c_{11}/c_{12})} \quad (9)$$

이며 bulk modulus 를 계산하기 위하여 hydrostatic 압력을 가한 상태인 $\sigma = \sigma_2 = \sigma_3$ 이 되며 shear stress 는 물론 0 이다. 따라서 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$ 가 되며 단 하나의 방정식만을 풀면 된다.

$$\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = c_{11} + 2c_{12} \quad (10)$$

Bulk modulus B 는 압력에 대한 체적 변화율이며 단순히 압력 σ_1 이 가해졌을 때 체적 변화율은 3 방향 변위의 합, $\Delta V = 3\varepsilon_1$ 으로 볼 수 있으며 (1차 근사로서 높은 차수 계산을 무시함) 따라서 cubic 결정에 대해

$$B = \frac{\sigma_1}{\Delta V} = \frac{c_{11} + 2c_{12}}{3} \quad (11)$$

이 된다.

3. 공명주파수 계산

밀도, 칫수, 탄성계수를 알고있는 고체의 공명주파수를 계산하는 방법은 초음파 공명분광법에서 가장 중심되는 주제인 데 불행하게도 이를 위한 일반적인 고체의 자유 진동 문제에 대한 해석적인 해(analytical solution)는 현재까지 존재하지 않는다. 따라서 근사적인 방법에 의한 비해석적인 해(non-analytical solution)만이 가능한 데 이에는 유한요소법 모델에 의한 해와 에너지 최소화법에 의한 해가 가능하다. 유한요소법은 다른 체적요소에 대한 힘의 균형을 가지고 그 응답을 계산하는 방법으로써 특정한 진동 모드가 돌발적으로 제외되는 상황을 방지하기 위하여 특정한 체적요소에 가해지는 모든 힘과 그 해의 형식을 알고 있어야 한다. 반면에 에너지 최소화 기법은 에너지가 최소화되는 상태, 즉

평형 상태를 결정하여 고체의 배열 상태를 정한다. 따라서 얻고자 하는 해의 형식을 알지 못할 경우 특정한 모드 형식을 놓치지 않기 위한 에너지의 최소값을 찾을 수 있다. 초음파공명분광법에서 사용하는 탄성계수 측정 이론은 위의 두 방법 중 에너지 최소화법을 적용하여 구한다.

역사적으로 볼 때 초기 초음파공명분광 이론은 지질학 분야에서 구형체 (특별히 지구)의 자유 진동에 대한 연구에서 시작하였으며 초기 초음파공명분광법 기술의 중심적인 이론은 J. D. Maynard [2] 에 의해서 이루어졌다. 초음파공명분광법의 이론적 개발은 등방성 구형체의 공명주파수를 계산하는 데서 시작되었는데 그 이유는 등방성 구형체가 운동방정식을 해석적으로 풀어낼 수 있는 한계이기 때문이다. Lamb 와 Love 에 의한 기본 이론에 이어 기본 방정식인 식 (1) 을 구형 좌표계에서 특수 함수를 사용하여 풀었으며 Fraser and LeCrew는 이 계산을 확장하여 구형체에 대한 공명주파수를 요즈음의 장비와 유사한 장치를 사용하여 처음으로 측정하였다 [3]. 이후 Anderson, Kumazawa 및 동료들은 이를 확장하여 아폴로 우주계획에서 얻어진 월면 암석의 탄성계수를 측정한 바 있다. 비등방성 구형체의 일반적인 문제는 해석적으로 풀 수 없고 특정한 형상에 대해서 가능한 데 1960 년대에는 관심사항이 정육면체 및 직육면체에 대한 연구로 전환되었다. Holland [4]와 Dermarest [5]는 이와 유사한 formalism을 사용하여 탄성적으로 등방성인 정육면체의 공명을 계산하는 이론적 기법을 개발하였고 초음파공명을 실험적으로도 측정하였다. 이 결과들은 Ohno [6]에 의해서 대칭성이 낮은 결정에 대해서도 일반화되었으며 이후 Mochizuki [7]가 구형체에 대해서 유사한 계산을 수행하였다. 이와는 별도로 고체물리 분야에서 미국 LOs Alamos 국립연구소에 Migliori와 Visscher가 여러 가지 형태와 결정 대칭에 적합한 수정된 알고리즘을 적용하여 이론을 완성하였고 이를 초음파공명분광법 (RUS, Resonant Ultrasoniat Spectroscopy) 라고 명명하였다 [8].

고체의 자유진동을 기술하기 위해서는 탄성 고체의 mechanical Lagrangian의 해를 구해야 하는 데 초음파공명분광법에서는 특정한 기하학적 구조에 대한 자유 표면 경계 조건에서 탄성과 방정식의 해를 구하고 고체의 고유 주파수 (eigenfrequency)를 계산함으로써 공명주파수를 구할 수 있다.

3.1. Lagrangian 최소화 기법에 의한 공명주파수 계산

고전 역학에서 Lagrangian L 은 다음과 같이 나타낸다.

$$L = \int_v (KE - PE) dV, \quad (12)$$

여기서 KE는 운동에너지이며 PE는 위치에너지이다. 체적이 V 이며 자유표면이 S 이며 선형 탄성계수 텐서 c_{ijkl} 이고 밀도가 ρ 인 임의의 형태의 탄성체에서 운동에너지는

$$KE = \frac{1}{2} \sum_i \rho \omega^2 u_i^2, \quad (13)$$

여기서 \sum 의 항 i 는 1 에서 3 까지 이고 이는 각각 x, y, z 방향을 의미한다. 한편 위치 에너지는

$$PE = \frac{1}{2} \sum_{i,j,k,l} c_{ijkl} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_k}{\partial x_l}, \quad (14)$$

여기서 u_i 는 변형량 벡터의 i 번째 요소이며 ($i = 1, 2, 3$ 이며 이는 각각 x, y, z 좌표축 방향을 의미함) 시간에 대한 harmonic 의존성, 즉 $u(t) = u_0 e^{i\omega t}$ 을 가정하였다. 달리 언급하지 않는 한 여기서 다루는 summation은 모두 1 에서 3 이다. 식 (13) 과 (14)는 단순 조화 진동 (simple harmonic oscillator)에 대한 가장 일반적인 KE 및 PE 의 표현이다.

Lagrangian의 최소값을 구하기 위하여, 즉 시스템의 평형 배치 구조를 구하기 위하여 u 가 V 내에서 그리고 S 위에서 임의적으로 변화하도록 하고 ($u_i \rightarrow u_i + \delta u_i$) L 의 변화를 계산하면,

$$L + \delta L = \int_V \left[\frac{1}{2} \sum_i \rho \omega^2 (u_i + \delta u_i)^2 - \sum_{i,j,k,l} c_{ijkl} \frac{\partial u_i + \delta u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right] dV \quad (15)$$

이 되는 데 여기서 δu_i 의 1st order 항을 고려하면

$$\delta L = \int_V \left[\sum_i \rho \omega^2 u_i \delta u_i - \sum_{i,j,k,l} c_{ijkl} \frac{\partial(\delta u_i)}{\partial x_j} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right] dV \quad (16)$$

이 된다. 이를 부분적분하기 위해서 $f = \frac{\partial(\delta u_i)}{\partial x_j}$, $g = \frac{\partial u_k}{\partial x_l}$ 라 놓으면

$$f = \delta u_i, \quad g' = \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_k \partial x_l} \text{ 이며 } \int f g = \int f g - \int f g' \text{ 이므로 위의 두 번째 항은,}$$

$$\text{두 번째 항} = \int_V \sum_{i,j,k,l} \left[c_{ijkl} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} \delta u_i \right) - \left(\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_k \partial x_l} \delta u_i \right) \right] dV$$

이 되며 식 (16)은

$$\begin{aligned} \delta L &= \int_V \sum_i (\rho \omega^2 u_i) \delta u_i - \sum_{i,j,k,l} \left[c_{ijkl} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} \delta u_i \right) - \left(\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_k \partial x_l} \delta u_i \right) \right] dV \\ &= \int_V \left(\sum_i \rho \omega^2 u_i + \sum_{j,k,l} c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_k \partial x_l} \right) \delta u_i dV - \int_V \sum_{i,j,k,l} \left[c_{ijkl} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} \delta u_i \right) \right] dV \\ &= \int_V \left(\sum_i \rho \omega^2 u_i + \sum_{j,k,l} c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_k \partial x_l} \right) \delta u_i dV - \int_S \left(\sum_i \sum_{j,k,l} \vec{n}_j c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right) \delta u_i dS \end{aligned}$$

따라서

$$\delta L = \int_V \left(\sum_i \rho \omega^2 u_i - \sum_{j,k,l} c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_k \partial x_l} \right) \delta u_i dV - \int_S \left(\sum_i \left[\sum_{j,k,l} \vec{n}_j c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right] \delta u_i \right) dS \quad (17)$$

δu_i 는 V 내에서 또는 S 위에서 임의적이므로 stationary point L (즉

$\delta L=0$ 인 점)에서의 u_i 의 값은 식 (17)의 괄호 [] 항이 0 이라야 한다. 따라서 식 (17)의 첫 번째 괄호 항을 0으로 놓으면 탄성과 방정식은

$$\rho\omega^2 u_i + \sum_{j,k,l} c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} = 0 \quad (18)$$

이 된다. 두 번째 괄호 항은 자유 표면 경계 조건으로

$$\sum_{j,k,l} \vec{n}_j c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} = \sum_j \vec{n}_j \sigma_{ij} = 0 \quad , \quad (19)$$

이 되며 여기서 σ_{ij} 는 응력 텐서의 ij 번째 성분이다.

이러한 조건을 만족하는 u_i 의 set는 정확히 시스템의 정규 모드 자유 진동 주파수 ω 와 상응하는 변형량이다. 물체의 자유 진동은 다음과 같은 Rayleigh-Ritz 방법을 적용하여 변형량 벡터를 임의적 함수 $\{\phi_\lambda\}$ 의 조합으로 완벽하게 전개할 수 있다.

$$u_i = \sum_\lambda a_{i\lambda} \phi_\lambda \quad (20)$$

임의 함수 ϕ_λ 에 대해서 Demarest [5] 과 Ohno [6]는 정규화된 Legendre polynomial을 사용하였는데 이 방법은 최종적인 matrix 요소 계산이 간단해지는 이점이 있으나 계산 가능한 시편의 형상에 제한이 있다. Visscher et. al [8]은 다음과 같이 ϕ_λ 를 직교좌표계에서 기본함수의 지수로 가정하고 계산하였다.

$$\phi_\lambda = x^l y^m z^n, \quad (21)$$

여기서 $\lambda=(l, m, n)$ 은 함수 라벨로 음이 아닌 정수 3 개의 조합으로 식 (20)을 식 (12) 에 대입하면 운동에너지 KE 부분은

$$\begin{aligned}
L_{KE} &= \int_V \frac{1}{2} \sum_i \rho \omega^2 u_i^2 dV \\
&= \int_V \frac{1}{2} \sum_i \rho \omega^2 (\sum_\lambda a_{i\lambda} \Phi_\lambda)^2 dV \\
&= \int_V \frac{1}{2} \sum_{i,i',\lambda,\lambda'} \delta_{ii'} \rho \omega^2 a_{i\lambda} a_{i'\lambda'} \Phi_\lambda \Phi_{\lambda'} dV
\end{aligned}$$

이 되며 위치에너지 PE 부분은

$$\begin{aligned}
L_{PE} &= \int_V \frac{1}{2} \left(\sum_{i,j,k,l} c_{ijkl} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right) dV \\
&= \int_V \frac{1}{2} c_{ijkl} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (\sum_\lambda a_{i\lambda} \Phi_\lambda) - \frac{\partial}{\partial x_l} (\sum_{\lambda'} a_{i'\lambda'} \Phi_{\lambda'}) \right] dV \\
&= \int_V \frac{1}{2} c_{ijkl} \left[\sum_{i,j,k,l,\lambda,\lambda'} a_{i\lambda} a_{i'\lambda'} \frac{\partial \Phi_\lambda}{\partial x_j} \frac{\partial \Phi_{\lambda'}}{\partial x_l} \right] dV
\end{aligned}$$

이 된다. 따라서 Lagrangian L 을 구하기 위하여 위 두 식을 합하면

$$L = \int_V \frac{1}{2} \left[\sum_{i,i',\lambda,\lambda'} \delta_{ii'} \rho \omega^2 a_{i\lambda} a_{i'\lambda'} \Phi_\lambda \Phi_{\lambda'} - \frac{1}{2} \sum_{i,j,k,l,\lambda,\lambda'} c_{ijkl} a_{i\lambda} a_{i'\lambda'} \frac{\partial \Phi_\lambda}{\partial x_j} \frac{\partial \Phi_{\lambda'}}{\partial x_l} \right] dV \quad (21)$$

또는

$$L = \int_V \frac{1}{2} \left[\sum_{i,j,m,n} \delta_{im} \rho \omega^2 a_{im} a_{jn} \Phi_m \Phi_n - \frac{1}{2} \sum_{i,j,k,l,m,n} c_{ijkl} a_{im} a_{jn} \frac{\partial \Phi_m}{\partial x_j} \frac{\partial \Phi_n}{\partial x_l} \right] dV \quad (22)$$

가 되며 여기서 λ 와 λ' 의 summation은 1 에서 N 까지 이다. 식 (21)은 다음의 matrix 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\text{윗 식을 보기 좋게 표현하기 위하여 } E_{ii'\lambda\lambda'} = \vec{E} = \int_V \Phi_\lambda \rho \Phi_{\lambda'} dV,$$

$$\vec{a} = a_{i\lambda}, \quad \vec{a}^T = a_{i'\lambda'}, \quad \vec{\Gamma} = \Gamma_{\lambda\lambda'ij} = \sum_{i,j} c_{ijkl} \int_V \frac{\partial \Phi_\lambda}{\partial x_j} \frac{\partial \Phi_{\lambda'}}{\partial x_l} dV \text{ 라고 놓고}$$

정리하면

$$L = \frac{1}{2} \omega^2 \vec{a}^T \vec{E} \vec{a} - \frac{1}{2} \vec{a}^T \vec{\Gamma} \vec{a} \quad (23)$$

여기서 a 는 요소가 a_i 인 벡터로 그의 transpose는 a^T 이며 E 와 Γ 는 order가 R (행이나 열의 개수를 뜻함) 인 matrix 이다. R 은 다음과 같은 truncation condition으로 결정되는 데

$$l + m + n < N, \quad (24)$$

여기서 $R = 3(N+1)(N+2)(N+3)/6$ 이다. $N \rightarrow \infty$ 인 경우 식 (21)은 "exact" 한 해를 가진다. 실제로는 N 은 계산 정밀도와 계산 시간을 고려하여 적당한 값으로 최적화한다. 급수를 중간에서 생략하면 실제보다 큰 고유치 (eigenvalue)가 계산될 수도 있는 데 최종 오차는 N 이 증가함에 따라 단순 감소한다 [8].

일반적으로 초음파 공명을 이용한 실험에서는 일반적인 시편 가공 오차(가장 주된 오차의 원인임)를 고려하여 $N=10$ 으로 놓고 식 (23) 의 고유 모드에 대해서 초기 30개 또는 50개의 공명 주파수를 정확하게 측정해야 한다.

Matrix E 의 요소는

$$E_{\lambda\lambda'\tau} = \delta_{\lambda\lambda'} \int_V \Phi_\lambda \rho \Phi_{\lambda'} dV \quad (25)$$

이며 matrix Γ 의 요소는

$$\Gamma_{\lambda\lambda'\tau} = \sum_{i,j} c_{ij\tau} \int_V \frac{\partial \Phi_\lambda}{\partial x_j} \frac{\partial \Phi_{\lambda'}}{\partial x_i} dV \quad (26)$$

이 되며 밀도 ρ 에 대해서 orthonormal set의 Φ_λ 를 선택한다면 E 는 unit matrix 가 되어서 계산이 간단해진다. 비록 계산상의 어려움을 감안하더라도

Φ_λ 를 선택함에 있어서 E 를 orthonormal set 보다는 여러 가지 형상에 대한 체적적분을 쉽게 다루기 위하여 complex한 형태로 적용하기도 한다.

변형량 u_i 가 자유진동 문제의 해라면 Lagrangian 식 (12)는 stationary 이며 이러한 해는 식 (21)을 각 R , 진폭 a_{ik} 에 대하여 미분한 것을 0 으로 놓고 구할 수 있다 (왜냐하면 $\delta L=0$, $\partial L/\partial a_{ik}=0$). 따라서 다음의 고유치 방정식이 성립한다.

$$\omega^2 \vec{E} \vec{a} = \vec{\Gamma} \vec{a} \quad (27)$$

행렬식 E 는 대칭이고 양의 값으로 정해지며 Γ 도 대칭이므로 식 (27)은 표준화된 수치해석법으로 풀어낼 수 있으며 이러한 고유치 방정식의 해를 통하여 자유진동 주파수 (고유치)는 물론 물리적 변형량 (고유 벡터)도 구할 수 있다.

3.2. 직육면체에 대한 초음파 공명 해

앞에서 다룬 기계적 Lagrangian의 해는 결국 다음과 같은 특정한 시편 형태에 대한 “기하학적” 인 적분의 계산으로 귀착된다.

$$f(p, q, r) = \int_V x^p y^q z^r dV \quad (27)$$

초음파공명분광법에서 가장 널리 쓰이는 형상이 그 결정 축과 시편 표면이 orthorhombic 또는 그 이상의 대칭성을 가진 배열된 직육면체이다. 직육면체는 식 (25)나 (26)의 적분이 다루기 쉬울 뿐만 아니라 관련된 대칭성으로 인하여 상당히 간단하게 계산할 수 있다. 각 면이 $2d_1, 2d_2, 2d_3$ 인 직육면체에 대해서 식 (27)의 적분은 다음과 같이 명백하게 구할 수 있다.

$$f(p, q, r) = \frac{8d_1^{p+1}d_2^{q+1}d_3^{r+1}}{(p+1)(q+1)(r+1)} \quad (28)$$

따라서 복잡한 Γ 와 E 의 행렬식 요소를 완벽하게 계산하여 $f(p, q, r)$ 로 도표화할 수 있다.

더욱이 직육면체에서는 3 개의 거울면이 존재하므로, 예컨대 $x \rightarrow -x$, $y \rightarrow -y$, $z \rightarrow -z$ 의 관계가 있다. Γ 의 행렬식 요소를 정확히 기술하고 대칭성을 평가하여 odd function 을 0 으로 놓으면 u_x 가 parity triplet $(-\xi, -\mu, -\nu)$ 으로 규정될 수 있다. 여기서

$$-\xi = (-1)^l, \mu = (-1)^m, \nu = (-1)^n \quad (29)$$

행렬식 Γ 는 u_y 와 u_z 가 다음의 parity를 가지는 경우에만 0 이 아닌 요소를 가진다.

$$u_x : (-\xi, \mu, \nu), u_y : (\xi, -\mu, \nu), u_z : (\xi, \mu, -\nu) \quad (30)$$

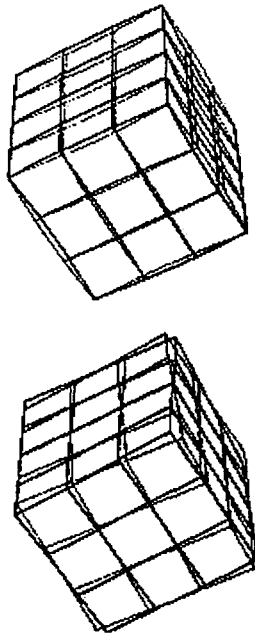
즉 식 (14)에서 $i=1$ 이고 $(l, m, n) = (\text{홀수}, \text{짝수}, \text{짝수})$ 일 때, 0이 되지 않으려면 $k=2$ 이고 $(l', m', n') = (\text{짝수}, \text{홀수}, \text{짝수})$ 이라야 되며 $k=3$ 이면 $(l', m', n') = (\text{짝수}, \text{짝수}, \text{홀수})$ 인 경우에만 어떤 값을 가진 항이 있다. 따라서 행렬식 Γ 를 하나의 parity triplet 만으로 구성된 block-diagonal matrix로 degenerate 시킬 수 있으며 이를 u_x 의 parity라고 부른다 [7]. 따라서 이러한 parity를 다음과 같이 표기하며

k	1	2	3	4	5	6	7	8
$-\xi$	+	+	+	+	-	-	-	-
μ	+	+	-	-	+	+	-	-
λ	+	-	+	-	+	-	+	-

변형에 대한 물리적 특성을 직관적으로 보면 특정한 변형량에 대한 k 값을 관련 지를 수 있다. 예를 들어 x 방향으로 균일한 이동 (즉 x 에서는 u , y , z 에

위: 순수 비틀림 모드($k=4$), 아래: 체적진동 모드($k=5$).

Fig. 1-1. 직육면체의 공진 고유벡터(진동 모드).



한 그림을 보였다.

1-1에 식 (27)에서 구한 두 가지 모드의 고유벡터에 대해서 최대 변형량을 표현
 여 모드를 특성값 양 수 있으므로 각각의 공명마다 모드를 확인할 수 있다. Fig.
 계층에 비례하므로 계산이 간단해지고 계산 시간도 절약된다. 또한 k 값을 동하
 diagonalized된 100×100 행렬식으로 단축되며 계산 시간은 matrix 크기의 3
 이렇게 함으로써 ($N=10$, $R=858$)인 경우 1000×1000 행렬식이 8 개의
 수)를 의미한다.

, 여기서 "+" 는 $(-1)^0=1$ (즉 짝수)를 의미하며 "-" 는 $(-1)^1=-1$ (즉 홀

서는 짝수)에서 u_x 는 $(l, m, n) = (0, 0, 0)$ 또는 $k=1$ 을 갖는다. y 방향으로 균일한 이동은 $k=7$ 이며 z 방향으로는 $k=6$ 이다. 유사하게 z 축으로 회전은 $k=3$ 이며 y 축으로 회전은 $k=2$ 가 되고 x 축 회전은 $k=1$ 이다. 이러한 6 개의 특수한 고유 벡터는 고유치가 0 이다 (즉 진동이 없다) $k=5$ 인 경우가 특수한 데 V 를 평균한 뒤 $\nabla u \neq 0$ 이 되며 즉 이것은 체적 진동과 관련된 k 이다. 이러한 종류의 진동 모드는 모서리에서의 변형량이 매우 작으므로 실험적으로 측정하기 곤란하다. (Fig. 1-1)

이를 정리하면

**Vibration Modes
(Rectangular Parallelepiped)**

- k=1** x-axis translation
- k=2** y-axis rotation
- k=3** z-axis rotation
- k=4** x-axis rotation
- k=5** volumetric
- k=6** z-axis translation
- k=7** y-axis translation
- k=8** complex motion

제 2 절 탄성계수 계산

초음파공명분광법을 이용하여 탄성계수를 측정하기 위해서는 밀도, 치수, 배열 각도 및 탄성계수를 알고있는 물체의 공명주파수를 계산하는 순방향 문제는 물론 실험으로 측정된 공명주파수에서 원하는 탄성계수를 계산하는 역방향 문제를 동시에 해결해야 한다. 앞 절에서 기술한 초음파 공명이론을 이용하여 순방향 문제 (탄성계수 \rightarrow 공명주파수)를 계산할 수 있다. 그러나 역방향 문제 (공명주파수 \rightarrow 탄성계수)의 정확한 해는 없으므로 비선형 최적화 절차를 사용하여 공명주파수를 형성하는 변수 set를 결정하는 것이 최선의 방법이다.

1. Levenberg-Marquardt 알고리즘

구하고자 하는 변수의 최적값을 구하기 위하여 우선 다음과 같이 figure of merit, F 를 구성하여야 한다.

$$F = \sum_{i=1}^N w_i (f_i - g_i)^2, \quad (31)$$

여기서 F 는 계산치와 측정치가 얼마나 잘 일치하는가를 판단하는 척도인 데 충분히 많은 개수, N 개의 주파수 측정값이 있어야 하며 w_i 는 측정된 주파수, g_i 의 신뢰도를 반영하기 위해서 주어진 가중치 (보통 0 이나 $1/g_i^2$ 으로 F 를 편차 분율로 측정함) 이며 $f_i = \omega_i/2\pi$ 는 i 번째 계산된 주파수이다. 어떤 공명 주파수는 여러 개를 보더라도 거의 같은 정도의 가중치의 합 c_{ij} 에 좌우된다. 따라서 신뢰성있는 결과를 얻기 위해서는 M 개 공명 (나중에 결정되어야 할 변수임) 보다 적어도 많은 개수의 공명을 측정하여야 한다.

주어진 변수 공간에서 F 의 최소치를 가지는 위치를 알아내는 절차가 필요한데 액체의 압축도 같은 것을 구할 경우에는 1차원 공간이면 충분하지만 triclinic 결정의 탄성계수 텐서 (21 개)와 시편 치수를 구하고자 한다면 24-차원 공간이 필요하다. 초음파공명분광법 측정에서는 Newtonian solution과

steepest descents의 혼성 방식으로 비교적 유연성이 있으며 조절가능하고 안정하며 신뢰성 있는 Levenberg-Marquardt 방법을 적용한다.

먼저 F 를 Taylor 급수 전개하면

$$F(\vec{x}) = F(\vec{x}_0) + \sum_{\alpha} (\vec{x} - \vec{x}_0)_{\alpha} \frac{\partial F(\vec{x}_0)}{\partial x_{\alpha}} + \sum_{\alpha, \beta} \frac{1}{2} (\vec{x} - \vec{x}_0)_{\alpha} \frac{\partial^2 F(\vec{x}_0)}{\partial x_{\alpha} \partial x_{\beta}} (\vec{x} - \vec{x}_0)_{\beta} \quad (32)$$

여기서 x 는 그 요소가 $(x_{\alpha}), \alpha=1, \dots$ 인 벡터로써 계산하고자 하는 변수 (탄성 계수, 치수, 또는 결정축과 시편면과 배열에서 정해지는 Euler angle 등)이다. 위의 전개는 주어진 영역 즉 $x-x_0$ 에서 유효하며 어떻게 보면 매우 작은 영역이 되므로 가능한한 정확한 초기값 x_0 를 넣기 위하여 가능한 모든 정보를 동원하는 것이 중요하다. 특히 다결정이나 화합물의 경우 중요한 관점이다.

F 가 x 에서 최소라면

$$\frac{\partial F(\vec{x})}{\partial x_{\alpha}} = 0, \quad \alpha=1, \dots, M. \quad (33)$$

이 되며 식 (32)를 사용하여

$$\frac{\partial F(\vec{x}_0)}{\partial x_{\alpha}} + \sum_{\beta} \frac{\partial^2 F(\vec{x}_0)}{\partial x_{\alpha} \partial x_{\beta}} (\vec{x} - \vec{x}_0)_{\beta} = 0 \quad (34)$$

M 차원을 Newtonian 방법으로 x 에 대해 반복법으로 풀면 위의 미분은,

$$\frac{\partial F}{\partial x_{\alpha}} = \sum_i 2w_i (f_i - g_i) \frac{\partial f_i}{\partial x_{\alpha}} \quad (35)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_{\alpha} \partial x_{\beta}} = \sum_i 2w_i \frac{\partial f_i}{\partial x_{\alpha}} \frac{\partial f_i}{\partial x_{\beta}} + \sum_i 2w_i (f_i - g_i) \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_{\alpha} \partial x_{\beta}} \quad (36)$$

이 된다. 이미 앞 장에서 $\partial f_i / \partial x_{\alpha}$ 를 계산하였으며

$$\frac{\partial \omega_i}{\partial x_\alpha} = \frac{1}{2} \omega_i \frac{\partial \omega_i^2}{\partial x_\alpha} = \frac{1}{2} \omega_i \cdot \vec{a}^\top \left[\frac{\partial \vec{\Gamma}}{\partial x_\alpha} - \omega^2 \frac{\partial \vec{E}}{\partial x_\alpha} \right] \vec{a}$$

이 되는 데 계산 시간을 절약하기 위하여 식 (36)에서 $\partial^2 f_i / \partial x_\alpha \partial x_\beta$ 에 비례하는 우변 2번째 항을 무시한다.

Levenberg-Marquardt 알고리즘을 적용하기 위해서 다음을 정의한다.

$$B_\alpha = \sum_i w_i (f_i - g_i) \frac{\partial f_i}{\partial x_\alpha} \quad (37)$$

$$A_{\alpha\beta} = \sum_i w_i \frac{\partial f_i}{\partial x_\alpha} \frac{\partial f_i}{\partial x_\beta} \quad (38)$$

식 (34)의 해는

$$x_\alpha = x_{0\alpha} - \sum_\beta A_{\alpha\beta}^{-1} B_\beta \quad (39)$$

식 (32)가 좋은 가정, 즉 x 가 최소값에 근접하여 있다면 이 식이 유효하지만 그렇지 않다면 steepest-descent 기법을 사용하는 것이 좋다.

$$x_\alpha = x_{0\alpha} - k \cdot B_\alpha \quad (40)$$

여기서 상수 k 는 x^2/F 차원을 갖는다. $A_{\alpha\alpha}$ 는 F/x^2 차원이며 F-surface 곡률 텐서의 $\alpha\alpha$ 번째 요소로 계산한다. 따라서 $A_{\alpha\alpha}^{-1}$ 은 변수 공간에서 α 번째 방향으로 이동하는 거리를 제한하는 자연적인 선택이다. 이것은 얇은 국부적인 최소치들이 많이 있어서 계산의 해를 함정에 빠뜨릴 수 있기 때문에 중요한 고려 사항이다. 만약 어떤 모드가 나타나지 않은 경우 (식 (31)에서 f_i 와 g_i 의 쌍이 잘못 구성되어서) 또는 “downhill” 경사를 따라 수많은 단계를 갈 경우, 이러한 최소치들이 나타난다.

Levenberg-Marquardt 알고리즘에서 식 (39) 를 다음과 같이 대치한다.

$$x_\alpha = x_{0\alpha} - \sum_\beta G_{\alpha\beta} B_\beta \quad (41)$$

, 여기서 $G_{\alpha\beta}^{-1} = A_{\alpha\beta} (1 + \Omega \delta_{\alpha\beta})$ (42)

식 (41)은 $\Omega=0$ 일 경우 식 (39)와 같으며, Ω 가 커서 거의 diagonal 로 되면 식 (40)과 같이 되는 데 적합한 Ω 값을 선택하여 두 계산 기법을 혼합하는 것도 가능하다.

만약 식 (41)을 반복하여 M-차원 변수 공간에서 x_{\min} 위치에서 수렴하였다면 (즉 $B_\alpha=0, \alpha=1, \dots, M$) F 는 그 위치에서 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$F(\vec{x}) = F(\vec{x}_{\min}) + \delta x_\alpha A_{\alpha\beta}(\vec{x}_{\min}) \delta x_\beta + \dots, \quad (43)$$

, 여기서 $\delta x = x - x_{\min}$ 이다.

F 의 곡율은 방향마다 다르고 최소값의 2 order 까지도 차이가 나므로 각각의 변수를 확실하게 정하는 좋은 방법이 된다. $2A$ 가 이 문제의 covariance matrix 의 역이므로 이를 diagonalize 하면 (또는 G 와 동일함) M 개의 고유벡터 y^μ 와 고유치 σ_μ^2 이 계산된다.

특히

$$\vec{G} \vec{y}^\mu = 2 \sigma_\mu^2 \vec{y}^\mu \quad (44)$$

이므로 이를 식 (43)으로 표현하면,

$$F(\vec{x}) = F(\vec{x}_{\min}) + \frac{(\delta \vec{x} \cdot \vec{y}^\mu)^2}{2\sigma_\mu^2}, \quad (45)$$

여기서 $\delta x \cdot y^\mu$ 는 두 벡터의 내적이며 y^μ 가 단위벡터이므로 $\delta x \cdot y^\mu$ 는 δx 를

y^μ 방향으로 투사한 크기가 된다. 따라서 식 (45)에서 최소치 근처에서의 F 표면의 형상을 알 수 있다. F 표면은 M-차원 변수 공간에서 주축이 y^μ 방향인 타원체이다. 주축의 길이는 다음과 같다.

$$s_\mu = \sigma_\mu \sqrt{2\delta F}, \quad (46)$$

여기서 δF 는 최소값을 초과하는 양이다. 실제로 하나 또는 그 이상의 σ_μ 는 때때로 상당히 크며 식 (44)에서 x_j 의 선형 조합과 상응하는 상당히 큰 불확정성을 대변한다. 따라서 각각의 탄성계수(또는 칫수, 배치 각도)에 대해 예상되는 오차를 쉽사리 첨가할 뿐만 아니라 이러한 값들의 선형조합도 구할 수 있다. 우리는 특정한 값 x_α 에 대한 오차를 몇 가지 선형조합으로 예측할 수 있으며 이런 방법으로 특정한 값의 최소점의 날카로움을 결정할 수 있다.

2. Error bars 및 goodness-of-fit에 대한 고려

시편 상수의 값과 불확정성을 평가하기 위한 정확하고 구체적인 절차를 기술하였음에도 좋은 답으로 간주되는 fit가 충분히 좋은가를 결정하는 것은 쉽지 않다. 데이터 fit를 고려하기에 앞서 시편과 데이터는 다음에 기술하는 몇 가지 조건을 만족해야 한다.

- 1) 최소한 시편 표면은 수 $\mu\text{m}/\text{mm}$ 정도의 평행을 유지해야 한다:
- 2) 무게를 측정하여 계산된 밀도는 재료의 x-ray 밀도의 1 - 2 % 이내라야 한다:
- 3) 측정되는 공명주파수 개수는 적어도 5 개 이상이라야 하며 아마도 구하고자하는 인자 개수의 8 - 10 배 정도라야 한다. 더욱이 누락된 모드가 측정주파수 개수의 10% 이내라야 한다.

물론 정확한 값을 결정하기 위해서 몇 개의 모드가 누락되었는지를 아는 것은 어렵지만 보통 측정코자 하는 상수에 대해서 타당한 추정을 함으로써 단위 주파수당 모드의 밀도를 정확히 추정할 수 있다. 따라서 계산된 주파수와 측정된 주

파수간의 1:1 mapping이 가능하다.

누락된 공진 모드가 없고 초기 30 개의 공명주파수에서 탄성계수를 계산할 경우, 일반적으로 0.1 - 0.2% RMS 오차이내에서 계산된다. 앞서 기술한 바와 같이 fitted parameter에 대한 error bar는 최소점 부근에서의 곡률의 변화 때문에 다양하게 변화하며 일반적으로 compressional moduli(c_{ij} , $i=1,3$)의 오차 한계가 0.5 - 1.0%, shear moduli(c_{ij} , $j=4,6$)에 대해서는 0.02%, off-diagonal moduli(c_{ij} , $i \neq j$)에 대해서는 2.0 - 3.0% 범위에 계산되며 전체적인 RMS error는 0.1 - 0.2% 이내에서 계산된다. 일반적으로 초음파공명분광법으로 탄성계수를 측정할 경우 전반적인 실험의 정확성은 RMS error 값으로 표현할 수 있으며 적어도 RMS error가 0.2% 이내이러야 그 실험 결과를 신뢰할 수 있다. 시편 치수의 정확성은 측정치에서 수 μm 이내여야 하며 각도는 x-선 회절에서 얻은 값에서 1 -2° 이내라야 한다.

주어진 시편에 대해 최소치가 존재할 경우 보통 fitting 절차에서 사용되는 초기값과 수렴 비율은 rough하고 independent하다. 그럼에도 불구하고 초기 추정치를 조심해서 선정해야 하는 데 이를 위해서 길이, 밀도, 각도 등이 정확히 측정되어야 한다. 탄성계수는 이미 알고있는 단결정 또는 다결정 값 또는 관계성이 있는 화합물에 대해서 문헌 정보에서 구한다. 수렴율은 특히 각도와 연관성이 깊은 데 수렴을 위한 단계가 너무 길어지면 원하는 최소값과 초기값보다 좋지않은 경로를 거쳐서 오답을 유발할 수 있으므로 새로운 초기추정치를 대입하는 것이 좋다.

일단 초기 fit가 얻어지면 그 정밀성에 대해서 여러 번 반복 시험해야 하며 특히 신물질의 탄성계수를 측정할 경우에는 초기값에 대한 불확정성이 있으므로 반복 실험을 통해서 정확한 값을 구하는 것이 일반적이다. 또한 fitting routine은 초기 추정값이 약간 다를 경우에도 동일한 값으로 수렴해야하며 적어도 컴퓨터 계산 시간을 너무 낭비하지 않고 충분히 검사하기 위해서는 어떤 경우라도 5% 이상에서 변경하지 않는 것이 좋다. 예를 들어 시편이 cubic 결정이고 ($c_{11}=c_{22}$, $c_{44}=c_{66}$, $c_{12}=c_{23}$) tetragonal 대칭성을 가정하더라도 각각의 탄성계수 값이 오차 한계 이내에서 구해져야 하며 시편이 여러 개이거나 적어도 하나 이상의 치수의 조합에 대해서도 여러 번 측정해보아야 정확성을 보장할 수 있다. 마지막으로 상변태나 물질의 고유한 변화가 없는 상태인 경우에는 측정주파수는 온도의 함수로 서서히 변화해야 한다.

제 3절 초음파 공명 주파수 측정

1. 초음파공명분광법 측정을 위한 탐촉자

초음파공명분광법의 장점은 mm 크기의 시편에서 모든 탄성 계수를 한번에 측정할 수 있다는 점이다. 탄성 계수를 알아내기 위해서 잘 정의된 geometry 하에서 시편이 자유롭게 공진하도록 하여야 하며 원통형이나 장방형 시편이 실험이나 계산하기에 가장 유리한 형태이고 대부분의 초음파공명분광법 측정은 장방형 시편에서 행해진다. 또한 대형 시편은 그 무게 때문에 상용 탐촉자를 사용한 자유로운 공진 조건이 어렵기 때문에 소형 시편에 대해 (수 mm 크기) 적용하는 것이 일반적이다. Undisturbed free-sample의 공진을 측정하는 비결은 탐촉자와 시편을 접촉한 상태에서 측정하는 것인데 여기서 어려운 점은 1 mm 크기의 시편의 가장 낮은 정규 모드와 1 mm 탐촉자가 비슷하다는 점이며 탐촉자가 더 커지면 상황은 더 좋지 않다. 이러한 시스템의 공진은 간단하게 계산할 수 있는데 탐촉자가 두껍고 짧다면 낮은 주파수 공진 모드는 torsional 일 것이며 예컨대 음속이 3 km/s 인 황파에서 길이 1.5 mm인 탐촉자의 경우 가장 낮은 공진 모드는 1 MHz 정도가 되면 따라서 시편의 크기와의 비교되기 때문에 이보다 작은 탐촉자를 제작할 수 있는가에 관계된다.

많은 경우 정전기 방식보다는 전자기적 장치를 많이 사용하는 데 그 중에서 EMAT (Electro-Magnetic Acoustic Transducer)를 사용할 경우 결론적으로 원하는 주파수 특성을 얻기 위해서는 그 크기가 커지기 때문에 압전 탐촉자보다 불리한 반면에 Q-factor 가 상당히 낮은 특성이 있다.

대표적인 압전소자인 PZT는 (강유전체, 밀도가 높기 때문에 금속과의 음향 match가 우수함) 기계적 Q가 50 정도로 낮기 때문에 상온에서 초음파공명분광법 측정에 적당하다. 상온에서 가능한 댐핑 재료로 유리나 고분자 재료는 원천적으로 상온에서 비정질에 가까운 상태이기 때문에 분산에 의한 탐촉자 잡음이 증가한다. 그러나 상온이 아닌 다른 온도에서는 재료가 응고되어 댐핑 작용이 없어진다. 실제로 고분자 강유전체인 PVDF(Polyvinylidene fluoride) strip을 mm 이하의 시편에 grease로 부착하여 상온에서 액체 헬륨 온도까지 초음파공명분광법 측정을 성공했다.

압전 소자나 강자성 탐촉자들은 Curie 온도 이상에서는 사용할 수 없기 때문에

(Lithium Niobate는 800 - 1100 K 에서 전기적으로 short 회로가 되거나 용융됨) 온도에 대한 문제를 해결하기 위한 방안으로 buffer rod를 사용하기도 한다. Buffer rod는 길고 가는 알루미늄 실린더를 사용하는 데 노 내부에 시편을 넣고 buffer rod로 양쪽에서 받치는 형식으로 측정한다. 여기서 고려해야 할 점으로 buffer rod의 자체 공진 신호와 시편 공진 신호 간에 convolution과 시편과 rod 간에 가해지는 힘의 균형이다. 구체적으로 길이 20 cm, 직경 3 mm의 알루미늄 봉에서 횡파 속도는 6000m/s로 진행하며 종파는 10,000m/s 속도이다. 이것을 이상적인 탐촉자 (질량이 0이고 stiffness가 무한대)와 한 변이 대략 3mm 인 시편 (대개 금속의 경우 음속은 5,000 m/s)에 접촉시킨다고 할 때 초기 50개 공명 신호는 0.438 - 1.25 MHz 에서 나타난다. 이 주파수 범위에서 buffer rod에 의한 공진이 나타나서 소위 reverberation limit가 있다. 이것은 대략 $Q=1000$ 인 고온 알루미늄의 경우 모드가 심각하게 중첩되어 전체적인 효과는 시편 측정에 사용되는 주파수 범위에서 음향을 방출하는 특성이 양호한 buffer rod로 볼 수 있다. 따라서 알루미늄 buffer rod를 사용하여 고온 실험을 하고자 할 경우 알루미늄 rod 의 공진 특성을 미리 조사하여 시편의 공진 주파수 영역에서 중첩되는 효과를 고려해야 한다. 일반적으로 MHz 범위에서 실험할 경우에는 큰 문제가 되지 않으나 시편의 Q 가 낮아지면 공진 진폭이 작아지면 신호가 상당히 왜곡되어 식별하기가 곤란할 경우도 발생한다. 이렇게 신호의 왜곡이 심할 경우 실제 공진 중심 주파수 f 에서 f/Q 만큼 떨어진 곳에 공진 주파수가 있는 것처럼 보일 수도 있으므로 주의해야 한다.

2. 초음파공명분광법 측정에서의 Q-factor

초음파공명분광법으로 측정할 수 있는 장점의 하나는 공명주파수에서 Q-factor를 측정할 수 있다는 점이다. Q-factor 는 공명 스펙트럼에서 최대치의 반가폭 (FWHM; Full Width Half Maximum) 또는 $\pi f \tau$ 을 (f = 공명 주파수, τ = 지수감쇠상수 또는 한 주기당 축적에너지/손실에너지 비율) 의미하며 Q 를 측정함으로써 초음파 감쇠에 대한 유용한 정보를 얻을 수 있다. 그러나 초음파공명분광법으로 구하는 Q 와 일반적인 초음파 감쇠 측정에 의한 Q 는 원리적으로는 동일하나 실제적인 측정에서는 다르다.

일반적인 초음파 감쇠 측정법에서는 평면 음향파가 시편 내부를 진행하면서 탄성적 산란 과정을 통해서 나타나는 현상으로써 선형적인 응답 특성을 나타내게

되며 따라서 가해진 주파수 이외에 다른 주파수가 생성되지는 않는다. 또한 평면 탐촉자를 사용하여 평면 음향파를 생성한다고 하지만 고체 내부를 진행하면서 회절하기 때문에 정확산 평면성을 계속 유지하면서 고체 내부를 진행하지는 않는다. 산란에 의한 빔의 퍼짐 각도는 대략 λ/d (λ = 음파의 파장, d = 탐촉자 직경) 인데 수신 탐촉자의 거리가 $R=d^2/\lambda$ 정도 떨어졌을 때 음파의 회절 효과가 뚜렷하다. 이러한 회절 효과를 고려하지 않는 경우 연속적인 펄스는 시간에 대해서 지수 함수적으로 감쇠하지만 회절이 존재한다면 열역학적 소실 (thermodynamic dissipation)을 보상해 주어야 한다.

초음파 감쇠는 열로 변환되어 소실되는 효과에 덧붙여서 다결정 금속 grain boundary 산란, 특히 grain size가 큰 재료에서 감쇠가 심하기 때문에 진정한 dissipation 이 아니다. 또한 시편 표면이 평행하지 않다면 연속적인 파의 왕복이 지그재그 형태로 나타나서 수신 신호는 감소하며 회절 패턴은 마치 레이저 빔 패턴에서 ring 형태 회절과 같이 nodal direction을 가진다. 이러한 사항들을 고려할 때 펄스-에코 실험에서는 진정한 감쇠를 측정하기 위해서 상당한 주의가 필요하다.

초음파공명분광법에서 Q-factor 의 측정은 공명 주파수에서의 신호의 폭 또는 반가폭 (FWHM), 즉 손실을 측정하는 것으로써 Q-factor 정의에 가장 가까운 실험 방법이다. 원래 공명 신호는 이론적으로 폭을 가질 수 없으나 실제로 이런 상황은 존재하지 않으며 반드시 어떤 폭을 가진다. 이렇게 공명 주파수에서 신호 폭이 존재한다는 것은 공명주파수가 어떤 원인에 의해서 약간 이동한 성분이 존재한다는 것을 의미한다. 이렇게 공명주파수를 이동시키는 원인으로는 i) 평행하지 않은 시편면, ii) 산란체 (grain boundary, inclusion, defect, 결함 등)이 있다. 만약 산란체에 의한 주파수 이동은 산란체가 탄성적이며 감쇠가 없다고 가정하고, (elastic and non-dissipative) 모든 산란체 중심의 위치, 크기, 형태를 알 수 있다면 이론적인 완벽한 물체로부터의 공진주파수와는 다른 약간 이동한 공명주파수를 계산하는 것이 가능할 것이다. 실제로 이러한 계산은 대단히 복잡하며 특히 3차원 물체의 공명을 정확히 계산하는 것은 상당히 어렵다.

그러나 초음파공명분광 실험도 역시 완벽한 것은 아니다. 펄스-에코 장치와 공진 장치간에 주된 차이점은 펄스-에코 방식에서는 센서가 시편에 접촉해서 시편-센서 시스템에서 진동 에너지를 전달하는 데 시편에서의 파의 radiation, 즉 진동 에너지가 어떤 진행 경로를 거쳐 측정 범위를 벗어나는 현상이 없다. 따라

서 일반적으로 펄스-에코에서 파의 방출은 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 초음파공명분광법에서는 시편의 공진을 정확히 측정하기 위해서 센서와 시편이 접촉되어야 하며 시편을 탐촉자가 잡고 있어야 한다. 시편이 가능한 한 자유롭게 진동하도록 하기 위하여 탐촉자가 시편을 잡는 힘은 가능한 한 작아야 하며 통상 mm 크기의 시편을 사용할 경우 가해지는 힘은 0.1 N 이하라야 한다. 이러한 시편의 진동에 의해서 시편 표면 또는 모서리에서 파의 radiation 이 발생한다. 이러한 시편의 radiation에 영향을 주는 것은 시편 mount 와 시편 주위의 기체가 있다. 특히 시편 주위 기체의 종류에 따라, 기압에 따라 영향을 받는다.

Shear 모드 공명에서 시편 진동면은 dipole-like radiation을 일으키므로 시편면의 크기가 gas에서의 종파 파장과 비슷할 경우(가장 낮은 주파수에서도 시편의 크기는 gas 에서의 음파의 파장보다는 큼) radiation match가 이루어져서 에너지가 시편에서 빠져나가며 따라서 Q값이 낮아진다. 예컨대 주변 기체 압력이 대기보다 높아서 공명을 변화시킬 경우 시편에 상당한 기계적 하중을 추가하는 것과 같은 작용을 한다. 통상 기체의 평균 자유 경로가 시편 chamber 크기보다 클 정도로 기압을 낮추면 압력에 무관하게 성공적인 실험을 할 수 있다.

진공 펌프를 사용하여 기압을 수 torr 정도로 낮추면 기체의 radiation 효과가 작아져서 공명 신호 진폭을 수 order 증대시킬 수 있다. 기압에 대한 Q 값의 영향을 측정해 보면 50K 이하 온도에서 기압 (He 기체) 의 영향이 상당하며 특히 Q-factor 측정 시에 문제가 된다. Isaak, Cynn, and Andeson [9]은 초음파공명분광법 방법으로 일반적인 2차 탄성 계수에다 압력 의존성을 변수로 추가하여 광물의 3차 탄성 계수(third order elastic constant)를 측정하였는데 기압을 수십 bar 까지 상승시키는 동안 Q 값 저하와 공명 주파수 이동이 나타났다.

제 4 절 고온 초음파공명분광 시스템 제작

초음파공명분광 시스템은 Fig. 4-1에 보인 바와 같이 기본적으로 연속적인 주파수를 발생시키는 synthesizer, 발생된 신호를 초음파 에너지로 변환하여 시편에 가해주는 송신용 광대역 초음파 센서와 초음파 신호를 수신하는 수신용 광대역 초음파 센서 및 제어용 PC로 구성된다. 이 장치는 온도 제어 기능이 없으므로 고온 탄성계수를 측정하기 위한 초음파 공명분광 실험 장치를 설계, 제작하기 위하여 기존에 보유하고 있는 초음파공명분광 장치 (미국 Quatrosonic 사 제품 Ruspec 장비)에 소형 가열로 및 온도 제어 장치를 부착하는 방식을 택했다. 초음파 센서로 사용되는 압전 소자는 Curie 온도 이상에서는 압전 성질을 잃어버리므로 알루미늄 봉을 wave guide로 사용하여 초음파가 furnace 내에 시편에 전달되도록 하였다.

기본적으로 고온 초음파공명실험 장치는 Fig. 4-2에 보인 바와 같이 광대역 초음파 센서를 알루미늄 wave guide에 접합하여 시편 하부에 설치하여 송신용으로 사용하였으며 동일한 센서 및 알루미늄 wave guide를 시편 상부에 설치하여 수신용으로 사용하였다. 시편을 holding 하는 힘은 스프링으로 제어되도록 하였으며 시편의 자유로운 진동을 위하여 가능한 한 작은 힘이 시편에 가해지도록 하였다. 상세 설계 도면은 부록에 첨부하였다.

소형 가열로는 1000 °C 까지 가열할 수 있도록 설계하였으나 시편의 산화 등을 고려하여 상온 ~ 약 500 °C 범위에서 온도에 따른 초음파 물성 측정, 특히 동적 탄성계수 및 음속 측정이 가능하도록 하였다. Fig. 4-3 및 4-4 에 제작된 고온 실험용 초음파공명 장치의 사진을 보였다.

초음파공명 실험에서 중요한 사항의 하나는 시편에 가해지는 힘에 따라, 외부 압력에 따라 공명 주파수 및 Q 값이 약간 이동한다는 점이다. 일반적인 탄성계수 측정 실험에서는 이러한 공명 주파수의 미세한 이동이 측정치에 큰 영향을 주지는 않으나 재료 물성에 중요한 인자인 Q 측정에서는 상당한 영향을 끼친다. 이러한 사항을 실험에 반영하기 위하여 2차 연도에서는 소형 load cell을 부착하여 시편에 가해지는 힘을 정량적으로 측정하고 제어할 수 있도록 할 예정이며 아울러 시편의 산화 방지는 물론 기압의 영향을 제어하기 위하여 간단한 진공 시스템을 제작하여 분위기 또는 진공 상태에서의 실험이 가능하도록 할 예정이다.

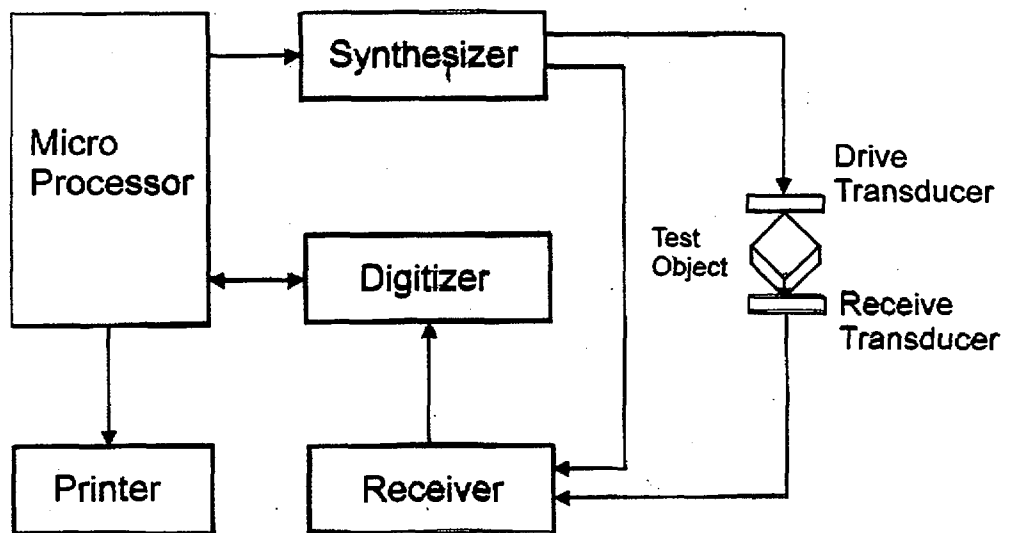


Fig. 4-1. Block diagram of resonant ultrasound spectroscopy (RUS).

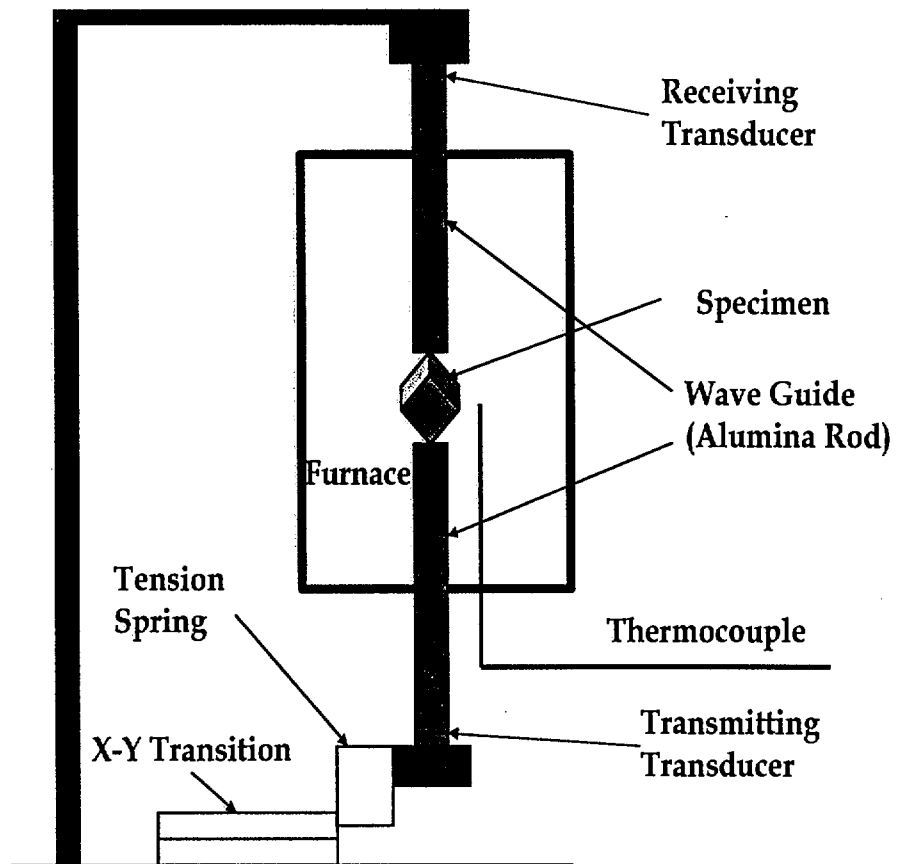


Fig. 4-2. A design of high temperature device for RUS experiment.

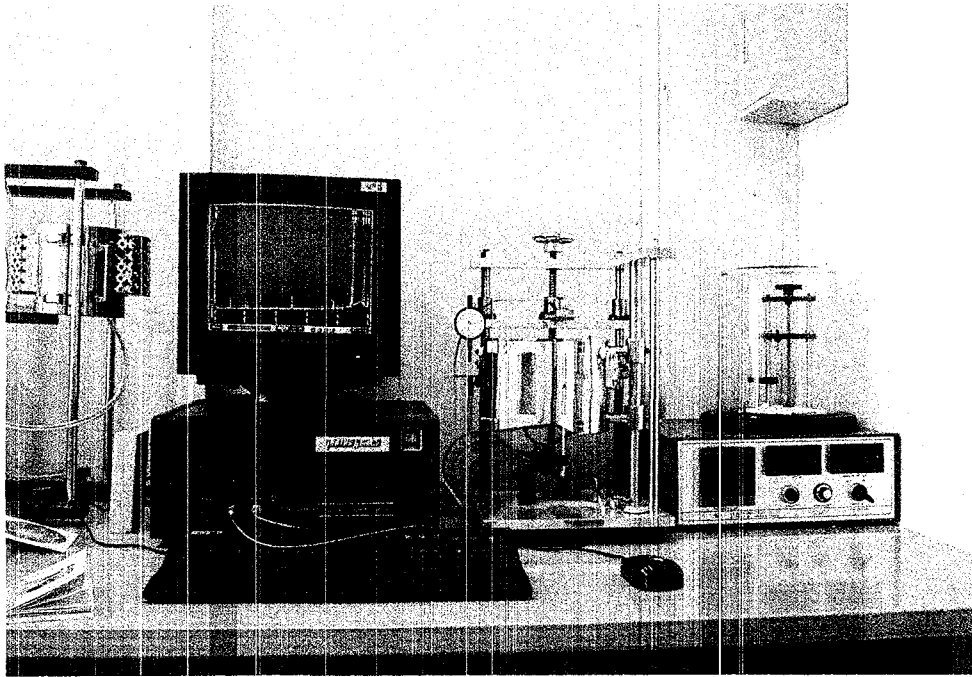


Fig 4-3. 제작된 고온 초음파공명분광 실험 장치 전경.

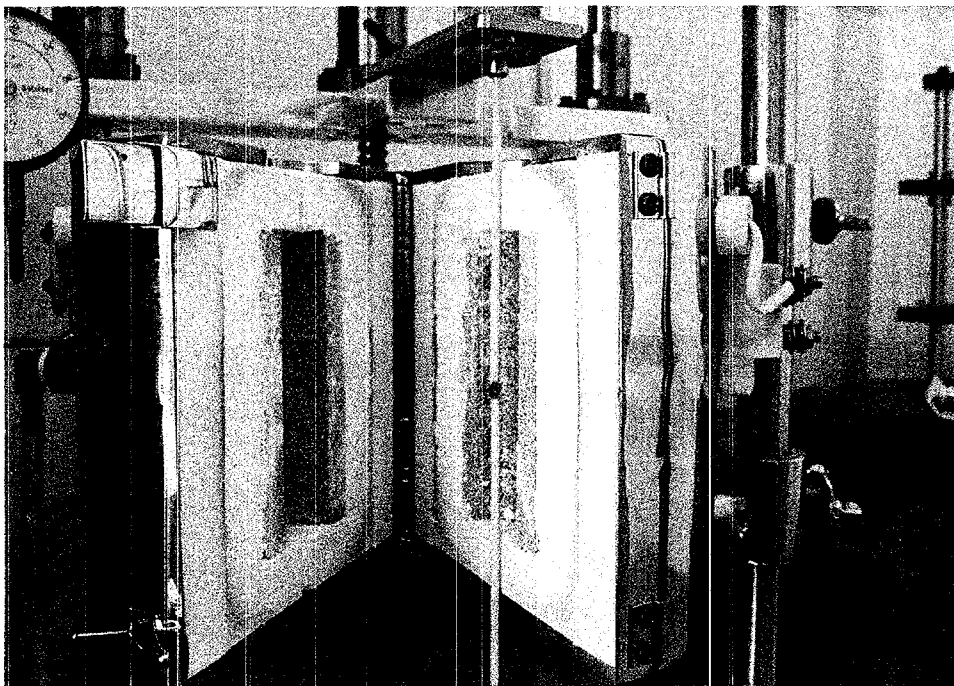


Fig. 4-4. 고온용 소형 furnace 내부에 초음파 탐촉자 및 wave guide에 SA 508 원자로 재료 시편이 장착된 모습.

제 5 절 초음파공명분광 실험

1. 원자로 용접부의 국부적 미세조직 변화에 따른 동적탄성계수 측정

1.1. 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 C1. 3 단조강(Mn-Mo-Ni 저합금강)을 용접하여 제작한다. 원자로 압력용기강의 용접부는 국부적으로 급격한 온도 변화를 겪음으로 인하여 복잡한 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 [10,11]. 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 [12]. 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 초음파공명분광이론은 지질학에 근거를 두며 구형체의 자유 진동에 대한 연구에서 시작되었는데 중심적인 이론은 J. D. Maynard [13] 의해서 전개되었으며 Holland [4]와 Demarest [5]는 탄성적으로 등방성인 직육면체의 공명을 이론적으로 계산하고 이를 실험적으로 측정하였는데 이 결과들은 Ohno [6]에 의해서 일반화되었다. 이러한 결과들을 종합하여 Visscher 등 [8]이 고체물리 분야에서 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(1 mm 정도)로도 측정 가능하여 작은 단결정 시편에도 적용할 수 있고, 단 한번의 측정으로 최대 21개의 이방성 탄성계수 텐서를 모두 구할 수 있다는 장점이 있다 [14]. 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 [15,16] 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 공명분광법으로 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.

1.2. 시편 준비

본 실험에 사용된 시편은 원자로용 ASME SA 508 Cl. 3 급 Mn-Mo-Ni 계 저합금강으로 화학성분은 Table 5-1과 같다 [17]. 원자로용 저합금강 모재는 소입 및 소둔(quenching & tempering)에 의해 모재는 tempered bainite 기지 조직을 갖는다. 한편 이의 용접부는 모재의 벽두께 220 mm를 약 130 pass 이상 자동 용접하고 용접 후열 처리 (post weld heat treatment)를 거치는 동안 일정한 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. 각각 시험편의 미세 조직 사진을 Fig. 5-1에 보였으며 각각의 미세 조직을 Table 5-2에 정리하였다. 각각의 재현 시험편 S1 ~ S7을 3.0 mm X 3.5 mm X 4.0 mm 크기의 장방형 시험편으로 가공하여 초음파공명분광법을 적용한 동적 탄성계수 측정에 사용하였다.

Table 5-1. 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 5-2. 시편의 열처리 이력 및 미세 조직

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

**CGTM*: Coarse Grained Tempered Martensite

**TM*: Tempered Martensite

**TB*: Tempered bainite

**F*: Ferrite

**FGTB*: Fine Grained Tempered bainite

**CC*: Coarse Carbide

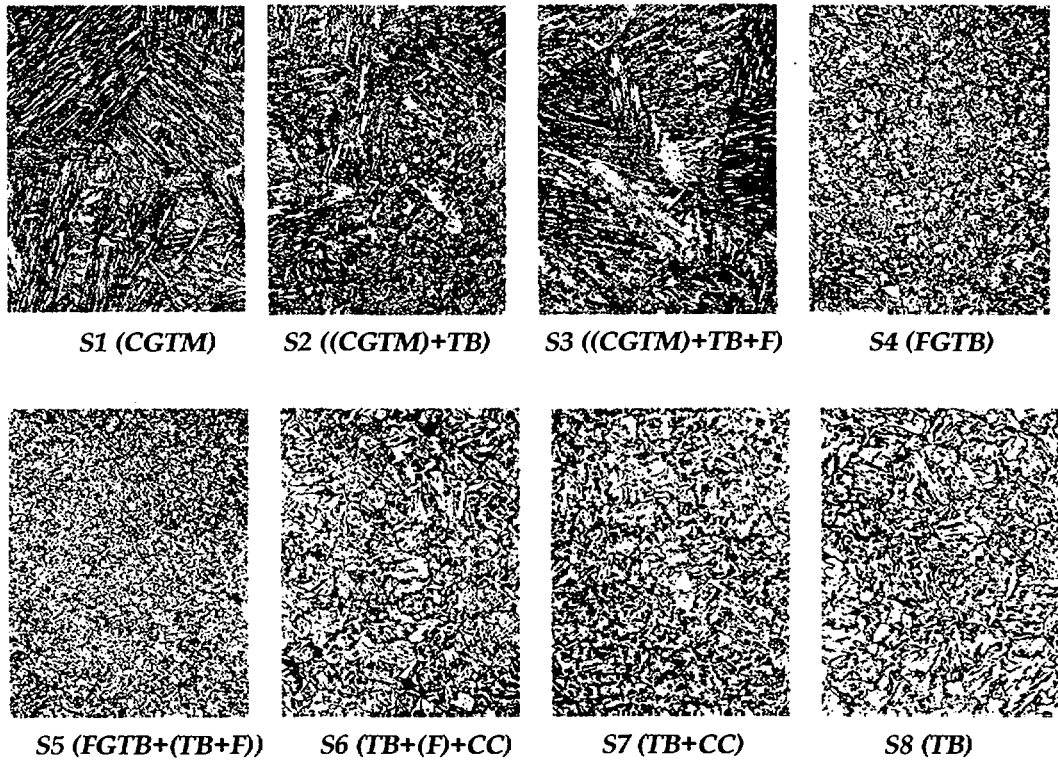


Fig. 5-1. Microstructures in various HAZ regions in SA 508 RPV weld.

1.3. 초음파공명분광법에 의한 탄성계수 측정

초음파공명분광법을 사용한 탄성계수 측정 과정은 우선 시편의 치수, 밀도, 추정 탄성계수를 가지고 추정 고유주파수 또는 추정 공명 주파수를 계산한다 [14]. 계산된 공명 주파수를 기초로 하여 실제 측정된 공명 주파수와의 비교를 통하여 정확한 탄성계수를 추출해야 하는데 컴퓨터 수치 해석에서 널리 사용되는 Levenberg-Marquardt법을 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 시편의 탄성계수를 구하였다.

Fig.5-2에 초음파공명분광법으로 탄성계수를 구하는 알고리즘을 보였다. 초음파공명분광법으로 재료의 탄성계수를 구하기 위해서는 먼저 시편의 대칭성을 결정하고 초기 추정 탄성계수 값을 입력해야 한다. 특히 초기 추정 탄성계수 값은 가능한 한 실제 탄성계수 값에 근접해야 하는데 이를 위해서 각종 문헌 자료, 다른 실험 데이터 등을 참조하여 결정한다. 장방형 시편의 3 축 방향 길이, 무게를 정밀 측정하고 여기에 대칭성 및 초기 추정 탄성계수 값들을 컴퓨터 프로그램 'RPMODEL' 입력하면 초기 추정 공명주파수가 계산된다.

여기서 주의할 점은 장방형 시편의 모서리에서의 직각도를 정확히 유지해야 하며 측정되는 공명 모드가 degenerate 되도록 하기 위해서 3 변의 길이를 가능한 한 다르게 해야 한다. 본 연구에서 사용한 시편의 제원은 3.5 mm X 4.0 mm X 4.5 mm 였다. 초음파공명분광 시스템에 시편을 장착하고 컴퓨터 프로그램 'RUSPEC'을 구동시켜서 공명주파수를 측정한다. 측정된 공명 주파수와 계산된 초기 추정 공명주파수를 비교해 가면서 프로그램 'RPR' 또는 'RPMODEL'을 구동시키면 Levenberg-Marquardt법에 의한 반복 수렴 알고리즘에 의해서 추정치와 계산치의 차이를 줄여나가면서 정확한 탄성계수를 계산한다.

장방형 시편을 사용할 경우 탄성계수 텐서 요소가 9개인 orthorhombic symmetry 까지 한꺼번에 측정할 수 있으나 본 연구에서는 등방성을 가정한 SA 508 Cl. 2 원자로 압력용기강 재료를 대상으로 다양한 열처리 변수에 의한 미세 조직 차이를 탄성계수 값과 연관지었다.

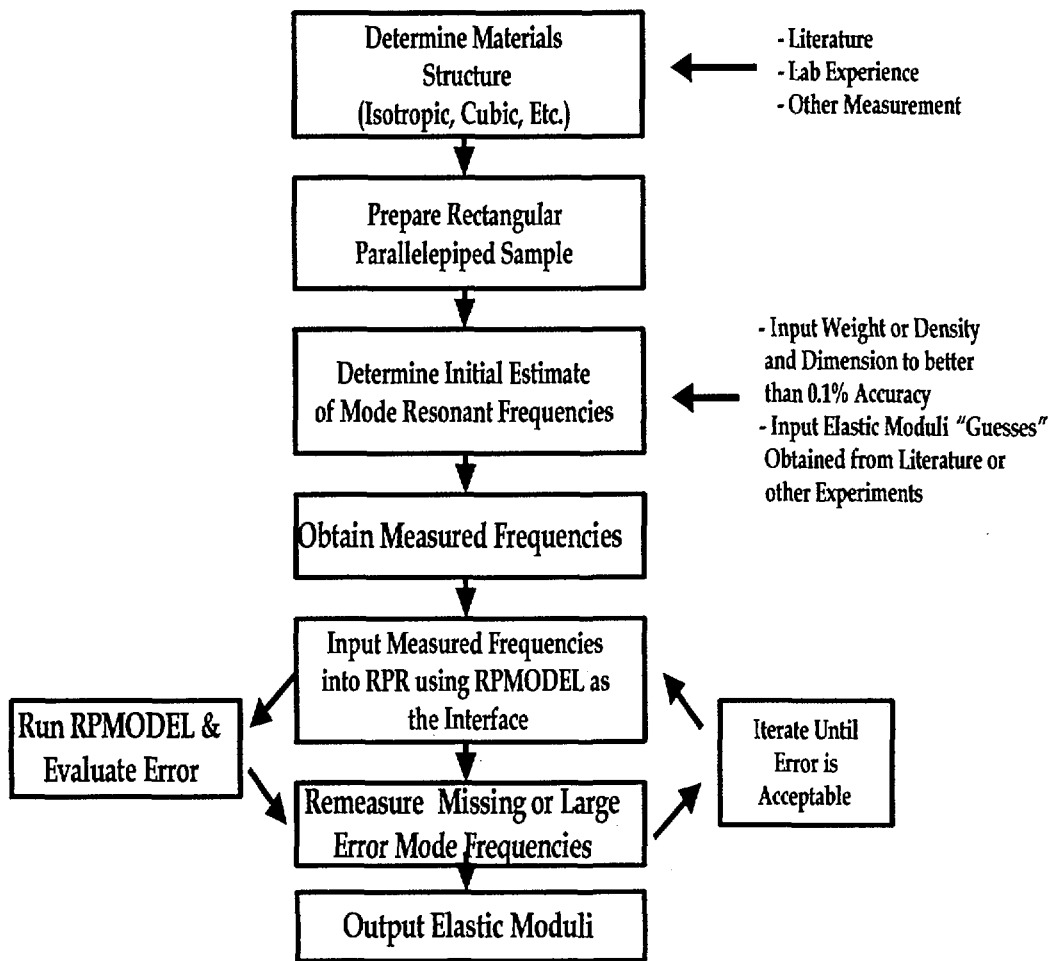


Fig. 5-2. 초음파공명분광법에 의한 탄성계수 측정 알고리즘.

원자로 압력용기강의 탄성계수 초기 추정치는 다음과 같은 방법으로 계산하였다.

1) $E = 207.200 - 57.09 T/1000$ (GPa, $T = ^\circ C$)를 적용하여 [18], $25^\circ C$ 에서의 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,

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

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

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

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

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

이 되며 이 값들을 초음파공명분광법의 초기 추정 탄성계수로 입력하였다.

1.4. 실험 결과 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.

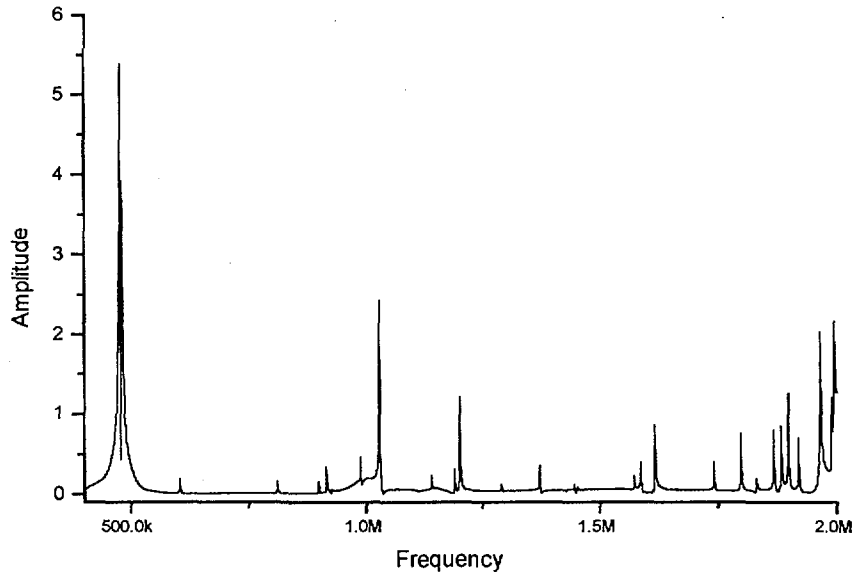


Fig. 5-3. Typical resonance spectrum of SA 508 rectangular parallelepiped shaped specimen.

SA 508 Cl. 3 장방향 재료에 대한 전형적인 초음파공명분광 스펙트럼을 Fig. 6-3에 보였다.

모재를 포함하여 총 8 종류의 시편을 각각 4 개씩 준비하여 상온에서 탄성 계수를 측정하였으며 Table 5-3 에 측정 결과를 정리하였다. 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% 이내이러야 신뢰성있는 데이터로 간주하는 데 비추어 본 실험 결과는 대단히 정밀한 측정이 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

Fig. 5-4 및 Fig. 5-5에 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 205 GPa 정도로 추정된 값이 초음파공명분광법으로 측정한 경우에는 209 ~ 212 GPa 정도로 약간 높게 나타난다. 이것은 아마도 초음파를 사용하는 동적 탄성계수 값이 정적 기계 시험법으로 측정한 탄성계수 값보다 약간 높게 나타나는 일반적인 현상으로 해석할 수 있다.

한편 Fig. 5-4 및 Fig. 5-5에서 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 ° C에서 1차 열처리하여 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), 부분변태(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 5-2에 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.

Table 5-3. 초음파공명분광법으로 측정된 탄성계수

Speimen No.	c ₁₁ [10 ¹² dyn/cm ²]	c ₁₂ [10 ¹² dyn/cm ²]	c ₄₄ [10 ¹² dyn/cm ²]	Young's Modulus, E (Gpa)	Shear Modulus (Gpa)	Bulk Modulus, B (Gpa)	Poisson's Ratio	RMS error (%)	Density [g/cm ³]	Index
SA508_1A	2.7661	1.1244	0.8208	211.607	82.08	167.17	0.28903	0.106	7.883818	1
SA508_1A1	2.7646	1.125	0.8198	211.383	81.98	167.153	0.28923	0.0816	7.883818	1
SA508_1B	2.7654	1.1282	0.8186	211.159	81.86	167.393	0.28976	0.0909	7.837368	1
SA508_1B1	2.7611	1.1239	0.8186	211.083	81.86	166.963	0.28929	0.0807	7.837368	1
SA508_1C	2.7681	1.1287	0.8197	211.425	81.97	167.517	0.28965	0.1188	7.849	1
SA508_1C1	2.7546	1.1161	0.8192	211.086	81.92	166.233	0.28836	0.0802	7.849	1
SA508_1D	2.7554	1.118	0.8187	211.001	81.87	166.38	0.28864	0.0846	7.857926	1
SA508_1D1	2.7587	1.1217	0.8185	211.02	81.85	166.737	0.28907	0.0804	7.857926	1
SA508_2A	2.724	1.0957	0.8142	209.548	81.42	163.84	0.28684	0.2279	7.842549	2
SA508_2A1	2.7226	1.0931	0.8148	209.641	81.48	163.62	0.28646	0.1928	7.842549	2
SA508_2B	2.7398	1.11	0.8149	209.971	81.49	165.327	0.28833	0.1478	7.889313	2
SA508_2B1	2.7419	1.1106	0.8156	210.147	81.56	165.443	0.28883	0.1454	7.88313	2
SA508_2C	2.7528	1.1236	0.8146	210.143	81.46	166.667	0.28986	0.1214	7.850296	2
SA508_2C1	2.7678	1.1377	0.8151	210.506	81.51	168.1	0.29129	0.1264	7.850296	2
SA508_2D	2.7732	1.1472	0.813	210.181	81.3	168.92	0.29262	0.1327	7.822154	2
SA508_2D1	2.7801	1.1534	0.8134	210.379	81.34	169.557	0.29321	0.1212	7.822154	2
SA508_3A	2.7565	1.1265	0.815	210.288	81.5	166.983	0.29011	0.1053	7.838466	3
SA508_3A1	2.757	1.1267	0.8152	210.337	81.52	167.007	0.29009	0.1016	7.838466	3
SA508_3B	2.7678	1.1383	0.8147	210.426	81.47	168.153	0.29143	0.121	7.834624	3
SA508_3C1	2.7658	1.1359	0.815	210.451	81.5	167.913	0.29111	0.1145	7.834624	3
SA508_3C	2.7551	1.1254	0.8149	210.244	81.49	166.857	0.29	0.0845	7.846036	3
SA508_3C1	2.7567	1.1259	0.8154	210.371	81.54	166.95	0.28999	0.0863	7.846036	3
SA508_3D	2.758	1.1273	0.8153	210.374	81.53	167.093	0.29016	0.1169	7.848398	3
SA508_3D1	2.7619	1.1306	0.8157	210.522	81.57	167.43	0.29044	0.1061	7.848398	3
SA508_4A	2.7534	1.1243	0.8145	210.134	81.45	166.74	0.28996	0.1071	7.838796	4
SA508_4A1	2.7566	1.1263	0.8152	210.329	81.52	166.967	0.29005	0.1158	7.838796	4
SA508_4B	2.757	1.1292	0.8139	210.078	81.39	167.18	0.29057	0.0986	7.821942	4
SA508_4B1	2.7567	1.1282	0.8142	210.133	81.42	167.11	0.29042	0.0964	7.821942	4
SA508_4C	2.7602	1.1275	0.8163	210.611	81.63	167.18	0.29004	0.1196	7.865665	4
SA508_4C1	2.7629	1.1324	0.8153	210.46	81.53	167.582	0.29069	0.0778	7.865665	4
SA508_4D	2.7613	1.1324	0.8145	210.273	81.45	167.53	0.29081	0.1013	7.844327	4
SA508_4D1	2.7681	1.1384	0.8149	210.471	81.49	168.159	0.29139	0.0989	7.844327	4
SA508_5A	2.7687	1.1299	0.8194	211.376	81.94	167.617	0.28982	0.0809	7.836949	5
SA508_5A1	2.7653	1.1261	0.8196	211.355	81.96	167.25	0.28938	0.0689	7.836949	5
SA508_5B	2.7676	1.1278	0.8199	211.456	81.99	167.44	0.28952	0.0705	7.869413	5
SA508_5B1	2.77	1.129	0.8205	211.617	82.05	167.6	0.28956	0.0694	7.869413	5
SA508_5C	2.7685	1.1294	0.8196	211.412	81.96	167.57	0.28973	0.0739	7.852715	5
SA508_5C1	2.7718	1.1308	0.8205	211.649	82.05	167.78	0.28976	0.0828	7.852715	5
SA508_5D	2.7723	1.1324	0.82	211.559	82	167.897	0.28999	0.0933	7.848172	5
SA508_5D1	2.7668	1.127	0.8199	211.441	81.99	167.36	0.28943	0.07	7.848172	5

Table 5-3. 초음파공명분광법으로 측정된 탄성계수 (계속).

Speimen No.	c_{11} [10^{12} dyn/cm ²]	c_{12} [10^{12} dyn/cm ²]	c_{44} [10^{12} dyn/cm ²]	Young's Modulus, E (Gpa)	Shear Modulus (Gpa)	Bulk Modulus, B (Gpa)	Poisson's Ratio	RMS error (%)	Density [g/cm ³]	Index
SA508_6A	2.7605	1.1221	0.8192	211.191	81.92	166.823	0.28901	0.0642	7.83646	6
SA508_6A1	2.7636	1.1237	0.82	211.404	82	167.027	0.28905	0.0696	7.83646	6
SA508_6B	2.754	1.1164	0.8188	210.996	81.88	166.227	0.28845	0.0864	7.823086	6
SA508_6B1	2.7573	1.1203	0.8185	210.996	81.85	166.597	0.28892	0.0594	7.823046	6
SA508_6C	2.7566	1.118	0.8193	211.141	81.93	166.42	0.28855	0.0841	7.843055	6
SA508_6D	2.7604	1.1208	0.8198	211.308	81.98	166.733	0.28878	0.1024	7.843327	6
SA508_6D1	2.764	1.1252	0.8194	211.293	81.94	167.147	0.28931	0.0696	7.843327	6
SA508_7A	2.7459	1.1116	0.8172	210.535	81.72	165.63	0.28815	0.0795	7.817048	7
SA508_7A1	2.7477	1.1125	0.8176	210.646	81.76	165.757	0.28882	0.0754	7.817048	7
SA508_7B	2.7571	1.1212	0.8179	210.873	81.79	166.657	0.28911	0.1143	7.817048	7
SA508_7B1	2.7608	1.1257	0.8175	210.86	81.75	167.08	0.28966	0.0881	7.817048	7
SA508_7C	2.7462	1.1096	0.8183	210.757	81.83	165.513	0.28777	0.1024	7.823595	7
SA508_7C1	2.7506	1.1148	0.8179	210.757	81.79	166.007	0.2884	0.0748	7.823595	7
SA508_7D	2.7519	1.1148	0.8186	210.919	81.86	166.043	0.28829	0.1041	7.818946	7
SA508_7D1	2.7551	1.1186	0.8182	210.897	81.82	166.417	0.28879	0.0796	7.818946	7
SA508_8A	2.7468	1.1121	0.8174	210.59	81.74	165.93	0.28817	0.0743	7.829797	8
SA508_8A1	2.7479	1.112	0.8179	210.709	81.79	165.737	0.28811	0.0739	7.829797	8
SA508_6C1	2.7563	1.1181	0.8191	211.096	81.91	166.417	0.28859	0.0573	7.843055	6
SA508_8B	2.7612	1.1268	0.8172	210.807	81.72	167.16	0.28981	0.0805	7.817835	8
SA508_8B1	2.762	1.126	0.818	210.98	81.8	167.133	0.28961	0.08	7.817835	8
SA508_8C	2.7553	1.119	0.8181	210.881	81.81	166.45	0.28884	0.0844	7.822957	8
SA508_8C1	2.7537	1.1169	0.8184	210.911	81.84	166.25	0.28856	0.0753	7.822957	8
SA508_8D	2.7501	1.116	0.8171	210.59	81.71	166.71	0.28864	0.0753	7.813875	8
SA508_8D1	2.7527	1.1167	0.818	210.815	81.8	166.203	0.2886	0.0834	7.813875	8

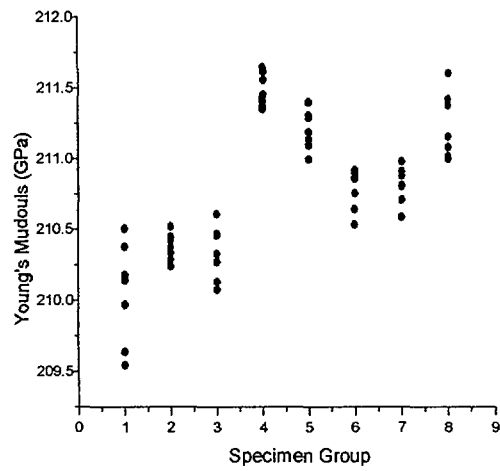


Fig. 5-4. Young's modulus of SA 508 Cl. 3 alloy by RUS. 1)

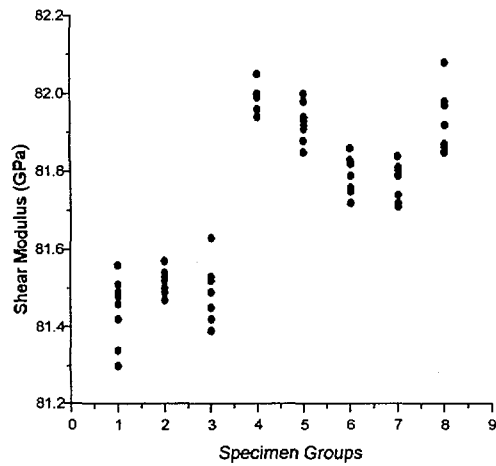


Fig. 5-5. Shear modulus of SA 508 Cl. 3 alloy by RUS.

-
- 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

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 능가하지 못한다고 보고된 것과 [19] 일치한다.

Fig. 5-6 및 Fig. 5-7에 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, E 는 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. 5-5)와 동일하므로 별도 그림으로 나타내지 않았다.

초음파 공명분광법으로 탄성계수의 측정 이외에도 공명 데이터를 이용하여 속도를 계산할 수 있는데 Fig. 5-8 및 Fig. 5-9에 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 이에 1) martensite의 tetragonality의 감소 및 소멸, 2) 전위 감소, 3) carbide 입자의 성장 및 구상화 등을 고려할 수 있다[20]. 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.

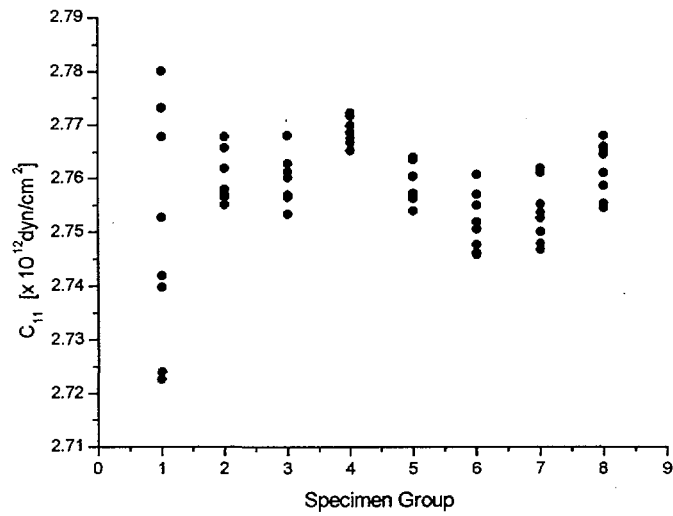


Fig. 5-6. Elastic stiffness (c_{11}) of SA508 Cl. 3 alloy by RUS²).

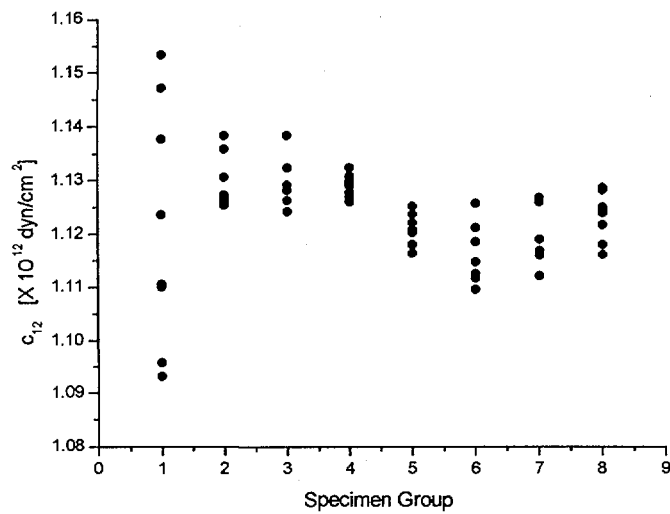


Fig. 5-7. Elastic stiffness (c_{12}) of SA508 Cl. 3 alloy by RUS.

-
- 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

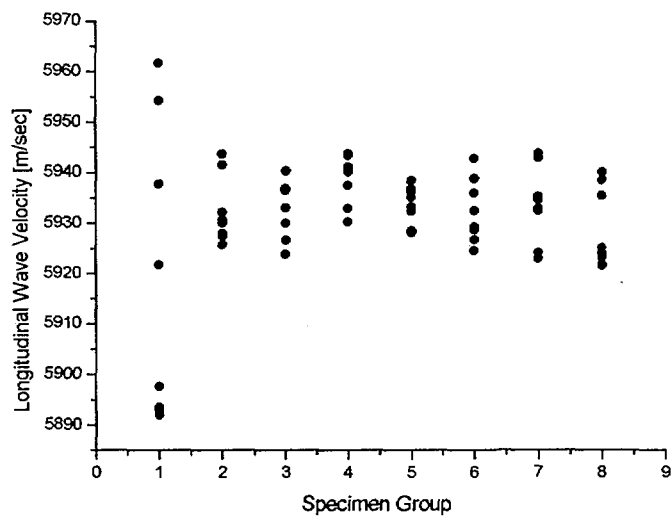


Fig. 5-8. Longitudinal wave velocity of SA 508 Cl. 3 alloy by RUS.³⁾

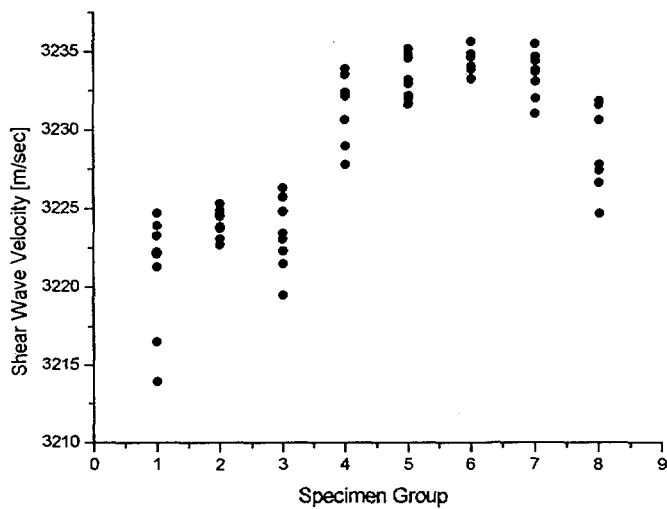


Fig. 5-9. Shear wave velocity of SA 508 Cl. 3 alloy by RUS.

- 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

초음파 속도는 재료의 미세 구조와 lattice distortion, 즉 결정립의 크기 및 형상, 잔류 응력 등에 관련된다. Palanichamy et al.은 [21, 22] 오스테나이트 스테인레스강을 냉간 가공한 뒤 이를 회복, 재결정 단계를 거치면서 종파와 횡파의 속도를 측정한 결과 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. Ahn and et al.은 [23] 한편 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 있는데 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 [24] 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.

Fig. 5-10 및 5-11에 온도 변화에 따른 Young's modulus 및 shear modulus의 변화를 보였으며 Fig. 5-12 및 5-13에 온도 변화에 따른 종파 속도 및 횡파 속도의 변화를 나타냈다. 개략적으로 보아 Young's modulus와 shear modulus는 온도 변화에 따라 선형적으로 변화하고 있으며 종파 속도 및 횡파 속도도 그 경향은 선형적이라고 판단할 수 있다. 그러나 자세히 살펴보면 직선성에서 약간 벗어나는 경향이 나타나고 있는데 본 연구에서는 2 개의 시편에서 측정된 데이터 뿐이기 때문에 이러한 현상이 실제 시편에 의한 경향인지 단순한 data scattering 인지 판단할 수 없다. 앞으로 보다 많은 측정을 통하여 이를 규명해야 할 것이며 또한 온도 변화에 따른 미세 조직의 차이에 따른 영향도 검토해 보아야 할 것이다.

한편 Fig. 5-10에서 기계적 시험에 의한 Young's modulus의 온도 의존 계수 $E = 207.200 - 57.09 T/1000$ (GPa, $T = ^\circ C$) [14]를 고려해 보았다. 초음파공명분광법에 의한 탄성계수 값은 거의 완벽한 이론적인 탄성계수라고 볼 수 있는 반면에

기계 시험에 의한 탄성계수는 일부 소성 변형도 포함된 탄소성 변형에 의한 계수라고 볼 수 있다. 이렇게 볼 때 두 측정치의 차이는 소성 변형에 의한 기여분이라고 볼 수 있으며 특히 기계 시험에서 온도의존계수는 $-57.09 \text{ MPa}/^\circ \text{C}$ 로 나타나는 데 본 실험에 의한 온도 의존 계수는 $-70.27 \text{ MPa}/^\circ \text{C}$ 로 나타나서 기계적 시험 결과보다 절대값이 크다는 것을 알 수 있다. 즉 고온으로 갈수록 기계적 시험 결과, 즉 정적 탄성계수와 초음파공명분광에 의한 동적 탄성계수의 차이가 줄어들고 있다. 이것은 저온으로 갈수록 기계 시험에 의한 정적 탄성계수에는 선형적인 탄성 성분이외에 비선형적인 소성 변형 성분이 추가되어있으나 온도가 증가할수록 소성 변형 성분이 감소하여 탄성에 가까워지기 때문에 두 값이 근접하는 것으로 일차적으로 판단되나 앞으로 보다 많은 실험 데이터 축적을 통하여 이러한 경향을 확인하고 구체적 원인을 규명할 필요가 있을 것이다.

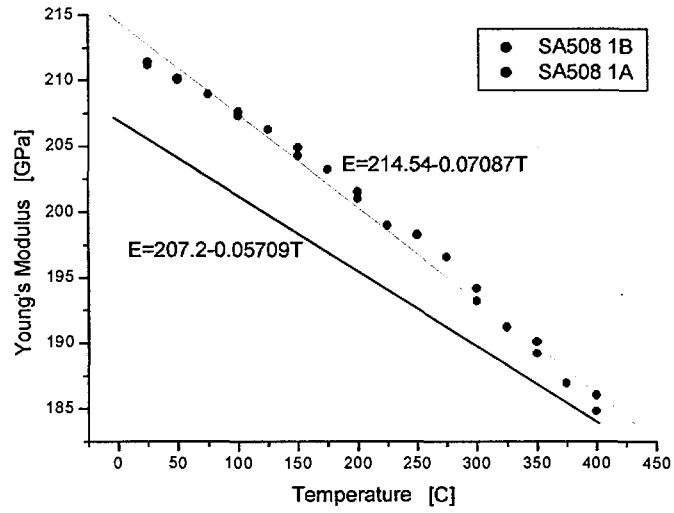


Fig 5-10. Variation of Youngs modulus of SA508 Cl. 3 steel.

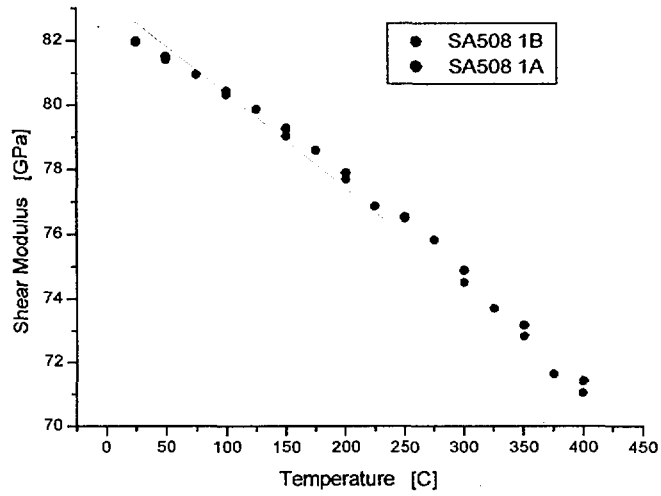


Fig 5-11. Variation of shear modulus of SA508 Cl. 3 steel.

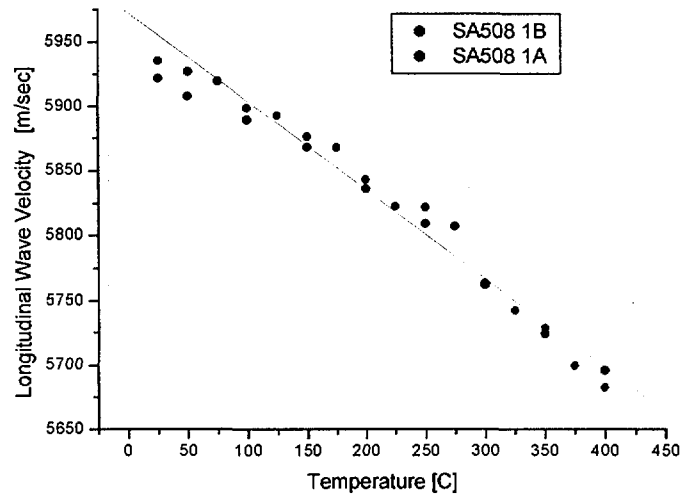


Fig 5-12. Variation of longitudinal wave velocity of SA508 Cl. 3 steel.

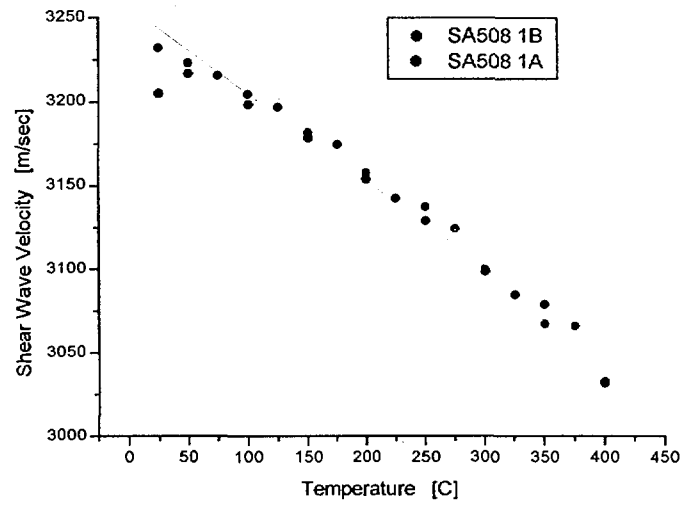


Fig 5-13. Variation of shear wave velocity of SA508 Cl. 3 steel.

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 Zirconium 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.

1.5. 결론

1. 초음파공명분광법을 적용하여 원자로 압력용기 재료인 SA 508 C1, 3 용접부의 각 부분을 재현한 시험편에 대해서 등방성을 가정하고 동적 탄성계수를 측정하였으며 측정된 동적 Young's modulus 209 ~212 GPa로 정적인 초기 추정값인 205 GPa 보다 약간 높았다.
2. 초음파공명분광법으로 측정한 탄성계수는 재료 미세 조직에 대단히 민감함을 보여주었으며 tempered martensite 조직보다 tempered bainite 조직의 탄성계수가 높았고, 유사한 미세 조직에서는 결정립이 작을수록 탄성계수가 증가하였다.
3. 초음파공명분광법으로 측정한 종파 속도는 시편의 차이에 대해서 큰 영향이 없었으나 횡파 속도는 결정립의 크기가 감소할수록, martensite 조직보다는 bainite 조직으로 갈수록 음속이 증가하였다.
4. Young's modulus 및 shear modulus는 온도에 따라 선형적으로 감소하였으며 이 경향은 종파 속도 및 횡파 속도에서도 유사하다. 기계 시험에 의한 온도 의존성과 초음파공명에 의한 온도 의존성의 차이는 기계 시험 시에 소성 변형 성분이 탄성계수 측정에 포함되었기 때문으로 판단되며 이 경향은 특히 저온으로 갈수록 커짐을 알 수 있다.
5. 초음파공명분광법을 이용하여 재료의 중성자 조사 취화 효과, 온도에 따른

탄성계수 변화, Zirconium 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.

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

제 1 절 단계별 연구개발 목표 달성도

당해 년도 연구 개발 목표로는 고온 실험용 초음파공명분광 실험 장치를 제작하고 온도에 따른 원자로 용접부의 동적 탄성계수를 측정하는 것이있는 바 해당 실험 장치를 제작 완료하였고 온도에 따른 동적 탄성계수 측정도 완료하였다

제 2 절 기술 발전의 기여도

초음파공명분광법은 재료의 미세 구조 변화에 대해서 대단히 민감한 방법으로써 최근에 그 기술이 개발되어 응용 분야를 넓히고 있는 기술이다. 이 방법으로 사용함으로써 과거에는 측정하기가 어렵거나 거의 불가능하였던 국부적인 탄성계수의 변화, 이방성 재료의 탄성계수 측정이 가능해졌다.

특히 이 방법은 재료의 미세적인 변화에 대단히 민감하므로 원자로 재료의 중성자 조사 취화 현상을 탐지하는 데 활용될 수 있다. 원자로를 비롯한 원자력 구조물의 안전성은 운전 년수가 증가해 감에 따른 열화 현상을 정확히 감시하는 데 있는 바 특히 중성자 조사에 의한 취화 현상을 손쉽게 알아내는 방법의 개발이 시급하다고 보겠다. 이러한 관점에서 본 초음파공명분광법을 적용한 미세적인 재료 물성 평가 기술을 개발함으로써 원자력 구조물의 안전성을 확보하는 데 기여하는 바가 크다고 하겠다.

제 5 장 연구개발 결과의 활용 계획

제 1 절 추가 연구의 필요성

본 연구에서는 종래에 상온에서만 측정이 가능했던 초음파공명분광 측정법을 고온에서 측정이 가능토록 하여 탄성계수의 온도 의존성을 알아볼 수 있게 되었다. 그러나 재료의 미세적인 변화를 알아보기 위해서는 탄성계수는 물론 mechanical Q-factor가 보다 연관성이 깊다. 초음파공명분광법을 사용하면 정의에 입각한 정확한 Q-factor를 측정할 수 있다. 본 연구에서는 고온에서 초음파가 전파되도록 하기 위해서 알루미늄 wave guide를 사용하였는데 고온 실험 시에 특히 Q-factor 측정에 중요한 인자로서 시편에 가해지는 힘을 정확히 제어해야 하며 주변 대기의 압력도 영향을 끼치므로 주변 기압을 제어해야 한다. 또한 고온에서 발생하는 시편의 산화를 방지하기 위하여 진공 또는 불활성 분위기에 서 실험할 수 있어야 한다. 따라서 앞으로 필요한 추가연구 사항으로는

- 1) Load cell을 부착한 시편 압력 제어
- 2) 진공 시스템 및 분위기 제어 장치 부착

제 2 절 타 연구에의 응용

본 연구는 재료의 미세적인 성질을 비교적 쉽게 측정할 수 있는 방법이므로 원자력 재료 연구 분야에서 각종 재료의 특성 측정에 활용될 것이다. 특히 재료의 자기적, 전기적 상변태 현상을 쉽게 감지할 수 있으며 초전도체의 초전도 변태 현상을 감지하는 데에도 사용된다. 또한 공명 현상을 적용하여 소형 부품의 비파괴검사, 용기 내용물의 비파괴적 식별 기술 등에도 응용된다.

제 6 장 참고 문헌

1. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Theory of Elasticity*, 3rd ed. (Pergamon Press, London, 1986).
2. J. D. Maynard, "Resonant ultrasound spectroscopy", *Phys. Today*, 49, pp. 26-31 (1996).
3. D. B. Frazer and R. C. LeCrew, "Novel method of measuring elastic and anelastic properties of solids", *Rev. Sci. Instrum.*, 35 (9) pp.1113-1115 (1964).
4. R. Holland, "Resonant properties of piezoelectric ceramic rectangular parallelepipeds", *J. Acoust. Soc. Am.*, 43 (5) pp. 988-997 (1968).
5. H. H. Demarest, "Cube-resonance method to determine the elastic constants of solids", *J. Acoust. Soc. Am.*, 49 (3) Pt. 2, pp. 768-775 (1971).
6. I. Ohno, "Free vibration of a rectangular parallelepiped crystal and its application to determination of elastic constants of orthorhombic crystals", *J. Phys. Earth*, 24, pp. 355-379 (1976).
7. E. Mochizuki, "Sphere-resonance method to determine elastic constants of crystal", *J. Appl. Phys.* 63 (12) pp.5668-5673 (1988).
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.*, 90 (4) Pt. 1, pp. 2154-2162 (1991).
9. D. G. Isaak, O. L. Anderson, J. D. Carnes, and H. Cynn, "Elasticity of fused silica spheres under pressure using resonant ultrasound spectroscopy", *J. Acoust. Soc. Am.* 104 (4) pp2200-2206 (1998).
10. 문종걸, 김주학, 홍준화, 이창희, "용접열 사이클 최고 온도가 원자로 압력용기강의 IRHAZ 의 미세 조직과 기계적 특성에 미치는 영향", *대한금속학회지*, 37 (8) pp. 1000-1007 (1999).
11. 김주학, 윤의박, "SA 508 Cl. 3 원자로 압력용기강 단위 열 영향부의 노치 인성과 미세 조직 변화", *대한금속학회지*, 36 (8) pp. 1329-1337 (1998).
12. 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, 41 (4) pp. 2098-2102 (1990).
13. J. D. Maynard, "The use of piezoelectric film and ultrasonic resonance to determine the complete elastic tensor in one measurement", J. Acoust. Soc. Am., 91 (3) pp. 1754-1762 (1992).
14. A. Miglioro, J. Sarrao, "Resonant ultrasound spectroscopy", John Wiley & Sons Inc. (1997).
15. 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., 35 (5) pp. 1195-1200 (2000).
16. 정용무, 권상철, 김영석, 정현규, "초음파공명분광법을 이용한 Zr-2.5Nb 합금의 이방성 탄성계수 측정", 한국비파괴검사학회 '99춘계학술발표회 논문집 pp.13-27 (1999).
17. ASME B & PV Code Sec. II, Part A, SA 508 (1995).
18. D. R. Ireland, W. L. Server, R. A. Wullaert, ETI Technical Report No. 75-43, pp.5-10 (1975).
19. E. P. Papadakis, "Ultrasonic attenuation and velocity in three transformation products in steel", J. Appl. Phys., 35 (5) pp.1474-1482 (1964).
20. R. Prasad, S. Kumar, "An investigation into the ultrasonic behavior of cast and heat-treated structures in steel", British J. NDT, 33 (10) pp.506-509 (1991).
21. 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., 33, pp. 253-259 (2000).
22. P. Palanichamy, A. Joseph, T. Jayakumar, B. Raj, "Ultrasonic velocity measurements for estimation of grain size in austenitic stainless steel", NDT&E Int., 28 (3) pp.179-185 (1995).
23. 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

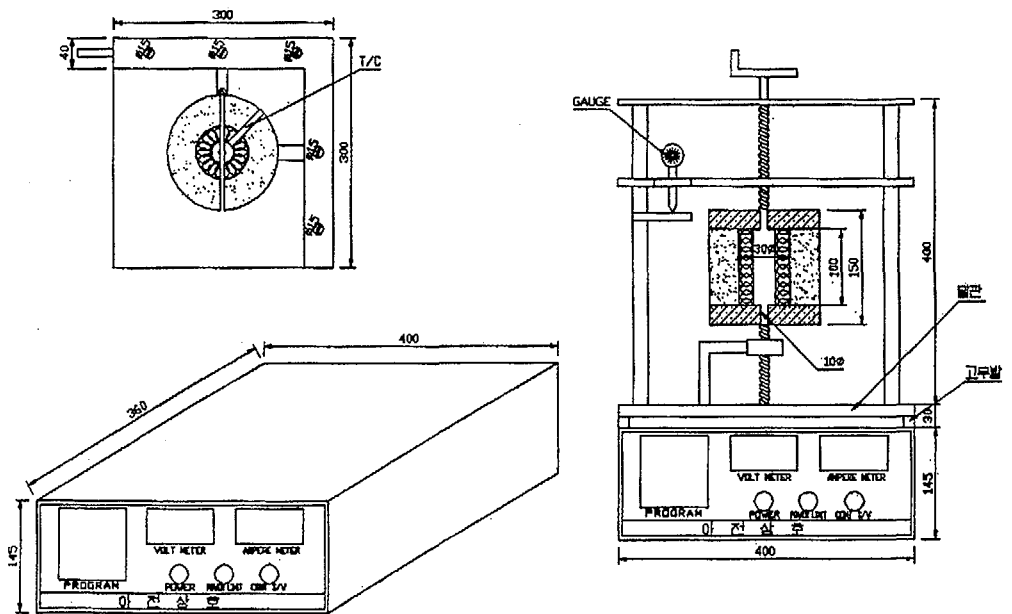
size of low carbon steel", NDT&E Int., 32, pp. 85-89 (1999).

24. 이승석, 안봉영, 민운식, 남영현, 이재열, "재료 물성의 비파괴 평가법", 한국표준과학연구원, 연구보고서, pp. 27 (1995).

부록

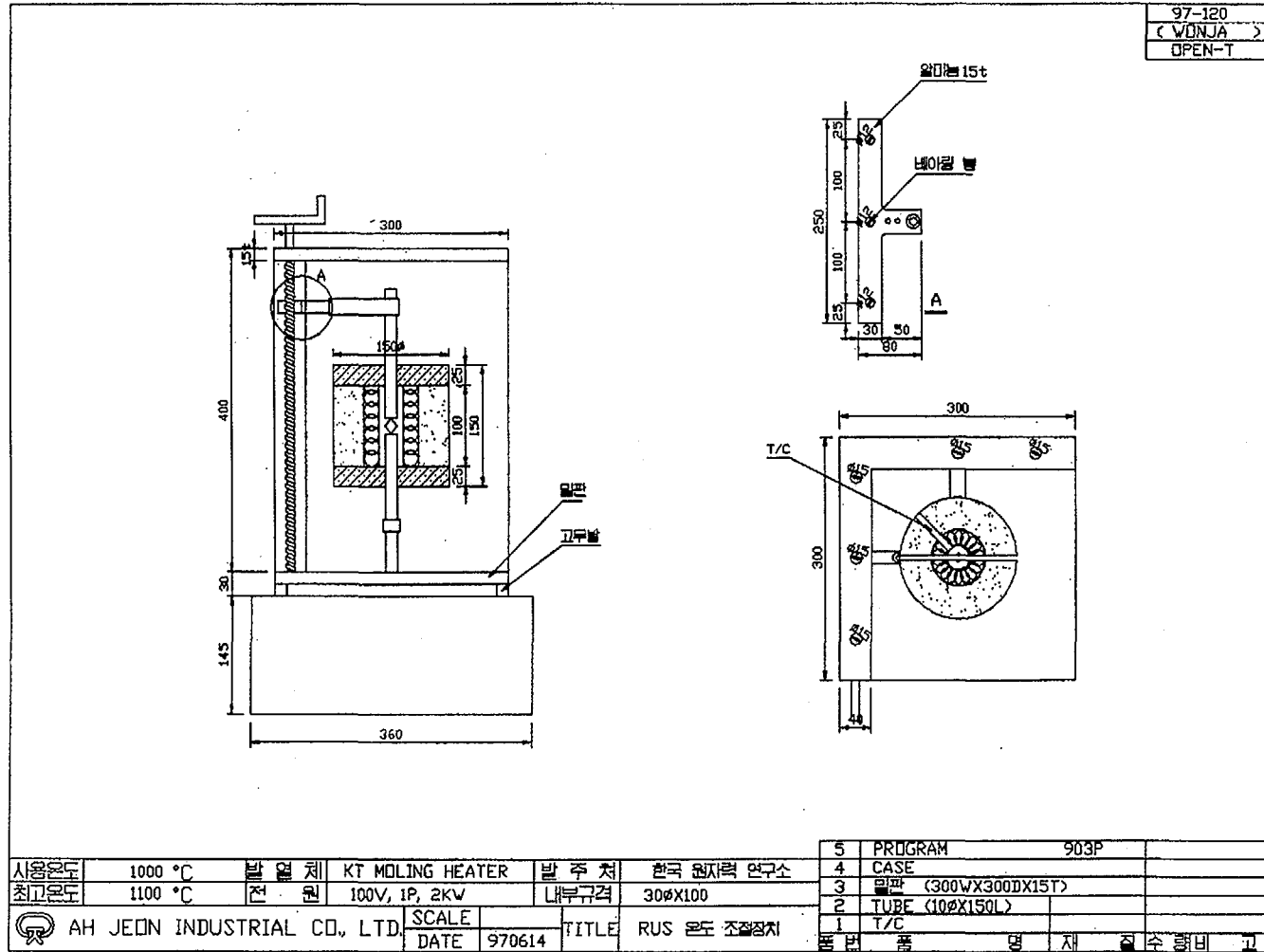
고온 초음파공명분광 시스템 설계도

97-120
 < WONJA >
 OPEN-T

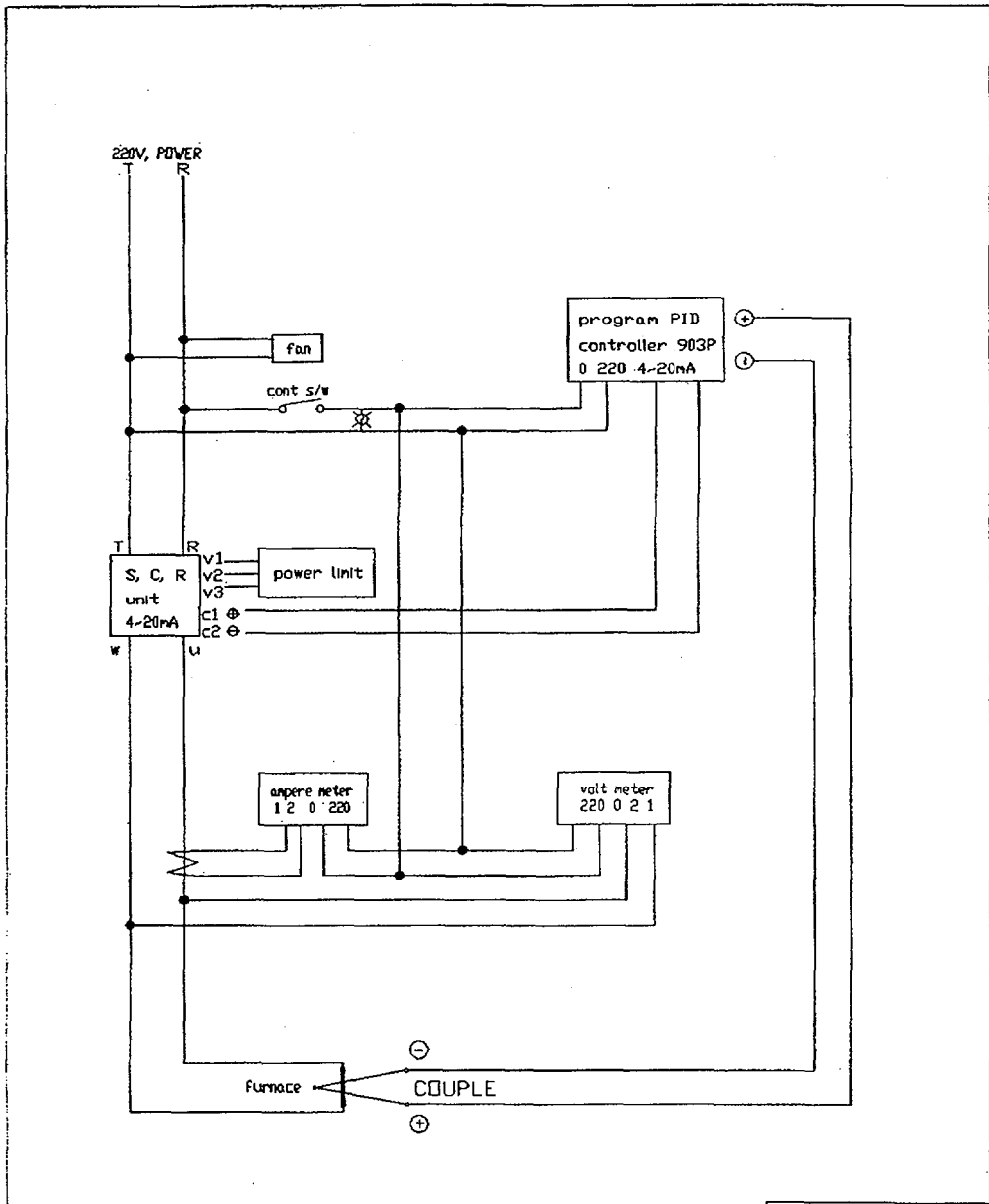



C-3 TYPE

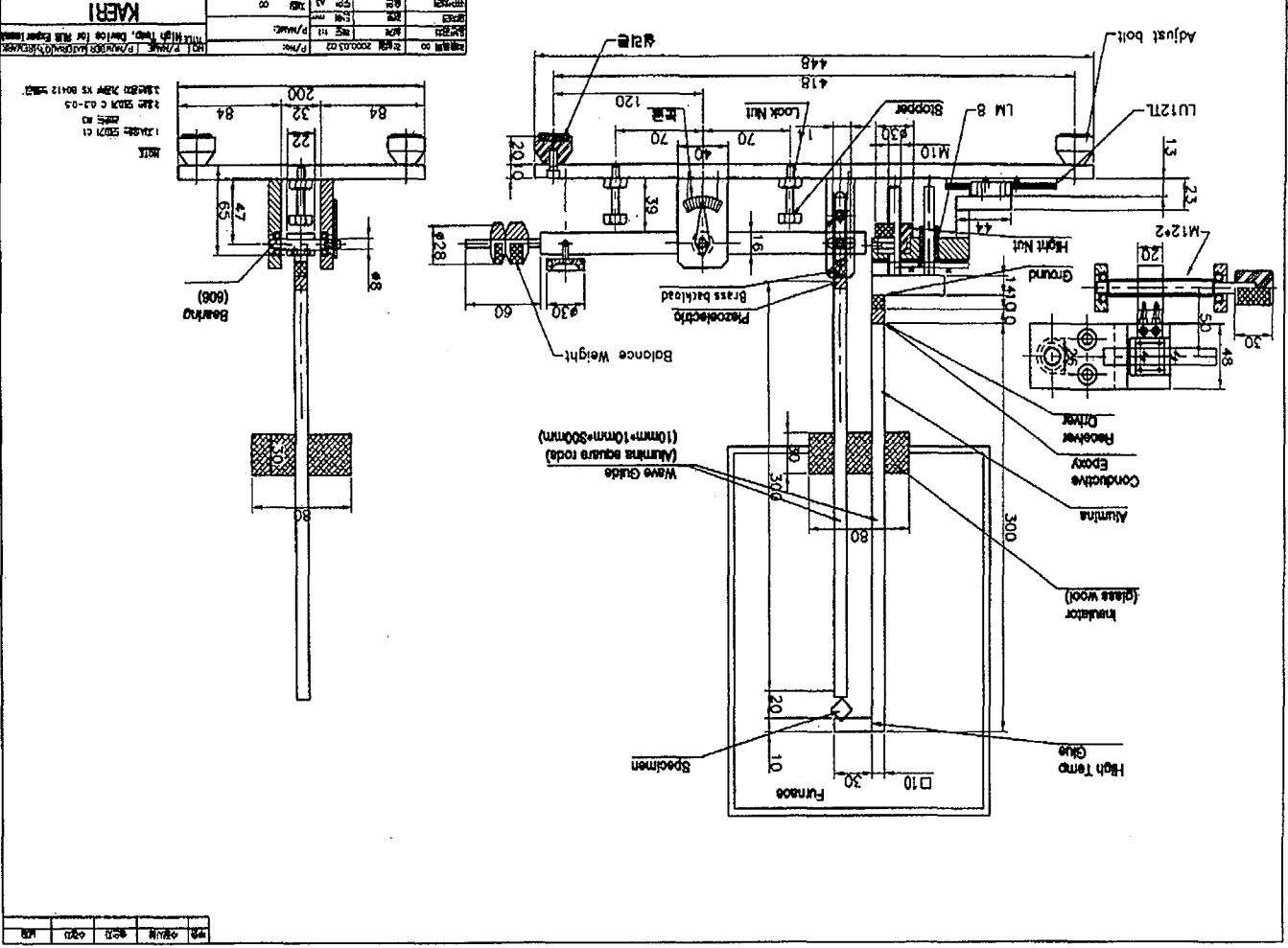
사용온도	1000 °C	발열체	KT MOLING HEATER	발주처	한국 원자력 연구소	5	PROGRAM	903P
최고온도	1100 °C	전원	100V, 1P, 2KW	내부규격	300X100	4	CASE	
						3	외판	(300WX300DX15T)
						2	TUBE	(100X150L)
						1	T/C	
AH JEON INDUSTRIAL CO., LTD.						SCALE		
						DATE	970614	
						TITLE	RUS 온도 조절장치	
						품명	종	명
						재질	질	수량비고

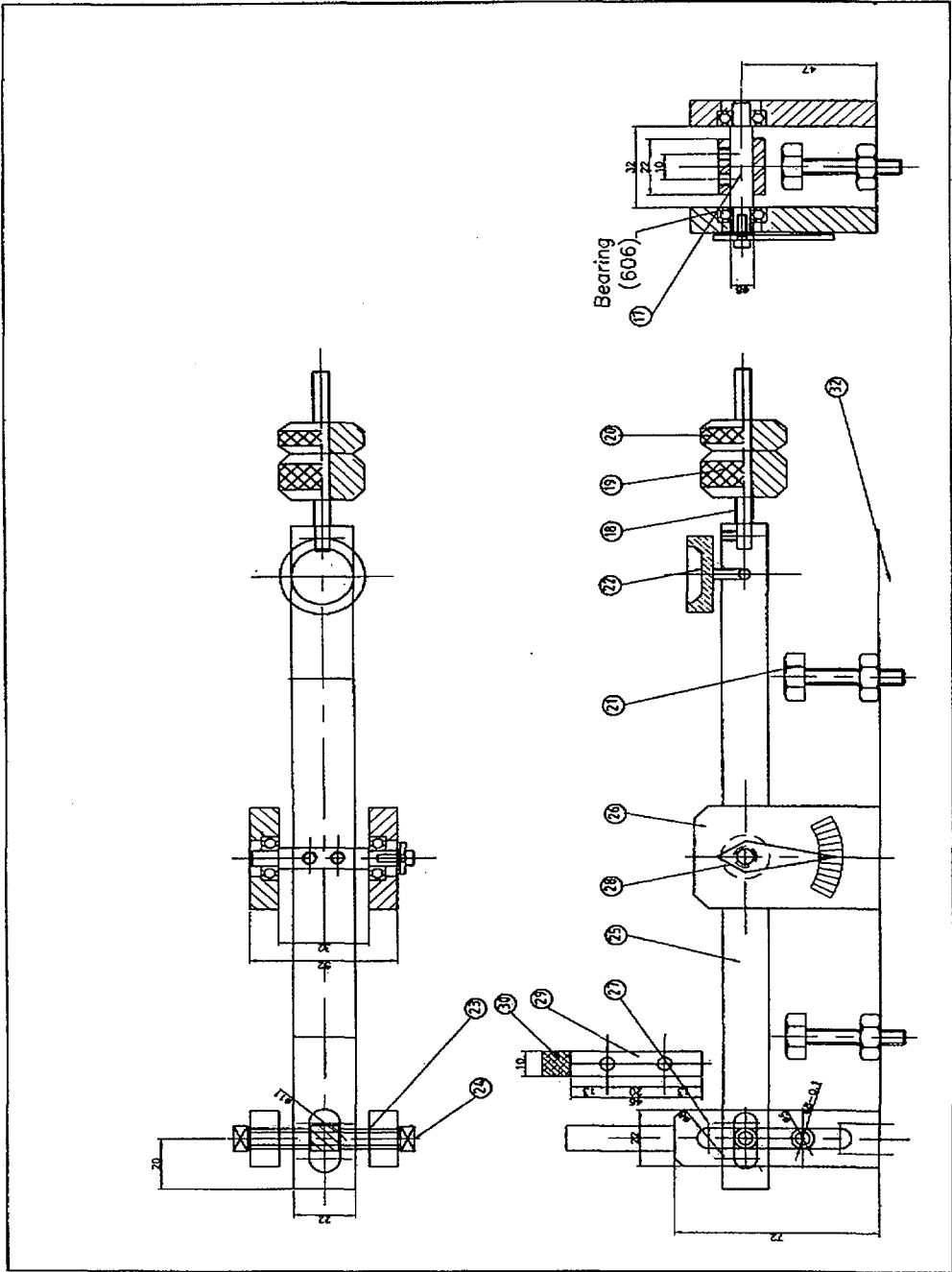


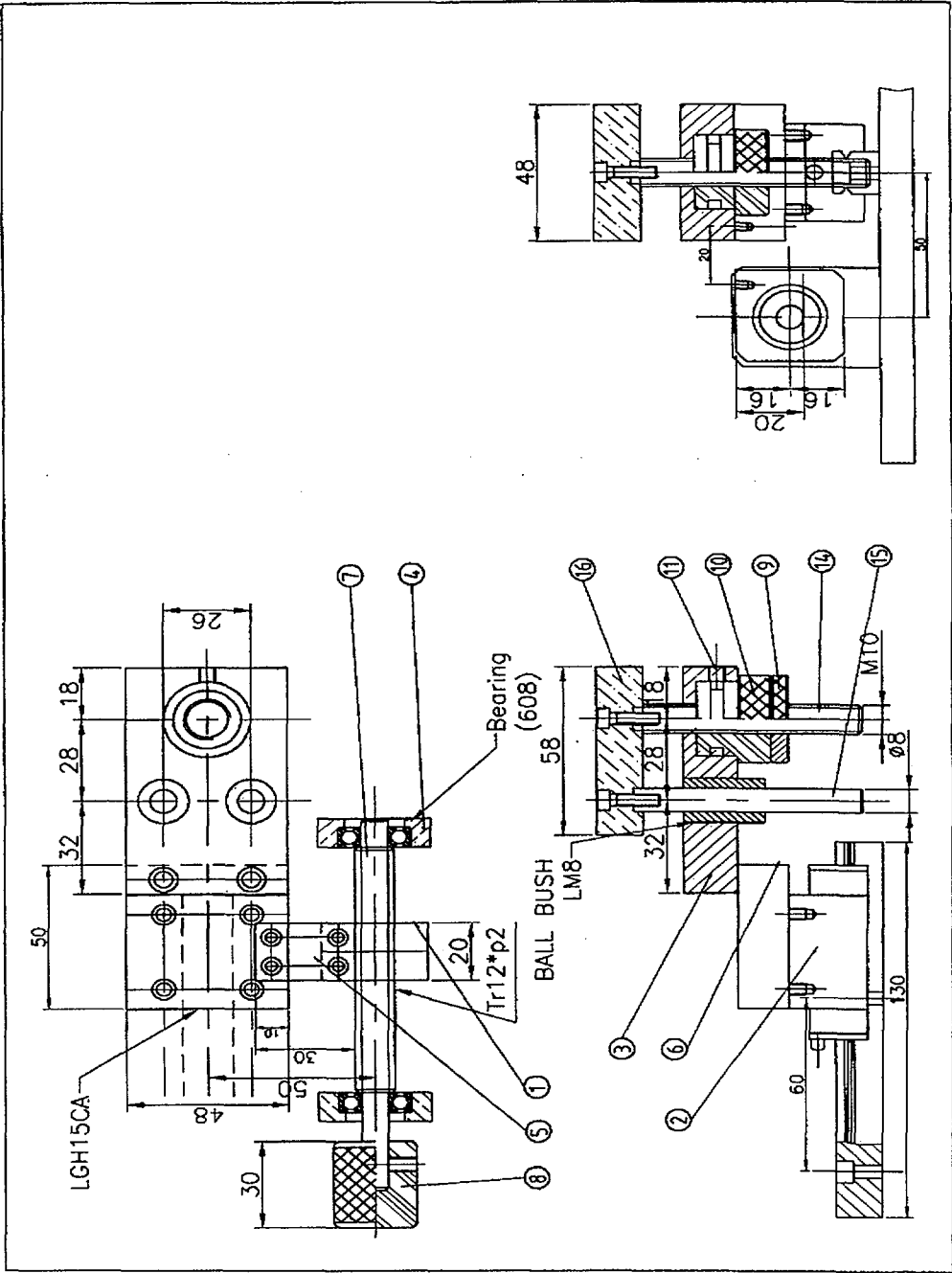
사용온도	1000 °C	발열체	KT MOLING HEATER	발주처	한국 원자력 연구소	5	PROGRAM	903P	
최고온도	1100 °C	전원	100V, 1P, 2KW	내부규격	300X100	4	CASE		
						3	외판 (300WX300DX15T)		
						2	TUBE (100X150L)		
						1	T/C		
AH JEON INDUSTRIAL CO., LTD.						SCALE		TITLE	RUS 온도 조절장치
						DATE	970614		

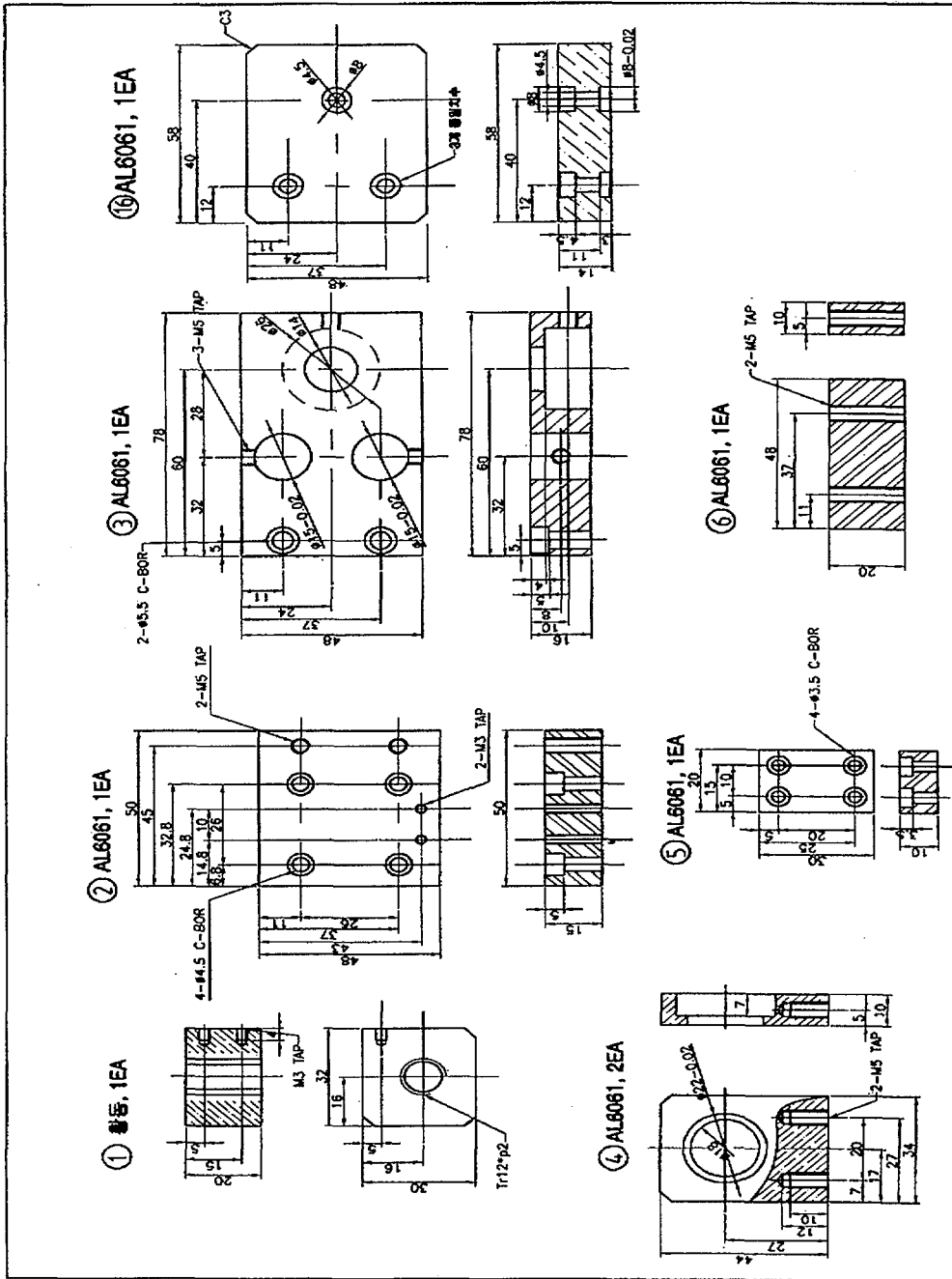


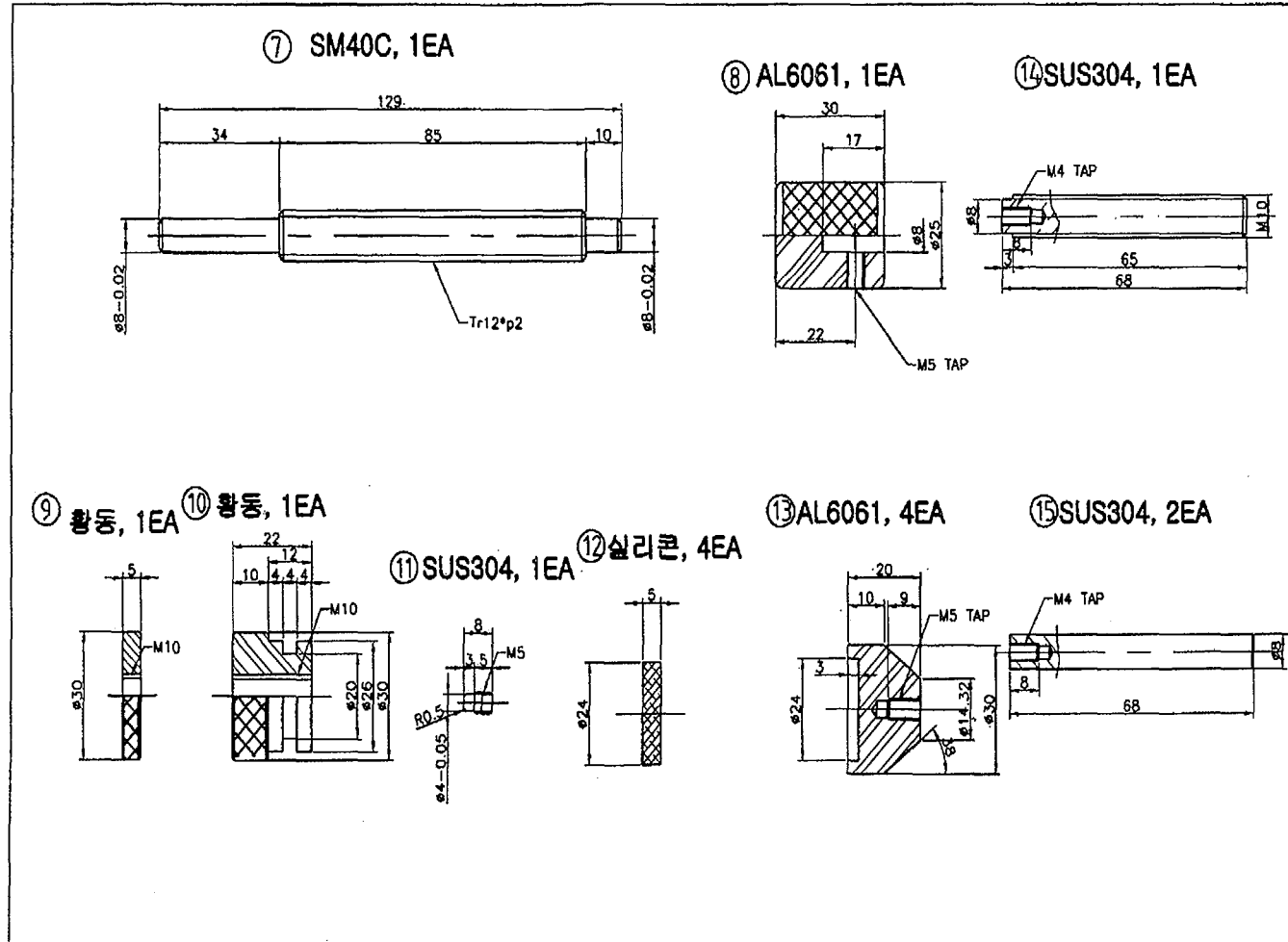
 AH JEON INDUSTRIAL CO.LTD	SCALE		TITLE	97-120
	DATE	970813		원자력연구소 OPEN-C



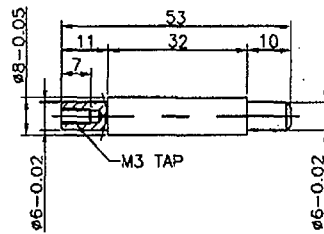




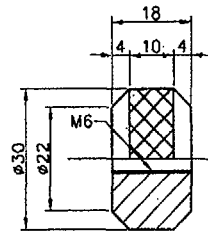




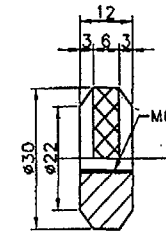
⑰ SUS304, 1EA



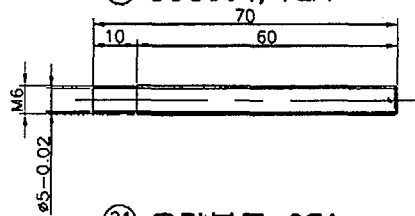
⑱ SUS304, 1EA



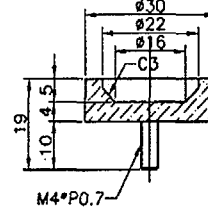
⑳ SUS304, 1EA



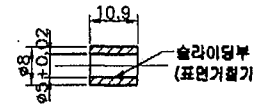
⑱ SUS304, 1EA



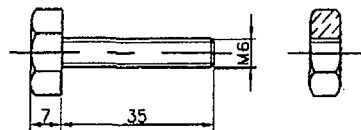
㉒ AL6061, 1EA



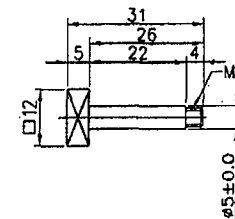
㉓ SUS304, 8EA



㉑ 유각볼트, 2EA



㉔ SUS304, 4EA



서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/RR-2077/2000			
제목 / 부제	초음파공명분광법을 적용한 재료 물성 측정 기술 개발		
연구책임자 및 부서명	정 용 무 (원자력재료기술개발팀)		
연구자 및 부서명	정현규(양자광학기술개발팀), 주영상(KALIMER기술개발팀), 심철무(하나로이용기술개발팀)		
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소
발행년	2001		
페이지	72 p.	도표	있음(o), 없음()
크기	Cm.		
참고사항			
비밀여부	공개(o), 대외비(), — 급비밀	보고서종류	연구보고서
연구위탁기관	계약 번호		
초록 (15-20줄내외)	<p>고온 탄성계수 측정을 위한 초음파공명분광 시스템을 제작하고 다양한 미세 조직을 가진 원자로 용접부의 탄성 계수를 초음파공명분광법으로 측정하여 탄성계수가 미세 조직에 민감함을 확인하였다. 이 방법을 사용하면 이방성 탄성계수는 물론 고온 탄성계수 및 Q-factor 측정을 통하여 원자력 재료의 중성자 조사 취화를 포함한 열화 감시에 활용될 수 있을 것이다.</p>		
주제명키워드 (10단어내외)	초음파공명분광, 탄성계수, 재료 물성 평가, 원자력 재료		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/RR-2077/2000			
Title / Subtitle	Materials Characterization by Resonant Ultrasound Spectroscopy Method		
Project Manager and Department	Yong-Moo Cheong(Nuclear Materials Technology)		
Researcher and Department	H.K. Jung(Quantum Optics Lab.), Y.S. Joo(KALIMER), C. M. Sim(HANARO),		
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI
Publication Date			2001
Page	p. 72	Ill. & Tab.	Yes(o), No ()
Size			Cm.
Note			
Classified	Open(o), Restricted(), ___ Class Document	Report Type	Research Report
Sponsoring Org.		Contract No.	
Abstract Lines)	(15-20		
<p>A high temperature resonant ultrasound spectroscopy(RUS) was developed. The dynamic elastic constant of RPV weld, which has various different microstructure was determined by RUS. It was confirmed the RUS method is very sensitive to the microstructures of the material. RUS can be used to monitor the degradation of nuclear materials including neutron irradiation embrittlement through the measurement of dynamic elastic constants, elastic anisotropy, high temperature elastic constant and Q-factor.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)	Resonant Ultrasound Spectroscopy, Elastic Constant, Material Characterization, Nuclear Materials		