

〈기술보고〉

경수로형 원전의 초음파 검사 기술현황

홍순신

한국원자력연구소
(1994. 1. 10 접수)

요 약

경수로형 원전의 NSSS 및 2 차계통의 주요부품에 대한 가동전, 중 검사로 수행되는 초음파 검사에 관한 내용을 수록하였다. 경수로형 원전에 적용하고 있는 초음파 검사 기술요건으로 ASME Sec. V 및 XI의 과거 10여년간의 변경과정과 검사기술, 강화된 검사 결과 기록 기준, 검사대상 및 범위에 관하여 언급하였다. 초음파검사의 신뢰성 제고를 위한 신기술의 실제 검사 적용을 유도하는 규격화의 조짐이 89년 ASME Sec. V 및 XI 규격에서 나타나고 있으며, 검사 결과의 평가 해석을 정확히 할 수 있도록 컴퓨터 화한 신호 처리 개념이 수록되어 그 요건을 살펴 보았다.

1. 서 론

원전 가동전, 중 검사는 설계, 건설, 제작 및 가동중의 주요 압력 경계계통의 안전성, 가동중의 신뢰성을 확보하는 주요 검사로서 한국 원자력 연구소는 1979년 기술 토착화를 시작하여 1980년대 중반에 기술 소화 및 국산화를 이룩하였으며 외국의 신기술을 도입하여 검사에 적용하는데 주도적인 역할을 하여오고 있다.

원전 비파괴검사는 거의 대부분의 비파괴검사 방법이 사용되고 있으며, 특히 ASME 규격을 토대로 살펴보면 기기 및 배관 용접부의 초음파검사, 증기 발생기 전열관의 와류탐상, 건설 제작시의 방사선투과 검사등이 주요 검사 방법으로 적용되고 있다.

경수로형 원전의 초음파검사는 ASME Sec. XI의 IWB 및 IWC, ASME Sec. V Art. 4 및 5의 요건에 따라 Class 1, 2 부품의 압력유지 용접부가 검사 대상이 된다. 초음파검사에도 수동과 자동으로 구분되며 자동 검사의 경우 원자로, 기타 기기인 증기 발생기, 가압기 등의 용접부 검사가 해당되며, 수동의 경우 역시 기기 및 배관 용접부에 적용된다. 국내 경수로형 원전의 경우 현재까지는 원자로의 자동 초음파검사와 기기, 배관 용접부의 수동 검사로 대별된다. 지금은 자료 수집의 자동

화와 신뢰성 제고를 위한 기기, 배관의 자동 검사가 수행되는 시점에 와있다.

경수로형 원전의 Class 1 압력 용기는 탄소강 재질에 오스테나이트계 강을 내벽에 Clad하여 사용하고 있으며, 원자로, 증기 발생기, 냉각 펌프를 연결하는 Main Loop는 배관의 재질이 CCSS(Centrifugally Casted Stainless Steel)로 초음파적으로 감쇄가 매우 심한 재질로 구성되어 있으며 Class 2 배관인 주증기 및 주급수 계통 배관을 제외하고는 대부분이 스테인레스 스틸 재질로 역시 초음파 고감쇄 재질들로 구성되어있다. 현재 영광 원자력 3호기 이후 건설되는 표준 원전의 경우는 Main Loop가 탄소강에 오스테 나이트계 강을 내벽에 Clad한 배관이 사용되고 있으나, 스테인레스 강 재질의 배관은 검사에 즉 신호 수집 및 결함 평가에 많은 기술 개발여지를 남기고 있는 부분이며, 현재 일반 산업분야에서는 좀처럼 접하기 어려운 부분이 두께가 두꺼운 스테인레스 강 배관이다.

본 논문은 원전 주요 부품인 압력 유지 기기, 배관의 용접부에 대하여 Class 1, 2로 구분하여 초음파검사 관련 요건 및 현재 적용되는 기술을 고찰하여 보기로한다.

2. 초음파검사

초음파검사는 신호의 송·수신 즉 전기적 에너지를 기계적 에너지로, 다시 역으로 바꿀 수 있는 압전 소자인 탐촉자(Transducer), 신호의 수집 및 처리를 담당하는 초음파탐상 장비, 검사 수행시 결함 유무 검출을 위한 대비 보정 시험편, 검사 수행자, 검사 절차서, 결함 평가 기준등이 갖춰져야 한다. 실제 피검사체내의 결함 유무를 판정하기 위한 방법으로 흔히 인공 결함 혹은 자연 결함이 내재된 보정 시험편에서 초음파 특성인 초음파 빔(Beam)의 진행 거리에 따른 감쇄(Attenuation) 정도와 인공 결함 크기에 따른 신호 진폭 크기를 결정하여 거리 진폭 보정 곡선(Distance - Amplitude Correction, DAC Curve, Fig.1)을 작성하여 검사를 수행한다. 결함의 크기 정도를 신호 진폭 크기로 나타내어 일정 곡선이상이 될때 기록 및 평가 대상으로 간주되는데, ASME Sec. V 및 XI의 기준이 년도에 따라 변화되고 있음을 보여준다.

2.1. 검사 기술

초음파 검사는 신호를 수집하고 처리하는 탐상 장비, 신호의 송수신을 담당하는 탐촉자로 크게 구분되는데, 적용하는 기술에 따라 다양한 검사기법들이 있다. 특히 원전 구성품으로 많이 사용되고 있는 오스테나이트 스테인레스 강의 용접부 검사는 초음파의 감쇄가 심하고 용접부 조직이 조대하여 계산이나 측정에 의한 초음파 화면 거리와 다른 위치에서 결함이 관찰되는 경우가 많

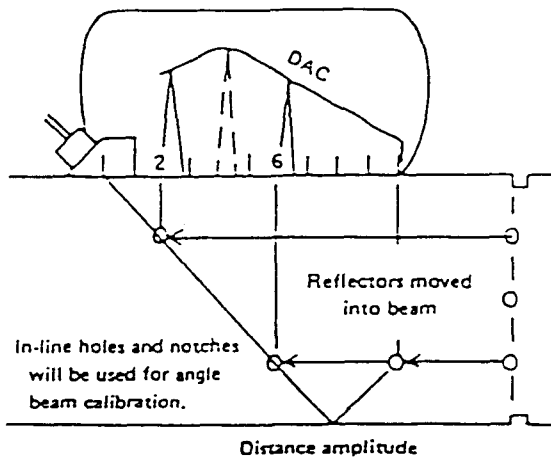


Fig. 1. Distance Amplitude Correction(DAC) Curve

아서 검사자의 풍부한 경험 및 이론적 기초가 뒷받침되어야 한다. 현재 국내경수로형 원전의 Main Loop 재질이 금속조직이 조대한 대표적인 재질로 원심주조형 스테인레스 강관인데, 이 배관은 결정입계에서의 초음파 감쇄, 속도, 반사 및 굴절이 다양하다. 이외에도 고합금강(High Alloy Steels), 고니켈 합금(High Nickel Alloy) 주조 배관(Casted Piping)등이 이런 경우에 해당된다. 따라서 이러한 초음파 검사의 난점을 해결하기 위하여 장비의 개발, 검사기법의 개발, 용접부 특성 연구등을 통해 결함의 발생원인, 검출 능력 향상, 정확한 결함 크기 및 위치 결정등이 이루어져 검사에 신뢰성을 높여야 한다.

사용탐촉자의 선택은 검사체의 재질, 두께에 따라 주파수 및 크기, 탐촉자의 형태 즉 단일(Single) 혹은 이중(Dual) 소자를 사용할 것인가를 결정하게 된다. 일반적으로 현재 국내에 적용하고 있는 탄소강의 경우는 2.25MHz가 주로 사용되고, 금속 조직이 조대한 스테인레스 강은 저주파수로 1.0MHz 혹은 1.5MHz가 사용된다. 특히 SA-351로 된 Main Loop배관은 1.0MHz의 Dual 소자 굴절 중과 탐촉자를 사용하여 신호 대 잡음비 및 검출 능력을 향상시킨 방법을 적용하고 있다. 용접부의 검사는 수직 종파와 사각 횡파를 사용하는데 2인치이상 두께의 압력 용기인 원자로, 증기 발생기, 가압기등의 용접부 검사는 89년 규격에서 검사면에서 부터 두께의 1/4 혹은 1인치의 검사 체적을 70°사각 탐촉자(Angle Beam Transducer)를 추가로 사용토록 하였다. 이는 초음파 탐촉자의 특성상 불감대(Dead Zone)를 없애기 위한 것이다. 이전에는 45°, 60°사각만이 용접부 검사에 이용되어 왔다. 초음파 탐촉자의 특성으로 근거리 음장(Near Field), 빔 퍼짐(Beam Spread), 감도(Sensitivity) 및 분해능(Resolution) 등이 고려되어 사용 주파수, 크기등이 결정된다. Table 1은 검사코자하는 배관의 두께에 따라 사용탐촉자의 크

Table 1. Maximum Nominal Search unit Sizes

배관 공칭 두께(in)	최대 공칭 크기(in)
0.5 미만	0.25
0.5-2.0	0.5
2.0 이상	1.0

기 선택 기준을 보여준다.

검사 기술은 초음파검사를 위하여 어떤 장비로 어떻게 신호를 수집하고, 어떻게 처리하는가에 따라 자동 혹은 수동으로 구분할 수 있는데, 현재 ASME에서 추천하여 사용하고 있는 DAC곡선을 작성하여 dB-Drop 방법에 의한 검출 및 크기평가를 수행하고 있으나 근래 장비 및 컴퓨터의 발전으로 신호 수집 및 처리의 기술이 컴퓨터화하고 있는 추세로 이미 89년 ASME Sec. V Art. 4에서 컴퓨터 영상 기법(Computerized Imaging Technique)이 추가되었다. 이는 신호 처리 Algorithm을 이용하여 신호 대 잡음 비를 향상시켜 결함 신호를 잡음으로부터 찾아내고, 수집된 결함 신호들을 재구성(Reconstruction)이라는 Algorithm를 사용하여 결함을 처리하는 기법등 검사 신뢰도 향상을 위한 방법들이 수록되고 있으며, 그 기술로는 Synthetic Aperture Focusing Technique(SAFT), Holography, UT-Phased Array Technique, UT Time-of-Flight(TOF) Technique, 자동 신호 수집 및 영상 기법등의 신기술이 소개되고 있다.

초음파검사는 검사속도를 빠르게 하는 것도 중요하지만 검사 결과 결함의 특성이 정확한 분석 및 해석을 거쳐 파괴 역학 평가로 정보가 제공되어야 기기의 사용여부등 중요한 결정에 신뢰성 있는 판단을 할 수 있다. 따라서 초음파 검사의 신호 해석, 컴퓨터에 의한 영상처리 기법등 앞서 기술한 신기술이 계속 개발되어 원자력 발

전소 주요 부품에 적용되는 시점에 있다.

2.2. 검사 대상

2.2.1. 검사 재질

초음파검사 대상 재질은 압력용기경우 판재 또는 단조재로 두께가 3인치에서 10인치 정도이며, 배관은 탄소강과 스테인레스 강으로 구분되며 대부분이 스테인레스 강으로 두께는 작게는 0.344인치에서 크게는 3인치가 넘는 것으로 공칭직경은 2인치에서 40인치까지의 배관이 검사 대상이 된다. Table 2의 내용은 원전 초음파검사 대상의 재질을 보여준다.

2.2.2. 검사 체적 범위(Examination Volume Boundary)

ASME Sec. XI, 77년판을 기준으로 검사 범위가 Class 1 용접부만 바뀌지 않고 Class 2 압력 용기, 노즐 용접부(Table 3 및 Fig.2, 3)와 배관은 검사 범위가 줄어들었으며, 특히 배관은 Class 1, 2 모두 Fig.4와 같이 용접부 Root 부위가 주요 검사 대상이 되었다. 압력 용기는 Class 1과 2를 구분하였으나 배관은 Class 1, 2가 똑같으며, Root 부위의 결함 검출은 세심한 주의가 요하는 매우 어려운 영역이라 하겠다.

Table 2. Material Specifications of Nuclear Power Plant Components for Ultrasonic Examination

구분	Spec. No.	Type, Gr	P. No Gr. No		Product Form
압력 용기	SA 508	CL2	3	3	Forging
	SA 533	B	3	3	Plate
	SA 540	B23	-	-	
배관	SA 182	F316	8	1	Forging
	SA 312	TP304	8	1	Wld. & smls pipe
	SA 351	CF8M	8	1	Casting
	SA 240	304	8	1	Plate
	SA 358	316	8	1	Wold. & Smls pipe
	SA 376	304	8	1	Smls pipe
	SA 106	B, C	1	1	Smls pipe
SA 333	GR 6	5	1	"	
SA 335	P22	5	1	"	

Table 3. Examination Volume Boundary of Weld

용접 구분	압력 용기		배 관
	Class 1	Class 2	
원주 및 축방향	Weld+1/2T 모재 (Fig. 2a)	Weld+1/2T 모재 (Fig. 2b)	Weld+1/4 in 모재 로 1/3T
노즐	" (Fig.3)	Weld+ 1/4 in 모재	(Fig.4)
전용접형태	Weld+1/2T 모재		Weld+1/2T 1인치중 작은 것(모재) 혹은 75년여름 부록전

2.3. 초음파 검사 기술 요건

2.3.1. 중첩 주사 요건

초음파검사시 주사 범위, 즉 압전 소자의 크기 기준으로 몇%의 중첩(Overlap) 주사를 수행하므로 결함이 누락되어 검출 안되는 사례가 발생치 않도록 하는 것으로 ASME Sec. XI, 86 ed. 규격을 기준으로 배관은 20° 목돌림 가능시는 초음파 빔(Beam) 퍼짐내에서 결함을 검출할 수 있고 불가능시는 50% 중첩 주사를 수행하며 자동 검사 수행시는 50% 중첩으로 검사가 강화되었다. 압력 용기는 50% 중첩 주사를 요구하고 있다. 과거 10% 중첩 주사와 비교하면 2배 정도의 검사 시간과 중첩을 요구하고 있다.(Table 4)

2.3.2. 결함 기록 기준

초음파검사 결과의 결함 기록 기준은 압력 용기의 기록 기준이 배관에 비해 강화되어 있었으나, ASME Sec. XI, 86년 규격에서 20% DAC 기준을 요구하고 있으며, 금속 조직이나, 형상에 의한 반사 신호로서 가동전 검사에서는 20% DAC 이상을, 가동중 검사에서는 새로이 발견된 결함은 50% DAC 이상을, 그리고 가동전 검사에서 발견된 결함은 확인만 하고 기록은 하지 않으며, 길이도 과거의 100% DAC에서 최대 결함 신호의 50%를 기록 기준으로 하고 있으며 압력 용기는 89년 규격부터 더욱 강화되어 50% DAC에서 20% DAC로 기록기준이 하향 조정되어 작은 결함도 기록하도록 요구하고 있다. 일반적인 초음파 검사는 50% DAC 이상이

기록되고, 길이나 두께 방향의 결함 끝점도 100% DAC가 되고, 100% DAC 이상의 결함은 분석 평가하여 결함 특성을 밝혀내야 하며 ASME Sec. XI IWB, C-3600에 따라 평가되어야 한다.(Table 5)

ASME Sec. XI 규격의 부록은 Table 6에서 보는 바와 같이 부록 II, V의 일반 행정 사항과 IV의 비철자성체인 증기 발생기 및 열 교환기 튜브 와전류 검사를 제외하고는 92년 규격까지 모두 초음파검사 관련 내용들을 수록할 만큼 원전의 주요 부품의 초음파 검사 중요성을 알 수가 있다. 경수로형 원전에 대한 초음파검사를 국한하기 위하여 ASME Sec. V Art. 4, 5를 물론 참고하지만 독자적인 요건을 만들기 위하여 부록으로 제시하고 있다. 86년 규격이전에는 탄소강 배관만을 부록 III에서 언급하였으나 이제는 스테인레스 강이 추가되고, 89년 규격에서 부록 I이 다시 부활되고, VI에서 볼트, 스톨드 검사의 기법이 새로 추가되고 검사자의 자격 및 실제 검사 능력을 점검하는 기량 검증(Performance Demonstration) 요건 등이 새로이 추가되며 검사의 신뢰성 제고를 향상키 위한 방법이 계속 요구되고 있다.

3. 결함 검출 사례

1979년부터 원자력 발전소 가동전. 중 검사를 수행하면서 초음파 검사에 의해 발견된 결함들이 많으며 특히 압력 용기인 가압기, 증기 발생기의 용접부에서 불합격 결함들이 발견되어 수리 조치한 경험이 있다. 가동전검사의 목적이 발전소의 건설 후의 건전성을 상업 운전전

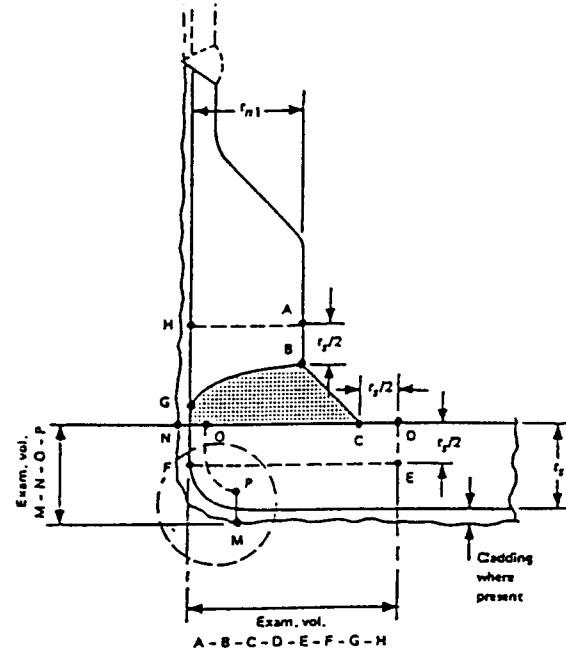
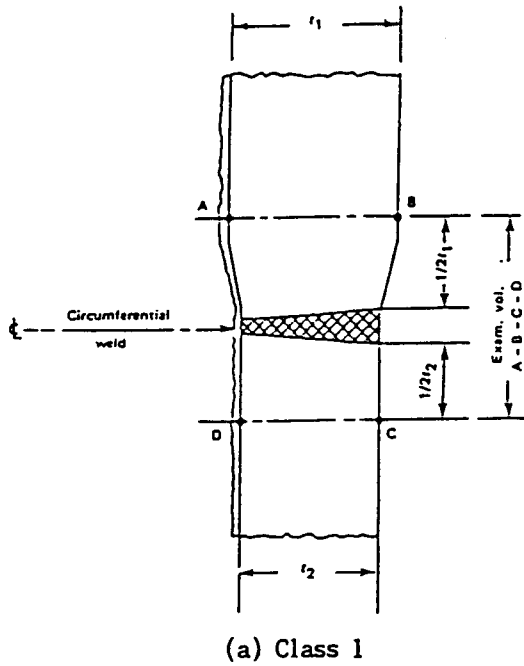


Fig. 3. Examination Volume of Class 1 Nozzle Weld

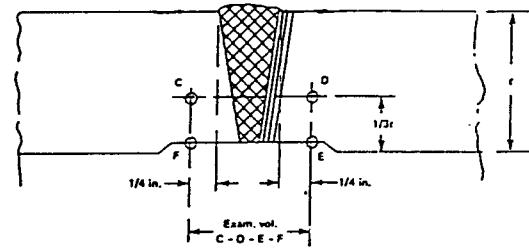
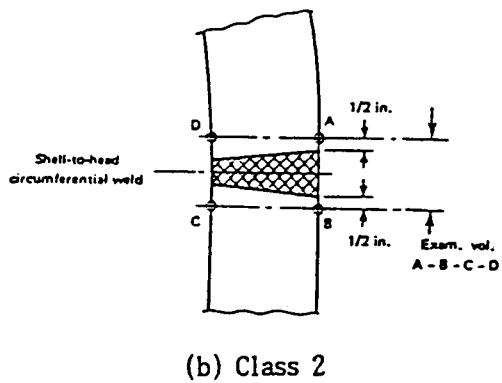


Fig. 4. Examination volume of Class 1 & 2 Piping Weld

Fig. 2. Examination Volume of Class 1 & 2 Pressure Vessel Weld

에 확보하며 또한 가동중검사의 기본 자료를 얻기 위하여 가동전 검사를 수행한다. 1984년 고리원자력 3호기를 시작으로 울진, 영광 원전까지 가동전 검사가 한국 원자력 연구소에서 수행되었으며 그 결과 많은 경험을 축적하게 되었으며 또한 발견된 결함은 수리조치를 하였는데 그 내용을 살펴보면 다음과 같다.

고리 원전 4호기 가동전 검사(1984)시 가압기 "Lower Shell to Lower Head" 원주 용접부위에서 20

여개 불합격 결함이 검출된 바 대부분 60°사각 횡파 탐촉자로 검출 되었으며 결함부를 제거하여 보수처리한 바 있으며, 영광 원전 2호기 가동전검사(1986)시 가압기 하단 중방향 용접부에서 역시 초음파 검사결과 불합격 결함들이 발견되고 이를 고주파 탐촉자(5 MHz)를 사용하여 최종적으로 2개를 불합격 결함으로 판정하였는데 결함은 균열성 결함으로 역시 수리 조치한 바 있다. 울진 원전 2호기 역시 가동전검사(1987)시 증기 발

Table 4. Overlap Scanning Change of Ultrasonic Examination

ASME SEC.XI	압력 용기	배 관
80 ed.	10 %	10 %
83 ed.	10 %	10 %
86 ed.	10 %	수동 20° 목돌림 가능시 불필요 불가능시 50% 자동은 50%
89 ed.	50 %	86 ed과 동일

Table 5. Indication Recording Criteria during Ultrasonic Examination

ASME Sec.XI	압력 용기	배 관
80 ed.	50% DAC 50% DAC(길이)	100% DAC 100% DAC(길이)
83 ed.	"	"
86 ed.	"	20% DAC 최대 결함신호의 50%
89 ed.	20% DAC 20% DAC(길이)	

Table 6. Requirements of ASME Sec. XI Appendices

부록	내 용	비 고
I	일반 초음파검사	77년 삭제 89년 부활
III	배관 초음파검사	86년 탄소강 및 스테인레스강 추가
VI	볼트 및 스티드 초음파검사	86년 추가
VII	초음파검사를 위한 검사자 자격요건	89년 추가
VIII	초음파검사 시스템의 기량 검증요건	89년 부록판 추가

생기 "Upper Shell to Transition Cone" 용접부에서 불합격 결함이 검출되었으며, 이 결함은 현장 RT검사 결과 UT로 발견된 결함이 확인되지 않았으며, 내벽 가까이 내재한 결함으로 연삭후 MT 수행결과 결함으로

판정되어 보수한 경험이 있으며 이외에도 많은 결함들이 초음파 검사로 발견되어 계속하여 가동중 검사시 재검사를 실시하여 결함의 성장유무를 관찰하고 있다

이와 같이 기기, 배관의 균열에 의한 사고를 사전에 막고 발전소의 안전성 확보와 가동중 보수, 용접시의 막대한 경비를 절감케 하므로 발생하는 경제적 이익은 대단하다.

4. 결 론

경수로형 원전 주요부품에 적용되는 비파괴검사 일환인 가동전, 중 검사를 ASME 규격에 의거 국내에도 적용하는 데, 특히 체적검사에서 중요한 검사중의 한 방법인 초음파검사에 관한 기술 기준 및 요건, 규격의 변화 과정을 본문에서 검토하였다.

ASME Sec. XI 86년과 89년 규격에서 부터 결함의 기록기준이 더욱 엄격하여지고 ASME Sec. XI 부록 VI, VII, 및 VIII에서 검사자의 자격요건이 까다로워졌다. 이는 원전 초음파 검사의 신뢰성을 제고하기 위한 한 방법이며 또한 ASME Sec. V art. 4에서 컴퓨터 영상 기술이 추가로 언급되었으며, 신호 수집, 처리기술에 관한 Software의 발전과 함께 실제 현장에 적용하는 계기를 마련하고 있다. 초음파검사의 기본인 인공결함 내재한 대비 보정 시험편을 가지고 검사를 하여왔으나 결함의 정확한 크기, 위치 및 특성을 결정짓기 위한 자연 결함이 내재한 시험편의 사용이 또한 요구되고 있으므로, 이에 대한 대비도 아울러 하여야 하겠다.

참고문헌

1. ASME B and PV Code, Section V, "Nondestructive Examination" (1974-1989 ed.)
2. ASME B and PV Code, Section XI, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components" (1974-1989 ed.)
3. 박대영 외 "원자력 발전소 가동전, 중 검사 현황 및 주요 결함", 한국원자력연구소, 1990
4. ASME B and PV Code, Section III, "Nuclear Power Plant Components, APPENDICES" (1989 ed)
5. 이삼래 외 "오스테 나이트 스테인레스 강의 초음파 탐상" 한국원자력연구소 1990.