

TOFD Technique을 이용한 원자로헤드 관통관 용접부 비파괴검사 Reactor vessel head penetration J-groove welds inspection by TOFD technique

김 왕배*, 이 영호**, 문 용식***, 김 창수***

* 한국수력원자력(주) 정비기획처 엔지니어링실

** 충남대학교 공과대학 기계공학과

*** 한국수력원자력(주) 정비기획처 엔지니어링실

ABSTRACT

The reactor pressure vessel head of PWR has penetrations for control rod drive mechanism and instrumentation systems. The Primary coolant water and operating temperature can cause the stress-corrosion cracking of these nickel-based alloy penetrations. It is difficult to detect and size flaws such as SCC in the reactor head penetrations using conventional UT methods because of complex geometry. Therefore, the utilities are using the TOFD technique for the detection and sizing of the flaw. This study shows the correlation between the ultrasonic wave direction and the orientation of the flaw and the range of flaw depth which can be detected by the TOFD techniques.

1. 서 론

가압경수로형 원자로 헤드에는 제어봉구동장치 및 계측장치를 위해 관통관이 설치되어 있다. 관통관은 원자로 헤드 관통부에 열박음되며, 최대 47도 정도의 경사를 가지고 원자로헤드 내면에 J-Groove 용접 형태로 노즐용접이 이루어진다. 이러한 용접은 용접부분의 심각한 타원형화로 인장응력을 증가시키는 부분에 아주 복잡한 형태의 잔류응력을 발생시킨다. 이 관통관 노즐과 관련 용접부에는 니켈계열 합금이 사용되는데 이 재질은 원자로냉각재와 원자로 운전조건에 영향을 받아 응력부식균열(PWSCC)이 발생할 수 있다.

2000년 11월 미국 Oconee 원전 1호기 원자로 헤드 관통관 노즐 부분에서 PWSCC에 따른 누설이 발견된 이후 타호기에서도 유사 결함들이 발견됨으로써 미국 원자력규제위원회(NRC)는 가압경수로형 원자로 헤드 관통관에 대한 강화된 비파괴검사 시행을 요구하고 있다.¹⁾

그림 1에서 보는 것처럼 검사의 대상이 되는 원자로 헤드 관통부는 그 기하학적 형태가 매우 복잡하여 일반적인 초음파검사법으로는 이러한 까다로운 조건 하에서 미세균열의 검출 및 크기 측정이 용이하지 않아 TOFD(Time Of Flight Diffraction) 검사법을 적용한다.

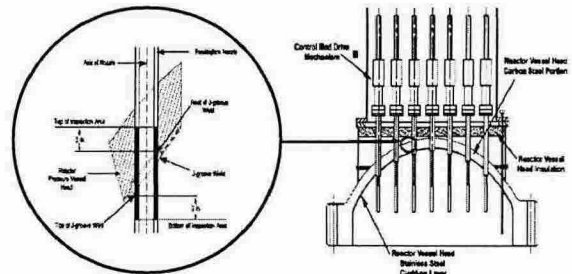


그림 1. 원자로헤드 관통부 형상

본 논문에서는 TOFD 검사방법으로 검출할 수 있는 결함 크기 범위를 확인하여 회절파를 이용한 결함검출의 정확성 및 신뢰성을 검증하고, 불연속부의 방향과 TOFD 탐촉자 초음파 주사 방향과의 상관관계를 정립하여 탐촉자 배열 위치에 따른 결함의 검출 가능성 및 신뢰도 정보를 확보하고자 한다.

2. 기본 이론

2.1 초음파 회절파

초음파가 피검사체 매질 내를 진행하다가 크랙과 같은 불연속부에 부딪히면 불연속면에 부딪힌 초음파는 대부분 반사되어 나가고, 불연속부의 끝부분에 부딪힌 초음파는 호숫물에 돌이 떨어졌

을 때 퍼져나가는 물결 모양의 형태로 초기 입사된 초음파와 같은 면을 따라서 퍼져 나가는데 이러한 파를 회절파(Diffraction wave)라 한다.

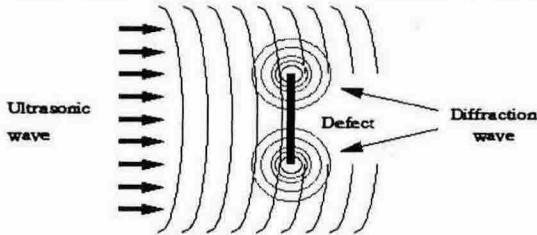


그림 2. 초음파 회절파 발생 개념

회절파는 반사파에 비해 약 30dB 정도로 비교적 매우 낮은 진폭을 가지고 있어 검출에 어려움이 있으나 불연속부의 끝부분에서 전방향으로 방사되어 나간다는 특징으로 결함의 크기측정에 매우 유용하게 이용된다.²⁾

2.2 TOFD 기법

TOFD(Time Of Flight Diffraction) 기법은 초음파와 불연속부 팁과의 상호 시간적인 연관관계를 이용하여 불연속부의 위치나 크기를 계산해 내는 비파괴 검사법이다. 결함의 위치나 크기는 항상 회절된 신호의 진행시간으로부터 결정된다.

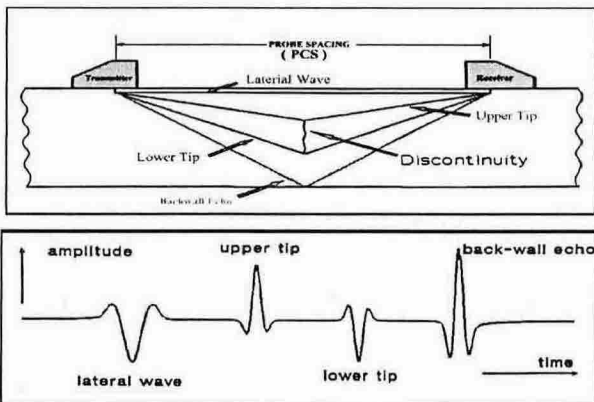


그림 3. TOFD 기법 구성 및 A-scan 신호유형

통상적으로 초음파 펄스가 송신된 후 수신기에 들어오는 첫 번째 신호는 피검사체의 표면 바로 아래 부분을 통과한 표면파 이다. 결함과 같은 불연속부가 없을 경우 수신기에 들어오는 두 번째 신호는 피검사체의 바닥으로부터 오는 신호이다. 따라서 TOFD 신호 평가시 표면파와 저면신호만 존재할 경우 피검사체 내부에 불연속부가 존재하지 않는 건전한 것으로 평가할 수 있다.³⁾

만약 피검체 내부에 결함과 같은 불연속부가 존재할 경우 이 불연속부로부터 회절되어 오는

신호는 표면파와 저면신호 사이에 존재할 것이다. TOFD 기법의 기본적인 구성 및 지시의 전형적인 A-scan 신호유형은 그림 3과 같다.

3. 실험 Data 취득, 평가

3.1 실험장치 구성

3.1.1 신호 취득평가 시스템

실험에 사용된 신호취득/평가 시스템은 현재 원자로헤드 검사에 사용되는 인트라스펙트 3차원 이미징시스템을 사용하였다. Motion control 시스템에 의해 제어되는 스캐너를 사용하여 표준시편에 가공된 Notch 신호를 취득 평가하였다. 실험용 표준시편에서의 음속은 5.52mm/μs, 축방향 주사간격은 0.04", 원주방향 이동간격은 1°로 설정하였으며, A/D rate는 50Mpsps로 하였다.

3.1.2 TOFD 탐촉자

실험에 사용한 탐촉자는 수평주사 TOFD 탐촉자를 채널 1, 수직주사 TOFD 탐촉자를 채널 2로하는 TOFD 탐촉자를 사용하였으며, 송수신 탐촉자 간격 24mm, 굴절각은 55±5°이었다.

3.1.3 표준시편(Standard block)

본 실험에 사용한 표준시편의 재질은 인코넬 600(ASME SB-166), 두께 15.85mm, 길이 419.5mm로 웨스팅하우스형 원자로헤드 관통관과 동일형상, 동일재질을 사용하였다. 결함을 모사하기 위하여 OD(Circumferential/Axial) Notch가 깊이 1, 3, 5, 7, 10, 12, 14mm 등 총 7종류, ID(Circumferential/Axial) Notch가 깊이 1, 3, 5, 7, 10, 12, 14mm 및 관통 등 총 8종류가 가공되었다. 시편에 가공된 노치는 CIP기술을 사용하여 가공되어 초음파에 대한 반응특성이 일차계통 응력부식균열의 그것과 매우 유사하게 나타난다.

3.2 신호 취득, 평가 및 분석

축 방향 노치에 대하여 노치 방향과 TOFD 탐촉자 주사방향과의 상관관계 분석을 위하여 축 방향 노치 방향과 수직인 주사방향을 가지는 TOFD 채널 #1을 주 탐촉자로 사용하고, 비교평가를 위하여 노치 방향과 동일한 주사방향을 가지는 TOFD 채널 #2를 보조 탐촉자로 하여 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 취득된 신호를 평가, 분석한 결과값은 다음의 표1과 같다.

표 1. 축방향 노치에 대한 실험 Data 분석값

번호	Notch Depth	Ch #1			Ch #2			비고
		Det.	Sizing		Det.	Sizing		
a	1	O	X	-	X	X	-	ID
b	3	O	O	2.9	O	X	-	ID
c	5	O	O	5.0	O	X	-	ID
d	7	O	O	7.2	O	X	-	ID
e	10	O	O	10.1	O	O	10.1	ID
f	12	O	O	11.9	O	O	12.0	ID
g	14	O	O	13.9	O	O	14.1	ID
h	16	O	X	15.9	O	X	15.9	ID
i	1	O	O	0.8	O	O	0.8	OD
j	3	O	O	2.9	O	O	3.0	OD
k	5	O	O	4.8	O	O	4.7	OD
l	10	O	O	9.9	O	X	-	OD
m	7	O	O	7.0	O	O	6.8	OD
n	12	O	O	11.9	O	X	-	OD
o	14	O	X	-	O	X	-	OD

원주 방향 노치에 대하여 노치 방향과 수직인 주사방향을 가지는 TOFD 채널 #2를 주 탐촉자로 사용하고, 비교평가를 위하여 노치 방향과 동일한 주사방향을 가지는 TOFD 채널 #1을 보조 탐촉자로 하여 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 취득된 신호를 평가한 결과값은 다음 표2와 같다.

표 2. 원주방향 노치에 대한 실험 Data 분석값

번호	Notch Depth	Ch #1			Ch #2			비고
		Det.	Sizing		Det.	Sizing		
A	1	O	X	-	O	X	-	ID
B	3	O	X	-	O	O	3.0	ID
C	5	O	X	-	O	O	5.2	ID
D	7	O	X	-	O	O	7.2	ID
E	10	O	O	10.5	O	O	10.0	ID
F	12	O	O	12.2	O	O	12.2	ID
G	14	O	O	13.8	O	O	14.2	ID
H	16	O	X	-	O	X	-	ID
I	3	O	O	3.2	O	O	3.1	OD
J	1	O	O	0.9	O	O	0.9	OD
K	5	O	O	4.8	O	O	5.0	OD
L	10	O	O	9.8	O	O	9.9	OD
M	7	O	O	6.8	O	O	6.8	OD
N	12	O	X	-	O	O	12.0	OD
O	14	O	X	-	O	X	-	OD
P	16	O	X	-	O	X	-	OD

4. 결 론

1) 결함 검출에 관해서는 초음파 주사방향과 결함 방향이 수직할 경우는 깊이 1mm 이상되는 모든 결함을 검출할 수 있으나, 같은 방향일 경우는 탐촉자로부터 1mm 이내의 거리에 있는 결함은 검출할 수 없으며, 3mm 이상 떨어진 결함에 대해서는 검출이 가능함을 확인하였다.

2) 결함의 크기측정에 관해서는 초음파 주사방향과 결함방향이 수직할 경우라도 팁이 탐촉자로부터 1~2mm 이내에 있는 결함에 대해서는 정확한 깊이측정을 할 수 없으며, 3mm 이상 떨어져 있어야만 크기측정이 가능함을 확인하였다. 또 같은 방향일 경우는 팁이 탐촉자로부터 7mm 정도 떨어져 있어도 정확한 깊이측정이 불가하며, 약 9mm 이상 떨어져 있어야 크기측정이 가능함을 확인하여 TOFD 기법을 활용한 결함의 깊이측정은 결함의 방향과 탐촉자의 초음파 주사방향의 상관관계에 따라 상당히 영향이 많음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 1.US NRC Order EA 03-009, " Issuance of First Revised NRC Order (EA-03-009) Establishing Interim Inspection Requirements for Reactor Pressure Vessel Heads at PWR", Feb, 2004
- 2.J. C. Drury, "Ultrasonic Flaw Detection for Technicians". Ninth Impression, Dinefwr Press, 1997, pp. 177-180
- 3.D. Coaster, "General Time of Flight Diffraction Training Course", Rev 0, TRC, 1994, pp. 4-13
- 4.Russ Devlin, "INTRASPECT UT Analysis Guidelines", Rev 5, Westinghouse Electric Company, 2003, pp. 4-9