

TOFD 기법을 활용한 원자로 상부헤드관통부 오버레이 용접부 결함 검출 가능성 평가

이정석[†] · 김진희^{*}

A Feasibility Test for Flaw Detection in Overlay Weld of Reactor Upper Head Penetration Using Time of Flight Diffraction Technique

Jeong Seok Lee[†] and Jin Hoi Kim^{*}

(Received 21 April 2014, Revised 20 June 2014, Accepted 16 July 2014)

ABSTRACT

A Failure or degradation of reactor upper head penetration is a recurring problem due to long term operation at nuclear power plants. And a flaw in the reactor upper head penetration has caused unplanned plant shutdown for repair as well as high economic impact on the plants. Consequently, a detection of flaws is of the utmost importance. Prior to the replacement of reactor upper head penetration, some utilities have repaired the flaws of reactor upper head penetration generated by overlay weld. Until now, only the base metal in reactor upper head penetration has been inspected according to 10 CFR 50.55a and ASME code case N-729-1. Accordingly, it is difficult to detect manufacturing defects and repair defects in overlay weld. This paper presents a case study on the application of Time of Flight Diffraction technique for reactor head penetration mockup with artificial flaws in overlay weld. This study offers a way to understand the flaws detected in reactor upper head penetration overlay weld.

Key Words : Reactor head penetration(원자로 헤드관통부), Time of Flight Diffraction(전파시간회절), J-weld(J-형상 용접부), Overlay Weld(오버레이 용접부), Nuclear power plant(원자력발전소)

1. 서론

원자력발전소 원자로 상부헤드관통부는 원자로 노심에 반응도를 제어하는 제어봉의 이동통로로 원자력발전 설비운영을 위한 핵심요소 중 하나이며, 표준형 발전소의 경우 83개가 설치되어 있다. 결함 발생으로 손상 시 안전성 영향뿐 아니라 불시정지로 인한 경제적 손실과 사회적 파장 등 원전 운전에 막대한 영향을 미칠수 있다. 원자로 상부헤드관통부 모재는 Alloy 600, J-용접부는 82/182 용접재 사용 및

300°C 이상의 고온에서 운전되므로 결함 발생 가능성이 높은 환경이다. 해외 원전의 경우 원자로 상부헤드관통부에 대한 결함 및 누설이 다수 발생하여 보수 및 교체가 활발히 진행 중이다. 국내에서는 2012년 한빛 3호기, 2013년 한빛 4호기 원자로 상부헤드관통부에 결함이 발생하여 오버레이 방법으로 보수를 수행한 사례가 있다. 결함이 발견되면 응력부식균열에 저항성이 강한 Alloy 690 계열 용접재를 사용하여 오버레이 용접방법으로 보수한다. 따라서 원자로 상부헤드 오버레이 보수부위에 발생하는 결함을 조기에 검출하여 예기치 않는 사고를 미연에 방지하는 것이 원자로 구조물의 신뢰성 확보를 위해 중요하다. 원자로 상부헤드관통부 비파괴검사는 10 CFR 50.55a¹⁾ 및 ASME Code Case N-729-1²⁾에 따라

[†] 책임저자, 회원, 한국수력원자력 중앙연구원
E-mail: jspluk@khnp.co.kr
TEL: (042)870-5562 FAX: (042)870-5549

^{*} 한국수력원자력 중앙연구원

정해진 주기, 검사방법 및 기량검증 절차에 따라 수행된다. 이때 수행되는 비파괴검사 기술은 관통관 내면에서 전파시간회절(TOFD: Time of flight diffraction) 기법에 의한 자동초음파검사가 수행되며, 관통부 모재에 대해서만 미국 전력연구소(EPRI)에서 기량검증이 인증된다. 본 연구에서는 원자로 상부헤드관통부와 동일한 모의 시험편에 인공결함을 삽입하여 전파시간회절 기법에 의한 오버레이 용접부의 결함 검출 및 크기 측정 가능성을 고찰하였으며, 또한, 오버레이 용접부에서 어느 정도 깊이까지 초음파 신호가 도달 및 수신되는지 여부도 확인하였다.

2. 이론적 고찰

TOFD 검사기법은 송신 및 수신 두 개로 분리된 진동자를 사용하여 표면을 흐르는 측면파(Lateral wave)와 저면에서 반사된 저면반사파(Back-wall echo) 사이에 수신된 회절파를 분석하여 결함여부를 확인하게 된다. 용접부에 결함이 없는 건전한 부위일 경우에는 측면파와 저면반사파만이 존재하며, 결함이 존재할 경우 초음파는 결함의 선단(Tip)에서 회절이 일어나게 된다. 이 회절신호가 수신 탐촉자에 도달되는 시간을 계산하여 결함의 위치를 측정하게 된다³⁾. Fig. 1과 Fig. 2는 TOFD 신호의 발생과정을 그림으로 나타낸다.

TOFD 기법은 펄스Echo 기법보다 반사체에 더욱 민감하여 응력부식균열과 관련된 결함 여부를 잘 확인할 수 있다. 결정립 경계, 용융부족, 혼입 등은 모두 결함의 회절신호와 유사한 신호를 나타내므로 평가에

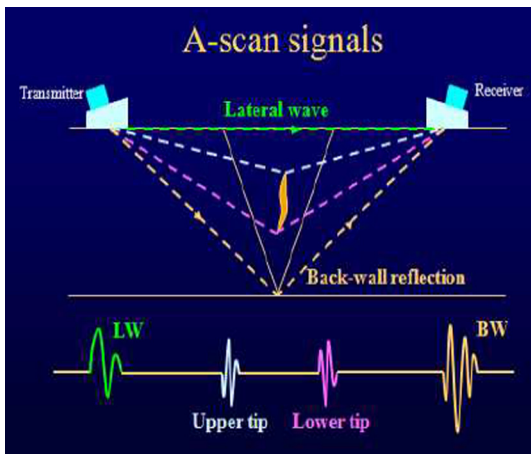


Fig. 1 TOFD Signal propagation

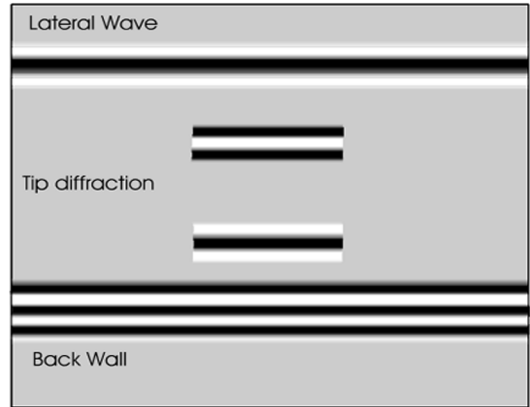


Fig. 2 B-scan image of TOFD signal

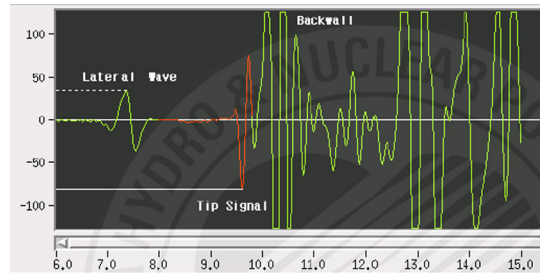


Fig. 3 Depth sizing method for OD connected notch

주의해야 한다. 또한, 초음파 신호크기와 무관하기 때문에 정확한 결함크기를 측정할 수 있으며 결함의 방향성에도 무관하다. 내면으로부터 기인한 결함의 선단 신호는 측면파와 동일 위상을 사용하여 결함의 깊이를 측정해야 하며, 외면으로부터 기인한 결함의 선단 신호는 측면파와 반대위상으로 측정해야 한다⁴⁾. Fig. 3은 외면으로부터 기인한 결함의 깊이 측정 방법을 나타낸다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치 구성

본 실험에서 사용된 자동 초음파탐상시스템은 실제 검사에서 사용되는 미국 Wesdyne사의 7010 스캐너와 Inraspect 신호 수집 및 평가용 소프트웨어(Ver. 6.18.2)을 사용하였다⁵⁾. 원자로 헤드관통관 모의 시험편 내면에 탐촉자를 위치시켜 전파시간회절(TOFD) 기법을 사용하여 자동주사 방식으로 신호를 수집하였다. 인공결함에서 반사되어 돌아오는 신호를 수집하여 평가용 소프트웨어를 통해 평가하였다.

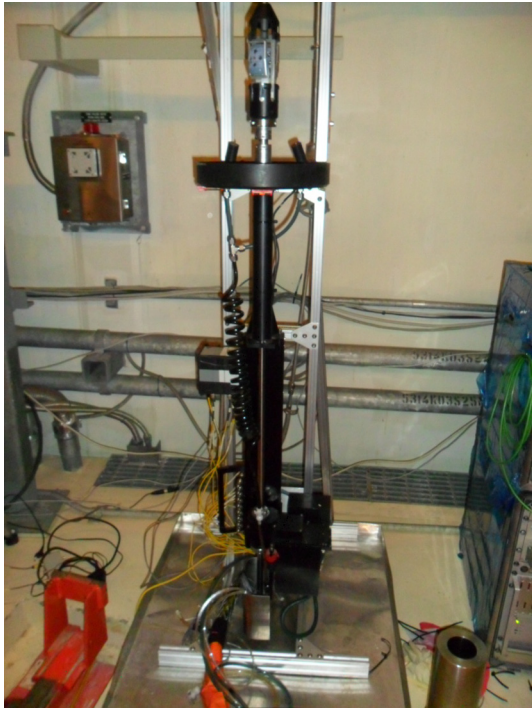


Fig. 4 7010 Scanner and probe



Fig. 5 Intraspect ultrasonic data acquisition and analysis system

3.2 탐촉자 사양

탐촉자는 Wesdyne사의 Open Housing용 탐촉자를 사용하였다. 채널은 송수신 진동자가 1쌍으로 이루어지는 TOFD의 4개 채널과 0°(수직 탐촉자) 1개 채널로 구성되어 있다. 1, 3번 채널은 원주방향으로 설치되어 축방향 결함을 검출하고 2, 4번 채널은 축방향으로 설치되어 원주방향 결함을 검출한다. 0° 탐촉자는 누설경로평가 목적이다. TOFD 4개 채널은 탐촉자 중심 간격(PCS: Probe Center Separation) 24mm, 진동자 크기 0.25"Ø, 중과 탐촉자이며, 탐촉자의 상세 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of open housing transducer

CH.	Type	Freq. (MHz)	Refracted Angle	Beam Direction
1	TOFD	5	55°	Circ.
2	TOFD	5	40°	Axial
3	TOFD	5	50°	Circ.
4	TOFD	5	35°	Axial
5	0°	2.25	0°	Radial

3.3 시험편 설계 제작

원자로 상부헤드관통부 오버레이 용접부 결함 검출 가능성을 실험하기 위해 현재 원자력발전소 원자로 헤드관통부에 설치된 동일 모재 재료 및 오버레이 용접 보수 방법으로 사용 중인 동일 용접재료를 사용하였다. 원자로 상부헤드관통부 모재는 Alloy 600, 오버레이 용접부는 Alloy 690 계열 용접재로 제작된 모의시험편을 사용하였으며 사양은 Fig. 6과 같다.

오버레이 용접 보수부위에서 발생 가능성이 높은 결함은 접합불량(lack of bond), 융합불량(lack of fusion), 기공(porosity) 및 게재물 등으로 평면상 또는 체적 형태이므로 인공결함은 상기 결함들을 모사하기 위해 평면상인 평저공(FBH : Flat Bottom Hole)을 외면으로부터 가공하였으며 상세 사양은 Table 2와 같다.

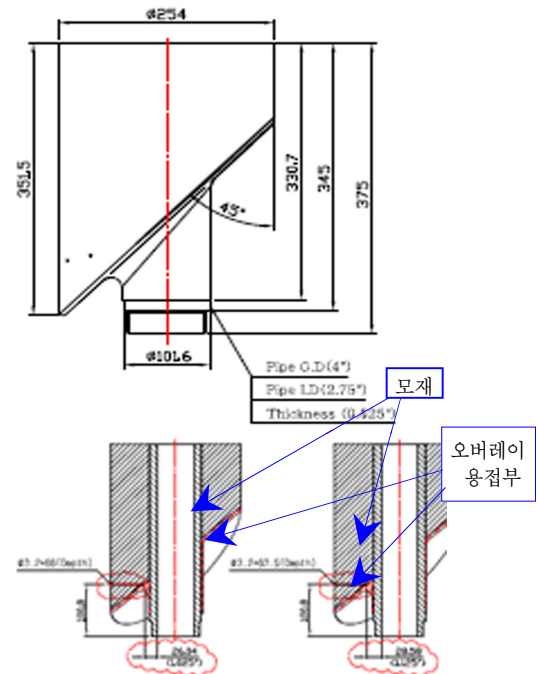


Fig. 6 Design drawing of flawed overlay weld specimen

Table 2 Detail dimensions of the artificial flaws

No.	Flaw Type	Hole Size(inch)	Circ. Position	Depth(inch)
1	FBH	0.125	0°	0.725
2	FBH	0.125	338°	0.825
3	FBH	0.125	22°	0.925
4	FBH	0.125	324°	1.025
5	FBH	0.125	38°	1.125

4. 실험결과 및 고찰

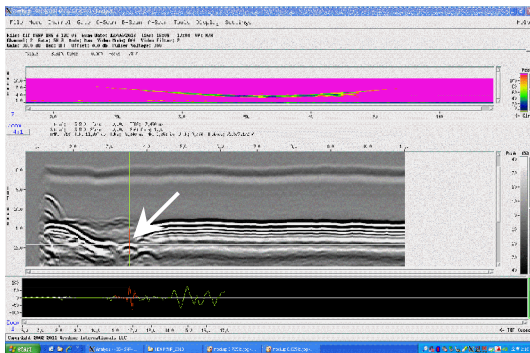
검사 시스템의 성능을 확인하기 위해 보정시험편에 보정을 수행한 후 모의시험편에 스캐너를 장착하여 자동으로 신호를 수집하였다. 수집된 데이터를 평가한 결과 Fig. 7과 같이 1.125" 깊이 FBH를 제외한 4개의 FBH가 4개의 TOFD 채널에서 모두 검출이 되었다. 1.125" FBH가 검출되지 않은 이유는 초음파 감쇄에 의한 영향으로 판단된다. 모의 결함시험편 검사 데이터에 대해 전 검사각도를 B-scan을 통해

확인하였다. 또한, B-scan의 모든 위치에 대하여 A-scan 신호를 확인하면서 평가하였다. Fig. 7은 각 깊이별로 검출된 신호화면을 보여주고 있다.

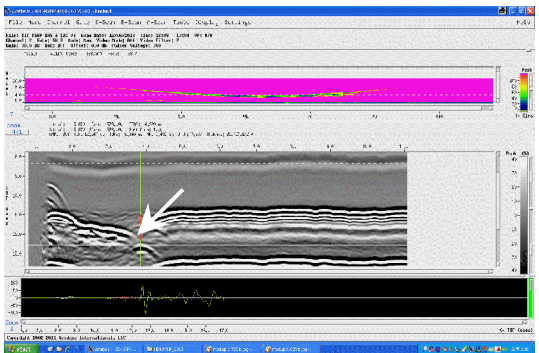
깊이 측정은 기량검증 된 절차에 따라 B-scan에서 검출된 신호에 커서를 맞추고 A-scan 신호위상을 이용하여 측정하였다. 결함에 대한 깊이측정은 외면으로부터 가공되었으므로 측면파의 위상과 반대 위상인 것을 이용하여 측정하였다. Fig. 8에 0.925"에 대한 깊이 측정 방법의 예를 나타내었으며, Table 3에 FBH 결함 시험편에 깊이 평가 결과를 나타내었다.

Table 3 FBH depth sizing evaluation results(unit : inch)

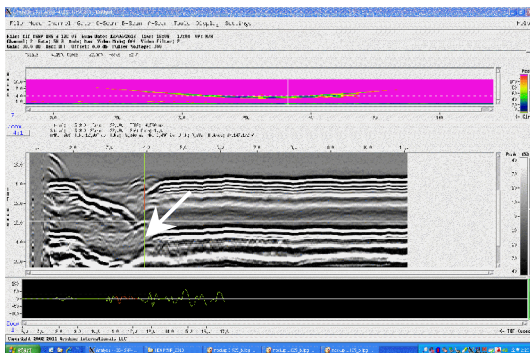
No.	Circ. Position	Actual Depth	Measured Depth	Difference
1	0°	0.725	0.734	0.009
2	338°	0.825	0.832	0.007
3	22°	0.925	0.916	-0.009
4	324°	1.025	1.029	0.004



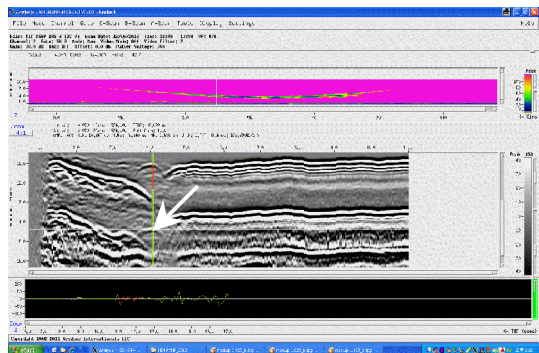
(a) 0.725" FBH



(b) 0.825" FBH



(c) 0.925" FBH



(d) 1.025" FBH

Fig. 7 Experimental results for FBH flawed overlay weld specimen

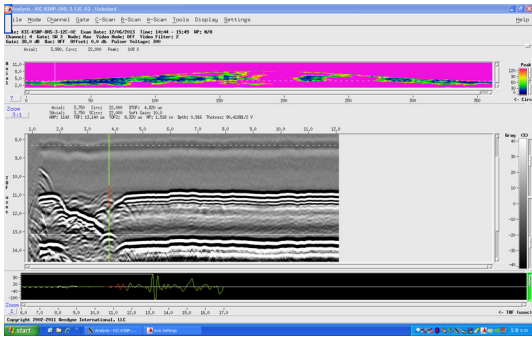


Fig. 8 Depth Sizing Method for 0.925" FBH

5. 결론

원자력발전소 원자로 헤드의 오버레이 보수 용접부 검사를 위해 TOFD 기법을 이용하여 모의시험편 인공결함에 대한 결함 검출 및 깊이 측정 가능성을 고찰한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) FBH이 삽입된 원자로 헤드 오버레이 보수 용접부 모의시험편에 대하여 결함검출 가능성을 실험한 결과 1.025" 깊이의 가공된 결함까지는 검출이 가능하였다.

2) 검출된 결함에 대하여 깊이 측정 결과, 오차가 거의 없어 깊이 측정의 정밀도가 높은 것으로 확인되었다.

3) 본 실험 결과에 따라 원자로 헤드 관통부 결함 발생 후 예방 보수방법으로 수행되는 오버레이 용접부 검사에 적용이 가능하다.

4) 상기 실험결과로 볼 때 특정 깊이까지 오버레이 용접 보수부위에서 발생 가능성이 높은 접합불량(lack of bond), 비드 간 융합불량(Inter bead lack of fusion), 기공 및 계재물 등의 결함에 대한 검출 가능성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. USA, Code of Federal Regulation, 10 CFR 50.55a, 2008, "Codes and Standards".
2. American Society of Mechanical Engineering, ASME Code Case N-729-1, 2006, "Alternative Examination Requirements for PWR Reactor Vessel Upper Heads with Nozzles Having Pressure-Retaining Partial-Penetration Welds Section XI", Division 1.
3. Ed Ginzel, 2013, "Ultrasonic Time of Flight Diffraction," Eclips Scientific Products Inc., pp. 85-121.
4. Fred Whytsell, 2012, "Reactor Vessel Head Penetration Ultrasonic Examination Analysis".
5. Fred Whytsell, 2010, "Procedure for Ultrasonic Examination of Reactor Vessel Head Penetrations".