

냉각재 공급자관 위상배열 검사 적용에 따른 결함 분석

이상훈[†] · 진석홍* · 김인철*

Analysis of Defect in CANDU Feeder Pipe using Phased Array Ultrasonic Inspection System

Sang-Hoon Lee[†], Seuk-Hong Jin*, In-chul Kim*

ABSTRACT

The feeder pipe of Main Primary Heat Transfer System in Wolsong Nuclear Power Plant was inspected by the Ultrasonic Phase Array technique in 2010. It is the first time to apply this method to the construction at Nuclear Power Plant in Korea. The time required for UT technique is less than RT method. The UT method doesn't need to evacuate personnel who works nearby inspecting area and doesn't need to wait developing of film. For these reasons, the UT method is the fastest method among the volumetric inspections. As a result of the examination, it became clear that main defect of the feeder pipe is the Lack of fusion in the welded area. Moreover, the rate of defect was reduced gradually as improvement of welder's skill. If welding machine has problem, the defect has tended to same pattern(occurred same position in the welding area) but these defects were founded without specific rules. For these reasons, the creation of defect is dependent on the skill of worker not on the automatic welding machine. This evaluation of defect signal and collecting data would be useful to further examination in ISI.

Key Words : Feeder(냉각재 공급자관), Phased Array UT(위상 배열 초음파검사), RT(방사선 투과검사), Defect(결함), Lack of fusion(용융 부족)

1. 서론

현재 국내외적으로 원자력발전소 배관의 제작 및 건설 중에 체적검사로 사용하는 주된 검사방법은 방사선투과검사이다. 그러나 방사선투과검사는 검사 시간이 많이 소요되고 검사자의 피폭을 수반하는 등 제약사항이 많다. 최근에 미국 ASME에서 Code Case (N-659-2)를 만들어 방사선투과검사를 위상배열 초음파검사로 대체하는 것을 일부 허용하였다. 위상배열 기법을 적용하면 배관 한쪽으로는 접근만으로 검사가 가능하고 방사선 투과검사 적용시에 선결조건인 주변 인력의 소개와 필름 현상을 위한 대기 시간

이 필요 없게 되어 다른 작업을 동시에 수행할 수 있다. 또한, 결함의 깊이를 정확히 알 수 있으므로 결함 보수시간을 줄이는 효과를 얻을 수 있다.

금번 월성원전 냉각재 공급자관 교체작업의 용접 검사에 국내에서 최초로 위상배열 초음파 검사기법을 적용하였다. 해당부위의 검사에 본 기법을 최초로 적용한 발전소는 캐나다의 포인트레프르 원전이다.

이번 검사는 캐나다의 용역기관에 의해서 수행되었으며 검사 데이터 전체를 원자력발전기술원에서 제공받아서 결함으로 판정된 지시에 대한 재평가를 수행하여 검사 및 평가의 신뢰도를 검증하였다.

또한, 본 기법의 후속 활용 여부를 검토하기 위하여 결함발생률 및 교체작업 공정을 변경추이, 발견 결함의 종류 및 분포도를 조사하였다.

[†] 책임저자, 회원, 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원
E-mail : lee@khnp.co.kr

TEL : (042)870-5626 FAX : (042)870-5649

* 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

2. 위상배열초음파검사의 원리

2.1 위상배열(Phased Array) 초음파 검사기법

위상배열 초음파 검사기법의 중요한 특징은 사용자가 컴퓨터를 이용하여 각각의 진동자에 대하여 초음파 발생시간과 진폭을 조절함으로써 초음파의 다양한 변수들인 각도, 집속 깊이(focused depth), 집속 점에서의 빔 반경(focal spot size) 등을 제어할 수 있다.

초음파 탐상에서 검사의 민감도는 결함으로부터 반사되어 돌아오는 초음파의 에너지에 의존한다. 반사되어 돌아오는 에너지를 높이는 방법으로 첫째, 탐촉자 자체의 송신 에너지를 높이는 방법이 있으나 진동자의 내구성 및 기기의 특성에 따라 제약이 있다.

둘째, 검출하고자하는 결함부위에 탐촉자 송신 에너지를 집속시키는 방법이다. 이는 탐촉자 송신 에너지의 증가 없이 집속부위에만 초음파 에너지를 증가시키므로 집속되지 않는 부분으로부터 잡음이 감소됨과 동시에 결함부위의 반사 에너지는 증대되는 방법이다. 아래 Fig. 1과 2는 위상배열 초음파기법을 이용하여 필요한 검사각의 생성과 수신 메커니즘을 보여주고 이때 초음파 처리형태를 보여준다. 또한 소프트웨어를 이용하여 진동자의 진동 강도와 순서를 제어할 수 있다.

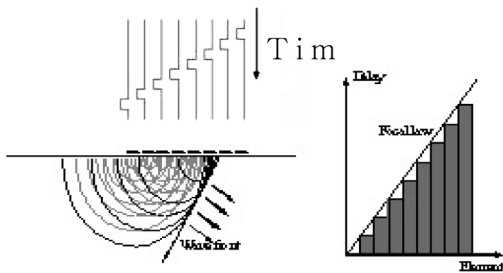


Fig. 1 Beam Steering Transmission

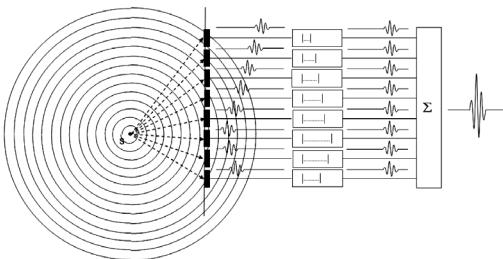


Fig. 2 Beam Steering Receipt

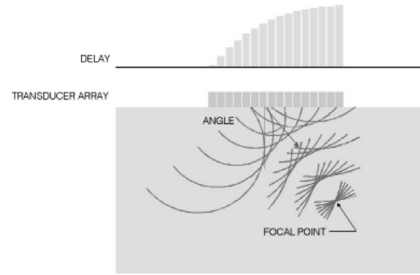


Fig. 3 Beam Focusing

2.2 빔 집속(Beam Focusing)

위상배열(Phased Array) 초음파 검사에서 중요한 기능은 원하는 검사 시편 두께에 초음파 에너지를 집속시켜 초음파 손실을 보상하고 투과능을 높여 결함에서 반사되는 더 많은 초음파를 수신함으로써 결함의 검출 감도 및 분해능을 높게 하는 것이다.

Fig. 3은 각 진동자(Element)에서 서로 다른 시간 지연이 적용되어 초음파 빔의 집속(Focusing)이 이루어지는 개념을 보여준다.

3. 냉각제 공급자관 검사

3.1 사용 장비

신호취득 장치로는 OmniScan(MX32/128)을 사용하였으며 탐촉자는 위상배열 탐촉자(10MHz, 27(ID) 위상배열 탐촉자)를 적용하였다. Fig. 4는 해당 장비의 사진이다.



Fig. 4 OmniScan



Fig. 5 Calibration of system

제작한 수동 스캐너를 배관에 거치하여 검사를 수행하였으며, 접촉매질로는 글리세린을 사용하였다. Fig. 5는 해당 장비를 사용하여 검사전 교정을 수행하는 사진이다.

3.2 검사부위

냉각재 공급자관은 핵연료가 장착된 380개 압력관의 입구 및 출구와 냉각재 모관을 연결하는 기기로서 냉각재 펌프와 압력관을 연결하는 입구측자관 380개와 압력관과 증기발생기를 연결하는 출구측자관 380개로 구성된다.

공급자관은 증기발생기에서 온도가 낮아진 냉각재를 압력관을 거쳐서 온도를 상승시켜 증기발생기로 공급하는 유로를 제공하며 용접부위(검사부위)는 Fig. 6과 같다.

냉각재 공급자관의 재질은 ASME SA106 Grade C이며 설계 온도 및 압력은 Table 1과 같다.

공급자관은 입구측 및 출구측을 합하여 760개이며 각각 다른 5종류의 구경으로 구성된다. 공급자관별 구경 및 두께/수량은 Table 2와 같으며 모든 용접부는 가스텅스텐 아크용접법(GTAW)을 사용하여 용접되었다.

Fig. 7은 냉각재 모관과 냉각재 공급자관의 용접부 검사 사진이다.

검사는 인증 과정을 거친 절차서(Ultrasonic Phased

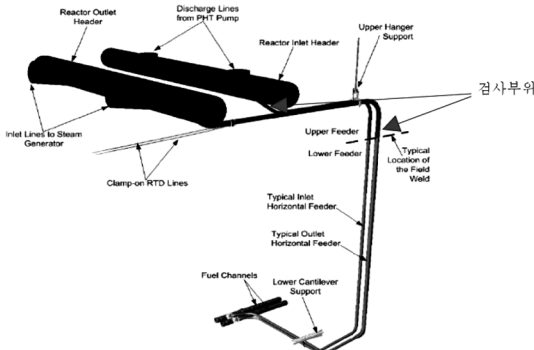


Fig. 6 Outline of the Feeder

Table 1 Design Temperature and Pressure of the Feeder

Feeder	Design Temp.	Design Pr.
Inlet Feeder	535°F(279°C)	1870psig(12.90 MPa(g))
Outlet Feeder	600°F(316°C)	1550psig(10.69 MPa(g))

Table 2 Spec. of the Feeder(Unit : Inch)

Classification	1.5"	2"	2.5"	3"	3.5"	Total
Number of the Inlet Feeder	Low	66	304	10		380
	Up	66	160	154		380
Number of the Outlet feeder	Low		60	320		380
	Up		18	102	68	192
Inside Diameter (tolerance : 0.015")	1.50	1.94	2.32	2.9	3.36	
Thickness (tolerance : +15 ~ -12.8%)	0.20	0.25	0.28	0.3	0.32	

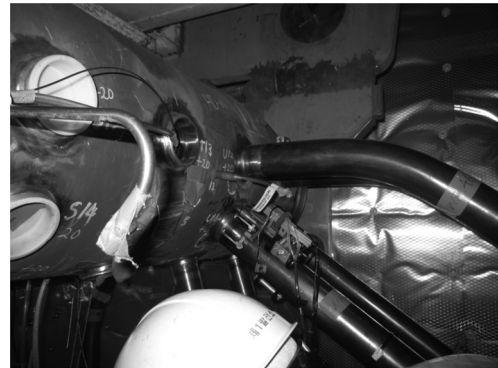


Fig. 7 Inspection of the Header to Feeder

Array Examination of Wolsong Feeder Welds(PA-P-1323))를 사용하여 METALOGIC사(캐나다 검사업체)에 의해서 수행되었다.

4. 검사 결과 분석

4.1 결함 발생을 및 제작 공정을 추이

현장 설치검사가 진행된 기간 동안의 결함 발생률 변화는 아래와 같으며 전체 결함 보수율은 6.2%이다.

결함 보수율은 Fig. 8과 같이 작업이 진행됨에 따라 낮아지는 경향을 볼 수 있다. 이는 냉각재 공급자관 자동용접기를 처음 접한 국내 용접사의 기량이 점차 향상된 것으로 보인다.

용접 공정률도 용접사의 기량 향상으로 인하여 향상되는 패턴을 나타내었다. 다만 마지막 단계에서 공정률의 하락과 결함보수가 높아진 것은 냉각재 공급자관이 모관에 설치될수록 공급자관 사이의 간섭이 심해져서, 용접 및 용접전 준비가 힘들어지는데 기인한다.

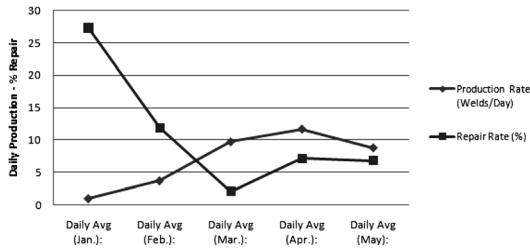


Fig. 8 Results of Repair Rate

4.2 결함의 종류

본 검사에서 나온 용접 불량으로 분류된 결함은 모재와 용가재 사이의 용융부족(Lack Of Fusion), 용가재 층간 용융부족(Inter path LOF), 용입부족(Incomplete Penetration), 체적 결함 등 4가지이며 각 결함별 점유율은 다음과 같다.

4.3 결함의 형태

가장 많이 발생된 결함은 Lack of Fusion(용융 부족)으로 용접 보수를 요하는 결함의 92%(모재와 용가재 사이 67%, 용가재 층간 25%)를 차지하였다. Fig. 10은 모재와 용가재간 LOF의 지시를 나타낸다.

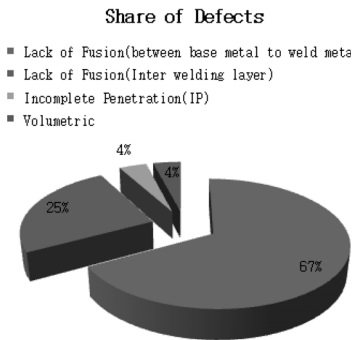


Fig. 9 Distribution Chart for Defect Types

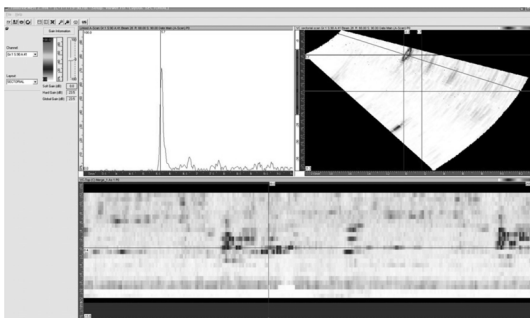


Fig. 10 Indication of LOF

LOF는 모재와 용가재의 경계면 또는 용가재 층간에서 입열 부족으로 인하여 발생하는 특징을 가지며 결함률이 시간이 지날수록 줄어들고 발생 위치 및 길이가 비정형화된 것으로 보아 자동용접기의 불량이라기보다는 입열량 조절과 용접속도 조절의 실패, 부적절한 용접전 준비(부재의 간격 조절 및 개선 각 문제)에 기인한 것으로 보인다.

금번에 발견된 LOF의 초음파신호는 구분이 용이한 고증폭의 신호가 일정한 불륨을 갖고 있는 형태로 나타난다. 다만 LOF 신호는 모재와 용가재 사이를 따라서 길이 방향으로 관찰되거나 용가재 층간에서 수평방향의 불륨을 갖는 특징을 갖고 있다.

용입부족의 신호는 초음파 신호형태로는 LOF와 유사하여 신호만으로는 상호 구분이 불가능하나 결함의 위치에 대한 프로파일을 하면 용접 기저부(루트부)에서 불륨을 갖고 관찰되는 특징을 갖고 있다. 특히 용입부족의 경우는 용접기의 초기 설정의 잘못으로 발생한 것으로 보이며 배관의 거의 360도에서 나타나는 특징을 가진다. Fig. 11은 용입부족 지시를 나타낸다.

Fig. 12는 LOF 결함의 위치를 표시한 결함보고서

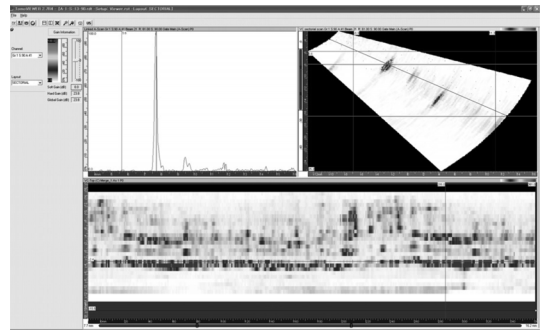


Fig. 11 Indication of Incomplete Penetration

WR63	175	11	OD	TDC	CW	Header	5.2	5.6	86	19	1.5	4
------	-----	----	----	-----	----	--------	-----	-----	----	----	-----	---

TDC

45° Skew Header Side
270° Skew Feeder Side

by: Jefrizal bin Fahmi	Signature:	Certification Type, Level and Reg. No.:
by: David Hermanutz	Signature:	Certification Type, Level and Reg. No.:

results included in this report are an interpretation of the testing instrument data and not a guarantee of equipment

Fig. 12 Examination Report

이다.

Fig. 12에서 보듯이 초음파 검사는 방사선 투과검사에서는 불가능한 결함의 깊이까지 정확히 탐지하므로 보수 용접의 시간을 단축할 수 있다.

다만 지시형태가 관심지시와 유사한 무관련지시의 구별을 위해서는 검증된 평가자에 의한 평가가 수행되어야 한다. 금번 검사에서도 모의 결함 시편을 제작하여 기법과 검사자의 검증을 사전에 수행하였다. 무관련지시는 용접 루트부 등 검사체 형상에 기인한 신호들로서 동일부위에서 반복적으로 발견되어지는 특징을 가지고 있다.

5. 결론

중수로 원전 냉각재 공급자관에 위상배열 검사기법을 적용함으로써 공기 단축과 용접 및 검사자의 피폭저감 효과를 얻을 수 있었다. 우리 보다 이전에 본 기법을 해당 검사부위에 적용한 캐나다 포인트 레프르 원전의 경우 검사자의 피폭을 수반하는 방사선 투과검사(7000장 이상 촬영 필요)를 초음파 검사로 대체하여 0.3Sv의 중사자 피폭 저감효과를 얻을 수 있었다.

위상배열 초음파를 사용한 금번 검사 데이터를 이용하여 일반 분석과 신호 분석을 수행하였으며, 일반 분석 결과 결함 발생률은 점차 줄어들었으며, 용접 공정률은 향상되는 경향을 나타내었다. 이것으로 실물모형을 사용한 철저한 사전 모의 용접훈련이 선행되면 초기 결함률의 저감효과를 얻을 수 있을 것으로 보인다.

또한 신호에 대한 재평가 결과 결함의 대부분은 LOF(용융부족)이고, 신호의 분해능 및 검출능이 뛰어나서 분명한 지시의 형태를 보였다. 또한 결함으로 판정된 지시에 대한 판정, 위치 및 증폭 정확성이 우수하였다.

제작 또는 설치시에 발생할 수 있는 주요 결함은 용융부족, 용입부족, 텅스텐 혼입, 기공 등의 결함들이며 금번의 신호 평가를 통해서 제작시 발생할 수 있는 결함에 대한 위상배열 초음파 기법의 검출능력이 우수한 것으로 확인되었다.

또한 가동중 검사시에 나타날 수 있는 결함에 대해서도 그 분해능이 초음파 기량검증을 통하여 입증되어있으므로 가동중 검사에서 지시가 발견되면 금번 설치검사에서 확보된 지시와의 상호 비교를 통해서 결함의 성장 여부 판단뿐만 아니라, 결함 생성 및 성장의 기저 조건 규명에도 크게 기여할 것이다.

국내 설치검사에 최초로 적용한 위상배열 초음파 기법은 공정단축 뿐만 아니라 신호의 검출능력, 검사 결과의 보존성 등 향후 활용성이 검증되어 앞으로 더 많은 적용이 추진될 것이다.

참고문헌

1. Design Manual of Wolsong NPP Unit 1, 86-33100-DM -000, Main PHT System
2. UltraVision1.0_Reference Guide Book, DUMLE002A Zetec(27-03-2006)
3. Examination Procedure, Ultrasonic Phased Array Examination of Wolsong Feeder Welds(PA-P-1323))