

가압기 노즐 이중금속 용접부의 구조적 오버레이 용접부에 대한 위상배열 초음파기법의 현장 적용

Field Application of Phased Array Ultrasonic Testing for Structural Weld Overlay on Dissimilar Welds of Pressurizer Nozzles

김진회*[†], 김용식*

Jin-Hoi Kim*[†] and Yongsik Kim*

초 록 용접 오버레이법은 1980년 초반에 배관 용접부 결함의 임시 보수방법으로 미국발전소에 처음 사용되었다. 원자력발전소의 배관 오버레이 용접부는 초음파검사 기술을 이용하여 주기적으로 검사되어야 한다. 최근 위상배열 초음파 기술 발달로 휴대하기 좋은 소형 장비를 이용할 수 있게 되었다. 현재, 완화기법 및 또는 복잡한 형상의 검사체의 표면검사 조건을 개선하기 위한 선제적인 용접 오버레이 기법 적용이 일반적으로 사용되고 있다. 복잡한 형상(용접 오버레이, 기존 용접부 및 모재)의 적당한 검사를 위해서는 여러 개의 일반 초음파검사용 초점 탐촉자들이 필요하게 된다. 대안으로 위상배열 초음파 탐촉자는 일반 초음파검사 탐촉자와 비교하여 더 좋고 빠른 커버리지를 제공하기 위해 다양한 초점거리에서 여러 검사 각도를 동시에 발생시킬 수 있다. 그래서, 이 기술은 검사 속도 증가, 비용 절감, 방사선 피폭을 줄일 수 있다. 이 논문에서는 현장검사에서 검출된 PAUT 신호에 대한 신호 분석 결과를 설명하였다.

주요어: 위상배열 초음파기법, 용접 오버레이, 가동중검사

Abstract Weld overlay was first used in power plants in the US in the early 1980s as an interim method of repairing the welds of flawed piping joints. Weld overlaid piping joints in nuclear power plants must be examined periodically using ultrasonic examination technology. Portable phased array ultrasonic technology has recently become available. Currently, the application of preemptive weld overlays as a mitigation technique and/as a method to improve the examination surface condition for more complex configurations is becoming more common. These complex geometries may require several focused conventional transducers for adequate inspection of the overlay, the original weld, and the base material. Alternatively, Phased array ultrasonic probes can be used to generate several inspection angles simultaneously at various focal depths to provide better and faster coverage than that possible by conventional methods. Thus, this technology can increase the speed of examinations, save costs, and reduce radiation exposure. In this paper, we explain the general sequence of the inspection of weld overlay and the results of signal analysis for some PAUT (phased array ultrasonic testing) signals detected in on-site inspections.

Keywords: PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing), SWOL (Structural Weld Overlay), ISI (In-Service Inspection)

1. 서 론

원자력발전소 주냉각재계통에 다수의 이중금속 용접부가 사용되고 있으며, 특히 Alloy 600은 1차 수 응력부식균열(primary water stress corrosion

cracking, 이하 PWSCC)에 민감한 재료로 알려지고 있다. Alloy 600 이중금속 용접부에서 최근 PWSCC에 의한 다수의 결함이 발견된 바 있으며, 미국원자력규제위원회(US NRC)는 이러한 용접부의 건전성을 확보하기 위해 보다 강화된 검

[Received: July 23, 2015, Revised: August 19, 2015, Accepted: August 21, 2015] *한수원중앙연구원 비파괴기술그룹, [†]Corresponding Author: Korea Hydro & Nuclear Power Company Ltd., Central Research Institute, Daejeon 305-343, Korea (E-mail: itouch11@khnp.co.kr)

사 및 PWSCC에 대한 완화대책을 적용할 것을 요구하고 있다.

1982년 이후 오버레이 용접은 BWR(boiling water reactor: 비등경수로) 원전에서 적용되어 왔고, 배관 내면의 용접 잔류응력을 인장응력 상태에서 압축응력 상태로 개선시켜 향후 예상되는 균열의 개시 및 성장을 억제하는데 효과가 매우 우수한 것으로 확인되었다.

미국 내 다수의 PWR(pressurized water reactor: 가압경수로) 원전에서도 PWSCC를 예방하기 위하여 Alloy 52 계열의 재료를 사용하여 이종금속 용접부에 대한 오버레이 용접 방법을 적용하고 있으며, 현재까지 PWSCC 예방에 효과가 높은 것으로 나타나고 있다.

2006년 미국 Wolf Creek 발전소 등 최근 국외 가압기 이종금속 용접부에서 예상보다 빨리 응력 부식균열에 의한 누설이 발견되고 있어, 한국수력원자력(주)는 2009년 고리 1호기를 시작으로 1차수 응력부식균열에 민감한 재료가 사용된 가압기 노즐 Alloy 600 계열 이종금속 용접부의 건전성 확보를 위해 가압경수로형 원전 가압기 노즐 이종금속 용접부에 구조적 오버레이 용접기술을 적용하고 있다.

또한 오버레이 용접은 가압기 노즐 안전단(safe end) 용접부 영역의 불연속 정도를 감소시켜 가동중검사가 용이하게 하며, 검사 체적이 배관의 외면 영역(오버레이 용접 두께에 기존 배관 두께의 바깥쪽 25%만큼이 더해진 영역)으로 이동하기 때문에 결함 검출 성능을 증대시킨다. 이에 따라 설비의 신뢰도를 향상시키고, 효율적인 가동중검사를 수행할 수 있으므로 원자력발전소의 안전성 유지뿐만 아니라 운영비용 절감 및 피폭량 감소 등의 효과를 기대할 수 있다[1].

본 논문에서는 한국형 원전의 가압기 오버레이 용접부위에 대한 건전성을 확인하기 위해 미국 전력연구원이 검증한 절차서(EPRI-WOL-PA-1: Procedure for manual array ultrasonic examination of weld overlaid similar and dissimilar metal welds: 동종 및 이종금속 용접부의 용접 오버레이에 대한 수동 위상배열 초음파탐상검사 절차서)를 사용하여 검사를 수행한 경험을 기술하였다[2]. 또한, 위상배열 초음파검사 결과 나타난 지시에 대한 분석 및 용접 결함이 발생한 원인, 재발방지대책에 대하여 기술하였다.

2. 구조적 용접 오버레이 검사

2.1. 용접 결함 원인

Alloy 600 계열의 이종금속 용접부위에 대한 오버레이 용접 공정 중에 발생하는 결함의 종류는 균열(crack), 접합부족/용융부족(LOB/LOF: lack of bond /lack of fusion), 기공(porosity) 및 슬래그 혼입(slag inclusion) 등이 있다.

균열은 연성저하균열(DDC: ductility dip cracking)이나 고온균열(hot cracking)로 발생한다. 연성저하균열은 재료의 연성이 현저히 감소하는 온도 범위 내에서 재가열 중에 일반적으로 발생하며, 다중 용접층 또는 높은 구속력을 가진 용접에서 일반적으로 더 많이 발생하는 경향이 있다. 고온균열은 유험과 같은 저용점 불순물의 과도한 양이 존재할 때 발생되며, 용접 중에 과도한 입열량을 포함한 부적절한 용접 변수에 의해 촉진된다.

접합부족은 모재와 첫 번째 오버레이 층간 계면에서 발생하는 결함으로 부적절한 비드 배치/진극봉 각도에 기인하여 발생하며 다른 원인으로서는 비드가 원주방향으로 용착될 때 용접 토치가 축방향으로 흔들리거나 표류할 때 발생한다.

기공은 일반적으로 불활성 가스의 적용시 나타나며, 용착되는 금속의 체적이 너무 크거나, 입열이 너무 낮거나 토치 오실레이션이 너무 빨라 발생한다.

현장 오버레이 용접부에서 검출된 초음파 지시 대부분은 접합부족/용융부족 및 기공에 의한 나타나는 지시였다.

2.2 오버레이 용접부 검사 일반사항

가압기 노즐 오버레이 용접부의 건전성을 확인하기 위해 수행된 비파괴검사 방법은 ASME Code Case N-740-1에 기술되어 있다. 오버레이 용접부 형상은 Fig. 1의 (a) 밀림관 노즐(surge nozzle), (b) 살수 노즐(spray nozzle), (c) 안전감압계통 노즐(SDS nozzle: safety depressurization system), (d) 안전 노즐(safety nozzle) 등이 있다.

Fig. 2는 오버레이 용접 전체 공정에 적용된 비파괴검사 방법을 보여 준다. 비파괴검사 방법으로는 오버레이 용접 전에 수행한 염색침투검사(PT), 초음파검사(UT)와 오버레이 용접 중단단

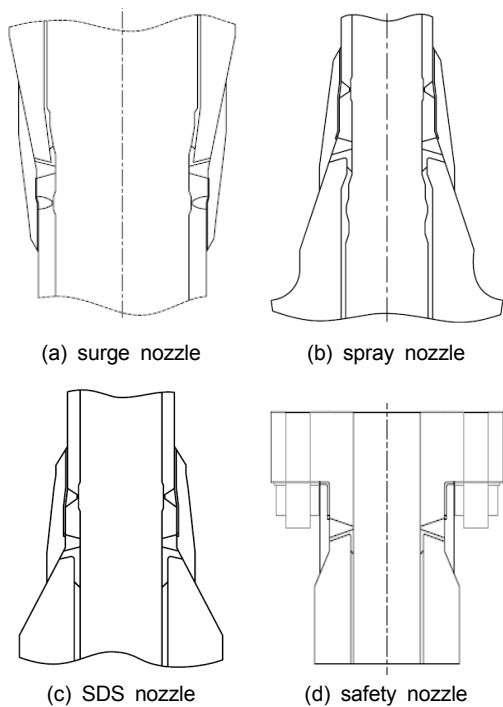


Fig. 1 Configuration of pressurizer nozzles

계 및 완료 후에 수행하는 염색침투검사(PT)와 초음파검사(UT), 위상배열초음파검사(PAUT) 등이 있다.

2.3. 오버레이 용접 작업 전 비파괴검사

오버레이 용접 작업 전에 기존 용접 영역에 대해 수행하여야 하는 비파괴검사법으로는 ASME Code Case N-740-1에서 명시한 염색침투검사(PT)를 수행(검사 방법: 참조 Fig. 2의 1.PT)하여야 하며, 1/16 인치 이상의 결함에 대해서는 제거하거나 보수용접을 하여야 한다[3].

또한, 필요시 ASME Section XI, IWB-2500에 따라 Fig. 3에 해당되는 영역(C-D-E-F)에 대하여 초음파검사를 수행하여야 한다(검사 방법 : 참조 Fig. 2의 2.PT).

2.4. 오버레이 용접 중간단계 검사

용접 중간단계 검사는 희생층(sacrificial layer) 및 3 bead 검사(이하 희생층 검사)와 템퍼비드(temper layer) 검사로 나눌 수 있다. 희생층 검사는 용접부의 황 성분의 영향으로 고온균열의 발

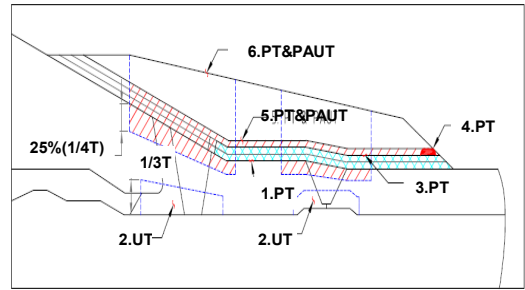


Fig. 2 Nondestructive methods for overlay welds

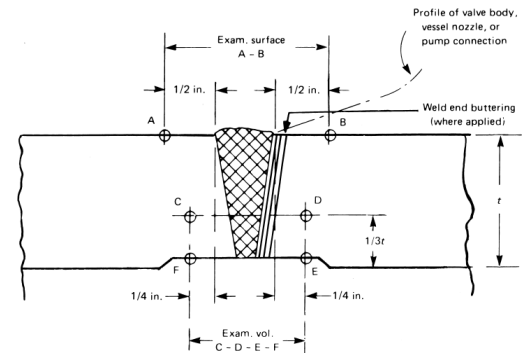


Fig. 3 UT examination volume of welds

생 여부를 확인하기 위해 수행하는 염색침투검사(검사 방법: 참조 Fig. 2의 3.PT & 4.PT)를 말한다. 템퍼비드 검사는 템퍼비드 2개층 용접이 완료된 후 3층 용접 시 3 bead 전까지 용접을 수행한 후 염색침투검사와 초음파검사를 수행하는 것을 말한다(검사 방법: 참조 Fig. 2의 5.PT, UT & PAUT). 이때 초음파검사는 두 가지 기법[펄스에코법(pulse echo)과 위상배열 초음파법(PAUT: phased array ultrasonic test)]을 동시에 적용하여 기존의 동종 및 이종금속 용접부 외면의 25%(깊이) 및 1/2 인치(넓이) 범위에 대해 건전성을 확인하여야 한다.

2.5. 오버레이 용접 완료 후 검사

최종 용접이 완료되면 염색침투검사와 초음파검사를 수행한다(검사 방법: 참조 Fig. 2의 6. PT & PAUT).

오버레이 용접부에 대한 초음파검사 기량 검증은 국내에 기량검증체계가 구축되지 않아, 미국 전력연구원(EPRI)에서 개발한 기량검증체계를 준용하고 있다. 미국 EPRI에서 인증받은 검사 절차

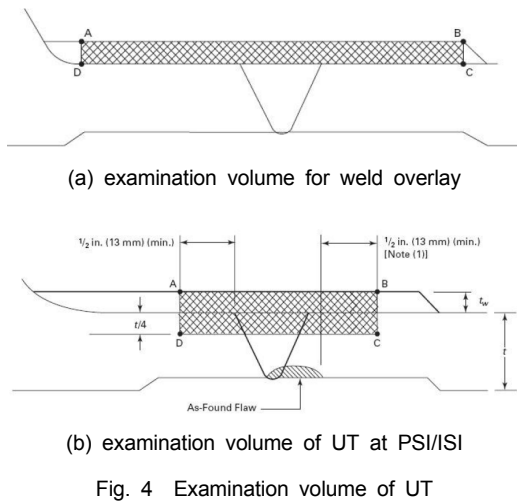


Fig. 4 Examination volume of UT

서는 PDI-UT-8(오버레이 용접에 대한 일반절차서) 및 EPRI-WOL-PA-1(오버레이 용접에 대한 수동 위상배열 초음파 절차서) 등이 있으며, 이 두 절차서는 Code Case N-504-3/Appendix Q 및 Code Case N-740-1의 요건을 만족하므로 오버레이 용접부의 검사에 적합하다.

국내 원전에서는 검사 검출 감도 및 검사 데이터를 저장할 수 있는 수동 위상배열 초음파검사 기법을 적용하여 검사를 수행하고 있다. 오버레이 용접 완료 후에 적용하는 초음파검사 영역은 Fig. 4와 같이 오버레이 용접 후 초음파검사 영역(a)과 가동전/중검사 시 초음파검사 영역(b)으로 나눌 수 있다. 일반적으로 용접 시공 후에 가동전검사(PSI: pre-service inspection)를 수행하며, 이 검사 결과는 향후 가동중검사(ISI: in-service inspection)의 기초자료로 활용된다.

3. 위상배열 초음파검사

3.1. 검사 장비 및 탐촉자

오버레이 용접부 검사에 사용되는 위상배열 초음파검사 장비로 미국 전력연구소(EPRI)에서 검증된 Olympus사의 Omniscan 16/64PR 및 GEIT사의 Phasor XS(Fig. 5 참조) 등이 있다.

현장 검사에 적용된 절차서는 동종 및 이종금속 용접부와 인접 모재에 대한 완전 구조적 오버레이 용접부에 직접 접촉식 pitch-catch 방식이며, 오버레이 용접부의 외부 표면으로부터 명시된 검



(a) Omniscan 16/64PR



(b) Phasor XS

Fig. 5 Instruments of phased array UT

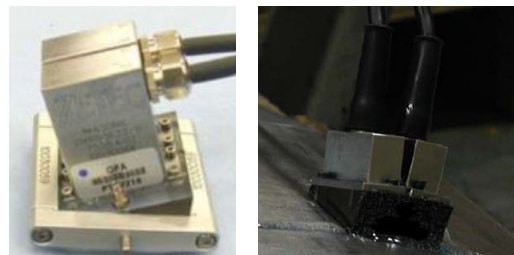


Fig. 6 Instruments of phased array UT

사 부위 내 불연속부의 정확한 검출과 크기 측정할 수 있다.

기량검증된 위상배열 탐촉자 및 웨지(Fig. 6 참조)를 사용하여 검사를 수행하며, 검사 전에 보정시험편을 활용하여 보정(시간축, 감도 등)을 수행한다. 위상배열 초음파검사 기법의 장점은 많은 수의 탐촉자 수를 2개로 줄여 검사 속도가 기존 검사법보다 빨라 검사자의 피로를 저감할 수 있다. 반면에, 검사 감도가 기존 검사법보다 높아 마이크로 기공 및 금속조직에 의한 신호가 검출되어 지시 평가 시 검사자의 주의가 필요하다.

미국 PNNL 연구소의 오버레이 결함시험편을 이용한 연구 결과 오버레이 용접부에 사용되는 위상배열 탐촉자의 최적주파수는 2 MHz이나 보조 검사로 1 MHz 또는 1.5 MHz를 추천하고 있다[4].

3.2. 위상배열 초음파검사 기술

위상배열 초음파검사 기술은 초음파 탐촉자의 특성을 전자적으로 제어하는 기술이며, 위상배열 초음파 탐촉자 구성소자(element)의 각각에 송신 펄스(pulse)와 수신 에코(echo)의 시간 지연을 조절하여 빔(beam)을 형성한다. 호이젠스의 원리로 생성된 음향파는 적당한 전자적 시간 지연을 통해 각 소자에 인가된다(송신). 각 소자에 수신된 반사파에 전자적 시간 지연(delay law)을 인가하여 신호로 결합하여 하나의 신호를 만들어낸다(Fig. 7 참조).

위상배열 초음파검사의 장점으로는 focusing 최적화, 다양한 beam angle의 활용으로 검사 감도를 향상시킬 수 있어 검사 감도 및 분해능을 향상시킬 수 있다. 또한, 신호 대 잡음비가 개선되어 초음파 신호 잡음(또는 노이즈)을 줄일 수 있으며, TR longitudinal wave probe를 사용하면 오스테나이트계 강과 같이 조대한 입자 구조를 가진 검사체에 대한 결함 검출 능력을 향상시킬 수 있다.

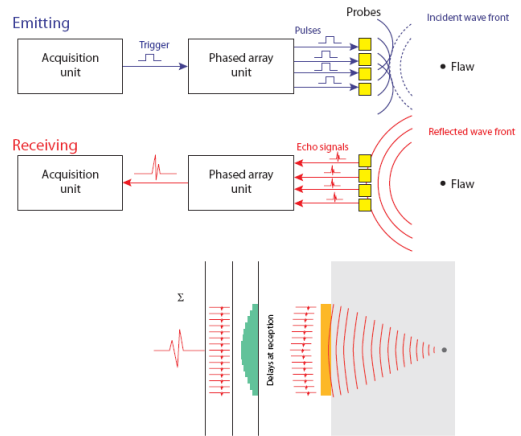


Fig. 7 Phased array wave forming

4. 오버레이 용접부 검사 결과

현장 가압기 오버레이 용접부에 대한 초음파 검사로 검출된 지시로는 라미나 형태의 접합 부족(LOB), 기공성 지시 등이 있었다. 또한, 초음파 검사로 명확히 알 수 없는 신호가 검출되어 파괴 분석을 통하여 신호 발생 원인을 분석하였다.

표준형 가압기 노즐 위치는 Fig. 8과 같이 가압기 상부에 6곳, 하부에 1곳이 있다.

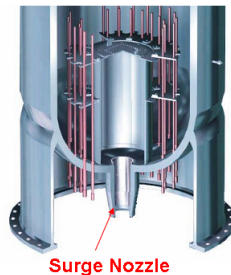
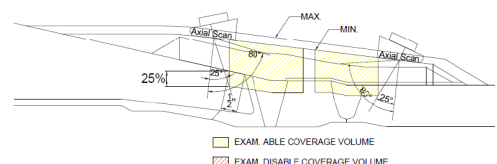


Fig. 8 The location of nozzles in pressurizer

4.1. 검사 스캔 플랜(Scan Plan)

검사체의 체적검사 영역이 관련 기술기준을 만족하지를 확인하기 위해, 검사 수행 전에 검사 스캔 플랜을 작성한다. 검사체에 대하여 초음파 빔이 4방향 [2개의 축방향 및 2개의 원주방향(시계방향, 반시계방향)]에서 100% 검사 체적을 만족하여야 하나, 기술기준에서 4방향에서 계산된 검사 체적의 평균값이 90% 이상을 요구하고 있다. Fig. 9은 검사 스캔 플랜을 작성한 예시를 보여주며 검사 전에 검사에 필요한 필수 변수를 확인하는 것이 가능하여 검사자의 인적실수를 예방할 수 있다.

Surge Nozzle Final Layer PAUT (ISI Axial Scan Parameter)



Examination coverage: 100%

AXIAL					CIRC.				
CAL. BLOCK	WEDGE	Nor. Angle	CONT.	FSP	CAL. BLOCK	WEDGE	Nor. Angle	CONT.	FSP
HB56-16-AX-01	360-152-079	53	16.75	1.500"	HB56-16-CIRC-01	360-152-078	44	16.75	1.500"
HB56-16-AX-01	360-152-237	53	18	2.500"	HB56-16-CIRC-01	360-152-236	40	18	2.500"

Fig. 9 The inspection scan plan for welds

4.2. 접합/용융 부족 지시

접합 부족/용융 부족 지시 신호는 저각도($0^{\circ} \sim 25^{\circ}$)에서 검출되며, 오버레이의 외부 표면에 평행한 방향의 지시로 오버레이와 원 모재 사이의 접착력 부족 및 비드 간 용융 부족이 원인이 되어 나타난다.

Table 1는 현장에서 검출된 지시의 평가 내용을 보여준다. 라미나형 결점(laminar flaw)은 ASME Code Case N-740-1의 결점 기준에 따라 평가를 수행하며, 평가 결과 합격 지시로 평가되었다. Table 1의 ISI는 가동중검사, a는 결점의 깊이, t는 공칭 벽 두께를 의미한다. Table 1에 기술된 a/t(%)는 검출된 지시의 값이며, ISI acceptance (a/t)%는 가동중검사 시 허용되는 지시의 값이다. Reduction in coverage의 의미는 검사체적에서 라미나형 결점에 의한 감소된 유효 범위의 검사 체적을 말하며, 감소된 검사 체적은 10% 미만이어야 한다.

Table 1에 있는 지시에 대한 초음파 신호 형상은 Fig. 10과 같았다. 지시는 낮은 각도에서 검출되었고 최대 진폭 값을 보인 각도는 20도였다. 초음파 지시를 배관 도면에 작도하면 지시 형상을 쉽게 인지할 수 있으며, 보다 더 정확하게 지시를 평가할 수 있다. 초음파 지시 위치를 오버레이 용접부 배관 형상에 도식한 결과는 Fig. 11과 같았다.

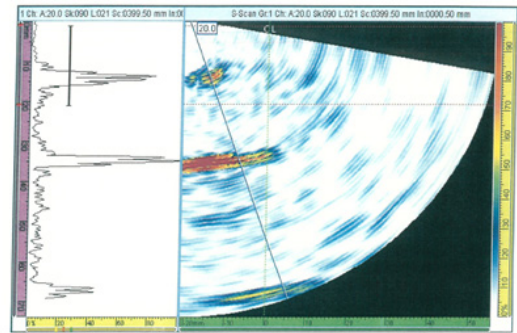


Fig. 10 UT signal of LOF

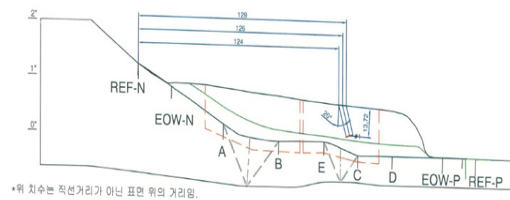


Fig. 11 Plotting of indication

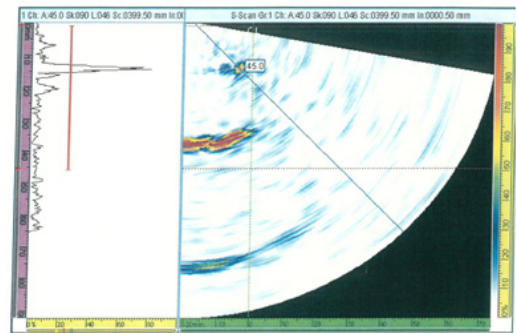


Fig. 12 UT signal of porosity

4.3. 기공성 지시(Porosity)

오버레이 용접부 내에 존재하는 기공에 대한 초음파 신호 형상은 Fig. 12와 같이 각도 45도에서 최대 진폭을 보였다. 이미지 형상은 찌그러진 원형으로 보이며 동일 선상에서 낮은 진폭값을 가지는 특징이 있다. Fig. 13은 이 지시에 대한 현장에서 파괴 방법으로 확인한 기공 사진이며, 보통 모형 시편에서 확인한 기공의 크기는 0.5 mm 이하의 작은 크기였다.



Fig. 13 Photo of porosity in mockup

Table 1 Evaluation sheet for a laminar flaw

Length (mm)	Area (mm ²)	Assumed Flaw				Reduction in Coverage(%)	
		Axial direction		Circumferential direction		ISI	
		a/t %	ISI acceptance (a/t)%	Indication (a/t)%	ISI acceptance (a/t)%	Axial direction	Circum. direction
22	75.4	2.94	11.47	5.88	11.08	0.11	0.10

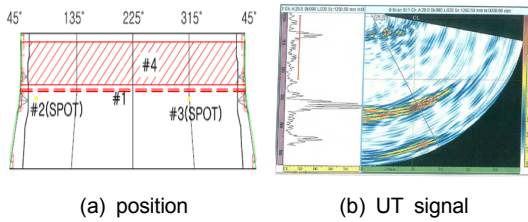


Fig. 14 Non-relevant indication

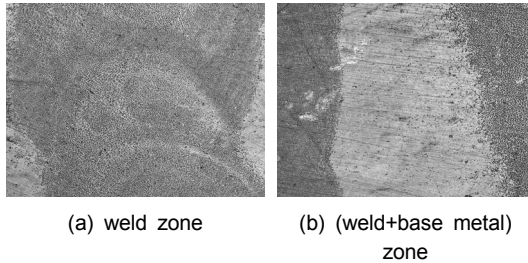


Fig. 15 Replica photo at indication area

4.4. 무관련 지시

현장 가압기 밀립관 노즐(surge nozzle)의 안전단부(safe end) 및 배관에 사용된 모재 재질(F347 STS)과 희생층 용접에서 사용된 용가재(ER308L) 사이의 재질 차이에 의해 발생된 것으로 추정되는 초음파 신호가 이종금속 용접부 부위를 제외한 구역에서 낮은 진폭으로 검출되었다. 초음파 지시의 특징은 배관 방향에서 탐촉자 주사 시 검출되고 반대방향 주사 시 노이즈 레벨 수준이며, 지시의 진폭이 약 5 mm 간격으로 일정한 패턴으로 보였다. Fig. 14(a)는 지시의 위치, (b)는 지시의 초음파 형상을 나타내며, 초음파 지시가 나타난 부위에 대한 후속 시공 및 가동중검사 시의 정확한 정보(결함 유무 등)를 얻기 위해 그 부위에 대한 레플리카 작업을 수행하였다. 레플리카 분석 사진은 Fig. 15와 같으며, 결함이 검출되지 않아 검출된 지시를 무관련 지시로 평가하였다. 향후 이와 같은 유사 신호가 검출되면, 이 분석 결과를 활용할 예정이다.

5. 결론

본 논문에서는 국내 가압기 오버레이 용접 부위에 대한 건전성을 확인하기 위해 수행한 비파

괴검사에 대한 분석 결과를 기술하였다. 특히, 미국 전력연구원에서 개발한 위상배열 초음파검사 절차서를 활용하여 검사를 수행한 결과 및 검출된 초음파 신호에 대하여 분석하였다.

현장 검출 초음파 신호에 대한 분석 결과, 검사 기법 검출능 확인을 위해 모형(mock up) 시험편에서 수행했던 모의훈련 결과와 유사한 신호가 검출되었다. 또한, 기공성 지시에 대한 파괴분석 결과 모형 시험편 결과와 같았다.

반면, 가압기 밀립관 노즐 부위에서 검출된 초음파 신호는 모형 실험편에서 검출되지 않은 신호로 분석을 위해 지시 부위에 대한 레플리카 작업을 수행하였다. 분석 결과 결함은 검출되지 않았으며, 검출된 지시는 모재(배관 및 안전단부)와 희생층 경계에서 용가재와 모재 사이의 재질 차이로 인하여 발생한 무관련 지시로 평가하였다. 이 분석 결과를 활용하여 향후 후속 호기의 오버레이 용접 부위에 대한 검사 자료로 활용할 예정이다.

끝으로, Alloy 600 계열의 이종금속 용접 부위에 대한 오버레이 용접 작업 시에는 용접 금속에 잔존하는 슬래그 및 기타 불순물이 용접 과정에서 용융 풀에 혼입되어 용접 결함을 유발할 가능성이 높기 때문에 초층 용접 시 및 매 용접 패스별 그라인딩(사상) 작업을 통하여 용융 풀에 불순물 혼입을 최소화할 수 있도록 용접 시공 절차 개선 및 엄격한 용접 관리가 필요할 것으로 판단되었다.

참고문헌

- [1] KHNP, Topical Report "SWOL Method for Pressurizer Nozzles," Feb. (2012)
- [2] EPRI, Technical Update 1015134 "Nondestructive Evaluation: Procedure for Manual Phased UT of Weld Overlays," October (2007)
- [3] ASME Code Case N-740-1, "Dissimilar Metal Overlay for Repair or Mitigation of Class 1, 2, and 3 Items Section XI, Division 1," January (2008)
- [4] PNNL, PNNL-21502 "Ultrasonic Evaluation of Two Dissimilar Metal Overlay Specimens," June (2012)