

원전 이종금속 용접부 초음파 검사 일반 절차서 개발

양승한[†] · 김용식* · 윤병식* · 권기일*

Generic Procedure Development for the Ultrasonic Examination of Dissimilar Metal Welds in Nuclear Power Plants

Seung Han Yang[†], Yong Sik Kim*, Byung Sik Yoon* and Kee Il Guon*

ABSTRACT

To enhance the reliability of ultrasonic testing system, MOST(Ministry of Science and Technology) bulletin 2004-13 was published in 2004.6 requiring performance demonstration in ultrasonic examination and MEST(Ministry of Education, Science and Technology) 2009-37 was published in 2009.9(formerly MOST bulletin 2004-13). In order to meet the MEST bulletin requirement and increase the reliability of ultrasonic testing, all the ultrasonic examination procedure and equipment should be performance demonstrated and qualified. In this paper, generic procedure for the ultrasonic examination of dissimilar metal welds are described and new technique are introduced.

Key Words : Dissimilar Metal Welds(이종금속 용접부), Ultrasonic Examination(초음파 검사), Procedure(절차서), Performance Demonstration(기량 검증)

1. 서론

V.C.Summer 발전소의 고온관 세이프 엔드의 누설을 비롯하여 미국 내 많은 원전 및 일본의 Tsuruga 원전, 스웨덴 Ringhals 원전 등의 이종금속용접부에서 결함이 발견되고 있어, 원전의 안전에 많은 영향을 미치고 있다.

이종금속용접부는 대부분 초음파 탐상검사에 의해 검사가 수행되고 있어 이종금속 용접부 내에 결함이 존재하는지의 여부를 검출하는데 사용되는 초음파 검사기술의 신뢰도 향상이 매우 중요한 문제라 할 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 세계 각국은 초음파검사의 신뢰성을 향상시키기 위해 기량 검증제도를 도입하고 있다. 기량 검증에 대한 요건은 ASME

(American Society of Mechanical Engineers) Code 1989 Winter Addenda Appendix VIII에 최초로 반영되었으며, 미국 규제기관인 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에 의해 1999년 11월 10CFR50.55a에서 기량 검증에 대한 이행 및 이행일정을 제시함으로써 미국 내에서 공식적으로 기량 검증에 대한 연구 및 시스템 운영이 시작되었다.

국내에서도 초음파 검사 기량 검증의 중요성을 인식하고 2004년 7월 과학기술부에서 고시 제2004-13호를 시작으로, 교육과학기술부 고시 제2009-37호에 의해 가동중 검사 수행 전에 기량 검증을 수행하도록 하고 있다.

이종금속 용접부에 대하여 현재는 PDI-UT-10과 같이 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 기량검증된 절차서를 이용하여 이종금속 용접부를 검사하고 있으나, 미국 EPRI에서 사용되는 시험편의 형상은 대부분 BWR(Boiling Water Reactor)을 기본으로 한 것으로 국내의 PWR(Pressurized Water Reactor)에 존재하는 이종금속 용접부 형상과는 차이가 있다.

[†] 책임저자, 회원, 한국전력공사 전력연구원 원자력발전연구소

E-mail :shyang@kepri.re.kr, sunny13@kepeco.co.kr
TEL : (042)865-5556 FAX : (042)865-5564

** 한국전력공사 전력연구원 원자력발전연구소

본 논문에서는 국내 원전 이종금속용접부 초음파 탐상 검사에 대한 기량 검증체계를 구축하기 위하여 국내의 이종금속 용접부 형상을 반영하여 제작된 시험편을 대상으로 기량검증된 절차서를 소개하고자 한다.

2. 국내 이종금속 용접부 현황 및 시험편

2.1 국내 이종금속 용접부 현황

이종금속 용접부는 보통 저합금강으로 구성된 노출부와 인코넬 소재로 된 셰이프 엔드가 버터링 및 용접을 통해 연결되거나 스테인리스 강 배관에 직접 용접으로 연결되는 형태로 구성되어 있다.

국내 이종금속 용접부는 수동으로 외부 표면에서 검사하는 부위가 있으며, 원자로 자동 검사 장비를 이용하여 내면에서 검사하는 부위가 있다. Table 1은 국내 발전소 별로 내면 검사, 외면 검사 대상을

Table 1 No. of dissimilar metal welds by power plant & examination surface

발전소	형식	용량 (MW)	이종금속 용접부 수량		
			내면검사	외면검사	합
고리1	PWR, W	587	8	9	17
고리2	PWR, W	650	6	9	15
고리3	PWR, W	950	6	12	18
고리4	PWR, W	950	6	12	18
영광1	PWR, W	950	6	12	18
영광2	PWR, W	950	6	12	18
영광3	PWR, CE	1000		25	25
영광4	PWR, CE	1000		25	25
영광5	PWR, CE	1000		29	29
영광6	PWR, CE	1000		29	29
울진1	PWR, F	950	6	12	18
울진2	PWR, F	950	6	12	18
울진3	PWR, CE	1000		29	29
울진4	PWR, CE	1000		29	29
울진5	PWR, CE	1000		29	29
울진6	PWR, CE	1000		29	29
월성1	PHWR, AECL	679		12	12
월성2	PHWR, AECL	700		24	24
월성3	PHWR, AECL	700		24	24
월성4	PHWR, AECL	700		24	24
합			50	398	448

구분하여 이종금속 용접부 수량을 나타내었다. Table 2는 내면, 외면 검사 부위와 상관없이 계통 및 용접 부위 별로 이종금속 용접부 수량을 나타내었으며, 총 이종금속 용접부 수량은 448개이다.

Table 2 No. of dissimilar metal welds by component

구분	형식, 계통	용접부위	수량
소구경	CE, RCS	Charging inlet	8
	CE, RCS	Letdown drain	32
	CE, RCS	Spray	16
	CE, PZR	Spray on pressurizer	8
	CE, PZR	SDS nozzle	16
	W2, RPV	Safety injection	6
	W2, PZR	Spray on pressurizer	2
	W3, PZR	Spray on pressurizer	4
	F3, PZR	Spray on pressurizer	2
	W2, PZR	Safety/Relief nozzle	6
	W3, PZR	Safety/Relief nozzle	16
	F3, PZR	Safety/Relief nozzle	8
	CE, PZR	Safety nozzle	24
중구경	CANDU	Emergency core cooling	48
	CANDU	Shutdown cooling	36
	CE,RCS-HOT	Surge to hot leg	8
	CE, PZR	Surge to pressurizer	8
	CE,RCS-COLD	Safety injection	32
	W2,PZR	Surge to pressurizer	2
	W3,PZR	Surge to pressurizer	4
	F3, PZR	Surge to pressurizer	2
	CE,RCS	Shutdown cooling nozzle	16
	CE, CLASS 2	Shutdown cooling Hx.	32
CE, CLASS 2	Containment spray Hx.	24	
대구경	W2, SG	Inlet	4
	W3, SG	Inlet	12
	F3, SG	Inlet	6
	W2, SG	Outlet	4
	W3, SG	Outlet	12
	F3, SG	Outlet	6
	W2, RPV	Inlet	4
	W3, RPV	Inlet	12
	F3, RPV	Inlet	6
	W2, RPV	Outlet	4
	W3, RPV	Outlet	12
F3, RPV	Outlet	6	

2.2 이종금속 용접부 기량 검증 시험편

현재 미국 EPRI에서 기량 검증용으로 사용되는 이종금속 용접부 형상은 미국 내에 존재하는 전체 이종금속 용접부 형상을 포함하지 않으며, 기량 검증 시험용으로 사용하는 시험편과 특정발전소 시험편을 포함하여 약 70 ~ 80% 정도 개발되었다. 국내에서 구축하는 이종금속 용접부 기량 검증 시스템은 현재 운전 중인 원자력발전소 20개 호기에 존재하는 모든 이종금속 용접부에 대하여 사전에 현장 조사를 실시하였으며, 이를 바탕으로 모든 형상을 포함할 수 있도록 시험편을 설계하였다. 시험편 내에 삽입된 결함의 위치는 용접부, 모재, 버터링 부위 등 결함이 발생할 가능성이 있는 부위이며, 축방향 결함과 원주방향 결함이 골고루 분포되었다.

3. 일반 절차서 개발

3.1 적용 범위

기량검증된 일반 절차서는 종파와 횡파 탐촉자를 사용하여 수동으로 검사하며, 종파 탐촉자의 경우에는 이중 진동자를 가지고 일정 깊이 또는 빔 행정 거리에 초음파 빔이 집속되며, 접촉면의 곡률에 따라 탐촉자의 면이 곡면 가공(contouring)된 것을 사용한다. 기량검증된 일반 절차서는 시험편 형상에 대해 현장 형상이 Table 3에 나타난 공차 내에 들 경우에 한해, 초음파검사를 할 수 있으며 적용 범위를 벗어나는 경우에는 별도로 검증을 거쳐야 한다. 제작되는 시험편은 현장 형상 조사 자료를 바탕으로 Table 3에 나타난 공차를 고려하여 설계하였으나, 향후 신규 원전에 존재하는 이종금속 용접부 검사에 대해서는 적용범위를 고려하여 검사를 해야 한다.

3.2 일반 절차서 특징

3.2.1 검사 기법 서류

금번에 개발된 일반 절차서는 기존의 기량검증된

Table 3 Allowable configuration tolerances

항목	허용 공차
테이퍼 각도	±3°
공칭 배관 직경	±0.50"
용접중심부 두께	±25%

일반 절차서와는 구성이 다르다. 기존의 기량검증된 절차서로는 페라이트계 배관 용접부에 대한 검출 및 길이 측정 절차서 KPD-UT-1, 오스테나이트계 배관의 용접부에 대한 검출 및 길이측정 절차서 KPD- UT-2, 결점 깊이 측정 절차서 KPD-UT-3, 스테드 및 볼트에 대한 검출 절차서 KPD-UT-4,5가 있으며, 이들 일반 절차서는 절차서 본문에서 검사 기법과 함께 검사에 필요한 사항을 포함하며, Table 1에 인정된 탐상기와 탐촉자의 조합 목록, Table 2에 인정된 탐상기에 대한 필수 탐상기 설정값을 나타내고 있다.

반면에 이번에 개발된 이종금속 용접부 초음파 검사 일반 절차서는 이전의 페라이트 및 오스테나이트 배관 용접부, 스테드 및 볼트의 형상과 비교하여 테이퍼가 있는 이종금속 용접부 형상을 일반적으로 기

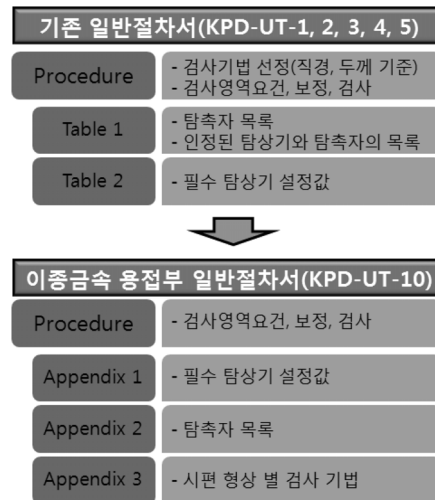


Fig. 1 Composition of generic procedure

Table 4 Appendix 3 Technique sheet composition

항목	세부 내용
형상 도면	- 형상 도면 - 적용 가능 대상
탐촉자 목록	- 탐촉자 목록 및 사양(형상별) - 케이블 종류 및 최대 길이 - 최대 케이블 중간 연결 수
주사 변수 서류	- 탐촉자별 주사 표면 - 주사 시작 및 끝점 - 화면 크기
주사 변수 도해	- 검사에 대한 위치 설명 그림 (탐촉자별)

술하는 것이 어려우며 또한 적용할 초음파 검사 기법을 일반적으로 기술하는 것에 한계가 있는 점과, 검사자에게 조금 더 명확한 검사 방법을 기술하기 위해 형상별로 검사 기법 서류를 도입하게 되었다. Fig. 1에 일반 절차서의 구성과 그 변경 내용을 표시하였으며, Table 4에 형상별로 작성된 검사 기법 서류(Appendix 3)에 포함되는 세부 내용을 표시하였다. Table 4에 나타난 바와 같이 각 형상별로 필요한 검사 기법은 대부분 Appendix 3에 포함되어 있으며, 절차서 본문은 모든 형상에 관계없이 적용할 수 있는 일반적인 검사 관련 내용과 함께, 검사 기법 서류(Appendix 3)의 활용 방법에 대해 기재하고 있다.

검사 기법 서류에 기재된 탐촉자는 해당 형상에 대해 사용할 수 있는 종파, 횡파 탐촉자이며, Appendix 2에 기재된 탐촉자는 Appendix 3에 기재된 모든 종파, 횡파 탐촉자의 목록이다. 검사 기법 서류에 기재된 탐촉자에서 종파 탐촉자는 목록에 기재된 탐촉자 외에는 사용할 수 없으나, 횡파 탐촉자의 경우는 검사 기법 서류에 포함되어 있지 않더라도, 기술적으로 타당한 이유가 있을 경우에는 Appendix 2 또는 오스테나이트계 배관 용접부 일반 절차서 KPD-UT-2의 Table 1(탐촉자 목록)에 등재되어 있는 탐촉자를 사용할 수 있다. 또한 형상별 검사 기법 서류(Appendix 3)에 포함되어 있는 종파 탐촉자에서도 형상 별로 대체 종파 탐촉자가 기재된 경우도 있으며, 기술적으로 타당한 이유가 있을 경우에 주 종파 탐촉자 대신에 사용할 수도 있도록 되어 있다.

3.2.2 원주 방향 검사용 탐촉자

다른 특징으로 축 방향 결점을 검출하기 위한 독특한 형상의 원주 방향 검사용 탐촉자를 사용하는 점이다. 일반적인 동종금속 용접부의 경우, 테이퍼 형상이 없는 평평한 형상으로 기존의 탐촉자(Fig. 3(a))를 사용하여도 결점을 검출할 수 있었다. 그러나 국내 이종금속 용접부의 경우, Fig. 2에 나타난 바와 같이 테이퍼가 있는 형상이 많으며, 용접부가 테이퍼가 시작되는 부분에 위치한 경우 기존의 탐촉자로는 Fig. 3(a)와 같이 테이퍼 각도가 증가함에 따라 검사 가능 영역이 감소하며 초음파가 결점에 도달하여도 반사되는 초음파가 왜곡된 방향으로 진행하게 되어 초음파가 수신되더라도 그 크기가 작거나 아예 수신되지 않을 수도 있는 악영향을 받게 된다.

이러한 단점을 극복하기 위해서 몇몇 형상에 대해 빔 모델링을 통해 Fig. 3(b)에 나타난 것과 같이 탐촉자 수직축에 대해 초음파가 뒤틀려서 입사될 수 있는 초음파 탐촉자를 설계, 제작하였다. Fig. 3(a)의 탐촉자의 경우 검사방향(시계 방향, 반시계 방향)에 관계없이 1개로 검사할 수 있었으나, Fig. 3(b)에 나타난 탐촉자의 경우에는 각 검사방향으로 각각 1개의 탐촉자가 필요하다.

이와 같은 목적으로 시계방향과 반시계방향 검사에 대해 별개로 빔 모델링을 통해 설계된 탐촉자 위치 형상의 예를 Fig. 4(a), (b)에 나타내었다.

Fig. 4(a), (b)는 종파 입사각 40도, 뒤틀림 각도(skew angle)가 각각 $\pm 30^\circ$ 로 설계되어 각각 시계방향과 반시계방향 원주 방향검사에 사용되는 탐촉자 위치 형상으로 송신부와 수신부 탐촉자가 일체형으로 연결되는 각각의 웨지의 형상으로 이루어져 볼 때, 초음파가 뒤틀려서 입사될 것이라는 것을 짐작할

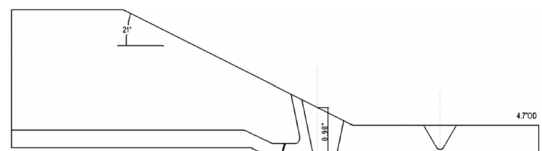


Fig. 2 Example of dissimilar metal weld position located near the transition from flat surface to tapered surface

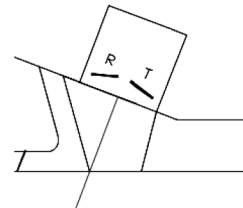


Fig. 3(a) Longitudinal wave transducer looking for axial flaw without skew(without axis correction)

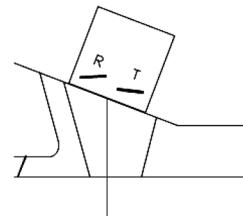


Fig. 3(b) Longitudinal wave transducer looking for axial flaw with skew(with axis correction)

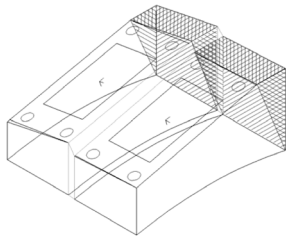


Fig. 4(a) Example of longitudinal wave transducer wedge design with +30 degree skew(with axis correction) for clockwise circumferential scan

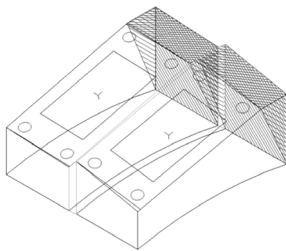


Fig. 4(b) Example of longitudinal wave transducer wedge design with -30 degree skew(with axis correction) for counterclockwise circumferential scan

수 있다.

이와 같이 설계, 제작된 탐촉자의 효과를 확인하기 위해 Fig. 2와 같은 용접부 형상에 존재하는 축 방향 결점에 대해 종파 입사각 40도이고 뒤틀림 각도가 각각 8°, 15°, 30°인 탐촉자와 자동 스캐너를 사용하여 자료를 취득하였다. Fig. 5(a), (b), (c)는 각각의 탐촉자를 사용하여 동일한 축 방향 결점에 대해 취득한 초음파 신호를 측면 화면(side view, B-scan)에 투영한 것이다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이, 뒤틀림 각도가 8°인 탐촉자보다 15°, 30°인 탐촉자가 결점으로부터의 신호가 훨씬 커서 검출이 용이한 점을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 5(b), (c)에 나타난 측면 화면으로는 뒤틀림 각도가 15°, 30°인 것 중에서 어느 것이 더 적합한 것이 판단하는 것이 쉽지 않으나, A-scan신호와 윗면 화면(Top-View, C-Scan)화면에 나타나는 신호를 통해서 적합한 뒤틀림 각도를 가지는 탐촉자를 선정할 수 있다.

위의 자료는 일반 절차서 기량 검증 전에, 뒤틀림 각도를 가진 원주 방향 검사용 탐촉자의 유용성에

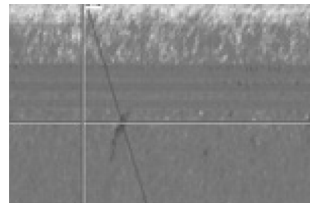


Fig. 5(a) Axial flaw Signal in side-view by 40 degree L wave, skew 8 degree transducer

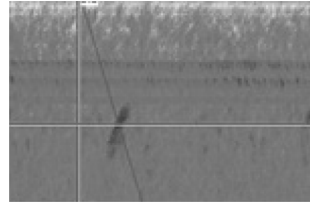


Fig. 5(b) Axial flaw Signal in side-view by 40 degree L wave, skew 15 degree transducer

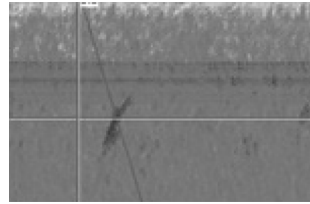


Fig. 5(c) Axial flaw Signal in side-view by 40 degree L wave, skew 30 degree transducer

대해 확인하기 위해 취득한 자료이며, 일반 절차서 기량 검증 과정 중에서도 이러한 뒤틀림 각도가 있는 탐촉자를 사용할 경우, 테이퍼 각도가 큰 형상에 포함된 축 방향 결점 검출이 용이한 점을 확인할 수 있었다.

절차서 기량 검증은 관련 요건에 따라 시험편 세트는 3명의 검사원에 대한 기량검증 시험 세트와 동등한 것을 포함하였으며, 절차서 범위 내에 있는 시험편 세트의 모든 결점에 대해 검출능이 입증되었다. 다만 기량 검증에 사용되는 모든 시험편에 포함된 결점은 비밀 자료로 분류되어 향후 검사자 기량 검증에 사용되는 바, 본 논문에서는 세부 사항에 대한 내용은 포함하지 못하였다.

4. 결론

국내 원자력 발전소에 존재하는 이중금속 용접부

에 대하여 현장 형상 조사 결과를 토대로 기량 검증용 시험편을 제작하였으며, 제작된 기량검증용 시험편을 이용하여 이중금속 용접부 수동 초음파 탐상 일반 절차서를 개발하였다. 개발된 일반 절차서는 검출, 길이 측정에 대하여 기량 검증되었으며, 국내 원전 이중금속용접부 형상을 반영하여 검사가 최적화되도록 하였다. 특히 새롭게 개발된 이중금속용접부 일반절차서는 기존 EPRI 절차서와는 다르게 Appendix 1,2,3의 개념이 포함되었다.

후 기

본 연구는 한국수력원자력(주)의 지원을 받아 한전 전력연구원에서 수행한 연구 결과물이다.

참고문헌

1. Kim, Y. S., Yoon, B. S., Yang, S. H. and Guon, K. I., 2009, "Status of Development for Dissimilar Metal Weld Performance Demonstration System in Korea," 2009 Annual Conference of KPVP, pp.219~220
2. Kim, Y. S., Yoon, B. S. and Yang, S. H., 2010, "Development of Performance Demonstration System for Dissimilar Metal Weld" 2010 Spring Conference of KSNT, pp. 29~34
3. ASME B&PV Code, Section XI, Division 1, Appendix VIII, 1995 with 96 addenda
4. Cases of ASME B&PV Code, N-695, "Qualification Requirements for Dissimilar Metal Piping Welds, Section XI, Division 1", 2003
5. Kim, Y. S., Yoon, B. S., Yang, S. H. and Guon, K. L., 2009, "Status of Development for Dissimilar Metal Weld Performance Demonstration System in Korea" 2009 Annual Conference of KPVP, pp. 219~220