

[기술논문] - 비파괴검사학회지

Journal of the Korean Society

for Nondestructive Testing

Vol. 29, No. 2 (2009. 4)

국제공동연구 PINC(Program for the Inspection of Nickel Alloy Components) 현황 및 고찰

Current Status and Investigation of International Co-operative Research Program - PINC (Program for the Inspection of Nickel Alloy Components)

김경조[†], 강성식, 송명호, 정구갑, 정해동

Kyung-Cho Kim[†], Sung-Sik Kang, Myung-Ho Song, Koo-Kap Chung and Hae-dong Chung

초 록 2002년 미국 Davis Besse 원전에서 원자로 압력용기의 상부헤드 관통관 부위의 손상이 발견되고, 2002년 벨기에 Tihange 2호기 및 2003년 일본 쓰루가 원전의 가압기 노즐에서 균열이 발견되어 세계적으로 니켈합금기기의 일차 수응력 부식균열(PWSCC; primary water stress corrosion cracking)이 원자력안전에 상당히 위협적임을 인식하게 되었다. 이에 따라 2005년부터 4년간 계획으로 미국 NRC를 중심으로 니켈합금기기의 검사에 관한 국제공동연구(PINC; program for the inspection of nickel alloy components, 이하 PINC라 함)를 시작하였고 본 논문에는 2005년부터 수행된 PINC 국제공동연구의 수행현황에 대해서 소개한다. PINC 국제공동연구의 목적은 일차 수응력 부식균열의 형상(morphology)을 규명하고, 일차 수응력 부식균열에 대한 비파괴 검사기법을 평가하는 것이다. 이 목적을 위하여 한국에서는 한국원자력안전기술원(Korea Institute of Nuclear Safety, KINS, 이하 KINS라 함)을 주축으로 한국원자력연구원, 성균관대, 원자력발전기술원, 한전KPS, (주)엔스코, (주)UMI, (주)세안, 두산중공업(주)이 참가하였고, PINC 수행 결과는 2009년 상반기에 NUREG 보고서로 발간될 예정이다. 이러한 국제공동연구를 수행함으로써 국내 기계재료분야의 결함 형성 및 분석기술이 선진국 수준임을 과시하고, 국내 비파괴검사 기술을 선진국 수준으로 끌어 올릴 수 있었으며, 이번 기회를 통하여 국내 산학연이 서로 협력하여 니켈합금기기의 건전성평가 기술을 한 단계 상승시킬 수 있었다.

주요용어: 하부관통관, 이중금속용접부, 일차 수응력 부식균열

Abstract After several PWSCCs were found in Bugey(France), Ringhals(Sweden), Tihange(Belgium), Oconee, Arkansas, Crystal Fever, Davis-Basse, VC Summer(U.S.A.), Thuruga(Japan), USNRC and PNNL started the research on PWSCC, that is, PINC project. The aim of this project is to fabricate and obtain representative NDE mock-ups with flaws to simulate tight PWSCC cracks, to identify and quantitatively assess NDE methods for accurately detecting, sizing and characterizing tight cracks such as PWSCC, to document the range of locations and crack morphologies associated with PWSCC and observed responses and to incorporate findings from other ongoing PWSCC research programs, as appropriate. By participating in PINC project, Korean morphology technique about PWSCC and NDE technique have improved and become similar level with other advanced country. Therefore, the evaluation technique of integrity for nickel alloy component has been improved by cooperation with university, research institute and industries.

Keywords: BMI(Bottom Mounted Instrumentation), DMW(Dissimilar Metal Weld), PINC(Program for the Inspection of Nickel Alloy Components), PWSCC(Primarily Water Stress Corrosion Crack)

1. 서 론

프랑스의 Bugey 및 미국의 Oconee, Arkansas, Crystal Fever, Davis-Basse 등에서 헤드 관통관에 축방향 및 원주방향 일차 수응력 부식균열이 발생하였고, 2002년 벨기에 Tihange 2호기 및 2003년 일본 쓰루가 원전의 가압기 노즐에서 균열이 발견되어 세계적으로 니켈합금기기의 일차 수응력 부식균열이 원자력안전에 상당히 위협적임을 인식하게 되었다[1-9]. 이에 따라 2005년부터 4년간 계획으로 미국 NRC를 중심으로 니켈합금기기의 검사에 관한 국제공동연구 PINC를 시작하게 되었고, 여기에는 미국을 비롯한 한국, 일본, 스웨덴, 핀란드 등이 참여하고, 미국에서는 연구비를, 다른 참여기관에서는 기술을 공여(in-kind contribution)하여 연구가 시작되었다.

PINC의 연구목적은 일차 수응력 부식균열의 형상(morphology)을 규명하고, 일차 수응력 부식균열에 대한 비파괴검사 기법을 평가하는 것이다. 이를 위하여, 우리나라에서는 KINS를 주축으로 한국원자력연구원에서는 실제 니켈합금기기에 일차 수응력 부식균열을 형성시키는 연구를 진행하였으며, 성균관대에서는 탄소강과 스테인리스강의 연결부위인 이중금속 용접부 등에 대한 초음파법의 전파거동 예측기법(modeling)에 관한 연구를 수행하였고, 원자력발전기술원, 한전KPS, (주)엔스코, (주)UMI, (주)세안, 두산중공업(주), 서울대에서는 가압기 이중금속용접부에 대한 비파괴검사 다자간시험(round robin test)에 참여하였고, 한전KPS는 BMI (bottom mounted instrumentation, 하부 관통관, 이하 BMI라 함) 이중금속용접부에 대한 비파괴검사 다자비교시험에 참가하였고, 전력연구원에서는 다자비교시험의 감독 및 데이터의 분석업무를 담당하였고, KINS에서는 국내 주관기관으로써 다자비교시험의 관리, 연구결과의 활용방안, 공동연구의 총괄업무를 담당하였다.

그 동안 미국에서는 PNNL, EPRI 등을 중심으로 실제 발견된 일차 수응력 부식균열에 대한 비파괴검사 수행 및 형상을 규명하였으며, 각국에서는 다자비교시험을 위한 시편을 차출하거나 제작하였고, 2006년 가을부터 가압기 이중금속용접부에 대한 다자비교시험을 시작하여 2007년 12월 일본, 스웨덴, 한국 및 미국에서 수행을 완료하였고, 2007년 11월부터 원자로 하부관통관 이중금속용접부에 대한 다

자비교시험을 시작하여 2008년 12월 일본, 스웨덴, 한국 및 미국에서 모든 검사를 완료하였다. 한국은 PINC 다자비교시험을 준비하기 위해서 자체적으로 예비 다자비교시험을 수행하였다. 가압기 이중금속용접부에 대한 예비 다자비교시험은 국내에서 4개의 시편을 차출하여 3개사가 참가하였으며, 원자로 하부관통관 이중금속용접부에 대한 다자비교시험은 국내에서 4개의 시편을 차출하여 2개사가 참가하여 성공적으로 PINC 다자비교시험 준비를 완료하였다. 2007년 6월 가압기 이중금속용접부에 대한 PINC 시편이 한국에 도착되어 2007년 6월부터 9월 초까지 전력연구원에서 다자비교시험을 수행하였으며, 원자력발전기술원 및 KPS에서는 위상배열 초음파검사(phased array UT)를, 두산중공업(주), (주)UMI, (주)ANSCO 및 (주)세안에서는 수동 초음파검사를, 서울대에서는 포텐셜 드롭법(potential drop method)을 적용하여 검사를 완료하였다. 2007년 11월부터는 니켈합금기기의 원자로 하부헤드 관통관의 시편에 대한 다자비교시험을 수행하였으며, 원자력연구원에서 일차 수응력 부식균열을 형성시킨 시편 1개 및 한전KPS에서 제공한 3개의 시편을 포함한 15개의 시편을 한국, 스웨덴, 미국 및 일본에서 제공하여 다자비교시험이 수행되었다. 한국은 3월에서 4월 사이에 한전KPS팀이 TOFD (time of flight diffraction)를 적용하여 다자비교시험을 완료하였다.

PINC 프로젝트에 대응하기 위해서 국내에는 9회의 실무회의를 개최하였고, 6회의 PINC 정기회의에 참가하였다. 본 기술 논문은 2005년부터 수행된 PINC 진행현황, PINC 조직 및 관련 참가회사, 예비 다자비교시험 및 다자비교시험, 다자비교시험으로부터 얻은 결과 및 향후 계획에 대해서 기술한다.

2. PINC Project 진행 현황

국제공동연구 PINC와 함께 국내 기관을 준비시키기 위해서 2005년 미국 NRC의 국제공동연구 참여요청에 따라 국내에서는 컨소시엄을 구성하여 대응하였다. 국내 컨소시엄은 한국원자력안전기술원, 한국원자력연구원, 한전KPS, 성균관대학교, 한수원발전기술원 등으로 구성하여 조직하였고 6차에서 2008년 11월 개최된 13차 PINC 정기회의에 참가하여 그 결과를 실무회의에서 발표하여 국내 컨소시엄 및 다자비교시험 팀이 PINC 다자비교시험을 준

비하고 정보를 공유하도록 하였다. 실무회의는 2006년에 4회, 2007년에 2회, 2008년에 3회 개최되었다.

PINC 6차 회의는 2006년 1월 31일부터 2월 4일까지 일본 JNES에서 개최되었다. 6차 회의는 한국이 최초로 참가한 회의로서 이 회의에서 한국이 PINC 회원국으로 정식으로 인정을 받았다. 6차 회의에서 한국의 국내 기관 컨소시엄의 연구계획 및 성과를 발표하였다. 주로 논의된 내용은 다자비교시험을 위한 활용가능 시편, 비파괴검사팀, 비파괴검사방법 및 다자비교시험을 수행할 감독관의 결정이었으며, PINC 참여기관의 연구동향을 파악하였다.

PINC 감독관 회의는 2006년 5월 9일 개최되었다. 감독관 회의에서는 목업시편의 결함, 목업시편의 핑거 프린트, 감독관의 권한 및 책임 범위, 포함될 기술적 정의, 다자비교시험의 계획, 좌표계, 시편에 표시할 사항, 감독관 체크리스트 등에 대해서 논의하였다.

PINC 7차 회의는 2006년 10월 25일부터 27일까지 미국 전력연구원(EPRI)에서 개최되었다. 일본, 미국, 스웨덴 및 한국에서 수행될 가압기 이종금속용접부 다자비교시험을 준비하기 위해서, 다자비교시험 준비 및 진행사항에 대해서 주로 회의를 하였다. PNNL은 North Anna 2호기의 파괴 및 비파괴검사 결과, 다자비교시험 계획(기술설명서 개발 포함)에서 개정된 사항 및 PNNL에서 새로 제작된 시편을 소개하였으며, JAIPEC은 최초로 일본에서 다자비교시험을 수행하면서 발생한 문제점들(좌표계 및 보정시편)을 정리하여 발표하였고, 7차 회의에서 가압기 이종금속용접부 다자비교시험에 대해서는 최종적인 계획을 확정하였고, 상부 및 하부관통관에 대해서는 보정시편 준비 등의 다자비교시험 준비를 시작하였다.

PINC 8차 회의는 2007년 2월 5일부터 6일까지 미국 NRC에서 개최되었다. PINC 7차 회의시 논의되었던 사항 및 필수검토항목(action items)으로 선정되었던 항목을 검토하였고, 일본은 가압기 이종금속용접부 다자비교시험시 검사체적, 검사방법 및 결함표시방법에 대하여 설명하였고, PNNL에서는 상부 및 하부관통관 시편(mockup)을 소개하였고, 다자비교시험 계획(가압기 이종금속용접부: 2007년 6월-8월, 상부 및 하부관통관: 8월-10월)에 대해서 논의하였다. 또한, 검사결과의 채점, 판정기준 수립, 분석방법 및 통계이용 및 파괴시험과정을 검토할 데이터분석그룹의 선정에 대해서 논의하였고, 일차

수용력 분석균열 시편에 대한 핀란드의 연구(3년 Project) 결과를 소개하였다.

PINC 9차 회의는 2007년 6월 5일부터 7일까지 일본 동북대에서 개최되었다. PINC 8차 회의시 선정되었던 필수검토항목(action items)에 대한 추진현황과 향후 추진계획 및 일정을 검토하였다. 조치항목의 검토과정에서 한국의 하부관통관 시편 제공 가능여부 및 시기, 관련 정보 및 제출시기 등에 관한 논의가 있었으며, 이에 대해 한국은 시편을 제공하기로 하였다. 한국은 이종금속용접부의 예비 다자비교시험 결과와 향후 가압기 이종금속용접부 다자비교시험 일정을 발표하였다. JAIPEC은 기 수행된 다자비교시험의 데이터 업데이트를 진행 중이며 약 2주 정도 소요됨을 설명하였고, 시험결과 데이터 작성(좌표 등)에 대한 명확한 정리가 필요함을 제시하였다. 또한, JNES는 실험실에서 응력부식균열을 생성한 하부관통관 모의 시편 제작에 대하여 설명하였고 하부관통관 다자비교시험을 위해 시편을 제공한다고 설명하였다. SKI는 유럽의 이종금속용접부 다자비교시험 현황에 대한 발표를 하였다. 미국(PNNL)은 하부관통관 노즐 모의시편에 대한 각국의 제공시편과 일정 등에 대해 설명하였다. 일본 쓰루가 원전 가압기 압력방출 노즐 안전단 누설 부위의 금속학적 관찰을 통한 크랙 형상 및 비파괴검사 데이터에 대한 설명이 있었고, 데이터 베이스 구축(Atlas Database Ver. 2.5)에 관한 설명이 있었으며, 데이터 베이스 개선을 위하여 논의하였다.

PINC 10차 회의는 2007년 10월 3일부터 5일까지 핀란드 헬싱키의 VTT에서 개최되었다. PINC 9차 회의시 논의되었던 사항 및 필수검토항목을 검토하였고, 한국원자력안전기술원은 다자비교시험시 있었던 문제점을 설명하였고 원자력연구원은 하부관통관 시편 제작현황을 설명하였으며, 일본은 자체 다자비교시험 결과 및 관서전력의 증기발생기 일차 수용력 부식균열 발생현황에 대해서 설명하였고, 유럽팀은 다자비교시험 수행현황에 대해서 설명하였고, NRC에서는 앞으로 작성될 보고서 및 데이터분석그룹에서 수행해야 할 사항에 대해서 설명하였다.

PINC 11차 회의는 2008년 4월 14일부터 18일까지 미국 PNNL에서 개최되었다. PINC 11차 회의에서는 TG-DAG, Atlas 및 NDE 그룹회의가 개최되었으며 각 그룹회의에서는 PINC 10차 회의시 논

의되었던 사항 및 필수검토항목으로 선정되었던 항목을 검토하였다. TG-DAG 그룹에서는 가압기 이종금속용접부 다자비교시험 결과에 대한 평가를 위하여 탐상 및 사이징에 대한 점수기준에 대하여 논의하였다. 일본은 시기적절하게 가압기 이종금속용접부 시편에 대한 파괴시험 결과를 제출하여 가압기 다자비교시험 결과에 대한 측정값(true state data)을 제공하여 도움을 주었으며 각 멤버에 의해서 제시된 의견은 점수기준을 작성하는데 반영되었다. TG-NDE 그룹에서는 10차 회의에서 논의되었던 필수검토항목(action items)의 종결여부 및 하부관통관 다자비교시험 현황에 대해서 논의하였다. TG-Atlas 그룹에서는 다자비교시험에 사용된 모든 변수, 실제 비파괴검사 신호 및 다자비교시험 크랙의 준비를 위해 사용된 기술을 제출하도록 감독관에게 요구하였으며, 차후 수행될 PINC 회의는 한국에서 9월말 정도에 개최하기로 결정하였다.

PINC 12차 회의는 2008년 9월 22일부터 25일까지 한국원자력안전기술원에서 개최되었다. TG-DAG에서는 11차 회의에서 논의되었던 필수검토항목(action items)의 종결여부 및 하부관통관 다자비교시험 결과 제출 및 현황에 대해서 논의하였다. TG-DAG에서는 가압기 이종금속용접부 보고서 및 원자로 하부관통관 보고서에 대해서 토론하였다. 가압기 이종금속용접부 다자비교시험 수행결과에 대해서 최종적으로 검토하였고, 각 회원사의 수정사항을 반영하였으며, 추가적인 분석이 필요한지 확인하였다. 원자로 하부관통관 보고서에 대해서는 아직 제출되지 않은 팀의 데이터 제출일, 측정값(true state data) 정보를 위한 평거 프린팅 및 시편 송부, 차기 하부관통관 데이터 분석 회의에 대한 날짜를 결정하였다. TG-Atlas에서는 일본의 관서전력에서 "Investigation result of SG nozzles cracking in Mihama-2 and RV nozzle cracking in Ohi-3"를 발표하였고, 성균관대학교에서 "Ultrasonic phased array model for inspection of dissimilar metal welds"를 발표하였다. 또한, PINC Atlas의 최신버전에 대해서 토론하였다.

PINC 13차 회의는 2008년 11월 22일부터 25일까지 PNNL에서 개최되었다. PINC 13차 회의에서는 TG-DAG 회의만이 개최되었다. TG-DAG 그룹에서는 하부관통관 다자비교시험 결과에 대한 평가를 위하여 탐상 및 사이징에 대한 점수기준에 대하여 논의하였다. 일본은 하부관통관에 대한 파괴시험

결과를 제출하여 채점에 활용하였으나 한국은 시편이 아직 PNNL에 있어 시편이 한국에 도착하는 대로 파괴시험을 수행할 예정이다. 표면에서 수행된 하부관통관 표면용접부 와전류탐상 다자비교시험 결과는 주파수에 영향을 많이 받았으며, 300 KHz 이상에서는 좋은 결과를 얻었다. 한국 결과에 대해서는 감독관에게 수정을 요구하였으며, 수정된 데이터는 재평가되었다. 하부관통관 다자비교시험 결과를 이용하여 하부관통관 다자비교시험 보고서에 대한 개략적인 작성에 대해서 상의하였으며 NRC는 가능한 한 2009년 2월 안에 하부관통관 보고서를 완료하기를 희망하였다.

14차 회의는 2009년 3월에 워싱턴D.C.의 NRC에서 개최될 예정이며 PINC II 및 발간될 NUREG 보고서에 대해서 논의할 예정이다.

3. PINC 조직 및 관련 참가회사

Fig. 1은 PINC 조직을 나타낸다. PINC 조직은 SC(steering committee)가 최고상위그룹이며 그 아래의 3개의 그룹(TG-Atlas, TG-NDE, TG-DAG)이 있으며 SC의 회원은 각 대륙(한국, 미국, 일본, 유럽)에서 1명이 선정되며 PINC 회의의 최종결정을 하고 있다. 3개의 그룹은 PINC 정기회의시 독립적으로 회의를 수행하여 그 목적이 다르다. TG-Atlas 그룹은 재료형상규명을 주로 논의하는 그룹이며 수행업무는 지금까지 발생된 일차 수송력 부식균열의 크랙형상규명 결과를 수집하여 전자 데이터베이스(Atlas)를 개발하고, 비파괴검사결과와 크랙형상과의 상관관계를 밝히고, 새로운 비파괴검사, 금속파면 관찰(fractography) 및 금속조직검사(metallography)를 수행한다. TG-NDE 그룹은 일차 수송력 부식균열 및 가상 크랙이 있는 시편에 대한 다자비교시험을 수행하고, 결함 탐상 및 결함 크기 측정에 대한 비

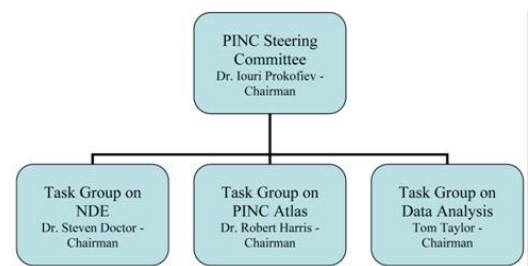


Fig. 1 PINC group

파괴검사 기법을 평가하고 제작시편에 대한 기술을 평가하고 규제에 적용하기 요건들을 검토한다. TG-DAG는 비파괴검사 데이터의 분석 계획을 수립하고, 시편의 파괴시험을 수행하며, 실제 형상과 비교하고, 데이터를 분석하고 프로젝트 보고서를 작성한다. TG-DAG 그룹은 규제기관 및 분석을 수행하는 PNNL, EPRI 및 KEPRI 이외에는 참가를 제한하였으며 보고서의 결론부분에 제시한 가동중검사 권고사항에 대해서 규제기관의 의견이 반영하도록 하였다.

PINC 참가 회원사는 주로 각 나라의 규제기관을 중심으로 선정되었으며, 각 나라의 회원사는 다음과 같다.

- 일본 회원사 :

Japan Nuclear Energy Safety Organization (JNES), Japan Power Engineering and Inspection Corporation(JAPEIC), Tohoku University, Mitsubishi Heavy Industry(MHI), Kansai Electric Power Company

- 유럽 회원사 :

Swedish Radiation Safety Authority(전 SKI, Swedish Nuclear Power Inspectorate), Swedish NDT Qualification Centre(SQC), 핀란드 VTT, Uddcomb Engineering(UE), 덴마크 Force Institute, 스웨덴 Wesdyne, 스페인 Technatom, 영국 Mitsui Babcock Energy Ltd.

- 한국 회원사 :

한국원자력안전기술원(KINS), 한국원자력연구원(KAERI), 한전KPS, 성균관대학교, 원자력발전기술원

- 미국 회원사 :

United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC), Electric Power Research Institute, Pacific Northwest National Laboratory

PINC 다자비교시험 참가팀은 각 나라 원자력발전소의 가동중검사를 수행하고 있는 가동중검사팀 및 관련 비파괴검사기법을 연구중인 학교가 주로 참가하였다.

4. 예비 다자비교시험

4.1. 가압기 이중금속용접부에 대한 예비 다자비교시험

가압기 이중금속용접부에 대한 다자비교시험을 수행하기 전에 국내 각 사가 보유한 시편중 PINC 다자비교시험 시편의 두께와 가장 유사한 두께의 시편을 4개 선택하여 예비 다자비교시험을 3개 회사에서 2007년 3월에서 4월 사이에 수행하였다. 시편은 각 사가 보유하고 있는 시편중 PINC 가압기 다자비교시험용 시편과 가장 유사한 시편을 선정하였다.

예비 다자비교시험 결과는 Table 1과 같다.

예비 다자비교시험 결과로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 원주방향 결함보다 축방향 결함의 탐지가 어렵다.
- 용접형상(재질,용접방법 등)을 갖춘 교정(비교) 시편이 필요하므로, 검사할 제품과 동일한 조건으로 제작된 시편제작이 필요하다.
- 서로 다른 재질의 계면지시 분석에 많은 시간이 소요되므로 검사전 재질 계면 지시 파악 및

Table 1 PRZ preliminary RRT result

	Team KD			Team KK			Team KH					
	Detection	Total No	Detecte	Miss	Detection	Total N	Detect	Miss	Detection	Total N	Detecte	Miss
시편 #1	Circ. Flaw	4	4	0	Circ. Flaw	4	1	3	Circ. Flaw	4	3	1
	Axial Flaw	2	2	0	Axial Flaw	2	1	1	Axial Flaw	2	1	1
시편 #2	Circ. Flaw	5	5	0	Circ. Flaw	5	5	0	Circ. Flaw	5	5	0
	Axial Flaw	3	3	0	Axial Flaw	3	0	3	Axial Flaw	3	1	2
시편 #3	Circ. Flaw	4	2	2	Circ. Flaw	4	3	1	Circ. Flaw	4	3	1
	Axial Flaw	0	0	0	Axial Flaw	0	0	0	Axial Flaw	0	0	0
시편 #4	Circ. Flaw	12	10	2	Circ. Flaw	12	11	1	Circ. Flaw	12	11	1
	Axial Flaw	0	0	0	Axial Flaw	0	0	0	Axial Flaw	0	0	0
Total	Circ. Flaw	25	21	4	Circ. Flaw	25	20	5	Circ. Flaw	25	22	3
	Axial Flaw	5	5	0	Axial Flaw	5	1	4	Axial Flaw	5	2	3
	Sum	30	26	4	Sum	30	21	9	Sum	30	24	6

검사 감도 교정을 수행할 필요가 있다.

- 검사체 내에 종파와 횡파가 공존하므로 검사가 어렵다. 따라서, 검사할 제품의 형상을 정확히 스케치하고, 나타날 지시의 위치를 사전에 숙지할 필요가 있다.
- 축방향 결점의 높이 측정이 까다롭다.
- Dual 엘리먼트 RL 탐촉자는 포커싱되는 위치를 어느 정도 벗어나면 정확한 결점위치 결정이 어렵다.
- 원둘레 주사(축방향 결함 검출)시는 카브리지를 고려하여 탐촉자를 만들 필요가 있다.

4.2. 상부관통관 이종금속용접부에 대한 예비 다자비교시험

예비다자비교시험에 사용된 시편에는 일본 오히3호기의 경험을 바탕으로 J-용접부 바깥쪽에 결함을 삽입하였다. 노즐부 및 노즐부에서 J-용접부 바깥쪽 2.54 mm까지의 결함 탐상 가능성은 이미 확인된 바 있으나, 이번에 오히3호기는 2.54 mm를 훨씬 넘어서는 위치에서 발견되었으므로 검사 가능성을 검토하기 위해 예비 다자비교시험을 수행하였다.

예비다자비교시험 결과를 Table 2에 나타내었다.

예비다자비교시험 결과로부터의 결과는 다음과 같다.

- OD에서 J용접부 바깥쪽으로 2.54 mm이상의 축방향 크랙과 7.62 mm이상의 원주방향 크랙은 찾기 어렵다.
- 축방향 지시가 원주방향 지시보다 찾기 어렵다.
- 누설경로를 놓칠 수 있다.
- 그라인드 마크는 찾기 어려웠다.
- 이상의 결과로부터 OD로부터 2.54 mm이상의 J용접부 바깥쪽 용접부에 있는 지시는 찾기 어려웠고 이러한 지시를 찾기 위해서는 새로운 기법이 개발되어야 한다.

5. 다자비교시험

5.1. 가압기 이종금속용접부에 대한 다자비교시험

가압기 이종금속용접부에 대한 다자비교시험은 Table 3와 같이 일본, 유럽, 한국, 미국의 순서로 수행되었으며 다자비교시험은 총 8개 (일본 6개, 스웨덴 2개 제공 등) 시편을 이용하여, 2007년 7월

에서 9월 사이에 수행되었으며 Fig. 2은 다자비교 시험 사진을 나타낸다.

본 국제공동연구는 USNRC와 KINS간의 협약에 따라 2009년 상반기 NRC NUREG 보고서가 발간되기 전까지는 결과를 발표하지 않기로 되어 있어 구체적인 결과를 수록하지 않고 개략적으로 설명한다. 참여업체는 총 5개이고, 결함탐지 방법은 수동 초음파법(manual UT), 위상배열 초음파법(phased array UT), 그리고 DCPD 방법 등 3가지 방법을 사용하였다.

업체간의 탐지능력에 상당한 차이를 확인하였고, 어떤 경우 깊은 결함을 찾지 못하는 경우도 발생하

Table 2 RVHP preliminary RRT result

Flaw		Distance From OD(mm)	Company	
#	Type		A	B
1-1	Axial	30.9	X	X
1-2	Axial	15.6	X	X
1-3	Axial	3.8	O	X
1-4	Leak	0	O	O
1-5	U.C.	-3.6	O	O
1-6	Grind.	3.8	X	X
2-1	Circ.	3.0	O	O
2-2	Circ.	29.3	X	X
2-3	Circ.	5.6	O	O
2-4	Circ.	23.4	X	X
3-1	Circ.	2.9	O	O
3-2	Circ.	32.0	X	X
3-3	Circ.	7.0	O	O
3-4	Circ.	22.1	X	X
4-1	Axial	30.8	X	X
4-2	Axial	12.8	X	X
4-3	Axial	3.4	O	X
4-4	Leak	0	O	X
4-5	U.C.	-3.7	O	O
4-6	Grind.	3.9	X	X

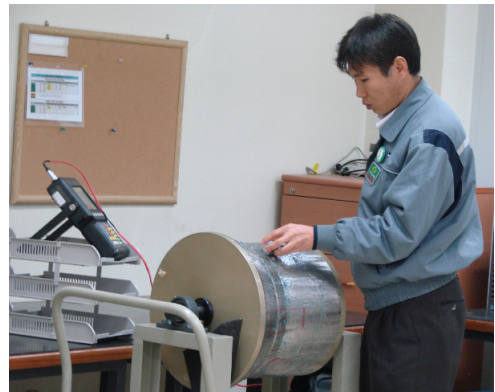


Fig. 2 Photo of PZR DMW RRT

Table 3 DMW RRT schedule

Task Name	Inspection Method			June		July				August				Inspection Time
		starts	end	21/22	25/29	02/06	09/13	16/20	23/27	30/03	06/10	13/17	20/24	
72 team	PA UT	starts	end											15day
- PINC 2.1-6, 2.9-10		06/21	07/02	2	5									
- Signal Evaluation		07/06	07/13			2	5							
- Rescan	Manual UT	07/16	07/16					1						10day
- PINC 2.1-6		starts	end											
- PINC 2.9-10		07/09	07/13			5								
65 team	Potential Drop	starts	end											18day
- PINC 2.1-6		07/23	08/03						5	5				
- PINC 2.9-10		08/06	08/15								5	3		
30 team	Manual UT	starts	end											9day
- PINC 2.1-6		08/06	08/10								5			
- PINC 2.9-10		08/13	08/17									4		
13 team	PA UT	starts	end											10day
- PINC 2.1-6		08/20	08/24									5		
- PINC 2.9-10		08/27	08/31										5	

Mockup Arrival 20-Jun Mockup Departure 3 Sep

였다. 즉, 종과 탐촉자의 사이즈가 커서 곡선으로 이루어진 배관에서는 배관과의 접촉이 완전하지 않았고, 용접부의 형상이 굴곡이어서 탐촉자와 배관 간의 접촉에 문제가 있었음을 확인하였다.

가압기 용접부 다자비교시험 결과로부터, 20% 이하의 크기가 작은 결함의 탐상 및 사이징에 대한 낮은 탐상 확률(priority of detection, POD)를 확인하였고 차후 이러한 문제점을 해결하고 추가적인 일차 수능력 부식균열 데이터를 취합하기 위하여 NRC는 PINC II를 계획하고 있으며 2009년 상반기에 시작할 예정이다. PINC I에 대한 구체적인 NUREG 보고서 검토는 NRC 및 PINC 회원국의 검토 후 2009년 중으로 발간될 예정이다.

5.2. 하부관통관 이중금속용접부에 대한 다자비교 시험

하부관통관 이중금속용접부에 대한 다자비교시험은 미국, 유럽, 한국, 일본, 미국의 순서로 수행되었으며 한국의 다자비교시험은 2008년 3월에서 4월 사이에 수행되었다. 원래 계획은 상부관통관에 대한 다자비교시험을 수행할 예정이었으나 보수의 어려움, 운반 등의 문제로 하부관통관에 대한 다자비교시험을 수행하게 되었다.

사용된 시편은 총 15개 (미국 6개, 일본 4개, 한국 4개 제공 등)이며, Fig. 3는 하부관통관 이중금속용접부에 대한 수행 사진을 나타낸다.

다자비교시험 팀은 TOFD 및 와전류탐상법을 이용하여 검사를 수행하였으며, 검사 수행전후 시스

템을 보정하기 위해서 선형성 체크(linearity check), 음속보정(sound velocity check) 등을 수행하였다. PINC 5.6 시편에 대해서는 스캔을 위한 적절한 탐촉자가 없어서 외부에서 검사를 시도하였다. 그러나 Fig. 4에서와 같이 초음파빔이 3개의 재질을 통과해야 하므로(SS→CS→SS) 용접부를 벗어난 지역에서는 검사가 불가능하였고, 용접부내에서의 검사도 용접부 폭(약 25 mm)이 좁아서 검사 가능한 영역이 매우 적어서 검사가 불가능하였다.



Fig. 3 Photo of BMI RRT

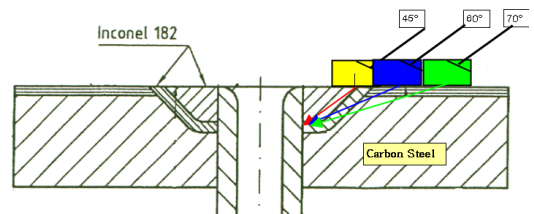


Fig. 4 Inspection of PINC 5.6

Table 4 BMI RRT plan

2007			2008					
October	November	December	January	February	March	April	May	June
PNNL Finger print								End of BMI RRT, Destructive examination
	↙	EPRI Zetec						
		↙	Europe	Europe	Korea			
					↙	Japan		

6. 결 론

한국은 컨소시엄을 구성하여 국제공동연구 PINC에 참가하였으며 현재까지 다음과 같은 연구를 수행하였다.

- 한국원자력연구원에서는 실제 니켈합금기기에 일차 수송력 부식균열을 형성시켰고 이 시편을 다자비교시험 시편으로 제공하였다.
- 성균관대에서는 탄소강과 스테인리스강의 연결 부위인 이종금속용접부 등에 대한 초음파빔의 전파거동 예측기법에 관한 연구를 수행하였다.
- 원자력발전기술원, 한전KPS, (주)엔스코, (주)UMI, (주)세안, 두산중공업(주), 서울대에서는 가압기 이종금속용접부에 대한 비파괴검사 다자비교시험에 참여하여 성공적으로 다자비교시험을 완료하였다.
- 한전KPS는 하부 관통관 이종금속용접부에 대한 비파괴검사 다자비교시험에 참가하여 성공적으로 다자비교시험을 완료하였다.
- 가압기 용접부에 대한 다자비교시험 결과, 현존하는 기술로 20%이하의 결함 탐상 및 사이징에 대한 어려움을 확인하였으며 이에 대한 추가적인 연구는 차후 PINC II에서 수행될 예정이다.
- KINS에서는 국내 주관기관으로써 다자비교시험의 관리, 국내 실무회의 개최, 국내 참가기관 정보 교환 등 PINC 공동연구의 총괄업무를 성공적으로 수행하였다.

이러한 국제공동연구를 수행함으로써 국내 기계재료분야의 결함 형성 및 분석기술이 선진국 수준임을 과시하고, 국내 비파괴검사 기술을 선진국 수준으로 끌어 올릴 수 있었으며, 이번 기회를 통하여 국내 산학연이 서로 협력하여 니켈합금기기의 건전성평가 기술을 한 단계 상승시킬 수 있었다.

향후 수행 계획은 다음과 같다.

원자력연구원에서 제작한 시편 및 PINC 5.2에 대한 파괴시험을 수행하고 그 결과를 NUREG 보고서에 추가할 예정이다.

이종금속용접부에서 초음파 전파거동 시뮬레이션을 2009년까지 완료하여 이를 PINC회의에서 발표하고 NUREG 보고서에 포함시킬 예정이다.

2009년 4월부터 PINC II project 시작하게 되면 한국 국내 컨소시엄을 구성하여 국내에서도 PINC II를 계속 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 국내 연구소, 비파괴검사 관련회사, 학교의 자발적인 참가에 의해 수행되었으며, 국내 컨소시엄 및 다자비교시험에 참가한 국내 참여회사, 연구소 및 학교 관계자들에게 감사드립니다.

참고문헌

[1] NRC Information Notice 2000-17: Crack in Weld Area of Reactor Coolant System Hot

- Leg Piping at V. C. Summer, United States Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Reactor Regulation, (2000)
- [2] A. Jenssen, K. Norrgard, C. Jansson, J. Lagerstom, G. Embring and P. Efsing, "Structural assessment of defected nozzle to safe-end welds in Ringhals 3 and 4," Proceedings of Fontevraud V International Symposium on Contribution of Materials Investigation to the Resolution of Problems Encountered in Pressurized Water Reactors, SFEN, pp 43-54, (2002)
- [3] L. E. Thomas, J. S. Vetrano, S. M. Bruemmer, P. Efsing, B. Forssgren, G. Embring and K. Gott, "High-resolution analytical electron microscopy characterization of environmentally assisted cracks in alloy 182 weldments," Proceedings of 11th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, ANS, (2003)
- [4] NRC Information Notice 2004-11: Cracking in Pressurizer Safety and Relief Nozzles and in Surge Line Nozzle, United States Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Reactor Regulation, (2006)
- [5] USNRC Website <http://www.nrc.gov/reactors/operating/ops-experience/pressure-boundary-integrity/weld-issues/index.html>, "Reactor Coolant System Weld Issues"
- [6] C. Amzallag, J. M. Boursier, C. Pages and C. Gimond, "Stress corrosion life experience of 182 and 82 welds in French PWRs," in Proceedings Fontevraud International Symposium Number 5, (2002)
- [7] Bamford, W. and Hall, J., "A review of alloy 600 cracking in operating nuclear plants: historical experience and future trends," 10th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, (2003)
- [8] D. Buisine, F. Cattant, J. Champredonde, C. Pichon, C. Benhamou, A. Gelpi and M. Vaindirlis, "Stress corrosion cracking in the vessel closure head penetrations of French PWRs," Sixth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, (1993)
- [9] V. N. Shah, A. G. Ware and A. M. Porter, "Assessment of pressurized water reactor control rod drive mechanism nozzle cracking," Prepared for U. S. Nuclear Regulatory Commission, Safety Programs Division, NUREG/CR-6245, EGG-2715, (1994)
- [10] 최성남, 김형남, 유현주, 조현준, 황원걸, "배관 용접부 초음파검사 시스템 개발", 비파괴검사학회지, 제28권, 제4호, pp. 331-337, (2008)