

CANDU형 원전 칼란드리아 및 내장품 원격 육안검사 기술 개발

이상훈[†] · 김한종^{*}

Development of Remote Visual Inspection Technology for CANDU Calandria & Internals

Sang-Hoon Lee[†] and Han-Jong Kim^{*}

ABSTRACT

During the period of retubing work for the licensing renewal, the fuel channels, calandria tubes and feeders of CANDU Reactors will be replaced, and calandria visual examination will be performed. This period is a unique opportunity to inspect the inside of the calandria. The visual inspection for the calandria vessel and its internals of Wolsong NPP is scheduled for confirming the calandria integrity. The first visual inspection for the calandria is planned in Pt. Lepreau led by AECL. The visual inspection for Wolsong NPP, led by NETEC(Nuclear Engineering & Technology Institute) of KHNP, will employ 3D laser scanner and 3D CAD Mock-up for the first time in the world, in addition to a conventional video camera. The inspection system is composed of a robot with the 3D laser scanner, a video camera and a hardness meter.

Key Words : End shield(중단차폐체), Feeder(원자로 공급자관), JP(Joint Project; 기술협력 협약), Liquid Poison(독물질), Fuel Channel(압력관), AECL(캐나다 원자력공사)Shutoff Rod(정지봉)

1. 서 론

중수로 원자로(칼란드리아)는 380개의 압력관을 내포한 구조이며, 각 압력관마다 12다발의 핵연료가 장전되어서 중수에 의해 냉각되는 형태이다. 압력관 외부는 칼란드리아 튜브가 감싸고 있으며, 칼란드리아 자체는 경수로 채워진 콘크리트 차폐벽 내부에 위치한다. 칼란드리아는 중단차폐체와 Lattice Tube에 의해 지지되며 내부는 반응도 제어 위한 중성자 흡수 시스템(액체 및 고체 방식), 발전소 정지를 위한 정지봉(Shutoff Rod), 액체 독물질(Liquid Poison) 제어 시스템, 감속재의 입출구 노즐 등의 내장품으로 구성되어 있다.¹⁾

현재 설계수명에 도달한 국내외의 많은 중수로

원전이 계속운전을 추진 중이다. 계속운전을 위한 설비보강 공사 기간 중에 압력관, 칼란드리아 튜브 및 원자로 공급자관 등을 교체하게 된다. 외국 발전소의 경우 이 기간 중에 칼란드리아 건전성 확인을 위하여 칼란드리아 및 내장품에 대한 육안 검사를 계획 중이며 월성원자력 발전소도 검사를 추진 중이다.

2. 국내외 검사 동향 및 검사 대상

2.1 국내외 검사 동향

중수로 원전의 중주국인 캐나다에서 칼란드리아 및 내장품에 대한 검사 필요성이 대두되어서 검사 수행을 준비 중이다.

2006년 8월 Hydro-Québec의 Gentilly2 발전소에서 칼란드리아 내부 설비인 Cobalt Adjust Guide Tube의 이완 현상이 발견되었고, 이 문제의 해결을 위하여 COG JP4220 조정위원회(CANDU GTDSC;

[†] 책임저자, 회원, 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

E-mail : lee@khnp.co.kr

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

^{*} 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

Guide Tube De-tensioning Steering Committee)가 구성되었다. 조정위원회는 AECL이 계속운전을 위해 칼란드리아 및 내장품에 대한 검사지침서 초안을 만들도록 요구하였다. 또한 이와 관련된 표준 지침 개발, 잠재열화기구의 발굴을 위해 JP4271 (Calandria and Internals FFLEG)를 구성하였다.

Bruce Power, HQ(Hydro-Québec), NBPN(New Brunswick Power Nuclear), OPG(Ontario Power Generation), KHNP 등과 같이 발전소 설계수명이 도래하여 계속운전을 준비하는 발전사들은 JP4220 및 4271에 이미 가입하였거나 가입 예정이다.

캐나다의 포인트레프르 원전이 세계 중수로원전 사상 최초로 칼란드리아 육안검사를 시행할 예정('09년 3월)이며, 이후에 월성원자력('09년 12월), Gentilly2 및 Embalse(2011년), Bruce3,4 호기(2012년) 순으로 검사가 예정 되어 있다. 한수원(주) 원자력발전기술원도 JP4220, JP4271을 가입하여 검사절차 및 판정기준을 확보할 예정이다.

2.2 검사 대상

검사 대상은 칼란드리아 내부 용접부 및 내부의 모든 구조물이다. Fig. 1은 칼란드리아 외부의 조감도이다.

Fig. 2는 계속운전을 위한 설비보강 공사 기간 중에 육안검사의 대상품이 되는 칼란드리아 및 내장품의 개략도이다.

수평방향으로 LISS 노즐, Flux Detector Guide Tube 등이 설치되어 있으며, 수직방향으로 정지봉, 제어봉, Flux Detector Guide Tube, Liquid Zone Control Unit 등이 설치되어 있다.

칼란드리아 내벽에는 감속재 입출구 노즐이 용접되어 있으며, 상부에 파열판(Rupture Disc)과

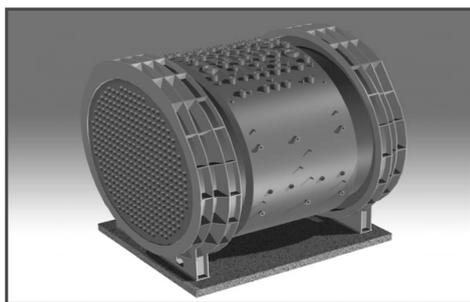


Fig. 1 Outside View of Calandria

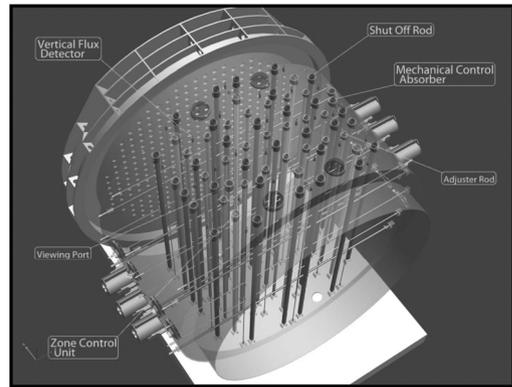


Fig. 2 Inside View of Calandria

Table 1 Inspection Method and Techniques

No	Inspection part	Method	Remarks
1	Moderator Inlet, Outlet nozzles	Remote VT	Fatigue Damage
2	Calandria Tubesheet Weld	Remote VT, Hardness measurement	Corrosion, Irradiation Embrittlement
3	Calandria Vessel Interior	Remote VT	Fatigue Damage, Mechanical Damage, Function check
4	Flux Detector Guide Tubes	Remote VT	Deformation, Function Check
5	LISS Nozzles	Remote VT	Deformation, Function Check
6	Shutoff Rod, Control Absorber, Adjuster Guide Tubes, Absorber Elements	Remote VT	Fatigue Damage, Deformation, Function Check
7	Calandria Manhole Cover to Nozzle Weld	Remote VT	Fatigue Damage, Deformation, Function Check

Viewing Port를 위한 개구부가 있고, 하부에 제어봉 및 정지봉 등을 위한 완충장치가 있다.

원격으로 진행되는 육안검사에 대한 점검부위, 점검 방법, 점검부위별 중요 열화기구를 Table 1에 나타내었다.

3. 적용 기법 및 검사 신뢰도 제고 방안

3.1 원격육안검사 및 경도측정

월성원자력발전소 칼란드리아 및 내장품 육안검사는 한수원(주) 원자력발전기술원이 주관하여 수

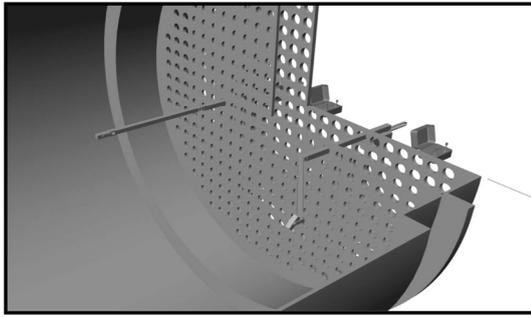


Fig. 3 A Concept for Inspection

행할 예정이다.

검사는 대상 설비의 방사선 준위를 감안하여 원격제어가 가능한 내방사선 로봇과 스캐너를 개발하여 수행할 예정이다. 압력관 및 칼란드리아 튜브의 제거부(6inch)로 검사 장비를 삽입하여 검사하여야 하므로 소형의 로봇과 스캐너의 개발이 요구된다.

튜브 개구부를 이용하여 로봇 및 스캐너를 삽입하여 검사하는 개념도를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3과 같이 칼란드리아 외부의 핵연료교환계통 브릿지 상부에 이송 로봇의 본체를 설치하고, 스캐너(비디오 카메라, 3D 레이저, 경도측정기)를 로봇 Arm 끝단에 장착하여 칼란드리아 튜브 개구부를 통해 검사체 내부로 투입 후 검사하게 된다. 경도측정을 위해 로봇은 4축 이상의 관절을 이용하여 해당 검사부위까지 접근 한다. 또한 경도측정을 위해 장비가 일정 압력을 유지하고 견딜 수 있도록 설계된다.

주요 검사 장비의 기능을 아래에 나타내었다.

3.1.1 비디오카메라 시스템

원격 육안검사는 로봇의 Arm에 장착된 비디오 카메라를 통해 원격으로 화상 자료를 취득하여 각 검사 대상품의 예상 열화기구에 따른 검사 및 평가가 진행된다. 비디오카메라는 문자표 및 Color Checker의 식별이 가능한 정도의 분해능을 갖추어야 하며, DVD 및 VHS 방식의 상호 전환과 정지 화상 수집이 가능한 NTSC 방식으로 설계된다.

3.1.2 경도측정기

칼란드리아 튜브시트의 용접부에 대한 경도측정은 재질의 취화 정도를 측정하여 중성자 조사취화

도를 평가하기 위하여 수행하며, 이것은 검사 후에 수행될 칼란드리아 조사취화에 대한 안정성 평가의 기본 자료로 활용된다. 로봇에 장착된 경도측정기를 검사 부위(칼란드리아 튜브 시트 용접부)에 접촉하여 해당 부위의 경도 값을 얻는다.

경도 측정 위치, 경도 측정 방식, 장비와 측정 장소의 편평도를 반영한 검사 반복 횟수, 검사 장소 숫자 등을 포함하는 상세 검사절차가 개발 중이다. 절차개발 시 우선 고려사항은 모재에 결함을 유발하지 않는 경도 측정 방법의 선택, 중성자 속이 가장 높은 검사부위의 선택, 선정된 경도측정기를 이용한 모형(Mock-up)에서의 신뢰도 시험 결과의 활용 등이다. 또한, 경도측정기의 스캐닝부와 수신부는 분리되어 있어서, 칼란드리아 내부에서 측정된 경도 값을 외부의 수신부에서 읽을 수 있도록 개발된다.

취득한 경도 값을 이용한 조사취화 영향평가를 통하여 중성자 조사취화에 대한 칼란드리아의 안전성을 검증하게 된다.

3.2 검사 신뢰도 제고 방안

월성원자력발전소 칼란드리아 육안검사는 일반적으로 수행되는 비디오카메라 검사 기법에 아래와 같은 검사 기법이 추가로 적용된다.

3.2.1 3D CAD 제작 활용

검사 및 장비 개발 이전 단계에 검사 대상기기의 모든 도면을 취합하여 3D CAD를 제작한다. 3D CAD의 제작을 통한 장점은 다음과 같다.

3D CAD의 입력변수에 로봇의 관절 형상 및 이동각도 등을 입력하여 시뮬레이션을 통하여 검사 대상의 100%를 포함하는 최적의 검사절차를 확립하고, 내부구조물과 로봇/스캐너의 간섭을 사전에 확인함으로써 검사의 신뢰성 및 안전성을 향상시킨다. 이러한 절차의 개발은 최소의 검사시간에 최선의 검사 수행을 가능하게 한다. 또한, 장비의 칼란드리아 내부 운전시간을 줄여서 검사장비 및 검사자의 방사선 영향을 최소화 할 수 있다.

3.2.2 실물모형(Mock-up) 제작 활용

3D CAD와 더불어서 제작될 실물 Mock-up은 실물의 1/4 부분을 실물과 동일한 크기로 제작되며 검사자의 훈련 및 장비의 인증에 사용 하게 된다.

3.2.3 3D 레이저 스캐너 적용

3D 레이저 스캐너는 레이저를 발진하여 송수신 시간을 측정함으로써 검사체의 형상을 구현하는 원리를 이용한다. 본 장치의 적용 시 장점은 검사 설비의 형상을 정밀하게 구현 가능하고, 취득 값을 3D CAD와 비교함으로써 설계 값과의 편차를 확인할 수 있다. 또한 지시 발견 시 해당 부위를 정밀 측정하여 정밀도를 향상 시킨다.

현재 고안 중인 3D 레이저 스캐너는 본체 외부 설치법, 직접이송법, 사진측량 장치 등이다. 본체 외부설치법은 검사체 외부에 스캐너 본체를 위치시키고 칼란드리아 내부에 측정방향 및 원주방향 이송과 각도 조절이 가능한 이송 로봇을 설치한다. 외부 스캐너에서 레이저를 발진시키면 이송로봇에서 검사체로 반사시켜서 검사체 표면까지 도달시킨다. 반대 경로를 거쳐서 검사체로부터 외부의 레이저 헤드에 돌아온 레이저는 프로그램에서 로봇의 포지션과 각도, 레이저의 운행 시간 등을 자동 계산하여 검사체의 형상을 3D로 구현하게 된다.

본 방식은 스캐너를 외부에 설치하기 때문에 스캐너크기의 제한을 받지 않고 크게 만들 수 있어서, 레이저 송수신 거리 즉, 이송로봇과 검사체 표면간의 거리를 길게할 수 있다. 이것은 칼란드리아 중앙의 한곳에 장비를 설치하여 내부 구조물에 의한 간섭 영역을 제외한 칼란드리아 전체의 검사가 가능하게 한다. 하지만 장비의 설치 시간 및 스캐닝 시간이 길어져서, 주어진 시간내에 여러 부위에 대한 검사가 어렵게 된다.

Fig. 4는 3D 본체 외부설치법 레이저 스캐너의 개념도이다.

직접 이송법은 레이저 헤드 본체가 직접 칼란드

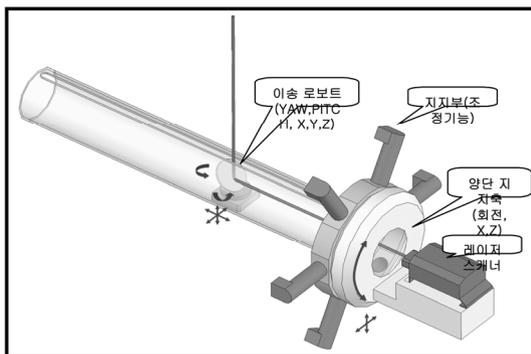


Fig. 4 3D Configuration of Laser Scanner

리아 내부에 설치된 레일을 이동하며 스캐닝 하는 방법이다. 이 방식은 주어진 헤드 본체가 칼란드리아 개구부를 통과해야 하므로 소형으로 제작되어야 하고, 이로 인해 장비와 검사체간의 거리를 길게 할 수 없다. 그러나 설치 및 스캐닝 소요시간이 적고 지시 발견시 해당 부위 인접 개구부를 이용한 검사를 통하여 정밀한 결과를 얻을 수 있다.

3.2.4 사진측량법의 활용

사진측량법(Photogrammetry)은 검사체를 서로 다른 각도에서 최소 2장 이상 촬영한 후 프로그램을 통한 이미지 합성을 통해 검사체의 3D 좌표값을 얻는 방식이다. 적용 측면에서 사진측량법이 레이저 방법에 비해서 쉬우나, 정밀도는 상대적으로 떨어진다.

4. 결 론

성공적인 검사를 위한 보조적인 수단으로 COG JP에 가입 하였으며, 이를 통해 계속운전을 추진하고 있는 발전사업자간의 판정기준 및 절차의 공유를 기대하고 있다. 또한 월성원자력발전소보다 선행하여 검사 예정인 포인트레프르 발전소 검사 경험의 확보를 위해 해당 원전 칼란드리아 육안검사 수행 시 참관을 추진 중이다.

선진 기법의 적용을 위해서 여러 가지 문제를 검토하고 있으나 장비별로 아래와 같은 추가 검토가 필요하다.

가. Delivery Robot(이송 로봇) 및 비디오카메라 이송 로봇은 경도측정기의 측정압력을 지지할 수 있도록 추가적인 지지 장치가 고안되어야 하며 일정한 압력을 유지할 수 있는 로드셀을 추가로 구성하여야 한다. 또한 비디오카메라의 CCD와 같이 방사선에 취약한 부품의 차폐 기술 및 소형, 경량의 고화질 카메라의 개발이 요구된다.

나. 3D 스캐너

3D 스캐너 관련 장비들은 현재 기 개발되어 남대문 형상복원 등에 사용되고 있으나, 좁은 출입구, 방사선 환경 등 악조건에서도 높은 품질을 얻도록 신개념의 장치 개발이 필요하다. 개발품은 스캐너의 진행시 로봇 암의 처짐을 보상하는 장치 및 프로그램 개발과 제한된 시간 내에 검사를 수행할 수 있도록 장비 설치와 제거 및 스캐닝 시간

을 최소화하는 장비의 고안이 필수적이다. 또한 본문에 언급된 여러 방식의 적용성 및 장단점을 분석해서 최적의 장비를 선정하여 개발하는 것이 요구된다.

한수원(주)은 2009년부터“중수로 원전 칼란드리아 검사 기법 개발” 과제를 통해 검사 기법 개발, 칼란드리아 검사 수행, 자동 제어 이송 로봇의 개발과 같은 장비 업그레이드를 추진할 예정이다. 또한 월성에 적용한 검사방법론을 세계 중수로 원전의 칼란드리아 표준검사 방법으로 채택되도록 노력하고 해외원전의 검사 수주를 통한 외화 획득과 국내 장비 및 비파괴검사기술의 우수성을 알리는 것을 목표로 하고 있다.

참고문헌

1. AECL “An Introduction and Technical Description of CANDU Nuclear Design, Engineering services and auxiliary programs.”, Part 2, Technical Description 600 MW Station., p1~p57