

압력용기 봉산누설 원격 육안검사 시스템 개발 Development of Remote Visual Inspection System for the Penetration of Boric Acid on the Reactor Vessel

*#최영수, 정경민

*#Y.S. Choi(yschoi1@kaeri.re.kr), K. M. Jeong
한국원자력연구원 원자력융합기술개발부

Key words : Reactor vessel, Nozzle, Boric acid, Remote Visual Inspection

1. 서론

원자력발전소는 국내 전력의 절반 정도를 공급하는 주요 에너지원으로 원자로의 열을 이용하여 증기를 발생시켜 전력을 생산한다. 원자로 압력용기는 원자력발전소의 핵심 구성품으로 안전하고 신뢰성 있는 운영을 보장하기 위해서는 구조의 건전성이 확보되어야 한다. 원자로 압력용기는 상부 및 하부 헤드에 관통관이 연결되어 각종 신호를 수집하고 원자로의 출력을 제어할 수 있도록 되어 있다. 원자로 압력용기 상부 및 하부헤드 관통관의 연결부위는 용접으로 처리되어 있으며, 경계부위의 건전성 확보를 위해 정기적인 검사가 수행된다. 압력용기 관통관 검사는 초음파, ECT, 육안 검사 방법등이 있으며, 본 논문에서는 육안검사를 수행하기 위한 원격 육안검사 시스템에 관해 논한다. 원자로 상부 및 하부헤드는 그림 1과 같이 원자로 압력용기의 상부 및 하부에 위치하고 있으며 수 십 개의 관통관에 제어 및 계측 장치들이 장착되어 있다. 상부 및 하부헤드에는 관통관이 압력용기와 용접된 상태로 부착되어 있으며, 관통관 주변의 누설 상태를 검사하여 원전 구조물 건전성을 확보하여야 한다.

원자로 압력용기 상하부 헤드 구조물은 작업공간이 협소하고 방사선이 높은 구역이므로 사람이 접근하여 검사작업을 수행하기는 어려운 실정이다. 원격검사 로봇은 사람을 대신하여 방사선 구역에서 장시간 작업을 수행할 수 있으므로 작업자의 방사선 피폭을 저감시키고 시간 단축 및 정밀 검사를 수행함으로써 작업의 효율을 증대시킬 수 있다.

본 논문에서는 원자로 압력용기의 상부 및 하부 헤드 관통관 봉산누설 육안검사를 위한 원격 검사 시스템을 개발하였다. 원격 검사 시스템은 이동로봇, 권선기, 제어/모니터링 콘솔로 이루어져 있다. 이동로봇은 방사선 구역에 사람대신 투입되고 작업자는 원격지의 안전한 곳에서 이동로봇을 원격으로 제어할 수 있다. 이동로봇의 접근성 및 활동 범위를 고려하여 환경에 적합한 이동로봇을 개발하였으며, 제어기는 조작자의 적응도를 높여 혼란을 배제하고 훈련시간을 줄이기 위해 하나의 모듈로 구성하여 상부 및 하부 헤드 검사로봇이 호환되도록 설계, 제작하였다. 제어/모니터링 콘솔은 주 모니터와 2개의 보조 모니터를 이용하여 관측자가 한 눈에 전체 상황을 쉽게 파악할 수 있도록 구성하였다.

2. 본론

원자로 압력용기 봉산누설 원격 육안검사 시스템은 상부 및 하부헤드 검사용 이동로봇, 제어 및 모니터링 콘솔로 구성된다. 그림 2는 원자로 압력용기 검사 시스템의 구성도를 보여주고 있으며, 본 논문에서는 상부 및 하부 검사용 이동로봇, 제어 및 모니터링 콘솔 순으로 기술한다.

상부헤드 검사 로봇은 반구형 상부 표면을 떨어지지 않고 이동할 수 있도록 자력을 이용하였다. 상부헤드 검사 로봇은 반구 표면을 따라 움직이며 5cm 높이의 보온재가 있는 좁은 공간에서 헤드 검사를 수행해야 되므로 경사면에서도 미끄러지지 않으며 이동이 가능해야 한다. 반구 형태의 상부헤드 표면

부착을 위해 로봇 몸체의 바닥면에 자석을 장착하였으며, 2개의 모터에 의해 후륜 바퀴를 구동하며 타이밍 벨트를 이용하여 전륜으로 구동력을 전달하도록 하였다. 카메라는 전방과 후방에 장착하여 검사 및 로봇의 이동을 용이하도록 하였으며, 전방 카메라는 좌우 $\pm 90^\circ$, 상하 $\pm 90^\circ$ 영역의 관측 범위를 갖도록 설계하였다. 카메라 회전은 롤과 틸트 메커니즘을 적용하여 원하는 영역의 영상을 관측할 수 있도록 하였다. 조명은 고휘도 LED를 카메라 주위에 설치하여 관측 대상체의 밝기가 유지되도록 하였다. 그림 3은 제작한 원자로 상부헤드 검사로봇의 실물을 보여주고 있다. 로봇의 크기는 상부헤드 보온재와의 간격 및 관통관 사이의 간격을 고려하여 높이 4.5cm, 폭 13cm, 길이 18cm 로 제작하였다.

원자로 하부 검사로봇은 보온재 바닥면에서 이동하며 반구 형태의 하부헤드 표면을 검사하게 된다. 원자로 상부 검사로봇과 같은 후륜 구동 메커니즘을 가지고 있으며, 전방 관측 카메라는 ASME 원격육안검사 요건을 만족시키기 위해 줌 갈라 카메라가 필요하다. 보온재면에서 하부헤드 표면까지의 거리는 약 10cm~70cm 정도로 다양한 관측 거리가 존재하므로 렌즈 배율과 초점조절이 원격으로 제어 가능하며 소형인 렌즈 일체형 줌 카메라를 선정하였다. 카메라 관측 방향 설정은 팬, 틸트 및 리프트 메커니즘을 적용하여 로봇이 이동하지 않고도 모든 방향의 관측을 수행할 수 있도록 하였으며, 특히 낮은 위치와 높은 위치의 관측 대상에 대한 시각차를 줄이기 위해 리프트 메커니즘을 적용하였다. 또한, 리프트 메커니즘은 장애물이나 불규칙한 바닥면에서 지렛대 역할을 하여 장애물을 넘어서거나 벗어나게 된다. 그림 4는 제작한 원자로 하부헤드 검사로봇의 실물을 보여준다. 로봇의 크기는 카메라 리프트의 상태에 따라 길이 및 높이가 달라진다. 리프트가 아래 방향으로 내린 상태에서는 높이 10cm, 길이 30cm 이며, 리프트를 위로 올린 상태에서는 높이 25cm, 길이 20cm가 된다.

제어/모니터링 콘솔은 작업자의 방사선 피폭을 최소화하기 위하여 방사선의 영향이 거의 없는 구역에서 원자로 상부 및 하부헤드 검사로봇을 원격으로 조작하게 된다. 상부 및 하부 헤드 환경은 수 십 개의 관통관이 조밀히 위치하여 하나의 카메라로 로봇을 조작하는 것은 어려우며 시간이 많이 소요된다. 따라서 본 시스템에서는 3개의 카메라를 이용하여 검사 및 로봇 조작의 편의성을 추구하였다. 주 관측 영상 및 보조 관측 영상은 원격로봇의 조작성을 높이기 위해 사용되었으며, 그림 5와 같이 관측 영상은 작업자가 한 눈에 전체 상황을 인지할 수 있도록 시야 범위 내에 두도록 하였다. 주 관측 영상은 중앙에 배치하고 보조 관측 영상은 좌우에 배치하여 검사화면과 로봇 움직임을 동시에 관측함으로써 환경을 쉽게 인식하여 작업시간을 단축할 수 있도록 하였다. 제어는 단일 조이스틱 모듈을 이용하여 조작의 편의성을 제공하였으며, 로봇의 전후 이동, 좌우 회전, 카메라 관측방향, 줌, 포커스, 조명 그리고 권선기를 제어할 수 있다. 그리고 검사 화면에 카메라 영상과 텍스트 중첩 표시 기능을 두어 영상 재검토를 손쉽게 하였다.

방사선 구역에서 작업을 수행하는 로봇은 방사선에 의한 영향을 고려하여야 한다. 모든 물질은 방사선에 의해 영향을 받지만 반도체 물질로 이루어진 전자부품이 방사선에 더욱 취약하다. 로봇 구성품중 카메라가 방사선에 가장 취약한 부품중의 하나이며, 방사선환경하에서의 작업 수명을 예측하기 위해 방사선 조사 실험을 수행하였으며 그림 6과 같은 방사선 조사 실험 결과를 얻었다. 카메라가 동작 불능이 되는 방사선 누적선량은 10~30 kR 정도이며, 로봇의 작업환경은 약 10 R/hr 이하이므로 카메라의 최대 수명은 약 1,000~3,000시간 정도로 추정할 수 있다. 작업공간의 방사선량은 시간이 지날수록 방사화가 진행되어 높아지므로 로봇의 작업 수명은 이를 충분히 고려하여야 한다.

3. 결론

원자력 발전소에서 주요 구조물인 원자로 압력용기의 건전성 확보를 위해 원자로 상부 및 하부 헤드 관통관의 부산 누설 여부를 원격으로 검사하는 로봇 시스템을 개발하였다. 본 시스템은 협소 구역에서의 작업을 위해 로봇의 크기를 소형화하고, 작업구역의 장애물 극복 및 관측을 위한 링크 구조 설계, 제작하였다. 본 시스템은 원격 이동로봇을 이용해 검사를 수행함으로써 작업자의 방사선 피폭 저감, 신뢰성 있는 데이터 확보, 작업시간 단축 등의 검사 효율 증대를 모색할 수 있게 되었다. 향후에는 조작자가 관통관 위치를 쉽게 파악할 수 있는 자동 인식 기능을 추가하여 보다 쉽고 빠르게 검사를 수행할 수 있도록 할 예정이다.

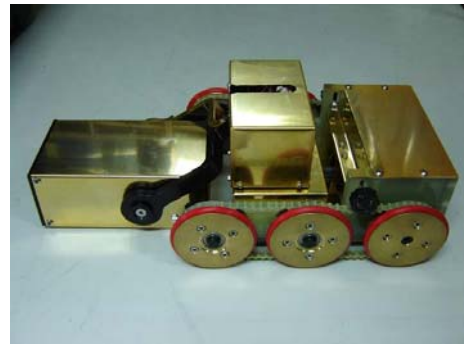


Fig. 4 Bottom head inspection robot



Fig. 5 Control and monitoring console

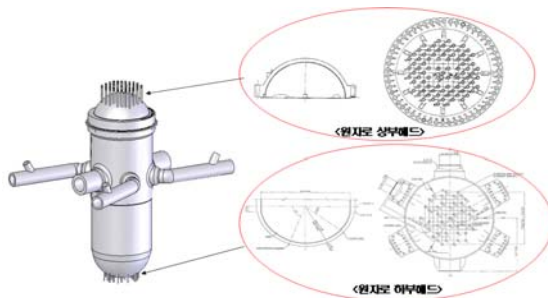


Fig. 1 Reactor vessel penetration nozzle

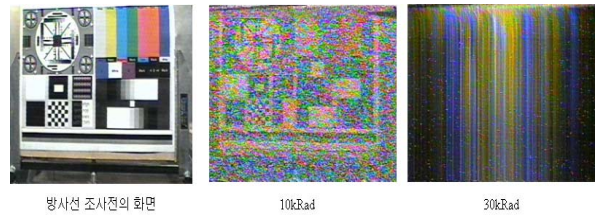


Fig. 6 Irradiation test on CCD camera

참고문헌

1. Arthur T. Howell, et al, "Degradation of the Davis-Besse Nuclear Power Station Reactor Pressure Vessel Head Lessons-Learned Report," Davis-Besse Reactor Vessel Head Degradation Lessons Learned Task Force Report, 2002.
2. K. M. Jeong, et al., "Development of a Remotely-operated Visual Inspection System for Reactor Vessel bottom-mounted Instrument Penetrations of KSNP and Lessons Learned," Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, 2006.
3. K. M. Jeong, et al., "한국 표준형 원자로 하부 원격 검사로봇 시스템 개발," CASS 2006, 2006..
4. K. M. Jeong, et al., "A Camera Pose Estimation Method Using a Single Image of Reactor Vessel Upper Head Penetration Nozzles in KSNPs," Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, 2007

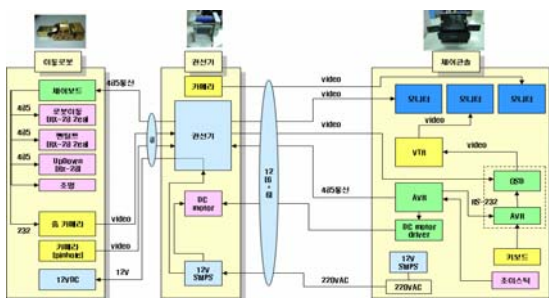


Fig. 2 Configuration of robot system



Fig. 3 Upper head inspection. robot