

핫셀용 수치제어가공기 기술 개발

Development of Computer Numerical Control Machine for Hot cell in IMEF

주용선, 오완호, 송웅섭, 김도식, 정양홍, 전중환, 유병옥, 백승제, 이은표, 홍권표

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자로 계통의 안전성을 확보하기 위해서는 속중성자($E > 1.0$ MeV)조사에 의한 재료의 조사취화(irradiation embrittlement)정도를 확인 및 평가한 후, 이들 시험자료들을 활용하여 원자력재료(연료 및 재료)에 관한 조사후 시험자료가 반드시 자료화(database)되어야 한다. 이를 위해서는 무엇보다도 먼저 발전소 현장에서 정상적으로 사용하고 있는 재료 또는 문제를 일으켜 원인 분석 및 평가를 요구하는 재료들과 하나로(HANARO)에서 중성자에서 조사한 재료로부터 기계적/물리적 시험자료를 생산할 수 있는 규격화된 시험시편을 원격으로 제작할 수 있는 기기 및 기술을 확보하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 높은 방사능을 지니고 있는 원자력재료로부터 규격화된 코드의 시험편을 원격으로 핫셀에서 제작할 수 있는 수치제어가공기 개발 및 핫셀 내부가 매우 높은 준위의 방사성물질로 오염된 상태에서 신규기기 또는 장치를 설치하는 작업의 내용도 함께 기술하였다.

Abstract

It is very important to make the database for irradiated nuclear fuels and materials by accumulating the test data. So it is very useful to secure safety and economical efficiency related to the nuclear reactor system for conducting examination of irradiated specimen to confirm the irradiation embrittlement of the reactor pressure vessel by neutron fluence hereafter. To do that, first of all, the test specimen manufacturing machine and test apparatus should be equipped in hot cell facility as well as techniques for making or test the normal and/or abnormal irradiated materials which are come from commercial reactor and HANARO research reactor are established. This paper describes the development of CNC(=computer numerical control) machine for hot cell to manufacture standard specimens from irradiated bulk materials as well as installation process in very contaminated hot cell.

1. 서론

속중성자($E > 1.0$ MeV)조사에 의한 재료의 조사 취화(irradiation embrittlement) 정도를 확인하고, 원자로 계통의 안전성을 확보하기 위해서는 많은 양의 원자력재료(연료 및 재료)에 관한 조사 후 시험자료가 자료화(database)되어야 한다. 이를 위해서는 무엇보다도 먼저 발전소 현장에서 정상적으로 사용하고 있는 재료 또는 사용하고 있는 설비로부터 결함이 발생하여 원인 분석 및 평가를 요구하는 재료들로부터 기계적/물리적 시험자료를 생산할 수 있는 규격화된 시험시편을 제작할 수 있는 기기 및 기술을 확보하는 것이 필요하다.

가압경수로 압력용기는 설계수명(design lifetime)이 다할 때까지 표면에 약 $1 \times 10^{19} \sim 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 의 속중성자($E > 1.0$ MeV)가 조사되는 것으로 예상하고 있다^[1,2]. 이러한 경우에 원자로 노심대(belt line)에 위치하고 있는 재료의 조사취화(irradiation embrittlement)정도를 예측하는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면 이러한 작업 또는 시험은 원자로 압력용기의 사용수명과 직접적으로 연관이 있기 때문이다. 따라서 원자로 압력용기 사용수명을 예측하고 연장하기 위해서는 현재 운영중인 원자로 압력용기와 재질이 같은 재료들을 중성자 속이 높은 하나로(HANARO) 연구용 원자로 및 조사캡슐(irradiation capsule) 장치를 활용하여 설계수명말기(EOL : End Of Life)에 도달할 것으로 예상하는 중성자를 조사시킨 후 기계적 물성치를 획득 및 평가하기 위해 충격시험 등의 시험을 한다. 그리고 ASTM E185-02^[1]에서 요구하는 시편의 최소 요구수량은 각 재료별로 12 개 이상이며, 통상적으로 원자로 압력용기는 4가지 재료-모재 횡방향, 모재 종방향, 용접재 및 열영향부-로 구성된다.

반면에 하나로 조사캡슐의 내부 체적(volume)이 매우 작아 ASTM E23^[3]에서 요구하는 표준시편(type-A)을 삽입하는 경우, 한번에 조사시킬 수 있는 시편의 수량이 매우 적어 한 재질의 조사취화정도를 시험 및 평가하기 위한 요구 조건-최소 12개 이상-을 감안할 때 수차례에 걸쳐 고비용을 투입하여 조사시험을 수행해야 하므로 비경제적이고 많은 시간을 요구하게 된다. 그래서 비경제적이고 고비용이 투입되는 조사시험의 개선방법으로 단면의 크기가 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 인 충격시편의 노치(notch)부위만을 하나로 조사캡슐에 삽입하여 중성자 조사시키고, 이를 비조사시편과 용접하여 시험하는 방법이 제안되었다. 그런데 노치부위와 비조사시편을 같은 단면의 크기로 용접하는 경우 시편의 직진도를 만족시키기 위해서는 가공을 해야 하는데 비조사시편의 단면의 크기를 $13 \times 13 \text{ mm}^2$ 로 하는 것이 가장 적당하다.

그러나 중성자에 조사된 원자력재료는 매우 높은 방사능을 지니고 있어 방사선 작업 종사자의 신체에 커다란 위협을 주어 이들로부터 규격화시편 제작은 반드시 방사선 차폐가 된 핫셀에서 이루어진다^[4]. 그리고 핫셀에서의 모든 작업은 시험대상물을 눈으로 관찰하며 손으로 직접 접촉하면서 취급하는 것이 아니라, 원격조작기(master-slave manipulator) 등을 사용하여 원격으로만 취급할 수 있다. 따라서 이렇게 단면의 크기가 다른 두 개의 시편을 용접한 후 규격에 맞는 시편을 핫셀내부에서 원격으로 제작하기 위해서는 가공 장치 및 시험기술이 확보가 우선되어야 한다.

2. 개발 내용

2.1 개요

조사재시험시설의 M2 핫셀에는 원자로압력용기용 감시 캡슐(surveillance capsule) 절단 및 해체용 밀링 형태의 장비가 설치되어 있었으나, 단지 감시 캡슐을 해체하기 위한 전용기로 제작되어 전 공정을 원격조작기에 의한 수동 조작만이 가능하도록 되어 있어 주로 작업자의 경험 및 감각 등에 의존하여 운전 및 가공하게 되므로 가공시편의 치수 정밀도를 사용자 또는 규격 코드(code or standard)에서 요구하는 조건을 만족시키는 것은 매우 어렵다. 따라서 점차로 다양성 및 정밀성을 요구하는 조사재(irradiated material) 정밀시편의 제작용으로는 더 이상 사용하는 것은 곤란하다. 그래서 기존에 설치되어 운영되었던 장비를 핫셀에서 반출하고 감시 캡슐의 절단, 해체 작업과 같은 기존의 가공작업 수행뿐 아니라 작고 정밀한 조사재 시편을 핫셀내에서 원격조작기

를 사용하여 가공하기 위한 장비로서 1회의 조사재의 장착으로 일련의 가공 공정을 연속적이며 자동적으로 수행하는 수치제어가공기(CNC Machine)를 핫셀 특성에 맞도록 개발하였다. 본 기기를 활용하여 조사재 재생증식(reconstitution) 용접시편, 중수로 압력관 시편 및 다양한 형태의 정밀한 조사재 시편 등을 가공할 수 있도록 원격조작기의 사용에 제한을 받지 않도록 설계 및 제작하였다. 일반적으로 사용되는 수치제어가공기는 생산성에 주안점을 두어 높은 주축회전수와 가공속도를 중요시하여 제작 보급하므로 장비의 크기는 물론 원격조작기로 조작할 수 없기 때문에 특별한 사양(specification)을 가지고 기계 본체의 목형에서부터 새로운 형태의 기계를 핫셀의 조건에 맞추어 제작하였고, 본 기계의 필수적으로 갖추어야 하는 조건을 다음과 같이 설정하였다.

- 핫셀 바닥에서 테이블 상면의 최대 높이 : 250 mm 이하
- 본 기계의 최대높이 : 1,500 mm 이하
- 공구의 크기는 원격조작기 조오(jaw)의 최대크기 : 90 mm 이하
- 공구의 중량 및 길이: 최대 20 kg, 200 mm 이하
- 기계의 중량 : 최대 2,000 kg
- 기계 본체와 조작부의 거리 : 최소 1,500 mm 이상
- 원거리 조작시 소음(noise)에 무관할 것.
- 본체와 연결되는 모든 케이블 : 직경 20 mm 이하

이러한 필수적인 조건을 갖추지 못하면 핫셀에서 기계의 성능이 현저히 떨어지는 원인이 되므로 위와 같은 조건을 만족하면서 기존의 밀링기에서 수행한감시캡슐 절단과 해체 작업 등을 수행할 수 있도록 하였다.

2.2 설계개념 및 제원

조사재시험시설의 M2 핫셀에 설치하는 기계는 핫셀 내부의 조건과 원격조작기의 작업 영역을 벗어나지 않고 취급할 수 있는 범위 내에서 크기 및 제원을 결정해야 한다.

- 핫셀 내부의 모든 조종은 최대용량 20 kg이하의 힘으로 가능할 것.
- 핫셀 내부의 운전조건 : 운전온도 25 ± 3 °C
: 운전습도 50 %
: 방사선량 최대 10 Ci(E > 1 MeV, Co-60 기준)
- 설치장소 : 핫셀 작업대(working table : 6 mm Stainless Plate) 위
- 테이블의 크기 : 600 x 380 mm
- 테이블의 최대 적재량 : 100 kg이하
- 이송량 : X 500 mm, Y 360 mm, Z 300 mm
- 테이블 상면에서 주축단거리 : 160~500 mm
- 주축중심과 킬럼앞면의 거리 : 395 mm
- 주축 회전속도 : 10~3,000 RPM
- 주축 흡의 테이퍼 : ISO No. 30
- 주축의 급 이송 속도 : X,Y(2,000 mm/min), Z(1,000 mm/min)
- 절삭이송속도 : 1~1,500 mm/min
- 각 축의 이송단위 : 0.001 mm
- 자동공구 교환장치 :더블 아암 스윙방식
- 공구선택방식 : 메모리 랜덤형
- 공구저장분수 : 6 분
- 공구형상 : BT30
- 공구의 크기, 무게 및 길이 : 직경 90 mm 이하, 20 kg 이하, 200 mm 이하
- PULL STUD : P30T-1
- 공구교환시간(T-T/C-C) : 1.0/2.3

- 주축최대 토크 : 저속 약 30 kg-m, 고속 약 10 kg-m
- 주축 공구 클램프력 : 1,000 kg 이상
- 주축정위치 정지방식 : 오리엔트제어방식(전기식)
- 모터 : 주축모터(30/연속정격) 7.5/5.5 kw, 이송용 :1.0 kw이상
- 전원 및 공압 : AC 220 V, 60 Hz, 6~8 kg/cm²

그리고 조사재시험시설의 핫셀은 항상 방사성물질이 존재하고 있기 때문에 본 기계를 핫셀 내에 설치한 이후에는 기계의 급유 및 정비 등이 불가능하므로설계의 특별요건으로 다음의 사항을 추가하였다.

- 이송계 구동부의 급유가 자동으로 이루어지는 구조로 할 것.
- 주축 구동부의 구동구조가 내 방사성의 특징을 갖출 것.
- 절삭유 공급장치는 본체와 분리된 구조일 것.
- 절삭 칩은 원격조종기에 의해 필터에서 분리하여 처리할 수 있는 구조일 것.
- 조립하기 위해 사용된 볼트가 표면으로 돌출 되지 않는 구조일 것.
- 전기 및 전자 부품은 방사능의 영향을 받지 않는 구조를 갖출 것.

2.3 성능검사

제작과정에서 설계변경으로 인한 제작부품의 변경, 기계의 주요부품의 제작 후 그 성능에 대한 시험이 필요한 경우에 실시하였다. 장비의 각각의 주요 구성품에 대한 조립상태와 각부의 동작상태 부품의 규격 등을 육안검사 및 치수검사를 실시하였으며, 또한 제작 시방서와 제작도면(shop drawing) 내용과의 일치여부도 확인하였다. 완전하게 조립한 기계의 성능을 확인하기 위하여 실시하며 조사재시험시설에 설치하기 위한 준비 작업이 진행 중에 있으므로, 제작공장에 핫셀 조건과 유사한 모형(mock-up)에 본 기계를 설치하여 시편을 실제 가공하였으며, 시편 가공상태를 육안검사를 통해 합격여부를 결정한 후, 이후 핫셀내 설치 공정을 진행하였다.

3. 핫셀 내부 설치 및 시운전

3.1 핫셀의 제염작업 및 기존장비의 제거

조사재시험시설의 M2 핫셀은 사용후핵연료, 각종 캡슐의 절단 및 시편 가공등 파괴시험을 수행하는 핫셀이기 때문에 핫셀내부의 방사선선량율이 매우 높을뿐 아니라 오염 정도가 매우 심하다. 그리고 새로 제작한 장비를 설치하기 위해 기존장비를 핫셀에서 제거해야 한다. 따라서 핫셀 내부로 진입하여 작업을 수행하는 작업자의 안전성을 고려하여 방사성물질에 의한 체외 피폭을 줄이면서 체내에 방사성물질을 흡입하지 않도록 방독면을 착용하고 제염을 실시하였다.

핫셀 제염은 핫셀의 작업구역에서 원격조작기를 이용한 제염과 방사선종사자가 핫셀 내부로 진입하여 제염하는 방법으로 수행하였다. 핫셀의 작업구역에서 원격조작기를 이용한 핫셀 제염은 크게 3회에 걸쳐 반복 수행하였다. 제일 먼저 원격조작기로 핫셀 바닥 및 장비를 제염하여 핫셀 내부에 방사선종사자가 출입을 할 수 있는 조건을 확립하였다. 그리고 핫셀 내부에 직접 작업자가 들어가 방사선 검출기로 직접 방사선의 세기를 측정 및 점검하면서 방사선 준위가 높은 부분을 집중적으로 제염하였고, 마지막으로 조사재시험시설에 있는 제원이 450 x 450 mm² 고준위 폐기물통(bin)에 들어가지 않는 필터류는 절단, 분해 및 해체하는 방법으로 처리하였다. 핫셀 내부에 작업자가 직접 투입할 수 있도록 방사선선량률 및 오염도를 낮추기 위해서 제염액을 탈지면에 적신 후 수차례 반복하여 핫셀의 작업대 바닥과 설치된 장비를 원격조작기로 접근이 가능한 모든 부분까지 제염을 수행하여 최대한 방사선선량률 및 오염도를 낮추었다.

원격조작기에 의한 방사선 제염을 마친 후, 방사선종사자가 직접 핫셀의 뒷문을 통하여 내부에 투입하여 진공청소기로 핫셀 바닥면 전체를 1차 제염하고 2차로 제염액과 제염지를 이용하여 방사선 제염작업을 수행하였는데, 방사성 물질의 체내 흡입을 막기 위하여 방독면을 착용한 후 방사선 검출기로 방사선선량률의 세기를 측정하면서 선량률 및 오염도가 높은 부분을 집중적으로 제염하였고, 제염작업 장면을 그림 1에 각각 나타내었다.

3.2 자동수치제어기 핫셀내부 설치

핫셀 제염 및 기존 장비의 제거가 완료된 후 자동 수치제어 가공기 설치를 수행하였다. 본 장비는 회전하거나 가공할 때 혹은 외부로부터 진동 등에 의해 기계의 수평 유지가 되지 않으면 기계의 수평과 정밀도에 막대한 영향이 발생하게 되므로 기초를 튼튼히 하여야 한다. 그런데 기계가 설치될 핫셀 바닥은 스테인레스 두께 6 mm로 시공되어 있어서 그림 2와 같이 4인치 스테인레스 파이프를 6 개소에 기초 보강공사를 실시한 후 기계의 수평작업, 배선작업 및 시운전을 실시하였다. 공장에서 제작후 성능검사를 완료하고, 핫셀의 천정문을 통해 핫셀내부로 쉽게 반입할 수 있도록 본체, 콘트롤 장치, 각종 배선류 등을 분리하였다. 서어비스 구역의 30/5 톤용 천정크레인을 사용하여 천정문을 개방하고, 기기를 들어 핫셀내부로 반입하였다. 그리고 핫셀내부에 설치한 1 톤용 인셀크레인을 사용하여 설치 지점으로 이송하였다. 본 작업과정을 그림 3에 나타내었다.

기초보강공사가 이루어진 핫셀의 작업대(working table) 위에 천정문을 통해서 핫셀 내부로 반입한 기계를 설치한 후 수평기(0.02mm/1M A급 RIKEN No. 98F03)를 사용하여 KS(Korean Standard)에서 규정하는 0.04 mm/1 m까지 레벨 볼트로 수평을 유지하도록 작업하였다.

핫셀의 작업구역에 설치한 콘트롤 장치와 핫셀내부로 반입한 본체간의 전원공급뿐 아니라 기기를 제어하기 위한 신호들을 상호간 주고 받기 위해서는 많은 양의 전선들이 연결되어야 한다. 그러나 기존에 설치한 핫셀의 작업대 상면에서 하면으로 통하는 배관의 수량이 적어 본 기기용 전선(전원 공급용 및 제어용 등)들을 배선하기에 부족해서 그림 4와 같이 배선용 구멍을 핫셀 작업대 위에 용접하여 설치하였다. 그리고 이를 통해 전원공급용 및 제어용 전선들을 핫셀의 바닥으로 내리고, 그리고 핫셀 작업대 아래부분에 설치되어 있는 매설관(penetration plug)을 통해 작업구역으로 그림 5와 같이 전선들을 인출하였다.

본 기기를 설계할 당시에는 핫셀 내부의 방사선 오염도를 고려하여 모든 전선들을 핫셀의 작업구역에서 핫셀 내부로 인출하도록 하였으나, 제어용 전선들을 핫셀 내부에서 작업자가 방독면을 착용한 상태로 작업(납땀 등의 매우 정교한 작업)하는 것은 거의 불가능하여 설계개념을 변경하여 작업하였다. 그래서 이에 대한 보완방법으로 핫셀내부에서 작업구역으로 인출하는 모든 전선들은 그림 6과 같이 방사선 계측기를 사용하여 오염도 여부를 점검한 후 작업하도록 하였다.

3.3 시운전

본 기기를 핫셀 내부에 반입하고, 또한 배선 작업을 완료한 후 최종적으로 시운전을 착수하기 전에 다음과 같은 사항을 확인하였다.

- 1) 기기의 수평도 재확인(그림 7)
- 2) 전원 공급 및 제어용 전선 연결 상태
- 3) 기기의 핫셀내부에서의 타 기기와의 간섭 상태

또한 본 기계에 탑재된 운용 프로그램은 FANUC Series의 O-MC로 그림 8과 같이 시험용 가공물을 가공하며 각각의 기능을 모두 확인하면서 실시하였다.

4. 결론 및 건의사항

핫셀에서 운용할 수 있도록 개발되어 있는 장비를 일반시장에서 구매하는 것은 매우 어렵다. 또한 핵연료 등을 절단하는 파괴시험기능을 가진 핫셀에 운전 중 신규 기기 또는 장비를 구매/설치하는 작업 또한 매우 힘들다. 따라서 핫셀시설운영과 장치개조에 관한 충분한 경험과 축적된 기술을 바탕으로 시험목적에 맞도록 장치의 설계, 개조 및 설치해야 한다.

급변 조사재시험시설에서는 파괴시험을 수행하는 M2 핫셀내부에 기존에 사용하던 밀링기를 제거하고, 신규로 제작한 수치제어가공기를 설치하였으며, 그 내용을 다음과 같다.

- 가. 2002년 1월부터 6월까지 약 4개월간에 걸쳐 핫셀 제염을 포함하여 기기의 설치 및 시운전을 수행하였다.
- 나. 설치후 시운전시 진동 및 소음이 제작시방서에서 요구하는 값을 만족하였다.

다. 본 기기의 설계, 제작 및 설치 공정을 통해 장치의 개조 및 운전 중인 핫셀 내부에 신규 장치를 설치하는 방법 및 기술을 확보하였다.

이렇게 획득한 내용들은 차후 오염된 핫셀에서의 장비 반출입 작업에 적용할 수 있을 것으로 사려되며, 핫셀시험에 관련된 필요한 장치를 개조와 관련된 치구들을 개발하는데 많은 도움을 줄 것으로 사려된다.

참고문헌

- [1] ASTM E185-02, "Standard Practice for Design of Surveillance Programs for Light-Water Moderated Nuclear Reactor Vessels", ASTM(2002).
- [2] ASTM E2215-02, "Standard Practice for Evaluation of Surveillance Capsules from Light-Water Moderated Nuclear Power Reactor Vessels", ASTM(2002).
- [3] ASTM E23-97a, "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials", ASTM(1993).
- [4] 박대규외 4인, "핫셀설계기술", KAERI/AR-468/97, 한국원자력연구소(1997).



그림 1. 핫셀 내부 제염(진공청소기).

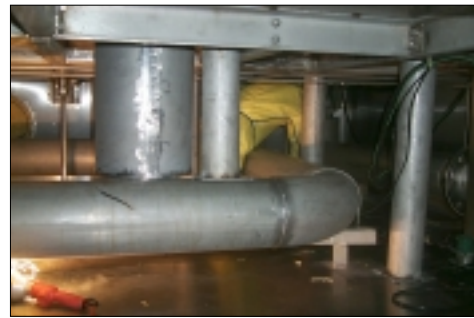


그림 2. 기초보강 공사.



그림 3. 자동 수치제어 가공기
핫셀내부 반입.



그림 4. 핫셀 작업구역에 설치한
배선용 연결장치.



그림 5. 핫셀내부와 작업구역간의 배선작업.



그림 6. 핫셀내부에서 인출한 전선들의 오염도 측정.

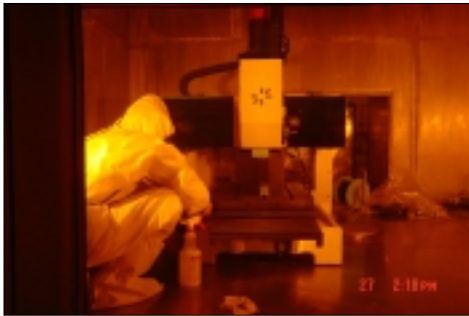


그림 7. 기기의 수평도 재점검.

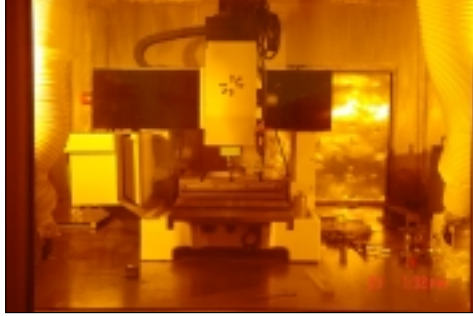


그림 8. 모형 가공물에 대한 시운전.