조사후 핵연료 천공장치 상세설계

김재용, 이형권, 박승재, 김봉구
한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

고연소도 핵연료봉(high burn-up nuclear fuel rod) 안정성 검증을 위하여 사용후 핵연료에 열전대(thermocouple)를 장입한 후 연구용원자로에서 재조사하여 열적성능을 검증하는 것은 중요하다. 현재까지 조사되기 전 핵연료 소결체(pellet)와 건식 재가공된 핵연료 소결체에 대해 연구용원자로에서의 조사시험은 진행되어 왔으나 조사후(irradiated nuclear fuel rod) 핵연료봉을 가공하는 재계장기술(re-fabrication technology)은 국내에서는 시도된 적이 없다. 현재까지는 몇몇 원자력 선진국에서만 보유하고 있는 기술로서 안전도와 정밀도를 요하는 기술이며 고연소도 핵연료의 조사특성을 파악하기 위한 필수 기술이다. 재계장기술은 크게 조사 중 핵연료봉 중심에 열전대를 설치하기위하여 지름 2.5mm, 깊이 60mm의 hole을 내는 천공공정(drilling process)과 열전대가 삽입된 핵연료에 봉단마개(end plug)를 삽입하기 위해 깊이 10mm의 소결체를 제거하는 소결체제거공정(defueling process)으로 나눌 수 있다.

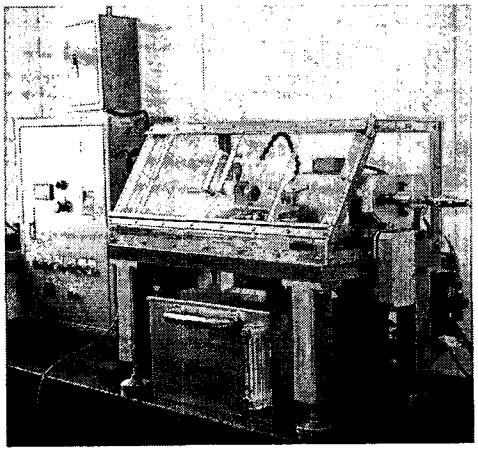

Fig. 1 Mock-up drilling device for a center hole on a simulated fuel rod

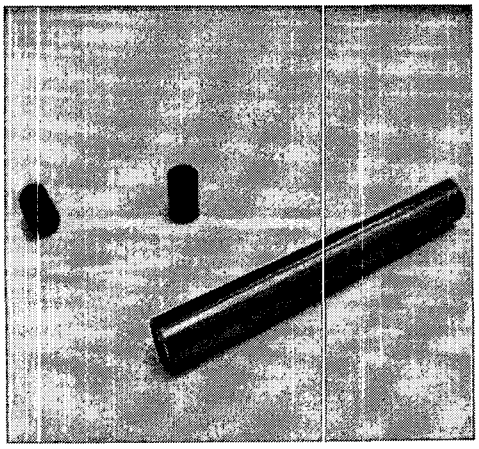

Fig. 2 Simulated fuel rod consisted of Ba_2FeO_3 and Zircaloy-4

재계장공정은 조사후 핵연료를 다루는 작업이므로 강한 방사선으로부터 운영자를 보호하기위해 모든 작업이 핫셀(hot-cell)내에서 원격조정기(manipulator)를 이용하여 이루어진다. 그러므로 천공장치 상세설계시 핫셀내의 공간크기(space size), 납셀창(lead window)을 통해 핫셀내부를 볼 수 있는 가시영역범위, 원격조정기의 작동범위 등을 고려하여야 한다. 이와 같이 조사후 핵연료 천공장치 상세설계에는 많은 제약조건을 만족시켜야 하는데 먼저 장비의 기본적인 성능을 검증하고 최적 절삭인자를 구하기위해서 일반실험실(cold lab)에서 사용이 가능한 모의 핵연료 천공장치를 Fig. 1처럼 제작하고 Fig. 2와 같이 지름 8.3mm, 뚜께 10mm인 바륨페라이트(Ba_2FeO_3) 6개를 zircaloy-4 rod에 resin을 이용하여 고착시켜 만든 모의 핵연료봉을 이용하여 천공시험을 실시하였다. 여러 차례의 천공실험을 통해서 조사후 핵연료봉 천공 최적조건을 구하였으며, 공정절차를 확립하고 천공 가능성을 확인하였다. 이렇게 얻어진 데이터들을 상세설계에 반영하였다.

본 장치는 그 기능에 따라서 크게 세 부분(component), 즉 천공부(drilling part), 드라이아이스부(dry-ice vessel part), 흡입부(suction part)로 나눌 수 있다. Fig. 3은 조사후 핵연료 천공장치의

개념도(conceptual drawing)이다. 각 부분의 기능과 상세설계시 고려해야 할 중요한 사항은 다음과 같다.

천공부의 중요한 기능은 소결체의 중심에 열전대를 삽입할 수 있는 hole을 가공해주며 봉단마개가 체결될 수 있도록 소결체의 일부분을 제거하는 역할을 수행한다. 또, hole내에 몰리브덴관(molybdenum tube)을 삽입하는 공정을 수행하며 회전속도 3,000~5,000 rpm, 절삭속도 0.005~2.5 mm/sec으로 동작되어야 한다. 처음부터 장축의 절삭공구를 이용하여 hole을 절삭하면 공구가 초기위치를 잡지 못하여 공구축이 흔들리는 떨림현상(chattering)이 일어나 절삭이 되지 않고 부러져 버리는 현상을 유발한다. 그러므로 절삭공구를 길이별로 총 3종류로 설계하고 절삭 깊이에 따라 교환하여 사용하도록 하였다. 소결체제거공정에서는 Fig. 4와 같이 절삭공구를 지름별로 총 5종류로 구분하여 별도의 장비 없이 피복관에 손상을 주지않고 제거할 수 있도록 설계하였다.

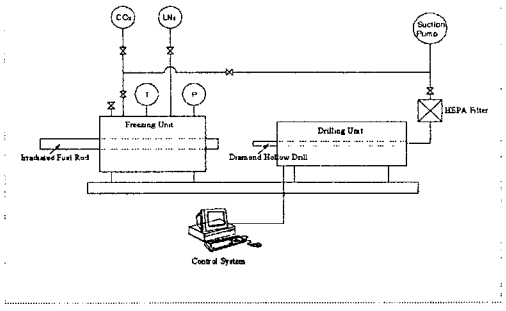

Fig. 3 Conceptual drawing of the drilling machine for irradiated nuclear fuel rods

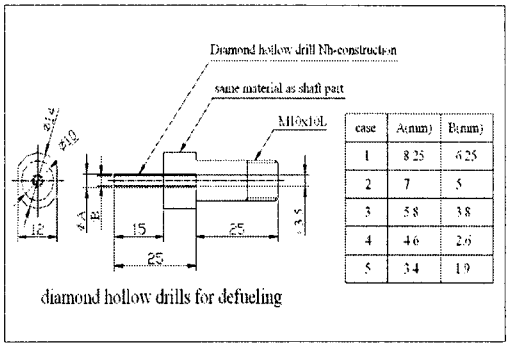

Fig. 4 Drawing of diamond hollow drills for the defueling process

드라이아이스부는 조사된 소결체내에 존재하는 크고 작은 크랙(crack)이 천공 중 하중을 받아서 더 진척되거나 소결체의 일부분이 떨어져나가는 현상을 막기 위해서 연료봉 내부 및 주위에 액체이산화탄소(LCO_2)를 투입한 후 -175℃의 액체질소(LN_2)을 이용하여 드라이아이스화 시키는 역할을 한다. 이 부분의 중요 설계 포인트는 기밀유지를 위해서 부착되는 드라이아이스 용기의 뚜껑(cap)부가 드라이아이스화 공정에서 얼려졌을 때 원격조정기를 이용하여 쉽게 탈착할 수 있도록 설계하는 것이다.

마지막 흡입부는 절삭도중 발생하는 소결체 칩(chip)을 작업과 동시에 배출하여 절삭공구의 마모를 최소화하고 절삭작업이 원활하게 진행되도록 하는 기능을 한다. 일반 칩과는 달리 조사후 소결체는 고준위 방사능물질(radioactive material)로 외부로 확산되거나 비산(scattering)되지 않도록 해야 함으로 흡입펌프(suction pump)전에 HEPA filter를 두어서 포집한 후 일괄 보관하도록 설계하였다. 또 일정 진공압 유지를 위해서 고속으로 회전(5,000 rpm max.)하고 있는 천공부와 흡입부 사이 연결부분의 기밀유지방법이 흡입부 상세설계의 중요 포인트라고 할 수 있다.

본 논문에서는 재계장기술 개발을 위해 설계되고 있는 조사후 핵연료 천공장치의 각 부분별 핵심설계방법과 조사후 핵연료 천공작업절차에 대해서 간략히 서술하였다. 또한 상세설계에 고려하여야 할 제약사항들에 대해서 기술하고 현재 운영 중인 모의 핵연료 천공장치에 대해서도 간략히 소개하였다.