

조사후 핵연료 가열시험장치 개발

Development of Post-irradiated Fuel Annealing Apparatus

김대호, 이찬복, 김영민, 김선기, 양용식,
정연호, 송근우, 김종현

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

고연소도 핵연료에서의 온도변화에 따른 핵분열기체의 거동을 실험하기 위하여 핵연료 가열시험장치를 개발하였다. 핵연료 가열시험장치는 핫셀 내에 설치될 가열부와 핫셀 외부의 Glove Box 내에 설치될 측정부로 구성되어 있다. 핫셀 내에 설치될 가열부는 전기저항로 가열방식으로 최고 1700℃까지 분당 50℃ 상승이 가능하도록 제작되었다. 방출되는 핵분열기체량을 실시간으로 측정하는 Glove Box 내 측정부는 Kr-85의 실시간 측정을 위한 Beta counter와 Kr-85와 Xe-133측정이 가능한 Gamma counter로 이중 측정방법을 채택하였다. 핵연료 가열시험장치의 가열로 및 측정기의 운전은 컴퓨터를 통해 자동제어 되고 모든 운전 및 측정자료들이 컴퓨터에 자동으로 기록된다. 핵연료 가열시험장치의 작동성은 노외에서 시험완료 되었으며 곧 핫셀에 설치될 예정이다.

Abstract

The Annealing(PIA) apparatus were developed to investigate the behavior of the fission gases with temperature variation in the high burn-up fuel. The PIA apparatus consists of the furnace to be installed in hot-cell and the detectors in glove box to be installed out-of the hot cell. The furnace is heated by the electrical resistance and the temperature can increase up to 50℃ per minute and up to the maximum temperature of 1,700℃. The detectors in glove box to measured the released fission gases with the time are the beta counter to measure Kr-85 and the and the gamma counter to detect Kr-85 and Xe-133. The operation of the PIA such as furnace and detector is controlled by the personal computer and all the operating history and the measured data are stored in the computer. Pre-operation test of PIA was completed and it will be installed in the hot cell soon.

1. 서 론

국내에서 활발하게 진행 중인 경수로용 고연소도 핵연료의 성능 및 안전성 평가를 위해서는 국내에서 생산한 고연소도 핵연료의 성능 데이터베이스가 필요하다. 현재까지 국산 고연소도 핵연료에 대한 성능자료는 전무한 상태이다. 손상연료에 대한 조사후 시험은 수회에 걸쳐 실시되었으나 실제 성능분석 및 해석에 사용되는 데이터베이스 생산은 수행되지 않았다. 특히 경수로용 핵연료의 고연소도화 추세에서의 성능자료는 핵연료개발에 필수적인 요소가 되고 있다. 국내에서는 2002년부터 국산 고연소도 핵연료에 대한 성능자료 생산이 한국원자력연구소를 주축으로 본격적인 연구가 수행되고 있다. 2002년말 울진 2호기 k23 핵연료집합체가 한국원자력연구소로 이송되어 현재 비파괴 및 파괴 조사후 시험이 수행 중에 있으며, 피복관 및 소결체에 대한 상세 조사후 시험을 준비 중에 있다. 이송된 국산 고연소도 핵연료는 평균 57,000 MWd/MTU까지 연소된 핵연료로 국부적으로는 67,000 MWd/MTU 연소부위까지 측정되었다.

외국의 경우 다양한 소결체 가열시험이 진행되고 있다. 특히 핫셀을 이용한 조사후 소결체 가열 시험은 프랑스 및 일본 등이 두드러진 소결체 사고모사에 대한 시험을 수행하여 각종 핵연료의 사고거동모사에 대한 데이터베이스를 구축하고 있다. 프랑스의 VERCORS 프로그램[1]의 경우 가압경수로의 중대사고시 핵연료의 건전성 상실을 가정한 거동시험이 진행되어 산화, 환원 분위기 및 온도에 따른 핵분열생성물의 방출운동, 핵분열기체의 총방출량, 방출핵종 및 미세구조변화 분석등이 수행되었고, 온도에 따른 기체상 핵분열생성물 및 가스상태의 핵분열생성물의 화학적 거동 등의 시험이 수행되었다. VERCORS 에 사용된 시료는 Pellet 3개와 양단에 depleted UO_2 를 넣은 60 ~ 80mm 크기로 텅스텐 또는 graphite 발열체를 사용한 유도로형태의 가열방식을 채택하여 최대 2,600K까지 가열이 가능하다. 시편은 20 W/cm의 저선출력에서 40시간정도 재조사를 통해 핵분열생성물을 활성화하여 가열 포집하는 형태의 시험이다. 시험분위기는 $H_2O + H_2$, H_2 , Steam 등의 LOCA 사고를 모사하였으며, 산화 환원의 시험도 함께 진행되었다. VERCORS 프로그램을 통해 취발성, 반취발성, 저취발성 및 비취발성 핵분열생성물의 방출거동을 확인하였으며, 특히 저취발성 핵분열생성물들에 대한 UO_2 및 MOX연료의 핵종 데이터베이스가 구축되었다. 아울러, 연료의 오염 및 이물질의 미세구조변화 관찰과 산화/환원의 사고조건과 SiC 등의 조절물질 영향연구가 함께 진행되었다. 반면에 일본의 VEGA 프로그램[2,3]의 경우는 HEVA, advaced VERCORS와 유사하나 Thoria 등의 고온재료를 이용하여 가열온도를 최대 3250K 까지 끌어 올렸으며, 특히 1.0MPa의 가압상태에서의 시험이 특징적으로 구별되는 시험이다. VEGA 프로그램의 시험조건은 최대온도 3250K, 0.1 ~ 1.0 MPa의 압력조건, He, H_2 , Air 및 Steam 분위기에서 짧은시간의 시편 재조사를 통해 가열시험이 진행되었다. 시험결과 특징으로는 가압상태에서의 가열시험을 통해 핵분열생성물의 방출량이 비가압상태보다 적게 방출되는 것을 확인하였다.

현재 제작된 소결체 가열시험장치는 국내 제작경험이 없는 점을 감안하여 1단계 계획에 따라 조사후 소결체의 저온시험[4]을 목적으로 제작되었다. 그림 1.은 소결체 가열시험장치의 개략도이다. 최대 상승온도를 1,700℃까지 분당 50℃ 씩 상승이 가능하도록 설계하였으며, 전기저항로방식의 Graphite Heating Element를 이용하여 열전대를 통한 PID 열원 조절이 가능하도록 제작되었다. 외국의 고온시험장치를 참조로 2단계 가열시험장치는 최대 2,600℃까지 가열이 가능한 유도로 형

태의 소결체 사고모사 시험장치를 제작할 계획이다.

본 논문을 통하여 국내에서 처음으로 시작하는 소결체 가열시험장치의 제작과 기능에 대한 기술적 특징을 설명하고 이를 통한 국산 고연소도 핵연료의 성능 데이터베이스 생산에 활용할 예정이다.

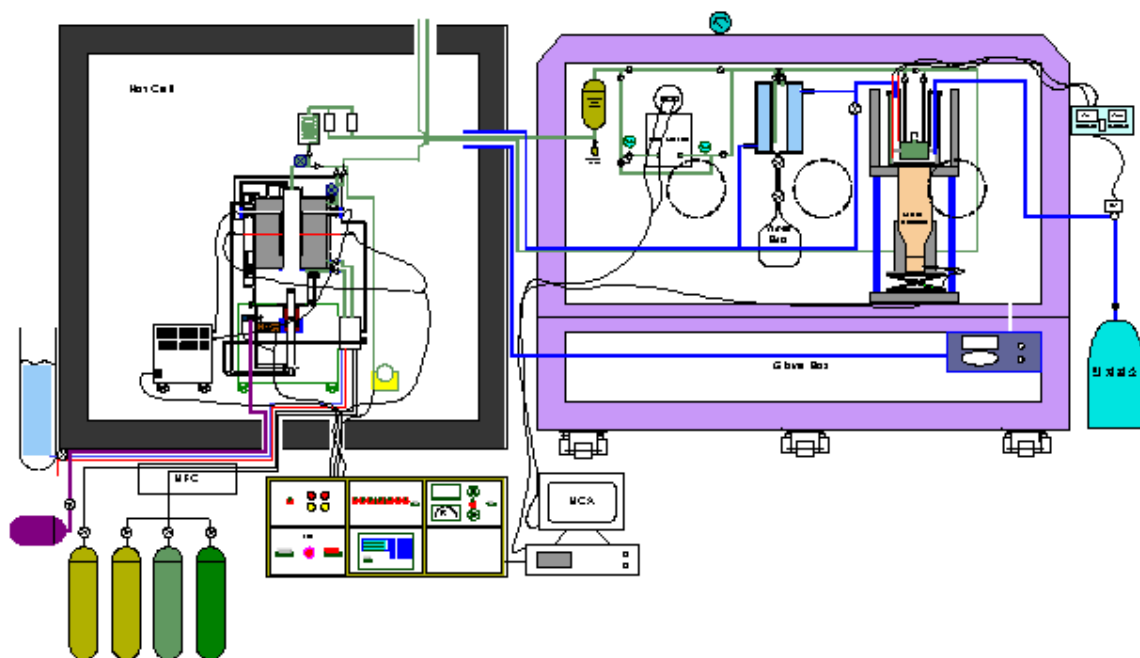


그림 1. 소결체 가열시험 장치 개략도

2. 가열시험장치

2.1 가열시험장치의 개요

고연소도 소결체의 사고모사를 위한 1차 가열로로 전기저항로를 선정하였다. 전기저항로는 핫셀 내부에 설치되어 원격조작을 통한 시험을 수행하기 때문에 핫셀 특수구역에서의 조작성 및 안전규정을 만족하도록 설계되었다. 가열로는 그림 2에서 보는 것과 같이 본체(Frame), LM Guide 및 구동설비, Double Chamber, Heating Element 및 기타 진공 Line 등으로 구성되어 있다. 전기저항로의 주전원 용량은 30 kW로 분당 50℃의 상승이 가능하며 노심부 알루미나 튜브의 재료 특성상 최대 1700℃까지 온도상승이 가능하다. 접근성이 불가능함에 따라 시료의 자동이송 장치가 설치되었으며, 시료 도가니는 알루미나 재질의 나사식 뚜껑을 채택하여 이송시 용이성을 증대시켰다. 가열로 챔버의 안쪽은 이중으로 설계되어 가열 및 단열부인 자켓부와 노심부로 이원화되도록 하고 외부의 이중자켓 안쪽으로 냉각수가 흐를 수 있도록 설계 제작되었다. 자켓부와 노심부는 진공펌프를 통해 시험초기의 불필요한 가스나 공기를 제거하도록 5×10^{-4} 기압의 진공을 유지한 후 Mass Flow Controller(MFC)를 이용하여 정량의 불활성 가스를 장입하면서 시험이 수행되도록 설계 제작

하였다. 가열로는 Controller에 연결되어 핫셀 외부에서 조정되도록 설계 제작되었다. 가열로에서 휘발성 핵분열기체의 포집을 위해 가열가스의 출력부 상단에는 휘발성 핵분열기체의 포획을 위한 TGT와 Filter가 설치되었으며, Filter의 구조는 독일 ITU의 소결체 가열시험장치와 동일한 2단형 구분 Filter로 설계 제작되었다. Filter의 상단부는 Cesium 포획을 위한 Zeolite, 하단부는 Potassium이 코팅된 입자형 침착활성탄이 설치되어 Iodine 포획이 가능하도록 하였다.

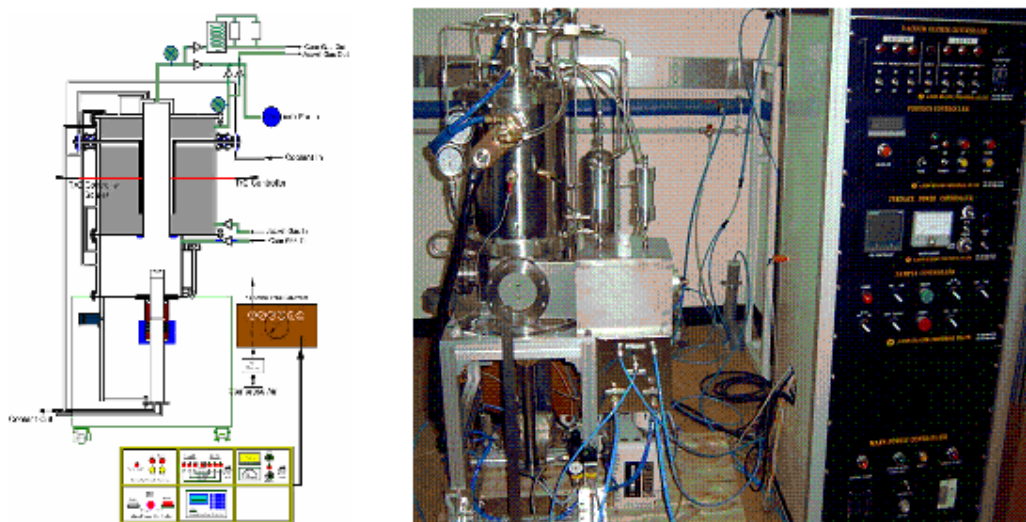


그림 2. 전기저항로 및 제어장치

2.2 가열로

가열로의 외형은 600(W) x 600(D) x 1100(H)mm이며, 전기출력은 30kW이다. 실제 Transformer에서 출력은 15kW 정도이다. 가열 노심관은 수직형 튜브의 전기저항로 방식이며 발열체는 Graphite이다. 가열로의 조작은 압축공기에 의한 솔레노이드 밸브작동을 통해 제어되며, 최대온도가 1,700℃이며 분당 50℃씩의 온도상승이 가능하다. 노심관 챔버는 알루미늄튜브로 1800℃까지 견디는 세라믹제열의 소재이며 외형은 이중의 Stainless steel 자켓으로 냉각이 가능하도록 제작되었다. 가열로의 온도상승은 알루미늄 튜브의 열적 특성에 따라 저온의 경우 급격한 온도상승이 가능하나 고온의 경우 온도 상승량을 작게 설정하여 사용해야하며 열손상을 방지하기 위해 냉각 온도 또한 가능한 작게 설정하여 운전하는 것이 장비의 전선성 유지에 좋다. 그림 3. 가열로의 상단부를 해체한 사진으로 노심관의 알루미늄 튜브, 발열체 및 단열재를 확인할 수 있다. 그림 4.는 Rotary vacuum pump로 단열부와 노심관 내의 공기나 불필요한 가스를 제거하기 위한 진공펌프이다. 진공도는 5×10^{-4} torr이며 220V(단상) 0.4kW 용량이다. 단열부와 노심관과는 완벽한 분리형태로 각각의 진공상태를 잘 유지해야 알루미늄과 단열재의 카본과의 반응을 최소화할 수 있다. 그림 5.는 1,700℃에서 가열된 시료도가니의 가열상태이며, 가열로의 조작에 필요한 압축공기의 불순물 제거와 가압량을 조절할 수 있도록 압축공기 필터가 설치되어 있고, Air Action Valve의 사진이다. 본 가열로에는 핫셀을 관통하는 $\phi 12\text{mm}$ 의 전력선, $\phi 1/4"$ 기체관과 핫셀내의 냉각수관 및 압축공기관으로 구성되어 있다. 냉각수는 분당 10 liter 정도의 공급이 되어야하며, 압축공기는 50 ~ 60 psi 정도의 압력이면 충분하다.

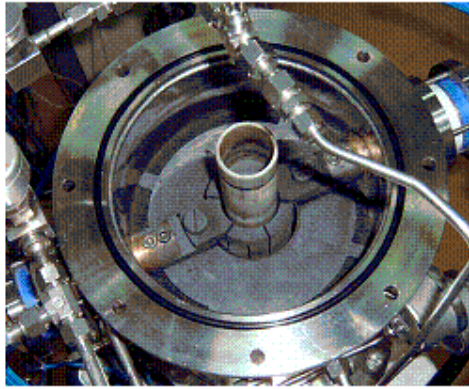


그림 3. 가열로 본체 상단부 해체 사진

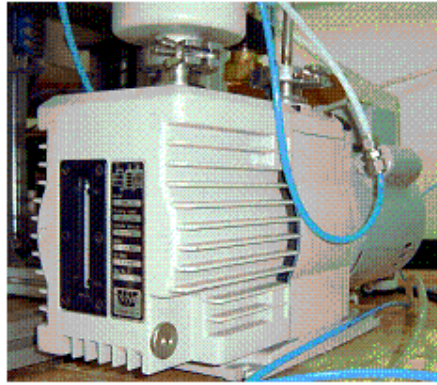


그림 4. 공기제거용 진공 펌프

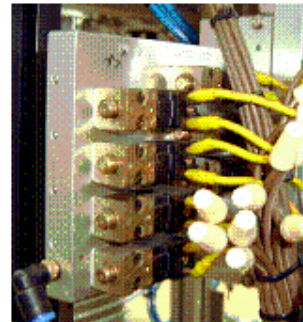
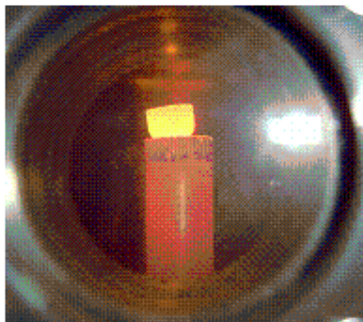


그림 5. 시료도가니 가열사진, 압축공기 필터, Air Action Valve

2.3 조절부 및 필터

가열로의 조절부는 전기제어, 시료이송제어, 진공펌프 제어, 불활성가스의 입출력제어 및 가열량제어로 구분되어 있다. 특히 가열량의 제어는 Eurotherm-2404 controller를 이용하여 RS-232 port를 이용한 PC 제어가 가능하도록 제작되었으며, 가열은 PID값으로 자동제어 된다. 이때 사용되는 프로그램은 itools 소프트웨어를 이용한다. 가열로에는 C-type의 열전대가 가열로 제어부와 연결되어 조절한다. 그림 6은 TGT 기능을 하는 가스냉각로이다. 가열된 소결체에서 발생하는 휘발성 핵분열생성물인 세슘을 포획하는 기능을 하게 된다. 일반적으로 가열로 출구튜브에서 80%가량 침적되나 금속성 세슘은 25℃ 이하를 유지해줘야 포획이 가능하다. 본 냉각로를 이용하여 세슘을 포획한 후 다음단계에 설치되는 휘발성 가스필터를 이용하여 잔여 세슘을 포획하게 된다. 그림 7은 휘발성 핵연료기체의 포획으로 위해 제작되었다. 필터 구조는 2단으로 구성하고 상단은 5A Molecule sieve의 Zeolite를 설치하여 Cesium을 포획하고, 하단은 원자력연구소에서 개발된 Iodine 포획용으로 Potassium[5]이 코팅된 Activated Carbon을 설치하여 Iodine을 포획하도록 제작하였다. Zeolite와 Activated Carbon 사이에는 300 메시의 STS 금속망으로 분리하고 상단과 하단에는 분진 제거를 위한 Hepa 매디어를 설치하였다. 본 필터는 독일 ITU에 설치되어 있는 가열로에 설치된 대응량의 필터와 동일한 제원으로 제작되었으며, 가열로에서 생성되는 휘발성 핵분열기체 포획에 효과적인 역할을 기대하고 있다.

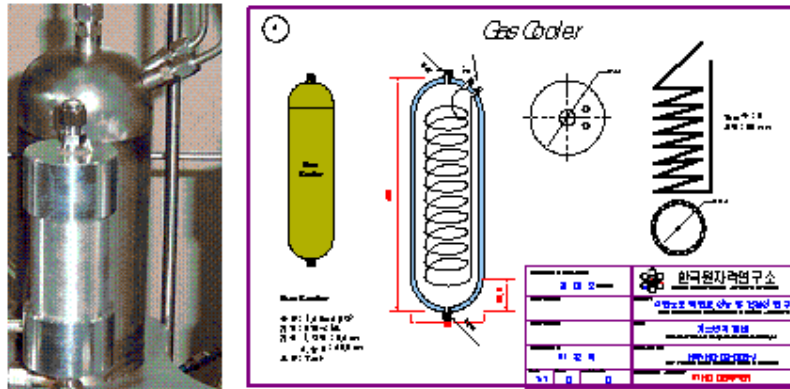


그림 6. 휘발성 핵분열 기체의 냉각로

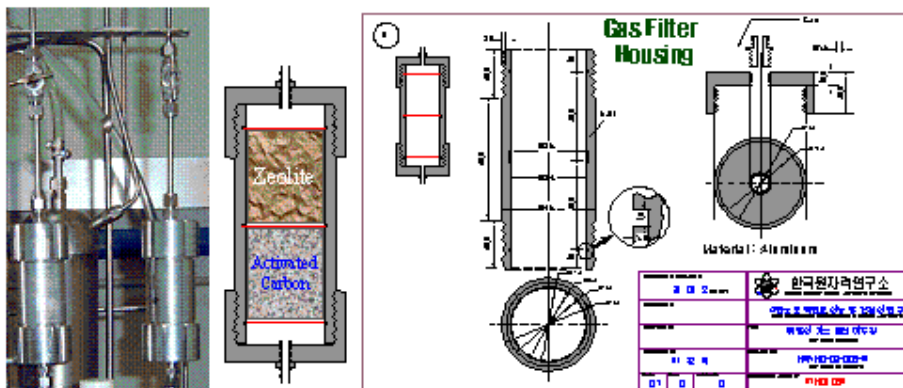


그림 7. 휘발성 핵분열 기체 필터

2.4 가스공급장치

가열로 내에 공급되는 불활성 gas와 산화 환원분위기 조절을 위한 임의의 가스공급을 위해 Gas Flow Controller를 제작하였다. 4 채널의 Mixed gas controller(GMC1000)는 Mass Flow Controller(MFC)를 통해 미량의 가스를 정량공급이 가능하도록 RS-232 port를 통해 PC 조절이 가능하도록 하였으며 프로그램을 통해 시험시간 중 공급된 가스의 총량과 시간당 공급되는 가스의 양을 통제할 수 있다 설치된 4개의 MFC는 분당 200 ml의 CO, 분당 20ml의 CO₂, 분당 1000ml의 He 및 분당 100ml의 H₂의 용량으로 가스 공급이 가능하다. 가열로의 단열부에는 Float 방식의 Controller를 설치하여 분당 200ml 이상의 불활성가스를 공급하여 노심관과 카본과의 반응을 최소화한다. 그림 8.은 Gas Flow Controller의 사진이다.



그림 8. Gas Flow Controller

3. 핵분열기체 포집 및 분석 장치

3.1 핵분열 기체포집 및 분석장치 개요

핫셀 내의 가열로에서 가열된 소결체의 핵분열기체는 핫셀 밖의 Glove Box로 이송되어 기체 분석을 수행하게 된다. 방출된 기체는 Glove Box(그림 9)내의 가스 Mixer를 통해 Beta Counter를 이용한 실시간 측정이 가능하도록 설계되었고, 기체내 수분 제거를 위한 이중 반응조 및 기체 포획을 위한 Cold Trap 반응조가 설치되었으며, 수분제거 및 Cold Trap에 사용되는 액체질소 자동공급장치가 설치되었다. Cold Trap된 핵분열기체는 Gamma Detector에 의해 실시간으로 핵종별 Activity가 측정된다.

Gamma Detector로는 측정 효율이 높은 NaI 검출기와 측정 분해능이 높은 HP-Ge를 선택적으로 사용할 수 있다. 검출기의 기본 프로그램이 실시간 측정이 되지않아서 실시간 핵종별 Activity 측정이 가능한 프로그램을 개발하였다. Cold Trap된 핵분열기체는 측정이 완료된 후 다시 핫셀로 배출되도록 설계되었으며, 압력계 등 측정장비를 이용하여 시설압력보다 음압을 자동 유지하도록 장비의 설치를 통해 시험의 안전성을 확보하였다.

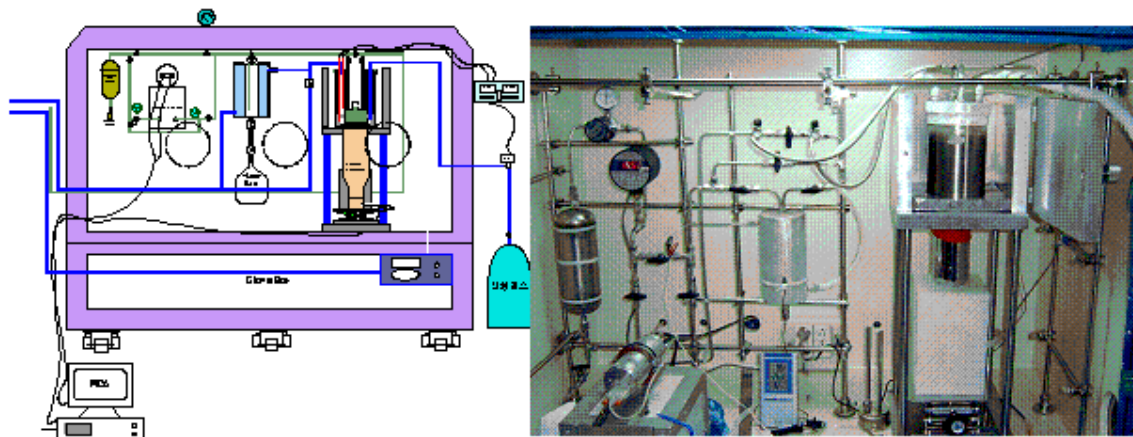


그림 9. 핵분열기체 포집 및 분석장치 개략도 및 사진

3.2 Cold Trap Reactor

가열로에서 발생된 핵분열기체는 Glove Box 내에 설치되어 있는 Water Vapor Trap과 Charcoal Cold Trap을 이용하여 수분제거 및 핵분열기체 포집을 수행하게 된다. 관로에 흐르는 기체는 핵분열기체 이외의 불활성기체와 분위기 유지를 위해 사용된 가스로 인해 수분이 발생하게 되고 수분이 핵분열기체 포집이 되는 Cold Trap에 결빙되어 관로를 막는 현상을 제거하기 위해 설치되었다. Water Vapor Trap은 그림 10.에서와 같이 이중자켓으로 구성하고 외관에 Cold Trap에 사용된 액체질소의 증기를 이용하여 관내 가스의 수분을 응축시키는 역할을 수행하게 된다. 실제 시험결과 액체질소 자동공급 장치에서 발생하는 질소증기는 수분응축을 충분한 $-20^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ 까지

의 온도유지가 가능하다. 액분열기체가 포집되는 Charcoal Cold Trap은 그림 10.에서와 같이 직경 60mm, 높이 30mm, 두께 0.5mm의 수직원통형으로 제작되어 하단에 검출기를 설치할 수 있도록 제작되었다. Cold Trap에 사용되는 Activated Carbon은 기체의 흐름을 원활하게 하기 위해 입자형을 사용하였다.

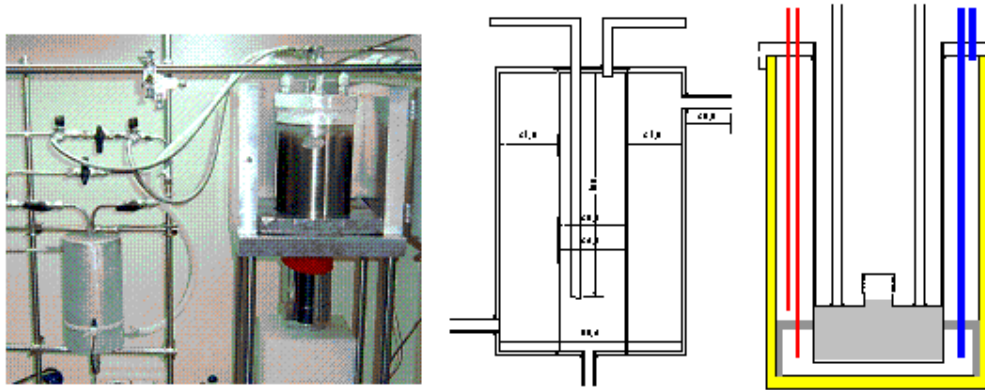


그림 10. Cold Trap Reactor 사진 및 개략도

3.3 액체질소 자동공급장치

가열로에서 발생된 액분열기체가 Charcoal Cold Trap에 포집되기 위해서는 -80°C 이하를 유지해야 Charcoal에 증착되게 된다. 각종 제어장치의 조작에 용이성과 적정량의 액체질소 공급을 위해 자동공급장치를 그림 11.과 같이 개발하였다. 자동공급장치는 액체질소 용기(35liter), Controller 및 극저온용 Solenoid Valve로 구성되어 있다. Controller는 두개의 열전대와 연결된 조절부가 설치되어 상한선과 하한선에 따라 극저온 Solenoid Valve를 여닫게 된다. 이때 설정된 온도는 -188°C 로 극저온에서의 열전대가 효과적인 반응을 온도이다. 이렇게 공급된 액체질소는 Cold Trap의 높이(30mm) 만큼을 유지하게 되며 이때의 증기는 Water Vapor Trap으로 이동되어 가스내 수분을 응축하는데 사용된다.

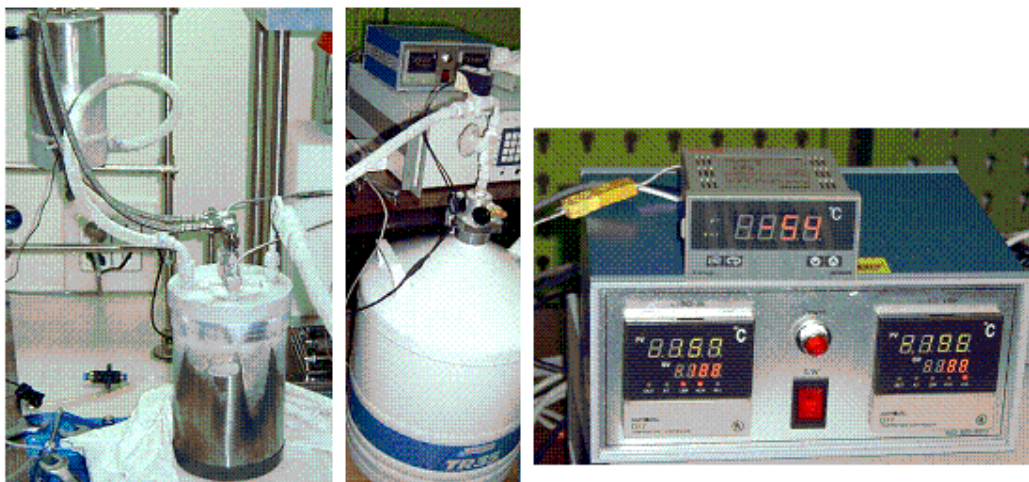


그림 11. 액체질소 자동공급장치

3.4 핵분열기체 분석장치

가열로에서 발생된 핵분열기체는 두가지의 검출기를 통해 분석된다. 1차로 Gas Mixer를 통해 나온 핵분열기체는 Proportional Counter인 Beta Counter를 통해 Kr-85의 실시간 측정이 이루어지고 이후 Charcoal Cold Trap에 포집되어 Gamma Detector를 이용하여 Kr-85와 Xe-133의 시간대별 Activity를 측정하게 된다. Beta Counter는 환경감시시스템을 시험용으로 개조한 Proportional Counter로 검출용기는 Stainless Steel로 170(L) x 100(W) x 54(H) mm, Volume은 900 ml이다. 검출기의 구조는 2개의 Proportional Counter Tube(FH 427F)로 샌드위치 두께 2mm STS Sheet로 분리되어 있으며 Window 면적은 156 cm² 이다. 검출기의 수명은 2x10¹⁰ counts이하이며, 측정범위는 상대로 3.7x10⁸ Bq/m³(related to Xe-133)이다. 자료취득은 분위기 조건은 10℃ ~ 40℃ 사이의 온도범위, 0.86 bar ~ 1.06 bar 사이의 가스압력, 상대습도는 10% ~ 80%이다. 사용전력은 230 V / 50 Hz, 대략 200 VA이다. 그림 12.는 Noble Gas Monitor FHT 59E-xp 와 분석 소프트웨어이다.



그림 12. Noble Gas Monitor(FHT 59E-xp) Beta Counter 및 프로그램

Gamma Detector는 NaI 섬광검출기로 Kr-85와 Xe-133의 Gamma 검출[6]을 목적으로 설치되었다. Cold Trap된 핵분열기체는 Gamma Detector에 의해 실시간으로 핵종별 Activity가 측정된다. Gamma Detector로는 측정 효율이 높은 NaI 검출기와 측정 분해능이 높은 HP-Ge 검출기를 선택적으로 사용할 수 있다. 1차시험은 NaI 검출기를 사용할 계획이다. 검출기의 기본 프로그램이 실시간 측정이 되지 않아 실시간 핵종별 Activity 측정이 가능한 프로그램을 개발하였다. 그림 13은 CANBERRA에서 공급한 NaI 검출기 Head, Preamplifier 2007P, MCA(inspector 2000)로 구성하고 Cold Trap에 설치된 사진이다.

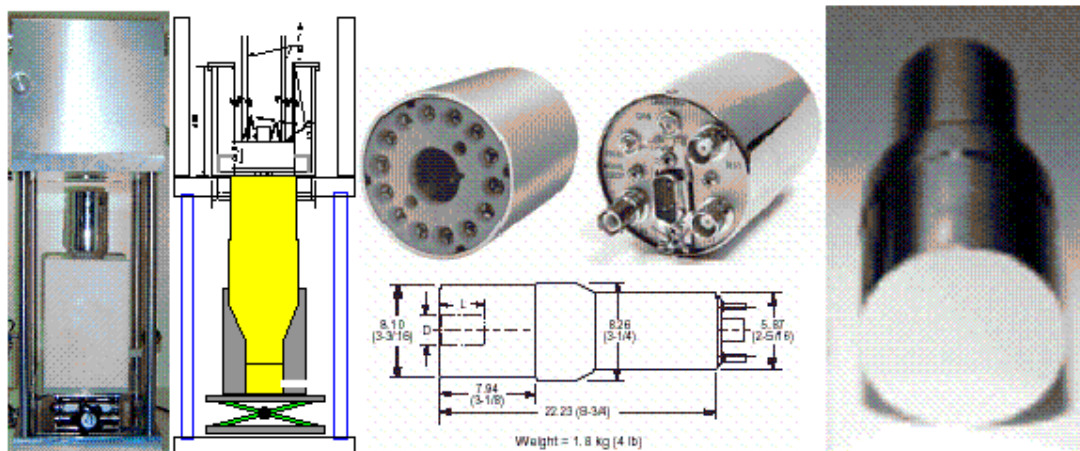


그림 13. Gamma Detector(NaI) 및 설치 개략도

4. 시험장비의 노외 검증시험

제작된 가열로는 조작부와 기밀성을 확인하고 자동온도보정 설정을 통하여 온도의 신뢰성을 유지하여야 한다. 그림 14.는 가열로의 저온 및 고온의 예비시험을 통하여 온도보정시험을 수행한 결과이며, 저온부에서의 온도편차가 30℃, 고온부에서는 5℃이내임을 확인하였다. 이러한 온도 편차는 저온시험의 경우 C-type(0 ~ 2500℃)의 열전대를 사용하면서 열전대의 온도편차 및 열전대 위치와 시료가 위치하는 Heat Zone과의 온도편차를 확인할 필요가 있다. 또한, 시료가 가열로의 Heat Zone에 위치하는지를 확인하였으며, PC를 통한 조절부의 자동 조작성을 확인하였다. 가열로에 장입되는 가스의 조절은 MFC를 통해 일정한 혼합가스의 공급이 필요함으로 시험을 통해 실제 공급량과 누적량을 확인하였다. Glove Box 내의 측정부 중 Beta Counter는 Kr-85 핵종을 시간에 따라 측정이 가능한 비례계수기이다. 계측기의 예비시험으로 Sr-90의 Beta Standard Source를 이용하여 검출기의 성능검증결과 $\pm 5\%$ 오차범위를 만족하는 것으로 나타났다. Gamma Detector(NaI)는 CANBERRA에서 제조된 Multi-Gamma ray Standard(MGS-3) Source를 이용하여 계측기 검교정을 수행하였다. 기타 Water Vapor Trap내에서의 온도, Cold Trap에서의 가스 유동형태를 고려한 Gas Flow의 양, 자동 액체질소 공급장치의 온도 및 작동여부, 검출기의 위치 등 다양한 검증시험이 수행되었다.

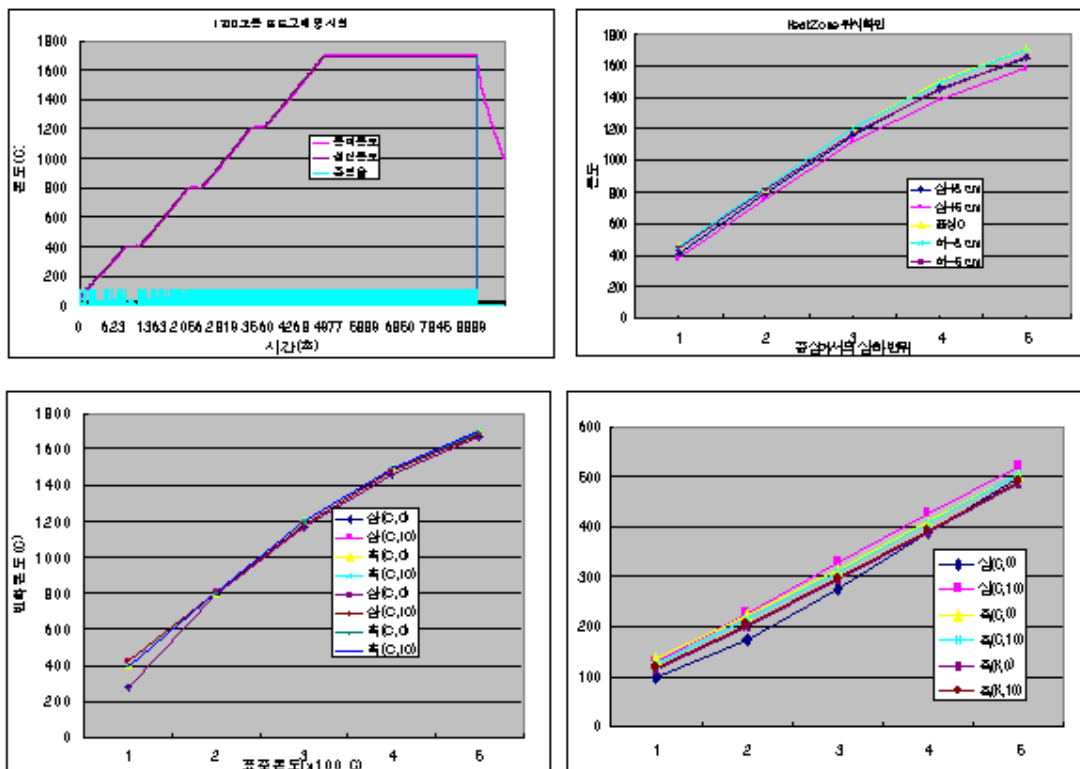


그림 14. Gamma Detector(NaI) 및 설치 개략도

5. 결 론

경수로용 고연소도 핵연료의 성능 및 안전성 평가를 위해서는 국내에서 생산한 고연소도 핵연료의 성능 데이터베이스가 필요하다. 고연소도 핵연료에서의 온도변화에 따른 핵분열기체의 기포생성 및 방출거동을 시험하기 위해 개발된 저온용 1차 가열시험장치는 조사후시험시설의 핫셀 내에 설치됨에 따라 특수구역에서의 조작성 및 안전규정을 만족하도록 설계되었다. 가열시험장치는 Hot-cell 내에 설치될 가열부와 Glove Box 내에 설치될 측정부로 구성되어 있다. Hot-cell 내에 설치될 가열부는 전기저항로 가열방식으로 최대 1700℃까지 분당 50℃ 상승이 가능하도록 제작되었으며, Glove Box 내 측정부는 Kr-85의 실시간 측정을 위한 Beta counter와 Kr-85와 Xe-133측정이 가능한 Gamma counter로 다중 측정방법을 채택하여 설계 제작되었다. 가열로 및 측정기의 조작 및 측정은 RS-232 Port를 이용하여 컴퓨터를 통해 조작된다. 국산 고연소도 핵연료 소결체의 가열 시험을 통한 데이터베이스 구축에 활용될 예정이다.

6. 후기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력연구개발 중장기계획사업의 지원으로 수행되었다. 본 연구를 도움을 주신 핵연료주거시험부 및 DUPIC 핵연료개발부에 감사드립니다.

7. 참고문헌

- [1] G. Ducros et al. "Fission product release under severe accidental conditions, VERCORS 1-6 results" Nuclear Engineering and Design 208, 2001. 4.
- [2] T. Nakamura et al., "Research program(VEGA) on the fission product release from irradiated fuel" JAERI-Tech 1999-036, 1999. 3.
- [3] 林出 烈 外, "조사재연료의 방사성물질방출(VEGA) 실험장치의 운전 및 보수요령서" JAERI-Tech 2001-029, 2001. 3.
- [4] J. H. Evans, "Post-irradiation fission gas release from high burn-up UO₂ fuel annealed under oxidising conditions," JNM 246, 1997. 6.
- [5] 박근일 외 "고온조건에서 사용후 핵연료로부터 핵분열 생성물 방출거동분석," KAERI/AR-676/2003, 2003. 4.
- [6] A. Onozawa et al., "Development of released FP gas measurement apparatus" 30th Enlarged Halden Program Group Meeting 2000. 12.