

# 핵연료조사시험용 하나로 제어장치 개발 Development of New Temperature Control System for Fuel Irradiation Test

강영환, 박승재, 안도희, 김봉구, 최명환, 신윤택, 김영진.

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

## 요 약

국내 유일의 연구용 원자로인 하나로는 국가 중점 주요시설로서 산.학.연이 필요로하는 다양한 재료 및 핵연료의 조사시험을 수행하고 있다. 국내에는 원자력 중장기사업으로 진행되고 있는 개량형 핵연료 개발이 현재 진행 중에 있으며, 이들 핵연료 조사시험을 위하여 계장캡슐이 개발되고 있다. 핵연료 개발자들은 조사시험시 핵연료 온도 측정은 물론 전 조사시험 기간 중 핵연료봉 내부압력과 핵연료봉 길이변화 등의 측정을 요구하고 있다. 본 논문은 현재 상세 설계가 완료되어 제작중인 핵연료 조사시험용 캡슐제어시스템의 주요 설계특성과 장치의 소개, 장치 개발을 위하여 적용된 기술들의 노외 성능 검증시험 결과를 포함하고 있다. 이 장치는 앞으로 국가 중장기 계획에서 요구하는 핵연료 조사시험을 위하여 활용된다.

## Abstract

HANARO is a very important facility in Korea. It offers various types of irradiation tests of materials. As part of the national nuclear R&D program, a series of in-pile tests are also being carried out to develop advanced fuel. Most of the separate testings have been done using a non-instrumented capsule since 1998, new irradiation technology development using an instrumented capsule is highly desirable to provide more qualified data to fuel designers since 2000. User's Instrumentation requirements are monitoring internal pressure and elongation of the fuel rods as well as fuel temperature during irradiation in HANARO.

This article describes design features and out-pile verification tests of the

applied temperature control methodology and soft wares for a new capsule control system development of HANARO as well as the future prospects for the development direction of new facilities and technologies. This system will be used for the fuel experiments related to advanced fuel development programs.

## 1. 서 론

국내에는 원자력 중장기사업으로 진행되고 있는 개량형 핵연료 개발이 현재 진행 중에 있다. 핵연료의 유형은 "신형 핵연료 개발"과제에서 UO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 소결체의 개발[1]을, "핵 비확산성 건식 공정 산화물 핵연료 개발"과제에서 사용 후 UO<sub>2</sub> 소결체의 개발[2]을, "SMART 원자로개발과제"에서는 금속합금 핵연료 등이 있다. 이들 핵연료 조사시험의 주요목적은 기존 핵연료와의 조사성능 평가를 하는데 있으며 이를 위하여 현재 핵연료 계장캡슐을 이용한 조사시험이 진행 중이다. 핵연료 조사시험은 1998년부터 무계장 캡슐을 이용한 조사시험이 진행중에 있으며 2003년부터 보다 정확한 측정 자료를 핵연료 개발자들이 활용할 수 있도록 계장캡슐을 활용한 조사시험이 진행 중이다. 그러나 하나로에서 수행되는 조사시험을 위하여 계장센서를 이용한 온도, SPND 평가만이 이루어지고 있으며, 핵연료의 온도제어나 핵연료의 파손 여부등을 감지할 수 있는 시스템은 아직 이루어지지 않고 있다. 그러므로 본 장치 개발은 이 분야의 선진기술 보유국들의 기술 장벽이 높아 그간 어려움이 많았던 우리로서는 기술적 파급효과는 물론 경제적 파급효과도 매우 크리라 기대된다.

본 제어장치는 그 개발 필요성이 인식된 2000년도에 기본설계[3]가 이루어졌고 2001년 외국의 기술자문을 통한 주요설계방향과 적용기법에 대한 타당성에 대한 검토[4]가 끝나 2002년도 국내 이 분야 전문업체와 공동으로 상세설계가 완성되었으며 2003년도에 본 장치의 제작이 진행 중에 있다.

## 2. 제어장치의 주요 설계특성

이번에 개발된 제어장치는 이용자 요구조건을 고려하여 설계되었는데, 핵연료 계장캡슐 자체의 설계 개념은 종래의 재료조사시험용 제어장치와 유사하다.[5,6] 핵연료 계장캡슐 제어계통에 사용되는 제어용 프로세서는 다음의 하드웨어에 대하여 단일 고장 기준을 만족하도록 이중화기기로 설계되었고 또한 자기진단 및 감시기능, event logging 기능 등과 같은 기능을 포함시켜 사용상의 편리성과 유지보수성을 높일 수 있게 하였다. 장치의 주요 구성은 조사시험 중 핵연료의 온

도제어를 위한 He/Ne 혼합가스 제어계통, 비상시 emergency He 가스 공급계통, 배기 계통 및 핵연료 파손시 이를 처리할 수 있는 delay/trap 계통으로 이루어져 있다. 특히 핵연료시편의 표면 온도를 일정한 범위로 제어할 수 있도록 하며 핵연료 조사시험시 핵연료 파손으로 인한 작업자들의 보호를 위하여 double containment 개념을 도입한 캡슐을 이용한다. 온도제어는 캡슐외통과 핵연료 피복관 사이의 갭에 열전도도가 차이가 많은 헬륨과 네온 가스를 적절히 혼합하여 공급할 수 있도록 하며, 시편의 온도 범위를 가능한 크게 제어할 수 있도록 하였다. 핵연료 파손 감지 시스템은 바스켓내부에 설치된 핵연료 봉이 독립적으로 파손이 일어났는지를 감지하는 시스템이다. 현재 고려하는 운전모드는 크게 수동모드와 자동모드로 구분되어 설계되었다. 이외에도 제어계통은 자료의 저장 및 분석기능을 갖도록 되어있다.

## 2.1. 제어계통의 주요 공정[7]

제어계통의 P&ID를 그림 1에 나타내었다.

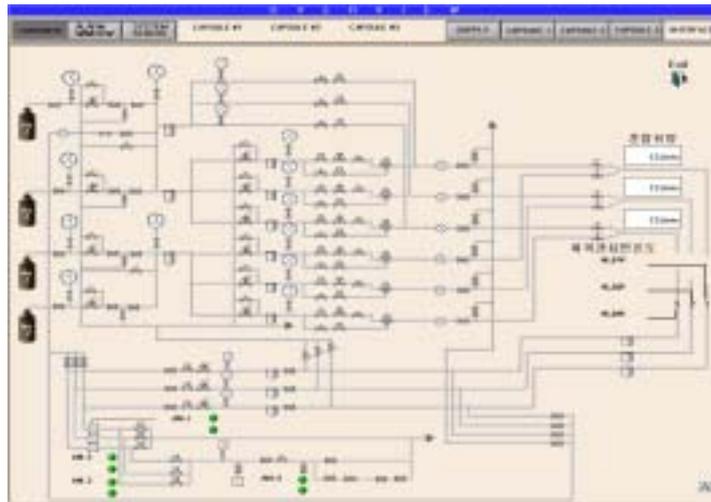


그림 1. P&ID drawing of fuel capsule control system

정상 운전시 헬륨가스는 공급 라인에 연결되어 있는 두 개의 47ℓ 실린더중 하나로부터 계통에 공급되는데, 초기 압력은 약 120 barg이다. 공급압력은 센서에 의해 감시되는데, 압력이 10 barg 이하로 낮은 경우 실린더 교체를 위해 경고 신호를 보낸다. 헬륨 연속적인 공급을 위하여 두 개의 실린더가 연결되어 있다. 공급압력은 RG(regulating valve)에 의해 저압측은 4barg로 감소되고, 고압측은 RV(relief valve)에 의해 보호된다. 4barg의 헬륨은 LF(line filter)를 거쳐 세 개로 나뉘어 지는데, 캡슐에 공급되기 전 RG에 의해 3barg로 다시 낮아지고 분진의 제거를 위해

PF(particle filter)를 통과한다.

자동 운전시 헬륨은 유량조절을 위해 SV(solenoid valve), PV (proportioning valve)와 NV(needle valve)를 통과한다. 이 때 AMV(auto/manual selector valve), 유량계 및 NV를 거쳐 캡슐로 주입된다. 자동운전의 시작은 항상 원자로의 출력이 안정된 후에 운전원의 조정에 의해 이루어진다. 자동운전은 원자로 출력이 적정치를 벗어날 때 종료되며, 이 때 헬륨 비상 주입이 이루어진다. 자동운전의 개시 전 가스 gap에는 100% 헬륨이 충전되어 있어야 한다. 네온 공급 회로는 헬륨 공급 회로와 동일하다.

비상 헬륨 공급 회로는 최소의 기기로 구성되는데, 핵연료 피복관의 고온 트립(trip), 헬륨 공급 압력의 저-저 그리고 원자로 출력의 저 경보에 의해 작동된다. 헬륨 공급 압력은 2차 압력조절 단계를 거치지 않은 4 barg이다.

각 캡슐의 헬륨과 네온 라인에 각각의 차단밸브가 물속에 위치하고 있다. 이 밸브들은 실험 종료시 적절한 도구로 멀리서 닫을 수 있도록 배치되어 있다. 헬륨과 네온 라인은 캡슐 가스 갭 가까이에서 합쳐지므로 지연없이 응답이 빠른 기체 혼합이 이루어진다.

배기 회로는 캡슐로부터의 배기체가 배기계통으로 연결되는 배관의 거리는 약 20m이다. 먼지제거용 입자 필터가 하단부의 기기 보호를 위해 설치되며, 출구의 과압(>10barg)을 대비하기 위해 RV도 설치되어 있다. 배압 RG는 캡슐 출구압력을 일정한 수준으로 유지하기 위하여 사용하는데, 이는 일반 RG와 반대되는 역할이다. 압력계에 의해 지시되는 캡슐 출구 압력은 고 또는 저압력 경보를 포함할 수 있다. 이 때 기체는 방사능감시기 주위에 감겨있는 차폐된 튜브 코일을 통과하게 되는데, 여기서 핵분열기체생성물을 감시하게 된다. 정상운전시 배기체는 공용의 배기라인을 통하여 배출된다. 핵분열생성물이 감지되는 경우 배기체는 delay/trap 계통으로 전환된다. 이 경우 핵연료봉 핀이 손상된 상태로 장시간 운전하는 것은 바람직하지 않으므로 실험과 원자로 운전의 종료가 요구될 것이다.

delay/trap 계통은 각각의 캡슐을 독립적으로 제어하도록 설계되어 있으므로 하나의 캡슐이 파손되는 경우에도 다른 두 개의 캡슐은 계속 운전할 수 있다. 감쇄계통의 주기기는 방사성기체를 수집하여 감쇄기간 동안 저장하는 5ℓ의 차폐 지연용기이다. 방사성 기체를 함유하고 있을 때 용기는 주 라인으로부터 차단되는데, 지연용기내 기체의 방사능 준위는 부착된 방사능감지기에 의해 측정된다. 고준위 경보는 캡슐 출구상의

SV를 닫게 한다. 지연용기는 정상시 진공상태로 유지시켜 계통 중지 전에 오염 기체를 최대로 수용하게 한다. 이 용기에 수용할 수 있는 배기체의 양은 정상운전시 한 개의 캡슐로부터는 18시간, 비상 헬륨 주입시는 2시간 그리고 캡슐의 flushing 시는 15분간에 해당된다. 샘플과 진공계통은 용기를 진공으로 유지시키고, 정확한 방사능 분석을 위해 용기내 시료를 채취할 때 사용된다. 지연용기 내로 방사성기체가 수집되고 감쇄되는 동안 용기는 차단된다. 이 차단 밸브는 시료 채취, 감쇄 후 공통 배기라인으로 배출 그리고 오염 기체를 트랩(trap)으로 통과시킬 수 있도록 설계된다.

기체트랩계통은 활성탄 층을 이용하여 상온에서 오염된 기체중의 iodine 화합물을 제거하는데 사용된다. 이 트랩은 카트리지 형식으로 교환이 가능하도록 설계되었으며, 차폐되어야 하고 필요시 글로브박스내에 설치될 것이다.

## 2.2. 시스템의 설비 구성도

주요 설비 구성도는 그림 2와 같다. 핵연료캡슐제어장치는 핵연료캡슐 조사 시험에서의 가스공급, 가스혼합, 가스배출, 핵연료캡슐과 연결부, 주제어장치 및 감시제어 모니터링 장치 등 핵연료캡슐 조사시험에 따른 주요 특성별 요소로 분리하여 제작함으로써 실험의 효율을 극대화 시킬 수 있도록 제작된다.

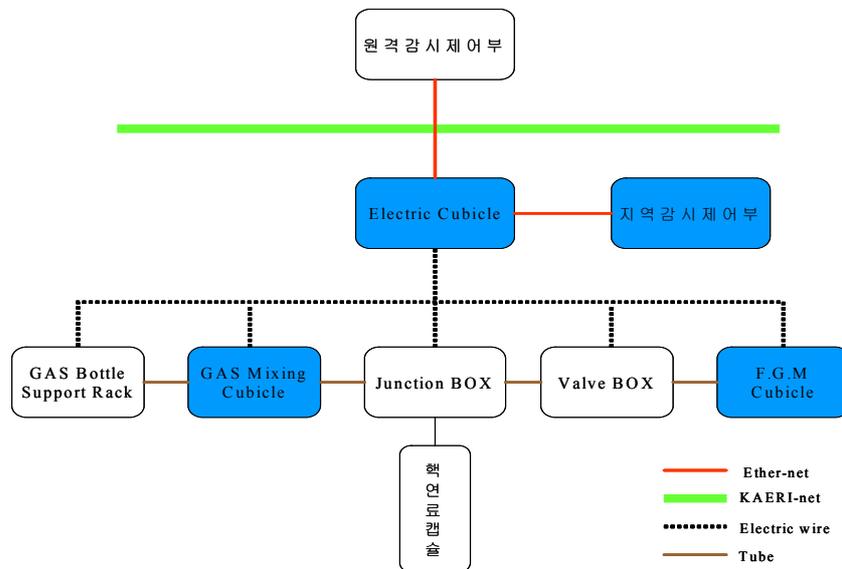


그림 2. 핵연료제어장치 구성도

구성요소는 감시, 계측, 제어를 수행하는 주제어장치(Electric Cubicle), 실험

데이터를 모니터링, 저장 및 분석하기 위한 사용자 인터페이스 장치인 원격 감시제어부/지역감시제어부, 그리고 캡슐의 온도를 제어하기 위한 계장 장치로 되어 있다.

각 요소별 특성은 다음과 같다.

■ Network

Ether-net 통신을 활용한 주 제어장치와 지역 감시 제어장치간의 통신을 2중화하여 하나로 외부에서 실험 장치를 제어 및 모니터링 할 수 있도록 KAERI Network를 이용하였고, 원격 감시장치의 확장이 용이하도록 하였다.

■ 원격 감시 제어부 및 지역 감시 제어부

핵연료캡슐제어장치는 휴먼 인터페이스(HMI)를 구현하여 자동제어, 원격 제어가 가능하도록 하였으며, 실험 변수의 모니터링 및 저장, 시스템 상태를 모니터링 할 수 있도록 하였다.

■ Electric Cubicle

주제어장치는 CPU/Power supply를 2중화하여, 국내 및 해외 원전에서 사용중인 제어장치와 같이 신뢰성 및 안정성을 확보하였으며, 주요변수의 경보상태를 표시하는 Annunciator Window를 장착하였다.

■ Gas Bottle Support Rack

장기 운전을 대비하여 헬륨 및 네온가스 공급부를 2중화된 Bottle 연결로 Gas Bottle 교체가 용이하도록 하였다.

■ Gas Mixing Cubicle

온도조절을 위하여 헬륨과 네온 가스 혼합비를 제어량에 따라 자동제어와 수동제어 모드로 선택 운전할 수 있도록 하였고 비상시를 대비한 Fail Safety 개념을 도입하였다.

■ Junction Box 및 Valve Box

Junction Box는 핵연료캡슐과 제어장치간의 연결부로서 캡슐로부터 인출된 튜빙과 신호선을 중계하도록 하였으며, 진공 개념을 도입하여 핵연료 파손시 가스누설을 방지할 수 있도록 하였다. Valve Box는 핵연료캡슐과 F.G.M Cubicle의 연결부로서 핵분열 가스 검출시 및 실험 종료 후 핵연료캡슐을 안전하고 신속하게 분리할 수 있도록 하였다.

■ F.G.M Cubicle

핵연료캡슐로부터 유출되는 배기체중의 핵분열기체를 방사능감지기(Fission Gas Monitor)로 감시하고 배기체의 유로를 공용의 배기라인 또는 delay/trap 계통으로 제어할 수 있는 주요부로서 Fail Safety 개념이 반영되도록 하였다.

### 3. 노외 설계검증시험

#### 3.1. 핵연료 온도제어 확인시험[8]

핵연료 캡슐 온도제어를 위하여 적용된 기법은 이용자 요구조건을 만족시킬 수 있는지와 하나로에 적용하기 전에 안전하게 조사시험을 할 수 있는지를 평

가하는 일이다. 본 실험에서 사용한 모캡 캡슐은 열원인 핵연료 봉을 모사하도록 캡슐내부에 히터(3.4kW)를 설치하여 만든 모의 핵연료 봉을 이용하였고, 핵연료 표면 온도 제어와 각 부품의 온도 측정을 위하여 열전대를 설치하였다. 모캡 캡슐을 이용하여 하나로 수력학적 조건을 모사할 수 있는 설계검증시험을 수행하였다. 주요 시험변수로는 헬륨/네온가스의 유동량(50 and 100 cc/min), 유동가스 압력, 히터출력(1 to 3.4kW) 및 혼합 가스 비이다. 이 시험으로부터 혼합가스 유동량과 가스압력은 무시할 수 있을 정도의 온도 변화를 보였으나, 히터출력과 혼합가스 비는 그림 3에 보는바와 같이 캡슐의 온도에 큰 의존도를 보이는 것으로 확인되었다.

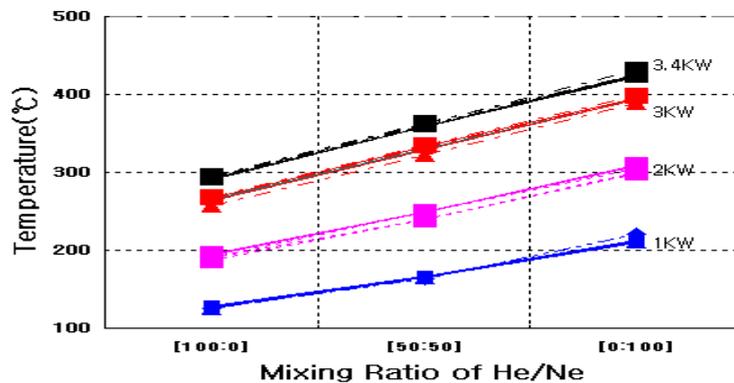


그림 3. 가스혼합비와 출력이 캡슐온도에 미치는 영향[8]

### 3.2. 핵연료 제어장치의 소프트웨어 확인 및 검증[9]

핵연료 제어장치 소프트웨어의 확인 및 검증 업무는 하드웨어 설계팀 및 소프트웨어 설계팀과는 독립적인 확인 및 검증 조직에 의해 수행되었다.

핵연료 제어장치 소프트웨어의 생명주기를 관련 표준에 따라 요구사항 단계, 설계단계, 구현단계, 시험단계, 설치 및 검증단계, 운전 및 유지보수 단계, 폐기 단계로 정의하고 각 단계에서 이루어질 소프트웨어 확인 및 검증 업무와 수행 기법을 기술한 확인 및 검증 계획서를 작성하였다.

소프트웨어 확인 및 검증 계획에 따라 수행된 대표적인 업무 및 그 결과는 다음과 같다:

- 소프트웨어 검토 및 평가, 추적성 분석, 인터페이스 분석: Fagan Inspection 기법을 통해 소프트웨어 및 인터페이스가 관련 표준과 부합함을 확인하였으며, 추적성 분석을 통해 각 단계의 결과물이 일관성을 가지고, 부적절하게 추가되거나 누락된 design feature가 없음을 확인하였다.
- 소프트웨어 시험 계획 및 절차 평가, 소프트웨어 시험 평가: 소프트웨어 시험 계획 및 절차가 반드시 시험되어야 할 소프트웨어 항목들을 올바르게 시험하도록 수립되었음을 확인하였다. 시험 수행 결과 평가를 통해 계획된 시험이 완전하고 올바르게 수행되었음을 확인하였으며 소프트웨어가 만족해야 할 목표들에 부합함을 확인하였다.

#### 4. 결론

핵연료 조사시험용 캡슐제어시스템은 상세설계가 성공리에 완료되어 2003년도 현재 제작중이다. 주요 적용기술에 대한 노외 검증시험을 통하여 온도제어에 적용된 기본 설계기술이 타당함을 확인하였다. 핵연료 제어장치 소프트웨어의 확인 및 검증작업을 통하여 소프트웨어 및 인터페이스가 관련 표준과 부합함을 확인하였다.

앞으로 수행될 주요 연구내역은 크게 2가지이다. 첫째는 제작후 소프트웨어 설계검증 작업이고 둘째는 하나로에서 최종 검증시험을 수행하는 일이다.

##### 가. 제작후 소프트웨어 설계검증

하나로 핵연료 제어장치에 대한 확인 및 검증업무중 운전 및 유지보수단계에 수행되어야 할 업무를 제어장치 제작 후 하나로에서 수행할 계획이다. 주요 고려하여야 할 업무는 다음과 같다.

- 환경적 요인에 의한 새로운 제약사항 및 위험요소에 대한 평가
- 운전 절차 평가
- 소프트웨어 변경 사항 평가
- 확인 및 검증 업무 반복 (필요한 경우)

##### 나. 하나로에서의 캡슐 설계검증시험

하나로 가동조건에서의 양립성과 온도제어 등의 적용 기술에 대한 최종 검증 및 이용자 요구사항에 대한 확인시험이 진행될 계획이다. 주요 변수를 제어봉 위치와 연구로 출력에 따른 온도로 하고, 제어계통을 자동모드로 전환시 온도제어 능력과 헬륨/네온가스 혼합비에 따른 효과 등이 설계검증시험으로 확인될 계획이다.

이러한 시험결과로부터 핵연료캡슐을 최적화하여 최종 설계 제작하고, 2004년 하나로 노심 조사공에 넣어져 이용자 요구조건에 맞는 조사시험이 수행될 예정이다. 이를 통해 핵연료 개발자들이 필요한 노내 특성자료들을 제공받을 수 있게 된다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력 중장기 사업 중 조사시험용 캡슐개발 및 활용 연구과제의 일환으로 수행된 연구결과입니다.

## 참고문헌

1. D.H. Kim, et al., Non-instrumented Capsule Design of HANARO Irradiation Test for the High Burn-up Large Grain UO<sub>2</sub> pellet, Proc. of the KNS Autumn Mtg., Suwon, Korea, Oct. 2001.
2. I.H. Jung, et al., Characterization of Irradiated Simulated DUPIC Fuel, Metals and Materials International, Vol.7, No.5, pp513-518, 2001.
3. 내부문서, 핵연료제어장치 예비기술시방서, HAN-IC-DD-SP-01-008, KAERI, Korea, 2001.
4. J.W. Hutchinso and J.D. Page, Control&Instrumentation Aspects of Instrumented Fuel Capsule, KIFC/DN0, RWE NUKEM(2002)
5. D.H. Ahn, et al., Conceptual Design of the Control and Instrumentation System for an Instrumented Fuel Capsule, Proc. of the KNS Autumn Mtg., Suwon, Korea, Oct. 2001.
6. Y.H. Kang, et al., Development of New I&C System for Fuel Irradiation Tests, HANARO Workshop 2003, Taejon, Korea, May 2003.
7. 내부문서, 핵연료제어장치 설계문서, HAN-IC-DD-DR-KAERI/BNF-02-001, Korea(2003).
8. Y.H. Kang, et al, Out-pile characteristics of basic designed capsule mockup, Proc. of KNS Spring Mtg., Korea, May 2002.
9. 내부문서, 핵연료제어장치 예비기술시방서, HAN-IC-DD-IT-KAERI /BNF-02-004, Korea, 2003.