

## 핵연료 조사시험용 캡슐개발 현황

### Status on Capsule Development for the Fuel Irradiation Test in HANARO

김봉구, 신운택, 박승재, 박종만, 이철용, 정홍준, 배기광, 강영환

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

핵연료주기기술 및 원자로 재료 개발을 위해서 하나로를 이용한 많은 조사시험이 요구되고 있다. 이에 따라 하나로에서의 조사시설 개발을 위한 설계 및 제조 기술을 확립하기 위해 연구를 진행하고 있다. 하나로에서 핵연료 소결체 조사시험을 위한 캡슐개발이 그중 하나이다. 핵연료 소결체 조사시험을 위한 무계장캡슐의 상세 설계에 따라 무계장캡슐의 제작이 완료되었다. 이 무계장캡슐은 1999년과 2000년에 실시될 모의 DUPIC 핵연료 소결체 및 DUPIC 소결체의 조사시험에 이용될 것이다. 그리고, 이 조사시험 결과는 개량형 경수로 핵연료를 하나로에서 조사시험을 하는데 필요한 기본자료를 제공하게 된다. 또한, 열전대와 SPND가 장착될 계장캡슐의 개념설계와 계장을 위한 기술개발을 진행하고 있다. 이 계장캡슐은 2000년 이후에 시행될 개량형 경수로 핵연료와 DUPIC 핵연료 등의 조사시험에 활용될 예정이다.

#### Abstract

The R&D programs on the nuclear reactor materials and nuclear fuel cycle technology require numerous in-pile tests in HANARO. Extensive efforts have been made to establish design and manufacturing technology for the development of irradiation facilities. One of them is the capsule development for the irradiation test of nuclear fuel pellet in HANARO. Detailed design of a non-instrumented capsule for irradiation testing of oxide fuel was finished and this capsule was fabricated. This capsule will be used for in-pile testing of simulated DUPIC fuel pellets at the year 1999 and DUPIC fuel pellets at the year 2000. This test will also be performed to provide the essential information for the advanced PWRs fuel irradiation testing in HANARO. The conceptual design of the instrumented capsule, in which sensors such as thermocouple and SPND(Self Powered Neutron Detector) will be installed, and the development of instrumentation technology are also of the ongoing activities. This capsule will be utilized for irradiation testing of advanced nuclear fuel such as advanced PWRs and DUPIC fuel after the year 2000.

## 1. 서론

하나로는 1995년 이후 5년 동안 성공적으로 가동되고 있다. 하나로 노심에는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 핵연료 및 재료 조사를 위해서 육각형의 CT, IR1, IR2 조사공, 원통형의 OR 조사공이 있으며, reflector 영역에 LH 조사공이 있다. 한국원자력연구소에서는 1994년 이후 핵연료 및 재료 조사시험을 위한 캡슐 개발을 진행해 오고 있다. 하나로의 CT 조사공에서 재료 조사시험, 조사공의 중성자속분포 측정을 위한 무게장캡슐이 설계, 제작되었고, 조사시험이 성공적으로 수행되었다[1,2]. 그리고, 재료 조사시험을 위한 무게장 및 계장 캡슐이 설계, 제작되었고, CT와 IR2 조사공에서 성공적으로 조사시험이 완료되었다[3-8]. 이러한 캡슐 개발의 목적은 조사공의 핵적 특성과 캡슐을 위한 설계자료를 얻기 위한 것이었다.

핵연료주기기술 개발을 위해서 하나로를 이용한 조사시험 요구가 증대되고 있으며, 이를 위한 실험이 계획되어 있다. 이에 따라 하나로에서 핵연료 조사시험용 캡슐개발을 위해 설계, 제작 기술을 확립하기 연구를 수행해 왔다. 현재, 핵연료 조사시험을 위한 무게장캡슐과 계장캡슐, 계장기술 등을 개발 중에 있다. 이 중 DUPIC 핵연료 조사시험을 위한 무게장캡슐이 성공적으로 설계, 제작되었으며, 이는 하나로 조사공에서 모의 DUPIC 핵연료, DUPIC 핵연료를 조사시험하기 위해 활용될 예정이다.

본 논문에서는 하나로에서 DUPIC 핵연료 조사시험을 위한 무게장캡슐 개발과 핵연료 조사시험을 위한 계장캡슐 및 계장기술 개발 현황과 향후계획에 대해 기술하였다.

## 2. DUPIC 핵연료 조사용 무게장캡슐 개발

### 2.1. DUPIC 핵연료

DUPIC 핵연료 주기기술은 한국, 캐나다, 미국 및 IAEA가 참여하는 국제공동연구이다 [9]. DUPIC 핵연료의 개념은 재처리과정을 거치지 않고 경수로용 사용후핵연료를 CANDU 원자로에 재사용하기 위한 것으로, 비핵확산성을 가진 혁신적인 핵연료로 국제적인 관심이 증대되고 있다[10]. 이러한 국제공동연구의 주목적은 연구용 원자로에서 조사시험을 통하여 DUPIC 핵연료의 성능을 입증하는 것이다. 캐나다 AECL에서는 DUPIC 핵연료의 제조를 성공적으로 수행하였으며, NRU에서 조사시험이 진행될 예정이다. 현재 한국원자력연구소에서는 경수로 사용후핵연료를 이용하여 DUPIC 핵연료를 제조하기 위한 준비를 진행하고 있다[9,11].

### 2.2. 무게장캡슐의 설계/제조

Fig. 2에서 보는 바와 같이 하나로 구동핵연료는 36 핵연료봉을 갖는 hexagonal 형태의 핵연료집합체와 18 핵연료봉을 갖는 원통형 핵연료집합체가 있다. DUPIC 모의 핵연료 조사시험을 위한 무게장캡슐은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 원통형 핵연료집합체와 유사하게 설계되었다. 이 캡슐의 외경은 56 mm, 총 길이는 960 mm이다. 그리고, bottom guide, 외부관 및 내부관, top guide 및 조사핵연료의 구조로 이루어져 있다. 경수로 사용후핵연료로부터 제조되는 DUPIC 핵연료는 높은 방사성 때문에 원격으로 취급 및 조립되어야 한다. 이에 따라 무게장캡슐의 각 부분이 분리될 수 있으며, hot cell에서 원격으로 조립, 분해 및 취급되도록 하였다. 먼저 원격조립 및 취급의 가능성 확인과 노외 열수력시험을 위해 예비설계에 따라 모의 무게장캡슐을 제작하였다. 그리고, 노외 열수력시험 결과에 따라 부분적인 설계변경을 하여 무게장캡슐을 개발하였다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 조사핵연료 구조는 3 개의 조사핵연료봉으로 이루어져 있다.

1개의 핵연료봉에는 5개의 핵연료소결체, 4개의 알루미늄 절연체와 Inconel 스프링으로 구성되어 있다[12-14]. 조사핵연료 피복관의 외경은 12.7 mm, 길이는 200 mm이다. 핵연료 소결체는 다음과 같은 2 종류이다.

- 5 소결체 :  $UO_2$ (enrichment 1.47%U-235)

- 10 소결체 :  $UO_2$  + 첨가제(경수로 사용후핵연료 - 초기농축도 3.21%U-235, 연소도 35,000 MWD/MTU, 10년 냉각 - 고체핵분열물질 모사)

선출력과 모의 핵연료 소결체(10 소결체)의 조성은 DUPIC 핵연료와 동일하다. 그리고, 하나로 조사공은 OR4로 선택되었다. 조사 핵연료봉의 평균 및 최대 선출력은 하나로 출력 20 MW에서 각각 370 W/cm와 407W/cm로 평가되었다.

### 2.3. 무계장캡슐의 열수력시험

압력강하 실험은 캡슐의 설계요건을 검증하고, 원자로 노심 유동관과의 수력학적 양립성은 입증한다. 그리고, 진동시험과 내구성실험을 통하여 캡슐 및 유동관의 구조적 건전성을 확인하고, 유체흐름에 의한 진동으로 무계장캡슐에 마모 발생여부를 각각 확인한다. 모의 무계장캡슐을 이용하여 압력강하, 진동실험 및 내구성 실험이 수행되었다[14]. 그리고, 이 결과에 따라 무계장캡슐의 설계를 일부 변경하여 무계장캡슐을 제작하였다. 이 무계장캡슐을 이용하여 냉각수 유량 5-11 kg/s 및 40 °C 조건에서는 압력강하 및 진동실험을, 유량 10.6 kg/s 및 40 °C에서는 10 일간 내구성실험을 수행하였다. Fig. 5에서는 압력강하실험결과를 보여주고 있으며, 이 결과는 하나로 냉각수에 대한 설계요구조건을 만족하였다. Fig. 6의 진동실험결과에 의하면, 진동수는 14-18.5 Hz, 최대 변형량은 50  $\mu$ m이하로 나타났다. 내구성실험을 수행한 후 무계장캡슐을 분해하여 관찰한 결과, 무계장캡슐의 건전성에 영향을 미치는 마모가 없음을 확인하였다.

## 3. 계장기술과 계장캡슐 개발

### 3.1. 계장기술

원자력발전소의 정상가동동안 핵연료 성능과 관련한 인자들은 핵연료 중심 및 표면온도, 피복관 표면온도, 핵연료봉 내압, 핵연료봉의 치수변화와 피복관 표면의 부식층 두께 등이 있다. 그리고, 이들은 연구용 원자로에서 조사시험을 통해서 측정될 수 있다. 핵연료 성능은 조사시험에 의해서 증명될 수 있으며, 측정된 data들은 핵연료 설계와 연구에 필요한 정보를 제공할 수 있다.

연구용 원자로에서 핵연료조사시험을 위한 계장 및 재계장 기술들은 Halden, JAERI, CEA 등에서는 이미 개발하여 활용하고 있다[15]. 그러나, 한국원자력연구소에서는 계장기술을 개발을 시작하고 있다. 현재 핵연료조사시험을 위한 계장캡슐은 개발 중에 있으며, 또한 핵연료 성능 인자들의 연속적인 측정을 위한 기기와 기술을 개발 중에 있다. 이들 중, 핵연료의 열전도도를 평가하는데 활용되는 핵연료의 중심 및 표면온도를 조사되는 동안에 측정하기 위해서는 핵연료 소결체에 중앙 hole과 표면 홈을 가공하여 열전대를 설치해야 한다. 한국원자력연구소에서는 핵연료 소결체의 hole과 홈을 가공하기 위한 drilling/grooving 기기를 Fig. 7과 같이 개발하였다. 현재 알루미늄을 이용하여 기기의 시운전을 수행하고 있으며, Fig. 8은 알루미늄을 이용하여 drilling과 grooving한 결과를 보여주고 있다.

### 3.2. 계장캡슐

한국원자력연구소에서는 현재 DUPIC 핵연료, 개량형 경수로핵연료, 금속핵연료 등의

핵연료 개발과 관련하여 조사시험이 계획되고 있다. 이들의 조사시험 계획에 따르면, 2000년부터 조사시험을 수행하기 위한 계장캡슐이 요구되고 있다. 이 실험은 하나로에서 수행되는 조사시험 중 계장캡슐을 이용하는 첫번째 실험이 될 것이다. 이를 위해 계장캡슐과 data 측정 시스템의 설계가 진행되고 있다. 계장품으로는 핵연료봉 온도와 중성자속을 측정하기 위해 열전대와 SPND가 설치될 예정이다. 여기서 개발된 계장캡슐은 개량형 경수로 핵연료 및 DUPIC 핵연료 등의 조사시험에 활용될 것이다. 이러한 목적에 따라 계장캡슐을 개발하기 위해 국제협력을 계획하고 있으며, 아울러 캡슐 제어 및 취급시스템과 같은 관련시설 개발도 함께 수행될 것이다. 그리고, 계속해서 핵분열성기체 압력검출기, 치수변화측정장치 등과 같은 기기들도 개발할 예정이다.

#### 4. 향후 계획

1999년부터 무계장캡슐을 이용한 DUPIC 핵연료의 조사시험이 시작될 예정이며, 2000년부터는 계장캡슐을 이용한 조사시험을 계획하고 있으며, 개량형 경수로 핵연료도 2000년부터 계장캡슐을 이용한 조사시험을 계획하고 있다[16]. 이외에도 여러 종류의 핵연료 개발에 따라 조사시험이 계획되고 있다. 이와 아울러 조사시험동안 핵연료봉 내압, 치수변화 등을 측정할 수 있는 계장캡슐들도 개발할 예정이다.

#### Acknowledgement

본 연구는 1998년도 과학기술부의 원자력연구 개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Y.S. Kim, et al., Design and Fabrication of Non-instrumented Capsule, KAERI/TR-509/95, KAERI, 1995.
2. Y.H. Kang, et al., Irradiation Test and Post-Irradiation Examination of Reactor Material using Non-Instrumented Capsule in HANARO, KAERI/TR-1164/98, KAERI, 1998.
3. 강영환 외, 재료 조사시험용 캡슐 및 관련 설비의 안전성 분석보고서, KAERI/TR-985/98, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1998.
4. K.N. CHOO, et al., Irradiation Tests of Reactor Materials using a HANARO Instrumented Capsule, Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Seoul, Korea, Oct. 1998.
5. 주기남 외, 재료조사시험용 계장캡슐(97M-01K) 설계,제작 보고서, KAERI/TR-1226/99, 한국원자력연구소, 1999.
6. K.N. Choo, et al., Irradiation of Reactor Materials Using an Instrumented Capsule in HANARO, The 6th Asian Symposium on Research Reactor, March 29 to 31, 1999, Mito, Japan.
7. Y.H. Kang, et al., Structural Analysis for the HANARO Irradiation Capsule through Vibration Test, The 6th Asian Symposium on Research Reactor, March 29 to 31, 1999, Mito, Japan.
8. 김봉구 외, 중성자속 측정용 무계장캡슐 제작, KAERI/TR-1249/99, 한국원자력연구소, 1999.
9. M.S. Yang, et al., Prospects and Challenges of DUPIC Fuel Development in Korea, 11th PBNC(May, 1998, Banff, Canada)

10. M.S. Yang, et al., Characteristics of DUPIC Fuel Fabrication Technology, Proceedings of International Conference on Future Nuclear Systems, Global 97, Yokohama, Japan, P. 535, 1997.
11. K.K. Bae, et al., Status of DUPIC Fuel Development in Korea, Workshop on Advanced Reactors with Innovative Fuels, PSI, Switzerland, 21-23, Oct. 1998.
12. I.H. Jung, et al., Temperature Analysis of DUPIC Fuel for Irradiation Test, Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, May 1998.
13. H.S. Park, et al., Design Analysis of Simulated DUPIC Fuel for Irradiation, Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Oct. 1998.
14. K.K. Bae, et al., Design and safety Analysis Report for Irradiation of DUPIC Fuel, KAERI/TR-1157/98, 1998.
15. 김봉구 외, 핵연료 조사시험용 계장기술 현황분석, KAERI/AR-513/98, 한국원자력연구소, 1999.
16. H.D. Kang, et al., Review and Recommendation for the Maximum Utilization and Reasonable Management of the HANARO Reactor, MOST, 1998.

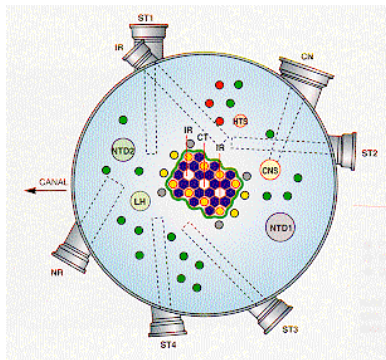


Figure 1. Core Configuration of HANARO.

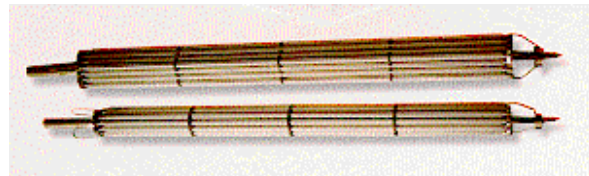


Figure 2. HANARO fuel assemblies, 36-element hexagonal fuel assembly and 18-element circular fuel assembly, with three spacers on each fuel assembly.

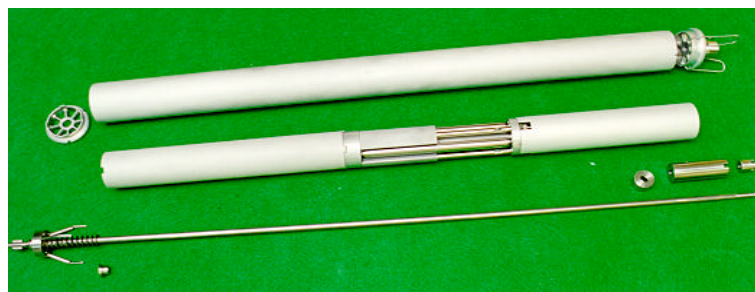


Fig. 3. Photograph on parts of non-instrumented capsule for simulated DUPIC pellet irradiation test before assembling.

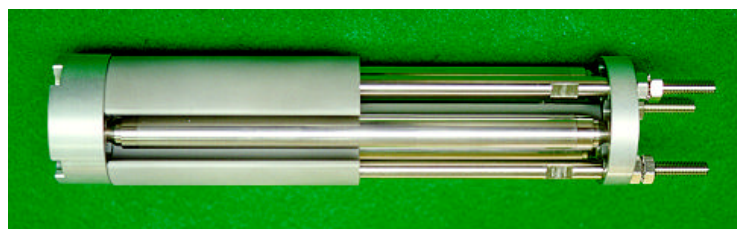


Fig. 4. Photograph on fuel assembly of non-instrumented capsule.

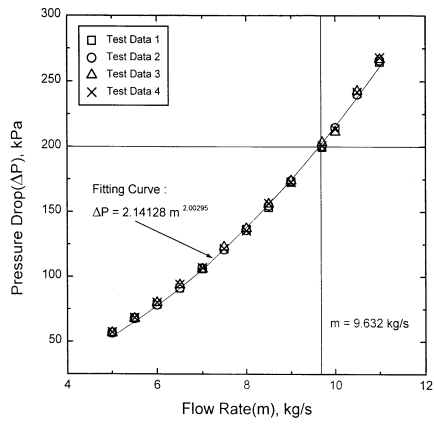


Fig. 5. The result of pressure drop test.

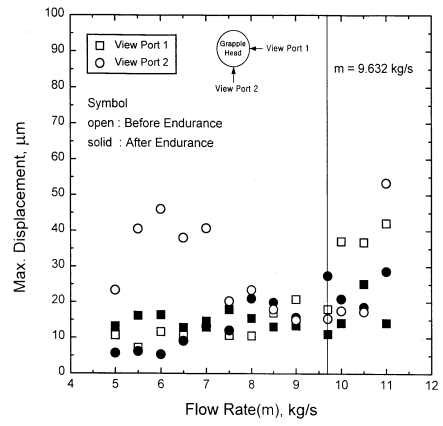


Fig. 6. The result of vibration test.

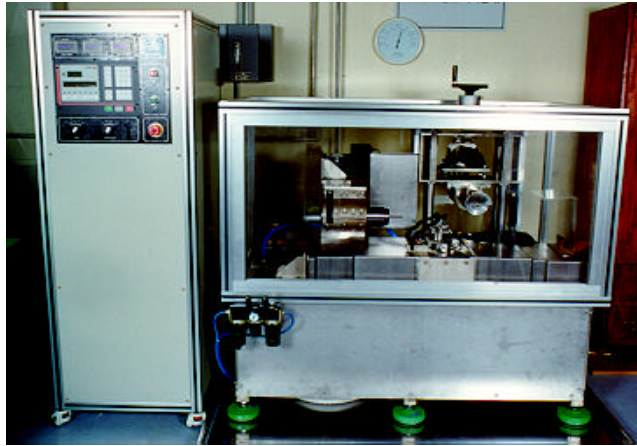


Fig. 7. Photograph of drilling & grooving machine.

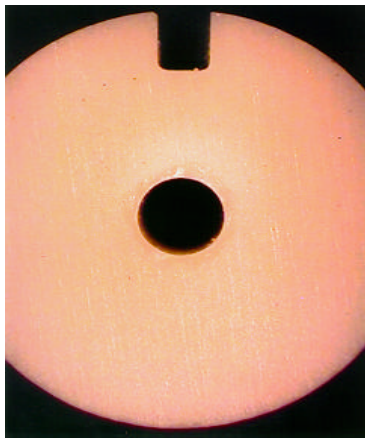


Fig. 8. Cross-section of alumina pellet drilled and grooved.