

새로운 핵연료 조사시험용 캡슐에 대한 열특성연구

Thermal Characteristics of New Concept of Capsule for Fuel Irradiation Test in HANARO

강영환, 김학노, 김봉구, 이병철, 최명환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

재료조사시험용 캡슐개발은 1995년부터 국내 원전에 사용중이거나 새로운 후보재료로 선정된 압력용기 및 노심 재료의 중성자조사 특성을 밝혀 내기 위하여 착수되어 현재 활발히 이용중에 있다. 2000년부터는 국내 핵연료 개발자들이 필요로 하는 조사특성 및 성능자료를 확보하기 위해서 새로운 개념의 핵연료 캡슐 연구개발도 진행되고 있다. 이 일환으로 새로운 개념의 캡슐에 대한 열적해석과 하나로에서의 안전성이 검토되었다. 열적특성 해석은 상용유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 수행하였고, 그 결과 하나로에서 사용하고 있는 기존의 방법보다 핵연료의 최고온도가 훨씬 낮아 보다 안전하게 이용자가 요구하는 시험 조건을 수용할 수 있음이 확인 되었다. 이들 결과는 앞으로 조사시험용 계장캡슐의 상세 설계시 기초데이터로 이용된다.

Abstract

The design and manufacturing technology of non-instrumented and instrumented capsule for material irradiation tests have been successfully established with the support of National Nuclear R&D Program. The development of the instrumented capsule for the fuel pellet test in HANARO are also progressing to provide essential in-pile information to fuel developer since 2000. The temperature calculation of the capsule are carried out with a commercial FEM code, ANSYS as a part of the new type of the capsule development. From this temperature calculation it is confirmed that due to the more lower peak temperature the fuel capsule test could be performed more safely. In addition the compatibility of the capsule to HANARO are also reviewed. The analysis results will be utilized for the detail design of the new type of instrumented capsule.

As a results of the development and installation of this system in HANARO, the

essential and reliable information on the development of commercial nuclear fuel can be provided.

1. 서 론

우리 나라에서의 조사시험기술개발은 1995년 하나로가 첫 임계에 도달하여 정상 가동된 후부터 이를 이용하여 국내 원전에 사용중이거나 새로운 후보재료로 선정된 압력용기 및 노심 재료의 중성자조사 거동을 밝혀 내기 위하여 착수되었다[1~4]. 핵연료 조사시험을 위한 조사캡슐은 핵연료 소결체의 조사시험을 할 수 있는 무게장 캡슐이 선 개발되었고 하나로 노심내 OR4 조사 공에서 DUPIC 모의 소결체가 성공리에 조사되었다[5]. 사용한 무게장 캡슐은 원통형 하나로 구동핵연료 집합체와 유사하며, 핵연료의 높은 방사성 때문에 원격으로 취급 및 조립되어야 하기 때문에 무게장 캡슐의 각 부분이 분리될 수 있으며, hot cell에서 원격으로 조립, 분해 및 취급이 가능하도록 제작되었다.

핵연료는 원자력 발전소 및 연구용 원자로의 핵심 구성요소이며 이들 원자로의 안전성과 경제성을 결정하는데 중요한 역할을 담당하고 있다. 따라서, 핵연료의 건전성 연구와 신형 핵연료 개발을 위해서는 핵연료의 노내 조사거동 자료 및 성능검증 자료 등이 필수적으로 확보되어야 하며, 이들 자료는 핵연료의 인허가와 원자로의 가동성 증대에 필요한 자료로도 활용된다.

현재 원자력 중장기사업으로 핵연료 연구 개발이 진행되고 있으며 산업계 및 학계에서도 핵연료에 대한 기초연구가 진행되고 있어, 이에 필요한 핵연료의 조사 특성 및 성능자료를 확보하기 위해서 하나로를 이용한 조사시험이 다양하게 요구되고 있다. 원자력 중장기 과제인 "신형핵 연료개발"과제에서는 UO_2 , $UO_2-Gd_2O_3$ 소결체의 조사시험을 2002년부터 계획하고 있으며[6], 조사시험중 핵연료의 온도, 압력 및 길이 변화 측정을 요구하고 있으며, 신형피복재 개발을 위한 조사취화와 부식시험을 2000년부터 요구하고 있다. 이외에도 2001년부터 단계적으로 금속핵연료의 조사시험을 계획하고 있다. 또한, 하나로 이용 활성화사업으로 진행중인 핵연료 조사시험분야에서는 학·연 공동으로 단결정 핵연료를 이용한 핵분열기체의 확산계수 측정연구[7]를 수행 중에 있다.

이들 핵연료 조사시험 계획에 따르면 다양한 핵연료의 조사시험, 특성측정 및 평가가 요구되고 있다. 이를 위해 하나로를 이용한 핵연료의 노내 조사특성 및 조사거동 자료생산을 위해서는 조사시험에 필요한 설비의 확보가 가장 먼저 이루어져야 한다. 이에 따라 이용자들이 요구하는 다양한 조사시험 요구를 충족시키기 위해 현재 장단기적 핵연료 조사시험용 계장캡슐 개발과 캡슐제어시스템 등의 개발이 진행되고 있다. 본 연구는 현재 개념설계단계에 있는 핵연료 계장캡슐에 대한 하나로에서의 조사시험 가능성 및 안전성 평가의 일환으로 수행된 열 해석 결과에 대한 내용이다. 또한 열적특성 해석은 상용유한요소 프로그램인 ANSYS[8]을 이용하여 수행하고, 결과를 고찰하였으며, 이들 열 특성 결과는 앞으로 조사시험용 계장캡슐의 상세 설계

시 기초데이터로 이용된다.

2. 기하학적 형상개념

핵연료 조사시험용 캡슐의 외형은 기존의 핵연료조사시험용 무게장 캡슐[5]과 동일하지만, 다음과 같은 기하학적 특성을 추가로 갖고 있다. 핵연료 계장캡슐의 개념은 Fig.1에서 보는 바와 같다. 캡슐의 주요 구성은 재료계장캡슐과 같이 본체, 보호관 및 안내관으로 구성되어 있다. 그러나 핵연료 계장캡슐의 본체는 이제까지의 개념과는 달리 NaK 와 같은 새로운 열매체를 적용하여 보다 냉각수로의 열전달을 용이하게 할 수 있도록 하였다. 현재 고려하는 본체에는 적게는 3개의 연료 봉을 수용할 수 있고, 많게는 2단으로 6개까지 연료 봉을 장전하여 조사시험할 수 있도록 개념을 잡았다. 또한 핵연료 조사시험중 용기 파손으로 인한 NaK의 안전성을 고려하여 2중의 용기를 채택하였다.

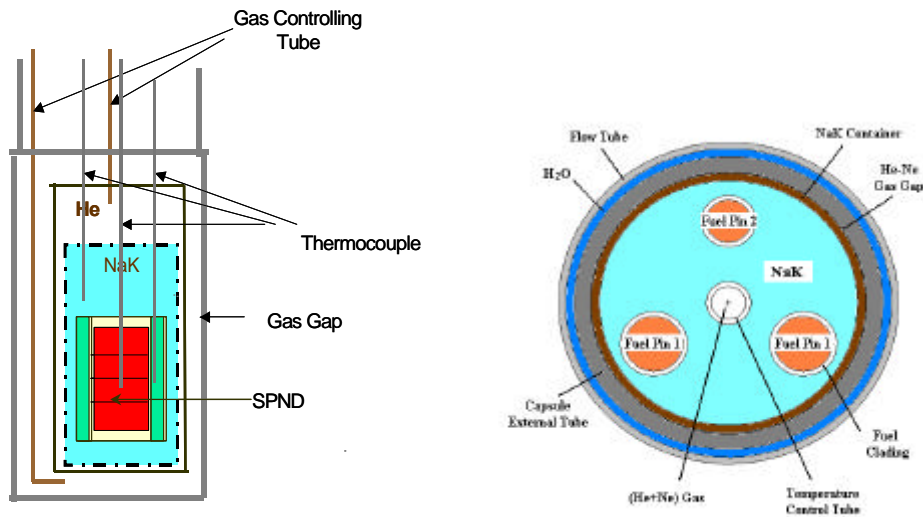


Fig. 1. New concept of the capsule

3. 해석모델 및 모델링

핵연료 조사시험용 캡슐의 내부 온도 제어를 위해서는 예상되는 온도를 정확히 예측하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 캡슐의 개념도에 기초하여 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 온도계산을 수행하였다. 유한요소 해석을 위한 모델의 생성은 축방향으로의 온도분포보다는 반경방향(r)으로의 온도분포의 변화가 크고, 관심이 있기 때문에 축방향 임의의 단면에 대한 반경방향과 원주방향(θ)의 2차원 형상을 고려하였으며, 또한 원주방향으로의 대칭성을 고려하여 1/6 모델을 생성하였다. Fig. 2는 온도계산에 사용된 유한요소모델을 나타내었다.

ANSYS를 사용한 유한요소해석에 사용 요소는 2-D coupled field 문제에 주로 사용하는 PLANE13을 사용하였고, 생성된 모델의 전체 절점과 요소수는 각각 2265개와 2183개이다.

핵연료 조사시험용 캡슐은 Table 1과 같이 핵연료봉 1과 핵연료봉 2의 경우와 캡슐 중앙으로부터 연료 중앙까지의 거리가 다른 경우(핵연료봉 3)에 대하여 고려하였다.

Table 1. Specifications of the fuel pin

Case	d (mm)	Pellet/Pin Dia.(mm)	Pellet Density(g/cc)	Enrichment(w/o)
Fuel Pin 1	14.5	10.55/12.42	10.79	1.5
Fuel Pin 2	14.5	8.19/10.06	10.96	3.1
Fuel Pin 3	15.9	8.19/10.06	10.96	3.1

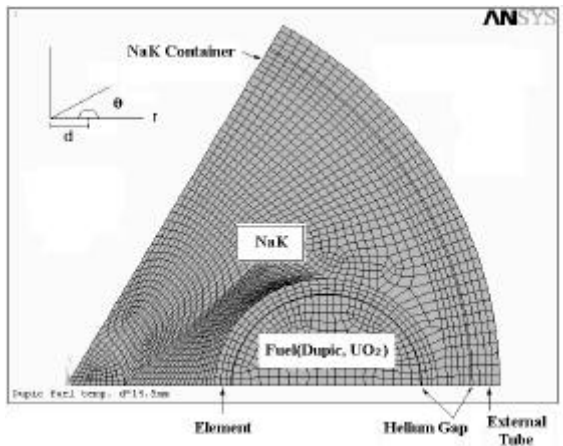


Fig. 2. Finite element model of the capsule

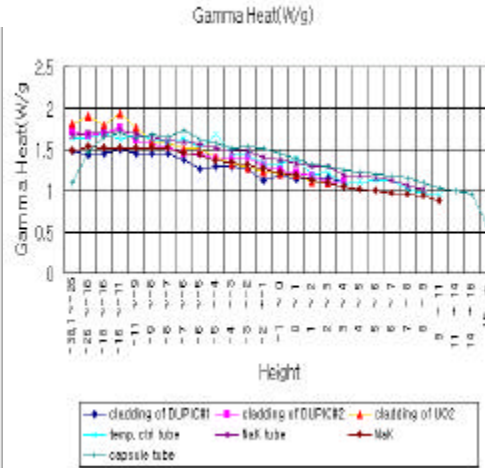


Fig. 3. Gamma Heat [9]

4. 하중 및 경계조건

조사시험시 하나로 노심에서 캡슐은 핵연료, NaK, SUS 재료의 외통과 NaK container는 감마유속에 의해 열원으로 작용하게 된다. 각 재료의 열 발생 밀도(W/m³)는 감마유속의 분포에 의존하여 캡슐의 축방향 위치와 시간에 따라 다르게 나타나는데, 본 계산에서는 다음과 같은 값을 이용하였다. 본 계산에 사용한 선 출력 및 감마(Fig. 3) 및 핵반응열은 현재 하나로에서 진행중인 고연소도 신형핵연료의 조사시험을 위한 예비 핵특성분석 결과를 이용하였다[9]. 계산 방법은 MCNP, HELIOS, VENTURE 코드를 이용하여 계산하였으며, 핵연료 특성자료는 현재개발중인 신형핵연료 및 연계핵연료의 기본자료[10]를 사용하였다.

- 핵연료봉 1: 40.44 kW/m
- 핵연료봉 2: 41.53 kW/m
- SUS : 1.7 W/g
- NaK : 1.53 W/g

해석에서의 경계조건은 모델이 원주방향에 대하여 1/6 대칭형상으로 형성되었기 때문에, $\theta=0^\circ$ 와 60° 에 대칭 경계조건을 적용하였고, 캡슐 외통의 냉각유체와 접하는 표면($r=24.14\text{mm}$)에서는 다음의 두 조건을 적용하여 결과를 비교하여 보았다.

- 표면온도: 43 °C
- 열전달계수: $h = 17 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

해석결과 두 경우 모두 즉, 캡슐 외통표면에 냉각수의 온도를 적용하여 계산하는 경우나 열

전달 계수를 적용하여 계산한 결과는 동일하였다. 따라서 본 해석에서는 모든 경우에 열전달 계수를 적용하여 계산하였고, 결과를 얻었다. 또한 헬륨 가스가 채워져 있는 캡에서는 대류와 복사가 무시될 수 있을 정도로 작기 때문에 전도만을 고려하였다.

Table 2는 열해석에 사용된 주 재료의 온도에 따른 열전도 값을 나타내었다. 핵연료봉 1의 물성은 참고문헌[10]을 핵연료봉 2의 물성은 CE-FMD Materials Manual[11]를 참조하였다.

Table 2. Thermal conductivities(k : W/m · K) of the materials with various temperatures

Temp.(°C)	20	300	600	900	1200	1500	1800	2100
k								
Fuel Pin 1	4.69	3.79	3.138	2.7	2.4038	2.218	2.15	2.2419
Fuel Pin 2	9.05	5.45	3.85	3.03	2.58	2.35	2.28	2.1
NaK	25.886	26.961	27.821	28.466	28.94	29.326	29.6	29.8
SUS	14	18.3	22.3	26.5	30.8	35	39	43.5
Helium	0.149	0.233	0.31	0.373	0.422	0.458	0.479	0.85

5. 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 연계 핵연료와 UO_2 연료의 캡슐을 이용한 조사시험을 위한 설계 목적의 일부로 조사시험시 발생할 수 있는 캡슐 내부 온도의 분포와 최대온도의 평가하는데 있다. 따라서 이들 연료를 캡슐에 삽입하였을 때 예상되는 온도와 중앙으로부터 반경방향으로의 연료의 중앙까지의 거리(d)에 따른 온도변화를 고찰하였다.

(1) 핵연료봉 1 ($d=14.5$ mm)

핵연료봉 1은 캡슐의 중앙으로부터 연료의 중앙까지의 거리, $d=14.5$ mm를 갖고, 연료의 직경은 10.55mm이다. Fig. 4는 1/6 모델에서의 온도분포 결과를 나타내었다. 최대온도는 약 2488 °C로 연료의 중심부에서 발생하고, 주위의 헬륨 캡에 의해서 온도가 상당히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 헬륨의 열전도도가 낮기 때문이다.

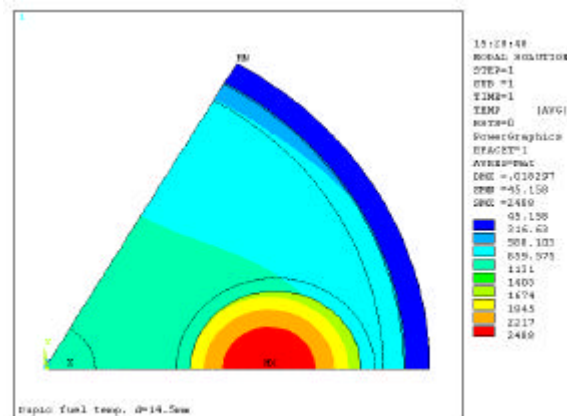


Fig. 4. Temperature profile of Fuel Pin 1

Fig. 5는 핵연료봉 1에 대한 원주방향 $\theta=0^\circ$ 인 곳에서의 반경방향 온도분포를 나타낸 것이고, Fig. 6은 캡슐의 중앙에서 연료의 중심까지의 거리, $d=14.5\text{mm}$ 인 곳에서의 원주방향 $\theta=0^\circ$ 에서 60° 까지의 온도분포를 보이고 있다. Fig. 5로부터 알 수 있는 것은 헬륨의 갭 부분에서는 온도 감소폭이 상당히 크다는 것과, NaK 부분에서의 온도는 캡슐 중앙 부분에서 거의 일정한 온도분포를 보였다. 또한 외통 쪽에서는 캡슐 표면에서의 큰 열전달로 인하여 온도의 변화가 심하며, 스테인레스 강 재료인 NaK container 부분에서는 약 700°C 의 온도를 보였고, NaK container와 캡슐 외통 사이의 헬륨 갭에서는 약 600°C 의 온도 감소를 보였다.

Fig. 6는 $d=14.5\text{mm}$ 인 곳에서의 θ 에 따른 원주방향 온도분포를 나타낸 것으로서, NaK 부분에서의 온도분포 값을 확인할 수 있다. 연료부분에서 높고, 상대적으로 다른 부분들에 낮은 값을 보이는 경향은 Fig. 5와 유사하나, 본 결과를 통하여 원주방향으로의 온도분포가 반경방향의 온도분포에 비하여 변화의 폭이 크지 않다는 것을 알 수 있다. 반경방향 NaK 부에서의 온도는 $760\sim 950^\circ\text{C}$ 범위에서 변화였다. 따라서 추후 유사한 연구가 수행될 경우 원주방향에 대한 온도분포의 고찰보다는 반경방향으로의 온도 분포를 고찰하는 것이 더 유의한 정보를 얻을 수 있을 것으로 보인다.

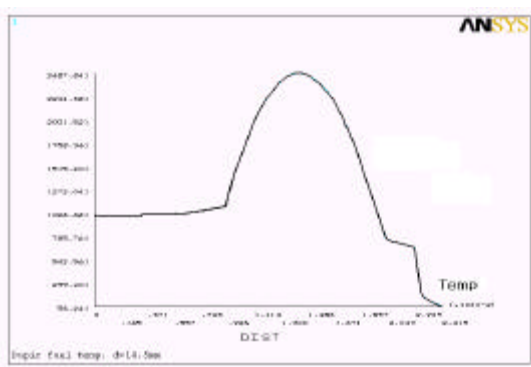


Fig. 5. Radial temp. profile of Fuel Pin 1 ($\theta=0^\circ$)

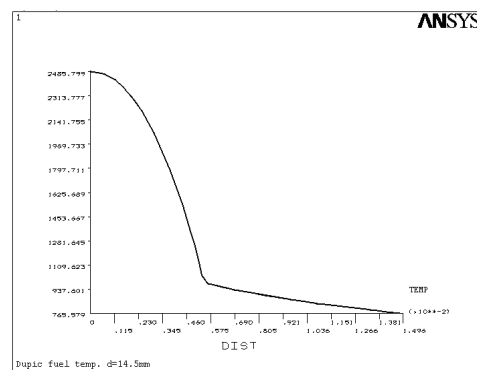


Fig. 6. Circumferential temp. profile of Fuel Pin 1 ($d=14.5\text{mm}$)

(2) 핵연료봉 2 ($d=14.5\text{ mm}$)

핵연료봉 2는 핵연료봉 1에 비해 약간 작은 8.19mm 의 직경을 갖는다. 핵연료봉 1의 경우와 동일한 모델과 동일한 조건인 $d=14.5\text{mm}$ 의 거리에 핵연료가 위치한 경우에 대하여 열 해석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 7과 8에 나타내었다.

그림들로부터 알 수 있듯이 온도의 분포는 핵연료봉 1의 경우와 동일한 경향을 보이지만, 핵연료봉 2의 경우 최대온도가 연료부에서 2633°C 로 핵연료봉 1 보다 약 145°C 높은 온도를 갖는다. 실제로 크기에 있어서는 핵연료봉 1보다 약간 작지만, 핵연료봉 2의 열발생 밀도가 더 크기 때문에 온도 또한 더 높게 발생한 것으로 보인다.

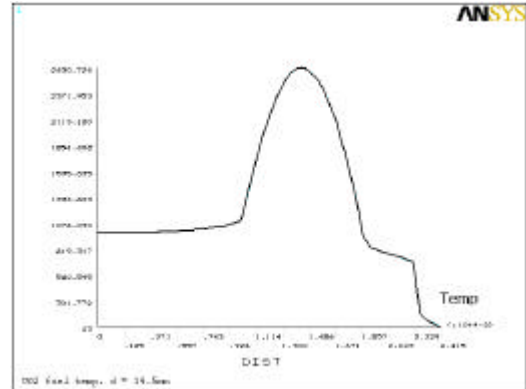
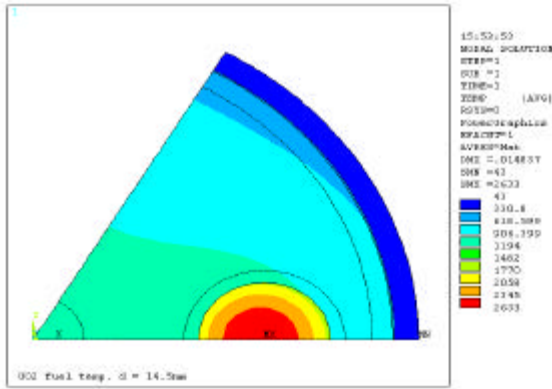


Fig. 7. Temperature profile of Fuel Pin 2 (d=14.5mm) Fig. 8. Radial temp. profile of Fuel Pin 2 ($\theta = 0^\circ$, d=14.5mm)

(3) 핵연료봉 3 (d=15.9 mm)

Fig. 9과 10은 핵연료봉 2 에 대하여 캡슐의 중앙에서부터 연료의 중심까지의 거리가 다른 경우의 결과를 보이고 있다. 같은 연료에 대한 (2)의 경우와 비교할 때, 이것은 캡슐 중앙에서 연료 중앙까지의 거리의 영향으로 생각할 수 있는데, 중앙에서 거리가 먼 (3)의 경우, 온도가 약 50 °C 정도 낮은 결과를 보이는 것으로 볼 때 외통쪽으로 가까이 갈수록 온도를 낮출 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 실제로 2000 °C 이상의 높은 상태에서 50 °C 정도의 차는 큰 의미를 갖는 것으로 생각되지는 않는다. 즉, 캡슐의 중앙에서부터 연료의 중심까지의 거리(d)는 온도에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. Table 3은 이상의 결과들을 요약하여 최대 온도만을 나타낸 값이다.

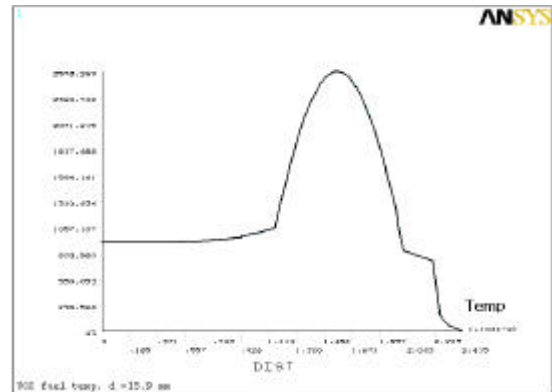
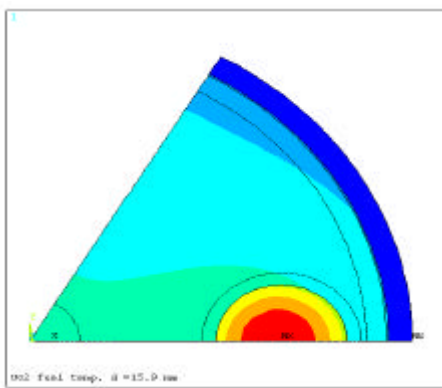


Fig. 9. Temperature profile of Fuel Pin 3 (d=15.9mm) Fig. 10. Radial temp. profile of Fuel Pin 3 ($\theta = 0^\circ$, d=15.9mm)

Table 3. Maximum temperature of the fuel irradiation capsule

Case	Distance from the center(d)	Max. Temp.	Remark
Fuel Pin 1	14.5 mm	2488 °C	Fuel center
Fuel Pin 2	14.5 mm	2633 °C	"
Fuel Pin 3	15.9 mm	2581 °C	"

6. 결 론

본 연구에서는 현재 진행되고있는 새로운 개념의 계장캡슐의 하나로에서의 조사 시험에 적용할 수 있는지를 평가하는 일이 가장 중요하다. 새로운 개념에 대해 수행된 열적특성 해석은 상용유한요소 프로그램인 ANSYS을 이용 고찰하였다.

1) 이들 열 특성 결과 하나로에서 기존의 방법보다 핵연료의 최고온도가 핵연료 녹는점보다 낮아 보다 안전하게 하나로에서 이용자가 요구하는 시험 조건을 수용할 수 있음이 확인되었다.

- 새로운 개념(NaK) 도입시 핵연료봉의 최대온도가 물과 직접 접하는 기존의 개념보다 약 200~300 °C 낮았고, 캡슐 주변의 온도의 구배가 작았다.
- 원주방향으로의 온도구배는 반경방향에 비하여 크지 않았다.
- 앞으로 조사시험용 계장캡슐의 상세 설계시 축방향으로의 핵연료봉 위치와 캡슐 외통의 크기를 최적화하면 보다 안전한 조사시험을 수행할 수 있는 캡슐이 개발될 것으로 기대된다.

2) 계장캡슐을 개발하여 하나로에 설치되면, 현재 개발 중인 신형 핵연료 및 금속 핵연료 등에서 요구되는 조사시험을 수행할 수 있고, 인허가 등에 필요한 중요 노내 자료의 확보가 가능하다.

3) 현재 개발중인 핵연료봉 계장기술의 확보를 눈 앞에 두고 있어, 핵연료 소결체와 피복관내 온도, 핵분열기체 생성에 의한 압력, 소결체 및 피복관 변형 등을 on-line으로 측정 핵연료의 조사이력과 함께 핵연료 성능검증 자료를 확보할 수 있는 체계를 구축하게 될 것이다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] 강영환 외, 1999, “다공 원통구조 개념을 도입한 캡슐 설계개선 연구”, 한국원자력학회 '99춘계학술발표회논문집 (CDROM)
- [2] 강영환 외, 1999, “열하중을 받는 다공 캡슐의 다공 원통구조 개념을 도입한 캡슐 설계개선 연구”, 한국원자력학회 '99춘계학술발표회논문집(CDROM)
- [3] Y.H. Kang, Y.S. Lee and M.H. Choi, "Thermal and Mechanical Characteristics of Instrumented Capsule for Material Irradiation Test", Proceeding of the 5th Asian Symposium On Research Reactors, Vol. 1, pp.328~332, 1996.
- [4] 강영환 외, “재료 조사시험용 계장캡슐의 열적 및 역학적 특성”, 한국원자력학회 '95 추계학술발표회 논문집(Ⅱ), pp.617~622, 1995.

- [5] 양명승 외, “DUPIC 핵연료 조사시험 예비평가”, 한국원자력학회 '98 춘계 학술발표회 논문집(Ⅱ), 1998.
- [6] 김대호 외, “고연소도 신형소결체의 하나로 캡슐 조사시험을 위한 시험봉 설계”, 한국원자력학회 '00추계학술발표회 논문집, 2000.
- [7] 박광현 외, “단결정 핵연료의 핵분열기체 확산계수 측정연구”, 한국원자력학회 '98 춘계 학술발표회 논문집(Ⅱ), 87~102, Proceedings of HANARO Workshop 2000, KAERI(2000).
- [8] ANSYS Inc., “ANSYS User's Manual”, SAS IP Inc., 1995.
- [9] 서철교, “고연소도 신형핵연료 소결체의 조사시험을 위한 예비 핵특성 분석”, 하나로내부통신문, HAN-RR-CR-900-00-082.
- [10] 배기광 외, “Dupic 핵연료 조사시험 설계 및 안정성분석 보고서”, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1157/98, 1998.
- [11] CE-FMD Materials Manual.