

2001 추계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

핵연료 조사시험용 계장캡슐에 대한 열적 특성연구

Thermal Characteristics of HANARO Instrumented Capsule for an Advanced Fuel Development

강영환, 김봉구, 김도식, 주기남, 오종명, 이병철

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

새로운 개념의 핵연료 계장캡슐 연구. 개발이 2000년부터 국내 핵연료 개발자들이 필요로 하는 조사특성 및 성능자료를 확보하기 위해서 진행되고 있다. 이 일환으로 새로운 개념의 계장캡슐에 대한 열 계산과 하나로에서의 안전성이 검토되었다. 온도 계산은 발열 핵연료가 직경에 비해 축방향 길이가 길고 축방향으로의 열 흐름을 무시한 무한 길이의 원통에 대한 열 전달 계산식을 이용하여 수행하였고, 그 결과 캡슐의 기본 설계 검토가 이루어졌으며 보다 안전하게 이용자가 요구하는 시험 조건을 수용할 수 있는 방안 등이 확인되었다. 이들 결과는 앞으로 조사시험용 계장캡슐의 상세 설계시 기초데이터로 이용된다.

Abstract

The development of the instrumented capsule for the fuel pellet test in HANARO are progressing to provide essential in-pile information to fuel developer since 2000. In thermal calculations for the design review of HANARO fuel capsule, a typical 1-D heat transfer equation are used. From this temperature calculation it is confirmed that new type of instrumented capsule concept would be understood and due to higher peak temperature the fuel capsule design concept should be modified in the detail design stage. 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. 서론

하나로에서의 핵연료 조사시험을 위한 캡슐은 핵연료 소결체의 조사시험을 할 수 있는 무게장 캡슐이 선 개발되었고 하나로 노심내 OR4 조사 공에서 DUPIC 모의 소결체가 성공리에 조사되었다[1]. 사용한 무게장 캡슐은 원통형으로 하나로 구동핵연료 집합체와 유사하며, 핵연료의 높은 방사성 때문에 원격으로 취급 및 조립되어야 하기 때문에 조립, 분해 및 취급이 가능하도록 제작되었다.

일반적으로 연구 개발중인 개량 핵연료는 기존의 핵연료와 비교한 성능과 안전성 평가 등이 발전로 혹은 연구로에서 선행적으로 평가되어야만 상용로 핵연료로서의 자격을 갖추게 된다. 따라서, 핵연료의 노내 조사거동 자료 및 성능검증 자료 등이 필수적으로 확보되어야 하며, 이들 자료는 핵연료의 인허가와 원자로의 가동성 증대에 필요한 자료로 활용된다.

현재 원자력 증장기사업으로 진행되고 있는 "신형 핵연료개발"과제에서는 UO_2 , UO_2 - Gd_2O_3 소결체의 조사시험을[2], "DUPIC 핵연료개발"과제에서는 DUPIC소결체의 조사시험을 2002년 말 계획하고 있다[3]. 이들 핵연료 조사시험 계획에 따르면 핵연료의 조사시험시 소결체 중심 및 표면 온도 측정이 요구되고 있다. 이에 따라 현재 장단기적 핵연료 조사시험용 계장캡슐 개발과 캡슐제어시스템 등의 개발이 진행되고 있다. 본 연구는 현재 개념 설계단계에 있는 핵연료 계장캡슐에 대한 하나로에서의 조사시험 가능성 및 안전성 평가의 일환으로 수행된 열 해석 결과에 대한 내용이다. 이들 열 특성 결과는 앞으로 조사시험용 계장캡슐의 상세 설계시 기초 데이터로 이용된다.

2. 기하학적 형상 및 설계개념

핵연료 조사시험용 계장캡슐의 외형은 기존의 핵연료조사시험용 무게장 캡슐[5]과 동일하지만, 종전과는 달리 double containment 개념을 도입하여 장기 조사시험시 보다 안전하게 수행할 수 있도록 하였다. 즉 장기 조사시험시 핵연료 파손이 일어나면 이를 사전에 감지할 수 있도록 헬륨/네온 혼합가스를 강제 순환시켜 파손으로 인한 핵분열생성가스를 감지하고, 또한 핵연료 소결체 표면 온도를 가능한 일정한 범위 하에서 조사시험이 수행되도록 핵연료 핀과 캡슐외통사이의 순환되는 헬륨 및 네온 가스의 혼합비와 순환량을 조절하여 열전달계수를 제어할 수 있도록 설계가 되고 있다. 핵연료 계장캡슐의 개념은 그림 1에서 보는 바와 같다.

주요 구성은 그림 2에서와 같이 최외각의 Basket, 시험용 핵연료 핀을 포함한 미니캡슐, 미니캡슐과 basket 과의 연결부, 캡슐제어계통과의 연결부로 구성되어 진다. 그러나 핵연료 미니캡슐은 그림 3에서와 같이 이제까지 수행된 무게장 캡슐의 설계특성과는 근본적으로 다르다. 즉 무게장 캡슐내 핵연료의 온도는 하나로 구동 핵연료의 연소도와 각 주기 초 및 말기에서의 핵적 특성변화에 의존하나 새로운 개념의 계장캡슐은 조사시험 기간중 핵연료의 온도를 이용자가 요구하는 범위 내에서 적절히 제어할 수 있도록 하였다. 현재 고려하는 basket에는 적게는 3 개의 핵연료 핀을 수용할 수 있고, 많게는 2 단으로 6 개까지 핵연료 핀을 장전하여 조사 시험할 수 있도록 개념을 잡았다.

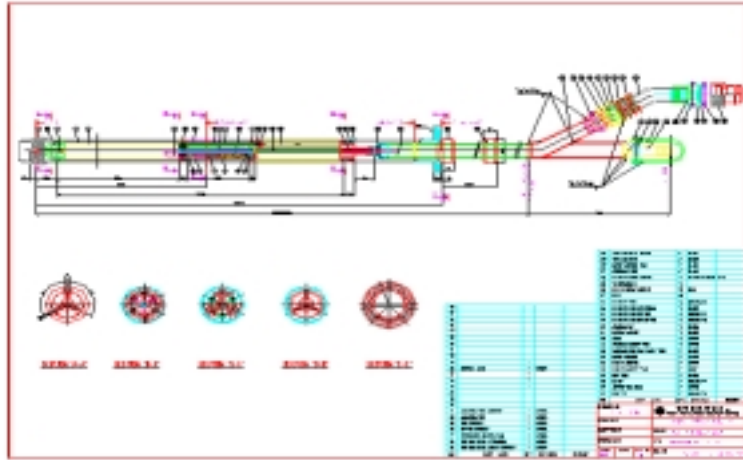


그림 1. 핵연료조사시험용 계장캡슐 구조

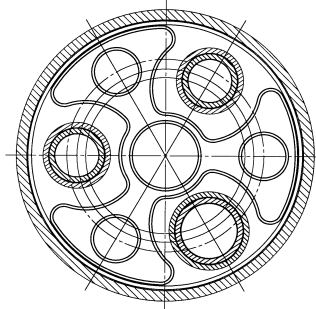


그림 2. 핵연료 계장캡슐단면도

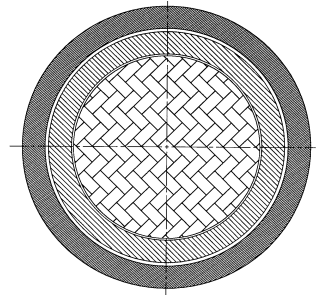


그림 3. 미니캡슐단면도

3. 열 계산 모델

일반적으로 핵연료 조사시험용 캡슐의 내부 구조는 중심부에 시험 핵연료를 배치하고 그 외측에 가스, 액체층 또는 고체 층이 번갈아 겹친 다중 원통이다. 캡슐 내에서의 발열은 캡슐 외통의 외측을 흐르는 원자로 1 차 냉각수로 냉각된다. 이와 같은 특징을 가지고 있는 캡슐의 열 계산에는 발열 핵연료가 직경에 비해 축방향 길이가 길고 축방향으로의 열 흐름을 무시한 무한 길이의 원통 구조라 가정한 열 전달 계산식을 이용하여 계산하는 것이 관례이다.[4] 그 예로서 개념설계 단계에서 가장 많이 사용되는 프로그램중의 하나인 미국 오크리지 국립연구소에서 개발된 1차원 열계산 GENGTC (Generalized Gap Temperature Calculation)[5]를 들 수가 있다. 이 코드를 사용하는 이유는 비교적 단순한 계산 방식을 채용하고 있고 핵연료의 핵분열발열, 고체 구조재의 감마선 흡수 발열, 열전도율 및 온도 의존성, 복사열전도율 뿐만 아니라 온도 상승시의 열팽창에 의한 재료의 치수 변화도 고려하고 있기 때문이다. 본 연구에서는 그림 4와 같은 이론적 해석모델에 기초하여 온도계산을 수

행하였다.

최외측 node의 온도, 즉 capsule 외표면 온도 $T_s(^{\circ}\text{C})$ 는 아래의 식으로부터 구한다.

$$T_s = T_{\infty} + \frac{q_A}{h \cdot A}$$

여기서 T_{∞} : 외부 냉각수 온도($^{\circ}\text{C}$)

q_A : 내부에서 발생하는 총 열량(W)

A : 캡슐 외표면적(m^2)

h : 표면 열전달율($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)

해석모델에서의 원환층의 내측 node 온도 $T_i(^{\circ}\text{C})$ 는 외측 node 온도 $T_o(^{\circ}\text{C})$ 로부터 아래의 무한길이 원통에 대한 r 방향 열전도 방정식에 따라 구한다.

$$T_i = T_o + \frac{G(r_o^2 - r_i^2)}{4k} + \left[\frac{q_i r_i}{A_i \cdot k} - \frac{G r_i^2}{2k} \right] \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)$$

여기서 G : Gamma 발열밀도(W/m^3)

r_i : 원환층의 내측 node 반경(m)

r_o : 원환층의 외측 node 반경(m)

k : 원환층의 열전도율($\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

A_i : 원환층의 내측 표면적(m^2)

q_i : 원환층의 내측 표면을 통하여 유입되는 열량(W)

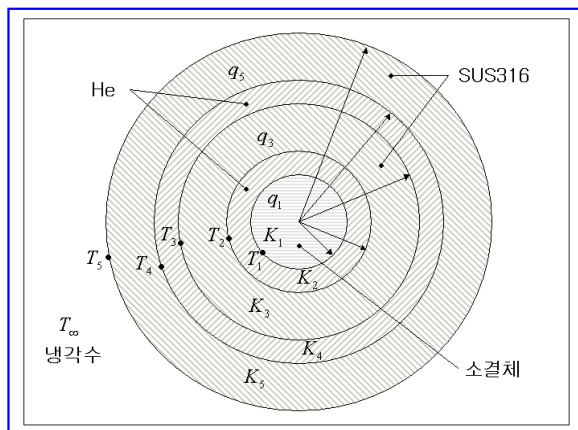


그림 4. 이론적 온도해석모델

4. 하중 및 경계조건

하나로 노심에서 조사시험시 주요 열원은 핵연료이며 구조재료인 SUS 재료는 감마유속에 의해 열원으로 작용하게 된다. 각 재료의 열 발생 밀도(W/m^3)는 감마유속의 분포에 의존하여 캡슐의 축방향 위치와 시간에 따라 다르게 나타나는데, 본 계산에서는 다음과 같은 값을 이용하였다. 본 계산에 사용한 선 출력 및 감마열 및 핵반응 열은 현재 하나로에서 진행중인 신형핵연료의 조사시험을 위한 예비 핵특성 분석 결과를 이용하였다[6]. 계산 방법은 MCNP, HELIOS, VENTURE 코드를 이용하여 계산하였으며, 핵연료 특성자료는 현재 개발중인 신형핵연료 및 DUPIC핵연료의 기본자료[7]를 사용하였다. 주요 설계 요구사항은 다음과 같다.[8]

- 핵연료봉 선출력: 최대 500 W/cm
- 핵연료 표면온도: 800℃ 이하
- 주요 캡슐 제원은 다음과 같다.

Case	Pellet Dia.(mm)	Cladding I.D./O.D.(mm)	Capsule Tube I.D./O.D.(mm)	Gap(mm) Cladding/Capsule
DUPIC 핵연료핀	10.55	10.80/12.80	13.00/15.00	0.1
신형핵연료핀	8.19	8.36/10.36	10.56/12.56	0.1

- 주요 캡슐에 사용 재료는 다음과 같다.

재료	Pellet (Enrichment%)	Cladding	Capsule Tube
DUPIC 핵연료핀	UO ₂ (최대 1.5%)	316L Stainless Steel	316L Stainless Steel
신형핵연료핀	UO ₂ (최대 4.5%)	316L Stainless Steel	316L Stainless Steel

경계조건은 모델이 원주방향에 대하여 대칭형상을 갖고 있으며, 캡슐 외통의 냉각유체와 접하는 표면에서의 온도는 냉각수 입구온도 35℃로 가정하고 캡슐 표면에서의 heat flux가 $1.05 \times 10^6 W/m^2$ 이므로 유로 면적을 고려하면 캡슐 표면 온도는 81℃가 된다. 캡슐 표면에서의 열전달계수의 계산은 종전에 구한 방법으로 계산하였으며, 열전달계수 h는 $22.9 \times 10^3 W.m^2/℃$ 이다.

또한 헬륨 가스가 채워져 있는 핵연료 소결체와 피복관 사이의 갭에서는 대류와 복사가 무시될 수 있을 정도로 작기 때문에 전도만을 고려한 경우와 피복관과 미니캡슐튜브사이의 갭에서는 핵연료 핀의 파손 감지와 표면 온도조절을 위하여 50 cc/min 정도의 가스를 흘려주므로 유체가 열원으로부터 어느 정도 열을 빼앗아 가는 경우이므로 대류를 고려하였다.

열 해석에 사용된 주 재료의 온도에 따른 열전도 등의 물성은 참고문헌[7]과 CE-FMD Materials Manual[9]를 참조하였다.

5. 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 DUPIC 핵연료와 신형 핵연료가 조사시험시 발생할 수 있는 캡슐 내부 온도의 분포와 최대온도를 평가하여 핵연료 계장캡슐에 대한 하나로에서의 양립성 평가를 하는데 주요 목적이 있다. 따라서 이들 핵연료를 캡슐에 삽입하였을 때 예상되는 온도와 중앙으로부터 반경방향으로 핵연료 중앙까지의 거리에 따른 온도변화를 고찰하였다. 이들 경계조건을 사용하여 구한 온도결과는 표 2와 3 및 그림 5와 6에서와 같다.

(1) 신형핵연료 핵연료 핀을 포함한 미니캡슐의 온도특성

신형핵연료 핵연료 계장캡슐은 캡슐의 중앙에 열원인 이산화우라늄 소결체가 있고 이를 스테인레스 강관으로 피복한 후 피복관 외부에 소결체 표면 온도 제어를 위한 겹을 두고 최외각에 스테인레스 강관이 있는 구조이다. 그림 5는 소결체 중심으로부터 캡슐 외통 표면까지의 온도분포 결과를 나타내었다. 최대온도는 소결체 중심부에서 나타나고 피복관과 소결체사이의 겹에서 전도만을 고려할 때 약 2825 °C로 가장 높고, 강제 대류를 고려하면 약 2491 °C 이었다. 또한 헬륨/네온가스 겹에서의 온도는 피복관 표면과 캡슐외통 내면에서가 소결체와 피복관사이에서의 겹에서 보다 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 핵연료 부분에서 온도가 가장 높고, 소결체 표면 온도는 원하는 온도보다 다소 높으며 930~1260 °C 범위에서 변하였다. 이는 냉매로서 흐르는 헬륨/네온가스의 온도에 따른 열전달계수를 정확히 예측할 수 없기 때문이다.

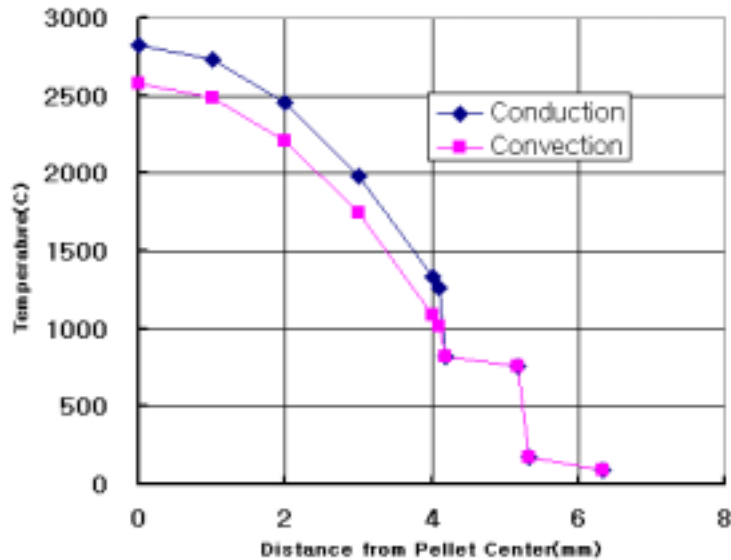


그림 5. 신형핵연료 조사시험용 캡슐의 온도분포

표 2 피복관과 소결체간의 갭에서의 열전달 조건에 따른 온도 (신형핵연료)

영역별 온도	Conduction	Convection
핵연료 소결체 중심온도, T_0 (°C)	2825	2581
핵연료 소결체 표면온도, T_1 (°C)	1265	1021
피복관 내면 온도, T_2 (°C)	827	826
피복관 표면 온도, T_3 (°C)	763	763
캡슐 내면 온도, T_4 (°C)	175	175
캡슐 표면 온도, T_5 (°C)	90	90

(2) DUPIC 핵연료핀을 포함한 미니캡슐의 온도

DUPIC 핵연료캡슐의 구조는 신형핵연료 핵연료 미니 캡슐의 구조와 동일하다. 그림 6은소결체 중심으로부터 캡슐 외통 표면까지의 온도분포 결과를 나타내었다. 최대온도는 소결체 중심부에서 나타나고 피복관과 소결체사이의 갭에서 전도만을 고려할 때 약 3000 °C로 가장 높고 강제 대류를 고려하면 약 2582 °C 이었다. 또한 헬륨/네온가스 갭에서의 온도는 피복관 표면과 캡슐외통 내면에서가 소결체와 피복관사이에서의 갭에서 보다 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 핵연료부분에서 온도가 가장 높고, 소결체 표면 온도는 원하는 온도보다 다소 높으며 790~1200 °C 범위에서 변화였다. 이는 냉매로서 흐르는 헬륨가스의 갭에서 대류를 정확히 예측할 수 없기 때문이다.

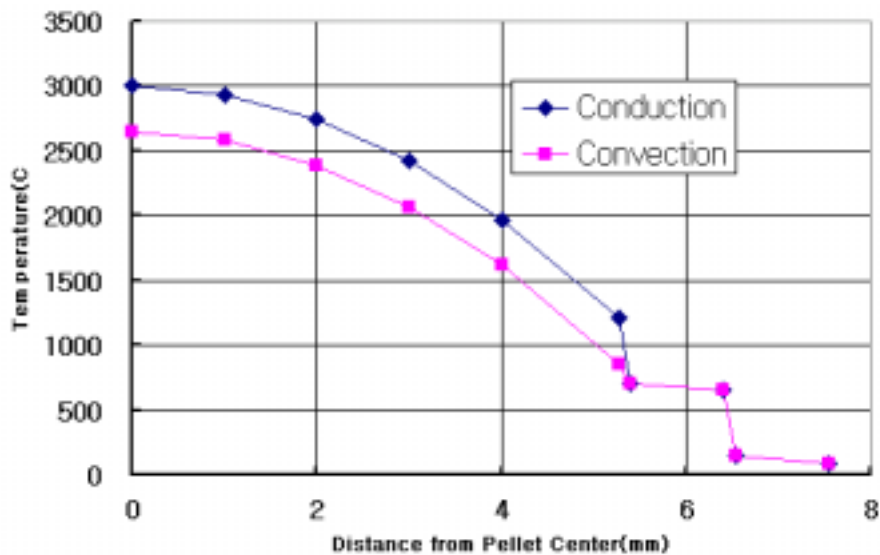


그림 6. DUPIC 조사시험용 캡슐의 온도분포

표 3. 피복관과 소결체간의 겹에서의 열전달 조건에 따른 온도 (DUPIC)

영역별 온도	Conduction	Convection
핵연료 소결체 중심온도, T_0 (°C)	3000	2651
핵연료 소결체 표면온도, T_1 (°C)	1206	858
피복관 내면 온도, T_2 (°C)	707	707
피복관 표면 온도, T_3 (°C)	655	655
캡슐 내면 온도, T_4 (°C)	152	152
캡슐 표면 온도, T_5 (°C)	81	81

표 2와 3 그리고 그림 5와 6에서 알 수 있듯이 단위 체적당 열밀도는 신형핵연료 소결체가 크지만 열전도도는 DUPIC 소결체보다 비교적 높아 최대온도는 결과적으로 낮게 되었다고 사료된다. 또한 이용자들이 요구하고 있는 최대 선 출력이 500 W/cm하에서는 핵연료 소결체가 두 경우 다 용융 온도보다 높아 설계변경을 통하여서만 하나로에서 조사시험이 될 수 있음이 확인되었다. 그러므로 겹에서의 대류를 정확히 고려할 수 있는 동적 해석을 통하여 보다 상세한 검토가 이루어져야 하지만 상세 설계시점에서 다음과 같은 사항이 검토되어야 한다. 주요사항은 캡슐의 위치를 조사공 핵적 특성에 맞도록 그 위치를 변경하던지, 핵연료의 농축도를 작게하는 방안, basket 내부에 중성자 흡수 단면적인 큰 차폐재료를 설치하는 방안, 그 외에도 제작성을 감안한 겹 조절 방안 등 추후 이에 대하여 상세 검토가 필요한 것으로 보인다.

온도 계산결과를 근거로 할 때 캡슐경계에서의 열응력은 ASME code에서 요구되는 값보다는 작아 종합적인 판단으로 볼 때 하나로에서 수용 가능성이 높다고 볼 수 있다.

표 4. 캡슐 부위별 최대온도

Case	Fuel Center Temp.(°C)	Fuel Surface Temp.(°C)	Capsule Surface Temp.(°C)	Thermal Stress of Capsule Wall(MPa)
신형핵연료 캡슐	2825	1265	90	202
DUPIC 핵연료 캡슐	3000	1206	81	170

6. 결 론

본 연구에서는 현재 진행되고 있는 새로운 개념의 핵연료 계장캡슐을 하나로에서의 조사 시험에 적용할 수 있는지를 평가하였다. 새로운 설계개념에 대해 수행된 열적특성 해석을 수행하였다.

- 1) 열 특성 결과 하나로에서 기존의 방법보다 핵연료의 최고 온도가 핵연료 용융점 보다

높은 것으로 나왔으며 보다 안전하게 하나로에서 이용자가 요구하는 시험 조건을 수용하기 위하여 몇가지 설계 변수들을 고려하여야 한다.

상세 설계시점에서 고려하여야 하는 설계 변수들은 다음과 같다.

- 조사공 핵적특성에 맞도록 Basket 내부에서의 캡슐 장입위치,
- 핵연료 농축도,
- Basket 내부에 중성자 흡수 단면적인 큰 차폐 재료의 설치,
- 그 외에도 캡슐의 제작성을 감안한 깎조절 등이다.

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 가능함이 확인되었다.

3) 현재 개발중인 이들 결과는 앞으로 조사시험용 계장캡슐의 상세 설계시 기초데이터로 이용된다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] 양명승 외, "DUPIC 핵연료 조사시험 예비평가", 한국원자력학회 '98 춘계 학술발표회 논문집(Ⅱ), 1998.
- [2] 김대호 외, "고연소도 신형소결체의 하나로 캡슐 조사시험을 위한 시험봉 설계", 한국원자력학회 '00추계 학술발표회 논문집, 2000.
- [3] M.S. Yang, et al, "Status of DUPIC Fuel Development", ISAC-2001, India(2001).
- [4] 강영환 외, "다공 원통구조물의 기계적 및 열적 성능해석 프로그램개발", 한국원자력학회 2000추계 학술발표회 논문집, 2000.
- [5] Hall C. Roland, "GENGTC, A One Dimensional CEIR Computer for Capsule Temperature Calculation in Cylindrical Geometry", ORNL-TM-1942, 1967. 12.
- [6] 서철교, "고연소도 신형핵연료 소결체의 조사시험을 위한 예비 핵특성 분석", 하나로 내부통신문, HAN-RR-CR-900-00-082.
- [7] 배기광 외, "DUPIC 핵연료 조사시험 설계 및 안정성분석 보고서", 한국원자력연구소, KAERI/TR-1157/98, 1998.
- [8] 정연호, 양명승, 내부통신문 HAN-IC-CR-01-030(2001.7.21).
- [9] CE-FMD Materials Manual.[1] 강영환 외, 1999, "다공 원통구조 개념을 도입한 캡슐 설계개선 연구", 한국원자력학회 '99추계 학술발표회 논문집 (CDROM)