

경수로 핵연료용 신형 소결체의 고속 연소 시험용 캡슐의 핵설계

Nuclear Design of Capsule for the Fast Burnup Test of Advanced LWR Fuel Pellet

서철교, 박상준, 이충성, 김학노, 이찬복

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

경수로의 고연소도 핵연료용으로 개발된 신형 소결체를 하나로에서 조사 시험하기 위해 핵연료 캡슐을 설계하였다. 조사 시험 요건은 실제 원전 핵연료의 연소 조건과 유사하도록 유지하면서 70GWD/MTU 이상의 고연소도까지 5년 이내의 짧은 시간에 조사 시험을 완료하는 것이다. 시험 요건을 만족시키는 고속 연소 시험을 수행하기 위해 중성자 차단막의 형태로 Hafnium을 사용하고, 캡슐의 기계적 건전성을 유지하기 위해 필요한 2단계 조사 시험의 개념을 활용하였다. 신형 소결체의 2단계 조사 시험은 첫 번째 캡슐에 시험 핵연료봉 6개를 넣어 적당한 연소도까지 조사시킨 후 3개를 인출하여 조사 후 시험에 이용하고, 나머지 핵연료봉은 Hafnium이 없는 새로운 캡슐에 넣어 목표 연소도까지 조사시키는 형식으로 이루어진다. 조사 시험용 캡슐에 대한 최적 핵설계로 필요한 조사시간을 절반 정도로 줄였고 보다 균일한 출력으로 연소가 이루어지도록 하였다.

Abstract

The large grain UO_2 pellet developed for the high burnup LWR fuel will be irradiated using in-pile fuel capsule at the HANARO. The fuel capsule should be irradiated under the similar condition to the LWR core up to the burnup higher than 70GWD/MTU within 5 years. To complete the irradiation test within desired period with satisfying the irradiation requirements, hafnium in the shape of neutron curtain is used and the concept of two-step irradiation test necessary for maintaining the integrity of the capsule is devised. The capsule at the 1st step has 6 fuel rods, in which 3 rods are out of the capsule for the post irradiation test after the 1st step irradiation test, and then the other fuel rods are loaded into new capsule and are irradiated up to the final burnup. Owing to the optimization in nuclear design of the capsule, we can reduce the irradiation time about half and irradiate the fuel capsule under more stable power condition.

1. 개요

큰 결정립 UO_2 소결체는 핵분열 기체의 방출량이 적어서 높은 연소도까지 연소될 수 있는 것으로 알려져 있으며 한국 원자력 연구소에서는 경수로용 고연소도 핵연료에 적용하기 위해 결정립의 크기가 기존의 $6\sim 8\mu m$ 에서 $12\sim 20\mu m$ 로 증가된 신형 소결체를 개발하였다[1]. 이러한 신형 소결체의 연소 성능 향상을 검증하기 위해 시험 핵연료봉을 하나로에 장전하여 2002년 초부터 5

년간 조사 시험을 수행할 계획이다. 고연소도에서의 노내 성능을 확인하기 위해 신형 소결체를 70GWD/MTU 이상까지 경수로용 핵연료와 유사한 조건에서 연소시켜 핵분열 기체 방출, 소결체의 안전성 및 고연소도에서의 결정립 세분화 및 핵분열 기체 기포 생성 등과 같은 조사후 시험을 수행할 계획이다[2].

조사 시험을 위한 시험 장치는 DUPIC 핵연료의 조사 시험을 위해 개발된 DUPIC 무게장 캡슐 [3]의 설계를 기본으로 하여 신형 소결체의 조사 요건에 따라 설계 개선한 핵연료 캡슐을 이용하기로 하였다. 조사 시험용 캡슐은 시험 핵연료봉 3개를 하나의 핵연료 다발로 조립하여 캡슐 내에 2개의 핵연료 다발을 상·하로 장전한다[4]. 장시간의 조사 시험에 대한 캡슐의 내구성이 아직 검증되지 않았기 때문에 캡슐은 2년 6개월 후에 노심에서 인출하여 핵연료 다발을 제외한 나머지 부분을 교체하여 계속 조사 시험하는 2단계 조사 시험이 된다. 이때 2개의 핵연료 다발 중 하나는 중간 연소도에서의 핵연료 연소 성능을 검사하기 위해 조사 후 시험을 수행하고, 나머지는 새로운 조사 캡슐에 장전하여 목표 연소도까지 조사시킬 예정이다.

신형 소결체를 5년 이내의 짧은 시간에 높은 연소도까지 조사 시험하려면 현재 DUPIC 핵연료 캡슐과 같은 개념으로는 충분하지 않으며 개선이 필요하다. 핵연료를 빨리 연소시키려면 높은 출력에서 연소가 이루어져야 하지만 조사 시험 핵연료의 안전성과 조사 시험 요건에 의해 최고 출력은 제한이 있을 수밖에 없다. 가능한 최고 출력으로 핵연료 캡슐을 설계할 수 있다고 하더라도 목표 연소도가 너무 높기 때문에 주어진 시간 이내에 조사 시험을 완료할 수 없다. 연소 초기의 출력을 조사 시험의 안전성 확보를 위하여 제한하다 보니 연소 후기의 출력이 너무 낮아 조사 시험 요건에 맞지 않을 뿐 아니라 조사시간이 너무 길어진다. 본 논문은 이러한 문제점을 극복하여 조사 요건에 맞는 신형 소결체 시험용 핵연료 캡슐을 어떻게 핵설계하였는지를 기술하였다.

2. 시험 요건

조사 시험은 각 시험의 목적에 맞게 이루어져야 하며 신형 소결체의 조사 시험 요건은 다음과 같다[4].

- 1) 목표 연소도 : 70GWD/MTU 이상
- 2) 조사시 평균 선출력 : 500~200W/cm
- 3) 조사시간 : 5년 이내

조사시간은 원자로 출력 운전 시간이 아니라 캡슐의 장전에서 인출까지의 시간을 가리킨다. 하나로는 28일 동안 계속 운전하고 7일 동안 핵연료 장전 및 유지/보수하는 운전 계획대로 운전하면 1년에 실제 운전 시간은 약 250일에 이른다. 따라서 5년 동안 하나로를 전출력 30MWth로 1250일 동안 운전을 할 때 조사 시험이 완료될 수 있는 핵연료 캡슐을 만들어야 한다.

3. 분석 방법

새로운 핵연료 캡슐이 위의 시험 요건을 만족하는지를 알아보기 위해서는 연소 기능이 있는 전산 코드를 이용해야 한다. MCNP[5]는 기하학적인 근사없이 계산할 수 있다는 장점은 있지만 연소 기능이 없기 때문에 캡슐이 장전되는 처음의 조건에 대한 분석만이 가능하므로 계산의 신뢰성을 확인하기 위하여 이용하도록 한다. 연소 계산을 할 수 있는 하나로 노심 관리 계산 체제의 VENTURE[6]를 이용할 경우에는 필요한 핵자료를 만들어야 하는데 캡슐의 기하학적인 모형이 특이하므로 WIMS-KAERI[7]로는 정확한 핵자료의 생산이 어렵다. 핵연료 캡슐의 분석은 복잡한 기하학적인 모양을 모델할 수 있는 HELIOS[8]로 핵자료를 만들어 VENTURE로 계산해 왔다. 신형 소결체의 조사 시험을 위한 핵연료 캡슐의 핵설계를 최적화하기 위해서는 여러 가지 경우에 대해서 많은 계산이 필요하여 계산 시간을 줄이기 위하여 VENTURE 계산을 하지 않고 직접 HELIOS로 계산이 이루어지도록 하였다. 핵연료 캡슐은 실제 하나로 노심(3차원)에서 조사되므로 2차원 전산 코드인 HELIOS로 분석할 때는 몇 가지 사항을 고려해야 한다. 첫 번째는 일정한 출

력 조건으로 계산을 할 것인지 아니면 일정한 중성자속 조건으로 연소 계산을 할 것인지를 결정해야 한다. 두 번째는 핵연료 캡슐에 대한 부분적인 모델로 계산할 것인지 노심 전체 모델(2차원)로 계산할 것인지를 결정해야 한다. 세 번째는 핵연료 캡슐에서 핵연료봉의 출력은 제어봉의 영향을 많이 받으므로 제어봉의 영향을 적절히 반영해야 한다.

3.1 일정한 출력 또는 중성자속

일반적으로 원자로는 열출력이 일정한 조건으로 운전되며 일정한 중성자속을 유지하도록 하지는 않는다. 출력(P)과 중성자속(Φ_{ave})의 관계는 다음 식과 같이 나타낼 수 있는데 연소가 진행됨에 따라 주기 초보다 주기 말에서 중성자속이 높다.

$$P = E_R N_f \sigma_f \Phi_{ave} \quad (1)$$

여기서, E_R 은 핵분열당 발생하는 에너지이고 σ_f 는 핵분열 단면적이다.

핵연료를 장전하여 운전을 계속함에 따라 핵분열 물질의 수밀도(N_f)는 작아지므로 일정한 출력(P)으로 운전하기 위해서는 중성자속(Φ_{ave})이 높아진다. 하나로에서 중성자속의 변화는 주기 길이(28일 운전)가 길지 않기 때문에 작다. 하나로 노심에서 캡슐의 핵연료 물질은 노심 전체 핵연료 물질의 일부분이므로 캡슐이 있는 부분의 중성자속은 노심 전체 중성자속의 변화에 영향을 받기 때문에 일정한 중성자속의 조건에서 연소가 진행된다고 볼 수 있다. HELIOS는 일정한 출력 조건으로 연소 계산을 수행하므로 캡슐의 정확한 계산을 위해서 일정한 중성자속의 조건으로 계산할 수 있도록 HELIOS를 수정하였다[9].

3.2 부분적인 모델 또는 전체 모델

부분적인 모델을 사용할 경우에는 빠른 계산을 할 수 있다는 장점이 있다. 그림 1은 DUPIC 핵연료 캡슐에 대한 부분적인 모델을 보여준다. 전체 노심에서 그림 1의 한정된 부분에 대한 평균 중성자속을 알고 있고 연소에 따른 중성자속 변화가 크지 않으면 이 모델을 이용할 수 있다. 그러나 가연성 독물질을 사용하는 경우에는 이 모델을 사용할 수 없다. 캡슐이 위치하는 부분의 중성자속이 가연성 독물질의 연소에 따라 큰 변화가 있기 때문이다. 이러한 경우에는 전체 노심 모델을 사용할 수밖에 없다. 그림 2는 HELIOS로 하나로 전체 노심을 모델했을 때 핵연료 캡슐이 장전된 조사공 OR4를 나타낸 것이다.

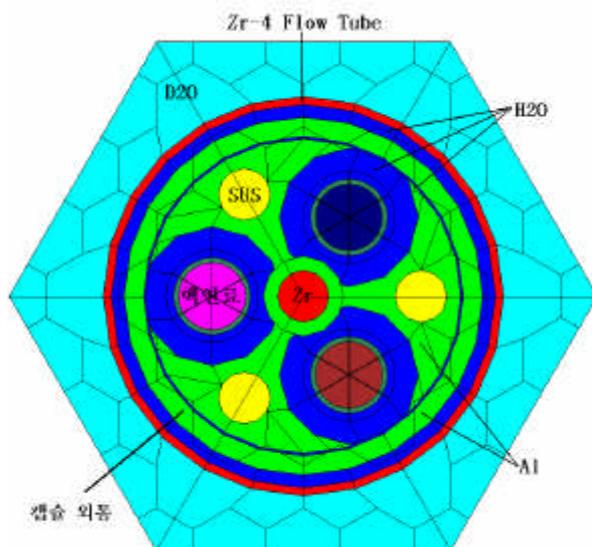


그림 1. 핵연료 캡슐의 부분 모델

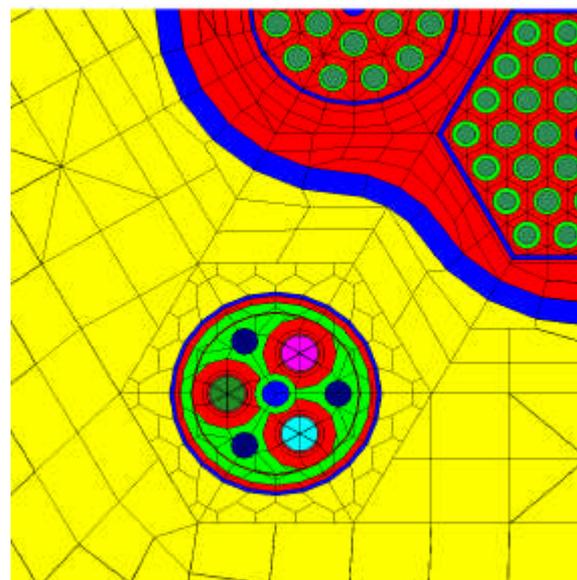


그림 2. 핵연료 캡슐의 전체 모델

3.3 제어봉의 영향

하나로에서 반응도 제어는 4개의 제어봉으로만 이루어지기 때문에 제어봉 삽입 정도에 따라 조사공 OR4 위치에서 중성자속 변화는 심하고, 조사될 핵연료봉이 축방향 어떤 지점에 위치하느냐에 따라 평균적인 출력과 출력 변화의 정도가 다르다. 안전성 관점에서는 모든 연소 시점에서 제어봉이 어떤 위치에 있더라도 조사될 핵연료봉의 출력은 안전성 분석에서 도출된 최대 선출력 이하여야 한다. 또한 연소 기간을 산출해내는 것이 중요하므로 평균적인 제어봉 위치에서의 핵연료 캡슐의 평균적인 조사 여건을 알아내어야 한다. 이러한 조건을 알아내기 위하여 하나로 노심 관리 계산 체제로 OR4 위치에 대하여 계산한 그림 3의 결과를 이용하였으며 캡슐이 조사될 때 평균적인 제어봉 위치는 450mm이다. 고속으로 조사 시험을 하기 위해서는 시험 핵연료봉은 높은 중성자속이 나타나는 지점에 위치하도록 하였다. 아래에 위치하는 시험 핵연료봉을 가장 높은 중성자속이 나타나는 지점에 위치시키고, 위에 있는 핵연료봉은 캡슐내 다른 구조물에 방해받지 않도록 하고 최대한 아래로 내린 것이다.

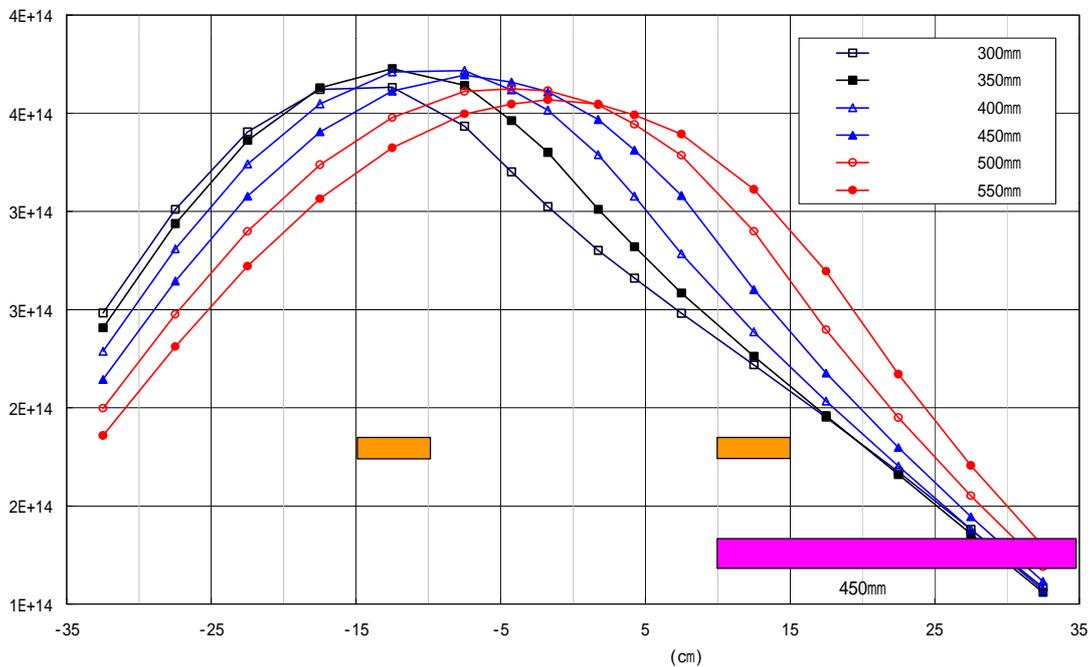


그림 3. 제어봉 위치에 따른 OR4 위치에서의 전체 중성자속의 축방향 분포

4. 계산 결과 및 토의

핵연료 캡슐의 기본적인 개념은 DUPIC 핵연료 캡슐이며 시험 핵연료봉에 대한 부분만 가압 경수로의 제원이 이용된다[3]. 신형 소결체 조사 시험을 위한 핵연료 캡슐을 만들 때 조정 가능한 것이 핵연료의 농축도 뿐이라면 주어진 조사시간은 목표 연소도에 비하여 매우 짧기 때문에 시험 요건을 만족하는 핵연료 캡슐을 만들 수 없다. 조사 시험을 빨리 완료하려면 농축도를 높여 높은 출력에서 조사가 이루어지도록 해야 하지만 시험 초기의 출력이 너무 높아진다. 따라서 시험 초기의 출력을 낮추기 위해서는 가연성 독물질의 사용이 불가피하다. 일반적인 가연성 독물질의 형태는 봉 모양을 가지고 있지만 OR4에서 조사시킬 경우는 조사공의 특성상 중성자속 준위는 노심에서 흘러나오는 것에 많이 의존하기 때문에 중성자속을 차단하는 형태의 중성자 차단막(시험 연료봉 3개를 외곽에서 감싸는 형태)가 바람직하다. 여러 가지 독물질이 사용될 수 있지만 비교적 쉽게 구할 수 있는 알루미늄에 붕소(Boron) 입자가 섞인 Boral Plate를 우선적으로 고려하였다. 가연성 독물질을 사용하는 경우는 중성자속 변화가 심하기 때문에 그림 2와 같은 하나로 노심 전체

모델을 사용한다. Boral Plate는 기계적인 건전성이 있어야 하므로 두께를 2mm로 설정하고 핵연료 농축도와 붕소 농도를 여러 가지 경우에 대하여 계산하여 결정하도록 한다. Boral Plate는 캡슐 외통의 바로 안쪽에 위치시켰다. HELIOS 계산을 할 때는 핵연료 캡슐 부분을 제외한 부분은 연소가 진행되지 않도록 하고 시험 핵연료봉과 가연성 독물질 부분만 연소가 되도록 하였다.

핵연료 농축도 4.0w/o의 경우에 대해서 Boral Plate에서 붕소 농도가 0.75, 1.0, 2.0 및 2.2w/o일 때에 대하여 계산하였다. 또한 핵연료 농축도가 5.0 및 6.0w/o인 경우에 대해서도 계산하여 핵연료 농축도의 변화에 대하여 어떤 변화가 있는지를 알아보았다. 계산 결과는 그림 4에 나타내었다.

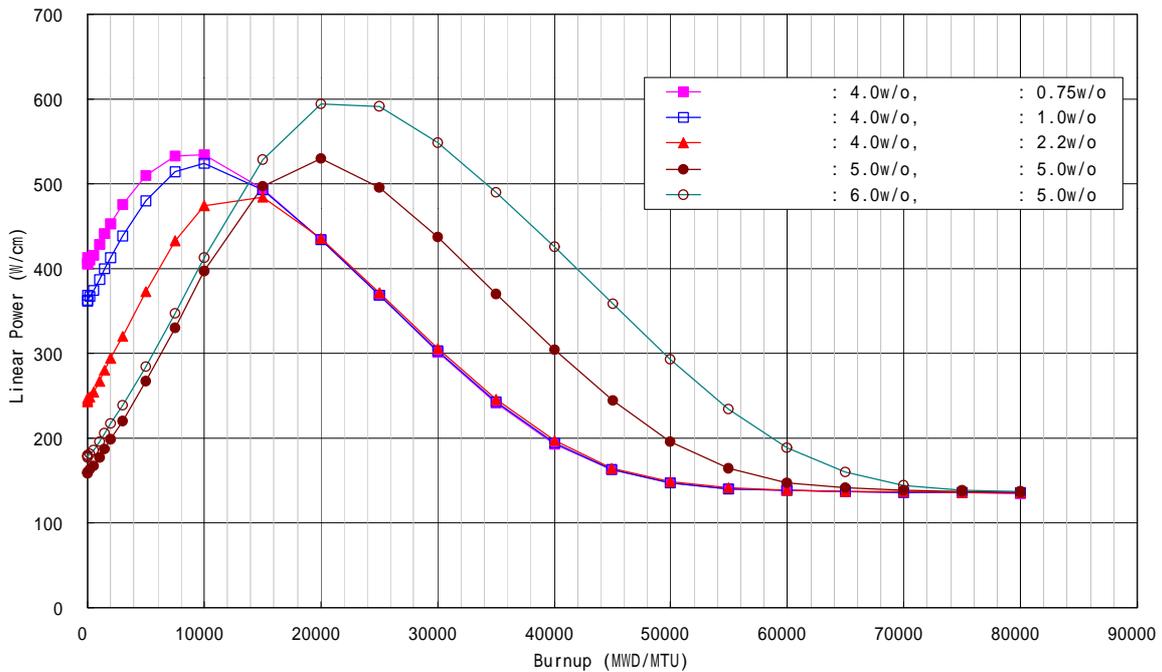


그림 4. 여러 가지 핵연료 농축도 및 붕소 농도에 대한 연소도에 따른 선출력

그림 4에서 선출력은 3개 시험 핵연료봉의 평균적인 값이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 시험 핵연료봉은 어떤 것은 노심에 가깝고 어떤 것은 멀기 때문에 각 핵연료봉의 선출력은 차이가 있고 축방향 선출력도 변화가 있기 때문에 최대 선출력은 평균적인 값보다 훨씬 크다. 그림 5에서 농축도 4.0w/o이고 붕소 농도가 2.2w/o인 경우가 최대 선출력 제한치를 만족하지만 목표 연소도 까지 필요한 조사시간(1612일)이 너무 길어 적당하지 않다.

그림 4에서 연소도에 따른 선출력의 모습은 포물선 형태인 것을 볼 수 있다. 핵연료 농축도와 붕소의 농도를 증가시키면 포물선의 중심이 오른쪽으로 이동하여 핵연료 농축도가 4.0w/o 보다 5.0w/o인 경우가 조사시간이 줄어들 것임을 알 수 있다. 그러나 농축도를 5.0w/o 이상으로 증가시킬 경우에는 조사시간이 더욱 줄어들 것으로 기대할 수 없다. 포물선의 왼쪽과 오른쪽의 기울기는 농축도와 상관없이 거의 같고 선출력 제한 요건을 만족시키기 위해서는 포물선 꼭지점의 높이가 같아야 하므로 농축도를 증가시키는 것은 오른쪽으로 포물선을 이동시키는 것에 불과하다. 농축도가 높아 포물선이 오른쪽으로 이동할 경우에는 연소 초기에 선출력이 낮아 많은 조사시간이 필요하므로 전체 조사시간이 줄어들 것을 기대할 수 없다. 따라서 붕소를 가연성 독물질로 사용하는 경우에는 연소가 너무 빨리 진행되기 때문에 적합하지 않으며 연소가 보다 느리게 진행되는 가연성 독물질을 사용해야 한다.

가연성 독물질로 흔히 사용되는 대부분의 독물질(Erbia, Gadolinia 등)은 연소 속도가 붕소 보다 빠르므로 사용할 수 없다. 미시적 흡수 단면적이 일반적인 구조재 보다 크고 붕소 보다 작은 물질이 적합할 것이다. 흡수 단면적이 작은 Indium(In), Silver(Ag), Hafnium(Hf), Iridium(Ir), Cobalt(Co) 등이 좋은 후보가 된다. 이에 대한 밀도, 중성자 에너지 0.0253eV에서의 미시적 평균 흡수 단면적(σ_a^0) 등은 다음과 같다.

원소	ρ (g/cc)	σ_a^0	Σ_a^0	핵종별 자연 상태 존재비
Cobalt	8.8	37.2	3.345	59(100.0)
Silver	10.49	63.6	3.725	107(51.84), 109(48.16)
Hafnium	13.36	102	4.598	174(0.16), 176(5.21), 177(18.61), 178(27.30), 179(13.63), 180(35.10)
Indium	7.31	193.5	7.419	113(4.29), 115(95.71)
Iridium	22.5	426	30.3	191(37.3), 193(62.7)

흡수 단면적 측면에서 Ir과 Co가 상·하한의 위치를 차지하고 있기 때문에 다른 재질이 적합하지 않으면 둘 중에 하나가 적합하지만 불행히도 이에 대한 HELIOS의 연소 핵자료가 없으므로 두 가지는 일단 제외한다.

우선 연소 사슬이 Hf 또는 Ag 보다 간단한 In를 이용하여 계산하여 보았으며 결과는 그림 5와 같다. Boral Plate의 경우는 붕소가 균질하게 Al과 섞여 제조되므로 표시할 때 붕소 농도로 하였지만 In은 금속의 형태로 사용한다고 가정하여 두께로 표시하였다.

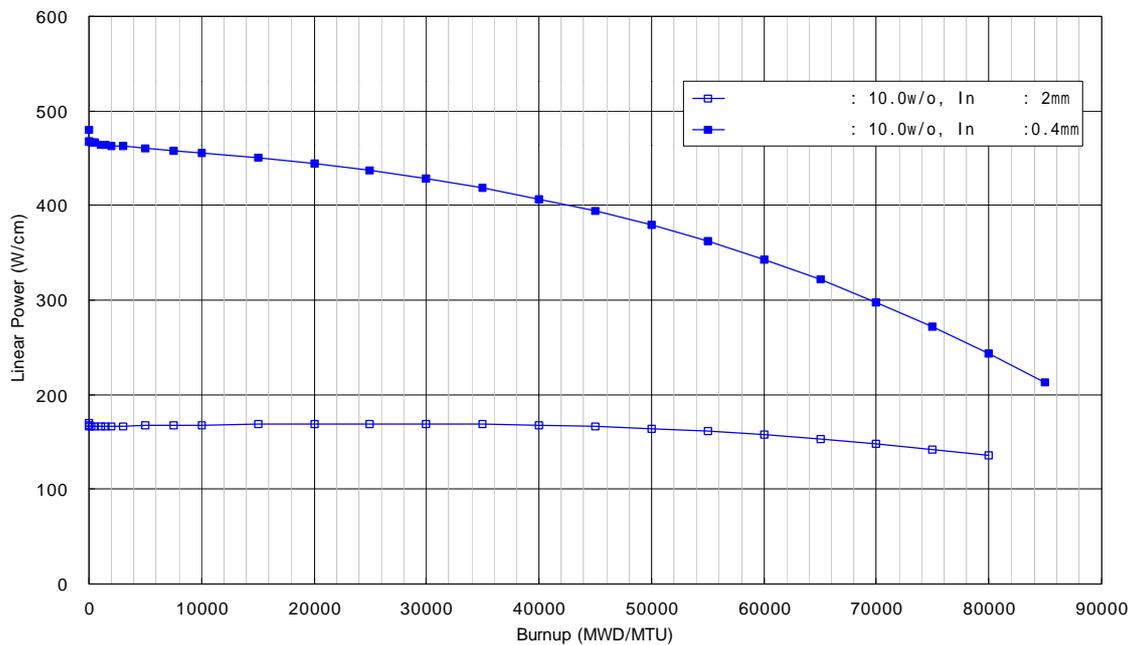


그림 5. In을 사용하는 경우의 연소도에 따른 선출력

In을 사용하는 경우는 목표 연소도까지 높은 선출력을 유지할 수 있기 때문에 적합한 것임을 알 수 있다. 같은 핵연료 농축도에 대하여 In의 두께가 두꺼울 경우에는 낮은 선출력으로 연소되지만 연소도에 따른 출력의 변화가 적다. 이것은 높은 농축도의 핵연료에 대하여 In의 두께를 두껍게 하면 높은 선출력을 일정하게 유지할 수 있음을 의미한다.

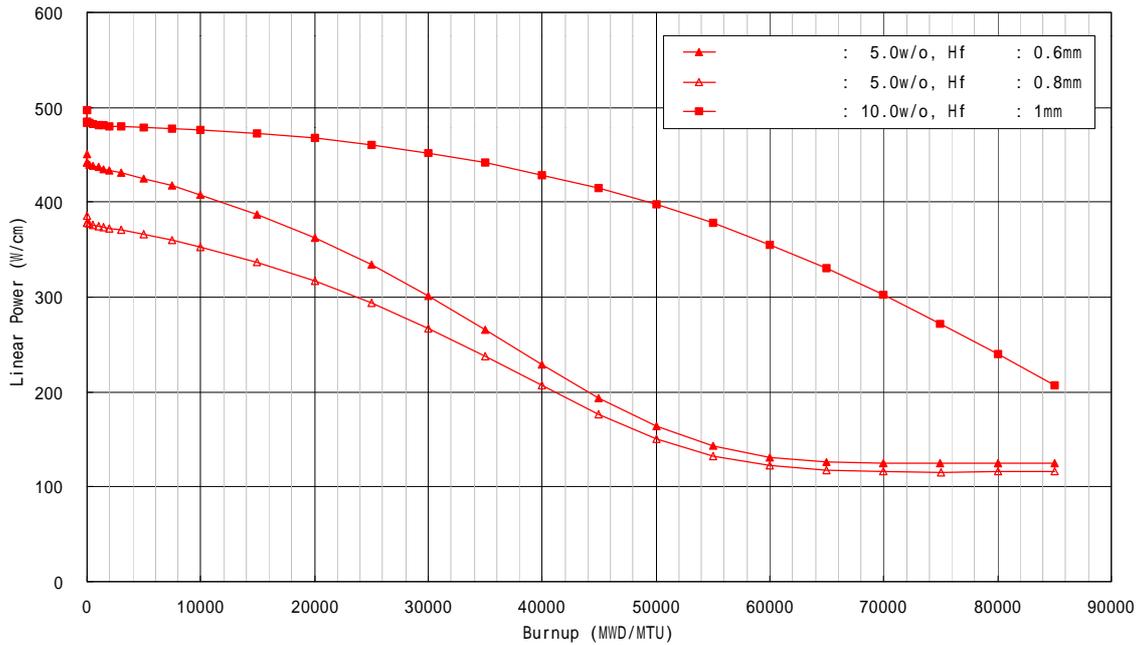


그림 6. Hf을 사용하는 경우의 연소도에 따른 선출력

In은 일부 가압 경수로에서 사용하는 Ag-In-Cd의 형태가 아닌 다른 형태로 사용될 경우에 대한 물리적 특성에 대한 충분한 자료가 없고 재료의 구입도 어려우므로 하나로서 제어봉 및 정지봉의 재질로 사용하는 Hf의 경우에 대해 계산을 수행하여 그림 6에 나타내었다. Hf의 흡수 단면적은 In의 절반에 불과하기 때문에 같은 농축도의 핵연료에 대하여 같은 출력을 내기 위해서는 Hf이 두께가 두꺼워야 하지만 연소 특성은 비슷하다. 단순히 미시적 흡수 단면적으로 판단할 때는 Hf이 In 보다 천천히 연소될 것으로 보이지만 계산 결과는 In의 경우와 비슷한 경향을 나타내는 것은 Hf의 연소 사슬에서 보상 효과가 있기 때문이다. 결과적으로 In과 Hf은 비슷한 성질을 나타내므로 Hf을 사용하는 것이 이미 하나로서 제어봉으로 사용하여 기계적 건전성 및 내부식성 등이 검증되어 있으므로 유리하다.

Hf을 사용할 때 농축도가 다른 경우에 Hf의 두께를 줄여서 초기 선출력을 비슷하게 유지하도록 하고 농축도에 따른 영향을 살펴보았다. 그림 6과 같이 농축도가 낮은 경우에 Hf의 두께를 줄여서 초기 선출력을 비슷하게 유지할 수는 있지만 지속적으로 높은 출력을 유지할 수 없음을 보여준다. 그림 5의 경우와 마찬가지로 빠른 시간 내에 연소를 시키기 위해서는 무엇보다도 핵연료 농축도를 높이는 것이 좋으나 시험 핵연료봉을 제조할 예정의 제조 공장이 인허가 받은 최고 농축도는 4.5w/o이므로 시험 핵연료봉의 최대 농축도를 4.5w/o로 한정할 수밖에 없다[4].

중성자 차단막인 Hf의 두께에 따라 선출력의 변화가 심하기 때문에 적절한 Hf의 두께를 결정해야 한다. 또한 어떤 위치의 핵연료봉을 2년 6개월 후에 꺼낼지를 결정하고 계속 조사시킬 핵연료봉의 위치에서 Hf을 제거할 때 안전성에 문제가 없고 조사시간에 대한 제한 요건을 만족하는지를 확인해야 한다. 시험 핵연료봉의 위치에 따라서 적절한 Hf의 두께가 다르므로 각각의 위치에 대하여 0.5~0.9mm의 두께를 0.1mm 간격으로 계산하였다. 계산 오차, 제어봉의 영향 및 Hf 두께의 제작공차에 의한 영향 등의 안전성 측면을 고려하여 선택된 최적의 Hf 두께는 핵연료봉이 위에 위치하는 경우는 0.6mm, 아래에 위치하는 경우는 0.7mm가 적당하다. 결정된 Hf 두께에 대한 연

소도에 따른 평균 선출력의 계산 결과는 그림 7과 같다. 위에 위치하는 핵연료봉은 선출력이 낮기 때문에 아래에 있는 핵연료봉을 계속 조사시키는 것이 전체 조사 시험을 빨리 완료할 수 있다. 따라서 1차 조사 시험 후에 이루어지는 2차 조사 시험은 아래에 있는 핵연료봉에 대해서 Hf을 제거하고 추가로 계산하여 같은 그림에 나타내었다.

1차 조사 시험의 목표는 2년 6개월 이내에 위에 있는 핵연료봉의 연소도를 35GWD/MTU까지 이르게 하고 아래에 있는 핵연료봉이 2차 조사 시험에서 Hf을 제거했을 때 한계 선출력 이하로 유지할 수 있게 충분히 연소시키는 것이다. 위에 있는 핵연료의 연소도가 35GWD/MTU에 도달하기 위해 필요한 시간은 594.6일(약 2년 5개월)이므로 주어진 시간내에 1차 조사 시험을 완료할 수 있다. 이때 2차 조사 시험을 할 대상인 아래에 위치하는 핵연료봉의 연소도는 42.5GWD/MTU에 이른다. 아래에 위치한 핵연료 집합체에서 Hf을 제거하여 2차 조사 시험을 할 때의 선출력은 1차 조사 시험의 초기 선출력 보다 낮으므로 안전성에 문제가 없음을 알 수 있다. 또한 목표 연소도까지 선출력이 200W/cm 이상으로 유지되므로 조사 시험 요건을 잘 만족시킨다. 아래에 있는 핵연료봉을 594.4일 후 꺼내어 Hf을 제거하고 2차 조사 시험을 하는 경우에 전체 조사시간은 1121.6일(약 4년 6개월)이 필요하므로 조사 시험 요건을 잘 만족시킨다.

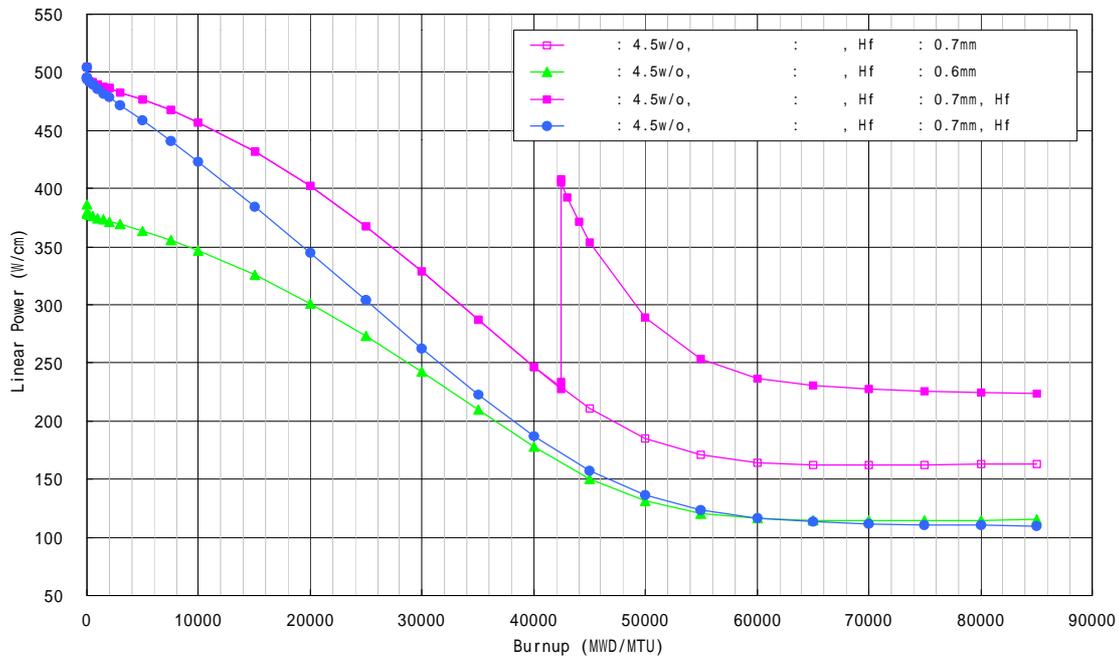


그림 7. 연소도에 따른 선출력 변화

Hf을 사용하고 2단계로 나누어 조사 시험을 수행함으로써 전체 조사시간이 줄어들었다. Hf의 연소에 의한 효과와 2단계 조사 시험의 효과를 각각 알아보았다. Hf의 연소에 의한 효과는 Hf이 연소되지 않도록 계산을 수행하여 알아보았다. 그림 8과 같이 가연성 독작용이 없을 경우 연소도에 따라 선출력이 빨리 떨어지므로 핵연료봉의 조사 시험을 빨리 할 수 없다. Hf의 가연성 독작용은 핵연료봉의 조사 시험을 빠르게 할 수 있으나 잔류 독작용이 너무 많이 남아 있으므로 2차 조사 시험에서 Hf을 제거하지 않으면 선출력이 너무 낮아 많은 조사시간을 필요로 하다. 또한 선출력이 200W/cm 이하이기 때문에 조사 시험 요건을 만족시킬 수가 없다. 그림 8은 Hf의 연소에 의한 효과와 2단계 구분 조사 시험의 효과를 조사시간 측면에서 보기 위하여 그림 7의 결과를 조

사시간과 연소도의 관계로 나타낸 것이다. 신형 소결체의 목표 연소도인 70GWD/MTU에 도달하기 위한 조사시간은 3가지 경우에 대하여 각각 1122, 1374 및 1822일이 필요하다. 그림 8에서 보는 바와 같이 가연성 Hf를 사용하면 조사시간은 약 446일을 줄일 수 있고, 2단계 구분 조사 시험을 하면 추가로 254일을 줄일 수 있다. 즉 Hf의 사용과 2단계 조사시험으로 700일을 줄일 수 있으므로 약 2년 10개월 일찍 조사시험을 완료할 수 있다.

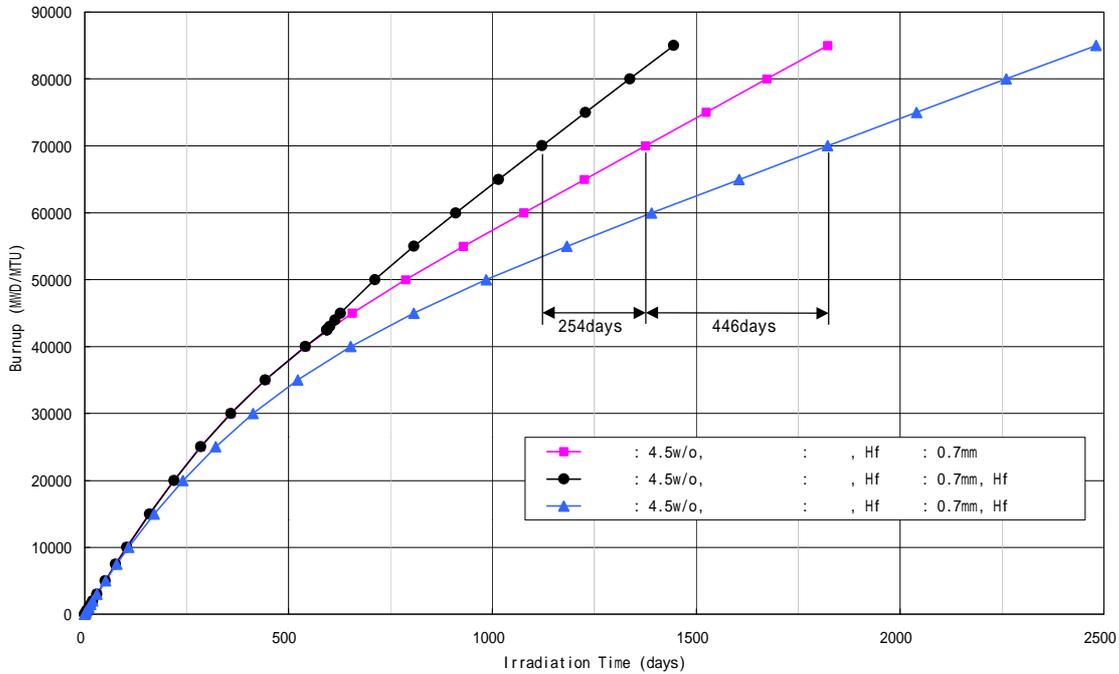


그림 8. 조사시간과 연소도의 관계

5. 결론

경수로의 고연소도 핵연료용으로 개발된 신형 소결체를 하나로에서 조사 시험하기 위한 핵연료 캡슐을 핵설계하였다. 시험 핵연료봉의 조사 요건은 실제 원전 핵연료의 연소 조건과 유사하도록 유지하고, 70GWD/MTU 이상의 고연소도까지 5년 이내의 짧은 시간에 조사 시험을 완료하도록 하는 것이다. DUPIC 핵연료 캡슐과 같이 기존에 하나로에서 사용하는 핵연료 캡슐로는 이와 같은 요건을 만족시킬 수 없다. 일정하게 높은 출력 조건으로 조사 시험이 이루어지도록 해야 하므로 가연성 독물질의 사용이 불가피하였다. 하나로에서 핵연료 조사 시험을 위해 가연성 독물질의 사용은 신형 소결체의 조사 시험에서 처음으로 시도되었다. 가연성 독물질은 중성자 스펙트럼과 중성자속 준위에 따라 연소되는 특성이 달라지기 때문에 하나로 조사공의 위치와 필요한 조사 시험 요건에 맞출 수 있도록 적절히 사용되어야 한다. 조사 시험이 이루어지는 곳은 하나의 외부 노심인 OR4 위치인데 중성자속 준위는 내부 노심에서 흘러나오는 중성자에 많은 부분을 의존하므로 가연성 독물질은 중성자 차단막의 형태로 Hf를 사용하는 것이 유리하다는 결론을 얻었다.

오랜 기간 동안 이루어지는 조사 시험에 대한 캡슐의 내구성은 아직 검증되지 않았기 때문에 캡슐을 2년 6개월 후에 분해하여 새로운 캡슐에 시험 핵연료봉을 옮겨 계속 조사 시험할 예정이다. 이와 같은 2단계 조사 시험은 최종 목표 연소도 뿐만 아니라 중간 단계의 어떤 특정 연소도에서도 조사 후 시험 자료를 추가로 확보할 수 있는 장점이 있다. 신형 소결체의 조사 시험을 위한 핵연료 캡슐에서는 시험 핵연료봉 3개로 이루어진 다발 2개를 캡슐내의 적절한 위치에 배치하여 2년 6개월 후에 캡슐을 분해할 때 1개 다발의 연소도가 35GWD/MTU에 이르도록 하고 다른 1개

다발은 새로운 캡슐에 넣어 목표 연소도까지 계속 조사 시험할 예정이다. 이와 같이 하려면 본 논문에서는 캡슐 내에 위치한 2개의 다발이 적당한 출력을 내고 적절한 시점에서 인출이 가능하도록 각 다발을 감싸는 Hf의 두께를 최적화하였다. 또한 캡슐의 내구성의 문제로 인하여 신형 소결체의 조사 시험이 2단계 구분 조사 시험이 되어야 하는 점을 이용하여 2차 조사 시험에서 잔류 독작용이 많은 Hf을 제거하여 빠른 조사 시험이 이루어지도록 하였다.

Hf을 중성자 차단막의 형태로 사용하고 적절한 연소도에서 2단계 구분 조사 시험을 하여 필요한 조사시간을 크게 줄였고 보다 균일한 출력 조건에서 조사 시험이 이루어지도록 신형 소결체의 핵연료 캡슐을 설계하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고 문헌

1. 송근우 외, “경수로용신형핵연료개발 : 소결체재료신기술개발,” KAERI/RR-2023/99, 한국원자력 연구소, 1999.
2. 김대호 외, “고연소도 신형 UO_2 소결체의 하나로 캡슐 조사시험을 위한 시험봉 설계,” 2000년 추계 원자력학회, 2000.10
3. 배기광 외, “DUPIC 핵연료 조사시험 설계 및 안전성분석보고서,” KAERI/TR-1157/98, 한국원자력연구소, 1998.10.
4. 이찬복 외, “경수로 핵연료용 큰 결정립 UO_2 소결체 조사시험,” HANARO Workshop 2000, 2000. 12.
5. J. F. Briesmeister (Editor), “MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code,” LA-12625-M, Los Alamos National Lab. (1993).
6. D. R. Vondy et al., “VENTURE : A Code Block for Solving Multigroup Neutronics Problems Applying the Finite-Difference Diffusion-Theory Approximation to Neutron Transport,” ORNL-5602, ORNL (1975).
7. H. R. Kim, “WIMS-KAERI for the Extended KMRR Reactor Physics Calculation,” KAERI Internal Report (1987).
8. E. A. Villarino, E. Martenenson, and R. J. J. Stamm'ler, “HELIOS: Usage of Transformation Laws for Angularly-Dependent Collision Probabilities,” *Joint Intl. Conf. on Mathematical methods and Supercomputing in Nuclear Application*, Vol. 2, p. 443-444, Pittsburgh, Karlsruhe, Germany, 19-23, April, 1993.
9. 서철교, “고연소도 신형 UO_2 소결체의 조사 시험을 위한 예비 핵특성 분석,” 내부통신문, HAN-RR-CR-900-00-082, 2000.11.