

HYPER 핵연료 열전도도 보정 및 He 생성효과 분석
The Adjustment of Thermal Conductivity and the Analysis of He Generation
Effects in the Metallic Fuel of HYPER

이병운, 신민재, 박원석
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

HYPER 연료중의 하나로 U-TRU-60Zr 합금형 연료가 고려되고 있으며, 정상상태에서의 합금형 핵연료 성능분석을 위하여 MACSIS-H 코드가 개발되고 있다. 본 논문에서는 기존의 3원합금 모델이 한계가 있기 때문에 열전도도 모델을 보정하였다. 또한 Am에 의한 He 생성량을 팽윤 및 핵분열생성가스 방출모델에 이식한 후, 플레넘부피대 연료심 부피비율로서 크리프 변형량에 대한 민감도 분석을 수행하였으며, 연료봉의 건전성을 유지하기 위한 플레넘의 길이를 도출하였다. 그러나 현재 보정된 열전도도 및 He 생성 모델은 불확실성이 많기 때문에 향후 이들을 검증하기 위한 지속적인 실험이 요구된다.

Abstract

U-TRU-60Zr alloy fuel is being considered as one of the blanket fuel for the HYPER in Korea. The MACSIS-H for an alloy fuel is being developed as the steady-state performance computer code. There was a limit in the existing thermal conductivity model for U-PU-Zr, so the thermal conductivity model was adjusted in this paper. He generation rate was also calculated, and then inserted into the swelling/FGR routine of the code. The sensitivity analyses of the creep was performed by considering the plenum volume vs. fuel slug volume rate, so the plenum length was also derived to keep the integrity of the fuel. However, there are uncertainties on the modeling such as the thermal conductivity and the He generation, so some experimental tests are needed for clarifying the uncertainties of fuel modeling.

1. 개요

HYPER 핵연료중의 하나로 U-TRU-60Zr 합금형 연료가 고려되고 있으며, 합금형 핵연료 성능분석을 위하여 MACSIS-H[1]가 개발되고 있다. 핵연료봉의 노내 거동상 원천적으로 가장 주요한 거동인자는 열전도도, 반경방향 온도분포도 및 용점이다. 왜냐하면 핵연료봉의 노내 거동은 연료심의 반경방향 온도 및 그 구배에 따라 다양한 상이 존재하며, 또한 노내 거동이 조사적, 열적 및 열기계적으로 복합적인 조건에서 기인되기 때문이다. 이와 같이 핵연료 성능분석을 위하여 가장 기본이 되면서 중요한 것은 연료심의 열전도도이지만, 기존의 핵연료 열전도도모델[2]은 Pu 함량 30wt%이하, 10wt%내외의 Zr 함량을 기준으로 하였기 때문에 Zr 함량이 매우 높은 HYPER 핵연료의 열전도도에는 적용이 되지 않는다. 이에 따라 Zr 함량에 따라 열전도도를 적용할 수 있도록 기존의 U-Pu-60Zr 열전도도 모델을 보정하였다. 또한 기존의 핵연료성능평가모델에서는 Am을 고려하지 않았기 때문에 핵분열가스가 생성되는 모델에서 ^{241}Am 에 의한 He의 생성량을 고려하지 않고 있었다. 따라서 Am에 의한 He 생성량을 MACSIS-H에 삽입하여 핵분열생성가스 방출에 의한 플레넘 압력을 고려할 수 있도록 하였다.

또한 본 논문에서는 보정된 열전도도 모델 및 He 생성량을 이용하여 합금형 핵연료의 연료심 대 plenum 비율에 대한 피복재 크리프의 민감도 분석을 수행하여 HYPER 합금형핵연료의 건전성을 분석하여 plenum의 길이비율을 결정하였다. 이 논문은 핵연료의 개념설계를 위하여 합금형 핵연료가 어떠한 성능을 나타낼 지를 예상하기 위한 것이며, 정확한 열전도도 및 He 생성량은 실험으로 검증되어야 할 것이다.

2. 열전도도 보정

2.1 기존 열전도도 모델 보정

핵연료 성능분석을 위하여 가장 기본이 되면서 중요한 것은 연료심의 열전도도이지만, 기존의 조사되지 않은 핵연료 열전도도모델은 10wt%내외의 Zr 함량을 기준으로 하고 있으며 그 모델은 다음과 같다. [2].

$$k_o = A + BT + CT^2, \quad \text{W/mK} \quad (1)$$

$$A = 17.5[(1-2.23Wz)/(1+1.61Wz)-2.62Wp]$$

$$B = 1.54 \times 10^{-2}[(1+0.061Wz)/(1+1.61Wz)+0.90Wp]$$

$$C = 9.38 \times 10^{-6}(1-2.70Wp)$$

여기서 Wz, Wp는 연료내에 함유된 지르코늄 및 플루토늄의 무게 분률이다.

그러나 이 모델은 그림 1에서 보는 바와 같이 Pu의 함량이 크게 증가하거나 Zr의 함량이 증가하게 되면 열전도도 값이 (-)가 되어 HYPER 연료심의 열전도도 모델로는 부적당하다는 것을 알 수 있다. 이는 기존 모델이 10wt%내외의 Zr 함량을 기준으로 하여 실험에 의한 도출된 모델이며, 또한 Pu 함량도 약 19wt% 내외의 값을 가졌을 때의 모델이기 때문이다. 따라서 기존 모델은 Zr 함량 10wt%내외에서 Pu 함량을 19±10wt% 정도까지 적용이 될 수 있다고 판단된다. 따라서 Pu 함량이 30wt%내외인 연료에서 Zr 함량이 크게 증가하였을 경우의 열전도도 모델이 필요하지만 현재까지는 이에 대한 실험데이터가 전무한 실정이다.

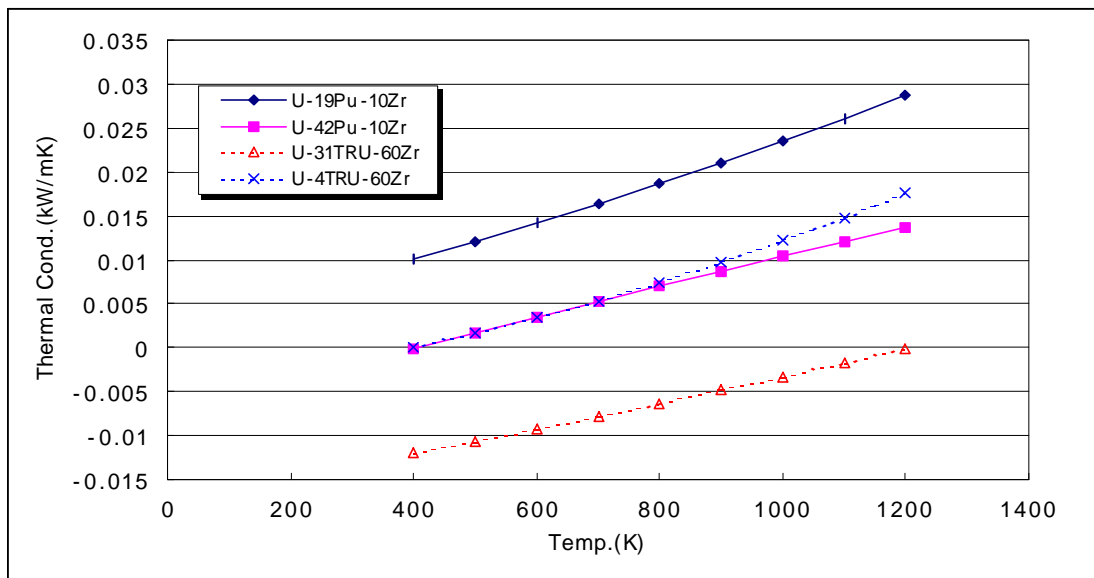


그림 1. 기존 모델에 의한 연료심의 열전도도

본 논문에서는 HYPER 핵연료심의 열전도도 모델을 MACSIS-H에 설치하기 위하여 기존의 U-Pu-Zr 모델과 Pu-Zr 열전도도를 구하기 위하여 사용하였던 U-Zr 열전도도 모델을 이용하였다.

U-Zr 합금에 대한 열전도도는 식 2와 같이 표시된다[3].

$$K_{U-Zr} = (7.488 + 3.43 \times 10^{-3}T - 32.53X_{Zr} + 4.33 \times 10^{-6}T^2 + 39.97(X_{Zr})^2 - (7.843 \times 10^{-4})TX_{Zr})/0.351 \quad (2)$$

여기서 T는 온도, X_{Zr} 은 Zr의 분율이다.

방정식(2)와 같은 U-Zr 모델로부터 U-TRU-Zr의 열전도도를 유추하기 위하여 우선적으로 U-TRU-10Zr 모델에서 TRU 함량이 0일 경우의 열전도도를 비교하였다. 그 후 Pu 함량을 5wt%씩 증가시키면서 U-Zr 모델과 U-TRU-10Zr 모델의 열전도도 값을 비교한 후 온도에 따른 Pu 함량증가당 열전도도 변화치를 U-Zr에 설치하였다. 또한 Zr이 추가되는 경향은 U-Zr 모델의 추세를 따른다고 가정하였다. 이에 따라 다음과 같은 방정식 (3)을 도출하였으며, 이 방정식에 따른 열전도도와 기존 모델의 열전도도를 비교하면 그림 2와 같다.

$$K_{U-TRU-Zr} = (7.488 + 3.43 \times 10^{-3}T - 32.53X_{Zr} + 4.33 \times 10^{-6}T^2 + 39.97(X_{Zr})^2 - (7.843 \times 10^{-4})TX_{Zr}) / 0.351 \times (2 \times 10^{-7} \times T^2 - 0.0004 \times T + 1.3233) / (X_{Pu} / 0.05) / (-2.3349 \times X_{Pu} + 0.9765) \quad (3)$$

여기서 X_{Pu} 는 Pu의 wt%, X_{Zr} 은 Zr의 wt%이다.

이 모델은 열전도도가 온도에 따라 증가하며, U-TRU-Zr 열전도도가 Zr 함량에 따라서 U-Zr 및 Pu-Zr과 같은 열전도도 추세를 가지며, 열전도도가 (-)의 값을 가지 않도록 열전도도 모델을 보정한 것이다.

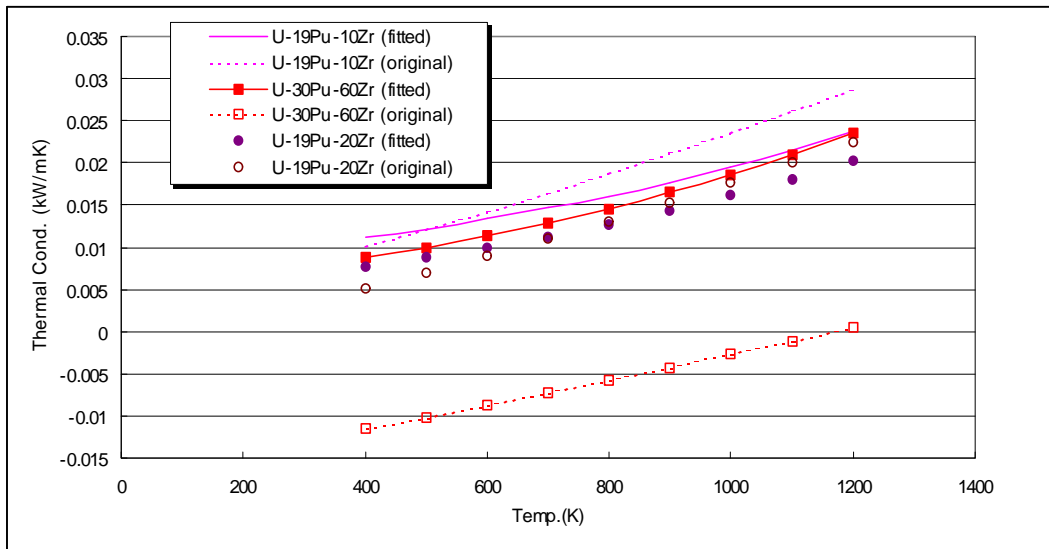


그림 2. 기존 모델 및 보정된 모델에서의 열전도도 비교

2.2 보정된 열전도도 모델 분석

그림 2에서 보는 바와 같이 Zr 함량이 높지 않을 경우에는 유사한 값을 가지지만 Zr 함량이 매우 높을 때는 기존의 모델은 열전도도가 (-)를 가지게 된다는 것을 알 수 있다. 그러나 보정된 모델에 의한 열전도도는 (+)를 가지게 하였으며, 또한 U-Zr의 추세를 따르기 때문에 열전도도가 높아진다는 것을 알 수 있다.

즉 3원합금의 경우 어떤 조성에서 열전도도가 (-)로 떨어지도록 모델화 되어 있었으며, 또한 Zr 함량에 따라 계속 감소하는 추세를 가지고 있다. 본 모델에서는 열전도도를 (+)로 올릴 수 있도록 2원 합금의 열전도도를 이용하여 3원합금의 열전도도를 보정하였으며, 또한 어느 정도의 Zr 함량에 따라 열전도도가 증가하도록 하였다.

그림 3에서 보는 바와 같이 3원 합금의 경우도 2원 합금의 경우와 마찬가지로 약 40% 정도의 Zr 함량이 되면 다시 증가하도록 하였다. 도출된 본 모델을 이용하면 낮은 Zr 함량에서는 기존의 모델과 열전도도 값이 유사하며, 어떠한 Zr 함량 및 TRU 함량에서도 사용할 수 있기 때문에 이 모델을 MACSIS-H에 설치하여 향후 핵연료봉 성능분석시 이용하도록 하였다.

그러나 도출된 모델은 실험으로 검증된 모델이 아니기 때문에 불확실성이 많아 향후 실험을 통한 검증이 필요한 상태이지만, 실험 이전에 핵연료의 개념설계를 위하여 합금형 핵연료가 어떠한 성능을 나타낼 지를 예상하기 위한 것이며, 정확한 열전도도 및 He 생성량은 실험으로 검증되어야 할 것이다.

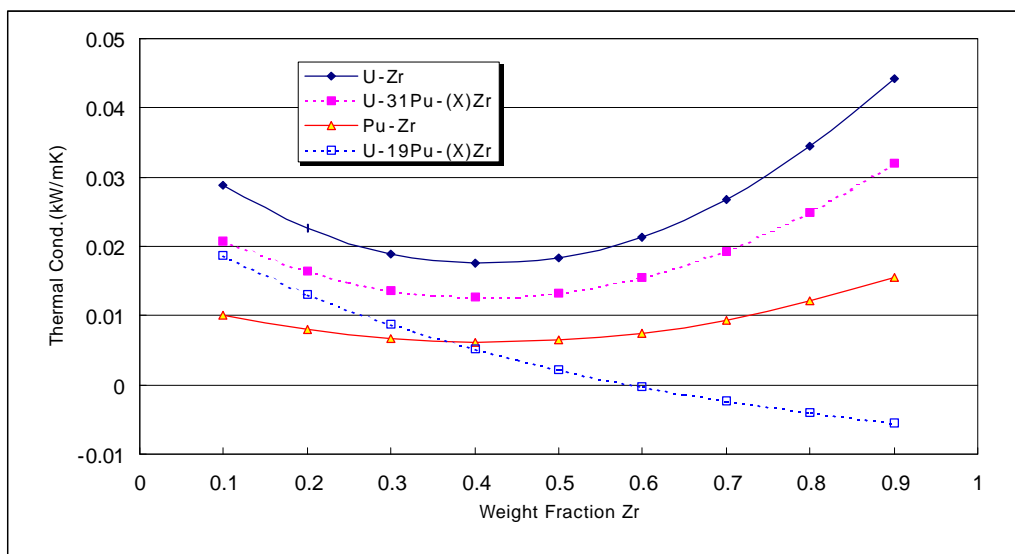


그림 3. 2원합금 및 U-19Pu-(X)Zr의 800K에서 Zr 함량에 따른 열전도도 추세

3. Am에 의한 He 생성량 추가

3.1 He 생성량 추가

HYPER 핵연료는 TRU 성분을 포함하기 때문에 Am이 포함되며, charge되는 핵연료심의 조성은 표 1과 같다[4].

표 1. charge되는 HYPER 핵연료 조성

연료심	함량 (wt%)
U	8.26
Pu	27.4
MA	4.34
(²⁴¹ Am)	(0.96)
Zr	60.0

U-TRU-60Zr에 함유되어 있는 ²⁴¹Am은 0.96wt%이며, ²⁴¹Am은 He을 방출하여 기존의 U-Pu-Zr 연료에는 고려하지 않았던 핵분열생성가스를 추가로 생성하게 된다. 현재까지 데이터에 의하면 Am 1g당 165일마다 약 50ml의 He을 방출한다고 분석되고 있다 (표 2 참조)[5].

표 2. He 생성량

Data Point	Specific He Generation (ml/g ²⁴¹ Am transmuted)
X501	39-45
SUPERFACT-1	33-63
EFTTRA-T4	45-60
Na point design (ORIGEN)	58
Pu-6Am-40Zr (ORIGEN)	47.2
Pu-20Am-40Zr (ORIGEN)	46.8
Am-20Pu-40Zr (ORIGEN)	46.6

이에 따라 HYPER 핵연료핀 1개에 장전되는 Am의 양을 다음과 같이 계산한 후 He의 생성량을 예측하였다.

즉 연료심 직경이 4.57mm이며, 연료심 밀도는

8.3U-27.4Pu-2Am-1.5Cm-0.8Np-60Zr의 경우 9.04 g/cm³이므로

연료봉 1개에서 연료심 무게는

$$V_{\text{fuel}} = \pi(0.457/2)^2(120) = 19.684 \text{ cm}^3$$

$$m_{\text{fuel}} = V \rho / 1000 = 0.178 \text{ Kg이 된다.}$$

이에 따라 Am 질량은 3.6g이며 ^{241}Am 질량은 1.7g이 장전된다고 가정하였다.

또한 165일마다 1g의 ^{241}Am 에서 약 50ml의 He이 발생된다고 가정하였으므로 합금형 연료봉의 경우 165일마다 핵연료심에서 약 85ml 발생한다고 가정하여, MACSIS-H의 핵분열생성가스 생성모듈에 첨가하였다. Am 농도는 연소도에 따라 줄어들지라도 보수적으로 일정하다고 보고 He 생성량 계산하도록 하였다.

3.2 He 생성효과 분석

그림 4는 U-TRU-60Zr 연료에서 ^{241}Am 에 의한 He이 생성될 때와 아닌 경우에 생성되는 가스량을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 Am의 양은 적지만 생성되는 He 가스의 양은 기존에 생성되는 가스 양의 약 1/3-1/2를 차지하는 것으로 나타난다. 이에 따라 U-TRU-60Zr 연료가 아닌 다른 연료심 성분이 HYPER 합금형 연료로 채택된다면 Am이 아무리 적은 양이 함유되어 있더라도 지속적인 민감도 분석이 필요한 것으로 나타났다.

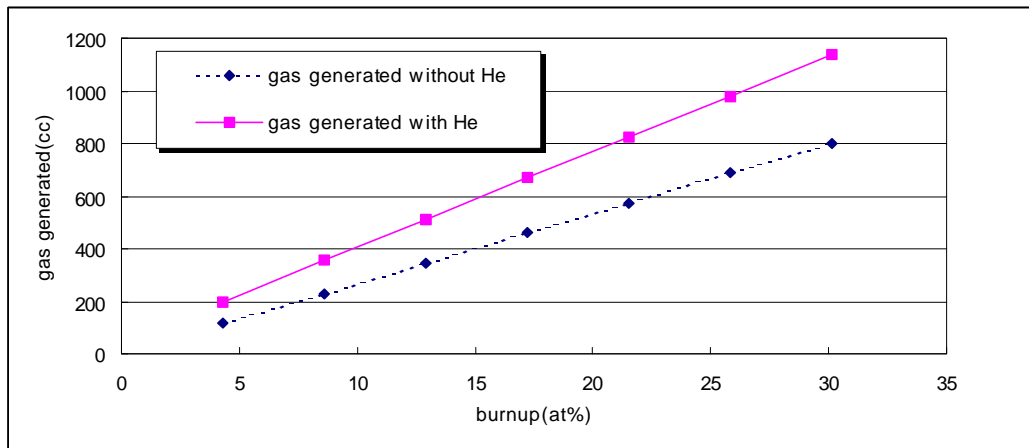


그림 4. U-TRU-60Zr 연료의 핵분열가스 생성량

그림 5는 He 생성효과를 고려하였을 때와 He 생성이 없다고 가정하였을 경우, 연료심부피대 plenum 부피비율에 의한 피복재의 크리프를 나타낸다. 연료심길이 1200mm인 경우 플레넘 부피비율이 0.5배인 경우 플레넘 길이는 450mm, 1.0배인 경우는 900mm, 1.5배인 경우는 1350mm이다. 플레넘 부피비율이 연료심부피의 0.5배인 경우 크리프 양에서 매우 많은 차이가 난다는 것을 알 수 있다. 그림에서 보는

바와 같이 플레넘이 0.5배인 경우와 1.5배인 경우의 크리프량이 차이가 나게 되며, 이 경우 He의 영향도 무시할 수 없게 된다. 현재 개념설계된 HYPER 연료는 플레넘 부피 비율을 약 1.5배로 하였기 때문에 He 생성에 의한 크리프변형을 수용할 수 있을 것으로 판단된다.

현재 피복재 변형계산에서는 공용현상을 고려하지 않았기 때문에 더욱 더 보수적으로 계산해야 하며, 향후 공용현상을 고려하여 과도현상시의 플레넘 압력 및 공용을 고려한 결과를 계속 추가하여야 하며, 또한 계속적인 열전도도 보정 및 실험에 의한 검증이 필요하다.

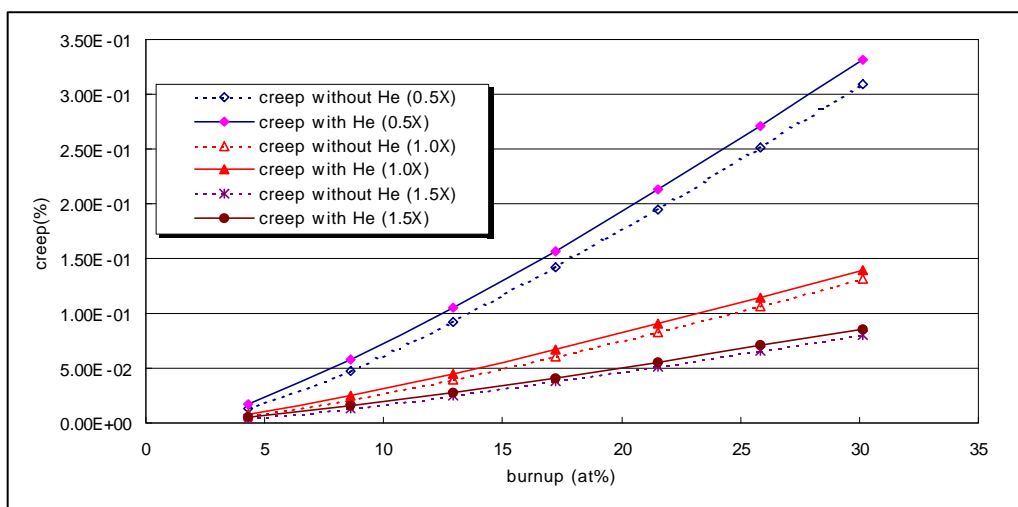


그림5. He 생성효과 및 plenum비율에 의한 크리프

4. 결론

HYPER 합금형핵연료로 U-TRU-60Zr 연료가 고려되고 있으며, TRU를 함유하는 연료이기 때문에 기존의 U-Pu-Zr 연료이외에도 MA가 함유된 연료이다. 이에 따라 연료심의 물성특성이 기존의 연료와는 틀리게 되며, 특히 핵연료성능분석시 가장 기본이 되는 열전도도를 도출해야 한다. 또한 Am에서 발생하는 He도 추가적으로 계산하여 핵연료성능을 분석하여 건전성을 가지는 설계개념을 개발하여야 한다.

기존의 핵연료 열전도도모델은 10wt%내외의 Zr 함량을 기준으로 하였기 때문에 HYPER 핵연료의 열전도도에는 적용이 되지 않는다. 이에 따라 Zr 함량에 따라 열전도도를 적용할 수 있도록 U-TRU-60Zr를 보정하였다. 열전도도를 (+)로 올릴 수 있도록 2원 합금의 열전도도를 이용하여 3원합금의 열전도도를 보정하였으며, 또한 어느 정도의 Zr 함량에 따라 열전도도가 증가하도록 하였다.

이렇게 도출된 모델은 실험으로 검증된 모델이 아니기 때문에 불확실성이 많아

향후 실험을 통한 검증이 필요한 상태이지만, 실험이전에 핵연료의 개념설계를 위하여 합금형 핵연료가 어떠한 성능을 나타낼 지를 예상하기 위한 것이며, 정확한 열전도도 및 He 생성량은 실험으로 검증되어야 할 것이다.

또한 기존의 연료는 Am을 고려하지 않았기 때문에 핵분열가스가 생성되는 모델에서 ^{241}Am 에 의한 He의 생성량을 고려하지 않고 있었다. 따라서 Am에 의한 He 생성량을 MACSIS-H에 삽입하여 핵분열생성가스 방출에 의한 FCMI를 고려할 수 있도록 하였다. 연료심 대 plenum 비율에 대한 민감도 분석을 수행하여 HYPER 합금형핵연료의 건전성을 분석하고 최적의 plenum비율을 결정하였다.

향후 연료심의 성분이 변경되는 경우, 재분석을 수행하여야 하지만, 현재까지 결과로는 현재 개념설계된 plenum으로 He 생성 추가에 의한 변형을 충분히 수용할 수 있는 것으로 나타났다. 상세설계 단계에서는 더욱 더 민감한 분석을 통하여 설계개념을 조정하여야 하지만, 충분히 수용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] W.Hwang et al., "Preliminary Analysis on the Temperature Profile of Blanket Rod for HYPER" Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Seoul, Korea, Oct 1999.
- [2] "Status of Fuel Element Modeling Codes for Metallic Fuels", M. C. Billone et al., Int. Conf. on Reliable Fuels for LMRs, Tucson, USA, 1986
- [3] 이병운 외 3인, HYPER용 합금형 및 분산형 핵연료 열전도도 및 온도분포 분석, 2001한국원자력학회 춘계발표회논문집, 2001.
- [4] 박원석 외, "고준위 폐기물 처리전환 기술개발 - 핵종변환기반기술개발", KAERI/RR-2117/2000, 2001
- [5] M.K.Meyer et.al, "Fuel Design Design for a U.S. Accelerator Driven Transmutation System" ANL Transmutation Development Workshop, ANL, 2001