

가돌리니아 가연성 독봉의 반경방향 출력 분포 예측 모델 개발

Model Development to Predict the Radial Power Distribution
in the Gadolinia Burnable Absorber Rod

이찬복, 송재승, 김대호, 방제건, 정연호
한국원자력연구소
대전시 유성구 사서함 105 호, 305-600

요 약

경수로의 장주기 및 고연소도 노심의 가연성독봉으로 널리 사용되고 있는 가돌리니아 독봉의 노내 성능 분석을 위해 필요한 반경방향의 출력분포를 Gd_2O_3 의 농도, 연소도 및 U-235의 농축도의 변화에 따라 예측하는 모델을 개발하였다. 참조용 자료로는 핵설계 Cell 계산 코드인 HELIOS의 예측치를 사용하였는데, 개발된 모델은 반경방향 출력분포 변화를 잘 예측하였다. Gd는 중성자 흡수단면적이 매우 크기 때문에 낮은 연소도에서 반경방향의 출력분포가 심한 변화를 보였으며, 연소도 20 MWD/kgU 이상에서는 Gd이 대부분이 소멸되어서 반경방향의 출력분포 변화도 크지 않는 것으로 나타났다.

Abstract

For the gadolinia burnable absorber rod which is widely used in the LWR core design of the longer cycle length and the high burnup fuel, a model was developed to predict the radial power distribution as a function of Gd_2O_3 content, burnup and U-235 enrichment. Predicted results of the cell neutronics code, HELIOS were used as the reference data with which the model prediction is shown to be in a good agreement. Due to the very high neutron absorption cross section of gadolinium, radial power distribution varied severely at low burnup while at high burnup its variation was not much due to the disappearance of gadolinium by neutron absorption.

1. 개요

가돌리니아 가연성독봉은 Gd의 중성자 흡수단면적이 매우 큰 장점에 따라 장주기 및 고연소도 핵연료 노심의 잉여반응도 조절 및 노심 내의 출력 분포를 평탄하게 유지하기 위해 경수로에 널리 사용되고 있다[1,2]. Gd 가연성 독봉은 가돌리니아(Gd_2O_3)와 UO_2 분말을 혼합하여 제조되기 때문에 UO_2 연료봉과 같이 노심에서 출력을 내는 역할도 한다. 노심의 주기길이를 증가시키기 위해

Gd₂O₃의 농도도 증가되어 왔는데, 현재 경수로에서 사용되고 있는 가연성독봉의 Gd₂O₃ 농도는 대개 4 ~ 8 w/o 정도이다[1,2]. 그리고 Gd 가연성독봉으로부터 출력을 내기 위해 U-235의 농축도도 증가시킬 수 있다. 국내의 경수로에서 사용된 Gd 독봉의 U-235의 농축도는 0.71 ~ 1.8 w/o 인데, 핵연료 성능 관점에서는 Gd 가연성독봉의 U-235 농축도를 더욱 높여서 독봉의 방출연소도를 증가시킬 수 있다. 이를 위해서는 고연소도까지의 Gd 가연성독봉의 노내에서의 거동을 정확히 예측하여야 한다. Gd₂O₃/UO₂ 소결체는 Gd의 첨가로 인해 UO₂ 소결체와 비교하여 열전도도, 밀도 및 용융온도가 Gd의 농도에 비례하여 감소한다. 그리하여 Gd 독봉은 동일한 출력에서 UO₂ 연료봉보다 핵연료 온도가 높기 때문에 핵분열기체방출이 증가할 수 있으며, 소결체의 용융이 발생하는 핵연료의 출력 크기도 낮다. 따라서 Gd₂O₃/UO₂ 소결체 내의 온도를 정확히 예측하기 위해서는 소결체 내부의 국부적인 출력 생성률을 정확하게 구해야 한다.

2. Gd 독봉의 출력 분포 분석

Gd 독봉에서 Gd₂O₃ 농도, 독봉의 연소도 및 초기의 U-235의 농축도 변화에 따른 반경방향의 출력분포는 Cell 계산 핵설계 코드인 HELIOS 코드[3]를 사용하여 계산하였다. 표 1은 Gd 동위원소의 자연분포와 각각의 중성자흡수단면적의 크기를 보여 주는데, 노심에서 중성자를 흡수하는 역할을 하는 동위원소는 Gd-155 및 Gd-157 이다. 그림 1은 독봉의 연소도에 따른 Gd-157의 농도 변화를 보여준다. Gd-157의 초기 농도의 크기에 따라서 연소도 10 ~ 20 MWD/kgU 이하에서 대부분의 Gd-157이 중성자 흡수로 인해 소멸됨을 알 수 있다. 그림 2는 9 w/o Gd₂O₃, 1.8 w/o U-235 독봉의 연소도에 따른 반경방향의 출력분포 변화를 보여 준다. 10 MWD/kgU 이하의 낮은 연소도에서는 Gd에 의한 중성자흡수가 활발하기 때문에 출력변화가 매우 심한 반면에, 연소도 20 MWD/kgU 이상의 고연소도에서는 Gd가 완전히 소멸되어 보통의 UO₂ 연료봉과 유사한 거동을 보인다.

그림 3, 4 및 5는 각각 연소도 2 MWD/kgU, 10 MWD/kgU 및 20 MWD/kgU에서 Gd₂O₃의 농도에 따른 반경방향의 출력분포 변화를 보여 준다. 연소도가 2 MWD/kgU일 때는 Gd가 소결체의 반경방향으로 아직 고르게 분포되어 있어서 출력분포가 비교적 평탄함을 알 수 있다. 그러나 독봉의 연소도가 증가함에 따라 잔존하는 Gd의 국부적인 분포가 변하게 되어 반경방향의 출력분포가 변한다. 그림 6은 Gd-157 원소의 연소도에 따른 반경방향의 분포를 보여 준다. Gd-157은 중성자 흡수의 Self-shielding 효과에 의해 소결체의 가장자리에서부터 점차 내부로 이동하면서 소멸된다.

그림 7은 30 MWD/kgU에서의 출력분포 변화를 U-235의 농축도 변화에 따라 보여주고 있다. 고연소도에서는 Gd가 완전히 소멸되기 때문에 Gd의 농도 보다는 U-235의 농축도에만 의존하여 반경방향 출력 분포가 변한다.

3. 출력분포 모델링

Gd 독봉의 반경방향 출력분포를 예측하는 모델은 Gd 독봉핵연료의 성능분석코드에 포함되어 온도 및 핵분열기체방출 등의 노내 거동 예측에 사용된다. Gd 독봉의 연소도에 따라 Gd 농도의 변화가 심하고, Gd 농도에 따라 반경방향의 출력분포도 변하기 때문에, 출력분포 예측 모델은 연소도의 크기에 따라 구분하여 계산하는 방법을 사용하였다. 즉, Gd의 농도가 높아 반경방향의 출력분포가 연소도에 따라 급격하게 변하는 영역과 Gd가 완전히 소멸되어 Gd의 영향이 없는 고연소도 영역으로 구분하여 모델식을 유도하였다.

Gd 독봉의 반경방향의 출력 분포를 보면 소결체의 가장자리에는 일반적인 UO_2 소결체에서 보이는 출력의 증가 현상을 보인다. 이는 소결체의 가장자리에서 U-238의 중성자공명흡수에 의해 Pu-239가 국부적으로 생성되기 때문이다. 따라서 반경방향의 출력분포의 함수 설정에는 이를 효과적으로 고려하기 위해 두 종류의 지수함수를 추가하였다. 그리고 반경방향의 변화는 반경함수에 대해 4 차항으로 표현하였으며, 각 항의 상수는 Gd_2O_3 농도와 연소도의 비선형 함수로 설정하였다. Gd 독봉의 출력분포는 U-235의 농축도 0.7, 1.8 및 3.0 w/o 별로 각각 계산되며, U-235의 농축도 변화에 따라 선형적으로 변한다고 가정하였다.

연소도가 20 MWD/kgU 보다 큰 고연소도 영역에서의 반경방향의 출력분포는 초기의 Gd_2O_3 농도에는 무관하고, U-235의 초기 농축도와 연소도에 따라 변하기 때문에 Gd 독봉의 반경방향 출력 분포는 U-235 농축도 및 연소도의 함수로 유도하였다. 일반적인 Gd 독봉의 출력 이력을 분석해보면, 낮은 연소도 영역에서는 Gd의 농도가 아직 크기 때문에 독봉의 출력이 고연소도 영역에서보다 매우 낮음을 알 수 있다. 따라서 Gd 독봉의 노내 성능분석에서는 낮은 연소도 뿐만 아니라 특히 고연소도까지의 전반적인 거동 해석이 필요하다.

Gd 독봉의 반경방향 출력분포(p)에 대한 모델식은 다음과 같으며, 각 상수의 최적치는 비선형 fitting을 통해 구하였다.

연소도 ≤ 20 MWD/kgU,

$$p(r, Gd, BU) = C_1(Gd, BU) + C_2(Gd, BU) \cdot r + C_3(Gd, BU) \cdot r^2 + C_4(Gd, BU) \cdot r^3 + C_5(Gd, BU) \cdot r^4 + C_6(Gd, BU) \cdot \exp(-D_1(1-r)) + C_7(Gd, BU) \cdot \exp(-D_2(1-r)^2)$$

위 식에서,

$$C_i(Gd, BU) = c_1^i + c_2^i \cdot BU + GD \cdot (c_3^i + c_4^i \cdot BU + c_5^i \cdot BU^2 + c_6^i \cdot BU^3)$$

D_i = 상수

연소도 > 20 MWD/kgU,

$$p(r, BU, EN) = E_1(BU, EN) + E_2(BU, EN) \cdot r + E_3(BU, EN) \cdot r^2 \\ + E_4(BU, EN) \cdot r^3 + E_5(BU, EN) \cdot r^4 \\ + E_6(BU, EN) \cdot \exp(-H_1(1-r)) + E_7(BU, EN) \cdot \exp(-H_2(1-r)^2)$$

윗 식에서,

$$E_i(Gd, EN) = e_1^i + e_2^i \cdot Gd + e_3^i \cdot EN + e_4^i \cdot Gd \cdot EN$$

D_i = 상수

그림 8-11은 비선형 Fitting을 통해 구한 Gd 독봉의 반경방향 출력분포 예측 모델식의 계산치와 참조용 자료인 HELIOS 핵설계 코드의 결과를 비교하고 있다. Gd의 반경방향 분포가 연소도에 따라 급격하게 변하는 것을 고려하면, 예측 모델식은 Gd 독봉의 반경방향 출력분포 변화를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 그리고 두 종류의 지수함수는 소결체 가장 자리에서 U-238의 공명 중성자흡수로 인해 생성된 Pu-239에 의한 국부적인 출력 증가 현상을 잘 묘사하고 있다. 개발된 모델식은 UO₂ 핵연료의 반경방향 출력분포 예측 프로그램인 RAPID(RADial Power and Burnup Prediction by following Fissile Isotope Distribution in the Pellet)[4]에 추가되어 Gd 가연성독봉 핵연료의 성능 분석에 사용될 것이다.

4. 결론

경수로의 장주기 및 고연소도 노심의 가연성독봉으로 널리 사용되고 있는 가돌리니아 가연성독봉 소결체의 반경방향의 출력분포를 Gd₂O₃의 농도, 연소도 및 U-235의 농축도의 변화에 따라 예측하는 모델식을 개발하였다. 참조용 자료는 Cell 계산 핵설계 코드인 HELIOS의 계산치를 사용하였다. Gd는 중성자흡수단면적이 매우 크기 때문에 낮은 연소도에서 반경방향의 출력분포에서 심한 변화를 보였으며, 연소도가 20 MWD/kgU 이상에서는 Gd가 대부분이 소멸되기 때문에 반경방향의 출력분포 변화도 크지 않은 것으로 나타났다. 개발된 모델식은 Gd 가연성독봉의 반경방향 출력분포 변화를 잘 예측하였다.

5. 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

6. 참고 문헌

- (1) D. S. Sohn, et al, Fuel Design Report for 17 x 17 Assembly, KAERI, 1987.
- (2) J. H. Baik, et al., Fuel Design Report for CE Type 16 x 16 Assembly, KAERI/TR-547/95, KAERI, 1995.
- (3) E.A. Villarino, et al., "HELIOS : Angularly dependent collision probabilities", Nucl. Sci. and Eng., 112, p.16-31, 1992.
- (4) 이찬복 외, RAPID Program to Predict Radial Power and Burnup Distribution in UO₂ Fuel, KAERI/TR-1217/99, KAERI, 1999.

표 1. Gd 동위원소의 분포 및 열중성자흡수단면적

Isotope	Abundance (a/o)	Thermal neutron absorption cross section(barn)
Gd-152	0,	10
Gd-154	2,1	80
Gd-155	14,8	61000
Gd-156	20,6	2
Gd-157	15,7	255000
Gd-158	24,8	2,4
Gd-159	21,8	0,8

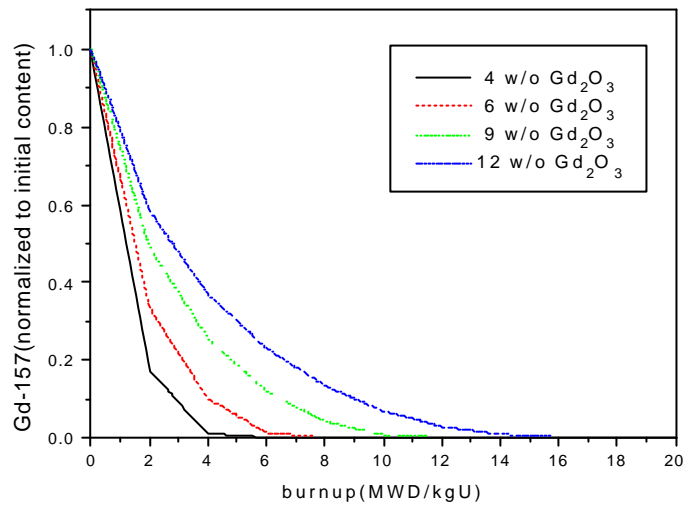


그림 1. 연소도에 따른 Gd-157 농도 변화(0.71 w/o U-235)

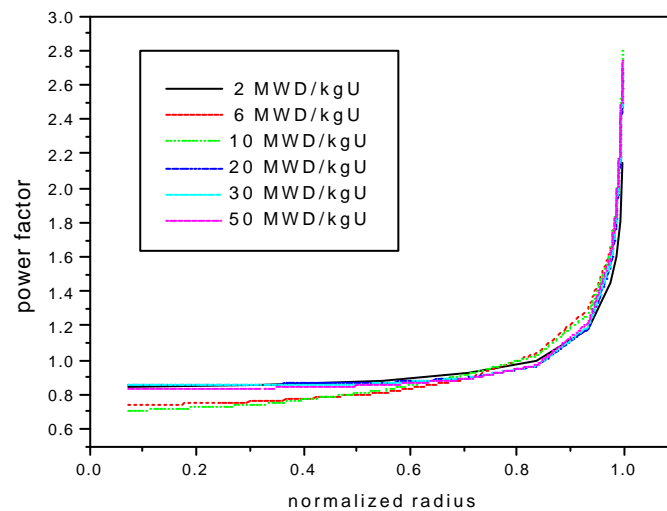


그림 2. 연소도에 따른 출력분포 변화(9 w/o Gd₂O₃, 1.8 w/o U-235)

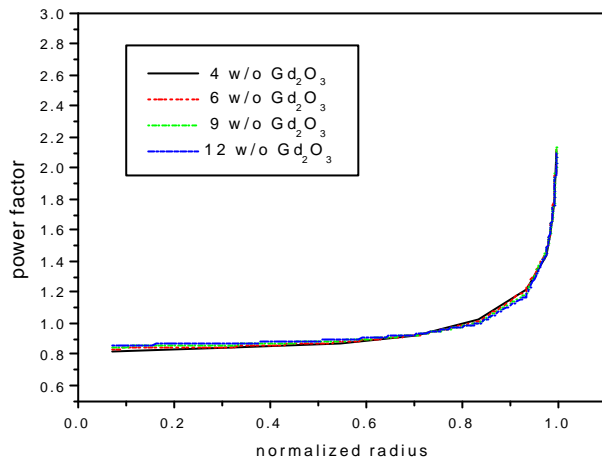


그림 3. 연소도 2 MWD/kgU에서의 출력 분포(1.8 w/o U-235)

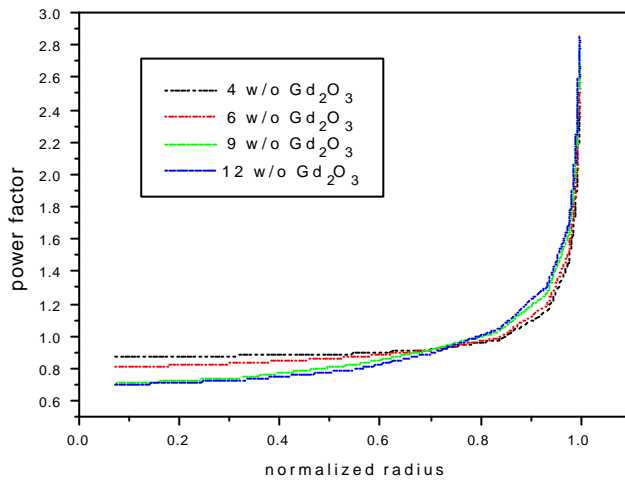


그림 4. 연소도 10 MWD/kgU에서의 출력 분포(1.8 w/o U-235)

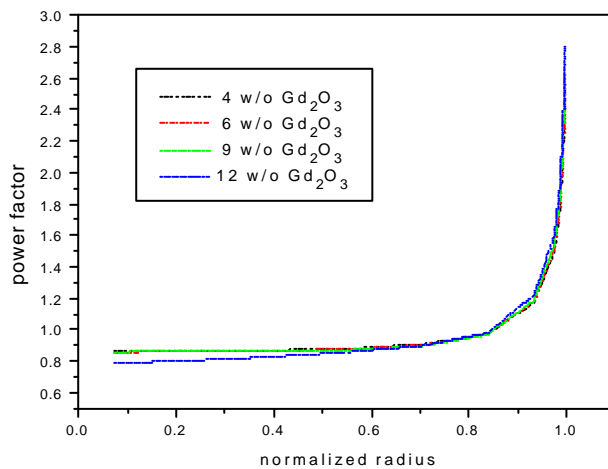


그림 5. 연소도 20 MWD/kgU에서의 출력 분포(1.8 w/o U-235)

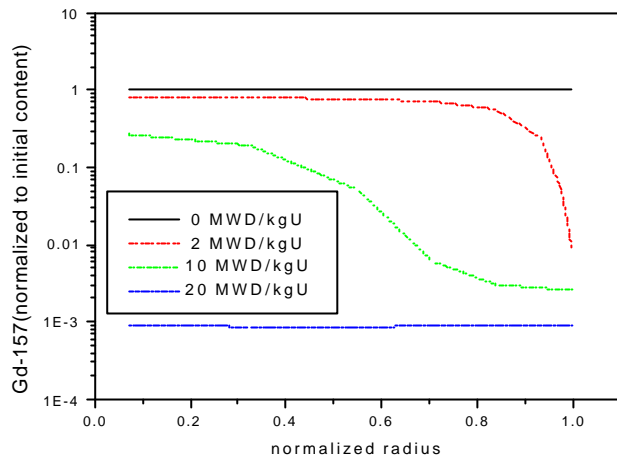


그림 6. 연소도에 따른 Gd-157 분포 변화(9 w/o Gd₂O₃, 1.8 w/o U-235)

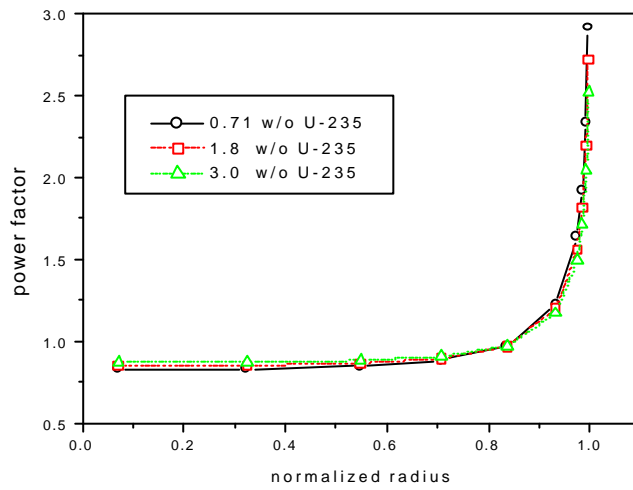


그림 7. 연소도 30 MWD/kgU에서 U-235 농축도에 따른 출력분포 변화(12 w/o Gd₂O₃)

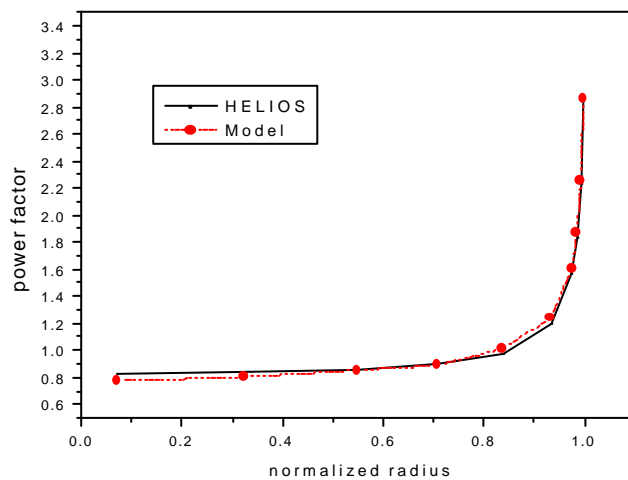


그림 8. 연소도 6 MWD/kgU에서의 모델 예측치 검증(4 w/o Gd₂O₃, 0.71 w/o U-235)

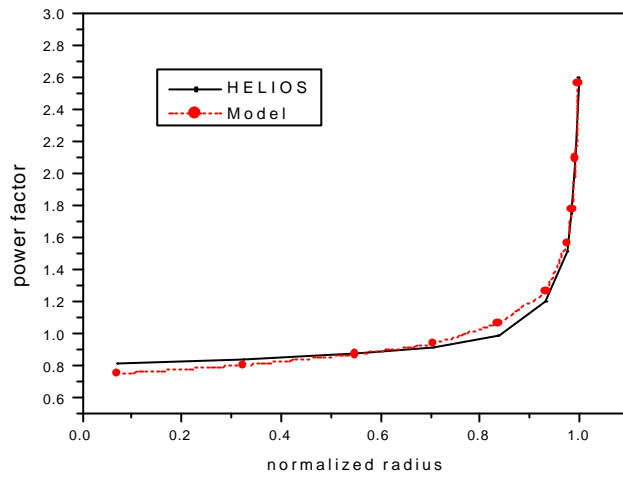


그림 9, 연소도 10 MWD/kgU에서의 모델 예측치 검증(6 w/o Gd₂O₃, 1.8 w/o U-235)

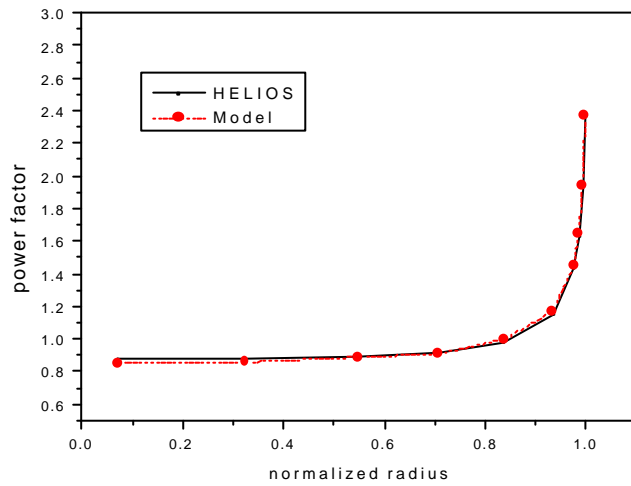


그림 10, 연소도 20 MWD/kgU에서의 모델 예측치 검증(6 w/o Gd₂O₃, 3 w/o U-235)

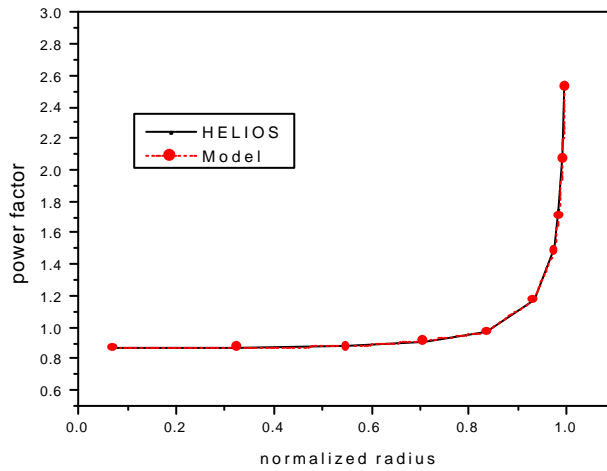


그림 11, 연소도 30 MWD/kgU에서의 모델 예측치 검증(12 w/o Gd₂O₃, 3 w/o U-235)