

'99 추계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

DUPIC 핵연료봉 열적거동 해석

박희성*, 배기광, 송기찬, 문제선, 양명승

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

DUPIC 핵연료는 신 개념의 핵연료로서 설계 해석 코드가 없기 때문에 범용 핵연료 설계 해석에 사용되는 여러 종류의 코드들을 검토 분석한 후 FEMAXI-IV 코드를 하나로 조사 해석 코드로 선정하였다. DUPIC 소결체 중심온도와 피복관의 틈새 거동을 해석하여 연료봉 설계에 필요한 기초자료를 생산하였다. DUPIC 핵연료는 다량의 핵분열 생성물을 함유하고 있기 때문에 소결체의 열전도도의 신뢰도를 확보하기 위해 다른 모델과 비교 분석하여 이중 우수한 FRAPCON-III 모델을 인용하였고, 하나로의 운전 조건에 맞게 피복관 표면 열전달 계수를 수정하였다. DUPIC 핵연료봉의 열적 해석에서 선출력 500W/cm인 경우 직경 틈새가 250 μ 인 연료봉이 최적으로 해석되었으며 더 나아가 연료봉의 내압 변화에 대해서도 분석을 수행하였다.

Abstract

This paper presents the analysis of DUPIC fuel rods to be irradiated at HANARO reactor, using a code of FEMAXI-IV. The centerline temperature of the pellet and gap behaviour in cladding were calculated and used for the rod design. FRAPCON-III was used to analyze the thermal conductivity of pellet, which is one of the most important parameters for the analysis of the thermal behavior at in-pile, because DUPIC fuel contains many fission products. The cladding surface heat transfer coefficient was modified for simulation. The change of the inner pressure of the fuel rod during irradiation was also examined. It is concluded that, from the simulation results, the optimal rod diameter was 250 μ for case LHR 500W/cm.

1. 서론

핵연료 설계 해석에 범용으로 사용되고 있는 코드들에 대하여 검토한 후 이중 DUPIC 핵연료 성능평가에 적합한 코드로 FEMAXI-IV[1]코드가 선정되었다. DUPIC 소결체 중심온도와 피복관의 틈새 거동을 해석하여 연료봉 설계에 필요한 기초자료를 생산하기 위해 열적 거동 분석에 중요한 변수인 소결체 열전도도와 피복관 표면 열전달 계수를 재정립하였다. 해석 시 고려한 사항으로 3개의 연료봉을 무계장 캡슐에 장전한 후 하나로 OR hole에서 조사하는 조건에 맞도록 하였다. 이러한 과정을 기초로 하여 조사 핵연료 선출력이 500W/cm 인 정상상태 조건에서 DUPIC 핵연료를 1년간 조사했을 때 소결체와 피복관의 틈새크기에 따른 핵연료 중심온도 및 틈새 분포와 내압의 변화를 알기 위해 소결체와 피복관 간의 틈새크기를 100 μ , 150 μ , 200 μ , 250 μ 인 경우에 대하여 계산하였다.

2 FEMAXI-IV 코드 분석

범용 핵연료 설계 해석에 사용되는 유수의 코드들을 살펴보면 ELESTRES[2], CARO(Siemens)[3], FRAPCON(INEL)[4], EXBURN-1[5], CYRANO3(France, EDP), TRANSURANUS[6], COPERNIC[7], 그리고 ENIGMA 등이 있다. 이중에서 하나로 조사 해석 코드로 선정된 FEMAXI-IV는 경수로 핵연료봉의 노내 거동을 해석하기 위해 개발되었으며 1992년 완료된 FEMAXI-III[8]의 확장된 코드이다. 이 코드에서는 Battelle High Burnup Experiment Program[9], Halden Project에서 생산된 자료를 이용하여 코드의 검증과 타당성 검토를 하고 있다. 코드의 기본구조와 구성 및 계산절차는 그림 1에 자세히 나타내었다.

3. 열적 거동 주요 변수 조정

3.1. 소결체 열전도도

온도 분포에서 열전도도는 매우 중요하다. DUPIC핵연료는 핵분열 생성물을 다량 함유하고 있기 때문에 열전도도가 감소하는데 이렇게 되면 중심온도가 상승하므로 높은 출력밀도로 연소시킬 수 없다. 이러한 DUPIC핵연료의 특성을 반영하기 위해 FRAPCON-III[10] 코드에서 제안하고 있는 순수 UO_2 의 열전도도와 소결체 제조시 발생하는 기공의 영향, 핵연료의 열전도도를 증가시키는 금속 석출물의 영향, 핵연료내에 존재하는 핵분열 생성물의 연소도 영향 및 점결함에 의해 열전도도를 감소시키는 방사선

조사 영향을 고려하여 모의 DUPIC핵연료에 사용했던 열전도도 모델과 MATPRO 모델에 대하여 비교하였다. 3모델에 대하여 비교한 결과를 그림 2에 나타내었다. 이중에서 열전도도가 뛰어난 FRAPCON-III모델을 채택하여 계산을 수행하였다.

3.2. 피복관 표면 열전달 계수

냉각수의 특성과 Prandtl number를 이용한 Dittus-Boelter 모델(PWR)을 이용하여 열전달 계수를 계산하였다. 조사될 핵연료봉은 그림 3과 같이 3개의 mini-element로 구성되어 하나로 OR hole에 위치하도록 하였으며 mini-element 주위로 냉각수가 흐르도록 설계되었다. 한편 하나로에서 조사될 캡슐을 대상으로 한 압력강하 시험 결과 200KPa에서 냉각수 유량이 9.632kg/s 정도로 흐를 때 피복관 열표면 전달계수 값은 $4.472 \times 10^4 \text{W/m}^2\text{K}$ 로 계산되었다.

3.3. 계산 조건

계산에 사용된 DUPIC 핵연료는 한 개의 연료봉에 5개의 소결체를 넣는데 이때 Slightly Enriched Uranium 소결체의 농축도는 1.47%이고 나머지 2개의 연료봉에 들어가는 사용후핵연료가 첨가된 Slightly Enriched Uranium 소결체의 농축도는 3.21%인 두 종류로 예정하여 설계하였다. 이와같이 제조된 연료봉을 무게장 캡슐에 장전한 후 하나로 OR hole에서 정상적인 가동조건에서 조사하는데 OR hole 1년간 조사한다고 가정하고 계산하였다. 조사 핵연료의 최대 선출력은 500W/cm 로 가정하였으며 하나의 냉각수 온도와 압력은 각각 313(K)와 0.4MPa 값을 갖는다. 핵연료봉은 내경이 10.80mm이고 두께가 0.33mm로 3개의 mini-element로 구성되며 Zircaloy-4 재질의 연료봉과 봉단 마개로 설계되었다. 연료봉과 피복관 및 계산에 사용된 기본 입력자료를 표 1에 나타내었다.

4. 결과 및 검토

4.1. 중심온도 및 틈새 변화

틈새크기가 100 μ 인 경우 중심온도와 틈새의 거동을 그림 4에 나타내었다. 소결체와 피복관 간 접촉이 조사 초기부터 서서히 진행되다가 45일 경과했을 때 발생하고 있음을 알 수 있다. 핵연료 중심온도는 1879°C 로 시작하여 틈새 간격이 달라붙는 시점까지 서서히 감소하다가 접촉이 일어난 후부터 다시 점차적으로 상승하여 조사가 완료되는 시점

에서 2178°C를 기록하고 있다. 그림 5는 틸새크기가 150 μ 인 경우인데 조사기간이 151 일 됐을 때 틸새 공간이 달라붙고 있다. 1년 동안 조사 기간 중 최고 중심온도는 2110°C 나타내고 있다. 틸새크기가 200 μ 인 경우에 대한 결과를 그림 6에 나타내었다. 299 일이 경과되었을 때 틸새가 접촉이 되면서 중심온도가 미미하게 증가하고 있음을 보여주고 있다. 중심온도는 조사 초기에 2241°C로 시작하여 조사완료 시점에서 1993.5°C로 나타났다. 틸새크기가 250 μ 일때 핵연료 중심온도와 틸새의 분포를 그림 7에 설명하고 있다. 1년 조사 기간 동안 소결체와 피복관의 틸새 간격이 열린상태로 종료됨을 알 수 있었으며 핵연료의 최고 중심온도는 2387°C로 나타났다. 이상과 같이 분석한 결과 DUPIC 핵연료봉을 설계하는데 연료봉의 틸새 간격을 250 μ 으로 했을 때 최적의 상태임을 확인되었다.

4.2 내압 변화

연료봉의 틸새크기가 100, 150, 200, 250 μ 인 경우에 대하여 선출력 500W/cm으로 1년동안 조사했을 때 각 연료봉의 내압변화를 계산한 결과를 표 2에 나타내었다. 틸새크기가 100인 경우 Xe+Kr 생성량은 최대 0.53×10^{-3} mol 이 생성되었다. 이중에서 약 35%가 방출된다고 볼때 연료봉 내압이 2.3기압으로 증가하는데, 핵분열 방출물의 불확실성을 감안하여 모두 방출된다고 고려하면 $(0.53 + 0.4) \times 10^{-3}$ mol의 가스가 연료봉 내에 채워지게 되는데 총 가스의 부피는 약 20.84cc이며 plenum의 부피가 약 4.9cc이므로 연료봉 내압은 약 4.3 기압으로 나타난다. 이 수치는 연료봉 외부의 압력이 약 4기압 일 때보다 조금 높기 때문에 연료봉의 내압 증가에 따른 기계적인 영향을 고려할때 부적합하다고 볼 수 있다. 틸새크기가 150인 경우 역시 Xe+Kr 이 최대 0.53×10^{-3} mol이 생성되었다. 틸새크기가 150인 경우와 마찬가지로 계산을 했을 때 연료봉의 내압은 약 3.6 기압이 된다. 틸새크기가 200과 250인 경우 Xe+Kr 이 최대 0.53×10^{-3} mol이 생성되었다. 틸새크기가 200 μ 인 경우 연료봉의 내압은 약 3.6 기압으로 나타났고, 틸새크기가 250인 경우 연료봉의 내압은 약 3.7 기압으로 계산되었다. 이와같은 계산 결과에서 틸새크기가 100 μ 인 경우에는 연료봉 내압이 냉각수 압력보다 커 피복관이 손상될 위험성을 내포하고 있어 부적합한 경우로 해석되었으며, 나머지 세가지 경우에는 연료봉의 기계적 영향을 받지 않는 것으로 해석되었다.

5. 결론

DUPIC 핵연료 중심온도와 틸새 거동을 분석한 결과 DUPIC 핵연료봉을 설계하는데

연료봉의 틈새 간격을 250 μ 으로 했을 때 최적의 상태임을 확인되었다. 연료봉 내압의 경우 틈새크기가 100 μ 인 경우에는 연료봉 내압이 냉각수 압력보다 커 피복관이 손상될 위험성을 내포하고 있어 부적합한 경우로 나타났으며, 틈새크기가 150 μ , 200 μ , 250 μ 인 경우에는 틈새 내압에 따라 연료봉에 기계적 영향을 받지 않는 것으로 해석되었다.

감사

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Motoe Suzuki, Hiroaki Saitou, FEMAXI-IV(Ver 2) : Light Water Reactor Fuel Analysis Code, JAERI-Data/Code 97-043
2. 석호천 외., ELESTRES.M11K 전산코드 사용지침 및 기술서, KAERI-TR-320-92
3. Dr. Eberle, Fr. Distler, Dr. Wunderlich, The KWU Fuel Rod Computer Code CARO-D, Technical Report B 111/34/79 (28.02.79), Class 2
4. FRAPCON-2 : A Computer Code for the Calculation of Steady State Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods.
5. Suzuki M. and Saitou., Detailed Description and User's Manual of High Burnup Fuel Analysis Code EXBURN-I, JAERI-Data/Code 97-046
6. K.Lassmann, TRANSURANUS: a fuel rod analysis code ready for use, Journal of Nuclear Materials 188(1992) p. 295-302
7. E. Bonnaud et al., COPERNIC : A state-of-the-art fuel rod performance code, ANS Winter Meeting, Albuquerque, N.M., U.S.A.(1997)
8. Nakajima T., Ichikawa M., et al., FEMAXI-III : A Computer Code for the Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of Fuel Rods, JAERI 1298 (1985)
9. High Burnup Effects Data Review Committee, Summary of Battelle High Burnup Effects Program Task 3, Central Research Institute of Electric Power Inc., T90802(1990)
10. D. D. Lanning et al., FRAPCON-III : Modifications to fuel rod material properties and performance models for high burnup application, NUREG/CR-6534, (1997)

표 1. 기본 입력자료표

구분	값	구분	값
연료봉	축방향 구획수 : 1 축방향 구획길이 : 5(cm)	Plenum	실단 부피 : 4900 (Cm ³) 허단 부피 : 0.000 (Cm ³) 초기 He 가스 양력 : 0.100 초기 He 가스 구성비 (%) He = 100.0 N ₂ , Kr, Xe = 0.0
피복관 (Zircaloy-4)	내부 직경 : 1.090 (cm) 외부 직경 : 1.145 (cm) 표면조도 : 0.0001 (cm)	기타	실온 : 291.15(K) 냉각수 온도 : 313(K) 냉각수 양력 : 0.4(MPa)
소결체	직경 : 1.0833 (cm) 길이(1개) : 1.20 (cm) 중량비 : 50.359 (g) 표면조도 : 0.0005 (cm) UO ₂ 이론적 밀도비 : 0.95		

표 2. 틸레별 연료봉내 내압

종대 크기 (g)	시간 (Hr)	amount of gas(10e-3 mol)			Fission gas release (%)	Inner gas pressure (MPa)
		produce (Kr+Xe)	release (Kr+Xe)	total in fuel rod		
100	362	0.53	0.19	0.4	35.15	0.23
150	362	0.53	0.06	0.27	11.21	0.16
200	362	0.53	0.05	0.27	8.84	0.15
250	362	0.53	0.06	0.28	11.16	0.16

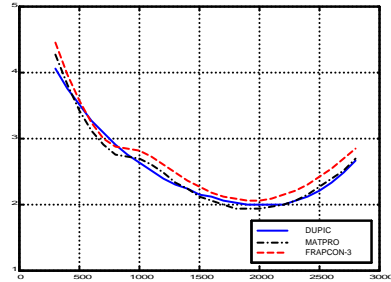
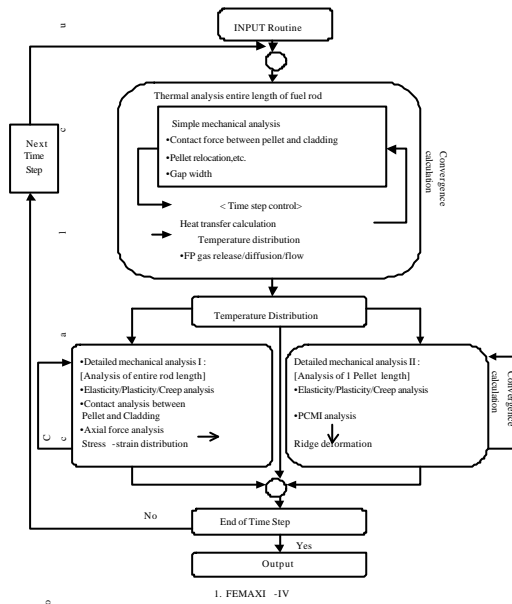


그림 2. 소결체 열전도도 분포 비교

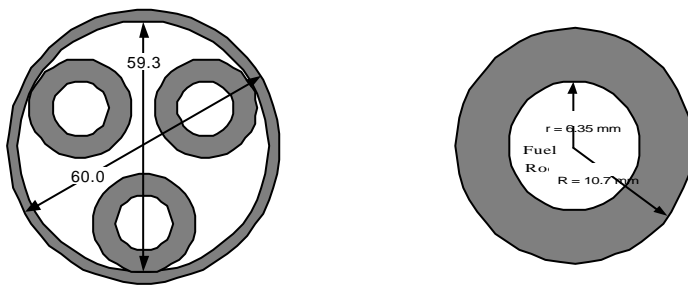


그림 3. 피복관 열전달 계수 계산에 고려된 DUPIC channel

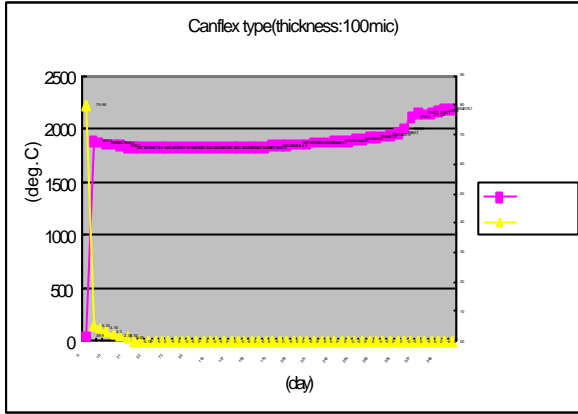


그림 4. 중심온도 및 틸레변화(틸레:100 μ m)

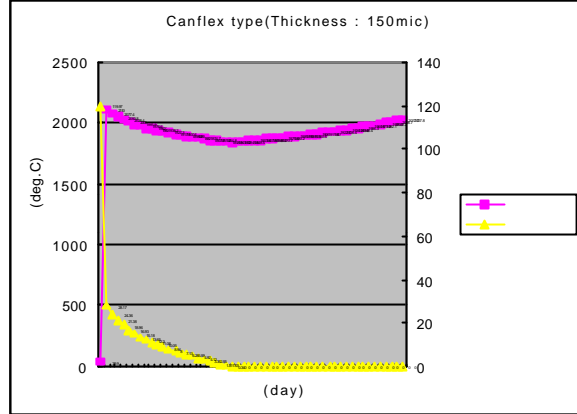


그림 5. 중심온도 및 틸레변화(틸레:150 μ m)

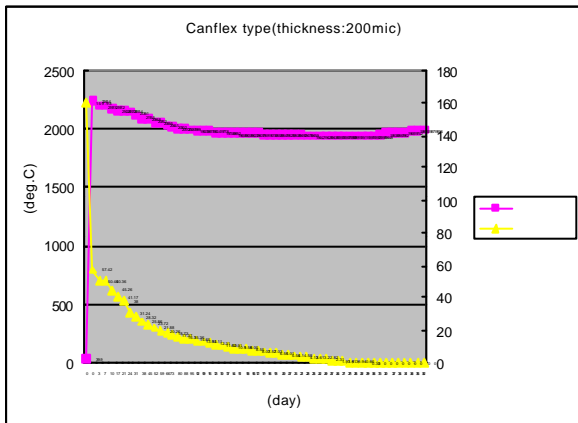


그림 6. 중심온도 및 틸레변화(틸레:200 μ m)

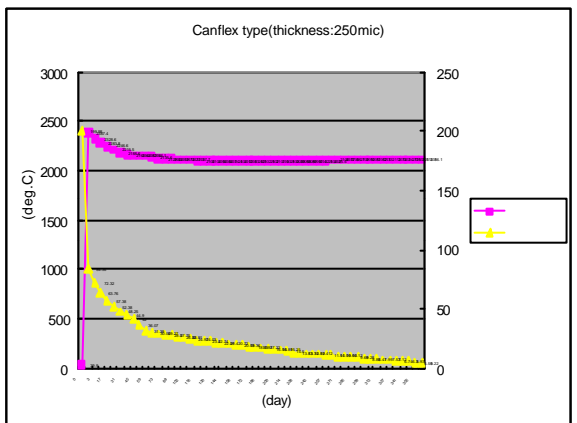


그림 7. 중심온도 및 틸레변화(틸레:250 μ m)