'96 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

GAPCON-THERMAL-2 Revision 2 코드를 이용한 핵분열 생성물 방출 모델 비교 연구

신안동, 국동학, 김용수
한양대학교
이상희, 김양은
한국전력연구원

요 약

핵분열 생성물 방출량을 계산하는 모델들에 대한 비교 분석을 위해 GAPCON-THERMAL-2 Revision 2 (GT2R2) 코드를 이용하여 Beyer-Hann , Beyer-Hann with NRC High Burnup Correction, ANS5.4 와 Modified ANS5.4 핵분열 생성물 방출 모델들을, RISO-M2-2C 핵연료봉의 실험결과와 비교하였다. Beyer-Hann 모델은 실험결과보다 낮게 예측한반면 ANS5.4 모델은 실험결과보다 높게 예측하였다. 한편 NRC High Burnup Correction 을 한 Beyer-Hann 모델과 Modified ANS5.4 모델은 실험 결과와 비슷한 방출비를 예측하였다. 이러한 결과를 확인하기 위해 국부적인 핵연료 온도와 연소도를 검토한 결과 ANS5.4 모델이 Modified ANS5.4 모델보다 온도와 연소도에 따라 더 민감한 반응을 보이고 있으며, Beyer-Hann 모델은 연소도 영향이 없이 각 온도 영역에서 일정하였고, Beyer-Hann with NRC High Burnup Correction 모델은 20,000MWd/MTU 연소도 이상영역에서 연소도 영향을 보이고 있다.

I. 서 론

핵분열 생성물의 방출은 핵연료의 봉내 압력을 상승시키고 기체상 핵분열 생성물들의 (Xe, Kr) 낮은 열전도도로 핵연료의 온도를 상승시키는 등 핵연료의 열적, 기계적 성능에 가장 중요한 현상이다. 핵연료 성능코드들에서 핵분열 생성물 방출량 계산은 방출 모델에 매우 의존적이다. 본 연구는 최적 핵분열 생성물 방출 모델 개발을 위한 기반연구로서 기존 핵분열 생성물 방출량 계산 모델에 대한 비교 분석 연구의 일환으로 초기 핵연료 성능 분석 코드인 GAPCON-THERMAL-2 Revision 2 (GT2R2)[참고 1] 에서 사용되는 주요 핵분열 생성물 방출 모델들을 (Beyer-Hann, Beyer-Hann with NRC High Burunup Correction, ANS5.4 .

Modified ANS5.4 FGR Model) RISO-M2-2C 핵연료봉 조사실험자료와 비교 분석 하고자 하였다.

II. GT2R2 핵분열 생성물 방출 모델들과 RISO-M2-2C

II.1 GAPCON-THERMAL-2 Revision 2

GT2R2 는 핵연료 열적 성능의 주요인자인 핵연료내 온도구배와 핵분열 생성물 방출량을 계산하기 위해 미국 AEC (Atomic Energy Commission)에 의해 1984 년 미국 PNL 연구소가 미국 NRC 의 핵연료 성능코드 감사계산용으로 개발한 코드이다. GT2R2 코드의 원형이자 각 Vendor 들의 핵연료성능 코드의 원형인 GAPCON 코드는 1972 년 고속증식로 핵연료 성능분석용으로 개발되었다. 이를 경수로 핵연료용 코드로 변형하여 GAPCON-THERMAL Series 를 개발하였다.

GT2R2 는 수많은 핵연료 특성모델과 로내 현상들에 대한 모델들로 구성되어 있다. 핵분열 생성물 방출량을 계산모델로는 주로 Beyer-Hann FGR Model[참고 2], ANS 5.4 model, Modified ANS 5.4 모델을 사용하고 있다.

II.1.1 Beyer-Hann FGR Model

하나의 Axial node 에 대하여 1200°C 이상 온도영역을 셋으로 나누어 각 영역의 전체에 대한 단면적비와 각 영역에서의 핵분열 생성물 방출비를 곱한 합을 node 하나의 핵분열 생성물 방출비로 계산한다.

$$F = 0.05X_1 + 0.141X_2 + 0.807X_3$$

여기서 X_1 , X_2 , X_3 는 각각 1200°C ~1400 °C, 1400°C ~1700 °C, 1700°C 이상의 온도영역들의 핵연료 전체 단면적에 대한 비로 각 시간간격과 각 Axial node 에 대해 계산되어진다. 상수 0.05,0.141,0.807 은 각 온도영역에서의 핵분열 생성물 방출률이다. 이 상수들은 400 ~18000MWd/MTU 연소도 영역에서 얻어진 자료들에 의해 구한 값을 사용하였다. 따라서 고연소도의 경우 핵분열 생성물 방출의 연소도에 의한 증가 효과를 고려해 주기 위해 NRC High Burnup Correction[참고 3]을 사용할 수 도 있다.

II.1.2 ANS 5.4 핵분열 생성물 방출 모델

핵연료 결정을 임의의 구라 가정하고 구 표면에 핵분열 생성물이 확산되어 나왔을때 모두 방출한다는 가정에서 출발한 확산방정식을 사용하여 핵분열 생성물의 방출을 묘사하는 Booth 모델을[참고 4] 기초로하여 정상상태 핵분열 생성물 방출비를 계산한다. ANS 5.4 모델의 인자는 local temperature, local burnup, time interval 들을 사용하고 있다. 안정한 핵분열 핵종의 경우 ANS 5.4 Model[참고 5]은 다음과 같은 식으로 나타 낼 수 있다.

$$f = 4\sqrt{\frac{\tau}{\pi}} - \frac{3}{2}\tau \qquad \text{when } \pi^2\tau \le 1$$

$$f = 1 - \frac{a^2}{15\tau} + \frac{6}{\tau}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\exp\left(-n^2\pi^2\tau\right)}{n^4\pi^4} \qquad \text{when } \pi^2\tau > 1$$

$$\text{where} \qquad \tau = D'\Delta t \quad , D' = \left(\frac{D_o}{a^2}\right)\exp\left(-Q / RT\right) \times 100^{Bu/28000}$$

$$\frac{D_o}{a^2} = 0.61\,\text{sec}^{-1} \quad , \text{Q} = 72{,}300\text{cal / mole}$$

위 모델에서 사용된 D_o/a^2, 활성화 에너지 (Q) 값은 400 ~60,000MWd/MTU 연소도 영역의 경수로와 고속증식로 실험결과에 의한 값이다.

Modified ANS 5.4 모델은[참고 6] ANS5.4 모델과 같은 Booth 모델 형태로 확산계수 D'값만이 변화 되었다. D_o/a^2 값은 $22.1\times10^{-4}\text{sec}^{-1}$, 활성화 에너지 Q 값은 49,700cal/mole 로, 연소도 영향을 나타내는 $100^{Bu/28,000}$은 $100^{MAX(0,Bu-25000)/21,000}$로 변화되었다.

II.2 RISO-M2-2C 연료봉의 조사실험

RISO 의 10MW 중수로 재료실험로 DR3 원자로에서 70 기압의 물로 냉각되는 rig 에서 조사된 RISO-M2-2C 연료봉은 10 개의 소결체(직경 12.6mm, 길이 12.0mm)가 Zr-2 피복관에 (두께 0.53mm, 내경 12.84mm, Total Free Volume 2950 mm^3, 충진기체 He 1atm) 들어 있으며 전체 핵연료 길이 128mm,평균 농축도 1.968%로(중앙 8 개 소결체 :2.28%, 양단 2 개 소결체:0.72%) 46 원자로주기를 거쳐 핵연료봉 평균 38,000MWd/MTU 연소도와 LHGR(Linear Heat Generation Rate) 은 359~552W/cm 범위에서 조사되었으며 실험결과 0.356 의 핵분열 생성물 방출비를 보였다. 자세한 조사전 특성과 조사조건및 결과는 참고문헌 6 에 기술되어있다.

GR2R2 에서의 모사를 위해 위 실험에서 사용한 모든 조건을 동일하게 입력하였고 46 원자로주기를 GT2R2 의 시간간격 한계인 35 로 조정을 위해 비슷한 출력을 보인 주기들을 하나의 시간 간격으로 간주하였고, 소결체 농축도를 평균 농축도 1.968% 로 사용하였다.

III. 결과 및 토의

RISO-M2-2C 핵연료봉의 실험조건들을 그대로 GT2R2 모사결과 예측한대로 그림 1 에서와 같은 연소도에 따라 각 모델의 핵분열 생성물 방출비의 변화를 보이고 있다. 계산과정 중 핵분열 생성물 방출 모델을 제외한 모든 조건을 동일하게 유지 하였음에도 불구하고, 실험 연소도인 38,000MWd/MTU 에서 Beyer-Hann 모델은 0.1501, NRC High Burnup Correction

을 한 Beyer-Hann 모델은 0.3456, ANS5.4 모델은 0.486, Modified ANS5.4 모델은 0.3706 의 핵분열 생성물 방출비를 예측하였다.

각 모델의 주요인자를 살펴보면 Beyer-Hann 모델은 국부적 온도만의 함수이고 NRC High Burnup Correction 을 할 경우 온도와 연소도의 함수가 된다. ANS 5.4 모델과 Modified ANS 5.4 모델은 온도, 시간, 연소도의 함수이다.

각 모델의 국부적 온도에 따른 핵분열 생성물 방출비 예측은 Beyer-Hann 모델은 각 온도영역에서 직선으로 나타난다. ANS 5.4 모델과 Modified ANS 5.4 모델은 온도가 상승하면서 핵분열 생성물 방출을 가속적으로 방출하며 ANS5.4 모델의 상대적으로 작은 활성화에너지 값으로 인하여 Modified ANS5.4 모델보다 온도영향이 크게 나타남을 알 수 있었다. [그림 2]

정상상태의 경우 조사시간을 연소도 함수로 나타낼 수 있으므로 각 모델은 핵연료의 국부적 온도별(1000°C, 1200°C, 1400°C, 1700°C,) 연소도에따른 핵분열 생성물 방출 비로 나타낼 수 있다. [그림 3,4,5,6] ANS5.4 모델은 연소도의 영향을 조사초기에서부터 고려하고 있고, Modified ANS5.4 모델은 25000 MWd/MTU 이상의 연소도에서만 고려하고 있으며 NRC High Burunup Correction 을 한 Beyer-Hann 모델은 20000 MWd/MTU 이상에서 연소도에 의한 핵분열 생성물 방출비 증가효과를 고려하고 있다.

참고문헌

1. M.E. Cunningham, C. E. Beyer, *GT2R2 : An Updated Version of GAPCON-THERAML-2, NUREG/CR-3907, PNL-5178*, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, September (1984)
2. Beyer, C.E. and C. R. Hann, *Prediction of Fission Gas Release From UO_2 Fuel, BNWL-1875,* Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, (1974)
3. Meyer, R. O., C. E. Beyer, and J. C. Voglewedg, *Fission Gas Release From Fuel at High Burup, NUREG-0418*, U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D. C., March (1978)
4. A. H. Booth, *A Method of Calculating Fission Gas Diffusion from UO_2 Fuel, CRDC-721*,(1957)
5. Rausch, W. N., and F. E. Panisko, *ANS54 : A Computer Subroutain for Predicting Fission Gas Release, NUREG/CR-1213, PNL-3577*, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, August (1979)
6. Beyer, C. E., and R. O. Meyer, *Semiempirical Model for Radioactive Fission Gas Release From UO_2, Trans. Am. Nuc. Soc.* 23, (1976) p.172
7. Bagger, C. H. Carlson, and P. Knudsen, *Details of Design, Irradiation and Fission Gas Release for the Danish UO_2-Zr Irradiation Test O22, RISO-M-2152*, Riso National Laboratory, Denmark, December(1978)

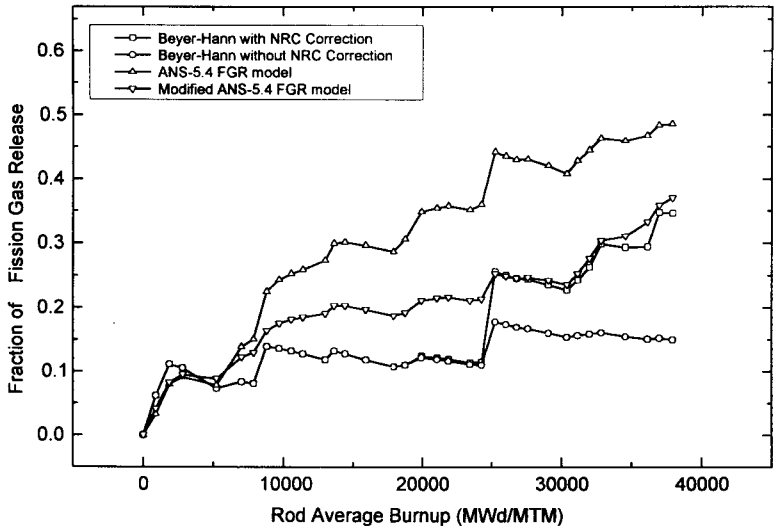

그림 1. RISO-M2-2C 핵연료봉의 GT2R2 코드 핵분열 생성물 방출모델들에의한 평균 연소도에 따른 핵분열 생성물 방출비 변화

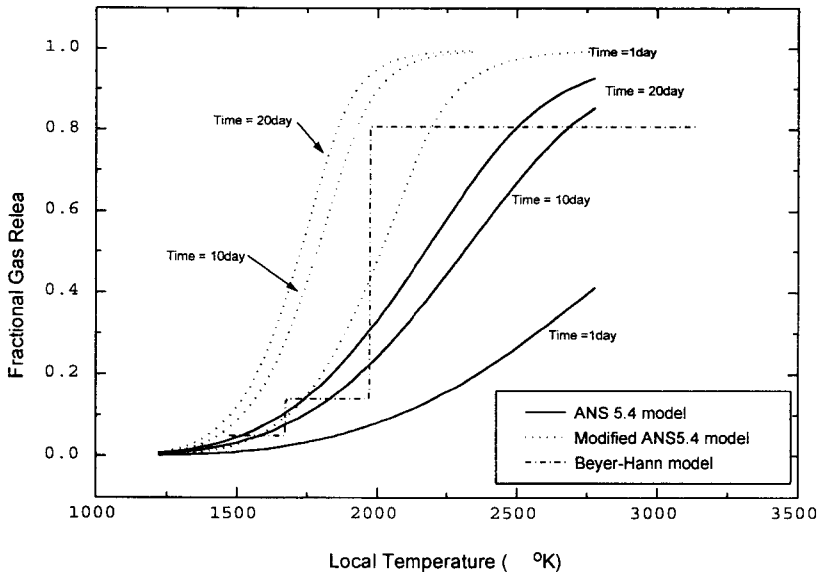

그림 2. Beyer-Hann, ANS 5.4 , Modified ANS5.4 모델의 28000MWd/MTU 연소도에서의 국부적 온도에 따른 핵분열 생성물 방출비 예측

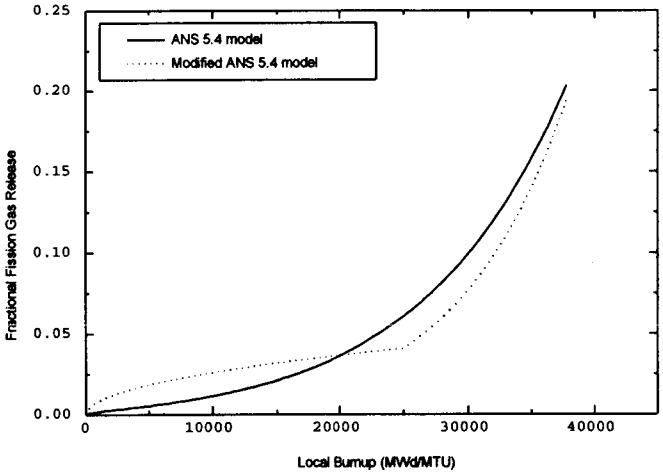

그림 3. ANS 5.4 Model 과 Modified ANS 5.4 Model 의 국부적 연소도에 따른 1000°C 에서의 핵분열 생성물 방출비

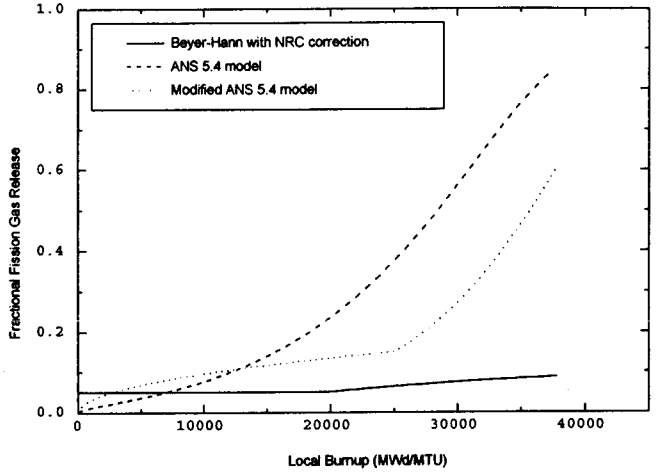

그림 4. Beyer-Hann with NRC High Burnup Correction,ANS 5.4 Model,Modified ANS 5.4 Model 의 국부적 연소도에 따른 1200°C 에서의 핵분열 생성물 방출비

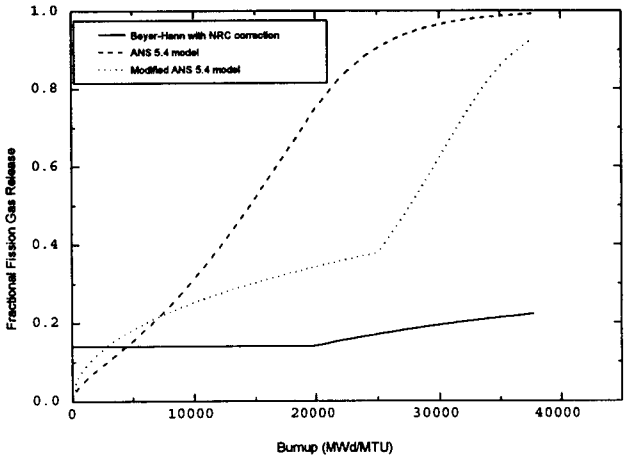

그림 5. Beyer-Hann with NRC High Burnup Correction,ANS 5.4 Model,Modified ANS 5.4 Model 의 국부적 연소도에 따른 1400°C 에서의 핵분열 생성물 방출비

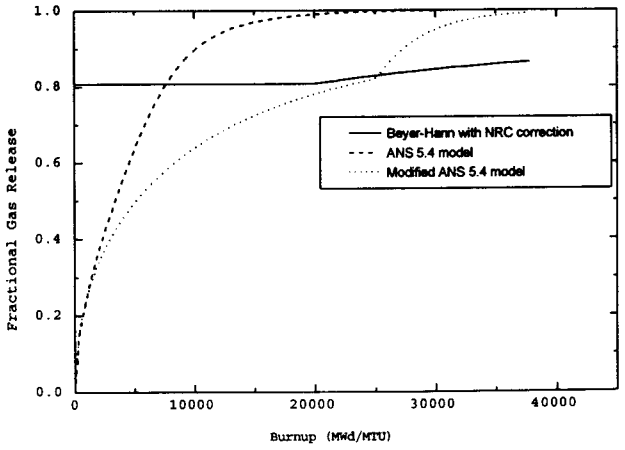

그림 6. Beyer-Hann with NRC High Burnup Correction,ANS 5.4 Model,Modified ANS 5.4 Model 의 국부적 연소도에 따른 1700°C 에서의 핵분열 생성물 방출비