

## MA 함유 SFR 금속연료 헬륨방출 모델링

이병운, 천진식, 김준환, 이찬복  
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045  
 boleee@kaeri.re.kr

### 1. 서론

소듐냉각고속로 (SFR)의 핵연료는 파이로프로세싱과 연계된 U-TRU-Zr 금속연료가 선정되어 개발되고 있다. 파이로프로세싱에서 공급된 TRU에는 MA(Minor Actinide)가 함유되어 있으며, 이 중에서 Am은 노내에서 He(헬륨) 기체를 방출하게 된다. 이와 같은 He 방출은 금속연료봉의 건전성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 SFR용 MA 함유 U-TRU-Zr 금속연료에서 MA에 의해 발생하는 핵분열기체 방출 프로그램을 개발하고, 금속연료의 핵분열기체 방출 거동을 예측하였다.

### 2. MA 함유 SFR 금속연료 헬륨방출 모델개발

#### 2.1 개요

MA에 의한 핵분열기체 방출 모델을 개발하기 위하여 미국 INL의 X501자료[1]를 분석한 결과, 핵분열기체방출 거동은 MA가 첨가되더라도 U-Pu-Zr과 전체적인 거동은 유사하지만, Am에 의한 He 방출을 고려하여야 하는 것으로 평가되었다. 이에 따라 MACSIS 코드[2]내에 MA 첨가에 의한 He방출을 모델링하고 부프로그램을 개발하였다.

#### 2.2 MA에 의한 He 생성

기존의 핵연료성능평가 모델에서는 Am을 고려치 않았기 때문에 MA에 의한 He 방출 프로그램을 설치하기 위하여, <sup>241</sup>Am에 의한 He의 생성량을 고려하는 것이 필요하다. 데이터 (Table 1)에 의하면 <sup>241</sup>Am 1g당 165일마다 약 50ml의 He를 방출하므로 [1], 금속연료봉에 함유되는 <sup>241</sup>Am의 양을 고려하여 He 생성량을 삽입하였다.

Table 1. X501 gas production and release

<sup>241</sup> AM 연소시 He 생성량 (ml/g)	He 방출률 (%)	핵분열 생성가스 방출률 (%)
39-45	90	79

### 2.3 He 방출 모델링

MACSIS 코드내에 MA 첨가에 의한 He방출 효과를 모델링하고 부프로그램 HeRel을 설치하였다. (Fig. 1).

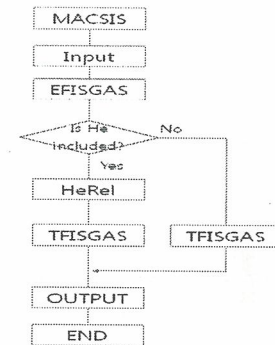


Fig. 1. Flow chart for He Release

결정입계 내부의 He 확산거동 및 기포생성/이동에 의한 방출모델에 대해서는 Booth[3]의 고전적 확산이론이 적용되었다. 핵연료 결정입계를 임의의 구라 가정하고 구 표면에 핵분열 생성물이 확산되어 나왔을 때 모두 방출한다는 가정에서 출발한 확산방정식을 사용하여 정상상태 핵분열 생성물 방출비를 계산하였다.

핵연료봉내 자유공간으로의 He 방출을 계산하기 위해서는 먼저, 결정입계에서의 핵분열생성 기체 원자들에 의해 형성되는 기포 생성/성장, 기체방출, 축적된 기포크기 분포도를 계산하고 여기서 입계면에서의 임계조건을 고려하여 He방출을 계산하였다.

본 모형에서는 금속연료의 반경방향 온도 구배는 100~200 °C로 낮아 대부분의 기포들의 합체 현상은 기포들의 자유이동에 의하여 충돌할 때 일어난다고 가정하였다. [4].

결정입에서 핵분열에 의해서 생성된 원자는 기체원자 자체의 확산 또는 기체기포의 이동에 의하여 결정입계로 도달하며, 주어진 시간구간에 결정입계에 도달되는 He기체원자들의 총 수는 다음

과 같이 세 가지 항의 합으로 산출된다.

$$TOTDIFHe(I) = C_g + G_r(1 - f_s) + G_g \quad (1)$$

여기서,

$C_g = f_r \times VFGIHe(J) \times 6.025E23 / 22.4E3 \times VOL(I) / TVOL$ , (축 및 반경 방향구간 J, I 에서 이전 구간까지 결정입계에 도달되는 기체원자들의 수),  $f_r$  = 핵분열 생성기체원자 확산에 의한 방출율,  $VFGIHe(J)$  = 축 및 반경 방향구간 J, I 에서 방출된 He 부피(cc),  $TVOL$  = 연료심의 J 축 방향구간에서의 부피(cc),  $(1 - f_s)$  = 이전 구간까지 기체원자들의 수에 대한 결정입의 unswept 된 부피분율,  $G_r = P_i * G * V_i$ , 현재 시간구간동안에 기체확산에 의한 결정입계에 도달되는 기체원자들의 수,  $P_i = I$  반경환구간에서의 핵분열생성기체 생성율,  $G$  = 확산방정식으로부터 구해지는 방출분율,  $V_i = I$  반경환의 부피(cc).

식 (1)으로부터 산출된 결정입계에 도달되는 기체원자들의 총 수를 사용하여 결정입자 경계상에 다중크기 기포 분포를 구하고, 이후 단위 부피당 기포 평균수에서 주어진 i 기포 크기 범위를 산출한 후 입계면에서의 임계조건을 고려하여 He 방출율을 계산하였다.

### 2.4 He 및 핵분열가스 방출 계산

Fig. 2는 MACSIS 코드에 의해 계산된 at.% 연소도에 따른 핵분열기체 방출을 나타낸다. 고속로 연료심인 U-TRU-10Zr의 경우, 핵분열기체는 연소도 1-2%에서 급격한 방출율을 나타내며 약 10at%에서 79%의 방출율을 나타낸다.

또한 Fig. 2에 MACSIS 코드내에 설치된 HeRel에 의해 계산된 He 방출율을 나타내었다. X501에 의해 예측된 바와 같이 기존의 핵분열기체 방출율보다 높은 90%정도의 방출율을 나타내는 것으로 계산되어, 개발된 He 방출모델은 He 방출율을 잘 모사하는 것으로 평가되었다.

이는 다중 기포크기를 기존의 핵분열기체 방출 모델보다 약간 크게 조절한 결과이다. 향후 실험 자료가 충분히 확보되면 다중기포 크기, 확산 계수 등의 핵분열방출에 영향을 미치는 인자들의 민감도 분석이 수행될 예정이다.

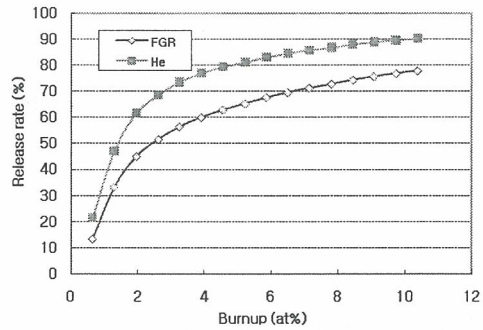


Fig. 2. Calculation of He Release and FG release rates

### 3. 결론

MA에 의한 핵분열기체 방출 모델을 개발하기 위하여 미국 INL의 X501자료를 분석한 결과, 핵분열기체방출 거동은 MA가 첨가되더라도 U-Pu-Zr과 전체적인 거동은 유사하지만, Am에 의한 He 방출을 고려하여야 하는 것으로 평가되었다. MACSIS에 HeRel 부프로그램을 설치하여 He 방출량을 계산하도록 하였다. He 기체 방출을 계산결과 MACSIS내에 설치된 HeRel 부프로그램은 He 방출을 실험자료를 유사하게 예측하는 것으로 평가되었다.

이와 같이 개발된 He 방출 모델을 활용하여, MA가 함유된 핵연료의 건전성에 영향을 미치는 설계인자를 평가할 예정이다.

### 4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 5. 참고문헌

- [1] M.K. MEYER, et al., Nuclear Applications In The New Millenium (AccAPP-ADTTA'01), Reno, Nevada, Nov 2001
- [2] W. Hwang, et al., Nucl. Tech. Vol.123, Aug. 1998
- [3] A.H. Booth, CRDC-721, 1957
- [4] W. Hwang, et al., KALIMER/FD100-WR-02/1999, July 1999