

저연소도에서 Am에 의한 SFR 금속연료 헬륨방출 평가

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

1. 서론

파이로프로세싱과 연계된 U-TRU-Zr 금속연료 및 U-Zr 금속연료는 소듐냉각고속로 (SFR)의 핵연료로 선정되어 개발되고 있다. U-TRU-Zr의 Am(아메리슘)은 노내에서 헬륨 기체를 생성하며, 생성된 헬륨은 연료봉 내의 플레넘 공간으로 방출되어 금속연료봉의 건전성에 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 SFR용 Am 함유 U-TRU-Zr 금속연료에서 Am에 의해 발생하는 헬륨가스 방출조건을 설정하고, 저연소도에서의 헬륨가스 방출 거동을 비교 평가하였다.

2. 저연소도에서 Am에 의한 헬륨방출 평가

2.1 개요

헬륨방출 거동 평가를 위하여 미국 INL의 AFC-1자료[1]를 분석한 결과, 방출 거동은 Am이 첨가되더라도 U-Pu-Zr의 핵분열기체방출 거동과 유사한 것으로 평가되었다. 이에 따라 MACSIS[2]에 헬륨 가스량을 포함시켜 핵분열기체 방출량을 계산하도록 하였으며[3], AFC-1 금속연료의 저연소도에서 헬륨방출을 예측하기 위하여 헬륨방출 요건을 설정하였다.

2.2 He 방출거동 모델

금속연료에서 핵분열 기체는 우선 연료 기지내에서 결정립계로 이동한 후, 결정립계에서 연료의 플레넘과 같은 빈 공간으로 방출된다. 또한 연료심내에 잔류되어 있는 핵분열기체는 기포성장을 통하여 연료 팽윤을 일으키게 된다.

본 연구에서는 헬륨방출 거동도 핵분열기체 방출 거동과 동일하다고 가정하였다. 그림 1은 핵분열기체 방출 및 헬륨 방출 개념도이다. 헬륨 방출 거동은 결정립계 내부 및 결정립계 거동을 연계하여 모델링되었다.

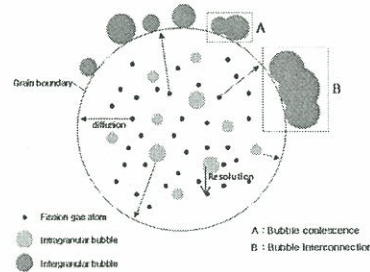


Fig. 1. Concept of He release model

결정립계 내부의 헬륨 방출모델에 대해서는 Booth의 고전적 확산 이론 및 Notley의 개념을 연계한 Speight 모델[4]을 적용하였다. 핵연료봉내 자유공간으로의 헬륨 방출을 계산하기 위해서는 먼저, 결정립계에서의 핵분열생성 기체원자들에 의해 형성되는 기포 생성/성장, 기체방출, 축적된 기포크기 분포도를 계산하고 여기서 입계면에서의 입계조건을 고려하여 헬륨 방출을 계산하였다.

2.3 결정립계의 헬륨가스 방출 조건

결정립계에서의 헬륨 가스의 기포크기 분포는 기존의 핵분열기체 분포보다 작다고 가정하였다. 따라서 헬륨 기포는 핵분열 기포보다 쉽게 확산된다. 연소도에 따라 헬륨 기포가 증가하고 입계에 도달하면 헬륨가스는 방출된다.

금속연료 미세구조 평가에 따르면 금속연료는 라미나 구조를 가지며 이 경우 결정립 반경은 약 1 μm 로 고려된다. 이에 따라 금속연료에서는 헬륨가스 및 핵분열가스가 쉽게 방출된다고 평가된다. 기존의 금속연료 시험결과에 따르면 금속연료 팽윤이 10%에 도달하면 기공이 연결되므로, 이 경우 금속연료의 모든 유효 결정립 크기를 1 μm 이하로 가정하였다.

또한 Barn 이론에 의하여 팽윤이 33%에 도달하면 모든 기체가 방출되기 시작하므로 이 경우에는 유효 결정립 크기를 0.1 μm 이하로 설정하였다. 이에 따라 본 연구에서는 다음과 같은 가정 및 조건이 헬륨 방출 모델에 입력되었으며, 그림

2에 헬륨가스 방출 계산흐름도를 나타내었다.

$$r_{He,i}^2 = \frac{1}{2} r_{FG,i}^2$$

$$D_s^{He} = D_s^{FG} \quad (D_b \propto \frac{D_s}{r^4} \text{인 경우})$$

$$E_t \leq 1\mu\text{m} \quad (\Delta V > 10\% \text{인 경우})$$

$$E_t \leq 0.1\mu\text{m} \quad (\Delta V > 33\% \text{인 경우}) \dots\dots (2)$$

여기서 $r_{He,i}^2$ i 크기의 헬륨가스 기포, $r_{FG,i}^2$ 는 i 크기의 핵분열가스 기포, D_s^{He} 는 헬륨 기포 확산 계수, D_s^{FG} 는 핵분열기체 기포 확산계수, D_b 는 기포 확산계수, D_s 는 표면확산계수, E_t 는 결정립 유효두께, ΔV 는 팽윤.

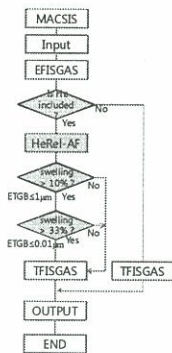


Fig. 2. Calculation flow for the helium gas release

2.4 헬륨방출 비교 평가

AFC-1B 및 AFC-1F 조사시험에서 저연소도에서의 헬륨방출 거동 및 핵분열가스 방출거동은 같은 거동을 보였으나, 핵분열 가스 방출률은 약 0-36% 그리고 헬륨방출은 그보다 낮은 0-15%의 방출률을 나타내었다.

그림 3에 측정값 및 본 연구에서 개발된 이론 모델에 의해 계산된 헬륨 방출율을 비교하였다. 실험결과에 따르면 어느 정도의 잠복기가 존재하며 약 6E20 f/cm³의 연소도에서 헬륨방출의 증가가 시작되었다.

핵분열 가스 방출 모델에 의하면, 결정립계에서의 가스량이 임계값에 도달했을 때 방출이 시작된다. 본 연구에서는 헬륨기포 크기 분포가 핵분열가스 기포 크기의 약 절반정도로 가정하였으므로, 헬륨 방출을 위한 임계값에 도달하는 시간이 지연되었다.

그러나 헬륨 기포의 확산계수를 핵분열가스의 4배 정도로 고려하였으므로 고 연소도에서는 핵

분열가스 방출률과 같거나 클 것으로 예상된다. 또한 그림 3에 나타난 것과 같이 만약 헬륨 기포의 확산계수를 핵분열 가스의 10배 정도로 고려한다면 4E20 f/cm³에서 방출이 시작되는 것을 알 수 있다.

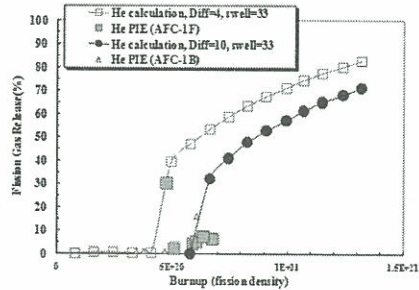


Fig. 3. Comparison with measured data and calculated results

비록 헬륨기포 분포 등의 자료가 아직 측정되지는 않았지만, 본 연구에서 개발된 헬륨방출 모델은 저 연소도에서 낮은 방출률을 나타내는 헬륨 방출 거동을 잘 묘사하며 AFC-1에서 측정된 시험자료와 일치하는 좋은 결과를 나타내는 것으로 평가되었다.

3. 결론

파이로프로세싱과 연계된 U-TRU-Zr 금속연료는 Am에 의해 헬륨이 생성되고 방출되는 영향을 고려하여야 한다. 이를 위하여 INL의 AFC-1 시험자료를 활용하여 핵분열기체 방출 자료를 분석하였으며, MACSIS 코드 내에 저연소도에서의 헬륨 방출 모델을 설치하고 비교한 결과, AFC-1에서 측정된 시험자료와 일치하는 좋은 결과를 나타내는 것으로 평가되었다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

[1] Bruce Hilton et al., INL/EXT-05-00785, 2006
 [2] W. Hwang, et al., Nucl. Tech. Vol.123, Aug. 1998.
 [3] B. O. Lee, et al., 2010 Spring KRS Conference, May. 2010.
 [4] R. J. White et al., JNM 118 (1983) 1-38.