

U-Zr 금속 핵연료 하나로 시험을 위한 소듐-물 반응 평가 및 캡슐 설계

천진식, 이병운, 김준환, 김종만, 이종탁, 이찬복
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
ischeon@kepri.re.kr

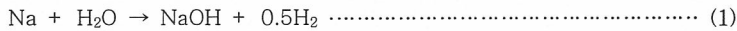
1. 서론

한국원자력연구원에서는 2007년부터 소듐 냉각 고속로 (SFR) 노심에 사용할 U-Pu-Zr 핵연료를 개발 중이다. 현재는 U와 Zr으로 이루어진 U-Zr 금속 합금 제조 기술을 개발하고 있으며, 2010년부터 설계 및 제조 연구 결과를 검증하기 위한 연소 시험을 계획하고 있다.

핵연료 성능 시험에 고속로를 이용하는 것이 적절하겠지만 세계적으로 가용한 고속로가 제한되어 있고 국내의 고속로 핵연료 설계 및 제조 기술 개발이 착수된 현 시점에서는 하나로를 이용한 연소 시험을 수행하는 것이 가장 현실적인 접근 방법이라고 할 수 있다. 금속 핵연료봉은 핵연료와 피복관 사이에 소듐을 충전하여 열전달을 용이하게 한다. 그러나 물과의 반응성이 큰 소듐이 포함된 핵연료봉을 하나로에서 시험하기 위해서는 소듐이 누출되지 않도록 캡슐을 설계하는 것이 필요하다. 또한 최악의 경우 소듐이 누출되더라도 하나로에 미치는 영향이 미미하도록 설계되어야 하고 그 영향을 평가하여야 한다. 본 논문에서는 소듐-물 반응에 대한 시험 결과를 기술하였고, 이에 대응한 캡슐 설계를 소개하였다.

2. 소듐-물 반응 특성 및 실험

소듐은 물과 다음과 같은 반응을 통하여 반응열과 수소 기체가 발생한다.



이때 발생하는 열은 141 kJ/mol이며 수소와 산소의 반응열은 286 kJ/mol-H₂이다. 그러므로 소듐과 물과의 반응열과 생성된 수소가 모두 산소와 반응한다고 가정할 때의 반응열을 합하면 213 kJ/mol이 되고 소듐 단위 질량으로 환산하면 9.3 MJ/kg이다. 이는 소듐이 공기에서 연소될 때 방출되는 열인 10.9 MJ/kg 과 비슷하며 목재의 연소열인 13.8 MJ/kg 보다 30% 작은 값이다 [1].

소듐을 물에 넣으면 수소의 생성으로 소량의 소듐 (상온에서 소듐의 밀도는 0.97 g/cm³)은 물 위에 떠 있으면서 계속해서 수소가 발생된다. 만약 소듐의 양을 좀 더 증가시키면 반응열 때문에 소듐이 녹고 생성된 수소가 발화되어 용융 소듐이 비산되지만 아르곤 가스가 있는 환경에서는 소듐과 물의 반응이 관찰되지 않았다 [2]. 그러므로 소듐에 의하여 화재가 일어나려면 우선 공기에 노출되어야하고 소듐의 양이 충분하여 반응열에 의하여 소듐이 녹으면서 수소 기체가 발화되는 조건을 만족하여야 한다.

소듐-물 반응 특성을 평가하기 위하여 소듐-물 반응 실험을 수행하였다. 실험은 0.5 g, 1 g, 1.5 g, 2 g 소듐에 대하여 수행하였다. 그물망 속에 소듐을 넣고 부력에 의하여 위로 떠오르지 않도록 추를 매달아 물속에 넣었다. 그림 1에 소듐-물 반응에 의하여 생성될 수 있는 수소 기체 부피 (STP 상태)를 나타내었다.

2 g의 소듐을 추가 달린 그물망에 넣은 직후 기포의 생성이 활발하며, 35초 정도에 그물망을 통과한 작은 소듐이 물 위로 떠올라 최초 발화되었으나 그 정도는 미미하였으며 유지 시간도 1초 정도로 매우 짧았다. 이 후에도 소듐의 간헐적인 발화로 수소 기포에 불이 일어나는 것도 관찰되나 지속 시간은 1초 미만이며, 불의 크기도 소듐 발화와 비슷한 수준이었고, 3-4회 정도 발생하였다. 기포 발생은 70초에 종료되었다. 그림 1에 소듐 양에 따른 기포의 발생 시간을 나타내었다. 그림과 같이 기포의 발생 시간은 소듐의 양에 따라 거의 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 반응 속도의 변화등 반응 양상이 현재 실험한 소듐 양의 범위에서는 큰 차이가 없음을 나타낸다.

3. 소듐-물 반응 대응 캡슐 설계

U-Zr 금속 핵연료 하나로 캡슐 설계의 기본 요건은 연소 기간 동안 시험 연료봉과 조사시험 캡슐은 용접 부위를 포함하여 건전성을 유지하여야만 하며, 하나로와의 양립성이 보장되어야 한다는 것이다.

이번 조사 시험에서 핵연료의 목표 연소도는 3 at% 이다. 조사시험 캡슐 조건은 핵연료 선출력과 핵연료 및 피복판의 온도를 고속로와 비슷한 수준이 되도록 설정하였다.

그림 2에 하나로 U-Zr 핵연료 조사시험 캡슐이 제시되어 있다. 캡슐은 열중성자 차폐체로 둘러싸서 목표 선출력에 도달하도록 한다. 소듐-물 반응 대응 설계를 위하여 핵연료봉을 밀봉 튜브 내에 넣는 구조이다. 여기에 핵연료심의 크기를 줄여서 핵연료봉에 소듐을 적게 넣어 밀봉 튜브가 파손되더라도 반응열과 수소의 발생이 작아 원자로에 미치는 영향이 없도록 설계하였다. 또한 조사시험 캡슐 상단에 그물망을 설치하여 누출된 소듐이 물 위로 떠오르는 것을 방지하고 물 속에 잠겨 있어 공기에 노출되지 않도록 한다. 소듐은 그물망에 의하여 물 속에 잠겨 있는 동안 지속적으로 수소를 방출하며 소듐-물 반응이 끝난 시점에 매우 작은 알갱이의 소듐만이 물 위로 떠오를 수 있어 원자로에 미치는 영향이 미미하게 된다.

계산에 의하면 핵연료봉에 추가되는 선출력은 21 W/cm이다. 이러한 추가적인 열 발생은 핵연료봉 선출력에 비하면 훨씬 작은 수준이며 특히 대부분의 열이 물로 방출되므로 핵연료봉의 추가적인 온도 상승에는 기여하지 않을 것으로 판단된다. 또한 핵연료봉 하나에 들어 있는 소듐이 0.66 g 이므로 그림 1에 근거하여 수소 기포의 발생 시간은 37.2 초이며, 부피는 0.32 리터로 평가된다. 소듐 전량이 피복판과 밀봉 튜브의 이중 차단벽을 통하여 누설된다고 가정할 때 캡슐의 그물망에 의하여 큰 알갱이의 소듐이 물 위로 떠오르지 않고 물 속에서 반응하여 수소 기포를 생성할 것으로 예상된다.

이러한 실험 결과는 소듐 전량이 한꺼번에 물 속으로 방출되는 상황에서 평가된 결과로 매우 보수적인 것이다. 실제로 파손이 발생하는 경우 소듐이 밀봉 튜브에서 일시에 물에 노출될 가능성이 희박하므로, 소듐이 실제 물과 접촉할 수 있는 면적을 고려하면 반응이 지속되는 시간은 훨씬 길어질 것이고 열 발생률도 현저히 작아 캡슐과 원자로에 미치는 영향은 거의 무시할만한 수준으로 판단된다.

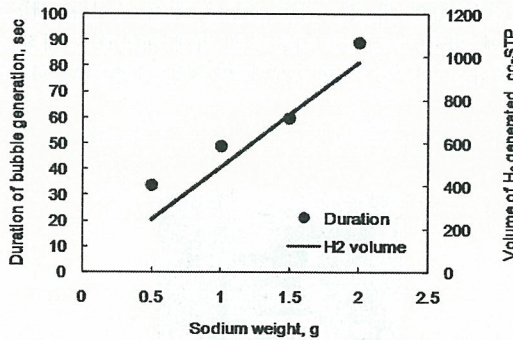


Fig 1. Hydrogen generated during Na-H₂O reaction

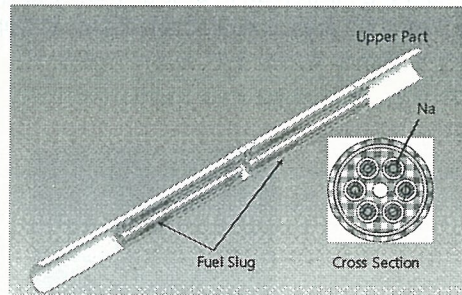


Fig 2. Hanaro U-Zr irradiation capsule.

4. 결론

U-Zr 금속 핵연료 하나로 캡슐 설계를 위한 소듐-물 반응 평가와 시험을 수행하였다. 캡슐에 장착될 핵연료봉에 들어 있는 정도의 적은 소듐이 물과 반응하여 발생할 수 있는 반응열과 수소는 작았다. 또한 그물망에 소듐을 넣어 물속에서 반응시킨 결과 소듐 방출은 미미한 수준이었다. 이러한 결과를 바탕으로 U-Zr 금속 핵연료 하나로 조사 시험 캡슐을 설계하였으며 추가적인 소듐-물 반응 영향을 낮추기 위한 여러 가지 대응 설계 방법을 제시하였다. 소듐이 누출되는 경우에 대하여 실험과 평가를 통하여 분석한 결과, 소듐이 캡슐과 원자로에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 교육과학기술부의 원자력중장기연구과제 중의 일부로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] V.M. Poplavskii et al., Atomic Energy, 96 (1004) 327-331.
- [2] M.M. Markowitz, J. of Chem. Edu., 40 (1997) 633-636.