

## 소듐냉각고속로용 금속핵연료와 피복관의 상호반응 방지 배리어 개발

양성우, 류호진, 김준환, 이병운, 이찬복  
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045  
 swyang@kaeri.re.kr7

## 1. 서론

제 4세대 소듐냉각고속로의 핵연료로 U, TRU, Zr이 혼합된 금속핵연료와 피복관 재료로 조사성능 및 기계적 특성이 우수한 페라이트-마르텐사이트 강이 개발되고 있다. 그러나 금속핵연료내의 U 및 TRU 원소와 피복관 구성 원소사이에서는 상대적으로 낮은 온도에서도 상호반응이 일어나 핵연료의 성능 및 피복관의 건전성을 저하시킬 수 있다. 이를 방지하기 위해 몇 연구자들이 금속핵연료와 피복관 사이에 배리어 물질을 삽입하여 반응을 억제하는 것을 제안하였는데, 대부분이 Zr과 V을 라이너형태 및 질화물로 삽입하는 것에 국한되어 있었기 때문에 다른 물질 및 형태를 이용한 배리어 물질의 평가는 거의 이루어지지 않았다. 최근에 수행된 연구로 Zr과 V 뿐만이 아닌 Cr, Mo, Ti, Ta, Nb 등의 상호반응 억제 성능이 평가되었고, 이 연구를 통해 V 및 Cr의 배리어 성능이 가장 뛰어난 것으로 나타났다[1]. 특히 Cr은 라이너형태로 배리어를 형성하기는 어렵지만, 여러 산업분야에서 쓰이는 것같이 전해도금을 통해 쉽고, 경제적으로 피복관 내면에 형성시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 Zr과 V을 사용한 라이너형태와는 달리 전해도금으로 피복관 재료 표면에 Cr을 형성시켜 배리어 성능을 평가하고자 하였다.

## 2. 실험 및 결과

핵연료와 피복관 재료로 각각 U-10wt%Zr과 대표적인 페라이트-마르텐사이트 강인 HT9이 디스크 형태로 사용되었다. 상호반응 열처리실험 전 HT9은 폴리싱, 에칭, 세척 과정 후 Sargent 액( $\text{CrO}_3$  250 g/l,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2.5 g/l)에서 Cr 전해도금 하였다. 전해도금 시 전해액의 온도에 따라 두 가지의 크롬 층을 얻을 수 있었는데, 50°C에서 도금될 경우 경질크롬이 형성되었고, 그 보다 고온인 80°C에서 도금될 경우 무균열크롬이 형성되었다. 경질크롬은 기계적 성능이 뛰어나 산업 전반에 걸쳐서 폭 넓게 사용되나, Cr 층 내부에 균열이 불가피하게 발생하게 되므로 내식성에 문제가 있기 때문에 무균열크롬으로 이를 보완 하였다. 도금된 HT9과 폴리싱, 세척과정을 거친 U-10wt%Zr은 일정한 힘으로 서로 맞닿게 하여 진공분위기에서 열처리 하였다. 상호반응 열처리실험은 800°C에서 25시간동안 진행되었다. 열처리 종료 후에는 물에 담가 급속 냉각하여 U-10wt%Zr/Cr층/HT9의 계면을 주사전자현미경으로 관찰하였다.

그림 1은 도금조건에 따라 800°C, 25시간동안 열처리실험 후 주사전자현미경으로 관찰한 것을 나타낸다. 비교적 고온에서 열처리 되었지만 Cr층이 U-10wt%Zr과 HT9 성분사이의 반응을 억제한 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 그림 1(a)에서 볼 수 있듯이 경질크롬의 경우 많은 균열이 발생하였기 때문에 이 균열을 통해 우라늄이 침투하였다. 이 때 침투된 U이 Cr층의 건전성을 약화시킬 수 있기 때문에 균열을 최소화한 무균열크롬으로 열처리 실험을 수행하였다. 그림 1(b)에서 볼 수 있듯이 무균열크롬의 경우 균열이 완전히 없어지는 않았지만 균열 감소에 의한 우라늄 침투가 현격히 줄어드는 효과를 보여 주고 있다. 따라서 경질크롬보다 무균열크롬의 배리어 성능이 더 뛰어난 것으로 관찰되었다.

그림 2는 실제 피복관 튜브 내부에 크롬 도금을 적용하기 위하여 구성한 장치 개략도 및 51 mm길이의 페라이트-마르텐사이트 강의 하나인 Gr.91강 내면에 크롬 도금을 적용한 것을 나타낸다. 도금액을 펌프로 순환시키며 양극물질인 납 합금 선을 튜브 내부로 통하게 하였다. 비록 얼마간의 두께 편차가 존재했지만 비교적 간단한 장치 구성만으로도 약 10  $\mu\text{m}/\text{h}$ 의 두께 형성률로 조밀한 크롬 층을 도금시킬 수 있었다. 따라서 튜브 내부에 Cr 전해도금을 적용한 결과 우수한 제조성을 갖는 것이 확인되었다.

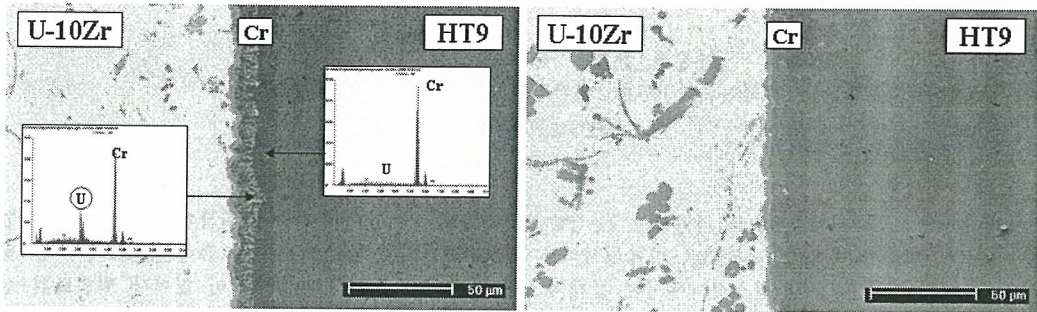


그림 1. 800℃, 25시간동안 열처리 실험 후 주사전자현미경 사진. (a) 경질크롬 (b) 무균열크롬

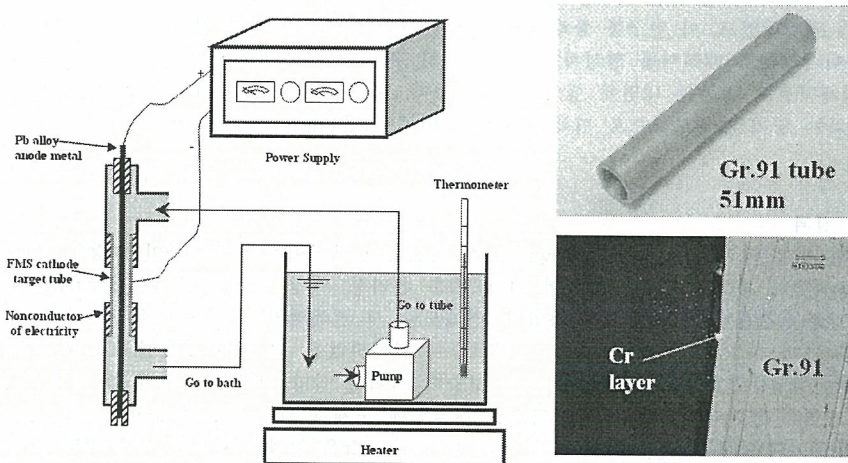


그림 2. 피복관 내면 크롬 도금장치 개략도 및 도금된 Gr. 91 튜브와 튜브 단면

### 3. 결론

본 연구에서는 금속핵연료와 피복관의 상호반응 방지 배리어로 기존의 V, Zr 라이너와 달리 전해도금에 의해 피복관 표면에 Cr을 형성하여 성능을 평가하였다. U-10wt%Zr과 HT9를 각각 핵연료와 피복관 재료로 사용하였고, 비교적 고온인 800℃에서 열처리 실험을 수행하였다. 경질크롬 도금 층에 의한 핵연료와 피복관 성분의 반응은 억제되었지만, Cr층 내부의 균열을 따른 U의 침투로 인한 건전선 약화가 우려되어 무균열크롬 도금법으로 이를 보완하여 뛰어난 배리어 성능을 관찰하였다. Cr 전해도금법은 튜브 내부에 적용한 제조성 시험에서도 우수한 결과를 보였다.

### 사 사

본 연구는 교육과학기술부의 지원을 받아 한미국제공동연구(I-NERI)를 통해 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] H.J. Ryu, B.O. Lee, S.J. Oh, J.H. Kim, and C.B. Lee, "Performance of FCCI Barrier Foils for U-Zr-X Metallic Fuel", Proceedings of the Nuclear Fuels and Structural Materials for the Next Generation Nuclear Reactors (NFSM-2008), Jun. 8-12, Anaheim(2008).