

가압경수로 고연소도 사용후연료 피복관의 부식 측정

오완호, 이은표, 서항석, 김은가, 민덕기, 전용범
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
 whoh@kaeri.kr

가압경수로 원자력발전소에서 핵연료의 경제성과 사용후연료의 발생량을 줄이기 위해서 운전주기를 늘리면서 연소도를 높이는 것이 현재 발전소의 운전추세이다. 따라서 원자로에서 핵연료의 연소주기를 연장하여 연소도를 높이려면 연소 중 핵연료의 건전성이 보증되는 것을 확인하여야 한다. 원자로 내에서 핵연료의 건전성은 사용후핵연료를 검사하여 그 거동을 평가함으로써 이루어진다. 핵연료의 연소거동에 대한 검사는 발전소 현장 수조에서 연료 재장전기간 동안에 수행하게 되며 보다 더 정밀한 검사는 사용후연료 중에서 특별히 선정된 연료를 조사후시험시설로 운반하여 핫셀에서 상세한 시험을 통해 이루어진다.

핫셀에서 사용후 연료봉에 대한 시험은 비파괴시험과 파괴시험으로 이루어지는데, 고연소도 핵연료에서 건전성에 영향을 주는 특별한 현상은 연료봉 피복관의 부식거동이다. 이것은 피복관의 산화현상으로 나타나게 되는데 본 연구에서는 고연소된 사용후연료봉의 피복관에 대한 산화특성을 검사하여 그 건전성을 확인하는 것이다.

1. 연료봉 피복관의 산화층 시험방법

사용후연료봉 피복관의 산화층시험은 핫셀내에 설치된 비파괴시험대에 연료봉을 장착한후 시험대에 부착된 와전류 산화층 측정장치를 이용하여 산화층의 두께를 측정한다. 연료봉에 대한 산화층의 두께는 연료봉을 상하로 이동시키면서 V홈에 접촉한 연료봉 표면에 와전류센서를 일정한 스프링 힘으로 밀착시켜 측정한다. 와전류시험장치의 측정주파수는 3 MHz이며 정확도는 $\pm 5 \mu\text{m}$ 이다. 측정전에 표준봉을 이용하여 시험장치를 교정한 후에 교정치와 비교하여 연료봉에 대한 산화층의 두께를 측정한다. 측정 후에는 측정시스템의 재현성을 보증하기 위해 표준시험봉으로 다시 확인한다. 이와 같이 비파괴시험법으로 연료봉의 전 길이에 대해서 산화층 분포를 측정하고 실제적인 산화층의 정밀측정은 연료봉을 절단한 후 지정한 부위에서 시편을 채취하여 금속조직시험으로 확인한다.

2. 사용후연료봉 산화층 두께 측정결과

산화층 측정시스템 교정용 표준시편은 미조사 연료봉 피복관 표면에 12 μm , 50 μm , 100 μm 두께의 마일러 필름을 부착하여 만들었다. 마일러 필름에 대한 산화층과의 유사성을 확인하기 위해 핫셀 밖에서 마일러 필름을 이용한 표준시편으로 측정장치를 교정한후 500 °C 공기 중에서 산화시킨 연료봉피복관의 산화층을 측정한 다음, 동일한 측정부위를 절단하여 금속조직시험 결과와 비교하였다. 산화시편에 대한 산화층두께는 비파괴 와전류시험 측정에서 $53 \pm 2 \mu\text{m}$ 이었으며, 금속조직시험에서는 $54 \pm 3 \mu\text{m}$ 로서 $\pm 3 \mu\text{m}$ 오차 이내에서 잘 일치하였다. 따라서 마일러 필름을 이용한 표준시험봉으로 핫셀 와전류 측정시스템을 교정한 후 연료봉을 원주방향으로 돌려가면서 연료봉 전길이에 대해서 표면산화층의 두께를 측정하였다. 사용후연료봉에 대한 와전류 시험을 마친 후 산화층의 정밀한 두께 확인을 위해서 연료봉을 절단하여 원주방향과 길이방향 위치에서 시편을 채취하여 금속조직시험으로 산화층을 측정하였다. 그림 1은 사용후연료봉의 전 길이에 있어서 산화층 두께측정의 와전류 비파괴시험 결과를 보여주고 있으며, 그림 2는 와전류 시험과 금속조직시험의 산화층 두께측정에 대한 비교측정치를 보여주고 있다.

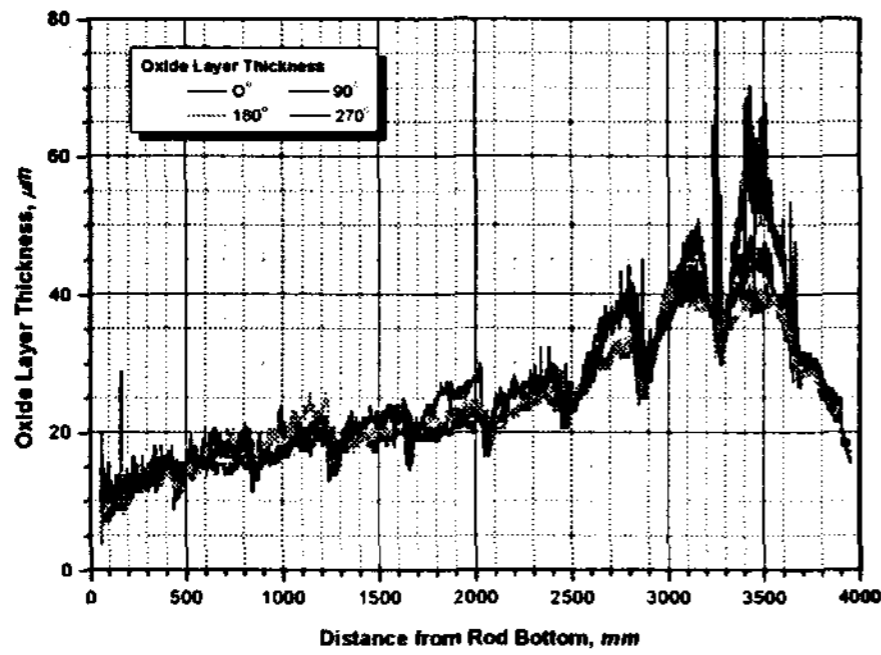


그림 1. 사용후연료봉 피복관의 산화층 두께 분포

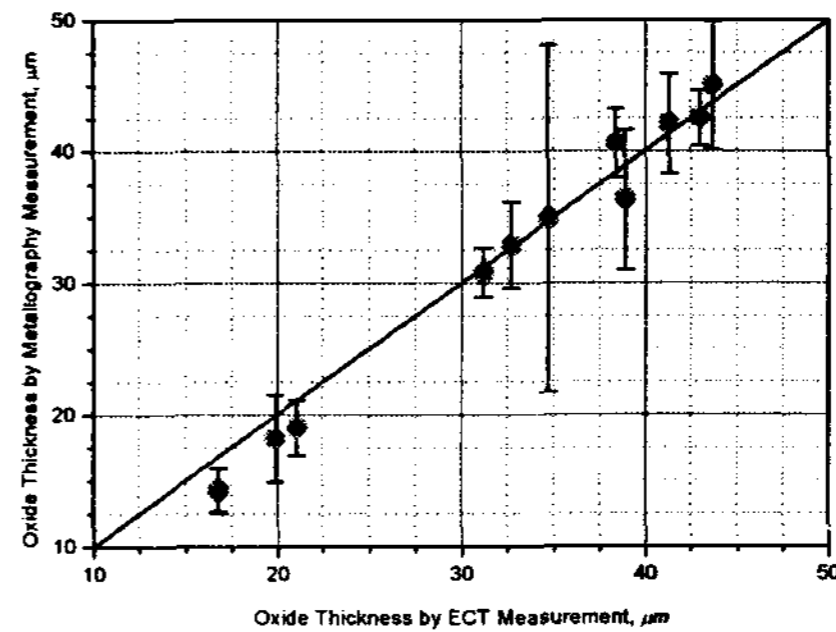


그림 2. 와전류시험과 금속조시험 산화층 측정결과 비교

그림 1에서 고연소 사용후연료봉의 피복관 표면산화층의 두께 분포를 0도, 90도, 180도와 270도 등 4방향에서 보여주고 있다. 측정결과에서 연료봉의 하부(2500 mm 이하)는 산화층의 두께가 30 μ m 미만으로 비교적 적게 형성되었으며 산화층이 가장 두껍게 형성된 지점은 연료봉의 상부인 3000~3500 mm 위치로 약 40~70 μ m 두께의 산화층이 형성되었다. 또 이곳의 산화층 두께가 측정 방향에 따라 차이가 많았는데 이것은 외관검사에서 나타난 것과 같이 산화층이 부분적으로 떨어져 나간 곳이 많을 뿐만 아니라 측정 중 와전류 센서에 이물질이 묻어나기 때문이다. 그림 2에서 연료봉의 와전류 산화층 측정치와 각 위치의 조직시험에서의 측정치를 비교하면 와전류 측정치의 기저값과 조직시험의 최대값에서는 서로 일치하고 있으나 측정지점에서의 평균값에서는 최대 10% 정도의 차이가 나고 있다. 이것은 사용후연료봉의 산화현상이 40~45 GWd/tU의 연소도에서는 안정적이고 일정한 현상을 보여주지만 연소도가 50 GWd/tU이상으로 가면 상부쪽에서 산화층이 심해지며 산화층 표면에 크러드 부착현상을 보여주고 있다. 이뿐만 아니라 산화층이 두꺼운 상부에서는 표면산화층이 부분적으로 떨어져 나가는 현상도 보여준다. 따라서 이와같은 산화층 표면조건은 와전류 시험시 측정치를 불안정하게 하고 실제 산화층두께 보다는 큰 값을 보여주게 한다(1).

3. 결론

고연소도 사용후연료봉의 경우, 연료봉 피복관 표면에 산화층이 두껍게 형성되고 부분적으로 떨어져 나간 곳이 있기 때문에 편차가 많이 있지만, 전체적으로 비파괴 와전류 측정법으로 측정된 산화층 두께와 금속 조직시험으로 측정된 산화층 두께 값이 비교적 잘 일치하고 있어 고연소도 연료봉의 건전성 평가에 비파괴 와전류측정법을 유용하게 활용할 수 있다는 것을 확인하였다.

참고문헌

1. S. K. Yagnik, D. P. Johnson and J. A. Kervinen, "Eddy Current Measurements of Corrosion and Metal Loss in Zircaloy Cladding with Ferromagnetic Crud," Nucl. Tech. Vol. 147, 2004.