

조사핵연료봉의 산화층 두께 측정

The Measurement of Oxide Layer Thickness of  
the Irradiated Fuel Rod

구대서, 박광준, 석호천, 김은가, 민덕기  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

산화층 두께 측정시스템 장치를 사용하여 고리 2호기에서 2주기동안 연소한 핵연료봉의 산화층의 두께를 측정하였다. 표준시편을 사용하여 본 산화층 두께 측정시스템 장치를 교정하였고, 또한 산화층 두께 측정방법을 설정하였다. 본 핵연료봉의 산화층 두께는 핵연료봉 하부의 수  $\mu\text{m}$ 에서 시작하여 핵연료봉 중앙부로 진행함에 따라 점차 증가하였고 핵연료봉 하단으로부터 3000mm 근방에서 산화층 두께가 최대 23 $\mu\text{m}$  이었다. 또한 본 산화층 두께 측정시험의 결과는 핵연료봉의 금속조직시험의 결과와 잘 일치하였으며, 이것은 본 핵연료봉의 산화층 두께 측정시험이 상당한 신뢰성이 있다는 것을 검증한다.

Abstract

The oxide layer thickness of fuel rod irradiated for 2 cycles in the Kori-2 unit reactor was measured by using the measurement by the eddy current system. Using standard specimens, the oxide layer measurement apparatus was calibrated, and also the measurement method was established. The oxide layer thickness of the irradiated fuel rod gradually increased from a few of  $\mu\text{m}$  to 23 $\mu\text{m}$  as the maximum value at 3000mm from the bottom end of fuel rod. The oxide layer thicknesses examined by the measurement of the layer thickness are in good agreement with those examined by a metallographic examination. This suggest that the examination of oxide layer of irradiated fuel rod is reliable as the same as the metallographic examination.

1. 서 론

원자로의 핵연료결함은 원자력 발전의 안전성에 영향을 주게 되는데 핵연료 건전성을 평가하는 방법으로써 핵연료 피복관 산화층두께 측정법을 이용하고 있다. 특정주파수의 교류

가 흐르는 코일을 금속과 같은 도체에 가까이 하였을 때 도체에는 전자기 유도(Electromagnetic Induction)에 의하여 코일에 수직하게 와전류가 발생한다. 이 와전류의 원리를 이용하여 조사 핵연료봉의 산화층 두께를 측정한다[1-4]. 외국에서는 조사 핵연료의 산화층 두께측정을 수행하여 노내의 핵연료 피복관 특성을 연구하고 있다. 국내에서도 핵연료 피복관 산화층 두께측정시스템을 제작하여 시험을 수행하여왔다[5-6].

본 연구에서는 핵연료봉 산화층 두께측정시스템에 의하여 핵연료봉 산화층 두께를 측정하였다. 표준시편을 제작하여 산화층 두께측정시스템을 교정(calibration)하였다. 산화층 두께측정시험에 의하여 고리 2호기에서 연소한 핵연료봉의 산화층의 두께를 측정하였다. 금속조직 시험을 수행하여 측정한 조사 핵연료봉의 산화층두께결과와 산화층 두께측정시험으로 얻은 결과와 비교하고 산화층 두께측정시험의 신뢰성을 검증하였다.

## 2. 시험장치 및 측정

산화층두께 측정시스템은 측정부, 제어부, 자료수집 및 처리부로 구성되어 있다. 그림 1은 측정 시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 측정부는 와전류 탐촉자 작동부와 시험체 접촉부로 구성되어 있다. 산화층 두께 측정시 와전류 탐촉자의 전후이동은 공압 시스템을 이용한다. 시험장치 교정유닛은 교정용 표준시편, 시편홀더, 감속모터 및 방수관으로 이루어진다. 제어부는 lower limit power amp., upper limit power amp., lower limit relay, upper limit relay, head up motor relay, head down motor relay, power relay and spindle motor relay 으로 이루어진다. 자료수집 및 처리부는 Fischerscope의 출력단(0~10V)에 data acquisition card를 장착하여 아날로그 신호를 A/D 변환하였다. 측정프로그램은 Turbo C language로 작성하여 측정하였다.

플라스틱 박막의 두께 11.9 $\mu$ m, 24.4 $\mu$ m 및 48.8 $\mu$ m으로 표준시편을 제작하였다. 이 표준시편을 사용하여 산화층 두께측정 시스템을 교정(calibration)하고 고리 2호기에서 연소한 J44-H08 핵연료봉의 하단에서 중앙부 및 상부까지 산화층 두께를 측정하였다. 금속조직시험을 수행하여 조사 핵연료봉 J44-H08의 하단에서 상부까지 모두 13곳의 산화층 두께를 측정하였다.

## 3. 조사핵연료봉의 산화층 두께측정

표 1은 NDT 및 DT방법에 의하여 고리원자력 2호기에서 연소한 핵연료봉 J44-H08의 산화층 두께를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 두 방법으로 측정한 산화층 두께측정치들은 비슷한 값을 나타내었다. 그림 2는 표준시편에 대한 산화층 두께측정 시스템의 calibration curve를 나타낸 것이다. 표준시편 두께에 따른 산화층 두께측정 시스템의 calibration이 이루어진 것을 알 수 있다.

그림 3은 산화층 두께 측정장치를 사용하여 고리원자력 2호기에서 2주기동안 연소한 J44-H08 핵연료봉 (연소도:32,000 MWD/MTU)의 산화층 두께를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 산화층 두께는 핵연료봉 하부의 수  $\mu\text{m}$ 에서 시작하여 핵연료봉 중앙부로 진행함에 따라 점차 증가하여 핵연료봉 하단으로부터 3000mm 근방에서 산화층 두께가 최대(23 $\mu\text{m}$ )가 되다가 다시 핵연료봉 상부쪽으로 진행함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 핵연료봉 하단으로부터 3000mm 근방이 상대적으로 핵분열이 많이 일어나고 연소가 많이 되기 때문에 산화층 두께가 최대인 것으로 추정된다. 그림 4는 금속조직시험에 의하여 고리원자력 1호기에서 1주기 동안 연소한(연소도:17,071 MWD/MTU)핵연료봉들의 산화층 두께를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 산화층 두께는 핵연료봉 하부의 수  $\mu\text{m}$ 에서 시작하여 핵연료봉 중앙부로 진행함에 따라 점차 증가하여 핵연료봉 하단으로부터 3000mm 근방에서 산화층 두께가 최대(15  $\mu\text{m}$ )가 되다가 다시 핵연료봉 상부쪽으로 진행함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

그림 5는 금속조직시험에 의하여 조사 핵연료봉 J44-H08 하단으로부터 2490-2510mm에서 산화층 두께를 거시적 현미경 사진으로 나타낸 것이다. 핵연료봉 횡단면 8곳의 거시적 현미경 사진에서 산화층 두께는 약 20 $\mu\text{m}$  정도였으며 산화층 두께측정시험의 결과와 잘 일치하였다.

따라서 핵연료봉의 산화층 두께는 핵연료봉의 연소도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 금속조직시험에 의하여 산화층 두께측정시험의 신뢰성이 양호함을 검증하였다.

#### 4. 결 론

1. 산화층두께 측정 시스템에 의하여 고리 2호기에서 2주기 동안 연소한 핵연료봉에 대한 산화층 두께를 측정한 결과 산화층 두께는 핵연료봉 하부의 수  $\mu\text{m}$ 에서 시작하여 핵연료봉 중앙부로 진행함에 따라 점차 증가하였고 핵연료봉 하단으로부터 3000mm 근방에서 산화층 두께는최대 23  $\mu\text{m}$  였다.
2. 핵연료봉의 산화층 두께는 핵연료봉의 연소도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.
3. 금속조직시험에 의한 산화층 두께측정 결과는 산화층 두께측정시험의 결과와 잘 일치하였고 금속조직시험에 의하여 산화층 두께측정시험의 신뢰성이 양호함을 검증하였다.

#### 감사의 글

본 연구가 과학기술부의 원자력사업의 일환으로 수행되었음

#### 참 고 문 헌

- [1] H. Stehle, W. Kaden and R. Manzel, "External Corrosion of Cladding in PWRs,"

- Nuclear Engineering and Design, Vol. 33., pp. 159-169(1975).
- [2] F. Garzarolli et al., "Progress in Understanding PWR Fuel Rod Waterside Corrosion," ANS Topical Meeting(III), pp. 35-72(1985).
- [3] F. Garzarolli, H. Schonfeld, D. B. Scott, "Characterization of Zirconium Oxide Corrosion Films on Irradiated Zircaloy Clad PWR Fuel Rods," C-E/KWU/EPRI, Task C Interim Report, RP 1250-01, Combustion Engineering, CE NPSD-192(1982).
- [4] Dr. Wunderlich, "Growth in Oxide Thickness on PWR Fuel Rods by Siemens/UB KWU," Technical Report U6 311/88/e13a(1988).
- [5] 안상복, "조사후 핵연료 집합체 및 부품에 대한 비파괴 시험기술 개발," KAERI/EP-131/89(1989).
- [6] 김은가 외, "수중조사핵연료 피복관 산화층 두께 측정장치 사용지침," KAERI/TR-312/92, pp. 4-21(1992).

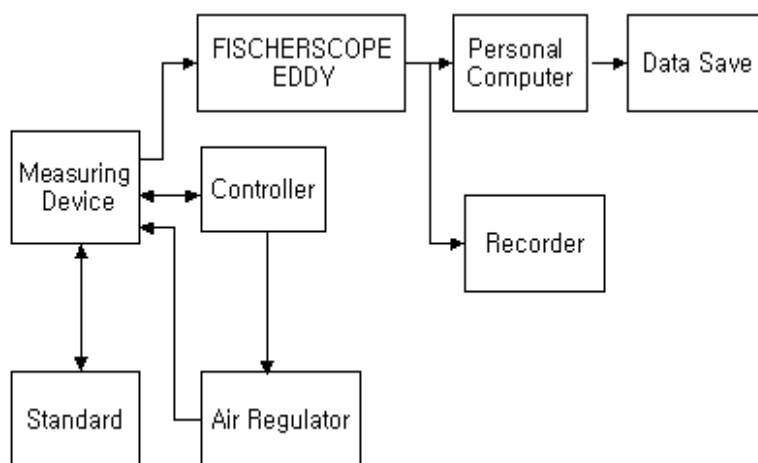


Fig.1. Schematic Diagram of Oxide Layer Thickness Measurement System.

Table 1. Oxide Layer Thickness of J44-H08 Fuel Rod due to NDT and DT

Location (mm)	160-180	490-510	830-850	990-1010	1290-1310	1490-1510	1760-1780	1990-2010	2290-2310	2490-2510	2790-2810	2990-3010	3290-3310
NDT ( $\mu\text{m}$ )	1	3	2	5	2	13	8	13	15	20	16	23	17
DT ( $\mu\text{m}$ )	2.1	3.2	2.9	3.7	3.7	8.5	6.4	12.2	11.7	20.1	17.3	24.7	21.9

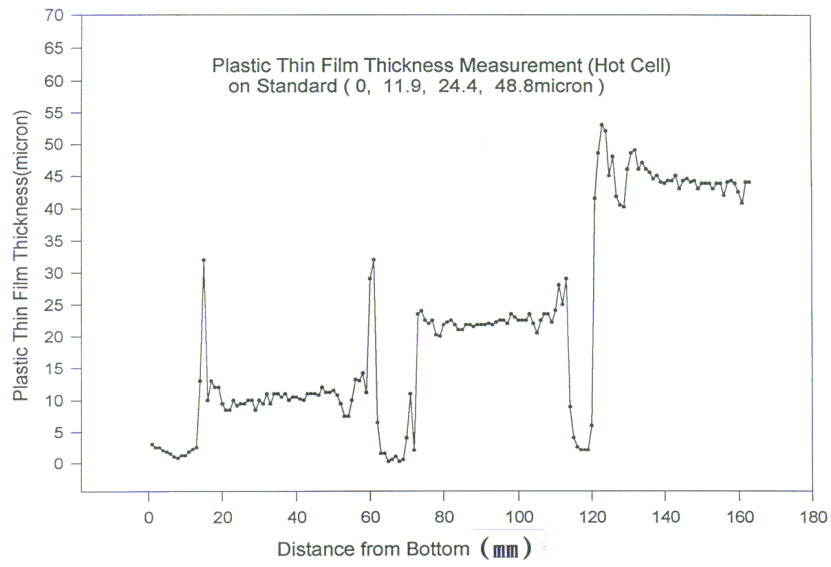


Fig.2. Calibration Curve of the Thin Film Thickness on Specimen.

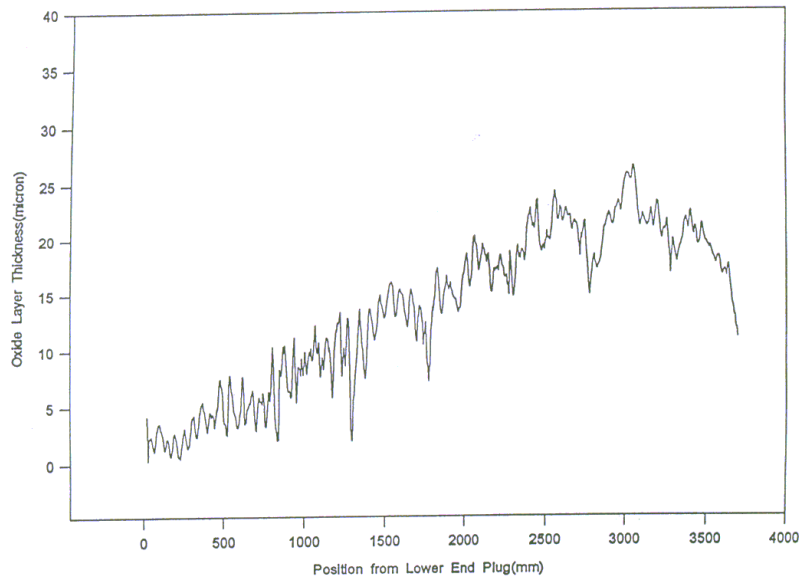


Fig.3. The Oxide Layer Thickness of the J44-H08 Fuel Rod.

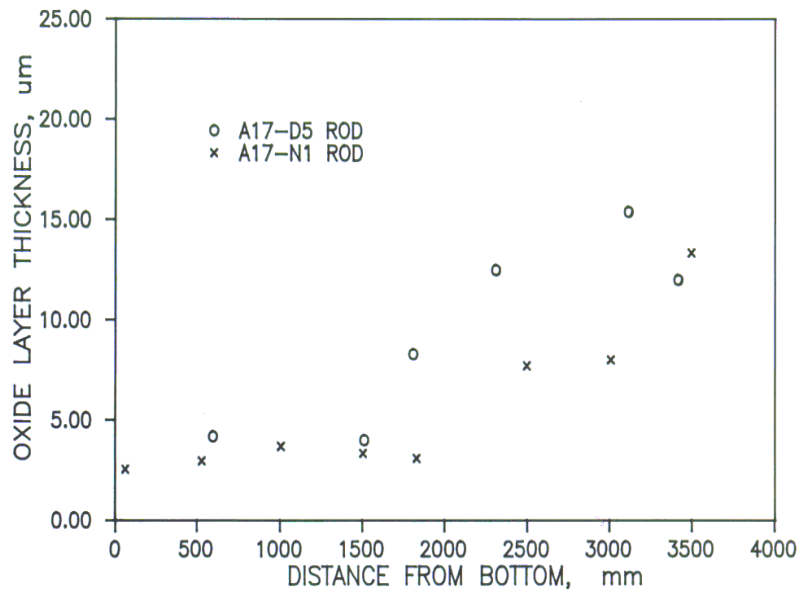


Fig.4. Oxide Layer Thickness of 1 Cycle-Irradiated Fuel Rods of the Kori-1 Unit Reactor.

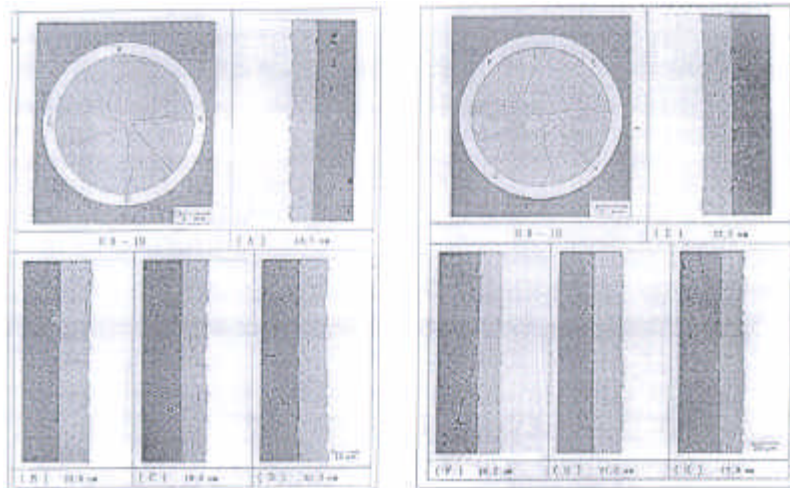


Fig.5. Photographs of Oxide layer on Macro-Structure at 2490~2510mm from the Bottom End of the J44-H08 Fuel Rod.