

2003 추계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

**사용후핵연료 피복관 산화층의  
비파괴 및 파괴시험 분석**

**Non-and Destructive Measurements on  
Oxide Thicknesses of Spent Fuel Cladding**

이은표, 김은가, 전용범, 민덕기, 이형권, 양송열, 서항석, 권형문, 주용선,  
홍권표, 유길성, 정원명, 구정희, 조일제, 국동학, 주준식

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

**요 약**

원자로에서 조사된 사용후핵연료 피복관은 연소도에 따라 직경이 다르고 휨 현상이 있다. 따라서 와전류탐상 방법을 통한 사용후핵연료 피복관의 정밀한 산화층 두께측정이 어렵다. 본 연구에서는 이러한 사용후핵연료 피복관 직경의 변화 및 휨 변형 등에 대응하여 와전류탐상 프로브가 사용후핵연료 피복관의 법선방향으로 항상 유지될 수 있는 산화층 두께측정 장치를 개발하였으며, 이 장치를 사용하여 실제 사용후핵연료봉에 대한 피복관 산화층 두께를 측정하였다. 또한 결과 비교를 위해 와전류 방법으로 측정된 핵연료봉을 절단하여 파괴적인 방법으로도 산화층 두께를 측정하여 비파괴와 파괴 결과를 상호 비교검토 하였다.

**Abstract**

During irradiation in reactor, the fuel claddings experience a diametric variance depend on burn up and a longitudinal sagging. It is known that getting the accurate data of oxide thickness on irradiated fuel cladding is difficult by Eddy current method. To have valuable data of oxide thickness, a new type of eddy current probe which can reduce the friction force and insertion resistance between device and cladding was developed. By using the device, the oxide thicknesses of spent fuel cladding from a commercial reactor were measured and compared with the destructive test results.

## 1. 서론

한국원자력연구소의 조사후시험시설(PIEF)[1,2,3]은 상용 원자로 핵연료에 대한 조사후시험을 목적으로 건설되었으며, 1987년 준공이후 현재까지 약 10여개의 집합체에 대한 조사후시험이 수행된바 있다. 조사후시험시설은 3개의 풀과 4개의 중콘크리트 핫셀 및 2개의 납 셀을 가지고 있으며, 연계 시설로는 방사화학 실험실 및 폐기물처리시설 등이 있다.

조사후시험시설 핫셀에서는 핵연료봉에 대한 외관검사, 와전류시험, 감마스케닝, 제원 측정, X-선 촬영, 핵연료봉의 핵분열기체포집 및 절단, 핵연료봉 시편 금속조직 시험, 밀도측정, 단면 감마스케닝 등을 수행할 수 있다. 이러한 여러 가지 시험을 통해 산출되는 조사후시험 자료들 중에도 사용후핵연료봉에 대한 와전류 탐상을 이용한 산화층 두께 측정자료는 핵연료봉의 설계 및 조사거동을 알아보는 중요한 자료중 하나이다. 특히 시험비가 많이 소요되고 폐기물을 많이 남기는 파괴적인 방법들에 비해 이 방법은 비파괴적인 방법으로 측정하기 때문에 가장 경제적이고 효율적으로 시험할 수 있는 방법으로 알려져 있다.

와전류탐상 비파괴 측정방법은 특수하게 제작된 산화층 측정장치가 필요하다. 사용후 핵연료봉은 길이가 약 4m에 달하고 연소도에 따라 직경의 변화가 일어날 뿐만 아니라 길이방향으로 약간의 휨 변형을 일으켜 직진도가 유지되지 않는 특성이 있다. 이러한 형상의 사용후핵연료봉의 산화층 두께를 비파괴적인 방법으로 측정하기 위해서는 산화층 두께 측정 펜슬 타입 와전류탐상 프로브가 사용후핵연료봉의 법선방향으로 항상 유지되어야만 정확한 산화층 두께를 측정할 수 있다.

본 연구에서는 시험 정확도에 영향을 주는 요인들을 제거하고 정확한 산화층과 재현성이 높은 결과를 산출할 수 있는 와전류탐상 프로브 장치를 개발 완료하고 개발된 장치를 핫셀 내의 비파괴시험 벤치에 설치하여 실제 원자로에서 조사된 사용후핵연료봉의 산화층 두께를 측정하였으며, 자료의 정확도를 확인하기 위해 같은 핵연료봉에 대한 파괴시험을 수행하여 그 결과치와 비교분석 하였다.

## 2. 와전류탐상 산화층 두께측정 장치의 설계요건

와전류탐상 산화층 두께측정 장치는 사용후핵연료봉 직경의 변화 및 휨 변형에 대하여 산화층 두께측정 펜슬 타입 와전류탐상 프로브가 항상 사용후핵연료봉의 법선방향으로 유지되도록 하여야 하며, 측정장치와 사용후핵연료봉과의 마찰력을 최소화하여야 할 뿐만 아니라 사용후핵연료봉(PWR)은 직경에 비하여 길이가 대단히 길기 때문에 사용후 핵연료봉이 산화층 측정장치에 삽입시 저항으로 좌굴변형을 일으킬 수 있으므로 삽입저항을 제거할 수 있는 구조로 하여야 하며 직경 9.5mm에서 12.7mm까지를 수용할 수 있어야 한다.

또한 사용후핵연료봉을 산화층 측정장치에 삽입시 펜슬 타입 와전류탐상 프로브는 뒤로 후퇴되어야 할 뿐만 아니라 전진시 펜슬 타입 와전류탐상 프로브가 사용후핵연료봉과의 충격을 완화시키고 접촉속도를 일정하게 유지할 수 있는 장치가 필요하다.

## 3. 와전류탐상 산화층 두께 측정 장치의 구조 및 제작

### 3.1. 와전류탐상 산화층 두께 측정 장치의 구조

사용후핵연료봉의 와전류탐상 산화층 두께 측정 장치는 그림1과 같이 길이 167mm, 폭 155mm 그리고 높이 37.5mm의 크기로 제작되었으며, 사용후핵연료봉이 삽입되고 펜슬 타입 와전류탐상 프로브를 고정하는 홀더, 펜슬 타입 와전류탐상 프로브를 전후진 시키기 위한 장치 그리고 사용후핵연료봉 삽입시 와전류탐상 프로브 반대쪽 로울러 베어링 블록을 전진 및 후진시키기 위한 장치 등으로 구성되어 있다.

#### 3.1.1. 홀더

홀더는 크게 사용후핵연료봉이 삽입되고 펜슬 타입 와전류탐상 프로브를 지지하는 안쪽 블록, 중간 블록, 바깥블록, 산화층 측정 장치를 시험장비에 설치하거나 제거하기 위한 블록 그리고 상하 덮개 판으로 구성된다.

안쪽 블록은 펜슬 타입 와전류탐상 프로브 및 와전류탐상 프로브 전후진 장치가 고정되며 사용후핵연료봉이 삽입되는 구멍에는 120° 간격으로 3개의 로울러 베어링이 상하 2열로 배치된다. 펜슬 타입 와전류탐상 프로브와 인접한 부분에 위치한 로울러 베어링 상하 4개는 고정형으로 되어 있으며 펜슬 타입 와전류탐상 프로브 반대편의 로울러 베어링 상하 2개를 가진 블록은 안쪽 블록과 슬라이딩될 수 있는 구조로 압축 코일 스프링에 의하여 사용후핵연료봉을 눌러주는 기능을 할 뿐만 아니라 사용후핵연료봉 삽입시 레버기구 및 플렉시블 케이블에 의하여 전후진시킬 수 있는 구조로 이루어져 있으며, 대각선 방향으로 일직선상에 2개의 핀과 압축 코일 스프링에 의하여 중간 블록과 연결되어 핀을 중심으로 회전 및 핀의 길이 방향으로 이동이 가능하다.

또한 펜슬 타입 와전류탐상 프로브를 전후진시키기 위한 블록으로 인한 무게의 불균형을 맞추기 위하여 1개의 판 스프링이 설치된다.

중간 블록은 안쪽 블록과 대각선 방향으로 일직선상에 2개의 핀에 의하여 끼워져 있으며 그사이에는 압축 코일 스프링이 있고, 또 다른 대각선 방향으로 바깥 블록과 일직선 상에 2개의 핀에 의하여 끼워져 있으며 그사이에는 압축 코일 스프링이 있어 핀 삽입 부에서의 회전 및 각 핀의 길이 방향으로의 이동이 가능하여 안쪽 블록이 사용후핵연료봉 반경방향으로 3.5mm 편위 및 5.5°의 경사까지 수용할 수 있어 와전류탐상 산화층 두께 측정 장치를 고정하는 랙의 상하 사용후핵연료봉 가이드 구멍의 범위를 수용할 수 있어 사용후핵연료봉 직경의 변화 및 휨 변형에 자유롭게 대응할 수 있다.

안쪽블록의 조합으로 인한 무게의 불균형을 맞추기 위하여 1개의 압축코일 스프링을 갖는 구조로 구성된다.

바깥 블록은 중간 블록과 연결되는 핀과 고정되어 있으며 상하 덮개 판이 상하 양쪽에 고정되고 사용후핵연료봉의 산화층 측정장치를 시험장비에 설치하거나 제거하기 위한 블록이 고정된 구조로서 사용후핵연료봉 직경의 변화 및 휨 변형에 능동적으로 대응하여 사용후핵연료봉의 산화층 두께를 연속적으로 측정할 수 있도록 설계 제작하였다.

#### 3.1.2. 펜슬 타입 와전류탐상 프로브 전후진 장치

펜슬 타입 와전류탐상 프로브 전후진 장치는 전기 마그네틱 자석, 에어 댐퍼 그리고 전원 스위치 등으로 구성되어 있다.

펜슬 타입 와전류탐상 프로브를 후진시키고자 할 때는 전기 마그네틱 자석에 전원을 공급함으로써 빠른 속도로 행하여지며 이때 발생하는 에어 댐퍼 내의 진공력을 제거하기 위하여 에어 댐퍼의 플런저 행정 끝에 작은 구멍을 뚫어 진공을 제거하였으며, 펜슬 타입 와전류탐상 프로브를 전진시키고자 할 때는 전기 마그네틱 자석에 전원을 차단시키면 와전류탐상 프로브 내의 압축코일 스프링에 의하여 프로브가 전진할 때 에어 댐퍼에 의하여 펜슬 타입 와전류탐상 프로브가 서서히 일정한 속도로 전진한다. 이와 같은 방법은 펜슬 타입 와전류탐상 프로브가 사용후핵연료봉에 접근할 때 일정한 속도를 유지하여 안정된 데이터를 얻고, 펜슬 타입 와전류탐상 프로브 선단의 세라믹 코팅은 충격에 매우 약함으로 손상을 방지하기 위함이다.

#### 4. 산화층 측정 장치의 성능시험

제작된 사용후핵연료봉의 산화층 두께 측정 장치를 이용하여 1m 길이의 스캐닝 벤치에서 미조사 산화피복관에 대한 측정시험을 실시하였다. 산화피복관의 표면 산화층 두께에 대한 비파괴 측정방법은 측정시험 전후에 표준 산화시험봉으로 측정장치를 교정해 주어야 한다. 따라서 측정장치의 교정을 위하여 20 $\mu\text{m}$ , 42 $\mu\text{m}$ , 64 $\mu\text{m}$  두께의 표준 산화층 시편을 가열로에서 610 $^{\circ}\text{C}$ 의 공기 중에서 산화시켜 만들었으며 산화층은  $\pm 1\mu\text{m}$  이내의 두께로 균일하게 입혀졌다. 이 표준시편을 이용하여 산화층 측정 시험 장비를 교정하였으며 교정후 표준 산화층 시편의 산화층 두께를 측정한 결과  $\pm 1\mu\text{m}$  오차 내의 측정값을 얻었다. 그러나 간이 시험장비에서 산화층 측정 프로브를 이동시키면서 표준 산화층 시편 두께를 측정할 때는 이동시 진동으로 인하여 측정오차가 커진다. 간이 시험 장비에서 표준 산화층 시편의 산화층 두께 이동 측정시험에서는  $\pm 2\mu\text{m}$  오차 이내의 측정값을 얻을 수 있었다. 결과적으로 이 측정값은 사용후핵연료봉 산화층 두께 측정 장치가 안정되고 재현성이 양호함을 보여주었다.

#### 5. 장치의 핫셀시험

제작된 사용후핵연료봉의 산화층 두께 측정 장치를 핫셀 내의 비파괴시험 벤치에 설치하여 사용후핵연료봉에 대한 산화층 측정시험을 실시하였다. 기 제작된 20 $\mu\text{m}$ , 42 $\mu\text{m}$ , 64 $\mu\text{m}$  두께의 표준 산화시험봉을 사용후핵연료봉 하단에 연결하여 측정장치를 교정한 후 사용후핵연료봉 하단 20mm의 위치부터 연속측정을 수행한 후 시작위치에서 재현성을 확인하고, 90 $^{\circ}$  간격으로 4 방향을 측정한 후 표준 산화시험봉으로 재현성을 확인하였다.

와전류탐상 방법을 통한 사용후핵연료 피복관의 산화층 두께 데이터를 검증하기 위하여 임의의 위치에서 취한 가공시편을 방사선 차폐형 광학현미경을 이용하여 사용후핵연료봉 단면에 대한 투영 사진을 촬영하여 산화층 두께를 측정된 값을 얻었다.

표 1은 파괴시험을 수행하여 얻은 산화층 두께 측정 데이터 위치에서의 와전류탐상법을 이용한 산화층 두께 측정 데이터를 표시하였으며 최대오차는  $\pm 1.8\mu\text{m}$  이내로 양호한 결과를 얻었다.

표 1. 와전류 탐상 측정값과 파괴시험 측정값의 비교

측정방법	499				1149				1997				3024				3397			
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
와전류 탐상법 측정값 (μm)	4.3	6.6	6.5	5.1	6.0	7.9	8.4	8.5	11.2	12.3	12.6	14.5	31.5	25.2	32.2	28.5	16.0	16.4	15.3	16.1
파괴시험 측정값 (μm)	4.8	5.0	5.5	4.6	7.0	7.4	7.8	7.2	12.4	12.0	11.4	13.0	31.5	25.2	34.0	30.0	18.2	15.0	15.0	16.0

시험에 사용된 사용후핵연료봉 집합체의 연소도는 40,610GWd/tU로서 그림 2는 길이 방향으로 1mm마다 측정된 시험 결과와 파괴시험을 수행하여 얻은 결과를 나타내고 있으며, 사용후핵연료봉 하단으로부터 3106mm의 위치에서 가장 두꺼운 40.1μm로 측정되었으며 그리드 위치에서는 상대적으로 낮은 값으로 측정되었다.

### 5. 결론

직경의 변화가 있는 사용후핵연료봉의 산화층 두께를 와전류탐상방법을 사용하여 정밀하게 측정할 수 있는 장치를 설계 제작하였으며, 이 장치를 사용하여 실제 사용후핵연료봉에 대한 산화층 두께를 측정하였다. 또한 같은 핵연료봉을 파괴시험하여 그 결과치와 비교분석한 결과 만족할 만한 신뢰도의 자료임을 확인할 수 있었다. 본 산화층 측정 장치의 개발로 조사후시험시설에서의 비파괴 산화층 두께 측정 시험을 통해 파괴시험을 수행하지 않고도 사용후핵연료봉의 전 길이에 대한 정밀한 산화층 두께 및 분포를 알 수 있게 되었으며, 사용후핵연료봉의 건전성 평가 및 향상된 성능의 차세대핵연료봉의 설계 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

### 감사의 글

이 연구는 과학기술부 주관으로 추진 중인 기관고유사업의 일환으로 추진하였으며, 관계자 여러분에게 감사의 말씀을 드린다.

### 참고문헌

- [1] 민덕기 외, “핵주기기시험시설운영”, KAERI/MR-369/2001 (2001).
- [2] 전용범 외, “핵주기기시험시설운영”, KAERI/MR-388/2002 (2002).
- [3] 민덕기 외, “고리원자력 2호기 원자력연료 조사후시험” (2003).

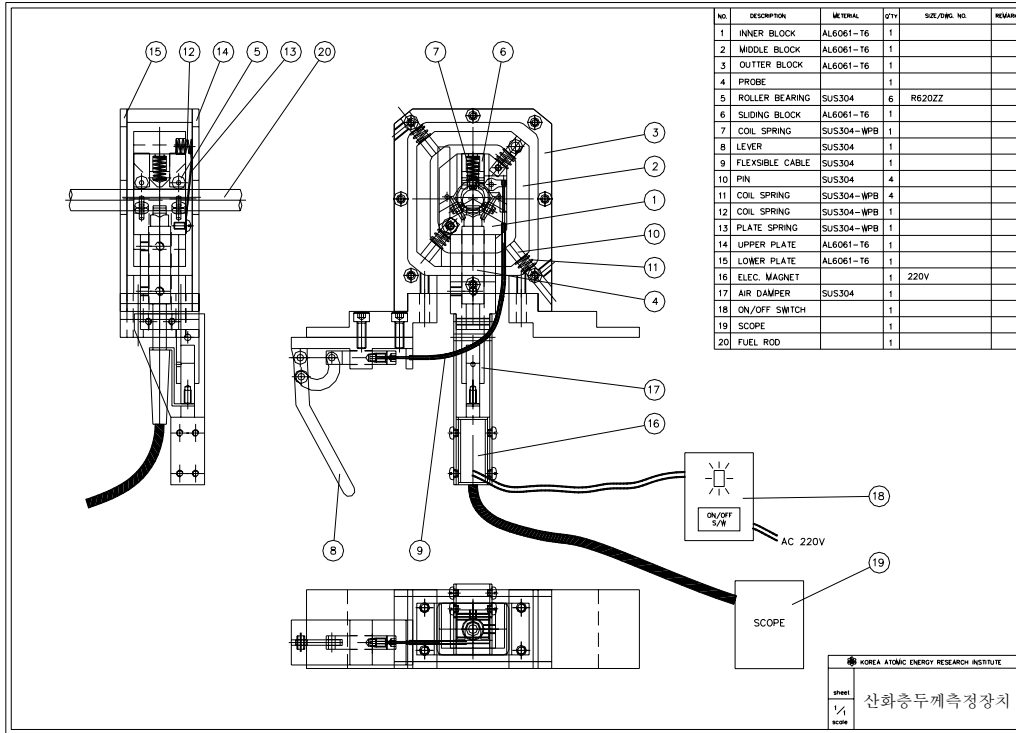


그림 1. 사용후핵연료봉의 와전류 산화층 두께 측정 장치의 조립도.

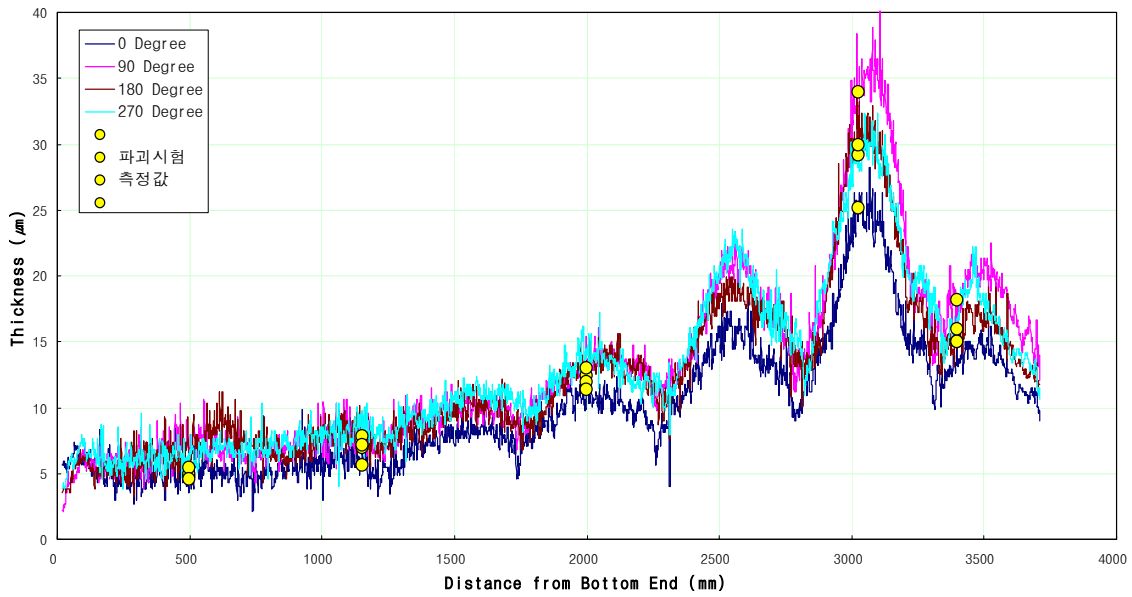


그림 2. 사용후핵연료봉의 와전류 및 파괴 시험 산화층 두께 측정 결과.