

## 핵연료 조사시험용 계장 캡슐(03F-05K)을 이용한 조사시험 중 핵연료 특성측정 기술 개발

손재민, 박승재, 신윤택, 조만순, 주기남, 오종명, 김수성, 김봉구, 김영진  
 한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150, [jmsohn@kaeri.re.kr](mailto:jmsohn@kaeri.re.kr)

### 1. 서론

한국원자력연구소에서는 핵연료 성능 및 안전성을 확인하기 위한 조사시험에 필수적으로 요구되고 있는 핵연료 조사시험용 캡슐을 개발하고, 이를 이용한 조사시험을 수행하고 있다. 하나로에서 핵연료 조사시험을 수행하기 위하여 1999년 5월에 핵연료 조사시험용 무게장 캡슐을 개발하여 현재까지 핵비확산성건식공정산화물핵연료(DUPIC), 연구로용 핵연료, HIMET 핵연료 및 신형핵연료 개발에 활용되어왔다. 2003년 3월에는 핵연료 조사시험용 계장 캡슐(이하 핵연료 계장캡슐) 02F-11K를 개발하여 하나로에서 53.94일간의 조사시험을 수행 함으로써 설계 검증시험을 성공적으로 완료하였다.[1]

핵연료 조사시험을 위한 계장은 핵연료의 노내 거동 연구 및 설계자료 확보를 위하여 이용되고 있으며, 계장을 통하여 핵연료 조사시험 중 측정할 수 있는 특성으로는 핵연료의 중심 및 표면 온도, 피복관 표면 온도, 핵연료봉 내압, 핵연료 길이 변화, 피복관의 길이 변화, 산화층 두께 변화, 그리고 중성자 속(neutron flux) 등이 있다. 02F-11K 핵연료 계장캡슐에서는 조사시험 중 핵연료 중심온도와 중성자속을 측정하기 위한 계장 기술이 적용되었다.[2] 본 논문에서는 핵연료봉의 내압 측정[3]과 핵연료 길이 변화 측정[4]을 위하여 개발된 계장 기술이 적용된 03F-05K 핵연료 계장캡슐의 설계·제작[5], 이를 이용한 조사시험[6], 그리고 조사시험을 통하여 측정된 자료에 관하여 기술하였다.

### 2. 핵연료 특성 측정 기술 개발

#### 2.1 계장기술을 위한 핵연료봉 제작

03F-05K 핵연료 계장캡슐에 적용된 핵연료 특성 측정 기술은 02F-11K 핵연료 계장캡슐에서 이미 적용되었던 열전대를 이용한 핵연료 중심온도 측정, 그리고 SPND(Self-Powered Neutron Detector)를 이용한 중성자속 측정 뿐만 아니라 압력계와 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 이용한 핵연료봉 내압 측정, 변형계와 LVDT를 이용한 핵연료 길이 변화 측정 기술이 개발되어 추가로 적용되었다. 이들의 특성 측정을 위하여 그림1과 같이 3개의

핵연료봉을 제작하였다. 그림 1(a)는 핵연료봉의 내부압력을 측정하기 위하여 핵연료봉 한쪽 끝부분에 압력계를 설치한 핵연료봉이며, 그림 1(b)는 핵연료의 길이 변화를 측정하기 위하여 핵연료봉 한쪽 끝부분에 변형계를 설치한 핵연료봉이다. 이 압력계와 변형계의 변화량은 LVDT에 의해 감지하도록 하였으며, 그림 1(c)는 핵연료 중심온도를 측정하기 위하여 핵연료 중심에 구멍을 뚫고 열전대를 설치한 핵연료봉이다.

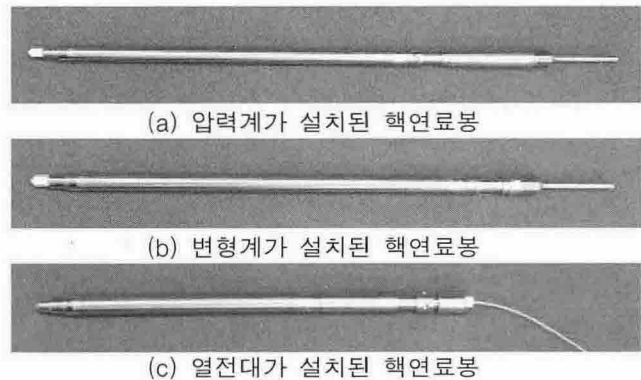


그림 1. 03F-05K 핵연료 계장캡슐 핵연료봉

#### 2.2 핵연료봉과 SPND의 설치

압력계, 변형계, 열전대가 각각 장착된 3개의 핵연료봉과 중성자속을 측정하기 위한 3개의 SPND는 그림2와 같이 배열되어 그림 3과 같이 제작된 03F-05K 핵연료 계장캡슐에 장착되었다. 핵연료 계장캡슐 보호관의 가지방향을 0°로 기준하였을 때 시계방향으로 0°, 120°, 240°에는 각각 3개의 SPND가 설치되었으며, 60°에는 핵연료 변형계가 장착된 핵연료봉, 180°에는 열전대가 설치된 핵연료봉, 300°에는 압력계가 설치된 핵연료봉이 설치되었다. SPND는 축방향으로 보아 핵연료봉 내부에 장착된 핵연료 소결체와 동일한 높이에 위치하도록 하였다.

#### 2.3 조사시험 및 핵연료 특성 자료 생산

03F-05K 핵연료 계장캡슐을 이용한 조사시험은 하나로 노심 OR5 조사공에서 31-2주기(2004.4.27-5.17), 32-1주기(2004. 5.24-6.12), 32-2주기(2004.6.21-7.6), 그리고 33-1주기(2004.9.13-10.1) 동안 수행 되었다.

조사시험이 수행되는 동안 핵연료 중심온도 측정을 위한 열전대 신호, 핵연료봉 내압 측정을 위한 LVDT 신호, 핵연료 길이 변화 측정을 위한 LVDT 신호 그리고 중성자속 측정을 위한 3개의 SPND 신호를 측정하였으며, 또한 하나로의 출력과 제어봉의 위치 자료를 함께 수집하였다. 그림4는 32-1주기 동안 측정된 자료를 나타내고 있다. 이와 같은 핵연료 특성 자료는 조사시험 기간 중 2분 간격으로 측정되었다.

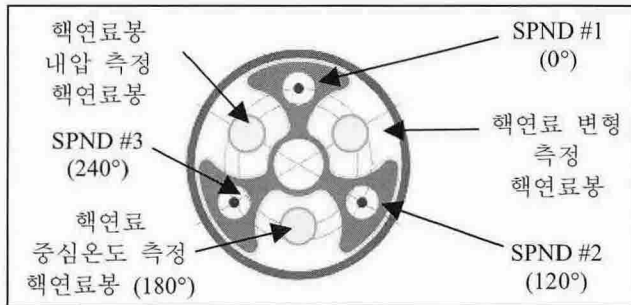


그림 2. 핵연료봉과 SPND 설치 위치

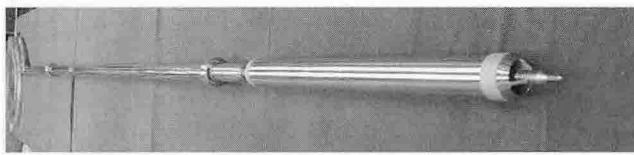


그림 3. 03F-05K 핵연료 계장캡슐

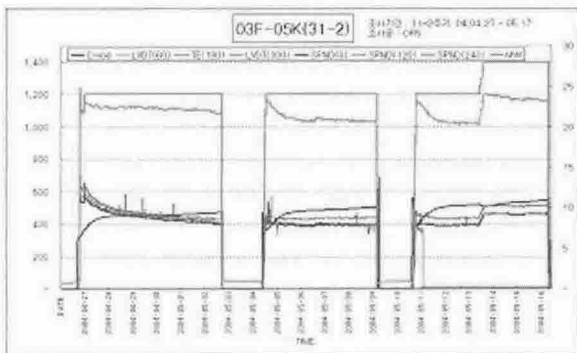


그림 4. 03F-05K 핵연료 계장캡슐 조사시험 데이터 (하나로운전 31-2 주기(2004.4.27-5.17))

### 3. 결론

핵연료 개발을 위하여 조사시험 중 핵연료 특성변화를 측정하는 것은 필수적으로 요구된다. 이에 따라 열전대를 이용한 핵연료 중심온도, 압력계와 LVDT를 이용한 핵연료봉 내압, 그리고 변형계와 LVDT를 이용한 핵연료 길이 변화와 같은 조사시험 중 핵연료 특성 뿐 아니라 SPND를 이용한 중성자속을 측정하기 위한 핵연료 계장캡슐 03F-05K를 설계·제작하였으며, 하나로 노심 OR5 조사공에서 조사시험을 성공적으로 수행하고, 조사시험 중 핵연료 특성 자료를 측정하였다.

이렇게 개발된 조사시험 중 핵연료 특성 측정 기술은 국내의 핵연료 개발은 물론 핵연료 개발을 위한 국제 공동연구에도 기여 또는 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 향후에는 조사시험을 통하여 측정된 자료를 분석하여 보다 신뢰도가 높은 핵연료 특성 자료를 생산하기 위한 노력을 지속적으로 기울일 것이다. 현재 한 개의 핵연료봉에서 두 가지의 특성을 측정할 수 있는 이중 계장 기술을 개발 중에 있다. 그리고, 이와 같은 핵연료 특성 측정을 위한 계장 기술과 특성자료 평가 기술은 현재 개발 중인 3-pin FTL(Fuel Test Loop)을 이용한 핵연료 조사시험에도 적극 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학기술기획평가원의 지원을 받아 2004년도 원자력연구개발 사업을 통해 수행되었음

### 참고문헌

- [1] 김봉구 외 8명, 핵연료 조사시험용 계장캡슐(02F-11K) 설계검증 시험을 위한 안전성 평가, 한국원자력학회 2003추계학술발표회, 2003.
- [2] 손재민 외 6명, 핵연료 조사시험시 SPND를 이용한 중성자속 측정 및 평가 연구, 한국원자력학회 2003 추계학술 발표회, 2003.
- [3] 손재민 외 6명, 핵연료봉 내부압력 측정을 위한 LVDT의 고온 노외시험, 한국원자력학회 2002 추계학술 발표회, 2002.
- [4] 손재민 외 6명, 핵연료 소결체 길이변화 측정을 위한 LVDT 고온 노외시험, 한국원자력학회 2003 추계학술 발표회, 2003.
- [5] 김봉구 외 10명, 핵연료 조사시험용 계장캡슐(03F-05K) 설계/제작, KAERI/TR-2773/2004, 한국원자력연구소, 2004.
- [6] 김봉구 외 9명, 핵연료 조사시험용 계장캡슐(03F-05K) 조사시험 계획서, KAERI/TR-2774/2004, 한국원자력연구소, 2004.