

실험연료봉 내압측정시험 최적시험방법 수립

이형권, 김도식, 서항석, 황용화, 권형문, 장정남, 김대호
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

nhkleel@kaeri.re.kr

1. 서론

조사후시험시설에서는 가압경수로형핵연료를 대상으로 봉내압측정시험을 수행해왔다. 그러나 수년 전부터 실험연료봉에 대한 봉내압 측정시험도 필요하게 되었다. 현재 사용 중인 핵연료봉 내압측정장치는 가압경수로형 핵연료를 대상으로 시험을 수행하는 전용장치로 제작되어 있다. 그러므로 실험연료봉에 대한 내압측정은 불가능하여 핵분열기체포집시험만을 수행해왔다. 핵연료봉 내압측정장치는 시험특성 및 용도에 따라 범용시험장치와 전용시험장치로 나눌 수 있다. 범용장치의 경우 경수로형 핵연료봉만 아니라 실험연료봉도 함께 시험할 수 있다. 그러나 시험정밀도가 낮은 단점이 있다. 전용장치의 경우 시험정밀도는 높지만 한가지 연료봉만을 시험할 수 밖에 없는 단점이 있다. 그 이유는 경수로형 핵연료봉과 실험연료봉의 기체량 차이가 매우 크기 때문이다. 또한 각 시험장치가 갖고 있는 고유의 공간체적과 압력계의 정밀도가 다르기 때문이다. 조사후시험시설에는 실험연료봉에 대한 봉내압 측정시험도 필요함에 따라서 2010년도부터 실험연료봉에 대한 봉내압측정 방안을 연구하게 되었다. 첫 번째 방안으로는 실험연료봉만을 대상으로 하는 전용장치 개발, 두 번째 방안으로는 기존장치에 계측기를 변경 또는 보완하는 방법, 세 번째 방안으로는 기존장치에서 실험방법만을 변경하는 방법 등을 연구 및 검토하였다. 그 결과 장치의 설치장소, 측정정밀도 및 경제성 등을 고려할 때 가장 적합하고 효율적인 방안인 “기존장치에서 실험방법을 변경” 하는 방안이 선정되었다.^[1] 실험연료봉에 대한 효율적인 봉내압측정 방안이 마련됨에 따라 시험절차, 시험관계식 도출, 기체회석량 산출 및 시험오차 최소화 방법을 수립하였다.

2. 본론

2.1 시험 개요

실험연료봉의 기체량은 가압경수로형에 연료에

비해 기체량이 매우 적으므로 기존장치에서 기체의 압력을 측정할 수 없으므로 현재의 사용 중인 시험장치에서 압력을 측정할 수 있도록 천공용기에 기체를 충전하는 과정을 수행하고 시험을 수행한다.

2.2 시험절차

2.2.1 장치 연료봉홀더에 연료봉을 장입하고 밀폐시킨다.

2.2.2 진공펌프를 가동하여 장치의 천공용기와 표준용기를 진공시킨다.

2.2.3 요구 진동도에 이르면 펌프를 끄고 각 압력별 천공용기의 체적을 측정한다.

2.2.4 측정된 각 압력별 천공용기의 체적으로부터 압력변화에 따른 천공용기체적을 산출한다.

2.2.5 다시 장치 내부를 진공시키고, 요구진공도에 다다르면 표준용기의 밸브를 닫는다.

2.2.6 천공용기에 헬륨가스를 충전하고, 연료봉을 천공한다.

2.2.7 연료봉 천공후 장치의 내부압력이 평형될 때까지 기다린다.

2.2.8 장치 내부의 압력이 평형되면 압력 및 온도를 기록한다.

2.2.9 표준용기의 밸브를 열어 압력이 평형되면 온도와 압력을 기록한다.

2.2.10 포집장치 부분의 진공도가 요구진공도에 다다르면 펌프를 정지하고 메인밸브를 열어 기체가 포집장치로 이동하도록 한다.

2.2.11 다이아후램펌프를 가동하여 기체가 회석되도록 한다.

2.2.12 기체포집병 밸브를 잠그고 장치내의 잔여 기체를 핫셀내부로 방출시킨다.

2.2.13 약 2시간 정도 가동 후 펌프를 정지하고 장치로부터 기체포집병을 분리한다.

2.3 시험관계식 도출

2.3.1 연료봉내의 기체량과 천공용기에 충전되어

있는 기체량의 합은 연료봉을 천공하였을 때 연료봉 공간체적, 천공용기 및 표준용기에 들어 있는 기체량은 같다는 조건식을 수립하여 식을 산출한다.

2.3.2 천공용기체적 산출

- V_f : 연료봉 공간체적
- P_f : 연료봉 내압
- Q_f : 연료봉 핵분열기체량
- V_c : 연료봉 천공전 천공용기의 체적
- V_t : 천공후 천공용기의 체적($V_t = V_f + V_c$)
- P_1 : 천공용기에 충전된 헬륨가스 압력
- P_c : 연료봉 천공후 천공용기에서 압력
- P_2 : 표준용기에서 기체의 압력

$$P_f V_f + P_1 V_c = (V_f + V_c) P_c \dots\dots\dots (1)$$

$$P_f V_f + P_1 V_c = (V_f + V_c + V_s) P_2 \dots\dots\dots (2)$$

식(1)을 식(2) 나누고 ($V_f + V_c$)를 V_t 라 놓으면

$$1 = \frac{V_t P_c}{(V_t + V_s) P_2} \dots\dots\dots (3)$$

식(3)을 정리하면 $P_2 V_t + P_2 V_s = V_t P_c$ 이며, V_t 항을 정리하면 $P_c V_t - P_2 V_t = P_2 V_s$ 이다.

$$\therefore V_t = \frac{V_s P_2}{P_c - P_2} \dots\dots\dots (4)$$

2.3.3 연료봉 공간체적

연료봉 공간체적(V_f)은 연료봉을 천공한 후의 천공용기 체적에서 연료봉의 천공전의 체적값의 차이이므로 식(5)와 같다.

$$V_f = V_t - V_c \dots\dots\dots (5)$$

2.3.4 연료봉 내압(P_f)

식(2)를 정리하면 연료봉내압 계산식은 식(6)과 같다.

$$P_f = \frac{(V_t + V_s)P_2 - P_c V_c}{V_f} \dots\dots\dots (6)$$

2.3.5 핵분열기체량(Q_f)

연료봉내의 핵분열기체량은 표준대기압 상태로 산출하며, 연료봉, 천공용기 및 표준용기에서의 기체의 온도는 같다고 가정한다.

$$Q_f = \frac{P_f \times V_f \times 273}{P_{STP} \times T} \dots\dots\dots (7)$$

2.4 충전기체량 결정

봉내압 산출오차를 최소화하기 위하여 천공용기에 충전하는 기체압력에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 충전압력은 장치의 체적과 압력계 분해능을 고려하여 압력범위 180~210 kPa 에서 10 kPa 단위로 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 봉내압 산출오차는 0.06~1.39 %로 나타났다. 충전압력 중 봉내압 산출오차를 최소화할 수 있는 최적 충전압력은 190 kPa인 것으로 나타났다.

3. 결론

실험연료봉 내압측정에 대한 방안 중 개발비용, 설치장소, 장치정밀도 등을 고려하여 기존 시험장치를 이용한 최적 실험방안이 결정됨에 따라 그 방안으로 실험연료봉에 대한 시험절차, 시험관계식 정립 및 기체 최적충진량 결정 등을 수행하였다. 이 실험방안은 연료봉 내부기체와 충전기체가 희석되어 기체성분분석 정밀도가 다소 저하될 수 있으나 기존 경수로형 핵연료봉 시험장치에 대한 수정 또는 변경 없이 사용할 수 있기 때문에 시험정밀도와 경제성측면을 고려할 때 최적의 시험방법이라고 할 수 있다.

4. 참고문헌

[1] 이형권 외, “실험연료봉 내압 및 핵분열기체량 측정방안에 관한 연구”, 한국방사성폐기물학회 2010 춘계학술발표회 논문요약집, pp. 305-306, 2010.