

## 민감도 분석에 따른 삼중수소 열량계 운영방안 개발

송규민, 이계우, 고병욱, 이숙경, 손순환  
 한국전력공사 전력연구원, 대전광역시 유성구 문지로 65  
[kmsong@kepri.re.kr](mailto:kmsong@kepri.re.kr)

### 1. 서론

한국전력공사 전력연구원에 구축 중인 삼중수소 실험실은 한수원(주)의 월성원전 삼중수소 제거설비 (TRF)에서 생산되는 삼중수소를 계량·분배할 수 있는 시설이다. 전력연구원은 본 시설에 입출고 되는 삼중수소의 재고관리를 위해 삼중수소 열량계를 구축한 바 있다. 삼중수소 열량계는 삼중수소를 저장용기로부터 꺼내지 않고 삼중수소 붕괴열만을 측정하여 재고량을 정량하는 비파괴 분석기기이다. 본 논문에서는 삼중수소 실험실에 설치된 삼중수소 열량계의 측정 범위에 따른 민감도를 측정하고 이를 분석하여 삼중수소 열량계의 효율적인 운영방안을 개발하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 실험방법

삼중수소 1g은 베타붕괴를 하면서 약 0.32 W (0.91 mW/TBq)의 열을 발산하게 되는데, 삼중수소 열량계는 삼중수소 붕괴열을 감지하여 삼중수소의 재고량을 정량하는 분석장비를 말한다. 전력연구원에 설치된 열량계는 twin cell type으로 펠티에소자로 기전력을 측정하여 열량을 계산한다. 따라서 삼중수소 재고량의 정확한 측정을 위해서는 사전 안정화와 펠티에소자의 민감도 측정이 수행되어야 한다. 펠티에소자의 민감도 측정은 삼중수소 열량계 측정셀에 열량을 공급할 수 있는 Joule Effect Cell(JEC)을 이용하였으며, 본 실험에서는 50 mW에서 6,000 mW까지의 발생열량에 따른 민감도를 측정하였다. 민감도 계산법으로 제작 업체에서 제공한 실험 초기값 기준법과 새로 제안하고자 하는 long duration baseline 기준법을 적용하여 비교실험을 수행하였다. 이 방법은 열량계를 24 시간 동안 안정화 할 때 마지막 7 시간 동안 얻은 baseline을 기준값으로 이용하는 방법이다. 측정시간을 결정하기 위해 6,000 mW에 대한 장기(22 시간) 측정 시험이 수행되었으며 이로부터 각 실험시간을 14 시간으로 결정하였다. 50~6,000 mW 실험에서는 14 시간 측정에 각 실험종료 시 7 시간의 안정화 시간을 주었으며, 실험실 여건상 부득이하게 연속실험이 어려운 1000, 2000, 2400, 3000 mW의 경우에 추가로 안정화 시간을 주었다. JEC에서 공급하는 열량은 설정값을 적용하지 않고 실제 실험시간동안 측정된 전류 및 전압으로 계산된 열량의 평균값(오차 0.01% 수준)을 적용하였다. 기전력측정 및 계산은 실험초기 30분 전 2,000개 data와 실험종료 30분 전 2,000개 data를 각각 적용하여 표본수량의 일관성을 주었다.

#### 2.2 결과 및 고찰

<그림 1>은 6,000 mW에 대한 22 시간 측정실험에서 얻은 민감도의 상대오차와 %RSD (Relative Standard Deviation)를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 상대오차는 최종적으로 측정된 민감도 95.52  $\mu\text{V}/\text{mW}$ 를 기준으로 하였으며, %RSD는 주어진 시간에서 종료시간까지 측정된 값에 대한 편차를 적용하였다. <그림 1>에서 보듯이 %RSD의 경우 0.1% 이내로 낮추기 위해서는 12 시간 이상의 측정시간이 요구되며, 상대오차의 경우 0.1% 이내로 유지하기 위해서는 14 시간 이상의 측정시간이 요구되는 것으로 나타났다. 상대오차 0.1%는 삼중수소 약 0.02 gT에 해당된다. 열량이 높을수록 정상상태에 도달하거나 안정화에 소요되는 시간이 많이 필요하므로 현재 측정범위에서는 14 시간이 적절한 것으로 판단된다.

<그림 2>는 삼중수소 열량계 민감도를 JEC 공급열량에 따라 나타낸 그래프이다. 초기값 기준법과 baseline 기준법을 적용하여 민감도 계산법을 비교하여 나타났다. 초기값 기준법은 기존에 일반적으로 사용하는 방법으로 기전력 변화량의 기준값을 JEC로 열량을 공급하기 전 측정셀과 레퍼런스셀에서 측정된 기전력 차이를 기준으로 삼는 방법이다. 반면에 baseline 기준법은 안정화 조건에서의 측정셀과 레퍼런스셀에서 측정된 기전력 차이를 미리 측정하여 이 값을 기준값으로 계속 사용하는 방법이다. 따라서 초기값 기준법은 실험마다 안정화 시간이 필요하다는 단점이 있으나 실험조건이 바뀌어도 문제가 없다는 장점이 있다. 반면, baseline 기준법은 실험조건이 많이 바뀌었을 경우 재확인 필요하지만 측정실험마다 소요되는 안정화 시간을 단축할 수 있어 전체 측정시간을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

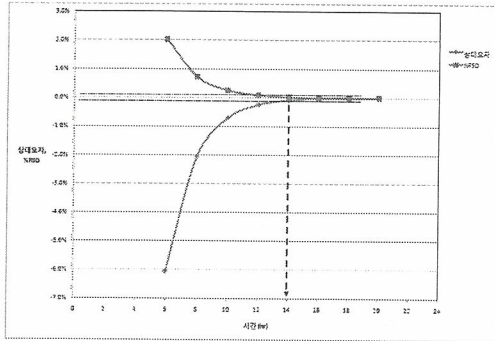


그림 1. 열량 6,000 mW에 대한 22 시간 실험 시 민감도 상대오차와 %RSD

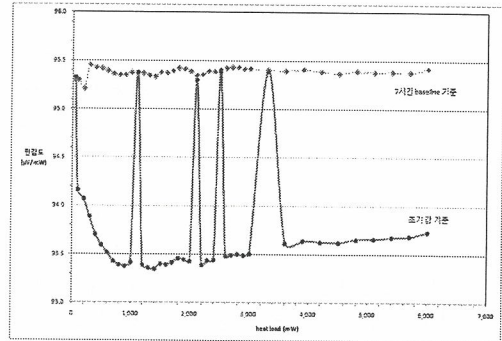


그림 2. 초기값 기준법과 7 시간 baseline 기준법에 의한 민감도 변화비교

<그림 2>에서 초기값 기준법에 의해 측정된 민감도는 평균  $93.77 \mu\text{V}/\text{mW}$ 였으며 %RDS는 약 0.7% 정도였다. 하지만 baseline 기준법으로 측정된 민감도는 평균  $95.38 \mu\text{V}/\text{mW}$ 에 %RSD 0.05% 이내를 유지하고 있다. 초기값 기준법은 앞 실험의 영향을 많이 받으며 특히 안정화 정도가 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 안정화 시간을 길게 한 1000, 2000, 2400, 3000 mW의 경우에 대해 연속된 다음 측정실험에서는 baseline 기준법과 거의 동일한 민감도를 얻을 수 있었다. 따라서 기존 방법을 적용할 경우 baseline 회귀를 위해 소요되는 시간이 측정시간과 거의 동일하게 필요하므로 1회 측정시간을 28 시간 이상으로 하여야 한다. 또한 제작업체가 추가로 제안한 측정전후 baseline 평균값 기준법을 적용한다면 소요시간이 더 증가하여 42 시간 이상이 필요하게 된다. 하지만 실험조건의 변화가 크지 않다는 전제조건에서 baseline 기준법을 적용한다면, 별도의 안정화 시간이 요구되지 않기 때문에 본 실험에서는 최대 21 시간, 최소 14 시간으로도 가능할 것으로 보인다. 만약 실험조건이 변한다고 해도 소요되는 시간은 여전히 초기값 기준법에서 요구하는 시간을 넘지는 않는다. 한편, 7 시간 안정화 조건에서 초기값 기준법을 적용할 경우 삼중수소 0.3 gT 이상의 측정오차가 발생할 것으로 추정된다.

### 3. 결론 및 향후계획

삼중수소 열량계 민감도 측정실험을 통해 최적 측정시간 선정 및 민감도 계산법을 제시하였다. 초기값 기준법에 의해 측정된 민감도는  $93.77 \mu\text{V}/\text{mW}$ , baseline 기준법에 의해 측정된 민감도는  $95.38 \mu\text{V}/\text{mW}$ 였다. 기존 초기값 기준법은 최대 측정시간 42 시간이 소요될 수 있는 반면 baseline 기준법은 14 시간 정도로도 가능할 것으로 본다. 또한 기존 7 시간 안정화 조건의 초기값 기준법을 적용할 경우 6,000 mW에서 삼중수소 0.3 gT의 측정오차가 예상되지만, baseline 기준법을 사용할 경우 삼중수소 0.01 gT까지 측정오차를 줄일 수 있다. 향후 측정범위를 넓혀 추가실험을 수행할 예정이며, ITER 삼중수소 운반·저장용기 등 측정대상의 구조 및 형태에 따른 영향도 검토하여 삼중수소 열량계의 효율적인 관리 및 정확도 향상을 위한 운전절차개발과 정량분석시스템을 구축할 계획이다.

### 사 사

본 연구는 지식경제부의 전력산업연구개발사업으로 수행 중에 있다.