

국제핵융합실험로를 위한 삼중수소 재고량 측정용 열량계 적합성 분석 및 설계

송규민, 손순환, 김정숙, 강덕원, 조승연*, 정홍석**

한전전력연구원, 대전광역시 유성구 문지동 103-16, *핵융합센터, **한국원자력연구소

kmsong@kepri.re.kr

국제핵융합실험로 삼중수소 플랜트 주요 시스템중의 하나인 삼중수소 저장 및 공급시스템(SDS: Storage and Delivery System)과 삼중수소 장기저장시스템(LTS: Long-Term Storage system)은 토카막에서 일어나는 핵융합반응의 주연료인 중수소 및 삼중수소를 저장하고 공급하는 기능을 한다. 국제핵융합실험로는 연료로 삼중수소를 사용하기 때문에, 외부로부터 주기적으로 공급되는 삼중수소와 운전 중 핵융합반응으로 소비된 삼중수소 그리고 환경으로 방출된 삼중수소의 측정·관리가 중요하다. 이 중에서 SDS는 시스템 구성품인 ZrCo 저장용기내 삼중수소 재고량을 측정하는 기능을 그리고 LTS는 외부로부터 공급된 운반용 1차 저장용기내 삼중수소 재고량을 측정하는 기능을 포함하고 있다. 특히 두 가지 경우 모두 삼중수소 저장방식의 특성 등으로 조건분석(온도, 압력) 및 시료채취(농도분석)에 의한 삼중수소 재고량 측정이 불가능하다.

본 연구에서는 삼중수소 재고량을 직접 측정하는 방법이 아닌 삼중수소 붕괴열을 이용하여 간접적으로 측정하는 방법중에서 SDS 및 LTS에 적합한 방법을 검토·선정하고 이를 설계에 반영하고자 한다.

- 배경 및 이론

달링톤 TRF나 월성원전 TRF의 삼중수소 취급 및 저장시스템(TGHSS: Tritium Gas Handling and Storage System)에서는 cPVT(concentration, pressure, volume, temperature) 방식을 적용하고 있다. 즉, 초저온증류계통에서 이송되는 기체형태의 삼중수소를 미리 계량된 용기에 담아 온도와 압력을 측정하고 GC를 이용하여 농도를 분석하는 방법으로 삼중수소량을 알 수 있다. 하지만, 국제핵융합실험로에 공급되는 삼중수소는 저장용기에 금속삼중수소화물 형태로 공급되어 상온에서의 증기압이 거의 제로에 가깝다. 따라서 삼중수소를 저장용기에서 모두 꺼내기 전에는 그 재고량을 측정할 수 없다. 따라서 삼중수소를 꺼내지 않고 측정이 가능한 간접식 방법을 적용하여야 한다. 간접식은 삼중수소 붕괴열을 측정하는 방법으로 다양한 형태를 취하지만 다음의 열수지방정식에 의해 설명이 가능하다.

$$(\text{Accumulation}) + (\text{Energy-in}) = (\text{Energy-out}) + (\text{Generation}) - (\text{Consumption})$$

$$I = (D + C) + \sigma$$

삼중수소 붕괴열 σ 는 저장용기의 내부에너지 증가분(I)과 외부로 방출되는 에너지(D+C)와 균형을 이룬다. 이때 삼중수소 붕괴열 σ 를 측정하기 위해 제어변수를 선택하여 isothermal 방식을 선택하거나 단열방식을 선택하게 된다. 또한 isothermal 방법에서 단순 열전도(D)에 의해 외부로 방출되는 에너지를 측정하는 방법과 내부에 인위적으로 열전달매체를 흘려(C) 유체의 온도증가를 측정하는 방법이 있을 수 있다. 이를 확장하여 물리적으로 동일한 조건을 레퍼런스로 삼아 에너지수지의 상대비교를 통해 측정하는 방식이 있을 수 있는데 대표적인 방법이 dual-cup 방법이다.

- 삼중수소 열량계 방법선정 및 설계

위에서 설명한 4가지 방식은 기본적으로 삼중수소 저장용기의 에너지수지를 만족한다. 즉, isothermal 방식의 경우 내부에너지 I=0을 유지시킴과 외부로 방출되는 에너지를 삼중수소 붕괴열

로 계산($\sigma=-D$ 또는 $\sigma=-C$ 또는 $\sigma=-D-S$)하여 삼중수소 재고량을 산출할 수 있게 한 것이다. 또한 단열방식을 선택하여 외부로 방출되는 열을 차단하여 $D+C=0$ 를 유지하여 내부에너지 증가분을 삼중수소 붕괴열로 계산($\sigma=I$)하여 삼중수소 재고량을 산출할 수 있게 한 것이다. 단열방식이든 isothermal 방식이든 온도측정에 의한 오차를 위해 레퍼런스를 이용하여 보정할 수 있다.

하지만 삼중수소 열량계의 4가지 방식은 적용대상에 따라 <표 1>의 장단점을 가지며, 이로부터 국제핵융합실험로 SDS와 LTS에는 각각 유체흐름방식과 isothermal 방식이 적합한 것으로 판단된다.

<표 1> 삼중수소 재고량 측정용 열량계 장단점 비교

| 방식 | Isothermal | 유체흐름식 | Adiabatic | Dual cup |
|-----|---|---|---|---|
| 장점 | <ul style="list-style-type: none"> 대상물이 어느 정도 커도 적용가능. | <ul style="list-style-type: none"> 온도 및 유량만 제어 | <ul style="list-style-type: none"> 측정변수 단순. | <ul style="list-style-type: none"> 측정오차보정. |
| 단점 | <ul style="list-style-type: none"> 온도제어 중요. | <ul style="list-style-type: none"> 대상물의 열교환기 설계가 중요. 온도, 유량간 종속성. | <ul style="list-style-type: none"> 단열설계 중요. 소형에 적합. | <ul style="list-style-type: none"> 레퍼런스의 모사성이 중요. 소형에 적합. |
| 적용성 | | | | |
| SDS | × | ○ | × | × |
| LTS | ○ | × | △ | △ |

유체흐름식은 경우에 따라 저장용기로부터 삼중수소가 유입될 가능성을 염두해 두어야 한다. 또한 삼중수소 붕괴열에 따라 충분히 온도변화를 감지할 수 있는 열용량이 작은 기체가 유리하다. 따라서 헬륨이 열전달매체로 가장 적합하다. 헬륨을 열전달매체로 적용할 경우, 1g의 삼중수소에서 발생하는 붕괴열을 5 l/min의 조건에서 약 4℃의 온도변화만 측정하면 가능하다. 국제핵융합실험로에서 요구하는 0.1g의 삼중수소에 대해서는 유속을 낮춰 4 l/min에서 약 0.33℃의 온도변화를 감지할 수 있어야 된다. 유속이 낮을수록 온도측정에 대한 정확성이 올라가지만, 열전달에 의한 다른 영향도 상대적으로 커지기 때문에 운전변수에 대한 최적화와 운전절차 개발이 필요하다.

Isothermal 방식의 경우 삼중수소 공급용 저장용기 전체(1차용기)를 열량계 bath에 넣고 측정하여야 한다. 따라서 삼중수소 공급용 저장용기의 형태와 규격이 bath의 설계에 영향을 준다. 또한 모든 표면에서 외부로 방출되는 에너지를 측정하기 위한 온도분포측정이 중요하므로 thermopile을 적용한다. 현재 국제핵융합실험로에서 요구하는 bath의 크기는 직경 22.5cm × 높이 70cm의 알루미늄 용기가 들어갈 수 있어야 한다. 삼중수소 열량계가 glovebox에 설치되는 경우 열량계 자체 크기 도 제약 받게 되므로 bath를 제외한 다른 시스템의 일부가 별도 공간에 설치될 수 있다. 삼중수소를 LTS로 공급한 후 폐기물로서 저장용기내 재고량을 측정할 경우 측정범위(<0.01gT)가 상당히 달라지는 것도 고려하여야 한다.

- 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 국제핵융합실험로 SDS와 LTS에 적합한 삼중수소 열량계 방식을 다음과 같이 선정하였으며, 향후 각 시스템의 연계성을 고려한 설계가 수행될 예정이다.

· SDS의 ZrCo 저장용기에 적합한 삼중수소 열량계는 유체흐름방식으로 열전달매체로 헬륨을 선정하였다. 본 열량계의 성능은 ZrCo 저장용기내 열교환기 설계에 의해 결정되므로 저장용기 설계시 이를 충분히 반영할 필요가 있다.

· LTS 외부로부터 공급되는 삼중수소 저장용기(1차용기)를 위한 열량계는 isothermal 방식이 적합하다. 본 열량계는 밀폐된 bath의 설계가 중요하며 국제핵융합실험로 삼중수소 공급용 저장용기와의 상세한 연계성 분석이 필요하다.