

질량분석법을 이용한 SG 중수누설 감시기술

강덕원, 손욱

한전전력연구원, 대전광역시 유성구 문지로 65

dwkang@kepri.re.kr

1. 서론

중수로 원전의 운영시, 1차측 냉각재 중수 누설의 원인이 증기발생기 세관의 결함이라는 점을 감안할 때 원전 안전성 및 세관 재질의 건전성 확보란 측면에서 중수 누설을 조기에 감지할 수 있는 기술의 개발은 방사성 물질의 환경오염 방지와 고가 중수의 손실에 의한 원전 운영경비의 증가와도 직결되기 때문에 이러한 누설을 조기에 감지한다는 것은 매우 중요한 의미를 지니고 있다. 누설 감시방법으로는 스펙트럼을 이용하는 적외선 분광법이나 액체섬광계측기(Liquid Scintillation Counter, LSC)를 이용하여 2차 측으로 누설되어 나오는 냉각재 내 삼중수소의 β^- 붕괴의 측정을 통해 중수누설 여부를 감시하는 기술이 주로 사용되어 오고 있다. 삼중수소를 이용한 감시기술은 측정감도는 1 ppm로 매우 뛰어나나 에너지가 매우 낮은 β^- 방사선을 측정해야 하기 때문에 고가의 섬광액을 사용해야 하고 이로 인해 화학약품비도 많이 들며 또한, 분석 후 방사능을 띤 난분해성 폐액이 발생하는 등 원전 운영에 경제적, 환경적으로 부담을 주고 있다. 이러한 요구에 의해, 질량분석기를 이용한 중수누설 감시기술을 개발하였다. 질량분석기술은 대상 물질 원자의 질량을 직접 측정한다는 측정원리상 경수 내 중수를 측정하는데 매우 효과적인 방법이다. 이 기술은 시스템 구성비가 고가이나 감도가 뛰어난 이중초점방식의 마그네틱 섹터형 질량분석기를 이용하여 1차 측 세관을 통해 누설되는 중수소의 질량을 직접 측정하여 누설량을 측정하는 기술이기 때문에 실시간 누설감시에 매우 유용하게 활용할 수 있다. 중수소라는 질량을 측정해야 하기 때문에 시료의 분해를 위해 크롬을 이용한 환원방식의 시료 전 처리 방식을 적용하였으며 이러한 장치를 구성하여 실험해 본 결과, 극미량의 중수누설 측정 및 감시에 매우 적합함을 알 수 있었다. 개발한 중수누설 감시장치는 원전 현장에 설치하여 실증시험을 거쳤으며 1주일 이상 수행한 현장 실증운영을 통해 3ppm 수준의 측정감도를 얻을 수 있었다.

2. 실험 및 결과

본 질량분석 시스템은 크게, 시료주입 및 전 처리 장치, 분자나 원자를 양 이온화시키는 이온화 장치, 질량분석기 및 검출기로 구성하였다(그림 3참조). 이 구성 방식에 따라 실제 분석방법은 다를 수 있으나 기본적으로 질량분석은 양이온으로 된 측정 대상의 분자나 원자를 그것의 질량 대 전하비 (m/z)를 이용하여 분리하는 원리를 이용하고 있다. 질량분석법에서는 측정대상 분자나 원자의 이온을 직접 하나하나 측정하기 때문에 다른 분석법에 비해 매우 높은 감도를 지닌다는 점과 이러한 이온들의 질량차이를 구별할 수 있기 때문에 동위원소를 구분할 수 있다는 점이 그 특징으로 꼽을 수 있다. 이러한 특징으로 인해 질량분석법은 경수와 중수의 질량차이를 구별하여 경수 내 중수의 농도를 측정해야 하는 중수누설 감시에 매우 적합한 분석법이라고 할 수 있다. 이중초점 질량분석기를 이용한 온라인 측정시스템을 통한 실험을 통해 HD와 H³ 피크가 1.0 ppm의 측정감도로서 각각 분리되는 것을 확인하였으며, 국내·외 중수로 SG는 물론 각종 열교환기에서의 발생하는 중수누설 감시에의 적용 가능성을 확인하였다. 중수누설 감시를 위한 질량분석기술을 활용하기 위한 적합한 시료의 전 처리 방법으로는 고온의 반응로내에서 크롬 촉매를 이용하여 물을 환원 처리하는 방법을 채택하였다. 시료주입은 크롬 반응관 온도를 1,050℃로 유지한 상태에서 수돗물을 회당 1 μ L씩 주입하였고, He 가스는 240초 측정 시간 동안 MFC를 제어하여 3mL/min로 흘려주었으며 메모리 효과를 없애주기 위해 측정 후 일정시간 동안은 150mL/min을 유지하도록 하였다(그림 1참조). 이 시스템은 고온에서 Cr 환원 열분해 반응에 의해 기화된 일정량의 반응기체를 질량분석기 내로 유입시킨 후 H₂와 HD의 질량의 차이를 고감도로 감지하면서 ppb level까

지 중수의 변화를 감지할 수 있다. 제작 농도와 측정농도 사이의 관계를 도시한 그림 2에서 두

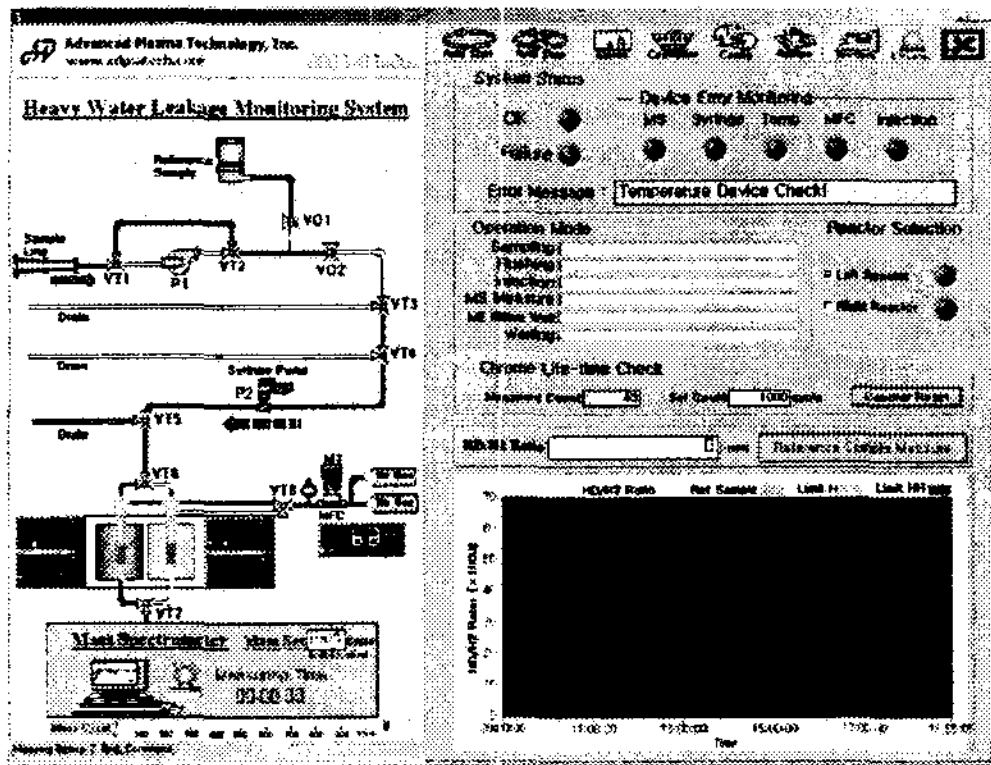


그림 1. 중수누설 감시시스템의 제어 메인화면

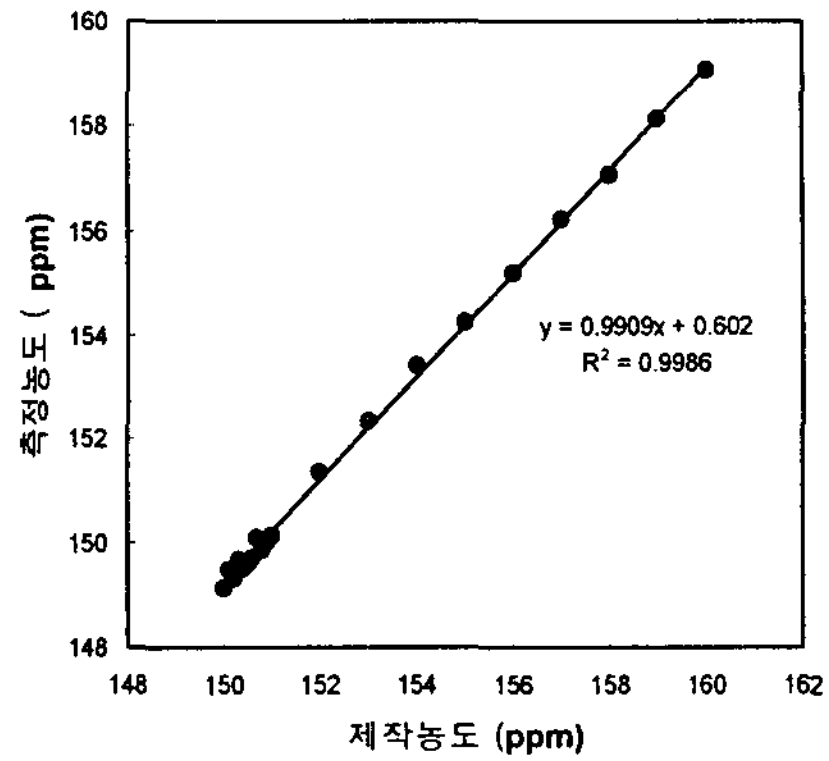


그림 2. 제작 중수농도와 측정 농도 관계

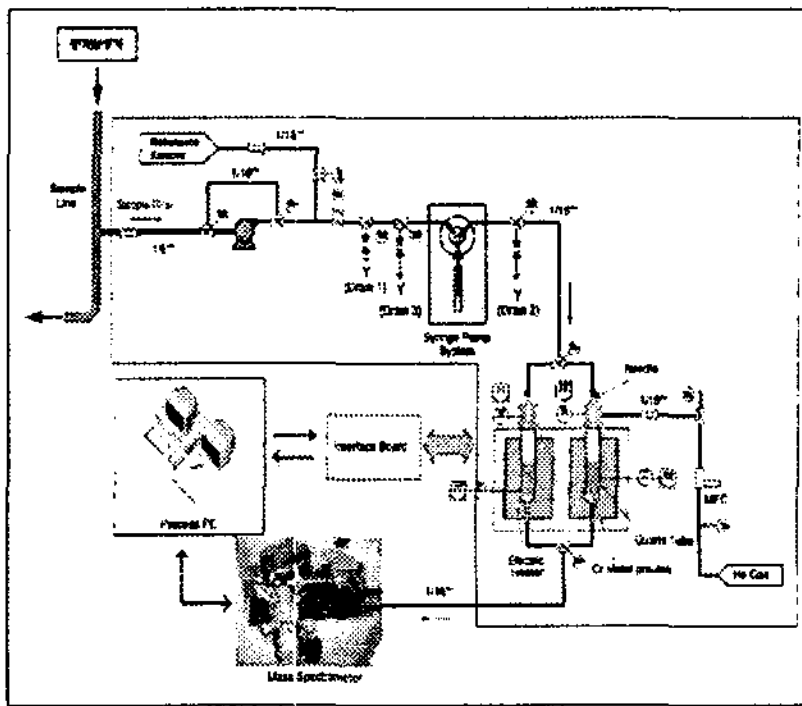


그림 3. 중수누설 감시시스템 공정도

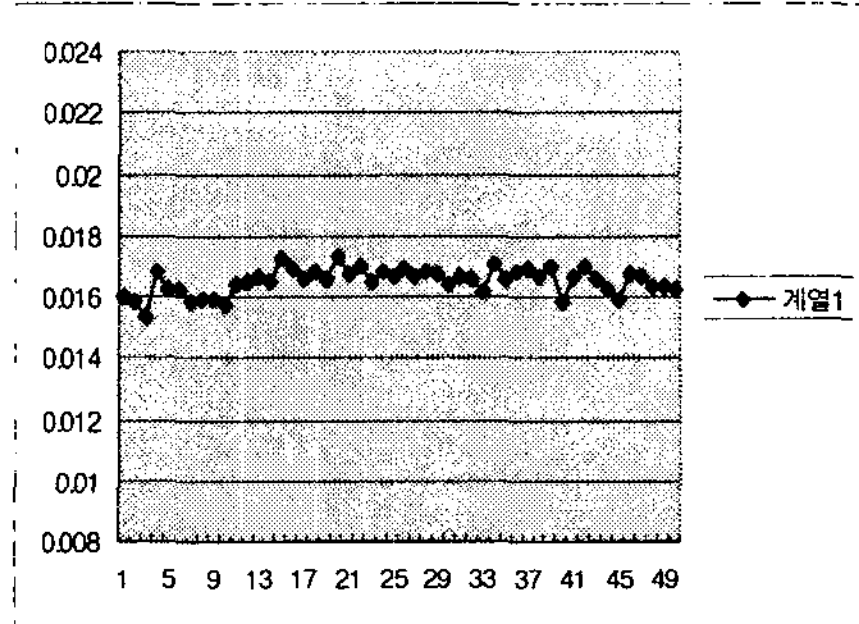


그림 4. 원전 시료 자동 데이터 측정 후 산출된 HD/H₂ 결과 분포

변수간의 상관계수 값(R)은 0.9986으로 매우 높은 사실을 확인할 수 있었다. 상기 그림 4는 원전의 시료라인을 간접적으로 연결하여 약 10시간 동안 측정하고 분석한 HD/H₂ 값의 결과를 보여주는 그림이다. 각 시료 당 질량분석기 데이터 스캔 시간은 6분이며 잔류효과 처리 및 새로운 시료주입을 위한 대기시간을 포함하여 4분을 설정해 1개의 시료를 측정하는 시간은 총 10분이 소요되었다. 그림 4에서 HD/H₂ 평균값은 0.0165이며 표준편차 0.00043으로 시스템의 측정예러는 2.6% 정도이었다. 이 값은 본 시스템이 대략적으로 물의 중수농도가 150ppm 이라고 가정하고 계통시료 또한 이 값과 크게 벗어나지 않는다고 하면 중수를 함유한 수중에서 ±3ppm 이내의 중수 검출이 가능하다.

3. 결론

중수로에서 중요한 사항으로 인식되고 있는 중수의 2차측으로의 누설을 조기에 감지하는 것은 고가의 중수 손실을 최소화시킬 수 있는 경제성 측면뿐 만 아니라 누설과 동시에 발생하는 1차측의 방사성 물질에 의한 2차측 계통 오염의 최소화라는 안전성의 제고 측면에서도 매우 중요하다. 따라서, 이러한 정밀 누설 감시기술은 경제적인 원전 운영과 2차측 계통의 방사능 오염 최소화를 구현하여 현장 작업자의 피폭선량 저감이라는 원전 운영자의 이득을 가져다 줄 것으로 기대된다. 본 연구를 통해 구축된 이중 초점방식의 질량분석기를 이용한 온라인 중수누설 감시기술은 중수로 원전의 증기발생기에서 발생하는 중수 누설뿐 만 아니라 각종 열교환기의 누설감시에도 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.