

**가압경수로 냉각재내 수소기체 탈기법**  
**The Removal of Hydrogen Gas for PWR Primary Coolant**

이두호, 강덕원, 지준화  
전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

**요 약**

원자로 운전중 수소는 환원분위기를 조성하여 계통재질의 부식을 방지할 목적으로 이용된다. 그러나 발전소의 정기보수 등을 위해 원자로를 정지시킬 때는 냉각재의 기체상에서 산소와 폭발성 혼합물을 형성시키지 못하도록 계통 내에 용존되어 있는 수소를 5 cc/kg 이하로 탈기시켜야 한다. 본 논문에서는 수소 탈기작업에 중요한 영향을 미치는 인자를 파악하여 효과적인 작업 수행을 위한 방안을 마련하는 데 초점을 두었으며, 중요한 변수로는 취출수의 정화 유속과 기체 배출 후 체적제어탱크에 남아있는 잔류 기체의 부피임을 알 수 있었다.

**Abstract**

Hydrogen is added to maintain reducing conditions in the primary coolant to minimize primary system corrosion. When the plant is to be shut down and the reactor coolant system opened for refueling or maintenance, the hydrogen must be degassed to <5 cc/kg. The hydrogen reduction is necessary to preclude a possible formation of an explosive or flammable mixture of oxygen and hydrogen in the gas space of reactor coolant system or an auxiliary system. This study was carried out to develop an effective control process for degassing hydrogen, and we learned from the calculations by simplified model that the two most influential parameters affecting degassing were the letdown purification flow rate and the residual gas volume remaining in the volume control tank after the expulsion of each burp of gas.

## 1. 서 론

원자로 일차계통 냉각재 중에는 산소, 수소 및 핵분열 생성기체 등이 존재하며 냉각재 중의 물이 방사화 분해되어 생성된 산소, 과산화수소 및 하이드록실 라디칼 등이 계통 재질과 산화반응하기 전에 수소와 재결합시켜 계통 재질이 부식되는 것을 방지하기 위해 냉각재 내에 수소를 강제적으로 주입하여 용존수소 농도를 약 25~50 cc/kg H<sub>2</sub>O로 유지하고 있다. 이로 인해 체적제어탱크(VCT : Volume Control Tank)의 상층부는 운전 중에는 기체상의 수소가 95 % 이상 존재하게 된다. 그러나 계획예방정비를 위한 위한 발전소 정지시에는 여러 기체성분 중에서도 특히 수소의 경우 냉각재의 기체상에서 산소와 폭발성 혼합물을 형성시키지 못하도록 수소농도를 5 cc/kg 이하의 수준까지 수소를 탈기시킨다. 이러한 탈기과정이 냉각재 온도의 강화와 함께 진행되므로 실제 원자로 정지시 작업과정 중에는 주어진 냉각시간 내에 탈기가 완료되기 어려운 면들이 존재한다.

본 논문에서는 수소 탈기과정에 밀접한 영향을 미치는 인자를 조사하여 탈기작업을 효율적으로 수행할 수 있는 방향을 제시하는 데 목적을 두었으며, 단순화한 모델을 통해 용존 수소량의 예측을 시도하고 모델의 예측값과 실제 운전자료를 근거로 한 실측값을 비교하여 효율적인 탈기조건을 예측하고자 하였다.

## 2. 냉각재 중의 수소기체 탈기법

발전소 계획예방 정지 약 24시간 전 원자로 냉각재 계통을 대기상으로 개방시키려고 할 때 원자로 냉각재의 수소농도는 15 cc/kg으로 감소되어야 한다. 미리 수소의 농도를 감소시키는 것은 5 cc/kg 미만으로의 마지막 범위까지 탈기를 쉽게 하기 위하여 제안된 것이다.

체적제어탱크에 대한 질소 퍼지는 기계적 탈기방법 중 가장 널리 사용되는 방법으로 탈기과정이 냉각재 온도의 강화와 함께 진행되므로 냉각 종말점에 이르러 안전농도까지 도달되어야 하는데 실제 원자로 정지시 작업과정 중에는 주어진 냉각 시간 내에 탈기를 완료시킨다는 것은 매우 어렵다. 이러한 사례를 바탕으로 탈기공정에 미치는 영향들에 대한 계산적인 연구를 통해 취출수의 정화유속과 기체 배출 후 체적제어탱크에 남아있는 잔류 기체의 부피가 탈기공정에 결정적인 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었다. 수소의 화학적 탈기법은 화학제어계통의 혼합기를 사용하여 30 % 과산화수소를 주입시켜 이루어지게 되는데, 혼합은 가압기 수위에 의존하여 30분 혹은 그 이상 동안 RCS와 가압기 내의 냉각재와 과산화수소를 혼합하도록 하는 것이다. 그때의 냉각재 시료는 여러 계통의 기체 공간 내에서 존재할 수 있는 잠정적 위험조건들(폭발성있는 혼합물)을 확인하기 위하여 발전소 정지시 가압기, 체적

제어탱크 등의 기체공간의 기체성분 존재 비의 분석이 요구된다.

### 3. 용존수소량 변화에 대한 기본 모델링

탈기 및 기액평형에 따른 용존수소량을 적정 수준까지 도달하도록 하는 데는 체적제어탱크에서의 탈기부피, 온도, 압력, 시간 등이 관련된 변수로 작용되므로 이러한 변수들을 모두 고려한 모델식은 매우 복잡할 것으로 판단된다. 따라서, 이중 관련성이 큰 인자들을 중심으로 하여 변수로 삼고 나머지 인자들은 일정한 상태로 유지된다고 가정하는 단순화된 모델을 우선 고려하여 용존수소량의 예측을 시도하고 이러한 모델의 예측값과 실제 운전자료를 근거로 한 실측값을 비교하여 효율적인 탈기 조건을 예측하고자 하였다. 먼저 가압기의 상부에서 냉각재가 분무되어 기액의 평형을 이루게 되고 기상에서의 수소 방출 및 액상 잔류수소의 재순환 과정으로 탈기가 진행될 때의 물질수지식을 세웠으며, 이때 유량률을  $W(\text{kg/h})$ , 수소 농도를  $C(\text{cc STP/kg})$ 라 가정하고 일정 온도가 유지된다고 가정하였다.

먼저 연속적으로 탈기가 진행되는 경우 계통에서의 수소 농도가 순간적으로 변하는 상태를 무시하고 빠른 시간 내에 평형농도에 도달한다고 가정했을 때 시간에 따른 용존수소의 농도변화를 그림 1에 나타내었다.

체적제어탱크의 기상 공간에 존재하는 수소를 질소로 퍼지하여 탈기한 후 냉각재의 용존 수소 농도가 평형에 이르도록 일정시간 유지한 후 다시 탈기를 시행하는 간헐적 탈기 방법을 사용한 경우의 용존 수소농도 변화는 체적제어탱크에서의 수소 제거율에 따라 결정된다. 따라서 각 탈기단계에서의 mass balance로부터 각 단계의 용존 수소농도 변화를 예측하였다. 이와 같은 간헐적 탈기과정에 있어서 탈기주기의 선정은 냉각재 용존수소와 체적제어탱크 및 가압기 기상에서 얼마나 빠른 시간 내에 기액평형이 이루어지는가에 따라 결정된다. 냉각재의 전체 체적이  $275 \text{ m}^3$ 이고 취출수 유량이  $16.4 \sim 22.5 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 유지되는 것과 EPRI 보고서의 실험결과를 고려하여 볼 때 약 3시간의 탈기 주기를 최적으로 선정하여 탈기하는 것을 기본으로 용존 수소농도의 변화를 살펴보면(그림 2 참조), 기액평형에 도달한 후의 냉각재나 용존수소 농도로서 체적제어탱크 기상에서의 수소제거를 위한 질소 퍼지 시간이 짧을수록 또한 취출수 유량이 클수록 기액평형 도달시간이 단축되고, 따라서 탈기주기도 단축될 수 있을 것으로 판단된다.

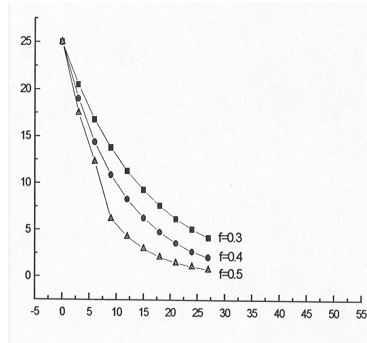
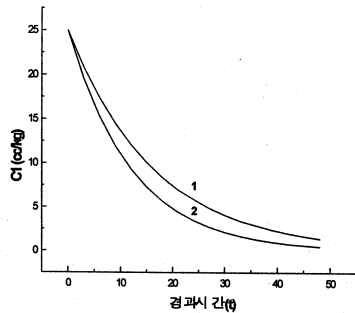


그림 1. 시간경과에 따른 수소농도 변화    그림 2. 간헐적 탈기에 의한 냉각재 용존수소농도 변화  
 1 :  $C_1=C_{1.0}\exp(-0.060t)$   
 2 :  $C_1=C_{1.0}\exp(-0.082t)$

#### 4. 모델 예측값에 대한 검증

모델 예측값을 바탕으로 '95~'97년중 계획예방정지에 따라 수행된 원자로 냉각재 계통에 대한 수소탈기에 따른 냉각재 용존 수소농도 변화를 살펴보면 실제 탈기과정의 용존 수소농도의 변화자료는 같은 형태의 간헐적 기계적 탈기방법에 의한 용존 수소농도 변화예측에서 제거율이 0.3~0.4에 해당하는 경우와 잘 일치하고 있다. 즉 체적제어탱크 기상에서의 수소탈기과정에서 제거율이 그리 크지는 못했던 것으로 보이며 질소 퍼지외에 진공에 의한 수소탈기를 병행하는 경우는 체적제어탱크에서의 수소 제거율이 더 향상될 수 있어 탈기주기가 단축될 여지가 있다고 판단된다. 또한 연속탈기에 의한 용존 수소농도 변화예측과 비교하면 실제 탈기과정의 용존 수소농도 변화자료와 거의 일치하는 경향을 보여주고 있다. 이는 연속탈기과정에서 선정된 letdown 유량속도가 체적제어탱크 기상과 냉각재와의 기액평형에 bottle neck으로 작용하기 때문인 것으로 보인다. 즉 취출수 유량을 더 증가시킬 수 있다면 기액평형 도달시간을 단축시켜 탈기주기 및 탈기완료시간이 더욱 단축될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 5. 결론

수소탈기에 가장 큰 영향을 미치는 인자로는 기액평형 유지에 관련된 취출수 유량속도와 질소퍼지 후 체적제어탱크 기상에 존재하는 잔여 수소기체의 양, 즉 수소 제거율임을 알 수 있었다. 빠른 시간 내에 변화된 수소농도로 기액평형을 이루도록 취출수 유량속도를 크게 할수록, 또 체적제어탱크에서의 수소 제거율을 증진시킬수록 탈기 완료시간이 단축될 수 있었다. 따라서 계획예방정지시 냉각재의 용존 수소농도를 체적제어탱크 기상에 대한 질소 퍼지의

기계적 탈기방법으로 효율적으로 안전농도까지 감소시키기 위해서는 취출수 유량을 허용범위 내에서 최대한으로 유지하여 체적제어탱크 기상에서의 수소농도 변화가 액상의 용존수소와 빠른 시간에 기액평형을 이루어 다음 번 탈기 주기를 단축시킬 수 있다. 또한 체적제어탱크 기상의 수소기체를 효율적으로 배출하기 위하여 체적제어탱크 액상의 수위를 허용범위 내에서 최대한으로 유지하여 질소 퍼지공간을 최소화함으로써 체적제어탱크 기상에서 질소 퍼지 후 잔존하는 수소기체의 양을 최소화함으로써 수소 제거율을 증진시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 참고문헌

1. 성기방, 강덕원, 원자로 정지시 일차측 화학처리 공정개발, KEPRI, TR.95ZJ17.97.81, (1997).
2. EPRI TR-105714-V1R4, PWR primary water chemistry guidelines, vol. 1, rev. 4, (1999).