

## 액체금속로 증기발생기에서 대규모 누출 소듐-물 반응 사고시 중후반기 압력거동특성 연구

정지영, 어재혁, 정경채, 김병호, 김태준, 남호운, 박남국\*  
한국원자력연구소, 전남대학교 공과대학 화학공학부\*  
(jyjeong@kaeri.re.kr)

## The Study on the Pressure Transient at the Later Phase of a Large Leak SWR in LMR Steam Generator

J-Y Jeong, J-H Eoh, K-C Jeong, B-H Kim, T-J Kim, H-Y Nam and N-C Park\*  
Korea Atomic Energy Research Institute, Chonnam National University\*  
(jyjeong@kaeri.re.kr)

### Abstract

In order to investigate the pressure transient at the later phase of a large leak sodium-water reaction event in KALIMER (Korea Advanced LIquid METal Reactor), an experimental study has been carried out. The experiment was performed to simulate the long-term system transient response of a large leak sodium-water reaction event due to double ended guillotine failure of three tubes in a 1/10 scale-down mock-up test facility with sufficient considerations of the quasi-steady state features of the SWR event.

### 1. 서 론

고온의 액체 소듐을 전열매체로 하여 2차 축의 급수를 가열하는 KALIMER 증기발생기는 고온, 고압의 급수 축 물/증기가 전열관을 사이에 두고 상대적으로 압력이 낮은 shell측 액체 소듐과 열 교환을 하고 있다[1]. 따라서 만일 전열관에 결함이 발생되어 물/증기가 shell측 소듐으로 흘러나와 직접 접촉하게 되면 격렬한 화학적 반응을 일으키게 되고, 이 과정에서 많은 양의 수소가스와 반응열 등이 생성되어 계통 내부 압력을 급격하게 상승시킨다. 그러므로 액체금속로를 설계할 때에는, 소듐과 물의 반응으로 인해 야기될 수 있는 계통의 건전성 손상 문제를 최소화 할 수 있는 방안이 반드시 고려되어야 한다.

액체금속로 증기발생기에서의 소듐-물 반응 현상은 반응인자인 물/증기가 shell측 소듐으로 누출되는 양에 따라 계통에 미치는 영향이 서로 다르다[2, 3]. 일반적으로 전열관에 pinhole이나 미세한 균열이 생겨 적은 양의 물/증기가 누출되는 소규모 사고의 경우, 사고 진행속도가 매우 느리므로 계통 내부 압력상승이 서서히 진행되고 그 폭 역시 작게 나타난다. 하지만 증기발생기 내부를 관통하는 전열관 중 하나가 양단 파단 되는 경우에는, 다량의 물/증기가 소듐 측으로 누출됨으로 인해 많은 양의 열과 수소가스를 순간적으로 생성시켜 계통 내부의 압력을 급격하게 상승시킨다[4]. 이러한 경우를 대규모 누출 사고가 분류하며, 통상 초기와 중/후반기 단계로 계통 내부 압력거동 형태를 나누어 사고해석을 수행한다. 대규모 소듐-물 반응사고가 일어나면 반응초기(수 msec)에는 격렬한 소듐-물 반응에 의한 급격한 압력파가 발생되어 전달되는 압력전파 단계를 거쳐, 차츰 반응생성물과 반응열의 계통 내에 유입되는 양의 증가로 인한 압력 증가 현상인 질량유입단계로 전환된다.

본 연구는 질량유입단계로 분류되는 소듐-물 반응사고 중후반기(~수 sec)에 증기발생기 상부 커버가스 공간에서 나타나는 압력거동특성을 실험적으로 검증함에 그 목적이 있다.

## 2. 실 험

실험은 실제 KALIMER 증기발생기를 1/10 규모로 축소 모사한 물모의 실험 장치(그림 1)를 이용해서 수행되었다. 장치는 크게 증기발생기를 모사하기 위한 실린더 형상의 시험관, 중간열전달 계통의 소듐 유동을 모사하기 위한 배관과 수소기체의 생성을 모사한 압축공기 공급계통 및 제어계통으로 구성되었다. 시험관은 직경 0.21m, 높이 1.6m의 원통형 구조로 내부에서 발생하는 모든 현상을 육안으로 직접 확인하고, 필요에 따라서는 카메라나 비디오카메라를 이용해서 현상을 촬영한 후 분석에 활용할 수 있도록 하기 위해 투명한 아크릴로 제작하였다. 이 시험관 상부에는 증기발생기 내부 커버가스 공간을 모사하기 위해 일정 공간(0.2m) 물을 채우지 않고, 실제 커버가스로 이용되는 불활성 기체인 알곤가스를 채웠다. 배관계통은 내부에 담겨진 유체의 흐름이 속도변화에 따라 원활하게 이루어질 수 있도록 충분한 수평 길이를 갖도록 하였으며, 소듐-물 반응 결과로써 생성되는 수소기체를 모사하기 위한 고온, 고압의 공기 주입관은 시험관 측면을 통해 중앙에서 수직으로 분사되도록 하였다. 분사되는 위치는 전열관 번들영역의 상, 하부에서의 전열관 파단을 모사할 수 있는 곳으로 설정되었다. 공기주입은 부피유량 제어를 통해 시간에 따라 주입된 양이 실시간에 기록될 수 있도록 하였으며, 주입 배관에 밸브를 설치하여 유량제어가 가능하도록 하였다. 여러 가지 실험 조건을 통해 측정된 모든 값들은 자료획득 계통을 통해 실시간에 기록 저장되었다. 본 연구에서 있어서 실제 사용되어야 할 유체는 소듐과 수소가스이나 실험장치의 구성 및 운전상의 용이함과 안전성, 경제성 등을 종합적으로 고려해서 물과 공기를 대체 매체로 사용하였다. 소듐과 수소가스 대신에 물과 공기를 사용함으로써 나타나는 전열 및 유동특성 등은 적절한 모사를 통해 보완하였다. 한편 소듐을 모사한 물의 순환속도는 KALIMER 증기발생기 내부 전열관 번들에서의 최대 순환속도인 1m/s를 반영하여, 0~0.34m/s 범위 내에서 일정한 간격으로 설정하였다. 그리고 주입되는 압축공기의 온도는 이중 제어장치를 통해 주입이 종료되는 시점까지 지속적으로 90℃를 잘 유지할 수 있도록 하였다.

## 3. 결과 및 토론

### 3.1 전열관 파단 위치에 따른 압력거동 특성

그림 2는 증기발생기 내부 전열관 번들영역 상, 하부에서 전열관이 양단 파단 되었을 때 커버가스 공간에서 나타나는 압력거동 특성을 비교하기 위한 실험결과를 보인 것이다. 각 실험항목별로 거의 동일한 압력으로 기포를 주입했음에도 불구하고 전열관 번들영역 상부에서 주입한 경우가 하부에서 주입한 경우에 비해 커버가스 공간에서의 압력상승 속도가 더 빠르게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 공기를 주입하는 두 위치 사이의 수두 차이(60cm)로 인한 주입량에서의 차이와 주입된 공기 기포가 커버가스 공간으로 이동하는 과정에서의 거리 차이로 인한 에너지 손실이 다름으로 인해 나타나는 현상으로 판단된다. 따라서 에너지 손실 부분을 무시하고 각 실험조건에 따라 주입되는 공기의 양을 동일하게 적용했을 경우에는 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 최대 압력 값에 있어서의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

### 3.2 물 순환유량에 따른 압력거동 특성

소듐-물 반응으로 생성된 수소기체가 계통을 순환하는 유체의 유량에 따라 계통 내부에서 어떤  
응용화학, 제 9 권 제 1 호, 2005

게 이동하며, 그러한 유동특성이 커버가스 공간에서의 압력거동 특성에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하였다. 실험결과 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 동일한 양의 공기를 주입했음에도 불구하고 물 순환유량이 많아질수록 커버가스 공간에서의 최종압력이 더 낮게 나타났다. 이는 정체되거나 저 유량으로 순환되는 경우에 비해 순환되는 물의 유량이 많아지면 주입된 공기에 의한 기포 성장이 상대적으로 둔화되고, 주입된 기포에 비해 상대적으로 더 많은 순환되는 차가운 물로 인해 기포의 에너지 손실이 커짐으로 인해 나타나는 현상으로 판단된다.

### 3.3 기포의 유동특성

물 순환유량이 6.2 l/s(번들영역에서의 유속; 0.18m/s) 이하일 경우에는 주입된 공기로 인해 생성된 대부분의 기포가 주입위치에 관계없이 상부 커버가스 영역으로 직접 유입되었으나, 8.7 l/s 이상에서는 대부분 시험관 하부 배관 쪽으로 유출됨을 확인할 수 있었다. 기포의 크기나 형태 역시 저 유량범위에서는 상대적으로 크고 둥근 타원형이었으나, 고 유량범위에서는 상대적으로 크기도 작아지고 모양도 찌그러진 타원형이거나 작은 구형임을 확인할 수 있었다. 그림 4는 물 순환유량에 따른 기포유동특성을 촬영한 대표적인 사례를 보인 것이다.

## 4. 결 론

동일한 시간동안 같은 양의 공기를 주입할 경우 주입 위치에 따른 커버가스 공간에서의 최종압력은 큰 차이를 보이지 않았다. 다만 순환되는 물의 양이 많아질수록 상대적으로 적은 유량일 경우에 비해 커버가스 공간서의 최종압력이 조금씩 더 낮아짐을 확인할 수 있었다. 또한 주입된 공기로 인해 생성된 기포들은 물 순환유량 6.7 l/s 이하에서는 거의 대부분 상부 커버가스 공간으로 직접 유입되었으나, 8.7 l/s 이상에서는 하부 배관 쪽으로 유출되어 배관을 따라 순환됨을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. D. H. Hahn et al., "KALIMER Conceptual Design Report", Report KAERI/TR-2204 (2002)
2. M. Hori, "Sodium/Water Reactions in Steam Generators of Liquid Metal Fast Breeder Reactors", Atomic Energy Review, 18(3), 707-778 (1980)
3. A. M. Judd, R. Currie, G. A. B. Linekar, J. D. C. Henderson, "The Under-Sodium Leak in the PFR Superheater 2, February 1987", Nucl. Energy, 31(3), 221-230 (1992)
4. H. Tanabe, H. Hamada, "Analysis of Large Leak Sodium-Water Reaction in Large FBR", Fast Reactor Safety, 203-212 (1990)

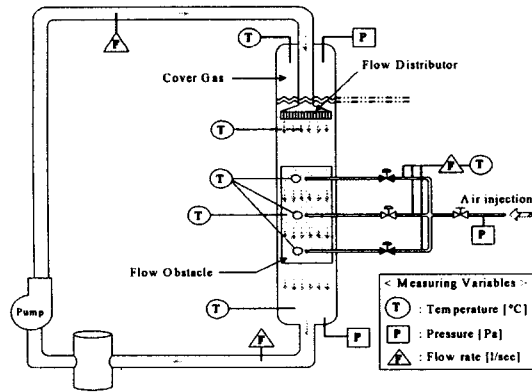


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

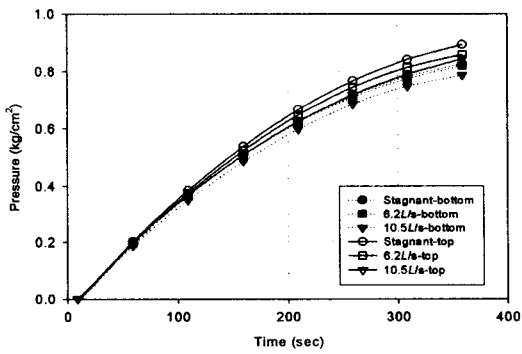


Fig. 2 Pressure variation in the cover gas region according to the injection position

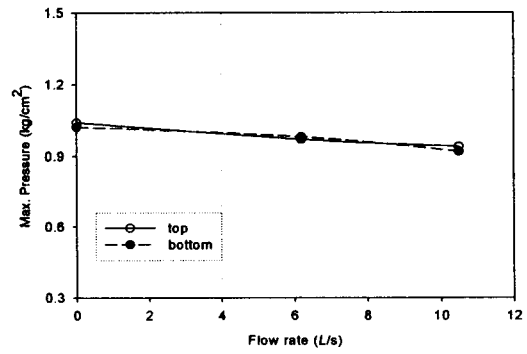


Fig. 3 Maximum cover gas pressure for the same injection rate



Fig. 4 Air bubble movement in the test tube at 6.7 l/s (injection position = top)