액체금속로 증기발생기의 대규모 소듐-물 반응사고 장기거동특성의 실험적 연구

정지영, 어재혁, 김병호, 김태준, 정경채, 한도희, 박남국 b
a 한국원자력연구소
b 전남대학교

1. 서론

고온의 액체소듐을 전열매체로 2 차 측 급수를 가열하는 칼리머 증기발생기는 고온, 고압의 급수 측 물/증기가 전열관을 사이에 두고 상대적으로 압력이 낮은 shell 측 액체소듐과 열교환을 하고 있다.[1] 따라서 만일 전열관에 결함이 발생되어 소듐과 물이 직접 접촉하게 되면 격렬한 화학적 반응을 일으키게 되고, 이 과정에서 많은 양의 수소가 생성되어 계통의 압력을 급격하게 상승 시킴으로 인해 안전성에 심각한 문제를 야기하게 된다.[2] 그러므로 설계단계에서부터 이에 대한 대책이 마련되어야 한다. 대규모 소듐-물 반응이 일어나게 되면 초기엔 급격한 압력파가 발생되어 전달되는 압력전파 단계를 거쳐, 중/후반기로 갈수록 점차 반응생성물과 반응열의 유입되는 양의 증가로 인해 계통 내부 압력이 증가되는 질량 및 에너지 유입단계로 전환된다.

KAERI 에서는 소듐-물 반응 중/후반기의 여러 복잡한 현상을 현실성을 고려한 단순화를 통해, 설계인자의 민감도를 설계단계에서 개략적으로 해석하기 위한 코드인 SELPSTA 를 개발하였다.

본 연구는 이 코드에 적용된 단순화된 모델의 타당성을 실험적으로 검증하였다.

2. 이론

2.1 소듐-물 반응 특성

소듐-물 반응이 일어날 수 있는 화학적 반응 형태를 종합해보면 다음과 같다.

$$aH_2O+bNa \rightarrow cH_2+dNaOH+eNa_2O+fNaOH+\Delta H \quad (1)$$

반응은 순간적으로 매우 격렬하게 일어나며, 발열반응이다. 또한 생성된 다량의 수소가스로 인해 계통 내부 압력이 급격히 증가된다. 소듐-물 반응에 의한 수소의 생성율은 일반적으로 50~63% 정도인 것으로 알려져 있다.[3] 소듐-물 반응으로 인해 생성된 많은 열에너지는 반응초기에 기포 내부온도를 상승시켜 순간적으로 반응경계 면에서 매우 높은 값을 나타낸다.

2.2 SELPSTA Code

SELPSTA 코드는 대규모 소듐-물 반응 시 반응경계 면에서 발생하는 복잡한 물리화학적 현상이, 결국은 반응에 의해 생성되는 수소기포의 총 부피와 반응열에 상응하는 증기발생기 내부 커버가스의 부피 및 온도 증가에 따른 압력변화로 이어져, 중간열전달계통과 증기발생기계통의 압력을 상승시킨다는 가정에 근거하고 있다. 따라서 커버가스 영역을 중심으로 계통의 전체적인 에너지수지를 고려한 해석 알고리즘을 기반으로 개발되었다. 반응이 시작되는 시점부터 증기발생기 shell 측 소듐과 급수 측이 완전히 격리되어 사고가 종료되는 시점까지 증기발생기 외벽과 커버가스 영역을 통한 에너지의 입/출입이 없는 단열계로 가정하여 해석을 단순화 하였다. [4]

3. 실험

3.1 실험장치

그림 1 에서 볼 수 있는 바와 같이 장치는 크게 KALIMER 증기발생기를 모사한 실험조, 중간 열전달계통의 소듐 유동상황을 모사한 배관계통과 기포공급계통, 그리고 제어계통과 자료획득 계통으로 구성되어 있다. 실험조는 높이 1.6m, 직경 0.21m 의 원통형 구조로 내부에서 일어나는 모든 현상을 육안으로 관찰하고, 필요에 따라서는 카메라나 비디오카메라로 촬영할 수 있도록 투명한 아크릴 관으로 제작하였다.

3.2 실험방법

본 실험에 있어서 실제 사용되어야 할 유체는 소듐과 수소이나, 실험장치의 구성 및 운전상의 용이함, 경제성, 안전성 등을 종합적으로 고려하여 물 모의 실험으로 대체하였다. 계 내부 각 지점에서의 측정 값들이 일정한 시간 동안 초기 설정 값에서 변하지 않고 유지될 때, 계가 정상상태에 도달한 것으로 간주하고 밀폐된 계 내부로 가열된 공기기포를 주입하며 온도 및 압력변화 경향을 조사하였다.

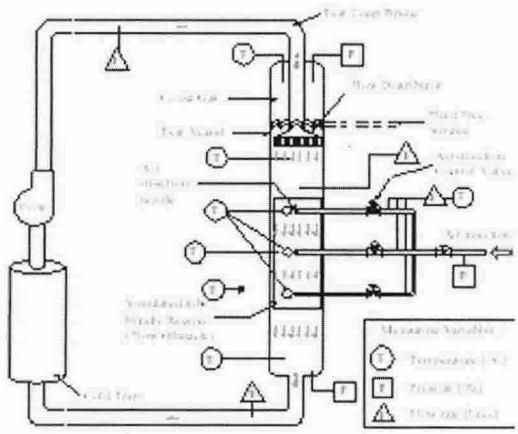

그림 1 실험장치 개략도

3.3 실험조건

실험조건은 실제 설계 값과 실험장치 간의 기하학적인 형태, 유동조건 및 전열특성에 대한 물리적인 기본 지배방정식을 설정하고, 상호 영향을 미치는 다양한 미지수를 반복계산법을 통해 소거하는 방법을 통해 선정하였다. 본 실험에 적용된 조건들은 다음과 같다.

- 압축공기 기포주입 온도: 90℃
- 압축공기 기포주입량: ~30cc/s
- 압축공기 주입압력: 1kg/cm^2
- 배관에서의 물 순환유량: 0, 6.2, 10.5ℓ /s
- 순환유체 온도: 상온
- 압축공기 기포주입 위치: 번들 영역 상,중,하

4. 결과 및 토의

물 순환유량에 따른 압력거동특성을 조사한 결과, 전열관 번들 상단부와 하단부(그림 2)에서의 파단을 모사한 경우 모두에 있어서 순환속도에 따라 계통 전반에 있어서의 압력거동 특성에 약간의 차이는 있었으나, 그 차이가 매우 작음을 알 수 있었다.

전열관 파단 위치에 따른 압력거동특성 실험결과에 있어서는, 3 가지 순환유량 모두에 있어서 상단에서 주입된 모형이 하단에서 주입된 모형에 비해 전반적으로 커버가스 영역에서의 압력상승 속도가 보다 더 빠름을 확인할 수 있었다.(그림 3) 이는 하단 주입구로의 기포 주입의 경우 상단 주입구로의 기포 주입에 비해 상대적으로 큰 수두 차(60cm)로 인해 전체적인 주입량이 감소되며, 상대적으로 먼 기포 이동거리에 따른 내부에너지 손실이 커서 일어난 현상으로 사료된다.

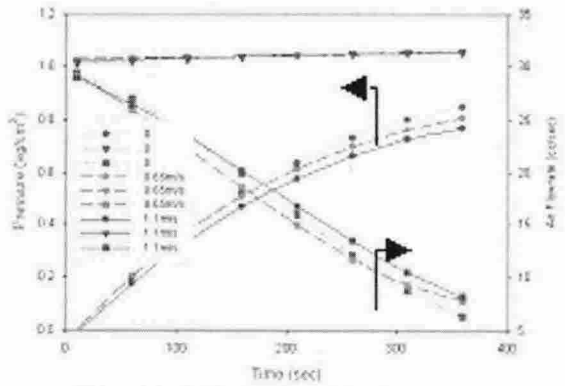

그림 2 물 순환유량에 따른 압력거동특성
(하단주입모형, ○ ;커버가스 압력, □ ;기포주입량, ▽;기포주입 압력)

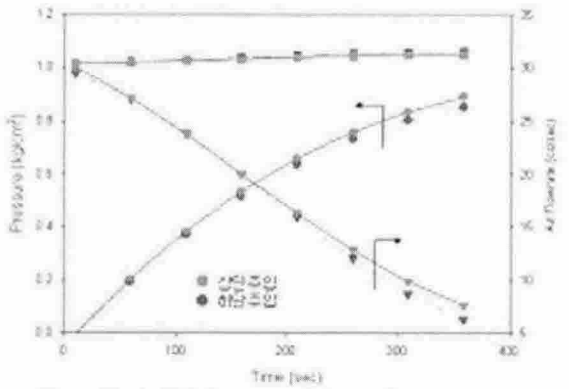

그림 3 물 순환속도 0m/s 에서의 기포 주입위치에 따른 압력거동 특성

5. 결론

물 순환유량 및 기포 주입 위치에 따른 계통 내 압력거동특성 실험결과, 물 순환유량 및 기포 주입 위치에 따라 압력거동 특성이 조금씩 상이하였으나 그 차이는 크지 않았다. 또한 코드 계산 값과 비교한 결과 약 5%의 오차범위 내에서 대체로 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

감사

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환으로 수행된 것입니다.

REFERENCES

[1] D. H. Hahn, et al., KALIMER Conceptual Design Report, KAERI/TR-2204/2002, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), 2002.
[2] Takashi TAKATA and Akira YAMAGUCHI, Numerical Approach to the Safety Evaluation of Sodium-Water Reaction, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 40, No. 10, pp.708-718, 2003.
[3] J. Y. Jeong, et al., A Study on the Characteristics of the Sodium-Water Reaction, KAERI/AR-654/2002, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), 2002.
[4] J. H. Eoh, et al., Numerical Investigation on the Long-term System Transient Response of a SWR Event in a LMR, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 40, No. 10, pp.871~880, 2003