

KALIMER IHTS에서의 압력파 거동 특성

Evaluation of the Pressure Wave in the KALIMER IHTS

김연식, 김성오, 김의광, 박진호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

액체금속로의 소듐-물반응사고에 따른 압력거동에 대한 분석을 수행하기 위하여 원자력연구소 KALIMER개발팀에서 개발된 SPIKE 코드에 대한 기본적인 물리적 현상 및 단순실험과의 비교를 수행하였으며 이를 바탕으로 KALIMER IHTS의 소듐-물반응사고로 인한 계통내 압력 거동현상을 분석하였다. 초기 압력 spike는 계통의 설계특성에 영향을 받지않고 비슷한 경향을 보였지만 expansion tank 크기는 전반적인 계통의 압력크기나 변동양상에 영향을 많이 미치는 것을 알 수 있었다.

Abstract

SPIKE code, which has been developed to investigate the sodium-water reaction phenomena in the liquid metal reactor by KAERI's KALIMER team, was evaluated to verify its applicability to the KALIMER design in both the water hammer phenomena and an experimental data on a simple system. The sodium water reaction of KALIMER IHTS was evaluated. Initial pressure spike was shown to be independent of the design features. Overall system pressure behavior is deeply dependent on the design features, i.e. expansion tank.

1. 서 론

한국형 액체금속로인 KALIMER는 소듐을 1차 및 2차 냉각재로 사용하고 3차 계통은 기존의 경수로 원자력전과 비슷한 물/증기 사이클이다. 1차 및 2차계통 (또는 중간계통, IHTS) 의 냉각재인 고온의 소듐은 물이나 공기 등과는 매우 강렬한 반응을 하여 폭발성이 있는 수소나 유독한 개스 등을 발생하기 때문에 이를 방지하기 위한 여러 가지 설계특성을 고려해야 한다. 이와같은

설계특성 중의 하나인 SWRPRS (sodium water reaction pressure relief system) 즉, 소듐-물반응압력방출계통은 증기발생기 튜브누설로 인하여 셀측에서 강렬한 반응을 일으키며 매우 큰 순간첨두압력을 발생하며 지속적으로 계통의 압력도 증가시킨다. 또한 소듐-물 반응으로 생긴 부식성이 강한 반응생성물이 배관을 통하여 압력경계를 이루는 기기나 부품에 유입되어 요구되거나 필요로하는 기능에 문제를 일으킬 수가 있다. 본 연구에서는 소듐-물반응사고시 야기되는 문제중 전자와 같은 급격한 압력변화가 발생하는 경우에 대비한 설계특성을 고려함에 있어서 압력과 거동 특성을 검토하여 보았다.

본연구의 평가를 위하여 사용된 컴퓨터 코드는 당 연구소 액체금속로(KALIMER)개발팀의 소듐기술개발분야에서 개발한 SPIKE이며 입력자료작성이나 설계적용을 위하여 필요한 몇가지 사항을 수정하여 사용하였다.

2. 본 론

KALIMER IHTS (intermediate heat transport system, 중간열전달계통) 평가에 앞서 사용된 컴퓨터 코드인 SPIKE 의 수학적 모델과 해석 알고리즘 등을 먼저 살펴보고 이의 이해를 바탕으로 분석작업을 기술하겠다.

2.1 SPIKE의 지배방정식

SPIKE 코드내의 수학적 모형은 일차원, 점성 (압력강하), 그리고 과도 (unsteady) 유동을 묘사하기 위하여 다음과 같은 지배방정식을 사용하였다. 즉,

연속방정식:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0 \quad (1)$$

운동방정식:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial P}{\partial x} + \rho F = 0 \quad (2)$$

$$\text{여기서, } F \equiv \frac{f u |u|}{2D_h} + g \sin \alpha \quad (3)$$

에너지방정식:

$$\rho a^2 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

단, u : 속도; ρ : 밀도; P : 압력; F : 마찰력+중력 항; a : 음속이다. 여기서, 에너지방정식에서 중력과 점성에 의한 영향은 다른 항들에 비하여 상대적으로 작기 때문에 무시하였다.

2.2 SPIKE 코드 해석 Algorithm

앞절에서 유도된 지배방정식을 푸는데 있어서 생각할 수 있는 방법중 전통적으로 그 적용성이 많은 특성방정식을 유도하여 특성곡선에 따라서 적분을 수행하는 특성기법 (MOC, method of characterization)을 사용하였다. 지배방정식들에 대한 특성방정식 유도는 다음과 같다.

먼저 운동방정식과 에너지방정식을 다음과 같이 두면

$$L_1 \equiv \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial P}{\partial x} + \rho F \quad (5)$$

$$L_2 \equiv \rho a^2 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} \quad (6)$$

이며 이를

$$L_1 + \lambda L_2 = 0 \quad (7)$$

에 대입하여 정리하면

$$\frac{dx}{dt} = u + a \ (C^+): \frac{du}{dt} + \frac{1}{\rho a} \frac{dP}{dt} + F = 0 \quad (8)$$

$$\frac{dx}{dt} = u - a \ (C^-): \frac{du}{dt} - \frac{1}{\rho a} \frac{dP}{dt} + F = 0 \quad (9)$$

이다. 그리고, 연속 및 에너지 방정식에서 유동입자 특성곡선을 따라서는 다음과 같은 관계식이 성립한다. 즉,

$$\frac{dx}{dt} = u \ (C^0): \ a^2 \frac{d\rho}{dt} - \frac{dP}{dt} = 0 \quad (10)$$

이다. 참고로 SPIKE 내에서는 소듐에 대하여 비압축성 균일 (constant) 밀도를 적용했기 때문에 위 마지막 C^0 곡선은 계산에 고려하지 않았다.

SPIKE는 액체금속로의 IHTS의 소듐-물반응사고를 묘사하기 위해 개발된 것이기 때문에 배관의 여러 가지 유로형태와 기기들을 반영할 수 있도록 되어있다. 예를들어 배관의 확장/수축부위, 배관연결, 엘보우, closed end, far end, rupture disk, surge 탱크, expansion 탱크, 그리고 반응영역 등이다. 이들에 대하여 계산의 안정성요건을 만족하기 위한 적절한 (유한)차분을 행하고 각 부분에 대한 식(8),(9)의 특성곡선을 따라 적분을 수행하여 이를 만족하는 속도와 압력을 구하는 방식으로 구성되어 있다.

2.3 KALIMER IHTS 압력과 분석

SPIKE에 대한 성능을 확인하기 위하여 단순한 배관에서의 수격현상 모의를 해본 결과 그림 1과 같이 비교적 양호한 결과를 나타냈다. 그리고 일본의 PNC에서 행한 중간열교환기의 소규모

물실험결과와의 비교에서는 전반적으로 일치하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다 (그림 2). 실험결과와 계산결과와의 차이는 실험조건과 계산 모델링의 차이에서 온 것이라고 판단된다. SPIKE 코드에 대한 검증은 실험규모실험 데이터와의 비교.보정을 통하여 이루어 지겠으나 현재 개발되고 있는 액체금속로 KALIMER는 개념설계단계이므로 앞에서 보인 단순한 경우에 대한 비교검증으로도 설계적용을 위한 분석이 가능하다는 것을 알 수 있다.

KALIMER는 1차계통이 풀형, 2차계통인 중간계통은 서로 독립적인 2개의 루프로 된 발전소로서 그림 3에는 1차계통과 1개의 중간루프만을 나타낸 그림이다. 소듐-물 반응을 분석하는데는 두 개의 중간계통이 서로 독립적이기 때문에 1개 루프만 고려해도 된다. 각 루프는 중간열교환기 2대와 순환펌프 1대, 증기발생기 1대, 그리고 연결배관 등으로 이루어져 있다. 이를 SPIKE 코드의 입력데이터화하기 위하여 배관요소를 모두 Branch 40개와 Junction 39 개로 나누고 기기로서 expansion tank와 rupture disk를 각각 1대씩 정의하였으며 그림 4에는 이의 개념도를 나타내었다. KALIMER IHTS는 수직높이 차이가 30여m 이기 때문에 중력에 의한 초기 교란이 매우 심하게 나타났다. 이를 극복하기 위하여 정상상태 계산을 수행하였으며 이를 과도기의 초기조건으로 계산을 수행하였다 (그림 5참조).

소듐-물반응사고에 의한 계통의 압력을 감압하기 위하여 피동기기인 rupture disk를 증기발생기 하부에 설치하는데 소듐-물반응사고에 의한 기준적인 압력거동을 보기위해서는 rupture disk가 작동되지 않은 상태를 먼저 계산할 필요가 있다. 그림 6은 rupture disk 가 작동되지 않은 경우에 대한 주요 부위에서의 압력변동 경향을 보이고 있다. 시간에 따라서 압력은 단조증가하는 경향을 가지면서 계통내 일부분에서는 매우 큰 압력진동을 보이고 있다. 그림 7에는 초기에 압력진동을 나타내었는데 rupture disk 배관에서의 압력진동폭이 약 2.5 MPa 임을 알 수 있다. 이는 rupture disk 의 설정압력이 2.5 MPa 이하이면 초기 압력진동에 의해 rupture disk가 작동할 수 있다는 것을 의미한다. 만약 rupture disk의 설정압력이 이보다 크다면 계통의 압력감압은 그 만큼 늦어지게 된다는 의미이다. 이에 대하여 고려할 수 있는 측면은 두가지가 있다. 하나는 rupture disk 의 설정압력이 높다는 것은 그 만큼 정상운전시 압력의 변화수용폭이 커서 유리한 측면을 가진다는 의미이나 상대적으로 작은 누출에 대한 계통의 대처시간이 길어져서 반응생성물이 순환펌프나 중간열교환기로 유입되어 요구되는 기기의 성능을 저해할 수 있다는 것이다. rupture disk의 설정 압력은 이런 측면에서 고려되어야 할 필요가 있다. 그림 8,9는 rupture disk 설정 압력이 각각 1.5 MPa, 3.0 MPa 인 경우의 압력거동을 나타낸 것이다. 그림 8은 초기 spike가 rupture disk 압력설정치를 상회하므로 사고초기에 rupture disk가 개방되는 경우이고 그림 9는 초기 spike가 rupture disk 설정 압력보다 낮아 계통압력이 rupture disk 설정압력 부근까지 증가되는 경우를 보여주고 있다. 설정 압력차이로 인한 rupture disk 개방시간 차이로 계통이 겪는 압력변화는 매우 다르나 일단 rupture disk가 개방되면 계통거동은 거의 비슷한 양상으로 변하는 것을 알 수 있다.

중간계통에는 소듐의 온도변화에 따른 체적변화 수용을 위하여 expansion tank를 배관 중간이나 증기발생기내에 설치하게 되는데 이것이 소듐-물반응사고의 압력거동에 영향을 미치게 된다. expansion tank의 영향을 평가하기 위하여 rupture disk가 작동하지 않는 경우에 한하여 분석을 수행하였다. 계산결과를 보면 expansion tank의 체적영향은 초기 압력 spike 크기에 별다른 영향을 미치지 못하는 것을 확인하였다. 기준으로 정한 expansion tank의 체적은 KALIMER 개념설계의 최근 데이터를 사용하였다. 그림 10은 그 결과를 보여주고 있다. 그러나, 초기이후의 계통 압력크기에는 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 그림 11에는 expansion tank 크기의 두 극단적인 경우에 증기발생기 출구 (SG exit) 와 IHX tube 에서 1초간 압력거동을 나타내었는데 그림에서 보듯이 각 경우마다 전반적인 압력변화가 비슷하지만 경우사이에는 매우 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고 같은 크기의 expansion tank일 경우 위치를 배관부위로 옮겨도 관심 대상인 IHX tube에서의 압력은 비슷함을 알 수 있었다.

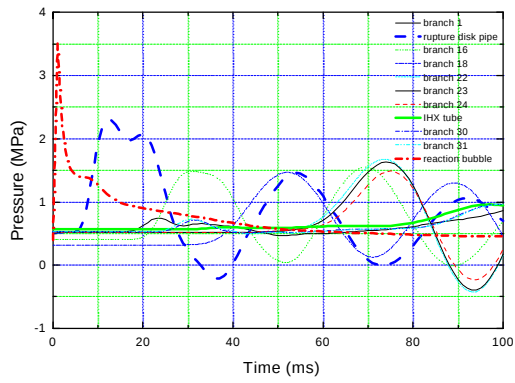
3. 결 론

액체금속로 KALIMER IHTS의 소듐-물반응사고에 따른 압력거동에 대한 분석을 수행하였다. 소듐-물반응사고로 인한 계통내 초기 압력 spike 는 계통의 설계특성에 영향을 받지않고 비슷한 경향을 보였지만 expansion tank 크기는 전반적인 계통의 압력크기나 변동양상에 영향을 많이 미치는 것을 알 수 있었다.

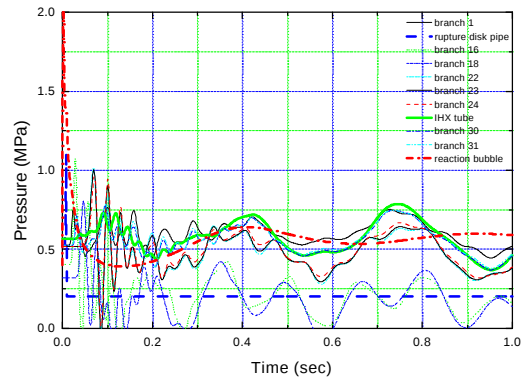
Acknowledgement: 본 연구는 과학기술부의 원자력사업 일환으로 수행 되었음.

References

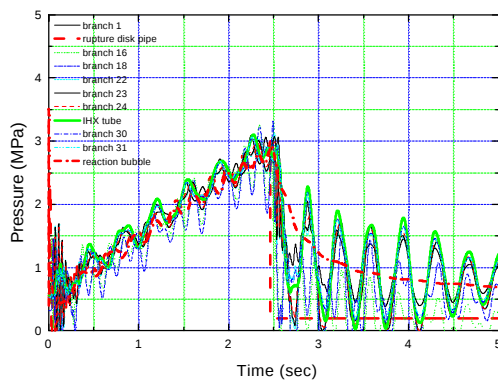
1. C.K. Park et al., KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-888/97, Jul. 1997
2. E. B. Wylie et al., Fluid Transients in Systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993
3. M.H. Chaudhry, Applied Hydraulic Transients 2nd Edition, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1987
4. M. Uotani, Results of Calculation with Code SP-AX, private communication, CRIEPI, 1995
5. 박진호 외, 소듐-물 반응해석을 위한 SPIKE 코드개발, KAERI/TR-1123/98, 1998. 8.



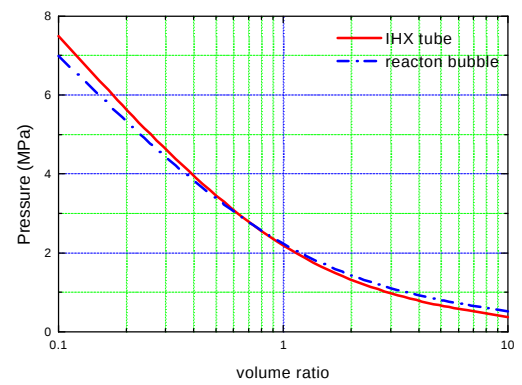
* 2, 7 SWR of the rupture disk pipe



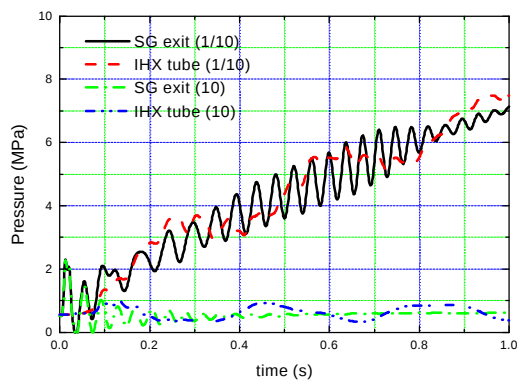
* 2, 8 SWR of the rupture disk pipe (rupture disk=1.5MPa)



* 2, 9 SWR of the rupture disk pipe (rupture disk=3.0MPa)



* 2, 10 expansion tank pressure spike



* 2, 11 expansion tank pressure spike