'2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 소듐-물 반응사고 후반기 계통거동 해석 모형 평가

Assessment of Analysis Model for Longer-Term Effects of SWR in LMR

어재혁, 심윤섭, 김연식, 김의광

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로 증기발생기 설계에서 매우 중요한 요소 중의 하나인 소듐-물 반응사고(SWR) 후반기 해석코드 개발을 위해 다양한 종류의 SWR 해석 코드에 대한 특성을 분석하고, SWR 후반기 해석에 적용하기 위한 해석모형을 설정하여 그 타당성 평가를 수행하였다. SWR 후반기 특성은 초기 wave propagation의 효과는 감소하고 bulk motion에 의한 영향이 지배적으로 나타나며, 소듐-물 반응에 의해 많은 수의 수소 기포가 생성되어 기포 경계면에서의 증발/확산에 의해 기포 내부로 기상 소듐이 유입되므로 해석 모형의 설정을 위해 기포 내부의 기상 소듐의 분압을 계산하였다. 수소기포 내부의 소듐 분압은 기포의 크기, 온도 및 기포압의 함수로 결정되며, 기포의 크기가 증가할수록 기포 내부의 소듐분압은 급격히 감소하므로 SWR 후반기 해석 모형은 수소기체의 단상으로 이루어진 기포의 축방향 팽창으로 인해 계통이 과압되는 형태의 단순 해석모형으로 가정할 수 있다. 이를 통해 타당성이 평가된 반응부위 수소기포 생성, 압력 전파 및 계통 과압 등에 관련한 단순 해석모형은 액체금속로 소듐-물 반응사고 후반기 계통거동 해석코드의 개발에 활용될 수 있다.

Abstract

The sodium-water reaction(SWR) is important in the design consideration of a LMR steam generator. To develop the analysis code for long-term effects of SWR, the investigation of the characteristics of various types of a SWR analysis code and the assessment of the analysis model for long term flows of SWR were performed. In an event of SWR, pressure spikes of wave propagation occur at its initial stage and last for a very short time, and then bulk motion of fluid and reaction products is progressed and lasts for a long time. In a case SWR occurs, a number of hydrogen bubbles produced and, through the gas-liquid bubble interfaces, sodium is entrained into a bubble by evaporation or diffusion. The partial pressure of sodium in a hydrogen bubble is determined as a function of bubble size, temperature, and pressure, and is rapidly decreased in a bubble as its size increased. Accordingly, it can be considered that the bulk motion of the later phase of SWR is an axial motion caused by expansion of a single-phase hydrogen gas bubble produced by a reaction in the vicinity of the leak site. Through this investigation, preliminary simple analysis model for long-term effects of SWR was set up and sensitivity study using the system design parameters such as pressure and temperature of IHTS for KALIMER(Korea Advanced LIquid MEteal Reactor) was performed, and also, this simple analysis model can be used to develop the long-term analysis code for SWR in KALIMER steam generator design.

1. 서론

액체금속로 증기발생기는 고온의 소듐을 열전달 매체로 하여 2차측의 급수를 가열하며 고온고압의 급수측 물/증기에 비하여 상대적으로 저압인 shell측 액체소듐이 전열관(tube) 을 사이로 격리되어 흐르고 있으므로 증기발생기 전열관(tube)의 결함이 발생하면 소듐과 물의 직접접촉에 의한 발열반응으로 인해 많은 양의 수소가 생성되어 계통의 압력을 급격히 상승시킨다. 따라서, 소듐과 물의 반응으로 인한 계통의 안전성 확보에 대한 연구가 필수적이라 할 수 있다. 소듐-물 반응은 반응 요인인 물/증기의 소듐상으로의 유입률에 따라 계통에 미치는 영향이 다르게 나타나는 것으로 보고되고 있으며, 편의상 다음의 표 1과 같이 물 누출율에 따라 사고유형을 분류하고 있다[1]. 증기발생기 전열관(tube)의 pinhole 또는 미세한 crack이 발생할 경우의 소규모 물 누출 사고시에는 사고 진행 속도가 매우 느리므로 계통 내부의 압력 상승은 천천히 진행되고 압력 상승폭 또한 작은 반면, 증기발생기 내부의 전열관(tube)중 하나가 양단 파단되는 경우에는 많은 양의 물/증기가 소듐측으로 누출되므로 소듐과 물의 반응에 의해 발생하는 수소의 양이 급격히 증가하여 격렬한 반응으로 인해 생성되는 수소기체가 소듐상을 밀어내면서 증기발생기 내부의 압력을 급격히 증가시키게 된다. 반응으로 인해 생성되는 기체 생성물의 대부분을 차지하는 수소는 초기에 구형의 단일 기포를 형성하여 성장하다가 안정성을 잃으면 수소와의 균질 2상 흐름을 형성하고, 물의 누출이 더 증가하면 기체상의 수소, 액상의 소듐, 그리고 이 두가지 상이 공존하는 비균질 2상 유동을 형성한다. 이러한 대규모 물 누출 사고의 해석은 반응 초기의 압력 Spike와 그 이후 발생하는 2차 압력 상승기간 이후의 중/후기 준정상상태(quasi steady state) 압력 거동으로 구분할 수 있으며 본 연구에서는 준정상상태(quasi steady state) 이후의 후반기 거동 해석 모형을 개발하고 그 타당성을 검증하였다.

2. 소듐-물 반응사고 해석 코드

액체금속로 증기발생기의 물 누출에 의한 소듐-물 반응시의 계통 압력과도 현상을 분석하기 위해 세계 각국의 여러 연구기관에서 액체금속로 증기발생기의 안전성 해석을 위한 코드를 개발해 왔으며 test 실험장치를 제작하여 수행한 실험 결과와 비교함으로써 코드의 신뢰성 및 정확성을 증진시키기 위한 노력을 경주하였다. 코드의 개발은 소듐-물 반응에 대한 물리적 이해를 토대로 다양한 가정과 적절한 분석모형을 사용하여 수행되었으며 본 연구에서는 이러한 기개발 코드 중에서 초기 압력 상승 및 2차 압력상승부터 압력방출 계통의 작동 이후 기간을 모두 해석할 수 있는 코드, 또는 초기 거동보다는 후기 거동의 분석에 초점을 맞춘 코드로서 계통의 압력과도 현상에 대한 분석을 그 주된 목적으로 하는 코드에 대한 분석을 통해 액체금속로 증기발생기의 소듐-물 반응 사고 분석을 위한 해석모형 개발에 활용하였다. 분석 대상 코드로는 초기 wave propagation 현상부터 압력방출 배관의 계통 과도현상까지를 모사할 수 있도록 인도에서 개발된 SWEPT 코드와 초기 압력 Spike 계산모듈과 준정상상태 압력을 계산하는 모듈, 그리고 물누출율을 계산하는 3가지 모듈로 구성되어 SWR시의 계통 전거동을 모사할 수 있도록 일본의 PNC에서 개발된 SWACS 코드가 있으며, 초기 압력 Spike 이후의 중/후기 계통 거동 평가를 위해 미국 ANL에서 개발한 SWAAM-LT 코드와 반응초기 계통 해석용으로 개발

된 TRANSWRAP 코드를 후기 특성에 맞게 변형한 HISTAM 코드를 들 수 있다. 여기서 나열한 각각의 코드에서 사용하고 있는 해석모델 및 그 기능상의 특징을 표2에 비교하였다[2].

3. 소듐-물 반응사고 해석모형 설정

소듐-물 반응시의 후반기 거동 해석은 장기간에 걸친 계통 거동 해석을 주된 목적으로 하므로 초기의 wave propagation 을 포함하는 초기(수 msec) 급격한 계통과도 현상 보다는 압력개방판(Rupture Disk) 파열 이후의 압력방출 배관계통에 대한 상대적으로 긴 시간동안(~수 sec)의 계통 거동 해석에 주안점을 둔다. 실제로 소듐-물 반응시 2 차계통 내부는 액체상의 소듐 및 수소기체의 혼합상이 존재하므로 2 상유동 모델이 필요하지만, 현상의 복잡성으로 인해 해석이 쉽지않고 wave propagation 의 영향이 감소하는 소듐-물 반응의 후기라는 점을 고려하여 본 분석에서는 계통의 gross motion 을 분석하기 위한 1 차원 해석 모형을 사용하여, 반응에 의해 생성되는 수소 기체와 액체 소듐은 완전히 분리되어 수소기체와 소듐의 경계면은 수소기체의 팽창에 의해 이동하면서 수소기체의 팽창에 의해 계통이 과압되는 형태의 단순 해석모형을 설정하였다. 이렇게 함으로써 수소기체와 소듐의 경계면 이동을 비교적 용이하게 추적하면서 계통의 사고 종료시점 등을 판단할 수 있는 장점이 있다. 이를 토대로, 소듐-물 반응사고에 대한 물리적 특성 및 기존 연구결과에서 사용한 접근 방법에 대한 검토 결과를 통해 현상 해석에 적절한 해석모형을 예비적으로 설정하였다. 이러한 단순 해석모형의 적용을 위해서는 몇 가지 중요한 가정이 필요하며, 본 연구에서는 해석모형의 설정 및 사용된 가정의 검증을 위한 타당성 평가를 수행하였다.

3.1 반응부위 모형 설정

증기발생기 내부에서의 전열관(tube) 파손으로 인한 소듐과 물의 급격한 발열반응으로 인해 많은 양의 수소기체와 에너지가 생성되며, 이러한 반응은 물리적/화학적으로 매우 복잡한 양상을 나타내므로 반응모형 설정을 위해서는 적절한 가정이 필요하다. 실제로 반응 부위를 통해 누출되는 물/증기는 고압의 전열관측과 상대적으로 저압인 소듐측의 압력차로 인해 jet 형태의 누출이 나타나며 jet 주위에 반응에 의해 생성되는 수소 기포가 무수히 분포하게 된다. 하지만, jet 형태의 물/증기 누출은 증기발생기 전열관 다발(tube bundle)에서 인접 전열관에 대한 손상을 유발할 수 있고 그렇게 되면 여러 개의 전열관에서 발생하는 현상을 종합적으로 고려해야 하므로 해석에 많은 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 전열관의 양단 파단을 가정하여 유입되는 물/증기 전부가 매우 짧은 시간동안 순간적으로 소듐과 반응하는 것으로 설정하고, 반응현상 해석의 단순화를 위해 반응 초기에 전열관 파단으로 인해 누출되는 물/증기는 소듐과 반응하여 반응부위를 중심으로 많은 수의 작은 수소기포를 형성하고, 물 누출이 유지되면 수소 기포의 수는 매우 짧은 시간 동안 급격히 증가하여 반응 부위를 중심으로 수소기포의 군을 이루게 되어 가상의 단일 수소기포를 형성하는 것으로 가정하였다. 이 경우 계속적인 반응으로 생성되는 수소는 가상의 단일 수소기포 안으로 모여 기포 부피의 팽창에 의해 계통이 과압된다. 여기서, 각각의 수소기포가 계통의 압력에 미치는 영향과 동일 부피를 가진 가상의 단일

수소기포가 계통 압력에 미치는 영향은 서로 차이가 있을 수 있으나 일차적으로는 해석적 접근을 가능케 하기 위하여 모형설정 과정에 이러한 차이는 일단 무시하였으며, 이와 같은 단순화의 타당성은 추후 단순 해석모형을 이용한 분석결과와 실험결과와의 비교를 통하여 검증될 수 있다. 기포의 형성과 성장은 그림 1과 같이 반응 부위를 중심으로 이루어 지는 것으로 설정하였으며 이 경우 소듐과 물의 반응은 두가지로 고려할 수 있다. 그림 1(a)는 파손된 전열관을 통해 누출되는 물/증기가 수소 기포의 표면으로 모두 이동하여 표면적 만큼의 반응 면적을 통해 기포 경계면에서 생성되는 수소가 기포 내부로 유입되어 기포가 지속적으로 성장하는 모형이다. 이 모형에서는 생성되는 수소에 의해 기포가 성장하면서 그 반응면적 역시 같이 증가하여 생성되는 수소의 양은 증가하는 반응 면적에 비례하여 급격히 증가할 것이므로 지나치게 보수적인 결과를 예측할 가능성이 있다. 그림 1(b)는 파손된 전열관 단면적에 상응하는 반응면적을 통해 누출되는 물이 모두 소듐과 반응하는 것으로, 그림 1(a)에 비해 수소 기포의 성장에 따른 비현실적인 수소 생성률 예측의 가능성이 적고, 일정한 물 누출율의 경우에는 생성되는 수소의 양이 일정하므로 계통의 전체 압력에 대한 Source term으로써의 기능을 충실히 수행할 수 있다는 장점을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 순간 반응 모델에 의해 누출되는 물/증기는 모두 소듐과 반응하여 수소를 형성하며, 반응 면적은 전열관의 파손 면적으로 가정한 모델을 설정하였다. 소듐-물 반응시 계통의 압력 과도는 다음과 같이 요약할 수 있다.

$$\text{System Pressure} \propto \text{Volume of } H_2 \text{ Bubble}$$
$$\text{Volume of } H_2 \text{ Bubble} \propto H_2 \text{ Generation rate}$$
$$H_2 \text{ Generation rate} = f(\text{Leak rate, Reaction area})$$

이와 같은 해석모형 설정을 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다.

- 소듐과 물은 동일공간에 존재만 하면 그 반응이 순간적으로 일어나며(Instantaneous Reaction Model), 소듐상으로 유입된 물은 모두 소듐과 반응한다.
- 미반응의 물/증기는 반응 공간내에 존재하지 않으며, 따라서 수소 기포 내부에 수분은 존재하지 않는다.
- 반응시 생성되는 수소의 양은 물에서 수소로의 전환비(Conversion ratio)의 함수이다.
- 반응이 일어나는 동안, 즉 반응에 의해 수소기포가 생성되는 기간(수 msec)동안의 소듐의 유동은 없다.

3.2 반응부위 기포압력 분석

반응 부위에서 발생한 기포는 계통의 압력을 증가시키며 기포 내부의 성분에 의해 계통에 미치는 영향이 달라질 것으로 예상된다. 즉, 반응에 의해 생성된 수소 기포 내부에는 앞서 언급한 바와 같이 순간 반응 모델을 사용하여 기포 내부에 수분이 존재하지 않는 것으로 가정하였으나 수소기포와 소듐 상의 경계면에서 확산 또는 증발에 의해 기포 내부로 유입되는 소듐이 존재할 경우, 단일 기포에 대하여 각 성분의 분압에 의해 기포가 계통에 미치는 압력이 달라질

수 있으므로 기포가 수소의 단상으로만 이루어져 있다는 가정이 타당성을 갖기 위해서는 기포 내부로 유입되는 소듐의 분압이 수소의 분압에 비해 무시할 만한 수준임을 정량적으로 보일 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 발생되는 수소기체가 이상기체(ideal gas)라는 가정을 통해 기포내부의 소듐 존재 유무에 의한 기포의 압력 변화를 검토하였다. 일반적으로 기포의 성장은 시간의 함수로 주어지며, 기포가 생성되어 성장하는 과정 중의 어느 한 순간, 즉 pseudo-steady state에서의 기포의 상태를 기준으로 보면 기포의 압력, P_B 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_B = \sum P_i = RT \sum \frac{m_i}{V_B} \quad (1)$$

$$\therefore P(t) = P_o + \int_0^t \frac{dP}{dt} dt \quad (2)$$

증기발생기 내부의 전열관 부위에서 소듐과 물의 반응에 의해 생성되는 수소기포 내부에 존재할 것으로 예상되는 sodium vapor의 영향에 의한 수소기포 압력 변화 분석을 위해 앞선 단순 모형과 마찬가지로 다음 그림 2와 같은 세 가지의 수소기포 상태 모형을 설정하였다. 여기서, P_o 는 기포의 압력, T_B 는 기포 내부의 온도, V_B 는 기포의 부피를 의미한다. 그림 2(a)는 소듐-물 반응에 의해 증기발생기 내부에 기포가 생성되어 성장하는 과정에서의 수소기체 단일상으로만 구성되어 있는 기포의 상태를 나타낸 그림이다. 소듐과 물의 반응은 순간적으로 정지되어 기포 경계면에서는 어떠한 반응도 일어나지 않으므로 기포의 크기는 성장하지 않고 일정한 것으로 가정하여 나머지 두가지 경우와의 비교를 위한 기준 경우로 활용된다. 그림 2(b)는 소듐과 수소기포의 경계면을 통해 기상 소듐이 수소기체 내부로 유입되기 전 단계를 나타낸다. 즉, 기포는 증기발생기 shell측의 소듐 상과 접해 있으므로 소듐상과 기포간의 경계면을 통하여 증발/확산에 의해 기포 내부로 유입된 소듐이 기포 내부에 존재는 하지만 기포 내부에서는 증발/확산 등이 일어나지 않고 기포 내부의 수소 상과는 완전히 분리되어 존재하는 모형이다. 이 경우, 기포 경계면을 통한 소듐의 확산/증발에 의해 실제 기포 내부로 유입되는 소듐의 질량(m_{Na}) 만큼이 기포 내부에서 일정 부피를 점유하고 있는 것으로 가정하여 기포 내부에 존재하는 기체상 소듐의 증발/확산에 의한 영향을 수소 단상으로만 이루어진 기포압과 비교하기 위한 경우를 의미한다. 그림 2(c)는 그림 2(b)에서 기포 내부에 존재하는 것으로 가정한 소듐 질량, m_{Na} 가 모두 증발/확산하여 수소기포 내부에 소듐의 vapor와 수소기체가 균일하게 분포하는 상태를 나타낸 그림으로 수소와 소듐이 각각의 분압을 형성하는 상태를 나타낸다. 이 세 가지 경우 모두 기포의 온도(T_B)와 부피(V_B), 그리고 반응면을 통해 유입된 기포 내부의 수소 질량, m_H 는 동일하며, 각 상의 온도 역시 T_B 로 동일한 것으로 가정하였다. 또한, 수소를 포함한 모든 기체상은 이상기체로 가정하였으므로 그림 2(a), (b), (c)에 대한 기포 압력은 이상기체 방정식을 적용하여 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_o = \frac{T_B}{V_B}(m_H R_H), \quad P_1 = \frac{m_H}{V_B - V_{Na}} R_H T_B, \quad P_2 = \frac{T_B}{V_B}(m_H R_H + m_{Na} R_{Na}) \tag{3}$$

여기서, 그림 2(b)의 기포 내부는 순간 반응모델[1][3]에 의해 수소기체만이 존재하는 것으로 가정하였다. 그림 2(c)에서 기상 소듐과 수소기체가 차지하는 분압은 참고문헌[4]을 참조하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$1 = \frac{P_{H,2}}{P_2} + \frac{P_{Na,2}}{P_2} \tag{4}$$

여기서, 기포 내부에 존재하는 소듐 기체 상의 분압을 $\frac{P_{Na,2}}{P_2} = a$ 로 정의하면, 수소와 기상 소듐의 분압은 각각 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{Na,2} = aP_2 \tag{5}$$

$$P_{H,2} = (1-a)P_2 = \frac{T_B}{V_B}(m_H R_H) = P_o \tag{6}$$

$$\therefore P_2 = P_o + aP_2 \tag{7}$$

위의 관계를 통해 $P_2 > P_o$ 의 관계가 성립하며, 기포 내부에 수소기체와 기상 소듐이 공존하는 경우의 기포압, P_2 는 수소기체의 단상으로만 이루어진 경우의 기포압, P_o 에 비하여 aP_2 만큼 높은 압력을 나타내고, a 의 값이 작을 경우 기포 내부에 존재하는 기상 소듐이 기포압에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 가정하여 수소기체의 단상 기포로 간주할 수 있게 된다. 그림 2(b)의 기포압을 분석하기 위해 P_o 및 P_2 와 비교하여 P_o, P_1 및 P_2 의 관계를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$P_o = \frac{m_H}{V_H} R_H T_B, \quad P_1 = \frac{m_H}{V_B - V_{Na,Liq}} R_H T_B, \quad P_2 = \frac{m_H}{V_B - V_{Na,vap}} R_H T_B \tag{8}$$

따라서, $V_B > (V_B - V_{Na,Liq}) >> (V_B - V_{Na,vap})$ 이므로 기포압은 $P_o < P_1 < P_2$ 의 관계를 갖는다. 즉, 증기발생기(SG) shell 측에 존재하는 소듐에 의해 기포의 압력은 수소 단일 상으로 구성된 경우에 비하여 다소 높은 압력을 나타내게 된다. 정량적으로는 수소기체의 단일 상으로 구성된 기포와 기포 내부에 기상의 소듐이 존재하는 경우의 압력차는 aP_2 로 정의되며 이를 다음의 그림 3에 도시하였다. 그림에서와 같이 기포 내부의 소듐의 분압, a 가 매우 작다면, 기포 내부의 기상 소듐의 영향이 작아지므로 소듐-물 반응에 의해 증기발생기(SG) 내부에 존재하게 되는 수소기포는 수소의 단상으로 간주할 수 있으므로, 참고문헌[5]의 data를 참고로 기포 내부의 소듐 분압, a 를 계산하여 P_o 와 P_2 의 차이에 대한 분석을 수행하였다.

3.3 기포 내부의 소듐분압 계산

액체금속로 증기발생기의 손상된 전열관을 통한 물/증기의 누출로 인해 소듐상에 기포가 발생하여 성장하는 현상을 간략히 모사하기 위하여 그림 4와 같은 모형을 설정하고 기포 내부에 존재하는 기상 소듐의 분압을 계산하여 기포의 전체 압력에 미치는 영향을 분석하였다. 반응에 의해 생성된 기포는 소듐 상에 존재하므로, 그림 4(b)와 같이 기포와 소듐의 경계면을 통한 증발 또는 확산에 의해 기상의 소듐이 기포 내부로 유입될 수 있다. 따라서, 그림 4(a)의 기포를 그림 4(b)와 같이 높이와 기포-소듐 경계면의 면적이 각각 a 와 $4\pi a^2$ 인 수조 형태로 보면, 참고문헌[4]을 참고하여 경계면에서 기포 내부로 유입되는, 즉 수조의 소듐 자유표면에서 수소기체로 채워져 있는 상부로 유입되는 기상 소듐의 질량유속(mass flux)을 계산할 수 있다. 먼저, 수조 내부에서의 소듐과 수소기체가 이루는 경계면(1)에서의 기상 소듐의 분압은 기포의 온도(T_B)에서의 포화압력(saturation pressure)이고, 수조의 상부(2), 즉 기포의 중심부에서의 기상 소듐의 분압은 초기에는 수소로만 이루어져 있는 것으로 가정하였으므로 "0"이 된다. 따라서, 초기(time=0)의 1점과 2점에서의 소듐과 수소의 분압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{Na,1} = P_{Na,sat} \text{ at } T_B, \qquad \therefore P_{H,1} = P_B - P_{Na,1} = P_B - P_{Na,sat} \tag{9}$$

$$P_{Na,2} = 0, \qquad \therefore P_{H,2} = P_B - P_{Na,2} = P_B \tag{10}$$

소듐의 수소기포로의 질량확산률 및 소듐의 확산계수(Diffusion Coefficient), D_{Na} 를 다음 식으로 계산할 수 있다[4].

$$\dot{m}_{Na} = \frac{D_{Na} P_B M_{Na} A}{\bar{R} T_B (a_2 - a_1)} \ln\left(\frac{P_{H,2}}{P_{H,1}}\right) \tag{11}$$

$$D_{Na} = 435.7 \frac{T_B^{3/2}}{P_B (V_{Na}^{1/3} + V_{H_2}^{1/3})^2} \sqrt{\frac{1}{M_{Na}} + \frac{1}{M_{H_2}}} \tag{12}$$

여기서, D_{Na} 는 소듐의 확산계수, M_{Na} 와 M_{H_2} 는 각각 소듐과 수소의 분자량, $\bar{R}$ 은 일반기체상수, 그리고 V_{H_2} 와 V_{Na} 는 각각 수소와 소듐의 원자부피를 나타낸다[6]. 여기에 1, 2점에서의 분압과 상경계면 면적(A), 그리고 확산거리(a)를 식 (11)에 대입하면 기포 내부로 확산되는 소듐의 총 질량, m_{Na} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_{Na} = m_{Na,o} + \int_0^1 \dot{m}_{Na}\, dt = m_{Na,o} + \int_0^1 4\pi \frac{D_{Na} P_B M_{Na} a}{\bar{R} \cdot T_B} \ln\left(\frac{P_B}{P_B - P_{Na,sat}}\right) dt \tag{13}$$

여기서, $m_{Na,o}$ 는 초기에 기포 내부에 존재하는 기상 소듐의 총 질량이며 단위 시간당 질량 확산률을 1sec까지 적분하여 기포 내부에 존재하는 기상 소듐의 총 질량을 계산하였다. 소듐-물

반응사고시에는 수 msec 내에서 구형의 수소기포가 생성되고 성장하여 환상판형(Pan cake)으로 전환되므로 위 식의 적분구간 0~1sec는 상대적으로 매우 긴 시간이라 볼 수 있다. 따라서, 기포 내부로 유입되는 기상 소듐의 총 질량은 매우 보수적인 관점에서 계산되었다고 할 수 있다. 이를 이용하여 기포 내부의 소듐 분압은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\therefore \frac{P_{Na}}{P_B} = D_{Na} \cdot \frac{3}{a^2} \cdot \ln\left(\frac{P_B}{P_B - P_{Na,sat}} \right) \propto f(a, P_B, P_{sat}(at \quad T_B)) \tag{14}$$

따라서, 기포 내부의 소듐분압은 기포의 온도, 압력, 그리고 초기 기포크기의 함수로 주어지므로, SPIKE 코드의 계산조건 및 결과[5]를 이용하여 분석을 수행하였다. SPIKE 계산 결과는 반응 시작 후 0.03msec에서 기포압력, P_B는 0.4MPa, 기포온도, T_B는 701K, 그리고 기포의 직경은 1.0cm이며, 이를 활용하면 소듐분압은 기포의 총 압력, P_B의 약 0.19%를 차지하는 것으로 계산된다. 또한, 1msec가 경과한 후에는 기포압력, P_B는 2.9MPa, 기포온도, T_B는 1563K, 그리고 기포의 직경은 6.49cm이므로, 소듐의 분압은 기포의 총 압력의 약 5.8%를 차지하는 것으로 계산된다. 따라서, 기포는 반응 시작과 동시에 중간열전달 계통(IHTS)의 정상운전 중 압력인 0.3MPa 보다 약간 높은 압력으로 생성되며, 이 때의 기포는 99.8% 이상 수소로만 구성됨을 알 수 있다. 또한, 반응 시작 후 1msec 경과한 후에는 기포의 총 압력, P_B는 2.73MPa의 수소압력과 0.17MPa의 소듐압력으로 이루어지지만 약 95% 정도의 수소가 기포를 구성하고 있으므로 수소의 단상 기포와 큰 차이는 없는 것으로 간주할 수 있다. 이러한 계산은 앞서 언급한 바와 같이 기포의 온도, 압력 및 기포 크기의 함수이므로 기포의 조건 변화에 의한 민감도 분석을 수행하였다.

3.4 기포내부 소듐분압 민감도 분석

기포 내부의 소듐분압은 기포의 온도, 압력 그리고 크기에 영향을 받으므로 초기 기포의 조건 및 기포성장에 의한 조건 변화를 고려하여 기포 내부의 소듐의 분압을 계산하였다. 정상운전 중의 중간열전달계통(IHTS)의 압력은 3기압(0.3MPa)이므로[7], 증기발생기 shell측에서 발생하는 기포는 초기에 최소한 0.3MPa 보다는 높은 압력을 가질 것으로 예상된다. 따라서, 참고문헌[5]의 결과를 토대로 초기 기포의 압력을 0.5MPa 에서 5MPa 까지, 그리고, 온도는 증기발생기 shell측의 소듐 온도를 토대로 300°C에서 SPIKE 코드의 계산에 의한 기포 온도, 1300°C까지의 영역을 설정하였다. 또한, 증기발생기 내부에서 생성된 기포는 초기에 구형의 형태에서 기포가 성장함에 따라 그 크기가 증기발생기 내부의 직경과 같아지면 환상판형(Pan cake) 기포로 전환되는 것으로 가정하여, 구형 기포의 최대 반경($a_{\max}$)은 환상판형 기포로 전환되었을 때의 경계면 표면적을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$4pa^2 = 2 \times pR_{SG}^{\ 2} \qquad \therefore a_{\max} = \frac{R_{SG}}{\sqrt{2}} \tag{15}$$

여기서, R_{SG} 는 증기발생기의 내반경으로, 참고문헌[7]을 참조하면, 구형 기포의 최대 반경은 약 1m가 되므로 기포의 반경을 1cm에서 100cm 사이의 영역으로 설정하여 분석을 수행하였다. 그림 5는 참고문헌[5]의 결과를 인용하여 기포 압력을 2.95MPa로 고정하고 기포 온도 및 기포 크기 변화에 따른 소듐 분압을 나타낸 결과로 온도 증가에 따라 기포내부의 소듐분압은 증가하지만, 기포의 크기가 증가할수록 그 값은 감소함을 알 수 있다. 특히, 기포가 환상 판형으로 전환되는 시점에서는 기포 내부의 소듐 분압은 0.01% 미만으로 매우 작은 비율을 나타내고 있다. 그림 6은 반응 직후 1msec 경과시의 기포 직경인 6.49cm 일 경우의 기포압 증가에 따른 소듐분압을 비교한 그림으로 기포압이 증가할수록 기포 내부의 소듐분압은 감소하며, 기포의 온도가 증가할수록 소듐분압은 증가함을 알 수 있다. 이 경우 기포압이 낮을 경우, 온도 증가에 따른 기포 내부 소듐의 분압이 급격히 증가하거나 data가 나타나지 않는 것은 기포온도 증가에 따라 포화압력이 비례하여 증가하면서 기포압이 포화압력 보다 감소하여 기포 경계면에서의 소듐비등이 발생하기 때문으로 식 (14)에서 소듐의 비등은 계산되지 않는다. 그림 7은 기포가 성장하여 증기발생기 내부에서 환상판형(Pan cake type)으로 전환되는 시점에서의 기포 내부의 소듐분압을 분석한 그림으로, 앞선 계산에서와 같이 구형 기포의 직경이 1m일 경우에 대한 분석 결과이다. 이 경우, 기포 내부의 소듐분압은 그림 6과 유사한 경향을 보이지만 동일압력 범위에 대하여 기포 크기의 증가로 인해 작은 기포와 비교하여 1% 미만의 분포를 나타내고 있다. 따라서, 소듐-물 반응 사고시의 계통 후반기 거동 분석을 위한 본 연구의 가정은 타당성을 갖는 것으로 판단할 수 있으므로 다음의 그림 8과 같은 형태의 분석이 가능하다. 그림 8(a)는 반응부위에서 생성된 반경 "a"의 가상의 단일 수소기포가 반경 "R"을 가진 증기발생기 내부에서 성장하는 것을 모사한 그림이며, 그림 8(b)는 가상의 단일 수소기포가 성장하여 그 크기가 증기발생기의 내경에 가까워지면서 구형(spherical shape)에서 환상판형(Pan cake shape)으로 전환되는 시점을 나타낸다. 또한, 그림 8(c)는 환상판형으로 전환된 수소기포의 층(Layer)이 증기발생기 shell측 상류(upstream)와 하류(down stream)를 통해 성장하면서 계통 내부를 과압시키는 현상을 모사하고 있다. 그림 8의 모형은 실제 현상과는 다소의 차이가 있을 수 있으나 앞선 분석을 통한 모형 설정과정에서의 가정을 토대로 소듐-물 반응사고 후반기 계통 거동 해석을 위한 코드모형에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

소듐-물 반응사고시의 계통해석은 반응 직후의 초기 첨두압력 분석과 중/후반기의 장기간의 계통거동 분석으로 구분할 수 있다. 중/후반기 계통해석 기능을 가진 코드들은 분석 목적에 따라 각기 다른 가정을 통해 개발되었으며, 본 연구에서는 각 코드의 분석 목적과 가정들을 파악하여 액체금속로 계통에 적용할 반응모형 및 압력전파 모형 설정을 위한 적절한 가정을 세우고 이러한 가정의 타당성 평가를 수행하였다. 액체금속로 증기발생기의 소듐-물 반응시 생성되는 기포내부의 소듐분압, a 는 기포의 반경, 온도 및 기포압의 함수로 결정되며, 초기 압력파 생성 이후의 반응 후기라는 점을 고려하여 수소기포의 직경이 증기발생기 내경에 근접하여

환상 판형으로 전환되는 시점에서의 기포내부 소듐 분압을 계산하였다. 계산 결과, 기포내부의 소듐분압은 0.01% 미만으로 매우 작게 계산되므로 소듐-물 반응에 의해 생성된 수소 단상으로 구성된 기포가 축방향으로 팽창하면서 계통을 과압시키는 형태의 단순 해석모형을 설정하였다. 본 연구를 통해 개발되어 타당성이 평가된 수소기포 생성, 압력전파 및 계통과압에 관련한 예비 모형은 액체금속로 소듐-물 반응사고 후반기 계통거동 해석코드의 개발에 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. M.Hori, "Sodium/Water Reactions in Steam Generators of Liquid Metal Fast Breeder Reactors", Atomic Energy Review pp.707~778, 1980
2. "소듐-물 반응사고 후반기 거동 해석모형 예비평가", 한국원자력연구소, KALIMER팀 내부문서, FS300-ER-01 Rev.0/2001
3. "액체금속로 설계기술개발-소듐기술개발", 한국원자력연구소, KAERI/RR-2021/99, 최종보고서, 1999
4. J.P. Holman, "Heat Transfer", 6th ed., McGraw-Hill, Inc., 1986
5. "SWR 배관의 본 해석", 한국원자력연구소, KALIMER팀 내부문서, FS300-AR-03 Rev.0/1999
6. William D. Callister, "Materials Science and Engineering: an introduction", 3rd ed. Wiley, New York, 1994
7. "KALIMER Preliminary Conceptual Design Report", Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI /TR-1636/2000, Aug., 2000

표.1 물누출율에 따른 사고유형 분류

Micro leak	- Leak rate < 0.05g/sec - 재질의 부식특성 - Self-wastage 현상
Small leak	- 0.05g/sec < Leak rate < 10g/sec - single target-wastage - target material의 손상규모 - Wastage 방정식
Intermediate leak	- 10g/sec < Leak rate < 1~2 kg/sec - multiple target-wastage
Large leak	- 1~2 kg/sec < Leak rate - 대규모 누출로 인한 압력 및 열유동 현상 해석 - 증기발생기 안전성 평가 - Pressure increase . 초기 Spike 압력 평가 . 중/후반기 계통 거동 평가

Leak rate = f(type, capacity, other condition)
(the values for the MONJU steam generator)

표 2. 소듐-물 반응사고 후기 분석코드의 해석모델 비교

<table>
<tr><th colspan="2"></th><th>SWEPT</th><th>SWACS</th><th>SWAAM-LT</th><th>TRANSWRAP</th><th>HISTAM</th></tr>
<tr><td colspan="2">개발국(기관)</td><td>INDIA</td><td>일본(PNC)</td><td>미국(ANL)</td><td>미국(GE)</td><td>미국(GE)</td></tr>
<tr><td colspan="2">초기 압력 Spike</td><td>○</td><td>○</td><td>X</td><td>○</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2">Relief System</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td><td>X</td><td>○</td></tr>
<tr><td colspan="2">Water injection (leak) Model</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td><td>X</td></tr>
<tr><td colspan="2">Bubble dynamics</td><td>○</td><td>○</td><td>X</td><td>○</td><td>X</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Flow Model</td><td rowspan="2">Sodium</td><td>o 초기 :
1-D, 1-P,
압축성</td><td>o 초기 :
1-D, 1-P
압축성
Fluid hammer</td><td rowspan="2">o 후기 :
1-D, 1-P
비압축성
o 반응경계면 추적</td><td rowspan="2">o 1-D, 1-P,
압축성 유동
o wave propagation</td><td rowspan="2">o 1-D, 1-P,
o 비압축성</td></tr>
<tr><td>o 후기
1-D, 2-P,
비압축성</td><td>o 후기 :
비압축성
1-D, 2-P
(with slip)</td></tr>
<tr><td>Gas</td><td>o Ideal Gas Model
o Adiabatic Expansion
o 압축성</td><td>o Ideal Gas Model
o Isothermal Expansion
o 압축성</td><td>o Ideal Gas Model
o 1-D, 1-P,
o Adiabatic
o 압축성 : 국부적용</td><td>o 압축성
o 1-Phase
o Adiabatic Expansion</td><td>o 압축성
o 1&2-Phase
o Adiabatic Expansion</td></tr>
<tr><td colspan="2">후반기해석기능</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td><td>X</td><td>○</td></tr>
</table>

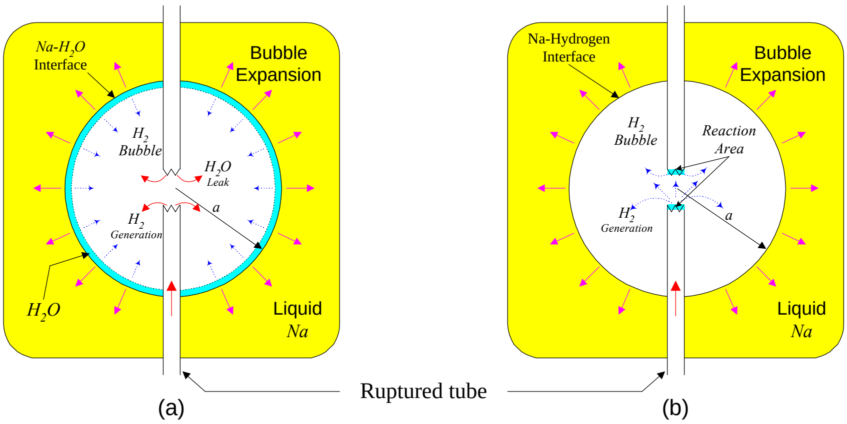

그림 1. 반응부위 수소기포 형성 모형

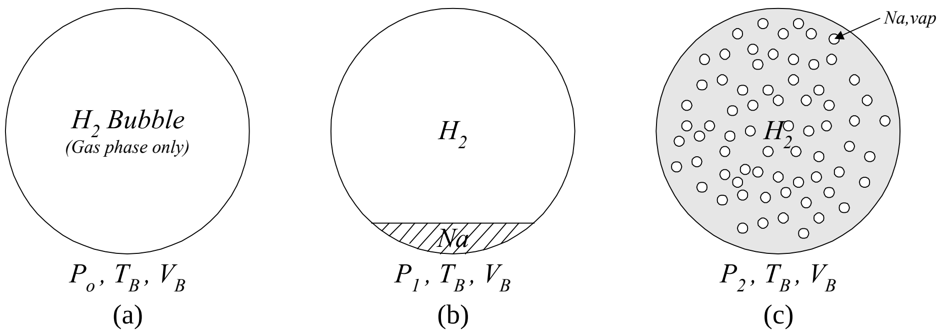

그림 2. 소듐-물 반응시의 수소기포 상태 모형

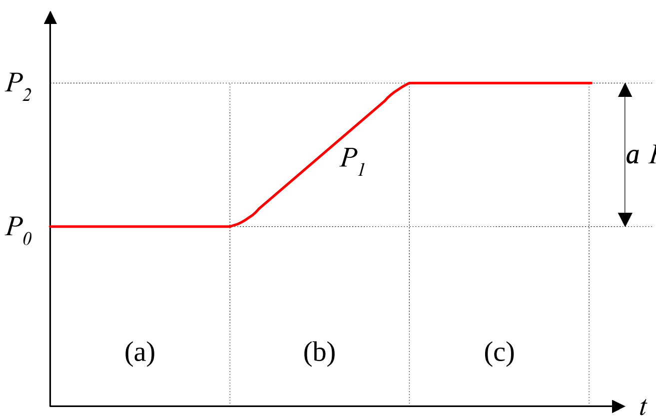

그림 3. 수소기포 상태별 기포압 비교

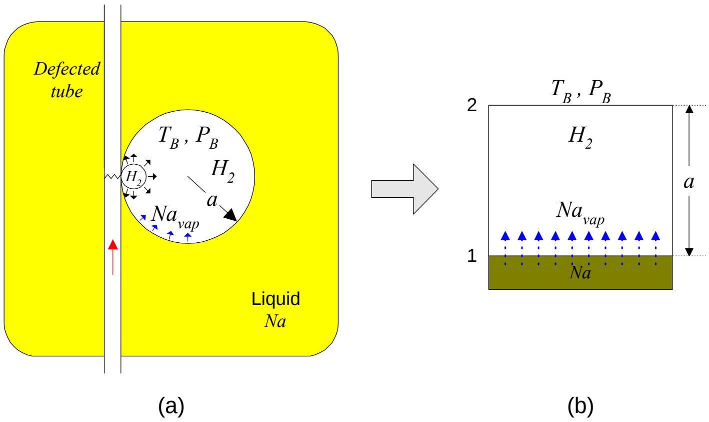

그림 4. 기포내부 소듐 분압 계산 모형

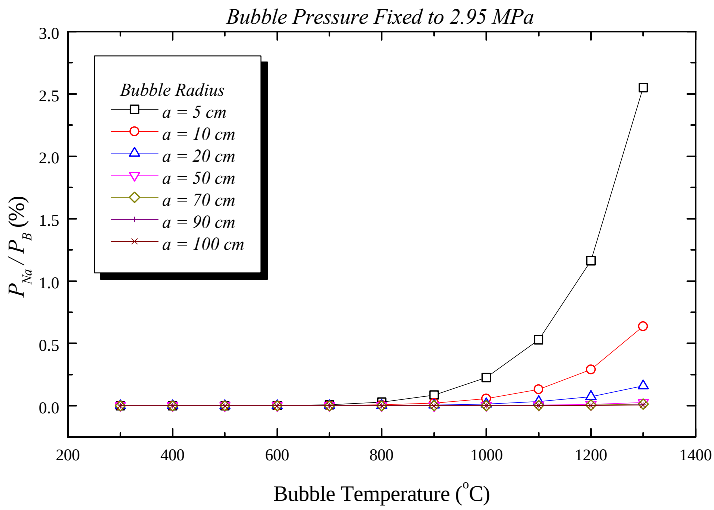

그림 5. 일정 기포압에서 생성되는 기포의 크기별 소듐분압 변화

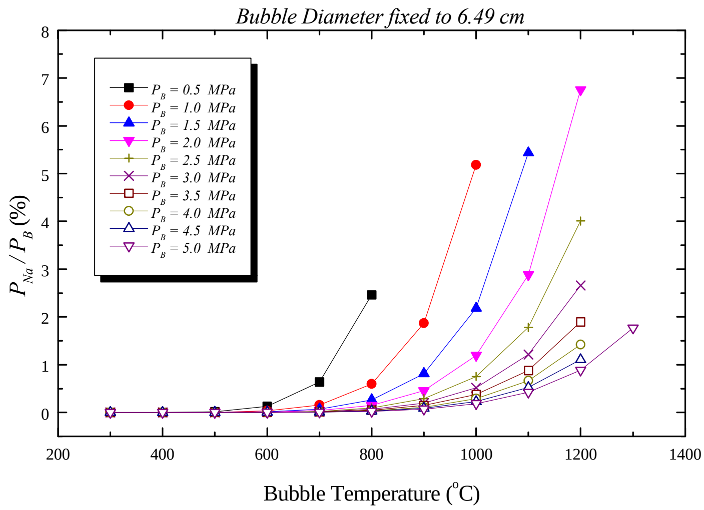

그림 6. 일정 기포크기에서 생성되는 기포의 압력별 소듐분압 변화

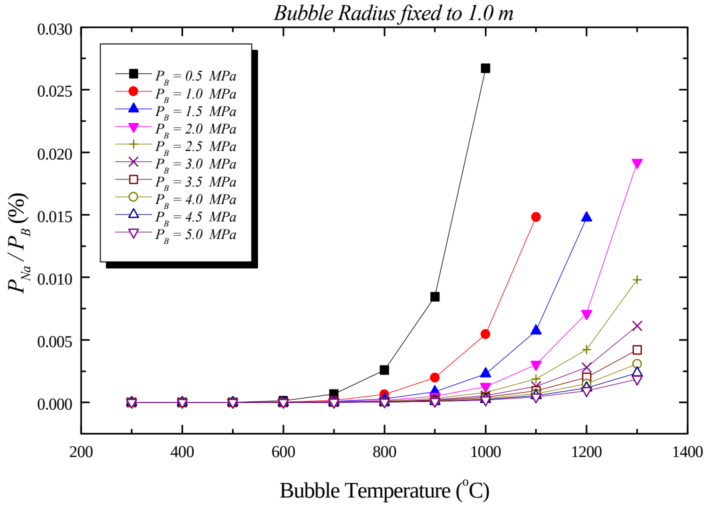

그림 7. 일정 기포크기에서 생성되는 기포의 압력별 소듐분압 변화

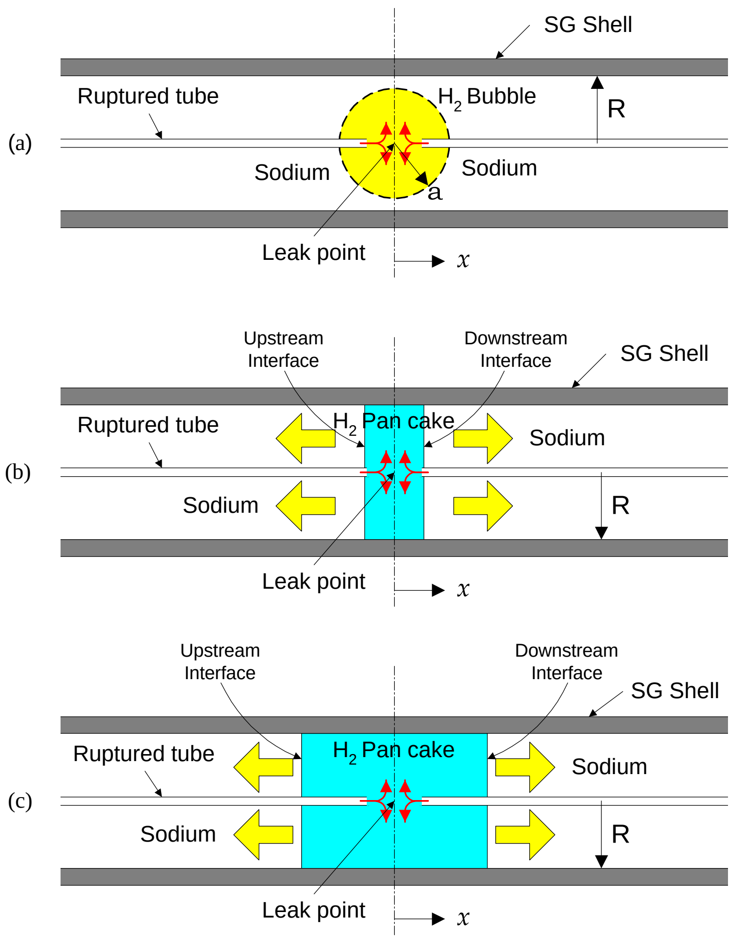

그림 8. 수소기포 성장에 따른 압력전파 모형