2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 소듐-물 반응사고 해석코드 준정상상태 반응모형 개선 연구

A Study on Improvement of the Quasi-steady Reaction Model for Analysis Code of a SWR in LMR

어재혁, 위명환, 김성오

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국형 액체금속로 KALIMER의 소듐-물 반응사고 준정상상태 계통과도 해석을 위해 개발된 전산코드, SELPSTA의 수소 생성량 계산을 위한 반응모형을 개선하고, 수소 생성량 계산에 가장 지배적인 영향을 미치는 반응빈도 상수의 민감도 분석을 수행하여 계통의 과도 압력변화 경향을 정량적으로 분석하였다. 소듐-물 반응시의 수소 생성량 계산은 반응빈도 상수의 함수로 표현되는 물/증기에서 수소기체로의 질량변환계수를 사용하여 개선하였으며, 이를 통해 몰단위 전환비의 함수로만 정의되어 있던 기존의 SELPSTA 코드 수소 생성량 계산 모형의 보수성을 현실화할 수 있음을 확인하였다. 또한, 소듐-물 화학반응시의 수소 생성량을 결정짓는 반응빈도 상수의 변화에 의한 계통 과도특성은 전열관으로부터의 물/증기 누출이 지속되는 기간에 한해서 그 영향이 나타나며, 이는 계통 과도를 유발하는 수소 생성량이 전적으로 전열관에서의 물/증기 누출률 변화에 의존하기 때문임을 확인하였다.

Abstract

In order to get the reasonable yield rate of hydrogen gas in a sodium-water chemical reaction, the reaction model associated with the hydrogen mass generation in SELPSTA code, which has been developed to analyze the quasi-steady system transient of a SWR event in KALIMER, is improved and sensitivity analyses using different reaction frequency constants (RFCs), which dominate the rate of hydrogen gas generation, are also performed quantitatively. Because the existing conservative reaction model, which adopts the steam-to-hydrogen molar conversion ratio for calculating the hydrogen gas generation, predicts very hign hydrogen gas generation, the analysis of system transient behavior has been overestimated. On the other hand the improved reaction model using the steam-to-hydrogen mass conversion factor expressed by a function of RFC makes the analysis of the system transient behavior reasonable by actualizing the mass generation of hydrogen gas in a SWR event. It is also confirmed that the major effects of the RFC change are appeared during the limited time period that steam injection is maintained since RFC variations totally depend on the water/steam leakage rate from heat transfer tubes to shell-side SG.

1. 서 론

고온의 액체소듐을 전열매체로 하여 2차측의 급수를 가열하는 KALIMER 증기발생기는 고온/고압의 급수측 물/증기가 전열관을 사이로 두고 상대적으로 저압인 shell측 액체소듐과 열교환을 하고 있으므로, 전열관(tube)의 결함이 발생하면 소듐과 물의 직접 접촉에 의한 발열반응으로 인해 많은 양의 수소가 생성되어 계통의 압력을 급격히 상승시키게 된다. 소듐-물 반응사고는 초기에 급격한 압력파 발생 및 전달 현상인 압력 전파단계(wave propagation stage)에서 반응 중/후기의 준정상상태에서는 반응 생성물 및 반응열의 계통내 유입량 증가로 인한 압력증가 현상인 매질이동단계(mass transfer stage)로 전환된다. 특히, 중/후반기 해석은 압력전파(wave propagation)를 포함하는 초기(수 msec) 급격한 계통과도 현상보다는 압력개방판(Rupture Disk) 파열 이후의 소듐-물 반응 압력방출계통(SWRPRS) 및 관련 배관계통 전체에 대한 상대적으로 긴 시간동안(~수 sec)의 계통 해석에 주안점을 둔다. 본 연구는 기 수행 연구의 일환으로써 소듐과 물의 화학반응시 생성되는 수소기체의 양을 계산하기 위해 물/증기에서 수소기체로의 질량변환 계수를 설정하여 중/후반기 해석코드의 수소생성모형을 현실화하고, 질량변환계수 계산에 직접적인 영향을 미치는 반응빈도상수에 대한 민감도 분석을 수행하여 반응 초기 및 중/후기 해석코드 입력인자 변화에 의한 계통의 압력변화 경향을 파악함으로써 소듐-물 반응사고 전 기간동안의 일관성 있는 해석을 가능케 하였다.

2. KALIMER 소듐-물 반응사고 해석

KALIMER의 소듐-물 반응사고 해석은 반응초기 압력전파단계(wave propagation stage) 해석을 위한 SPIKE 코드[1]와 중/후기 매질이동단계(mass transfer stage) 해석용 SELPSTA 코드[2]를 사용하여 수행한다. 이들 코드는 모두 전열관으로부터 누출되는 물/증기 누출량 및 소듐과 물의 반응에 의해 발생하는 수소생성량에 의해 계통과도를 계산하므로 전열관 누출모형과 수소생성모형이 코드의 가장 핵심적인 해석모형이라고 할 수 있다. 특히, SELPSTA 코드는 반응 초기의 급격한 압력 spike 이후, 장기간의 계통과도 해석을 목적으로 하므로, 초기조건으로 SPIKE 코드 계산결과를 활용하도록 개발되었다. 따라서, 반응 초기와 중/후기 계통 해석에 일관성을 부여하기 위해서는 기 수행연구[3]를 통해 설정된 바 있는 전열관 물/증기 누출모형과 더불어 수소생성모형 역시 반응초기 해석모형과의 일관성이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 반응 초기의 압력전파단계 해석용 SPIKE 코드[1]의 반응모형 분석을 통해 반응 중/후기 해석용 SELPSTA 코드의 수소생성모형을 개선하고, 반응빈도상수와 관련된 입력변수에 대한 민감도 분석을 수행하여 반응 초기 및 중/후기 계통의 압력변화 특성을 분석하였다.

2.1 SELPSTA 코드

소듐-물 반응(sodium-water reaction ; SWR) 사고 준정상상태(quasi-steady state) 해석을 위해 개발된 SELPSTA(Sodium-water reaction Event Later Phase System Transient

Analyzer) 코드[2]는 증기발생기 shell측 소듐에 대하여 비압축성(incompressible), 1차원 비정상 점성유동(one-dimensional unsteady viscous flow)을 적용하고, 증기발생기 상부의 cover gas와 소듐-배출 탱크의 비활성 기체는 이상기체(ideal gas)로 가정하여 이상기체 방정식을 적용한 해석모형을 사용하여 개발되었다. 또한, 소듐-물 반응사고 준정상상태(quasi-steady state) 계통 특성을 반영하여 압력개방판(Rupture disk) 파열 이후의 소듐 배출현상 및 물/증기측과 shell측 소듐이 격리되어 반응이 종료되는 사고 종료시점 계산기능을 포함하며, 반응 초기의 압력전파단계(wave propagation stage) 계산을 위해 기 개발된 SPIKE 코드[1]의 계산 결과를 계산 초기조건으로 활용함으로써 반응 초기 및 중/후기의 일관된 계통해석이 가능하도록 개발되었다.

2.2 수소생성모형

소듐과 물의 화학반응은 매우 복잡한 물리적 현상으로 여러가지 반응의 형태로 나타나며, 반응 생성물 역시 기체, 액체 및 고체의 다양한 형태로 존재한다. 이들 반응생성물 중 기체생성물의 대부분을 차지하는 수소는 소듐-물 반응사고 발생시 계통 열수력 거동에 가장 지배적인 영향을 나타낼 것으로 예상되므로, 소듐-물 반응 해석시에는 복잡한 물리적/화학적 현상으로부터 반응에 의해 생성되는 수소의 양을 계산하기 위한 적절한 수소생성모형의 설정이 필요하다. 현실적으로, 소듐과 물의 화학반응에 의해 생성되는 수소의 양을 정확히 계산하기는 매우 어렵다. 따라서, 대부분의 소듐-물 반응사고 해석코드의 수소생성모형은 전열관의 물/증기 누출량을 기준으로 물/증기에서 수소기체로의 전환비(conversion ratio)를 사용하여 수소의 양을 계산하는 개념이 일반적으로 사용되며, 이러한 전환비는 소듐-물 화학반응의 반응계수 계산을 통해 설정된다[4]. SPIKE 코드나 SELPSTA 코드의 수소생성모형과 관련된 화학반응 계수로는 물에서 수소기체로의 몰단위 전환비(steam to hydrogen molar conversion ratio) 및 질량변환계수(mass conversion factor) 등이 있으며, 특히 반응에 의해 생성되는 수소기체의 질량 계산에 직접적으로 사용되는 질량변환계수는 다양한 소듐-물 화학 반응식에 근거하여 계산되는 반응빈도상수(reaction frequency constant)에 의해 결정된다.

2.3 소듐-물 반응빈도상수 계산

증기발생기 전열관측 물/증기의 누출에 의해 발생하는 소듐과 물의 반응현상은 다양한 화학반응 형태를 나타낸다. 이들 화학반응 중에서 가장 주된 반응은 식 (1)의 형태로 나타나며, 식 (1)의 화학반응 이후에도 식 (2) 및 (3)의 형태로 전열관 물/증기 누출에 의한 지속적인 화학반응이 일어난다[4].

$$Na + H_2O \rightarrow NaOH + \frac{1}{2}H_2 \tag{1}$$

$$Na + \frac{1}{2}H_2 \rightarrow NaH \tag{2}$$

$$Na + NaOH \rightarrow Na_2O + \frac{1}{2}H_2 \tag{3}$$

이들 화학반응 중, 반응에 참여하는 여분의 소듐이 충분히 존재하고 소듐의 온도가 320°C 이상으로 유지되는 경우에는 식 (1)과 식 (3)의 화학반응을 합성하여, 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다[5].

$$2Na + H_2O \rightarrow Na_2O + H_2 \tag{4}$$

실제로 증기발생기 내부에서의 소듐-물 반응은 물리적/화학적으로 매우 복잡한 현상이며, 반응부위 및 반응과정에서 외부적인 요인에 의해 많은 영향을 받게 되므로 위의 다양한 화학반응 중에서 어떤 반응이 일어날지는 정확히 예측할 수 없으나, 다양한 연구를 통해 주로 식 (1) 및 식 (4)와 같은 2가지 형태의 화학반응이 경쟁적으로 일어난다고 알려져 있으므로[4][5], 소듐-물 반응사고 해석은 주로 식 (5)와 같은 형태의 반응에 대해 이루어지고 있다.

$$\begin{array}{lllll} 2Na & + H_2O \rightarrow & Na_2O & + H_2 & \beta \\ Na & + H_2O \rightarrow & NaOH & + 1/2H_2 & 1-\beta \end{array} \qquad (0 \le \beta \le 1) \tag{5a}$$

$$(1+\beta)\,Na + H_2O \rightarrow \beta\,Na_2O + (1-\beta)\,NaOH + 1/2(1+\beta)\,H_2 \tag{5b}$$

여기서, β 는 반응빈도상수(reaction frequency constant)로 0에서 1 사이의 값을 갖는다. 즉, 식 (5a)의 두가지 반응을 통해 생성되는 수소의 양이 서로 다르므로 이 두가지 반응에 대하여 수소 생성량을 적절히 계산하기 위하여 반응빈도상수를 도입하였다. 식 (5a)의 두가지 반응을 반응빈도상수, β 를 이용하여 단일 반응식으로 나타내면 식 (5b)와 같이 표현되며, 이 반응식에서 알 수 있듯이 물 1 mole을 기준으로 반응에 참여하는 각각의 반응물과 생성물을 mole 단위로 비교하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{cases} H_2 & : \ 1/2 \cdot (1+\beta) \\ Na_2O & : \ \beta \\ NaOH & : \ (1-\beta) \\ Na & : \ (1+\beta) \end{cases} \tag{6}$$

여기서, $NaOH$, Na_2O, Na 등의 고체 및 액체 생성물은 H_2와 같은 기체 생성물에 비해 상대적으로 반응시의 계통 열수력 거동에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다. 따라서, 계통 압력거동에 주된 영향을 미치는 수소기체의 생성량에 대한 화학양론적 반응상수(stoichiometric reaction constant), α 를 이용하면 식 (6)의 반응빈도상수(β)는 식 (7)과 같이 계산된다.

$$\beta = 2\alpha - 1 \tag{7}$$

여기서, α 는 소듐과 물의 화학반응시 생성되는 수소의 양을 계산하기 위한 일종의 mole 단위 전환상수(molar conversion factor)로 현재까지 실험을 통해 발표된 해외논문 [4][5][6]을 참조하면 물 1mole당 0.7mole의 수소가 생성하는 것으로 보고되고 있으므로, 반응빈도상수(reaction frequency constant), β 는 식 (7)에 의해 0.4가 된다.

2.4 SELPSTA 코드 수소생성모형 개선

소듐-물 반응시 생성되는 수소기체의 질량은 전열관의 물/증기 누출유량을 토대로 계산되며, 물/증기에서 수소기체로의 질량변환계수는 앞서 계산된 반응빈도상수를 이용하여 계산된다. 즉, 식 (6)의 관계를 이용하여 반응에 참여하는 각 반응원소와 생성원소의 양을 질량기준으로 나타내면, 물에서 수소로의 질량단위 전환계수 (steam to hydrogen mass conversion factor)는 식 (8)과 같이 표현된다. 식에서 M 은 각각의 반응물 및 생성물의 분자량을 의미한다.

$$\begin{cases} C_{mass,H_2} &= \frac{1}{2}\cdot(1+\beta)\cdot\frac{M_{H_2}}{M_{H_2O}} = \alpha\cdot\frac{M_{H_2}}{M_{H_2O}} \\ C_{mass,Na_2O} &= \beta\cdot\frac{M_{Na_2O}}{M_{H_2O}} = (2\alpha-1)\cdot\frac{M_{Na_2O}}{M_{H_2O}} \\ C_{mass,NaOH} &= (1-\beta)\cdot\frac{M_{NaOH}}{M_{H_2O}} = 2\cdot(1-\alpha)\cdot\frac{M_{NaOH}}{M_{H_2O}} \\ C_{mass,Na} &= (1+\beta)\cdot\frac{M_{Na}}{M_{H_2O}} = 2\alpha\cdot\frac{M_{Na}}{M_{H_2O}} \end{cases} \quad (8)$$

식 (7)에 의해 계산된 반응빈도상수(β)를 식 (8)에 대입하면 물/증기에서 수소기체로의 질량변환계수(C_{mass,H_2})는 약 0.08이 된다. 즉, 소듐과 물의 화학반응에 참여하는 반응물을 질량 단위로 계산하면, 물 1g은 약 1.79g의 소듐과 반응하여 약 0.08g의 수소를 발생시키는 것으로 계산된다. 따라서, SELPSTA 코드 계산시 반응에 의해 생성되는 수소기체의 질량은 물/증기에서 수소기체로의 질량변환계수(C_{mass,H_2})를 이용하여 식 (9)와 같이 계산되며, 질량 변환계수는 물/증기에서 수소기체로의 몰단위 전환비(molar conversion ratio), α 의 함수로 입력되도록 모형화 하였다. 식에서, $\dot{m}_{PRH}$ 와 $\dot{m}_{leak}$ 은 각각 반응에 의해 단위 시간당 생성되는 수소질량과 전열관으로부터 누출되는 물/증기의 누출유량 (leak rate)을 의미한다.

$$\dot{m}_{PRH} = C_{mass,H_2}\cdot\dot{m}_{leak} = \alpha\cdot\frac{M_{H_2}}{M_{H_2O}}\cdot\dot{m}_{leak} \quad (9)$$

식 (9)의 수소생성모형은 물/증기에서 수소기체로의 질량변환계수에 의해 수소 생성량을 계산하지만, 기존 SELPSTA 코드 수소생성모형은 질량변화계수가 물/증기와 수소기체 간의 몰단위 전환비(molar conversion ratio)만의 함수로 정의되어 있으므로, 두 모형간의

수소생성률(hydrogen generation rate)은 결국 식 (10)의 관계를 갖는다. 식에서, 하첨자 "current" 및 "previous"는 각각 SELPSTA 코드의 개선된 수소생성모형과 기존의 모형을 의미한다.

$$\dot{m}_{PRH,current} = \left(\frac{M_{H_2}}{M_{H_2O}} \right) \cdot \dot{m}_{PRH,previous} \tag{10}$$

3. 기존 수소생성모형과의 비교

본 연구를 통해 설정된 수소 생성모형은 물/증기에서 수소기체로 전환되는 질량단위 전환상수를 사용함으로써 기존 모형에서 계산하는 과도한 수소 생성량을 현실화시킬 수 있다. 그림 1은 본 연구를 통해 설정된 수소생성모형의 개선 전/후에 대한 SPIKE 및 SELPSTA 코드 계산 결과를 나타낸 그림이다. 그림 1(a)는 동일한 물/증기 누출률에 대한 기존 모형과 새로운 모형 간의 과도기 수소 발생량 변화를 도시한 그림으로, 기존의 수소생성 모형은 식 (9) 및 식 (10)의 관계와 같이 새로운 모형에 비해 약 9배 많은 수소 발생량을 계산하고 있음을 보여주고 있다. 그림 1(b)는 이와 같은 두 모형간의 수소 발생량 차이에 대한 계통의 과도기 압력변화 경향을 도시한 그림이다. 그림에서와 같이 기존 모형은 현재 수소생성 모형과 비교하여 과도한 수소 발생량을 계산하므로 계통의 급격한 압력증가를 초래하여 압력개방판(rupture disk)이 약 0.4초 빨리 파열되고, 압력개방판 파열 이후에도 지속적으로 과도한 양의 수소기체 발생으로 인해 급격한 2차 압력 상승 경향을 나타낸다.

이와는 반대로 질량단위 변환계수를 사용하는 새로운 수소생성 모형은 수소 생성량을 현실화하여 압력개방판(rupture disk) 파열 이후에 2차 압력상승이 나타나긴 하지만 기존의 보수적 수소생성 모형에 비해 압력 상승폭이 상당히 작게 나타나므로 두 모형 간에 서로 다른 압력 거동을 나타내고 있음을 확인하였다. 하지만, 수소의 생성량은 전적으로 물/증기의 누출량에 의존하므로 두가지 모형 모두 전열관 물/증기 누출이 종료되는 시점부터는 거의 동일한 압력 거동을 나타내었다. 따라서, 본 연구를 통해 설정된 수소생성 모형은 질량단위의 전환상수를 사용함으로써 보다 정확하고 현실성 있는 계산 결과를 얻을 수 있으며, 반응 초기의 SPIKE 코드 반응모형과 일관성을 유지함으로써 향후 소듐-물 반응사고 초기 및 중/후기 통합 해석에도 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 소듐-물 반응빈도상수 민감도 분석

소듐-물 반응에 의해 생성되는 수소기체의 질량은 물/증기에서 수소기체로의 질량변환계수(mass conversion factor)에 의해 계산되며, 질량변환계수는 식 (8)에서와 같이 반응빈도상수(reaction frequency constant)의 함수로 주어진다. 따라서, 계통의 열수력 거동에 가장 지배적인 영향을 나타내는 수소기체의 생성질량은 결국 반응빈도상수에 의해 결정된다고 할 수 있으므로, 본 절에서는 소듐-물 반응빈도상수의 민감도 분석을 수행하여

해석코드의 반응계수 입력변화에 의한 계통의 압력 특성변화 경향을 파악하였다. 반응빈도상수 변화에 의한 반응 초기와 중/후기의 전반적인 계통특성 변화 분석을 위해 SPIKE와 SELPSTA 계산을 각각 수행하였으며, 민감도 분석 대상 인자인 반응빈도상수는 해석의 적용성 확장을 위해 기준 값인 0.4를 기준으로, 0.5와 0.6까지 변화시키면서 계통의 압력변화를 분석하였다. 반응빈도상수 민감도분석을 위한 계산 case 번호와 물/증기에서 수소기체로의 mole 단위 전환비(steam to hydrogen molar conversion ratio)를 정리하여 표 1에 제시하였다.

그림 2는 SPIKE 코드[1]를 사용하여 소듐-물 반응사고시의 반응 초기 압력파 전파단계의 정상상태를 계산한 결과로, 초기 30초간의 정상상태 계산을 통해 얻은 결과를 Restart file에 저장하여 SPIKE 코드 과도계산을 위한 초기조건으로 설정하고 이를 토대로 과도해석을 수행하였다. 그림 3은 반응빈도상수 변화에 의한 반응 초기 계통 압력거동을 도시한 그림으로, cover gas 영역과 압력개방판 설치 배관(rupture disk line) 모두 1% 미만의 차이만을 나타내는 것으로 계산되었으며, 그림 4의 반응영역 기포 압력거동에서도 큰 영향은 나타나지 않는 것으로 분석되었다. 이는 반응 초기의 압력전파단계의 특성상 반응에 의해 생성되는 수소기체의 양이 계통 압력거동에 지배적인 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그림 5와 6은 각각 반응초기 계산 결과를 토대로 질량 유입효과가 나타나는 준정상상태(quasi-steady state)의 수소 생성량 및 계통 압력거동을 반응 초기 계산결과를 포함하여 도시한 그림이다. 그림 5에서와 같이 반응빈도상수의 증가로 인해 수소생성량의 증가가 나타나지만, 전열관측 급수격리가 시작되는 시점부터는 그 차이가 현저히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 반응에 의한 수소기체의 생성이 전열관 물/증기 누출량의 함수이기 때문으로, 급수측 반응요인 차단에 의해 전열관 물/증기 누출이 차단되는 약 90초경[7] 이후로는 반응빈도상수 변화에 의한 영향이 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

그림 6은 반응빈도상수 증가에 의한 계통 평균압력 변화를 도시한 그림으로, 반응 초기 압력전파단계(wave propagation stage)에서는 거의 나타나지 않던 반응빈도상수 변화의 영향이 중/후기 질량유입효과(mass transfer effect)가 나타나는 시점부터는 상대적으로 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 반응 초기의 압력전파단계(wave propagation stage)에서는 소듐과 물의 화학반응 속도에 의한 압력파의 전파가 주요 계통과도 원인으로 작용하므로 반응에 의해 생성되는 수소의 질량이 큰 영향을 미치지 않는 반면, 반응 초기 압력전파 단계 이후의 준정상상태 매질이동단계(mass transfer stage)에서는 반응에 의해 생성되는 수소질량과 반응에너지가 계통 과도의 주된 원인이 되므로 반응초기와 비교하여 상대적으로 활발한 영향이 나타나는 것으로 판단된다. 정량적으로는 반응빈도상수가 25% 증가하는 경우, 수소생성량 증가에 의한 계통 압력의 급격한 증가로 인해 압력개방판(rupture disk)의 파열 시간이 약 17% 정도 단축되는 것으로 분석되었으나, 증기발생기 shell측 소듐 배출에 의한 소듐측 반응요인 격리시간은 약 0.2% 정도 단축되는데 불과해

반응빈도상수의 변화가 증기발생기 shell측 소듐 방출 등에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 수소생성량을 결정짓는 반응빈도상수의 변화가 전열관측 반응요인의 격리 시점인 약 1분 내외에 한해서만 계통의 압력거동에 영향을 미칠 뿐이며, 전열관에서의 물/증기 누출이 중단되는 약 90초 이후에는 수소생성이 중단되므로 shell측 소듐 방출 등을 포함하는 준정상상태(quasi-steady state)의 계통 거동에는 그 영향이 나타나지 않기 때문으로 판단된다. 이와 같은 분석 결과를 표 2에 정리하여 제시하였다.

본 분석을 통해 반응에 의한 수소생성량을 결정짓는 반응빈도상수(reaction frequency constant)의 변화는 초기 압력전파단계(wave propagation stage) 보다는 중/후기의 질량유입효과(mass transfer effect)가 나타나는 시점에서 주된 영향을 미치며, 전열관으로부터의 물/증기 누출이 지속되는 동안에 한해서 그 영향이 나타남을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 소듐-물 반응사고 중/후반기 계통해석을 위해 개발된 SELPSTA 코드의 수소생성 모형을 전열관 누출에 의한 물/증기 누출질량에서 수소기체로의 질량변환계수를 사용하여 개선하고, 기존 모형과의 비교 평가를 수행하여 기존 해석모형의 과도한 보수성을 상당히 완화시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 계통의 열수력 거동에 가장 지배적인 영향을 나타내는 수소기체의 생성질량은 결국 반응빈도상수에 의해 결정되므로, 반응빈도상수의 민감도 분석을 통해 해석코드의 반응계수 입력변화에 의한 계통의 압력변화 경향을 분석하였다. 분석 결과, 반응 초기의 압력전파단계(wave propagation stage)에서는 소듐과 물의 화학반응 속도에 의한 압력파의 전파가 주된 계통과도 원인으로 작용하므로 반응빈도상수에 의해 결정되는 수소생성량 변화는 계통의 압력과도에 큰 영향을 미치지 않는 반면, 초기 Spike 압력 이후 지속적인 반응에 의해 발생하는 2차 압력상승을 포함하는 준정상상태에서는 반응에 의해 생성되는 수소 질량과 반응 에너지가 계통 과도의 주된 원인이 되므로 반응 초기에 비해 상대적으로 활발한 영향이 나타남을 확인하였다. 또한, 소듐-물 반응 중/후기 매질이동단계(mass transfer stage)에서의 반응빈도상수의 변화는 전열관 물/증기 누출이 지속되는 기간동안만 수소 생성량 변화에 영향을 미치므로, 반응요인이 차단되는 시점 이후에는 계통의 과도 거동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 본 연구에서 수행한 소듐-물 반응사고 중/후기 해석코드의 수소생성모형 개선 및 반응빈도상수의 민감도분석 결과는 향후 반응 초기 및 중/후기 통합해석 전산체제 구축에 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 박진호 외, "소듐-물 반응 해석을 위한 SPIKE 코드 개발", KAERI/TR-1123/98, Korea Atomic Energy Research Institute, 1998
2. 어재혁 외, "KALIMER 소듐-물 반응사고 중/후반기 해석코드 개발", 한국 원자력학회, 2002 춘계학술발표회, 2002
3. 어재혁, "소듐-물 반응사고 중/후반기 전열관 물/증기 누출모형 설정 보고서", 한국원자력연구소, KALIMER 팀 내부문서, LMR/FS300-CN-01 Rev.0, 2002
4. M. Hori, "Sodium/Water Reactions in Steam Generators of Liquid Metal Fast Breeder Reactors", Atomic Energy Review - Austria, 18[3], pp.707~778, 1980
5. A.K. Rajput, "Pressure Transients Resulting from Sodium-Water Reaction Following a Large Leak in LMFBR Steam Generator", Reactor Research Centre, Kalpakkam, India
6. P. Selvaraj, G. Vaidyanathan and S.C. Chetal, "Review of Design Basis Acci dent for Large Leak Sodium-Water Reaction for PFBR", Nuclear System Division, Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Kalpakkam, India

표 1. 반응빈도상수 민감도 분석표

분석 경우수	α	β	Relation
기준	0.70	0.4	$\beta = 2\alpha - 1$
1	0.75	0.5	
2	0.80	0.6	

α : steam to hydrogen molar conversion ratio
β : reaction frequency constant

표 2. 반응빈도상수 민감도 분석 결과

Case No.	Maximum H_2 Production rate [kg/sec], (% diff.)	Rupture Disk bursting time [sec], (% diff.)	Shell side isolation time [sec], (% diff.)
Ref.	1.68 (-)	1.989 (-)	297.44 (-)
1	1.80 (+7.2)	1.656 (-16.7)	296.91 (-0.2)
2	1.92 (+14.4)	1.267 (-36.3)	296.22 (-0.4)

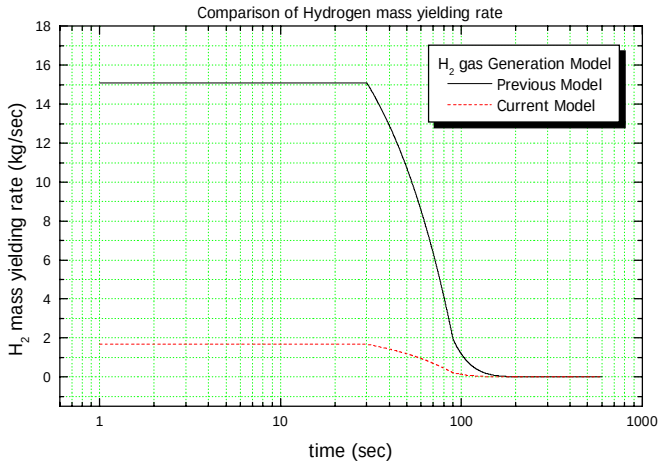

그림 1(a). 수소생성모형 비교 (수소생성률)

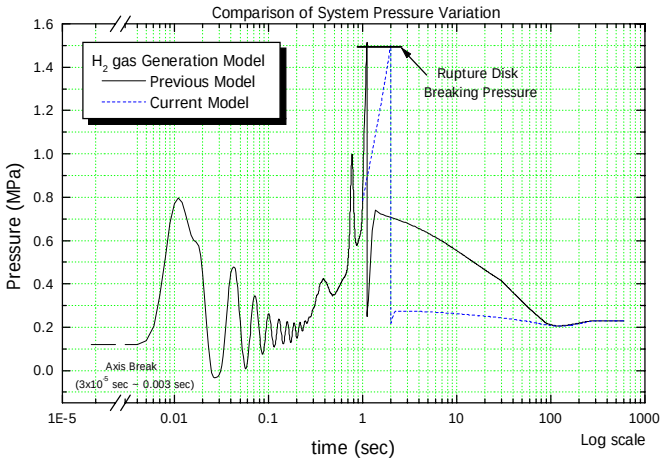

그림 1(b). 수소생성모형 비교 (계통 압력변화)

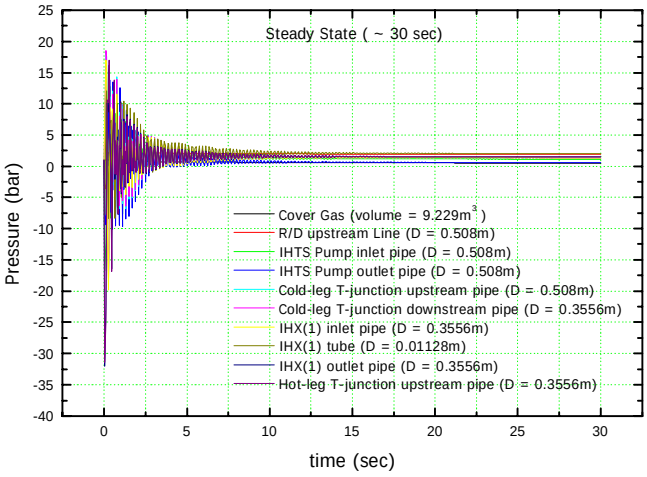

그림 2. SPIKE 코드 정상상태(steady-state) 계산

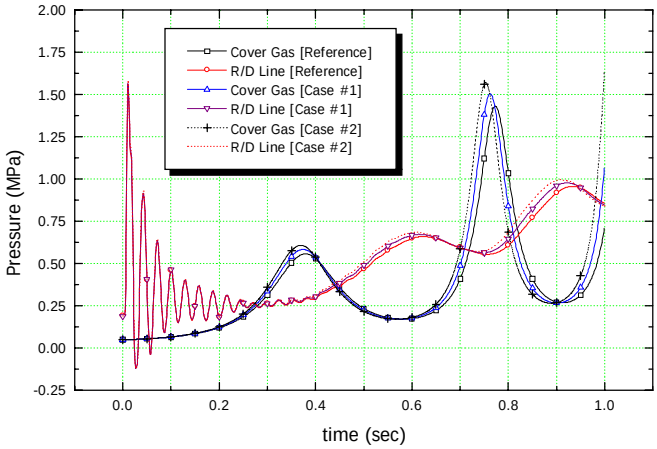

그림 3. 반응빈도상수 변화에 의한 CG 및 R/D Line 압력변화 비교

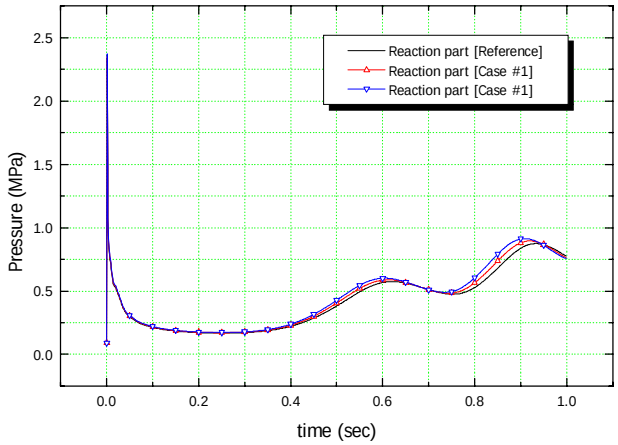

그림 4. 반응빈도상수 변화에 의한 반응영역 압력변화 비교

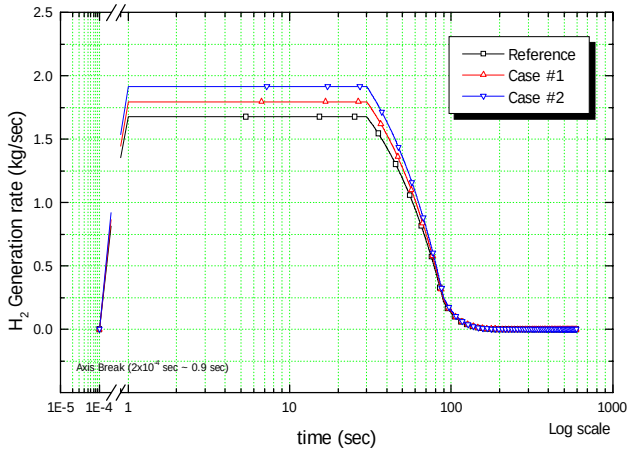

그림 5. 반응빈도상수 변화에 의한 수소생성량 변화 비교

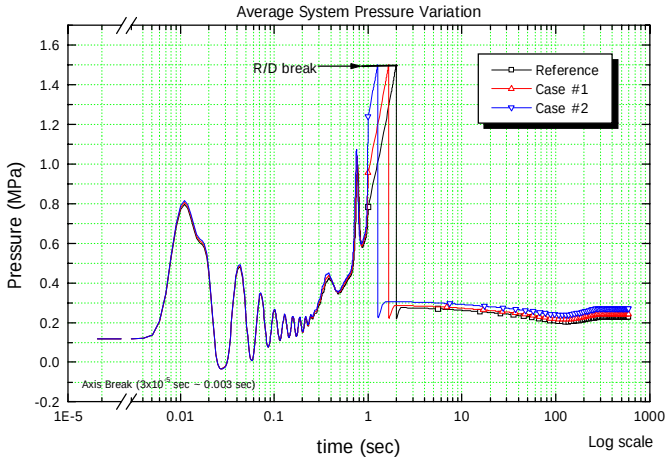

그림 6. 반응빈도상수 변화에 의한 중/후기 계통 평균압력 변화 비교