

TROI 실험결과를 활용한 원자력발전소 중대사고시 노외 증기폭발 하중평가

박익규[†] · 김중환* · 민병태*

(2008년 7월 9일 접수, 2009년 6월 24일 수정, 2009년 6월 24일 심사완료)

An Evaluation of the Ex-vessel Steam Explosion Load Against TROI Experimental Results

Ik-Kyu Park, Jong-Hwan Kim and Beong-Tae Min

Key Words : TROI(TROI 실험), Steam Explosion(증기폭발), TEXAS-V(TEXAS-V 코드), Ex-Vessel(노외)

Abstract

The TEXAS-V code tuned for TROI-13 was used for analyzing the parametric findings in TROI experiments. The calculations on the melt composition are relatively similar to the TROI experimental results. The water depth effect in TEXAS-V code seems to be consistent with TROI experiments in some degree. The water area effect of TEXAS-V calculations seems not to be harmonious to that in TROI experiments. This seems to indicate that TEXAS-V as 1-dimensional code or as the numerical steam explosion has a limitation on estimating area effect. Thus, TEXAS-V tuned for TROI-13 seems to have an ability to estimate the parametric effect of TROI experiments. The evaluated TEXAS-V was used for estimating the ex-vessel steam explosion load. The calculated explosion pressure and load were about 40 MPa and 75 kPa.sec, which are not much threatening level for containment integrity.

1. 서론

용융물-냉각수 반응은 때때로 급격한 열전달로 인한 파괴적인 충격파를 동반하는 증기폭발을 발생시킬 수가 있다.⁽¹⁾ 그래서, 증기폭발에 대한 많은 실험적 연구 및 해석적 연구가 진행되어 왔다.^(2,3) 증기폭발에 대한 실험 연구로 많은 현상들이 규명되었으나, 실제 원자로 물질의 폭발성과 열에너지의 기계적 에너지로의 변환률 등 아직도 해결되지 않는 문제들이 있다.⁽⁴⁾ 한국원자력연구원에서는 이러한 실제 원자로 물질에 대한 문제를

해결하기 위하여 원자로 물질의 다양한 조성을 사용한 TROI 실험을 수행하고 있다.⁽⁵⁾

실험적인 연구가 스케일링 문제 등에 있어서 원자로에 직접 적용하기는 어렵기 때문에 해석적인 연구도 수행되었다. TEXAS-V 코드⁽⁶⁾를 포함한 여러 증기폭발 해석코드가 실험적인 관찰을 근거로 하여 개발되었다.⁽⁷⁾ 그러나, 최근의 TROI 실험 연구에서는 물질 효과 등 몇 가지 특이할 만한 결과들을 발견하였다. 이러한 결과들은 증기폭발 해석코드로 원자로 경우를 해석하기 전에 반영되는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 TROI 실험에서 관측된 몇 가지 중요한 점을 검토하고 TEXAS-V 코드와 TROI-13 실험에 근거하여 TROI 실험의 관측 사항을 민감도 분석을 통하여 분석하였다. 이러한 TEXAS-V 코드의 원자로 물질 실험에 대한 능력을 검증한 뒤 노외 증기폭발 하중을 평가하였다.

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구원

E-mail : gosu@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-8938 FAX : (042)868-4801

* 한국원자력연구원

2. TROI 실험 관측 결과

TROI 실험에서 관측된 것은 용융물-냉각수 반응의 결과가 물질의 조성비에 따라 크게 달라진다는 점이다.⁽⁸⁾ 일반적으로, 전형적인 노심 용융물은 UO_2 와 ZrO_2 가 80:20으로 섞여 있는 것이다. TROI 실험에서는 이 전형적인 80:20 코륨은 자발적인 증기폭발을 일으키지 않았다. 반면에 70:30 코륨은 자발적인 증기폭발을 일으키는 경우가 있었으며, 100% ZrO_2 용융물은 냉각수의 과냉각도만 충분하다면 언제든지 자발적인 증기폭발을 일으키는 것으로 관측되었다.

TROI 실험에서 관측된 다른 하나는 용융물-냉각수 반응의 결과가 초기의 냉각수 깊이에 영향을 받는다는 점이다.⁽⁹⁾ 70:30 코륨을 사용하였을 경우 냉각수의 깊이가 67 cm 였을 때는 자발적인 증기폭발이 발생하였으나, 냉각수의 깊이가 90 cm 혹은 130 cm 에 이르렀을 때는 자발적인 증기폭발이 발생하지 않았다. 심지어 냉각수의 깊이가 130 cm 였을 때는 외부기폭을 사용한 3 차례 실험에서 모두 증기폭발이 발생하지 않았다.

TROI 실험에서 냉각수의 단면적이 증기폭발에 미치는 영향을 분명히 밝혀낼 수는 없었다.⁽¹⁰⁾ 왜냐하면, 70:30 코륨을 사용하고 냉각수의 단면적이 다른 경우에 해당하는 실험이 없기 때문이다. 분명한 사실은 좁은 단면적을 사용한 용융물-냉각수 반응이 넓은 단면적을 사용한 용융물-냉각수 반응에 비해 더 큰 증기폭발을 만들어 내지 않는다는 것이다.

3. TEXAS-V 모델 고정

TEXAS-V 코드를 이용한 TROI-13의 해석을 위한 입력조건을 Fig. 1과 Table 1에 제시하였다. 반응용기 부분의 격자는 단면적 0.283 m^2 이고 높이가 0.06 m 인 격자가 25 개로 구성하였고, 압력용기, 슬라이딩 밸브 그리고 용융로 용기를 포함하는 대기부분은 단면적이 7.62 m^2 이고 높이가 0.0623 m 인 20 개의 격자로 구성하였다.

TEXAS-V 코드의 증기폭발 모델에 대한 주요 모델 상수를 Table 1에 제시하였다. 혼합 계산에서는 Rayleigh Talyor instabilities에 의한 분쇄모형 증용융물 제트의 침투 부분을 추월하는 용융물을 분쇄시키는 Coherent jet fuel fragmentation model을 사용하였다.

Table 1과 Fig. 1에서 TROI-13의 경우에 70:30 코륨을 수면위 1.08 m 위치에서 7.34 m/s의 속도로 0.1 MPa, 292 K 인 냉각수에 투입하였다. 이때 TEXAS-V 코드의 사용된 모델을 보면 우선 용융물 제트의 반경 크기로 깨어지는 최초 용융물 drop은

NBREAK에 의해 2 개로 지정하였다. 용융물을 쪼개는 용융물 분쇄모델은 IENTRY, IENTRY2에 의해 Coherent jet breakup model로 지정하여, 용융물 제트의 침투부분을 추월하는 용융물을 Rayleigh Taylor instabilities에 의해 쪼갬다.

혼합 계산을 완료한 후에 폭발 계산을 위한 기폭 압력, PTRIG은 1 MPa로 정하였다. 폭발 단계에서 용융물을 분쇄하는 모델에서 초당 분쇄량을 결정하는 상수, CFR은 0.02의 추천 값을 사용하였고, 이때 쪼개지는 데브리의 반경, RFRAG로 $1.0e-4 \text{ m}$ 로 정하였다. 그 외에 반응용기의 높이가 1.5 m 이므로 Flooding 높이를 1.5 m로 지정하였다. 용융물 입자의 최고갯수를 $1.0e6$ 으로 정의하여 용융물 1 개 그룹 내에서 용융물 입자의 개수가 $1.0e6$ 개가 넘으면 새로운 용융물 그룹을 정의하였다.

Table 1 TEXAS-V input for TROI-13

TROI-13 Condition	TEXAS-V Model
Melt mass (2.26 kg)	NBREAK=2
Melt (70:30 Corium)	IENTRY=1(Old breakup)
Free Fall (1.08 m)	IENTRY2=1(Coherent jet)
Injection Speed (-7.34m/s)	CFR=0.002(default)
Pressure (0.1 MPa)	RFRAG=1.0e-4 m
Water Area (0.283 m ²)	PTRIG=1.0 MPa
Water Temp. (292 K)	Flooding(111)=1.5 m
Water Depth (0.67 m)	Particle Number=1.0e6

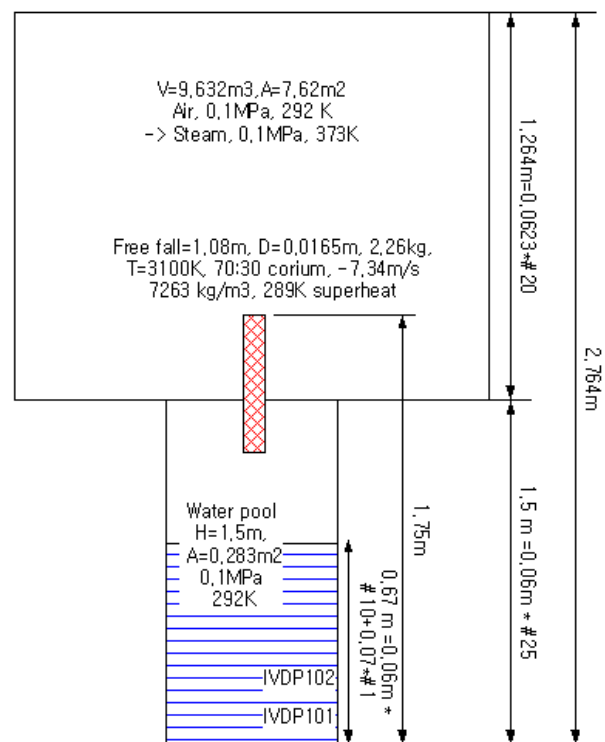


Fig. 1 TEXAS-V input for TROI-13

TEXAS-V 에서 기포유동 영역에서 증기의 응축은 다음의 기포와 냉각수간의 난류 열전달 계수로 지배된다.

$$h_{conv} = \frac{k_l(2 + 0.6 Pr_l Re_l^{0.5})}{2r_{bubble}} \quad (1)$$

$$r_{bubble} = \text{Maximum} \left[\frac{We_{crit} \sigma_l^{0.5}}{\rho_l U_{rel}^2}, C(47) \right] \quad (2)$$

여기서, h_{conv} , k_l , Pr , Re_l , r_{bubble} , We_{crit} , σ_l , ρ_l , U_{rel} , $C(47)$ 는 각각 대류 열전달 계수, 열전도도, 프란틀 수, 레이놀즈 수, 기포 반경, 임계 Weber 수, 표면 장력, 밀도, 상대속도, 최대 반경을 나타내고, 아래 첨자 l 는 냉각수를 나타낸다.

한편 TEXAS-V 는 1 차원적인 코드로서 용융물이 투입되고 있는 국부지역의 냉각수 온도는 포화상태까지 올라가고, 용융물이 없는 지역에서 냉각수는 과냉각 상태로 있는 것을 해석하지 못한다. 따라서, 냉각수의 과냉각도가 큰 증기폭발의 혼합을 해석할 때 지나치게 큰 응축으로 인해 기포계수가 극히 작게 계산될 수가 있다. 그런데, 증기폭발에서 폭발력은 기포계수에 극히 민감한 것으로 알려져 있다.

따라서, 혼합모델에서 냉각수의 과냉각도가 클 때 응축량을 조절하여 기포계수의 크기를 움직이는 기포와 냉각수간의 열전달 계수를 조정할 수 있는 C(47)에 대한 민감도 분석을 수행하였다. C(47)은 TEXAS-V 코드의 응축모델에 관련된 최소 기포의 크기를 나타낸다. 이 상수는 응축모델에 큰 영향을 미치며 이 상수 값이 크게 되면 응축이 작게 되고, 이 상수 값을 작게 하면 응축이 커지게 된다. 응축의 정도가 달라지게 되면 냉각수의 기포계수가 달라져서 용융물-냉각수의 반응 거동이 달라지게 된다.

C(47)에 대한 민감도 계산 결과를 Fig. 2 에 제시하였다. 계산된 폭발압력의 크기는 20 MPa 에서 60 MPa 로 TROI-13 의 실험 결과가 7 MPa 에 비추어서는 다소 큰 값이다. 이것은 1 차원적인 TEXAS-V 코드로 2 차원적인 TROI 실험을 모사하는데 어려운 점이 있음을 시사한다. C(47)=100e-3 m 일 때 폭발 압력의 크기가 20 MPa 로서 TROI-13 결과에 제일 가까워서 이 값을 사용하기로 한다. 10 cm 의 최소 기포 크기는 물리적으로 의미를 갖기는 어려운 것으로 판단되나, TROI 실험처럼 넓은 냉각수 단면적을 갖고 과냉각도가 큰 냉각수를 사용할 때에 기포계수를 합리적 수준으로 유지하기 위해서는 불가피한 선택이다.

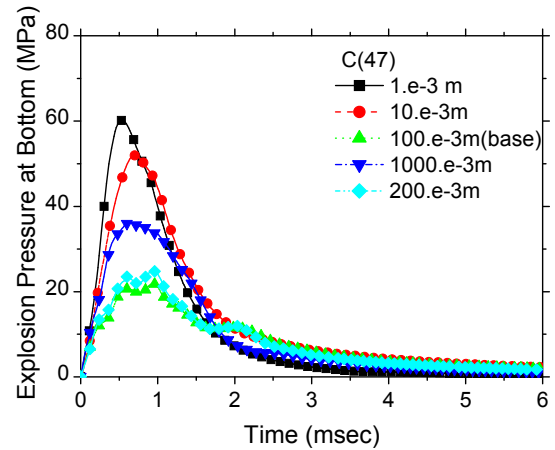


Fig. 2 Sensitivity study for condensation constant

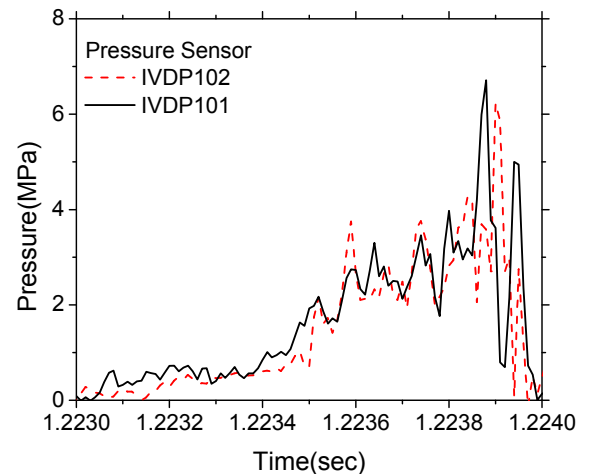


Fig. 3 Measured explosion pressure for TROI-13 test

Fig. 3 에 TROI-13 실험에서 측정된 증기폭발 압력을 제시하였다. 여기서 IVDP101 과 IVDP102 는 반응용기 바닥으로부터 각각 20 cm, 40 cm 높이의 벽면에 부착된 동압계를 나타낸다.

4. 민감도 계산 수행

4.1 용융물 조성비에 대한 민감도 분석

Fig. 4 에는 TEXAS-V 를 사용하여 용융물의 성분이 증기폭발에 미치는 영향을 분석하기 위한 폭발압력을 제시한 것이다. 여기서 ZrO_2 100 % 성분의 용융물의 폭발압력이 가장 크게 계산되었으며, 80:20 코륨의 경우가 폭발력이 가장 낮게 계산이 되었다.

이러한 결과가 도출된 것은 혼합체 내부에서 용융물의 분율은 거의 비슷하게 도출되었지만,

수증기 분율의 경우 Fig. 5 에서와 같이 100% ZrO₂ 의 경우 상당히 낮게 나왔고, 70:30 코립, 80:20 코립 순으로 수증기 분율이 증가하였기 때문인 것으로 나타났다.

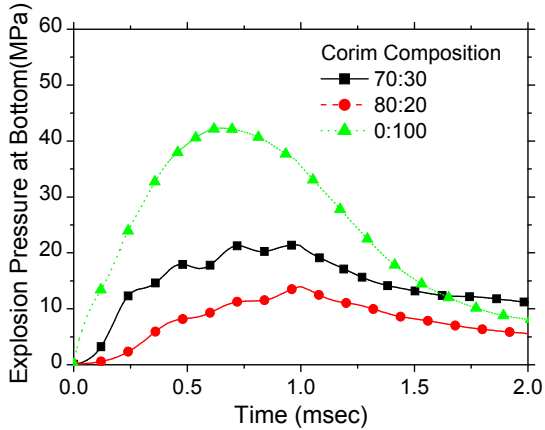


Fig. 4 Sensitivity Study on Composition by TEXAS-V

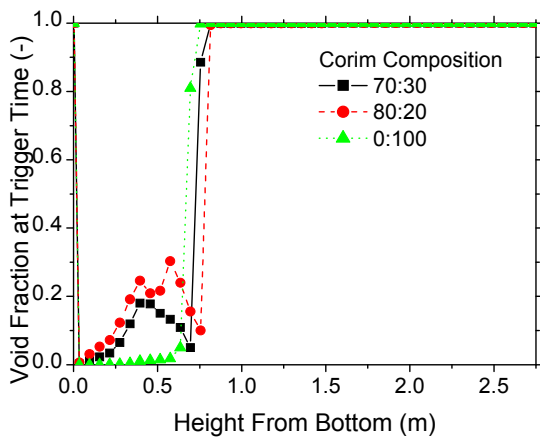


Fig. 5 Void fractions for 3 melt compositions

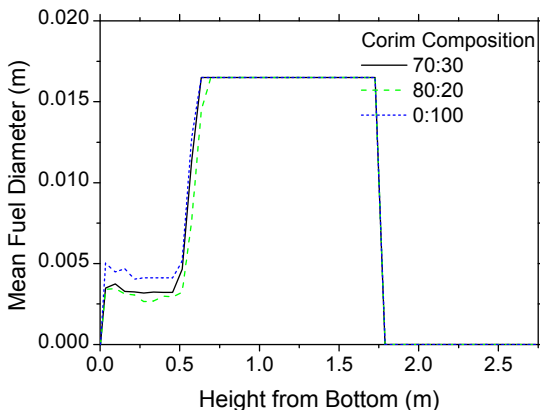


Fig. 6 Particle size distributions for 3 melt compositions

이것은 Fig. 6 에서와 같이 용융물의 크기가 100% ZrO₂ 의 경우에는 크고, 70:30 코립, 80:20 코립에서는 점점 작아졌기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 100 % ZrO₂ 의 경우에는 용융물의 온도가 70:30 코립이나 80:20 코립에 비해서 낮은 것도 기포계수가 낮는데 기여하고 있다. 전언한 바와 같이 증기폭발은 기포계수가 큰 경우에 그 폭발력이 낮은 것은 주지하여야 한다.

4.2 냉각수 깊이에 대한 민감도분석

Fig. 7 에 냉각수의 깊이가 변할 때 계산된 증기폭발 압력을 제시하였다. 여기서 냉각수의 깊이가 95 cm 의 경우에 용융물의 증기폭발 압력이 가장 크게 계산되었으며, 냉각수의 깊이가 130 cm 일 때 코립의 경우가 증기폭발 압력이 가장 낮게 계산이 되었다. 이러한 결과가 도출된 것은 Fig. 8 에서와 같이 혼합체 내부에서 용융물의 분율은 거의 비슷하게 도출되었지만, 수증기 분율의 경우 냉각수 깊이가 67 cm 일 때 보다 냉각수 깊이가 95 cm 일의 경우 수증기 분율이 상당히 낮게 나왔기 때문인 것으로 나타났다.

냉각수 깊이가 130 cm 일 경우 수증기 분율이 상당히 낮지만, 증기폭발 압력은 가장 낮은 것으로 나타났다. 이것은 냉각수 깊이가 130 cm 일때 수증기 부피분율의 시간적 변화를 검토하면 이유를 알 수가 있다. Fig. 9 에서 보이듯이 시간이 경과할 때 수증기 부피분율은 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 용융물이 작은 크기로 깨어지고 냉각수 깊이가 깊기 때문에 용융물이 식고 있는 것으로 판단된다. 이에 따라 냉각수 130 cm 의 경우에는 오히려 폭발압력이 작게 평가되는 것으로 나타난다. 이것은 TEXAS-V 로 증기폭발을 계산할 때 기폭을 용융물이 반응용기의 바닥에 닿았을 때 시킨데서 기인한다.

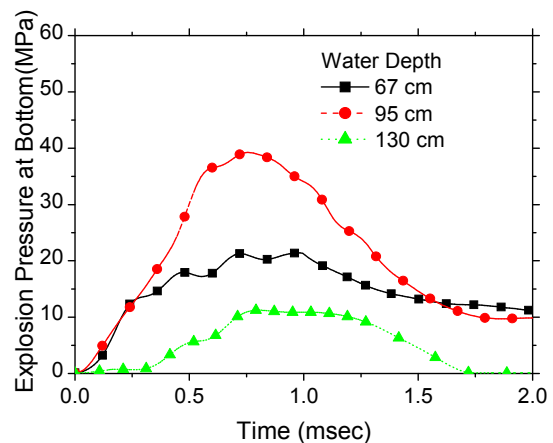


Fig. 7 Sensitivity study on water depth by TEXAS-V

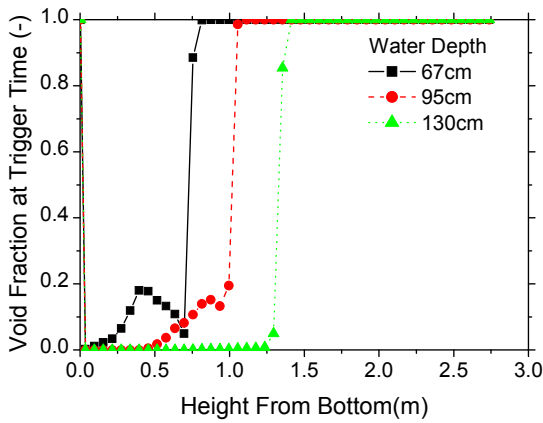


Fig. 8 Void fractions for 3 water depths

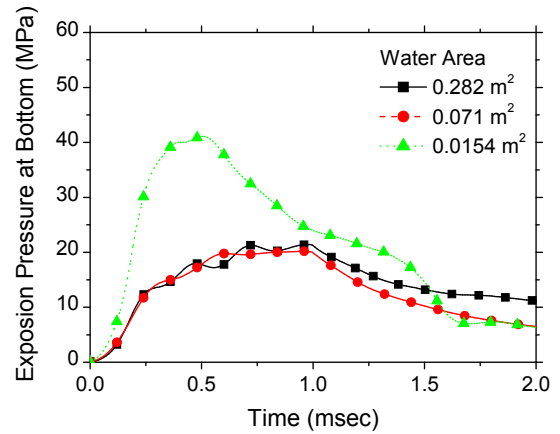


Fig. 10 Sensitivity study on water area by TEXAS-V

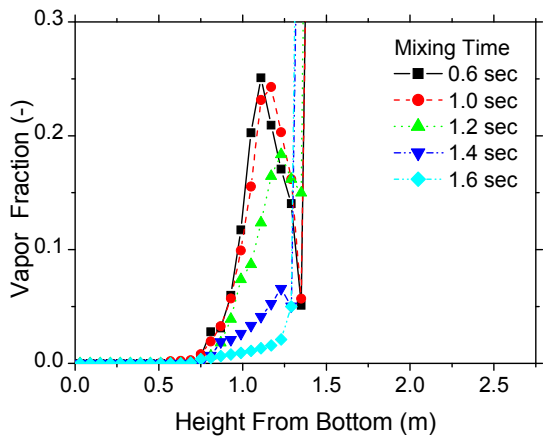


Fig. 9 Time dependent void fractions for 130 cm water

이러한 분석결과는 TROI 실험관측 결과에서도 냉각수 깊이가 130 cm 일 때 자발적인 증기폭발 및 외부 기포에 의한 증기폭발이 발생하지 않은 이유를 시사하고 있다. 즉, 용융물이 반응용기의 바닥에 도달했을 때는 용융물이 상당히 냉각되었기 때문에 증기폭발이 발생하지 않았던 것으로 판단된다.

4.3 냉각수 단면적에 대한 민감도분석

Fig. 10 에 냉각수의 단면적에 따른 증기폭발 압력의 변화를 제시하였다. Fig. 11 에는 냉각수의 단면적이 달라졌을 경우 각상의 부피 분율을 제시하였다. 여기서 기본이 되는 경우는 냉각수 단면적이 0.283 m² 이며, TROI 실험에서는 이 경우와 0.071 m² 의 경우에 대한 실험을 수행하였다. 0.071 m² 의 경우에 증기폭발은 오히려 더 발생하지 않는 것으로 나타났다. TEXAS-V 의 경우 0.283 m² 와 0.071 m² 의 두 경우가 큰 차이가 없는데, 이것은 0.071 m² 실험이 증기폭발력을 증대시키지는 않는다는 TROI 관측결과와 일치한다.

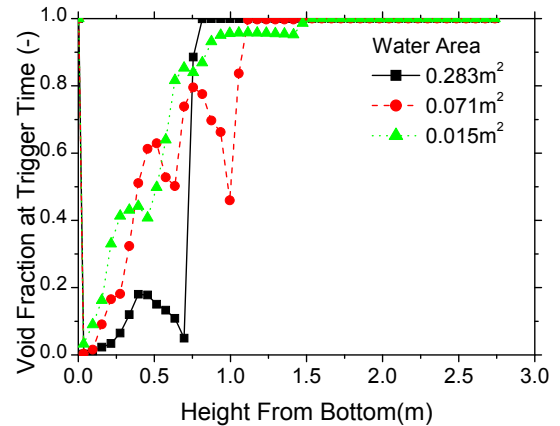


Fig. 11 Void fractions for 3 water areas

냉각수의 단면적이 0.0154 m² 인 경우에는 증기폭발 압력이 오히려 증가하고 있는데, 이것은 냉각수 단면적이 작아져도 수증기 분율은 크게 늘지 않는 반면 용융물의 분율은 크게 증가했기 때문이다. 이러한 증가가 곧바로 폭발력의 증대라고는 볼 수 없다. 왜냐하면, 증기폭발 압력은 폭발위치로부터 거리가 멀어질수록 1/r² 에 비례하여 감쇄된다. 따라서 냉각수 단면적이 0.0154 m² 에서 40 MPa 이라는 폭발압력은 냉각수 단면적 0.071 m², 0.283 m² 에 대해서 각각 10 MPa 과 2.5 MPa 에 해당한다고 볼 수 있다. 이렇게 냉각수 단면적이 줄었을 때 폭발력을 증대시키지 않는다는 TROI 실험의 관측결과를 TEXAS-V 가 제대로 계산하고 있다고 판단된다.

다만, 냉각수의 단면적이 0.0154 m² 인 경우처럼 과도한 기포계수를 갖는 혼합체가 증기폭발을 일으킬 수 있는지에 대해서는 논란의 여지가 있다. TROI 실험에서 80:20 실험은 증기폭발을 잘 일으키고 있지 않는데, 이의 주된 이유 중의 하나가

과도한 기포계수 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 과도한 기포계수에서도 증기폭발을 발생시키는 것은 증기폭발 해석 전산모델이 안고 있는 문제로 판단되며 이에 대한 개선이 필요하다.

5. 노외 증기폭발 하중평가

Fig. 12 와 Table 2 에는 원자로 공동에서의 노외 증기폭발 계산을 수행하기 위한 초기조건 및 기하학적 조건이 제시하였다. 이 노외 증기폭발에 대한 입력조건은 OECD-SERENA PHASE-I 프로그램⁽⁷⁾에서 참여국들의 PWR 의 노외 증기폭발에 대한 초기조건들을 고려하여 정한 것이다.

노외 증기폭발은 원자로용기의 하단부가 파괴되어 50 cm 직경을 가진 용융물이 4 m 깊이의 냉각수가 채워진 원자로공동에 투하되어 발생한다. 이때 기폭은 용융물이 원자로 공동의 바닥에 닿아서 발생하는 것으로 가정하였다. TEXAS-V 의 증기폭발 모델 상수들은 TROI 계산을 통하여 정리가 된 값들을 사용하여 계산의 일관성을 유지하도록 하였다.

Table 2 TEXAS-V input for Reactor Cavity

Ex-vessel Condition	TEXAS-V Option
Melt mass(8000 kg)	NBREAK=2
Melt(8:2 Corium)	IENTRY=1(Old breakup)
Free Fall(1.0 m)	IENTRY2=1(Coherent jet)
Injection Speed(-6.26m/s)	CFR=0.002(default)
Pressure (0.2 MPa)	RFRAG=1.0e-4 m
Water Area (23.758 m ²)	PTRIG=1.0 MPa
Water Temp. (343.4 K)	C(47)=100.e-3 m
Water Depth(4.0 m)	Particle Number=1.0e6

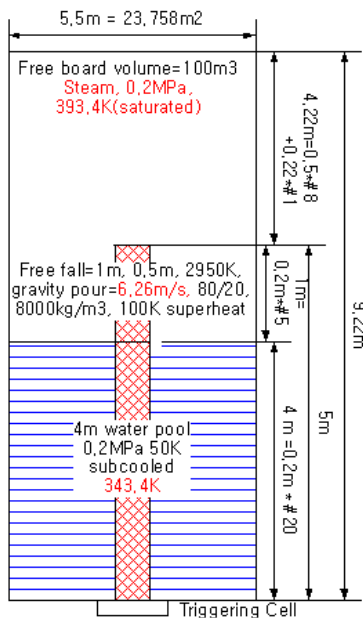


Fig. 12 TEXAS-V input for ex-vessel explosion

Fig. 13, 14, 15 에 혼합계산이 완료되었을 경우 각 상의 부피분율 및 이 혼합체를 가지고 폭발계산을 수행한 폭발 압력과의 거동 및 폭발하중을 제시

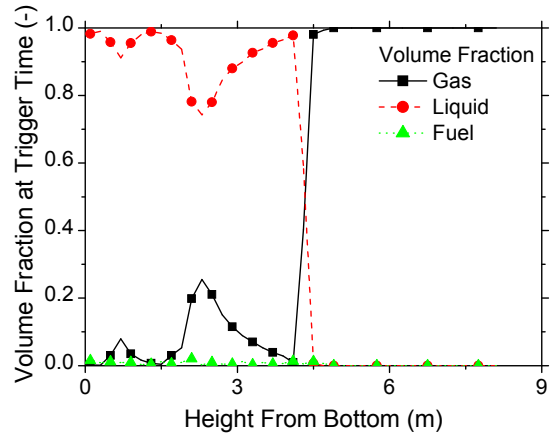


Fig. 13 Volume fraction for ex-vessel explosion.

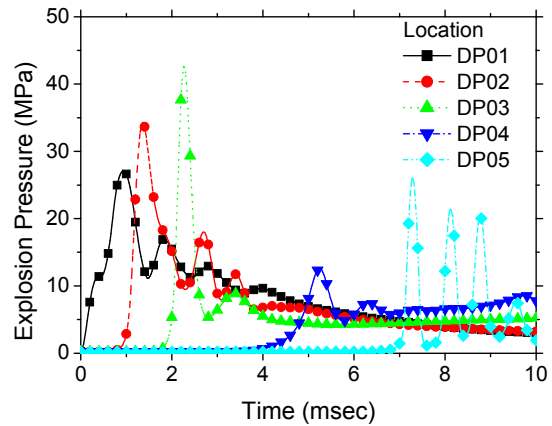


Fig. 14 Calculated ex-vessel explosion pressure

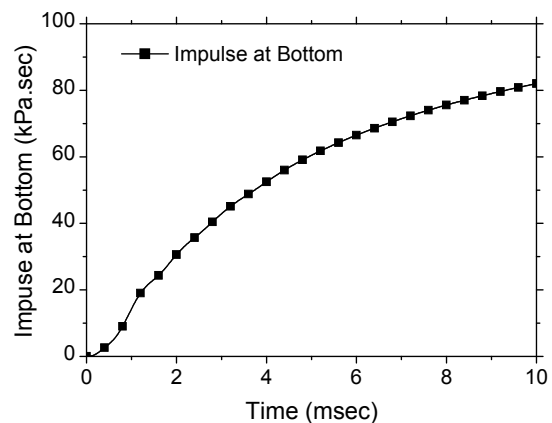


Fig. 15 Calculated ex-vessel explosion load

하였다. Fig. 14 에서 DP01, DP02, DP03, DP04, DP05 는 원자로공동 바닥으로부터 각각 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m, 0.8 m, 1.0 m 의 벽면에 해당하는 위치를 표시한다. 용융물이 바닥에 닿았을 때 혼합계산을 중지하고 증기폭발 계산을 수행한 결과 증기폭발 최고압력은 40 MPa 이고 하중은 75 kPa.s 이다. 이 값은 원자력발전소의 격납건물의 정적 설계하중이 대략 50 psig (344 kPa, 1psig = 6.894757kPa)인 점을 감안하면 건전성에 위해를 주는 정도는 아닌 것으로 판단된다.

6. 결 론

TROI 실험의 관측결과를 검토하였고 TEXAS-V 코드와 TROI-13 실험 결과를 이용하여 TROI 실험의 관측 결과를 해석하였다. TROI-13 의 계산을 통하여 TEXAS-V 의 주요 모델 상수를 고정하였다. 이를 바탕으로 TROI 실험에 대한 민감도 분석을 수행하였는데, 여기서 냉각수조건의 효과에 대한 평가 및 물질 효과에 대한 평가를 수행하였다. TEXAS-V 해석은 TROI 실험과 마찬가지로 용융물의 물질 구성은 냉각수의 조건과 마찬가지로 증기폭발력에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 이는 주로 혼합체의 각 상의 분포와 관련이 있는 것으로 분석되었다. 따라서, 혼합체의 각 상의 분포에 대한 실험 자료를 확보하고 이를 이용한 전산 코드의 검증은 냉각수 효과는 물론 물질효과의 분석에도 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

TEXAS-V 가 TROI-13 에서 나타난 민감도를 잘 평가하는 것을 보인 후 노외 증기폭발 해석을 수행하였다. 이렇게 본 연구에서는 TROI-13 실험을 활용한 TEXAS-V 코드의 모델 고정, TROI 실험의 민감도 결과를 활용한 TEXAS-V 코드 증명, 노외 증기폭발 해석의 일련의 증기폭발 해석 체계를 정립하였다. 다만, TEXAS-V 의 혼합 단계에서 용융물 파쇄 모델이 용융물의 크기에 있어서 다양한 스펙트럼을 보여주지 못하는 한계가 있고, 과냉각도가 큰 TROI 실험과 같은 상황에서 기포계수를 합리적으로 예측하기 어려운 문제 등은 해결할 과제로 남아 있다.

후 기

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았

습니다.(연구과제 관리코드: M20702040004-08M0204-00410)

참고문헌

- (1) Corradini, M. L., Kim, B. J. and Oh, M. D., 1988, "Vapor Explosions in Light Water Reactors: A Review of Theory and Modeling," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 22, No.1, pp. 1~117.
- (2) Magallon, D. and Huhtiniemi, I. 2001, "Corium Melt Quenching Tests at Low Pressure and Subcooled Water in FARO," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 204, pp. 369~376.
- (3) Huhtiniemi, I. and Magallon, D., 2001, "Insight into Steam Explosions with Corium Melts in KROTOS," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 204, pp. 391~400.
- (4) Song, J. H., Kim, H. D., Hong, S. W., Park, I. K., Shin, Y. S., Min, B. T., Kim, J. H. and Chang, Y. J., 2001, "Steam Explosion Experiments Using ZrO₂," *Transactions of the KSME B*, Vol. 25, No. 12, pp. 1887~1897.
- (5) Kim, J.H., Min, B.T., Park, I.K., Kim, H.D., and Hong, S.W., 2008, "Steam Explosion Experiments Using Partially Oxidized Corium," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp.1~9
- (6) Tang, J., 1993. "Modeling of The Complete Process of One-Dimensional Vapor Explosions," Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison.
- (7) Meignen, R. and Magallon, D., 2005, "Comparative Review of FCI Computer Models Used in the OECD-SERENA Program," *Proceedings of ICAPP-05*, Seoul, Korea, May 15-19.
- (8) Kim, J. H., Park, I. K., Min, B. T., Hong, S. W., Song, J. H., and Kim, H. D., 2004, "An Effect of Corium Composition Variations on Occurrence of a Spontaneous Steam Explosion in the TROI Experiments," *Proceedings of NUTHOS-6*, Nara, Japan, Oct. 4-8.
- (9) Kim, J. H., Park, I. K., Min, B. T., Hong, S. W., Shin, Y. S., Song, J. H. and Kim, H. D., 2004, "The Influence of Variations in the Water Depth and Melt Composition on a Spontaneous Steam Explosion in the TROI Experiments," *Proceedings of ICAPP '04*, Pittsburgh, PA USA, June 13-17.
- (10) Kim, J. H., Park, I. K., Min, B. T., Hong, S. W., Hong, S. H., Song, J. H. and Kim, H. D., 2006, "Results of the Triggered TROI Steam Explosion Experiments with a Narrow Interaction Vessel," *Proceedings of ICAPP '06*, Reno, NV USA, June 4-8.