

TROI 실험결과를 활용한 TEXAS-V 코드 검증 및 원자로 노외증기폭발 하중평가

박익규* · 김종환[†] · 민병태* · 홍성호* · 김희동* · 홍성완*

The Verification of TEXAS-V code for TROI Experimental Results and the Evaluation of the Ex-vessel Steam Explosion Load

Ik-Kyu Park, Jong-Hwan Kim, Beong-Tae Min, Seong-Ho Hong,
Hee-Dong Kim and Seong-Wan Hong,

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, but are arguable value for the integrity.

1. 서론

용융물-냉각수 반응이 때때로 급격한 열전달로 인하여 파괴적인 충격파를 발생시킬 수가 있다. [1] 그래서, 증기폭발에 대한 많은 실험적 연구 및 해석적 연구가 진행되어 왔다.[2,3] 증기폭발에 대한 연구로 많은 것들이 발견되었으나, 실제 원자로 물질의 폭발성과 열에너지의 기계적에너지로의 변환률 등 아직도 해결되지 않는 문제들이 있

다.[4] 이러한 실제 원자로 물질에 대한 이슈를 해결하기 위하여 실제 원자로 물질의 다양한 조성을 사용한 TROI 실험이 수행되었다.

실험적인 연구가 스케일링 문제등에 있어서 원자로에 직접 적용하기는 어렵기 때문에 해석적인 연구도 수행되었다. TEXAS-V 코드를 포함한 여러 증기폭발 해석코드가 실험적인 관찰을 근거로 하여 개발되었다.[5] 그러나, 최근의 TROI 실험 연구에서는 물질 효과등 몇가지 특이할 만한 결과들이 발견 되었다. 이러한 결과들은 증기폭발 해석 코드로 원자로 경우를 해석하기 전에 반영되는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 TROI 실험에서 관측된 몇가지 중요한 점을 검토하고 TEXAS-V 코드와 TROI-13 실험에 근거하여 TROI 실험의 관측 사항을 민감

[†] 한국원자력연구원

E-mail : kimjh@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2649 FAX : (042)863-3689

* 한국원자력연구원

도 분석을 통하여 분석하였다. 이러한 TEXAS-V 코드의 원자로 물질 실험에 대한 능력을 검증한 뒤 노외증기폭발 하중을 평가하였다.

2. TROI 실험 관측

TROI 실험에서 관측된 것은 용융물-냉각수 반응의 결과가 물질의 조성비에 따라 크게 달라진다는 점이다.[6] 일반적으로, 전형적인 노심용융물은 UO₂ 와 ZrO₂ 가 80:20 으로 섞여 있는 것이다. TROI 실험에서는 이 전형적인 80:20 코륨은 자발적인 증기폭발을 일으키지 않았다. 반면에 70:30 코륨은 자발폭발을 일으키는 경우가 있었으며, 100% ZrO₂ 용융물은 냉각수의 과냉각도만 충분하다면 언제든지 자발증기폭발을 일으키는 것으로 관측되었다.

TROI 실험에서 관측된 다른 하나는 용융물-냉각수 반응의 결과가 초기의 냉각수 깊이에 영향을 받는다는 점이다.[7] 70:30 코륨을 사용하였을 경우 냉각수의 깊이가 67cm 였을 때는 자발적인 증기폭발이 발생하였으나, 냉각수의 깊이가 90cm 혹은 130cm 에 이르렀을 때는 자발적인 증기폭발이 발생하지 않았다. 심지어 냉각수의 깊이가 130cm 였을 때는 외부기폭을 사용한 3 차례 실험에서 모두 증기폭발이 발생하지 않았다.

TROI 실험에서 냉각수의 단면적이 미치는 분명히 밝힐 수는 없었다.[8] 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 tuned for TROI-13

TEXAS-V 를 이용한 TROI-13 의 해석을 위한 입력조건이 그림 1 와 표 1 에 제시되어 있다. 반응용기부분의 격자는 단면적 0.2827m² 이고 높이 0.06m 인 격자가 25 개로 구성되어 있고, 압력용기, 슬라이딩벨브, 용융로용기를 포함하는 대기부분은 단면적이 7.62m² 이고 높이가 0.0623m 인 20 개의 격자로 구성되어 있다.

TEXAS-V 코드의 증기폭발 모델에 대한 주요 상수가 표 1 에 제시되어 있다. 혼합 계산에서는 Rayleigh Talyor instabilities 에 의한 분쇄모형 중 용융물제트의 침투부분을 추월하는 용융물들을 분쇄시키는 coherent jet fuel fragmentation model 을 사용하고 있다.

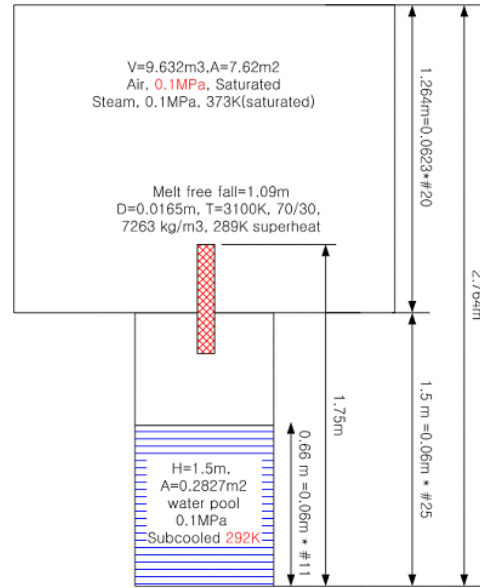


Fig. 1 TEXAS-V input for TROI-13

Table 1 TEXAS-V input for TROI-13

TROI-13 Condition	TEXAS-V Option
Melt mass(2.26 kg)	NBREAK=2
Melt(7:3 Corium)	IENTRY=1(Old breakup)
Free Fall (3.8m)	IENTRY2=1(Coherent jet)
Pressure (0.1MPa)	CFR=0.002(default)
Water Area (0.283m ²)	RFRAG=1.0e-4m
Water Depth(0.67m)	PTRIG=1MPa
	Flooding Height(111)=1.5
	Particle Number=1.0e6

먼저, 혼합모델에서 특히, 냉각수의 과냉각도가 클 때 문제가 되는 C(47)에 대한 민감도 분석을 수행하였다. C(47)은 TEXAS-V 코드의 응축모델에 관련된 최소 기포의 크기를 나타낸다. 이 상수는 응축모델에 큰 영향을 미치면 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 분석결과가 그림 2 에 제시되어 있으며, 그 폭발 압력 거동이 C(47)=100e-3 일 때가 TROI-13 결과에 부합하는 것으로 나타났다. 그림 3 에는 TROI-13 실험에서 측정된 증기폭발 압력이 제시되어 있다.

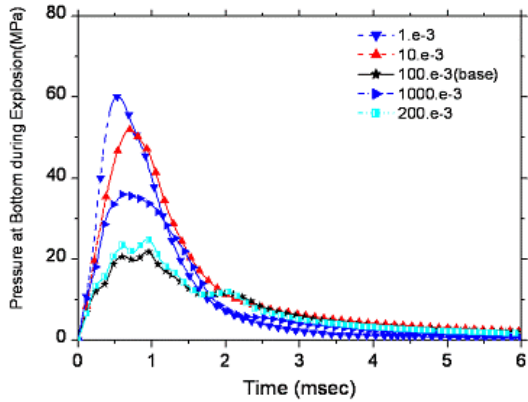


Fig. 2 Sensitivity study for condensation constant

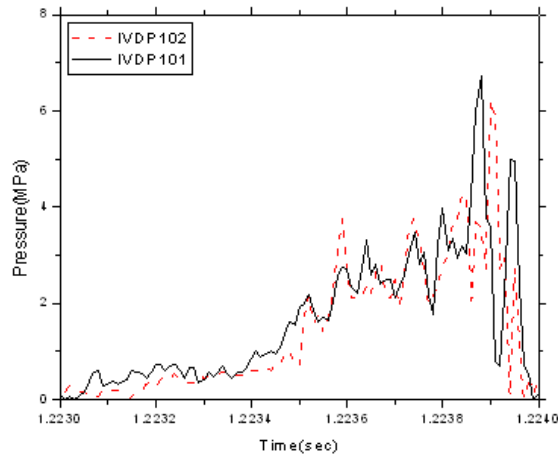


Fig. 3 Measured explosion pressure for TROI-13 test

4. TROI 실험결과 분석

4.1 용융물 조성비에 대한 민감도 분석

그림 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 $UO_2:ZrO_2$ 의 코륨의 경우가 폭발력이 가장 낮게 계산이 되었다.

이러한 결과가 도출된것은 그림 5 에서와 같이 혼합체 내부에서 용융물의 분율은 거의 비슷하게 도출되었지만 수증기분율의 경우 100% ZrO_2 의 경우 상당히 낮게 나왔고, 70:30 코륨, 80:20 코륨 순으로 수증기분율이 증가하였기 때문인 것으로 나타났다. 이것은 그림 6 에서와 같이 용융물의 크

기가 100% ZrO_2 의 경우에는 크고, 70:30 코륨, 80:20 코륨에서는 점점 작아졌기 때문인 것으로 분석되었다.

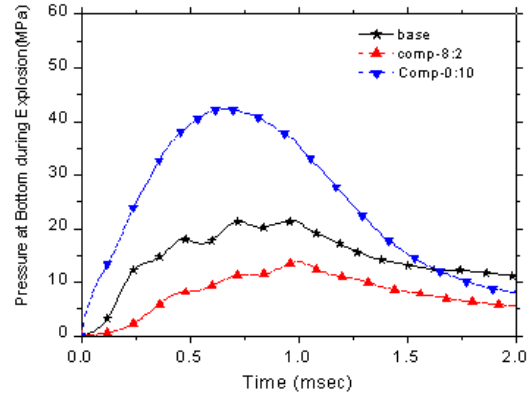


Fig. 4 Sensitivity Study on Composition by TEXAS-V

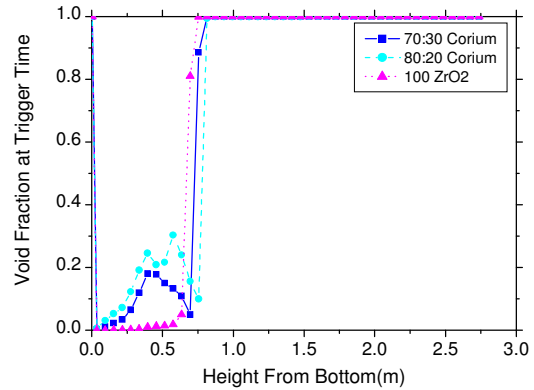


Fig. 5 Void fractions for 3 melt composition

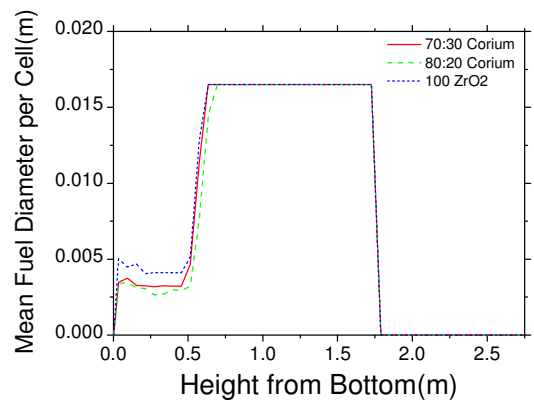


Fig.6 Particle size distribution for 3 melt compositions

4.2 냉각수 깊이에 대한 민감도분석

그림 7 에는 TEXAS-V 를 사용하여 냉각수의 깊이가 증기폭발에 미치는 영향을 분석하기 위한 폭발압력을 제시한 것이다. 여기서 냉각수깊이가 95cm 의 경우에 용융물의 폭발압력이 가장 크게 계산되었으며, 냉각수의 깊이가 130cm 일때 코륨의 경우가 폭발력이 가장 낮게 계산이 되었다.

이러한 결과가 도출된 것은 그림 8 에서와 같이 혼합체 내부에서 용융물의 분율은 거의 비슷하게 도출되었지만 수증기 분율의 경우 냉각수 깊이가 67cm 일 때 보다 냉각수 깊이가 95cm 일의 경우 상당히 낮게 나왔고 때문인 것으로 나타났다.

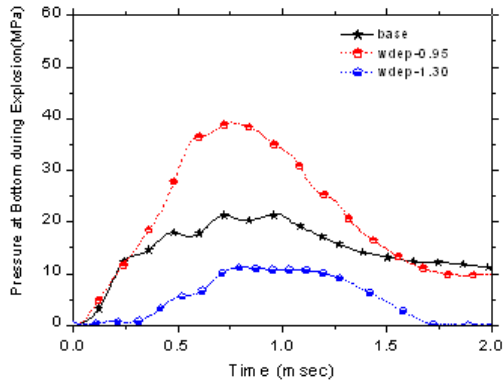


Fig.7 Sensitivity study on water depth by TEXAS-V

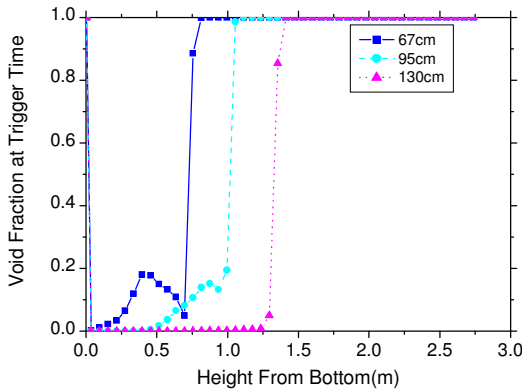


Fig. 8 Void fractions for 3 water depths

냉각수 깊이가 130cm 일 경우 수증기 분율이 상당히 낮지만, 폭발압력은 가장 낮은 것으로 나타났다. 이것은 냉각수 깊이 130cm 일 수증기 분율을 검토하면 이유를 알 수가 있다. 이들 그림 9 에서 보이듯이 시간이 경과할 때 수증기 분율은 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 용융물이 작은

크기로 깨어지고 냉각수 깊이가 깊기 때문에 용융물이 식고 있는 것으로 판단된다. 이에 따라 냉각수 130cm 의 경우에는 오히려 폭발압력이 작게 평가되는 것으로 나타난다. 이러한 현상은 용융물의 자발기폭이 반응용기의 바닥에 닿았을 때 일어나기 때문인 것으로 판단된다.

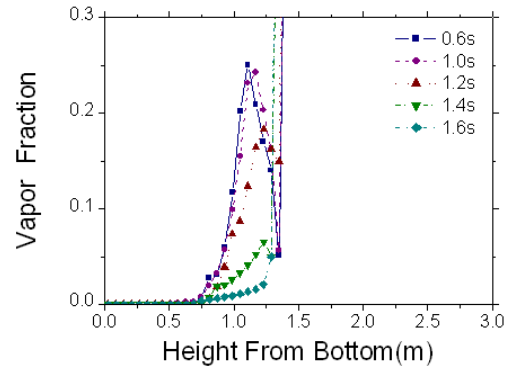


Fig. 9 Time dependent void fractions for 130 water depth

4.3 냉각수 단면적에 대한 민감도분석

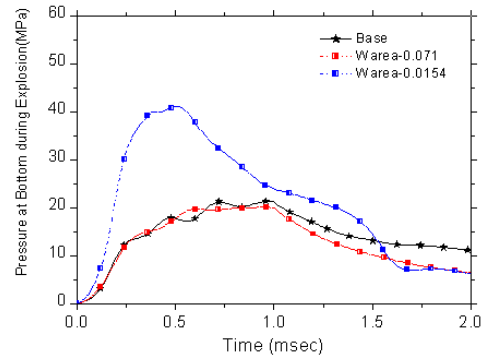


Fig. 10 Sensitivity study on water area by TEXAS-V

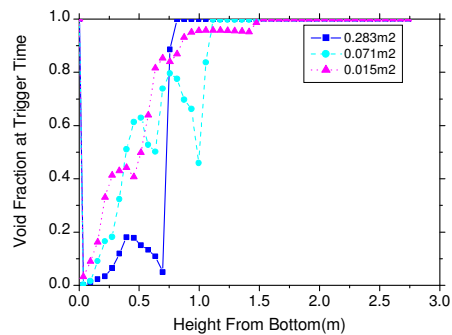


Fig. 11 Void fractions for 3 water areas

그림 10 은 TEXAS-V 를 사용하여 냉각수의 단면적이 증기폭발에 미치는 영향을 분석하기 위한 폭발압력을 제시한 것이다. 그림 11 은 냉각수의 단면적이 달라졌을 경우 각상의 부피 분율을 제시한 것이다. 여기서 기본이 되는 경우는 냉각수 단면적이 0.283 m^2 이며, TROI 실험에서는 이 경우와 0.071 m^2 의 경우에 대한 실험이 수행 되었다. 0.071 m^2 의 경우에 증기폭발은 오히려 더 발생하지 않는 것으로 나타났다. TEXAS-V 의 경우 0.282 m^2 와 0.071 m^2 의 두 경우가 큰 차이가 없는데 이것은 실험 결과와는 다른 결과 이다.

냉각수의 단면적이 0.0154 m^2 인 경우에는 증기폭발 압력이 오히려 증가하고 있는데, 이것은 냉각수 단면적이 작아져도 수증기 분율은 크게 늘지 않는 반면 용융물의 분율은 크게 증가했기 때문이다. 이렇게 냉각수 단면적의 효과는 TROI 실험결과와는 일치하지 않는데 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

5. 노외증기폭발 하중평가

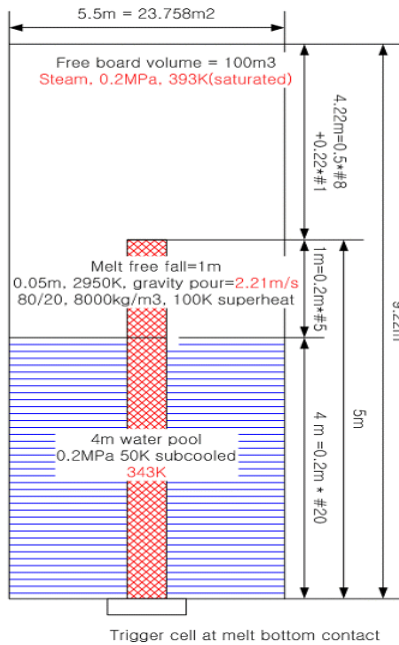


Fig. 12 TEXAS-V input for ex-vessel explosion

그림 12 에는 Ex_vessel 에서의 증기폭발 계산을 수행하기 위한 초기조건 및 기하학적 조건이 제시되어 있다. Ex_vessel 에서의 증기폭발은 원자로공동에 4 m 깊이의 냉각수가 채워진 뒤 원자로용기의 하단부가 파괴되어 50 cm 직경을 가진 용융물이 투하되어 발생한다. 이때 기폭은 용융물이 원

자로 공동의 바닥에 닿아서 발생하는 것으로 가정하였다. TEXAS-V 의 증기폭발 모델 상수들은 TROI 계산을 통하여 정리가 된 값들을 사용하여 계산의 일관성을 유지하도록 하였다.

그림 13, 14, 15 에는 혼합계산이 완료되었을 경우 각 상의 부피분율 및 이 혼합체를 가지고 폭발 계산을 수행한 폭발압력과의 거동 및 폭발 하중이 제시되어 있다. 용융물이 바닥에 닿았을 때 혼합 계산을 중지하고 폭발계산을 수행한 결과 폭발압력은 40 MPa 에 이르고 있고, 하중은 75 kPa.s 다. 이러한 결과는 원자력발전소의 건전성에 큰 위해를 주는 정도는 아니지만 무시할 만한 값은 아닌 것으로 판단된다.

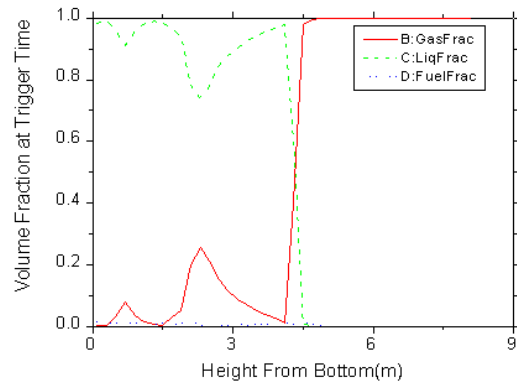


Fig. 13 Volume fraction for ex-vessel explosion

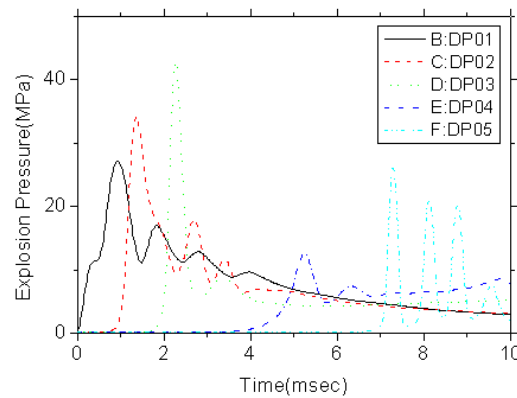


Fig. 14 Calculated ex-vessel explosion pressure

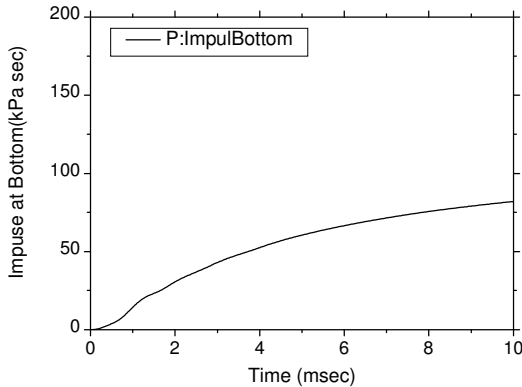


Fig. 15 Calculated ex-vessel explosion load

6. 결론

TROI-13 실험 및 결과 분석하고, TEXAS-V 를 이용한 TROI-13 의 해석하였다. TROI-13 의 해석에 있어서 증기 응축 모델 상수(C(47))에 대한 민감도 분석을 실시하였는데, 10 cm 의 기포 크기가 TROI-13 의 폭발압력을 예측하는데 합리적인 것으로 나타났다. 사실 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.

이를 바탕으로 TROI-13 을 기준으로 한 민감도 분석을 수행하였는데, 여기서 냉각수조건의 효과에 대한 평가 및 물질 효과에 대한 평가를 수행하였다. TEXAS-V 해석은 TROI 실험과 마찬가지로 용융물의 물질구성은 냉각수의 조건과 마찬가지로 증기폭발력에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 이는 주로 혼합체의 각 상의 분포와 관련이 있는 것으로 분석되었다. 따라서, 혼합체의 각 상의 분포에 대한 실험데이터를 확보하고 이를 이용한 전산코드의 검증은 냉각수 효과는 물론 물질효과 분석에도 큰 도움이 될 것이다.

TEXAS-V 가 TROI-13 에서 나타난 민감도를 잘 평가하는 것을 보인 후 Ex-vessel 증기폭발 해석을 수행하였다. 이렇게 본 연구에서는 TEXAS-V 의 TROI 실험을 활용한 증명, TROI 실험의 민감도 결과를 활용한 증명, 노외 증기폭발 해석의 일련의 증기폭발 해석 시스템을 정립하였다. 다만, TEXAS-V 의 Old breakup 이 데브리 크기에 있어서 다양한 스펙트럼을 보여주지 못하는 한계가 있고,

과냉각도가 큰 TROI 실험과 같은 상황에서 기포계수를 합리적으로 예측하기 어려운 문제 등은 해결할 과제로 남아 있다.

후기

본 연구는 과학기술부 원자력 증장기 과제에서 재정적인 지원을 받았습니다.

참고문헌

- (1) M. L. Corradini et al., 1988, "Vapor Explosions in Light Water Reactors: A Review of Theory and Modeling," Progress in Nuclear Energy, 22, No.1, pp.1-117.
- (2) D. Magallon and I. Huhtiniemi, 2001, "Corium Melt Quenching Tests at Low Pressure and Subcooled Water in FARO," Nuclear Engineering and Design, 204, pp.369-376.
- (3) I. Huhtiniemi and D. Magallon, 2001, "Insight into Steam Explosions with Corium Melts in KROTOS," Nuclear Engineering and Design, 204, pp.391-400.
- (4) J. H. Song et al., 2002, "Experiments on the Interactions of Molten ZrO₂ with Water Using TROI Facility," Nuclear Engineering and Design, 213, pp.97-110.
- (5) R. Meignen, D. Magallon, 2005, "Comparative Review of FCI Computer Models Used in the OECD-SERENA Program," Proceedings of ICAPP-05, Seoul, Korea, May 15-19.
- (6) J. H. Kim, I. K. Park, B. T. Min, S. W. Hon1, J. H. Song and H. D. Kim, 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.
- (7) J. H. Kim, I. K. Park, B. T. Min, S. W. Hong, Y. S. Shin, J. H. Song and H. D. Kim, 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
- (8) J. H. Kim, I. K. Park, B. T. Min, S. W. Hong, S. H. Hong, J. H. Song and H. D. Kim, 2006, "Results of the Triggered TROI Steam Explosion Experiments with a Narrow Interaction Vessel," Proceedings of ICAPP '06, Reno, NV USA, June 4-8.