

원자로 물질의 증기폭발에서 고화 입자 크기 분석

박익규^{*†}, 김종환^{*}, 민병태^{*}, 홍성완^{*}

* 한국원자력연구원 열수력안전연구부

Analyses of Size of Solidified Particles in Steam Explosions of Molten Core Material

Ik-Kyu Park^{*†}, Jong-Hwan Kim^{*}, Beong-Tae Min^{*} and Seong-Wan Hong^{*}

* Thermal Hydraulics Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received November 17, 2009 ; Revised September 27, 2010 ; Accepted September 30, 2010)

Key Words : TROI(TROI 실험), Steam Explosion(증기폭발), Fuel Coolant Interaction(용융물 냉각수 반응), Particle Size(입자 크기)

초록: 고화 입자 크기의 관점에서 TROI 용융물-냉각수 반응 실험의 결과에 대한 물질 효과를 분석하였다. 고화 입자 크기를 분석하면 용융물-냉각수 반응에서 초기 조건, 혼합, 폭발을 유기적으로 해석할 수 있다. 증기 폭발이 발생한 경우와 폭발이 발생하지 않는 경우의 고화 입자 크기를 분석한 결과 증기 폭발이 발생한 경우에는 미세 입자가 많고 비교적 큰 입자는 적은 것으로 나타났다. 또한, 혼합 과정에 대한 정보를 보존할 수 있는 증기 폭발이 발생하지 않은 용융물-냉각수 반응을 이용하여 용융물 입자 크기에 대한 물질 효과를 분석하였다. 증기 폭발이 잘 발생하는 용융물은 증기 폭발에 참여할 수 있는 큰 입자를 많이 포함하고 있었고, 증기 폭발이 잘 발생하지 않는 용융물은 증기 폭발보다는 냉각되기 쉬운 작은 입자 혹은 미세 입자를 많이 포함하고 있었다.

Abstract: The effect of materials on fuel coolant interactions (FCIs) was analyzed on the basis of a solidified particle size response for TROI experiments.⁽¹⁾ The solidified particle size response can provide an understanding of the relationship among the initial condition, the mixing, and an explosion. Through a comparison of the size distributions of the solidified particles in the case of explosive and non-explosive FCIs, it is revealed that an explosive FCI results in the production of a large amount of fine particles and a small amount of large particles. The material effect of the size of solidified particles was analyzed using non-explosive FCIs without losing the information on the mixing. This analysis indicates that an explosive melt includes large particles that participate in the steam explosion, whereas a non-explosive melt includes smaller particles and finer particles.

- 기호설명

- D_f : 용융물 입자 직경
- f_0 : 비례 상수
- t : 시간
- U_{rel} : 용융물과 냉각수 상대 속도
- We : Weber 수
- ρ_c : 냉각수 밀도
- ρ_f : 용융물 밀도
- σ_f : 용융물 표면 장력

1. 서론

원자력 발전소 대형관 파단 등으로 노심 냉각수가 소실되면 노심은 녹아서 노심 용융물이 되고, 원자로 용기 하반구로 모일 수 있다. 만약 원자로 용기가 파손되면 노심 용융물은 원자로 공동으로 이동할 수 있다. 이 과정에서 원자로 용기 하반구 혹은 원자로 공동에 냉각수가 채워져 있다면 용융물-냉각수 직접 반응이 발생할 수 있다. 용융물-냉각수 반응은 급격한 열전달로 인해 파괴적인 충격파를 동반하는 증기폭발을 일으킬 수도 있다.⁽²⁾ 증기폭발은 원자로 중대사고의 가장 중요한 현안 중의 하나였기 때문에 이에 대해서 많은 실험적 혹은 이론적인 연구를 해왔다. 실험 연구는 소규모

† Corresponding Author, gosu@kaeri.re.kr
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

실험,⁽³⁾ 중규모 실험,⁽⁴⁾ 실제 노심 용융 물질을 활용한 실험^(5,6) 등이 있다.

증기폭발 실험들은 증기폭발 현상의 탐구에 많은 기여를 하였으나, 실제 원자력 발전소의 안전성 분석에는 전산 코드를 일반적으로 활용한다.⁽⁷⁾ 증기폭발 해석 코드들은 증기폭발 실험의 관찰 결과를 토대로 개발되었다. 증기폭발을 해석하기 위해서 개발된 코드들은 ESPROSE.m, IFCI, MC3D, TRACER-II, TEXAS-V 등이 있는데, 이들 코드들은 차원, 혼합 분쇄 모델, 폭발 분쇄 모델 등에서 다르다.⁽⁸⁾ 이러한 실험 또는 해석 도구를 활용한 증기폭발 연구를 통해서 많은 사실이 밝혀졌지만, 아직도 열 에너지의 기계적 에너지로의 변환비 또는 실제 원자로 물질의 폭발성 같은 몇 가지의 미해결 쟁점이 남아 있다.^(9,10) 이들 미해결 쟁점으로 인하여 증기폭발 해석 코드의 결과가 서로 상이하고 이에 따라 원자로 안전성 분석에도 어려움이 있다. 해석 코드상의 불일치는 혼합 과정에서 용융물 제트 붕괴(melt jet breakup) 및 용융물 입자 미세 분쇄(fuel particle fine fragmentation)의 차이에서 기인한다. TROI 실험은 이러한 실제 원자로 물질의 에너지 변환비 및 폭발성에 대한 실험 자료를 제공하기 위하여 수행되어 왔다.^(1,11) TROI 실험에서는 지르코니아(ZrO_2 용융물) 및 코륨(ZrO_2 와 UO_2 혼합 용융물)과 같은 원자로 물질을 사용하였다.

본 논문에서는 용융물의 물질 특성이 용융물-수증기 반응의 결과에 미치는 영향을 분석하기 위하여 용융물의 입자크기를 분석하였다. 먼저, 3.1 절에 물질 효과와 관련된 선행 실험 연구를 용융물 입자 크기의 관점에서 분석하였다. 그 다음에 TROI 실험에 관찰된 점을 고려하여 증기폭발(steam explosion)의 경우와 급냉(quenching)인 경우에 대해서 최종 용융물 입자 크기 분포를 3.2 절에 분석하였다. 이러한 분석을 기반으로 3.3 절에서는 급냉으로 귀결된 TROI 물질효과 실험을 분석하여 실제 원자로 물질이 증기폭발을 억제하는 물질효과를 분석하였다. 본 논문에서 분석한 TROI 실험의 경우에는 외부 기폭이 없는 용융물-냉각수 반응이며, 외부 기폭이 있는 경우에 대해서는 향후 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

2. TROI 실험

TROI 실험 장치는 상부 압력 용기, 하부 압력 용기, 슬라이딩 밸브, 그리고 반응 용기로 구성되

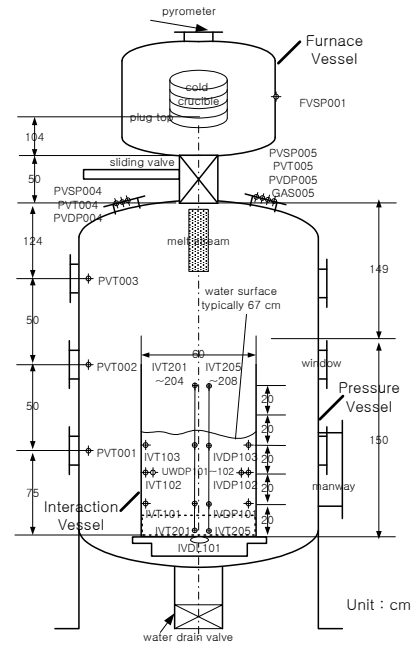


Fig. 1 Diagram of TROI experimental facilities

어 있다. 상하부 압력 용기는 2.0 MPa, 212 oC의 공기에서 견딜 수 있도록 설계하였다. 코륨을 생산을 위하여 저온 용융로 방법론이 TROI 실험에 도입하였는데, 이 방법은 러시아의 Lebedev Institute of Academy Science에서 개발된 것이다.⁽¹²⁾ 상부 압력 용기에는 150 kW, 50 kHz의 유도 가열을 통하여 3000 K 이상의 뜨거운 용융물을 생산하는 저온 용융로를 설치하였다. 용융로 튜브내부에 냉각수로 강제로 순환하는 수냉 방식으로 용융물로부터 방사되는 열로부터 저온 용융로를 보호하고 있다. 코륨이 생산되고 원하는 온도까지 과열이 되면, 저온 용융로 아래 마개를 공기압으로 제거한다. 그리고 펀치를 작동하여 아래 마개 자리에 형성된 얇은 소결층을 깨고 구멍을 만든다. 그러면 용융로에서 생산된 코륨이 구멍을 통해 빠져나가 반응 용기의 냉각수 속으로 자유 낙하한다. 코륨이 다 빠져나가면 슬라이딩 밸브를 닫아서 증기폭발로부터 저온용융로를 보호한다.

하부 압력 용기에는 온도, 대기 압력, 수증 압력을 재기 위한 계기를 설치하였고, 기체 포집기와 고속카메라를 장착하였다. 반응 용기에는 온도계, 압력계, 힘 측정계 등을 설치하였다. 저온용융로의 코륨의 온도를 측정하기 위하여 2 색 광학 고온계(IRCON 3R-35C15-0-0-0-1, 1500~3500 °C, 오차: 측정 범위의 0.3 %)를 상부 압력 용기의 상단에 설치하였다. 반응용기의 수온, 압력용기의 기온 및 용융

물의 낙하 거동을 측정하기 위하여 15 개의 K 형 열전대를 설치하였다. 압전 방식 압력 변환기(PCB Piezotronics Inc., Model 112A, 69 MPa 혹은 20 MPa, 2 초의 rise time)를 반응 용기의 벽면 및 압력 용기의 벽면에 설치하여 증기폭발이 발생하였을 때 동압을 측정하였다. 정압 변환기를 상하부 압력 용기에 설치하여 각각의 대기 압력을 측정하였다. Agilent Technology 사의 VXI 시스템(1 채널당 샘플링 속도: 동적 신호 800 kHz, 정적 신호 1kHz) 을 활용하여 측정된 실험 자료를 PC 에 저장하였다. 고속 디지털 비디오 카메라(Phantom V 4.0, 1000 pps 에서 512x512 픽셀)를 사용하여 증기폭발을 가시화하였다. 하부 압력 용기의 대기의 건분을 추출하여 기체 질량 분광계(gas mass spectro-meter: Finnigan MAT 271) 를 사용하여 기체 색층(gas chromatographic) 분석을 수행하였다.

TROI 실험에서 관측된 것 중의 하나는 용융물-냉각수 반응의 결과가 UO_2 , ZrO_2 , Zr, Steel 등의 코륨의 구성 물질의 비율이 달라짐에 따라서 확연히 달라진다는 점이다.⁽¹³⁾ 용융물-냉각수 반응 실험에서 사용되는 전형적인 코륨은 UO_2 와 ZrO_2 의 80:20 의 혼합물이다. TROI 실험에서는 전형적인 80:20 코륨은 자발적인 증기폭발을 일으키지 않았다. 반면에 70:30 코륨은 자발적인 증기폭발을 확률론적으로 일으켰다. 지르코니아(100 % ZrO_2 용융물)의 경우에는 냉각수의 과냉각도만 충분하다면 거의 대부분 자발적인 증기폭발을 일으켰다. 비록 한 차례씩의 실험밖에 수행하지 못하였지만, 87:13 코륨과 49:51 코륨의 경우도 80:20 코륨처럼 증기폭발을 발생시키지 않았다.

Fig. 2 에는 TROI 실험에서 폭발의 증거로 측정된 반응용기 벽면에서 측정된 수증의 폭발 압력을 제시하였다. 이렇게 측정된 압력파를 기준으로 폭발인지 아니면 단순 급냉인지를 구분할 수 있다. Fig. 3 에는 3cm 직경의 코륨 제트가 깊이 67 cm 의 냉각수에 투입되어 형성된 혼합체의 사진을 제시하였다. 이때 형성된 용융물 입자의 크기 분포, 수증기 분율 분포 등의 혼합체의 조건이 증기폭발을 좌우한다.

Fig. 4⁽¹⁴⁾에서는 UO_2 와 ZrO_2 의 성분비에 따른 외부 기폭을 사용하지 않는 경우에 용융물과 냉각수의 반응시 에너지 변환비를 제시하였다. 이 그림에서는 에너지 변환비의 증기 폭발로 인한 원자로 안전성 분석에서의 큰 영향을 감안하여 그 절대값은 제거하였고, 상대적인 값만을 비교할 수 있도록 하였다. 이 그림을 통해 용융 물질이 같아도

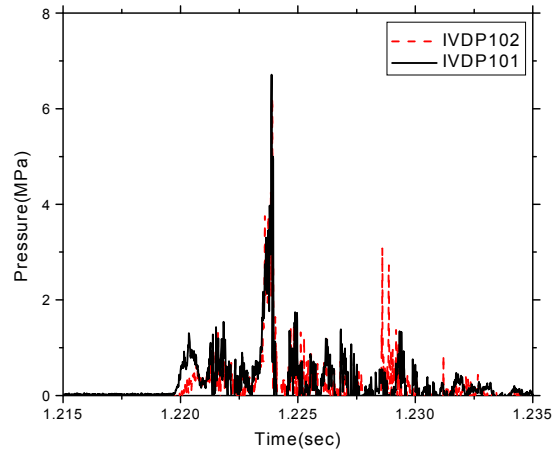


Fig. 2 Measured explosion pressure at TROI-13 Test



Fig. 3 Corium-water mixing behavior at TROI-28

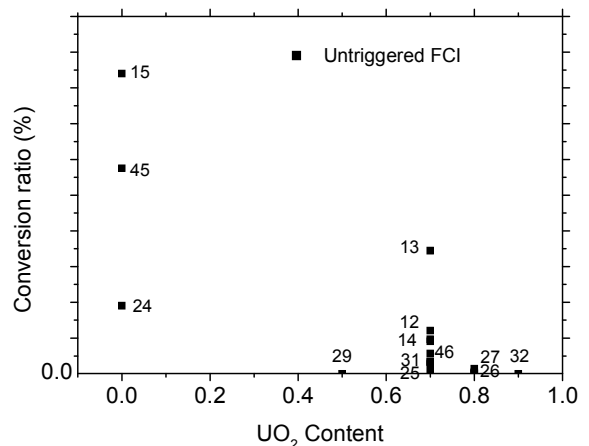


Fig. 4 Conversion ratios of TROI test

조건에서 에너지 변환비는 서로 상이하다는 것을 알 수 있다. 또한 에너지 변환비는 지르코니아, 70:30 코륨, 80:20 코륨 순서로 작아지는 것을 알 수 있다. 이 그림에서 untriggered 는 외부 기폭을 사용하지 않았다는 것을 나타낸다.

초기 냉각수 깊이,⁽¹⁵⁾ 냉각수 단면적,⁽¹⁶⁾ 자유낙 하거리, 대기압력, 코륨 온도 등의 다른 실험 인자가 있으나, TROI 실험에서 밝혀진 이들 인자들의 증기폭발에 미치는 영향은 실험의 횟수가 부족으로 다소 불확실성이 포함 되어있다. 이러한 증기폭발의 민감도 분석 실험 결과를 활용하여 증기폭발의 분석에 활용하기 위해서는 초기 조건, 혼합, 폭발을 유기적으로 연결시켜야 한다. 본 논문의 3 장에서는 TROI 실험을 용융물-냉각수 실험에 대한 용융물 입자 크기 반응 관점에서 분석하여 초기조건, 혼합, 폭발의 유기적인 관계를 밝혔다. 이러한 노력을 통하여 TROI 실험에서 용융물의 물질구성이 증기폭발의 결과에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다.

3. TROI 물질효과 실험에 대한 고화 입자 분포 분석

3.1 선행연구분석

FITS-A 실험⁽⁴⁾은 철-알루미나($\text{Fe-Al}_2\text{O}_3$) 혼합 용융물을 사용하였는데, 증기폭발(steam explosion)이 발생한 경우에 고화 입자의 평균 직경은 용융물 입자의 0.155 ~ 0.260 mm 였고, 증기 피크(steam spike)의 경우에는 2 mm, 급냉의 경우에는 3.8 mm 였다. 급냉(quenching)의 경우에 6.5 mm 이상의 큰 고화 입자들이 13 %를 차지했고, 폭발의 경우에 0.1 mm 이하의 작은 고화 입자들이 35 %를 차지했다. FARO 실험⁽¹⁷⁾에서는 150 kg 의 80:20 코륨을 사용하였는데 증기폭발은 발생하지 않았고, 급냉된 경우에 고화 코륨 입자의 평균 직경은 3.5 ~ 4.8 mm 였다.

KROTOS 실험⁽¹⁸⁾에서는 1.4 ~ 1.7 kg 의 알루미나 (Al_2O_3) 용융물 혹은 2.6 ~ 5.4 kg d 의 코륨을 사용하였다. KROTOS 실험에서 증기폭발이 발생한 경우 고화된 알루미나 입자는 평균 직경이 0.11 ~ 0.7 mm 이고 106 μm 이하의 미세 입자가 349 ~ 682 g 이었다. 증기폭발이 발생하지 않고 급냉이 된 경우에 고화 입자의 평균 직경은 8 ~ 17 mm 이고 106 μm 이하의 미세 입자가 0 ~ 72 g 에 불과했다. 증기폭발이 발생하지 않는 경우에 알루미나 고화 입자의 직경은 8 ~ 17 mm 인데 반해서 코륨의 고화 입자의 직경은 1 ~ 1.7 mm

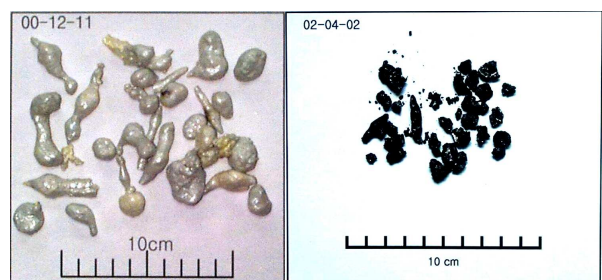
였다.

ALPHA 프로그램⁽¹⁹⁾에서 용융물-냉각수 반응 실험을 위하여 Thermite($\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3 + \text{aluminum}$)로 생산한 알루미나 용융물 10 ~ 20 kg 을 사용하였다. 증기폭발이 발생했을 때 용융물 입자의 평균 직경은 160 ~ 420 μm 였다. ZREX 실험⁽²⁰⁾에서는 지르코늄(Zirconium)을 포함하는 용융물 2 ~ 6 kg 을 사용하였다. 이 실험에서는 외부 기폭 장치를 이용하여 기폭을 하였을 때 증기폭발이 발생하였는데, 냉각수의 과냉각도가 10 ~ 80 K 이고 지르코니아의 함량이 4.8 ~ 92.3 %일 때는, 냉각수의 과냉각도나 지르코니아의 함량에 무관하게 증기폭발이 발생하였다.

급냉된 ZREX-25a 와 ZREX-27 실험에서 관측된 용융물 입자의 평균 직경은 대략 5.9 mm 와 3.9 mm 였다. 고화된 용융물 입자는 직경이 8 mm 이상인 것이 60 %를 차지하였고, 8 mm 이하인 것들은 40 % 를 차지 하였다. 최근에 FARO 와 KROTOS 실험에 대해서 용융물 입자 크기 분포를 분석한 논문이 있다.⁽²¹⁾ FARO 실험에서는 반응용기 바닥에서 고화된 용융물의 얇고 납작한 덩어리가 바닥에 깔리고 그 위로 입자화된 고화 용융물이 가라앉아 있었다. 이러한 거동은 TMI 에서와 마찬가지로의 결과이다. 입자화된 고화 용융물 입자의 크기는 대략 3.0 ~ 4.8 mm 였다. KROTOS 실험에서는 증기폭발로 인해 100 μm 이하의 용융물 입자가 생성되었다.

3.2 급냉과 폭발에서 용융물 입자 크기의 차이

노심 용융물이 냉각수에 떨어졌을 때 일어나는 용융물-냉각수 반응은 급냉(quenching)과 증기폭발(steam explosion) 두 가지로 나눌 수 있다. 폭발적인 반응이 없는 단순 급냉 과정에서는 용융물은 혼합 과정에 의해 용융물 입자로 쪼개지고, 넓어진 열전달 면적을 통해 그 열을 냉각수에 다소 빠르



(a) Zirconia particles (b) Corium particles

Fig. 5 Comparison of big particle group.

게 빼앗긴다. 증기폭발은 높은 압력의 충격과 기계적인 에너지 전달 과정이 포함된 맹렬한 용융물-냉각수 반응이다. 즉, 혼합과정을 통해서 형성된 용융물 입자와 냉각수의 혼합체를 압력파가 진행하면서 용융물 입자를 미세 분쇄하여 그 열을 한꺼번에 냉각수에 부여하여 폭발적인 증기형성으로 주위 구조물에 물리적인 충격을 가한다. 급냉과 증기폭발은 폭발 압력의 측정과 기계적인 에너지의 양을 측정을 통해 구분할 수 있다.

TROI 실험에서는 지르코니아 (ZrO₂), 80:20 코륨, 70:30 코륨 등의 용융물을 사용하여 용융물-냉각수 반응 실험을 수행하였다. TROI 실험의 용융물-냉각수 반응은 용융물의 구성 물질에 따라서 매우 상이한 결과를 보여주었다. TROI 실험에서 지르코니아-냉각수 반응은 코륨-냉각수 반응에 비해 폭발성이 매우 강하다. 그런데, 이렇게 서로 상이한 반응의 결과는 용융물-냉각수 반응의 혼합 단계에 형성되는 용융물 입자의 크기에 의해 체계적으로 설명할 수 있다. 이러한 아이디어는 지르코니아-냉각수 반응과 코륨-냉각수 반응의 결과와 고화된 용융물 입자 크기를 통해서 얻을 수 있었다. Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에서 보면, TROI 실험에서 지르코니아-냉각수 반응에서 생긴 고화된 용융물 입자는 코륨-냉각수 반응에서 생긴 고화된 용융물 입자에 비해서 크기도 크고 그 모양도 훨씬 구형에 가깝다.

TROI 실험에 대해서 급냉의 경우와 증기폭발의 경우에 대해 Table 1 에 비교하였다. Table 1 의 comparison A 에는 지르코니아-냉각수의 반응에서 증기폭발인 경우와 급냉인 경우의 고화 입자 (solidified melt particle) 분포를 제시하였다. TROI-2 실험과 TROI-4 실험은 냉각수의 과냉각도에 다른 실험 조건은 유사하다. 이 실험에서 냉각수의 과냉각도는 각각 68 K 와 81 K 였다. 그러나, TROI-2 실험은 단순 냉각으로 끝났고, TROI-4 실험은 증기폭발로 귀결되었다. TROI-2 실험과 TROI-4 실험이 끝난 뒤 수거된 고화된 용융물 입자의 분포는 서로 상당히 달랐으며 이것은 용융물-냉각수 반응의 결과가 증기폭발과 급냉으로 갈라졌기 때문이다.

급냉으로 귀결된 TROI-2 에서 고화 입자는 6.35 mm 이상이 2 kg (36.4 %)에 달했고, 0.71mm 이하의 것은 단지 0.04 kg (0.7 %)에 불과했다. 반면에 증기폭발로 이어진 TROI-4 실험 에서는 6.35 mm 이상의 고화입자가 겨우 0.18 kg (4.3 %) 이고 0.71

mm 이하의 것은 0.26 kg (6.1 %) 이상이였다. TROI 실험에서 증기폭발은 고화 입자를 반응 용기에서 사출시킨다. 물론, 고화 입자의 분석을 위해 반응용기 밖 압력용기 내부에 있는 고화 입자들은 수거되지만 크기가 작은 것들은 누락될 가능성이 있다. 따라서, TROI-4 실험에서 0.71mm 이하의 0.26 kg (6.1 %)은 실제 값에 비해 같거나 과소 평가된 값이다.

Table 1 의 comparison B 항목에는 70:30 코륨을 사용한 용융물-냉각수 반응의 고화 입자의 크기 분포를 비교하였다. TROI-11 과 TROI-13 의 초기 조건은 실험에서 조절 가능한 범위 내에서 냉각수와 용융물의 조건이 유사하다. 그러나, TROI-11 은 단순 급냉이 되었고, TROI-13 은 증기폭발로 귀결되었다. 급냉으로 귀결된 TROI-11 에서 직경이 4.75 mm 이상인 고화 입자는 2.855 kg (31.9 %) 인 반면에, 직경이 0.71 mm 이하인 고화 입자는 단지 0.09 kg (0.9 %)에 불과하다. 반면, 증기 폭발로 이어진 TROI-13 에서는 각각 0.865 kg (11.2 %)과 2.43 kg (31.4 %)이다.

TROI 실험에서는 지르코니아를 사용한 실험 에서는 만약 냉각수의 과냉각도와 같은 증기폭발에 영향을 주는 요인을 증기폭발이 잘 일어나도록

Table 1 Comparison of particle size distribution between explosive and non-explosive FCI tests

TROI test number	Unit	Comparison A		Comparison B	
		2	4	11	13
UO ₂ / ZrO ₂	w/o	0/100	0/100	70/30	70/30
Steam explosion		NO	SE	NO	SE
Total	kg	5.50	4.216	9.23	7.735
>6.35mm	kg (%)	2.00 (36.4)	0.18 (4.3)	1.490 (16.1)	0.620 (8.0)
4.75 ~ 6.35mm	kg (%)	0.67 (12.2)	1.116 (26.5)	1.365 (14.8)	0.245 (3.2)
2.0 ~ 4.75mm	kg (%)			4.800 (52.0)	2.675 (34.6)
1.0 ~ 2.0mm	kg (%)	0.25 (4.5)	0.540 (12.8)	1.250 (13.6)	1.225 (15.8)
0.71 ~ 1.0mm	kg (%)			0.235 (2.6)	0.540 (7.0)
0.425 ~ 0.71mm	kg (%)	0.04 (0.7)	0.260 (6.1)	0.040 (0.4)	0.965 (12.5)
<0.425mm	kg (%)			0.050 (0.5)	1.465 (18.9)
Shell >50mm	kg (%)	2.54 (46.2)	1.360 (32.3)	0 (0)	0 (0)
Small shell 10~20mm	kg (%)	0 (0)	0.760 (18.0)	0 (0)	0 (0)

맞춰준다면 항상 자발 증기폭발이 발생하였다. 그런, 70:30 코륨 실험에서는 이러한 요인들은 잘 맞춰준다고 하더라도 자발 증기폭발은 확률론적으로 발생하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결론은 Fig. 4 를 통해서도 알 수 있다.

특이한 점은 증기폭발이 발생하지 않은 경우에, 지르코니아-냉각수 반응에서 생성된 고화 입자는 그 크기가 크고, 표면이 매끈한 고른 구형의 형태이나, 70:30 코륨- 냉각수 반응에서 생성된 고화 입자는 그 크기가 상대적으로 작고, 표면이 거칠 거칠한, 그 형태도 불규칙적이다(Fig. 5).

구형 입자와 불규칙한 입자는 표면 장력의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 구형은 상대적으로 표면적이 작아서 열을 잘 보존할 수 있고 이에 대한 효과로 냉각수의 수증기 분율도 상대적으로 작을 것으로 판단된다. 이것은 상대적으로 증기폭발에 유리한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

증기 폭발이 발생하면 고화 입자 크기가 작아지는 Table 1 의 결과는 FITSA 실험,⁽⁴⁾ KROTOS 실험,⁽¹⁸⁾ ALPHA 실험⁽¹⁹⁾에서도 같은 경향을 보이고 있으며, 이러한 점을 3.1. 절에 기술 한 바 있다. 이와 같이 급냉의 경우에 비해서 증기 폭발의 경우에 고화 입자의 크기가 상대적으로 작아 지는 것은 알 수 있었다.

한편, 급냉으로 끝난 경우의 고화 입자의 분포는 증기 폭발로 이어진 경우의 기폭 직전의 혼합 단계의 용융물 입자 크기 분포를 어느 정도 반영하고 있기 때문에, 기폭 직전의 혼합 단계의 용융물 입자 크기 분포와 증기 폭발 후의 용융물 입자 크기 분포의 인과 관계를 반영한다. 즉, Table 1 에서 TROI-2 는 TROI-4 의 혼합 단계의 용융물 입자의 크기 분포를, 또 TROI-11 은 TROI-13 의 혼합 단계의 용융물 입자의 크기 분포를 나타낸다고 볼 수 있다. Table 1 에서 지르코니아를 사용한 급냉으로 귀결된 TROI-2 와 증기폭발로 이어진 TROI-4 실험을 비교하면 6.35 mm 이상의 용융물 입자는 36.4 % 에서 4.3 %로 감소하였고, 반대로 0.71 mm 이하의 작은 입자는 0.7 % 에서 6.1%로 증가였다. 또한 70:30 코륨을 사용한 급냉으로 귀결된 TROI-11 과 증기 폭발로 이어진 TROI-13 을 비교하면 6.35 mm 의 큰 고화 입자는 16.1% 에서 8.0 %로 감소하였고, 0.71 mm 이하의 작은 입자는 0.9%에서 30.4 %로 증가하였다.

이렇게, 증기 폭발의 원동력은 혼합 단계에서 형성된 비교적 큰 용융물 입자가 폭발 단계에서 작은 입자로 쪼개지면서 냉각수에 일시에

전달하는 열 에너지라는 것을 알 수 있다. 또한, 혼합 단계에서의 큰 용융물 입자는 증기 폭발의 잠재 에너지원인 반면에 혼합 단계에서의 작은 용융물 입자는 잠재 에너지원의 손실이라고 볼 수 있다. 특히, 혼합 단계에서 작은 용융물 입자가 많아지면 혼합체의 수증기 분율이 높아지고 이것은 보통 증기폭발의 기폭을 억제한다.

3.3 물질 구성에 따른 고화입자크기 분석

TROI 실험에서 관찰된 것 중의 하나는 폭발 성향이 용융물의 구성 물질 비에 따라서 크게 달라진다는 것이다. 지르코니아-냉각수 반응은 만약 냉각수의 과냉각도만 충분하다면 언제나 자발 증기폭발을 생성하였다. 70:30 코륨-냉각수 반응에서는 과냉각도가 충분한 상태에서 자발 증기폭발이 확률론적으로 발생하였다. 80:20 코륨-냉각수 반응의 경우에는 과냉각도가 충분하더라도 증기폭발 없이 급냉으로 귀결되었다.

용융물-냉각수의 반응이 급냉으로 귀결될 지 아니면 증기폭발로 이어질 지에 영향을 미치는 요소로는 주위 압력, 수증기 분율, 용융물 과열도 등이 있다. Dullforce 등의 실험에 의하면 물이 포화 온도에 가까울수록 증기폭발은 잘 발생하지 않았으며 주석의 온도가 높아지면 증기폭발이 발생하지 않는 물의 온도가 점차 낮아진다.⁽²³⁾ Matsumura 의 자발적 기폭 메커니즘에 의하면 증기막의 안정성이 증기폭발과 관계가 있다.⁽²⁴⁾ Fletcher 의 기폭 연구 분석에 의하면 비응축성 개스의 존재, 고온의 물, 고압 조건으로 기폭을 막을 수 있고, 기폭의 크기는 작을수록 기폭을 막을 수 있다.⁽²⁵⁾ 신용승 등의 실험 연구에 의하면 주석-물 증기폭발에서 물속의 공기 비율을 5%이상 늘리면 증기폭발력을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.⁽²⁶⁾ 이것은 물속의 기체 비율 증가로 증기폭발의 기폭이 폭발로 발달하는 것을 막을 수 있다는 것을 의미한다. KROTOS 실험에서⁽¹⁸⁾ 코륨의 경우 수증기 분율은 13 ~ 31 %에 이르고 증기폭발은 발생하지 않았다. 반면에 알루미늄의 경우에는 수증기 분율이 0.6 ~ 10 %인 경우에 증기폭발이 발생하였고 10 ~ 30 %인 경우에는 증기폭발이 발생하지 않았다. 이렇게, 용융물과 냉각수의 직접적인 접촉이 기폭이 되는 힘이라는 점에서 수증기 분율은 증기폭발이 발생하는 중요한 인자로 판단된다.

또한, 3.2 절에서 제시한 바와 같이 용융물의 입자 크기 분포는 증기 폭발의 잠재력 및 증기

폭발의 기폭성에 관련이 깊은 것으로 판단된다. 이렇게 용융물-냉각수 반응에서 증기폭발의 발생과 폭발 잠재력은 수증기 분율 및 용융물의 입자 크기 분포를 통하여 특정 지을 수 있다. 또한, 수증기 분율은 용융물의 입자 크기 분포에 의해서 어느 정도 좌우된다.

한편, 증기 폭발로 이어진 경우의 용융물의 고화 입자의 크기 분포는 폭발 단계에서 용융물 분쇄 현상에 의해서 혼합 단계에서의 정보를 대체로 잃어 버린다. 하지만, 급냉으로 귀결된 경우의 용융물의 고화 입자의 크기 분포는 혼합 단계의 정보를 보존하고 있다. 이렇게 본 3.3 절에서는 급냉으로 끝난 경우에 대해서 용융물의 고화 입자 크기 분포를 용융물의 구성 물질에 따라서 분석하여 원자로 물질이 증기 폭발을 잘 발생시키지 않은 억제 효과를 밝히고자 한다.

Table 2 에는 TROI 실험 결과를 용융물의 구성 물질에 지르코니아 (TROI-2), 70:30 코륨 (TROI-11), 그리고 80:20 코륨 (TROI-18) 순서로 정리하였다. 지르코니아-냉각수 반응에서의 고화 입자 크기와 코륨-냉각수 반응에서의 고화 입자 크기의 다른 점 중 하나는 고화 입자의 주요 집단이다. 지르코니아-냉각수 반응 (TROI-2)에서는 6.35 mm 이상의 큰 고화 입자가 36.3 %를 차지하고 있다. 그러나 코륨-냉각수 반응 (TROI-11, 18)에서는 2 ~ 4.75 mm 의 비교적 중간 크기의 고화 입자가 38 ~ 52 % 를 차지하고, 6.35 mm 이상의 비교적 큰 크기의 고화 입자는 16 ~ 18 정도로 다소 낮다. 6.35 mm 이상의 비교적 큰 용융물 입자가 증기폭발의 잠재적 에너지원이라는 관점에서 지르코니아-냉각수 반응이 에너지 변환비가 클 수 있는 구조라는 것을 알 수 있다.

한편, Table 2 에서 0.71 mm 이하의 작은 고화 입자가 차지하는 비율은 지르코니아 (TROI-2), 70:30 코륨 (TROI-11), 그리고 80:20 코륨 (TROI-18) 순으로 각각 0.7 %, 0.9%, 그리고 5.3 %로 증가한다. 이것은 혼합체의 수증기 분율은 지르코니아, 70:30 코륨, 그리고 80:20 코륨 순서로 증가할 것이라는 것을 의미한다. 수증기 분율이 증가하면 증기 폭발의 기폭 및 폭발력을 억제하기 때문에 이것에 의하면 증기 폭발의 잠재력은 지르코니아, 70:30 코륨, 그리고 80:20 코륨 순으로 작아진다.

지르코니아 (TROI-2)는 두 70:30 코륨 (TROI-11)과 80:20 코륨 (TROI-18)에 비해서 큰 입자의

비율은 36.3 %로 2 배 정도 크고, 작은 입자의 비율도 0.7 %로 작다. 따라서 지르코니아는 코륨에 비해서 증기 폭발 잠재력이 크다.

또, 70:30 코륨 (TROI-11)은 6.35 mm 이 상의 입자는 16.1 %로 18.4 %인 80:20 코륨 (TROI-18)에 비해서 다소 작아 증기 폭발의 잠재력은 80:20 코륨과 비슷하거나 다소 작을 것으로 판단된다. 하지만, 70:30 코륨 (TROI-11)에서 0.71 mm 이하의 작은 고화 입자가 차지하는 비율은 0.9 % 로 80:20 코륨 (TROI-18) 의 5.3 %의 비해서는 매우 작다. 이렇게 70:30 코륨의 증기폭발의 발생 또는 잠재력은 80:20 코륨에 비해 큰 것으로 판단된다.

이러한 고화 입자에 의한 증기폭발 잠재력에 대한 분석 결과는 TROI 의 실험에서 측정된 폭발압력으로 구분한 증기폭발의 결과와 일치한다. TROI 실험에서는 지르코니아-냉각수 반응이 코륨-냉각수 반응에 비해서 자발 폭발 발생 가능성이 높고 그 폭발력도 강하다. 또한, 70:30 코륨이 80:20 코륨에 비해서 증기 폭발 횟수 및 폭발력도 큰 것으로 나타났다.

한편, 용융물 입자의 크기를 결정하는 것으로 알려진 대표적인 무차원 수는 용융물의 표면장력에 대한 관성력의 비로 나타나는 식 (1)과 Weber

Table 2 Comparison of particle size distribution between explosive and non-explosive FCI tests

TROI test number	Unit	2	11	18
UO ₂ /ZrO ₂ /Zr	w/o	0/100	70/30	78/22
Ambient Pressure	MPa	0.1	0.1	0.118
Subcooling	°	8	77	85
Water Depth	m	67	67	67
Water Area	m ²	0.36	0.283	0.283
Total	kg	5.50	9.23	9.055
>6.35mm	kg (%)	2.0 (36.3)	1.490 (16.1)	1.670 (18.4)
4.75~ 6.35mm	kg (%)	0.67 (12)	1.365 (14.8)	1.415 (15.6)
2.0 ~ 4.75mm	kg (%)		4.800 (52.0)	3.455 (38.2)
1.0 ~ 2.0mm	kg (%)	0.25 (5)	1.250 (13.6)	1.595 (17.6)
0.71 ~ 1.0mm	kg (%)		0.235 (2.6)	0.440 (4.9)
0.425 ~ 0.71mm	kg (%)	0.04 (0.7)	0.040 (0.4)	0.405 (4.5)
<0.425mm	kg (%)		0.050 (0.5)	0.075 (0.8)

number 이다. 또한, 용융물-냉각수 반응에서 용융물 입자의 파쇄에 의한 용융물 입자 크기의 변동은 식 (2)와 같이 상대속도, 밀도, Weber number 등으로 구성된다.⁽²²⁾

$$We = \frac{\text{inertia of fuel drop}}{\text{surface tension}} = \frac{\rho_c U_{rel} D_f}{\sigma_f} \quad (1)$$

$$\frac{dD_f}{dt} = -f_0 \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_f}} U_{rel} \quad (2)$$

$$f_0 = \left(0.1093 - 0.078 \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_f}} \right) We^{0.246} \quad (3)$$

여기서, ρ_c , ρ_f , U_{rel} , D_f , σ_f , 그리고 t 는 각각 냉각수의 밀도, 용융물의 밀도, 상대 속도, 용융물의 직경, 용융물의 표면 장력, 시간을 나타낸다.

식 (1)에서 최종적인 용융물의 직경은 냉각수의 밀도, 상대속도, 용융물의 표면 장력으로 나타난다. 이때 냉각수의 밀도, 용융물의 표면 장력은 동일하므로 용융물의 직경은 용융물과 냉각수의 상대속도로 나타내게 된다. 식 (1)이 최종적인 입자 크기에 관한 식이라면 식 (2)는 동력학적인 입자 크기의 변동을 나타낸다. 이 식에도 식 (1)과 마찬가지로 용융물과 냉각수의 상대속도에 의해 동력학적인 입자 크기 변동이 결정된다. 각각 같은 속도로 냉각수에 떨어진 용융물은 밀도가 무거울 수록 부력을 적게 받아 속도가 빠르다. 따라서 상대적으로 무거운 용융물일수록 용융물 입자 감소율도 크고, 최종적인 용융물의 직경은 작아지게 된다. 지르코니아, 70:30 코륨, 80:20 코륨의 밀도는 각각 5096, 7263, 7625 kg/m³ 로 점점 무거워 진다.

한편 고온의 용융물의 표면 장력에 대해서는 물질의 구성과 무관하게 대략 0.4~0.6 J/m² 의 일률적인 값을 사용하고 있다. 표면 장력이 일정한 가운데 밀도 차이의 부력으로 인한 상대속도 차이가 밀도가 작은 지르코니아가 제일 작고 밀도가 큰 80:20 코륨에서 상대속도 차이가 제일 크다. 따라서 식 (1)과 식 (2)에 의하여 용융물 입자 크기는 지르코니아, 70:30 코륨, 80:20 코륨 순으로 작아 진다. 이것은 Table 2에서 급냉으로 귀결된 경우에 용융물의 입자크기가 지르코니아, 70:30 코륨, 80:20 코륨 순으로 작아지는 현상을 설명할 수 있다.

Table 2의 TROI 실험 결과는 3.1 절에서 소개한 기존 실험의 결과와도 일치한다. KROTOS

실험에서 알루미늄-냉각수 반응 실험에서 증기 폭발이 발생하지 않고 급냉으로 귀결된 경우에 고화 입자의 평균 크기는 8 ~ 17 mm 였는데 반해, FARO 실험에서 코륨-냉각수 반응 실험에서 증기 폭발이 발생하지 않고 급냉으로 귀결된 경우에 고화 입자의 평균 크기는 3.5 ~ 4.8 mm 인 것으로 나타났다. 이렇게 급냉에서 고화 입자의 크기가 상대적으로 큰 알루미늄의 경우가 코륨에 비해서 그 폭발성이 매우 큰 것으로 알려져 있다.

4. 결 론

TROI 실험에서는 용융물의 물질 차이가 증기폭발의 발생이나 증기폭발의 강도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 지르코니아-냉각수 반응은 냉각수의 과냉각도만 충분하면 중간 강도의 자발 증기폭발이 쉽게 발생한다. 70:30 코륨-냉각수 반응은 냉각수의 과냉각도가 충분하면 확률론적으로 자발 증기폭발이 발생한다. 80:20 코륨-냉각수 반응은 냉각수의 과냉각도가 충분해도 자발 증기폭발이 발생하지 않는다. 심지어 외부 기폭에 의한 증기폭발도 발생시키기 어렵다.

TROI 실험에서 압력과 측정을 통하여 얻은 결과를 고려하여 급냉의 경우와 증기 폭발로 이어진 경우에 대해서 용융물 입자 크기를 비교하였다. 용융물-냉각수 반응의 결과가 증기폭발일 때는 급냉일 때에 비해서 6.35 mm 이상의 대형 고화 입자는 적게 생성되고, 0.71 mm 소형 고화 입자는 더 많이 생성된다. 증기폭발에 관여하는 대형 고화 입자의 크기 및 모양 등은 용융물 구성 물질에 따라 달라진다.

혼합 단계에서의 혼합체의 특성이 용융물-냉각수 반응의 결과를 결정하고, 혼합체의 특성은 급냉의 경우가 증기 폭발로 이어진 경우보다 훨씬 더 잘 보존한다. 따라서, 급냉으로 귀결된 TROI 실험을 고화 입자 크기 분포의 관점에서 분석하였다. 자발적인 증기 폭발이 잘 발생하고 에너지 변환비가 큰 지르코니아-냉각수 반응에서는 대형 입자가 많았고 소형 입자가 적었다. 반면에 자발적인 증기 폭발이 잘 발생하지 않고 에너지 변환비가 상대적으로 작은 80:20 코륨-냉각수 반응에서는 상대적으로 소형 입자가 많았고 대형 입자는 적었다.

혼합 단계에서 용융물의 입자 크기가 물질에 따라 차이가 나는 것은 주로 밀도 차이에 의한 부력의 차이 때문인 것으로 판단된다. 밀도가 낮은 지르코니아의 경우 밀도가 큰 코륨에 비해

물속에서의 부력이 크다. 따라서 냉각수와 용융물과의 상대 속도 차이가 작게 되고 용융물 입자도 코름 만큼 작게 파쇄되지 않는다. 한편, 코름의 상사물로 많이 사용되었던 알루미늄은 그 밀도가 지르코니아 보다도 작으며 이러한 점에서 용융물 입자가 상대적으로 크고 증기폭발 발생 또는 증기 폭발 강도가 코름에 비해 매우 큰 것으로 판단된다.

이렇게 용융물-냉각수 반응을 수치적으로 계산함에 있어서 적절한 용융물 입자의 크기를 예측하는 것이 매우 중요하다. 용융물 입자 크기의 적절한 예측을 위해서는 상대 속도의 적절한 예측 외에도, 용융물의 표면 장력의 값에 대한 신뢰도 제고 및 점성도에 대한 적절한 고려 등의 노력도 필요하다. 한편, 용융물-냉각수 반응에서 중요한 역할을 하는 수증기 분율을 예측할 때 용융물 입자의 크기 외에도 용융물의 온도와 용융물의 열 전도도 등도 어느 정도 역할을 하는 만큼 이에 대한 적절한 고려가 있어야 한다.

후 기

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학기술재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.(연구과제 관리코드: M20702040004-08M0204-00410)

참고문헌

- (1) Song, J. H., Park, I. K., Shin, Y. S., Kim, J. H., Hong, S. W., Min, B. T. and Kim, H. D., 2003, "Fuel Coolant Interaction Experiments in TROI using a UO₂/ZrO₂ Mixture," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 222, pp.1~15.
- (2) 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.
- (3) Matsumura, K. and Nariai, H., 1996, "Self-Triggering Mechanism of Vapor Explosions for a Molten Tin and Water System," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 33, No.4, pp. 298~306.
- (4) Mitchell, D. E., Corradini, M. L. and Tarbell, W. W., 1981, *Intermediate Scale Steam Explosion Phenomena: Experiments and Analysis*, NUREG/CR-2145, SAND81-0124, SNL.
- (5) 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.
- (6) Huhtiniemi, I. and Magallon, D., 2001, "Insight into Steam Explosions with Corium Melts in KROTOS," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 204, pp. 391~400.
- (7) Park, I.K., Kim, J.H., Min, B.T., 2008, "An Evaluation of the Ex-vessel Steam Explosion Load against TROI Experimental Results," *Transactions of the KSME B*, Vol. 33, No. 8, pp. 622~628. 2009
- (8) 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.
- (9) Basu, S. and Ginsberg, T., 1996, *A Reassessment of the Potential for an Alpha-Mode containment Failure and a Review of the Current Understanding of Broader Fuel-Coolant Interaction Issues*, Second Steam Explosion Review group Workshop, NUREG-1524, USNRC.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Aleksandrov, V. I., Osiko, V. V., Prokhorov, A. M., and Tatarntsev, V. M., 1978, "Synthesis and Crystal Growth of Refractory Materials by RF Melting in a Cold Container, Chapter 6," *Current Topics in Materials Science*, Vol. 1, Edited by E. Kaldis, North-Holland Publishing Company .
- (13) 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.
- (14) Baek, W.P., Hong, S.W., 2008, "Overview of the TROI Facility and Roles in the SERENA Project," *1st PRG Meeting (Kick-off Meeting) of the OECD-SERENA Project*, NEA Headquarters, Issy-les-Moulineaux, France, 15-16 January 2008.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) Magallon, D., Hohmann, H., 1997, "Experimental Investigation of 150-kg-scale Corium Melt Jet Quenching in Water," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 177, pp.321~337.
- (18) Huhtiniemi, I., Magallon, D., Hohmann, H., 1999, "Results of Recent KROTOS FCI Tests: Alumina versus Corium Melts," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 189, pp. 379~389.
- (19) Ymanao, N., Maruyama, Y., Kudo, T., Hidaka, A., Sugimoto, J., 1995, "Phenomenological Studies on Melt-coolant Interactions in the ALPHA Program," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 155, pp. 369~389.
- (20) Cho, D. H., Armstrong, D. R., Gunther, W. H., 1998, *Experiments on Interactions between Zirconium-Containing Melt and Water*, NUREG/CR-5372, ANL.
- (21) Magallon, D., 2006, "Characteristics of Corium Debris Bed Generated in Large-scale Fuel-coolant Interaction Experiments," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 236, pp.1998~2009.
- (22) Chu, C. C., 1986, *One-Dimensional Transient Fluid Model for Fuel-Coolant Interaction Analysis*, Ph. D. Thesis, University of Wisconsin-Madison.
- (23) Dullforce, T. A., Buchanan, D. J. and Peckover, R. S., 1976, "Self-Triggering of Small-Scale Fuel-Coolant Interactions: I. Experiment," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 9, pp. 1295~1303.
- (24) Fletcher, D. F., 1995, "Steam Explosion Triggering: A Review of Theoretical and Experimental Study Investigations," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 155, pp. 27~36.
- (25) Matsumura, K. and Nariai, H., 1996, "Self-Triggering Mechanism of Vapor Explosions for a Molten Tin and Water System," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 33, pp. 298~306.
- (26) Sin, Y. S., Kim, J. H., Hong, S. W., Song, J. H. and Kim, H. D., 2002, "Study on Effect of Air Bubble upon Vapor Explosions with Tin-Water System," *KNS Spring Meeting*.