2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

용융물 재배치 과정에 대한 LAVA 실험 결과 분석

Analyses of the LAVA Experimental Results on Melt Relocation Progress

강경호, 조영로, 김종환, 박래준, 김상백, 김희동
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

간극 냉각을 통한 노심용융물의 노내 냉각 가능성을 규명하기 위해 수행한 LAVA 실험에서 파편층과 용융물 풀의 형성 및 냉각수로 전달되는 열 에너지 비율 등 용융물 재배치 과정에 대한 실험 결과를 분석하였다. 실험 조건에 따라 용융물 재배치 과정에서 용융물 질량의 10.0 ~ 20.0 % 가량이 입자화 되었고 전체 용융물 열 에너지의 15.5 ~ 47.5 % 정도가 냉각수로 전달되었다. Al_2O_3 / Fe 용융물 실험에 비해 Al_2O_3 용융물을 이용한 실험에서 냉각수로 전달되는 열 에너지의 비율이 증가하였고 Al_2O_3 용융물을 이용한 실험에서는 파편층이 많이 생성된 실험에서 열 에너지 전달 비율이 증가하였다. TEXAS-III 코드를 이용한 용융물 재배치 과정에 대한 해석 결과와 Epstein 상관식을 이용한 파편층의 생성 양에 대한 계산 결과도 LAVA 실험 결과와 유사한 범위를 나타내었다. LAVA 실험 결과에서 나타난 파편층의 생성 비율과 냉각수로 전달되는 열 에너지의 비율을 고려하여 용융물 풀의 초기 온도 값을 계산하였다.

Abstract

The analyses of the melt relocation progress focused on the formation of the fragmented particles and the energy transfer to surrounding water have been performed for the LAVA experiments whose objectives are to investigate the in-vessel corium retention through a gap cooling. During the melt relocation process 10.0 to 20.0 % of the melt mass was fragmented and also 15.5 to 47.5 % of the thermal energy of the melt was transferred to water inside the lower head vessel. The increase of the fragmented particles leads to the pressurization of the LAVA vessel and the heat transfer to water, which reduces the initial thermal attack from the melt after all. The experimental results are coincident with the results of the TEXAS-III code calculation and also simple model evaluations on the melt relocation progress. Using the fractions of the fragmented particles and energy transfer to water in the LAVA experiments, the initial temperature of the melt pool was evaluated.

1. 서론

1979 년에 발생한 미국 TMI-2 원전 사고에서는 원자로 노심이 손상되어 원자로 용기 하부 반구에 용융물 풀(pool)을 형성하는 사고가 발생하였으나 원자로 하부의 냉각수에 의해 용융물이 냉각되어 사고가 종결되었다. TMI-2 사고 경위 및 결과에 대한 분석 결과 노심용융물과 원자로 용기 하부 반구 내벽 사이의 미세한 간극 내부에서 비등 열 전달에 의한 열 제거가 유력한 냉각 기구로 제기되었다[1,2]. 간극을 통한 노심 용융물의 냉각 기구가 규명되면 사고의 진행을 원자로 용기 내부에서 종결 시킬 수 있으며 원자로 용기의 파손으로 인해 원자로 용기 외부에서 발생할 수 있는 복잡한 사고 현상에 대한 대처 방안을 단순화할 수 있다. 중대사고 관리 전략 관점에서 간극 냉각(gap cooling)을 노심 용융물의 노내 냉각 기구로 적용하기 위해서는 용융물 재배치 과정 후 간극의 형성 여부 및 생성 원리 그리고 간극을 통한 냉각 능력 등 전반적인 간극 냉각 특성이 규명되어야 한다.

노심 용융물과 원자로 용기 하부 반구 내벽 사이에서 간극의 형성 여부 및 생성 원리를 규명하고 노심 용융물과 반구의 열적 거동에 대한 간극의 영향을 분석하기 위하여 LAVA(Lower-plenum Arrested Vessel Attack) 실험을 수행하였다. LAVA 실험에서는 노심 용융물의 상사 물로 Al_2O_3/Fe 용융물 (혹은 Al_2O_3 용융물)을 사용하고 원자로 용기 하부 반구를 1/8 선형 축소한 반구형 반응 용기를 이용하여 노심 손상 후기 과정에서 노심 용융물이 원자로 하부 용기로 재배치되는 과정 및 이후의 용융물 풀과 원자로 용기의 냉각 과정을 실험하였다. LAVA 실험에서는 용융물의 재배치 과정 중 용융물과 냉각수의 반응에 의해 용융물 파편층과 용융물 풀(pool)이 형성되고 용융물 열 에너지의 일부분이 냉각수로 전달된다. 용융물 풀은 고온 상태를 지속적으로 유지하여 반구에 열적 부하를 주게 됨으로써 용융물 풀의 형성은 용융물의 냉각 및 반구의 건전성을 평가하는데 매우 중요하게 작용한다. 따라서 LAVA 실험에서 간극의 형성과 간극을 통한 냉각 특성을 규명하기 위해서는 용융물 파편층과 용융물 풀의 형성 및 냉각수로 전달되는 열 에너지의 정량화 등 재배치 과정에 대한 분석이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 파편층 입자의 형성과 LAVA 실험 용기 내부의 압력 측정 값을 분석하고 TEXAS-III 코드와 간단한 모델을 이용한 해석 연구를 통하여 LAVA 실험에서 용융물 재배치 과정을 고찰하였다.

2. LAVA 실험의 개요

LAVA 실험은 고온 용융물과 냉각수가 반응하여 발생할 수 있는 증기 폭발 현상을 억제하고 중대사고 시 저압 사고 경위를 모사하기 위하여 17 기압의 초기 압력 조건에서 실험을 수행하였다. 노심 용융물의 상사 물로 Al_2O_3/Fe 용융물 (혹은 Al_2O_3 용융물)을 사용하고 원자로 용기 하부 반구를 1/8 선형 축소한 반구형 반응 용기(내부 직경: 50 cm, 두께: 2.5 cm)를 이용하여 내부 직경 2.4m, 높이 4.8m 의 LAVA 압력 용기 내부에서 실험을 수행하였다. LAVA 실험 과정은 반응 도가니에서 생성된 용융물이 반구 하부의 냉각수와 접촉하여 파편층(fragmented particles)을 형성하는 재배치 과정과 재배치되어 형성된 용융물 풀(pool)의 냉각 과정으로 나눌 수 있다.

LAVA 실험에서는 간극을 통한 노심용융물과 반구의 냉각 특성을 규명하기 위해 용융물 재배치 과정 및 용융물과 반구 내벽 사이에서 간극 형성과 반구의 열적 거동에 영향을 미치는

실험 인자로 원자로 용기 내외부의 압력 부하, 냉각수 과냉각도(subcooling) 및 수위 그리고 용융물의 성분과 질량을 변화 시켜서 총 12 회 실험을 수행하였다. 구체적인 실험 조건은 표 1 에 기술하였다. 반구 내, 외부에 작용하는 압력 부하 (pressure load)는 반응 중 반구의 변형과 이에 따른 간극 형성에 영향을 미치며 냉각수의 과냉각도 및 수위는 용융물 재배치 과정 중 냉각수로 전달되는 열 에너지의 전달 비율과 파편층 및 용융물 풀의 형성에 영향을 미쳐서 결국 반구 내부로 전달되는 열적 부하 (thermal load)를 결정하는 주요한 인자이다. LAVA 실험에서 노심용융물의 상사 물로 사용한 Al_2O_3/Fe 용융물과 Al_2O_3 용융물은 고화 온도와 밀도 그리고 용융물 내부의 다공성 등 열역학적, 재료적 특성이 상이하다. Al_2O_3 용융물은 Fe 용융물에 비해 고화 온도가 500K 이상 높고 용융물 층 내부에 다공성이 크다. 그리고 용융 상태에서 Al_2O_3 용융물의 밀도는 약 2600kg/m^3 이며 Fe 용융물의 밀도는 약 7000 kg/m^3 로서 밀도 차이가 많이 난다. 이와 같은 용융물의 열역학적, 재료적 특성의 차이는 파편층 형성과 냉각수로 전달되는 열 에너지 비율 등 용융물 재배치 과정 중 용융물의 주입 특성을 결정하며 이후에 간극의 형성과 간극 냉각 특성을 좌우한다.

본 논문에서는 LAVA 실험에서 용융물의 재배치 과정에 초점을 맞춰서 실험 조건에 따른 용융물 파편층의 형성과 용융물과 냉각수 사이의 열 전달 특성에 대하여 실험 결과를 분석하였다. 이와 더불어 TEXAS-III 코드와 간단한 모델을 이용하여 LAVA 실험에서 용융물 재배치 과정에 대한 해석 연구를 수행하였다.

3. LAVA 실험의 용융물 재배치 과정에 대한 분석

LAVA 실험에서 용융물 재배치 과정 중 냉각수로 전달되는 열 에너지 양과 용융물 파편층의 형성에 대하여 실험 결과를 분석하였다. 실험 결과 분석을 통해 구한 재배치 과정에서 형성되는 파편층의 질량과 냉각수로 전달되는 열 에너지의 양을 이용하여 용융물 풀의 초기 온도를 계산하였다.

3-1. 용융물 재배치 과정 중의 에너지 전달

용융물 재배치 과정 중 용융물의 파쇄(fragmentation) 과정에 의해 용융물 열 에너지의 일부분은 냉각수로 전달되고 나머지는 용융물 풀에 남아 결국 반구 내부에 가해지는 초기의 열적 부하를 결정하게 된다. 실험 중 측정한 LAVA 실험 용기 내부의 압력 변화를 이용하여 수증기 발생 율을 계산하고 더불어 용융물에 의해 냉각수에 전달되는 열속을 정량화 하였다.

실험 용기 내부의 압력 상승 율을 토대로 이상 기체 상태 방정식을 근간으로 하는 FAI[3] 방법을 이용하여 각 실험의 수증기 발생 율(dm/dt)과 냉각수에 전달되는 에너지 유속(E)을 식 (1)과 식 (2)을 이용하여 각각 계산하였다. 식 (1)에서 V 는 LAVA 실험 용기 내부의 체적이고 dP/dt 는 실험 용기의 압력 상승 율을 나타낸다. 식 (2)에서 A_{cross} 는 반구 내부의 단면적이고 h_{fg} 는 수증기의 기화열을 나타낸다. 각 실험 별 수증기 발생 율과 냉각수에 전달되는 에너지 유속을 표 2 에 정리하였다. LAVA 실험 용기 내부의 측정 압력(P_total)은 초기에 thermite 반응 열에 의해 발생한 압력 상승 값(P_thermite)과 용융물 재배치 과정 중에 수증기 발생으로 인한 압력 상승

값(P_steam)을 더한 값으로 수증기 발생 율은 수증기 발생으로 인한 압력 상승 값을 이용하여 계산하였다. Thermite 반응 열에 의한 압력 상승과 수증기 발생에 의한 압력 상승의 발생 시간 차이에 의해 LAVA 실험 용기 내부의 압력 상승이 단계적 특성을 보이므로 두 성분의 구분이 가능하다. 압력 상승 곡선에서 다소 오차는 존재하지만 30kg 의 Al_2O_3 용융물을 주입한 실험의 경우 평균적으로 약 1.7bar 의 압력 상승이 thermite 반응 과정에서 발생한 것으로 나타났다.

$$\frac{dm}{dt} = m_{evap} = \frac{(MW)V}{RT}\frac{dP}{dt} \qquad (1)$$

$$E = \frac{m_{evap} h_{fg}}{A_{cross}} \qquad (2)$$

LAVA 실험에서 측정된 실험 용기 내부의 압력 변화를 보면 용융물 재배치 과정의 차이로 인해 각 실험 별로 압력 상승에 소요된 시간이 상이하였다. 각 실험 별로 압력 상승에 소요된 시간(Dt)을 고려하여 용융물의 재배치 과정 중에 냉각수를 가열하고 수증기 화하는데 사용된 에너지 양($E_{relocation}$)은 다음 식 (3)으로 나타낼 수 있으며 용융물의 총 에너지(E_{total})는 식 (4)의 LAVA 실험에서 사용한 thermite 용융물의 화학 반응 식을 이용하여 계산하였다. 에너지 전달량과 thermite 반응을 통해 생성된 용융물의 전체 열 에너지를 비교하여 용융물 재배치 과정 중 손실되는 에너지 분율을 계산하였다. 전체 용융물의 열 에너지 및 재배치 과정에서 손실되는 에너지 분율에 대한 계산 결과를 표 3 에 정리하였다.

$$E_{relocation} = E \cdot \Delta t \cdot A_{cross} + M_w c_p \Delta T \qquad (3)$$

$$2Al + Fe_2O_3 \rightarrow Al_2O_3 + Fe + 3978kJ/kg \qquad (4)$$

$E_{total} = M_{melt} \times 3978kJ/kg$ (용융물의 총 에너지)

표 3 에 정리한 용융물 재배치 과정 중 냉각수에 전달되는 에너지 양에 대한 계산 결과를 보면 냉각수 수위가 낮았던 LAVA-8 실험의 경우에 냉각수에 전달되는 에너지 양 및 전체 용융물 열 에너지에 대한 전달 에너지의 분율이 현격히 작은 것을 알 수 있다. 그리고 Al_2O_3/Fe 용융물을 주입한 LAVA-1, 2, 6 실험의 경우가 Al_2O_3 용융물을 주입한 나머지 실험에 비해 전체 용융물의 열 에너지에 대한 냉각수에 전달되는 에너지의 분율이 작게 나타났다. 이 같은 결과는 표 5 에 정리한 파쇄 용융물 입자의 생성 율에서도 나타나듯이 Fe 용융물이 주입되는 경우에 Fe 용융물은 용융물 풀을 대부분 형성하며 Al_2O_3 파쇄 용융물 입자도 적게 생성됨으로써 LAVA 실험 용기 내부의 압력 상승 값이 작게 나타나 용융물에 의해 냉각수로 전달되는 에너지가 제한되었다는 것을 보여준다.

용융물의 질량을 증가하여 수행한 LAVA-11, LAVA-12 실험 결과를 보면 냉각수에 전달되는 열 에너지는 다른 LAVA 실험에 비해 현격히 높지만 용융물의 총 에너지에 대한 냉각수로 전달되는 에너지의 비율은 다른 Al_2O_3 용융물 실험 결과와 큰 차이를 보이지 않았다. FARO 실험[4,5]에서는

용융물의 질량과 냉각수의 질량이 증가할수록 용융물 재배치 과정 중 냉각수로 전달되는 열 에너지의 비율이 증가하였다. 냉각수 질량 면에서 LAVA-8 실험과 다른 LAVA 실험 결과를 비교하면 위와 같은 경향을 확인할 수 있다. 그러나 LAVA-11, 12 실험에서는 냉각수의 질량은 기존 LAVA 실험과 동일하게 설정한 반면 용융물의 질량은 기존 실험에 비해 높게 설정하였다. 용융물 재배치 과정 중 냉각수로 전달되는 용융물의 열 에너지의 양은 증가하였으나 열 에너지 전달 비율은 큰 차이를 보이지 않았다. LAVA 실험에서 설정한 용융물과 냉각수의 질량 범위에서는 냉각수의 초기 질량이 용융물 재배치 과정 중 열 에너지 전달 비율에 결정적인 영향을 미친 것으로 생각된다. 그러나 LAVA 실험의 경우 용융물 질량과 냉각수 질량의 범위가 제한적이기 때문에 현 단계에서 용융물과 냉각수의 질량에 따른 절대적인 열 에너지 전달 비율을 결정하기에는 한계가 존재한다.

3-2. 파쇄 용융물 입자의 형성

반응이 종결된 후 반구 내부에 고화 되어 있는 용융물의 형상을 보면 고화 용융물 덩어리(cake)가 형성되고 상단에 파쇄 용융물 입자가 쌓여있는 것을 알 수 있다. LAVA 실험에서 파쇄 용융물 입자의 총 질량은 대체로 냉각수의 초기 과냉각도에 반비례하는 경향을 나타내었다. 그림 1 은 Al_2O_3 용융물 실험에 대하여 냉각수 과냉각도와 파편층의 생성 질량 사이의 관계를 보여준다. 냉각수 과냉도를 낮게 설정하고 수행한 실험에서는 용융물이 상대적으로 고온의 냉각수로 주입되면서 용융물과 냉각수 접촉 면 부근에서 격렬한 비등 현상이 발생하여 용융물의 입자 화가 증대되었다. LAVA 실험에서 보여진 냉각수 과냉각도와 용융물 파편층의 생성 질량과의 관계는 FARO 실험과 같은 기존 FCI 실험 결과와 반대 경향을 나타낸다. 일반적으로 냉각수 과냉각도가 증가할수록 응축 현상이 활성화되어 압력 상승을 낮추게 된다. 반면 응축 현상이 활성화되어 기공률(void fraction)이 낮아질수록 파쇄 용융물 입자의 질량은 증가하여 냉각수로 전달되는 열량이 커지고 결국 압력 상승이 높아진다. 그러나 냉각수 과냉각도가 낮을수록 파쇄 용융물 입자의 질량은 감소하여 냉각수로 전달되는 열 에너지가 제한된다. 그러므로 냉각수 과냉각도가 증가함에 따라 위의 두 가지 현상이 상충되어 어떤 경향이 우세할 것이라는 결론을 내리기에는 무리가 있다[6].

위에서 언급한 냉각수 과냉각도에 따른 파쇄 용융물 입자의 형성에 대한 상관 관계는 TEXAS 모델[7]에서 사용한 파편층의 생성 율(m_f)에 관한 식에서도 알 수 있다. 식 (5)는 TEXAS 모델에서 사용한 파편층의 생성 율에 관한 상관식을 보여준다. 식 (5)에서 냉각수 기공률에 관한 보정 계수(F)는 기공률이 낮을수록 큰 값을 나타낸다. 따라서 냉각수 과냉각도가 증가할수록 기공률이 낮아져서 파쇄 용융물 입자의 생성율을 증가시킨다. 그러나 동시에 냉각수 과냉각도가 증가할수록 냉각수의 밀도(r_c)가 증가하여 파쇄 용융물 입자의 생성 율을 감소시킨다. 결국 위에서도 언급하였듯이 냉각수 과냉각도에 따른 파쇄 용융물 입자의 생성 율은 관련 인자에 따라 서로 다른 경향을 나타낸다.

$$\dot{m}_f = C r_f 4pR_p^2 N_p V_{jet} F \quad \text{(5)}$$

$$V_{jet} = \left(\frac{P - P_{th}}{r_c} \right)^{0.5}$$

용융물 입자의 직경은 수 mm 에서 수 cm 까지 다양한 분포를 보였다. 표 4 는 실험 별 파쇄 용융물 입자 직경의 분포를 정리한 것이다. 용융물 입자의 대부분은 직경 5.7 mm 이상을 나타내었고 2.0 mm 이하의 직경을 갖는 입자의 분율은 10.0 % 미만을 나타내었다. 이와 같은 파쇄 용융물 입자 직경의 분포는 용융물의 냉각 관점에서 실험을 수행한 FARO 실험 결과[4,5]와 유사한 분포를 나타내며 Al_2O_3 용융물을 이용하여 증기 폭발 현상을 실험한 일본 ALPHA 실험[8]에서 측정된 mm 크기의 입자 직경보다는 큰 값을 나타낸다. 이 같은 결과는 LAVA 실험에서 용융물이 재배치 과정 중 증기 폭발 현상과 같은 급격한 열 전달 과정을 거치지 않고 냉각되었다는 사실을 의미한다. 파쇄 용융물 입자 직경의 크기에서 실험 조건에 따른 별다른 특징은 없었다. 그림 2 는 대표적인 파쇄 용융물 입자의 사진을 보여준다. 파쇄 용융물 입자의 크기가 작고 완벽한 원형을 띄는 것은 용융물이 급격한 냉각 과정을 거친 경우를 나타내며 반면에 파쇄 용융물 입자가 불규칙한 형상을 보이고 수 cm 의 크기를 갖는 것은 용융물이 비교적 더딘 냉각 과정을 거친 것을 의미한다[4,5,8].

LAVA 실험과 같이 고온 용융물이 냉각수 층을 통과하면서 재배치되면 용융물은 파쇄(fragmentation) 과정을 거쳐 일부분은 입자화 되고 나머지는 용융물 풀(pool)을 형성하여 결국 고화 후 용융물 덩어리(cake) 형태를 갖는다. 용융물의 파쇄 과정에 영향을 미치는 주요 기구로는 Rayleigh-Taylor instability 에 의한 용융물 jet 선단(leading edge)의 파쇄 현상과 Kelvin-Helmholtz instability 에 의해 용융물 jet 표면에서 capillary wave 의 성장과 이에 따른 입자의 생성으로 크게 나눌 수 있다[9].

본 연구에서는 TEXAS-III 코드[10]를 이용한 용융물 재배치 과정에 대한 해석을 수행하여 개별 실험 조건에서 용융물 파편층의 생성 비율을 계산하였다. 파편층 형성에 대한 실험 결과와 TEXAS-III 코드 계산 결과는 표 5 에 정리하였다. 그림 3 은 파편층의 질량에 대한 TEXAS-III 코드 계산 결과를 보여준다. LAVA 실험 조건과 상응하는 TEXAS-III 코드의 입력 조건을 설정하여 냉각수 과냉각도 및 수위 그리고 주입 용융물 성분에 따른 용융물 재배치 과정 중 실험 용기 내부의 압력 상승과 용융물 파편층의 생성 비율 등에 대한 계산을 수행하였다. TEXAS-III 코드 계산 결과 냉각수 과냉각도와 수위에 따른 LAVA 실험 용기 내부의 압력 상승과 파편층 입자에 대한 계산 값은 실험 결과와 유사한 경향을 보였으나 그 절대 값은 실험 결과 값에 비해 낮게 계산되었다. 이 같은 계산 결과의 차이는 TEXAS-III 코드가 용융물 입자의 파쇄 과정에 관여하는 기구로 Rayleigh-Taylor instability 만을 고려하고 재배치 과정을 1 차원적으로 단순화하여 계산하기 때문이다.

TEXAS-III 코드에서는 Rayleigh-Taylor instability 에 의한 용융물 jet 선단의 파쇄 현상만을 고려하였으므로 Kelvin-Helmholtz instability 에 의해 용융물 jet 표면에서 생성되는 파쇄 용융물 입자의 질량을 다음 식 (6)의 Epstein[11]이 제안한 semi-empirical 상관식을 이용하여 계산하였다. 식 (6)을 이용하여 계산한 입자화 되는 용융물 jet 의 질량 율과 아래 식 (7)에서 제시한 jet 의 질량 유속을 이용하여 Kelvin-Helmholtz instability 에 의해 jet 표면에서 erosion 을 통한 파쇄 용융물 입자의 생성 질량은 식 (8)과 같이 계산된다. 식 (6)에서 r_j, r_g 는 용융물 jet 와 수증기의 밀도를

각각 나타내며 u_j는 용융물의 주입 속도를 나타낸다. 식 (7)과 (8)에서 d_j와 $A_{jet_surface}$는 용융물 jet 의 직경과 표면적을 나타내고 M_{melt}는 용융물의 전체 질량을 의미한다.

$$\text{Mass rate of jet breakup,}\quad m_{br} = 0.08 \cdot \left(\frac{r_g}{r_j} \right)^{1/2} r_j u_j \quad \text{(6)}$$

$$\text{Jet mass flow rate,}\quad m_j = \frac{p}{4} \cdot d_j^2 \cdot r_j \cdot u_j \quad \text{(7)}$$

$$\text{Fragmented particle mass,}\quad m_{erosion} = m_{br} \cdot A_{jet\_surface} \cdot \frac{M_{melt}}{m_j} \quad \text{(8)}$$

표 5 에서 정리한 jet 표면에서 erosion 에 의한 파쇄 용융물 질량 산출 상관식을 이용한 계산 결과를 보면 용융물 질량의 변화는 전체 주입 용융물 질량에 대한 파쇄 용융물 입자의 생성 비율에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그리고 Epstein 상관식은 냉각수 과냉각도에 대한 변수를 포함하고 있지 않기 때문에 냉각수 과냉각도에 따른 파쇄 용융물 입자의 생성 비율의 차이는 계산할 수 없다.

LAVA 실험 중에서 Al_2O_3 용융물 만을 주입한 실험 결과를 보면 실험 조건에 따라 전체 주입 용융물 질량의 3.8 ~ 44.7 % 정도가 입자화 된 것을 알 수 있다. TEXAS-III 코드 계산 결과와 jet 표면의 erosion 에 의한 파쇄 용융물 입자 계산 결과를 합하면 전체 용융물 질량에서 16.5 ~ 22.0 % 정도가 입자화 된 것을 유추할 수 있다. 용융물의 질량에 비해 상대적으로 너무 적게 파쇄 용융물 입자가 생성된 LAVA-11 실험과 상대적으로 너무 많은 용융물 입자가 생성된 LAVA-5 실험 결과를 배제하면 실험에서 측정된 용융물 입자의 질량과 계산으로 구한 파쇄 용융물 입자의 질량은 유사한 범위를 갖는 것을 알 수 있다.

TEXAS-III 코드를 이용하여 구한 용융물 입자의 질량과 jet 표면의 erosion 에 의한 파쇄 용융물 입자 계산 결과를 비교하면 jet 표면에서 erosion 에 의한 입자의 생성이 다소 높은 것으로 나타났으며 이 같은 결과는 FARO L-08, L-19 실험 결과와도 일치한 경향을 보임을 알 수 있다. FARO L-08 실험과 L-19 실험은 각각 44kg 과 157kg 의 UO_2-ZrO_2 용융물을 사용한 실험으로서 용융물 질량을 제외한 다른 실험 조건은 동일하게 설정하고 수행되었다. 두 실험에서 압력 상승율은 용융물이 반응 용기 하단부와 접촉한 직 후 최대 값을 나타내었고 그 도달 시간은 거의 동일하였다. 이를 근거로 두 실험의 용융물 선단에서 파쇄 용융물 입자의 생성은 용융물이 반응 용기 하단부와 접촉한 직 후 중지되고 이 후에 발생하는 용융물 파편층은 용융물 jet 표면에서 erosion 에 의한 것으로 가정하여 파쇄 용융물 입자의 생성 비율을 계산하였다. 계산 결과 용융물 선단에서 생성된 파쇄 용융물 입자의 질량은 두 실험 모두 12kg 이었고 용융물 jet 표면에서 erosion 에 의해 생성된 파쇄 용융물 입자의 질량은 L-08 실험과 L-19 실험에서 각각 18kg, 65kg 으로 계산되어 용융물 선단에서 생성된 파쇄 용융물 입자의 질량보다 큰 값을 나타내었다. 따라서 용융물 선단에서 Rayleigh-Taylor instability 만을 고려하여 용융물의 파쇄 과정을 모의한 TEXAS-III 코드를 이용하여 용융물의 파쇄 과정을 계산하기에는 한계가 존재한다는 사실을

확인할 수 있었고 두 모델에 의한 파편층 형성 분율을 합하는 것이 타당하다는 사실을 알 수 있었다. TEXAS 모델을 개발한 미국 위스콘신 대학에서도 위와 같은 TEXAS-III 코드의 한계를 보완하여 Rayleigh-Taylor instability 에 의한 용융물 jet 선단(leading edge)의 파쇄 현상과 Kelvin-Helmholtz instability 에 의해 용융물 jet 표면에서 erosion 에 의한 파쇄 과정 그리고 용융물 jet 선단에서 Boundary layer stripping 에 의한 파쇄 기구를 모두 포함한 TEXAS-V 코드를 개발하였다[12].

3-3. 파쇄 용융물 입자와 용융물 풀의 초기 온도

파쇄 용융물 입자의 질량과 LAVA 실험 용기 내부의 압력 변화에 대한 측정 값과 관련 계산을 통하여 LAVA 실험에서 용융물 재배치 과정 중에 용융물의 전체 열 에너지의 15.5 ~ 47.5 % 정도가 냉각수로 전달되며, 전체 용융물 질량 중 10.0 ~ 20.0 % 가량이 입자화 된다는 사실을 알 수 있었다. Thermite 용융물은 이와 같이 재배치 과정 중에 입자화 되고 냉각수에 열을 전달함으로써 반구 내부에 용융물 풀을 형성하는 시점에는 thermite 반응 초기 상태에 비해 온도가 낮아진다. 반구 내부에서 용융물 풀의 초기 온도는 반구 내벽에 가해지는 열적 부하를 결정하므로 이를 정량화 하는 것은 반구의 열적 거동에 대한 분석과 LiLAC 코드[13]와 같은 전산 코드 해석에서 초기 조건을 설정하기 위해 필수적인 사항이다.

LAVA 실험에서 용융물의 온도 측정을 위해 사용한 상용 W/Re 열전대와 2 색 적외선 온도계(two color pyrometer)를 이용하여 thermite 반응 직 후 용융물의 초기 온도를 측정하였다. 그림 4 는 반응 후 용융물의 온도 변화를 보여준다. Thermite 용융물 생성은 격렬한 발열 반응을 동반하는 화학 반응 과정이기 때문에 두 가지 방법으로 측정한 온도 값에 다소 차이가 존재한다. W/Re 열전대로 측정한 용융물의 온도가 적외선 온도계로 측정한 값에 비해 높았다. 적외선 온도계는 용융물 상부 표면의 온도를 측정하므로 용융물 피막층의 온도를 측정하였을 가능성이 있는 반면 W/Re 열전대는 용융물 풀 내부에 장착하였으므로 W/Re 열전대로 측정한 용융물의 온도를 초기 온도로 채택하였다. W/Re 열전대로 측정한 용융물의 초기 온도 값은 ± 1 %의 오차 범위를 갖으며 이를 감안하여 본 연구에서는 용융물의 초기 온도를 2700K 로 설정하였다.

용융물 재배치 과정 후 용융물 풀의 초기 온도를 파쇄 용융물 입자의 형성과 재배치 과정 중 냉각수에 전달되는 열 에너지 손실을 고려하여 계산하였다. 용융물 재배치 과정 중 형성되는 파쇄 용융물 입자의 크기(d_{dp})는 식 (9)와 같이 계산된다[14]. 이렇게 형성된 파쇄 용융물 입자는 주위 냉각수로 복사에 의해 주로 냉각된다고 가정하면 식 (10)과 같이 재배치 과정 후 온도(T_{dp})를 계산할 수 있다[14].

$$d_{dp} = \left(\frac{s_{dj}}{g r_{dj}} \right)^{\frac{1}{2}} \qquad (9)$$

$$T_{dp} = \left(\frac{18 s\, e\, t}{r_{dj} d_{dp} c_{p,dj}} + \frac{1}{T_{dp,o}^{\,3}} \right)^{-\frac{1}{3}} \qquad (10)$$

LAVA 실험에서 용융물 재배치 과정 중에 전체 용융물 질량의 15 %가 파편층을 형성하고 냉각수로 35 %의 열 에너지가 전달된다고 가정하여 반구 내부에 형성된 초기 용융물 풀의 온도를 식 (11)을 이용하여 계산하였다.

$$m_{fg}\left[h_{fs}+c_{p,dj}(T_{dp,o}-T_{dp})\right]+m_{pool}\left[h_{fs}+c_{p,dj}(T_{dp,o}-T_{pool})\right]=41.8MJ \quad (11)$$

식 (9)를 이용하여 계산한 파편층의 평균 직경은 5.2mm 이다. 용융물 jet 의 초기 온도는 위에서 측정한 2700K 를 사용하고 재배치 과정에 소요된 시간을 1.3 초라고 가정하여 재배치 과정 후 파편층의 온도를 식 (10)에서 계산하면 약 2212 K 가 되며 식 (11)를 이용하여 계산한 용융물 풀의 초기 온도는 2514.4 K 가 된다.

4. 결론

LAVA 실험에서 용융물 재배치 과정 중 파쇄 용융물 입자의 형성과 냉각수로 전달되는 열 에너지 분율에 대하여 실험 및 계산 결과를 이용하여 고찰하였다. 용융물 입자의 생성 율은 냉각수의 초기 과냉각도 및 수위에 따라 차이를 나타냈다. 파쇄 용융물 입자의 대부분은 Al_2O_3 용융물이었으며 파쇄 용융물 입자의 증가는 냉각수로 활발한 열 전달로 이어져서 LAVA 실험 용기 내부의 압력 상승을 주도하였다. 용융물 재배치 과정에서 전체 용융물 질량의 10.0 ~ 20.0 % 가량이 입자화 되었고 전체 열 에너지의 15.5 ~ 47.5 % 정도가 냉각수로 전달되었다. 파쇄 용융물 입자 질량의 증가와 이에 따른 냉각수로 전달되는 열 에너지의 증가는 재배치 과정 후 용융물 풀의 열 에너지 양을 감소시켜 결국 반구 내부로 전달되는 초기 열적 부하를 감소시키는 역할을 하였다.

LAVA 실험에서 보여진 파쇄 용융물 입자의 생성 비율과 재배치 과정 중 냉각수로 전달되는 열 에너지 비율에 대한 실험 결과는 FARO 실험과 FAI 실험 등 관련 실험 결과와 비교하면 타당한 범위를 나타낸다. TEXAS-III 코드를 이용한 용융물 재배치 과정에 대한 해석 결과와 Epstein 상관식을 이용한 파쇄 용융물 입자의 생성 양에 대한 계산 결과도 LAVA 실험에서 측정한 파쇄 용융물 입자의 생성 비율 및 냉각수로 전달되는 열 에너지의 분율과 유사한 범위를 나타내었다. TEXAS-III 코드 계산에서 금속 용융물을 주입한 경우와 비교하여 산화 용융물을 주입한 실험에서 파쇄 용융물 입자의 생성 양이 증가하였고 LAVA 실험 용기 내부의 압력 상승도 높게 계산되었다. 냉각수 수위가 낮은 경우는 LAVA 실험 용기 내부의 압력이 낮게 상승하였으며 냉각수 과냉각도가 낮을수록 파쇄 용융물 입자의 생성 질량과 LAVA 실험 용기 내부의 압력 상승이 높게 계산되어 LAVA 실험 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

결론적으로 LAVA 실험 결과에서 나타난 파쇄 용융물 입자의 생성 비율과 냉각수로 전달되는 열 에너지의 비율을 고려하여 용융물 풀의 초기 온도 값을 계산하였고 이를 통해 반구 내부로 전달되는 열적 부하의 정량화와 LiLAC 코드 해석 등 관련 전산 코드를 이용한 LAVA 실험 해석의 중요한 초기 조건을 제시한 것으로 생각된다. 그러나 LAVA 실험과 같이 고온 용융물이 냉각수가 존재하는 반구 내부로 재배치 되는 경우에는 용융물 파편 층의 형성과 재배치 과정 중

열 전달 현상에 있어 용융물의 초기 주입 조건이 절대적인 영향을 미칠 수 있다. LAVA 실험에서는 용융물을 반구 중앙 부로 주입하고자 하였으나 주입 과정에서 용융물의 주입 방향 및 조건에 불확실성이 존재하며 실제 일부 실험에서 용융물이 비대칭적으로 반구 내부에 주입된 경우가 발견되었다. 용융물의 주입 조건에 대한 불확실성을 규명하는 것이 용융물 재배치 과정에 대한 보다 정확한 분석을 위해 필수적이지만 LAVA 실험 조건이 고온, 고압 과정이기 때문에 용융물 주입 조건에 대한 불확실성을 규명하기에는 현실적인 제약이 따른다. 또한 TEXAS-III 코드를 이용한 재배치 과정에 대한 해석 연구와 이론식에 근거한 재배치 과정에 대한 계산 과정에도 계산에 사용한 가정에 불확실성이 존재하고 실제 현상이 3 차원의 복잡한 반응 과정을 거치는 반면 계산에서는 1 차원으로 문제를 단순화하는 한계가 존재하기 때문에 이 부분에 대한 개선 작업도 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 과제의 일환으로 수행하였습니다.

참고 문헌

1. J. R. Wolf et. al., TMI - 2 Vessel Investigation Project Integration Report, NUREG/CR 6197 (EGG - 2734), 1994

2. L.A. Stickler, et al., Calculations to Estimate the Margin to Failure in the TMI-2 Vessel, NUREG/CR-6196(EGG 2733), 1994

3. R. J. Hammersley et al., Experiments to Address Lower Plenum Response Under Severe Accident Conditions, EPRI 보고서

4. D. Magallon et al., Experimental Investigation of 150-kg-scale Corium Melt Jet Quenching in Water, Nuclear Engineering and Design 177(1997), 321 – 337

5. D. Magallon et al., Lessons Learnt from FARO/TERMOS Corium Melt Quenching Experiments, Nuclear Engineering and Design 189(1999), 223 – 238

6. A. Annunziato et al., TMI-2 Simulation by RELAP5/SCDAP and COMETA Codes, 8th International Conference on Nuclear Engineering(ICONE-8), April 2 – 6, 2000, Baltimore, MD USA

7. Jian Tang, Modeling of the Complete Process of One-Dimensional Vapor Explosions, PhD Thesis, University of Wisconsin Madison, 1993

8. N. Yamano et al., Phenomenological Studies on Melt-Coolant Interactions in the ALPHA Program, Nuclear Engineering and Design 155(1995), 369 – 389

9. M. L. Corradini, Vapor Explosions : A Review of Experiments for Accident Analysis, Nuclear Safety, Vol. 32, No. 3, July – September 1991

10. M. L. Corradini, et al., TEXAS-III Code Manual, 1994

11. M. Epstein et al., The Three Mile Island Unit 2 Core Relocation – Heat Transfer and Mechanism, Nuclear Technology Vol. 87, Dec. 1989

12. M. L. Corrradini et al., Fuel Fragmentation Model Advances using TEXAS-V, JAERI-Conf 97-011, 1997, 733 – 750

13. J. Kim et al., Analysis of Natural Convection Heat Transfer and Solidification of a Two-Layered Pool, to be

published at Journal of Korean Society of Computational Fluids Engineering, Vol. 6, 2001
14. K. Y. Suh et al., Debris Interactions in Reactor Vessel Lower Plena During a Severe Accident: I. Predictive Model, Nuclear Engineering and Design

표 1. LAVA 실험 조건

Test	Composition & Mass of Melt	Subcooling & Depth (& Mass) of Water	In / Ex-Vessel Pressure
LAVA-1	Al_2O_3/Fe, 40 kg	55 K, 50 cm (70kg)	17.4 / 17.4 bar
LAVA-2	Al_2O_3/Fe, 40 kg	46 K, 50 cm (70kg)	17.5 / 1.0 bar
LAVA-3	Al_2O_3, 30 kg	43 K, 50 cm (70kg)	16.7 / 1.0 bar
LAVA-4	Al_2O_3, 30 kg	50 K, 50 cm (70kg)	17.9 / 1.0 bar
LAVA-5	Al_2O_3, 30 kg	22 K, 50 cm (70kg)	17.9 / 1.0 bar
LAVA-6	Al_2O_3/Fe, 40 kg	52 K, 50 cm (70kg)	17.6 / 1.0 bar
LAVA-7	Al_2O_3, 30 kg	34 K, 50 cm (70kg)	18.4 / 1.0 bar
LAVA-8	Al_2O_3, 30 kg	56 K, 25 cm (28kg)	16.4 / 1.0 bar
LAVA-9	Al_2O_3, 30 kg	24 K, 50 cm (70kg)	17.0 / 1.0 bar
LAVA-10	Al_2O_3, 30 kg	5 K, 50 cm (70kg)	16.2 / 1.0 bar
LAVA-11	Al_2O_3, 72 kg	52 K, 50 cm (70kg)	17.3 / 1.0 bar
LAVA-12	Al_2O_3, 70 kg	40 K, 50 cm (70kg)	15.5 / 1.0 bar

표 2. 용융물 재배치 과정의 증기 발생율

	P_thermite (bar)	P_steam (bar)	P_total (bar)	Steam Generation Rate (kg/s)	Energy Flux (MW/m^2)
LAVA-1	-	-	3.37	1.69	8.27
LAVA-2	-	-	3.29	0.49	2.40
LAVA-3	-	-	3.50	0.53	2.60
LAVA-4	-	-	4.63	1.15	5.63
LAVA-5	1.80	4.87	6.67	0.88	4.31
LAVA-6	-	-	3.91	2.09	10.23
LAVA-7	1.70	2.80	4.50	0.41	2.00
LAVA-8	1.41	1.42	2.83	0.18	0.88
LAVA-9	1.83	2.62	4.45	0.32	1.54
LAVA-10	1.60	3.55	5.15	0.68	3.33
LAVA-11	2.82	11.34	14.16	2.13	10.43
LAVA-12	2.70	5.33	8.03	0.95	4.65

표 3. 용융물 재배치 과정 중 냉각수로 전달되는 열 에너지 분율

	압력 상승 시간(sec)	E_{total} **(MJ)**	$E_{relocation}$ **(MJ)**	$E_{relocation} / E_{total} \times 100$ **(%)**
LAVA-1	8.9	159.1	43.9	27.6
LAVA-2	29.9	159.1	43.7	27.5
LAVA-3	29.2	119.3	44.8	37.6
LAVA-4	17.8	119.3	54.4	45.6
LAVA-5	24.6	119.3	56.7	47.5
LAVA-6	8.3	159.1	48.4	30.4
LAVA-7	30.4	119.3	38.9	32.6
LAVA-8	35.5	119.3	18.5	15.5
LAVA-9	36.9	119.3	37.3	31.3
LAVA-10	23.2	119.3	45.4	38.0
LAVA-11	23.6	278.5	111.7	40.1
LAVA-12	59.7	278.5	124.1	44.5

표 4. 파쇄 용융물 입자 직경의 분포

	≥ 5.7 mm	**4.0 ~ 5.7 mm**	**2.0 ~ 4.0 mm**	**0.4 ~ 2.0 mm**	**≤ 0.4 mm**
LAVA-4	69.7 %	8.1 %	12.4 %	8.6 %	1.4 %
LAVA-5	83.2 %	6.1 %	6.1 %	4.3 %	0.4 %
LAVA-6	79.7 %	13.3 %	5.1 %	1.6 %	0.3 %
LAVA-7	78.6 %	10.1 %	7.6 %	3.3 %	0.4 %
LAVA-8	80.0 %	8.8 %	7.2 %	3.9 %	0.5 %
LAVA-9	76.9 %	18.2 %	2.9 %	2.0 %	0.2 %

표 5. 파쇄 용융물 입자의 질량

<table>
<tr><th></th><th>Experiments
(kg/%)</th><th>TEAS-III($m_{leading}$)
(kg/%)</th><th>Jet erosion($m_{erosion}$)
(kg/%)</th><th>$m_{leading} + m_{erosion}$
(%)</th></tr>
<tr><td>LAVA-1</td><td>0.8 / 2.0</td><td>-</td><td>-</td><td></td></tr>
<tr><td>LAVA-2</td><td>2.8 / 7.0</td><td>2.6 / 6.5</td><td>-</td><td></td></tr>
<tr><td>LAVA-3</td><td>4.2 / 14.0</td><td>1.7 / 5.7</td><td rowspan="3">3.24 / 10.8</td><td>16.5</td></tr>
<tr><td>LAVA-4</td><td>3.3 / 11.0</td><td>1.7 / 5.7</td><td>16.5</td></tr>
<tr><td>LAVA-5</td><td>13.4 / 44.7</td><td>3.4 / 11.2</td><td>21.8</td></tr>
<tr><td>LAVA-6</td><td>3.7 / 9.3</td><td>2.6 / 6.5</td><td>-</td><td></td></tr>
<tr><td>LAVA-7</td><td>6.3 / 21.0</td><td>-</td><td rowspan="4">3.24 / 10.8</td><td></td></tr>
<tr><td>LAVA-8</td><td>3.0 / 10.0</td><td>2.6 / 8.7</td><td>19.5</td></tr>
<tr><td>LAVA-9</td><td>5.2 / 17.3</td><td>3.4 / 11.2</td><td>22.0</td></tr>
<tr><td>LAVA-10</td><td>4.5 / 15.0</td><td>-</td><td></td></tr>
<tr><td>LAVA-11</td><td>3.2 / 4.6</td><td>-</td><td rowspan="2">7.57 / 10.8</td><td></td></tr>
<tr><td>LAVA-12</td><td>11.5 / 16.4</td><td>-</td><td></td></tr>
</table>

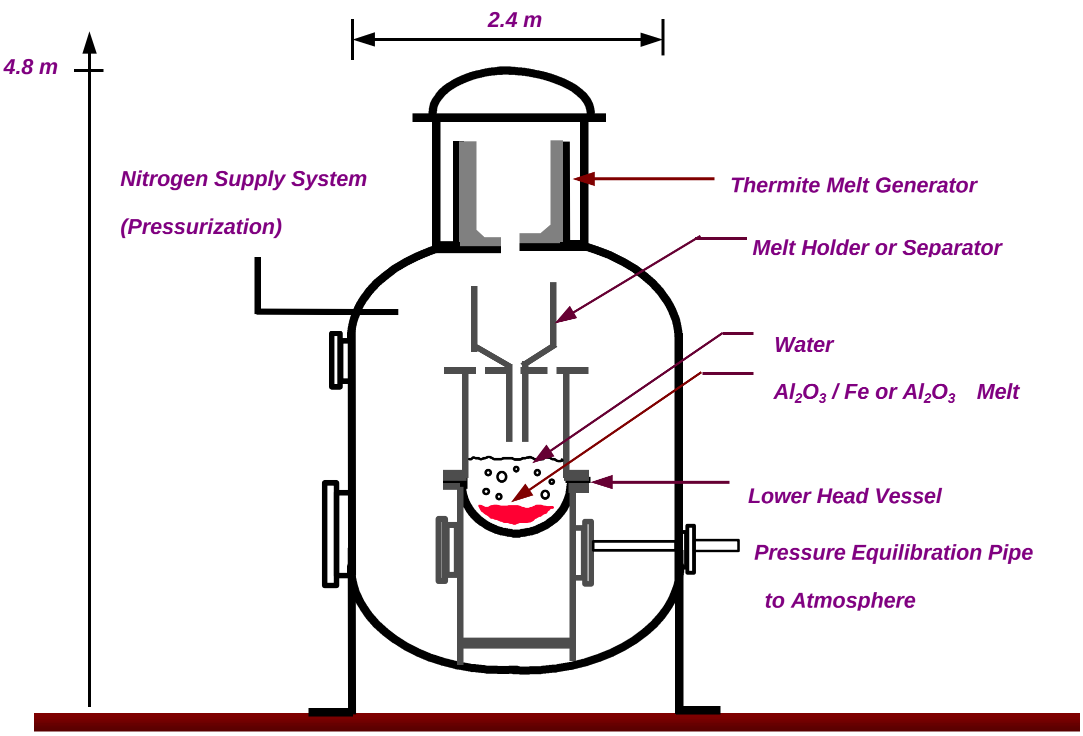

그림 1. LAVA 실험 장치 개념도

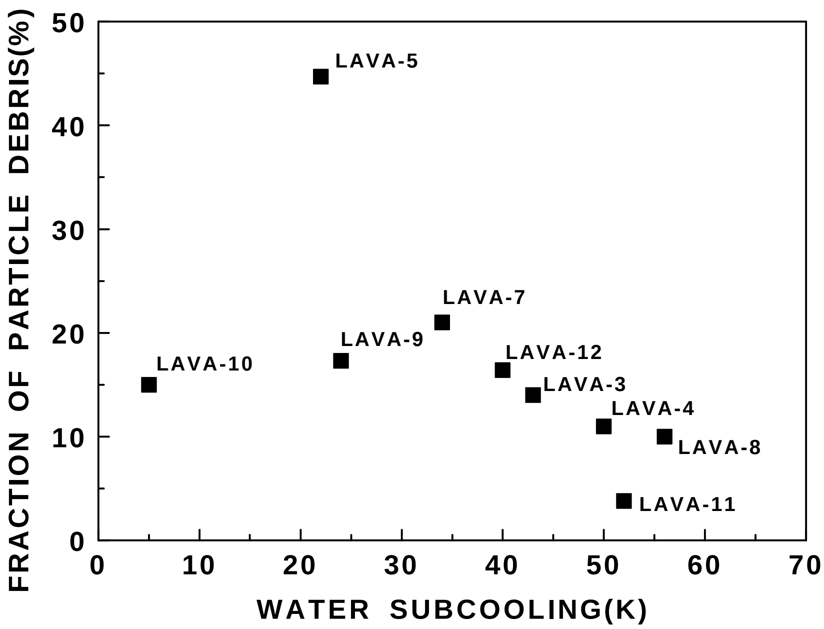

그림 2. Al_2O_3 용융물 실험에서 냉각수 과냉각도와 파쇄 용융물 입자 질량의 관계

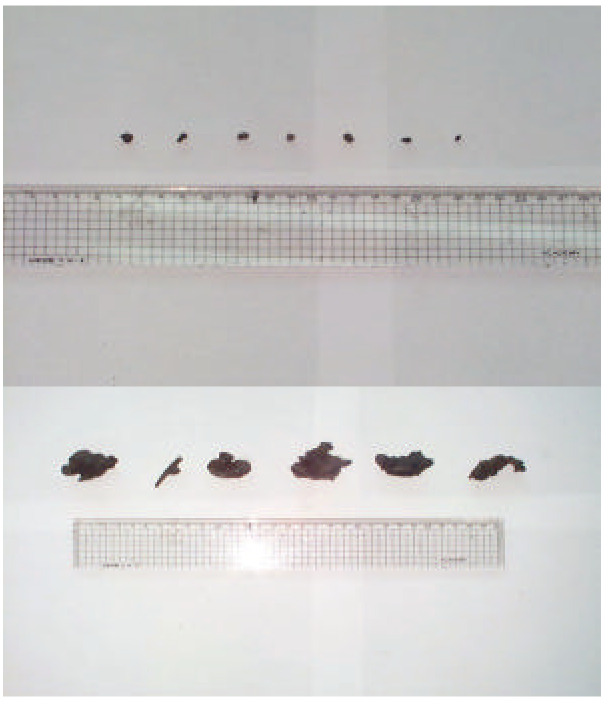

그림 3. 대표적인 Al_2O_3 파쇄 용융물 입자의 사진 (LAVA-12 실험)

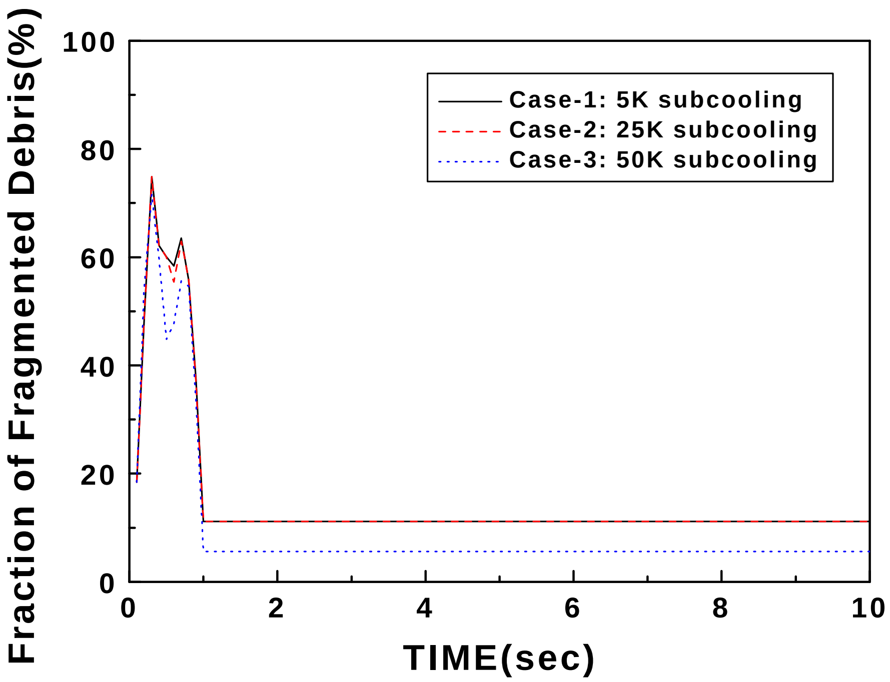

그림 4. 파쇄 용융물 입자의 질량에 대한 TEXAS-III 코드 계산 결과

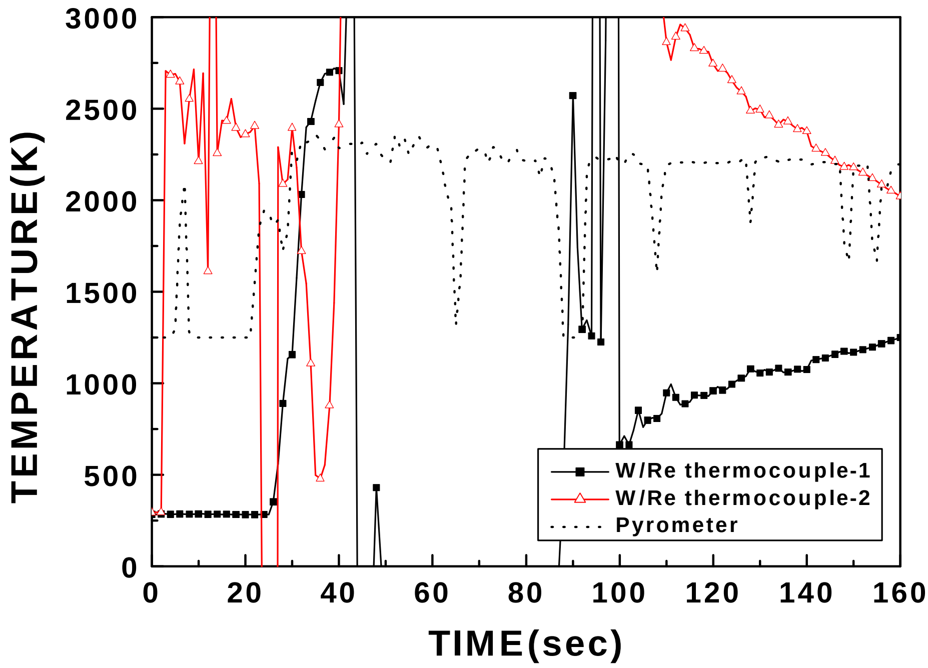

그림 5. Thermite 반응 후 용융물의 초기 온도 변화