'2000 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

노내 노심용융물 냉각 실험(LAVA 실험)에서 용융물 재배치 과정에 대한 고찰
Study on the Melt Relocation Process in the In-Vessel Corium Retention Experiment(LAVA Experiment)

강경호, 김종환, 박래준, 김상백, 김희동
한국원자력 연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

간극을 통한 노내 노심용융물의 자연 냉각 기구를 규명하기 위해 수행중인 LAVA 실험의 일환으로 냉각수 과냉각도와 질량이 용융물의 재배치 과정 및 반구의 열적 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 수행한 실험 결과와 TEXAS-III 코드를 이용한 해석 연구 결과를 기술하였다. 냉각수 과냉각도를 낮게 설정하고 수행한 실험에서는 파쇄 용융물 입자가 많이 생성되었고 LAVA 실험 용기 내부의 압력 상승이 높게 측정되었으며 반구 내벽에 가해진 열적 부하도 낮게 나타났다. 또한, 파쇄 용융물 입자의 직경이 작고 완전한 원형을 띄는 것을 알 수 있었다. 이는 과냉각도가 낮은 경우 용융물이 냉각수 층을 통과하면서 활발한 비등 현상과 급격한 냉각 과정을 겪은 결과라고 생각된다. TEXAS-III 코드를 이용하여 수행한 냉각수 과냉각도 및 수위 그리고 용융물 성분에 대한 민감도 분석 결과도 LAVA 실험 결과와 유사한 경향을 보였다.

Abstract

This paper presents the results of the tests performed as a series of the LAVA experiments to assess the effects of the initial subcooling and height of water focused on the melt relocation process into the lower head vessel. Generally the total mass of the fragmented debris particles was inversely proportional to the initial subcooling of water. The vigorous boiling heat transfer combined with the steam production agitated in the subcooling condition might result in the increase of the fragmented particles mass and the small and perfect spherical configuration of the debris particles. Also, in the tests performed under the low subcooling of water, the lower head vessel represented a mild thermal behavior. The results of the sensitivity study on the melt relocation process using the TEXAS-III code supported again the results of the LAVA tests for the effects of the initial subcooling and height of water and melt composition on the melt relocation process.

1. 개 요

TMI-2 원전 사고의 원자로 용기에 관한 지속적인 시험 결과 핵연료 용융물과 원자로 용기 하부 반구 내부의 수 mm 크기의 미세 간극을 통한 노심 용융물의 자연 냉각 기구가 중대사고의 진행을 원자로 용기 내부에서 종결시킬 수 있는 주요한 냉각 기구로 제시되었다[1]. 한국 원자력 연구소에서는 간극을 통한 노내 노심용융물의 냉각 현상에 대한 종합적인 실증 실험으로 SONATA-IV(Simulation Of Naturally Arrested Thermal Attack - In Vessel) 연구를 수행하고 있으며, 현재는 이의 원리 검증 실험으로 상사 용융물을 이용한 LAVA (Lower-plenum Arrested Vessel Attack) 실험을 수행하고 있다[2,3].

LAVA 실험은 1997년 5월 23일에 첫 번째 실험을 실시한 이래 지금까지 총 12회 실험을 수행하였다. 반구 내 외부의 압력 부하, 주입 용융물의 성분 그리고 냉각수 과냉각도 및 냉각수 수위에 대한 영향 평가 실험을 수행하였으며, 반구 내 외부의 압력 부화와 주입 용융물의 성분 영향 평가 실험 결과에 대해서는 99년도 춘계 기계학회 학술 대회와 원자력학회 학술 대회에 발표하였다[4,5]. 본 논문에서는 최근에 수행한 냉각수 과냉각도와 수위에 대한 영향 평가 실험을 위주로 실험 결과를 정리하였다. 냉각수의 초기 과냉각도와 수위는 용융물의 재배치 과정을 좌우하여 초기 반구 내벽에 가해지는 열적 부하 및 간극의 형성에 영향을 미친다. 그러나, 실험을 통해 이에 대한 정량적인 계측과 결과를 분석하기에는 한계가 존재하기 때문에 TEXAS-III 코드를 이용하여 고온 용융물이 냉각수 층을 통과하면서 반구 내부로 재배치되는 과정에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

LAVA 실험의 개요는 2절에 정리하였고 냉각수 과냉각도 및 수위에 대한 영향 평가를 위한 실험 조건과 결과는 3절과 4절에 각각 정리하였다. TEXAS 코드를 이용한 용융물 재배치 과정에 대한 민감도 분석의 결과는 5절에 기술하였으며 결론은 6절에 정리하였다.

2. LAVA 실험 개요

LAVA 실험은 상사용융물을 이용하여 용융물과 반구 내벽 사이에 간극이 형성되는지 여부와 간극의 형성이 용융물과 반구의 냉각 특성에 미치는 영향을 규명하는 것을 목적으로 수행하고 있다. 반응 용기는 원자로 용기 하부 반구를 1/8로 선형 축소한 반구형 용기이며, 내부 직경 50 cm, 두께 2.5 cm 규격의 Carbon Steel(SA516 Gr. 70)로 제작하였다. 노심용융물의 모사 체는 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물 40 kg(혹은 Al_2O_3 Thermite 용융물 30 kg)을 사용하였다. Thermite 용융물은 반응 용기 상부의 도가니 내부에서 생성되며, 생성된 용융물은 직경 8 cm의 주입관을 통하여 반구 내부로 자유 낙하에 의해 재배치된다. 고온 용융물이 냉각수와 접촉하면서 발생할 수 있는 증기 폭발 현상을 억제하고 실제 원전 사고 발생 시 감압 계통이 작동되는 저압 사고 경위를 모사하기 위하여 LAVA 실험 용기를 17 기압으로 가압한 상태에서 실험을 수행하였다.

반구 내부로 주입된 용융물의 온도는 W/Re 열전대를 반구 하단부 중앙으로부터 5 cm, 10 cm 지점에 설치하여 측정하였다. 반구의 온도 거동은 13 개의 K 형 열전대를 반구 외벽에서 2 mm 내부에 동심원 방향으로 설치하여 측정하였고, 반응 중 반구의 변형은 측정 오차 +/- 0.002 mm 의 선형 변형 측정기를 반구 외벽 T1 열전대 옆에 장착하여 측정하였다. 그림 1과 그림 2는 LAVA 실험 장치의 개념도와 반구 외벽에 장착한 K 형 열전대의 위치도를 보여준다.

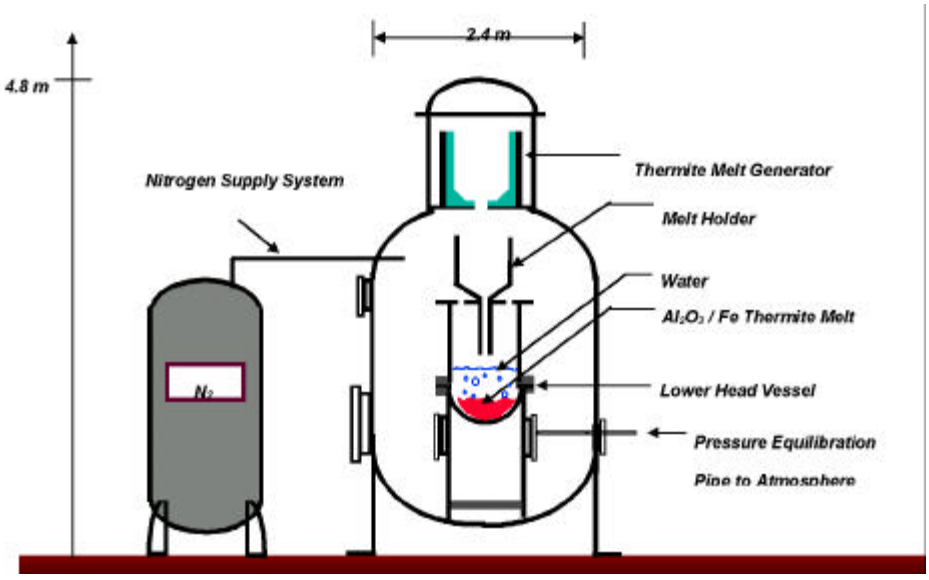

그림 1. LAVA 실험 개념도

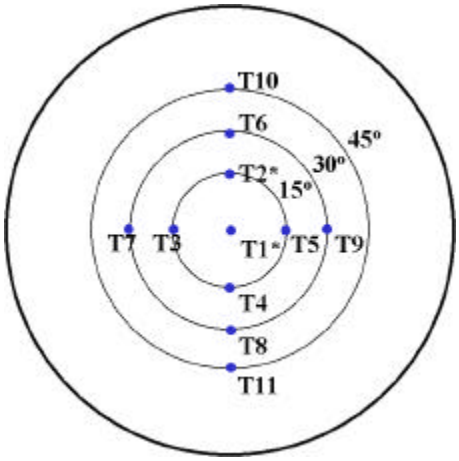

그림 2. 반구 외벽에 장착한 K형 열전대 위치도

3. LAVA 실험 조건

본 논문에서는 지금까지 수행되었던 LAVA 실험 중에서 LAVA-4, LAVA-5, LAVA-7, LAVA-8 그리고 LAVA-9 실험 결과를 중심으로 냉각수 과냉각도와 질량에 대한 영향을 기술하였다. LAVA-4, LAVA-5, LAVA-7 그리고 LAVA-9 실험은 냉각수 과냉각도를 달리하였으며, LAVA-8 실험은 기존 실험에 비해 초기 냉각수 수위를 낮게 설정하고 수행한 실험이다. 표 1은 실험 조건을 정리한 것이다.

표 1. LAVA 실험 조건

실험 명	용융물 성분 및 질량	냉각수 과냉각도	냉각수 수위	계통 압력
LAVA-4	Al_2O_3 , 30kg	50K	50cm	17.9bar
LAVA-5	Al_2O_3 , 30kg	22K	50cm	17.9bar
LAVA-7	Al_2O_3 , 30kg	34K	50cm	17.6bar
LAVA-8	Al_2O_3 , 30kg	56K	25cm	16.4bar
LAVA-9	Al_2O_3 , 30kg	24K	50cm	17.0bar

4. LAVA 실험 결과

표 2는 용융물 냉각율과 반구 외벽 최고 온도 및 평균 냉각율 그리고 파쇄된 입자 질량에 대한 실험 결과를 정리한 것이다. 반응이 종결된 후 반구 내부의 고화되어 있는 용융물 형상을 보면 반구 내부에 고화 용융물 덩어리(Cake)가 형성되고 상단에 파쇄된 용융물 입자가 쌓여있는 것을 알 수 있다. 그리고 반구 내벽과 접촉하는 고화 용융물 상단부에 수 mm에서 수 cm 크기의 간극이 형성되어 있는 것이 관측되어 LAVA 실험에서 간극을 통해 용융물과 반구의 냉각이 가속화되었다는 사실을 뒷받침하였다.

실험 결과에 의하면 파쇄 용융물 입자의 총 질량은 대체로 초기 냉각수 과냉각도에 반비례하는 것을 알 수 있다. 파쇄 용융물 입자의 직경은 수 mm에서 수 cm 까지 다양한 크기를 띄고 있고 LAVA-5 실험과 LAVA-9 실험과 같이 용융물이 급격한 냉각 과정을 거친 경우에는 파쇄 용융물 입자의 크기가 작고 완벽한 원형을 띄는 것을 알 수 있었다. 특히 반구 외벽의 온도가 가장 낮게 측정된 LAVA-9 실험에서는 비록 수거한 파쇄 용융물 입자의 질량이 LAVA-5 실험에 비해 적었지만 용융물 Cake 내부에 수 mm 크기의 파쇄 용융물 입자가 다량 분포하는 것이 관측되어 반구 내벽에 가해진 열적 부하가 작았던 실험 결과를 다시 한번 입증하였다. 반면에 비교적 용융물이 더딘 냉각 과정을 거치고 상대적으로 높은

냉각수 과냉각도에서 수행한 실험(LAVA-4, LAVA-7, LAVA-8 실험)에서는 파쇄 용융물 입자가 불규칙한 형상을 보이고 수 cm의 크기를 갖는 것을 알 수 있다. 급냉 과정을 거치지 않고 형성된 불규칙한 용융물 입자의 내부에는 동공이 형성되어 있고 표면에서 내부로 결(Grain)이 형성되어 있는데 이와 같은 용융물 입자의 형상은 일반적으로 용융물이 완만한 냉각 과정을 거친 경우에 나타나는 현상이다[6].

표 2. LAVA 실험 결과

실험 명	용융물 냉각율	반구 외벽 최고 온도	반구 냉각율	파쇄 용융물 입자
LAVA-4	1.1K/s	1067K	1.3-4.0K/s	3.3kg
LAVA-5	3.9K/s	877K	0.3-0.6K/s	13.4kg
LAVA-7	0.8K/s	1164K	0.7-1.3K/s	6.3kg
LAVA-8	2.2K/s	1148K	0.5-0.8K/s	3.0kg
LAVA-9	4.0K/s	773K	2.0K/s	5.2kg

그림 3은 반응 중 LAVA 실험 용기의 압력 변화를 보여준다. 전반적인 압력 변화 거동은 모든 실험에서 유사하게 측정되었다. 상대적으로 파쇄 용융물 입자가 많이 생성된 LAVA-5 실험에서 LAVA 실험 용기 내부의 압력이 최대 6.7bar 정도 상승하여 다른 실험에 비해 압력 상승폭이 높게 측정되었다. 그리고 냉각수 수위를 기존 실험의 절반 높이인 25cm로 설정하고 실험한 LAVA-8 실험에서는 최대 압력 상승이 2.7bar로 다른 실험에 비해 낮게 측정되었다. LAVA-5 실험에서는 용융물이 과냉각도가 낮은 냉각수 층을 통과하면서 격렬한 비등 현상으로 인해 파쇄 용융물 입자의 생성이 증대되고 결국 LAVA 실험 용기 내부의 압력 상승이 높게 측정된 것으로 생각된다.

반구 외벽의 최고 온도를 비교하면 전반적으로 냉각수 과냉각도를 낮게 설정하고 수행한 실험에서 반구 외벽의 온도가 낮게 측정되었다. LAVA-7 실험의 경우는 용융물의 성분 분리가 완벽하게 이루어지지 않아서 약 3kg의 Fe 용융물이 반구 내부에 먼저 주입되어 반구 외벽의 온도가 LAVA-5 실험에 비해 높게 측정된 것으로 생각된다. LAVA-8 실험은 냉각수 수위를 낮게 설정하고 수행하였기 때문에 반구 외벽의 온도가 다른 실험에 비해 높게 측정되었다. 냉각수 수위가 낮다는 것은 결국 초기 냉각수 질량이 다른 실험에 비해 적었다는 것을 의미하므로 용융물과 반응하여 수증기화 할 수 있는 냉각수의 질량이 제한되어 실험 용기 내부의 압력 상승이 낮게 측정되었고 입자화된 용융물의 질량도 적게 나타난 것으로 보인다. 그러나, 현 단계에서 냉각수 수위의 영향을 일반화하기에는 실험 데이터가 부족하기 때문에 이에 대한 보완 실험을 계획하고 있다.

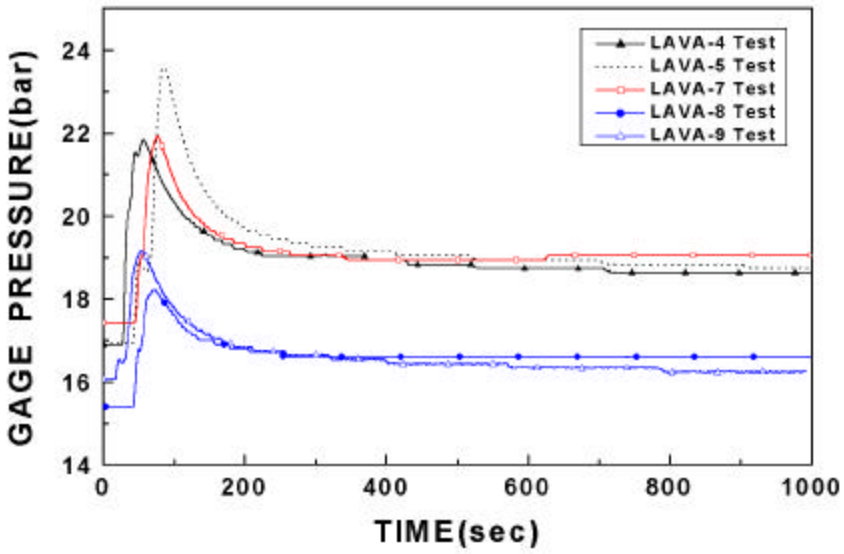

그림 3. LAVA 실험 용기 내부의 압력 변화

5. TEXAS-III 코드를 이용한 용융물 재배치 과정 해석

LAVA 실험 결과에서 보여지듯이 냉각수의 초기 과냉각도와 수위는 용융물의 재배치 과정을 좌우하여 초기 반구 내벽에 가해지는 열적 부하 및 간극의 형성에 영향을 미친다. 그러나, 실험을 통해 이에 대한 정량적인 계측과 결과를 분석하기에는 한계가 존재하기 때문에 TEXAS-III 코드를 이용하여 용융물의 재배치 과정에 대한 민감도 분석을 수행하였다. TEXAS-III 코드는 Rayleigh-Taylor 불안전성을 바탕으로 하여 천이 액상 입자의 파쇄 모델(Transient Liquid Particle Fragmentaion Model)을 이용하여 고온 용융물과 냉각수 반응 현상을 1차원적으로 계산할 수 있는 코드이다[7]. TEXAS-III 코드가 용융물과 냉각수의 혼합 반응 현상을 3차원적으로 해석할 수 없기 때문에 LAVA 실험 용기 및 반응 용기를 단순화하여 1차원 계산을 수행하였다. 그림 4는 TEXAS-III 코드 계산의 개념도을 보여준다. LAVA 실험 용기를 총 30개의 Cell로 구분하여 해석 영역을 설정하였다.

LAVA 실험 조건과 비교될 수 있게 5 경우에 대하여 TEXAS-III 코드를 이용하여 민감도 분석을 수행하였다. 표3은 본 연구에서 수행한 TEXAS-III 코드 계산 조건을 정리한 것이다. 용융물 주입 높이는 LAVA 실험의 경우와 같이 반구 하단 부에서 0.7m로 설정하였고 용융물은 중력에 의한 자유 낙하 방법으로 반구 내부로 주입되는 것으로 가정하였다. Case-1은 LAVA-4 실험과 동일한 조건에서 해석을 수행한 것으로서 본 TEXAS-III 코드 계산의 기본 해석 Case로 선정하였다. Case-2는 Al_2O_3 용융물 대신에 Fe 용융물이 주입된 경우를 가정한 것으로 이전 LAVA 실험 결과에서 보여진 용융물 성분에 따른 재배치 과정

에 대한 영향을 분석하기 위하여 수행한 계산이었다. Case-3과 Case-4는 냉각수 과냉각도의 영향을 분석하기 위해 수행한 계산이며, Case-5는 LAVA-8 실험의 경우와 같이 냉각수 수위를 낮게 설정하여 계산한 것이다.

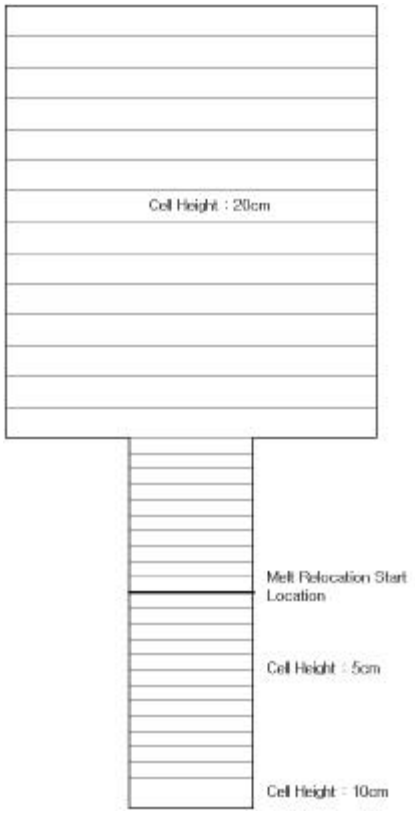

그림 4. TEXAS-III 코드 해석 영역도

표 3. TEXAS-III 코드 해석 조건

	용융물 성분	냉각수 과냉각도	냉각수 수위	비 고
Case-1	Al_2O_3, 30kg	50K	50cm	기본 해석
Case-2	Fe, 30kg	50K	50cm	용융물 성분 영향
Case-3	Al_2O_3, 30kg	5K	50cm	냉각수 과냉각도 영향
Case-4	Al_2O_3, 30kg	25K	50cm	냉각수 과냉각도 영향
Case-5	Al_2O_3, 30kg	50K	25cm	냉각수 수위 영향

그림 5는 LAVA 실험 용기 내부 압력 상승에 대한 TEXAS-III 코드 계산 결과를 보여준다. LAVA 실험 결과에서 나타났듯이 냉각수 과냉각도를 낮게 설정한 경우에 LAVA 실험 용기의 압력 상승이 높게 계산되었다. 포화 온도에 가까운 냉각수 조건일수록 용융물과 반응 시 격렬한 비등 현상으로 인해 생성되는 수증기량이 증가하여 전체적인 실험 용기의 압력 상승이 높게 계산된 것으로 판단된다. Fe 용융물의 용융 온도 및 밀도, 열전도도 등 물성치는 Al_2O_3 용융물과 상이하다. 또한 기존 LAVA 실험 결과를 보면 Fe 용융물은 냉각수 층을 통과하면서 파쇄되는 용융물 입자가 거의 존재하지 않았음을 알 수 있다. TEXAS-III 코드 계산 결과도 Fe 용융물이 주입되는 경우는 파쇄 용융물 입자가 거의 생성되지 않았으며 이에 따라 실험 용기 내부의 압력 상승도 다른 계산 경우에 비해 낮게 계산되었음을 보여준다.

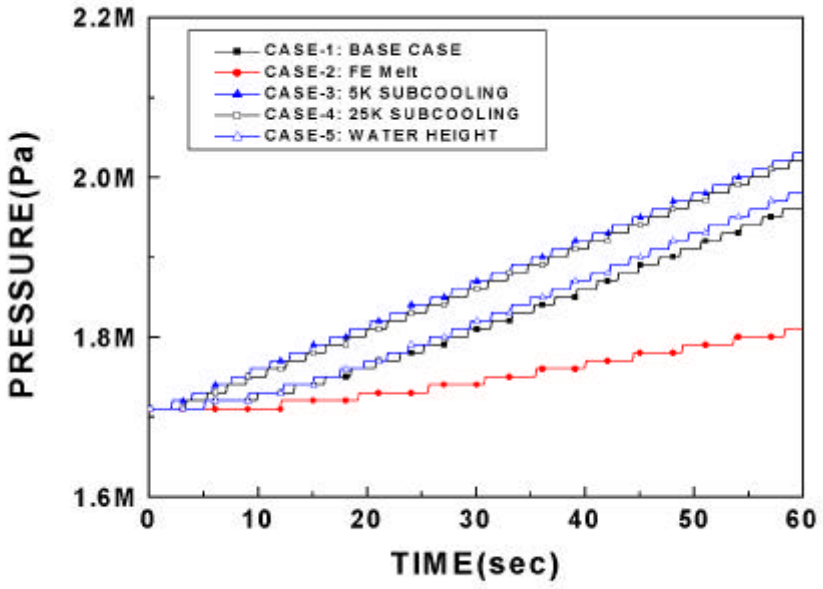

그림 5. TEXAS-III 코드 계산 결과 : LAVA 실험 용기 내부 압력 변화

그림 6은 용융물 재배치 과정에서 파쇄된 용융물 입자의 총 면적에 대한 TEXAS-III 코드 계산 결과를 보여준다. LAVA 실험 용기 압력 상승에 대한 계산 결과와 마찬가지로 파쇄된 용융물 입자의 총 면적도 냉각수 과냉각도에 의해 좌우된다는 것을 알 수 있다. 그림 8은 용융물 재배치 과정에서 용융물 선단(Leading Edge)의 위치 변화에 대한 TEXAS-III 코드 계산 결과를 보여준다. 냉각수 수위를 낮게 설정하고 계산한 Case-5 계산과 Fe 용융물을 주입하고 계산한 Case-4 계산의 경우는 약 0.2 초에 반구 하단부에 용융물의 선단이 도달되는 것으로 계산되었고, 나머지 계산에서는 약 0.3 초에 용융물의 선단이 반구 하단부에 도달되는 것으로 계산되었다. Fe 용융물의 밀도가 Al_2O_3 용융물의 밀도에 비해

2배 이상 크기 때문에 반구 하단부에 용융물의 선단이 빨리 도착한 것으로 생각되며, Case-5의 경우는 냉각수 층의 높이가 상대적으로 작았기 때문에 위와 같은 결과가 나타난 것으로 생각된다. 용융물 선단의 위치 변화에 대한 냉각수 과냉각도의 영향은 미미한 것으로 나타났다.

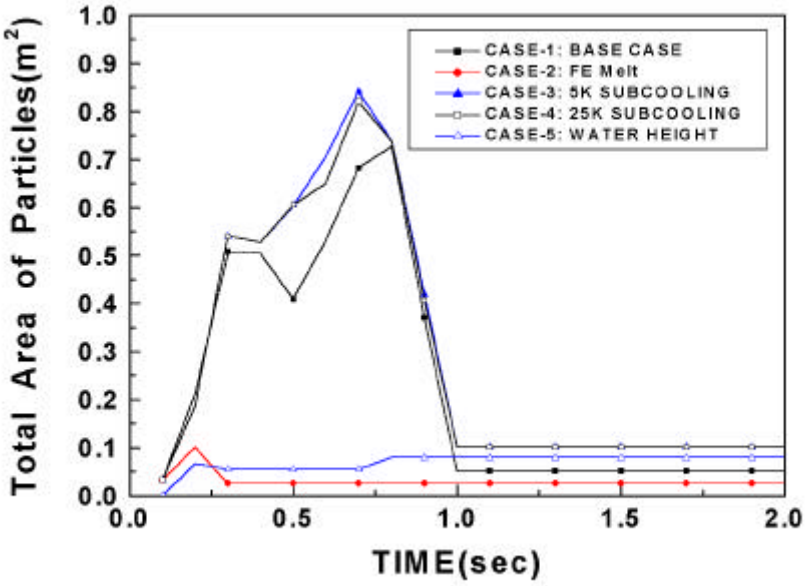

그림 6. TEXAS-III 코드 계산 결과 : 파쇄 용융물 입자의 총 면적

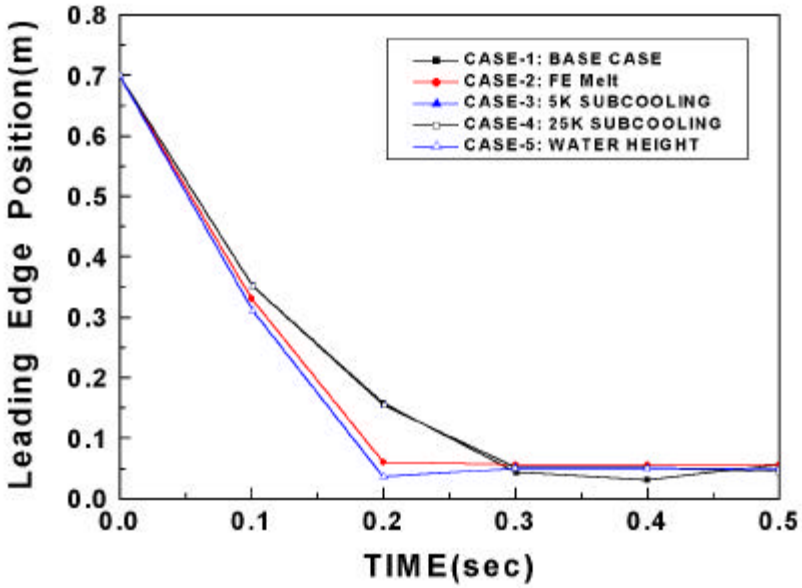

그림 7. TEXAS-III 코드 계산 결과 : 용융물 선단의 위치 변화

그림 8은 증발된 수증기의 분율에 대한 TEXAS-III 코드 계산 결과를 보여준다. 계산 초기에는 Al_2O_3 용융물을 주입한 경우에 증발된 수증기 분율에 큰 차이가 없었으나 Fe 용융물을 주입한 경우는 현격히 낮은 분율을 보였다. 그러나, 계산 시간이 진행됨에 따라 거의 비슷한 분율 값을 나타냈으며, Case-5 경우가 다른 계산에 비해 다소 높은 값을 나타내었다. 이는 Fe 용융물의 경우 용융물 특성 상 재배치 과정에서 파쇄 용융물 입자의 생성이 다른 경우에 비해 현저하게 적기 때문에 초기에 증발되는 수증기의 양이 적게 나타난 반면 시간이 경과함에 따라 용융물의 고온 열에 의해 냉각수가 증발하여 결국에는 다른 계산과 유사한 분율을 나타낸 것으로 생각된다. 냉각수 수위를 낮게 설정하고 계산한 Case-5의 경우는 초기 냉각수의 양이 적기 때문에 전반적인 분율이 높게 계산된 것으로 판단된다.

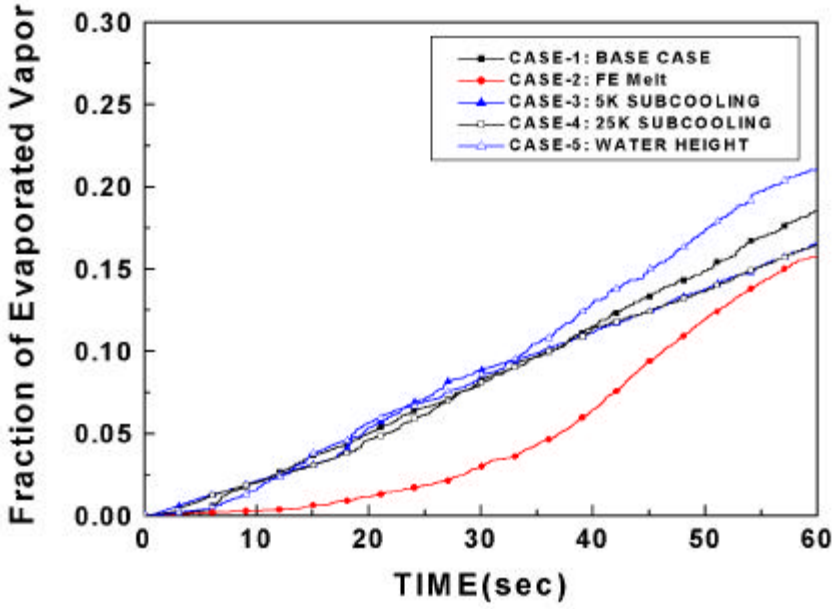

그림 8. TEXAS-III 코드 계산 결과 : 증발된 수증기의 분율

위에서 언급하였듯이 TEXAS-III 코드는 용융물과 냉각수 반응 현상을 1차원적으로 계산하는 한계가 존재한다. 그러나, 실제로 용융물이 냉각수 층을 통과하는 과정은 3차원적인 현상이므로 실험 계측 결과와 코드 계산 결과를 직접 비교하기에는 무리가 따른다. 예를 들어 실험 용기 내부의 압력 상승 값도 실험에서 측정된 압력 상승 값과 차이가 있고, 용융물 선단이 반구 내벽에 도달하는 시간도 실제 실험에서 유추한 시간에 비해 너무 짧게 계산되었다. TEXAS-III 코드 계산 결과에 근본적인 한계가 존재하지만 LAVA 실험 계측에 있어서도 용융물의 재배치 과정을 정밀하게 측정할 수 없기 때문에 각각의 변수를 설정하여 민감도 분석을 수행한 것은 의미가 있다고 생각된다. 해석 결과를 종합하면, Fe 용융물이

주입된 경우는 파쇄 용융물 입자의 생성이 제한되어 전반적으로 실험 용기 내부의 압력 상승이 Al_2O_3 용융물을 주입한 경우에 비해 적게 계산되었다. 그리고, 파쇄 용융물 입자의 형성 및 이에 따른 실험 용기의 압력 상승은 냉각수 과냉각도에 의해 좌우되었으며 LAVA 실험 결과에서 나타난바와 같이 냉각수 과냉각도가 낮은 경우에 활발한 비등 현상과 파쇄 용융물 입자의 생성으로 실험 용기의 내부 압력이 높게 계산되었다.

6. 결론

간극을 통한 노내 노심용융물의 자연 냉각 기구를 규명하기 위해 수행한 LAVA 실험 중에서 냉각수 과냉각도와 수위가 용융물의 재배치 과정 및 반구의 열적 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 수행한 실험을 중심으로 실험 결과를 정리하였다. 냉각수 과냉각도는 파쇄 용융물 입자의 생성에 영향을 미쳐서 결국 반구에 가해지는 열적 부하를 좌우하였다. 상대적으로 냉각수 과냉각도를 낮게 설정하고 수행한 LAVA-5 실험에서는 다른 실험에 비해 파쇄 용융물 입자가 많이 생성되었고 LAVA 실험 용기 내부의 압력 상승 폭이 높게 측정되었다. 반구 외벽의 최고 온도도 냉각수 과냉각도를 낮게 설정한 LAVA-5 실험과 LAVA-9 실험에서 낮게 측정되었다. 냉각수 수위를 다른 실험에 비해 1/2로 설정하고 수행한 LAVA-8 실험 결과를 보면 용융물과 반응하여 수증기화 할 수 있는 냉각수의 질량이 제한되어 실험 용기의 압력 상승이 낮게 측정되었고 파쇄 용융물 입자의 질량도 적게 나타났다.

실험을 통해 용융물 재배치 과정에 대한 정량적인 계측과 실험 결과를 분석하기에는 한계가 존재하기 때문에 TEXAS-III 코드를 이용하여 냉각수 과냉각도 및 수위 그리고 용융물 성분에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 해석 결과 용융물 재배치 과정에 대한 냉각수 과냉각도 및 수위의 영향은 LAVA 실험 결과와 유사한 경향을 나타냈다. 그리고, Fe 용융물의 특성에 따른 재배치 과정의 양상 또한 기존 LAVA 실험 결과와 비슷한 결과를 제시하였다. 그러나, 실험 계측의 어려움과 1차원 계산을 수행하는 TEXAS-III 코드의 한계 때문에 현 단계에서 실험 결과와 코드 해석 결과를 정량적으로 비교하기에는 무리가 따른다. 이를 보완하기 위해서 보다 다양한 조건에 대한 민감도 해석을 통해 LAVA 실험에서의 용융물 재배치 과정에 대한 정밀한 현상 분석을 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구 개발 과제의 일환으로 수행하였습니다.

참고 문헌

1. J. R. Wolf, et al., "TMI-2 Vessel Investigation Project Integration Report",

NUREG/CR-6197 TMI V(93)EG10 EGG-2734, March 1994.

2. Kim, S. B. and Kim, H. D., "Recent Progress in SONATA-IV Project", OECD/NEA CSNI PWG-2, the Third Meeting of TG-DCC, Rockville, MD, USA, May 9-10, 1997.

3. K. H. Kang, et al., "Experimental Investigation on In-vessel Debris Coolability through Inherent Cooling Mechanism", OECD/CSNI Workshop on In-Vessel Core Debris Retention and Coolability, Garching, Germany, March 3-6, 1998.

4. **강 경호 외 4인**, "**원자로 중대사고 시 간극을 통한 노심용융물의 냉각 가능성에 대한 실험 연구**", 1999**년 춘계 기계학회 학술 대회**.

5. **강 경호 외 4인**, "**간극을 통한 노내 노심용융물 냉각 방안에 관한 연구**", 1999**년 춘계 원자력학회 학술 대회**.

6. D. Magallon, H. Hohmann, "High Pressure Corium Melt Quenching Tests in FARO", Nuclear Engineering and Design 155(1995), 253-270.

7. Cho-Chone Chu, M. L. Corradini et al., "A Code Manual for TEXAS-III", April 1996.