

간극을 통한 노내 노심용융물 냉각 방안에 관한 연구
Study on In-vessel Debris Retention through Gap Cooling

강경호, 김종환, 박래준, 김상백, 김희동

한국원자력 연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자로 용기 하부 반구를 1/8로 선형 축소한 반구형 반응 용기 내부에 Al_2O_3/Fe 혼합 용융물(혹은 순수한 Al_2O_3 용융물)을 주입하여 반구 내외부의 압력 부하와 주입 용융물 성분이 반구의 열적, 기계적 거동 및 간극 형성에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, 반구 내외부의 압력 차이가 존재하는 경우에는 용융물과 반구 내벽 사이에 0.6 mm에서 3.0 mm 크기의 간극이 형성되었으나, 압력 부하 효과가 제거된 실험에서는 Fe 용융물과 반구 내벽이 용접되어 간극이 형성되지 못하였다. 동일한 압력 부하 조건에서 순수한 Al_2O_3 용융물을 주입한 실험의 경우에는 혼합 용융물을 주입한 실험에 비해 반구의 냉각율이 약 10 배 이상 높게 측정되었는데, Al_2O_3 용융물의 경우는 용융물 층 내부의 다공을 통하여 간극 내부에서 비등한 수증기가 방출되어 효과적인 열 제거가 이루어진 반면, Fe 용융물이 주입된 실험에서는 간극 내부에서 생성된 수증기가 방출될 수 있는 유로가 제한되어 효율적인 냉각이 이루어지지 않은 것으로 생각된다. 실험 결과와 더불어 FLUENT 코드와 ABAQUS 코드 해석을 수행하여 실험 결과를 분석하였다. 용융물과 반구 내벽 사이에 간극이 존재한다고 가정하고 비등에 의한 열 제거 효과를 부여하여 FLUENT 코드 해석을 수행한 결과, 실험에서 측정된 반구 외벽 온도 거동과 유사한 결과를 보였는데, 이는 간극을 통한 열 제거 가능성을 제시한 것으로 생각된다. 간극 형성의 주요한 기구로 작용하는 반구의 팽창 거동을 분석하기 위하여 수행한 ABAQUS 코드 계산 결과를 보면, LAVA 실험에서 측정된 반구 변형의 원인은 용융물에 의해 반구 내벽에 가해지는 열적 부하라는 사실을 알 수 있었다.

Abstract

A series of experiments, called LAVA(Lower-plenum Arrested Vessel Attack), are in progress to investigate the possibility of in-vessel debris cooling in a narrow gap. A 1/8 linear scaled mockup of a lower head vessel was used with Al_2O_3/Fe thermite melt(or Al_2O_3 only) as a corium simulant. In these tests, the influence of internal pressure load and the material component of the melt simulants on gap formation were studied. As well, the thermal behavior of the vessel was examined. In case the internal pressure was imposed, a gap formed at the interface between the debris crust and vessel wall. This gap affected initial heat-up of the vessel but couldn't ensure the cooling of the vessel wall. A significantly rapid temperature reduction occurred only in the Al_2O_3 melt test, which is postulated that in Al_2O_3 melt, water ingress into the gap is rather easy because the evaporated steam escapes through the porous media of the Al_2O_3 melt. Also, thermal behavior analyses of the vessel using FLUENT code show that water penetration into the gap could cause effective cooling of the vessel. For clear confirmation of the vessel expansion and its effect on the gap formation, analytical investigations using ABAQUS code were performed. Through the ABAQUS code calculations, it is confirmed that the vessel was experienced due mainly to the thermal load from the thermite melt.

1. 계 요

1979년 미국 TMI-2 원전에서 발생한 중대사고는 19톤의 핵연료 물질이 용융되어 원자로 용기 하부 반구로 재배치되었으나, 용기가 파손되지 않고 노심용융물이 냉각되었다는 점에서 기존의 사고 관리 전략에 수정을 요구하는 계기가 되었다^[1]. TMI-2 사고에서 발생한 원자로 용기 내부의 냉각수에 의한 노심용융물의 자연 냉각 기구가 규명된다면 중대사고를 노내에서 종결시키는 사고 관리 전략의 도출이 가능하게되어 용기 파손으로 인한 복잡한 노외 현상에 대한 대처 방안을 단순화할 수 있는 장점이 있다. 노내 노심용융물 자연 냉각 기구로는 노심용융물과 반구 내벽에 생성되는 수 mm 크기의 간극을 통한 냉각이 유력한 냉각 기구로 간주되고 있으며, 이에 대한 종합적인 실증 실험으로 한국 원자력 연구소에서 SONATA-IV(Simulation Of Naturally Arrested Thermal Attack - In Vessel) 연구를 수행하고 있다^[2]. 현재는 SONATA-IV 연구의 원리 검증 실험(Proof-of-Principle Test)으로 Al_2O_3/Fe 용융물을 이용한 LAVA(Lower-plenum Arrested Vessel Attack) 실험을 수행하고 있다^[3].

LAVA 실험은 1997년 5월 23일에 첫 번째 실험을 수행한 이래 지금까지 총 9회 실험을 수행하였다. 이 기간동안 용융물이 냉각수 층을 통과하여 반구로 재배치되는 과정에서 용융물과 반구 내벽 사이에 간극이 형성되는데 영향을 미치는 주요 실험 인자인 반구 내외부의 압력 부하, 용융물 성분, 냉각수 과냉도 및 수위에 대한 영향 평가 실험을 수행하였다. LAVA 실험을 통하여 용융물과 반구 내벽 사이에 간극이 형성될 수 있다는 사실과 이러한 간극이 용융물과 반구의 냉각 거동에 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었다. 그러나, 상사용융물을 이용한 실증 실험은 고온, 고압 실험 조건에 따른 실험 계속의 어려움과 이로 인한 정량적인 냉각 능력 검증의 불확실성 때문에 현 단계에서 구체적인 사고 관리 전략으로 도출하기에는 한계가 존재한다. 정량적인 냉각 능력의 검증과 이를 통한 구체적인 노내 자연 냉각 기구를 통한 사고 관리 전략을 수립하기 위하여 LAVA 실험의 후속으로 간극을 통한 노내 노심용융물의 정량적인 냉각 특성을 규명하기 위하여 용융물에 대한 지속 가열(Sustained Heating) 방법의 도입과 대형 용융물 냉각 실험을 계획하고 있다.

본 논문에서는 반구 내외부의 압력 부하와 주입 용융물 성분에 따른 용융물과 반구의 열적, 기계적 거동 분석을 위주로 LAVA 실험 결과를 기술하였다. 이와 더불어 FLUENT 코드 계산을 수행하여 용융물과 반구의 열적 거동과 간극을 통한 열 제거 가능성에 대한 해석 결과를 기술하였다. 그리고, ABAQUS 코드를 이용하여 반구의 변형 거동을 해석하였으며, 압력 부하와 Creep 효과의 존재 여부에 따른 민감도 분석을 수행하여 반구 변형의 원인에 대한 분석을 수행하였다.

2. LAVA 실험 계속 및 방법

LAVA 실험은 노심용융물이 냉각수가 존재하는 원자로 용기 하부 반구로 재배치되는 경우에 노심용융물과 반구 내벽 사이에 형성되는 간극을 통한 냉각 기구의 규명을 목적으로 수행한 실증 실험이다. 상사용융물을 이용하여 용융물과 반구 내벽 사이에 간극이 형성되는지 여부와 간극의 형성이 용융물과 반구의 냉각 특성에 미치는 영향을 규명하는 것에 초점을 맞추어 실험을 수행하였다.

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 모사체는 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물 40 kg(혹은 Al_2O_3 Thermite 용융물 30 kg)을 사용하였고, 혼합 분말에 DC 12V 의 직류 전원을 공급, 화학 반응을 통하여 생성하였다. 용융물은 반응 용기 상부의 도가니 내부에서 생성되며, 생성된 용융물은 직경 8 cm의 주입관을 통하여 반구 내부로 자유 낙하에 의해 재배치된다. 실험에서 사용한 용융물이 반구 내부에 모두

주입되면 반구 바닥 면에서 12.5 cm 높이로 쏘아게 된다. Al_2O_3/Fe Thermite 용융물은 Al_2O_3 용융물과 Fe 용융물의 혼합 용융물로 밀도 차이가 2 배 이상 되기 때문에 반응과 동시에 Fe 용융물과 Al_2O_3 용융물의 분리가 이루어져 밀도가 큰 Fe 용융물이 하부에 쏘아게 된다. 주입 용융물 성분 영향 평가를 위하여 Al_2O_3 용융물만 주입한 실험에서는 이와 같은 용융물의 밀도 차이를 이용하여 별도의 용융물 분리 용기에서 Al_2O_3 용융물과 Fe 용융물을 분리하여 반구 내부로 주입하였다. 냉각수는 용융물을 주입하기 전에 28 kW 전기 용량의 밴드 히터를 이용하여 실험 온도로 가열하였다. 고온 용융물이 냉각수와 접촉하면서 발생할 수 있는 증기 폭발 현상을 억제하기 위하여 LAVA 실험 용기를 17 기압으로 가압한 상태에서 실험을 수행하였다.

반구 내부로 주입된 용융물의 온도는 W/Fe 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 L1 열전대 옆에 장착하여 측정하였다. 반응이 끝난 후 두께 1 mm의 띠톱(Band Saw)으로 반구를 절단하여 고화 용융물과 반구 사이의 간극 형성 여부를 관측하였고, 이와 더불어 초음파 계측기를 이용하여 국부적인 간극 크기를 측정하였다. 그림 1은 LAVA 실험 장치의 개념도와 반구 외벽에 장착한 K 형 열전대의 위치도를 보여준다.

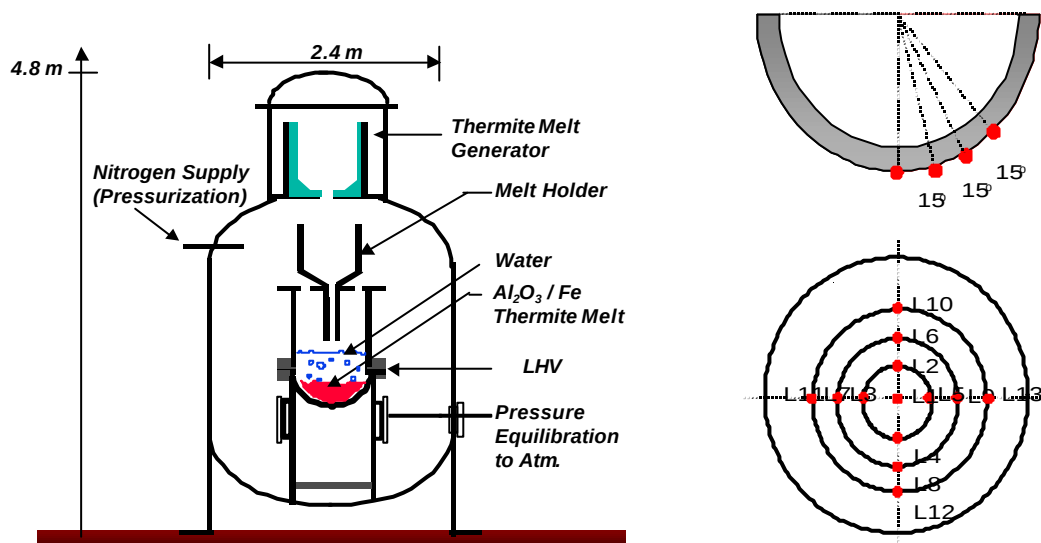


그림 1. LAVA 실험 개념도와 반구 외벽에 장착한 K형 열전대 위치도

3. LAVA 실험 조건

본 논문에서는 지금까지 수행되었던 LAVA 실험 중에서 반구 내외부의 압력 부하와 주입 용융물 성분 영향 평가 실험으로 실시한 LAVA-1, LAVA-4, LAVA-6 실험 결과에 대하여 기술하였다. LAVA-1 실험은 반구 내외부에 압력 부하를 형성하지 않고 수행한 실험이며, LAVA-4 실험은 Al_2O_3 용융물만 주입하여 수행하였다. 표 1은 구체적인 실험 조건을 기술한 것이다.

표 1. LAVA 실험 조건

실험 명	용융물 종류 및 질량	냉각수 질량 및 온도	반구 초기 온도	반구 압력 부하
LAVA-1	Al_2O_3/Fe , 40 kg	70 kg, 418 K	415 K	0,0 MPa
LAVA-4	Al_2O_3 , 30 kg	70 kg, 427 K	414 K	1,69 MPa
LAVA-6	Al_2O_3/Fe , 40 kg	70 kg, 427 K	420 K	1,66 MPa

4. LAVA 실험 결과

그림 2는 0° 동심원과 15° 동심원에서 측정한 반구 외벽 온도 거동을 보여준다. 반구 내외부에 압력 부하를 형성시키지 않고 수행한 LAVA-1 실험의 경우에는 0° 동심원 위치에서 반구 외벽의 온도를 측정하지는 못했지만, 15° 동심원에서 측정한 온도 곡선을 보면 최고 온도가 1200 °C를 넘고, 반구의 평균 냉각율은 약 0,24 K/s 로 비교적 서서히 냉각되는 등 반구가 심한 열적 부하를 받은 것을 알 수 있다. 이 같은 사실은 LAVA-1 실험에서 반응이 종결된 후 반구 중앙 면을 절단하여 관측한 결과, 용융물과 반구 내벽 사이에 간극이 존재하지 않고, 오히려 반구 내벽이 약 5 mm 정도 용발(Ablation)되었다는 것을 보아도 알 수 있다. 반면, 반구 내외부에 압력 부하를 형성하고 수행한 실험에서는 용융물과 반구 내벽 접촉면에서 0.6 mm에서 2.4 mm 크기의 간극이 형성된 것을 관측할 수 있다^[3].

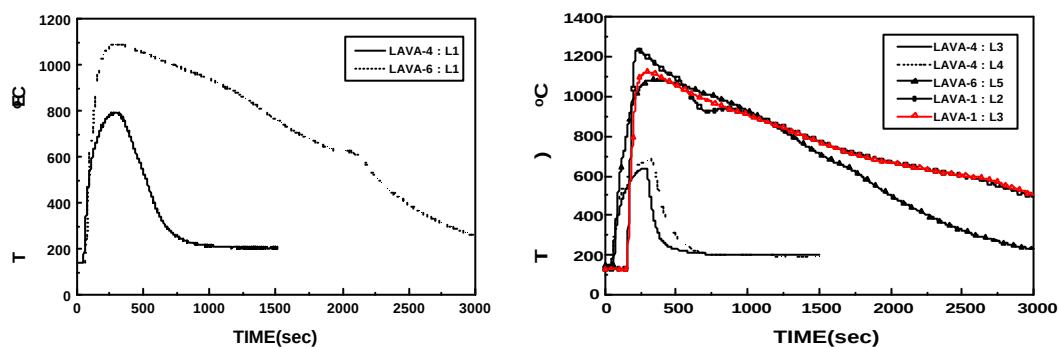


그림 2. 0° 동심원과 15° 동심원 위치의 반구 외벽 온도 거동

그림 2를 보면, 동일하게 반구 내외부에 압력 부하를 형성시키고 실험한 LAVA-4 실험과 LAVA-6 실험에서 반구 외벽의 온도 거동에 큰 차이가 존재하는 것을 알 수 있다. LAVA-6 실험은 LAVA-4 실험에 비해 반구 외벽 최고 온도가 약 300 °C 이상 높고, 초기의 온도 상승도 다소 가파르게 나타났다. Fe 용융물은 Al_2O_3 용융물과 비교하여 용융 온도가 약 500 °C 정도 낮고, 밀도는 상대적으로 높다. 따라서, 반구 내부로 주입 당시 상당히 과열되어 있는 상태이기 때문에 초기에 반구 내벽에 가하는 열적 부하가 높은 것으로 생각된다. LAVA-6 실험에서 반구 외벽의 평균 냉각율은 0,3 K/s로서 LAVA-1 실험과 큰 차이는 없었다. 그러나, LAVA-4 실험의 경우는 약 2 K/s 로 측정되어 LAVA-1, LAVA-6 실험

험에 비해 급격한 냉각이 발생하였음을 알 수 있다. 이와 같은 냉각 특성은 Fe 용융물 내부에는 다공성(Porosity)이 적기 때문에 용융물과 반구 내벽사이의 간극 내부에서 냉각수가 비등이 발생하더라도 수증기가 방출될 수 있는 유로가 제한되어 간극 내부로 더 이상 냉각수의 공급이 불가능하였기 때문에 나타난 현상이라고 생각된다. 반면, LAVA-4 실험에서는 다공성이 큰 Al_2O_3 용융물 내부에 수증기가 방출되는 유로가 쉽게 형성되어, 간극 내부로 냉각수 침투가 원활히 발생한 것으로 생각된다.

실험 결과를 종합하면, 반구 내외부에서 압력 부하의 존재 여부는 용융물과 반구 내벽 사이에서의 간극 형성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반구 내부에 17 기압의 압력 부하가 부여되면, 용융물에 의한 열적 부하와 더불어 반구를 팽창시켜 간극이 형성된다는 사실도 알 수 있다. 간극이 형성되면 내부로 냉각수가 침투할 수 있어서 용융물에서 반구로 전달되는 열량을 제거할 수 있는 가능성이 있지만, 효율적인 냉각이 이루어지기 위해서는 수증기가 방출될 수 있는 유로가 필수적이다. LAVA-4, 6 실험 결과에서 나타났듯이 Al_2O_3 용융물의 경우는 용융물 층 내부의 다공을 통하여 간극 내부에서 비등한 수증기가 방출되어 효과적인 열 제거가 이루어진 것으로 생각된다.

5. FLUENT 코드를 이용한 용융물과 반구 열적 거동 분석

(1) FLUENT 코드 해석 방법

FLUENT 코드(Version 4.51)를 이용하여 LAVA 실험에 대한 2차원 열 전달 계산을 수행하였다. Thermite 용융물이 반구 내부로 주입되어 용융물 풀(Pool)을 형성한 시점을 해석 초기 시점으로 설정하였고, 반구 내부에 쌓이는 용융물 풀의 높이는 부피를 계산하여 12.5 cm로 설정하였다. 용융물과 반구를 60 x 60 개의 사각 격자로 구성하여 계산을 수행하였다. 그림 3은 FLUENT 코드 계산 영역에 대한 개념도와 해석 격자 구조의 모습을 보여준다. 그림 3에서 표시한 W1 경계는 외부 대기와 접촉하는 반구 외벽을 나타내며, 공기로의 자연 대류 열 전달과 복사 열 전달을 고려하였다. 공기에서의 열 전달 계수는 $50 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 고정하였고, 반구 표면의 방사율(Emissivity)은 0.6 을 사용하였다. W2 경계는 용융물 풀과 동일한 높이의 반구 면을 나타내는데, 이 경계면에서 용융물과 접촉하지 않는 반구 부분으로 열 전도에 의한 열 전달 조건을 부여하여 계산하였다. W3 경계는 용융물 상부를 의미하며, 상부 냉각수로 막 비등과 복사에 의한 열 전달을 계산하였다. 상부의 막 비등 열 전달 계수는 $700 \text{ W/m}^2\text{K}$, 용융물 표면의 방사율은 0.6을 각 각 사용하였다.

용융물 풀과 반구 내벽 사이의 간극을 통한 열 제거는 Monde의 임계 열유속 상관식^[6]을 이용하여 해석 조건으로 설정한 간극 크기에 대한 임계 열 유속 값을 계산한 후 용융물 온도와 수증기의 포화 온도를 고려하여 유추한 열 전달 계수를 사용하여 모의하였다. 용융물이 반구 내부로 주입되면서 생성되는 초기 간극의 크기는 $1 \mu\text{m}$ 로 가정하였고, 반구 외벽의 온도가 최고 온도에 도달하는 300 초에 1 mm 로 확장된다고 가정하였다. Monde 상관식은 수직 평판 간극 실험에서 구해진 식이므로 LAVA 실험과 같은 반구형 간극에 직접 적용하기에는 한계가 존재한다^[6]. 따라서, 1 mm 간극에서 Monde 상관식으로 구한 열 전달 계수를 100 %, 50 %, 25 %로 값을 변화시키면서 민감도 분석을 수행하였다. LAVA 실험 결과에서 나타난 간극을 통한 열 제거 능력을 정량화하기 위하여 한국 원자력 연구소에서는 SONATA-IV 연구의 일환으로 CHFG(Critical Heat Flux in Gap) 실험^[6]을 수행하고 있다. CHFG 실험에서 반구형 간극 내에서의 열 전달 상관 관계식을 도출되면 이를 LAVA 실험 해석에 이용하여 간극을 통한 냉각 능력의 정량화를 수행할 계획이다.

용융물 풀이 형성되면, 풀 내부에서 자연 대류 유동장이 형성되어 풀 내부의 열전

달 현상을 지배하게 된다. 유동장이 형성됨에 따라 반구 상부에 열적 부하가 집중되는 것이 일반적인데, LAVA 실험에서는 반구 하단부(0° 동심원 위치)에 열적 부하가 집중되었다. 이 같은 결과는 용융물이 반응 용기 상부의 도가니에서 생성된 후 주입 관을 통과하여 반구 하단부로 자유 낙하함에 따라 용융물과 가장 먼저 접촉하는 반구 하부에 열적 부하가 집중되었을 가능성과 용융물이 재배치 과정에서 냉각수 층을 통과하면서 외부가 급속히 냉각되어 피막 층이 형성되면서 풀 내부의 유동장 형성이 열 전달 현상에 크게 영향을 미치지 못했을 가능성도 존재한다. 따라서, 용융물 풀 내부에 자연 대류 유동 효과를 제거하고 FLUENT 코드 계산을 수행하여 LAVA 실험 결과와 비교 분석하였다. 그리고, LAVA-6 실험에서는 Al_2O_3/Fe 용융물이 분리되어 Fe 용융물이 반구 하단부에 쌓여있었으므로, 용융물의 성분을 순수한 Fe 용융물로 가정하고 열 전달 계산을 수행하였다.

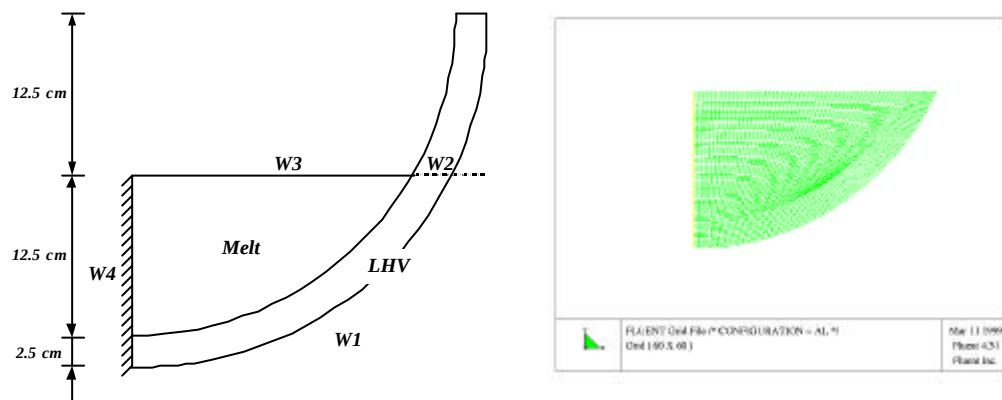


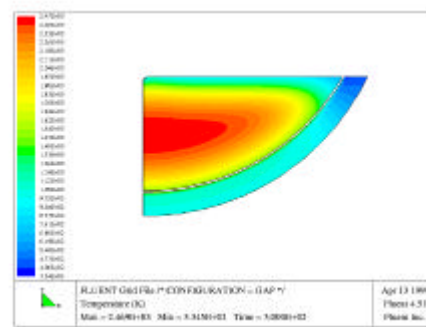
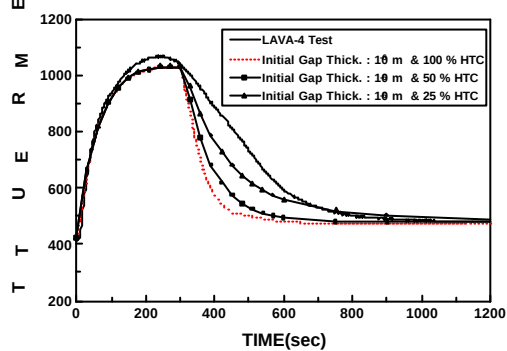
그림 3. FLUENT 코드 계산 영역에 대한 개념도와 해석 격자 구조의 모습

(2) FLUENT 코드 해석 결과

FLUENT 코드를 이용하여 LAVA-4 실험과 LAVA-6 실험에 대한 용융물 풀과 반구의 열적 거동 분석을 수행하였다. 초기 간극 크기를 $1\ \mu m$ 로 설정하고, 300 초 지난 시점에서 $1\ mm$ 로 확장된다고 가정하고 계산을 수행하였다. Monde 상관식을 이용하여 구한 간극 내부에서의 열 전달 계수 값에 불확실성이 존재하므로, 이에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 그림 4는 LAVA-4 실험에 대한 FLUENT 코드 계산 결과를 보여준다. 반구 외벽 L1 지점(0° 동심원 위치)의 온도 거동을 보면, 간극 크기를 $1\ \mu m$ 로 설정하고 계산한 초기 온도 상승 형태는 실험 결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 그리고, 간극 크기가 $1\ mm$ 로 확장된다고 가정하고 계산한 300 초 이후의 냉각 거동에서는 열 전달 계수를 25 % 로 보정한 경우($k = 809.8\ W/m^2K$)가 비교적 실험 결과와 유사한 거동을 보였다. 인위적으로 열 전달 계수를 선정하였지만, LAVA-4 실험에 대한 FLUENT 코드 계산 결과는 용융물과 반구 내벽 사이의 간극에서 냉각수에 의한 열 제거를 통하여 반구가 효과적으로 냉각될 수 있다는 것을 알 수 있다.

LAVA-6 실험 해석에서는 용융물의 성분을 순수한 Fe 용융물로 가정하고 계산하였다. 그림 5는 LAVA-6 실험에 대한 FLUENT 코드 계산 결과를 보여준다. 초기 간극 크기를 $1\ \mu m$ 로 설정한 경우와 간극이 존재하지 않는 경우에 대하여 계산을 수행하였으며,

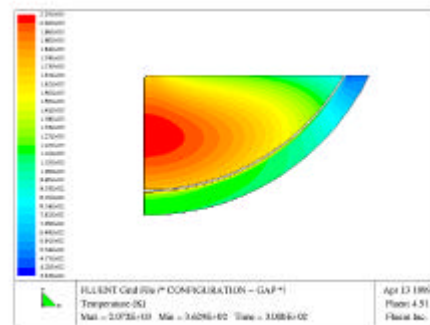
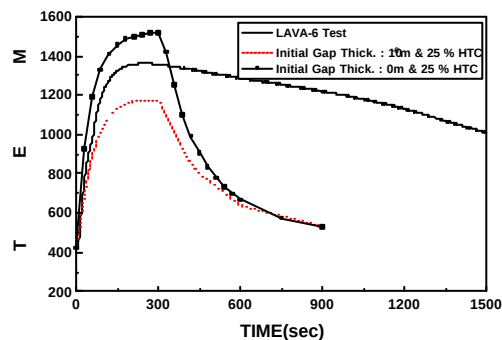
300 초 이후의 냉각 거동 계산에서는 열 전달 계수를 25 %로 동일하게 보정하여 계산하였다. 계산 결과를 보면, 초기 간극 크기가 $1\ \mu\text{m}$ 인 경우는 실험 결과에 비해 반구 외벽의 온도와 증가율이 낮게 계산되었고, 간극이 존재하지 않는 경우에는 실험 결과 보다 높게 계산되었다. 그리고, 300 초 이후의 냉각 거동은 실험 결과와는 달리 900 초가 지난 시점에 500 K 이하로 냉각되었다. 용융물 성분을 순수한 Fe 용융물이라고 가정하고 계산한 한계가 존재하지만, Al_2O_3 용융물을 주입한 LAVA-4 실험과 비교하여 Fe 용융물이 반구 하단부에 쌓이는 LAVA-6 실험에서는 Fe 용융물 내부에 다공성이 낮아서 간극이 형성되어도 수증기가 유출될 수 있는 유로가 확보되지 못함에 따라 효과적인 냉각이 이루어지지 않았다는 것을 알 수 있다.



(a) L1 지점의 반구 외벽 온도 거동

(b) 300초 시점의 반구 온도 분포

그림 4. LAVA-4 실험에 대한 FLUENT 코드 계산 결과



(a) L1 지점의 반구 외벽 온도 거동

(b) 300초 시점의 반구 온도 분포

그림 5. LAVA-6 실험에 대한 FLUENT 코드 계산 결과

6. ABAQUS 코드를 이용한 반구의 기계적 거동 분석

(1) ABAQUS 코드 해석 방법

용융물에 의한 열적 부하와 반구 내부에 가해지는 압력 부하에 의해 반구는 반응 중 팽창을 하게 된다. 이러한 반구의 기계적인 팽창 효과는 용융물과 반구 내벽 사이에 간극이 형성되는데 주요한 요인으로 작용할 수 있으며, LAVA 실험에서도 실시간 반구의 변형이 측정되었다. 그러나, LAVA 실험에서는 반구 외벽의 L1 열전대 장착 위치(0° 동심원)에서만 변형을 측정하였기 때문에 전반적인 반구의 변형을 예측하기에는 한계가 존재한다. 따라서, 전반적인 반구의 기계적 변형을 예측하고, 반구의 변형 원인을 규명하기 위하여 상용 구조 해석 코드인 ABAQUS 코드(Version 5.7.1)를 이용한 구조 해석을 수행하였다.

ABAQUS 코드는 구조물의 응력 해석과 구조 변형, 그리고 파손 모드 등을 해석할 수 있는 상용 유한 요소(Finite Element) 해석 코드이다. ABAQUS 코드를 이용하여 LAVA 실험에서 반구 변형 정도 및 변형 원인을 분석하고자 2 차원 축 대칭 탄, 소성 응력 해석(Elastic-plastic Stress Analysis)을 수행하였다. LAVA 실험에서와 같이 고온 용융물에 의한 열적 부하와 반구 내부의 압력 부하가 동시에 구조물에 가해지는 경우에 대한 구조 해석을 수행하기 위해서는 열 전달 계산과 응력 해석 계산의 2 단계의 계산 절차를 통해야 한다. 반구 내부에 가해지는 열적 부하의 모의는 FLUENT 코드 계산을 통하여 구한 열속을 이용하였다. 반구 내부에 열속이 부여된 조건에서 열 전달 계산을 수행하여 반구 내부의 온도 분포를 구하였고, 이렇게 구한 반구의 온도 변화를 초기 값으로 사용하여 반구의 기계적 거동을 계산하였다. 계산에 사용된 요소(Element)는 4 각 격자 형태로 열 전달 계산에서는 DCAX4, 응력 해석에서는 CAX4 형태의 요소를 선정하였으며, 전체적인 반구의 해석 구조는 FLUENT 코드 해석에서 구성한 반구 구조와 동일하게 설정하여 계산하였다. 그림 6은 ABAQUS 코드 해석의 개념도와 반구 격자 구조의 모습을 보여준다.

일반적으로 용기가 용융 온도의 1/2 이상의 고온 상태를 수 시간 유지하게 되면 응력이 축적되어 Creep에 의한 파손 가능성이 존재한다. 그러나, LAVA 실험의 경우는 용융물이 냉각수에 의해 냉각되어 Creep 파손이 발생할 정도로 반구의 고온 상태가 유지되지 않았기 때문에 Creep 효과에 반구의 변형 및 파손이 발생하지 않을 것으로 생각된다. 그러나, Creep 거동에 대한 민감도 분석을 수행하기 위하여 Creep 거동을 포함한 해석과 Creep 효과를 제거한 해석을 수행하여 계산 결과를 비교하였다. Creep 거동 해석은 정상 상태에서 일반적으로 사용되는 Bailey-Norton 식을 이용한 Power Creep Law를 적용하였다^[7].

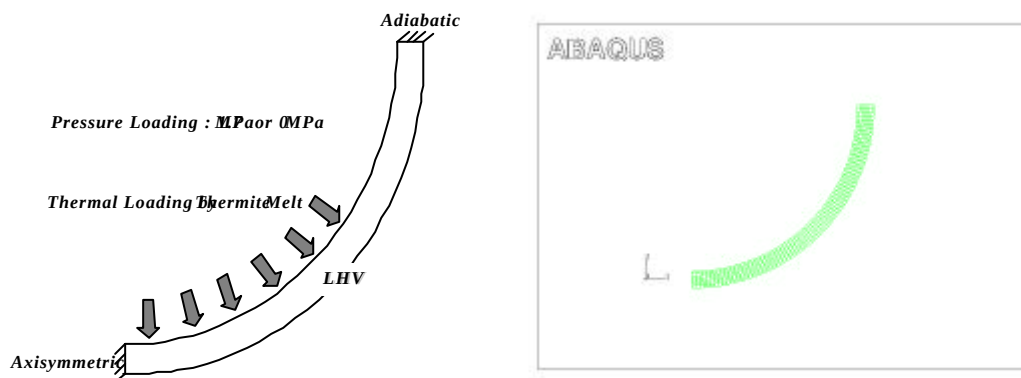


그림 6. ABAQUS 코드 계산 영역에 대한 개념도와 해석 격자 구조의 모습

(2) ABAQUS 코드 해석 결과

LAVA-4 실험에 대하여 반구 변형 정도 및 변형 원인에 대한 ABAQUS 코드 계산을 수행하였다. 반구에 대한 응력 해석을 수행하기 위해서는 반구 내부의 온도 변화가 초기 값으로 사용되므로, FLUENT 코드 계산을 통하여 구한 반구 내벽에 가해지는 열속을 이용하여 열 전달 계산을 수행하였다. 그림 7은 ABAQUS 코드 계산을 수행하여 구한 반구 외벽 L1 지점(0° 동심원)의 온도 변화와 300 초 시점에 반구의 온도 분포를 보여준다. L1 지점의 온도 변화를 보면, LAVA-4 실험 결과와 ABAQUS 코드 계산 결과가 유사한 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 이에 따라, 열 전달 계산을 수행하여 구한 반구 내부의 온도 변화를 초기 값으로 사용하여 반구 내부에 1.7 MPa의 압력 부하가 부여된 경우와 압력 부하가 존재하지 않는 경우에 대한 응력 해석을 수행하였다.

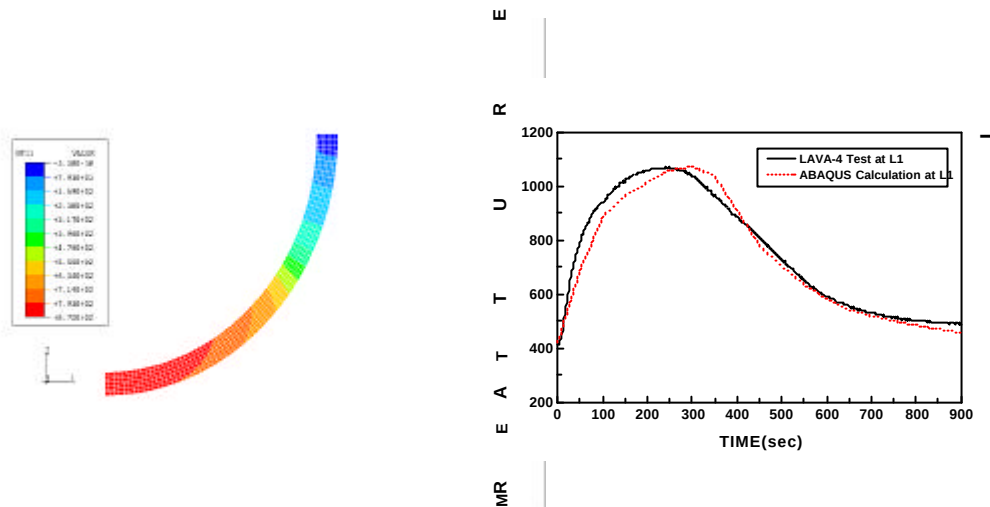


그림 7. ABAQUS 코드 계산 결과 : 반구 온도 분포와 L1 지점 온도 변화

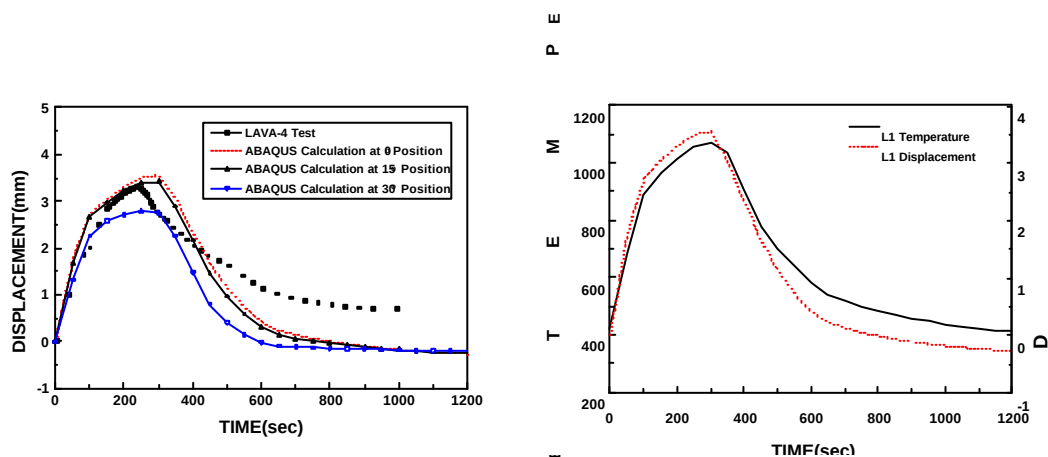
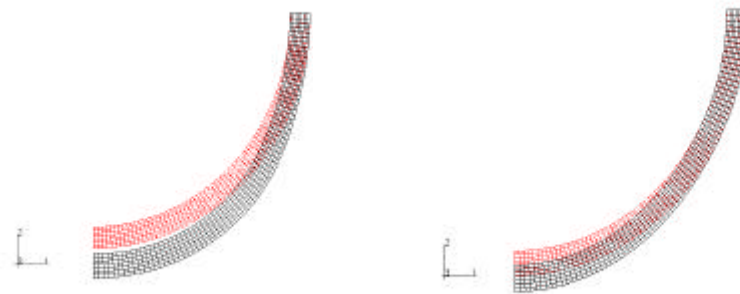


그림 8. ABAQUS 코드 계산 결과 : 압력 부하가 존재하는 경우의 반구 변형 거동

그림 8 과 그림 9 는 반구 내부에 1.7 MPa의 압력 부하가 존재하는 경우에 대한 ABAQUS 구조 해석 결과를 보여준다. LAVA-4 실험에서는 L1 지점에서 선형 변형 측정기

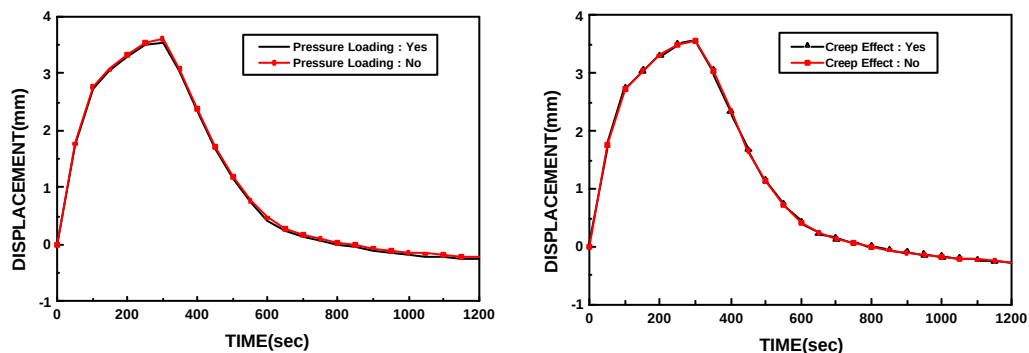
를 이용하여 반구의 변형을 실시간 측정하였다. 측정 결과, 초기 상태에서 최대 3.3 mm 팽창한 후 서서히 수축하여 약 1 mm 팽창한 상태에서 고정되었다. 실험에서 측정된 반구의 변형 거동은 L1 지점의 온도 변화와 거의 유사한 곡선을 나타내어 반구의 변형이 용융물에 의한 열적 부하 때문이라는 것을 추측할 수 있다. 그림 8 을 보면, ABAQUS 코드 계산 결과도 LAVA-4 실험 결과와 유사한 값을 보이는 것을 알 수 있다. 그리고, 반구 변형 곡선은 ABAQUS 코드를 이용한 열 전달 계산으로 구한 반구의 온도 변화와 유사한 거동을 보이는 것을 알 수 있는데, 이는 LAVA-4 실험 결과에서 나타난 바와 같이 반구 변형의 주요 원인이 용융물에 의해 반구 내벽에 가해지는 열적 부하라는 것을 보여준다. 그림 9 는 변형된 반구의 형상을 10 배 확대해서 보여준다. 그림 8의 위치 별 반구 변형 곡선에서도 알 수 있듯이 0° 동심원 지점에서 반구의 변형이 가장 크게 나타났으며, 시간에 따라 반구가 팽창과 수축하였다는 알 수 있다.



(a) 300 초 시점 : 10배 확대 모습

(b) 450 초 시점 : 10배 확대 모습

그림 9. ABAQUS 코드 계산 결과 : 압력 부하가 존재하는 경우의 반구 변형 모습



(a) 압력 부하의 영향

(b) Creep 효과의 영향

그림 10. ABAQUS 코드 계산 결과 비교

반구 내부에 가해지는 압력 부하가 변형에 미치는 영향을 분석하기 위하여 동일한 열적 부하 조건에서 압력 부하를 제거하고 계산을 수행하였다. 그리고, Creep 거동이 반구 변형과 파손에 미치는 영향을 분석하기 위하여 압력 부하가 존재하는 경우에 대하여 Power Creep Law를 사용하여 응력 계산을 수행하였다. 그림 10 은 두 경우에 대한 ABAQUS 코드 계산 결과를 보여준다. 각 각의 경우에 대하여 응력 계산을 수행한 후 L1 지점(0° 동심원 위치)의 반구 변형 곡선을 비교하였다. 그림 10을 보면, 반구 내외부의 압력 부하 존재 여부와 Creep 거동 효과는 반구 변형에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. ABAQUS 코드 계산을 통하여 LAVA 실험에서 반구 변형의 원인은 용융물에 의해 반구 내벽에 가해지는 열적 부하 때문이라는 사실을 알 수 있다.

7. 결론 및 향후 연구 계획

용융물 피막층과 반구 내벽 사이의 간극내부에서 냉각수의 열 제거를 통한 노심용융물의 냉각 가능성을 규명하기 위하여 수행중인 LAVA 실험 결과를 기술하였다. 원자로 용기 하부 반구를 1/8로 선형 축소한 반구형 반응 용기 내부에 Al_2O_3/Fe 혼합 용융물(혹은 순수한 Al_2O_3 용융물)을 주입하여 반구 내외부의 압력 부하와 주입 용융물 성분이 반구의 열적, 기계적 거동 및 간극 형성에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, 반구 내외부의 압력 차이가 존재하는 경우에는 용융물과 반구 내벽 사이에 0.6 mm에서 3.0 mm 크기의 간극이 형성되었으나, 압력 부하 효과가 제거된 실험에서는 Fe 용융물과 반구 내벽이 용접되어 간극이 형성되지 못하였다. 동일한 압력 부하 조건에서 순수한 Al_2O_3 용융물을 주입한 실험의 경우에는 Al_2O_3/Fe 혼합 용융물을 주입한 실험에 비해 반구의 냉각율이 약 10 배 이상 높게 측정되었는데, Al_2O_3 용융물의 경우는 용융물 층 내부의 다공을 통하여 간극 내부에서 비등한 수증기가 방출되어 효과적인 열 제거가 이루어진 반면, Fe 용융물이 주입된 실험에서는 간극 내부에서 생성된 수증기가 방출될 수 있는 유로가 제한되어 효율적인 냉각이 이루어지지 않은 것으로 생각된다.

실험 결과와 더불어 FLUENT 코드와 ABAQUS 코드 해석을 수행하여 실험 결과를 분석하였다. 용융물과 반구 내벽 사이에 간극이 존재한다고 가정하고 비등에 의한 열 제거 효과를 부여하여 FLUENT 코드 해석을 수행한 결과, 실험에서 측정된 반구 외벽 온도 거동과 유사한 결과를 나타냈다. 이는 간극을 통한 열 제거 가능성을 제시한 것으로 생각된다. 그리고, 간극 형성의 주요한 기구로 작용하는 반구의 기계적 거동을 분석하기 위하여 수행한 ABAQUS 코드 계산 결과를 보면, 반구 내외부의 압력 부하와 Creep 효과의 존재 여부가 반구의 변형 거동에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서, LAVA 실험에서 측정된 반구 변형의 원인은 용융물에 의해 반구 내벽에 가해지는 열적 부하라는 사실을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구 개발 과제의 일환으로 수행 하였습니다.

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. M. Monde et al., "Critical Heat Flux during Natural Convective Boiling in Vertical Rectangular Channels Submerged in Saturated Liquid", ASME J. of Heat Transfer, 104, p. 300 - 303, 1982
5. S. H. Yang et al., "An Experimental Study of the Pool-boiling CHF on Downward Facing Plates", Journal of the Korean Nuclear Society, V, 26(4), p.493-501, 1994.
6. J. H. Jeong, et al., "Experimental Study on CHF in a Hemispherical Narrow Gap", OECD/CSNI Workshop on In-Vessel Core Debris Retention and Coolability, Garching, Germany, March 3-6, 1998.
7. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., ABAQUS User's Manual, Version 5.5-1, Providence, Rhode Island, 1995