2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

간극 냉각 특성에 대한 LAVA 실험 결과 분석

Analyses of the LAVA Experimental Results on Gap Cooling Characteristic

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

요 약

간극을 통한 노내 노심용융물의 냉각 가능성을 규명하기 위해 수행한 LAVA 실험에서 실험 인자에 따른 간극의 형성 및 반구의 냉각 거동에 대한 실험 결과를 종합하여 간극 냉각 특성을 분석하였다. 반구 내, 외부에 압력 부하가 존재하는 경우 1 ~ 3mm 크기의 간극이 형성되었으며 용융물의 성분에 따라 간극 냉각 특성의 차이가 뚜렷하게 나타났다. Al_2O_3 용융물 실험에서는 Al_2O_3/Fe 용융물 실험에 비해 간극이 뚜렷하게 형성되고 용융물 층 내부에 다공성이 커서 간극 내부로 냉각수가 원활하게 침투하여 반구가 효과적으로 냉각되었다. 간극을 통한 냉각 가능성은 반구 내부에서 전도 열 유속을 측정한 결과 최대 70 ~ 470 kW/m^{2}의 열속으로 냉각수에 의해 비등 열 제거가 이루어졌다는 사실에서 다시 한번 확인할 수 있었다.

Abstract

The analyses of the LAVA experimental results focused on gap formation and gap cooling characteristics have been performed. The experimental results address the non-adherence of the debris to the lower head vessel and the consequent gap formation in case there was an internal pressure load across the vessel. The thermal behaviors of the lower head vessel during the cooldown period were mainly affected by the heat removal characteristics through this gap, which were mainly determined by the possibilities of the water ingression into the gap depending on the melt composition of the corium simulant. The enhanced cooling capacity through the gap was distinguished in the Al_2O_3 melt tests. The reason would be that due to a large gap at the interface of the lower head vessel wall and a highly porous configuration of the aluminum oxide layer water could penetrate into the gap easily and also the steam generated in the gap could possibly escape via the pores inside the melt layer. The possibility of heat removal through gap in the LAVA experiments was confirmed again from that the vessel cooled down with the conduction heat flux through the vessel by 70 to 470 kW/m^2.

1. 서론

1979 년에 일어난 미국 TMI-2 원전 사고에서는 원자로 노심이 손상되어 원자로 용기 하부

반구에 용융물 풀(pool)을 형성하는 사고가 발생하였으나 원자로 하부의 냉각수에 의해 노심용융물이 냉각되어 사고가 종결되었다. TMI-2 사고 결과는 기존 중대사고 코드 해석 결과와는 상반되게 원자로 용기 반구로 재배치된 노심용융물이 10 – 100 °C/min 의 냉각 율로 냉각되어 용기의 파손이 발생하지 않고 사고가 종결되었다는 것을 보여주었다[1,2]. TMI-2 원전 사고를 계기로 노심용융물의 노내 냉각 기구에 대한 연구가 활발히 이루어졌고 노심용융물과 원자로 용기 하부 반구 내벽 사이에 형성되는 간극을 통한 냉각이 유력한 냉각 기구로 제기되었다[2,3].

노심용융물이 냉각수가 존재하는 반구 내부로 재배치되어 용융물 풀을 형성하는 경우에 용융물과 반구 내벽 사이의 비 접촉성(contact resistance)에 의해 미세한 간극이 형성된다. 용융물과 반구의 열적, 재료적 특성의 차이에 의해 초기에 형성된 간극은 반구에 가해지는 열적, 기계적 부하에 의해 반구가 팽창함에 따라 크기가 성장한다. 간극 냉각 기구의 핵심은 간극 내부로 냉각수가 침투하여 비등 열 전달에 의해 노심용융물과 반구가 냉각되는 것이다. 간극 냉각 기구를 사고 관리 전략으로 구체화하기 위해서는 간극 형성 기구 및 간극의 형성이 노심용융물과 반구의 냉각에 미치는 영향에 대한 고찰 그리고 간극의 분포 및 크기에 대한 정량화와 간극을 통한 열 제거 능력의 정량적인 평가가 선행되어야 한다. 한국 원자력 연구소에서는 원자로 용기 하부 반구 내부에서 노심 용융물의 냉각 기구를 규명하기 위하여 SONATA-IV(Simulation of Naturally Arrested Thermal Attack In Vessel)[4,5] 연구를 기획하여 1 단계 원리 검증 실험인 LAVA(Lower-plenum Arrested Vessel Attack) 실험[6,7]과 CHFG (Critical Heat Flux in Gap) 실험[8]을 수행하였다.

LAVA 실험에서는 상사 용융물을 이용하여 노심 용융물과 원자로 용기 하부 반구 내벽 사이에서 간극의 형성 여부와 생성 원리를 규명하고 간극의 크기를 측정하였고 간극 형성이 노심 용융물과 반구의 냉각에 미치는 영향을 분석하였으며 CHFG 실험에서는 mm 크기의 미세 간극을 인위적으로 형성시킨 후 이를 통한 노심 용융물의 냉각 특성 및 크기를 정량화 하였다. 본 논문에서는 현재까지 수행한 12 차례의 LAVA 실험에 대하여 간극의 형성과 간극 냉각 특성에 초점을 맞춰서 실험 결과를 분석하였다.

2. LAVA 실험의 개요

2-1. 실험 계측

노심용융물의 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. 그림 1 은 LAVA 실험의 개념도를 보여준다. 용융물 풀의 온도 변화는 W/Re 열전대를 반구 중앙부 하단에서 5 cm, 10 cm 상단 지점에 설치하여 측정하였다. 반응 중 반구의 온도 변화는 K 형 열전대를 이용하여 측정하였다. 13 개의 K 형 열전대를 동심원 방향으로 외벽에서 3 mm 깊이에 장착하였다. LAVA-9 실험 이후에 수행한 실험에서는 반구 내부에서 열 전도에 의한 열속을 계산하기 위하여 반구 외벽에서 13 mm 깊이에 추가로 K 형 열전대를 장착하였다. 그림 2 는 반구에 설치한 K 형 열전대의 위치와 번호를 보여준다. 간극 냉각 기구를 규명하기 위해서는 용융물과 반구 내벽 사이에 형성되는 간극을 실시간 측정하는 것이 필수적이다. 그러나 LAVA 실험의 경우는 반구 내부에서 고온, 고압 조건하의 이상 유동 현상을 동반하는 복잡한 반응 형상을 보이고, 반응 중

반구 외벽이 700K 이상의 고온 상태이기 때문에 반응 중 간극의 크기를 측정하는 것은 현실적으로 불가능하다. 본 연구에서는 반응이 끝난 후 두께 1 mm 의 띠톱(band saw)으로 반구를 절단하여 고화 용융물과 반구 내벽 경계 면의 구조를 관찰하여 간극 형성 유무 및 크기 그리고 용융물의 고화 특성 등을 관찰하였다. 이와 더불어 초음파 계측 법(ultrasonic pulse echo method)을 이용하여 간극의 분포 및 크기를 실험 후 측정하였다[9].

2-2. LAVA 실험 조건

LAVA 실험은 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 반구 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 변형에 영향을 미쳐서 궁극적으로 용융물과 반구 내벽 사이에서 간극이 형성되는데 주요한 요인으로 작용한다. 반구 내, 외부에 작용하는 압력 부하의 영향을 분석하기 위하여 LAVA-1 실험과 LAVA-2 실험을 수행하였다. LAVA-1 실험은 반구 내, 외부의 압력 조건을 동일하게 설정한 후 40kg 의 Al_2O_3/Fe 용융물을 과냉각도 55K 의 냉각수 내부로 주입한 실험이다. LAVA-2 실험은 반구 내, 외부에 16.5 기압의 압력 부하를 형성시킨 상태에서 다른 실험 조건은 LAVA-1 실험 조건과 동일하게 설정하고 수행한 실험이다. LAVA-6 실험은 충분한 계측이 이루어지지 않았던 LAVA-2 실험에 대한 반복 실험이다.

초기에 수행한 LAVA 실험을 제외한 대부분 실험에서는 Al_2O_3 산화 용융물을 사용하였다. Al_2O_3 용융물은 고화 온도가 2323K 로서 고화 온도가 1800K 인 Fe 용융물에 비해 용융 상태에서 과열도(superheat)가 낮고 용융물 층 내부에 다공성(porosity)이 큰 점 등 두 성분 사이의 열역학적, 재료적 특성이 상이하다[10]. 본 연구에서는 이와 같은 용융물의 열역학적, 재료적 특성이 간극 형성 및 반구의 열적 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 Al_2O_3/Fe 혼합 용융물을 주입한 실험과 순수한 Al_2O_3 용융물을 주입한 실험 결과를 비교하였다. 용융 상태에서 Al_2O_3 용융물의 밀도는 약 2600kg/m^3 이며 Fe 용융물의 밀도는 약 7000 kg/m^3 이다. 순수한 Al_2O_3 용융물을 주입한 실험에서는 Al_2O_3 용융물과 Fe 용융물의 밀도 차이를 이용하여 밀도가 큰 Fe 용융물을 걸러내고 순수한 Al_2O_3 용융물을 반구 내부로 주입하였다. LAVA-3 실험과 LAVA-4 실험은 주입 용융물의 성분 영향을 평가하기 위하여 30kg 의 Al_2O_3 용융물만 주입하고 수행한 실험이다.

냉각수의 과냉각도 및 수위는 용융물 재배치 과정 중 냉각수로 전달되는 열 에너지의 전달 비율과 파쇄 용융물 입자의 생성에 영향을 미쳐서 결국 반구 내부로 전달되는 초기 열적 부하를 결정하는 주요한 인자이다. Al_2O_3 용융물을 주입한 경우에 냉각수 과냉각도 및 수위에 대한 영향 평가 실험을 수행하였다. LAVA-5 실험과 LAVA-7, 9, 10 실험은 냉각수의 초기 과냉각도에 대한 영향 평가를 위해 수행한 실험이다. 냉각수의 초기 과냉각도를 5 ~ 34 K 범위로 변화하여 실험을 수행하였다. LAVA-8 실험은 냉각수의 초기 수위에 대한 영향 평가를 위해 기존 실험에서 냉각수 수위로 설정한 50 cm 의 1/2 수위인 25 cm 의 냉각수 수위 조건에서 실험을 수행하였다.

LAVA-11, LAVA-12 실험은 용융물 질량에 대한 영향 평가를 위해 70kg 의 Al_2O_3 용융물을 주입하여 실험을 수행하였다. 용융물의 질량이 증가하면 용융물의 체적이 증가하여 용기와의

접촉면이 증가하며 간극 내부에서 냉각수 침투에 의해 제거되는 열 에너지의 양이 증가하게 되어 간극 내부로 냉각수 침투에 의한 냉각 가능성을 평가할 수 있다.

3. LAVA 실험 결과 분석

반응 후 반구 중앙 절단 단면에 대한 관측과 초음파 계측 법을 이용한 간극 크기 및 분포에 대한 측정 결과와 반구의 열적 거동에 대한 실험 결과를 종합하여 LAVA 실험에서 간극 냉각 특성을 분석하였다.

3-1. 간극의 형성

LAVA 실험에서 용융물과 반구 내벽 사이에서 간극의 형성 여부와 크기를 정량화 하는 것은 간극을 통한 노내 노심용융물의 냉각 방안을 구체화하기 위해 필수적으로 규명해야 할 항목이다. 그러나 고온, 고압 조건에서 수행되는 LAVA 실험의 특성 때문에 반응 중 간극의 크기를 측정하기는 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 반응이 종결된 후 반구 중앙 면의 절단과 고화 용융물의 형상에 대한 관측을 통해서 간극의 존재 여부 및 크기를 측정하였고 더불어 초음파 계측 법을 이용하여 반응 후 반구 단면에 대한 간극의 크기 및 분포를 유추하였다.

Al_2O_3/Fe 용융물 실험의 경우 반응 후 반구 중앙 면을 절단하여 간극의 크기를 측정하였다. 그림 3 은 LAVA-1, 2, 6 실험에 대한 반구의 중앙 절단 면을 보여준다. 반구 내외부에 압력 부하가 없었던 LAVA-1 실험에서는 Fe 용융물이 반구 내벽과 용접되어 반구 내벽이 약 5mm 정도 용발(ablation) 되었다. 반구 내외부에 약 16 기압의 압력 부하를 설정하고 수행한 LAVA-2 실험과 LAVA-6 실험에서는 0.6 mm 에서 2.5 mm 크기의 간극이 형성되었으며 접촉면의 일부분에서 반구 내벽의 용발이 관측되었다. Al_2O_3/Fe 용융물을 주입한 실험과는 달리 Al_2O_3 용융물을 주입한 실험의 경우는 용융물 층 내부의 다공 때문에 반응 후 반구를 중앙 절단할 수 없었다. 그러나 Al_2O_3 용융물 덩어리(cake)가 반구 내벽과 쉽게 분리되었고 고화 면 상단에서 용융물과 반구 내벽 사이의 경계면을 관찰한 결과를 종합하면 용융물과 반구 내벽 사이에 간극이 존재함을 확신할 수 있었다. 그림 4 는 Al_2O_3 용융물을 주입한 LAVA-9 실험에서 반응 후 반구와 분리한 고화 용융물 덩어리(cake)의 사진을 보여준다. 반구 내벽과 접하는 고화 용융물의 외부 표면은 대체로 원형을 유지하고 있었고 표면에 작은 동공(pore)과 갈라진 틈(crevices) 등이 관측되었다. Al_2O_3 용융물은 산화물로서 금속 반구와 재질이 상이하고 반구와 접촉 시 Fe 용융물에 비해 과열도(superheat)가 낮기 때문에 간극이 쉽게 형성된 것으로 생각된다.

Al_2O_3 용융물이 주입된 경우는 용융물 층의 취성(brittleness)이 매우 강하여 반구를 중앙 절단하기가 쉽지 않다. 따라서 반응 후 초음파 계측 법을 이용하면 원형 상태에서 간극의 크기 및 분포의 측정이 가능하다. 그림 5 는 LAVA-6, LAVA-10, LAVA-11 그리고 LAVA-12 실험 반구에 대하여 반응 후 초음파 계측 법을 이용하여 측정한 간극의 크기 및 분포를 보여준다. 반구 외부 면의 경도를 따라 남-북, 동-서 방향으로 간극의 크기를 측정하였다. 그림에서 0^o 는 반구의 바닥 면을 나타내며 -80^o, $+80^o$ 는 각각 반구의 상단부를 나타낸다. 간극의 크기는 경도 상의 위치를 따라 차이를 보이며 대개 1.0 ~ 5.8 mm 의 크기를 갖는 것으로 측정되었다. LAVA-6 실험에서 간극이 존재하

지 않는다고 나타난 반구 하단부인 0^o 동심원 부근은 그림 3에서 보여진 반구의 중앙 절단 단면 사진에서 Fe 용융물과 반구 내벽이 용접된 부분과 비슷한 위치를 나타낸다. LAVA-6 실험의 반구 중앙 절단 단면에서 Fe 용융물 층은 부분적으로 용접되어 균일한 간극을 보이지 않는다. 반면 LAVA-10, 11 실험에서는 간극이 반구 면 전체에 고루 분포하였으며 반구 하단부인 0^o 동심원 위치보다 반구 상단부로 갈수록 간극의 크기가 증가하는 경향을 보였다. LAVA-12 실험의 경우는 Fe 용융물이 많이 유입되어 반구 하단부에서 용융물에 의한 반구 내벽의 용발이 발생하지는 않았으나 초음파 계측 결과 간극이 거의 형성되지 않았음을 알 수 있다.

3-2. 실험인자에 따른 반구의 냉각 특성

LAVA 실험에서 형성된 간극은 열 저항체로 작용하여 초기 가열 단계에서 반구의 온도 상승에 영향을 미친다. 그러나 반구의 냉각 특성은 용융물의 성분과 질량 그리고 냉각수 과냉각도 차이에 따라 실험 별로 상이한 결과가 나타났다. 각 실험 인자가 반구의 냉각 특성에 미치는 영향을 중심으로 실험 결과를 분석하였다.

용융물 성분의 영향

그림 6은 Al_2O_3/Fe 용융물을 주입한 실험과 Al_2O_3 용융물을 주입한 실험에서 15^o 동심원 위치의 반구 외벽의 온도 변화를 보여준다. 그림 6을 보면 용융물 성분에 따라 반구의 최고 온도와 냉각율 등 냉각 특성이 확연히 달라짐을 알 수 있다. Al_2O_3/Fe 용융물을 주입한 실험의 경우는 간극이 존재하지 않았던 LAVA-1 실험과 간극이 형성되었던 LAVA-2, LAVA-6 실험에서 반구의 냉각율이 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 LAVA-2 실험과 LAVA-6 실험에서 간극이 형성되었음에도 간극을 통한 효과적인 열 제거가 이루어지지 않았다는 것을 의미한다. 반면 그림 6(b)의 Al_2O_3 용융물 실험 결과들은 그림 6(a)에 나타난 Al_2O_3/Fe 용융물 실험 결과에 비해 급격한 냉각이 이루어졌으며 이는 간극 내부로 냉각수의 주입에 의해서만 가능한 냉각 특성이다.

Al_2O_3 용융물을 주입한 실험에서는 간극이 반구 전체 면에 균일하게 분포한 반면 Al_2O_3/Fe 용융물을 주입한 실험의 경우는 위치에 따라 용융물과 반구 내벽이 용접되어 간극의 형성이 불완전하여 냉각수 침투가 이루어지지 않음에 따라 용융물 성분에 의한 냉각 특성의 차이가 발생한 것으로 생각된다. 또한 반구 중앙 면 절단 사진에서 알 수 있듯이 Fe 용융물 층 내부는 다공이 거의 존재하지 않는 조밀한 구조를 가지고 있고 초기 상태에서 700 K 이상의 과열 상태를 유지하기 때문에 간극 내부에서 생성된 수증기가 방출할 수 있는 유로가 제한되어 냉각수 침투에 의한 효과적인 열 제거가 이루어지지 않은 것으로 생각된다. 반면 Al_2O_3 용융물 층 내부는 다공이 많이 존재하여 간극 내부에서 발생한 수증기의 방출 경로가 확보되어 간극 내부로 냉각수의 지속적인 주입이 가능하여 이에 따른 비등 냉각이 이루어진 것으로 생각된다.

Al_2O_3 용융물을 주입한 일련의 실험에서 실험 조건인 냉각수 과냉각도와 수위 그리고 용융물의 질량을 달리한 경우에 따른 반구의 냉각 거동의 특성을 아래에 기술하였다.

냉각수 과냉각도의 영향

그림 7 은 냉각수 과냉각도의 영향을 분석하기 위하여 LAVA-4 실험에 비해 냉각수 과냉각도를 낮게 설정하고 수행한 LAVA-5 실험과 LAVA-9 실험에서 반구 외벽의 온도 변화를 보여준다. 반구 외벽의 최고 온도는 LAVA-4 실험에 비해 200K 이상 낮게 측정된 것을 볼 수 있다. LAVA-4 실험과 비교하여 용융물 파편층이 많이 생성되었기 때문에 용융물에 의해 초기에 반구 내부에 전달된 열 에너지가 감소하였으며 결국 반구 외벽의 최고 온도가 낮게 측정되었다.

LAVA-9 실험에서는 2.1 ~ 2.83 K/s 의 냉각율로 반구가 냉각되어 LAVA-4 실험 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 위에서 언급하였듯이 LAVA-9 실험에서 반응이 종결된 후 고화 용융물 덩어리 (cake)가 반구 내벽과 쉽게 분리되어 간극이 존재함을 확신할 수 있었다. LAVA-4 실험에서와 같이 LAVA-9 실험에서도 모두 2.0 K/s 이상의 냉각율로 반구가 냉각되어 간극 내부에서 냉각수에 의한 열 제거를 통해 반구가 효과적으로 냉각되었음을 알 수 있었다. 반면 LAVA-5 실험에서는 반구 외벽의 최고 온도는 낮았지만 냉각율도 상대적으로 낮게 측정되었다. LAVA-5 실험은 용융물 파편층이 전체 용융물 질량의 45 % 가량 형성된 경우로 상대적으로 용융물 풀의 열적 부하가 감소하였으므로 파편층이 용융물 풀의 냉각을 저해했다고 추정된다. 상부에 파편 층이 많이 쌓여 있으면 파편 층 내부에서 비등 현상이 활발이 발생하여 간극 내부에는 냉각수의 주입이 잘 이루어지지 않음으로써 반구의 냉각율이 저하하였다. LAVA-5 실험과 같이 파편층이 많이 형성되어 용융물 풀과 복합적인 구조를 형성할 경우 파편층에 의한 냉각수의 공급 제한 가능성에 대해서는 앞으로 추가적인 연구를 필요로 한다.

<u>냉각수 수위의 영향</u>

대부분의 LAVA 실험이 초기 냉각수 수위를 50cm 로 설정하고 수행한 반면 LAVA-8 실험에서는 냉각수 수위의 영향을 평가하고자 냉각수 수위를 25cm 로 설정하여 실험을 수행하였다. 그림 8 은 LAVA-8 실험에서 반구 외벽의 온도 변화를 보여준다. 용융물 재배치 과정에 대한 고찰에서 언급하였듯이 냉각수 수위가 낮을수록 파쇄 용융물 입자의 생성이 감소하고 결국 냉각수로 전달되는 열 에너지의 양도 제한된다. 또한 반응 중 간극 내부로 주입될 수 있는 냉각수의 질량이 적어지므로 용융물과 반구의 냉각 거동에 영향을 미칠 수 있을 것으로 생각된다. LAVA-8 실험에서 측정된 반구 외벽의 온도 거동을 보면 최고 온도가 LAVA-4 실험에 비해 약 100K 정도 높게 측정되었다. 그리고 15° 지점에서 측정된 반구 외벽의 온도가 LAVA-4 실험 결과와는 달리 1000K 이상의 고온을 나타내었고 전반적인 반구의 냉각율도 0.5 K/s 전후로 낮게 측정되었다. 반구의 냉각 특성은 LAVA-4 실험의 간극 냉각과 비슷하나 냉각율이 훨씬 낮은 이유는 용융물과 반구를 충분히 냉각시킬 수 있는 냉각수의 질량이 제한되어 이와 같은 냉각 거동이 나타난 것으로 생각된다. 2000 초가 지난 시점에서 반구 외벽의 온도가 소폭 상승한 점도 냉각수가 고갈되어 냉각이 이루어지지 않았음을 보여준다.

<u>용융물 질량의 영향</u>

간극을 통한 용융물의 냉각 가능성을 규명하는데 있어 간극의 형성 여부 뿐만 아니라 간극 내부로 냉각수의 침투 가능성이 선결되어야 한다는 것을 Al_2O_3/Fe 용융물 실험 결과를 통해 확인할 수 있었다. 간극을 통한 냉각 가능성을 좌우하는 냉각수의 침투는 간극 길이와 밀접한 관계를

가진다. 간극 내부로 냉각수의 침투 거리(water penetration length)가 간극 냉각에 미치는 영향을 분석하기 위해 Al_2O_3 용융물의 질량을 70kg 으로 증가하여 LAVA-11, LAVA-12 실험을 수행하였다. 그림 9 는 LAVA-11 실험에서 측정한 반구 외벽의 온도 변화를 보여준다. 그림을 보면 반구 외벽의 위도에 따라 0.5 ~ 1.9 K/s 의 반구 냉각율이 측정되었음을 알 수 있다. LAVA-4, LAVA-9 실험에서 측정된 반구 외벽의 냉각율을 고려하면 LAVA-11 실험의 경우 반구 상단부에서는 간극 내부로 냉각수가 침투하여 효과적인 열 제거가 이루어진 반면 반구 하단부에서는 충분한 냉각이 이루어지지 않은 것으로 생각된다.

그림 10 은 LAVA-12 실험에서 측정한 반구 외벽의 온도 변화를 보여준다. 반구 외벽의 최고 온도는 T1 열전대에서 측정한 1339 K 였고 15^o 동심원 위치에서 반구 외벽의 온도는 T3 열전대 지점에서만 제대로 측정되었는데 이 지점에서 최고 온도는 1287 K 로서 LAVA-11 실험에서 측정된 온도에 비해 100 K 정도 높게 나타났다. T1 지점에서 반구 외벽의 냉각율은 0.29 K/s 로서 기존 Al_2O_3 용융물 실험에 비해 낮게 측정되었다. 이와 같은 냉각율은 오히려 Al_2O_3/Fe 용융물을 주입한 실험에서 측정된 냉각율과 비슷한 값을 나타낸다. 특히 LAVA-12 실험에서는 30^o 동심원 위치에서 측정된 반구의 냉각율이 최대 0.54 K/s 로서 0^o 동심원 위치에서 측정된 반구의 냉각율과 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 동일 경도 상에서 측정한 위도 별 반구의 냉각 거동도 LAVA-11 실험에서 부분적으로 나타난 냉각 특성을 보이지 않았다. LAVA-12 실험의 경우는 그림 6 에서 보여진 간극의 크기 분포에서도 나타나듯이 반구 하단부에서 Fe 용융물과 반구 내벽이 밀착되어 간극이 존재하지 않은 결과가 하부에서의 냉각에 영향을 미쳤을 가능성이 크다.

3-3. LAVA 실험의 간극 냉각 특성

간극 내부에서 냉각수에 의해 제거되는 열량을 정량화 하기 위하여 반구를 통한 전도 열 유속을 측정하였다. 그림 11 은 LAVA-9 실험에서 측정한 반구 외벽의 온도 변화와 전도에 의한 열속의 변화를 보여준다. 반구가 가열되는 동안에는 열속 값이 양(+)의 값을 나타내다가 냉각 단계에서는 음(-)의 값을 나타내었다. 열속 값이 음(-)의 값을 나타낸다는 것은 간극을 통한 열 제거에 의해 반구 내벽이 외벽에 비해 빨리 냉각되었음을 의미한다. 그림 11 을 보면 LAVA-9 실험에서 간극 내부에서 냉각수에 의해 최대 70 ~ 260 kW/m^2 의 열속으로 열 제거가 이루어졌음을 알 수 있다. LAVA-4 실험의 경우는 반구의 열속을 측정하지 않아서 FLUENT 코드 계산 결과를 이용하여 반구 내벽에 가해진 열속을 유추하였다[11]. FLUENT 코드 계산에서는 용융물과 반구 내벽 사이에 1mm 크기의 간극이 존재한다고 가정하고 간극 내부에서 Monde 의 임계 열 유속 상관식을 이용하여 열 제거량을 정량화 하였다. 그림 12 는 FLUENT 코드 계산 결과를 근거로 유추한 LAVA-4 실험에서 T1 지점의 반구 내벽에 가해진 열속의 변화를 보여준다. 그림을 보면 LAVA-4 실험의 경우 T1 지점에서 최대 470 kW/m^2 의 열속으로 열 제거가 이루어졌음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 LAVA-9 실험 결과와 직접적인 비교를 할 수는 없으나 LAVA-9 실험 결과와 비슷한 냉각 특성을 나타낸다. LAVA-4 실험에서 T1 지점의 반구 외벽의 냉각율은 1.61 K/s 였고 LAVA-9 실험에서 열속을 측정한 지점의 반구 외벽의 냉각율은 2.0 K/s 이상의 값을 나타내어 반구 외벽의 냉각율이 1.5 K/s 이상의 값을 가지면 간극 내부에서 냉각수에 의한 열 제거를 통해 반구가 효과적으로 냉각된다고 판단하였다.

4. 결론

LAVA 실험에서 각 실험 인자에 따른 간극의 형성 및 반구의 냉각 거동에 대한 실험 결과를 종합하여 간극 냉각 특성을 분석하였다. 반구 내, 외부에 압력 부하가 존재하는 경우 실험 조건에 상관없이 용융물과 반구 내벽 사이에서 간극이 형성되었음을 알 수 있다. LAVA 실험에서 형성된 간극은 열 저항체로 작용하여 초기 가열 단계에서 반구의 온도 상승에 영향을 미친다. 그러나 냉각 단계에서는 용융물 성분과 질량 그리고 냉각수 과냉각도 및 수위 등 실험 조건에 따라 상이한 결과가 나타났다. Al_2O_3 용융물을 실험에서는 간극 내부로 냉각수가 원활하게 침투하여 반구가 효과적으로 냉각되었다. 이와 더불어 Al_2O_3 용융물 층 내부는 Fe 용융물 층에 비해 다공성이 크고 반구 내벽과 경계면에서 간극의 형성이 뚜렷하기 때문에 간극에서 생성된 수증기가 분출될 수 있는 유로가 확보되어 반구가 효과적으로 냉각되었다. 반면 Al_2O_3/Fe 용융물을 주입한 실험에서는 Fe 용융물과 반구 내벽 사이가 부분적으로 용접되는 등 간극의 크기 및 분포가 Al_2O_3 용융물을 주입한 실험에 비해 뚜렷하지 못해서 간극 내부로 냉각수가 유입되는데 한계가 존재하여 반구가 효과적으로 냉각되지 않았다.

Al_2O_3 용융물을 주입한 실험에서도 냉각수 수위 및 과냉각도 그리고 용융물의 질량에 따라 반구의 냉각 거동이 다르게 나타났다. 냉각수 과냉각도를 낮게 설정하고 수행한 실험에서 파쇄 용융물의 입자가 많이 발생하여 결국 반구 내벽에 가해진 열적 부하가 감소하였다. 냉각수 수위를 낮게 설정하고 수행한 LAVA-8 실험과 용융물의 질량을 증가하여 실험을 수행한 LAVA-11, 12 실험의 경우는 반구 외벽의 최고 온도가 LAVA-4 실험에 비해 200 K 정도 높게 측정되었고 반구의 냉각도 상대적으로 더디게 이루어졌다. 냉각수 수위를 낮게 설정한 경우 용융물 재배치 과정 중 냉각수에 의해 제거되는 열 에너지의 양이 감소하고 반응 중 용융물을 충분히 냉각시킬 수 있는 냉각수 양이 제한되어 위와 같은 냉각 특성을 나타낸 것으로 생각된다. LAVA-11 실험과 LAVA-12 실험의 경우는 용융물 질량이 증가하여 반구 하단부까지 냉각수의 침투가 이루어지지 않아 냉각 특성이 감소되었다고 판단된다. 그러나 위 실험에서 원자로 하부의 냉각 가능성에 대한 결론은 반구에 유입된 금속 용융물 층의 작용 등 실험의 불확실성에 비추어 추가적인 분석이 필요하다. 용융물의 질량이 증가하여 간극 내부에 냉각수 침투 거리(water penetration length)가 증가한 경우에 대한 냉각 특성의 규명은 LAVA 실험 결과를 실제 원전에 적용하는 데 필수적인 사항이다. 용융물의 질량이 증가하면 반구 하부에는 냉각수가 유입되지 못할 가능성이 존재하기 때문에 이런 경우에 대한 실험 데이터의 확보와 냉각 거동을 명확히 분석하기 위하여 반구의 규격과 용융물의 질량을 증가시켜서 실험을 수행할 계획이다.

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. J.L. Rempe, et al., INEL Phase I Debris Cooling Tests and Analyses, INEL-95/0242, 1995
4. S. B. Kim et.al., Recent Progress in SONATA-IV Project, OECD/NEA CSNI PWG-2, The Third Mtg. Of TG-DCC, Rockville, MD, USA, May 9-10, 1997
5. K. Y. Suh et al., SONATA-IV Simulation Of Naturally Arrested Thermal Attack In-Vessel, Proc. Int. Conf. on PSA Methodology and Applications, pp. 453-460, Seoul, November 26-30, 1995
6. K. H. Kang et al., Experimental Investigations on In-Vessel Debris Coolability through Inhererent Cooling Mechanisms, OECD/CSNI Workshop on In-Vessel Core Debris Retention and Coolability, Garching, Germany, March 3-6, 1998
7. S. B. Kim et al., Major Results of In-Vessel Corium Cooling in the SONATA-IV Experimental Program, RASPLAV Seminar-2000, Munich, Germany, 14-15 Nov., 2000
8. 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
9. K. M. Koo et al., Measurements of the Gap/Displacement and Development of the Ultrasonic Temperature Measuring System applied to Severe Accident Experiments, KAERI/TR-1754/2001
10. M. L. Corradini, Vapor Explosions : A Review of Experiments for Accident Analysis, Nuclear Safety, Vol. 32, No. 3, July – September 1991
11. K. H. Kang et al., Study on In-Vessel Debris Retention through Gap Cooling, Korean Nuclear Society Spring Meeting, Pohang, Korea, May 1999

표 1. LAVA 실험 조건

Test	Composition & Mass of Melt	Subcooling & Depth 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

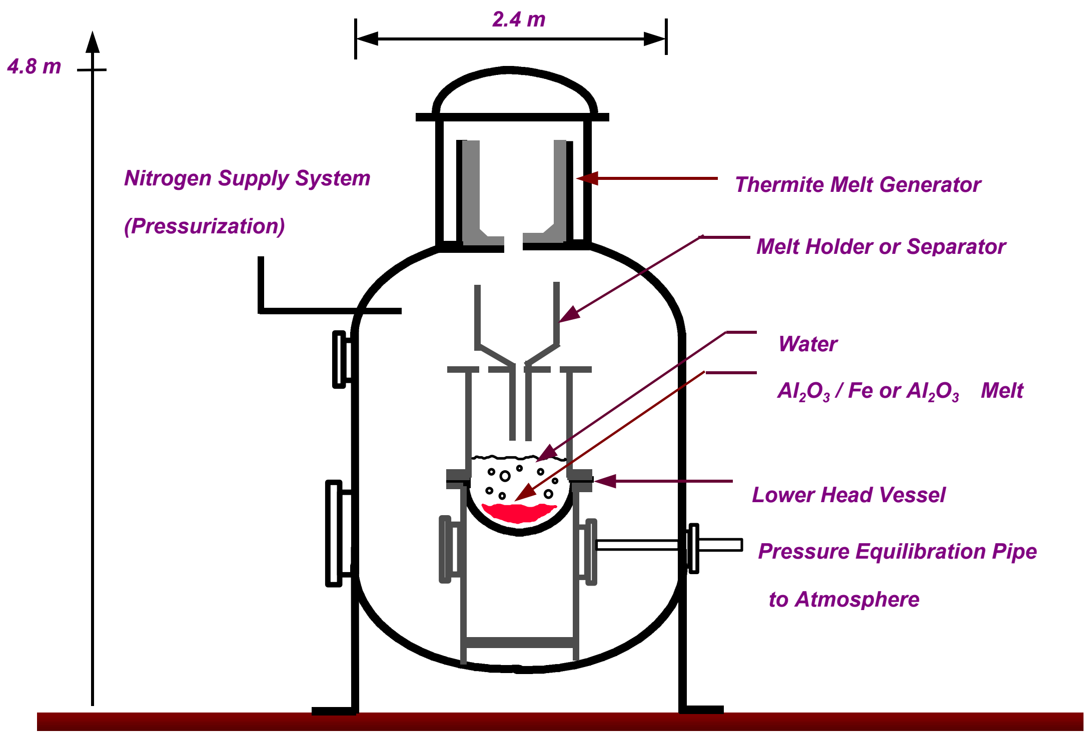


그림 1. LAVA 실험 장치 개략도

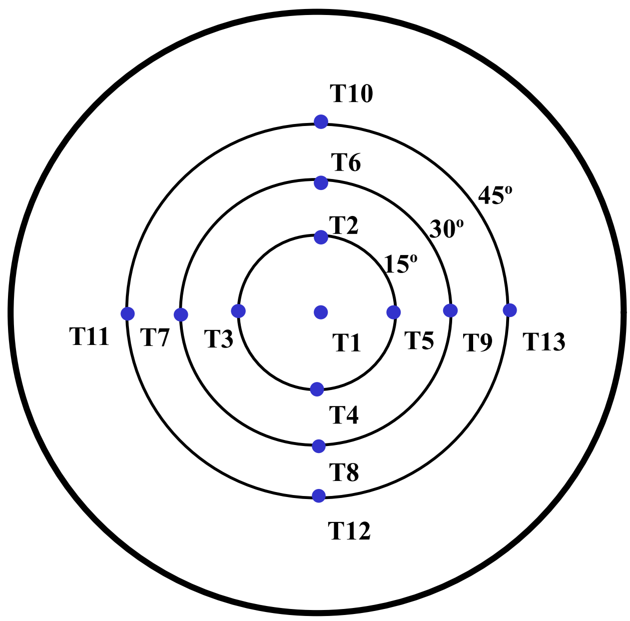
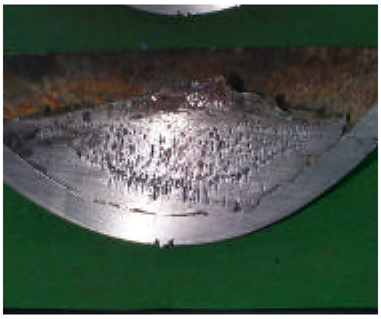


그림 2. 반구에 설치한 K 형 열전대의 위치



(a) LAVA-1 실험 **(b) LAVA-2 실험** **(c) LAVA-6 실험**

그림 3. Al_2O_3/Fe 용융물 실험의 반구 중앙 절단면 사진

그림 4. LAVA-9 실험에서 고화된 Al_2O_3 용융물 덩어리(cake)의 사진

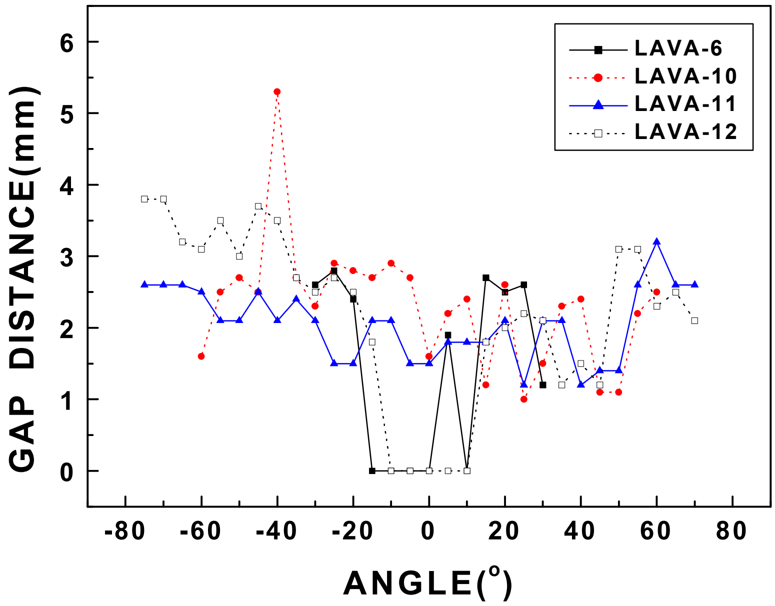
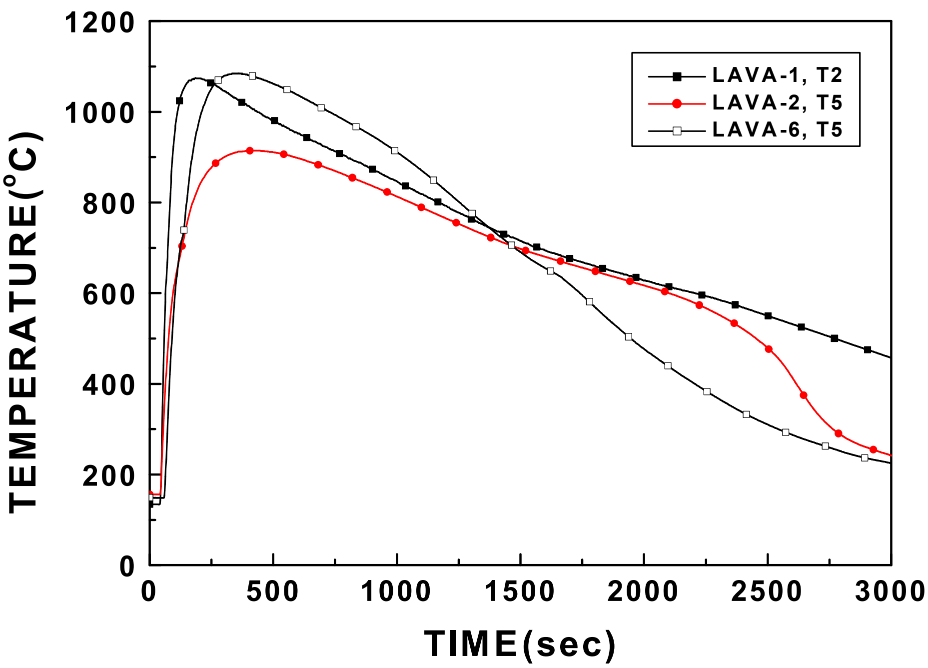
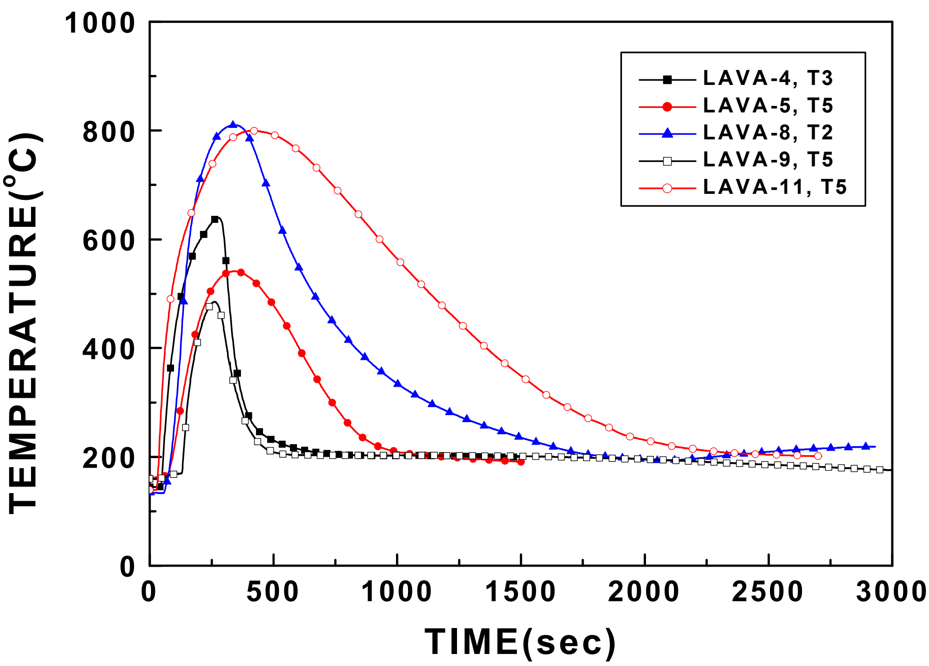


그림 5. 초음파 계측 법으로 측정한 반구 외부 경도 면에 대한 간극의 분포 및 크기

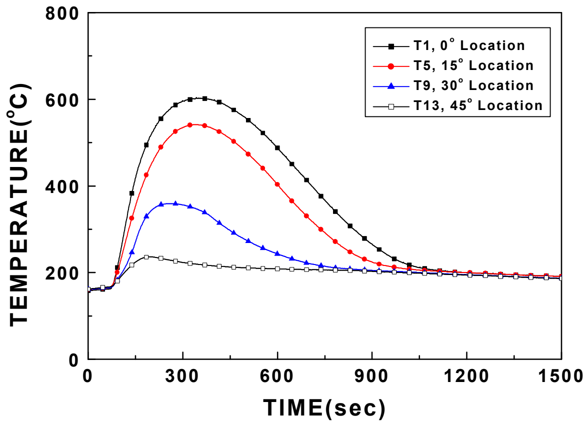


(a) Al_2O_3/Fe 용융물 실험

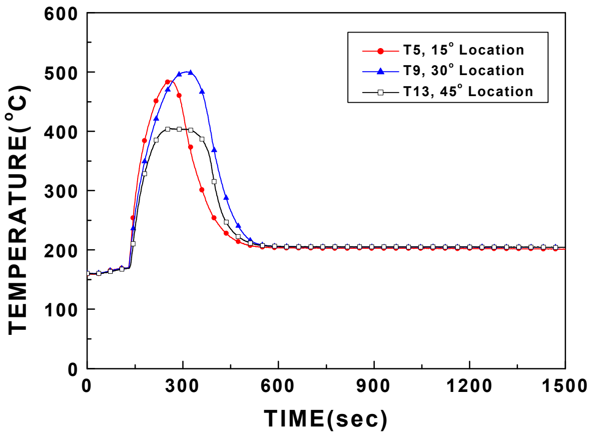


(b) Al_2O_3 용융물 실험

그림 6. 15° 동심원 위치에서 측정한 반구 외벽의 온도 변화



(a) LAVA-5 실험



(b) LAVA-9 실험

그림 7. 낮은 냉각수 과냉각도에서 수행한 실험에서 측정한 반구 외벽의 온도 변화

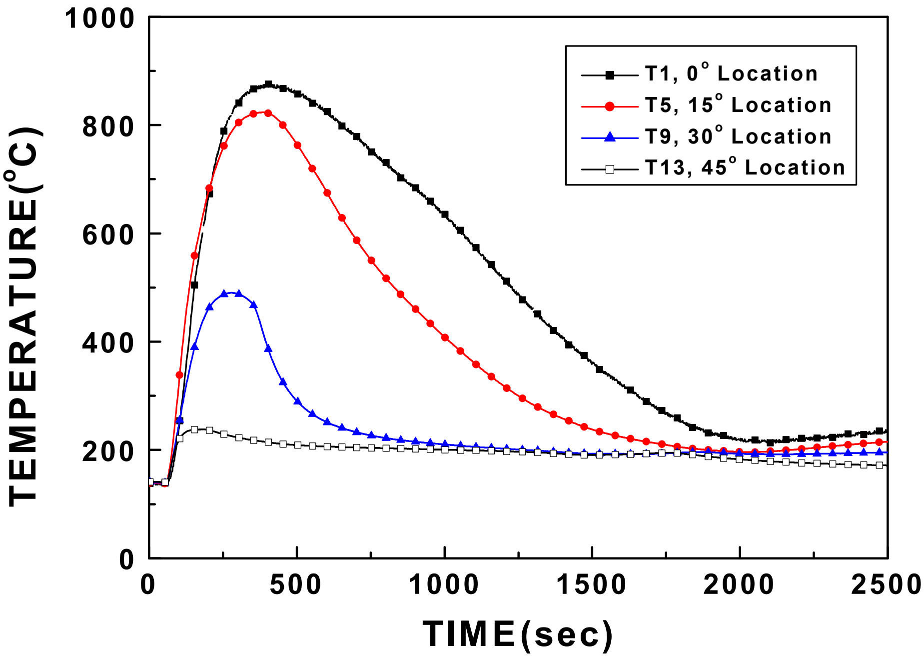


그림 8. LAVA-8 실험에서 측정한 반구 외벽의 온도 변화

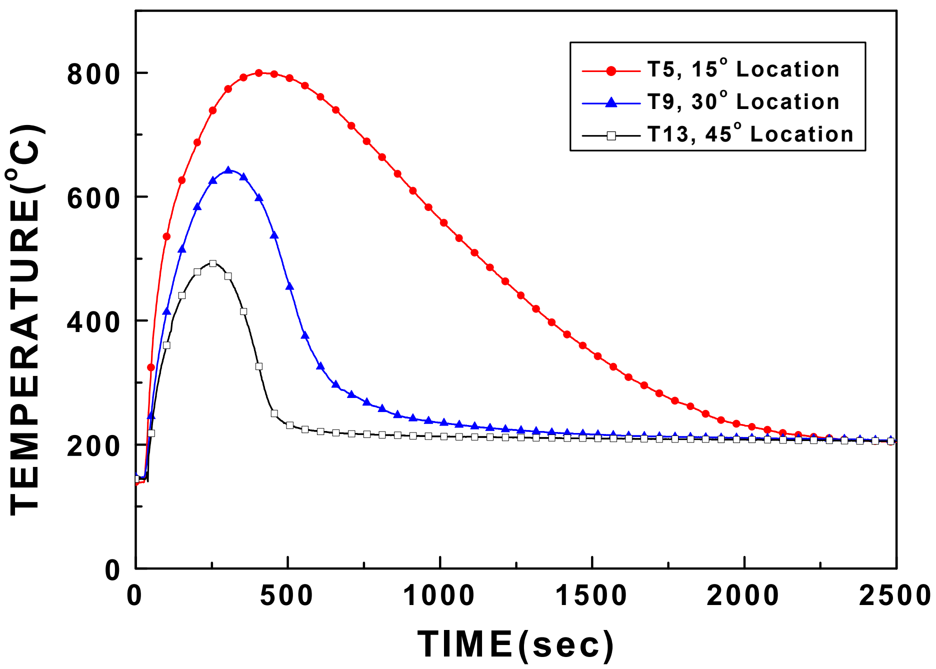


그림 9. LAVA-11 실험에서 측정한 반구 외벽의 온도 변화

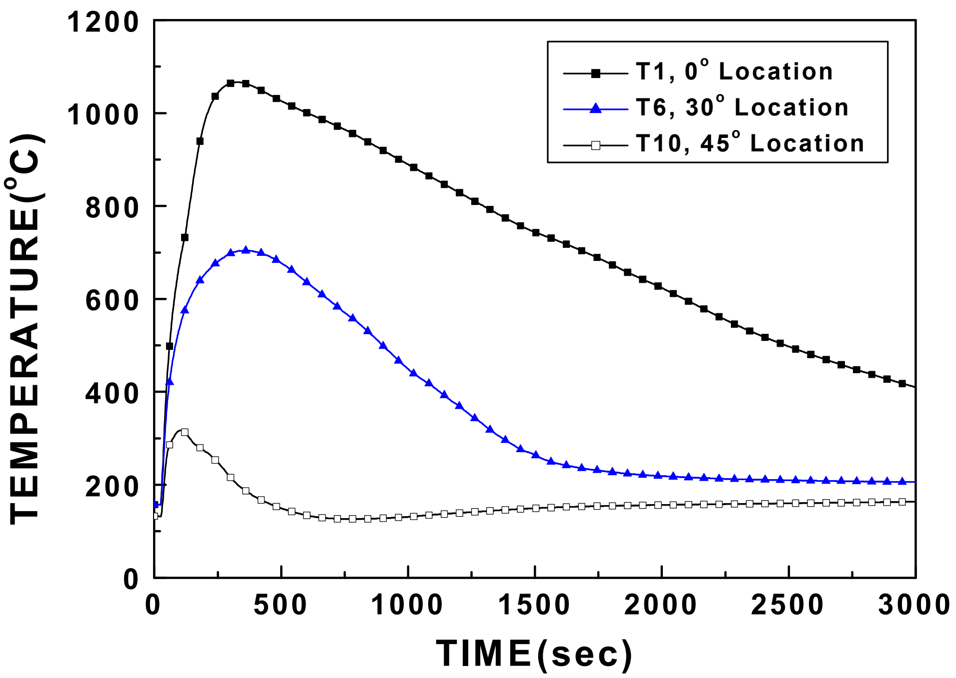


그림 10. LAVA-12 실험에서 측정한 반구 외벽의 온도 변화

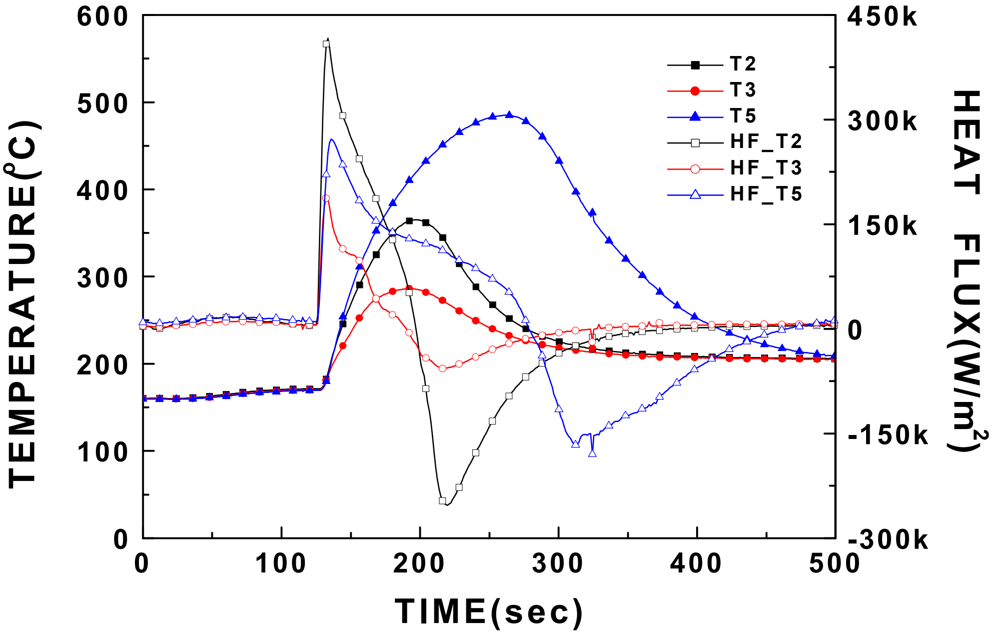


그림 11. LAVA-9 실험에서 측정한 반구 내부에서 전도에 의한 열속의 변화

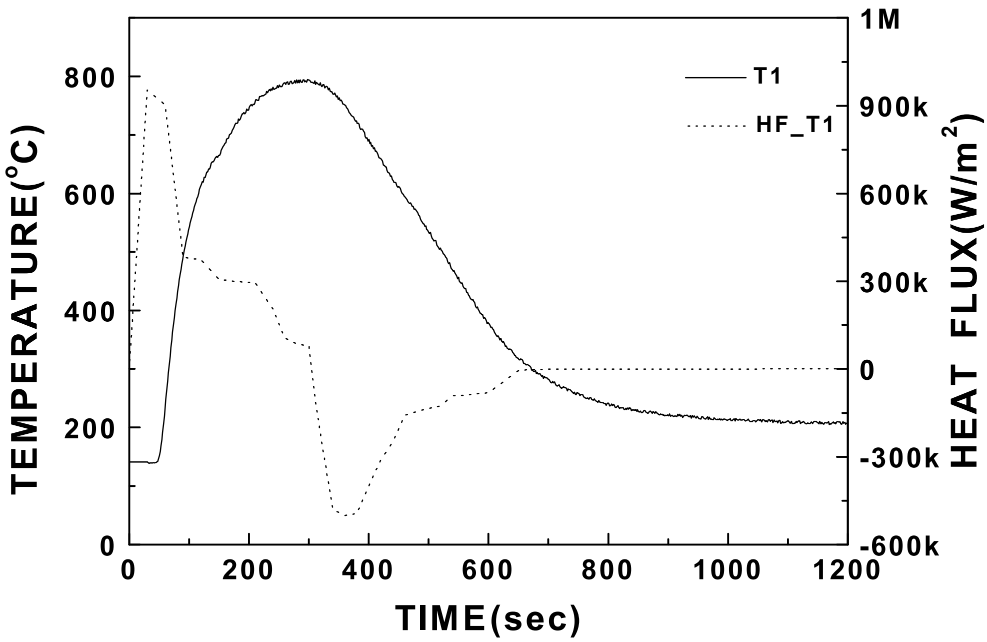


그림 12. LAVA-4 실험에서 반구 외벽의 온도와 열속의 변화 (FLUENT 코드 계산)