2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

200 kg 이상의 대용량 상사 용융물을 이용한 노내 간극 냉각 실증 실험 연구

An Experimental Study on In-vessel Debris Retention through Gap Cooling using above 200kg of Simulant Melt

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

요 약

Thermite 상사 용융물을 사용하여 노심 손상 후기 과정에서 노심용융물이 원자로 하부 용기로 재배치되는 과정과 간극의 형성 과정 및 간극을 통한 냉각 특성을 규명하는 실험(LMP200 실험)을 2회 수행하였다. 용융물의 질량과 반구 규격의 증가함에 따른 냉각수 침투 거리의 증가가 간극의 형성과 간극 냉각 가능성에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과 용융물의 질량과 반구의 규격이 증가함에 따라 반구 하부에 까지 냉각수가 침투하지 못하여 간극 냉각이 이루어지지 않았다. CCFL 상관식을 이용한 간극 냉각 가능성 평가 결과도 3mm 크기의 균일한 간극이 형성되지 못하면 반구 하부에서 냉각수에 의한 열제거가 이루어지지 못한다는 사실을 보여주었다. 간극 냉각 가능성은 재배치된 노심용융물의 성분 및 질량 그리고 간극의 크기에 의해 결정됨을 확인하였다.

Abstract

LMP200 experiments have been performed using Al_2O_3/Fe thermite melt(or Al_2O_3 only) to be relocated into the 1/5 linear scaled vessel of a reactor lower plenum filled with water. In this study, the effect of melt mass and vessel dimension on the gap formation and also the thermal behaviors of the vessel were examined focused on the characteristics of water penetration into the gap. In parallel with experimental work, evaluations of the coolability through gap using CCFL correlation were performed. It could be inferred from the thermal behaviors of the LHV that the increase of the melt mass prevented water penetration into the gap.

1. 서 론

한국 원자력 연구소에서는 노심 용융물의 노내 냉각 기구를 규명하기 위하여 노내 노심 용융물의 자연 냉각 실증 실험인 SONATA-IV(Simulation of Naturally Arrested Thermal Attack In Vessel)[1] 연구를 기획하여 1 단계 원리 검증 실험인 LAVA(Lower-plenum Arrested Vessel Attack) 실험[2]과 CHFG (Critical Heat Flux in Gap) 실험[3]을 수행하였다. LAVA 실험과 CHFG 실험을 통해 고온의 용융물과 반구가 접촉할 때 간극이 형성됨과 간극 내부에서 냉각수의 비등 열 제거에 의한 냉각 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 LAVA 실험 결과를 보면 70 kg의 용융물을 사용한 LAVA-11, 12, 13 실험의 경우는 재배치된 용융물의 질량이 증가하여 반구 하부에서 효과적인 냉각이 이루어지지 않았다. 간극 내부에서의 냉각 과정은 역류 유동 제한 현상(Counter Current Flow Limit: CCFL)에 의해 좌우된다는 CHFG 실험 결과와 용융물의 질량이 증가한 경우에 간극 냉각 특성을 나타내지 않은 LAVA 실험 결과는 간극을 통한 냉각 가능성은 간극의 크기와 재배치되는 용융물의 질량에 영향을 받으며 궁극적으로 간극 내부로 냉각수의 침투 여부에 의해 결정된다는 사실을 보여준다.

간극을 통한 냉각 기구를 실제 원전 사고 시 노내 노심 용융물의 냉각(In-Vessel corium Retention: IVR) 방안에 관한 사고 관리 전략으로 구체화하기 위해서는 간극 내부에서 냉각수의 침투 거리에 따른 간극 냉각 가능성에 대한 정성적, 정량적인 분석이 이루어져야 한다. 반구 내부로 재배치되는 노심용융물의 질량이 증가하면 용융물의 하중에 의해 간극의 형성이 용이하지 않을 수 있으며 간극 내부에서 제거해야 할 노심용융물의 열 에너지가 증가하여 간극 냉각에 의해 효과적인 열 제거가 이루어지지 않을 가능성이 있다. 따라서 기하학적 구조가 확장됨에 따른 용융물과 반구 내벽 사이에 형성되는 간극의 크기 및 분포의 변화는 간극 냉각 가능성을 결정하는데 필수적인 사항이다.

용융물의 질량과 반구 규격의 확장에 따른 간극의 형성과 이를 통한 냉각 특성을 규명하기 위하여 LAVA 대형 용융물 실험(LMP200 실험)을 수행하였다. LAVA 실험에서는 원자로 용기 하부 반구를 1/8 선형 축소한 반구형 반응 용기를 사용하였으나 LMP200 실험에서는 1/5 선형 축소한 반구형 반응 용기를 사용하였다. 노심 용융물의 모사체로 Al_2O_3/Fe 혼합 용융물(혹은 순수한 Al_2O_3 용융물)을 사용하여 노심 손상 후기 과정에서 노심용융물이 원자로 하부 용기로 재배치되는 과정과 간극의 형성 과정 그리고 간극을 통한 냉각 특성을 규명하는 실험을 2회 수행하였다. 용융물의 재배치 과정 중 열 에너지 전달 특성과 간극의 형성 그리고 이에 따른 반구의 냉각 특성에 관하여 LMP200 실험 결과를 정리하고 용융물과 반구의 규격이 확장됨에 따라 간극 내부로 냉각수 침투 거리의 증가가 간극 냉각 가능성에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과 분석과 더불어 CHFG 실험에서 구한 CCFL 상관식을 이용하여 LMP200 실험에서 간극 냉각 가능성에 대한 평가를 수행하였다.

2. 실험 개요

가. 실험 장치

그림 1은 LAVA 대형 용융물 실험(LMP200 실험) 장치의 개략 도면을 보여주고 그림 2는 실험 장치 외부와 내부의 사진을 보여준다. LMP200 실험 장치는 일자형의 압력 용기와 압력 용기를 보호하는 외부의 보호 용기로 구분된다. 압력 용기는 설계 압력 30기압의 강철(carbon steel)로 제작하였고 압력 용기 내부에 thermite 용융물 도가니와 용융물 분리 용기가 설치된다. 실험에서 용융물과 냉각수가 반응하여 생성되는 압력 상승을 LMP200 실험 장치만으로 감당하기 위해서는 압력 용기 내부의 체적이 커져야 하므로 기존 LAVA 압력 용기와 5 inch 규격의 압력 평형 관을 연결하여 압력을 분산시켰다. 따라서 LMP200 실험의 압력 용기는 그림 1에서 보는 바와 같이 내부 직경 1m의 일자형 구조를 갖는다.

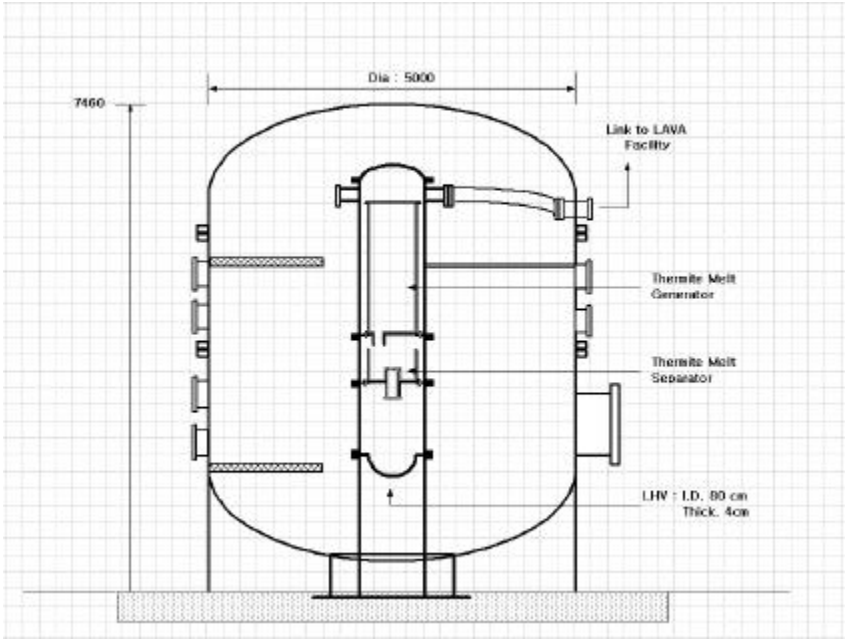

그림 1. LAVA 대형 용융물 실험(LMP200 실험)의 실험 장치 개략 도면

원자로 용기 하부 반구를 모의한 반응 용기는 원자로 용기 하부 반구를 1/5로 선형 축소한 반구형 모양을 갖는다. 반구형 반응 용기의 내부 직경 80 cm, 두께 4.0 cm 규격의 carbon steel(SA516 Gr. 70)로 제작하였으며 내부 표면을 조도 1s 이하로 정밀 가공하

여 용융물과 반구 내벽 사이에서 간극의 형성에 영향을 미치는 표면 거칠기를 최소화하였다.

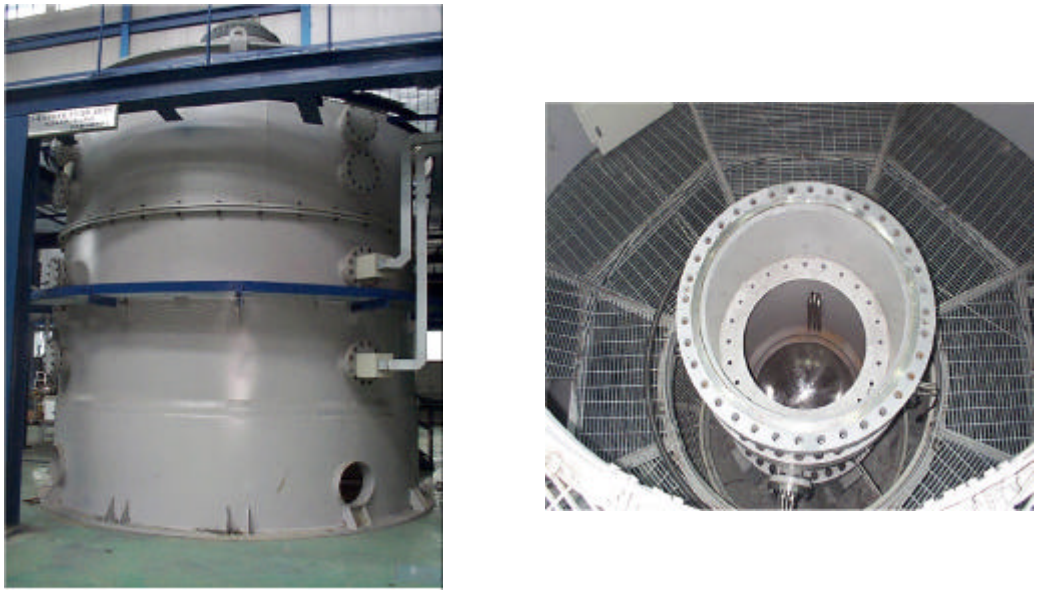

그림 2. LAVA 대형 용융물 실험(LMP200 실험)의 실험 장치 사진

나. 실험 계측

LMP200 실험에서 실시간 계측한 주요 측정 인자는 용융물과 냉각수 반응 시 실험 용기의 압력 상승과 반구 외벽과 용융물의 온도 변화 등이다. 실험 용기 내부의 압력 변화는 PDCR330-1634(제조회사 : Druck, 압력 측정 범위 : 0 - 60 Bar) 압력 센서를 이용하여 측정하였다. 반구 내부로 주입된 용융물의 온도는 W/Re 열전대를 이용하여 측정하였다. W/Re 열전대는 반구 하단부 중앙으로부터 2 cm, 5 cm 지점에 각각 설치하였다. 반구의 온도 변화는 반구 외벽에 설치한 K 형 열전대를 이용하여 측정하였다. 17 개의 K 형 열전대를 동심원 방향으로 외벽에서 3 mm 깊이에 장착하였다. 그리고 반구 내부에서 열 전도에 의한 열속(heat flux)을 계산하기 위하여 반구 외벽에서 13 mm 깊이에 추가로 13개의 K 형 열전대를 장착하였다. 그림 3은 반구에 설치한 K 형 열전대의 위치와 번호를 보여준다.

간극을 통한 냉각 기구를 규명하기 위해서는 반응 중 용융물과 반구 내벽 사이에

형성되는 간극의 크기와 변화를 측정하는 것이 필수적이다. 그러나 LMP200 실험의 경우는 반구 내부에서 고온, 고압 조건의 이상 유동 현상을 동반하는 복잡한 반응 형상을 보이고 반응 중 반구 외벽의 온도가 고온이기 때문에 계측 장비를 이용한 실시간 간극 측정은 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 초음파 계측 센서를 이용하여 간극의 분포 및 크기를 실험 후 측정하였다.

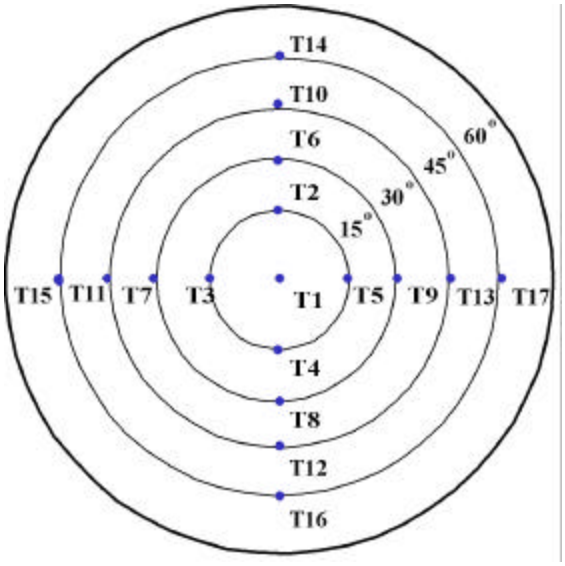

그림 3. 반구 내부에 장착한 열전대의 위치도

다. 실험 조건

LMP200 실험의 목적은 용융물의 질량과 반구의 규격이 증가한 경우에 LAVA 실험에서 보여진 간극 냉각 특성을 확인하는 것이다. 따라서 기존 LAVA 실험이 냉각수 아냉도(subcooling) 및 수위 그리고 주입 용융물 성분의 변화 등 다양한 실험 조건에서 실험을 수행한 반면 LMP200 실험에서는 용융물 질량과 반구 규격의 차이에 초점을 맞추어 2회 실험을 수행하였다. 이를 위해 LMP200 실험에서는 LAVA 실험에서 용융물의 성분과 냉각수 초기 조건 등에서 기준 실험으로 선정한 LAVA-4 실험과 냉각수의 초기 조건과 주입 용융물의 성분을 동일하게 설정하여 실험을 수행하였다. 구체적인 실험 조건은 표 1에 기술하였다.

LMP200-1 실험은 200kg의 Al_2O_3 용융물을 아냉도 45K, 수위 60cm의 냉각수 내부로 주입하고자 수행한 실험이었으나 용융물 분리 용기 내부의 분리 턱이 파손되어 360kg의 Al_2O_3/Fe 혼합 용융물이 반구 내부로 주입되었다. LMP200-2 실험에서는 용융물 분리

용기 내부의 분리 턱을 보강하여 실험을 수행하였다. 그러나 용융물 생성 과정에서 Fe 용융물이 Al_2O_3 용융물 층 내부에 용해, 석출되어 20kg의 Fe 용융물이 200kg의 Al_2O_3 용융물과 함께 반구 내부로 주입되었다.

LMP200-1 실험은 200kg의 Al_2O_3 용융물과 160kg의 Fe 용융물이 주입된 경우로 40kg의 Al_2O_3/Fe 혼합 용융물을 사용한 LAVA-2, 6 실험과 용융물 성분비가 유사한 실험이다. LMP200-2 실험에서도 Fe 용융물이 일부 주입되었지만 기존 LAVA 실험 결과에서도 알 수 있듯이 thermite 상사 용융물을 이용한 실험에서는 용융물의 성분 분리가 완벽하게 이루어지지 않기 때문에 일반적으로 주입 용융물 총 질량의 10% 내외의 Fe 용융물이 Al_2O_3 용융물과 함께 주입된다. 결국 LMP200-1 실험은 기존 LAVA 실험 중에서 Al_2O_3/Fe 혼합 용융물을 주입한 실험과 비교할 수 있고 LMP200-2 실험은 순수한 Al_2O_3 용융물을 주입한 LAVA 실험과 비교할 수 있다. LMP200-1 실험과 같이 160kg의 Fe 용융물이 반구 하부로 주입된 경우는 간극의 형성과 간극 냉각을 통한 열 제거 가능성에 부정적인 영향을 미치게 된다.

표 1. LMP200 실험 조건

실험명	용융물 성분, 질량	냉각수 질량, 수위	냉각수 아냉도, 수위	반구 내, 외부 압력(bar)
LMP200-1	Al_2O_3/Fe, 360kg	250kg, 60cm	45K, 60cm	14.2 / 1.0
LMP200-2	Al_2O_3, 200kg	250kg, 60cm	50K, 60cm	14.2 / 1.0

3. 실험 결과

실험 결과를 용융물 재배치 과정 중의 에너지 전달과 간극 형성 및 용융물과 반구의 열적 거동으로 분류하여 기술하였다.

가. 용융물 재배치 과정 중의 에너지 전달

용융물 재배치 과정 중 파편층이 형성되면서 용융물 열 에너지의 일부분은 냉각수로 전달되고 나머지는 용융물 풀에 남아서 결국 반구 내부에 가해지는 초기의 열적 부하를 결정하게 된다. 실험 중 측정한 압력 용기 내부의 압력 변화를 이용하여 수증기 발생

율과 용융물에 의해 냉각수에 전달되는 열속을 계산하였다. 그림 4는 LMP200-1 실험과 LMP200-2 실험에서 측정한 압력 용기 내부의 압력 변화를 보여준다. 실험 용기 내부의 압력 상승은 용융물 생성 과정 중 thermite 반응열에 의한 압력 상승과 용융물 재배치 과정 중 용융물과 냉각수의 반응(FCI: Fuel Coolant Interaction)에 의한 압력 상승으로 구분된다. LMP200-1 실험에서는 thermite 반응열에 의해 3.0 bar 정도 압력이 상승하였고 이어서 용융물과 냉각수의 반응에 의해 10.8 bar의 압력 상승이 측정되었다. LMP200-2 실험에서도 압력 상승 형태는 유사하였고 thermite 반응열과 용융물과 냉각수의 반응에 의해 각각 4.0 bar, 8.34 bar의 압력 상승이 측정되었다.

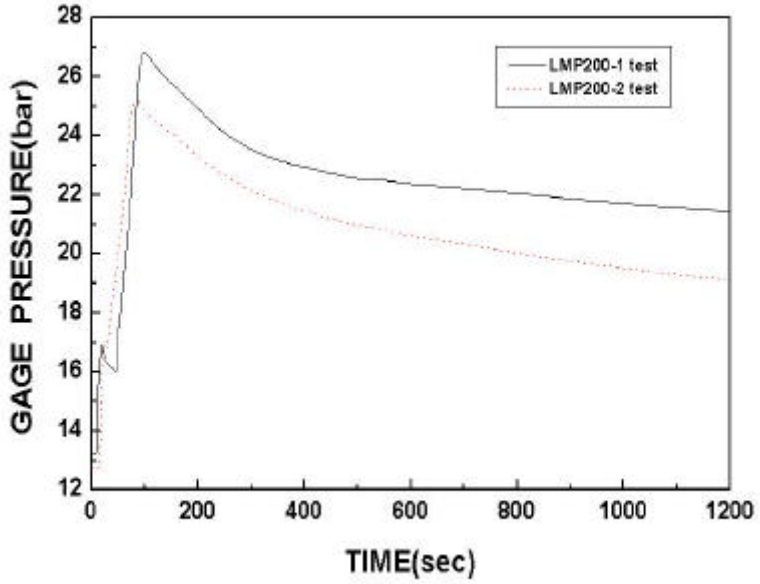

그림 4. LMP200 실험에서 압력 용기 내부의 압력 변화

실험 용기 내부의 압력 상승 율을 토대로 이상 기체 상태 방정식을 근간으로 하는 FAI 방법[4]을 이용하여 LMP200-1 실험과 LMP200-2 실험에서 용융물 재배치 과정 중에 수증기 발생 율(m_{evap})과 냉각수에 전달되는 에너지 유속(E)을 식 (1)과 (2)를 이용하여 각각 계산하였다.

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

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

식 (1)과 (2)에서 계산한 용융물 재배치 과정 중 수증기 발생 율(m_{evap})과 냉각수에 전달되는 에너지 유속(E)을 이용하여 재배치 과정에서 냉각수로 전달되는 열 에너지의 전달 양(E_r)을 식 (3)에서 계산할 수 있다. 냉각수로 전달되는 열 에너지의 일부는 냉각수를 포화 온도로 가열하는데 사용되고 이어서 포화 온도의 냉각수를 수증기화 하는데 이용된다. 식 (3)에서 냉각수가 수증기로 변화는 과정은 반구 내부에서만 이루어진다고 가정하였고 압력 상승에 소요된 시간(Δt)은 그림 5에서 보여진 압력 용기 내부의 압력 상승에 대한 LMP200-1 실험과 LMP200-2 실험 결과를 이용하였다.

$$E_r = E \cdot \triangle t \cdot A_{cross} + M_w c_p \triangle T \quad (3)$$

용융물 생성 초기의 총 열 에너지는 식 (4)의 thermite 화학 반응식으로부터 계산할 수 있다. 식 (4)에서 thermite 반응 열 에너지(3978 kJ/kg)에 용융물의 질량을 곱하면 용융물의 초기 열 에너지를 계산할 수 있다.

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

용융물의 총 열 에너지에 대한 용융물 재배치 과정 중 냉각수로 전달되는 열 에너지의 비율은 LMP200-1 실험과 LMP200-2 실험에서 각각 14.2 %, 19.2 %로 계산되었다. LAVA 실험에서 냉각수로 전달되는 에너지의 비율이 평균 35 %이였던 것에 비해 LMP200 실험에서 용융물 재배치 과정 중에 냉각수로 전달되는 열 에너지의 비율이 낮게 나타났다. LAVA 실험에서는 용융물과 냉각수의 질량비가 약 1:8이었던 것에 비해 LMP200 실험의 경우는 질량비가 1:3 이하여서 재배치 과정 중 에너지 전달 비율이 낮아진 것으로 생각된다. LAVA 실험 중에서 용융물의 질량과 냉각수의 질량비가 LMP200 실험과 유사하였던 LAVA-8 실험에서 측정된 열 에너지의 전달 비율이 15.5 %로서 LMP200 실험 결과와 유사한 것을 감안하면 용융물과 냉각수의 질량비가 재배치 과정 중 냉각수로 전달되는 용융물의 열 에너지의 전달 비율을 결정하였음을 확인할 수 있다.

나. 간극의 형성

실험이 종결된 후 초음파 계측 센서를 이용하여 반구 외부 면의 경도를 따라 남-북, 동-서 방향으로 간극의 크기와 분포를 측정하였다. 그림 5와 그림 6은 LMP200-1 실

험과 LMP200-2 실험에서 실험 후 초음파 계측 법을 이용하여 측정한 간극의 분포와 크기를 각각 보여준다. 그림 5와 그림 6에서 0° 위치는 반구 바닥 면을 나타내며 -80°, +80° 위치는 각각 반구의 상단 부를 나타낸다. 두 실험 모두에서 반구 하부인 -20 ~ 20° 부근에서는 간극이 측정되지 않았다. LMP200-1실험과 LMP200-2 실험에서 Fe 용융물이 쌓여있는 동심원 위치를 감안하면 Fe 용융물이 재배치된 부분과 반구 내벽 사이에서는 간극의 형성이 용이하지 않았다는 사실을 알 수 있다. 간극 크기는 동심원 위치에 따라 큰 차이를 나타냈는데 일반적으로 반구 상단 부에서 간극이 크게 형성되었다.

LMP200-1, 2 실험에서 측정한 간극 크기의 분포를 비교하면 전체적인 분포 형태는 유사하지만 LMP200-1 실험에서 1mm 크기 이하의 간극이 반구 전체 면에서 측정된 반면 LMP200-2 실험에서는 1mm 크기 이상의 간극이 주로 측정되었다는 사실을 알 수 있다. 즉 LMP200-1 실험에서는 Fe 용융물이 반구 동심원 상에 50° 까지 주입되었고 반구 내부로 주입된 전체 용융물의 질량이 LMP200-2 실험에 비해 많아서 Fe 용융물과 반구 내벽 사이에서 간극이 형성되기가 쉽지 않았을 것으로 생각되며 이와 같은 용융물의 질량과 용융물 풀 형상의 차이가 전체적인 간극 크기를 결정한 것으로 보여진다. 결국 LMP200 실험에서는 반구 하부에 Fe 용융물이 집중되고 LAVA 실험에 비해 용융물의 하중이 증가하여 반구 하부에서 간극이 형성되지 못한 것을 알 수 있다.

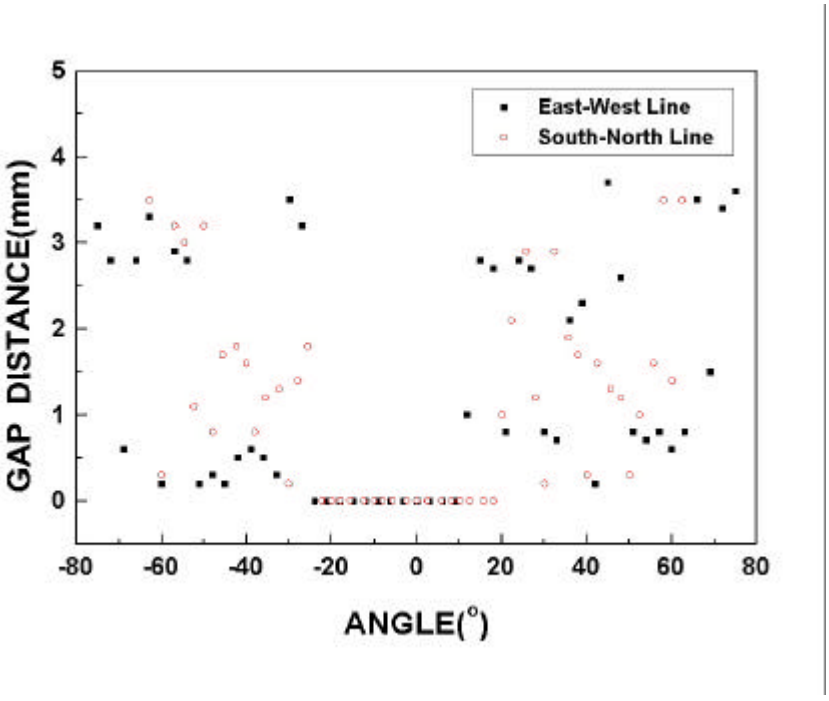

그림 5. LMP200-1 실험에서 측정한 간극의 크기 및 분포

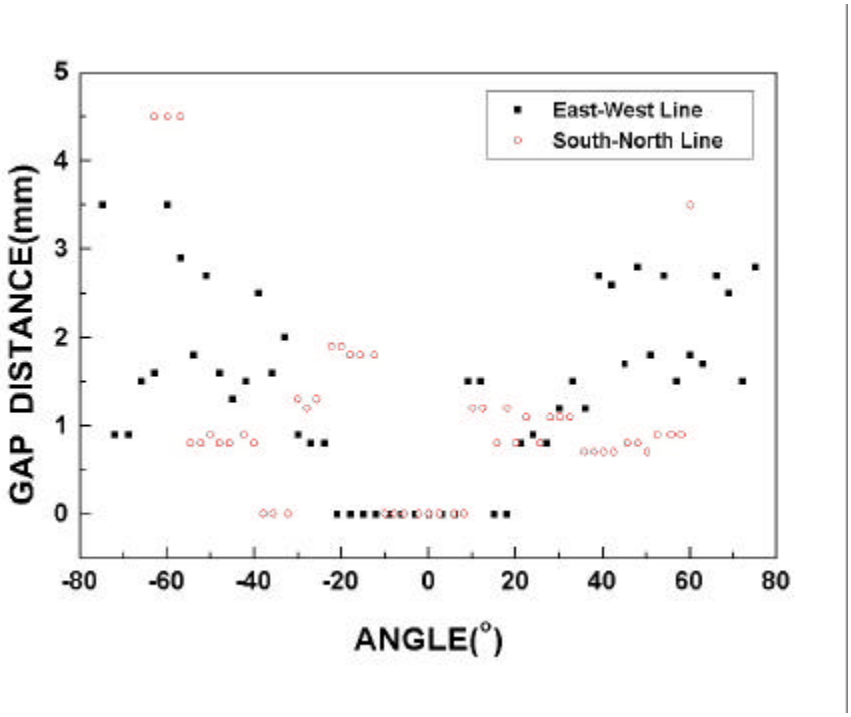

그림 6. LMP200-2 실험에서 측정한 간극의 크기 및 분포

다. 반구의 열적 거동

그림 7은 LMP200-1 실험과 LMP200-2 실험에서 0° 동심원 위치(T1 열전대)의 반구 외벽에서 3mm 내부의 온도 변화를 비교한 것이다. T1 지점에서 반구의 최고 온도는 큰 차이는 없지만 냉각 과정에서는 LMP200-2 실험의 경우가 LMP200-1 실험 보다 다소 빨리 냉각되었음을 알 수 있다. LMP200-1 실험에서 냉각 율은 0.075 K/s였고 LMP200-2 실험에서 냉각 율은 0.11 K/s였다. 두 실험에서 냉각 율의 차이가 있었지만 기존 LAVA 실험 중 Al_2O_3/Fe 혼합 용융물을 주입한 LAVA-6 실험이나 70kg의 Al_2O_3 용융물을 주입한 LAVA-11, 12 실험에서 측정된 T1 지점의 냉각 율인 0.2 ~ 0.3 K/s 보다 낮은 값을 나타내었다. LMP200-1 실험과 LMP200-2 실험에서 Fe 용융물이 쌓여있던 높이가 동심원 상에서 각각 50°, 29°였고 용융물의 질량이 3배 이상 증가하였기 때문에 반구 하부에서는 냉각이 원활하게 이루어지지 않은 것으로 생각된다. 특히 반구 하부에서는 간극이 형성되지 않아서 냉각수에 의한 열 제거가 전혀 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 그림 8은 LMP200-1 실험과 LMP200-2 실험에서 30° 동심원 상의 반구 외벽의 온도 변화를 비교한 것이다.

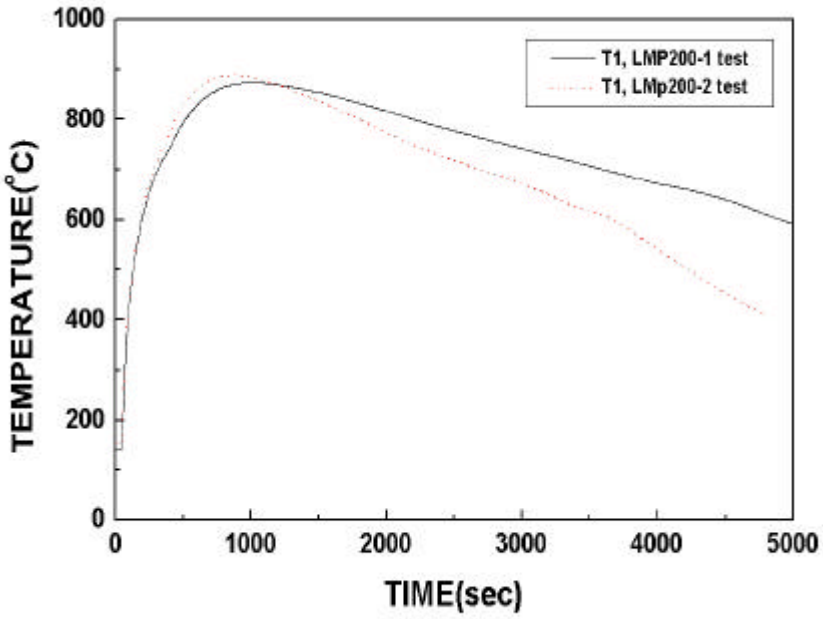

그림 7. LMP200 실험에서 T1 지점의 반구 외벽 온도 변화

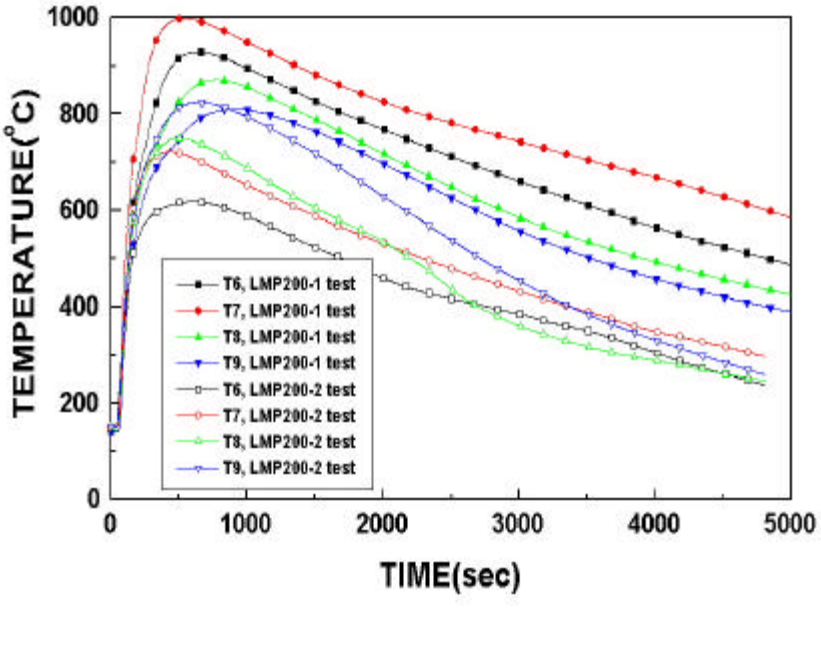

그림 8. LMP200 실험에서 30° 동심원 위치의 반구 외벽 온도 변화

0° 동심원 위치와는 달리 LMP200-2 실험에서 Al_2O_3 용융물 층을 나타내는 30° 동심원 위치부터는 동일 동심원 상의 최고 온도가 LMP200-1 실험에 비해 200 K 이상 낮게 측정되었다. 반구 상부는 Al_2O_3 용융물 층이어서 반구 하부의 Fe 용융물 층에 비해 상대적으로 간극이 크게 형성되어 간극 내부에서 냉각수에 의해 냉각이 이루어지고 이와 더불어 용융물 풀 상부에서 냉각수에 의한 열 제거가 활발히 이루어져서 온도가 낮게 측정된 것으로 생각된다.

4. 간극을 통한 냉각 가능성 평가

간극 내부로 냉각수의 침투 거리가 간극 냉각 특성에 미치는 영향을 평가하고자 CHFG 실험에서 구한 역류 유동 제한 현상(CCFL)에 관한 상관식을 이용하여 간극 내부에서 제거할 수 있는 최대 열 제거 양을 계산하였다. CHFG 실험 결과는 반구 형 미세 간극 내부에서 제거될 수 있는 최대 열 제거 양은 간극 내부로 유입되는 냉각수의 유량과 배출되는 수증기의 유량 사이의 상관 관계인 역류 유동 제한 현상에 의해 결정된다는 사실을 알려준다. 즉 간극 입구로 유입되는 냉각수의 공급량이 수증기의 배출량보다 작으면 간극 내부로 냉각수가 침투하지 못하여 열 제거가 불가능해지며 반대로 냉각수의 공급량이 수증기의 배출량보다 많으면 간극 내부로 냉각수가 원활하게 침투하게 되어 용융물과 반구 내벽이 냉각된다. CHFG 실험에서 구한 CCFL 상관식은 식 (5)와 같다.

$$j_g^{*1/2} + 0.8\, j_l^{*1/2} = 0.31 \qquad (5)$$

$$j_g^* = j_g \sqrt{\frac{\rho_g}{gD_h(\rho_l - \rho_g)}}, \quad j_g^* = j_g \sqrt{\frac{\rho_g}{gD_h(\rho_l - \rho_g)}}$$

간극 내부에서 냉각수와 수증기의 질량 보존 방정식은 아래 식 (6)과 같이 표현되며 식 (5)와 (6)을 조합하면 역류 유동 제한 현상에 의해 결정되는 수증기의 최대 증기 속도($j_{g,max}$)는 식 (7)과 같이 표현되며 20기압 포화 조건의 물 성치를 대입하여 최대 증기 속도를 계산하였다.

$$\rho_g j_g = \rho_l j_l \qquad (6)$$

$$j_{g,\max} = \frac{0.31^2 \sqrt{\rho_g g D_h(\rho_l - \rho_g)}}{\rho_g (1 + 0.8\sqrt[4]{\rho_g/\rho_l})^2} = 1.722\sqrt{D_h} \qquad (7)$$

식 (7)에서 구한 최대 증기 속도를 이용하여 간극 내부에서 제거할 수 있는 최대

열 제거 양($Q_{\max}$)을 다음 식 (8)에서 계산하였다. 간극 내부의 상태를 20기압 포화 조건으로 가정하고 용융물의 질량과 간극의 크기를 달리하여 LMP200 실험에서 간극을 통해 제거할 수 있는 최대 열 제거 양을 계산하였다.

$$Q_{\max} = h_{fg}\,\rho_g\,A_{gap}\,j_{g,\max} \qquad (8)$$

LMP200 실험에서 냉각수 침투 거리에 따른 반구의 냉각 특성을 분석하기 위하여 200 kg의 Al_2O_3 용융물이 주입된 경우에 대하여 간극 크기와 냉각수의 침투 거리에 따른 제거해야 할 용융물의 열 에너지와 간극을 통해 제거할 수 있는 최대 열 제거 양을 비교하였다. 간극을 통해 제거해야 할 용융물의 열 에너지의 양은 재배치 과정에서 손실되는 열 에너지와 반구 내부로 전달되는 열 에너지의 양을 고려하여 계산하였다. 용융물 재배치 과정 중 냉각수로 전달되는 열 에너지의 비율은 LMP200-1, 2 실험 결과를 고려하여 20.0 %로 가정하였다. LMP200 실험에서 반구 내부에 형성된 용융물 풀은 상부의 냉각수에 의해 일부분 냉각되고 나머지 열 에너지는 반구 내벽에 전달된다. 내부 발열이 없는 반구 형 용융물 풀에서 자연 대류에 의해 상부와 하부로 전달되는 열 에너지 비율은 식 (9)의 Nu 수 상관 식으로 표현되며 이를 이용하여 용융물 풀의 상부와 하부로 전달되는 열 에너지의 양을 식 (10)에서 계산하였다[5]. 계산 결과 LMP200 실험에서 용융물 풀의 열 에너지의 38.0 %가 반구 내벽에 전달되었음을 확인하였다.

$$Nu_{up} = 0.25\ Ra^{0.304} \qquad (9a)$$

$$Nu_{dn} = 0.472\ Ra^{0.22}\left(\frac{H_d}{R}\right)^{0.317} \qquad (9b)$$

$$Ra = \frac{g\beta\ H_d^{3}\Delta T}{\alpha\nu} \qquad (9c)$$

$$Q_{up} = \frac{Nu_{up}k}{H_d}\Delta T\cdot A_{up} \qquad (10a)$$

$$Q_{dn} = \frac{Nu_{dn}k}{H_d}\Delta T\cdot A_{dn} \qquad (10b)$$

용융물 재배치 과정 중 냉각수로 전달되는 에너지 비율($f_{relocation}$)과 반구 내벽에 전달되는 용융물의 열 에너지 비율(f_{dn})에 대한 계산 결과를 이용하여 LMP200 실험에서 제거해야 할 열 에너지의 양(Q)을 식 (11)에서 계산하였다. 용융물 풀의 질량(M_{pool})을 변화시켜서 용융물 풀 층의 높이에 따른 제거해야 할 열 에너지를 계산하였다. 식 (

11)에서 반구가 냉각되는데 소요되는 시간(Δt)은 LMP200 실험 결과를 고려하여 1000초로 가정하였다.

$$Q = (1 - f_{relocation}) \cdot f_{dn} \cdot M_{pool} \cdot E_{thermite} \cdot \Delta t^{-1} \qquad (11)$$

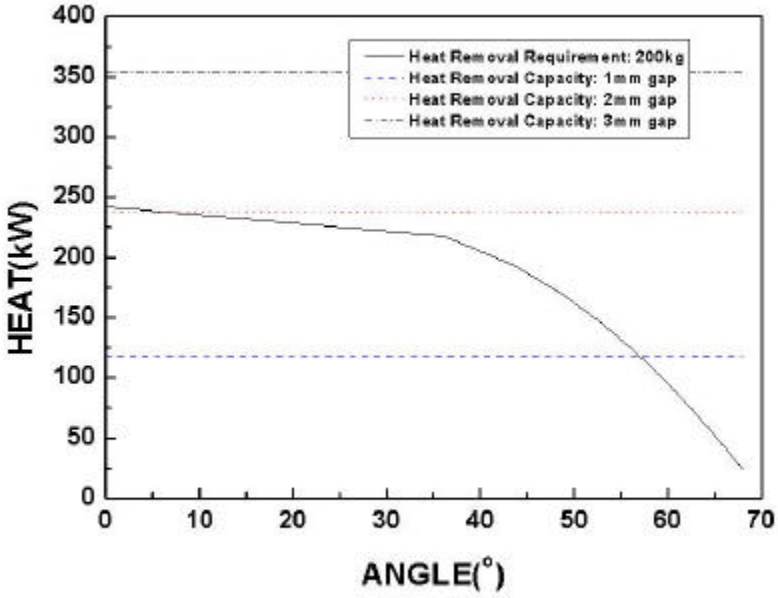

그림 9. 200kg의 Al_2O_3 용융물이 주입된 경우에 간극을 통한 최대 열 제거 능력

그림 9는 200kg의 Al_2O_3 용융물이 주입된 LMP200 실험에 대하여 제거해야 할 에너지의 양과 간극을 통해 제거할 수 있는 최대 열 에너지 양의 관계를 보여준다. 그림 9를 보면 3mm 크기의 균일한 간극이 형성되는 경우는 반구 하부에서도 냉각수가 침투하여 냉각이 이루어지는 것을 알 수 있다. 그러나 1, 2mm 크기의 간극에서는 각각 반구 상단에서 57^{o}, 10^{o} 동심원 위치까지만 냉각수가 침투하여 효과적인 열 제거가 이루어졌다.

5. 결 론

200kg 이상의 대용량 상사 용융물을 이용한 간극 냉각 실증 실험인 LAVA 대형 용융물 실험(LMP200 실험)의 결과를 기술하였다. LMP200 실험에서는 LAVA 실험에서 보

여진 간극 냉각 특성이 나타나지 않았다. 용융물의 질량이 증가하여 제거해야 할 용융물의 열 에너지가 증가한 반면 반구 하부에서 간극이 형성되지 못하여서 간극 냉각이 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 용융물 하중의 증가는 간극 형성에 영향을 미쳤을 것으로 생각되지만 현 상태에서 이에 대한 물리적인 근거를 제시하기에는 부족한 점이 많다. 간극 형성 기구에 대한 물리적인 현상 규명에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다. CCFL 상관식을 이용한 간극 냉각 가능성 평가 결과도 3mm 크기의 균일한 간극이 형성되지 못하면 반구 하부에서 냉각수에 의한 열 제거가 이루어지지 못한다는 사실을 보여주었다. 본 연구에서는 보다 일반적이고 다양한 사고 조건에 대하여 간극 냉각 가능성을 표현하기 위하여 간극 냉각을 통한 냉각 선도(coolability map)를 도출하는 연구를 진행하고 있다.

노심 손상 후기 과정에서 고온 용융물이 냉각수가 존재하는 원자로 하부로 주입될 때 노심 용융물의 냉각 가능성은 중대 사고의 진행을 종결하는 중요한 요소로 작용한다. LMP200 실험 결과 분석을 통하여 간극 냉각 가능성은 반구 내부로 재배치되는 노심용융물의 질량과 간극의 크기에 직접적인 영향을 받으며 다량의 노심용융물이 재배치되면 용융물의 하중에 의해 간극의 형성이 용이하지 않을 수 있고 또한 간극 내부에서 제거해야 할 용융물의 열 에너지가 증가하여 간극 냉각만으로 충분한 냉각이 이루어지지 않는다는 사실을 확인하였다. 따라서 실제 사고 시 간극 냉각의 적용 가능성은 개별 사고 조건에 대한 냉각 가능성을 평가하여 결정할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구 개발 과제의 일환으로 수행하였습니다.

참고 문헌

1. S. B. Kim et al., Major Results of In-Vessel Corium Cooling in the SONATA-IV Experimental Program, RASPLAV2000 Meeting, November 2000
2. 강경호 외, 간극을 통한 노내 노심용융물 냉각 방안에 관한 실험(LAVA 실험) 연구 결과 종합, KAERI/TR-1805/01, 2001
3. 박래준 외, 반구형 간극에서의 임계 출력에 관한 실험 연구, KAERI/TR-1800/01, 2001
4. R. J. Hammersley et al., Experiments to Address Lower Plenum Response under Severe Accident Conditions, EPRI Report
5. Yu Maruyama et al., Experimental Study on In-Vessel Debris Coolability in ALPHA Program, Nuclear Engineering and Design 187(1999), 241-254