

중대사고 대처 능력 향상을 위한 노내 냉각 방안의 개선에 관한 실험 연구

Experimental Study on the Enhancement of In-Vessel Corium Retention for the Improvement of the Management on the Severe Accident

강경호, 조영로, 박래준, 구길모, 김상백, 김희동

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

중대사고 대처 능력 향상을 위해 노심용융물의 노내 냉각 방안의 개선안으로 제기된 노내 간극 구조물을 이용한 냉각과 반구 내, 외부 동시 냉각 방안에 대한 타당성 검토 실험을 수행하였다. 본 실험은 한국 원자력 연구소에서 수행한 간극을 통한 노심용융물의 노내 자연 냉각 실험인 LAVA 실험의 일환으로 수행하였으며 개선된 냉각 기구에 대한 효과를 검증하기 위하여 실험 조건이 유사한 LAVA-11 실험과 실험 결과를 비교, 분석하였다. 실험 결과 노내 간극 구조물을 이용한 냉각과 반구 내, 외부 동시 냉각 방안 모두 기존 LAVA 실험에 비해 반구가 효과적으로 냉각되어 반구의 건전성이 향상되었음을 확인할 수 있었다. 노내 간극 구조물을 이용한 실험에서는 간극 구조물이 파손되지 않아서 반구가 열적, 기계적 손상을 전혀 받지 않았다. 또한 반구 내, 외부 동시 냉각 실험에서도 반구 외벽의 최고 온도 및 냉각율 등에서 LAVA 실험에 비해 효과적인 냉각이 이루어졌으며 반구와 외부 guide vessel 사이 간극에서 측정된 냉각수의 온도 변화도 비등 열 전달에 의한 효과적인 반구의 냉각 특성을 보여주었다.

Abstract

The feasibility experiments were performed for the assessment of improved In-Vessel Corium Retention(IVR) concepts using a internal engineering gap device and also a dual strategy of In/Ex-vessel cooling using the LAVA experimental facility. The internal engineering gap device was installed inside the lower head vessel and it made a uniform gap with the vessel by 10 mm. In/Ex-vessel cooling in the dual strategy experiment was performed installing an external guide vessel outside the lower head vessel at uniform gap of 25 mm. It could be found from the experimental results that the internal engineering gap device was intact and so the vessel experienced little thermal and mechanical attacks in the internal engineering gap device experiment. And also the vessel was effectively cooled down via mutual boiling heat removal in- and ex-vessel in the dual strategy experiment. It is concluded that the improved cooling measures using a internal engineering gap device and a dual strategy promote the cooling characteristics of the lower head vessel and so enhance the integrity of the vessel in the end.

1. 서론

중대사고 시 노심용융물을 원자로 용기 내에 억류하여 냉각시킴으로써 원자로 용기의 건전성을 확보하고 사고의 진행을 노내에서 종결하는 사고 관리 방안인 노심용융물의 노내 냉각 방안(IVR: In-Vessel Corium Retention)이 중대사고 관리 전략으로 고려되고 있다[1]. 노심용융물의 노내 냉각 방안은 냉각 기구에 따라 원자로 용기 내벽 냉각과 외벽 냉각으로 구분할 수 있다. 원자로 용기 내벽 냉각은 원전 사고 시 원자로 용기 내부에 냉각수가 존재할 때 노심용융물과 원자로 용기 내벽 사이에 형성되는 미세 간극 내부에서 냉각수의 비등 열 제거에 의한 노심용융물의 냉각 기구이다. 그리고 원자로 용기 외벽 냉각은 사고 시 원자로 용기 하부의 공동(cavity)을 침수하여 원자로 용기 외벽에서 비등 열 제거에 의해 노심용융물을 냉각시키는 방안이다.

한국 원자력 연구소에서는 원자로 용기 반구 내부에서 간극 냉각에 의한 노심 용융물의 냉각 기구를 규명하기 위하여 SONATA-IV(Simulation of Naturally Arrested Thermal Attack In Vessel) 연구[2]를 기획하여 1 단계 원리 검증 실험인 LAVA(Lower-plenum Arrested Vessel Attack) 실험[3]과 CHF_G (Critical Heat Flux in Gap) 실험[4]을 수행하였다. LAVA 실험에서는 Al₂O₃/Fe (혹은 Al₂O₃)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 분석하였다. 그리고 CHF_G 실험에서는 mm 크기의 미세 간극을 인위적으로 형성시킨 후 이를 통한 노심 용융물의 냉각 특성 및 크기를 정량화 하였다. LAVA 실험과 CHF_G 실험에서 간극 냉각에 의한 노심 용융물의 냉각 가능성을 확인하였으나 간극 냉각의 경우 다량의 용융물이 재배치되면 간극 내부에서 제거될 수 있는 노심 용융물의 열 에너지에 한계가 존재하여 충분한 냉각을 유지하기가 힘들다[5]. 간극 냉각 가능성은 간극 크기와 반구로 재배치되는 노심 용융물의 질량에 좌우되므로 각 사고 경위에 대한 냉각 가능성의 규명을 위하여 냉각 가능 선도(coolability map) 도출 등 추가적인 연구가 진행되고 있다.

새로운 원전의 경우 노심 용융물의 노내 냉각 방안(IVR)을 위하여 원자로 용기 외벽에 물을 채우는 원자로 용기 외벽 냉각이 적극적으로 검토되고 있다. 실제 APR-1400[1], AP600[6], Loviisa 원전[7] 등에 원자로 용기 외벽 냉각이 중대사고 대처 방안으로 적용되었다. 저 용량 원전인 AP600 과 Loviisa 원전에 대해서는 원자로 용기 외벽 냉각 수행 시 열적, 기계적 여유도에 대한 연구가 이루어져서 사고 관리 개념으로서 적용 타당성 면에서 많은 부분 검증된 상태지만 APR-1400 원전과 같은 대용량 원전의 경우에는 열적 여유도를 비롯한 현상 자체에 대한 불확실성이 존재하여 확실한 결론을 내리지 못한 상태이다. 대용량 원전에서는 소형 원전에 비해 외부에 가해지는 열적 부하가 크기 때문에 원자로 용기 하부 반구로 전달되는 노심 용융물의 열속이 외벽 냉각으로 제거할 수 있는 열속 보다 클 수 있다. 프랑스에서 차세대 원전으로 추진 중인 N4 원전의 경우는 이와 같은 대용량 원전에서 원자로 용기 외벽 냉각 기구의 불확실성을 보완하기 위하여 반구 내, 외부를 동시에 냉각하는 방안(Dual Strategy)[8]을 채택하여 연구를 수행하고 있다. 그리고 원자로 용기 내부에 구조물을 설치하여 용융물 재배치 과정 초기에 고온의 노심 용융물과 반구가 직접 접촉하는 것을 방지하고 간극 냉각 효과를 향상시키는 방안[9, 10]이 보다 강화된 IVR 방안으로 제기되었다. 현재 한국에서 차세대 원전으로 추진하고 있는 APR-1400 원전의 경우도 프랑스 N4 원전의 경우와 같이 1400Mwe 급의 대용량 원전이므로 용기 외벽 냉각 기구를

보완하여 노심 용융물의 노내 냉각 방안을 강화하는 연구가 필요하다.

한국 원자력 연구소에서는 노심 용융물의 노내 냉각 방안의 개선안으로 제기된 노내 간극 구조물(Internal Engineering Gap Device)을 이용한 냉각 강화 방안과 반구 내, 외부 동시 냉각(Dual Strategy) 방안에 대한 타당성 검토 실험을 LAVA 실험의 일환으로 수행하였다. LAVA 실험에서와 같이 노심 용융물의 모사 체로 Al_2O_3 용융물을 사용하였고 원자로 용기 반구를 1/8로 선형 축소된 반구형 반응 용기를 이용하여 실험을 수행하였다. 노내 간극 구조물을 이용한 실험과 반구 내, 외부 동시 냉각 실험은 LAVA 실험의 일환으로 수행되었기 때문에 각각 LAVA-15 실험과 LAVA-16 실험으로 명명하였다. 용융물과 반구 내벽 사이에서 형성되는 간극을 통한 자연적인 반구 내벽 냉각만을 수행한 LAVA 실험 중에서 실험 조건이 유사한 LAVA-11 실험과 실험 결과를 비교하여 노내 간극 구조물의 영향과 반구 내, 외부 동시 냉각의 영향을 분석하였다.

2. 노심용융물 노내 냉각 방안(IVR)의 개선안 마련을 위한 실험 내용

현재 대표적인 노심 용융물의 노내 냉각 방안의 개선안으로 고려되고 있는 것은 노내 간극 냉각 효과를 증진시키고 용융물 재배치 과정 초기에 고온의 노심용융물과 원자로 용기 하부 반구가 직접 접촉하는 것을 방지하기 위해 노내에 간극 구조물을 설치하는 방안과 노내 간극 냉각과 원자로 용기 외벽 냉각 방안의 불확실한 열적 여유도를 증진시키기 위해 반구 내, 외부 동시 냉각하는 방안을 들 수 있다. 다음은 본 논문에서 노내 간극 구조물을 이용한 냉각 방안과 반구 내, 외부 동시 냉각 방안에 대한 타당성 검토 실험으로 수행한 실험의 내용을 정리한 것이다.

(1) 노내 간극 구조물(Internal Engineering Gap Device)을 이용한 냉각: LAVA-15 실험

LAVA 실험은 노심용융물이 반구 내부로 재배치되면서 반구 내벽과 노심용융물 외부 피막층 사이에 자연적으로 형성되는 간극에 의한 냉각 가능성을 규명하는 실험이다. 간극 내부에서 제거할 수 있는 열 에너지의 양은 간극의 크기에 좌우되며 다량의 용융물이 재배치되면 냉각 능력의 한계가 존재한다. 이를 보완하기 위해 반구 내부에 노내 간극 구조물을 설치하여 재배치 과정 초기에 용융물이 반구와 직접 접촉하는 것을 방지하고 구조물과 반구 내벽 사이에 인위적으로 간극을 형성시켜서 간극 냉각 능력을 향상시키는 방안을 고안하여 LAVA-15 실험을 수행하였다. 그림 1은 반구 내부에 간극 구조물을 설치한 LAVA-15 실험의 개념도를 보여준다. LAVA-15 실험은 노내 간극 구조물 설치에 대한 타당성 검토 실험으로서 간극 구조물의 규격은 LAVA 반구의 규격을 고려하여 임의로 정하였다. 원자로 용기 내부 간극 구조물을 이용한 노내 냉각 방안의 강화에 대한 연구가 활성화되면 간극 구조물의 규격과 재질에 대한 민감도 분석이 필요할 것으로 생각된다. LAVA-15 실험에서 사용한 간극 구조물은 LAVA 반구와 동일한 재질인 carbon steel로 제작하였고 내부 직경 464mm, 두께 8mm로서 LAVA 반구 내벽과 10mm 크기의 균일한 간극을 형성하게 제작하여 반구 내부에 장착하였다.

(2) 반구 내, 외부 동시 냉각(Dual Strategy) 방안: LAVA-16 실험

LAVA 실험에서는 반구 내부에만 냉각수를 주입하고 실험을 수행하였으나 LAVA-16 실험에서는 LAVA 반구 외부에 guide vessel 을 장착하고 냉각수를 주입하여 반구 내, 외부 동시 냉각의 영향을 분석하였다. LAVA 반구 외부에 설치한 guide vessel 은 기존 LAVA 외벽 냉각 실험[10]에서 사용한 guide vessel 과 동일한 것으로서 LAVA 반구 외벽과 guide vessel 사이는 25mm 크기의 균일한 간극이 형성된다. 그림 2는 반구 내, 외부 냉각을 동시에 수행한 LAVA-16 실험의 개념도를 보여준다. 실험 전에 반구와 guide vessel 사이의 간극 내부에 상온의 냉각수를 주입하여 반구 외벽에서 수조 비등에 의한 열 제거를 도모하였다.

3. 실험 조건

LAVA-15 실험과 LAVA-16 실험 조건은 강화된 냉각 기구를 제외하고는 기존 LAVA 실험과 동일하게 설정하고자 하였다. 기존 LAVA 실험 결과에서 용융물의 질량을 70kg 으로 증가시킨 LAVA-11, 12 실험의 경우에 반구 하단부에서는 간극 냉각 특성이 두드러지지 않았기 때문에 냉각 기구가 추가된 경우 냉각 특성에 대한 비교 분석을 위해 LAVA-15, 16 실험 조건을 LAVA-11 실험과 동일하게 설정하였다. 표 1은 LAVA-11, 15, 16 실험에 대한 구체적인 실험 조건을 보여준다. LAVA-15 실험에서는 70kg 의 Al_2O_3 용융물을 주입하고자 하였으나 용융물 이동 과정에서 질량 손실이 발생하여 60kg 의 Al_2O_3 용융물이 반구 내부로 주입되었다.

LAVA-15, 16 실험에서도 LAVA-11 실험에서와 같이 LAVA 반구 외벽에서 3mm, 13mm 내부에 동심원 방향으로 K 형 열전대를 장착하여 반응 중 반구의 온도 변화를 측정하였다. 이와 더불어 LAVA-15 실험에서는 노내 간극 구조물 외벽에서 4mm, 7mm 내부에 동심원 방향으로 13 개의 K 형 열전대를 장착하여 온도 거동을 측정하였고 LAVA-16 실험에서는 LAVA 반구와 외부 guide vessel 내부에 존재하는 냉각수의 온도 변화를 측정하기 위하여 3 개의 K 형 열전대를 설치하였다. 그림 3은 LAVA 반구에 설치한 열전대의 위치와 LAVA-16 실험에서 냉각수의 온도를 측정하기 위해 설치한 열전대의 위치를 보여준다. LAVA-15 실험에서 노내 간극 구조물에 설치한 K 형 열전대의 동심원상 위치는 LAVA 반구에 설치한 열전대의 동심원상 위치와 동일하다.

4. 실험 결과

노내 간극 구조물을 이용한 냉각 방안과 반구 내, 외부 동시 냉각 방안의 효과를 분석하기 위하여 LAVA-15 실험과 LAVA-16 실험 결과를 LAVA-11 실험 결과[12]와 비교, 분석하였다.

(1) 노내 자연 냉각 실험 결과: LAVA-11 실험 결과

용융물과 반구 내벽 사이에 형성되는 간극을 통한 냉각만을 고려한 LAVA-11 실험에서는

30kg의 Al_2O_3 용융물을 주입한 이전 LAVA 실험에 비해 용융물의 질량을 70kg으로 증가하였기 때문에 반구 하단부에서는 간극 내부에서 비등 열 제거에 의해 반구의 냉각이 활성화되는 간극 냉각 특성을 보이지 않았다. 그림 4는 LAVA-11 실험에서 측정된 반구 외벽의 온도 변화를 보여준다. 그림 4를 보면 반구 상단부인 T13 열전대에서 측정된 반구 외벽의 최고 온도는 반구 하단부에 위치한 T5 열전대에서 측정된 온도에 비해 300K 정도 낮고 냉각율도 1.9 K/s로 비교적 높게 나타났지만 T5 열전대 지점에서는 0.5 K/s의 더딘 냉각율을 나타내어 반구 상단부에서 보여진 간극 냉각 특성이 나타나지 않았음을 알 수 있다. LAVA-11 실험에서는 일반적으로 LAVA 실험에서 반구 외벽의 온도가 가장 높게 측정되고 냉각도 더디게 발생하는 0° 지점(T1 열전대)에서 반구 외벽의 온도를 측정하지 못하였다. 그러나 LAVA-11 실험과 유사한 조건에서 수행한 LAVA-12 실험 결과를 보면 0° 중심원 위치에서 측정된 반구 외벽의 최고 온도가 1339K였고 냉각율은 0.29 K/s였던 것을 감안하면 LAVA-11, 12 실험과 같이 용융물의 질량이 증가하면 간극 내부로 냉각수의 침투 거리(water penetration length)가 증가하여 반구 상단부에서는 간극 내부로 냉각수가 침투하여 효과적인 열 제거가 이루어진 반면 반구 하단부에서는 냉각수의 침투가 원활하지 못하여 냉각이 충분하게 이루어지지 않았음을 알 수 있다.

(2) 노내 간극 구조물을 이용한 냉각 실험 결과: LAVA-15 실험 결과

실험 결과 LAVA-15 실험에서 반구 내부에 설치한 노내 간극 구조물(Internal Engineering Gap Device)은 파손되지 않았다. 그림 5는 반응이 종결된 후 LAVA 반구에서 분리한 간극 구조물과 반구 내부의 사진을 보여준다. Al_2O_3 고화 용융물은 간극 구조물 내부에 대부분 존재하였고 간극 구조물 외부를 보면 심한 열적 부하를 받은 흔적을 찾아볼 수 없었다. 간극 구조물이 온전하였기 때문에 LAVA 반구 내벽은 열적, 기계적 손상이 전혀 없는 상태였다.

그림 6은 간극 구조물 외부에서 4mm 내부에 설치한 열전대로 측정된 구조물의 온도 변화를 보여준다. 간극 구조물의 온도를 측정하기 위해 설치한 K형 열전대는 용융물과 냉각수의 반응이 일어나는 반응 용기 내부에서 외부로 열전대 선이 연결되기 때문에 0° 중심원 위치에 설치한 열전대 선이 용융물 재배치 과정 중 파손되어 본 논문에는 15° 중심원 위치에서 측정된 온도를 수록하였다. 그림 6을 보면 동일한 중심원 위치에 장착한 열전대로 측정된 온도임에도 불구하고 정도에 따라 온도 측정 값에 차이가 큰 것을 알 수 있다. 이 같은 결과는 용융물이 냉각수 층을 통과하여 재배치 됨에 따라 완전 대칭 형태로 구조물 내부에 주입되지 못하고 비대칭적으로 용융물이 주입되었기 때문에 발생한 것으로서 이전 LAVA 실험에서도 유사한 결과를 나타내었다. 정도상에서 측정된 온도 값에 차이가 존재하지만 LAVA-11 실험에서 측정된 반구 외벽의 온도 값에 비해 낮게 측정되었음을 알 수 있다. 최고 온도도 낮게 측정되었지만 냉각 과정에서 간극 구조물은 급격히 냉각되었다. D3 열전대에서 측정된 냉각율은 10.34 K/s였고 D4 열전대에서 측정된 냉각율은 4.23 K/s로서 LAVA-11 실험에서 측정된 반구의 냉각율보다 훨씬 큰 값을 나타내었다. LAVA-15 실험에서 사용한 간극 구조물의 두께가 LAVA 반구 두께의 1/3 미만이기 때문에 용융물에 의한 열적 부하가 간극 구조물 내부를 통과하는데 소요되는 시간(thermal wave penetration time constant)은 LAVA-11 실험에서 열적 부하가 반구 내부를 통과하는데 소요되는 시간보다 9배 이상 빠르다. 이와 같이 빠르게 간극 구조물을 통과한 열적 부하가 간극 구조물

외벽과 LAVA 반구 내벽 사이에 10mm 크기의 균일한 간극 내부에서 냉각수에 의한 활발한 비등 열 제거에 의해 효과적으로 냉각되었기 때문에 급격한 냉각율이 나타난 것으로 생각된다.

그림 7은 LAVA 반구 외벽에서 3mm 내부에서 측정한 온도의 변화를 보여준다. LAVA-15 실험에서 내부 간극 구조물이 파손되지 않아서 LAVA 반구 내부에는 용융물이 직접 주입되지 않았다. 그림 7에서 보여지듯이 반구 외벽의 온도는 동심원 위치에 상관없이 LAVA 실험 용기 내부 압력 조건의 포화 온도보다 다소 낮은 값을 나타내어 LAVA 반구가 별다른 열적 부하를 받지 않았음을 알 수 있다.

(3) 반구 내, 외부 동시 냉각 실험 결과: LAVA-16 실험 결과

LAVA-16 실험에서는 반구 내, 외부 동시 냉각(Dual Strategy)의 영향을 평가하기 위하여 LAVA 실험에서 수행한 노내 냉각과 LAVA 외벽 냉각 실험에서 수행한 외부 guide vessel 을 이용한 외벽 냉각을 동시에 적용하였다. 그림 8은 반응 후 반구 내부에 존재하는 고화 용융물과 반구를 분리해낸 외부 guide vessel 내부의 사진을 보여준다. 그림 8에서 보여지듯이 도가니에서 생성된 용융물이 반구 내부로 주입되는 과정에서 용융물이 외부로 분출되어 외부 guide vessel 플랜지 상단에 약 5.85 kg의 고화 용융물이 남아있었다. 그러나 분출된 용융물이 LAVA 반구와 외부 guide vessel 이 간극을 형성하는 반구 부분에는 존재하지 않았으며 실험 장치 해체 작업 시 간극 내부에 냉각수가 남아있는 것을 확인할 수 있었다.

그림 9는 동심원 위치에서 측정한 반구 내, 외부의 온도 변화를 보여준다. 그림 9에서 T2 온도 측정 지점은 반구 외벽에서 3mm 내부이고 T1_D, T3_D 그리고 T5_D 온도 측정 위치는 반구 외벽에서 13mm 내부를 나타낸다. 그림 9를 보면 용융물의 열 에너지가 반구 내벽에서 전달되기 때문에 13mm 내부에서 측정한 온도 값이 3mm 내부에서 측정한 온도 값보다 다소 높고 온도 상승 시간도 약 20초 가량 빨랐음을 알 수 있다. 반응 초기에는 비교적 복잡한 온도 변화를 나타내지만 200초 이후에는 LAVA 실험 용기 내부의 압력 조건에서 포화 상태를 나타내는 200 ~ 300 °C 정도의 온도 분포를 나타내었다. 특히 LAVA-11 실험에 비해 반응 초기에 반구가 약 10 K/s 이상의 냉각율로 급격히 냉각되었다. 이 같은 결과는 반구 내벽에서 간극에 의한 냉각과 더불어 반구 외벽에서 냉각수의 비등 열 제거에 의해 반구가 효과적으로 냉각되었다는 것을 의미한다.

그림 10은 LAVA 반구와 외부 guide vessel 내부 간극에서 측정한 냉각수의 온도 변화를 보여준다. 그림 10에서 GAP_WATER_B 열전대는 반구 최 하단부인 0° 동심원 위치에서 LAVA 반구 외벽에서 10mm 떨어진 지점에 설치하였고 GAP_WATER_M, GAP_WATER_T 열전대는 각각 15°, 30° 동심원 위치에서 LAVA 반구 외부 표면에 밀착하여 설치하였다. GAP_WATER_M 열전대에서 측정한 냉각수의 온도는 400초까지는 국부적인 막 비등 형태를 나타내다가 400초 이후에는 포화 온도를 유지하였고 GAP_WATER_T 열전대에서 측정한 냉각수의 온도는 GAP_WATER_M 열전대에서 측정한 냉각수의 온도보다 다소 낮은 값을 나타내었다. 이는 외부 guide vessel 과 LAVA 반구 외벽 사이의 간극 하단부에서 발생한 수증기가 간극 상단부로 분출되고 상부의 냉각수가 간극 내부로 유입되는 전형적인 역류 유동 현상을 나타냄으로써 간극 상부 쪽이 냉각수가 침투하기가 용이하였기 때문에 나타난 현상이다. GAP_WATER_B 열전대에서 측정한 냉각수의 온도 변화를 보면 반응 후 약 150초까지는 200 °C 이상의 비등 형태를 보이다가

이후에는 다소 온도가 낮아졌음을 알 수 있다. 간극 최 하단부에 설치하였지만 GAP_WATER_B 지점에서 측정한 냉각수의 온도가 GAP_WATER_M, T 지점에서 측정한 온도보다 전체적으로 낮았는데 이와 같은 결과는 GAP_WATER_B 열전대를 반구 외벽에서 10mm 떨어진 지점에 설치하여 격렬한 비등 현상으로 인해 과열 증기(superheated vapor)가 생성되는 반구 표면 근처에 비해 간극 중간 부분에는 냉각수가 존재함에 따라 나타난 것으로 생각된다. 간극 내부에서 냉각수의 온도 측정값은 국부적인 열점(hot spot)이 형성되기도 했지만 전반적으로 반구 표면에서 냉각수의 비등에 의해 효과적인 열 제거가 이루어졌다는 사실을 의미한다.

(4) 실험 결과 종합

노내 간극 구조물을 이용한 냉각 실험인 LAVA-15 실험과 반구 내, 외부 동시 냉각을 수행한 LAVA-16 실험 결과를 보면 반구의 최고 온도와 냉각율 등에서 간극 냉각만을 고려한 LAVA-11 실험에 비해 반구가 효과적으로 냉각되었음을 알 수 있었다. LAVA-11 실험에서는 반구 하단부의 경우 반구가 충분히 냉각되는데 1500 초 가량 소요되었지만 LAVA-15 실험과 LAVA-16 실험에서는 내부 간극 구조물과 반구가 약 60 초 만에 포화 온도 상태로 급격히 냉각되었다. LAVA-15 실험의 경우는 LAVA 반구 외벽을 냉각시키지는 않았지만 반구 내부에 설치한 간극 구조물은 내, 외부가 동시에 냉각되는 조건이었고 실제 용융물에 의한 열적 부하가 내부 간극 구조물에 집중되었다. 그리고 LAVA-16 실험의 경우는 반구 내부에서는 용융물 피막 층과 반구 내벽 사이에 형성되는 간극을 통한 냉각과 반구 외벽에서 수조 비등에 의한 열 제거가 동시에 이루어지는 조건이었다. LAVA-15 실험에서 간극 구조물과 LAVA-16 실험에서 반구의 냉각 거동을 종합하면 내부 간극 냉각만을 수행한 LAVA-11 실험에 비해 냉각 능력이 월등히 향상되었음을 확인할 수 있었고 이와 같은 결과는 반구 내부에서 수 mm 크기의 불 균일한 간극을 통한 냉각 능력보다 상대적으로 큰 크기의 균일한 간극을 통한 외벽 냉각의 효과가 훨씬 지배적이었다는 것을 의미한다.

5. 결론

중대사고 시 노심용융물의 노내 냉각 방안을 개선하기 위하여 제기된 노내 간극 구조물을 이용한 냉각 방안과 반구 내, 외부 동시 냉각 방안에 대한 타당성 검토 실험 결과를 정리하였다. 본 실험은 한국 원자력 연구소에서 수행한 간극을 통한 노심용융물의 노내 자연 냉각 실험인 LAVA 실험의 일환으로 수행하였으며 개선된 냉각 기구에 대한 효과를 검증하기 위하여 기존 LAVA 실험 중에서 용융물의 질량이 70kg 으로 증가하여 반구 하단부에서 간극 냉각 특성으로 간주할 수 있는 효과적인 냉각 거동을 보이지 않았던 LAVA-11 실험 결과와 비교하였다. 실험 결과 노내 간극 구조물을 이용한 냉각 방안과 반구 내, 외부 동시 냉각 방안 모두 LAVA-11 실험에 비해 반구가 매우 효과적으로 냉각되어 반구의 건전성이 향상되었음을 알 수 있었다. 노내 간극 구조물을 반구 내부에 장착하고 실험을 수행한 LAVA-15 실험에서는 노내 간극 구조물이 파손되지 않아서 LAVA 반구가 열적, 기계적 손상을 전혀 받지 않았다. 그리고 용융물에 의한 열적 부하가 집중되었던 간극 구조물의 냉각율이 LAVA-11 실험에서 반구의 냉각율에 비해 최고

20 배 이상 높게 측정되었으며 포화 온도 상태로 냉각되는데 소요된 시간도 60 초로서 1500 초가 소요된 LAVA-11 실험에 비해 훨씬 짧았다. 이 같은 결과는 간극 구조물 내벽에서 형성된 미세 간극과 간극 구조물 외벽과 LAVA 반구 내벽 사이에 인위적으로 형성한 10mm 크기의 균일한 간극을 통한 비등 열 제거에 의해 반구가 효과적으로 냉각되었음을 의미한다. 반구 내, 외부를 동시에 냉각한 LAVA-16 실험 결과도 LAVA-11 실험에 비해 반구 외벽의 최고 온도 및 냉각율 등에서 효과적인 냉각이 이루어졌음을 알 수 있었다. LAVA-16 실험에서 LAVA 반구와 외부 guide vessel 사이 간극에서 측정된 냉각수의 온도 변화도 비등 열 전달에 의한 효과적인 반구의 냉각 특성을 보여주었다. LAVA-15 실험에서 실질적으로 용융물의 열적 부하를 받은 내부 간극 구조물과 LAVA-16 실험에서 반구의 경우는 내벽 냉각 뿐만 아니라 외벽 냉각을 동시에 수행한 경우로서 반구 내벽 냉각만을 수행한 LAVA-11 실험과 비교해서 냉각 능력이 월등히 향상된 실험 결과는 반구 내부에서 수 mm 크기의 불 균일한 간극을 통한 냉각 능력보다 상대적으로 큰 크기의 균일한 간극을 통한 외벽 냉각의 효과가 훨씬 지배적이었다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 상사 용융물을 이용한 LAVA-15, 16 실험 결과를 검증하고 노내 간극 구조물과 외부 guide vessel 의 규격에 대한 민감도 분석을 위해 한국 원자력 연구소에서 노내 노심용융물의 냉각 현상을 해석하기 위하여 개발한 LiLAC 코드[13]를 이용한 해석 연구를 수행할 계획이다. LiLAC 코드 해석을 통하여 노내 간극 구조물과 외부 guide vessel 의 규격에 대한 민감도 분석뿐만 아니라 대형 간극(10mm, 25mm) 내부에서 냉각수의 비등 현상과 용융물 풀의 거동에 대한 상세한 분석 그리고 반구 외벽에서 냉각수 유동 조건에 대한 영향 평가 등을 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 과제의 일환으로 수행하였습니다.

참고 문헌

1. 한국전력공사 전력연구원, “차세대원전 중대사고 관리를 위한 In-Vessel Retention 워크샵”, 한국전력공사 전력연구원 발간, 1998년
2. 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
3. K. H. Kang et al., “Study on In-Vessel Debris Retention through Gap Cooling,” Korean Nuclear Society Spring Meeting, Pohang, Korea, May 1999
4. 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
5. K. H. Kang et al., “Evaluations of the Coolability in the LAVA Experiments and Large Advanced Light Water Reactors(ALWR) using Gap Cooling Model,” Korean Nuclear Society Spring Meeting, Cheju, Korea, May 2001

6. T. G. Theofanous et al., "In-Vessel Coolability and Retention of a Core Melt," Nuclear Engineering & Design 169, pp. 1-48, 1997
7. O. Kymalaineen et al., "In-Vessel Retention of Corium at the Loviisa Plant," Nuclear Engineering & Design 169, pp. 109-130, 1997
8. P. Richard et al., "In-Vessel Core Retention: Some Results on the Dual Strategy," ICONE-7, Tokyo, Japan, April 19-23, 1999
9. P. Meloni et al., "Preliminary Assessment of an In-Vessel Core Retention Strategy using Best Estimate Tools," ICONE-8, Baltimore, USA, April 2-6, 2000
10. J. Baron, "Conceptual Design of a Metallic In-Vessel Core Catcher," ICONE-8, Baltimore, USA, April 2-6, 2000
11. K. H. Kang et al., "A Feasibility Experiment for Assessing the Efficacy of Ex-vessel Cooling through the External Guide Vessel," SARJ-99, Tokyo, Japan, November 8-10, 1999
12. 강경호 외, "간극을 통한 노내 노심용융물 냉각 방안에 관한 실험(LAVA 실험) 연구 결과 종합," KAERI/TR-1805/2001, 2001년 3월
13. J. T. Kim et al., "Modeling of Cooling in a Gap between Melt Crust and Vessel Wall," Korean Nuclear Society Spring Meeting, Cheju, Korea, May 2001

표 1. 실험 조건

실험 명	용융물	냉각수 아냉도/수위	반구 내/외 압력	비고
LAVA-11	Al ₂ O ₃ , 70kg	52K, 50cm	17.3 / 1.0 bar	간극 냉각
LAVA-15	Al ₂ O ₃ , 60kg	53K, 50cm	16.7 / 1.0 bar	간극 구조물
LAVA-16	Al ₂ O ₃ , 70kg	50K, 50cm	14.0 / 1.0 bar	반구 내, 외부 동시 냉각

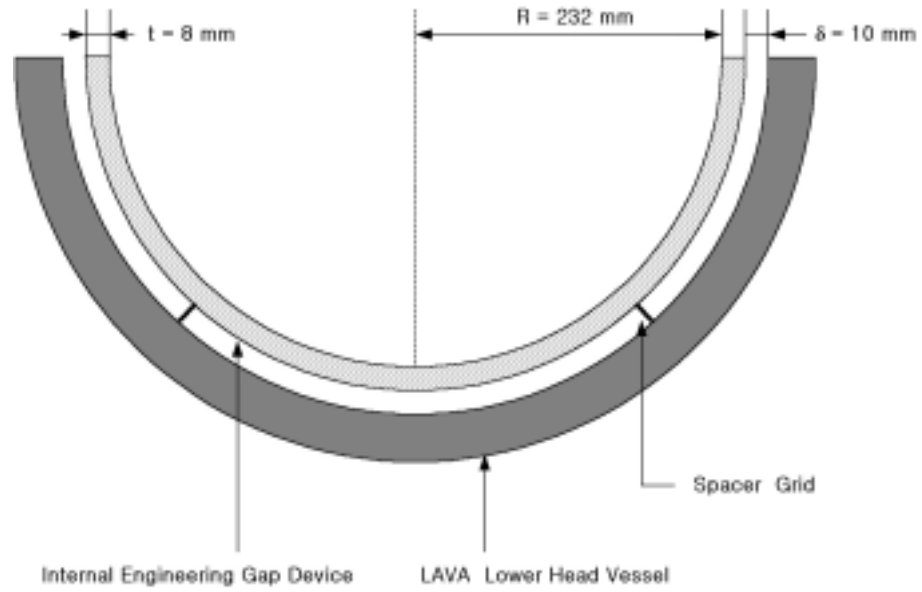


그림 1. 반구 내부에 간극 구조물을 설치한 LAVA-15 실험 반구의 개념도

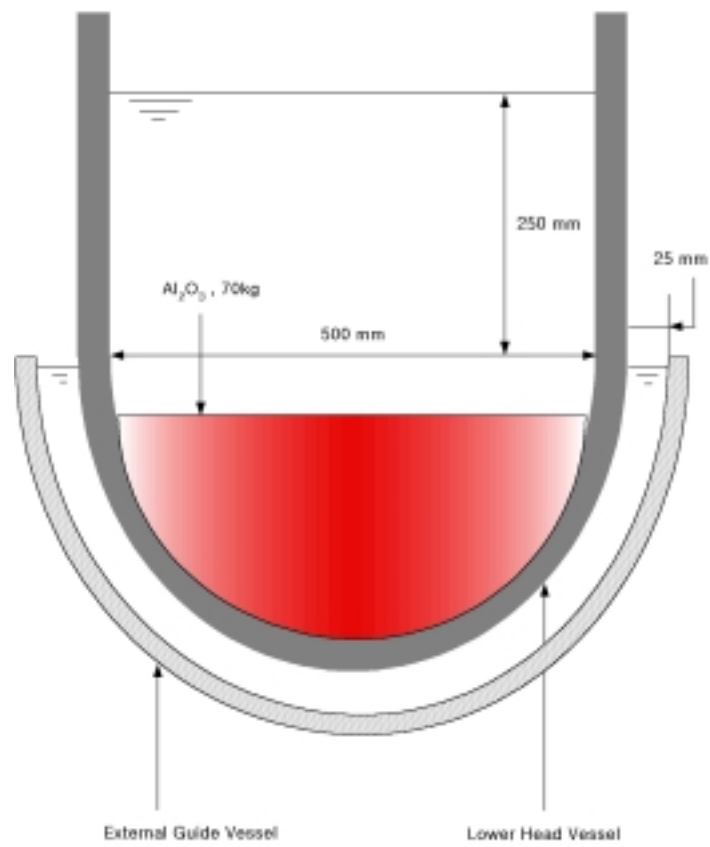


그림 2. 반구 내, 외부 동시 냉각을 수행한 LAVA-16 실험의 개념도

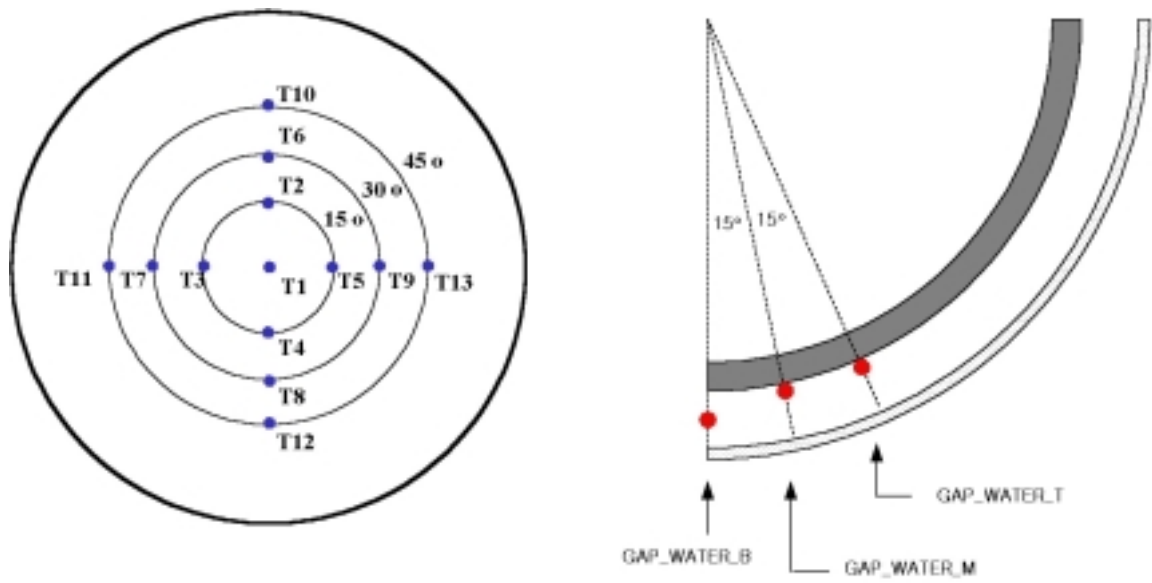


그림 3. LAVA 반구와 냉각수의 온도 측정을 위해 설치한 K형 열전대의 위치

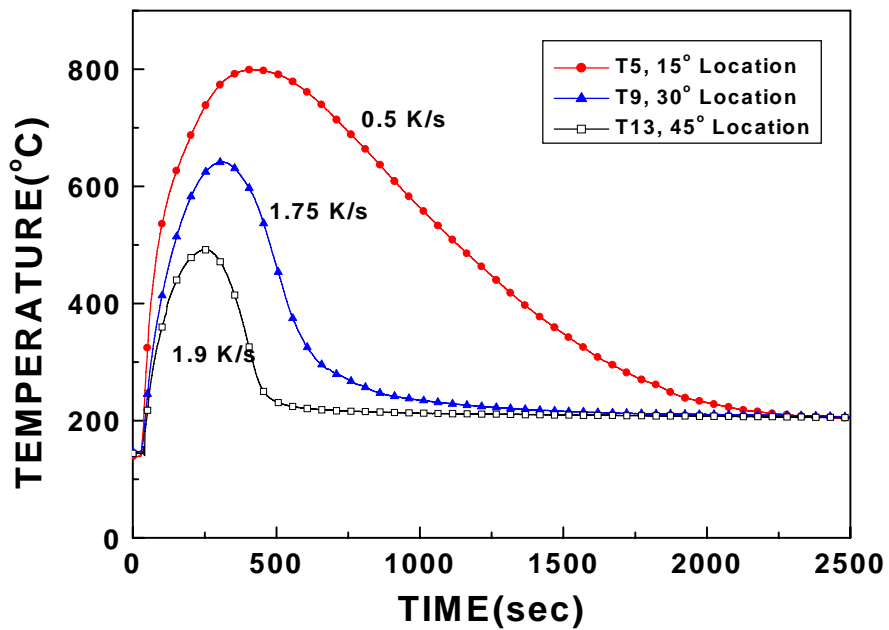


그림 4. LAVA-11 실험에서 반구 외벽의 온도 변화



그림 5. LAVA-15 실험에서 반응이 종결된 후 LAVA 반구 내부와 반구에서 분리한 간극 구조물의 사진

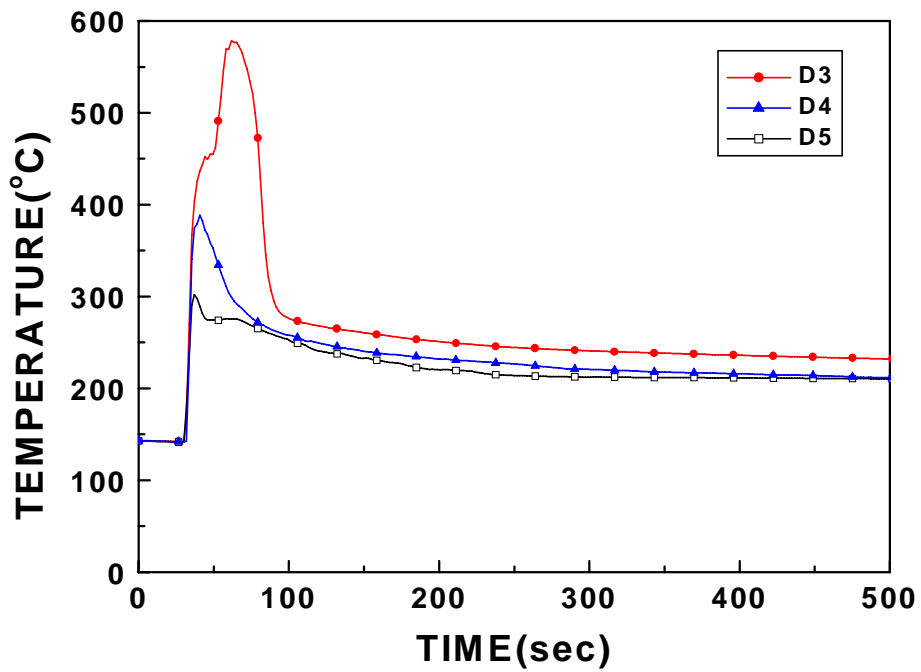


그림 6. 15° 동심원 위치에서 간극 구조물 외부에서 4mm 내부의 온도 변화

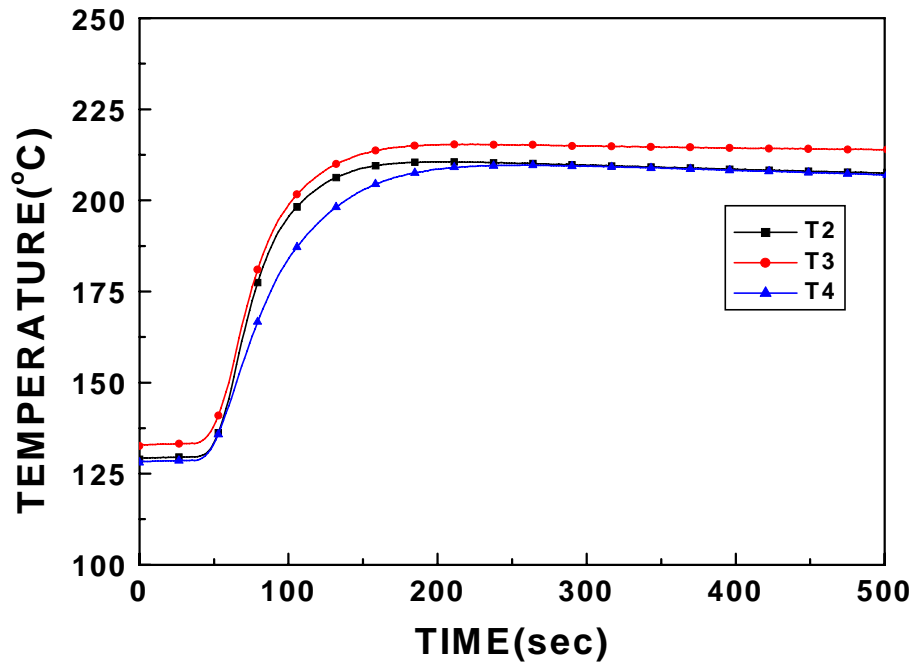


그림 7. LAVA-15 실험에서 반구 외벽의 온도 변화



그림 8. LAVA-16 실험에서 반응 후 반구 내부에 존재하는 고화 용융물과 반구를 분리해낸 외부 guide vessel의 사진

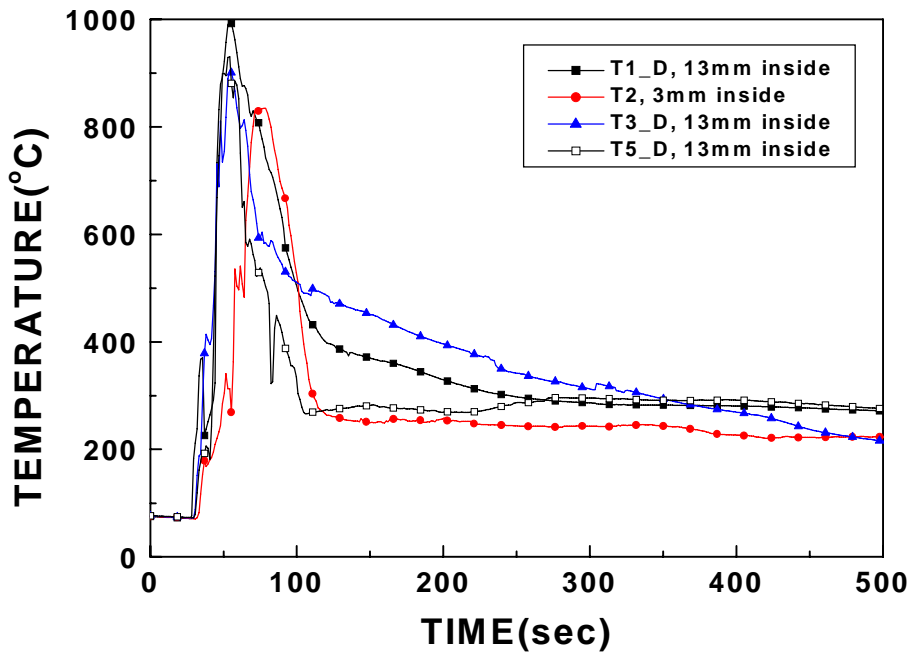


그림 9. LAVA-16 실험에서 반구 내, 외부의 온도 변화

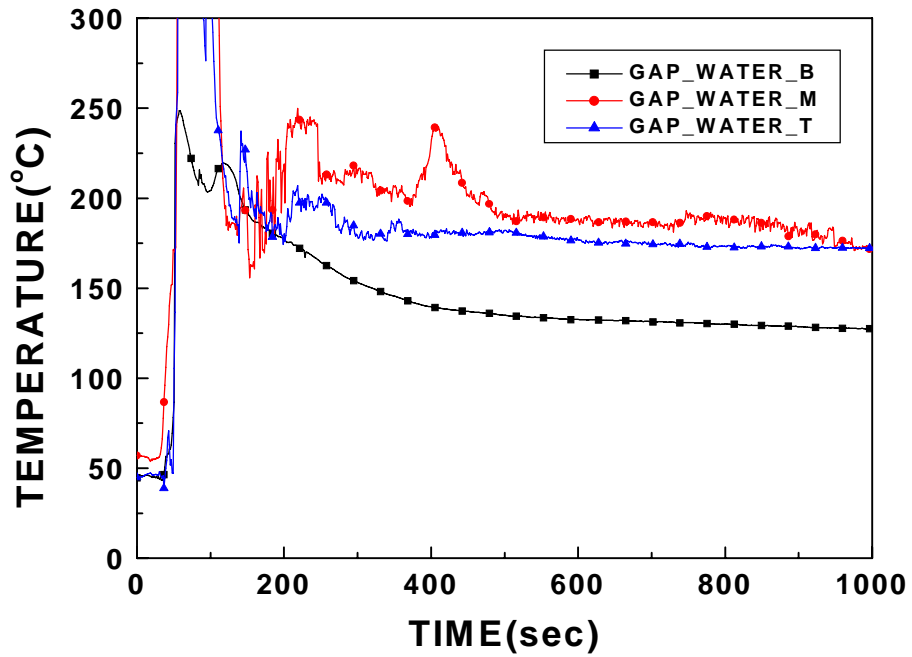


그림 10. LAVA-16 실험에서 외부 간극 내부의 냉각수의 온도 변화