

'99 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

간극 구조물을 이용한 원자로 용기 외벽 냉각 방안에 대한 가능성 검토 실험 연구
A Feasibility Experiment for Assessing the Efficacy of Ex-vessel Cooling
through the External Gap Structure

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

황일순
서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

요 약

중대사고 시 원자로 용기 외벽 냉각 방안의 하나로 제기되고 있는 간극 구조물을 이용한 원자로 용기 외벽 냉각 가능성 규명 실험 결과에 대하여 기술하였다. 원자로 용기 하부 반구를 1/8로 선형 축소한 반구형 반응 용기 내부에서 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ Thermite 용융물을 이용하여 반구 외벽에 열 제거 조건이 없는 경우(Dry Case 실험)와 1.68 m/s의 유속으로 냉각수를 강제 주입한 경우(Wet Case 실험)에 대한 반구의 파손 가능성과 열적 거동을 비교하였다. 실험 결과, Dry Case 실험의 경우는 반응 후 28초가 지난 시점에 반구가 파손되었으나, Wet Case 실험에서는 반구 외벽에서 냉각수에 의한 핵 비등 열 전달 현상에 의해 반구의 건전성이 유지될 수 있었다. 용융물 풀 내부의 유동장 형성과 이에 따른 반구의 열적 거동을 분석하기 위하여 수행한 FLUENT 코드 계산 결과에서도 용융물 풀 내부에서 자연 대류 유동장이 형성되어 반구 상부에 열적 부하가 집중되지만, 외벽에 냉각수를 주입하면 충분한 열 제거가 이루어질 수 있다는 가능성을 알 수 있었다.

Abstract

This paper presents the results of a feasibility experiment for assessing the efficacy of ex-vessel cooling through the external gap structure during a severe accident. In this study, a 1/8 linear scale mockup of a lower plenum was used with $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ thermite melt as a corium simulant. The results show that in dry case test conducted without cooling the outside of the vessel, after about thirty second from the thermite ignition the vessel was heated to cause a complete melt penetration at about 30 degree upper position from the bottom. Whereas in wet case test conducted cooling the outside of the vessel with 0.85 kg/s of water flow rate using 2.5 cm of uniform gap structure, the vessel effectively cooled down with 23.7 K/s of cooling rate by nucleate boiling at the surface of the vessel. The results of two-dimensional analyses using FLUENT code show a similar trend of vessel thermal behavior presented in the tests. Synthesized the results of the tests and analyses work, a natural convection of the melt pool could cause the formation of hot spot at the upper portion of the vessel, but the vessel could effectively cool down by heat removal with ex-vessel cooling.

1. 계 요

중대사고 시 원자로 용기 하부 반구로 재배치된 노심용융물을 원자로 용기 내부에서 냉각시킴으로써 사고를 종결하는 방안(In-vessel Retention)이 주요한 사고 관리 전략(Accident Management Strategy)으로 제기되고 있다. 노내 노심용융물 냉각 방안은 냉각 기구에 따라 노내 노심용융물 자연 냉각 방안과 원자로 용기 외벽 냉각 방안으로 구분할 수 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^[1]. 현재는 SONATA-IV 연구의 원리 검증 실험(Proof-of-Principle Test)으로 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ 용융물을 이용한 LAVA(Lower-plenum Arrested Vessel Attack) 실험을 수행하고 있다^[2]. LAVA 실험을 통하여 간극을 통한 냉각 가능성은 일정 정도 규명되었지만, 상사 용융물을 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. 한국 원자력 연구소에서는 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.

원자로 용기 외벽 냉각을 통한 냉각 기구의 규명은 비교적 냉각 능력의 정량화가 용이하다는 장점이 있다. 외벽 냉각에 의한 노심용융물 냉각 특성을 규명하기 위해서는 원자로 용기 외벽에서 냉각수 비등에 의한 열 제거 능력의 효율성과 원자로 용기를 냉각시킬 수 있는 충분한 냉각수 질량의 확보 가능성에 대한 검증이 선행되어야 한다. 그리고, 원자로 용기 외벽 냉각은 원자로 용기 배관 및 단열재 등 외부 구조물과 원자로 공동(Reactor Cavity)의 형태에 따라 냉각 방법 및 특성이 좌우된다. 기존의 연구는 Lowiisa 원전과 AP600 형 원전 등 개별 원전에 대하여 원자로 공동 내부에 냉각수를 주입하여 원자로 용기 외벽에서의 풀 비등(Pool Boiling) 열 전달 특성을 규명하고, 이를 통한 외벽 냉각 가능성에 대한 평가를 수행하였다^[3]. 최근에는 원자로 공동 침수에 의한 냉각 방안에서 쟁점으로 부각되는 원자로 용기 외부 단열재 구조가 존재하는 경우에 대한 비등 열 전달 실험이 F. B. Cheung 등에 의해 수행되었다^[4].

서울대학교 황 일순 교수는 노내외 인위적인 간극 구조물을 이용한 노심용융물의 냉각 방안으로 제시한 COASIS(Corium Attack Syndrome Immunization Structure) 개념의 일환으로 원자로 용기 외부의 인위적인 간극 구조물 내부에 강제 유동(Forced Flow)을 형성함으로써 비교적 적은 냉각수의 질량으로 효율적인 열 제거를 통한 원자로 용기 외벽 냉각을 실현하는 COASISO(Outside) 방안을 제기하였다^[5]. 그러나, 효율적인 냉각이 가능한 외부 간극의 크기 및 냉각수 주입 유량에 대한 검증 실험이 전무한 상태이다. 본 논문에서는 간극 구조물을 이용한 원자로 외벽 냉각 능력을 검증하기 위한 가능성 규명 실험(Feasibility Study)으로 실시한 LAVA_EXV 실험에 대하여 기술하였다. LAVA_EXV 실험은 원자로 용기 하부 반구를 1/8로 선형 축소한 반구형 반응 용기 내부에서 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ Thermite 용융물을 이용하여 수행하였고, 반구 외벽에서의 냉각 방식에 따라 Dry Case와 Wet Case로 구분하여 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

반응 용기는 원자로 용기 하부 반구를 1/8로 선형 축소한 반구형 용기이며, 내부 직경 50cm, 두께 2.5cm 규격의 Carbon Steel(SA516 Gr. 70)로 제작하였다. 노심용융물의 모사체는 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ Thermite 용융물 40 kg을 사용하였고, 혼합 분말에 DC 12V의 직류 전

원을 공급, 화학 반응을 통하여 생성하였다. 40 kg의 용융물이 반구 내부에 주입되면 반구 바닥 면에서 12.5 cm 높이로 쌓이게 된다. Al_2O_3/Fe Thermite 용융물은 Al_2O_3 용융물과 Fe 용융물의 혼합 용융물로 밀도 차이가 2 배 이상 존재하기 때문에 반응과 동시에 Fe 용융물과 Al_2O_3 용융물의 분리가 이루어져 밀도가 큰 Fe 용융물이 하부에 쌓이게 된다.

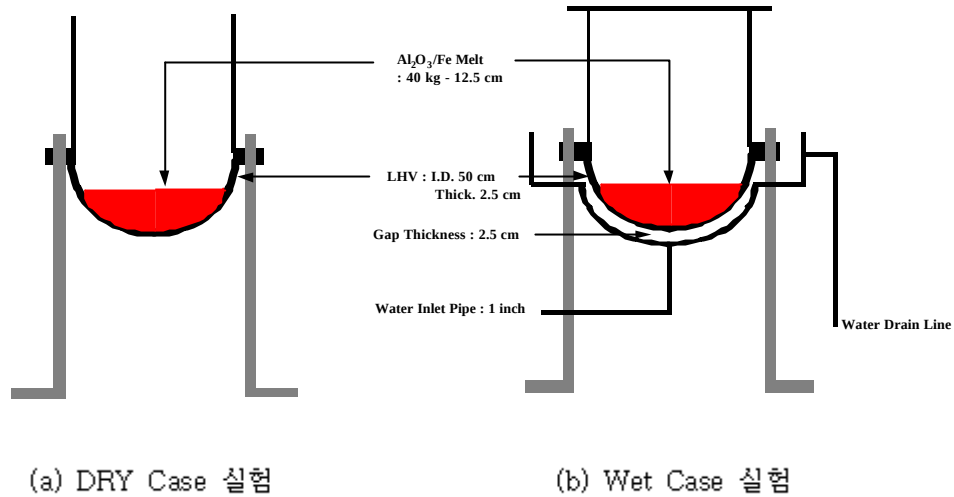


그림 1. LAVA_EXV 실험 개념도

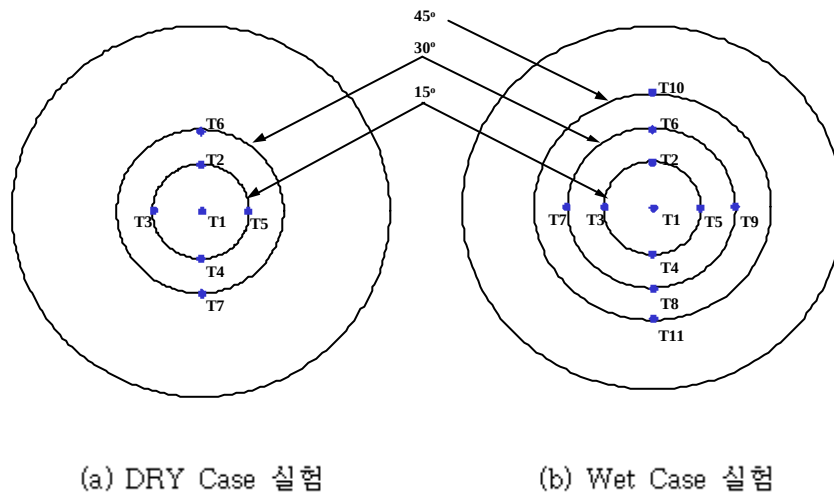


그림 2. 반구 외벽에 장착한 열전대 위치도

그림 1은 LAVA_EXV 실험의 개념도를 보여준다. Dry Case 실험은 반구 내, 외부에서 별도의 냉각 기구를 부여하지 않고, 대기압 상태의 열린 공간에서 수행하였다. Wet Case 실험은 용융물이 냉각수와 반응하여 발생할 수 있는 증기 폭발 현상을 억제하기 위하여 LAVA 실험 용기 내부에서 16 기압 조건으로 가압하여 수행하였다. Wet Case 실험에서는 냉각수를 1 inch 배관을 통하여 자유 낙하 방식으로 반응 용기와 외부 반구 사이의 2.5 cm 간극 내부에 주입하였다. 주입 냉각수의 유량과 유속은 각 각 0.85 kg/s, 1.68 m/s 이며,

냉각수 공급 용기를 이용하여 최대한 주입시킬 수 있는 냉각수의 질량은 약 300 kg으로 반구 외벽에 6분 가량 주입할 수 있는 용량이다.

반응 중 반구의 열적 거동을 측정하기 위하여 반구 외벽에 동심원 방향으로 K형 열전대를 장착하였다. 그림 2는 반구 외벽에 장착한 열전대의 위치를 보여준다. Dry Case 실험에서는 반구 외벽에서 2 mm 내부에 동심원 방향으로 7 개의 K 형 열전대를 장착하였고, Wet Case 실험에서는 11 개의 K 형 열전대를 장착하였다. 그리고, 반응 중 열속을 측정하기 위하여 T1, T2 열전대 장착 지점 옆에 Dry Case 실험은 19 mm, Wet Case 실험은 10 mm 내부에 추가로 열전대를 장착하였다.

3. 실험 결과 및 해석

3.1. Dry Case 실험 결과

Thermite 반응이 시작한 후 약 28초가 지난 시점에 T7 열전대 장착 지점(30° 동심원 위치)이 파손되었다. 파손 형태는 가로 13cm, 세로 7cm의 타원형을 나타냈다. Thermite 용융물이 생성된 후 성분 분리가 이루어지면서 T7 지점에 열점(Hot Spot)이 형성된 것으로 생각된다. 반구 파손이 발생한 후에도 반구 내부에 존재하는 용융 풀은 상당 기간 용융 상태를 유지하여 반구 외벽에 별도의 냉각 기구가 존재하지 않으면 반구에 가해지는 열적 부하가 크다는 사실을 알 수 있었다. 그림 3은 파손된 반구의 사진과 위치를 보여준다.

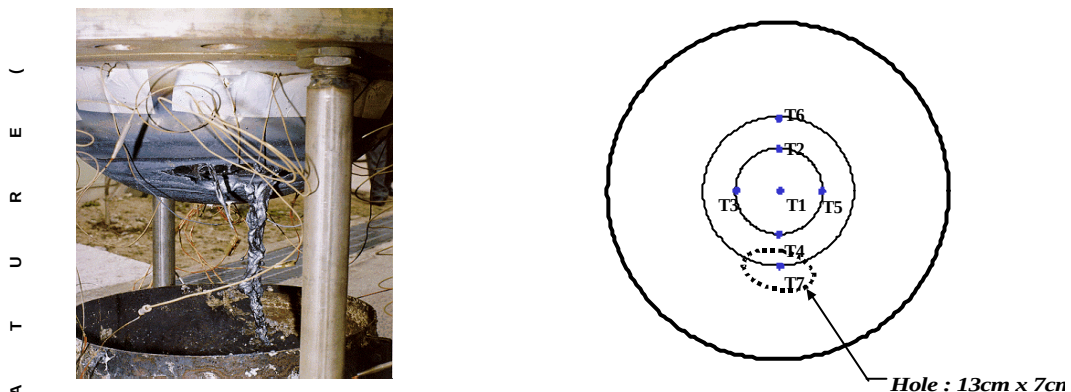


그림 3. Dry Case 실험의 파손된 반구의 사진과 파손 위치도

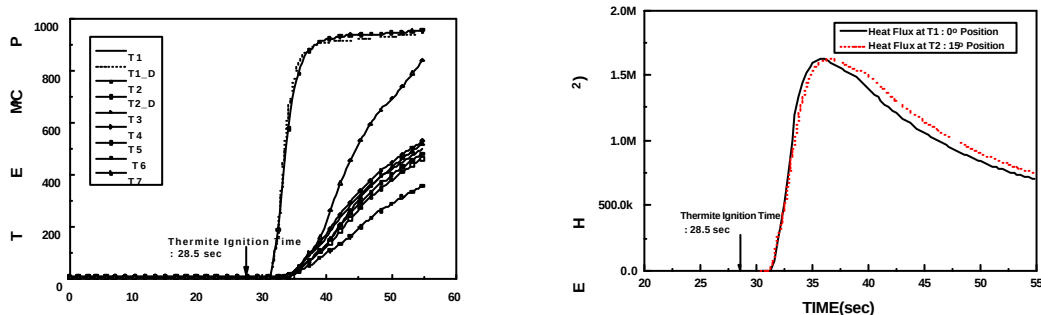


그림 4. Dry Case 실험의 반구 외벽 온도 거동과 열속 변화

그림 4는 반구 외벽 온도 거동과 T1, T2 지점에서 측정한 열속을 보여준다. T1, T2, T2_D 열전대를 제외한 열전대는 반구 파손으로 유출된 용융물에 의해 시그널 선이 파손되었다. 반구 내부에 장착한 T1_D, T2_D 열전대의 초기 온도 변화를 보면, 3 초 이내에 900 °C 이상의 고온 상태로 급격히 온도가 상승한 것을 알 수 있다. 15° 동심원 상에 위치하는 열전대의 온도 값은 유사한 상승 곡선을 보이고 있으며, 반구가 파손된 T7, T4 지점에서 다른 위치에 비해 온도가 높게 측정되었다. 반구 파손 지점과 위도 별 온도 분포를 보면 용융물 풀(Pool) 내부에서 자연 대류 유동의 형성과 Al_2O_3 용융물과 Fe 용융물의 분리 현상으로 인해 30° 동심원 위치에 열적 부하가 집중되었다는 것을 알 수 있다.

3.2. Wet Case 실험 결과

Wet Case 실험에서는 반구의 파손이 발생하지 않았다. 그림 5는 반응의 종결된 후 반응 용기의 모습과 용기 내부의 고화 용융물 형상을 보여준다. 그림에서 고화 용융물 형상을 보면, 상단의 산화 용융물 표면에 금(Crack)이 생성되어 있고, 중앙 면은 약간 부풀어 있는 반면 반구와 접촉하는 가장 자리는 상대적으로 수축되어 있는데, 이는 용융물과 반구의 접촉면에서 활발한 열 전달이 이루어졌다는 것을 의미한다.

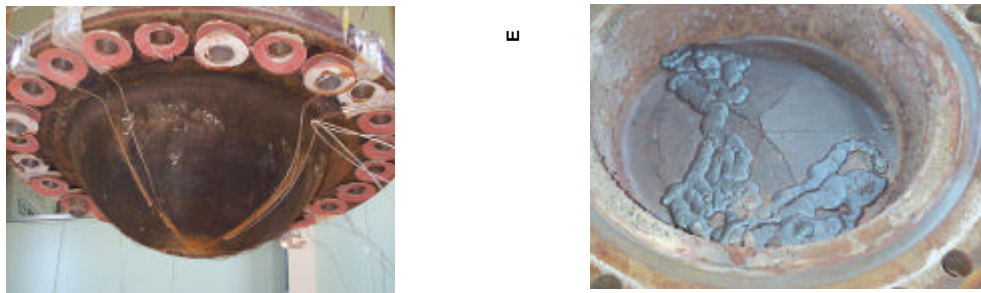


그림 5. Wet Case 실험의 반응 후 반구 외부와 고화 용융물 형상

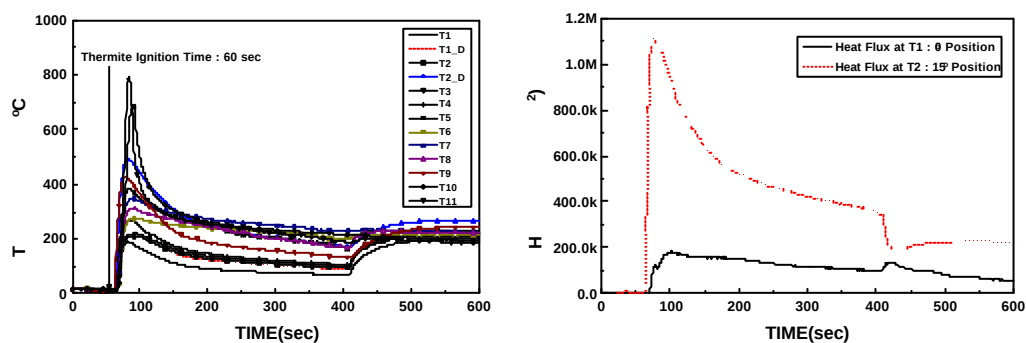


그림 6. Wet Case 실험의 반구 외벽 온도 거동과 열속 변화

그림 6은 반구 외벽 온도 거동과 T1, T2 지점에서의 열속의 변화를 보여준다. 반구 외벽의 최고 온도는 45° 동심원 상의 T11 열전대 지점에서 측정되었다. T11 지점의 반구 외벽은 800 °C 이상의 고온 상태로 가열되었으나, 약 23.7 K/s의 급격한 냉각율로 10초

만에 500 °C 이하로 냉각되었다. 이와 같은 냉각율은 동일한 용융물의 성분과 질량, 실험 압력 조건에서 반구 내부의 냉각수에 의한 노내 냉각 실험으로 수행한 LAVA-2 실험^[2]과 비교하여 10배 이상 큰 값으로서 T11 지점의 반구 외벽에서 막 비등 현상이 발생하였더라도 냉각수의 강제 유동에 의해 기포 막이 넓게 성장하지 못하고, 기포가 반구 상부로 유출되어 냉각^[6]이 가속되었다는 것을 알 수 있다. 30° 동심원 지점에서 반구가 파손되었던 Dry Case 실험과 비교하여 Wet Case 실험에서는 45° 동심원 지점에서 최고 온도가 측정되는 등 열적 부하의 크기가 반구 상부로 이동할수록 증가한 것을 알 수 있다. 이는 반구 하단부에서 냉각수를 강제 유동시킴으로써 반구 하단부와 용융물의 성분 분리가 이루어지는 30° 동심원 지점보다는 상부에서 반구의 열적 부하가 가깝 크게 나타난 것으로 생각된다. 특히, T1, T2, T3 지점의 최고 온도는 200 °C 내외로 실험 압력인 16 기압의 포화 온도 보다 낮게 측정되었다. 결국 반구 하부에서는 냉각수의 비등 현상이 발생하지 않고, 반구 외벽에서 충분한 냉각이 이루어졌다는 사실을 유추할 수 있다. 그림 6에서 반구 외벽의 온도가 400초 시점에서 다시 상승하는 것을 볼 수 있다. 이 시점은 냉각수의 강제 주입이 끝난 시점과 거의 일치하며, 이 후에는 냉각수에 의한 강제 대류 열 전달 효과가 없어지고, 풀(Pool) 비등 형태의 열 전달 현상이 발생했다는 것을 보여준다. Dry Case 실험에서는 T1, T2 지점에서의 열속 값이 거의 동일하였으나, Wet Case 실험에서는 두 지점에서 열속 값의 차이가 존재하고, 특히 T1 지점에서는 0.2 MW/m²의 적은 값을 보였다. T1 지점에서 열속 값이 낮게 측정된 것은 반구 내부와 외부의 온도 차이가 작았기 때문이다.

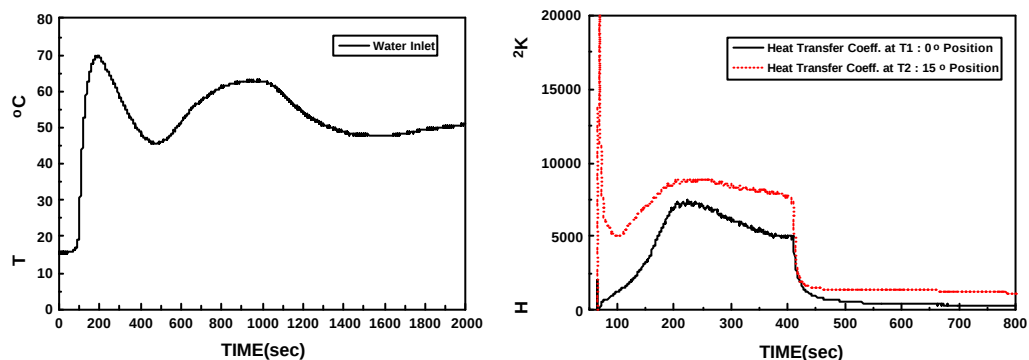


그림 7. Wet Case 실험의 냉각수 온도 거동과 열전달 계수의 변화

열속 값을 사용하여 T1, T2 지점에서 냉각수의 열 전달 계수를 계산하였다. 실험에서 냉각수 주입 관과 배출 관에서 각 각 냉각수의 온도를 측정하고자 하였으나, 배출 관의 온도는 용융물 생성 반응 과정 중에 열전대가 손상되어 측정하지 못하였다. 따라서, 주입 관에서 측정한 냉각수 온도를 이용하여 열 전달 계수를 계산하였다. 그림 7은 냉각수 주입 관에서 측정한 냉각수 온도와 T1, T2 지점에서 계산한 열 전달 계수의 변화를 보여준다. 열전달 계수는 T1, T2 지점에서 평균값으로 각 각 6000 W/m²K, 8000 W/m²K로 계산되었다. T1, T2 지점을 제외한 위치에서는 열속을 측정하지 않았기 때문에 아래의 Bromley^[6]의 강제 유동 막 비등에 대한 열 전달 상관식을 이용하여 15°, 30°, 45° 동심원 상의 열 전달 계수를 계산하였다.

$$h = 2.7 \left(\frac{U k_v \rho_v h_{fg}'}{D \Delta T_w} \right)^{1/2} \dots \dots \dots \text{(Eq. 1)}$$

Bromely 상관식은 수평 환상관에서 포화 조건의 냉각수를 이용한 실험에서 구해진 것으로 반구형 간극 내부에 과냉도가 큰 냉각수를 주입한 LAVA_EXV 실험에 직접 적용하기에는 한계가 존재하지만, 강제 유동에 의한 열 전달 현상을 모의할 수 있으므로, T5, T7, T11 지점에서 측정한 반구 외벽 온도를 이용하여 열 전달 계수를 계산하였다. 그림 8은 Bromely의 상관식을 이용하여 계산한 열 전달 계수의 변화를 보여준다. 열 전달 계수 값을 보면, 반구 외벽의 온도가 급격한 상승과 냉각 거동을 보이는 100 초 이전의 구간에서는 열 전달 계수가 최고 8000 $\text{W/m}^2\text{K}$ 에서 4000 $\text{W/m}^2\text{K}$ 의 분포를 갖는다. 그리고, 100 초에서 200 초 사이에는 평균적으로 약 1500 $\text{W/m}^2\text{K}$ 의 값을 보이면서 다소 증가하다가 반구 외벽의 온도가 250 $^{\circ}\text{C}$ 이하로 냉각되는 200 초 이후에는 변동폭이 커지면서 상승하는 것을 알 수 있다. 실험에서 측정한 반구 외벽의 온도 거동과 T1, T2 지점의 열속, 그리고 Bromely의 상관식으로 계산한 열 전달 계수를 종합해 보면, 반구 외벽에서 냉각수의 강제 주입에 의한 비등 열 제거를 통하여 충분한 냉각을 이룰 수 있다는 것을 알 수 있다.

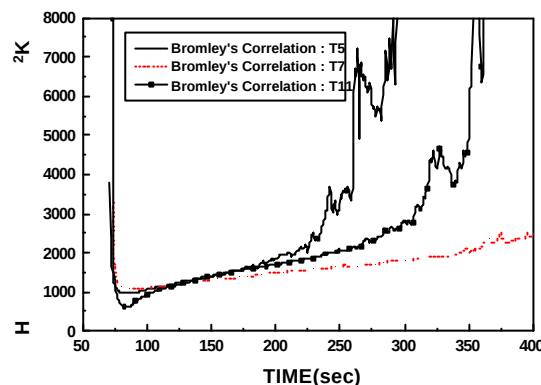


그림 8. Bromely의 상관식을 이용하여 계산한 열전달 계수의 변화

3.3. FLUENT 코드를 이용한 실험 결과 해석

상용 전산 코드인 FLUENT 코드(Version 4.51)를 이용하여 LAVA_EXV 실험에 대한 2차원 유동장 해석을 수행하였다. 용융물 풀 내부의 자연 대류 유동 현상은 Boussinesq 모델과 $k-\epsilon$ 난류 모델을 이용하여 계산하였고, 용융물의 상 변화 현상은 고정 격자 내부에서 유동과 엔탈피 방정식을 계산하는 Enthalpy-porosity 방법을 사용하여 온도 변화에 따른 액상 분율을 계산하였다. 용융물과 반구를 60 x 60 개의 사각 격자로 구성하여 계산을 수행하였다. 그림 9는 FLUENT 코드 계산 영역에 대한 개념도와 해석 격자 구조의 모습을 보여준다.

용융물 풀의 높이는 12.5 cm로 설정하였는데, FLUENT 코드는 용융물이 두 가지 성분으로 분리되어 있는 경우에 대한 상변화 해석이 불가능하기 때문에 용융물의 성분을 반구 하부에 쌓이는 Fe 용융물로 가정하고 계산을 수행하였다. 그림 9에서 W1 경계는 반구 외부 열 전달 경계를 나타내고, W2 경계는 용융물 상단부와 접촉하는 반구의 위치, W3 경계는 용융물 상부 대기를 각각 나타낸다. W4 경계는 대칭 경계 조건을 부여하였다.

Dry Case 실험에 대한 해석은 반구 외부(W1 경계)에서의 열 전달 경계 조건을 대기로의 대류 열 전달과 복사 열 전달을 고려하여 계산하였다. 용융물의 초기 온도에 불확실성이 존재하기 때문에 용융물 온도를 2700K와 3400K의 두 경우에 대하여 민감도 분석을 수행하였다.

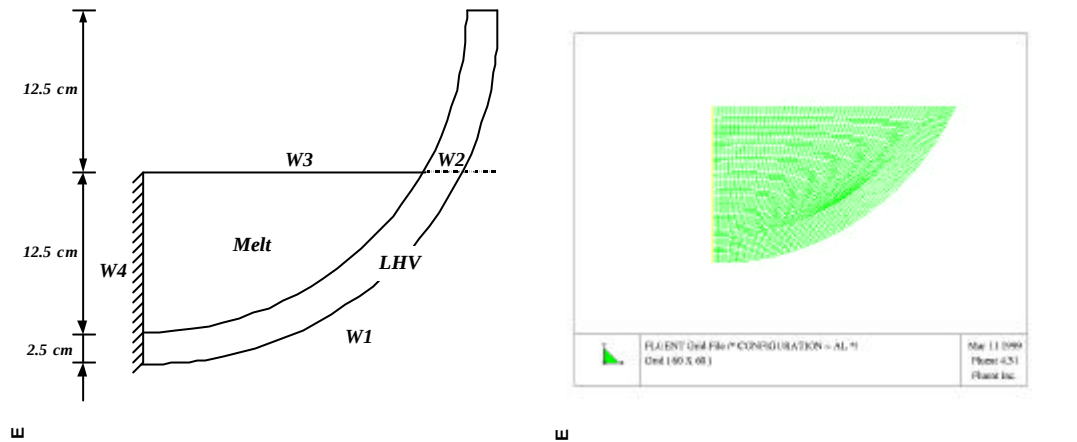


그림 9. FLUENT 코드 계산 영역에 대한 개념도와 해석 격자 구조의 모습

그림 10 은 Dry Case 실험에 대한 FLUENT 코드 해석 결과를 시간에 따른 반구 외벽 온도의 변화로 보여준다. 계산 결과, 두 경우 모두 50° 지점에서 반구가 파손되었다. 그러나, 파손 시간은 2700K 경우에는 120 초, 3400K 경우에는 60 초로 계산되어 28 초 후에 반구가 파손된 Dry Case 실험 결과와는 다소 차이가 존재한다. 이 같은 결과는 용융물의 성분을 순수한 Fe 용융물로 가정하고 계산한 초기 조건 설정의 작위성과 고온에서 물성치의 불확실성 및 FLUENT 코드의 내재된 계산 능력의 한계 등 복합적인 요인 때문이라고 생각된다.

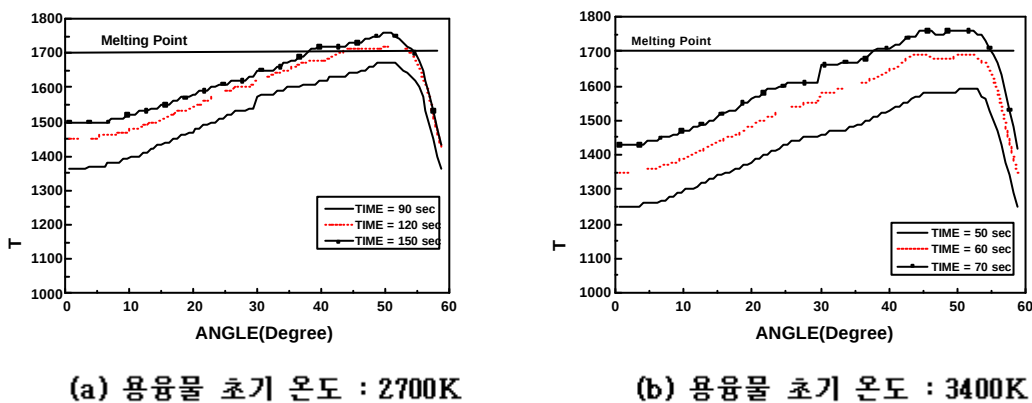
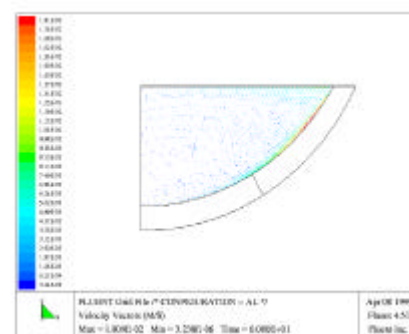
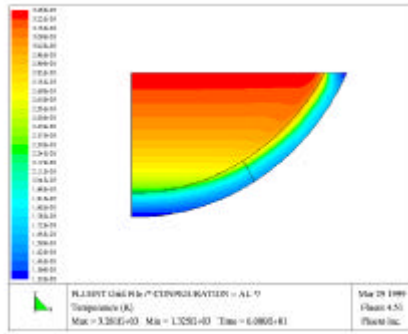


그림 10. Dry Case 실험의 FLUENT 코드 해석 결과 : 위치별 반구 외벽 온도 거동

반구의 파손 위치도 실험 결과와 차이가 존재하는데, 실험에서는 30° 지점에서 용융물의 분리가 이루어지면서 활발한 유동이 형성되어 이 부분에 용융물에 의한 열적 부하가 집중되었을 것으로 생각된다. 그림 11 은 용융물의 초기 온도를 3400K로 설정하고 계산한 Dry Case 실험 해석에서 60초 시점의 온도 분포와 유동의 모습을 보여준다. 그림 11 을 보

면, 실험 결과와 다소 차이가 발생하였지만 FLUENT 코드 계산 결과를 통하여 용융물 풀 내부에서 활발한 자연 대류 유동이 형성되고, 이로 인하여 반구 상부에 용융물에 의한 열적 부하가 집중된다는 사실을 알 수 있었다.

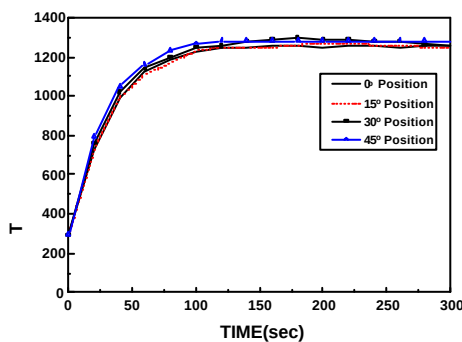


M

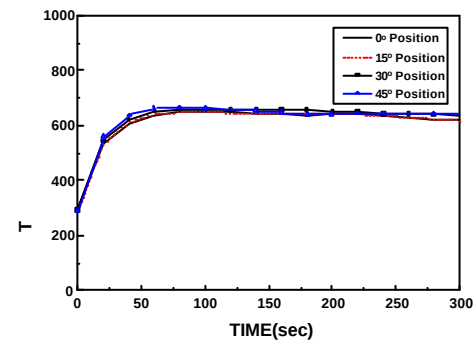
N

그림 11. FLUENT 코드 해석 결과 : 60초 시점의 온도 분포와 유동의 모습

Wet Case 실험에 대한 해석에서는 용융물의 초기 온도를 비교적 Dry Case 실험과 유사하게 모의하였던 3400K로 설정하였다. 그리고, 반구 외벽에서 냉각수의 강제 유동에 의한 열 전달 계수는 Bromely의 상관식을 이용하여 계산한 그림 8 에서 100 초에서 200 초 구간의 평균값인 $1500 \text{ W/m}^2\text{K}$ 와 T1, T2 지점에서 측정한 열 전달 계수의 평균값인 $7500 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 사용하여 계산 결과를 비교하였다. 그림 12 는 Wet Case 실험에 대하여 위의 두 가지 열 전달 계수를 사용하여 계산한 FLUENT 코드 해석 결과를 시간에 따른 반구 외벽 온도의 변화로 보여준다.



(a) $h = 1500 \text{ W/m}^2\text{K}$



(b) $h = 7500 \text{ W/m}^2\text{K}$

그림 12. Wet Case 실험의 FLUENT 코드 해석 결과 : 위치별 반구 외벽 온도 거동

그림 12 의 반구 외벽 온도 변화를 보면, 외벽에서의 열 전달 계수에 상관없이 45° 동심원 위치에서 온도가 가장 높게 계산되었다는 것을 알 수 있다. 그러나, Wet Case 실험

에서 측정된 결과와는 달리 위도에 따른 반구 외벽의 온도 차이가 크지 않다는 것을 볼 수 있다. 실험에서는 반구 하단부에서 냉각수가 공급됨에 따라 반구 하부에서의 열 제거 효과가 크고, 상부로 이동할수록 열 제거 능력이 감소하는 등 반구 외벽의 열 전달 조건이 위치별로 달라질 수 있는데, FLUENT 코드 계산에서는 위도에 관계없이 동일한 열 전달 경계 조건을 부여하였기 때문에 외벽 온도 거동의 차이가 발생한 것으로 생각된다.

이와 같은 한계가 존재하므로 직접적인 적용에는 무리가 있지만, 실험 측정값과 코드 계산 결과에서 반구의 초기 온도 상승과 최고 온도 값을 비교하면, Wet Case 실험에서 반구 외벽에서의 열 전달 계수는 $1500\text{ W/m}^2\text{K}$ 과 $7500\text{ W/m}^2\text{K}$ 사이의 값을 가졌다는 것을 추측할 수 있다. 결국, Wet Case 실험 결과와 FLUENT 코드 계산 결과를 종합해보면, Wet Case 실험과 같이 반구 외벽에서 냉각수를 강제 주입하면 냉각수의 핵 비등 열 전달에 의해 반구의 파손이 발생하지 않고, 효과적으로 냉각이 이루어질 수 있다는 사실을 알 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구 계획

원자로 용기 하부 반구를 1/8로 선형 축소한 반구형 반응 용기 내부에서 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ Thermite 용융물을 이용하여 반구 외벽에 열 제거 조건이 없는 경우(Dry Case 실험)와 1.68 m/s의 유속으로 냉각수를 강제 주입한 경우(Wet Case 실험)에 대한 반구의 파손 가능성과 열적 거동을 비교하였다. 실험 결과, Dry Case 실험의 경우는 28초 후에 반구가 파손되었으나, Wet Case 실험에서는 반구 외벽에서 냉각수에 의한 핵 비등 열 전달 현상에 의해 충분한 열 제거가 이루어져서 반구가 파손되지 않았다. Dry Case 실험에서 반구가 파손된 위치는 30° 동심원 지점으로 용융물 풀 내부의 자연 대류 유동의 형성과 Al_2O_3 용융물과 Fe 용융물의 성분 분리가 이루어지면서 열점(Hot Spot)이 형성된 것으로 생각된다. 반면, Wet Case 실험에서는 냉각수에 의해 반구 외벽에서 약 $7500\text{ W/m}^2\text{K}$ 의 열 전달 계수가 측정되어 활발한 비등 열 전달에 의해 냉각이 이루어졌다. 실험과 더불어 용융물 풀의 유동장 형성과 이에 따른 반구의 열적 거동을 분석하고, 반구 외벽에서 냉각수가 주입되는 경우의 열 전달 기구를 알아보기 위하여 FLUENT 코드 계산을 수행하였다. FLUENT 코드 계산 결과를 보면, 용융물 풀 내부에서 자연 대류 유동장이 형성되어 반구 상부에 열적 부하가 집중되지만, Wet Case 실험과 같이 외벽에 냉각수를 주입하면 냉각수에 의한 핵 비등 열전달에 의해 충분한 열 제거가 이루어질 수 있다는 가능성을 알 수 있었다. Wet Case 실험에서 측정된 반구 외벽 온도 변화를 보면, 냉각수의 강제 주입이 종결된 시점부터 반구 외벽의 온도가 다시 상승하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 냉각수 강제 유동이 반구의 열적 거동에 미치는 영향을 자세히 분석하기 위하여 강제 유동 효과를 제거한 풀 비등 실험을 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구 개발 과제의 일환으로 수행하였습니다.

참고 문헌

1. 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.

2. K. H. Kang, et al., "Experimental Investigation on In-vessel Debris Coolability through Inherent Cooling Mechanisms", OECD/CSNI Workshop on In-Vessel Core Debris Retention and Coolability, Garching, Germany, March 3-6, 1998.
3. O. Kymäläinen, et al., "In-vessel retention of corium at the Loviisa plant", Nuclear Engineering and Design 169 (1997), p. 109-130.
4. T. Y. Chu, et al., "Ex-vessel boiling experiments - Part II: Reactor-scale boiling experiments of the flooded cavity concept for in-vessel core retention", Nuclear Engineering and Design 169 (1997), p. 89-99.
5. I. S. Hwang, et al., "The COASISO Design(II) : Proof-of-principle Demonstration", The 14th KAIF/KNS Annual Conference, Seoul, Korea, April 7-9, 1999.
6. V. K. Dhir and G. P. Purohit, "Subcooled Film-boiling Heat Transfer from Spheres", Nuclear Engineering and Design 47 (1978) 49 - 66.
7. 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.