

원자로내 용융물 재배치시 용기 하부의 온도 거동

강경호, 김종환, 김상백, 김희동

한국원자력연구소

김현섭, 허훈

한국과학기술원

요 약

중대사고시 노심의 손상에 의한 노심용융물이 원자로 용기 하부 반구로 재배치될 때 고온의 노심용융물에 의한 열적 부하로 원자로 용기의 파손을 일으키게 된다. 원자로 용기 하부 반구 내에서의 노심용융물의 열적 거동 및 하부 반구에 대한 열적 부하에 대한 분석은 용융물의 성분 및 재배치 과정의 복잡성 등으로 인한 실험적 모사의 한계성 및 현상 분석의 난이함에도 불구하고 기존 원자로의 중대사고에 대한 안전 여유도의 제고와 이에 따른 노내외 사고 관리 전략의 수립을 위하여 연구의 필요성이 제기된다. 본 연구에서는 노심용융물 냉각 연구(SONATA-IV)의 예비 실험으로 노심용융물의 상사물로 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물을 이용하여 실제 원자로 용기 하부 반구를 1/8 로 선형 축소한 반구형 실험 용기로 주입하는 실험을 수행하였다. 아울러 원자로 용기 하부 반구로 재배치된 노심용융물에 의한 열적, 기계적 부하에 대한 분석을 수행하기 개발된 유한 요소 프로그램인 CALF (Computer Analysis for Lower Head Failure) 코드를 이용한 하부 반구의 열적 거동에 대한 해석 결과를 정리하였다. 용융물 주입 실험 결과 용융물 주입과 동시에 하부 반구에 직경 5 cm 크기의 하부 반구 파손이 발생하였다. 이는 고온 용융물에 의한 제트류(Jet Impingement)의 효과로 생각된다. 동일한 조건에서 CALF 코드로 하부 반구의 열적 거동을 분석하였는데, 실험과는 달리 하부 반구의 파손이 발생하지않았다. 이같은 해석 결과는 용융물의 제트류 효과가 존재하지 않는다면 고온의 용융물이 하부 반구 내로 재배치되더라도 하부 반구의 파손이 발생하지 않는다는 것을 보여준다.

1. 개요

미국의 TMI-2 사고 이래로 원자로 용기 하부 반구내로 재배치된 노심용융물에 의한 원자로 용기의 파손 가능성에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나, 고온의 노심용융물이 냉각수가 존재하는 원자로 용기 하부 반구로 재배치되는 경우 원자로 용기 하부 반구 내에서의 노심용융물의 열적 거동 및 하부 반구에 대한 기계적, 열적 부하에 대한 분석은 현상의 복잡성 및 실험적 모사의 한계성으로 아직 명확히 이루어지고 있지 않은 실정이다. 현상 분석의 난이함에도 불구하고 재배치된 노심용융물에 의한 원자로 용기 하부 반구의 열적 거동에 대한 규명은 기존 원자로의 중대사고에 대한 안전 여유도의 제고와 이에 따른 노내외 사고 관리 전략의 수립을 위하여 연구의 필요성이 제기된다.^[4]

본 연구에서는 노심용융물의 노내 냉각 연구(SONATA-IV)의 예비 실험으로 노심용융물의 상사물로 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물을 이용하여 실제 원자로 용기 하부 반구를 1/8 로 선형 축소한 반구형 실험 용기로 주입하는 실험을 수행하여 얻은 하부 반구의 열적 거동에 대한 실험 결과와 원자로 용기 하부 반구로 재배치된 노심용융물에 의한 열적, 기계적 부하에 대한 분석을 수행하기 위해 개발된 유한 요소 프로그램인 CALF (Computer Analysis for Lower Head Failure) 코드를 이용한 하부 반구의 열적 거동에 대한 해석 결과를 실었다.

고온 용융물에 의한 하부 반구의 열적 거동에 대한 실험에서는 20 kg의 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ Thermite 용융물을 내부 직경 0.5 m, 두께 0.025 m의 Carbon Steel 재질의 반구형 실험 용기에 주입하였다. 실험은 대기중에서 수행하였으며, 반구 내부는 냉각수가 존재하지 않는 건조한 상태였다.

CALF 코드는 노심용융물이 원자로 용기 하부 반구로 재배치되는 경우 원자로 용기 하부 반구의 열적 거동 및 파손 가능성에 대한 분석을 위하여 개발된 유한 요소 프로그램이다. 본 논문에서는 위에서 언급한 Thermite 용융물 하부 반구 주입 실험과 같은 조건에서 CALF를 이용한 해석을 수행하여 실험 결과와 비교하였다.

2. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ Thermite 용융물 주입 실험

실험 내용 및 방법

20 kg의 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ Thermite 용융물을 직경 0.5 m, 두께 0.025 m의 Carbon Steel 재질의 반구형 용기내부로 주입하여 하부 반구의 열적 거동을 알아보는 실험을 수행하였다. 실험에서 사용한 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ Thermite 용융물은 2600 K 이상의 고온 용융물일 뿐더러 반응을 통한 용융물의 생성이 비교적 용이하고 구매 단가가 저렴한 장점으로 인하여 각종 실험에서 노심용융물 모사체로 채택하고 있다. Thermite 반응은 Al과 Fe_2O_3 분말을 섞은 후 Al_2O_3 로 단열된 도가니 내에 장착하고 점화기에 DC 12 V의 전원을 공급하여 점화시켰다. 용융된 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ 용융물은 직경 0.045 m의 용융물 주입관을 통하여 반구 내로 유입된다. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ 용융물은 반응이 끝난 후 수 십초 내에 밀도차이에 의하여 Fe 용융물과 Al_2O_3 용융물로 분리되며, 따라서 반구 내에 쌓이는 용융물은 하단부의 Fe 용융물과 상단부의 Al_2O_3 용융물로 분리되어 쌓일 것으로 생각된다. 반구 외부 표면 및 내부 중간 부분에는 위도별로 총 11개의 k-type 열전대를 장착하여 반응 중의 하부 반구의 온도 변화를 측정하였다. 아래 그림 1, 2는 하부 반구 내에 설치한 열전대의 위치도와 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다.

실험 결과

5 kg의 Al 분말과 15 kg의 Fe_2O_3 분말을 혼합하여 DC 12 V의 전원을 공급한 결과 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ Thermite 용융물이 성공적으로 생성되었다. 하부 반구로의 용융물 주입은 전원 공급 후 수십 초 이내에 이루어졌다. 하부 반구에 장착한 열전대를 통한 온도 측정은 용융물 주입 전까지는 이루어졌으나 용융물이 하부 반구와 접촉하자마자 반구가 파손되어 용융물이 반구 아랫 부분으로 분출되면서 열전대를 손상시켜서 접촉 순간부터의 온도는 측정하지 못하였다. 저장된 온도 데이터를 분석한 결과 하부 반구의 파손은 용융물이 접촉하자마자 순간적으로 이루어진 것으로 판단되며, 실험 후 반구를 관찰한 결과 하부 반구 중앙 부분에 용융물 주입관 두께가 거의 같은 직경 5 cm의 구멍이 생성되어 있었다. 아래 그림 3은 용융물 주입 전, 후의 하부 반구의 모습을 나타낸 것이다. 이같은 하부 반구의 파손은 2600 K의 고온용융물의 제트류(Jet Impingement)가 낙하 속도 5.28 m/s로 하부 반구에 가한 열적 충격 때문으로 생각된다. 제트류에 의한 하부 판 및 반구의 파손을 결정하는 요인은 제트류의 온도 및 속도, 용융물 풀의 깊이, 그리고 제트류의 성분 등을 들 수 있다. 특히, 용융물이 하부 반구에 주입되어 하부 반구를 충분히 가열시키기 전에 발생하는 제트류에 의한 초기 하부 반구의 파손은 CORVIS 실험에서 보여주듯이 용융물의 성분에 의해 좌우된다.^[2] CORVIS 실험뿐만 아니라 제트류에 의한 하부 용기의 파손 현상을 실험한 Power 나 EROS 실험 결과에서도 Al_2O_3 용융물의 제트류에 의한 용기의 침식 및 파손은 거의 발생하지 않았으나 Fe 용융물의 제트류에 의해서는 하부 용기의 심각한 침식 및 파손이 발생하였다.^[1] 이러한 현상은 Al_2O_3 용융물의 고화점이 2300 K로 상대적으로 높아서 차가운 하부 용기와 접촉하자마자 용기와 용융물 사이에 피막층이 생성되어 용기의 침식 및 파손을 방지한 것으로 생각된다. 그러나, 본 용융물의 하부 반구로의 재배치 실험은 고온의 용융물이 하부 반구 내에 온전히 재배치된 후에 용융물의 열적 부하에 의한 하부 반구의 파손 가능성 및 열적 거동을 분석하는 것을 목적으로 한 것이므로 추후의 실험은 용융물의 제트류에 의한 하부 반구의 초기 파손을 방지하여 실험을 수행할 것이다.

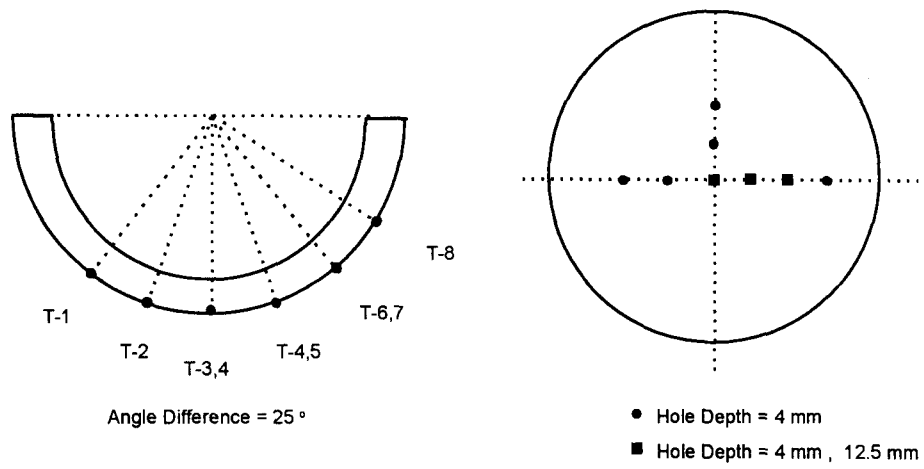


그림 1. 하부 반구 열전대 위치도

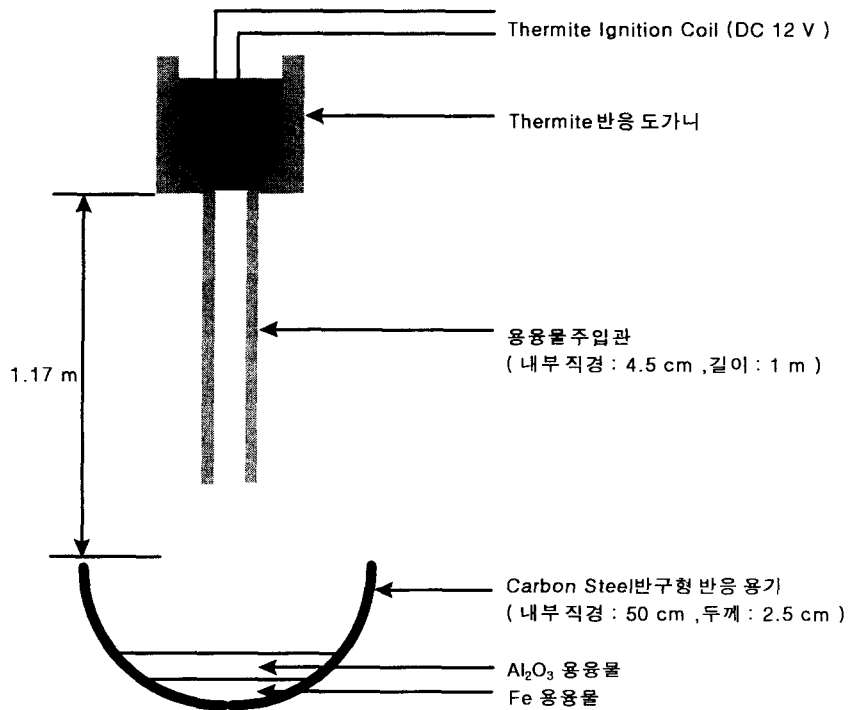
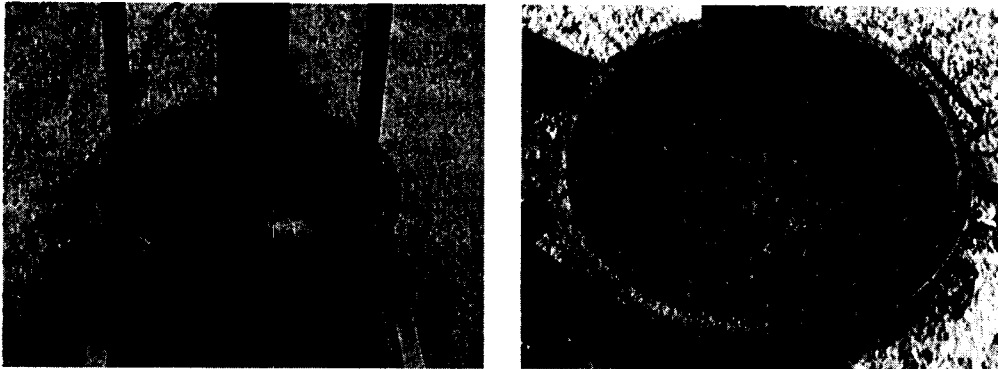


그림 2. Al₂O₃/Fe Thermite 용융물 하부 반구 주입 실험 개략도



(a) 용융물 주입 전 하부 반구

(b) 용융물 주입 후 하부 반구

그림 3. 용융물 주입 전 후의 하부 반구 모습

3. CALF(Computer Analysis for Lower Head Failure) 코드 해석

CALF 코드는 원자로 용기 하부 반구로 재배치된 노심용융물에 의한 하부 반구에 대한 열적, 기계적 부하를 분석하기 위하여 개발된 유한 요소 프로그램이다. 본 논문에서는 위에서 기술한 용융물의 하부 반구로의 재배치 실험과 같은 조건에서 CALF 코드를 이용하여 수행한 해석 결과를 기술하였다.

하부 반구의 열적 거동 분석의 초기 조건은 위의 실험 조건과 동일하다. 용융물의 초기 온도는 2500 K 로 가정하였으며, 20 kg 의 Al_2O_3/Fe 용융물이 하부 반구 내로 재배치된 후 밀도차에 의해 분리된 상태를 초기 조건으로 설정하였다. 하부 반구 외부 및 용융물의 상부는 실험에서와 같이 온도 298 K 의 대기 중에 노출되어 있다. 용융물 및 하부 반구의 Node 개수는 519 개이며, Element 개수는 총 463 개로 설정하였다. 그림 4 는 해석에 사용된 Mesh 의 모습과 초기 해석 조건을 나타낸 것이다. Al_2O_3/Fe 용융물의 열에너지는 하부 반구로의 전도 및 상부 대기중으로의 대류 및 복사로 전달되며, 하부 반구는 반구 외부의 대기로 복사 및 대류에 의해 열을 전달 시킨다. 해석 결과 용융물 재배치 후 약 30 분 경에 하부 반구 외부 표면 온도가 최고점에 도달하였다. 그러나, 이 시점의 외부 표면 온도는 약 1700 K 로 하부 반구 재료의 용융점인 1800 K 에는 미치지 못하는 것으로 나타났다. 따라서, 실험에서와 같이 용융물의 제트류 효과가 존재하지 않는다면 하부 반구의 파손이 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 아래 그림 5 는 경도 0° 지점과 경도 30° 지점의 하부 반구 외부 표면의 온도를 나타낸 것이다. 그림 6 은 하부 반구 외부 표면 온도가 최고점에 달하는 순간의 반구 및 용융물의 온도 분포도를 나타낸 것이다.

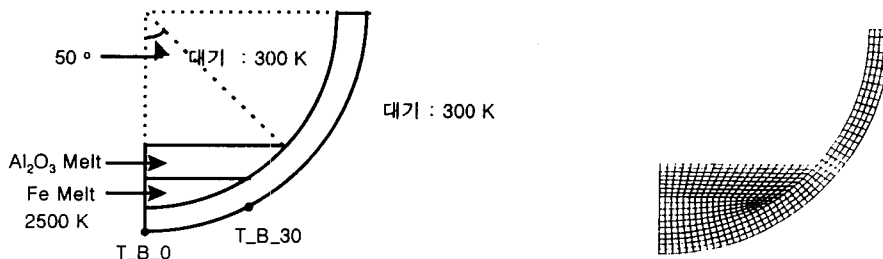


그림 4. Mesh 모습 및 초기 해석 조건

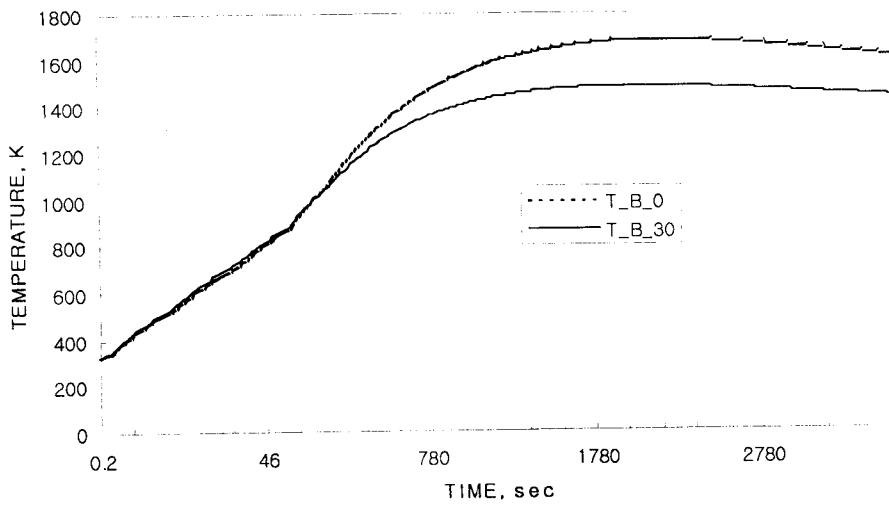


그림 5. 하부 반구 온도 변화

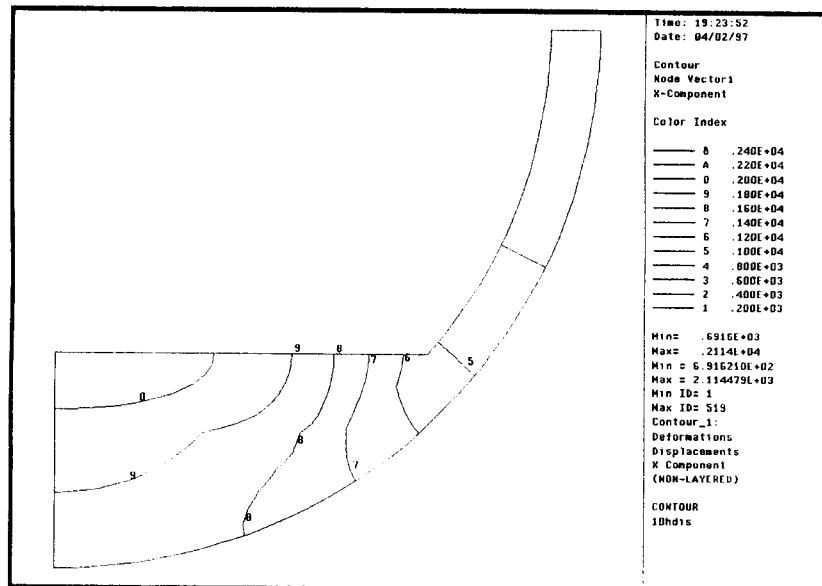


그림 6. 용융물 및 하부 반구 온도 분포도 (재배치 후 30 분 경과)

4. 결론

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ Thermite 용융물을 이용하여 실제 원자로 용기 하부 반구를 1/8 로 선형 축소한 반구형 실험 용기로 주입하여 용융물에 의한 하부 반구의 열적 거동을 알아보는 실험을 수행하였다. 실험 결과 용융물 주입과 동시에 하부 반구에 직경 5 cm 크기의 하부 반구 파손이 발생하였다. 이는 고온 용융물에 의한 제트류(Jet Impingement)의 효과로 생각된다. 동일한 조건에서 CALF 코드로 하부 반구의 열적 거동을 분석하였는데, 실험과는 달리 하부 반구의 파손이 발생하지 않았다. 이같은 해석 결과는 용융물의 제트류 효과가 존재하지 않는다면 고온의 용융물이 하부 반구 내로 재배치되더라도 하부 반구의 파손이 발생하지 않는다는 것을 보여준다. 추후의 실험에서는 용융물의 제트류 형성을 억제하여 용융물이 하부 반구 내로 안착된 후 용융물에 의한 하부 반구의 열적 거동을 분석하여 CALF 코드 해석 결과와 비교할 것이다. 또한, 하부 반구 내에 냉각수가 존재하는 경우에 대한 실험과 해석을 수행하여 냉각수의 존재 여부가 용융물의 냉각 및 하부 반구의 열적 거동에 미치는 영향을 분석할 예정이다.

참고 문헌

1. D.A. Powers, " Erosion of Steel Structures by High Temperature Melts ", Nucl. Sci. Eng. 88, 357-366, 1984.
2. H.Hirschmann, " CORVIS-Report No.7 : State of Progress, December 1996 ", Feb. 1997.
3. R.J. Witt, " Local Creep Rupture Failure Modes on a Corium-loaded Lower Head ", Nuclear Engineering Design 148, 385-411, 1994
4. L.A.Stickler, J.L.Rempe, " Calculations to Estimate the Margin to Failure in the TMI-2 Vessel ", NUREG/CR-6196, 1994