’99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

MELCOR 코드를 이용한 LAVA-3 실험 해석

Analysis of LAVA-3 Experiment Using MELCOR code

박종화, 조성원, 김동하, 김상백, 김희동
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 305-303

요 약

이 연구에서는 MELCOR1.8.4 코드 COR 모듈내 하부반구 모의용 모델을 이용하여 한국원자력연구소에서 수행한 하부반구내 용융물 냉각실험인 LAVA-3 실험의 해석 결과를 제시하였다. 해석 목적은 실험 측정자료들을 검증하고, 유사실험 해석시 필요한 부가적인 측정변수를 규명하는 것이다. 또한 MELCOR 코드 모델의 적용성을 평가하고, 유사 하반구 실험을 용이하게 해석할 수 있는 해석체계를 구성하는 것이다. LAVA-3 해석결과, 하부용기 외벽온도가 잘 예측되었으나 모델의 제한점으로인해 debris 의 냉각율을 과대평가하였다. 또한 용융물 재배치 직후, 하반구 벽면의 온도가 용융온도에 도달되지 않도록, 하반구 벽면 보호를 위한 새로운 전략으로, 하반구 외벽에 여러 구조물의 부착을 제안하였다. 추후 측정되야 할 부가적인 변수들로 수증기 발생율, 하부용기 외벽과 접해있는 cavity 대기온도, 실험용기 외벽면 온도 그리고 축방향 debris 온도(최소 2 개)가 제안되었다. 민감도 분석결과, 파쇄입자 크기, 용융물에서 하반구 벽으로의 열전달 계수 그리고 파쇄입자의 재배치 시간 상수값이 하부반구내 debris 의 냉각에 영향을 미치는 주요 인자들로 규명되었다.

Abstract

This study analyzes the LAVA-3 experiment using the lower plenum model of COR module in MELCOR1.8.4 code, in order to investigate the corium coolability in the lower vessel head. The objectives of this analysis are to validate the measured data and to identify the new parameters to be measured in the subsequent experiments. Also to evaluate the applicability of the MELCOR code and to construct an effective system for analyzing the experiment are the additional objectives. From this simulation, the temperature of the outer surface of the wall shows a good agreement with the experiment but the cooling rate of the debris is over-estimated due to the model limitations. The attachment of several structures to the outer surface of the wall is recommended as a new strategy to protect the lower vessel head wall from being over-heated immediately after the relocation of molten materials and reaching at its melting point. The additional new parameters to be measured are recommended such as steam generation rate, atmosphere temperature in the cavity, the outer surface temperature of the test vessel and at least two measured points in the debris. According to the sensitivity study, the size of particles, heat transfer coefficient between debris and wall, and the relocation time constant of solid debris are identified as the main parameters that can have much effect on the coolability of debris in the lower vessel head.

I. 서 론

중대사고시 고온의 debris 를 담고있는 원자로 하부용기의 거동에 관한 연구는 격납용기내 현상연구를 위한 초기조건과 노내에서 debris 를 냉각시켜 사고를 조기에 종결할 수 있는 사고관리방법을 개발할 수 있는 정보들을 제공할 수 있기 때문에 중요성이 크게 인지되어왔다. 특히 TMI-2 사고시 총 20 ton 의 노심용융물이 하부용기로 재배치되어, 약 1373 K 의 국부적인 고온 영역들이 약 30 분간 지속된후 냉각되었던점을 상기할때 노내 노심용융물 냉각가능성에대한 현상규명의 필요성이 요구되었다.

이같은 노심용융물의 냉각 근거로는, 용융물과 냉각수 반응시 형성된 debris 로부터의 열전달, 또는 하부 반구용기로 재배치된 용융 debris 외곽에 형성된 피막층과 원자로하부용기 벽면 사이에, 벽면의 온도증가와 고압 부하로 용기벽면이 국부적으로 팽창되어 생성된, 확대된 간극으로 연속적으로 냉각수가 유입 및 비등, 유출되어 하부용기벽면과 debris 를 냉각시킬 수 있다[1]. 이같은 debris 냉각현상을 모의, 평가하기 위해 한국 원자력연구소에서는 SONATA-IV 실험[2]의 일환으로 Lava 실험을 수행하고있다[3]. LAVA-3 실험은 용융물의 냉각현상 이해와 초기간극의 형성유무 및 간극의 크기를 측정하기위한 실험으로, 그림 1 에서 보듯이 하부용기내 냉각수를 채운상태에서 상부쪽에서 용융된 thermite 중 Al_2O_3 를 냉각수로 주입시켜 냉각과정을 연구하는 실험이다.

이같은 냉각현상에 관한 연구 추진은 먼저 가용한 해석 tool 을 이용하여 실험을 모의후, 측정치와 비교, 분석을하여, 실험에서 진행된 냉각과정에 대한 충분한 이해를 얻고, 각냉각과정관련 주요 변수들 및 개발이 필요한 현상들을 규명하여, 보완하는 것이다. 이 연구에서 가용한 tool 은 임의의 계통을 모의할 수 있고, 또한 제어함수를 이용하여 다양한 실험 조건들을 모의할 수 있는 능력을가진 MELCOR 코드로 정하였다.

II 본 론

첫째 MELCOR 코드의, COR 모듈내 하부반구모델을 이용하여 LAVA-3 실험을 가능한 실제와 가깝도록 입력을 구성하여 측정치와 비교, 분석을 하였다. 두번째는 주요입력값에

따른 효과 평가와 debris 냉각관련 주요변수를 규명하기위해 민감도분석을 하였다. 마지막으로 세번째는 추후 유사실험의 입력작성이나 결과해석시 추가적으로 필요한 측정변수들을 제안하였다. LAVA-3 실험에서 측정 자료들은 실험 용기내 대기 온도 및 압력 변화, 재배치 이후 하반구내 냉각수 온도및 debris 온도 그리고 하부 용기 외벽면 위치별 온도값등 이다.

II.1 입력구성

입력 구성시 MELCOR 코드중 하부 용기 부분만을 독립적으로 사용하는 것은 가능하기 않기 때문에 최소한의 계통들을 연결하여, 하부 용기 부분만을 모의하는 효과를 나타낼 수 있도록 LAVA-3 실험시설을 모델하였다[4]. 하부 반구용기와 용기내 debris 의 거동을 모의하기 위해 source volume (질소가스 주입), downcommer volume (유로연결), 하부용기를 담고있는 하부반구용기 volume, 노심 volume (용융로), 상부공간 volume(실험용기), 방출 volume(건물) 그리고 한개의 전열기와 두개의 밸브를 고려하였고, 그림 2 에 각 제어체적들을 표시하였다.

하부 반구내 냉각수 온도는 실험조건을 만족하도록 가열기를 이용하여 초기 320K 로부터 14 Watt 로 서서히 가열하여 냉각수의 온도가 433K 로 일정하게 유지되도록 하였다. 또한 용융물이 하부반구로 주입되기 전 밸브를 작동하여 실험용기내 압력을 16.5 기압으로 일정하게 유지하였다. Thermite 용융 도가니의 모의는 가상의 노심(Al_2O_3)에 직접적인 fission 출력을 가해서 모의하였고, 노심(Al_2O_3:총량 30Kg)을 동시에 용융시켜 냉각수로 차있는 하부반구쪽으로 재배치되도록 입력을 구성하였다. 노심은 각 ring 마다 핵연료봉 4 개로 구성하였다. 노심의 물성치는 Al_2O_3의 값을 사용하였고, 용융물의 초기 주입온도는 thermite (Fe ,Al_2O_3 혼합물) 용융시 서로 열평형 상태를 고려하여 Al_2O_3 의 용융온도인 2300 K 로 설정하여 하부반구로 재배치(낙하) 시켰다.

용융물이 냉각수로 채워진 하부반구로 재배치될 때 실험 용기내 급격한 압력 증가를 모의하기 위하여 노심용융물이 하부용기로 재배치되는 즉시 downcommer 에서 하부반구로, 그리고 실험용기에서 대기쪽으로 개방되있는 각유로에 설치된 두밸브를 동시에 잠그도록 하였다. 하부반구(반경=0.25m)는 반경방향으로 각 링(Ring) 내 면적이 같도록 4 개의 링으로 구분하였고, 하부용기 바닥면은 하부 반구 면적과 같은 판 (slab)으로 모의하였다.

II.2 모델평가를위한 민감도분석

LAVA-3 실험 모의시 정확한 값을 정의할 수 없는 입력변수들의 값에 따른 효과를 평가하고, debris 냉각에 중요한 영향을 미치는 변수들을 규명하기위해 10 개 변수를 선정하여, 손계산과 함께 반복적으로 계산을 수행, 분석하였다.

첫번째 변수는 재배치직전의 “용융물온도값”으로 이에 관한 측정이 없었다. 그러나 thermite 중 Al_2O_3 의 용융온도(2300K)와 실험후 조사로부터 하부에 다공성이 매우적은 용융

응고물이 축적되있는 debris 형태을 고려할 때, 재배치 직전의 용융물온도는 최소한 2300K 이상이었을 것으로 추정된다. 그림 3 은 용융온도변화에 따른 debris 온도 변화를 보여준다. 두번째는 하부반구로 낙하하는 용융물이 냉각수표면에 도달해서부터 냉각수내에서 하부반구바닥(안쪽벽)에 닿을때까지 냉각수로의 급격한 열전달을 사용자가 정의한 "급냉열전달계수값"을 적용하여 모의한다. 이때 사용자는 이같은 짧은기간동안 debris 의 급냉을 고려할 수 도있고, 무시할 수 도있다. 이같이 용융물이 냉각수와 접촉, 급격한 반응후 안정된 파쇄층을 형성하기 까지의 복잡한 열전달과정[5]을 종합적으로 고려해서, 평균적인 열손실양을 계산하기위한 급냉 열전달계수값을 정량적으로 구할 수 는 없으며, 단지 가정할 수 밖에 없다고 판단된다.

이같은 문제점은 용융물이 냉각수와 급격한 반응을하여 안정된 파쇄층을 형성하기 까지에 관해 좀더 자세한 모델을 개발하여 첨가함으로서 개선할 수 있을 것이다. 그림 4 는 급냉 열전달계수에 관한 분석으로, 급냉 열전달계수값이 1000 W/(m^2.K) 그리고 급냉을 고려하지 않는 경우 각각의 벽면온도를 보여준다. 급냉열전달현상을 고려한 경우 하부벽면의 최대온도가 낮게 예측되었고, 이후 언급할 고체 debris 의 재배치 시간상수값의 크기에 따라서 debris 초반온도 변화에 영향을 주었다.

세번째 변수인 용융물의 유도관 하단부에서 냉각수로의 "낙하속도"는 손계산에 의하면 약 1.5 m/s 로 예측된다. 그러나 냉각수내에서는 급격한 기포발생과 부력으로 낙하속도가 느려질것으로 예상된다. 그림 5 는 낙하속도가 각각 1.5 m/s 와 0.2 m/s 일 경우를 보여준다. 네번째는 냉각수와 반응한 용융물이 즉시 일정 직경을 가진 파쇄입자로 전이될때, 하부반구 반경방향으로 파쇄층의 높이가 균일하도록 조절하기위해, 파쇄층이 높은 ring 에서 낮은 ring 으로 고체파쇄입자가 이동하는 속도를 조절하는 "재배치 시간상수값"이다. 이 시간상수값은 사용자가 입력하며, 급냉현상을 고려할때만 그효과가 있다. 이 시간상수값을 크게 하면 급냉과정이 오래지속되며, 이시간상수값을 작게한 경우는 신속히 급냉과정에서부터 안정된 파쇄층에서의 열전달 과정으로 이동하게된다. 그림 6 은 고체 debris 재배치 시간상수값의 영향평가를, 급냉열전달계수값을 1000 으로 고정한 상태에서, 1, 60, 300sec 로 각각 지정, 비교하였다. 재배치시간 상수값을 작게입력한 경우 급냉되지않은 debris 가 급격히 퍼짐으로 하부벽면의 온도가 좀더 상승하게된다. 그러나 재배치시간 상수값을 크게 입력한 경우는 파쇄층의 급냉시간이 길어진다. 이상 언급한 네개변수들은 결과적으로 급냉후 하반구에 재배치된 debris 의 최대온도값에 직접적으로 영향을 주었다.

급냉이후 안정된 파쇄층으로부터 냉각수로의 열전달은 파쇄층의 다공성, 파쇄입자의 직경, 하부반구내 ring 별, 축방향별 유로면적 그리고 파쇄층내 dry-out 열속계산시 사용되는 최소다공성 크기에의해서 영향을 받을 것으로 판단된다. 특히 다섯번째 "파쇄층의 다공성"변수는 사용자가 입력시 지정하는데, 만일 바닥면에 응고된 용융물이 쌓여있는 경우, 다공성값을 작게 입력하여, 냉각수와의 열전달양을 제한 할 수 있다. 반면에 이같은 다공성 적은 응고층 상단에 엉성한 파쇄층이 존재할 경우, 상단이 존재하는 cell 에 큰 다공성값을 입력

하여 냉각수로의 열전달 양을 가속시켜 복잡한 debris 를 모의할 수 있다. LAVA-3 실험 경우 debris 의 하단 부분은 다공성이적은 응고층이고 상단 일부는 엉성한 파쇄층을 형성하였다. 이때 각층의 다공성을 측정한 자료는 없으며, 현실적으로 평균적인 다공성값을 결정하기는 어렵다. 따라서 이값을 변화해가면서 실험측정치를 가장 잘예측하는 값을 구하였다. 그림 7 은 다공성값에 따른 debris 온도를 보여준다. 또한 여섯번째 변수인 “파쇄입자의 직경”은 대류열전달 계산시 열전달 면적을 계산하는데 사용된다. 그러나 위에서 언급한 바와 같이 LAVA-3 실험경우, debris 하단부는 파쇄층이 아니라 응고된층이었다. 그림 8 은 이를 모의하기위해 가상적으로 매우큰 파쇄입자를 가정하여, 크기에따른 debris 온도효과를 보여준다. 일곱번째 변수인 “하부반구내 유로단면적”은 해당 유로를 통해 재배치되어 유입되는 고체파쇄층양을 결정한다. 따라서 이 유로면적이 클경우,해당 유로에 많은 debris 가 존재하는 것이다. 그림 9 는 해당 유로와 접하고있는 하부반구의 온도값에대한 영향을 보여준다. 여덟번째인 그림 10 은 파쇄층내 dryout 열속 계산시 사용되는 허용가능한 “최소 다공성 크기값”에 따른 파쇄층으로부터 냉각수로의 열전달양에 영향을 보여준다.

아홉번째 변수인 하부반구에 재배치된 파쇄층으로부터 하부 용기벽면으로의 “열전달계수값”은 파쇄층과 하부 용기내 벽면간 온도 차이를 이용 debris 로 부터 하부벽면으로의 열전달을, 모의한다. 이열전달계수값의 결정은, 먼저 debris 층과 하부벽면이 서로 밀착되어 간극이 없다고 가정하면, 경계면에서 하부용기벽면으로의 열전달 계수값은 아래의 식에 따라서 약 1330 W/(㎡.K) 으로 계산된다[6].

$$h_{con} = \frac{1}{\left(\dfrac{\Delta Z_1}{K_1} + \dfrac{\Delta Z_2}{K_2}\right)}$$

단 1 : Al_2O_3 2 : Carbon steel K: 열전도도
ΔZ_1 : debris 최하단 cell 101 의 축높이의 반
ΔZ_2 : 하부용기벽면 안쪽 node 두께의 반

그러나 debris 와 벽면이 접촉되지 않은 경우 (실험의 경우 약 1mm 의 간극이 관찰됨), 이 간극 내부가 수증기로 차있다고 가정할 때(수증기를 통한 열전도도=39 W/(㎡.K))[7], debris 로부터 하부반구내벽으로의 열전달이 방해될 것을 고려하여, 완전접촉된 경우의 열전달계수값보다 적은 700 W/(m^2.K)의 열전달 계수를 사용하여 비교 하였다. 최근 이같은 간극효과에 대한 새로운 가정사항으로, 간극내 냉각수 유입과 비등에의해, debris 와 하부용기벽의 열이 일부 제거될 수 있다. 그러나 MELCOR 코드의 모델에는 간극에의한 이같은 열제거방식을 가정한 모델은 없다. 그림 11 은 debris 로부터 하부용기벽으로의 열전달 계수값의크기에 따른 하부용기벽면의 온도와 debris 온도 거동의 영향을 보여준다. 마지막 열번째로 수행한 민감도 분석 변수는 하부용기 외벽면을 통해 cavity 내 대기로 대류열전달되는 양을 제어하는 “대류열전달 계수값”이다. 그러나 그림 12 에서 손계산 결과[8]에 따른 예상값 영역(4~10 W/m^{2}K)에 따른 하부반구벽면 온도의 영향은 무시할만함을 보여준다.

II.3 Base 경우의 실험 해석 결과

MELCOR를 이용하여 LAVA-3 실험의 가용한 측정치인 하부반구로 재배치 직후의 debris의 온도, 하부반구내 냉각수온도, 실험용기내 압력변화 및 대기온도 그리고 하부반구 외벽의 위치별 온도값을 가장 실험치를 잘 예측하는 해석결과와 비교, 분석하였다.

먼저 하부 반구 바닥에 재배치된 debris의 냉각율은, 그림 13 에서 보듯이 측정치(-1.237 ^{o}C/sec)와 비교하여 계산결과(-1.642 ^{o}C/sec)가 약 1.32배 빠르게 예측되었다. 이러한 차이는 실험에서 debris의 온도를 측정하기위한 열전대가 다공성이 매우 작은 영역속에 덮혀있게 되어, 냉각수와의 직접적인 접촉이 가능하지 않았던 반면, 코드에서는 냉각수에 덮인 파쇄층은 냉각수 수위 이하 전영역에서 냉각수와의 열전달이 고려되기 때문으로 분석된다. 또한 debris의 초기 측정온도가 약 1800K 로 용융온도 2300K 와 비교하여 매우낮게 측정되었다.

실험용기내 압력변화 및 온도에 중요한 변수인 외벽을 통한 열 손실양에 관한 측정 자료의 부족으로 제한적인 분석이 수행되었다. 그림 14는 실험 용기내 압력변화를 보여주며, 측정치의 경우 냉각수의 일부만이 용융물과 반응하여 spike 형태를 보였다가 이후 응축에 의해 압력이 급격히 감소된다. 그러나 MELCOR에서는 국부비등 효과는 무시되고, 용융물의 에너지가 하부 반구내 냉각수 전체에 균일하게 전달되어, 냉각수 온도를 포화 온도까지 가열시켜 수증기를 발생시키기 때문에 초반 급격한 수증기발생에의한 spike 현상은 나타나지 않았다. 그림 15의 하부 반구내의 냉각수 온도도 측정치의 경우 국부적 비등이 발생된 용융물 인접영역에서 측정되어 과대평가된 반면 계산치의 경우 용융물이 가진 열에너지가 냉각수 전체에 균일하게 전달되어진 냉각수온도 값이기 때문에 계산치가 크게 과소평가됨을 볼 수 있다.

하부반구 바닥의 외벽면 온도경우 MELCOR 계산결과와 측정치가 잘 일치하였다. 재배치 직후 비교적 저온의 하부용기벽과 직접 접촉하게된 debris는 큰온도차이에 의한 급격한 열전달로, debris의 온도는 빠르게 감소되고, 하부용기벽면의 온도는 가파르게 증가되어, 이후 일시적으로 서로 열적 평형 상태를 유지한다. 이부분은 그림 16에서 급격한 온도 증가후 완만하게 감소되며 온도를 유지하는 부분을 나타낸다. 이후 상부 debris 영역이 하부용기보다 빠르게 냉각되기 때문에, 열흐름이 하부용기 벽면으로부터 debris 쪽으로 역류하게되며, 하부용기 벽면 온도가 뚜렷하게 감소하게 된다.

III 결 론

MELCOR1.8.4 코드의 COR 모듈내 하부반구모의용 모델을 이용하여 LAVA-3 실험을 해석하였다. 가장 중요한 측정변수의 하나인 하부반구 외벽면의 온도는 냉각수로 채워져있는 하부 반구로 고온의 용융물이 재배치되자 약 1223K 까지 순간적으로 가열된다. 이때의 온도 증가율은 debris와 하반구벽면간의 열전달 계수값에 의존하며, 이 계산에서는 용융물과

하부반구가 밀착되었다고 가정하여, 손계산을 통해 구한 1330 W/(㎡ K) 값을 사용한 경우, 결과를 잘 예측하였다. 실제 실험에서 약 1mm 의 간극이 관찰되었으나, 간극이 너무 좁고 균일하지않아, 설혹 간극 효과가 있었다 하더라도, 간극의 영향을 판단하기가 어렵고, 또한 MELCOR 에서는 관련 모델이 개발되어 있지 않아 간극에 대하여는 추가적인 연구가 요구된다. 다만 간극 효과가 클경우에는 간극내 냉각수 비등에 의한 수증기 발생양이 증대될 것을 예상할 때 추후 검증을 위해서는 수증기발생율에 관한 측정자료가 필요하다고 판단된다.

초기 debris 의 최대온도 측정치가 계산치와 비교하여 매우 낮게 예측되었다. 이는 급냉과정동안 과도하게 열이 빠져나갔다는 것을 의미하지만, 고체 debris 재배치 시간상수값을 이용한 민감도 분석결과에서 알 수 있는 바와같이, 만일 측정치에서와 같이 debris 온도가 낮아질때까지 급냉이 오래유지 되었었다면, 초기 최대온도이후 냉각율이 변화되는 영역이 나타나야 되나, 실제 측정치경우 존재하지 않았다. 따라서 측정된 debris 의 최대온도값에 신뢰성은 재검증이 필요하며, 다만 모의결과에 의하면 급냉과정은 매우짧았다고 판단된다.

이같은 하반구 벽면의 급격한 온도 증가와는 반대로 debris 의 온도는 비교적 차가운 하부벽면으로의 급격한 열전달에의해 온도가 신속하게 감소된다. MELCOR 계산 결과 냉각수와 접하고있는 상부 debris 층의 냉각율이 측정치보다 빠르게 예측되었으며, 실제 경우에는 debris 온도를 측정하기위한 열전대 위치(상단)에 냉각수가 침투할 수 없을 정도로 밀도가 높은 용융물 응고층에 의해서 덮혀있었던 반면에, 코드 모델에서는 냉각수 수위 아래에 있는 debris 는 모두 냉각수로 열전달할 수 있는 파쇄입자층으로 간주하는 모델 때문으로 분석된다. LAVA-3 실험과같이 재배치된 용융물이 모두 파쇄층이 아니고 일부는 파쇄층, 나머지는 밀도가 높은 응고된 용융물 debris 일 경우를 모의하기 위해서는 용융물 중 파쇄층으로 전환되어 냉각수와 열전달하는 분율과 냉각수가 침투되지 못해서 오직 열전도만을 고려하는 밀도 높은 응고 영역의 분율을 예측하기 위한 모델이 개발되어야한다. 또한 파쇄층의 입자크기를 예측할 수 있는 모델의 개발은 노내냉각과 관련되어 해결되어야할 중요한 문제이다.

하부반구내 debris 의 온도변화는 축방향에 따라서 매우 다른 경향을 보여주었다. 특히 하부반구 벽면과 바로 인접한 debris 층은 재배치되자마자 저온의 하부벽면으로 급격히 열이 전달되어 매우 신속하게 서로 열적 평형상태를 이루었다. 이후 하부반구벽면의 냉각여부는 상부층 debris 가 얼마나 빠르게 냉각되어 지는가에 따라서 하부반구로부터, 인접 debris 로 열이 전달되는 역류현상이 발생되어, 하반구벽면의 온도가 낮아지기 시작하였다. 따라서 중대사고시 하반구벽면의 안전성확보는 이같은 초기의 급격한 열전달 공격에의한 하반구 벽면의 가능한 최대온도값과, 이후 냉각수와 접해있는 상층 debris 로부터 얼마나 빠르게 내부 debris 층으로 냉각이 전파될 수 있느냐가 관점인 것이다. 이같은 문제의 해결점을위해 하부반구벽면 취약부분에 열용량과 열전도도가 매우큰 물질을 부착시켜서(전도), 고온 debris 에의한 초반열공격을 완화할 수 있는 방법을 연구 제안하며, 이에관한 분석을 추후

수행할 예정이다.

하부반구형태의 실험 모의에 대한 MELCOR 코드의 적용성을 평가한 결과 LAVA-3 실험에서 사용된 용융로, 용융물주입, 전열기 사용, 질소가스주입 및 압력제어들을 모의하는 것이 가능하였고, 또한 MELCOR 코드를 이용한 하반구 실험 해석시 추후 부가적으로 측정되어야할 변수들로는 재배치직전의 용융물온도, 재배치후 하부반구내 높이별 용융물 온도(최소한 2 개), 수증기 발생율, 실험용기 외벽면 온도 그리고 하부 반구 외벽면 대기온도등이 제안되었다. 현재 개발된 입력과 경험을 바탕으로 유사 하반구실험을 용이하게 해석할 수 있는 체계를 구축하였다.

IV 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. Kune Y.Suh, Robert E.Henry," Debris Interactions in Reactor Vessel Lower Plena During A Severe Accident : I. Predictive Model ",Nuclear Engineering and Design, October 1995.
2. H.D.Kim, S.B.Kim,"Overview of severe accident research and SONATA-IV phase-I experiment at KAERI",CSARP, Bethesda MD, May 4-7 1998.
3. 강경호 외," 원자로 중대사고시 자연냉각계통에의한 핵연료 용융물의 냉각에 관한 실험연구", 98' 춘계 기계학회 학술발표대회,1998.
4. "MELCOR Computer Code Manuals : Reference Guide",NUREG/CR-6119, Vol.1 & 2, July 1997.
5. Cho-chone et.al. , " A Code Manual for TEXAS-III ", Univ. Wisconsin Madison, 1986 April.
6. M.M.El-Wakil," Nuclear Heat Transport ", pp114-117,International text book company,1971
7. MAAP 코드내 부프로그램 (STMSIU, STWATF, THCST) 이용 계산
8. 박이동 외," 열전달 ", pp 206-207,보성문화사, 1987.

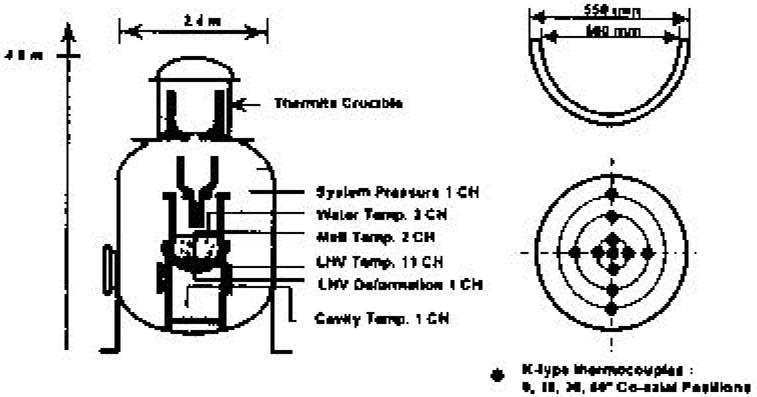
2.4 m
4.8 m
Thermite Crucible
System Pressure 1 CH
Water Temp. 3 CH
Melt Temp. 2 CH
LHV Temp. 11 CH
LHV Deformation 1 CH
Cavity Temp. 1 CH
550 mm
480 mm
K-type thermocouples :
0, 18, 36, 54° Co-axial Positions

그림 1 Lava-3 실험장치 및 열전대위치

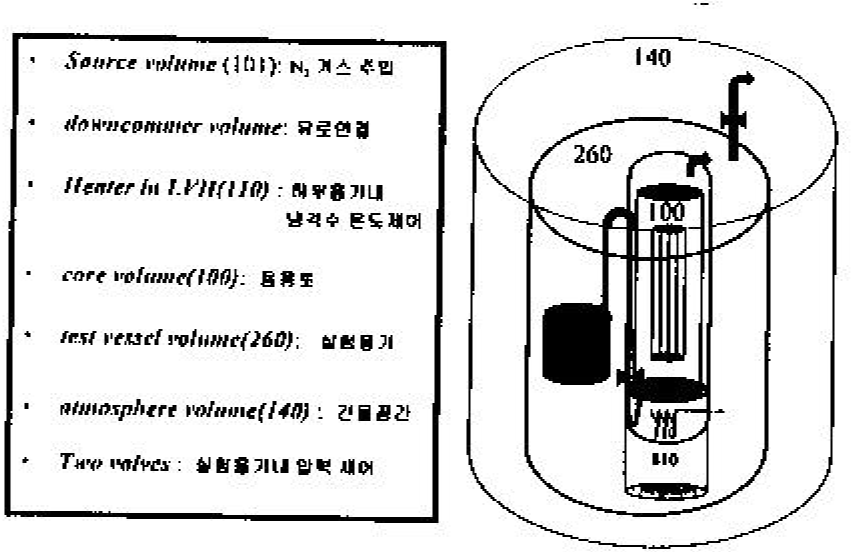
Source volume (101): N₂ 가스 주입
downcomer volume: 유로연결
Heater in LVH(110) : 하부용기내 냉각수 온도제어
core volume(100): 용융로
test vessel volume(260): 실험용기
atmosphere volume(140) : 건물공간
Two valves : 실험용기내 압력 제어
140
260
100
110

그림 2 Lava-3 실험모의를 위한 Melcor 코드 입력 구성도

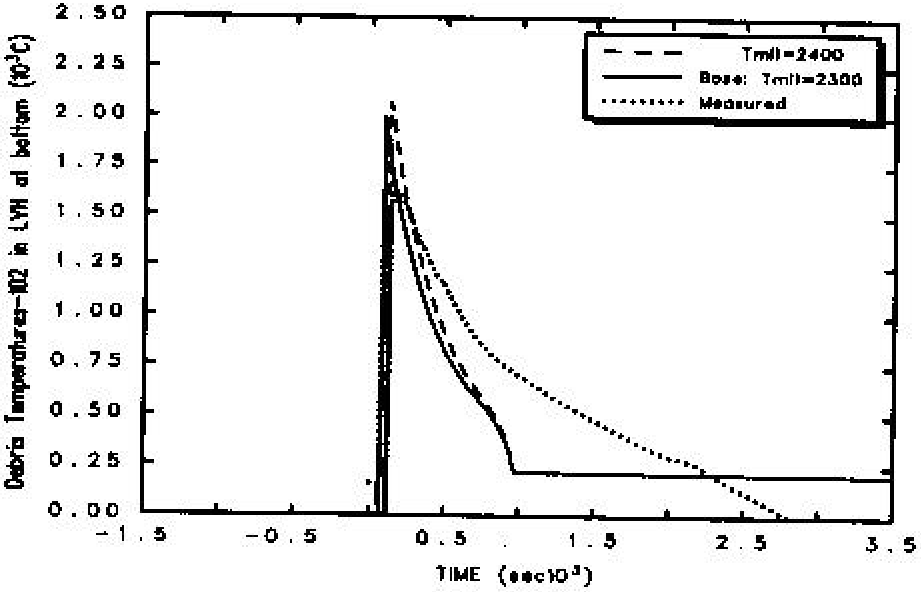

그림 3 초기용융온도값에 따른 debris 온도변화

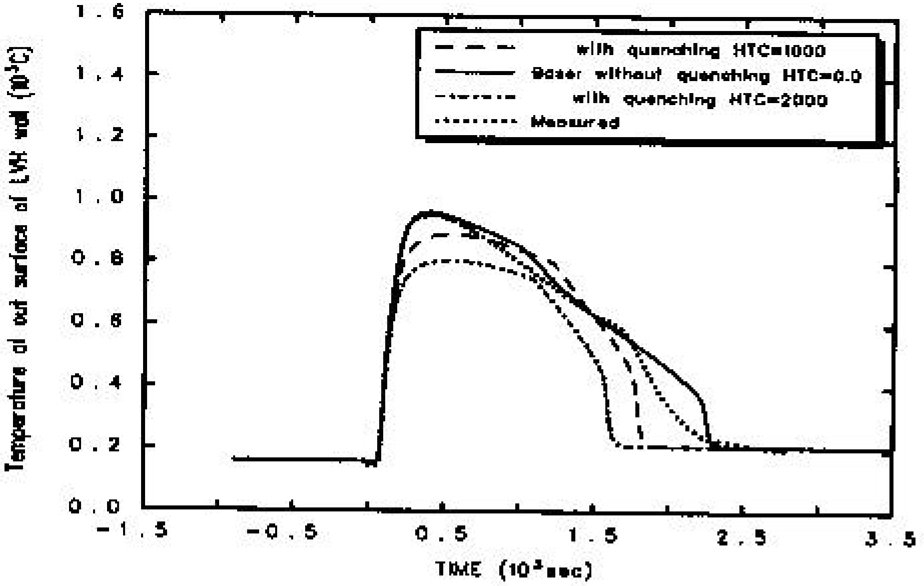

그림 4 급냉여부에 따른 하반구 최저 외벽면 온도변화

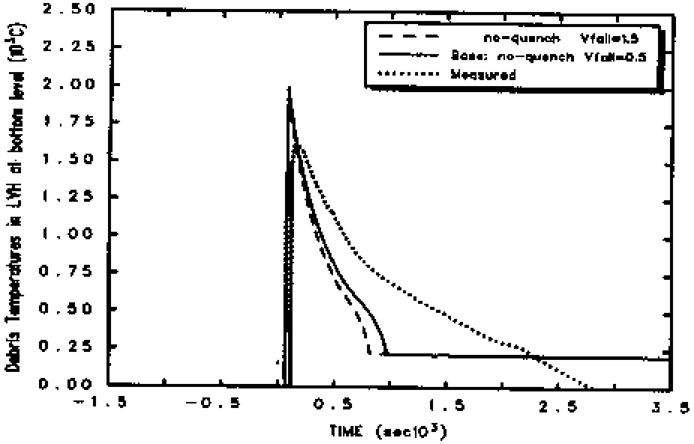

그림 5 낙하속도에 따른 debris 온도변화

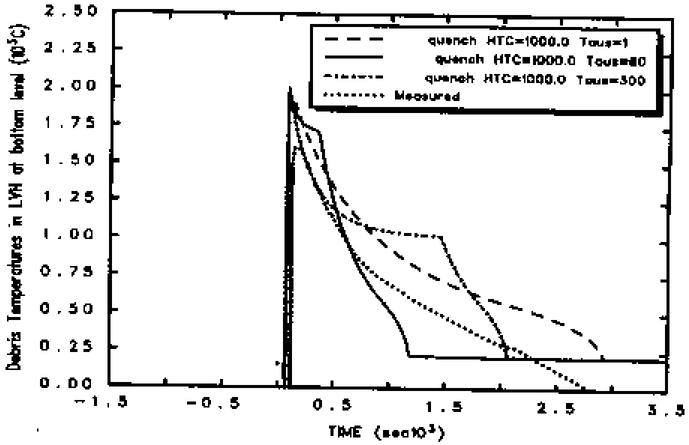

그림 6 고체파쇄입자 재배치 시간상수값에따른 debris 온도변화

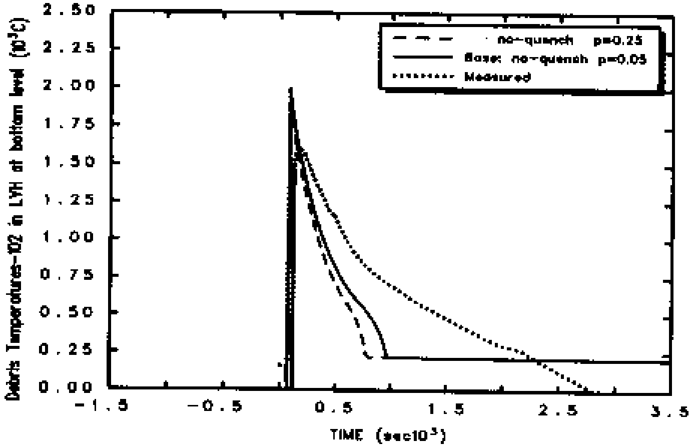

그림 7 Cell 지정 다공성값에 따른 debris 온도변화

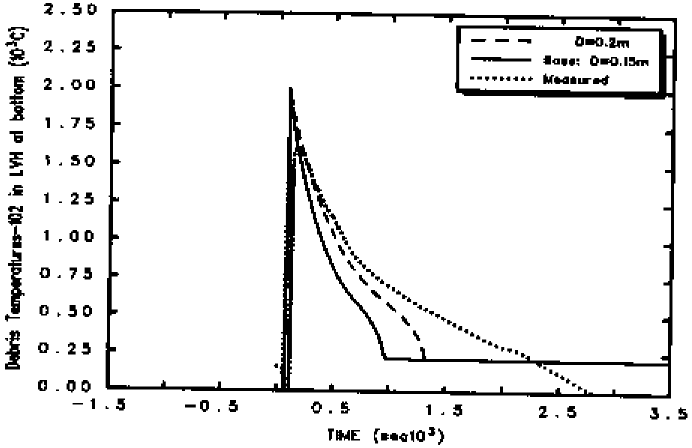

그림 8 파쇄입자 직경크기에 따른 debris 온도변화

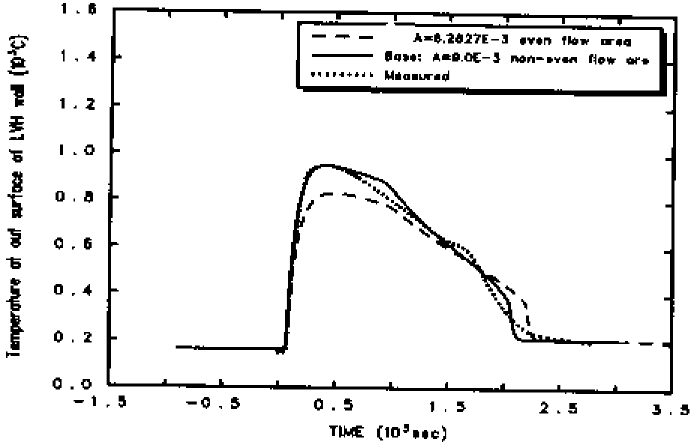

그림 9 유로면적크기에 따른 하반구 최저 외벽면 온도변화

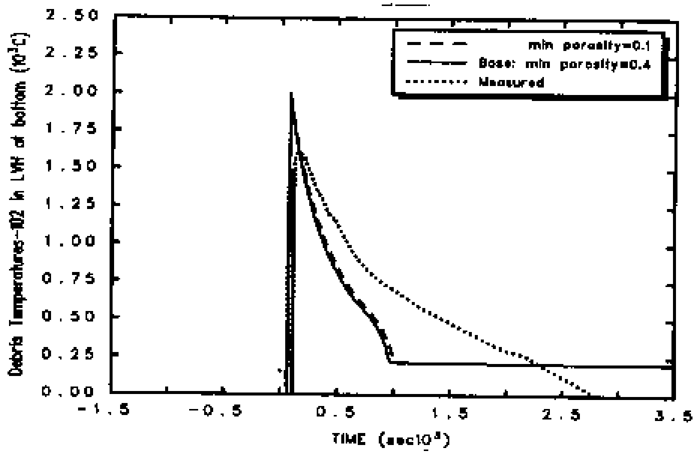

그림 10 파쇄층의 사용자지정 최소 다공성값에 따른
하반구 최저 외벽면 온도변화

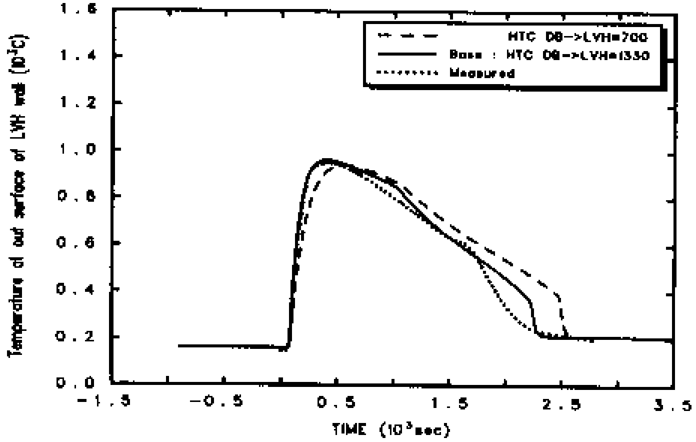

그림 11 Debris에서 하반구벽으로의 열전달계수값에 따른
하반구 최저 외벽면 온도변화

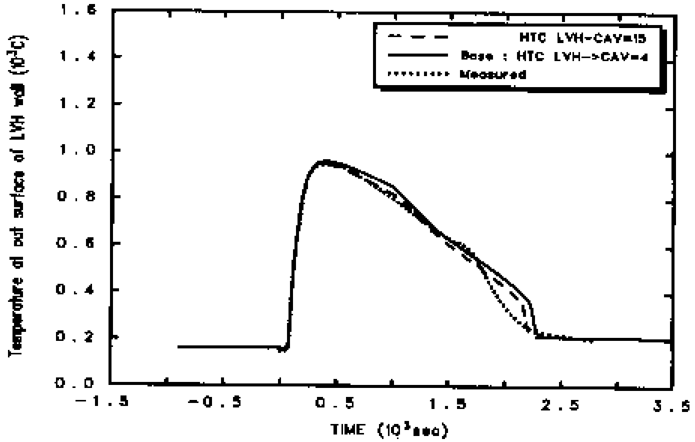

그림 12 하반구외벽에서 cavity 대기로의 열전달계수값에 따른
하반구 최저 외벽면 온도변화

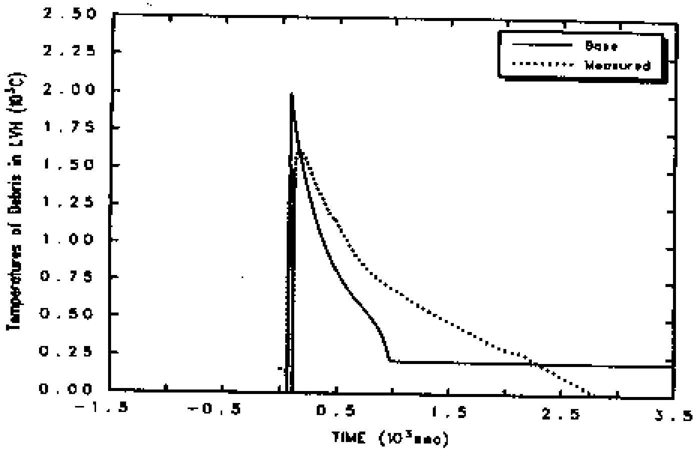

그림 13 Base 계산경우 Cell-102 에서의 debris 온도

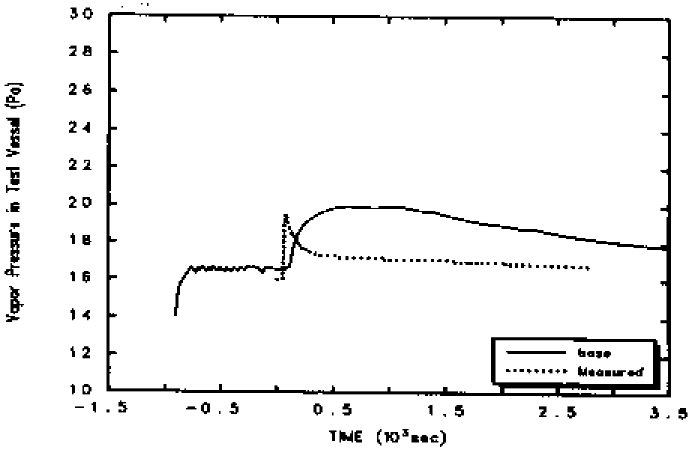

그림 14 Base 계산경우 실험용기내 압력변화

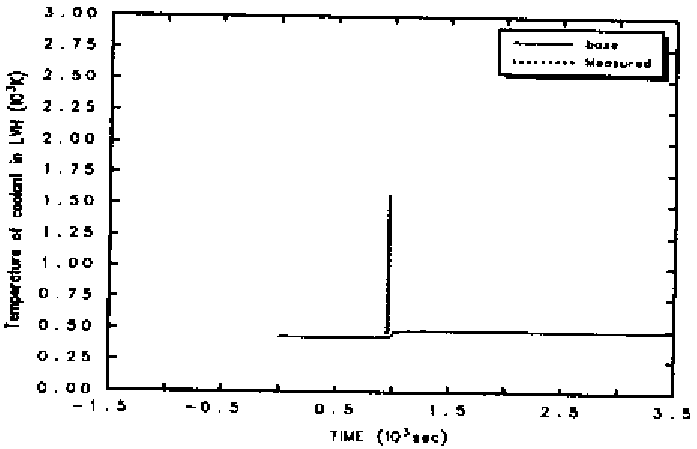

그림 15 Base 계산경우 하부반구내 냉각수 온도변화

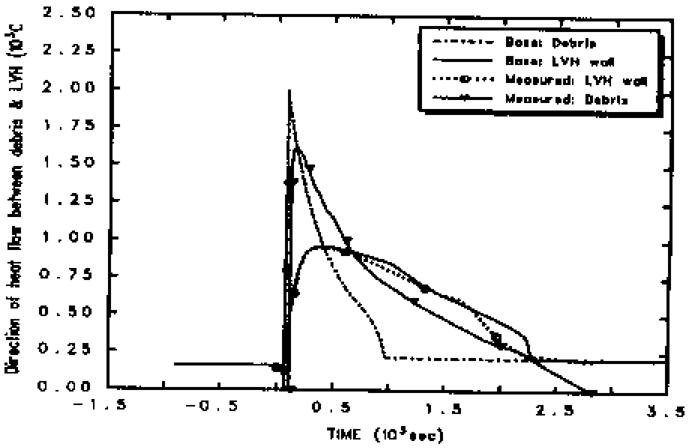

그림 16 Base 계산경우 하부반구내 각 부품별 열흐름 방향