' 2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

MELCOR1.8.4 를 이용한 외벽 냉각 효과 평가

The Evaluation of External Vessel Cooling Effect using MELCOR1.8.4

박종화, 김동하, 최영
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 305-303

요 약

이 연구에서는 MELCOR 1.8.4 코드의 하부 반구 모델을 이용, PWR 원전을 대상으로 일차계통을 저압(5bar)과 고압(170bar)으로 구분, 외벽냉각 유무에 따른 반구내 debris 냉각과 반구벽 건전성에 미치는 영향을 비교, 평가하였다. 계산결과, 반구내벽으로의 최대열속은 재배치 직후, 고압경우 약 1.4 MW/m^2, 저압경우 약 1.2MW/m^2 이었고, 반구외벽으로부터 제거되는 평균 열속 크기는 저압경우 약 0.3 MW/m^2, 고압경우는 0.2 MW/m^2 부터 0.4 MW/m^2 까지 분포하였다. 두 경우, 반구외벽으로부터 제거되는 열속이 약 0.5 MW/m^2 에 도달시 반구손상이 발생되었다. 일차계통을 저압으로 유지하고 외벽냉각을 수행하는 것이 반구건전성 유지를 위한 기본조건으로 판단되며, 외벽냉각시 냉각수 온도 차이 효과는 현재 MELCOR 에서 고려할 수 없음이 확인되었다. MELCOR 내 관통관 손상 모델은, 적용시 압력이나 외벽냉각 여부에 관계없이 재배치 즉시 손상되기 때문에 고려하지 않았다.

Abstract

In this study, the effect of external vessel cooling on debris coolability and vessel integrity for the PWR case is examined for the two typical pressure ranges of high (170 bar) and low (5 bar) case using the lower plenum model in MELCOR1.8.4. As the conditions of these calculations, 80 tons of debris was relocated at once into the lower vessel head and the debris temperature leaving from the core region was 2700 K. The decay heat one hour after reactor shutdown was assumed. The creep failure of the vessel wall was simulated with 1-D model, which can consider the rapid tempertaure gradient over the wall thickness during the ex-vessel cooling. From the calculation results, the maximum heat fluxes from the bottom debris to the inside of vessel wall were 1.4 MW/m^2 and 1.2 MW/m^2 at just after relocation for the high and the low pressure cases, respectively. For the low-pressure case, the heat flux removed from the outer surface of lower vessel to the pool in cavity was 0.3 MW/m^2 and, for the high-pressure case, it was distributed from 0.2 MW/m^2 to 0.4 MW/m^2. When the vessel creep occurs, the removed heat flux

level was 0.5 MW/m^2 for the both cases. It is expected that to keep the primary side at low pressure and to perform the ex-vessel flooding be the basic conditions to sustain the vessel integrity. It was identified that the effect of different flooding water temperature on ex-vessel cooling could not be considered. In MELCOR, the penetration tube always fails just after relocation regardless of the RCS pressure or availability of the ex-vessel cooling. Therefore, penetration failure was not allowed to occur.

I. 서 론

중대사고시 노심으로부터 재배치된 고온의 '노심재배치물질(debris)'을 담고있는 원자로 하부용기 외벽면(cavity 공간)에 냉각수를 충수시켜 debris 로부터 발생된 열을 반구외벽면을 통해 효과적으로 제거시켜, 궁극적으로 debris 를 냉각, 원자로 하부용기 건전성을 확보하려는 소위 '외벽 냉각(External vessel cooling)' 방안은 중대사고시 노심내에 용융물을 포획(IVR: In-Vessel Retention)하기 위한 중요한 사고관리 방안의 하나로 인식 되고 있다.

외벽냉각에 관한 연구 쟁점은 반구 안쪽 벽면으로 예상되는 유입 열속크기, 냉각수와 접하고 있는 반구 외벽면 위치(각도)에 따른 제거 열속 크기 그리고 실제 원전경우 원자로용기는 대부분 하부 반구를 비롯하여 용기 전체가 단열 처리되어 있기 때문에, cavity 충수시 단열층을 통과하여 충분한 양의 냉각수가 유입, 유출되어 반구 외벽으로부터 충분히 열을 제거할 수 있는지 여부에 관한 것이다.

현재 까지 언급한 쟁점들에 관해, 용융 pool 내 대류현상에 의해, 하부 피막층 내벽으로의 유입 열속 크기 [1], 과도 냉각시 가열면 기운 기울기의 함수로 하향 비등면에서 포화 냉각수로의 임계열속및 최소 막비등 열속[2] 그리고 단열체를 통한 냉각수 유량에 관한 연구[3]가 있었다. 그러나 외벽 냉각과 관련한, 자료들은 현재 까지 매우 제한적으로 가용하다. 그러나 Guo 와 El-Genk 에의한 대기압, 포화 냉각수 조건에서, Kutatleadze 의 상향 비등면에서 포화 냉각수로의 임계열속 상관식을 기본으로, 기운각 함수로 과도 냉각 방법을 통해 개발한, 임계열속과 최소 막비등 상관식들을 MELCOR 외벽 냉각 모델에 적용, 사용하고 있다.

이 연구 에서는 이 같은 외벽냉각 현상모의용 모델을 포함하고 있는 MELCOR 1.8.4 코드의 COR 모듈내 하부반구모델 [4]을 이용하여, 재배치되는 노심용융물의 양을 일반적인 PWR 초기노심재고량의 50%인 약 80 톤(UO_2, Zr, ZrO_2, stainless steel, 제어봉 물질 혼합물)이 하부반구로 동시에 재배치되고, 재배치 직전, 초기 온도는 2700 K, 붕괴열크기는 재배치시 원자로 정지후 1 시간이 경과된 경우로 가정하였고, 일차계통의 압력크기를 저압(5bar)과 고압(170bar)일 경우로 구분하여, 외벽냉각 유무에 따른 debris 냉각과 반구 건전성에 미치는 영향을 비교, 평가하였다. 연구 의미는 MELCOR 코드의 외벽 냉각 모델을 검토하고, 압력크기와 외벽냉각 유무에 따른 debris 냉각과 반구건전성에 관한 예측 결과를 제시하며, 외벽냉각시 반구내, 외벽을 통해 유입, 유출되는 열속 크기의 변화를 평가하여, 외벽냉각의 성공을 위한 기본 조건을 평가하는데 있다.

II 본 론

II.1 MELCOR 외벽냉각관련 모델 및 외벽냉각 모의를 위한 입력 구성 설명

MELCOR 코드에서의 외벽냉각현상은 'COR 모듈내 Lower Plenum 모델' 에서 다룬다. 이 모델은 노심 용융물이 냉각수로 채워진 하부반구로 재배치될 때 재배치된 용융물과 냉각수와의 열전달 과정을 첫째는 급냉 열전달 단계, 두번째는 짧은시간 동안 진행되는 급격한 열전달율 변화를 연속적으로 연결시켜 주기위한 과도 열전달 단계 그리고 마지막으로 안정된 파쇄층으로 부터의 열전달 단계로 구분하여 모의한다. 또한 반구벽과 관통관의 가열 및 손상 그리고 cavity 공간내 유체와의 열전달 현상들을 모의할 수 있다.

MELCOR 코드내 반구 손상은 아래 3 개 조건들중 어느 한 개의 조건이 만족될때 발생된다. 첫째 관통관 온도가 사용자 지정 손상 온도 값에 도달될 경우, 두번째는 재배치 유입된 용융물과 냉각수 반응시 급격한 수증기 발생에 의한 과압 손상, 마지막 세번째로는 고온과 약화된 물성조건하에 역학적 부하로 인한 creep 손상 발생이다. MELCOR 의 creep 파열 손상 모델은 0-D 와 1-D 의 두 종류의 모델을 가지고 있다. 0-D 모델이 기본모델로 지정되 있고, 이 경우 전체 mesh 층 질량을 기본으로한, 평균화된 온도값을 사용, 압력차와 등가 stress 값을 적용, 현재 조건하에서의 링별 creep 손상 예상시간을 계산한후, 수명분율 (life fraction) 규칙을 적용, 미세 손상들 (time step/손상예상 시간)을 연속적으로 축적, 총 strain 이 18% (사용자 지정) 에 도달될 경우 creep 손상이된 것으로 판단한다. 1-D 모델은 총 부하에 따른 반구벽내 각층별 plastic 과 thermal strain 을 적용하여 총 strain 을 계산하며, 이때 각 mesh 층의 온도에 따른 손상 정도를 고려한다. 관통관은 원자로 하부용기 벽을 관통해서 설치되있으며, 노심내 위치별 중성자 검출을 위한 thimble 관이 관통하게 된다. 만일 중대사고시 하부반구로 재배치된 노심용융물에 의해 관통관이 용융, 파손될 경우 하부반구내 용융물이 하부반구의 creep 파손 없이도 관통관을 통해 반구 외벽 cavity 공간으로 방출될 수 있다. MELCOR 코드 경우 관통관 손상은 사용자가 지정한 온도값(기본값:1273 K)을 기준으로 판단하도록 단순히 모델하고 있다.

MELCOR 코드 경우 외벽면으로 부터 cavity 내 유체로의 열전달량 계산은 임계열속크기, 최소막비등 열속크기 그리고 막비등 열속크기 값들을 기본으로, 현재의 외벽면과 포화냉각수 간의 온도차이에 해당되는 비등영역을 구한후, 해당 영역에서의 열속크기를, 앞에서 언급한 3 개의 열속 크기를 기본으로, 서로 내삽하여 구한다. 구해진 열속크기를 이용, 반구 외벽면으로 부터 cavity 내 냉각수로 제거되는 열량을 계산한다. 이때 핵비등 열전달계수 상관식은 가열면의 기울기에 무관하지만, 임계열속점, 천이영역, 안정 막비등 영역에서의 열속값은 기울기에 관계되며, 반구벽내 링간 열전달은 모의하지 않는다.

이상 언급된 모델들을 가지고 있는 MELCOR 를 사용하여 일반적인 PWR 외벽냉각 모의를 하기 위한 입력을 다음과 같이 구성하였다. 먼저 MELCOR1.8.4 의 COR 패키지내

“lower plenum 모델”을 이용하여, 외벽냉각 모의시 발전소 계통 전체를 모의할 필요는 없다. 따라서 외벽냉각과 관련된 주요 계통인 노심(CV170)과 down-commer (CV130), 원자로 하부 용기(CV150), 반구외벽을 충수할 cavity 공간 (CV801), cavity 충수용 냉각수를 담고있는 탱크 (CV401), 그리고 외벽냉각시 cavity 내 발생되는 수증기의 방출에 의한 cavity 공간 가압을 방지하기 위한 방출공간 (CV141) 등을 고려하여 모의영역을 단순화 시켰다. 그림 1 은 외벽냉각을 위한 단순화된 입력 구성도를 보여준다. 단순화된 입력은 모의 시간이 짧고, 반구내 재배치된 debris 의 냉각 및 반구 건전성 여부관련 주요 매개변수들의 민감도 분석을 용이하게 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 원자로 용기내 노심(active 영역)을 축방향으로 1 개로 구분하여 노심의 하부반구 재배치가 가능한 동시에 일어나도록 하였다. 하부반구로 노심을 동시에 재배치시킨 이유는 반구벽의 건전성을 보수적으로 평가하기 위해서이다. 실제 경우 용융된 노심의 재배치 현상은 노심내 여러 구성 물질들의 용융점 차이와 상호작용(예: Eutectic)으로 일정량의 노심 용융 물질이 하부반구로 시간에 따라, 불연속적인 방식으로 재배치될 것이기 때문에, 재배치 직후 반구벽의 최대온도값, 반구내 순간적인 압력 증가등을 좀 더 보수적으로 예측할 것으로 판단된다.

노심의 동시 재배치를 위해서 다음과 같은 입력을 사용하였다. 첫째 ZrO_2 층 파열 온도값, 두번째는 민감도 분석 카드 번호 1132 에서 지정하는 ZrO_2 층만 남아있는 경우 재배치되는 온도값 및 핵연료봉의 구성 성분에 관계없이 재배치 되도록 하는 사용자 지정 온도값들을 모두 재배치시키고 싶은 2700 K 로 동일하게 지정하여, 이 온도에 도달됨과 동시에 노심이 재배치되도록 하였다. 그러나 링별 손상온도에 도달되는 시간이 차이가 날 수 있으므로, 링별 출력 첨두 계수값을 조정하여, 모든 링이 동시에 재배치되도록 하였다.

하부반구로 재배치되는 노심양은 일반적인 PWR 기준으로 초기 노심 재고량의 약 50% 에 해당되는 80 톤으로 가정하였고, 재배치시 노심온도는 2700K, 붕괴열은 재배치시 원자로 정지후 1 시간이 경과된 경우로 가정하였다. 이같은 조건의 노심물질이 하부로 재배치하여, 하부반구내 냉각수와 반응후 반구안쪽에 도달될때 까지 진행되는 급냉 열전달과정시 보수적 평가를 위해 냉각수와 열전달이 없는 것으로 가정 (0.0 W/m^2-K) 하였다. 두번째 단계시 고체 debris 와 용융물의 반구내 링간 반경 퍼짐을 제어하는 시간상수값 (민감도 카드번호 1020 (1),(2))을 각 3 초와 1 초로 지정하여 비교적 느리게 링간 퍼짐이 진행되도록 하였다. 세번째단계인 안정된 파쇄층으로 부터 냉각수와의 열전달 단계시 냉각수에 잠긴 노심용융물은 사용자가 지정한 직경 5cm 의 균일한 구형 파쇄입자층으로 변화되는 것으로 가정하였다. 반구내 재배치된 debris 로부터 반구 내벽으로 전달되는 열속크기 모의시, 사용하는 열전달 계수값은 코드내 기본값(1000.0 W/m^2-K)을 적용하였다. 이열전달 계수는 실제로, 하부피막층에서 반구내벽으로의 열속을 의미한다 (MELCOR 하부 파막층 모델 없음).

하부반구벽에 위치한 관통관은 링별, 모두 동일한 것 으로 가정하였고, debris 로 부터 관통관으로의 열전달 모의시 사용되는 열전달 계수값은 코드내 기본값 (1000.0 W/m^2-K)을 적용하였다. 또한 관통관 손상 발생 온도는 코드내 기본값 (1273.15 K)을 적용하였다. 그러

나 이같은 기본 손상 온도값 적용시, 외벽냉각의 유무에 관계없이 용융물이 재배치되는 순간, 즉시 관통관 손상이 발생 되었다. 따라서 반구벽의 creep 손상 여부를 모의하기 위해, 임의로 관통관 손상 온도값을 높은값 (5000 K)으로 설정하여 관통관 손상을 억제시켰다. 하부반구벽의 creep 손상은 반구벽 전체의 평균온도를 사용하는 코드내 기본으로 설정된 "0-dimensional 모델 "을 적용하지 않고, 외벽냉각시 예상되는 반구내 급격한 온도 기울기를 고려하여, 열팽창과 층별 온도값에따른 stress 분포 계산 및 재료 손상에 따른 효과를 고려할 수 있는, "1-dimensional 모델"을 적용하여, 모의하였다.

외벽냉각을 위해 1000 초에 50 °C 의 냉각수를 cavity 공간으로 주입하기 시작하여 약 수십초 이후 cavity 내 수위가 하부반구 상단에 도달, 유지되도록 하였다 (그러나 실제 MELCOR 외벽 냉각 모델은 포화 냉각수를 기본으로 개발 하였기 때문에 아냉효과는 고려할 수 없음) 이때 cavity 충수 시나 수위를 하부반구 상단으로 과도기간동안 일정하게 유지시키기 위해 cavity 로 충수할 냉각수를 담고있는 탱크(CV401)와 cavity 공간(CV801) 사이에 밸브(401)를 설치하여, 만일 cavity 내 냉각수가 가열, 비등되어 수위가 하부반구 상단 이하로 내려갈 경우, 즉시 밸브를 열어 cavity 내로 냉각수를 보충, 수위를 하부반구 상단으로 과도기간 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 그러나 반구가 파손되면 밸브를 잠가서 더 이상 수위제어를 하지 않도록 하였다. 또한 외벽냉각시 반구외벽면으로부터 제거된 열의 흡수로인해 비등된 수증기로 cavity 공간내 압력이 증가되는 것을 방지하기 위해 방출 공간 (CV141)을 고려하여 cavity 공간이 1 기압으로 일정하게 유지 되도록 모의 하였다.

이상 언급한 입력으로 일반적인 PWR 원전에 대해, 냉각수로 차있는 하부반구에 동시에 고온의 노심물질이 재배치될때 외벽냉각 여부에 따른 debris 냉각과 반구 건전성에 관한 영향을 평가하기 위한 계산을 수행하였다. 일차계통의 압력은 중대사고시 가능한 최소압력 범위인 대형 LOCA 시 약 5 기압과 최대 압력 범위인 PORV 개방 설정압력인 170 기압을 각각 가정하였다. 단 관통관 손상과 반구외벽의 단열층 존재는 고려하지 않았다.

II.2 압력 변수에 의한 외벽냉각 영향 분석 결과

II.2.1 저압 경우 외벽냉각 유무에 따른 계산 결과

그림 2 는 외벽냉각 수행여부에 관계없이 약 1120 초에 노심이 2700 K 에 도달 되었을때 약 80ton 의 노심이 하부반구로 동시에 재배치됨을 보여준다. 재배치되었을때 반구로부터, 총붕괴열 발생율 크기는 원자로 정지후 1 시간에 해당되는 붕괴열 발생 크기인 약 28 MW 이었다. 외벽냉각을 수행하지 않은 경우 debris 방출이 불연속적인 것은 외벽냉각을 수행하지 않은 경우 약 5900 초경에 하부반구의 링 1, 2 가 손상된 반면에 외곽의 링 3 는 약 7200 초에 손상되었기 때문이다. 외벽냉각을 할 경우 반구 손상시간은 14100 초에 손상되는 것으로 예측되었다. 그림 3 은 cavity 내 냉각수 수위 변화를 보여준다. 외벽냉각시 1000 초에 cavity 내 냉각수 주입을 시작하여, 즉시 하부반구 상단까지 냉각수 수위가 도달 되었고, 이후 수위가 일정하게 유지되었다. 반구손상 직전 cavity 내 냉각수가 비등되어 이

상수위가 증가되고, 비등으로 인한 냉각수 감소로 밸브가 개방되어 냉각수를 보충, 수위가 회복됨을 보여준다. 또한 원자로 용기파손후 점진적으로 cavity 수위가 감소됨을 보여준다. 그림 4 는 cavity 내 냉각수 온도 변화 과정으로, 외벽 냉각시 반구외벽으로 부터 제거된 열 흡수로 cavity 냉각수 온도의 증가와 비등 그리고 재보충 과정의 일련을 보여준다.

그림 5 는 반구와 접하고있는 debris 의 링별 온도를 보여준다. 하부 반구로 재배치시 노심물질의 초기온도는 2700K 였으나, 하부반구내 존재하는 구조물과 반구내 퍼짐시간동안의 유체와의 열전달로 인해 재배치 직후 반구내벽과 접한 debris 최대 도달온도는 약 2600 K 였다. 그러나 링 1 의 debris 는 동시 재배치이전의 불연속적인 재배치 현상으로 인해 최대 온도가 단지 1800 K 정도로 예측되었다. 그림 6 은 외벽냉각 여부에 따른, 총 strain 변화 과정을 보여준다. 용융물 재배치 직후, 링 1 이 외벽냉각을 하지 않은 경우, 재배치 이후 약 4780 초만에 총 strain 값이 사용자 지정 손상값인 0.18 에 도달되어 반구 creep 손상이 발생되었다. 이때 내부층들은 손상직전 모두 급격하게 팽창되었다. 외벽냉각을 한 경우 cavity 내 냉각수가 가열, 비등되어 외벽 냉각 능력을 상실하기 전까지는 반구 외벽 온도가 반구벽 손상온도 이하로 비교적 일정하게 유지되었다. 외벽냉각을 하지않는 경우는 재배치 이후 반구벽의 온도가 급격하게 상승하여 재배치 이후 약 4780 초 만에 반구벽이 손상되었다 그러나 외벽냉각을 한 경우, 재배치 이후 약 12880 초에 반구벽이 손상되었다. 이후의 온도 값은 남아있는 소량의 debris 에 의한 것이다. 그림 7 은 외벽 냉각 여부에 따른 링별 반구 외벽면 온도 변화과정을 보여준다. 그림 8 은 반구벽내 링별 관통관 온도 변화를 보여준다. 관통관은 바닥 debris cell (MELCOR 에서의 노심내 모의를 위한 축방향과 반경방향으로 지정되는 기본 계산 영역) 높이에 의해 덮힌 면적을 통해 열을 받아, 반구 최내벽층만으로 열을 전달한다. 관통관의 온도는 재배치 즉시, 외벽냉각 여부에 관계없이 사용자가 지정한 손상온도인 1273.15 K 에 즉시 도달된다. 따라서 이 연구에서는 creep 손상시간을 예측하기 위해 관통관 손상은 임의로 높은 손상온도값을 지정, 발생을 제한하였다. 그림 9 는 링 1 에서 debris 로부터 반구내벽으로의 열속크기를 보여준다. 초기에 최대 1.2 MW/m^2 이고, 이후 과도기간 동안 약 0.3 MW/m^2 이었다. 또한 반구 외벽으로 부터 cavity 내 냉각수로의 제거열속은 시간에 따라 증가하며, 반구 손상이 발생되기 직전 0.5 MW/m^2 에 도달 하였다.

II.2.2 고압경우 외벽냉각 유무에 따른 계산 결과

일차계통 압력이 170 인 고압사고 경우, 약 1620 초에 약 80 ton 노심이 하부반구로 동시에 재배치되었다. 그림 10 은 외벽냉각을 한 경우 하부반구의 냉각수 고갈 (dryout)시점이 다소 지연됨을 보여준다. 그림 11 은 외벽냉각시 cavity 내 냉각수 수위 변화 과정을 보여준다. 1000 초에 cavity 내 충수가 시작되어 하부반구 상단까지 충수되었고, 이후 비등에 의한 수위 하락시 냉각수를 보충, 수위를 반구상단으로 일정하게 유지시켰다. 약 8600 초경 하부반구 creep 손상으로 용융물이 cavity 로 방출될때 cavity 냉각수의 급격한 비등으로 일시적인 수위상승과 이후 점진적인 cavity 수위 감소 과정들을 보여준다. 또한 cavity 내 초기에 50 ° C 의 냉각수가 주입되었으나, 이후 외벽면으로 부터 제거된 열을 흡수하여 냉각수 온도가 계속적으로 증가되었다. 그러나 실제 MELCOR 모델에서는, 반구외벽

으로 부터의 제거 열속은 포화 냉각수 비등 조건에서 개발된 상관식이기 때문에, 아냉 냉각수에서의 비등은 고려하지 못한다. 다만, 아냉 냉각수의 주입은 현재 모델에서는 오직 caity 수위 변화에만 효과를 줄 수 있다. 그림 12 는 반구내벽과 접한 debris 의 링별 온도 변화를 보여준다. 외벽냉각을 하지 않은 경우 약 재배치 이후 약 1180 초 만에 반구가 creep 손상되어 debris 온도가 급격히 감소하는 것을 보여준다. 그러나 외벽냉각을 수행한 경우 재배치 이후 약 6980 초로 반구 손상이 지연되었다. 그림 13 은 외벽냉각 유무에 따른 반구벽 총 strain 변화를 보여준다. 링 1 경우 총 strain 값이 2800 초에 0.18 에 도달되어 creep 손상이 발생됨을 보여준다. 그림 14 는 링별 반구 외벽층 온도 변화과정으로 외벽 냉각을 한 경우 cavity 내 냉각수가 가열, 비등되기 전까지, 저압 경우 보다 반구벽의 가열이 좀더 빠르게 진행됨을 볼 수 있다. 이는 재배치 직전, 반구벽 초기온도가 고압경우가 저압 경우 보다 약 200 K 더높았기 때문에 좀더 빠르게 진행된 것으로 판단된다. 하부반구로 재배치되는 초기 노심물질의 온도는 2700K 이었으나 하부반구내 존재하는 구조물로의 열손실 및 반구내 퍼짐시간동안의 열전달로 인해 반구내벽 링 1 의 초기 debris 온도가 약 2100 K 로 예측되었다. 외벽냉각을 하지 않은 경우는 재배치 이후 반구벽의 온도가 급격하게 상승하여 재배치 이후 약 1180 초 만에 반구벽이 손상온도에 도달되었다. 그러나 외벽냉각을 수행한 경우 재배치 이후 약 6980 초 이후에 반구가 손상되었다. 반구 손상후 debris 온도값이 남아 있는 것은 소량의 debris 에 의한 것이다. 그림 15 는 반구벽 링별 관통관 온도 변화를 보여준다. 고압 경우에도 재배치 즉시 외벽냉각 수행 여부에 관계없이 사용자가 지정한 관통관 손상온도인 1273.15 K 에 순간적으로 도달되어 손상된다. 그림 16 은 링 1 경우 시간에 따른 debris 로부터 반구내벽으로의 열속 크기와 반구외벽으로부터 cavity 내 냉각수로의 열속 크기 변화를 보여준다. 초기에 debris 로 부터 반구내벽으로의 최대열속은 1.4 MW/m^2 이었고, 이후 과도기간동안 약 0.2 MW/m^2 ~0.4 MW/m^2 이었다. 반구외벽으로부터 cavity 냉각수로의 제거 열속 크기는 시간에 따라 증가 하였고, 약 0.2 MW/m^2 ~ 0.5 MW/m^2 로 분포하였고, 반구 손상시 저압 경우와 동일하게 약 0.5 MW/m^2 에 도달하였다. 그림 17 은 고압과 저압경우의 총 strain 변화로 저압일 경우 보다 고압일 경우 손상이 빠르게 발생되는 것을 보여준. 그러나 고압시에도 외벽냉각을 한경우가 저압이라도 외벽냉각을 않한 경우보다 creep 손상 발생시간이 지연되어, 반구건전성에 대한 외벽냉각의 효과를 보여주었다.

III 결 론

압력에 의한 효과로는, 고압보다 저압인 경우가 creep 손상 발생시간이 상대적으로 지연되었고, creep 손상 발생의 지연은 반구벽에 가해진 부하 크기가 고압일 경우보다 저압일 경우가 상대적으로 작기 때문이다. 그러나 고압일 경우에도 외벽냉각을 수행한 경우가 저압이라도 외벽냉각을 하지 않은 경우보다 creep 손상시간이 지연되어, 외벽냉각의 효과를 보여주었다. 따라서 일차계통을 저압으로 유지하고, 외벽냉각을 수행하는것이 반구 건전성을 유지하기 위한 기본적인 조건으로 판단된다. 하부 반구 내,외벽으로 유입되는 열속은 고압일 경우가 저압일 경우 보다 높았으며, 제거되는 열속 크기도 고압경우가 저압경우 보다 컸다. 고압경우 유입되는 초기 최대 열속 크기는 약 1.4 MW/m^2, 저압경우는 1.2 MW/m^2 이

었고, 제거되는 열속은 저압경우 평균적으로 약 0.3 MW/m^2, 고압 경우는 0.2~0.4 MW/m^2 로 분포되었다. 두 경우 모두 cavity 로 제거되는 열속 크기가 0.5 MW/m^2 에 도달시 반구 creep 손상이 발생되었다. 또한 외벽냉각시 냉각수 온도에 의한 차이 효과는 현재 MELCOR 에서 고려할 수 없음이 확인되었다.

IV 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기 사업의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

1. F. Mayinger, M. Jahn, H.H. Reineke and V. Steinbrenner,"Examination of Thermalhydraulic Processes and heat transfer in a core melt",BMFT RS 48/1, Institute fur Verfahrens technik T.U. Hanover, Germany,1976
2. M.S. El-Genk and Z. Guo,"Transient Critical Heat Flux for inclined and Downward-Facing Flat Surfaces,"ANS Proc., HTC-6 volume 6, 1992, National Heat Transfer Conference, August 9-12, 1992, San Diego
3. R.E.Henry, J.P. Burelbach, R.J. Hammersley and C.E. Henry,"Cooling of Core Debris within the reactor vessel lower head," Nuclear Technology vol.101 pp.385-399, Mar 1993.
4. "MELCOR Coputer Code Manual: Primer and Users' Guides & Reference Manual Version 1.8.4",NUREG/CR-6119, Vol 1,2 SAND97-2398,July 1997.

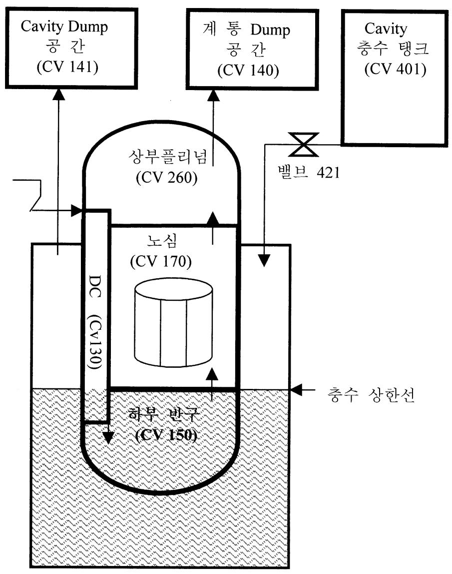

그림 1. PWR 외벽냉각 모의를 위한 입력 구성도

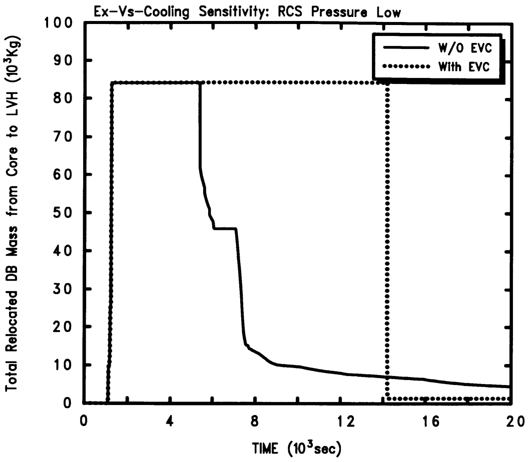

그림 2. 시간에 따른 하부 반구내 debris 질량

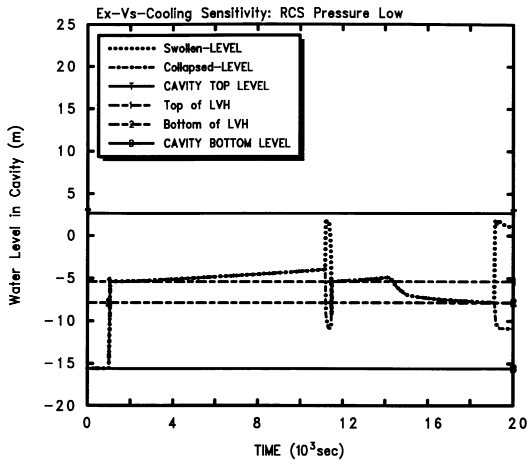

그림 3. Cavity 내 냉각수 수위

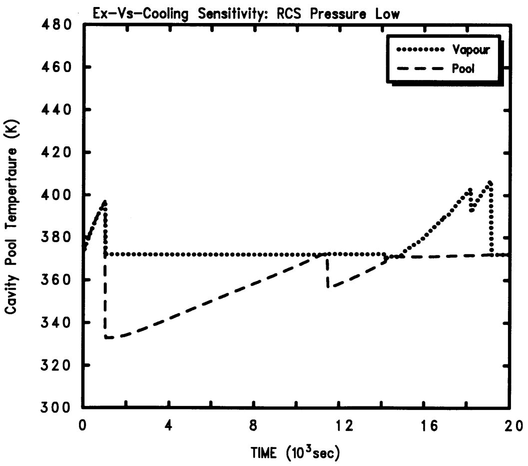

그림 4. Cavity 내 냉각수 온도

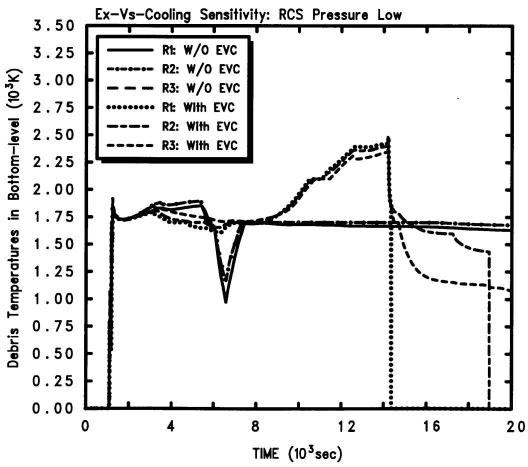

그림 5. 반구와 접한 debris 링별 온도

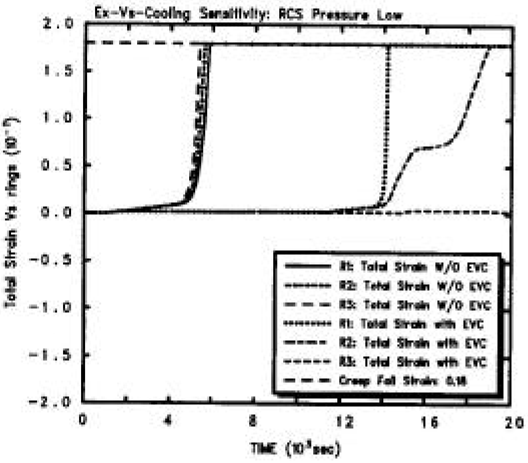

그림 6. 링별 총 strain

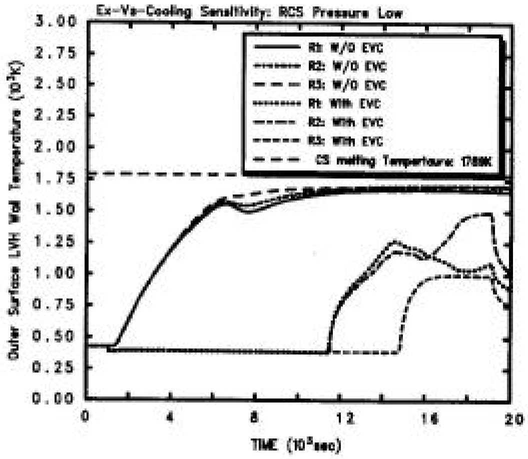

그림 7. 링별 하부 반구 외벽면 온도

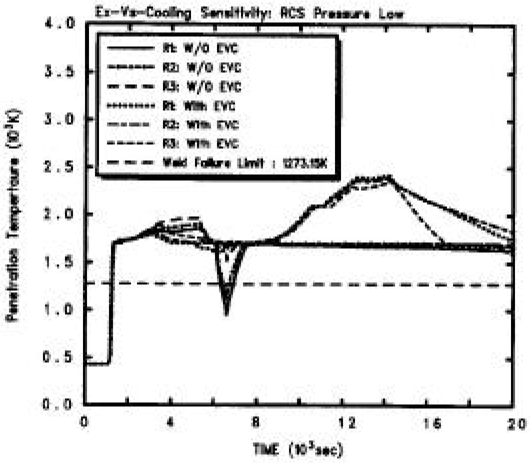

그림 8. 링별 penetration 관 온도

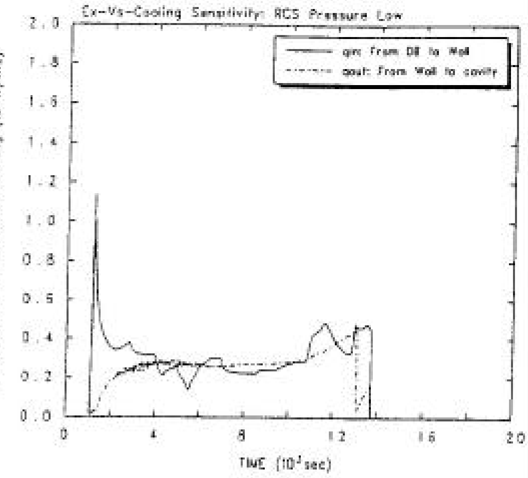

그림 9. 링 1 에서 debris 로 부터 반구내벽 그리고 반구외벽면으로부터 cavity 로의 열속

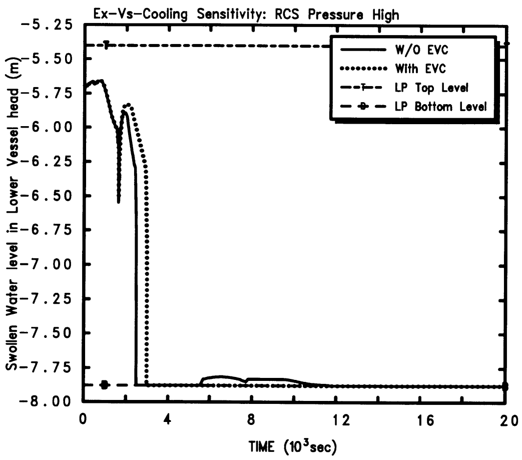

그림 10. 시간에 따른 하부 반구내 냉각수 수위

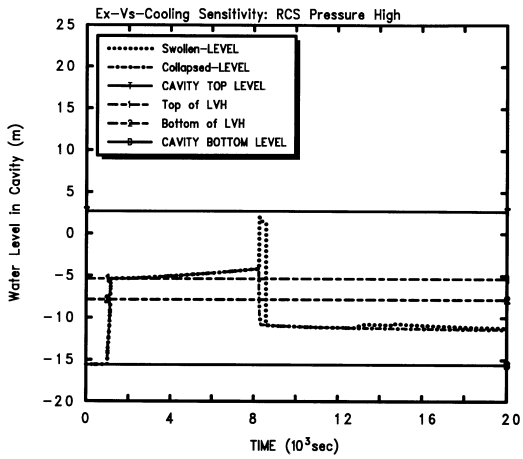

그림 11. Cavity 내 냉각수 수위

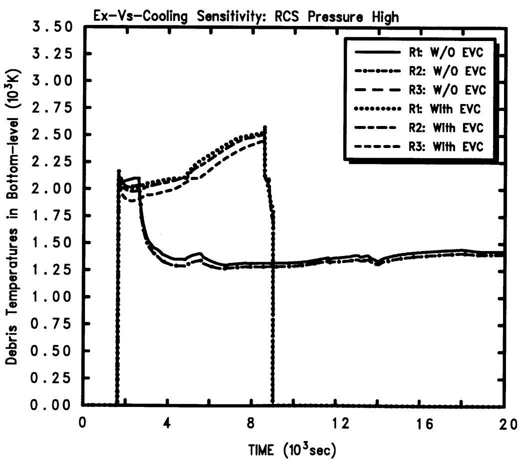

그림 12. 반구와 접한 debris 링별 온도

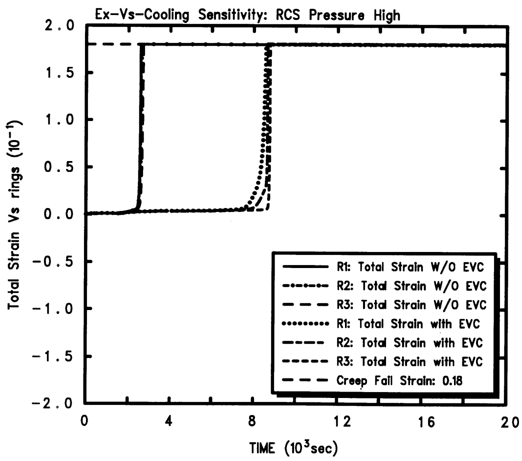

그림 13. 링별 총 strain

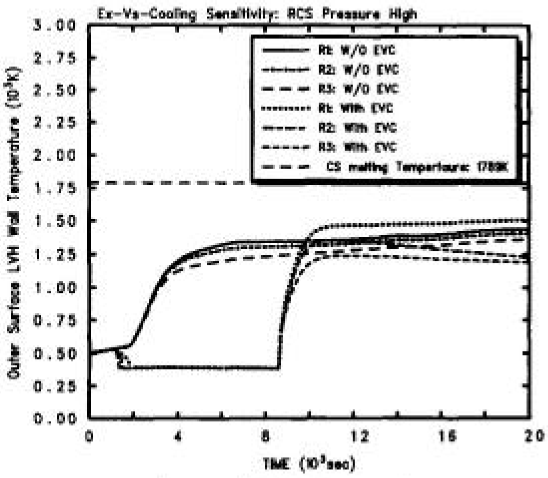

그림 14. 링별 하부 반구 외벽면 온도

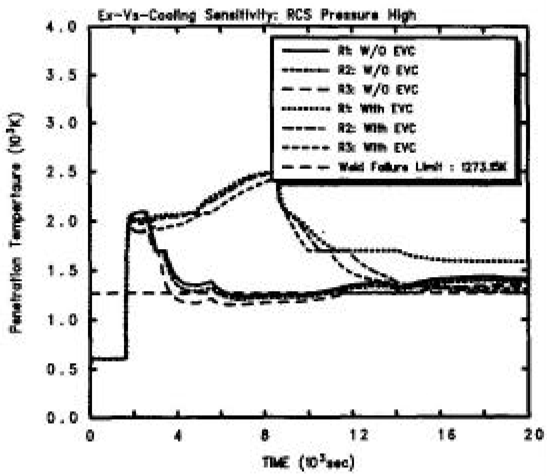

그림 15. 링별 penetration 관 온도

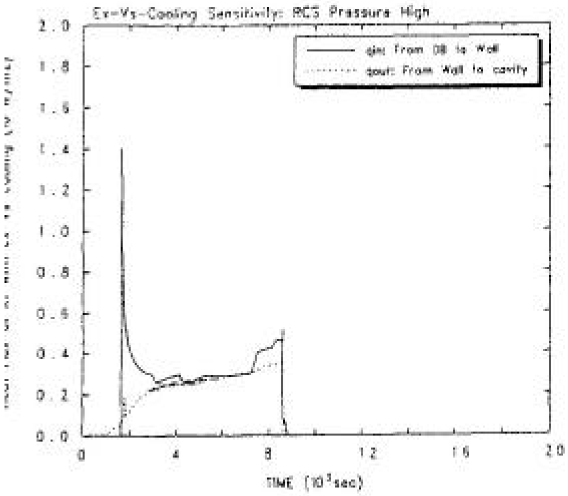

그림 16. 링 1 에서 debris 로 부터 반구내벽 그리고 반구외벽면으로부터 cavity 로의 열속

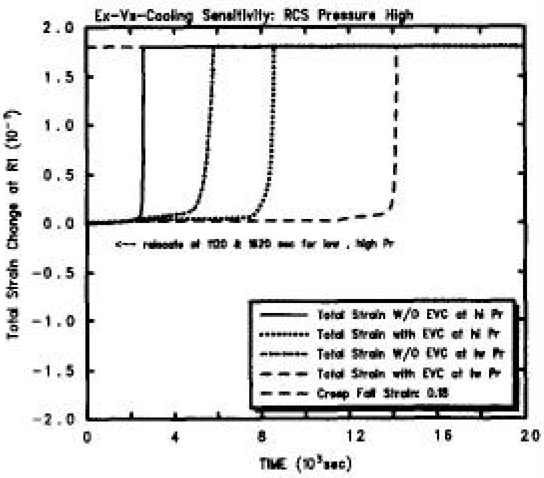

그림 17. 압력에 따른 링 1 의 총 strain