



KR0100874

KAERI/TR-1790/2001

**MELCOR 코드를 이용한 압력에 따른 KNGR  
원전 외벽냉각 효과 평가**

**The Evaluation of Pressure Effects on the  
Ex-vessel Cooling for KNGR with MELCOR**

**2001년 03 월**

**한국 원자력 연구소  
Korea Atomic Energy Research Institute**

**32 / 42**

**K**

# 제 출 문

한국원자력연구소장 귀하  
본 보고서를 차세대원자로개발 (III단계) 핵심기술연구 (중대사고분야) 과제의 기술보고서로 제출합니다.

2001 년 03 월

과 제 명 : 차세대원자로개발 (III단계) 핵심기술연구 (중대사고분야)  
주 저 자 : 박종화  
공 저 자 : 박수용  
          김동하

## 요 약 문

중대사고 시 원자로 하부용기 외벽면 원자로 공동 공간에 냉각수를 충수시켜 노심용융물로부터 발생된 열을 반구외벽면을 통해 제거시켜, 궁극적으로 노심용융물을 냉각, 원자로 하부용기 건전성을 확보하려는 소위 "외벽 냉각( External vessel cooling)" 방안은 노심 내에 용융물을 포획(IVR: In-Vessel Retention)하기 위한 중요한 사고관리 방법이다.

이 보고서에서는 외벽냉각 현상을 모의할 수 있는 MELCOR 1.8.4 코드의 COR 모듈 내 하부반구 모델을 이용하여 KNGR 원전을 대상으로 일차계통의 압력크기를 저압(5bar)과 고압(170bar)의 경우로 구분하여, 외벽냉각 유무에 따른 debris 냉각과 반구 건전성에 미치는 영향을 비교, 평가하였다. 재배치되는 노심용융물의 양이 초기 노심재고량을 기준으로 50%가 하부반구로 동시에 재배치되고, 재배치 시 초기 용융물 온도는 2700 K, 붕괴열 크기는 재배치 시 원자로 정지 후 1시간이 경과된 경우를 적용하였다. 연구의 목적은 MELCOR 코드의 외벽 냉각 모델 검토를 포함하여, 압력크기와 외벽냉각 유무에 따른 debris냉각 여부와 반구건전성에 관한 예측 결과를 제시하고, 부가적으로 외벽냉각 성공을 위한 개략적인 필요조건들을 제안하는 것이다.

계산 결과에 의하면 외벽 냉각 시 cavity 에 주입되는 냉각수의 온도와 총 주입 냉각수 양이 외벽 냉각 효과의 지속시간을 결정하는 중요한 인자임을 알 수 있었다. 특히 cavity 내 냉각수 온도가 시간에 따라 가열되어 포화온도에 도달되면 외벽을 통한 냉각 능력이 상실되어 반구벽 온도가 급격히 증가하기 시작하였다. 따라서 외벽냉각 효과의 지속을 위해서는 cavity 내 냉각수 온도 증가를 억제할 수 있는 장기적인 방안이 필요하다고 판단된다. 또한 압력효과는 고압보다 저압인 경우가 creep 손상 발생시간이 지연되었다. 그러나 외벽 냉각을 한 고압경우가 저압이라도 외벽냉각을 하지 않은 경우보다 creep 발생이 지연되었다. 따라서 일차계통을 저압으로 유지하고, 외벽냉각을 수행하는 것이 반구건전성 유지를 위한 기본 조건으로 판단된다.

사용자 지정 손상 온도값 1273.15 K 에 도달하면 ICI (In-Core-Instrument)penetration 관의 손상이 발생하는 것으로 판단하는 MELCOR내 모델을 적용할 경우 압력이나 외벽 냉각 유무에 관계없이 모두 재배치 즉시 penetration관의 손상이 발생된다. 따라서 penetration 관 손상관련 모델의 보완이 필요하다고 판단된다.

이 보고서의 계산 결과는 MELCOR 코드의 하부반구 모델에 의한, 언급한 특정 조건에서의 예측 결과만을 제시한다. 그러나 하부반구 건전성 여부는 여러 변수들에 의해 직, 간접으로 영향을 받기 때문에 특정 계산 결과만을 기초로 외벽냉각의 성공여부를 판단하는 것은 부적절하며, 관련 변수들에 관한 충분한 계산과 관련 실험자료의 수집과 분석, 토의를 통해 그 성공여부를 개략적으로 예측할 수 있다고 판단된다.

## SUMMARY

During the severe accident, to make the debris cool and to keep the vessel intact by injecting water into the cavity space, which cause a direct contact between the external surface of lower vessel wall and the cold water, so called, External Vessel Cooling, is an important accident management strategy so as to retain the hot debris in the vessel without vessel failure.

In this report, the effect of external vessel cooling on debris coolability and vessel integrity for the KNGR were examined from the two typical pressure range of high(170 bar) and low(5 bar)case, respectively. The lower plenum model in MELCOR 1.8.4, which considers an external vessel cooling is used. As the base case, 50% of the initial core inventory was relocated simultaneously into the lower vessel head and the debris relocation temperature from the core region was 2700 K. The decay heat has been assumed to be that of one hour after reactor shutdown. The purpose of this study is to review the external vessel cooling model in MELCOR and to present the calculational results on the debris coolability and vessel integrity from high and low pressure level with and without external vessel cooling. Additional purpose is to recommend the conceptual requirements for the successful external vessel cooling.

From the calculation results, both the coolant temperature and the total amount of coolant mass injected into the cavity are known to be the important factors in determining the time period to keep the external vessel cool. Especially, when the coolant temperature reaches the saturation condition, the heat removal capability through the external vessel surface degrades severely. Therefore, a long-term strategy to keep the coolant temperature subcooled throughout the transient is suggested to sustain or prolong the effect of external vessel cooling.

Regrading to the effect of RCS pressure, the creep failure time for the low pressure case was more delayed than that for the high pressure case. The creep failure time for the high pressure case with external vessel cooling was more delayed than that for the low pressure case without external vessel cooling. Therefore it is suggested that to keep the primary side at low pressure and to perform the external vessel cooling be the essential conditions to sustain the vessel integrity.

The MELCOR model assumes that the penetration tube fails when the tube reaches user-defined failure temperature. Therefore, penetration failure always occurs after relocation regardless of the RCS pressure or availability of the external vessel cooling. So, it is necessary that the model should be improved.

This report only shows the calculational results using the lower plenum model in MELCOR1.8.4 with the above-mentioned special conditions. Because the lower vessel integrity is influenced directly or in-directly by the several parameters, it is not proper to determine whether the external vessel cooling succeeds or not only with these results obtained under the limited conditions. Consequently, It is expected that the external vessel cooling can be determined only conceptually after the sufficient calculations, analysis of collected experimental data, and discussions are completed.

## 목 차

제출문	
요약문.....	i
목 차.....	iii
그림목차.....	iv
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 MELCOR1.8.4 코드의 Lower Plenum 모델 .....	4
2.1 Lower plenum내 debris 냉각모델 .....	4
2.2. 하부반구 파손 모델 .....	12
2.2.1 0-D 모델 .....	13
2.2.2 1-D 모델 .....	14
2.3. 외벽 냉각 모델 .....	15
제 3 장 외벽 냉각 입력 구성 .....	20
제 4 장 계산 결과 .....	23
4.1 저압 사고 경위 .....	23
4.2 고압 사고 경위 .....	24
제 5 장 결론 및 추후 연구분야 .....	26
참고문헌 .....	27
부록 1 (KNGR 외벽냉각 모의용 MELGEN 입력) .....	40
부록 2 (용기외벽으로부터 cavity 대기로 대류열전달계수값 예측) .....	61

## 그 립 목 차

그림 3-1. 외벽냉각 모의를 위한 MELCOR 입력도.....	27
그림 4-1-1. 저압, 외벽냉각시 노심온도 .....	28
그림 4-1-2. 저압시, 하부반구내 debris 질량 변화 .....	28
그림 4-1-3. 저압, 외벽냉각시 cavity내 냉각수 수위 .....	28
그림 4-1-4. 저압, 외벽냉각시 cavity내 냉각수 온도 .....	28
그림 4-1-5. 저압, 외벽냉각 따른 링1 반구와 접한 debris 온도 .....	29
그림 4-1-6. 저압, 외벽냉각 따른 링2 반구와 접한 debris 온도 .....	29
그림 4-1-7. 저압, 외벽냉각 따른 링3 반구와 접한 debris 온도 .....	29
그림 4-1-8. 저압, 외벽냉각 안한 경우 링1 소성변형 .....	29
그림 4-1-9. 저압, 외벽냉각 한 경우 링1 소성변형 .....	30
그림 4-1-10. 저압, 외벽냉각 안한 경우 내벽의 링별 소성변형 .....	30
그림 4-1-11. 저압, 외벽냉각 한 경우 내벽의 링별 소성변형 .....	30
그림 4-1-12. 저압, 외벽냉각 안한 경우 링 1 반구내 응력분포 .....	30
그림 4-1-13. 저압, 외벽냉각 한 경우 링 1 반구내 응력분포 .....	31
그림 4-1-14. 저압, 외벽냉각 따른 링 1 반구외벽 온도 .....	31
그림 4-1-15. 저압, 외벽냉각 따른 링 1 반구벽 중앙온도 .....	31
그림 4-1-16. 저압, 외벽냉각 따른 링 1 반구내벽 온도 .....	31
그림 4-1-17. 저압, 외벽냉각 안한 경우 링별 외벽온도 .....	32
그림 4-1-18. 저압, 외벽냉각 한 경우 링별 외벽온도 .....	32
그림 4-1-19. 저압, 외벽냉각 따른 링1 penetration 관온도 .....	32
그림 4-1-20. 저압, 외벽냉각 따른 링2 penetration 관온도 .....	32
그림 4-1-21. 저압, 외벽냉각 따른 링3 penetration 관온도 .....	33
그림 4-1-22. 저압, 외벽냉각한 경우 링1 내및 외벽에서 열속 .....	33
그림 4-1-23. 저압, 외벽냉각 따른 반구손상시 방출 debris양 .....	33
그림 4-2-1. 고압, 외벽냉각시 노심온도 .....	34
그림 4-2-2. 고압시, 하부반구내 수위 변화 .....	34
그림 4-2-3. 고압시, 하부반구내 debris 질량 변화 .....	34
그림 4-2-4. 고압, 외벽냉각시 cavity내 냉각수 수위 .....	34
그림 4-2-5. 고압, 외벽냉각시 cavity내 냉각수 온도 .....	35
그림 4-2-6. 고압, 외벽냉각 따른 링1 반구와 접한 debris 온도 .....	35
그림 4-2-7. 고압, 외벽냉각 따른 링2 반구와 접한 debris 온도 .....	35
그림 4-2-8. 고압, 외벽냉각 따른 링3 반구와 접한 debris 온도 .....	35
그림 4-2-9. 고압, 외벽냉각 안한 경우 링1 소성변형 .....	36
그림 4-2-10. 고압, 외벽냉각 한 경우 링1 소성변형 .....	36
그림 4-2-11. 고압, 외벽냉각 안한 경우 내벽의 링별 소성변형 .....	36
그림 4-2-12. 고압, 외벽냉각 한 경우 내벽의 링별 소성변형 .....	36
그림 4-2-13. 고압, 외벽냉각 안한 경우 링 1 반구내 응력분포 .....	37
그림 4-2-14. 고압, 외벽냉각 한 경우 링 1 반구내 응력분포 .....	37
그림 4-2-15. 고압, 외벽냉각 따른 링 1 반구외벽 온도 .....	37
그림 4-2-16. 고압, 외벽냉각 따른 링 1 반구벽 중앙온도 .....	37

그림 4-2-17. 고압, 외벽냉각 따른 링 1 반구내벽 온도 .....	38
그림 4-2-18. 고압, 외벽냉각 안한 경우 링별 외벽온도 .....	38
그림 4-2-19. 고압, 외벽냉각 한 경우 링별 외벽온도 .....	38
그림 4-2-20. 고압, 외벽냉각 따른 링1 penetration 관온도 .....	38
그림 4-2-21. 고압, 외벽냉각 따른 링2 penetration 관온도 .....	39
그림 4-2-22. 고압, 외벽냉각 따른 링3 penetration 관온도 .....	39
그림 4-2-23. 고압, 외벽냉각한 경우 링1 내벽 및 외벽에서 열속.....	39
그림 4-2-24. 고압, 외벽냉각 따른 반구손상시 방출 debris양 .....	39

## 제 1 장 서론 : 연구 목적 및 배경

중대사고 시 노심으로부터 재배치된 고온의 "노심 용융물질(debris)"을 담고 있는 원자로 하부용기 외벽면 cavity 공간에 냉각수를 충수시켜 debris로부터 발생된 열을 반구 외벽면을 통해 제거시켜, 궁극적으로 debris를 냉각, 원자로 하부용기 건전성을 확보하려는 소위 "외벽 냉각( External vessel cooling)" 방안은 중대사고시 노심 내에 용융물을 포획(IVR: In-Vessel Retention)시키기 위한 중요한 사고관리 방법의 하나로 인식 되고있다.

외벽냉각에 관한 연구 쟁점은 크게 3 영역으로 구분할 수 있다. 첫째는 반구내 재배치된 노심물질에 의해 반구 안쪽 벽면으로 예상되는 열속 크기이다. 이같은 열속 크기는 냉각수로 채워진 반구로 재배치된 노심용융물이 반구내 냉각수와 반응하는 정도에 따라 차이가 있다. 만일 재배치된 debris층 내부에 용융 pool 영역이 존재할 경우 용융pool 내 형성될 수 있는 자연대류에 의해 반구내벽면 위치에 따른 열속 크기가 차이가날 수 있다. 이같은 debris층 상부 및 하부방향으로의 열속크기에 관한 연구는 Epstein 과 Fauske 의 분석과 반구내 debris가 부분적으로 채워져 있을 경우를 고려한 Mayinger에 의한 개선식 그리고 Jahn과 Reineke에 의해 실험적으로 관측된 반구내면 위치에 따른 관련식들이 개발되어있다[1]. 이같은 용융pool 내부에 형성된 자연대류에 의해 피막층 안쪽 경계면 위치별 열속을 나타내는 식은 일반적으로 Nu수와 Ra 수를 연관지은 형태로 제시되며, MAAP 과 SCDAP/RELAP5 MOD3.1 코드에서는 위에서 언급한 식들을 사용하여 반구 상단 및 내벽으로의 열속 크기를 모의한다. 그러나 이 연구에서 사용한 MELCOR1.8.4 코드 경우 반구내 debris는 모두 동일크기의 구형 파쇄층이라고 가정하여, 반구내벽으로의 대류열속값 은 대류 열전달계수값을 사용자가 임의로 입력(COR00009 (2); default 1000  $W/m^2-K$ )하여 구하도록 되어있다. 단 사용자가 지정한 debris 용융온도(default 3200 K) 도달시 열전도도를 증가시켜 용융 pool에 의한 대류효과를 상징적으로 모의할 수 있는 기능이 있다 (민감도카드번호 1250 (1),(2)).

한편 냉각수로 채워진 하부반구로 재배치된 노심용융물이 냉각수와 반응 후 모두 파쇄층(particulated debris layer)으로 변한 후, 냉각수에 잠긴 파쇄층의 냉각과정은 파쇄층과 내부에 있는 냉각수간의 복잡한 열전달 현상에 의해서 지배되기보다는 파쇄층의 축방향 높이에 따른 상부 냉각수의 flooding 이나 dryout 위치에 의해 영향을 받는 것으로 가정하여 dryout위치에서 파쇄층으로 부터 냉각수로 열이 전달된다고 모의한 Lipinski 0 모델 [2], 파쇄입자층으로부터 주위 구조물(예; debris또는 반구벽 등)로의 열전달이 복사와 전도에 의해서 진행되며 광학적으로 두꺼운 무한 평판일 경우에 관한 가정을 적용한 Henry Epstein Fauske [3]모델이 개발되어있다.

또한 파쇄입자층이 냉각수로 채워지지 않고 수증기만에 의해 덮혀 있을 경우, 지속적인 붕괴열 발생으로 파쇄층 중앙부가 가열, 용융될 경우, 용융물이 파쇄층 내부로 이동, 침투되는 특성에 영향을 주는 상대 침투성(relative permeability)에 관해 Carman-Kozeny, Blake-Kozeny 그리고 rumph-Gupte의 모델들[4]이 개발되어 있다. 또한 수증기로 채워진 파쇄입자층 내부에서 전도와 복사에 의한 파쇄층 내부간 열전달 현상을 모의하기 위한



등가 열전도도 값에 관해 Imura-Yagi, Imura-Luikov, Imura-Wortmeter, Imura-Takegoshi 등의 모델들[5]이 개발되어있다. 만일 이같은 수증기로 차있는 파쇄입자가 발생하는 붕괴열로 인해 계속적으로 가열될 경우, 결과적으로 중앙에 용융 영역이 생성 되게된다. 반구내 재배치된 debris가 물질별로 미리 가정한 형태로 배열되도록 모의하고있는 MAAP 코드 경우 파쇄입자층은 oxidic pool (U-Zr-O 혼합물)상단 metal 층위에 분포하는 것으로 가정한다. 만일 파쇄층이 냉각수에 덮힌 경우 냉각과정은 Lipinski 0-D모델을 적용하고, 내부온도 분포는 lumped 모델이기 때문에 모의하지 않는다. 주위 구조물 (oxidic pool 상단 피막층, metal 층, 반구벽)과 열전달은 Henry Epstein Fauske 모델을 적용하여 모의한다. 특히 상부에 용융 metal층이 존재할 경우, metal층 하부에 있는 oxidic pool로부터 전달된 열이 metal층의 높은 열전도도로 인해 반구상단 벽쪽으로 전달된다. 이때 metal 층이 얇을 경우 단위면적당 열속이 증대하여 적절한 냉각을 시켜주지 못할 경우 반구벽 상단부의 파손이 예상될 수 있다.

SCDAP/RELAP5 경우는 파쇄층의 상태를 파쇄층온도와 void fraction 에 따라 1) dryout, 2) 과도, 3) 냉각의 세가지 상태로 구분하여 일반적인 기본 열전달식과 가정들을 적용 냉각과정을 모의하고, 파쇄층내부의 온도분포는 lumped 모델이기 때문에 모의하지 않는다[6]. Debris 형태가 오직 파쇄층인 MELCOR 코드경우 냉각은 Lipinski 0-D 모델을 적용하고, 파쇄입자층 내부의 온도분포는 입자층 전체를 반경별, 축높이별 위치에 따라 세분된 cell 이라는 기본조각으로 구분하여 각 cell별 축방향, 반경방향 전도에 의한 열전달을 모의한다. 이때 cell 간 등가 열전도도 값은 단순히 부품별 열전도도 값을 기본으로 표면적과 cell 높이를 고려하여 구한다. 또한 주위와 열전달은 사용자 입력 (COR00011, CORZjj02)을 사용 모의한다.

두번째로는 고온의 용융물이 재배치되어있는 하부반구의 외벽면이 냉각수와 접할 경우, 외벽표면에 형성된 이상유체 경계면에서 물방울의 생성, 성장 및 이동 현상이 복잡하기 때문에 표면에서의 열속값들이 반구의외벽면 위치에 따라 다르게 분포될 것이다. 따라서 냉각수와 접하고 있는 반구 외벽면 위치(각도)에 따른 열전달계수값에 관한 자료는 외벽 냉각효과를 평가하기 위해 필요한 자료이다. 현재까지 수행된 중, 소형 실험들은 아래쪽을 향한 표면상에 비등이 일어날 경우 평판, 구면, 반구형태의 3가지 종류에 대하여 표면의 기울기, 각의 기울기, 하부벽의 두께, 표면의 curvature, 벽면 구성 물질들에 따른 영향을 평가하였다[7]. 한편 Common Wealth Edison IPE 와 사고관리 프로그램의 지원하에 Robert E. Henry 등에 의해 수행된 실험에 의하면 직경 0.3m, 반구벽 두께 1.75 cm 와 3.3 cm 의 반구의외벽면에 단열층이 존재할 경우 과도기간 동안 어떠한 외벽면의 온도 상승도 발생되지 않았음을 관측하였다. 따라서 외벽면으로부터 냉각수로 열전달은 핵비등 현상에 의해 진행될 것이라고 판단하였고, 반구 내벽면에 약 1 MW/m<sup>2</sup> 크기의 열속을 외벽냉각을 통해서 제거할 수 있음을 확인하였다[8]. 이같은 결과들은 현재 MAAP 코드에 채택되어있다. MAAP코드 경우 외벽면으로부터 cavity 내 유체로의 열전달은 유체와의 경계면에 과도양함수 형태로 에너지 보존식을 구성, 유체와 접하고있는 하부반구의 외벽면의 온도를 구하고, 유체와의 열전달계수값은 물의 경우 핵비등 열전달계수값을 이용하여 외벽면을 통한 대류 열전달량을 계산한다. 이때 핵비등 열전달계수값은 가열면의 기울기에 무관하다. SCDAP/RELSP5 경우 반구의외벽을 통한 단일 열전달 계수값을 지

정하여 단순히 모의한다. MELCOR 경우 외벽면으로부터 cavity내 냉각수로의 열전달은 비등곡선내 핵비등영역, 전이막비등영역 그리고 안정막비등 영역의 3개 영역관련 열전달 계수 상관식을 선택, 적용하여 계산한다. 이때 핵비등 열전달계수 상관식은 가열면의 기울기에 무관하지만, 임계열속, 전이막비등영역 그리고 안정막비등영역에서의 열전달계수 값은 가열면의 기온각도에 관계된다. 이때 하부반구 링간 반경방향으로의 열전달은 없다.

마지막 세번째는 실제 원전경우 원자로용기는 대부분 하부반구를 비롯하여 용기전체가 대부분 단열 처리되어있다. 이같은 단열층이 설치된 경우 cavity 충수시 반구외벽을 통한 열제거가 용이하기 위해서는 단열층을 통과하여 충분한 양의 냉각수가 유입, 유출될 수 있어야한다. 즉 cavity 에 충수된 냉각수가 반구외벽을 덮고있는 단열재를 통과하여 반구 외벽과 접촉, 반구외벽에서 급격히 비등되고, 이때 비등된 냉각수가 용이하게 단열재를 빠져나올 수 있어야한다. 이같은 분야와 관련한 연구로 common wealth Edison IPE 와 사고관리 프로그램의 지원하에 Robert E. Henry 등에 의해 수행된 실험에 의하면 단열 재를 냉각수가 유입, 유출 되는데 소요되는 시간값 (약 80초)을 기초로, 유입된 냉각수가 모두 비등하여 수증기로 변환됨으로서 단열재가 설치된 반구외벽면을 통한 최대 열제거 가능 양을 예측하여 보았다. 이같은 최대 열제거가능 추정치는 약  $2 \text{ MW/m}^2$  로, 이 값은 중대사고시 하부반구의 건전성 유지를 위해 필요한 외벽에서의 예상 열속값보다 충분히 큰값으로, 단열재가 설치될 경우에도 cavity를 충수시켜 외벽냉각을 통해 하부반구로부터 충분히 열제거가 가능함을 보여주었다. 따라서 이 실험 결과에 의하면 단열재가 설치된 경우에도 단열재가 없는 경우와 마찬가지로 반구외벽면을 통한 열제거 능력에는 큰차이가 없는 것으로 판단하였다.

이 보고서에서는 외벽냉각 현상을 모의할 수 있는 MELCOR 1.8.4 코드의 COR 모듈내 하부반구 모델[9]을 이용하여 KNGR 원전을 대상으로 재배치되는 노심용융물의 양이 초기노심 재고량을 기준으로 50%인 80 톤이 하부반구로 동시에 재배치되고, 재배치시 초기 용융물 온도는 2700 K, 붕괴열크기는 재배치시 원자로 정지 후 1시간이 경과된 경우, 일차계통의 압력크기를 저압(5bar)과 고압(170bar)일 경우로 구분하여, 외벽냉각 여부에 따른 debris 냉각과 반구 건전성에 미치는 영향을 비교, 평가하였다. 그러나 하부반구 건전성 여부는 여러 변수들에 의해 직, 간접으로 영향을 받는다. 직접변수들로는 노심재배치 방식(동시, 불연속)및 시점, 반구내 냉각수 유무 및 양, 재배치된 debris 양, 구성물질 및 온도, 성분별 배열분리여부, 파쇄입자 크기 및 분율, 붕괴열 크기, 계통 압력 변화(감압, 가압), 외벽냉각 유무 및 시점, 외벽냉각 시 주입 냉각수 온도 및 총 주입냉각수 양, 안전 주입계통 운전여부 등의 직접적인 변수 외에 MELCOR 하부반구 모델내 불확실 간접변수 및 nodalization 형태 변경들까지 포함되면 그 분석양은 실로 방대하다. 따라서 특정 계산 결과만을 기초로 외벽냉각의 성공여부를 판단하는 것은 부적절하며, 관련 변수들에 관한 충분한 계산과 관련 실험자료의 수집, 분석, 토의를 통해 그 성공여부를 개략적으로 추정할 수 있다고 판단된다. 따라서 이 보고서의 계산 결과는 MELCOR 코드의 하부반구 모델에 의한 위에서 언급한 특정 조건에서의 예측 결과만을 제시한다. 이 연구의 의미는 MELCOR 코드의 외벽 냉각 모의 모델을 검토와 압력크기와 외벽냉각 유무에 따른 debris냉각과 반구건전성에 관한 예측 결과를 제시하며, 부가적으로 외벽냉각 성공을 위한 개념적인 필요조건을 제안하였다.

## 제 2 장 MELCOR 1.8.4 코드의 Lower Plenum 모델

### 2.1 Lower plenum내 debris 냉각모델

MELCOR 코드의 "COR 모듈내 Lower Plenum 모델" 은 노심 용융물이 냉각수로 채워진 하부반구로 재배치될 때 재배치된 용융물과 냉각수와의 열전달 과정을 세 단계로 구분하여 모의한다. 첫째는 급냉 열전달 단계, 두번째는 짧은시간 동안 진행되는 급격한 열전달을 변화를 연속적으로 연결시켜 주기 위한 과도 열전달 단계 그리고 마지막으로 안정된 파쇄층으로 부터의 열전달 단계로 각각 구분한다. 또한 반구벽과 penetration판의 가열 및 손상 그리고 반구의벽과 cavity 공간과의 열전달 현상을 모의할 수 있다.

먼저 노심 하부 지지판이 손상되면 균일온도의 용융물이 냉각수로 가득 차 있는 하부반구로 재배치된다. 이때 용융물이 냉각수 수면에 도달되기 전에는 냉각수와의 어떤 열전달도 없다. 이때 용융물의 낙하속도는 냉각수 도달 전이나 후 모두 동일하게 사용자가 지정한 속도값 (COR00012 (4))을 사용한다. 재배치하는 용융물의 하단침투가 반구바닥 안쪽에 도달되기 전 열전달은 재배치되는 용융물중 냉각수에 잠긴 용융물의 부피 비율을 재배치 시작 시 총 표면적에 곱하여 구한 냉각수와의 접촉면적과 입력 시 사용자가 지정한 급냉 열전달계수값 (COR00012(1)) 을 사용하여, 냉각수로의 열전달량을 계산한다. 이때 냉각수에 잠긴 부분의 용융물은 사용자가 입력에서 지정한 직경값(CORijj04 (3))을 가진 균일 구형 파쇄입자들로 즉시 변화된다고 가정한다. 이 파쇄입자들은 이후 사용자가 지정한 하강속도로 하부로 재배치되어 하부반구 내벽에 도달되면, 해당 링의 급냉 열전달단계가 종료되고, 두번째 과도 열전달 단계가 모의되기 시작한다.

이전까지 진행된 대량의 급냉열전달 단계로부터 세번째 단계인 안정된 파쇄층 형태로 부터의 열전달단계로 전환함에 따른 불연속적인 급격한 열전달 변화과정을 연속적으로 연결, 모의하기 위해 첫째 "급냉 열전달 단계"와 세번째 "안정된 파쇄층으로부터 열전달 단계" 를 아래 설명할 감쇄인자를 적용하여 유연하게, 서로 연결하였다. 이 중간단계를 "과도열전달단계"라 한다. 감쇄인자값은 링별로 용융물이 하부반구 내벽에 도달 되는 순간, 그값을 1로 초기 설정하고, 이후 연속적으로 감소되어 값이 0.01 이되면 세번째 단계인 안정된 파쇄층 단계로 전환되어진 것으로 가정하여, 안정된 파쇄층으로부터 열전달 단계를 모의하기 시작한다. 감쇄인자 f는 아래와같이 정의된다.

$$f(t + \Delta t) = \text{Min} \left[ 1, f(t)e^{(-\Delta t/\tau_s)} + \frac{V_{\text{cor}}}{V_{\text{LP}}} \right] \text{--- (1)}$$

단 f (t): 시간 t 에서의 감쇄인자,  $\Delta t$  : time step 크기

$\tau_s$  : 퍼짐시간 상수

$V_{\text{cor}}$  : 다른 ring에서 퍼져들어오는 debris양

$V_{\text{LP}}$  : 하부반구내 특정 ring 에 있는 총 debris 양

감쇄인자의 감소는 링별 재배치된 debris가 반구내에서 링별 debris 상단 높이를 모두 같게 하기 위해 링간 반경 방향으로의 debris 양이동을 모의하기 위한 퍼짐속도를 제어하는 시간 상수값 ( $\tau_s$ )과 링간 이동하는 debris의 질량과 하부반구내 임의 링에 이미 재배치된 debris 질량 정도에 관계된다. 예를 들면 만일 링간 유입되는 debris 질량이 링내 이미 존재하고있는 debris 질량보다 많은 경우, 즉 반구내 재배치 직후인 링간 높이조절 과도시점에는 감쇄인자의 값은 1.0으로 대기 상태에 있게 된다. 그러나 반구내 링별 debris 상단 높이가 모두 같아진 이후(즉  $V_{cor}=0$ )는 반경방향 퍼짐상수 값에 의해서 감쇄인자값이 1에서부터 감소를 시작한다. 만일 퍼짐시간 상수값(민감도카드 번호 1020 (1),(2))을 크게 주면 느리게 감소하고, 작게 주면 빠르게 감소한다. 이 기간동안 열전달계수값은 급냉 열전달계수값에 감쇄인자를 곱한 값을 사용한다.

링별 파쇄층 높이가 서로 다른 이유는 용융물이 재배치되면서, 링별로, 축높이별로 사용자가 지정한 서로 다른 유로면적(용융물 유입양 제한)으로인해, 재배치된 debris 질량이 다르기 때문에, 파쇄층 상단 높이가 링별로 다를 수 있다. 이 경우 하부반구내 재배치된 debris의 링간 높이를 모두 같게하기 위해 내부에서 외부쪽으로 진행하면서 두개 링간 debris 상단 높이를 비교하여, 외부쪽 링 파쇄입자 높이가 더높을 경우, 외부 링의 여분의 파쇄입자를 내부 링으로 이동시켜 전체 링들의 파쇄층 상단 높이를 같도록 한다. 이때 안쪽 링으로 이동되어야할 debris부피( $V_{eq}$ ) 및 time step  $\Delta t_c$ 동안 높이 조절을 위해 이동하는 실제 debris 부피( $V_{cor}=V_{rel}$ )는 아래와 같이 모의한다.

$$V_{rel} = V_{eq} (1 - e^{(-\Delta t_c / \tau_{spread})}) \quad \text{--- (2)}$$

단  $V_{eq}$  : 반경간 높이차이에 의해 더낮은 높이의 안쪽 링으로 퍼짐이동되어야할 debris 부피

$$= \frac{[f_d(IR) - f_d(IR+1)] * V_T(IR) * V_T(IR+1)}{(V_T(IR) + V_T(IR+1))}$$

$f_d$  : 링내 총부피에 대한 debris 부피분율

$V_T(IR)$  : 반구내 링IR 총부피

$\Delta t_c$  : 현재 time step 크기,

$\tau_{spread}$  : 반경 시간 퍼짐 상수(default; 1초)

만일 계산된 감쇄인자값이 0.01 이하로 되면, "과도 열전달단계" 가 종료되고, 마지막 세번째 단계인 "안정된 파쇄층으로 부터 열전달단계" 를 시작한다.

세번째 단계인 "안정된 파쇄층으로 부터 열전달 단계"시 파쇄입자는 반구내 빈 공간, 즉 이전에는 유체만으로 채워져 있던 공간을 구성하고 있는 각 cell 내 빈 공간에 채워지게 된다. 이때 임의 한 개 cell을 구성하고있는 공간은 세 종류로 구분된다. 첫째는 파쇄입자 자신의 점유공간, 둘째 파쇄입자간 작은 사이공간 그리고 세번째는 이들을 제외하고 cell에 존재하는 여분의 자유공간으로 구분된다. 임의 한 cell 내부 빈공간에 상부 cell로 부

터 재배치되어, 유입되는 파쇄입자를 수용하기 위해 가용한 최대 공간부피는 cell 총 부피에서 cell 내 이미 이전부터 존재하고 있는 파쇄입자의 점유공간 부피와 파쇄입자간 사이공간 부피를 제외하고 남은 자유공간 부피만큼이 가용하며, 인접한 상부 cell 로부터 재배치할 수 있는 최대 파쇄입자 부피( $V_{comp}$ )는 아래와 같이 계산한다.

$$V_{comp}^{j+1} = V_{free}^j - V_{free}^j * \epsilon^j = \sum_i \frac{M_i}{\rho_i} \text{ --- (3)}$$

단 j: cell 축 높이, i: 물질 종류, M: 질량  $\rho$ : 밀도  
 $\epsilon$ : 파쇄입자 다공성,  $V_{free}$ : cell내 자유 빈공간 부피

파쇄입자 자체가 차지하고 있는 공간은 파쇄입자내 다공성에 의한 부피는 포함하지 않았다. 즉 입자내부의 다공성은 없다고 가정하였다. 따라서 실제로 파쇄입자내 다공성에 의한 점유부피는 파쇄입자간 사이공간으로 구분하여 별도로 정의하였다. 이 파쇄입자간 사이공간은 사용자가 다공성 값을 축높이별로 입력(CORZjj01 (3))에서 지정하여 그 크기를 조정할 수 있다. 만일 cell 높이 j 에서의 다공성 값을 입력시 "1" 로 가정한 경우 인접한 상단 j+1 의 cell 에 존재하는 debris 가 하단으로 재배치 될 수 없다. 역으로 만일 cell 높이 j 에서의 다공성 값을 입력시 "0" 로 가정한 경우 인접한 상단 j+1 의 cell 에 존재하는 debris 가 하단 빈공간 전체로 모두 재배치될 수 있다. 따라서 실제의 경우는 하부반구cell 내 다공성 값은 재배치된 debris의 특성(예 debris 다공성 측정값, 또는 debris상단 높이)에 따라 조정할 필요가 있다.

위에서 설명한 cell 형태로 구성된 안정된 파쇄층으로 부터의 열전달은 크게 전도와 대류로 구분하여 설명할 수 있다. 단 이 연구에서는 cell내 존재할 수 있는 부품은 오직 파쇄층(실제경우 단일 cell내 건전 핵연료봉이나 유도관 존재 가능) 이기 때문에 cell 내부 부품들간 열전달 현상은 고려하지 않겠다.

첫째 안정된 파쇄층으로 부터의 cell 과 cell간 반경방향과 축방향으로의 전도 열전달 현상이 고려되고, 만일 임의 인접한 두 cell 중 한 개 cell내 파쇄층의 온도가 사용자가 지정한 용융온도 이상에 도달되었을 때는 용융물 대류에 의한 열전달 증가 현상을 민감도 카드(번호 1250)를 이용, 사용자가 열전달계수값을 임의로 증가시켜 모의할 수 있다. 인접한 cell 내 부품간 축방향과 반경방향으로의 전도 모델 모의시 등가 열전도도는 인접한 cell 내 부품들의 열전도도 값과 단면적, 각 해당 cell의 축높이 값을 이용하여 구한다. 인접한 두 cell i, j 간 온도차이에 의한 열전도양  $q_{ij}$ 를 아래와같이 모의한다.

$$q_{ij} = K_{eff} (T_i - T_j) \text{ --- (4)}$$

$$\text{단 } K_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{2K_i} + \frac{1}{2K_j}}$$

$$\begin{aligned}
& - \text{축방향} \quad \dot{K}_i = K_i A_i / \Delta Z_i \quad (\text{PD경우: } A_i = A_{\text{pdi}}) \\
& - \text{반경방향} \quad \dot{K}_i = K_i A_i / \Delta r_i \quad (\text{PD경우: } A_i = A_{\text{pdi}}) \\
& \quad \quad \quad (A_{\text{pdi}} = 6V_{\text{pdi}} / D_{\text{pd}}, \Delta r_i = V_{\text{tot}} / A_{ri}) \\
& \quad \quad \quad \Delta Z_i = \text{축방향 cell } i \text{ 높이}
\end{aligned}$$

위의 경우  $V_{\text{pdi}}$  는 파쇄층의 부피를,  $V_{\text{tot}}$  는 임의 한 cell 의 총 부피를 나타내며,  $A_{ri}$  는 특정 cell 의 반경 단면적을 나타낸다. 위의 식에서 축방향 열전달 경우는 축방향 cell 단면적과 축방향 node 길이를 이용하고, 반경방향 열전달 경우는 반경방향 cell 단면적과, 반경방향 node 길이를 이용한다.

일반적으로 축방향으로의 cell 간 열전도양은 무시할 만큼 적다. 그러나 냉각수와 수증기 경계면이 존재하는 특정 cell 에서는, 수위를 경계로한 축방향으로의 열전도 양은 급격한 온도 차이로 인해 매우 크다. 냉각수 수위가 위치한 cell 의 평균온도( $T_i$ )를 냉각수로 덮힌 부분 온도값( $T_c$ )과 노출된 부분 온도값( $T_h$ )으로 표현하면 아래와 같다.

$$T_i = X_a T_h + X_p T_c \quad \text{--- (5)}$$

단  $X_a$  : 수위 위치한 cell 의 노출 분율

$X_p$  : 수위 위치한 cell 의 냉각수에 덮힌 분율

cell 내 냉각수로 덮힌 부분과 노출된 부분으로 영역을 각각 구분하여, 미소시간  $\Delta t$  동안의 에너지 보존식을 아래와 같이 구성한다.

#### 냉각수에 잠긴부분

$$C_p X_p^n (T_c^n - T_c^o) = C_p (T_h^o - T_c^o) (X_p^n - X_p^o) + [K_{\text{eff}} (T_h^n - T_c^n) - h_p X_p^n A (T_c^n - T_p^n) + X_p Q] \Delta t \quad \text{---- (6)}$$

#### 노출된 부분

$$C_p X_a^n (T_h^n - T_h^o) = C_p (T_c^o - T_h^o) (X_a^n - X_a^o) + [K_{\text{eff}} (T_c^n - T_h^n) - h_a X_a^n A (T_h^n - T_a^n) + X_a Q] \Delta t \quad \text{---- (7)}$$

위의 (5), (6), (7) 방정식은  $X_a^o, X_p^o, T_c^o, T_h^o$  를 이용, 동시에 풀어서  $T_c^n, T_p^n$  을 구할 수 있다.

그러나 앞의 (4)식에서 사용하는 방법과 같이 파쇄층내 축방향 열전도를 계산하기 위한 등가 열전도도값, 즉  $K_{\text{eff}}$  를 냉각수와 수증기가 접해있는 cell 에 적용하면, 축방향으로의 열전도양을 과소평가하게 된다. 따라서 이같이 cell 내 냉각수와 수증기 경계 수위가 존재하여, 급격하게 축 방향으로의 온도가 변화될 것으로 예상되는 특정 cell 에는 축방향 온도차이에 의한 전도양이외에 냉각수나 수증기와의 열전달양도 함께 고려해주어야 적절하다.

$$K_{eff} \frac{d^2T}{dZ^2} - h \frac{A}{V} (T - T_f) + Q = 0 \quad \text{--- (8)}$$

$$\text{단 } T \Rightarrow T_c \text{ 또는 } T_h$$

$$T_f \Rightarrow T_a \text{ 또는 } T_p$$

또한 위식에서  $A/V$  는 cell에서 수증기나 냉각수에 잠긴부분을 나타내고,  $h$  값은  $Z=0$ 을 경계로  $h_a$  , 또는  $h_p$  가 될 수 있다.  $a$  는 수증기,  $p$  는 냉각수를 나타낸다. 위의식을  $(dT/dZ)_{Z=0}$  에 관해 풀면,  $K_{eff}$  는 아래와같이 구해진다.

$$K_{eff} = k_i A_i \sqrt{\frac{h_a A}{k_i V}} \quad \text{--- (9)}$$

따라서 앞에서 언급한 두식 (6), (7) 의 등가 열전도값  $K_{eff}$  는 cell내 이상수위가 존재할 경우 위에서 구한 식 (9)의 등가 열전도도값을 적용해야한다.

마지막으로 노심외곽부에 위치하는 파쇄층 경우 이 최외곽에 위치한 파쇄층으로부터 입력에서 지정한(CORZjj02) 인접 HS 구조물쪽 (예 baffle) 으로 열전달은 아래와같이 모의한다.

$$q_{pd-HS} = \frac{T_{pd} - T_{hs}}{R_{gap} + R_{diff}} \quad \text{--- (10)}$$

$$\text{단 } R_{gap} = \Delta r_{gap} / K_{gap}$$

$$R_{diff} = \sqrt{\frac{\pi \Delta t}{(k \rho C_p)_{hs}}}$$

$$\Delta r_{gap} = \text{외곽파쇄층과 구조물간 거리}$$

두번째로 안정된 파쇄층으로 부터의 대류 열전달을 설명하겠다. 안정된 파쇄층으로 부터의 대류열전달은 먼저 유체가 수증기일 경우는 자연대류와 강제대류로 구분한후 두경우를 다시 층류와 난류로 각각 구분하여 해당되는 상관식들을 적용하여 모의한다. 그러나 만일 유체가 냉각수일 경우는 파쇄층과 냉각수간의 온도차이에 따라 핵비등영역과 막비등 영역으로 구분하여 모의한다. 단 막비등시에는 복사열전달양을 함께 고려한다.

코드내에서 파쇄층과 유체간의 대류열전달은 파쇄입자 온도와 유체온도에 의한 조건에 따라 해당 상관식 ( $h_{cor,f}$ )을 구하여 아래와 같이 모의한다.

$$q = h_{rx} A_s (T_s^n - T_f) \quad \text{--- (11)}$$

단  $h_{rx}$  즉 완화 열전달계수 (relaxed heat transfer coefficient)는 아래와 같이 정의된다.

$$h_{rx,f}^n = f_{old,f} h_{rx,f}^{n-1} + (1 - f_{old,f}) h_{cor,f} \quad \text{--- (12)}$$

완화된 열전달계수 값을 사용한 이유는 수치해적인 불안정을 방지하기 위함이다. 위의

식에서 하첨자 f는 냉각수나 수증기로 지정될 수 있고,  $f_{old,f}$  값은 냉각수 경우 0.9, 수증기 경우 0.5를 기본으로 사용하고 있다. 상첨자 n 과 n-1은 각각 현재와 바로  $\Delta t$  이전 시간을 나타낸다.  $h_{cor,f}$  는 유체의 종류에 따라서 첫째 수증기와의 대류 열전달 경우는 건전한 부품일 경우(예 핵연료봉)와 파쇄층 경우로 각각 구분하여 해당 상관식을 이용, 구하고, 두번째 냉각수와의 열전달은 건전한 부품과 파쇄층의 구분없이 같은 방법으로 부품이나 파쇄층 온도값과 유체의 포화온도값 차이에 따라 적합한 상관식을 구한다.

수증기와 건전한 부품간의 대류 열전달계수값은 다음과 같이 구한다. 먼저 강제대류 가정하에 층류와 난류조건에서 구한 두개의 열전달계수값 중 큰값을 강제대류 열전달계수값으로 정한다. 그리고 자연대류 가정하에서 역시 층류와 난류 조건에서 구한 두개의 열전달계수값 중 큰값을 자연대류 열전달계수값으로 정한다. 이후 최종적으로 채택하는 부품과 수증기간의 대류 열전달계수값은 강제와 자연대류 열전달계수값 중에서 큰값을 최종적으로  $h_{cor,f}$  로 결정한다. 먼저 수증기와 건전 부품간의 강제대류와 자연대류 시 층류와 난류에 따른 열전달 상관식은 아래와 같다.

수증기와 건전 부품간의 강제대류 층류 조건

$$Nu = C(n)g_{d,v} \quad \text{--- (13)}$$

$$\text{단 } g_{d,v} = 1 + \frac{0.00826}{F(z) + 0.0011}$$

$$F(z) = \frac{(Z - Z_o)}{D_b RePr}$$

수증기와 건전 부품간의 강제대류 난류 조건

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad \text{--- (14)}$$

수증기와 건전 부품간의 자연대류 층류 조건

$$Nu = 0.18Ra^{1/4} (L/D_b)^{-1/9} \quad \text{--- (15)}$$

수증기와 건전 부품간의 자연대류 난류 조건

$$Nu = 0.065Ra^{1/3} (L/D_b)^{-1/9} \quad \text{--- (16)}$$

또한 수증기와 파쇄입자간의 대류열전달일 경우는 앞에서와 같이 강제대류와 자연대류일 경우로 구분하여 둘중 큰값을 결과적으로 파쇄층과 수증기간의 대류 열전달계수값 (즉  $h_{cor,f}$ )으로 결정한다.

수증기와 파쇄층간의 강제대류 조건



$$Nu = 2.0 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad \text{--- (17)}$$

수증기와 파쇄층간의 자연대류 조건

$$Nu = 2.0 + 0.6 Gr^{1/4} Pr^{1/3} \quad \text{--- (18)}$$

유체가 냉각수일 경우는 건전 부품이나 파쇄층일 경우 모두 동일하게 건전부품이나 파쇄층 표면온도값과 냉각수 포화온도값 간의 차이( $\Delta T$ ) 크기에 따라 아래와 두식중 해당되는 상관식을 선택하여  $h_{cor,f}$  (= >아래의  $h$ )를 구한다.

$$h = 34.5 P^{1/4} \Delta T^{1.523} \quad (\Delta T < 23.4K)$$

$$h = 1.41 * 10^7 P^{1.4} \Delta T^{-2.575} \quad (\Delta T \geq 23.4K) \quad \text{--- (19)}$$

그러나  $\Delta T$ 가 23.4 K 보다 크거나 같을 경우, 즉 막비등 영역일때는 위의식에서 구한 열전달계수값에 복사 열전달계수값을 함께 고려하여 대류열전달 계수값  $h_{cor,f}$  를 구한다.

$$h_{cor,f} = h + h_{rad} \quad \text{--- (20)}$$

$$h_{rad} = \sigma \varepsilon \frac{T_s^4 - T_f^4}{T_s - T_f}$$

단  $T_s$  : 부품 표면온도,  $T_f$  : 유체온도 ,  
 $\sigma$  : Stefan Boltzmann 상수  $\varepsilon$  : 방출성 (=0.4)

파쇄층으로부터 냉각수나 수증기로 대류열전달양 계산시 열전달 면적  $A_{cv}$ 는 입력시 (CORijj04 (3)) 지정한 파쇄입자 직경값을 근거로 구한다.

$$A_{cv} = 4\pi R^2 = \frac{6V_{pd}}{D_{pd}} \quad \text{--- (21)}$$

단  $V_{pd}$  = 파쇄층물질만의부피  
 $D_{pd}$  = 파쇄층입자직경 (2R)

그러나 냉각수로 채워진 하부반구로 용융물이 재배치된 직후, 처음 상당기간동안 고온의 파쇄층 상단에 위치할 냉각수가 파쇄층내부로의 유입이 용이하지 않을 것이다. 이는 중력에 의해 파쇄층 상단으로부터 하단쪽으로 이동되는 냉각수가 고온 파쇄층 내부로 침투되는 즉시 격렬하게 반응하여 증발되기 때문에, 이로 인해 상부쪽으로 급격하게 대량의 수증기가 상승하게되어 상부에 존재하는 냉각수가 하부쪽으로 내려오는 것을 억제하게 된다. 따라서 파쇄층내에 냉각수로 차있는 영역과 dryout 된 영역간의 경계층면이 형성되게 된다. 이같이 dryout 된 파쇄층으로부터 경계층면을 통해 상부 냉각수쪽에서의 열전달양을 예측하는 열속값을 Lipinski 0-dimensional 모델을 적용하여 구한다. 이때 열

전달면적은 총 파쇄입자들의 표면적을 사용하지 않고 해당 경계면 cell의 축방향 단면적을 사용하여 구한다. 또한 capillary head ( $\lambda_c$ )를 아래와 같이 가정하여 파쇄입자의 직경 크기에 관계없이 사용할 수 있도록 하였다.

$$q_d = 0.756 h_v \left[ \frac{\rho_v (\rho_l - \rho_v) g d \varepsilon^3 (1 + [\lambda_c / L][0.0005/d])}{(1 - \varepsilon) [1 + (\rho_v / \rho_l)^{1/4}]^4} \right]^{1/2} \quad \text{--- (22)}$$

$$\text{단 } \lambda_c = \frac{6\sigma \cos\theta (1 - \varepsilon)}{\varepsilon d (\rho_l - \rho_v) g}$$

만일 하부반구내 특정 위치 cell 에서 위 식으로부터 구한 dryout 열속값( $q_d$ )으로 냉각수로 열전달이 이루어지고 있다면, 이 축높이 이하 cell들에서는 파쇄층으로부터 냉각수로의 어떤 열전달도 고려하지 않는다. 또한 이 dryout 열속이 발생된 cell 내에 파쇄층을 제외한 다른 부품으로부터 냉각수로의 열전달도 무시된다.

냉각수로 차있는 하부반구내 노심용융물이 재배치될 경우 이제 까지 설명한 반구관련 열전달 모델들을 기본으로 하여 하부반구내 관련 각 부품별 (반구내벽과 접한 바닥debris cell, 반구내벽층, 반구내부층, 반구외벽층, penetration 관) 열균형 방정식을 구성하여, 아래와 같은 연립방정식형태로 구성, 하부반구내 관련 부품들의 온도값인 해를 구한다.

$$\begin{aligned} C_{p,p} (T_p^n - T_p^o) &= (q_{d,p} - q_{p,h} - q_{p,v}) \Delta t \\ C_{p,d} (T_d^n - T_d^o) &= (q_s - q_{d,h} - q_{d,v} - q_{d,d}) \Delta t \\ C_{p,h,n} (T_{h,n}^n - T_{h,n}^o) &= (q_{n-1,n} + q_{d,h} - q_{h,v}) \Delta t \quad \text{--- (23)} \\ C_{p,h,i} (T_{h,i}^n - T_{h,i}^o) &= (q_{i-1,i} - q_{i,i+1}) \Delta t \\ C_{p,h,l} (T_{h,l}^n - T_{h,l}^o) &= (q_{h,c} - q_{l,2}) \Delta t \end{aligned}$$

단  $C_{p,k}$  = 부품 k의 열용량,  $T_k$  = 부품 k 온도

$q_{kk}$  = k 에서 k 로의 열속

k= d 이면 debris

= h 반구벽

= v 유체

= h,n 하반구벽 안쪽 node

= h,i 하반구벽 내부node ( $2 \leq i \leq n-1$ )

= h,l 하반구벽 바깥node

\* 상부첨자: n=new time step, o=old time step

임의 링에서 debris 로부터 (MELCOR 에서는 모두 같은 직경크기의 구형 파쇄입자로 가정) 하부반구 내벽쪽에서의 열전달양( $q_{dh}$ )은 하부반구 안쪽 접촉면적을 통해서, 사용자가 입력시 지정한 열전달 계수값( $h_{dh}$ : HDBLH, COR00009 (2))과 하부반구 내벽 node 의 온

도( $T_{h,n}$ , 단  $n=5$  사용자 지정)와 이와 접촉하고있는 debris( $jj=01$ )간의 온도차이값에 의해서 결정된다. 단 이때 접촉면적은 판으로 모의하는 해당링의 면적이 아니라 하부반구 형태로 전환한 면적값을 적용한다.

$$q_{dh} = h_{dh} A_h (T_d - T_{h,n}) \text{ --- (24)}$$

하부반구벽은 반경방향인 링간, 열전달이 없고, 오직 임의 링내 반구벽 두께따른 방향으로만 열전달이 일어나는 것으로 가정한다. 또한 반구벽내 임의 두개 node간 ( $i, i+1$ ) 열전달은 아래와같이 모의한다. 단  $i=n$  은 반구내벽을,  $i=1$ 은 반구외벽을 나타낸다 (예; 반구벽을 4개층으로 구분시 node점  $n=5$ ).

$$q_{i,i+1} = k_i FAC A_h \frac{T_{h,i} - T_{h,i+1}}{\Delta Z_i} \text{ --- (25)}$$

이때 하부반구내 임의 두 node간 열전달 모의시 두 node 중 한 node 온도가 사용자가 지정한 용융온도(TKMIN) 이상으로 과도하게 증가되면 용융에 의한 대류로 열전달이 증가되는 현상을 모의할 수 있도록 열전달율을 증가시키고, 또한 과도하게 한 node 온도만이 증가되는 현상을 배제하기 위해, 두 node간 온도차이를 조정하도록 아래와 같은 인자 (FAC)를 사용한다 (민감도카드번호 1250 (1),(2)).

$$FAC = \text{Max} [ 1.0, [TKFAC(T_{max} - TKMIN)]^3 ] \text{ --- (26)}$$

단 TKFAC: 계수 (예 0.01)

$T_{max}$ : 상대적으로 더높은 node 온도

TKMIN: 해당 node 구성물질 용융온도

반구외벽을 통한 열손실은 반구 외벽면 온도와 cavity 내 대기 온도간의 차이에 의해서 사용자가 지정한 대류열전달 계수값을 이용 하부반구 외벽면을 통해 cavity로 일어난다. 하부반구 외벽면을 냉각수로 채워서, 반구가 손상되지 않도록 하는 외벽냉각( External Cooling )시 관련현상을 모의하는 모델은 다음 2.3 절에서 설명한다.

## 2.2 하부반구 파손 모델

실제로 중대사고 후반, 고온의 용융물이 하부반구로 재배치될 경우 다음과 같은 하부용기 및 관련 부품들의 손상 형태가 예상된다.

- 1 Penetration nozzle 및 관 가열손상
- 1 Penetration 관 이탈(ejection)
- 1 하부반구 creep 손상
- 1 하부반구 용기와 cyliner 용기간 용접부위 용융 손상

- 1 하부반구벽 용융 손상
- 1 용융물 jet 에 의한 용융관통(impingement)
- 1 용융pool 상단으로 metal층 분리 시 국부열속에 의한 하부 용기 손상

그러나 MELCOR 코드에서의 하부반구 손상은 아래 4개 조건중 어느 한 개의 조건이 만족될 때 발생된다고 가정한다.

1. Penetration관( penetration nozzle)의 온도가 입력시 지정한 손상온도값 (TPFAIL; default 1273.15K, COR00009 카드) 에 도달될 때
2. Control Function을 이용 사용자가 특별하게 모의한 반구 손상조건을 만족할 때 (CORRii02 [2]) 해당 링의 유입관 손상 발생)
3. 하부반구로 재배치된 용융물과 냉각수 반응시 발생하는 급격한 증기 발생으로 인해 원자로용기내 압력이 증가되어 사용자가 지정한 압력 상한값에 도달되었을 때 (COR00012 [2]=2.0E+7=20 Mpa)
4. 하부반구벽이 고온에 의해 약화된 상태에서 압력차이와 용융물자체 하중에 의한 부하로 인한 creep 발생시

위의 조건중 1 ~ 3 은 사용자 지정이므로 4번 항목을 계산하기 위한 MELCOR 코드의 모델에 관해 설명하겠다. MELCOR 코드에서 하부반구벽 creep손상은, 부프로그램 corlmp.f 에서 모의하며, 단 creep 손상이 발생하는 것으로 사용자가 가정하는 총 strain 값 (민감도카드 1601(4) )보다 작고 원자로용기와 cavity 간 최소압력차 제한값(민감도카드 1600(3))인 1000 Pa 보다 압력차이 값이 클 경우 creep 손상여부 모의를 진행한다. 하부반구벽의 creep 손상 여부는 두 종류의 모델중 한가지를 선택, 모의할 수 있다. 첫째는 기본으로 사용되고 있는 0-D 모델, 두번째는 민감도카드번호 1600 (1)을 1.0으로 입력할 경우 동작되는 1-D 모델로 구성되어 있다.

### 2.2.1 0-D Model :

반구벽 내 균일 두께의 mesh층별 온도값과 질량값을 기본으로 하여 구한 반구벽 전체에 관한 단일 평균온도값을 적용, 원자로용기와 격납건물간 압력차이와 재배치된 debris자체하중을 고려한, 등가 stress 를 구하여, 이를 이용 각 ring 별 Larson-Miller 매개 변수값을 구한다.

$$\sigma_o = \frac{(\Delta p + \rho_d g \Delta Z_d) R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \text{ --- (27)}$$

$$P_{LM} = SC1601(1) \text{Log}_{10} \sigma_o + SC1601(2) \text{ --- (28)}$$

최종적으로 이를이용 링별 반구손상 시간을 예측한다.

$$t_R = 10 \left( \frac{P_{\text{Max}}}{T_{\text{AVG}}} - SC^{1601(3)} \right) \quad \text{--- (29)}$$

단 압력차이 크기가 사용자가 지정한 최소 압력차값 (sensitivity card 1600 [30]=1000 Pa) 보다 클 때만 strain 크기를 계산하며, 이 strain 크기를 life-fractin 규칙을 이용, 즉 현재 time step 크기를 현재 시간에서의 예상 반구 손상 시간으로 나누어준 기여분값을 매 시간 step 별로 연속적으로 축적하여, 궁극적으로 1에 도달되면 해당 ring의 반구벽이 손상된 것으로 판단한다. 아래식에서 5는 반구내벽 총 strain값을 나타낸다.

$$\epsilon_{pi}(5:t + \Delta t) = \epsilon_{pi}(5:t) + 0.18 \frac{\Delta t}{t_R} \quad \text{--- (30)}$$

0-D 모델 경우, 반구벽을 통한 온도 구배가 있다 하더라도, 반구벽 질량에 따른 평균온도를 계산하여, 임의 시간에 반구벽면 전체가 평균온도로 일정하게 유지되고 있고, stress도 일정하다고 가정하여, LMP(각 ring에 한 개 LMP값)를 적용, 반구벽의 손상 여부를 판단한다. 한편 반구벽 온도가 시간에 따라 변하기 때문에, 시간 진행에 따라 계속적으로 파열되는 시간까지 기여분을 값이 1에 도달되면 반구벽 creep 손상이 발생된 것으로 간주한다. 실제 0-D 모델은 반구벽을 통해 온도구배가 완만한 경우에 적용할 수 있다.

## 2.2.2 1-D Model :

1-D 모델 경우는 온도구배가 심한, 예를 들면 외벽냉각을 수행할 경우에 사용할 수 있다. 하반구벽내 층별 stress 및 strain 분포를 계산한다. 이때 온도 변화에 따른 thermal strain 변화와 물성치 손상 진행으로 인한 stress 변화를 고려한다. 온도에 따른 Elastic modulus 는 아래 식을 사용하여 구한다.

$$E(T_i) = 2.0 * 10^{11} \left[ \frac{1}{1 + \left(\frac{T_i}{900}\right)^6} - \frac{1}{1 + \left(\frac{1800}{900}\right)^6} \right] \quad \text{--- (31)}$$

온도에 따른 yield stress 는 아래 식을 사용하여 구한다.

$$\sigma_y(T_i) = 4.0 * 10^8 \left[ \frac{1}{1 + \left(\frac{T_i}{900}\right)^6} - \frac{1}{1 + \left(\frac{1800}{900}\right)^6} \right] \quad \text{--- (32)}$$

Thermal strain은 아래 식을 사용하여 구하며,  $1.0 * 10^{-5}$  은 carbon steel 의 열팽창계수값이고,  $T_{ref}$  는 MELCOR 입력 시 하부반구 초기 온도값이다.

$$\epsilon_{th} = 1.0 * 10^{-5} (T_i - T_{ref}) \quad \text{--- (33)}$$

위 식에서  $E(T_i)$  는 경계면상의 두 mesh층의 node의 평균온도  $T_i$ 에서 계산하며,  $\epsilon_{ot}$  값은 같은 ring내 모든 mesh 층들에 대하여 같다.  $\epsilon_{pl}$  과  $\epsilon_{th}$  은 각 ring 내 plastic 및 thermal strain을 나타낸다. 아래의 아래첨자  $i$  는 yield 되지않은 mesh층내 stress를 나타낸다.

$$\sigma_i = E(T_i) [\epsilon_{tot} - (\epsilon_{pl,i} + \epsilon_{th,i})] \text{ --- (34)}$$

위의 [34]식은 같은 ring내 모든 mesh층들에 대한 total strain (total strain = elastic + plastic + thermal)은 같다는 가정을 기초로 하고 있다. 1-D 모델에서의 또 다른 가정은 하부반구벽 두께별로 분포된 stress들의 총합이 현재 반구벽에 가해진 부하크기와 같다는 것이다.

$$[\Delta P + \rho_d g \Delta Z_d] R_o^2 = \sum_i^{N_{NY}} \sigma_i (R_i^2 - R_{i-1}^2) + \sum_i^{N_Y} \sigma_Y(T_i) (R_j^2 - R_{j-1}^2) \text{ --- (35)}$$

단 NY: non yield, Y: yield

위 방정식 [34], [35]를 이용하여  $\epsilon_{ot}$  에 대하여 해를 구한 후 이를 이용하여 stress 분포 값을 개선해 나간다. 단 이때 LMP 상관식을 이용한  $t_R$ 을 적용  $\epsilon_{pl}$  을 구한다. 단  $\epsilon_{th}$  은 반구층별 온도분포를 알기 때문에 구해진다. 손상은  $\epsilon_{ot}$  값이 0.18 에 도달되면 해당 링의 반구벽의 creep 손상이 발생된 것으로 판단한다.

### 2.3 MELCOR 1.8.4 코드의 외벽 냉각 모델

하부반구 외벽으로부터 cavity 공간으로의 열전달은 각 링별로 하부반구 외벽면이 pool과 접한 면적과 대기와 접한 면적비를 각각 구하여, cavity 내 대기와 pool 쪽으로의 열전달을 서로 구분하여, 반구 외벽면으로부터 cavity로의 총 열전달량 ( $=q_{hc}$ )을 계산한다.

$$q_{hc} = h_{atm} (1 - F_{PL}) A_h (T_{h,1} - T_{atm}) + h_{rx,PL} F_{PL} A_h (T_{h,1} - T_{sat}) \text{ --- (36)}$$

단  $A_h$  = 임의 ring 면적

$h_{atm}$  = 반구외벽에서 cavity 대기로 열전달계수

$h_{rx,PL}$  = 반구외벽에서 cavity pool로 완화 열전달계수

$F_{PL}$  = 반구외벽 pool과 접촉 분율

$T_{atm}$  = CVH 로부터 cavity 대기온도

$T_{sat}$  = CVH 로부터 cavity pool 포화온도

$T_{h,1}$  = time step 시작시 반구 외벽면 온도

방정식 (36)의 오른쪽 부분의 첫번째 항은 반구의벽으로부터 cavity 대기로의 열전달양을 나타내며 두번째 항은 cavity pool 로의 열전달양을 각각 나타낸다. Pool 분율  $F_{PL}$  은 단순히 time step 시작 시 CVH 로 부터 cavity내 pool 깊이를 기준해서 pool 에 잠기게 되는 링별 하부반구 외벽면적의 분율을 나타낸다. Cavity내 대기로의 열전달 계수;  $h_{atm}$  은 사용자가 원하는 값을 지정 민감도 분석을 수행할 수 있도록 민감도분석 카드번호 1246의 첫째 항에, 기본값으로  $10 \text{ W/m}^2\text{-K}$  로 설정되어 있다 (부록 2 참조 [10]). Cavity 내 pool 로의 완화안된 열전달계수값(  $h_{unrelax,PL}$  )은 아래 설명할 “하향면 포화 냉각수 비등 모델” (downward-facing saturated pool boiling model) 을 사용하여 계산한다.

완화된  $h_{rlx,f}$  은 이후 설명할 하향면 포화 냉각수 비등 모델 (downward-facing saturated pool boiling model)에서 구한, 완화안된 열전달계수값을 사용, 아래와같이 구한다. 이같은 완화된 열전달 계수값은  $\Delta t$  간격으로 급격한 열전달 계수값의 변화를 방지하기 위해서 적용한다.

$$h_{rlx,f}^n = f_{old,PL} h_{rlx,f}^{n-1} + (1 - f_{old,PL}) h_{unrelax,f} \quad \text{--- (37)}$$

단 상부첨자  $n$  =현재시간 ,  $n-1$  =  $\Delta t$  이전시간

하부첨자  $rlx$ =완화된,  $unrelax$ =완화안된

$f_{old,PL}$  = 유체별로  $\Delta t$  이전 시간값을 사용하는 분율

$f$  = 유체, 수증기 또는 공기

$f_{old,PL}$  은 수증기와 물에 대해 각각 기본으로 0.5, 0.9 값을 사용하고 있고, 민감도카드 번호 1200 을 사용, 사용자가 임의로 값을 조정할 수 있다.

아냉된 냉각수가 비등되기 전에는 pool 로의 열전달은 무시된다. 즉 하부 용기 외벽면의 온도가 cavity내 냉각수 포화온도 이상일 경우만 pool 로의 열전달이 고려된다. 따라서 방정식 (37) 의 오른쪽 부분, 두 번째 항은 절대로 음이 될 수 없다. “하향면 포화 냉각수 비등 모델”은 아래와 같이 3 종류의 열전달 영역으로 구성된다.

1. 완전 핵비등영역 (비등면 기울기 무관, 표면온도와 포화온도간 차이 관계)
2. 전이막비등 영역 (이 영역에서 열속값 크기는 표면온도, 포화냉각수 온도간 차이를 기본으로 해서 임계 열속과 최소 열속값을 log 내삽하여 구한다)
3. 안정막비등 영역 (비등면 기울기 관계)

위에서 언급한 3개의 열전달 영역은 각각 “완전 핵비등영역”과 “전이막비등영역”을 구

분하는 "임계열속점", 그리고 "전이막비등 영역"과 "안정막비등 영역"간을 구분하는 "최소 막비등열속점"으로 구분된다.

먼저 핵비등 영역 내에서의 열전달은 가열면의 기운 각도에 무관하다고 가정한다. 그러나 핵비등의 상한치인 임계열속점은 표면의 기운 각도에 관계된다고 가정하며, 아래와 같이 나타낸다[11].

$$q_{CHF}(\theta) = (0.034 + 0.0037\theta^{0.656})\rho_v^{0.5}h_{lv}[g\sigma(\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \quad \text{--- (38)}$$

- 단  $\theta$  = 표면의 기운 각도 ( 완전 하향면일 경우 =0 기준)  
 $\rho_l, \rho_v$  = 각각 물과 수증기의 밀도  
 $g$  = 중력가속도  
 $\sigma$  = 수증기와 물간의 표면장력  
 $h_{lv}$  = 물의 증발 잠열

또한 위의 식중 0.034, 0.0037, 0.656은 민감도 분석카드번호 1245를 이용, 사용자가 원하는 값을 지정할 수 있다.

두번째 경계가 되는 최소막비등 열속점은 가열면의 기운 각도의 함수로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{MIN}(\theta) = (4.8E-4 + 8.2E-4 * \theta^{0.407})\rho_v^{0.5}[g\sigma(\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \quad \text{--- (39)}$$

단 위식경우 4.8E-4, 8.2E-4, 0.407 은 민감도 분석카드번호 1245 번을 이용, 사용자가 원하는 값을 적용할 수 있다.

완전핵비등 영역에서의 열전달은 기본으로 HS(Heat Structure) package 의 상관식을 적용한다. 그러나 만일 민감도카드 1241(5)에 양의 값을 입력하면, MARCH 코드에서 사용하는 아래와 같은 단순화된 상관식을 적용하여 물에 잠긴 구조물로부터의 핵비등열전달을 모의한다. 이때 표면온도와 냉각수 포화온도간 차이의 함수로 핵비등영역 내에서의 열속을 계산할 수 있다.

$$q_{NB}(\Delta T) = h_{NB}A_h\Delta T \quad \text{--- (40)}$$

$$\begin{aligned} \text{단 } \Delta T < 23.4 \text{ K} & \quad h = 34.5 P^{1/4} T^{1.523} \\ \Delta T \geq 23.4 \text{ K} & \quad h = 1.41(107)P^{1/4} T^{-2.575} \end{aligned}$$

안정막비등 영역에서의 열속은  $\Delta T$  의 함수로 표현되며 안정 막비등 영역내 에서의 열전달계수를 구하는 상관식은 사용자가 두 종류 중에서 한가지를 선택하여 사용할 수 있다. 먼저 기본으로 사용되는 막비등 열전달 계수는 아래와 같다.



$$q_{FLM}(\Delta T) = h_{FLM} A_b \Delta T \quad \text{--- (41)}$$

$$\text{단 } h_{FLM}(\Delta T) = 0.142 K_v \left[ \frac{h_v \rho_v g (\rho_l - \rho_v)}{\mu_v K_v \Delta T} \right] (\sin \theta)^{0.333333}$$

$\mu_v = \text{수증기점성도}, K_v = \text{수증기전도도}$

위의 식에서 계수 0.142 및 0.333333 은 민감도 분석카드번호 1245를 이용하여 사용자가 원하는 값을 지정할 수 있다.

두번째의 안정막비등 열전달 계수는 민감도 분석카드번호 1245 의 7번째 항을 1.0 으로 setting 하면 작동되며, 이때 사용되는 안정 막비등영역내 에서의 열전달계수 상관식은 아래와 같다.

$$h_{FLM}(\Delta T) = (0.055 + 0.016\theta^{0.5}) K_v \left[ \frac{h_v v_v g (v_l - v_v)}{\mu_v K_v \Delta T} \right]^{1/3} \quad \text{--- (42)}$$

$v_v = \text{수증기비체적}, v_l = \text{냉각수비체적}$

위의식에서 0.055, 0.016 및 0.5는 민감도 카드번호 1245를 이용 사용자가 지정한 값으로 분석할 수 있다.

이상 방정식 (38),(39),(41),(42) 까지는 모두 특정 각에서의 열속이나 열전달계수값을 의미한다. 그러나 MELCOR 코드에서는 일정 ring 내 평균값을 필요로 하기 때문에 특정 각에서 함수값  $f(\theta)$  를 이용 ring "i"의 평균값  $f_i$  를 구해야한다.

$$f_i = \frac{\int_{\theta_{i-1}}^{\theta_u} f(\theta) \sin \theta d\theta}{\cos \theta_{i-1} - \cos \theta_u} \quad \text{--- (43)}$$

$$\text{단 } \theta_u = \min[\theta_i, \max(\theta_{i-1}, \theta_{PL})]$$

위의 식에서  $\theta_{PL}$  은 하부반구 바닥에서부터 pool 표면까지의 각도이다.

그런데 만일 매우 작은 내반경을 가정할 경우(즉 매우작은 각 값지정)는 바람직하지 않다. 왜냐하면 하부반구 모델에서는 국부적인 고온지역의 형성을 억제할 수 있는 반경방향 열전도를 모의하지 않기 때문이다. 만일 반경방향으로의 열전달이 고려되면 발생되지 않을 용기파손이 발생될 수 있다.

앞에서 언급한 각각의 열전달 영역에서의 상관식들을 적용하여 완화안된 열전달 계수값을 구하는 구체적인 계산 절차는 아래와 같다.

첫째 식 (40)으로부터 구한 핵비등열속값을 임의 ring에 대한 식 (38)의 임계열속값과 같다고 가정하여  $\Delta T$  값을 구하면, 이는 임계열속시 예상되는 표면과 포화온도간의 차이값  $\Delta T_{CHF}$  과 같을 것이다. 또한 식(41)로부터 구한 막비등열속값을 식(39)의 최소 막비등 열속값과 같다고 가정하여  $\Delta T$  값을 구하면, 이는 최소 막비등열속 시 예상되는 표면과 포화온도간의 차이값  $\Delta T_{MIN}$  과 같을 것이다. 한편 코드내 COR 모듈 시작 시  $\Delta T$  값(표면 및 포화온도 차이)을 알고 있다. 따라서 현재 조건이 비등곡선에 어떤 열전달 영역에 해당되는지는 COR 모듈 시작 시 알고있는  $\Delta T$  값을 앞에서 구한  $\Delta T_{CHF}$  ,  $\Delta T_{MIN}$  과 비교하여 해당 열전달 영역을 찾을 수 있다.

1. 만일  $\Delta T < \Delta T_{CHF}$  이면 완전 핵비등 영역에 해당되며 이때 완화안된 열전달 계수는 식 (40) 으로부터 구한다.
2. 만일  $\Delta T > \Delta T_{MIN}$  이면 안정된 막비등 영역에 해당되며, 이때 완화안된 열전달 계수는 식 (41) 또는 (42) 로부터 구한다.
3. 만일  $\Delta T_{CHF} < \Delta T < \Delta T_{MIN}$  이면 과도막비등 영역에 해당되며, 이때 완화 안된 열전달 계수는 임계 열속값과 최소열속값간의 log 내삽을 아래와 같은 식을 이용, 수행하여 완화안된 열전달 계수를 구한다.

$$h_{TRN} = \frac{q_{MIN}}{\Delta T_{MIN}} \left( \frac{\Delta T}{\Delta T_{MIN}} \right)^{\left[ \frac{\log(q_{CHF}/q_{MIN})}{\log(\Delta T_{CHF}/\Delta T_{MIN})} \right]} \quad \text{--- (44)}$$

MELCOR 코드 경우 외벽면으로 부터 cavity 내 유체로의 열전달을 비등곡선내 핵비등 영역, 전이 막비등 영역 그리고 안정막비등 영역의 3개 영역 관련 열전달계수 상관식을 적용하여 계산한다. 이때 핵비등 열전달계수 상관식은 가열면의 기울기에 무관하지만, 임계열속점, 전이 막비등영역이나 안정 막비등 영역에서의 열속값은 가열면의 기온 각도에 관계되며, node간 반경방향으로의 열전달이 모의되지 않는다. 만일 첫번째 ring 을 작게 정의할 경우 첫째 ring node 에서 국부적인 고온이 형성, 적절치 못한 반구 파손이 발생될 수 있다.

### 제 3 장 외벽 냉각 입력 구성

MELCOR 1.8.4 의 COR package내 lower plenum 모델을 이용한 외벽냉각 모의 시 발전소 계통 전체를 모의할 필요는 없다. 따라서 외벽냉각 시 관련된 주요 계통인 노심(CV170)과 down-commer (CV130), 원자로 하부용기(CV150), 반구외벽을 충수할 cavity 공간 (CV801), cavity 충수용 냉각수를 담고있는 탱크 (CV401), 그리고 외벽냉각 시 cavity내 발생하는 수증기의 방출에 의한 cavity 공간 가압을 방지하기 위한 방출공간(CV141) 등을 고려하여 모의영역을 단순화 시켰다. 그림 3.1은 단순화된 외벽냉각을 위한 입력 구성도를 보여준다. 단순화된 입력은 모의 시간이 짧고, 반구내 재배치된 debris의 냉각 및 반구 건전성 여부관련 주요 매개변수들의 민감도 분석이 용이하다는 장점이 있다. 또한 원자로 용기내 노심(active 영역)을 축방향으로 1 개로 구분하여 노심의 하부반구 재배치가 가능한 동시에 일어나도록 하였다. 하부반구로 노심을 동시에 재배치시키는 이유는 반구벽의 건전성을 보수적으로 평가하기 위해서이다. 왜냐하면 실제 경우 용융된 노심의 재배치 현상은 노심내 여러 구성 물질들의 용융점 차이와 상호작용(예: Eutectic)으로 소량의 노심 용융 물질이 하부반구로 불연속적인 시간 간격으로 재배치될 것이기 때문에 동시에 용융물이 하부반구로 재배치될 경우의 충격보다 재배치 직후 반구벽의 최대온도값, 압력증가 등을 보수적으로 예측할 것으로 판단했기 때문이다.

노심의 동시 재배치를 위해서 다음과 같은 입력을 사용하였다. 첫째  $ZrO_2$ 층 파열 온도값, 두번째는 민감도 분석 카드 번호 1132에서 지정하는  $ZrO_2$ 층만 남아있는 경우 재배치되는 온도값 및 핵연료봉의 구성 성분에 관계없이 재배치되는 사용자 지정 온도값들을 재배치시키고 싶은 온도값인 모두 2700 K로 동일하게 지정하여, 이 온도값에 도달됨과 동시에 노심이 재배치되도록 하였다. 그러나 반경 방향별 2700 K에 도달되는 시간이 차이가 날 수 있으므로, 반경 방향 링별 출력 침투 계수값(CORRii03)을 조정하여 링별 모두 동일시간에 손상 지정 온도값인 2700K 에 도달할 수 있도록 조절하였다.

이같은 핵연료봉의 재배치 여부는 건전한 핵연료봉과 손상 핵연료봉으로 구분하여 모의한다. 건전 핵연료봉이 손상 핵연료 봉으로 전환여부는 COR00008에서  $\beta$ -Zr 두께가 사용자가 지정한 두께 보다 얇아지면 손상 핵연료봉으로 전환되도록 모의하고 있다. 그러나 이 연구에서는  $\beta$ -Zr 두께에 관계없이 민감도 카드번호 1132에서 지정한 온도값에 도달할 때까지 declad된 핵연료봉(예:  $ZrO_2$ 층이 파열되어 재배치된 경우)이 붕괴되지 않고 현 위치에 머물러 있도록 모의하였다.

이 건전한 핵연료봉과 손상된 핵연료봉의 재배치 여부는 CORZjj02 의 두번째 항에서 사용자가 지정하는 노심지지 관련 선택사항에 의해서 결정된다. 먼저 건전한 핵연료봉의 경우는 두 종류의 선택사항이 있다. 첫째 해당위치의 핵연료봉이 녹거나 또는 손상핵연료봉으로 전환될 때까지 현 위치에 머물 수 있다. 두번째는 축방향으로 현 위치 바로 아래 위치(node)가 빈 공간일 경우 현 위치 핵연료봉은 즉시 손상핵연료봉으로 전환된다. 현재 연구에서는 두번째 종류의 선택사항을 선택하였다.

손상된 핵연료봉의 재배치는 역시 두 종류의 선택사항이 있다. 첫째는 CORZjj04 에서 지정한 온도값에 도달될 때 까지 손상된 핵연료봉이 현 위치에 머물 수 있다. 두번째는 손상된 핵연료봉이 전혀 지지되지 않아 손상 핵연료봉 생성 즉시 하부로 재배치하게 된다. 현재 연구에서는 첫번째 종류의 선택사항을 선택하였다. 또한 붕괴열 크기는DCHSHUT 를 사용 재배치 시 원자로 정지 후 1시간이 되도록 하였다.

이같은 노심물질이 하부반구로 재배치될 경우, 재배치된 노심물질의 냉각은 세 단계로 진행된다. 첫째는 용융물이 하부반구내 냉각수를 통해 낙하하여 반구안쪽에 도달될때 까지 진행되는 급냉과정, 이 연구 경우 급냉과정시 냉각수와 열전달이 없는 것으로 가정 (COR00012 (1)=0.0)하였다. 두번째 단계에는 고체 debris와 용융물의 반구내 링간 반경 퍼짐을 제어하는 시간상수값(민감도 카드번호 1020 (1),(2))은 각각 3초와 1초로 지정하여 비교적 느리게 진행되도록 하였다. 세 번째 단계는 안정된 파쇄층으로부터 냉각수와 열전달 단계이다. 이 단계 시 냉각수에 잠긴 노심용융물은 사용자가 CORijj04 에서 지정한 직경 5cm의 균일한 파쇄입자층으로 변화되는 것으로 가정하였다. 반구내 재배치된 debris로부터 반구내벽으로 전달되는 열속 크기를 모의할 때 사용되는 열전달계수값은 코드내 기본값 (COR00009 (2)=1000.0)을 적용하였다.

하부반구벽에 위치한 penetration은 모두 동일한 형태로 링별로 모두 특성이 같다. debris로부터 penetration으로의 열전달 모의 시 사용되는 열전달계수값은 코드내 기본값 (COR00009 (1)=1000.0)을 적용하였다. 또한 penetration 관 손상의 발생 온도(COR00009 (3)=1273.15 K)는 코드내 기본값을 적용하였다. 그러나 이같은 지정 손상 온도값 적용 시 외벽냉각의 유무에 관계없이 용융물이 재배치되는 순간 항상, 즉시 penetration 관 손상이 예측 되었다. 따라서 반구벽의 creep 손상을 모의하기 위해, 임의로 높은 온도값(5000 K)을 설정하여 penetartion 관 손상 발생을 억제하였다. 하부반구벽의 creep 손상은 반구벽 전체의 평균온도를 사용하는 코드내 기본으로 설정된 "0-dimensional 모델"을 적용하지 않고, 외벽냉각 시 예상되는 반구내 급격한 온도 기울기를 고려하여 "1-dimensional 모델"을 적용하여, 모의하였다.

반구외벽은 1000초에 50 ° C 의 냉각수가 즉시 충수되기 시작하여 약 수십초 이후 수위가 하부반구 상단에 도달되도록 하였다. 이때 cavity 충수 및 수위를 하부반구 상단으로 과도기간동안 일정하게 유지시키기 위해 cavity 로 충수할 냉각수를 담고있는 CV401과 cavity 공간 CV801 사이에 밸브 401를 설치하여, 만일 cavity내 냉각수가 가열, 비등되어 수위가 하부반구 상단 이하로 내려갈 경우, 즉시 밸브를 열어 cavity 내로 냉각수를 보충시켜 수위를 하부반구 상단으로 항상 유지할 수 있도록 모의하였다. 그러나 반구 파손 발생이 되면 밸브를 닫아서 더 이상 수위제어를 하지 않도록 하였다. 또한 외벽냉각 시 발생하는 수증기로 인해 cavity 공간의 압력증가를 방지하기 위해 임의 방출 공간(CV 141)을 고려하여 cavity 공간이 1기압으로 일정하게 유지 되도록 하였다. 이같은 방법으로 구성된 MELCOR1.8.4 용 KNGR 하부반구 외벽냉각 해석용 입력파일(고압용)을 부록 1 에 포함하였다.

이상 언급한 입력내용으로 KNGR 원전에 대해 재배치되는 노심양은 KNGR 노심 초기

재고량의 50%, 재배치 시작 시 debris 온도는 2700K, 붕괴열 크기는 원자로 정지후 1시간후 값을 가지고 냉각수가 차있는 하부반구로 동시에 재배치될 때 외벽냉각 유무에 따른 debris냉각과 반구 건전성에 관한 계산을 수행하였다. 일차계통의 압력은 중대사고시 가능한 최소압력 범위인 LOCA 시 약 5기압과 최대 압력 범위인 PORV 개방 설정치 압력 170 기압을 가정하였다.

## 4 계산 결과

분석은 일차계통 압력이 5기압과 170 기압일 경우, 외벽냉각을 수행할 경우와 하지 않을 경우, debris냉각과 반구벽 온도거동 및 반구건전성 여부에 미치는 영향을 평가 하였다. 단 penetration 판 손상이 고려되지 않았고, 반구의 벽에 단열층도 없는 것으로 가정하였다.

### 4.1 저압 경우 외벽냉각 유무에 따른 계산 결과

저압사고 경위를 모의하기 위해 일차계통의 압력을 5 기압으로 유지하도록 모의하였다. 그림 4.1.1 는 외벽냉각에 관계없이 약 1120초에 노심온도가 2700 K 에 도달하였을때 KNGR 노심 초기재고량을 기준으로 50% 인 80톤의 노심이 하부반구로 동시에 재배치됨을 보여준다. 재배치될때의 붕괴열 크기는 원자로 정지후 1시간이 경과된, 총붕괴열양이 약 28 MW 이었다. 그림 4.1.2은 반구내 재배치된 debris 질량의 변화를 보여준다. 특히 외벽냉각을 수행하지 않은 경우 debris 방출이 불연속적인 것은 약 5900초경에 하부반구의 링1, 2가 손상된 반면에 외곽의 링3 는 약 7200초에 손상되었기 때문이다. 외벽냉각을 한 경우 반구 손상시간은 14100초에 손상되었다. 그림 4.1.3 는 cavity 내 냉각수 수위 변화를 보여준다. Cavity내 냉각수 주입시점인 1000초후 수십초만에 하부반구 상단까지 냉각수로 채워져, 이후 과도기간동안 수위가 일정하게 유지되었다. 반구손상 직전 cavity 내 냉각수가 비등되어 이상수위가 증가되고, 비등으로 인한 냉각재 손실로, 수위 감소시 밸브를 개방하여 냉각수를 보충하여 수위를 회복시키는 과정을 보여 준다. 또한 원자로 용기파손후 점진적으로 cavity 수위가 감소되었다. 그림 4.1.4 는 cavity 내 냉각수 온도 변화로, 외벽냉각시 cavity내 냉각수 온도의 연속적인 증가와 비등 그리고 재보충 과정들을 잘 보여준다.

그림 4.1.5~4.1.7 은 반구와 접하고있는 debris의 링별 온도변화를 보여준다. 초기에 하부반구로 재배치시 노심물질의 온도는 2700K 이었으나 초기 debris가 불연속적으로 재배치되어, 반구내벽의 초기 debris온도가 약 1800K 로 낮게 예측되었다. 그림 4.1.8 는 외벽냉각을 수행하지 않은 경우, 반구벽 두께별 plastic strain 변화 과정을 보여준다. 용융물 재배치 직후 링 1의 반구 외벽층이 늘어나서 재배치 이후 4780초만에 가장 먼저 총 strain 값 0.18 에 도달되어 반구의 creep 손상이 발생되었다. 이때 다른 내부층들은 수축하여 줄어들다가 손상직전 모두 급격하게 팽창되었음을 보여준다. 그림 4.1.9 는 외벽냉각을 수행한 경우, 반구벽 두께별 plastic strain 변화 과정을 보여준다. 외벽이 낮은 온도를 유지하여 반구손상을 억제하였기 때문에 cavity 내 냉각수가 비등점에 도달되어 반구의외벽을 통한 열제거능력이 상실될때 까지 반구 손상이 억제되었다. 그러나 cavity 냉각수가 비등온도에 접근하자, 반구내 각층들이 급격히 늘어나 반구가 creep손상 되었다. 그림 4.1.10,그림 4.1.11는 링별 외벽냉각 유무에 따른 총 strain 을 보여준다. 그림 4.1.12,그림4.1.13 는 외벽냉각 유무에 따른 반구벽내 stress 분포를 보여준다. 그림 4.1.14~그림4.1.16 는 하부반구 링1의 외벽층으로부터 내벽

층 까지의 온도 변화과정으로 외벽냉각을 한 경우 cavity 내 냉각수가 가열, 비등되어 외벽냉각능력을 상실하기 전까지는 반구벽의 온도가 반구벽 용융온도 이하로 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 그러나 cavity 내 냉각수가 비등 온도에 도달되자 반구벽 각층들의 온도가 증가되기 시작하여 반구벽 손상온도 이상으로 증가되는 것을 보여준다. 따라서 외벽 냉각시 cavity 에 주입되는 냉각수의 온도와 주입 총 양이 외벽 냉각 효과의 지속 크기를 결정하는 중요한 인자임을 알 수 있다. 외벽냉각을 하지않는 경우는 재배치 이후 반구벽의 온도가 급격하게 상승하여 재배치 이후 약 4780초 만에 반구벽이 손상되었다 그러나 외벽냉각을 한 경우 재배치 이후 약 12880초에 반구벽이 손상되었다. 이후에 온도는 남아있는 소량의 debris에 의한 것이다. 그림 4.1.17, 그림 4.1.18 는 외벽 냉각 여부에 따른 링별 반구외벽면 온도를 보여준다. 그림 4.1.19 ~그림 4.1.21 는 반구벽내 링별 penetration 관 온도를 보여준다. Penetration 관의 온도는 재배치 즉시 외벽냉각 여부에 관계없이 사용자가 지정한 penetration관 손상온도인 1273.15 K 에 즉시 도달된다. 따라서 이연구에서는 creep 손상시간을 예측하기 위해 penetration 손상은 무시하였다. Penetration 관은 바닥 debris cell 높이에 의해 덮힌 면적을 통하여 열을 받아, 접하고 있는 반구내벽층으로 열을 전달한다. 그림 4.1.22 은 링1 에서 debris 로부터 반구내벽으로의 열속 크기를 보여준다. 초기에 최대 1.05 MW/m<sup>2</sup> 이고, 이후 과도기간동안 약 0.2 MW/m<sup>2</sup> 이었다. 또한 시간에 따른 반구외벽으로부터 cavity 로의 열속은 초반 최대 0.38 MW/m<sup>2</sup> 이고, 이후 0.1 MW/m<sup>2</sup> 이하를 유지하였다. 그림 4.1.23 는 반구손상시 cavity로 방출되는 debris양을 보여준다.

#### 4.2 고압경우 외벽냉각 유무에 따른 계산 결과

고압사고 경위를 모의하기 위해 일차계통의 압력을 170 기압으로 유지하도록 모의하였다. 재배치시 노심용융물량은 KNGR초기 노심재고량을 기준으로 50%인 80톤이 동시에 하부반구로 재배치되었고, 이때 재배치되는 노심물질의 온도는 2700K 이고, 재배치될때 원자로정지후 약 1시간후의 붕괴열 크기로 설정하였다.

그림 4.2.1 는 외벽냉각을 한 경우 약 1620초에 노심이 하부반구로 동시에 재배치되었음을 보여준다. 그림 4.2.2 은 하부반구내 냉각수 수위 변화를 나타낸다. 이때 외벽냉각을 한 경우 하부반구내 냉각수 고갈(dryout) 시점이 다소 지연됨을 보여준다. 그림 4.2.3 은 반구내 재배치된 debris질량의 시간에 따른 변화를 보여준다. 그림 4.2.4 는 외벽냉각시 cavity 내 냉각수 수위 변화과정을 보여준다. 1000초에 cavity를 충수하기 시작하여, 수십초후 하부반구 상단까지 충수하였고, 이후 비등으로 인해 고갈된 냉각수를 보충하여 수위를 반구상단으로 일정하게 유지하였다. 약 8600초경 하부반구의 creep 손상으로 용융물이 cavity내 냉각수와 반응할 때 급격한 비등으로 일시적으로 수위가 상승하였다가, 이후 점진적으로 cavity 수위가 감소되는 과정들을 보여준다. 그림 4.2.5 는 cavity내 냉각수 온도로 초기에 50° C의 냉각수가 주입되었으나, 이후 외벽면으로 부터의 제거된 열의 흡수로 인해 냉각수 온도가 계속적으로 증가됨을 보여준다. 특히 손상시점은 cavity내 냉각수 온도가 포화온도에 도달되어 외벽 냉각능력이 상실된 시점임을 보여준다. 그림 4.2.6 ~ 그림 4.2.8 은 반구

내벽과 접한 debris의 링별 온도를 보여준다. 외벽냉각을 하지 않은 경우, 재배치 이후 약 1180초 만에 반구가 creep 손상되어 debris온도가 급격히 감소하는 것을 보여준다. 그러나 외벽냉각을 한 경우 반구 손상이 재배치 이후 약 6980초 이후로 지연되었다. 그림 4.2.9, 그림 4.2.10 은 외벽냉각 유무에 따른 링1의 반구벽 두께따른 plastic strain 변화를 보여준다. 링1 경우 2800초에 총 strain 값이 0.18 에 도달되어 creep 손상이 발생됨을 보여준다. 그림 4.2.11, 그림 4.2.12 는 외벽냉각 여부에 따른 링별 총 strain 을 나타낸다. 그림 4.2.13, 그림 4.2.14 는 외벽냉각 여부와 반구두께 따른 stress 분포를 나타낸다. 그림 4.2.15~ 그림 4.2.17 은 링1 의 반구 외벽층으로부터 내벽층 까지의 온도 변화로, 외벽 냉각을한 경우 저압 경우 보다 가열이 좀더 빠르게 진행됨을 볼 수 있다. 이는 재배치 직전 반구벽 온도가 고압인 경우가 저압 경우보다 약 200 K 정도 높았기 때문에 좀더빠르게 진행된 것으로 판단된다. 고압인 경우에도 cavity 내 냉각수가 비등온도에 도달되자 반구벽 각층들의 온도가 빠르게 증가하기 시작하여, 반구벽 손상온도 이상으로 증가되는 것을 보여준다. 고압 경우 역시 외벽 냉각시 cavity 에 주입되는 냉각수의 온도와 주입총 냉각수량이 외벽 냉각효과와 지속시간 크기를 결정하는 중요한 인자임을 알 수 있었다. 하부반구로 재배치되는 초기 노심물질의 온도는 2700K 이었으나 하부반구내 존재하는 구조물 및 반구내 퍼짐시간동안 열전달로 인해 반구내벽의 초기 debris 최대온도도 저압경우와 같이 재배치시 온도값보다 낮은 약 2100K 였다. 외벽냉각을 하지 않는 경우는 재배치 이후 반구벽의 온도가 급격하게 상승하여 재배치 이후 약 1180초 만에 반구벽이 손상온도에 도달되었다. 그러나 외벽냉각을 수행한 경우 재배치 이후 약 6980초후 반구가 손상되었다. 반구 손상후 debris온도값이 남아있는 것은 소량의 debris에 의한 것이다. 그림 4.2.18, 그림 4.2.19 는 외벽냉각을 수행여부에 따른 링별 하부 반구 외벽면온도 변화를 각각 보여준다. 그림 4.2.20 ~ 그림 4.2.22 은 반구벽 링별 penetration관 온도 변화를 보여준다. Penetration관의 온도는 고압 경우에도 재배치 즉시 외벽냉각 수행 여부에 관계없이 사용자가 지정한 penetration관 손상온도인 1273.15 K 에 순간적으로 도달된다. 따라서 저압 경우와 마찬가지로 creep 손상시간을 예측하기 위해 penetration 관 손상을 무시하였다. 그림 4.2.23 는 시간에 따른 debris로부터 반구내벽으로의 열속 크기와 반구외벽으로부터 cavity내 냉각수로의 열속크기 변화를 보여준다. 초기에 반구내벽으로의 최대열속은  $1.4 \text{ MW/m}^2$  이었고, 이후 과도기간동안 약  $0.3 \text{ MW/m}^2$  이었다. 반구외벽으로부터 cavity 로 열속크기는 초기최대  $0.37 \text{ MW/m}^2$  , 이후는 약  $0.1 \text{ MW/m}^2$  이하였다. 그림 4.2.24는 반구외벽 손상시 cavity로 방출되는 debris 양을 나타낸다.



## 5 결론 및 추후 연구 분야

외벽 냉각시 cavity 에 주입되는 냉각수 온도와 총 주입 냉각수량이 외벽 냉각 효과의 지속시간 크기를 결정하는 중요한 인자임을 알 수 있었다. 특히 cavity 내 냉각수 온도가 시간에 따라 가열되어 포화온도에 도달되면 외벽을 통한 냉각 능력이 상실되어 반구벽 온도가 급격히 증가하기 시작하였다. 따라서 외벽냉각 효과의 지속을 위해서는 cavity 내 냉각수 온도 증가를 억제할 수 있는 장기적인 방안이 필요하다고 판단된다.

또한 압력에 의한 효과는 고압보다 저압인 경우가 creep 손상 발생시간이 지연되었다. 이같은 creep 손상의 지연은 반구벽에 가해진 부하크기가 고압일 경우보다 상대적으로 매우 작기 때문이다. 그러나 외벽냉각을 한 경우, 고압일지라도 외벽냉각을 하지 않은 저압 경우 보다 creep 손상 시점이 지연되어, 외벽냉각의 효과를 보여 주었다. 따라서 일차계통을 저압으로 유지하고, 외벽냉각을 수행하는 것이 하부반구의 건전성을 유지할 수 있는 기본조건으로 판단된다.

Penetration 관 온도가 사용자가 입력시 지정한 손상온도값 1273.15 K 에 도달하면 penetration 관의 손상이 발생하는 것으로 판단하는 MELCOR 모델을 적용할 경우, 압력이나 외벽냉각 여부에 관계없이, 재배치 즉시 penetration 관이 손상된다. 그러나 실제 경우 외벽 냉각 수행시 penetration관의 손상이 지연될 수 있는 현상, 예를들면 penetration관 벽 팽창으로 인한 반구벽과의 열전달 면적 증가, 관내 냉각수 효과, 그리고 외벽냉각시 반구벽내 재배치하는 debris의 plugging 가능성 등이 존재한다. 따라서 penetration 손상관련 모델의 보완이 필요하다고 판단된다.

## 참고문헌

1. M. Jahn and H.H. Reineke, "Free Convection Heat Transfer with Internal Heat Sources," Proceedings of the 5th international Heat Transfer Conference, vol.3, p.74.1974.
2. Ronald J. Lipinski, "A Coolability Model For Post accident Nuclear Reactor Debris", Nuclear Technology, vol 65, Apr.1984.
3. M.Epstein, F.B.Cheung, et. al, "Effective Thermal Conductivity for Combined Radiation and Free Convection in an Optically Thick Heated Fluid layer", ASME, Vol 103 pp 114~120, 1981 Feb.
4. R. Byron Bird, "Transport Phenomena", Willey Int Edt, 1960, pp196-200.
5. S.Imura and Takegoshi, "Effect of Gas Pressure on the Effective Thermal Conductivity of Pack Beds," Heat Transfer Japanese Research, 3,4,1974,p.13
6. "SCDAP/RELAP5/MOD 3.1 Code Manual; Damage Progression Model Theory", NUREG/CR-6150 EGG-2720, vol 2, Idaho National Engineering Laboratory, 1995.
7. M. S.El-Genk and Cheng Gao, "Experiments on Pool Boiling of Water from Downward-Facing Hemispheres," Nuclear Technology Vol. 125, Jan 1999.
8. Robert E. Henry et. al., "Cooling of Core Debris Within the Reactor Vessel Lower Head", Nuclear Technology vol 101 pp 385~399, Mar 1993.
9. "MELCOR Coputer Code Manual: Primer and Users' Guides & Reference Manual Version 1.8.4", NUREG/CR-6119, Vol 1,2 SAND97-2398, July 1997.
10. 박이동외, "열전달", 보성문화사, pp 206-207 (table 5.6, Fig 5-36).
11. M.S.El-Genk and Z. Guo, "Transient Critical Heat Flux for inclined and Downward-Facing Flat Surfaces," ANS Proceeding, HTC-6 vol 6,1992, National Heat Transfer Conference, August 9-12,1992, San Diego.

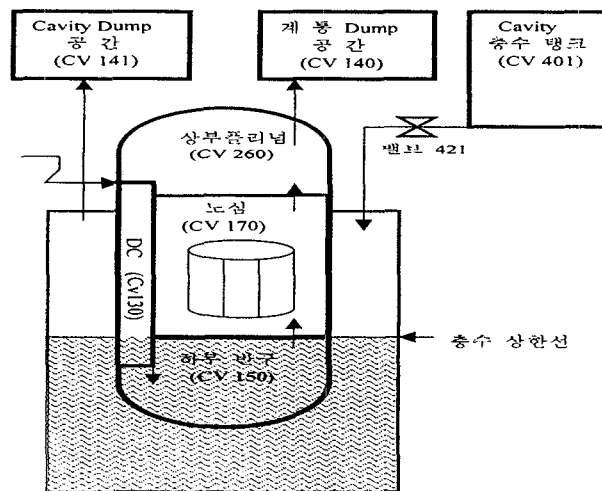


그림 3-1. 외벽냉각 모의를 위한 MELCOR 입력도

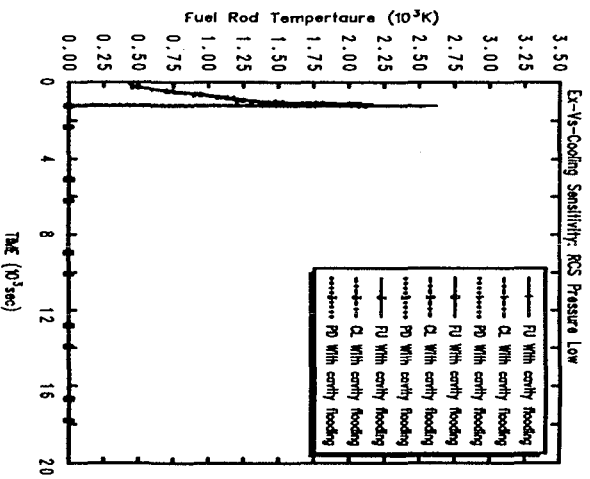


그림 4-1-1. 저압, 외벽망각시 노심온도

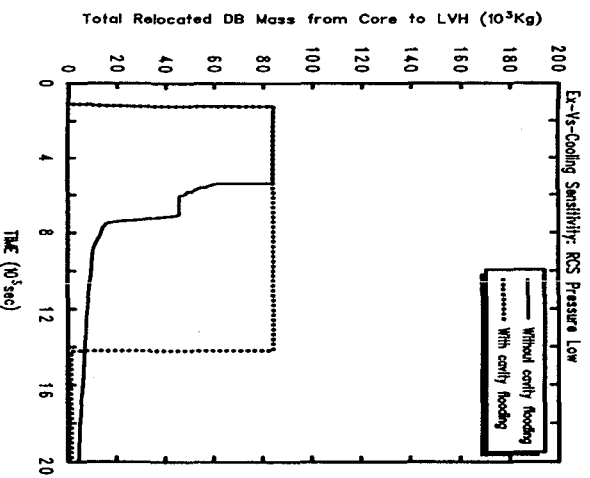


그림 4-1-2. 저압시, 하부반구내 debris 결량

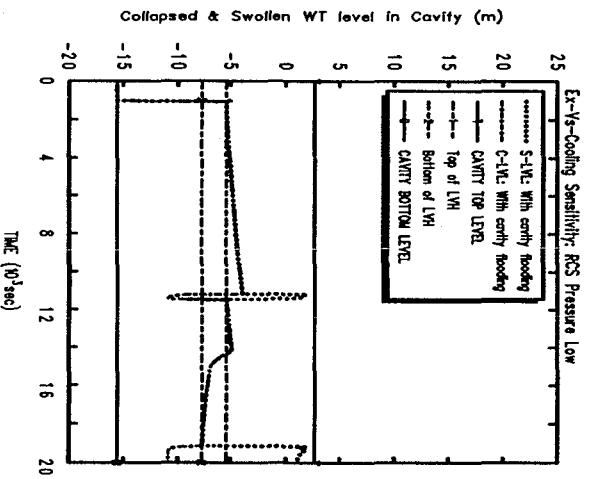


그림 4-1-3. 저압, 외벽망각시 CAVITY내 경각수 수위

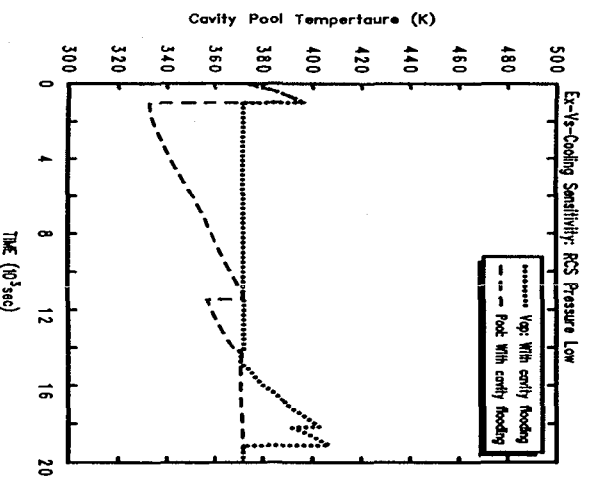


그림 4-1-4. 저압, 외벽망각시 CAVITY내 경각수 온도

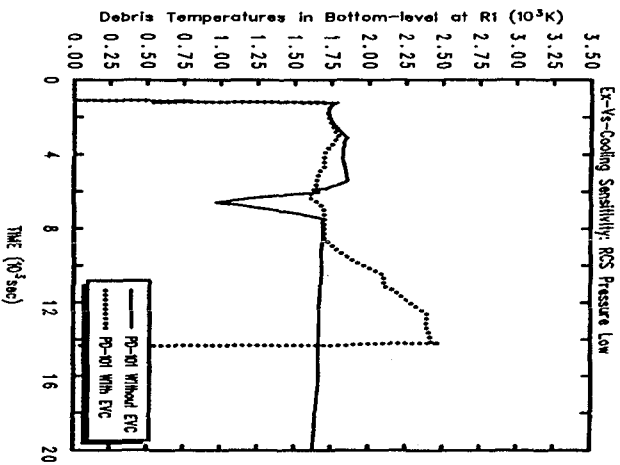


그림 4-1-5. 저압, 외벽냉각 따른 링1 반구와 접한 debris 온도

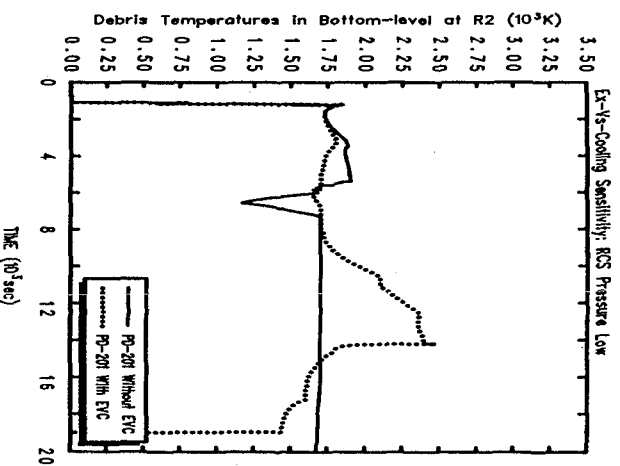


그림 4-1-6. 저압, 외벽냉각 따른 링2 반구와 접한 debris 온도

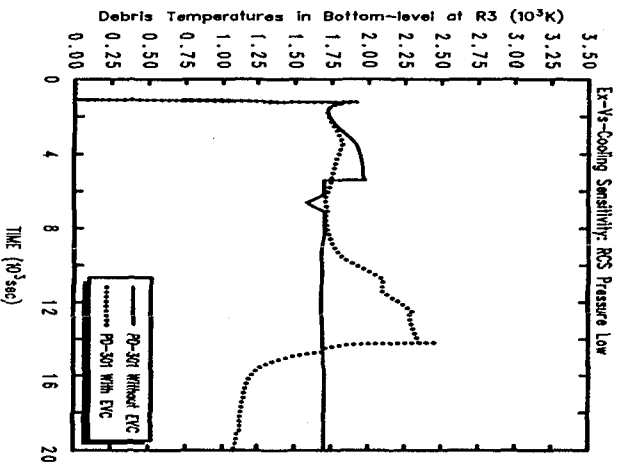


그림 4-1-7. 저압, 외벽냉각 따른 링3 반구와 접한 debris 온도

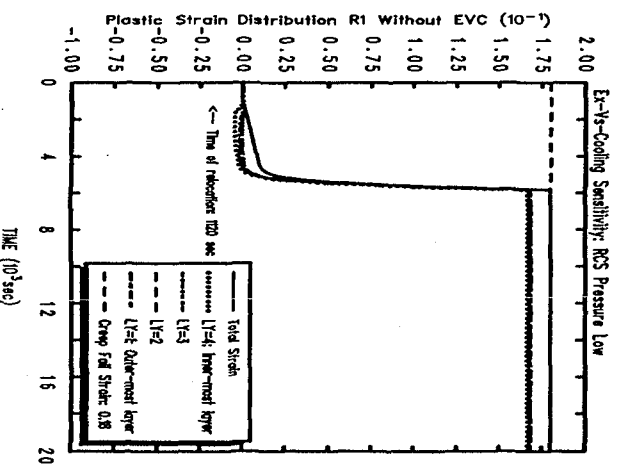


그림 4-1-8. 저압, 외벽냉각 인한 경우 링1 소성변형

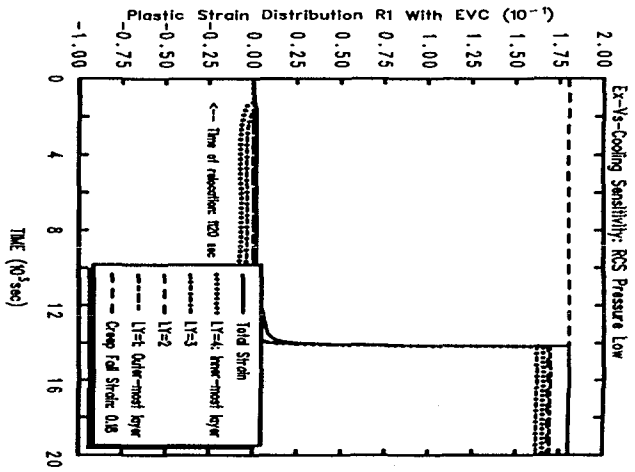


그림 4-1-9. 저압, 외벽냉각 한 경우 링1 소성변형

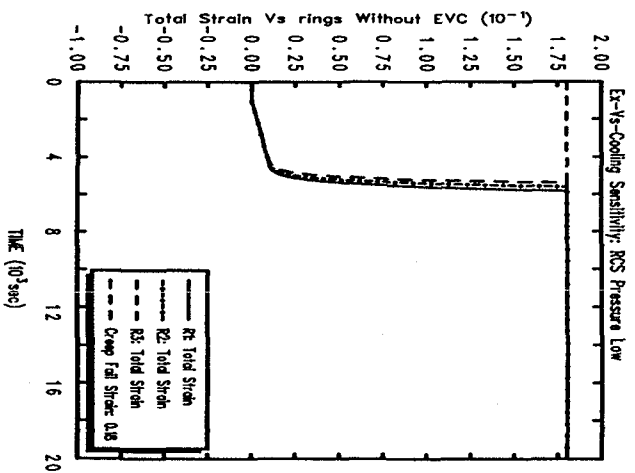


그림 4-1-10. 저압, 외벽냉각 안한 경우 내벽의 링별 소성분포

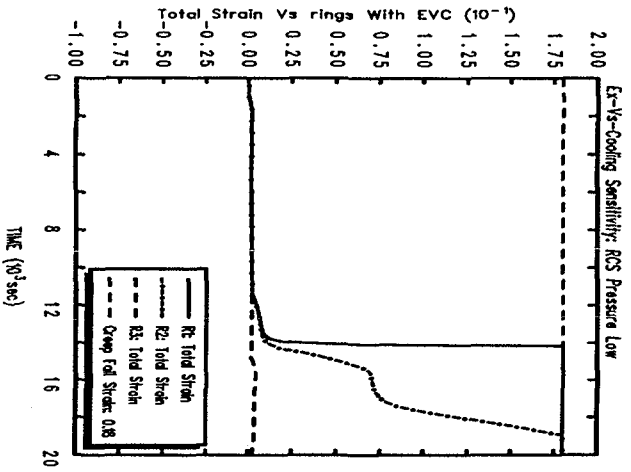


그림 4-1-11. 저압, 외벽냉각 한 경우 내벽의 링별 소성변형

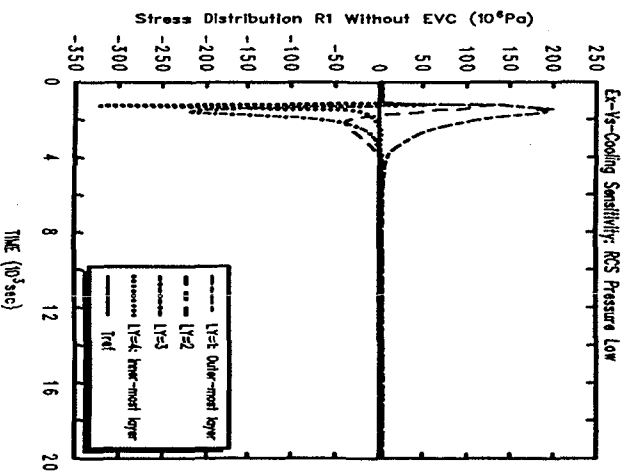


그림 4-1-12. 저압, 외벽냉각 안한 경우 링 1 반구내 응력분포

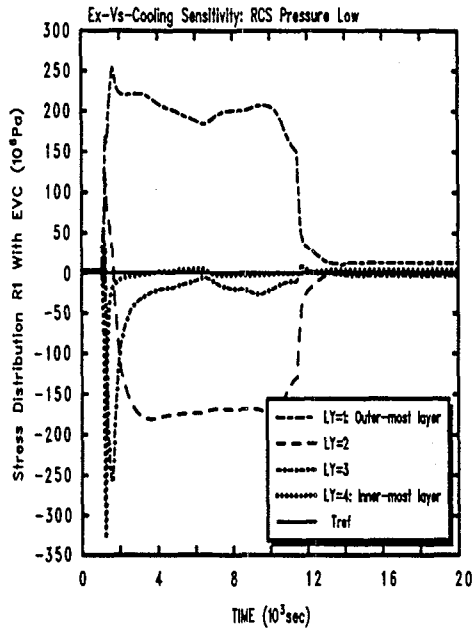


그림 4-1-13. 저압, 외벽냉각 한 경우 링 1 반구내 응력분포

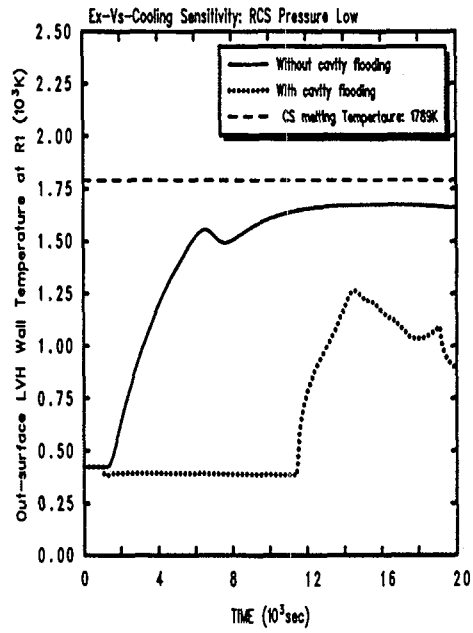


그림 4-1-14. 저압, 외벽냉각 다른 링 1 반구외벽 온도

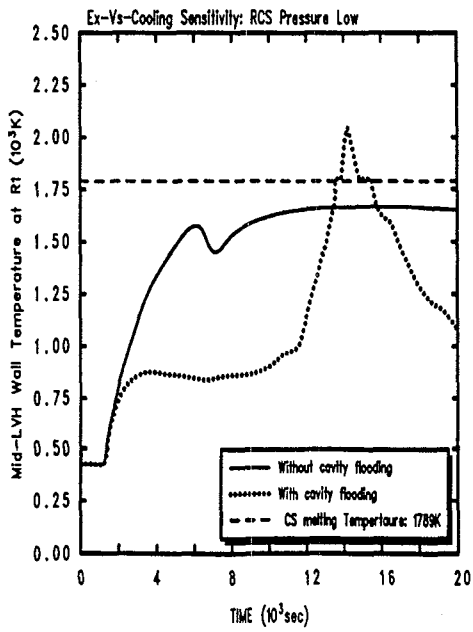


그림 4-1-15. 저압, 외벽냉각 다른 링 1 반구벽 중앙온도

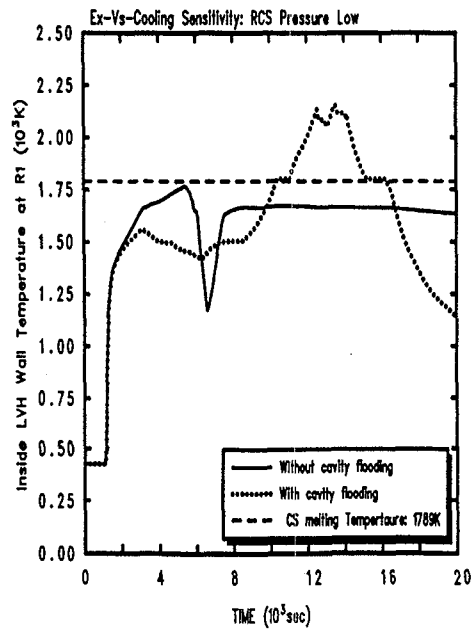


그림 4-1-16. 저압, 외벽냉각 다른 링 1 반구내벽 온도

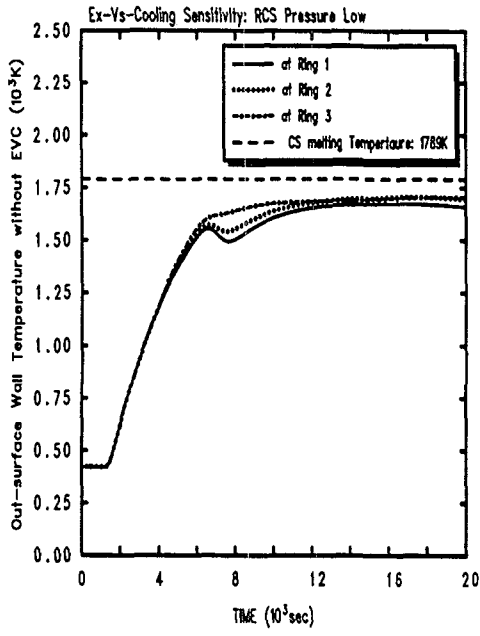


그림 4-1-17. 저압, 외벽냉각 안한 경우 링별 외벽온도

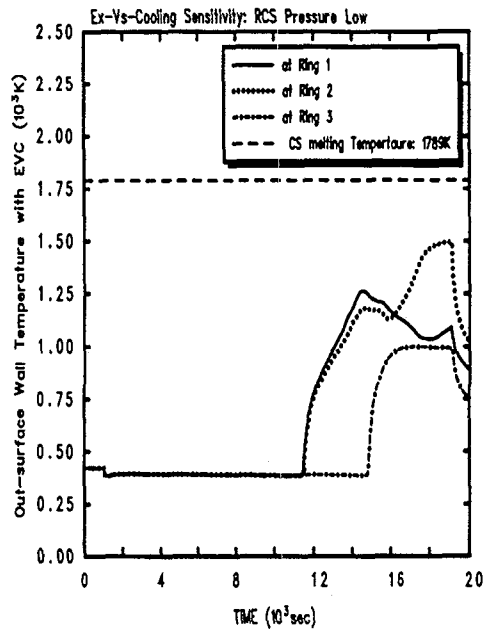


그림 4-1-18. 저압, 외벽냉각 한 경우 링별 외벽온도

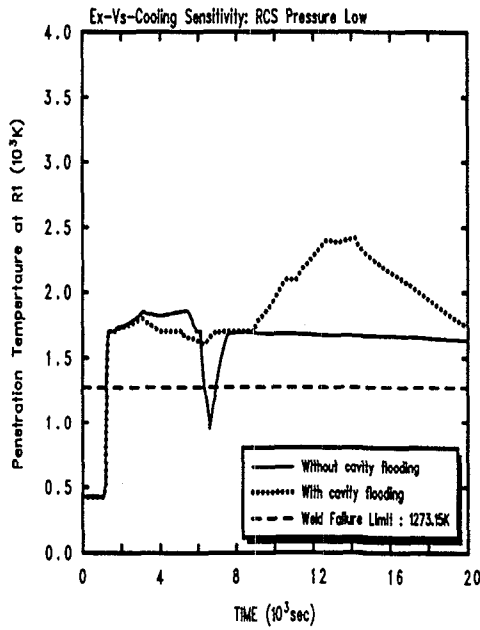


그림 4-1-19. 저압, 외벽냉각 따른 링1 penetration 관온도

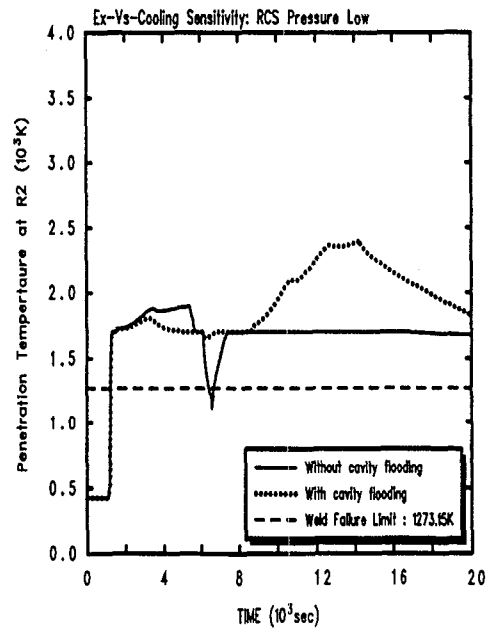


그림 4-1-20. 저압, 외벽냉각 따른 링2 penetration 관온도

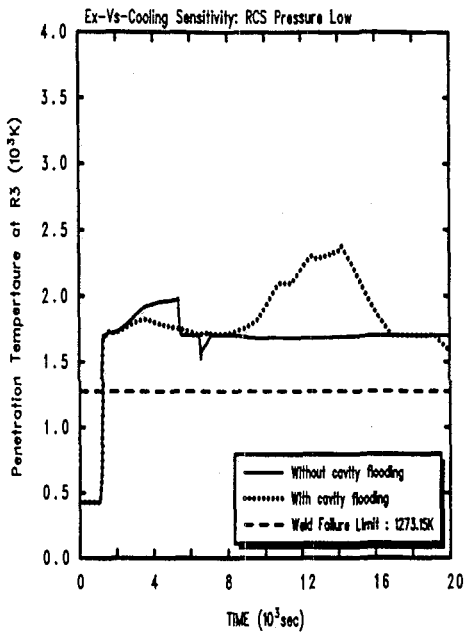


그림 4-1-21. 저압, 외벽냉각 따른 링3 penetration 관온도

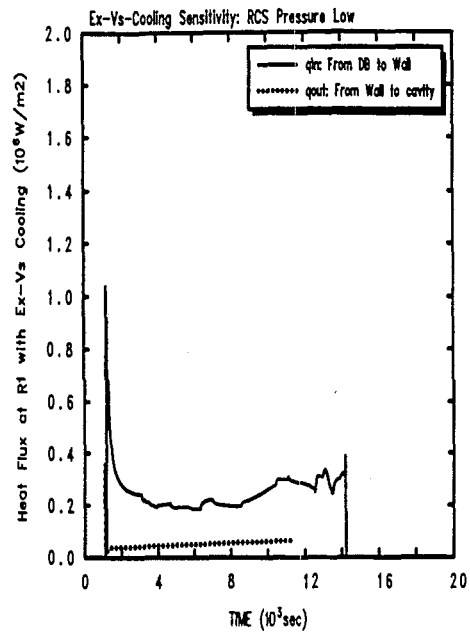


그림 4-1-22. 저압, 외벽냉각 한 경우 링1 내벽 및 외벽에서 열속

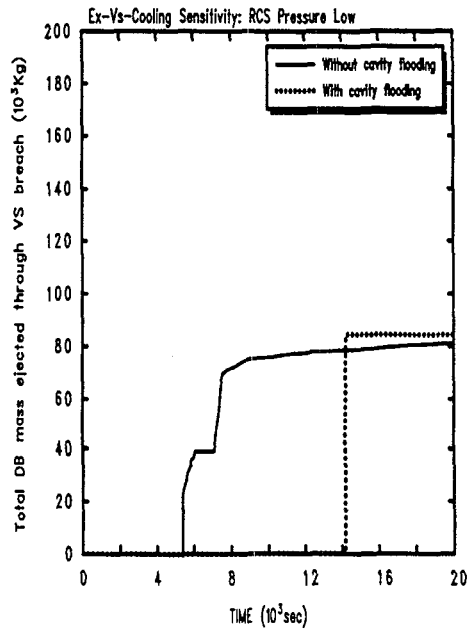


그림 4-1-23. 저압, 외벽냉각 따른 반구손상시 방출 debris양



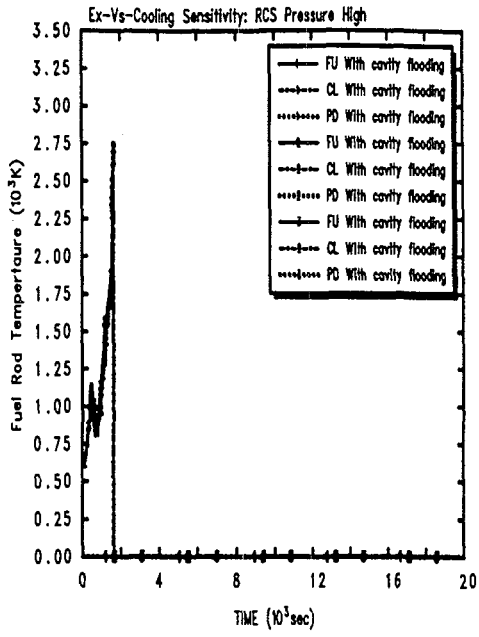


그림 4-2-1. 고압, 외벽냉각시 노심온도

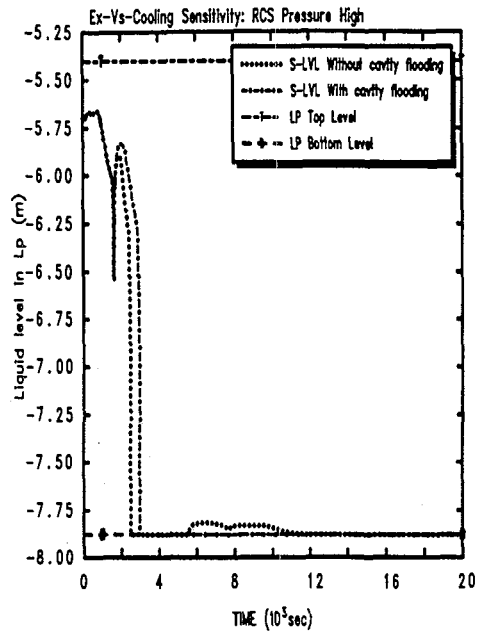


그림 4-2-2. 고압시, 하부반구내 수위

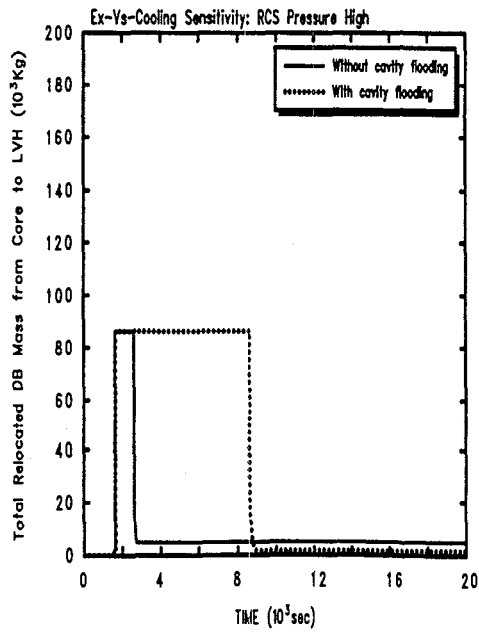


그림 4-2-3. 고압시, 하부반구내 debris 질량

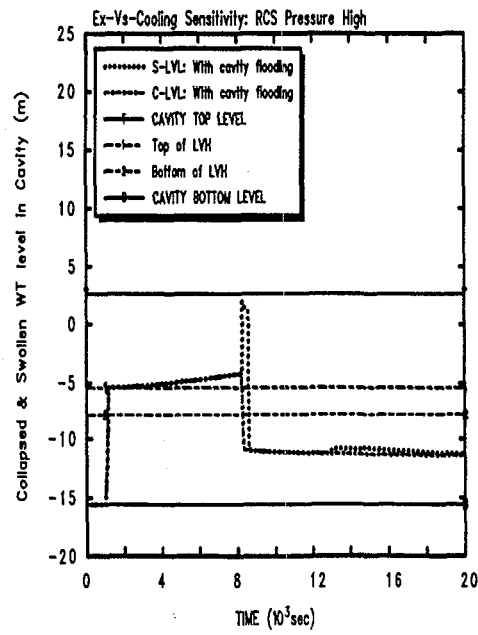


그림 4-2-4. 고압, 외벽냉각시 cavity내 냉각수 수위

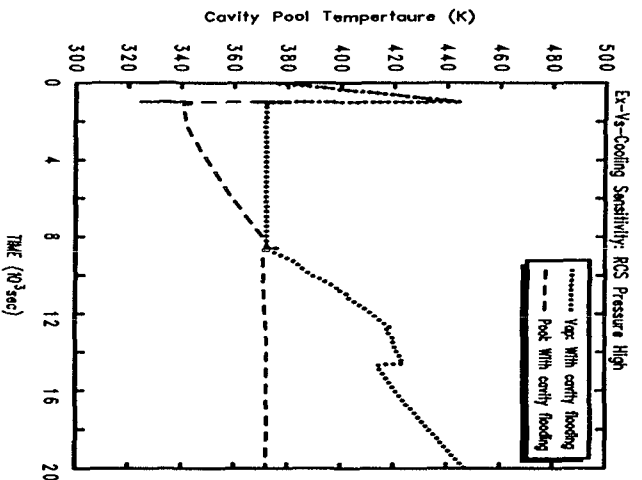


그림 4-2-5. 고압, 외벽방각시 cavity내 냉각수 온도

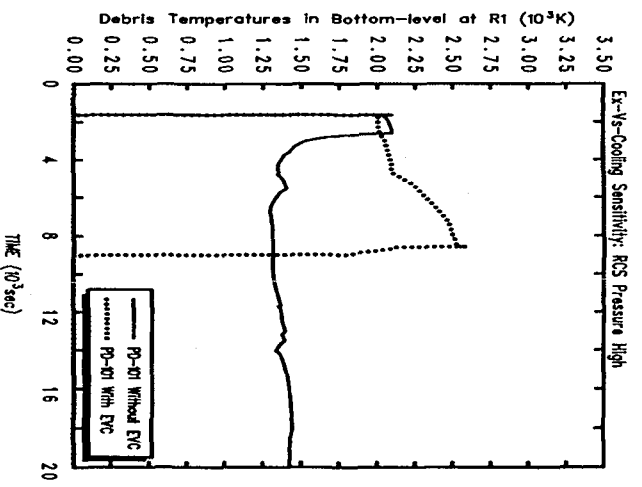


그림 4-2-6. 고압, 외벽방각 따른 링1 반구와 접한 debris 온도

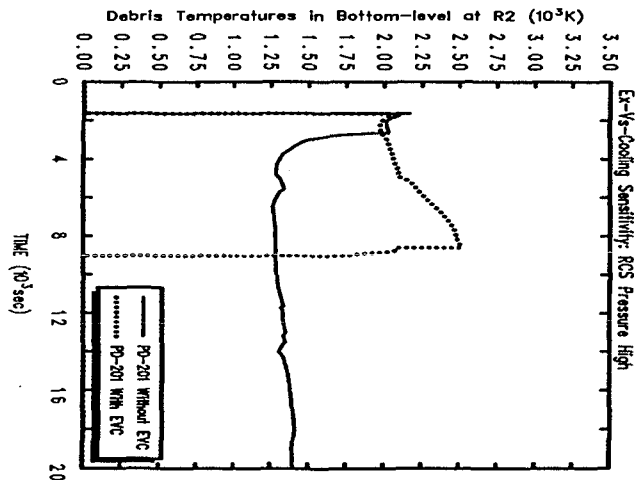


그림 4-2-7. 고압, 외벽방각 따른 링2 반구와 접한 debris 온도

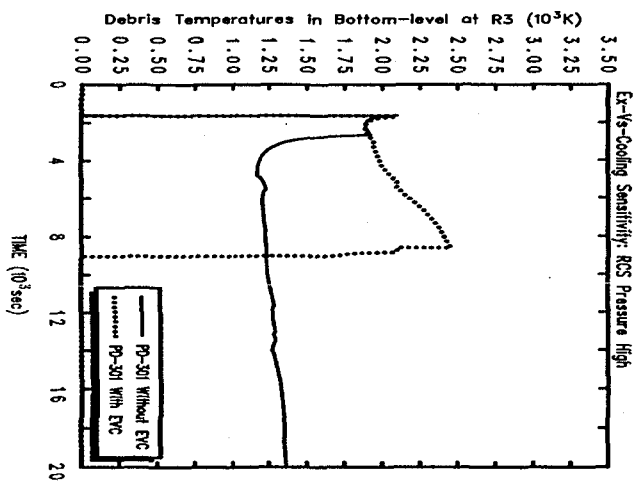


그림 4-2-8. 고압, 외벽방각 따른 링3 반구와 접한 debris 온도

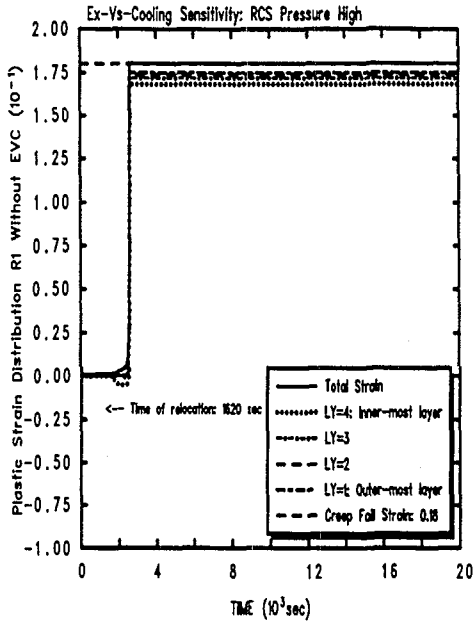


그림 4-2-9. 고압, 외벽냉각 약한 경우 링1 소성변형

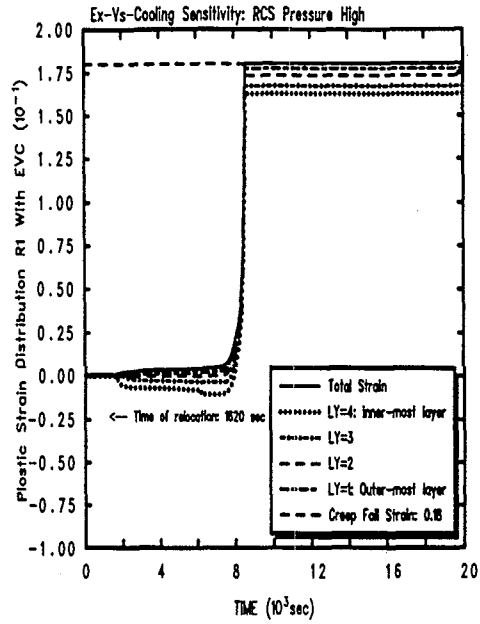


그림 4-2-10. 고압, 외벽냉각 한 경우 링1 소성변형

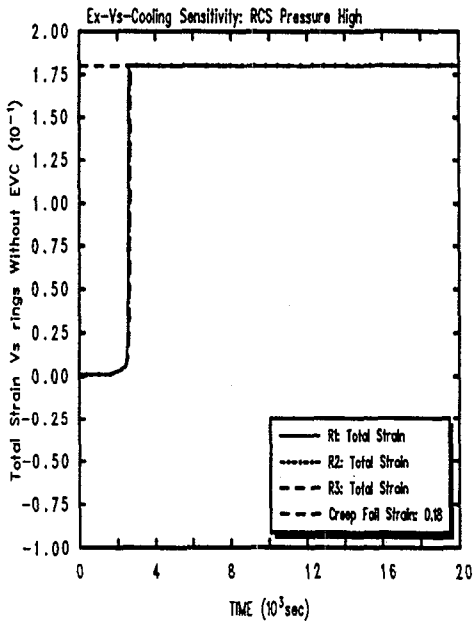


그림 4-2-11. 고압, 외벽냉각 약한 경우 내벽의 링별 소성변형

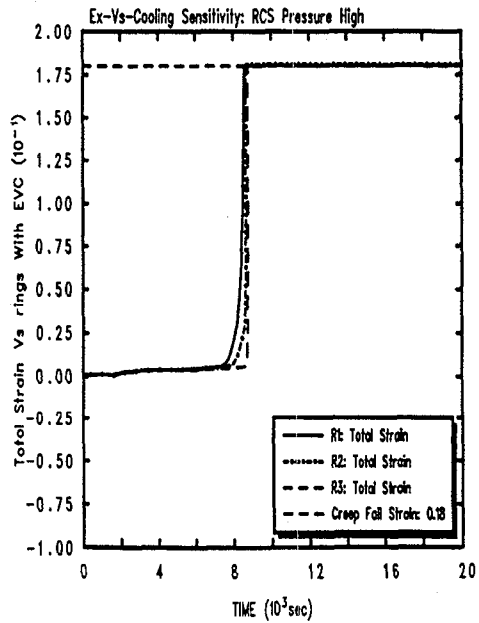


그림 4-2-12. 고압, 외벽냉각 한 경우 내벽의 링별 소성변형

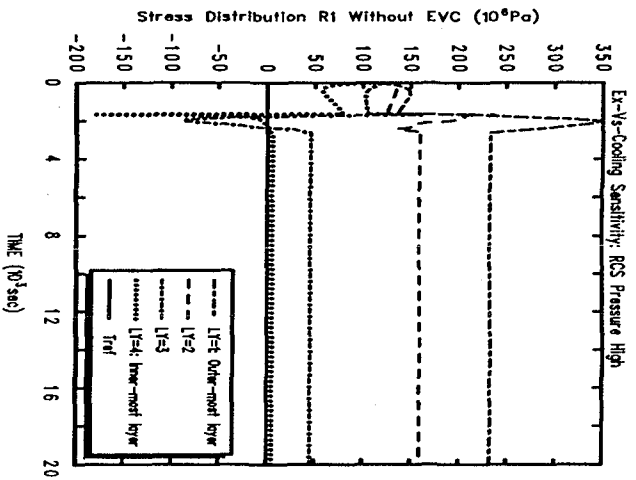


그림 4-2-13. 고압, 외벽응각 안전 경우 링 1 반구내 응력분포

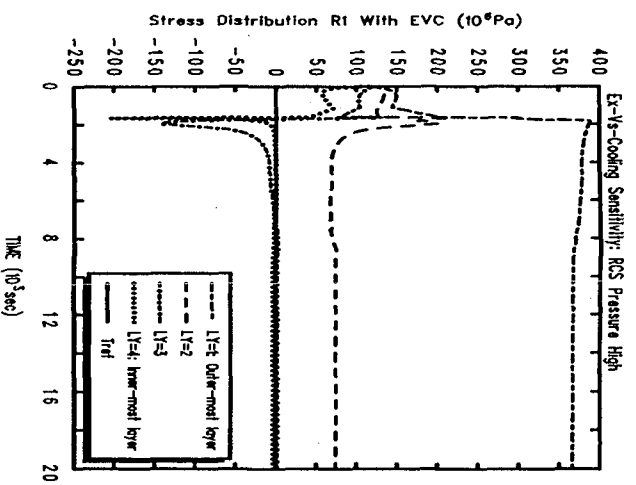


그림 4-2-14. 고압, 외벽응각 환 경우 링 1 반구내 응력분포

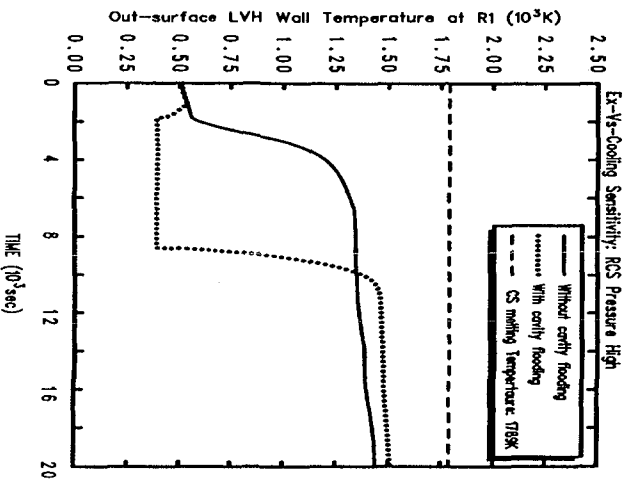


그림 4-2-15. 고압, 외벽응각 파손 링 1 반구외벽 온도

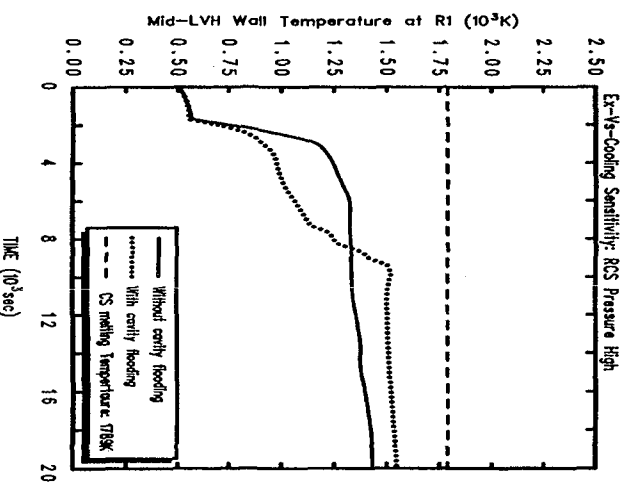


그림 4-2-16. 고압, 외벽응각 파손 링 1 반구벽 중앙온도

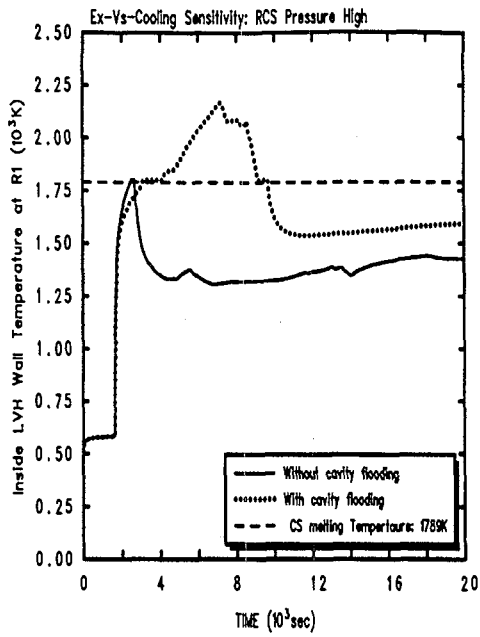


그림 4-2-17. 고압, 외벽냉각 따른 링 1 반구내벽 온도

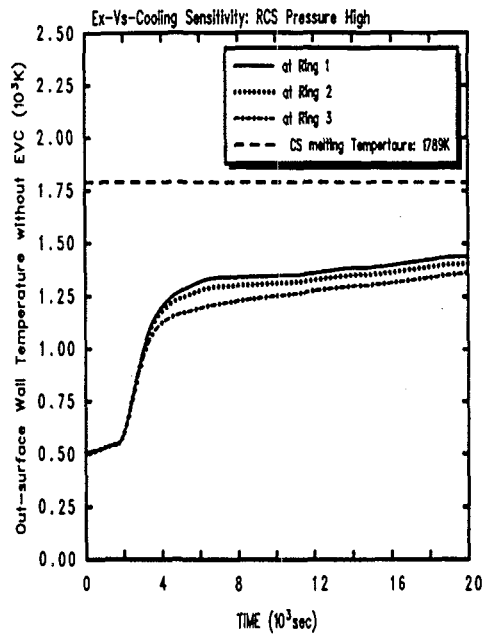


그림 4-2-18. 고압, 외벽냉각 안한 경우 링별 외벽온도

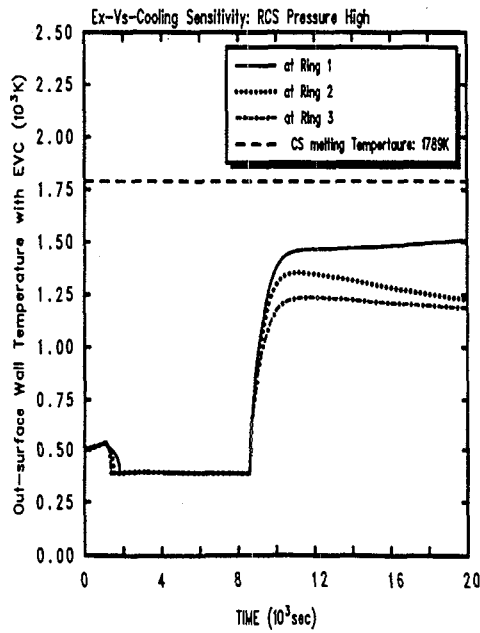


그림 4-2-19. 고압, 외벽냉각 한 경우 링별 외벽온도

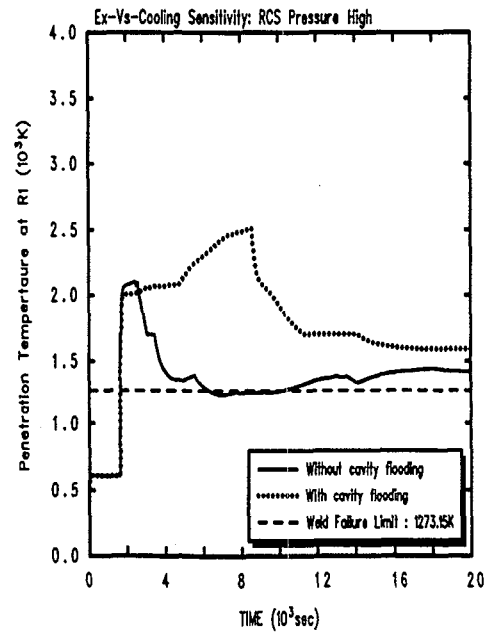


그림 4-2-20. 고압, 외벽냉각 따른 링1 penetration 관온도

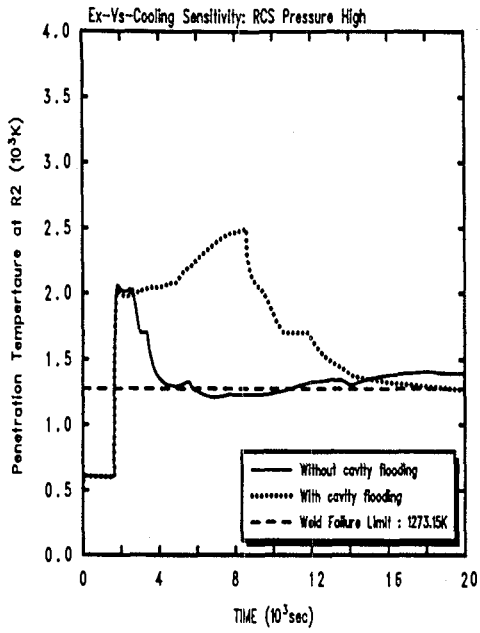


그림 4-2-21. 고압, 외벽냉각 따른 링2 penetration 관온도

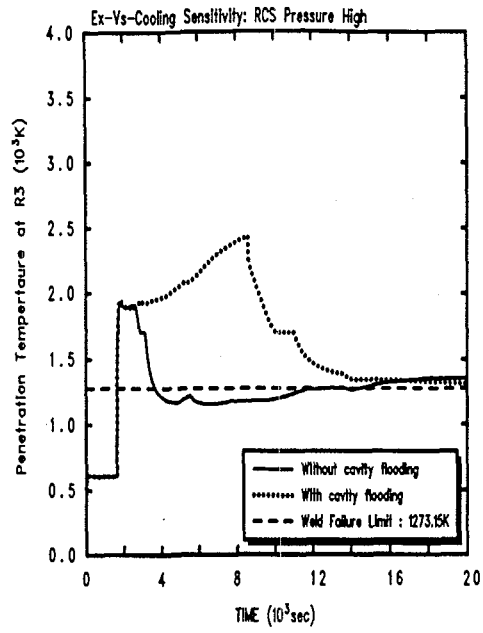


그림 4-2-22. 고압, 외벽냉각 따른 링3 penetration 관온도

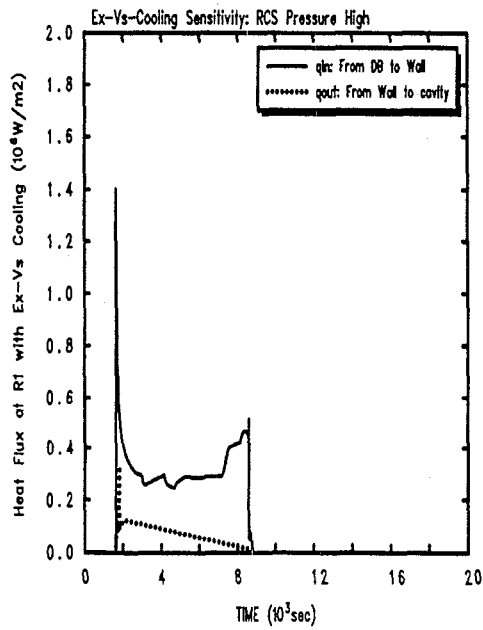


그림 4-2-23. 고압, 외벽냉각 한 경우 링1 내벽 및 외벽에서 열속

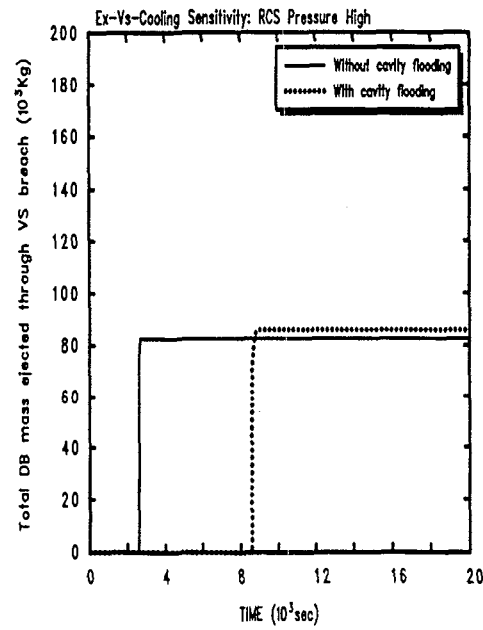


그림 4-2-24. 고압, 외벽냉각 따른 반구손상시 방출 debris양

부 록 1 (KNGR 외벽냉각 모의용 MELGEN 입력)

\*eot\* melgen

\*\*\*\*\*  
\* Simplified Input for simulating the Ex-Vs-Cooling on KNGR \*  
\*\*\*\*\*

TITLE 'Ex-Vs-Cooling Analysis'

CRTOU

DTIME 0.001

\*\*\*\*\*  
\* FILES \*  
\*\*\*\*\*

OUTPUT KGOU

DIAG KGDIA

RESTART KRST

\*\*\*\*\*  
\* NCGS \*  
\*\*\*\*\*

NCG004 N2 4

NCG005 O2 5

NCG006 H2 6

NCG007 CO2 7

NCG008 CO 8

NCG009 CH4 4

\*\*\*\*\*  
// Simplified Nodalization for simulating //  
// the ex-vessel cooling on KNGR //  
\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*  
\* 400 Dump Volume \*  
\*\*\*\*\*  
20.0

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*  
\* \* \* \* \*

----- simplified input for ex-vs-cooling analysis -----

\*

-----

\* CONTROL VOLUME DATA FOR VESSEL

-----

CV13000 down-comer 2 2 1 \*non-Equilibrium,Vertical,RCS  
CV130A0 2  
CV130A1 PVOL 170.0E+05 TATM 626.0  
CV130A3 PH2O -1.0 MFRC.3 1.0  
CV130BA -6.28 0.0  
CV130BB -5.402 4.302  
CV130BC -1.592 17.292  
CV130BD -0.686 20.344  
CV130BE 0.686 23.94  
CV130BF 2.801 31.06  
CV130BG 3.858 32.77

\*

-----

\* steam gas inlet flow rate & energy input

-----

CV130C1 MASS.3 RATE CF.223  
CV130C2 TE 333 8 \* T src 8: use tab ft for T to def s-h  
\*  
TF33300 'time-T steam gas' 4 1.0 0.0  
TF33311 0.0 636.0 \*570.0  
TF33312 1000.0 636.0 \*570.0  
TF33313 1500.0 1000.0 \*1000.0  
TF33314 20000.0 636.0 \*570.0

\*

CF22300 'RCS stm inj' L-A-IFTE 3 1.0 0.0  
CF22310 1.0 0.0 CFVALU.824  
CF22311 0.0 0.0 TIME  
CF22312 0.0 10.0 TIME

\*

CF82400 'RELOCATION' L-GT 2 1.0 0.0  
CF82406 2 'SSS Fuel Relocation complete'  
CF82411 0.0 1.0 TIME \* for test  
CF82412 1.0 0.0 CFVALU.825

\*

CF82500 'UO2MAS' ADD 3 1.0 0.0  
CF82511 1.0 0.0 COR-MUO2-FU.104  
CF82512 1.0 0.0 COR-MUO2-FU.204  
CF82513 1.0 0.0 COR-MUO2-FU.304

\*

-----

\*

CV15000 lower-plen 2 2 1  
CV150A0 3  
CV150A1 VPOL 19.261  
CV150A2 PVOL 169.5E+05  
CV150A3 TPOL 615.0  
CV150BA -7.88 0.  
CV150BB -6.979 5.1149075  
CV150BC -6.28 13.552096  
CV150BD -5.402 22.164836

\*

CV17000 CORE-REGION 2 2 1  
CV170A0 3  
CV170A1 VPOL 30.383  
CV170A2 PVOL 169.2E+05  
CV170A3 TPOL 615.0  
CV170BA -5.402 0.0  
CV170BB -0.686 30.383



```

*
CV26000 'UP-PLNM' 2 2 1
CV260A0 3
CV260A1 VPOL 76.92
CV260A2 PVOL 169.0E+05
CV260A3 TPOL 615.0
CV260BA -0.686 0.0 *2000.54
CV260BB 0.686 21.172 *2000.54
CV260BC 3.858 54.329 *2000.54
CV260BD 4.874 68.826 *2000.54
CV260BE 6.114 76.92 *2000.54
*
-----
*
CV14000 'DUMP VOL' 1 1 1 * horizontal flow
CV14001 0 -1 * time independent
CV140A0 2
CV140A1 PVOL 166.0E+05 TATM 625.0
CV140A2 PH2O -1.0 MFRC.3 1.0
CV140B0 -10.0 0.0 * level, vol are arbitrary selected
CV140B1 20.0 50000.0
*
CV14100 'CAVITY DUMP' 1 1 1 * horizontal flow
CV14101 0 -1 * time independent
CV141A0 2
CV141A1 PVOL 0.98E+05 TATM 372.0
CV141A2 PH2O -1.0 MFRC.3 1.0
CV141B0 -10.0 0.0 * level, vol are arbitrary selected
CV141B1 20.0 50000.0
*
*
CV80100 CAVITY 2 0 8
CV801A0 3
CV801A2 PVOL 1.0E+05
CV801A3 TPOL 371. TATM 375.75
CV801BA -15.646 0.0
CV801BB -14.732 2.549
CV801BC -10.464 311.5
CV801BD -9.474 343.24
CV801BE -7.023 406.25
CV801BF 2.642 476.50
*
-----
*
* Input for cavity flooding
*
-----
*
* eq-model
CV40100 'Fire PP' 1 0 1
CV401A0 3
CV401A1 VPOL 50000.0
CV401A2 PVOL 2.0E5 TPOL 323.0 * Tsat=453.04 K at 10 bar
CV401A3 TATM 323.0 MLFR.4 1.0 RHUM 1.0
CV401B0 2.642 0.0
CV401B1 20.0 60000.0 * abundant wt source assumption
*
*
FL40100 'Fire-CAVITY' 401 801 2.642 2.642
FL40101 0.7853981 1.0 1.0 * A, L, FRACT-open
FL40102 3 * horizontal flow indic
FL40103 1.0 1.0 * FORM LOSS

```

```

FL40104  0.0  0.0          * FLOW RATE
FL401S0  0.7853981  1.0  1.0  * A. L. HYD.
*
*
FL401V1  -1  421  421
*
CF42100  'CHK VS brch' L-A-IFTE 3 1.0 0.0
CF42111  1.0  0.0  CFVALU.420
CF42112  1.0  0.0  CFVALU.423
CF42113  0.0  0.0  TIME
*
CF42000  'Level chk' L-GT 2 1.0 0.0
CF42011  0.0  1.0E-7  TIME
CF42012  1.0  0.0  COR-ABRCH
*
CF42300  'LVH flood' L-A-IFTE 3 1.0 0.0
CF42311  1.0  0.0  CFVALU.424
CF42312  1.0  0.0  CFVALU.425  * Control on "vv open" by CF-425
CF42313  0.0  0.0  TIME  * if t < 1000 sev then vv close
* to give initiating time for flooding
CF42400  'Injt Time' L-GE 2 1.0 0.0
CF42411  1.0  0.0  TIME
CF42412  0.0  1000.0  TIME
*
* to check fill level
CF42700  'Level chk' L-GT 2 1.0 0.0
CF42711  0.0  -5.402  TIME
CF42712  1.0  0.0  CVH-LIQLEV.801  * wt level in cavity
*
CF42500  'TAB VV cnt' TAB-FUN 1 1.
CF42503  425
CF42510  1.0  0.0  CVH-LIQLEV.801
*
TF42500  'C-2' 4 0.2 0.0
TF42510  -15.6  1.0
TF42511  -7.0  1.0
TF42512  -5.402  0.0
TF42513  0.0  0.0
*
*-----*
*-----*
* FLOW PATH *
*-----*
*-----*
*
FL13000  DOWN-LP 130 150 -6.28 -6.28
FL13001  3.13548 3.75 1.0
FL13002  3 0 0 0
FL13003  4.0348 3.3447
FL13004  0.0 0.0
FL130S1  3.3676 3.14 0.5082
*
FL130S2  7.77 2.04 1.343
*
FL15000  LP-CORE 150 170 -5.402 -5.402
FL15001  4.1381 2.07 1.0
FL15002  0 0 0 0
FL15003  1.3294 2.99
FL15004  0.0 0.0
FL150S1  7.77 1.239 1.343
FL150S2  5.595 1.905 0.0123
*

```

```

* back to first core nodalization for test (4/15/00, kdh) 2000.5.4
FL17000 CORE-UP 170 260 -0.686 -0.686
FL17001 4.3578 2.96 1.0
FL17002 0 0 0 0
FL17003 7.0 7.6
FL17004 0.0 0.0
FL170S1 5.595 1.905 0.0123
FL170S2 10.45 3.822 0.279
FL26000 'UP-DUMP' 260 140 6.114 6.114
FL26001 4.0 4.0 1.0 * A, L, fract-open
FL26002 3 0 0 0 * normal horizontal flow
FL26003 3.0 3.0
FL260S0 2.0 4.0 1.5957691 * 4*A/(2*pi*r)
*
* Cavity to dump
FL26100 'CAV-DUMP' 801 141 2.64 2.64
FL26101 4.0 4.0 1.0 * A, L, fract-open
FL26102 3 0 0 0 * normal horizontal flow
FL26103 3.0 3.0
FL261S0 2.0 4.0 1.5957691 * 4*A/(2*pi*r)
*
*
*-----
*-----
*--- CORE INPUT ---
*-----
*-----
*
COR00000 3 5 3 2 5 3
*
COR00001 4.13E-3 4.85E-3 8.50E-5 0.01285 0.002 0.0012 0.165
COR00002 'PWR' 'B4C'
COR00003 0.25 0.25 0.25 0.25 0.25
COR00004 101 -90 * CF NUMBER
COR00005 1000. 1000. 1000. 1000. 1000. 1000.
COR00006 0 * Eutectic model off
COR00007 2 2 2 2 1.0 1.0 1.0 1.0
COR00008 0.0 0.0
* penetration fail tempertaure
COR00009 1000. 1000. 5000.0 1.0 *1273.15 1.0
* hquench
* (no quench: FCI 0.0)
* (with quench: FCI 1000.0)
COR00012 0.0 2.1E+7 3 2.5
*
SC10002 1132 2700.0 1
SC10003 1132 2700.0 2
*
SC10006 1131 1.0E-9 1
SC10007 1131 2700.0 2
* if small --> fast sprading
* if large --> slow spreading
SC10004 1020 3.0 1
SC10005 1020 1.0 2
* Conduction enhancemrnt factor
SC10008 1250 2500.0 1
SC10009 1250 0.026 2
*
SC10050 1502 1.0E-3 1
*
* (Use fission power to make core melt )
*-----

```

\* This update is to turn off the fission power  
 \* at the moment of core relocation.

-----  
 CF09000 'FISSION POWER' L-A-IFTE 3 1.0 0.0  
 CF09010 1.0 0.0 CFVALU.824  
 CF09011 1.0 0.0 CFVALU.092  
 CF09012 1.0 0.0 CFVALU.091

\*  
 CF09100 'FISSION ON' TAB-FUN 1 1.00 0.0  
 CF09103 111  
 CF09110 1.0 0.0 TIME  
 TF11100 'ENERGY SOURCE' 5 1.E+03 0.0  
 TF11111 0. 0.0  
 TF11112 -400.0 2.0E5  
 TF11113 600.0 9.0E4  
 TF11114 2900.0 9.0E4  
 TF11115 20000.0 9.0E4

\*  
 CF09200 'FISSION OFF' TAB-FUN 1 1.00 0.0  
 CF09203 112  
 CF09210 1.0 0.0 TIME  
 TF11200 'ENERGY SOURCE' 5 1.0 0.0  
 TF11211 0. 0.0  
 TF11212 -400.0 0.0  
 TF11213 600.0 0.0  
 TF11214 2900.0 0.0  
 TF11215 20000.0 0.0

-----  
 \* CELL ELEVATIONS AND POROSITIES

	Z	DZ	PORIN	PORDP	
CORZ0101	-7.88	0.901	0.1	0.3	* 0.1 Lower plenum
CORZ0201	-6.979	0.699	0.1	0.3	* 0.1 Lower plenum
CORZ0301	-6.28	0.878	0.1	0.3	* 0.1 Lower plenum

\*  
 CORZ0401 -5.402 3.810 0.947 0.3 \* active core

\*  
 CORZ0501 -1.592 0.906 0.947 0.3 \* upper end

	IHSA	ISUP	
CORZ0102	15051	10	* LOWER HEAD
CORZ0202	15052	00	* Lower Cylinder * BOTTOM PLATE
CORZ0302	13051	11	* 11 LOWER SUPPORT PLATE
CORZ0402	17001	10	
CORZ0502	17002	10	

\* FZPOW

CORZ0103	0.0
CORZ0203	0.0
CORZ0303	0.0
CORZ0403	1.0
CORZ0503	0.0

-----  
 \* RADIAL ZONE INPUT

\* ASCELA \* Core ID = 3.64744m --> 10.448795 m2

CORR0101	3.5099413	* IR=1.057	f1=0.3359182
CORR0201	4.1648722	* IR=1.563	f2=0.3985983
CORR0301	2.7739812	* IR=1.82372	f3=0.2654833

\* IHSR ICFLHF

CORR0102	17051
CORR0202	17052
CORR0302	17053

```

*          FRPOW
CORR0103  0.92 *0.93057
CORR0203  0.93 *0.94014
CORR0303  1.32 *1.29929

```

```

*****

```

```

*          2. LOWER PLENUM AND LOWER CORE INPUT

```

```

*****

```

```

*          -----
*          SPECIFIC CELL INPUT

```

```

*          -----
*          R A   IREFN  ICVHC  ICVHB
COR10101  -1      150
COR20101  -1      150
COR30101  -1      150
*
COR10201  101
COR20201  201
COR30201  301
*
COR10301  102
COR20301  202
COR30301  302
*
COR10401  -1      170
COR10501  104
*
COR20401  -1      170
COR20501  204
*
COR30401  -1      170
COR30501  304

```

```

*          -----
*          CELL MATERIAL INITIAL MASS

```

```

*          -----
*          XMFU  XMCL   XMSS   XMCP   XM CN  XM CB  GS   GT
COR10102  0.0    0.0  58.910794  0.0  -1.1  0.0  0.0  0.0
COR20102  0.0    0.0  69.903151  0.0  -1.1  0.0  0.0  0.0
COR30102  0.0    0.0  46.516148  0.0  -1.1  0.0  0.0  0.0
*
COR10202  0.0    0.0  1943.1621  0.0  -1.1  0.0  0.0  0.0
COR20202  0.0    0.0  2305.7431  0.0  -1.1  0.0  0.0  0.0
COR30202  0.0    0.0  1534.3269  0.0  -1.1  0.0  0.0  0.0
*
COR10302  0.0    0.0  5861.0253  0.0  -1.1  0.0  78.24626  111.93222
COR20302  0.0    0.0  6954.6530  0.0  -1.1  0.0  92.75445  132.68636
COR30302  0.0    0.0  4627.8839  0.0  -1.1  0.0  61.805267  88.413182
*-----
*   50%
*-----
COR10402  19712.306  4704.0  156.27  215.08  -1.1  0.0  367.336  242.859
COR20402  23367.3  5576.2  185.246  254.969  -1.1  0.0  435.446  287.89
COR30402  15570.385  3715.6  123.4354  169.89  -1.1  0.0  290.15  191.83
*
COR10502  0.0  1060.6068  0.0  0.0  -1.1  0.0  0.0  115.50182
COR20502  0.0  1257.2613  0.0  0.0  -1.1  0.0  0.0  136.91782
COR30502  0.0  837.75358  0.0  0.0  -1.1  0.0  0.0  91.232739

```

```

*
* -----
*   CELL INITIAL TEMPERATURE
* -----
*
*      TFU      TCL      TSS      TCN
COR10103  558.94  558.94  558.94
COR10203  558.94  558.94  558.94
COR10303  558.94  558.94  558.94
COR10403  558.94  558.94  558.94
COR10503  558.94  558.94  558.94
*
COR20103  558.94  558.94  558.94
COR20203  558.94  558.94  558.94
COR20303  558.94  558.94  558.94
COR20403  558.94  558.94  558.94
COR20503  558.94  558.94  558.94
*
COR30103  558.94  558.94  558.94
COR30203  558.94  558.94  558.94
COR30303  558.94  558.94  558.94
COR30403  558.94  558.94  558.94
COR30503  558.94  558.94  558.94
*
* -----
*   EQUIVALENT DIAMETER
* -----
*
*      DHYCL    DHYSS    DHYDP    DHYCNC    DHYCNB
COR10104  1.0E-6    1.0E-6    0.05
COR20104  1.0E-6    1.0E-6    0.05
COR30104  1.0E-6    1.0E-6    0.05
*
COR10304  0.0119823  4.4877217E-3  0.05
COR20304  0.0119823  4.4877217E-3  0.05
COR30304  0.0119823  4.4877217E-3  0.05
*
COR10404  0.0119823  4.4877217E-3  0.0075
COR20404  0.0119823  4.4877217E-3  0.0075
COR30404  0.0119823  4.4877217E-3  0.0075
*
COR10504  0.0119823  4.4877217E-3  0.0075
COR20504  0.0119823  4.4877217E-3  0.0075
COR30504  0.0119823  4.4877217E-3  0.0075
*
* -----
*   CELL BOUNDARY AND FLOW AREAS
* -----
*
*      bound area  flow area
COR10105  5.9847379  1.1823798  0.0
COR20105  8.8473318  1.4030041  0.0
COR30105  13.103156  3.0841796  0.0
*
COR10205  4.6429876  3.9760543  0.0
COR20205  6.8638012  4.71796  0.0
COR30205  10.16549  10.371343  0.0
*
COR10305  5.8319643  5.0487088  0.0
COR20305  8.6214842  5.9907648  0.0
COR30305  12.768669  13.16931  0.0
*
COR10405  25.307271  1.89  0.0
COR20405  37.412135  2.25  0.0

```

```

COR30405 43.652648 1.49 0.0
*
COR10505 6.0179495 1.89 0.0
COR20505 8.8964290 2.25 0.0
COR30505 10.380394 1.49 0.0
*
* -----
* SURFACE AREA INPUT
* -----
* ASFU ASCL ASSS ASCN
COR10106 0.0 0.0 0.4197265 0.0
COR20106 0.0 0.0 0.4980446 0.0
COR30106 0.0 0.0 0.3314173 0.0
*
COR10206 0.0 0.0 13.844604 0.0
COR20206 0.0 0.0 16.427913 0.0
COR30206 0.0 0.0 10.931742 0.0
*
COR10306 0.0 494.88771 41.758517 0.0
COR20306 0.0 586.64833 49.550374 0.0
COR30306 0.0 390.90261 32.972656 0.0
*
COR10406 1828.7186 2642.5111 63.034921 0.0 * FU r= 4.13mm
COR20406 2167.7942 3132.3963 74.682827 0.0 * CL r= 4.85
COR30406 1444.4709 2087.2091 49.763564 0.0 * No rod...=55033
*
COR10506 0.0 510.67087 45.5 0.0
COR20506 0.0 605.35795 52.4 0.0
COR30506 0.0 403.36943 34.6 0.0
*
* -----
* Lower Head Input *
* -----
* IRS IRE TLH RADLH ICVCAV
CORLHD01 1 1 510.0 1.057 801
CORLHD02 2 2 510.0 1.563
CORLHD03 3 3 510.0 2.314575
* -----
* Mesh layer in LH wall *
* -----
* total wall thickness=0.165 m
CORLHN01 'SA-508-MG-D' 0.04125
CORLHN02 'SA-508-MG-D' 0.0825
CORLHN03 'SA-508-MG-D' 0.12375
CORLHN04 'SA-508-MG-D' 0.165
*
* -----
* Lower Head Penetration *
* -----
*
* -----
* KNGR
* -----
* total num of in-core instrument nozzle= 61
* outer radius of penetration tube = 0.0381, inner radius = 9.525E-3 m
* , dz1=0.901, dxlh1=0.04125 m, Rho-inconel=8442.0
* ro=0.0381 m, ri=0.009525
*
* XMPN = pi*( ro**2-ri**2)*(dz1+dxlh1)*Rho-inconel
* = 4.2753444E-3*(0.94225)*8442= 34.008118
*

```

```

*          IPNREF  IRP   XMPN  TPN   ASPN   AXPN   DFLPN
*
CORPEN01 -1  1  221.8712  510.0  4.4207693  0.2023937  0.15
CORPEN02 -1  2  263.27087  510.0  5.245655  0.2401589  0.15
CORPEN03 -1  3  175.1902  510.0  3.4906533  0.1598106  0.15
*
* 0-D model for calcul stress/ strain
*SC20001 1600  0.0  1
* 1-D model for calcul stress/ strain
SC20001 1600  1.0  1
*
*****
*
* 3. TRANSFER PROCESS PACKAGE
*
*****
* FDI INPUT
*
*          NFDICV   NFDCAV   TPIN   TPOT
FDI0100   801       1       102   101
FDI0101   CAVITY
*
*          ZBOTT    ZTOP
FDI0102  -15.646   -8.045
*
*          NMSIN   NTHRM
TPIN10100 6       9
TPIN10200 5       9
*
* 'OUT' TRANSFER PROCESS FOR CAVITY PACKAGE
*          NMSOT   NPOT01  IOTMTX
TPOT10100 5       101   UIN.103
TPOT10200 5       102   DEF.1
*
TPIN60100 16       1
TPIN60200 16       1
TPOT60100 16       601   DEF.1
TPOT60200 16       602   DEF.1
*
*          NROW    NCOL
TPM1030000 5       6
*          NROW/NCOL  VALUE
TPM1030001 1/1      1.0   * UO2
TPM1030002 2/2      1.0   * ZRO2
TPM1030003 3/3      1.0   * STEEL
TPM1030004 4/4      1.0   * ST.OX
TPM1030005 5/5      1.0   * POISON
*
*
*//////////://////////
*//*****//
*/// HAET STRUCTURE INPUT *///
*//*****//
*//////////://////////
*
* HSCCCCC000 (2) ; 1=rectangular
*                  2=cylindrical
*                  3=sphere
*
*                  C Y
*
*-----*
* LH wall, which were not contact with DB *

```



\*-----\*

\* Rectangular  
HS15051000 5 2 0  
HS15051001 'Lower head wall 1'  
HS15051002 -7.879 1.0 \*-7.88 hz surf lhs bot  
HS15051004 301  
HS15051100 -1 1 1.8235  
HS15051101 1.86475 2  
HS15051102 1.9885 5  
HS15051201 'SS-308' 4  
HS15051300 -1  
HS15051400 1 150 'INT' 0.05 0.05  
HS15051500 0.1 3.647 0.899  
HS15051600 0

\* C Y  
HS15052000 5 2 0  
HS15052001 'Lower head wall 2'  
HS15052002 -6.979 1.0  
HS15052004 302  
HS15052100 -1 1 1.8235  
HS15052101 1.86475 2  
HS15052104 1.9885 5  
HS15052201 'SS-308' 4  
HS15052300 -1  
HS15052400 1 150 'INT' 0.05 0.05  
HS15052500 10.16 3.647 0.698  
HS15052600 0

\* C Y  
HS13051000 5 2 0  
HS13051001 'Lower head wall 3'  
HS13051002 -6.28 1.0  
HS13051004 303  
HS13051100 -1 1 1.8923  
HS13051101 1.93355 2  
HS13051102 1.975 3  
HS13051103 2.016 4  
HS13051104 2.0573 5  
HS13051201 'SS-308' 4  
HS13051300 -1  
HS13051400 1 150 'INT' 0.5 0.5  
HS13051500 10.39 4.62915 0.8779  
HS13051600 0  
\*HS13051600 1 130 'EXT' 0.5 0.5  
\*HS13051700 11.13 4.95915 0.8779

\*

\*

\*-----\*

\* Dummy structure for depositing FP  
\* locate at bottom-most in LP

\*-----\*

\*

HS13054000 5 1 0  
HS13054001 'dummy structure'  
HS13054002 -7.88 -1.0E-7  
HS13054004 0 0  
HS13054100 -1 1 0.0  
HS13054101 0.04125 2  
HS13054102 0.165 5  
HS13054201 'SS-308' 1  
HS13054202 'SS-308' 4  
HS13054300 -1  
HS13054400 1 150 'INT' 0.05 0.05

```

HS13054500    1.0  1.0  1.0
HS13054600    0
*
*-----
*   RV Upper Head
*-----
*
HS26011000    6   5   0      * temp nodes, top hemisphere (88deg), steady
HS26011001    'RPV UPPER HEAD'
HS26011002    3.858      * lowest elevation
HS26011100    -1   1   2.25514 * xi
HS26011101    2.25941    2
HS26011102    2.57884    6
HS26011201    'SS-308'    1      * 18Cr-8Ni
HS26011202    'SA-508-MG-D'  5
HS26011300    -1
HS26011400    1  260 'INT'  0.5  0.5
HS26011500    1.0    2.25514    1.0
HS26011600    0
*
*-----
*   Down Commer
*-----
*
HS13011000    6   2   0      * temp nodes, cylindrical, std-st
HS13011001    'DOWNCOMER WALL 1'
HS13011002    -6.28    1.0      * lowest elev, vertical
HS13011100    -1   1   1.9939 * loca/node#, X relative to axis of cyl
HS13011101    2.0039    2
HS13011102    2.0439    6
HS13011201    'SS-308'    1
HS13011202    'SA-508-MG-D'  5
HS13011300    -1      * no internal pow sorc
HS13011400    1   150 'INT'  0.5  0.5 * LHS B.C
HS13011500    10.999622  0.99695  0.878 * additional LHS B.C (A, Lchar, dZ)
*   A= 2*pi*2.31458*(6.28-5.402)=12.76
*   Lchar = V/As => for plane wall Lc= wall thickness/2
*                   for long cylinder Lc= r/2, for sphere Lc = r/3
*   dZ=0.878
HS13011600    1   130 'EXT'  0.5  0.5 * RHS B.C
HS13011700    11.275454  0.99695  0.878 * additional RHS B.C
*
*-----
*
HS13013000    6   2   0      * temp nodes, cylindrical
HS13013001    'DOWNCOMER WALL2'
HS13013002    -5.402    1.0      * lowest elev, vertical
HS13013100    -1   1   1.9939 * XI
HS13013101    2.0039    2
HS13013102    2.0439    6
HS13013201    'SS-308'    1
HS13013202    'SA-508-MG-D'  5
HS13013300    -1
HS13013400    1   170 'INT'  0.5  0.5
HS13013500    59.082252  0.99695  4.714
HS13013600    1   130 'EXT'  0.5  0.5
HS13013700    60.563827  0.99695  4.714
*
*-----
*
*   Update from original start
HS13021000    6   2   0      * temp nodes, cylindrical

```

```

HS13021001 'DOWNCOMER WALL3'
HS13021002 -0.686 1.0 * lowest elev, vertical
* Update from original end
HS13021100 -1 1 1.9939 * XI
HS13021101 2.0039 2
HS13021102 2.0139 3
HS13021103 2.0239 4
HS13021104 2.0339 5
HS13021105 2.0439 6
HS13021201 'SS-308' 1
HS13021202 'SA-508-MG-D' 5
HS13021300 -1
HS13021400 1 260 'INT' 0.5 0.5
HS13021500 56.927428 3.99 4.543 * ch length=HD of Cv 270 (RELAP)
HS13021600 1 130 'EXT' 0.5 0.5
HS13021700 58.354968 4.085 4.543 * ch length=HD of CV 130 (RELAP)
*
*-----*
* RV CYLINDRICAL WALL
*-----*
* Cylindrical
HS17001000 4 2 0
HS17001001 'CORE VS WALL-1'
HS17001002 -5.402 1.0 * vertical
HS17001004 304 0 * use bulk fluid temp in boundary CV
HS17001100 -1 1 2.314575
HS17001101 2.3923625 2
HS17001102 2.5479375 4
HS17001200 -1
HS17001201 'SA-508-MG-D' 1
HS17001202 'SA-508-MG-D' 3
HS17001300 -1
HS17001400 1 170 INT 0.5 0.5 * LHS B.C
HS17001500 55.408463 1.1572875 3.81 * additional LHS B.C
HS17001600 0 * outer surface of RV is insulated
*
* Cylindrical
HS17002000 4 2 0
HS17002001 'CORE VS WALL-2'
HS17002002 -1.592 1.0 * vertical
HS17002004 305 0 * use bulk fluid temp in boundary CV
HS17002100 -1 1 2.314575
HS17002101 2.3923625 2
HS17002102 2.5479375 4
HS17002200 -1
HS17002201 'SA-508-MG-D' 1
HS17002202 'SA-508-MG-D' 3
HS17002300 -1
HS17002400 1 170 INT 0.5 0.5 * LHS B.C
HS17002500 13.175871 1.1572875 0.906 * additional LHS B.C
HS17002600 0 * outer surface of RV is insulated
*
* Cylindrical
HS17003000 4 2 0
HS17003001 'CORE VS WALL-3'
HS17003002 -0.686 1.0 * vertical
HS17003004 0 0 * use bulk fluid temp in boundary CV
HS17003100 -1 1 2.314575
HS17003101 2.3923625 2
HS17003102 2.5479375 4
HS17003200 -1
HS17003201 'SA-508-MG-D' 1

```

HS17003202 'SA-508-MG-D' 3  
 HS17003300 -1  
 HS17003400 1 130 INT 0.5 0.5 \* LHS B.C  
 HS17003500 66.082954 1.1572875 4.543 \* additional LHS B.C  
 HS17003600 0 \* outer surface of RV is insulated

\*

-----

\* Cavity base

-----

\*

HS81009000 5 1 0  
 HS81009001 'CAVITY FLOOR'  
 HS81009002 -0.8 -1.0E-7  
 HS81009100 -1 1 0.0  
 HS81009101 0.01 5  
 HS81009200 -1  
 HS81009201 'STAINLESS STEEL' 4  
 HS81009300 0  
 HS81009400 1 801 INT 1.0 1.0  
 HS81009500 1.13 1.0 1.0  
 HS81009600 0

\*

-----

\* Fire PP Structure

-----

\* rectangular

HS14011000 4 1 0  
 HS14011001 'Fire PP St'  
 HS14011002 2.642 -1.0E-7  
 HS14011100 -1 1 0.0  
 HS14011101 0.01 4  
 HS14011201 'STAINLESS STEEL' 3  
 HS14011300 -1  
 HS14011400 1 401 'INT' 0.5 0.5  
 HS14011500 1.0 1.0 1.0  
 HS14011600 0

\*

-----

\* UPPER SUPPORT PLATE

-----

\* rectangular

HS17051000 3 1 0  
 HS17051001 'USP-RING1'  
 HS17051002 -0.686 -1.0E-7 \* RHS bottom  
 HS17051100 -1 1 0.0  
 HS17051101 0.005 2  
 HS17051102 0.01 3 \* thickness=0.01m  
 HS17051201 'STAINLESS STEEL' 2  
 HS17051300 -1  
 HS17051400 1 260 'INT' 0.5 0.5  
 HS17051500 3.511 1.057 1.0 \* 1.057  
 HS17051600 1 170 'EXT' 0.5 0.5  
 HS17051700 3.511 1.057 1.0

\*

HS17052000 3 1 0  
 HS17052001 'USP-RING2'  
 HS17052002 -0.686 -1.0E-7  
 HS17052100 -1 1 0.0  
 HS17052101 0.005 2  
 HS17052102 0.01 3  
 HS17052201 'STAINLESS STEEL' 2  
 HS17052300 -1

Property	Units
*****	
MATERIAL PROPERTIES	
*****	
-----	
End of H S Input	
-----	
HS38013600	0
HS38013500	1.0
HS38013400	1 140 INT 0.05
HS38013300	-1
HS38013202	4 SS-308
HS38013201	1 SS-308
HS38013102	5 0.165
HS38013101	2 0.04125
HS38013100	-1 1 0.0
HS38013004	0 0
HS38013002	-10.0 -1.0E-7
HS38013001	dummy structure
HS38013000	5 1 0
*****	
HS38012600	0
HS38012500	125.66371 1.0 10.0
HS38012400	1 140 INT 0.5 0.5
HS38012300	-1 * no-internal PW src
HS38012201	3 CARBON STEEL
HS38012200	-1
HS38012101	2.5 4 * wall thickness=0.5m assume
HS38012100	-1 1 2.0 * radius=2m cylinder TK
HS38012002	-10.0 1
HS38012001	Dump Vol WALL
HS38012000	4 2 0
CY	
*****	
Dump Volume WALL STRUCTURE	
*****	
HS17053700	2.773274 1.0 1.0
HS17053600	1 170 EXT 0.5 0.5
HS17053500	2.773274 1.0 1.0
HS17053400	1 260 INT 0.5 0.5
HS17053300	-1
HS17053201	2 STAINLESS STEEL
HS17053102	0.01 3
HS17053101	0.005 2
HS17053100	-1 1 0.0
HS17053002	-0.686 -1.0E-7
HS17053001	USP-RING3
HS17053000	3 1 0
*****	
HS17052700	4.162 1.0 1.0
HS17052600	1 170 EXT 0.5 0.5
HS17052500	4.162 1.0 1.0
HS17052400	1 260 INT 0.5 0.5

```

***      temperature      K
***      density          kg/m*3
***      heat capacity    J/kg-K
***      thermal conductivity W/m-K
***
*

```

```

-----
*
*
-----
***      Material 41 is Material SS-308
-----
*
*

```

```

MPMAT04100 'SS-308'
MPMAT04101 RHO      51
MPMAT04102 CPS      52
MPMAT04103 THC      53
MPMAT04153 MLT     1800.0

```

```

***
TF05100 'RHO SS-308' 2 1.00 0.0
TF05112 200.00 8027.3 *
TF05113 5000.00 8027.3

```

```

*
TF05200 'CPS SS-308' 11 1.00 0.0
TF05212 294.261 475.83 *RELAP data
TF05213 310.928 478.20
TF05214 366.483 498.07
TF05215 422.039 511.73
TF05216 477.594 526.60
TF05217 563.150 535.69
TF05218 588.706 542.59
TF05219 644.261 550.76
TF05220 810.928 568.47
TF05221 922.039 576.19
TF05222 1088.71 591.80

```

```

*
TF05300 'THC SS-308' 11 1.00 0.0
TF05312 294.261 14.8843 *RELAP data
TF05313 310.928 15.0574
TF05314 366.483 16.0958
TF05315 422.039 16.9612
TF05316 477.594 17.9996
TF05317 563.150 18.8650
TF05318 588.706 19.5573
TF05319 644.261 20.4227
TF05320 810.928 22.8457
TF05321 922.039 24.2303
TF05322 1088.71 26.4803

```

```

*
*
-----
***      Material 42 is SA508 MG-D (Carbon steel)
*      3/4Ni-1/2Mo-Cr-V for RV base metal
-----

```

```

MPMAT04200 'SA-508-MG-D'
MPMAT04205 TMP      75
MPMAT04204 ENH      76
MPMAT04201 RHO      77
MPMAT04202 CPS      78
MPMAT04203 THC      79
MPMAT04253 MLT     1800.0
TF07500 'TMP SA-508-MG-D' 6 1.00 0.0

```

TF07511	0.0	300.	99624.5	500.
TF07512	379679.	1000.0	846146.	1800.
TF07513	1114146.	1800.1	4186986.	5000.
*				
TF07600	'ENH SA-508-MG-D'	6	1.00	0.0
TF07611	300.00	0.0	500.	99624.5
TF07612	1000.00	379679.	1800.0	846146.
TF07613	1800.10	1114146.	5000.0	4186986.
*				
TF07700	'RHO SA-508-MG-D'	2	1.00	0.0
TF07712	200.00	7833.5		* 0.0283 lbm/in3
TF07713	5000.00	7833.5		
*				
TF07800	'CPS SA-508-MG-D'	12	1.00	0.0
TF07812	294.261	444.38		*RELAP data
TF07813	310.928	453.86		
TF07814	366.483	480.64		
TF07815	422.039	502.03		
TF07816	477.594	524.51		
TF07817	533.150	545.95		
TF07818	588.706	566.37		
TF07819	644.261	589.48		
TF07820	810.928	673.69		
TF07821	922.039	802.07		
TF07822	1088.71	679.48		
TF07823	5000.0	679.48		* src data is extended upto 5000 K
*				
TF07900	'THC SA-508-MG-D'	12	1.00	0.0
TF07912	294.261	37.73		*RELAP data
TF07913	310.928	38.0762		
TF07914	366.483	38.7685		
TF07915	422.039	38.7685		
TF07916	477.594	38.5954		
TF07917	533.150	38.0762		
TF07918	588.706	37.2108		
TF07919	644.261	36.3454		
TF07920	810.928	33.2301		
TF07921	922.039	30.8071		
TF07922	1088.71	25.9610		
TF07923	5000.0	25.9610		* src data is extended upto 5000 K
*				
*-----*				
*** MATERIAL 32 IS INCONEL-600				
*-----*				
MPMAT03200	'INCONEL-600'			
MPMAT03201	RHO	81		
MPMAT03202	CPS	85		
MPMAT03203	THC	84		
MPMAT03253	MLT	1800.0		
*				
TF08100	'RHO INCONEL'	7	1.0	0.0
TF08110	100.0	8500.0		
TF08111	500.0	8330.0		
TF08112	1000.0	8150.0		
TF08113	1500.0	7900.0		
TF08114	2000.0	7690.0		
TF08115	2500.0	7430.0		
TF08116	3000.0	7200.0		
*				
TF08400	'THC INCONEL'	7	1.00	0.0
TF08410	273.15	14.8		
TF08411	294.26	14.885		

TF08412	366.08	15.750		
TF08413	477.59	17.481		
TF08414	588.71	19.212		
TF08415	699.82	20.943		
TF08416	866.50	29.51		
TF08500	'CPS INCONEL'	7	1.00	0.0
TF08510	273.15	440.		
TF08511	294.26	443.8		
TF08512	366.08	464.7		
TF08513	477.59	485.7		
TF08514	588.71	506.6		
TF08515	699.82	527.5		
TF08516	866.50	530.		

\*

-----

\*\*\* MATERIAL 01 IS AIR (He properties are used)

-----

MPMAT01000	'HELIUM'			
MPMAT01001	THC	18		
MPMAT01002	VIS	19		
MPMAT01003	CPS	118		
MPMAT01004	RHO	119		

\*

TF01800	AIR-CP	4	1.0	
TF01811	300.	0.15		
TF01812	1200.	0.40		
TF01813	2100.	0.57		
TF01814	2700.	0.72		

\*

TF11900	AIR-RHO	1	1.0	
TF11911	273.15	0.1785		* ASSUMED CONSTANT (FIXED VOLUME)

\*

TF11800	AIR-CPS	2	1.0	
TF11811	273.15	2.084E4		
TF11812	5000.0	2.084E4		

\*

TF01900	AIR-VIS	4	1.0	
TF01911	273.15	1.5E-5	400.	2.3E-5
TF01913	700.	3.5E-5	2400.	7.5E-5

\*

\*

-----

\*\*\* Material 33 is carbon steel

-----

MPMAT03300	'CARBON STEEL'			
MPMAT03301	RHO	37		
MPMAT03302	CPS	38		
MPMAT03303	THC	39		
MPMAT03304	ENH	35		
MPMAT03305	TMP	36		
MPMAT03353	MLT	1789.0		

\*

TF03500	'ENH CS'	9	1.00	0.0
TF03512	300.0	0.0		*13500.0
TF03513	400.0	50000.0		*63500.0
TF03514	600.0	166000.0		*79500.0
TF03515	800.0	304000.0		*317500.0
TF03516	1000.0	495000.0		*508500.0
TF03517	1030.0	547800.0		*561300.0
TF03518	1050.0	567000.0		*580500.0
TF03519	1100.0	602000.0		*615500.0
TF03520	5000.0	602000.0		*615500.0



```

*
TF03600      'TMP CS'  9  1.00  0.0
TF03612          0.0    300.0
TF03613          50000.0  400.0
TF03614          166000.0  600.0
TF03615          304000.0  800.0
TF03616          495000.0 1000.0
TF03617          547800.0 1030.0
TF03618          567000.0 1050.0
TF03619          602000.0 1100.0
TF03620          602000.0 5000.0

```

```

*
TF03700      'RHO CS'  6  1.00  0.0
TF03711          300.0  7850.0
TF03712          400.0  7825.0
TF03713          500.0  7790.0
TF03714          600.0  7750.0
TF03715          700.0  7720.0
TF03716          5000.0  7720.0

```

```

*
TF03800      'CPS CS'  11  1.00  0.0
TF03812          300.0  440.0
TF03813          400.0  500.0
TF03814          600.0  580.0
TF03815          650.0  600.0
TF03816          800.0  690.0
TF03817          900.0  800.0
TF03818          1000.0  955.0
TF03819          1030.0 1760.0
TF03820          1050.0  960.0
TF03821          1100.0  700.0
TF03822          5000.0  690.0

```

```

*
TF03900      'THC C S'  8  1.00  0.0
TF03910          300.0  51.6
TF03911          400.0  50.0
TF03912          600.0  44.5
TF03913          800.0  37.0
TF03914          1000.0  30.0
TF03915          1100.0  27.0
TF03916          1200.0  25.0
TF03917          5000.0  25.0

```

```

*
*//////////////////////
*////////////////////// Decay Heat Package //////////////////////
*//////////////////////
*

```

DCHREACTOR 'PWR'

```

*-----*
*  usr input R-X shutdown time      *
*-----*
*  no trip ft specified   S/D time= about 1 hr
DCHSHUT  0   -1980.0  *-1759.0

```

```

*-----*
*  ANS decay heat curve      *
*-----*

```

DCHDECPOW 'ANS'

```

*  ANS decay curve multiplier sensitivity Card (PWR Default=3412 MWT)
*  but for KNGR, 4000 MWT (=1.1723329*3412 MWT)
*  for 100% core inventory case

```

```

*SC00012  3200  1.1723329  1  * 100% corium relocat
SC00012  3200  0.5861664  1  * 50% corium relocat
*
*-----*
*  NPP operation time *
*-----*
*  irradiation time [sec]
*      578.7037 day --> 1.5854896 yr
DCHOPRTIME  5.0E7
*
*-----*
*  Number of fission/fissile atom *
*-----*
DCHNCPSI    0.713
*****
* Radio-Nuclide Class Input *
*****
*
*-----*
*  Input for define new element or redefine default element *
*  ex)
*  This decay heat data should be supplied by the results from ORIGEN
*  ( SVP refer the CS & I composition related data )
*-----*
*          element name by usr      Mass of CI at S/D
DCHNEM0100      CI                  1.0E-6
*          time after SD[sec]      Decay PW[W/Kg]/unit mass
DCHNEM0101      0.0                 8.38070E5
DCHNEM0102      6.12                6.69130E5
DCHNEM0103      61.2                4.66530E5
DCHNEM0104      612.0               3.26060E5
DCHNEM0105      3600.0              2.23950E5
DCHNEM0106      7200.0              1.72960E5
DCHNEM0107      14400.0             1.14380E5
DCHNEM0108      36000.0             0.70876E5
DCHNEM0109      54000.0             0.53576E5
*
*-----*
*  Input for define new Class or redefine default Class *
*-----*
*          Class name by usr (1~15 default class ID, therefore we use
*          other ID#, e.x. 16)
DCHCLS0160      CSI
*          Element name in above new class
DCHCLS0161      CI
*          ALL: All default classes are use in calculation
DCHDEFCLS0      'ALL'
*          Yes: Sum of all the class decay power qre equal
*          to whole core decay power
DCHCLSNORM      'YES'
*
*****
*          R N INPUT
*          RN package activation switch
*          0 : active
*          1 : in-active
*
*****
*RN1000  0          * RN1 PACKAGE ACTIVE
RN1000  1          * RN1 PACKAGE INACTIVE
*

```

```

*****
** CAVITY PACKAGE INPUT **
*****
CAV0100 801 'KNGR CAVITY'
* CONCRETE LAYER DEFINITION **
CAV01C0 'KNGR' * FROM KAERI AVERAGE DATA(REF. DATA-KAERI9412)
CAV01C1 SIO2 0.5903 CAO 0.1357
CAV01C2 AL2O3 0.1068 K2O 0.0241
CAV01C3 NA2O 0.0189 FE2O3 0.0321
CAV01C4 MGO 0.0100 TIO2 0.0060
CAV01C5 MNO 0.0001 CR2O3 0.0100
CAV01C6 CO2 0.0231
CAV01C7 H2OCHEM 0.0200 H2OEVAP 0.0328 * total=0.0528
* FROM CORCON DEFAULT
*
* BASALTIC CORCON 4 CORCON 1 OLD LCS
CAV01CA DENSCT 2400. * 2400. 2340. 2291.0 2340.
CAV01CB TSOLCT 1350. * 1353. 1350. 1450.0 1420.
CAV01CC TLIQCT 1650. * 1653. 1650. 1960.0 1670.
CAV01CD TABLCT 1450. * 1450. 1450. 1450.0 1500.
CAV01CE TINCT 311.0
CAV01CF EMISCT 0.6
*
CAV01G0 CORCON 2
*
* NRAYS RO ZO
CAV01G1 99 0.0 0.0
*
* ZT RAD HIT RADC RW HBB NBOT NCORN
CAV01G2 0.0 5.0576 5.930 0.1 8.0576 4.2672 40 9
*
*-----
* error correction
*-----
CAV01TP 102
*-----
*
* CORCON MOD OPTION(DEFAULT/MOD3/MOD2 MODEL VALUES)
CAV01U1 BOILING 0.0 * boiling curve enhancement(0) (0./0./1.)
CAV01U2 GFILMBOTT 0.0 * slag(0)/gas(1) film model (1./0./1.)
CAV01U3 GFILMSIDE 0.0 * slag(0)/gas(1) film fodel (1./0./1.)
CAV01U4 HTRBOT 0.0
CAV01U5 HTRINT 0.0
CAV01U6 HTRSIDE 0.0
CAV01U7 MIXING -1.0
CAV01DH -2 -2 -2
*
*
*==== End of KNGR ex-vs cooling Input deck ====

```

부 록 2 (용기 외벽으로부터 cavity 대기로의 대류 열전달계수값 예측)

가열된 평판 하부의 폐공간내 자연대류현상으로 간주하면, 아래와 같이 표현된다.

$$Nu = h D/K = C (Gr Pr)^n$$

위의 K 값은 하부용기 외벽면 온도와 cavity내 대기온도의 평균온도값에서 산출된 공기의 열전도도값이다. K 값과 [10] 을 이용하면, Nu 값은 아래와 같다.

$$\text{Max [Gr, Pr]} = 10^{11}$$

$$C=0.58, \quad n=0.2, \quad D=0.5$$

$$K=0.0558648$$

[부록 G, 표 G-1,  $(430+1200)/2=815$  에서  
건조공기 열전도도 ]

$$Nu = h (D/K) = 0.58 (10^{11})^{0.2}$$

$$h = (K/D) 0.58(10^{11})^{0.2}$$

$$\Rightarrow 10.27061 \text{ W/m}^2\text{-K}$$

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁연구기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-1790/2001					
제 목 / 부 제	MELCOR 코드를 이용한 압력에 따른 KNGR 원전 외벽냉각 효과 평가				
주 저 자	박종화 (한국원자력연구소, 열수력안전연구팀)				
공 저 자	박수용, 김동하 (한국원자력연구소, 열수력안전연구팀)				
발행지	대 전	발행 기관	한국원자력연구소	발행일	2001년 3월
면 수	71 p	도 표	유 ( O ), 무 ( )	크 기	A4
참고사항					
비밀여부	공개 ( O ), 대외비 ( ), ----비밀		보고서종류	기술보고서	
위탁연구기관	한국전력공사		계약번호		
초 록	<p>이 보고서에서는 MELCOR 1.8.4 코드의 하부반구 모델을 이용, KNGR 원전을 대상으로 일차계통을 저압(5bar)과 고압(170bar) 으로 구분, 외벽냉각 유무에 따른 반구 내 debris 냉각과 반구 벽 건전성에 미치는 영향을 비교, 평가하였다. 계산 조건은 재배치되는 총 질량이 80 ton, 재배치 시 노심온도가 2700 K, 붕괴열크기는 재배치 시 원전정지 후 1시간이 경과된 경우를 가정하였다. 반구 creep 파손여부는 외벽냉각시 반구내 급격한 온도구배를 고려할 수 있는 1-D 모델을 적용하였다. 계산결과, 외벽냉각 시 cavity 에 주입되는 냉각수 온도와 주입 총 양이 외벽 냉각효과의 지속시간을 결정하는 중요한 인자임을 알 수 있었다. 외벽냉각 효과의 지속을 위해 cavity내 냉각수 온도증가를 억제할 수 있는 장기적인 방안이 필요하다고 판단된다. 또한 일차계통을 저압으로 유지하고 외벽냉각을 수행하는 것이 반구건전성 유지를 위한 필요조건으로 판단된다. MELCOR내 기본 penetration손상모델 적용 시 압력크기나 외벽냉각 여부에 관계없이 재배치 즉시 손상된다. 따라서 penetration관 손상모델 보완이 필요하다고 판단된다.</p>				
주제명 키워드	MELCOR1.8.4, 하부반구모델, 중대사고, 외벽냉각, 크리프, 소성변형, penetration관, KNGR				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.	Sponsoring Organization Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code	
KAERI/TR-1790/2001					
Title/Subtitle	The evaluation of pressure effects on the ex-vessel cooling for KNGR with MELCOR				
Main Author	Jong-Hwa Park (KAERI, Thermal-hydraulic Safety Research)				
Author	Soo-Yong Park, Dong-Ha Kim (KAERI, Thermal-hydraulic Safety Research)				
Pub. Place	Taejon	Pub. Org.	KAERI	Pub. Date	March 2001
Page	71 p	Fig.	Yes ( O ), No ( )	Size	A4
Note					
Classified	Open ( O ), Outside ( ), ----- Class		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.	KEPCO		Contract No.		
Abstract	<p>In this report, the effect of external vessel cooling on debris coolability and vessel integrity for the KNGR were examined from the two typical pressure range 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 ton of debris was relocated simultaneously into the lower vessel head and the debris relocation temperature from the core region was 2700 K. The decay heat has been assumed to be that of one hour after reactor shutdown. The creep failure of the vessel wall was simulated with 1-D model, which can consider the rapid temperature gradient over the wall thickness during the ex-vessel cooling. From the calculation results, both the coolant temperature and the total amount of coolant mass injected into the cavity are known to be the important factors in determining the time period to keep the external vessel cool. Therefore, a long-term strategy to keep the coolant temperature subcooled throughout the transient is suggested to sustain or prolong the effect of external vessel cooling. Also, it is expected that to keep the primary side at low pressure and to perform the ex-vessel flooding be the essential conditions to sustain the vessel integrity. From MELCOR, the penetration failure always occurs after relocation regardless of the RCS pressure or availability of the external vessel cooling . Therefore, It is expected that the improvement of the model for the penetration tube failure will be necessary.</p>				
Subject	MELCOR1.8.4, lower plenum model, Severe Accident, External vessel				
Keywords	cooling, creep, plastic strain, penetration tube, KNGR				