'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# MELCOR 코드를 이용한 MP-2 실험의 수치해석적 연구

# Numerical Analysis for the Melt Progression 2 Experiment Using the MELCOR Code

송명진, 박세인, 서재승, 전규동
한양대학교

박재홍
한국원자력안전기술원

## 요 약

중대사고시 노심용융 과정을 파악하기 위한 MP 실험 중에서 후기 노심용융 실험인 MP-2에 대한 MELCOR 코드를 이용한 수치적 해석을 수행하였다. MP-2 실험의 수치해석 모델링에 사용된 MELCOR 버전은 1.8.3을 사용하였으며, 이전에 사용되던 1.8.2에는 없는 파편 영역의 미세 파편과 금속 차단물 영역의 집괴 파편 (Conglomerate Debris) 모델이 첨가되었다. MELCOR 코드가 MP-1, MP-2 실험과 같은 작은 크기의 실험을 모델링하기 위한 코드가 아닌 상업용 원자로를 모델링하기 위해 설계되었음을 생각하면, 모든 영역에서 온도는 500K 이내의 범위로 들어 맞았으며 대부분의 지역에서는 250K 이내로 실험 결과들과 들어 맞았다. 그리고 물질의 용융과 재배치 정도는 PIE(Post-Irradiation Examination) 결과와 거의 일치 하였다.

## Abstract

The purpose of the Melt Progression, or MP, series of experiments was to investigate core melt progression during the severe accident. There were two experiments in the MP series (MP-1, MP-2). We performed numerical analysis using the MELCOR code in the late phase core melt experiment MP-2. The version of MELCOR used to model these experiments was version 1.8.3 of the code. This appended the modeling of the debris region as particulate debris and the crust region as conglomerate debris. Considering that MELCOR is designed to model large-scale reactor plants rather than small-scale experiments like MP-1 and MP-2, Temperatures were predicted to within 500K in all regions and within 250K in many regions, while the calculated melting and relocation in MP-2 agreed quite well with PIE (Post-Irradiation Examination) data.

## 1. 서 론

MELCOR는 경수를 사용하는 원자력 발전소의 중대사고를 모사하기 위해 미국 NRC의 주관으로 Sandia National Lab에서 개발한 완전 통합형, 엔지니어링 차원의 컴퓨터 코드이다. MELCOR 코드는 가압경수로(PWR)나 비등경수로(BWR)에서 일어나는 모든 중대사고 현상들 예를 들면 원자로 냉각계통과 격납용기의 열수력학적 반응, 원자로심의 온도증가와 용융물질의

재배치, 핵분열 생성물의 방출과 전달을 다루고 있다.

MP(Melt Progression)는 후기 노심용융 과정을 연구하고 중대사고 코드의 성능을 비교 평가하기위한 실험이다. 두 번의 MP 실험 중에서 1989년 Sandia National Lab에 있는 ACRR(Annular Core Research Reactor)에서 수행된 MP-1 실험은 변형된 노심을 재연할 수 있는 초기 구성요소를 적용하였다. 세 영역으로 이루어진 시험용 번들을 사용했으며 각 영역은 32개의 PWR 형태의 핵연료봉으로 구성된 핵연료봉 영역, Zr-$UO_2$ 크러스트로 둘러 쌓여있는 32개의 핵연료봉을 포함하는 크러스트 영역과 $ZrO_2$-$UO_2$가 파편으로 섞여 있는 파편층을 포함하는 파편 영역이다. 그 외에 열장벽, 냉각장치, 지지구조물, 격납구조물, 그리고 계측기 등으로 구성된다. MP-1 실험은 원자력 가열작용을 이용했으며 부분적인 용융이 진행되어 파편층 영역은 침전이 되었지만 실험중에 크러스트와 핵연료봉 영역의 물질은 용융이 되지않았다. MP-2 실험에서 사용한 시험용 번들은 MP-1과 비슷하지만 더 길어진 핵연료봉 영역과 반경방향으로 절연체를 감소시켰다. MP-2 실험은 1992년 11월에 수행되었으며, 파편층과 크러스트의 일부분 용융이 진행되어 결과적으로 MP-1 보다 많은 재배치가 일어났다.

이 보고서에서는 MP-2 실험의 구성요소 값을 사용하여 MELCOR 코드 평가를 수행하고 MELCOR의 계산 결과 값과 실험값을 비교 검증한다. MELCOR의 노심(COR) 패키지에 대한 민감도 분석을 수행하며, 이 수치해석에 MELCOR의 버전 1.8.3을 사용했다.

## 2. 본 론

### 1) 실험설비 및 시험 설명

MP 실험은 초기 노심용융을 재현한 DF 실험을 완성하기위해 설계된 것으로 파편을 포함하는 파편층에 근거를 두는 금속 차단물 형성을 가정한 후 변형된 노심의 행위를 시험하는 것으로 시험용 번들은 세 영역으로 나뉘어져 있다. 실험설비의 그림은 Fig. 1에 나타나 있다.

#### 가. 핵연료봉 영역

핵연료봉 영역은 핵연료를 포함하는 가장 낮은 곳에 위치한 영역으로, 1.27㎝ 평방 피치로 배열된 32개의 PWR 형태의 핵연료봉으로 구성되어있다. 6×6 격자구조로서 4 곳의 모퉁이 핵연료봉은 공간상의 이유로 제거되었다. 핵연료봉의 상부는 핵연료봉 영역 위에 있는 크러스트 영역에 삽입되어 고정되어 있는 반면에, 하부는 “격자 스페이스 바”라는 쇠로 고정되어 있다. 실험에서 사용된 핵연료봉은 일반적인 PWR 규격(펠렛의 OD는 0.826㎝, 피복재의 OD는 0.963㎝ 이고 두께는 0.122㎝)을 사용하였다. 핵연료봉 영역의 높이는 MP-1은 5.4㎝이고 MP-2는 10.0㎝ 이다.

#### 나. 크러스트 영역

크러스트 영역은 직접적으로 핵연료봉 영역 위에 위치하고 있다. 주로 금속물로 이루어져 있으며, 낮은 용융점을 갖는 원자로 물질들에서 형성된 차단물을 재연하기 위해 설계되었다. 이런 차단물들은 중대사고시 핵연료봉에서 총농처럼 흘려내려야 하며, 노심의 차가운 부분에서 재냉각 되어 금속 차단물을 형성한다. 크러스트 영역은 금속 차단물로 둘러 쌓여있는 32개의 핵연료봉 하단부로 구성되어 있다. MP-1에서는 금속 차단물은 각각 32%, 18%, 50%의 무게비를 갖는 $UO_2$, $ZrO_2$와 Zr의 혼합물이다. MP-2의 금속 차단물은 피복재(Zr, Sn), PWR 제어봉 물질(Ag, In)과 스테인레스강(Fe, Cr, Ni와 Mo)으로 구성되어 있다. MP-2의 크러스트 물질은 낮은 부분의 TMI-2 크러스트 구성 요소를 재현하기 위해서 설계되었다. 크러스트 영역의 높이는 두 실험 모두다 3.5㎝이다.

다. 파편 영역

파편 영역은 크러스트 영역 위에 놓여 있으며, $UO_2$와 $ZrO_2$의 미립자로 된 파편으로 구성되어 있다. 파편층의 높이는 16.4㎝ 이다. 파편 영역에 있는 각 물질들의 질량은 Table 1에 나타나 있다. 파편층에 있는 입자들의 지름은 1에서 5㎜ 사이로 분포하고 있으며 평균은 약 2㎜이다.

2) 수치해석에 사용된 MELCOR 특징 및 해석력

일반적으로 MELCOR 코드는 경수로에서 중대사고 과정을 모사하기 위해 개발된 완전 통합형 코드로서 발전소 시스템들의 비정상 또는 사고상황에서의 반응을 모델링하기위한 여러 가지 모델을 포함한다. 초기에는 사고 시 물리적현상의 이해부족으로 주로 복잡한 물리적현상을 반영하기 위해 사용자 입력 매개변수 값을 많이 사용하였지만 이후 컴퓨터의 발달 때문에 현상학적 불확정성과 사용자 예측을 줄임으로써 계산시간을 줄이고 좀더 나은 예측을 할 수 있게 되었다.

MELCOR 1.8.3 코드는 불확실성 분석과 민감도 분석을 포함하고 있으며, 이들의 사용을 용이하게 하기 위해 많은 기계적 모델들을 임의로 조절할 수 있는 사용자 입력 매개변수 값들과 함께 프로그램 되어있다. 분석자들로 하여금 MELCOR 계산과정에서 모델링의 기계적특성에는 어떠한 영향도 주지않는 사용자 입력 매개변수 값이 발전소 시스템에 어떤 영향을 미치는지 쉽게 알 수 있도록 한다. 수렴구간과 반복횟수를 지정하는 수치적 매개변수 값뿐만 아니라 이런 형태의 사용자 입력 매개변수 값들은 민감도 상수로서 프로그램화 되어있다. MELCOR 코드는 "제어체적(control volume)"을 사용하여 발전소 시스템을 모사하는 것이 일반적이고도 쉽게 접근할 수 있으며, 어떠한 특별한 노드구성 없이도 원자로심을 모사할 수 있다.

3) MP-2의 노드화

MP-2 기본 모델은 축 방향으로 15개의 수평면과 반경방향으로 3개의 링으로 구성되어진 45개의

노드를 갖는다. 반경방향의 링은 안에서부터 4, 10, 18개의 핵연료봉을 갖는다. MP-2 노드는 Fig. 2에 나타나 있다.

4) MP-2에 사용된 원자로 출력

MP-2 실험에서 사용되는 원자로 출력은 ACRR의 중성자 조사에 의한 핵분열이다. 실험장치에서 발생하는 출력을 계산하기 위해서는 실험장치 각 부분의 지역적인 coupling factor와 ACRR power에 의해 계산된 값을 사용한다. 간략하게 계산과정은 다음과 같다. coupling factor는 각각의 영역에서 W/kg($UO_2$)-kW(ACRR)의 단위로 주어지고, kW당 시험용 번들에 더해지는 fission power를 얻기 위해 $UO_2$질량과 coupling factor의 곱한 후 세 영역에서 더한다. 이러한 합은 제어함수에 의해 곱셈 연산자로 사용되어 kW의 단위를 갖는 bundle fission power의 결과가 된다. MP-2에서는 실험동안 $UO_2$의 재배치를 설명하기 위해 실제의 지역적인 $UO_2$ 질량을 사용하여 계산을 수행한다.

5) MELCOR 용 입력 모델

가. CVH/FL 패키지 모델

MP-2 기본 모델링에서 실험장치 내 세부분인 파편 영역, 크러스트 영역, 핵연료봉 영역은 각각의 제어체적으로 모사가 되고 각 제어체적은 유로로 연결이 된다. MP-2 실험은 폐쇄 시스템이므로 실험장치 밖으로의 유로는 없으며, 모든 제어체적은 68.9㎪(10psia) 압력과 300K 온도를 초기조건으로 설정 한다.

나. COR 패키지 모델

MP-2실험에서는 핵연료봉 영역을 MP-1의 3개대신 5개의 수평면으로 나누어서 총 15개의 수평면으로 구성하므로 서 높이가 증가했다. 반경방향으로 노드구성은 바깥 반경이 각각 1.4㎝, 2.7㎝와 4.36㎝인 3개의 링으로 구성했으며, 각각의 핵연료봉의 수는 안쪽부터 4, 10, 18개이다. 구성 성분들의 질량은 Table 1에 있다.

모든 경우에 연료봉의 질량은 각각 링에서의 연료봉 숫자에 따라 배분되어진다. 파편 영역과 크러스트 영역에 있는 미립자로 된 파편과 집괴 형태의 파편은 모델링이 되어있다. 이 부분은 MELCOR 1.8.2에는 없는 모델링이다. 격자 스페이스 바를 통한 열손실을 모사하기 위해 축방향 첫 번째 수평면에 lower grid space를 포함시키고, 그 부분은 COR00011 노심 경계 열전도 선택사양을 이용하여 반경방향으로의 열구조물과 연결을 하는 모델링 방법을 사용한다. 그 이유는 하단부 한 부분으로서 격자 스페이스 바를 COR 패키지로 모사 할 때에 단열재로서 적합하지 않기 때문이다. MELCOR는 안쪽 링 OS(other structure)와 바깥쪽 링 OS 사이의 열전도를 고려하지 않기 때문에 반경방향으로의 열손실은 실제보다 적은 값을 사용하여 예측한다.

축방향 peaking factor는 shape factor와 지역적인 factor를 사용하여 계산한다. MELCOR 입력에서

축방향 peaking factor는 CORZjj03 카드를 사용한다. COR0003카드에 주어지는 radiation view factor는 MELCOR 기본값인 0.25이다.

물질들간의 상호반응(eutectics)모델은 사용하지 않는다. 이는 크러스트 영역의 물질들이 온도가 올라가면 그들이 상호반응을 일으키기 보다는 먼저 녹아 내려서 각각 독립적으로 활동하기 때문이다.

모든 축방향 수평면에서 크러스트 영역이나 핵연료봉 영역으로 재배치되는 물질은 오직 용융물로 하기위해 물질의 공극률은 0.750으로 설정 한다. 이는 파편영역을 지탱하기 위해 인위적으로 높은 파편영역의 공극률 값 0.513을 준다. 지르칼로이의 임계 최소두께는 MELCOR 기본값인 $10^{-4}$m 이지만 MP-2 실험에서는 크러스트 영역에서의 집괴 파편을 지탱하기 위해 $10^{-5}$m로 주어진다. 지르칼로이의 물성치는 MATPRO(MATerial PROperties package)에 의해 주어지는 값을 사용한다.

다. 열구조물 모델

MP-2실험에서 열구조물 모델링은 반경방향으로의 15개와 축 방향으로의 상단부 경계 열구조물을 포함하는 16개로 구성된다. MP-2에서는 Ta(tantalum), $ThO_2$, $ZrO_2$ 섬유, Al과 스테인레스 스틸로 구성된다. 이러한 열구조물은 단열과 용융 장벽으로써의 역할을 한다.

$ThO_2$, Ta, $ZrO_2$는 MELCOR에서 물성치를 제공하지 않으므로 MP 패키지에서 주어진다. MP 패키지에는 그러한 물질들의 밀도, 열전도 계수, 비열과 specific heat capacity를 적분하여 구하는 specific enthalpy가 주어진다. 모든 열구조물은 방사율 0.7을 갖는 기본 복사모델을 사용한다. 경계 온도는 냉각자켓의 온도를 사용한다.

6) MELCOR 계산결과

가. 파편 영역 온도

파편영역의 축방향 수평면 10, 11의 온도는 Fig. 3 에 나타난다. 계산된 온도 값은 약 10,000초 까지는 실험에서 측정된 온도와 거의 같다. 10,000초가 지난 후 계산 값은 측정치보다 500K정도 낮다. 그러나 파편영역의 온도가 2,600K를 넘으면 thermocouple은 electrical shunting effect에 의해 때때로 신뢰할 수 없는 값을 갖는다는 것을 고려할 필요가 있다. 축방향 수평면 12,13,14,15도 같은 경향을 보인다. 하지만 더 낮은 수평면에서 훨씬 명확하다. 수평면 15에서는 측정치는 계산 값보다 낮다. 이는 파편영역의 상부에서 thermocouple이 단열재와 접촉이 일어나기 때문이라고 생각된다.

그림에서 보면 최고온도는 축방향 수평면 11에서 2,800K이다. Thermocouple의 신뢰할 수 있는 측정온도는 2,600K를 넘지 못하므로 계산된 파편층 온도는 전체적으로 링 1에서 측정된 값을 경계치 온도로 설정한다. MELCOR 계산 값에서 보여지는 좀 더 작은 피크들은 축방향 peaking

factor의 영향이다. 링 2와 3에서의 최고온도나 온도의 기울기는 링 1과 유사하게 나타난다.

나. 크러스트 영역 온도

MELCOR 모델링에서는 피복재에서 재동결 되는 집괴 파편을 차단물질로 간주한다. 그러므로 피복재 온도는 크러스트 영역에서 차단물질뿐만 아니라 손상되지 않은 물질의 온도를 나타낸다. 크러스트 영역에서 측정치와 계산 값을 비교하기 위해 피복재 온도를 사용한다.

모든 링의 수평면 7(축방향에서 가장 낮은 크러스트 영역)에서 계산된 피복재 온도는 Fig. 4에서 측정값과 비교했다. 이 수평면에서 계산값은 측정치와 대략 250-500K 정도의 차이를 보여준다. 그리고 thermocouple의 측정이 중단되는 시점에서는 거의 일치한다.

수평면 8, 9에서의 계산값과 측정치의 온도차 또한 축방향 수평면 7과 유사하다. 크러스트 영역에서 링 1, 2, 3의 전체적인 축 방향 온도를 비교해보면 가장 큰 온도차는 링 1에서 약 250K 정도 차이를 보인다. 바깥 링들은 100K 이내에서 실험값과 일치한다. 위의 결과는 축 방향으로의 온도변화가 거의 없음을 보여주며, 이는 피복재의 축방향 열전도 때문이라고 생각된다.

다. 핵연료봉과 격자 온도

Fig. 5에서는 모든 링에서 수평면 2의 온도와 측정값을 비교한다. 그림에서 보듯이 대략 계산값이 측정치보다 250-500K 정도 높다. 핵 연료봉 영역에서 축방향으로의 온도 기울기는 그렇게 크지 않으며, 이는 축방향 열전도 때문이다.

핵 연료봉 영역에서는 thermocouple이 격자 스페이서에 고정되어 있기 때문에 피복재의 온도가 반영되지 않는다. 그래서 계산 값과 측정치 사이에 온도차가 크게 나타난다. 안쪽의 OS 온도는 시간과 함께 증가하나 링 3 에서는 그냥 낮은 상태로 남아 있다. 이러한 결과는 노심 경계치 열전도 모델의 효과 때문이다.

7) 민감도 분석

가. 축방향 열전도

COR 패키지에서 축방향 열전도는 미세 파편물을 제외하고 축 방향으로 근접한 셀 사이에 같은 물질끼리 수행되어진다. 축방향 열전도는 실험에서 매우 중요한 열 손실 메커니즘이다. 왜냐하면 실험장치의 밑부분 격자 스페이서는 냉각자켓을 따라 직접적인 열 손실과 많은 양의 heat sink가 이루어지기 때문이다. 이 부분에 대한 민감도 분석은 MELCOR CORTST01 입력자료에서 이루어진다.

축방향 열전도를 사용하지 않은 계산결과는 Fig. 6과 Fig. 7에 보여진다. 그림에서 보듯이 파편영역에서는 약 400K, 크러스트 영역에서 온도는 750K 정도 더 높은 결과를 나타낸다. 이는 핵연료봉 영역에서 핵연료와 피복재를 통한 열전도가 없기 때문이다. 이는 또한 핵연료봉 영역의

온도를 약 450K 정도 낮춘다. 파편영역의 온도는 파편과 차단물 구성성분 간의 직접적인 열전도의 결핍때문이 아니라 차단물의 온도가 더 높기 때문이다. 이러한 효과는 파편영역의 낮은 부분에서 더 명확하다.

### 나. Candling 모델 선택사양

기본 모델링에서는 MELCOR CORTST01 입력자료에서 candling-on(IDRP=2)가 사용된다. 민감도 분석에서는 candling-off(IDRP=1)인 선택사양이 사용되었다. 두 가지 경우의 온도분포는 Fig. 8 에 보여진다. 둘 사이에는 크게 온도차가 나지 않으며 단지 candling-off인 경우 많은 피복재 물질이 크러스트 영역에 남아 있으며 파편영역에는 모든 용융물질이 남아있다.

### 다. Candling 모델 재동결 열전도 계수

MP 실험의 MELCOR 모델링에서 물질의 재동결은 그리 큰 역할을 하지 않는다. MP-2에서는 COR00005 입력자료에서 기본값이 1,000 W/mK인 재동결 열전달 계수를 50%와 150% 두 가지 경우로 민감도 분석을 수행하였다. 결과적으로는 확연한 차이는 나지 않고 재배치된 물질의 조성에서 약간의 차이가 난다. 파편영역과 크러스트 영역에 좀 더 많은 $ZrO_2$와 Zr이 남아있고 크러스트 영역에서 핵연료봉 영역으로 재배치되는 Zr 양이 적다.

### 라. 대류 열전달 계수

민감도 분석은 COR 패키지에서 강제대류, 자연대류 열전달 계수를 바꿔줌으로써 수행된다. 하지만 이러한 값들은 결과에 어떠한 영향도 미치지 않는다. 이는 복사 열전달에 의한 효과가 대류 열전달보다 우세한 폐쇄 시스템이기 때문이다.

### 마. 노심 구성물 View Factors

노심 패키지내의 복사 열전달을 계산하기위해 사용되는 view factor는 기본값이 0.25가 사용된다. 여기서는 view factor를 0.1과 0.5 두 가지 경우로 민감도 분석을 수행하였다. view factor는 COR00003 입력자료에서 바꾼다.

Fig. 9과 Fig. 10은 두 가지 경우의 온도분포를 보여준다. 일반적으로 view factor를 증가시킴으로써 복사 열전달이 커지기 때문에 구성성분 들의 온도는 낮아지게 된다. 미세 파편영역에서 view factor를 0.1로 하면 온도는 300K정도 증가하고 0.5로 놓으면 온도는 200K정도 감소한다. 크러스트 영역에서는 200K 증가하고 50K정도 감소한다. 위의 두 경우에서 보듯이 view factor를 60%(from 0.25 to 0.1)감소시킨 경우가 100%(from 0.25 to 0.5) 증가 시킨 경우보다 온도의 변화가 더 크다. 이는 이미 radiation heat loss가 최고 값에 접근한 걸로 보여진다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 MP-2 실험에 대해 MELCOR 1.8.3 을 이용하여 후기 노심용융 과정에서의 물질 용융 및 재배치과정을 수치적으로 해석하고 노심 패키지에 대해 민감도 분석을 수행하였다. 수치해석결과 온도는 모든 영역에서 500K 이내, 대부분의 지역에서 250K 이내의 범위로 실험결과와 일치하였으며 물질의 용융과 재배치정도는 PIE(Post-Irradiation Examination) 결과와 거의 일치하였다.

코드계산은 22,000 초까지 수행하였고, 20,000 초에서 열원을 제거했다. 물질의 용융은 대략 14,000 초에서 시작된다. 특히 크러스트 영역에서는 피복재가 녹아서 재동결 되는 집괴 파편을 차단물질로 간주하며, 측정값과 비교하기 위해 크러스트 영역의 온도는 피복재의 온도를 사용한다. 계산값은 측정치와 대략 250K 정도 차이가 나며 이는 온도가 2,600K 를 넘으면 thermocouple 이 온도를 측정하지 못하기 때문이다.

MELCOR 1.8.3 을 이용한 MP-2 실험의 수치적 해석은 실험 측정값에 보다 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 이전 버전 1.8.2 에서 모델링되어 있지 않은 미세파편과 집괴파편 모델링이 첨가되었고, 보다 개선된 candling 모델과 노심용융모델을 사용했기 때문이다. 그러나 다른 중대사고 해석 코드인 SCDAP/RELAP 과 달리 MELCOR 코드는 용융물이 순간적으로(중력에 의해서) 재배치가 이루어지는 candling 모델을 사용 했으며, 이런 점에서는 실험과 일치하지 않는 면이 있다. 그러므로 개선된 노심 손상모델(연료봉 피막재 파손모델, 공융 혼합물의 형성 및 거동 해석 모델)이 추가된 MELCOR 1.8.4 를 이용한 수치해석적 분석이 요구된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국원자력안전기술원에서 시행한 “중대사고평가 규제기술개발”의 일환으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. R. D. Gasser, et. al., “Late-Phase Melt Progression Experiment : MP-2”, SAND93-3931, Sandia National Lab.(1997).
2. MELCOR Code 1.8.2 Assessment for Melt Progression Experiment, Sandia National Lab.(1994).
3. MELCOR Code Development Group, “MELCOR 1.8.3 User’s Guide”, Sandia National Lab.(1994).
4. MELCOR Code Development Group, “MELCOR 1.8.3 Reference Manual”, Sandia National Lab.(1994).

| Material | Masses(kg) | | |
|---|---|---|---|
| | Stub | Crust | Debris |
| $UO_2$(fuel) | 1.912 | 0.613 | |
| Zr(clad) | 0.415 | 0.122 | |
| $UO_2$(debris) | | 0.065 | 3.859 |
| Zr(debris) | | 0.296 | 0.802 |
| $ZrO_2$(debris) | | 0.109 | |
| Sn(debris) | | 0.033 | |
| Ag(debris) | | 0.092 | |
| In(debris) | | 0.023 | |
| Fe(debris) | | 0.094 | |
| Cr(debris) | | 0.017 | |
| Ni(debris) | | 0.059 | |
| Mo(debris) | | 0.005 | |

**Table 1. Material masses for MP-2**

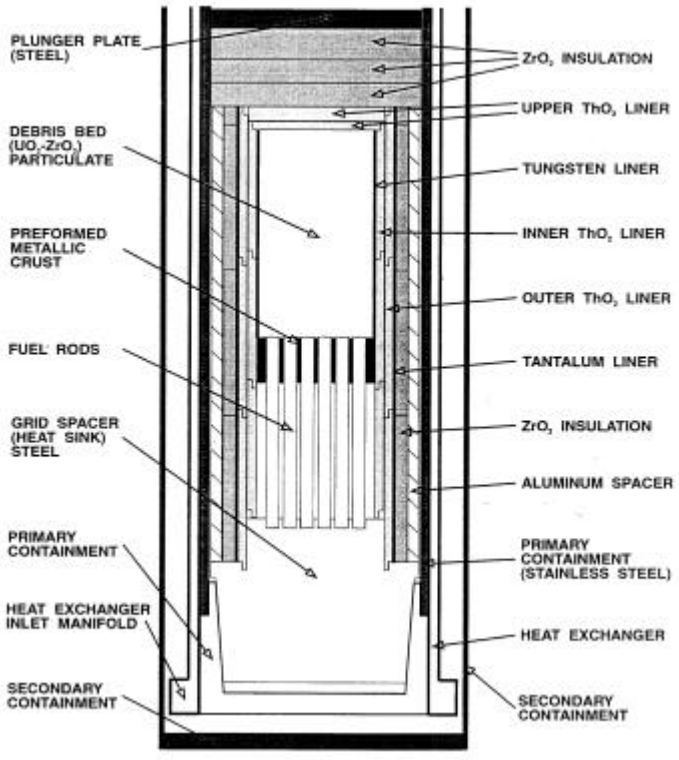


**Fig. 1. MP-2 실험설비**

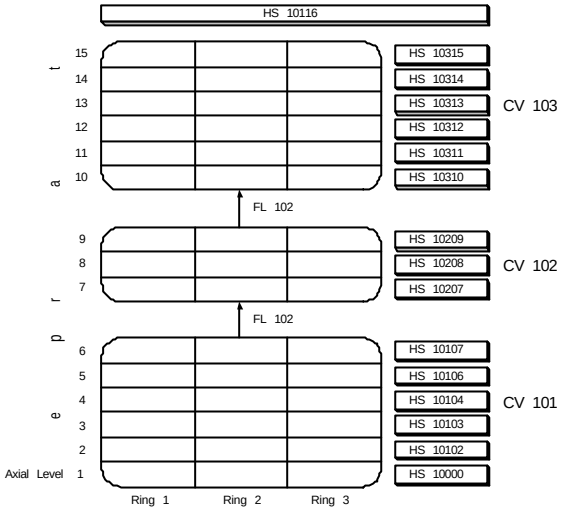


**Fig. 2. MP-2 Nodalization**

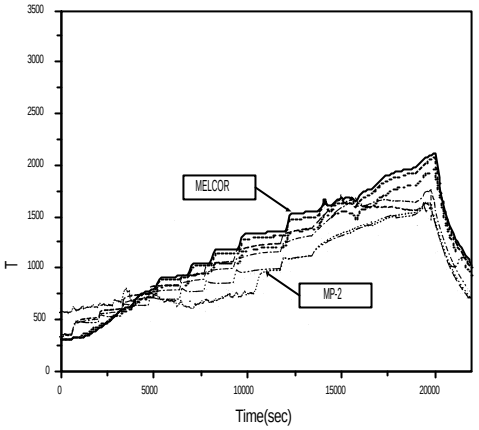


**Fig. 5. 핵연료 영역 온도**

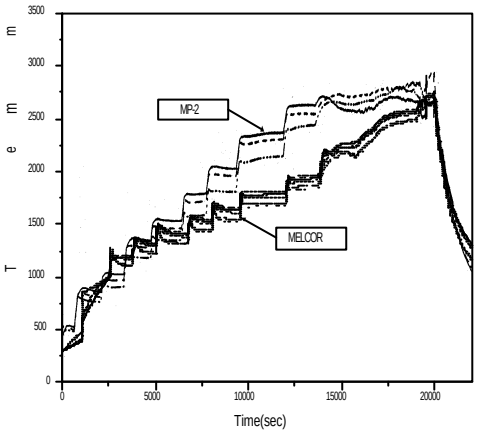


**Fig. 3. 파편영역 온도**

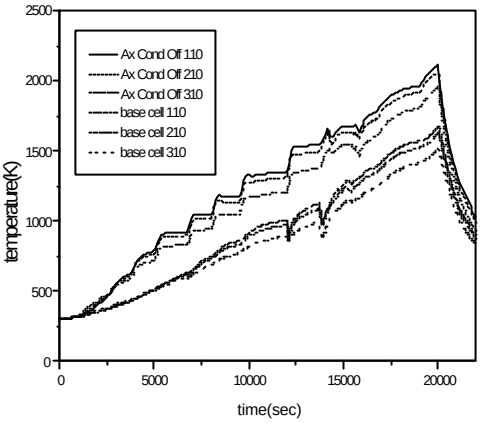


**Fig. 6. 파편영역 민감도 분석 (축방향 열전도)**

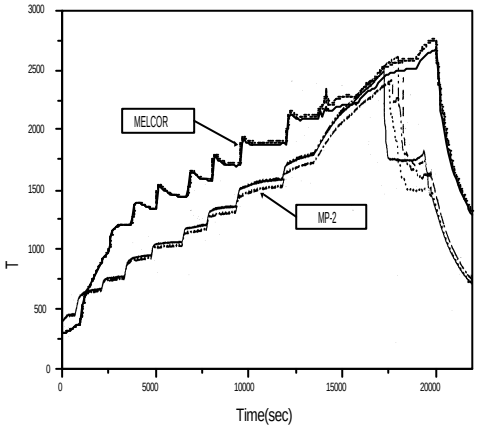


**Fig. 4. 크리스트 영역 온도**

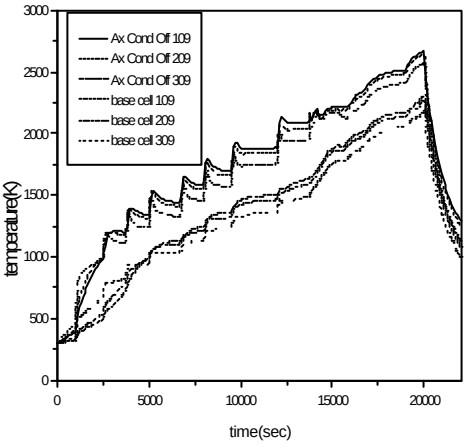


**Fig. 7. 크리스트영역 민감도 분석 (축방향 열전도)**

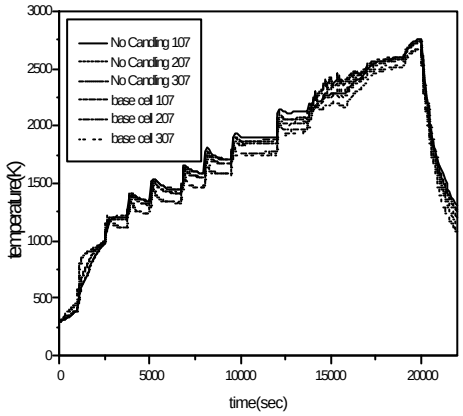


**Fig. 8. Candling 모델 민감도 분석**

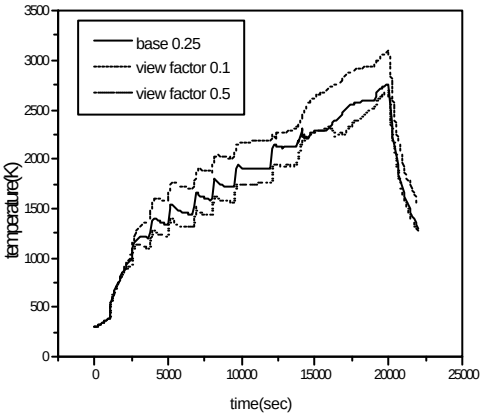


**Fig. 9. View Factor 민감도 분석(크러스트 영역)**

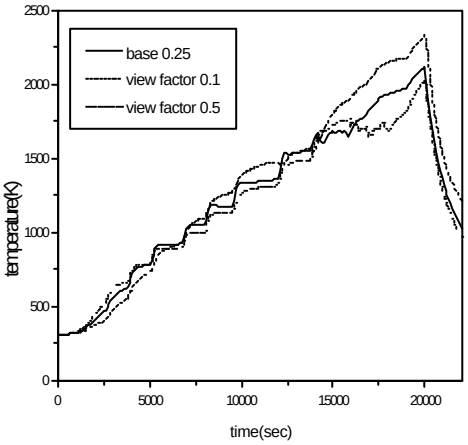


**Fig. 10. View Factor 민감도 분석(파편 영역)**