'2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SCDAP/RELAP5/MOD3.2 를 사용한 TMI-2 사고 후기 노심용융 모의

Simulation of Late Phase of the TMI-2 Accident in SCDAP/RELAP5/MOD3.2

박세인, 전규동
한양대학교, 원자력공학과, 서울시 성동구 행당동 17

박재홍
한국원자력안전기술원, 대전시 유성구 구성동 19

요 약

TMI-2 사고는 중대사고시 노심용융과정에 대한 정보를 제공하는 유일한 실제 사고라는 점에서 실험이상의 가치를 지닌다. 그러므로 사고결과와 전산코드 모사결과와의 비교를 통해 해당 전산코드의 완성도는 물론 입력자료의 최적성을 판단하는데 있어 좋은 기준을 제시할 수 있다. 본 연구에서 사고모의를 위해 사용한 전산코드는 SCDAP/RELAP5/MOD3.2 이며, 후기 노심용융 과정을 가장 근접하게 모의할 수 있는 입력자료의 변수값을 찾기 위해 다양한 경우에 대해 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석을 위해서 기존에 사용되고 있던 여타 발전소 및 실험장치의 입력자료를 수집하여 비교·분석 하였다. 특히 SCDAP/RELAP5 Peer Review 에서 제시된 해석모델의 단점을 고려하여 모의 과정에 반영하였다. 모의 결과, SCDAP 입력자료의 Gamma Heating Fraction 에 의해 후기 노심용융 과정의 진행 양상이 많은 영향을 받음을 확인할 수 있었다. 차후 관련 해석모델에 자체에 대한 연구를 통해 보완할 예정이다.

Abstract

TMI-2 accident is more valuable than the related experiments in the point of view that it is a real accident offering huge information about the late phase of severe accident. Therefore it gives out good standards for evaluation of code performance and input's suitableness by comparing the accident data and simulated outputs. In this study SCDAP/RELAP5/MOD3.2 was selected for accident simulation. And sensitivity analysis was performed on varied cases to find out the most proper input variable about the late phase of core melting phenomena. Other plants and experimental facilities' input deck were collected and analyzed for the sensitivity study and the shortcomings proposed by SCDAP/RELAP5 Peer Review were considered to the simulation. As a result gamma heating fraction in the input affect the progress of core melting phenomena. About this a study on the related model itself will be carried out.

I. 서　　론

본 연구에서 사용된 전산코드인 SCDAP/RELAP5 는 중대사고시에 경수로의 냉각수계통에서 일어나는 각종 과도현상을 모사하기 위해 개발되었다. 현재 최신 버전은 SCDAP/RELAP5/MOD3.2 이며, 지금까지의 평가로는 중대사고시 노심용융과정 초기진행에 대해서는 비교적 현상과 일치하는 결과를 보이나 후기 노심용융과정에 대해서는 많은 불확실성이 존재하는 것으로 판단되고 있다. 그러나 MOD3.1 에서 MOD3.2 로 옮겨가면서 많은 오류가 수정되었으며, 해석모델 상에서의 발전도 동시에 이루어져, 많은 향상을 보이고 있는 것도 사실이다.

후기 노심용융 과정을 모의하는 해석모델을 분석해보면 아직까지 많은 부분을 사용자가 지정하는 값에 의존하고 있음을 알 수 있는데, 이로인해 입력자료에 어떤 값을 입력하는지에 따라 사고 진행의 양상이 많은 차이를 보인다. 따라서 아직 관련 해석모델이 완전하게 물리적 현상을 따라가지 못하고 있는 시점에서 사용가능한 전산코드를 이용하여 최상의 모의 결과를 얻어내기 위해서는 사용자가 입력하는 입력자료 값 중에서 어떤 부분이 제일 민감하게 작용하는지에 대한 분석이 필요하다. 본 연구의 범위는 해석모델의 단점을 일단 인정하는 범위에서 최적의 입력자료를 구성할 수 있는 기반을 조성하는데 있으며, 이를 위해 관련자료를 수집 및 해석하여 민감도 분석을 수행하였다.

II 본　　론

II.1 기본 입력자료 구성

TMI-2 사고 모사를 위해 사용된 입력자료는 냉각수 계통 모의를 위한 기존 RELAP5 부분과 노심용융 전반을 모의하기 위한 SCDAP 부분, 하부헤드로 재배치된 노심파편의 거동을 모의하기 위한 COUPLE 부분의 3 부분으로 구성된다. 그림 1 은 노심계통의 노드구성을 보여준다. 노심은 5 채널로 나누어 구성했으며 각 채널은 중심부터 외곽까지의 링(ring) 구조를 의미한다. 즉 축방향으로는 10 개, 방사상으로는 5 개의 노드로 나누었다. 사고 진행과정은 크게 4 개의 phase 로 나누어 입력자료 또한 4 개의 부분으로 나누었으며, 각 단계에서 실제 사고에서 발생한 계통상의 변화를 반영하였다.

표 1 은 사고 당시의 초기조건을 SCDAP/RELAP5 의 정상상태 계산을 통해 얻은 결과와 비교한 것이다. 두 값이 비교적 일치하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

표 1. 사고 초기조건과 정상상태 모사결과 비교

Parameter	ICBC data base	SCDAP/RELAP5
Reactor power(MW)	2700	2700

Primary system pressure(MPa)	15.2	15.2
Pressurizer level(m)	5.77	5.76
Pressurizer heat power(MW)	1.39	1.39
Cold leg 1A temperature(K)	561	565
Cold leg 2A temperature(K)	548	565
Hot leg A temperature(K)	592	593
Hot leg B temperature(K)	592	593
Makeup flow(kg/s)	5.44	0.0
Letdown flow(kg/s)	4.18	0.0
PORV flow(kg/s)	2.59	0.0
Steam generator A pressure(MPa)	7.31	6.34
Steam generator B pressure(MPa)	7.24	6.28
Steam generator A pressure(MPa)	586	576
Steam generator B pressure(MPa)	585	582

또한 입력자료에 실제사고를 반영하기 위해 General Table 의 형태로 HPI/makeup flow 와 노심출력을 감안하였다(그림 2, 3)

II.2 민감도 분석을 위한 입력자료 구성

민감도 분석을 위한 자료를 구축하기 위해 다음과 같이 크게 3 가지의 방법을 사용하였다.

- USNRC 의 SCDAP/RELAP5 Peer Review Committee 에서 제시한 해석모델의 주요 단점을 참고하여 해당 입력자료값 분석
- 다른 실험 및 원자로 해석에 사용된 입력자료를 수집하여 비교분석
- 그외, 사용자가 지정가능한 입력변수값 조절

먼저 Peer Review 에서 제시한 모델링 개선이 요구되는 항목을 정리하고 그에 따른 해당 입력자료를 정리하면 표 2 와 같다.

표 2. SCDAP/RELAP5 의 해석모델 개선요구 사항

현상 및 모델	문제점	해당입력자료(Card, Word)
연료봉 액화, 이동 및 응고	a. 연료봉 산화막 실패경계를 입력변수로 처리했기 때문에 사용자가 선택가능함 b. 피복재에 ballooning 현상이 일어났을 때 발생하는 피복재 안쪽 재배치 현상, 증기/Zr 물질교환 및 UO_2-Zr 반응에 대한 부적절한 모델링 c. 용융물질을 액적의 흐름에 의한 재배치가 아닌 중력에 의해 하강하는 환형태의 흐름으로 다룸	a. 40000300, W2 Oxide shell stability parameters b. N/A c. 40000310, W3 Metallic meltdown parameters 40002000, W3 Core slumping control card d. 40004001~40004999 Convect, radiation, truncate, user defined options e. 40000100, W4

	d. 용융물질로부터 주변증기 및 구조물로 이루어지는 대류 및 복사열전달 e. 잔열과 산화에 의해 발생하는 열을 다루는 모델 부족	SCDAP control, power history type 40000400, W1 Gamma heating 40004001~40004999 Oxidation, user defined options
제어봉 및 노심구조	a. eutetic 반응과 용융물질의 방사상 재배치, 용융물질이 재배치되는 동안에 일어나는 열수력 현상 및 열전달 기작에 대한 모델부족 b. blockage 의 형성과정에 grid spacer 가 미치는 영향에 대한 모델부족 c. 노심 plate 에 대한 모델 부족	a. N/A b. 40001001~40001099, W1~W6 Grid spacer description 40001000, W1~WN Grid spacer elevation c. N/A
노심파편에서의 열전달 (Fragmentation uenching)	a. 노심파편층의 유효열전도 계수 b. 파편층의 용융과 용융물질의 파편층 내부에서의 거동 c. 파편층의 열수력모델	a. 40009NN3, W1 Thermal conductivity b. 40000320, W1 Molten pool parameter 40001100, W1 Definition of core slumping model 40002000, W3 Core slumping control card 40002200, W1~W3 User defined core slumping c. N/A
용융풀의 형성, 크러스트의 거동 및 용융풀 내부의 열전달	a. 용융풀 내부의 자연대류 계산능력 b. 크러스트의 파손으로 인한 용융물질의 재배치 c. 크러스트의 파손기작 및 거동	a. N/A b. 40000320, W1 Molten pool parameters 40001100, W1 Definition of core slumping model 40002200, W1~W3 User defined core slumping

또한 현재의 흐름을 파악하기 위해 다른 실험 및 원자로의 입력자료를 참조하여 서로 차이가 나는 값들을 비교하였다. 동시에 코드 매뉴얼에서 권고하고 있는 기본값과도 비교하여 보았다(표 3).

표 3. SCDAP/RELAP5 의 입력자료값 비교

입력변수 (Card, Word)	TMI-2	FLHT	SFDS	CORA-5	Vessel Boiloff	Uljin 3&4	Default
40000300, W1(K)	2502.5	2500	2500	2500	2500	2500	2500
40000300, W2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.2/0.6
40000300, W3	0.07	0.14	0.1	0.1	0.07	0.5	0.07
40000310, W1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
40000310, W2(K)	0.0	1750.0	0.0	1750.0	0.0	1750.0	1750.0
40000310, W3(m/s)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
40000500, W3	0.33	0.25	0.25	0.248	0.33	0.18	0.33

위의 표에서 확인할 수 있는 것처럼 대부분의 입력자료들이 코드 매뉴얼에서 권고하는 기본값을 크게 벗어나지 않는 범위에서 사용하고 있음을 알 수 있다. 결국 모델링 상의 문제점 및 여타 입력자료 값의 비교분석을 통해 TMI-2 입력자료에서 고려되어야 할 부분들을 정리하여 표 4 와 같이 민감도 분석의 각 경우를 정리하였다.

표 4. 민감도 분석 자료

Cases	Card Num.	Word	Default value	Applied value	Option description
1	40002200	W1 W2 W3	Non	W1: 13500.0 W2: 15800.0 W3: 1	**User Defined Core Slumping** **W1;** Time at which material from upper plenum or core slumps(s) **W2;** Mass of material that slumps from upper region or core plate at time of Word 1(kg) **W3;** Parameter controlling user definition of material slumping to lower head, 1=Material slumps to lower head, 2=Material slumps to in-core molten pool
2	40001100	W1	1	0	**Definition Core Slumping Model** Indicator of model for determining when a pool of molten material in the core region slumps, 0=Model that results in latest possible slumping, 1=Model that results in earliest possible slumping
3	40000300	W2	0.6	0.2	**Oxide Shell Stability Parameters** Fraction of oxidation of fuel rod cladding for stable oxide shell
4	40000310	W2	0.0	1750.0	**Metallic Meltdown Parameters** Surface temperature of drops of liquefied/ slumping fuel rod cladding, 0.0=The location of freezing is calculated by the heat transfer model for the drops
5	40000100	W4	2	1	**SCDAP Control** Power history type 1 = Generic PWR(33,800MWD/tU) 2 = TMI(3,250MWD/tU) 3 = PBF Severe Fuel Damage Test Series 4 = PBF(other test series) 5 = Full decay power 6 = No decay power
6	40000100	W4	2	5	
7	40000100	W4	2	6	
8	40000300	W2	0.6	0.9	**Oxide Shell Stability Parameters** Fraction of oxidation of fuel rod cladding for stable oxide shell
9	40000310	W1	0.2	0.0	**Metallic Meltdown Parameters** Fraction of surface area covered with drops that results in blockage that stops local oxidation
10	40000320	W1	1.0	2.0	**Molten Pool Parameters** Multiplication factor on fuel diameter that defines minimum thickness that crust at bottom of molten pool must have in order to support and seal the molten pool
11	40000400	W1	0.026	0.057	Gamma Heating Gamma heating fraction. The fraction of power used to directly heat the coolant by gamma heating. ($0.0 \le x \le 0.057$)

12	40000400	W1	0.026	0.03	
13	40000400	W2	0.026	0.04	
14	40000400	W3	0.026	0.05	

II.3 민감도 분석 결과

민감도 분석의 결과는 크게 4 가지의 관점에서 분석되었다. 관점 선정의 기준은 사고의 실제 결과와 비교가능한지와 물리적 중요성을 감안한 것이다.

- 용융풀의 위치 및 형태
- 용융물질의 총질량
- 1 차측의 압력
- 수소생성량

용융풀은 실제사고에서 10,000 초 이후에 발생하여 반구형태로 발전한다. 그리고 13,500 초 경과후 용융풀의 크러스트가 실패하면서 하부헤드로의 재배치가 일어난다. 표 5 에 각 경우별로 하부헤드로의 재배치가 일어나기 직전의 노심상태를 나타냈다.

표 5. 용융풀 실패 직전의 노심 배치

core degradation map

```
I = intact fuel component                  underscore indicates       __I__   x's indicate
P = porous debris                          metallic or planar         __V__   that total or bulk
L = partially liquefied porous debris
M = molten or frozen ceramic pool          blockage in volume at bottom   xxPxx   blockage occurs
V = Relap fluid volume now void of fuel      of indicated node            xxMxx   in the volume
```

Base Case

```
Conditions of in-core molten pool at    11350.    sec

effective radius of pool     = 0.9721E+00 (m)
total heat generated in pool = 0.4987E+07 (W)
volume of molten pool         = 0.1924E+01 (m*3)
total rate of heat removal   = 0.0000E+00 (W)
temperature of molten pool   = 2872.30    (K)
total mass of UO2 in pool    = 0.1330E+05(Kg)
liquidus temp of material    = 2873.00    (K)
total mass of metallic Zr    = 0.0000E+00 (kg)
total mass of oxidic Zr      = 1887.14    (kg)
mass of liquefied material in partially liquefied porous debris = 0.8238E+04 kg

 Fuel rod component #        1         3         5         7         9

   Axial node #
          10                 L         P         I         I         I
           9                 L         L         I         I         I
           8                 V         V         L         L         L
           7                 V         V         V       xxMxx       L
           6               xxMxx     xxMxx     xxMxx       L         L
           5               xxMxx       L         P         I         P
           4                 P         I         I         I         I
           3                 I         I         I         I         I
           2                 I         I         I         I         I
           1                 I         I         I         I         I
Relap vol. at bottom     10010000  20010000  30010000  40010000  50010000
```

Case 1

```
Conditions of in-core molten pool at    11350.    sec

effective radius of pool     = 0.9721E+00 (m)
total heat generated in pool = 0.4987E+07 (W)
volume of molten pool         = 0.1924E+01 (m*3)
total rate of heat removal   = 0.0000E+00 (W)
temperature of molten pool   = 2872.30    (K)
total mass of UO2 in pool    = 0.1330E+05(Kg)
liquidus temp of material    = 2873.00    (K)
total mass of metallic Zr    = 0.0000E+00 (kg)
total mass of oxidic Zr      = 1887.14    (kg)
mass of liquefied material in partially liquefied porous debris = 0.8238E+04 kg

 Fuel rod component #        1         3         5         7         9

   Axial node #
          10                 L         P         I         I         I
           9                 L         L         I         I         I
           8                 V         V         L         L         L
           7                 V         V         V       xxMxx       L
           6               xxMxx     xxMxx     xxMxx       L         L
           5               xxMxx       L         P         I         P
           4                 P         I         I         I         I
           3                 I         I         I         I         I
           2                 I         I         I         I         I
           1                 I         I         I         I         I
Relap vol. at bottom     10010000  20010000  30010000  40010000  50010000
```

Case 2

```
Conditions of in-core molten pool at    11060.    sec

effective radius of pool     = 0.7548E+00 (m)
total heat generated in pool = 0.2246E+07 (W)
volume of molten pool         = 0.9005E+00 (m*3)
total rate of heat removal   = 0.0000E+00 (W)
temperature of molten pool   = 2867.44    (K)
total mass of UO2 in pool    = 0.6277E+04(Kg)
liquidus temp of material    = 2873.00    (K)
total mass of metallic Zr    = 0.0000E+00 (kg)
total mass of oxidic Zr      = 847.553    (kg)
mass of liquefied material in partially liquefied porous debris = 0.5120E+04 kg

 Fuel rod component #        1         3         5         7         9

   Axial node #
          10                 P         P         I         I         I
           9                 L         L         I         I         I
           8                 V         V         L         L         P
```

Case 3

```
Conditions of in-core molten pool at    11350.    sec

effective radius of pool     = 0.9721E+00 (m)
total heat generated in pool = 0.4987E+07 (W)
volume of molten pool         = 0.1924E+01 (m*3)
total rate of heat removal   = 0.0000E+00 (W)
temperature of molten pool   = 2872.30    (K)
total mass of UO2 in pool    = 0.1330E+05(Kg)
liquidus temp of material    = 2873.00    (K)
total mass of metallic Zr    = 0.0000E+00 (kg)
total mass of oxidic Zr      = 1887.14    (kg)
mass of liquefied material in partially liquefied porous debris = 0.8238E+04 kg

 Fuel rod component #        1         3         5         7         9

   Axial node #
          10                 L         P         I         I         I
           9                 L         L         I         I         I
           8                 V         V         L         L         L
```

Axial node #	1	3	5	7	9
7	xxMxx	xxMxx	xxMxx	L	P
6	L	L	L	L	P
5	I	I	I	I	P
4	I	I	I	I	I
3	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I
1	I	I	I	I	I
Relap vol. at bottom	10010000	20010000	30010000	40010000	50010000

Axial node #	1	3	5	7	9
7	V	V	V	xxMxx	L
6	xxMxx	xxMxx	xxMxx	L	L
5	xxMxx	L	P	I	P
4	P	I	I	I	I
3	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I
1	I	I	I	I	I
Relap vol. at bottom	10010000	20010000	30010000	40010000	50010000

Case 4

Conditions of in-core molten pool at 11350. sec

effective radius of pool = 0.9721E+00 (m)
total heat generated in pool = 0.4987E+07 (W)
volume of molten pool = 0.1924E+01 (m*3)
total rate of heat removal = 0.0000E+00 (W)
temperature of molten pool = 2872.30 (K)
total mass of UO2 in pool = 0.1330E+05(Kg)
liquidus temp of material = 2873.00 (K)
total mass of metallic Zr = 0.0000E+00 (kg)
total mass of oxidic Zr = 1887.14 (kg)
mass of liquefied material in partially liquefied porous debris = 0.8238E+04 kg

Fuel rod component # / Axial node #	1	3	5	7	9
10	L	P	I	I	I
9	L	L	I	I	I
8	V	V	L	L	L
7	V	V	V	xxMxx	L
6	xxMxx	xxMxx	xxMxx	L	L
5	xxMxx	L	P	I	P
4	P	I	I	I	I
3	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I
1	I	I	I	I	I
Relap vol. at bottom	10010000	20010000	30010000	40010000	50010000

Case 5

Conditions of in-core molten pool at 11350. sec

effective radius of pool = 0.9721E+00 (m)
total heat generated in pool = 0.4987E+07 (W)
volume of molten pool = 0.1924E+01 (m*3)
total rate of heat removal = 0.0000E+00 (W)
temperature of molten pool = 2872.30 (K)
total mass of UO2 in pool = 0.1330E+05(Kg)
liquidus temp of material = 2873.00 (K)
total mass of metallic Zr = 0.0000E+00 (kg)
total mass of oxidic Zr = 1887.14 (kg)
mass of liquefied material in partially liquefied porous debris = 0.8238E+04 kg

Fuel rod component # / Axial node #	1	3	5	7	9
10	L	P	I	I	I
9	L	L	I	I	I
8	V	V	L	L	L
7	V	V	V	xxMxx	L
6	xxMxx	xxMxx	xxMxx	L	L
5	xxMxx	L	P	I	P
4	P	I	I	I	I
3	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I
1	I	I	I	I	I
Relap vol. at bottom	10010000	20010000	30010000	40010000	50010000

Case 6

Conditions of in-core molten pool at 11350. sec

effective radius of pool = 0.9721E+00 (m)
total heat generated in pool = 0.4987E+07 (W)
volume of molten pool = 0.1924E+01 (m*3)
total rate of heat removal = 0.0000E+00 (W)
temperature of molten pool = 2872.30 (K)
total mass of UO2 in pool = 0.1330E+05(Kg)
liquidus temp of material = 2873.00 (K)
total mass of metallic Zr = 0.0000E+00 (kg)
total mass of oxidic Zr = 1887.14 (kg)
mass of liquefied material in partially liquefied porous debris = 0.8238E+04 kg

Fuel rod component # / Axial node #	1	3	5	7	9
10	L	P	I	I	I
9	L	L	I	I	I
8	V	V	L	L	L
7	V	V	V	xxMxx	L
6	xxMxx	xxMxx	xxMxx	L	L
5	xxMxx	L	P	I	P
4	P	I	I	I	I
3	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I
1	I	I	I	I	I
Relap vol. at bottom	10010000	20010000	30010000	40010000	50010000

Case 7

At time= 10459.2 sec

maximum temperature in reactor core = 2854.25 K
component no. 1 axial node = 8
nuclear heat generation = 0.2465E+08 W
total reactor power = 0.2626E+08 W
total fission product and actinide decay = 0.2626E+08 W
total oxidation heat generation = 0.2108E+09 W
debris oxidation = 0.0000E+00 W
total hydrogen production from intact rod = 0.1424E+01 kg/s
total hydrogen production rate = 0.1424E+01 kg/s

Fuel rod component # / Axial node #	1	3	5	7	9
10	P	P	I	I	I
9	L	L	I	I	I
8	L	L	I	I	I
7	L	L	P	I	I
6	L	L	L	L	I
5	I	I	I	I	I
4	I	I	I	I	I
3	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I
1	I	I	I	I	I
Relap vol. at bottom	10010000	20010000	30010000	40010000	50010000

Case 8

Conditions of in-core molten pool at 11350. sec

effective radius of pool = 0.9721E+00 (m)
total heat generated in pool = 0.4987E+07 (W)
volume of molten pool = 0.1924E+01 (m*3)
total rate of heat removal = 0.0000E+00 (W)
temperature of molten pool = 2872.30 (K)
total mass of UO2 in pool = 0.1330E+05(Kg)
liquidus temp of material = 2873.00 (K)
total mass of metallic Zr = 0.0000E+00 (kg)
total mass of oxidic Zr = 1887.14 (kg)
mass of liquefied material in partially liquefied porous debris = 0.8238E+04 kg

Fuel rod component # / Axial node #	1	3	5	7	9
10	L	P	I	I	I
9	L	L	I	I	I
8	V	V	L	L	L
7	V	V	V	xxMxx	L
6	xxMxx	xxMxx	xxMxx	L	L
5	xxMxx	L	P	I	P
4	P	I	I	I	I
3	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I
1	I	I	I	I	I
Relap vol. at bottom	10010000	20010000	30010000	40010000	50010000

Case 9

Conditions of in-core molten pool at 11350. sec

effective radius of pool = 0.9721E+00 (m)
total heat generated in pool = 0.4987E+07 (W)
volume of molten pool = 0.1924E+01 (m*3)
total rate of heat removal = 0.0000E+00 (W)
temperature of molten pool = 2872.30 (K)
total mass of UO2 in pool = 0.1330E+05(Kg)
liquidus temp of material = 2873.00 (K)
total mass of metallic Zr = 0.0000E+00 (kg)
total mass of oxidic Zr = 1887.14 (kg)
mass of liquefied material in partially liquefied porous debris = 0.8238E+04 kg

Fuel rod component # / Axial node #	1	3	5	7	9
10	L	P	I	I	I
9	L	L	I	I	I
8	V	V	L	L	L
7	V	V	V	xxMxx	L
6	xxMxx	xxMxx	xxMxx	L	L
5	xxMxx	L	P	I	P
4	P	I	I	I	I
3	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I
1	I	I	I	I	I
Relap vol. at bottom	10010000	20010000	30010000	40010000	50010000

Case 10

Conditions of in-core molten pool at 11350. sec

effective radius of pool = 0.9721E+00 (m)
total heat generated in pool = 0.4987E+07 (W)
volume of molten pool = 0.1924E+01 (m*3)
total rate of heat removal = 0.0000E+00 (W)
temperature of molten pool = 2872.30 (K)
total mass of UO2 in pool = 0.1330E+05(Kg)
liquidus temp of material = 2873.00 (K)
total mass of metallic Zr = 0.0000E+00 (kg)
total mass of oxidic Zr = 1887.14 (kg)
mass of liquefied material in partially liquefied porous debris = 0.8238E+04 kg

Fuel rod component # 1 3 5 7 9

Axial node #

Case 11

Conditions of in-core molten pool at 12012. sec

effective radius of pool = 0.1307E+01 (m)
total heat generated in pool = 0.1060E+08 (W)
volume of molten pool = 0.4673E+01 (m*3)
total rate of heat removal = 0.0000E+00 (W)
temperature of molten pool = 2872.95 (K)
total mass of UO2 in pool = 0.3190E+05(Kg)
liquidus temp of material = 2873.00 (K)
total mass of metallic Zr = 0.0000E+00 (kg)
total mass of oxidic Zr = 4881.28 (kg)
mass of liquefied material in partially liquefied porous debris = 0.2934E+04 kg

Fuel rod component # 1 3 5 7 9

Axial node #

```
           10            L        P        I        I        I
            9            L        L        I        I        I
            8            V        V        L        L        L
            7            V        V        V      xxMxx      L
            6          xxMxx    xxMxx    xxMxx      L        L
            5          xxMxx      L        P        I        P
            4            P        I        I        I        I
            3            I        I        I        I        I
            2            I        I        I        I        I
            1            I        I        I        I        I
Relap vol. at bottom   10010000 20010000 30010000 40010000 50010000
```

```
           10            P        P        I        I        I
            9            L        L        I        I        I
            8            V        V        V        L        V
            7            V        V        V        V        V
            6          xxMxx    xxMxx    xxMxx    xxMxx    xxMxx
            5          xxMxx    xxMxx    xxMxx    xxMxx      L
            4          xxMxx    xxMxx      P        P        I
            3            P        P        I        I        I
            2            I        I        I        I        I
            1            I        I        I        I        I
Relap vol. at bottom   10010000 20010000 30010000 40010000 50010000
```

Case 12

```
Conditions of in-core molten pool at    10909.    sec

effective radius of pool     = 0.5315E+00 (m)
total heat generated in pool = 0.8305E+06 (W)
volume of molten pool        = 0.3144E+00 (m*3)
total rate of heat removal   = 0.0000E+00 (W)
temperature of molten pool   = 2872.52    (K)
total mass of UO2 in pool    = 0.2144E+04(Kg)
liquidus temp of material    = 2873.00    (K)
total mass of metallic Zr    = 0.0000E+00 (kg)
total mass of oxidic Zr      = 329.907    (kg)
mass of liquefied material in partially liquefied porous debris = 0.9462E+04 kg

 Fuel rod component #        1        3        5        7        9

    Axial node #
           10            L        P        I        I        I
            9            L        L        I        I        I
            8          xxMxx      L        L        L        L
            7            L      xxMxx      L        L        L
            6            L        L        L        L        L
            5            I        I        I        I        L
            4            I        I        I        I        I
            3            I        I        I        I        I
            2            I        I        I        I        I
            1            I        I        I        I        I
Relap vol. at bottom   10010000 20010000 30010000 40010000 50010000
```

Case 13

```
0    At time=      10642.7

maximum temperature in reactor core       = 2861.02 K
component no.  1 axial node               = 8
nuclear heat generation                   = 0.2459E+08 W
total reactor power                       = 0.2614E+08 W
total fission product and actinide decay  = 0.2614E+08 W
total oxidation heat generation           = 0.3820E+08 W
debris oxidation                          = 0.0000E+00 W
total hydrogen production from intact rod = 0.2581E+00  kg/s
total hydrogen production rate            = 0.2581E+00  kg/s

 Fuel rod component #        1        3        5        7        9

    Axial node #
           10            L        P        I        I        I
            9            P        L        I        I        I
            8            L        L        L        I        I
            7            L        L        L        I        I
            6            L        L        L        L        P
            5            I        I        I        I        P
            4            I        I        I        I        I
            3            I        I        I        I        I
            2            I        I        I        I        I
            1            I        I        I        I        I
Relap vol. at bottom   10010000 20010000 30010000 40010000 50010000
```

Case 14

```
At time=      10557.8      sec

maximum temperature in reactor core       = 2855.08 K
component no.  1 axial node               = 8
nuclear heat generation                   = 0.2464E+08 W
total reactor power                       = 0.2619E+08 W
total fission product and actinide decay  = 0.2619E+08 W
total oxidation heat generation           = 0.3664E+08 W
debris oxidation                          = 0.8547E-03 W
total hydrogen production from intact rod = 0.2475E+00  kg/s
total hydrogen production rate            = 0.2475E+00  kg/s

 Fuel rod component #        1        3        5        7        9

    Axial node #
           10            P        P        I        I        I
            9            L        L        I        I        I
            8            L        L        L        I        I
            7            L        L        L        I        I
            6            L        L        L        L        P
            5            I        I        I        I        P
            4            I        I        I        I        I
            3            I        I        I        I        I
            2            I        I        I        I        I
            1            I        I        I        I        I
Relap vol. at bottom   10010000 20010000 30010000 40010000 50010000
```

위의 표에서 Case 11 의 경우 용융풀의 형태가 반구형에 가장 근접한 모습을 보여준다. Case 11 의 용융풀은 10,975 초에 형성되며, 풀 내부 용융물질의 질량은 36781 kg 으로 계산되었다. 실제 사고에서 용융된 물질의 총질량이 40,800 kg 이고 하부헤드로는 15,800 kg 이 재배치 되었다. 모의 과정에서는 일단 하부헤드로의 재배치가 발생하면 용융물질이 모두 하방으로 이동한다고 가정하므로 차이가 있지만 Case 11 이 용융물질의 질량예측에서도 가장 근접한 결과를 보여주었다.

1 차측의 압력은 그림 4 에서 확인할 수 있다. 압력은 각 경우에 상관없이 거의 동일한 경향을 보이고 있다. 단, 7 천 초 이후 실제 결과보다 낮게 모의하고 있어 미흡한 점이 발견되었다.

그림 5 는 수소 생성량을 시간에 따른 누적 형태로 나타낸 것인데 gamma heating fraction 이 증가할수록 수소량도 증가하는 경향을 보인다. 그림 6 에 그림 5 의 일부분을 확대하여 나타내었다. 차후의 연구에서 gamma heating fraction 값의 조절과 함께

HPIS 유량 등을 감안하면 실제사고에 더욱 근접한 모의결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

III 결 론

후기 노심용융과 관련된 모델을 분석하고 관련자료를 참조하여 SCDAP/RELAP5 전산코드의 중요모델을 파악하였다. 또한 다른 입력자료와의 비교를 통해 현재 주로 사용되고 있는 입력자료값에 대한 정보를 얻을 수 있었다.

TMI-2 사고를 SCDAP/RELAP5 를 사용하여 민감도 분석을 수행한 결과 전산코드 자체의 성능이 향상됨에 따라 많은 물리적 현상들을 비교적 잘 모사하고 있었으나 아직 개선의 여지가 적잖이 남아있는 것으로 판단된다. 대체적으로 기본계산에서 사용된 입력자료 값이 매뉴얼에서 제시된 권고값을 사용하고 있다는 점을 감안하더라고 실제 사고를 잘 모사하고 있으나, gamma heating 과 관련된 입력값에서의 변동을 통해 더욱 실제와 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 차후 관련 모델링 자체에 대한 연구를 통해 개선해야할 여지가 있는 것으로 판단된다.

IV 감사의 글

본 연구는 한국원자력안전기술원의 중대사고 평가 규제기술 개발 사업의 일환으로 수행되었으며, SCDAP/RELAP5/MOD3.2 코드는 Innovative Systems Software 와의 협약에 의해 사용하였다.

참 고 문 헌

1. ”SCDAP/RELAP5/MOD3.2 Code Manual Volume 5 Developmental assessment,” NUREG/CR-6150 INEL-96/0422 Revision 1 Volume 5
2. ”SCDAP/RELAP5/MOD3.2 Code Manual Volume 2 Damage Progression Model Theory,” NUREG/CR-6150, INEL-96/0422 Revision 1 Volume 2
3. M.L. Corradini, V.K. Dhir, T.J. Haste, “SCDAP/RELAP5 Independent Peer Review,” Los Alamos National Laboratory, LA-12481 UC-000, Jan. 1993
4. 박종화, “중대사고 해석코드 SCDAP 평가 및 개선,” 한국에너지연구소, 1989. 5
5. 박군철, 이병철, 조재선, 김재학, “중대사고시 수소생성 및 혼합모델의 개선연구,” 한국원자력안전기술원, 1996. 7
6. 박래준, 이성재, 조영로, 천세영, 류건중, “냉각수가 비등하지 않을 때 노심용융물의 피막층 형성에 대한 연구,” 한국원자력연구소, 1994. 10

7. “TMI-2 Analysis Exercise Final Report,” OECD-NEA, NEA/CSNI/R(91)8, April 1992
8. “Analysis of Three Mile Island - Unit 2 Accident,” EPRI, NSAC-1, July 1979

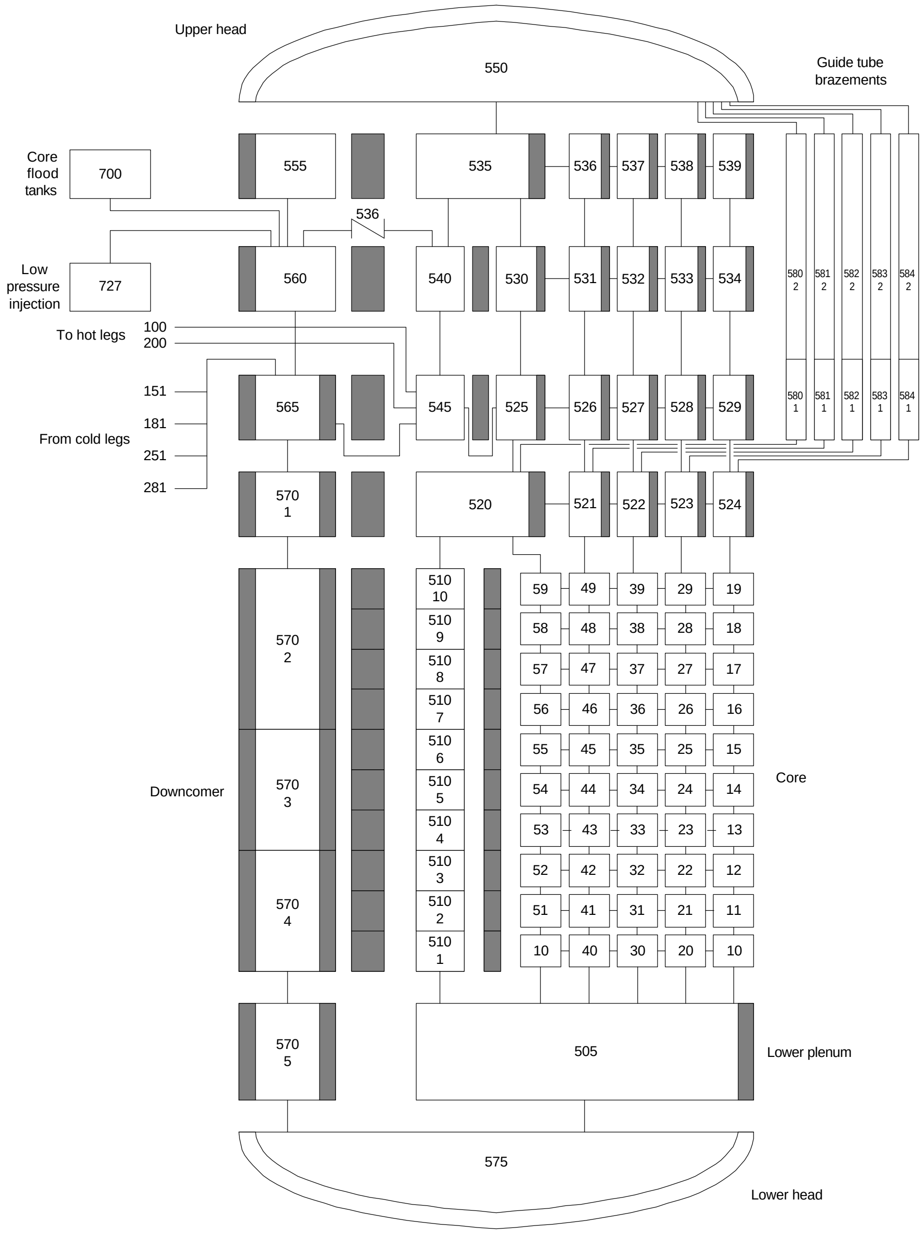
Upper head
550
Guide tube brazements
Core flood tanks
700
555
535
536
537
538
539
536
Low pressure injection
727
560
540
530
531
532
533
534
580 2
581 2
582 2
583 2
584 2
To hot legs
100
200
151
181
251
281
From cold legs
565
545
525
526
527
528
529
580 1
581 1
582 1
583 1
584 1
570 1
520
521
522
523
524
Downcomer
570 2
570 3
570 4
510 10
510 9
510 8
510 7
510 6
510 5
510 4
510 3
510 2
510 1
Core
570 5
505
Lower plenum
575
Lower head

그림 1. 노심 노드

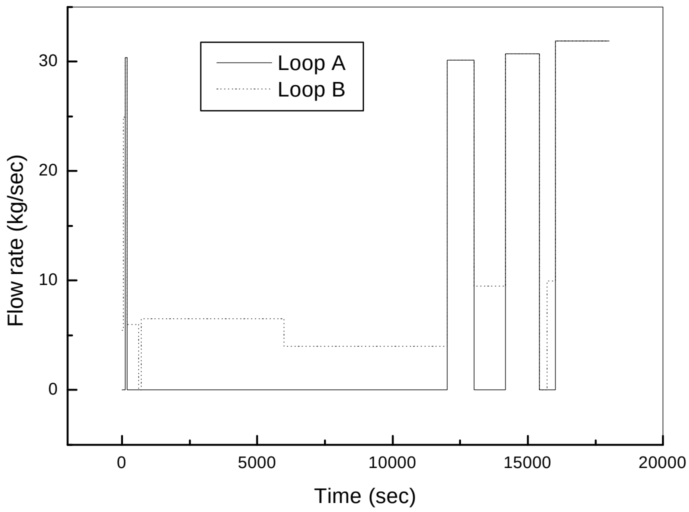

그림 2. HPI makeup flow(경계조건)

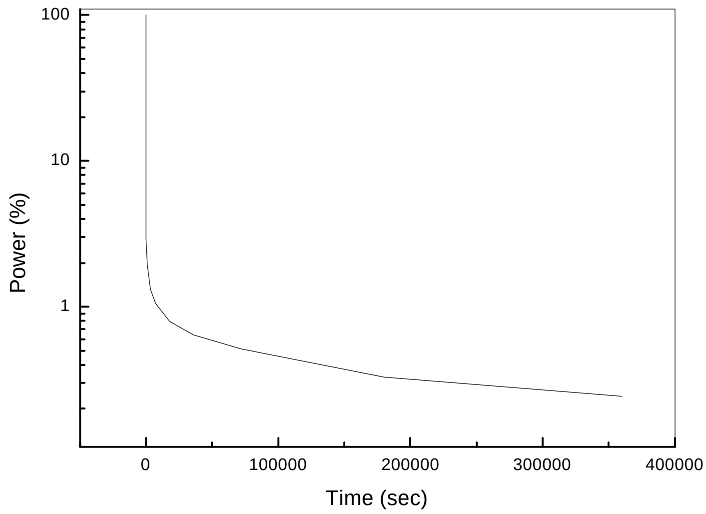

그림 3. 노심 출력(경계조건)

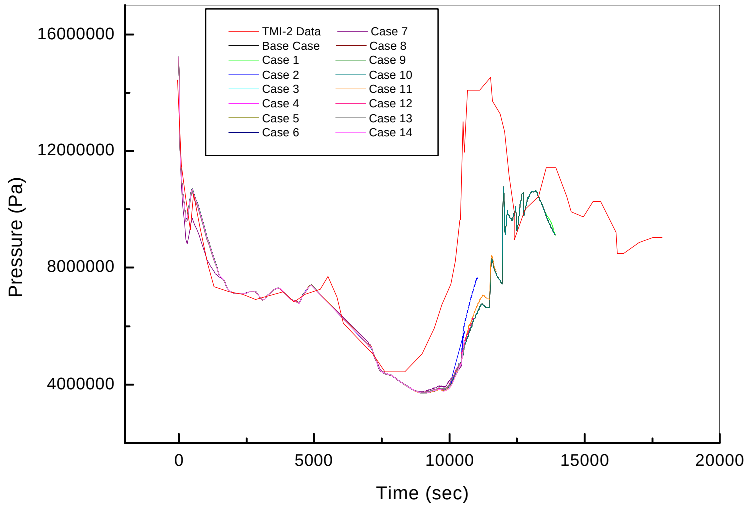

그림 4. 1 차측 압력

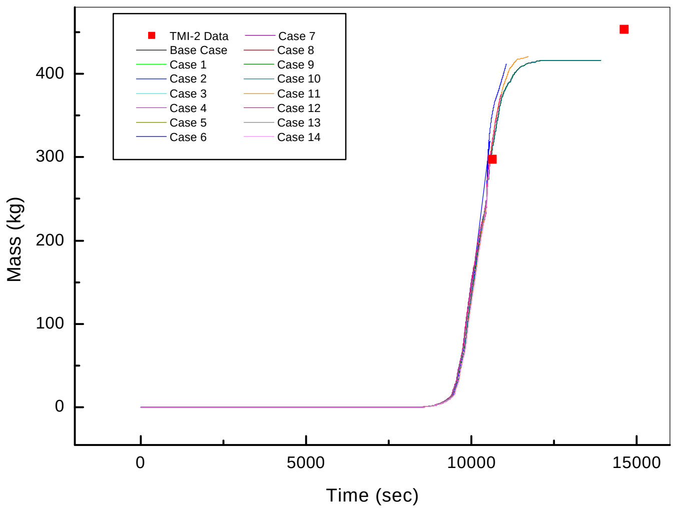

그림 5. 수소 생성량(누적)

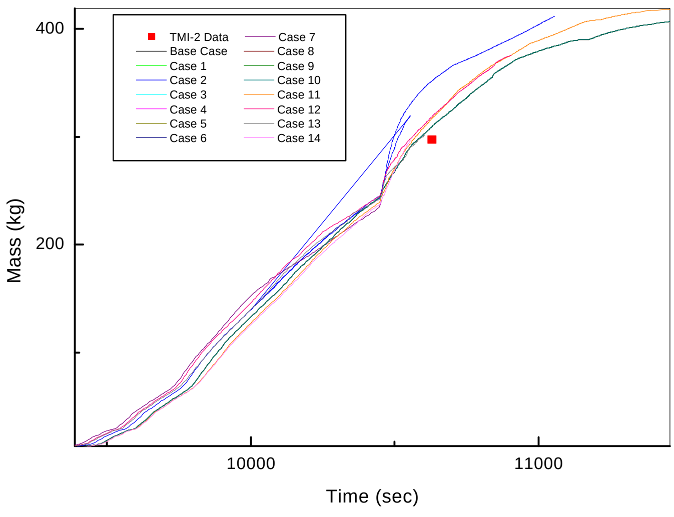

그림 6. 수소생성량 부분확대