

# 방출된 노심용융 물질에 의한 콘크리트 침식 천이 모의

김환열<sup>†</sup>, 박종화<sup>\*</sup>, 김희동<sup>\*</sup>, 홍성완<sup>\*</sup>

## Transient Simulations of Concrete Ablation due to a Release of Molten Core Material

H. Y. Kim, J. H. Park, H. D. Kim, and S. W. Kim

**Key Words:** Molten Core Concrete Interaction (노심용융물 콘크리트 상호반응), Concrete Ablation (콘크리트 침식), Severe Accident Management (중대사고관리)

### Abstract

If a molten core is released from a reactor vessel into a reactor cavity during a severe accident, an important safety issue of coolability of the molten core from top-flooding and concrete ablation due to a molten core concrete interaction (MCCI) is still unresolved. The released molten core debris would attack the concrete wall and basemat of the reactor cavity, which will lead to inevitable concrete decompositions and possible radiological releases. In a OECD/MCCI project scheduled for 4 years from 2002, 1 to 2005, 12, a series of tests were performed to secure the data for cooling the molten core spread out at the reactor cavity and for the 2-D long-term core concrete interaction (CCI). The tests included not only separate effect tests such as a melt eruption, water ingression, and crust failure tests with a prototypic material but also 2-D CCI tests with a prototypic material under dry and flooded cavity conditions. The paper deals with the transient simulations on the CCI-2 test by using a severe accident analysis code, CORQUENCH, which was developed at Argonne National Laboratory (ANL). Similar simulations had been already performed by using MELCOR 1.8.5 code. Unlike the MELCOR 1.8.5, the CORQUENCH includes a melt eruption model and a newly developed water ingression model based on the water ingression tests under the OECD/MCCI project. In order to adjust the geometrical differences between the CCI-2 test (rectangular geometry) and the simulations (cylindrical geometry), the same scaling methodology as used in the MELCOR simulation was applied. For the direct comparison of the simulation results, the same inputs for the MELCOR simulation were used. The simulation results were compared with the previous results by using MELCOR 1.8.5.

### 1. 서 론

원자로에서 노심 용융이 일어나는 중대사고시, 중대사고 완화조치를 취했음에도 불구하고 노심

용융물이 노내에 유지되지 않으면 노심 용융물은 원자로 공동 바닥에 재정렬되어 콘크리트 구조물과의 상호반응을 일으켜 침식에 의해 밑바닥이 파손되거나 과압이 발생하여 핵분열 생성물이 외부로 누출된다. 경수형 원자로에서는 사고완화 전략 중의 하나로 노심 용융물이 노외로 분출되었을 경우 원자로 공동에 침수시키는 것을 채택하고 있다. 이 경우 노심 용융물의 냉각이 이루어지는지, 또한 콘크리트로 이루어진 원자로 공동에 방출된 노심 용융물과 콘크리트와의 상호반

---

† 한국원자력연구원 열수력안전연구센터

E-mail : hykim1@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-8946 FAX : (042)861-2574

\* 한국원자력연구원 열수력안전연구센터

---

응에 의해 어느 정도 콘크리트 침식이 일어나는지 등에 대한 사항은 중대사고관리 전략수립에 중요하지만 아직까지 해결되지 않은 중대사고의 주요 쟁점이다. 미국 Argonne 국립연구소에서는 1990년대에 MACE 실험장치를 이용하여 노심용융물 상부에 물을 주입시켜 노심 용융물과 콘크리트의 상호반응(MCCI : Molten Core Concrete Interaction)을 안정화시키고 노외로 분출된 노심 용융물을 냉각시키는 실험 및 해석적 연구를 수행하였다[1].

MACE 실험에서 확인된 용융물 냉각 메커니즘인 bulk cooling, water ingression, melt eruption, 및 crust failure와 같은 개개의 메커니즘에 대해 보다 확실한 근거를 제공할 수 있는 실험 데이터를 만들어 각각의 냉각 메커니즘에 대한 이해와 해석적 모델을 통해 노외 분출 노심 용융물의 냉각 문제를 해결하고, 아울러 MCCI에 관한 불확실한 문제를 해결해야 할 필요성이 대두되었다. 이에 대한 문제를 해결하기 위해 OECD/NEA MCCI 국제공동연구 프로그램이 2002년 1월부터 2006년 12월까지 4년 동안 수행되었다[2]. 이 프로그램에서는 원자로 물질을 사용하여 SSWICS(Small Scale Water Ingression and Crust Strength) 실험 및 MET(Melt Eruption Test) 등의 개별효과 실험과, 2차원 장기 CCI(Core Concrete Interaction) 실험이 수행되었다. 아울러 SSWICS 실험을 근거로 냉각수가 용융물 상부에 형성되는 crust에 침투되어 냉각능력이 향상되는 water ingression 모델이 개발되었다[3].

CORQUENCH 코드[4]는 미국 아르곤 국립연구소에서 1990년대부터 개발을 시작하여 현재까지도 개발이 진행되고 있는, 노심 용융물 냉각 및 MCCI를 모의할 수 있는 코드로서 최신의 water ingression 냉각모델이 사용되고 있다. 노심 용융물 냉각과 MCCI에 관련한 최신의 OECD/NEA MCCI 실험 데이터가 열전달 모델 수정 및 검증에 사용되기 때문에, CORQUENCH 코드는 국내에서 가동 중인 원전 및 신규 원전의 MCCI 계산에 충분한 활용가치가 있다.

본 논문에서는 CORQUENCH 코드를 사용하여 OECD/NEA MCCI 프로그램에서 수행하였던 CCI-2 실험에 대한 천이 모의를 수행하여 용융물 온도, 콘크리트 반경 방향 및 축 방향 침식깊

이 등을 실험결과와 비교하였다. 아울러, CCI-2 실험에 대한 기존의 MELCOR 해석결과와 비교 분석하였다.

## 2. CCI-2 실험

CCI-2 실험은 100 % 산화 PWR corium에 8 w%의 LCS 콘크리트를 섞은 후 LCS basemat에서 노심용융물과 콘크리트 상호작용을 알아보는 실험이다. CCI-2 실험장치는 Fig. 1과 같이 test section, corium의 직접전기가열을 위한 전원공급장치, 물공급계통, 증기응축탱크, off-gas의 거름과 배기를 위한 순환계통 및 자료취득장치 등으로 구성된다. Corium을 가두어 두는 test section은 가로 및 세로가 각각 50cm인 사각형 단면을 갖고 있으며 높이가 약 3.4 m이다. Test section 아래쪽으로는 50cm x 50cm의 단면을 갖는 깊이 55cm의 콘크리트 basemat이 설치되어 있어 약 35cm의 축방향 콘크리트 침식 측정이 가능하도록 되어 있다. 실험중 붕괴열 모의를 위한 텅스텐 전기봉이 내화성을 갖는 2개의 MgO 측면에 설치되어 있고, 나머지 2개의 측면은 콘크리트로 되어 있어 2개 측면 방향으로 콘크리트 침식 측정이 가능하다. Test section 하부의 MgO와 콘크리트 경계는 수직, 플랜지 형태의 주물형 seam으로 되어 있어 실험 종료후 쉽게 분리될 수 있으므로, 고화된 corium 형상을 볼 수 있도록 설계되어 있다. MgO 벽면은 실험 종료후 재사용이 가능하지만 콘크리트 벽면은 실험 후 버리도록 되어 있다.

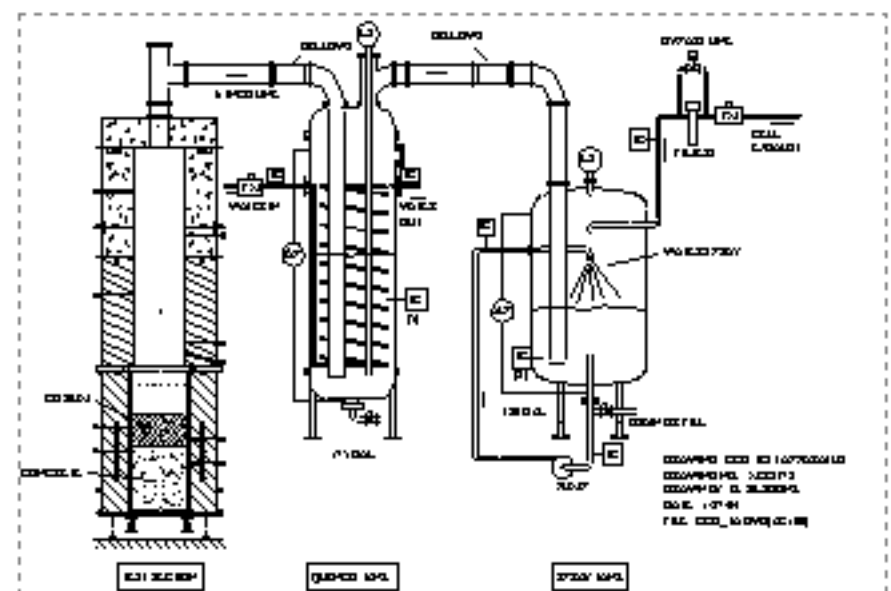


Fig. 1 Schematic diagram of CCI-2 test facility

### 3. CORQUENCH 해석결과 및 토의

#### 척도해석

CCI-2 실험에 대한 MELCOR 1.8.5 해석은 이미 수행된 바 있다[5]. 기존의 MELCOR 해석은 실린더 좌표계에서만 가능하기 때문에, 가로 및 세로가 각각 50cm인 직교형 좌표계에서 수행된 CCI-2 실험을 MELCOR 코드로 해석하기 위해 적절한 척도해석을 수행하였다. CORQUENCH 코드를 사용한 본 해석의 경우, MELCOR 해석결과와 직접 비교를 위해 동일한 기하학적 해석형상이 요구되므로, 기존의 MELCOR 해석에서 사용된 것과 동일한 척도해석 방법을 적용하였다. 여기에서는 MELCOR 해석시 사용된 척도해석 방법을 간략히 소개한다.

CCI-2 실험에서 400 kg의 용융물이 가로와 세로가 각각 50cm인 test section에 들어있는 경우 용융물 높이는 약 25cm가 된다. 여기서 용융물의 밀도는  $6400 \text{ kg/m}^3$ 으로 가정하였다. 실험에서 콘크리트 침식은 1개의 밑 바닥면과 2개의 옆면으로 발생하며, 나머지 2개의 옆면으로는 침식이 발생하지 않는다. 그러므로 바닥면과 옆면의 침식 면적은 각각  $0.25 \text{ m}^2$ 이 된다. 반면, MELCOR 해석에서는 test section은 원통형의 기하학적 형상으로 묘사되며, 콘크리트 침식은 원통의 아랫면과 옆면으로 발생한다.

이와 같은 실험과 해석에서의 기하학적 차이를 조정하기 위한 적절한 scaling 방법으로 다음과 같은 3가지의 기준을 적용하였으며, 이러한 기준을 만족하도록 적절한 해석 형상을 결정하였다. 첫째 기준은 실험과 해석사이에 동일한 초기 열유속을 유지하는 것이다. 둘째 기준은 실험과 해석사이에 아랫면과 옆면의 콘크리트 침식면 비를 동일하게 유지하는 것이다. 셋째 기준은 실험과 해석사이에 dt 시간동안 침식된 콘크리트 부피와 용융물 부피 비를 동일하게 유지시키는 것이다.

이와 같은 세 가지 기준을 만족하기 위해서는 잔열을 묘사하는 power를  $\pi$ 배 크게 해야 하고, 아울러 초기 용융물 질량을 역시  $\pi$ 배 크게 해야 한다. 해석에서 용융물 높이는 실험과 마찬가지로 25cm로 유지시키기 위해, 해석의 test section 반경은 50cm로 결정되었다. Fig. 2는 실험과 해석의 test section을 비교한 것으로, 해석 test section은 CORQUENCH와 MELCOR 동일하다.

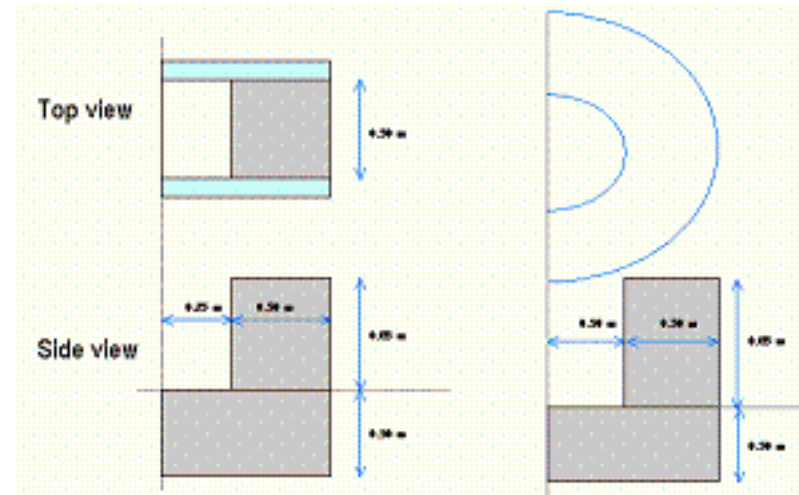


Fig. 2 Test section (test; left, analysis; right)

#### CORQUENCH 코드의 주요 냉각 모델

CORQUENCH 코드에서 용융물/물 경계면의 온도가 corium의 freezing 온도보다 큰 경우에는 고화층(crust)이 형성되지 않으며, freezing 온도 아래로 될 경우에는 고화층이 형성되기 시작한다. 그러나 용융물과 콘크리트 반응에 의해 생성된 가스가 고화층을 파괴하는 경우에는 고화층이 잘게 부숴져 용융물로 다시 녹아들어 고화층이 형성되지 않게 된다. 즉, 가스의 superficial velocity가 식 (1)로 표현되는 임계속도 이하로 되어야 단단한 고화층이 형성되기 시작한다.

$$j_{g,cr} = \frac{0.445 R h_m (T_m - T_f)}{\delta_{mcr} \rho_{cr} \Delta e_{cr} \left\{ \frac{k_{cr} (T_f - T_{sat})}{\delta_{mcr} h_m (T_m - T_f)} \ln \left[ \frac{1}{1 - \xi} \right] - 1 \right\}} \quad (1)$$

단단한 고화층이 형성되고 고화층과 냉각수 사이의 막비등이 깨져 고화층 상부온도가 포화온도에 도달하면 고화층 틈새로 냉각수가 침투하여 water ingression에 의한 냉각이 이루어진다. Dryout limit은 계통압력과 콘크리트 종류 및 조성에 따라 변하며 OECD/MCCI 실험결과를 토대로 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$q_{dry} = \left( \frac{h_w (q - q_0) g}{v_w} \right)^{5/13} \left( \frac{M_{cr}^2 (\Delta e_{mcr})^2}{c_{cr} \Delta e_{mcr}} \right)^{4/13} \left( \alpha_{w,0} \left[ T_{sat} - \left( T_{sat} + \frac{\sigma_w}{\alpha_{w,0} E_{cr}} \right) \right] \right)^{19/13} \quad (2)$$

Dryout 열유속이 식 (2)와 같이  $q_{dry}$ 인 경우, 침투 가능한 고화층에서 물 침투는 식 (3)과 같이 고화층 상부면에서 총 열유속이 dryout 열유

속 이하인 경우에 일어난다.

$$q_{dr}''(P, x_{com}^m) \geq k_{cr} \frac{(T_f - T_{ms})}{\delta} + \frac{x_{VO_2} \rho_{cr} q_{dec} \delta}{2} + \rho_s h_{sv} j_{nc} |r_{sw} \quad (3)$$

단단한 고화층이 형성된 후, 고려할 수 있는 다른 하나의 냉각 메커니즘은 melt eruption이다. 이는 화산에서 마그마가 분출되듯이 노심 용융물과 콘크리트가 반응하여 생성된 가스 압력에 의해 용융물이 상부 냉각수로 간헐적으로 분출되어 냉각을 증진시키는 메커니즘을 갖고 있다. Melt eruption 모델은 OECD/NEA MCCI 실험결과를 토대로 개발 중이며 현재 CORQUENCH 코드에는 식 (4)와 같은 Ricou & Spalding 모델[7]이 사용되어지고 있다.

그러나, MELCOR 코드에는 풀비등 상관식이 사용되며, 지금까지 언급된 water ingresson 및 melt eruption과 같은 냉각 모델이 반영되어 있지 않다.

$$K_e = E \left( \frac{\rho_g}{\rho_m} \right)^{1/2} \quad j_m = K_e j_g \quad (4)$$

#### 주요 입력자료

Table 1은 해석에 사용된 주요 입력자료로서 MELCOR 해석시 사용되었던 입력자료와 동일하다. 콘크리트의 solidus 및 liquidus 온도는 CCI-2 실험에 사용된 LCS 콘크리트와 조성이 가장 유사한 MELCOR 사용자 설명서[6]에 나와 있는 CORCON-2 콘크리트의 solidus 및 liquidus 온도를 사용하였다. 용융물의 초기온도는 CCI-2 실험에서 측정된 온도를 사용하였다. Decay heat는 척도해석에서 언급한 바와 같이 CCI-2 실험에서 사용된 텀스텐 전기봉 열량보다  $\pi$ 배 큰 값을 사용하였다. 해석이 시작되고 5시간이 지나면, 용융물 상부로 물이 주입되는 것으로 가정하였다. 그리고 보수적인 계산을 위해 test section 외부로 방출되는 열손실은 없다고 가정하였다.

Table 2는 해석에 사용된 용융물 조성 및 질량을 나타낸 것이다. 용융물 질량은 척도해석에서 언급한 바와 같이 CCI-2 실험에서 사용된 용융물 질량의  $\pi$ 배 큰 값을 사용하였다.

Table 1 Major input

Initial temp. of concrete	300 K
Density of concrete	2320 kg/m <sup>3</sup>
Solidus temp. of concrete	1420 K
Liquidus temp. of concrete	1670 K
Ablation temp. of concrete	1568 K
Initial temp. of melt	2175 K
Emissivity of melt	1
Emissivity of surrounding	0.8
Decay heat (0 ~ 5 hrs)	constant at 377 kW
Decay heat (5 ~ 6 hrs)	linear decrease to 157 kW
Water addition	at 5hrs
Heat loss	0.0 kW

Table 2 Melt mass and composition

Melt composition	Mass (kg)
UO <sub>2</sub>	766.5
ZrO <sub>2</sub>	314.2
SiO <sub>2</sub>	75.4
Cr	75.4
CaO	12.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.6

#### 해석 결과 및 토의

모든 입력조건은 동일하게 하고 두 코드의 계산결과와 실험결과를 비교하였다. 노심 용융물과 콘크리트 사이의 열전달 모델은 CORQUENCH 코드와 MELCOR 코드 모두 slag film 모델을 사용하였다. Fig. 3은 시간에 따른 노심 용융물 온도를 나타낸 것으로서, 노심 용융물 온도는 CORQUENCH 코드가 MELCOR 코드보다 조금 높게 계산되었지만 두 코드 모두 실험결과를 유사하게 예측하는 것으로 나타났다. Fig. 4는 시간에 따른 콘크리트 침식깊이를 나타낸 것이다. CORQUENCH 코드에서 계산된 콘크리트 침식

깊이가 MELCOR 계산보다 더 작은 것으로 나타났습니다.

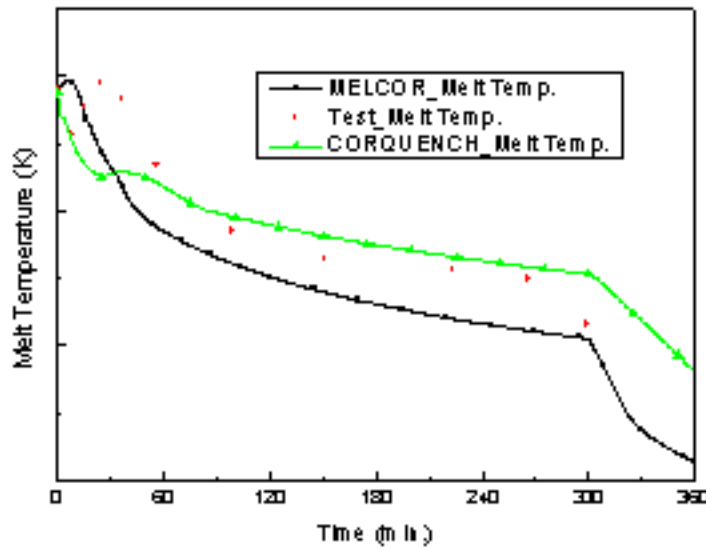


Fig. 3 Melt temperature

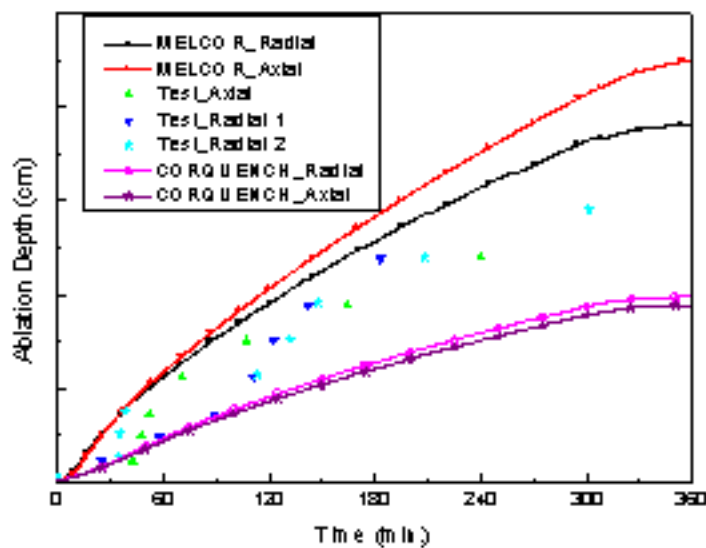


Fig. 4 Concrete ablation

Fig. 5는 상부면과 콘크리트 면으로의 전달되는 열량을 비교한 것이다. 상부로 냉각수 주입이 일어나기 이전에 MELCOR 코드에서는 상부로 전달되는 열량이 거의 없으며 많은 열량이 콘크리트로 빠져나가는데 비해 CORQUENCH 코드에서는 상당량이 상부로 빠져나가며 이에 따라 콘크리트로 빠져나가는 열량이 상대적으로 작음을 알 수 있다. 상부로 냉각수 주입이 일어나면 두 코드 모두 냉각수로 전달되는 열량이 급격히 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은 decay heat과 화학반응에 의한 열량을 비교한 것이다. Decay heat는 입력자료 이므로 두 코드가 서로 일치하고 있으며, 화학반응에

의한 열량은 계산 초기에 차이가 남을 알 수 있다.

Fig. 7은 melt height를 비교한 것이다. MELCOR 코드는 용융물 분출 현상에 대한 모델이 없기 때문에 5시간 경과 후 상부로 냉각수가 주입되더라도 debris bed가 crust 상단에 형성되지 않는다. 반면 CORQUENCH 코드에는 용융물 분출 현상을 모의하는 Ricou & Spalding 모델이 있기 때문에 상부에 냉각수가 존재하는 경우 debris bed가 crust 상단에 형성된다. MELCOR 코드에서 계산된 melt height는 CORQUENCH 코드에 비해 낮은 것으로 나타났는데 이는 그림 3.3.2-24에서 보여지듯이 CORQUENCH 코드에 비해 콘크리트 침식깊이가 크게 계산되기 때문인 것으로 판단된다.

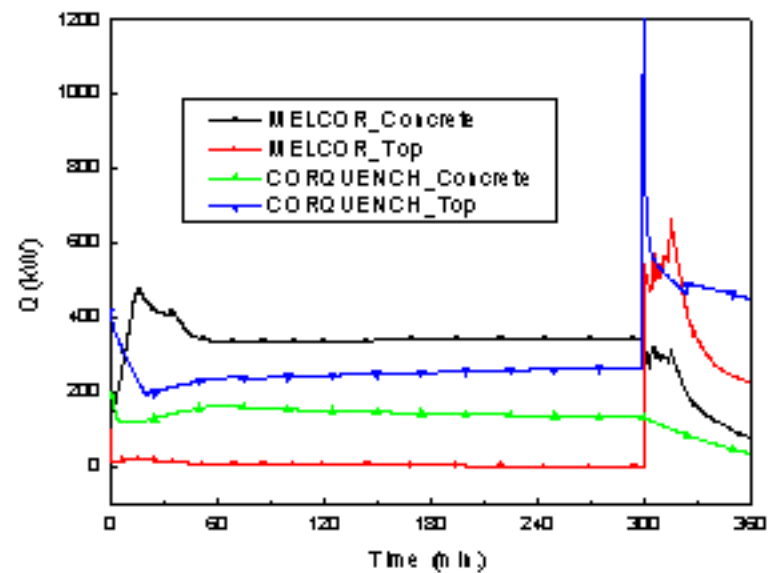


Fig. 5 Heat balance(heat release)

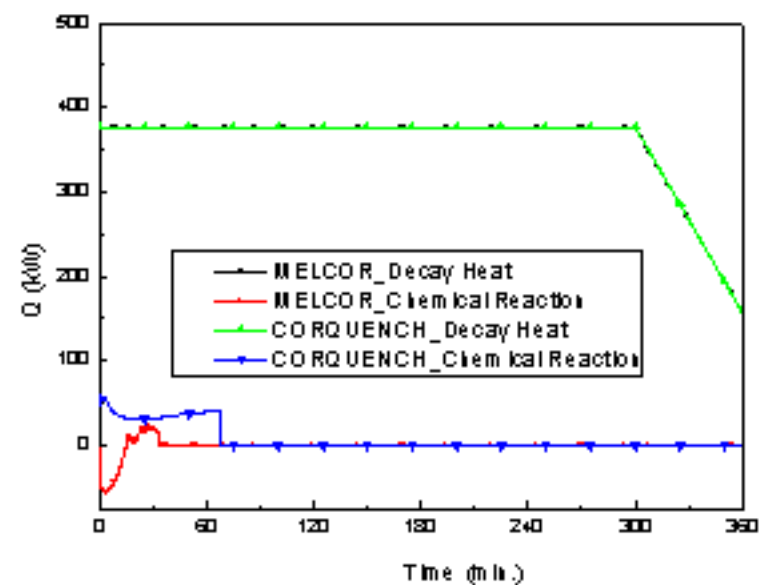


Fig. 6 Heat balance(heat addition)



## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기 계획사업 과제의 일환으로 수행하였습니다.

## 참고문헌

- [1] M. T. Farmer, B. W. Spencer, J. L. Binder, and D. J. Hill, Status and Future Direction of the Melt Attack and Coolability Experiments (MACE) Program at Argonne National Laboratory, Proc. 9th Int. Conf. on Nucl. Eng., ICONE-9697, April 2001.
- [2] OECD/NEA Agreement on the OECD MCCI Project, A project to investigate ex-vessel melt coolability and concrete interaction during a severe accident, 2002.
- [3] M. T. Farmer, J. J. Sienicki, and A. Kovtonyuk, OECD MCCI Analytical Support (Stand Alone Task) Water Ingression Modeling of the OECD/MCCI SSWICS Tests, NRC/MCCI-2003-TR01, Oct, 2003.
- [4] M. T. Farmer, OECD MCCI Project CORQUENCH 3.0 User's Guide Draft, OECD/MCCI-2007-TR01, Feb, 2007.
- [5] H. Y. Kim, J. H. Song, and H. D. Kim, MELCOR Simulations on Molten Core Concrete Interaction, Proc. of ICAPP'05, Paper No. 5141, Seoul, Korea, May 15-19, 2005.
- [6] MELCOR Computer Code Manuals, Version 1.8.5, NUREG/CR-6119, Dec, 2000.
- [7] F. B. Ricou and D. B. Spalding, "Measurements of Entrainment of Axisymmetrical Turbulent Jets," J. Fluid Mechanics, Vol. 11, pp. 21-32, 1961.

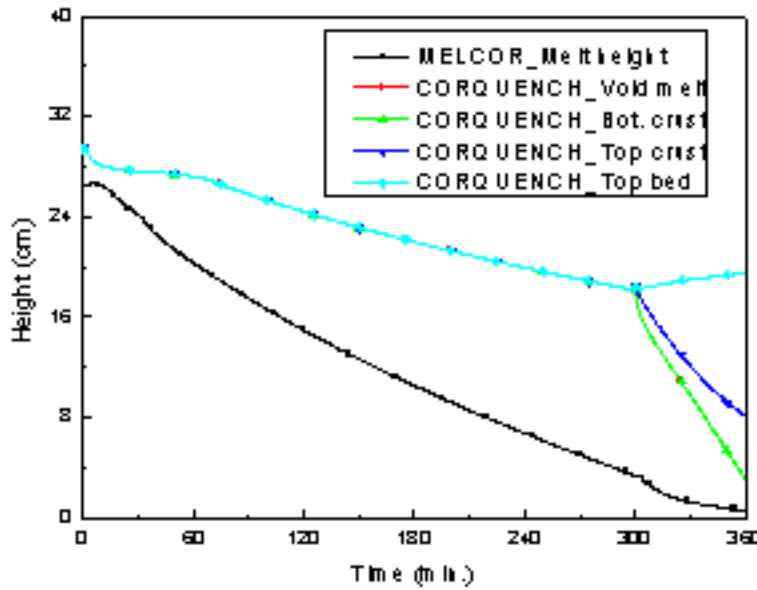


Fig. 7 Melt height

## 4. 결론

본 논문에서는 melt eruption 모델과 최신의 water ingressión 냉각 모델이 반영되어 있는 CORQUENCH 코드를 사용하여 OECD/NEA MCCI 프로그램에서 수행하였던 CCI-2 실험에 대한 천이 모의를 수행한 결과를 기술하였고, 기존의 MELCOR 해석결과와 비교 분석하였다. 용융물 온도는 CORQUENCH 코드가 MELCOR 코드보다 조금 높게 계산되었지만 두 코드 모두 실험결과를 유사하게 예측하는 것으로 나타났다. 축방향 및 반경방향의 콘크리트 침식깊이는 CORQUENCH가 MELCOR 계산보다 더 작게 계산되었으며, 실험결과보다 더 작게 예측하였다. 이는 상부로 냉각수 주입이 일어나기 이전에 MELCOR 코드에서는 상부로 전달되는 열량이 거의 없으며 많은 열량이 콘크리트로 빠져나가는 데 비해 CORQUENCH 코드에서는 상당량이 상부로 빠져나가며 이에 따라 콘크리트로 빠져나가는 열량이 상대적으로 작기 때문으로 판단된다.

CORQUENCH 코드에는 OECD/NEA MCCI 프로그램에서 수행하였던 여러 실험결과를 바탕으로 새로운 용융물 냉각 모델이 개발되어 반영될 예정이므로, 추후 이를 사용하여 좀더 정밀한 MCCI 계산을 수행할 필요가 있다.