

CORQUENCH 코드를 사용한 실규모 원자로의 노심용융물과 콘크리트 상호반응 해석

김환열* · 박종화**

Scoping Analysis of MCCI (Molten Core Concrete Interaction) at Plant Scale Using CORQUENCH Code

Hwan Yeol Kim* and Jong Hwa Park**

Keywords : Molten Core Concrete Interaction, Debris Coolability, Concrete Ablation, Severe Accident

Abstract

If a reactor vessel is failed to retain a molten corium in a postulated severe accident, the molten corium is released outside the reactor vessel into a reactor cavity. The molten corium would attack the concrete wall and basemat of the reactor cavity, which may lead to inevitable concrete decompositions and possible radiological releases. In the OECD/MCCI project, a series of tests were performed to secure the data for cooling the molten corium spread out at the reactor cavity and for the long-term CCI (Core Concrete Interaction). Also, a MCCI (Molten Core Concrete Interaction) analysis code, CORQUENCH was upgraded at Argonne National Laboratory with embedding the new models developed for the tests. This paper deals with analyses of MCCI at plant scale under the conditions of top flooding using the upgraded CORQUENCH code. The modeling approach is briefly summarized first, followed by presentation of a validation calculation that illustrates the predicative capability of the modeling tool. With this background in place, the model is then used to carry out a parametric set of scoping calculations that define approximate coolability envelopes for the LCS (Limestone Common Sand) concrete that has been evaluated in the OECD/MCCI project.

1. 서론

노심 용융물이 노내에 유지되지 못하고 원자로 밖으로 방출되는 중대사고시, 노심 용융물은 원자로 공동 바닥에 재정렬되어 콘크리트와의 상호반응을 일으켜 침식에 의해 밑바닥이 파손되어 핵분열 생성물에 의해 토양이 오염되고 격납건물의 파손이 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 잘 이루어지는지, 또한 원자로 공동에 방출된 노심 용융물과 콘크리트와의 상호반응에 의해 어느 정도 콘크리트 침식이 일어나는지 등에 대한 사항은 아직까지 해결되지 않은 중대사고의 주요 쟁점이다. 미국 Argonne 국립연구소에서는 1990년대에 MACE 실험장치를 이용하여 노심용융물 상부에 물을 주입시켜 노심 용융물과 하부의 콘크리트와의 상호반응 (MCCI : Molten Core Concrete Interaction)에 대한 실험 및 해석적 연구를 수행하였다[1]. MACE 실험에서는 bulk cooling, water ingress, melt eruption, 및 crust failure와 같은 개개의 용융물 냉각 메커니즘이 존재한다고 제기되었고, 이에 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.

OECD/MCCI 프로그램[2]은 우리나라를 포함한 총 13개국이

참여하여 2002년 1월 1일부터 4년 동안 계속된 국제공동연구로서, 원자로 물질을 사용하여 water ingress, melt eruption, crust failure 등에 대한 개별효과 실험과, 이차원 장기 CCI (Core Concrete Interaction) 실험이 수행되었고 현재 실험 스펙트럼을 다양화하여 2단계 프로그램이 진행 중에 있다. 아울러 수행되었던 water ingress 실험을 근거로 냉각수가 용융물 상부에 형성되는 crust에 침투되어 냉각능력이 향상되는 water ingress 모델이 개발되었다[3].

CORQUENCH 코드[4]는 미국 아르곤 국립연구소에서 1990년 대부터 개발을 시작하여 현재까지도 개발이 진행되고 있는, 노심 용융물 냉각 및 MCCI를 모의할 수 있는 코드로서 최신의 water ingress 냉각모델과 melt eruption 모델이 사용되고 있다. 노심 용융물 냉각과 MCCI에 관련한 최신의 OECD/MCCI 실험 데이터를 바탕으로 개발된 용융물 냉각 모델이 사용되기 때문에, CORQUENCH 코드는 국내에서 가동 중인 원전 및 신규 원전의 MCCI 계산에 충분한 활용가치가 있다.

본 논문에서는 CORQUENCH 2.0 코드를 사용하여 실규모 원전에서 일어나는 MCCI 현상에 대한 천이 계산을 수행하였다. CORQUENCH 코드에 적용된 최신의 용융물 냉각 모델과 이의 검증계산에 대한 간략한 소개를 하였다. 아울러 LCS (Limestone Common Sand) basemat을 갖는 실규모 원자로 공동으로 방출된 노심용융물의 양과 냉각수가 주입되는 시점에서 녹아들여간 LCS 콘크리트 양을 변화시키면서 콘크리트 침식깊이, 침식시간 및 debris 양 등을 계산하여 비교 분석하였다. 본 MCCI 계산은 현재 개발된 최신의 용융물 냉각 모델을 사용하여 실규모 원자로를 대상으로 수행한 것으로서, 추후 가동 중인 원전 및 신규 원전의 MCCI 계산 수행에 많은 도움이 되리라고 판단된다.

* 한국원자력연구원, hykim1@kaeri.re.kr

** 한국원자력연구원, jhpark3@kaeri.re.kr

2. 본 론

2.1 노심용융물 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 velocity 가 식 (1)로 표현되는 임계속도 이하로 되어야 단단한 고화층이 형성되기 시작한다.

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

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.

$$q_{dry}'' = C \left(\frac{h_v(\rho_l - \rho_v)g}{v_v} \right)^{5/13} \left(\frac{Nk_{cr}^2(\Delta e_{sat})^2}{c_{cr}\Delta e_{crack}} \right)^{4/13} \left(\alpha_{exp} \left[T_{sol} - \left(T_{sat} + \frac{\sigma_y}{\alpha_{exp} E_{cr}} \right) \right] \right)^{15/13} \quad (2)$$

Dryout 열유속이 식 (2)와 같이 q_{dry} 인 경우, 침투 가능한 고화층에서 물 침투는 식 (3)과 같이 고화층 상부면에서 총 열유속이 dryout 열유속 이하인 경우에 일어난다.

$$q_{dry}''(P, \chi_{con}^m) \geq k_{cr} \frac{(T_f - T_{sat})}{\delta} + \frac{\chi_{UO_2} \rho_{cr} q_{dec} \delta}{2} + \rho_v h_{lv} j_{nc} |_{T_{sat}} \quad (3)$$

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[5]이 사용되어지고 있다.

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

2.2 CORQUENCH 코드에 대한 검증계산

2.1에서 언급된 냉각모델에 대한 검증계산은 LCS basemat에서 수행되었던 MACE 실험의 M1b 및 M3b에 대해 미국 Argonne 국립연구소에서 수행되었다[6]. 검증계산에서는 실험결과를 잘 모의하는 water ingression coefficient C(식(2))를 9.0으로. 또한

melt eruption coefficient E(식(4))를 0.08로 결정하였다. 그림 1 및 2는 M1b 실험에 대한 용융물 온도와 콘크리트 침식깊이를 나타낸 것이다.

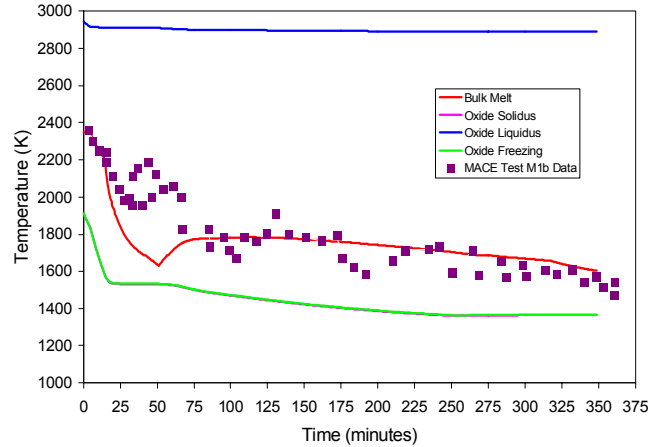


그림 1 M1b 실험의 용융물 온도

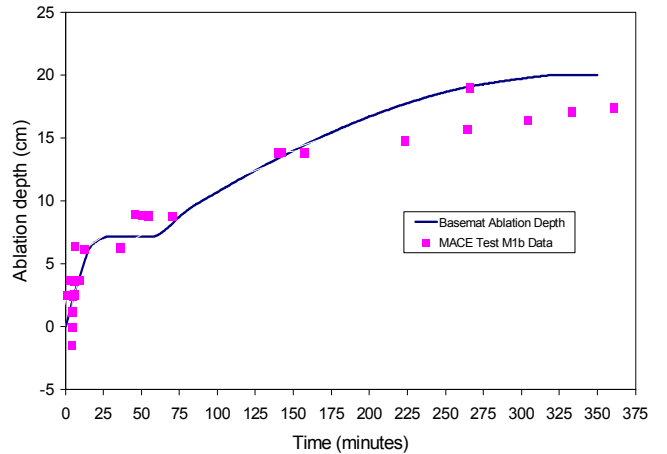


그림 2 M1b 실험의 콘크리트 침식깊이

3. 결 과 및 토 의

CORQUENCH 코드를 사용하여 노심용융물이 LCS 콘크리트 cavity에 방출되어 침식되는 과정에 대한 1-D 계산을 수행하였다. 노심용융물의 단면적은 1 m^2 로 가정하였고, 노심용융물의 양(초기 용융물 깊이 15 cm ~ 40 cm까지 변화)과 냉각수가 주입되는 시점에서 녹아들어간 LCS 콘크리트 양(0% ~ 20%까지 변화)을 변화시키면서 계산을 수행하였다. 냉각수가 주입되는 시점은 dry cavity를 가정하고 계산하여 구할 수 있다. 계산 초기에는 노심용융물 상부에 냉각수가 존재하지 않는 dry cavity를 유지하지만 주어진 일정한 양의 콘크리트가 녹아 들어가면 상부로부터 냉각수가 주입되기 시작한다. 콘크리트 침식 깊이에 변화가 없으면 안정화된 것으로 판단하여 계산을 종료하였다. 계산에 사용된 주요 입력자료는 표 1과 같다.

표 2는 초기 노심용융물 깊이와 노심용융물에 녹아들어간 콘크리트 양에 따른 냉각수가 주입되기 시작하는 시점을 나타낸 것이다. 예상할 수 있는 바와 같이, 초기 노심용융물 깊이가 깊을수록 또한 녹아들어간 노심용융물의 양이 많을수록 냉각수 주입 시점이 늦어지는 것을 알 수 있다.

표 1 주요 입력자료

콘크리트 초기 온도	300 K
콘크리트 solidus 온도	1393 K
콘크리트 liquidus 온도	1563 K
콘크리트 decomposition 온도	1450 K
노심용융물 초기 온도	2398 K
Crust permeability	$1.91 \times 10^{-10} \text{ m}^2$
Particle bed diameter	$2.8 \times 10^{-3} \text{ m}$
Particle bed porosity	0.4
Cavity absolute pressure	0.4 MPa
냉각수 포화 온도	417 K

표 2 냉각수 주입시점

	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm	40 cm
0 %	0.00 분	0.00 분	0.00 분	0.00 분	0.00 분	0.00 분
5 %	3.00 분	3.75 분	4.25 분	5.00 분	5.00 분	5.50 분
10 %	6.75 분	8.00 분	9.00 분	10.00 분	10.00 분	11.00 분
15 %	12.50 분	14.25 분	15.50 분	17.00 분	17.50 분	18.50 분
20 %	21.75 분	24.00 분	25.75 분	27.50 분	29.00 분	30.00 분

초기 노심용융물 깊이가 30 cm 이고, 냉각수 주입시점에서 노심용융물에 녹아들어간 콘크리트 양이 10 %인 경우에 대한 계산결과를 그림 3 ~ 5에 나타내었다.

그림 3은 계산시간에 따른 노심용융물 온도를 나타낸 것이다. 상부로 냉각수가 주입되는 시점은 계산시작 후 10분이 경과한 때로서, 이 시점에서 노심용융물 온도가 조금 더 급격하게 낮아 짐을 알 수 있다.

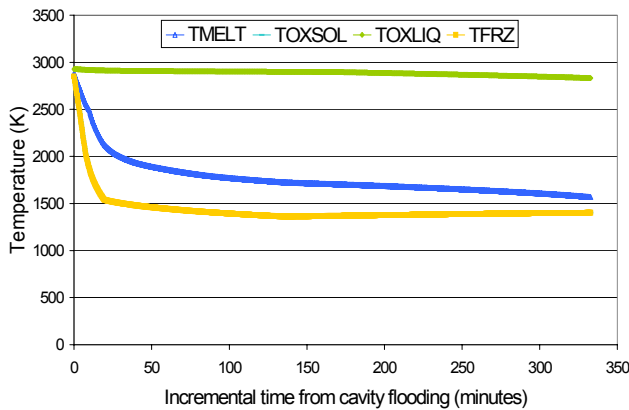


그림 3 노심용융물 온도

그림 4는 열평형도를 나타낸 것으로, 냉각수 주입 시점에서 상부 냉각수로의 열전달량이 급격히 증가되는 것을 알 수 있다.

그림 5는 시간에 따른 debris 분포를 나타낸다. 노심용융물이 콘크리트 캐비티에 방출된 지 310.50 분이 경과한 후 콘크리트 침식은 더 이상 일어나지 않고 안정화되는 것으로 계산되었으며, 이때의 콘크리트 침식깊이는 51.25 cm 이었다. 이 시점에서 용융물 분출 현상에 의해 상부 냉각수로 적체되는 debris bed의 질

량은 1697 kg 이었고, crust 질량은 989.72 kg, melt pool 질량은 610.44 kg 이었다. 용융물 분출 현상에 의해 냉각수로 적체된 많은 양의 debris에 의해 냉각이 일어나고 있음을 알 수 있다.

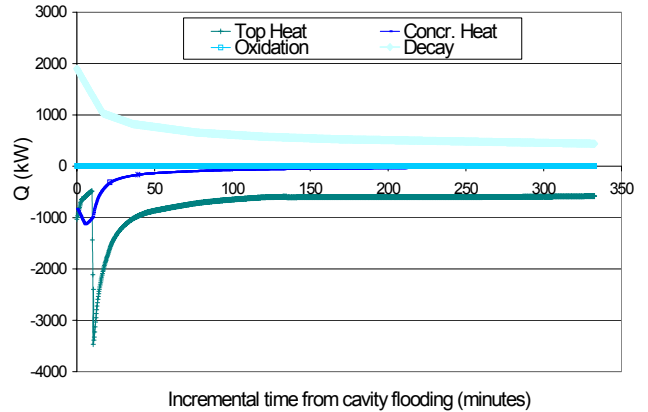


그림 4 열평형도

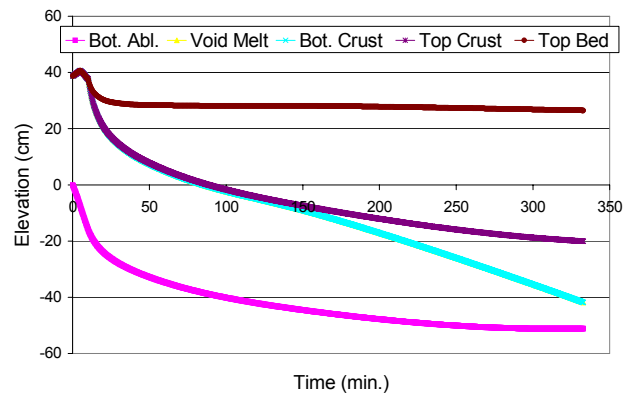


그림 5 Debris 분포

그림 6 및 7은 초기 노심용융물 깊이와 냉각수 주입시점까지 녹아들어간 콘크리트 양에 따른 콘크리트 총 침식 깊이와 이때 까지 걸리는 시간을 나타낸 것이다. 초기 노심용융물의 양과 녹아들어간 콘크리트 양이 많을수록 콘크리트 침식이 더 많이 일어나며 아울러 콘크리트 침식이 더 이상 일어나지 않고 안정화 될 때까지 걸리는 시간도 증가됨을 알 수 있다.

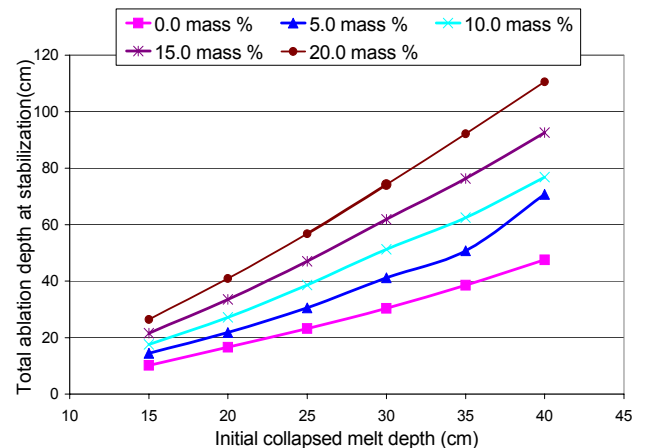


그림 6 콘크리트 총 침식깊이

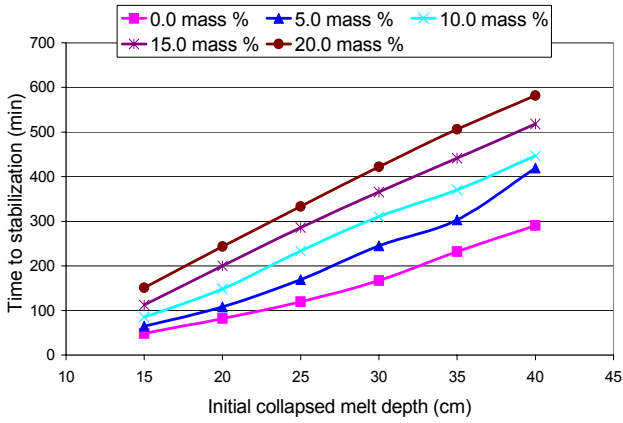


그림 7 콘크리트 침식에 걸리는 시간

그림 8은 콘크리트 침식이 더 이상 일어나지 않고 안정화된 시점에서, crust 질량과 용융물 분출 현상에 의해 상부 냉각수로 적체되는 debris bed의 질량비($M_{crust} / M_{crust+bed}$)를 나타낸 것이다. 초기 노심용융물 깊이가 깊을수록 또한 냉각수 주입시점까지 녹아들어난 노심용융물의 양이 적을수록 crust가 차지하는 비율이 작아지는 것을 알 수 있다.

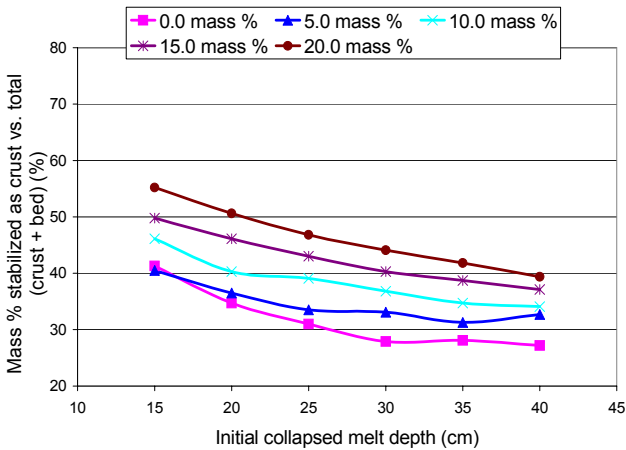


그림 8 Crust와 bed에서 crust가 차지하는 비율

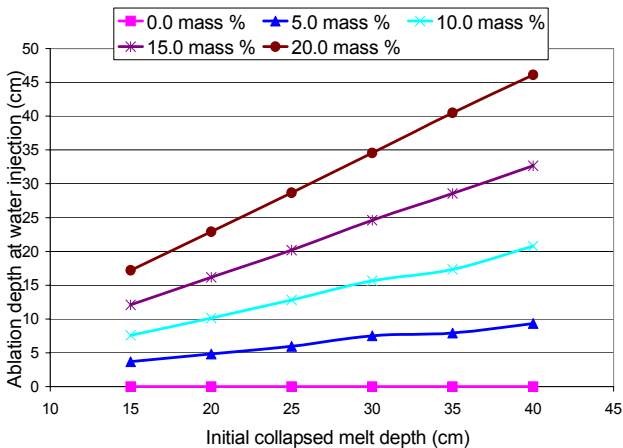


그림 9 냉각수 주입시점의 콘크리트 침식깊이

그림 9는 초기 노심용융물 깊이와 냉각수 주입시점까지 노심 용융물에 녹아들어난 콘크리트 양에 따른 냉각수가 주입되기 시작하는 시점의 콘크리트 침식깊이를 나타낸 것이다. 초기 노심 용융물 깊이가 깊을수록 또한 녹아들어난 노심용융물의 양이 많을수록 냉각수 주입 시점의 콘크리트 침식깊이가 깊어지는 것을 알 수 있다.

4. 결론

LCS basemat을 갖는 원자로 공동에서 일어나는 MCCI 현상에 대한 천이 계산을 CORQUENCH 2.0 코드를 사용하여 수행하였다. 방출된 노심용융물의 양과 냉각수가 주입되는 시점에서 녹아들어난 LCS 콘크리트 양을 변화시키면서 콘크리트 침식깊이, 침식시간 및 debris 양 등을 계산하였다. 초기 노심용융물의 양과 녹아들어난 콘크리트 양이 많을수록 콘크리트 침식이 더 많이 일어나며 아울러 콘크리트 침식이 더 이상 일어나지 않고 안정화될 때까지 걸리는 시간도 증가됨을 알 수 있었다. 본 계산은 용융물 냉각에 관련된 최신의 모델을 사용하여 실규모 원자로를 대상으로 수행한 것으로서 추후 가동 중인 원전 및 신규 원전의 MCCI 계산에 많은 도움이 되리라고 판단된다.

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] F. B. Ricou and D. B. Spalding, Measurements of Entrainment of Axisymmetrical Turbulent Jets, J. Fluid Mechanics, Vol. 11, pp. 21-32, 1961.
- [6] M. T. Farmer, S. Lomperski, D. J. Kilsdonk, and R. W. Aeschlimann, OECD MCCI Project Final Report, OECD/MCCI-2005-TR06, Feb. 28, 2006.