

CORCON-MOD3 를 이용한 국내 원전에서의 노심용융물과 콘크리트간의 반응특성 분석

신기열, 정 모

영남대학교

김상백, 김희동

한국원자력연구소

요 약

원자력 발전소에서의 중대사고시, 고온의 노심 용융물이 원자로 공동으로 떨어지면 노심용융물과 콘크리트간의 반응(MCCI)에 의한 여러가지 현상으로 인해 격납용기의 건전성을 위협할 수 있다. 본 연구에서는 국내 원전에서의 MCCI 현상에 대한 실험과 해석결과를 살펴보았다. 실험은 영광 원전 3, 4호기 원자로 공동구조물의 콘크리트를 대상으로 thermite 20kg을 사용한 것이며 해석은 MELCOR 코드내의 MCCI 상세해석 모듈인 CORCON-MOD3를 이용하였다. 해석에 사용된 콘크리트의 화학성분과 열물성은 실험을 통하여 측정된 값을 사용하였으며 해석결과는 실험 결과와 비교하였다. 또한 CORCON 코드에서의 MCCI 현상의 해석시 용융물의 초기온도, 용융물의 질량, 콘크리트의 종류에 따른 예측결과들을 비교하였다. MCCI 현상의 해석시 콘크리트의 종류에 따른 가스발생량과 구성성분의 변화가 크게 나타남으로 콘크리트의 화학적 구성성분을 적합하게 입력하여야 한다. 콘크리트의 종류에 따른 하부로의 열유속은 크게 차이가 없으나 침식율은 크게 차이가 나며 이는 콘크리트의 상변화 잠열의 차이에서 기인한 것이다. CORCON 코드는 실험에 비해 작은 침식율을 예측하고 있으며 콘크리트의 침식율은 용융물의 양에 비해 초기온도의 변화에 더 큰 영향을 받는 것으로 예측하고 있다.

1. 서론

원자력 발전소에서 중대사고가 발생하면 원자로 내의 손상된 핵연료가 녹아 원자로 용기하부에 용융풀을 형성하게 된다. 만약 원자로 용기하부가 파손하게 되면 내부에 용융된 고온의 노심용융물이 격납용기 하부 공동(cavity) 바닥 콘크리트면(basemat)으로 떨어지게 된다. 이때 고온의 노심용융물은 하부의 콘크리트 구조물과 반응함으로써 콘크리트의 침식(erosion)과 함께 수소(H₂) 등의 가연성 가스, 불활성 기체 및 핵분열 생성물을 발생시켜 결과적으로 격납용기의 건전성을 위협하게 된다. 이러한 노심 용융물과 콘크리트간의 반응(MCCI) 현상에서 용융물과 콘크리트의 종류, 수증기의 화학적 반응으로 생성된 여러가지 가스들의 종류와 그 상대적인 양, 공동 바닥면의 침식속도 등은

사고의 완화 및 조기진화를 위한 대책수립과 안전한 격납용기의 설계를 위한 공동 바닥면 두께와 면적 결정에 매우 중요한 기초자료가 된다.

MCCI 현상은 반응 과정이 매우 복잡하고 노심용융물과 콘크리트 접촉과정에서 노심용융물의 조건이나 콘크리트의 종류에 따라 반응특성이 다르게 나타나며, 특히 노심용융물에서 중의 형성과 내부에서의 열전달, 가스유입에 따른 물질전달 및 금속성분의 산화, 핵분열 생성물인 에어로졸의 생성 등의 여러가지 불확실성을 내포하고 있는 현상이다. 1980년대 중반 이후로 미국 SNL, ANL과 독일 FZK 에는 자국의 발전소에서 사용되는 콘크리트인 Basaltic(BAS) 과 Limestone Common Sand(LCS) 에 대해 용융 상사물(SUS304, Mild steel, UO_2-ZrO_2-Zr , $Fe+Al_2O_3$)을 사용하여 콘크리트의 침식율, 방출 가스의 종류와 상대적인 생성량, 상부와 하부로의 열유속 등을 측정하였다[1]. 또한 사고완화와 용융물 냉각을 위해 상부에서 냉각수를 주입한 SWISS[2], MACE[3] 실험도 수행하였다. 이러한 여러 실험결과들을 바탕으로 MCCI 현상을 모사하기 위한 CORCON[4], WECHSL[5], VANESA[6] 등의 해석 코드도 개발되어 있다. 국내에서의 MCCI 관련 연구는 대부분 상용코드를 이용한 해석에 치중하고 있으며 상용코드는 주로 CORCON 코드를 사용하고 있다[7]. 본 연구에서는 MCCI 현상에 포함하고 있는 많은 불확실성들을 규명하고 이를 해결하기 위한 기초연구의 일환으로 국내 영광 원전 3, 4 호기 공동 구조물에 사용된 콘크리트를 대상으로 MCCI 현상의 실험을 수행하였다[8]. 실험과 함께 MCCI 해석에 필요한 콘크리트의 강도평가와 화학적 구성성분의 분석하고, 온도변화에 따른 밀도, 열전도율, 열확산율, 비열 등의 열물성치들을 측정하였다. 본 연구는 실험에서 측정된 국내 영광 원전 3, 4호기용 콘크리트의 화학적 구성성분, 열물성 등의 특성을 고려하여 CORCON 코드를 이용한 계산을 통해 해석시의 문제점과 그 방안을 살펴 보았다.

2. 해석 및 입력조건

국내 원전에서의 MCCI 현상에 대한 해석을 위해서는 실험을 통한 반응 특성의 검정과 함께 콘크리트의 특성도 반드시 필요하다. 본 연구에서는 국내 영광 원전 3, 4호기의 공동 구조물에 사용된 콘크리트를 이용한 MCCI 실험을 수행하고 이를 해석하고자 한다. 실험에 대한 해석에 사용된 코드는 중대사고 종합해석코드인 MELCOR 코드내의 CORCON-MOD3[4] 를 이용하였다. CORCON 코드에서 주어진 콘크리트의 종류는 전체 화학성분을 포함한 기준 콘크리트 (CORCON 1, 2, 3, 4) 과 이를 단순화한 것 (BASALT, LIMESTONE/CS, CRBR), 그리고 사용자가 입력할 수 있도록 한 것 (CONTYP) 으로 구분되어 진다. 기준 콘크리트는 각각 basaltic aggregate concrete, limestone aggregate/common sand concrete, generic SE United States concrete 그리고 Savannah river site concrete 를 나타내며, BASALT 는 basaltic concrete (BAS), LIMESTONE/CS 는 limestone/common sand concrete (LCS), CRBR BAS 는 clinch river breeder reactor concrete 를 나타내는 것이다.

MCCI 현상이나 용융물의 냉각성 연구에서 콘크리트의 종류는 중요한 변수이다. 이들 콘크리트의 종류는 사용재료의 화학적 구성성분에 따라 구분되며 국내 원전에서 사용되는 콘크리트는 화학성분상 미국 basaltic 콘크리트와 비슷한 값을 가지지만 다소 차이가 있다. 본 연구에서는 설계기준강도를 만족하여 실험을 수행하기 전에 먼저 콘크리트 시편의 화학성분을 분석하였다. 표 1은 원전에서 주로 사용되는 콘크리트의 성분과 함께 본 연구에서 측정된 영광원전 3, 4호기 콘크리트 반응시편의 화학성분을 비교한 것이다. 영광 원전 3, 4호기용 콘크리트 (YGN 3&4) 의 화학성분은 BAS 에 비해 SiO_2 의 양은 비슷하지만 CaO 와 CO_2 성분이 2배 정도로 크게 나타난다. 따라서 국내 원전에서 MCCI

반응시에는 이들 콘크리트의 화학적 분해과정은 BAS 와 비슷한 경향을 가지지만 가스의 생성량의 증가로 상부로의 열전달을 증가시켜 침식율이 감소할것으로 예측된다.

본 연구의 해석대상은 콘크리트의 1차원 침식을 모사하기 위한 MEK1 실험[8]으로 용융상상물로는 Thermite 20kg 을 사용한 것이다. 그림 1은 MEK1 실험시편의 구조를 나타낸 것이다. 반응용기는 내경 240mm, 외경 450mm, 높이 1000mm 의 알루미늄 (Al_2O_3) 도가니 하부에 두께 20mm의 콘크리트를 부어 시편을 만들어져 있다. 반응용기 상부에는 용융상상물인 20kg 의 thermite가 내경 약 50mm의 주입구로 유입되게 된다. 또한 상부에는 내경 50mm의 관을 통해 MCCI 반응시 발생하는 가스의 방출하도록 되어 있다. 각 조건에 따른 해석에 사용된 시편의 조건은 이상과 같으며 용융물의 양과 초기온도 및 콘크리트의 종류에 따른 CORCON 코드의 계산 결과를 살펴 보았다. 표 2는 해석에 사용된 여러가지 변수들을 정리한 것이다. 해석을 위해 결정한 각 변수의 값들은 실험치를 기준으로 하였다. 용융물의 초기온도는 MEK1 실험에서 측정된 최고온도 2503 K 와 TURC-1T 에 나타난 2520 K 를 기준으로 하였다.

표 1. 원전용 콘크리트의 화학성분(wt %)

Composition	YGN 3&4	BAS	LCS
SiO ₂	55.70	54.84	35.80
CaO	15.80	8.82	31.30
Al ₂ O ₃	10.30	8.32	3.60
K ₂ O	2.86	5.39	1.22
Na ₂ O	2.04	1.80	0.082
MgO+MnO+TiO ₂	1.61	7.21	0.69
Fe ₂ O ₃	2.60	6.26	1.44
Cr ₂ O ₃	0.021	0.00	0.014
H ₂ O	7.23	5.86	4.70
CO ₂	2.78	1.50	21.154
Total	100.941	100	100

표 2. CORCON 코드 해석의 조건 및 입력변수

Concrete type	BAS	YGN 3&4	LCS
Melt temperature(K)	2300	2520	2700
Melt mass(kg)	10	20	30
Concrete density(kg/m ³)	2340	2252	2340
Solidus Temperature(K)	1350	1350	1420
Liquidus Temperature(K)	1450	1650	1670
Ablation Temperature(K)	1450	1450	1500

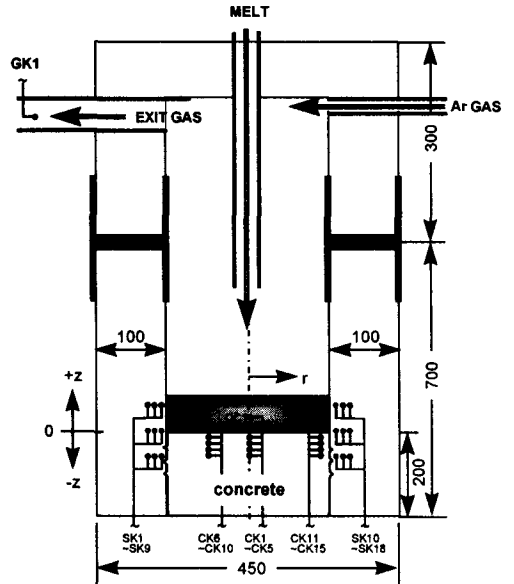


그림 1. MEK1 실험용 반응시편의 구조.

3. 계산결과

그림 2는 주어진 콘크리트에 대하여 초기온도에 따른 용융물의 온도변화를 나타낸 것이다. 콘크리트의 성분에 관계없이 용융물의 온도가 시간에 따라 감소 하고 있음을 알 수 있다. 그림 3에서 그림 5는 MCCI 시 발생하는 각 가스들의 생성량의 변화를 각 콘크리트에 따라 비교한 것이다. 각 콘크리트의 종류에 따라 발생가스의 양과 각 가스의 구성비가 크게 다르게 예측하는 것을 볼 수 있다.

특히 LCS 는 총 가스발생량이 YGN 3&4 에 비해 약 3~3.6 배 정도 많이 나타나며, BAS 의 경우 YGN 3&4 에 비해 약 30% 정도 작게 나타남을 알 수 있다. 그림 6는 용융물의 초기온도에 따른 콘크리트로의 열유속을 각 콘크리트에 따라 비교한 것이다. 열유속은 콘크리트의 성분의 차이에는 크게 영향을 받지 않지만 용융물의 초기 온도에 민감한 것으로 나타난다. 하지만 동일한 초기 용융물온도에 대해서 각 콘크리트의 침식율은 다르게 나타나는 것을 그림 7에서 볼 수 있다. 이는 CORCON 코드에서 적용하는 침식모델은 식 (1) 과 같이 준정상상태 (quasi-steady state) 로 침식이 이루어지는 것으로 보고 침식온도 이상에서 콘크리트의 상변화잠열에만 지배를 받기 때문이다.

$$q = \rho \Delta H_{m} \frac{dx}{dt} \text{-----(1)}$$

여기서 ρ 는 콘크리트의 밀도, ΔH_{m} 는 콘크리트의 분해잠열, dx/dt 는 침식속도를 나타낸다. 또한 이 모델은 콘크리트 침식면 하부로 열전도에 의한 열전달을 무시하고 있으며 이는 초기 용융물과의 반응과정과 사고 말기에 용융물의 장기냉각에 대한 해석을 포함하고 있지 못하고 있다. 반응초기에 콘크리트로의 열전도에 의한 열전달은 콘크리트와 접촉하는 용융물의 표면을 서서히 고화시키게 되며 이는 초기 반응특성을 해석하는데 필요한 것이다.

그림 8과 그림 9는 용융물의 초기 온도와 질량의 변화에 따른 콘크리트 침식율의 변화를 나타낸 것이다. 콘크리트는 YGN 3&4 이고 반응시편의 중앙에서 하부로의 침식결과를 실험과 비교한 것이다. 해석과 비교한 실험에서는 용융물의 종류 (thermite) 만 동일할 뿐 반응콘크리트의 종류 (LCS at TURC-1T) 및 크기 (시편내경: 410mm at TURC-1T) 가 다르고 특히 용융물의 양의 경우 TURC-1T 는 200kg 으로 MEK1 의 20kg 의 10배의 양을 사용한 결과이다. 그림 7과 그림 8의 결과에서 용융물의 질량변화에 비해 용융물의 초기온도의 변화가 콘크리트의 침식율에 미치는 영향이 다소 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 MEK1 실험에 비해 CORCON 코드에서 초기의 콘크리트의 침식율이 다소 작게 예측하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 CORCON 코드에서 하부로의 침식율을 균일하게 계산하는 것에서 비롯된 것이라 볼 수 있다.

이상의 결과에서 CORCON 코드를 이용한 국내 원전의 MCCI 현상의 해석에는 국내 원전용 콘크리트의 MCCI 실험을 통하여 콘크리트의 화학적 성분을 분석하고 MCCI 시 생성되는 가스의 양과 상대적 비율을 측정하고 콘크리트의 침식특성을 해석에 반영하여야 함을 알 수 있다.

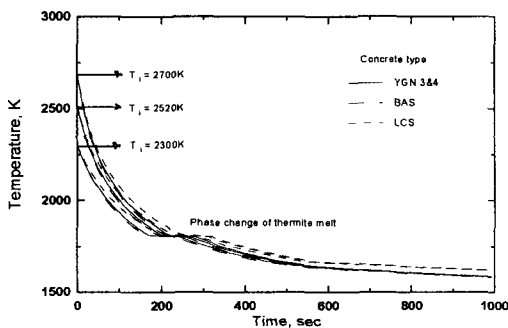


그림 2. 초기온도에 따른 용융물의 온도 변화. (Thermite 20kg)

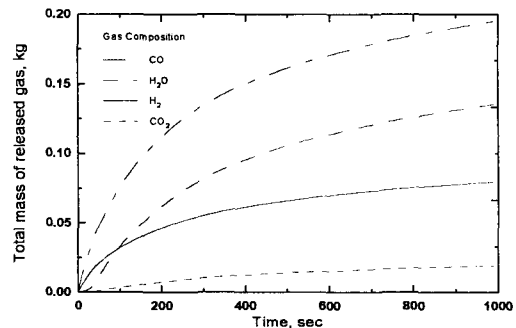


그림 3. YGN 3&4 에서의 가스발생량 및 그 성분 (Thermite 20kg, Initial temperature 2520K)

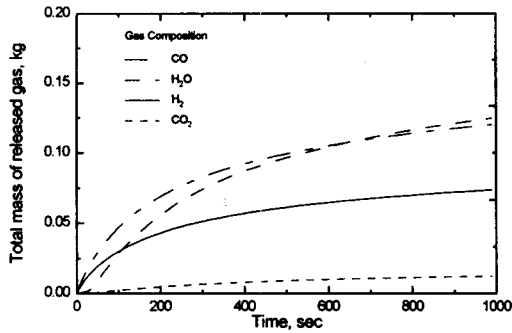


그림 4. BAS 에서의 가스발생량 및 그 성분 (Thermite 20kg, Initial tmeperature 2520K)

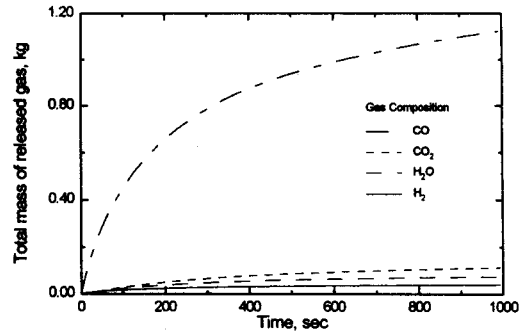


그림 5. LCS 에서의 가스발생량 및 그 성분 (Thermite 20kg, Initial tmeperature 2520K)

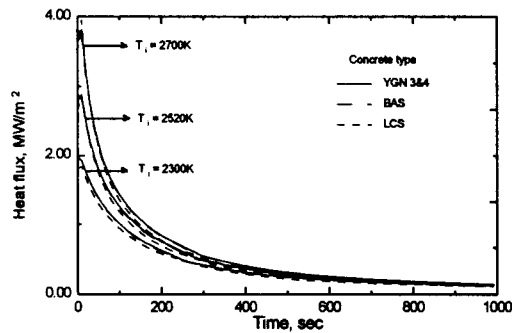


그림 6. 용융물의 초기온도에 따른 하부열유속의 변화(Thermite 20kg).

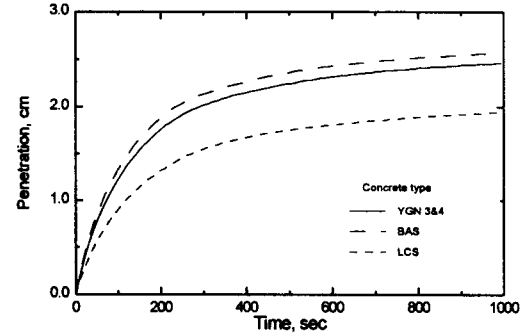


그림 7. 각 콘크리트에서의 침식율 (Thermite 20kg, Initial tmeperature 2520K)

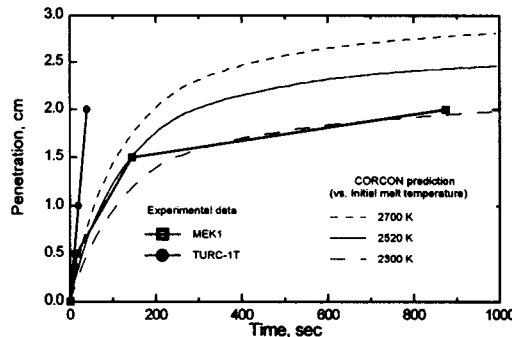


그림 8. 용융물 초기온도에 따른 YGN 3&4의 침식율. (Thermite 20kg)

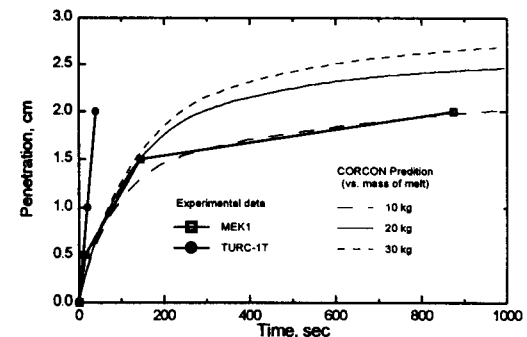


그림 9. 용융물의 질량에 따른 YGN 3&4의 침식율 (Initial tmeperature 2520K)

4. 결론

국내 원전에서의 MCCI 현상에 대한 실험과 해석결과를 살펴보았다. 실험은 영광 원전 3, 4호기 원자로 공동구조물의 콘크리트를 대상으로 thermite 20kg을 사용한 것이며 해석은 MELCOR 코드내의 MCCI 상세해석 모듈인 CORCON-MOD3 를 이용하였다. 해석에 사용된 콘크리트의 화학성분과 열물성은 실험을 통하여 측정된 값을 사용하였으며 해석결과는 실험 결과와 비교하였다. 또한

CORCON 코드에서의 MCCI 현상의 해석시 용융물의 초기온도, 용융물의 질량, 콘크리트의 종류에 따른 예측결과들을 비교하였다. MCCI 현상의 해석시 콘크리트의 종류에 따른 가스발생량과 구성성분의 변화가 크게 나타남으로 콘크리트의 화학적 구성성분을 적합하게 입력하여야 한다. 콘크리트의 종류에 따른 하부로의 열유속은 크게 차이가 없으나 침식율은 크게 차이가 나며 이는 콘크리트의 상변화 잠열의 차이에서 기인한 것이다. CORCON 코드는 실험에 비해 작은 침식율을 예측하고 있으며 콘크리트의 침식율은 용융물의 양에 비해 초기온도의 변화에 더 큰 영향을 받는 것으로 예측하고 있다.

5. 참고문헌

1. H. Alsmeyer et al., "Nuclear Science and Technology ; Molten corium/concrete interaction and corium coolability -A state of the art report-", *Final Report, EUR16649EN*, European Commission(1995).
2. R. E. Blose, J. E. Gronager, A. J. Suo-Anttila, and J. E. Brockmann, "SWISS: Sustained Heated Metallic Melt/Concrete Interactions with Overlying Water Pools," *NUREG/CR4727, SANDS85-1546 R3, R4, R7*(1987).
3. M. T. Farmer et al., "MACE Core Coolability Test M1B," *20th Water Reactor Safety Meeting*, Bethesda, MD(1992).
4. D. E. Bradley et al., "CORCON-MOD3: An Integrated Computer Model for Analysis of Molten Core-Concrete Interactions," *User's Manual, NUREG/CR-5843, SAND92-0167*(1993).
5. H. Alsmeyer, "BETA Experiments in Verification of the WECHSL Code: Experimental Results on the Melt-Concrete Interaction," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 103, pp. 115~125(1987) and H. Alsmeyer et al., "BETA Experimental Results on Melt/Concrete Interactions: Silicate Concrete Behavior," *Proc. of the Committee on the Safety of Nuclear Installations(CSNI) Specialists Meeting on Core Debris-Concrete Interactions*, EPRI, NP-5054-SR(1987).
6. D. A. Power et al., "VANESA: A Mechanistic Model of Radionuclide Release and Aerosol Generation During Core Debris Interactions with Concrete," *NUREG/CR-4308, SAND85-1370*(1986).
7. 정창현 외, "중대사고시 노심용융물과 콘크리트 반응현상에 관한 연구," *KAERI/CM-026/95*(1995).
8. K.M. Nho, J.H. Kim, S.B. Kim, K.Y. Shin and M. Chung, "An Experimental Study on the Transient Interaction Between High Temperature Thermite Melt and Concrete," *J. of Korean Nuclear Society*, Vol.29, No.4, pp. 336~347(1997).