

노심 용융물과 콘크리트와의 반응(MCCI)에 대한 실험적 연구

노기만, 김중환
한국 원자력 연구소
신기열, 정모
영남대학교 기계공학과

요 약

원전에서 가상적인 중대사고 발생시 격납용기 하부 캐비티에서 고온의 노심용융물과 콘크리트와의 반응시 생성되는 기체의 종류 및 양, 콘크리트 침식율 및 주변 열전달 특성은 중대사고 연구의 쟁점으로서 이에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 본 연구에서는 용융 유사물로 고온의 금속 용융물(SS304) 및 Thermite ($Fe+Al_2O_3$)를 영광 3,4 호기 원전에 사용한 콘크리트 시편에 부여 침식율, 생성가스 종류 및 주변 열전달 계수를 측정하였고 후에 MELCOR 코드내 MCCI 해석 부분인 CORCON MOD-3 코드와 비교할 계획이다. 본 논문에서는 MCCI scoping test 의 실험 장치, 실험 방법 및 결과를 소개하였다. 약 $1600^{\circ}C$ 의 SUS 304 용융물(10kg)은 충분치 않은 melt superheat 와 용융물 이송과정시 열손실로 인해 침식이 거의 일어나지 않았으나, Thermite 실험에서는 측면 및 하부 방향으로 최대 2.7cm/min 의 침식율을 보였으며 하부방향으로의 최대 열유속은 약 $3.1MW/m^2$ 로 나타났다. 본 연구의 결과 및 실험 기술은 차세대 원전의 중대사고 완화를 위한 원자로 캐비티 설계 실증실험에 응용될 예정이다.

1. 개요

중대사고시 원자로 용기가 파손되어 고온의 용융물이 격납용기 하부 캐비티 바닥 콘크리트면(basemat)과 반응하면 침식(erosion) 및 가연성 가스(H_2), 불활성 기체, 핵분열 생성물을 발생시켜 결과적으로 격납용기 내부의 압력을 증가시켜 그 건전성을 위협할 수가 있다. 이러한 노심 용융물과 콘크리트와의 반응 현상중 중요한 변수는 용융물과 콘크리트, 수증기의 화학적 반응으로 생성된 가스의 종류와 상대적 양, 캐비티 바닥면의 용발속도등으로 이들은 안전한 격납용기 설계 및 캐비티 바닥면 두께와 면적 결정에 매우 중요한 기초자료가 된다.

1980년대 중반이후로 미국 SNL[1,2,3,4] 과 독일 FZK[5]는 자국의 발전소 건설에 사용되는 콘크리트인 Basaltic 과 Limestone Common Sand(LCS) 에 대해 용융 상사물(SUS304, Mild steel, $UO_2-ZrO_2-Zr, Fe+Al_2O_3$)을 사용하여 콘크리트 침식율, 방출 가스 종류와 상대적 양, 상부와 하부로의 열유속 등을 측정하였다. 현재까지 진행되는 MCCI 실험의 주요 목적은 용융물 상부에 냉각수가 존재할 때, Floating Crust가 열전달에 미치는 영향과 MCCI 현상을 다루는 CORCON[6], VANESA[8], WECHSEL[5] 코드를 개선시키는 것이다. 미국 ANL의 ACE[7], MACE 실험[9]은 용융물 상부에 물을 주입하여 Melt-Quenching 현상을 실험하고 있다.

본 실험은 대형 실험을 위한 예비실험으로서 콘크리트 성분이 **Basaltic**에 가까운 영광 3,4 호기 원전 콘크리트 시편에 대해 용융상사물로 스테인레스 스틸 (SUS304) 10kg과 Thermite (산화철과 알루미늄) 5kg을 사용하였고 그 결과는 다량의 용융산화물을 이용할 대형 실험 연구의 기초자료로 사용될 것이다. 실험변수로서 바닥 및 벽면으로의 콘크리트의 침식율, 생성가스 종류 및 상대적인 양 및 상,하부로의 열 유속을 계산하며 본 MCCI 실험 연구의 결과 및 축적된 실험기술은 차세대 원전 캐비티 설계 개선안과 관련하여 효과적인 melt spreading 방법 및 용융물의 붕괴열을 효과적으로 냉각시키는 Core Catcher를 개발하는 TOCATA-XV 실험에 응용될 예정이다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

본 실험은 대형적납용기(지름 1.24m, 높이 1.5m) 에서 thermite를 실험하기에 앞서 수행하는 예비 실험으로서 1/2 scale 규모의 소형 보호용기(지름 0.55m 높이 0.65m) 내부에서 실험을 수행하였고 그림 1은 사용된 보호용기 및 반응용기, 콘크리트 시편을 보여준다. 용융상사물인 스테인레스 스틸 용융 방법은 약 10KW 출력의 전기저항식 SiC Heater를 사용하였고(SUS304 10 kg), thermite 가열의 경우는 약 5kg의 산화철과 알루미늄의 C 혼합물을 사용하여 산화용융물(Fe+Al₂O₃)을 생성시켰다. 콘크리트 시편은 바닥과 벽면 두께가 각각 100mm, 높이가 400mm인 원통형이며 측면 침식을 보기위해 크기가 서로다른 두개의 시편(내경: 250mm와 150mm) 을 이용하여 실험을 수행하였다. 반응용기 바닥과 측면에는 콘크리트의 온도변화와 열유속 및 침식율을 측정하기 위해 고온측정용 Chromega vs. Alomega(K-type) 열전대를 축방향과 반경방향으로 250mm내경의 시편에 12개, 150mm내경의 시편에 34개씩 각각 설치 하였으며 melt temperature 를 측정하기 위해 Tungsten 5% Rhenium vs. Tungsten 26% Rhenium thermocouple (C-type) 및 Optical Pyrometer (최대 2000°C)를 사용하였고 각 열전대의 위치는 그림 2와 5에서 보는 바와 같다. 측정된 Data는 PC와 Hardware로 구성된 자료처리장치로 전송되어 저장되며 자료처리용 Multifunction Board는 89kHz Sampling Rate를 가지는 열전대용 35채널과 제어를 위한 Analog Input/Output 각각 7채널로 구성되어 있다. 측정된 Data를 컴퓨터 화면에 표시하는 방안은 프로그램이 쉽고 다양한 기능을 가지고 있는 Visual Designer를 사용하였고 이 Software는 기존의 Data Acquisition용 Software보다 사용자가 편리하게 이용할 수 있고 Window상에서 프로그램이 가능하도록 되어 있다. 금속용융물과 콘크리트가 반응시 생성되는 가스 포집 및 고온 용융물의 불확실한 거동에 대한 위험성을 고려해 반응용기 외부에는 두께 4mm의 철재 보호용기가 설치되어 있고 보호용기 상부에는 생성되는 H₂, H₂O, CO, CO₂ 가스의 측정을 위해 직경 10mm의 동관을 설치하고 동관 끝단에는 발생가스의 포집장치를 설치하였다. 보호용기 하부에는 생성되는 폭발성 수소 가스를 회색시키고 검출용 carrier 가스로 쓰이는 아르곤(Ar)가스가 보호용기 내로 일정유량 공급되어 반응용기 및 보호용기내의 공기를 제거하고 이와 함께 MCCI시 발생되는 가스가 동관을 통해 흘러가도록 하여 포집한다. 포집한 가스는 가스분석기(Gas Chromatograph) 및 질량분석기(Mass Spectrometer)를 통해 그 종류 및 발생량의 상대적인 양을 분석한다.

3. 실험 결과

실험수행에 앞서 먼저 예비 해석의 결과를 바탕으로 반응용기의 크기를 용융물의 양에 따라 각각 내경 250mm(이하 MK0-C1이라 칭함)와 150mm(이하 MK0-C2라 칭함)로 결정하였으며 후자는 콘크리트 시편 측면 침식을 측정하는 것이 주 목적이다. MK0-C1실험은 실제 corium 성분중의 하나인 SUS304 10kg이 pouring 되는 낙하거동 및 이송 채널을 통해 흐를 때 대기로의 열손실을 평가하여 전기로가 낼 수 있는 최대 superheat 를 이용해 콘크리트 침식가능 여부를 관찰하고 K-type thermocouple 이 고온에서 잘 작동하는 지를 점검하는 것이 그 목적이다. MK0-C2실험은 반응용기 내경을 작게하여 상대적으로 콘크리트 하부 및 측면침식을 함께 관찰함이 그 목적이며 또한 전기로가 발생시킬 수 있는 온도보다 훨씬 높은 melt의 superheat를 얻기 위하여 Thermite반응을 이용. 실제사고 발생시 생기는 노심용융물의 온도에 근접한 실험을 하고자 하였다. 두 실험모두 melt를 대기중에서 자연냉각시키는 방법으로 Sustained Heating 방법은 사용하지 않았다. 실험결과 용융물의 양은 적지만 그 온도(약 2700K) 가 높은 MK0-C2실험에서 보다 활발한

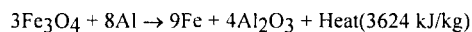
침식이 일어났다. 발생가스의 분석은 MK0-C2실험에서만 이루어졌으며 각 실험에 대한 결과는 다음과 같다.

1) MK0-C1 실험 (SUS304 10kg)

10KW 출력의 전기로를 이용한 MK0-C1실험은 용융상사물로 SUS304 10kg을 1600°C 로 녹여 내경 250mm의 콘크리트 반응용기에 유압장치를 이용하여 붓는 실험이다. 콘크리트 반응용기의 하부에는 중앙 축 하부방향으로 5mm간격씩 3개, 반경 62.5mm위치에 대칭으로 각각 2개의 열전대를 표면안쪽으로 5mm간격으로 설치하였다. 또한 벽면내부에도 반경방향 대칭으로 각각 2개의 열전대를 표면에서부터 5mm간격으로 설치하여 하부 및 측면침식율을 측정하고자 하였다(그림 2 참조). 용융물의 생성은 대기온도에서 스테인레스 스틸 용융온도(1372°C)를 초과하여 1600°C 까지 약 1시간 30분간 천천히 가열한후 이 온도로 약 1시간 지속가열하여 용융시켰다. Melt 의 온도는 전기로 제어반의 저항온도계 (RTD)를 이용한 온도로 제어하며 용융상태는 High Temperature Pyrometer로 확인하였다. 전기로 도가니에서의 용융물의 표면온도는 약 1500±30°C로서 SUS304의 용융온도에서 약 100~150°C정도의 superheat 를 유지하고 있음을 알 수 있었고 용융물의 superheat 는 전기로의 용량(최고 1600°C)의 한계로 인해 150°C 이상 올릴 수 없었다. 그림 3은 콘크리트 시편 중앙에서 하부쪽에 설치된 열전대의 온도변화를 나타낸 것이다. 표면의 열전대(channel 2)는 고온의 melt 에 의해 약 3분 후 파손되었으나 깊이 5mm 하부에 설치된 열전대(channel 3)는 최고 900°C를 도달하였으며(그림 3 channel 3 참조) 콘크리트의 고화 온도(Solidus Temperature)인 약 1077°C [6] 에 미치지 못하여 침식이 일어나지 않았음을 알 수 있었다. 기타 반경방향 및 측면에서 측정된 온도 Data로는 콘크리트의 침식이 일어나지 않음을 예측하였고 실험이 끝난후 melt를 반응용기에서 분리시킨 결과 하부 콘크리트 표면에서 작은 양의 침식이 발견되었고 생성가스에 의해 고화된 용융물의 하부 표면에 생긴 기공을 발견할 수 있었다. 시간에 따른 온도 Data로 부터 산출된 측면 및 하부 열유속은 그림 4에서 보는 바와 같으며 시편 중앙에서의 하부 열유속값이 0.3MW/m², 측면에서의 열유속이 0.15MW/m²로서 하부열유속이 측면의 2배정도임을 알 수 있다.

2) MK0-C2실험 (Thermite: 5kg)

산화철(Fe₃O₄)과 알루미늄(Al)의 화학반응열에서 얻어진 고온의 용융물을 이용한 MK0-C2실험은 측면 침식을 측정하기 위한 것으로 내경150mm 반응용기에서 수행하였고 다음은 Thermite 반응에 대한 화학 반응식이다.



콘크리트 시편에 설치된 각 열전대의 위치는 그림 5와 같다. MK0-C1에서와 같이 시편 중앙에서 하부방향과 반경방향 및 측면에 총 34개의 k-type 열전대를 설치하였다. Thermite 점화봉을 가열한 후 약 30초가 지난후 시료의 격렬한 반응이 시작되었고, 반응이 약 15초가 진행된 후 하부의 plug 가 녹아 약 2700K의 용융물이 반응용기에 낙하되었다. Thermite반응에서 생성된 용융물의 온도를 재기 위해 반응용기 내부에 Alumina Insulation 관에 탄탈륨 피복관으로 싸인 C-Type 열전대(최고 측정온도 2300°C)로 측정하였으나 열전대가 녹아 용융물의 온도가 2300°C 이상이 됨을 알 수 있었다. 그림 6과 7은 시편 중앙 및 반경 75mm 에서 측정된 열전대들의 온도 분포를 보여주고 있다. 용융물이 떨어지고 난 후 초기의 하부 침식율은 중앙(r=0)에서 21cm/hr, 반경(r=37.5mm)에서 164cm/hr로 큰 차이를 보이고 있으며, 측면에서의 침식율은 16cm/hr로 나타났다. 이는 LCS Concrete와 SUS304를 사용한 TURCISS에서의 초기 침식율 180~210 cm/hr와 Thermite를 사용한 TURCI에서 초기 1 분간 100 cm/hr 이었고 1-4분동안 50-80 cm/hr보다는 다소 차이를 보이고 있으나 여기서 국내 원전용 콘크리트가 Basaltic에 가까워 침식이 더 잘일어나는 것을 확인할 수 있다. 측면은 TURC 실험의 경우 MgO벽면이고 본 실험은 콘크리트 벽면으로 서로 달라 비교는 제외하였다. 시간이 지남에 따라 용융물이 식으면서 열유속 및 침식율은 낮아져 반응이 중단됨을 그림 8 에서 알 수 있었다. 실험이 완료된 후 시편을 조사해본 결과 반응용기 하부는 침식으로 인해 단면의 모양이 크게 변화하였음을 알 수 있었고 반응중에 발생한 H₂O는 대부분 연결 동관에

응축되었으며 채취한 발생가스는 양이 미소하여 분석이 불가능하였다. 열유속의 계산을 위한 용융물의 온도는 참고문헌[4]을 참고로 약 2247°C 를 기준으로 하였으며 초기 최대 열유속은 하부방향으로 $r=37.5\text{mm}$ 에서 3.1MW/m^2 , 중앙에서 387kW/m^2 이며, 측면방향으로는 약 297kW/m^2 으로 나타났다.

4. 결론

노심용융물과 콘크리트와의 반응을 모사한 본 실험에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 1600°C의 SUS304를 콘크리트 반응용기에 떨어뜨린 실험에서는 콘크리트의 침식이 거의 일어나지 않았으나 약 2300°C의 Thermite를 이용한 실험에서는 콘크리트 침식이 발생되었으므로, 콘크리트 침식을 유발하기 위해서는 melt 이송시 열손실을 줄이거나 보다 높은 용융물의 superheat 이 필요하다는 것을 알 수 있었다.
- 2) Thermite를 이용한 실험에서는 C-Type 열전대가 녹았으므로 용융물의 온도는 2300°C이상이었음을 알 수 있었으며, 고온의 용융물 온도측정을 위해서는 새로운 측정기법의 개발이 필요하다.
- 3) Thermite용융물과 콘크리트반응에서 약 5mm의 침식이 일어났으며, 초기의 침식율은 16~164cm/hr로 하부 및 측면방향이 서로 큰 차이를 보였다.
- 4) 콘크리트 시편 측면 및 하부로의 열유속은 SUS304를 사용한 경우 $0.15\sim 3\text{MW/m}^2$ 이고, Thermite를 사용한 경우는 하부방향으로 최대 3.1MW/m^2 , 측면으로는 0.3MW/m^2 로 나타났다.
- 5) Thermite를 이용한 실험에서 발생한 다량의 수증기는 거의 응축되었고, 기타 발생가스는 그 양이 미소하여 정성적인 분석이 불가능하였다. 따라서 차후 실험에서는 Mass Spectrometer 를 이용하여 미소량의 가스의 분석이 필요하다.

5. 참고 문헌

- 1) Copus, E.R. et al., "Core-Concrete Interactions Using Molten Steel with Zirconium on a Basaltic Basemat: The SURC-4 Experiment", NUREG/CR-4994, SAND87-2008, April, 1989.
- 2) Blose, R.E. et al., "SWISS: Sustained Heated Metallic/Melt Concrete Interactions with Overlying Water Pools", NUREG/CR 4727, SAND85-1546(R3, R4, R7), July, 1987.
- 3) Copus, E.R. and Bradley, D.R., "Interaction of Hot Solid Debris with Concrete", NUREG/CR-4558, SAND85-1739, 1986.
- 4) Gronager, J.E. et al., "TURCI: Large Scale Metallic Melt-Concrete Interaction Experiments and Analysis", NUREG/CR-4420, SAND85-0707(R5, R7), January, 1986.
- 5) Alsmeyer, H., "Beta Experiments in Verification of the WECHSEL Code: Experimental Results on the Melt-Concrete Interaction", Nuclear Engineering Design, Vol.103, pp.115~125, 1987.
- 6) Bradley, D. R. et al., "CORCON-MOD3: An Integrated Model for Analysis of Molten-Core Concrete Interactions", NUREG/CR-5843, SAND92-0167, April, 1992.
- 7) Fink, J.K. et al., "Aerosol and Melt Chemistry in the ACE Molten Core-Concrete Interaction Experiments", High Temperature and Materials Science, Vol. 33, pp. 51~75, 1995.
- 8) Power, D.A. et al., "VENESA: A Mechanistic Model of Radionuclide Release and Aerosol Generation During Core Debris Interactions With Concrete", NUREG/CR-4308, SAND85-1370, July 1986.
- 9) Farmer, M.T et al., "MACE Core Coolability Test M1B", 20th Water Reactor Safety Meeting, Bethesda, MD, October 21-23, 1992

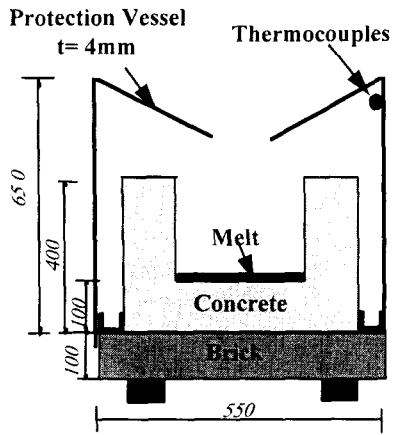


Fig. 1 MCCI Experimental Facility.

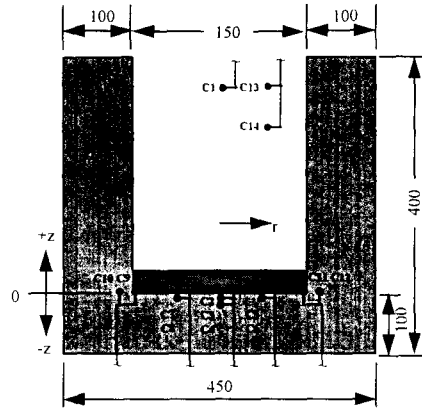


Fig. 2 Locations of Thermocouples within Concrete Cylinder(MK0-C1).

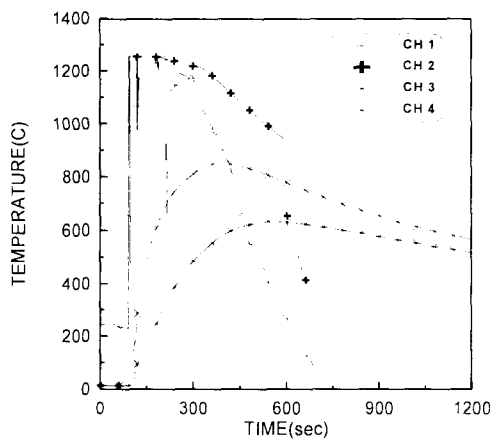


Fig. 3 Temperature Data Measured by K-type Thermocouples in MK0-C1($r=0$).

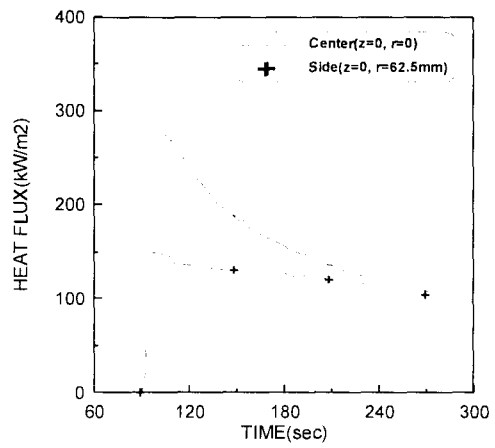


Fig.4 Downward and Sideward Heat Flux in MK0-C1.

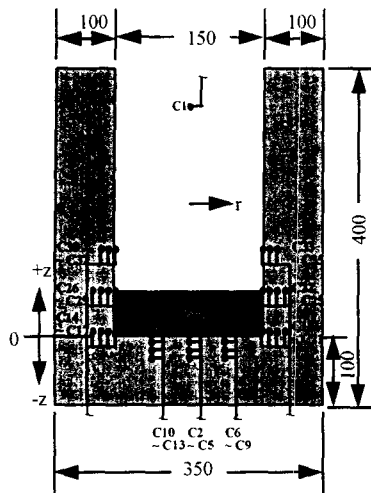


Fig. 5 Locations of Thermocouples within Concrete Cylinder(MK0-C2).

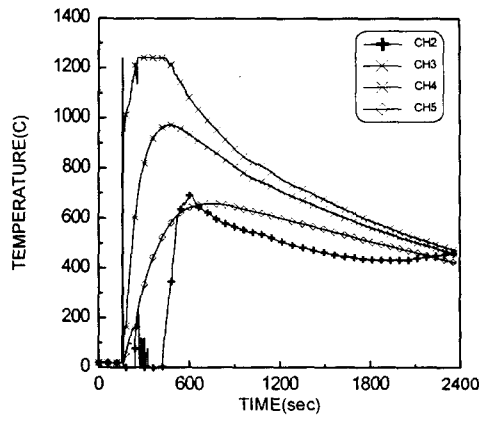


Fig. 6 Temperature Data Measured by K-type Thermocouples in MK0-C2(r=0).

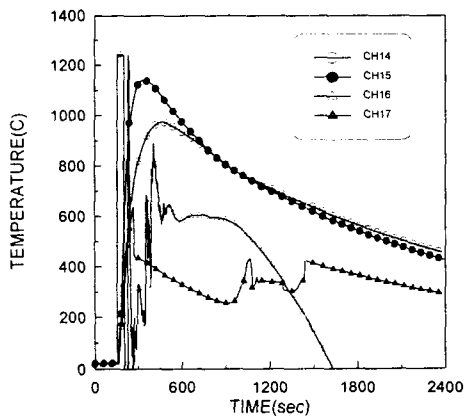


Fig. 7 Temperature Data Measured by K-type Thermocouples in MK0-C2(r=75mm).

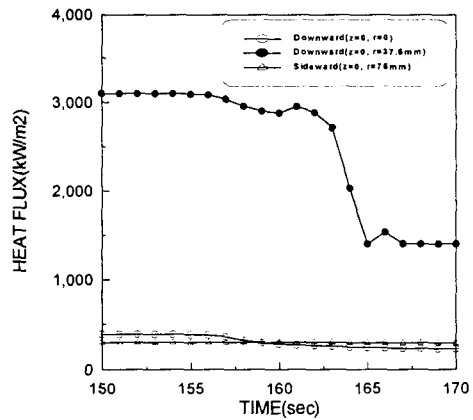


Fig. 8 Downward and Sideward Heat Flux in MK0-C2(r=0).