

영광 원전 3, 4호기용 콘크리트를 이용한 MCCI 현상의 실험적 연구

신기열, 정 모
영남대학교 기계공학부
김상백, 김종환, 조영로
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 영광원전 3, 4호기에 사용된 공동구조물 콘크리트와 고온용융물간의 반응특성을 실험적으로 살펴보았다. 실험은 유도가열로를 이용한 1차원 장기침식을 모사하기 위한 MEK-S1 실험이다. 실험에서는 유도로의 전원부족으로 용융풀을 형성하지 못하여 장기침식에는 실패하였다. 하지만 약 1500°C 의 고온 SUS 304 에 의한 콘크리트의 침식을 확인할 수 있었다. 실험후 분해한 콘크리트 반응시편의 단면은 침식으로 인해 매우 불규칙한 모양을 나타내었으며, 최대침식 깊이는 24 mm 로 나타났다. 실험중에 발생한 가스의 성분분석 결과에서 H₂, CO₂, CO 및 O₂, N₂ 등의 가스가 발생된 것을 알 수 있었다.

1. 개요

원자로에서 중대사고가 발생하면 손상된 핵연료중 상당량이 용융되어 원자로 용기 하부에 모여 용융풀을 형성하게 된다. 이때 원자로 용기 하부가 파손되면 노심용융물이 원자로 공동 (cavity) 에 떨어지게 되며 콘크리트 바닥면 (basemat) 과 장시간 반응한다고 가상된다. 이 현상을 노심용융물과 콘크리트간의 반응 (Molten Core-Concrete Interaction: MCCI) 이라 한다. 이때 고온의 용융물은 콘크리트 바닥면을 침식 (erosion) 시키며 가연성 기체, 비용축성 기체 및 핵분열 생성물을 발생시킨다. 노심용융물에 의한 원자로 캐비티 콘크리트의 침식에 의한 구조물의 파손과 여러 종류의 기체 방출에 의한 격납용기 내부압력의 상승은 결과적으로 격납용기의 건전성을 악화시키고 인체에 해로운 방사선 물질을 외부로 방출하게 된다.

지난 1980 년대 중반 이후로 미국 SNL[1-5] 및 독일 FZK[6]가 자국의 발전소에 대해 MCCI 현상을 예측하기 위한 코드의 개발을 위해 일련의 대형 실험들을 수행하였으며, 미국 ANL 은 현재까지도 용융물의 장기 냉각 가능성에 초점을 둔 국제공동연구 ACE/MACE[7-9] 실험을 진행하고 있다. 최근의 MACE M3B 실험은 대규모 반응용기(1.2m x 1.2m)를 사용해 냉각수에 의한 냉각효과와 floating crust의 형성에 대한 연구를 수행하고 있다. 국내 원전에서의 MCCI 현상에 대한 연구는 실험[10]과 코드해석[11]을 병행하고 있으나 대부분의 연구는 코드해석을 주로한 것이며 실험을 통한 정량적인

해석자료는 아직 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내 원전에서의 MCCI 현상의 해석에 필요한 기초자료를 확보하고, 실험을 통한 MCCI 현상을 모사하여 자료를 축적하고자 한다. 본 연구는 이러한 결과의 일부로서 국내 영광 원전 3, 4호기를 대상으로 원자로 공동 구조물의 설계자료를 토대로 콘크리트시편을 제작하여 MCCI 현상을 모사한 결과이다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

본 연구에서 수행한 노심용융물과 콘크리트와의 반응 (MCCI) 을 모사하기 위한 실험을 수행하였다. 실험을 위한 장치는 보호용기, 유도 가열 장치, 반응용기, 가스공급 및 측정장치, 자료처리장치 등으로 이루어져 있다. 그림 1은 MCCI 현상을 모사하기 위한 실험장치를 나타낸 것이다.

보호용기는 유도 가열 자장에 영향이 없는 알루미늄 합금 6061-T6 를 사용하여 원통형 (D 1240 x H 1500 x t 20 mm) 으로 만들었으며 주위에 냉각수가 흐르는 물자킷이 설치되어 있다. 용융물과 콘크리트가 반응시 생성가스 포집을 위해 플랜지 타입의 연결관이 상부에 연결되고 바닥에는 모든 열전대가 통과하는 port 가 설치되어 있다. 실험 진행시 반응용기 내부에서 일어나는 현상을 비디오 촬영하기 위하여 반응용기 상판 및 격납용기 상부에 플랜지를 사용하여 각각 강화유리 창문 (D 100 x t 12 mm) 을 격납용기 외부에서 약 60 도 각도로 촬영할 수 있도록 하였다. 격납용기의 상부에는 실험 중 예상되는 폭발적 반응시 생성되는 압력상승을 막기위해 외부로 배출할 수 있는 안전 밸브가 설치되어 있고 추후 덤프탱크로의 파이프를 연결할 수 있는 플랜지 (D 150 x t 5mm) 가 설치되어 있다.

유도코일을 이용한 유도 가열 장치는 알루미늄 보호용기 내부에 제작된 유도 코일과 고주파 유도가열 장치 (최대용량 50 kW) 및 냉각수 순환 장치로 이루어져 있다. 유도코일 내부에는 반응용기가 설치되고 콘크리트 상부에는 용융상사물이 있게 된다. 유도가열장치에서의 전기공급량을 조절함으로써 용융상사물의 용융과 지속가열을 통해 사고시 노심용융물의 핵반응열 (350W/kg, UO_2) 을 모사하는데 사용된다.

반응용기는 용융물 및 실험 목적에 따라 두 가지 종류로 설계, 제작되었다. MCCI 현상에서 콘크리트는 하부와 측면으로의 침식특성이 다르게 나타남으로 이를 비교하기 위하여 1차원침식을 모사하기 위한 실험(이하 MEK-S1 실험이라 칭함)과 2차원 침식을 모사하기 위한 실험(이하 MEK-T2 실험이라 칭함)으로 구분하여 수행하였다. 이들 반응용기는 다시 반응시편과 상부보호용기와 두경으로 이루어져 있다. 상부보호용기와 두경은 반응시 발생가스의 측정과 분해, 조립을 위해 사용된다.

MEK-S1 실험용 반응시편은 콘크리트의 1차원 하부침식을 모사하고 측면으로의 침식을 방지하기 위해 내화물질로서 원통형 용기를 만들고 내부에 콘크리트 재료를 양생하여 제작하였다. 1차원 반응시편은 그림 2에서 보는 바와 같이 외경이 345 mm, 내경 200 mm, 두께 72.5 mm, 높이 400 mm 의 원통형 알루미늄 용기내에 두께 250 mm의 콘크리트를 양생하여 제작하였다. 내화물질은 최고 사용온도가 1815 °C 인 미국 NORTON 사의 MINRO-AL 44 (95.5% Al_2O_3 , 14 mesh-1.4 mm) 알루미늄 분말을 사용하였다. 원통형 내화물은 대기 중에서 3일간 양생한 후 약 200 °C 의 온도에서 약 12시간 정도 구워 강도를 높였다. 반응용기의 콘크리트 바닥과 알루미늄 벽면에는 온도변화와 열유속 및 침식율을 측정하기 위해 K 형 (Nickel-Chromium/Nickel-Aluminum) 열전대를 콘크리트에 36개, 알루미늄 원통측면에 24개, 상부두경에 4개씩 설치하였으며 용융물의 온도를 측정하기 위해 C 형 (Tungsten-5%Rhenium/Tungsten-26%Rhenium) 열전대 3개와 S 형 (Platinum-10%Rhodium/Platinum) 열전대 1개를 콘크리트 하부에 설치하였다. 실험시편의 구조와 각 열전대의 설치 위치는 그림 2에서 보는 바와 같다.

기체공급 및 측정장치 부분은 금속용융물과 콘크리트가 반응시 수증기 (H_2O), H_2 , CO , CO_2 등의 가스가 생성될 것으로 예상되므로 이들 가스를 측정하는데 필요하다. 기체공급장치는 MCCI 시 반응용기 공간에 존재한 공기에 의해 용융물이 산화되며 이를 방지하기 위해 외부에서 비용축성가스인 아르곤 (Ar) 가스를 일정량 공급하는 장치이다. 반응시 발생된 가스들은 반응용기 상부의 배출구를 통해 나오며 이들 생성 기체들을 일정 시간간격으로 포집한 후 가스 분석기 (Gas Chromatograph) 를 이용하여 생성 기체의 종류 및 상대적인 양을 측정하게 된다. 가스공급과 배출량을 측정하기 위하여 각 배관에 유량계를 설치하였다. 아르곤가스의 유량측정을 위한 장치는 OMEGA 사의 FMA875-V Mass flow meter로서 정확도가 $\pm 2\%$ F/S, 반응도가 1.2 second, 유량범위가 0 ~ 200 SLPM 이다. 반응가스의 배출유량을 측정하기 위한 장치는 SIERRA 사의 780-Mass flow meter로서 정확도가 $\pm 5\%$ F/S, 유량범위가 0 ~ 400 SLPM, 최고사용온도가 230 °C 이다.

자료처리장치는 실험장치에 부착된 여러 계측기들에서 나오는 온도, 유량, 압력 등의 신호를 PC 와 Hardware 로 구성된 자료처리 장치로 전송하여 저장하는 장치이다. 자료처리용 Hardware 는 FLUKE 사의 2285B-Data logger로서 100 채널 용량으로 초당 16 개의 데이터 처리속도와 0.52 ~ 1.3 °C 의 열전대 정밀도를 가지는 것이다. 데이터 로그는 윈도우상에서 손쉽게 데이터를 처리할 수 있도록 "Visual Basic" 소프트웨어를 이용하여 구동하며 측정된 데이터는 MS Excel 화면에 나타나며 저장할 수 있도록 하였다.

이상의 실험장치들을 이용한 MEK-S1 실험은 반응시편 내부에 용융상사물로서 stainless steel(SUS) 304 를 넣어 외부의 유도코일로 열을 가함으로서 용융풀을 만들고 실제사고에서의 핵반응열을 모사하는 실험이다. 콘크리트의 침식은 용융물의 온도에 가장 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있으므로 이를 규명하기 위하여 용융물의 온도를 각각 1800 K, 2000 K, 1600 K 의 세단계로 변화해 가며 실험을 수행하고자 한다. 초기에 용융풀을 만들기까지는 유도로의 출력을 최대한 활용하고 콘크리트의 침식온도에 가까이 가면서부터 시편의 상태를 관찰하여 사고에 대비한다. 용융풀의 온도가 1800 K 에 도달하면 미리 계산된 핵반응열 (350W/kg, UO_2) 에 해당되는 전원을 가하여 침식율을 측정한다. 용융 모사물의 온도는 C 형 열전대로 측정하며, 콘크리트의 온도는 내부에 설치된 K 형 열전대로 측정한다. 용융모사물의 온도상승으로 인해 변화하는 콘크리트의 온도는 자료처리장치에서 표시 및 저장되며 콘크리트의 침식율은 시편내부에 설치된 K 형 열전대의 온도로서 판단한다. 다시 전원을 올려 용융물의 온도가 2000 K 가 되면 침식율의 변화를 다시 측정한다. 마지막으로 용융물의 온도를 1600 K 로 내려 침식율의 변화를 측정한다 다음 실험을 마친다. 유도가열 중 용융물 모사물인 SUS 304 의 산화와 발생되는 수소가스 등의 폭발성가스에 의한 폭발을 막기 위해 회석용으로 아르곤가스를 일정량 주입하면서 실험을 수행한다. 또한 각 단계별로 침식과정에서 발생하는 가스의 양과 성분을 분석하기 위하여 준비된 채취백을 이용하여 일정시간 간격으로 가스를 채취한다. 채취한 반응가스는 빠른시간내에 구성성분에 대한 화학분석을 한다.

3. 실험결과

MEK-S1 실험은 유도로 전원공급장치를 이용하여 핵반응열을 모사하며 지속가열을 통해 고온용융물에 의한 콘크리트의 장기침식을 모사하는 실험이다. 실험은 대형 알루미늄 격납용기 내에서 수행되었으며 국내 원전용 콘크리트 시편의 1차원 하부 침식특성을 알아보고 침식시에 발생하는 가스의 양과 각 가스들의 구성성분들에 대한 자료를 얻기 위한 실험이다. 하지만 유도가열로의 용량부족으로 인해 SUS 304 를 용융하지 못하였기 때문에 콘크리트의 장기침식을 모사하는데는

실패하였다. 하지만 고온상태의 SUS 304 로 인해 하부 콘크리트가 불규칙하게 분해되어 침식한 것을 확인하였으며 다음은 그 결과들을 설명하였다.

본 실험에서는 용융상사물인 SUS 304 의 온도변화를 측정하기 위해 C 형 열전대 3개와 S 형 열전대 1개를 콘크리트 시편에 설치하였다. 또한 콘크리트의 온도변화와 침식율을 측정하기 위하여 하부 방향으로 K 형 열전대가 일정간격으로 설치되어 있다. 그림 3은 SUS 304 의 온도를 측정하기 위해 설치한 C-type 열전대에서의 온도변화를 보여 준다. 유도로의 전원공급이 시작된지 약 5시간 40분정도가 지난후 SUS 304 가 녹기 시작하는 것을 볼수 있으며 최고 측정온도는 1501 °C 이다. 콘크리트상부의 용융모사물은 1398.1 °C 까지 온도가 상승하다 1131.1 °C 까지 하강한 후 다시 1364.8 °C 로 상승하며 마지막에 1501.5 °C 이 최고 온도를 측정하였다.

그림 4 에서 그림 6 까지는 콘크리트하부에 설치한 각 열전대의 온도변화를 보여주고 있는 것이다. 여기서 하부 콘크리트는 용융 모사물이 녹아 용융물을 형성하기 전에 이미 침식이 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 또한 MEK-S1 실험 통하여 열전대의 온도변화를 분석함으로써 콘크리트의 침식온도와 고화, 액화온도에 대한 정보를 얻을 수 있다. 콘크리트 하부에 설치한 K 형 열전대가 파손될 때까지 측정한 온도는 1011.4 ~ 1277.3 °C 였으며, 파손후 다시 측정된 온도의 최고치는 1262 ~ 1350 °C 로 나타났다. MEK-S1 실험용 콘크리트시편의 성분과 유사한 Basaltic 콘크리트의 경우 고화온도가 1077 °C, 액화온도가 1377 °C, 침식온도가 1177 °C 로 알려져 있다. MEK-S1 실험에 사용된 국내 원전용 콘크리트성분은 Basaltic 콘크리트에 비해 H₂O, CaO, CO₂ 성분이 많으므로 이들의 분해과정에서 콘크리트의 고체상태가 약화되고 이로 인해 상변화온도가 다소 떨어질 것이라 예측할 수 있다. 국내 원전에서의 MCCI 현상을 이해 분석하기 위해서는 이러한 콘크리트의 상변화온도에 관한 연구가 필요하며 이는 추후 실험결과의 해석과 함께 수행해야 할 과제이다.

그림 7은 실험 후 콘크리트의 침식단면을 나타낸 것이다. 약간의 SUS 304 가 용융되어 바닥의 콘크리트가 부분적으로 심한 침식이 일어났으며, 용융물이 아닌 고온 SUS304 에 의해서도 콘크리트가 녹아 있는 것을 볼 수 있다. 또한 콘크리트 반응시편의 단면은 침식으로 인해 매우 불규칙한 모양을 나타내고 있으며, 침식량은 9 ~ 24 mm 정도로 SUS 304 와의 접촉상태에 따라 다르게 나타났다. 최대침식 깊이는 24 mm 로 나타났다. 침식면을 상세히 살펴보면 콘크리트의 분해과정에서 내부에 기공이 많이 생겨 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 침식과정에서 콘크리트의 구성성분에 따라 분해되는 시간이 각기 달라 일찍이 분해가 이루어진 공간에서 기공이 생기는 것으로 판단된다. 또한 일반적으로 골재성분은 분해되는데 시간이 다소 많이 걸려 침식면에서 돌출되어 있는 것을 볼 수 있다.

그림 8은 MEK-S1 실험과정에서 발생한 가스의 성분을 시간별로 나타낸 것이다. 생생가스는 가스유량계를 지난 후 8 mm 배관을 통해 일정시간 동안 채취하였다. 분석결과 CO₂ 가스가 CO 가스에 비해 많이 발생되었으며, 수소가스 (H₂) 의 경우 초기침식과정에서 발생량이 증가하다 시간이 지남에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다. CORCON 코드를 이용한 예비계산에서는 CO 가스가 가장 많이 발생하는 것으로 나왔으나, 실험에서의 이와같은 결과는 용융물이 풀을 형성하지 못하고 고체상태를 유지하였기 때문에 배출과정의 가스에 의한 산화반응이 작은 것에 기인한다고 볼 수 있다. 만약 용융물을 통해 가스가 배출되었다면 수증기 (H₂O) 및 CO₂ 성분은 화학반응 ($Fe + H_2O \rightarrow FeO + H_2$, $Fe + CO_2 \rightarrow FeO + CO$) 을 거쳐 H₂와 CO 의 발생이 증가하여 가스의 성분비가 크게 달라질 것이라 예측할 수 있다. 가스의 성분 중 산소와 질소의 양이 많이 나온 것은 채취배관이 출구에 가까이 있어 외부의 공기가 유입된 것으로 생각된다. 실험 종료후 장치를 분해하는 과정에서 가스배출관에서 약 1.5리터의 응축수가

나왔으며 이는 발생한 수증기가 응축된 것으로 생각된다. 화학 성분을 기준으로 콘크리트 시편중 약 7%의 H₂O 성분이 반응시에 배출될 경우 응축수의 양은 약 2리터정도로 계산되어 진다.

4. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 국내 영광원전 3, 4호기에 사용된 공동구조물 콘크리트와 고온용융물간의 반응특성을 실험적으로 살펴보았다. 실험은 유도가열로를 이용한 1차원 장기침식을 모사하기 위한 MEK-S1 실험이다. 실험에서는 유도로의 전원부족으로 용융풀을 형성하지 못하여 장기침식에는 실패하였다. 하지만 약 1500 °C 의 고온 SUS 304 에 의한 콘크리트의 침식을 확인할 수 있었다. 실험후 분해한 콘크리트 반응시편의 단면은 침식으로 인해 매우 불규칙한 모양을 나타내었으며, 최대침식 깊이는 24 mm 로 나타났다. 실험중에 발생한 가스의 성분분석 결과에서 H₂, CO₂, CO 및 O₂, N₂ 등의 가스가 발생된 것을 알 수 있었다.

차기에 수행할 MEK-T2 실험에서는 콘크리트의 2차원 장기침식을 모사하기 위한 것이다. MEK-T2 실험에서는 용융모사물의 용융풀 형성과 고온 열원에 의한 콘크리트의 열충격을 동반한 콘크리트의 침식을 모사하기 위해 Thermite(Fe+Al₂O₃) 를 용융 모사물로 사용할 예정이다. 또한 콘크리트의 장기침식을 유도하기 위하여 유도로 전원공급장치를 이용함으로써 핵반응열을 모사할 예정이다. 이상의 여러 실험에서 얻은 결과는 현재 MCCI 의 해석코드인 CORCON 코드를 이용하여 비교, 평가할 예정이다. 본 연구의 결과는 현재 운전 중인 국내 여러 원전에서의 MCCI 와 관련된 중대사고의 해석과 차세대 원전에서의 중대사고 완화를 위한 연구에 기초자료로 활용될 것이다.

5. 참고문헌

- [1] Copus,E.R.,and D.R.Bradley, NUREG/CR-4558,SAND85-1739(1986)
- [2] Gronager,J.E. et al., NUREG/CR-4420,SANDS 85-0707 R5,R7(1986), and Gronager,J.E., et al., NUREG/CR-4521,SAND86-0318 R5,R7(1986).
- [3] Tarbell,M.W., et al., NUREG/CR 3024,SAND82-2476 R3,R4 (July `1987).
- [4] Blose,R.E., et al., NUREG/CR4727, SANDS85-1546 R3,R4,R7(July 1987).
- [5] Corpus,E.R. et al., NUREG/CR-4994, SAND87-2008, R3,R5,R7 (1987); and Lee,M. et al., Restricted CSNI Report No.155(1988).
- [6] Alsmeyer, H., Nuclear Engineering and Design, 103, pp.115-125(1987).
- [7] Fink., J.K. et al., High Temperature and Materials Science, Vol. 33, pp. 51~75, 1995.
- [8] B.W.Spencer et al., Proceedings of the 2nd OECD (NEA) CSNI Specialists Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interaction, KfK 5108, NEA/CSNI/R (92), p.357-372, Nov. 1992.
- [9] Farmer, M.T. et al., "MACE Core Coolability Test M1B", 20th Water Reactor Safety Meeting, Bethesda, MD, October 21-23, 1992.
- [10] K.M. Nho, et al., J. of Korean Nuclear Society, Vol.29, No.4, pp. 336~347(1997).
- [11] 정창현 외, "중대사고시 노심용융물과 콘크리트 반응현상에 관한 연구," KAERI/CM-026/95(1995).

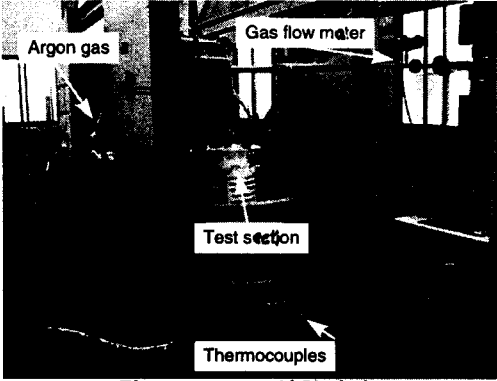


그림 1. MEK-S1 실험장치.

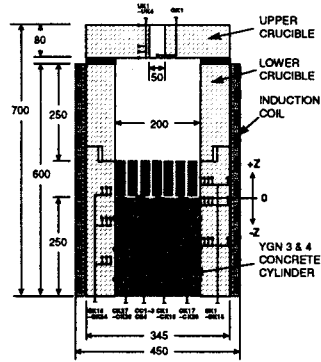


그림 2. MEK-S1 실험용 반응시편의 구조.

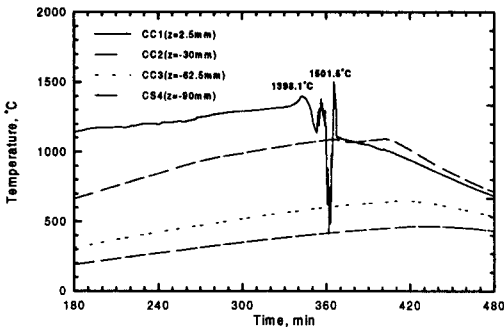


그림 3. 용융모사물 SUS 304의 온도변화

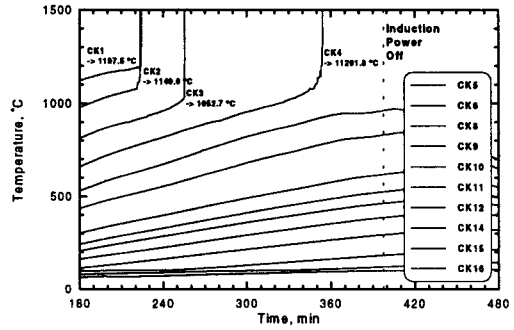


그림 4. 콘크리트의 온도변화(r=0mm).

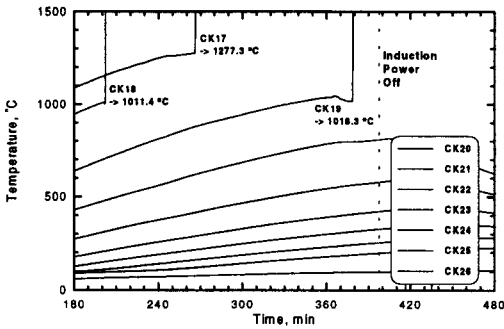


그림 5. 콘크리트에서의 온도변화(r=50mm).

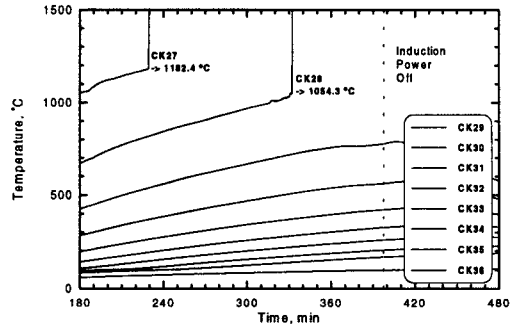


그림 6. 콘크리트에서의 온도변화(r=85mm).

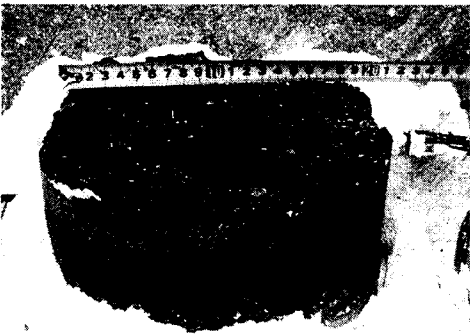


그림 7. MEK-S1 실험후 콘크리트의 침식단면.

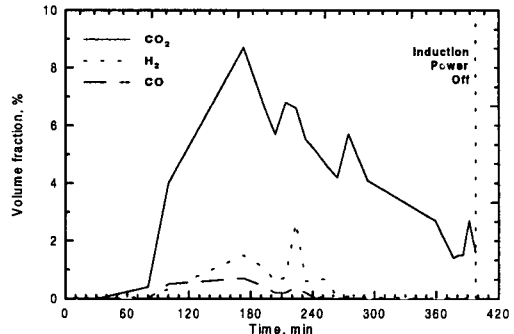


그림 8. MEK-S1 실험에서 채취한 발생가스의 성분별분포.