

MCCI 실험에 대한 검증계산을 통한 MELCOR 코드 평가 및 취약점 도출

이병철, 김주열, 정충현

서울대학교

요약

원자력발전소 중대사고시 격납건물의 건전성을 위협할 수 있는 현상들 중의 하나인 MCCI에 대한 분석을 목적으로 MCCI 관련 실험인 SWISS 및 SURC 실험에 대하여 MELCOR 1.8.2를 이용하여 계산을 수행하였다. 에어로졸 생성량을 제외한 MCCI 진행과정의 주요 예측대상에 대하여 실험결과와의 비교를 통하여 콘크리트 침식 진행과정 및 침식율, 노심용융률의 온도분포 및 열유속, 반응에 의해 유출되는 각종 가스 생성율, 그리고 노심용융률의 냉각에 따른 각질층 형성 등을 파악하였다. 콘크리트 침식과정 및 노심용융률의 온도 예측은 적절하며 콘크리트 분해에 따른 각종 방출가스는 열수력 조건에 따라 큰 불확실성을 보여주는 것으로 나타났다. 아울러 노심용융률의 냉각에 따른 각질층의 동적 거동해석은 MELCOR 1.8.2의 모델로서는 불가능하였다. 보다 많은 검증계산을 통하여 적절한 해석방법의 도출 및 새로운 모델 제시의 필요성이 있다고 판단된다.

1. 서 론

MCCI(Molten Core/Concrete Interaction)는 원자력발전소 중대사고시 원자로용기 파손후 용융 노심물질이 하부의 원자로공동으로 떨어져 밀바닥의 콘크리트 구조물과 반응함으로써, 콘크리트 침식과 그 과정에서 생성되는 콘크리트의 분해물의 화학반응으로 연소가능한 가스가 발생되며, 또한 이러한 가스들이 용융 노심물 층 내부로 유입, 상승하면서 장시간에 걸쳐 핵분열생성물의 에어로졸을 방출하는 복합적인 현상이다. MCCI가 발생되면 격납건물의 바닥(basemat)이 크게 손상되며, 연소가능한 가스들은 격납건물 대기로 방출되어 연소를 일으켜 격납건물 내부의 압력을 급격히 증가시키는 요인이 되어 격납건물과 중대사고시 작동되어야 할 안전관련설비의 건전성을 크게 위협할 수 있다. 따라서 중대사고시 안전성 향상을 위한 MCCI 관련 노심용융률과 콘크리트 사이의 열전달과 그에 따른 화학반응 및 야기되는 여러가지 현상을 규명하기 위한 연구가 필요하다.

MCCI의 복합적인 현상진행에 대하여 불확실성을 내포한 주요 현상은 노심용융층의 형성 및 내부 층 사이의 열전달, 노심용융률과 콘크리트 접촉면에서 이루어지는 열 및 물질 전달, 노심용융률 금속성분의 산화 반응에 의한 가연성 가스 생성, 방사성해중의 에어로졸 생성, 콘크리트 침식, 그리고 상부냉각수 유입에 따른 노심용융률 층의 냉각가능성 및 각질층 거동 등으로 나눌 수 있다. 현재 이들 현상에 대하여 많은 연구가 진행되어 소규모 또는 대규모의 실험이 여러 연구기관에서 수행되었으며 MCCI를 모사할 수 있는 상세전산코드도 개발되었다. 현재까지 진행중이거나 완료된 대표적인 실험 및 해석 연구결과로는 대표적으로 SURC^[1,2], TURC, BETA, SWISS^[3], ACE, 그리고 MACE 등의 실험과 CORCON^[4]과 WECHSL 등의 전산코드가 있다.

본 연구에서는 MCCI 현상 규명을 위해 수행된 주요 실험에 대하여 대표적 해석코드라고 할 수 있는 CORCON 코드를 이용한 해석결과를 제시하고자 하며, 상부 냉각수의 노심용융물과 콘크리트 반응에 대한 영향을 분석하고 노심용융물의 주입모드에 대한 영향을 분석할 수 있는 실험을 대상으로 선정하여 코드예측 정도를 비교 분석하고자 한다. 아울러 이를 통해 실험결과와의 비교분석(benchmarking)을 통하여 예측정도를 파악하고 전산코드의 한계와 적용범위를 규정하고자 한다.

2. MCCI 분석 대상 및 계산 방법

2.1 실험 개요

본 연구에서의 분석 대상인 SWISS 및 SURC 실험에 대하여 개요를 간략하게 기술하고자 한다. 보다 자세한 내용은 참고문헌[1,2,3]을 참조하기 바란다.

1) SWISS 실험

MCCI가 진행되는 동안에 상부에서 주입되는 냉각수의 영향을 평가하기 위한 SWISS 실험은 전기유도 가열기를 이용하여 용융시킨 스테인레스 스틸을 모사체로 하여 하부의 콘크리트 판위로 투하시키고 일정한 시간이 경과한 다음 용융물 층위에 냉각수를 주입한다. SWISS 실험에서는 노심용융물 모사체로 스테인레스 스틸을 사용하고 콘크리트 판이 스테인레스 스틸 용융물에 노출되는 것으로 설정하였다. SWISS 실험은 두 경우로 수행되었다. SWISS-1에서는 냉각수가 주입되기 전에 상당한 콘크리트 침식의 발생을 허용하고 용융물/콘크리트 반응은 냉각수가 주입되는 시간에서 준정상 상태로 진행되도록 한다. SWISS-2에서는 용융물이 콘크리트와 접촉하는 순간 냉각수가 주입되고 용융물/콘크리트 반응은 냉각수 주입시 천이(transition) 현상이 발생하도록 설정하였다. 표 1은 SWISS실험에 대한 주요 실험조건 및 결과를 요약한 것으로, 본 계산에서는 SWISS-1과 SWISS-2를 모두 모사하는 계산을 수행하였다.

2) SURC 실험

실제 노심용융물을 모사할 수 있도록 계획된 SURC 실험은 SWISS 실험과는 다르게 표 2에서 보는 바와 같이 MCCI의 다양한 조건하에서 수행되었다. 실험장치의 구성 및 실험방법은 SWISS와 거의 동일하다. 다만 MCCI에 대한 해석코드의 검증을 위해 열전달 메카니즘, 가스 유출 반응 그리고 에어로졸의 증발 유출 과정 파악을 주요 대상으로 하고 있다. SURC-1과 SURC-2는 UO_2 와 ZrO_2 의 혼합물을, SURC-3과 SURC-4는 스테인리스 스틸을 각각 사용하여 콘크리트와의 반응을 파악하되, SURC-3와 SURC-4는 반응 중간에 지르칼로이 금속을 주입하여 그 영향을 파악하였다. 본 계산에서는 SURC-1과 SURC-4를 대상으로 계산을 수행하고자 한다.

2.2 코드 계산 방법

본 계산에서는 현재 CORCON 코드를 확보하고 있지 않는 관계로 CORCON/MOD2를 수용하고 있는 중대사고의 종합적 해석코드인 MELCOR 1.8.2^[5]를 사용하였는데 원자로공동 제어체계의 열수력적 거동이 다소 다르게 취급되는 점을 제외하고는 동일한 계산 모델이다. MELCOR1.8.2의 경우 노심용융물의 열전달시 상부의 대기로의 열전달 계산시 대기의 조건이 경계조건으로 부과되도록 되어 있다.

MELCOR 1.8.2 코드계산에 사용한 주요 고려 사항은 다음과 같다.

1) 실제 실험에서는 expansion volume을 두어 반응 용기내 압력을 일정한 한계값 이상 넘지 않도록 고려하였다. 즉 용기 압력을 일정하게 유지하기 위해 ball valve를 사용하여 상,하한의 압력폭을 유지하였다. 본 계산에서는 이를 단일 압력으로 간주하여 대기압으로 일정하게 유지하였다.

2) 원자로공동 구조에 대한 현재 MELCOR 1.8.2에서 허용되는 유일한 선택은 CORCON/MOD2 원자로공동 구조 중 “flat-bottom cylinder” 이다. 하지만 실험에서는 고온의 용융물과 콘크리트가 반응하는 과정을 단순히 일차원적으로 보기 위해 실린더 양 옆면을 MgO 단열 물질로 세우고 실린더 밀면만을 콘크리트로 채웠

기 때문에 실험에 맞는 입력 파일을 작성하기가 쉽지 않다. 이를 해결하기 위해 body point(ray)가 콘크리트 표면과 만나는 지점)의 위치를 실린더 밀면에만 지정하였다.

3) 제어체적 열수력 조건을 위해서는 용융물의 열 계거와 콘크리트와의 반응에의 경계조건으로써 CVH(Control Volume Hydrodynamics) 페키지를 이용하여 온도와 압력을 정의하였다. 용융물과 콘크리트와의 격렬한 반응으로 인해 생긴 열과 기체들은 CAV 페키지와 관련된 CVH의 제어체적에서는 열 및 물질의 source가 된다.

4) Fission product simulant와 에어로졸 방출은 고려하지 않았다.

3. 계산결과 및 분석

SWISS-1 & -2 실험 및 SURC-1 & -4 실험에 대하여 MELCOR 1.8.2 를 이용하여 계산을 수행하였다. 본 연구에서는 다만 MCCI의 복잡한 현상에 대하여 세부적으로 적용하고 있는 CORCON 각 해석모델의 적합성을 파악하기 위하여, 실험별로 비교분석을 수행하는 방법 대신 MCCI의 세부 현상 부분별로 계산 결과를 비교하였다. 본 계산에서는 실험과 같은 조건하에서 SWISS-1, SWISS-2, SURC-1, 그리고 SURC-4에 대하여 각각 3776, 3623, 21808, 그리고 13513 초가 소요되었으며 실험결과에 비하여 약 20 -30 % 늦게 나타났다.

ii) 콘크리트 침식율 및 침식진행모양

콘크리트의 침식과정은 실험의 경우 전체적으로 동일하게 진행되지 않지만(SWISS 실험의 경우 가장자리에서 빠르고 높게, SURC 실험은 중간 부분에서 빠르고 높게 나타난다) 계산에서는 1차원적으로 해석하므로 지점에 관계없이 같은 침식모양을 보여준다. 그럼 1과 2은 각각 SWISS-1과 SURC-4의 콘크리트 침식 정도를 시간에 따른 과정으로 나타낸 그림으로, 콘크리트의 wet/dry front가 위치한 지점을 의미한다. 실험치와 비교해보면 거의 동일한 침식과정을 보여준다고 할 수 있다. 다만 실험결과를 고려할 경우 1차원 모델로는 콘크리트 바닥의 국부적인 침식 정도의 분포를 예측할 수 없다. 그럼 3는 SWISS-1과 -2의 시간에 따른 침식율을 보여주는 것으로 냉각수 주입 전후(SWISS-1은 약 1900초, SWISS-2는 약 100초에 각각 물이 주입됨)를 기준으로 침식율을 비교해 볼 경우 냉각수 주입에 따른 콘크리트 반응에는 별 다른 영향을 끼치지 못함을 알 수 있다. 이는 실험결과에서도 밝히고 있는 사항으로 서로 일치한다. 그럼 3에서 나타난 침식을 강하는 실험시의 decay power를 모사하는 전원장치의 휴즈가 끊어져 발생한 것이다.

2) 노심용융물의 온도 분포

노심용융물의 온도 분포는 노심용융물로부터 주위의 콘크리트, 상부 냉각수, 그리고 노심용융물 내부 충 사이의 열전달에 좌우되므로 각 열전달에 대한 모델 검토가 우선되어야 한다. 이전의 연구결과[6]에 의하면 콘크리트 침식에 따라 분해물 속에 있는 각종 가스의 상승 효과로 인해 노심용융물로부터의 열전달은 활발히 이루어지는 것을 알 수 있다. 따라서 노심용융물의 온도는 고화온도이상에서는 빠르게 하강하고, 고화온도 근처에 이르러서는 각질층 형성 등에 의해 열전달이 더디게 진행되어 완만한 하강을 보여준다. 그럼 4는 SURC-1 실험에 대하여 예측된 노심용융물의 온도 분포를 보여준다. SURC-1의 경우 UO₂-ZrO₂의 혼합물을 모사체로 사용하였기 때문에 계산시 노심용융물의 구조는 heavy oxide-metal-light oxide의 층 구조를 가지며, 그럼 4의 온도는 이들 용융물 층의 평균 온도를 의미한다. 그림을 살펴보면 계산 후반부의 온도예측이 쉽지 않다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 다음의 두가지로 설명될 수 있다. 첫째, 현재 모델에서는 지르칼로이와 이산화규소의 응축상(condensed phase) 발열반응을 고려하지 않기 때문에 충분한 열생성이 이루어지지 않았다. 둘째, 노심용융물의 활발한 열전달을 설명하는 열전달 메카니즘이 부족하다. 한편, 노심용융물 내부의 열전달을 야기하는-계산 결과에서 interlayer heat transfer가 상당한 부분을 차지하는데- 노심용융물 층의 온도 분포는 SWISS-1 실험의 경우 그림5과 같다.

3) 각종 가스 생성율

본 연구에서는 MCCI 시 발생되는 가스의 경우 대표적인 가스인 CO, CO₂, H₂, 그리고 H₂O에 대하여 계산을 수행하였다. 위 가스들은 콘크리트의 침식에 따른 분해물로서 생성되는 것으로 실험에서의 gas flux와 비교해보면 가스 종류에 따른 상대적인 양과 시간에 따른 변화에 있어서는 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 가스들의 절대적인 양에 있어서는 계산 결과가 낮게 나타났다. 그림 6은 SWISS-1에 대하여 예측된 각종 가스의 발생량을 보여준다. 연소성 가스인 H₂와 CO의 양이 상대적으로 낮게 나타남을 알 수 있다. 하지만 실험에서는 이산화탄소나 수증기의 환원반응이 진행되어 일산화탄소나 수소의 양이 상대적으로 높게 나타났다고 밝히고 있다. 그림 6과 아울러 그림 7에서 보는 바와 같이 계산결과에서는 냉각수 주입시각을 중심으로 일산화탄소가 많아지며 환원반응이 상대적으로 적게 진행되었다. 또한 계산시 부과하는 열수력적 조건에 따라 불확실한 가스생성을 보여주었다.

4) 각질층 형성

노심용융물이 냉각됨에 따라 형성되는 각질층은 노심용융물로부터의 대류열전달에 의한 열제거 지연과 용융물의 내부와 주변에 대한 열저항의 역할로 인해 콘크리트 침식율을 적게 한다. 즉, 열손실은 적어지고 용융물의 냉각은 천천히 이루어지면서 안정한 상태에 도달하게 된다. SWISS 실험의 경우 실험후 조사를 통하여 노심용융물 주위에 여러군데 국부적인 각질층 형성을 확인되었고 성장 및 소멸의 과정을 겪은 것으로 파악되었다. 하지만 계산에서는 모든 방향으로 각질층은 단순히 성장할 따름이며 형성된 다음에는 짧은 시간 이내에 용융물층이 고화된다. 따라서 현재의 CORCON/MOD2 모델에서는 각질층의 동적인 거동은 예측되지 않는 것으로 판단된다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 에어로졸 거동을 제외한 MCCI의 현상진행을 파악하고 열전달 메카니즘을 중심으로 현재 까지의 제시된 주요 관련모델을 검토하였다. 그리고 각 세부적인 모델의 MCCI에 대한 복합적인 해석결과를 마련하고 전산모델인 CORCON/MOD2의 해석여부를 검증하기 위하여 SWISS 와 SURC 실험에 대한 MELCOR 1.8.2를 이용한 계산을 수행하였다. 주요 검토 및 해석 내용은 다음과 같다.

- 1) CORCON/MOD2에 제시된 주요 열전달 모델의 예측 정도는 상호간에 큰 차이를 보여준다. 따라서 노심용융물로부터의 열전달은 콘크리트 분해에 따른 가스 주입을 고려하여 보다 활발히 이루어지는 모델을 사용하여야 한다.
- 2) 콘크리트 침식에 대한 1차원 모델은 국부적인 침식의 차이를 설명해 주지는 못하지만, 실험과의 비교 분석을 통하여 적절한 결과를 제시하고 있다고 판단된다.
- 3) 노심용융물 층의 온도 분포 및 열전달은 적절한 입력이 가능할 경우 충분히 예측할 수 있다.
- 4) 노심용융물 주위에 형성되는 각질층의 동적인 거동 예측은 CORCON/MOD2 모델에서는 불가능하다.
- 5) 콘크리트 분해에 따른 발생되는 각종 가스는 gas reaction chemistry 뿐만 아니라 주위의 열수력적 조건에 크게 의존하며 큰 불확실성을 보여준다. 따라서 고려해야 할 주요 반응의 중요도와 콘크리트의 phase diagram에 대한 검토가 필요하다.

한편, 실험과의 비교분석 과정을 통하여 다음과 같은 일련의 사항에 대한 연구 수행이 필요하다고 판단된다.

- 1) 보다 개선된 전산코드인 MELCOR 1.8.3의 설치 및 계산에의 활용
- 3) 보다 많은 검증자료의 마련을 통한 MCCI 해석에 대한 근거 제시
- 4) 상부 냉각수의 존재에 따른 각질층의 거동 해석 모델에의 반영

5. 참고문헌

- [1] E.R.Copus, et al., "Core-Concrete Interactions Using Molten Urinia with Zirconium on a Limestone Concrete Basemat," NUREG/CR-5443, SAND90-0087, Sandia National Lab., Sep., 1992.
- [2] E.R.Copus, et al., "Core-Concrete Interactions Using Molten Steel with Zirconium on a Basaltic Basemat: The SURC-4 Experiment," NUREG/CR-4994, SAND87-2008, Sandia National Lab., Apr., 1989.
- [3] 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/CR-4727, SAND85-1546, Jul., 1987.
- [4] R.K. Cole, D.P. Kelly, and M.A. Ellis, "CORCON-Mod2: A Computer Program for Analysis of Molten-Core Concrete Interactions", NUREG/CR-3920, SAND84-1246, Aug., 1984.
- [5] "MELCOR 1.8.2 User's Guide/Reference Manual," Sandia National Lab., Feb., 1993.
- [6] 정창현 외, "증대사고시 노심용융물과 콘크리트 반응현상에 관한 연구," KAERI/CM-050/94, 한국원자력 연구소, 7. 1995.

목적		
- Examine the Effect of an Overlying Water Pool on Melt Interaction with Concrete		
수행내용		
실험명	SWISS-1	SWISS-2
조건	<ul style="list-style-type: none"> - 304 Stainless Steel 46kg - Limestone/Common Sand - Water quench initiates at 2085 sec - Initial temperature of the melt is between 1912 and 2048 K - Fuse fails at 1294 sec 	<ul style="list-style-type: none"> - 304 Stainless Steel 44.2kg - Limestone/Common Sand - Water quench initiates at 99 sec - Initial temperature of the melt is between 1803 and 1959 K - Fuse fails at 1456 and 2141 sec
결과	<ul style="list-style-type: none"> - Test terminates at 2425 sec - Crust height from the original concrete surface is 25 cm 	<ul style="list-style-type: none"> - Test terminates at 2460 sec - Crust height from the original concrete surface is 10.9 cm

표 1 SWISS 실험의 개요

목적				
- Production of Thermal-Hydraulic Data for CORCON Validation - Production of Data for VANESA Aerosol-Generation and Chemistry Model				
실험명	SURC-1	SURC-2	SURC-3	SURC-4
조건	<ul style="list-style-type: none"> - UO₂-ZrO₂ 204.2kg - UO₂ 67% - ZrO₂ 23% - Zr 10% - Induction Power - 280kW - Pressure : 0.83atm - Reaction sustained for 130minute - Limestone 	<ul style="list-style-type: none"> - UO₂-ZrO₂ 203.9kg - UO₂ 69% - ZrO₂ 22% - Zr 9% - Induction Power - 280kW - Pressure : 0.83atm - Reaction sustained for 150minute - Basaltic 	<ul style="list-style-type: none"> - Steel-Zr 50kg - Steel 45kg - ZrO₂ 5kg - Zr 9% - Induction Power - 280kW - Pressure : 1atm - Reaction sustained for 120minute - Limestone 	<ul style="list-style-type: none"> - Steel-Zr 250kg - UO₂ 69% - ZrO₂ 22% - Zr 9% - Induction Power - 280kW - Pressure : 0.83atm - Reaction sustained for 62minute - Basaltic
결과	<ul style="list-style-type: none"> - Erosion 27cm - Aerosol Release 30~200g/m³ - Gas Release 29~150slpm 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosion 35cm - Aerosol Release 10~300g/m³ - Gas Release 26~110slpm 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosion 33cm - Aerosol Release 0.02~0.04g/sec - Gas Release 50~100slpm 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosion 25cm - Aerosol Release 0.5~10g/sec - Gas Release 60~130slpm

표 2 SURC 실험의 개요

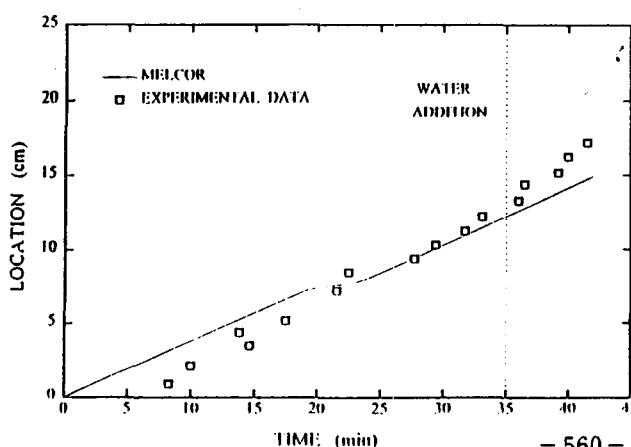


그림 1 SWISS-1 실험에 대한 콘크리트 침식진행과정

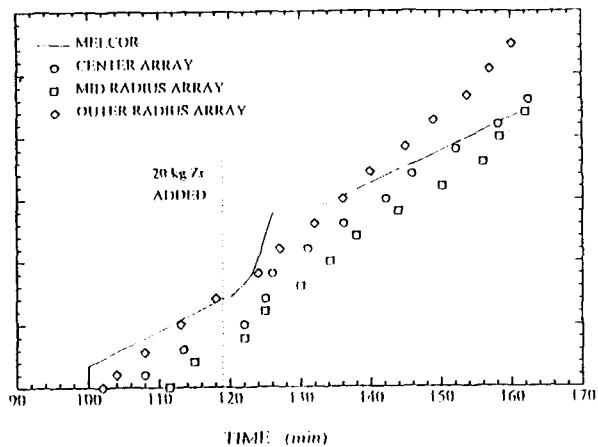


그림 2 SURC-4 실험에 대한 콘크리트 침식진행과정

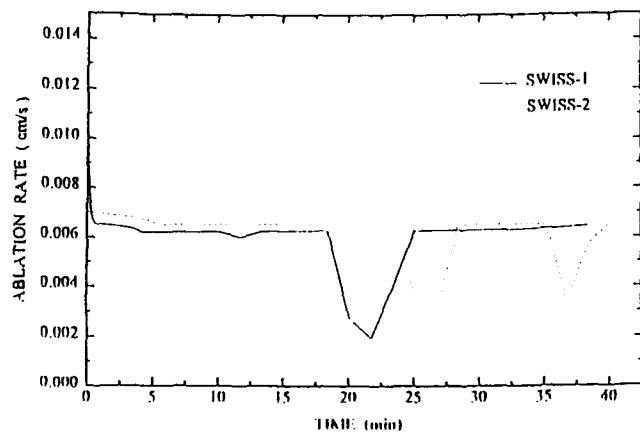


그림 3 SWISS 실험에 대한 계산된 콘크리트 침식율

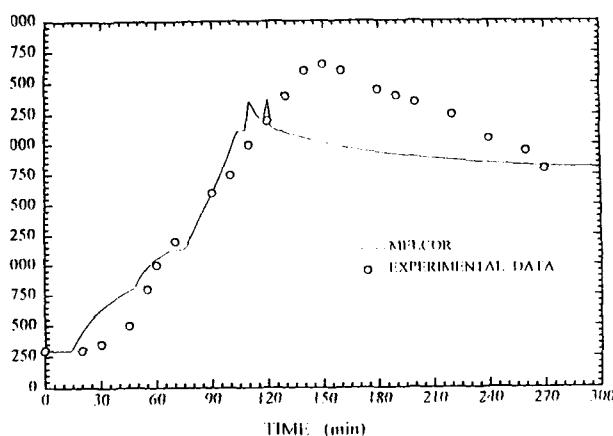


그림 4 SURC-1 실험에 대한 노심용융물 온도 변화

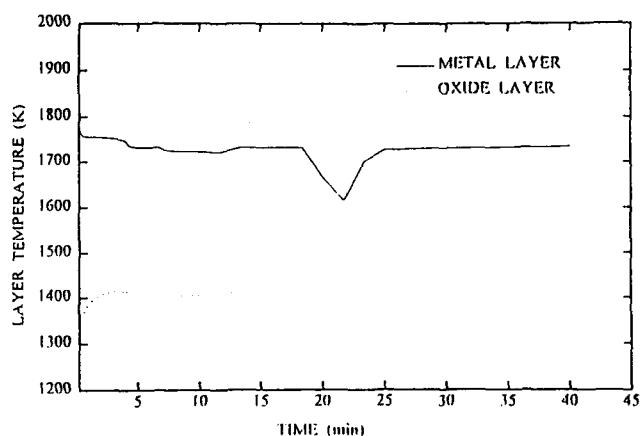


그림 5 SWISS-1 실험에 대한 계산된 노심용융물 층 온도변화

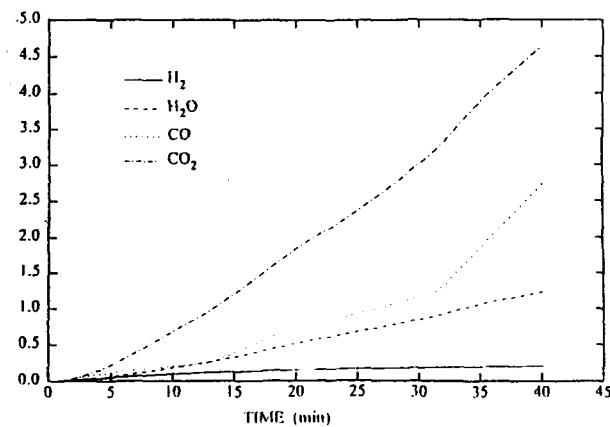


그림 6 SWISS-1 실험에 대한 계산된 가스 생성량 - 561 - 그림 7 SWISS-1 실험에 대한 계산된 CO/CO₂의 비

