

2002 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

중대사고시 원자로공동 콘크리트 용융침식 분석모형에 따른  
격납건물 건전성 영향 분석

**Analysis of the MCCI Modelling Effect  
on the Containment Integrity during Severe Accident**

박재홍, 김한철, 서남덕, 이종인

한국원자력안전기술원  
대전광역시 유성구 구성동 19

조성원

한국방사선기술연구소  
대전광역시 유성구 구성동 19

**요 약**

원자로공동으로 방출된 노심용융물을 냉각시키는 것은 격납건물의 장기적 건전성을 유지하는데 필수적이다. 원자로공동 침수계통이 콘크리트 기반의 용융침식 억제와 격납건물의 건전성에 미치는 영향을 중대사고 종합분석 코드인 MELCOR 코드를 사용하여 신행경수로 (APR) 1400에 대해 평가하였다. 노심용융물에 의한 콘크리트 용융침식 예측모형들이 콘크리트의 용융침식과 격납건물의 과압방지에 미치는 영향을 분석하였다. 원자로공동 침수계통으로 노심용융물 상부를 냉각수로 덮어도 냉각이 반드시 보장되지는 않는 것으로 분석되었다. 또한 사고발생 후 약 3일만에 격납건물이 파손되는 것으로 예측되기 때문에 격납건물 수소제어계통, 여과배기계통 또는 수조배기장치, 살수계통 등을 적절히 사용하여 격납건물의 압력을 극한내압 미만으로 유지하는 방안을 중대사고 관리전략으로 연구할 필요가 있다.

**Abstract**

Coolability of ex-vessel corium is essential to maintain the long-term containment

integrity. The effect of reactor cavity flooding system (CFS) on the mitigation of concrete basemat melt-through and the containment integrity is evaluated for APR1400 using the integral system code MELCOR. Also, the effects of debris layering and mixing model are analyzed. It is evaluated that the overlying water pool by CFS will promote the potential for debris coolability but will not necessarily ensure it. It is suggested to study the severe accident strategy using the hydrogen control system, containment spray system, venting or pool scrubbing system to maintain the pressure below the ultimate pressure capacity because the containment is failed by overpressure in about 3 days following the severe accident.

## 1. 서론

중대사고시 장기적인 격납건물 성능에 큰 영향을 주는 원자로공동으로 방출된 노심용융물의 냉각가능성은 가장 다루기 힘든 미해결 현안이다. 노심용융물의 냉각은 격납건물 콘크리트 기반의 용융관통과 지속적인 격납건물의 과압파손을 방지하는데 필수적이며 따라서 격납건물로 부터의 방사능누출의 두려움이 없이 중대사고를 완화 및 종식시킬 수 있다. 중대사고 발생시 원자로용기에서 방출된 노심용융물은 짧은 기간 펼쳐지는 과정을 거친 후에 격납건물 원자로공동의 콘크리트 基盤 (basemat)을 침식한다. 기체생성을 동반한 콘크리트의 용융침식은 노심용융물 온도 보다 훨씬 낮은 온도에서 발생한다.

원자로공동으로 분출된 노심용융물을 확산 및 냉각시키기 위해 원자로공동의 바닥면적을  $80.445\text{m}^2$ 으로 설계하고 원자로공동을 침수시킬 수 있는 침수계통 (Cavity Flooding System: CFS)이 신형경수로 (Advanced Power Reactor: APR) 1400 설계에 반영되었다. 원자로공동의 바닥면적과 침수계통은 노심용융물을 확산시키고 노심용융물 상부를 냉각수로 덮음으로써 노심용융물의 냉각을 촉진시킬 수는 있어도 냉각이 반드시 보장되지는 않는다 (NUREG-1512, 1998)는 의견이 있다. 원자로공동 침수계통이 콘크리트 기반의 용융침식 억제와 격납건물의 장기적 건전성에 미치는 영향을 미국 NRC가 개발한 중대사고 종합분석 코드인 MELCOR 코드 (NUREG/CR- 6119, 2000)를 사용하여 평가하였다.

## 2. MELCOR 코드의 콘크리트 용융침식 예측모형

MELCOR 코드의 CAV package는 내장된 CORCON-Mod3 코드 (NUREG/CR-5843, 1993)를 사용하여 원자로공동에서 노심용융물에 의한 콘크리트 침식을 분석한다. 노심용융물에 의한 열전달, 콘크리트 침식, 침식에 의한 원자로공동 형태변경, 노심용융물 및 기체의 화학적 특성에 대한 예측모형이 포함되어 있다. MELCOR코드는 노심용융물이 원자로공동으로 방출되었을 때 원자로공동의 형태에 따른 최대면적으로 노심용융물이 순간적으로 펼쳐진다고 가정하기 때문에 원자로공동의 펼쳐짐 계산은 수행하지 않는다. 노심용융물에 의한 콘크리트 침식은 주로 열에 의한 것이며 준정적 (準靜的) 과정으로 간주할

수 있다.

노심파편물 상부의 냉각수가 노심파편층과 접촉하여 노심파편물 상부의 고체층을 파열시켜 냉각가능한 노심파편물층을 형성할 가능성이 있기 때문에 MAAP 코드 (Henry et al., 1994)에서는 노심파편물 상부에 냉각수가 있을 경우 노심파편물 상부 고체층의 파열과 노심파편물 급냉이 발생한다고 가정한다. 그러나 MELCOR 1.8.5 코드에서는 고체층의 파열과 노심파편물 급냉을 포함하지 않는다. 노심파편물 상부표면에 단단하게 굳은 고체층 (crust)이 형성되면 파편물 상부표면으로 부터의 열손실이 사실상 발생치 않게 되어 콘크리트 기반 침식과정은 수십일 이상 지속될 수 있다. 이러한 극한상황에서의 침식율은 노심용융물의 붕괴열 생성율과 원자로공동 콘크리트의 용융엔탈피에 의해 지배되며, 콘크리트 기반이 용융관통될 수 있다. 이와 동시에 콘크리트 침식과정에서 발생한 기체는 격납건물을 계속 가압하여 격납건물 파손이 예상된다.

MELCOR 코드 (NUREG/CR-6119, 2000)는 노심용융물 내의 각종 산화물들은 서로 혼합되며 금속성분들도 서로 혼합되나 산화물과 금속은 서로 혼합되지 않는 것으로 가정한다. 각 상(相)의 밀도가 다르다면 노심용융물들은 중력에 의해 산화파편물 상과 금속파편물 상으로 분리된다. 그러나 하부의 산화파편물층에서 생성된 기체기포들이 상부의 금속파편물층으로 통과할 때 기포들의 교란효과에 의해 부분적으로 또는 완전히 이러한 성층화 (成層化)가 깨어질 수 있다. 각 상의 밀도차이가 충분히 작고 기체기포가 충분히 크다면 하부층의 기체기포들이 반출되어 상부층과의 경계면을 통과하여 상부층과 혼합될 수 있다. MELCOR 1.8.5 코드의 CORCON-Mod3 모델은 밀도가 증가하는 순서에 따라 ① LOX (Light Oxide: 금속상 보다 가벼운 순수산화물), ② LMX (Light Mixture: 금속상 보다 가벼운 혼합물 상), ③ MET (Metal: 순수 금속), ④ HMX (Heavy Mixture: 금속상 보다 무거운 혼합물 상), ⑤ HOX (Heavy Oxide: 금속상 보다 무거운 순수산화물)의 5개 노심용융물층을 가정하며 표 1과 같이 15개의 노심용융물 형태가 원자로공동에 형성될 수 있다.

표 1 원자로공동에서의 노심용융물 형태

형태	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	성층화		혼합 (2성분)	성층화							성층화		혼합 (2성분)	혼합 (1성분)	
LOX				x	x	x					x				x
LMX							x	x	x	x		x	x		
MET	x			x			x				x	x		x	
HMX		x	x		x	x			x	x					
HOX	x	x		x	x		x	x	x						

(x는 층이 형성된 것을 뜻함)

MELCOR 입력에서는 (1) 완전 혼합, (2) 완전 성층화 및 (3) 반출 및 분리에 의한 기계적 혼합모형의 3개 선택사항 중에서 1개를 선택하여 분석할 수 있다. 완전혼합 예측모형은 노심용융물이 언제나 1개의 층을 형성한다고 생각하는 가장 단순한 예측모형으로서 금속과 산화물이 모두 존재할 경우 노심용융물층은 각 상의 상대밀도들에 따라 HMX 또는 LMX (표 1의 형태 3 또는 13) 층이 된다. 완전성층화 예측모형은 금속과 산화물의 상이한 2상 혼합물의 생성을 고려치 않는다. 이 예측모형을 선택할 경우 2개의 산화물층이 금속층에 의해 LOX, MET, HOX 층으로 분리될 수 있다. 초기의 산화물 상에 UO<sub>2</sub>가 충분히 풍부하여 초기의 금속 상 보다 더욱 밀도가 클 경우 금속층 (MET) 아래에 산화물층 (HOX)을 형성한다고 가정한다. 금속 보다 가벼운 콘크리트 산화물과 철 산화물이 풍부한 산화물층 (LOX)은 금속층 상부에 축적된다. 따라서 노심용융물의 구조는 최상부에 가장 가벼운 LOX 층, 중간층은 MET, 최하부는 가장 무거운 HOX 층이다 (형태 4). 가장 일반적인 선택은 Green 등 (1988, 1990, 1991)에 의해 개발된 반출 및 분리에 의한 기계적 예측모형을 택하는 것이다. 이 기계적 예측모형은 가벼운 물질이 밀도차이에 의해 상부층으로 반출 (entrainment)되는 현상과 무거운 물질이 하부로 가라앉아 가벼운 물질과 분리되는 성층화 현상을 기계적으로 예측하는 모형이다. 이 기계적 예측모형을 선택할 경우 노심용융물 상들의 상대적 밀도들의 미미한 변화에 의해 노심용융물 형태가 층 뒤집기 (layer flip)라 불리는 즉각적인 변화가 발생되지 않는다. 그 대신 각 상들의 밀도가 같아질 때 마다 (혼합을 일으키는 기체유동이 없는 조건에서) 각 상들은 점점 더 강하게 혼합된다.

### 3. 격납건물의 장기적 건전성에 미치는 영향 분석

과학기술부는 “원자로 격납시설은 원자로 노심이 손상되더라도 사고결과(영향)를 완화할 수 있도록 구조적 건전성과 핵분열 생성물의 방출에 대한 방벽의 기능을 유지하여야 한다”는 정책을 발표하였다 (원자력발전소 중대사고 정책, 2001. 8). 격납건물이 구조적 건전성과 핵분열 생성물의 방출에 대한 방벽의 기능을 유지하는지를 아래와 같이 평가한다.

- (1) 노심손상 발생 이후부터 24시간 동안 발생가능한 중대사고 조건에서 원자로 격납시설은 핵분열생성물의 누출을 억제할 수 있는 기밀방벽의 역할을 유지하기 위해 강제 격납건물의 경우 ASME code의 C급운전 한계값 또는 콘크리트 격납건물의 경우 계수하중범주 한계값을 초과하지 않아야 한다.
- (2) 노심손상사고 발생 24시간 이후부터 제어할 수 없는 핵분열생성물 누출에 대처할 수 있는 방벽기능이 유지되는지를 확인하기 위해 격납건물의 극한내압능력 분석결과를 사용하여 중대사고 환경조건에서 격납건물의 파열이나 붕괴가 발생되지 않는지를 평가한다.

신형경수로 1400의 격납건물 계수하중범주 (Factored Load Category: FLC) 한계값은

115 psig (0.894 MPa abs.)이고 격납건물의 완전파손확률이 50%인 극한내압능력 (Ultimate Pressure Capacity: UPC)은 198.2 psig (1.468 MPa abs.)이다. 원자로공동 침수계통 (CFS)과 노심용융물에 의한 콘크리트 침식 예측모형이 격납건물의 건전성에 미치는 영향을 MELCOR 코드를 사용하여 분석하였다. 대형냉각재상실사고 (LBLOCA) 발생시 격납건물 살수계통이 작동되지 않고 원자로공동 침수계통이 작동되는 상황에서 최대압력이 계수하중범주 한계값을 초과하는 시각은 약 42시간 (약 1.8일)이고, 극한내압을 초과하여 격납건물이 파손되는 시각은 사고발생 후 약 71시간 (약 3일)으로 분석되었다. 완전 혼합, 완전 성층화 및 기계적 혼합 예측모형 어느 것을 선택하든지 노심손상 발생 후 24 시간 동안 격납건물의 최대압력이 계수하중범주 한계값 미만이므로 격납건물은 핵분열생성물의 누출을 억제할 수 있는 기밀방벽의 역할을 유지할 수 있는 것으로 분석되었다. 그러나 완전 성층화나 기계적 혼합 예측모형에 의해 사고발생 후 약 3일만에 격납건물이 파손되는 것으로 예측되기 때문에 이때 부터 격납건물은 핵분열생성물 누출에 대처할 수 있는 방벽기능을 유지할 수 없는 것으로 예측되었다 (표2, 그림 1 및 2 참조). 격납건물 여과배기계통 또는 수조배기장치 등을 사용하여 격납건물의 압력을 극한내압 미만으로 유지하는 방안을 중대사고 관리전략으로 연구할 필요가 있다.

표 2 LBLOCA 및 CFS 작동시 격납건물 압력과 콘크리트 기반 침식깊이

	FLC (0.894MPa) 도달	UPC (1.468MPa) 도달	Liner (0.9144m) 관통	Basemat (4.2672m) 관통
기계적 혼합, CFS 작동	43.25 시간	71.33 시간	9.74 시간	178.21 시간 (7.425일)
완전혼합, CFS 작동	67.32 시간	123.69 시간	17.02 시간	250.46 시간 (10.44일)
완전 성층화, CFS 작동	41.96 시간	71.61 시간	11.51 시간	194.21 시간 (8.09일)
기계적 혼합, CFS 고장	none (<800,000 초)	none (<800,000 초)	9.57 시간	73.14 시간 (3.05일)
완전혼합, CFS 고장	none (<800,000 초)	none (<800,000 초)	16.45 시간	none (<800,000 초)
완전 성층화, CFS 고장	none (<1,000,000 초)	none (<1,000,000 초)	10.08 시간	73.48 시간 (= 3.06일)

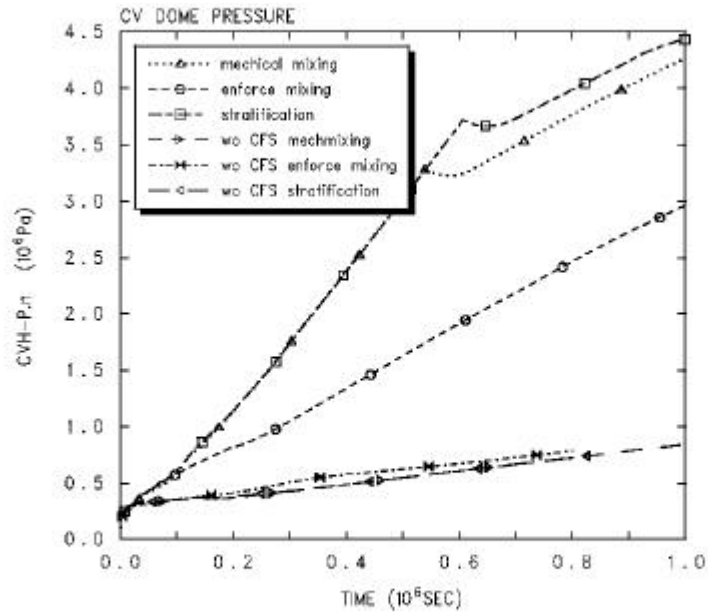


그림 1 콘크리트 용융침식 모델 및 CFS에 따른 격납건물 압력

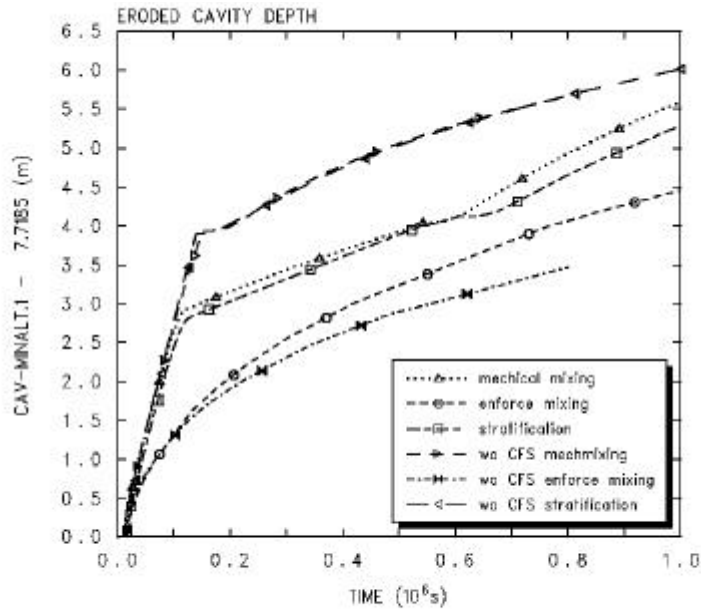


그림 2 콘크리트 용융침식 모델 및 CFS에 따른 원자로공동 콘크리트 침식깊이

원자로공동 침수계통이 작동되지 않는 경우 격납건물의 압력은 계수하중범주 미만으로 격납건물은 건전성을 유지하는 것으로 3개 예측모형에 의해 분석되었다. 그러나 두께 0.914m의 콘크리트와 두께 8mm의 강재라이너가 용융관통되는 시간은 원자로공동 침수

계통이 작동되는 경우 9.7시간, 작동되지 않는 경우 9.6시간으로 기계적 혼합 예측모형에 의해 예측되었다. 원자로공동 침수계통이 작동되어도 깊이 0.922m 까지의 강재라이너가 용융관통되는 이유는 노심파편물 상부가 냉각수로 덮혀 있을 때 노심파편물 상부표면에 단단하게 굳은 고체층이 형성되면 MELCOR 1.8.5 코드는 고체층의 파열과 노심파편물 급냉을 고려하지 않기 때문이다. 따라서 노심파편물 상부표면으로부터 냉각수로의 열손실이 작아 원자로공동에 냉각수가 공급되어도 콘크리트 기반의 침식과정이 지속되는 것으로 판단된다. 두께 4.27m의 콘크리트 기반이 용융관통되는 시간은 원자로공동 침수계통이 작동되는 경우 기계적 혼합모형에 의해 약 7.4일, 작동되지 않는 경우 완전 성층화 모형에 의해 약 3.1일로 예측되어 침수계통이 콘크리트 침식억제에 효과가 있음을 보였다.

원자로공동 침수계통에 의해 노심용융물 상부를 냉각수로 덮음으로써 노심용융물의 냉각을 촉진시킬 수는 있어도 냉각이 반드시 보장되지는 않는 것으로 분석되었다. Alsmeyer 등 (1998)은 독일 FzK의 COMET 실험설비에서 용융물의 하부로 냉각수를 주입시켜 용융물의 냉각가능성을 연구하였다. 용융물의 하부로 주입된 냉각수가 용융물을 상대적으로 짧은 시간 내에 냉각시킬 수 있는 충분한 공극 (porosity)을 용융물 내부에 형성시키기 때문에 이 새로운 방법은 용융물 냉각에 유효하게 작용하는 것으로 평가되었다. 이러한 냉각수의 하부주입 개념은 EPR (European Pressurized Reactor)의 core catcher 설계에 반영되었다 (Weissshaepfl, 1999). 현재 원자로공동에서의 노심용융물의 냉각 가능성은 중대사고현상의 현안으로서 OECD/NEA 주관으로 국제협력연구가 수행중이다. 관련 연구결과와 기술현황을 참고하여 노심용융물의 냉각능력 향상방안을 추후 원자로공동 설계나 중대사고 관리전략에 반영할 필요가 있다.

노심용융물에 의한 콘크리트 용융침식 예측모형들 (완전 혼합, 완전 성층화 및 기계적 혼합모형)과 원자로공동 침수계통 작동 여부에 따라 발생하는 기체의 발생량을 표 3과 그림 3 ~ 8에 보였다. 가연성 기체의 경우, 수소의 발생량은 콘크리트 용융침식 예측모형과 침수계통 작동 여부에 큰 영향이 없는 것으로 예측되었다. 그러나 CO의 발생량은 침수계통 작동 여부에 큰 영향이 없으나 콘크리트 용융침식 예측모형에 영향을 받는 것으로 나타났다.

표 3 노심용융물-콘크리트 반응에 의한 가연성기체 발생량

	H <sub>2</sub> 발생량		CO 발생량	
	약 1일 (86,000초)	약 9일 (798,000초)	약 1일 (86,000초)	약 9일 (798,000초)
기계적 혼합, CFS 작동	1,624.61 kg	2,412.98 kg	8,865.88 kg	13,515.8 kg
완전혼합, CFS 작동	1,382.95 kg	2,350.88 kg	7,314.16 kg	12,579.5 kg
완전 성층화, CFS 작동	1,574.26 kg	2,484.19 kg	8,395.94 kg	13,867.4 kg
기계적 혼합, CFS 고장	1,693.43 kg	2,398.8 kg	9,061.5 kg	13,399.7 kg
완전혼합, CFS 고장	1,559.13 kg	2,357.53 kg	8,260.61 kg	12,591.0 kg
완전 성층화, CFS 고장	1,730.01 kg	2,405.13 kg	9,241.71 kg	13,359.3 kg

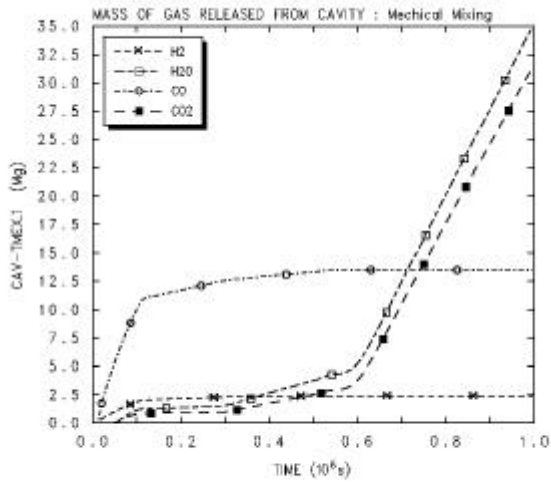


그림 3 기계적 혼합 및 CFS 작동시 기체발생량

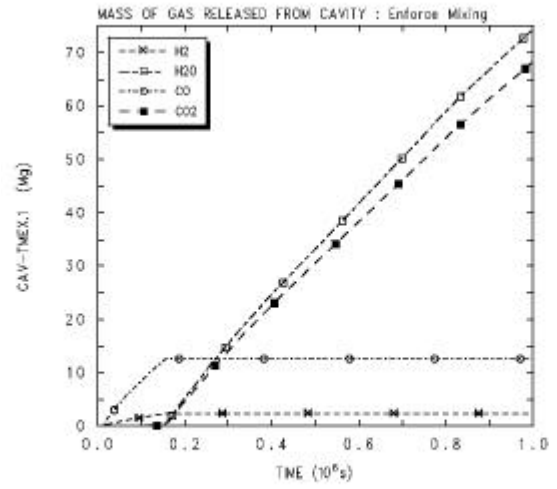


그림 4 완전혼합 및 CFS 작동시 기체발생량

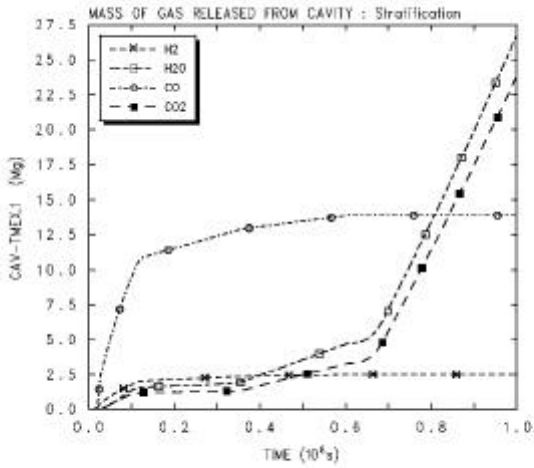


그림 5 완전 성층화 및 CFS 작동시 기체발생량

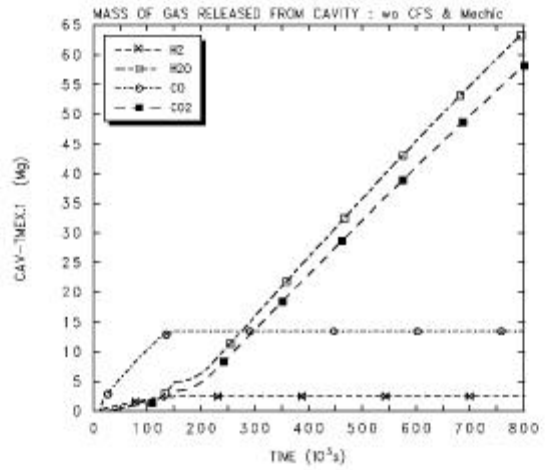


그림 6 기계적 혼합 및 CFS 고장시 기체발생량



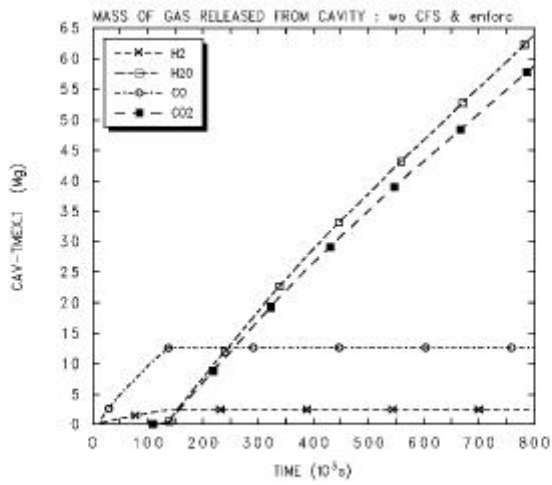


그림 7 완전혼합 및 CFS 고장시 기체발생량

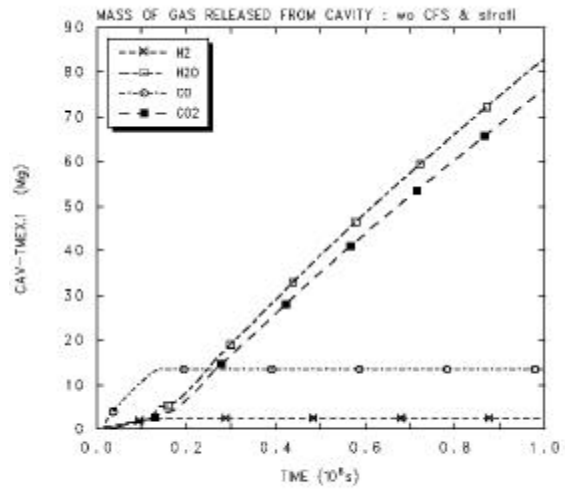


그림 8 완전 성층화 및 CFS 고장시 기체발생량

#### 4. 결론

이 연구에서는 원자로공동으로 분출된 노심용융물을 냉각시키기 위한 원자로공동 침수계통이 콘크리트 기반의 용융침식 억제와 격납건물의 장기적 건전성에 미치는 영향을 미국 NRC가 개발한 중대사고 종합분석 코드인 MELCOR 코드를 사용하여 평가하였으며, 노심용융물에 의한 콘크리트 용융침식 예측모형들 (완전 혼합, 완전 성층화 및 기계적 혼합모형)과 원자로공동 침수계통 작동 여부에 따라 원자로공동의 콘크리트 기반 용융관통 시각과 격납건물의 과압방지에 미치는 영향을 분석하였다.

대형냉각재상실사고 발생시 격납건물 살수계통이 작동되지 않고 원자로공동 침수계통이 작동되는 상황에서 완전 성층화이나 기계적 혼합 예측모형을 적용할 경우 최대압력이 극한내압을 초과하여 격납건물이 파손되는 시각은 사고발생 후 약 71시간 (약 3일)으로 분석되었다. 따라서 이때 부터 격납건물은 핵분열생성물 누출에 대처할 수 있는 방벽기능을 유지할 수 없기 때문에 격납건물 수소제어계통, 여과배기계통 또는 수조배기장치, 살수계통 등을 적절히 사용하여 격납건물의 압력을 극한내압 미만으로 유지하는 방안을 중대사고 관리전략으로 연구할 필요가 있다.

대형냉각재상실사고 발생시 두께 4.27m의 콘크리트 기반이 용융관통되는 시간은 원자로공동 침수계통이 작동되는 경우 기계적 혼합모형에 의해 약 7.4일, 작동되지 않는 경우 완전 성층화 모형에 의해 약 3.1일로 예측되어 침수계통이 콘크리트 침식억제에 효과가 있음을 보였다. 원자로공동 침수계통에 의해 노심용융물 상부를 냉각수로 덮음으로써 노심용융물의 냉각을 촉진시킬 수는 있어도 냉각이 반드시 보장되지는 않는 것으로 분석되었다. 현재 원자로공동에서의 노심용융물의 냉각 가능성은 중대사고현상의 현안으로서 OECD/NEA 주관으로 국제협력연구가 수행중이다. 관련 연구결과와 기술현황을 참고하여

노심용융물의 냉각능력 향상방안을 추후 원자로공동 설계나 중대사고 관리전략에 반영할 필요가 있다.

## 감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 일부로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 과학기술부, 2001, 원자력발전소 중대사고 정책, 과학기술부 원안71231- 751, 8월 30일
- Alsmeyer, H., Spencer, B. and Tromm, W., 1998, The COMET-concept for cooling of ex-vessel corium melts, Proc. of ICONE-6, May 10-15, San Diego.
- Froment, K., Seiler, J.M., 1999, On the importance of a strong coupling between physicochemistry and thermalhydraulics for modeling late phases of severe accidents in LWRs. Proc. NURETH-9.
- Greene G. A., Chen J. C., and Conklin M. T., 1988, Onset of Entrainment Between Immiscible Liquid Layers Due to Rising Gas Bubbles, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 31, p. 1309.
- Greene G. A., Chen J. C., and Conklin M. T., 1990, Bubble-Induced Entrainment Between Stratified Liquid Layers, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 34, p.149.
- Greene G. A., 1991, Heat, Mass, and Momentum Transfer in a Multi-Fluid Bubbling Pool, Advances in Heat Transfer, Vol. 21, pp. 270-345.
- Henry R. E., Pail C. Y., Plys M. G., 1994, MAAP4 - Modular Accident Analysis Program for LWR Power Plants, Fauske & Associates, Inc., May.
- NUREG-1512, 1998, Final Safety Evaluation Report Related to Certification of the AP600 Standard Design Docket No. 52-003, US NRC, Sep.
- NUREG/CR-5843, 1993, CORCON-MOD3: An Integrated Computer Model for Analysis of Molten Core-Concrete Interactions, SAND92-0167, SNL, Oct.
- NUREG/CR-6119, 2000, MELCOR Computer Code Manuals: Version 1.8.5, SAND2000-2417/1, SNL, Oct.
- Weisshaeupl, 1999, Severe accident mitigation concept of the EPR, Nuclear Engineering and Design, 187 (1999), 35-45.