

2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

노심용융물-콘크리트 반응에 의한 가연성기체 발생시
중대사고관리를 위한 격납건물 살수영향 및 중지시점 분석

**Analysis of the Containment Spray Effect for Severe Accident Management
during Molten Core-Concrete Interaction**

박재홍, 서남덕, 김한철, 김태형, 이종인

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

조성원

한국방사선기술연구소
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

중대사고시 노심용융물-콘크리트 반응 (MCCI)이 발생하는 경우 가연성기체의 발생이 크게 증가하기 때문에 격납건물 살수를 계속하는 것은 살수에 의한 증기응축으로 격납건물의 수소농도가 증가하여 수소연소에 의해 격납건물의 건전성을 위협할 수 있다. 100% 물-증기반응에 의해 발생하는 수소가 단열등체적 및 완전연소 (AICC) 가정에 의한 수소연소에 의한 하중에도 견딜 수 있고 그리고 연소폭발천이가 발생치 않도록 격납건물이 설계되었을 경우, MCCI 반응이 일어나는 초기에 격납건물 살수에 의해 수소연소를 발생시키는 경우 격납건물은 건전성을 유지할 수 있으나 MCCI 후기에서는 가연성기체의 발생이 크게 증가하여 격납건물 살수는 격납건물의 건전성을 손상시킬 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 현상을 실험경수로 1400에 대해 MELCOR 전산코드로 분석한 결과 중대사고관리를 위해 MCCI 초기에 격납건물 살수에 의해 수소연소를 발생시키는 경우 산소를 고갈시켜 격납건물 압력감소, 증기불활성화 및 산소결핍에 의해 격납건물 손상압력 도달시간을 크게 증가시킬 수 있을 것으로 예측되었다.

Abstract

Massive combustible gases generated by MCCI during a severe accident in NPP causes a problem of when we should spray the containment. The increase of hydrogen concentration due to the steam condensation caused by spraying might lead to a hydrogen burning and thus intimidate the containment integrity. In case the containment is designed to be robust enough to sustain the AICC (Adiabatic Isochoric Complete Combustion) load and to prevent DDT (Deflagration to Detonation Transition), it might be effective to spray and thus burn the hydrogen at early phase of MCCI to keep the containment integrity. Spraying the containment at late phase of MCCI might cause the containment to fail because of the increased combustible gases generation. MELCOR analysis for APR1400 shows that spraying the containment at early phase can delay the time to reach containment failure pressure by steam inerting and oxygen depletion. This kind of analysis helps us to better establish a spray actuation time for an accident management procedure against a postulated 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 계속적인 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 기초콘크리트 (basemat)를 침식시키며 노심용융물-콘크리트 반응 (Molten Core-Concrete Interaction: MCCI)에 의해 다량의 가연성 기체를 발생시킨다.

중대사고시 초기에 격납건물 살수가 가능한 경우 또는 전원이 상실되었다가 MCCI가 상당히 진행된 사고후기에 복구되는 경우 격납건물 살수는 증기를 응축시켜 수소농도를 급증시켜 연소를 가능케하기 때문에 중대사고관리 관점에서 격납건물 살수가 격납건물의 건전성에 미치는 영향이 크다. 100% 물-증기반응에 의해 발생하는 수소가 단열등체적 및 완전연소 (Adiabatic Isochoric Complete Combustion: AICC) 가정에 의한 수소연소시의 하중에도 견딜 수 있고 그리고 연소폭발천이가 발생치 않도록 격납건물이 설계되었을 경우, MCCI 반응이 일어나는 초기에 격납건물 살수에 의해 수소연소를 발생시키는 경우 격납건물은 건전성을 유지할 수 있으나 MCCI 후기에서는 가연성기체의 발생이 크게 증

가하기 하여 격납건물 살수는 격납건물의 건전성을 손상시킬 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 현상을 신형경수로 1400에 대해 미국 NRC가 개발한 중대사고 종합분석 코드인 MELCOR 1.8.5 코드 (NUREG/CR-6119, 2000)를 사용하여 평가하였다.

2. MELCOR 코드를 사용한 신형경수로 1400의 MCCI에 대한 격납건물 거동분석 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.

노심과편물 상부의 냉각수가 노심과편층과 접촉하여 노심과편물 상부의 고체층을 파열시켜 냉각가능한 노심과편물층을 형성할 가능성이 있기 때문에 MAAP 코드 (Henry et al., 1994)에서는 노심과편물 상부에 냉각수가 있을 경우 노심과편물 상부 고체층의 파열과 노심과편물 급냉이 발생한다고 가정한다. 그러나 MELCOR 1.8.5 코드에서는 고체층의 파열과 노심과편물 급냉을 포함하지 않는다. 노심과편물 상부표면에 단단하게 굳은 고체층 (crust)이 형성되면 과편물 상부표면으로 부터의 열손실이 사실상 발생치 않게 되어 콘크리트 기반 침식과정은 수십 일 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.

그림 1, 2, 및 3은 신형경수로 1400의 노외에서의 MCCI 및 노심 내부의 가연성 기체 생성과 살수효과를 분석하기 위한 MELCOR 1.8.5 코드를 사용한 예측모형이다.

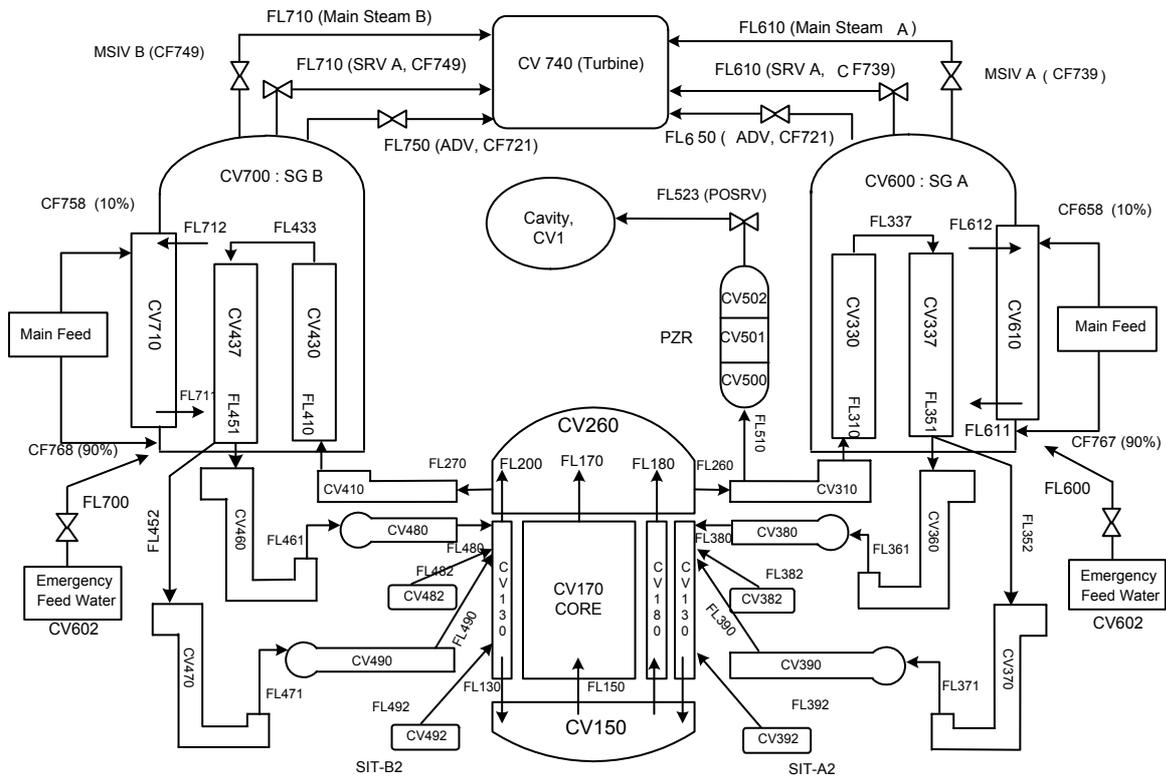


그림 1 신형경수로 1400의 RCS 거동분석을 위한 MELCOR 분석모형

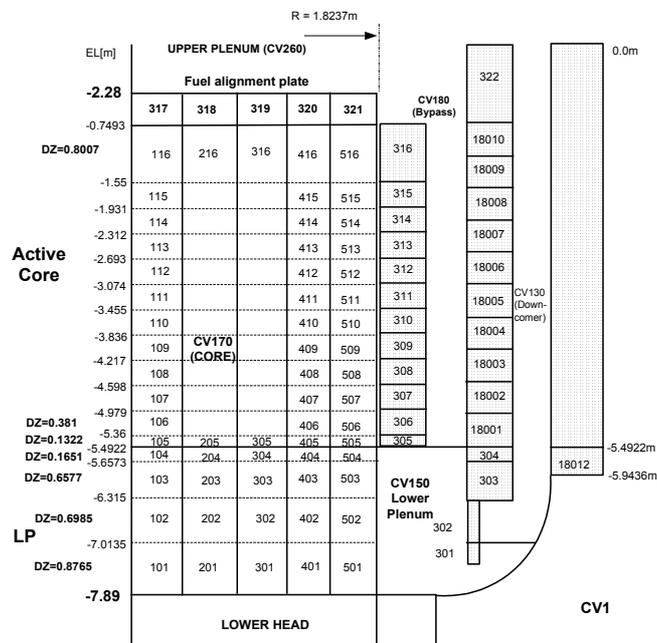


그림 2 신형경수로 1400의 노심분석을 위한 MELCOR 분석모형

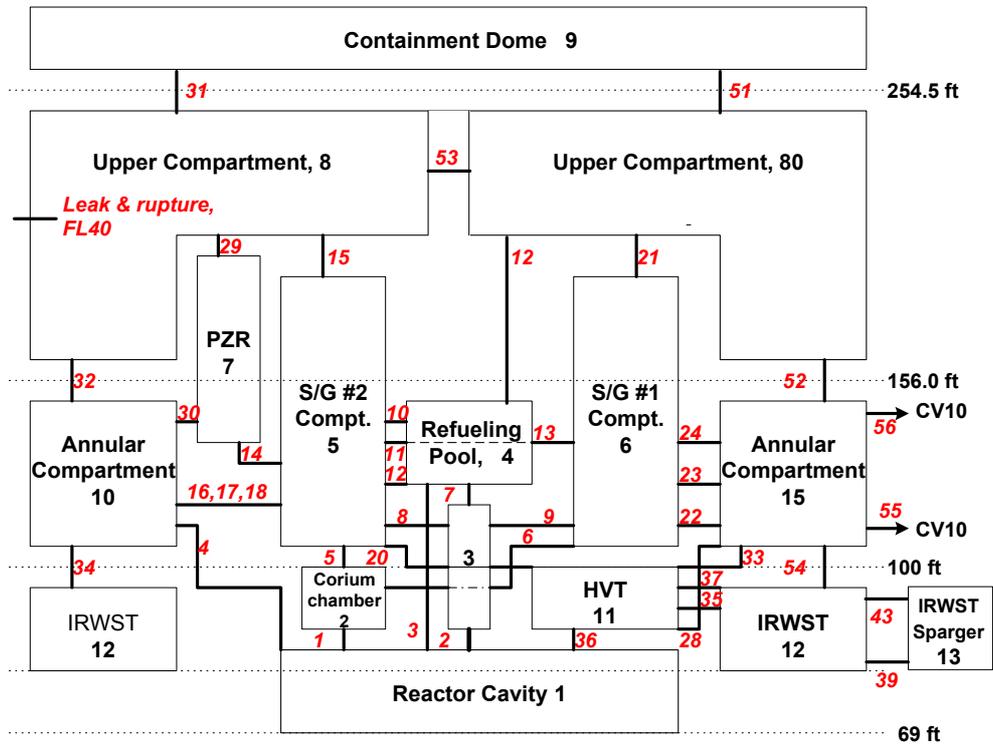


그림 3 신형경수로 1400의 격납건물 거동분석을 위한 MELCOR 분석모형

3. 격납건물의 장기적 건전성에 미치는 영향 분석

신형경수로 1400의 격납건물 설계와 PSA 분석에 사용된 주요 하중 값들은 다음과 같다. 중대사고시 100% 물-증기반응에 의해 발생하는 수소가 단일등체적 및 완전연소 (AICC) 가정에 의해 수소가 연소될 때의 하중은 117.5 psia (0.810 MPa)이며, 격납건물 계수하중범주 (Factored Load Category: FLC) 한계값은 129.7 psia (0.894 MPa abs.)이다. 격납건물의 완전파손확률이 50%인 극한내압능력 (Ultimate Pressure Capacity) 또는 완전손상 압력 및 파손면적은 각각 212.9 psia (1.468 MPa)와 약 1ft² (0.0929m²)이다. 또한 부분손상 압력 및 파손면적은 각각 183.7 psia (1.267 MPa)와 약 0.1ft² (0.00929m²)이다.

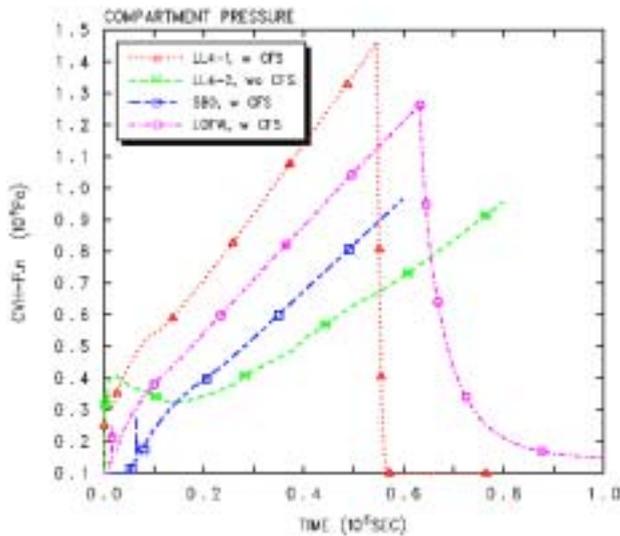
노심용융물에 의한 콘크리트 침식 예측모형이 격납건물의 건전성에 미치는 영향을 MELCOR 코드를 사용하여 분석하였다. 대형냉각재상실사고 (LBLOCA: 저온관 파단면적 0.5ft², 0.0465m²)와 전원상실사고 (SBO) 및 2차측 급수상실사고 (LOFW)에 대해 원자로 공동 침수계통 (Cavity Flooding System: CFS), 수소제어를 위한 피동촉매형수소재결합기 (Passive Autocatalytic Recombiner: PAR) 및 수소점화기 (Igniter) 작동여부 (/ = 작동)에 따른 분석을 다음과 같이 수행하여 격납건물 파손시점 및 가연성 기체 발생량을 예측하

고, 격납건물 살수계통 (Containment Spray System: CSS)의 작동여부에 따른 영향을 분석하였다.

표 1 MCCI거동시 가연성 기체 발생량 및 살수효과 분석

중대사고경위	비고
LL4 = LBLOCA x /SIT x SI x /CFS x /PAR x /Igniter	가연성 기체 발생량 예측
LL4 = LBLOCA x /SIT x SI x CFS x /PAR x /Igniter	
SBO23 = SBO x /Rx trip x SI x /CFS x /PAR x /Igniter	
LOFW17 = LOFW x /Rx trip x SI x /CFS x /PAR x /Igniter	
LL4 = LBLOCA x /SIT x SI x /CFS x /PAR x /Igniter x CSS	CSS 영향 분석

그림 4는 MCCI에 의해 격납건물이 가압되어 파손되는 시점을 보이고 있다.



격납건물 파손 압력 및 면적		LBLOCA
부분손상 (1.27 MPa)	0.1ft ²	456,643초 (5.28일)
완전손상 (1.47 MPa)	0.1ft ²	547,545초 (6.34일)

그림 4 MCCI에 의한 격납건물 손상시점

그림 5는 LBLOCA, SBO 및 LOFW 사고시 원자로공동 침수계통 (CFS) 작동 여부에 따라 MCCI 반응에 의해 가연성 기체의 발생량을 나타내며, 약 400,000초 (4.6일)에 수소 및 일산화탄소의 발생량은 약 5,000 kg 및 28,000 kg 정도임을 보이고 있다.

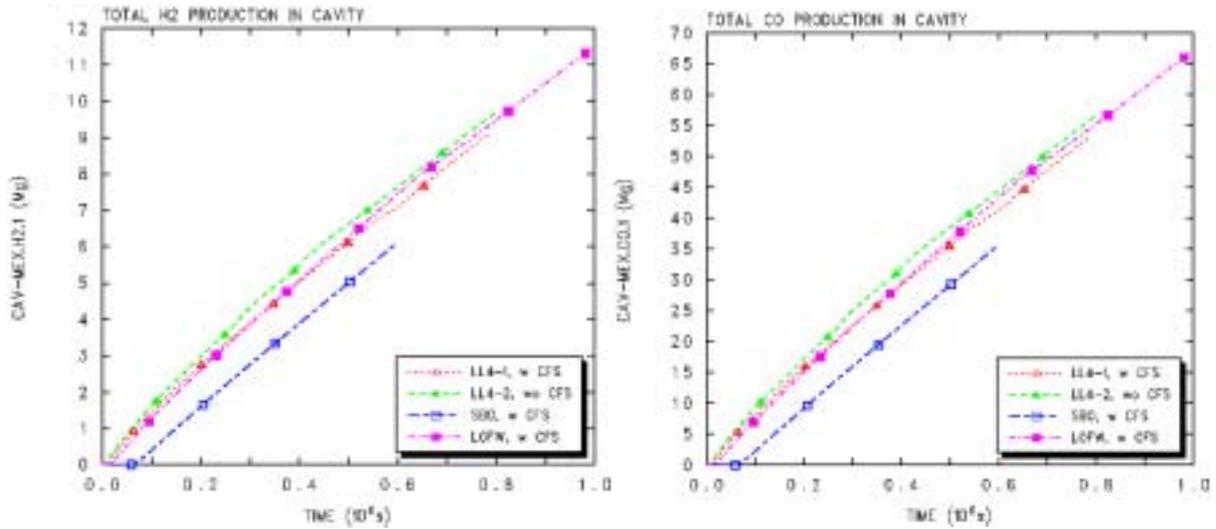


그림 5 LBLOCA, SBO 및 LOFW 사고시 MCCI 반응에 의한 가연성 기체의 발생량

중대사고시 초기에 격납건물 살수가 가능한 경우 또는 전원이 상실되었다가 MCCI가 상당히 진행된 사고후기에 복구되는 경우 격납건물 살수는 증기를 응축시켜 수소농도를 급증시켜 연소를 가능케하기 때문에 중대사고관리 관점에서 격납건물 살수가 격납건물의 건전성에 미치는 영향이 크다. 전원이 상실되었다가 전원이 조기 (사고 약 2시간 후) 및 후기 (사고 약 5일 후)에 복구되어 격납건물 살수시스템이 작동되는 경우에 대해 분석하였다. 그림 6은 격납건물 살수시스템을 사고 약 2시간 후에 작동시켰을 때 격납건물 내부의 압력과 수소, CO 및 산소의 농도를 보이고 있다. 사고 약 2시간 후에 살수시스템을 작동시킨 경우 MCCI가 거의 진행되지 않은 상태이기 때문에 가연성 기체의 생성량이 적고 격납건물 내부의 산소농도가 연소가 가능한 5% 이상이어서 원자로용기가 파손되는 시점까지 노내에서 생산된 적은 양의 수소가 방전 등에 의해 연소되어 격납건물 압력이 약 360 KPa (52.2 psia) 정도 상승하여 AICC 가정에 의한 수소연소하중 설계값 (0.810 MPa, 117.5 psia) 보다 훨씬 낮음을 보이고 있다. 이는 살수작동에 의해 연소된 수소의 질량이 AICC 가정에 의한 수소연소하중 계산에 사용된 수소의 질량 이하이기 때문이다. 또한 살수에 의한 격납건물 압력감소 및 산소결핍에 의해 격납건물 손상압력 도달시간을 크게 증가시킬 수 있을 것으로 예측되었다.

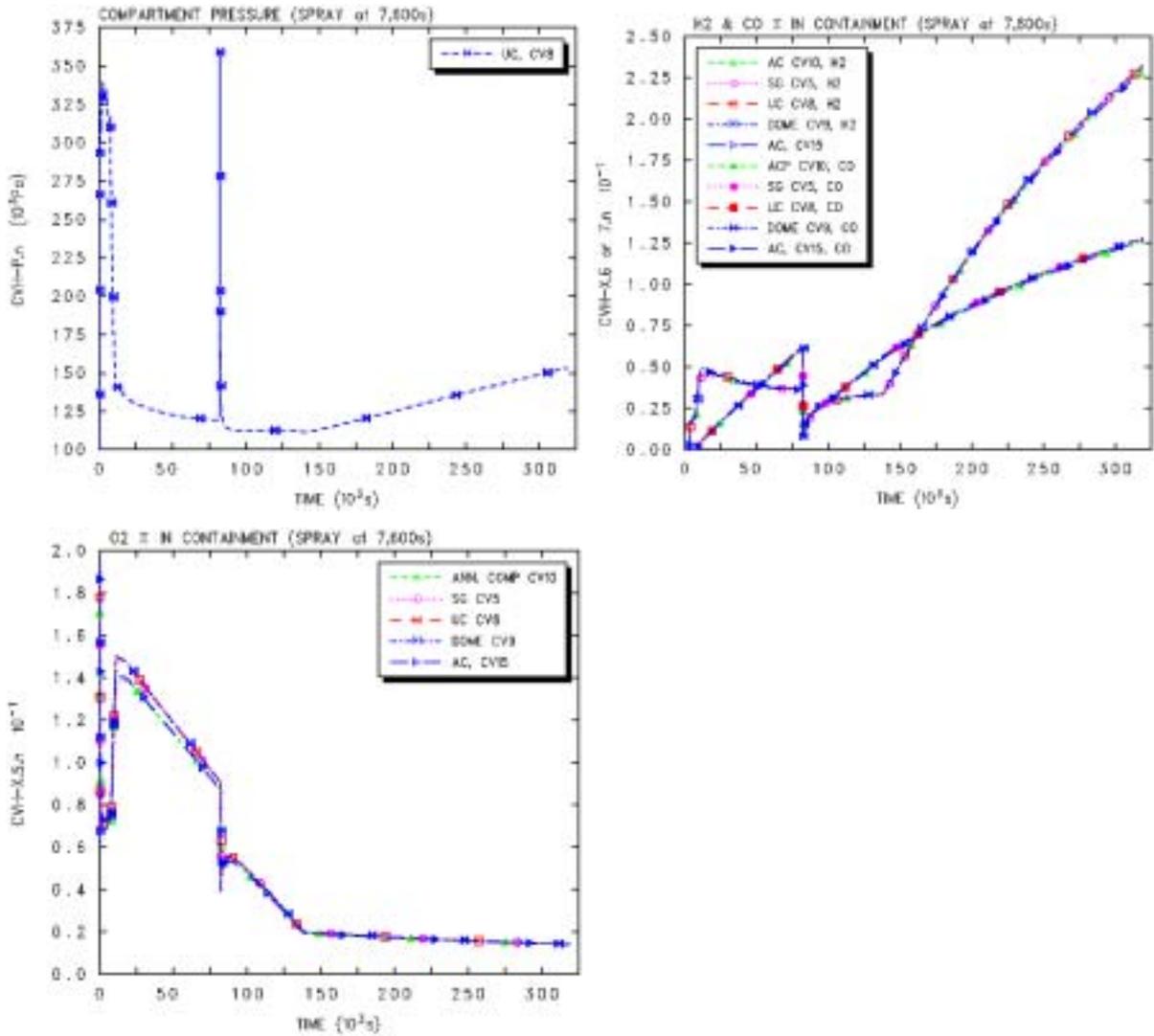


그림 6 MCCI 초기에 격납건물 살수계통 작동시 격납건물 내부의 압력, 가연성 기체 및 산소 농도

격납건물 살수계통을 사고 약 5일 후 (432,000초)에 작동시켰을 때 격납건물 내부의 압력과 수소, CO 및 산소의 농도를 보이고 있다. 사고 약 5일 후에 살수계통을 작동시킨 경우 격납건물 압력은 급격히 감소한다. 그러나 MCCI가 상당히 진행되어 가연성 기체의 생성량이 상당히 많아 (그림 5참조) 수소 및 CO의 농도가 각각 32% 및 16% 이상 급증하나 산소의 양이 4% 이하로 연소한계치 미만이기 때문에 연소가 발생하지는 않았으나 만약 격납건물 외부에서 산소가 유입될 경우 수소연소하중 설계에 사용된 100% 물-증기 반응에 의해 발생하는 수소 보다 상당히 많기 때문에 폭발에 의한 격납건물 파손 가능성이 있음을 보이고 있다 (그림 7 참조).

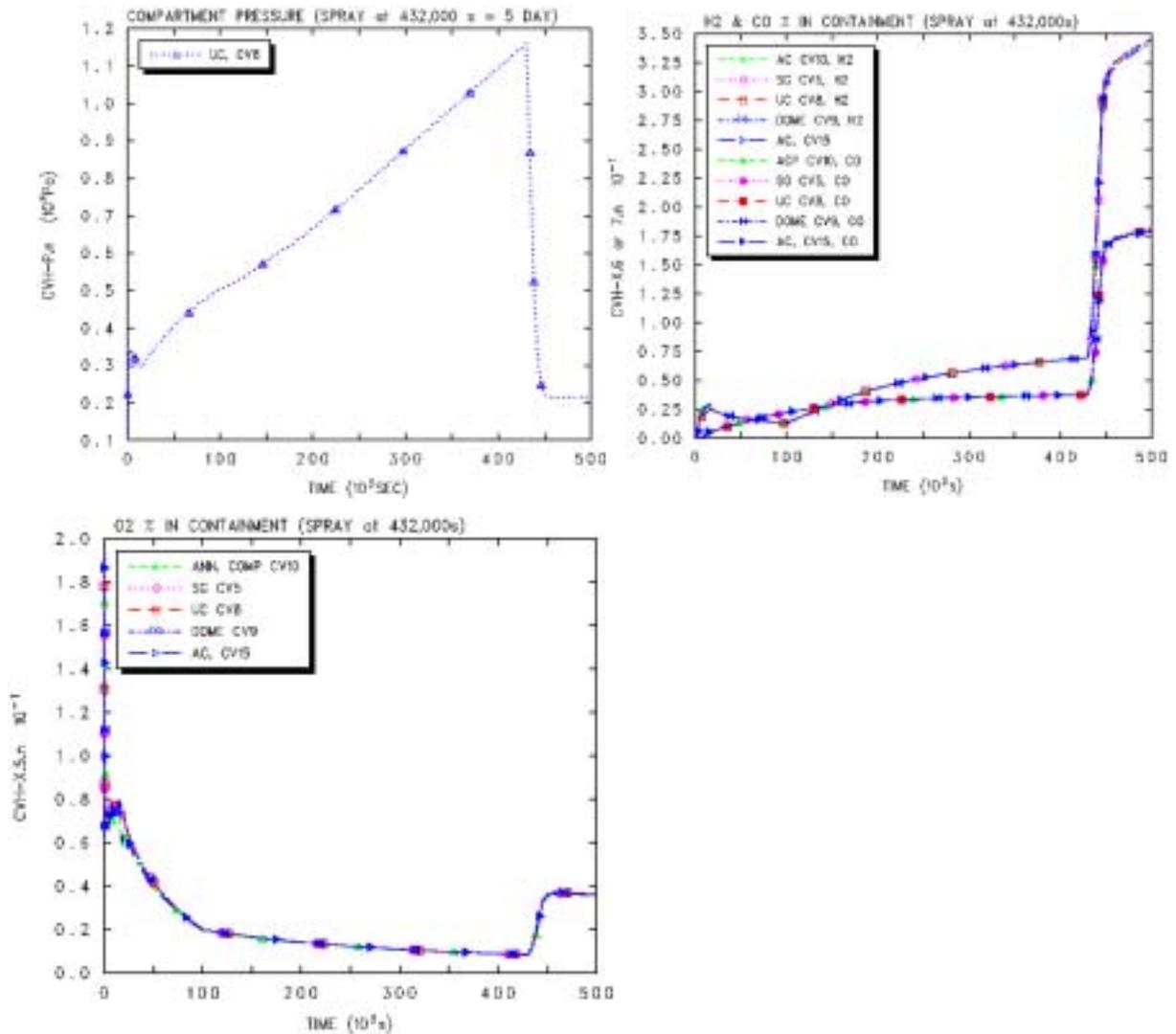


그림 7 MCCI 후기에 격납건물 살수계통 작동시 격납건물 내부의 압력, 가연성 기체 및 산소 농도

4. 결론

신형경수로 1400에서는 격납건물의 압력제어를 위해 격납건물 살수를 주요 중대사고 관리전략 중의 하나로 채택하고 있다. 그러나 중대사고시 노심용융물-콘크리트 반응(MCCI)이 발생하는 경우 가연성기체의 발생이 크게 증가하기 때문에 격납건물 살수를 계속하는 것은 살수에 의한 증기응축으로 격납건물의 수소농도가 증가하여 수소연소에 의해 격납건물의 건전성을 위협할 수 있다.

중대사고관리전략 평가를 위해 MCCI 초기에 격납건물 살수에 의해 수소연소를 발생시키는 경우와 MCCI 후기에 격납건물을 살수시키는 경우의 영향을 MELCOR 전산코드로 분석하였다. 100% 물-증기반응에 의해 발생하는 수소가 단열등체적 및 완전연소(AICC) 가정에 의한 수소연소시의 하중에도 견딜 수 있고 그리고 연소폭발천이가 발생치 않도록 격납건물이 설계되었을 경우, MCCI 반응이 일어나는 초기에 격납건물 살수에 의해 수소연소를 발생시키는 경우 수소의 양이 AICC 가정에 의한 수소연소하중 계산에 사용된 수소의 양 이하이므로 격납건물은 건전성을 유지할 수 있으며 또한 살수에 의한 격납건물 압력감소 및 산소결핍에 의해 격납건물 손상압력 도달시간을 크게 증가시킬 수 있을 것으로 예측되었다. MCCI 후기에서는 가연성기체의 발생이 크게 증가하여 격납건물 살수는 격납건물의 건전성을 위협할 수 있을 것으로 예측되었다.

원자로건물 살수가 가연성기체 연소에 미치는 영향이 크기 때문에 사고후기 MCCI에 의해 가연성기체의 발생이 크게 증가될 때 원자로건물의 건전성을 유지시키기 위해 살수를 중지시켜야 하는 시점을 찾는 분석을 추후 수행할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 일부로 수행되었습니다.

참고문헌

- Henry R. E., Pail C. Y., Plys M. G., 1994, MAAP4 - Modular Accident Analysis Program for LWR Power Plants, Fauske & Associates, Inc., May.
- 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.