

2002 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

**MELCOR 1.8.5 코드를 이용한 중대사고시의 격납건물 성능분석**

**Analysis of the Containment Performance during Severe Accident  
Using MELCOR 1.8.5 code**

박재홍, 김한철, 서남덕, 이종인

한국원자력안전기술원  
대전광역시 유성구 구성동 19

조성원

한국방사선기술연구소  
대전광역시 유성구 구성동 19

**요 약**

원자로 노심이 손상되는 중대사고가 발생하여도 원자로 격납시설이 구조적 건전성을 유지하고 핵분열 생성물의 방출에 대한 방벽기능을 수행하여 사고결과를 완화할 수 있기 위해서는 노심손상 발생 이후 24시간 동안은 격납건물 압력이 ASME code의 계수하중범주 허용 값을 초과하지 않아야 하고, 그리고 사고발생 시점 24시간 이후부터는 핵분열생성물이 제어할 수 없을 정도로 누출되는 것에 대처할 수 있는 방벽기능을 유지하여야 한다. 100% 핵연료피복재 금속과 물 반응에 의해 수소가 생성되어 방출되고 이 수소가 방전 등에 의해 연소되며 이에 따른 압력증가가 수반되는 사고시 격납건물의 건전성이 유지되는지 신형경수로 1400과 신고리 1,2원전을 대상으로 중대사고 종합분석 코드인 MELCOR 1.8.5코드를 사용하여 예비적으로 분석하였다. 예비평가 결과, 계수하중범주 한계 값 계산에 사용되는 압력하중은 이러한 사고시의 LOCA 등에 의한 압력과 수소연소에 의해 증가하는 압력을 고려하여 결정하는 것이 바람직한 것으로 밝혀졌다.

**Abstract**

Containment should maintain its role as a reliable, leak-tight barrier by ensuring that

containment stress do not exceed the ASME Factored Load Category (FLC) limits for a minimum period of 24 hours, and that following this 24 hour period the containment should also continue to provide a barrier against the uncontrolled release of fission products. The containment integrity during an accident that releases hydrogen generated from 100% metal water reaction of the active fuel cladding accompanied by hydrogen burning is preliminarily evaluated for the APR1400 and Shin-Kori unit 1&2 using the integral system code MELCOR 1.8.5. It can be concluded from this preliminary study that we need to take into consideration both the LOCA pressure and the pressure due to the hydrogen burning when we calculate the containment pressure of the FLC load.

## 1. 서론

중대사고현상에 의한 격납건물 파손은 과압 (過壓), 動的 압력 (dynamic pressure, 또는 衝擊波, shock wave), 격납건물 내부에서 발생한 비산물 (飛散物, missile), 외부에서 격납건물에 부딪히는 비산물, 노심용융물에 의한 원자로공동 콘크리트의 용융관통, 격납건물 우회사고 (迂回事故, bypass) 등이 있다. 격납건물이 파손되는 경우 파손형태는 방사능물질의 所外放出에 큰 영향을 미칠 수 있다. 만약 격납건물이 서서히 누출 (漏出)된 다면 누출부위의 위치에 따라 다량의 방사능물질이 격납건물이나 인접건물에 보존될 수 있다. 이와는 대조적으로 격납건물에 대형破裂 부위가 발생하면 대부분의 방사능물질은 주변 환경으로 급속히 방출되게 된다.

중대사고 조건에서 원자로용기 파손에 의한 냉각재 방출에 따른 압력과도 현상은 설계기준사고 해석에서 고려된 것 보다 더욱 심각할 수 있는데 이는 원자로용기 파손 이전에 수소가 생성되고 격납건물 내부의 가열에 의해 격납건물의 초기압력이 증가되기 때문이다. 가압에 의해 격납건물은 變形된다. 고온은 격납건물 변형을 더욱 악화시킨다. 가압 및 고온에 의한 변형으로 격납건물 관통부 근처에 누출을 일으키거나 콘크리트 격납건물의 강재 라이너가 찢어지게 된다. 콘크리트 격납건물은 과압에 의해 강재 라이너가 찢어 지더라도 破裂은 발생치 않고 오히려 균열이 발생할 가능성이 더 높다. 강재 라이너는 보통 1/4inch (0.635cm) 두께의 라이너를 사용하고 비구조재이며 누출방지 목적으로 설치 되기 때문에 높은 연성 (延性)이 필요하다. 또한 비구조재이므로 낮은 항복 및 극한강도의 재료 사용이 가능하다.

노심손상 발생 이후부터 24시간 동안 격납건물이 핵분열생성물의 누출을 억제할 수 있는 기밀방벽의 역할을 유지하기 위해 중대사고 발생시 격납건물의 압력은 ASME code 의 계수하중변주 허용값을 초과하지 않아야 한다. 냉각재상실사고에 의한 중대사고 발생 시 100% 핵연료피복재 금속과 물 반응에 의해 수소가 생성 및 방출되고 수소연소에 의

한 압력이 증가되는 사고동안 격납건물의 건전성이 유지되는지의 여부를 미국 NRC가 개발한 중대사고 종합분석 코드인 MELCOR 1.8.5 코드 (NUREG/CR-6119, 2000)를 사용하여 신형경수로 1400과 신고리 1,2 원전에 대해 예비적으로 평가하였다. 또한 격납건물의 건전성 유지를 위해 이러한 중대사고 발생시 격납건물의 압력은 계수하중범주 허용값 보다 작은 지를 검토하였다.

## 2. 관련 규제요건 검토

10CFR50.34(f)(3)(v)(A)(1)은 100% 핵연료피복재 금속과 물 반응에 의해 수소가 생성 및 방출되고 수소연소에 의한 압력이 증가되는 사고동안 격납건물의 건전성이 유지되기 위해서는 격납건물의 압력이 콘크리트 격납건물의 경우 계수하중범주 (사하중과 압력하중의 조합) 한계값 이하로 유지되어야 할 것을 요구하고 있다. 또한 최소 설계요건으로 사하중 + 310kPa (45psig) 하중조합을 제시하고 있다. 여기서 사하중은 구조물의自重 및 기기의自重으로서 정하중이다. 여기서 압력하중은 가장 심각한 파단사고에 근거한 사고압력에 적절한 여유도를 고려하여 설정한다. 이에 대해 한국원자력안전기술원의 경수로형 원전 안전심사지침서 (KINS-G-001, 1999) 3.8.1절에 기술되어 있는 관련내용은 다음과 같다:

사하중과 압력하중의 조합 요건에 의해 ASME CC-3000에 추가되는 하중조합과 CC-3720을 만족하여야하는 하중조합은 다음과 같다.

- 1) 계수하중범주 :  $D + P_{g1} + [P_{g2} \text{ 나 } P_{g3}]$
- 2) 사용하중범주에서 격납건물 라이너의 변형률은  $P_{g3}$  압력의 작용시 CC-3720의 한계값을 초과하지 않아야한다.
- 3) 상기 1)이나 2)의 최소설계조건으로, 다음 하중조합을 만족하여야한다:  
 $D + 310\text{kPa (45psig)}$  여기서  
 $D$  : 사하중  
 $P_{g1}$  : 100%의 핵연료피복재와 물의 반응으로 생성되는 수소가 방출되는 사고시의 압력  
 $P_{g2}$  : 통제되지 않는 수소연소로 인한 압력  
 $P_{g3}$  : 이산화탄소를 비활성화 용재로 가정하여 사고후 비활성화에 따른 압력

하한값으로 제시된 압력하중 310kPa (45psig)은 해변에 위치하지 않은 내륙에 건설된 원전의 안전성 때문에 10CFR50.34(f)(3)(v)(A)(1)에 포함되었다 (INEEL/EXT-97-01257, 1997). NRC 검토결과, 내륙에 건설되는 원전의 격납건물 설계는 격납건물 성능에 영향을 미치는 물리적 현상의 불확실성을 감당할 수 있는 충분한 여유가 없는 것으로 밝혀졌다. 따라서 45psig의 압력하중이 10CFR50.34(f)(3)(v)(A)(1)에 포함되었다. 이 45psig의 압

력하중은 이 규정이 제정될 1982년 2월 당시까지 미국에서 허가된 원전 격납건물의 대표적 설계압력이다. 따라서 계수하중범주 한계값 설정시 100% 핵연료 피복재와 물의 반응으로 생성되는 수소가 방출되는 사고시의 압력 값과 수소연소에 의한 압력하중이 발생하는 중대사고시의 압력 값에 근거하여 압력하중을 결정하여야 할 것으로 판단된다.

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 평가하여야 한다. 이러한 평가에 격납건물 극한내압능력 (Ultimate Pressure Capacity: UPC) 분석결과를 사용할 수 있다. 중대사고시 격납건물의 압력이 극한내압능력 분석으로 제시된 극한내압 보다 작을 경우 격납건물은 핵분열생성물을 제어누출시킬 수 있을 것으로 판단된다. 극한내압은 격납건물 파손확률이 50%인 압력이다.

Leaver와 Additon (1993)은 노심손상 발생 이후부터 24시간 동안 격납건물이 핵분열생성물의 누출을 억제할 수 있는 기밀방벽의 역할을 유지하기 위한 격납건물의 압력은 ASME code의 계수하중범주 허용값을 초과하지 않아야 하고, 24시간 이후부터 격납건물은 제어할 수 없는 핵분열생성물 누출에 대처할 수 있는 방벽기능을 유지하여야 하는 요건을 그림 1과 같이 표현하였다.



그림 1. LOCA에 의한 중대사고시 격납건물 압력분포

### 3. 냉각제상실사고시 수소연소에 의한 격납건물의 압력거동 분석

신형경수로 1400은 2002년 5월 2일 표준설계가 인가되었으며 표준설계를 참조한 신고리 3,4호기의 건설허가 신청이 2003년 7월로 예정되어 있다. 한수원은 2002년 5월 3일 신고리 1,2 원전의 건설허가를 신청하였다. 신고리 1,2 원전은 개선형 한국표준원전 (KSNP+)이다.

100% 핵연료피복재 금속과 물 반응에 의해 수소가 생성 및 방출되고 수소연소에 따른 압력 증가가 수반되는 사고동안 격납건물의 건전성이 유지되는지의 여부를 중대사고 종합분석 코드인 MELCOR 코드를 사용하여 신형경수로 1400과 신고리 1,2 원전에 대해 예비적으로 평가하였다. 여러 가지 초기사건 중에서 대형냉각재상실사고시 압력과 수소연소에 의한 압력을 계산하기 위해 영광 5,6호기 중대사고시 국부수소농도분석 보고서(한수원, 2001a)에 제시된 대형냉각재상실사고(파단면적  $1.7\text{ft}^2 = 0.158\text{ m}^2$ ) 경위를 사용하였다.

원자로용기가 파손되어 노심용융물이 원자로공동으로 분출된 후 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. MELCOR 입력에서는 (1) 완전 혼합, (2) 완전 성층화 및 (3) 반출 및 분리에 의한 기계적 혼합모형의 3개 선택사항 중에서 1개를 선택하여 분석할 수 있다. 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.

신형경수로 1400은 파단면적  $0.5\text{ ft}^2 (= 0.04645152\text{ m}^2$ , 파단직경  $0.2432\text{ m}$ )의 대형냉각재상실사고가 발생한 후 안전주입탱크 (SIT), 터빈구동 보조급수계통 (TDAFW) 펌프, 원자로공동 침수계통 (CFS)이 작동한 후 피동형 촉매 수소재결합기 (Passive Autocatalytic Recombiner: PAR) 26대와 수소점화기 10대가 작동 (PAR & Burn)되는 사고경위 ( $LL4 = LL * /SIT * /TDAFW * /CFS * /PAR \& Burn * CSS$ )에 대해 분석하였다.

신고리 1,2 원전의 경우 PAR가 2대 (추정) 설치될 예정이나 이 예비분석에는 고려하지 않고 수소점화기 작동에 의한 수소연소에 따른 격납건물 압력을 계산하였다. LOCA 발생 후 고압 및 저압안전주입계통, 격납건물 송풍냉각계통, 충전펌프의 작동을 중지시켰고, 원자로 정지 후 주증기격리밸브가 닫히면서 보조급수계통이 작동되는 사고경위를 MELCOR 코드로 분석하였다 ( $LL = LL * /SIT * /TDAFW * HPSI * LPSI * /Burn * CSS$ ). 이 분석에서 파단면적은  $4.4\text{ft}^2 (= 0.4082\text{ m}^2$ , 파단직경  $0.721\text{m}$ )로 가정하였다.

신형경수로 1400과 신고리 1,2 원전의 대형냉각재상실사고시 격납건물 압력과 수소연소에 의한 격납건물 압력은 그림 2 및 3과 같으며, 사고발생 후 24시간 까지의 격납건물 압력을 표 1에 요약하였다.

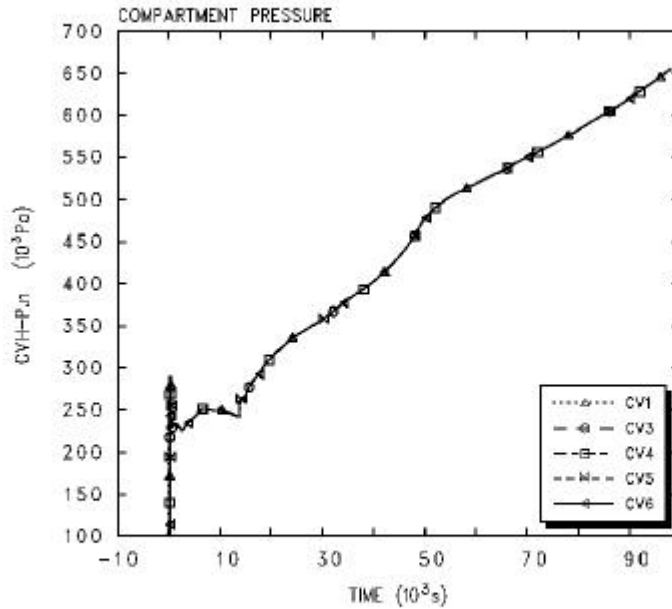


그림 2. LOCA 및 수소연소시 격납건물 압력 (신형경수로 1400)

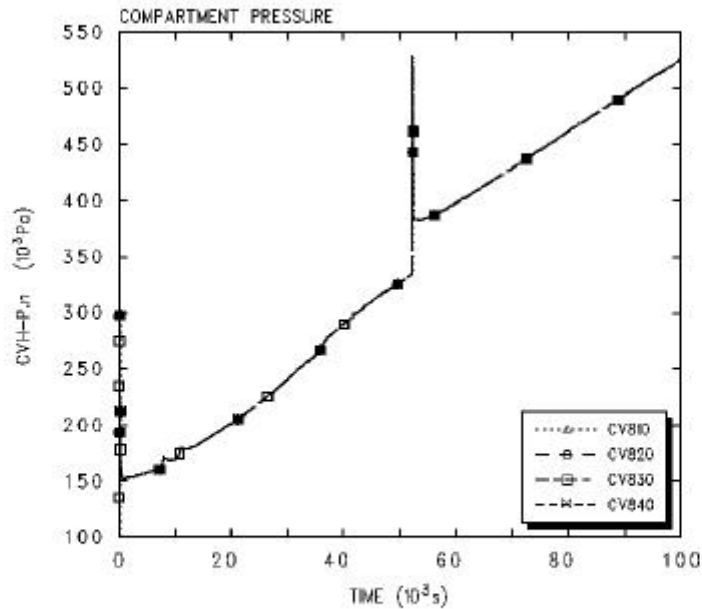


그림 3. LOCA 및 수소연소시 격납건물 압력 (신고리 1,2)

표 1. 신형경수로 1400과 신고리 1,2 원전의 LOCA 및 수소연소시 격납건물 압력

	신형경수로 1400	신고리 1,2
핵연료피복재 100%의 질량, kg	25,715.2	20,256.53*
100% MWR에 의한 수소생성량, kg	1,137	880*
24시간 까지의 격납건물 최고압력, kPa (psig)	602.767 (72.73)	527.2 (61.77)
24시간에서의 격납건물 압력, kPa (psig)	602.767 (72.73)	481.8 (55.18)
계수하중범주 한계값, kPa (psig)	852.85 (109)	분석예정

\* 영광 5,6호기 자료 (한수원, 2001)

여러 가지 초기사건 중에서 대형냉각재상실사고시 압력과 수소연소에 의한 압력을 MELCOR 코드를 사용하여 신형경수로 1400과 신고리 1,2 원전에 대해 예비적으로 평가한 사고 후 24시간 까지의 격납건물 최대압력은 표 1과 그림 2 및 3에 요약한 바와 같다. 신형경수로 1400의 계수하중범주 한계값 852.85kPa (109psig)은 斷熱等體積 조건에서의 완전연소 (Adiabatic Isochoric Complete Combustion: AICC) 가정에 의한 수소연소 하중 (103.3psig), 격납건물 직접가열현상 발생시의 격납건물 압력 (91.3psig), 원자로공동에서의 노심용융물과 냉각수의 접촉에 의한 증기급증 압력 (105.2psig), 원자로공동에서의 노심용융물과 콘크리트 반응에 의한 격납건물 압력 (103.04psig)을 포괄할 수 있는 압력이다 (한수원, 2001b). 이 분석에서 계산된 격납건물 압력 602.767kPa (72.73 psig)는 계수하중범주 한계값 보다 작기 때문에 사고 후 24시간 동안 격납건물은 핵분열생성물의 누출을 억제할 수 있는 기밀방벽의 역할을 유지할 수 있다.

신고리 1,2 원전의 계수하중범주 한계값은 현재 계산중이므로 사고 후 24시간 동안 격납건물의 건전성 유지여부는 아직 판단할 수 없다. 그러나 이 분석에서 계산된 격납건물 압력 527.2kPa (61.77psig)는 10CFR50.34(f)(3)(v)(A)(1)의 계수하중범주 한계값의 하한 값으로 제시된 압력하중 값 310kPa (45psig)을 크게 초과한다. 따라서 ASME code의 계수하중범주 한계값 설정시 100% 핵연료 피복재와 물의 반응으로 생성되는 수소가 방출되는 사고시의 압력값과 수소연소에 의한 압력하중이 발생하는 중대사고시의 압력 값에 근거하여 압력하중을 결정하여야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 100% 핵연료피복재 금속과 물 반응에 의해 수소가 생성 및 방출되고 수소연소에 따른 압력 증가가 수반되는 사고동안 격납건물의 건전성이 유지되는지의 여부를 중대사고 종합분석 코드인 MELCOR 코드를 사용하여 신형경수로 1400과 신고리

1,2 원전에 대해 예비적으로 평가하였다. 여러 가지 초기사건 중에서 대형냉각재상실사고 시 압력과 수소연소에 의한 압력을 계산한 결과 신형경수로 1400의 격납건물 압력은 계수하중범주 한계값 보다 작기 때문에 사고 후 24시간 동안 격납건물은 핵분열생성물의 누출을 억제할 수 있는 기밀방벽의 역할을 유지할 수 있다.

신고리 1,2 원전의 계수하중범주 한계값은 아직 제시되지 않아 사고 후 24시간 동안 격납건물의 건전성 유지여부는 판단할 수 없다. 그러나 이 분석에서 계산된 LOCA 및 수소연소에 의한 격납건물 압력 527.2kPa (61.77psig)은 10CFR50.34(f)(3)(v)(A)(1)의 계수하중범주 한계값의 하한 값으로 제시된 압력하중 값 310kPa (45psig)을 크게 초과한다. 따라서 100% 핵연료 피복재와 물의 반응으로 생성되는 수소가 방출되는 사고시의 압력(예: LOCA에 의한 격납건물 압력)과 수소연소에 의한 압력에 근거하여 ASME code의 계수하중범주 한계 값 계산에 사용되는 압력하중을 결정하여야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 일부로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- 한수원, 2001a, 영광 5,6호기 중대사고시 국부수소농도분석 보고서 (개정본), 문서번호 9-035-N463-002, 개정번호 3.
- 한수원, 2001b, 신형경수로 1400 4차질의 답변
- INEEL/EXT-97-01257, 1997, Load Combinations for Containment Design Against Severe Accident, INEEL Technical Evaluation Report, Ellison, P., Nov.
- 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.
- Leaver D, and Additon S., 1993, ALWR utility requirements document containment performance requirements, Nuclear Engineering and Design 145 (1993) 307~319.
- 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.