

2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

CANFLEX-NU 핵연료노심의 공급자관과단사고에 대한 격납건물거동 해석

Containment Building Behaviour Analysis for CANFLEX-NU Fuel Core in Case of Feeder Break

최훈

한전전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

월성 1호기에 CANFLEX-NU 핵연료를 장전하였을 경우 사고영향 평가를 수행하였다. 공급자관 과단사고에 대해 격납건물내 열수력 거동 해석을 수행하였다. 격납건물내 열수력 거동 분석에는 PRESCON2코드를 사용하였으며, 이는 월성 2,3,4호기에 적용되었던 방법론과 동일하다. 37봉의 기존핵연료 장전노심과 비교하기 위해 동일한 방법론으로 37봉 핵연료장전 노심에 대해 동일한 분석을 수행하여 비교하였다. 모든 안전계통이 가용한 경우(단일사고)와 격납건물 부계통 손상을 동반한 경우(이중사고)에 대하여 분석을 수행하고 결과를 요약하였다. 격납건물의 건전성은 영향을 받지 않는다.

Abstract

Accident analysis is carried out for CANDU 6 nuclear power plant with CANFLEX-NU fuel loaded core. The behaviour of containment thermalhydraulic for feeder break accident were analysed. PRESCON2 code are used for the containment thermalhydraulic behaviour. For the comparison with the results of 37-element fuel core, the same scope of analyses as CANFLEX-NU fuel core were done for 37-element fuel core. All safety system available(single failure) case and containment system failure(double failure) cases are analyzed. The integrity of containment is not affected and well below the criteria.

1. 서 론

월성 1호기에 CANFLEX-NU 핵연료를 장전하였을 경우 공급자관 과단사고에 대해 격납건물내 열수력 거동 해석을 수행하였다. 본 해석은 CANFLEX-NU 핵연료를 장전할 경우 안전해석측면에서 어떠한 영향이 있는지 평가하기 위해 수행된 여러 사고해석업무 중 일부

분으로 수행되었다.

월성 1호기의 최종안전성분석보고서에는 공급자관파단사고와 같은 소형냉각재상실사고에 대해서는 상세한 격납건물거동 분석결과가 제시되어 있지 않으므로 본 연구를 통해 월성 2,3,4호기에 적용된 방법론을 적용하여 월성 1호기에 대해 기존연료 장전 노심과 CANFLEX-NU 연료 장전 노심의 격납건물거동 해석방법론을 확립하고 해석결과를 비교하였다.

2. 분석방법론

2.1 격납건물 거동분석

일차계통이나 이차계통의 배관파단으로부터 방출되는 질량 및 에너지로 인한 격납건물내 압력, 온도, 격실간 차압 등의 열수력적 거동을 분석하여 격납건물이 구조적 건전성을 유지하여 방사성핵종의 누출을 방지하는 안전기능을 수행하는지 확인하는 것이 격납건물 거동분석의 목적이다. 격납건물의 구조적 건전성 및 방사성핵종 누출량 분석을 위해 최대압력(Peak Pressure), 압력종속 신호(Pressure Dependent Signal), 격실간 차압(Differential Pressure), 수소 농도(Hydrogen Concentration), 방사성핵종 누설량(Radionuclide Release) 등의 항목을 분석한다. 격납건물 내부의 최고압력이 설계압력을 초과하지 않아 구조적 건전성에 영향이 없음을 확인하기 위해 최대압력분석을 수행하고, 격납건물 격리, 비상노심냉각계통 작동 및 원자로 정지를 위한 원자로건물 고압 신호 발생시점을 결정하기 위해 압력종속 신호 분석을 수행한다. 격실간 차압으로 인해 내부구조물의 건전성이 저해되지 않음을 확인하기 위해 격실간 차압 분석을 수행하고, 격납건물 내부 어떠한 지점에서든 수소 폭연이나 폭발을 방지할 수 있을 만큼 수소농도가 낮음을 확인하기 위해 수소 농도 분석을 수행하며, 격납건물내부에 존재하는 방사성핵종의 거동과 주민피폭량 계산을 위해 격납건물 외부로 어느 정도의 방사성핵종이 누설되는지 평가하기 위해 방사성핵종 누설량 분석을 수행한다. PRESCON2 코드를 사용하여 위의 여러 가지 다양한 분석을 수행한다. 분석 목적에 따라 노드 분할 및 가정이 달리 적용된다.

2.2 격납건물 모델링

분석 목적에 따라 격납건물내부를 묘사하는 모델의 상세도를 달리하여 적용한다. 격실간 차압 및 수소농도 분포 분석을 위해서는 월성 1호기 격납건물을 상세하게 묘사한 모델로서 격납건물을 40개의 노드와 이들 노드간의 연결을 나타내는 80개의 링크로 구성된 상세모델을 사용하였고, 최대압력 분석에는 9개의 노드와 25개의 링크로 구성된 간략모델(그림1)을 사용하였으며, 방사성핵종 누설 및 압력종속 신호 분석에는 환기계통과 중수증기 회수계통(그림2)을 포함시킨 14개 노드, 37개 링크로 구성된 모델을 사용한다. 비교적 큰 개구부를 갖는 인접한 격실들은 한 개의 노드로 묘사한다. 각 노드에 대해서는 체적과 단면적, 수력학적 직경, 수평 면적 등의 자료가 제공되어야 한다. 또한, 노드를 구성하고 있는 벽면의 재질별로 면적이 제공되어야 한다. 각 링크에 대해서는 기하학적 면적, 길이 및 수력학적 길이, 직경 및 저항계수 등의 자료가 제공된다. 노드에 대한 기하학적 자료 이외에 벽면을 통한 열전달, 부가적인 열제공원, 국부공기냉각기, 살수계통, 격납건물내 초기조건, 계기용 공기계통, 벽면을 통한 누설, 격납건물 격리, 출입구를 통한 누설, 장기간의 비상노심냉각 순

환 등이 분석을 위한 가정에 따라 모델링에 가감된다.

2.3 거동분석 목적별 가정

2.3.1 최고압력 분석

계통 열수력 해석에서 얻어진 질량/에너지 방출량 자료를 이용하여 격납건물 내부에 발생할 수 있는 최고의 압력을 계산하기 위해 가급적 압력을 높이는 방향으로 모델을 구성한다. 격납건물 벽을 통한 누설은 전혀 없는 것으로 가정하고, 열제거원으로 작용하는 내부구조물 벽의 표면적은 과소평가하여 적용하며, 공기냉각기는 3급 전원에 의해 8개만 작동하도록 하고 살수 계통도 2/3만 작동하는 것으로 가정한다. 열생성원과 계기용공기 주입도 모델에 포함시키며, 격납건물격리도 사건개시와 동시에 작동하는 것으로 가정하여 9노드/25링크 모델을 사용한다.

2.3.2 압력종속 신호 분석

격납건물 고압에 의한 정지신호는 늦게 발생할수록 보수적이므로 124kPa(g)의 압력에서 하루동안 건물부피의 5%에 해당하는 내부공기가 격납건물 벽을 통해 누설된다 가정하고, 가능한 모든 열제거원을 작동하도록 하고 열생성원은 없는 것으로 모델을 구성한다. 내부구조물과 벽의 질량과 표면적을 과대평가하여 적용한다.

2.3.3 격실간 차압 분석

가능한 한 압력을 높이는 방향으로 모델을 구성한다. 모델을 구성하는데 적용되는 가정은 최고압력 분석시와 동일하며, 상세한 격실 압력 자료가 필요하므로 40노드/80링크 모델을 적용한다.

2.3.4 방사성핵종 누설 분석

방사성핵종 누설을 최대로 하는 것이 보수적이므로 압력을 최대한 높이고 누설량을 최대로 가정할 필요가 있다. 따라서, 최고압력 분석에 적용되었던 가정과 124kPa(g)의 압력에서 일일당 건물부피의 5%에 해당하는 내부공기의 격납건물 벽을 통한 누설을 가정한다.

2.3.5 수소 농도 분석

격납건물내 수소농도를 높이는 방향으로 모델을 구성한다. 따라서, 벽을 통한 누설은 없으며 격실간 파열문은 모두 닫혀 격실간 유동을 최소화하고, 수소 농도를 흐리게 하는 계기용공기의 주입은 모델에 포함시키지 않는다.

3. 분석결과

단일사고와 여러 가지의 이중사고에 대해 주로 격납건물내 압력 및 온도 거동에 초점을 맞

추어 해석을 수행하였으며 환기 및 중수증기 회수계통을 포함한 9노드 25링크 모델이 사용되었다. 최대출력을 갖는 006 채널의 정체과단을 가정하여 계산된 질량 및 에너지 방출자료가 사용되었다. 질량 및 에너지는 두 가지 경로를 통해 격납건물 내로 방출된다. 첫 번째 경로는 과단된 공급자관을 통해 핵연료교환기실로 방출되는 경로이며, 두 번째 경로는 채널 내 정체로 인해 압력관 및 칼란드리아관이 과단되어 일차냉각재가 감속재로 유입되고 가열된 감속재가 칼란드리아 파열관을 깨뜨리고 증기발생기실로 방출되는 경로이다.

3.1 모든 안전계통이 가용한 경우

표 1은 예측되는 과도상태의 주요 사건을 보여준다. 모든 안전계통이 가용한 경우에 대한 격납건물내 압력 및 온도 과도상태는 그림 3과 그림 4에 보이고 있다. 원자로건물 고압에 의한 격리신호는 14.3초에 발생하며 격납건물 격리는 격리댐퍼 차단에 요구되는 시간 3초를 포함하여 18초에 이루어진다. 파열판들은 56초 이내에 모두 파열된다. 단기간동안 압력상승을 제한하기 위해 두 번의 살수가 자동적으로 개시된다. 20.8 kPa(g)의 첨두압력이 132초에 발생한다. 살수는 390초에 정지하지만 살수원은 고갈되지 않는다. 비상노심냉각계통의 회복단계를 모사하는 PRESCON2 모델이 3220초 이후에 사용되며, 압력은 7000초 후 8.5 kPa(g)에 이른다. 이후에 계속해서 격납건물 압력은 국부공기냉각기 및 건물누설 효과에 의해서 점차적으로 감소한다. 16840 초에 정상 계기용공기 주입이 종료된후 격납건물 압력은 빠른 속도로 감소하여 약 6.7 일에 대기압에 도달한다. 최고온도는 103℃로 핵연료교환기실에서 336초에 발생하며 장기적으로는 40℃에 머문다.

3.2 격납건물 격리계통 완전상실

표 2는 예측되는 사건전개를 보여준다. 격납건물 압력은 14.3초에 격리설정치에 도달하지만 입구 및 출구의 격리댐퍼가 닫히지 않는다. 감속재실과 격납건물 3, 4 층 사이의 파열벽은 37 초에 파열된다. 첨두압력 18.3 kPa(g) 이 194초에 발생한다. 이 첨두압력은 살수개시 설정치인 19 kPa(g) 이하이므로 살수는 이루어지지 않는다. 이후에 공기냉각기, 벽, 건물누설 및 환기입구와 출구관을 통한 유출 등의 효과로 인해 격납건물 압력은 점차적으로 감소한다. 증기발생기실내의 압력은 516초에 대기압에 도달한다. 환기배출송풍기가 운전원 조치에 의해 914 초에 정지된다. 첨두온도 103℃ 가 204초에 핵연료교환기실에서 발생하며 장기적으로 42℃에 머문다. 그림 5와 그림 6은 압력과 온도 과도상태를 보인다.

3.3 살수계통 완전상실

예측되는 사건전개가 표 3에 요약되어 있다. 격납건물 고압에 의한 격리가 18초에 발생한다. 감속재실과 격납건물 3, 4층 사이의 파열벽은 55초에 파열된다. 첨두압력 30.5 kPa(g) 이 278초에 기저실에서 발생된다. PRESCON2 모델이 3220 초에 비상노심냉각계통의 회복단계를 모사하고, 압력은 약 6000 초에 8.7 kPa(g) 에 도달한다. 이후에 국부공기냉각기, 벽 및 건물누설 등의 효과로 인해 격납건물내의 압력은 점차로 감소한다. 16840초에 계기용공기 주입이 종료된 후 압력은 빠른 비율로 감소하여 약 6.8 일에 대기압에 도달한다. 그림 7은 압력과도상태를 보이고 있다. 그림 8은 장기간의 격납건물내 온도 과도상태를 보여준다. 최대온도 106℃ 는 324 초에 핵연료교환기실에서 발생하며 장기적으로는 41℃에 머문다.

4. 결론

월성 1호기에 CANFLEX-NU 핵연료를 장전하였을 경우 공급자관 파단사고에 대해 격납 건물내 열수력 거동 해석을 수행하였다. 모든 안전계통이 가용한 경우(단일사고)와 격납건물 격리계통 손상을 동반한 경우(이중사고)에 대한 분석결과를 요약하고 모든 안전계통이 가용한 경우에 대해 기존 37봉 핵연료 장전노심의 해석결과와 비교하였다. 그림 3과 그림 4에 보인 바와 같이 CANFLEX-NU 핵연료를 장전한 노심의 안전성이 기존의 핵연료 노심에 비해 변화가 없음을 확인할 수 있다. 압력과도는 월성 2,3,4호기의 결과보다도 적게 분석이 되었으나 그 차이는 미미하며, 온도과도는 월성 2,3,4호기의 결과에 비해 약 10℃ 가량 높은 최고온도를 보이고 있다. 이는 월성 1호기에만 설치되어 있는 증기발생기실 격리 파열판 때문으로 파악된다. 이 파열판은 차압이 3.45 kPa(d)에 이르면 파열되도록 설계되어 있다. 대형냉각재 상실사고에서는 초기 압력과도가 크기 때문에 이 파열판이 사고발생과 동시에 파열되어 핵연료교환기실 내의 온도상승이 억제되나 공급자관 파단사고와 같은 소형냉각재 상실사고에서는 파열압력에 도달하지 못하므로 핵연료교환기실에서 증기발생기실로의 유동을 막아 핵연료교환기실 내의 온도가 보다 높이 상승한다. 공급자관 파단사고로 인해 격납건물의 구조적 건전성은 전혀 영향을 받지 않으며, CANFLEX-NU 핵연료 장전 노심의 파단방출 에너지가 오히려 기존 핵연료 장전 노심보다 적어 안전성이 향상됨을 확인할 수 있다.

5. 참고문헌

- [1] Wolsong NPP Units No. 2/3/4, "Final Safety Analysis Report", 1995
- [2] Containment Analysis Models Wolsong-1 CANFLEX-NU, W1-CANFLEX-AR-006, 2002

표 1 안전계통 가용시 채널 O6_mod 에서의 공급자관 정체파단에 대한 격납건물 분석 사건 전개

격납건물 (F/M_107 실) 로의 직접적인 파단방출 및 핵분열생성물의 누출	0 초
칼란드리아 방출도관을 통하여 증기발생기실로의 파단방출 및 핵분열생성물의 누출	23 초
압력에 의한 격납건물 격리 발생	18 초
격납건물 3, 4 층과 감속재실 사이에 있는 파열벽 파열	55 초
기저실과 핵연료교환기 보수실 (A&C) 사이의 파열벽 파열	56 초
살수 개시	132 초
침두압력	20.8kPa(g)
침두압력 발생 시간	132 초
살수 정지	214 초
살수 개시	357 초
살수 정지	390 초
계기용공기 주입 완료	16840 초
증기발생기실 압력이 대기압에 도달되며 격납건물 분석 종료	586000 초 (6.7 일)

표 2 격리계통 완전상실시 채널 O6_mod 에서의 공급자관 정체파단 사고에 대한 격납건물 사건전개

격납건물 (F/M_107 실) 로의 파단방출 및 핵분열생성물의 누출	0 초
칼란드리아 방출도관을 통하여 증기발생기실로의 파단방출 및 핵분열생성물의 누출	23 초
격납건물 압력이 증가하여 격납건물 격리설정치에 도달하지만 환기입구관, 환기출구관 및 중수증기회수관의 격리댐퍼는 격리계통 완전상실로 인해 완전개방상태로 유지된다고 가정	18 초
감속재실과 격납건물 3, 4 층 사이에 있는 파열벽 파열	37 초
기저실과 핵연료교환기 보수실 (A&C) 사의의 파열벽 파열	60 초
침두압력	18.3 kPa(g)
침두압력 발생시간	194 초
증기발생기실 압력이 대기압에 도달	516 초
계기용공기 주입이 종료되고 누출 종료	16840 초

표 3 살수계통 완전상실시 채널 O6_mod 에서의 공급자관 정체파단 사고에 대한 격납건물 사건진개

격납건물 (F/M_107 실) 로의 파단방출 및 핵분열생성물의 누출	0 초
칼란드리아 방출도관을 통하여 증기발생기실로의 파단방출 및 핵분열생성물의 누출	23 초
압력에 의한 격납건물 격리발생	18 초
격납건물 3, 4 층과 감속재실 사이에 있는 파열벽 파열	55 초
기저실과 핵연료교환기 보수실 (A&C) 사이의 파열벽 파열	56 초
첨두압력 첨두압력 발생시간	30.5 kPa(g) 278 초
계기용공기 주입 종료	16840 초
증기발생기실 압력이 대기압에 도달되며 격납건물 분석 종료	588500 초

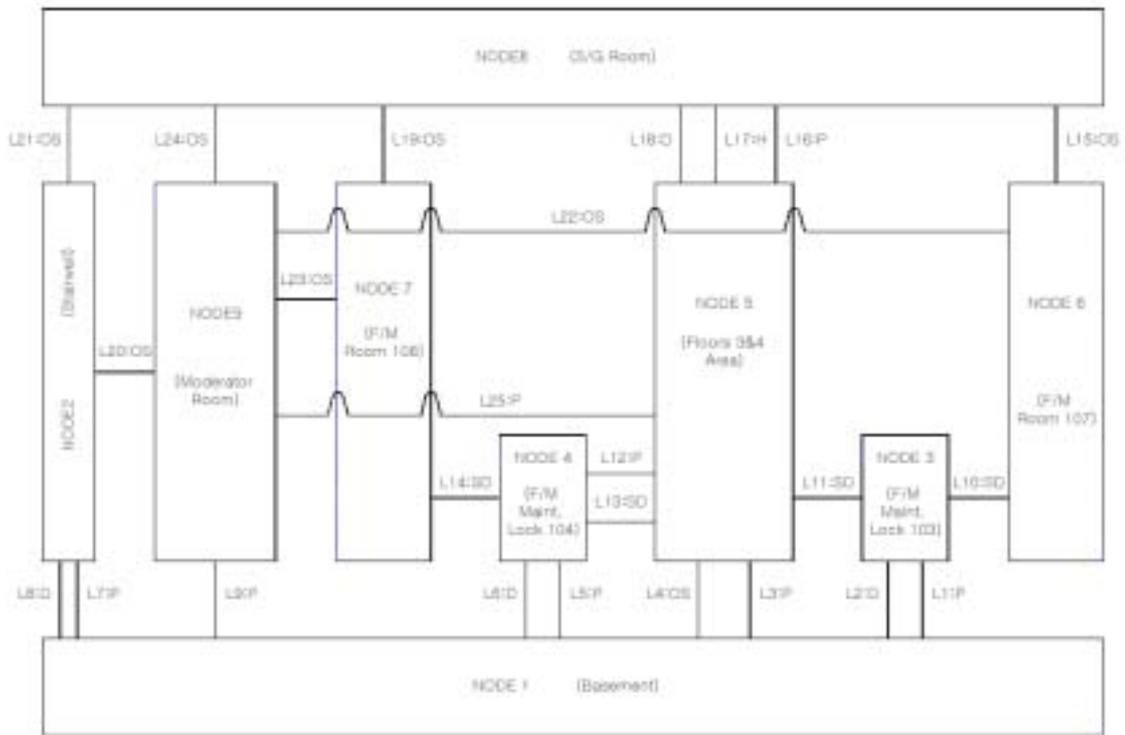


그림 1 격납건물 9 노드 25 링크 모델

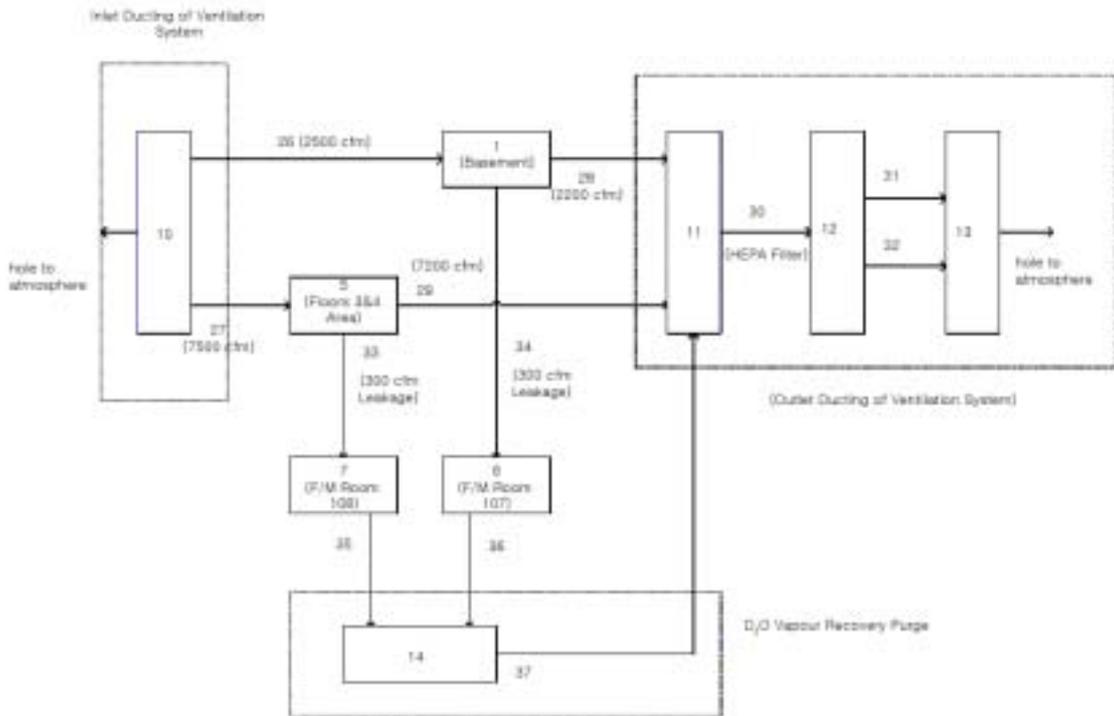


그림 2 환기 및 중수증기 회수계통 모델

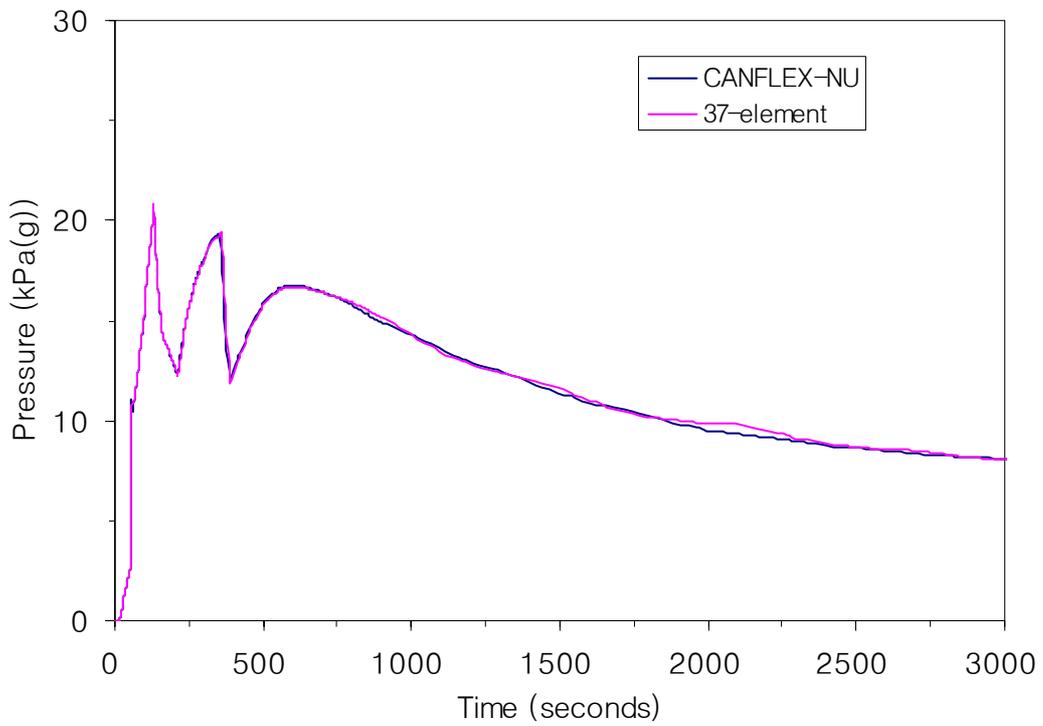


그림 3 안전계통이 가용한 경우의 격납건물 압력과도 상태

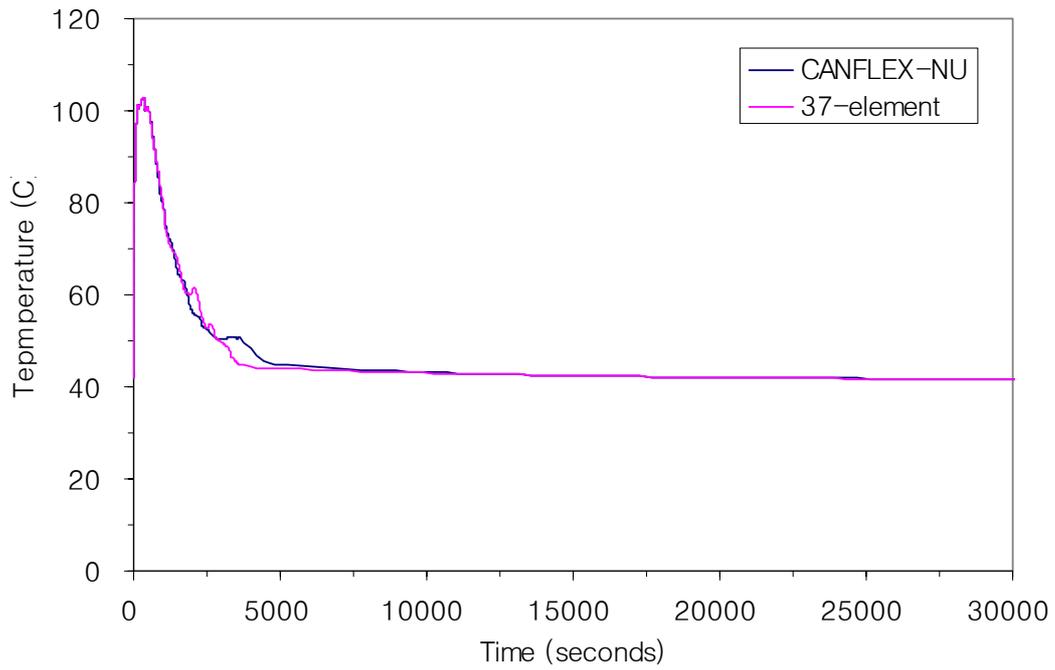


그림 4 안전계통이 가용한 경우의 격납건물 온도과도 상태

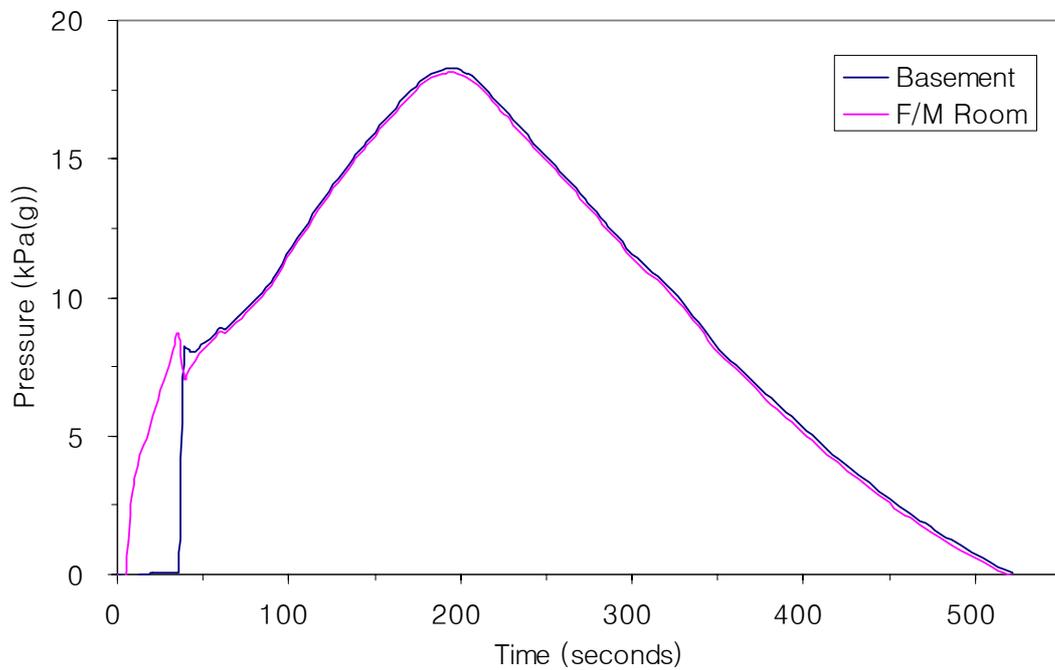


그림 5 격리계통 완전상실시 격납건물 압력과도 상태

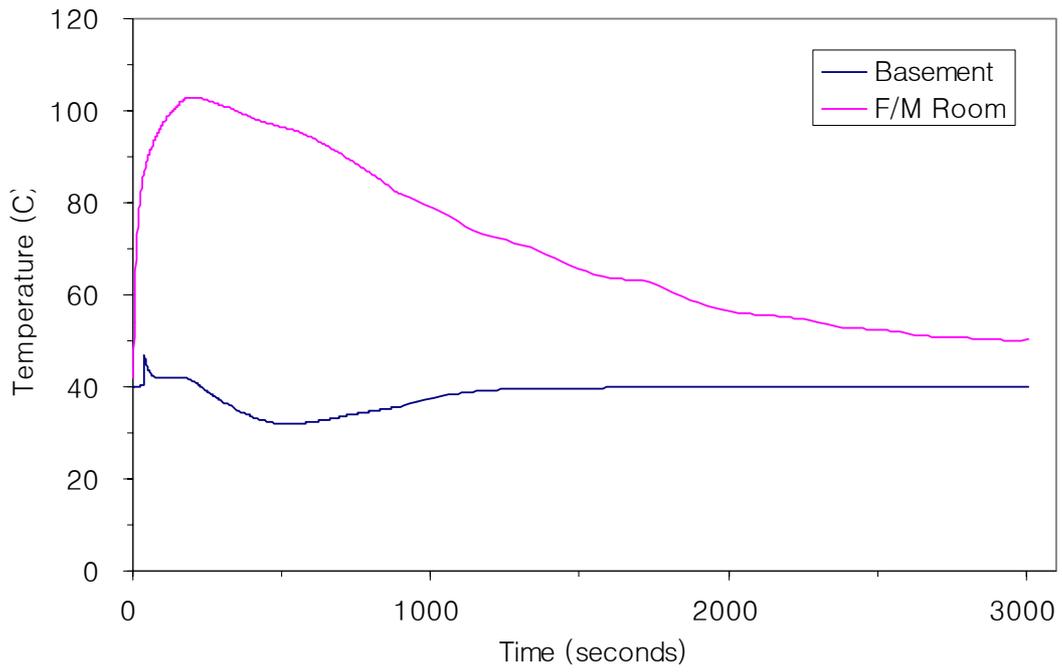


그림 6 격리계통 완전상실시 격납건물 온도과도 상태

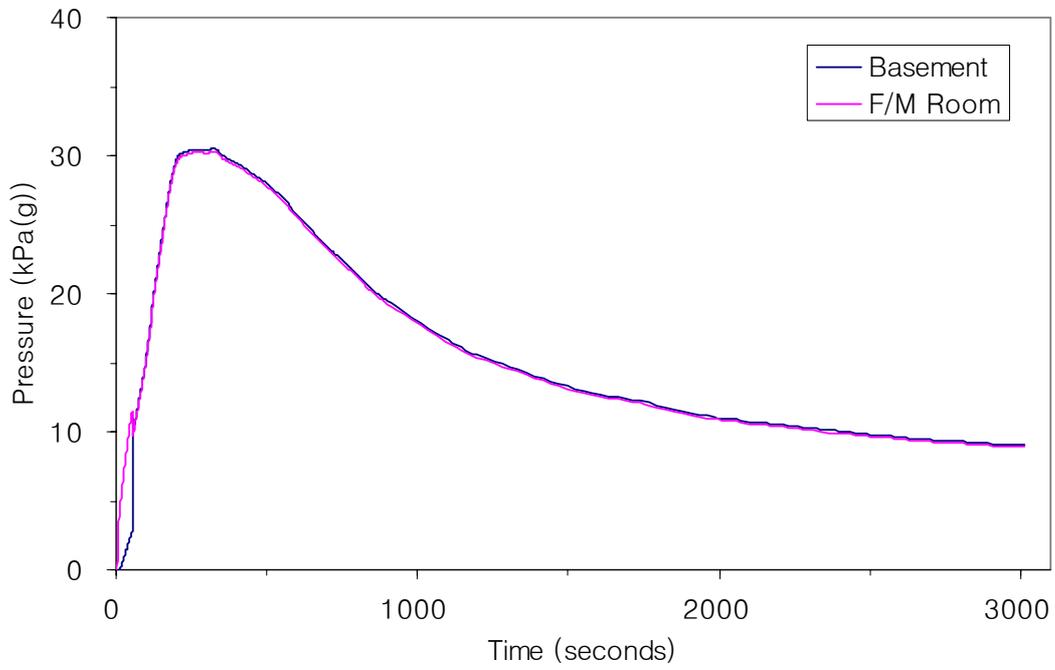


그림 7 살수계통 완전상실시 격납건물 압력과도 상태

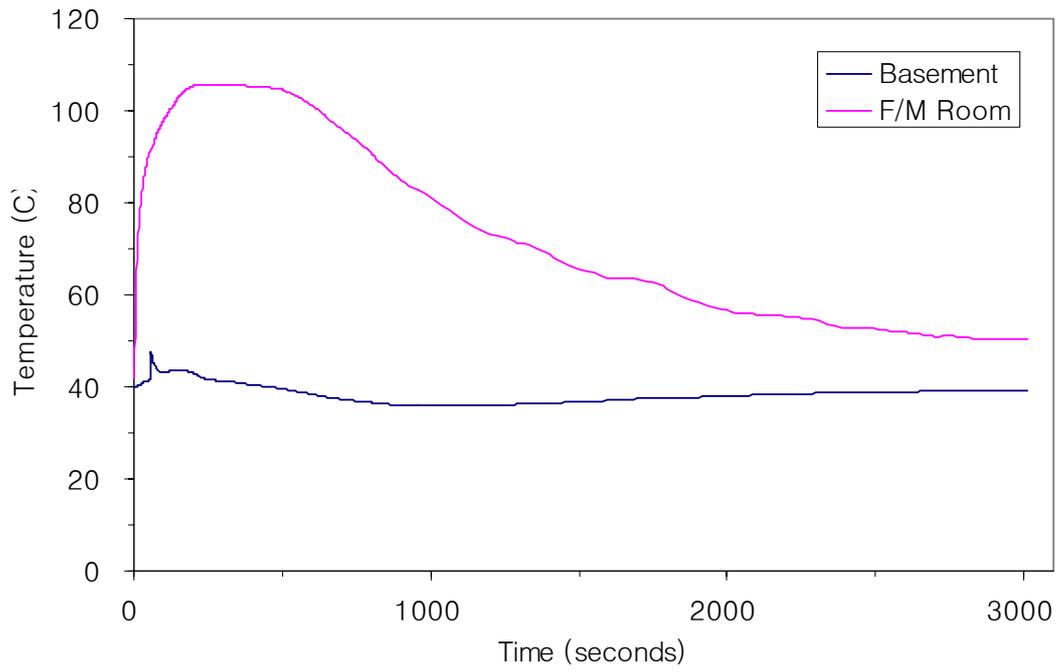


그림 8 살수계통 완전상실시 격납건물 온도과도 상태