

피동형원자로 열수력 연계해석 통합코드체계개발

조봉현, 정법동, 황영동, 장문희
한국원자력연구소

정 익
서울대학교

요 약

계통분석 코드인 RELAP5/MOD3와 격납용기 분석 코드인 CONTEMPT4/MOD5에 피동형 격납용기 열전달 모델을 추가하여 개선한 CONTEMPT4/MOD5/PCCS 코드를 이용하여 피동형원자로의 원자로 계통과 격납용기의 열수력 연계해석을 위한 통합코드를 구성하였다. 두 코드는 process 제어의 개념을 이용하여 각 코드의 특성을 유지시키면서 explicit coupling되게 하였으며 통합코드를 1000MWe급 피동형 원전의 냉각재 상실사고분석에 적용시켜 검증하였다. 통합코드는 원자로 계통과 격납용기의 계산을 동시에 수행함으로써 얻을 수 있는 격납용기-계통 간의 열수력 현상을 파악할 수 있게 하여줌으로써 피동형 원전의 열수력 분석도구로서 사용할 수 있는 것으로 분석되었다.

1. 서 론

피동형 원자로에서는 주요한 공학적 안전설비가 피동형으로 설계되어 펌프 등의 동적기기를 최소화하고 중력, 기체압력 등의 자연 법칙에 의한 정적 수단에 의하여 안전 기능을 수행하도록 하고 있다^[1]. 이에 따라 경수로 안전해석에서 사용되는 기존의 안전분석체계도 상당한 수정이 필요하게 되었으며 피동형 기기와 중력 구동의 열수력 해석을 수행할 코드체계도 필요하게 되었다.

특히 대형냉각재 상실사고인 경우 감압이 끝난 후 재 관수 기간 동안의 핵연료 침투온도가 격납용기의 압력에 따라 상당히 변하며 안전주입이 IRWST로부터 중력에 의하여 이루어 지기 때문에 계통과 격납용기의 열수력학적 특성이 기존의 경수로 보다 더 긴밀하게 연계되어 있어 계통-격납용기 분석을 동시에 수행할 코드체계가 필요하다.

이러한 문제를 극복하기 위해서는 각 코드를 통합한 코드체계의 구축이 필요하며 이는 여러 가지 방법이 의하여 구현할 수 있다. 이와 같은 코드의 통합은 계통-노심분석을 위해 RELAP5-COBRA/TF의 통합코드를 구성한 바 있으며^[2], 미국 Idaho 국립연구소에서도 계통-중대사고격납용기 분석을 위해 RELAP-CONTAIN 코드를 PVM(Parallel Virtual Machine) software를 이용하여 통합한 바가 있다^[3].

본 연구에서는 피동형 격납용기의 해석을 목적으로 격납용기 열수력 과도해석 코드인 CONTEMPT4/MOD5에 피동형 격납용기의 열전달 모델을 추가하여 개선한 CONTEMPT4/MOD5/PCCS 코드와 신형원자로 계통의 열수력 해석에 사용할 수 있는 RELAP5/MOD3.2를 연결한 연계해석 통합코드 체계를 구축하였다. 통합방법으로는 각 코드의 특성과 수치해법을 고려하여 매 시간간격에 경계조건으로 자료를 상호 교환할 수 있게 각 코드의 관련 부 프로그램을 수정하

였고, 각 코드의 계산을 적절히 제어하는 supervisory program을 작성하였다. 또한 통합 코드의 검증과 유용성 확인을 위하여 1000MWe급 피동형원자로 KP1000의 대형냉각재상실사고를 대상으로 원자로 계통 및 격납용기 계통의 과도 특성을 분석하였다.

2. 피동형 격납용기 해석을 위한 CONTEMPT4/MOD5 코드 개선

CONTEMPT4/MOD5 코드는 PWR, BWR의 격납용기 다격실해석 코드로 ice condenser가 있는 경우까지 분석이 가능하다. 전산 코드는 입력을 처리하는 부 프로그램 INSEQ, 격실 및 구조물의 초기화 계산을 하는 부 프로그램 INISHL과 계산시간 간격별 격실의 해석을 수행하는 부 프로그램 GO의 3개의 블록으로 구성된다. 해석을 수행하는 부 프로그램에는 사고시 격납건물 내부로 유입되는 증기의 질량 및 에너지 계산모델, 각종 공학적 안전기구들에 의한 열제거 모델, 그리고 피동 열전달기구들에 의한 열전달모델이 포함된다.^[4]

피동형 격납용기 냉각계통(PCCS)은 기존의 원전과 달리 격납건물 살수계통(spray cooling system)이나 격납건물 송풍냉각기(Fan Cooler) 등의 능동열제거기기들을 사용하지 않으며, 철재격납용기와 같은 열전달 구조물로의 열전달 만으로 사고시 격납건물의 압력을 진압하게 되므로 피동형 철재 격납용기의 열전달 상관식이 첨두압력 계산에 중요하다. 그러나 기존의 코드가 이들 열전달을 적절하게 고려하지 못할 뿐 아니라 습식 냉각 열전달은 고려하고 있지 않다.

본 코드의 개선시 추가된 모델은 다양한 조건의 실험에서 얻어진 공기의 부력유동 상관식과 열전달과 물질전달의 analogy 개념을 이용한 질량전달 모델이다. 기존의 부 프로그램에서 모델의 추가를 위하여 열전달 계수를 계산하는 HTCDEF 부 프로그램과 열구조물 입력을 처리하는 INSEQ 부 프로그램이 확장되었으며, 질량전달계수의 계산을 위하여 HTPCC 부 프로그램이 추가되었고, 입출력과정과 계산의 편의를 위하여 내부의 프로그램을 수정하였다. 추가된 열전달 상관식을 표 1, 표 2에 정리하였다.

CONTEMPT4/MOD5/PCCS의 검증을 위하여 피동형 냉각계통을 채택하고 있는 Westinghouse의 AP600 발전소를 대상으로 AP600 SSAR의 설계자료^[5]를 입력으로 이용하여 저온관 양단판단사고(DECLB)를 해석하고 WGOTIHC 코드의 결과와 비교하였다. 계산결과 압력과 온도는 두 결과가 유사한 경향을 보이며 열전달 상관식의 선택에 의해 최대압력과 온도에 있어서 약간의 차이만 존재한다. 두 경우의 압력변화를 그림 1에서 비교하였다.

3. RELAP5/MOD3.2 와 CONTEMPT4/MOD5/PCCS 통합코드 구성

RELAP5/MOD3.2와 CONTEMPT4/MOD5/PCCS코드의 연계해석 통합코드를 구성하기 위하여 UNIX System이 제공하는 process 제어 방법을 채택하였다. 이 방법은 super process가 각 코드계산의 process를 제어하는 방식으로 매 시간간격마다 서로의 정보량을 교환하며 정보를 교환하는 방식은 각 코드의 시간제어 방식에 따라 달라질 수 있다. 계통 분석코드로 선정한 RELAP5/MOD3.2는 시간제어가 semi-implicit scheme이나 격납용기 분석 코드인 CONTEMPT4는 근본적으로 explicit scheme이므로 explicit coupling으로 통합분석체계를 구축하였다. 통합체계는 한 개의 제어 프로그램인 supervisory process CONLAP과 두개의 child process인 RELAP과 CONTEMPT로 구성되어 있다. 각 process는 병렬로 처리되며 두 코드를 연결하는 계산 자료는 매 시간 간격으로 각 process에 상호교환 된다. 그림 2는 통합 버전에서 각 process의 계산 방식을 도식화 한 것이다.

이 과정에서 계통분석코드인 RELAP5에서 격납용기 측의 경계조건을 pseudo time dependent volume으로 모사하여 이 volume에 필요한 압력, 각 상에서의 에너지, 건도 등은 CONTEMPT process에서 계산하여 매 시간 간격마다 새로운 자료를 CONLAP을 통하여 받음으로써 재 갱신한

다. 반면에 RELAP5 process에 의하여 계산되는 질량/에너지 방출량은 CONTEMP4 process의 입력으로 매 시간마다 CONLAP을 통하여 전달된다. 자료 교환의 시간 간격으로는 CONTEMP4의 시간 간격으로 택하여 RELAP5가 자료 교환의 시간까지 수 번의 계산을 하게 하였다. 그 이유는 일반적으로 RELAP5의 시간 간격이 CONTEMP4에 비교하여 상당히 작기 때문이다.

두 코드의 통합을 위하여 각 코드의 부 프로그램을 약간 수정을 하였으며 두 코드간의 상호 자료 교환과 통제를 위하여 supervisory program CONLAP을 작성하였는데 CONLAP은 두 process간의 자료 교환을 위하여 전산기계에 약간의 memory space를 확보하는 것과 격납용기와 상호 작용을 하는 원자로계통의 체적의 확인 그리고 계산절차에 의하여 두 process의 수행과 정지 등의 통제가 필요하다. RELAP5의 수정된 부분의 역할은 다음과 같다. 주 프로그램에서는 다른 process와의 자료교환을 위한 common memory space를 확보 조정하고, TRANSET 는 격납용기와 상호 작용을 하는 junction의 index를 찾아내고 질량/에너지 방출량을 초기화한다. TRAN에서는 CONTEMP4 process의 요구에 따라 계산을 진행하거나 정지하는 역할을 하면서 질량/에너지 방출량을 다른 process인 CONTEMP4로 자료 전달을 한다. TSTATE에서는 격납용기를 모의하고 있는 pseudo volume의 물성치를 CONTEMP4 process의 결과에 의거하여 갱신하여 준다. 수정된 CONTEMP4/MOD5/PCCS에서의 주 프로그램에서는 RELAP과 마찬가지로 common memory를 조정하고 부 프로그램 GO에서는 CONLAP에서 주어진 계산절차에 따라 계산을 수행하고 다른 RELAP5 process에 계산된 압력, 엔탈피 그리고 건도 등의 자료를 전달한다. TRNSXN에서는 냉각재 파단면에서 방출되는 질량/에너지를 정하고 HTBIN에서는 RELAP5 process에서 정하여 지는 reflood 시작시점이 EOB시간을 결정하기 위하여 전달되어 온다.

4. 통합코드의 검증

통합 코드의 검증과 유용성의 확인을 위하여 KP1000의 원자로 계통에서의 대형냉각재 상실사고(LBLOCA)시의 격납용기 해석 및 계통 분석해석을 통합코드로 계산하였다.

분석대상인 KP1000은 미국 Westinghouse사의 AP600을 참조노형으로 Scaleup한 1000 MWe급 대용량 피동형원자로로 3-loop 형태의 냉각재 계통과 피동형 안전계통 및 IRWST를 채택하고 있다.^[6] 사고시 노심은 피동형 안전주입계통 및 자동감압계통, 피동형 잔열제거계통에 의하여 냉각되며 격납건물로 방출된 에너지는 공기에 의한 자연대류와 중력에 의해 철제격납용기 외벽에 살수되는 물막에 의해 냉각된다. KP1000은 격납용기와의 경계면이 파단부위 뿐 아니라 IRWST의 개방면이 있어 피동안전 주입의 특성이 격납용기의 압력에 민감할 수 있는 계통이다.

분석에 있어 정상상태의 열출력은 3,215MWt로 가정하였고 ANS73 붕괴열 모델을 적용하였다. 노심은 263 연료봉으로 구성된 핵연료 집합체인 하나의 hot channel과 192개의 집합체로 구성된 average channel로 모델링하였으며 축방향 출력분포는 1.55 chopped cosine 형태로 가정하였다. 고온관 유량은 4,675 Kg/sec로 하였으며, IRWST는 1,325 m³의 32.2℃의 물로 채워져 격납건물 대기로 열려져 있다. 또한 피동형 안전주입계통도 모델링되었다.

격납건물은 AP600에 비해 노심 출력의 증가로 인한 격납용기의 자유 체적 및 피동열침원의 증가를 반영하였으며, 격납건물 냉각계통은 격납용기 내부의 체적 증가로 인한 환형공간의 채널이 상부로 확장되었다. 격납용기 최대 압력/온도 해석시 침투 압력에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 격납용기 자유체적, 질량/에너지 방출, 피동열 침원의 모델링 및 격납용기의 초기압력 등이다. 격납건물 계통은 격납건물내부의 건격실, 철제격납건물과 차폐건물 사이의 환형공간인 PCCS 격실, PCCS 입구와 출구에 해당하는 2개의 외부공기 격실의 총 4개의 격실로 모델링되었다. 격납용기 해석을 위한 입력자료는 침투압 및 온도의 계산에 보수성을 충족시킬 수 있게 하였으며, 피동열 침원은 19개로 모델링하였다.^[7]

그림 3은 대형 저온관 파단사고 후 격납용기와 계통의 압력변화를 나타낸 것이다. 통합코드의 경우는 내부 철재 및 콘크리트 구조물을 CONTEMPT4/MOD5/PCCS에서 자세히 모델할 수 있으므로 응축 열전달로 인하여 blowdown 최대 압력후 서서히 감소하고 있다. 그러나 RELAP 계통코드의 경우 격납용기내의 복잡한 열구조물을 모델링하기 못하였기 때문에 이에 대한 영향은 나타나지 않고 최대 압력 후 거의 일정하게 유지된다. 그림 4에서는 계통의 축압기, 노심보충수탱크 및 IRWST로 부터의 노심 안전주입량을 나타낸 것으로 축압기에서의 물이 고갈되기 전까지 계통의 압력이 비교적 높게 유지되는 경우는 거의 유사하지만, 그 이후 격납용기의 압력과 계통의 압력차를 IRWST의 수두가 극복하게되어 IRWST로 부터 안전주입이 시작되는 시점은 서로 상이한 결과가 나왔다. 이로 IRWST 안전주입이 격납용기 압력의 거동에 민감하다는 것을 알 수 있으며 기존의 발전소에 비하여 피동형 발전소는 계통/격납용기 해석의 연계해석 체계가 더 중요하다는 보여주고 있다. 따라서 통합코드는 계통과 격납용기의 계산을 동시에 수행함으로써 얻을 수 있는 격납용기-계통 간의 열수력 현상을 파악 할 수 있게 하여줌으로써 피동형 원전의 열수력 분석도구로서 사용할 수 있음을 검증하였다.

5. 결 론

격납용기 분석 코드인 CONTEMPT4/MOD5에 피동형 열전달 모델을 추가하여 개선한 CONTEMPT4/MOD5/PCCS 와 계통분석 코드인 RELAP5/MOD3를 이용하여 피동형원전의 원자로계통과 격납용기의 연계해석을 위한 통합코드를 구성하였다. 두 코드는 process 제어의 개념을 이용하여 각 코드의 특성을 유지시키면서 explicit coupling되게 하였다. 두 코드의 통합을 위하여 각 코드의 부 프로그램을 약간 수정을 하였으며, 두 코드간의 상호 자료 교환과 통제를 위하여 supervisory program CONLAP을 작성하였다. 또한 통합코드를 KP1000의 냉각재상실사고에 적용시켜 검증하였다. 통합코드는 원자로 계통과 격납용기의 계산을 동시에 수행하여 격납용기-계통 간의 열수력 현상을 파악할 수 있게 하여줌으로써 피동형 원전의 열수력 분석도구로서 사용할 수 있는 것으로 분석되었다.

참고문헌

- [1] 장문희 등, “신형원자로 계통개념연구”, KAERI/RR-1483/94, 한국원자력연구소, 1995, 제 4 절 피동형 원자로 계통/격납용기 연계해석 체계 구축
- [2] S.Y.Lee, et. al., COBRA/RELAP5 : A Merged Version of the COBRA-TF and RELAP5/MOD3 codes, Nuclear Technology Vol. 99, p 177 , 1992
- [3] R.P Martin, RELAP5/CONTAIN Coupling, Idaho National Engineering Laboratory, 1993 RELAP5 Users Seminar, Boston, Massachusetts, 1993
- [4] NUREG/CR-4547, CONTEMPT4/MOD6: A Multicompartment Containment System Analysis Program, 1986
- [5] AP600 Standard Safety Analysis Report, 1992
- [6] 한국전력공사, “원자력발전소 안전성점검 연구(격납건물 성능해석 분야),” 최종보고서, 1994
- [7] 김성오 등, “대용량 피동형 원자로(KP1000) 계통개념 및 대형냉각재 상실사고에 대한 안전계통 성능평가” KAERI/TR-837/97, 한국원자력연구소, 1997

표 1. 부 프로그램 HTCOEF의 추가 열전달 상관식

Heat transfer coefficient		Correlation	Valid range
Natural convection	Hugot	$h = 0.108 \frac{k}{s} \left(\frac{g\beta(T_w - T_\infty)s^3}{\nu\alpha} \right)^{0.325}$	$6 \cdot 10^6 \leq Ra \leq 3 \cdot 10^9$
	Sparrow	$h = 0.667 \frac{k}{s} \left(\frac{g\beta(T_w - T_\infty)s^3}{\nu\alpha} \left(\frac{s}{H} \right) \right)^{0.229}$	$1 \cdot 10^3 \leq Ra \leq 2 \cdot 10^7$
	Miyamoto	$h = 0.0961 \frac{k}{s} \left(\frac{g\beta(T_w - T_\infty)s^3}{\nu\alpha} \right)^{0.344}$	$3 \cdot 10^7 \leq Ra \leq 2 \cdot 10^{10}$
Mixed convection	Colburn	$h_{forced} = 0.023 \frac{k}{D_h} Re^{0.8} Pr^{1/3}$	$0.5 \leq Pr \leq 100.$
	McAdams	$h_{free} = 0.13 \frac{k}{s} \left(\frac{g\beta(T_w - T_\infty)s^3}{\nu\alpha} \right)^{1/3}$	$1 \cdot 10^7 \leq Gr \leq 1 \cdot 10^{12}$

표 2. 부 프로그램 HTPCC 질량전달 상관식

Mass transfer coefficient	Correlation
Natural convection analogy	$h_m = C \left(\frac{D}{D_h} \right) \left\{ \frac{gs^3}{\nu_m^2} \left(\frac{\rho_s - \rho_o}{\rho_o} \right) \frac{\nu}{D} \right\}^m$
Forced convection analogy	$h_m = 0.023 \left(\frac{D}{D_h} \right) Re^{0.8} \left(\frac{\nu}{D} \right)^{1/3}$

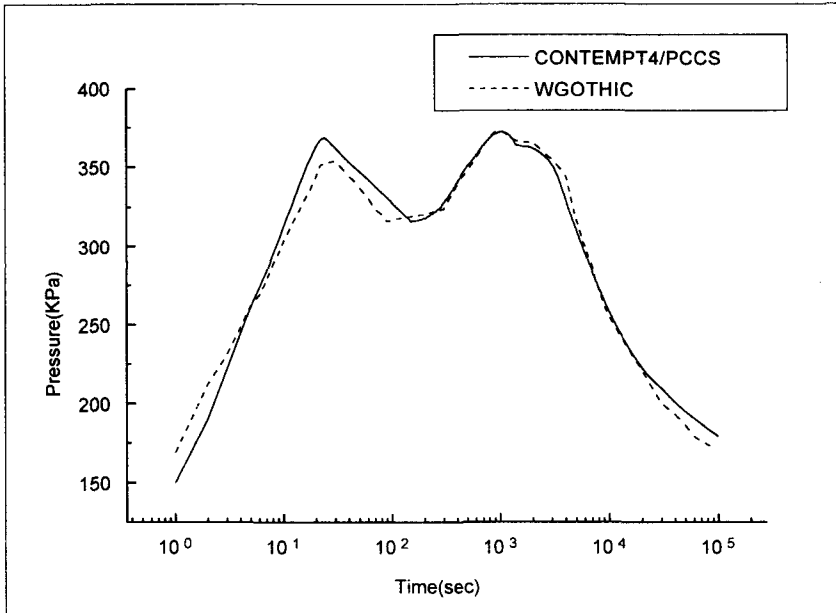


그림 1. 격납건물 압력 변화(AP600)

(CONTEMPT4/MOD5/PCCS 격납용기해석 코드 영역)

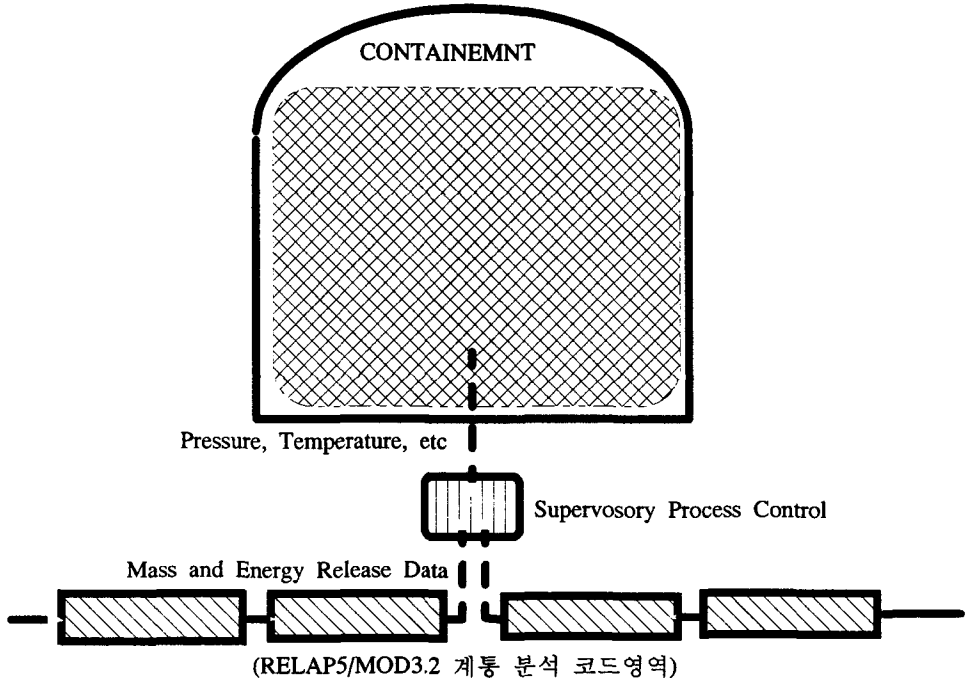


그림 2. 통합코드에서의 계산처리 절차

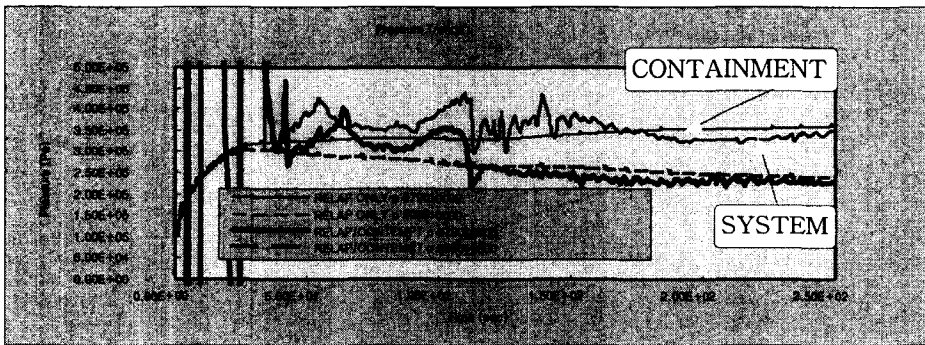


그림 3. KP1000 대형저온관 파단사고시 계통 및 격납용기의 압력변화

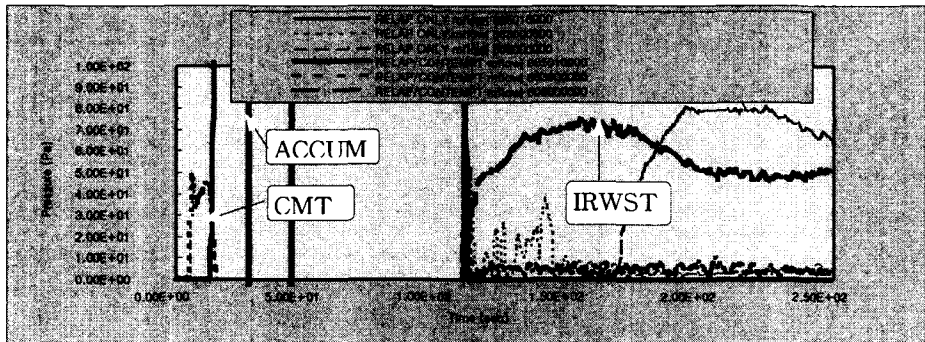


그림 4. KP1000 대형저온관 파단사고시 피동형 안전주입의 변화