'96 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

안전감압계통의 열수력과도현상 평가

이희도, 윤선홍
한국전력기술(주)
박군철
서울대학교

요 약

가압기의 유체 조건이 증기에서 이상유체로 변화하는 완전급수상실사고 경우에 대한 안전감압계통의 가압기 노즐 및 밸브 전단에서의 유량, 밸브 후단에서의 압력 변화 등 RELAP5/MOD1과 RELAP5/MOD3로 계산된 열수력 조건이 유사한 추세를 나타내었다. 또한 RELAP5/MOD1-CALPLOTFIII와 RELAP5/MOD3-CALPLOTFIII 전산체제로 계산된 안전감압계통의 각 배관부위에서의 동하중도 유사한 추세를 나타내었다. 즉, RELAP5/MOD1-CALPLOTFIII와 RELAP5/MOD3-CALPLOTFIII 전산체제를 이용한 안전감압계통의 열수력 과도현상 해석 결과가 유사하여 RELAP5/MOD1 대신에 RELAP5/MOD3가 안전감압계통의 열수력 과도현상 분석에 대체사용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구는 안전감압계통에 국한하여 수행되었으며, RELAP5/MOD1과 RELAP5/MOD3를 이용한 가압기안전밸브 방출배관에 대한 기존의 연구 결과에 의하면 RELAP5/MOD3가 만족스러운 결과를 제공하지 못하는 바, 다른 계통에 RELAP5/MOD1 대신 RELAP5/MOD3를 대체적용하기 위해서는 개별적으로 각 계통에 대한 비교 평가가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

1. 서 론

열수력 과도현상으로 인한 배관계통의 동적 및 열응력의 완벽한 평가는 일반적으로 열수력 분석, 기계적 하중 계산, 동적구조 해석 및 과도열응력 분석으로 이어지는 4 단계로 구분되어 수행된다(참

고문헌 1).

열수력 과도현상 분석은 밸브의 순간적 개폐 및 펌프의 오작동 결과로 주증기계통, 급수계통, 가압기 방출계통 및 기타 계통에 대한 열수력 분석을 수행하기 위해 RELAP 계열의 열수력 코드를 사용하며, 배관계통에 작용하는 기계적 하중을 계산하기 위해 CALPLOTFIII나 REFORC와 같은 동하중 계산용 전산코드를 이용한다. 여기서 계산된 하중함수(Forcing Function)는 배관과 배관지지물에 대한 구조물 응답분석시 PIPSYS와 같은 배관 응력해석 코드의 입력으로 사용된다.

안전감압밸브(SRV) 방출배관에 작용하는 열수력 조건 및 동하중 실험 결과를 RELAP5/MOD1-REFORC 전산체제를 이용하여 분석한 1982년의 EPRI 보고서에 의하면 전체적으로 실험치와 분석치가 좋은 일치를 나타내고 있다(참고문헌 2). 이를 근거로 영광3,4호기의 주요 이차계통의 열수력과도현상 분석은 RELAP5/MOD1-REFORC 전산체제를 이용하여 수행되었다. 최근에는 RELAP5/MOD2 및 RELAP5/MOD3가 RELAP5/MOD1의 자리를 차지하여 RELAP5/MOD1의 사용이 극도로 제한받고 있으며, 이런 배경하에서 EPRI에서 수행된 안전감압밸브(SRV) 방출배관에 작용하는 열수력 조건 및 동하중 실험치를 RELAP5/MOD3를 이용하여 분석 평가하므로써 RELAP5/MOD3의 대체가능성을 타진하고자 많은 사람이 노력하였다. 그러나, 그동안의 발표논문에 의하면 전체적으로 RELAP5/MOD3의 분석결과가 RELAP5/MOD1의 분석 결과에 비해 만족할만한 결과를 제공하지 못하고 있다(참고문헌 3). RELAP5/MOD3를 사용하는 최근의 추세에 의해 본 보고서에서는 안전감압계통의 열수력과도현상을 RELAP5/MOD1-CALPLOTFIII와 RELAP5/ MOD3-CALPLOTFIII를 이용하여 비교평가하므로써 안전감압계통에 대한 RELAP5/MOD3의 사용가능성 여부를 판단하고자 한다.

PRA 결과를 통해 영광3,4호기 노심손상 확률을 줄일 수 있는 설계개선 사항으로 충수 및 배수 운전 (Feed and Bleed Operation)을 위한 안전감압계통(Safety Depressurization System) 설계를 채택하였다. 충수 및 배수 운전은 완전급수상실사고(Total Loss-Of-Feedwater)와 같은 설계기준초과사고를 완화하는데 이용된다. 가압기방출 배관계통에 설치된 기존의 가압기안전밸브(Pressuriser Safety Valve)가 일반적으로 증기 방출 조건에서 설계된 것에 반하여, 안전감압계통에 설치된 안전감압밸브(Safety Depressurization Valve)는 증기 뿐만아니라 이상유체가 방출되므로 이러한 유체 조건에서의 열수력 과도현상에 대비한 안전감압계통의 설계가 수행되었다.

2. 안전감압계통

안전감압계통은 설계기준초과사고인 완전급수상실사고시 원격수동운전을 통하여 원자로냉각재계통의 신속한 감압기능을 수행한다. 원자로냉각재계통의 신속한 감압이 이루어진 후, 고압안전주입펌프가 가동되어 원자로냉각재계통에 냉각수를 공급하므로써 노심노출을 방지한다. 이러한 충수 및 배수 운전 수행 중에는 안전감압계통 내에서 이상유동이 발생하며, 계통의 기기와 지지물은 이상유동 조건에서도 기능을 유지하도록 설계된다.안전감압계통은 4" Sch 160의 배수배관, 계통격리 목적의 게이트 밸브와 글로브 밸브 및 900 psid에서 파열되는 파열판 등으로 구성되어 있으며, P&ID는 그림 1과 같다.

3. 모델링

3.1 RELAP5 모델링

그림 2와 같이 RELAP5 모델은 가압기, 모터 구동밸브, 900 psid에서 파열되는 파열판, 격납건물 및 각 기기를 연결하는 4" Sch 160의 배수배관으로 구성되었으며, 9RC008 배관과 9RC007 배관 중에서 본 논문에서 취급한 9RC008 배관은 총 68개의 제어체적과 67개의 정선으로 구성되었다.

특히 안전감압밸브의 개폐시간이 약 20초 정도이므로 밸브 개폐로 인한 동하중 영향은 미미할 것으로 판단되나, 밸브 개폐로 인한 동하중 및 상변화로 인한 동하중의 상대적인 크기를 비교하기 위해 밸브 개폐 시간을 0.3초로 설정하였다. 밸브가 완전개방된 후 0.2초의 여유시간을 임의로 제공하므로써 상변화 단계로 진입하기 이전에 정상상태를 만들었다. NSSS에서 제공된 시간에 따른 가압기의 압력과 건도는 TMDPVOL 모델을 사용하여 모사하였다. 제어체적의 길이는 0.5ft에서 1ft 사이를 유지하도록 하였으며, Time Step은 Acoustic Courant Limit를 토대로 0.1msec를 초과하지 않도록 모델링하였다. 특히 배관 벽면에서의 열전달은 무시되었으며, 밸브 및 배관 출구를 제외하고는 Chocking 옵션이 적용되지 않았다.

3.2 CALPLOTFIII 모델링

하중함수를 생성하기 위해 CALPLOTFIII, 즉 RELAP5/MOD1-CALPLOTFIII와 RELAP5/MOD3-CALPLOTFIII 전산체제를 이용하였다.

하중이력을 계산하는 일반적인 방법은 다음 방정식에 따라 bend나 T와 같은 요소에서 축방향 힘의 총합을 구하는 것이다.

$$F = F_W + F_{CS} + F_G$$

여기서 F_W는 유체가속에 기인한 파동하중, F_{CS}는 F 방향에 수직한 제어면 (Control surface)에서의 압력과 운동량, 그리고 F_G는 제어체적(Control volume)에 작용하는 중력에 각각 해당한다.

유동면적이나 유동방향이 변하는 위치에서 힘이 작용하므로 이러한 힘이 정확히 계산되도록 열수력학적 모델을 구성하였다. 특히, 밸브나 Tee와 같이 유동이 복잡한 양상을 띨 가능성이 있는 위치에 세심한 주의를 기울였으며, 밸브 및 배관 출구와 같이 열수력학적 변수들의 급격한 변화 때문에 더욱 다루기 힘든 Chocking이 발생하는 위치에 또한 주의를 기울였다.

4. 결론

그림 3은 완전급수상실사고시 가압기의 유체 조건이 증기에서 이상유체로 변화하는 상황을 나타내고 있으며, 그림 4와 5는 상기 조건에서의 RELAP5/MOD1과 RELAP5/MOD3로 계산된 가압기 노즐 및 밸브 전단에서의 유량을 나타내고 있고, 그림 6은 밸브 후단에서의 압력 변화를 나타내고 있다. 그림 4,5,6에서 알 수 있듯이 RELAP5/MOD1과 RELAP5/MOD3는 안전감압계통의 열수력 분석 결과에서 좋은 일치를 나타내고 있다. 그림 7,8,9는 RELAP5/MOD1-CALPLOTFIII와 RELAP5/MOD3-CALPLOTFIII 전산체제 즉, CALPLOTFIII로 계산된 각 배관부위에서의 동하중을 나타내고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 안전감압계통의 각 부위에 미치는 동하중도 좋은 일치를 나타내고 있다. 이상에서

알 수 있듯이 RELAP5/MOD1-CALPLOTFIII와 RELAP5/MOD3-CALPLOTFIII는 안전감압계통의 열수력과도현상 해석에서 유사한 결과를 제공하여 RELAP5/MOD1 대신에 RELAP5/MOD3가 안전감압계통의 열수력 분석에 대체사용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구는 안전감압계통에 국한하여 수행되었으며, RELAP5/MOD1과 RELAP5/MOD3를 이용한 가압기안전밸브 방출배관에 대한 기존의 연구 결과에 의하면 RELAP5/MOD3가 만족스러운 결과를 제공하지 못하는 바, 다른 계통에 RELAP5/MOD1 대신 RELAP5/MOD3를 대체적용하기 위해서는 개별적으로 각 계통에 대한 비교 평가가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. J. G. Arendts and A. G. Ware, "Piping system Response Induced Themal-Hydraulic Transients ; A Review of Recent Analysis Methods and Experiments", Nuclear Eng. and Design, pp 271-277.

2. "Applications of RELAP5/MOD1 for Calculation of Safety and Relief Valve Discharge Piping Hydrodynamic Loads", EPRI. NP-2479, December 1982

3. L. C. Smith & T. M. Adams, "Comparison of Analytically Determined Structual Solutions with EPRI Safety Valve Test Results" ,ICAP,1990

4. "RELAP5/MODI. Code Mannual Volume Ⅰ, Volume Ⅱ & Volume Ⅲ", INEL, March 1982.

5. "CALPLOTFIII : A Computer Program for Calculating Fluid Forces Based on RELAP5 Results", Ebasco.

6. "RELAP/MOD3. Code Mannual Volume Ⅰ, Volume Ⅱ & Volume Ⅲ", INEL, June 1990.

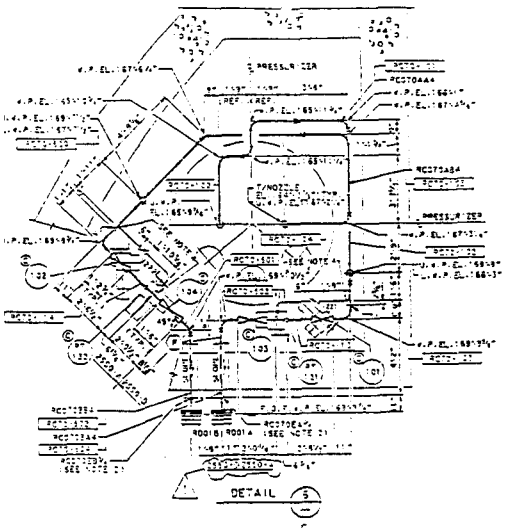

그림 1 안전감압계통 P&ID

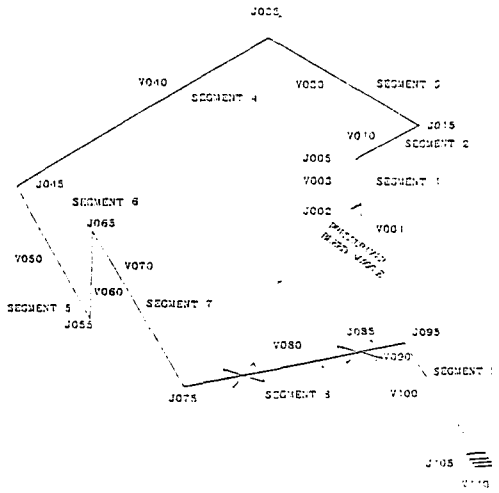

그림 2 RELAP5 및 CALPLOTFIII 모델

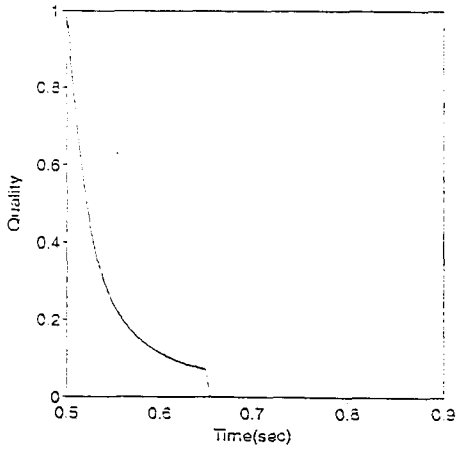

그림 3 가압기 건도

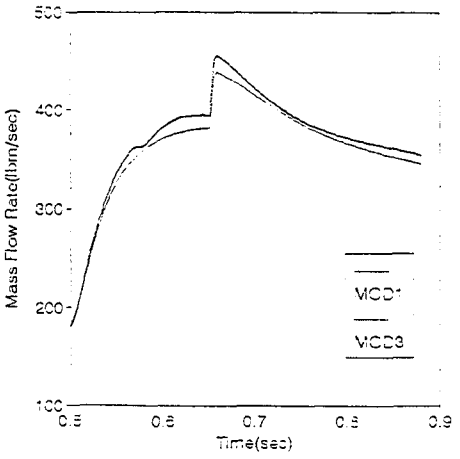

그림 4 가압기노즐의 유량

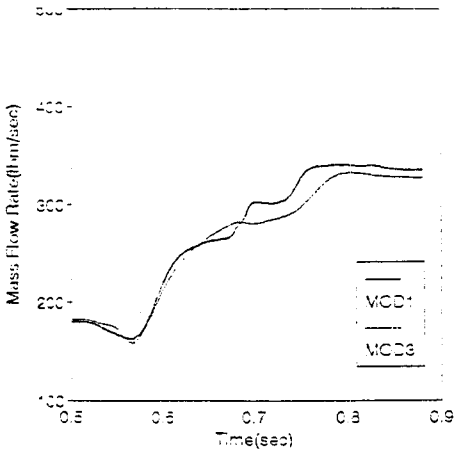

그림 5 밸브 상단의 유량

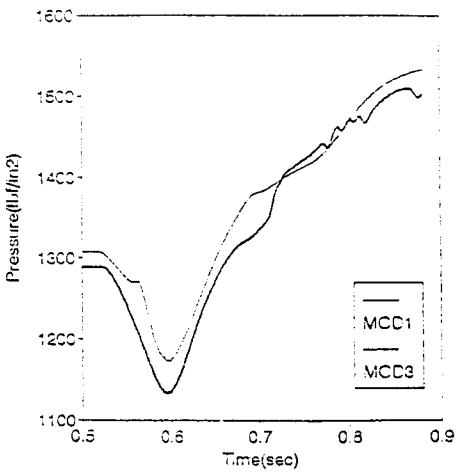

그림 6 밸브 후단의 압력

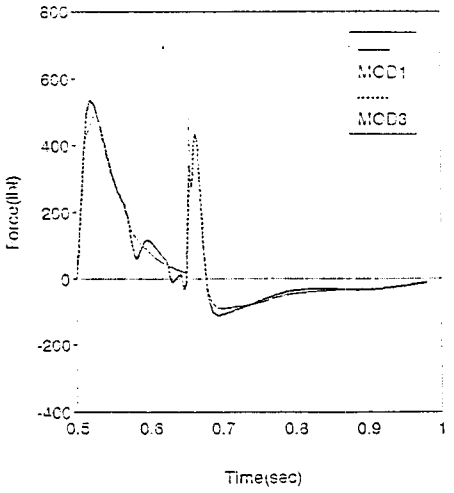

그림 7 Segment 1의 하중 이력

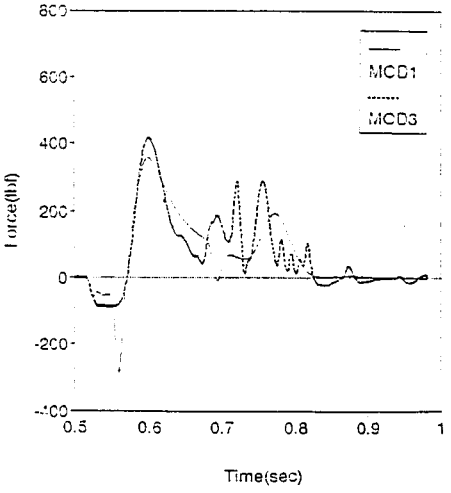

그림 8 Segment 8의 하중 이력

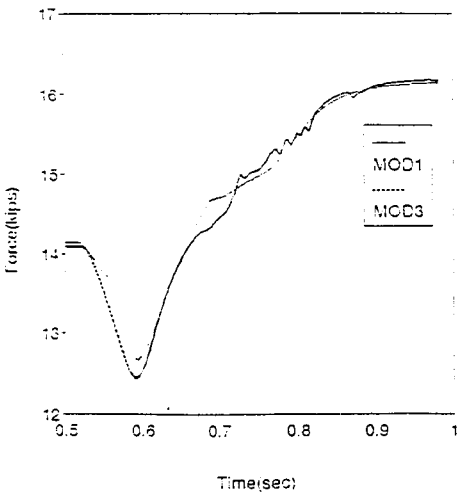

그림 9 Segment 9의 하중 이력