

'96 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회  
**RD-14 자연순환 실험에 대한 RELAP5 코드 모사**

**양채용 · 조용진 · 김인구 · 이석호 · 이종인**  
한국원자력안전기술원  
대전광역시 유성구 구성동 19

**요 약**

RD-14은 CANDU형 발전소를 묘사하기 위한 실험장치로서 여러 초기조건에서 자연순환 실험이 수행되었다. 본 연구에서는 RD-14 실험장치의 자연순환 실험을 RELAP5 코드로 모사하여 결과를 비교·평가하였다. 본 연구는 CANDU형 발전소 사고해석의 검증용 코드로서 RELAP5 코드의 적용 타당성을 평가하기 위한 과정으로 수행되었다. 계산결과, RELAP5 코드는 RD-14 실험장치의 자연순환 실험을 잘 예측하고 있음을 보여주고 있어 CANDU형 발전소의 자연순환 평가에 유용하다는 결론을 얻었다.

**1. 서론**

캐나다의 WNRE에 설치되어 있는 RD-14은 CANDU형 발전소를 묘사하기 위한 실험장치로서 10MPa의 일차측 압력과 11MW 노심출력 규모의 두 채널로 구성되어 있으며, 발전소의 전체 높이 변화에 대응되는 증기발생기, 펌프, 헤드 그리고 37개 전기열선을 가진 6m 수평 노심채널로 구성되어 있다. 또한 Surge Tank로서 일차측 압력과 냉각재 재고량을 유지할 수 있다.

CANDU형 원자로의 사고해석시 열수력현상을 묘사하기 위한 계통코드의 개발이 이루어져왔다. 특히 AECL에서 개발된 CATHENA는 그 대표적인 코드로서 AECL이 RD-14 실험장치의 자연순환 실험결과 [1]와 비교·분석하여 CATHENA 코드의 적용성을 평가한 바 있으며 [2], 또한 CATHENA 코드로서 월성 2호기 발전소의 사고해석을 수행하였다. 그러나 CANDU형 발전소의 사고해석을 위한 검증용 코드가 개발되지 않아, 이의 검증용 코드 수립이 절실히 요구된다.

RELAP5 코드는 PWR형 발전소 사고해석의 검증용 코드로서 널리 사용되고 있으나 CANDU형 발전소의 사고해석에 적용한 경우는 없다. RD-14의 RIH/ROH LOCA 실험에 대해서는, RELAP5 코드의 CANDU형 발전소에 대한 적용 타당성을 평가하기 위한 일련의 과정으로, RELAP5 코드를 사용하여 이미 분석한 바 있다 [3]. 본 연구에서는 RD-14 자연순환 실험을 RELAP5/MOD3.2로 모사하였다. 이를 위하여 RD-14 실험 중 T8513, T8515 및 T8517 실험에 대하여 RELAP5 코드를 사용하여 분석하였다. 자연순환 실험은 노심의 조건, 예를 들면, 배수되는 냉각재량, 초기 노심 압력 및 유량, 이차측 열전달 조건 등에 민감하게 영향을 준다. 본 분석에서는 각 실험에 대하여 여러 변수, 특히 일차측 압력 및 유량, 급수 유량 및 온도에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

**2. RD-14 자연순환 실험**

RD-14 실험장치에서 수행된 T8513, T8515, T8517 실험은 일차 및 이차측 온도 압력의 초기조건, 배수되는 냉각재량 그리고 노심에서 발생하는 열량 등에 따라 분류된다 [1]. 본 실험은 냉각재

재고량의 함수로서 자연순환의 유량을 관찰하는데 그 목적을 두고 있다. 실험은 초기 이차측 압력에 따라 4.6MPa과 0.2MPa으로 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 4.6MPa은 Class IV 전원상실 사고를 대표하고, 0.2MPa은 LOCA, 설계기준 지진사고 및 SLB 사고 등을 대표한다. 실험이전 초기조건은 안정되고 (Stable) 단상의 자연순환이 이루어지게 한다. 실험 시작과 더불어 Surge Tank를 일차계통으로부터 고립시키고, 단계적으로 냉각재를 배수시킨다. 실험 과정 동안 증기발생기 출구 냉각재 온도가 특정 시간에서 갑자기 감소하다가 증가하는 현상이 관찰되었으며, 이 현상은 2차측 열전달 조건이 일정치 않음을 보여주는 것으로서 실험결과에 민감한 영향을 주는 것으로 나타나고 있다.

T8513 실험은 고출력, 고압력에 해당되는 경우로서 초기 다섯 번은 전체 냉각재 재고량의 2%씩 배수되고, 그 후 두 번에 걸쳐 10%씩 배수되었다. 실험결과, 실험이 끝날 때까지 유동은 안정되었으며, 약 70%의 냉각재 재고량에서 채널의 유동은 성층화 (Stratified)되었다. 즉 채널 입구 온도는 과냉각되고 채널 출구 온도는 포화 상태가 되어, 약 70% 냉각재 재고량에서 채널유동이 성층화가 될 때 노심채널 위 부분에서 Dry-out이 발생하였다.

T8515 실험에서는 저출력, 고압력 조건에서 T8513과 같은 방법으로 냉각재를 배수시킨다. 92%와 84%의 재고량 사이에서 유동의 진동이 발생되었다. 이 유동 진동은 증기발생기 한 쪽의 루프에서 발생하였으며, 다른 쪽에서는 유동이 거의 일정하게 유지된다. 또한 냉각재재고량 84% 이하로 떨어지면 채널에서는 유동의 역흐름이 생기고, 약 70%의 재고량에서는 채널 유동은 성층화되고 또한 2상 조건을 형성하여, 채널출력이 정지되어 본 실험을 종료한다.

T8517 실험 초기조건은 저출력, 저압력 조건으로 2%씩 다섯 번 배수하고, 다음에 10%씩 네 번 배수하였다. 시험 시작과 더불어 때때로 중단되는 유동 (Intermittent flow)이 형성된다. 이 유동은 흐름이 거의 정체되어 (Near-stagnant condition) 있다가 갑자기 큰 유량이 간헐적으로 형성되는 유동을 의미한다. 약 70%의 재고량에서 채널의 역유동이 형성되었으며, 약 50% 재고량에서 채널 유동은 성층화되고 정체되는 조건에 도달하였다.

### 3. RELAP5 코드 계산 결과

RELAP5 코드 해석을 위한 Nodalization은 AECL에서 CATHENA 코드 분석을 위해 사용한 Nodalization으로 구성하였다 [2]. RELAP5의 정상상태 조건은 RD-14 실험결과에서 측정된 주요 변수들에 기초하여 선정되었다. 특히 계통 압력, 채널 압력 및 온도, 일차측 유량 등을 기준으로 선정하여 적절히 조절하였다. 그러나 2차측 조건, 특히 급수 조건이 제시되지 않아, 주로 급수 유량 및 온도를 변화시켜 일차측 변수들이 실험조건 값과 맞도록 정상상태 조건을 유도하였다.

실험 기간 동안 증기발생기 조건 및 급수유량의 변화가 관찰되었으나 이와 관련된 모든 변수의 변화량이 제시되지 않았다. 따라서 본 RELAP5 코드 분석에서는 증기발생기는 모두 일정한 경계조건이 유지된다는 가정에 근거를 두고 모델되었으며, 급수 유량 및 온도 또한 전 과도상태 동안 일정한 값으로 유지된다고 분석하였다. 자연순환 모사는 초기 RD-14 실험조건, 특히 초기 압력과 유량에 크게 의존함을 보여주었다. 같은 실험 종류에서도 여러 조건, 특히 일차측 압력, 이차측 급수 유량 및 냉각재 유량의 몇몇 조건에서 RELAP5 코드를 수행하였다.

#### 1) T8513 실험 모사

RELAP5 분석에서 계산된 결과는 그림 1에 제시되어 있다. 실험결과에서는 약 3000초에서 약간의 압력 변동이 있거나 3000초 이후부터는 일정하게 유지되며, 이는 실험 기간 중 이 시점에서 증기발생기 출구 일차측 온도의 큰 감소가 있었기 때문인 것으로 묘사되어 있다. 이것은 실험 과정동안 급수유량의 조건이 일정치 않아 발생하는 문제이며, 관련 자료 [3]에서는 급수유량과 관련된 변수들의 변화량이 제시되지 않았다. 따라서 RELAP5 분석에서는 2차측 증기발생기의 일정한 경계조

진, 즉 일정한 급수온도 및 유량을 가정하였다. 따라서 RELAP5 분석에서는 3000초에서 배수에 따라 별 변화 없이 압력이 연속적으로 감소한다.

6000초 이후에서는 CATHENA 코드와 같은 심한 유량 진동 현상은 RELAP5 코드에서는 나타나지 않음을 보여주고 있다. 약 6500초에서 채널 입구 냉각재는 단상유동으로 유지되고 출구측은 2상 유동이 형성되어 성층화가 일어난다. 전반적으로 RELAP5 코드 분석결과는 RD-14 실험결과를 잘 예측하고 있다.

## 2) T8515 실험 모사

그림 2는 T8515 실험에 대한 RELAP5의 계산결과를 보여주고 있다. 약 1500초까지는 냉각재 유량이 실험치와 잘 일치한다. 그 이후부터는 실험에서는 미소한 유량 진동이 발생하고 더 이상의 유량 증가는 존재하지 않지만, 계산결과에서는 그와 같은 유량진동은 발생하지 않을 뿐더러 압력이 조금 상승하여, 전체적으로 RELAP5 계산 압력이 높게 평가되었다. 6000초 이후부터는 유동이 크게 진동하는데 이는 실험결과와 비슷한 경향을 보인다. CATHENA 코드에서 나타나는 3000초 이후부터의 유동진동은 발생하지 않았다. 압력 예측은 3000초까지 크게 예측하나 그 이후부터는 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 CATHENA 코드에서 발생하는 큰 압력 진동은 발생하지 않았다.

결과적으로 RELAP5는 T8515 실험을 대체적으로 잘 모사하고 있음을 보여주고 있으나, 증기발생기의 2차측 압력이 낮은 상태에서 실시하는 실험을 코드로 모사할 경우에 증기발생기 2차측 조건, 즉 급수의 유량 및 온도의 정확한 모델이 중요한 것으로 나타났다. 따라서 실험조건과 다른 단순화된 증기발생기 2차측 모델로서는 실험에서 나타나는 유동의 진동을 예측하기는 쉽지 않았다.

## 3) T8517 실험 모사

T8517 실험에 대한 RELAP5 코드 계산 결과는 그림 3에 주어져 있다. 본 실험에서 6000초 이후부터 역유량 값으로 진동하는 현상 발생하는데 코드 분석에서도 역시 이와 같은 유량 진동이 일어나는지 확인하는 것이 중요하다. 그러나 RELAP5 코드 계산에서는 이보다 이른 시간인 약 2000초에서 역유량 진동현상이 관찰되었다. 역유량 진동현상이 일어나는 시점은 실험 이전의 초기 조건, 증기발생기의 냉각조건 등 여러 현상에 의해 지배됨을 알 수 있었다.

## 4. 결론

CANDU형 발전소를 묘사한 RD-14의 자연순환 실험결과와 RELAP5 코드 계산결과는 잘 일치하고 있다. 몇몇 실험한 코드 계산결과가 실험치와 조금의 차이를 보여주고 있으나, 이는 실험에서 몇몇 변수, 특히 급수 유량 및 온도 등의 변화량이 알려지지 않아 실제 실험과 다른 조건으로 분석되었기 때문이다. 이 변수들에 대해서 실험과 같은 조건으로 분석된다면 더욱 더 잘 예측할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. V.S. Krishnan and P. Gulshani, "Thermosyphoning Behavior of a Pressurized-Water Facility with CANDU-PHTs Geometry," 2nd International Topical Meeting on NPP T/H and Operations, April 1986, Tokyo, Japan.
2. J.P. Mallory and P.J. Ingham, "CATHENA Simulation of Thermosyphoning in a Pressurized-Water Test Facility," 1986.
3. I.G. Kim, Y.J. Cho and S. Lee, "RELAP5 Simulations of Critical Break Experiments in the RD-14 Test Facility, CNS Proceedings, 16th Annual Conferences CNS, Saskatoon, Jun., 1995.

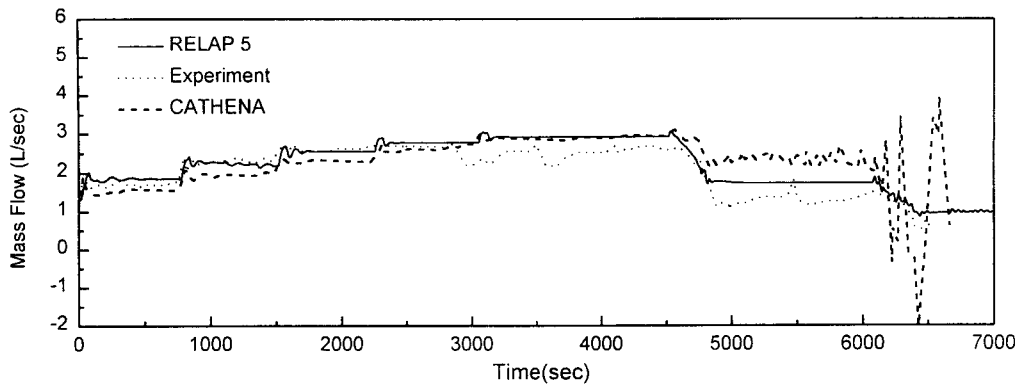


그림 1 T8513 실험에 대한 히터 2 입구의 유량

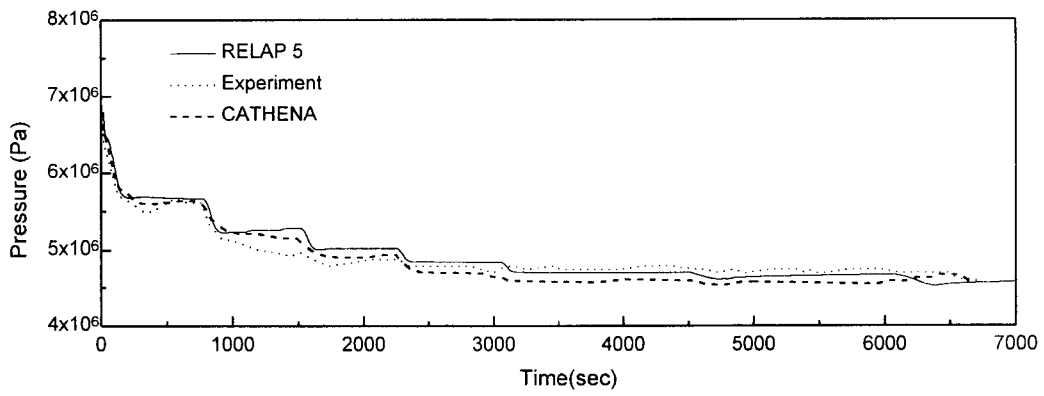


그림 1 (계속) 헤드 1의 압력

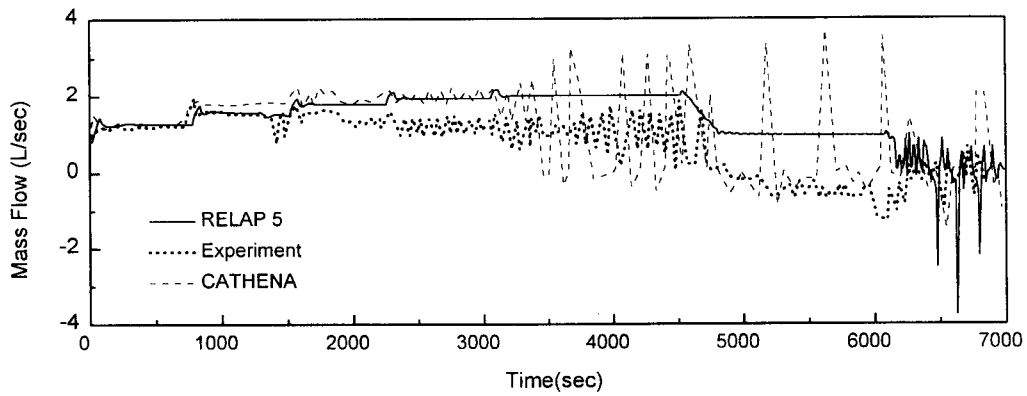


그림 2 T8515 실험에 대한 히터 2 입구의 유량

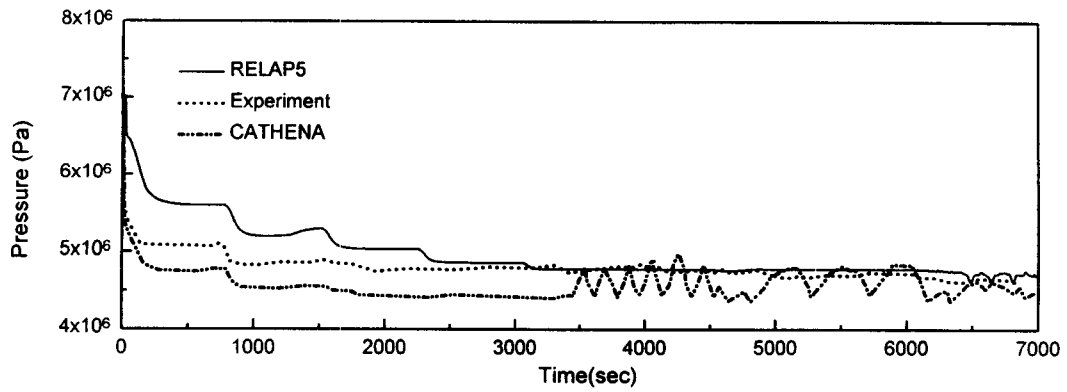


그림 2 (계속) 헤드 1의 압력

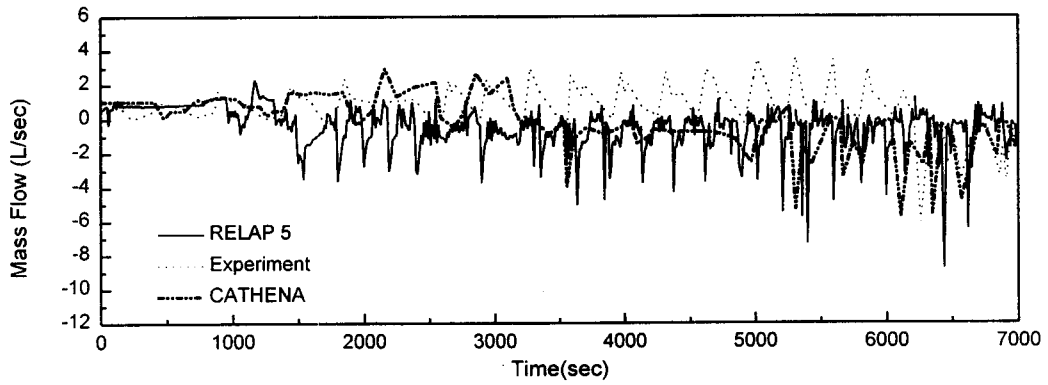


그림 3 T8517 실험에 대한 히터 2 입구의 유량

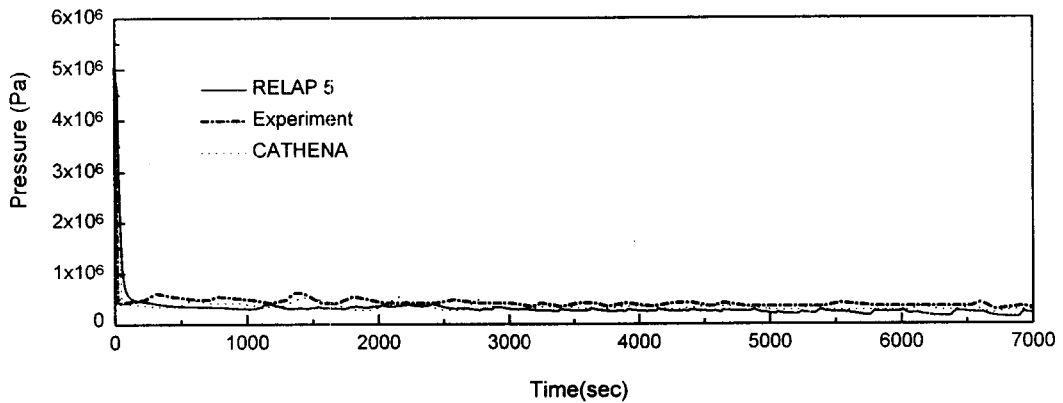


그림 3 (계속) 헤드 1의 압력