

## CANDU형 발전소의 주증기관 파단사고에 대한 RELAP5 코드 모사

양채용 · 이석호 · 이종인  
한국원자력안전기술원  
대전광역시 유성구 구성동 19

### 요 약

CANDU형 발전소의 사고해석 검증을 위한 계통분석 코드는 별도로 개발되어 있지 않으며, PWR 사고해석 검증용으로 널리 사용되고 있는 RELAP5 코드를 CANDU형 발전소의 사고해석 검증용으로 개발하려는 연구가 현재 진행되고 있다. CANDU형 발전소를 묘사한 RD-14 실험장치에서의 실험결과를 RELAP5 코드로 평가한 연구는 있으나, 실제 CANDU형 발전소의 사고해석에 적용한 예는 없다. 본 연구에서는 RELAP5 코드를 이용하여 CANDU형 발전소의 주증기관 파단사고를 분석하고, 그 결과를 월성 2,3,4 FSAR의 분석결과와 비교하여, CANDU형 발전소에 대한 RELAP5 코드의 적용 타당성을 평가하는데 그 목적이 있다. 연구결과, RELAP5 코드는 CANDU형 발전소의 주증기관 파단사고를 잘 모사하고 있으며, CANDU형 발전소의 사고해석 검증용 코드로서 적절함을 보여주고 있다.

### I. 서론

RELAP5 코드는 PWR형 발전소의 사고분석으로 개발된 최적방법의 열수력 계통 코드로서 PWR형 발전소 사고해석을 위한 검증용으로 널리 사용되고 있다. 그러나 CANDU형 발전소의 사고해석을 위한 검증용 코드는 별도로 개발되지 않아, CANDU형 발전소의 사고해석에 대한 검증용 코드로서 RELAP5의 적용 타당성을 연구한 바 있다 [1,2,3].

RD-14은 CANDU형 발전소를 묘사하기 위해 설치된 실험장치로서 이곳에서 자연순환 실험 [4], RIH/ROH LOCA 실험 [5] 등 실제 CANDU형 발전소와 유사한 사고를 묘사하기 위한 실험을 수행하였다. 참고문헌 1, 2, 3에서 RELAP5 코드의 CANDU형 발전소에 대한 적용 타당성 평가를 목적으로 RELAP5를 사용하여 RD-14의 RIH/ROH LOCA 실험과 자연순환 실험을 모사하였다. 이 연구에서의 RELAP5 코드 계산결과는 RD-14 자연순환과 RIH/ROH LOCA 실험결과와 잘 일치함을 보여주고 있어, RELAP5 코드는 CANDU형 발전소의 사고해석을 잘 모사할 수 있을 것으로 평가되었다.

위에서 설명한 바와 같이 RELAP5 코드로서 RD-14 실험장치와 관련된 실험에 대한 평가는 수행한 바 있으나, 실제 CANDU형 발전소의 사고해석을 모사한 적은 없다. 본 연구는 CANDU형 발전소를 대표하는 월성 2,3,4호기 발전소를 RELAP5 코드를 사용하여 사고해석을 모사하여, CANDU형 발전소 사고해석에 대한 RELAP5 코드의 적용 타당성을 평가함은 물론, 월성 2,3,4호기 사고해석을 검증하기 위한 목적으로 본 연구가 수행되었다. 주요 사고로서 LOCA 사고와 Non-LOCA를 대표하는 주증기관 파단사고를 선정하였으며, 본 연구에서는 주증기관 파단사고에 대한 연구결과를 발표한다.

주증기관 파단사고는 증기관 헤드에서의 100% 파단을 가정하였으며, RELAP5 분석결과는 월성 2,3,4호기 FSAR에 제시된 CATHENA 계산결과와 비교된다. CATHENA 코드는 AECL이 CANDU형 발전소의 사고해석을 위해 개발한 코드이며, 월성 2,3,4호기 사고해석을 수행한 대표적인 열수력 계통분석 코드이다. 따라서 CATHENA 계산결과와 RELAP5

계산결과를 비교하여, RELAP5 코드가 주증기관 파단사고를 잘 모사하고 있는지 평가하고, 사고후 주요 계통의 작동 시점, 원자로 변수의 변화량 등 CATHENA 계산결과에 타당성을 평가한다.

## II. 월성 2,3,4호기 계통분석

RELAP5 코드를 사용하여 사고해석을 수행하기 위해서는 월성 2,3,4호기 발전소에 대한 계통분석이 먼저 수행되어야 한다. 즉 RELAP5 코드에 적당한 입력 (Input Deck) 작성은 월성 2,3,4호기 FSAR에서 분석된 계통 Nodalization으로 기초로 만들어졌다. 이로부터 운전 논리, 계통 작동 논리 등이 작성되어 정상상태 계산이 수행되고, 각각의 사고해석이 수행되었다.

### II.1 월성 2,3,4호기 계통분석

RELAP5 코드 분석을 위한 월성 2,3,4호기 계통 Nodalization은 월성 2,3,4호기 FSAR에 사용된 CATHENA 코드와 같은 Nodalization을 구성하였다. 또한 각 노드 (Node) 및 계통의 상세 데이터도 역시 CATHENA 코드의 입력값을 사용하였다.

이와 같이 구성된 Nodalization을 기초로 정상상태 계산이 수행되었으며, 표 1은 103% 전출력에서의 정상상태 계산결과를 보여주고 있다. CANDU형 발전소는 노심 출구에서 약 4.7%의 Quality를 유지하는 특징이 있다. 정상상태 코드 분석시 주요 변수들이 각 루프에서 약간의 진동 (Oscillation)이 발생하지만, 평균값이 실제 운전값과 유사한 결과를 보여주고 있다.

### II.2 계통의 Control Logics

주증기관 파단사고 후 일차측 냉각재의 과냉각으로 노심의 온도와 압력이 급격히 감소하여, 여러 원자로 정지신호에 의해 원자로 정지된다. 사고해석시 원자로 정지는 냉각재 계통 저압신호에 의해 원자로 정지된다고 가정하였다. 원자로 정지 후 계속되는 과냉각으로 압력이 감소하여 LOCA 신호가 발생하여 충수 및 배수계통 (Feed & Bleed System) 및 가압기의 격리밸브가 작동되어 냉각재 계통으로부터 격리되어, 5.25MPa 압력 이하에서 10분 동안 지속되어 발생하는 안전주입 신호에 의해 LOCA 정지신호 후 10분에 안전주입수가 공급된다.

주증기관 파단사고는 과도상태 동안 급수에 대한 공급 가정이 사고에 중요하게 영향을 미치는 것으로 나타났다. FSAR에서는 급수량이 충분하여 과도상태 동안 충분히 공급되는 것으로 분석하였다. 본 분석에서는 출력과 증기발생기 수위에 의해 조절되는 급수밸브의 Control Logic에 따른 공급을 가정하였다. 또한 주증기관 파단사고시 액체방출밸브 (LRVs)가 작동될 수 있으며, LRVs는 열림설정치 10.24MPa, 닫힘설정치 10MPa에서 작동되는 것으로 가정하였다. 실제 LRVs의 열림 시간은 1초, 닫힘 시간은 3초이나, 본 분석에서는 열림/닫힘시간을 모두 2초로 모델하였다.

ECC 계통 작동은 우선 LOCA 신호 후 ECC 계통 후단 밸브가 열리고, 안전주입 작동 신호가 발생하면 ECC 탱크에 있는 밸브가 최종적으로 열려 냉각재계통으로 안전주입수가 공급된다. 그리고 냉각재압력이 ECC 탱크 압력인 4MPa 이상에서는 역지밸브에 의해 냉각재가 ECC 탱크로 역류되는 것을 막는다.

## III. 주증기관 파단사고의 RELAP5 코드 모사

월성 2,3,4호기 FSAR에는 냉각재 저압력 정지신호에 의해 원자로 정지된다고 가정하였으며, 본 분석에서도 이에 기초하여 분석하였다. 냉각재펌프는 10% 전출력 이하에서 압력이 2.5MPa 이하가 되었을 때 2분의 지연시간으로 정지되는 것으로 고려하였다. 주요 과

도 진행상황은 표 2에 제시되어 있으며, FSAR 결과와 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

주증기관 파단사고의 특징은 안전주입이 시작되면서 압력이 급격히 증가하여 결국에는 액체방출밸브가 열리는 압력까지 증가하고, 액체방출밸브의 작동으로 급격한 압력 증가가 중지된다는 것이다.

그림 1은 헤더에서의 압력 변화를 보여주고 있으며, FSAR의 결과와 거의 일치하고 있다. 안전주입이 시작된 후 압력이 급격히 상승하는데, 이것은 냉각재가 가득 찬 상태에서 안전주입이 발생하여 추가의 물이 주입되기 때문이다. 그러나 FSAR에서는 그 압력 상승은 액체방출밸브(LRVs)의 작동에 의해 중지되고 압력이 다시 급강하는 결과를 초래하였지만, 본 분석에서는 압력이 10.24MPa에서 LRVs가 작동하여 열리지만, 이내 압력이 10MPa에 도달하여 LRVs가 닫혀 압력이 더 이상 감소하지 않고, 10MPa 근처에서 압력이 조절되는 현상을 보여주고 있다. 시간이 흐름에 따라 노심 냉각 조건이 안정화되어, 압력은 차차 감소하는 경향을 보여주고 있다.

그림 2은 헤더에서의 냉각재 유량 변화를 나타내고 있다. 주증기관 파단 후 초기 냉각재 변화를 과냉각으로 냉각재유량이 증가하지만, 유량은 차차 감소하여 결국에서는 자연순환에 의해 노심은 냉각된다. 최대 유량은 FSAR의 결과보다 다소 작으나, 전체적으로 거의 일치함을 보여주고 있다. 또한 그림 3,4는 냉각재온도 변화와 출구헤더에서의 Quality를 나타내고 있다. 또한 그림 5,6은 각각 안전주입유량과 증기 및 급수유량을 나타내고 있다.

냉각재 상실사고를 제외한 사고에 대해 안전주입이 발생하면, 안전주입과 동시에 압력이 급격히 상승하여 LRVs가 작동된다. 따라서 이와 같은 사고해석시에 LRVs의 작동 모델이 사고해석에 중요하게 영향을 미치는 것으로 평가되었다. RELAP5 분석결과, 현재 LRVs의 열림설정치와 닫힘설정치가 큰 차이가 없어 LRVs가 열린 후 압력이 급격히 감소하지 않고, 냉각재압력이 일정 기간 LRVs 작동설정치에서 조절되는 것으로 평가되었다.

#### IV. 결론

RELAP5/Mod3.2를 사용하여 103% 전출력시 100% 증기헤더관 파손 사고를 모사하였으며, 월성 2,3,4호기 FSAR에 제시된 CATHENA 계산결과와 아주 잘 일치된 결과를 보여주었다. Non-LOCA를 대표하는 주증기관 파단사고시 RELAP5 코드는 CANDU형 발전소 사고해석의 검증용 코드로서 적절함을 보여 주었다. 추후 LOCA 사고를 분석하여 사고해석에 대한 전반적인 결론을 도출할 필요가 있다.

주증기관 파단 사고해석시 주급수 및 액체방출밸브의 작동 가정은 사고에 중요한 영향을 미치는 것으로 평가되었다. 액체방출밸브가 작동되는 시점부터는 CATHENA 계산결과와 다른 결과를 보여주고 있으며, 이것은 현재의 액체방출밸브 모델링에 대하여 액체방출밸브의 열림설정치(10.24MPa)와 닫힘설정치(10MPa)의 차이가 작아 액체방출밸브의 역할을 수행하지 못하고, 냉각재의 압력을 그 설정치 근처에서 유지하기 때문인 것으로 분석된다. 추후 관련 밸브의 열림/닫힘 시간을 상세히 묘사하여 액체방출밸브 작동이후 보다 적절한 모사가 요구된다.

#### 참고문헌

1. 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.
2. 양채용, 조용진 등, "RD-14 자연순환 실험에 대한 RELAP5 코드 모사," '96 추계학술발표회논문집(I)
3. "CANDU형 원자로 열수력 사고해석 코드 체계 평가," 과학기술처, KINS/GR-111, 1996.

4. 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.
5. J. P. Malloy, "CATHENA Idealization - Documentation of the RD-14 Test Facility, RC-54-1," AECL, 1988. Also, B. N. Hanna and T. E. Macdonald, "CATHENA Idealization - Documentation of the RD-14 Test Facility, RC-54-2," AECL, 1988.

<표 1> 월성 2,3,4 원자로 정상상태 초기변수 (평균값)

|                       | 월성 2,3,4 FSAR | RELAP5 |
|-----------------------|---------------|--------|
| 원자로 출력 (%FP)          | 103           | 103    |
| RIH 압력 (MPa)          | 11.4          | 11.4   |
| ROH 압력 (MPa)          | 10.0          | 10.2   |
| RIH 온도 (°C)           | 268           | 262    |
| ROH 온도 (°C)           | 310           | 311    |
| ROH 유량 건도 (%)         | 4.7           | 4      |
| 노심 Mass Flow (kg/sec) | 1897          | 1812   |
| 가압기 수위                | 12.48         | 12.5   |
| 증기드럼압력 (MPa)          | 4.69          | 4.77   |
| 총 증기유량 (kg/sec)       | 1018          | 1100   |
| 총 급수유량 (kg/sec)       | 1061          | 1100   |

<표 2> 100% 증기헤더관 사고 추이

|                           | 월성 2,3,4 FSAR<br>(초) | RELAP5<br>(초) |
|---------------------------|----------------------|---------------|
| 증기헤더관 파단                  | 0                    | 0             |
| 냉각재저압 정지변수에 의<br>해 원자로 정지 | 30                   | 20            |
| LOCA 신호,<br>회로 격리신호       | 64                   | 55            |
| 냉각재펌프 정지신호                | 80                   | 80            |
| 냉각재펌프 정지                  | 200                  | 200           |
| 안전주입 시작                   | 664                  | 655           |
| 안전주입 정지                   | 681                  | 668           |
| 액체방출밸브 열림,<br>압력 최대값      | 718                  | 705           |

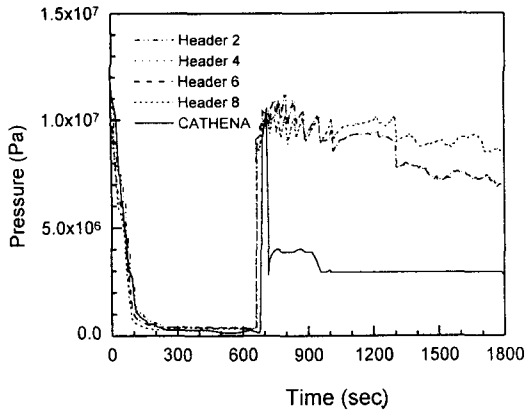


그림 1 Inlet Header Pressure

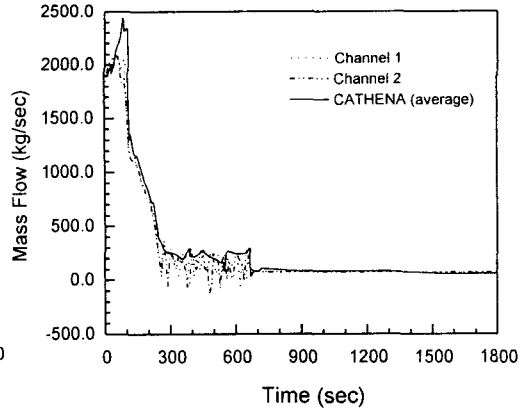


그림 2 Mass Flow Rate

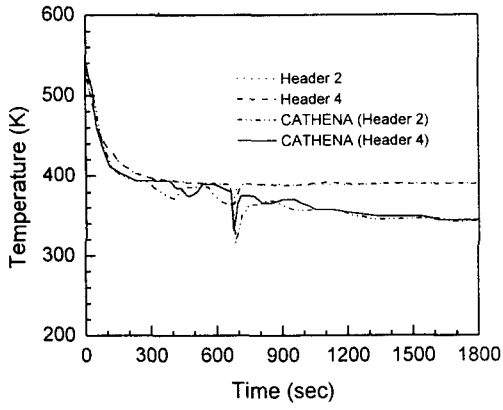


그림 3 입구헤더의 압력

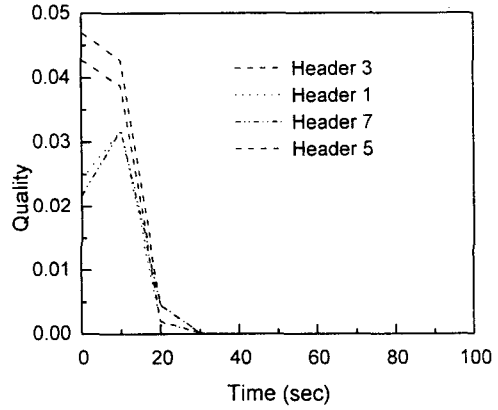


그림 4 출구헤더의 Quality

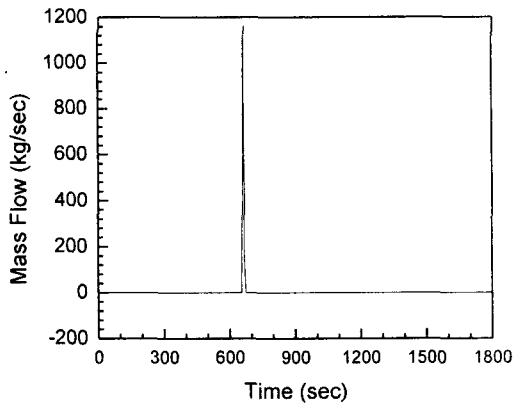


그림 5 안전주입탱크를 통한 안전주입수량

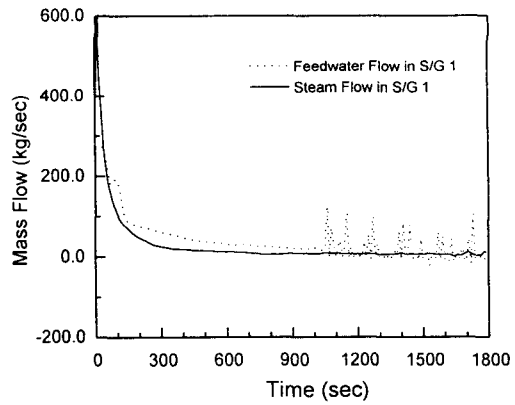


그림 6 증기발생기 1에서의 증기유량 및 급수유량