

# CANDU 핵연료 채널의 Post-Blowdown 시 열유동 현상에 대한 정상상태 3차원 CFD 해석

강형석, 이보옥, 민병주

대전 유성구 덕진동 150번지 한국원자력연구소, 305-600, hskang3@kaeri.re.kr

## 1. 서론

CANDU에서는 비상노심계통이 작동하지 않는 상태에서 대형 냉각재배관 파단사고가 나면 핵연료채널 내에서 냉각재가 파단 부위로 급속히 방출되어 기포화되면서 채널 출력이 급격하게 증가하는 power pulse 현상이 일어난다. 이때 원자로는 보호계통의 작동으로 정지되고, 원자로 출력은 잠열수준으로 떨어진다[1]. 이때 안전기준 중의 하나는 약 1 시간 동안의 blowdown 및 post-blowdown 기간에 냉각기능이 상실된 핵연료 채널내에서 핵연료 압력관의 건전성 유지와 채널의 파손방지이다[2]. 이와 같은 핵연료 및 압력관 가열, 팽창현상에 대한 이해와 핵연료채널의 사고안전해석코드에 사용할 모델 개발 및 검증을 위해서 모의 실험이 캐나다 AECL에서 수행되었다[3]. 실험결과에 의하면 과열 증기가 핵연료 채널 내로 흘러가서 가열되다가 국부적으로 metal-steam exothermic 반응을 일으켜 수소생성으로까지 이어져 가는 post-blowdown 현상은 3차원의 국부적인 특성이 중요한 것으로 나타났다. 따라서 현재 핵연료채널 사고해석에 사용되고 있는 1차원 코드인 CATHENA 나 CHAN-II 을 이용하여 post-blowdown 현상을 해석하는 것 보다 3차원 CFD 코드를 이용하는 것이 실제현상을 잘 모사할 수 있는 것으로 판단된다. 그리고 그 해석결과를 이용해서 1차원 해석코드의 모사능력을 평가하는데도 유용하게 사용하게 될 것으로 예상된다. 따라서 이런 목적을 위해 28봉 핵연료 채널 실험[3]에 대한 3차원 유동 및 열전달 해석을 상용코드인 CFX5.7 를 이용하여 수행해서 실험결과와 비교하였다.

## 2. Post-Blowdown 실험

실험장치(CS28-1)는 직경이 약 13cm, 길이가 약 2m 으로, 28 개의 핵연료채널, 압력관 및 칼란드리아관으로 구성되어 있고, 약 40°C 로 유지되는 감속재 수조 안에 잠겨져 있다[3]. 핵연료봉은 전기 가열기로 모사하였고, 압력관과 칼란드리아관 사이에는 상온, 대기압 상태의 이산화탄소가 약 6l/m 의 유량으로 흐른다. 실험은 대기압에서 온도가 약 700 °C 인 과열증기를 10.2g/s 유량으로 전기로 가열되고 있는 28 봉 핵연료 다발이 위치한 압력관 내로 흐르게 하면서 핵연료, 피복관, 압력관, 칼란드리아관,

증기 및 감속재의 온도를 총 84 곳에서 측정하였다. 또한 실험은 post-blowdown 시나리오에 따라 약 2400 초 동안 수행되었고, 실험초기에는 가열기 출력을 일정하게 유지하다가 1500 초 후부터는 출력을 상승시켰다. 실험결과 분석에 의하면 가열기에서 생성된 열의 약 70~80%가 복사열전달에 의해서 감속재 수조로 전달되는 것으로 나타났다[3]. 이 실험장치의 증기관 입구에서는 약 700 °C 인 과열증기가 흘러 들어오면서 가열되지 않는 핵연료 모사 장치 표면에서 응축현상이 일어나서 핵연료채널 입구에서는 증기의 온도가 650~550 °C 로 분포하는 것으로 나타났다[3].

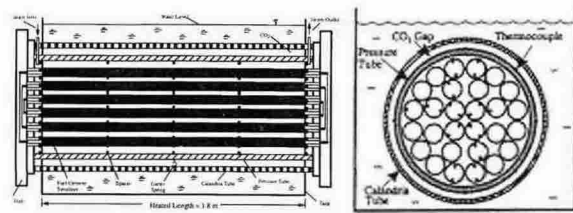


그림 1. CS28-1 실험장치 측면도 및 정면도[3]

## 3. CFD 해석

본 연구에서는 Post-blowdown 실험에 대한 비교검증 CFD 해석을 정상상태 실험에 대해서만 수행하였다.

### 3.1 격자모델 및 경계조건

실험장치에서 핵연료를 모사하는 가열기부터 칼란드리아관까지 모사하는 격자를 1/8 대칭 조건을 이용해서 정렬격자로 약 13만 개를 생성하였다. 정상상태 실험에서는 감속재 수조 온도가 거의 일정하게 40 °C 로 유지되기 때문에 CFD 계산의 복잡성을 피하기 위해서 따로 냉각유동으로 모사하지 않고 접촉된 칼란드리아관의 외벽온도를 수조온도와 같도록 열전달 온도 경계조건을 주었다. 과열증기와 이산화탄소의 입구경계조건은 Dirichlet 조건을 활용하여 실험데이터를 이용해서 주었다. 특히 증기온도는 부수로의 높이에 따라 일차함수로 표현되는 증기온도를 각 부수로로 유입되는 증기의 온도로 가정하여 모사하였다. 출구조건은 Newmann 조건인 압력경계조건을 사용하였다. 전기 가열기에서 발생하는 열출력은 열생성(heat

source) 조건을 사용하였다.

3.2 CFX5.7 의 유동 및 열전달 모델

가열기에서 생성된 열이 전도에 의해 핵연료 피복관 표면까지 전달되고, 표면에서는 증기에 의한 대류 열전달에 열이 실험장치 밖으로 빠져나가고, 복사 열전달에 의해 피복관 표면에서 압력관 내벽으로 열 전달이 이루어진다. 압력관과 칼란드리아관 사이로 흐르는 이산화탄소는 유량이 작아서 거의 정체된 상태이므로, 압력관 외벽과 칼란드리아 내벽 사이의 온도차이에 의한 복사열전달만 존재한다. 이런 열유동 현상을 CFX5.7 에 내장된 유동모델과 열전달 모델을 이용하여 계산하였다. 과열증기의 유동은 k-ε 난류모델과 scalable 벽법칙을 사용하여 계산하였고, 복사모델은 discrete transfer 모델을 사용하였다[4].

3.3 해석결과 분석

먼저 해석결과가 정상상태조건을 만족하는지 확인하기 위해 입구측 증기 에너지 유입율과 출구측 증기 에너지 방출율과 칼란드리아관을 통해 수조냉각수로 방출된 에너지 방출율의 합이 핵연료를 모사하는 가열기 출력과 일치하는 지를 확인하였다(표 1). 그리고 실험에서 핵연료 채널 입구 내로 유입되는 증기의 온도가 측정된 2 개 위치에 대해서 증기의 주 유동 방향으로의 온도변화 정도를 CFX5.7 로 예측된 결과와 비교하였다. 실험에서는 TC64A 의 온도가 600 °C, TC65 에서는 700 °C 로 약 100 °C 증가하였고, TC64 에서는 550 °C, TC66 에서는 670 °C 로 약 120 °C 증가하였다. 여기서 TC64A 의 온도는 선형보간에 의해 가정된 값이다. CFX5.7 해석결과에 의하면 TC65, TC66 에서는 각각 710.6 °C, 659.1 °C 로 예측되었다. CFX5.7 해석결과가 실험결과에 비해서 TC65 위치에서는 높게 예측하고, TC66 위치에서는 낮게 예측한다. 이것은 CFX5.7 해석이 space grid[3]를 모사하지 않았기 때문에, 증기가 space grid 를 지날 때마다 열혼합이 발생하는 것을 모사하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

표 1. 정상상태 열평형 검증

열 평형(Heat Balance)		
열 생성	대류 열전달	복사 열전달

(전기 가열기)	(과열 증기)	(칼란드리아 외벽)
1.276 KW	0.220 KW	1.052 KW

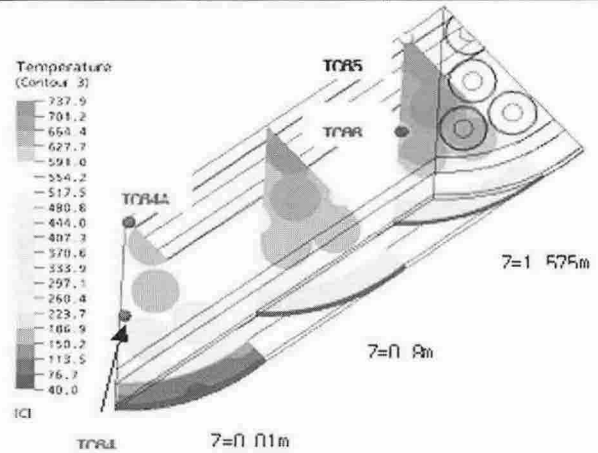


그림 2. 핵연료채널 온도분포 해석결과

4. 결론

본 연구를 통해서 CFD 해석이 CANDU 핵연료채널 내 post-blowdown시 3차원 열유동 현상에 대해서 타당한 결과를 제시하는 것으로 입증되었고, CFD 격자모델에 space grid 만 추가하면 실험결과에 더 근사하게 접근하는 결과를 얻게 되리라 예상 할수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 연구개발사업의 일환으로 이루어졌습니다.

참고문헌

[1] 이보욱, 민병주, CANDU-6 원자로의 Post-Blowdown 핵연료채널 해석을 위한 CATHENA 코드 모델 개발 및 검증, 04 원자력학회 춘계 학술대회 논문집, 2004.  
 [2] D. J. Oh, Fuel Channel Analysis for Loss-of-Coolant Accident(LOCA), AB, Wolsong NPP 2, 3, 4, 86-03500-AB-018, Rev. 0, KAERI, 1993.  
 [3] Q. M. Lei, D. B. Sanderson, K. A. Haugen and H. E. Rosinger, Post-Test Analysis of the 28-Element High-Temperature Thermal-Chemical Experiment CS28-1, Proceedings of International Conference on Simulation Methods in Nuclear Engineering, Montreal, Canada, 1993.  
 [4] ANSYS Inc., CFX5.7 Manual, 2004