

## 비상노심냉각 상실을 동반한 35% 입구모관 파단사고에 대한 CANDU-6 원자로 감속재 과도해석

### A Moderator Transient Analysis of the CANDU-6 Reactor for the 35% RIH Breaks with a Coincident Loss of ECC Injection

윤철, 이보옥, 민병주  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

개발된 CFD 모델을 사용하여, 비상노심냉각 상실을 동반한 35% 입구모관 파단사고에 대하여 감속재 과도해석을 수행하였다. 핵연료 채널의 건전성은 두가지 주요한 변수로서 평가되는데, 그 변수는 압력관 접촉온도와 지역적 감속재 과냉각도이다. 실험적 연구로부터 28°C보다 높은 감속재 과냉각도는 PT/CT 접촉온도가 800°C를 넘는 경우에도 핵연료 채널의 건전성을 보장한다. 이 연구에서 파단 후 550초까지의 감속재 천이과정 중, PT/CT 접촉이 일어나는 부위에서 감속재의 최소 과냉각도 28°C보다는 높게 유지됨이 밝혀졌다. 증기 대류나 지르코늄-증기 반응과 같은 장기적인 영향을 고려하기 위해, 550 초 이후의 과도계산이 계속될 것이다.

#### Abstract

By using the developed CFD model, a transient moderator analysis has done for 550 sec of the 35% RIH(Reactor Inlet Header) Breaks with a coincident loss of ECC(Emergency Core Cooling) Injection. The fuel channel integrity can be examined by two key parameters, which are the pressure tube contact temperature and the local moderator subcooling. From the experimental data, the moderator subcooling of 28°C or higher guarantees fuel channel integrity even when PT/CT contact temperature is higher than 800°C. It is found in this study that the local minimum subcooling near the PT/CT contacts is well bounded over 28°C during the transient up to 550 seconds after the break. The transient computation after 550 sec will be

continued to consider the long-term effects such as steam convection and Zr-steam reaction.

## 1. 서 론

CANDU-6형 중수로에서 비상노심냉각 상실을 동반한 냉각재 상실 사고가 일어날 경우, 핵연료 채널의 건전성은 감속재가 궁극적인 열침원으로 작동할 수 있는가 여부에 의존한다. 방출과정(Blowdown Phase) 기간 중 일차측의 압력과 온도가 높은 수준을 유지하는 경우나, 또는 후-방출과정(Post-Blowdown Phase) 기간 중 증기대류나 지르코늄-증기 반응과 같은 장기적인 영향으로 압력관의 온도가 높게 유지될 경우, 압력관은 부분어 오르거나 처지게 되어 압력관을 둘러싸고 있는 칼란드리아 관과 접촉하게 된다.(PT/CT 접촉) 이때, 접촉면을 통해 감속재로 열전달이 급격히 일어나게 되는데, 감속재의 과냉각도가 충분한 여유도를 제공하지 못하는 경우에는 칼란드리아 관 표면에 막비등이 지속적으로 일어나게 되어 핵연료 채널의 건전성이 위협받게 된다. 따라서 본 연구의 목적은 각 PT/CT 접촉이 일어나는 위치에서 감속재의 과냉각도를 해석하는 전산유체역학 모델을 만들어내는 것이다. 설계기준사고 중 감속재로의 열전달이 가장 많은 비상노심냉각 상실을 동반한 35% 입구모관 파단사고를 대상사고로 하여 과도계산이 수행되었고, 사고초기에 작동하도록 되어 있는 초기 감속재냉각(fast moderator cooldown)은 고려하지 않았고, 클래스 IV 전원은 공급된다고 가정하였다. 이 연구를 위하여 AEA Technology에서 개발된 범용 CFD 코드인 CFX-4.4가 사용되었다.

1995년 Collins<sup>1)</sup>는 극좌표형 격자구조계를 적용하여, 범용 CFD 코드인 PHOENICS2를 사용한 월성 2/3/4호기 감속재 과도해석을 수행하였다. 이 연구의 결과는 본 연구의 결과와 더불어 결과 부분에 도시된다. Yoon 등<sup>2)</sup>은 방사형 격자 구조계를 사용한 CFD 모델을 이용하여, 비상노심냉각을 동반한 35% 입구모관 파단사고에서 방출과정(Blowdown Phase) 동안인 파단후 40초까지 감속재 해석을 수행한 바 있다. 두 선행 연구 모두에서 노심 영역에 있는 380개의 칼란드리아 관 매트릭스 주위의 감속재 유동을 해석하기 위해 다공성 매질 근사법을 적용하였으나, 그 매질내 3차원 수력학적 저항이나 가열효과 등이 고려되지 못하였다. 본 연구에 사용된 CFD 모델에 대한 설명이 다음절에서 주어지며, 선행 연구에 비교해 개선된 사항이 자세히 설명된다.

## 2. 감속재 과도해석을 위한 CFD 모델

CANDU-6형 원자로의 용기는 길이 6 meter, 지름 7.6 meter의 누워있는 원통 모양이며, 그 내부는 중수인 감속재로 채워져 있다. 감속재는 8 개의 주입 노즐을 통해 용기안으로

분사되고 두 개의 출구를 통해 용기 밖으로 열교환기를 거쳐 다시 용기로 돌아가는 두개의 결합된 순환회로를 구성한다. 칼란드리아 용기 안 작은 동축의 노심영역에는 380개의 칼란드리아 관들이 있고, 그 외에도 다양한 제어 계측 장비가 존재한다. 도형을 단순화시키기 위하여 다양한 제어 계측 장비가 없다고 가정하고, 칼란드리아 관 매트릭스를 다공성 매질로 근사하였다. 용기 내 난류의 생성과 소산을 모사하기 위해  $k-\epsilon$  난류 모델과 로그 벽법칙을 사용하였고, 부력은 Buossinesq 근사법을 적용하였다.

### 나비형 격자구조

CANDU-6 감속재 유동해석을 위한 최적의 격자구조의 구성요건은 다음의 세 가지이다. 첫째, 노심 영역의 다공성 매질에서 가능하면 격자를 크게 생성하여 각 셀당 고체와 유동공간의 비가 균일하게끔 만든다. 둘째, 노심 외부의 반사체 영역에서는 유동 속도가 빠르고 칼란드리아 외벽이 있으므로 차별화 오차를 줄이기 위해 셀의 크기를 적정한 수준으로 작게 유지한다. 셋째, 감속재의 유동은 주입 노즐로부터의 제트 모멘텀 힘과 노심에서 형성된 부력의 상호 작용으로 결정되므로 주입노즐의 도형과 주입속도 구배는 가능한한 실제에 가깝게 처리한다.

현 월성 2/3/4호기 감속재 해석에서는 기존의 방사형 격자구조를 지양하고 보다 개선된 나비형 격자구조(그림 1)를 적용하였다. 나비형 격자구조는 앞에 열거한 세가지 요건을 보다 잘 만족한다. 이 연구에서 사용된 나비형 격자구조는 총 4개의 블록으로 구성되고, 총 셀의 수는 38,272개이다. 벽 근처의 셀의 YPLUS 값은 벽법칙에서 요구되는 30~100이다.

### 다공성 매질 내 3차원 저항모델

다공성 매질에서 지배 방정식의 각 항에 기공율(porosity)이 적용됨으로 유동공간의 축소로 인한 가속이 고려된다. 반면에 다공성 매질이 가정된 공간을 유체가 통과할 때 받는 저항은 지배 방정식의 생성항으로 처리하였다. Yoon 등<sup>2)</sup>에서는 Hadaller 등<sup>3)</sup>이 실험으로 구한 관 다발의 축방향에 직각으로 흐르는 2차원 유동 저항식을 적용하였다. 이때 그 실험식은

$$\left. \frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{\substack{corrs, \\ axial}} = Const(T) \cdot V^n \quad (1)$$

형태로 나타낼 수 있다. Const(T)는 온도의 함수로 나타나는 상수, n은 1.7 ~ 1.8인 값, 그리고 V는 각 위치에서 유속이다. 그러나, 2차원 저항식을 적용할 경우 불가피하게 유동의 성분 분해과정이 필요하고, 이 과정에서 속도 크기의 왜곡이 일어나게 되어 그에 따른 오차가 생성된다.

이 오차를 최소화하고, 저항 모델을 3차원화하기 위해 입사각에 따른 압력강하 관계식 도입하였다. 그림 2는 입사각에 따른 압력강하 실험의 개념도와 그 실험 자료<sup>4)</sup>로부터 도

출된 보정식을 나타낸다. 보정식은 Boltzmann의 Sigmoidal 식을 기준으로 상수를 계산하였다.

### 과도 열부하의 생성항 처리

비상노심냉각을 동반한 35% 입구모관 파단사고에서 감속재로 전달되는 총출력이 모든 설계기준사고 중 최대이고, 따라서 이 연구에서 대표 냉각재 상실 사고로 선정되었다. 그림 3은 이 경우 감속재와 열교환기로의 총 열부하를 보여준다. 실선으로 표현된 감속재로의 총 열부하는 세 개의 피크군을 갖는데, 첫 번째 피크는 1초에 일어나는 냉각재 상실로 인한 출력펄스이고, 20~40초에 일어나는 피크군은 방출기간 중 PT/CT 접촉에 의한 감속재로의 열전달이다. 세 번째로 500초 이후 일어나는 완만한 피크군은 후-방출기간 중 증기 대류나 지르코늄-증기 반응과 같은 장기적인 영향에 의한 PT/CT 접촉에 따른 열전달이다. 따라서, 그림 3의 B 부분은 대체로 균일한 분포로 감속재를 가열하는 반면, A 부분은 PT/CT 접촉에 의한 감속재로의 열전달로서 채널, 번들 단위의 매우 국부적인 열부하가 된다. 이 열부하를 얼마나 정확히 처리하느냐가 본 감속재 해석의 불확실성을 결정짓는 주 요소가 된다.

이 모델에서는 그림 1에서 나타난 격자와 채널, 번들 위치의 상응에 따라, 매 과도시간에서 각 채널, 번들의 열부하를 그에 상응하는 격자 셀이 차지하는 부피에 따라 나누어 줌으로써 최선의 열부하 적용을 실현하였다.

## 3. 결과와 토의

그림 4은 월성 최종안전성분석보고서<sup>5)</sup>(FSAR)에서 제공되는 접촉비등 실험결과이다. 감속재의 과냉각도가 약 28°C이상일 때, 칼란드리아 관 외벽에서 막비등은 어떠한 경우에도 일어나지 않음을 알 수 있다. 압력과 온도가 800°C 이하로 낮을 경우 막비등을 방지하는 과냉각도에 여유가 더 생기나 그 영역에서 압력관의 파손으로 실험자료의 신뢰도가 떨어지므로 보수적으로 감속재의 최소 과냉각도 28°C를 막비등 존재 유무의 기준으로 사용하였다.

표 1은 방출과정 동안 파단회로에서 임계유로 채널의 6 그룹화이고, 표 2는 후-방출과정 동안 파단회로에서 임계 및 비임계 유로 채널의 6 그룹화이다. 방출과정(Blowdown Phase)는 파단 후 40초까지의 기간인데, 이 기간 중 일차측의 압력은 약 30기압 정도까지 떨어진다. 방출과정 중 출력이 낮은 그룹 5와 6에서는 PT/CT 접촉이 일어나지 않는다. 표 3은 방출과정 중 PT/CT 접촉결과로서 각 PT/CT 접촉의 시간과 위치, 압력관 온도를 나타낸다. 표 4는 각 채널열의 깊이에서 수압에 의한 정압의 변화와 그에 따른 비등점의 변화를 보여준다.

그림 5는 파단 사고 후 100초의 감속재 해석으로 얻어진 속도장과 온도분포를 보여준다.

파단 후 550초까지의 유동패턴은 국부적으로는 속도장의 변화를 보여줌에도 불구하고, Carlucci 등<sup>6)</sup>에 의해 정의된 혼합방식 유동패턴(Mixed-type flow pattern)을 유지한다. 이 유동 패턴의 특징은 각 단면에서 비대칭적인 속도장과 온도분포, 한쪽 주입구에서 분사된 찬 유체의 제트-반전(jet reversal), 그리고 노심 영역의 느린 2차 유동 등이다.

그림 6은 이렇게 얻어진 전 과도 기간 중의 온도분포 결과로부터 A, D, G, K, N 등 5개의 채널 열의 깊이에서 최소 과냉각도를 구해서 그래프로 나타내었다. Collins<sup>1)</sup>의 결과와 비교하여 A와 D 열의 과냉각도는 현 연구의 결과가 조금 낮은 값을 보이나, 대체로 비슷한 값 수준과 경향을 보임을 알 수 있다. 파단 후 약 50초가 지나면서부터는 A열을 제외한 노심내 대부분의 영역에서 최소 과냉각도가 28°C를 넘으므로 칼란드리아 관표면의 막비등이나 dry-out이 일어날 가능성은 없다. 따라서 보다 자세히 살펴보아야 할 부분은 100초 이전에 PT/CT 접촉 시간과 위치에서의 과냉각도이다. 그림 7은 0~50초 동안의 각 채널열의 깊이에서 최소 과냉각도를 구해서 그래프로 나타내었다.

표 1, 2와 3의 정보를 토대로 방출 기간중 PT/CT 접촉이 일어나는 가장 높은 채널 열은 24초 부근의 E열과 30초 부근의 C열이다. 그림 8과 9는 이들 각각의 시간과 깊이에서 감속재의 과냉각도 분포를 보여준다. 28°C 이하의 최소 과냉각도는 첫 번째 또는 12번째 번들이 있는 양 끝 tubesheet 근처에서 나타나고, PT/CT가 일어나는 2 ~ 8번째 번들의 위치에서는 과냉각도가 30°C 이상임으로, 감속재 해석 결과 막비등을 유발하는 어떠한 감속재 과냉각도와 PT 접촉 온도의 조합은 발생하지 않는다는 것이 밝혀졌다.

#### 4. 결론

이 연구에서 과도 열부하를 에너지 방정식의 생성항으로 처리함으로써, 비상노심냉각 상실을 동반한 35% 입구모관 파단사고에 대하여 CANDU-6 감속재 유동을 예측할 수 있는 새로운 3차원 전산 유체역학적 해석 기술이 개발되었다. 과도계산은 파단 후 550초까지 완료되었으며, 그로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 파단 후 1초에 일어나는 출력펄스의 영향은 무시할 정도로 적고, 그로 인한 온도 증가는 1°C 미만이다. 그 이유는 감속재의 총량이 이 펄스의 일에 비해 상대적으로 크기 때문이다.
- 2) 20초에서 40초 사이의 방출기간 중, 지역적으로 낮은 최소 감속재 과냉각도가 발견되나, PT/CT 접촉이 일어나는 2 ~ 8번째 번들의 근처에서는 막비등을 방지할 정도의 높은 감속재 과냉각도가 유지된다. 따라서 클래스 IV 전원이 공급될 때, 비상노심냉각 상실을 동반한 35% 입구모관 파단사고에 대하여, 막비등은 일어나지 않는다.

- 3) 40초 이후 550초까지 후-방출기간 동안 감속재의 과냉각도는 꾸준히 증가하여 40°C 이상의 높은 값에 도달한다. 그러나, 유동 패턴은 초기의 혼합방식 유동패턴(Mixed-type flow pattern)을 유지한다. 이 유동 패턴의 특징은 각 단면에서 비대칭적인 속도장과 온도분포, 한쪽 주입구에서 분사된 찬 유체의 제트-반전(jet reversal), 그리고 노심 영역의 느린 2차 유동 등이다.

앞으로의 연구 과제로서는 다음과 같이 정리된다.

- 1) 클래스 IV 전원이 공급될 때, 비상노심냉각 상실을 동반한 35% 입구모관 파단사고에 대하여 550초 이후 1500초까지의 감속재 해석.
- 2) 클래스 IV 전원이 공급되지 않을 때, 비상노심냉각 상실을 동반한 35% 입구모관 파단사고에 대한 감속재 해석.
- 3) 감속재 해석 모델의 정확도를 유지한 상태로 계산속도 단축 방안 모색

## 후기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 연구개발사업의 일환으로 이루어졌으며, 이에 대하여 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] W.M. Collins, "PHOENICS2 Model Report for Wolsong 2/3/4 Moderator Circulation Analysis," 86-03500-AR-05, 1995.
- [2] C. Yoon, B. W. Rhee, and B. J. Min, "3-D CFD Analysis of the CANDU-6 Moderator Transient for the 35% RIH Break with Loss of ECC Injection," The 10th international Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10), Seoul, Korea, Oct. 2003.
- [3] G.I. Hadaller, R.A. Fortman, J. Szymanski, W.I. Midvidy and D.J. Train, "Frictional Pressure Drop for Staggered and In Line Tube Bank with Large Pitch to Diameter Ratio," *Proceedings of 17th CNS Conference*, Federation, New Brunswick, Canada, 1996

- [4] *Crossflow Pressure Loss over Banks of Plain Tubes in Square and Triangular Arrays Including Effects of Flow Direction*, ESDU 79034, 1979
- [5] 월성원자력 2,3,4호기 최종안전성분석보고서, 제10권, 한국전력공사
- [6] L.N. Carlucci and I. Cheung, "The Effects of Symmetric/Asymmetric Boundary Conditions on the Flow of an Internally Heated Fluid," *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 2, pp 47-61, 1986
- [7] P. Soedijono, W.M. Collins and T. De, "Moderator Analysis For In-Core and Out-of-Core Loss of Coolant Accident (LOCA)," Wolsong NPP 234, 86-03500-AR-052, Revision 0, AECL EAEL, Feb. 1995

표 1. 방출과정 동안 파단회로에서 임계유로 채널의 6 그룹화

그룹	대표 출력 [MW]	채널 명칭
1	7.3	O17, N16
2	7.0	S13, M17, O15, H15, M15, P12, L16, P16, P14
3	6.6	L20, N18, K15, N14, O13, J14, H13, L14, L18, J12, Q15, J16, Q13, F15, K13, G14, G12, E14, M13, R12, R14, F13, G16, K17, N12, E12, H17, M19, L12, S15, J18, R16, K19, P18, Q17, D13, O19
4	6.0	G18, T12, T14, E16, F17, D15, H19, N20, U13, C12, T16, J20, C14, S17, R18, Q19
5	(PT/CT 접촉 없음)	B13, U15, P20, E18, D17, M21, F19, V12, K21, C16, G20, O21, V14, H21
6	(PT/CT 접촉 없음)	W13, B15, S19, T18, R20, U17, L22, Q21, N22, A12, D19, V16, C18, E20, J22, A14, B17

표 2. 후방출과정 동안 파단회로에서 임계 및 비임계 유로 채널의 6 그룹화

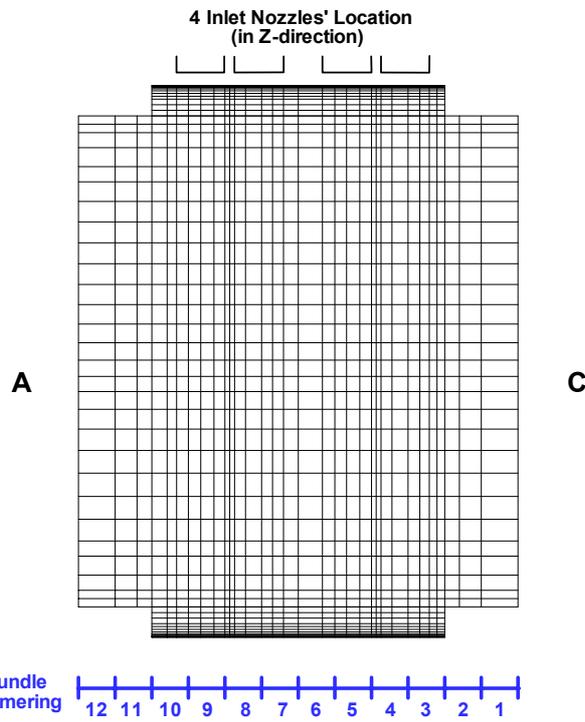
그룹	채널 명칭
1	O17, N17, P15, N16
2	S13, O16, N16, M17, N15, O15, M18, H15, M15, L15, P12, L16, O14, J15, P13, P16, L17, P14
3	L20, H12, H14, N18, K15, G15, Q12, M14, O12, N14, K16, H16, K14, J13, O13, J14, H13, L14, L18, J12, Q15, Q14, J16, Q13, N13, E13, F15, O18, K13, G13, G14, S14, L13, R13, G12, R15, E14, M13, F14, P17, K12, S12, R12, R14, F13, G16, K17, J17, Q16, N12, F12, E12, K18, H17, M19, M12, L12, E15, L19, F16, N19, S15, J18, R16, T13, G17, K19, P18, Q17, D13, O19, T12, H18, T14
4	G18, D14, E16, D12, J19, S16, F17, D15, T15, R17, M20, P19, Q18, H19, N20, U13, K20, U12, E17, C13, C12, D16, F18, U14, O20, T16, J20, C14, S17, G19, R18, Q19
5	B13, U15, C15, P20, H20, E18, D17, M21, L21, F19, V12, N21, T17, K21, S18, R19, V13, C16, B12, U16, G20, Q20, O21, J21, V14, B14, D18, E19
6	W13, H21, P21, B15, V15, S19, T18, C17, F20, R20, U17, L22, M22, G21, Q21, B16, W12, K22, N22, A12, D19, V16, A13, C18, E20, J22, T19, A14, O22, S20, U18, W14, B17, V17

표 3. 비상노심냉각을 동반한 35% 입구모관 파단사고에서 방출과정 중 PT/CT 접촉결과

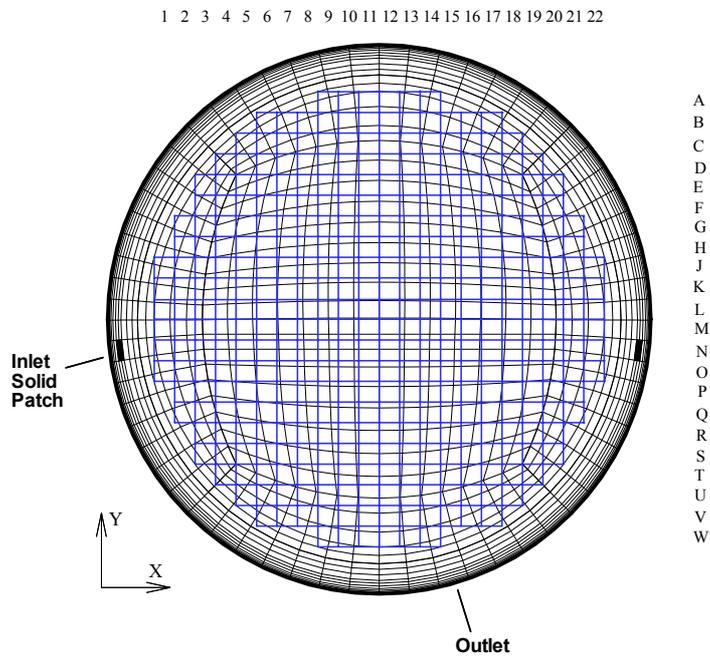
그룹과 대표채널 출력 [MW]	PT/CT 접촉 시간 [s]	Bundle 위치 ("C"에서 "A"로)	접촉 시간에서 최대 PT 온도 [oC]	접촉 시간에서 일차측 내부 압력 [MPa(a)]
그룹 1 7.3	21.3	5	809.6	4.0
	21.9	6	812.7	4.0
	22.2	7	808.1	3.9
	22.7	4	805.8	3.9
	25.1	8	780.2	3.7
	25.7	3	801.4	3.7
	31.2	2	789.2	3.3
그룹 2 7.0	24.1	5	802.0	3.8
	25.0	6	790.8	3.7
	25.1	4	797.7	3.7
	26.5	7	777.4	3.6
	28.0	3	794.2	3.5
	34.0	2	776.3	3.2
그룹 3 6.6	24.3	6	803.7	3.8
	24.6	5	804.5	3.8
	24.7	7	796.9	3.8
	26.7	4	799.8	3.6
	28.9	8	760.7	3.5
	30.5	3	795.2	3.3
	38.4	2	782.1	2.9
그룹 4 6.0	29.6	5	793.3	3.4
	30.0	6	782.2	3.4
	33.8	4	779.9	3.2
	37.5	3	764.4	3.0

표 4. 각 채널의 깊이에서 수정력학적 압력과 그에 따른 비등점

열	포화 압력[kpa]	포화 온도 [°C]
A	128.89	107.67
D	138.02	109.65
G	147.15	111.53
K	156.28	113.32
N	165.41	115.02
Q	174.54	116.65
T	183.67	118.21
W	192.80	119.72

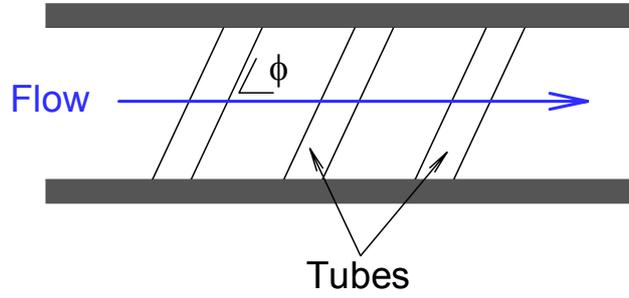


(a) “B”에서 본 격자단면과 번들 위치

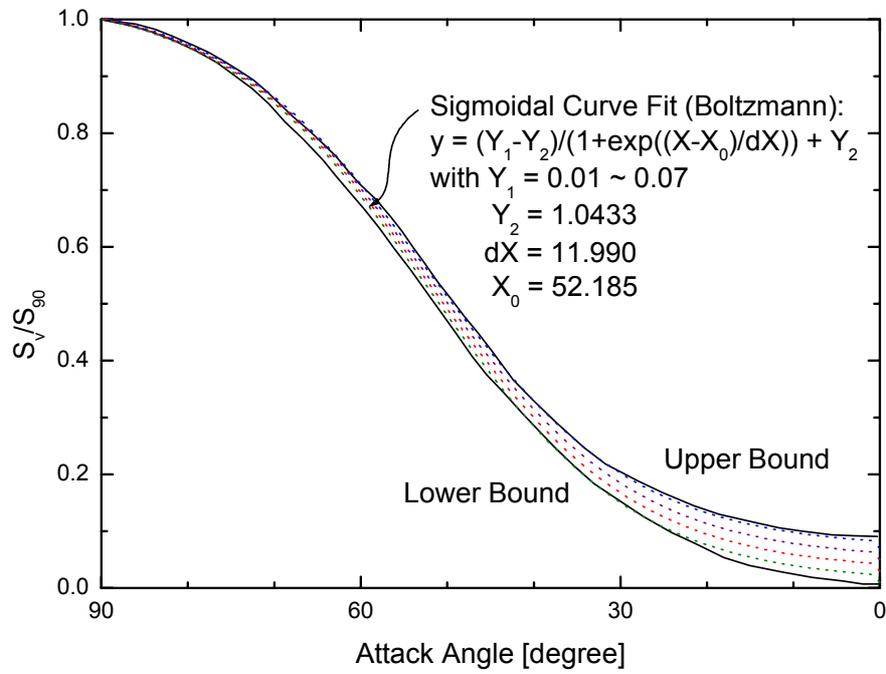


(b) “C”에서 본 격자단면과 채널 위치

그림 1: 나비형 격자구조와 상응하는 채널-번들 위치



(a) 입사각에 따른 저항 실험 개념도



(b) 입사각에 따른 압력강하비

그림 2: 입사각에 따른 압력강하 실험과 보정식

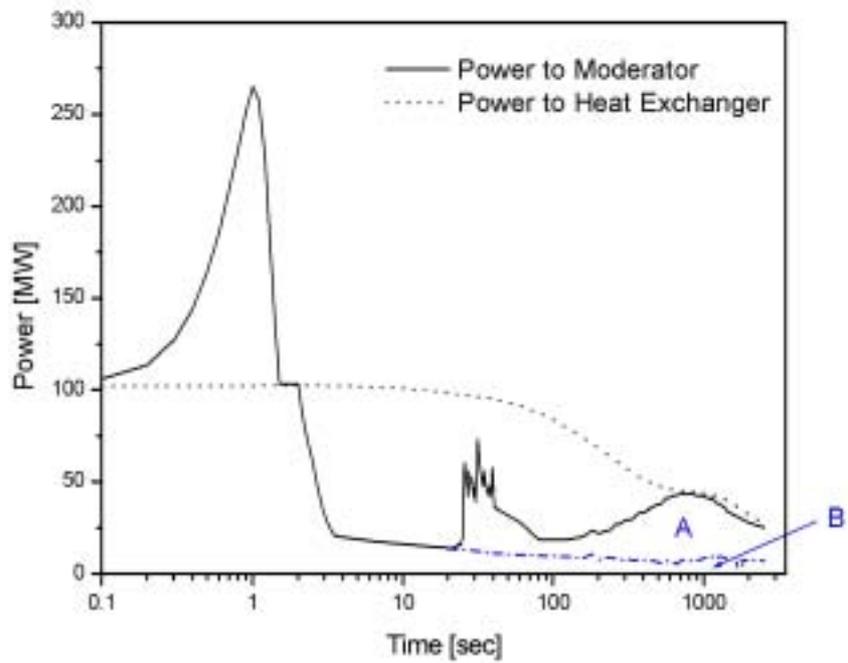


그림 3: 비상노심냉각을 동반한 35% 입구모관 파단사고에서 감속재와 열교환기로 전달 되는 총출력

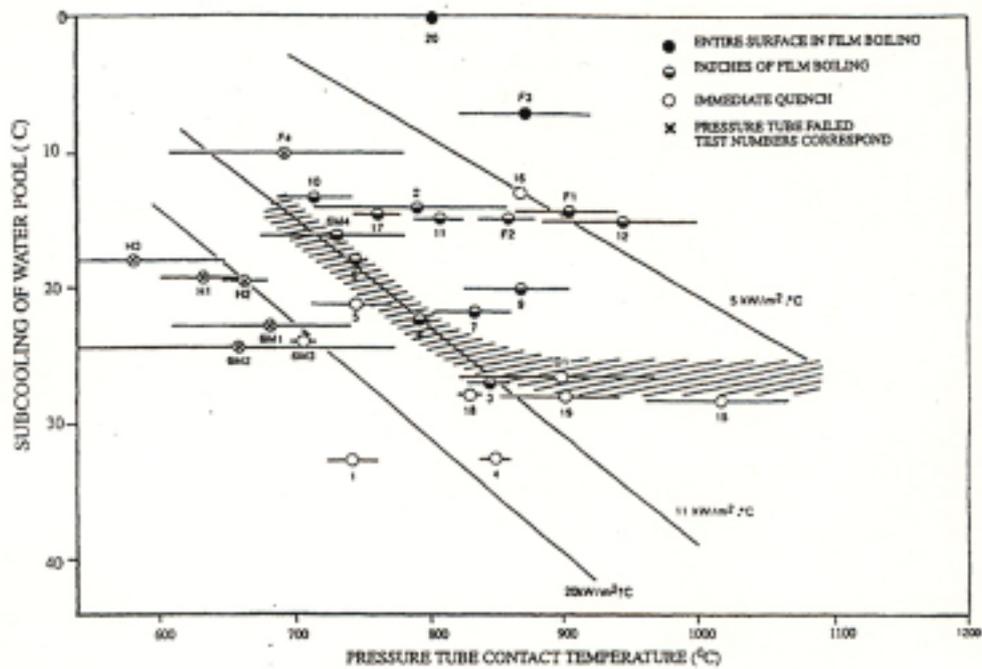
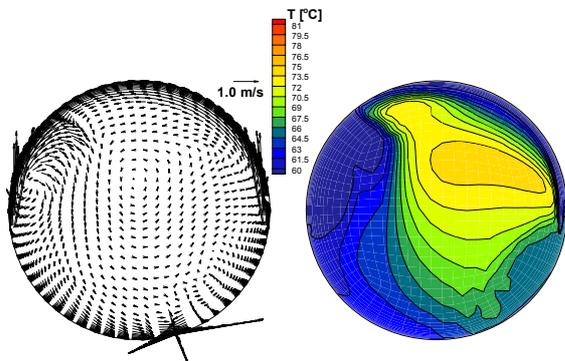
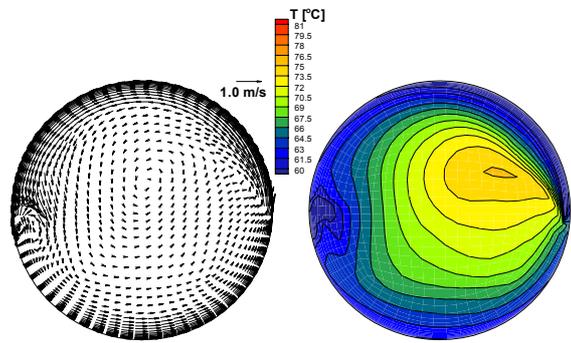


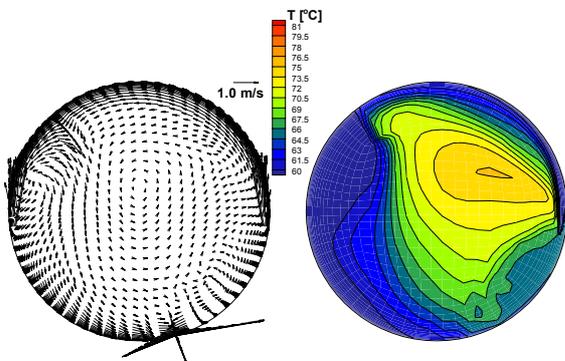
그림 4: 접촉비등 실험결과



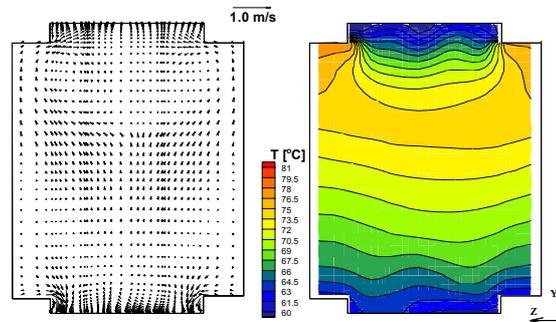
(a) "C"쪽 끝 tubesheet에서 1.418m 단면



(b) "C"쪽 끝 tubesheet에서 2.0m 단면



(c) "C"쪽 끝 tubesheet에서 3.582m 단면



(d) 중심 단면에서 "B"쪽으로 0.3m 단면

그림 5: 파단 후 100초에서 감속재의 속도장과 온도 분포

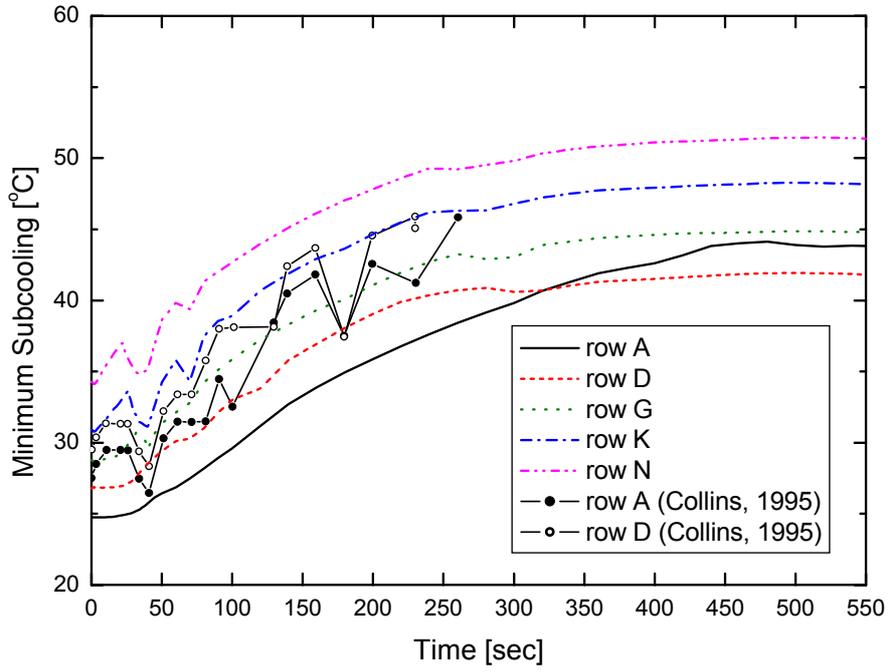


그림 6: 파단후 0~550초 동안 5개 채널 열 수심에서 최소 과냉각도

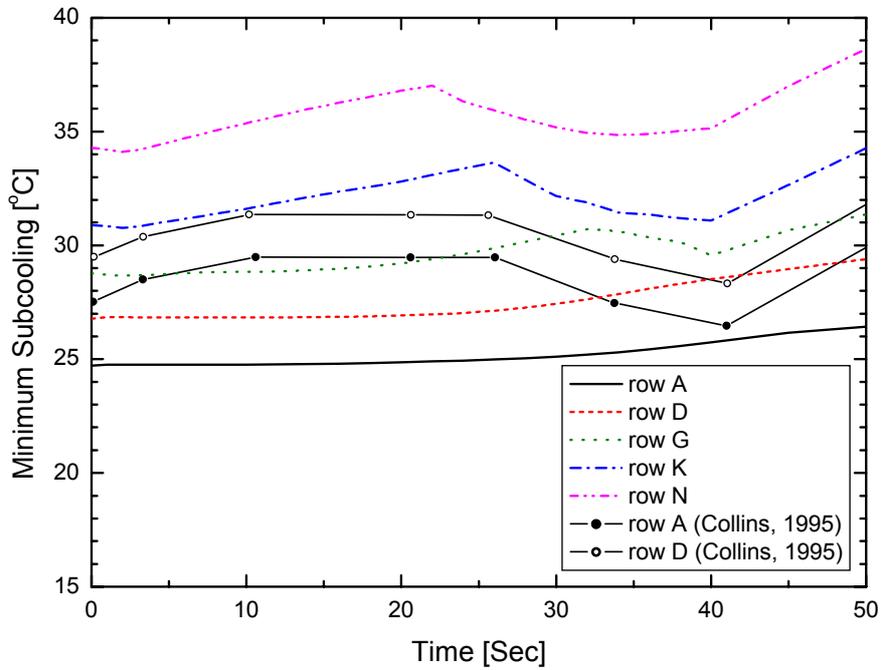


그림 7: 파단후 0~50초 동안 5개 채널 열 수심에서 최소 과냉각도

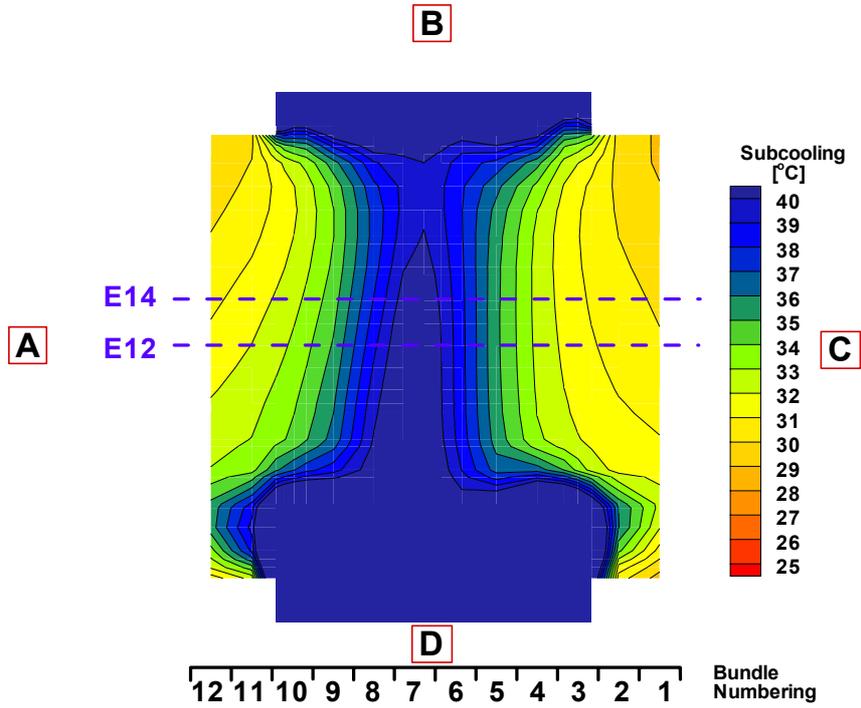


그림 8: 파단 후 24초에서 E열 깊이에서 과냉각도 분포도

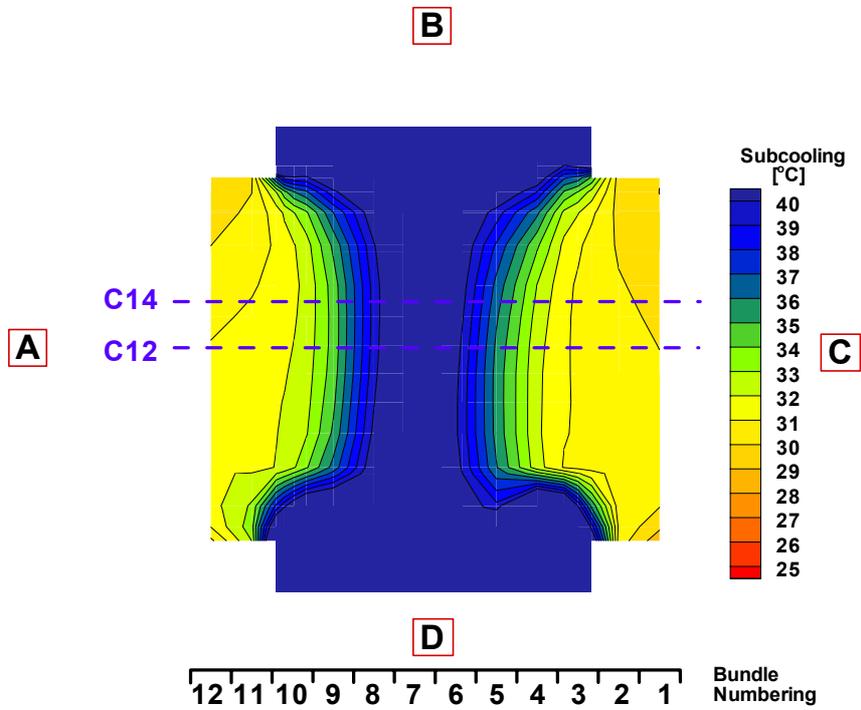


그림 9: 파단 후 30초에서 C열 깊이에서 과냉각도 분포도