

액체금속로 노심열수력 해석을 위한 부수로 해석코드 개발

김원석, 김영균, 김영진
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

액체금속로의 노심은 핵연료봉과 와이어랩에 의한 부수로로 구성된 복잡한 기하학적 구조의 집합체로 이루어져 있다. 이러한 액체금속로의 정상상태 및 과도상태 노심열수력 상세해석을 위하여 부수로 해석코드 MATRA-LMR 코드를 개발하고 있다. 본 논문에서는 ORNL 19 Pin 실험결과와 EBR-II 실험 모의시 정상상태 노심열수력 해석코드인 SLTHEN 코드 계산에 사용되었던 실험데이터를 사용하여 현재 MATRA-LMR 코드로 계산을 수행한 후 그 결과를 비교·분석함으로써, MATRA-LMR 코드의 개발 상태를 평가해 보았다. ORNL 19 Pin 실험과 MATRA-LMR 계산을 비교한 결과 실험을 정확히 예측하는 것으로 나타났다. SLTHEN 코드 계산결과와의 비교에서는 집합체 평균 출구온도와 부수로 최대 출구온도를 비교한 결과 두 코드의 계산은 약 3% 이하의 차이를 보이고 있다. 현재의 MATRA-LMR 코드는 단일 집합체 계산만 가능하나 앞으로의 작업을 통해 전 노심 해석이 가능하도록 다중 집합체 계산 코드로 개발할 예정이다.

I. 서론

액체금속로 KALIMER (Korea Advanced LIquid METal Reactor)의 노심은 핵연료봉과 와이어랩에 의한 부수로로 구성된 복잡한 기하학적 구조의 집합체로 이루어져 있다. 이러한 액체금속로의 정상상태 및 과도상태 노심열수력 상세해석을 위하여 부수로 해석코드 MATRA-LMR (Multichannel Analyzer for Transient and Steady-State in Rod Array)을 개발하고 있다. 이 코드는 COBRA-IV-i를 근간으로 수년간 개발해 오고 있는 MATRA 코드[1]를 액체금속로 전용으로 개량하여, 개발하고 있는 것이다.

MATRA 코드는 현재 α -version을 내놓고 있는데 여기에는 여러가지 기능개선이 이루어졌다. 즉, COBRA-IV-i가 Cyber 용인데 비해 MATRA는 HP Workstation 및 IBM PC 용으로 사용자 환경이 향상되었고, 코드의 기능면에서도 Fortran 90을 사용하여 구조를 간단하게 하므로써 사용자가 편리하게 다룰 수 있도록 하였고, 집합체내에서 Blockage가 발생했을 때의 해석과 같이 특정 부위에서 보다 상세한 모의를 위해 node를 미세하게 나눌 수 있도록 축방향 node가 일정하지 않아도 되게 하는 등의 수정·보완이 이루어진 것이다. 그러나 MATRA는 여전히 냉각재로 물을 사용하는 가압경수로용으로서 냉각재로 소듐을 사용하는 액체금속로에서는 직접 사용할 수가 없다.

현재 냉각재로 소듐을 사용하고 이에 따른 열전달 계수 및 압력강하 상관식을 수정하거나 추가하여 액체금속로에 사용이 가능하도록 여러가지 기능을 수정·보완하는 등 MATRA-LMR 개발 작업을 계속 추진중에 있다. 코드의 최종적인 개발목표는 집합체간 열전달을 고려할 수 있도록 기능을 향상시킴으로써 전체노심을 계산할 수 있도록 하고, 정상상태는 물론 과도상태에도 계산결과와 신뢰도를 향상시켜, 액체금속로 노심열수력의 상세해석 코드로 개발하는 것이다. 그림 1에 코드의 개발계획을 나타내었다.

본 논문에서 MATRA-LMR의 비교계산 코드로 사용된 SLTHEN[2]은 70년대 중반 MIT에서 개발된 SUPERENERGY 코드를 기반으로 하여 개발되었다. 이는 액체금속로 노심 열수력해석의 계산속도를 향상시키기 위해, 정확한 부수로 간의 운동량 결함을 액체금속로 핵연료 집합체에 적합한 근사모델로 대체하여 단순화된 Energy 모델을 사용하고 있다. 이 모델은 MATRA-LMR 코드처럼 질량, 에너지, 축방향 운동량,

횡방향 운동량 보존 방정식 및 냉각재 상태방정식을 사용하지 않고, 에너지 보존방정식만을 푸는데, 부수로 내 축방향 속도 및 부수로 간의 운동량 결합은 모델링을 통하여 간접적으로 고려된다. SLTHEN 코드는 수치해석 방법을 개량하고 최근에 발표된 개선된 상관식을 채택하여 효율성 및 정확도가 향상된 코드이다.

본 논문에서는 ORNL 19 Pin 실험결과와 EBR-II 실험모의시 SLTHEN 코드 계산에 사용되었던 실험데이터를 사용하여 현재 개발중인 MATRA-LMR 코드로 계산을 수행한 후 그 결과를 비교·분석함으로써, MATRA-LMR 코드의 개발 상태를 평가해 보고자 한다.

II. MATRA-LMR 코드 개발 내용

MATRA-LMR은 그 근간을 COBRA 코드에 두고 있다. COBRA (COolant Boiling in Rod Array) 코드는 부수로 해석이라는 기본적인 개념을 활용하고 있다. 즉, 핵연료봉 집합체의 유효면적을 여러개의 부수로 나누고, 다시 각 부수로는 수직적으로 여러개의 Control volume으로 나누어, 질량, 에너지 및 운동량 방정식을 유도하여 유량, 압력, 엔탈피 등을 계산한다. COBRA 코드는 1967년에 처음 개발되어 여러 기능이 개선되면서 1976년에는 COBRA-IV-i가 발표되었다. 국내에서는 1997년에 COBRA-IV-i를 근간으로 정확도 향상 및 사용자 편의를 위해 여러 기능이 추가된 MATRA 코드의 α -version이 개발되었다. 그러나 여전히 MATRA는 경수로에만 적용이 가능할 뿐 액체금속로에서는 사용할 수가 없었다. 이를 액체금속로에 적용할 수 있도록 개발된 것이 MATRA-LMR 이다 (그림 1). 이를 위해 다음과 같은 사항이 수정되거나 추가되었다.

1. 소듐 물성치

냉각재로 물 대신에 액체금속로 냉각재인 소듐에 대한 물성치를 계산하는 상관식을 Subroutine으로 작성하여 코드에 재구성함으로써 코드 운용시 기본적으로 계산되도록 하였다.

2. 소듐에 대한 열전달계수

기존 MATRA의 열전달 계수는 냉각재로 물을 이용한다는 가정하에 Dittus-Boelter 상관식을 사용하고 있다. 이에 대한 사항을 물 대신 소듐에 대해 수정하였다. 즉, Schad-Modified, Westinghouse, Lyon-Martinelli 상관식으로 대체하여 선택적으로 사용할 수 있도록 하였다.

3. 압력강하 상관식

(가) Novendstern에 의한 압력강하

6각형 덕트안에 핵연료봉 주위를 감고 있는 와이어랩 (Wire-wrap)은 현재 액체금속로 설계에 보편적으로 도입된 개념이다. 그러나 와이어에 의해 발생하는 복잡한 기하형상 때문에 단순한 모델로는 핵연료봉 지역내의 압력강하를 정확히 구하기가 힘들다. Novendstern[3]은 그 이전의 압력강하 모델 개념과 실험결과를 이용하여 새로운 상관식을 발표하였는데 이는 다음과 같다. 특히 Novendstern 모델은 압력강하가 주로 마찰에 의한다는 가정하에 계산되었다.

$$\Delta P = M f_s (L/D_{ei}) (\rho V_i^2/2)$$

$$M = \left[\frac{1.034}{(P/D)^{0.124}} + \frac{29.7(P/D)^{6.94} (Re)^{0.086}}{(H/D)^{2.239}} \right]^{0.885}$$

여기서 M은 와이어가 없는 매끈한 관에서 구한 압력강하에 실질적인 값으로 보정하기 위해 실험에서 구해진 보정치이다.

(나) CRT (Chiu-Rohsenow-Todreas)에 의한 압력강하

CRT[4] 모델은 Novendstern 모델을 개선한 것으로 압력강하를 보다 정확히 계산할 목적으로 개발되었다. 즉, CRT 모델에서는 압력강하를 마찰에 의한 항과 와이어랩 형태손실에 의한 항으로 구성한다. Chiu 등은 부수로 해석에서 그림 2에서 보듯이 부수로 타입 1 (Interior)에서는 짧은 거리에서의 방향전환이 주로 이루어져 마찰에 의한 것보다는 주로 형태손실에 의한 압력강하의 영향을 받고, 부수로 타입 2 (Edge)에서는 주로 마찰에 의한 압력강하의 영향을 주로 받는다는 가정하에 아래와 같이 전체 압력강하를 부수로 별로 나타내었다. 이때 부수로 타입 3 (Corner)에 대한 압력강하는 Edge의 압력강하와 같다고 가정하였다.

$$\Delta P_1 = f_{sl} \frac{L}{D_{el}} \frac{\rho V_1^2}{2} \left[1 + C_1 \frac{A_{rl}}{A_1} \frac{D_{el}}{H} \frac{P^2}{(\pi P)^2 + H^2} \right]$$

$$\Delta P_2 = f_2 \frac{L}{D_{e2}} \frac{\rho V_2^2}{2} C_3 \left\{ 1 + \left[C_2 n \left(\frac{V_T}{V_2} \right)_{\text{exp}} \right]^2 \right\}^{1.375}$$

(다) CT (Cheng-Todreas)에 의한 압력강하

Cheng-Todreas[5]에 의해 제안된 압력강하 모델은 많은 실험자료에서 얻은 결과로 다음과 같다.

$$\Delta P_1 = f_i (L/D_{ei}) (\rho V_i^2/2)$$

- Interior 부수로

$$f_i = \frac{1}{Re_1^m} \left[C_{f1} \left(\frac{P_{wl}}{P_{wl}} \right) + W_d \left(\frac{3A_{r1}}{A_1} \right) \left(\frac{D_{e1}}{H} \right) \left(\frac{D_{e1}}{D_w} \right)^m \right]$$

- Edge 부수로

$$f_2 = \frac{C_{f2}}{Re_2^m} \left[1 + W_s \left(\frac{A_{r2}}{A_2} \right) \tan^2 \theta \right]^{\frac{(3-m)}{2}}$$

- Corner 부수로

$$f_3 = \frac{C_{f3}}{Re_3^m} \left[1 + W_s \left(\frac{A_{r3}}{A_3} \right) \tan^2 \theta \right]^{\frac{(3-m)}{2}}$$

III. ORNL 19 Pin 실험

1. 실험 소개

ORNL에서 수행한 19 Pin 실험(FFM-2A)은 액체금속로 요건에 따라 6 각형의 Duct와 Wire-wrap으로 된 핵연료봉으로 이루어진 집합체로 구성되어 있다. 이 실험의 주된 목적은 집합체내 온도분포를 구하는 것이다 [6]. 핵연료봉 직경은 0.23 in., Wire-wrap 직경은 0.056 in. 그리고 Pitch는 12 in. 이다. 실제 노심 중 가열된 부분은 중간에 위치한 21 in. 이며, 이 부분의 시작점은 유량이 유입되는 노즐에서부터 16 in. 높이에 있다. 코드 모의시에는 총 40 in.를 고려하였는데 이는 노즐입구에서부터 시작하여 Heated zone 위 3 in. 까지이다. 따라서 출구온도를 구하기 위한 Thermocouple은 Heated zone 끝부분으로 밑에서부터 37 in.에 설치되어 있다.

2. 계산결과

실험은 유량과 출력을 달리하여 여러 경우를 수행하였는데, MATRA-LMR 계산에서는 고유량·고출력 (55 gal/min, 9.7 kW/ft/rod)인 경우와 저유량·저출력 (0.74 gal/min, 0.15 kW/ft/rod)인 경우 두 가지를 계산하여 실험값과 비교하였다. 그림 3은 주어진 부수로에서 실험과 계산을 비교한 것이다. 압력강하 상관식에 따라 약간씩 차이를 보이는데 전체적으로 초기에 발표된 Novendstern 상관식보다는 최근에 작성된 CRT 및 CT 상관식이 실험값에 근접한 결과를 보이고 있다. 이와같은 결과는 저유량·저출력에 대해서 계산한 그림 4에서도 같은 경향을 나타내고 있다.

그림 5는 부수로 1, 8, 7 25에서 축방향 온도분포를 MATRA-LMR로 계산한 값이다. 노심 Heated zone이 16 in.에서 시작하므로 이때까지는 온도가 일정하다가 Heated zone에서 부터 상승하기 시작하여 Heated zone이 끝나는 37 in. 이후부터는 다시 하락하기 시작한다. 부수로 별로는 안쪽에 위치한 1번 부수로에서 온도가 가장 높고 그 다음 7, 8번 부수로 그리고 가장자리에 위치한 25번 부수로에서 가장 낮은 온도분포를 보였다. 저유량·저출력 경우인 그림 6에서도 이와 비슷한 경향을 보이고 있다. 다만 축방향 유량이 적고 속도가 낮음에 따라 반경방향으로의 열전도율이 상대적으로 커져 각 부수로간 온도차가 고유량·고출력인 경우보다 크지 않았다.

IV. EBR-II 실험

1. 실험 소개

본 논문에서 사용된 실험데이터는 EBR-II에서 수행한 실험으로서 중앙에 위치한 집합체와 그 주위를 둘러싼 6개의 집합체 즉, 7개의 집합체로 구성되어 있다. 그림 7에는 이러한 집합체의 구성도 및 각각의 집

합체에 대한 Pin 수, 출력, 유량을 나타내었다. 중앙에 위치한 것은 단일 덕트를 갖는 보통 핵연료 집합체 형태로 이루어진 61 Pin 집합체이고, 그 아래는 일반적으로 제어봉에서 사용하는 형태로서 두 개의 덕트로 구성되어 있는 61 Pin 집합체이다. 또한 그 위는 7 Pin으로 구성된 집합체이고, 좌우 4개의 집합체는 모두 91 Pin으로 구성되어 있다. 본 계산에서 사용된 91 Pin은 4개중 높은 출력과 낮은 출력을 갖는 두 개의 집합체에 대하여 MATRA-LMR 계산을 수행하여 SLTHEN 계산결과와 비교하였다. 입력 데이터는 집합체 입구온도 699.8 °F, 축방향 길이 55.2 in., 핵연료봉 직경 0.23 in.이다. 출력이 0.63 MWth, 유량 30866 lbm/hr인 집합체와, 출력이 0.37 MWth, 유량이 24415 lbm/hr인 집합체에 대하여 계산결과를 비교하였다. 유동분할 모델은 CRT 방식을 사용하였다. 높이에 따른 출력분포는 24 부분으로 나누어 가운데 부분에 Heating zone이 있는 형태를 취하고 있다.

2. 계산결과

계산에 사용된 91 Pin 집합체는 그림 8에서 오른쪽 하단에 위치한 집합체와 왼쪽 하단에 위치한 집합체이다. 표 1에 나타난 계산결과에서 보듯이 높은출력을 갖는 집합체의 집합체 평균 출구온도 및 부수로 최대 출구온도는 MATRA-LMR이 955 °F와 1041 °F, SLTHEN이 928 °F와 1060 °F를 각각 나타내어 평균 출구온도에 있어서는 MATRA-LMR이 27 °F, 부수로 최대 출구온도는 SLTHEN이 19 °F 높게 계산되었다. 이는 집합체 평균 출구온도에서 2.9 %, 부수로 최대 출구온도에서 1.8 %의 차이를 나타내는 것이다. 압력강하는 MATRA-LMR이 8.3 psi, SLTHEN이 7.4 psi로 계산되었다. 반면 낮은출력을 갖는 집합체인 경우 표 1에서 보듯이 집합체 평균 출구온도에서는 1.6 %, 부수로 최대 출구온도는 1.5 %로 높은출력을 갖는 경우에 비해 두 코드의 계산결과가 상당히 일치하며, 압력강하 계산결과도 유사한 값을 보이고 있다. 두 경우 모두 집합체 평균 출구온도는 MATRA-LMR에서 높게 나타나고, 부수로 최대 출구온도는 SLTHEN에서 높게 나타나는데, 이는 유량분할 모델링 차이에서 오는 것이다. 즉, MATRA-LMR 코드에서는 집합체내의 유체속도 분포가 자연스럽게 중심부분이 높은 포물선 형태로 형성되는데 반하여, SLTHEN 코드의 모델링에서는 집합체내 주변부를 제외한 나머지 중심부분의 유속은 모두 같다고 가정하는 방식이기 때문이다.

계산시간은 HP J200 Workstation에서 수행시 MATRA-LMR인 경우 257초, 256초가 소요되었고, SLTHEN인 경우 7개 집합체 전체를 동시에 계산하는데 걸린시간이 7.4초였다. MATRA-LMR이 현재는 단일 집합체 계산만 가능하나 다중 집합체 계산이 가능하도록 개발되었을 경우 SLTHEN 코드에 비해 상당히 많은 계산시간이 소요될 것으로 보인다.

V. 결론

핵연료봉과 와이어랩에 의한 부수로로 구성된 복잡한 기하학적 구조를 갖는 액체금속로 노심내 집합체의 정상상태 및 과도상태 열수력 상세해석을 위하여 부수로 해석코드 MATRA-LMR을 개발하고 있다. 현재 냉각제로 사용하고 있는 소듐과 관련된 열전달 계수 및 압력강하 상관식 등을 수정하거나 추가하는 한편, 여러가지 기능을 수정·보완하는 등 MATRA-LMR 개발 작업을 계속 추진중에 있다.

본 논문에서는 ORNL 19 Pin 실험결과와 EBR-II 실험모의시 정상상태 노심열수력 해석코드인 SLTHEN 코드 계산에 사용되었던 실험데이터를 사용하여 계산을 수행한 후 그 결과를 비교·분석함으로써, MATRA-LMR 코드의 개발 상태를 평가해 보았다.

특히 ORNL 19 Pin 실험 모의에서는 MATRA-LMR에 추가된 압력강하 상관식에 대한 비교·분석도 수행하였다. EBR-II 실험에 대하여는 출력이 다른 두 개의 91 Pin 집합체 계산을 수행하였다. 계산결과에 대한 비교값으로는 집합체 평균 출구온도와 부수로 최대 출구온도를 사용하였으며, 압력강하와 계산시간도 함께 비교하였다.

ORNL 19 Pin 계산결과에서는 고출력·고유량인 경우 Novendstern 상관식보다는 CRT나 CT 상관식이 보다 정확히 실험값을 예측하였고, 저출력·저유량인 경우에는 계산이 전체적으로 실험값을 높게 예측하고 있다. 이는 코드내 열전달 계수가 실험에 비해 과소평가된 결과라고 판단된다.

EBR-II 91 Pin 계산결과에서는 다른 열수력 모델을 사용하고 있는 SLTHEN 코드와 비교한 결과 나타난 차이는 두 코드의 유량분할 모델링 차이뿐만아니라 SLTHEN 코드가 전 노심 계산이 가능한데 반하여 MATRA-LMR는 단일 집합체 계산만 가능하여 집합체간 열전달 효과를 고려하지 못한데서 기인된 결과라 여겨진다.

본 논문에 나타난 결과만 가지고 MATRA-LMR 코드의 예측능력에 대한 정확한 평가를 내리기는 어렵다. 다만 실험결과와 잘 일치하고, 두 코드의 계산결과가 대체로 비슷한 값을 보이므로 현재 개발중인

MATRA-LMR의 액체금속로 계산에 대한 기본적인 신뢰성을 확인한 것이다. 앞으로 계속 코드 분석작업과 개발작업을 수행함과 동시에, 좀 더 정확한 평가를 위해서 데이터 수집·분석을 통한 벤취마크 계산과, 국내외 실험에 의한 모의를 통한 비교계산 작업을 수행할 예정이다. 또한 현재의 MATRA-LMR 코드는 단일 집합체 계산만 가능하나 앞으로의 작업을 통해 전체 노심 해석이 가능하도록 다중 집합체 계산 코드로 개발할 예정이다.

VI. 참고문헌

- [1] 유연중 외, "부수로 해석 코드 MATRA α -version 개발", 한국원자력학회, '97 추계학술발표대회, 1997
- [2] Yang W. S., "An LMR Core Thermal-Hydraulics Code Based on the ENERGY Model", Journal of the KNS, Vol. 29, No. 5, pp. 406-416, 1997
- [3] Novendstern E., "Turbulent Flow Pressure Drop Model for Fuel Rod Assemblies Utilizing A Helical Wire-wrap Spacer System", Nucl. Eng. Design, Vol. 22, 1972
- [4] Chiu C., Rohsenow W. M., and Todreas N. E., "Turbulent Flow Split Model and Supporting Experiments for Wire-wrap Core Assemblies", COO-2245-56TR, MIT, 1978
- [5] Cheng S. K., and Todreas N. E., "Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-wrapped Hexagonal Rod Bundles - Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters", Nucl. Eng. Design, Vol. 92, pp. 227-251, 1986
- [6] Fontana R. E. et al., "Temperature Distribution in the Duct Wall and at the Exit of a 19-Rod Simulated LMFBR Fuel Assembly (FFM Bundle 2A)", Nuclear Technology, Vol. 24, pp. 176-200, 1974

표 1. 91 Pin 집합체 계산결과 비교

91 Pin 집합체	고출력/고유량 (0.63 MWth, 30866 lbm/hr)		저출력/저유량 (0.37 MWth, 24415 lbm/hr)	
	MATRA-LMR	SLTHEN	MATRA-LMR	SLTHEN
집합체 평균 출구온도 (°F)	955	928	887	874
부수로 최대 출구온도 (°F)	1041	1060	951	964
집합체 평균 압력강하 (psi)	8.3	7.4	6.1	4.9
계산시간 (초), HP J200 W/S	257 ^a	7.4 ^b	256 ^a	7.4 ^b

a : 1개의 집합체 계산시 걸린시간
b : 7개 집합체를 동시에 계산하는데 걸린시간

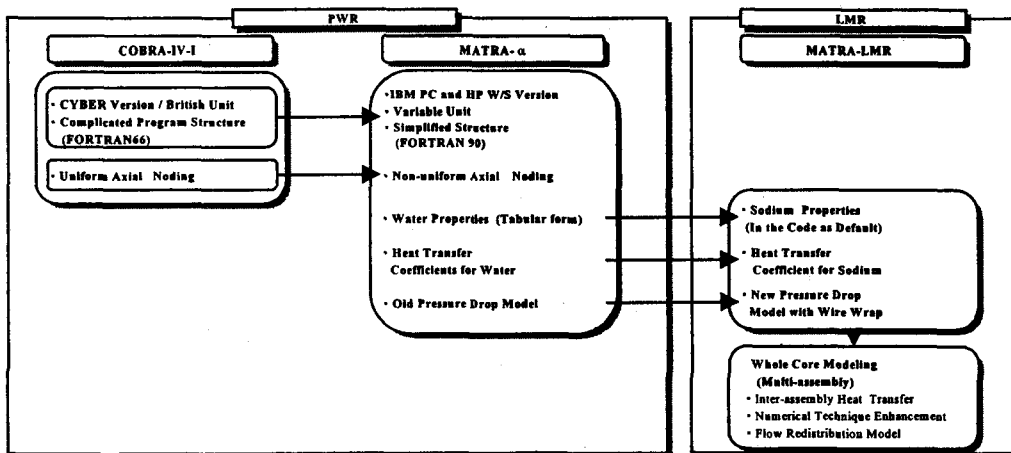


그림 1 부수로 해석 코드 (MATRA-LMR) 개발 계획

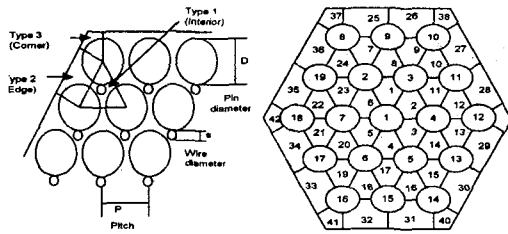


그림 2 부수로 형태 및 번호체계

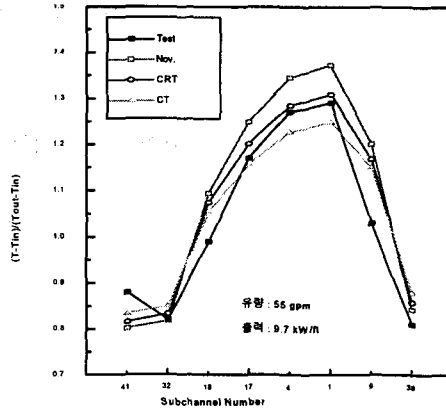


그림 3 Rod heated zone 출구에서의 온도 (고유량, 고출력)

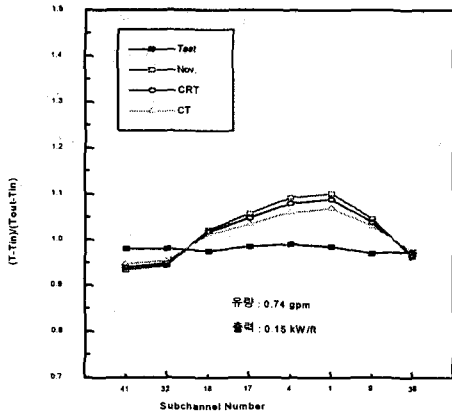


그림 4 Rod heated zone 출구에서의 온도 (저유량, 저출력)

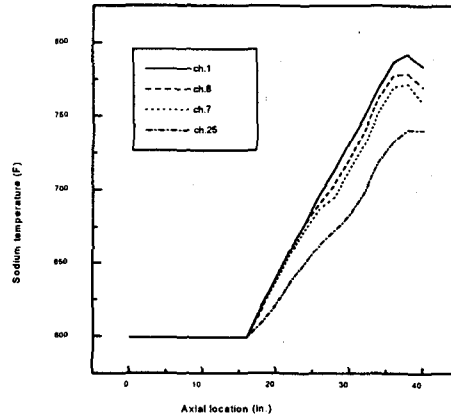


그림 5 19 Pin 핵연료봉 축방향 온도분포 (고유량, 고출력)

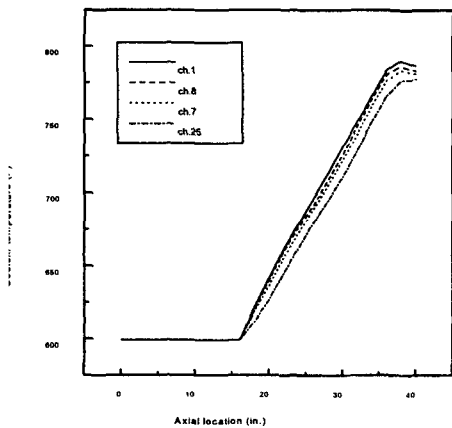


그림 6 19 Pin 핵연료봉 축방향 온도분포 (저유량, 저출력)

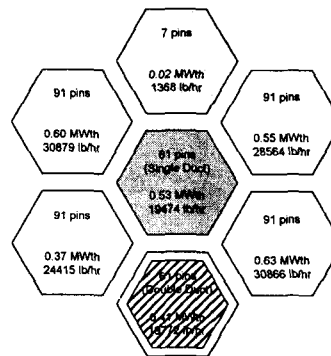


그림 7 EBR-II 실험 구성도