

저압력 · 저유속 조건에서의
COBRA 계열 부수로 해석 코드의 수치적 불안정성 고찰

A Study on the Numerical Instability
of COBRA-Series Subchannel Analysis Codes
at Low-Pressure and Low-Flow Conditions

유연중, 황대현, 김공구, 지성균

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

저압력 · 저유속 조건에서의 수치적 불안정성이 기존의 COBRA 계열 부수로 해석 코드들이 가지고 있는 일반적인 문제점임을 확인하고, 그 적용 불가능한 운전 조건의 범위를 평가하였다. 정상 상태에서 기존의 상용 가압 경수로 유속의 약 30% 정도의 저유속 운전 조건을 갖는 SMART 노심에 대한 MATRA 코드의 분석 불가능 운전 영역을 평가하기 위하여, MATRA를 포함한 몇 가지 대표적인 COBRA 계열 부수로 해석 코드들을 사용하여 다양한 운전 조건들에 대한 분석을 수행하였다. 분석 코드로는 CE의 TORC와 Siemens/KWU의 COBRA3CP, PNL의 COBRA4I 및 KAERI의 MATRA를 선정하였고, 분석 대상으로는 UKAEA의 Winfrith Establishment에서 수행한 CHF 실험에 사용된 다양한 운전 조건들을 사용하였다. 분석 결과, 저압력 · 저유속 조건에서의 수치적 불안정성 경향이 모든 코드에서 유사하게 나타났으며, 비교적 안정적인 수치적 거동을 보인 MATRA의 경우, 100 bar 이하의 압력과 300 kg/sec-m^2 이하의 질량 유속 조건에서 분석이 불가능한 것으로 평가되었다. 향후 저압력 · 저유속 조건에서의 COBRA 계열 부수로 해석 코드의 수치적 불안정성에 대한 정확한 원인 분석 및 개선 방안 도출이 요구된다.

Abstract

The numerical instability at low-pressure and low-flow conditions has been confirmed to be the common problem of the existing COBRA-series subchannel analysis codes. In addition, the range of operating conditions at which the analyses by the codes are impossible has been evaluated. To evaluate the MATRA's inapplicable range of operating conditions of the SMART core that is to be operated at the low flow condition, i.e., about 30% of the flow of the existing commercial pressurized water reactors at the steady-state condition, the analyses of various operating conditions were performed by using several representative COBRA-series subchannel analysis codes including MATRA. TORC of CE, COBRA3CP of Siemens/KWU, COBRA4I of PNL, and MATRA of KAERI were chosen as the subchannel analysis codes to be evaluated. The various operating conditions used in the CHF tests carried out at the Winfrith Establishment of UKAEA were chosen as the conditions to be analyzed. As the result, the numerical instabilities at low-pressure and low-flow conditions occurred in the analyses by all of the codes. It was revealed that the MATRA code, which was numerically more stable than the other codes, was not able to analyze the conditions of the pressure not more than 100 bar and the mass velocity not more than 300 kg/sec-m^2 . Hereafter it is required to find out the exact reason for the numerical instability of the existing COBRA-series subchannel analysis codes at low-pressure and low-flow conditions and to devise the new method to get over that numerical problem.

1. 서론

현재 KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute)에서는 원자로 노심 열수력 설계 및 분석을 위하여 부수로 해석 코드 MATRA(Multichannel Analyzer for steady states and Transients in Rod Arrays) [1-4]를 개발 중에 있으며, 역시 KAERI에서 현재 개발 중인 일체형 원자로 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) 노심 설계에 적용하고 있다. SMART 노심은 정상 상태에서 기존의 상용 가압 경수로 유속의 약 30% 정도의 저유속으로 운전된다.[5] 또한 SMART 노심의 여러 가지 DNB(Departure from Nucleate Boiling) 관련 사고 조건 중에서 최소 DNBR(DNB Ratio)이 발생하는 지점에서의 유속은 정상 상태 유속의 약 20% 정도로 낮다.[5] 한편 기존의 COBRA(Coolant Boiling in Rod Arrays) 계열 부수로 해석 코드들은 가압 경수로의 운전 조건인 고압력·고유속 조건에 적용하도록 개발되었기 때문에, 특히 저압력·저유속 조건에서 수치 해가 잘 수렴되지 않는 문제점을 가지고 있다.[6,7] 따라서 COBRA 계열 코드인 MATRA를 SMART 노심 분석에 적용하기 위해서는, 무엇보다도 먼저 MATRA 코드로 분석이 불가능한 SMART 노심 운전 조건의 범위를 파악하는 일이 시급하고, 더 나아가 그러한 수치적 불안정성을 일으키는 원인을 분석하여 해결 방안을 도출하는 일이 필요하다. 본 논문에서는 그러한 노력의 일환으로, 다양한 운전 조건에 대한 몇 가지 대표적인 부수로 해석 코드들의 분석을 통하여, 저압력·저유속 조건에서의 수치적 불안정성이 기존의 COBRA 계열 부수로 해석 코드들이 가지고 있는 일반적인 문제점임을 확인하고, 그 적용 불가능한 운전 조건의 범위를 평가하였다.

2. 분석 코드

다양한 운전 조건에 대한 적용성 비교 평가에 사용하기 위해 선정된 부수로 해석 코드들은 CE (Combustion Engineering)의 TORC[8]와 Siemens/KWU(Kraftwerk Union)의 COBRA3CP[9], PNL(Pacific Northwest Laboratory)의 COBRA4I[6,10] 및 KAERI의 MATRA이다. 이들은 모두 COBRA 계열 코드들인데, COBRA 코드는 가장 널리 알려진 부수로 해석 코드로서, 현재 원자로 노심 열수력 설계 및 분석에 사용되고 있는 대부분의 부수로 해석 코드들은 바로 이 COBRA 코드로부터 개발되었다. 1967년에 PNL에서 처음 개발된 COBRA-I[11]을 시작으로 COBRA-II[12], COBRA-III[13]의 발전 과정을 거쳐 COBRA-IIIC[14]와 COBRA4I가 각각 1973년과 1976년에 개발되었고, 그 이후에 개발된 수많은 부수로 해석 코드들의 모태가 되었다. 본 분석에 사용된 TORC와 COBRA3CP는 COBRA-IIIC로부터 개발되어 현재 상용 가압 경수로 노심 열수력 설계에 실제로 사용되고 있고, MATRA는 COBRA4I로부터 개발되어 현재 KAERI 내에서 SMART와 중수로, 하나로 및 액체금속로 노심 분석에 사용되고 있다.[15-18]

3. 수치 해법

일반적으로 원자로 노심의 열수력적 거동을 해석하는 문제는, 노심 입구와 출구에서의 경계 조건들을 만족시키면서 노심 전 영역에서의 유동 및 엔탈피 등의 분포를 구하는 경계치 문제(boundary-value problem)라고 할 수 있다. 그런데 이와 같이 계산 영역의 양단(both ends of space domain)에 경계 조건이 부과되는 경계치 문제를 경계치 해법으로 분석하기 위해서는, 상당량의 계산기 기억 용량이 필요하고 수치 해석상의 어려움이 따르기 때문에, 일반적으로 초기치 문제(initial-value problem)에 대한 해석 방법론을 사용하여 그 근사 해를 구하는 것이 보통이다.[13,19,20] 초기치 해법을 사용하여 원자로 노심의 경계치 문제를 해석하기 위해서는, 노심 출구 경계 조건을 만족시키는 미지의 노심 입구 경계 조건을 찾을 때까지 노심 입구로부터 출구까지의 계산 과정을 반복적으로 수행하는 multi-pass marching scheme[21]을 사용해야 한다. COBRA 계열 부수로 해석 코드들은 각 축방향 평면에서의 유체의 엔탈피(enthalpy: h), 밀도(density: ρ), 교차류(crossflow: w), 축방향 유량(axial flow: m) 및 압력(pressure: p)을 노심 입구로부터 출구까지 계산하는 과정을, 교차류와 축방향 유량에 대해 주어진 수렴 조건을 만족할 때까지 반복하게 된다.[6,14] 경계 조건으로는, 대개의 경우, 노심 입구에서의 엔탈피, 축방향 유량 및 교차류 분포와 노심 출구에서의 균일한 압력 분포를 사용하는데, 첫 번째 계산(iteration)에서는 노심 입구에서의 교차류가 없는 것으로 가정한다. 노심 출구에서의 균일 압력 분포 경계 조건을 만족시키기 위해서는, 축방향 운동량 방정식을 사용하여 각 축방향 평면에서의 인접한 부수로간의 횡방향 압력 차이를 하류(downstream) 방향으로 인접한 축방향 평면에서의 부수로간

의 횡방향 압력 차이로부터 계산하여, 이 압력 차이를 운동량 방정식의 source 항으로 입력해서 인접한 부수로간의 횡방향 압력 차이가 줄어드는 방향으로 교차류를 계산한다. 노심 입구로부터 출구까지의 반복적인 계산 과정을 통하여 노심 출구에서의 균일 압력 분포가 점차적으로 상류(upstream) 쪽으로 전파(propagation)됨으로써 결국 경계치 해(boundary-value solution)가 얻어지게 된다. 이 과정 중에서 교차류, 축방향 유량 및 압력을 구하는 수리적 해석 과정은, 축방향 및 횡방향 운동량 방정식이 결합된 연합 운동량 방정식(combined momentum equation)의 해를 구하는 과정이라고 말할 수 있다. 이러한 연합 운동량 방정식의 미지수(unknown)로서 교차류 혹은 축방향 압력 구배(axial pressure gradient: dp/dx)를 선택할 수 있는데, 비교적 초기에 개발된 코드들은 교차류 방정식의 수치 해를 구했으나,[8,10,14] 최근에 와서는 축방향 압력 구배 방정식의 해를 구하는 수치 해법을 사용하는 것이 일반적인 추세이다.[9,22,23] 본 분석에 사용된 TORC와 COBRA4I 및 MATRA는 교차류 방정식 해법을 사용하고 있고, COBRA3CP는 축방향 압력 구배 방정식 해법을 사용하고 있다. 이러한 교차류 방정식 해법과 축방향 압력 구배 방정식 해법의 계산 흐름도(flowchart)는 각각 그림 1과 2에 나타내었고, 개략적인 계산 과정은 다음에 기술한 바와 같다.

3.1 교차류 방정식 해법 (Crossflow Equation Solution Scheme)

연합 운동량 방정식의 미지수로 교차류를 사용하는 교차류 방정식 해법에서는, 그림 1에 보인 바와 같이, 먼저 축방향 유량 m 에 대한 추정치로 첫 번째 iteration에서는 이전 축방향 평면에서의 값을 사용하고, 그 이후의 iteration에서는 그 이전 iteration에서 구한 값을 사용한다. 에너지 방정식을 풀어서 엔탈피 h 를 구하고, 유체의 상태 방정식으로부터 밀도 ρ 와 그 밖의 물성치들을 구한 후, 관련 보조 방정식들을 이용하여 열 전달 계수(heat transfer coefficient: H_{surf})나 마찰 계수(friction factor: f_{fric}) 등을 구한다. 앞에서 구한 변수들의 값을 사용하여 교차류를 포함하고 있는 항을 제외한 축방향 압력 구배 dp/dx 를 구하고, 축방향 및 횡방향 운동량 방정식이 결합된 교차류 방정식을 풀어서 교차류 w 를 구한다. 연속 방정식으로부터 축방향 유량 m 을 갱신(update)하고, 앞에서 구한 교차류 항을 포함해서 축방향 압력 구배 dp/dx 를 갱신한다. 각각의 부수로에서의 축방향 압력 구배를 이용하여 인접 부수로간 횡방향 압력차(lateral pressure difference between adjacent subchannels: Δp_{lat})를 구하고, 축방향 운동량 방정식으로부터 압력 p 를 구한다. 이와 같은 축방향 평면에서의 일련의 계산 과정을 노심 입구로부터 출구까지 수행하는 과정을, 교차류 w 와 축방향 유량 m 이 각각의 수렴 조건을 동시에 만족할 때까지 반복하게 된다.

3.2 축방향 압력 구배 방정식 해법 (Axial Pressure Gradient Equation Solution Scheme)

연합 운동량 방정식의 미지수로 축방향 압력 구배를 사용하는 축방향 압력 구배 방정식 해법에서는, 교차류 방정식 해법에서와 마찬가지로 그림 2에 보인 바와 같이, 먼저 축방향 유량 m 에 대한 추정치로 첫 번째 iteration에서는 이전 축방향 평면에서의 값을 사용하고, 그 이후의 iteration에서는 그 이전 iteration에서 구한 값을 사용한다. 에너지 방정식을 풀어서 엔탈피 h 를 구하고, 유체의 상태 방정식으로부터 밀도 ρ 와 그 밖의 물성치들을 구한 후, 관련 보조 방정식들을 이용하여 열 전달 계수 H_{surf} 나 마찰 계수 f_{fric} 등을 구한다. 교차류 방정식 해법에서와는 다르게, 축방향 및 횡방향 운동량 방정식이 결합된 축방향 압력 구배 방정식을 풀어서 축방향 압력 구배 dp/dx 를 구한다. 횡방향 운동량 방정식으로부터 교차류 w 를 구하고, 연속 방정식으로부터 축방향 유량 m 을 갱신한다. 각각의 부수로에서의 축방향 압력 구배를 이용하여 인접 부수로간 횡방향 압력차 Δp_{lat} 를 구하고, 축방향 운동량 방정식으로부터 압력 p 를 구한다. 교차류 방정식 해법에서와 마찬가지로, 이와 같은 축방향 평면에서의 일련의 계산 과정을 노심 입구로부터 출구까지 수행하는 과정을, 교차류 w 와 축방향 유량 m 이 각각의 수렴 조건을 동시에 만족할 때까지 반복하게 된다.

이 두 가지 수치 해법은 비록 같은 지배 방정식을 사용하고 있지만, 교차류 방정식의 경우, 미지수인 w 가 인접한 부수로간의 갭(gap)에서 정의되기 때문에, 풀어야 할 방정식의 개수가 갭의 총 개수와 같은 반면, 축방향 압력 구배 방정식의 경우에는, 미지수인 dp/dx 가 각각의 부수로에서 정의되기 때문에, 풀어야 할 방정식의 개수는 부수로의 총 개수와 같다. 일반적으로 부수로의 개수는 갭의 개수에 비하여 대략 50~60 % 정도로 적기 때문에, 축방향 압력 구배 방정식 해법이 교차류 방정식 해법에 비하여, 특히 노심 전체에 대한

해석과 같은 큰 문제를 다루는 경우에 있어서 그 계산 효율이 높다. 한편, COBRA 계열 부수로 해석 코드들은 연합 운동량 방정식의 행렬 해법(matrix solver)으로 반복법(iterative method)의 일종인 연속 이완법(successive over-relaxation: SOR) 혹은 직접법(direct method)의 일종인 가우스 소거법(Gauss elimination: GE)을 사용하고 있는 것이 보통인데, 계산 효율 관점에서 연속 이완법과 가우스 소거법 중 어느 방법이 우위에 있다고 한마디로 논의할 수는 없다. 즉, 각 축방향 평면에서 횡방향으로 수행되는 내부 계산(inner calculation)시에는 대체로 연속 이완법이 가우스 소거법에 비하여 계산 속도가 빠르지만, 가우스 소거법이 방정식의 정확한 수치 해를 구하는 반면, 연속 이완법은 반복 계산을 통한 근사 해를 구하기 때문에, 노심 입구로부터 출구까지의 축방향 진행이 반복되는 외부 계산(outer iteration)시 누적되는 오차로 인하여 외부 반복 계산 회수가 증가하게 되어 전체적인 계산 효율은 가우스 소거법의 경우와 비슷해지거나 혹은 오히려 더 나빠질 수 있기 때문이다. 본 분석에 사용된 COBRA4I는 연속 이완법을 사용하고 있고, TORC와 COBRA3CP 및 MATRA는 가우스 소거법을 사용하고 있다.

4. 분석 실험 자료

부수로 해석 코드들의 분석 대상으로는 UKAEA(United Kingdom Atomic Energy Authority)의 Winfrith Establishment에서 수행한 CHF(Critical Heat Flux) 실험[24]에 사용된 운전 조건들을 사용하였다. Winfrith CHF 실험은 매우 다양한 운전 조건 하에서 수행되었기 때문에, 부수로 해석 코드의 적용 불가능 운전 영역을 평가하는 데에 있어 매우 적합하다고 판단되어 본 연구의 분석 대상으로 선정하였다. 실험에 사용된 봉다발은 직경이 9.5 mm이고 봉간 피치가 12.7 mm이며 가열 길이가 3000 mm인 25 개의 봉으로 구성되어 있으며, 가열 길이 영역의 시작 지점에서 하류 방향으로 275 mm 떨어진 지점으로부터 545 mm의 동일한 간격으로 5 개의 지지 격자가 부착되어 있다. 실험은 균일한 축방향 출력 분포를 사용하여, 20~160 bar의 압력과, 150~3600 kg/sec-m²의 유량, 그리고 150~320 °C의 입구 온도 범위에서 수행되었다. 분석에 사용된 부수로 해석 모형과 함께, Winfrith 5×5 봉다발의 기하학적인 치수와 횡방향 봉별 출력 분포를 그림 3에 나타내었으며, Winfrith CHF 실험에 사용된 총 123 개의 운전 조건들의 조합을 압력과 질량 유속 및 집합체 평균 출구 건도를 이용하여 표 1과 같이 나타내었다. 그림 3의 횡방향 출력 분포는 1~19 번 봉들에 비하여 20~25 번 봉들의 출력이 상대적으로 높고, 따라서 22 번 부수로가 고온 부수로임을 보여 준다. 또한 표 1의 운전 조건으로부터 저압력·저유속 조건에서의 집합체 평균 출구 건도가 상당히 높은 것을 알 수 있다.

5. 분석 결과

분석에 사용된 부수로 해석 코드들의 열수력 모형과 계산 모형들은 기본적으로 동일하게 선정하였다. 축방향 유량 m 과 인접 부수로간 횡방향 압력차 Δp_{lat} 에 대한 외부 반복 계산 가속 인자(acceleration factor)의 값으로는 각각 0.8과 0.5를 동일하게 사용하였고, COBRA4I 경우의 교차류 w 에 대한 내부 반복 계산 이완 인자(over-relaxation factor)의 값으로는 1.6을 사용하였다. 수렴 조건으로는 축방향 유량 m 과 교차류 w 에 대한 외부 반복 계산간 상대 오차가 각각 1%와 10%보다 작은 경우로 선정하였다. 분석 결과, 그림 4~15에 보인 바와 같이 코드들간에 약간의 차이는 있으나, 저압력·저유속 조건에서의 수치적 불안정성 경향이 모든 코드에서 유사하게 나타났다. 그림 4~7은 분석에 따른 각 코드의 수렴도(convergence map)를 질량 유속과 압력의 관점에서 나타낸 것이고, 그림 8~11은 각 코드의 수렴도를 집합체 평균 출구 건도와 압력의 관점에서 나타낸 것이며, 그림 11~14는 각 코드의 수렴도를 집합체 평균 출구 건도와 질량 유속의 관점에서 나타낸 것이다. 각 코드의 수렴도에 대한 비교를 통해서 알 수 있듯이 4 개의 코드들 중에서 COBRA3CP와 MATRA가 비교적 안정적인 수치적 거동을 보였으며, 가장 안정적인 것으로 나타난 MATRA의 경우, 분석이 불가능한 운전 영역은 표 2에 나타난 바와 같이 100 bar 이하의 압력과 300 kg/sec-m² 이하의 질량 유속 조건인 것으로 평가되었다.

6. 논의

분석이 가능했던 운전 조건에서 각 코드의 계산 효율을 비교한 결과, 그림 16과 17에 나타난 바와 같이 현저한 차이를 보였다. 그림 16은 분석에 소요된 각 코드의 총 계산 시간을 비교한 것으로서, 공통적으로

분석이 가능했던 운전 조건에 대한 각 코드의 평균 총 계산 시간을 비교해 보면 다음과 같다.

COBRA3CP (0.20 sec) < TORC (1.04 sec) < MATRA (1.67 sec) < COBRA4I (3.09 sec)

그림 17은 분석에 소요된 각 코드의 외부 반복 계산 회수를 비교한 것으로서, 각 코드의 평균 반복 계산 회수를 비교해 보면 다음과 같다.

COBRA3CP (3.7 회) < TORC (6.0 회) < MATRA (6.4 회) < COBRA4I (8.1 회)

위의 두 비교 결과를 이용하여 각 코드가 1회의 반복 계산을 하는데 소요되는 평균 계산 시간을 다음과 같이 비교해 볼 수 있다.

COBRA3CP (0.05 sec/회) < TORC (0.17 sec/회) < MATRA (0.26 sec/회) < COBRA4I (0.38 sec/회)

따라서 COBRA3CP 경우에 대한 상대적인 크기를 비교하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

COBRA3CP (1 배) < TORC (3.4 배) < MATRA (5.2 배) < COBRA4I (7.6 배)

결과적으로, 앞서서도 언급했듯이 교차류 방정식 해법을 사용하고 있는 TORC나 MATRA, COBRA4I보다는 축방향 압력 구배 방정식 해법을 사용하고 있는 COBRA3CP의 계산 효율이 가장 좋은 것으로 나타났다. 이러한 두 가지 수치 해법간 계산 효율의 차이는, 연합 운동량 방정식의 미지수 선정에 따른 방정식의 개수 차이뿐만 아니라, 방정식의 계수 행렬(coefficient matrix) 구조의 차이로도 설명할 수 있다. 즉 교차류가 정의되는 임의의 값에 대한 인접 값의 개수에 비하여, 축방향 압력 구배가 정의되는 임의의 부수로에 대한 인접 부수로의 개수가 일반적으로 적기 때문에, 계수 행렬의 밴드 폭(band width) 역시 줄어들어 계산 효율이 좋아진 것이다. 뿐만 아니라, 계수 행렬의 특성상 축방향 압력 구배 방정식의 경우가 교차류 방정식의 경우에 비하여 대각 지배(diagonal dominance)의 정도가 훨씬 크기 때문에 수치적인 안정성과 더불어 계산 효율 역시 더욱 좋아진 것이다. 따라서 MATRA 코드를 사용하여 수치적으로 보다 안정적이고 효율적인 분석을 수행하기 위해서는, 기존의 교차류 방정식 해법을 축방향 압력 구배 방정식 해법으로 대체할 필요가 있다. 한편, 각 코드의 계산 결과를 비교하기 위하여 저압력·저유속, 중간압력·저유속, 고압력·저유속 조건들 중에서 임의로 각각 한 경우씩을 선정하여, 그림 18~20에 나타난 바와 같이 집합체 출구에서의 각 부수로별 건도 및 유동 분포를 비교하였다. 출구 건도에 대한 코드간의 최대 절대 오차는 0.7% 정도로서, 집합체 평균 출구 건도가 대략 50% 이상인 것을 감안하면 허용할 만한 오차 범위 내에 있고, 출구 질량 유속에 대한 코드간의 최대 상대 오차는 1% 정도로서, 축방향 유량의 수렴 조건이 1%인 것을 고려하면, 이 역시 허용 오차 범위 내에서 각 코드들이 거의 동일한 결과를 예측하고 있다고 말할 수 있다.

7. 결론

정상 상태에서 기존의 상용 가압 경수로 유속의 약 30% 정도의 저유속 운전 조건을 갖는 SMART 노심에 대한 MATRA 코드의 분석 불가능 운전 영역을 평가하기 위하여, CE의 TORC와 Siemens/KWU의 COBRA3CP, PNL의 COBRA4I 및 KAERI의 MATRA를 사용하여, UKAEA의 Winfrith Establishment에서 수행한 CHF 실험에 사용된 다양한 운전 조건들에 대한 분석을 수행하였다. 분석 결과, 저압력·저유속 조건에서의 수치적 불안정성이 기존의 COBRA 계열 부수로 해석 코드들이 가지고 있는 공통된 문제점을 확인하였고, 비교적 가장 안정적인 수치적 거동을 보인 MATRA의 경우, 100 bar 이하의 압력과 300 kg/sec-m² 이하의 질량 유속 조건에서 분석이 불가능한 것으로 평가되었다. 향후 저압력·저유속 조건에서의 COBRA 계열 부수로 해석 코드의 수치적 불안정성에 대한 정확한 원인 분석 및 개선 방안 도출이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 원자력연구개발 중장기사업과제의 일환으로 수행되었으며, 과학기술부의 지원에 감사 드립니다.

참고 문헌

- [1] Y. J. Yoo and D. H. Hwang, "Development of a Subchannel Analysis Code MATRA α -Version," 1997 Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Taegu, Korea, October 24-25 (1997).

- [2] KAERI, Y. J. Yoo, D. H. Hwang, D. S. Sohn, M. H. Chang, and J. R. Park, "MATRA (Multichannel Analyzer for steady states and Transients in Rod Arrays) Ver. α ," Program Registration Number: 97-01-12-5227, Korea Computer Program Protection Foundation, November 7 (1997).
- [3] Y. J. Yoo and D. H. Hwang, "Development of a Subchannel Analysis Code MATRA (Ver. α)," KAERI/TR-1033/98, Korea Atomic Energy Research Institute, April (1998).
- [4] Y. J. Yoo, D. H. Hwang, and D. S. Sohn, "Development of a Subchannel Analysis Code MATRA Applicable to PWRs and ALWRs," *J. Korean Nucl. Soc.*, **31**, 3, 314-327, June (1999).
- [5] 지성균 외, "신형원자로기술개발 - 일체형원자로노심설계기술개발," KAERI/RR-1885/98, Korea Atomic Energy Research Institute, March (1999).
- [6] C. W. Stewart, C. L. Wheeler, R. J. Cena, C. A. McMonagle, J. M. Cuta, and D. S. Trent, "COBRA-IV: The Model and the Method," BNWL-2214, Battelle, Pacific Northwest Laboratories, July (1977).
- [7] J. M. Cuta, C. W. Stewart, A. S. Koontz, and S. D. Montgomery, "VIPRE-01: A Thermal-Hydraulic Code for Reactor Cores, Volume 4: Applications," EPRI NP-2511-CCM-A, Volume 4, Prepared by Battelle Pacific Northwest Laboratories, Prepared for Electric Power Research Institute, April (1987).
- [8] "TORC Code - A Computer Code for Determining the Thermal Margin of a Reactor Core," CENPD-161-P-A, Combustion Engineering, Inc., April (1986).
- [9] K. Mistelberger and M. A. Veloso, "COBRA 3CP: An Improved Version of COBRA IIIC/MIT-2," ST112/87/e353, Siemens/Kraftwerk Union, August (1987).
- [10] C. L. Wheeler, C. W. Stewart, R. J. Cena, D. S. Rowe, and A. M. Sutey, "COBRA-IV-I: An Interim Version of COBRA for Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores," BNWL-1962, Battelle, Pacific Northwest Laboratories, March (1976).
- [11] D. S. Rowe, "Cross-Flow Mixing between Parallel Flow Channels during Boiling, Part I, COBRA - Computer Program for Coolant Boiling in Rod Arrays," BNWL-371 Pt1, Pacific Northwest Laboratory, March (1967).
- [12] D. S. Rowe, "COBRA-II: A Digital Computer Program for Thermal-Hydraulic Subchannel Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements," BNWL-1229, Battelle Memorial Institute, Pacific Northwest Laboratories, February (1970).
- [13] D. S. Rowe, "COBRA-III: A Digital Computer Program for Steady State and Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements," BNWL-B-82, Battelle Memorial Institute, Pacific Northwest Laboratories, July (1971).
- [14] D. S. Rowe, "COBRA-IIIC: A Digital Computer Program for Steady State and Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements," BNWL-1695, Battelle, Pacific Northwest Laboratories, March (1973).
- [15] 유연중, "SMART 노심에 대한 MATRA 코드의 적용성 평가," SMART-CA-CA120-06, Korea Atomic Energy Research Institute, January (2000).
- [16] J. H. Park, J. S. Jun, H. C. Suk, Y. J. Yoo, and D. H. Hwang, "Subchannel Analysis for a CANDU Fuel Channel," *1999 Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Pohang, Korea, May 28-29 (1999).
- [17] I. C. Lim, H. T. Chae, Y. J. Yoo, and D. H. Hwang, "Modification of MATRA- α for the Subchannel Analysis of HANARO Core," KAERI/TR-1042/98, Korea Atomic Energy Research Institute, May (1998).
- [18] W. S. Kim and Y. G. Kim, "MATRA-LMR Code for Thermal-Hydraulic Subchannel Analysis of LMR," *NTHAS98: First Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety*, 227-234, Pusan, Korea, October 21-24 (1998).
- [19] W. J. Minkowycz, E. M. Sparrow, G. E. Schneider, and R. H. Pletcher, *Handbook of Numerical Heat Transfer*, 40-46, John Wiley & Sons, Inc. (1988).

- [20] D. S. Rowe, "Initial- and Boundary-Value Flow Solutions During Boiling in Two Interconnected Parallel Channels," *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **12**, 834-835 (1969).
- [21] J. Weisman and R. W. Bowring, "Methods for Detailed Thermal and Hydraulic Analysis of Water-Cooled Reactors," *Nucl. Sci. Eng.*, **57**, 255-276 (1975).
- [22] T. L. George, K. L. Basehore, C. L. Wheeler, W. A. Prather, and R. E. Masterson, "COBRA-WC: A Version of COBRA for Single-Phase Multiassembly Thermal Hydraulic Transient Analysis," PNL-3259, Pacific Northwest Laboratory, July (1980).
- [23] C. W. Stewart, J. M. Cuta, S. D. Montgomery, J. M. Kelly, K. L. Basehore, T. L. George, and D. S. Rowe, "VIPRE-01: A Thermal-Hydraulic Code for Reactor Cores, Volume 1: Mathematical Modeling (Revision 2)," EPRI NP-2511-CCM-A, Volume 1, Revision 2, Prepared by Battelle, Pacific Northwest Laboratories, Prepared for Electric Power Research Institute, July (1985).
- [24] F. H. Bowditch and D. J. Mogford, "An Experimental and Analytical Study of Fluid Flow and Critical Heat Flux in PWR Fuel Elements," AEEW-R2050, AEE Winfrith, February (1987).

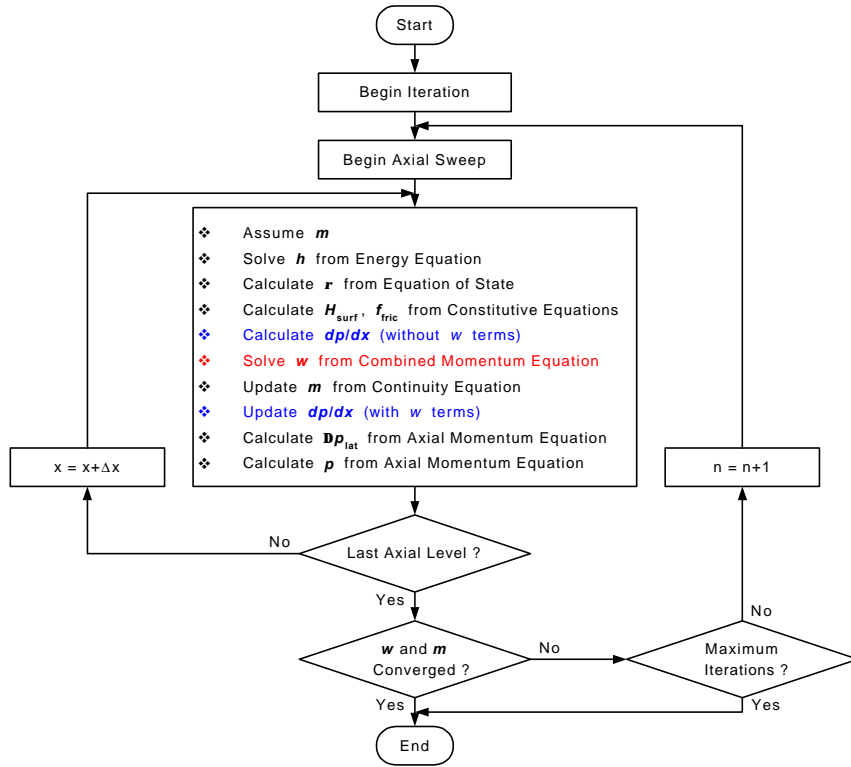


그림 1. 교차류 방정식 해법의 계산 흐름도

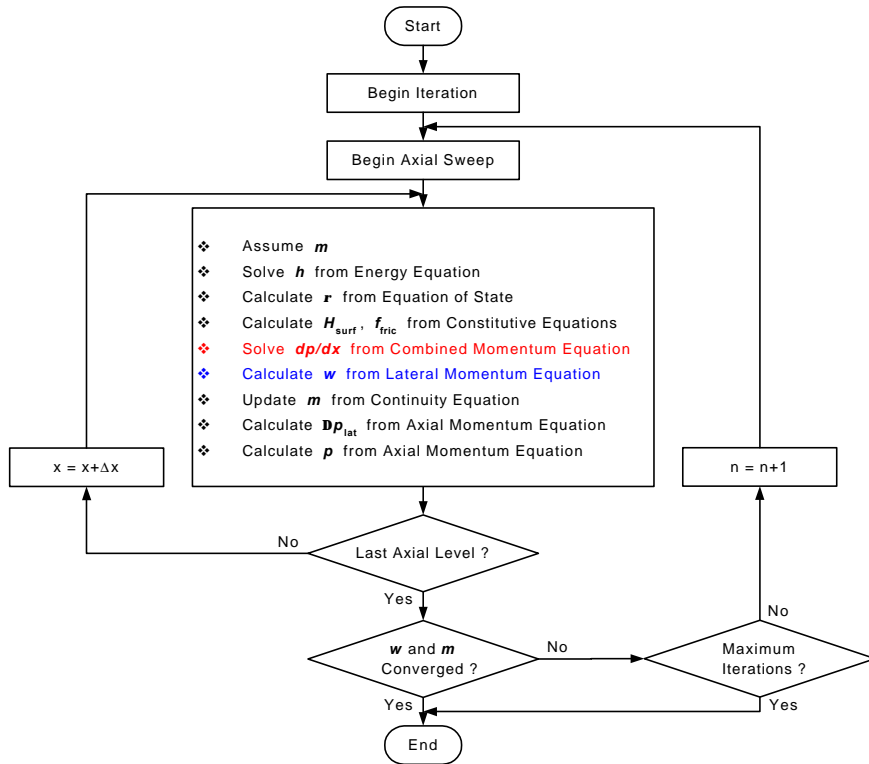


그림 2. 측방향 압력 구배 방정식 해법의 계산 흐름도

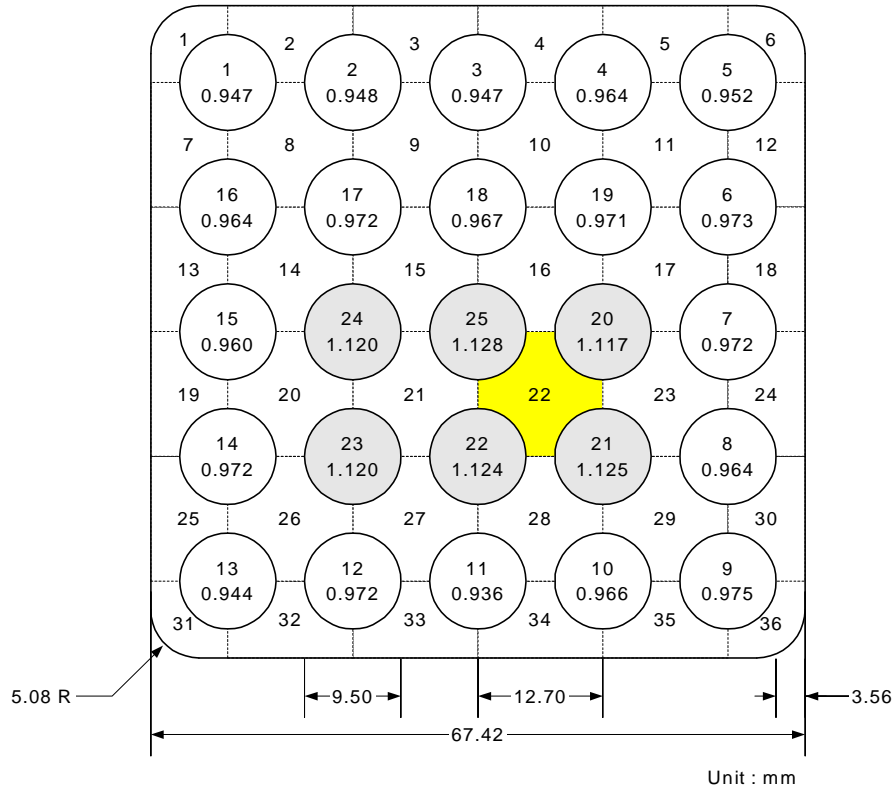


그림 3. Winfrith 5×5 봉다발의 부수로 해석 모형

표 1. Winfrith CHF 실험에 사용된 주요 운전 조건

Case No.	1~7	8~18	19~43	44~65	66~82	83~99	100~107	108~123	
Pressure (bar)	20	30	40	70	100	140	150	160	
Mass Velocity (kg/sec-m ²)	3600	—	—	—	—	2 -0.04~0.14	2 -0.10~0.11	2 0.01~0.10	2 -0.01~0.08
	3000	—	—	4 0.13~0.19	2 0.07~0.16	—	—	—	—
	2400	—	—	4 0.15~0.21	2 0.12~0.19	2 0.02~0.15	3 -0.10~0.13	3 -0.13~0.12	4 -0.16~0.11
	1200	—	3 0.27~0.31	4 0.29~0.35	3 0.26~0.33	3 0.16~0.25	5 0.02~0.20	3 -0.02~0.19	4 -0.07~0.18
	600	2 0.39~0.44	3 0.45~0.48	4 0.49~0.55	6 0.49~0.56	3 0.42~0.47	3 0.25~0.30	—	2 0.14~0.18
	300	3 0.53~0.59	3 0.59~0.61	5 0.65~0.69	6 0.66~0.70	4 0.66~0.70	2 0.56~0.59	—	2 0.48~0.51
	150	2 * 0.63~0.64	2 0.69~0.70	4 0.73~0.75	3 0.82~0.82	3 0.80~0.85	2 0.86~0.89	—	2 0.76~0.79

* Number of Tests
Bundle-Average Exit Quality

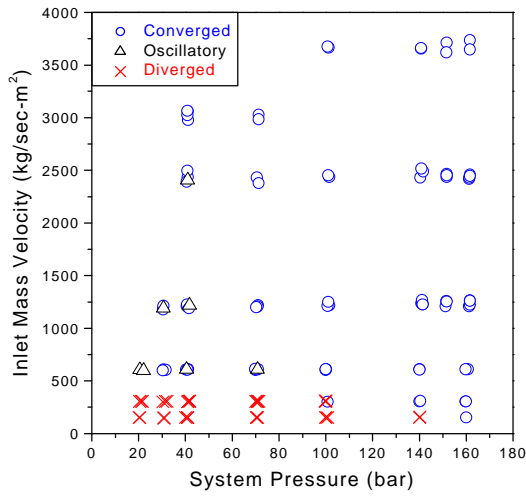


그림 4. Winfrith CHF 실험 자료 분석에 따른 TORC 코드의 수렴도 (w & GE ; G_{in} vs. P_{ex})

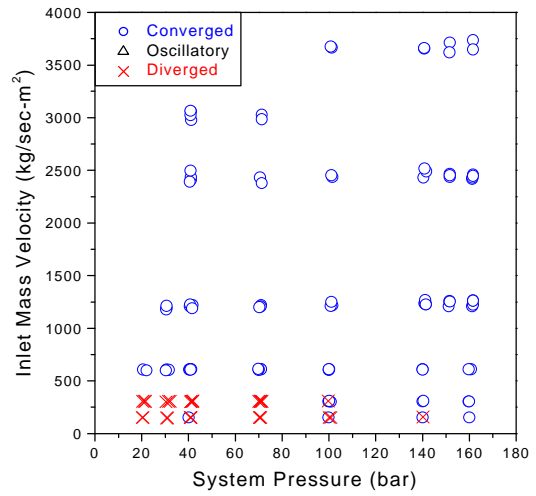


그림 5. Winfrith CHF 실험 자료 분석에 따른 COBRA3CP 코드의 수렴도 (dp/dx & GE ; G_{in} vs. P_{ex})

* w : 교차류 방정식 해법 (crossflow equation solution scheme)

* dp/dx : 축방향 압력 구배 방정식 해법 (axial pressure gradient equation solution scheme)

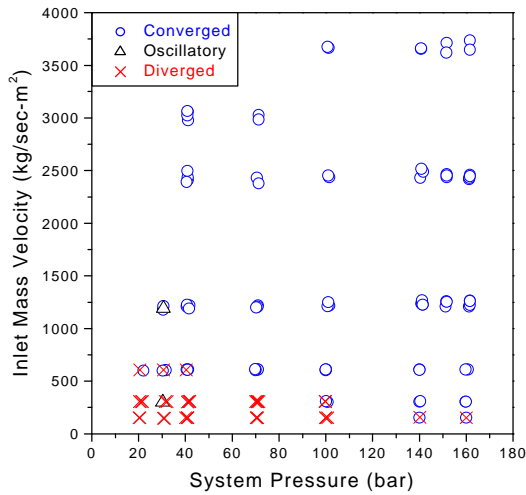


그림 6. Winfrith CHF 실험 자료 분석에 따른 COBRA4I 코드의 수렴도 (w & SOR ; G_{in} vs. P_{ex})

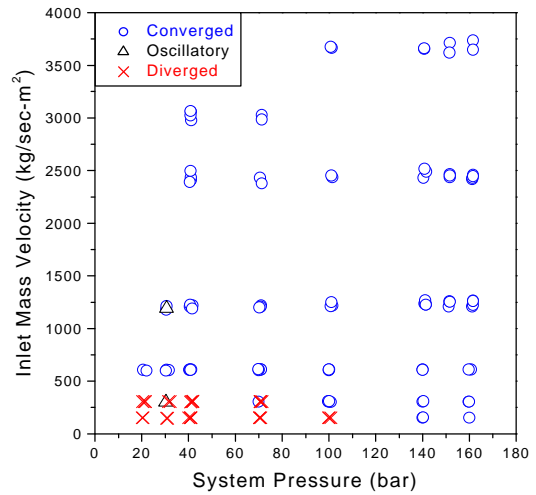


그림 7. Winfrith CHF 실험 자료 분석에 따른 MATRA 코드의 수렴도 (w & GE ; G_{in} vs. P_{ex})

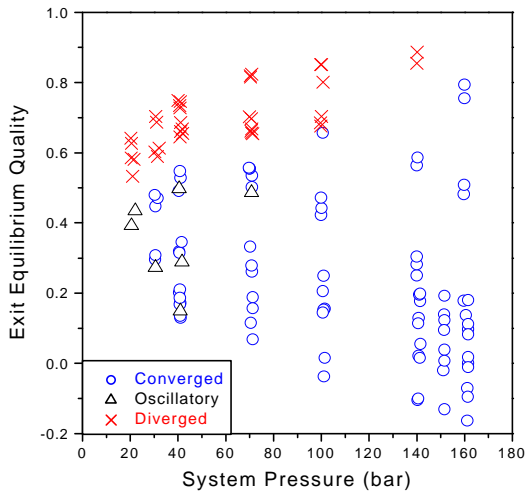


그림 8. Winfrith CHF 실험 자료 분석에 따른 TORC 코드의 수렴도 (w & GE ; X_{ex} vs. P_{ex})

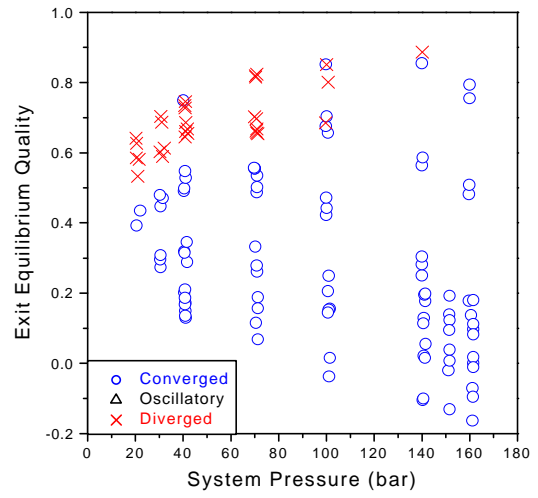


그림 9. Winfrith CHF 실험 자료 분석에 따른 COBRA3CP 코드의 수렴도 (dp/dx & GE ; X_{ex} vs. P_{ex})

* GE : 가우스 소거법 (Gauss Elimination : matrix solver)

* SOR : 연속 이완법 (Successive Over-Relaxation : matrix solver)

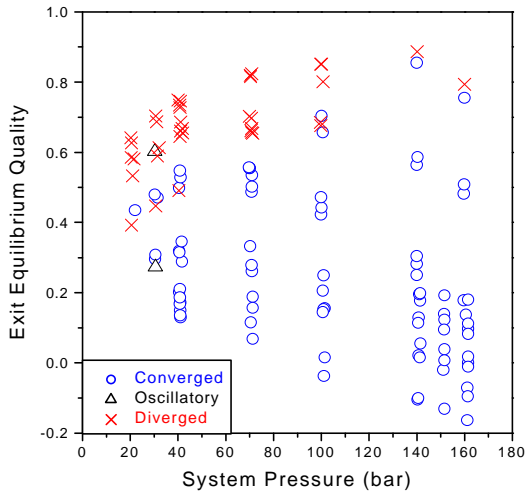


그림 10. Winfrith CHF 실험 자료 분석에 따른 COBRA4I 코드의 수렴도 (w & SOR ; X_{ex} vs. P_{ex})

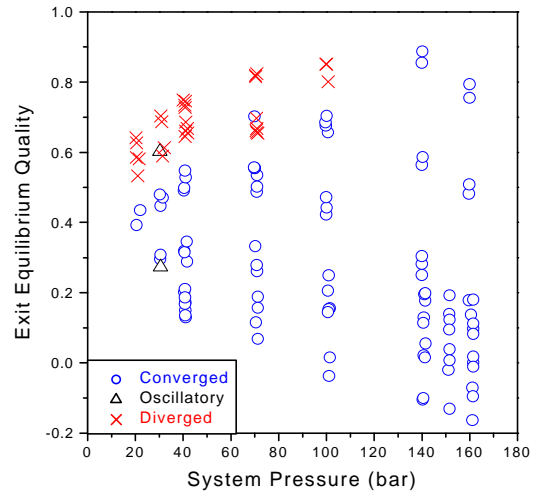


그림 11. Winfrith CHF 실험 자료 분석에 따른 MATRA 코드의 수렴도 (w & GE ; X_{ex} vs. P_{ex})

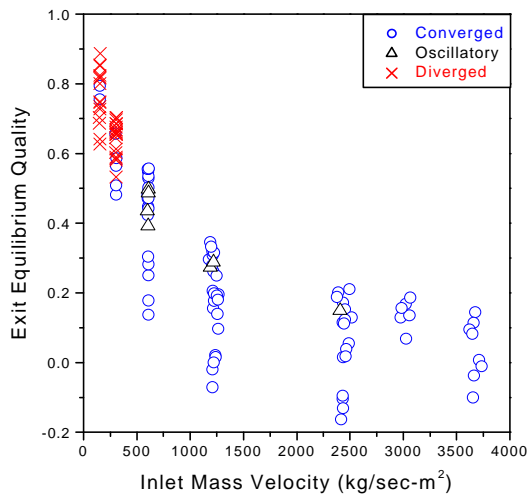


그림 12. Winfrith CHF 실험 자료 분석에 따른 TORC 코드의 수렴도 (w & GE ; X_{ex} vs. G_{in})

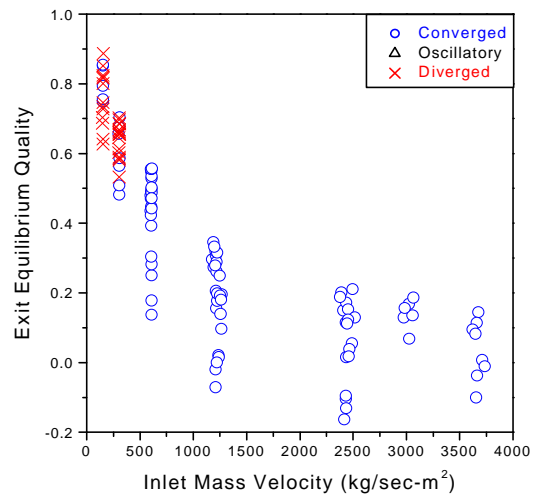


그림 13. Winfrith CHF 실험 자료 분석에 따른 COBRA3CP 코드의 수렴도 (dp/dx & GE ; X_{ex} vs. G_{in})

- * P_{ex} : 집합체 출구 압력 (bundle exit pressure)
- * G_{in} : 집합체 입구 질량 유속 (bundle inlet mass velocity)
- * X_{ex} : 집합체 평균 출구 건도 (bundle-average exit quality)

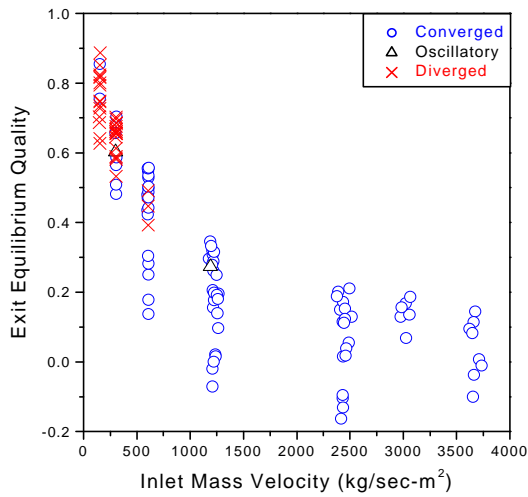


그림 14. Winfrith CHF 실험 자료 분석에 따른 COBRA4I 코드의 수렴도 (w & SOR ; X_{ex} vs. G_{in})

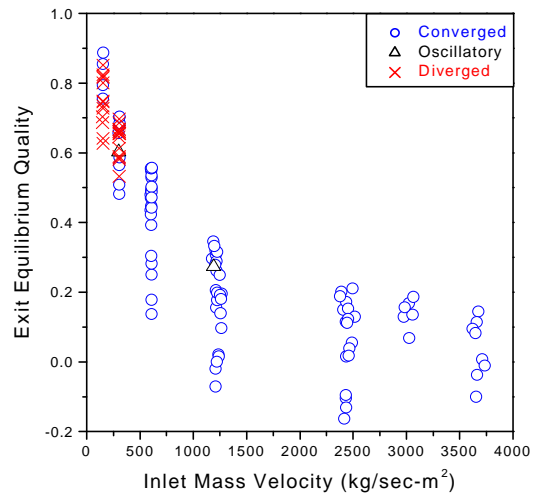


그림 15. Winfrith CHF 실험 자료 분석에 따른 MATRA 코드의 수렴도 (w & GE ; X_{ex} vs. G_{in})

표 2. Winfrith CHF 실험 자료 분석에 따른 MATRA 코드의 수렴표 (w & GE ; G_{in} vs. P_{ex})

Case No.		1~7	8~18	19~43	44~65	66~82	83~99	100~107	108~123
Pressure (bar)		20	30	40	70	100	140	150	160
Mass Velocity ($kg/sec-m^2$)	3600	—	—	—	—	○	○	○	○
	3000	—	—	○	○	—	—	—	—
	2400	—	—	○	○	○	○	○	○
	1200	—	○	○	○	○	○	○	○
	600	○	○	○	○	○	○	—	○
	300	X	X	X	X	○	○	—	○
	150	X	X	X	X	X	○	—	○

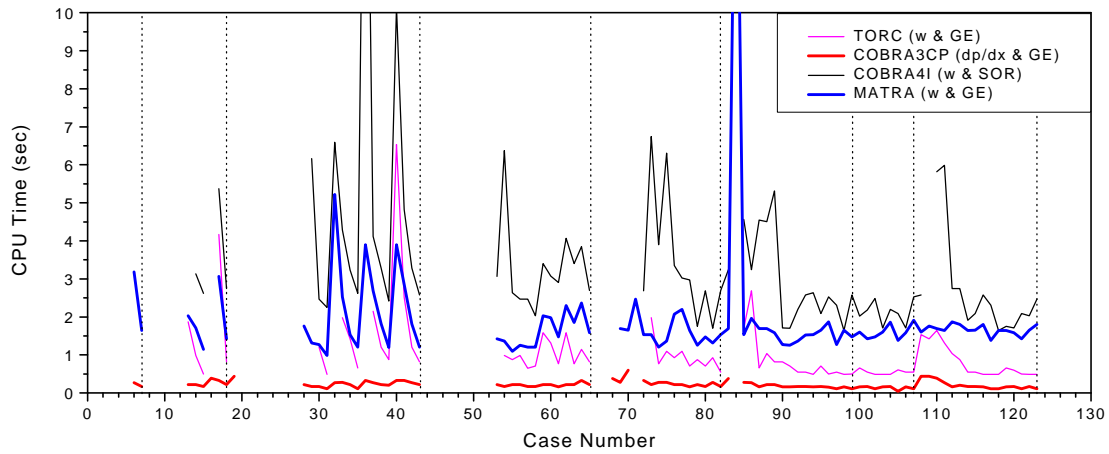


그림 16. Winfrith CHF 실험 자료 분석에 소요된 각 부수로 해석 코드의 계산 시간 비교

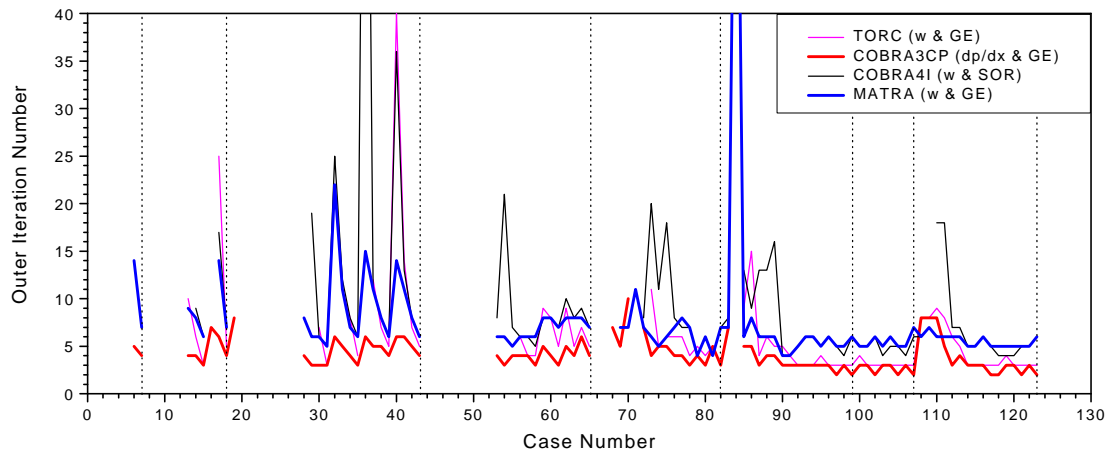
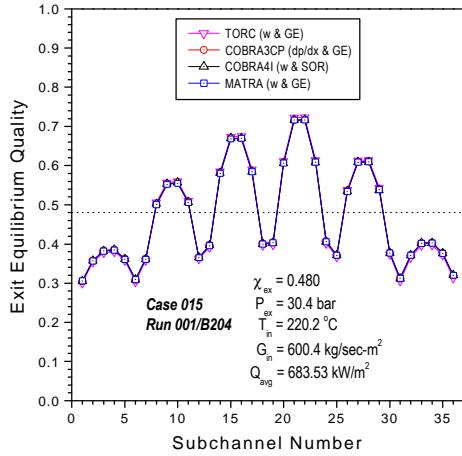
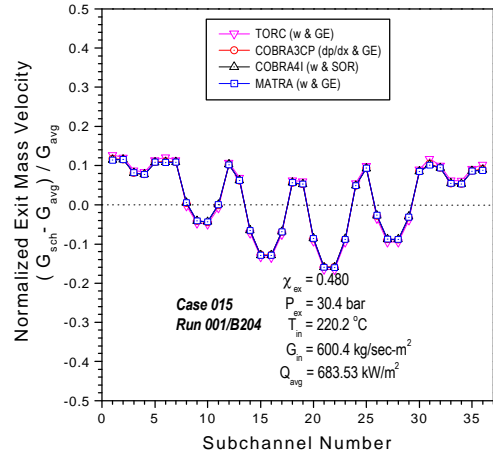


그림 17. Winfrith CHF 실험 자료 분석에 소요된 각 부수로 해석 코드의 반복 계산 회수 비교

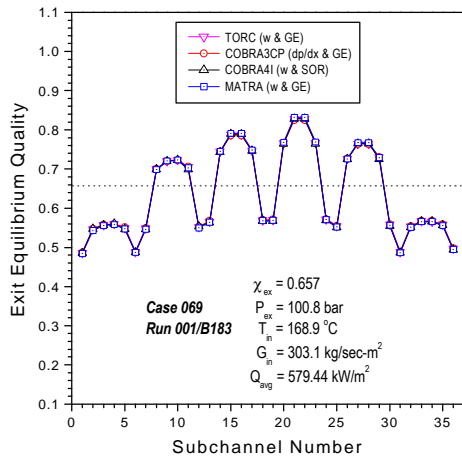


(a) 출구 건도 분포

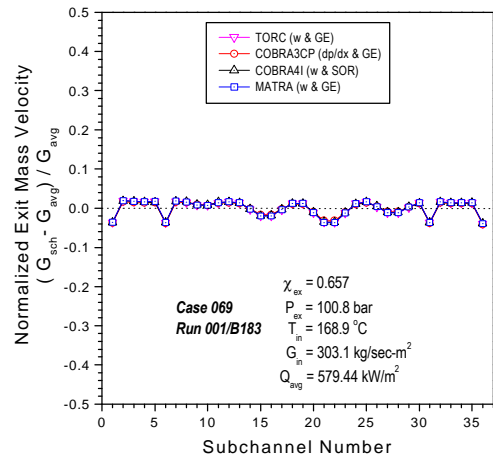


(b) 출구 유동 분포

그림 18. 저압력 · 저유속 조건에서의 출구 건도 및 유동 분포에 대한 부수로 해석 코드 예측 결과 비교

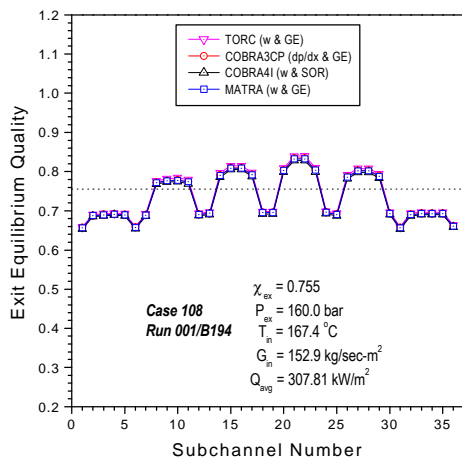


(a) 출구 건도 분포

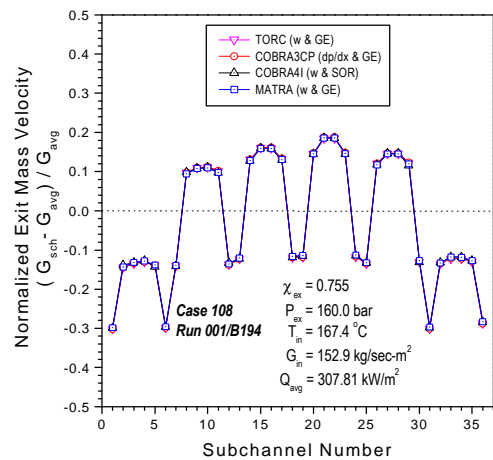


(b) 출구 유동 분포

그림 19. 중간압력 · 저유속 조건에서의 출구 건도 및 유동 분포에 대한 부수로 해석 코드 예측 결과 비교



(a) 출구 건도 분포



(b) 출구 유동 분포

그림 20. 고압력 · 저유속 조건에서의 출구 건도 및 유동 분포에 대한 부수로 해석 코드 예측 결과 비교