

WRB-2/COBRA-IV CHF 분석체제 적용성 평가 (Evaluation of Applicability of WRB-2/COBRA-IV CHF Analysis System)

김강훈, 박응준, 양승근, 전병순, 김홍주, 박종률
한국원전연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

가압경수로 노심의 열수력장 분석체제 개선을 위한 연구의 일환으로 COBRA-IV 코드를 이용하여 WRB-2 CHF 상관식의 성능을 평가하였다. 먼저 CHF TS에 대한 COBRA-IV 입력모형을 선정하기 위한 예비분석을 수행하였다. 임의로 선정된 CHF 시험자료를 대상으로 하여 분석모형의 크기, 축방향 분석노드의 수(또는 분석간격), 그리고 여러 가지 보조관계식(기포율 모형, 이상유동 모형 등)의 민감도 분석을 수행하였다. 분석결과 변수들의 예측치 들은 각각의 모형에서 유사하였으나, 외부반복 횟수는 모형의 크기와 축방향 분석노드의 수에 따라 많은 차이가 있었고 보조관계식에 따라서도 수렴의 안정성에 영향을 받았다. 이와 같은 결과를 기준으로 하여 선정된 분석모형을 이용하여 WRB-2 상관식 개발에 사용되었던 시험자료와, 최근에 추가된 개선된 V5H/IFM TS에 대한 자료를 평가하였다. 평가 결과 WRB-2/COBRA-IV CHF 분석체제의 변수별 경향 및 성능은 WRB-2/THINC-IV CHF 분석체제와 유사한 것으로 나타났다.

Abstracts

Evaluation of performance of WRB-2 CHF correlation has been performed with COBRA-IV subchannel code. To determine input model of COBRA-IV for CHF test section(TS), preliminary analyses had been performed. The preliminary analyses include the sensitivity study with respect to size(or range) of TS model(1/8 TS, 1/4 TS, full TS), number of axial node(or axial length step, 30, 50, 70, 80, 100) and constitutive relations(such as void model, 2 phase flow model, etc.) with arbitrarily selected test data. The predicted flow parameters are similar for all models, but there is somewhat difference in the number of external iteration model to model, ie., size of model, number of axial node, and constitutive relations. Based on the results, the selected optimized model is that full TS model with 100 axial node and constitutive relations of no subcooled void option. Calculations on data base(DB) of WRB-2 CHF correlation and data of Modified V5H/IFM TS have been done with optimized TS model. The results show that parametric trends and performance (correlation limits) of both WRB-2/COBRA-IV and WRB-2/THINC-IV are similar and there is no inherent differences.

1. 서론

원자로심의 연료봉에서 발생하는 열에너지는 강제순환에 의하여 일차계통 주 냉각수로 전달되며 보다 효과적인 열전달을 위하여 노심의 운전조건은 열전달 효율이 높은 핵비등 영역(Nucleate Boiling Regime)으로 결정된다. 그러나 표면열속이 증가하여 핵비등 영역을 벗어나게 되면 열전달 계수가 급격히 감소하고 연료봉 표면 온도가 급격히 증가하는 핵비등 이탈(Departure from Nucleate Boiling, DNB)이 발생하게 된다. 이 경

우 연료봉 피복재의 국부적인 파손이 예상되므로 노심내 DNB 거동을 정확히 예측하여 노심 운전조건이 핵비등 영역에서 이탈되지 않도록 하는 것이 중요하다.

CHF 분석체제란 노심에서의 DNB 거동을 평가하기 위한 고온 부수로 해석 모형과 열수력장 해석 코드 및 임계 열속(Critical Heat Flux, CHF) 상관식 등 노심 열수력장 분석에 사용되는 방법론을 나타낸다. 원자로 열 출력을 제한하는 가장 중요한 인자인 DNBR은 물리적으로 측정 가능한 변수가 아닐 뿐만 아니라 DNB 현상 자체에 대한 역학적 구조가 아직 명확하게 밝혀지지 않았으며, 더욱이 원자로심과 같은 복잡한 기하구조에 대한 분석은 전적으로 실험 자료에 근거한 실험 상관식에 의존하고 있다. 일반적으로 임계 열속 상관식은 여러 가지 변수들의 함수로 표현되며 가압 경수로 노심 분석에는 국부 유동조건에 근거하여 개발된 상관식이 적용되고 있어 예측에 사용된 코드에 따라 그 성능이나 거동이 달라질 수 있다. 웨스팅하우스사의 WRB-2/THINC-IV CHF 분석체제는 $q''_{CHF} = A - B \cdot X_{loc}$ 의 함수형태로 구성되어 684개의 자료에 대하여 M/P의 평균이 1.0051, 표준편차가 0.0847로 상관식 한계 DNBR은 1.17이다[1]. 축방향으로 비균일한 출력분포의 영향은 Tong의 F인자를 사용하여 보정하며, 최근에 개선된 V5H/IFM 연료에 대한 시험자료에 대한 평가에서는 WRB-2/THINC-IV 분석 체제의 상관식 한계 DNBR 1.17을 적용할 수 있는 것으로 보고되고 있다[2]. 따라서 본 논문에서는 고유 CHF 분석체제의 개발을 위한 연구의 일환으로 CHF 시험부(TS)를 적절히 모사 할 수 있는 분석모형을 민감도 분석을 통하여 최적화하고, 지배방정식을 섭동해법으로 처리하는 웨스팅하우스사의 THINC-IV와 함께 개발된 WRB-2 상관식을 제어체제에 대하여 일반적인 유한 차분법을 사용하는 COBRA-IV를 이용하여 평가하고, WRB-2/THINC-IV 체제와 WRB-2/COBRA-IV 체제간의 성능을 비교하였다.

2. 분석모형 최적화

분석 모형 선택을 위한 민감도 분석은 기하구조에 대한 모형(모형의 크기, 축방향 분석간격 등)과 보조관계식(기포율 모형, 이상유동 모형 등)의 선택에 있어서 각각의 경우를 비교하여 최적의 모형과 변수를 선택하기 위하여 임의로 선정된 시험자료에 대하여 수행되었다. 분석 모형의 크기에 대한 민감도 분석은 그림 1과 같은 1/8 TS 모형, 1/4 TS 모형, 전체 TS 모형에 대하여 다른 민감도 분석대상인 축방향 분석간격과 보조관계식은 표 1의 기준모형과 같이 고정시킨 상태에서 각 모형에 대한 외부 반복의 횟수와 각 수로별 또는 축방향 위치에 대한 유동변수(압력변수, 질량속도 등)를 비교하여 모형의 크기를 결정하였다. 외부 반복횟수는 해의 수렴성과 관련되어 수행시간에 큰 영향을 준다. 여러 가지 조건에 대하여 외부 반복계산 횟수의 경향을 알아보기 위하여 표 2와 같은 조건을 선택하였다. 분석 모형의 크기가 결정된 후에는 축방향 분석 간격에 대한 민감도 분석을 수행하였으며, 각 분석 간격은 지지격자의 중심이 분석 노드 중앙부분에 위치하는 경우만을 선택하였다. 축방향 분석 간격에 대한 민감도 분석에 대해서도 외부 반복계산 횟수와 각 수로와 축방향위치에 대한 물성치를 비교하여 축방향 분석 간격을 결정하였다. 또한 보조관계식에 대한 민감도 분석은 기포율 모형으로 미포화 비등 모형을 사용하지 않는 경우, 균질류 모형, 슬립모형 (슬립율 2.0 과 1.5)을 사용하는 경우, 단상유동 마찰계수에 가열에 의한 영향을 보정하지 않는 경우, 그리고 이상유동 마찰계수 모형으로 균질류 모형을 사용하는 경우를 기준 모형과 비교하여 외부 반복계산의 횟수와 유동 변수들을 근거로 각각의 변수 및 모형을 결정하였다.

2.1 분석모형의 크기

각 분석 모형의 크기에 대한 외부반복 횟수는 그림 2와 같다. 1/8 TS 모형(M8.50)의 경우에 가장 적은 수의 외부반복이 수행되어지며, 1/4 TS 모형(M4.50)과 전체 TS 모형(MF.50)의 경우는 서로 비슷하거나 오히려 전체 TS 모형에서 적은 외부 반복이 수행 되어짐을 알 수 있다. 각 수로별 특정 축방향 위치(측정된 CHF 발생위치)에서의 압력변수(출구로부터 정의된 압력강하)와 질량속도는 표 3과 같다. 이 경우 1/4 TS 모형과 전체 TS 모형에서의 압력변수는 Corner < Mid < Center의 순이며 비슷한 크기를 가지고 있다. 이것은 접수길이(Wetted Perimeter)등의 기하구조와 기포의 분포등에 의한 영향으로 생각된다. 한편 1/8 TS 모

형에서는 Center 수로에서 가장 큰 값을 나타내고 있으며 그 크기에 있어서도 두 모형과는 다르다. 이것은 부수로의 유동 면적과 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다. 축방향 질량속도의 분포는 그림 3부터 그림 5에서와 같이 각각의 모형에서 Corner < Center < Mid 의 순으로 나타나고 있으며, 축방향 분포에서 Mid 와 Center 수로에서는 입구 쪽의 질량유속이 출구 쪽 보다 큰 반면 Corner 수로에서는 출구쪽의 질량속도가 입구쪽에 비해 큰 것을 알 수 있다. 이것은 상대적으로 높은 출력수준과 이로 인한 기포의 발생등으로 인해 내부수로 쪽의 액체가 외부수로로 이동되었기 때문으로 생각된다. 또한 1/8 TS 모형에서는 다른 두 TS 모형과는 다르게 미포화 기포 발생지점 부근인 60 inch 부근에서 Center수로와 Mid 수로의 질량속도 거동이 같은 것으로 나타났다. 한편 열역학적 평형 건도는 세가지 분석모형에서 모두 Center > Mid > Corner 수로의 순으로 반경방향 출력분포에 의한 영향이 나타나고 있다.

이상과 같은 분석모형의 크기에 대한 민감도 분석 결과 각 분석모형에 따른 외부 반복 계산횟수에 대해서는 1/8 TS 모형이 가장 유리하며, 유동변수의 예측성능은 유사한 것으로 보인다. 그러나 1/8 TS 모형이나 1/4 TS 모형은 TS의 조건(특히 반경방향 출력분포)이 대칭이 아닌 경우에 일반적으로 적용하기 어려운 단점이 있다. 따라서 분석모형의 크기에 대해서는 전체 TS 모형을 선택하였다.

2.2 축방향 분석간격

축방향 분석 간격에 대해서는 오래 전부터 코드 사용자들의 관심의 대상이 되어왔으며, 일반적으로 축방향 분석노드의 수와 분석 소요시간은 비례하는 것으로 알려져 있다. CHF TS의 분석에 적절한 분석노드(또는 분석간격)를 결정하기 위하여 지지격자의 중심이 노드 경계부근에 위치하지 않는 조건에 해당하는 몇 가지 경우에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 앞 절에서 결정된 전체 TS 모형에 대하여 분석노드의 수는 기준 경우인 50개(MF.50)에 대하여 민감도 분석대상을 30개(MF.30), 70개(MF.70), 80개(MF.80) 그리고 100개(MF.100)를 정하였다. 이때 사용된 실험자료는 CHF TS에서 무작위로 추출되었다. 분석노드의 수에 대한 외부반복 횟수는 그림 6에서와 같이 기존의 일반적인 인식과는 다른 결과로 나타났다. 분석노드 30개와 50개의 경우에는 30여회 정도의 외부 반복을 수행하며, 30개의 노드를 사용하는 경우에 보다 안정적인 수렴을 보이고 있다. 분석노드의 수를 70개, 80개, 100개로 증가시키면, 이에 따라 외부반복의 횟수도 점차 감소하며 100개의 경우에서 가장 안정적인 수렴을 나타내고 있다. 한편 축방향의 질량속도의 분포는 그림 7부터 그림10에서와 같이 각 경우에 대하여 유사한 것으로 보이나, 노드의 수를 증가시킬수록 지지격자에 의한 영향을 보다 잘 모사하고 있는 것으로 나타났다. 분석노드와 관련된 외부반복 횟수의 변화는 분석 모형의 기하학적 구조(횡방향 노드와 축방향노드, 인접수로간의 면적 등)가 해의 수렴성에 미치는 영향에서 원인을 찾을 수 있는 것으로 생각된다. 일반적으로 기하구조와 관련하여 다음과 같은 범위이내 일 때 해의 수렴성이 좋아진다고 알려져 있다[3].

$$0.1 < \frac{A_{channel}}{\Delta X^2} < 10 \quad (1)$$

$$0.2 < \frac{A_i}{A_j} < 5 \quad (2)$$

이 범위 밖인 경우 큰 수로내의 상대적으로 작은 유량의 변화가 작은 수로내의 큰 유량의 변화로 전파될 수 있으며, 수치적 불안정을 초래할 수 있다. 따라서 횡방향의 구조가 고정된 경우 Center 수로와 Mid 수로에 대하여 식 (1)에 의해 계산되는 값은 축방향 분석 간격만의 함수가 된다. 따라서 분석대상 CHF TS의 분석에는 축방향으로 100노드를 선정하는 것이 바람직한 것으로 평가되었다.

2.3 보조관계식

앞 절에서 결정된 전체 TS 모형과 축방향 노드가 100개인 모형에 대하여 이상유동 관련변수를 여러 가지로 선택하여 분석한 결과 물성치 등의 예측에는 큰 차이가 없는 것으로 평가되었다. 단지 미포화 기포 모형을 사용한 기준 모형에서 미포화 기포의 발생이 예측된 지점 부근의 축방향 질량속도 분포와 미포화 기포 모형을 사용하지 않은 경우의 질량속도 분포 거동에서 약간의 차이가 존재하고 있다. 미포화 기포모형을 사

용하지 않는 경우에 대하여 수정된 Armand의 기포모형과 Armand의 이상 마찰계수 모형을 사용한 경우 (noscV)에 대한 수로별 질량속도와 축방향 질량속도의 분포를 나타내는 그림 11은 기포율과 이상 마찰계수 모형으로 균질류 모형을 사용한 경우(ahm)에 대한 그림 12에 비교하여 큰 차이가 없었다. 그러나 각 선택사항에 따른 외부반복 횟수는 그림 13과 같이 나타나 외부 반복의 관점으로는 기준 경우에 대하여 미포화 기포 모형을 사용하지 않는 것이 바람직한 것으로 평가되었다. 이러한 경향은 COBRA-IV의 해법 자체가 열적으로 평형 상태인 이상유동 모형을 사용하고 있는 상황에서 비평형을 보정하기 위한 관계식이 해법 자체에는 별다른 기여를 하지 못하는 것으로 생각된다.

2.4 부수로 Numbering 방법

전체모형에 대하여 Out-In 방법과 Line-wise 방법과 같이 두 가지 부수로 Numbering 방법을 각각 적용해 본 결과 변수에 대한 예측치 와 외부 반복횟수에서 별다른 차이점을 발견할 수 없었다. 따라서 계수행렬의 폭(Bandwidth)을 고려하여 행렬의 폭을 최소로 하는 형태를 분석모형으로 선정하였다. 따라서 CHF TS 분석을 위한 COBRA-IV 분석 모형은 표 4와 같이 선택되었다.

3. 분석결과

민감도 분석을 통하여 결정된 TS 분석 모형을 이용하여 WRB-2/COBRA-IV 분석체제의 거동과 성능을 평가하였다. COBRA-IV를 이용한 부수로 분석시 물성치와 관련된 입력자료는 ASME Steam Library[4]를 사용하였고, 비등의 발생여부는 단상영역의 열전달에 적용되는 Dittus-Boelter 상관식[5]과 핵비등 영역의 열전달에 적용되는 Jens-Lottes 상관식[5]으로 부터 구해지는 온도차이(ΔT)를 이용하여 결정하였다. 즉, 비등의 발생조건은

$$\Delta T_{DB} \geq \Delta T_{JL} \quad (3)$$

여기서

$$\Delta T_{DB} = \frac{D_E}{k} \cdot \frac{q''}{0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}} \quad (4)$$

$$\Delta T_{JL} = (T_{sat} - T_b) + \frac{60(q''/10^6)^{0.25}}{e^{P/900}} \quad (5)$$

이다.

위와 같은 방법으로 평가된 WRB-2/COBRA-IV 분석체제를 기존의 WRB-2/THINC-IV 분석 체제와의 비교를 위하여 먼저 각 변수에 대한 P/M(예측치/측정치)의 경향을 검토하였다. 그림 14와 15는 두 분석체제의 계통 압력과 국부 건도에 대한 P/M의 거동을 나타내고 있다. 그림 16은 WRB-2/COBRA-IV 분석체제의 국부 질량속도에 대한 P/M의 거동을 나타내고 있다. 두 분석체제 모두 각 변수에 대한 P/M의 특정한 경향은 없는 것으로 보이며 그림 17과 그림 18에서와 같이 정규분포로 가정할 수 있다. 또한 그림 19에서와 같이 측정치에 대한 예측치의 거동도 서로 유사한 것으로 평가되었다. WRB-2/COBRA-IV 분석체제의 M/P의 분포가 정규 분포이므로 평균과 표준편차, 그리고 Owen 인자[6]로 부터 평가되는 상관식 한계 DNBR은 표 5에서와 같이 1.17로 결정되며 이는 WRB-2/THINC-IV 분석체제의 성능과 같다. 서로 다른 지배 방정식의 처리 방법과 보조관계식이 사용된 COBRA-IV 와 THINC-IV를 이용하여 평가된 WRB-2 CHF 상관식의 성능이 상당히 유사하게 나타난 것은 민감도 분석을 통하여 최적화된 분석 모형의 사용과 최적화된 상관식 함수형태의 영향으로 판단된다.

4. 결론

CHF TS를 대상으로 한 민감도 분석결과 분석 모형에 대한 부수로 코드의 수행시간은 단지 유동수로나 분석 노드의 갯수보다는 분석모형 자체의 기하구조(축방향과 횡방향 분석간격의 상호관계, 인접 수로간의 면적비 등)와 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다. 민감도 분석을 통하여 최적화된 부수로 분석 모형을 이용한 WRB-2/COBRA-IV 분석체제의 성능은 WRB-2/THINC-IV 분석체제와 유사한 것으로 평가되어, 향후 분석코드의 개선(보조 관계식, 비평형 이상유동 모형 등)과 상관식 변수의 선정, 계수의 최적화 등을 통하여 CHF 분석체제를 개선하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Davidson, S.L. & Kramer, W.R., "Reference Core Report : V5 Fuel Assembly," WCAP-10444-P (1988).
2. Sung, Y.X., "DNB Margin Recovery Program," Westinghouse TUG Winter Meeting (1996).
3. Stewart, C.W., et.al., "COBRA-IV : The Model and the Method," BNWL-2214 (1997).
4. "ASME Steam Table, 6 e/d," ASME (1992).
5. Collier, J.G. & Thome, J.R., "Convective Boiling and Condensation, 3 e/d," Clarendon Press (1996).
6. Owen, D.B., "Factors for One-Sided Tolerance Limits and for Variable Sampling Plans," SCR-607 (1963).

표 1 민감도 분석 기준 모형 및 분석 대상 모형

	기준모형 (No. in Gr-2)	민감도 분석대상 (No. in Gr-2)
미포화 기포	Levy 모형 (N1=1)	No Subcooled Void (N1=0)
기포율 모형	수정된 Armand 모형 (N2=1)	균질모형 (N2=0) 슬립모형 (N2=5) 슬립비= 2.0 = 1.5
이상유동 마찰계수	Armand 모형 (N3=1)	균질모형 (N3=0)
마찰계수 가열 보정	보정 (N4=1)	비보정 (N4=0)
단상유동 열전달계수	Dittus-Boelter	N/A (N6=0)
난류혼합변수	0.059	N/A(N1=0) in Gr-10
Numbering 방법	Out-In	Line-wise

표 2 외부 반복계산 횟수의 경향을 위한 자료

Case	Pressure (psia)	Tin (°F)	Gin (Mlbm/hr-ft ²)	Qavg (MBtu/hr-ft ²)
1	2431.6	580.7	1.985	0.39938
2	2431.5	539.6	2.057	0.49336
3	2133.3	537.5	1.997	0.44743
4	2433.7	511.4	1.969	0.52204
5	2131.2	497.5	1.995	0.51292
6	2431.4	471.5	1.991	0.57761
7	2439.2	534.0	1.990	0.48381
8	1840.9	539.5	1.990	0.43442
9	1841.5	493.5	1.981	0.5015
10	1551.0	499.4	1.972	0.48221
11	1542.8	467.5	1.971	0.51858
12	1832.3	446.0	1.992	0.55186
13	1831.4	437.5	1.983	0.56735
14	2430.6	584.1	1.979	0.3823
15	2124.6	580.5	1.493	0.31203
16	2458.3	598.0	2.943	0.50248
17	2462.6	568.0	3.019	0.58142
18	2159.2	570.7	3.002	0.52451
19	1861.2	575.4	2.963	0.47779

표 3 분석모형에 대한 CHF 발생 위치에서의 유동변수

모형 \ 변수	압력변수 (psi)			질량속도 (Mlbm/hr-ft ²)			국부건도 (분율)		
	Corner	Mid	Center	Corner	Mid	Center	Corner	Mid	Center
1/8 TS 모형	10.0102	10.0138	10.0162	1.7746	2.0621	2.0485	.219	.236	.248
1/4 TS 모형	9.5936	9.5969	9.5993	1.7704	2.0613	2.0450	.192	.206	.222
전체 TS 모형	9.5938	9.5972	9.5997	1.7685	2.0601	2.0463	.194	.206	.221

표 4 CHF 분석을 위해 선정된 COBRA-IV 분석 모형

변수	분석모형	No. in Gr-2
분석모형의 크기	전체모형	N/A
축방향 분석노드수	100 노드	N/A
미포화 기포	No	N1=1
기포율 모형	수정된 Armand 모형	N2=1
단상유동 마찰계수	$0.184 Re^{-0.2}$	N/A
이상유동 마찰계수 보정	Armand 모형	N3=1
마찰계수 가열 보정	보정	N4=1
단상유동 열전달계수	Dittus-Boelter	N6=0
난류혼합변수	0.059	N1=0 in Gr-10
Numbering 방법	Line-wise	N/A

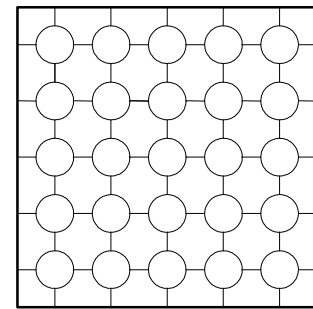
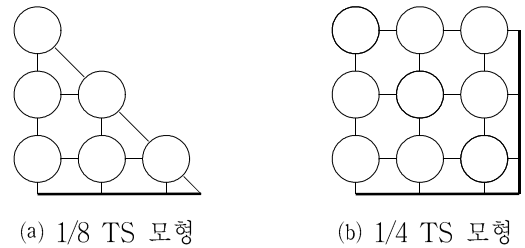


그림 1 CHF TS COBRA-IV 입력모형

표 5 두 분석체제간 비교

Code Statistics		THINC-IV (*)	COBRA-IV
Mean (M/P)		1.012 (1.0051)	0.9960
STD	Same	0.0867(0.0847)	0.0776
	Diff		
	Equal	0.0866(0.0850)	0.0784
	Unequal	0.0864(0.0844)	0.0773
상관식 한계		1.17(1.17)	1.17

* for Original Data Base [1]

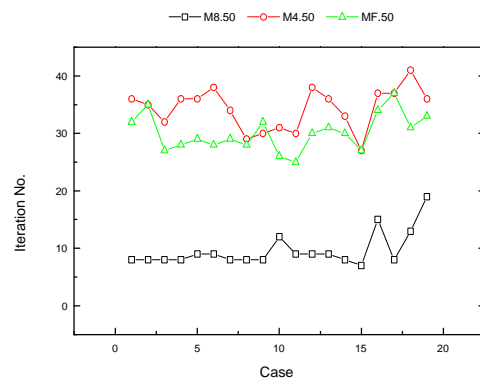


그림 2 모형크기에 대한 외부 반복횟수

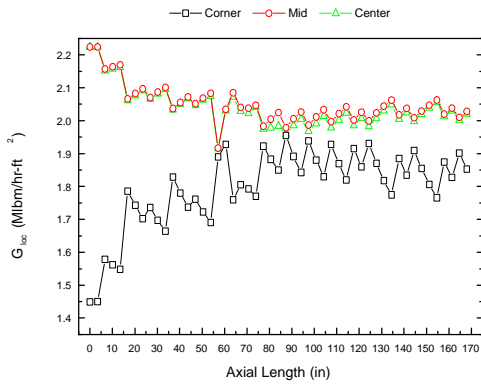


그림 3 1/8 TS 모형의 축방향 질량속도 분포

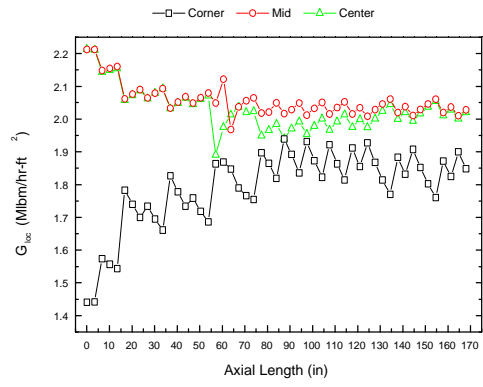


그림 4 1/4 TS 모형의 축방향 질량속도 분포

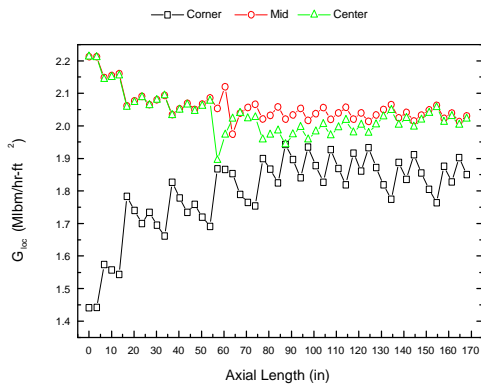


그림 5 전체 TS 모형의 축방향 질량속도 분포

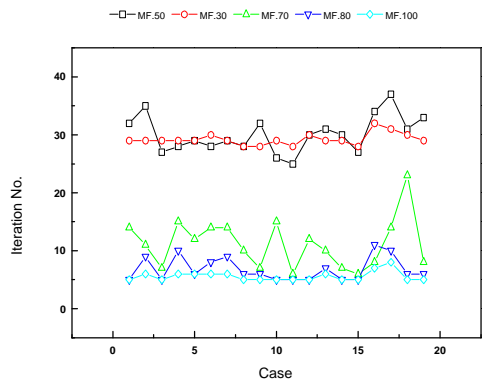


그림 6 축방향 노드수에 대한 외부반복 횟수

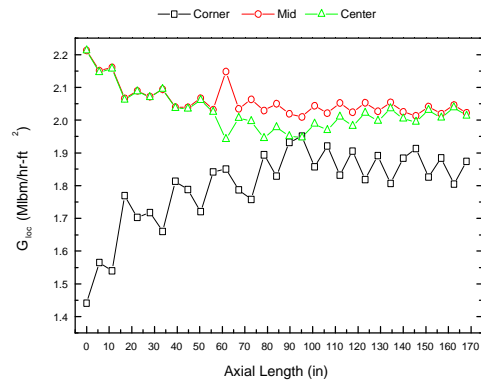


그림 7 30 축방향 노드모형의 질량속도 분포

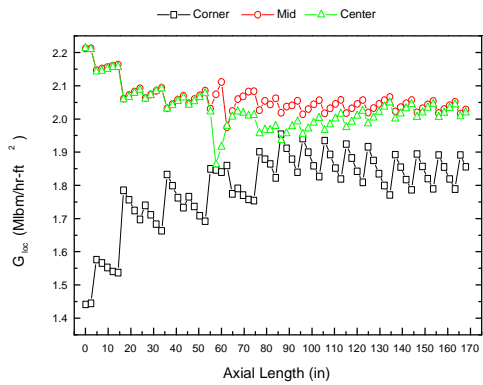


그림 8 70 축방향 노드모형의 질량속도 분포

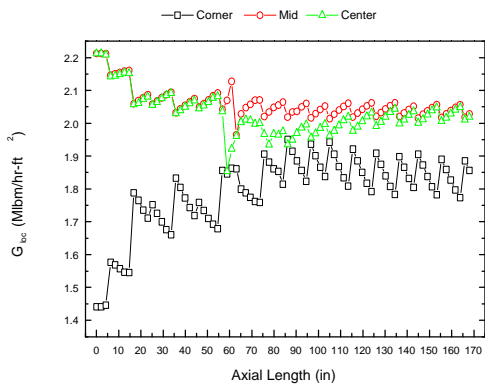


그림 9 80 축방향 노드모형의 질량속도 분포

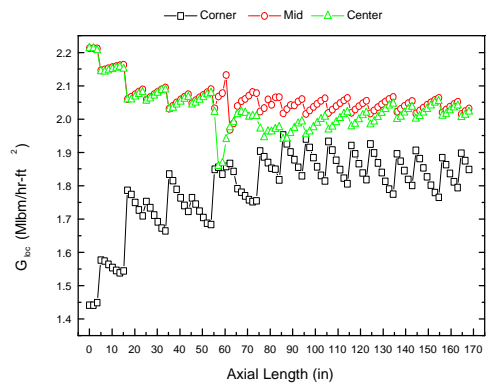


그림 10 100 축방향 노드모형의 질량속도 분포

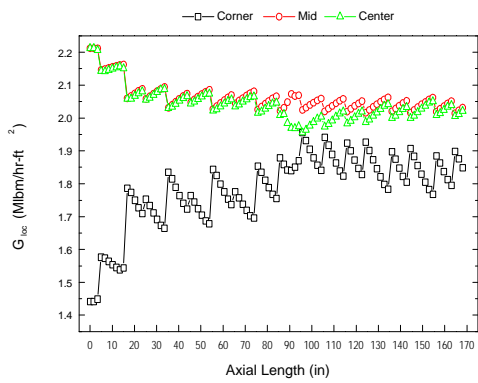


그림 11 미포화 기포율 모형이 배제된 경우의 축방향 질량속도 분포

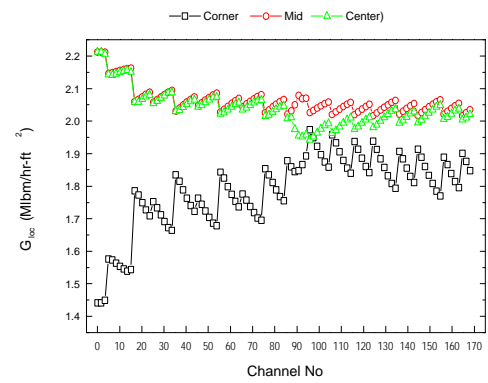


그림 12 균질모형 관계식을 사용한 경우의 축방향 질량속도 분포

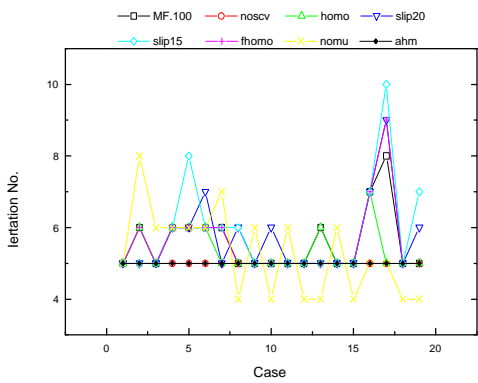


그림 13 보조관계식에 대한 외부반복 횟수

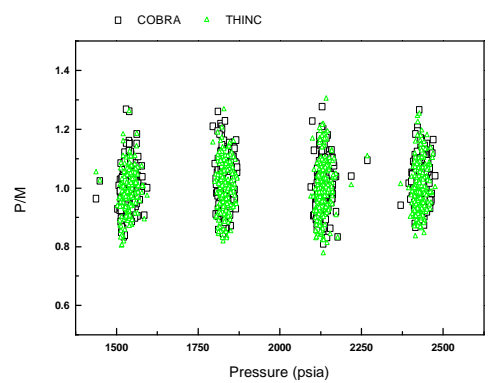


그림 14 압력에 대한 P/M 경향

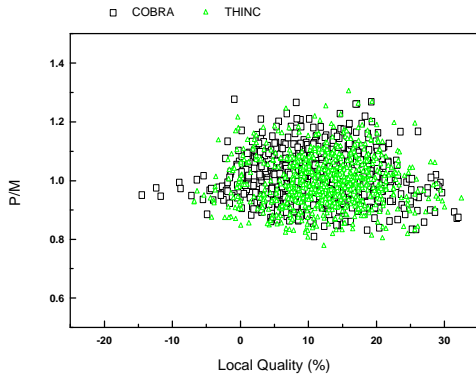


그림 15 국부건도에 대한 P/M 경향

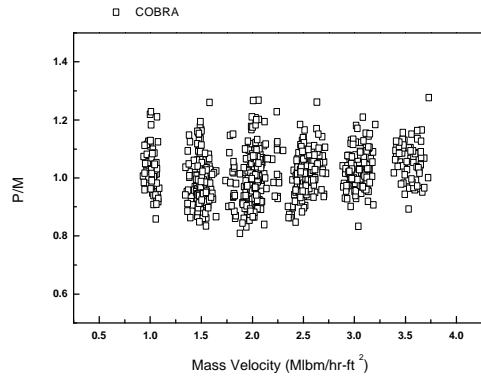


그림 16 국부 질량속도에 대한 P/M 경향

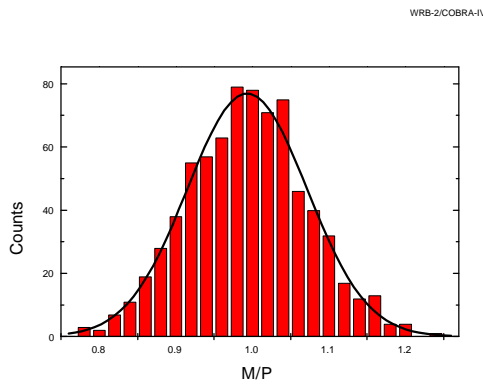


그림 17 WRB-2/COBRA-IV 의 M/P 분포

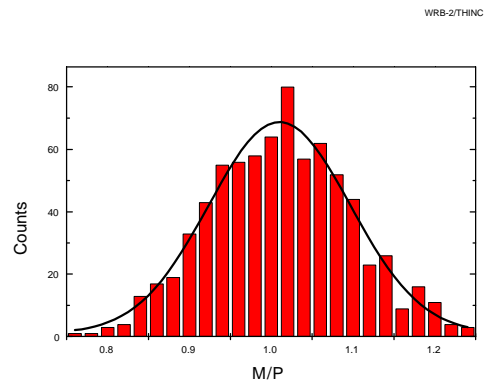


그림 18 WRB-2/THINC 의 M/P 분포

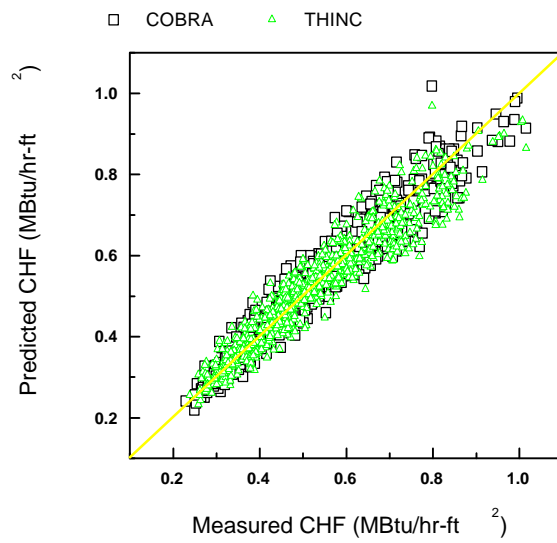


그림 19 두 분석체제에 대한 CHF 측정치와 CHF 예측치와의 관계