2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

다차원 최적 계통분석코드 MARS 2.3 의 부수로 해석능력 개발

Development of Subchannel Analysis Capability of the Best-Estimate Multi-Dimensional System Code, MARS 2.3

정재준, 배성원, 황대현, 이원재, 정법동

한국 원자력 연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요약

다차원 최적 계통분석코드 MARS 의 3 차원 열수력 모듈은 원래 COBRA-TF 코드를 근간으로 개발되었다. COBRA-TF 코드의 열수력 모델은 3 차원 직교 좌표계뿐만 아니라 부수로 좌표계(Subchannel coordinates)에서 사용될 수 있도록 개발되었으며 부수로 해석을 위한 별도의 열수력 모델도 포함하고 있다. 따라서 MARS 코드는 기본적으로 부수로 해석능력을 보유하고 있다고 할 수 있다. 본 연구에서는 MARS 2.3 의 부수로 해석능력을 평가하기 위해 ISPRA 16-Rod Bundle Test (PWR 열수력 조건) 및 GE 9-Rod Bundle Test (BWR 열수력 조건)을 모의하였으며, 계산결과 및 기존의 연구결과를 근거로 현재 MARS 3D 모듈에 사용되고 있는 Void drift 모델을 개선하였다.

Abstract

The 3-dimensional hydrodynamic module of the best-estimate system code, MARS, has been developed from the COBRA-TF code. COBRA-TF adopts a two-fluid, three-field model for two-phase flows on rectangular Cartesian coordinates or subchannel coordinates. In addition, COBRA-TF has special models for subchannel analysis, such as turbulent mixing model and void drift model. Therefore, it can be said that MARS has the capability of subchannel analysis. In this paper, to evaluate the subchannel analysis capability of MARS 2.3, we have simulated and the ISPRA 16-rod bundle test and the GE 9-rod bundle test, which represents typical PWR and BWR core thermal-hydraulic conditions, respectively. Using the calculation results and other existing assessment results, the void drift model of MARS 2.3 has been improved.

1. 서론

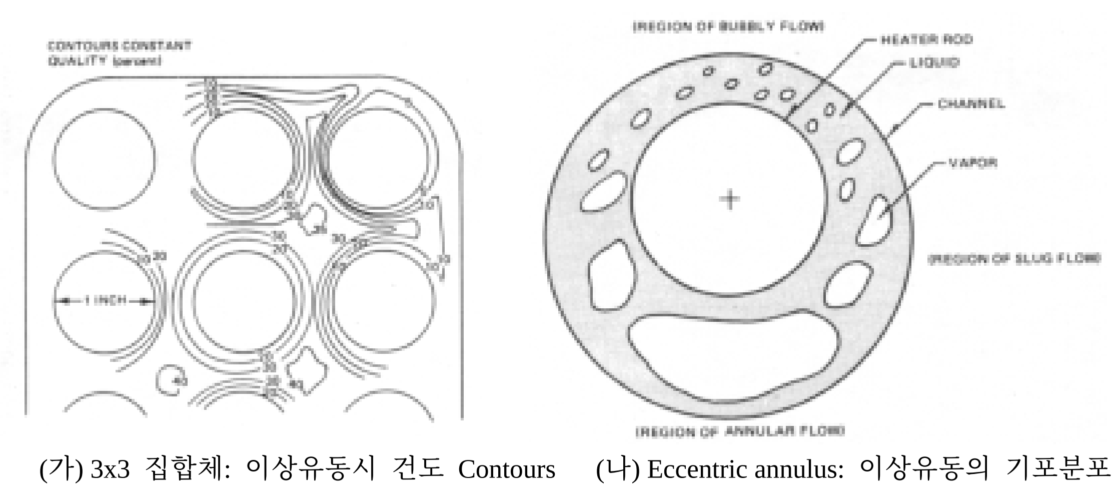
다차원 최적 계통분석코드 MARS 는 일차원 계통분석코드 RELAP5 와 다차원 원자로 용기 열수력 코드 COBRA-TF 의 “통합 코드”를 근간으로 하여 개발되었다.

그 다음 단계로 “통합코드”의 구조 개선(Restructuring) 및 현대화가 수행되었으며, 더 나아가서 MARS 고유의 열수력 모델 개발 및 평가를 통해 현재의 MARS 2.3 으로 개발되어왔다(Lee, 2002).

그런데, MARS 코드의 3 차원 열수력 모듈(다음부터 3D 모듈이라 부름)로 활용되고 있는 COBRA-TF 코드는 열수력 모델을 3 차원 직교 좌표계뿐만 아니라 부수로 좌표계(Subchannel coordinates)에서 사용할 수 있도록 개발되었으며 부수로 해석을 위한 별도의 열수력 모델도 포함하고 있다(Jeong, 1999). 그러므로 MARS 코드는 기본적으로 부수로 해석능력을 보유하고 있다고 할 수 있다. 그러나, 지금까지 MARS 3D 모듈은 주로 냉각재 상실사고시의 재관수 열전달 해석 및 원자로 용기 내부의 다차원 유동 해석 등에 치중되었으며 부수로 해석에는 거의 활용되지 않았다. 부수로 해석은 원자로심의 열적 여유도 평가를 위해 필요한데 이는 곧 노심내부의 국부 열수력 조건 및 임계열속(Critical heat flux) 계산 능력과 직결된다. 본 논문은 MARS 3D 모듈의 노심내부 국부 유동분포 예측능력에 초점을 둔다.

현재 가압경수로의 부수로 해석에는 COBRA 계열코드, MATRA, TORC, THINC-IV, VIPRE-01 등이 주로 쓰이고 있다. 이들 코드는 축방향 유동이 지배적이라는 가정하에서 균질혼합체 모델이나 Drift flux 모델을 채택하고 있으며 정상상태 계산 능력이 탁월하다. 부수로 열수력 모델의 가장 중요한 특성은 부수로간의 유동 혼합(Flow mixing)을 모델하는 방법에 따라 기술된다. 유동 혼합은 다음 네 가지 요소에 의해 발생한다:

가. Diversion cross flow: 인접한 부수로간의 압력차에 따라 발생하는 횡방향 유동.
나. Turbulent mixing: 난류 유동에 의한 유동혼합.
다. Void drift: 이상유동시 증기가 유속이 큰 쪽으로 몰리는 성향(그림 1 참조).
라. Buoyancy drift: 수평관 유동에서 중력에 의해 유발되는 유동.



(가) 3x3 집합체: 이상유동시 건도 Contours (나) Eccentric annulus: 이상유동의 기포분포

그림 1. Void drift 현상을 보여주는 실험결과(Lahey and Moody, 1993)

MARS 3D 모듈에서는 위의 각 항목을 각각 횡방향 운동량 보존식, Lahey 의 등체적교환 모델(Equal-volume exchange model) 및 Void drift 모델로 모의하고 있다. 단, 위의 네 번째 항목은 MARS 3D 모듈 적용영역을 벗어나므로 별도의 모델을 채택하지 않는다. MARS 3D 모듈은 기존 부수로 코드와 비교하여 대동소이한 것으로 보이지만, 축방향 유동이 지배적이라는 가정이 포함되지 않았고 이상유동 모델로 Two-fluid three-field model 을 쓴다는 점에서 일반적인 과도유동의 적용성 및 발전성이 뛰어나다고 할 수 있다. 다만, MARS 3D 모듈은 Semi-implicit time scheme 을 쓰기 때문에 기존의 Marching scheme 을 쓰는 코드에 비해 계산속도가 느리다는 단점이 있다.

본 연구에서는 MARS 2.3 의 부수로 해석능력을 평가하기 위해 ISPRA 16-Rod Bundle Test 및 GE 9-Rod Bundle Test 를 모의하였으며, 계산결과 및 기존의 연구결과를 근거로 현재 MARS 3D 모듈에 사용되고 있는 Void Drift 모델을 개선하였다. 단, 본 연구에서는 임계열속에 관한 평가계산은 수행하지 않았다.

2. MARS 3D 모듈의 Turbulent Mixing 및 Void Drift 모델 개선

MARS 3D 모듈에서는 Turbulent Mixing 및 Void Drift 를 모델하기 위해 Lahey(1993) 의 등체적교환 모델(Equal-volume exchange model) 및 Void drift 모델을 채택하고 있다. 등체적 교환 모델은 동일한 체적의 “유체 덩어리”가 인접한 부수로 사이에서 난류유동으로 인해 서로 교환된다는 개념에서 출발한 것이다(그림 2 참조). 이 경우, 두 부수로의 밀도가 다르면 결과적으로 질량교환이 이루어진다. 다만, 각 상(액상과 기상)의 횡방향 요동 속도는 서로 동일하며 이는 다음과 같이 근사한다:

$$\tilde{u}_{i-j} = \tilde{u}_{j-i} = \frac{\varepsilon}{l}, \qquad (1)$$

여기에서 ε: eddy diffusivity,

l : subchannel mixing length.

위의 가정을 쓰면, 부수로 i 에서 부수로 j 로 전달되는 총 질량유속(Net mass flux)는 다음과 같이 나타난다:

$$w''_{i-j} = \frac{\varepsilon}{l}\left[(\alpha\rho)_{l,i} - (\alpha\rho)_{l,j}\right] + \frac{\varepsilon}{l}\left[(\alpha\rho)_{g,i} - (\alpha\rho)_{g,j}\right] \qquad (2)$$

혹은,

$$w''_{i-j} = (w''_{i-j})_l + (w''_{i-j})_g \qquad (3)$$

여기에서 $(w''_{i-j})_l = \frac{\varepsilon}{l}\left[(\alpha\rho)_{l,i} - (\alpha\rho)_{l,j}\right],$ (4)

$$(w_{i-j}^{''})_g = \frac{\varepsilon}{l}\left[(\alpha\rho)_{g,i} - (\alpha\rho)_{g,j}\right]. \quad (5)$$

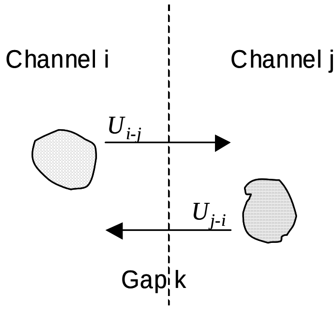


그림 2. 부수로간의 등체적 교환 모델 개념도

식 (3)에는 연속액상 및 기상의 총 질량유속이 각각 표현되었는데, 액적의 난류혼합 효과는 무시하였다. 한편, ε/l 은 다음과 같이 근사된다:

$$\frac{\varepsilon}{l} = w_k' / \rho S_k$$

여기에서 w_k' 은 부수로 i 와 부수로 j 사이의 Gap k 에서 요동 횡류(Fluctuating crossflow)를 의미하며 다음과 같이 근사할 수 있다:

$$w_k' = \beta \cdot S_k \cdot \overline{G_{ij}} \cdot \theta \quad (6)$$

여기에서 S_k = Intersubchannel gap width,

β = Mixing coefficient,

$\overline{G_{ij}}$ = Channel averaged mass flux,

θ = Two-phase multiplier.

위의 Two-phase multiplier(Hwang, 2000)는 유동양식에 따라 각각 다음과 같이 모델한다[1]:

- Bubbly-slug flow region

$$\theta = 1 + (\theta_M - 1)\frac{x}{x_C}, \quad x \le x_C .$$

- Annular flow region as

$$\theta = 1 + (\theta_M - 1)\frac{1 - x_o / x_C}{x / x_C - x_o / x_C}, \quad x > x_C .$$

여기에서 $x_o / x_C = 0.57\,\mathrm{Re}^{0.0417}$,

[1] 기존의 MARS 2.3 에서는 Two-phase multiplier 를 쓰지 않았다 (즉, $\theta = 1$).

$$\theta_M = 5,$$

$$x_C = \frac{0.4\sqrt{gD_{hy}\rho_f \Delta\rho}/G + 0.6}{\sqrt{\rho_f/\rho_g} + 0.6}.$$

난류 혼합에 의한 에너지 교환량은 식 (3)의 질량교환과 유사한 형태로 다음과 같이 표현된다:

$$q''_{i-j} = \frac{\varepsilon}{l}\left[(\alpha\rho h)_{l,i} - (\alpha\rho h)_{l,j}\right] + \frac{\varepsilon}{l}\left[(\alpha\rho h)_{g,i} - (\alpha\rho h)_{g,j}\right] \tag{7}$$

그림 1 에 나타난 Void drift 현상은 난류혼합 모델로 모사되지 않는다. Lahey 등은 이 현상을 평형상태의 기포분포를 찾아가는 과정으로 해석하였으며 기포분포가 평형상태에 도달하면 난류혼합 유동은 사라진다고 보았다. 따라서 총 난류 혼합 유동은 기포분포의 비평형 정도에 의해 결정된다고 보았다. 결과적으로 식 (4)와 (5)는 다음과 같이 바뀐다(Kelly, 1980):

$$w''_{g,i-j} = \frac{\varepsilon}{l}\left[(\alpha\rho)_{g,i} - (\alpha\rho)_{g,j} - [(\alpha\rho)_{g,i} - (\alpha\rho)_{g,j}]_{EQ}\right]. \tag{8}$$

$$w''_{l,i-j} = \frac{\varepsilon}{l}\left[(\alpha\rho)_{l,i} - (\alpha\rho)_{l,j} - [(\alpha\rho)_{l,i} - (\alpha\rho)_{l,j}]_{EQ}\right]. \tag{9}$$

그리고 평형상태 기포분포는 그림 1 이 의미하는 바와 같이 질량유속이 크면 기포율도 크다고 본다. 이는 다음 수식으로 표현된다.

$$\left(\alpha_i - \alpha_j\right)_{g,EQ} = K\left(G_i - G_j\right)_{EQ}. \tag{10}$$

식 (10)을 이용하여 식 (8)과 (9)를 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$w''_{g,i-j} = \frac{\varepsilon}{l}\left[(\alpha\rho)_{g,i} - (\alpha\rho)_{g,j} - K_{VD}\frac{G_i - G_j}{\overline{G}_{i,j}}\rho_g\right], \tag{11}$$

$$w''_{l,i-j} = \frac{\varepsilon}{l}\left[(\alpha\rho)_{l,i} - (\alpha\rho)_{l,j} + K_{VD}\frac{G_i - G_j}{\overline{G}_{i,j}}\rho_l\right]. \tag{12}$$

여기에서 K_{VD} 은 Void drift coefficient 이다. 기존의 MARS 2.3 에서는 Lahey(1993)의 모델에 입각하여 Void drift coefficient 가 두 부수로의 평균 기포율과 같다고 모델하였다. 그런데, Hwang 등(2000)의 평가에 따르면 Void drift coefficient 를 상수 혹은 압력과 건도의 함수로 나타내는 것이 더 정확한 것으로 나타나 여기에서는 상수(입력자료)로 간주하고 식 (11) 및 (12)와 같이 모델하였다. 부수로간의 에너지 및 운동량 교환율도 식 (11) 및 (12)와 유사하게 모델할 수 있다.

3. 계산결과 및 논의

앞 절에서 설명한 MARS 3D 모듈의 부수로 해석능력을 평가하기 위해 ISPRA 16-Rod Bundle Test (Herkenrath, 1980) 및 GE 9-Rod Bundle Test (Lahey, 1970)을 모의하였다. 우선 기존의 MARS 2.3 을 그대로 써서 계산한 다음, 개선된 모델을 써서 동일한 조건으로 다시 계산하여 결과를 비교하였다.

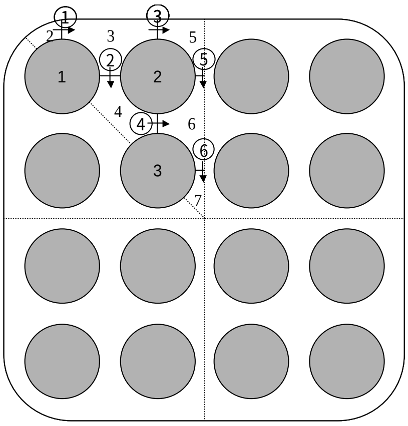
평가계산에 사용한 ISPRA 16-Rod Bundle Test 및 GE 9-Rod Bundle Test 는 각각 PWR 및 BWR 핵연료를 모사한 실험이다. 이들 실험에서 측정한 주요 출력변수는 각 부수로 출구에서 건도 및 질량유속(Mass flux)이었다. ISPRA 실험 봉다발에는 전형적인 PWR 그리드(혼합날개는 없음)가 설치되어 있으며, 단상 난류혼합 계수는 0.005 가 적정한 것으로 나타났다(Hwang, 1990). GE 실험 봉다발에는 그리드 대신 봉을 연결하는 핀(Pin)이 등간격으로 설치되어 있다. 여기에서도 단상 난류혼합 계수는 0.005 가 적정한 것으로 나타났다(Lahey, 1970). 두 실험에서 공통적으로 축방향 및 횡방향 출력분포는 균일하였다. 그러므로 부수로 구조 및 균일 출력분포를 고려하여 “1/8 Symmetry”를 가정하고 그림 3 과 같이 부수로를 모델하였다. 두 실험의 Test section 길이(가열봉 길이)는 각각 3.66 m 및 1.83 m 이다. MARS 입력모델에서 축방향 Mesh 규격은 각각 10.16 cm(4”) 및 7.62 cm(3”)이다.

두 실험설비에서는 각각 수십 건의 정상상태 실험이 수행되었는데, 여기에서는 유사한 조건의 실험을 제외하고 선별하여 ISPRA 실험 27 건 및 GE 실험 13 건을 채택하였다. 각 실험의 열수력적 조건을 표 1 과 2 에 열거하였다. MARS 코드로 이들을 모의할 때 각각의 정상상태 실험을 일련의 준평형 상태 실험이 연속적으로 진행되는 것으로 간주하고 입력을 준비하였다.

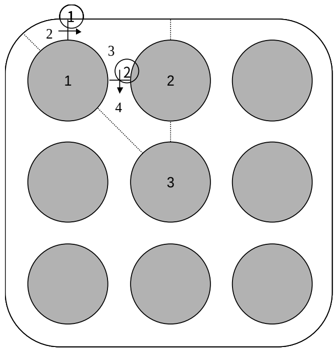
3.1 기존 모델과 개선된 모델의 계산결과 비교

표 1 과 2 에 열거된 실험을 우선 기존의 MARS 코드로 모의하고, 그 다음 개선된 코드로 모델하였다. 이때 단상 난류혼합계수(β) 및 Void drift coefficient(K_{VD})는 각각 0.005 및 1.0 을 썼다.

그림 4 ~ 9 에는 두 실험의 계산결과(EVVD 라고 표시된 것이 개선된 모델의 결과)와 실험결과가 비교되어 있다. 이들 실험의 주요 출력변수는 각 부수로 출구의 건도 및 질량유속이지만, 각 부수로에서 엔탈피 증가분을 비교하는 것도 의미가 있으므로 이 값들을 실험결과로 나눈 값(P/M of enthalpy increase)을 별도로 나타내었다. 그림 4 ~ 9 의 결과를 통해 개선된 모델의 계산결과가 기존 모델의 개선결과에 비해 현저히 좋아졌음을 알 수 있다. 특히, BWR 조건의 계산결과에서 모델개선의 효과가 크게 나타났다.



ISPRA 16-Rod Bundle Test



GE 9-Rod Bundle Test

그림 3. MARS 코드의 부수로 입력모델

표 1. ISPRA 16-Rod Bundle Test 열수력적 조건

No.	Run No.	Pressure (bar)	Inlet temp. (C)	Mass flux (kg/m^{2}s)	Power (kW/m^2)
1	205.1	160.09	291.2	2276.2	719.5
2	203.0	160.21	300.6	2291.9	716.9
3	202.1	160.33	290.7	2692.4	713.4
4	200.0	160.14	300.8	2722.2	716.8
5	211.0	160.12	291.3	2691.6	886.0
6	209.0	160.61	289.9	3144.1	707.6
7	207.1	160.20	300.7	3130.1	717.4
8	208.0	160.35	310.5	3212.9	717.3
9	214.0	159.85	290.3	3123.6	883.9
10	213.0	160.20	300.4	3133.2	886.4
11	221.0	160.16	290.8	3101.1	1069.6
12	206.1	160.40	311.3	2270.7	719.6
13	217.0	159.87	290.4	2286.7	887.7
14	216.0	160.07	300.0	2274.6	883.5
15	227.0	159.97	310.1	2255.4	886.2
16	225.0	160.29	289.7	2245.0	1070.1
17	226.0	160.45	300.0	2244.5	1070.1
18	224.0	160.46	309.5	2207.8	1070.8
19	201.0	160.19	310.9	2714.4	717.2
20	210.0	160.25	301.6	2693.1	888.4
21	212.0	159.93	310.3	2746.9	884.5
22	219.0	160.19	290.4	2701.2	1070.1
23	218.0	160.18	300.9	2683.6	1064.7
24	222.0	160.53	310.0	2671.1	1069.3
25	215.0	160.20	309.6	3236.1	887.2
26	220.0	160.01	299.7	3128.8	1069.1
27	223.0	159.96	310.3	3113.7	1069.9

표 2. GE 9-Rod Bundle Test 열수력적 조건 (압력 68.9 Bar)

No.	Run no.	Inlet temp (C)	Mass flux (kg/m^{2}s)	Power (kW)
0	1B	19.50	651.0	0
0	1C	19.50	1342.7	0
0	1D	19.50	2047.9	0
0	1E	19.50	2671.8	0
1	2B2	213.10	718.8	532
2	2B3	234.00	725.6	532
3	2B4	261.00	725.6	532
4	2C1	259.00	1437.6	532
5	2C2	269.20	1448.5	532
6	2D1	155.40	732.4	1064
7	2D2	226.00	732.4	1064
8	2E1	216.60	1464.7	1064
9	2E2	239.90	1464.7	1064
10	2E3	271.90	1437.6	1064
11	2G1	173.20	1451.2	1596
12	2G2	192.30	1464.7	1596
13	2G3	214.70	1451.2	1596

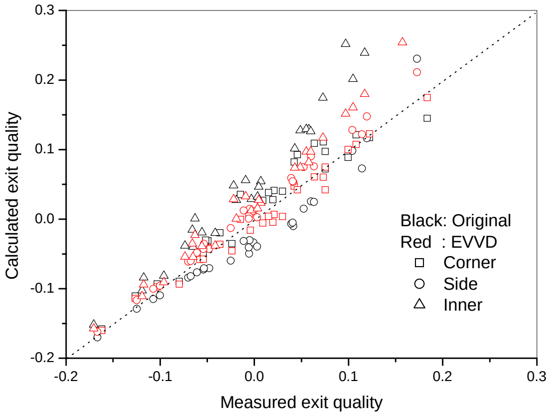


그림 4. ISPRA test – Exit quality

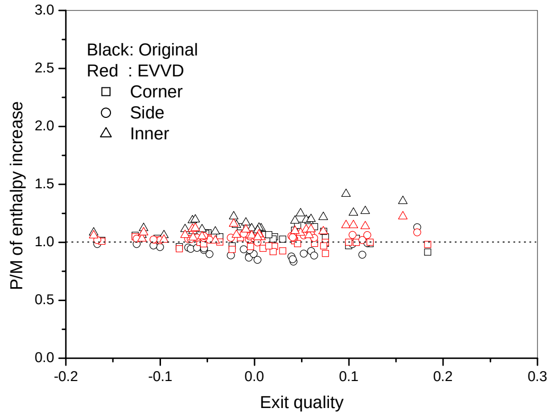


그림 5. ISPRA test – P/M of enthalpy increase

그림 10 에는 GE test 의 각 실험별 출구건도를 계산값과 비교하였다. Inner – Side – Corner 부수로의 순으로 기포율이 크게 계산되어 실험과 잘 일치함을 알 수 있다. Corner 부수로의 출구건도는 질량유속이 낮기 때문에 클 것으로 예상되지만, Void drift 효과에 의해 낮게 나타났으며, 계산결과 또한 동일한 경향을 보인다. 이는 MARS 3D 모듈의 Void drift 모델이 잘 작동하고 있음을 의미한다.

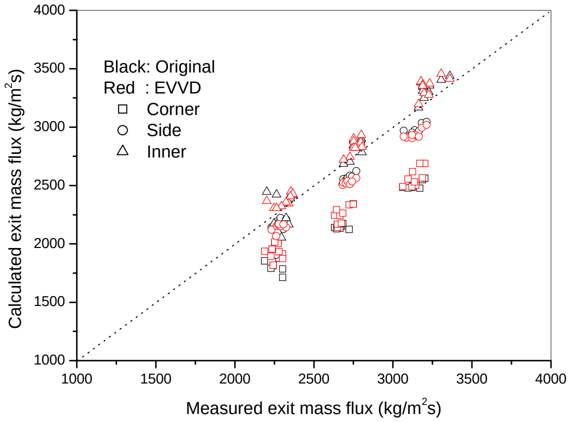


그림 6. ISPRA test – Exit mass flux

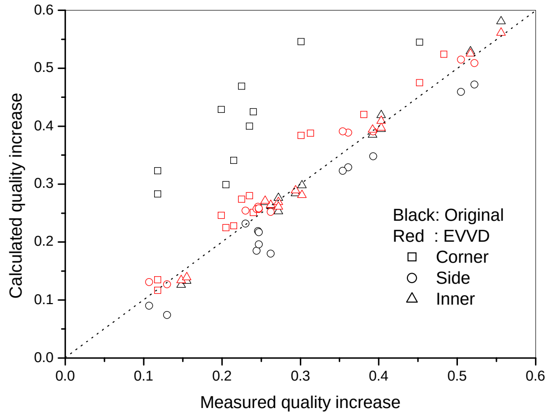


그림 7. GE test – Exit quality

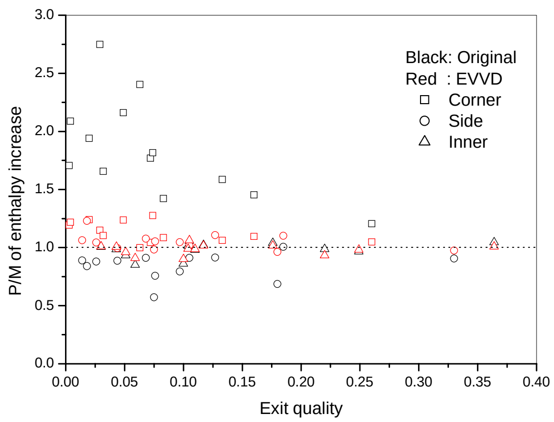


그림 8. GE test – Exit quality

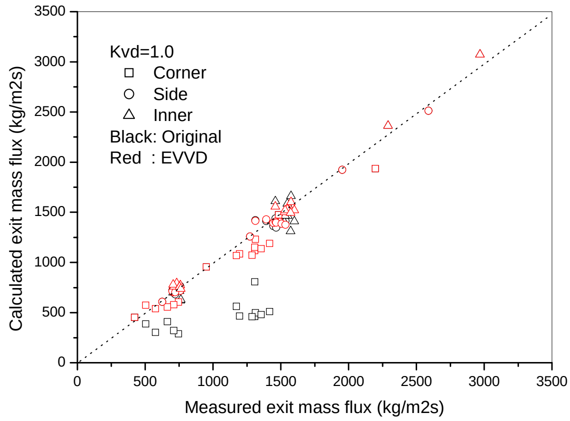


그림 9. GE test – P/M of enthalpy increase

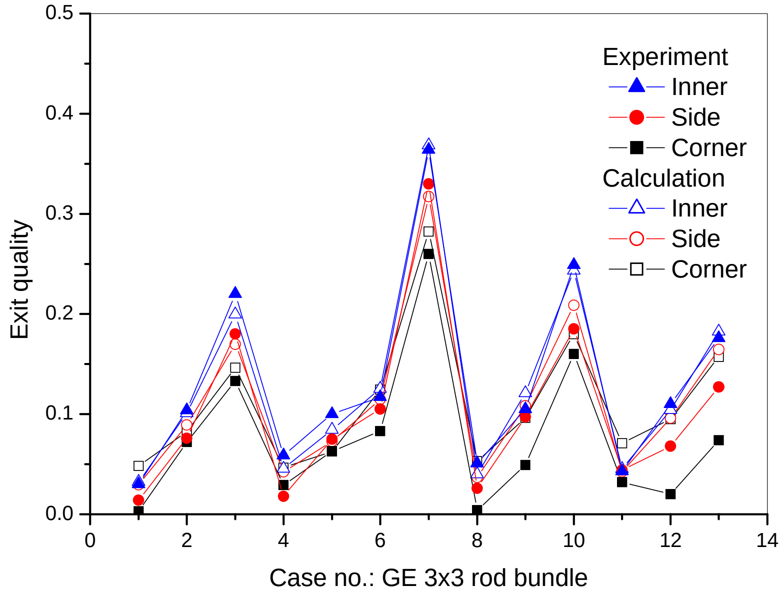


그림 10. GE test 의 출구건도 계산 및 실험 결과 비교

3.2 Void Drift Coefficient (K_{VD})에 따른 계산결과 비교

K_{VD} 의 영향은 Hwang 등(2000)이 COBRA-IV-I 코드를 이용한 연구에서 상세하게 수행하였다. 그 연구결과에 따르면 K_{VD} 는 압력, 건도 및 유동양식의 함수인 것으로 나타났다. 그런데 이들 매개변수 중에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 압력이었다. K_{VD} 는 압력이 낮을수록 크고, 높으면 적은 것으로 나타났다. 그래서 본 연구에서는 다음과 같이 K_{VD} 민감도 계산을 수행하였다.

- ISPRA Test (160 Bar): K_{VD} = 1.0, 0.6, 0.2.
- GE test (69 Bar): K_{VD} = 1.0, 1.4, 1.8.

그림 11 ~ 15 는 계산결과를 보여준다. ISPRA test 및 GE test 에서는 K_{VD} 가 각각 0.2 및 1.8 인 경우에 실험결과와 잘 일치한다. 이는 MARS 3D 모듈의 해석결과가 Hwang 등의 해석결과와 일관성이 있음을 의미한다. K_{VD} 에 관한 체계적인 연구는 추후에 수행할 예정이다.

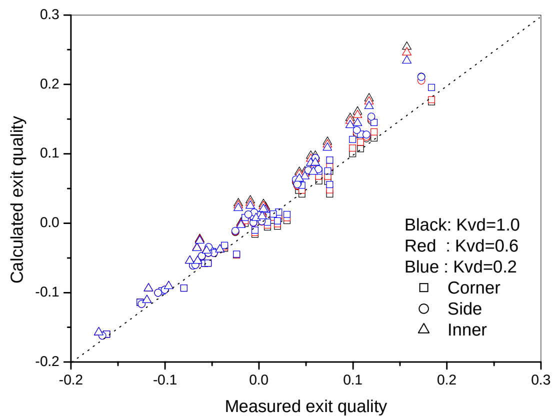


그림 11. ISPRA test – K_{VD} 에 따른 Exit quality

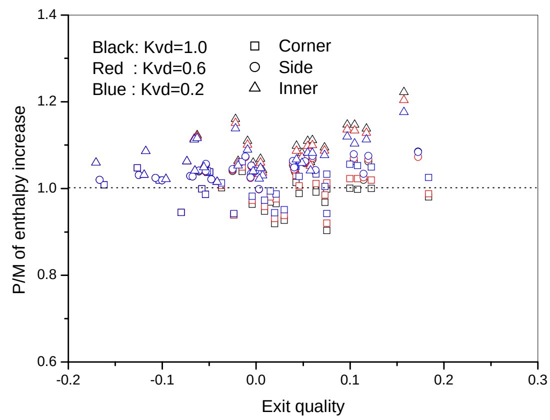


그림 12. ISPRA test – K_{VD} 에 따른 P/M of enthalpy increase

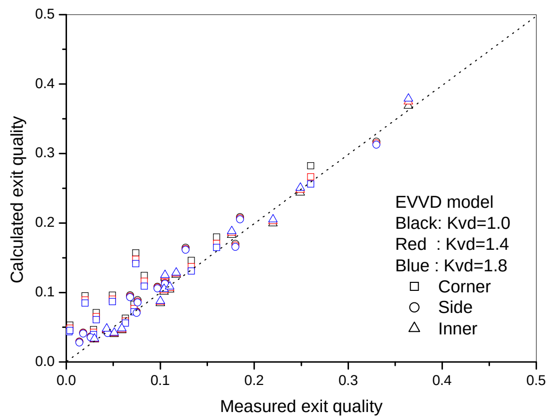


그림 13. GE test – K_{VD} 에 따른 Exit quality

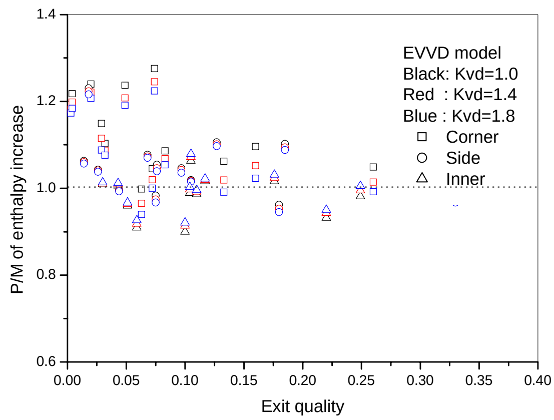


그림 14. GE test – K_{VD} 에 따른 P/M of enthalpy increase

4. 요약 및 결론

MARS 코드의 3D 모듈로 활용되고 있는 COBRA-TF 코드는 열수력 모델을 3 차원 직교 좌표계뿐만 아니라 부수로 좌표계에서도 사용할 수 있도록 개발되었으며 부수로 해석을 위한 별도의 열수력 모델도 포함하고 있다. 따라서 MARS 코드는 기본적으로 부수로 해석능력을 보유하고 있다고 할 수 있다. 그런데, 지금까지 MARS 3D 모듈은 주로 냉각재 상실사고시의 재관수 열전달 해석 및 원자로 용기 내부 다차원 유동 해석 등에 치중되었으며 부수로 해석에는 거의 활용되지 않았다.

본 연구에서는 MARS 2.3 의 부수로 해석능력을 평가하기 위해 ISPRA 16-Rod Bundle Test 및 GE 9-Rod Bundle Test 를 모의하였으며, MARS 코드 계산결과 및 기존의 연구결과를 근거로 현재 MARS 3D 모듈에 사용되고 있는 Void Drift 모델을 개선하였다. 그 결과, MARS 3D 모듈은 두 실험에서 측정된 부수로별 출구건도 및 질량유속을 잘 예측하는 것으로 나타났다. Void Drift Coefficient (K_{VD})에 따른 민감도 계산도 수행하였는데, 기존의 연구결과에서와 마찬가지로 K_{VD} 는 압력이 낮을수록 크고, 높으면 적은 값을 쓰는 것이 타당한 것으로 나타났다.

결론적으로, MARS 3D 모듈은 핵연료 봉다발 내부의 유동 분포를 정확하게 계산할 수 있는 능력이 있는 것으로 판단된다. 그렇지만, 부수로 해석코드로 자리를 잡기 위해 정확한 임계열속 계산능력도 갖추어야 하는데, 이에 관한 연구는 추후에 수행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기개발계획의 일환으로 수행된 것이다.

참고 문헌

CE, A Computer Code for Determining the Thermal Margin of a Reactor Core: TORC, CENPD-161 (1986).

Chelemer, H. and Hochreiter, L.E., Application of the THINC IV Program to PWR Design, WCAP-8054 (1973).

Herkenrath, H. et al., Experimental investigation of the enthalpy and mass flow distribution in 16-rod clusters with BWR-PWR-Geometries and conditions, ISPRA Report, EUR 7575 EN, 1980.

Hwang, D.H., et al., Improvement of analysis system for core thermal hydraulic field and CHF, KAERI/RR-980/1990, KAERI (1990).

Hwang, D. H. et al., “Assessment of the interchannel mixing model with a subchannel analysis code for BWR and PWR conditions," Nuclear Engineering and Design 199 (2000), pp. 257-272.

Jeong, J.-J., Ha, K.S., Chung, B.D. and Lee, W.J., "A Multidimensional Thermal-Hydraulic System Analysis Code, MARS 1.3.1," *J. Korean Nuclear Society*, vol. 31, no. 3, pp. 344-363 (1999).

Kelly, J. E., Development of a two-fluid, two-phase model for light water reactor subchannel analysis, PhD Thesis, Department of Nuclear Engineering, MIT, August 1980.

Lahey, Jr., R.T. et al., Two-phase flow and heat transfer in multirod geometries: subchannel and pressure drop measurements in a nine-rod bundle for diabatic and adiabatic conditions, GE report, GEAP-13049, 1970.

Lahey, Jr., R.T. and Moody, F. J., The thermal hydraulics of a boiling water reactor, 2nd Ed., American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois USA (1993), pp. 168-184.

Lee, W. J. et al., "Development of a Realistic Thermal-Hydraulic System Analysis Code," KAERI/RR-2235/2001, Korea Atomic Energy Research Institute, 2002.

Stewart, C.W. et al., VIPRE-01: A Thermal-Hydraulic Analysis Code for Reactor Cores, EPRI-NP-2511 (1983).