2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 집합체의 유로 폐쇄 현상 분석을 위한 코드 개발

The Development of Code for the Analysis of the Flow Blockage of Rod Bundles of LMR

하귀석, 정해용, 장원표, 이용범

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

액체금속로 집합체내의 일부 유로 폐쇄 현상은 국부적으로 소듐 비등을 일으키거나 피복재의 건전성에 영향을 줄 수 있으므로, 설계 및 안전해석 측면에서 이에 대한 정확한 해석이 요구된다.

이를 목적으로 MATRA-LMR 코드에 분산유동저항 모델을 코드에 적용하여 Wire Spacer와 연료봉 등의 벽면이 유체에 미치는 영향을 보다 정확히 고려하였다. 또한 Upwind Differencing과 Central Differencing 기법을 서로 다른 유동 영역에 적용하여 보다 다양한 유동장에 대한 계산 수행 능력을 부가하여 코드의 정확도를 높였다. 즉 운동량 방정식에서 |Re| 수가 2보다 적을 경우에 그리고 에너지 방정식에서 |Pe| 수가 2보다 적을 경우에 각각의 대류항에 Central Differencing 방법을 이용하고, 두 방정식에 확산항을 추가하였다. 실험에 대한 계산 결과에서 분산유동 저항 모델과 위의 Hybrid 기법을 적용한 결과는 실험에 매우 근접한 결과를 낳았다.

Abstract

A partial flow blockage within a fuel assembly in liquid metal reactor may result in localized boiling or a failure of the fuel cladding. Thus, the precise analysis for the phenomenon is required for a safe design of LMR. To take account of the effects of the surfaces of rod and wire spacer on the fluid, the distributed resistance model was implemented into the MATRA-LMR code, which is important to the analysis for flow blockage. Also central differencing scheme for the velocities is used in the flow with the |Re| less than 2 and for the enthalpies with the |Pe| less than 2. Diffusion terms are added to the equations of momentum and energy. the validation calculation was carried out against to the experiment of FFM series tests and the results using MATRA-LMR with the distributed resistance model and above hybrid scheme well agree with the experimental data.

1. 서론

액체금속로에서 노심의 냉각재 부수로는 일차계통에서 유입된 이물질이나 혹은 핵연료 자체의 파손물들에 의해 폐쇄될 수 있다. 이러한 폐쇄물들은 냉각재의 유동을 방해하고 폐쇄물 하류에서 핵연료봉의 손상을 가져올 수 있다. 집합체 내의 핵연료봉 한 개가 파손되면 다른 핵연료봉으로 전파되며, 결국 중대사고로 발전할 수 있다. 따라서 중대사고를 야기하는 경로를 예방하거나, 사고 완화를 위해, 신뢰성 있는 컴퓨터 코드를 이용하여 부수로가 폐쇄된 집합체내의 냉각재 온도분포를 정확히 예측해야 한다.

다양한 실험들이 Wire Spacer를 갖는 집합체 내부를 대상으로 수행되었다. 이들 실험의 관측결과, 이들 Wire-Spacer들은 집합체내에서의 압력강하를 증가시킬 뿐만 아니라 유동을 Wire가 감긴 방향으로 흐르도록 유도한다. 또한 부수로가 폐쇄될 경우 하류의 유동은 일부 재순환되어 냉각재의 온도가 상승하는 원인이 된다. 현재 개발중인 MATRA-LMR 코드는 Wire forcing function을 사용하여 Wire-wrap에 의한 유동 분포를 모델하고 있다. 이 모델은 Wire-wrap을 따라 유체의 흐름이 형성된다는 가정을 전제하고 있으므로 다른 유동저항이 없는 경우에는 타당한 결과를 준다. 하지만 보다 복잡한 여러 상황에 대한 올바른 기술을 위해서는 분산 유동저항 모델(Distributed Resistance Model, DRM)과 같은 방법으로 유동 저항에 의해 유발되는 효과를 반영하는 것이 필요하다. 또한 부수로 폐쇄시 발생되는 재순환 유동은 매우 낮은 속도로 형성된다. 이를 적절히 모사하는 수치해석 방법은 현재 MATRA-LMR에 구현되어 있는 Upwind Differencing 보다는 하류의 영향을 고려할 수 있는 Central Differencing 방법이 보다 적절하다.

기존에 개발된 부수로 해석 코드인 SABRE4, ASFRE[1]등의 코드는 모두 적용 방법은 약간의 차이를 가지지만 분산 유동저항 모델을 구현함으로써 유로 폐쇄 현상을 성공적으로 해석하고 있다. SABRE4 코드의 경우는 확산(Diffusion)이 지배적인 유동에 대해 Central Differencing 방법을 사용하고 있다.

본 연구는 분산유동저항 모델과 Central Differencing을 부수로 폐쇄 해석을 위한 MATRA-LMR 코드에 적용하는 과정과 그 결과를 제시한다.

2. 분산 유동저항 모델과 Central Differencing의 코드 적용

MATRA-LMR은 두개의 Numerical Scheme을 갖고 있다. 하나는 MARCHING Method를 이용한 Implicit Scheme이며, 다른 방법은 Upwind Differencing을 적용한 ACE(Advanced Continuous Eulerian) 방법의 Explicit Scheme이다. MARCHING 기법을 적용한 Implicit Scheme은 재순환 유동의 유동 방향으로 인해 유로 폐쇄 해석에 적절치 못하다. 따라서 여기서는 MATRA-LMR의 Explicit Scheme을 이용하였다.

MATRA-LMR에 이용된 종 방향과 횡 방향의 운동량 보존식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\langle \rho u\rangle_V A+\frac{\partial}{\partial X}\langle \rho u^2\rangle_A A+\{D_C^T\}\langle \rho uv\rangle_S S = -A\frac{\partial}{\partial X}\langle p\rangle_A - A\langle \rho\rangle_A g - C_T\{D_C^T\}[w'][D_C]\{u'\}-\frac{1}{2}\left(\frac{f}{D_h}+\frac{K}{\Delta X}\right)\langle \rho u^2\rangle_A A \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\langle \rho v\rangle_{V'} S+\frac{\partial}{\partial X}\langle \rho vu\rangle_{A'} S + C_S\{D_C\}\{D_C^T\}\left\{\frac{S}{l}\langle \rho v^2\rangle_S \cos\beta\right\} = -\frac{S}{l}\{D_C\}\{\langle p\rangle_A\}-\frac{1}{2}\frac{S}{l}K_G\langle \rho v^2\rangle_S \tag{2}$$

여기서 β 는 임의의 Gap 과 인접한 Gap 사이의 각을 의미한다.

식 (1)과 (2)의 오른쪽의 마지막 항들은 벽면과 유체사이의 운동량 교환을 나타낸다. 이들은 벽면이 유체에 미치는 힘이며, 분산 유동 저항 항으로 나타낼 수 있다. Wire-Spacer 를 갖는 핵연료봉에서는 그림 1 과 같이 벽면이 유체에 미치는 힘은 4 개의 성분으로 나눌 수 있다. 이들 중 F_R^L 과 F_W^N 은 아래와 같이 지배적인 유동의 방향에 따른 상관식들로 표현할 수 있다.

$$F_R^A = \frac{A_R f}{8}\rho c|c|\cos\theta \tag{3}$$

$$F_W^T = \frac{A_W f}{8}\rho c|c|\cos(\phi-\theta) \tag{4}$$

- 횡방향 유동이 지배적일 경우

$$F_R^L = \frac{A_R f}{8}\rho v|v|\left(\frac{D_V''}{S_T}\right)^{0.4}\left(\frac{S_L}{S_T}\right)^{0.6}\frac{1}{E(\omega)} \quad (5)$$

$$F_W^N = \frac{A_W f}{8}\rho v_N|v_N|\left(\frac{D_V''}{S_T}\right)^{0.4}\left(\frac{S_L}{S_T}\right)^{0.6}\frac{1}{E(\omega)} \quad (6)$$

- 종방향 유동이 지배적일 경우

$$F_R^L = \frac{A_W'' f}{8}\rho v|v|\left(\frac{D_V''}{S_T}\right)^{0.4}\left(\frac{S_L}{S_T}\right)^{0.6} \quad (7)$$

$$F_W^N = \frac{A_{wp} f_n}{2}\rho v_N|v_N| \quad (8)$$

$$f_n = \left(\frac{A_g}{A_{mg}}\right)^n\left[1+\frac{10}{\mathrm{Re}^{0.667}}\right] \quad (9)$$

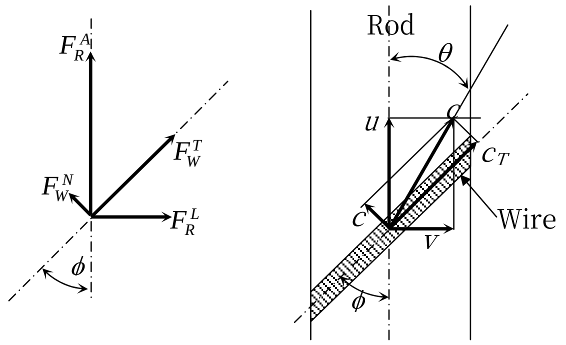


그림 1 연료봉과 Wire의 방향에 따른 속도 성분과 힘의 성분

여기서 $c^2 = u^2 + v^2$, A_R, A_W, A_W'' 는 각각 제어체적 내에서의 핵연료 봉, Wire Spacer, 전체 벽면의 표면적들을 나타낸다. 횡 방향의 유동을 나타낸는 식 (6)에서 Gunter-Shaw 상관식[2]이 도입되었으며, $E(\omega)$는 Gap 의 제어체적에서 Wire Spacer 의 위치에 따른 증배계수이다.[3] D_V'' 는 체적 평균 수력학적 직경으로서 $D_V'' = 4\Delta V_f / A_W''$ 와 같이 정의된다. v_N 은 Wire Spacer 의 감김 방향에 대해 수직한 성분의 속도로서 $v_N = u\sin\phi - v\cos\phi$ 와 같이 나타낼 수 있다. S_T 는 핵연료봉의 Pitch 이고, S_L 은 두 핵연료봉 열들 사이의 간격이다(그림 2). A_{wp} 는 Wire Spacer 를 제어체적 내에서 정면으로 바라본 투영 면적을 의미한다. . A_g 와 A_{mg} 는 그림 2 에 정의된 바와 같이 Gap 의 유동 면적과 최소 유동 면적을 의미한다. 식 (9)에서 지수 n 은 부수로나 Gap 의 제에체적 형태에 따라 다른 값을 갖는다. 그림 1 에서 정의된 4 개의 힘 성분들을 종 방향과 횡 방향으로 다시 나누어 식 (1)과 (2)에 각각 적용하면 식 (10)과 (11)로 표현할 수 있다.

식 (10)과 (11)이 MATRA-LMR 코드에 수치해석적으로 적용되었다. 일반적으로 위의 힘들을 Explicit 하게 처리하면 이들은 Wire Spacer 로 인한 횡 방향 유동(Cross-flow)을 증가시키는 반면에 Time Step 이 이들의 힘들로 제한된다. 또한 Implicit 항으로 표현하면, 이들은 수치적인 안정성을 증가시키는 반면에 횡 방향 유동을 감소시킨다. MATRA-LMR 의 Explicit Solution Scheme 은 압력 강하를 계산하기 위해 유동 저항을 New Time 속도를 이용하여 Semi-implicit 하게 표현한다. 이러한 조건하에서 식 (10)과 (11)의 오른쪽 세번째 항은 Wire Spacer 로 인한 유동장을 적절하게

나타내기 위해 Implicit 부분과 Explicit 부분으로 나누었으며, 다른 실험 자료를 평가하므로써 그 항의 10 %을 Explicit 하게 처리하였다.

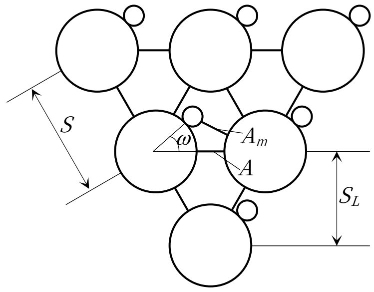


그림 2. 임의의 제어체적에서 평균적인 Wire-Spacer의 위치와 Gap의 정의

$$\frac{1}{2}\left(\frac{f}{D_h}+\frac{K}{\Delta X}\right)\left\langle \rho u^2 \right\rangle_A A = \frac{1}{\Delta X}\left\{\frac{A_R f}{8}\rho c|c|\cos\theta + \frac{A_W f}{8}\rho c|c|\cos(\phi-\theta)\cos\phi + F_W^N \sin\phi\right\} \tag{10}$$

$$\frac{1}{2}\frac{S}{l}K_G\left\langle \rho v^2 \right\rangle_S = \frac{1}{l\Delta X}\left\{F_R^L + \frac{A_W f}{8}\rho c|c|\cos(\phi-\theta)\sin\phi - F_W^N \cos\phi\right\} \tag{11}$$

일반적으로 에너지 방정식 및 운동량 방정식에서 대류항들을 수치해석적으로 나타낼 때, 수치적인 안정성 때문에 Upwind Differencing 이 이용된다. 이것은 대류되는 물성치가 상류의 물성치와 같다고 가정한 것이다. 이러한 가정은 확산이 주요 Transport 형태가 아닌 유동에 대해 적절하다. 반면에 확산이 지배적인 경우에 상류와 하류의 물성치를 동시에 고려해야 한다. 이 경우에 Central Differencing Scheme 은 대류항의 속도가 매우 작기 때문에 임의의 인위적인 수치 확산(Artificial Diffusion)으로 인한 오차는 매우 작다. MATRA-LMR 에서 대류항의 물성치는 운동량 방정식에서 Re 수가 2 보다 적을 때, 에너지 방정식에서 Pe 수가 2 보다 적을 때 Central 값을 이용하도록 수정하였으며, 또한 이들 두식에 확산 항을 Source 항들에 추가하였다. 운동량 방정식에서 대류되는 유량과 에너지 방정식에서 대류되는 엔탈피는 각각 (식) (12)와 (13)과 같이 수정되었다. [4]

$$(\rho uA)_{j+1/2} = \begin{cases} \frac{1}{2}\left[(\rho uA)_j + (\rho uA)_{j+1/2}\right] & if\ |\mathrm{Re}_j| < 2 \\ (\rho uA)_j & if\ \mathrm{Re}_j > 2 \\ (\rho uA)_{j+1} & if\ \mathrm{Re}_j < 2 \end{cases} \tag{12}$$

$$(h)_j = \begin{cases} \frac{1}{2}\left(h_j + h_{j+1}\right) & if\ |\mathrm{Pe}_j| < 2 \\ h_j & if\ \mathrm{Pe}_j > 2 \\ h_{j+1} & if\ \mathrm{Pe}_j < 2 \end{cases} \tag{13}$$

4. 적용 결과

유로 폐쇄가 없는 두개의 FFM(Fuel Failure Mockup)-2A 실험을 모의하여 식 (10)과 (11)에서

의 세번 째 항의 Explicit 부분과 식 (9)의 지수 *n*을 부수로 형태에 따라 조정하였다. 이어서 분산 유동 모델과 Central Differencing이 적용된 효과를 각각 평가하기 위해 유로 폐쇄가 된 두개의 실험을 모의하였다. 그림 3은 위의 실험들을 모의하기 위한 MATRA-LMR의 Nodalization을 나타낸다. 실험 모사를 위한 Nodalization은 전체적으로 42개의 부수로, 60개의 Gap, 40개의 축방향 노드로 구성되어 있다.

FFM-2A 실험[5]의 집합체는 6 각형 덕트 내에 19 개의 모의 연료봉을 포함하며, 삼각형 Pitch 로 배열되어 있다. 연료봉 직경은 5.842 mm 이고, Wire Spacer 의 직경은 1.4224 mm 이다. 가열 부위까지의 입구 길이는 304.8 mm, 가열 부위의 길이는 533.4 mm, 출구 길이는 152.4 mm 이다.

고유량 고출력의 경우에 가열부로 부터의 출력은 16.975 kW/rod 이고, 입구 유량은 3.0378 kg/s (55 gal/min)이다. 저유량 저출력의 경우, 출력은 0.263 kW/rod 이고, 유량은 0.04087 kg/s (0.15 gal/min)이다. 그림 4 는 식 (9)의 지수 *n* 을 안쪽 부수로(1~24)에 1.0, 가장자리 부수로(25,~36)에 4.5, Corner 부수로(37~42)에 3.0 을 적용한 결과와, MATRA-LMR 에 기존에 모델되어 있는 Wire Forcing Function 을 이용한 결과를 비교한 것이다. Wire Spacer 로 인한 집합체 전체에서의 와류를 얻기 위해 가장자리 부수로와 Corner 부수로에 큰 값을 할당하였다. 그림 4 에서 보듯이 분산 유동 저항을 이용한 결과는 Wire Forcing Fuction 을 적용한 결과 및 실험결과 등에 상당히 근접한 예측을 하였다.

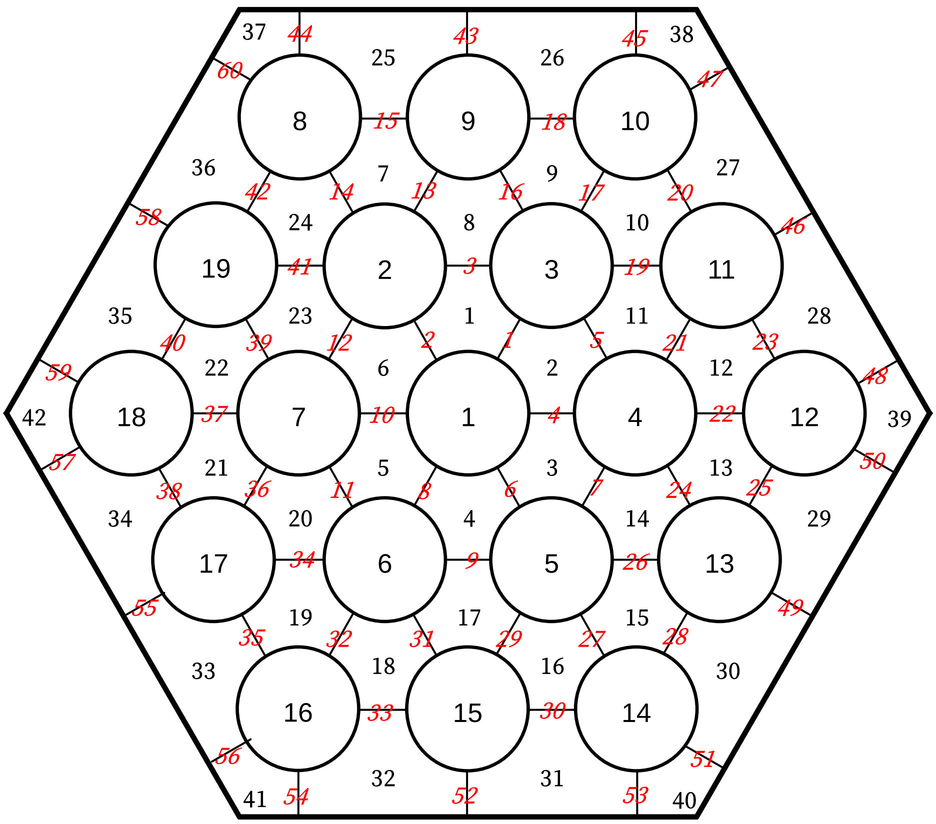
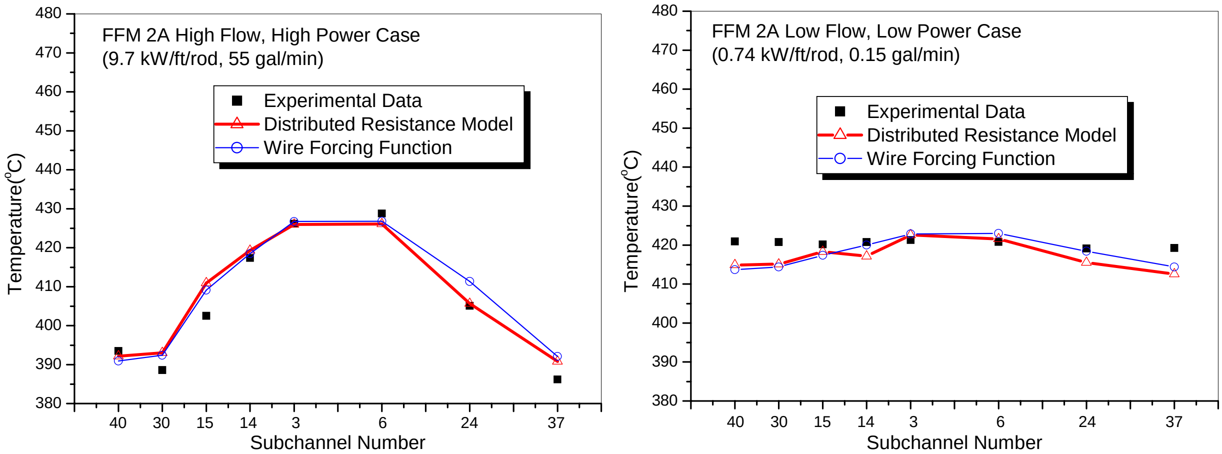


그림 3. ORNL THORS 실험 해석을 위한 Nodalization(*Italic* : Gap, Circle : Rod)

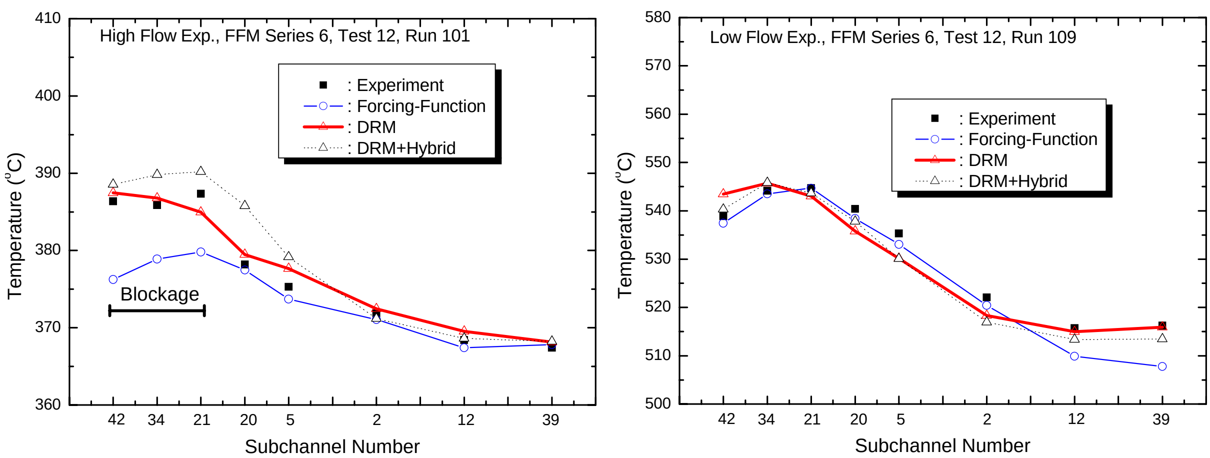
그림 5 는 MATRA-LMR 에 기존에 모델되어 있는 Wire Forcing Function, 분산 유동 저항 모델, 분산 유동 저항 모델 및 Central Differencing 과 Upwind Scheme 을 혼용한 Hybrid Scheme 을 함께

적용한 결과를 보여주고 있다. 여기에 이용된 FFM-5B 실험[6]은 그림 3 에서 14 개의 부수로(7, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 33, 34, 35, 36, 37, 42)가 가열부위 중간에서 폐쇄되어 유동 면적의 약 1/3 이 감소된 경우이다. 고유량 고출력의 경우에 입구 온도는 323.6 °C 이고, 입구에서의 유체 속도는 6.93 m/s 이다(Domanus, 1980). 그림 5 에 보인 바와 같이, 유동 면적의 일부가 폐쇄되어 폐쇄된 부분의 하류 온도는 상당히 높게 나타난다. 이의 주요 요인은 폐쇄부의 상부에서 재순환 유동이 형성되기 때문이다. 고유량, 고출력의 경우에 Wire Forcing Function 을 이용한 경우는 폐쇄부의 상부의 유체 온도를 실험보다 상당히 낮게 예측한다. 반면에 분산 유동 저항 모델만을 이용한 예측은 실험에 거의 근사하지만, 폐쇄부 근처에서의 온도 추세는 실험과 약간 다르다. 그러나 Central Differencing 을 혼용한 Hybrid Scheme 의 경우에는 실험보다 약간 높게 예측하지만, 온도의 횡방향 추세는 실험에 매우 근접한다. 이러한 경향은 저유량, 저출력의 경우에서도 같은 경향을 보인다.



(a) 고유량, 고출력의 경우　　　　(b) 저유량, 저출력의 경우

그림 4. 유로 폐쇄가 없는 경우에 대한 MATRA-LMR 예측 결과



(a) 고유량, 고출력의 경우　　　　(b) 저유량, 저출력의 경우

그림 5. 유로 폐쇄의 경우에 대한 MATRA-LMR 예측 결과

저유량, 저출력의 경우, 입구에서의 속도는 0.48 m/s 이고, 출력은 52.8 kW이다. 이 경우는 Wire

Forcing Function을 이용한 경우도 Blockage 반대편을 제외하면 실험과 매우 유사한 결과를 낳았다. 반면에 분산 유동 저항 모델은 42번 부수로에서 실험보다 약 8 ℃ 정도 높게 예측한다. 분산 유동 저항 모델과 Hybrid Scheme을 적용한 경우는 42번 부수로에서 개선된 결과를 보인다. 이러한 결과는 모두 유로 폐쇄시 나타나는 저 유속 부분에서 Central Differencing이 훨씬 적은 오차를 포함하기 때문으로서 보다 타당한 결과를 준 것으로 평가된다.

4. 결론

현재 원자력연구소에서는 액체금속로의 집합체의 유로 폐쇄 현상을 모의 계산할 수 있는 MATRA-LMR 코드를 개발하고 있으며, 이 코드에 분산유동저항 모델 및 Upwind Differencing과 Central Differencing을 서로 다른 유동 영역에 적용하여 보다 다양한 유동장에 대한 계산 수행 능력을 부가하여 코드의 정확도를 높였다. 분산 유동 저항 모델의 완성을 위해 유로 폐쇄가 없는 실험을 모의하였으며, 식 (9)의 *n*을 집합체 내부의 부수로에 대해 1.0, 집합체 가장자리 부수로에 대해 4.5, 집합체 Corner 부수로에 대해 3.0을 적용하였다.

기존의 Wire Forcing Function을 이용할 경우는 유로 폐쇄가 없는 집합체 해석에서는 타당하지만, 유로폐쇄가 발생하게 되면 이 모델은 결함을 보인다. 즉 유로 폐쇄가 발생할 경우 분산유동저항 모델이 보다 타당한 결과를 낳았다. 그러나 유로 폐쇄시에 나타나는 Diffusion이 지배적인 유동에 대해서는 Upwind Differencing이 문제점을 갖고 있다. 이를 위해 분산유동저항 모델을 코드에 적용하고, 운동량 방정식에서 |Re| 수가 2보다 적을 경우에 그리고 에너지 방정식에서 |Pe| 수가 2보다 적을 경우에 각각의 대류항에 Central Differencing 방법을 이용하고, 두 방정식에 확산항을 추가하였다. 전체적인 계산 결과에서 분산유동 저항 모델과 Central Differencing을 적용한 결과는 실험의 온도 경향을 보다 잘 예측하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구.개발사업의 일환으로 수행되었다.

7. 참고 문헌

[1] H. Ninokata, A. Efthimiadis and N. E. Todreas, “Distributed Resistance Modeling of Wire-wrapped rod buldles”, Nuclear Engineering Design, 62, 81-100 (1980)

[2] A. Y, Gunter and W. A. Shaw, “A general correlation of friction factors for various types of surfaces in crossflow”, Trans, ASME, 67, 643 (1945)

[3] K. Y. Suh and N. E. Todreas, “An Experimental Correlation of Cross-Flow Pressure Drop for Triangular Array Wire-Wrapped Rod Assemblies”, Heat Transfer and Fluid Flow, Vol. 76, pp. 229-240 (1987).

[4] R. Potter et al., “SABRE I - A computer program for the calculation of three dimensional flows in rod clusters”, AEEW-R 1057 (1979)

[5] M. H. Fontana 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, 24, 176-200 (1974)

[6] Domanus, H. M., et al., “Applications of the COMMIX code using the porous medium formulation”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 62, 81-100 (1980).