2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Wire-wrapped 연료봉 집합체 해석을 위한 분산유동저항 모델

Distributed Resistance Model for the Analysis of Wire-wrapped Rod Bundles

하귀석, 정해용, 권영민, 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. 유로 폐쇄 현상의 정확한 해석을 위해서는 Wire-wrap**의 영향을 적절하게 고려하는 것이 중요하다. 국내에서 개발된** MATRA-LMR **코드는** Wire forcing function**을 사용하여** Wire-wrap**에 의한 유동 분포를 모델하고 있다.** Wire forcing function**은 유로가 폐쇄되는 경우에 적절한 해석능력을 제공하지 못하므로 이를 분산유동저항 모델로 변경하였으며,** FFM 2A **실험을 대상으로 코드 변경의 적절성을 검토하였다.**

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. MATRA-LMR code developed by KAERI models the flow distribution in an assembly by using the wire forcing function to consider the effects of wire-wrap spacers, which is important to the analysis for flow blockage. However, the wire forcing function does not have the capabilities of analysis when the flow blockage is occurred. And thus this model was altered to the distributed resistance model and the validation calculation was carried out against to the experiment of FFM 2A.

1. 서론

액체금속로의 핵연료 집합체 내의 유로가 폐쇄되는 경우는 설계기준사고로서, 액체금속로의 안전성에 영향을 끼치므로 액체금속로 설계단계에 있어서 이에 대한 정확한 현상분석 및 해석이 필요하다. 액체금속로의 안전성과 관련된 유로 폐쇄의 영향은 Blockage의 크기와 재질, 노심내의 위치, 연료봉 출력 그리고 냉각재 유속등에 의해 좌우된다. 위의 인자들에 의해서 Blockage가 끼치는 영향의 정도가 결정되며, 이에 의해 파생되는 노심내의 불균형 온도분포의 정도를 파악할 수 있다.

또한 유로가 폐쇄될 때, 그 후단에서의 유동은 정상적인 유동과 다른 특성을 가지므로 Wire-wrap의 영향을 올바르게 모사하는 것이 온도와 속도 분포에 큰 영향을 주게 된다. 국내에서 개발된 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.

기존에 개발된 부수로 해석 코드인 SABRE4, ASFRE등의 코드는 모두 적용 방법은 약간의 차이를 가지지만 분산 유동저항 모델을 구현함으로써 유로 폐쇄 현상을 성공적으로 해석하고 있다. 본 연구는 분산유동저항 모델의 이론적 배경을 정리하고 부수로 방법에 적용하는 과정과 그 결과를 제시한다.

2. 분산 유동저항 모델

운동량 보존방정식의 적분형태는 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left\langle \rho \vec{v} \right\rangle + \frac{1}{V_f}\int_{A_f} \rho \vec{v}(\vec{v}\cdot\vec{n})dA = \left\langle \rho \right\rangle \vec{g} + \frac{1}{V_f}\int_{A_f} (-p\vec{n} + \bar{\bar{\tau}}\cdot\vec{n})dA + \left\langle \vec{R} \right\rangle \quad (1)$$

위 식에서 < >는 해당 체적에 대한 평균값을 의미하며, $\left\langle \vec{R} \right\rangle$은 다음과 같이 정의된다.

$$\left\langle \vec{R} \right\rangle \equiv \frac{1}{V_f}\int_{V_f} \vec{R} dV = \frac{1}{V_f}\int_{A_{fs}} (-p\vec{n} + \bar{\bar{\tau}})dA$$

여기서 V_f, A_f, A_{fs} 는 각각 유체의 제어체적의 순수 유체 부피와 유체와 유체 사이의 경계면, 유체와 고체 사이의 경계면을 나타낸다. ρ , $\vec{v}$, p는 각각 유체의 밀도, 속도, 압력을 의미하며, τ 는 응력 텐서, $\vec{n}$ 은 경계면에 수직한 단위 법선 벡터이다. 일반적으로 부수로 해석을 위한 보존 방정식은 질량, 에너지, 횡방향 운동량, 종방향 운동량 등을 이용한다. 식 (1)의 마지막 항은 Wire-wrapped 연료봉이나 집합체의 덕트 벽면 등과 유체가 교환하는 운동량을 나타내는 것으로서, 벽면이 유체에 가한 힘으로서 이를 분산유동저항 항이라 부르며, 이는 유체가 벽면에 미치는 힘($\vec{F}_{DR}$)을 나타내는 항력과 마찰 상관식들로 표현할 수 있다.

$$\vec{F}_{DR} = -\int_{A_{fs}} (-p\vec{n} + \bar{\bar{\tau}}\cdot\vec{n})dA \quad (2)$$

Wire-wrap이 있는 연료봉 다발에 대해서 A_{fs} 는 연료봉(A_R)과 Wire-wrap(A_W)의 표면적의 합이다. 즉,

$$A_{fs} = A_R + A_W \tag{3}$$

따라서 식 (2)의 힘은 다음과 같이 구분되어 기술될 수 있다:

$$\vec{F}_{DR} = -\int_{A_R} (-p\vec{n} + \overline{\overline{\tau}} \cdot \vec{n})dA - \int_{A_W} (-p\vec{n} + \overline{\overline{\tau}} \cdot \vec{n})dA. \tag{4}$$

또는, $\vec{F}_{DR} = \vec{F}_R + \vec{F}_W$

만약 연료봉의 축에 평행한 방향과 수직인 방향의 단위 벡터를 $\vec{n}_A$, $\vec{n}_L$ 이라 하고, Wire-wrap의 축에 평행한 방향과 수직인 방향의 단위 벡터를 각각 $\vec{n}_T$, $\vec{n}_N$ 이라 정의하면 식(4)의 각 항은 다음과 같이 기술될 수 있으며, 이들은 그림 1에 도시되어 있다.

$$\vec{F}_R = \vec{F}_R^A + \vec{F}_R^L. \tag{5}$$

$$\vec{F}_W = \vec{F}_W^T + \vec{F}_W^N. \tag{6}$$

$$F_R^A = -\int_{A_R} ((\overline{\overline{\tau}} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{n}_A dA. \tag{7}$$

$$F_R^L = -\int_{A_R} \left(-p(\vec{n} \cdot \vec{n}_L) + ((\overline{\overline{\tau}} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{n}_L)\right)dA. \tag{8}$$

$$F_W^T = -\int_{A_W} ((\overline{\overline{\tau}} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{n}_T dA. \tag{9}$$

$$F_W^N = -\int_{A_W} \left(-p(\vec{n} \cdot \vec{n}_N) + ((\overline{\overline{\tau}} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{n}_N)\right)dA. \tag{10}$$

마찰력과 압력손실의 관계는 다음과 같이 연결된다.

$$\Delta p \cdot A_{flow} = \tau \cdot A_{fs}. \tag{11}$$

여기서 $\tau = \frac{f}{8} \rho c^2$ (f : Darcy friction factor)

식 (11)을 이용하여 관에서의 유동에 대한 압력손실은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta p = \frac{1}{2} f \frac{L}{D_e} \rho c^2 \tag{12}$$

따라서 $\vec{n}_A$와 $\vec{n}_T$ 방향의 전체 마찰에 의한 마찰저항은 아래와 같이 기술된다.

$$\langle R_z \rangle = -\frac{\Delta p_{fric} A_{flow}}{V_f} = -\frac{\tau A_{fs}}{V_f} \tag{13}$$

결과적으로 해당 체적에 대한 유동마찰저항력은 다음과 같다.

$$R(c) = V_f \langle R \rangle = -\frac{A_{fs} f_{AT}}{8} \rho c |c| \tag{14}$$

여기서 f_{AT} 는 실험적인 상관식으로부터 제공될 수 있다. 연료봉과 유속의 방향에 의해 형성되

는 각을 q 라 하고, 연료봉과 Wire-wrap이 이루는 각을 f 라 하면 연료봉과 Wire-wrap 방향으로 형성되는 힘은 각각 다음과 같다.

$$F_R^A = R(c)\left(\frac{A_R}{A_{fs}}\right)\cos q \ . \tag{15}$$

$$F_W^T = R(c)\left(\frac{A_W}{A_{fs}}\right)\cos(f - q)\,. \tag{16}$$

마찬가지로 횡 방향에 대해서도 다음이 성립한다.

$$\langle R_{tr} \rangle = -\frac{\Delta p_{tr} A_{flow\_tr}}{V_f} \tag{17}$$

그러므로 횡 방향의 유속 v 에 대한 마찰저항은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$G(v) = -\frac{A_{fs} f_{tr}}{8} r\, v|v|\,. \tag{18}$$

위의 식에 포함된 f_{tr} 은 마찰과 형태손실을 모두 포함하는 계수이다. f_{tr} 은 Gunter-Shaw가 제시한 상관식과 Suh-Todreas 등이 제시한 상관식을 사용할 수 있다.

$$f_{tr} = f_G \left(\frac{D_V}{S_T}\right)^{0.4} \left(\frac{S_L}{S_T}\right)^{0.6} \frac{1}{E(w)}\,. \tag{19}$$

여기서 f_G 는 Gunter-Shaw가 제시한 상관식이며, $E(w)$ 는 Wire-wrap의 영향을 고려하여 Suh-Todreas가 제시한 함수이다. 위의 식 (18)에 따라 연료봉과 Wire-wrap의 직교 방향으로 형성되는 힘은 다음과 같다.

$$F_R^L = G(v)\left(\frac{A_R}{A_{fs}}\right). \tag{20}$$

$$F_W^N = G(c_N)\left(\frac{A_W}{A_{fs}}\right). \tag{21}$$

식 (21)에서 $v_N = u \sin f - v \cos f$ 로 정의된다.

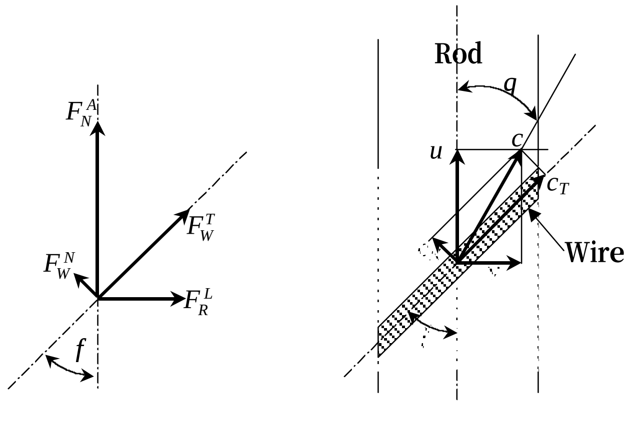

그림 1 연료봉과 Wire의 방향에 따른 속도 성분과 힘의 성분

3. 분산유동저항 모델의 부수로 코드 적용

부수로 코드인 MATRA-LMR의 축방향 운동량에 대한 지배방정식은 다음의 보존 방정식을 사용하여 구성된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\langle \rho u\rangle A \;+\; \frac{\partial}{\partial x}\left\{\rho u^2\right\}A \;+\; [D_C^T]\left\{\rho uv\right\}_S S =$$

$$-A\langle\rho\rangle g\cos\varphi \;-\; A\frac{\partial}{\partial x}\{p\} \;-F_T[D_C^T]\{\hat{w}'\}[D_C]\{u_j'\} - \frac{1}{2}\left(\frac{f}{D_h}+\frac{K}{\Delta X}\right)\left(\frac{m^2}{\rho^* A}\right)_j \qquad (22)$$

$V_f = A\cdot\Delta X$ 의 관계를 이용하여 식 (1)을 재구성하면 MATRA-LMR 코드의 지배방정식에 해당되는 각 항과 직접적으로 비교 가능하다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\langle\rho\vec{v}\rangle A + \frac{1}{\Delta X}\int_{A_f}\rho\vec{v}(\vec{v}\cdot\vec{n})dA = A\langle\rho\rangle\vec{g} + \frac{1}{\Delta X}\int_{A_f}(-p\vec{n}+\bar{\bar{\tau}}\cdot\vec{n})dA + \frac{V_f}{\Delta X}\langle\vec{R}\rangle \qquad (23)$$

식 (22)와 (23)으로부터 분산유동저항력을 포함한 축방향 부수로 차분식을 구성하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}m_j \;+\; \hat{\hat{A}}_j\frac{1}{\Delta X}(p_{j+1}-p_j) \;+\; \frac{1}{\Delta X}(\hat{u}m^*_{j+1}-\hat{u}m^*_j) \;+\; [D_C^T]\left\{S\hat{v}\left(\frac{m}{A}\right)^*_j\right\}$$

$$=-\hat{\hat{A}}\hat{\rho}_j g\cos\theta \;-F_T[D_C^T]\{\hat{w}'\}[D_C]\{u_j'\}$$

$$-\frac{1}{\Delta X}\left\{\frac{A_R f_{AT}}{8}\rho c|c|\cos\theta + \frac{A_W f_{AT}}{8}\rho c|c|\cos(\phi-\theta)\cos\phi + \frac{A_R f_{tr}}{8}\rho v_N|v_N|\sin\phi\right\} \qquad (24)$$

MATRA-LMR의 양해법에서는 위 식의 유동저항 항을 implicit로 처리하여 시간 간격의 제한을 완화하고 있다. 이를 적용하기 위해서는 $u = c\cos\theta$ 의 관계를 사용하여 다음과 같이 재정리하는 것이 필요하다.

$$m_j \;=\; \left\{m_j^n - \hat{\hat{A}}\frac{\Delta t}{\Delta X}(p_{j+1}-p_j) - \Delta t F_j\right\}\Big/\left\{1+\frac{\Delta t}{\Delta X\cdot A_{flow}}\cdot\frac{A_R f_{AT}}{8}|c|\right\} \qquad (25)$$

마찬 가지로 MATRA-LMR에서 사용하는 횡방향 운동량 보존식은 다음과 같이 구성된다.

$$Sl\Delta X\frac{\partial}{\partial t}\langle\rho v\rangle \;+\; (\rho uv_j - \rho uv_{j-1})Sl \;+\; C_S[D_C][D_C^T]\left\{(N)\{\rho v^2\}S\Delta X\cos\Delta\beta\right\}$$

$$= -Sl\Delta X\,\rho_j\sin\theta\cos\beta + S\Delta X[D_C]\{p_j\} - S\Delta X\frac{1}{2}\cdot f_{fric}\rho v|v| + Sl\Delta X\langle R\rangle \qquad (26)$$

다음의 일반적인 지배방정식과 비교해 보면 각 항의 의미를 더욱 확실히 이해할 수 있다.

$$V_f\frac{\partial}{\partial t}\langle\rho\vec{v}\rangle + \int_{A_f}\rho\vec{v}(\vec{v}\cdot\vec{n})dA = V_f\langle\rho\rangle\vec{g} + \int_{A_f}(-p\vec{n}+\bar{\bar{\tau}}\cdot\vec{n})dA + V_f\langle\vec{R}\rangle \qquad (27)$$

위 식 (26)을 $l\Delta X$ 로 나누고 $w=\rho vS$ 를 이용하여 재정리하면 횡방향 운동량의 차분식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} w_j - \frac{S}{l}[D_C]\{p_j\} + \frac{1}{\Delta X}(\bar{u}w_j^* - \bar{u}w_{j-1}^*) + \frac{S}{l} C_S [D][D_C^T]\left\{(N)\frac{w_j^2}{r S^2}\cos\Delta b\right\}$$
$$= -S r_j g \sin q \cos b - \frac{1}{l \cdot \Delta X}\left\{\frac{A_R f_{tr}}{8} r v|v| + \frac{A_W f_{AT}}{8} r c|c|\cos(f - q)\sin f + \frac{A_R f_{tr}}{8} r v_N |v_N| \cos f\right\} \quad (28)$$

w 와 관련된 유동 저항 항을 implicit로 처리하면 위 식은 다음과 같이 정리된다.

$$w_j = \left\{ w_j^n + \frac{S}{l}\Delta t[D_C]\{p_j\} - \Delta t G_j \right\} \Big/ \left\{ 1 + \frac{\Delta t}{S l \Delta X}\frac{A_R f_{tr}}{8}|v_j| \right\} \quad (29)$$

4. 적용 결과

위의 분산유동저항 모델을 적용한 MATRA-LMR 코드를 사용하여 유로 폐쇄가 없는 경우에 대한 분석을 수행하고 그 결과를 Wire Forcing Function을 이용한 결과와 비교하였다. 평가 대상 실험은 ORNL에서 19-pin FFM (Fuel Failure Mockup) 2A bundle에 대해 수행한 Test 번호022472-1143(고출력 고유량)와 020472-1459(저출력 저유량)이다. FFM 2A 실험은 다양한 범위의 유량과 출력을 대상으로 수행되었다. 그 중 가장 높은 유량과 가장 낮은 유량을 갖는 실험들을 대상으로 코드의 능력을 평가하였다. 이들 실험자료는 표 1과 같이 MATRA-LMR 코드에 입력하였다.

표 1 MATRA-LMR 입력 자료

Number of rods	19
Number of subchannels	42
Number of gaps	60
Rod diameter	0.23 in
Wire-wrap diameter	0.056 in
Wire-wrap pitch	12 in
Axial power distribution(normalized)	0 ~ 12 in : 0.0
	12 ~ 33 in : 1.0 (heated zone : 21 in)
	33 ~ 40 in : 0.0 (Exit)
Total axial length	40 in
Outlet pressure	14.7 psia
Power	Low case : 0.15 kW/ft/rod
	High case : 9.7 kW/ft/rod
Inlet flow rate	Low case : 0.74 gal/min
	High case : 9.7 gal/min

그림 2에서 보듯이 실험 FFM 2A는 42개 Channel과 60개의 Gap으로 구성되어 있다. 축 방향 노드 수는 40개로 나누어 축 방향 노드의 길이는 1인치이다.

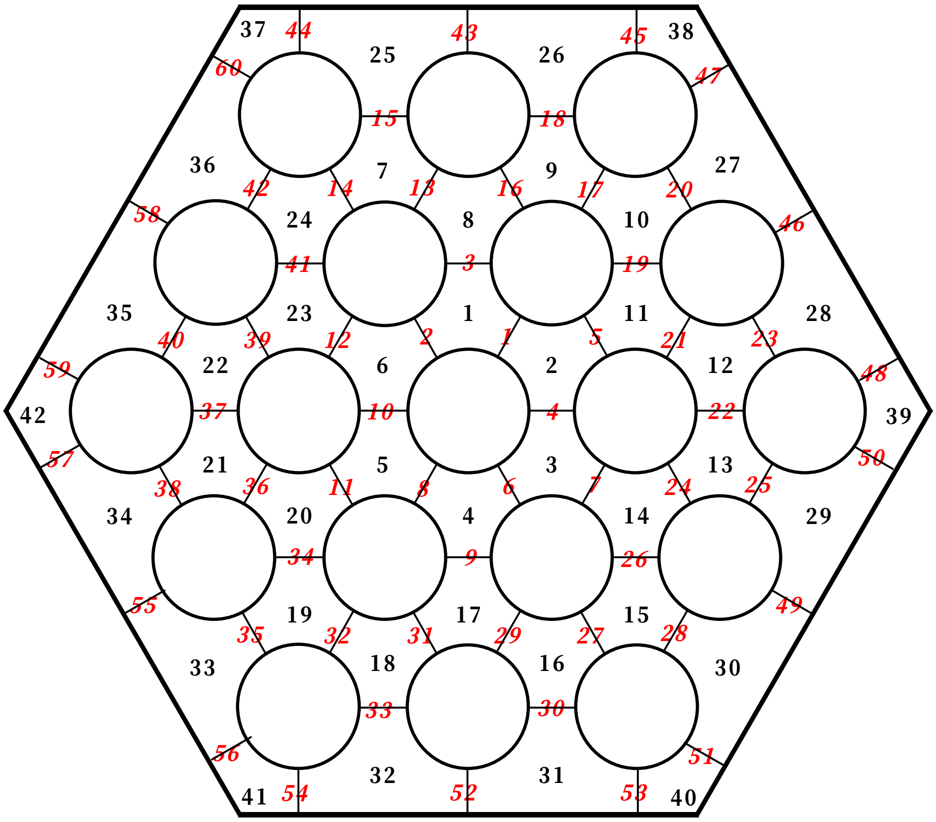

그림 2. ORNL THORS 실험 해석을 위한 Nodalization(*Italic* : Gap, Circle : Rod)

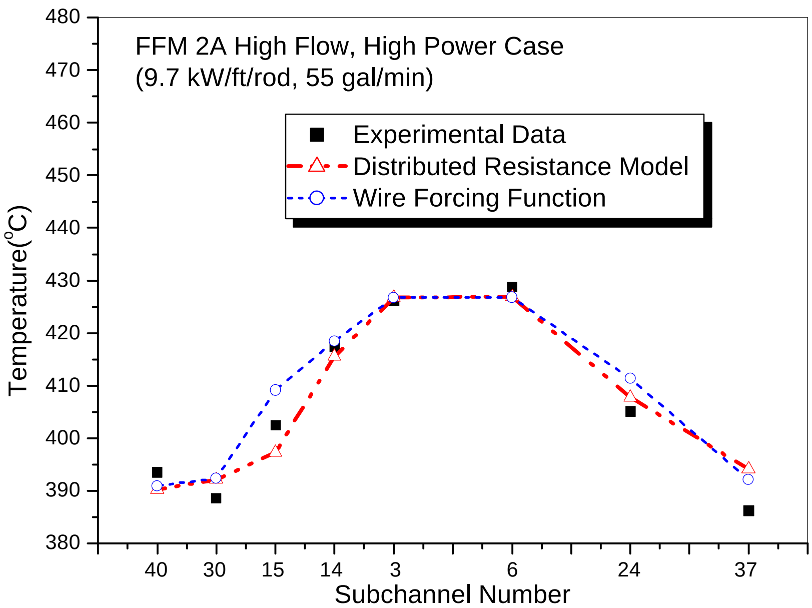

그림 3 FFM 2A 고출력 고유량 실험에 대한 계산결과 비교

앞에서 설명한 두 경우의 실험 중 유량이 높은 경우에 대해 Wire Forcing Function을 이용한 결과와 분산유동저항 모델을 이용한 결과를 그림 3에서 비교하여 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 두 결과는 전체적으로 거의 유사한 결과를 보이나, 15번 부수로에서 Wire Forcing의 경우 약 5 °C

높게 예측하고, 분산유동저항의 경우는 약 4 °C 낮게 예측한다. 24번 부수로에서도 분산유동저항의 경우가 실험보다 더 근접한 결과를 낳았으며, 37번 가장자리 부수로에서는 약간 높게 예측한다.

그림 4는 저유량 저출력의 경우에 대한 평가 결과를 보여주고 있다. 이 실험은 낮은 유량으로 인해 냉각재인 소듐의 높은 열전달 특성에 의해 부수로 간의 온도 분포가 두드러지지 않는다. 이 경우에 대한 계산 결과 분산유동저항 모델을 이용한 계산이 집합체 중심부에서 실험보다 약 2 °C 높게 계산한다. 전체적으로 Wire Forcing의 경우가 미세하게 실험에 더 근접한다.

분산유동저항 모델을 이용한 전체적인 계산 결과는 약 4 °C 정도의 차이를 보이며, 대체적으로 실험에 잘 근사한다.

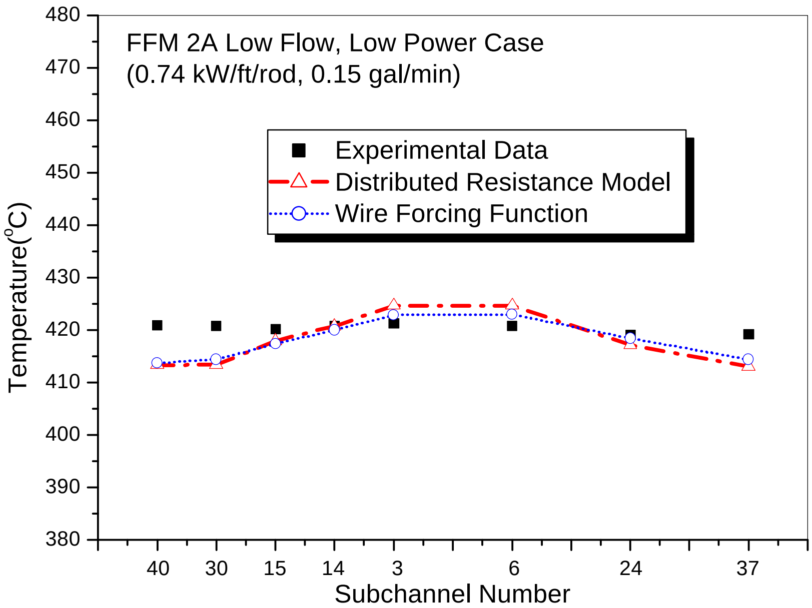

그림 4 FFM 2A 저출력 저유량 실험에 대한 계산결과 비교

4. 결론

현재 원자력연구소에서는 액체금속로의 집합체의 유로 폐쇄 현상을 모의 계산할 수 있는 MATRA-LMR 코드를 개발하고 있으며, 이 코드에 분산유동저항 모델을 적용하여 보다 다양한 유동장에 대한 계산 수행능력을 부가하였다.

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 낳을 것이다. 이를 위해 분산유동저항 모델을 코드에 적용하였으며, 유로 폐쇄가 없는 경우에 대해 성공적으로 계산이 수행되었다. 향후 유로폐쇄 실험을 모사하여 분산유동저항 모델의 타당성을 입증할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구.개발사업의 일환으로 수행되었다.

7. 참고 문헌

[1] S. K. Cheng and N. E. Todreas, "Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-Wrapped Hexagonal Rod Bundles – Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters", Nuclear Engineering and Design Vol. 92, pp. 227-251 (1986).

[2] 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).

[3] 김영태, 등, "MATRA-LMR 코드의 액체 금속로 집합체 유로 막힘 현상 해석 가능성 검토", KAERI KALIMER 팀 내부보고서, (1999)

[4] E.I.H. Lin and W. T. Sha, "Thermal-Hydraulic Analysis of a Wire-Wrapped 19-Rod Bundle with Edge Blockage", Transactions of the ANS, Vol. 28, pp. 539-540 (1978)

[5] 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)

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

[7] 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)