

2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 전노심 열유체 해석체제 구축방안 연구
Study on the Inter-Assembly Flow Analysis Tool in LMR Cores

김영균, 김영일
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

임현진
아주대학교
경기도 수원시 팔달구 원천동 산 5

요 약

액체금속로의 핵연료집합체는 덕트라는 특수한 구조를 갖고 있으며, 이 덕트로 인하여 각 집합체는 서로간의 유량교환이 없는 폐쇄유로를 형성한다. 집합체 내부 복잡한 구조에서의 열유체 해석은 일반적으로 부수로 해석코드를 사용하게 된다. 그러나, 냉각재인 액체금속은 열전도도가 매우 높기 때문에 덕트와 덕트 사이를 흐르는 유량에 의한 열전달이 집합체 내부의 온도에 영향을 미칠 수가 있다. 또한, 노심 상부구조물에 의하여 역류되는 냉각재에 의하여 발생하는 집합체간의 유량 재분배가 발생하는데 이들을 해석하기 위한 방법론을 개발할 필요가 있다. 본 논문에서는 액체금속로의 노심 열유체 설계 및 해석을 위해 단일집합체 부수로 해석 코드와 다공성 매질 해석 코드를 연계하여 집합체간 열유체 해석을 포함한 전노심 해석 코드 개발의 요건과 구축 방안에 대하여 검토하였다.

Abstract

The core design of liquid metal reactors requires accurate calculation of the thermofluid behavior in the subassemblies. Due to the high thermal conductivity of the sodium coolant, transverse inter-assembly heat transfer may have a significant effect on the temperature profile within the subassembly. There is a need to develop a whole core thermal hydraulic analysis code to analyze the inter-assembly flow in the core. A calculation system has been proposed which links a subchannel code for the subassembly with a porous medium approach code for the inter-assembly flow.

1. 서론

소듐을 냉각재로 사용하는 액체금속로는 높은 출력밀도 및 높은 연소도 특성으로 인하여 노심의 열수력학적 설계조건이 가압경수로의 경우와는 다른 고유한 특성을 갖게 된다. 즉, 냉각재인 소듐의 열전도율 및 비등점이 높기 때문에 피복재 온도나 핵연료의 최대온도에 설계 제한조건을 두게 된다.

이러한 설계온도를 만족시키면서 냉각재의 노심 출구온도를 높이기 위하여 액체금속로의 핵연료집합체는 가압경수로의 경우와 달리 6각형 덕트내에 3각형 격자구조로 핵연료봉을 밀집배열하고 나선격리기 (spiral wire spacer)나 그리드 격리기(grid spacer) 등으로 그 간격을 유지시키며, 집합체의 출력에 따라 냉각재 유량을 다르게 조절한다. 따라서, 노심의 열수력학적 설계 및 해석방법은 가압경수로의 경우와 다르게 된다.

특히, 액체금속로 핵연료집합체가 덕트라는 특수한 구조를 갖고 있으며 각 덕트는 덕트간의 유량이 없는 막힌 유로를 갖고 있기 때문에, 각각의 덕트를 흐르는 유량을 노심의 입구에서 미리 분배해 주어야 한다. 이 유량분배는 각각의 핵연료 피복관의 누적 손상률이 동일하게 되어 핵연료봉의 신뢰성을 확보할 수 있도록 해 주어야 하며, 이를 위하여 노심 유량 분배장치를 사용하게 된다.

한편, 나트륨은 열전도도가 매우 높기 때문에 덕트와 덕트 사이를 흐르는 유량에 의한 열전달이 집합체 내부의 온도에 영향을 미칠 수가 있다. 이러한 덕트와 덕트 사이를 흐르는 집합체간 열전달 중 열전도에 의한 부분은 현재 개발하고 있는 부수로 해석코드 MATRA-LMR에서 계산이 가능하지만, 대류에 의한 열전달이나 노심 상부구조에 의한 유량재분배는 이 코드로는 계산할 수가 없다. 이러한 현상을 계산하기 위해서는 부수로 해석코드와 다공성매질 해석코드를 연계한 전산체제를 구성하는 것이 가장 효과적인 것으로 판단되어 이를 위한 작업을 수행하고 있다.

본 논문에서는 이를 위해 부수로 해석법과 다공성매질 해석법에 대해서 비교 검토하고, 전노심 해석체제가 갖추어야 할 요건과 구축방안에 대하여 기술하였다.

2. 노심 열유체 개념설계 방법론

나트륨을 냉각재로 사용하고 있는 액체금속로 노심의 핵연료 집합체는 일반적으로 삼각형 격자 형태로 장전되어 있는 핵연료봉 다발을 육각형 형태의 덕트로 감싸고 있는 형태로 구성되어 있다. 따라서, 덕트와 덕트 간에 열교환은 발생하지만 유량은 교환되지 않는 폐쇄회로를 형성하게 된다. 그러므로, 이들 각각의 집합체에 흐르는 냉각재 유량을 적절하게 분배하고, 그에 따른 온도분포를 적절하게 유지시키는 것이 핵연료 집합체에서 생성되는 열량을 효과적으로 추출할 수 있는 열유체 설계의 기본 목표가 된다. 각 집합체에 필요한 유량은, 정상상태는 물론 과도상태에서도 핵연료, 피복관 및 구조재의 건전

성 확보, 냉각재 비등방지 조건 등을 고려하여 분배되어야 한다. 전반적인 액체금속로 노심 열유체 개념 설계 및 분석 작업은 노심구성과 그에 따른 핵설계 데이터를 연계자료로 하여 유량분배, 온도분포계산, 정상상태 열유체 해석, 과도상태 열유체 해석, 안전해석 연계자료 제공의 흐름에 따라서 진행하게 된다.[1,2]

개념설계 단계에서의 열유체 설계 및 특성 분석은 먼저 노심 열유체 설계목표에 따라 노심내 전체유량을 계산한 후, 각 집합체별 열출력과 그 집합체에서의 핵연료봉 최고 선출력 밀도에 따라 집합체별 필요 유량을 계산한 후 이들을 몇 개의 유량그룹으로 나눈다. 다음으로 이렇게 분배된 유량을 바탕으로 각 집합체의 최고온도 연료봉에 대한 냉각재 온도, 피복관 중심온도, 핵연료 중심온도 등을 계산하는 방식으로 수행된다. 이 때, 각 집합체에서의 핵연료 피복관 최고 중심온도가 같은 값을 갖도록 유량을 재조절하며, 이 유량에 의한 노심내 압력손실값을 비롯한 모든 계산값들이 설계조건을 만족하는지를 확인하고, 그에 따른 집합체별 필요 유량을 결정하여 유량분배 장치인 오리피스를 구성하게 된다. 이러한 일련의 해석 절차는 노심 핵설계 및 안전성 분석과 연계되어 반복 수행하며, 최종적으로 핵 및 열유체 안전성 분석을 통하여 검증을 받게 된다.

액체금속로 노심 열수력 설계 및 특성분석의 전반적인 작업 흐름도를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 노심 핵설계에 의하여 출력분포를 구하면, 열수력학적 설계목표에 따라 노심내 전체유량을 결정하고, 출력분포에 따라 설계기준을 만족시키도록 각 집합체별 유량을 계산한다. 다음에는 각 집합체의 유사 유량에 따라 동일 유량군을 설정하고 집합체의 압력강하, 온도분포 등을 계산하여 각 유량군별 집합체에서 압력강하가 같아지도록 오리피스 장치를 설계한다.

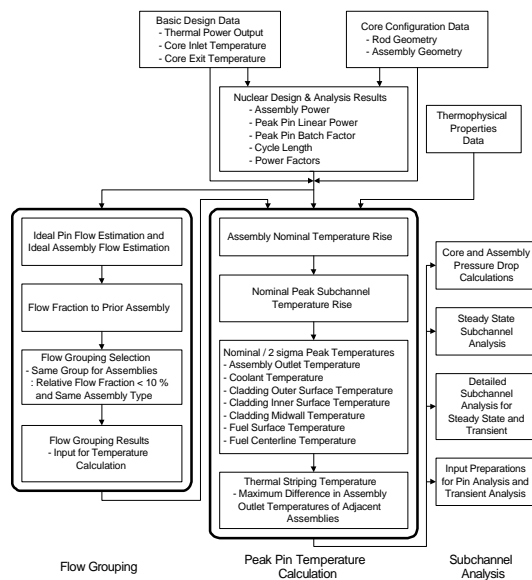


그림 1. 액체금속로 노심 열유체 개념설계 및 특성분석 작업 흐름도

이 때 정상상태시의 냉각재, 피복관 및 핵연료의 최고온도가 설계조건을 만족하는지를 확인하고 이에 따른 집합체별 최소유량을 결정하여 오리피스 장치 설계시 반영하여야 한다. 또한 이들 모두의 해석은 핵설계와 연계되어 반복수행하게 되며, 핵열수력 안전성 분석을 통하여 검증은 받아야 한다.

액체금속로의 노심열수력설계에서는 핵연료 온도가 설계제한치를 만족시키는 지 확인 여부와, 노심구조물해석에 필요한 입력자료를 생산하기위해서 노심의 온도분포를 정확하게 예측할 필요가 있다. 그러나 액체금속로의 노심에는 수많은 핵연료봉이 조밀하게 배치되어 있어 부수로(subchannel)간에 질량, 운동량, 에너지전달이 일어나므로, Novendstern 모델과 CRT모델 등의 단순 해석모델로는 국부지역의 온도와 유속분포를 정확하게 계산하기 어렵다.[3,4,5,6]

지금까지 개발된 컴퓨터 코드는 경수로형 원자로를 해석하기 위한 것들이 대부분이며, 액체금속로용으로 개발된 몇몇의 코드들은 그나마 입수하기가 매우 어려운 실정이다. 유로의 하류(downstream) 부분에서 최소의 교란이 발생하는 상태에 국한된 초기조건 문제로는 부분적인 유로폐쇄 문제와 같은 액체금속로의 경우를 정확하게 해석할 수 없으며, 경계조건 문제로서 액체금속로를 해석해야 할 것으로 보인다.

따라서 이를 해결하기 위한 대표적인 전산코드인 COBRA는 대표적인 부수로해석용 전산코드이다.[7] MATRA-LMR은 단상류에서의 다유로(multichannel) 열수력 해석코드로서 액체금속로의 단상 다집합체 열수력해석을 위해 COBRA-IV-I를 개선한 것으로 단일 집합체 뿐만 아니라 여러 집합체를 동시에 모사할 수 있도록 개발하고 있다.[8] 노심 열수력 설계 및 해석에 필요한 계산 모듈과 계산 코드들은 앞으로 더욱 보완하고 검증한 후 추후 계속될 노심 열수력 해석을 위한 기초로 쓰이게 될 것이다.

3. 전노심 해석의 필요성 및 방법론

3.1 부수로 해석코드와 다공성매질 해석코드

액체금속로의 노심 열유체 해석을 위해서는 현재 부수로 해석 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 부수로 해석 방법은 냉각재의 축방향 유속이 반경방향 유속에 대해 지배적이라는 가정에서 그 모델을 수립한다. 또한, 부수로 해석코드 MATRA-LMR의 집합체간 열전달 모델은 집합체간에 흐르는 저유량의 소동 냉각재를 오직 열전도 현상만 고려하여 모델링 한 것이다. 따라서, 근본적으로는 부수로 해석 방법의 한계로 인하여, 집합체의 온도분포 및 전노심 열유체 해석에 많은 영향을 미치는 현상으로 파악되고 있는 실제 노심내 집합체간 냉각재에서 발생하는 유량재분배나 역류 현상에 대한 해석이 불가능하다.

이러한 문제점을 극복하기 위하여는 부수로 해석 방법에서 적용한 집합체간 열전달 모델의 한계를 개선할 수 있는 보다 상세한 열유동 현상 해석체제가 요구된다. 그러나, 일

반적으로 사용되는 다공성매질 해석코드로는 코드 자체의 특성상 실제 원자로에 장전되는 217개나 271개 핵연료봉의 핵연료집합체 내부에서의 복잡한 형태를 갖는 구조의 열유체 해석을 수행하는 데는 적절하지 못하기 때문에, 집합체 내부 상세 열유체 해석 계산은 부수로 해석코드를 이용하고, 집합체간 유량재분배나 역류 현상등을 해석하는 집합체간 열유체 해석은 다공성매질 해석코드로 계산하는 방법을 연계한 전노심 열유체 해석체제 구축을 위한 연구를 수행하고 있다. 본 연구의 최종목표는 부수로 해석코드로는 현재까지 개발되어 검증 및 개선작업이 진행중인 MATRA-LMR을 이용하고 다공성매질 해석코드로는 COMMIX-1AR/P[9]를 이용하여, 이와 같은 연계코드 개발을 통하여 전노심 열유체 해석체제를 구축하는 것이다. 이와 같이 MATRA-LMR 코드와 COMMIX 코드를 연계하는 방법은 부수로 해석코드 CADET와 다공성매질 해석코드 TRIO-VF를 연계하여 전노심을 해석하고 있는 프랑스 CEA의 해석법과 유사한 방법이다.[10]

부수로 해석코드인 MATRA-LMR 코드는 현재 단일 집합체 계산 및 주변 집합체와의 열전달을 고려한 7개 집합체 계산까지 가능한 상태로 개발되어 있다. COMMIX-1AR/P는 유체계통기술개발 과제에서 도입하여 사용하고 있는 다공성매질 해석코드로서, 본 연구의 다공성매질 해석 연계를 위해 매우 적절한 코드로 평가되었다.

3.2 부수로 해석법과 다공성매질 해석법

부수로 해석법

부수로 해석은 현재 노심 열유체 해석, 특히 핵연료집합체 해석에 가장 널리 사용되고 있는 방법이다. 처음에는 설계계산을 위해 사용되었으나 현재는 안전해석용으로까지 범위를 확장하여 유로 막힘 현상을 해석 등에 사용되기도 한다.

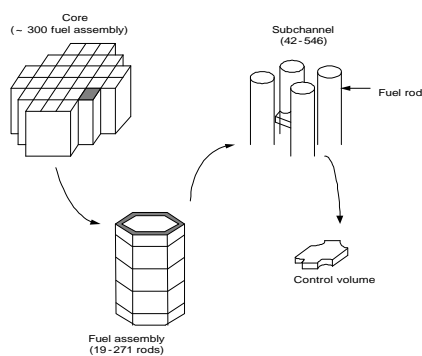


그림 2. 부수로 Control Volume

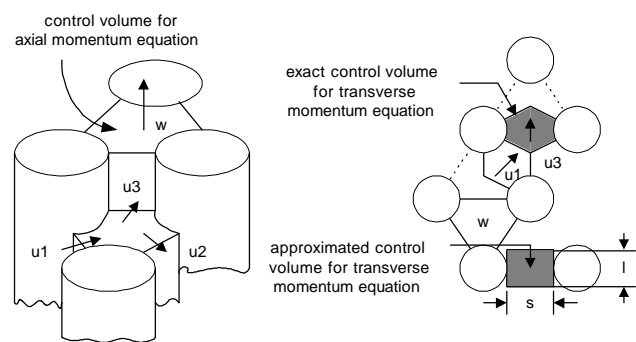


그림 3. 축/반경 방향 운동량 control volume

부수로 해석법은 냉각재의 축방향 유속이 반경방향 유속에 대해 지배적이라는 가정에서 그 모델을 수립한 것이다. 따라서, 이러한 조건 하에서 반경방향 운동량 방정식에 가

정을 도입하여 계산식을 단순화시킬 수 있는 것이다. 반면에 이에 따른 제약으로 인하여 반경방향 유속이 축방향 유속에 비해 크게 작지 않은 집합체간 열유동의 경우에는 부수로 해석코드를 사용할 수 없게 된다. 그림 2와 그림 3은 부수로 해석에 사용된 control volume에 대한 정의와 축방향 및 반경방향 운동량 방정식에 적용된 control volume의 예를 나타낸 것이다.

다공성매질 해석법

부수로 해석코드인 MATRA-LMR의 집합체간 열전달 모델은 앞 절에서 설명한 바와 같이 집합체간에 흐르는 저유량의 소용 냉각재를 오직 열전도 현상만 고려하여 모델링한 것이다. 그러나, 실제로는 노심내 집합체간 냉각재에서 발생하는 유량재분배나 역류 현상이 집합체의 온도분포 및 전노심 열유체 해석에 많은 영향을 준다. 따라서, 이러한 현상을 계산하기 위해서는 부수로 해석법에서 적용한 집합체간 열전달 모델의 한계를 극복하여 보다 상세한 열유동 현상을 해석할 수 있는 계산체제가 요구된다. 따라서, 집합체 내부의 해석은 부수로 해석코드를 이용하고 집합체간 열전달 해석은 다공성매질 해석코드로 계산하도록, 이를 연계할 수 있는 계산모듈을 개발하여 전노심 열유체 해석체제를 구축하기 위하여 연구를 진행하고 있는 것이다. 부수로 해석모델과 다공성매질 해석모델에 사용되는 수학적 모델을 표 1에 요약하여 나타내었다.[11]

표 1. 부수로 해석법과 다공성매질 해석법의 모델 비교

Continuity (mass)	Porous Body	$g_v \frac{\partial \langle r \rangle}{\partial t} + \frac{\Delta_x (g_{Ax}^{i(x)} \{r\}^{i(x)} \{u_x\})}{\Delta x} + \frac{\Delta_y (g_{Ay}^{i(y)} \{r\}^{i(y)} \{u_y\})}{\Delta y} + \frac{\Delta_z (g_{Az}^{i(z)} \{r\}^{i(z)} \{u_z\})}{\Delta z} = 0$
	Sub - channel	$A_{\beta} \frac{\partial \langle r \rangle}{\partial t} + \frac{\Delta m_i}{\Delta z} = - \sum_{j=1}^j W_{ij}$
Energy (enthalpy)	Porous Body	$g_v \frac{\partial \langle r \rangle \langle h \rangle}{\partial t} + \frac{\Delta_x (g_{Ax}^{i(x)} \{r\}^{i(x)} \{h\}^{i(x)} \{u_x\})}{\Delta x} + \frac{\Delta_y (g_{Ay}^{i(y)} \{r\}^{i(y)} \{h\}^{i(y)} \{u_y\})}{\Delta y} + \frac{\Delta_z (g_{Az}^{i(z)} \{r\}^{i(z)} \{h\}^{i(z)} \{u_z\})}{\Delta z}$ $= g_v^i \langle \frac{Dp}{Dt} \rangle + \frac{\Delta_x (g_{Ax}^{i(x)} \{k_e \frac{\partial T}{\partial x}\})}{\Delta x} + \frac{\Delta_y (g_{Ay}^{i(y)} \{k_e \frac{\partial T}{\partial y}\})}{\Delta y} + \frac{\Delta_z (g_{Az}^{i(z)} \{k_e \frac{\partial T}{\partial z}\})}{\Delta z} + g_v^i \langle (q_{rb})^i \langle q^i \rangle \langle f \rangle \rangle$
	Sub - channel	$A_{\beta} \frac{\partial \langle rh \rangle}{\partial t} + \frac{\Delta [m_i h_i]}{\Delta z} = A_{\beta} \langle \frac{Dp_i}{Dt} \rangle + \langle q_i \rangle_{rb} - \sum_{j=1}^j W_{ij} [h_i - h_j] - \sum_{j=1}^j W_{ij} \langle h^* \rangle$
Axial Momentum (Z - Direc .)	Porous Body	$g_v \frac{\partial \langle r \rangle \langle u_z \rangle}{\partial t} + \frac{\Delta_x (g_{Ax}^{i(x)} \{r\}^{i(x)} \{u_z\}^{i(x)} \{u_x\})}{\Delta x} + \frac{\Delta_y (g_{Ay}^{i(y)} \{r\}^{i(y)} \{u_z\}^{i(y)} \{u_y\})}{\Delta y} + \frac{\Delta_z (g_{Az}^{i(z)} \{r\}^{i(z)} \{u_z\}^{i(z)} \{u_z\})}{\Delta z}$ $= -g_v^i \langle r \rangle g_z - \frac{\Delta_x (g_{Ax}^{i(x)} \{p\})}{\Delta x} + \frac{\Delta_x (g_{Ax}^{i(x)} \{t_{zz}\})}{\Delta x} + \frac{\Delta_y (g_{Ay}^{i(y)} \{t_{yz}\})}{\Delta y} + \frac{\Delta_x (g_{Ax}^{i(x)} \{t_{xz}\})}{\Delta x} + g_v^i \langle R_z \rangle$
	Sub - channel	$\frac{\partial \langle m_i \rangle}{\partial t} + \sum_{j=1}^j W_{ij} \langle u_z^* \rangle + \frac{\Delta (m_i u_{zi})}{\Delta z} = -A_{\beta} \langle r \rangle g_z - A_{\beta} \frac{\Delta \{p\}}{\Delta z} - \sum_{j=1}^j W_{ij}^M (u_{zi} - u_{zj}) - \{ \frac{F_{iz}}{\Delta z} \}$
Transverse Momentum (x - Direc .)	Porous Body	$g_v \frac{\partial \langle r \rangle \langle u_x \rangle}{\partial t} + \frac{\Delta_x (g_{Ax}^{i(x)} \{r\}^{i(x)} \{u_x\}^{i(x)} \{u_x\})}{\Delta x} + \frac{\Delta_y (g_{Ay}^{i(y)} \{r\}^{i(y)} \{u_x\}^{i(y)} \{u_y\})}{\Delta y} + \frac{\Delta_z (g_{Az}^{i(z)} \{r\}^{i(z)} \{u_x\}^{i(z)} \{u_z\})}{\Delta z}$ $= -g_v^i \langle r \rangle g_x - \frac{\Delta_x (g_{Ax}^{i(x)} \{p\})}{\Delta x} + \frac{\Delta_x (g_{Ax}^{i(x)} \{t_{xx}\})}{\Delta x} + \frac{\Delta_y (g_{Ay}^{i(y)} \{t_{yx}\})}{\Delta y} + \frac{\Delta_z (g_{Az}^{i(z)} \{t_{zx}\})}{\Delta z} + g_v^i \langle R_x \rangle$
	Sub - channel	$\frac{\partial \langle W_{ij} \rangle}{\partial t} + \frac{\Delta}{\Delta x} (W_{ij} \{u_x\}) + \frac{\Delta}{\Delta z} (W_{ij} \{u_z\}) = - (S_{ij}^y \frac{\Delta \{p\}}{\Delta x}) - \{ \frac{F_{ix}}{\Delta x \Delta z} \}$

표에서 적용된 다공성 해석법의 porosity에 대한 기본 정의는 다음과 같다.

$$\text{Porosity } (\gamma) = \frac{\text{Fluid Volume } (A_f)}{\text{Total Volume } (A_T)}$$

즉, 구조물과 유체를 포함하는 다수의 fluid cell들에 대해 x, y, z의 3차원으로 각 방향에 대한 투과율(porosity)을 구하고, 축 및 횡방향에 대한 유체 저항계수를 산정한 후, 압력장(pressure gradient)을 계산하고 이를 바탕으로 질량, 에너지, 운동량 방정식을 구성하여 최종적으로 온도, 밀도, 유속을 계산하게 되는 것이다. 따라서, 축방향 유속을 지배적이라고 가정한 부수로 해석과는 달리 다차원 유동해석을 하기 때문에 집합체간 열전달 현상에 대해 보다 실제현상에 근접한 모델이 가능한 것이다.

3.3 집합체간 열전달 해석모델

부수로 해석법의 집합체간 열전달 계산 모델

액체금속로 핵연료집합체 내에서의 부수로 온도분포를 계산할 때, 그 주변 집합체와의 열전달이 미치는 영향을 고려하여 실제와 같은 상태를 모사함으로써 부수로 온도 계산의 정확성을 높이기 위해, 단일 집합체 해석용으로 개발된 부수로 해석코드인 MATRA-LMR 내에 집합체간 열전달 모델을 추가하였다.[12,13]

MATRA-LMR 코드의 집합체간 열전달 모델은 열전도도가 큰 소듐 냉각재에 의한 집합체간 열전달 현상, 특히 주변 집합체가 열출력 차이가 큰 블랭킷 집합체와 핵연료집합체로 구성되어 중심 집합체의 내부 부수로 온도분포에 영향을 크게 줄 것으로 예상되는 비균질 노심의 경우까지 해석이 가능하도록 개선한 것이다. 집합체간 열전달 현상을 고려한 부수로 온도분포 해석 방법은 질량, 에너지, 그리고 운동량에 대한 지배방정식을 이용하여 온도 및 유량분포를 계산하는 것으로, 단일 집합체의 계산과 근본적인 차이는 없다.

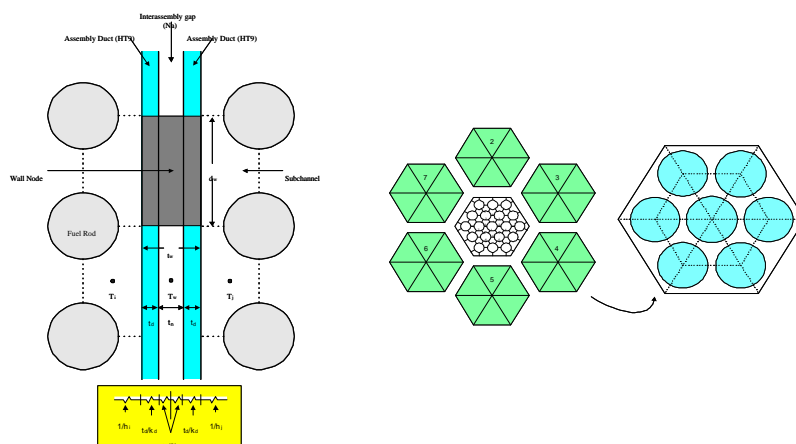


그림 4. MATRA-LMR 코드의 집합체간 열전달 모델 개념

먼저, 두 집합체 사이의 열전달 모델은 대류에 의한 영향을 고려하지 않고 오직 열전도에 의한 열전달만을 고려하였으며, 단일 node로 구성된 벽 영역을 설정하여 모사하였다. 현재 MATRA-LMR코드에서 사용하고 있는 액체금속로의 집합체간 열전달 모델 개념을 그림 4에 나타내었다.

여기서, 벽 node는 그림에서와 같이 두 집합체의 덕트벽과 그 사이 간격 (덕트벽 i + 집합체 사이 간격 + 덕트 j)을 포함하여 나타내었다. 이러한 벽 node를 이용한 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$(\rho_w C_{pw} t_w) \frac{(T_w - T_w^n)}{\Delta t} = - U_i(T_w - T_i) - U_j(T_w - T_j) + q_w'' t_w$$

[총열량]=[부수로 I로부터의 열량]+[부수로 j로부터의 열량]+[덕트벽내 열발생량]

그림에서와 같이 두 집합체간 열전달을 모사하기 위해서 집합체내 가장자리 핵연료봉과 가장자리 부수로 및 덕트에 대하여 모델링하였으며, 덕트벽 그리고 덕트와 덕트 사이 (집합체와 집합체 사이)에는 정지된 소뚝이 차 있는 것으로 가정하였다. 처음에는 계산범위를 주변집합체 영향까지 고려하도록 확장하면서 관심대상의 표준 집합체만 단일 집합체와 같은 수준의 계산을 수행하고 주변 집합체에 대해서는 lumped model로 취급하여 보다 정확한 온도분포를 예측하고자 하였다.

이러한 집합체간 열전달 해석모델의 개념은 다음과 같은 가정을 사용하였다.

- 해석 대상 집합체는 표준 집합체 1개와 6개의 주변 집합체들로 구성된다.
- 집합체 덕트 사이의 저유동 소뚝은 열전도 현상으로 취급한다.
- 전 집합체에 동일한 축방향 node 수를 사용하고, 덕트 두께는 균일하다.
- 반경방향 온도분포 및 wire-wrap 사용은 표준 집합체에서만 고려한다.
- 단상유동 (single phase) 모델에만 적용 가능하다.

집합체내 가장자리 부수로와 덕트벽 사이에서의 대류 열전달은 난류유량 열전달 데이터로부터 구해지며, 이웃한 집합체와의 사이에 있는 소뚝에 의한 열전달은 열전도를 고려하여 얻어진다. 그러나, 집합체간 소뚝 유동은 그 양이 집합체내 유량에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 벽 node에서의 축방향 대류 및 반경방향 유량혼합에 의한 항을 열전도 모델로 단순화하여 모델링 하였다. 즉, 집합체간 소뚝 유동에 대해서도 덕트벽과 같이 열전도에 의한 저항값으로 보고 벽 node에서의 열전달은 이 세 저항값의 합으로 구성하였다. 이와 마찬가지로 벽 node의 유효 열저항값도 2개의 덕트벽과 그 사이 소뚝값에 대한 합으로 나타내었다.

다공성매질 해석법의 집합체간 열전달 계산 모델

현재까지 노심 열유체 해석에는 주로 부수로 해석법이 주로 적용되고 있으나, 액체금속로의 비균질 노심과 같이 집합체간 열출력 차이가 큰 집합체의 온도분포는 단일 집합체

로 해석한 결과와 매우 상이하다. 특히, 모델의 특성으로 인하여 집합체간 소듐 유동의 역류나 유량재분배 현상은 해석할 수가 없으므로, 정확한 집합체간 열전달 현상이나 전노심 열유체 해석을 수행할 수 없는 한계가 있다.

그림 5는 집합체 덕트 사이의 실제 소듐 유동과 집합체간 열유체 해석의 필요성을 대략적으로 나타낸 것이고, 그림 6은 집합체 덕트 사이의 실제 소듐 유동 흐름을 대략적으로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 집합체간 유량의 흐름과 그에 의한 열전달 및 유량의 재분배와 유량 역류현상을 계산할 수 있는 계산 체제를 구축하기 위해서는, 집합체 내부 부수로 해석에 장점이 있는 부수로 해석코드와 집합체간 유량 해석에 장점이 있는 다공성매질 해석코드를 연계하여 전노심 해석체제를 갖추는 것이다.

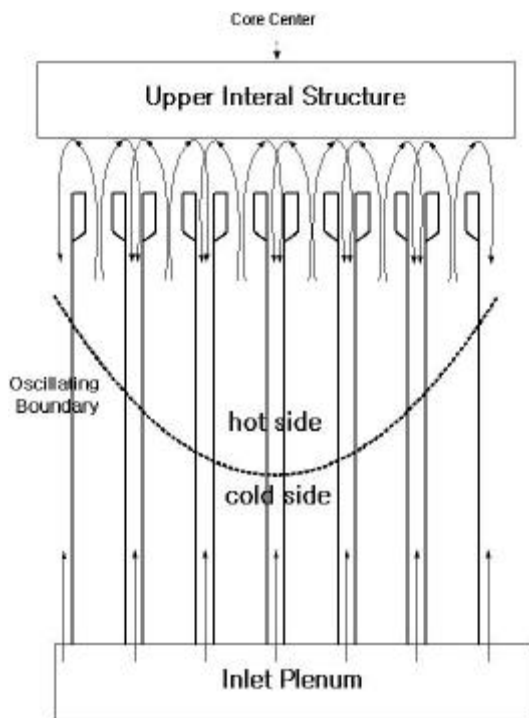


그림 5. 집합체간 유동 해석의 필요성

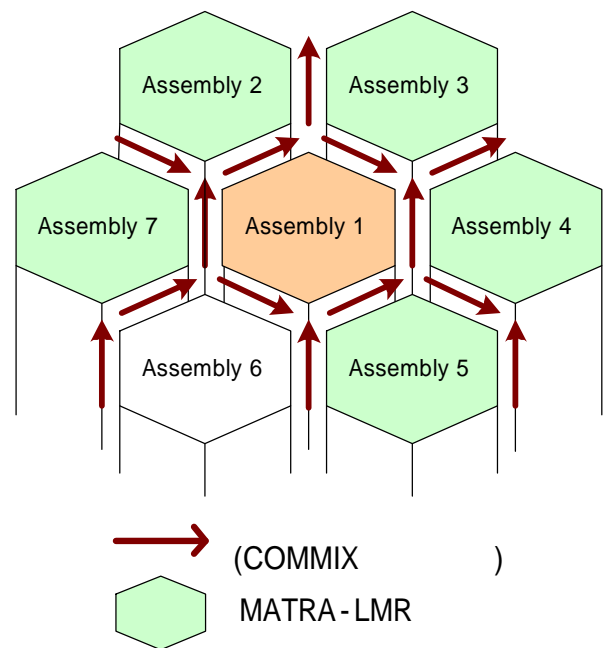


그림 6. 집합체간 유동 흐름 모형

이러한 영향에 의한 집합체간 유동의 속도분포를 그림 7에, 온도분포를 그림 8에 각각 나타내었다. 그림에 나타난 것은 모두 CEA에서 집합체간 유체 해석체제를 이용하여 계산한 SPX2의 노심에 대한 계산결과이다.[10]

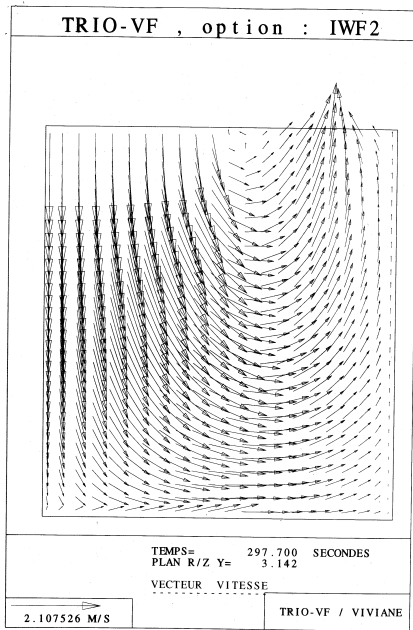


그림 7. 집합체간 유동의 속도 분포

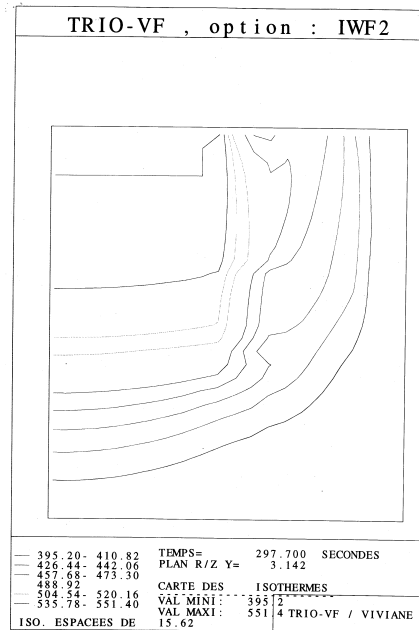


그림 8. 집합체간 유동의 온도 분포

따라서, 집합체 내부의 온도분포는 부수로 해석법을 적용하고, 집합체간 열유동 현상은 다공성매질 해석법을 적용하는 두 방법론의 연계를 통해 소용 역류와 유량 재분배 현상을 고려한 액체금속로 노심의 열유체 해석체제를 구축하는 것이 액체금속로 노심 열유체 전산 코드 개발의 목표가 된다. 앞에서 설명한 부수로 해석법과 다공성매질 해석법의 특성을 표 2에 요약하였다.

표 2. 부수로 해석법과 다공성매질 해석법 특성 비교

	해석모델	해석 특성
부수로 해석법	<ul style="list-style-type: none"> · 반경방향 운동량 근사적 처리 - 축방향 유량이 지배적 요소 - 동일한 출구 압력 가정 - forward marching 	<ul style="list-style-type: none"> · 복잡한 기하형태 계산에 유리 · 역류모델 해석 불가 · 유량재분배 현상 모사 불가
다공성매질 해석법	<ul style="list-style-type: none"> · 다차원 열유동 해석코드 - 직교, 원통 및 육각형 좌표계 	<ul style="list-style-type: none"> · 역류모델 해석 가능 · 유량재분배 현상 가능 · 집합체 내부 상세 해석에 제한적임

3.4 연계코드 계산체제

이와 같은 전체적인 액체금속로 열유체 해석체제는 단일 집합체 상세해석 및 7개 집합체를 이용한 집합체간 열전달 계산은 MATRA-LMR 코드로 계산하고, 전노심 해석은 MATRA-LMR과 COMMIX 코드를 연계한 MATCOM 코드를 개발하여 구성할 것이다. 이러한 액체금속로 노심 열유체 해석 전산체제 개발 방향과 구성을 그림 9에 나타내었다.

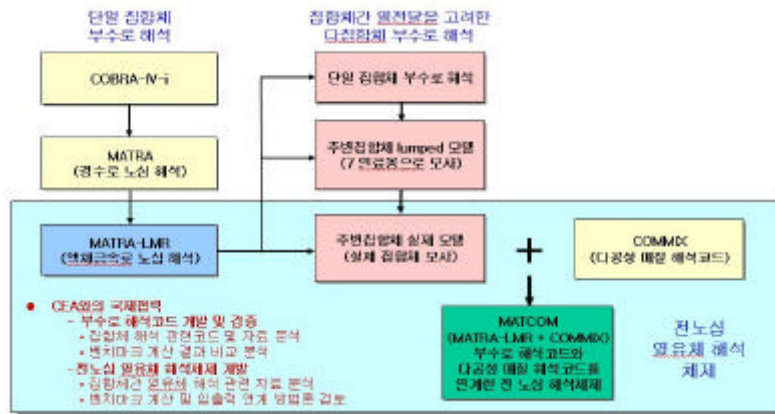


그림 9. 액체금속로 노심 열유체 해석 전산체제 개발방향

또한, 전노심 열유체 해석 전산체제를 완료하기 위해서는 부수로 해석코드 MATRA-LMR의 검증계산 및 개선 작업과 함께, 부수로 해석코드 MATRA-LMR과 다공성매질 해석코드 COMMIX를 연계할 수 있는 연계 코드 MATCOM 개발 작업이 진행될 것이다. 연계코드 MATCOM은 전체 계산을 제어하는 것과 함께, 자체적으로 필요한 계산을 수행하는 작업 및 부수로 해석코드의 입출력과 다공성매질 해석코드의 입출력을 변환하여 연계하는 작업을 수행하게 될 것이다. 이와 같은 연계 코드 및 계산 체제를 그림 10에 대략적으로 나타내었다.

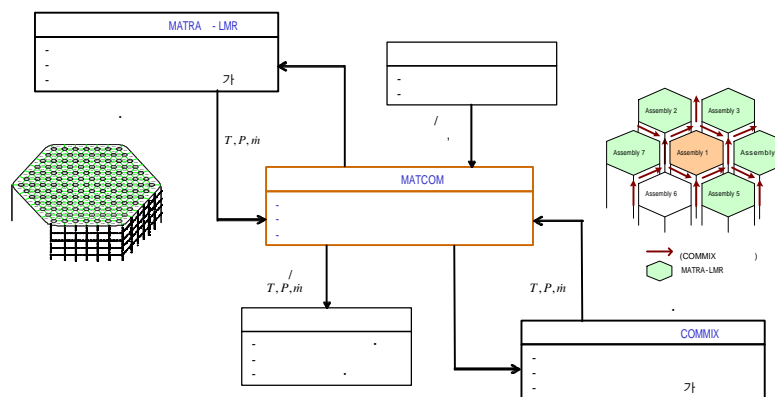
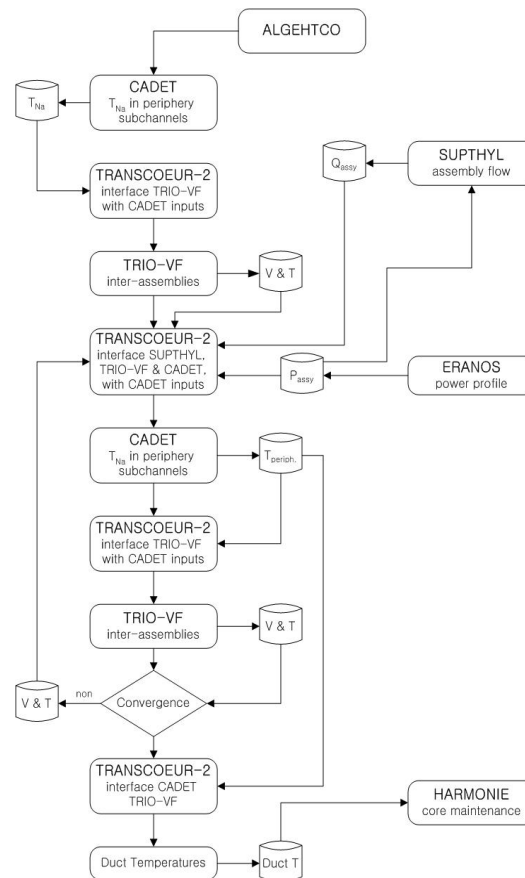


그림 10. 전노심 해석을 위한 연계 코드 및 계산체제

이와 같이 MATRA-LMR 코드와 COMMIX 코드를 연계하는 방법은 부수로 해석코드 CADET와 다공성매질 해석코드 TRIO-VF를 연계하여 전노심을 해석하고 있는 프랑스 CEA의 해석법과 유사한 방법이다. 프랑스 CEA에서 사용하고 있는 집합체간 열유체 해석체제를 그림 11에 나타내었다. 본 연구에서 최종적으로 구축하려는 MATRA-LMR과 COMMIX를 연계하는 MATCOM 코드가 그림에서 보는 것과 같이 CADET와 TRIO-VF를 연계하는 TRANSCOEUR-2 코드와 같은 기능을 갖는 것이다.[10]

연계코드 MATCOM은 부수로 해석코드의 출력자료를 다공성매질 해석코드의 입력자료로 변환시켜주는 부분과, 다공성매질 해석 코드의 출력자료를 부수로 해석코드의 입력자료로 변환시켜주는 부분, 그리고 자체적으로 노심 모델을 선정하여 계산해 주는 부분 등 셋으로 크게 그 역할을 구분할 수가 있다.

중장기 과제 제 3단계 2차년도 과제에서는 이러한 연계 프로그램의 요건을 선정하고 그 프로그램을 개발하는 작업을 수행하게 될 것이다.



Duct Temperature Calculation System

그림 11. CEA의 집합체간 열유체 해석체제

4. 결론 및 연구방향

액체금속로의 핵연료집합체는 6각형 덕트내에 3각형 격자구조로 핵연료봉을 밀집 배열하고, 각 덕트는 막힌 유로를 갖고 있어 서로간에 유량교환이 없기 때문에, 각각의 집합체에 공급되는 유량을 집합체의 출력에 따라 노심의 입구에서 미리 분배하여, 유량의 경제성을 높이고 노심 출구에서의 온도를 평탄화시켜야 한다. 이 유량분배는 각각의 핵연료 피복관의 누적 손상률이 동일하게 되어 핵연료봉의 신뢰성을 확보할 수 있도록 해 주어야 한다.

지금까지 이러한 설계 및 해석을 위해 개발된 컴퓨터 코드는 경수로형 원자로를 해석하기 위한 것들이 대부분이며, 액체금속로용으로 개발된 몇몇의 코드들은 그나마 입수하기가 매우 어려운 실정이다. 따라서, 대표적인 부수로해석용 전산코드인 COBRA코드를 개량 검증하여 액체금속로의 다집합체 열수력 해석에 사용할 수 있도록 하기 위하여 MATRA-LMR코드를 개발중이다. 현재는 단일 집합체 해석만이 가능했던 코드를 여러 집합체를 동시에 모사할 수 있도록 개량하였으며, 계속 보완하고 검증한 후 노심 열수력 해석을 위한 코드로 활용할 것이다.

한편, 나트륨은 열전도도가 매우 높기 때문에 덕트와 덕트 사이를 흐르는 유량에 의한 열전달이 집합체 내부의 온도에 영향을 미칠 수가 있다. 이러한 덕트와 덕트 사이를 흐르는 집합체간 열전달 중 열전도에 의한 부분은 현재 개발하고 있는 부수로 해석코드 MATRA-LMR에서 계산이 가능하지만, 대류에 의한 열전달이나 노심 상부구조에 의한 유량재분배는 이 코드로는 계산할 수가 없다. 이러한 현상을 계산하기 위해서는 부수로 해석코드와 다공성매질 해석코드를 연계한 전산체제를 구성하는 것이 가장 효과적인 것으로 판단되어 이를 위한 작업을 수행할 예정이며, 본 논문에서는 이를 위해 부수로 해석법과 다공성매질 해석법에 대해서 비교 검토하고, 전노심 해석체제가 갖추어야 할 요건과 구축방안에 대하여 기술하였다.

부수로 해석코드로는 현재까지 개발되어 검증 및 개선작업이 진행중인 단일 집합체 및 주변 집합체와의 열전달을 고려한 7개 집합체 계산이 가능한 MATRA-LMR을 이용하고, 다공성매질 해석코드로는 COMMIX-1AR/P를 이용하며, 이들을 연계할 수 있도록 연계코드 MATCOM의 개발을 통하여 전노심 열유체 해석체제를 구축하는 것이 본 연구의 최종목표이다. 이와 같이 MATRA-LMR 코드와 COMMIX 코드를 연계하는 방법은 부수로 해석코드 CADET와 다공성매질 해석코드 TRIO-VF를 연계하여 전노심을 해석하고 있는 프랑스 CEA의 해석법과 유사한 방법이다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Park C. K. et al., KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-888/97 (1997)
- [2] Hahn D. H. et al., KAERI Concept Study, GE Nuclear Energy (1995)
- [3] Novendstern E. H., "Turbulent Flow Pressure Drop Model for Fuel Rod Assemblies Utilizing a Helical Wire-Wrap Spacer System", Nucl. Eng. and Des., 22, 19 (1972)
- [4] Chiu C. et al., "Flow Split Model for LMFBR Wire Wrapped Assemblies", COO-2245-56TR, MIT, Cambridge (1978)
- [5] Cheng S. K. and Todreas N. E., "Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-Wrapped Hexagonal Rod Bundles - Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters", Nucl. Eng. and Des., 92, 227 (1986)
- [6] Yang W. S., "An LMR Core Thermal-Hydraulics Code Based on the ENERGY Model", Journal of KNS, Vol. 29, No. 5, pp. 406-416 (1997)
- [7] Wheeler C. L. et al., "COBRA IV-I : An Interim Version of COBRA for Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores", BNWL-1662 (1976)
- [8] Kim W. S. et al., "A Subchannel Analysis Code MATRA-LMR for Wire-Wrapped Liquid Metal Cooled Reactor Subassembly, Annals of Nuclear Energy", No.2, Vol. 29 (2002)
- [9] Domanus. H. M. et al., COMMIX-1A : A Three-Dimensional Transient Single-Phase Computer Program for Thermal Hydraulic Analysis of Single and Multicomponent Systems, NUREG/CR-2896, ANL (1983)
- [10] Valentin B. et al., Evaluation of Wrapper Tube Temperatures of Fast Neutron Reactors using The TRANSCOEUR-2 Code, NURETH-7, Saratoga Springs, New York (1998)
- [11] Todreas N. E. and Kazimi M. S., Nuclear Systems : Thermal Hydraulic Fundamentals, Hemisphere Publishing Corp. (1990)
- [12] Kim W. S. et al., "Inter-Assembly Heat Transfer Modeling for the Development of LMR Core Subchannel Code", NTHAS2, KNS/AESJ (2000)
- [13] George T. L. et al., "COBRA-WC : A Version of COBRA for Single-Phase Multiassembly Thermal-Hydraulic Transient Analysis", PNL-3259 (1980)