

집합체간 유량 재분배 현상을 고려한 액체금속로 노심 열유체 해석법

임현진, 김영균, 김영일, 오세기*
한국원자력연구소, 아주대학교*
ex-hilim@kaeri.re.kr

A Study on Thermal Hydraulic Analysis of LMR Cores with Inter-assembly Flow Redistribution

H. I. LIM, Y. G. KIM, Y. I. KIM and S. K. OH*
Korea Atomic Energy Research Institute, Ajou University*

1. 서론

소듐 냉각제를 사용하는 액체금속로는 높은 출력밀도와 연소도 특성으로 인하여 노심 열유체 설계조건이 가압경수로와는 다른 고유한 특성을 갖게 된다. 즉, 냉각제인 소듐은 열전도율 및 비등점이 높기 때문에 피복재 온도나 핵연료 최대 온도에 설계 제한조건을 두게 된다.

이러한 액체금속로 노심의 핵연료 집합체는 덕트라는 특수한 구조로 구성되어 있으며 각 덕트와 덕트 사이에는 유량의 교환이 없이 열교환만 발생하는 막힌 유로로 구성되어 있기 때문에 각각의 덕트에 흐르는 유량을 노심의 입구에서 미리 분배해 주어야 한다. 유량분배는 각각의 핵연료 피복관의 누직 손상률이 동일하게 되어 핵연료의 신뢰성이 확보될 수 있도록 해 주어야 하며, 이를 위하여 노심 입구에 유량분배 장치를 사용하기도 한다. 전반적인 액체금속로 노심의 열유체 개념설계 및 분석은 노심 구성과 그에 따른 핵연료 설계 데이터를 연계자료로 하여 유량분배, 온도분포계산, 정상상태 열유체 해석, 과도상태 열유체 해석, 안전해석 연계자료 제공의 흐름에 따라 구하게 된다[1].

현재까지 액체금속로의 열유체 해석에는 부수로 해석코드를 주로 사용하였다. 그러나, 액체금속로의 냉각제인 소듐은 열전도도가 매우 높기 때문에 덕트와 덕트사이를 흐르는 유량에 의한 집합체간의 열전달은 집합체의 내부 온도 분포와 덕트 벽면 온도에 큰 영향을 미칠 수 있다. 그림 1은 액체금속로 노심의 집합체간 유량재분배 현상을 개략적으로 설명한 것이다. 그림에서와 같이, 노심의 상부구조물에 의한 저항 압력으로 인하여 집합체 출구의 유량이 덕트와 덕트 사이로 역류되는 유량 재분배 현상이 발생하게 되고, 이는 노심의 집합체간 유동과 집합체 덕트의 온도에 영향을 주게 되어 덕트의 건전성 분석에 중요한 영향을 끼친다. 이러한 집합체간 유량 재분배 현상은 부수로 해석법을 적용하여 해석하는 것이 제한적이거나 불가능하므로 새로운 방법론의 개발이 요구된다[2,3].

이에 따라, 집합체간 냉각제 유동, 대류 열전달 및 유량재분배 현상 등을 계산할 수 있는 전산체제를 구축하기 위하여, 집합체 내부의 조밀한 구조의 해석에 유리한 부수로 해석법과 집합체간 소듐유동의 유량 재분배 현상을 계산할 수 있는 다공성 매질 해석 코드를 연계하는 방법론 및 전산 체제의 구축 연구가 진행 중이다. 본 논문은 이와 같은 액체금속로 노심의 집합체 온도분포, 노심 집합체간 온도분포, 집합체 덕트 온도분포 해석을 위하여 현재 개발이 진행 중인 부수로 해석법 다공성 매질 해석법의 연계방법에 대해 기술하였다.

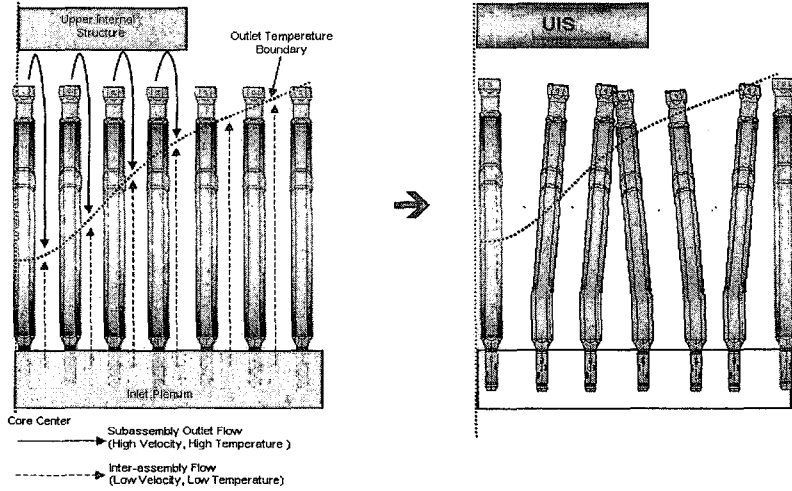


그림 1. 액체금속로 노심의 집합체간 유량재분배 현상 개념

2. 부수로 해석법과 다공성 매질 해석법의 연계 방법론

2.1 부수로 해석법과 다공성 매질 해석법의 비교

부수로 해석법

노심 열유체 해석에 대한 부수로 해석법의 주된 가정은 반경방향 유속에 비해 축방향 유속이 지배적이라는 가정에서 그 모델을 수립한다. 따라서, 반경방향의 운동량 방정식에 가정을 도입하여 계산모델을 단순화시킬 수 있다. 그러나, 이에 따른 제약에 의해 반경방향 유속이 축방향 유속에 비하여 무시할 수 없는 집합체간 유량 재분배 현상에 대해서는 부수로 해석 코드의 적용이 불가능 하다. 그림 2와 3은 부수로 해석에 사용된 control volume에 대한 정의와 축방향 및 반경방향 운동량 방정식에 적용된 control volume의 예를 나타내었다[4].

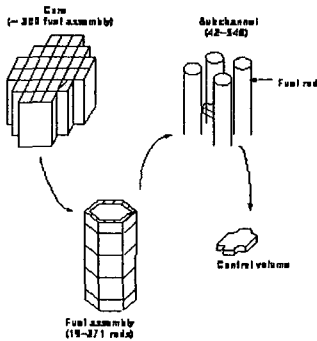


그림 2. 부수로 control volume

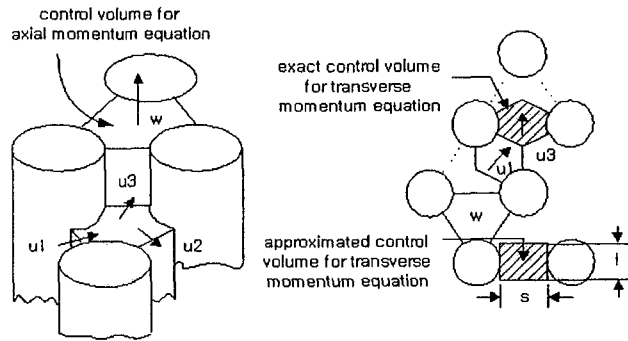


그림 3. 축/반경방향 control volume

다공성 매질 해석법

앞에서 설명한 바와 같이 실제 액체금속로 노심에서 발생하는 집합체간 유량재분배나 역류현상 등은 집합체의 온도분포 및 노심 전체의 열유체 해석에 많은 영향을 준다. 따라서, 이러한 현상을 해석하기 위해 부수로 해석법의 한계를 극복하는 보다 상세한 열유동 해석 체계의 개발이 요구된다. 이에 따라, 집합체 내부는 부수로 해석법을 이용하고 집합체간 열유동 해석은 다공성 매질 해석법을 이용하는 방법과 이에 대한 연계계산 코드가 현재 개발 중에 있다.

그림 2 및 3과 같은 유체 구조물의 해석을 위해 설정한 control volume에서 다공성 해석법을 적용하기 위해서는 다음과 같이 투과율(porosity) 이라는 기본 정의를 따른다.

$$Porosity = \frac{Fluid\ Volume}{Total\ Volume} \quad (1)$$

즉, 대상 control volume에 대해, 전체 구조물에 대한 실제 유체가 흐르는 유로의 비율인 투과율(porosity)을 각 방향에 대해 구한 후, 축방향과 횡방향에 대한 유체 저항계수를 산정하여 압력장(pressure gradient)을 계산하고 이를 바탕으로 질량, 에너지, 운동량 방정식을 구성하여 최종적으로 온도, 밀도, 유속을 계산하게 되는 것이다. 따라서, 한 지점에 대해 축방향의 유속이 지배적이라고 가정한 부수로 해석과는 달리 보다 현실적인 차원으로 유동해석을 하기 때문에 집합체간 열전달 현상에 대해 보다 상세한 모델을 구성하는 것이 가능한 것이다[4]. 앞에서 설명한 두 코드의 모델에 대한 가정 및 특성 그리고 이에 대한 각 보존방정식의 기본적인 수치 모델을 비교, 검토 하였다. 부수로 해석법과 다공성 매질 해석법의 특성은 표 1을 통해 정리하였다.

표 1. 부수로 해석법과 다공성 매질 해석법의 특성비교

	해석 모델	장점 및 단점
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 불가능 · 유량재분배 현상 모사 불가능
다공성 매질 해석법	<ul style="list-style-type: none"> · 다차원 열유동 해석 코드 - 직교, 원통 또는 육각 좌표계 	<ul style="list-style-type: none"> · 역류모델 해석 가능 · 유량재분배 현상 해석 가능 · 복잡한 구조에 대한 세부 모델 제한적

3.3 유량 재분배 해석을 위한 연계 계산

부수로 해석법과 다공성 매질 해석법의 연계 계산 과정은 그림 4와 같다. 연계계산 과정은 부수로 해석 코드를 이용한 집합체 내부의 온도분포 해석과 다공성 매질 해석 코드를 이용하여 구성된 원동형 노심 모델의 집합체간 유동 해석을 수행 한 후, 수렴된 두 코드의 계산 결과를 바탕으로 각각의 결과를 서로 연계하여 집합체 덕트 온도 분포를 계산하는 과정으로 진행된다.

집합체 온도분포 계산은 MATRA-LMR을 이용하였다[5]. 이 코드는 COBRA-IV-i를 근간으로 개발한 경수로 부수로 해석용 MATRA를 바탕으로, 소듐 물성치, 열전달 상관식 및 압력강하 상관식 등을 추가, 보완하여 액체금속로 노심의 집합체 해석을 위해 개발한 코드이다. 또한, 노심 집합체간 유동의 해석은 액체금속로의 원자로 pool 유동 해석을 위해 ANL에서 개발된 COMMIX-1AR/P 코드를 이용하였다[6].

집합체 온도분포 계산

부수로 해석법을 이용한 집합체 온도분포 계산은 대상 집합체에 대해 주변과 열전달이 없는 단열조건으로 가정하여 계산한다. 이러한 과정에 의해 대상 집합체의 부수로 온도분포가 구해지며, 최외각 부수로의 온도는 집합체간 유량 재분배 해석의 결과와 연계 된다.

집합체간 열유동 해석

액체금속로 노심은 일반적으로 수백개의 집합체로 구성되어 있다. 이러한 노심의 집합체간 유량 재분배 현상을 해석하기 위해 육각형 덕트의 집합체로 구성된 노심은 개념 설계 자료를 바탕으로 원통형 노심 모델로 구성된다. 그림 5는 집합체별 유량 분배가 이루어진 노심에 대한 원통형 노심의 계산 모델을 설명한 것이다.

집합체 덕트 온도분포 계산

집합체 덕트의 온도 분포는 부수로 해석 코드로 계산한 집합체의 최외각 부수로 온도분포와 다공성 매질 해석코드로 계산한 집합체간 유동의 온도분포를 바탕으로 계산된다. 이때, 두 코드의 계산 결과는 대상 집합체의 덕트 벽면을 경계조건으로 하여 노심에서의 위치와 길이 방향으로 연계된다.

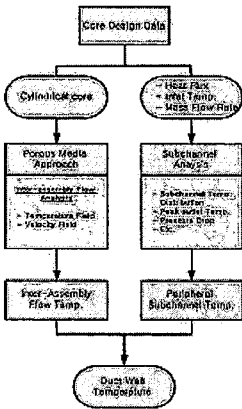


그림 4. 연계계산 개요

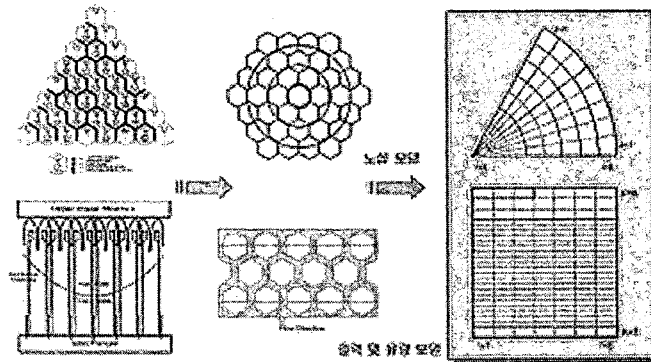


그림 5. 집합체간 열유동 해석을 위한 노심 모델

4. 참조 계산 및 해석

참조계산은 KALIMER-150 breakeven 노심에 대해 수행하였다[1]. 노심 반경은 약 1.76 m, 높이는 3.6 m 이고 원통형 노심은 집합체의 기하학적 규모를 바탕으로 11×36 mesh로 구성하였다. 노심 입구온도는 386.2 °C 이고, 원자로 상부 구조물에 의해 발생하는 역류로 인한 최대 압력 차는 약 0.2 MPa 로 가정하였다. 그림 6은 원통형 노심의 계산모델을 나타

낸 것이고, 그림 7은 노심의 온도 및 속도분포의 계산 결과를 나타낸 것이다. 그림7 에서와 같이, 노심 집합체간 유동의 형태는 노심 상부에서 발생하는 역류현상에 의해 대부분 역방향 및 반경방향으로 분포되어 있다. 따라서, 노심 중앙부분에 위치한 집합체의 출구 유동은 다시 노심 집합체의 덕트와 덕트 사이로 유입되어 중앙의 하단까지 역방향으로 흐른 후, 반경방향을 통해 노심 외각 부분의 상부로 유출되는 것을 알 수 있다.

그림 8과 9는 노심 중앙 부분에 위치한 드라이버 집합체 (DR0302)와 가장자리에 위치한 블랭킷 집합체(RB0704)의 덕트 온도 분포의 계산결과를 집합체간 유량 재분배의 영향이 없는 경우와 비교한 것이다. 드라이버 집합체의 경우는 노심 중앙에 위치했기 때문에 노심 상부로부터 역류된 고온의 냉각재 영향을 상당히 크게 받는 것을 알 수 있다. 한편, 노심 외각 부분에 위치한 블랭킷 집합체의 경우는 대부분의 저온의 냉각재가 분포함에 따라 집합체 덕트 온도 분포는 유량 재분배의 영향이 없는 경우에 비해 낮게 예측되었다. 결론적으로, 집합체 덕트의 온도 분포는 집합체 간 열유동, 집합체 내부의 부수로 온도 분포, 그리고 노심에서 집합체 위치에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다.

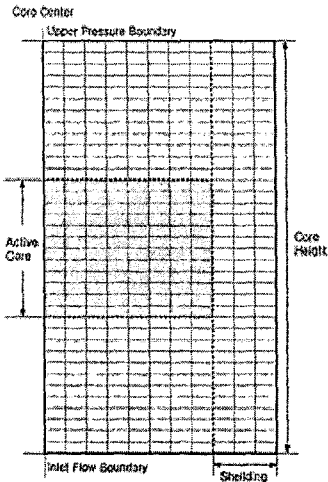


그림 6. 노심 계산모델

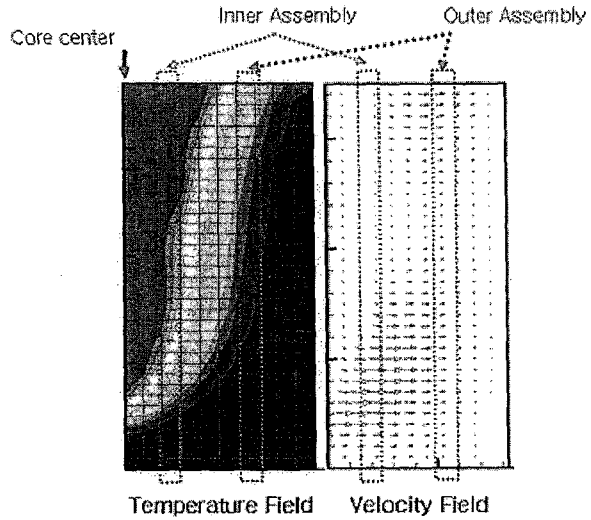


그림 7. 노심 온도 및 속도분포

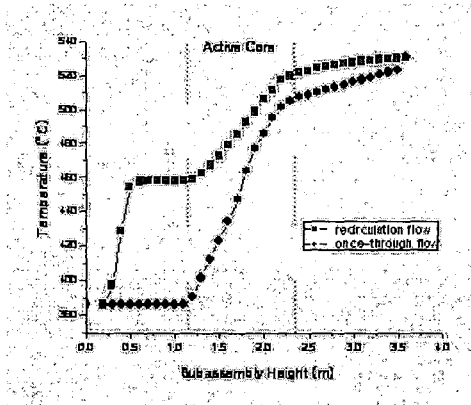


그림 8. 드라이버 집합체의 덕트 온도분포

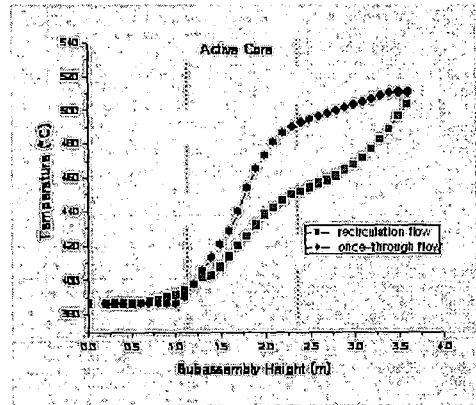


그림 9. 블랭킷 집합체 덕트 온도 분포

5. 결론 및 토의

액체금속로의 냉각재인 소듐의 집합체간 유량 재분배 현상은 집합체 덕트의 온도에 영향을 주게 되어 덕트의 건전성 분석에 중요한 영향을 끼친다. 이러한 집합체간 유량 재분배 현상은 부수로 해석법을 적용하여 해석하는 것이 제한적이거나 불가능 하므로 새로운 방법론의 개발이 요구된다.

본 논문을 통해 부수로 해석 코드와 다공성 매질 해석 코드를 연계하는 액체금속로의 노심 열유체 해석법과 이를 바탕으로 수행한 참조 계산의 결과를 기술 하였다. 참조 계산은 KALIMER-150 개념설계 중 하나였던 breakeven 노심과 집합체의 개념설계 자료를 바탕으로 MATRA-LMR코드와 다공성 매질해석 코드인 COMMIX-1AR/P코드를 연계하여 유량 재분배 현상의 해석을 수행하였으며, 그 결과를 유량 재분배 현상을 고려하지 않은 경우와 비교하였다. 두 방법을 연계한 해석법으로 집합체 덕트의 온도분포를 계산한 결과, 액체금속로 노심의 집합체는 노심에서의 위치와 열유동 조건에 따라 집합체간 유량 재분배의 영향을 보다 현실적으로 반영하는 결과를 볼 수 있었다.

이와 같은 부수로 해석법과 다공성 매질 해석법의 연계 방법은 추후 액체금속로 전노심 열유체 해석을 위한코드 구축의 기본 방법론으로 활용될 것이며 추후 연계 코드로 개발될 것이다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 시행하는 원자력증장기사업의 일환으로 수행되었습니다.

[참고문헌]

1. Y. G. KIM et al., "Thermal Hydraulic Characteristics of KALIMER Conceptual Design Cores," *Proc. of KNS*, Gwangju, Korea, May 24-25, 2002.
2. Y. G. KIM et al., "Study on The Inter-Assembly Analysis Tools in LMR Cores," *Proc. of KNS*, Kyeongju, Korea, May 24-25, 2003.
3. B. Valentin, "Evaluation of Wrapper Tube Temperature of Fast Neutron Reactors Using the TRANSCOER-2 Code," NURETH-7, pp.1351-1360, 1995.
4. W. T. Sha, "An overview of Rod-bundle Thermal Hydraulic Analysis," ANL-79-10, Argon National Laboratory (ANL), 1980.
5. H. J. Lim et al., "Analysis on Temperature Profiles of KALIMER Breakeven Core Subassemblies," *Proc. of KNS*, Gwangju, Korea, May 24-25, 2003.
6. P. L. Garner et al. "COMMIX-1AR/P: A Three-Dimensional Transient Single-Phase Computer Program for Thermal Hydraulic Analysis of Single and Multicomponent Systems," ANL-93/33, Argon National Laboratory (ANL), 1992.