'2000 춘계학술발표회논문집
한국원자력학회

Wire 격자 지지 액체금속로 집합체의 압력강하 계산 모듈 개발

Development of Pressure Drop Calculation Modules for a Wire-Wrapped LMR Subassembly

임현진, 오세기
아주대학교
경기도 수원시 팔달구 원천동 산 5

김영균, 김원석
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구는 와이어 격자 지지 액체금속로 집합체에서의 압력 손실 예측을 위한 전산 코드 개발의 초기단계로, 집합체의 핵연료 다발을 제외한 부분들을 급 확장 및 급 수축 유동 현상으로 모델링하고, 이에 대한 압력강하 계산 모듈을 개발한 것이다. KALIMER 증식노심 핵연료 집합체의 설계자료를 예로 계산한 결과, 모듈의 총 압력강하는 핵연료 다발부분을 제외할 때, 약 0.13 MPa 로서 단순 모델의 개념으로서는 비교적 타당한 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract

Pressure drop calculation modules for a wire-wrapped LMR subassembly has been developed. In this study, pressure drop modules for inlet hole, lower part and upper part of a wire-wrapped LMR subassembly was developed using simple formulas of sudden expansion and sudden contraction. A case calculation study was done using design data of a KALIMER driver fuel subassembly. And the total pressure drop in the driver fuel subassembly, except for the bundle part, was calculated as 0.13 MPa, which is in the reasonable pressure drop range. The developed modules will be integrated in the total subassembly pressure drop calculation code with further improvements.

1. 서론

소듐을 냉각재로 사용하는 액체금속로는 효과적인 열출력 제어와 소듐의 화학적 안정성 유지를 위해, 노심을 구성하는 각 핵연료 집합체의 덕트를 스테인레스강 또는 HT9으로 구성하고 있다. 액체금속로 노심은 일반적으로 삼각형 격자 형태로 장전되어 있는 연료봉 다발을 육각형 형태의 덕트로 감싸고 있는 집합체로 구성되어 있으며, 덕트와 덕트 사이에는 유량의 교환이 없는 폐쇄회로를 형성하고 있다. 따라서 이들 집합체에서 발생되는 열량을 효과적으로 추출하기 위해서는 각각의 집합체에 흐르는 냉각재 유량을 적절하게 분배하고, 그에 따른 온도분포를 적절하게 유지시키는 것이 열수력 설계의 기본 목표가 되는 것이다.[1]

노심 전체에 대한 냉각재 유량분배 개념은 전출력에 대한 필요 유량을 결정한 후, 노심 집합체별 출력 분포에 따라 각 집합체별로 유량을 결정하는 것이다. 이러한 각 집합체의 유량을 몇 개의 동일 유량 그룹으로 구성한 후, 집합체의 온도 분포를 계산하여 각 그룹의 피복관의 최고 중심온도가 동일하도록 하고, 이때의 압력강하를 고려하여 집합체 하부에 오리피스를 구성하게 된다. 따라서, 냉각재 유량분배 조절을 위한 핵연료 집합체 전체 압력강하의 정확한 예측이 노심 열수력 설계에서 중요하게 요구되는 사항이다.

집합체 핵연료 번들 부분의 압력 손실 계수 상관식으로는 Novendstern 모델, CRT (Chiu-Rosenhow-Todreas) 모델, CT (Cheng & Todreas) 모델 등이 선행 연구를 통해 개발되어 [2] 활용되고 있으나, 핵연료 집합체 전체의 총 압력 강하를 계산하기 위해서는 핵연료 다발 부분 이외의 입구 노즐, 집합체 하부 및 상부에서의 압력강하도 함께 계산해 주어야 한다.

본 연구에서는 핵연료 집합체 전체 압력강하 계산 코드 개발을 위해 그 초기 단계로 번들 부분을 제외한 핵연료 집합체내에서의 압력 강하 계산 모듈을 개발하였다. 각 모듈들은 집합체의 형상에 따른 냉각재의 유동 특성을 기준으로 입구 노즐, 집합체 상부 및 하부, 핵연료 번들 입/출구로 구분하여 단순화하였다. 또한 개발된 계산모듈을 검증하기 위해 KALIMER 증식노심의 핵연료 집합체 설계자료를 이용하여 압력강하를 계산해 보았다.

2. 핵연료 집합체 유동 흐름 형태

일반적인 액체금속로 핵연료 집합체의 기하학적 형태는 그림 1과 같다. 집합체의 구성은 그림 2에 단순화 하여 나타낸 것처럼 크게 입구노즐, 집합체 하부, 핵연료 번들, 집합체 상부로 구분할 수 있다.

노심 하부 플레넘에서 올라오는 냉각재는 오리피스에 의하여 유량이 분배되어 집합체의 최 하

단부 측면에 일정한 배열 및 형태로 구성된 좁은 입구 노즐로 유입된 후, 집합체 하부에서 합류하여 핵연료 봉 번들 부분을 통과하면서 온도가 상승된 다음, 상부를 통해 재합류하여 집합체 외부로 유출된다.

따라서, 핵연료 집합체는 냉각재의 유동 특성을 통한 모듈화가 가능하며, 이와 같이 구분한 각 모듈의 압력강하 현상은 급 수축(Sudden Contraction) 및 급 확장(Sudden Expansion) 모델로 단순화 할 수 있게 된다.

3. 압력강하 모듈

3.1 단순화 모델 개념

집합체 압력 강하 계산을 위한 핵연료 집합체의 단순화 모델은 그림 2와 같으며, 다음과 같은 가정으로 수행하였다.

- 입구 노즐에서 유입되는 냉각재의 유량은 각 노즐에 동일하게 분배된다
- 집합체 하부 및 상부에서의 유동은 급 확대 (Sudden Expansion) 및 급 수축 (Sudden Contraction) 형태로 단순화한다
- 각 모듈 출구의 냉각재는 동일 유속 (Uniform Velocity) 으로 분포한다

이와 같이 단순화한 집합체 모델의 압력 손실 계수는 냉각재의 유동특성을 결정하는 기하학적 구조와 이에 따른 레이놀즈 수에 의해 결정된다. 유동 특성에 따라 구분한 각 영역에 대한 레이놀즈 수(Re)는 다음과 같이 계산 된다.

$$Re = \frac{\rho u_{avg} D_e}{\mu} \quad (1)$$

ρ : 소듐 평균 밀도 (kg/m^3)

u_{avg} : 평균유속 (m/sec)

D_e : 등가직경 (m)

μ : 소듐 평균 점도 ($kg/m-sec$)

따라서, 유동특성을 기준으로 집합체가 n개의 모듈로 구성되어 있다고 가정하면 집합체의 전체 압력강하 ΔP_{total}은 각 모듈에 대한 형태 손실 및 마찰 손실의 총 합으로 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\Delta P_{total} = \frac{\rho_{avg}}{2} \sum_{i=1}^{n} [(K_i + f_i) v_i^2] \quad (2)$$

ρ_{avg} : 소듐 평균 밀도 (kg/m^3)

K_i : 각 모듈에 대한 형태 손실 계수

f_i : 각 모듈에 대한 마찰 손실 계수

v_i : 각 모듈에서의 평균유속 (m/sec)

이와 같이 핵연료 집합체의 압력강하 모듈은 핵연료 집합체의 냉각재 유량과 그림 2에서와 같이 단순화 한 각 모듈의 기하학적 자료를 입력으로 하여, 입구 노즐부터 집합체 상부까지의 각 모듈에 대한 유속 및 레이놀즈 수(Re)를 구한 후, 이를 바탕으로 압력 손실 계수와 압력 강하를 계산하게 되는 것이다.

형태 손실에 관계된 상수들은 레이놀즈 수(Re)의 범위에 대해 주어진 기하학적 형상에 대해 나타낸 Idelchik의 데이터[3] 및 기존의 상관식과 최근에 실험을 통하여 개발된 상관식[4,5]을 이용하였으며, 소듐 냉각재의 물성치는 집합체 입구 온도와 출구 온도의 평균값을 적용하였다. 각 모듈에 대한 모델링은 다음과 같다.

3.2 집합체 입구 노즐 모듈

입구 노즐의 압력강하 모듈은 다음과 같은 가정으로 모델링 하였다.

- 집합체로 유입되는 유량은 각 입구 노즐에 대해 동일하게 분배된다
- 입구 노즐에서의 압력강하에는 마찰에 의한 영향이 거의 없다
- 입구 노즐이 형성된 부분은 원통 수직관 구조를 이룬다
- 입구 노즐은 직사각형의 형태를 이루고 있다

따라서, 주어진 입구노즐의 갯수 및 형상은 등가직경의 개념으로 그림 3과 같이 단순화 할 수 있으며, 이에 대한 압력 손실 계수 K_i는 입구노즐에서의 레이놀즈 수가 $Re > 10^4$ 인 범위에서 대해 Idelchik의 데이터에 따라 다음과 같은 직경 및 면적 비의 함수로 표현될 수 있다.[3] (그림 3 참조)

$$K_i = f\ (b / D_0,\ f')) \quad (3)$$

$f' = \left(\frac{b D_1}{\pi D_0^2 / 4}\right)$: 노즐과 수직 원통관의 단면적 비

3.3 집합체 하부 및 상부 모듈

입구 노즐을 통하여 유입된 냉각재는 좁은 유로 구간에서 재 합류하여 핵연료 번들이 배치된 상부 방향의 넓은 유로 구간으로 급속히 확장하게 된다. 이에 따른 압력 손실 계수는 면적 비와 레이놀즈 수의 범위로부터 구할 수 있다.

집합체 하부와 같이 유로가 좁은 영역에서 넓은 영역으로 확장되는 경우와 집합체 상부와 같이 넓은 영역에서 좁은 영역으로 수축하는 경우의 형태 손실 계수 K_D 및 K_U는 일반적으로 다음과 같은 관계를 갖는다. (그림 2 참조)

$$K_D = [(\frac{D_3}{D_2})^2 - 1]^2 \quad (4)$$

$$K_U = \zeta (1 - \frac{A_4}{A_3}), \quad \zeta \leq 0.5 \quad (5)$$

식 4 및 5에서 D는 각각의 등가직경으로 유효범위는 $1 < D_3/D_2 < 5$이고, A는 각각의 유로 면적을 의미한다.

급 확장의 경우, 좁은 영역의 레이놀즈 수가 3,500 이상이고, 동일 유속분포(uniform velocity distribution)를 이룬다고 가정하면, 전체 압력 손실 계수 K는 식 6과 같이 형태 손실 계수와 마찰 손실 계수의 합으로 표현된다.

$$K = \frac{\Delta P}{\rho v^2/2} = K_{loc} + K_{fr} = K_{loc} + \frac{K'_{fr}}{n^2} \quad (6)$$

$$K_{loc} = (1 - \frac{A_3}{A_2})^2 \text{ : 형태 손실 계수}$$

$$K'_{fr} = \frac{\Delta P_{fr}}{\rho v_i^2/2} = \lambda \frac{L_1}{D_3} \text{ : 마찰 손실 계수}$$

$\lambda = f(Re)$

n : 유면적 비

또한, 동일한 범위 (Re > 10,000) 의 난류유동에서 급 수축하는 경우 전체 압력 손실은 식 7과 같다.

$$K = 0.5\left(1 - \frac{A_4}{A_3}\right)^{0.75} + \zeta_{fr} \quad (7)$$

$$\zeta_{fr} = \lambda\frac{L_2}{D_4}, \quad \lambda = f(Re)$$

3.4 핵연료 다발 입구 및 출구 모듈

핵연료 번들 부분에서 냉각재의 유입, 유출로 발생하는 형태 손실은 덕트 내벽의 등가직경과 핵연료봉 전체가 차지하는 면적의 관계로 단순화하였다. 따라서, 유입의 경우에는 급 수축으로, 유출의 경우에는 급 확장으로 가정할 수 있으며, 이 두 경우의 형태 손실 계수들은 앞에서 언급한 식 4 및 식 5를 이용하면 식 8 및 식 9와 같이 표현된다.

· 유입시의 형태 손실 계수 K_i,

$$K_i = \left[\left(\frac{D_{duct} - D_{total}}{D_{duct}}\right)^2 - 1\right]^2 \quad (8)$$

D_{total} : 핵연료 봉 전체가 차지하는 등가직경

D_{duct} : 덕트 등가 직경

· 유출시의 형태 손실 계수 K_o,

$$K_o = \zeta\left(1 - \frac{A_{duct} - A_{total}}{A_{duct}}\right), \quad \zeta \leq 0.5 \quad (9)$$

A_{total} : 핵연료 봉 전체의 유로 면적

A_{duct} : 덕트의 유로 면적

4. 압력강하 계산결과

개발된 압력강하 모듈을 검증하기 위하여 KALIMER 증식특성 노심 핵연료 집합체의 입력자료를 이용하여 계산 작업을 수행하여 보았다. 계산에 사용된 입력자료는 표 1에 나타낸 것과 같다. 소듐 냉각재의 집합체 입구 및 출구 온도는 각각 386.2。C 및 586。C 이고, 냉각재의 유량은 최대 열출력을 갖는 집합체에 분배된 유량인 38 kg/sec 로 하였다. 이에 대한 계산 결과를 표 2에

정리하였다. 주어진 유량 및 온도범위에서의 압력강하는 입구 노즐부분이 0.05265 MPa, 집합체 하부와 상부에서는 각각 0.01877 MPa 및 0.05526 MPa이며, 핵연료 번들 입구 및 출구 분분의 압력 강하는 매우 작은 값으로, 핵연료 집합체의 전체 압력 강하에 대한 영향이 거의 없음을 알 수 있었다. 결론적으로, 본 연구에서 개발한 단순 모델로 구성한 압력강하 모듈로 계산한 집합체 모듈의 전체 압력 강하는 핵연료 다발을 제외하였을 때, 약 0.13 MPa로 나타났다.

5. 결론 및 토의

본 연구는 와이어 격자 지지 액체금속로 집합체에서의 압력손실 예측을 위한 전산 코드 개발의 초기단계로 집합체의 핵연료 번들을 제외한 부분에서의 유동 현상을 급 확장 및 급 수축 모델로 단순화하고, 이에 대한 압력 강하 계산 모듈을 개발한 것이다. 집합체를 입구 노즐, 집합체 하부 및 상부, 핵연료 번들 입구 및 출구로 모듈화 하였으며, 각 모듈에 대한 압력 손실 계수는 레이놀즈 수(Re)의 범위에 대해 주어진 기하학적 형상에 대해 나타낸 Idelchik의 데이터[3] 및 기존의 상관식과 최근에 실험을 통하여 개발된 상관식[4,5]을 이용하였다.

KALIMER 증식노심 핵연료 집합체의 설계자료를 예로 계산한 결과, 모듈의 총 압력강하는 핵연료 다발부분을 제외할 때, 약 0.13 MPa 로서 단순 모델의 개념에서는 비교적 타당한 결과를 얻을 수 있었다.

앞으로의 연구를 통하여 입구 노즐 및 집합체 상부, 하부에 대한 보다 상세한 모델을 구성하고 상관식 등의 개발을 통해 핵연료 집합체 전체의 압력 강하를 정확히 예측할 수 있는 전산 코드를 개발할 것이다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 김영균 외, “액체금속로 KALIMER 증식특성 설계노심의 정상상태 열수력 특성 분석”, ‘99추계 학술발표회 논문집, 한국원자력학회 (1998).

[2] A. E. Waltar and A. B. Reynolds, Fast Breeder Reactors, Pergamon Press (1981).

[3] I. E. Idelchik, Greta R. Malyavskaya, et al., Handbook of Hydraulic Resistance, Hemisphere Publishing Corp. (1986).

[4] Kyong-Won Seo, et al., "An Experimental Investigation of Side-Orifice Effect on Pressure Drop for Single-Phase Flow" Proceedings of the KNS (1996).

[5] **전문헌 외**, "**저유량 천이시 하부플레넘에서의 유량 재분배 연구**", KAERI/CM-103/96, 1996.

그림 1. **집합체 모양**

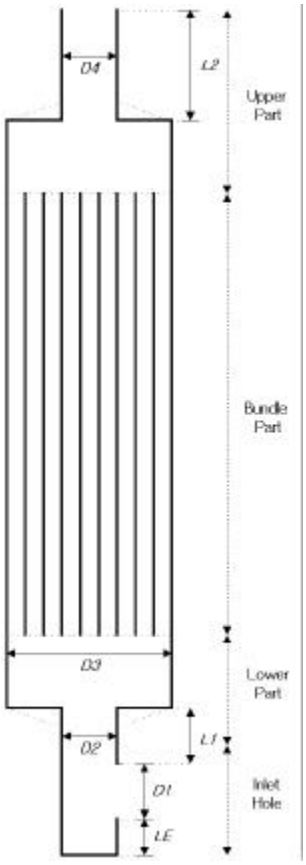

그림 2. **간략한 집합체 모델**

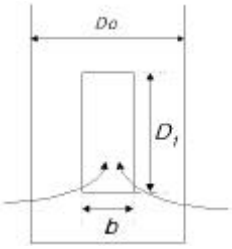

그림 3. **입구노즐 모델**

표 1. KALIMER 핵연료 집합체 압력강하 계산을 위한 입력자료

Input parameters	Input Values
Mass flow rate of Soduim (kg/sec)	38.0
Inlet Temperature of Sodium (℃)	386.2
Outlet Temperature of Sodium (℃)	530.0
Number of Inlet Nozzle	6
Average width of Inlet Nozzle (m)	0.0245
Average height of Inlet Nozzle (m)	0.0491
Diameter of Inlet stream section (m)	0.08
Diameter of Lower Part (m)	0.1496
Diameter of Uppert Part (m)	0.12
Length of Upper Part (m)	0.3
Diameter of Fuel Pin (m)	0.0074
Number of Pins per Assembly	271

표 2. KALIMER 핵연료 집합체의 압력 강하 계산결과

Physical Properties of Sodium (Average)	Temp. (℃)	Density (kg/m^3)	Viscosity (kg/m · sec)
	458.1	819.628	2.566E-4

	Velocity (m/sec)	Re	K	ΔP (MPa)
Inlet Nozzle Part	6.10	5.456E5	3.453	0.05265
Lower Part	9.22	2.360E6	0.538	0.01877
Upper Part	2.64	1.260E6	19.38	0.05526
Fuel Bundle Inlet	2.64	1.260E6	0.223	0.00064
Fuel Bundle Outlet	5.62	1.840E6	0.282	0.00365
Total Pressure Drop	-			**0.13095**