2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

신형핵연료 조사시험용 캡슐의 압력손실 모델

A Pressure Loss Model for Irradiation Capsule of Advanced PWR Fuel

오동석, 인왕기, 김대호, 전태현

한국원자력연구소
대전광역시 유성우체국 사서함 105 호

요약

신형핵연료 소결체에 대한 하나로 조사시험용 Capsule 의 기하형상 결정을 위해 핵연료 압력손실계수 예측 모델을 개발하였다. 모델은 단순화된 형상에 대해 기존 문헌에서 제공되는 모델들을 각 요소에 적용시키고 자유 유동 원리에 의해 요소 별 압력손실계수를 중첩시켰다. 측정 자료와 비교한 결과 제안된 모델은 측정치 보다 4 % 높게 예측하는 것으로 나타났으며 Capsule 설계 단계에서 기하형상 최적화를 위한 도구로 적절한 것으로 판단되었다. 후보 Capsule 의 압력손실이 200 kPa 에 도달하는 유량은 7.1 kg/s 인 것으로 나타나 하나로 수력적 제한조건에 대해 45%의 여유를 갖으며 만족하는 것으로 나타났다.

Abstract

A pressure loss model is developed to determine the geometric feature of the simulated advanced PWR fuel capsule. The proposed model is superposed on the basis of free flow principle by using models for simple geometry presented in open literatures.

Even though the proposed model somewhat overpredicts for the pressure loss, the comparison between the experiment and the prediction shows that the model is suitable as a tool for the geometry optimization in capsule design phase. It is found that the candidate capsule satisfies the Hararo hydraulic design criteria with the 45% margin.

1. 서론

경수로용 신형핵연료는 기존 경수로용 핵연료에 비해 방출 연소도를 증가 시키고 열적 기계적 성능 향상을 목표로 현재 개발되고 있다. 신형핵연료 소결체의 목표 연소도는 70 MWD/kgu-rod avg. 이상으로 핵분열 기체의 방출을 억제 할 수 있는 큰 결정립 UO_2 소결체를 토대로 하고있다. 신형핵연료의 소결체 노내 조사 시험의 목적은 노내 성능 및 건전성을 확인하고 생산된 노내 성능 자료를 통해 신형핵연료 소결체의 성능모델을 개발 하는데 있다. 이러한 조사시험을 위해 사용된 Capsule 의 기하형상 결정시 하나로 노심의 유량 확보를 위해 Capsule 이 장전되는 OR(Outer Reactor)홀에서의 압력손실이 200 kPa 이상이어야 하며 Capsule 내의 신형

핵연료 소결체를 충분히 냉각 시킬 수 있는 유량을 확보하여야 한다는 수력적 제한 조건이 있다. 이의 만족여부를 확인하기 위해 먼저 Capsule 의 압력손실을 예측하고 이로부터 Capsule 의 유량을 구하는 작업이 필요하다. 그러나 하나로에 사용되는 핵연료 및 Capsule 은 형상이 매우 복잡하기 때문에 압력손실은 주로 실험을 통해 구해졌다.

지금까지 하나로 핵연료에 대해 수행된 압력손실 시험은 Yang[1]및 Jung[2]에 의해서 수행되었다. Yang[1]은 하나로 핵연료 집합체에 적용되는 Code 계산모델을 검증 하기 위해 부수로 유속분포 및 압력강하 실험자료를 생산하였다. 실험에 사용된 핵연료집합체는 18 봉 및 36 봉을 갖으며 정격운전 중 핵연료 채널 압력 손실은 18 봉 및 36 봉 핵연료 집합체에 대해 각각에 대해 214 kPa 및 205 kPa 로 측정되었다. Jung[2]은 DUPIC(Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU Reactors) Capsule 이 하나로 수력 설계한계를 만족하는 지를 알아보기 위해 유량이 변화할 때 Capsule 전체 압력 손실을 측정하였다. 시험 유량 범위는 5 에서 10 kg./s 이며 유량 온도는 하나로 노심의 입출구 온도인 35/45°C 의 평균인 40°C 이다. 압력강하 실험 결과 약 200 kPa 의 압력손실을 유발시키는 OR 유량은 8.8 kg/s 인 것으로 측정되었다.

비압축 등온조건에서 임의의 구간에서 측정된 정압 손실은 각 요소 압력손실의 합으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_{total} = \sum_{i=1}^{n} \Delta P_i \qquad (1)$$

여기서 n 은 요소의 갯수를 나타낸다.

각 요소의 압력손실계수는 봉다발에서의 유체속도를 이용하여 식(2)와 같이 정의 할 수 있다.

$$K_i = \Delta P_i / (\frac{1}{2} \quad r \quad V_{cb}^2) \qquad (2)$$

여기서 ΔP_i 는 요소 압력손실 그리고 r 는 유체의 밀도, V_{cb} 는 Cooling Block 내 유속이다.

압력손실계수는 일반적으로 Reynolds 수에 따라 나타내는데 본 연구에서 사용된 기준 Reynolds 수는 Cooling Block 내에서 유속과 수력직경을 사용하여 아래와 같이 정의하였다.

$$\mathrm{Re} = \frac{V_{cb} \cdot D_{hcb}}{n} \qquad (3)$$

여기서 V_{cb} 는 Cooling Block 내 유속, D_{hcb} 는 Cooling Block 위치에서 수력직경, 및 n 는 유체의 동점성 계수를 나타낸다.

본 연구는 신형핵연료 소결체의 노내 조사용 시험 Capsule 의 압력손실계수를

예측하는 모델을 제안하고 이를 통해 하나로 정상 운전 조건에서 유량을 계산함으로써 신형 핵연료 Capsule 의 하나로 설계한계 만족성 여부를 평가하였다.

2. 모델개발

경수로용 신형핵연료 Capsule 의 기하형태는 그림 1 의 (A)와 같다. 집합체는 Rod Tip, Guide, Lower End Plate 로 구성된 Capsule 하부와 Lower Housing, Housing Support, Cooling Block, Fuel Rod, 및 Upper Housing 으로 구성된 Element Assembly 부분과 Upper Endplate, 및 Grapple Head 로 구성된 Capsule 상부로 구성되어있으며 Capsule 상/하부와 Element Assembly 는 원통 형태의 Support Tube 에 의해 체결 고정된다. OR 입구를 통해 들어오는 유량은 Lower End Plate 입구에서 Capsule 내부로 흘러가는 주류와 Capsule 외벽과 OR 내벽을 통해 흐르는 우회류로 분배되며 Upper End Plat 를 지나며 합류하여 OR 출구로 나간다.

제안된 신형핵연료 Capsule 은 Lower End Plate 와 OR 내벽과의 간극이 0.35 mm 로 매우 작으며 OR 내벽과 Capsule 외벽의 간극도 2 mm 로 비교적 작음에 따라 우회류량은 존재하지 않는 것으로 가정하였다. 또한 Capsule 을 통해 들어온 냉각재 유량은 동일하게 분배되며 각 요소의 냉각재는 완전 발달된 유동으로 가정함으로써 모델을 단순화 시켰다.

Capsule 내를 흐르는 유량은 동일하게 분배됨에 따라 Capsule 내를 하나의 유로로 볼 수 있으며 단일 유로를 통과할 때 발생하는 압력손실계수는 각 요소의 압력손실들을 자유유동원리(free flow principle)[3]에 의해 중첩 시킴으로써 전체 수로의 압력손실계수를 구할 있다.

따라서 Capsule 의 압력손실계수는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$K = K_{inlet} + K_{st,f} + K_{cb,f} + K_{me,f} + K_{gh,f} + K_{epl} + K_{hl} + K_{cb} + K_{hu} + K_{epu} + K_{gh} \quad (4)$$

여기서 우변 각 항의 압력손실 모델식은 표 1 에 제시되었다[4]. 여기서 사용된 압력손실 모델식은 단순화된 일반 기하형상에 대해서 생산된 것으로서 Capsule 에 적용하기 위해 각 요소와 유사한 형상의 모델식들을 선택하였다.

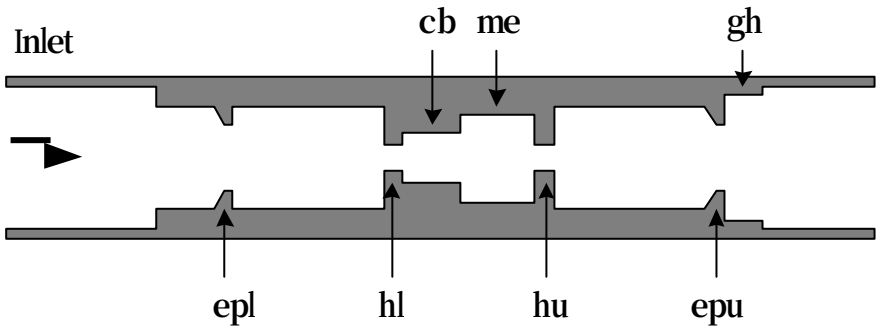
입구 압력손실계수 (K_{inlet}) :

Capsule 의 입구 영역은 OR 의 입구와 Capsule 을 고정시키는 장치 및 Capsule 의 Rod Tip 및 Guide 를 포함하는 매우 복잡한 형상이다. 신형핵연료 Capsule 의 입구 형상은 참고문헌 [1]의 18 개의 봉으로 이루어진 봉다발의 입구형상과 동일하도록 설계되었으며 압력손실계수는 기존의 실험 결과로부터 얻을 수 있다. 이 때 측정된 정압 손실은 베르누이 정리[5]를 이용하여 식(5)와 같이 입구영역의 총 압 손실로 전환된다.

$$\Delta P_{inlet} = \Delta P_{inlet}^{m} + \frac{1}{2 \cdot r}\left[\left(\frac{m}{A_1}\right)^2 - \left(\frac{m}{A_2}\right)^2\right] \quad (5)$$

Table 1. Pressure Loss Coefficient Model for Each Component

No	Component	Model	Ref.
1	Friction, $(K_{st,f},\ K_{cb,f},\ K_{me,f},\ K_{gh,f})$	$0.632 \cdot \mathrm{Re}_i^{-0.25} \left(\frac{L_i}{D_{h,i}}\right) \cdot \left(\frac{A_r}{A_i}\right)^2$	[5]
2	Thick Edge Orifice, $(K_{hl},\ K_{hu})$	$\left\{0.5 \cdot \left(1-\frac{A_o}{A_1}\right)+\left(1-\frac{A_o}{A_2}\right)^2 + t \cdot \sqrt{1-\frac{A_o}{A_1}} \cdot \left(1-\frac{A_o}{A_2}\right) + l \cdot \frac{L_o}{Dh_o}\right\} \cdot \left(\frac{A_r}{A_l}\right)^2$, $t = f(\frac{L}{D_h})$	[3] diag. 4-12
3	Thick Edge Orifice with Champed Inlet, $(K_{epl},\ K_{epu})$	$\left\{0.25 \cdot \left(1-\frac{A_o}{A_1}\right)+\left(1-\frac{A_o}{A_2}\right)^2 + t \cdot \sqrt{1-\frac{A_2}{A_1}} \cdot \left(1-\frac{A_o}{A_2}\right) + l \cdot \frac{L_o}{Dh_o}\right\} \cdot \left(\frac{A_r}{A_l}\right)^2$, $t = f(\frac{L}{D_h})$	[3] diag. 4-12
4	Sudden area increase, $(K_{cb},\ K_{gh})$	$0.5 \cdot \left(1-\frac{A_l}{A_r}\right)^{3/4} \left(\frac{A_r}{A_l}\right)^2$	[3] diag. 4.1



See Nomenclatrue section for abbreviations

여기서 ΔP_{inlet}는 입구영역 총압 손실, ΔP_{inlet}^{m}는 측정된 정압 손실, r는 유체 밀도, m은 질량유속 및 A는 유로 면적 이며 하첨자 1과 2는 입구영역의 시작과 끝을 나타낸다.

요소 별 마찰 압력손실계수($K_{stl,f}$, $K_{cb,f}$, $K_{me,f}$, $K_{stu,f}$, $K_{tg,f}$):

Capsule 내 Lower Support Tube, Cooling Block, Mini-element, Upper Support Tube, 및 Grapple Head에서의 유동은 난류 강도가 높은 난류 유동에 이라 보고 각 요소의 마찰 계수는 Blasius 형태의 마찰 계수 식[5]을 이용하여 얻고 마찰압력손실은 마찰계수에 요소의 기하 특성 인자 인 수력직경, D_h,와 마찰길이, L,를 고려함으로써 구해진다.

Lower Housing 및 Upper Housing 압력손실계수 ($K_{hl}, K_{,hu}$):

Lower Housing 및 Upper Housing의 기하형상은 일정한 두께를 갖은 판에 비교적 유로 폐쇄율이 낮도록 천공된 형태로 이 요소들 전후에서의 유동형태는 오리피스 (Thick Edged Orifice) 주변에서의 유동형태와 동일하다고 가정하고 오리피스에 대한 압력손실계수 식을 이용하여 요소의 압력손실계수를 계산하였다.

Lower End Plate 및 Upper End Plate 압력손실계수 ($K_{epl}, K_{,epu}$):

Lower End Plate 및 Upper End Plate의 기하형상은 Lower/Upper Housing의 기하형상과 유사하나 입구가 모따기 처리되었다. 따라서 압력손실계수는 오리피스 (Thick Edge Orifice) 압력손실계수 모델 중 유로 축소에 의한 영향을 반으로 감소시킴으로써 구하였다.

Cold Block 및 Grapple Head에서 유로 팽창에 의한 압력손실계수 (K_{cb}, K_{gh}):

Cold Block에서 Mini-element로의 유로 팽창과 Grapple Head에서 Housing으로의 유로 팽창에 의한 압력손실계수는 유로 팽창 시 발생하는 압력손실계수 식으로부터 구하였다.

3. 기존 시험자료와의 비교

DUPIC Capsule에 대한 노외 압력손실 측정 자료 자료들을 사용하여 제안된 모델을 평가하고 결과를 비교하였다. DUPIC Capsule의 기하형상은 그림 1의 (B)와 같다. 그림 1에서 DUPIC Capsule의 기하형상은 신형핵연료 Capsule의 기하형상과 기본적으로 같으나 Mini-assembly가 신형핵연료 Capsule은 두 개인데 반해 DUPIC Capsule은 한 개 존재한다.

DUPIC Capsule에 대한 측정치와 모델의 예측치는 그림 2와 같다. 그림 2에서 Reynolds 수 변화에 따른 모델 예측치의 변화는 시험치와 유사한 것을 볼 수 있으며 제안된 모델은 DUPIC Capsule 시험치에 비해 4% 높게 예측하는 것으로 나타났다. 이는 Capsule의 복잡한 기하형상 내에서 복잡한 유동을 단순화된 모델을 이용하여 계산함에 따라 오차들이 수반된 것으로 생각된다. 비록 제안된 모델이 실험

치에 대해 높게 예측하나 신형핵연료 Capsule 개발 단계에서 Capsule 의 형상 개발을 위한 설계 계산이나 형상의 최적화를 위한 도구로서 적절한 것으로 평가된다.

4. 신형핵연료 Capsule 후보 형상에 대한 수력적 평가

제안된 모델을 이용하여 노심 정상운전 조건인 OR 에서의 압력손실이 200 kPa 일 경우 노심 요소별 압력손실계수를 계산하고 표 2 에 나타내었다. Capsule 의 전체 압력손실계수는 4.0 인 것으로 나타났으며 Mini Assembly 가 Capsule 압력손실계수에 영향을 많이 주는 요소인 것으로 나타났다. 정상운전 중 OR 을 통해 흐르는 수력적 인자들을 표 3 에 나타내었다. 표 3 에서 정상상태에서의 유량은 7.1 kg/s 이며 이는 노심 한계치 12.7 kg/s 에 대해 45%의 여유를 갖으며 하나로 제한 조건을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 2. Pressure Loss Coefficient of Each Component (Mass Flow-rate = 7 kg/s)

Component	Pressure Loss Coefficient	Fraction (%)
Capsule Inlet	0.494	12.5
Support Tube	0.025	0..6
Cooling Block	0.384	9.7
Mini-elements	0.038	0.96
Grapple Head	0.004	0.1
Lower End Plate	0.451	11.4
Lower Housing	0.634	16.0
Cooling Block	0.42	10.6
Upper Housing	1.14	28.8
Upper End Plate	0.345	8.7
Expansion to Housing	0.029	0.73
Total	3.964	100

Table 3. Coolant Flow-rate at HANARO Design Criteria (200 kPa)

Parameter	AFA Capsule	DUPIC Capsule
Dynamic Pressure, [kPa]	50	77
Reynolds Number	123000	150000
Mass Flow-rate, [kg/s]	7.1	8.8

4. 결론

신형핵연료 조사시험용 Capsule 의 압력손실 모델을 개발하고 기존 측정자료와 비교하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 압력손실 모델은 기존 측정치에 비해 약 4 % 높게 예측하는 것으로 나타났으나 형상 개발을 위한 설계 계산이나 형상의 최적화를 위한 도구로서 적절한 것으로 평가된다.
2. 하나로 정상운전 시 신형핵연료 Capsule 을 통해 흐르는 유량은 7.1 kg/s 로 하나로 제한조건 12.7 kg/s 의 45% 여유도를 갖으며 만족하는 것으로 나타났다.
3. 본 연구에서 개발된 모델은 Capsule 외벽과 OR 내벽을 통해 흐르는 우회류가 존재하지 않는 다는 가정 아래 사용되었으나 Lower End Plate 나 Upper End Plate 의 외경이 감소하는 설계 변경이 발생할 경우 간극을 통한 우회류를 고려하기 위해 모델의 개선이 필요할 것으로 생각된다.

NOMENCLATURES

DUPIC	Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU Reactors	
OR	Outer Reactor	
PWR	pressurized water reactor	
A	flow area	
[m^2]		
D	diameter	[m]
K	stagnation pressure loss coefficient	
L	friction length	[m]
m	mass flow-rate	[kg/s]
P	static pressure	[Pa]
Re	Reynolds number	
V	Velocity	[m/s]

GREEK LETTERS

Δ	difference	
ρ	density	[kg/m^3]
ν	kinematic viscosity	[m^2/s]
λ	friction factor	

SUBSCRIPT

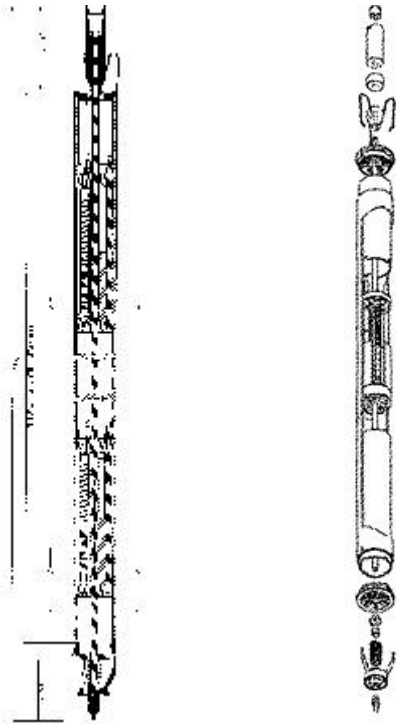
cb	cooling block
inlet	capsule inlet
epl	lower end plate
epu	upper end plate
f	friction
gh	grapple head
h	hydraulic
hl	lower housing
hu	upper housing
l	local
m	measurement
me	mini-element
r	reference
st	support tube
1	inlet
2	outlet

후기

본 연구는 과학기술부 원자력 연구 개발 중장기 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

1. Yang Y. K., et al., "Measurements of Subchannel Velocity and Pressure Drop for HANARO Fuel Elements," KAERI/TR-735-96 (1996)
2. Jung H. J., "Design and Safety Analysis Report for Irradiation of DUPIC Fuel," KAERI/TR-1157/98 (1998)
3. Hoerner, S. F., "Fluid Dynamic Drag," 2nd edition Published by the Author, (1965)
4. Idelchik, I. E., "Handbook of Hydraulic Resistance," 3rd edition Published by Begell House, (1996)
5. Flank M. White, "Fluid Mechanics," 3rd edition Published by McGraw-Hill Book Co. (1995)



(A) Advanced PWR (B)DUPIC

Figure 1. Configuration of Capsules

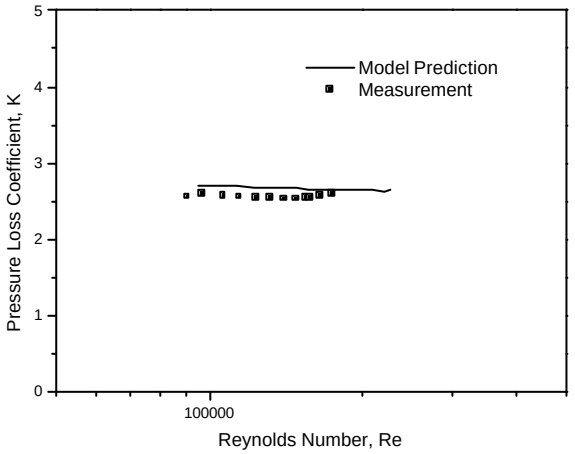


Figure 2. Comparison of Pressure Loss Coefficient between Measurement and Prediction of DUPIC Capsule