2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

신형핵연료 조사시험용 캡슐의 다수로 압력손실 모델 개발

A Multi Channel Pressure Loss Model for Irradiation Capsule of Advanced PWR Fuel

오동석, 김대호, 전태현
한국원자력연구소
대전광역시 유성우체국 사서함 105호

요약

신형핵연료 소결체에 대한 하나로 조사시험용 Capsule 설계를 위해 Capsule 내 우회유량 평가를 위한 다수로 압력손실 모델을 개발하였다. 이 모델은 기존 문헌에서 제공되는 단순화된 형상에 대한 모델들을 Capsule 각 형상 요소에 적용시키고 자유 유동 원리에 의해 요소 별 압력손실계수를 중첩시킨 것이다. 제안된 모델의 압력손실계수는 기존의 측정치와 비교했을 때 4 % 낮게 예측하는 것으로 나타났으나 Capsule 설계 단계에서 기하형상 최적화를 위한 도구로는 적절한 것으로 판단되었다. 개발된 모델을 하나로 수력적 제한 조건에서 적용한 결과, 후보 Capsule 에서 유량은 8 kg/s 이며 이 때의 우회유량은 8.8 % 인 것으로 나타났다. 따라서 신형핵연료 조사시험용 캡슐은 하나로 수력적 제한조건에 대해서는 37 %의 여유를 갖으며 만족하는 것으로 나타났다.

Abstract

A multi channel pressure loss model is developed to estimate the flow condition in the simulated advanced PWR fuel capsule. The proposed model is superposed on the basis of free flow principle by using pressure loss models for simple geometries presented in open literatures. Through the comparison between the experimental data and the predictions, the proposed model turns out to underpredict the pressure loss by about 4 %. So, the model is suitable as a tool for the geometry design in capsule design phase. According to the prediction results for HANARO capsule, the flow rate at the hydraulic design criteria condition is 8 kg/s with 8.8 % bypass flow fraction. It means that the candidate capsule satisfies the HANARO hydraulic design criteria with the 37 % 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 Capsule의 기하형상 결정시 하나로 노심의 유량 확보를 위해 Capsule이 장전되는 OR(Outer Reactor)홀에서의 압력손실은 200 kPa 이상이어야 하며 Capsule 내의 신형핵연료 소결체를 충분히 냉각 시킬 수 있는 유량을 확보하여야 한다는 수력적 제한 조건을 만족하여야 한다. 만족여부를 확인하기 위해 먼저 Capsule의 압력손실을 예측하고 이로부터 Capsule의 유량과 우회유량을 평가하는 작업이 필요하다.

하나로에 사용되는 핵연료 및 Capsule은 형상이 매우 복잡하기 때문에 압력손실은 주로 실험을 통해 구해졌으며 모델에 대한 예측은 신형핵연료 조사시험용 캡슐 초기 기하형상 결정 단계에서 이루어졌다.

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 18봉 및 36봉을 갖으며 정격운전 중 핵연료 채널 압력 손실은 18봉 및 36봉 핵연료 집합체에 대해 각각에 대해 214 kPa 및 205 kPa로 측정되었다. Jung[2]은 DUPIC(Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU Reactors) Capsule이 하나로 수력 설계한계를 만족여부를 확인하기 위해 유량이 변화할 때 Capsule 전체 압력 손실을 측정하였다. 시험 유량 범위는 5에서 10 kg/s 이며 유량 온도는 하나로 노심의 입출구 온도인 35/45 °C의 평균인 40 °C이다. 압력강하 실험 결과 약 200 kPa의 압력손실을 유발시키는 OR 유량은 8.8 kg/s인 것으로 측정되었다. Oh[3]은 DUPIC Capsule에 대한 압력손실 모델을 개발하고 기존 실험자료와 비교 검증하였으며 이 모델을 이용하여 신형핵연료 조사시험용 캡슐의 압력손실을 예측하였다. 여기서 사용된 압력손실 모델은 냉각재가 Capsule의 내부로 만 흐르며 HANARO OR과 Capsule의 외벽 사이로는 유량이 흐르지 않는 다고 가정하였다. 그러나 신형핵연료 조사시험용 캡슐 기하 형상 최적화과정에서 Capsule 외벽과 OR 내벽 사이의 유체 유인 진동에 의한 서로 간의 간섭을 감소시키기 위해 Capsule 외벽 턱의 두께를 감소시킴에 따라 OR Capsule 과의 간격을 넓어지고 이에 따라 외벽을 통해 흐르는 우회유량에 대한 평가가 요구되었다.

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 n은 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_i는 요소 압력손실 그리고 r는 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.

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

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

본 연구는 신형핵연료 소결체의 노내 조사용 시험 Capsule의 수력적 인자를 계산하기 위해 압력손실계수 예측 모델을 제안하고 이를 통해 하나로 정상 운전 조건에서 Capsule 내로 흐르는 유량과 우회류량을 계산함으로써 신형 핵연료 Capsule의 하나로 설계한계 만족성 여부를 평가하였다.

2. 모델개발

2.1 다수로 모델

Capsule의 기하형태는 그림 1의 (A)와 같다. 집합체는 Rod Tip, Guide 등으로 구성된 Capsule 입구 부분과 Lower End Plate, Lower Housing, Housing Support, Cooling Block, Fuel Rod, Upper Housing, 및 Upper End Plate로 구성된 Capsule 몸통과 Grapple Head 등으로 구성된 Capsule 출구로 구성된 되어있다. OR 입구를 통해 들어오는 유량은 Lower

End Plate 입구에서 Capsule 내부로 흘러가는 주류와 Capsule 외벽과 OR 내벽을 통해 흐르는 우회류로 나누어지며 Upper End Plat를 지나며 합류하여 OR 출구로 나간다. 그림 2는 Capsule에서의 유로를 개략적으로 보여주고 있다. Capsule 입구에서는 단일 유로를 형성하며 Capsule 몸통 부분에서 몸통 내부로 흐르는 유로와 외부로 흐르는 유로로 갈라진 평행 계통(Parallel System)을 이루며 Capsule 출구에서는 두 유로가 합쳐진 단일 유로를 형성한다. 유로 입구 및 출구에서 유량과 몸통 내외부를 통해 흐르는 유량은 동일하며 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{inlet} = Q_{outlet} = Q_{main} + Q_{bypass} \qquad (4)$$

Capsule 총압손실은 유로 입구 압력손실과 유로 출구 압력손실 및 몸통에서의 압력손실의 합으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_{capsule} = \Delta P_{inlet} + \Delta P_{main} + \Delta P_{outlet} \qquad (5)$$
$$\Delta P_{capsule} = \Delta P_{inlet} + \Delta P_{bypass} + \Delta P_{outlet}$$

다수로에서 기하형상과 총 유량이 주어지고 각 수로의 유량과 압력손실계수은 그림 3과 같은 과정에 의해 구할 수 있다. 먼저 주어진 유량과 기하형상 조건에서 추정된 우회유량에 의해 각 요소의 압력손실계수를 구하고 Capsule 몸통 주수로에서의 압력손실과 우회 수로에서의 압력손실을 구한다. 주수로와 우회 수로의 압력손실을 비교해 차이가 나면 우회유량을 변화시켜서 기존의 과정을 반복하고 두 압력손실이 동일하면 수로 입 출구에서 압력손실을 계산하고 식 (5)에 의해 Capsule 압력손실을 계산한 다음 식(6)에 의해 Capsule 총압손실이 계산된다.

$$K_{capsule} = \Delta P_{capsule} / (\frac{1}{2} \quad r \quad V_{cb}^2) \qquad (6)$$

2.2 요소 별 압력손실계수

상기 절에서 구분된 영역인 Capsule의 입구, 출구, 주수로, 및 우회수로에서의 압력손실계수는 모델에 의해 구해진 각 요소에서 압력손실계수를 자유유동원리(free flow principle)[4]에 의해 중첩 시킴으로써 구해진다. 각 요소의 압력손실계수는 기존 단순 형상에 대해 구해진 압력손실계수 식을 단순화된 Capsule의 형상에 적용시킴으로써 구해지는데 요소별 압력손실 모델 식은 표 1과 같다[5].

입구 압력손실계수 (K_{inlet}) :

Capsule의 입구 영역은 OR의 입구와 Capsule을 고정시키는 장치 및 Capsule의 Rod Tip 및 Guide를 포함하는 매우 복잡한 형상이다. 신형핵연료 Capsule의 입구 형상은 참고문헌 [1]의 18개의 봉으로 이루어진 봉다발의 입구형상과 동일하도록 설계되었으며 압력손실계수는 기존의 실험 결과로부터 얻을 수 있다. 이 때 측정된 정압 손실은 베르누이 정리 [6]를 이용하여 식(7)과 같이 입구영역의 총 압 손실로 전환된다.

$$\Delta P_{inlet} = \Delta P_{inlet}^{m} + \frac{1}{2 \cdot r}[(\frac{m}{A_1})^2 - (\frac{m}{A_2})^2] \qquad (7)$$

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

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

Capsule 내 Lower Support Tube, Cooling Block, Mini-element, Upper Support Tube, 및 Grapple Head 와 Capsule 외부 벽면 OR 내부 벽면에서의 유동은 난류 강도가 높은 난류 유동으로 보고 각 요소의 마찰 계수는 Blasius 형태의 마찰 계수 식[6]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 ($K_{hl}, K_{hu}, K_{eplo}, K_{epuo}$) :

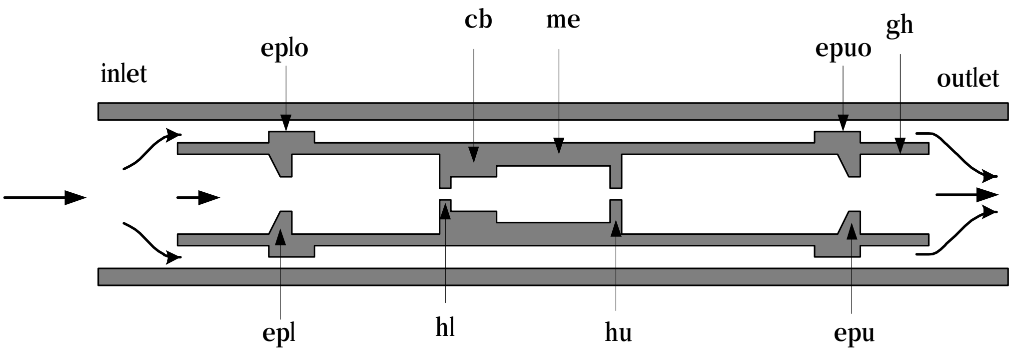
Capsule 내 Lower Housing 및 Upper Housing과 Capsule 외부의 Lower End Plate 및 Upper End Plate의 기하형상은 일정한 두께를 갖은 판에 비교적 유로 폐쇄율이 낮도록 천공된 형태로 이 요소들 전후에서의 유동형태는 오리피스 (Thick Edged Orifice) 주변에서의 유동형태와 동일하다고 가정하고 오리피스에 대한 압력손실계수 식을 이용하여 요소의 압력손실계수를 계산하였다.

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 입구 수접 부분이 모따기로 처리되었다. 따라서 압력손실계수는 오리피스 (Thick Edge Orifice) 압력손실계수 모델 중 유로 축소에 의한 영향을 반으로 감소시킴으로써 구하였다.

Table 1. Pressure Loss Coefficient Model for Each Component

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

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 1 (a)와 같다. DUPIC Capsule에 대한 측정치와 모델의 예측치는 그림 4와 같다. 그림 4에서 Reynolds 수 변화에 따른 모델 예측치의 변화는 시험치와 유사한 것을 볼 수 있으며 제안된 모델은 DUPIC Capsule 시험치에 비해 4% 낮게 예측하는 것으로 나타났다. 이는 Capsule의 복잡한 기하형상 내에서 복잡한 유동을 단순화된 모델을 이용하여 계산함에 따라 오차들이 수반된 것으로 생각된다. 비록 제안된 모델이 실험치에 비해 낮게 예측하나 신형핵연료 Capsule 개발단계에서 Capsule의 형상 개발을 위한 설계 계산이나 형상의 최적화를 위한 도구로서 적절한 것으로 평가된다.

DUPIC Capsule에 대한 우회유량 분율은 그림 5와 같다. 그림 5에서 우회유량 분율은 Reynolds 수가 증가할수록 증가하며 HANARO 제한 조건인 Capsule에서의 압력손실이 200 Kpa인 경우 우회유량은 6.8% 인 것으로 나타났다.

4. 신형핵연료 Capsule 후보 형상에 대한 수력적 평가

그림 1의 (b)의 형상의 신형 핵연료 Capsule에 대해서 제안된 모델을 이용 OR에서의 압력손실이 200 kPa 일 경우 노심 요소별 압력손실계수를 계산하고 표 2에 나타내었다. Capsule의 전체 압력손실계수는 4.8 인 것으로 나타났으며 Mini Assembly의 Housing이 Capsule 압력손실계수에 영향을 많이 주는 요소인 것으로 나타났다. 정상운전 중 OR을 통해 흐르는 수력적 인자들을 표 3에 나타내었다. 표 3에서 정상상태에서의 유량과 우회유량 분률은 각각 8 kg/s 및 8.8 % 인 것으로 나타났으며 이는 노심 한계치 12.7 kg/s에 대해 37 %의 여유를 갖으며 하나로 제한 조건을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 2. Pressure Loss Coefficient of Each Component (Mass Flow-rate = 8 kg/s)

Component	Pressure Loss Coefficient	Fraction (%)
Capsule Inlet	0.496	10.
Support Tube	0.029	0.6
Mini-elements	0.250	5.2
Grapple Head	0.012	0.3
Lower End Plate	0.608	12.6
Lower Housing	0.939	19.5
Cooling Block	0.337	7.0
Upper Housing	1.714	35.6
Upper End Plate	0.384	8.0
Expansion to Housing	0.040	0.8
Total	4.807	100

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

Parameter	AFA Capsule	DUPIC Capsule
Dynamic Pressure, [kPa]	41	82
Reynolds Number	150000	160000
Mass Flow-rate, [kg/s]	8.0	9.1
Bypass Fraction, [%]	8.8	6.2

4. 결론

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

1) 압력손실 모델은 기존 측정치에 비해 약 4 % 낮게 예측하는 것으로 나타났으나 형상 개발을 위한 설계 계산이나 형상의 최적화를 위한 도구로서 적절한 것으로 평가된다.
2) 하나로 정상운전 시 신형핵연료 Capsule을 통해 흐르는 유량 및 우회유량 분률은 각각 8 kg/s 및 8.8 %인 것으로 나타나 하나로 제한조건 12.7 kg/s의 37% 여유도를 갖으며 만족하는 것으로 나타났다.

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]
PL	pressure loss	
PLC	pressure loss coefficient	
Q	flow-rate	[kg/s]
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

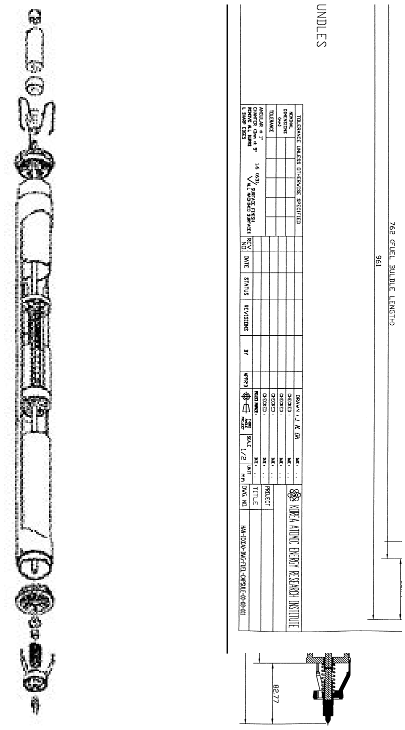
cb	cooling block
inlet	capsule inlet
epl	lower end plate
eplo	lower end plate in bypass channel
epu	upper end plate
epuo	upper end plate in bypass channel
f	friction
gh	grapple head
h	hydraulic
hl	lower housing
hu	upper housing
l	local
m	measurement
me	mini-element
r	reference
st	support tube
1	inlet
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. Oh D. S., et al. "A Pressure Loss Model for Irradiation Capsule of Advanced PWR Fuel," KNS autumn meeting Taejon, (2000)
4. Hoerner, S. F., "Fluid Dynamic Drag," 2nd edition Published by the Author, (1965)
5. Idelchik, I. E., "Handbook of Hydraulic Resistance," 3rd edition Published by Begell House, (1996)
6. Flank M. White, "Fluid Mechanics," 3rd edition Published by McGraw-Hill Book Co. (1995)



(A) DUPIC　　　　**(B) Advanced PWR**

Figure 1.　Configuration of Capsules

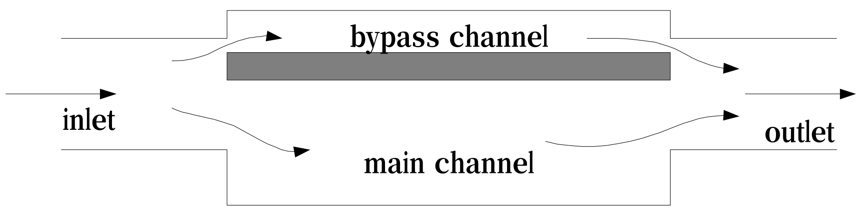


Figure 2.　Schematic Diagram of Analysis Channel

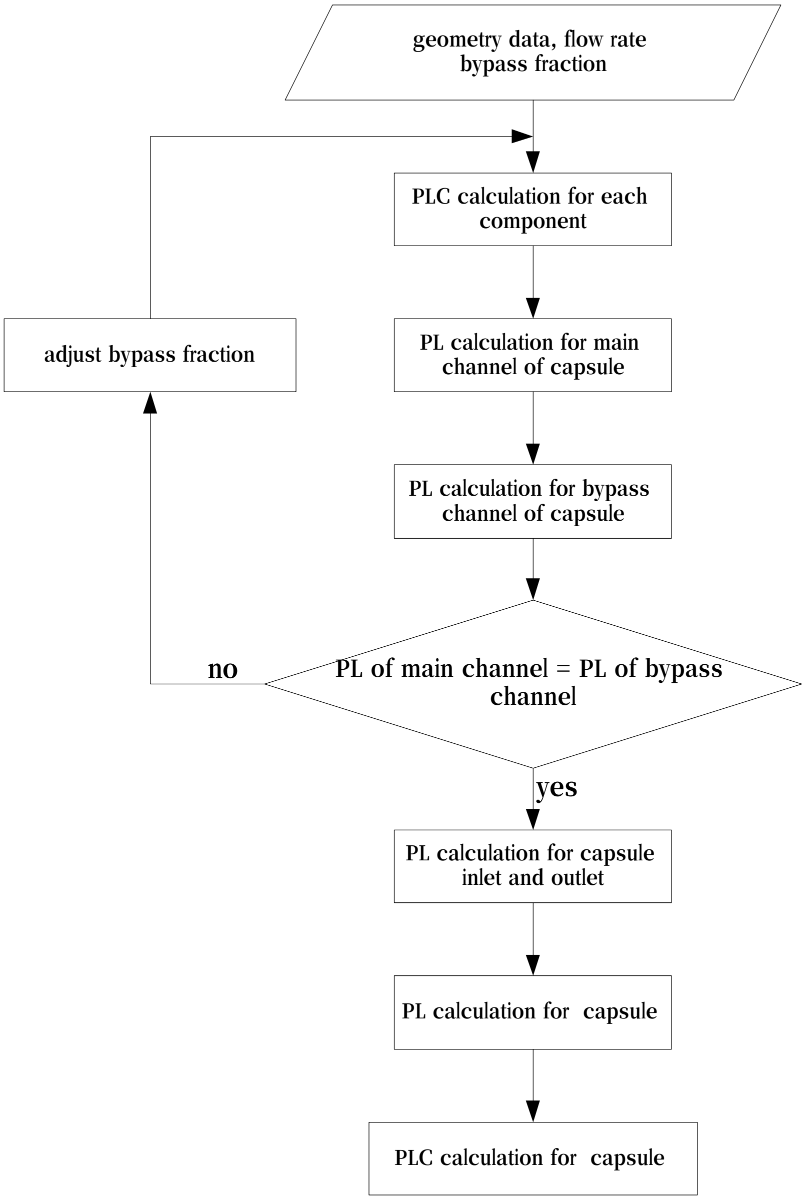


Figure 3. Pressure Loss Coefficient Calculation Procedure

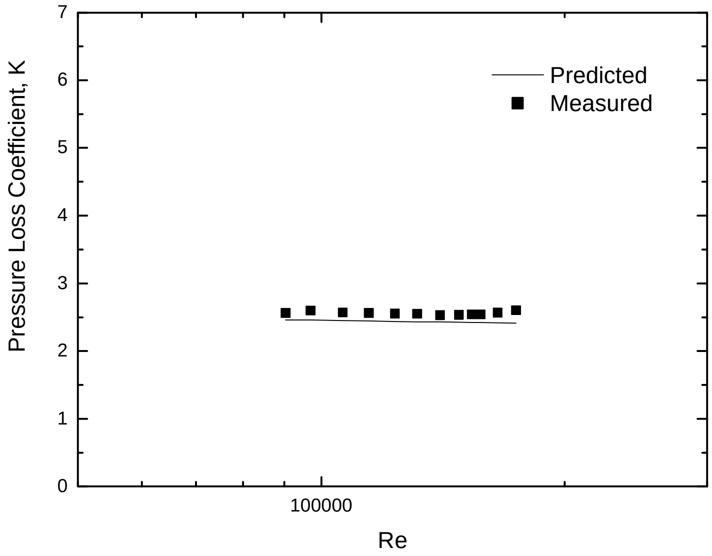


Figure 4. Comparison of Pressure Loss Coefficient between Measurement and Prediction of DUPIC Capsule

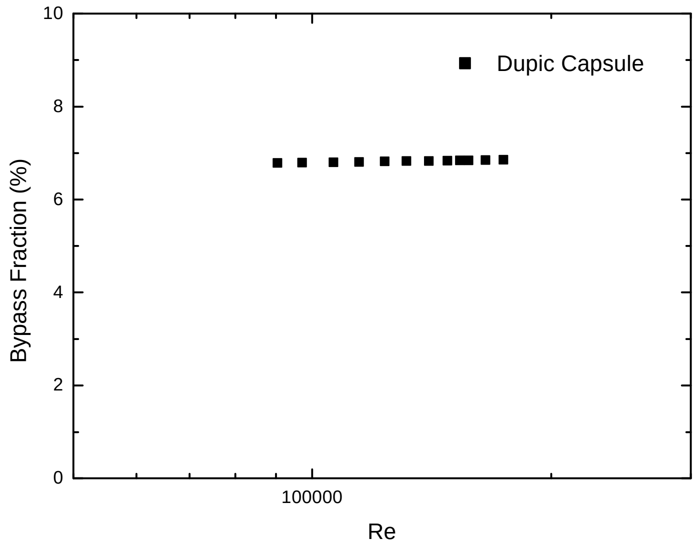


Figure 5. Bypass Fraction of DUPIC Capsule