’99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

덕트형 지지격자 압력손실 모델

A Pressure Drop Model for Duct Type Spacer Grid

오동석, 인왕기, 방제건, 신창환, 전태현

한국원자력연구소
대전광역시 유성우체국 사서함 105 호
305-600

요약

단상유동에서 덕트형 지지격자 압력손실계수 예측을 위해 평행 다수로 모델과 요소별 압력손실 모델을 개발하였다. 평행 다수로 모델은 에너지 보존식과 운동량 방정식으로부터 유도되었으며 요소별 압력손실 모델은 자유 유동 원리에 의해 임의 수로의 요소 별 압력손실계수를 더한다. 수로 내 각 요소의 압력손실계수는 기존의 문헌에서 제공되었다. 시험자료와 비교한 결과 제안된 모델은 지지격자 압력손실 자료를 잘 예측하며 지지격자 개발 단계에서 기하형상 최적화를 위한 도구로 적절한 것으로 판단되었다.

Abstract

A multiple parallel flow path model and pressure loss model of the each component are proposed to predict the pressure loss coefficient of the duct type grid in single-phase flow. The multiple parallel flow path model is generated by the energy conservation and momentum equations. The channel specific component pressure loss coefficients are combined on the basis of the free flow principle. The available literatures provide pressure loss coefficient needed for each component in a channel. The proposed model reasonably predicts available grid pressure loss data, therefore the model is suitable as a tool for the grid optimization in grid development phase.

1. 서론

지지격자는 봉과 봉 사이의 요구되는 간격을 유지하며 부가적으로 냉각재 혼합을 통해 열적 여유도 향상시키는 핵연료집합체 주요 요소이다. 냉각재가 지지격자를 통과 할 때 유로의 변화 그리고 유로 내 장애물, 냉각재와 벽면간의 마찰 등으

로 인해 압력손실이 발생한다. 압력손실 증가는 노심 내 냉각재 유량 확보를 위한 펌프 용량 증가를 유발시키기 때문에 지지격자의 기계적 성능과 열적 혼합 능력을 저해 하지 않는 범위 내에서 압력손실이 작은 지지격자 개발에 대한 연구가 활발히 이루어지고있다. 교체노심에서 신연료 지지격자 기하형상이 기존 연료의 것과 차이날 경우 기하형상 차로 인한 압력손실 차는 교차류 유인 핵연료봉 프레팅 마모를 발생시키며 프레팅 마모는 핵연료 봉 손상의 주 원인이 된다. 따라서 새로운 지지격자 개발 시 압력손실 차를 최소화 시키려는 노력과 함께 이 작업의 일환으로 지지격자 압력손실에 대한 정확한 예측이 요구되어왔다.

PWR 상업용 발전소에서 사용되고있는 지지격자는 그림 1 에서와 같이 크게 두 가지 형태로 구분된다:

1) 격자판을 가로 세로로 다수 배열하고 그 교차차점을 용접함으로써 봉을 받아들일 수 있는 방을 형성하고 방 벽면으로부터 돌출된 딤플과 스프링에 의해 봉을 지지하는 격자판형 지지격자
2)두 겹의 격자판을 가로 세로 다수 배열함으로써 축방향을 따라 수로를 형성하며 수로 상부는 축방향에 대해 경사지도록 함으로써 회전유동을 발생시키고 수로의 벽면을 바깥쪽으로 휨으로써 스프링 역할을 하는 수로형 지지격자

1) 형태의 지지격자는 지지격자의 일반적인 개념으로 PWR 뿐만 아니라 BWR 용 핵연료에서도 사용되고있으며 2) 형태의 지지격자는 80 년대 후반에 개발된 개념으로써 기계적 열적 성능이 우수함에 따라 새로 개발되는 지지격자에는 두 겹 격자판 개념의 적용이 시도되고있다.

지지격자는 형상이 복잡하기 때문에 압력손실은 주로 실험을 통해 구해졌다. 비압축 등온조건에서 임의의 구간에서 측정된 정압 손실은 봉다발의 마찰압력손실과 지지격자의 형상압력손실의 합으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = \Delta P_o + n\Delta P_{sg} \qquad (1)$$

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

$$C = \frac{\Delta P_{sg}}{\frac{1}{2} r V_o^2} \qquad (2)$$

여기서 ΔP_{sg} 는 지지격자 압력손실 그리고 r 는 유체의 밀도, V_o 는 맨 봉다발에서 유속이다.

지금까지 수행된 지지격자 압력손실계수 모델에 관한 연구를 보면 다음과 같다. Rehme(1973)는 FBR 핵연료 집합체용 격자판형 지지격자에 대한 모델을 수정항력계수와 유로 폐쇄율의 곱으로 나타내고 Reynolds 수가 10^5 보다 큰 경우 삼각형과 사각형 배열 연료봉 지지격자에 대한 수정항력계수는 6 과 7 사이에 존재한다고 제안하였다. Cevolani(1995)는 수정항력계수를 넓은 Reynolds 영역에서 편리하게 사용할 수 있도록 Rehme 모델의 수정항력계수를 상관식 형태로 나타내었다. Kim(1993)은 혼합 날개가 부착되지 않은 지지격자에 대해 이론에 근거한 해석적 모델을 개발하고 FBR 용 지지격자와 같이 단순한 형태의 지지격자 시험자료와 비교하였다. Kim 모델은 FBR 용 지지격자와 같이 단순한 지지격자에 제한된다. Oh(1998)는 지지격자

에 작용하는 수력하중의 평형식으로부터 PWR 용 지지격자 압력손실모델을 제시하였으며 혼합날개에 대한 모델도 간단한 방법으로 제시하였다.

현재까지 개발된 모델은 대부분 격자판형 지지격자에 관한 것으로 덕트형 지지격자에 대해선 아직 개발되지 않았다. 격자판형 지지격자에 대한 모델을 바로 덕트형 지지격자에 적용하기엔 지지격자 내의 유동 형태와 지지 기구 차이에 따른 문제점들이 존재한다. 따라서 본 연구에서 두 겹의 격자판으로 형성된 덕트형 지지격자에 대한 압력손실모델을 개발하고 기존 시험 자료들과 비교하였다.

2. 모델개발

수로형 지지격자 압력손실계수는 먼저 봉다발 부수로를 지지격자 기하형상에 따라 세분화하고 각각의 수로에 대해 에너지 평형식과 운동량 방정식을 적용함으로써 전체적 수로에 대한 압력손실계수식인 평행 다수로 모델을 만들었다. 이 모델에서 요구되는 각 수로의 요소별 압력손실계수는 별도의 요소별 압력손실모델로부터 구해진다. 수로형 지지격자는 두 겹의 격자 판에 의해 제작됨으로써 이웃수로의 간섭을 받지않으며 이웃 수로와 평행한 수로를 형성한다. 따라서 수력적 해석 시 수로를 기하형상 특성에 따라 구분하고 독립적으로 고려하는 것이 유체역학적인 측면에서 바람직하다. 따라서 전형적인 수로를 그림 2 에서와 같이 세분화하였다. 수로는 주 수로(I)와 주수로와 인접한 겝수로(II), 안내관 주변 수로(III, IV), 외각 수로(V, VI), 모서리 수로(VII) 등으로 구분된다.

2.1 평행 다수로 모델

앞에서 언급된 세분화된 수로는 그림 3 과 같이 개략적으로 나타내어질 수 있다. 그림 3 에서 b 와 c 지점 사이의 3 개의 독립된 수로는 세분화된 수로를 대표한다. 각 수로에 대해 모델 개발을 위해 아래와 같은 가정을 사용하였다.

- 그림 3 에서 a 와 d 지점에서 반경방향 속도 분포는 균일하다.
- 그림 3 에서 a 와 c, d 지점에서 반경방향으로 균일한 정압 분포 P 를 갖는다.

위의 가정을 그림 3 의 수로에 적용하고 에너지 평형식을 적용하면 식(3)과 같다.

$$P_a + \frac{\rho}{2}V_a^2 = P_c + \frac{\rho}{2}V_{c,i}^2 + K_{ac,i}^b \frac{\rho}{2}V_{b,i}^2 \quad ; i = 1, \ldots, N \qquad (3)$$

여기서 i 는 수로 번호, $K_{ac,i}^b$ 는 a 와 c 사이의 임의 수로에서 b 지점 유로 면적을 기준면적으로 했을 때 정체압력손실계수(stagnation loss coefficient)를 나타낸다. 각 수로가 이웃 수로와 독립되어있으므로 c 지점에서의 속도는 $V_{c,i} = V_{b,i}\frac{A_{b,i}}{A_{c,i}}$ 와 같이 표현되며 이 식을 식(3)에 적용하면 식(4)와 같다.

$$P_a + \frac{\rho}{2}V_a^2 - P_c = \frac{\rho}{2}\left[K_{ac,i}^b + \left(\frac{A_{b,i}}{A_{c,i}}\right)^2\right]V_{b,i}^2 \quad ; i = 1, \ldots, N \qquad (4)$$

이때 a 지점과 b 지점에서의 속도는 식(5-a)와 식(5-b)의 관계로부터 식(5-c)와 같이

표현된다.

$$A_b = \sum_{i=1}^{N} A_{b,i} \quad \text{(5-a)} \qquad A_c = \sum_{i=1}^{N} A_{c,i} \quad \text{(5-b)} \qquad V_b = V_a \frac{A_a}{A_b} \quad \text{(5-c)}$$

a 와 b 지점에 연속방정식은 다음과 같으며,

$$A_a V_a = \sum_{i=1}^{N} A_{b,i} V_{b,i} \tag{6}$$

식(6)과 식(5-c)로부터 식(7)과 같은 관계식이 생산된다.

$$1 = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{A_{b,i}}{A_b} \right) \left(\frac{V_{b,i}}{V_b} \right) \tag{7}$$

구간 a 와 c 사이의 정압 손실 계수를 아래 식과 같이 정의할 경우

$$P_a - P_c = C_{ac}^{b} \frac{1}{2} V_b^2 \tag{8}$$

식(4)과 식(7), 식(8)로부터 구간 a 와 c 사이의 압력손실계수는 아래식과 같이 표현된다.

$$C_{ac}^{b} = \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^{N} \frac{A_{b,i} / A_b}{\sqrt{K_{ac,i}^{b} + \left(\frac{A_{b,i}}{A_{c,i}} \right)^2}} \right]^2} - \left(\frac{A_b}{A_a} \right)^2 \tag{9}$$

지지격자 출구에서 라운드나 모따기 영향을 무시하고 각각의 출구의 유동이 평행한 제트유동이라고 가정하고 운동량 방정식을 c 와 d 지점사이에 적용하면 식(10)과 같은 식이 주어진다.

$$P_c - P_d = \frac{\rho}{A_d} \sum_{i=1}^{N} A_{c,i} V_{c,i} (V_d - V_{c,i}) \tag{10}$$

식 (8)과 동일한 형태로 c 와 d 사이의 정압 손실 계수를 정의하고 식(10)에 적용하면 구간 c 와 d 사이의 압력손실계수는 식 (11)과 같이 표현된다.

$$C_{cd}^{b} = 2 \left[\left(\frac{A_b}{A_d} \right)^2 - \frac{A_b}{A_d} \sum_{i=1}^{N} \frac{A_{b,i}}{A_b} \left(\frac{V_{b,i}}{V_b} \right)^2 \frac{A_{b,i}}{A_{c,i}} \right] \tag{11}$$

식(9)과 식(11)과 같이 표현된 구간 a 와 c 사이의 압력손실계수 C_{ac}^{b} 와 구간 c 와 d 사이의 압력손실계수 C_{cd}^{b} 는 동일한 기준 유로면적 A_b 에 대해 유도됨에 따라 구간 a 와 d 사이의 종합적 정압손실계수는 두 계수의 합으로써 간단히 나타낼 수 있다.

$$C_{ad}^{b} = C_{ac}^{b} + C_{cd}^{b} \tag{12}$$

2.2 요소별 압력손실계수 모델

평행 다수로 모델로부터 지지격자 압력손실계수를 구하기 위해 먼저 각각의 수로의 압력손실계수를 알아야 한다. 각 수로의 종합적 압력손실계수는 자유유동원리 (free flow principle)에 의해서 식(13)과 같이 결합된다[6].

$$K_{ac}^{b} = K_f + K_{un} + K_{ai} + K_{ad} + K_{dh} + K_{ic} + K_{ah} + K_{aht} + K_{db} + K_{df} \qquad (13)$$

여기서 우변 각 항의 의미와 압력손실 모델식은 표 1 에 제시되었다[6,7]. 압력손실 모델식은 일반적인 기하형상에 대해서 생산된 것으로서 덕트형 지지격자에 적용하기 위해 각 요소와 유사한 형상의 모델식들을 선택하였다.

지지격자 내 마찰(K_f) 압력손실계수:

핵연료집합체 내 봉다발에서는 난류 강도가 높은 유동으로 지지격자 경계층도 난류유동이라 보고 지지격자 내 마찰 압력손실계수를 Blasius 형태로 표현하였다. 마찰계수 식의 계수는 참고문헌 [5]에서 제시된 값으로 표면 조도를 고려하여 핵연료봉과 지지격자에 대하여 구별하여 적용되었다.

상류 너겟(K_{un}), 유로 확대(K_{ai}), 유로 축소(K_{ad}) 및 출구 텝(K_{aht}) 압력손실계수:

형상압력손실은 Reynolds 수의 영향을 받지않으며 기하형상 특성에 따라 결정되는 항력계수로부터 구해질 수도 있다. 상류 너겟의 항력계수는 너겟의 형상이 탄환 모양과 유사하다고 보고 그래프 형태로 제시된 3 차원 탄환형상의 항력계수 표로부터 종횡비를 고려하여 구해졌다. 유로 확대에 의해 발생하는 소용돌이류(wake)는 입구 모양이 유선형인 2 차원 사각단면의 후방에서 발생하는 소용돌이류와 유사하다고 보고 유로 확대에 의한 항력 계수를 결정하였다. 유로 축소에 의한 항력계수는 무딘 입구형상의 2 차원 사각단면의 전방에서의 항력계수와 동일하다고 보았다. 출구 텝에서의 유동은 장애물 후방에서 발생하는 소용돌이류간의 간섭이 없는 평판에서의 유동과 유사하다고 보고 이로부터 항력계수를 구하여졌다.

하류 너겟(K_{dn}) 및 입구 유로(K_{ic}) 축소 압력손실계수:

지지격자 상단에 위치한 너겟에서의 압력손실계수는 너겟에 의한 유로 축소의 영향을 고려하여 축소 유로에 대한 압력손실계수 식으로부터 구하였다. 너겟을 지난 냉각재가 팽창 할 때 발생하는 압력손실은 K_{cd}^{b} 계산에서 고려된다. 지지격자 판에 의한 지지격자 입구에서의 압력손실계수는 격자 판에 의한 유로 축소 영향을 단순히 고려함으로써 구하여졌다.

입구 텝(K_{ah}) 압력손실계수:

지지격자 입구 텝 전후에서의 유동형태는 예리한 오리피스 (sharp edged orifice) 주변에서의 유동형태와 동일하다고 가정하고 오리피스에 대한 압력손실계수 식으로부터 입구 텝 압력손실계수를 계산하였다.

수로 휨(K_{db}) 압력손실계수:

수로가 휠 때 압력손실계수는 수로의 형상을 고려하여 사각 덕트가 휠 때 압력손실계수 식으로부터 구해졌다.

유로의 점진적 확장될 때(K_{df}) 압력손실계수:

지지격자 입구 수로의 단면은 지지격자 중간 부분에서 스프링 역할을 하도록 봉쪽으로 휘어져있다. 이 경우 지지격자 중간에서 유로의 점진적 확장에 의해 압력손실이 발생한다. 유로의 점진적 확장에 의한 압력손실계수는 간단히 유로의 팽창 시 압력손실계수의 0.5 배로 가정하였다.

3. 기존 시험자료와의 비교

두 종류의 수로형 지지격자에 대한 압력손실시험 자료들을 사용하여 제안된 모델을 평가하고 결과를 비교하였다. 각 지지격자의 기하인자는 표 2 에 제시된 바와 같다. Type A은 17X17 봉배열의 Westinghouse 핵연료집합체에 설치된 지지격자이며 Type B는 14X14 봉배열의 ABB-CE 핵연료집합체에 설치된 지지격자 이다. 두 지지격자는 모두 동일한 수로 휨 각도를 갖는다.

그림 4 에서 두 지지격자 시험치에 대한 모델의 예측치를 비교하였다. 그림에서 제안된 모델은 Type A 지지격자 시험치에 대해선 8.4% 오차를 보이고있으며 Type B 지지격자 시험치에 대해선 1.4% 오차를 보이는 것으로 나타나 모델은 측정치를 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. 그러나 그림에서 Reynolds 수 변화에 따른 모델의 예측치의 변화는 시험치에 비해 완만한 것을 볼 수 있다. 노심 조건과 같은 높은 Reynolds 수 영역에서 형상 압력손실계수는 Reynolds 수에 독립적인 것을 고려해 볼 때 제안된 모델 중 마찰 압력손실 모델은 개선의 여지가 존재하는 것으로 판단된다. 비록 제안된 모델이 Reynolds 수 변화에 따른 압력손실계수의 변화를 정확히 모사하지 못한다 하더라도 신형 지지격자 개발 단계에서 수로형 지지격자 개발을 위한 설계 계산이나 지지격자 형상의 최적화를 위한 도구로서 적절한 것으로 평가된다.

Table 2. Geometric Parameters of the Duct Type Spacer Grids

Parameter	Type A	Type B
Rod Array	17×17	14×14
Rod Diameter, D[mm]	9.55	11.2
Pitch to Diameter, P/D	1.319	1.316
Grid Height, L[mm]	44.45	44.45
Strap Thickness, t[mm]	0.381	0.356
Bending Angle, δ[deg]	20	20
Number of Guide Tubes	25	5

4. 결론

수로형 지지격자에 대한 압력손실계수 모델을 에너지 평형식과 운동량 방정식에 근거하여 제시하였다. 압력손실계수 모델을 평행 다수로 모델과 평행 다수로 모델에서 요구되는 각 수로에 대한 압력손실계수 모델로 구분되며 각 수로의 압력손실계수는 자유유동원리(free flow principle)에 의하여 결합된다.

제안된 모델은 수로형 지지격자에 의해 구성된 Westinghouse 및 ABB-CE 형 집합체 압력손실측정자료와 비교 검증되었다. 비교 결과로부터 제안된 모델은 두 형태의 집합체 지지격자에 대하여 압력손실을 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. 그러나 Reynolds 수 변화에 따른 모델의 예측치의 변화는 측정치에 비해 완만한 것으로 나타나 이에 대해선 개선의 여지가 존재하긴 하나 제안된 모델은 수로형 지지격자 개발을 위한 지지격자 형상의 최적화를 위한 도구로 사용하기에는 적절한 것으로 평가되었다.

NOMENCLATURES

BWR	boiling water reactor	
PWR	pressurized water reactor	
FRB	fast breeder reactor	
A	flow area	$[m^2]$
AP	projected area	$[m^2]$
C	static pressure loss coefficient	
Dh	hydraulic diameter	[m]
K	stagnation pressure loss coefficient	
L	friction length	[m]
P	static pressure	[Pa]
PW	wetted perimeter	[m]
R	radius of curvature	[m]
Re	Reynolds number	
n	number of grids in a bundle	

GREEK LETTERS

Δ	difference	
α	duct width	[m]
β	duct length	[m]
ρ	density	$[kg/m^3]$
δ	bending angle	
e	area blocking ratio	

SUBSCRIPT

ad	area decrease
ah	inlet anti hanging tab
aht	exit anti hanging tab
ai	area increase
db	duct bending
df	diffuser
dn	downstream nugget
f	friction
ic	inlet contraction
l	local
m	grid middle level
o	bare rod
r	reference (b position in Fig. 3)
rd	rod
sd	sudden decrease
sg	spacer grid
t	tab
un	upstream nugget

후기

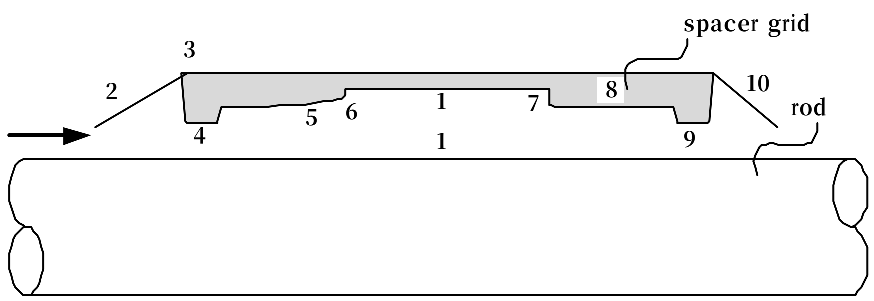
본 연구는 과학기술부 원자력 연구 개발 중장기 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

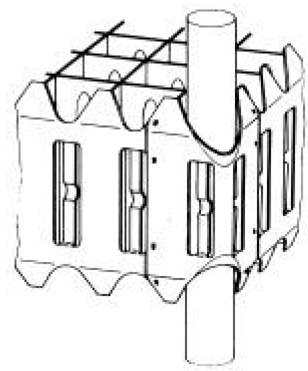
REFERENCES

1. Rehme K., "Pressure Drop Correlation for Fuel Element Spacers," Nuclear Technology, Vol. 17, 15-23 (1973)
2. Cevolani, S., "ENEA Thermal Hydraulic Data Base for the Advanced Water Cooled Reactor Analysis, IAEA 1st Research Co-ordination Meeting of CRP on Thermal Hydraulic Relationships for Advanced Water Cooled Reactors, Vienna, 5-8 (1995)
3. Kim, N. H., Lee S. K. and Moon K. S., "Elementary Model to Predict the Pressure Loss Across a Spacer Grid without a Mixing Vane," Nuclear Technology, Vol. 98, 349 – 353, (1992)
4. Oh, D. S., et al., "A Pressure Drop Model for PWR Grids," Proceedings of the KNS Spring Meeting Seoul, Korea, May (1998)
5. SPC, "SPC 17x17 (15mil) EDF HTP Pressure Drop Test in the Hermes-P Loop," E-5023-906-2, (1992)
6. Hoerner, S. F., "Fluid Dynamic Drag," 2nd edition Published by the Author, (1965)
7. Idelchik, I. E., "Handbook of Hydraulic Resistance," 3rd edition Published by Begell House, (1996)

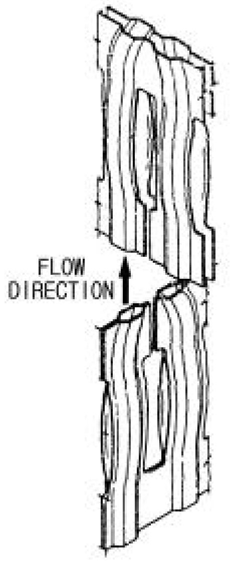
Table 1. Pressure Loss Coefficient Model for Each Component

No	Component	Model	Ref.
1	Friction, K_f	$\left(\frac{A_r}{A_l}\right)^{1.8}\left(\frac{Dh_o}{Dh_l}\right)^{-0.2}\frac{L}{4A_l}\left(0.204PW_{rd}+0.184PW_{st}\right)\left(\frac{A_r}{A_o}\right)^{0.2}$	[5]
2	Inlet anti tab, K_{ah}	$\left[0.707\cdot\left(1-\frac{A_l}{A_o}\right)^{0.375}+\left(1-\frac{A_l}{A_r}\right)^2\right]\cdot\left(\frac{A_r}{A_l}\right)^2,\ A_l=A_r-AP_t$	[7] diag. 4-11
3	Inlet contraction, K_{ic}	$0.5\cdot\left(1-\frac{A_r}{A_o}\right)^{3/4}$	[7] diag. 4-9
4	Upstream nugget, K_{un}	$0.2\cdot\frac{\varepsilon_{ng}}{\left(1-\varepsilon_{ng}\right)^2},\quad \varepsilon_{ng}=\frac{AP_{ng}}{A_r}$	[6] ch. 3 fig. 21
5	Diffuser loss, K_{df}	$0.5\cdot\left(1-\frac{A_r}{A_l}\right)^2$	[7] diag. 4-1
6	Sudden area increase, K_{ai}	$0.5\cdot\frac{\varepsilon_{ai}}{\left(\varepsilon_{ai}-1\right)^2}\left(\frac{A_r}{A_m}\right)^2,\quad \varepsilon_{ai}=\frac{A_{sd}}{A_m}$	[6] ch. 3 fig. 22
7	Sudden area decrease, K_{ad}	$0.4\cdot\varepsilon_{ad}\left(\frac{A_r}{A_m}\right)^2,\quad \varepsilon_{ad}=\frac{A_{sd}}{A_m}$	[6] ch. 3 fig. 22
8	Duct bending, K_{db}	$\left\{\left[0.316+8.65\left(\frac{Dh_r}{2R}\right)^{1.32}\left(\frac{b}{a}\right)^{0.34}\right]\mathrm{Re}^{-0.25}\left(\frac{Dh_r}{Dh_o}\right)^{-0.25}\frac{R}{Dh_r}\right\}\cdot\delta\cdot\left(\frac{V_r}{V_o}\right)^{-0.25}$	[7] diag. 4-1
9	Downstream nugget, K_{dn}	$0.5\cdot\left(1-\frac{A_l}{A_r}\right)^{3/4}\left(\frac{A_r}{A_l}\right)^2,\quad A_l=A_r-AP_{ng}$	[7] diag. 4-9
10	Exit anti tab, K_{aht}	$1.7\cdot\frac{\varepsilon_{aht}}{\left(1-\varepsilon_{aht}\right)^2},\quad \varepsilon_{aht}=\frac{AP_t}{A_r}$	[6] ch. 3 fig. 8





1) Strap Type



2) Duct Type

Figure 1. Spacer Grids

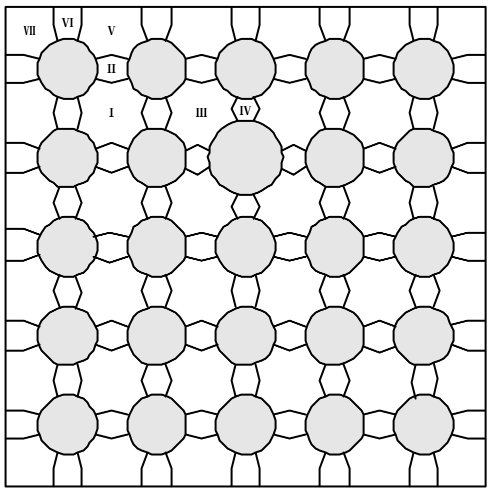


Figure 2. Subchannels for Duct Type Grid

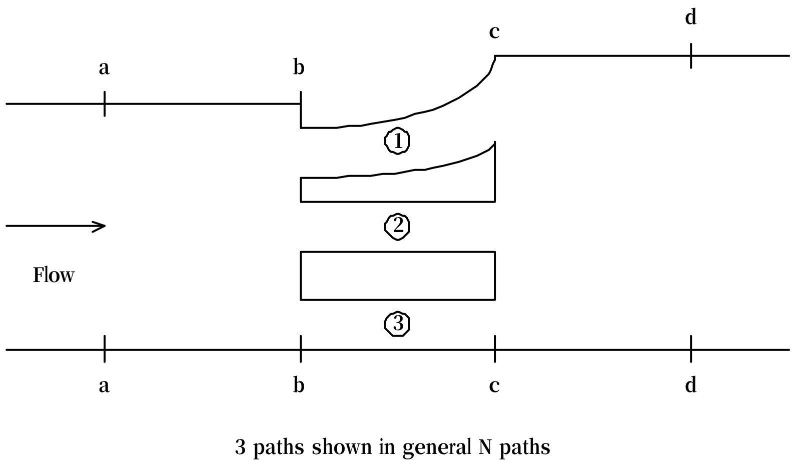


Figure 3. Multiple Parallel Flow Path

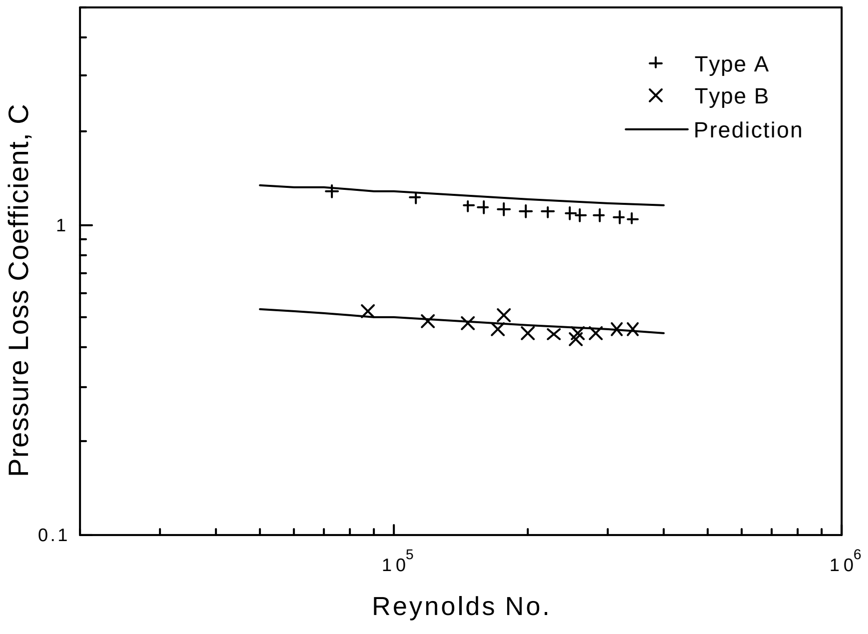


Figure 4. Evaluation of the Pressure Loss Model