

지지격자가 있는 봉다발과 축방향으로 평행한 유동의 압력손실에 관한 실험적 연구[§]

이치영^{*†} · 신창환^{*} · 박주용^{*} · 인왕기^{*}

* 경수로핵연료기술개발부, 한국원자력연구원

Experimental Study on Pressure Loss of Flow Parallel to Rod Bundle with Spacer Grid

Chi Young Lee^{**†}, Chang Hwan Shin^{*}, Ju Yong Park and Wang Kee In^{*}

* LWR (Light Water Reactor) Fuel Development Division, KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute).

(Received December 15, 2011 ; Revised April 10, 2012; Accepted April 18, 2012)

Key Words: Rod Bundle(봉다발), Spacer Grid(지지격자), Friction Factor(마찰계수), Loss Coefficient(손실계수)

초록: 지지격자가 있는 봉다발과 축방향으로 평행한 유동에서, 봉다발 마찰계수와 지지격자 손실계수를 평가하였다. 시험부는 외경 9.5 mm, 길이 2000 mm 인 봉 25 개를 5×5 정사각 구조로 배열하여 제작하였으며, 봉 중심간 거리와 봉 외경의 비는 1.35 였다. 지지격자로는 plain 지지격자, split-vane 지지격자, hybrid-vane 지지격자를 이용하였다. 지지격자가 없는 봉다발의 마찰계수는 기존 상관식과 비교적 잘 일치하였다. 지지격자가 있는 봉다발 실험의 경우, hybrid-vane 지지격자에서 봉다발 마찰계수 및 지지격자 손실계수가 가장 크게 측정되었으며, 이는 지지격자의 유동단면 막음비 증가와 혼합날개 형상에 의한 유동 교란이 증가되기 때문인 것으로 판단된다. $Re=5 \times 10^5$ 조건에서 plain 지지격자, split-vane 지지격자, hybrid-vane 지지격자의 손실계수는 약 0.79, 0.80, 0.88 로 예측되었다.

Abstract: The friction factor in a rod bundle and the loss coefficient at a spacer grid were examined. As a test section, 25 smooth rods, 9.5 mm in diameter and 2000 mm in length, were prepared and installed in a 5×5 square array in a square channel. In this case, the P/D (Pitch-to-Diameter ratio) was 1.35. In this work, plain (i.e., no mixing vanes), split-vane, and hybrid-vane spacer grids were tested. In a bare rod bundle (i.e., no spacer grid), the measured friction factors were in good agreement with the previous correlations. Among the spacer grids tested, the hybrid-vane spacer grid presented the largest friction factor in the rod bundle and loss coefficient. This may be because of the flow pattern change induced by large relative plugging of the flow cross section and mixing vane geometry. At $Re = 5 \times 10^5$, the predicted loss coefficients of plain, split-vane, and hybrid-vane spacer grids were approximately 0.79, 0.80, and 0.88, respectively.

- 기호설명 -

A : 단면적 (m^2)
 C_v : 수정된 항력계수 (-)
 D : 봉 외경 (m)
 d : 정사각 채널 단면의 폭 길이 (m)
 d_h : 수력직경 (m)
 f : 마찰계수 (-)
 g : 중력가속도 (m/s^2)

K : 손실계수 (-)
 L : 측정길이 (m)
 L_p : 접수길이 (m)
 N : 봉 개수 (-)
 P : 봉 중심간 거리 (m)
 ΔP : 압력강하 (Pa)
 Re : 레이놀즈수 ($=\rho V d_h / \mu$)
 V : 유속 (m/s)
 W : 봉과 벽 사이의 거리 (m)

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011.

11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, chiyounglee@kaeri.re.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

그리스문자

ϵ : 지지격자에 의한 유동단면 막음비 (-)

μ : 점도 (Pa·s)

ρ : 밀도 (kg/m^3)

하첨자

B : Blasius 상관식

c : 예측치

f : 지지격자가 없는 상태의 유동단면적

g : 중력에 의한 압력강하

M : McAdams 상관식

m : 측정치

p : 투영 면적

plain : Plain 지지격자

RB : 봉다발 영역

RB* : 전체 봉다발 길이

SG : 지지격자 영역

SG* : 전체 지지격자

1. 서 론

가압경수로(PWR; Pressurized Water Reator)내 핵연료 봉다발 구조에서 봉 간 거리는 지지격자(spacer grid)에 의해 유지된다. 냉각수는 인접한 연료봉들 사이에 형성된 부수로를 통해 축방향으로 평행하게 흐르는데, 지지격자는 봉다발 내 유동 분포를 변화시켜 열전달 성능에 지대한 영향을 미칠 수 있다. 봉다발 내 열전달 성능을 향상시키기 위해서 지지격자 상부에는 일반적으로 유동 혼합을 위한 장치, 즉 혼합날개(mixing vane)를 설치한다. 혼합날개는 부수로 내 선회류(swirl flow)나 부수로 사이의 교차류(cross flow)를 발생시켜 부수로와 부수로 사이의 엔탈피 교환을 활발하게 함으로써 봉다발 내 열전달 성능 향상에 기여하고, 핵연료 집합체의 임계 열유속(CHF; Critical Heat Flux)을 증가시키는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁻³⁾ 하지만, 혼합날개가 있는 지지격자 설치시 압력강하가 증가하여 큰 용량의 냉각수 펌프가 요구되는 문제점을 수반할 수 있다. 따라서, 실제 원자로에서 혼합날개가 있는 지지격자를 사용하기 전에 지지격자의 손실계수에 대한 평가가 반드시 수행되어야 한다.

원자로 노심에서의 압력강하를 간략화하면 식 (1)에서 나타낸 바와 같이, 연료봉다발에서 발생하는 압력강하(ΔP_{RB^*}), 지지격자에 의한 압력강하(ΔP_{SG^*}), 그리고 높이차에 의한 압력강하(ΔP_g)의 합으로 표현될 수 있다.

$$\Delta P = \Delta P_{RB^*} + \Delta P_{SG^*} + \Delta P_g$$

$$= \left(f \frac{L_{RB^*}}{d_h} + \sum K \right) \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho g L_{RB^*} \quad (1)$$

여기서, f , L_{RB^*} , d_h 는 각각 마찰계수와 봉다발의 전

체 길이, 그리고 유동단면의 수력직경을 나타낸다. K 는 지지격자의 손실계수를 나타내고, ρ , V , g 는 각각 물의 밀도, 유속, 중력가속도를 나타낸다.

식 (1)에 나타낸 바와 같이, 원자로 노심 내 압력강하를 예측하기 위해서는 봉다발에서의 마찰계수(f)와 지지격자의 손실계수(K)에 대한 정보의 획득이 필수적이다. 봉다발이 이루고 있는 유로(부수로)와 지지격자 및 혼합날개의 형상이 복잡하기 때문에, 봉다발 마찰계수와 지지격자 손실계수는 일반적으로 실험을 통하여 얻어진다. 따라서, 실험을 통한 봉다발 마찰계수와 지지격자 손실계수에 대한 검토 및 데이터 획득은 원자로의 노심 설계 및 성능 평가를 위해 매우 중요하다.

한편, 유동 혼합날개의 효과를 극대화시키기 위해서는 혼합날개의 형상, 크기 및 구부림 각도 등을 최적화해야 하는데 이러한 작업을 위해서는 방대한 경우에 대한 열수력적 고찰이 필요하다. 최근 혼합날개 형상의 최적화를 위해 CFD(Computational Fluid Dynamics)가 주로 이용되는데 이러한 CFD의 신뢰성 확인을 위해서, 다양한 혼합날개에 대한 실험데이터 확보 역시 이루어져야 한다.

본 연구에서는 5×5 모의 봉다발과 3 가지 종류의 지지격자(plain 지지격자, split-vane 지지격자, hybrid-vane 지지격자)를 이용하여 압력강하 실험을 수행하였다. 실험데이터를 토대로 봉다발 마찰계수와 지지격자 손실계수를 평가하였으며, 실제 원자로 작동 조건에서 지지격자 손실계수를 예측하였다. 본 연구의 결과는 원자로 설계 및 성능 평가 코드에 유용하게 이용될 것으로 판단된다.

2. 실험장치 및 데이터 처리

2.1 실험장치

지지격자가 있는 봉다발의 압력손실을 측정하기 위해서 본 연구 그룹에서는 종합 유동 실험 장치인 OFEL(Omni Flow Experimental Loop)을 구축하였다. Fig. 1에 OFEL의 3 차원 개략도를 나타내었다. OFEL은 모의 봉다발 시험부, 저장수조, 주순환 펌프, 질량유량계, 배관 및 계측장치로 구성된다. 작동유체는 순수를 사용하였고, 모든 실험은 단상에서 수행하였다. 주순환 펌프에 의해 작동유체는 저장수조에서 수직으로 설치되어 있는 모의 봉다발 시험부로 유입된다. 모의 봉다발 시험대 하단부에는 허니컴 구조물(honeycomb flow rectifier)을 설치하여 주순환 펌프와 배관에서 생성되는 와류

(vortices)를 억제하도록 하였다. 모의 봉다발 시험부를 지난 유동은 저장수조로 재유입되며 저장수조의 수면은 대기압 상태로 유지하였다. 물의 유량은 VFD(Variable Frequency Drive)를 이용하여 조절하였으며, 측정은 주순환 펌프 하류에 설치된 질량유량계(Rheonik)를 이용하였다. 정밀한 유량 조절을 위하여 주순환 펌프 주위에 bypass line 을 설치하였고, 안전을 위해 설계 압력보다 낮은 압력에서 전체 시스템이 작동하도록 rupture line 을 설치하였다. OFEL의 설계 최고 압력과 온도는 각각 10 기압과 80 °C 이다. 압력강하와 입구 온도를 측정하기 위하여 압력측정장치(pressure transmitter, Rosemount)와 K-type 열전대(Omega)를 각각 설치하였고, 실험 중 모든 데이터는 데이터 획득장치(34970A, Agilent)를 이용하여 저장하였다.

2.2 모의 봉다발 시험부

모의 봉다발 시험부는 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 25 개의 봉을 5×5 의 정사각 형태로 배열하여 제작하였다. 봉의 외경과 길이는 각각 9.5 mm 와 2000 mm 이고, 봉 중심간 거리와 봉 외경의 비 (P/D; Pitch-to-Diameter ratio)는 1.35 이다. 봉다발을 감싸고 있는 외측 정사각 채널은 내부 유동을 관

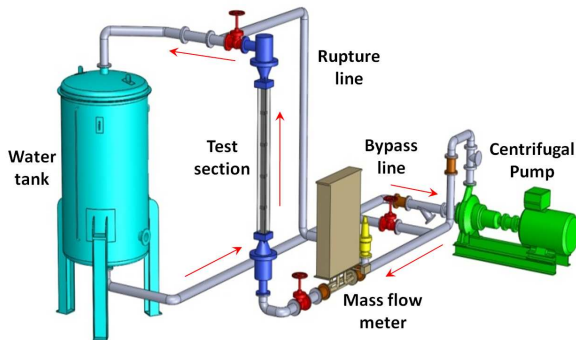


Fig. 1 Schematic diagram of test loop (OFEL)

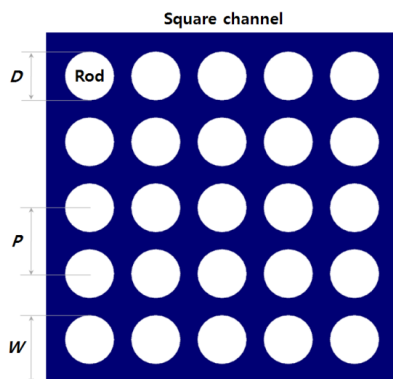


Fig. 2 5×5 square arrayed rod bundle

찰할 수 있도록 아크릴(acrylic) 재질로 제작하였다.

Table 1 에 본 실험에서 이용한 모의 봉다발 시험부의 형상인자를 정리하였으며, 수력직경(d_h)은 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다.

$$d_h = \frac{4A_f}{L_p} = \frac{4(d^2 - N \cdot \pi \cdot D^2 / 4)}{4 \times d + N \cdot \pi \cdot D} \quad (2)$$

여기서, A_f 는 유동단면적, L_p 는 접수길이, d 는 정사각 채널의 단면 폭길이, N 은 봉 개수, D 는 봉 외경을 나타낸다.

Fig. 3 에 실험데이터 측정영역에 관한 세부 개략도를 나타내었다. 모의 봉다발 시험부 내에는 총 4 개의 지지격자를 설치하였다. 지지격자의 높이는 격자판을 기준으로 약 40 mm 였고, 지지격자 간 설치 간격은 400 mm 로 유지하였다. 이 중, 실험데이터 측정은 유동이 입구와 출구의 형상에 영향을 받지 않을만큼 충분히 떨어진 두 영역 (measuring regions 1 and 2 in Fig. 3)에서 이루어졌다. 본 논문의 모든 실험데이터는 두 영역에서 측정된 값을 평균하였다. 시험부내 완전히 발달된 유동 (fully-developed flow)을 확보하기 위하여 첫번째 압력 측정홀(P1 in Fig. 3)을 입구에서 약 800 mm 하류에 준비하였고, 각 측정영역의 길이는 400 mm 로 동일하였다. 각 측정영역에서, 봉다발 마찰 계수 측정영역과 지지격자 손실계수 측정영역 길이는 각각 200 mm 로 설정하였다.

2.3 지지격자

본 실험에서는 plain 지지격자, split-vane 지지격자, hybrid-vane 지지격자 등 총 3 가지 지지격자를 이용하였다. Fig. 4 는 본 실험에서 이용한 지지격자의 사진이며, Fig. 5 는 혼합날개의 형상을 나타낸다. Plain 지지격자는 격자판(strap)과 연료봉 고정을 위한 스프링(spring) 및 딥플(dimple)로 이루어지며, 혼합날개는 없다. Split-vane 지지격자에서 2 개의 혼합날개는 서로 반대 방향으로 굽혀져 있

Table 1 Geometric parameters of test section

Rod bundle array	5×5
Number of rods (N)	25
Square channel (d, mm)	68×68
Rod diameter (D, mm)	9.5
Rod length (mm)	2000
Hydraulic diameter (d_h , mm)	11.2
Pith-to-Diameter ratio (P/D)	1.35
Wall distance-to-Diameter ratio (W/D)	1.39

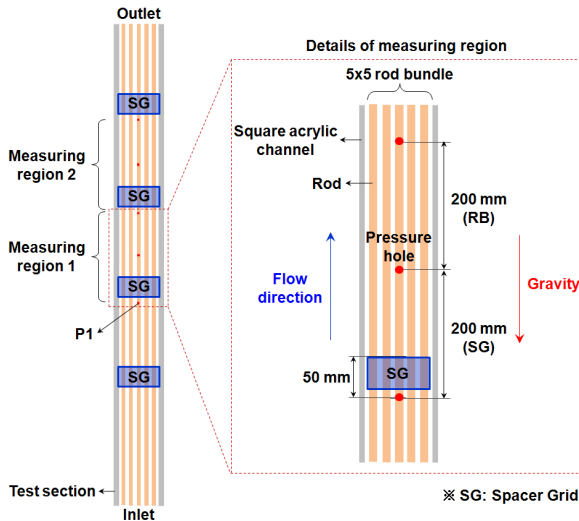


Fig. 3 Measuring region in test section (side-view)

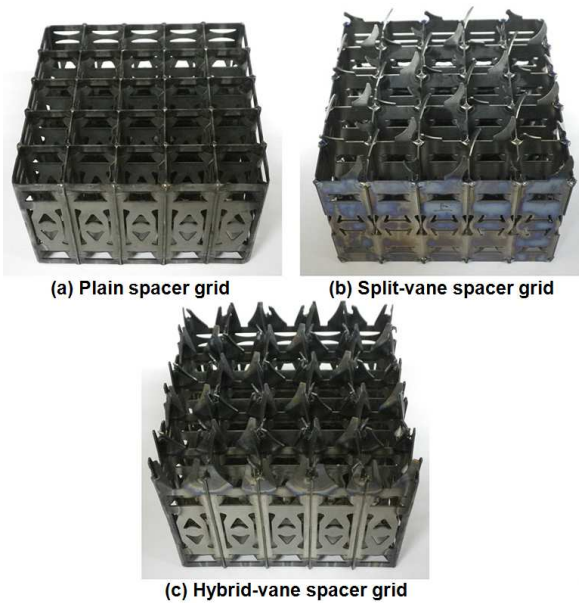


Fig. 4 Spacer grids

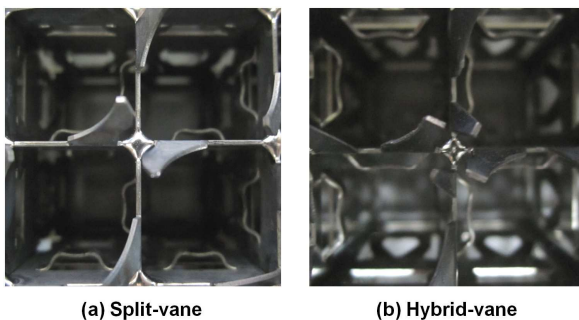


Fig. 5 Mixing vanes (top-view)

고, 지지격자의 격자판 교차 지점에 설치되어 있다. 이러한 혼합날개는 지지격자 하류에 부수로간

교차류를 발생시키는 역할을 하며, 구부림 각도는 약 30 도이다. Hybrid-vane 지지격자에서 2 개의 혼합날개는 지지격자 하류에 교차류를 발생시키기 위한 주 혼합날개이고, 다른 2 개의 혼합날개는 부수로 내 회전류를 발생시키기 위한 부 혼합날개이다. 혼합날개 모두 지지격자의 격자판 교차점에 위치하며, 구부림 각도는 약 35 도이다.

2.4 실험데이터 처리

측정한 압력강하 데이터를 기반으로 봉다발 마찰계수와 지지격자 손실계수를 아래와 같은 식을 이용하여 계산하였다.

$$f = \frac{\Delta P_{RB}}{0.5 \rho V^2 (L_{RB}/d_h)} \tag{3}$$

$$K = \frac{\Delta P_{SG} - \Delta P_{RB}}{0.5 \rho V^2} \tag{4}$$

위 식에서 하첨자 SG 와 RB 는 Fig. 3 에 나타낸 바와 같이 지지격자 구간과 지지격자가 없는 봉다발 구간을 의미한다. 본 연구에서는 Fig. 3 에서 나타낸 RB 영역의 봉다발 마찰계수가 SG 구간에서의 마찰계수와 동일하다고 가정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 지지격자가 없는 봉다발 마찰계수

Fig. 6 에 지지격자를 설치하지 않은 봉다발 마찰계수를 측정하여 나타내었다. 비교를 위해 Blasius 상관식⁽⁴⁾과 McAdams 상관식⁽⁴⁾에 의한 예측 결과를 함께 나타내었다.

$$f_B = 0.316 Re^{-0.25}; \text{Blasius correlation} \tag{5}$$

$$f_M = 0.184 Re^{-0.2}; \text{McAdams correlation} \tag{6}$$

$$Re = \frac{\rho V d_h}{\mu} \tag{7}$$

Blasius 상관식과 McAdams 상관식은 본 실험 영역에서 실험 데이터를 비교적 잘 예측함을 확인할 수 있었으며, 이러한 경향은 기존 보고⁽⁵⁾와 동일한 결과이다. Marek 등⁽⁵⁾은 정사각 봉다발 구조에서 P/D 가 봉다발 마찰계수에 미치는 영향에 관해 언급한 바 있다. 그들의 결과에 따르면, 일정한 레이놀즈수 조건에서(예를 들면, Re=10⁵) P/D 가 감소할수록, 즉 봉 간격이 좁아질수록 측정된 마찰계수와 상관식에 의한 마찰계수의 비(f_m/f_c)가 급격하게 감소하였다. 본 연구 그룹 역시, 봉 간격이 좁은

영역에서는 기존 상관식이 마찰계수를 과대 예측하는 것을 확인한 바 있다.⁽⁶⁾ 하지만 봉 벽면에서의 전단응력이 비교적 상수로 유지되는 영역, 즉, P/D 가 약 1.2 보다 큰 봉다발 구조에서는 원형관으로 부터 유도된 기존 상관식이 마찰계수를 비교적 잘 예측하였다.⁽⁵⁾

본 실험 결과를 토대로 볼 때, 지지격자가 없는 $P/D=1.35$ 의 정사각 배열 봉다발 경우에 대해서는 기존 상관식을 이용하여 봉다발 마찰계수를 예측하여도 크게 무리가 없음을 확인할 수 있었다.

3.2 지지격자가 있는 봉다발 마찰계수

Plain 지지격자, split-vane 지지격자, hybrid-vane 지지격자 등 3 종류의 지지격자를 설치한 후, 봉다발 부분에서의 마찰계수를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 비교를 위해 Blasius 상관식과 McAdams 상관식에 의한 예측결과 역시 함께 나타내었다.

본 실험영역에서, plain 지지격자를 장착한 경우의 봉다발 마찰계수는 Blasius 상관식과 McAdams 상관식에 의한 예측결과와 비교적 잘 일치하였고, 지지격자가 없는 봉다발 마찰계수 실험데이터(Fig. 6)와 크게 차이가 없었다. 그러나, 혼합날개가 있는 지지격자의 경우는 다른 경향을 나타냈다. Split-vane 지지격자의 경우 plain 지지격자의 경우보다 큰 봉다발 마찰계수를 나타내었고, hybrid-vane 지지격자의 경우에서 가장 큰 봉다발 마찰계수가 측정되었다. 레이놀즈수가 2×10^5 인 조건에서 plain 지지격자, split-vane 지지격자, hybrid-vane 지지격자에 의한 봉다발 마찰계수는 각각 약 0.016, 약 0.018, 약 0.019 정도로 나타났다.

Fig. 8 에는 plain 지지격자의 봉다발 마찰계수에 대해, split-vane 지지격자와 hybrid-vane 지지격자의 봉다

발 마찰계수 비(i.e., ff_{plain})를 나타내었다. 본 실험영역에서는 레이놀즈수가 증가함에 따라 ff_{plain} 가 증가하는 경향을 보였다.

본 실험에서 봉다발 마찰계수의 측정 시작점은 Fig. 3 에 나타낸 바와 같이 지지격자로부터 약 150 mm 떨어진 지점이고, 이는 시험부 유동단면의 수력직경을 기준으로 약 $13.4d_h$ 위치이다. Split-vane 지지격자와 hybrid-vane 지지격자의 실험데이터를 토대로 볼 때, 혼합날개의 영향은 지지격자로부터 약 $13.4d_h$ 지점까지도 여전히 남아있다는 것을 의미한다. 혼합날개가 봉다발을 흐르는 유동양식(flow pattern)을 변화시켜서 압력강하에 영향을 미치는 것으로 판단되므로, 추후 적절한 유동 계측 방법을 이용하여 이에 대한 추가 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3.3 지지격자 손실계수

봉다발을 평행하게 흐르는 유동이 지지격자를 통과할 때, 지지격자(격자판, 스프링, 덤플 및 혼합날개)의 형상과 유동단면적의 변화로 인해 원

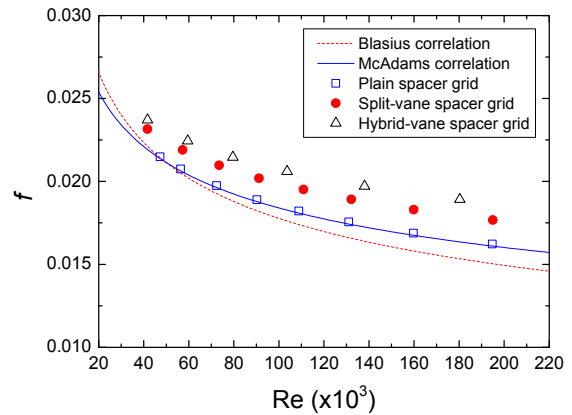


Fig. 7 Friction factor in rod bundle with spacer grid

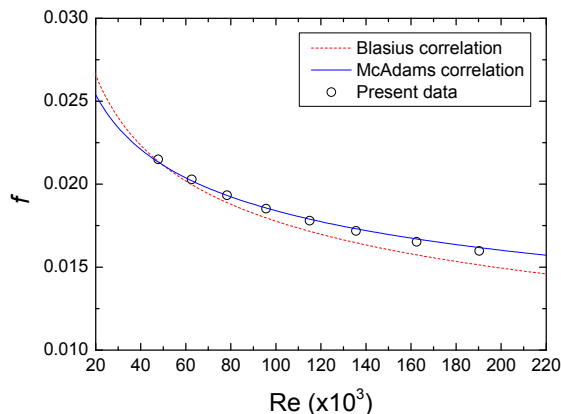


Fig. 6 Comparison between previous correlations and friction factor measured in bare rod bundle

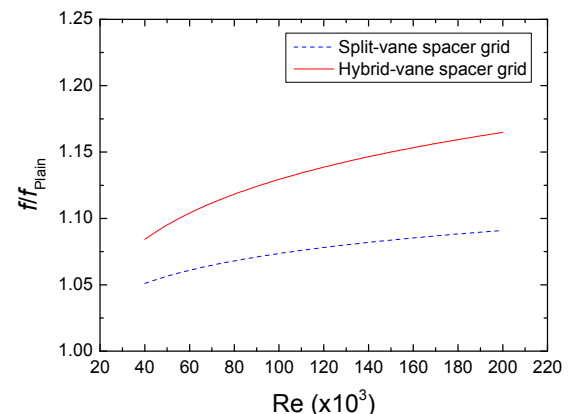


Fig. 8 Friction factor ratio (ff_{plain}) in rod bundle with spacer grid

치 않는 유동교란(예를 들면, 유동박리 등과 같은 현상)이 일어날 수 있으며, 이 경우, 마찰에 의한 압력손실뿐 아니라 추가적인 압력손실(minor loss)⁽⁷⁾이 발생하게 된다. 지지격자의 형상이 매우 복잡한 관계로 지지격자에 의해 유발되는 모든 압력손실을 나타내는 손실계수(식 (1)에서 K 값)는 일반적으로 실험을 통하여 평가된다.

Fig. 9 에 본 실험에서 이용한 지지격자의 손실계수 측정결과를 나타내었다. Hybrid-vane 지지격자가 가장 큰 손실계수를 나타내었고, split-vane 지지격자, plain 지지격자 순서로 손실계수가 작아졌다. 전반적으로 혼합날개가 있는 지지격자가 plain 지지격자보다 더 큰 손실계수를 나타내었다. 이러한 결과에 대한 원인 중 하나는 지지격자에 의한 유동단면 막음비(relative plugging of flow cross section) 때문일 수 있다.

Rehme⁽⁸⁾는 혼합날개가 없는 지지격자를 이용하여 지지격자의 손실계수에 대한 실험을 수행하였으며, 지지격자에 의한 유동단면적의 변화가 지지격자의 손실계수를 결정하는 중요한 인자로 파악하였다. Rehme⁽⁸⁾는 혼합날개가 없는 지지격자의 유동단면 막음비와 손실계수의 관계를 다음과 같이 제안하였다.

$$K = C_v \varepsilon^2 \tag{8}$$

여기서, C_v 는 수정된 항력계수(modified drag coefficient)를 나타내고, Rehme⁽⁸⁾는 실험데이터를 근거로 6-7($Re > 5 \times 10^4$)을 제안하였다. 유동단면 막음비는 지지격자에 의한 유동단면적의 변화 정도를 나타내는 인자로 다음과 같이 정의된다.

$$\varepsilon = A_p / A_f \tag{9}$$

위 식에서 A_p 는 지지격자의 투영 면적(projected

cross section area)을 의미하고, A_f 는 지지격자가 없는 경우의 유동단면적(undisturbed flow cross section area)을 의미한다.

Rehme⁽⁸⁾의 상관식은 유동단면 막음비가 증가할수록 지지격자의 손실계수가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 본 연구에서 이용한 plain 지지격자, split-vane 지지격자, hybrid-vane 지지격자의 유동단면 막음비는 각각 약 0.32, 약 0.48, 약 0.56 이다. 혼합날개가 있는 지지격자의 경우 혼합날개 때문에 혼합날개가 없는 지지격자보다 더 큰 유동단면 막음비를 갖는 것을 알 수 있다. Rehme⁽⁸⁾의 상관식과 본 실험에서 사용한 지지격자의 유동단면 막음비 데이터로 판단하여 볼 때, plain 지지격자, split-vane 지지격자, hybrid-vane 지지격자 순으로 손실계수가 증가한 이유는 유동단면 막음비의 증가 때문으로 판단할 수 있다. 또한, 혼합날개가 있는 경우, 혼합날개 형상에 의해 유동은 더욱 극심하게 교란되므로 이로 인한 영향 역시 지지격자의 손실계수를 결정하는 요인이 될 수 있을 것으로 생각된다.

한편, Fig. 9 에 Rehme⁽⁸⁾ 상관식에 의해 예측된 plain 지지격자의 손실계수를 함께 나타내었다. 수정된 항력계수(C_v)는 7 이라 가정하였다. Rehme⁽⁸⁾ 상관식은 본 실험에서 이용한 plain 지지격자의 손실계수를 과소예측하고 있음을 알 수 있으며, 이는 Rehme⁽⁸⁾ 상관식을 도출하는데 사용된 지지격자보다 본 연구에서 사용한 지지격자의 형상이 더욱 복잡하기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로, 지지격자의 경우 복잡한 형상때문에 손실계수의 예측이 쉽지 않으며, 지지격자의 손실계수를 정확하게 예측(모델링)하기 위해서는 다양한 형태의 지지격자를 이용한 변수 연구(parametric study)가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

본 실험에서 레이놀즈수가 2×10^5 일 때, plain 지지격자, split-vane 지지격자, hybrid-vane 지지격자의 손실계수를 측정된 결과, 약 0.85, 0.87, 0.94 이었다. 앞서 언급하였듯이, 실제 원자로 작동조건에서 지지격자 손실계수의 예측은 원자로 설계 및 평가에 매우 중요한 정보이다. 일반적으로 실제 원자로가 작동되는 레이놀즈수 조건은 약 5×10^5 이다. Fig. 9 에서 각 실험데이터 위의 곡선은 실험데이터를 곡선 맞춤(curve fitting)한 결과이다. 외삽법(extrapolation)을 이용하여 레이놀즈수가 5×10^5 조건에서, plain 지지격자, split-vane 지지격자, hybrid-vane 지지격자의 손실계수를 평가한 결과, 약 0.79, 0.80, 0.88 이었다.

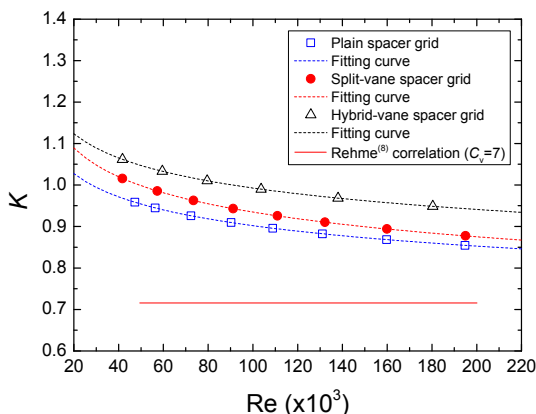


Fig. 9 Loss coefficient at spacer grids

4. 결 론

참고문헌

본 연구에서는 종합 유동 실험 장치인 OFEL 을 구축하여 지지격자가 있는 5×5 정사각 배열의 봉다발에서 압력손실을 측정하였다. 모든 실험은 약 4×10^4 에서 약 2×10^5 의 레이놀즈수 범위에서 수행하였다. 제작한 모의 봉다발 시험부의 P/D 는 1.35 였고, plain 지지격자, split-vane 지지격자, hybrid-vane 지지격자 등 3 가지 종류의 지지격자를 이용하여 봉다발 마찰계수와 지지격자 손실계수를 평가하였다.

지지격자가 없는 봉다발에서 측정된 마찰계수는 Blasius 상관식과 McAdams 상관식에 의한 예측치와 비교적 잘 일치하였다. 지지격자가 있는 봉다발을 이용한 실험 결과, 본 실험 영역에서는 plain 지지격자, split-vane 지지격자, hybrid-vane 지지격자 순으로 봉다발 마찰계수 및 지지격자 손실계수가 증가하였다. 이러한 경향은 지지격자의 유동단면 막음비의 증가와 혼합날개에 의해 유동의 교란이 증가되기 때문인 것으로 판단된다. 실제 원자로 작동조건($Re=5 \times 10^5$)에서 각 지지격자의 손실계수를 예측한 결과, plain 지지격자는 약 0.79, split-vane 지지격자는 약 0.80, hybrid-vane 지지격자는 약 0.88 로 나타났다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 원자력기술개발사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

- (1) Oh, D. S., 2002, "Measurement of Flow Structure in Rod Bundle Downstream of Split Vaned Spacer Grid," *Proceedings of 2002 SAREK Summer Annual Conference*, pp. 138~144.
- (2) In, W. K., Oh, D. S. and Chun, T. H., 2001, "CFD Application to Development of Flow Mixing Vane in a Nuclear Fuel Assembly," *Proceedings of 2001 KSME Spring Annual Conference*, pp. 482~487.
- (3) In, W. K., Oh, D. S. and Chun, T. H., 2001, "Optimum Design of Hybrid Mixing Vane in a Nuclear Fuel Bundle by the CFD Method," *Proceedings of 2001 KSME Autumn Annual Conference*, pp. 224~229.
- (4) Todreas, N. E. and Kazimi, M. S., 1990, *Nuclear Systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals*, Hemisphere Pub. Corp., New York.
- (5) Marek, J., Maubach, K. and Rehme, K., 1973, "Heat Transfer and Pressure Drop Performance of Rod Bundles Arranged in Square Arrays," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16, pp. 2215~2228.
- (6) Lee, C. Y., Shin, C. H., Park, J. Y., Oh, D. S. and In, W. K., 2011, "Measurement of Pressure Loss in Tight Lattice Rod Bundle with Spacer Grid," *Proceedings of 2011 KNS Autumn Annual Conference*, pp. 355~356.
- (7) Fox, R. W., McDonald, A. T., 1999, *Introduction to Fluid Mechanics*, John Wiley and Sons, 5th edition.
- (8) Rehme, K., 1973, "Pressure Drop Correlations for Fuel Element Spacers," *Nuclear Technology*, Vol. 17, pp. 15~23.