

〈論 文〉

허니콤 표면의 마찰계수 특성에 관한 연구 (Part 1 : 표면 마찰계수 측정 및 모델링)

하 태 응*

(1993년 10월 29일 접수)

The Characteristic of Friction-Factor on Honeycomb Surfaces (Part I : ExperimentaI Tests and Friction-Factor Modeling)

Tae Woong Ha

Key Words : Honeycomb(허니콤), Friction-Factor(마찰계수), Flat Plate Tester(평판시험기), Rotordynamic(회전체역학), Honeycomb Seal(허니콤 밀봉장치)

Abstract

Friction-factors for honeycomb surfaces are measured with a flat plate tester. The flat plate test apparatus is described and a method is discussed for determining the friction-factor experimentally. The friction-factor is calculated for the flat plate test based on the Fanno-line flow. The test parameters are honeycomb cell width, depth, clearance, inlet pressure, and Reynolds number(or Mach number). A new empirical friction-factor model for honeycomb surfaces are developed as a function of these parameters.

기 호 설 명

- | | |
|-----------------------------|--------------------|
| A : 평판시험기 단면적 | R : 기체상수 |
| A_w : 전단응력이 작용하는 표면적 | Re : 레이놀즈수 |
| b : 허니콤 셀넓이 | S_i : 표준편차 |
| d : 허니콤 셀깊이 | T : 온도 |
| D_h : 수력지름 | T_i : 정체온도 |
| g_c : 중력가속도 | T_o : 출구온도 |
| f : Fanning 마찰계수 | U : 유체속도 |
| H : 허니콤 표면사이 간격 | W : Test 단면의 넓이 |
| Ma : 마하수 | y_i : 실험데이터 |
| m : 질량 | \hat{y}_i : 계산값 |
| \dot{m} : 질량흐름율 | γ : 공기의 비열비 |
| n : 관측수 | μ : 점성계수 |
| P : 정압 | ρ : 밀도 |
| P_c : 공기의 임계압력 (37.7 bar) | τ_w : 표면 전단응력 |
| P_i : 정체압 | |
| P_o : 출구에서의 정압 | |

1. 서 론

*정회원, 경원대학교 건축설비학과

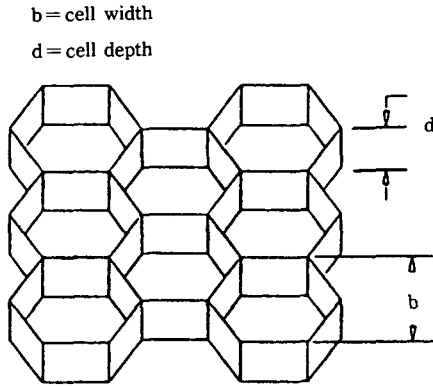


Fig. 1 Honeycomb cell pattern

seal)이 작동유체의 누설을 줄이고 회전체 시스템의 동적 안정성을 향상시키는데 매우 효과적인 것으로 실험에 의해 밝혀졌다.^(1,2) 그러나 허니콤 실의 성능을 이론적으로 예측하고자 하는 노력은 지금까지 그다지 만족스럽지 못했으며, 그 원인 중 하나는 허니콤 표면의 마찰계수 특성에 관한 정보가 불충분했기 때문으로 사료된다. 본 연구의 목적은 허니콤 표면의 마찰계수 특성을 밝힘으로써 허니콤 실의 정적 및 동적 특성해석을 개선시키는데 있다. 본 연구에 사용된 실재료는 허니콤으로, Fig. 1에 나타나 있는 것처럼 작은 육각형 셀(cell)의 연속적인 구조로 되어 있다.

Moody⁽³⁾가 파이프흐름에 대한 마찰계수를 레이놀즈수와 표면 상대조도의 함수로 나타낸 이후, 마찰계수에 대한 광범위한 연구결과가 발표되어 왔다. 허니콤 표면에 대하여는, Stocker 등⁽⁴⁾이 이차원 정적 실험장치를 사용해 다양한 크기의 허니콤 실을 통한 누수량을 측정 발표했고, Elrod 등⁽⁵⁾은 처음으로 매끈한 로터와 허니콤 스테이터 사이를 흐르는 공기흐름에 대한 마찰계수를 측정 발표했다. 그러나 Stocker와 Elrod 등에 의해 발표된 허니콤 표면에 대한 실험적 데이터는 매끈한 표면과 허니콤 표면을 나란히 놓은 구조에서 측정되었기 때문에 그들의 데이터로부터 순수한 허니콤 표면에 대한 마찰계수를 추출하는 것이 어렵다. 그러므로 허니콤 실에 대한 이론적 해석을 위하여 순수한 허니콤 표면에 대한 마찰계수 측정이 요구된다.

2. 실험장치

평판시험기는, Fig. 2에 나타난 것처럼, 허니콤

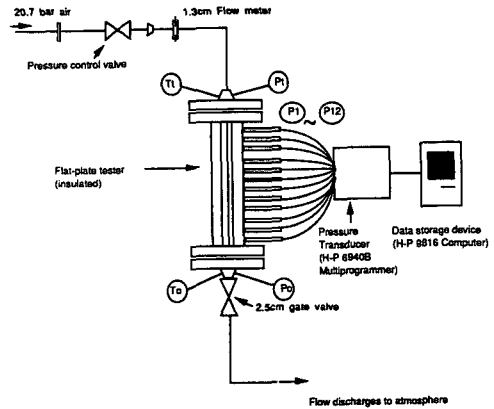


Fig. 2 Friction-factor measurement system schematic

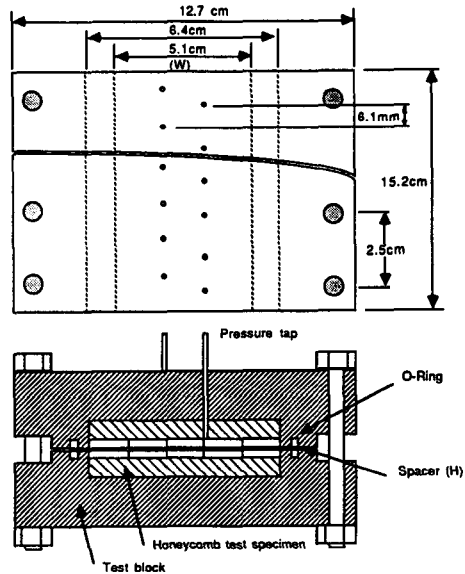


Fig. 3 Flat plate tester assembly

시편 사이를 통과하는 공기유량, 온도 및 압력구배를 측정하도록 고안하였다. 평판시험기는 Fig. 3에 나타난 것처럼 테스트 블록, 스페이서 및 허니콤 시편으로 구성되어 있고 여러가지 허니콤 테스트 시편을 용이하게 설치할 수 있도록 설계되었다. 측면 누설(leakage)을 막기 위해서 3 mm 지름의 O-링을 스페이서를 따라서 설치하였고, 스페이서로는 넓이 1.3 cm, 길이 15.2 cm의 정밀한 두께의 스테인레스 심을 사용했다. Fig. 4의 허니콤 시편은 Hastelloy-X로 만든 허니콤 평판을 매끈한 기본 스테인리스 평판에 부착한 것으로 원래는 넓이

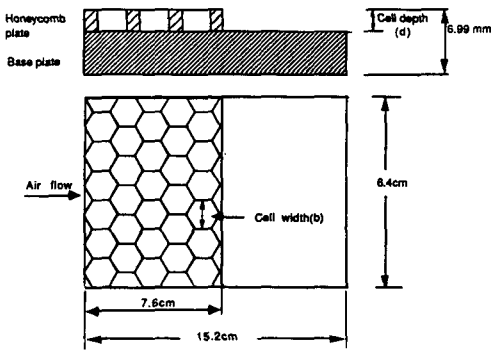


Fig. 4 Honeycomb test specimen

5.4 cm, 길이 15.2 cm로 설계되었으나 실험결과 레이놀즈수가 너무 낮아져서 길이 7.6 cm로 수정하였다. 공기유량을 측정하기 위해서 평판시험기의 상류에 1.3 cm 터빈유량계(turbine flow meter)를 설치하였고, 정체온도 및 출구온도를 측정하기 위하여 지름 1.59 mm의 열전대(철-콘스탄탄)를 사용하였다. 허니콤 시편을 따라 흐름방향의 압력구배를 측정하기 위해서, 지름 1.6 mm의 정압측정용 탭을 등간격으로 12개소에 설치하고 정압측정기(ScanValve model J)로 측정하였다. 이때 정압측정 탭의 끝단은 Fig. 3에 보인 것처럼 허니콤 시편의 기본 평판상단과 일치시켰다. 터빈유량계, 열전대 및 정압측정기의 측정정밀도는 각각 $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{min}$, 1° K 및 0.96 kPa 이다.

3. 마찰계수 계산식

일정한 비열비를 갖고 있는 이상기체의 일정한 단면을 갖는 덕트를 통과하는 일차원, 정상류, 단열흐름을 Fanno-line flow라고 한다. 본 연구에 사용된 평판시험기는 Fanno-line flow의 가정에 매우 유사하기 때문에 이를 기본으로 하여 마찰계수 식을 유도할 수 있다. Fig. 5는 평판시험기 단면에서 택한 제어체적(control volume)을 나타내었다.

길이 dz 의 제어체적에 대한 운동량방정식(momentum equation)은 다음과 같다.

$$-AdP - \tau_w A_w = \rho A U dU \quad (1)$$

평판시험기에 대한 수력지름(hydraulic diameter)은 정의에 따라 $D_h = 2H$ 가 되며 이상기체의 상태방정식 및 질량보존법칙을 사용하면 마하수는 다음과 같이 식(2)으로 표현된다.

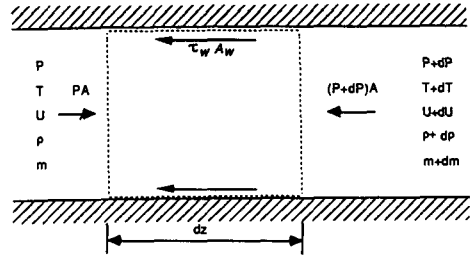


Fig. 5 Control volume for analysis of adiabatic, constant area flow

$$Ma = \left[\frac{-1 + \sqrt{1 + 2(\gamma - 1) \left(\frac{\dot{m}}{PA} \right)^2 \left(\frac{RT_t}{\gamma g_c} \right)}}{(\gamma - 1)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

마찰계수와 전단응력 사이의 관계는 식(3)과 같이 나타낼 수 있는데 이때, f 는 Fanning 마찰계수이다.

$$f = \frac{\tau_w}{0.5\rho U^2} \quad (3)$$

최종적으로, 식(1)과 (3), 이상기체의 상태방정식, 마하수의 정의와 질량보존법칙을 이용하면 평판시험기에 대한 마찰계수 식을 아래 식(4)과 같이 유도할 수 있다.

$$f = \frac{D_h}{2} \frac{1}{Ma} \left\{ \frac{1 - Ma^2}{(1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma^2) \gamma Ma^2} \right\} \frac{dMa}{dz} \quad (4)$$

4. 실험방법

본 연구에서는 Table 1에 열거한 것처럼 매끈한 평판과 허니콤 시편(4-셀높이와 3-셀깊이)에 대하여 각각 3가지의 다른 간격(clearance)과 일정 범위의 레이놀즈수(또는 마하수)의 조건에서 실험하였다.

한 실험시편이 평판시험기에 설치되면 5가지의 입구압력(6.9, 9.7, 10.4, 15.2, 17.9 bar)과 5가지의 레이놀즈수를 선정한다. 평판시험기 상류에 설치되어 있는 제어밸브를 사용하여 출구압력을 조절, 설정된 레이놀즈수 조건을 얻는다. 평판시험기를 통과하는 공기흐름이 정상류가 되었을 때 유량, 온도 및 흐름방향으로 12개소에 설치된 정압을 측정하여 컴퓨터(Hewlett-Packard 9816(16bit))에 수록한다.

마찰계수를 실험치로부터 계산하기 위해서는 식 (4)에서 보인 것처럼 흐름방향에 따른 마하수와 마하수의 구배를 알아야 한다. 식(2)를 이용하여 마하수 분포를 계산하고, 마하수의 구배(dMa/dz)는

Table 1 List of a smooth and honeycomb test specimens

Test no.	Cell width	Cell depth	Clearance	Range of f	Re. no. ($\times 10^3$)
1	smooth	-	0.25 mm	0.004-0.009	5-62
2	smooth	-	0.38 mm	0.004-0.008	7-96
3	smooth	-	0.51 mm	0.004-0.010	5-130
4	1.57 mm	2.29 mm	0.25 mm	0.017-0.023	5-46
5	1.57 mm	2.29 mm	0.38 mm	0.027-0.035	7-66
6	1.57 mm	2.29 mm	0.51 mm	0.024-0.042	5-90
7	1.57 mm	3.05 mm	0.25 mm	0.020-0.022	9-40
8	1.57 mm	3.05 mm	0.38 mm	0.025-0.033	10-60
9	1.57 mm	3.05 mm	0.51 mm	0.024-0.044	10-74
10	1.57 mm	3.81 mm	0.25 mm	0.005-0.006	7-67
11	1.57 mm	3.81 mm	0.38 mm	0.009-0.013	5-83
12	1.57 mm	3.81 mm	0.51 mm	0.012-0.027	5-100
13	0.79 mm	2.29 mm	0.25 mm	0.062-0.081	5-26
● 14	0.79 mm	2.29 mm	0.38 mm	0.041-0.069	5-46
● 15	0.79 mm	2.29 mm	0.51 mm	0.036-0.078	7-62
● 16	0.79 mm	3.05 mm	0.25 mm	0.028-0.093	5-31
● 17	0.79 mm	3.05 mm	0.38 mm	0.061-0.149	6-40
● 18	0.79 mm	3.05 mm	0.51 mm	0.053-0.142	7-55
19	0.79 mm	3.81 mm	0.25 mm	0.030-0.038	5-37
20	0.79 mm	3.81 mm	0.38 mm	0.027-0.037	6-60
21	0.79 mm	3.81 mm	0.51 mm	0.028-0.039	7-88
22	0.51 mm	2.29 mm	0.25 mm	0.008-0.009	5-55
23	0.51 mm	2.29 mm	0.38 mm	0.007-0.015	6-82
24	0.51 mm	2.29 mm	0.51 mm	0.012-0.019	6-110
● 25	0.51 mm	3.05 mm	0.25 mm	0.046-0.119	6-27
● 26	0.51 mm	3.05 mm	0.38 mm	0.039-0.086	6-55
● 27	0.51 mm	3.05 mm	0.51 mm	0.048-0.088	6-65
28	0.51 mm	3.81 mm	0.25 mm	0.012-0.015	5-55
29	0.51 mm	3.81 mm	0.38 mm	0.016-0.017	6-82
30	0.51 mm	3.81 mm	0.51 mm	0.017-0.026	6-115
● 31	0.41 mm	2.29 mm	0.25 mm	0.025-0.061	7-31
● 32	0.41 mm	2.29 mm	0.38 mm	0.016-0.048	8-53
● 33	0.41 mm	2.29 mm	0.51 mm	0.017-0.058	11-77
● 34	0.41 mm	3.05 mm	0.25 mm	0.020-0.044	7-39
● 35	0.41 mm	3.05 mm	0.38 mm	0.020-0.038	6-63
● 36	0.41 mm	3.05 mm	0.51 mm	0.016-0.042	7-89
37	0.41 mm	3.81 mm	0.25 mm	0.015-0.038	6-45
38	0.41 mm	3.81 mm	0.38 mm	0.025-0.038	7-69
● 39	0.41 mm	3.81 mm	0.51 mm	0.014-0.031	7-95

● Friction-factor-jump occurring

계산된 마하수로부터 수치적 방법 (least-squares cubic curve fit)을 사용하여 구한다. 본 논문에서 발표된 마찰계수는 식 (3)에 의해 정의된 Fanning 마찰계수이며 평균 마찰계수이다. 입구 및 출구에서의 압력강하로 인한 영향을 배제하기 위해서, 시편의 중앙부에 있는 6개소의 데이터를 사용하여 평균한 값을 구하였다. 한편 흐름방향에 따른 마하수와 마찰계수의 분포는 입구 및 출구부분을 제외하고 거의 일정함을 모든 실험 경우에서 관찰할 수 있었다.

실험장치를 통한 측정치로부터 마하수와 마찰계수를 식 (2)와 (4)를 사용하여 계산할 때 결과에 대한 불확실성 (uncertainty)은 Holman⁽⁶⁾의 방법으로 나타낼 수 있다. n 개의 측정치 ($x_1, x_2 \dots x_n$)로부터 계산된 결과 M 의 불확실성 W_R 은 식 (5)와 같다.

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial M}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial M}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

마찰계수를 계산할 때 사용된 측정값들 (x_1, x_2, x_3, x_4)은 면적, 압력, 유량, 그리고 정체온도이며 이들의 측정정밀도들 (w_1, w_2, w_3, w_4)은 각각 2.58 mm², 0.96 kPa, 5×10^{-5} m³/min 그리고 1°K이다. 결과적으로 식 (5)를 사용한 마하수 및 마찰계수 결과의 최대 불확실성은 각각 0.2%와 0.1%로 나타났다.

5. 결과 및 고찰

5.1 레이놀즈수 (또는 마하수)의 영향

레이놀즈수 ($Re = \rho(2H)U/\mu$)는 평판시험기 단면형상의 수력지름 ($D_h = 2H$)를 사용하여 정의하였다. 일반적으로 파이프내의 흐름에서, 마찰계수는 무차원수인 레이놀즈수와 상대조도의 함수이다. 상대조도는 파이프의 직경에 대한 절대조도의 비로 표시된다. 그러나 허니콤 표면에 대한 절대조도는 곧, 허니콤 셀의 홀깊이를 나타내므로 허니콤 표면에 대한 상대조도는 무의미하다.

허니콤 표면에 대한 분명히 다른 두 마찰계수 패턴이 Fig. 6에 나타나 있다. 많은 경우에, 마찰계수는 레이놀즈수가 증가함에 따라서 거의 일정하거나 약간 감소하는 결과를 보였고, 이는 파이프내의 난류흐름에서 마찰계수의 일반적 특성과 일치한다. Fig. 6 중에서 실험 7이 이러한 특성을 나타내고 있다. 그러나 실험 17과 18 경우에는 마찰계수가

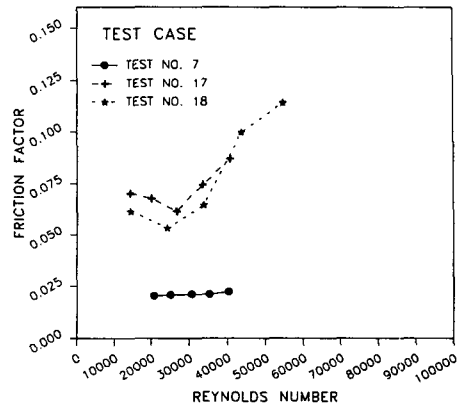


Fig. 6 Friction-factor versus Reynolds number

감소하다가 약 레이놀즈수 24,000과 26,000에서 각각 급상승하는 결과를 보이고 있다. 본 연구에서는 이 현상을 “마찰계수 급상승현상 (friction-factor jump phenomena)”이라고 표현하겠다. Fig. 6에 나타난 것처럼 이 현상은 비교적 높은 레이놀즈수에서 일어나기 때문에 일반적인 층류에서 난류로의 천이현상으로 볼 수 없다.

본 연구에서 행해진 모든 실험경우 중에서 약 42%가 “마찰계수 급상승현상”을 보였고, Table 1에 “●”로 표시되었다. 이 “마찰계수 급상승현상”은 허니콤 셀안에서 발생한 음향 공진주파수의 가진 (excitation of acoustic resonance frequency)에 의한 것으로 본 지에서는 다루지 않고 Part 2에서 기술하도록 하겠다. 다만 본 지에서는 마찰계수 실험결과와 특히 “마찰계수 급상승현상”이 일어나지 않는 경우에 한하여 다루고자 한다.

주어진 흐름조건에서 레이놀즈수와 마하수는 1 : 1로 대응을 하며 각각에 대한 마찰계수는 변함이 없다. Fig. 7과 Fig. 8은 허니콤 셀높이가 1.57 mm, 깊이가 2.29 mm 그리고 간격이 0.25 mm인 경우에 입구압력에 대한 마찰계수 결과를 각각 레이놀즈수와 마하수에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 7에 나타난 것처럼 레이놀즈수의 범위는 입구압력이 증가함에 따라서 오른쪽으로 이동하지만, 마하수의 범위는 거의 일정함을 나타낸다. (Fig. 8 참조) 이런 경향은 “마찰계수 급상승현상”이 일어나는 경우에 더욱 뚜렷하며, 서로 다른 간격에 대한 실험결과도 거의 같은 마하수에서 마찰계수 급상승이 시작됨을 보였다. 따라서 허니콤 표면에 대한 마찰계수 결과는 레이놀즈수보다는 마하수와 더 연관성이 있음을

CELL WIDTH=1.57mm, CELL DEPTH=2.29mm, CLEARANCE=0.25mm

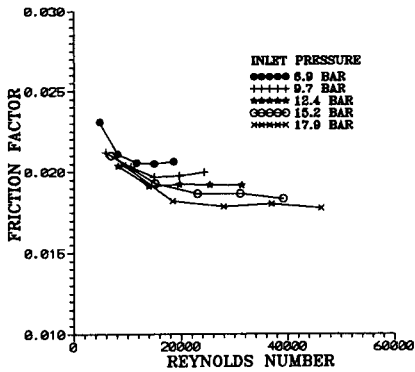


Fig. 7 Effect of inlet pressure for honeycomb surfaces(1)

P=17.9 BAR, CELL DEPTH=3.81mm, CLEARANCE=0.25mm

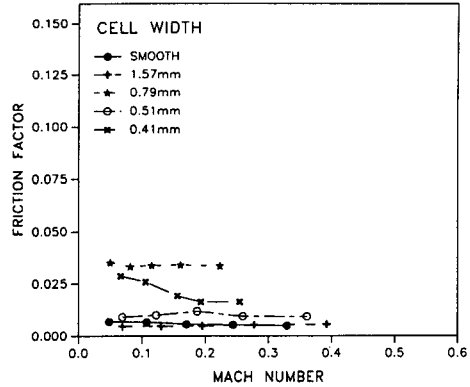


Fig. 9 Comparison of friction-factor with cell widths(1)

CELL WIDTH=1.57mm, CELL DEPTH=2.29mm, CLEARANCE=0.25mm

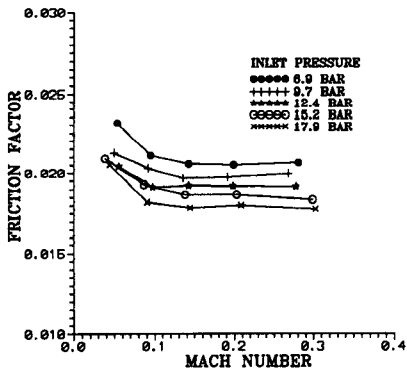


Fig. 8 Effect of inlet pressure honeycomb surface(2)

P=17.9 BAR, CELL DEPTH=2.29mm, CLEARANCE=0.25mm

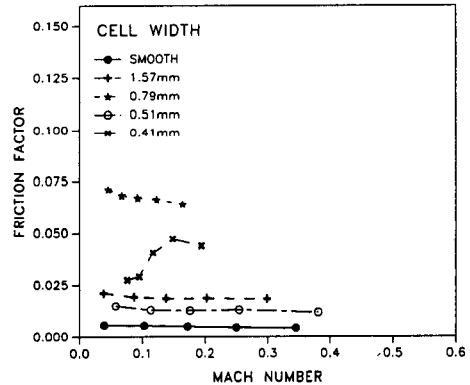


Fig. 10 Comparison of friction-factor with cell widths(2)

보여주며, 이하에서는 마하수를 레이놀즈수 대신 특성변수로 사용하였다.

5.2 입구압력의 영향

본 연구에서는 각 시편에 대하여 다섯가지 입구 압력(6.9, 9.7, 12.4, 15.2 및 17.9 bar)으로 실험을 하였다. 일반적으로 Fig. 7, Fig. 8에 나타난 것처럼 마찰계수는 입구압력이 증가함에 따라서 감소함을 보였다. 식(4)에서, 마찰계수는 마하수와 마하수 구배의 함수이고, 입구압력의 증가는 마하수와 마하수 구배의 감소를 야기했다. 이때, 마하수 구배의 감소가 마하수의 감소보다 더 커서 마찰계수는 입구압력의 증가에 따라 감소함을 보였다.

5.3 셀넓이의 영향

본 연구에서는 네가지 셀넓이(1.57, 0.79, 0.51

및 0.41 mm)가 사용되었다. Fig. 9와 Fig. 10에 나타난 것처럼 마찰계수는 셀넓이에 매우 민감하게 변하며 또한 셀깊이와 간격(clearance)과도 밀접한 관계가 있다. 3.81 mm 셀깊이의 경우, 0.25와 0.38 mm 간격 실험에서는 0.79 mm 허니콤 셀넓이의 표면이 가장 큰 마찰계수를 나타내고 0.41, 0.51 및 1.57 mm 순서를 보였다. (Fig. 9 참조) 2.29 mm 셀깊이의 경우에는 Fig. 10에 나타난 것처럼 좀 다른 경향을 보였다. 0.79 mm 셀넓이의 표면이 역시 가장 큰 마찰계수를 나타내고 0.41, 1.57 및 0.51 mm의 순서를 보였다. 이와 같이 허니콤 표면의 마찰계수는 허니콤의 형상, 즉 셀넓이, 깊이 및 간격의 조합과 밀접한 관계가 있다. 예상했던 대로, 허니콤 표면의 마찰계수는 매끈한 표면의 마찰계수에 비해 매우 크게 나타났다. 그러나 3.81 mm 셀깊이와 0.25 mm 간격 실험의 경우(Fig.

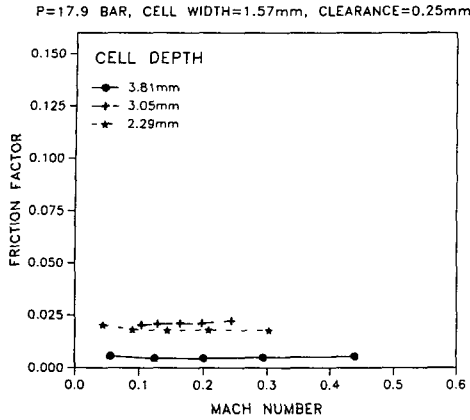


Fig. 11 Comparison of friction-factor with cell depths

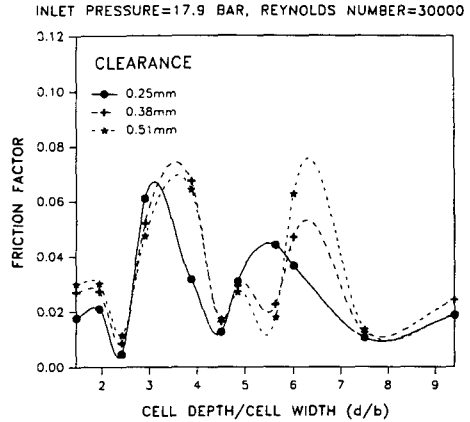


Fig. 13 Friction-factor versus the ratio of cell depth to cell width with clearance

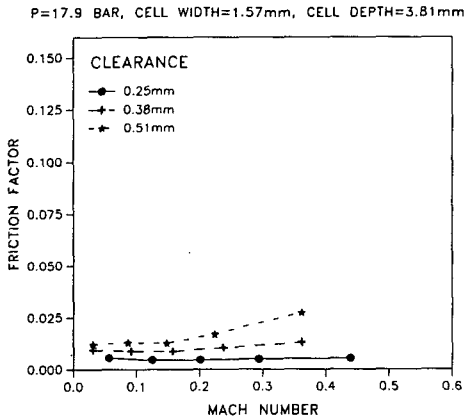


Fig. 12 Comparison of friction-factor with clearances

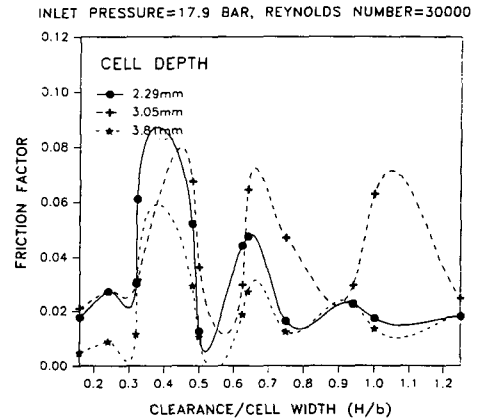


Fig. 14 Friction-factor versus the ratio of cell depth to cell width with cell depth

9 참조) 1.57 mm 셀넓이의 표면 마찰계수가 매끈한 표면의 것에 비해 적게 나타났다. 이것은 Stocker 등의 누설(leakage) 실험결과와 일치하는 것으로, 큰 허니콤 셀넓이의 경우에는 흐름 단면적이 셀안으로 확장되기 때문인 것으로 설명될 수 있다.

5.4 셀깊이의 영향

세 허니콤 셀깊이(2.29, 3.05, 및 3.81 mm)가 본 연구에 사용되었다. 0.41 mm 셀넓이 경우를 제외한 대부분의 실험에서, 3.05 mm 셀깊이의 마찰계수가 가장 크게 나타났고 이어 2.29 mm와 3.81 mm 순으로 되었다.(Fig. 11 참조)

5.5 간격의 영향

마찰계수에 대한 허니콤 표면사이 간격의 영향은 스페이서의 두께를 변화시킴으로써 행하여졌다. 본

연구에서는 세 간격(0.25, 0.38 및 0.51 mm)이 네 개의 셀넓이와 세개의 셀깊이에 대하여 사용되었다. “마찰계수 급상승현상”의 경우 때문에 분명한 경향을 찾기는 어렵지만, “마찰계수 급상승현상”이 일어나지 않는 경우에는 간격(clearance)이 증가함에 따라서 마찰계수가 증가함을 보였다.(Fig. 12 참조)

앞에서 논의된 것처럼 허니콤 셀넓이, 셀깊이, 그리고 간격이 매우 밀접하게 연관되어 표면 마찰계수에 영향을 주고 있다. 허니콤 셀넓이에 대한 셀깊이의 비(d/b)는 마찰계수에 대한 중요한 요소일 수 있다. Fig. 13은 d/b 에 대한 마찰계수 결과를 나타내며, 그 결과는 평판에 새긴 다양한 깊이의 원형공동에 대한 저항계수(resistance coefficient)를 발표한 Schlichting⁽⁷⁾의 결과와 매우 유사하다. 본 연구결과로부터, $d/b=3.87$ 의 경우

(0.79 mm 셀너비와 3.05 mm의 셀깊이), 간격이 0.38 mm일 때 최대의 마찰계수를 보였다. 허니콤 셀너비에 대한 간격의 비(H/b)에 대한 마찰계수 결과가 Fig. 14에 나타나 있다. 본 실험결과로부터 $H/b=0.48$ 의 경우(0.79 mm 셀너비와 0.38 mm 간격), 3.05 mm 셀깊이의 경우에 최대의 마찰계수를 보였다.

6. 허니콤 표면 마찰계수의 모델링

평판시험기를 사용한 허니콤 표면에 대한 마찰계수 실험결과로부터, 허니콤 표면에 대한 마찰계수는 기존의 Moody나 Blasius의 마찰계수 식과 같이 레이놀즈수나 표면 상대조도만의 함수로 정의되기 어려우며, 여러 실험변수들의 영향을 고려한 새로운 마찰계수 식을 만들 필요가 있다. 앞 절에서 논의한 허니콤 표면 마찰계수의 실험변수에 대한 영향분석으로부터 “마찰계수 급상승현상”이 일어나지 않는 경우 다음과 같은 특성을 알 수 있다:

- (1) 마찰계수는 마하수의 증가에 따라서 거의 일정하거나 약간 감소한다.
- (2) 입구압력이 증가함에 따라서 마찰계수는 감소한다.
- (3) 마찰계수는 허니콤 표면사이의 간격에 민감하며, 일반적으로 간격이 증가함에 따라서 증가한다.
- (4) 허니콤 셀너비에 대한 허니콤깊이의 비(d/b)와 허니콤너비에 대한 간격의 비(H/b)가 마찰계수에 중요한 요소이다. 그러나 Fig. 13과 Fig. 14에 나타난 것처럼 마찰계수는 이들 요소에 매우 불규칙하게 변한다. 따라서 이 요소들을 일반적인 마

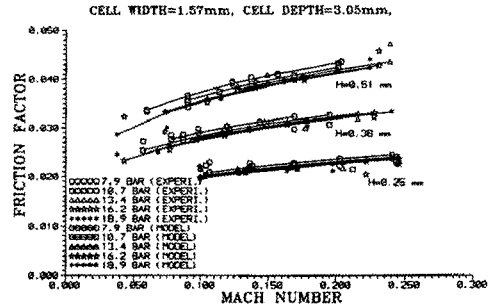


Fig. 15 Comparison between experimental and model data for the non-friction-jump case

찰계수 식에 포함시키기 어렵고 포함시킨다 하더라도 식의 복잡성때문에 사용하기에 편리하지 못한 것으로 사료된다. 결과적으로, 새로운 허니콤 표면 마찰계수 식은 각 허니콤 형상(셀너비 및 깊이)에 대하여 만들어졌다. 위의 특성을 고려한 허니콤 표면에 대한 마찰계수 식은 다음과 같다:

$$f = C_1 + \frac{H}{b} \left[\frac{C_2}{\frac{P}{P_c}} + C_3 (Ma)^{c_4} \right] \quad (6)$$

상수 C_1-C_4 는 실험결과로부터 통계프로그램인 SAS(statistical analysis software package)를 사용하여 결정하였고 Regression의 정밀도는 다음에 정의된 표준편차(standard error)로 나타낼 수 있다.

$$S_t = \left[\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (7)$$

상수 C_1-C_4 와 표준편차가 Table 2에 열거되었다. 1.57 mm 허니콤 셀너비와 3.05 mm 셀깊이의 경우 식(6)을 사용한 계산값과 실험결과의 비교가 Fig.

Table 2 Coefficients for the non-friction-factor-jump cases

Cell width	Cell depth	c_1	c_2	c_3	c_4	S_t
1.57 mm	3.81 mm	-0.0080	0.0019	0.0936	0.1254	0.0025
1.57 mm	2.29 mm	0.0097	0.0044	0.0502	-0.0372	0.0032
1.57 mm	3.05 mm	0.0045	0.0023	0.1664	0.2663	0.0017
0.79 mm	3.81 mm	0.0352	0.0013	-0.0021	-0.4520	0.0037
0.79 mm	2.29 mm	0.0773	0.0039	-0.0253	-0.2431	0.0076
0.51 mm	3.81 mm	0.0038	0.0009	0.0147	0.2565	0.0021
0.51 mm	2.29 mm	0.0080	0.0007	0.0194	0.2820	0.0029
0.41 mm	3.81 mm	0.0152	0.0018	0.0092	1.2826	0.0058

15에 나타나 있다. 이 비교에서 C_1-C_4 는 각각 0.0045, 0.0023, 0.1664와 0.2663이고 표준편차는 0.0017이었다.

7. 결 론

평판시험장치를 사용하여 허니콤 표면에 대한 마찰계수 측정 시험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일반적으로 허니콤 표면의 마찰계수는 매끈한 표면의 것보다 매우 크게 나타났다.

(2) 두개의 다른 마찰계수 특성이 관찰되었다. 하나는 관내 난류유동에서의 일반적 특성인 레이놀즈수(또는 마하수)가 증가함에 따라서 마찰계수가 거의 일정하거나 약간 감소하는 것이고, 다른 하나는 레이놀즈수(또는 마하수)가 증가함에 따라서 감소후 급상승하는 현상을 보였다.

(3) 마찰계수는 입구압력의 증가에 따라서 감소함을 보였다.

(4) 허니콤넓이에 대한 셀깊이의 비(d/b)와 허니콤넓이에 대한 간격의 비(H/b)가 허니콤 표면 마찰계수의 중요한 요소이며, $d/b=3.87$ 그리고 $H/b=0.48$ 에서 최대의 마찰계수를 보였다.

(5) 허니콤 표면에 대한 마찰계수는 기존의 마찰계수식인 Moody나 Blasius의 식으로 정의되기 어렵기 때문에 새로운 표면 마찰계수식이 마하수, 압력 및 간격의 함수로 만들어졌다.

참고문헌

(1) Childs, D. W. and Moyer, D. S., 1985, "Vibra-

tion Characteristics of the HPOTP(High-Pressure Oxygen Turbopump) of the SSME(Space Shuttle Main Engine)," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 107, No. 1, pp. 152~159.

(2) Childs, D. W., Elrod, D. and Hale, K., 1989, "Annular Honeycomb Seals: Test Results for Leakage and Rotordynamic Coefficients; Comparisons to Labyrinth and Smooth Configurations," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 111, April 1989, pp. 293~301.

(3) Moody, L. F., 1994, "Friction Factors for Pipe Flows," *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs.* 66, pp. 671~684,

(4) Stocker, H. L., Cox, D. M. and Holl, G. F., 1977, "Aerodynamic Performance of Conventional and Advanced Design Labyrinth Seals with Solid-Smooth, Abradable, and Honeycomb Lands," *Detroit Diesel Allison*, NASA CR-135307.

(5) Elrod, D. A., Nelson, C. C. and Childs, D. W., 1989, "An Entrance Region Friction Factor Model Applied to Annular Seals Analysis: Theory vs. Experiment for Smooth and Honeycomb Seals," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 111, pp. 293~301.

(6) Holman, J. P., 1978, *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, New York, NY, p. 45.

(7) Schlichting, H., 1979, *Boundary-Layer Theory*, 7th Ed., McGraw-Hill, New York, NY, p. 656.