

〈論 文〉

허니콤 표면의 마찰계수 특성에 관한 연구 (Part 2 : 마찰계수 급상승현상에 관한 고찰)

하 태 응*
(1993년 10월 29일 접수)

The Characteristic of Friction-Factor on Honeycomb Surfaces (Part II : Friction-Factor Jump Phenomenon)

Tae Woong Ha

Key Words : Honeycomb(허니콤), Friction-Factor Jump(마찰계수 급상승), Acoustic Resonance(음향공진), Resonance Mode(공진모드)

Abstract

Test results of friction-factor for the flow of air in a narrow channel lined with various honeycomb geometries show that, generally, the friction-factor is nearly constant or slightly decreases as the Reynolds number(or Mach number) increases, a characteristic common to turbulent flow in pipes. However, in some test geometries this trend is remarkably different. The friction factor dramatically drops and then rises as the Mach number increases. This phenomenon can be characterized as a "friction-factor jump." Further investigations of the acoustic spectrum indicate that the "friction-factor jump" phenomenon is accompanied by an onset of a normal mode resonance excited coherent flow fluctuation structure, which occurs at Reynolds number of the order of 10^4 . New empirical friction-factor model for "friction-factor jump" cases is developed as a function of Mach number and local pressure.

기 호 설 명

b : 허니콤 셀넓이
 d : 허니콤 셀깊이
 F : 음향 공진주파수
 f : Fanning 마찰계수
 H : 허니콤 표면사이 간격
 Ma : 마하수
 n : 관측수
 P : 정압
 P_c : 공기의 임계압력 (37.7 bar)
 S : 스트로할(Strouhal)수
 S_i : 표준편차(standard error)

U : 유체속도
 y_i : 실험데이터
 \bar{y}_i : 계산값
 λ : 파장

1. 서 론

터보기계의 밀봉장치인 환상실(annular seal)에 관한 최근의 연구는 그 실을 통한 작동유체의 누설(leakage)을 줄이고 실을 통한 시스템의 동적특성(rotordynamic characteristic)을 향상시키고자 함에 있다. 의도적으로 거칠게 만든 다양한 표면에 대한 실험과 해석이 여러 연구자들⁽¹⁻³⁾에 의해 이

*정회원, 경원대학교 건축설비학과

루어졌고, 유체나 기체 실설계에 이용되었다. 최근 허니콤 구조물을 실표면에 부착한 허니콤 실이 작동유체의 누설을 줄이고 시스템의 동적 안정성을 향상시키는데 유효하다는 실험적 결과가 Childs⁽⁴⁾에 의해 발표되었고, 허니콤 실에 대한 이론적 해석이 시도되었다. 허니콤 실의 이론적 해석에 있어서 중요한 문제중 하나는 허니콤 실표면에서의 표면 마찰손실을 정확히 예측하는 것이며, 이를 위해 다양한 허니콤 표면에 대한 표면 마찰계수가 실제 실험과 유사한 간격에 대하여 측정되었고, 그 결과로부터, 실험된 허니콤 표면의 42%가 레이놀즈수(또는 마하수)의 증가에 따라서 마찰계수가 급상승하는 결과를 나타냈다. 이 현상은 매우 큰 레이놀즈수(10⁴범위)에서 발생하는 것으로, 일반적인 층류

에서 난류로의 천이로 볼 수 없기 때문에 허니콤 실의 이론적 해석을 위해서 이 현상이 규명될 필요가 있다. 또한 실이 마찰계수가 급상승하는 구간에서 운전된다면 큰 마찰계수로 인해서 누설을 더욱 감소시킬 수 있고 시스템의 동적 안정성을 향상시킬 수 있는 가능성이 있다. 따라서 본 연구의 목적은 허니콤 표면에서 일어나는 마찰계수 급상승현상을 규명하고 이 경우에 대한 새로운 허니콤 표면 마찰계수식을 만드는 데 있다.

2. 마찰계수 급상승현상

Table 1에 열거된 것처럼, 매끈한 면과 허니콤 시편들에 대하여 평판시험기를 사용하여 마찰계수

Table 1 List of a smooth and honeycomb test specimens

Test no.	Cell width	Cell depth	Clearance	Range off	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	7-46
● 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

가 측정되었고, 그 결과는 일반적으로 허니콤 표면이 매끈한 표면보다 마찰계수가 매우 큰 것을 보였으며 마찰계수가 허니콤의 형상인 셀높이, 셀깊이, 허니콤 표면사이 간격의 조합에 민감한 것으로 나타났다. 또한 Fig. 1에 나타난 것처럼 매끈한 표면에 대한 마찰계수는 Moody 선도의 결과와 잘 일치함을 보였다. 대부분의 경우 마찰계수는 레이놀즈수(또는 마하수)의 증가에 따라서 거의 일정하거나 약간 감소하는, 관내 난류유동에서의 일반적인 마찰계수 특성과 일치함을 보였다. Fig. 1에서 1.57 mm와 0.51 mm 셀높이의 경우가 이러한 특성을 보여주고 있다. 그러나 Fig. 1에서 0.79 mm와 0.41 mm 셀높이의 경우는 매우 다른 경향을 보이고 있다. 마찰계수가 감소하다가 각각 레이놀즈수 15,000과 23,000에서 급상승하는 결과를 보이며 이하 이 현상을 “마찰계수 급상승현상”이라 부를 것이다. 허니콤 표면의 큰 표면조도를 고려할 때, 레이

놀즈수 15,000에서의 흐름은 난류로 확신할 수 있으며, 따라서 이 현상은 층류에서 난류로의 천이현상으로 볼 수 없다. 본 연구에서 행해진 실험중 42%가 마찰계수 급상승현상을 보였고, 이 경우들을 Table 1에서 “●”로 표시하였다.

3. 공동내의 압력요동

앞에서 언급된 마찰계수 급상승현상은 이미 알려진 공동흐름의 현상으로부터 설명할 수 있다. 이 절에서는 공동흐름의 현상에 관하여 고찰해 보고, 이 공동흐름의 현상과 허니콤 표면에서의 압력요동 측정에 관해 논하겠다. Fig. 2에 나타난 것처럼, 허니콤은 육각형 셀 모양이 연결되어 있는 구조를 하고 있다. 하나의 허니콤 셀은 셀높이(b)와 셀깊이(d)를 갖는 공동이며 주변에 같은 모양의 셀들이 연결되어 있다. 그러므로, 얇은 허니콤 표면 사

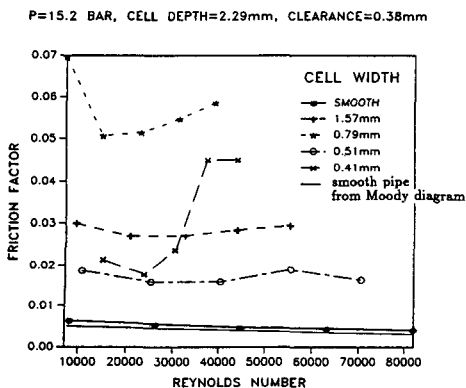


Fig. 1 A typical friction-factor pattern

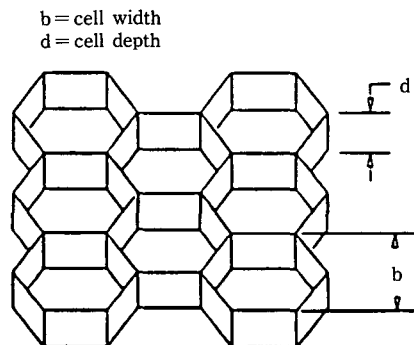


Fig. 2 Honeycomb cell pattern

이를 통과하는 공기의 흐름은 매우 복잡한 것으로 생각된다.

한개의 공동위를 흐르는 흐름에 관한 연구결과는 연속된 공동위를 흐르는 흐름에 대한 현상의 예측을 가능하게 할 수 있다. Krishnamurty⁽⁵⁾가 이차원 공동흐름에 관한 실험에서 공동으로부터의 강한 음향복사(acoustic radiation)에 동반된 주기적인 압력요동이 있음을 밝힌 이래, 여러 모양의 열린공동(open cavity)내의 압력요동에 관한 많은 이론적 및 실험적 연구가 Plumblee 등,⁽⁶⁾ Rossiter,⁽⁷⁾ East,⁽⁸⁾ Heller 등,⁽⁹⁾ Yu⁽¹⁰⁾ 및 Tam 등⁽¹¹⁾에 의해 행해졌다. 이들의 연구는 공동안에서 압력요동 발생에 관한 적절한 설명을 가능하게 하였다. 공동내의 압력요동은 두개의 다른 메카니즘에 의해 야기될 수 있다. 첫째는 feedback 모드공진에 의한 것으로 주로 얇은 공동(넓이/깊이 > 1.0)에서 일어나며, Rossiter 등⁽⁷⁾에 의해 제안되었다. Fig. 3에 나타난 것처럼, 공동의 상류끝단에서 주기적으로 발생된 와류들이 전단층(shear layer)을 따라서 공동의 하류끝단까지 이동된다. 이 와류들이 공동의 하류벽면에 부딪치고 이때 발생된 음향파동(acoustic pulse)은 공동내에서 상류쪽으로 전파되어 공동 상류끝단에서 전단층을 자극, 음향파동의 주파수로 새로운 와류를 발생시킨다. 이와 같은 방식으로 와류와 음향파동이 케한루프(feedback loop)를 형성한다. 이 경우의 공진주파수(resonance frequency)는 공동의 넓이와 관계가 있다. 둘째는

Plumblee 등⁽⁶⁾에 의해 제안된 normal 모드공진이다. 이것은 주로 깊은 공동(넓이/깊이 < 1.0)에서 일어나며, Fig. 3에 나타난 것처럼 공동의 열린쪽에 형성된 전단층의 요동에 의해서 공동의 하류벽면 근처에서 주기적인 외부 유체의 공동안으로 유입과 1/2주기 후 공동안으로부터 유체의 유출이 야기된다. 이 주기적인 질량유입과 유출은 공동안에서 압축파(compressible wave)를 발생시키는데, 이는 헬름홀츠(Helmholtz)공진기와 매우 유사하다. 이 경우의 공진주파수는 공동의 깊이와 관계가 있다.

이 압력요동은 난류유동장에서 발생한 큰 스케일 와류의 응집된 흐름구조(large scale coherent flow structure)의 일부분이다. 일반적인 난류유동장은 공동의 길이스케일(length scale, e. g. b 또는 d)보다 매우 작은 길이스케일의 압력요동과 불규칙한 속도성분을 포함하고 있는 것으로 여겨진다. 그러나 어떤 조건하에서는 공동의 길이스케일과 같은 큰 길이스케일의 흐름구조가 매우 작은 길이스케일의 난류유동장에 중첩된 큰 스케일와류의 응집된 흐름구조를 이룰 수 있다. 이런 흐름구조에서는 흐름의 혼합(mixing)에 의한 운동량전달(momentum transfer)이 지배적이 되고, 결과적으로 마찰제수에 영향을 줄 수 있을 것이다.

육각형의 허니콤 셀은 3차원이며 주변의 연속된 셀의 영향때문에 얇은 두 허니콤 표면사이를 흐르는 흐름은 분명히 단일 공동위를 흐르는 흐름과는 다를 것이다. 그러나 기본적인 흐름의 메카니즘은 단일 공동에서나 허니콤 셀에서 유사할 것으로 사료된다.

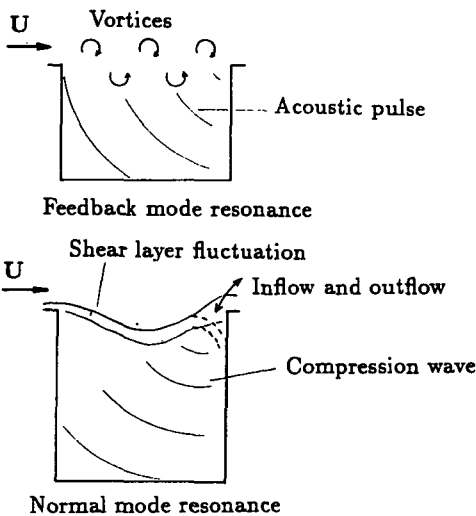


Fig. 3 Simplified pictorials of an acoustic resonance frequency generation for the single cavity

3.1 허니콤 셀내의 압력요동 측정장치

Fig. 4는 허니콤 셀(공동)내의 압력요동을 측정

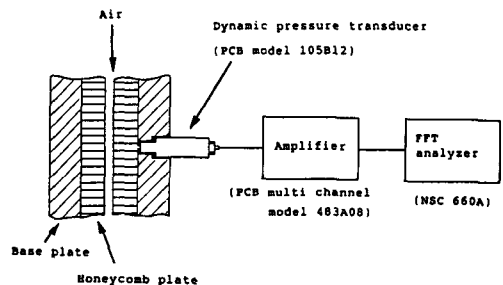


Fig. 4 Pressure fluctuation measurement system schematic

하기 위한 장치의 개략도이다. 하나의 허니콤 셀내의 동압을 측정하기 위하여 허니콤 셀 밑부분에 구멍을 뚫고 동압 측정기(dynamic pressure transducer)를 설치한다. 이 동압 측정기의 측정범위는 0.5 Hz~125 kPa이다. 동압 측정기로부터 측정된 시간에 따라 변하는 신호는 FFT(Fast Fourier Transform) 스펙트럼 분석기를 사용하여 주파수 영역으로 변환하여 공진주파수를 찾게된다. 동압 측정용 탭은 허니콤 시편의 중앙에 설치되어 있다.

4. 실험결과 및 고찰

“마찰계수 급상승현상”이 일어나는 경우를 포함하여 여러가지 허니콤 형상의 시편에 대하여 압력요동이 측정되었다. Fig. 5는 Table 1의 7, 17, 18 번 실험경우에 대한 마찰계수 결과를 보여주고 있다. 17 및 18번 실험경우는 “마찰계수 급상승현상”을 나타내고 7번 실험경우는 “마찰계수 급상승현상”이 일어나지 않는 경우이다. 위 세가지 경우에 대한 압력요동의 주파수 스펙트럼 결과가 Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 6과 Fig. 7은 $d/b=3.86$ 인 허니콤 공동에 대한 결과이다. 레이놀즈수(또는 마하수)가 증가함에 따라서 기본주파수(fundamental frequency)는 약 28 kHz에 접근한다. 만약 한 허니콤 공동이 허니콤 셀깊이를 갖는 한쪽이 뚫린 오르간 파이프와 같이 작용한다고 가정하면, 간단한 헤름홀츠주파수 계산으로부터 3.05

mm의 허니콤 셀깊이에 대한 기본주파수는 28 kHz가 된다. 따라서 이 압력요동은 normal 모드의 공진의 결과로 생각할 수 있다. Fig. 6의 “마찰계수 급상승현상”의 경우에, 기본주파수의 세기는 마찰계수의 급상승현상이 시작되는 레이놀즈수 24,000까지 증가한다. 더 큰 레이놀즈수에 대하여 기본주파수의 세기는 점점 감소하며, 레이놀즈수 44,000에서 그의 조화(harmonic)주파수들이 나타나기 시작한다. 이 조화주파수들의 세기가 증가함에 따라서 역시 마찰계수도 증가함을 보였다. 일반적으로 조화주파수들의 발생은 비선형효과(nonlinear effect)와 관계되는 것으로 마찰계수의 상승과 관련이 있는 것으로 생각할 수 있다. 이와 유사한 주

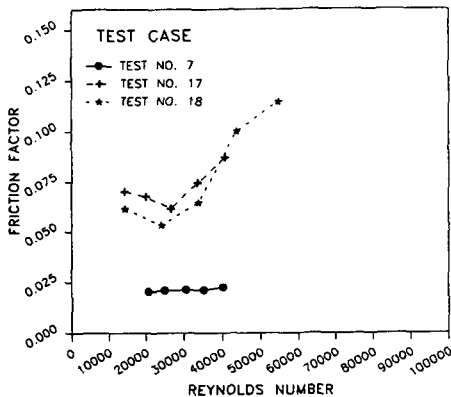


Fig. 5 Friction-factor versus Reynolds number for test number 7, 17, and 18 in Table 1.(Test no. 7 : $b=1.57$, $d=3.05$, $H=0.25$ mm ; Test no. 17 : $b=0.79$, $d=3.05$, $H=0.38$ mm ; Test no. 18 : $b=0.79$, $d=3.05$, $H=0.51$ mm)

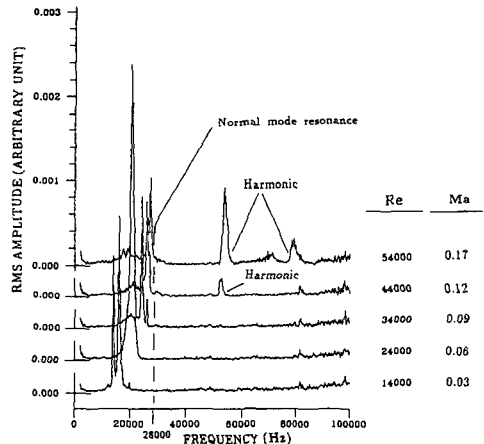


Fig. 6 Frequency spectra for test number 18($b=0.79$, $d=3.05$, and $H=0.51$ mm)

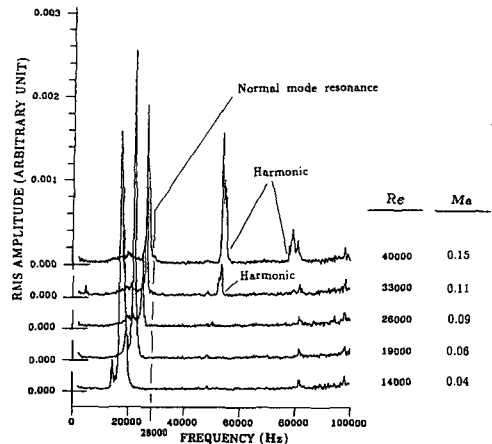


Fig. 7 Frequency spectra for test number 17($b=0.79$, $d=3.05$, and $H=0.38$ mm)

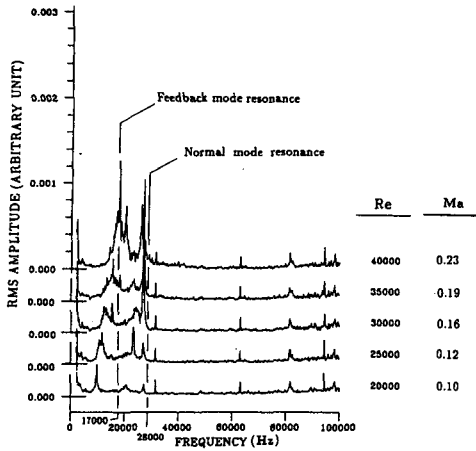


Fig. 8 Frequency spectra for test number 7 ($b=1.57$, $d=3.05$, and $H=0.25$ mm)

파수 스펙트럼이 Miksad⁽¹²⁾의 음향자극(sound excitation)에 의한 층류 자유전단층(laminar free shear layer)의 불안정성 및 천이에 관한 연구결과에서 나타났다. Miksad의 연구결과는 비선형효과와 관계가 있는 조화주파수와 하위 조화주파수(subharmonic)가 층류에서 난류로의 천이과정에서 발생됨을 보였다. “마찰계수 급상승현상”에 대한 적절한 설명은 다음과 같다. 허니콤 셀안에서 발생한 음향 공진 주파수(acoustic resonance frequency)에 의한 주기적 압력요동은 전단층을 자극하여 이미 난류인 유동장에 큰 스케일의 불안정성(instability)을 야기하며 이것은 조화주파수들에 의해 큰 스케일 와류의 응집된 흐름구조로 발전된다. 이 흐름구조에서는 운동량전달이 보다 효과적으로 이루어짐으로써 에너지소산이 증가, 결과적으로 마찰계수가 상승하게 된다.

“마찰계수 급상승현상”이 일어나지 않는 경우 ($d/b=1.93$)의 스펙트럼 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이 경우에는 2개의 기본주파수가 나타난다. 하나는 레이놀즈수(또는 마하수)가 증가함에 따라서 17 kHz로 접근하고 다른 하나는 28 kHz로 접근한다. 허니콤 셀의 깊이가 ($d=3.05$ mm) 앞의 두 경우와 같기 때문에 28 kHz는 normal 모드공진으로 볼 수 있다. 그러나 17 kHz는 다르다. 만약 공동위를 흐르는 와류의 평균속도를 유체 평균속도의 66%로 가정한다면, Feedback 모드공진 개념으로부터 파장과 주파수의 관계는 $F=0.66U/\lambda$ 가 된다. 측정된 17 kHz는 허니콤 셀깊이의 두배에

해당하는 파장을 갖는 것으로 이 셀의 Feedback 모드공진과 일치한다. 따라서, “마찰계수 급상승현상”이 일어나지 않는 경우에는 normal 모드공진과 feedback 모드공진이 동시에 존재하며 그 기본주파수들의 밴드폭(bandwidth)도 비교적 넓게 나타났다. 더욱이, normal 모드공진에 대한 조화주파수들이 나타나지 않기 때문에 이 유동장은 큰 스케일 와류의 응집된 흐름구조로 발전하지 않고 결과적으로 마찰계수의 상승현상을 보이지 않는다. 이와 유사한 스펙트럼결과가 난류유동 범위에서 Miksad에 의해 발표되었다.

스트로할수(Strouhal number)는 무차원화된 주파수로서 허니콤 셀깊이(d)를 사용하여 아래와 같이 정의한다.

$$S = \frac{Fd}{U} \tag{1}$$

여러가지 허니콤 셀의 기본주파수와 그의 조화주파수에 대한 스트로할수가 마하수의 함수로 Fig. 9에 나타나 있다. 이 데이터들은 3개의 곡선군을 이루고 있으며 위 두 곡선은 “마찰계수 급상승현상”이 일어나는 허니콤 형상의 경우이고 아래곡선은 “마찰계수 급상승현상”이 일어나지 않는 경우에 해당된다. 작은 마하수 범위에서 여러 직사각형 공동에 대한 Tam 등⁽¹¹⁾의 이론적 스트로할수의 계산결과와 비교해 볼 때, 위 두 곡선은 normal 모드공진과 정성적으로 잘 일치됨을 보였다. 이 비교는 허니콤 셀에서 발생하는 음향공진 모드와 그것의 조화주파수들이 마찰계수 급상승현상과 관계된다는 설명을 뒷받침하고 있다.

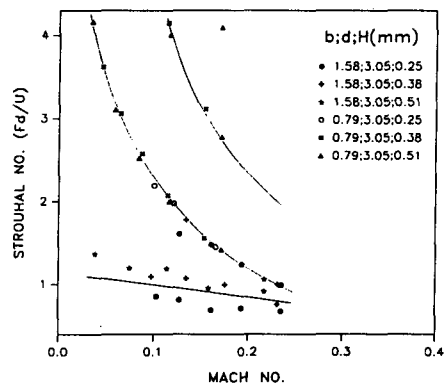


Fig. 9 Strouhal number for various honeycomb geometries

5. 허니콤 표면 마찰계수 모델링

“마찰계수 급상승현상”의 경우

앞서 논의된 것처럼 “마찰계수 급상승현상”은 허니콤 형상과 관계된 음향공진 모드와 밀접한 관계를 갖고 있는 것으로 설명되어 졌다. 그러나 본 연구결과로서는 어떤 허니콤 형상에서, 그리고 어떤 흐름조건(마하수)에서 상승현상이 시작될지 예측할 수 없었다. Fig. 10에 나타난 것처럼 마찰계수의 상승은 마하수의 함수이지만 허니콤 형상과 허니콤 표면간격에 따라서 상승을 시작하는 마하수가 다를 것을 보이고 있다.

이같은 불규칙성때문에 이 경우의 마찰계수 식은 주어진 허니콤 형상과 간격에 대하여 마하수와 압력의 함수로 아래와 같이 표현되었다.

$$f = c_1 + \frac{c_2}{\left(\frac{p}{p_c}\right)} + c_3(Ma) + c_4(Ma)^2 + c_5(Ma)^3 \quad (2)$$

상수 $c_1 - c_5$ 는 평판 실험결과로부터 통계프로그램인 SAS(Statistical Analysis Software Package)을 사용하여 결정하였다. regression의 정밀도는 다음에 정의된 표준편차(standard error)로 나타내었다.

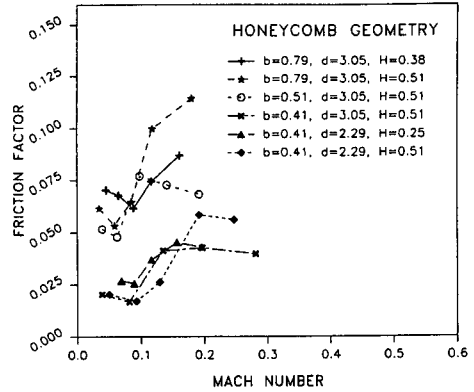


Fig. 10 Friction factor versus Mach number for friction-factor-jump cases

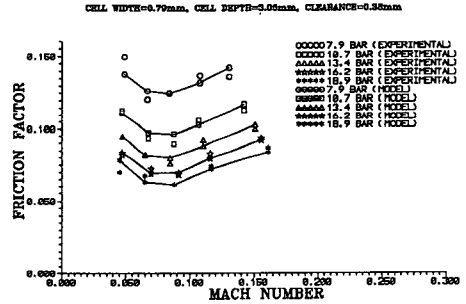


Fig. 11 Comparison between experimental and model data for the friction-factor-jump case

Table 2 Coefficients for the friction-factor jump cases

b	d	H	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	max. Ma	S_t
0.79 mm	3.05 mm	0.25 mm	0.0864	0.0180	-2.0088	13.373	-27.264	0.17	0.0011
0.79 mm	3.05 mm	0.38 mm	0.1435	0.0228	-3.9179	37.453	-106.67	0.17	0.0026
0.79 mm	3.05 mm	0.51 mm	0.1225	0.0118	-3.6471	44.051	-139.10	0.18	0.0035
0.51 mm	3.05 mm	0.25 mm	-0.0414	0.0112	3.2779	-36.837	118.27	0.16	0.0035
0.51 mm	3.05 mm	0.38 mm	0.0279	0.0070	0.3340	-3.7635	9.5870	0.21	0.0034
0.51 mm	3.05 mm	0.51 mm	0.0638	0.0050	-0.7141	9.5679	-32.127	0.20	0.0041
0.41 mm	2.29 mm	0.25 mm	-0.0776	0.0087	1.8550	-11.133	21.772	0.20	0.0024
0.41 mm	2.29 mm	0.38 mm	0.0613	0.0028	-1.5054	13.516	-32.344	0.24	0.0017
0.41 mm	2.29 mm	0.51 mm	0.0638	0.0023	-1.5595	13.899	-31.745	0.26	0.0025
0.41 mm	3.05 mm	0.25 mm	-0.0469	0.0025	1.5621	-10.326	20.485	0.24	0.0015
0.41 mm	3.05 mm	0.38 mm	0.0138	0.0026	0.0877	0.4006	-2.2445	0.27	0.0022
0.41 mm	3.05 mm	0.51 mm	0.0340	0.0013	-0.4862	4.8140	-10.934	0.29	0.0028

$$S_i = \left[\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (3)$$

상수 $c_1 - c_8$ 와 표준편차가 Table 2에 나타나 있다. 0.79 mm 허니콤 셀넓이와 3.05 mm 셀깊이와 0.25 mm 간격의 경우 식(2)를 사용한 계산값과 실험결과의 비교가 Fig. 11에 나타나 있다. “마찰계수 급상승현상”의 경우에 식(2)의 유효 마하수의 범위는 실험된 마하수의 범위로 제한된다. 왜냐하면 그보다 높은 마하수에서 마찰계수 급상승현상을 추정할 수 없기 때문이며 최대 마하수가 Table 2에 나타나 있다.

6. 결 론

허니콤 표면에서 “마찰계수 급상승현상”을 설명하기 위해 허니콤 셀내의 압력요동을 동압측정기를 사용하여 측정된 스펙트럼 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) “마찰계수 급상승현상”이 일어나는 경우에는 허니콤 셀의 깊이와 관계된 normal 모드(헤름홀츠공진)의 기본주파수에 의한 압력요동이 발생하고 그의 조화주파수들이 존재한다. 길이스케일이 매우 작은 기본 난류유동장에 음향공진에 의해 비교적 큰 길이 스케일의 주파수들이 중첩된 흐름구조인 큰 스케일과류의 응집된 흐름구조로 발전한다. 이 같은 흐름구조에서는 비선형효과가 지배적이고 운동량전달이 보다 효과적으로 이루어짐으로써 에너지소산이 증가, 결과적으로 마찰계수의 상승현상을 보이게 된다.

(2) “마찰계수 급상승현상”이 일어나지 않는 경우에는 허니콤 셀의 깊이와 관계된 normal 모드공진과 허니콤 셀의 넓이와 관계된 feedback 모드공진이 동시에 존재한다. 그러나 normal 모드의 조화주파수들이 발생하지 않기 때문에 비선형효과가 중요하지 않고 이 흐름구조는 큰 스케일과류의 응집된 흐름구조로 발전하지 못하므로 결국 “마찰계수 급상승현상”을 보이지 않는다.

(3) “마찰계수 급상승현상”은 허니콤의 형상과 허니콤 표면사이의 간격 및 마하수의 함수로 나타났다. 그러나 본 연구에서는 어떤 허니콤 형상에서 그리고 어떤 흐름조건(마하수)에서 마찰계수가 상승할 것인지를 예측할 수 없었다.

(4) “마찰계수 급상승현상”의 경우에 대한 허니콤 표면 마찰계수 식을 마하수와 압력의 함수로 각

허니콤 형상에 대하여 제안하였다.

참고문헌

- (1) Childs, D. W. and Kim, C. H., 1985, “Analysis and Testing for Rotor Dynamic Coefficients of Turbulent Annular Seals with Different Directionally Homogeneous Surface Roughness Treatment for Rotor and Stator Elements,” *ASME Journal of Lubrication Technology*, Vol. 108, pp. 605~611.
- (2) Nelson, C. C., 1984, “Analysis for Leakage and Rotordynamic Coefficients of Surface Roughened Tapered Annular Gas Seals,” *ASME Journal of Engineering for Power*, Vol. 106, No. 4, pp. 927~934.
- (3) Childs, D. W. and Kim, C. H., 1986, “Test Results for Round-Hole Pattern Damper Seals: Optimum Configurations and Dimension for Maximum Net Damping,” *ASME Journal of Tribology*, Vol. 108, pp. 605~611,
- (4) Childs, D. W., Elrod, D. and Hale, K., 1988, “Annular Honercomb Test Results for Leakage and Rotordynamic Coefficients; Comparisons to Labyrinth and Smooth Configurations,” *ASME Paper 88-Trib-35, ASME/STLE Joint Tribology Conference*.
- (5) Krishnamutry, K., 1955, *Acoustic Radiation from Two-Dimensional Rectangular Cutouts in Aerodynamic Surfaces*, NASA TN 3487,
- (6) Plumblee, H. E., Gibson, J. S. and Lassiter, L. W., 1962, *A Theoretical and Experimental Investigation of the Acoustic Response of Cavities in an Aerodynamic Flow*, WADC-TR-61-75.
- (7) Rossiter, J. E., 1964, *Wind Tunnel Experiments on the Flow over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds*, Royal Aircraft Establishment, TR No. 64307.
- (8) East, L. F., 1966, “Aerodynamically Induced Resonance in Rectangular Cavities,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol 3, No. 3, pp. 277~287.
- (9) Heller, H. H. and Bliss, D. B., 1975, *Aerodynamically Induced Pressure Oscillations in Cavities-Physical Mechanisms and Suppression*

Concepts, AFFDL-TR-74-133.

- (10) Yu, Y. H., 1976, "Measurements of Sound Radiation from Cavities at Subsonic Speeds," *AIAA Paper No. 76-529, Presented at the AIAA 3rd Aeroacoustics Conference, Palo Alto, CA, July 20-23.*
- (11) Tam, C. K. and Block, P. J. W., 1978, "On the Tones and Pressure Oscillations Induced by Flow over Rectangular Cavities," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 89, Part 2, pp. 373-399.
- (12) Miksad, R. W., 1972, "Experiments on the Nonlinear Stages of Free-Shear-Layer Transition," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 56, Part 4, pp. 695-719.