

다공벽의 기체역학에 관한 연구

곽종호[†] · 김희동^{*}

A Study of the Gasdynamics of Perforated Wall

Jong-Ho Gwak and Heuy-Dong Kim

Key Words: Boundary Layer(경계층), Compressible Flow(압축성 유동), Passive Control(피동제어), Perforated Wall(다공벽), Porosity(기공율), Small Disturbance Method(미소교란법)

Abstract

Perforated wall has long been employed to control a variety of flow phenomena. It has been, in general, characterized by a porosity of the perforated wall. However, this porosity value does not take account of the number and detailed shape of porous holes, but is defined by only the ratio of the perforated area to total wall surface area. In order to quantify the porous wall effects on the flow control performance, an effective porosity should be known with the detailed flow properties inside the porous holes. In the present study, a theoretical analysis using a small disturbance method is performed to investigate detailed flow information through porous hole and a computational work is also carried out using the two-dimensional, compressible Navier-Stokes equations. Both the results are compared with existing experimental data. The gasdynamical porosity is defined to elucidate the effect of perforated wall.

1. 서론

최근 미소관로를 통하는 유동은 MEMS나 Bio-Thermal and Fluid Mechanics분야에서 매우 다양한 형태로 응용되고 있다. 이와 같은 응용에서, 직경이 매우 작은 관로를 통하는 기체유동은 저레이놀즈수와 고마하수의 영향을 받게 되므로, 관로 내부에서 발생하게 되는 유체의 점성과 열전달 효과뿐만 아니라 유동의 압축성이 매우 중요한 역할을 하게 된다.

일반적으로 충격파와 경계층의 상호간섭현상⁽¹⁾이라든지, 유동유발 소음(flow-induced noise)현상⁽²⁾ 등을 제어하기 위하여 종래 다공벽이 많이 적용

되어, 유동제어의 효과를 실험적으로 조사한 많은 실례가 있었다⁽³⁻⁵⁾. 이러한 다공벽은 대부분 직경이 수 mm이하의 미소구멍으로 구성되어 있으며, 다공벽의 미소구멍을 통하는 유동의 특성에 관해서는 지금까지 단지 정성적으로 알려져 왔을 뿐 이에 관한 구체적인 연구사례는 매우 드물다. 더욱이 다공벽의 특성을 나타내는 기공율(porosity)은 다공벽의 구멍의 개수나 형상에 관계없이, 전체 벽의 표면에 대한 구멍의 표면적만으로 정의하고 있어, 실제 기체역학적인 기공율의 정의에 고찰이 필요하다.

구체적으로 충격파와 경계층유동의 간섭현상을 제어하기 위한 수단으로, 충격파가 위치하는 영역에 다공벽을 설치하여 어떤 특성의 기공율인 경우, 충격파와 경계층의 간섭현상이 성공적으로 제어된 연구사례가 있다⁽³⁻⁵⁾. 이 경우 다공벽의 구멍을 통하는 기체유동의 특성은 제어효과를 평가하는데 필수적으로 알려져야 하지만, 지금까지 이러

[†] 안동대학교 기계공학과 대학원

E-mail : kimhd@andong.ac.kr

TEL : (054)820-6018 FAX : (054)823-5495

^{*} 안동대학교 기계공학부

한 유동에 대한 이론적 및 수치해석적인 접근이 곤란하였을 뿐만 아니라, 미소구멍을 통하는 유동의 계측이 곤란하므로, 실험적 연구에 한계가 있었다.

일반적으로 일정 단면적의 유로를 기체가 통과하는 경우, 관로 벽면에서 발생하는 기체의 점성과 열전달의 효과는 잘 알려진 Fanno방정식과 Rayleigh방정식⁽⁶⁾에 의하여 이해되어 왔다. 그러나 이들 방정식들은 유동방향으로 점성의 효과 및 열전달의 효과가 일정하다고 가정하는 일차원 유동에 근거하고 있어, 실제 유동과는 상당한 차이가 있을 것으로 예상된다. 더욱이 위의 두 방정식들에 의하면, 관로가 충분히 긴 경우, 점성에 기인하는 것이든, 열전달에 기인하는 것이든, 관로 출구에서 유동에 초크하는 한계조건을 전제하고 있어⁽⁷⁻⁹⁾, 관로 내부에서 발생하는 유동의 기체역학에 관해서는 상세 정보를 제공하지 않는다.

본 연구에서는 다공벽의 기체역학을 상세하게 조사하기 위하여, 이론해석과 수치해석을 수행하여, 유용한 종래의 실험결과와 비교하였다. 이론해석에서는 다공벽의 미소구멍을 통과하는 질량유량과 압력손실의 관계를 이용하여, 다공벽 내부에서 발생하는 기체유동의 특성을 조사하였다. 또 수치해석에서는 압축성 Navier-Stokes방정식에 유한 체적법을 적용하여, 이론해석의 결과와 비교하였다. 본 연구의 이론해석 및 수치해석의 결과로부터 다공벽의 미소구멍을 통하는 기체역학을 상세하게 파악할 수 있었으며, 다공벽의 유효기공율 (effective porosity)을 얻을 수 있었다.

2. 이론해석

Fig. 1에 도식적으로 나타낸 바와 같이, 본 연구에서는 다공벽을 구성하는 미소구멍을 통과하는 점성 압축성 유동을 해석하기 위하여, 다공벽을 지나는 유동에서 전압 p_0 와 정압 p_s 를 가지는 난류경계층 유동을 가정한다. T_0, p_w, ρ_w 는 각각 벽면유동의 전온도, 압력, 밀도이며, p_s, T_s, U_e, ρ_e 는 각각 속도분포 $U(y)$ 를 가지는 경계층 외연에서의 압력, 온도, 속도, 밀도를 나타낸다. 이러한 점성 압축성 유동이 다공벽을 통과하는 경우, 직경 D 와 길이 l 인 미소구멍의 입구(그림의 점1)에서 유동상태량들은 마하수 M_h , 속도 v_h , 밀도 ρ_h , 압력 p_l 으로 정의한다. 이 경우 경계층 내부에서 압력구배가 발생하지 않는다고 가정하면, 다공벽

면에서의 압력 p_w 는 p_s 와 같으며, 벽면에서의 유속이 0이므로 p_w 는 p_0 와 같게 된다. 이때 미소구멍의 출구(그림의 점2)에서의 정압과 마하수는 다음과 같은 해석절차에 의하여 얻어질 수 있다.

먼저, 기체의 상태방정식으로부터 일반적으로 국소 압력비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{p}{p_0} = \frac{T}{T_0} \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{T}{T_0} \frac{\rho v A}{\rho_0 v_0 A} = \frac{T}{T_0} \frac{\dot{m} \rho^* v^*}{\rho^* v^* \rho_0 v_0} \tag{1}$$

$$= \frac{T}{T_0} \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{max}} \frac{\rho^*}{\rho_0} \frac{a^*}{v}$$

식(1)에서 하첨자 0은 정체점 상태를, 그리고 상첨자 *는 유동의 임계 즉 초크 상태를 의미한다. 또 a^*/v 는 $1/M^*$ 로 정의되며 ρ^*/ρ_0 는 임계상태에서 밀도비를 나타내므로, 식(1)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{p}{p_0} = \frac{T}{T_0} \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{max}} \frac{1}{M^*} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{1/(\gamma-1)} \tag{2}$$

식(1)과 (2)에서 T/T_0 와 M^* 는 에너지 방정식으로부터 마하수 M 의 함수로 표현될 수 있으므로 식(2)는 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{p}{p_0} \frac{\dot{m}_{max}}{\dot{m}} = \frac{\left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\gamma/\gamma-1}}{M \sqrt{1 + \frac{\gamma-1}{\gamma+1} (M^2 - 1)}} \tag{3}$$

위 식(3)은 Fig. 1에 도시된 점 1과 2사이의 압력 p 와 마하수 M 의 관계식을 얻는데 적용될 수 있으며, 점 1과 2사이의 유동에서 발생하게 되는 점성효과의 유무에 관계없이 사용될 수 있다. 한편 이와 유사하게 식(3)에서 질량유량비 \dot{m}_{max}/\dot{m} 는 식(4)와 같이 M_h 와 M_h^* 의 함수로 표현할 수 있다.

$$\frac{\dot{m}_{max}}{\dot{m}} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{1/(\gamma-1)} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_h^2 \right)^{1/(\gamma-1)} \frac{1}{M_h^*}$$

$$= \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_h^2 \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \frac{1}{M_h}$$

한편 Fig. 1에서 점 1과 2사이의 미소구멍에서 발

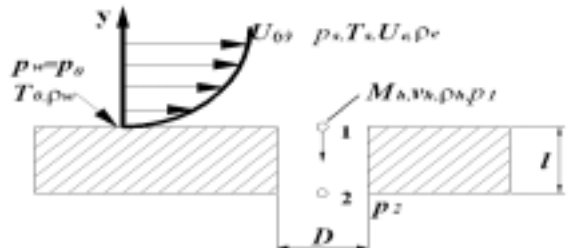


Fig. 1 Flow configuration and definitions

생하는 유동의 점성효과는 다음과 같은 Fanno 유동의 관계식으로부터 결정된다.

$$\frac{1 - M^2}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2} \frac{1}{M^3} \frac{dM}{d\ell} = \frac{\gamma}{2} \frac{\lambda}{D} \quad (5)$$

위 식에서 l 은 미소구멍의 입구로부터 출구로 향하는 거리이며, λ 는 관마찰계수를 의미한다. 미소구멍 내부에서, 유동이 초크하는 위치 l 에서 $M=1.0$ 의 조건으로 적분하면 식(6)으로 변형된다.

$$\frac{1}{\gamma} \left(1 - \frac{1}{M^2}\right) + \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \ln \left[1 - \frac{2}{\gamma + 1} \left(1 - \frac{1}{M^2}\right)\right] = \frac{\lambda}{D} \ell \quad (6)$$

위에서 기술한 식들을 이용하여, 다공벽의 미소구멍에서 발생하는 압력강하 $p_1 - p_2 = \Delta p$ 로 정의하면, 다음의 관계식을 얻는다.

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{p_1 - p_2}{p_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{\max}} \times \left[\frac{1}{M_h \sqrt{1 + \frac{\gamma-1}{\gamma+1} (M_h^2 - 1)}} - \frac{1}{M_2 \sqrt{1 + \frac{\gamma-1}{\gamma+1} (M_2^2 - 1)}} \right] \quad (7)$$

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{\max}} = \frac{M_h}{\left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_h^2\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}$$

여기에서 $\dot{m} = \rho_h v_h A$ 는 미소구멍을 통하는 질량 유량이며, $\dot{m}_{\max} = \rho^* a^* A$ 로 등엔트로피 유동인 경우의 질량유량을 의미한다. 한편 관마찰계수를 일정한 값으로 가정하고, 미소구멍의 입구(점1)에서 출구(점2)까지 적분을 수행하면 식(8)을 얻는다.

$$\frac{1}{\gamma} \left(1 - \frac{1}{M_2^2}\right) + \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \ln \left[1 - \frac{2}{\gamma + 1} \left(1 - \frac{1}{M_2^2}\right)\right] - \frac{1}{\gamma} \left(1 - \frac{1}{M_h^2}\right) - \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \ln \left[1 - \frac{2}{\gamma + 1} \left(1 - \frac{1}{M_h^2}\right)\right] = \frac{\lambda}{D} \ell \quad (8)$$

따라서 위의 식(7)과 (8)로부터 M_2 를 소거하면, 미소구멍을 통하는 유동에서 발생하는 압력강하 $p_1 - p_2$ 는 M_h 의 함수로 얻을 수 있다. 본 연구에서는 미소구멍의 길이 l 이 크지 않으므로, M_2 는 다음과 같이 미소섭동량과 M_h 의 함으로 표현한다.

$$M_2 = M_h + \epsilon, \quad \epsilon^2 \ll 1 \quad (9)$$

위의 식(9)를 (7)에 적용하면,

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{\max}} \frac{1}{M_h \sqrt{1 + \frac{\gamma-1}{\gamma+1} (M_h^2 - 1)}} \quad (10)$$

$$\times \left[\frac{\epsilon}{M_h} + \frac{\frac{\gamma-1}{\gamma+1} M_h \epsilon}{1 + \frac{\gamma-1}{\gamma+1} (M_h^2 - 1)} + \phi(\epsilon^2) \right]$$

또 유사한 방법으로 식(9)를 식(8)에 적용하면,

$$-\frac{2}{\gamma + 1} (M_h^2 - 1) \frac{\epsilon}{\gamma M_h^3} + \phi(\epsilon^2) = \frac{\lambda}{D} \ell \quad (11)$$

식(10)과 (11)에서 $\phi(\epsilon^2)$ 항은 미소하므로, 이를 무시하면 식(11)은

$$\frac{\epsilon}{M_h^3} = \frac{\gamma \lambda \ell}{2D} \frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_h^2}{1 - M_h^2} \quad (12)$$

위의 식에서 다공벽의 미소구멍을 통하는 유동에 있어서, $M_h < 1$ 인 경우에는 $\epsilon > 0$ 으로 되어, 유동은 미소구멍에서 가속하게 되며, $M_h > 1$ 인 경우에는 점성의 영향으로 유동이 감속하게 된다. 또 식(7)과 식(10)으로부터 다음의 식(13)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{[1 + (\gamma - 1) M_h^2] M_h^2}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_h^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)} (1 - M_h^2)} \frac{\gamma \lambda \ell}{2D} \quad (13)$$

위의 식에서 $M_h < 1$ 인 경우에는 $\Delta p > 0$ 이며, $M_h > 1$ 인 경우에는 $\Delta p < 0$ 으로 된다. 또 M_h 가 매우 작은 아음속이거나, 거의 음속인 경우, 그리고 M_h 가 매우 큰 초음속인 경우에 식(13)은 각각 다음의 세 형태의 식들로 주어진다.

$$M_h^2 \ll 1 : \frac{\Delta p}{p_0} = M_h^2 \frac{\gamma \lambda \ell}{2D} \quad (14)$$

$$M_h \approx 1 : \frac{\Delta p}{p_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \frac{1}{1 - M_h} \frac{\gamma^2 \lambda \ell}{4D} \quad (15)$$

$$M_h^2 \gg 1 : \frac{\Delta p}{p_0} = - \frac{1}{\left(\frac{\gamma-1}{2} M_h^2\right)^{1/(\gamma-1)}} \frac{\gamma \lambda \ell}{D} \quad (16)$$

3. 수치해석

본 연구에서는 미소구멍을 통하는 유동을 수치적으로 모사하기 위하여, 축대칭, 압축성 Navier-Stokes 방정식에 표준형 $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하여

유한 체적법으로 수치해석을 수행하였다. 공간항에 대해서는 풍상차분법, 시간항에 대해서는 4단계 Runge-Kutta법으로 이산화하였다.

Name	d	D	k _{geo}	k _{gas}
I	3.112	0.125	3.94	2.94
II	2.663	0.140	4.91	3.75
III	5.021	0.300	5.67	5.52
IV	5.406	0.280	4.94	5.84
V	4.718	0.300	5.64	6.27

Table 1 Diameter and porosity value of perforated holes

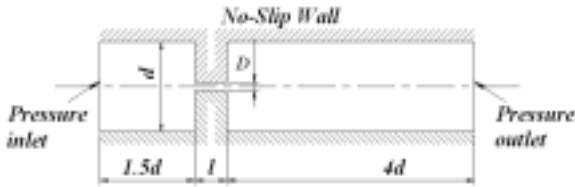


Fig. 2 Boundary conditions

Fig. 2에서 본 수치계산에 적용된 미소관로를 통하는 유동의 계산영역을 나타내었으며, 다공벽을 중심으로 상/하류로 각각 관로 직경 d의 1.5배와 4배로 설정하였다. 다공벽의 길이 l은 1mm이다. 다공벽의 형상은 위의 그림에 나타난 경우와 다공벽에 대해 30°(II, V) 기울어진 두 가지 경우를 적용하였으며, 미소구멍의 직경은 D로 정의한다. 본 수치계산의 경계조건으로는 다공판 상류의 전압력 및 전온도를 적용한 pressure inlet, 하류에는 정압력을 적용한 pressure outlet이 적용되었다. 수치계산에 사용된 기체는 공기이며, 다공벽면 및 관로 벽면은 단일 no-slip조건을 적용하였다. 본 수치계산에 사용된 미소구멍의 상세 치수와 기공율은 Table 1에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 3에는 본 연구의 이론해석의 결과를 나타내었다. 식(14)는 $M_h^2 \ll 1$ 인 경우에 미소섭동법에 의하여 얻어진 이론해석의 결과이며, 그림에서 M_h 가 약 0.57까지는 식(13)의 결과와 잘 일치한다. 이것은 미소구멍을 통하는 유동이 $M_h=0.57$ 에서 $M_2=1$ 로 된다는 것을 의미한다. 식(15)는 $M_h \approx 1.0$ 인 경우이며, $M_h=0.8 \sim 1.2$ 사이에서 식(13)의 결과와 잘 일치하고 있다. 식(16)은 $M_h^2 \gg 1$ 인 경우이며, $\Delta p < 0$ 인 것은 M_h 가 매우 큰 경우, 예를 들면 극초음속 같은 유동에서 점성의 영향으로

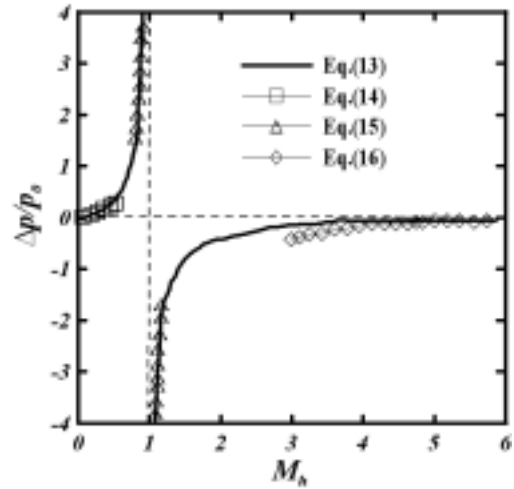


Fig. 3 $\Delta p/p_0$ vs M_h

인해 유효단면적이 감소한다는 것을 의미한다. 그림에서 식(16)의 결과는 M_h 가 5.0이상에서 식(13)과 잘 일치한다.

Fig. 4에는 관마찰계수 λ 를 매개변수로 하여 이론해석으로부터 얻어진 M_h 와 $\Delta p/p_0$ 의 관계를 나타내었다. 참고로 그림의 굵은 실선은 Doerffer & Bohning⁽⁸⁾에 의하여 얻어진 다공벽의 경험식을 도시하였다.

$$M_h = 1.2 \left(\frac{\Delta p}{p_0} \right)^{0.55} \tag{17}$$

위의 경험식은 레이놀즈수가 약 650이고, $\lambda=0.1$ 인 경우에 대한 것이며, 본 이론해석의 결과는 $\lambda=0.13$ 인 경우 식(17)의 경험식과 잘 일치한다. 그림에서 주어진 λ 에 대하여 $\Delta p/p_0$ 가 증가할수록 M_h 가 증가하며, λ 가 증가할수록 동일한 M_h 값을 얻기 위해서는 $\Delta p/p_0$ 가 증가하여야 한다는 것을 알 수 있다. 또 λ 가 매우 작은 경우, 예를 들면

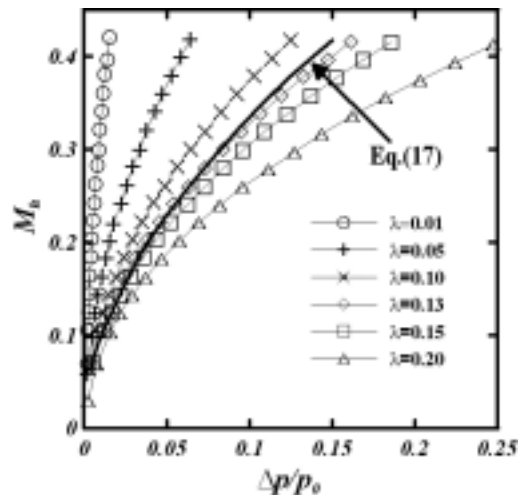


Fig. 4 M_h vs $\Delta p/p_0$

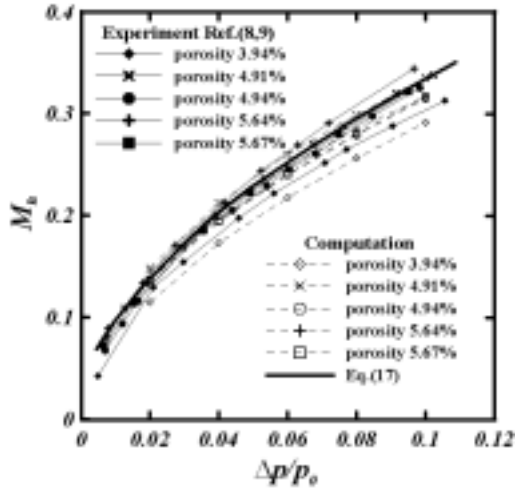


Fig. 5 M_h vs $\Delta p/p_0$

$\lambda=0.01$ 인 경우 $\Delta p/p_0$ 의 매우 작은 변화는 M_h 값을 급속하게 증가시킨다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에는 본 연구의 수치계산으로부터 얻어진 M_h 와 $\Delta p/p_0$ 의 관계를 이전의 실험결과와 비교하였다. 그림에 나타난 기공율은 다공벽의 형상으로부터 얻어진 것이며, 본 연구의 수치계산 결과는 M_h 를 다소 과소평가하는 것으로 보인다. 구체적으로 동일한 $\Delta p/p_0$ 값에 대해 본 수치계산 결과는 실험에서 얻어진 M_h 보다 약간 작다. 또 동일한 $\Delta p/p_0$ 를 얻기 위해서, 실험에서는 5.64%인 경우에 M_h 가 가장 크지만, 수치계산에서는 기공율이 4.91%에서 가장 큰 M_h 가 얻어진다. 이것은 본 수치계산에서 적용된 다공벽은 1개의 미소구멍으로 이루어진데 반해 실험에서는 다수의 미소구멍으로 다공벽을 구성하여, 다공벽을 통과하는 유동의 압력손실이 유동장의 유효압력비에 영향을 미치기 때문이라 판단된다.

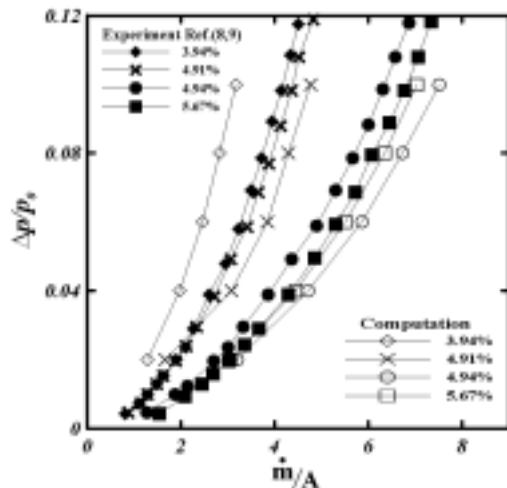


Fig. 6 Relationship between $\Delta p/p_0$ and \dot{m}/A

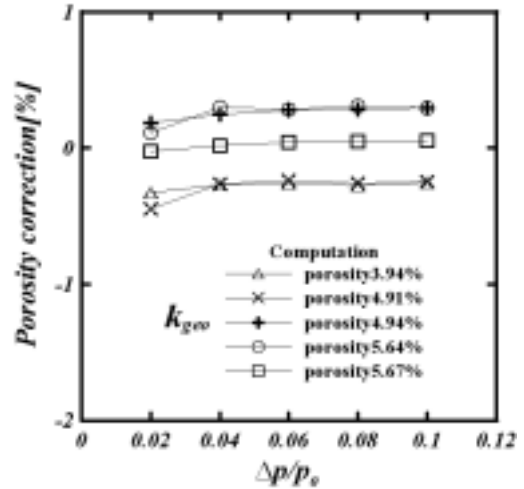


Fig. 7 Porosity correction

Fig. 6에는 단위면적당 질량유량(\dot{m}/A)과 $\Delta p/p_0$ 의 관계를 나타내었다. 일반적으로 질량유속이 증가할수록 $\Delta p/p_0$ 는 증가하며, 동일한 질량유속에서 기공율이 작을수록 $\Delta p/p_0$ 는 증가한다. 본 수치계산의 결과는 실험결과와 단지 정성적으로 일치한다. 위의 결과들에서 기공율은 M_h 와 $\Delta p/p_0$ 그리고 \dot{m}/A 에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다. 그러나 Fig. 5와 6으로부터 기공율의 영향을 명확하게 규명하기가 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 기하학적인 형상으로부터 구해지는 기공율과 기체역학적인 기공율을 다음의 식(18)과 같이 정의하였다.

$$\dot{m} = k_{gas} A_h \rho_h v_h = A_t \rho_t v_t \quad (18)$$

위의 식에서 하첨자 t 는 다공벽의 전체구멍을 그리고 h 는 미소구멍의 상태를 나타내며, k_{gas} 는 유출계수와 유사한 의미를 가지는 기체역학적인 기공율을 의미한다. 위의 식에서 얻어지는 k_{gas} 와 기

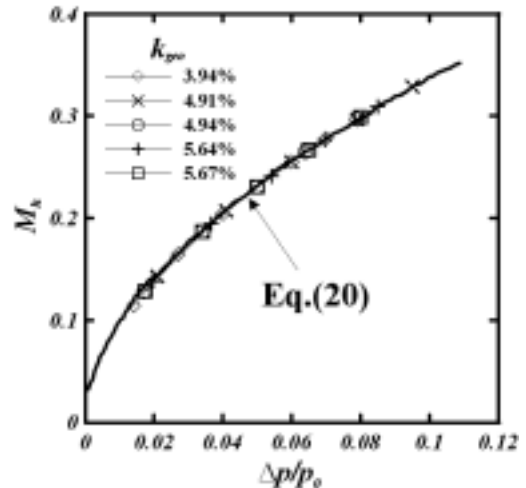


Fig. 8 Correlation curve of M_h with $\Delta p/p_0$

하학적 기공율 k_{geo} 를 이용하여 식(19)와 같은 기공율 보정식을 얻을 수 있었다.

$$Porosity\ correction = \frac{k_{gas} - k_{geo}}{k_{geo}} \quad (19)$$

Fig. 7에는 수치계산에서 얻어진 기공율 보정의 결과를 나타내었다. 그림에서 주어진 k_{geo} 에 대해, $\Delta p/p_0$ 가 증가함에 따라 기공율 보정은 다소 증가하다가 일정해지는 경향을 보이고 있다. 또 그림에서 k_{geo} 가 4.94%와 5.64%인 경우에는 양의 값을 가진다. 그러나 k_{geo} 가 5.67%인 경우에 기공율 보정이 거의 0으로 된다. 이 결과로부터 k_{geo} 가 큰 경우에 k_{gas} 와 k_{geo} 는 거의 같게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8에는 본 연구에서 얻어진 기공율 보정을 이용하여, M_h 와 $\Delta p/p_0$ 의 관계를 나타내었다. 본 수치계산으로부터 얻어진 모든 데이터는 다음과 같이 k_{gas} 와 M_h 의 함수로 요약된다.

$$\left(\frac{\Delta p}{p_0}\right) = \frac{0.057}{(k_{gas})^2} \left[k_{gas} \frac{M_h}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_h^2\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}} p_0 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0}} \right]^2 \quad (20)$$

따라서 Fig. 8로부터 기체역학적인 기공율 k_{gas} 를 사용하는 경우 M_h 와 $\Delta p/p_0$ 의 관계는 k_{geo} 의 값에 관계없이 본 연구로부터 얻어진 식(20)으로부터 산출할 수 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 미소관로를 통한 기체유동을 조사하기 위하여 이론해석과 수치해석을 수행하였다. 이론해석에서는 다공벽을 통하는 유량과 압력차를 이용하여 1차원 압축성 점성 유동장에 대하여 해석하였으며, 수치해석에서는 2차원, 축대칭, 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한 체적법을 적용하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 이론해석으로부터 미소구멍을 통하는 M_h 와 $\Delta p/p_0$ 의 관계는 실험결과와 잘 일치한다.

(2) 마찰계수가 증가할수록 동일한 M_h 를 얻기 위해서는 $\Delta p/p_0$ 가 증가하여야 한다.

(3) 기하학적인 기공율은 기체역학적인 기공율과는 다르며, 기공율의 효과를 평가하는데 기체역학적 기공율의 도입이 필요하다.

(4) M_h 와 $\Delta p/p_0$ 의 관계는 기체역학적 기공율의 함수로 주어지며, 본 연구에서는 경험식(20)을 얻었다.

후 기

본 연구는 2003년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Bur, R., Corbel, B. and Delery, J., 1998, "Study of Passive Control in a Transonic Shock Wave/Boundary Layer Interaction," *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 3, pp. 394~400.
- (2) Wang, J., Lauchle, G. C. and Howe, M. S., 2003, "Flow-Induced Force Fluctuations on a Sphere at High Strouhal Number," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 17, Issue 3, pp. 365~380.
- (3) Bohning, R. and Doerffer, P., 1995, "Final Technical Report-Contribution of Karlsruhe University," EUROSHOCK I, TR AER2-92-49, Karlsruhe.
- (4) Bohning, R. and Doerffer, P., 1999, "Hybrid and Active Control of the Shock Wave-Turbulent Boundary Layer Interaction and Porous Plate Transpiration Flow," EUROSHOCK II Final Technical Report, BRPR-CT95-0076, Karlsruhe.
- (5) Stanewsky, E., Delery, J., Fulker, J. and Geissler, W., 1993-1995, "EUROSHOCK- Drag Reduction by Passive Shock Control," Results of the Project EUROSHOCK, AER2-CT-0049.
- (6) Shapiro, A. H., 1953, "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow," The Ronald Press Company, New York, Vol. 1, pp. 159~218.
- (7) Zierp, J., Bohning, R. and Doerffer, P., 2002, "Continuation of Modelling of Perforated Plate Aerodynamics Performance," *Aerospace Science & Technology*, Vol. 6, Issue 6, pp. 407~411.
- (8) Doerffer, P. and Bohning, R., 2000, "Modelling of Perforated Plate Aerodynamics Performance," *Aerospace Science & Technology*, Vol. 4, Issue 8, pp. 525~534.
- (9) Zierp, J., Bohning, R. and Doerffer, P., 2003, "Experimental and Analytical of Perforated Plate Aerodynamics," *Proceedings of the 6th ISAIIF*, Vol. 1, pp. 184~189.