

미세 간극을 지나는 축대칭 내부 유동의 압축성 효과 분석

김 성 수* · 장 세 명**

* (주)계양정밀, ** 군산대학교 기계자동차공학부

Compressibility Effect in the Axisymmetric Internal Flow Past a Microgap

Seong-Soo Kim* and Se-Myong Chang**

* Keyyang Precision Co., ** School of Mechanical and Automotive Engineering, Kunsan Nat'l Univ.

(Received February 8, 2010 ; Revised October 1, 2010 ; Accepted October 4, 2010)

Key Words: Compressible Flow(압축성 유동), Micro Gap(미세 간극), Internal Flow(내부 유동)

초록: 본 연구에서는 미세 간극을 지나는 압축성 내부 유동 문제에 대해 간략화된 축대칭 모형을 제안하였다. 수치 해석과 실험을 통하여 미세 간극에 의해 형성되는 고리 모양의 좁은 단면을 지나서 아음속 유동이 가속되어 발생하는 초킹 현상을 관찰하였다. 질량 유량과 차압 사이의 관계를 구하고, 대응되는 실험 결과와 비교하여 수치 결과의 타당성에 대해 논하였다. 또한 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식의 수치해석을 통하여 초킹 이후의 초음속 제트 유동장의 형성 및 이의 회절을 가시화하였다. 본 연구를 통하여 자동차 동력계의 밸브 등 많은 응용 분야를 지닌 미세 간극의 축대칭 압축성 유동에 대한 물리적 이해를 확대하였다.

Abstract: In this study, a simplified axisymmetric model is proposed for the problem of compressible internal flow past a microgap. Using numerical and experimental methods, the phenomena of choked flows are observed; these flows are induced by the acceleration of subsonic flows past the narrow cross-section of an annular shape made by a microgap. The relation between mass flow rate and differential pressure is obtained, and by comparing the result with experimental results, the reliability of the numerical results is discussed. The generation of a supersonic jet flow and its diffraction are visualized by performing the numerical analysis of axisymmetric compressible Navier-Stokes equations. This investigation greatly extends the physical understanding of the axisymmetric compressible flow, which has a wide range of engineering applications, e.g., in the case of valves in automotive power systems.

- 기호설명 -

A^* : 노즐 목(throat) 단면적
 \dot{m} : 질량 유량(mass flow rate)
 E : 단위 부피당 총 에너지
 Kn : 크누센수(Knusden number)
 $M, Mach$: 마하수(Mach number)
 p : 정압(static pressure)
 p_0 : 정체 압력(대기압)
 R : 기체 상수, $287 J/(kg K)$
 T : 온도(temperature)
 T_0 : 정체 온도(상온)
 q : 단위 면적당 전도 열동력
 t : 시간

u : 유속(flow velocity)
 \bar{u} : 난류 평균 속도
 x : 가로 방향 공간 좌표
 y : 세로 방향 공간 좌표
 x_j : 공간 좌표
 γ : 비열비(specific heat ratio, 1.4)
 δ : 기체 분자의 평균 직경
 λ : 특성 길이(characteristic length)
 ν : 프란틀-마이어 각(Prandtl-Meyer angle)
 ρ : 밀도(density)
 θ : 유동 각(flow angle)
 τ_{ij} : 유체 점성에 의한 전단 응력(shear stress)

1. 서론

† Corresponding Author, smchang@kunsan.ac.kr

동력계 흡기구에 설치된 배관으로서 엔진의 작동 조건에 따라 적정 압력을 조성하는 역할을 한다.⁽¹⁾ 여기에는 통상 Fig. 1(a)와 같은 밸브가 들어가는데, 이 밸브는 엔진 내부 피스톤의 하강 운동에 의해 발생하는 부압(negative pressure)을 이용하여 혼합기 폭발시 실린더와 피스톤의 미세 간극으로부터 새어나오는 기체(blow-by gas)를 흡기부로 재순환시키는 관로의 유량을 적절하게 조절한다. 이러한 불완전 연소 기체는 일반적인 자동차 엔진의 전체 탄화수소 배출량에서 대략 20~35%를 차지하고 있다.⁽²⁾ Fig. 1(b)는 이와 같은 밸브의 양단에 주어진 압력 차를 두고 흐르는 유량을 측정한 결과인데, 각 부품 회사에서는 일반적으로 품질 관리(quality control)를 위하여 표본에 대한 검사를 실시하고 있다. 그러나 공정 및 시험 장비에 대한 표준화가 이루어지지 않아서 각 회사마다 스펙이 다르며 샘플에 따라 특성 값이 다르게 나온다.⁽³⁾

저자들은 이러한 선행 연구를 수행하면서, 그리고 타 문헌 연구의 결과와 비교하는 과정에서, PCV 밸브 내의 미세 간극이 매우 좁아졌을 경우 유속이 빨라져 유동 내의 압축성 효과를 무시할

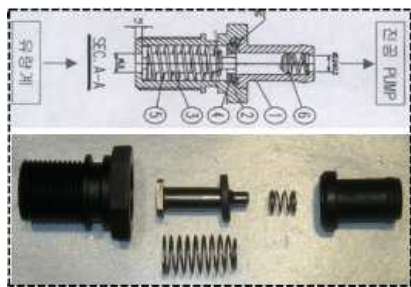
수 없다는 사실을 알게 되었다.⁽⁴⁾ 만일 Fig. 1(b)에서 출구 압력 조건이 다음 조건을 만족시키면, 초킹(choking)이 발생하고 이 지점에서 국부 마하수(Mach number)는 1로 제한된다.^(5,6)

$$\frac{p}{p_0} < 0.5283 \quad (1)$$

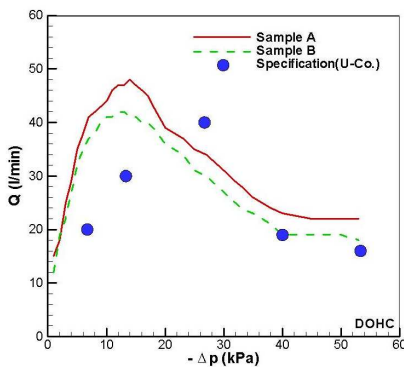
입구에서 표준 대기압 조건을 적용할 때, Fig. 1(b)의 데이터에서 $-\Delta p > 47.8 \text{ kPa}$ 인 지점에서는 초킹이 발생하여 만일 밸브 개도를 고정시킨다면 유량이 균일한 값으로 유지된다. 초킹점 이후 유동 단면적이 증가할 경우, 공기와 같은 압축성 유체는 팽창하면서 초음속 영역까지 가속된다. 실제로 PCV 밸브 내부에서 초킹을 일으키기 위해서는 마이크로 규모의 미세 간극이 요구된다. 최근의 연구에 의하면, 이러한 미세 간극은 밸브가 거의 닫혔을 때뿐 아니라 밸브에 미세한 균열(crack)이 발생되었을 때 성능 저하에도 많은 영향을 미친다.⁽⁷⁾

1893년, 스웨덴의 공학자 de Laval은 압축성 유동의 초킹 현상을 이용하여 초음속 증기 터빈을 개발하였다.⁽⁵⁾ 이 기술은 이후 초음속 풍동과 로켓 노즐 등에 이용되면서 오늘날에 이르고 있다. 비교적 최근 연구로서, 축대칭 노즐에서 발생하는 내부 유동에서의 마하 충격파에 대해서는 Addy⁽⁸⁾가 정량적인 측정을 시행하였다. 평행 판 사이 저밀도 내부 유동장에서의 유동 해석 및 실험은 Shi 등⁽⁹⁾이 실시하였으나, 관심사를 비교적 유속이 느린 비압축성 유동장에 한정하고 있다. 최근에는 Handerson and Powell⁽¹⁰⁾과 같이 축대칭 초킹 제트에서 발생하는 유동 소음 등에 관심이 집중되고 있다. 또한 본 연구에서의 실험 조건과 비슷한 유동 영역인 초음속 마이크로 제트에 대한 수치해석 연구는 Jeong 등⁽¹¹⁾이 수행한 바 있다.

본 연구에서는 밸브 시스템의 간략화된 공학적 모델을 제시하고, 주요 파라미터인 미세 간극의 개폐도에 따른 유체역학적 특성에 대해 탐구하고자 한다. 실험과 수치해석을 동시에 실시 및 비교, 전산유체역학 모델의 신뢰성을 검증하고, 수치적 방법으로 미세 간극 유동장을 가시화하여 정밀하게 압축성 유동의 물리 현상들을 분석한다.



(a)



(b)

Fig. 1 PCV Valve: (a)prototype, (b)characteristics.⁽³⁾

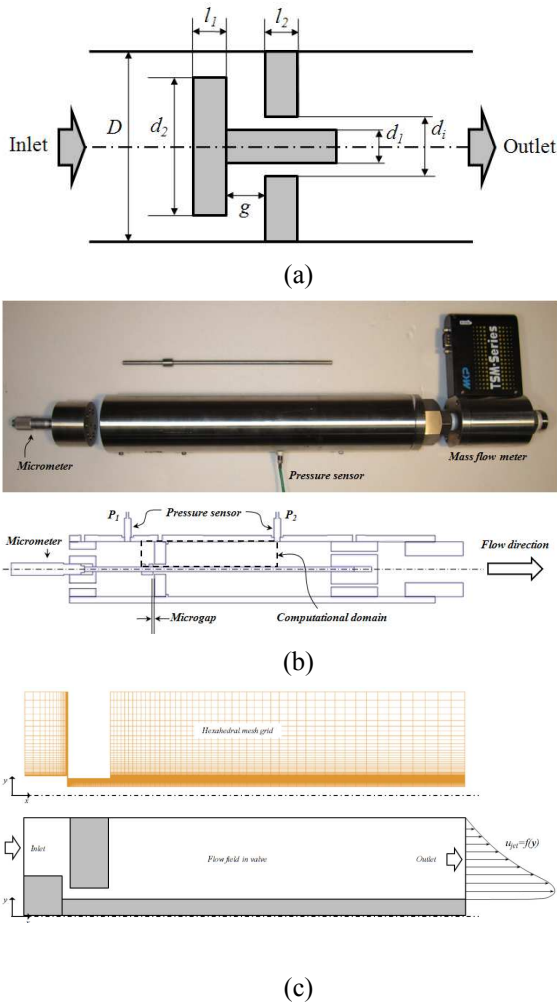


Fig. 2 Engineering models: (a)schematic, (b)experimental setup, (c) computational grids and domain

2. 연구 방법

본 연구에서는 크게 압축성 유체역학의 기초 이론, 실험, 그리고 수치 해석 등의 세 가지 방법을 사용한다.

2.1 기초 이론

출구가 좁아지는 노즐에서 일단 초킹이 발생하면, 유속은 국지적인 음속에 수렴하고, 질량 유량(mass flow rate)은 더 이상 증가하지 못한 채로 다음의 임계값(critical value)을 갖는다.^(5,6)

$$\dot{m} = \frac{p_0 A^*}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (2)$$

식 (2)는 일반적으로 식 (1)의 출구 조건에 대해

성립하는데, 비점성(inviscid) 및 단열(adiabatic) 벽면 조건 하에서 유도되었다.

2.2 실험 모델의 구성

본 연구의 궁극적 목적은 밸브 시스템을 정밀하게 해석할 수 있는 도구를 마련하는데 있지만, 본 문제와 같이 매우 작은 간극을 지나는 압축성 유동장에서는 제트 유동에 의한 출구 경계 조건을 정확히 알 수 없으므로 수치 해석이 매우 어렵다. 따라서 보다 간략화된 기하학적 형상을 공학적 모델로 채택하여 Fig. 2(a)와 같이 구성하였다. 최근 공학기술의 발달로 실제 PCV 밸브에서는 이와는 달리 스펴에 테이퍼가 진 모델들이 흔히 사용되고 있다.⁽⁷⁾ 그러나 본 논문에서 관심사는 미세 간극에 의한 압축성 유동의 초킹이므로 보다 단순한 기하학적 형상의 실험 모델을 채택하기로 한다. 즉 최소 단면적을 결정하는 가장 중요한 파라미터인 미세 간극(g)만을 고려하고자 한다. 이외의 데이터 상수들은 Table 1에 제시하였다.

Fig. 2(b)는 본 연구에 사용한 실험 모델을 보여 주고 있다. 간극의 크기는 입구 측에 설치된 조절 나사로 μm 단위까지 조절이 가능하다. 입구측은 대기압에 노출되어 있으며, 출구측은 $5 m^3$ 크기의 진공 탱크($p < 0.01 atm$)에 연결된다. 모델 출구의 압력은 추가로 설치된 개폐 밸브를 이용하여 수동으로 조절할 수 있다. 그런데 본 연구에서의 관심 영역은 Fig. 2(b)의 점선 사각형 내부이므로, 간극 입출구의 압력은 각각 P_1 , P_2 지점에 설치된 압력 변환기(pressure transducer, Kistler 4618A2) 2조로 측정하고, 질량 유량은 유량계(mass flow meter, MKP TSM-140)로 측정한다.

2.3 수치 계산 방법

Fig. 2(c)에서는 실험 결과와 비교할 수치 시뮬레이션을 위한 계산 영역과 격자계를 보여주고 있다. 격자계는 실험 모델의 관심 영역의 대칭면에 대해서 약 118,000 개의 요소로 구성하고, 유동 경계층(boundary layer)에 대한 정밀한 계산을 위하여 벽면과 가까운 영역에서는 조밀하게 배치한다.

이러한 수치 계산에서는 다음과 같은 압축성 Navier-Stokes 방정식을 풀이한다.

Table 1 Values of constant parameters: Fig. 2(a)

Symbol	Value	Unit
D	50	mm
d_1	5	
d_2	10	
l_1, l_2	10	
d_i	9	

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \mathbf{G}_j}{\partial x_j} + \mathbf{S} \quad (3)$$

여기에서

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u_i \\ E \end{pmatrix}, \mathbf{F}_j = \begin{pmatrix} \rho u_j \\ \rho u_i u_j + p \delta_{ij} \\ u_j (E + p) \end{pmatrix}, \mathbf{G}_j = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{ij} \\ u_i \tau_{ij} + q_j \end{pmatrix}$$

$$i, j = 1, 2$$

이고, \mathbf{S} 는 축대칭 유동의 좌표 변환으로 인해 발생하는 생성 항(source term)이다.⁽¹¹⁾ 유속이 최대 초음속까지 가속되므로 높은 레이놀즈수 유동에 관한 일반적인 $k-\epsilon$ 난류 모델(turbulence model)을 사용한다.

모델 벽면에서는 점착(no-slip) 조건과 일정 온도 조건을 사용한다. 일반적으로 초음속 유체역학 실험에서 사용하는 금속 모델은 열전도도가 큰 열 손실원(heat sink)이므로, 표면 경계층에서 열전달이 일어나기 때문에 실제 물리 현상에 더 근사한 일정 온도 조건을 사용한다.^(12,13)

고속 제트 유동에서 출구 경계 조건에 대한 고려는 매우 중요하다. 원방 경계에 고정된 경계 조건을 줄 경우, 격자가 불필요하게 많이 소요됨은 물론, 연속(continuity) 방정식을 만족시키지 못하여 해가 수렴하지 못할 수도 있다. 이에 대해서는 다음과 같은 새로운 방법을 시도하였다.⁽¹⁴⁾

먼저 비압축성 유동의 실험값으로부터, 원형 제트(round jet) 난류 유동의 경우, 출구의 평균 속도 분포는 다음과 같다.⁽¹⁵⁾

$$\frac{\bar{u}}{U_{\max}} \approx \operatorname{sech}^2\left(10.4 \frac{y}{x}\right) \quad (4)$$

여기에서 U_{\max} 는 다음과 같이 출구에서 연속 방정식에 식 (4)를 대입하여 풀어서 구한다.

$$\dot{m} = \int_{y_1}^{y_2} \rho \bar{u} 2\pi y dy \quad (5)$$

식 (5)의 질량 유량의 값은 입구 조건으로부터 주어지며, 초킹이 되었을 경우에는 식 (2)의 이론 값을 따른다.

Fig. 2(c)의 출구에서 대칭축 막대의 직경(d_1)은 관로 직경(D)에 비하여 매우 작은 편이므로, 출구 유동장의 초기 조건으로 식 (4)를 선택하는 것은 물리적으로 타당한 접근이라고 생각된다. 그러나 압축성 효과 때문에 출구에서 식 (4)가 엄밀하게 성립하지 못하므로, 이를 초기 조건으로 삼아 식 (3)에 대하여 800 회(물리적 시간으로 0.2 s 이내) 반복 계산 후, 먼저 밀도 값을 수렴시킨 다음, 경계에서의 속도장 분포를 유동장이 정상 상태로 수렴할 때까지 다시 반복하여 식 (4)를 대체하도록 한다. 이는 마치 출구에 가상 영역(buffer zone)을 둔 것과 유사하다.

수치 해석은 근사 리만 해법에 근거하는 유한 체적법(finite volume method)을 사용하였으며, 공간과 시간 정확도는 각각 2차까지 확장되었다.⁽¹²⁾

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 앞 절에서 설명한 연구 방법들을 이용하여 먼저 실험 데이터를 얻은 다음, 상응하는 계산 결과와 이를 비교하였다. 다음 계산 결과의 타당성에 대하여 고찰하고 각 계산 결과로부터 가시화된 유동장의 모습을 정밀하게 분석하여 물리적인 해석을 하였다.

3.1 실험과 계산 결과의 비교

결과 데이터의 비교를 위하여 주어진 간극에 대하여 실험과 계산 조건을 동일하게 맞추는 일은 매우 중요하다. Fig. 2(b)의 실험 모델에서 유동력(flow force)에 의한 공탄성 변형으로 인하여 초기 설정 간극과 구동시의 간극에 미세한 차이가 발생하였다. 따라서 초킹이 일어났을 때의 유량 값을 기준으로 동일한 질량 유량에서 실험과 계산 데이터를 비교하였고, 그 결과는 Fig. 3에 제시되어 있다. 각각 다른 간극에 대하여 세 가지 경우를 비교하였는데, 모든 경우에 대하여 모델 입출구 양단의 압력비가 클수록(차압이 작을수록) 실험 값이 계산 값보다 다소 커지는 경향이 관찰된다. 이는 실험의 경우 압차가 작아지는 영역에서 유동력의 감소로 인하여 유효 간극이 다소 커지는 것으로 파악된다. 초킹 영역(질량 유량이 거의 일정해지기 시작하는 점)을 조사해 보

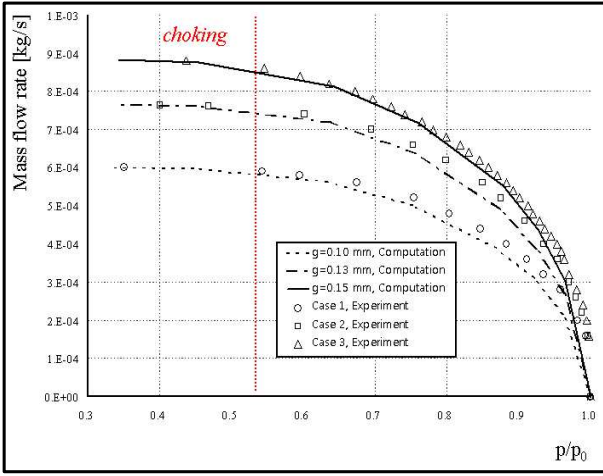


Fig. 3 Comparison of data in experiment and computation

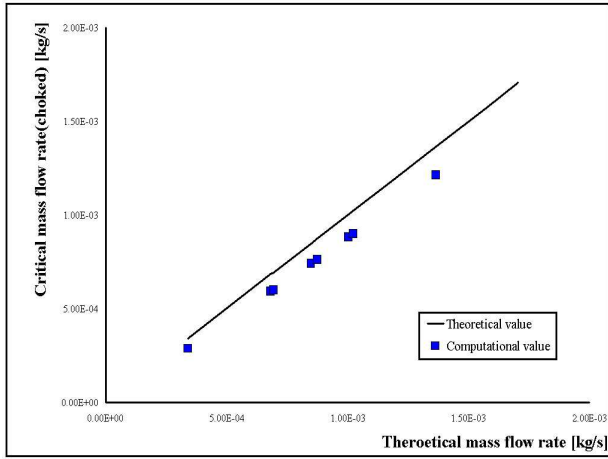


Fig. 4 Critical mass flow rate at choked flow

면, 식 (1)의 이론값보다 다소 더 작은 압력비를 나타내는데, 이는 미세 간극에서 발생하는 저팽창된(under-expanded) 마이크로 제트의 영향으로 간극 출구의 정압이 원방 출구 경계의 정압보다 높기 때문인 것으로 보인다.

3.2 기초 이론과의 비교

Fig 2(c)의 계산 모델에서 고정된 간극에 대하여 준 1차원(quasi-1D) 압축성 유동의 이론식 (2)를 이용하여 임계 질량 유량을 비교할 수 있다. 그 결과는 Fig. 4에 제시되어 있다. 수치 계산에서는 점성(viscosity) 효과, 난류, 그리고 벽면에서의 열전달 등이 고려되어 있으므로, 기초 이론에서의 유량 값보다 다소 작은 값이 나올 수 있다. 즉, 간극의 벽면 근처에서 미세한 경계층이 발달하게 되고, 유효 간극의 크기를 감소시키

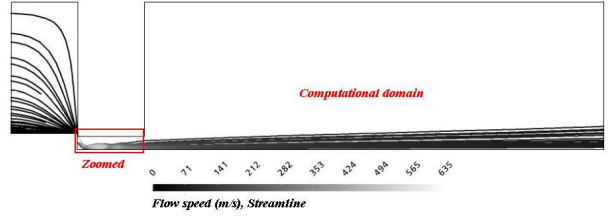


Fig. 5 Streamline and flow speed, $g = 0.1 \text{ mm}$

는 효과가 있다. 간극의 크기가 커질수록, 또는 질량 유량이 증가할수록 이러한 오차는 커져서, Fig. 4의 데이터서는 최대 11%까지 이르고 있다. 따라서 미세 간극에서는 일반적으로 양단 압력비가 작아지면서(압차가 커지면서) 초크된 유동의 유효 최소 단면적이 비점성 압축성 유체역학 이론의 예측 값보다 약간 작아진다. 즉, 초킹은 간극의 출구보다 조금 이전에서 발생한다(3.4절 참조). 이렇게 되는 주된 원인은 앞절에서 설명한 저팽창 마이크로 제트 및 유체 점성에 의한 벽면 마찰과 열전달 때문이다.^(5,6)

3.3 미세 내부 유동의 가시화

수치 계산의 장점은 실험으로 쉽게 측정하기 어려운 미세 간극 모델의 내부 유동을 가시화(visualization)할 수 있다는 것이다. Fig. 5에서는 $g = 0.1 \text{ mm}$ 인 경우 유동장의 유선의 모습을 보여주고 있다. 미세 간극에서 발생하는 고속 유동이 제트를 형성하면서 후류로 방사되고 있는 모습을 관찰할 수 있다. 특히 간극을 통과한 직후, 압축성 유동의 파동 현상인 충격파나 팽창파(expansion wave)의 존재로 인하여 제트의 경계가 울퉁불퉁해져 있다.

Fig. 6(a)와 (b)는 각각 관심 영역의 압력 분포와 이곳에서 일어나고 있는 복잡한 파동 현상들을 스케치한 개념도이다. Fig. 6(c)는 마하수 분포를 가시화하고 있는데, 주요 파동의 존재를 확인하기 위한 측정 위치가 선분으로 표시되어 있다. 이 선분들을 따라 마하수의 분포를 도시한 것은 Fig. 6(d)이다. 각 파동들에 의하여 구분되는 유동장의 영역은 ①부터 ⑧까지로 표시하였다.

일단 간극에서 초킹을 일으킨 유동장은 팽창하면서 ①영역에서 $Mach = 3.4$ 인 초음속 유동장을 형성하고 있음을 알 수 있다(Fig. 6(c)). 이 초음속 영역에서 제트 경계와의 입사각에 따른 경사 충격파(oblique shock)를 만들고, 이 충격파가 벽면

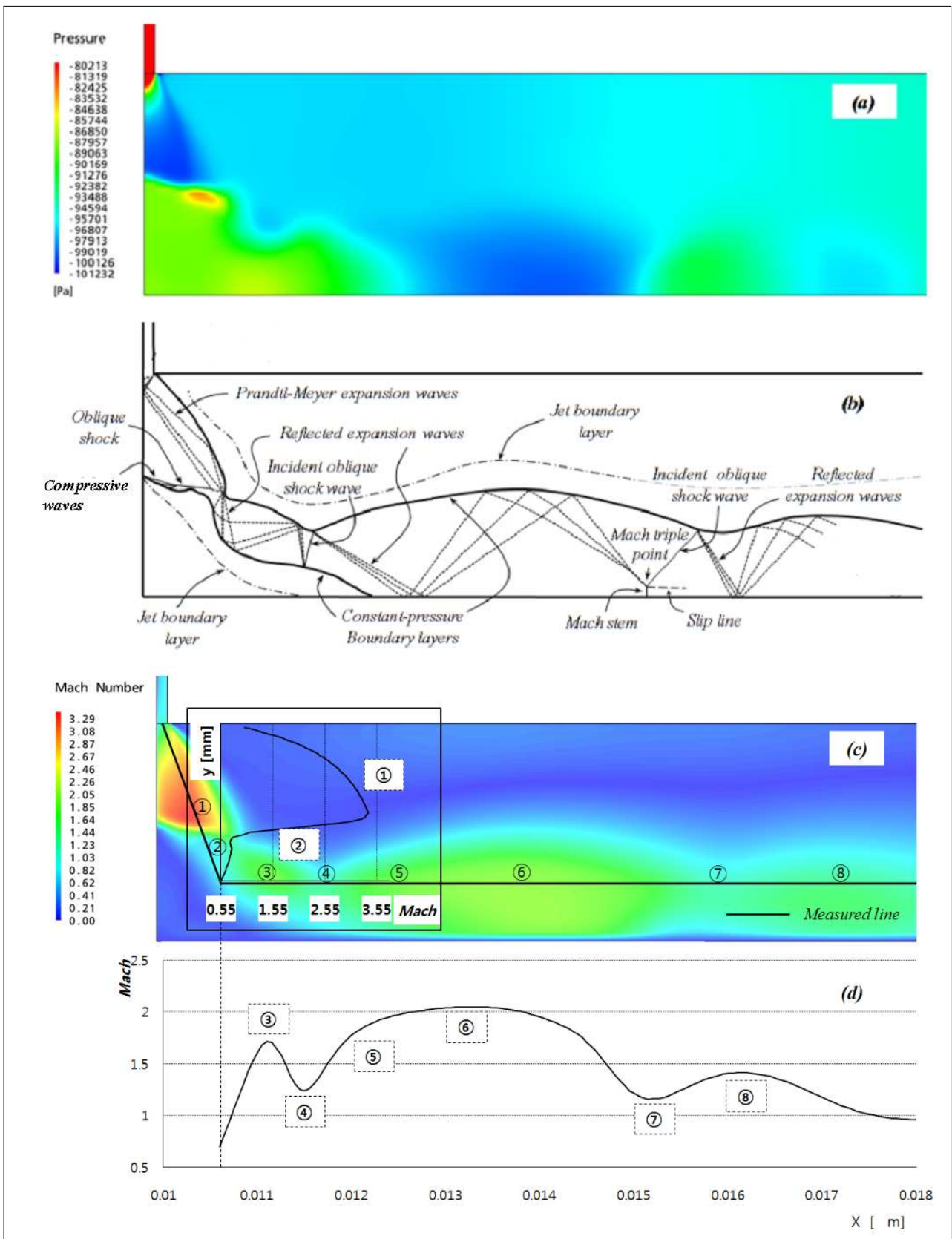


Fig. 6 Zoomed view of computational domain in Fig. 5: (a)pressure, (b)schematic, (c)Mach number(field), and (d)Mach number(jet axis)

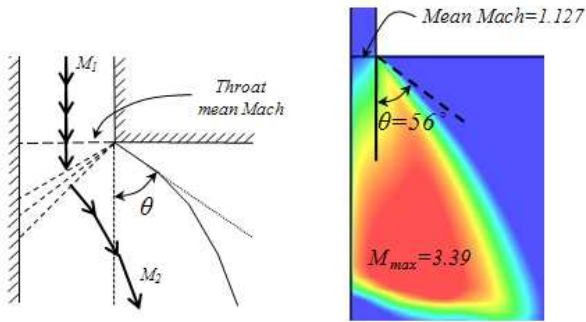


Fig. 7 Prandtl-Meyer expansion wave

에 의해 급격하게 꺾이면서 마하 원반(Mach disk)을 형성하는데, 이 강한 충격파를 가로질러 급격하게 감속된다(②영역). 그러나 이곳을 지난 유동은, 좁아진 제트 유관(stream tube)을 통과하면서 다시 가속되고(③영역), 제트 경계에 대하여 ①영역에서와 같은 원리로 ④영역을 형성한다.

Fig. 6(b),(c)에서와 같이 제트는 아래 벽면을 따라 흐르면서(Coanda 효과⁽¹⁶⁾), 팽창파는 아래 벽면에 반사되고 다시 제트 경계에 반사되면서 초음속 유동을 가속시키고 있다: ⑤,⑥영역. 그러나 자유단인 제트 경계에 반사된 팽창파는 압축파를 만들고, 이 압축파는 충격파를 형성하면서 고정단인 아래 벽면에 반사되면서 미세한 마하 삼중점(Mach triple point)을 형성한다: Fig. 6(a),(b) 참조. 아래 벽면에서 반사된 충격는 ⑦영역의 유동 마하수를 다소 감소시키며, 제트 벽면에 반사되며 팽창파로 변하면서 ⑧영역과 같이 유동을 가속시킨다.

이러한 과정은 무한히 반복되는 것이 아니라 유체 점성에 의하여 발생하는 확산(diffusion) 및 소산(dissipation)에 의하여 점차 아음속 유동으로 감속하여 나간다.

3.4 점성 효과 등에 대한 고찰

연구 결과 미세 간극에 의한 초킹점은 간극이 끝나는 지점이 있지 않다는 사실을 발견하였다. 3.2절에서도 언급하였듯이, 벽면에서의 유체 점성 효과와 열전달에 의하여 정확한 초킹점은 간극의 내부, 즉 팽창부 이전에 존재한다. 이 점의 위치에 따라 3.3절에서 고찰한 압축성 유동 현상의 입구 경계 조건이 크게 달라진다.

예를 들어, Fig. 5~6에서의 유동장은 간극이 끝나는 점에서 음속 조건이 아닌 $M_1 = 1.13$ 의 값을

갖는다. 여기에 Prandtl-Meyer 팽창파의 관계식을 적용하면,

$$\nu(M) = \sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma+1}(M^2-1)} - \tan^{-1} \sqrt{M^2-1} \quad (6)$$

이고, 식 (6)에 의하여 $M_2 = 3.39$, $\theta = 58.4^\circ$ 라는 계산 결과가 나온다. 이는 Fig. 6(c) ①영역에서의 계산 결과와 대체로 일치한다. Fig. 7에서 제트 경계의 확장 각도는 식 (6)의 예측 값과 오차 4% 이내에서 일치한다.

한편 $g = 0.1 \text{ mm}$ 인 작은 간격으로 인하여, 최대 Knudsen 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Kn = \frac{\lambda}{g} \quad (7)$$

여기에서 초킹점의 $T/T_0 = 0.8333$, 식 (1), 그리고 공기 분자의 $\delta = 1.5 \times 10^{-10} \text{ m}$ 로부터 특성 길이는 $\lambda = 6.230 \times 10^{-7} \text{ m}$ 로 계산된다.⁽¹⁷⁾ 결국 식 (7)을 계산하면, $Kn = 0.006$ 이 되는데 이는 $Kn < 0.03$ 범위 안에 있기 때문에 Navier-Stokes 방정식과 점착 조건이 유효한 영역이라고 판단된다.⁽¹⁸⁾ 즉, 간극이 현재보다 1/5 이하로 작아지면, 희박기체의 미끄럼 경계조건 효과를 고려해야 할 것으로 보인다.

4. 결론

자동차 동력계 흡기부에서 압축성 유체인 상온의 공기를 작동 유체로 사용하는 PCV 밸브의 간략화된 축대칭 실험 모델을 고안하여, 이에 대한 실험 및 수치해석을 실시하였다. 그 결과 지금까지의 연구로부터 다음과 같은 결론들을 얻었다.

(1) 실험 결과를 설명할 수 있는 수치 해석 방법을 구축하였다. 특히 압축성 제트 유동의 원방출구 조건을 기존의 비압축성 난류 유동의 실험 값을 초기조건으로 하여 얻는 새로운 방법을 고안하였다(식 (4)~(5) 참조). 이 방법을 사용하여 간극과 출구의 단면적 비(확대비)가 687.5:1인 극한 마이크로 제트 유동에 대해 비교적 좁은 계산 영역(기존의 1/5 이내⁽¹¹⁾)에서 성공적인 계산을 수행할 수 있었고, 절약된 개수의 격자만큼 미세 간극에 격자를 충분히 배치함으로써 계산의 효율

성을 증대할 수 있었다.

(2) 수치 해석 결과로부터 밸브 내부의 초킹에 의해 발생하는 임계 질량 유량 값을 계산하였다. 비점성 기초 이론에서는 미처 설명하지 못하는 유체 점성, 난류, 열전달들의 효과로부터, 초킹점이 간극 내부로 미세하게 이동하고, 비교적 강한 초음속 유동이 발생함을 관찰하였다. 또한 미세 간극 후류의 저팽창된 마이크로 제트 유동으로 인하여 원방 경계의 정압에 비해 다소 높은 유체 정압이 간극 출구에 작용함을 실험과 계산 결과 모두에서 확인할 수 있었다.

(3) 간극의 크기를 $g = 0.1 \text{ mm}$ 로 하였을 때, 초킹이 일어나면 길이 8 mm 이내 제트 경계 내부 영역에서 미세 규모의 초음속 파동 영역 4개가 형성됨을 확인할 수 있었다. 이 관심 영역을 확대해보면, 압축성 유체역학에서 찾아볼 수 있는 거의 모든 종류의 파동들이 복잡하게 반사, 회절, 간섭하는 현상을 보인다. 유동의 마하수는 최고 $Mach = 3.4$ 까지 가속되는 것으로 파악된다. 현재의 계산 수준으로 Navier-Stokes 방정식과 점착조건은 유효한 것으로 보이나, 간극이 지금보다 $1/5$ 이하로 준다면 희박대기 효과에 의해서 벽면 조건에 대한 수정이 필요할 것으로 보인다.

본 연구를 통하여 많은 공학적 응용 분야를 지닌 미세 간극의 축대칭 압축성 유동과 마이크로 제트에 대한 물리적 이해를 확대하였다.

후 기

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-521-D00066). 또한 본 연구의 수행에 있어 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업의 지원을 받았음.

참고문헌

- (1) http://en.wikipedia.org/wiki/PCV_valve
- (2) Dhariwal, H. C., 1997, "Control of Blowby Emissions and Lubricating Consumption in I. C. Engines," *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, No. 10-13, pp. 1267~1274.
- (3) Chang, S. M., 2006, "Characteristics Measurement of PCV Valves for Automobiles," *Proceedings of the KSME, KSME 2006R102, Fall Annual*

Meeting, pp.6~9.

- (4) Lee, J. H., Choi, Y. H. and Lee, Y. W., 2005, "Computational Analysis of Flow Characteristics of a PCV Valves," *Transactions of KSAE*, Vol. 13, No. 4, pp. 66~77.
- (5) Anderson, J. D., 1990, *Modern Compressible Flow*, McGraw-Hill, NewYork, 2e, pp. 147~185.
- (6) Liepmann, H. W. and Roshko A., 1993, *Elements of Gas Dyanmics*, Dover, New York, pp. 39~61.
- (7) Song, S. M., Kwon, O. H. and Lee, Y. W., 2007, "Effect of the Differential Pressure by the Blow-by Gas Flow on the PCV Valve with a Crack," *International Journal of Automotive Technolgy*, Vol. 8, No. 2, pp. 219~224.
- (8) Addy, A. L., 1981, "Effects of Axisymmetric Sonic Nozzle Geometry on Mach Disk Characteristics," *AIAA J.*, Vol. 19, No. 1, pp. 121~126.
- (9) Shi, W., Miyamoto, M., Katoh, Y. and Kurima J., 2001, "Choked flow of Low Density Gas in a Narrow Parallel-Plate Channel with Adiabatic Walls," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 2555~2565.
- (10) Henderson, B. and Powell, A., 1997, "The Use of an Array to Explain the Sound Characteristics of Secondary Small Plate Tones Produced by the Impingement of an Axisymmetric Choked Jet," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 102, No. 3, pp. 1454~1462.
- (11) Jeong, M. S., Kim, H. S. and Kim, H. D., 2001, "A Fundamental Study of the Supersonic Microjet," *Proceedings of KSME, KSME 01F248, Fall Annual Meeting*, pp. 622~627.
- (12) Chang, S. M., *Unsteady Shock Wave-Vortex Interactions in the Compressible Shear Layer*, Ph.D. Thesis, DAE965342, KAIST.
- (13) Chang, S. M., Chang, K. S. and Lee, S., 2004, "Reflection and Penetration of a Shock Wave Interacting with a Starting Vortex," *AIAA J.*, Vol. 42, No. 4, pp. 796~805.
- (14) Wasistho, B., Geurts, B. J. and Kuerten, J. G. M., 1997, "Simulation Techniques for Spatially Evolving Instabilities in Compressible Flow over a Flat Plate," *Computers and Fluids*, Vol. 26,

- No. 7, pp. 713~739.
- (15) Wyganski, I. and Fiedler, H., 1969, "Some Measurements in the Self-Preserving Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 38, Pt. 3, pp. 577~612.
- (16) Noh, T. H. and Chang, S. M., 2007, "Correlations Between the Opening Angle of a Louver and Flow Rate for the Efficient Control of a Large Fan," *Proceedings of KSCFE, Fall Annual Meeting*, pp. 272~276.
- (17) <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/kinetic/menfre.html#c3>
- (18) Anderson, J. D., 1989, *Hypersonic and High Temperature Gas Dynamics*, McGraw-Hill, New York, pp. 20~23.