

<기술논문>

## 다공벽을 이용한 충격파 강도의 피동제어

최영상\*\* · 권순범\* · 조철영\*\*

(1996년 2월 7일 접수)

### Passive Control of Strength of Shock Wave

Young-Sang Choi, Soon-Bum Kwon and Cheol-Young Cho

**Key Words :** Passive Control(피동제어), Porosity(기공률), Supersonic Flow(초음속 흐름)  
Shock Wave(충격파)

#### Abstract

A shock wave, being an irreversible process, gives rise to entropy increase. A great deal of effort has been made to control shock wave and boundary layer interaction related to energy losses as well as problems of vibration and noise. In the present study, tests are performed on a roof mounted half circular arc in an indraft type supersonic wind tunnel to evaluate the effects of porosity, length and depth of cavity in passive control of shock wave on the attenuation of shock strength by reviewing the measured static pressures at the porous wall and cavity. Also the flow field is visualized by a Schlieren system. The results show that in the present study the porosity of 8% produced the largest reduction of pressure fluctuations and that for the same porosity, the strength of shock wave decreases with the increasings of the depth and length of cavity.

#### 기 호 설 명

P : 압력(static pressure), (kPa)  
 Po : 정체압력(stagnation pressure), (kPa)  
 To : 정체온도(stagnation temperature), (K)  
 M : 마하수(Mach number)  
 L : 공동의 길이(cavity length), (mm)  
 D : 공동의 깊이(cavity depth), (mm)  
 h : 노즐목 반 높이(throat half height), (mm)  
 R : 원호노즐의 곡률반경, (mm)  
 x : 노즐목으로부터 노즐 중심축을 따르는 거리, (mm)

그리스문자

$\sigma$  : 기공률(porosity), (%)  
 $\lambda$  : 부하 감소율(load decrement ratio), (%)  
 $\Phi$  : 정체점 상대 습도(stagnation relative humidity), (%)

#### 1. 서 론

운송수단 및 산업기계의 고속, 고출력화는 외부 유동에서뿐만 아니라 내부유동에도 충격파의 발생, 충격파와 경계층의 상호작용, 유동의 박리, 난류와 같은 바람직하지 않은 문제를 제기하고 있다.

예를 들면 최근 급속한 산업발전에 따라 사용 빈도가 증가된 고압 공기압축기, 진공펌프 등의 공기

\*회원, 경북대학교 기계공학과

\*\*회원, 경북대학교 대학원 기계공학과

기계나 빠른 교통수단에 대한 요구로 그 개발수요가 점차 증대되고 있는 저소음, 저진동의 천음속 및 초음속 항공기의 익과 가스터빈 등에서는 고풍력, 고효율을 얻기 위해 작동 유체인 공기 및 배기가스를 고온, 고압, 고속화시킴에 따라 off-design 상태에서 익 표면에 충격파(shock wave)가 형성되고, 충격파와 익 경계층과의 간섭에 의해 경계층이 박리되며 장치의 진동, 소음 및 비행체의 갑작스런 양력저하와 항력증가 등이 야기된다.<sup>(1)</sup>

특히, 충격파는 정압의 갑작스런 상승(Jump) 즉, 유동 마하수의 급격한 감소와 엔트로피의 급격한 증가<sup>(2)</sup>가 수반되는 비가역 과정으로 전압손실(total pressure loss)이 동반되게 되며 이는 압력회복(pressure recovery)의 감소와 관련되어 에너지 손실<sup>(3~5)</sup>로 직결된다. 이와 같은 복잡한 현상들은 에너지자원 이용의 효율증대와 소음공해와 같은 환경적 측면에서 공학적으로 해결하여야 할 문제들로 이에 대한 연구의 필요성이 대두되게 되었다.

엔트로피의 급격한 증가가 동반되는 충격파의 비가역성의 정도는 충격파의 강도(shock strength :  $(P_2 - P_1)/P_1$ , 여기서  $P_1$ ,  $P_2$ 는 각각 충격파 직전, 직후의 정압)와 직접 연관되고, 이 충격파 강도가 크면 클수록 익의 경계층과 충격파와의 간섭이 강해져 진동, 소음 등이 심해지며, 또한 등엔트로피 흐름으로부터의 이탈의 정도를 나타내는 엔트로피의 증가가 수반되어 전압 손실량이 커지게 된다. 그러므로 앞에서 언급한 기계 및 장치에서의 에너지 손실 및 진동, 소음 등을 줄이려면 충격파의 강도를 제어하는 것이 필수적이다.

Bushnell-Whitcomb에 의해 충격파로 인한 손실을 줄이는 방법으로 충격파와 경계층의 간섭을 피동적으로 제어하는 방법이 제안된 이래 비행체 익 등에서의 충격파저동의 제어는 능동적인 방법(active control)과 피동적인 방법(passive control)으로 행해져 왔다.

먼저 능동적인 방법으로 Finke<sup>(6)</sup>는 충격파가 존재하는 위치에 구멍을 뚫어 가스를 불어넣음으로써, 또 Thiede<sup>(7)</sup>와 Krogmann<sup>(8)</sup> 등은 충격파가 존재하는 위치에 구멍을 뚫고 기류를 흡입함으로써 충격파를 제어하는 기법을 연구하였다. 그러나 이와 같은 방법은 가스를 흡입 혹은 송출하기 위한 장치를 부가적으로 설치해야 하는 어려운 문제가 있으며, 주로 마하수가 3 이상인 초음속유동에서 효과적인 것으로 알려져 있다.

다음, 피동적인 제어방법은 충격파의 거동 및 강도를 제어하기가 가장 간단한 방법으로써 주로 마하수 1~2 정도의 천음속 근방의 유동에 대해 유효하다고 알려져 있다.

즉, 충격파의 강도가 크면 클수록 충격파와 익 경계층과의 간섭이 크게 되어 경계층의 박리가 심하게 되고, 그에 따라 갑작스럽게 항력이 증가하고, 양력이 감소되므로 이를 감소시키기 위해서 충격파의 강도를 피동적으로 제어하는 방법으로 충격파가 형성되는 위치의 표면을 다공벽면으로 하고 그 다공벽의 아래를 공동(cavity)으로 한 것이다.

충격파에 의한 압력상승에 따라 충격파 직후의 기류가 다공벽을 통하여 공동내로 유입되고, 유입된 이 기류는 다시 다공벽을 통하여 압력이 낮은 충격파 전방으로 유출됨으로써 충격파의 강도를 강하시켜 충격파의 비가역성도 줄이고, 충격파와 경계층과의 간섭을 약화시켜 충격파에 의한 항력의 증가를 줄이고 또한 양력의 감소도 줄이는 방법이다.

위와 같은 다공벽과 공동을 이용한 충격파의 피동적 제어에 관한 연구로서 Szumowski<sup>(9)</sup>는 준 1차원 다공벽을 전파하는 충격파의 강도 감쇠율을 구하여 이로부터 유출계수를 구하였다. Schnerr 등<sup>(10)</sup>은 압축기 익렬에서 다공성판(porous plate)을 덮은 공동을 이용하여 다공벽면상의 충격파와 경계층의 상호작용을 피동적으로 제어하였으며, Motsitsuki 등<sup>(11)</sup>은 초음속유동에서 의사충격파(pseudo-shock wave)에 대한 피동제어의 영향을 연구하였다. Saida 등<sup>(12)</sup>은 초음속 유동장내의 평판 위에 위치한 step 전방의 박리류에 대해 피동제어를 행하여 다공벽면의 기공률, 구멍의 분포 및 구멍의 경사 등에 대한 영향을 조사하였다. Zierep<sup>(12)</sup>은 천음속 채널유동에서 천공된 판으로 덮은 공동을 이용한 피동제어의 효과를 수치계산과 실험을 통하여 연구하였으며, 약 8%의 기공률로도 피동제어의 효과를 충분히 얻을 수 있음을 밝혔다. Thiede 등<sup>(13)</sup>은 천음속유동장에서 충격파가 존재하는 위치의 벽면에 구멍을 뚫고 그 하부를 공동으로 하여 피동제어의 효과를 연구하였다. 그러나 Thiede 등은 벽면의 구멍 형상을 공동설치부의 翼의 강도에 영향을 미칠 수도 있는 slit slot으로 하였으며, 기공률도 15%로 고정하여 연구하였을 뿐이다.

본 논문에서는 대기 흡입식 간헐 초음속 풍동을

사용하여 가속된 마하수 1.20의 유동장에서 충격파 발생장치로 경사충격파를 발생시킨 뒤 그 충격파의 입사위치인 측정부의 하부 평면벽에 다공벽과 공동을 설치하여 충격파를 피동적으로 제어하였다. 사용된 다공벽의 구멍 형상은 가공이 쉽고 다공벽 설치부의 구조적 강도저하에 영향이 적은 원형으로 하고, 다공벽의 기공률과 다공벽 하부에 설치한 공동의 길이 및 깊이의 변화가 충격파의 강도감쇠에 미치는 영향을 조사하는데 목적을 두었다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도이며 이 대기 간헐흡입식 초음속풍동(intermittent indraft type supersonic wind tunnel)은 크게 나누어 측정부(test section), 진공탱크(vacuum tank), 풍동저기조(reservoir)로 구성되어 있다.

진공탱크의 압력을 약 1kPa 이하로 하여 측정부 하류에 설치된 진공밸브를 열면 측정부에서 약 15초 정도의 초음속 정상상태 흐름을 유지시킬 수 있도록 진공탱크와 풍동저기조의 용량은 각각 5m<sup>3</sup>와 44m<sup>3</sup>로 하였다.

풍동 저기조내의 정체점 상대습도  $\phi$ 와 온도  $T_0$ 는 제습장치 및 가열기 등을 설치하여 조절하였고, 풍동저기조내의 상태를 균일하게 유지하기 위해 순환팬을 사용하였다. 정체점 상태량 측정을 위해 디지털 습도계(CHINO, Co., model HN-K)와 온도계를 사용하였다.

측정부는 유로의 폭이 25mm, 높이가 80mm인 듀랄루민으로 제작된 4각 덕트(duct)에 유동을 초음속으로 가속시키기 위하여 곡률 반경 300mm의 원호노즐을 상부벽에 설치하였고 경사충격파를 발생시키기 위하여 노즐목(throat)으로부터 하류로 36.5mm, 하부벽으로부터 42.2mm인 위치에 쇠기선단각도가 5°이고 길이가 30mm인 충격파 발생기(shock generator)를 설치하였다.

또한, 솔리렌시스시스템으로 유동장의 흐름을 가시화하기 위하여 측정부의 양 측면에는 두께 10mm의 광학유리를 사용하였으며, 유동장내의 정압 측정을 위하여 직경 1mm의 정압공을 하부벽의 중심축을 따라 5mm 간격으로 배열시키고 특히 충격파가 입사하는 하부벽 근방에는 2.5mm 간격으로 밀집시켰다. 하부벽에 공동을 설치한 경우에는 공동 내부의 정압측정을 위하여 2.5mm 간격으로 5개의 정

압공을 공동의 저면(底面)에 추가하여 설치하였다

다공판은 두께 1mm의 강판(steel plate)을 사용하였으며 다공판에는 8개의 구멍을 1열로 하여 충격파가 입사하는 지점을 중심으로 전·후에 각각 2열씩 총 4열로 32개의 구멍을 뚫었다. 한편 공동길이의 효과를 조사하는 경우에는 동일한 기공률과 동일한 형상에 대하여 다공벽의 길이만을 길게 하여 실험을 수행하였다.

실험은 풍동저기조내의 상태량을  $T_0=298K$ ,  $P_0=101.3kPa$ 로 일정하게 유지시킨 다음 동일한 공동 길이(10mm) 및 깊이(5mm)에 대하여 다공판 구멍의 개수는 변화시키지 않고 직경만을 0.7, 0.9, 1.1, 1.3mm로하여 기공률을 5, 8, 12, 17%로 변화시켜 충격파 전·후의 압력 변화를 조사함으로써 기공률의 효과를 규명하였다.

또한 정체점 상대습도  $\phi$ 는 35% 이하가 되도록 하여 본 연구의 실험범위내에서는 비평형과정의 응축이 일어나지 않도록 하였다.

측정결과 충격파를 통한 압력 증가가 피동제어를 하지 않은 경우에 비해 가장 적고, 부하감소효과가 가장 큰 기공률인 8%와 본 실험에서 사용한 가장 큰 기공률인 17%에 대하여 먼저 충격파 상류로는 공동의 길이를 일정하게 하고 충격파 하류 방향으로만 넓혀 공동의 길이  $L=10, 15, 20mm$ 의 경우에 대해 유동장 및 공동내의 압력변화를 관찰하여 공동 길이의 영향을 조사하였다.

다음, 역시 동일한 기공률에 대하여 공동의 깊이만 변화시켜  $D=5, 8mm$ 에 대해 충격파 전·후의 압력변화를 관찰함으로써 공동 깊이의 효과도 조사하였다.

또한, 각각의 기공률과 공동의 길이 및 깊이를 변화시킨 모든 경우에 대하여 공동내의 정압분포를 측정함으로써 공동내부의 압력과 다공벽 표면의 압

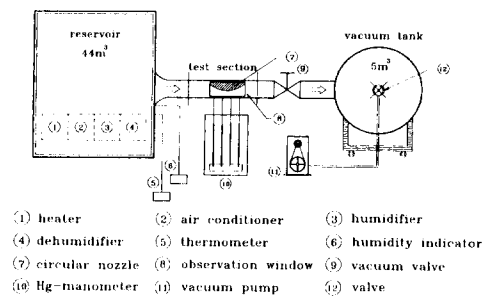


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

력과의 관계도 관찰하였다

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 기공률의 영향

Fig. 2는 피동제어를 하지 않는 경우와 제어하는 경우의 유동장의 개략도를 나타낸 것으로 Fig. 2(b)와 같이 충격파가 입사되는 하부벽을 다공벽으로 하고 그 아래를 공동으로 만든 경우, 충격파 하류의 급격한 압력상승은 경계층 흐름을 공동으로 유입하게 하고 공동을 통하여 충격파 전방으로 유출되게 한다. 따라서 충격파 전방의 경계층 두께는 두꺼워지고 그로 인해 압축파가 발생된 결과, 충격파 입사점 근방에서의 마하수가 감소되어 엔트로피의 증가와 압력구배가 작아지게 되고 박리의 정도도 감소하게 된다.

Fig. 3은 피동제어를 행하지 않은 경우에 대한 가시화 사진, 무차원 압력분포, 마하수 분포 및 유동현상 개략도를 나타낸 것이다.

Fig. 3(a)는 유동장을 가시화한 슐리렌사진으로 곡률반경  $R=300\text{mm}$ 의 원호노즐을 통하여 초음속으로 팽창된 유동은 충격파 발생용 췌기의 선단에서 마하수가 1.20로 되고, 췌기에 의해 발생된 경사충격파는 노즐 하부벽에 입사한 후, 마하 반사(Mach reflection)를 하고 있음을 보이고 있다.

본 실험에서 유동을 1차원이라 가정할 경우 유동장의 기하학적 형상에 의하면 췌기선단에서의 마하수는 1.27로 되어야 하나 정압측정에 의하여 확인

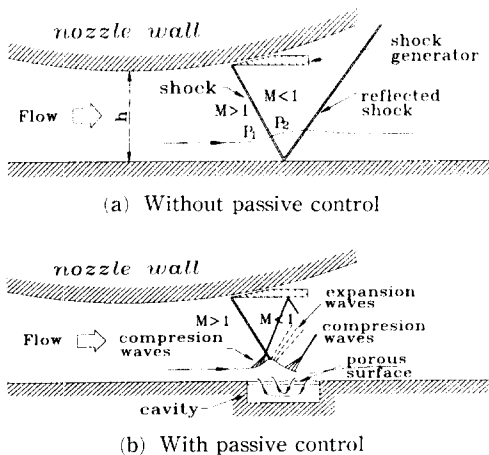
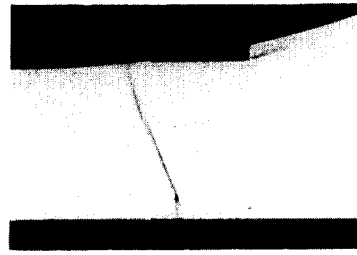


Fig. 2 Schematics of flow field



(a) Schlieren photograph

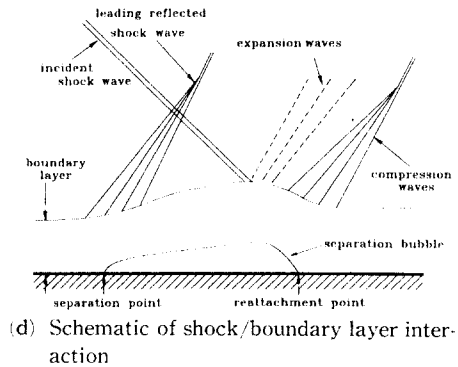
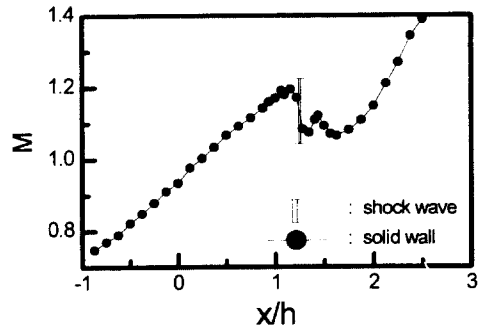
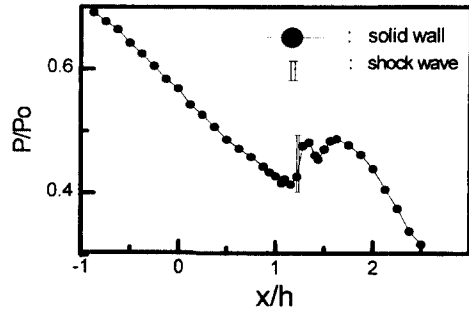


Fig. 3 Schlieren photograph and distributions of static pressure, Mach number and schematic of shock/boundary layer interaction without passive control ( $R=300\text{mm}$ ,  $h=40\text{mm}$ ,  $P_0=101.3\text{ kPa}$ ,  $T_0=298\text{K}$ ,  $\phi=35\%$ )

된 마하수는 1.20으로 나타났다.

이는 상부 노즐벽 및 썰기선단 부근에서 발생되는 경계층의 영향과 유동장이 완전한 1차원이 아닌 것에 기인된 결과로 판단된다.

Fig. 3(b), (c)는 노즐목(throat)을 원점으로, 노즐목 반높이(h)로 무차원화된 거리에 대한 무차원 정압분포 및 마하수분포를 나타낸 것이다.

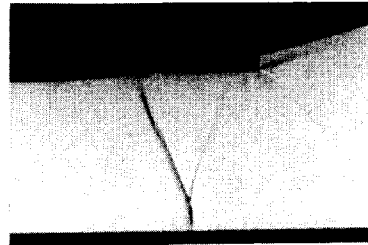
충격파가 입사하는 무차원 거리  $x/h=1.25$ 에서 급격한 정압 상승과 마하수의 감소를 볼 수 있다. 또한 그림 (b), (c)에서 보이는 바와 같이 충격파의 입사에 의해  $x/h=1.4$ 까지 감속되었다가 다시 팽창하는 유동장내에 또다른 완만한 압력증가와 마하수 감소를 관찰할 수 있다. 이는 입사 충격파와 경계층과의 간섭의 결과 충격파의 입사점 하류에서 경계층의 외연이 다시 요면(凹面)으로 되기 때문에 압축파가 발생되고, 이 압축파의 집적에 의해 또다른 충격파가 발생하므로 써 야기된 영향과, 선두입사충격파(leading incident shock wave)로 유입되는 경계층 근방의 유체입자가 선두 입사충격파에 의하여 벽면 쪽으로 전향(turning)되고 전향된 유체입자가 압력 추정공으로 충돌(impingement)하여 운동량을 전달하게된 영향 때문으로 판단된다.

이와 같은 충격파와 경계층의 간섭작용을 Fig. 3(d)에 도식적으로 나타내었다. 그림에서 충격파 발생기에 의해 발생된 경사충격파가 하부벽으로 입사하여 경계층을 박리시키고 있으며, 박리된 경계층의 기하학적 형상에 의하여 압축파의 입사점 전방에 선두 반사충격파(leading reflected shock wave)가 형성되고 있다. 한편 입사충격파는 경계층 외연에 있어서 자유 경계면에서의 반사와 같이 반사하기 때문에 팽창파로 되어 반사된다.

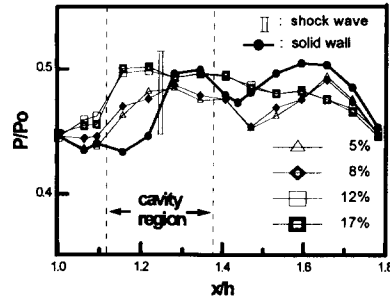
Fig. 4는 동일한 공동 길이, 공동 깊이에 대하여 기공률 변화에 따른 무차원 압력분포, 마하수 분포와 무차원 압력으로부터 구한 양력(lift)과 직결되는 부하(load)의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 두 점선 사이의 영역이 다공벽으로 된 영역이다.

Fig. 4(a)는 8%의 기공률로 피동제어를 행한 경우의 슐리렌사진이며, 모든 기공률에 대한 충격파의 위치는 공동이 없는 경우, 즉 제어를 행하지 않은 Fig. 3(a)의 경우와 동일하게 나타났다. 여기서 공동의 깊이는  $D=5\text{mm}$ , 길이는  $L=10\text{mm}$ 로 일정하고 충격파의 입사점은 다공벽(즉, 공동)의 중심에 위치하도록 하였다.

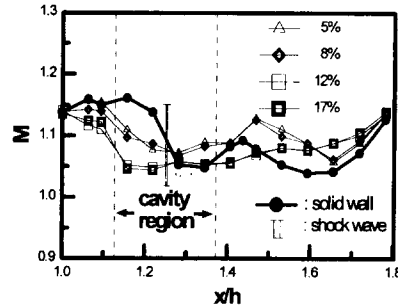
Fig. 4(b)는 기공률 5, 8, 12, 17%에 대한 정압



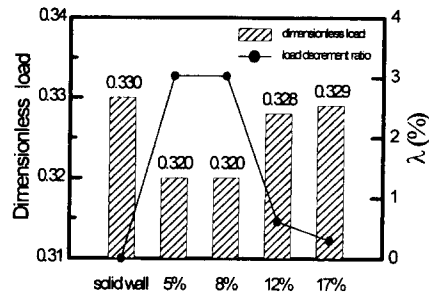
(a) Schlieren photograph  
( $\sigma=8\%$ ,  $L=10\text{mm}$ ,  $D=5\text{mm}$ )



(b) Pressure distribution



(c) Mach number distribution



(d) Dimensionless load and load decrement ratio

Fig. 4 Effects of porosity on the distributions of static pressure, Mach number, dimensionless load and load decrement ratio ( $R=300\text{mm}$ ,  $h=40\text{mm}$ ,  $P_0=101.3\text{ kPa}$ ,  $T_0=298\text{K}$ ,  $\phi=35\%$ )

분포를 공동을 설치하지 않은 경우(solid wall)와 비교하여 나타낸 것이다.

충격파를 통한 압력의 갑작스런 상승으로 충격파 하류의 유체가 다공벽을 통하여 공동내부로 유입(inflow)되고, 이것은 공동을 거쳐 압력이 상대적으로 낮은 충격파 상류로 다공벽을 통하여 유출(outflow)되므로 다공벽이 설치되지 않은 경우와 비교할 때 충격파 하류의 압력상승폭은 많이 감소되었으나 공동으로부터 충격파 상류로의 유체유출이 경계층의 두께를 증가시켜 Fig. 3(d)에서 설명한 선두 반사충격파로 집적되는 일련의 압축파를 발생시키게 되어 충격파 상류에서의 압력은 공동이 없는 경우보다 오히려 높게 나타났다.

이 경우 기공률이 크면 클수록 충격파 하류로부터 공동을 통하여 유입된 뒤 충격파 상류로 유출되는 유량이 많아지므로 경계층의 두께가 더 두꺼워지게 되고 이로 인한 압축파의 발생에 의하여 충격파 상류에서의 압력이 더 높게 나타났다. 한편, Fig. 4(b), (c)의 압력 분포와 마하수 분포에서 알 수 있듯이 기공률이 큰 12, 17%의 경우가 작은 5, 8%의 경우에 비하여 전체적으로 압력은 높고, 마하수는 작게 나타났다.

이는 기공률이 너무 크게 되면 충격파 하류에서 상류로의 유동량이 많게 되고, 이에 따라 충격파 상류에서의 기류유출의 영향으로 경계층의 박리가 발생되기 때문이라고 사료된다. 12%와 17%로 기공률이 증가함에 따라 충격파 후방에서 전방으로의 유동이 원활해진 결과 충격파 상류에서의 압력은 높은 반면 충격파 하류에서의 압력변화는 작고 완만하게 나타났으며, 5%와 8%의 경우가 기공률이 큰 12%와 17%에 비해 충격파 선단에서의 압력상승폭도 낮고 최대 압력과 최소 압력 사이의 압력 차이도 줄어들어 압력분포가 완만해지므로 오히려 충격파제어에 더 효과가 있음을 알 수 있다.

Fig. 4(d)는 하부벽에 작용하는 양력과 직결되는 부하와 부하감소율(load decrement ratio)을 나타낸 그림이다. 여기서, 부하는 단위 폭에 대한 정압과 길이의 곱(즉, Fig. 4(b)에서의 곡선 하부의 면적)을 의미한다. 그림으로부터 5%와 8%일 때가 노즐벽에 작용하는 부하가 가장 적고, 기공률의 증가에 따라 점차 증가하여 17%에서는 solid wall의 경우와 거의 같게 되었다.

한편, 부하감소율을 다음과 같이 정의하여 Fig. 4(d)에 나타내었다.

$$\lambda(\text{기준부하에 대한 부하 감소율}) = \frac{\text{기준부하} - \text{부하}}{\text{기준부하}}$$

따라서, solid wall을 기준부하로 한 부하감소율은  $\lambda(\sigma=5\%)=3.03\%$ ,  $\lambda(\sigma=8\%)=3.03\%$ ,  $\lambda(\sigma=12\%)=0.61\%$ ,  $\lambda(\sigma=17\%)=0.3\%$ 로 되었다.

기공률의 증가에 따라 압력상승폭이 점차 줄어들기는 하나, 기공률이 12%와 17%까지 증가한 경우 부하에 있어서는 제어하지 않은 경우와 별 차이가 없다는 사실로부터 본 실험조건에서 피동제어에 가장 효과가 큰 기공률을 구할 수 있다.

본 논문에서는 8%의 기공률이 압력과 부하감소에 있어서 나머지 경우에 비하여 상대적으로 좋은 결과를 얻었으며, 이는 본 실험과 조건은 다르지만 피동제어에 미치는 기공률의 영향을 조사한 Zierep<sup>(12)</sup>의 연구 결과와도 일치한다. 따라서 본 논문에서의 공동 길이 및 공동 깊이의 변화가 충격파제어에 미치는 효과를 규명할 때의 기공률은 8%를 기준으로 하고 기공률이 큰 경우의 효과를 함께 비교하기 위해 17%에 대해서도 같은 방법으로 반복하여 실험하였다.

### 3.2 공동길이의 영향

피동제어에서의 공동 길이(cavity length) 즉, 다공벽 길이의 영향을 조사하기 위해 공동의 깊이를 5mm로 하고 다공판의 기공률을 8%와 17%로 일정하게 한 다음, 각각에 대하여 공동의 길이만 충격파 입사위치에서 하류 방향으로 넓힌  $L=10, 15, 20\text{mm}$ 의 세가지 경우에 대해 조사하였다. 즉, 모든 경우에서 경사충격파가 입사하는 위치는 다공벽이 시작되는 위치로부터 하류 5mm로 일치시켰다.

Fig. 5는 다공벽 영역(즉, 공동 길이)이 충격파의 제어에 미치는 영향을 조사한 것으로 기공률은 8%, 공동의 깊이는 5mm이다. 압력, 마하수 분포 도내의 점선은 다공벽의 시작점을 나타낸다(이하 동일).

Fig. 5(a)의 슐리렌사진은 공동 길이  $L=20\text{mm}$ 인 경우의 것을 대표적으로 나타낸 것이다.

Fig. 5(b)는 공동의 길이가 증가하는데 따른 다공벽에 있어서의 무차원 정압분포를 나타낸 그림이다. 동일한 기공률과 공동 깊이의 경우에 있어 충격파 하류의 다공벽의 영역이 넓어질수록 압력이 전체적으로 낮아지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 넓어진 공동영역을 통과할 때가 공동의 길이가 짧

을 때에 비해 상대적으로 작은 유동저항을 갖게 되므로 충격파 뒤쪽의 높은 압력의 기류가 보다 많이 공동으로 유입한 후, 충격파 상류의 낮은 압력영역으로 유출하게 되어 충격파강도가 낮아지게 되기 때문이다. 특히,  $x/h=1.7$  근방에서는  $L=20\text{mm}$ 인 경우가  $10\text{mm}$ 인 경우에 비하여 압력이 7~8% 정도 낮은 것으로 나타나 공동의 길이가 길어질 때 가 더 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 5(c)는 공동의 길이 변화에 따른 유동장내의 정압측정으로부터 구한 마하수분포를 나타낸 것으로 공동의 길이가 길어짐에 따라 상대적으로 낮은 압력의 영향으로 충격파강도가 감소되어 유동이 적게 감속되었음을 보여준다.

Fig. 5(d)는 압력 분포로부터 구한 노즐벽에 작용하는 부하와 부하감소율을 나타내는 그림이다. 다공벽 시작점 위치부터 충격파 입사점까지의 거리가 동일한 경우에는 충격파입사 이후의 다공벽의 길이가 길어질수록 충격파 직후의 경계층 두께 감소에 기인한 압력 증가의 감소로 제어효과가 증대되어 벽면에 작용하는 부하도 점점 줄어드는 것을 볼 수 있다.

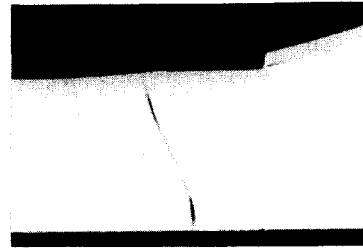
한편, solid wall의 기준부하에 대한 부하감소율은  $\lambda(L=10)=3.03\%$ ,  $\lambda(L=15\text{mm})=5.15\%$ ,  $\lambda(L=20\text{mm})=6.36\%$ 로 나타났다.

Fig. 6은 Fig. 5의 결과를 재확인하기 위하여 공동의 길이는  $5\text{mm}$ 로 Fig. 5의 경우와 동일하게 유지하고, 기공률만 17%로 증가시킨 경우의 측정결과를 나타낸 그림이다.

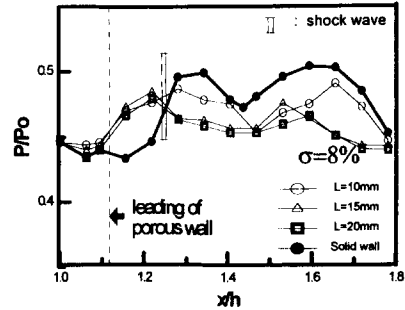
Fig. 6(a)는 유동장을 가시화한 슐리렌사진으로  $L=20\text{mm}$ 인 경우의 것을 대표적으로 나타내었다.

Fig. 6(b)의 정압 분포에서는 Fig. 5의 기공률  $\sigma=8\%$ 인 경우에서와 성향이 동일하며, 공동의 길이가 길어질수록 충격파 전·후의 압력 간섭을 일으키는 제어영역의 확대로 공동길이가 짧은 경우에 비하여 압력이 전체적으로 낮고 분포가 완만하며, 또한 Fig. 6(c)에 보이는 바와 같이 마하수는 반대로 높게 된다. 더 넓어진 제어 영역을 통한 표면과 공동내의 원활한 압력전달효과 즉, 유동으로 인하여 공동표면 위의 마하수분포는 대체적으로 solid wall인 Fig. 3(c)의 경우보다 균일하게 되는 것으로 나타났다.

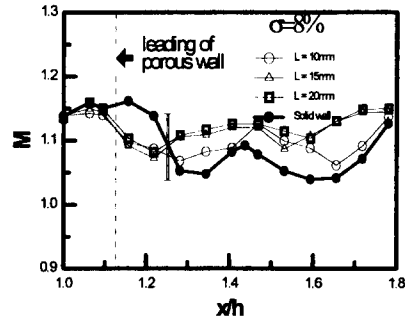
Fig. 6(d)로부터 solid wall의 기준부하에 대한 부하 감소율  $\lambda$ 는  $\lambda(L=10)=0.3\%$ ,  $\lambda(L=15)=2.42\%$ ,  $\lambda(L=20)=3.94\%$ 로 나타났다. 이로부터 공



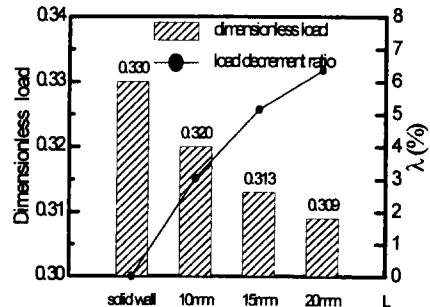
(a) Schlieren photograph  
( $\sigma=8\%$ ,  $L=20\text{mm}$ ,  $D=5\text{mm}$ )



(b) Pressure distribution

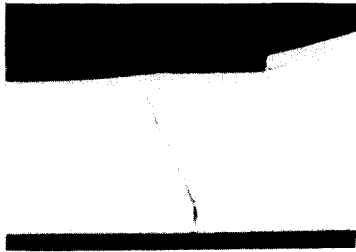


(c) Mach number distribution

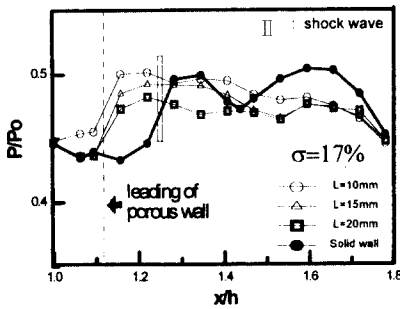


(d) Dimensionless load and load decrement ratio

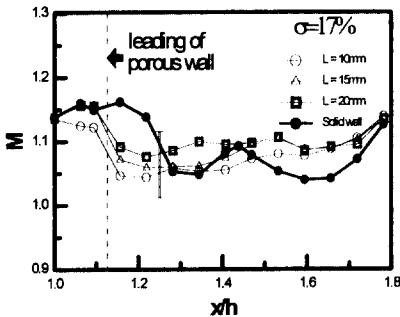
Fig. 5 Effects of cavity length on the distributions of static pressure, Mach number, dimensionless load and load decrement ratio ( $R=300\text{mm}$ ,  $h=40\text{mm}$ ,  $P_0=101.3\text{ kPa}$ ,  $T_0=298\text{K}$ ,  $\phi=35\%$ ,  $\sigma=8\%$ )



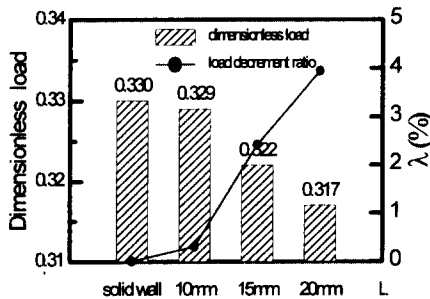
(a) Schlieren photograph  
( $\sigma=17\%$ ,  $L=20\text{mm}$ ,  $D=5\text{mm}$ )



(b) Pressure distribution



(c) Mach number distribution



(d) Dimensionless load and load decrement ratio

6 Effects of cavity length on the distributions of static pressure, Mach number, dimensionless load and load decrement ratio ( $R=300\text{mm}$ ,  $h=40\text{mm}$ ,  $P_0=101.3\text{kPa}$ ,  $T_0=298\text{K}$ ,  $\Phi=35\%$ ,  $\sigma=17\%$ )

동의 길이 변화에 따른 피동제어의 영향은 공동의 길이가 길어질수록 상대적으로 더 넓은 범위에 걸쳐 압력전달이 이루어짐으로써 충격파의 강도를 감쇠시키는데 효과적이라는 것을 알 수 있다.

### 3.3 공동 길이의 영향

피동제어(passive control)에서 공동의 깊이(cavity depth) 변화에 따른 영향을 조사하기 위하여  $L=10\text{mm}$ 인 공동 길이에 대하여 다공벽의 기공률을 8%와 17%로 일정하게 한 후, 공동의 깊이만  $D=5\text{mm}$ 와  $8\text{mm}$ 로 변화시켜 조사하였다.

Fig. 7은 기공률  $\sigma=8\%$ ,  $L=10\text{mm}$ 인 경우의 공동 깊이 변화에 따른 측정결과를 나타낸 것이다.

Fig. 7(a)는 공동 깊이  $D=8\text{mm}$ 인 경우의 유동장을 가시화한 슐리렌사진을 대표적으로 나타낸 것이다.

Fig. 7(b)의 깊이 변화에 따른 압력분포에 의하면  $D=8\text{mm}$ 인 경우가  $D=5\text{mm}$ 인 경우에서보다 공동을 통과하는 기류의 유동저항이 작게 되어 공동을 통한 유입, 유출량이 많게 되므로 충격파 전방의 유출부에서는 상대적으로 압력이 높게 되고 유입부에서는 낮게 나타났다. 즉, 충격파의 입사위치인  $x/h=1.25$ 의 전방에서는 공동 깊이가 깊은 8mm의 경우가 압력이 높고 반대로  $x/h=1.25$  이후에는 5mm인 경우가 압력이 높게 된다.

이의 결과로부터 동일한 기공률과 공동 길이에 대해서는 공동의 깊이가 깊은 경우가 충격파 직후의 유동이 쉽게 공동으로 유입되어 충격파 직후 영역에서는 경계층이 얇게 되고 그에 따라 Fig. 3(d)에서 보이는 재부착점 이후에 발생하는 충격파에 의한 압력증가는 억제되고 반대로 입사충격파 직전의 경계층은 더 두껍게 되어 선두반사충격파에 의한 압력증가는 크게 됨을 알 수 있다.

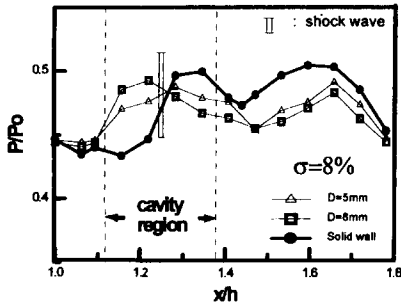
Fig. 7(c)는 Fig. 7(b)의 정압을 사용하여 구한 마하수분포를 나타낸 그림으로 상대적으로 커진 공동을 통하여 충격파 전·후에 압력간섭이 원활해진 결과 전체적으로  $D=5\text{mm}$ 의 경우에서보다  $D=8\text{mm}$ 인 경우의 압력감소효과가 크게 나타나 상대적으로 더 높은 마하수분포를 유지하고 있으며, 마하수분포는 압력분포와는 반대의 경향을 나타낸다.

Fig. 7(d)의 깊이 변화에 따른 부하 비교에서 공동 깊이가 깊어짐에 따라 앞서 언급한 제어의 영향으로 solid wall의 기준부하에 대해서  $\lambda_{(D=5\text{mm})}=3.03\%$ ,  $\lambda_{(D=8\text{mm})}=3.64\%$ 로 부하가 감소되어졌음

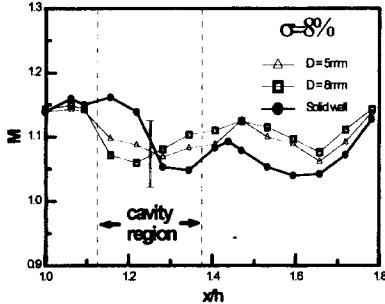




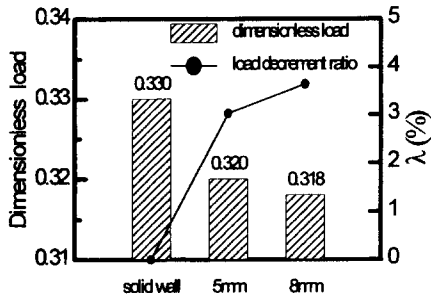
(a) Schlieren photograph  
( $\sigma=8\%$ ,  $L=10\text{mm}$ ,  $D=8\text{mm}$ )



(b) Pressure distribution



(c) Mach number distribution



(d) Dimensionless load and load decrement ratio

**Fig. 7** Effects of cavity depths on the distributions of static pressure, Mach number, dimensionless load and load decrement ratio ( $R=300\text{mm}$ ,  $h=40\text{mm}$ ,  $P_0=101.3\text{ kPa}$ ,  $T_0=298\text{K}$ ,  $\phi=35\%$ ,  $\sigma=8\%$ )

을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7의 결과를 재확인하기 위하여 공동 길이는  $L=10\text{mm}$ 로 Fig. 7의 경우와 동일하게 유지하고, 기공률만  $\sigma=17\%$ 로 했을 경우의 공동의 깊이 변화에 따른 가시화 사진, 압력, 마하수 분포와 부하 및 부하감소율을 나타낸 그림이다.

Fig. 8(a)는 대표적으로 나타낸  $D=8\text{mm}$ 인 경우의 슐리렌사진이다.

Fig. 8(b)의 압력 분포도로부터  $\sigma=8\%$ 의 경우와 동일하게 공동 깊이가 깊어질수록 압력이 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 또한, 이때 마하수의 분포도 Fig. 7(c)와 동일한 경향을 나타내고 있으며, 이를 Fig. 8(c)에 나타내었다.

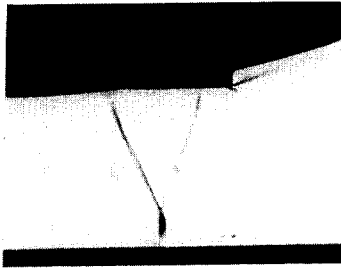
Fig. 8(d)의 노즐 하부벽에 작용하는 부하 비교로부터 solid wall의 기준부하에 대하여  $\lambda(D=5\text{mm})=0.3\%$ ,  $\lambda(D=8\text{mm})=3.03\%$ 로 부하 감소가 있음을 알 수 있다.

위의 결과들로부터 공동의 깊이가 변화에 따른 피동제어의 영향은 공동의 깊이가 깊어질수록 더 증가된 공동내의 체적으로 인해 상대적으로 원활한 압력전달이 이루어짐으로써 충격파의 강도를 감소시키는데 효과적이라는 것을 알 수 있다.

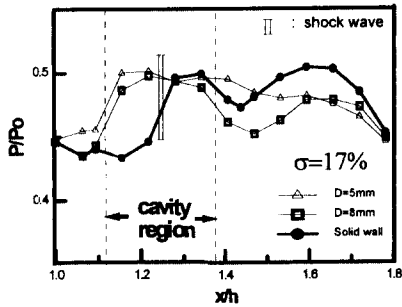
Fig. 9는 기공률, 공동 길이, 공동의 깊이 변화에 따른 공동 내부의 정압 분포를 나타내는 그림이다.

Fig. 9(a)는 공동 길이를 10mm, 깊이를 5mm로 일정하게 하고 기공률만 변화시켜가며 측정한 공동 저면의 압력분포를 나타낸 것으로, 어느 경우에도 공동내의 압력은 거의 균일함을 알 수 있고, 기공률 증가에 따라 충격파 하류의 기류가 유입될 수 있는 다공벽의 면적이 늘어남으로 충격파 하류의 높은 압력이 쉽게 전달되어 공동 내부의 압력은 기공률이 낮은 경우에 비하여 높게 됨을 보이고 있다.

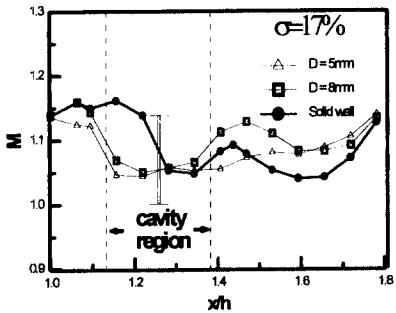
Fig. 9(b)는 공동의 깊이가 5mm인 경우 공동의 길이 변화에 따른 공동 저면의 압력분포를 나타낸 것으로 공동내의 압력은 거리  $x$ 에 관계 없이 균일하게 유지되고 있다. 공동 길이가 깊어질수록 충격파 직후의 고압기류가 공동내로 쉽게 유입되어 공동 길이가 짧은 경우에 비하여 상대적으로 높은 값을 나타낼 것이라 판단되었으나 이와 정반대의 현상이 나타났다. 이는 공동의 길이가 깊어질수록 충격파 직후의 고압의 기류가 쉽게 공동내로 유입되어 공동내의 압력을 높이는 효과는 있으나, 공동의



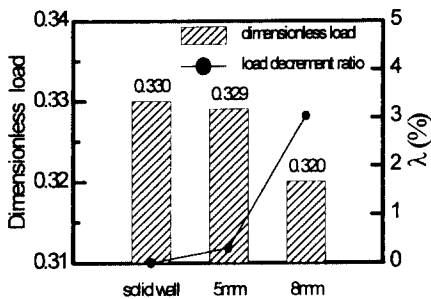
(a) Schlieren photograph  
( $\sigma=17\%$ ,  $L=10\text{mm}$ ,  $D=8\text{mm}$ )



(b) Pressure distribution

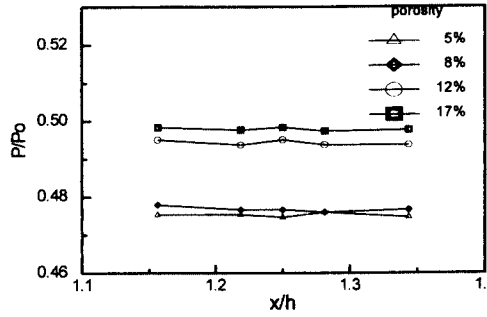


(c) Mach number distribution

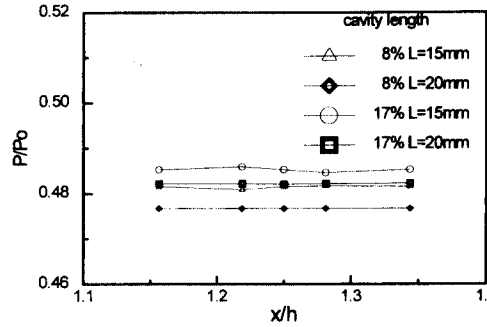


(d) Dimensionless load and load decrement ratio

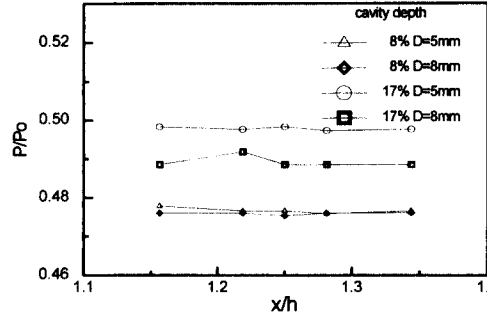
Fig. 8 Effects of cavity depths on the distributions of static pressure, Mach number, dimensionless load and load decrement ratio ( $R=300\text{mm}$ ,  $h=40\text{mm}$ ,  $P_0=101.3\text{ kPa}$ ,  $T_0=298\text{K}$ ,  $\phi=35\%$ ,  $\sigma=17\%$ )



(a) Effect of porosity



(b) Effect of cavity length



(c) Effect of cavity depth

Fig. 9 Pressure distribution in the cavity for the variations of (a) porosity, (b) cavity length, and (c) cavity depth ( $R=300\text{mm}$ ,  $h=40\text{mm}$ ,  $P_0=101.3\text{ kPa}$ ,  $T_0=298\text{K}$ ,  $\phi=35\%$ )

길이 가 길어짐으로써 보다 낮은 압력의 하류에까지 다공벽으로 된 결과 기인되는 압력강하 효과가 더 크기 때문이라고 생각된다.

Fig. 9(c)는 공동의 길이를 10mm로 일정하게 한 상태에서 길이 변화에 대한 공동 저면의 압력 분포를 나타낸 그림이다. 여기서도 동일한 기공률에 대해서 공동 깊이가 깊을수록 충격파 하류의 고압기

류가 공동을 통해 충격파 상류로 유동할 때 공동 내에서의 유동저항이 적게 되어 공동내의 압력이 낮게 됨을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

초음속 유동장내에 발생하는 충격파에 대한 피동 제어(passive control)의 영향을 알아보기 위해 노즐 하부벽면에 다공관을 부착한 공동을 설치하여 다공벽면의 기공률, 공동의 길이 및 깊이에 따른 충격파 전·후의 압력 변화를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 실험조건에서 충격파의 강도감쇠에 가장 효과가 큰 기공률은 8%의 경우로 나타났다.
- (2) 동일한 기공률과 공동 깊이에 대해서 다공벽의 면적이 넓을수록 충격파 하류에서 압력의 증가가 낮고, 부하도 작게 됨을 알았다.
- (3) 동일한 기공률과 다공벽 면적인 경우에는 공동의 깊이가 깊을수록 충격파강도는 낮게 되고, 부하도 작게 됨을 알았다.

#### 참고문헌

- (1) 齊田暢三, 三栖 功, 門田匡人, 1992, “はく離 충격波のパッシブコントロール,” 日本機械學會論文集B, 58卷 554號.
- (2) Deych, M. YE., Saltanov, G. A., Stepanchuk, V. F. and Orlova, V. M., 1969. “Study of Energy Losses in Condensation Discontinuities and Shock in the Flow of Wet Steam,” *Heat Transfer-Soviet Research*, Vol. 1, No. 2, Mar.
- (3) 權純範, 松尾一泰, 川越茂敏, 瀬戸口後明, 龍谷後夫, 1986, “凝縮を伴うラバルノズル流れの全壓損失(實驗結果),” 日本機械學會論文集 B, 52卷 480號.
- (4) 權純範, 松尾一泰, 川越茂敏, 松尾繁, 1987, “凝縮を伴うラバルノズル流れの全壓損失(數値解析),” 日本機械學會論文集 B, 53卷 489號.
- (5) Troyanovskii, B. M., 1980. “Influence of Wetness on Efficiency of Steam Turbine,” *Combustion*.
- (6) Finke, K., 1977. “Stoßschwingungen in Schallnahen Strömungen,” *VDI-Forschungsheft*, 580.
- (7) Thiede, P., 1980. “Supercritical Airfoil Flow Control by Slot Suction in the Shock Region,” *Proc. of the 5th USAF/FRGDEA Meeting on “Viscous and Interacting Flow Field Effects,”* Annapolis, Md., AFFDL-TR-80-3088.
- (8) Krogmann, P., Stanewsky, E. and Thiede, P., 1985. “Effect of Suction on Shock/Boundary Layer Interaction and Shock Induced Separation,” *J. of Aircraft*. Vol. 22.
- (9) Szumowski, A. P., 1971, “Attenuation of a Shock Wave Along a Perforated Tube,” *Shock Tube Research*, 14, Chapman and Hall.
- (10) Schnerr, G. H. and Dohrmann, D., 1993. “Numerical and Experimental Investigation of Passive Control of the Shock-Boundary Layer Interaction in a Transonic Compressor Cascade,” *ICFM*.
- (11) 望月・ほか3名, 1990. 機講論, No. 900-14, 176.
- (12) Zierep, J., 1992. “Trends in Transonic Research,” *Theoretical and Applied Mechanics*.
- (13) Thiede, P. and Krogmann, P., 1989. “Passive Control of Transonic Shock/Boundary Layer Interaction,” *Symposium Transonicum III*, IUTAM Symp. Göttingen 24-27, 5, 1988, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg.
- (14) 김병지, 1993. “초음속 유동에 있어서 응축과 경사충격파에 관한 연구,” 경북대학교 박사 논문.