

〈기술논문〉

## 응축충격파와 경계층 간섭의 피동제어 (Ⅱ)

최영상\* · 권순범\*\* · 김병지\*\*\*

(1996년 10월 9일 접수)

### A Passive Control of Interaction of Condensation Shock Wave and Boundary Layer (Ⅱ)

Young-Sang Choi, Soon-Bum Kwon and Byung-Ji Kim

**Key Words :** Passive Control(피동제어), Interaction(간섭), Condensation Shock Wave(응축 충격파), Nonequilibrium Condensation(비평형응축), Porosity(기공률)

#### Abstract

A passive control of interaction of condensation shock wave / boundary layer for reducing the strength of condensation shock was conducted experimentally in a  $2.5 \times 8 \text{cm}^2$  indraft type supersonic wind tunnel. The effects of following factors on passive control were investigated : 1) the thickness of porous wall, 2) the diameter of porous hole, and 3) the orientation of porous hole. On the other hand, the location of nonequilibrium condensation region and condensation shock wave was controlled by regulation of the stagnation conditions. Surface static pressure measurements as well as Schlieren observations of the flow field were obtained, and their effects were compared with the results the cases of without passive control. It was found that thinner porous wall, smaller porous hole and FFH orientation for the same cavity size and porosity of 12% are more favourable than the cases of its opposite.

#### 기 호 설 명

$P$  : 정압(static pressure), (kPa)  
 $P_0$  : 정체 압력(stagnation pressure), (kPa)  
 $T_0$  : 정체 온도(stagnation temperature), (K)  
 $M$  : 마하수(Mach number)  
 $L$  : 공동의 길이(cavity length), (mm)  
 $D$  : 공동의 깊이(cavity depth), (mm)  
 $h$  : 노즐 목 반높이(throat half height), (mm)  
 $R$  : 원호노즐의 곡률반경, (mm)  
 $x$  : 노즐 목으로부터 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

최근의 대형 여객기와 같은 수송 수단이나 고압 공기기계 등의 고속화와 고출력화로 이들 유체기계 의 익표면상의 유동은 衝擊波를 수반하는 천음속으로 된다. 이 衝擊波는 벽면을 따라 발생하는 익면境界層과 복잡한 상호간섭을 일으켜 境界層이 박리되고 그 결과 항력의 급격한 증가 및 진동, 소음이 증가되게 된다.<sup>(1,2,3)</sup>

\*회원, 경북대학교 대학원 기계공학과

\*\*회원, 경북대학교 기계공학과

\*\*\*회원, 카톨릭상지전문대학 자동차과

따라서 이러한 간섭현상은 항공기 및 각종 고속, 고압 유체기계의 효율과 성능저하에 영향을 미치므로 충격파와 경계층의 간섭현상을 제어하는 연구가 요구되고 있다.

천음속 항공기에 대한 성능을 향상시키고 충격파의 발생에 의한 항력을 감소시키기 위하여 적용된 방법이 초임계 익형(supercritical airfoil)의 사용이다. 그러나 이 방법은 design flight condition에서만 유효하며, 특히 두께비(thickness ratio)가 큰 익형의 off-design 상태에서는 항력이 급격하게 증가한다.<sup>(4,5)</sup>

이와는 달리 천음속 유동장에서 충격파로 인한 항력을 감소시키는 가장 간단하고 경제적인 방법이 Dennis & Whitcomb에 의해 제안된 충격파와 경계층 간섭의 피동제어 방법(passive control method)이다. 이 방법은 충격파가 위치하는 곳의 유로의 표면을 공동을 가지는 다공벽(porous wall)으로 한 것으로, 충격파 하류의 급격한 압력의 상승이 경계층 흐름의 일부를 다공벽을 통과하여 공동내부로 유입되게 한 뒤 충격파 상류로 유출되게 한다. 이때 기류의 순환으로 인해 충격파 상류의 경계층이 두꺼워지게되어 초음속 영역에서 압축파(compression waves)가 형성되고 압축파를 통한 유동마하수의 감소로 인해 충격파 전·후의 엔트로피 변화와 압력구배 및 유동의 박리(shock induced separation)를 감소시킬 수 있다.<sup>(4,5,6)</sup>

천음속 유동에서 衝擊波와 境界層과의 간섭을制御하는데 유효하다고 알려진 被動的인 방법에 대해서 Bahi<sup>(6)</sup> 등은 12% 두께비의 circular arc와 14% 두께비의 supercritical airfoil에서 충격파가 발생하는 위치에 normal holes로 된 다공벽과 그 하부를 공동(cavity)으로 하여 충격파를 被動制御하였으며, Krogmann<sup>(7)</sup> 등은 13% 두께비의 supercritical airfoil에서 衝擊波가 존재하는 위치의 표면을 normal holes로 된 다공벽과 normal double slot으로 하고 그 아래를 공동으로 하여 두 경우의 제어 효과를 연구한 바 있다. 또한 Zierep<sup>(8)</sup>은 channel wall에서의 被動制御 효과를 실험과 수치해석으로 비교하였으며, Kwon<sup>(9)</sup> 등은 circular arc nozzle에서 경사충격파를 발생시켜 충격파가 입사하는 노즐의 하부벽면을 空洞을 가지는 normal holes의 다공벽으로 하여 충격파와 境界層의 간섭에 대한 制御 효과를 연구한 결과 각각 약 8%의 기공률로도 충분한 효과를 얻을 수 있음을

밝혔다.

이들 연구자들은 normal holes의 다공벽에 대해 기공률(porosity), 공동 길이(cavity length) 및 공동 깊이(cavity depth)의 변화가 충격파와 경계층의 간섭을 제어하는데 미치는 영향을 조사한 것이었다.

한편, Raghunathan<sup>(10, 11)</sup>은 6% 두께비의 circular arc model에서 NH(normal holes), FFH(forward-facing holes), BFH(backward-facing holes)의 다공벽 구멍의 경사(hole orientation)에 대해 실시한 피동제어에서 FFH의 경우가 피동제어를 하지 않은 경우와 비교할 때 충격파로 인한 항력의 감소가 가장 우수한 것으로 밝혔다.

또한 Saida<sup>(1)</sup> 등은 step을 가지는 유동장의 박리 충격파(Separated shock wave)를 다공벽 구멍의 직경을 변화시키고, 구멍의 경사를 NH, FFH(30°, 60°), BFH(30°, 60°)로 다르게 하여 피동제어를 연구한 결과 동일한 기공률인 경우는 다공벽 구멍이 작은 경우가, 그리고 구멍의 경사는 FFH 30°인 경우가 충격파를 통한 압력 상승이 가장 완만해 충격파의 강도감쇠에 효과가 있다고 제시하였다.

지금까지의 衝擊波와 境界層 간섭의 制御에 관한 연구는 多孔壁의 구멍을 막히게 할 수도 있고, 충격파와 境界層과의 간섭기구(interaction mechanism)에 영향을 미칠 수도 있는 무수의 凝縮液滴(droplets)이 동반되는 非平衡 과정의 凝縮을 배제한 衝擊波(momentum shock wave)의 被動制御에 대한 것이 대부분이다.

그러나, 最近 사용 頻度가 급격히 증가하고 있는 원자력 발전용 터빈의 경우에는 爐의 안전성 때문에 터빈 입구부터 출구까지 거의 飽和 상태의 증기가 사용되고 있다. 飽和 상태의 증기는 高溫 高壓의 증기에 비하여 비체적이 크기 때문에 이 포화증기가 통과하게 되는 流路에 대응되는 터빈의 動翼의 길이는 길어지게 되고, 그에 따라 濕蒸氣의 동익에 대한 상대속도는 터빈 출구 근방의 段(stage)에서는 超音速으로 된다. 濕蒸氣가 超音速으로 팽창하면 이 濕蒸氣는 非平衡 과정의 凝縮(nonequilibrium condensation)이 일어나고 凝縮의 결과로 발생된 凝縮 잠열이 어느 임계치를 넘게 되면 凝縮衝擊波(condensation shock wave)가 발생된다.

또한, 고속 비행체는 실제로 습공기 증을 비행하

게 되고, 고압 공기 기계 등의 경우에는 습공기 상태에서 운전되고 있으므로 충격파와 境界層의 간섭을 制御하는 연구는 非平衡 과정의 凝縮衝擊波가 동반되는 流動場에 대하여 수행하는 것이 절대적으로 필요하다.

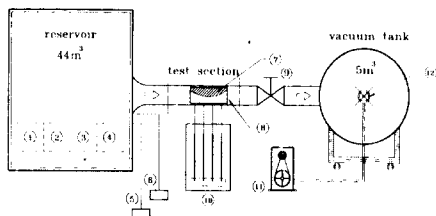
따라서, 본 연구에서는 대기 흡입식 간헐 초음속 풍동을 사용하여 응축성 작동유체인 습공기를 노즐을 통하여 팽창시켜 노즐 하부 벽면의 소정의 위치에 비평형 과정의 凝縮과 凝縮衝擊波가 발생하게 하고 이 위치의 하부 벽에 空洞를 가지는 다공벽을 설치하여 응축충격파를 被動制御하는 경우를 연구의 대상으로 하였다.

이때 실험은 多孔壁의 기공률(porosity)과 多孔壁 하부에 설치한 空洞의 길이(cavity length) 및 깊이(cavity depth)를 일정하게 한 상태에서 다공벽의 두께(porous wall thickness), 다공벽 구멍의 크기(hole diameter) 및 다공벽 구멍의 경사(hole orientation)를 변화시켜 응축충격파와 경계층 간섭의 피동제어에 미치는 영향을 규명하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 본 실험에 사용된 대기 간헐 흡입식 超音速 풍동(intermittent indraft type supersonic wind tunnel)과 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로, 풍동은 측정부(test section), 진공탱크(vacuum tank) 및 풍동저기조(reservoir)로 구성되어 있다.

진공탱크의 압력을 약 1kPa 정도로 유지한 상태에서 측정부 하류에 설치된 진공밸브를 열면 측정부에서 약 15초 정도의 超音速 定常 狀態 흐름을



- ① Heater
- ② Air conditioner
- ③ humidifier
- ④ Dehumidifier
- ⑤ Thermometer
- ⑥ Humidity indicator
- ⑦ Circular nozzle
- ⑧ Observation window
- ⑨ Vacuum valve
- ⑩ Hg-Manometer
- ⑪ Vacuum pump
- ⑫ Valve

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

유지시킬 수 있도록 진공탱크와 풍동저기조의 용량은 각각 5m³와 44m³로 하였다.

비평형 과정의 凝縮領域이 수반되는 유동장에서 凝縮衝擊波의 위치와 모양은 노즐의 형상과 정체점 상태량에 따라 영향을 받게된다. 따라서 본 실험에서는 곡률반경이 300mm이고 두께비가 13%인 half circular arc를 측정부의 상부 벽에 설치한 노즐을 사용하고, 풍동저기조 내의 상태량은  $T_0=293K$ ,  $P_0=101.3kPa$ ,  $\phi=70\%$ 로 일정하게 유지시켜 노즐목 하류의 동일한 위치에서 凝縮領域과 凝縮衝擊波가 발생하도록 하였다.

충격파에 의한 익의 항력증가는 천음속 영역에서 크게 영향을 받지만 초음속 영역에서는 그 영향이 작게 나타난다.<sup>(6,14,15)</sup> 본 연구에서 응축충격파 직전의 마하수를 1.1로 한 것은 천음속 유동장에서 발생하는 충격파의 피동제어를 연구하는데 적당하다고 판단된다.

풍동저기조 내의 濕空氣는 가열기로 정체점 온도를, 증기발생장치로 정체점 相對濕度를 소오의 상태량이 되도록 조절하였고, 순환 팬을 사용하여 풍동저기조 내의 濕空氣의 상태를 충분히 균일한 상태로 유지하였다. 정체점 상태량은 디지털 습도계(CHINO, Co., model HN-K)와 온도계를 사용하여 측정하였다.

測定部는 유로의 폭이 25mm, 높이가 80mm인 듀랄루민 판(duralumin plate)으로 제작된 4각 단면의 流路로서 유동을 초음속으로 가속시키기 위하여 half circular arc를 상부벽에 설치하였다.

또한, 슐리렌 시스템을 이용하여 충격파를 전·후한 流動場의 흐름을 가시화하기 위해 測定部の 양 측면에는 두께 10mm의 광학 유리를 사용하였으며, 유동장 내의 정압 측정을 위하여 직경 1mm의 정압공을 하부 벽의 중심축을 따라 5mm 간격으로 배열시키고, 특히 凝縮領域과 凝縮衝擊波가 발생하는 위치의 하부벽 근방에는 2.5mm 간격으로 밀집시켰다.

하부벽에 피동제어용 空洞를 설치한 경우에는 空洞 내부의 정압을 측정할 수 있도록 정압공을 2.5mm 간격으로 空洞의 저면(底面)에도 추가로 설치하였다.

본 연구의 1차 실험<sup>(13)</sup>으로 凝縮衝擊波의 강도감쇠에 미치는 기공률의 영향을 조사하기 위해 5, 8, 12, 17%로 기공률을 변화시켜가며 조사한 결과 다른 경우에 비해 상대적으로 충격파 전·후의 압력

과 마하수 변화가 가장 완만하고, 노즐 하부 벽에 작용하는 양력(lift)과 직결되는 부하(load)가 최소가 되어 부하감소율(load decrement ratio)이 가장 큰 값으로 나타난 기공률 12%를 본 연구에 적용하였다.

모든 실험에서 다공벽으로는 듀랄루민 판을 사용하였고, 多孔壁의 구멍 형상은 가공이 쉽고 多孔壁 설치부의 구조적 강도저하에 영향이 작은 원형으로 하였다.

먼저 다공벽 두께의 영향을 조사하는 경우에는 多孔壁에 여덟 개의 구멍을 1열로 하여 凝縮衝擊波가 발생하는 지점을 중심으로 전·후에 각각 2열씩 총 4열로 32개의 구멍을 뚫었고, 다공벽 하부에 설치한 空洞의 길이는 5mm, 길이는 10mm로 동일하게 한 상태에서 다공벽의 두께만을 1, 2, 3mm로 변화시켜 실험하였다.

다음으로 다공벽 구멍의 크기에 따른 제어효과를 조사하는 경우는 다공벽의 두께변화시 피동제어에 가장 좋은 효과를 나타낸 1mm의 두께를 사용하고, 空洞의 길이는 5mm, 길이는 20mm로 동일하게 한 상태에서 다공벽 구멍의 직경만을 1.1, 1.5, 2.2mm로 변화시켜 조사하였다.

이때 구멍의 기공률을 12%로 일정하게 한 상태에서 직경만을 변화시키에 따라 구멍의 개수가 변화하여 직경이 1.1mm인 경우는 64개의 구멍이 충격과 전·후로 각각 4열씩, 직경이 1.5mm인 경우는 36개의 구멍이 3열로, 2.2mm인 경우는 16개의

서 空洞内部의 압력과 多孔壁 표면의 압력분포도 비교하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 다공벽 두께의 영향

작동유체인 습공기가 노즐을 통해 급격히 팽창되어 초음속으로 되면 이 습공기는 비평형 과정의 응축이 일어나게 되어 유동은 미세한 액적을 포함하는 氣液 二相流로 되고, 응축의 결과로 발생된 잠구멍이 2열로 배열되었다.

또한 다공벽 구멍의 경사에 대한 제어효과를 조사하는 경우에는 공동의 길이를 20mm, 깊이는 5mm로 각각 일정하게 유지하면서 다공벽 구멍의 경사만을 NH, FFH, BFH 및 충격과 전·후에서 구멍의 경사가 서로 다른 FBFH(Forward-Backward Facing Hole), BFFH(Backward-Forward Facing Hole)의 두 경우를 포함한 모두 다섯 가지에 대해 충격파를 통한 압력변화를 조사하였다.

이때 다공벽 구멍의 크기는 구멍의 직경변화로 부터 가장 효과가 큰 것으로 조사된  $d=1.1\text{mm}$ 를 기준으로 하여, NH의 경우에는  $d=1.1\text{mm}$ 를 사용하고, 나머지의 경우에는 구멍이 경사질 때 동일한 단면적이 유지되도록  $d=1.0\text{mm}$ 를 사용하였다.

그리고 12%의 기공률에 대하여 다공벽의 두께, 다공벽 구멍의 크기 및 구멍의 경사를 변화시킨 모든 경우에 대하여 空洞내의 정압분포를 관찰함으로써

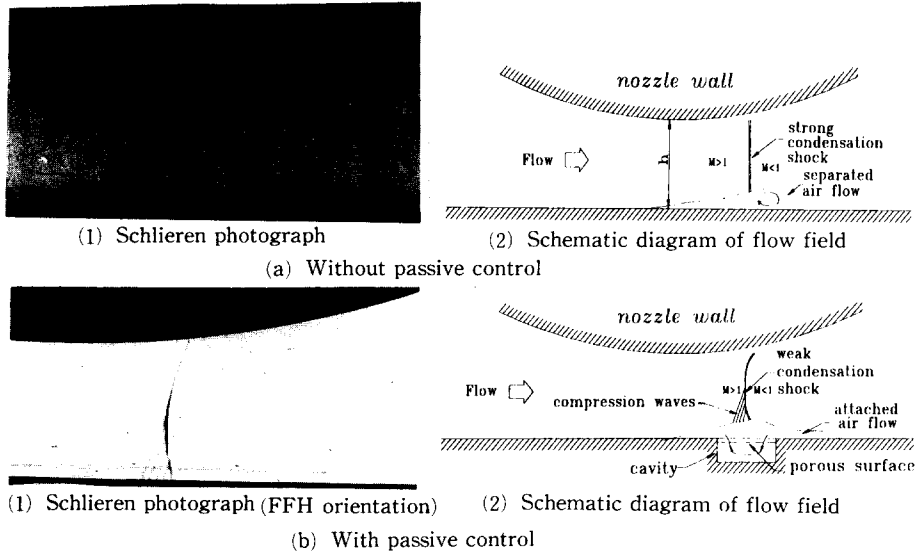


Fig. 2 Comparison of the results with and without passive control

위의 유체에 放出되기 때문에 유동장 내의 1度, 速度分布 등은 응축이 수반되지 않는 피 유동의 경우와는 상당히 달라지게 된 비평형 과정의 응축으로 발생하는 잠열의 인해 주위의 초음속 유동은 감속되고, 짧은 응축에 의한 잠열의 방출이 어느 임계치 되면 유동장에서는 엔트로피의 급격한 증반되며, 유동의 불연속성인 凝縮衝擊波가

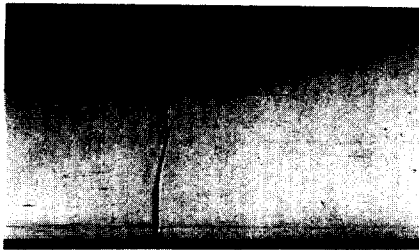
는 응축충격파와 경계층과의 간섭현상을 위하여 被動制御를 하는 경우와 적용하지 우의 유동장의 개략도를 나타낸 것으로 )와 같이 凝縮衝擊波가 위치하는 곳의 하 多孔壁으로 하고 그 아래를 空洞으로 만든 격과 하류의 급격한 압력상승은 境界層 空洞으로 유입하게 하고 空洞을 통하여 충격의 境界層내로 유출되게 한다. 따라서, 충 방의 境界層 두께가 두꺼워지고 그로 인해 발생된 결과 凝縮衝擊波 발생위치 전방에 동 마하수가 감소하게 되어 凝縮衝擊波를 트로피의 증가와 압력구배가 작아지게 되고 정도도 감소하게 된다.

은 被動制御를 행하지 않은 경우에 대한

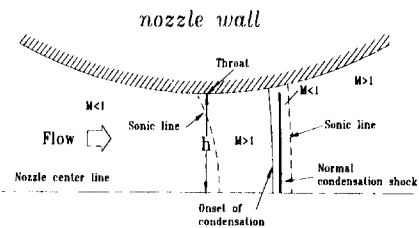
가시화 사진, 무차원 압력 분포, 마하수 분포 및 凝縮衝擊波의 개략도를 나타낸 것이다.

Fig. 3(a)는 유동장을 가시화한 슐리엔 사진으로 노즐을 통하여 유동이 초음속으로 팽창될 때 습공기의 온도가 급격하게 저하하여 공기의 포화온도 이하로 낮아짐에 따라 노즐목 직후에서 비평형 과정의 凝縮이 일어나고 이 凝縮에 의한 잠열의 방출이 임계치를 넘게 되어 凝縮衝擊波가 발생되고 있음을 볼 수 있다. 凝縮衝擊波의 발생기구와 형상은 노즐의 형상과 습공기의 상대습도 및 온도에 따라 달라지는데 본 연구의 실험조건에서 발생된 凝縮衝擊波는 거의 垂直衝擊波에 가까운 형상으로 나타났다.

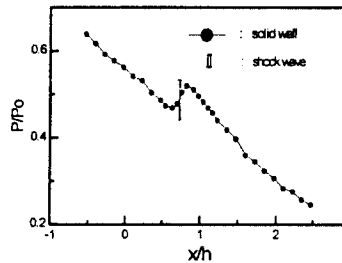
Fig. 3(b), (d)는 노즐 목(throat)을 원점으로, 노즐 목 반높이(h)로 무차원화된 거리에 대한 무차원 정압 분포 및 마하수 분포를 나타낸 것이다. Fig. 3(b)의 압력분포에서 무차원 거리  $x/h=0.6$ 까지는 습공기가 노즐을 통과할 때 등엔트로피 팽창을 하고 있음을 나타내며, 등엔트로피 팽창으로부터 이탈하기 시작하는  $x/h=0.6$ 의 위치가 凝縮개시점(onset of condensation)으로 노즐 목으로부터 약간 하류에 위치하고 있으며 이때의 Mach 수는 1.1로 나타났다.  $x/h=0.6-0.9$ 의 구간이 凝縮領域(condensation zone)으로  $x/h=0.75$  근방에서



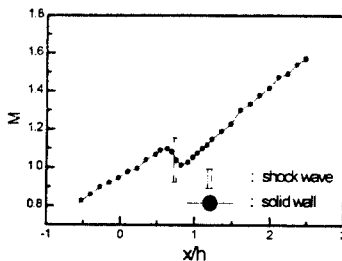
(a) Schlieren photograph



(c) Schematic of flow field with condensation shock



(b) Pressure distribution



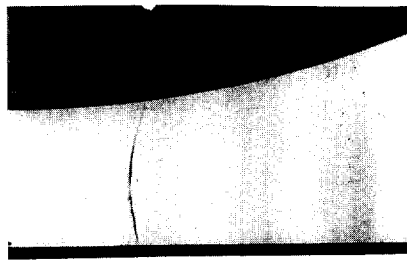
(d) Mach number distribution

Fig. 3 Schlieren photograph, schematic of condensation shock, distributions of static pressure and Mach number of without passive control. ( $R=300\text{mm}$ ,  $h=40\text{mm}$ ,  $P_0=101.3\text{kPa}$ ,  $T_0=293\text{K}$ ,  $\phi=70\%$ )

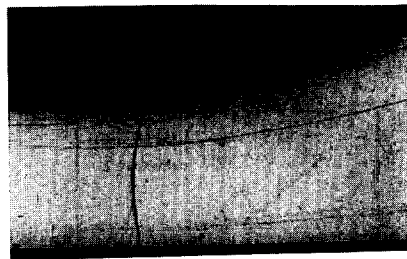
급격한 정압 상승과 마하수의 감소를 볼 수 있으므로 이 위치에서 凝縮衝擊波가 발생하고 있음을 알 수 있다. 잠열방출에 의한 마하수 증가의 효과가 유로 단면적의 확대에 의한 마하수 감소효과보다 크게되어 응축충격파 하류에서의 유동은 다시 초음속으로 됨을 알 수 있다. Fig. 3(c)는 비교적 높은 상대습도를 가진 습공기가 초음속 노즐을 통해 팽창될 때 발생하는 응축충격파 전·후의 유동장을 도식적으로 나타낸 것이다.

Fig. 4는 凝縮衝擊波와 境界層의 干涉을 제어하기 위하여 설치한 다공벽의 두께변화가 제어에 미치는 영향을 조사하기 위하여 기공률을 12%, 공동의 길이를 10mm, 공동의 깊이를 5mm로 일정하게 유지한 후 다공벽의 두께만을 1, 2, 3mm로 변화시켜가며 충격파 전·후의 압력을 측정하였다.

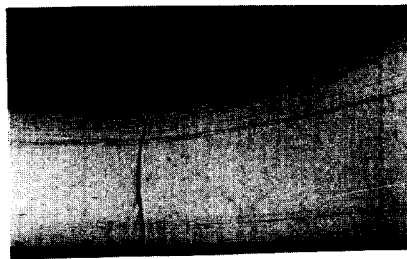
Fig. 4(a)는 다공벽의 두께에 따른 슐리렌 사진으로 凝縮衝擊波의 위치는 空洞이 없는 경우, 즉 制御를 행하지 않은 Fig. 3(a)의 경우와 동일하게



t = 1mm

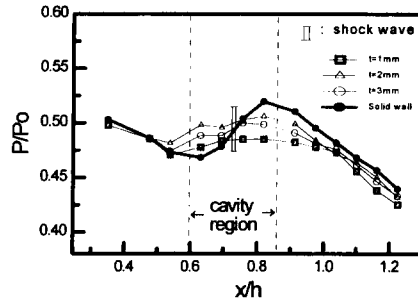


t = 2mm

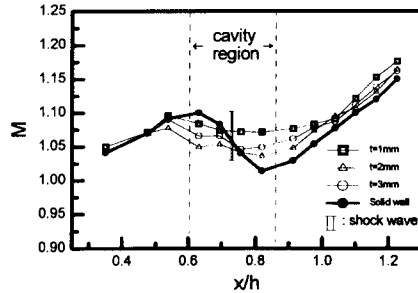


t = 3mm

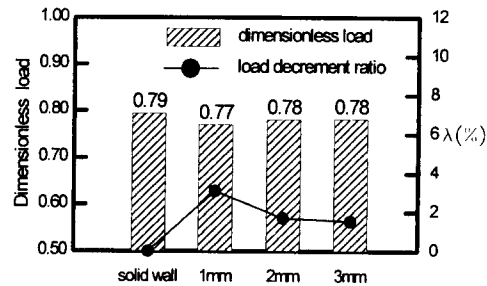
(a) Schlieren photograph



(b) Pressure distribution



(c) Mach number distribution



(d) Dimensionless load and load decrement ratio

Fig. 4 Schlieren photograph, effects of porous wall thickness on the distributions of static pressure, Mach number, dimensionless load and load decrement ratio (R=300mm, h=40mm, P<sub>0</sub>=101.3kPa, T<sub>0</sub>=293K, φ=70%, σ=12%, L=10mm, D=5mm)

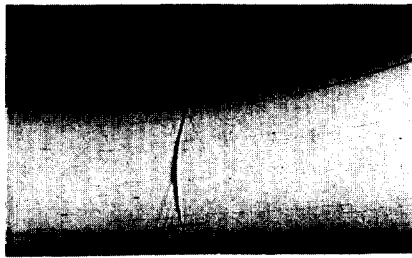
나타났으나, 충격파의 모양은 制御를 하지않은 경우의 거의 垂直衝擊波와 같은 모양에서 垂直衝擊波와 경사충격파의 조합으로 이루어진 λ형의 충격파로 변화하였음을 볼 수 있다.

이는 凝縮衝擊波 하류의 고압의 기류가 충격파 상류로 多孔壁과 空洞를 통하여 순환됨으로 충격파 상류의 境界層 두께가 두꺼워져 多孔壁의 선단으로부터 압축파가 발생된 뒤 垂直衝擊波와 합체됨에 따라 하부 벽면 부근에서의 충격파는 모양이 λ형

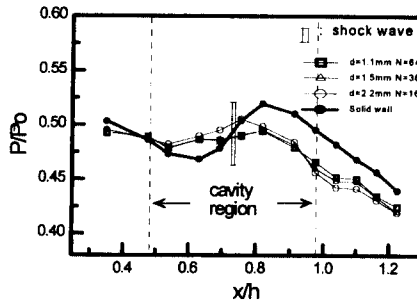
으로 변화된 것이다.

Fig. 4(b)는 두께 1, 2, 3mm에 대한 정압 분포를 solid wall의 경우와 비교하여 나타낸 것이다.

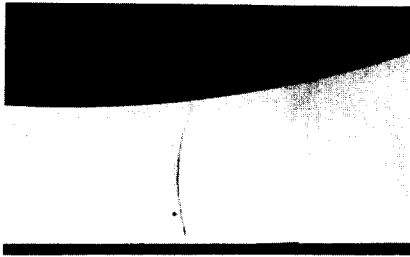
凝縮衝擊波를 통한 압력의 갑작스런 상승으로 충격파 하류의 유체가 多孔壁을 통하여 空洞 내부로 유입(inflow) 되고, 空洞를 거쳐 압력이 상대적으로 낮은 충격파 상류로 多孔壁을 통하여 유출(out-flow)되므로써 多孔壁이 설치되지 않은 경우와 비교할 때 충격파 하류의 압력상승폭은 많이 감소되



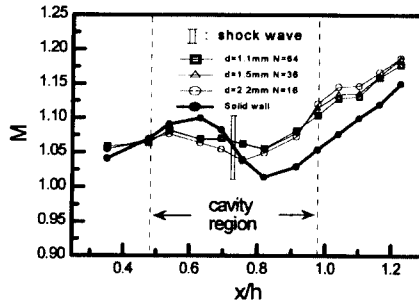
d=1.1mm



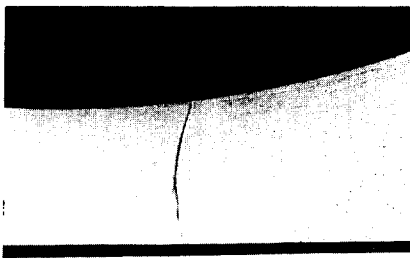
(b) Pressure distribution



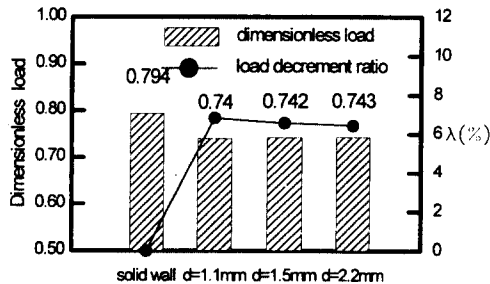
d=1.5mm



(c) Mach number distribution



d=2.2mm



(d) Dimensionless load and load decrement ratio

Fig. 5 Schlieren photograph, effects of porous hole diameter on distributions of static pressure, Mach number, dimensionless load and load decrement ratio (R=300mm, h=40mm, P<sub>0</sub>=101.3kPa, T<sub>0</sub>=293K, ϕ=70%, σ=12%, L=20mm, D=8mm)

있으며 空洞으로부터 충격파 상류로의 유체 유출이 境界層의 두께를 증가시켜 압축파를 발생시키게 되어 충격파 상류에서의 압력은 空洞이 없는 경우보다 더 높게 나타났으나 충격파 전·후의 압력구배는 전반적으로 완만하게 되었다.

한편, Fig. 4(b), (c)의 압력 분포와 마하수 분포에서 알 수 있듯이 다공벽의 두께를 1mm로 한 경우가 그보다 두꺼운 경우에 비하여 충격파 전·후의 압력분포는 가장 완만하고, 마하수 변화도 작게 나타났다.

Fig. 4(d)는 하부벽에 작용하는 양력과 직결되는 부하와 부하감소율<sup>(13)</sup>을 나타낸 그림이다. 여기서, 부하는 단위 폭에 대한 정압과 길이의 곱(즉, Fig. 4(b)에서의 곡선 하부의 면적)을 의미하는 것으로 피동제어에 의한 압력구배의 변화가 나타나는  $x/l = 0.35 - 1.25$  영역에서 측정된 정압으로 구하였다. 그림으로부터 다공벽의 두께는 1mm일 때가 노즐의 하부벽면에 작용하는 부하가 가장 작게 나타남을 볼 수 있다. 또한 solid wall을 기준 부하로 한 부하 감소율을 다음과 같이 정의하였을 때  $\lambda = 3.1\%$ 로 가장 크게 되었다.

$$\lambda(\text{기준 부하에 대한 부하 감소율}) = \frac{\text{기준 부하} - \text{부하}}{\text{기준 부하}}$$

충격파의 강도 감쇠는 충격파 전·후의 압력차에 의해 충격파 하류에서 상류로의 경계층 흐름의 일부가 순환되는 질량유량에 크게 지배되는 것으로 다공벽의 두께변화가 미치는 영향은 크지 않다. 다만, 다공벽의 두께가 얇은 경우가 피동제어에 더 효과가 있을 것이라는 예상을 본 실험을 통해 확인할 수 있었다.

### 3.2 다공벽 구멍 크기의 영향

Fig. 5는 多孔壁 구멍의 크기(hole diameter)가 被動制御에 미치는 영향을 조사하기 위해 空洞의 깊이를 5mm, 길이를 20mm로 하고 다공벽의 기공률을 12%로 일정하게 한 다음, 각각에 대하여 다공벽 구멍의 직경만을 1.1, 1.5, 2.2mm로 증가시켜 각각의 경우 구멍의 개수 64, 32, 16개가 충격파 상·하류에 절반씩 분포되도록 하여 실험한 결과를 나타낸 것이다.

압력과 마하수 분포도 内の 점선은 多孔壁의 시작점을 나타낸다(이하 동일). 즉, 모든 경우에서

凝縮衝擊波는 多孔壁의 중앙에 위치하도록 하였다.

Fig. 5(a)는 다공벽 구멍의 직경변화에 대한 슬리렌 사진을 나타낸 것이다. 가시화 사진에서 충격파의 발생위치는 변하지 않았으나 그 모양은 충격파 직전에서 발생된 여러 개의 압축파와 합체되어 하부벽 부근에서는 모든 경우에  $\lambda$ 형으로 변화했음을 볼 수 있다.

다공벽 두께 변화와 다공벽 구멍의 변화에 대한 가시화 사진을 비교해 보면, 구멍의 크기를 변화시킨 경우가 충격파의 모양에 더 큰 변화를 보이고 있다. 이는 구멍의 크기가 다공벽 두께 보다 경계층의 간섭에 더 크게 영향을 미치기 때문이라 생각된다.

Fig. 5(b)는 다공벽 구멍 직경의 증가에 따른 무차원 정압 분포를 나타낸 그림이다. 동일한 기공률과 空洞 크기에 대해서는 작은 직경의 다공벽인 경우가 충격파를 전·후한 압력증가가 비교적 완만해지는 것을 관찰 할 수 있다.

이것은 기공률이 12%로 일정하므로 구멍의 직경이 2.2mm일 때는 6개의 구멍이 다공벽의 한줄에 4개씩 2열로 배열되던 것이 1.1mm일 때는 64개의 구멍이 한줄에 8개씩 4열로 배열되도록 구멍의 개수가 늘어나게 되므로, 그로 인해 다공벽 면적 중에 유로 부분의 면적은 동일하지만 직경이 큰 경우에 비해 작은 경우가 보다 조밀하게 구멍이 분포되므로 경계층 흐름이 충격파 상류로 유출할 때 다공벽의 전 영역에서 기류가 통과할 수 있기 때문이라 생각된다.

실제로 가시화 사진에서도 충격파 상류에서 발생하는 압축파의 개수가 구멍이 배열된 수와 같이 되어 압력파의 개수가  $d=2.2\text{mm}$ 일 때 두 개에서  $d=1.1\text{mm}$ 일 때는 네 개로 되어 충격파 직전의 마하수가 보다 낮게 되기 때문이다.

Fig. 5(c)는 다공벽 구멍의 직경 변화에 따른 유동장 내의 정압 측정으로부터 구한 마하수 분포를 나타낸 것으로 구멍이 작을수록 즉, 구멍의 개수가 많을수록 충격파 강도가 작게 되고, 충격파 하류에서의 유동이 작게 감속됨을 보여준다.

Fig. 5(d)는 압력 분포로부터 구한 노즐의 하부벽면에 작용하는 부하와 부하감소율을 나타낸 그림으로 다공벽 구멍의 크기가 작은 경우가 위에서 설명한 制御 효과의 증대로 인해 벽면에 작용하는 부하도 더 줄어드는 것을 볼 수 있다.

본 실험에서 사용한 구멍의 직경에 대해서는 직



경이 가장 작은  $d=1.1\text{mm}$ 인 경우가 부하감소율은  $\lambda=6.8\%$ 로 가장 크게 나타났다.

피동제어에 미치는 영향을 조사하기 위하여  $D=8$ ,  $L=20\text{mm}$ 인 空洞에 대하여 기공률을 12%, 다공벽 두께를 1mm, 구멍의 직경을 1.1mm로 일정하게 한 후, 다공벽 구멍의 경사만을 변화시킨 경우의 실험 결과를 나타낸 것이다.

3.3 다공벽 구멍 경사의 영향

Fig. 6은 다공벽 구멍의 경사(hole orientation)가

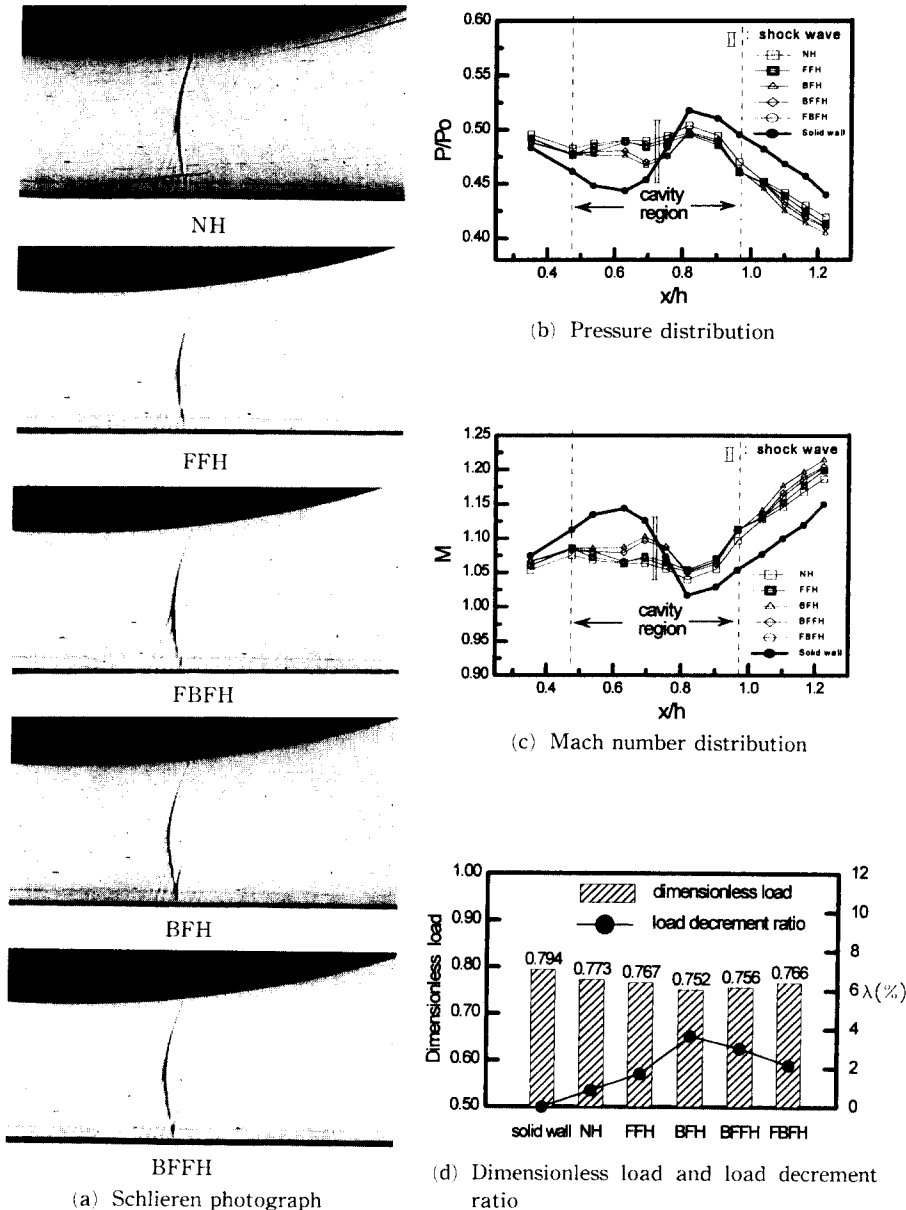


Fig. 6 Schlieren photograph, effects of porous hole orientation on the distributions of static pressure, Mach number, dimensionless load and load decrement ratio  
 293K,  $\phi=70\%$ ,  $\sigma=12\%$ ,  $L=20\text{mm}$ ,  $D=8$  ( $R=300\text{mm}$ ,  $h=40\text{mm}$ ,  $P_0=101.3\text{kPa}$ ,  $T_0=$   
 mm)

구멍의 경사는 1) 다공벽 표면과 수직인 NH, 2) 다공벽 표면에서 노즐 상류 방향으로 30° 기울어진 FFH, 3) 다공벽 표면에서 노즐 하류 방향으로 30° 기울어진 BFH, 4) 충격과 상류에는 FFH 30°와 하류에는 BFH 30°로 한 FBFH, 5) 충격과 상류에서는 BFH 30°와 하류에서는 FFH 30°로 조합한 BFFH의 모두 5경우로 하여 충격과 전·후의 압력과 마하수 변화를 조사하였다.

Fig. 6(a)는 구멍의 경사변화에 대한 유동장을 가시화한 것이다. FFH 나 FBFH는 충격과 상류에서 발생된 압축파가 다른 경우보다 더 선명하고 즉, 압축의 정도가 크고 압축파와 수직충격파가 합체되는 위치에서도 더욱 검게 나타나 압축파의 강도가 큼을 볼 수 있다.

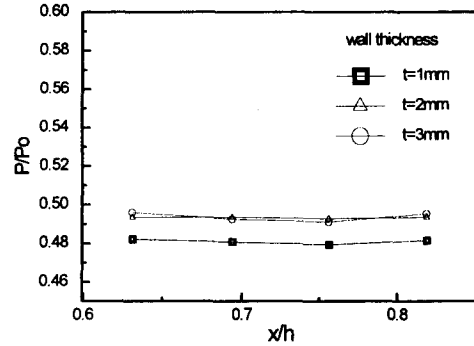
이것은 두 경우 모두 충격과 직전의 구멍 방향이 노즐 상류 쪽으로 경사져 있으므로 피동제어로 충격과 하류의 기류가 순환하여 상류에서 유출될 때 노즐로 들어오는 기류의 경계층과 강한 간섭현상을 일으켜 경계층 두께가 다른 경우에 비해 더 두꺼워져 더욱 강한 압축파를 발생시키게 된 때문으로 생각된다.

한편 BFH와 BFFH의 경우는 모두 충격과 직전 부분의 다공벽 구멍이 노즐 하류 쪽으로 경사져 있으므로 노즐로 유입해 들어오는 기류의 경계층과의 간섭이 FFH나 FBFH의 경우보다는 약하게 되어 충격과 상류에서의 압축파도 약하게 나타남을 볼 수 있다.

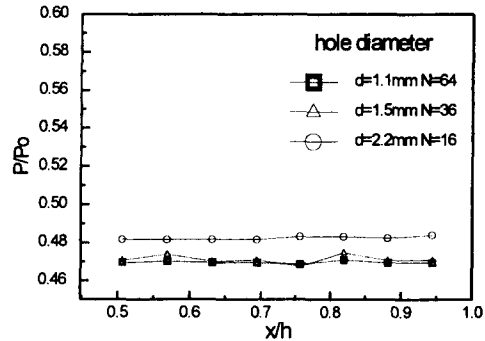
Fig. 6(c)의 구멍 경사에 따른 압력 분포에 의하면 FFH인 경우가 다른 경우에서보다 상대적으로 충격과 전·후의 압력구배가 가장 완만하게 나타났다.

이 결과는 응축을 수반하지 않는 유동장에서 다공벽 구멍 경사에 대한 피동제어를 연구한 Saida<sup>(1)</sup> 등과 Raghunathan<sup>(10,11)</sup> 등이 가장 완만한 압력 및 마하수 구배를 나타낸 것으로 제시한 FFH 30°의 결과와 그 경향이 일치한다.

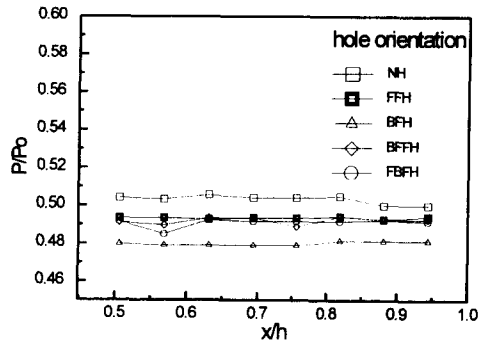
이러한 경향은 응축을 수반하지 않는 경우와 비교할 때 기공률만 8%에서 12%로 증가<sup>(13)</sup>하였을 뿐이며, 공동의 길이 및 깊이, 다공벽 구멍의 경사 등이 피동제어에 미치는 효과는 그 경향에 차이가 없음을 확인할 수 있다. 이는 응축으로 발생한 응축액적이 기류의 순환시 다공벽 구멍에 가장 크게



(a) Effect of porous wall thickness ( $\sigma=12\%$ ,  $L=10\text{mm}$ ,  $D=5\text{mm}$ )



(b) Effect of porous hole diameter ( $\sigma=12\%$ ,  $L=20\text{mm}$ ,  $D=8\text{mm}$ )



(c) Effect of porous hole orientation ( $\sigma=12\%$ ,  $L=20\text{mm}$ ,  $D=8\text{mm}$ )

Fig. 7 Pressure distribution in the cavity for the variations of (a) porous wall thickness, (b) porous hole diameter and (c) porous hole orientation.

( $R=300\text{mm}$ ,  $h=40\text{mm}$ ,  $P_0=101.3\text{kPa}$ ,  $T_0=293\text{K}$ ,  $\phi=70\%$ )

영향을 미친 결과로 사료된다.

Fig. 6(d)는 Fig. 6(c)의 정압을 사용하여 구한 마하수 분포를 나타낸 그림으로 FFH인 경우가 상대적으로 충격파 상류에서 발생된 강한 압축파를 통해 감소됨에 따라 凝縮衝擊波를 통한 압력증가의 감소 효과가 크게 나타나 상대적으로 더 높은 마하수를 유지하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6(e)의 구멍의 경사에 대한 부하 비교에서는 FFH인 경우가 앞에서 언급한 被動制御의 영향으로 압력구배는 가장 완만하게 나타났으나 부하계산에서는 BFH의 경우가 가장 낮게 나타났으며 부하감소율도  $\lambda=5.3\%$ 로 가장 크게 되었다. 이것은 충격파 직전에서 구멍의 경사가 노즐 하류방향으로 되어있어 FFH의 경우에 비해 충격파 상류에서 기류의 유출에 의한 압력상승이 상대적으로 작게 나타난 때문이라 생각된다. Fig. 6(d)의 압력분포에서도 충격파 직전에서 압력상승이 다른 경우에 비해 작게 나타난 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 다공벽의 두께변화, 다공벽 구멍의 직경변화 및 구멍의 경사에 따른 空洞 底面의 정압분포를 나타내는 그림이다.

Fig. 7(a)는 空洞길이를 10mm, 깊이를 5mm로 일정하게 하고 다공벽의 두께만을 변화시켜가며 측정한 空洞 저면의 압력 분포를 나타낸 것으로 두께 1mm의 경우가 가장 낮게 나타나 多孔壁면에서의 압력분포와 동일한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7(b)는 空洞의 깊이가 5mm, 깊이가 20mm인 경우 다공벽 구멍의 직경 변화에 따른 空洞 저면의 압력 분포를 나타낸 것으로 空洞내의 압력은 거리 x에 관계 없이 균일하게 유지되며, 직경이 작은 경우가 다공벽의 전영역에 구멍이 분포되어 더 원활한 기류의 순환이 이루어질 수 있으므로 공동내의 압력은 낮게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7(c)는 공동의 깊이를 8mm, 空洞의 깊이를 20mm, 기공률을 12%, 다공벽 구멍의 직경을 1.1mm로 일정하게 한 상태에서 다공벽 구멍의 경사 변화에 대한 空洞 저면의 압력 분포를 나타낸 그림이다.

#### 4. 결 론

초음속 유동장 내에서 비평형과정의 凝縮에 의해 발생하는 凝縮衝擊波와 境界層과의 간섭을 被動 制

御(passive control)하기 위해 충격파가 존재하는 위치의 노즐 하부벽면에 多孔壁과 그 아래에 空洞을 설치하여 각각의 실험에서 多孔壁의 기공률과 空洞의 길이 및 깊이를 일정하게 한 상태에서 다공벽의 두께 변화, 다공벽 구멍의 직경변화, 다공벽 구멍의 경사에 따른 凝縮衝擊波 전·후의 압력 변화를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 多孔壁의 두께는 얇을수록 충격파 전·후의 압력변화가 더 완만하게 나타났다.

(2) 동일한 기공률과 空洞의 크기에 대해서 多孔壁 구멍의 직경은 작을수록 凝縮衝擊波 하류에서의 압력증가는 낮고, 부하도 작게 됨을 알았다.

(3) 동일한 기공률, 공동의 크기, 다공벽 구멍의 직경에 대해서 多孔壁 구멍의 경사는 FFH인 경우가 凝縮衝擊波 전·후의 압력 변화가 가장 완만하게 나타났다.

(4) 空洞 저면의 정압분포는 多孔壁面의 정압분포와 동일한 경향을 보였다.

(5) 다공벽 구멍의 크기 및 경사가 피동제어에 미치는 영향은 응축을 수반하지 않는 경우와 비교할 때 그 경향에는 차이가 없었다.

#### 참고문헌

- (1) 齊田暢三, 三栖 功, 門田匡人, 1992, “はく離 衝擊波のパスティブコントロール,” 日本機械學會論文 集 B, 58卷 554號.
- (2) 權純範, 松尾一泰, 川越茂敏, 瀬戸口俊明, 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.
- (3) 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의 全壓損失(數値解 析),” 日本機械學會, 論文集 B, 53卷 489號.
- (4) 瀬戸口俊明, S. Raghunathan., 1991, “衝擊波 を伴う流れ場 における境界層のパスティブコントロ ール(1),” 機械の研究 43卷 4號, pp. 463~468.
- (5) 瀬戸口俊明, S. Raghunathan., 1991, “衝擊波 を伴う流れ場 における境界層のパスティブコントロ ール(2),” 機械の研究 43卷 5號, pp. 566~572.
- (6) Bahi, L., Ross, J. M. and Nagamatsu, H. T., 1983, “Passive Shock Wave / Boundary Layer Control for Transonic Airfoil Drag Reduction,” *AIAA Paper* 83-0137, Jan.

- (7) Krogmann, P., Stanewsky, E. and Thiede, P., 1984, "Effect of Suction on Shock / Boundary Layer Interaction and Shock Induced Separation," *AIAA Paper* 84-0098 Jan.
- (8) Zierep, J., 1992, "Trends in Transonic Research," *Theoretical and Applied Mechanics*.
- (9) Kwon, S. B., Choi, Y. S., Kim, B. G. and Cho, C. Y., 1996, "Passive Control of Strength of Shock Wave," *KSAS Proceedings*, Apr.
- (10) Raghunathan, S. and Mabey, D. G., 1987, "Passive Shock Wave / Boundary Layer Control on a Wall Mounted Model," *AIAA Paper* 86-0285, Feb.
- (11) Raghunathan, S. and Mcilwain, S. T., 1990, "Further Investigation of Transonic Shock -Wave Boundary-Layer Interaction with Passive Control," *J. Aircraft*, Vol. 27, No. 1, Jan.
- (12) White, F. M., 1991, "Viscous Fluid Flow," pp. 435~436, McGraw-Hill, Inc.
- (13) Kwon, S. B., Choi, Y. S. and Jung, Y. J., 1996, "A Study on the Passive Control of Condensation Shock Wave," *ADD Proceedings*, Sept.
- (14) Nagamatsu, H. T., Orozco, R. D. and Ling, D. C., 1984, "Porosity Effect On Supercritical Airfoil Drag Reduction By Shock Wave / Boundary Layer Control," *AIAA Paper* 84-1682, June.
- (15) Nagamatsu, H. T., Ficarra, R. V. and Dyer, R., 1985, "Supercritical Airfoil Drag Reduction By Passive Shock Wave/Boundary Layer Control in the Mach Number Range. 75 to. 90," *AIAA Paper* 85-0207, Jan.