〈기술논문〉

응축충격파와 경계층 간섭의 피동제어 (I)

최영상* · 정영준* · 권순범**

(1996년 10월 9일 접수)

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

Young-Sang Choi, Young-Jun Jung and Soon-Bum Kwon

Key Words : Passive Control(피동제어), Porosity(기공률), Supersonic Flow(초음속 흐름), Condensation Shock Wave(응축충격파), Nonequilibrium Condensation(비평형응축)

Abstract

There were appreciable progresses on the study of shock wave / boundary layer interaction control in the transonic flow without nonequilibrium condensation. But in general, the actual flows associated with those of the airfoil of high speed flight body, the cascade of steam turbine and so on accompany the nonequilibrium condensation, and under a certain circumstance condensation shock wave occurs. Condensation shock wave / boundary layer interaction control is quite different from that of case without condensation, because the droplets generated by the result of nonequilibrium condensation may clog the holes of the porous wall for passive control and the flow interaction mechanism between the droplets and the porous system is concerned in the flow with nonequilibrium condensation. In these connections, it is necessary to study the condensation shock wave / boundary layer interaction control by passive cavity in the flow accompanying nonequilibrium condensation with condensation shock wave. In the present study, experiments were made on a roof mounted half circular arc in an indraft type supersonic wind tunnel to evaluate the effects of the porosity, the porous wall area and the depth of cavity on the pressure distribution around condensation shock wave. It was found that the porosity of 12% which was larger than the case of without nonequilibrium condensation produced the largest reduction of pressure fluctuations in the vicinity of condensation shock wave. The results also showed that wider porous area, deeper cavity for the same porosity of 12% are more favourable "passive" effect than the cases of its opposite.

기 호 설 명

P : 정압(static pressure), (kPa)
Po : 정체 압력(stagnation pressure), (kPa)
To : 정체 온도(stagnation temperature), (K)
M : 마하수(Mach number)
L : 공동의 길이(cavity length), (mm)
D : 공동의 깊이(cavity depth), (mm)
h : 노즐목 반높이(throat half height), (mm)
R : 원호노즐의 곡률 반경, (mm)
x : 노즐 목으로부터 노즐 중심 축을 따르는 거

*경북대학교 대학원 기계공학과
**회원, 경북대학교 기계공학과

리, (mm)

그리스문자

σ : 기공률(porosity), (%)

λ : 부하 감소율(load decrement ratio), (%)

Φ : 정체점 상대 습도(stagnation relative humidity), (%)

I. 서 론

고압의 공기 압축기와 진공 펌프 등의 공기 기계나 천음속 및 초음속 항공기의 익과 가스터빈 등에서는 고출력, 고효율을 얻기 위해 작동 유체인 공기 및 배기 가스를 고온, 고압, 고속화시킴에 따라 off-design 상태에서는 익 표면에 충격파가 발생된다. 이 衝擊波는 익면 경계층과 간섭을 일으켜 境界層을 박리시키고 항력의 급격한 증가를 비롯하여 기기의 진동 및 소음을 증가시키게 된다.[1]

특히, 충격파는 정압의 불연속적인 Jump, 즉, 流動 마하수의 급격한 감소와 엔트로피의 급격한 증가가 수반되는 비가역 과정으로 全壓損失(total pressure loss)이 동반되게 되며, 이는 壓力회복(pressure recovery)의 감소와 직접 관련되어 에너지 손실로 이어지게 된다.[2, 3]

엔트로피의 급격한 증가가 동반되는 衝擊波의 비가역성의 程度는 衝擊波의 강도(shock strength, $(P_2-P_1)/P_1$, 여기서 P_1, P_2는 각각 衝擊波 직전 및 직후의 정압)와 직접 관련된다. 따라서 위에서 언급한 충격파에 의해 야기된 바람직하지 못한 현상들을 줄이려면 衝擊波와 境界層과의 간섭을 制御하는 것이 필수적인 사항이다. 지금까지 衝擊波와 境界層과의 간섭을 制御하기 위해서 쓰여진 방법으로는 기류의 流動 마하수가 비교적 높은 超音速 流動에서는 能動的 방법(active control method)이, 천음속 근방의 기류 마하수에서는 被動的 방법(passive control method)이 유효하다고 하여 연구되어 왔다.

먼저 능동적인 방법으로 Finke[4]는 衝擊波가 존재하는 위치에 구멍을 뚫어 gas를 불어넣으므로써, 또 Thiede[5]와 Krogmann[6] 등은 衝擊波가 존재한 위치에 구멍을 뚫고 기류를 흡입(suction)함으로써 衝擊波와 境界層과의 간섭을 制御하는 방법을 연구한 바 있다. 그러나, 이 능동적인 방법은 기류의 마하수가 3 이상인 높은 超音速 유동에 유효하며 또한 多孔壁을 통해 gas를 흡입 또는 유출하기 위해서는 진공펌프 혹은 공기압축기 등의 부대설비가 필요하고 그에 따른 저항이 증가하는 단점이 있다.

천음속 유동에서 衝擊波와 境界層과의 간섭을 制御하는데 유효하다고 알려진 被動的인 방법에 대해서 Bahi[7] 등은 12% 두께비의 circular arc와 14% 두께비의 supercritical airfoil 에서 충격파가 발생하는 위치에 다공벽과 그 하부를 공동으로 하여 충격파를 被動制御하였으며, Krogmann[6] 등은 13% 두께비의 supercritical airfoil에서 衝擊波가 존재하는 위치의 표면을 double slot으로 하고 그 아래를 공동으로 하여 압력이 높은 衝擊波 하류의 境界層 흐름이 壓力이 낮은 衝擊波 상류로 流動하게 함으로써 衝擊波 상류의 境界層의 두께를 두껍게 하여 여러 개의 압축파로 분산시킴으로써 衝擊波의 강도를 감소시켰다. 또한 Zierep[8]은 channel wall 에서의 被動制御 효과를 실험과 수치해석으로 비교하였으며, Kwon[9] 등은 측정부의 상부 벽에 반경 300mm의 half circular arc를 부착한 노즐에서 경사충격파를 발생시켜 충격파가 입사하는 노즐의 하부 벽면을, 空洞을 가지는 다공벽으로 하여 충격파와 境界層의 간섭에 대한 被動制御를 연구한 결과 각각 약 8%의 기공률로도 制御의 효과를 충분히 얻을 수 있음을 밝혔다.

지금까지의 衝擊波와 境界層 간섭의 制御에 관한 연구는 多孔壁의 구멍을 막히게 할 수도 있고, 衝擊波와 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 安全性 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 포화습증기가 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 넘게되면 凝縮

衝擊波(condensation shock wave)가 발생된다.

또한, 고속 비행체는 실제로 습공기 중을 비행하게 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를 발생시키고, 이 위치의 하부 벽에 空洞을 가지는 다공벽을 설치하여 被動制御함으로써 多孔壁의 기공률과 空洞의 길이 및 깊이의 변화가 凝縮衝擊波의 강도감쇠와 境界層과의 간섭에 미치는 영향을 조사하는데 목적을 두었다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험 장치의 개략도이며 이 대기 간헐 흡입식 超音速 풍동(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 超音速 定常 狀態 흐름을 유지시킬 수 있도록 진공탱크와 풍동저기조의 용량은 각각 5m³와 44m³로 하였다.

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

測定部는 유로의 폭이 25mm, 높이가 80mm인 듀랄루민 판으로 제작된 4각 덕트(duct)로서 유동을 초음속으로 가속시키기 위하여 half circular arc를 상부 벽에 설치하였다.

또한, 슐리렌 시스템으로 流動場의 흐름을 가시화하기 위하여 測定部의 양 측면에는 두께 10mm의 광학 유리를 사용하였으며, 유동장 내의 정압 측정을 위하여 직경 1mm의 정압공을 하부 벽의 중심 축을 따라 5mm 간격으로 배열시키고 특히 凝縮領域과 凝縮衝擊波가 발생하는 하부 벽 근방에는 2.5mm 간격으로 밀집시켰다. 피동제어를 위해 하부 벽에 空洞을 설치한 경우에는 空洞 내부의 정압 측정을 위하여 2.5mm 간격으로 정압공을 空洞의 저면(底面)에도 추가하여 설치하였다.

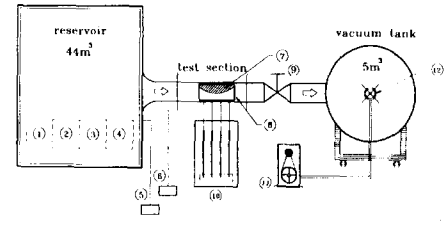
多孔壁으로는 두께 1mm의 듀랄루민 판을 사용하였으며 多孔壁에는 8개의 구멍을 1열로 하여 凝縮衝擊波가 발생하는 지점을 중심으로 전·후에 각각 2열씩 총 4열로 32개의 구멍을 뚫었다. 이때 사용된 多孔壁의 구멍 형상은 가공이 쉽고 多孔壁 설치부의 구조적 강도저하에 영향이 적은 원형으로 하였다.

한편, 空洞 길이의 효과를 규명 할 경우에는 多孔壁의 기공률과 空洞 깊이는 동일하게 한 상태에서 空洞의 길이만을 길게 하여 실험을 수행하였다.

비평형 과정의 凝縮領域과 凝縮衝擊波의 위치를 고정시키기 위해 본 실험에서는 곡률 반경이 300 mm인 13% 두께의 half circular arc(nozzle과 翼의 역할 병용)를 측정부의 상부 벽에 부착시킨 노즐을 사용하고, 풍동저기조 내의 상태량을 To=293K, Po=101.3kPa, ϕ=70%로 일정하게 유지시켜 노즐목 하류의 동일한 위치에서 凝縮衝擊波가 발생하도록 하였다.

충격파에 의한 익의 항력증가는 주류의 마하수가 천음속인 경우가 초음속인 경우보다 크게 된다.[7,10,15] 따라서 본 연구에서는 응축충격파 직전의 마하수가 1.1 정도인 경우를 연구의 대상으로 하였다.

실험은 먼저 동일한 空洞 길이(10mm) 및 깊이(5mm)에 대하여 多孔壁 구멍 개수는 변화시키지 않고 직경만을 0.7, 0.9, 1.1, 1.3mm로하여 기공률을 5, 8, 12, 17%로 변화시켜가며 凝縮衝擊波



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

전·후의 압력 변화를 조사함으로써 기공률의 효과를 규명하였다. 이때 기공률은 다공벽에 가공된 구멍의 면적과 다공벽 면적의 비를 나타낸것이다.

측정결과 被動制御를 하지 않은 경우에 비해 衝擊波를 통한 압력 증가가 가장 적고, 부하 감소 효과가 가장 큰 기공률인 12%에 대하여 衝擊波 상류로는 空洞의 길이를 5mm로 일정하게 하고 하류 방향으로만 넓혀 空洞의 길이가 10, 15, 20mm가 되도록 하여 유동장 및 空洞내의 압력 변화를 관찰하여 空洞 길이의 영향을 조사하였다.

다음, 역시 기공률은 12%로 하고 공동의 길이 10mm와 20mm의 두 경우에 대해 각각 空洞의 깊이만 2.5, 5, 8mm로 변화시켜 가며 충격파 전·후의 압력변화와 부하를 관찰함으로써 空洞 깊이의 효과도 조사하였다.

또한, 각각의 기공률과 空洞의 길이 및 깊이를 변화시킨 모든 경우에 대하여 空洞내의 정압분포를 관찰함으로써 空洞內部의 압력과 多孔壁 표면의 압력분포와의 상관관계를 조사하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 기공률(porosity)의 영향

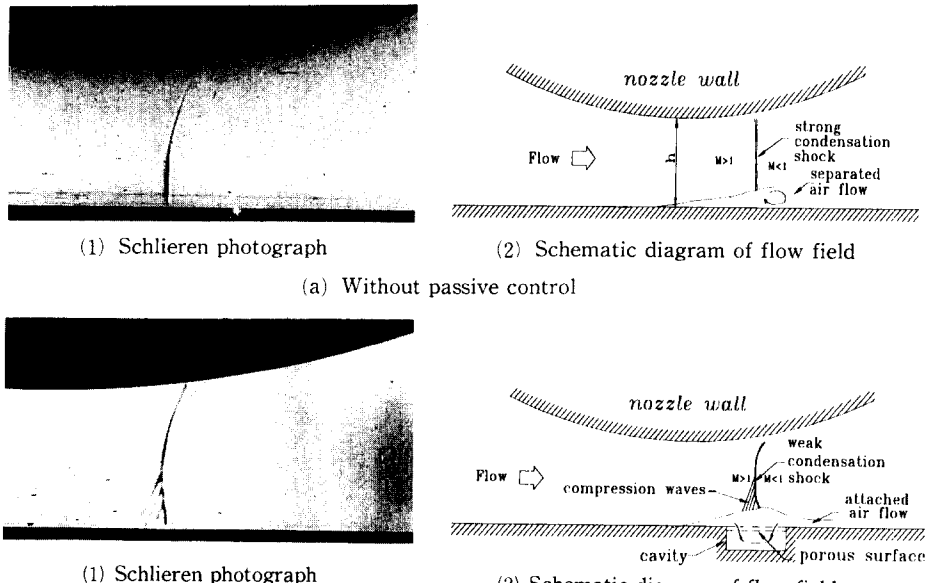
Fig. 2는 被動制御를 하지 않는 경우와 制御를 하는 경우의 가시화 사진과 유동장의 개략도를 나타낸 것이다.

Fig. 2(a)와 같이 피동제어를 적용하지 않은 경우(solid wall)는 충격파가 발생하면 충격파 하류에서 급격하게 정압이 상승하고, 경계층과의 간섭으로 인해 충격파가 발생하는 위치의 하부 벽면에서 경계층이 박리 되므로 비행체의 항력 증가와 양력 감소를 야기시키게 된다.

그러나, Fig. 2(b)와 같이 衝擊波가 위치하는 곳의 하부 벽을 多孔壁으로 하고 그 아래를 空洞으로 만든 경우, 충격파 하류의 급격한 압력상승은 境界層 흐름을 空洞으로 유입하게 하고 空洞을 통하여 충격파 상류의 境界層내로 유출되게 한다. 따라서 충격파 전방의 境界層 두께가 두꺼워지고 그로 인해 압축파가 발생된 결과 衝擊波를 통한 엔트로피의 증가와 압력구배가 작아지게 되고 박리의 정도도 감소하게 된다.[7,9,10]

Fig. 3은 被動制御를 하지 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 슐리렌 사진으로 원호노즐을 통하여 유동이 초음속으로 팽창됨에 따라 습공기의 온도가 급격하게 저하하여 수증기의 포화온도 이하로 낮아짐으로써 노즐 목 직후에서



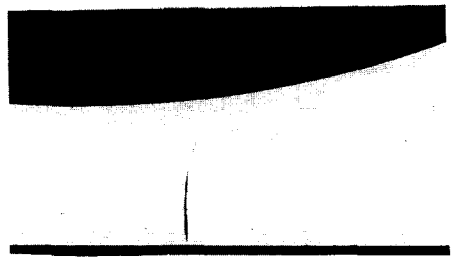
(1) Schlieren photograph (2) Schematic diagram of flow field

(a) Without passive control

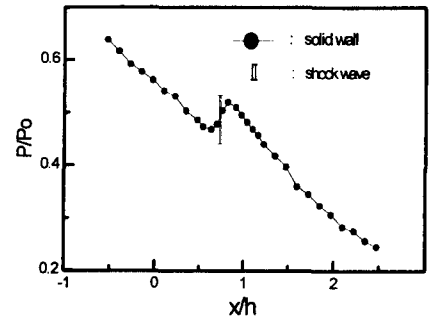
(1) Schlieren photograph (σ=12%, L=20mm, D=8mm) (2) Schematic diagram of flow field

(b) With passive control

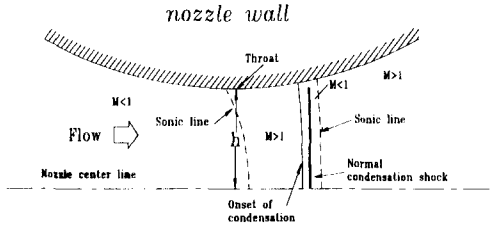
Fig. 2 Comparison of the results with and without passive control.



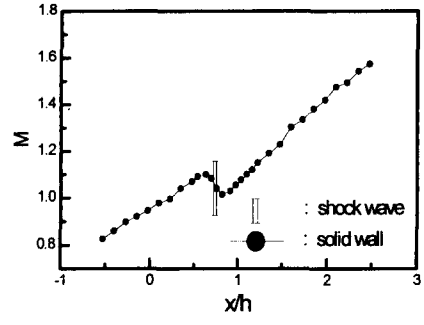
(a) Schlieren photograph



(b) Pressure distribution



(c) Schematic of flow field with condensation shock



(d) Mach number distribution

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

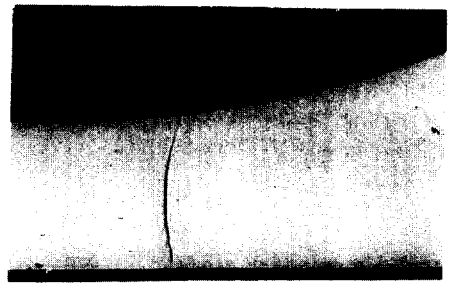
비평형 과정의 凝縮이 일어나고 이 凝縮에 의한 잠열의 방출이 임계치를 넘게 되어 凝縮衝擊波가 발생되고 있음을 볼 수 있다. 凝縮衝擊波의 발생기구와 형상은 노즐의 형상과 습공기의 상대습도 및 온도에 따라 달라지는데 본 연구의 실험조건에서 발생된 凝縮衝擊波는 거의 垂直衝擊波에 가까운 형상으로 나타났다.

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=0.6까지는 습공기가 노즐을 통과할 때 등엔트로피 팽창을 하고 있음을 나타내며, 등엔트로피 팽창으로부터 이탈하기 시작하는 x/h=0.6의 위치가 凝縮 개시점(onset of condensation)으로 노즐 목으로부터 약간 하류에 위치하고 있다. x/h=0.6−0.9의 구간이 凝縮領域(condensation zone)으로 x/h=0.75 근방에서 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 유로단면적의 확대에 의한 마하수 감소 효과보다 크게 되어 응축충격파 하류에서의 유동은 다시 초음속으로 됨을 알 수 있다. Fig. 3(c)는 비교적 높은 상대습도를 가진 습공기가 초음속 노즐을 통해 팽창 될 때 발생하는 응축충격파 전·후의 유동장을 도식적으로 나타낸 것이다.

Fig. 4는 凝縮衝擊波와 境界層의 간섭에 미치는 기공률의 영향을 조사한 것으로 空洞의 크기는 깊이 D=5mm, 길이 L=10mm로 일정하며, 충격파의 입사점은 多孔壁 영역(즉, 空洞 길이)의 중심에 위치하도록 한 상태에서 기공률만 5, 8, 12, 17%로 변화시켜가며 실험한 것이다.

압력 분포, 마하수 분포에서 두 점선 사이의 영역은 多孔壁으로 된 영역을 나타낸 것이다.

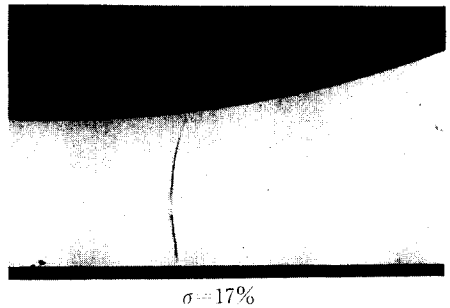
Fig. 4(a)는 기공률을 변화시켜가며 被動制御를 행한 경우의 슐리렌 사진으로, 凝縮衝擊波의 위치



σ=5%

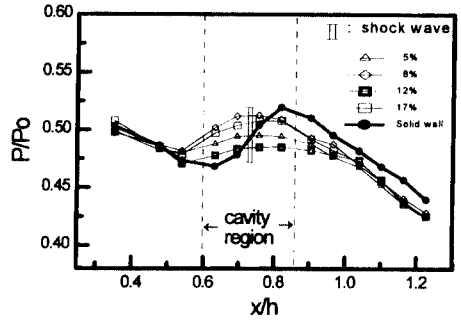
σ=8%

σ=12%

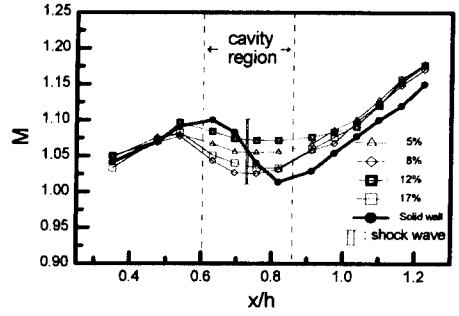


σ=17%

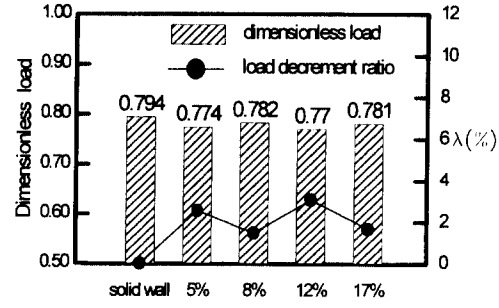
(a) Schlieren photograph



(b) Pressure distribution



(c) Mach number distribution



(d) Dimensionless load and load decrement ratio

Fig. 4 Schlieren photograph, effects of porosity on the distributions of static pressure, Mach number, dimensionless load and load decrement ratio. (R =300mm, h = 40mm, P_0=101.3kPa, T_0= 293K, Φ=70%, L=10mm, D=5mm)

는 空洞이 없는 경우, 즉 制御를 행하지 않은 Fig. 3(a)의 경우와 거의 동일하게 나타났다.

그러나, 충격파의 모양은 被動制御를 하지 않은 경우의 垂直衝擊波와 같은 모양에서 垂直衝擊波와 경사충격파의 조합으로 이루어진 λ형의 충격파로 변하였다.

이는 衝擊波 하류의 고압의 기류가 충격파 상류로 多孔壁과 空洞를 통하여 순환될 때 충격파 상류의 境界層 두께가 두꺼워져 발생된 압축파와 多孔壁 구멍 위치로부터 발생된 마하파[13]가 복합적으로 垂直衝擊波와 합체됨에 따라 충격파의 모양이 λ형으로 변화된 것이다.

Fig. 4(b)는 기공률 변화에 대한 정압 분포를 solid wall과 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을 거쳐 압력이 상대적으로 낮은 충격파 상류로 多孔壁을 통하여 유출(outflow)되므로써 多孔壁이 설치되지 않은 경우와 비교할 때 충격파 하류의 압력상승폭은 많이 감소되었으나 空洞으로부터 충격파 상류로의 유체 유출이 境界層의 두께를 증가시켜 압축파를 발생시키게 되어 충격파 상류에서의 압력은 空洞이 없는 경우보다 오히려 높게 나타나 충격파 전·후의 압력구배는 전반적으로 완만하게 되었다.

한편, Fig. 4(b), (c)의 압력 분포와 마하수 분포에서 알 수 있듯이 기공률 12%의 경우가 5, 8, 17%의 경우에 비하여 충격파 전·후의 압력분포가 가장 완만하고, 마하수 변화도 작게 나타났다. 이 그림에서 solid wall의 경우는 유동방향의 좁은 영역에서 급격한 압력 및 마하수 변화가 나타났으나 피동제어를 한 경우는 구배가 완만해진 구간이 훨씬 길어진 것을 볼 수 있는데 이로부터 피동제어는 간섭영역(interaction region)에서 충격파 상·하류 사이의 압력 전달을 증대시키게 됨을 알 수 있다.[14]

Fig. 4(d)는 하부 벽에 작용하는 양력(lift)과 직결되는 부하(load)와 부하감소율(load decrement ratio)을 나타낸 것이다. 여기서, 부하는 단위 폭에 대한 정압과 길이의 곱(즉, Fig. 4(b)에서의 곡선 하부의 면적)을 의미하는 것으로 피동제어에 의한 압력구배의 변화가 나타나는 $x/h=0.35-1.25$ 영역에서 측정한 정압으로 구하였다. 기공률이 12%일 때가 노즐의 하부 벽면에 작용하는 부하는 가장 작게 나타났다. 한편, solid wall인 경우의 부하를 기준부하로 하여 부하감소율을 다음과 같이 정의하였다.

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

부하 감소율은 기공률이 12%인 경우가 $\lambda=3.1\%$로 가장 크게 나타났다.

본 논문에서는 12%의 기공률이 압력과 부하 감소에 있어서 나머지 경우에 비하여 상대적으로 좋은 결과를 얻었으며, 이는 凝縮을 수반하지 않는 천음속 유동장에서 각각 충격파 강도의 被動制御를 연구한 Zierep[8] 이나, 본 실험에 사용한 노즐과 동일한 형상의 원호노즐에서 경사충격파를 피동제어한 Kwon[9] 등이 그들의 실험조건에서 피동제어의 효과가 가장 큰 기공률이라고 제시한 8%보다는 큰 값이다.

이와같이 기공률의 값이 증가한 것은 비평형 과정의 凝縮에 의해 생성된 액적이 피동제어를 위해 설치한 多孔壁 구멍에 미친 영향과, 凝縮衝擊波와 境界層과의 간섭기구가 凝縮을 수반하지 않는 경우의 간섭기구와 차이가 있으므로 인해 기인된 것으로 추정된다. 따라서 본 논문에서의 空洞 길이 및 空洞 깊이의 변화가 凝縮衝擊波와 境界層과의 간섭에 미치는 효과를 규명할 때의 기공률은 12%를 기준으로 조사하였다.

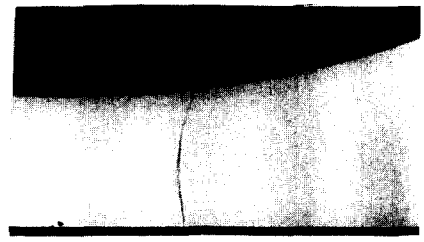
3.2 공동길이의 영향

Fig. 5는 被動制御에서 空洞 길이의 영향을 조사하기 위해 空洞의 깊이를 5mm로 하고 다공벽의 기공률을 12%로 일정하게 한 상태에서 空洞의 길이만 충격파 입사위치에서 하류 방향으로 넓힌 L=10, 15, 20mm의 경우에 대한 측정 결과를 나타낸 것이다. 즉, 모든 경우에서 凝縮衝擊波가 발생하는 위치는 多孔壁이 시작되는 위치로부터 하류 5 mm로 일치 시켰다.

Fig. 5(a)는 空洞의 길이 변화에 대한 슐리렌 사진을 나타낸 것으로 이 경우에도 凝縮衝擊波의 위치는 制御를 행하지 않은 경우와 거의 동일하나 모양은 λ형으로 변화되었다. 그러나, 공동의 길이가 길어질수록 압축파가 더 분명해지고 압축파와 수직충격파가 합체되는 위치도 조금씩 높아짐을 볼 수 있는데 이는 충격파 직전에서의 유출효과의 증대가 경계층을 더 두껍게 만든 영향 때문이라고 사료된다.

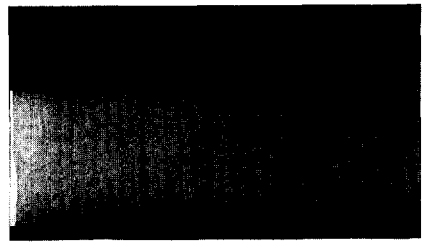
Fig. 5(b)는 노즐 하부 벽면에서의 정압 분포를 나타낸 그림으로 凝縮衝擊波 하류로 공동의 길이가 길어질수록 충격파 전·후의 압력증가는 전체적으로 더 완만해지는 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 空洞의 길이가 긴 경우가 짧은 경우에 비해 보다 하류의 境界層 흐름까지 空洞을 통



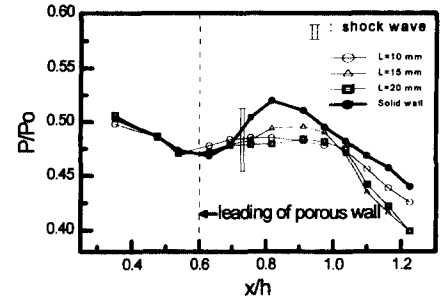
L=10mm

L=15mm

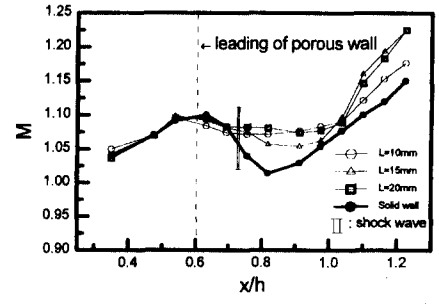


L=20mm

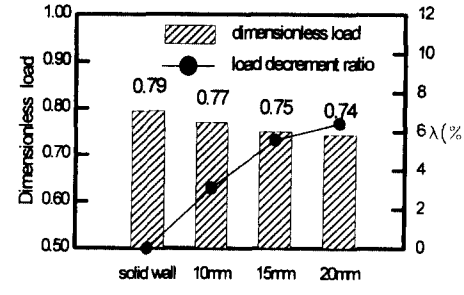
(a) Schlieren photograph



(b) Pressure distribution



(c) Mach number distribution



(d) Dimensionless load and load decrement ratio

Fig. 5 Schlieren photograph, effects of cavity length on the distributions of static pressure, Mach number, dimensionless load and load decrement ratio.
(R=300mm, h=40mm, P_0=101.3kPa, T_0=293K, Φ=70%, σ=12%, D=5mm)

과하게 되고, 충격파 상류로 유출될 때 상대적으로 작은 유동저항을 갖기 때문으로 판단된다. 따라서 충격파 하류의 높은 압력의 境界層 흐름이 보다 많이 空洞으로 유입되어 충격파 하류에서의 압력 증가가 완만하게 되므로 境界層과의 간섭에 의해 발생되는 유동의 박리도 억제된 것으로 생각된다.

Fig. 5(c)는 空洞의 길이 변화에 따른 유동장 내의 정압 측정으로부터 구한 마하수 분포를 나타낸 것으로 空洞의 길이가 길어짐에 따라 충격파 전·후의 마하수 변화도 더 완만해짐을 알 수 있다.

Fig. 5(d)는 압력 분포로부터 구한 노즐의 하부 벽면에 작용하는 부하와 부하감소율을 나타낸 그림이다. 多孔壁 시작점 위치로부터 凝縮衝擊波 발생 위치까지의 거리가 동일한 경우 衝擊波 하류로 多孔壁의 길이가 길어질수록 벽면에 작용하는 부하도 점점 줄어드는 것을 볼 수 있다.

한편, solid wall의 기준 부하에 대한 부하감소율은 L=20mm일 때가 λ=6.4%로 가장 크게 나타

났다.

이러한 경향은 응축을 수반하지 않는 초음속 유동장에서 각각 박리충격파(separated shock wave)의 피동제어를 연구한 Saida 등[1]의 결과나, 본 실험과 기하학적 형상이 동일한 노즐에서 경사충격파를 피동 제어한 Kwon[9] 등의 연구 결과와도 잘 일치한다. 따라서 응축의 수반 여부에 관계 없이 공동의 길이는 긴 경우가 피동제어에 더 효과가 있음을 알 수 있다.

3.3 공동깊이의 영향

응축충격파의 被動制御에 空洞의 깊이 변화가 미치는 영향을 조사하기 위하여 L=10mm와 20mm의 두 가지 空洞 길이에 대하여 기공률을 12%로 일정하게 한 후, 空洞 깊이만 D=2.5, 5, 8mm로 변화시켜가며 충격파 전·후의 압력과 마하수 변화를 조사하였다.

Fig. 6은 L=10mm인 경우에서 空洞의 깊이 변화에 대한 측정결과를 나타낸 것이다.

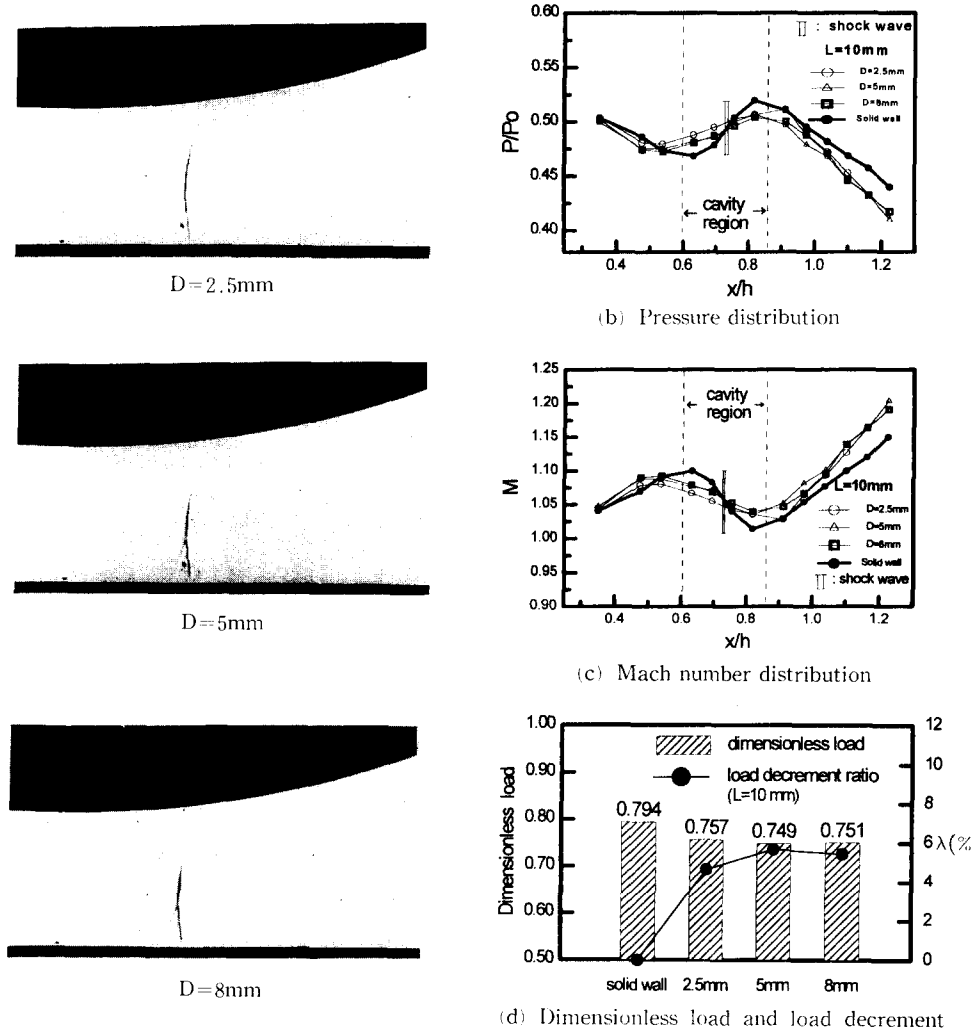


Fig. 6 Schlieren photograph, effects of cavity depth on the distributions of static pressure, Mach number, dimensionless load and load decrement ratio.

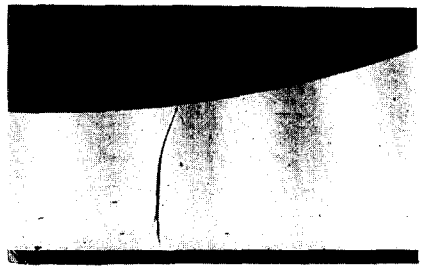
(R=300mm, h=40mm, P_0=101.3kPa, T_0= 293K, Φ 70%, σ=12%, L=10mm)

Fig. 6(a)의 슐리렌 사진에서도 공동의 길이 변화에서와 같이 凝縮衝擊波의 위치는 被動制御를 행하지 않은 경우와 거의 동일하나 충격파 상류에서 발생된 압축파와 수직충격파의 합체로 충격파의 모양은 λ형으로 변했다.

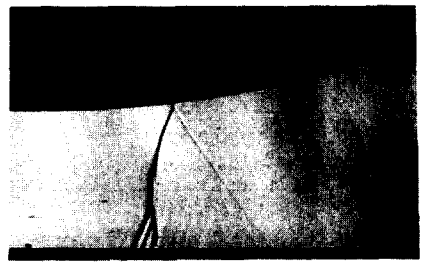
Fig. 6(b)에서는 공동 깊이 D=5 및 8mm인 경우가 D=2.5mm인 경우에서 보다 상대적으로 空洞을 통과하는 유동저항이 작으므로 空洞을 통해 境界層 흐름이 유입된 뒤 충격파 상류로의 유출이 원활하게되어 solid wall의 경우에 비해 충격파를 통한 압력변화가 상대적으로 낮게 나타났다.

Fig. 6(c)는 Fig. 6(b)의 정압을 사용하여 구한 마하수 분포를 나타낸 것으로 D=5mm와 8mm가 凝縮衝擊波 전·후에서 압력 간섭이 원활해진 결과 D=2.5의 얕은 공동 깊이에 비해 충격파를 통한 마하수 변화가 더 완만함을 나타내고 있다.

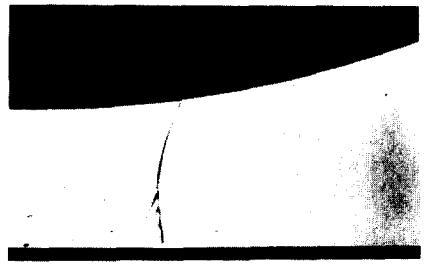
Fig. 6(d)의 부하 비교에서는 D=2.5mm의 경우는 부하감소율이 λ=4.6%였으나 空洞의 깊이가



D=2.5mm

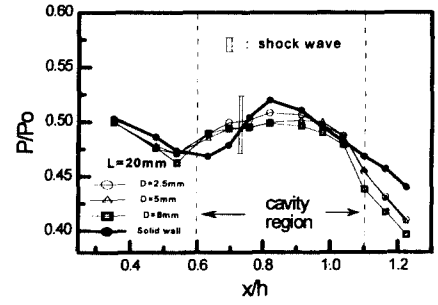


D=5mm

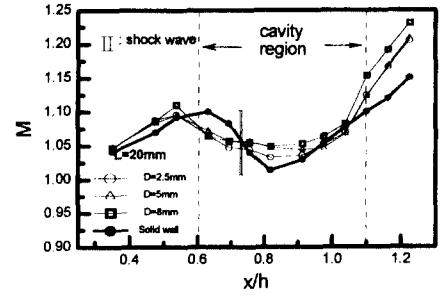


D=8mm

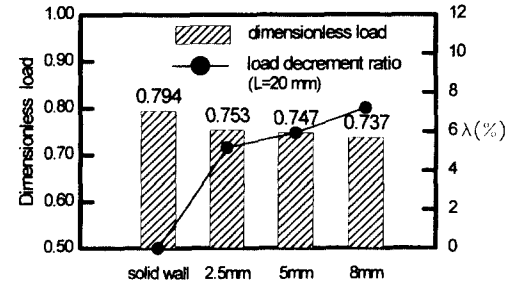
(a) Schlieren photograph



(b) Pressure distribution



(c) Mach number distribution



(d) Dimensionless load and load decrement ratio

Fig. 7 Schlieren photograph, effects of cavity depth on the distributions of static pressure, Mach number, dimensionless load and load decrement ratio.
(R=300mm, h=40mm, P_0=101.3kPa, T_0=293K, Φ=70%, σ=12%, L=20mm)

깊어짐에 따라 앞에서 언급한 制御효과로 인해 D=5mm일 때가 5.7%, D=8mm일 때가 5.4%로 나타났다.

Fig. 7은 Fig. 6의 결과를 재확인하기 위하여 동일한 조건에서 공동의 길이만 L=20mm로 하여 공동의 깊이를 변화시킨 경우의 가시화 사진, 압력, 마하수 분포와 부하 및 부하감소율을 나타낸 그림이다.

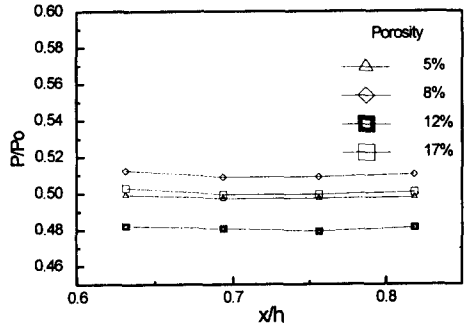
사진(a)는 공동 길이를 20mm로 하여 공동의 깊이만 변화시킨 경우의 슐리렌 사진을 나타낸 것이다. 凝縮衝擊波의 위치는 被動制御를 행하지 않은 경우와 거의 동일하게 나타났으나 공동 길이를 10 mm로 한 경우보다 압축파와 수직충격파의 합체가 더 분명하게 나타나고 합체되는 위치도 벽면에서 더 높아짐을 볼 수 있다. 이는 공동의 길이가 긴 경우처럼 공동의 깊이가 깊은 D=8mm일 때가 다른 경우보다 충격파 하류에서 상류로 더 원활하게 기류가 순환할 수 있기 때문으로 판단된다.

Fig. 7(b)의 압력 분포와 (c)의 마하수 분포에서도 공동 깊이가 8mm인 경우가 충격파 하류에서의 압력과 마하수 변화가 더 완만하게 나타났다.

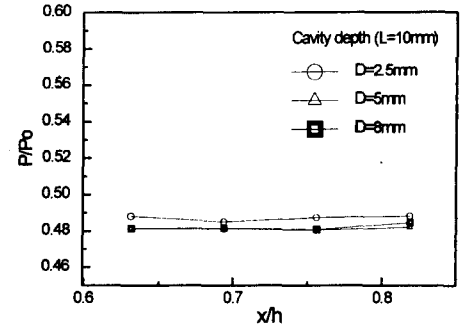
Fig. 7(d)에서는 D=2.5, 5, 8mm일 때 부하감소율이 각각 λ=5.2, 5.9, 7.2%로 D=8mm인 경우가 가장 크게 부하 감소가 되었음을 알 수 있다.

위의 결과들로부터 空洞의 깊이 변화에 따른 被動制御의 영향은 공동의 길이에 대한 영향도 다소 있을 수 있다고 예상되나 空洞의 깊이가 어느정도 깊은 경우가 더 증가된 공동내의 체적으로 인해 상대적으로 원활한 압력전달이 이루어짐으로써 衝擊波의 强度를 감쇠시키는데 효과적이라는 것을 알 수 있다.

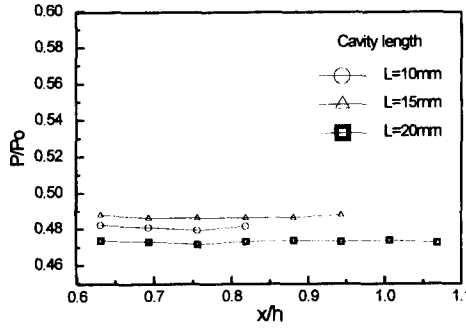
Bahi 등[7]과 Nagamatsu 등[10]은 각각 응축을 수반하지 않는 천음속 유동장에서 14% 두께비의 supercritical airfoil에 대해 공동 길이를 27mm,



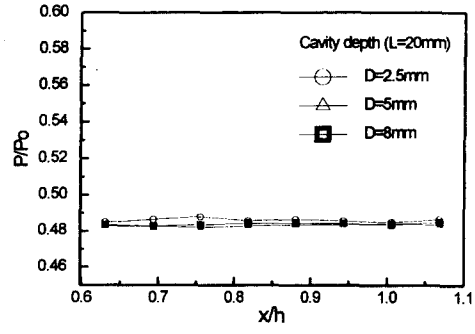
(a) Effect of porosity
(L=10mm, D=5mm)



(c) Effect of cavity depth
(σ=12%, L=10mm)



(b) Effect of cavity length
(σ=12%, D=5mm)



(d) Effect of cavity depth
(σ=12%, L=20mm)

Fig. 8 Pressure distribution in the cavity for the variations of (a) porosity, (b) cavity length and (c) cavity depth.
(R=300mm, h=40mm, P_0=101.3kPa, T_0= 293K, Φ=70%)

기공률을 10.4%로 하고 공동의 깊이만 1/4inch (6.35mm)와 3/4inch(19.5mm)의 두 가지로 실시한 피동제어에서 1/4inch인 경우가 衝擊波를 통한 압력증가가 완만하며, 항력의 증가나 양력의 감소도 작아 피동제어에 효과가 더 크다고 제시한 바 있다. 따라서 응축을 수반하는 유동장에서 행한 본 연구에서 被動制御에 효과가 큰 것으로 나타난 空洞의 깊이 5mm와 8mm는 이들이 제시한 6.35mm에 근사한 값이다. 좀더 여러 단계의 깊이에 대해 실험을 수행한다면 제어효과가 가장 큰 空洞의 깊이를 찾을 수 있으리라 생각된다.

Fig. 8은 기공률, 空洞 길이 및 깊이 변화에 따른 空洞 내부의 정압 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 8(a)는 空洞 길이를 10mm, 깊이를 5mm로 일정하게 하고 기공률만 변화시켜가며 측정한 空洞 저면의 압력 분포를 나타낸 것으로, 기공률 12%의 경우가 가장 낮게 나타나 多孔壁면에서의 압력분포와 동일한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8(b)는 空洞의 깊이가 5mm인 경우 空洞의 길이 변화에 따른 空洞 저면의 압력 분포를 나타낸 것으로 空洞내의 압력은 거리 x에 관계 없이 균일하게 나타났다.

空洞 길이가 길어질수록 凝縮衝擊波 직후의 고압 기류가 空洞내로 쉽게 유입되어 空洞 길이가 짧은 경우에 비하여 상대적으로 높은 값을 나타낼 것이라 판단되었으나 이와는 정반대의 현상이 나타났다. 이는 空洞의 길이가 길어질수록 凝縮衝擊波 직후의 고압의 기류가 쉽게 空洞내로 유입되어 空洞내의 압력을 높이는 효과는 있으나, 空洞의 길이가 길어짐으로써 보다 낮은 압력의 하류에까지 多孔壁으로 된 결과로부터 기인되는 압력강하 효과가 더 크기 때문이라고 생각된다.

Fig. 8(c)는 기공률을 12%로, 空洞의 길이를 20 mm로 일정하게 한 상태에서 空洞의 깊이 변화에 대한 空洞 저면의 압력 분포를 나타낸 그림이다. 여기서도 空洞 깊이가 깊을수록 凝縮衝擊波 하류의 고압기류가 空洞을 통해 凝縮衝擊波 상류로 유동할 때 空洞내에서의 유동저항이 작게 되어 空洞의 저면에 미치는 압력이 낮게 됨을 볼 수 있다.

4. 결 론

초음속 유동장 내에서 비평형 과정의 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 多孔壁의 기공률, 空洞의 길이 및 깊이의 변화에 따른 凝縮衝擊波 전·후의 압력 변화를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구의 실험 조건에서는 12%의 기공률이 가장 큰 제어효과를 나타냈으며, 이는 동일한 측정부의 기하학적 조건하에서 凝縮을 수반하지 않는 경우의 충격파 강도감쇠에 대한 연구에서 제시한 8%의 기공률보다는 큰 값으로 이는 응축에 의한 영향으로 판단된다.

(2) 동일한 실험 조건에서 空洞의 길이는 긴 경우가, 空洞의 깊이는 깊은 경우가 凝縮衝擊波 전·후의 압력 변화가 완만하게 되고, 부하도 작게 나타났다.

(3) 피동제어가 간섭영역을 증대시켜 충격파 전·후의 압력과 마하수 분포가 완만해짐을 알 수 있다.

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

(5) 凝縮衝擊波와 境界層과의 간섭에 대한 被動制御의 효과를 凝縮을 수반하지 않는 경우의 결과와 비교할 때 최적 기공률의 값은 증가하였으나 空洞의 길이 및 깊이 변화가 미치는 영향은 모두 동일한 경향을 나타냈다.

참고문헌

(1) 齊田暢三, 三栖 功, 門田匡人, 1992, "はく離衝擊波のパツシブコントロール," 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, 瀨戶口後明, 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.

(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の全壓損失(數値解析)," 日本機械學會, 論文集 B, 53卷 489號.

(4) Finke, K., 1977, "Sto schwingungen in Schallnahen Str mungen," VDI-Forschungsheft, 580.

(5) 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.

(6) 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.

(7) 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.

(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) 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.

(11) 瀬戸口俊明, S. Raghunathan., 1991, "衝撃波を伴う流れ場におげる境界層のパツシブコントロール(1)" 機械の研究 第43卷 第4號, pp. 463～468

(12) 瀬戸口俊明, S. Raghunathan., 1991, "衝撃波を伴う流れ場におげる境界層のパツシブコントロール(2)" 機械の研究 第43卷 第5號, pp. 566～572.

(13) White, F. M., 1991, "Viscous Fluid Flow,", McGraw-Hill, Inc. pp. 435～436.

(14) 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.

(15) 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.