

〈論 文〉

유로내에서 응축을 수반하는 초음속 유동의 미소진폭 파형벽에 의한 Prandtl-Meyer 팽창

권순범* · 안형준** · 김병지** · 선우은**

(1993년 10월 13일 접수)

Prandtl-Meyer Expansion through a Small Wavy Wall of Supersonic Flow with Condensation in a Channel

Soon-Bum Kwon, Hyung-Joon Ahn, Byung-Ji Kim and Eun Sunwoo

Key Words : Supersonic Flow(초음속 유동), Oblique Shock Wave(경사충격파), Nonequilibrium Condensation(비평형 응축), Wavy Wall(파형벽), Method of Characteristics(특성곡선법), Expansion Wave(팽창파)

Abstract

The characteristics of Prandtl-Meyer expansion of supersonic flow with condensation through a wavy wall in a channel are investigated by experiment and numerical direct marching method of characteristics. In the present study, for the case of moist air flow in the type of indraft supersonic wind tunnel, the dependency of location of formation and reflection of the oblique shock wave generated by the wavy wall and the distribution of flow properties, on the specific humidity and temperature at the entrance of the wavy wall and the attack angle of the wavy wall to the main stream is clarified by schlieren photograph, distribution of static pressure and Mach number, and plots of numerical results. Also, we confirm that the wavy wall plays an important key role in the formation of oblique shock wave, and that the effect of condensation on the flow field appears apparently.

기 호 설 명

A	: 파형벽의 진폭	x, y	: 좌표축
A, B, C, D	: 경사충격파의 입사점 또는 반사점	y^*	: 유로의 평균입구 높이
E, F, G, H	: 경사충격파의 입사점 또는 반사점	W	: 와류(wake)
I	: 응축충격파	θ	: x 축에 대한 파형벽의 영각
l	: 파형벽의 주기	ϕ	: 상대습도
M	: 마하수	ω	: 절대습도
\dot{P}	: 노즐팽창률	하첨자	
p	: 압력	0	: 정체점
T	: 온도	f	: 동결
		w	: 파형벽
		e	: 파형벽 입구

*정회원, 경북대학교 기계공학과

**정회원, 경북대학교 대학원 기계공학과

1. 서 론

수증기 혹은 습공기 등과 같은 응축성 기체속을 물체가 초음속으로 비행하게 되면 비행체 주위의 어떤 영역에서는 증기분자가 서로 충돌하여 응결되는 응축이 비평형과정으로 일어나게 된다.^(1,2) 비평형-응축이 수반되는 고속비행체의 날개와 증기터빈 동익 등의 표면이 응축에 의해 발생된 수적이나 외부에서 가해진 외력에 의하여 변형 및 손상된 굴곡의 형태를 가지게 되면, 갑작스럽게 팽창하는 부분이나 미소한 진폭을 가지는 파형벽이 존재하게 되고 응축과 응축충격파(condensation shock wave), 팽창 파(expansion wave), 경사충격 파(oblique shock wave) 등에 의해 유동장은 더욱 복잡해져 유동장의 상태량 및 유동조건에 큰 변화를 일으키게 된다.⁽³⁾

이와 관련하여 Smith⁽⁴⁾는 응축성분을 포함하는 2성분 기체의 임의의 양의 영각을 가진 모서리 주위의 초음속 유동시, 즉 Prandtl-Meyer 팽창시 응축개시점의 위치와 응축영역 및 그에 미치는 변수들에 관하여 실험적으로 연구하였으며, Tkalenko⁽⁵⁾는 응축성분을 포함하는 2성분 기체의 Prandtl-Meyer 팽창시 응축이 유동에 미치는 영향에 대하여 특성 곡선법으로 수치해석을 통하여 연구한 바 있다.

또한, 미소진폭 파형벽면을 통하여 흐르는 초음속 유동에 대한 연구로서는 Burg 등⁽⁶⁾이 해석적 방법을 사용하여 유동장내의 압력계수를 구한 바 있으며, Jungbluth⁽⁷⁾는 선형과 비선형 이론에 기초를 둔 연구를 수행한 바 있다. 그러나 위의 두 연구에서는 유동장내의 상태량은 물론 파형벽면상의 상태량도 정확하게 구하지 못하였고, 단지 그러한 유동장에 대한 해석이 가능함을 정성적으로 예견하였을 뿐이다. 또한, 응축성 기체가 초음속으로 파형벽을 통하여 흐르게 되면 극히 제한된 경우를 제외한 대부분의 경우에는 비평형과정의 균일응축이 일어남에도 불구하고 위에 언급한 연구들에서는 응축효과를 고려하지 않았으므로 실제의 대부분의 경우와 상이한 결과를 얻었다고 생각된다.

한편, Kim 등⁽⁸⁾은 미소진폭 파형벽을 가진 유로내에서 응축을 수반하는 초음속 유동의 특성을 수치해석에 의하여 연구한 바 있다. 그러나 Kim의 연구에서는 주류에 대한 미소진폭 파형벽의 영각(attack angle)이 없는 경우($\theta_w=0$)로 한정하였다.

따라서 본 논문에서는 보다 일반성이 있는 경우인 응축성 기체의 초음속 흐름이 주류에 대하여 어떤 영각을 가진 미소진폭 파형벽을 통하여 Prandtl-Meyer 팽창되는 흐름을 실험과 2차원 수치해석에 의하여 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 논문에서 연구의 주대상이 된 유동장은 증기터빈 저압 최종단 부근의 동익내 유동이다. 즉, 습증기가 급격히 팽창하여 비평형과정의 응축이 일어나는 작은 굴곡이 있는 동익내 유동이다. 한편, 사용된 풍동은 대기 흡입식 초음속 풍동⁽³⁾이며 작동 유체는 수증기와 거동이 유사한 습공기이다.

Fig. 1은 측정부의 상세를 나타낸 것이다. 폭 30 mm, 높이 60 mm의 사각다트르 된 유로의 하부벽에는 흐름방향에 수직한 방향으로의 유동상태량을 균일하게 할수 있을 뿐만 아니라 비평형과정의 응축이 일어나지 않은 초음속 유동이 파형벽에 유입되도록 하기 위하여 팽창률 \dot{P} 가 5000 sec⁻¹로 일정한 초음속 노즐(half nozzle)이 부착되어 있다.⁽⁹⁾

파형벽 입구의 높이는 22.6 mm, 파형벽의 진폭과 주기는 각각 1.5 mm와 80 mm이다. 주류에 대한 파형벽의 영각은 4°, 7°, 10°의 3종류이며, 노즐출구 즉, 파형벽면 입구의 마하수는 증기터빈 최종단 부근의 동익유동을 고려하여 1.40으로 하였다.⁽⁹⁾ 마하수 1.40은 노즐하류의 파형벽 입구에 설치한 수은 마노미터로 측정된 정압과 노즐목의 면적에 대한 파형벽 입구의 면적비에 의해 확인되었다.

한편, 파형벽의 입구에서의 습공기 중에 포함되어 있는 수증기량 즉, 절대습도 ω_0 는 초음속 풍동의 저기조(reservoir)에 있어서의 정체점 온도 T_0 와 상대습도 ϕ_0 에 의해 조절되었다. 이 경우, 저기조에 있어서의 전압 p_0 는 101 kPa로 일정하다. 정

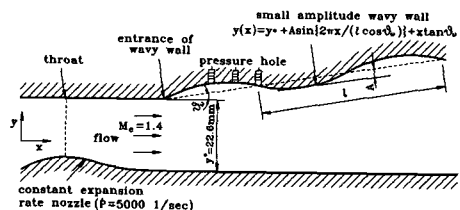


Fig. 1 Schematic of test section with wavy wall in a channel

압은 파형벽면에 직경 1mm의 구멍을 영각 θ_ω 가 4° 와 7° 인 경우에는 5 mm 간격으로, 유동장의 상태량이 좀더 급격히 변화할 것으로 예상되는 θ_ω 가 10° 인 경우에는 4 mm 간격으로 뚫어 수은 마노미터에 연결하여 측정하였다.

본 연구에서 사용한 가시화방법으로는 Xe 연속광원과 초점거리 3000 mm인 두개의 凹面鏡으로 구성된 슈리렌법이다.

3. 수치해석

응축이 수반되는 정상 2차원 초음속 유동을 수치해석 하기 위한 지배방정식 및 비평형과정의 응축에 관련된 식 등은 참고문헌(8)에서와 같다.

수치해석한 유동장은 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 유로의 상부벽은 주류에 대해 영각이 θ_ω 인 미소진폭의 파형벽으로, 하부벽은 평면으로 되어 있다. 계산영역은 파형벽의 입구로부터 하류 120 mm이며, 파형벽의 입구를 $x=0$ 로 하였다.

수치해석 경우의 파형벽은 실험에서의 동일하게 $1.5 \sin(2\pi x/80)$ 로 되어 있으며, 이는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 x 축에 대하여 영각 θ_ω 로 경사지게 하면 $y(x) = y^* + 1.5/\cos\theta_\omega[\sin(2\pi x/80/\cos\theta_\omega)] + x \tan\theta_\omega$ 의 식으로 된다. 파형벽 입구의 높이 y^* 및 마하수 Me 는 각각 22.6 mm와 1.40이며, 파형벽에 유입되는 흐름의 y 방향으로의 상태량은 균일하다고 가정하였다. 파형벽 입구에서의 상태량은 정체점 조건으로부터 유동마하수가 1.40로 등엔트로피적으로 팽창되었을 경우의 상태량으로 하였다. 이 경우 파형벽에 유입되는 흐름은 균일하며 비평형 응축은 아직 일어나지 않는다.

한편, 평판으로 된 하부벽과 영각 θ_ω 인 미소진폭의 파형벽에 있어서의 유선은 벽면을 따른다고 볼수 있으므로 하부벽과 상부벽에 있어서의 유선과 x 축이 이루는 각도 θ 는 다음과 같다.

하부벽에서, 즉, $y(x)=0$ 에서

$$\theta = 0 \tag{1}$$

상부벽에서, 즉,

$$y(x) = y^* + \frac{1.5}{\cos(\theta_\omega)} \sin\left[\frac{(2\pi x)}{80\cos(\theta_\omega)}\right] + x \tan(\theta_\omega)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left\{\frac{dy}{dx}\right\}_{wall\ profile}$$

$$= \tan^{-1}\left\{\left[\frac{3\pi}{80\cos^2(\theta_\omega)}\right] \cos\left[\frac{2\pi x}{80\cos(\theta_\omega)}\right] + \tan(\theta_\omega)\right\} \tag{2}$$

수치해석은 정상 2차원 유동을 해석하는데 유력한 직접진행형 특성곡선법(direct marching method of characteristics)을 사용하였다.

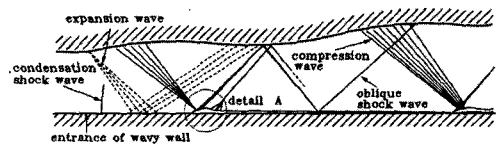
4. 결과 및 고찰

Fig. 2는 응축성 기체인 습공기의 초음속 흐름이 미소진폭 파형벽을 통하여 Prandtl-Meyer 팽창되는 유동장의 일례로서, (a)는 슈리렌 가시화사진이며, (b)는 슈리렌 (a)의 유동장을 도식적으로 나타낸 것이다. 여기서 주류에 대한 파형벽의 영각 θ_ω 는 4° 이고, 정체점 온도 T_0 와 상대습도 ϕ_0 는 각각 288 K와 45%이며, 파형벽 입구에서의 유입 마하수는 1.40이다.

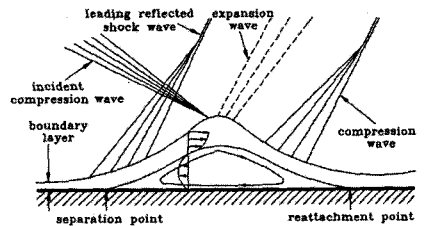
슈리렌 사진의 명암으로부터 알 수 있는 바와 같이 파형벽 입구에서 $x=5$ mm 부근에 거의 수직형태의 약한 응축충격과 I가 발생하고 있으며, 상부 파형벽의 $x=0\sim 10$ mm사이에서 발생한 Prandtl-



(a) Schlieren photograph ($\theta_\omega=4^\circ, T_0=288\text{ K}, \phi_0=45\%$)



(b) Schematic of flow field



(c) Detail A

Fig. 2 Schlieren photograph and schematic of flow field

Meyer 팽창파는 하부벽으로 입사한 후 정상반사하여 상부벽으로 재반사하고 있다. 또 상부파형벽의 변곡점(inflexion point)에 상당하는 $x=10$ mm와 30 mm사이에서는 압축파가 발생되어 A점 부근으로 입사하여 경계층과 간섭한 후 경사충격파 AB로 되고 있다. 상부 파형벽으로 입사한 경사충격파 AB는 재반사하여 다시 하부벽 E점으로 입사하고 재차 반사하여 상부벽 F점으로 입사되고 있다. 이와 같은 유동형상을 도식적으로 나타낸 것이 (b)이며, 특히 하부수평벽 A점 근방에서는, 상부 파형벽 $x=10\sim 30$ mm사이에서 발생한 압축파가 하부수평벽에 입사하여 경계층과 간섭한 결과, 경계층이 박리되어 생긴 경사충격파 CD가 존재함을 알 수 있으며, 이를 (c)에 도식적으로 나타내었다.⁽¹⁰⁾

한편, 슈리렌 사진을 나타내는 (a)에서 I위치에 있는 미소교란은 응축충격파이고, 나머지 검은 점들로 나타난 것은 광학유리의 흠집에 기인된 것들이다.

Fig. 3은 주류에 대한 파형벽의 영각 θ_w 와 정체점 상대습도 ϕ_0 가 각각 4° 와 45%인 경우에 대하여 정체점 온도 T_0 가 파형벽면에 있어서의 정압과 마하수 분포에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이는 파형벽에서 수는 마노미터로 측정된 정압을 정체점 압력($P_0=101$ kPa)으로 무차원화한 정압분포와 이것으로부터 구한 마하수분포이다. 그림중 기호 ■, ●, ▲들은 각각 T_0 가 288 K, 293 K, 298 K에 대한 경우이고, 세 경우 모두 파형벽 입구에서의 마하수

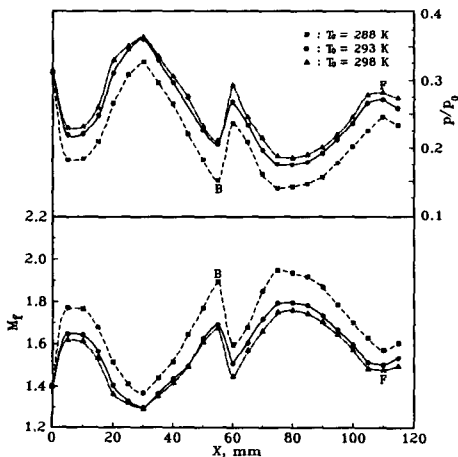


Fig. 3 Effect of stagnation temperature on distribution of static pressure and Mach number ($\theta_w=4^\circ$, $p_0=101$ kPa, $\phi_0=45\%$)

는 1.40로 동일하다.

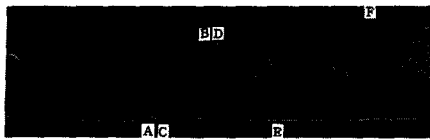
$T_0=288$ K일 때의 슈리렌 사진(Fig. 2(a))과 슈리렌 사진의 도식도(Fig. 2(b))에서와 같이, 상부 파형벽 입구부터 $x=10$ mm까지는 상부 파형벽이陽의 영각을 가짐으로써 야기되는 Prandtl-Meyer 팽창과 유로면적의 증가에 따른 팽창효과때문에 정압이 감소하고 마하수가 1.76정도까지 증가되고 있다. 파형벽의 변곡점에 상당하는 $x=10$ mm와 30 mm 사이에서는 유로의 면적이 증가함에도 불구하고 유선과 x 축이 이루는 각도 θ 의 기울기, 즉, $d\theta/dx$ 가 陰으로 되는 압축효과와 응축충격파 I에 의한 압력상승효과가 유로면적의 증가효과보다 크게 되어 압력의 급격한 증가가 일어났다. 한편, Prandtl-Meyer 팽창과 상부 파형벽 $x=0\sim 10$ mm 사이에서 발생한 팽창파가 하부 수평벽에 입사하여 정상반사함으로써 야기되는 팽창효과 때문에 상부 파형벽 $x=30\sim 56$ mm 사이에서는 압력의 급격한 감소 즉, 급격한 팽창이 일어나며, 마하수는 급격히 증가한다.

상부 파형벽 $x=56\sim 60$ mm 사이에서는 경사충격파 AB와 CD의 입사에 의해 압력의 급격한 증가현상이 나타났다. 또 상부파형벽 $x=60\sim 74$ mm 사이에서는 두 벽면 사이의 면적의 증가에 기인되는 팽창이 급격히 일어나고 있으며, 74~110 mm 사이에서는 파형벽의 압축효과와 상부 파형벽으로부터 입사한 경사충격파 BE가 반사한 경사충격파 EF 때문에 유속이 감소되고 있음을 알 수 있다.

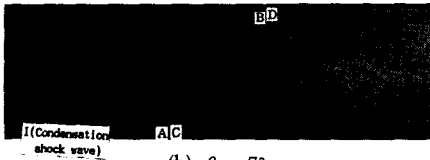
이상과 같은 압력 및 마하수의 분포는 정체점 온도 T_0 에 관계없이 유사한 변화를 나타냈으나, 정체점 온도 T_0 가 높을수록 전체적으로 마하수는 작게, 마하수분포에 對應하여 정압은 크게 나타났다. 이러한 경향은 파형벽 입구에서의 마하수와 정체점 상대습도가 동일한 경우에는 정체점 온도가 높을수록 정체점 비습도가 높게 되고, 그에 따른 응축에 의한 잠열의 방출이 크게 되기 때문이다.

Fig. 4는 주류에 대한 파형벽의 영각 θ_w 가 유동장에 미치는 영향을 나타낸 슈리렌 사진과 마하수 분포이다. 여기서, $T_0=293$ K, $\phi_0=45\%$ 이고 파형벽 입구에서의 유동마하수는 1.40이다. 마하수 분포의 (d)에서 기호 ■, ●, ▲들은 각각 θ_w 가 4° , 7° , 10° 에 대한 것이다. 마하수분포는 상부 파형벽에서 측정된 정압분포로부터 구하였다.

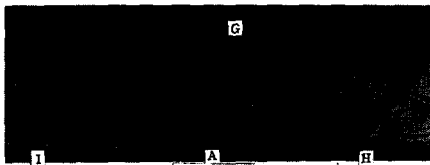
슈리렌 사진에서 영각 θ_w 가 4° 와 7° 인 경우는 Fig. 2에서 언급한 유동형상과 같은 경향을 보이고



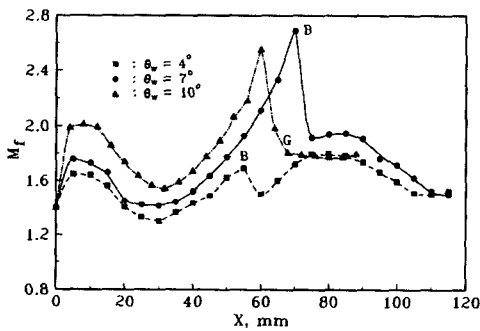
(a) $\theta_\omega = 4^\circ$



(b) $\theta_\omega = 7^\circ$



(c) $\theta_\omega = 10^\circ$



(d) Distribution of Mach number

Fig. 4 Effect of attack angle on static pressure ($T_0 = 293$ K, $\phi_0 = 45\%$)

있다. 파형벽 입구에서의 유입유동 마하수, 온도, 상대습도가 같은 경우에는, 유로면적의 증가가 큰 7° 인 경우가 4° 인 경우에 비하여 팽창률이 크므로 하부 수평벽 $x=5$ mm 근방에 수직의 약한 응축충격과 I가 발생되고 있음에도 불구하고 상부 파형벽 $x=10\sim 30$ mm 사이에서 발생하는 압축파의 하부벽으로의 입사위치인 A점이 좀더 하류에 위치함을 보이고 있다. 또한, 이 압축파가 A점에서 반사하여 상부 파형벽에 입사되는 B점의 위치도 7° 인 경우가 4° 인 경우에 비하여 하류에 위치함을 보이고 있다. 이는 파형벽 입구에서의 유동상태량이 동일한 경우에는 주류에 대한 파형벽의 영각 θ_ω 가 클수록 동일한 x 위치에 있어서 유동마하수가 커지게 되고 그에 따라 유선과 x 축이 이루는 각도인 마하

각의 크기가 작게 되기 때문이라고 생각된다.

마하수분포 (d)를 보면, B점에 있어서의 마하수는 영각이 큰 $\theta_\omega = 7^\circ$ 인 경우가 4° 인 경우에 비하여 팽창이 크게 되어 높게 나타났다. 그러나, $\theta_\omega = 10^\circ$ 인 경우는 $\theta_\omega = 7^\circ$ 혹은 4° 인 경우에 대하여 앞에서 언급한 것과 같은 양상으로는 되지 않았다. 즉, 슈리렌 사진에서 알 수 있는 바와 같이 $\theta_\omega = 10^\circ$ 인 경우는 상부 파형벽의 $x=65$ mm 근방에서 발생한 경계층의 박리때문에 경사충격과 GH가 발생되며, A점에서 반사한 경사충격과는 상부파형벽에 입사되지 못하고 박리된 유체 경계층에 입사하여 반사되는 형상으로 나타났다. 또한, 이로 인하여 $\theta_\omega = 7^\circ$ 인 경우에 비하여 최대 유동마하수가 작게 됨을 (d)로부터 알 수 있다.

Fig. 5는 절대습도 ω_0 가 유동마하수에 미치는 영향을 알아 보기 위한 슈리렌 사진과 상부 파형벽에서의 측정된 정압분포로부터 구한 유동 마하수분포를 나타낸 것이다. 파형벽 입구의 유입마하수와 영각은 각각 1.40 과 7° 이며, (a), (b), (c)는 각각 절대습도 ω_0 가 0.0023 ($T_0 = 283$ K, $\phi_0 = 31.6\%$, 기호 ■), 0.0055 ($T_0 = 293$ K, $\phi_0 = 40.7\%$, 기호 ●), 0.0101 ($T_0 = 298$ K, $\phi_0 = 54.6\%$, 기호 ▲)인 경우에 대한 것이다.

슈리렌 사진을 보면, 앞서 Fig. 4(b)와 유사한 유동형상을 보이고 있으나 $\omega_0 = 0.0101$ 인 (c)의 경우에는 하부벽 $x=3$ mm 부근에 응축충격과 I가 발생되어 수직형태로 나타났고, 상부 파형벽에서 D점 직후의 경계층은 입사 경사충격과 AB와 CD가 경계층과 간섭하여 박리되므로써 와류(wake) W를 발생시키고 있음을 알 수 있다. 그리고 ω_0 가 클수록 상부 파형벽의 $x=10\sim 30$ mm 사이에서 압축파가 발생되어 하부 수평벽으로 입사하여 집적되는 A점과 이 압축파가 집적되어 경사충격파로 되어 상부 파형벽에 입사되는 B점은 상류에 위치하며, 상부 파형벽 B점으로부터 하부벽으로 입사되는 경사충격파의 위치인 E점도 절대습도 $\omega_0 = 0.0101$ 인 (c)의 경우가 $\omega_0 = 0.0055$ 인 (b)의 경우보다 상류에 위치함을 볼 수 있다. 또한 유동 마하수분포로부터 ω_0 가 클수록 전체적으로 유동마하수가 작게 됨도 알 수 있다. 이는 파형벽 입구 마하수와 유동장의 기하학적 형상이 동일한 경우에는 ω_0 가 클수록 응축에 기인되는 잠열 방출량이 크게 되어 유동의 감속효과가 크게 되기 때문이라고 생각된다.

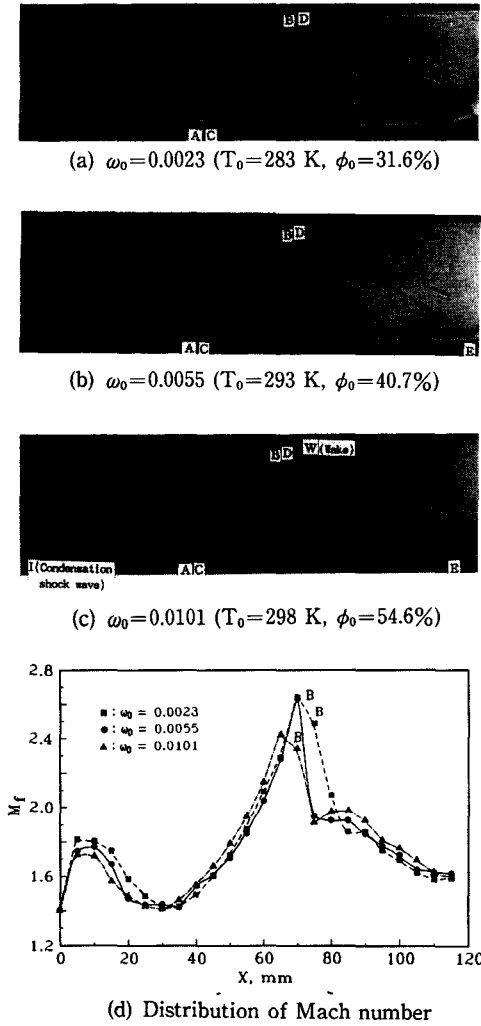


Fig. 5 Effect of absolute humidity on Mach number ($\theta_w = 7^\circ$)

Fig. 6은 $\theta_w = 7^\circ$, $T_0 = 298$ K, $\phi_0 = 54.6\%$ 이고, 파형벽 입구의 유입 유동마하수 $M_e = 1.40$ 인 경우에 대하여 2차원 수치해석으로부터 구한 유선, 동결마하선, 등압선 및 등액상 질량비 분포를 나타낸 것이다. 여기서, 실험결과인 슈리렌 사진은 수치해석의 결과와 비교를 하기 위하여 함께 나타내었다.

유선분포(a)에 의하면 상부 파형벽 $x = 10 \sim 30$ mm 사이에서 형성된 압축파가 하부벽으로 입사함으로써 하부벽쪽으로 전향된 흐름은 경사충격파 AB에 의해 반대방향으로 전향되고, 이는 다시 경사충격파 BE에 의해 유동조건에 맞도록 전향되고 있음을 알 수 있다.

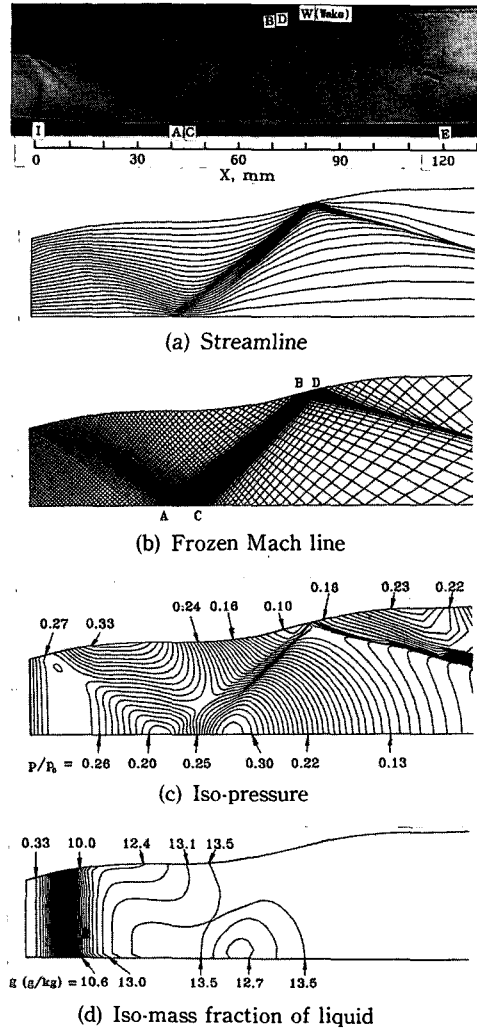


Fig. 6 Schlieren photograph and plots of numerical results ($\theta_w = 7^\circ$, $T_0 = 298$ K, $\phi_0 = 54.6\%$)

동결 마하선분포(b)는 슈리렌 사진의 명암과 유사하게 나타나고 있다. 즉, 슈리렌 사진에서와 같이 상부 파형벽의 변곡점에 해당하는 $x = 10 \sim 30$ mm 사이에서 발생하는 압축파가 하부 수평벽 $x = 46$ mm 근방으로 입사하여 직접되어 약한 경사충격파를 형성해 나가고 있으며, 상부 파형벽 입구에서 발생된 Prandtl-Meyer 팽창팬이 하부수평벽 $x = 30$ mm 근방으로 입사하여 정상반사하고 있음도 알 수 있다. 또 상부 파형벽 $x = 35$ mm 근방에서 생성된 마하파가 하부 수평벽에 입사하여 정상반사(regular reflection)되어 前述의 약한 경사충격파에 합체됨으로써 충격파강도(shock strength; $p_2 -$

p_1/p_2 , 여기서 p_1, p_2 는 각각 충격파 직전 직후의 정압)가 강화된 경사충격파 AB로 되고 있다.

등압선 분포(c)에 의하면 상부 파형벽의 변곡점인 $x=10\text{ mm}$ 에서와 30 mm 사이의 $x=25\text{ mm}$ 근방에서 무차원 정압 $p/p_0=0.33$ 으로 제일 높게 나타났으며, A점과 B점에 있어서의 충격파 강도는 B점의 경우가 0.59로 A점의 경우 0.20보다 크게 나타났다.

액상의 질량비 g 의 분포를 나타내는 (d)에 의하면, 동일한 x 에 대해서 전체적으로 상부파형벽에서의 값이 하부 수평벽의 경우보다 작게 나타났다. 이것은 상부 파형벽에 있어서의 파형벽의 영각 θ_w 에 의한 팽창효과 즉, 유로의 면적이 증가되는 효과가 파형벽의 기하학적 형상에 의해 야기되는 압축효과보다 크게 되어 파형벽에서의 국소과포화도가 하부벽에서의 값보다 크게 된 결과라고 생각된다.

한편, 실험결과와 B, D점이 수치해석의 결과에서보다 상류에 위치하였다. 이는 수치해석시 사용한 작동유체는 비점성이라는 가정에 기인된 결과로 판단된다.

5. 결 론

미소진폭 파형벽을 가진 유로내에서 응축을 수반하는 초음속 유동의 Prandtl-Meyer 팽창을 실험과 2차원 수치해석의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 파형벽 입구에서의 마하수와 정체점 상대습도가 동일한 경우에는 정체점 온도가 높을수록 유동장의 압력분포는 전체적으로 크게, 마하수분포는 작게 된다.

(2) 파형벽 입구에서의 유입 유동마하수, 온도, 상대습도가 동일한 경우에는 주류에 대한 상부 파형벽의 영각 θ_w 가 큰 7° 인 경우가 4° 인 경우에 비하여 압축파의 하부벽으로의 입사 위치인 A점은 하류에 위치하고, 이 압축파가 집적되어 이루어진 경사충격파의 상부 파형벽에 입사되는 B점의 위치도 하류에 위치한다. $\theta_w=10^\circ$ 인 경우에는 유동형태가 $\theta_w=7^\circ, 4^\circ$ 인 경우와 다르게 된다.

(3) 파형벽 입구에서의 유입 유동마하수와 영각 θ_w 가 동일한 경우에는 절대습도 ω_0 가 클수록 압축파의 하부벽으로의 입사점인 A점과 경사충격파가 상부파형벽에 입사되는 B점은 상류에 위치한다.

(4) 2차원 수치해석의 결과는 실험결과와 정성적으로 일치하였다.

후 기

이 논문은 1992년도 교육부 지원 학술진흥재단의 지방대학 육성과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Wegener, P. P. and Mack, L. M., 1958, "Condensation in Supersonic and Hypersonic Wind Tunnels," *Adv. Appl. Mech.*, Vol. 5, pp. 307~447.
- (2) Matsuo, K., Kawagoe, S., Kwon, S.B., Yamamoto, H. and Sugiyama, E., 1986, "Studies of Condensation Shock Waves (2nd Report, Relation Between Condensation Shock Wave and Condensation Zone)," *Bull. of JSME*, Vol. 29, 248, pp. 439~443.
- (3) Maiorskii, E. V. and Troyanovskii, B. M., 1965, "An Experimental Study of Supersonic Flow in Turbine Cascades," *Teploenergetika*, 12 (12), 69-72, p. 93.
- (4) Smith, L. T., 1971, "Experimental Investigation of the Expansion of Moist Air around a Sharp Corner," *J. AIAA*, Vol. 9, No. 10, pp. 2035~2037.
- (5) Tkalenko, R. A., 1970, "On Spontaneous Condensation in Supersonic Flow around an Obtuse Angle," *Mekhanika Zhidkosti*, Gaza, No. 5, pp. 73~77.
- (6) Burg, K., Viriyabhun, S. and Zierp, J., 1973, "Die Überschallströmung Längs einer Welligen Wand mit Geader Gegenwand," *Acta Mechanica*, Vol. 16, pp. 271~278.
- (7) Jungbluth H., 1974, *Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen*, Verlag G. Braun, Karlsruhe, pp. 41~54.
- (8) 金丙知, 權純範, 1992, "미소진폭 파형벽을 가진 유로내에서 凝縮을 수반하는 超音速 유동의 特性," *大韓機械學會論文集*, 제16권 제10호, pp 1990~1997.

- (9) Gyarmathy, G., 1976, *Two-Phase Steam Flow in Turbines and Separators*, Ed. by Moore M.J. and Sieverding C. H., McGraw-Hill, pp. 127~189.
- (10) 生井武文, 松尾一泰, 1983, “衝擊波の力學”, コロナ社, pp. 92.