

## 초음속 습공기 제트에서 발생하는 마하디스크의 거동

백승철\* · 김희동\*\* · 권순범\*\*\*

### Behaviors of Mach Disk in Underexpanded Supersonic Moist Jet

Baek Seung-Cheol\* · Kim Heuy-Dong\*\* · Kwon Soon-Bum\*\*\*

#### ABSTRACT

It has been well known that the major feature of compressible flow fields might be different depending on their formation processes. The objectives of the present study is to investigate the effect of jet development on the time history of supersonic jet flow field, accompanying nonequilibrium condensation. Especially, the behaviors of Mach disk diameter and location in a supersonic moist air jet are presented in terms of nozzle pressure ratio and initial relative humidity. The relative humidity of moist air is controlled at the nozzle supply, and the nozzle pressure ratio is varied to obtain the moderately underexpanded flows at the exit of the nozzle, installed in an indraft wind tunnel. It is found that at the same pressure ratio the Mach disk diameter increases with the initial relative humidity, while moves further upstream. Furthermore, the values of Mach disk diameter and location for increasing pressure ratio show larger than those for increasing.

#### 초 록

압축성 유동장의 주된 특징은 유동장의 형성과정에 의존한다는 것은 잘 알려져 있다. 본 연구의 목적은 비평형 응축을 수반하는 초음속 제트유동장의 발달에 미치는 제트의 시간이력을 조사하는 것이다. 특히 초음속 습공기 제트에서 마하디스크 직경과 위치의 거동이 노즐압력비와 초기 상대습도의 향으로 소개된다. 대기흡입식 풍동설비에 장착된 노즐의 출구에서 부족팽창된 습공기 제트를 얻기 위해 노즐의 압력비와 초기상대습도를 변화시켰다. 마하디스크의 직경은 동일한 압력비에서 상대습도가 증가함에 따라 증가하지만, 그 위치는 상류로 이동하는 것으로 나타났다. 또한 노즐의 작동압력비가 증가하는 경우의 마하디스크 직경과 발생위치가 감소하는 경우보다 더 크다.

#### 1. 서 론

\* 경북대학교 대학원 기계공학과(Kyungpook Natl. Univ., Graduate of Engineering Sci., Dep. of Mech. Engineering)

\*\* 안동대학교 기계공학부(Andong Natl. Univ., School of Mech. Engineering)

\*\*\* 경북대학교 기계공학부(Kyungpook Natl. Univ., School of Mech. Engineering)

일반적으로 부족팽창된 초음속 제트는 로켓이나 미사일, 초음속 및 극초음속 비행체의 제트 엔진의 배기가스와 스프레이 페인팅, 가스용접, 레이저 등과 같은 여러 산업분야에서 사용되는 노즐로부터 분출되는 경우에 나타난다. 부족팽창된 제트의 wave 구조에 대한 주된 특성은 입사충격파가 제트 중심축 근방에서 마하 디스크(Mach disk)의 발생이다. 부족팽창된 제트 내에서 발생하는 마하 디스크의 직경과 노즐출구로부터의 위치는 노즐의 정체압력과 배압의 비와 비열비 등의 함수이며, 노즐의 기하학적 형상에도 의존하는 것으로 알려져 있다.<sup>(1,2)</sup>

한편 산업현장에서 일반적으로 사용되는 노즐의 작동기체는 고온·고압인 보일러의 과열증기이다. 이러한 경우 습분이 포함된 과열증기가 초음속으로 급속하게 가속되면 비평형 과정의 응축이 일어나고, 이 응축에 의한 잠열이 주위 기체로 방출된다. 이러한 비평형 응축은 유동 내에서 발생하는 일종의 국부가열과정으로서 유동의 전압손실과 국소 정압의 상승이 일어난다.<sup>(3)</sup>

이전의 연구에 따르면 압축성 유동장은 유동이 어떠한 과정으로 형성되었는가에 달라질 수 있다고 알려져 있다.<sup>(4)</sup> 즉, 정상 및 비정상 유동장에서 동일한 상·하류 압력조건에 대해서도 그 유동의 시간이력(time history)에 따라 의존한다. 이러한 관점으로부터 본 연구는 제트 내에서 발생하는 비평형 응축의 효과가 존재하는 음속 노즐을 통해 분사되는 부족팽창된 초음속의 마하디스크 거동을 조사하기 위해 단순 음속노즐(simple sonic nozzle)을 사용하여 노즐 정체실의 초기 상대습도(initial relative humidity)와 더불어 노즐압력비가 증가시키는 경우와 감소시키는 방법으로 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 연구는 Fig. 1에 보이는 대기간헐 흡입식 풍동을 사용하여 수행되었다. 본 연구에서 사용

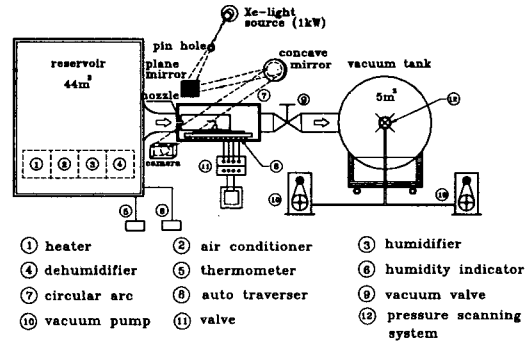


Fig. 1 Schematic of experimental facility

된 측정부는 직사각형 덕트이며, 상류에는 노즐 직경에 비해 상대적으로 큰 직경의 원관을 사용하였다. 또 관의 끝단에 원형평판이 부착되어 있고, 평판의 중심에 직경 5mm이고, 길이가 8mm인 음속노즐을 설치하였다. 또, 제트유동을 슈리렌 가시화를 위해 측정부 측면에 200×100mm<sup>2</sup>의 광학창을 설치하였다.

초음속 습공기 제트의 시간이력에 대한 마하디스크의 거동을 살펴보기 위해 노즐의 배압을 감소시켜 노즐 상·하류의 압력비가 증가되는 경우와 감소되는 경우에 대한 실험을 수행하였다. 또한 제트 유동장은 Fig. 1에 보이는 Xe광원의 슈리렌 시스템을 사용하여 새도우 그래프법으로 가시화하였으며, 자동이송장치를 사용하여 제트 중심축을 따라 pitot 압력과 정압을 측정하였다.

초기 정체점의 습분이 제트구조와 유동장의 물성치에 미치는 영향을 조사하기 위해 정체온도는  $T_0=286K$ 에서 322K까지 변화시켰으며, 상대습도는  $\phi_0=30\%$ 에서 70%까지 변화시켰다. 상류 정체상태를 대기압으로 일정한 상태에서 배압을 변화시켜 노즐의 작동압력비를  $PR=3.8\sim 12.3$ 까지 변화시켰다.

## 3. 결과 및 토론

Fig. 3은 정체점의 초기상대습도가  $\phi_0=30\%$ 로 일정한 상태에서 노즐의 작동압력비의 변화 즉,

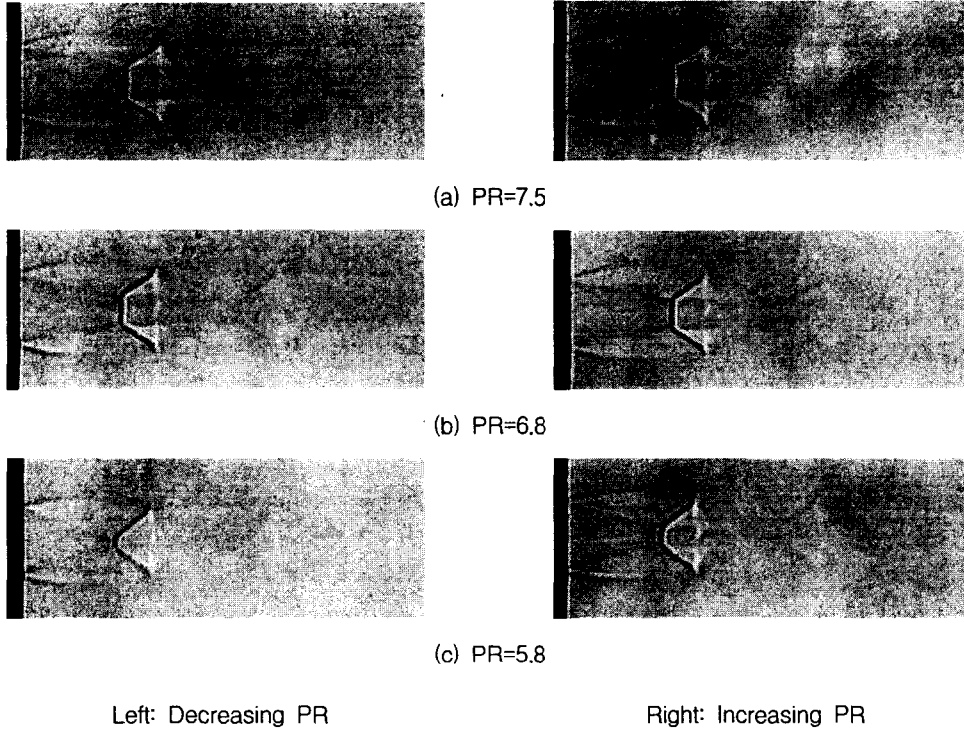


Fig. 2 Shadowgraphs of underexpanded jet with PR( $\phi_0=30\%$ )

압력비가 증가하는 경우와 감소하는 경우에 대한 제트의 새도우그래프이다. 노즐의 압력비가 증가함에 따라 마하디스크의 직경은 점차 증가하며, 발생위치도 노즐구로부터 점차 하류로 이동한다. 그림으로 노즐의 작동압력비가 증가하는 경우의 마하디스크 직경이 감소하는 경우에 비해 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

노즐의 작동압력비 변화에 따른 마하디스크의 발생위치와 Ref.2에서 제안된 아래의 경험식을 Fig. 3에 나타내었다.

$$x_m/D_e = 0.65(p_0/p_b)^{1/2} \quad (1)$$

노즐의 압력비가 증가함에 따라 마하 디스크의 발생위치는 노즐 작동압력비의 관계없이 모두 노즐출구로부터 하류로 이동한다. 그러나 본 연구에서 얻은 결과는 경험식에 의한 값보다 제트 하류에 위치하는 것으로 나타났다. 또한 마하디스크의 발생위치는 노즐 작동압력비가 증가하는 경우가 감소하는 경우에 비해 더욱 하류에 위치함을 알 수 있다. 또한 상대속도가 증가함에 따

라 마하디스크는 노즐 출구쪽에 위치한다.

Fig. 4는 노즐 작동압력비 변화에 따른 마하디스크 직경을 Ref.2에서 제안된 아래의 경험식 (2)와 (3)을 함께 나타내었다.

축소노즐의 경우에

$$D_m/D_e = 0.36(p_0/p_b - 3.9)^{1/2} \quad (2)$$

Sharp edge를 가진 오리피스에의 경우에

$$D_m/D_e = 0.31(p_0/p_b - 5.0)^{1/2} \quad (3)$$

본 연구에서 관찰된 마하디스크의 직경의 크기는 식(3)의 결과 근처에 위치하며, 노즐의 작동압력비가 증가함에 비례하여 커진다. 그러나 노즐의 작동압력비가 증가하는 경우의 마하디스크 직경이 감소하는 경우에 비해 상대적으로 동일한 압력비에서 더 크다. 또한 동일한 압력비에서 상대속도가 30%인 경우에 비해 70%인 경우가 마하 디스크 직경이 더 크다. Fig. 3과 4의 마하디스크 거동은 제트 내에서 발생하는 비평형 응축의 영향으로 판단된다. 초음속 제트 내

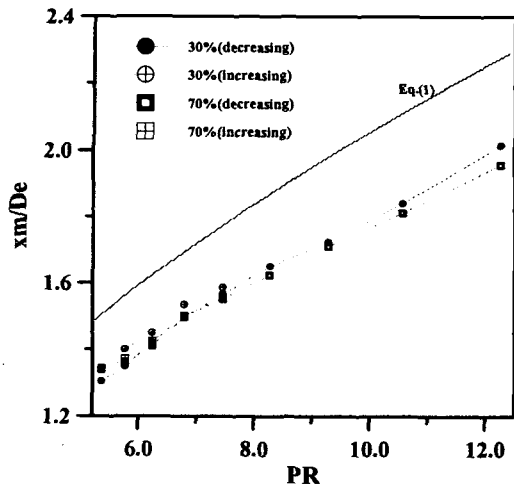


Fig. 3 The behavior of Mach disk location with varying PR

에서 비평형 응축이 발생하면 잠열이 방출과 더불어 전압손실과 국소 정압의 상승이 일어난다. 유동의 전압손실은 전압의 감소로 인해 마하디스크의 발생 위치를 상류로 이동시키고, 국소정압의 상승은 응축이 발생하지 않는 경우에 비해 barrel shock과 제트 경계를 확장시킨다. 한편 저기조의 초기 상대습도가 증가함에 따라 응축에 의한 영향은 더욱 커져 마하디스크 직경의 상대적인 증가와 상류로의 이동을 일으킨다.

#### 4. 결론

초음속 제트 내에서 발생하는 습공기의 비평형 응축이 마하 디스크의 거동을 포함한 부족팽창된 초음속 제트의 거동에 미치는 영향을 조사하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 그 결과 노즐 작동압력비가 증가함에 따라 마하디스크의 발생위치는 하류로 이동하고 그 직경은 비례하여 증가하나, 상대습도의 증가에 따라 마하 디스크의 발생위치는 노즐출구쪽으로 이동하는 반면에 그 직경은 증가한다. 또한 노즐의 작동압력비가 증가하는 경우는 감소하는 경우에 비해 마하디스크 발생위치는 제트하류로 이동하며 직경은 더욱 커지는 것으로 나타났다.

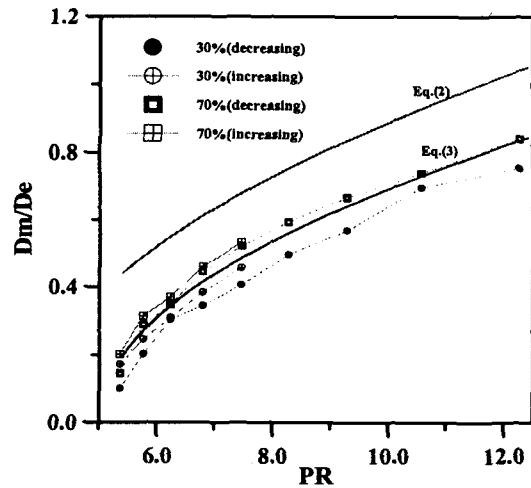


Fig. 4 The behavior of Mach disk diameter with varying PR

#### 참고 문헌

1. Crist, S., Sherman, P. M. and Glass, D. R., 1966, "Study of the Highly Underexpanded Sonic Jet," AIAA Journal, Vol.4, No.1, pp.68-71.1. Driftmyer, R. T., 1972, "A Correlation of Freejet Data," AIAA Journal, Vol.10, No.8, pp.1093-1095.
2. Addy, A. L., 1981, "Effects of Axisymmetric Sonic Nozzle Geometry on Mach Disk Characteristics," AIAA Journal, Vol.19. No.1, pp.121-122.
3. Hill, P. G., 1966, "Condensation of Water Vapour during Supersonic Expansion in Nozzle," J. Fluid Mech., Vol.25, part 3, pp.593-620.
4. Gribben, B. J., Badcock, K. J. and Richards, B. E., 2000, "Numerical Study of Shock-Reflection Hysteresys in an Underexpanded Jet," AIAA Journal, Vol. 38, No. 2, pp.275-283.