

Petal 노즐로부터 방출되는 초음속 자유제트 유동에 관한 연구

이준희[†] · 김중배[†] · 김희동^{*}

A Study of the Supersonic Free Jet Discharging from a Petal Nozzle

Jun-Hee Lee · Jung-Bae Kim · Heuy-Dong Kim

Abstract

The supersonic jet discharging from a petal nozzle is known to enhance mixing effect with the surrounding gas because it produces strong longitudinal vortices due to the velocity difference from both the major and minor axes of petal nozzle. In the present study, the supersonic free jet discharging from the petal nozzle is investigated experimentally. The nozzles used are 4, 6, and 8 lobed petal nozzles with a design Mach number of 1.7, and the flow fields are compared with a circular nozzle with the same design Mach number. The pitot impact pressures are measured using a fine pitot probe. The flow fields are visualized using a Schlieren optical method. The results show that the petal nozzle has more increased supersonic length compared with the circular jet.

Key Words : Supersonic Free Jet(초음속 자유제트), Compressible Flow(압축성 유동), Ejector(이젝터), Petal Nozzle(페달 노즐), Impact Pressure(충돌 압력), Shock Wave(충격파)

1. 서 론

최근 초음속 이젝터 시스템⁽¹⁾이나 스크램제트 엔진⁽²⁾등과 같은 공업 응용에서는 서로 다른 기체의 혼합촉진이 시스템의 전체성능을 결정하는 주요 요소로 고려되고 있다.

초음속 제트는 본질적으로 전단층의 발달이 비압축성 아음속 제트보다 작으므로 그 자체로는 주위 기체와의 혼합 효과가 크지 않다^(3,4). 따라서 인위적인 방법으로 초음속 제트와 주위기체의 혼합을 증가시키기 위하여 꽃잎 모양의 노즐단을 갖는 페달노즐(petal nozzle)이 제안되고 있다⁽⁵⁻⁷⁾. 이러한 페달노즐로부터 방출되는 초음속 유동은 Fig. 1 에 모식적으로 나타낸 바와 같이, 꽃잎 모

양의 노즐출구단면 주축(major axis)과 보조축(minor axis)에서 유동의 특성길이가 다르게 되므로, 유동방향의 강한 와류가 형성되어 전단작용을 크게 한다. 이 때 형성된 와류는 초음속 제트 내부로 주위 기체의 혼입은 크게 증가시켜, 초음속 제트류의 혼합촉진에도 크게 기여할 것으로 예상되지만 현재까지 이에 관한 연구는 많지 않다.

따라서 본 연구는 노즐단의 형상이 초음속 제트 유동과 주위 유동간의 혼입 및 혼합 효과에 미치는 영향을 조사하기 위하여 lobe 의 개수를 4, 6, 8 개로 한 페달노즐을 사용하여 실험을 수행하였으며, 종래의 원형 출구단면을 갖는 노즐의 실험 결과와 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1 과 Table 1 에는 본 연구에서 사용한 페달노즐과 원형노즐의 상세형상 및 치수를 나타내었다. 페달노즐은 축소부와 목, 확대부로 구성되

[†] 안동대학교 기계공학과 대학원
E-mail : junnylee@anuis.andong.ac.kr
^{*} 안동대학교 기계공학부

어 있으며, 축소부와 목의 단면형상은 원형이지만 확대부의 형상은 꽃잎모양이다. 즉 노즐확대부가 시작되는 지점의 단면형상은 원형이고 노즐출구면은 폭 L_t 의 lobe가 4, 6, 8개인 꽃잎형상이다. 본 연구에서는 노즐출구의 단면이 긴 축을 주축, 단면이 짧은 축을 보조축으로 하여, 노즐출구에서 주축의 길이는 노즐 목직경보다 크지만, 보조축의 길이는 목직경보다 작게 하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 압축기, 고압탱크, 정체실, 폐

Table 1 Nozzle geometric parameters

Nozzle	Circular	4-lobed	6-lobed	8-lobed
D_e	8.67	-	-	-
D_{ma}	-	12	12	12
D_{mi}	-	4.24	4	3.91
L_t	-	3	2	1.5
L_h	-	3	3.27	3.44
M_e	1.7	1.7	1.7	1.7

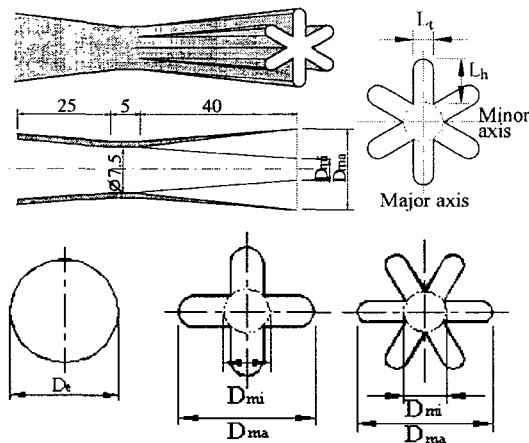


Fig. 1 Schematics of nozzle geometry

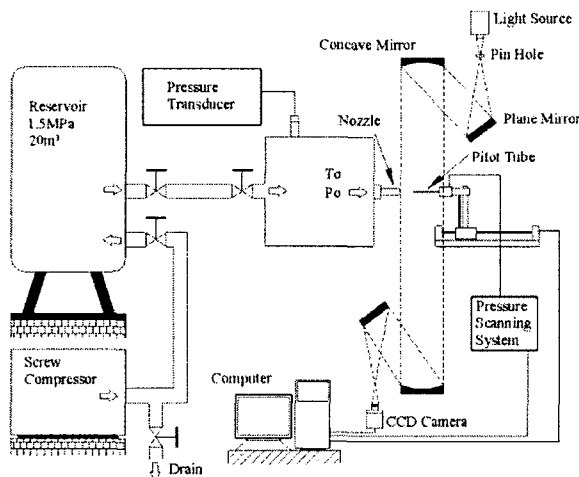


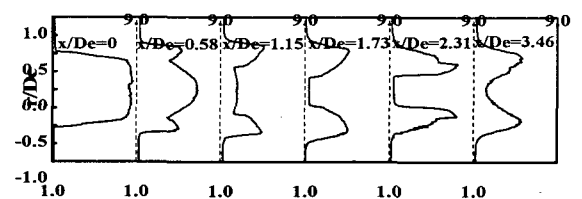
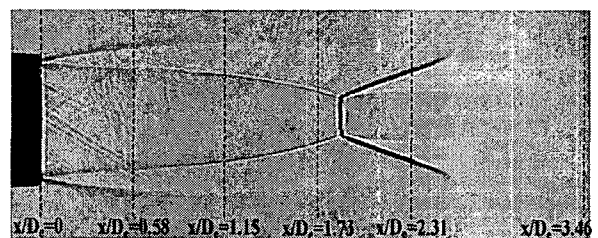
Fig. 2 Schematics of experimental apparatus

탈노즐과 피토관, 계측시스템 및 슈리렌 시스템으로 구성된다. 고압탱크에 약 1.5MPa로 저장된 압축공기는 정체실로 안내되어 폐탈노즐을 통하여 대기로 방출된다. 이 때 정체실의 압력측정은 반도체형 압력센서를 사용하였으며, 자유제트 유동장에는 직경 0.5mm의 피토관과 압력 스캐닝 장치를 유동의 상하류 및 반경방향으로 이송하여 총돌압력을 측정하였다. 실험조건으로는 정체실 압력과 대기압의 비를 $p_0/p_a=10.0$, 피토관의 이송거리는 노즐출구로부터 유동방향의 거리 x 를 원형노즐의 출구직경 D_e 로 무차원화하여 $x/D_e=0.0$ 에서 25.0까지 하였으며, 제트 유동장의 가시화하는 할로겐 광원을 사용하여 새도우법으로 하였다.

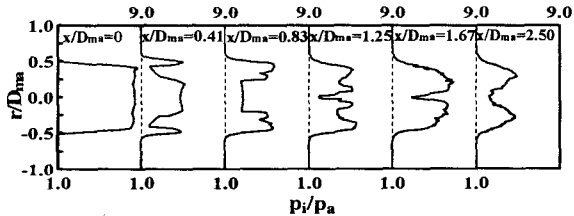
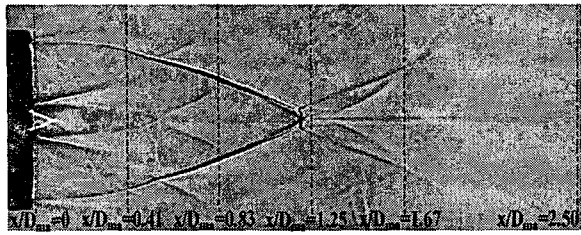
3. 결과 및 고찰

Fig. 3에는 p_0/p_a 가 10.0인 경우, 원형노즐 및 lobe가 4개와 6개인 폐탈노즐 출구로부터 방출되는 초음속 제트 유동장을 가시화한 결과이며, 유동방향의 각 위치에서 유동의 반경방향으로 피토 총돌압력(pitot impact pressure)을 비교하였다. 그림에서 x/D_e , x/D_{ma} , x/D_{mi} 및 r/D_e , r/D_{ma} , r/D_{mi} 는 각각 노즐출구를 원점으로 하는 유동방향의 거리 x 와 노즐 중심축으로부터 반경방향의 거리 r 을 D_e , D_{ma} , D_{mi} 로 무차원한 값이며, 횡축은 피토 압력 p_i 를 배압 p_a 로 무차원화 하였다. 여기에서 D_e , D_{ma} , 및 D_{mi} 는 각각 원형노즐의 출구직경과 폐탈노즐 출구의 주축 및 보조축의 길이를 나타낸다.

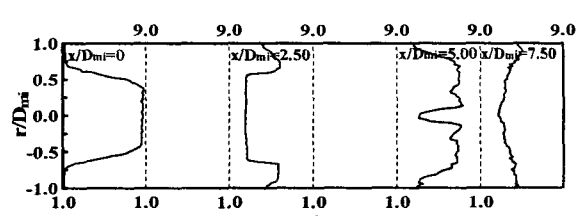
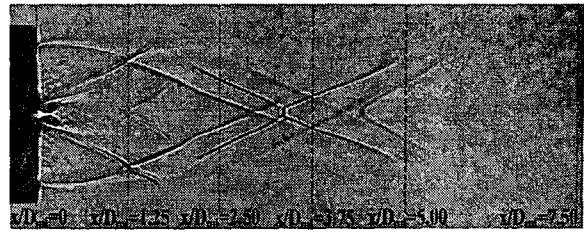
Fig. 3(a)의 원형노즐로부터 방출되는 초음속 유동은 전형적인 부족팽창 상태로 노즐출구에서 팽창하여 $x/D_e=1.88$ 에서 마하디스크가 발생한다. 그러나, lobe가 4개인 폐탈노즐로부터 방출되는 유동(Fig. 3(b,c))에서 주축 방향의 바렐충격파의



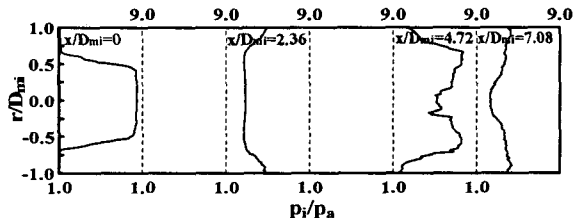
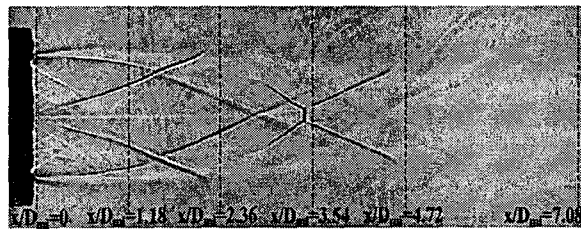
(a) Circular nozzle



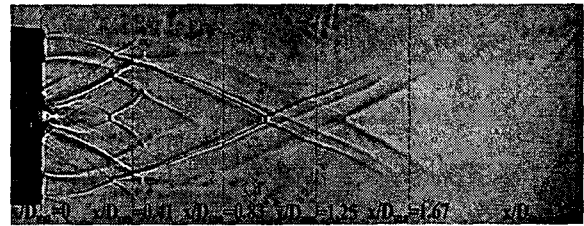
(b) 4-lobed petal nozzle (major axis)



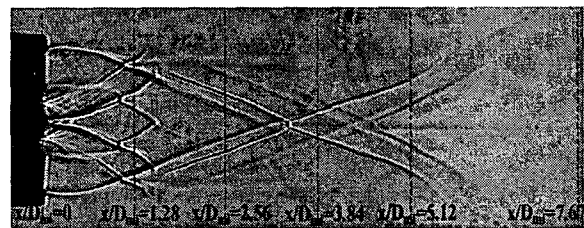
(e) 6-lobed petal nozzle (minor axis)



(c) 4-lobed petal nozzle (minor axis)



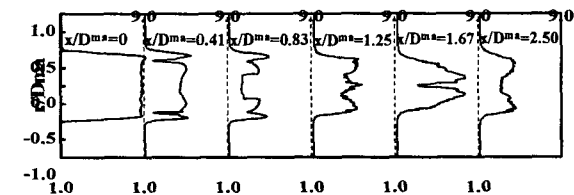
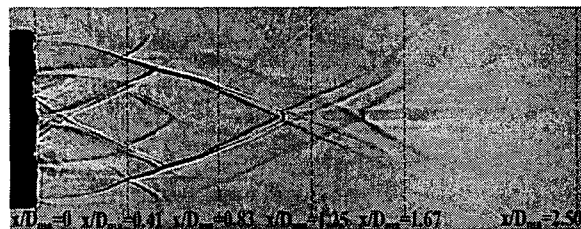
(f) 8-lobed petal nozzle (major axis)



(g) 8-lobed petal nozzle (minor axis)

Fig. 3 Comparison of circular and petal nozzles

($p_0/p_a=10.0$)



(d) 6-lobed petal nozzle (major axis)

기울기는 원형노즐의 경우에 비해 더욱 증가하고 $x/D_{ma} \approx 0.54$ ($x/D_{mi} \approx 1.54$)에서 주축과 보조축으로부터 발생한 바렐충격파가 서로 교차하며, $x/D_{ma} \approx 1.19$ ($x/D_{mi} \approx 3.35$)에서 바렐충격파는 마하디스크를 형성한다. 한편, 보조축의 유동에서는 주축과 보조축으로부터 발생한 바렐충격파가

마하디스크의 형성없이 $x/D_{ma} \approx 0.98$ ($x/D_{mi} \approx 2.77$)에서 교차되는 것이 관찰된다. 이러한 경향은 lobe의 개수가 증가할수록 주축과 보조축으로부터 발생한 바렐충격파의 기울기는 증가하고, 주축의 유동에서 마하디스크의 발생위치는 6-lobed 페탈노즐 (Fig. 3(d,e))에서 $x/D_{ma} \approx 1.16$ ($x/D_{mi} \approx 3.48$), 8-lobed 페탈노즐 (Fig. 3(f,g))에서 $x/D_{ma} \approx 1.09$ ($x/D_{mi} \approx 3.35$)로 노즐출구방향으로 이동하며, 마하디스크의 직경도 감소한다. 또, 보조축의 유동에서 주축과 보조축으로부터 발생한 바렐충격파는 마하디스크를 형성하지 않고, 주축의 마하디스크 전방에서 교차하며 lobe의 개수가 증가할수록 주축의 마하디스크 위치와 보조축의 바

펠충격파 교차점의 간격은 감소한다. 이것은 주축과 보조축에서의 초음속 길이가 다르므로 주축의 유동에서는 유동 하류에 마하디스크가 발생하는 반면, 보조축의 유동에서는 마하디스크가 형성되지 않고 바렐충격파가 교차되는 것으로 판단된다.

한편, Fig. 3의 총돌 압력분포로부터 모든 유동은 노즐출구에서 제트경계가 명확히 나타나며, 완전히 발달된 형태를 보인다. 그러나 유동이 노즐출구 하류로 진행하면서 보조축 방향의 총돌압력 분포에서는 제트 경계의 확산현상이 주축 방향의 경우보다 더욱 급격하게 발생하는 것으로 관찰되며, 이는 lobe 사이에서 보조축의 유동이 강한 와류를 일으키는 것으로 판단된다.

이러한 경향의 상세를 조사하기 위하여 Fig. 4에는 원형노즐 및 페탈노즐의 제트 중심에서 유동 방향의 총돌압력 분포를 나타내었다. 그림에서 횡축은 노즐출구로부터 유동방향의 거리 x 를 원형노즐의 출구직경 D_0 로 무차원화 하였고 종축에는 총돌압력을 대기압으로 무차원화 하였다. lobe의 개수가 각각 4, 6, 8개인 페탈노즐의 경우, $x/D_0 \approx 1.6$ 에서 충격파가 발생하며, 그 후 유동은 팽창과 압축이 반복되면서 충격파의 강도는 조금씩 약해지고, lobe의 개수가 증가할수록 팽창 및 압축의 주기는 조금씩 감소한다. 그러나 원형노즐의 경우는 $x/D_0 \approx 1.88$ 에서 압축이 시작되며 $x/D_0 \approx 10.0$ 까지 증가한 후 다수의 충격파 시스템에 의하여 압축과 팽창을 반복하여 아음속 영역으로 된다. 그림으로부터 부족팽창상태의 유동에서 페탈노즐로부터 방출되는 초음속 제트유동의 초음속 구간이 원형노즐의 경우보다 감소함을 알 수

있다.

4. 결 론

1. 페탈노즐로부터 방출되는 초음속 제트유동장에서 초음속 길이는 원형 초음속 노즐의 경우에 비해 감소하였다.
2. 가시화 결과 초음속 페탈노즐의 주축과 보조축에서 발생하는 충격파가 서로 복잡하게 간섭하는 것이 관찰되며, 이러한 간섭은 페탈노즐의 lobe 사이에서 발생하는 와류가 주위기체와의 혼합 및 확산에 영향을 미치기 때문이다.
3. 페탈노즐을 이젝터 시스템 등의 공업응용에서 기체의 혼입 및 혼합을 위한 구동노즐로 사용할 경우 기존의 원형노즐에 비하여 기체의 혼입 및 혼합이 크게 향상될 것으로 기대되며, 이젝터 시스템 전체성능은 향상될 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2002년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- 1) Clark, L. T., 1995, "Application of Compound Flow Analysis to Supersonic Ejector-Mixer Performance Prediction," AIAA Paper, No. 95-0645.
- 2) Schindel, L., 1999, "Effect of Nonuniform Nozzle Flow on Scramjet Performance," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 15, No. 2, pp. 363-364.
- 3) Goebel, S. G., and Dutton, J. C., 1991, "Experimental Study of Compressible Turbulent Mixing Layers," *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 4, pp. 538-546.
- 4) Chinzei, N., Masuya, G., Komuro, T., Murakami, A., and Kudou, K., 1986, "Spreading of Two-Stream Supersonic Turbulent Mixing Layers," *Physics of Fluids*, Vol. 29, No. 5, pp. 1345-1347.
- 5) Tillman, T. G. and Presz Jr., W. M., 1995, "Thrust Characteristics of a Supersonic Mixer Ejector," *Journal of Propulsion and Powers*, Vol. 11, No. 5, pp. 931-937.
- 6) Kumar, R. R. and Kurian, J., 1995, "Estimation of Mixing of High-Speed Streams," *Journal of Propulsion and Powers*, Vol. 12, No. 2, pp. 429-431.
- 7) Lee, J. H., Kweon, Y. H., Jeong, M. S., Lee, J. C., and Kim, H. D., 2002, "An Experimental Study on the Supersonic Free Jet Discharged from a Petal Nozzle," Proceedings of the KSPE Spring Annual Meeting, pp. 55-56

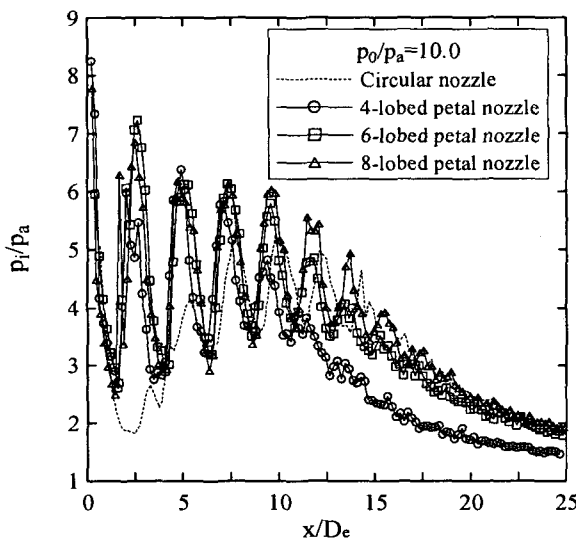


Fig. 4 Pitot pressure distributions along the nozzle center line