

초음속 마이크로 제트 유동에 관한 기초적 연구

정미선* · 김현섭* · 김희동**

A Fundamental Study of the Supersonic Microjet

M. S. Jeong, H. S. Kim and H. D. Kim

Key Words : Microjet(마이크로 제트), Shock Wave(충격파), Underexpanded Jet(부족팽창제트), Overexpanded Jet(과팽창 제트), Micronozzle(마이크로 노즐)

Abstract

Microjet flows are often encountered in many industrial applications of micro-electro-mechanical systems as well as in medical engineering fields such as a transdermal drug delivery system for needle-free injection of drugs into the skin. The Reynolds numbers of such microjets are usually several orders of magnitude below those of larger-scale jets. The supersonic microjet physics with these low Reynolds numbers are not yet understood to date. Computational modeling and simulation can provide an effective predictive capability for the major features of the supersonic microjets. In the present study, computations using the axisymmetric, compressible, Navier-Stokes equations are applied to understand the supersonic microjet flow physics. The pressure ratio of the microjets is changed to obtain both the under- and over-expanded flows at the exit of the micronozzle. Sonic and supersonic microjets are simulated and compared with some experimental results available. Based on computational results, two microjets are discussed in terms of total pressure, jet decay and supersonic core length.

1. 서론

직경이 매우 작은 노즐로부터 방출되는 제트유동은 최근 들어 여러 기계가공분야 뿐만 아니라 의공학 분야에서도 광범위하게 활용되고 있다. 예를 들면 마이크로 제트는 TV 브라운관이나 각종 액정의 마스크, 분자빔 장치, 각종 가공물의 크리닝, 반도체 제작공정, 각종 마이크로 장치 등 공학 분야에 광범위하게 활용되고 있다^(1,2). 더욱이 최근 가축이나 인체의 질병 치료에 주사바늘의 사용이 감염부작용을 일으킬 뿐만 아니라 주사바늘의 사용 후 처리 등의 사회적인 문제로 인하여 주사바늘을 사용하지 않고, 마이크로 제트를 이용하여 직접 약물을 인체나 가축 또는 식품 등에 투여하는 방법이 세계적으로 주목을 받고 있다.^(3,4)

마이크로 노즐로부터 방출되는 제트 유동은 제트의 공급압력이 대기압의 2 배를 능가하게 되면, 노즐 출구에서 유동은 초음속으로 될 수 있다.⁽⁵⁾

그러나 마이크로 제트 유동특성은 노즐벽면에서 발생하는 경계층 등의 점성의 영향이 지배적으로 되어, 큰 스케일의 초음속 제트 유동과는 매우 다를 수 있다. 예를 들면 초음속 마이크로 제트의 경우, 노즐 출구 직경을 특성길이라고 하는 레이놀즈수는 수백에서 수천정도⁽⁶⁾로, 제트유동은 층류에서 난류로 천이할 수 있을 뿐만 아니라 제트내부에서 발생하는 충격파 시스템이나 제트감쇠 등의 중요 유동특성이, 종래 알려져 온 초음속 자유제트의 구조^(7,8,9)와는 다르게 될 것으로 예상된다.

현재까지 이와 같은 초음속 마이크로 제트 유동특성은 잘 알려져 있지 않으며, 이에 관한 연구는 매우 부진한 실정에 있다. 이것은 초음속 마이크로 제트 유동을 실험적으로 측정하는 것은 극히 곤란하며, 노즐의 제작 또한 용이하지 않기 때문이다. 고도로 정밀한 가공을 한다고 하더라도 노즐 벽면의 표면조도는 노즐 직경의 수 퍼센트 내지 수십 퍼센트가 될 수 있으므로, 노즐 출구에서 발생하는 제트유동은 사용되는 노즐에 따라 달라지게 될 수 있다.

본 연구에서는 Navier-Stokes 방정식을 이용한 수치계산을 수행하여, 초음속 마이크로 제트유동의

* 안동대학교 기계공학과 대학원

** 안동대학교 기계공학부

상세 구조를 조사하였다. 수치계산에서는 여러 형태의 난류모델을 적용하여, 유용한 실험결과⁽¹⁰⁾와 비교하였으며, 노즐의 압력비 및 레이놀즈수가 제트 내부에서 발생하는 압력분포 등에 미치는 영향을 조사하였다. 또 본 연구에서는 두 형태의 노즐(즉, 음속 노즐과 초음속 노즐)로부터 방출되는 제트 유동을 해석하여, 두 마이크로 제트유동의 특성을 비교하였다.

2. 수치해석방법

수치계산에서는 축대칭 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하였으며, 지배방정식의 공간항들에 대해서는 Upwind 차분법을, 그리고 시각항의 적분에 대해서는 4 단계 Runge-Kutta 법을 적용하였다. 수치계산에 사용된 지배방정식과 수치계산법에 대해서는 문헌(11)에 상세히 기술되어 있으므로, 본 논문에서는 생략한다.

2.1 수치계산영역 및 경계조건

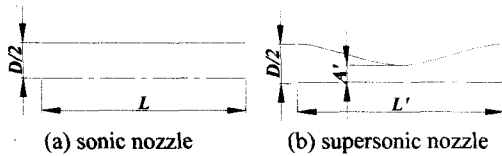


Fig. 1 Micro nozzle geometries used in computation ($D=1.2\text{mm}$, $L=15\text{mm}$, $L'=18\text{mm}$)

Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 음속/초음속 마이크로 노즐을 나타낸 개략도이다. 음속 노즐의 지름은 1.2mm 이며 초음속 노즐의 경우 실험값과의 비교를 위하여 문헌(10)의 실험노즐의 형상을 사용하였다. 문헌(10)에서 사용된 초음속 노즐은 가공정밀도를 향상시키기 위하여 특수유리로 제작되었으며 노즐목의 직경은 0.705mm, 노즐 출구직경은 1.2mm 로, 설계마하수는 2.6 이다.

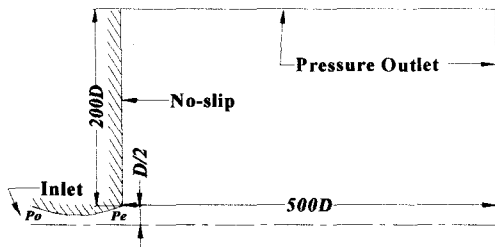


Fig. 2 Computation area and boundary conditions

Fig. 2 는 수치계산에 적용된 마이크로 제트유동의 계산영역과 경계조건을 나타낸 그림으로 노즐의 출구를 기준으로 길이방향으로 500D, 반경방향으로 200D 의 계산영역을 설정하여 수치계산을 수행하였다.

수치계산에 적용된 경계조건은 노즐 출구에서 유입조건으로 Pressure inlet, 하류경계에는 유출조건으로 Pressure outlet 조건을 적용하였으며 모든 고체벽면에 대하여 단열 no-slip 조건을 적용하였다. 본 연구에서 사용된 마이크로 노즐의 유동장이 중심축에 대하여 대칭이므로 대칭축에 대하여 상반부만을 계산영역으로 설정하였다. 수치계산에 사용된 음속/초음속 노즐의 격자수 약 60000 개의 정렬 격자로, 벽면의 경계층이 발달하는 부분과 출구 주위의 충격파가 발생하는 곳에 격자점을 집중시켰다.

본 연구에서는 난류모델과 벽함수를 변화시켜, 난류모델과 벽함수가 마이크로 유동장에 미치는 영향을 조사하였으며, 수치계산의 타당성을 조사하기 위하여 유용한 실험값과 비교하였다. 본 연구의 수치해의 수렴판정을 위하여 질량, 운동량, 에너지, κ 와 ϵ 의 잔차를 10^{-4} 이하로 설정하였으며 노즐 입구와 출구에서의 질량유량의 변화를 조사하여, 질량유량의 합이 $\pm 0.5\%$ 이하로 되는 조건을 수치 해가 수렴한 것으로 판정하였다.

3. 결과 및 고찰

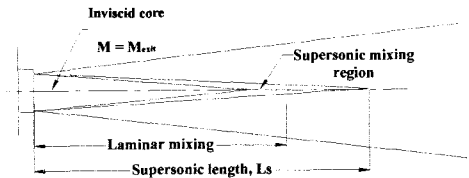


Fig. 3 Schematic diagram of microjet flow

Fig. 3 은 노즐 출구에서 적정팽창(correctly expanded flow)을 하는 마이크로 제트 유동장의 개략도를 나타낸 그림이다. 제트유동이 노즐 출구에서 적정팽창을 하는 경우, 제트내부에 충격파들은 발생하지 않게 되며, 노즐 출구면에서 발생하는 균일 속도가 유지되는 core 부분이 하류까지 지속된다. 이러한 제트는 주위의 유체와 혼합하게 되므로, 제트 core 부분은 점차 축소되어, 제트내부에서 균일속도가 더 이상 존재하지 않게 된다. 그러나 유동은 초음속 상태로 혼합을 계속하여, 노즐 출구로부터 L_s 의 거리⁽¹²⁾에서 아음속 제트로 천이한다.

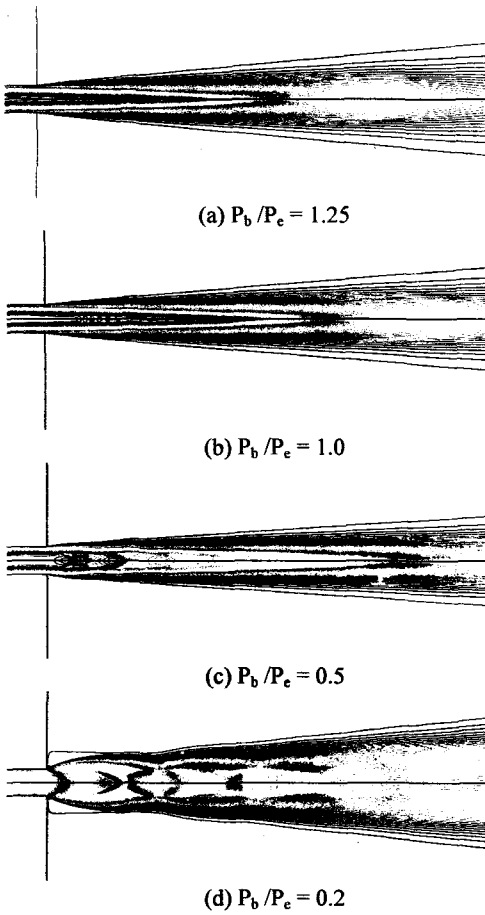


Fig. 4 Total pressure contours of sonic microjet

Fig. 4 에는 음속 노즐에 대하여, 노즐 출구에서 정압을 P_e , 노즐의 배압을 P_b 로 하여, P_b/P_e 의 값을 변화시킨 경우의 등전압력선도를 나타내었다. 따라서, $P_b/P_e=1.0$ 은 음속노즐에서 유동이 적정팽창(correct expansion)되는 경우를, $P_b/P_e<1.0$ 은 부족팽창(under-expansion)을 그리고 $P_b/P_e>1.0$ 은 과팽창(over-expansion)을 의미한다. 그림(a)에서 높은 전압력 분포는 제트 중심축 부근에서 발생하며, 이 부분은 하류로 갈수록 축소되며, 전체 제트유동은 확산의 효과로 제트 폭이 증가된다. 제트 출구 부근에서 제트유동은 주위 유체와 층류혼합을 하는 것으로 보이며, 제트 코어의 길이는 노즐 출구 직경의 수배의 거리에 있는 것으로 보인다. 이 경우 노즐 출구에서 제트는 약한 과팽창 상태이다.

그림(b)는 노즐출구에서 제트가 적정팽창을 하는 경우로, 전압력의 분포는 Fig. 3의 전형적인 모식도와 매우 유사하다. 그림(c)와 (d)는 노즐 출구에서 제트가 부족팽창을 하는 경우이며, 제트 내부에는 다수의 충격파 시스템이 발생한다. 이 경

우 적정팽창 제트에서 발생하는 제트 코어 영역은 더 이상 존재하지 않게 된다.

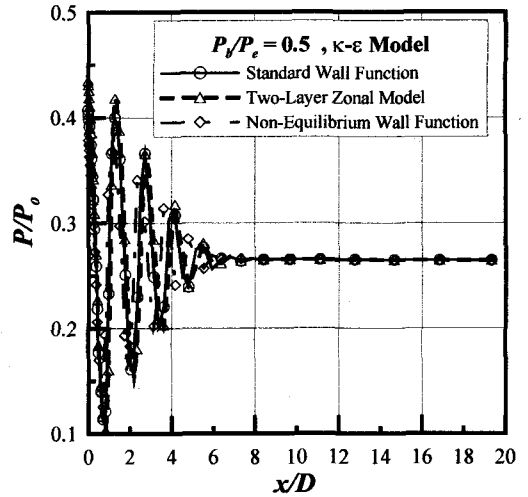


Fig. 5 Static pressure distributions along the axis of sonic microjet

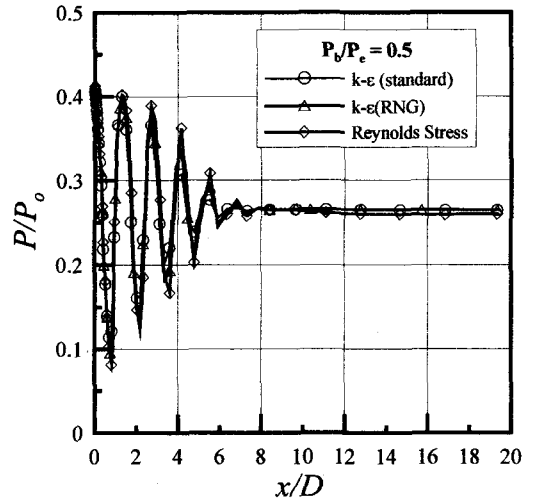


Fig. 6 Static pressure distributions along the axis of sonic microjet

Fig. 5 는 수치계산에서 사용된 벽함수가 음속노즐의 축을 따르는 정압 분포에 미치는 영향을 알아보기 위하여 $P_b/P_e = 0.5$, standard $k-\epsilon$ Model를 나타내었다. 횡축은 노즐 출구에서부터 중심 축을 따르는 거리 x 를 노즐의 지름 D 로 무차원화 하였으며, 종축은 축 방향의 국소정압 P 를 노즐 입구 전압 P_0 로 무차원화 하였다. 그림에서 노즐 출

구로 방출되는 제트내부의 팽창과 압축과의 영향으로 팽창과 압축을 반복하고 있으며, 벽함수의 변화에 상관없이 거의 일정한 경향을 나타내고 있다. 따라서 벽함수가 sonic microjet의 유동장에 미치는 영향은 무시할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 6에는 유동해석에 적용된 난류모델이 음속 제트 유동장에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 3가지의 난류모델을 사용한 경우, 압력비 P_b/P_e 가 0.5일 때 노즐 축을 따르는 정압 분포를 나타내었다. 수치계산에 적용된 난류모델이 다른 경우, 제트내부에서 발생하는 팽창과 압축의 주기 등의 주요특성은 유사하나, 난류모델이 팽창과 압축의 강도에는 다소 영향을 미치는 것으로 보인다. 예를 들면 Reynolds stress 모델은 팽창과 압축의 강도를 가장 강하게 예측하는 것으로 보인다.

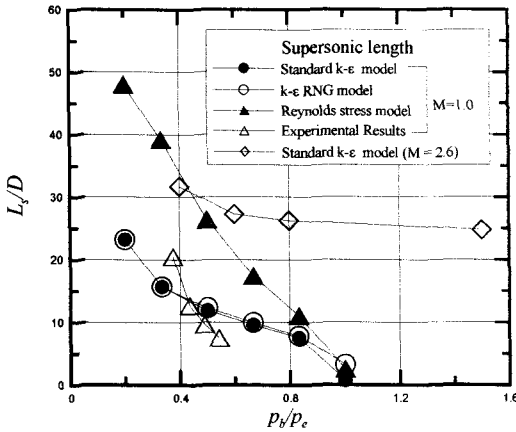


Fig. 7 Supersonic length of sonic/supersonic microjet

Fig. 7에는 압력비 P_b/P_e 의 변화에 따른 제트의 Supersonic length의 변화를 각각의 난류모델에 대하여 나타내었으며 실험값⁽¹⁰⁾과 비교하였다. 그림으로부터 L_s 는 압력비가 감소하여 부족팽창 됨에 따라서 증가하고 있으며, Reynolds stress 모델을 제외한 다른 두 난류모델과 실험 데이터는 비교적 잘 일치하고 있다.

한편 일반적으로 초음속 제트 유동의 실제 전압(total pressure)을 측정하는 것은 용이하지 않으며, 대개의 경우 전압관(pitot probe)으로 측정된 압력값, 즉 충돌전압(impact pressure)을 유동의 실제 전압으로 보정하지 않고 사용한다. 충돌압력을 유동의 전압력으로 환산하기 위해서는 전압관 상류의 국소 마하수가 알려져야 하며, 이 경우 전압관 바로 상류에 수직충격과 발생한다고 가정하여, 수직충격과에 의한 압력손실만을 고려한다. 그러나 실제의 전압과 상류에서 발생하는 수직충격과 바로 하류의 유동이 전압과 내부의 어떤 정체상태까지

감속되는 과정에서 부가적인 손실이 발생하게 될 뿐만 아니라, 전압관 상류에서 발생하는 충격과는 거의 항상 시간변동을 하게 된다. 따라서 수치계산에서 얻어지는 전압력을 실험값과 비교할 목적으로 충돌압력을 환산하는 경우에는 다소간의 오차가 발생하게 된다는 것에 주의할 필요로 한다. 본 연구에서 수치계산결과로부터 얻어진 국소마하수 M_1 을 이용하여 다음의 식을 이용하여 충돌전압 P_{it} 을 구하였다.

$$P_{it} = \frac{P_{it}}{P_{o1}} P_{o1} \quad (1)$$

$$= \left\{ \frac{(\gamma+1)M_1^2}{(\gamma-1)M_1^2+2} \right\}^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left\{ \frac{\gamma+1}{2\gamma M_1^2 - (\gamma-1)} \right\}^{\frac{1}{\gamma-1}} P_{o1}$$

위의 식에서 우변의 첫번째와 두번째 항은 전압관 상류에서 발생하는 수직충격과 전후의 전압력비이며, γ 는 기체의 비열비, 그리고 P_{o1} 는 실제유동의 전압이다.

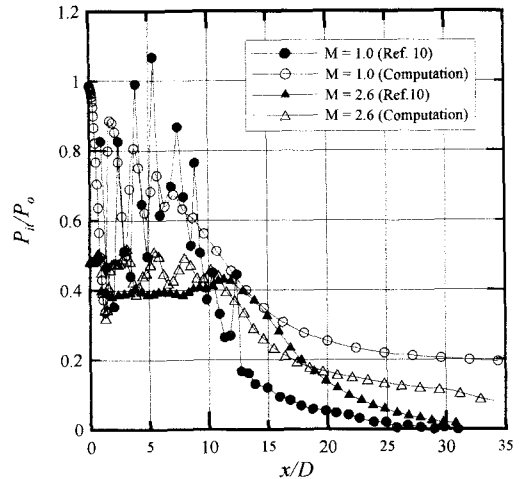


Fig. 8 Impact pressure distributions along the axis for the sonic and supersonic nozzles

Fig. 8에는 마하수 $M=2.6$ 인 적정팽창($P_b/P_e=1.0$) 초음속노즐과 마하수 $M=1.0$ 인 부족팽창($P_b/P_e=0.3$) 음속노즐의 경우, 제트 축 방향에서 발생하는 충돌압을 실험값⁽¹⁰⁾과 비교하였다. 그림에서 $M=2.6$ 인 초음속노즐의 경우 노즐 출구로부터 약 $x/D=12$ 까지의 영역에서 충돌전압 P_{it} 은 증가와 감소를 반복하면서 변동을 하는 것으로 보이며, $x/D > 12$ 에서는 거리의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타난다. 또, $M=1.0$ 인 음속노즐인 경우 충돌압력은 초음속노즐에 비해 높으며, 변동 또한 큰 것으로 보인다. 그림의 실험값과 수치계산 결과의 비교로부터, 본 수치계산은 실험결과와 단지 정성적으로 유사한 경향을 나타낸다.

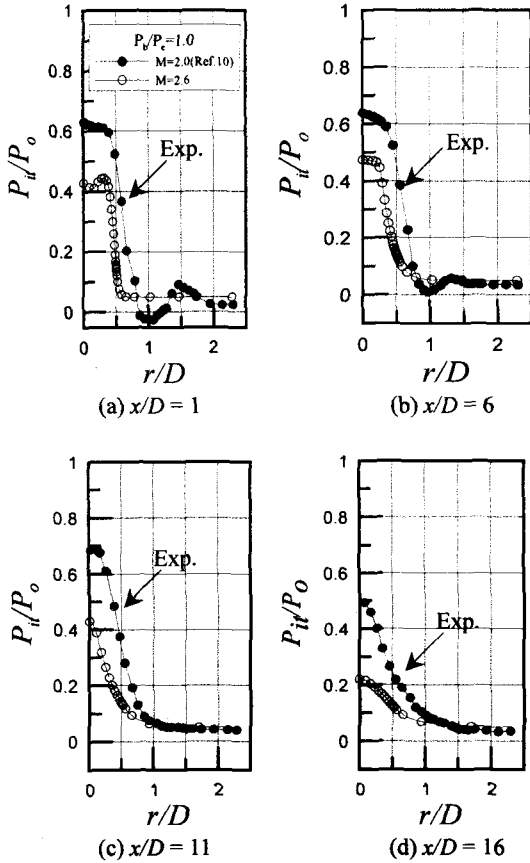


Fig. 9 Radial impact pressure distributions at several axial locations (supersonic nozzle)

Fig. 9는 초음속 노즐의 경우에 대하여, 노즐출구에서 하류방향으로의 무차원 거리 $x/D=1, 6, 11, 16$ 되는 지점에 대하여 노즐 중심축에서 반경방향의 충돌압력을 입구전압으로 무차원화 하여 나타낸 그림이다. 그림에서 ●는 문헌(10)의 실험값이며 ○는 수치해석 결과이다. 실험 데이터는 $M=2.0, P_b/P_e=1.0$ 일 때이며 수치 해석 데이터는 $M=2.6, P_b/P_e=1.0$ 의 경우이다. 그림에서 M 이 서로 다르므로 실험값과 수치해석 결과의 정량적인 비교는 곤란하나 정성적으로 경향의 일치성을 보이고 있다. 또, 초음속 자유제트 유동에서의 전압분포 경향과는 달리, Jet boundary 근처에서 급격한 압력구배를 보여주고 있다. 마하수가 클수록 제트내부에 발생하는 충격파 등의 영향으로 인한 전압손실이 더 많이 발생한다는 것을 알 수 있다.

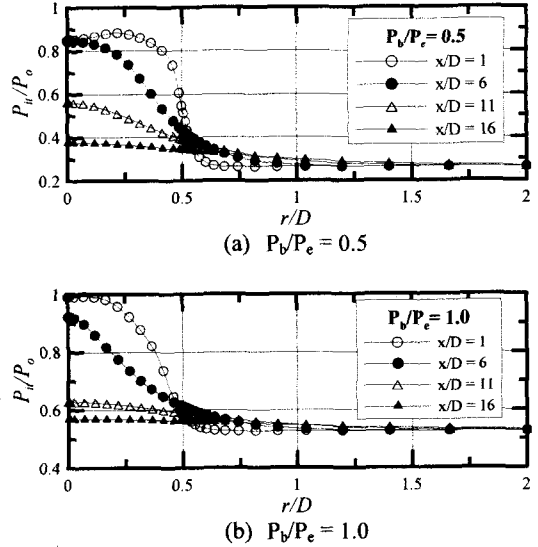


Fig. 10 Radial impact pressure distributions at several axial locations (sonic nozzle)

Fig. 10에는 음속 노즐의 경우, 노즐 출구에서부터 무차원 거리 $x/D=1, 6, 11, 16$ 되는 지점에서 반경방향의 충돌압력을 입구전압으로 무차원화 하여 나타내었다. 그림에서 $P_b/P_e=0.5$ 의 부족팽창의 경우 x/D 가 증가할수록 노즐 중심축에서 P_i 는 감소하며, 제트폭은 증가한다는 것을 알 수 있다. 또 $P_b/P_e=1.0$ 인 적정 팽창의 경우에도 유사한 경향을 나타내지만, 동일한 x/D 에 대해서 $P_b/P_e=0.5$ 인 경우보다 $P_b/P_e=1.0$ 인 적정팽창의 제트의 경우가 더 높은 P_i 를 가진다는 것을 알 수 있다.

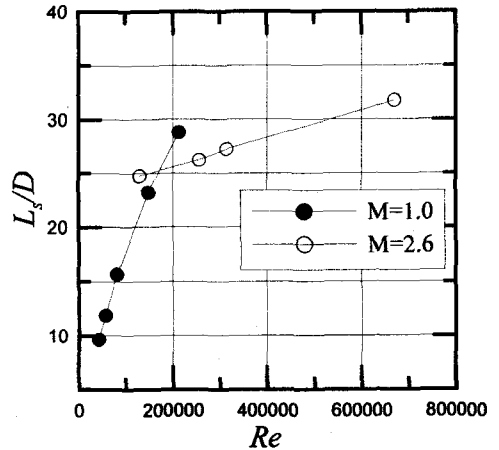


Fig. 11 Relationship between Reynolds number and supersonic length

Fig. 11에는 음속 노즐의 경우에 있어서 레이놀즈 수 Re 가 L_s 에 미치는 영향을 나타내었다. 그림

에서 레이놀즈수 Re 는 노즐출구에서 발생하는 질량유속(mass flux)과 노즐출구 직경을 특성길이로 하여 산출하였다. $M=1.0$ 인 경우 레이놀즈수가 증가함에 따라 L_s 는 급격하게 증가하는 경향을 보이며, $M=2.6$ 인 경우에도 이와 유사한 경향을 보인다. 그러나 $M=1.0$ 과 $M=2.6$ 의 두 경우를 비교하면, 동일한 Re 수에 대하여 L_s 는 $M=1.0$ 인 경우보다 $M=2.6$ 인 경우가 더 크다는 것을 알 수 있다. 한편 Re 수의 변화에 따른 L_s 의 의존성은 $M=1.0$ 인 음속 노즐의 경우가 더 뚜렷하게 나타나는 것으로 보인다. 따라서 Re 수가 L_s/D 에 미치는 영향은 초음속 마이크로 제트에 비해 음속마이크로 제트가 더 큰 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 직경이 매우 작은 음속/초음속 마이크로 노즐에 관한 기초적인 유동특성을 이해할 목적으로 음속/초음속 노즐에 대하여 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식에 여러형태의 난류모델과 wall function 을 적용한 수치해석을 수행하였으며 실험값과 비교하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 마이크로 노즐의 수치해석에 있어서 wall function 은 유동장에 큰 영향을 미치지 않으나 난류모델은 제트내부의 팽창과 압축의 강도에 다소 영향을 미친다. 특히 Reynolds stress 모델의 경우 팽창과 압축의 강도가 가장 강하게 나타난다.
- (2) 부속팽창인 경우와 적정팽창인 경우 모두 x/D 가 증가할수록 노즐 중심축에서 P_{11} 는 감소하며 제트폭은 증가하지만, 동일한 x/D 에 대하여 부속팽창인 경우와 적정팽창인 경우의 P_{11} 를 비교할 때, 적정팽창 제트의 P_{11} 가 더 강하게 나타난다.
- (3) $M=2.6$ 인 초음속노즐의 경우 노즐 출구로부터 약 $x/D=12$ 까지의 영역에서 충돌전압 P_{11} 는 증가와 감소를 반복하면서 변동을 하지만, $x/D > 12$ 에서는 거리의 증가에 따라 감소하며 $M=1.0$ 인 음속노즐인 경우 충돌압력은 초음속 노즐에 비해 높으며, 변동 또한 크게 나타난다.
- (4) Re 와 L_s 의 관계에 있어서, 동일한 Re 수에 대하여 L_s 는 $M=1.0$ 인 경우보다 $M=2.6$ 인 경우가 더 크게 나타났다. 또한 Re 수가 L_s/D 에 미치는 영향은 초음속 마이크로 제트에 비해 음속 마이크로 제트가 더 크다.

이 논문은 2001년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Hagen, O.F., 1974, "Molecular Beams and Low Density Gas Dynamics," Ed. by P.P. Wegener, Dekker Inc.
- (2) 김희동, 이종수, 1996, "가스 미립화용 노즐로부터 방출되는 초음속 분류에 관한 실험적 연구 (I)," 대한기계학회논문집(B), 제 20 권, 제 2 호, pp. 697-709.
- (3) Quinlan, N. J., Kendall, M. A. F., Bellhouse, B. J., Ainsworth, R. W., 2000, "Investigations of Gas and Particle Dynamics in First Generation Needle-Free Drug Delivery Devices," Shock Waves Journal, Vol. 10, pp. 395-401.
- (4) Burkoth, T.L., Bellhouse, B.J., Hewson, G., Longridge, D.J., Muddle, A.G. and Sarphie, D.F., 1999, "Transdermal and transmucosal powdered drug delivery," Critical Reviews in Therapeutic Drug Carrier Systems, Vol. 16, pp. 331-384.
- (5) Fox, J.H., 1974, "On the Structure of Jet Plums," AIAA Journal, Vol. 12, pp. 105-107.
- (6) Hu, T. and McLaughlin, D., 1990, "Flow and Acoustic Properties of Low Reynolds Number Underexpanded Supersonic Jets," Journal of Sound and Vibration, Vol. 141, pp. 485-505.
- (7) Love, E.S., Grigsby, C.E., Lee, L.P. and Woodling, M.J., 1959, "Experimental and Theoretical Studies of Axisymmetric Free Jet," NASA TR R-6.
- (8) Amson, T. and Nicholls, J., 1959, "On the Structure of Jets from Highly Underexpanded Nozzles into Still Air," Journal of Aero space Science, Jan, pp. 16-24.
- (9) Kendall, M.A.F., Quinlan, N.J., Thorpe, S.J., Ainsworth, R.W. and Bellhouse, B.J., 1999, "The Gas-Particle Dynamics of a High-Speed Needle-Free Drug Delivery System," Shock Waves Journal, pp. 605-610.
- (10) Scroggs, S.D. and Settles, G.S., 1996, "An Experimental Study of Supersonic Microjets," Experiments in Fluids, Vol. 21, pp. 401-409.
- (11) 이권희, 구병수, 김희동, 2001, "가스절단용 초음속 제트유동에 관한 기초적 연구," 대한기계학회 논문집(B), 제 25 권, 제 6 호, pp. 837-844.
- (12) Shirie, J.W. and Seubold, J.G., 1967, "Length of the Supersonic Core in High-Speed Jets," AIAA Journal, Vol. 5, pp. 2062-2064.