

## 초음속 마이크로 제트 유동에 관한 기초적 연구

정미선\* · 김현섭\* · 김희동\*\* · 박종호\*\*\*

### A Fundamental Study of the Supersonic Microjet Flow

Mi-Seon Jeong\* · Hyun-Sub Kim\* and Heuy-Dong Kim\*\* · Jong-Ho Park\*\*\*

#### ABSTRACT

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 between 0.2 and 1.25 to obtain both the under- and over-expanded flows at the exit of the micronozzle. and Reynolds number  $Re$  is changed between 600 to 40000. For both laminar and turbulent microjet flows, 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.

#### 초 록

본 연구에서는 초음속 및 음속 마이크로 제트 유동의 특성을 파악하기 위해서 2차원 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용한 수치해석을 수행하였다. 수치해석에서는 여러 형태의 난류모델을 적용하여 실험결과와 비교하였으며, 부족팽창과 과팽창 상태를 얻기 위하여 노즐 출구의 압력비  $P_0/P_e$ 를 0.2~1.25로 변화시켰다. 또, 레이놀즈 수  $Re$ 를 약600~40000까지의 범위에서 변화시켜,  $P_0/P_e$ 와  $Re$ 가 마이크로 제트 유동장에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구로부터 층류 제트의 특성은 난류 제트와는 달리 레이놀즈 수의 의존성이 크다는 것을 알았다.

**Key Words** : Compressible Flow(압축성 유체), Shock Wave(충격파), Supersoni Microjet(초음속 마이크로 제트), Correctly-expanded Flow(적정 팽창 유동), Laminar Flow(층류 유동), Turbulent Flow(난류 유동)

• 2001년 12월 12일 접수 ~ 2002년 3월 18일 심사완료

\* 학생회원, 안동대학교 기계공학과 대학원

주연락저자, E-mail : jeongmiseon@hanmail.net 경북 안동시 송천동 388번지

\*\* 정회원, 안동대학교 기계공학부

\*\*\* 중신회원, 충남대학교 기계공학과

## 1. 서 론

최근에는 직경이 매우 작은 노즐로부터 방출되는 제트유동이 여러 기계가공 분야뿐만 아니라 의공학 분야에서도 광범위하게 활용되고 있다. 예를 들면 마이크로 제트는 TV브라운관이나 각종 액정의 마스크링, 분자빔 장치, 각종 가공물의 크리닝, 반도체 제작공정, 각종 마이크로 장치 등 공학 분야에 광범위하게 활용되고 있다(1,2). 최근 가축이나 인체의 질병 치료에 주사바늘의 사용이 감염 부작용을 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 2배를 증가하게 되면, 노즐 출구에서 유동은 초음속으로 될 수 있다<sup>(5)</sup>. 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 특성 길이로 하는 레이놀즈 수는 수백에서 수천정도<sup>(6)</sup>로, 제트유동은 층류에서 난류로 천이할 수 있을 뿐만 아니라 제트내부에서 발생하는 충격파 시스템이나 제트감쇠 등의 중요 유동특성이 종래 알려져 온 초음속 자유제트의 구조<sup>(7,8,9)</sup>와는 다를 것이라고 예상된다.

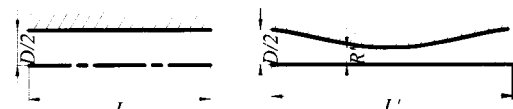
현재까지 이와 같은 초음속 마이크로 제트 유동특성은 잘 알려져 있지 않으며, 이에 관한 연구는 매우 부진한 실정에 있다. 이것은 초음속 마이크로 제트 유동을 실험적으로 측정하는 것은 극히 곤란하며, 노즐의 제작 또한 용이하지 않기 때문이다. 더욱이 고도로 정밀한 가공을 한다고 하더라도 노즐 벽면의 표면조도는 노즐 직경의 수 퍼센트 내지 수십 퍼센트가 될 수 있으므로, 노즐 출구에서 발생하는 제트유동은 사용되는 노즐에 따라 달라지게 될 수 있다.

마이크로 제트 유동의 경우, 제트 유동을 지배하는 유동의 특성길이가 매우 작으므로 제트의 공급압력이 비교적 낮은 경우의 제트 유동은 층류 상태로 될 것이 예상되며, 제트의 공급압력이 증가하는 경우의 제트유동은 난류로 천이하게 될 것으로 판단된다. 이 경우 마이크로제트 유동의 특성은 층류나 혹은 난류냐에 따라 크게 변화하게 되지만, 이에 대한 구체적인 연구 사례는 드물다.

본 연구에서는 Navier-Stokes방정식을 이용한 수치해석을 수행하여, 초음속 마이크로 제트유동의 상세 구조를 조사하였다. 수치해석에서는 여러 형태의 난류모델을 적용하여, 유용한 실험결과<sup>(10)</sup>와 비교하였으며, 노즐의 압력비 및 레이놀즈 수가 제트 내부에서 발생하는 압력분포와 유동장 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. 수치계산 영역 및 경계조건

본 수치해석에서는 축대칭 압축성 Navier - Stokes 방정식을 유한체적법으로 이산화하여, 공간항에 대해서는 풍상차분법을, 그리고 시간항의 적분은 다단계 Runge-Kutta법을 적용하였다. 직경이 매우 작은 노즐의 경우 벽면근처에서 유동의 수치해에 미치는 난류모델의 영향이 나타날 수 있으므로, 난류 모델을 변화시켜 수치해석을 수행하였으며, 층류 유동에 대한 수치해와 비교하였다.



(a) Sonic nozzle (b) Supersonic nozzle

Fig. 1 Micro nozzle geometries used in computation ( $D=1.2\text{mm}$ ,  $2R'=D'=0.705\text{mm}$ ,  $L=15\text{mm}$ ,  $L'=18\text{mm}$ )

Fig. 1은 본 수치해석에 적용된 음속/초음속 마이크로 노즐을 나타낸 개략도이다. 본 연구에 적용된 음속 노즐의 직경은 1.2mm이며, 초음속 노즐의 경우, 노즐 목의 직경은 0.705mm이며, 노즐의 축소부와 확대부의 길이  $L'$ 은 18mm이다<sup>(10)</sup>. 본 수치해석으로부터 얻은 결과를 검증하기 위하여 문헌(10)의 실험결과를 인용하였다.

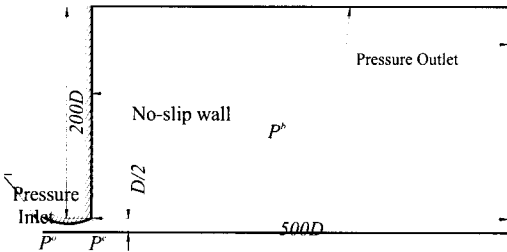


Fig. 2 Computational area and boundary conditions

Fig. 2는 수치해석에 적용된 마이크로 제트 유동의 계산영역과 경계조건을 나타내었다. 계산영역으로는 노즐의 출구를 기준으로 길이방향으로 500D, 반경방향으로 200D의 계산영역을 설정하여 수치해석을 수행하였다. 경계조건으로는 노즐 출구에서 유입조건으로 Pressure inlet, 하류경계에는 유출조건으로 Pressure outlet조건을 적용하였으며 모든 고체벽면에 대하여 단열 no-slip조건을 적용하였다.

본 연구에서 적용된 마이크로 노즐의 유동장은 중심축에 대하여 대칭이므로 중심축에 대하여 상반부만을 계산영역으로 설정하였다. 수치해석에 사용된 음속 및 초음속 노즐의 격자수는 약 5만개의 정렬 격자로, 벽면의 경계층이 발달하는 부분과 출구 주위의 충격파가 발생하는 곳에 격자점을 집중시켰다.

본 수치해석에서 얻은 수치해의 수렴판정을 위하여 질량, 운동량, 에너지,  $k$ 와  $\epsilon$ 의 잔차를  $10^{-4}$  이하로 설정하였으며 노즐 입구와 출구에서의 질량유량의 변화를 조사하여, 질량유량의 합이 0.5%이하로 되는 조건을 수치 해가 수렴한 것으로 판정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 노즐 출구에서 적정팽창(correctly expanded flow)을 하는 마이크로 제트 유동장의 개략도를 나타낸 그림이다. 제트유동이 노즐 출구에서 적정팽창을 하는 경우, 제트내부에 충격파들은 발생하지 않으며, 노즐 출구면에서 발생하는 균일 속도가 유지되는 core부분이 하류까지 지속된다. 이러한 제트는 주위의 유체와 혼합하게 되므로, 제트 core부분은 점차 축소되어, 제트내부에서 균일 속도가 더 이상 존재하지 않게 된다. 그러나 유동은 초음속 상태로 혼합을 계속하며, 노즐 출구로부터  $L_s$ 의 거리<sup>(11)</sup>에서 아음속 제트로 천이하게 된다.

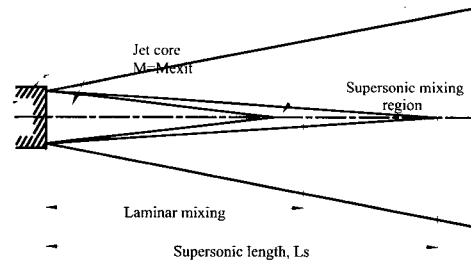


Fig. 3 Schematic diagram of correctly expanded microjet flow

Fig. 4는 음속 노즐의 경우,  $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하여  $P_b/P_e$ 의 값을 변화시켰을 때의 등전압력 선도를 나타내었다. 여기에서  $P_b$ 는 제트 유동의 배압이며,  $P_e$ 는 노즐 출구면에서 발생하는 유동의 정압이다. Fig. 4(a)는 노즐 출구에서 약한 과팽창 상태에 있는 유동을 나타낸 것으로, 제트 중심축 부근에서 발생한 높은 전압력 영역이 하류로 갈수록 축소되고 있다. 제트 코어의 길이는 노즐 출구 직경의 수배의 거리까지 유지되고 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 압력비  $P_b/P_e = 1$ 인 적정팽창을 하는 경우의 제트유동을 나타낸 것으로, Fig. 3의 모식도에 표시한 제트코어, 초음속 길이, 초음속 혼합장 등이 잘 나타나 있다. Fig. 4(c)와 (d)는  $P_b/P_e$ 가 1보다 작은 노즐 출구에서 제트 유동이 부족팽창을 하는 경우를 나타낸 것으로, 제트 내부에 다수의 충격

격파 시스템이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또 이의 영향으로 적정팽창 제트에서 발생하는 제트 코어 영역은 더 이상 존재하지 않고 있음을 확인할 수 있다.

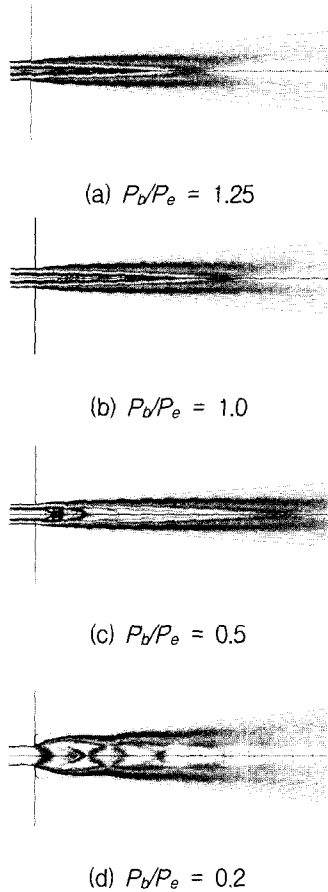


Fig. 4 Total pressure contour of sonic microjet (k-ε turbulent model)

Fig. 5는 적정팽창을 하는 초음속 마이크로 제트 유동장에 대하여 레이놀즈 수를 변화시킨 경우의 등마하수 선도를 나타내었다. Fig. 5(a)의  $Re < 10^3$  경우 제트유동은 노즐출구에서 하류방향으로 갈수록 점차 확대되며, 제트의 폭 또한 상당히 넓게 나타난다. 그러나  $Re$ 가 증가함에 따라서 제트폭의 변화정도는 감소하고 제트유동은 하류방향으로 거의 일정한 형태를 유지한다. 이것은 레이놀즈 수가 작을수록 점성의 영향이 크

게 나타나기 때문이다.

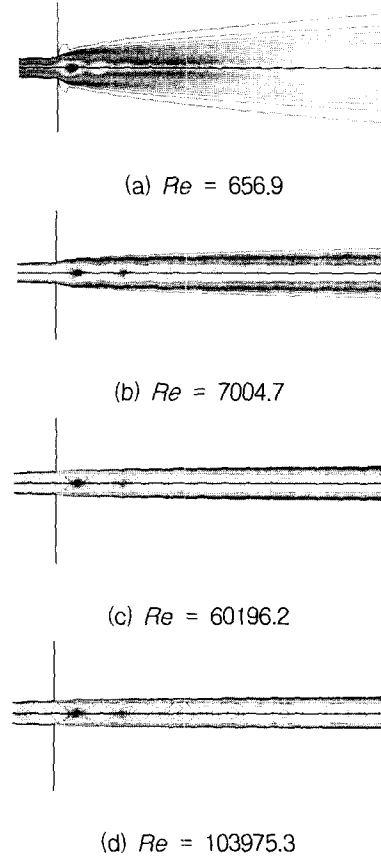


Fig. 5 Mach number contour of supersonic microjet ( $M=2.6$ ,  $P_b/P_e=1.0$ ,  $P_b/P_e=0.0501$ )

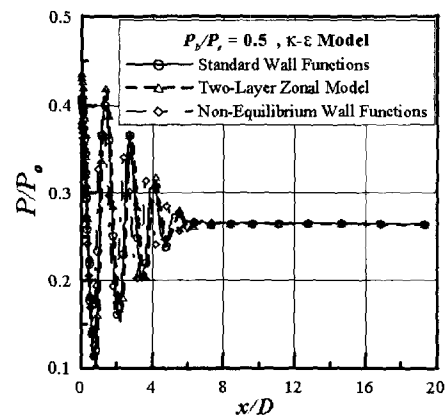


Fig. 6 Static pressure distributions along the axis of sonic microjet

Fig. 6은  $P_b/P_e=0.5$ 이고  $k-\epsilon$ 난류모델인 경우,

수치해석에 사용된 벽함수가 음속 마이크로 제트 유동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 노즐 축을 따르는 정압 분포를 나타내었다. 그림으로부터 제트유동은 팽창과 압축과의 영향으로 팽창과 압축을 반복하고 있으며, 이러한 경향은 벽함수의 변화와 거의 무관하다는 것을 알 수 있다.

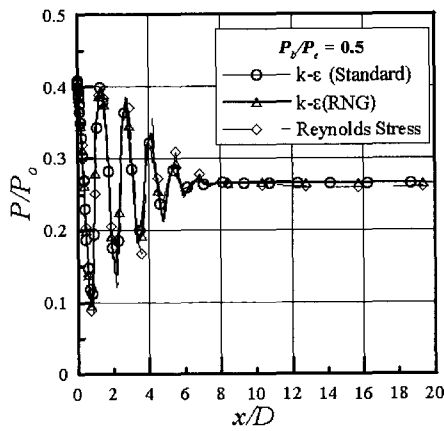


Fig. 7 Static pressure distributions along the axis of sonic micro jet

Fig. 7은  $P_t/P_e=0.5$ 인 음속노즐의 경우, 유동해석에 사용된 난류모델이 제트 유동장에 미치는 영향을 알아보기 위해 난류모델을 변화시켜 노즐축을 따르는 정압분포를 나타내었다. 본 수치해석에 사용된 모든 난류 모델에 대해서, 제트 내부에서 발생하는 팽창과 압축의 주기 등의 주요 특성은 유사하나, 난류모델이 팽창과 압축의 강도에는 다소 영향을 미친다는 것을 알았다.

Fig. 8은 적정팽창( $P_t/P_e=1.0$ )상태인 초음속노즐 ( $M=2.6$ )과 부족팽창( $P_t/P_e=0.3$ )상태인 음속노즐 ( $M=1.0$ )의 경우, 노즐 중심축을 따르는 총돌 전압<sup>(12)</sup>  $P_{t1}$ 의 분포를 나타낸 것으로 실험값과 비교하였다. 초음속 노즐의 경우 총돌전압이 감소와 증가를 반복하면서 변동을 하다가  $x/D>12$ 인 지점에서는  $x/D$ 의 증가에 따라 단조롭게 감소한다. 또 음속 노즐의 경우, 총돌압력은 초음속 노즐의 경우보다 높게 나타나고 있으며, 변

동은 크게 나타나고 있다. 또한, 실험값과 수치해석결과가 정성적으로 유사한 경향을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

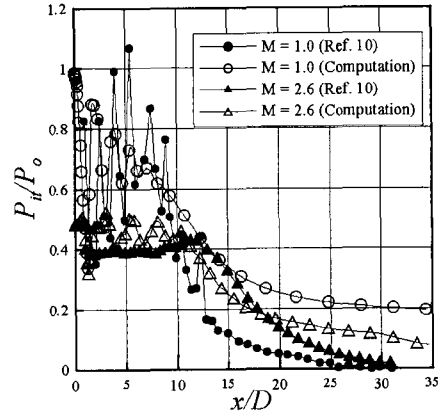


Fig. 8 Impact pressure distributions along the axis (  $k-\epsilon$  turbulent model)

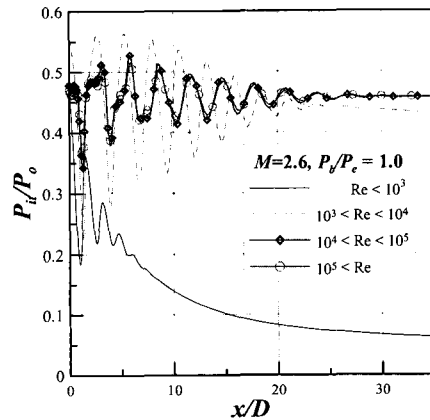


Fig. 9 Impact pressure distributions along the axis (laminar jet)

Fig. 9는 적정팽창인 층류 유동의 초음속 마이크로 제트 유동장에 대하여 레이놀즈 수를 변화시켰을 때 노즐 축방향을 따르는 총돌전압 분포를 나타내었다.  $Re<10^3$ 인 경우, 총돌전압이 증가와 감소를 반복하며 변동을 하지만,  $x/D$ 가 증가함에 따라 단조롭게 감소한다. 레이놀즈 수가 증가하면,  $P_{t1}/P_0$ 의 변동폭은 작아지며 일정한 형

태로 수렴한다는 것을 알 수 있다.

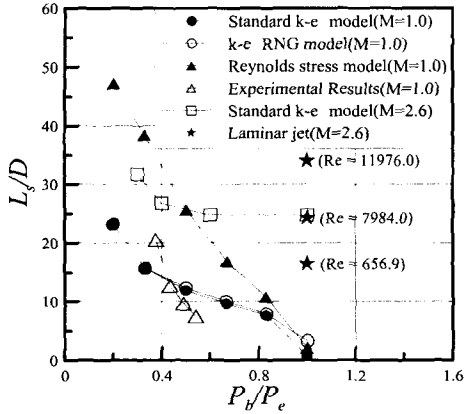


Fig. 10 Supersonic length of sonic and supersonic micro jet

Fig. 10은 음속 및 초음속 마이크로 유동장의 압력비( $P_0/P_e$ ) 변화에 따른 초음속 길이의 변화를 각각의 난류모델과 실험값<sup>(10)</sup>을 비교하여 나타내었다. 그림으로부터 무차원 초음속 길이  $L/D$ 는 압력비  $P_0/P_e$ 가 감소함에 따라 증가한다는 것을 알 수 있으며, 실험값과 대체로 잘 일치한다. 초음속 노즐에서 층류 유동의 경우, 동일한 압력비에 대해서 레이놀즈 수가 증가함에 따라 초음속 길이가 증가한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 층류 유동과 난류 모델의 경우, 레이놀즈 수의 변화에 따른 초음속 길이의 변화를 나타내었다. 층류 제트의 경우, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 초음속 길이는 증가하며, 실선으로 표시된 이론값<sup>(11)</sup>은 속도가 균일하게 유지되는 제트코어의 길이를 나타낸 것으로 수치해석 결과와 정량적으로 비교하는 것은 곤란하지만 정성적으로는 잘 일치하고 있다. 난류 제트의 경우, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 무차원 초음속 길이  $L/D$ 는 거의 일정하게 나타나며, 층류 제트에 비하여 난류 제트의 무차원 초음속 길이  $L/D$ 가 상당히 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 층류 제트가 난류 제트에 비해 레이놀즈 수에 강하게 의존한다는 것을 알 수 있다.

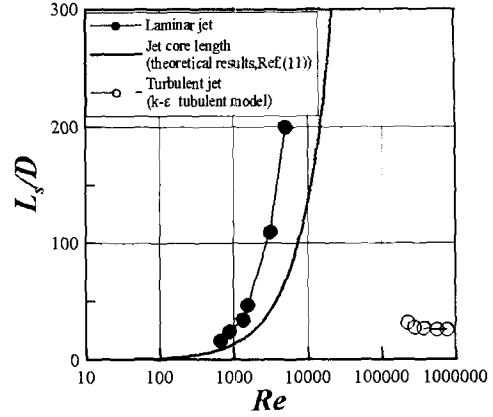


Fig. 11 Relationships between Reynolds number and supersonic length

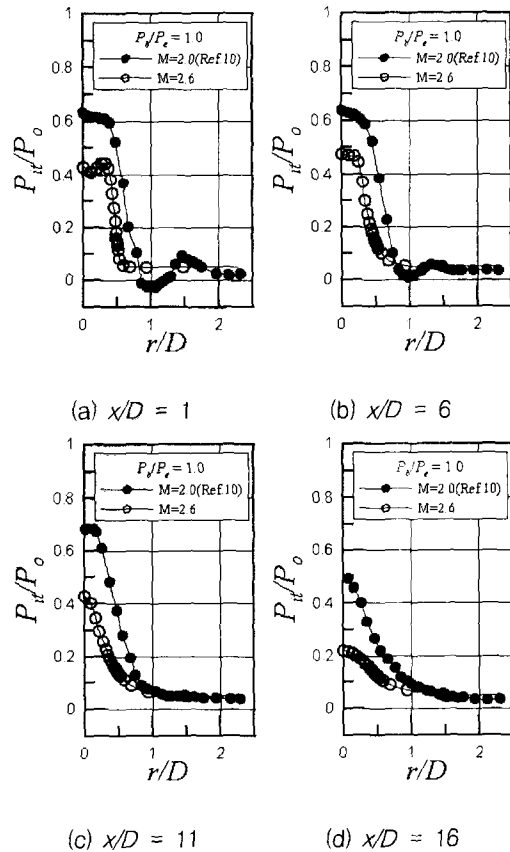


Fig. 12 Radial impact pressure distributions at the several axial locations (supersonic nozzle)

Fig. 12는  $k-\epsilon$ 난류모델을 사용한 경우, 노즐 출구에서 하류방향으로  $x/D$ 가 1, 6, 11, 16인 지점에서의 반경반향에 대한 충돌전압 분포를 나타내었다. 그림으로부터 Jet 경계 근처에서 급격한 압력변화가 발생하며,  $r/D$ 가 증가함에 따라 충돌전압은 감소한다. 일정한  $x/D$ 에 대해서 마하수가 커질수록 전압 손실이 더 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

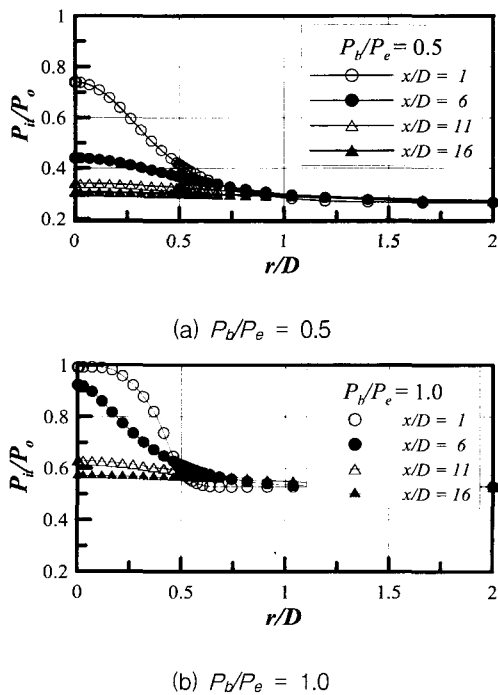


Fig. 13 Radial impact pressure distributions at the several axial locations (sonic nozzle)

Fig. 13은 음속노즐의 경우, 노즐출구로부터 하류방향으로  $x/D$ 가 1, 6, 11, 16인 지점에서 반경반향에 대한 충돌전압 분포를 나타내었다. 그림(a)의 부족팽창인 경우,  $x/D$ 의 값이 증가할수록 충돌전압은 감소하며 제트폭은 증가함을 알 수 있다. 그림(b)의 적정팽창의 경우에서도 충돌전압 분포는 부족팽창의 경우와 유사한 경향을 나타내며, 동일한  $x/D$ 에 대해서 높은 충돌전압 분포를 나타내고 있다.

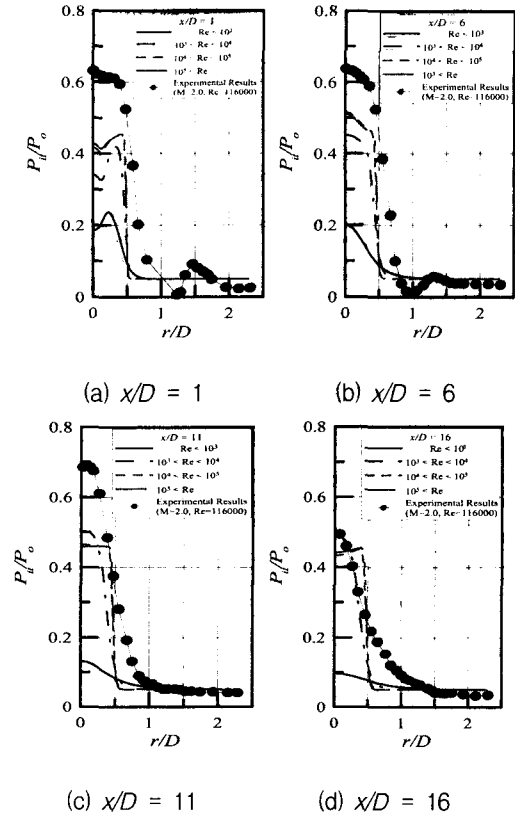


Fig. 14 Radial impact pressure distributions at the several axial locations (supersonic nozzle)

Fig. 14는 층류 유동일 때, 초음속 노즐 ( $M=2.6$ )에서 레이놀즈 수의 변화에 따른 노즐 출구로부터 하류방향으로  $x/D$ 가 1, 6, 11, 16인 지점에서의 반경반향에 대한 충돌전압 분포를 나타내었다. 그림(a)와 (b)에서는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 충돌전압은 증가하고 있으며, 그림(c)와 (d)에서는  $10^3 < Re < 10^4$ 의 범위에서 충돌전압이 가장 크게 나타나고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Navier-Stokes 방정식을 이용한 수치해석을 통하여 초음속 및 음속 마이크로 제트 유동 특성을 조사하였다. 수치해석 결과로

부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 수치해석에 있어서 벽함수는 제트 유동장에 큰 영향을 미치지 않으며, 난류모델은 제트 내부의 압축과 팽창의 강도에 다소 영향을 미친다.
- (2) 초음속 노즐의 경우, 노즐출구로부터 노즐 중심축에서  $x/D < 12$  지점까지는 충돌전압이 증가와 감소를 반복하지만  $x/D > 12$  인 경우,  $x/D$ 가 증가함에 따라 충돌전압은 감소한다. 또 음속 노즐의 경우, 일정한 거리에 대한 충돌전압이 초음속 노즐에 비해 더 높게 나타나며 충돌전압의 변동폭도 크게 나타난다.
- (3) 부족팽창인 경우와 적정팽창인 경우 모두  $x/D$ 가 증가할수록 노즐 중심축에서 충돌전압은 감소하며 제트폭은 커진다.
- (4) 층류 제트의 경우 난류제트에 비해 Reynolds 수의 영향을 크게 받으며, Reynolds 수가 어느 정도 큰 경우에는 제트의 초음속 길이  $L_s$ 가 길다.

### 후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었음.

### 참고 문헌

- 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 (1)," 대한기계학회논문집(B), 제20권, 제2호, pp. 697-709.
- 3) Quinlan, N. J., Kendall, M. A. F., Bellhouse, B. J. and 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) Adamson, 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) Shirie, J. W. and Seubold, J. G., 1967, "Length of the Supersonic Core in High-Speed Jets," AIAA Journal, Vol. 5, pp. 2062-2064.
- 12) 정미선, 김현섭, 김희동, 2001, "초음속 마이크로 제트 유동에 관한 기초적 연구," 대한기계학회 추계학술대회 논문집(B), pp. 622-627