

## 초음속 동축제트의 유동특성에 관한 연구

이권희\* · 구병수\*\* · 김희동†  
(2000년 12월 8일 접수, 2001년 8월 31일 심사완료)

### Study of the Flow Characteristics of Supersonic Coaxial Jets

Kwon-Hee Lee, Byoung-Soo Koo and Heuy-Dong Kim

**Key Words:** Supersonic Nozzle(초음속 노즐), Compressible Flow(압축성 유동), Supersonic Jet(초음속 제트), Assistant Jet(보조제트), Shock Wave(충격파), Jet Core(제트 코어), Gas Cutting(가스절단)

#### Abstract

Supersonic coaxial jets are investigated numerically by using the axisymmetric, Navier-Stokes equations which are solved using a fully implicit finite volume method. Three different kinds of coaxial nozzles are employed to understand the flow physics involved in the supersonic coaxial jets. Two convergent-divergent supersonic nozzles are designed to have the same Mach number 2.0, and used to compare the coaxial jet flows with those discharging from one constant-area nozzle. The impingement angle of the annular jets are varied. The primary pressure ratio is changed in the range from 2.0 to 10.0 and the assistant jet ratio from 1.0 to 3.0. The results obtained show that the fluctuations of the total pressure and Mach number along the jet axis are much higher in the constant-area nozzle than those in the convergent-divergent nozzles, and the constant-area nozzle lead to higher total pressure losses, compared with the convergent-divergent nozzles. The assistant jets from the annular nozzle affect the coaxial jet flows within the distance less than about ten times the nozzle throat diameter, but beyond it the coaxial jet is conical with self-similar velocity profiles. Increasing both the primary jet pressure ratio and the assistant jet pressure ratio produces a longer coaxial jet core.

#### 기호설명

- De : 노즐 출구 직경(mm)
- Dt : 노즐 목 직경(mm)
- L : 노즐 목 길이(mm)
- Ls : 초음속 유동장 길이(mm)
- p<sub>01</sub> : 주제트 공급압력(ata)
- p<sub>b</sub> : 기저 압력(ata)
- p<sub>s</sub> : 정압력(ata)
- p<sub>t</sub> : 전압력(ata)
- x : 노즐 출구로부터 축방향 길이(mm)
- y : 노즐 중심으로부터 반경방향 길이(mm)
- α : 노즐 확대 반각
- β : 보조제트 충돌각

#### 1. 서 론

일반적으로 초음속 제트유동은 고압의 기체를 오리피스나 노즐을 통하여 방출시킬 때 발생하며, 비상체의 추진, 금속분말의 제조, 섬유제작, 고전류 차단 스위치, 공기블라스트가공 등 다양한 산업분야에 응용되고 있다. 현재까지 노즐이나 오리피스로부터 방출되는 음속 및 초음속 제트유동에 관한 많은 실험적 및 해석적 연구가 수행되었다. 종래의 연구<sup>(1-3)</sup>에 의하면 제트 압력비는 노즐출구에서 형성되는 유동상태 뿐만 아니라 제트유동장 내부에서 발생하는 충격파구조 및 위치, 제트경계의 구조, 제트코어 그리고 제트폭 등의 유동특성을 결정하는 중요한 변수로 보고하였으며, 유동장의 물리적 기구 등은 현재 비교적 상세하게 알려져 있다.

그러나, 가스절단 노즐(gas cutting nozzle),<sup>(4)</sup> 기체 역학 레이저(gasdynamics laser),<sup>(5)</sup> 초음속 이젝터

---

\* 회원, 안동대학교 BK21 연구원  
 \*\* 안동대학교 대학원 기계공학부  
 † 책임저자, 회원, 안동대학교 기계공학과  
 E-mail : kimhd@andong.ac.kr  
 TEL : (054)820-5622 FAX : (054)823-5495

(supersonic ejector),<sup>(6)</sup> 제트소음 경감,<sup>(7)</sup> 추력증강<sup>(8)</sup> 등의 많은 응용에서는 대부분 초음속 동축노즐 (supersonic coaxial nozzle)을 사용하고 있다. 이 경우 보조제트유동이 초음속 노즐로부터 방출되는 주제트 유동특성에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되지만, 현재까지 이에 대한 상세한 연구는 수행되지 않았으며, 초음속 동축노즐의 실제적인 응용 및 설계를 위해서는 체계적인 연구가 요구된다.

최근 Masuda 등<sup>(9)</sup>은 실험과 수치계산을 통하여 음속노즐을 통하는 초음속 부족팽창 동축제트를 연구하여, 노즐의 형상 및 보조제트의 총돌각도, 압력비 등이 주제트에서 발생하는 충격파 마하디스크의 형상에 미치는 영향을 조사하였다. 그러나 수치계산에서는 기체의 점성을 고려하지 않았으며, 실험과 수치계산의 결과는 단지 정성적으로 일치하였다. Lee 등<sup>(10)</sup>은 Navier-Stokes 방정식의 수치계산법을 이용하여, 보조제트의 압력비 및 전온도가 주제트 내부에서 발생하는 전압력, 마하수, 제트코어, 충격파 위치 등의 유동특성에 미치는 영향을 광범위하게 조사하였다. 또 Gutmak 등<sup>(11)</sup>은 유동의 혼합촉진을 위하여 사각 및 원형 동축제트를 사용하여 보조 및 주제트의 압력비가 두 유동의 혼합특성에 미치는 영향을 조사하였다.

가스절단을 목적으로 한 초음속 동축제트의 경우, 절단성능 및 효율은 동축제트의 공급압력비 뿐만 아니라 보조제트의 총돌각, 노즐형상 등에 의하여 좌우될 것으로 예상되지만, 현재까지 가스 절단용 초음속 동축제트에 관한 연구는 매우 부족한 실정에 있다.

본 연구에서는 가스절단용 초음속 동축제트 유동의 특성을 조사하기 위하여, 축대칭 Navier-stokes 방정식을 유한체적법으로 수치계산하였다. 수치계산에서는 보조제트가 주제트유동특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 보조제트의 총돌각, 노즐형상 그리고 압력비가 동축제트 유동에서 발생하는 충격파구조 및 위치, 전압력 및 마하수, 제트코어길이 그리고 속도분포 등의 동축제트의 특성값에 미치는 영향을 상세하게 조사하였다.

## 2. 초음속 동축제트 유동

Fig. 1에는 본 연구에서 적용된 초음속 동축제트 유동을 발생시키기 위한 노즐 형상을 도식적으로 나타내었다. 주제트는 노즐 목직경  $D_t$ , 노즐

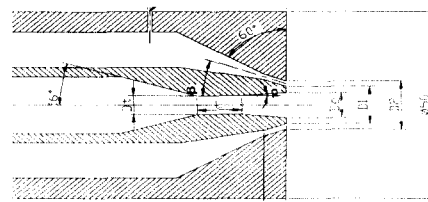


Fig. 1 Details of supersonic coaxial nozzles

Table 1 Dimension of coaxial nozzles

	$D_t$ (mm)	$D_e$ (mm)	$D_1$ (mm)	$D_2$ (mm)	$L$ (mm)	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$M_d$	Flow
N-1	5	6.5	9.5	12.5	0	5	0	2.0	supersonic
N-2	5	6.5	9.5	12.5	0	5	20	2.0	supersonic
N-3	5	5	8	11	10	0	0	1	sonic

목의 길이  $L$  그리고 노즐의 확대반각  $\alpha$  인 초음속 또는 음속노즐( $\alpha = 0$ )로부터 방출되는 공기( $\gamma = 1.4$ )의 유동에 의하여 발생한다. 본 연구에서는 보조제트 총돌각의 영향을 조사하기 위하여, 보조제트의 총돌각도  $\beta$  를 변화시켰으며, 주 노즐의 형상을 세 종류로 변화시켰다. 보조제트는 주제트의 중심축에 대하여 총돌각  $\beta$  를 가지는 축소 환형 노즐 (converging annular nozzle)에 의하여 발생하며, 노즐 끝단의 기저(base)높이는 Fig. 1에 나타난 바와 같이  $D_1 - D_e$ (여기서  $D_e$ 는 주노즐의 출구 직경)이다.

Table 1에는 본 연구에 적용된 초음속 동축노즐의 상세제원을 나타내었다. N-1과 N-2는 설계마하수가 2.0인 전형적인 축소/확대형의 초음속노즐로, 노즐목 및 출구직경은 각각 5mm와 6.5mm이며, 보조제트의 총돌각  $\beta$  는 0도와 20도로 설계되었다.

또 노즐 N-3는 단면적이 일정( $\alpha = 0$ )한 음속노즐로  $\beta$  가 0이며, 출구직경은 5mm이다. 이 경우 음속노즐의 일정 단면적 부분의 길이는  $L (= 10\text{mm})$ 로 고정하였다.

본 연구에서는 주제트유동의 공급압력을  $p_{01}$  그리고 전온도를  $T_{01}$ 로 하였으며, 대기압과 대기온도를 각각  $p_a$ 와  $T_a$ 로 정의하였다. 또 보조제트의 공급압력을  $p_{02}$  그리고 전온도를  $T_{02}$ 로 하여, 주제트의 압력비  $PR$ 을  $p_{01}/p_a$ 로, 보조제트의 압력비  $PR_{assist}$ 를  $p_{02}/p_a$ 로 정의하였다. 따라서  $PR_{assist} = 1.0$ 인 경우에는 보조제트 입구에서 압력이 대기압과 동일하다. 본 연구에서는 제트의 압력비  $PR$ 을 2.0에서 10.0까지의 범위에서 변화시켰으며, 가스절단용 노즐의 실제 응용에서 적용되고 있는 바와 같이, 보조제트의 압력비  $PR_{assist}$ 를 1.0에서 3.0까지의 범위에서

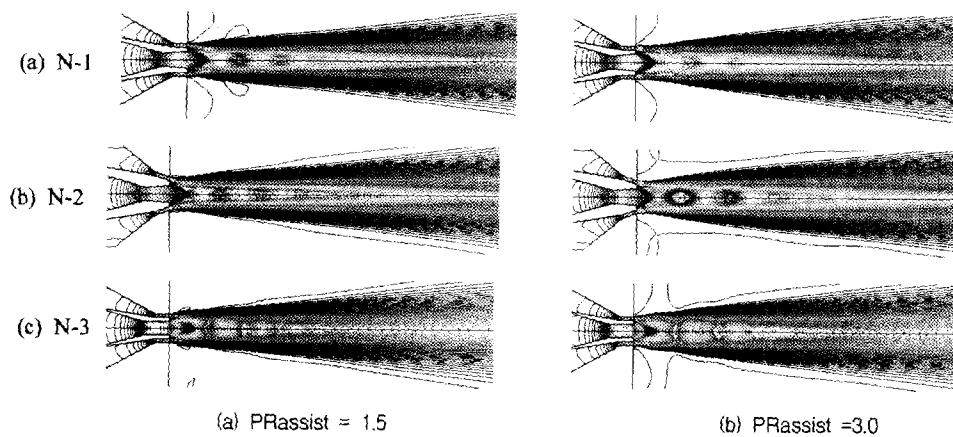


Fig. 2 Mach number contours (PR = 8.0)

변화시켰다. 한편 본 연구에 적용된 제트유동에 대하여 노즐출구 직경을 대표길이로 하는 Reynolds수는 노즐 압력비 PR에 따라 변화하였으나,  $1.53 \times 10^5 \sim 5.38 \times 10^5$ 의 범위에 있었다.

### 3. 수치계산법 및 경계조건

본 연구에서는 보조제트를 수반하는 초음속 제트 유동장을 수치적으로 모사하기 위하여 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하였다. 지배방정식과 상세한 수치계산법에 대해서는 문헌<sup>(12)</sup>에 기술되어 있으므로, 여기에서는 생략한다. 수치계산에서는 제트전단층 유동, 충격파, 벽면 근처의 경계층 유동을 정도 있게 해석하기 위하여 공간항의 차분은 2차 정도의 upwind scheme을, 시간 미분항의 적분은 다단계 Runge-Kutta 방법을 적용하였다.

수치계산에 적용된 정렬 격자계의 격자점은 약 50,000개이며, 벽면근처 및 주유동과 보조유동이 분사되는 부분에 격자점을 집중시켰다. 본 연구에서와 같은 수치계산에서는 계산영역이 얻어지는 해에 영향을 미칠 수 있으므로, 본 연구에서는 먼저 계산영역을 변화시켜 예비수치 실험을 수행하였다. 그 결과 수치계산의 영역이 계산결과와 경계조건의 설정에 영향을 미치지 않는, 반경 방향으로 노즐 출구 직경의 약 30배, 그리고 노즐출구로부터 하류방향으로 약 150배의 영역을 설정하였다.

본 수치계산의 경계조건은 주유동과 보조유동에 각각 전압  $p_{01}$ ,  $p_{02}$ 와 전온도( $T_{01}=300K$ )의 유입조건을

적용하였으며, 유출조건으로 일정한 압력( $p_a$ ) 조건을 적용하였다. 또 모든 고체벽면은 단열 no-slip 조건이 적용하였다.

한편 수치계산에서 난류 전단응력들을 계산하기 위하여 압축성 효과를 포함하는 표준 k-ε 난류모델을 적용하였다. 수치계산의 수렴해의 판정을 위하여 질량, 운동량, 에너지, 그리고 k와 ε의 잔차들이  $10^{-4}$  이하로 되는 경우와 계산영역을 출입하는 질량 유동의 Imbalance가  $\pm 0.5\%$  이하로 되는 경우에 수렴해가 얻어진 것으로 판단하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 초음속 동축제트 유동의 마하수 분포

Fig. 2에는 PR=8.0, PRassist=1.5와 3.0인 경우, 노즐 형상에 따른 초음속 동축제트의 등마하수 분포를 나타냈었다. 그림에서 N-1과 N-2의 설계마하수는 2.0이며, 이때 노즐출구에서 주제트 유동의 적정팽창에 요구되는 압력비 PR은 7.8이다. 그러나 이 값은 보조제트 유동을 고려하지 않은 것으로, 보조제트 유동이 있는 경우, 보조제트는 노즐출구에서 발생하는 배압에 영향을 미칠 것이다. 따라서 보조제트를 수반하는 초음속 동축제트의 경우 적정팽창의 압력비를 정확하게 예측하는 것은 곤란하다.

그림에 나타낸 N-1의 경우(PR=8.0) 보조제트의 압력비는 주제트의 유동에 영향을 미치는 것으로 보인다. PRassist=1.5인 경우 보조제트 유동은 거의 아음속 상태로 환형노즐로부터 방출되어, 주제트 유동에

충돌하게 된다. 주제트 유동은 노즐 출구부근에서 발생하는 경사충격파가 주제트와 보조제트 유동의 경계면에서 반사하여 다수의 충격파군을 형성한다. 그러나  $PR_{assist}=3.0$ 인 경우 환형노즐의 출구에서 보조제트 유동은 팽창하여, 약한 초음속 상태로 주제트 유동에 충돌한다. 이 경우 충돌위치나 보조제트 내부에서 발생하는 압력이 변화하게 되므로, 그림으로부터 주제트 유동에서 발생하는 충격파 시스템의 위치나 강도는 다소 달라지게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 2(b)는 보조제트의 충돌각  $\beta$ 가 20도인 N-2의 경우로, 정성적인 경향은 유사하지만,  $PR_{assist}=1.5$ 에서 주제트 유동은 노즐출구에서 거의 적정팽창에 가까운 상태라는 것을 제트 경계의 형상으로부터 알 수 있다. 그러나  $PR_{assist}=3.0$ 인 경우 주제트 유동의 경계의 굴곡이 보다 현저하게 나타나므로, 제트 내부에서 팽창과 압축이 보다 강하게 발생한다는 것을 알 수 있다.

한편 N-3의 경우 주제트의 유동은 노즐출구에서 부족팽창상태로 되어 제트내부에는 충격파의 마하디스크가 발생한다. 따라서 다수의 뚜렷한 바렐형의 제트 경계가 형성됨을 관찰 할 수 있다.

이상의 마하수 분포로부터 보조제트 유동은 주제트 내부에서 발생하는 압력강화로 인하여,  $PR_{assist}$ 의 값이 증가할수록 노즐출구에서 강한 Prandtl-Meyer 팽창과 발생하여, 보조제트는 주제트 유동쪽으로 향하게 된다. 또, 주제트 유동은 보조제트 내부에서 발생하는 압력으로 인하여, 두 제트 유동은 서로 강한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

4.2 초음속 동축제트의 중심축에서 발생하는 압력과 마하수

Fig. 3에는 본 연구의 세 형태의 노즐에 대하여  $PR=4.0$ 로 일정하게 하여,  $PR_{assist}(=p0S/pa)$ 를 1.5와 3.0으로 변화시킨 경우, 동축제트의 중심축에서 발생하는 정압, 전압 및 마하수를 비교하였다. 그림의 횡축은 노즐출구로부터 하류방향 거리  $x$ 를 노즐 목 직경  $D_t$ 로, 그리고 그림의 종축의 값은 국소정압  $p_s$  및 국소전압  $p_t$ 를 노즐입구의 전압  $p_{01}$ 으로 각각 무차원하였다. 그림에서  $PR_{assist}=1.5$ 인 경우 마하수 분포로부터 N-1과 N-2는 주제트에서 노즐 중심축을 따라 발생하는 마하수는 노즐 출구에서 약간 증가한 후, 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 일반적으로 노즐로부터 방출되는 유동이 과팽창 상태인 경우, 노즐 출구에서 유동의 마하수는 감소

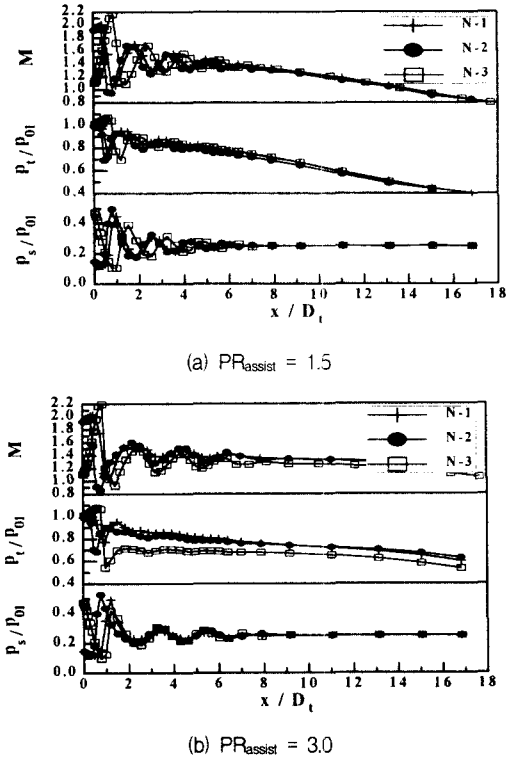


Fig. 3 Static, total pressures and Mach number distributions along the center line of coaxial jet ( $PR = 4.0$ )

하게 되지만, 본 연구에서 노즐 출구 부근에서 유동의 마하수가 국소적으로 증가하는 것은 보조제트의 영향으로 판단된다. 한편 N-3의 경우 노즐 출구에서부터 유동의 마하수는 급격하게 증가하여, 어떤 피크값을 가진 후에 급격하게 감소하며, 그후 다시 증가와 감소를 반복하는 형태로 된다. 따라서 이 경우 주제트 유동은 노즐출구에서 부족팽창 상태라는 것을 알 수 있다. 노즐 출구로부터 하류에서 발생하는 마하수 변동은 제트 내부에서 발생하는 충격파 시스템 때문이며, 마하수의 변동이 거의 발생하지 않는 즉 충격파 시스템이 존재하지 않는 영역은 약  $x/Dt \geq 7.0$ 으로 판단된다.

제트 중심축에서 발생하는 전압은  $PR_{assist}=1.5$ 인 경우 노즐 출구로부터  $x/Dt < 2.0$ 의 영역을 제외하고는 노즐 형태에 큰 영향을 받지 않으며,  $x/D > 7.0$ 의 영역에서는 세 형태의 노즐 모두 노즐 출구로부터 거리가 증가함에 따라 전압은 단조롭게 감소한다. 그러나,  $x/D > 7.0$ 의 영역에서 N-1과 N-2에서 발생하는 유동의 정압은 N-3의 부족팽창 유동과는 매우

다르게 나타난다. 즉 N-1과 N-2에서 정압의 증가와 감소는 N-3에서 정압의 감소와 증가형태로 그 위상이 바뀌어 나타남을 관찰 할 수 있다. 이것은 유동이 과팽창이거나 부족팽창으로 되는 경우 주제트 내부에서 발생하는 압축파와 팽창파의 위상이 달라지게 되기 때문이다.

종래의 대부분의 연구<sup>(13,14)</sup>에서는 제트내부에서 발생하는 전압을 측정하여, 유동의 마하수를 산출하였다. 이것은 제트 경계에서 일정압력이 작용하게 되므로, 제트내부의 정압을 일정한 것으로 가정한 결과이다. 그러나 본 연구의 경우,  $x/D_t < 7.0$ 의 영역에서는 노즐의 형태에 무관하게 유동방향으로 상당한 정압 변동을 나타내며,  $x/D_t > 7.0$ 의 영역에서는 일정 압력값을 유지한다.

유사한 경향은 Fig. 3(b)의  $PR_{assist}=3.0$ 에서도 관찰할 수 있다. 그러나 Fig. 3(a)의 결과들과 비교로부터  $PR_{assist}=3.0$ 인 경우 N-3에서 발생하는 전압과 마하수는 다른 두 노즐 N-1과 N-2에 비하여 상당히 낮다. 이것은 주제트유동이 단면적 일정의 음속노즐인 경우, 노즐 출구에서 발생하는 유동은 부족팽창 형태로 되어, 제트 중심축 부근에서 강한 마하디스크의 유동이 형성되기 때문이다. 따라서 가스 절단의 응용에 있어서 노즐출구로부터 절단물까지의 거리가 주어지는 경우, 제트에서 발생하는 전압력은 절단성능을 좌우하게 되므로, 이 경우 음속노즐에 비하여 축소확대형의 초음속 노즐이 더 바람직하다는 것을 알 수 있다.

위의 결과로부터  $PR=4.0$ 인 경우,  $x/D_t < 7.0$ 의 영역에서는 유동방향의 마하수, 전압력 그리고 정압력은 큰 변동을 하며, 이러한 변동은 제트출구에서 발생하는 유동의 팽창상태에 의존한다는 것을 알 수 있다. 그러나  $x/D_t > 7.0$ 의 영역에서 유동의 마하수와 전압력은 노즐의 형태에 무관하게 유동방향으로 단조롭게 감소하며, 정압력은 일정하게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4에는  $PR=8.0$ 인 경우 노즐 중심축을 따르는 유동의 마하수, 전압력 그리고 정압력을 나타내었다. 그림으로부터 Fig. 3의 결과와는 달리 세 노즐 모두 노즐출구에서 마하수와 전압력은 급격하게 증가한 후 감소하게 되며, 그 후 유동방향으로 증가와 감소를 반복하게 된다. 따라서, 세 노즐 모두 주제트는 노즐 출구에서 부족팽창 상태로 되며,  $x/D_t > 9.0$  이상의 영역에서는 마하수와 전압력의 변동은 관찰되지 않는다.

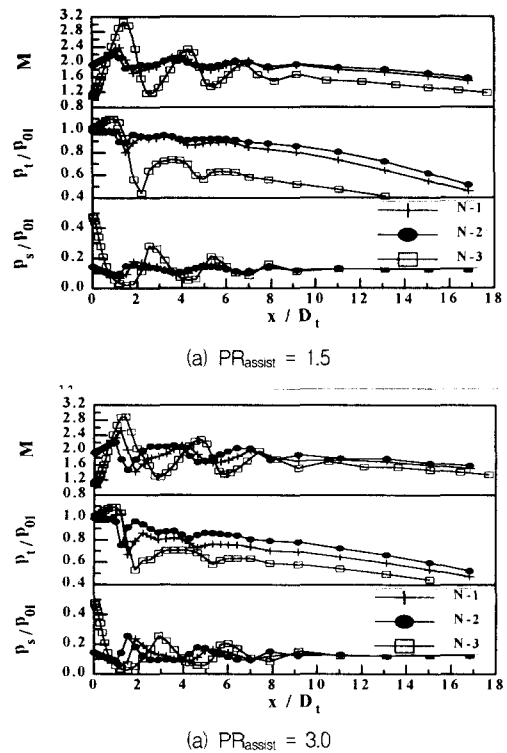


Fig. 4 Static, total pressures and Mach number distributions along the center line of coaxial jet ( $PR = 8.0$ )

또 동일한  $x/D_t$ 에 대하여 N-3에서 발생하는 전압력과 마하수는 N-2나 N-1에 비하여 상당히 낮으며, N-3에서 유동방향의 정압력 변동은 다른 두 노즐에 비하여 상당히 크다.

#### 4.3 초음속 동축제트 유동장에 미치는 보조 제트의 영향

보조제트의 압력비가 변화하는 경우에 주제트 유동특성을 더욱 상세히 조사하기 위하여,  $PR=8.0$ 인 경우 유동방향의 전압력분포를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에는 N-2와 N-3의 노즐을 사용한 경우의 전압력값을 비교하였다. Fig. 5(a)에서  $x/D_t < 13.0$ 의 영역에서는  $PR_{assist}$ 가 증가할수록 노즐 중심축에서 발생하는 전압력은 낮아지며, 약  $x/D_t \geq 17.0$ 의 영역에서는  $PR_{assist}$ 가 증가할수록 전압력의 값은 높게 나타난다. 또,  $x/D_t < 13.0$ 의 영역에서  $PR_{assist}$ 가 증가할수록 전압력의 변동은 커지게 된다는 것을 알 수 있다. 그러나 다소 다른 경향은 Fig. 5(b)에서 관찰된다. 노즐 출구로부터 가까

운 하류에서 발생하는 전압력 변동은  $PR_{assist}$ 가 증가할수록 작아지며, 먼 하류에서 전압력의 값은  $PR_{assist}$ 가 증가할수록 높게 나타난다.

위의 결과로부터 N-2의 경우 보조제트의 압력비가 높은 경우 주제트 유동에서 발생하는 전압력 값은 낮아지는 반면, N-3에서는 반대로 되는 것으로 보인다. 이것은 N-2와 N-3에서 발생하는 충격파의 형태나 위치가 달라지기 때문이다. 일반적으로 제트 내부유동에서 발생하는 전압력의 손실은 두 유동점성으로 기인한 점성산일과 충격파 시스템으로 인한 손실 등을 생각할 수 있다. N-2의 경우 보조제트의 총돌각은 20도이며, 주제트 내부에서 발생하는 경사충격파는  $PR_{assist}$ 가 증가할수록 강도가 증가하게 된다. 따라서, 전압력변동이 큰 영역에서는 충격파로 인한 손실이 증가하여,  $PR_{assist}$ 가 증가할수록 주제트 유동에서 발생하는 전압력 손실은 커지게 된다. 반면, N-3의 경우 주제트에서 발생하는 유동은 부족팽창상태로, 제트 중심축 부근에서 발생하는 충격파는 마하디스크를 형성하게 된다. 이 마하디스크의 위치 및 형상은 전압손실에 큰 영향을 미친다. 또, 마하디스크 형상은 주제트 유동의 팽창과정과 정도에 의존하게 되며,  $PR_{assist}$ 이 증가하게 되면, 주제트 유동의 팽창은 보조제트의 총돌로 인하여 제한을 받게 된다. 이 경우 보조제트는 마하디스크의 위치를 이동시키거나 형상을 변화시키게 된다.

Fig. 5(b)의 결과에 의하면,  $PR_{assist}$ 이 변화하는 경우 마하디스크의 위치는  $x/D_t \approx 1.5$ 로 거의 일정하게 나타나며, 전압력의 급감소는  $PR_{assist}$ 가 증가할수록 작아진다는 것을 알 수 있다. 따라서  $PR_{assist}$ 이 증가함에 따라 보조제트 유동은 노즐 출구에서 주제트의 팽창정도를 제한하게 되어, 충격파 마하디스크의 형태를 변화시키는 것으로 판단된다.

#### 4.4 초음속 동축제트의 코어길이

Fig. 6에는  $PR$ 과  $PR_{assist}$ 가 초음속 제트 코어길이에 미치는 영향을 나타내었다. 그림의 종축은 초음속 동축 제트의 중심축에서 발생하는 음속점까지의 길이  $L_s$ 를 노즐 목직경  $D_t$ 로 무차원한 값을, 그리고 횡축은 주제트의 압력비를 나타낸다. 그림으로부터 주제트와 보조제트 압력비가 증가할수록  $L_s$ 의 값은 증가한다는 것을 알 수 있다. 또,  $L_s$ 에

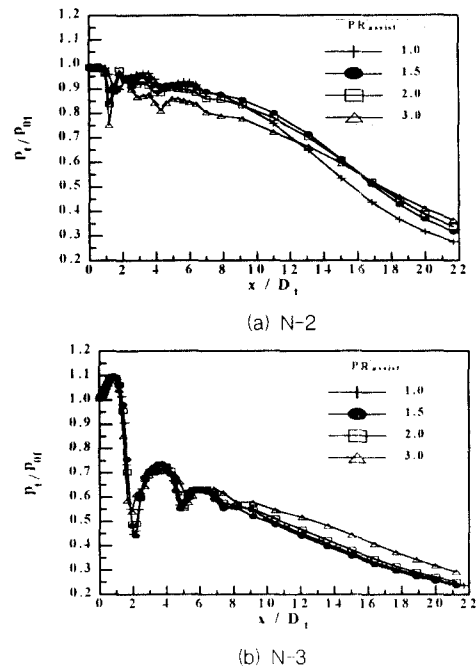


Fig. 5 Total pressure distributions along the center line of coaxial jet ( $PR=8.0$ )

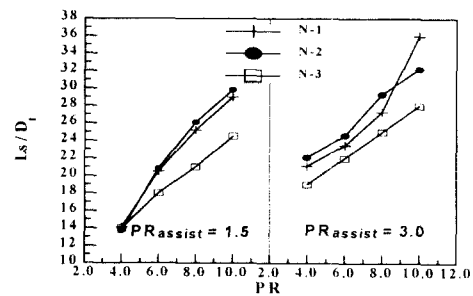


Fig. 6 Supersonic jet core length

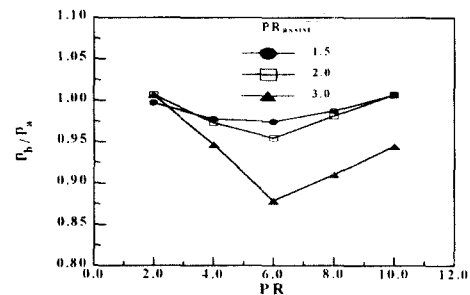


Fig. 7 Variation of base pressure with  $PR$

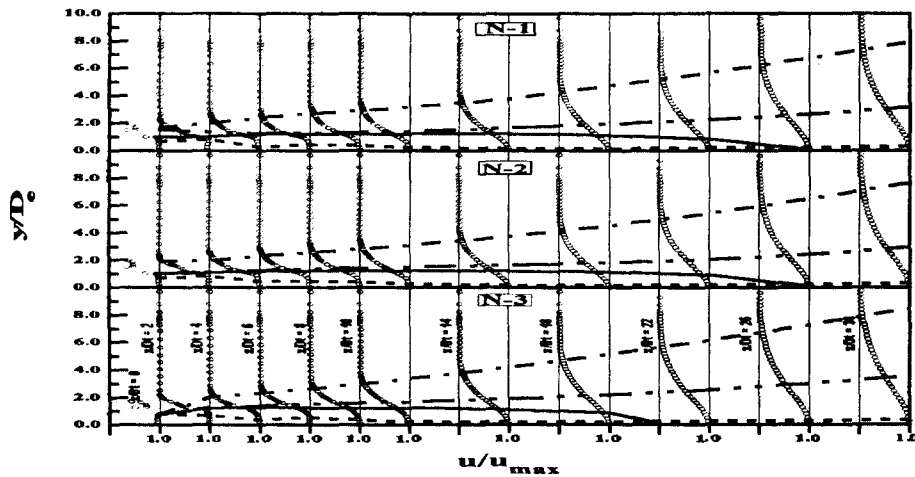


Fig. 8 Velocity profiles in different coaxial jets (PR = 8.0, PRassist = 1.5)  
 (..... : 0.99u/umax, ----- : 0.5u/umax, - - - - : 0.05u/umax, \_\_\_\_\_ : M=1.0)

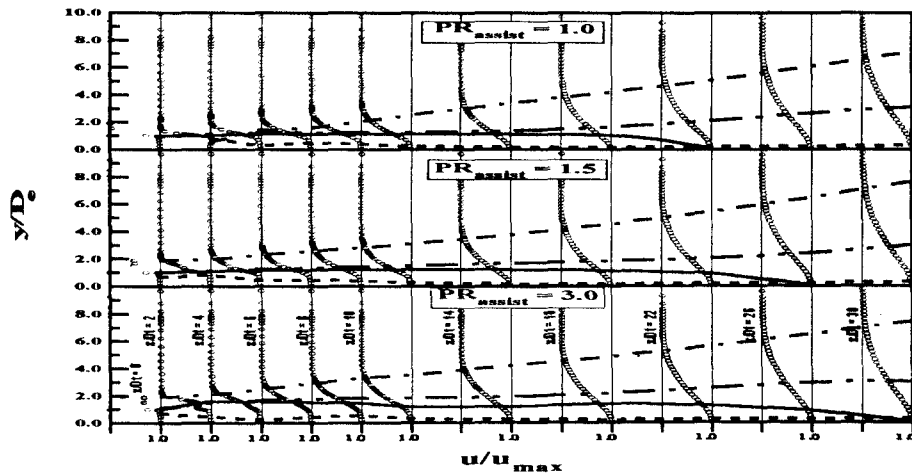


Fig. 9 Velocity profiles in different coaxial jets (N-2, PR = 8.0)

미치는 노즐형상의 영향은 총돌각이 20도인 N-2가 가장 긴 것으로 보인다. PR=8.0이고 PRassist=1.5인 경우 N-2에서는  $Ls/D_s \approx 26$ , 그리고 음속노즐인 N-3에서는 약 20 정도로 보여진다. 따라서 보조제트의 총돌각이 20도인 경우가 0도에 비하여  $Ls$ 의 값이 증가한다는 것을 알 수 있다. 유사한 경향은 PRassist=3.0에 대해서도 발견되지만, PR이 매우 큰 10.0에서는 N-1이 N-2보다  $Ls$ 의 값이 큰 것으로 나타난다. 또 동일한 PR인 경우  $Ls$ 에 미치는 PRassist의 영향은 PRassist가 클수록  $Ls$ 는 증가하는 것으로 보인다.

이상의 결과로부터 초음속 동축제트 음속영역의 길이  $Ls$ 는 PR, PRassist 및 노즐형상에 의존하며, PR과 PRassist가 주어지는 경우 단면적이 일정한 음속노즐보다 축소확대형의 초음속 노즐이  $Ls$ 가 길어진다. 따라서 가스절단의 응용이 아니라 초음속 동축제트의 전파길이가 중요한 산업적 응용에서는 음속노즐에 비하여 초음속 노즐이 유리하다는 것을 알 수 있다.

한편 보조제트 압력비 PRassist의 값은 노즐 끝단의 기저(base)에서 발생하는 압력에 영향을 미치게 되므로, 이러한 기저압력은 주제트의 유효압력비로 작

용하게 된다. 따라서 Fig. 7에 노즐 끝단의 기저높이 중심 부근에서 발생하는 압력 즉 기저압력의 변화를 PR에 대하여 나타내었다. 그림의 종축은 기저압력  $p_b$ 를 대기압력( $p_a$ )로 무차원화하였다.

그림으로부터 기저압력의 값은  $PR_{assist}$ 에 무관하게 PR이 증가함에 따라 감소하다가  $PR=6.0$  부근에서 최소로 된 후에 PR의 증가에 따라 다시 증가하게 된다는 것을 알 수 있다. 이러한 기저압력의 변화는 노즐 출구에서 형성되는 주제트 유동의 특성을 결정하는 중요한 요인으로 작용하게 된다. 예를 들면 노즐출구에서 발생하는 유동의 팽창상태는 기저압력에 의하여 결정되게 되므로, 본 연구에서 적용된 동축노즐의 경우 적정팽창에 요구되는 압력비는 주노즐의 기하학적 형상과 PR만에 의하여 결정되지 않고,  $PR_{assist}$ 의 값에 의존하게 된다. 그림으로부터  $PR>4.0$ 인 경우  $PR_{assist}$ 의 값이 증가할수록 기저압력은 낮아지게 된다. 이것은 주제트와 보조제트유동이 노즐 출구에서 팽창하기 때문이며, 노즐 출구에서 발생하는 경계층 유동과도 관련될 것으로 판단된다. 따라서, 기저압력과 노즐의 공급압력의 비를 유효압력비로 하여 초음속 동축제트 유동장을 해석하는 것이 필요하지만 본 연구에서는 이를 수행하지 않았다.

#### 4.5 초음속 동축제트의 속도분포

초음속 동축제트 유동장을 상세하게 고찰하기 위하여, Fig. 8에는 세 형태의 노즐을 사용한 경우 제트유동장에서 발생하는 속도분포를 나타내었다. 그림에서  $x/D_c$ 는 노즐출구를 원점으로 하는 유동방향의 거리  $x$ 를 노즐목 직경  $D_c$ 로 무차원한 값을 나타내며, 그림의 종축의 값은 노즐 중심축으로부터 반경방향의 거리  $y$ 를 노즐의 출구직경  $D_c$ 로 무차원한 값이다. 또 그림의 횡축의  $u/u_{max}$ 는 유동의 국소속도  $u$ 를 국소 최대속도로 무차원한 값이다.

그림에는  $u/u_{max}$ 가 0.99인 값을 연결한 선을 파선으로,  $u/u_{max}$ 가 0.5인 선을 이점쇄선으로, 또  $u/u_{max}$ 가 0.05인 선을 일점쇄선으로, 마하수가 1인 선은 실선으로 나타내었다.

또 초음속 동축제트의 유동이 아음속으로 천이하는 영역을 나타내기 위하여, 마하수  $M=1.0$ 인 선을 실선으로 나타내었다. 그림으로부터 초음속 동축제트 유동의 속도분포는 노즐 출구부근에서는 보조제트 유동의 영향으로 인하여, 다수의 변곡점을 가지게 되며, 상당히 왜곡(distortion)된 형태로 된다는 것

을 알 수 있다. 그림의 파선으로 나타낸 포텐셜 코어는 노즐출구로부터 가까운 하류에서는 제트내부에서 발생하는 충격파 시스템으로 인하여 약간의 변동을 하는 것으로 보이지만, 하류에서는 유동의 확산작용으로 인하여 점차 줄어들거나 중심축 부근의 극히 제한된 영역으로 축소된다. 또 그림에 나타낸 실선(음속선)으로부터 노즐의 중심축에 대하여 반경방향으로 음속영역의 크기는 노즐 출구 가까운 영역을 제외하고는 거의 일정하게 유지하다가 점차 줄어들어 사라지게 된다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 노즐출구로부터 이 위치까지의 거리를  $L_s$ 로 정의하였다. 그림으로부터 N-3에서 발생하는  $L_s$ 는 N-1이나 N-2에 비하여 상당히 짧게 나타나지만, 반경방향으로 음속영역의 크기는 노즐형태에 큰 영향을 받지 않는 것으로 보인다.

한편 음속영역이 줄어들기 시작하는 위치로부터 그림의 파선, 즉 제트의 폭은 거리에 따라 거의 직선적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 이것은 동축제트는 음속 영역이 감소하기 시작하는 위치로부터 원추형상(conical jet)으로 확대되는 것을 의미하며, 이 영역에서 동축제트의 속도분포는 자기상사형(self-similar)으로 된다. Fig. 9에는  $PR_{assist}$ 가 N-2노즐에서 발생하는 동축제트의 속도분포에 미치는 영향을 나타내었다. 그림으로부터 보조제트는 주로 노즐출구로부터 가까운 거리에서 발생하는 속도분포에 영향을 미치며, conical jet의 영역에서 발생하는 속도분포나 제트의 폭에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 이것은 동축제트가 급속하게 혼합하여 노즐출구로부터 어떤 위치에서는 단일제트(Single jet)에서 발생하는 유동장과 같은 특성을 가지게 된다는 것을 의미한다.  $PR_{assist}$ 가 1.5에서 3.0으로 변화하는 경우 동축제트가 원추형으로 확대되기 시작하는 위치는 보조제트의 압력비에 무관하게 대략  $x/D_c=10.0$ 에서 14.0 사이로 보여진다.

## 5. 결론

본 연구에서는 가스절단의 목적으로 활용되고 있는 초음속 동축제트 유동을 조사하기 위하여 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한 체적법을 적용하여 수치계산을 수행하였다. 수치계산에서는 세가지 형태의 동축노즐을 적용하였으며, 주제트의 압력비와 보조제트의 압력비를 변화시켜, 동축제트에서 발생하는 유동특성의 변화를



토론하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과들은 다음과 같이 요약된다.

(1) 초음속 동축제트는 주제트와 보조제트의 압력비에 의하여 팽창상태가 결정되며, 유동방향의 전압력 및 마하수 변동은 주제트의 압력비가 증가할수록 그리고 보조제트의 압력비가 감소할수록 증가한다.

(2) 초음속 동축제트의 중심축에서 발생하는 정압력은 노즐출구 직경의 8배 내지 10배의 거리까지의 영역에서는 큰 폭으로 변동을 하며, 그 하류에서 정압력은 일정하게 유지된다.

(3) 주제트의 압력비가 일정한 경우, 축소확대형의 초음속 노즐에 비해 일정 단면적의 음속노즐에서 발생하는 유동방향의 전압력과 마하수 변동이 큰 것으로 나타났으며, 전압력 손실은 음속노즐에서 더욱 크다.

(4) 동축제트의 코어길이는 주제트 및 보조제트의 압력비가 증가할수록 증가하며, 보조제트의 충돌각이 0도인 경우에 비하여 20도인 경우에 제트코어의 길이가 증가하였다.

(5) 동축제트의 속도분포에 미치는 보조제트의 영향은 노즐 출구직경의 약 14배의 거리 이내에 한정되며, 제트의 폭이 선형적으로 증가하는 원추형 제트의 특성을 가진다.

### 후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

### 참고문헌

- (1) Love, E. S., Grigsby, C. E., Lee, L. P. and Woodling, M. S., 1959, "Experimental and Theoretical Studies of Axisymmetric Free Jets," NASA TR R-6.
- (2) 김희동, 신현승, 1996, "초음속 노즐을 통하는 부속팽창 제트에 관한 수치계산적 연구(2)," 대한기계학회 논문집(B), 제20권, 제6호, pp. 1994~2004.
- (3) Owczat, J. A., 1964, "Fundamentals of Gas Dynamics," International Textbook Co.
- (4) Crowe, J. J., 1942, "Divergent Nozzle Tips for Economical Oxygen Cutting," *Weld. J.*, Vol. 21-1, pp. 34~40.
- (5) Hishida, H., Azami, N., and Iwamoto, K., etc., 1997, "Flow and Optical Fields in a Supersonic Flow Chemical Oxygen-Iodine Laser," AIAA paper 97-2391.
- (6) Chow, W. L. and Addy, A. L., 1961, "Interaction between Primary and Secondary Streams of Supersonic Ejector System and Their Performance Characteristics," *AIAA Jour.* Vol. 2, No. 4, pp. 680~695.
- (7) Kim, H. D., Setoguchi, T. et al, 2001, "Suppression of The Self-Induced Oscillations of The Under Expanded Jets Impinging Upon an Object," *8th International sound and vibration* (to be presented)
- (8) Alperin, M. and Wu, J. J., 1983, "Thrust Augmenting Ejector, Part 2," *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 12, pp. 1698~1706.
- (9) Masuda, W. and Moriyama, E., 1994, "Aerodynamic Characteristics of Underexpanded Coaxial Impinging Jets," *JSME Int. J., Series II*, Vol. 37, No. 4, pp. 769~775.
- (10) 이권희, 구병수, 김희동, 2000, "가스절단용 초음속 제트유동에 관한 기초적 연구," 대한기계학회 투고중
- (11) Gutmark, E., Schadow, K. C. and Wilson, K. J., 1991, "Effect of convective Mach number on mixing of coaxial circular and rectangular jets," *Phys. Fluids*, Vol.3, pp. 29~36.
- (12) Kim, H. D., Lee, Y. K., Setoguchi, T. and Yu, S., 1999, "Numerical Simulation of the Supersonic Flows in the Second Throat Ejector-Diffuser Systems," *Journal of Thermal Science*, Vol. 8, No. 4, pp. 214~222.
- (13) Rousso, M. D., Kochendorfer, F. D., 1950, "Experiment Investigation of Spreading Characteristics of Chocked Nozzle into Quiescent Air," NACA RM-E50E03.
- (14) Ewan, B.B.C. R., and Moodie, K., 1986, "Structure and Velocity Measurement in Underexpanded Jets," *Combustion Science and Technology*, Vol. 45, pp.275~288.