

# 가스절단용 초음속 제트유동에 관한 기초적 연구

이권희\* · 구병수\*\* · 김희동\*\*\*

(2000년 10월 20일 접수, 2001년 4월 26일 심사완료)

## A Fundamental Study of Supersonic Coaxial Jets for Gas Cutting

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

**Key Words:** Supersonic Nozzle(초음속 노즐), Compressible Flow(압축성 유동), Supersonic Jet(초음속 제트), Gas Cutting Technology(가스 절단 기술), Shock Wave(충격파), Jet Core(제트 코어)

### Abstract

Jet cutting technology currently makes use of a generic supersonic gas jet to improve the cutting speed and performance. In order to get a better understanding of the flow characteristics involved in the supersonic jet cutting technology, the axisymmetric Navier-Stokes equations have been solved using a fully implicit finite volume method. Computations have been conducted to investigate some major characteristics of supersonic coaxial turbulent jets. An assistant gas jet has been imposed on the primary gas jet to simulate realistic jet cutting circumstance. The pressure and the temperature ratios of the primary and assistant gas jets are altered to investigate the major characteristics of the coaxial jets. The total pressure and Mach number distributions, shock wave systems, and the jet core length which characterize the coaxial jet flows are strongly affected by the pressure ratio, but not significantly dependent on the total temperature ratio. The assistant gas jet greatly affects the basic flow characteristics of the shock system and the core length of under and over-expanded jets.

### 1. 서론

가스제트를 이용하여 모재를 가공하거나 절단하는 기술은 최근 산업기술분야에서 다양하게 응용되고 있다. 금속모재를 절단하기 위하여 사용되고 있는 가스제트의 경우, 절단속도나 성능의 관점으로부터 대부분 초음속 동축제트를 이용하고 있으나,<sup>(1)</sup> 초음속 동축제트 유동장의 물리적 특성에 대해서는 지금까지 충분하게 연구되지 않았다. 따라서 현재 대부분의 가스절단용 제트노즐의 설계나 최적 작동조건 등에 대해서는 경험

이나 시행착오에 의존하고 있는 실정이며, 절단용가스나 동력의 절감을 위해서는 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

Fig. 1에는 가스절단용 초음속 동축제트유동장을 도식적으로 나타내었다. Fig. 1에서 보조제트는 모재의 가열을 목적으로 약 800K에서 1000K까지 예열된 가스를 이용하여 모재를 국소적으로 가열하게 된다. 이때 동축제트를 통하여 주제트를 고속으로 모재에 충돌시켜 충돌부위에서 급격한 산화반응을 발생시키며, 동시에 주제트의 고운동량을 이용하여 절단이나 기타 목적의 가공을 수행할 수 있다. 위와 같은 가스절단 제트의 성능이나 가공속도는 제트유동의 주요 기체역학적 특성과 밀접한 관계를 갖는다. 일반적으로 가스절단용 노즐은 단면적이 일정하거나 축소되는 음속노즐과 축소확대형인 초음속 노즐을 사용하

\* 회원, 안동대학교 BK21 연구원

\*\* 안동대학교 대학원 기계공학부

† 책임저자, 회원, 안동대학교 기계공학과

E-mail : kimhd@andong.ac.kr

TEL : (054)850-5622 FAX : (054)841-1630

며,<sup>(2)</sup> 노즐의 형상은 적절한 운전 압력비와 제트 유동의 특성을 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 가스 절단 노즐을 설계하고, 절단성능을 향상시키기 위해서 노즐로부터 방출되는 고속제트 유동에 관한 기체역학적 전문지식이 필요하다.

노즐로부터 공간으로 방출되는 자유제트 유동장은 Fig. 2에 도식적으로 나타낸 바와 같이, 제트유동이 주위 유체의 영향을 받지 않고 노즐 중심축의 유속이 노즐출구의 유속과 동일하게 유지되는 Potential core와 제트경계, 그리고 제트폭 등으로 특성화된다.<sup>(3)</sup> 노즐로부터 방출되는 제트의 마하수가 1.0 이상인 초음속 제트유동에서는 노즐의 압력비에 따라 노즐출구에서의 유동상태와 제트유동장 내부의 충격파 시스템 등이 결정되므로, 제트유동은 유동방향으로 대개 큰 유속변동이 발생하게 된다. 따라서 초음속 제트유동의 경우, 노즐출구로부터 제트유동의 유속이 초음속으로 유지되는 영역과 유체의 점성확산이나 주위 유체의 entrainment로 인하여, 제트의 유속이 아음속으로 감속되는 영역으로 구분하는 것이 일반적이다.<sup>(4)</sup>

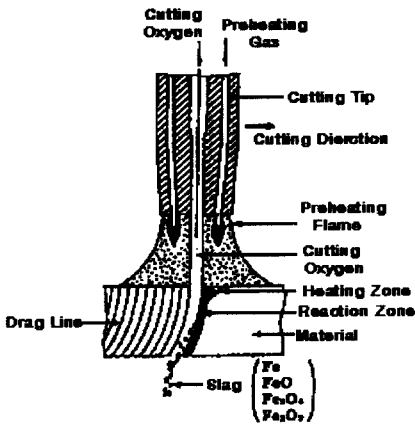


Fig. 1 Schematic of gas cutting flow field

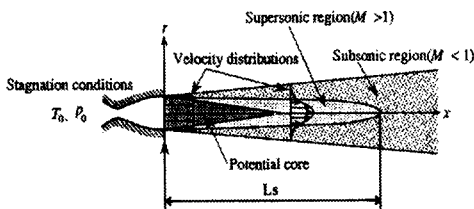


Fig. 2 Schematic diagram of typical supersonic jet

노즐출구에서 발생하는 적정팽창상태의 제트유동을 제외하고는 초음속 제트 영역에서는 유동장 내부에 충격파, 팽창파, 마하디스크 등이 발생하게 되며, 이들은 제트의 경계와 복잡한 간섭을 일으키게 되므로, 제트유동의 특성을 이해하는 것은 용이하지 않다.

초음속 자유제트 유동에 관해서는 현재까지 많은 연구가 수행되어, 노즐의 압력비가 알려지는 경우, 제트유동에서 발생하는 충격파구조 및 위치, 제트경계의 구조 그리고 제트코어, 제트폭 등 유동의 기구가 비교적 상세하게 알려져 있다.<sup>(5),(6)</sup>

그러나 가스 절단용 동축 초음속 제트유동에 대해서는 적정팽창의 초음속 제트가 절단 성능에 유리<sup>(7)</sup>하다고 경험적으로 알려져 있을 뿐, 유동장의 이해나 물리적 기구 등이 충분히 알려져 있지 않다. 즉 보조제트 유동이 주제트 유동 특성에 어떤 영향을 미치는지, 보조제트와 주제트와 압력비와 온도비가 변화하는 경우 동축 초음속 제트 유동장은 어떻게 변화하는지를 조사하는 것은 가스 절단용 노즐의 설계에 있어서 대단히 중요하다. 최근 Masuda 등은<sup>(8,9)</sup> 음속노즐을 사용하여, 보조제트가 부족팽창 층돌분류에 미치는 특성을 조사하였다. 또 유사 연구로 초음속 제트유동에서 발생하는 추력증강이나 제트소음 경감<sup>(10)</sup> 및 두 유동의 혼합의 촉진<sup>(11)</sup>을 위하여 보조제트를 이용한 연구예가 보고되었으나, 보조제트가 동축 주제트유동 특성에 미치는 영향에 대하여는 거의 알려져 있지 않다.

본 연구에서는 동일한 작동유체인 공기를 사용하는 동축노즐에 대하여 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법으로 수치계산하여 보조제트가 주 초음속 제트 유동특성에 미치는 영향을 조사하였다. 수치계산에서는 목직경이 5.0mm, 노즐출구에서의 설계마하수가 2.0, 보조제트의 분류각도가 0°인 동축 초음속 제트유동을 대상으로, 주제트 유동의 압력비를 2.0에서 10.0까지의 범위에서, 그리고 보조제트의 압력비를 1.0에서 3.0까지의 범위에서 변화시켰다. 또 기체의 온도가 제트유동장에 미치게 되는 영향을 조사하기 위하여 주제트와 보조제트의 전온도를 각각 200K에서 1000K의 범위에서 변화시켰다. 수치계산의 결과들은 동축제트 유동에서 발생하는 충격파구조 및 위치, 제트 중심축에서 발생하는 전압력 및 마하수분포 그리고 제트의 코어길이 등의 특성 값들

을 조사하기 위하여 사용되었다.

## 2. 수치계산법 및 경계조건

본 연구에서는 보조제트를 수반하는 초음속 제트유동장을 수치적으로 모사하기 위하여 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한 체적법을 적용하여 계산하였다. 지배방정식과 상세한 수치계산법에 대해서는 문헌<sup>(12)</sup>에 기술되어 있으므로, 여기서는 생략하도록 한다. 수치계산에서는 제트유동, 충격파, 벽면 근처의 경계층 유동을 정도 있게 해석하기 위하여 2차 정도의 upwind scheme을 사용하였으며, 시간 미분항의 적분은 다단계 Runge-Kutta 방법을 적용하였다. 본 연구에서는 수치계산의 영역이 계산결과와 경계조건의 설정에 영향을 미치지 않도록 예비해석을 여러 번 수행하여 반경 방향으로 노즐 출구직경의 약 30배, 그리고 노즐출구로부터 하류방향으로 약 150배의 영역을 설정하였다.

Fig. 3은 수치계산에 사용된 정렬 격자계의 일부를 나타낸 것으로 격자점은 약 50,000개이며, 벽면근처 및 주유동과 보조유동이 분사되는 부분에 격자점을 집중시켰다. 본 계산의 경계조건은 주유동과 보조유동에 각각 전압( $P_0$ )과 전온도( $T_0=300K$ )의 유입조건을 적용하였으며, 유출조건으로 일정압력(대기압) 조건을 적용하였다. 또 모든 고체벽면은 단일 no-slip 조건이 적용되었다. 수치계산에서는 난류 전단 응력 들을 계산하기 위하여 압축성 효과를 포함하는 표준 k- $\epsilon$  난류 모델을 적용하였다. 계산상의 수렴판정을 위하여 질량, 운동량, 에너지, 그리고 k와  $\epsilon$ 의 잔차들이  $10^{-4}$  이하로 되는 경우에 수렴해가 얻어지는 것으로 하였으며, 또 계산영역을 출입하는 질량유동의 Imbalance를 조사하여  $\pm 0.5\%$  이하로 되는 경우에 계산의 수렴조건을 설정하였다.

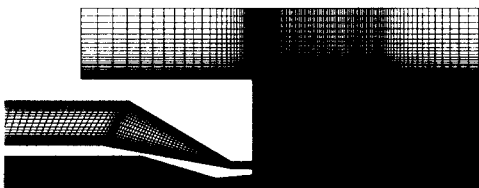


Fig. 3 Computational grid

## 3. 결과 및 고찰

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  $p_{0s}$  그리고 전온도를  $T_{0s}$ 로 하여, 주제트의 압력비 PR을  $p_{01}/p_a$ 로, 보조제트의 압력비 PR<sub>assist</sub>를  $p_{0s}/p_a$ 로 정의하였다. 따라서 PR<sub>assist</sub>=1.0인 경우에는 보조제트 입구에서 압력이 대기압과 동일하다. 본 연구에 적용된 노즐 압력비의 범위에 대하여 노즐출구에서 주제트유동의 Reynolds 수는  $1.53 \times 10^5 \sim 5.38 \times 10^5$ 까지 변화하였다.

### 3.1 제트유동장에 미치는 압력비의 영향

Fig. 4에는 보조제트가 없는 경우 주제트의 압력비 PR(= $p_{01}/p_a$ ) 변화에 따른 동축 제트의 등마하수 분포를 나타냈었다. 그림에서 PR=2.0인 경우는 노즐내에서 수직충격파가 발생하여 노즐출구에서 유동은 아음속 상태로 된다.

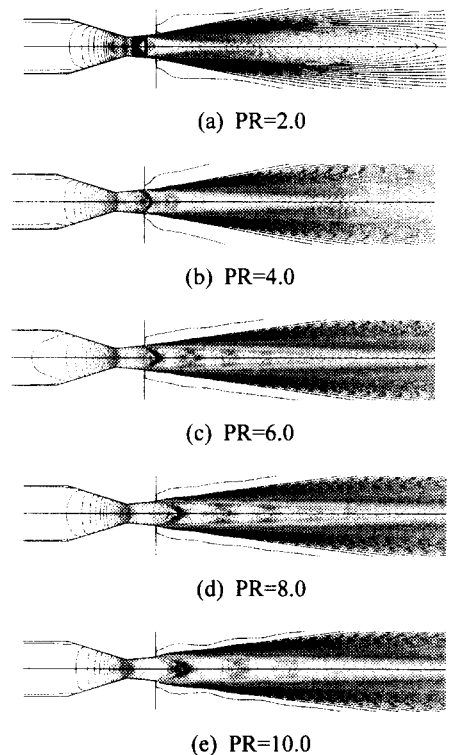


Fig. 4 Mach number contours with no assistant jet

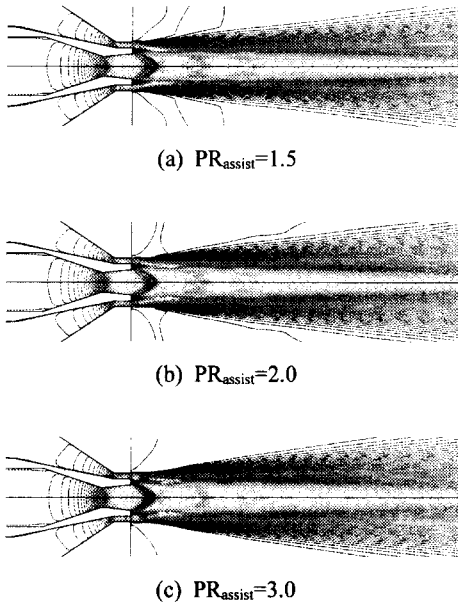
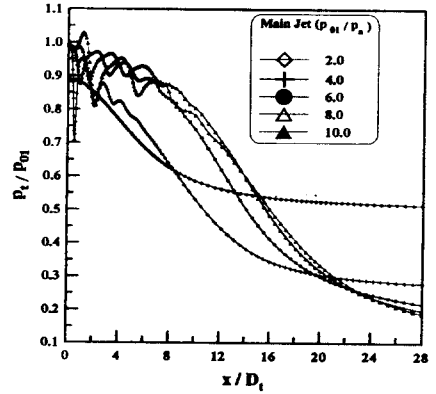


Fig. 5 Mach number contours for different assistant jets (PR=8.0)

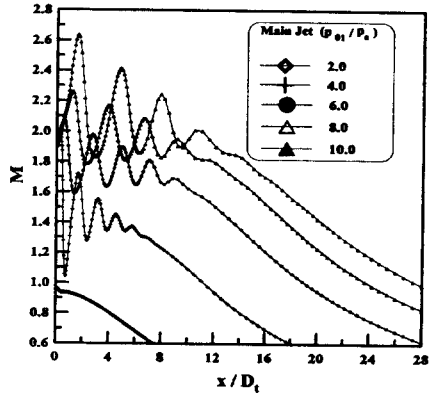
PR=4.0인 경우 노즐출구 바로 상류에 경사충격파가 발생하여 노즐의 벽면경계층과 복잡한 상호간섭을 하게 된다. 그러나 PR이 더욱 증가하는 경우 충격파는 노즐을 빠져 나와 전형적인 초음속 자유제트유동을 형성한다.

Fig. 5에는 PR=8.0인 경우에 보조제트의 압력비  $PR_{assist}(=p_{0s}/p_a)$ 를 1.5에서 3.0으로 변화시켜 얻어진 동축 제트의 등마하수분포를 나타내었다. 그림의 마하수분포에서 보조제트가 주제트에 충돌하여 동축 제트폭의 팽창을 억제하는 것으로 보이며, 이러한 경향은  $PR_{assist}$ 가 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타난다. 따라서 보조제트의 유동은 주제트 유동에 대하여 압력경계조건으로 작용하게 되므로 제트폭이나 전파길이 등에 영향을 미치는 것으로 보인다.

보조제트가 없는 경우, PR을 2.0에서 10.0으로 변화시켜 동축 제트의 유동방향 전압력 및 마하수분포를 Fig. 6에 나타내었다. 그림의 횡축은 노즐출구로부터 하류방향 거리  $x$ 를 노즐 목직경  $D_t$ 로, 그리고 국소전압  $p_t$ 는 노즐입구의 전압  $p_{01}$ 으로 무차원 하였다. PR=2.0인 경우 Fig. 4(a)에서 보인 바와 같이 노즐출구에서 유동은 아음속이므로 전압력 및 마하수는 유동방향으로 단조롭게



(a) Total pressure



(b) Mach number

Fig. 6 Total pressure and Mach number distributions along the jet center line (No assistant jet)

감소한다. PR=4.0 이상인 경우 동축 제트 유동장 내에서 발생하는 충격파 시스템으로 인하여 유동 방향으로 전압력 및 마하수는 증가와 감소를 반복하다가, 어떤  $x/D_t$  이상에서는 단조로운 감소의 형태를 보인다.

그러나 PR=4.0에서는 마하수가 노즐 출구에서 감소한 후 다시 증가하고 있어 노즐출구에서 충격파가 발생하는 과팽창상태라는 것을 알 수 있으며, PR=6.0 이상에서는 유동의 마하수가 유동 방향으로 증가한 후 감소하고 있으므로, 유동은 노즐출구에서 적정팽창 또는 부족팽창상태임을 알 수 있다. 한편 전압력분포로부터 PR=2.0과 4.0인 경우, 즉 노즐출구에서 제트유동이 과팽창상태로 되면 PR=6.0 이상인 부족팽창의 유동보다 전압력 감소가 작다는 것을 알 수 있다. 또 마하

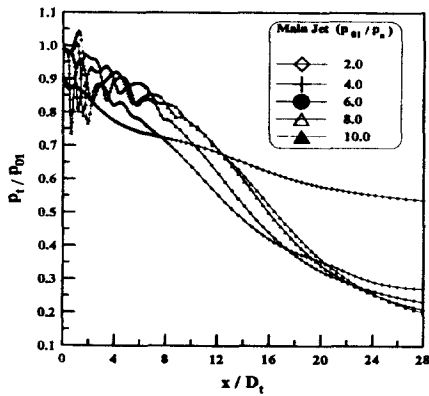
수분포로부터 PR이 증가할수록 유동방향으로 마하수의 변동도 증가하게 될 뿐만 아니라 마하수 변화 주기도 증가하게 된다. 이것은 제트내에서 발생하는 충격파와 시스템의 위치변화 때문이다. 이와같은 보조제트가 없는 경우의 결과는 참고문헌<sup>(13)</sup>의 실험결과와 정성적으로 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 PR<sub>assist</sub>가 1.5인 경우, PR 변화에 따른 전압력 및 마하수분포를 나타낸 것이다. 그림으로부터 동축 제트유동장의 정성적인 경향은 보조제트가 없는 Fig. 6과 유사하지만, 동축 제트의 유동방향으로 전압력 변동은 보조제트가 없는 경우보다 작으며, 피크마하수는 더욱 커짐을 알 수 있다. 이것은 보조제트가 노즐출구의 배압을 감소

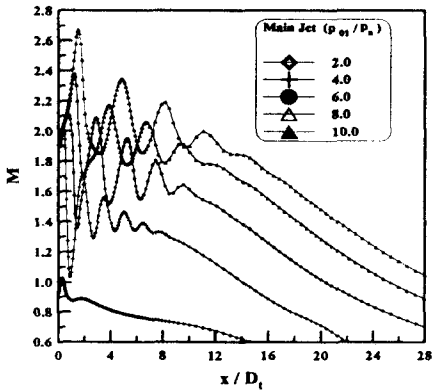
시켜, 주유동의 유효압력비를 증가시키는 역할과 제트경계에서의 두 제트유동의 전단작용으로 인하여 제트내부에서 발생하는 충격파의 강도가 증가하기 때문이다.

보조제트가 동축제트에 미치는 영향을 더 상세히 조사하기 위하여 Fig. 8에는 PR=8.0인 경우 보조제트의 PR<sub>assist</sub>를 1.0에서 3.0으로 변화시켜 얻어진 전압력 및 마하수분포를 나타내었다.

그림으로부터 보조제트가 주제트유동에 미치는 영향은 정성적으로 거의 유사하지만, PR<sub>assist</sub>가 증가함에 따라 제트내부에서 발생하는 충격파와 시스템은 더욱 강해진다는 것을 알 수 있다. 또 PR<sub>assist</sub>는 충격파와 시스템의 위치나 제트의 전과거리에도 약간의 영향을 미치는 것으로 보인다.

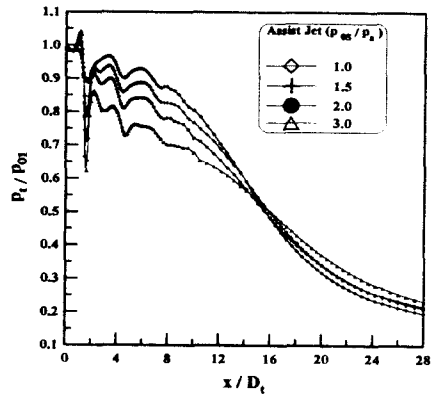


(a) Total pressure

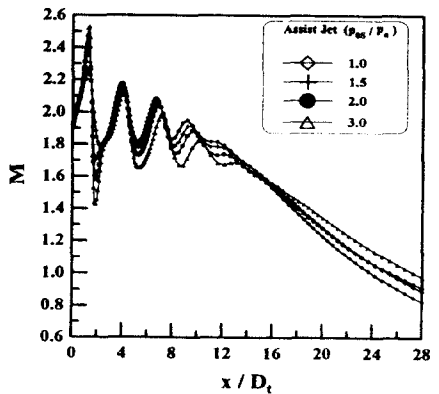


(b) Mach number

Fig. 7 Total pressure and Mach number distributions along the jet center line (PR<sub>assist</sub> = 1.5)



(a) Total pressure



(b) Mach number

Fig. 8 Total pressure and Mach number distributions along the jet center line (PR = 8.0)

그림(a)로부터  $x/D_t$ =약15.0 보다 상류에서는 보조제트가 없는 경우( $PR_{assist}=1.0$ )에 비하여 보조제트가 있는 경우( $PR_{assist} > 1.0$ )가 유동의 전압력  $p_t$ 가 적으며,  $x/D_t$ =약15.0 보다 하류에서는 그 반대가 된다. 또 Fig. 8(b)의 마하수분포로부터  $x/D_t$ =약15.0 보다 상류에서는 보조제트가 없는 경우에 비하여 보조제트가 있는 경우가 유동의 마하수는 작으며,  $x/D_t > 15.0$ 에서는 그 반대의 경향을 나타낸다. 이것은 제트유동장내에 충격파가 발생하는 초음속 영역과 아음속 영역에서 발생하게 되는 유동의 주요 손실기구가 다르기 때문이다. 즉 제트내 초음속 영역에서 유동의 손실은 주로 충격파에 의하여 발생되는데 비하여, 아음속 영역에서는 두 유동의 혼합손실 및 점성소산에 의한 유동의 손실이 발생하기 때문이다.

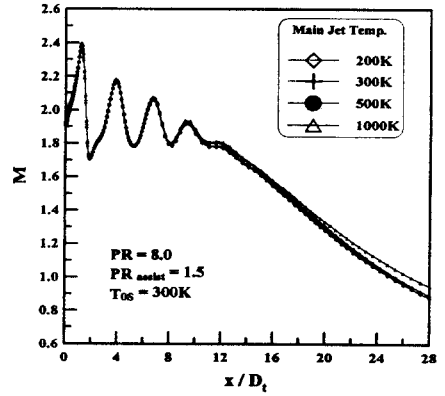
3.2 제트유동에 미치는 전온도의 영향

주제트 및 보조제트의 전온도가 동축 제트에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Fig. 9에는 전온도 변화에 따른 동축 제트의 마하수분포를 나타내었다

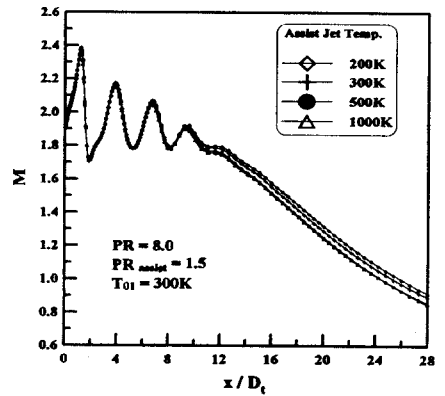
Fig. 9(a)는 보조제트의 전온도가 300K로 일정하고, 주제트의 전온도가 200K에서 1000K로 변화하는 경우이며, Fig. 9(b)는 주제트의 전온도가 300K로 일정하고, 보조제트의 전온도가 200K에서 1000K로 변화하는 경우이다. 두 그림으로부터 제트의 전온도가 변화하는 경우, 제트내에서 충격파시스템이 발생하는 영역 약  $x/D_t < 12$ 까지는 유동방향의 마하수분포는 거의 동일하며,  $x/D_t > 12$ 에서 전온도의 영향이 발견된다. 즉 주제트의 전온도가 증가하는 경우 동일한  $x/D_t$ 의 위치에서 제트의 마하수는 약간 증가하며, 보조제트 전온도가 증가하는 경우에는 마하수가 감소하는 경향을 보이고 있다.

3.3 제트의 코어길이

Fig. 10에는 전온도 및 PR이 초음속 제트 코어 길이에 미치는 영향을 나타내었다. Fig. 2에서 기술한 바와 같이, 그림의 종축은 동축 제트의 초음속 제트 코어길이  $L_s$ 를 노즐 목직경  $D_t$ 로 무차원한 값을, 그리고 횡축은 주제트의 압력비를 나타낸다.



(a) Effect of primary jet temperature



(b) Effect of assistant jet temperature

Fig. 9 Mach number distributions along the jet center line

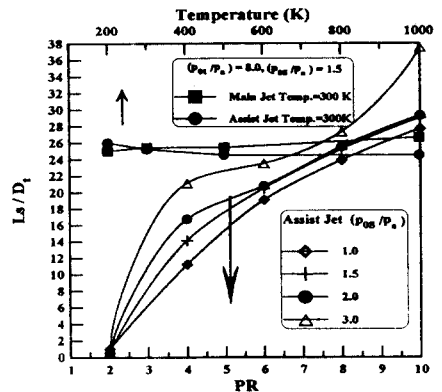


Fig. 10 Jet core length

주제트 및 보조제트 압력비가 증가할수록 초음속 제트 코어의 길이  $L_s$ 는 증가하게 되지만, 전 온도 변화에 따른  $L_s$ 의 변화는 크지 않다. 동일한 PR에 대해서  $PR_{assist}$ 가 증가할수록  $L_s$ 의 값은 길어지는 것으로 보인다. 또 주어진 PR에 대해서  $PR_{assist}$ 가 증가함에 따라  $L_s$ 의 값이 증가하는 정도는 PR=약7.0에서 가장 작은 것으로 보인다. 이것은 PR=7.0에서 주제트 유동은 적정팽창에 가까운 상태이며, 이 경우 보조제트 유동은 주제트의 코어길이에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

3.4  $x=10mm$ 에서의 전압력

제트유동을 이용하는 가스절단에서는 절단노즐과 모재와의 거리가 너무 가까우면 절단이나 가공시 발생하는 용융금속들이 절단노즐을 손상시키게 되며, 일정 거리 이상이 되면 제트유동의 운동에너지가 감소되어 절단성능이 저하되어 경험적으로 절단노즐과 모재와의 거리  $x$ 를 약 10mm로 설정하고 있다.

Fig.11에는 통상적으로 가스제트 절단에서 절단이 용이하게 되는  $x/D_t$ =약2.0에서의 전압력을 PR의 변화에 대하여 나타내었다. 전압력은 과팽창 상태인 PR=2.0에서 4.0까지는  $PR_{assist}$ 가 증가할수록 증가하나 PR=6.0이상에서는  $PR_{assist}$ 가 증가할수록 감소하는 것으로 보인다. 특히  $PR_{assist}=3.0$ 인 경우 다른 보조제트의 압력비에 대해서 보다 유동의 전압력은 현저한 감소를 보이고 있다. 이것은 전술한 바와 같이  $PR_{assist}$ 의 증가는 주유동의 유효 압력비 증가 및 제트경계에서의 두 제트유동이 진단작용으로 인하여 제트내부에서 발생하는 충격파의 위치 및 강도를 변화시키기 때문이다. 즉 PR 및  $PR_{assist}$ 의 변화에 따라 충격파의 위치가 변화하며, 참고로  $x/D_t$ =약 2.0 위치는 충격파 전후에 위치한다.

3.5 충격파의 위치 변화

Fig. 12는 동축제트내의 충격파의 위치를 압력비에 따라 나타낸 것으로 PR 및  $PR_{assist}$ 가 증가할수록 첫 번째 충격파의 위치는 유동의 하류방향으로 이동하며, 충격파사이의 간격은 증가한다. 그러나 전체적인 충격파 시스템의 위치는 PR에 크게 의존하며,  $PR_{assist}$ 은 과팽창상태의 제트유동에서 발생하는 충격파의 위치에 영향을 미치는 것으로 보이며, 주로 첫 번째 충격파보다는 세 번째

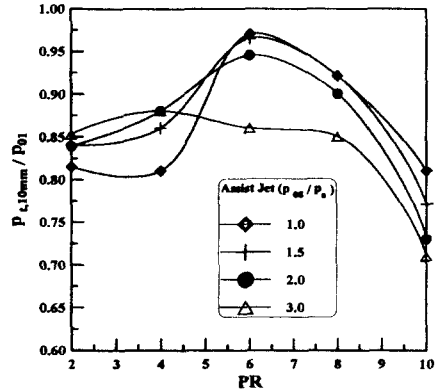


Fig. 11 Total pressure with PR

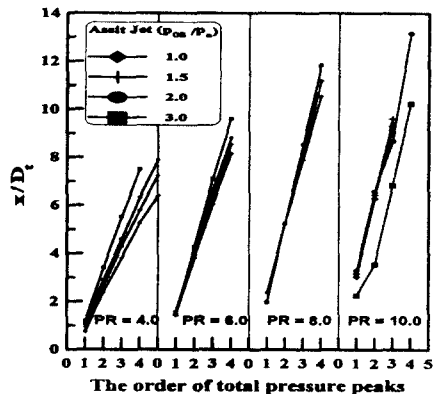


Fig. 12 Variation of total pressure peak locations

이후의 충격파 위치에 큰 영향을 미친다.

이러한 충격파의 위치는 Fig. 11에서도 언급한 바와 같이 절단위치에서의 유동의 전압력을 결정하므로 실제응용에서 절단노즐과 모재와의 거리를 설정하는데 중요한 자료가 된다.

4. 결론

본 연구에서는 가스절단에 사용되는 초음속 제트유동에 대한 기초적 연구의 일환으로 동축초음속 노즐에 대하여 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한 체적법을 적용한 수치계산을 수행하여 보조제트가 주제트에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동축 제트유동장은 PR에 의존하여 팽창상

태가 결정되며, 유동방향의 전압력 및 마하수변동은 PR이 증가할수록, PR<sub>assist</sub>가 감소할수록 증가한다.

(2) 제트의 초음속 영역에서는 제트의 진온도는 제트특성에 큰 영향을 미치지 않는다.

(3) 제트코어 길이 Ls는 PR 및 PR<sub>assist</sub>가 증가할수록 증가하지만 유동의 적정팽창상태에서 증가의 정도가 가장 적으며, 제트의 진온도에는 큰 영향을 받지 않는다.

(4) 충격파 위치는 PR 및 PR<sub>assist</sub>가 증가할수록 유동의 하류방향으로 이동하며, 충격파 사이의 간격도 증가하나 PR<sub>assist</sub>는 제트내부에서 발생하는 세 번째 이후의 충격파의 위치에 영향을 미친다.

### 참고문헌

- (1) Slattman, G. V. and Roper, E. H., 1951, *Oxygen Cutting*, McGraw-Hill Co.
- (2) Crowe, J. J., 1942, "Divergent Nozzle Tips for Economical Oxygen Cutting," *Weld. J.*, Vol. 21-1, pp. 34~40.
- (3) 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.
- (4) Scroggs, S. D. and Settles, G. S., 1996, "An Experimental Study of Supersonic Microjets," *Experiments in Fluids*, Vol. 21, pp. 401~409.
- (5) Owczat, J. A., 1964, "Fundamentals of Gas Dynamics," International Textbook Co.
- (6) 김희동, 이종수, 1996, "가스 미립화용 노즐로부터 방출되는 초음속 분류에 관한 실험적연구 (I)," 대한기계학회논문집(B), 제20권, 제2호, pp.697~709.
- (7) 金炳哲, 1999, "高速ガス切斷法について," 容接技術, pp. 121~124.
- (8) 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.
- (9) Masuda, W. and Nakamura, T., 1993, "Effects of Nozzle Contour on the Aerodynamics Characteristics of Underexpanded Annular Impinging Jets," *JSME Int. J., Series II*, Vol. 36, No. 4, pp. 238~244.
- (10) Papamoschou, D. and Debiassi, M., 1999, "Noise Measurement in Supersonic Jets Treated with Mach Wave Elimination Method," *AIAA J.*, Vol. 37, No. 2, pp. 154~160.
- (11) Charyulu, B. V. N, Kurian, L., Venugopalan, P. and Sriramulu, V., 1998, "Experimental Study on Mixing Enhancement in Two Dimension Supersonic Flow," *Experiments in Fluids*, Vol. 24, pp. 340~346.
- (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) 이권희, 김지은, 하지수, 박부민, 1999, "분리형 가스절단팁 개발," 대한용접학회 추계학술대회 논문집, pp. 146~149.