초음속 코히어런트 제트에 관한 기초적 연구

정미선* · 조위분* · 김희동**

A Fundamental Study of the Supersonic Coherent Jet

Mi-Seon Jeong, Wee-Bun Cho and Heuy-Dong Kim

Key Words : Compressible Flow(압축성 유동), Combustion(연소), Supersonic Jet(초음속 제트), Supersonic Coherent Jet(초음속 코히어런트 제트), Correctly-Expanded Jet(적정팽창 제트), Jet Core Length(제트 코어 길이)

Abstract

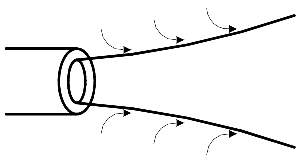
In steel-making processes of iron and steel industry, the purity and quality of steel can be dependent on the amount of CO contained in the molten metal. Recently, the supersonic oxygen jet is being applied to the molten metal in the electric furnace and thus reduces the CO amount through the chemical reactions between the oxygen jet and molten metal, leading to a better quality of steel. In this application, the supersonic oxygen jet is limited in the distance over which the supersonic velocity is maintained. In order to get longer supersonic jet propagation into the molten metal, a supersonic coherent jet is suggested as one of the alternatives which are applicable to the electric furnace system. It has a flame around the conventional supersonic jet and thus the entrainment effect of the surrounding gas into the supersonic jet is reduced, leading to a longer propagation of the supersonic jet. The objective of the present study is to investigate the supersonic coherent jet flow. A computational study is carried out to solve the compressible, axisymmetric Navier-Stokes equations. The computational results of the supersonic coherent jet are compared with the conventional supersonic jet.

1. 서 론

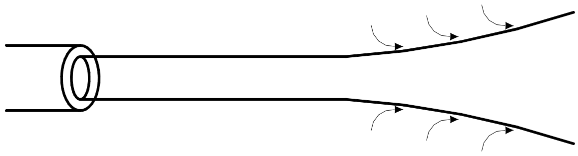
일반적으로 철광석을 녹인 선철에는 대략 3-5% 정도의 탄소 성분을 포함하고 있어, 강의 기계적 강도를 저하시키는 주요 원인으로 된다. 따라서 선철에 포함된 탄소성분을 제거하기 위해서는, 고압의 산소 제트를 쇳물에 충돌시켜 철분에 포함된 이산화탄소 성분을 가능한 제거하는 공정이 요구된다. 따라서 제트는 고압의 산소를 노즐이나 오리피스로부터 방출시켜, 제트를 전로의 쇳물에 충돌시킴으로써 쇳물에 포함된 이산화탄소와 산소의 화학반응을 촉진시킬 필요가 있다. 이러한 경우, 산소 제트는 쇳물에 가능한 깊게 침투하여, 제트와 쇳물의 혼합을 촉진시켜 주어야 한다.

초음속 제트의 경우 압력비가 주어지면, 제트 내부에서 발생하는 바렐 충격파나 제트 경계구조 등을 이론적, 해석적으로 쉽게 구할 수 있다[1-4]. 그러나, 전로에서 사용되는 산소 제트의 경우에는 가능하면 제트 코어길이 및 초음속 길이를 길게 하여 쇳물에 충돌하는 제트의 침투 길이를 길게 하여야 한다. 이를 위해서 제트가 주변의 기체와 혼합하여 제트폭이 확대되는 것을 가능한 억제하여야 한다. 만일 주변 기체가 산소 제트 내로 혼입(entrainment)되는 정도를 줄일 수 있다면, 제트의 초음속 길이뿐만 아니라 코어 길이가 길어질 것이며, 쇳물 속으로 산소 제트의 침투길이는 증가할 것이다. 이것은 제트 출구 부근에서 기체를 연소시키는 방법 등을 이용하여 제트 주변의 배압을 낮추게 된다면, 침투 길이의 향상에 효과적일

** 안동대학교 기계공학부
E-mail : kimhd@andong.ac.kr
TEL : (054)820-5622 FAX : (054)823-5495
* 안동대학교 대학원 기계공학과



(a) Conventional supersonic jet



(b) Supersonic coherent jet

Fig. 1 Schematics of a conventional supersonic jet and a supersonic coherent jet

것으로 예상된다.

Fig.1 은 단순한 초음속 제트와 제트가 분출되는 주위에 화염을 발생시켜 제트 코어 길이를 길게 한 coherent 제트를 비교하였다. Fig.1 (a)는 단순한 초음속 제트 유동을 나타낸 것으로, 제트가 노즐로부터 분출되어 주위의 기체를 혼입하며 제트폭이 확산되고 있다. Fig.1 (b)는 coherent 제트 유동으로, 제트 주위의 화염에 의해 주제트와 주변의 기체와의 혼입이 억제됨으로 제트 코어 길이가 길어진다.

coherent 제트에 대한 종래의 연구로는, Mathur 등(5-8)은 철광석 제조 공정에서 불필요한 불순물들을 제거하기 위해서 coherent 제트에 대한 실험적 연구를 수행하였다. Brhel(9) 등은 전로에서의 탈탄소화를 하기 위해서 초음속 산소 제트 주위에 화염을 생성시킨 유동장에 대한 연구를 수행하였다. 그러나, 아직까지 coherent 제트에 대한 연구는 매우 미진한 실정이며, 기존의 연구 자료만으로 coherent 제트의 유동 특성을 명확히 파악하는 것은 불충분하다.

본 연구에서는 수치해석을 통해서 coherent 제트의 유동 특성 및 연소 기체가 제트 코어 길이에 미치는 영향을 조사하였다. 수치계산에는 2 차원 축대칭, 압축성 Navier-Stokes 유동 방정식에 표준 k-ε 난류 모델을 적용하였다. 얻어진 수치해석 결과는 유용한 실험 결과(10)와 비교하였다.

2. 수치해석

본 연구에서는 coherent 제트 유동을 수치적으로 모사하기 위하여, 표준 k-ε 난류 모델을 포함하는 축대칭, 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한 체적법을 적용하였다. 본 수치계산에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] -\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i'}\,\overline{u_j'}\right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H)= \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(x+\frac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_i}+u_j(\tau_{ij})_{eff}\right] \tag{3}$$

위의 식들은 유한 체적법으로 이산화하였으며, 공간항에 대해서는 풍상차분법, 시간항에 대해서는 4 단계 Runge-Kutta 법으로 적분하였다.

비예혼합 연소에 대한 수치계산은 PDF (Probability Density Function)을 사용하였으며, 지배방정식은 다음과 같다(11-12).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{f})+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i\bar{f})=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\frac{\partial\bar{f}}{\partial x_i}\right) \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\overline{f'^2}\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i\overline{f'^2}\right)= \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\frac{\partial\overline{f'^2}}{\partial x_i}\right)+C_g\mu_t\left(\frac{\partial\bar{f}}{\partial x_i}\right)^2-C_d\rho\frac{\varepsilon}{k}\overline{f'^2} \tag{5}$$

여기에서, f 는 혼합 분율(mixture fraction)으로, $f=\dfrac{Z_i-Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel}-Z_{i,ox}}$ 로 나타낸다. Z_i 는 원소 i 의 질량 분율이며, 아래첨자 ox 와 $fuel$ 은 각각 산화제와 연료를 의미한다. 또, σ_t 와 C_g, C_d 의 값은 각각 0.7, 2.86, 2.0 이다(12).

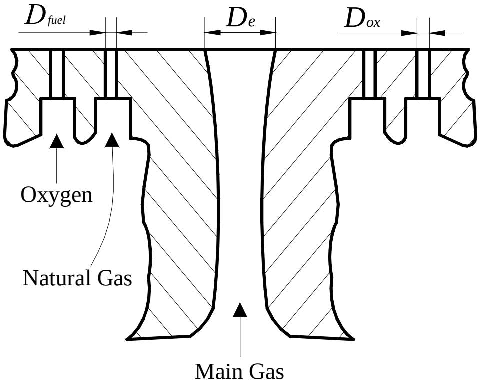
식(5)의 $\rho u_i'\overline{f'}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\rho u_i'\overline{f'}=-\frac{\mu_t}{\sigma_t}\frac{\partial\bar{f}}{\partial x_i} \tag{6}$$

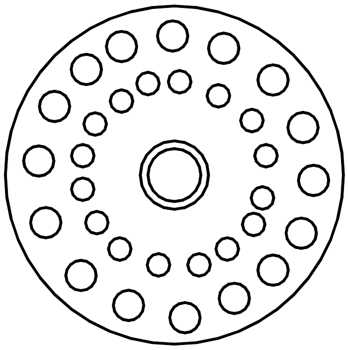
평균 열역학적, 화학적 성질들은 아래의 식으로 표현된다.

$$\bar{\phi}=\int_0^1\phi(f)\,p(f)\,df \tag{7}$$

본 수치해석의 연소에 사용된 연료는 Natural gas 인 CH_4 이며, 산화제는 O_2 를 사용하였다. 연료와



(a) Coherent nozzle



(b) Cross-sectional nozzle used in experiments

Fig. 2 Schematics of the supersonic coherent nozzle

산화제의 반응식은 다음과 같다.

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \quad (8)$$

Fig.2 는 본 수치 계산에 사용된 노즐의 형상이다. Fig.2 (a)는 문헌(10)의 실험에 사용된 노즐이며, 주제트의 노즐은 출구 직경(D_e)은 0.58inch, 목(throat)의 직경은 0.427inch 인 설계 마하수가 2.0 인 초음속 노즐을 사용하였다. 연료와 산화제가 분사되는 보조 노즐은 음속 노즐로써, Natural gas 와 Oxygen 노즐의 출구 직경은 각각 D_{fuel} = 0.113inch, D_{ox} = 0.161inch 이다. Fig.2 (b)는 실험[10]에서 사용된 노즐의 정면도를 나타낸다. 본 연구에서는 2 차원 축대칭 계산을 수행하였으며 연료와 산화제가 분사되는 노즐의 형상은 환형관의 형태로써, 실제 실험에 사용된 노즐 형상과는 다소 상이하다.

Fig.3 은 본 수치계산에 적용된 계산 영역과 경계 조건을 나타낸다. 계산 영역은 노즐 출구로 부터 하류 방향으로 $300D_e$, 노즐 중심축에서 반경방향으로 $70D_e$ 의 영역을 설정하였다. 경계 조건으로, 초음속 노즐의 입구에는 pressure inlet 조건, 음속 노즐의 입구에는 mass flow inlet 조건을 적용하였다. 또한, 노즐의 출구에는 pressure outlet 조건, 모든 고체 벽면에는 단열 no-slip 조건, 중심축에 대해서는 축대칭 조건을 적용하였다. 본 수치해석에

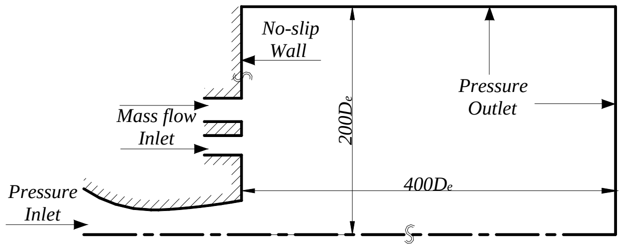


Fig. 3 Computational flow field and boundary conditions

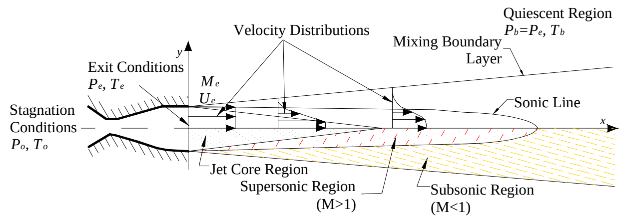


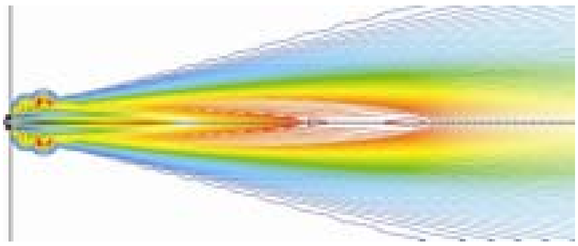
Fig. 4 Schematic of supersonic correctly-expanded jet

서 제트 유동장은 중심축에 대해서 대칭이므로 상반부에 대해서 약 4 만개의 정렬 격자를 생성하여 수치해석을 수행하였다. 수치해의 수렴 판정을 위하여 질량, 운동량, 에너지, k 와 ε의 잔차를 10^{-4} 이하로 설정하였으며, 노즐의 입구와 출구에서 질량 유량의 변화를 조사하여 질량 유량의 합이 0.5% 이하로 되는 조건을 수치해가 수렴한 것으로 판정하였다.

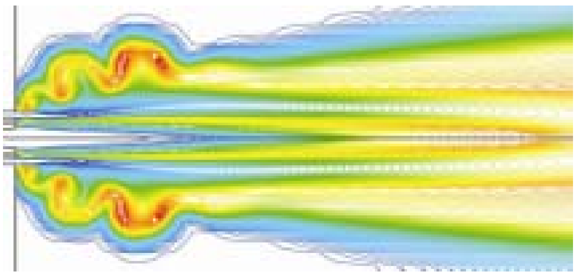
3. 결과 및 고찰

Fig.4 는 노즐 출구로부터 적정 팽창을 하는 초음속 제트 유동장의 모식도를 나타낸다. 그림에서 P_o, T_o 는 노즐의 입구에서의 정체 상태, P_e, T_e 는 노즐의 출구에서의 출구 상태, P_b, T_b 는 대기 상태를 나타낸다. 제트 유동이 노즐 출구로부터 적정 팽창하는 경우, 제트 내부에서는 충격파가 발생하지 않으며, 노즐 출구면에서 균일 속도를 유지하는 제트 코어 부분이 하류까지 지속된다. 제트는 하류에서 주위의 유체와 혼합함으로써 제트 코어 영역은 점차 축소되며, 제트 내부에서는 더 이상 균일 속도가 유지되지 않는다. 그러나, 유동은 초음속 상태로 계속 혼합하여, 음속선(sonic lone)을 지나면서 아음속 제트로 천이한다. 노즐 출구로부터 균일 속도를 유지하는 영역의 종점까지의 거리를 제트 코어 길이(jet core length)라 하며, 노즐 출구로부터 음속선(sonic line)까지의 길이를 초음속 길이(supersonic length)라고 한다[13].

Fig.5 는 주제트의 마하수 M_e = 2.0, P_b/P_e = 1.0 인 경우, 초음속 coherent 제트의 등온도 선도를 나타낸다. Fig.5 (a)에는 유동장을 전체의 등온도 선도를

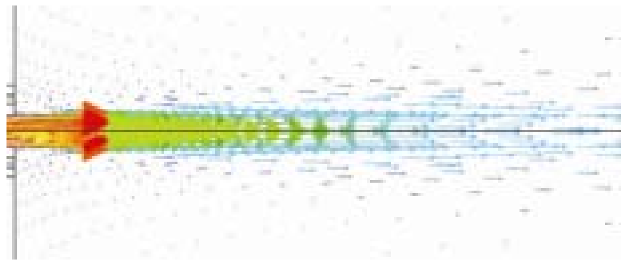


(a) Static temperature field

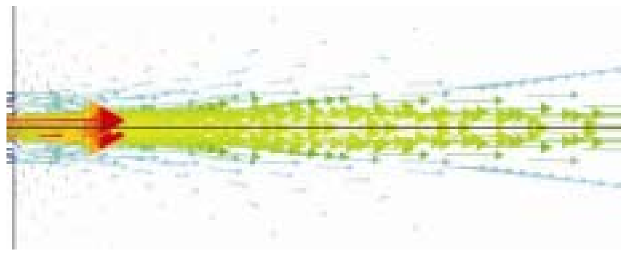


(b) The flow field near the nozzle exit

Fig. 5 Static temperature contours of the supersonic coherent jet (M_e = 2.0, P_b/P_e = 1.0)



(a) Conventional supersonic jet



(b) Supersonic coherent jet

Fig. 6 Velocity vector contours (M_e = 2.0, P_b/P_e = 1.0)

나타낸 것이며, 노즐 출구에서 난류 화염이 생성되는 것을 관찰할 수 있다. Fig.5 (b)에는 노즐 출구 부근의 유동장을 상세하게 나타낸 것으로, 주제트가 분출되는 주위에 연료와 산화제가 혼합되어 복잡한 유동장이 형성된다. 주제트의 주제트가 분출되는 주위에 난류 화염이 생성되어 화염의 유동은 난동(fluctuation)하지만, 주제트 유동은 Fig.4 의 제트가 적정팽창 하는 모식도와 유사하게 나타난다.

Fig.6 은 출구 마하수가 2.0 인 경우, 화염의 유무에 따른 초음속 제트 유동장을 나타낸 속도 벡터 선도이다. Fig.6 (a)는 화염이 없는 단순한 초음속 제트 유동의 경우로써, 제트가 분출되면서 주위의 기체의 기체와 제트가 혼합을 하고 있다. Fig.6 (b)는 화염을 가진 coherent 제트의 유동장을 나타낸다. 단순한 초음속 제트에 비해 주위의 기체는 노즐의 출구면에서 상당히 떨어진 영역에서 주제트와 혼합을 하고 있다. 이것은 주제트 주위의 화염이 주제트와 대기의 기체가 혼합하는 것을 억제시켜 주기 때문이다.

Fig.7 에는 노즐 출구 마하수가 2.0 인 초음속 제트에서, 화염이 제트 유동장에 미치는 영향을 알아보기 위해 실험 결과[10]와 수치해석 결과를 비교하였다. 여기에서 u_e 는 주제트 노즐의 출구면의 속도를 의미한다. closed symbol(●, ■)은 화염이 없는 제트 유동의 결과이며, open symbol(○, □)은 화염을 가진 coherent 제트 유동에 대한 결과이다. 원모양(○, ●)은 실험 결과[10], 사각형 모양(□, ■)은 본 수치해석 결과를 나타낸다. 수치해석 결과에서, 화염이 없는 제트의 경우에는 속도가 균일

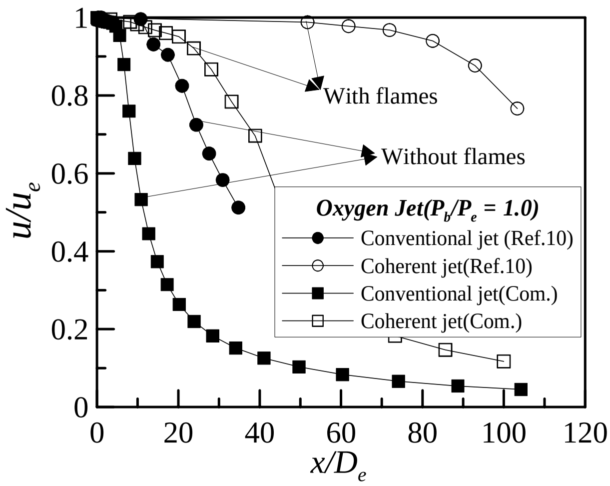


Fig. 7 Velocity distributions along the jet axis (P_b/P_e = 1.0, M_e = 2.0)

하게 유지되는 영역이 노즐 출구 직경의 약 7~8 배가 되며, 그 이후의 영역에서 속도는 서서히 감소한다. 그러나, 주제트 유동 주위에 화염이 있는 coherent 제트의 경우, 속도가 균일하게 유지되는 영역은 노즐 출구 직경의 약 20 ~ 25 배 정도로써, 화염이 없는 제트에 비해 약 3 배 정도 더 길다. 수치해석 결과는 실험 결과와 많은 차이를 보이는데, 이것은 화염이 발생하는 노즐의 형태와 관련이 있다. 본 연구에서는 2 차원 축대칭 계산을 수행하였으므로, 화염은 환형관의 출구로부터 분출되지만, 실험에서는 주제트 주위에 설치된 수 많은 출구(Fig.2 (b))로부터 각각의 화염이 분출되기 때문이다.

Fig.8 에는 단순한 초음속제트와 초음속 coherent

제트에 대해서 노즐 출구로부터 x/D_e =1, 10, 20, 30 및 40 인 지점의 반경 방향 속도 분포를 나타내었다. Fig.8 (a)의 단순한 초음속 제트의 경우, x/D_e=1 인 지점의 반경방향 속도는 제트 중심축(r/D_e=0) 근처에서 일정한 값을 유지하다가, 제트 경계에서 급격한 속도 구배를 가지며 감소한다. x/D_e가 증가할수록, 즉, 노즐 출구로부터 멀어질수록, 제트 중심축의 속도는 감소한다. 제트 경계에서의 속도 구배는 완만해지며, 제트폭도 넓어진다. Fig.8 (b)에는 coherent 제트의 반경 방향 속도 분포이며, 초음속 제트의 경우와 유사한 경향을 나타낸다. 그러나, 초음속 제트에 비해 coherent 제트가 중심축에서 더 큰 값을 가지며, 제트 경계에서의 속도 구배는 더 급격하다. 이것은 초음속 제트에 비해 coherent 제트가 속도를 균일하게 유지하는 제트 코어 영역이 상당히 길게 나타난다.

Fig. 9 는 출구 마하수(M_e)가 2.0, 압력비(P_b/P_e)가 1.0 인 단순한 초음속 제트와 초음속 coherent 제트의 질량 유량비를 나타내었다. 단순한 초음속 제트의 질량 유량비는 노즐 출구에서 멀어질수록, 증가하고 있다. 초음속 coherent 제트의 경우, 단순한 초음속 제트와 유사한 경향을 나타내지만, 단순한 초음속 제트에 비해 작은 값을 가진다. 이는 주제트와 주변 기체와의 혼합이 화염으로 인하여 단순한 초음속 제트에 비해 적어지기 때문이다.

Fig.10 은 출구 마하수가 2.0 인 coherent 제트의 경우, 노즐 출구와 대기의 압력비(P_b/P_e)의 변화에 따른 등속도 선도를 나타낸다. Fig.10 (a)는 약한 부족팽창 상태인 P_b/P_e=0.8 인 경우이며, 주제트의 내

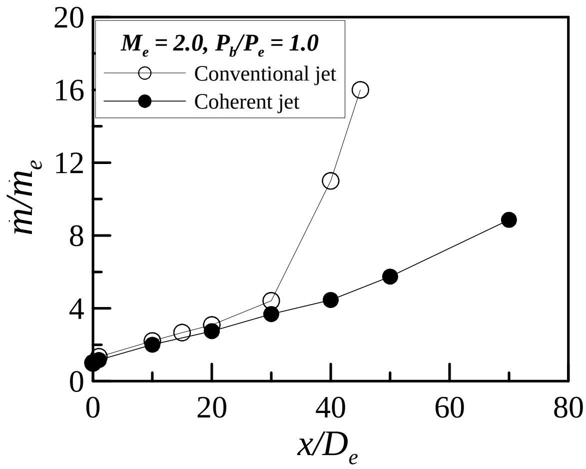
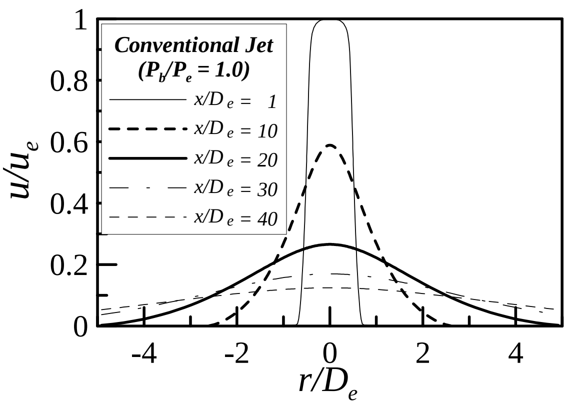
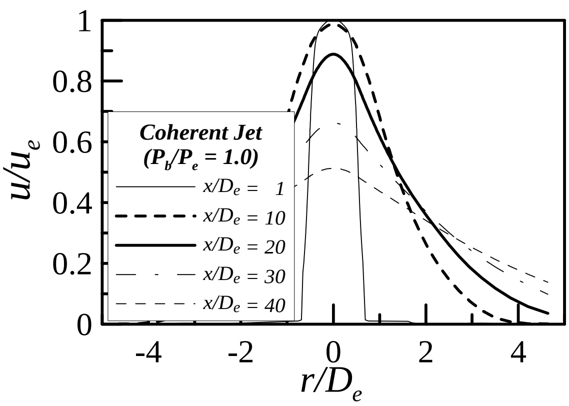


Fig. 9 Mass flow rate of the conventional jet and coherent jet (M_e =2.0, P_b/P_e = 1.0)

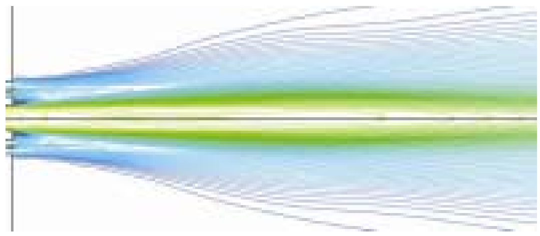


(a) Conventional supersonic jet

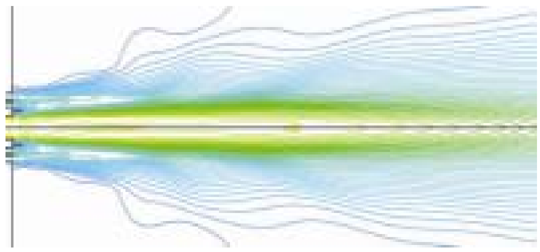


(b) Supersonic coherent jet

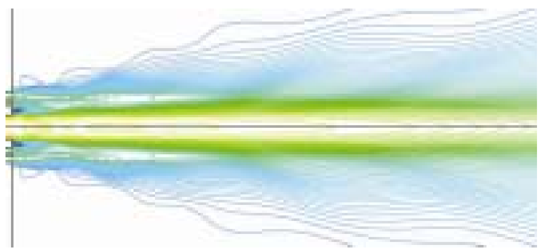
Fig. 8 Radial velocity distributions (M_e = 2.0, P_b/P_e = 1.0)



(a) P_b/P_e = 0.8



(b) P_b/P_e = 1.0



(c) P_b/P_e = 1.5

Fig. 10 Velocity contours for various pressure ratios (M_e = 2.0)

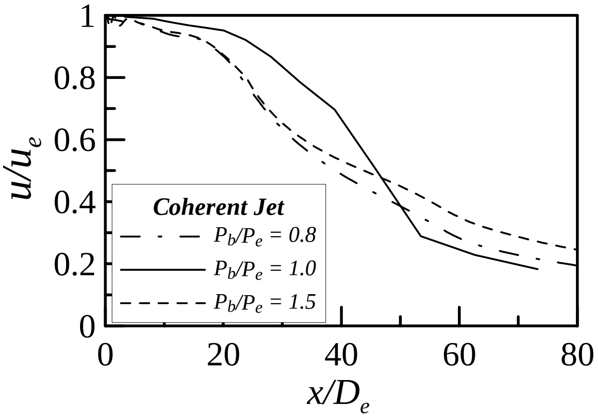


Fig. 11 Velocity distributions along the jet axis (M_e = 2.0)

부에서 충격파 구조가 잘 관찰되지 않는다. Fig.10 (b)는 압력비(P_b/P_e)가 1.0 인 적정팽창 제트인 경우이며, Fig.9 (c)는 압력비(P_b/P_e)가 1.5 인 약한 과팽창 상태로, 노즐 출구 부근에서 충격파 구조가 미세하게 나타나고 있다.

Fig.11 은 coherent 제트의 압력비(P_b/P_e)의 변화에 따른 제트 중심축을 따르는 속도 분포를 나타내었다. 약한 부족 팽창 상태인 P_b/P_e =0.8 인 경우, 속도는 노즐 출구에서부터 감소하고 있으며, $x/D_e<$ 약 45 일 때, P_b/P_e =1.0 에 비해 속도 분포는 작게 나타나고 있다. 그러나 x/D_e >약 45 인 경우에는 크게 나타나고 있다. 약한 과팽창 상태를 나타내는 P_b/P_e =1.5 인 경우, 속도 분포는 부족팽창의 경우와 유사하게 나타나지만, x/D_e=30 이후에서는 더 작게 나타난다. P_b/P_e =1.0 인 경우에 비해, x/D_e < 약 50 인 경우에는 속도분포는 작게 나타나며, x/D_e >약 50 인 경우에는 크게 나타나고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 2 차원 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용한 수치해석을 통하여 초음속 coherent 제트의 유동 특성을 조사하였다. 수치해석을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 주제트 주위의 화염이 주제트와 주변 기체가 혼합하는 것을 억제시킴으로써, 화염이 없는 초음속 제트에 비해 coherent 제트의 제트코어 길이는 약 3 배정도 더 길어진다.

(2) 주제트와 주변 기체와의 혼합으로 인한 질량 유량은 화염이 없는 초음속 제트에 비해 coherent 제트가 더 작다.

(3) 제트 코어 길이에 대해서는 부족팽창 및 과팽창 coherent 제트에 비해, 적정팽창 coherent 제트의 경우가 더 길게 나타났다.

(4) 수치해석 결과는 실험결과와 일치하지 않으며, 이것은 실험에서는 3 차원 형상인 노즐을 사용하여 연구를 수행하였지만, 본 연구에서는 2 차원 축대칭으로 coherent 제트 유동에 대해 수치 해석하였기 때문이다.

후 기

본 논문은 2003 년도 두뇌 한국 21 사업에 의해 지원되었음.

참고문헌

(1) Fox, J. H., 1974, "On the Structure of Jet Plumes," J. AIAA, Vol.12, pp.105-107.
(2) Hu, T. and McLaughin, D., 1990, "Flow and Acoustic Properties of Low Reynolds number Underexpanded Supersonic Jets," J. Sound and Vibration, Vol.141, pp.485-505.
(3) 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.
(4) Amson, T. and Nicolls, J., 1959, "On the Structure of Jets from Highly Underexpanded Nozzles into still Air," J. Aero space Science, Jan., pp.16-24.
(5) Mathur, P. C., Konicsics, D. and Engle, D., 1997, "Results of Oxygen Injection in the EAF with Praxair Coherent Jet Injectors: A Novel Technology," Electric Furnace Conference Proceedings, ISS, Vol.55, pp.305-313.
(6) Busboom, E. Cooper, S. and Daubler, L., 1998, "Improving EAF Productivity with Praxair Coherent Jet Technology," Electric Furnace Conference, November.
(7) Sarma, B. et al., 1998, "Fundamental Aspects of Coherent Gas Jets," Electric Furnace Conference Proceedings, ISS, Vol.56, pp.657-672.
(8) Anderson, J. E., Mathur, P. C. and Selines, R. J., 1998, "Method and Introducing Gas into a Liquid," U.S. Patent No.5814125, September.
(9) Brhel, J., Shver, V., Coburn, M., Blakemore R. and Mendrek, A., 2001, "An Improved Method of Appling Chemical Energy into the EAF," Air Products and Chemicals, Inc.
(10) Anderson, J. E., Sommers, N. Y., Farrenkopf, D. R. and Bethal, Conn., 1998, "Coherent Gas Jet," U.S. Patent No.5823762, Oct.
(11) Bish, E. S. and Norton T. S., 1998, "Numerical Modeling of Turbulent Jet Diffusion Flames: Challenges and Implications for Flare Flame Simulations," America/Japanese Flame Research Committee Int'l Symposium, October.
(12) FLUENT V6 User's Guide, 2001, Volume 3, Fluent, Inc.
(13) Shire, J. W. and Seubold, J. G., 1967, "Length of the Supersonic Core in High-Speed Jets," J. AIAA, Vol.5, pp.2062-2064.