

Jet가 분출되는 채널내 정사각단면 실린더 주위유동 및 혼합현상

엄준석* · 김도형* · 양경수**

Confined laminar vortex shedding and scalar mixing around a square cylinder with a jet

Jun-Seok Eom, Do-Hyeong Kim, Kyung-Soo Yang

Key Words: vortex shedding, drag, scalar transport, Strouhal number, planar jet, square cylinder

Abstract

In this study, the confined laminar flow around a square cylinder, which ejects a either on the front face or on the rear face, is numerically simulated. In each case, three ratios of jet velocity to the fixed upstream velocity are considered. In all cases of the rear fuel jet, the high mass-fraction region is formed along the streamlines from the jet exit. In case of front jet, drag is significantly decreased when the jet velocity ratio is greater than 1. The results obtained exhibit flow and scalar-mixing characteristics encountered in a planar combustor

기호설명

C_d : 항력계수 ($= Drag / (\frac{1}{2} \rho U^2)$)

C_l : 양력계수 ($= Lift / (\frac{1}{2} \rho U^2)$)

D : 정사각단면 실린더 높이

f_s : Vortex Shedding 진동수

H : 채널 간격

IR : 입구 유동속도와 제트 속도비 (V_{jet}/U)

Re : Reynolds 수 ($= UD/\nu$)

St : Strouhal 수 ($= f_s D/U$)

T : 무차원화 시간 ($= t \times U/D$)

U : 균일한 입구 속도

u_i : 2차원 직교 좌표계 속도성분

V_{jet} : 제트 속도

α : 2종 확산계수

ν : 동점성계수

ρ : 밀도

ϕ : 연료의 질량분율

1. 서론

2차원 실린더에 주위에서의 주기적인 Karman vortex shedding 은 학문적으로 흥미로운 연구 과제일 뿐만 아니라 여러 가지 공학적인 문제에 응용 될 수 있어 그간 많은 연구가 수행되어왔다. 이와 같은 유동장은 이론적인 해석을 수행하는데 어려움이 있어 주로 실험을 통한 연구가 주를 이루었고 근래에는 컴퓨터의 성능과 수치해석 기법의 발전으로 수치해석을 통한 연구가 병행되고 있다. 이런 유동장의 특성은 박리에 의해 필연적으로 형성된 실린더 전후의 압력차로 인하여 큰 항력이 발생하며 실린더에 횡방향 및 종방향

* 인하대학교 대학원

*** 정회원, 인하대학교 기계·항공·자동차공학부

의 주기적인 하중으로 피로를 주게된다. 또한 그 주기성이 구조물의 고유진동수와 일치되면 공진을 일으킬 수 있어 구조물에 큰 피해를 줄 수도 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해 원형실린더에 대해서는 실험 및 수치해석적인 연구가 많이 수행되었으며 그에 따라 수동적, 능동적인 방법 등 여러 가지 방식의 유동제어 연구(Kwon & Choi⁽¹⁾, Duke et al.⁽²⁾, Park et al.⁽³⁾)가 상당수 수행되었다. 그러나 정사각단면의 실린더 주위유동에 대한 연구는 적은 편이며 특히 주기적으로 shedding하는 유동의 특성값인 Strouhal 수가 실험결과와 수치해석결과에서 입구속도장의 형태와 수치해석기법에 따라 상당한 차이를 보여 수치해석적인 연구에 많은 어려움이 따르고 있다.(Davis & Moore⁽⁴⁾)

본 연구에서는 2차원 채널내 정사각단면 실린더 주위의 유동장을 수치해석으로 계산하여 기존의 연구결과와 비교하여 코드를 검증한 후 이런 유동장의 실제적인 응용 예로 연소기내 보염기 주위의 유동 및 연료혼합 특성을 고찰하였다. 2차원 평면형 보염기(Koutmos et al.⁽⁵⁾)는 실린더 후면 제트로부터 분출된 연료를 정사각단면 실린더의 선단 부에서 주유동의 박리에 의해 형성된 큰 규모의 공기 vortex로 혼합을 촉진하고 제어한다. 제트는 공기와 연료의 혼합을 제어하기도 하지만 이로 인한 실린더 주위 유동장의 변화로 인하여 실린더에 작용하는 항력과 양력 값의 변화도 초래할 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 평면형 보염기의 특성을 Fig. 1 과 같이 모형화하여 연구하였다. 즉, 채널의 중심에 정사각단면 실린더가 있고 실린더 후면에서 주유동에 대한 여러 가지 제트 속도 비율(IR)에 따라 연료를 분사했을 때의 유동장의 변화와 그로 인한 항력과 양력의 변화, 연료와 공기의 혼합양상, 그리고 실린더 전면에서 제트를 분사했을 때 유동장의

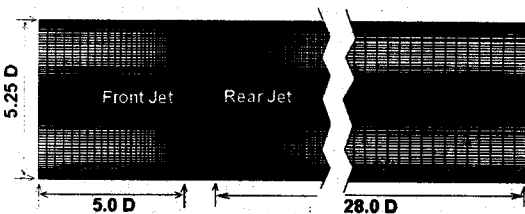


Fig. 1 Physical configuration and grid system

구조변화와 항력의 변화를 수치해석을 통하여 연구하였다. 주유동은 $Re=200$ 의 층류유동에 국한하였다.

2. 수치해석법 및 경계조건

2.1 지배방정식

본 연구에서 고려된 비정상 2차원 비압축성 유체의 지배방정식은 다음과 같은 연속방정식, 모멘텀 방정식 그리고 혼합현상을 지배하는 passive scalar transport 방정식이다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_j \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

윗식중 유동장을 지배하는 방정식 (식 (1), (2))의 해를 먼저 구하기 위해 Fractional Step Method⁽⁶⁾를 사용하여 연속방정식과 모멘텀 방정식을 분리(decouple)하였고 차분법으로는 대류항에 대하여 2차 정확도의 LUDS(Linear Upwind Difference Scheme)를, 그 이외의 항에는 중앙차분법을 적용하였다. Scalar 방정식에서의 ϕ 는 연료의 질량분율이고, 이 방정식 풀기 위해 공기와 근사한 밀도를 갖는 n-octane을 연료로 채택하였다. 두 물질의 2중 확산계수는 $\alpha = 0.505 \times 10^{-5} m^2/s$ 를 사용하였고 대류항에서는 정확도를 기하기 위해 QUICK(Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics)⁽⁷⁾ 방법을 사용하였다. 또한 유동장을 풀기 위해서는 Poisson 방정식을 풀어야하는데 계산의 가속화를 위하여 SOR(Successive Over Relaxation)과 다격자 알고리즘(Multigrid Algorithm)을 이용한 Iteration을 하였고 Scalar 장을 풀기 위해서는 계산시간을 절약하기 위해 AF(Approximate Factorization) 방법을 사용하였다.

2.2 경계조건 및 유동형상

유동장에 대한 경계조건은 채널과 실린더 벽면에

대해 noslip 조건을 적용하였고 입구의 유동은 주 유동속도 U 로 균일한 속도장을 주었으며 출구 속도장은 대류 조건⁽⁸⁾을 사용하였다. ϕ 에 대해서는 벽면에서 Neumann 조건을 사용하였으며 출구에서는 유동장과 마찬가지로 대류 조건을 사용하였다. 기하학적인 형상은 높이 $D=8mm$ 의 실린더를 Fig. 1 과 같은 채널의 중심선상에 위치시켰으며 실린더의 가운데에 폭이 $D/8$ 인 제트를 전후에서 각각 $IR=0.235, 0.53, 1.54$ 로 균일한 속도장을 주었으며 제트에 대해서는 6개의 격자를 주유동방향에 수직방향으로 사용하였다. $144 \times 72, 216 \times 108, 288 \times 144, 360 \times 180$ 그리고 432×216 의 격자계로 격자세분화 연구를 수행하였는데 효율적인 계산시간을 위하여 288×144 비균일 격자계를 선택하였다. 이 격자계로 얻어진 결과는 더 높은 해상도로 얻어진 결과와 비교하여 볼 때 큰 차이를 보이지 않는다.

3. 결과

3.1 Code의 검증

Code를 검증하기 위하여 기존에 수행되었던 제트가 없는 $H/D=6$ 의 정방형 실린더에 대하여 층류영역인 $Re=200-600$ 의 범위에서 포물선형태의 입구속도장과 균일한 형태의 입구속도장의 두 가지 경우에 대해서 Strouhal 수를 계산 비교해보았다. 이런 두 가지 대표적인 형태의 입구속도장으로 수치모사해본 이유는 Davis et al.⁽⁹⁾ 의 실제 실험에서 입구의 속도장이 완전히 성장한

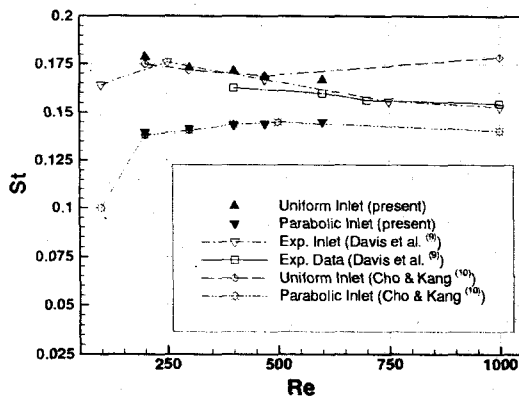


Fig. 2 Comparison of Strouhal number

포물선 형태도 아니고 균일한 형태도 아니기 때문이다. Fig. 2에서 보듯이 Davis et al.⁽⁹⁾ 의 실제 실험 결과가 두 가지 수치해석의 결과의 사이에 있는 것은 타당한 결과이며 Cho & Kang⁽¹⁰⁾의 수치해석 결과와 실제 실험에서 얻은 입구 속도장을 입구조건으로 사용한 Davis et al.⁽⁹⁾ 의 수치해석결과 (Fig. 2 ∇)와도 잘 일치하고 있다. 또한 Davis & Moore⁽⁴⁾의 연구결과에서 보고된 바에 의하면 수치해석의 경우 Strouhal 수는 입구속도장의 형태와 대류항의 차분방법에 따라 상당한 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그래서 이번 연구에서 실제 실험에 가장 가까운 결과를 보이는 균일한 형태의 입구속도장 및 LUDS 차분법을 선택하였다.

제트에 의한 유동장의 변화가 타당한지 검토하기 위하여 첫째, 제트가 없는 주기적인 정상해에 제트를 갑자기 작동시켜 계산을 수행하고 둘째, $T=0$ 일 때부터 제트와 함께 유동장을 성장시켜 주기적인 정상해를 구해보았을 때 두 가지 경우가 차이를 보이지 않았다.

3.2 후향 제트 (Rear Jet)

3.2.1 IR 의 변화에 따른 연료와 공기의 혼합

후향 제트의 경우 주기적인 해에 대하여 시간 평균값을 취했을 때 IR 이 1보다 작은 두 가지 경우에는 Fig. 3에서 보듯이 주유동에 의해 형성된 Vortex에 제트유동의 침입이 없어 실린더 벽면과 Vortex 사이에 높은 질량분율의 ϕ 값이 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있으며 주유동의 재부착점에 연료의 ϕ 값이 높아졌다. 또한 실린더 아래 및 윗면에 재순환 영역이 존재하여 그곳의 ϕ 값이 조금 높아진 것을 알 수 있다. $IR=1.54$ 의 경우에는 연료유동이 주유동의 vortex를 뚫고 나가 4개의 vortex가 아래위로 떨어진 형상으로 되어 높은 ϕ 값의 영역이 길게 형성되는 것을 볼 수 있다. 세 가지 경우 모두 ϕ contour와 유선의 그림을 비교해보면 ϕ 값이 제트로부터의 유선을 따라 높은 값으로 형성되어 주로 유동장에 따라 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이런 결과로 연료의 질량분율 ϕ 는 확산항보다 대류항으로 인한 혼합, 전달이 활발함을 알 수 있다.

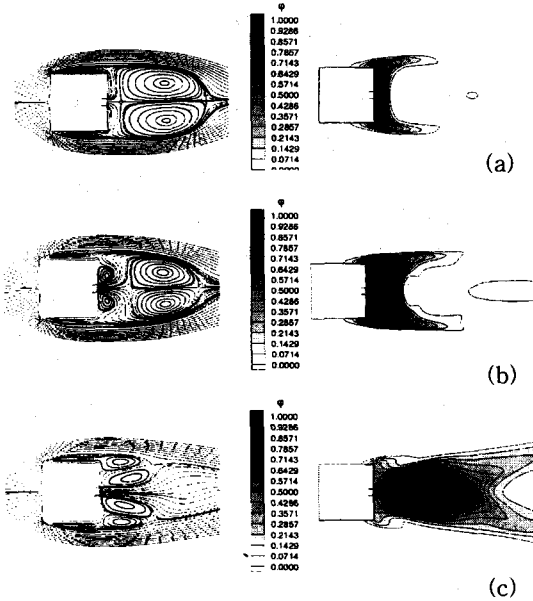


Fig. 3 Time-averaged streamlines and ϕ contours for rear jet (a) $IR=0.235$, (b) $IR=0.53$, (c) $IR=1.54$

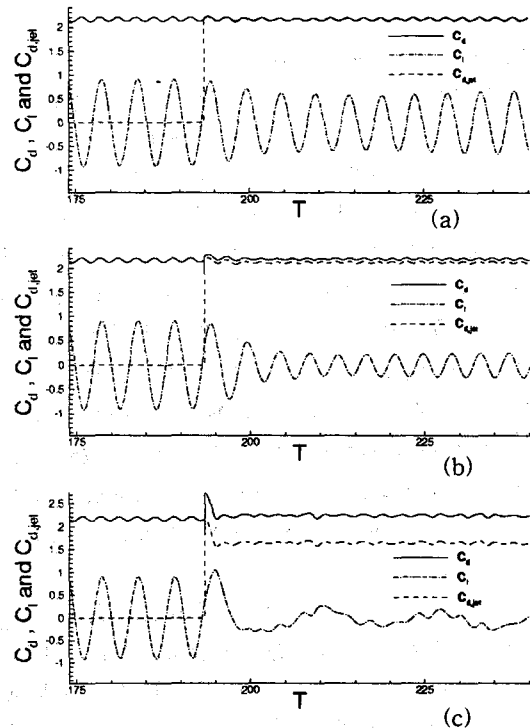


Fig. 4 Drag and Lift Coefficients for Rear Jet (a) $IR=0.235$, (b) $IR=0.53$, (c) $IR=1.54$

3.2.2 유동장의 변화

Fig. 4 에서 항력계수는 실린더 전후 압력 차에 의한 형상항력과 위, 아랫면의 마찰에 의한 점성항력을 합한 C_d 와 그 값에 제트 모멘텀을 포함한 총항력계수 $C_{d,jet}$ 를 구분하여 표시하였다. Fig. 3을 보면 후향 제트의 속도가 커짐에 따라 주유동의 Vortex를 밀어내어 실린더의 선단 부에서 발생된 박리 선을 따라 생기는 두 유선이 만나는 점과 실린더 후면 사이의 거리가 길어지고 vortex 쌍이 멀어지게되어 실린더 위아래로 유동이 진동하는 폭이 줄어든다. 이로 인해 C_l 값의 진폭이 작아진 것을 볼 수 있다. 그리고 주유동의 박리에 의해 생성된 실린더 후면의 Vortex의 크기와 제트로 인해 생성된 Vortex의 크기를 비교해보면 각각의 속도의 크기에 비례한다는 것을 알 수 있다. IR 이 1보다 작은 경우는 제트에 의한 vortex들의 크기가 작고, 또한 주유동의 선단부 박리에 의해 생성된 vortex 쌍 사이에 간격 있지만 제트의 속도가 주유동의 속도보다 큰 세 번째 경우, 제트로 인해 생성된 vortex 쌍이 실린더 후단부에 붙어 있는 쌍보다 조금 더 큰 것을 볼 수 있다. 항력의 변화를 보면 제트가 추력작용을 하여 제트의 모멘텀을 포함한 $C_{d,jet}$ 이 작아져 유동 제어의 측면에서는 제트 속도가 클수록 유리하다고 볼 수 있다. 그러나 제트의 속도를 지속적으로 증가시키려면 에너지 차원에서 문제가 있고 또한 연료의 안정적인 혼합의 관점에서 바람직하지만은 않다. 후면 제트의 작용시 특이한 점은 Table. 1 에서보면 제트의 속도증가에 따라 실린더 후면의 압력이 떨어져 제트 모멘텀을 제외한 C_d 값은 조금 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 현상은 원형실린더 후방에서 제트를 분사한 Mo & Duke⁽¹¹⁾ 의 연구에서도 확인되었다.

$IR=1.54$ 의 경우 C_d, C_l 의 그래프를 보면 불규칙하게 진동하는 것으로 보이나 유동장을 시간에 대한 평균값을 구해보면 대칭형태로 나타나 이 경우 역시 주기적인 유동장 형태임을 알 수 있다

3.3 전향 제트 (Front Jet)

후향 제트에서 제트 모멘텀을 제외한 항력계수 값이 약간 증가하는 현상을 관찰하였다. 이러한 이유는 제트의 속도증가로 실린더 뒷면의 압력이

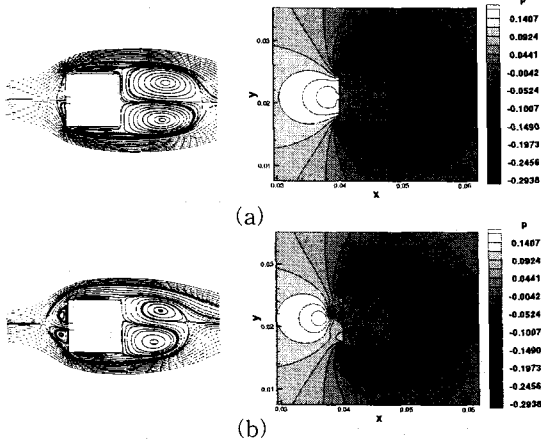


Fig. 5 Time-averaged streamlines and pressure contours for front Jet (a) $IR=0.53$, (b) $IR=1.54$

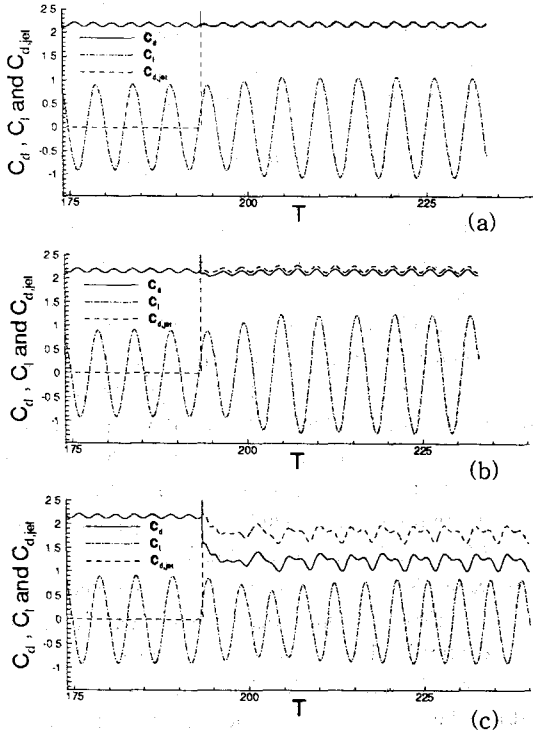


Fig. 6 Drag and Lift Coefficients for Front Jet (a) $IR=0.235$, (b) $IR=0.53$, (c) $IR=1.54$

오히려 감소되어 압력에 의한 형상항력이 증가한 것이다. 이와 같은 결과와 비교하기 위해 전방에서 같은 IR 의 제트를 분사하는 경우에 대하여 고찰해보았다. 전방 제트를 가했을 때 C_l 의

변화를 보면 IR 이 1보다 작을 때 실린더 주위로 흐르는 유동의 증가로 진폭이 증가하였으나 Table 1에서 RMS 값을 보면 $IR=1.54$ 의 경우는 오히려 진폭이 약간 감소함을 볼 수 있다. 이것은 IR 이 1보다 커지면 전체유동장의 양상이 크게 변화하기 때문으로 간주되며 후향제트에서도 IR 이 1보다 클 때 정성적으로 큰 변화가 생긴 현상과 일관성이 있다. 한편 Fig. 5 (b)의 유선을 보면 제트로부터의 유량이 실린더 위쪽으로 치우쳐 흐르는 것을 볼 수 있다. 이러한 원인은 정확히 알 수 없었으나 주기적인 주유동의 위상이 반대인 시점에서 제트를 가했을 때는 제트의 유량이 아래쪽으로 치우쳐 선택적으로 흐르는 현상이 나타났다. 이러한 현상으로 보아 제트유량의 선택적인 치우침은 물리적으로 타당한 것으로 간주된다.

항력의 경우 세 가지 결과중 $IR=1.54$ 의 경우에서 기대했던 바와 같이 전면의 분포 압력 감소로 인하여 상당한 C_d 값의 감소가 보였다. 제트 모멘텀을 제외한 C_d 값의 경우 제트가 없는 경우에 비해 42.7%의 감소를 보였으며 총항력 $C_{d,Jet}$ 값에서도 15.3%의 감소를 보였다. 후향 제트의 경우는 유동장의 압력 변화로 인한 항력의 변화값보다 제트 모멘텀의 추력의 영향이 크지만 전향 제트에서는 압력장의 변화로 인한 항력의 감소값이 제트의 모멘텀으로 인한 항력의 증가값보다 더 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 5.에서 보면 실린더 전면에 위치하던 높은 압력 값을 갖는 정체점이 제트로 인해 전방으로 밀려있어 실린더 전면에 작용하는 압력이 크게 떨어져 항력의 감소효과가 발생한 것이다. 그리고 Fig. 6 (c)의 경우 특이하게도 C_l 의 그래프는

IR	0.0	Front Jet			Rear Jet			
		0.235	0.53	1.54	0.235	0.53	1.54	
m e a n	C_d	2.16	2.17	2.14	1.24	2.17	2.19	2.24
	C_l	8.61e-4	6.57e-4	1.65e-4	-6.30e-2	1.46e-3	9.37e-4	-4.28e-2
	$C_{d,jet}$	2.16	2.18	2.20	1.83	2.16	2.12	1.65
r m s	C_d	3.11e-2	3.85e-2	4.81e-2	0.110	2.24e-2	1.39e-2	2.38e-2
	C_l	0.639	0.748	0.871	0.612	0.438	0.169	0.140
	$C_{d,jet}$	3.11e-2	3.85e-2	4.81e-2	0.110	2.24e-2	1.39e-2	2.38e-2

Table 1. Mean and RMS Value of C_d , C_l and $C_{d,jet}$

완전히 규칙적인 진동을 하지만 C_d 는 비대칭 형태의 규칙적인 진동을 한다. 이것은 제트의 유량이 한쪽으로 치우침에도 불구하고 실린더 위, 아래로 지나는 각각의 유량은 같은 양, 같은 형태로 교차되어 대칭으로 흐르기 때문에 C_l 이 규칙적으로 진동한다. 그러나 C_d 의 경우는 후면의 vortex 쌍이 Fig. 5 (b)에서 보듯이 상하 비대칭 형태로 형성되고 탈락되기 때문에 Fig. 6의 (c)와 같이 진동한다.

4. 결론

본 논문은 두 평판사이에 부착된, 한 면에서 연료제트가 분출되는 정사각단면 실린더 주위의 유동장 및 연료와 공기의 혼합현상을 고찰하였다.

후향 제트의 경우 모든 IR 에서 실린더 후면의 Shedding 하는 vortex 쌍을 밀어내어 C_l 의 진폭이 감소되었으며 IR 이 1보다 작은 경우는 정상적인 형태의 변화 없이 진폭이 감소되었다. C_d 는 제트 모멘텀을 제외한 항력 값에서 후면의 압력감소로 인하여 약간의 증가를 보였지만 제트 모멘텀을 포함한 총 항력의 감소효과를 얻을 수 있었다. 연료와 공기의 혼합양상을 보면 제트로부터의 유선을 따라 높은 ϕ 값이 형성되어 확산에 의한 효과보다 대류에 의한 연료의 혼합이 지배적임을 알 수 있다.

전향 제트의 경우 IR 이 1보다 작을 때 실린더 주위로 흐르는 유량의 증가로 인하여 C_l 의 진폭이 증가하였으며 제트 모멘텀으로 인한 항력의 증가값이 압력장의 변화로 인한 항력의 감소값보다 더 커 총 항력이 증가하였다. $IR=1.54$ 의 경우는 이와 반대로 전면 압력감소로 인한 항력값의 영향이 더 커 총 항력의 감소가 발생하였다. 또한 제트 분사 방향에 상관없이 제트의 속도가 주유동장의 평균 속도보다 큰 경우에 주유동장에 정성적인 큰 변화를 야기하는 것을 볼 수 있으며 이런 변화에 대한 IR 의 임계값이 1을 전후로 하여 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

(1) Kwon, K. and Choi, H., 1995, "Control of

laminar vortex shedding behind a circular cylinder using splitter plates", *Phys. Fluids*, Vol. 8, No. 2, pp. 479-486.

- (2) Duke, R., Shrader, B., and Mo, J., 1993, "Effects of a rear stagnation jet on the wake behind a cylinder", *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 9, Technical Notes, pp. 1727-1729.
- (3) Park, D. S., Ladd, D. M., and Hendricks, E. W., 1994, "Feedback control of von karman vortex shedding behind a circular cylinder at low reynolds numbers", *Phys. Fluids*, Vol. 6, No. 7, pp. 2390-2405.
- (4) Davis, R. W., Moore, E. F., 1982, "A numerical study of vortex shedding from rectangles", *J. Fluids Mech.*, Vol. 116, pp. 475-506.
- (5) Koutmos, P., Mavridis, C. Barkrozis, A., and Papailiou, D., 1998, "Isothermal and non-premixed turbulent reacting wake flows past a two-dimensional square cylinder", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 17, pp. 90-99.
- (6) Kim, J. and Moin, P., 1985, "Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations", *Journal of Computational Physics*, Vol. 59, No. 2, pp. 308-323.
- (7) Akselvoll, K. and Moin, P., 1996, "Large eddy simulation of turbulent confined coannular jets", *J. Fluids Mech.*, Vol. 315, pp. 387-411.
- (8) Pauley, L. L., Moin, P. and Reynolds, W. C., "A numerical study of unsteady laminar boundary layer separation" Report No. TF-34, Thermo-sciences Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford University.
- (9) Davis, R. W. and Moore, E. F. and Purtell, L. P., 1984, "A numerical-experimental study of confined flow around rectangular cylinder", *Phys. Fluids*, Vol. 27, No. 1, pp. 46-59.
- (10) Cho, S. H. and Kang, S. H., 1997, "Simulation of vortex shedding from a square cylinder in oscillating channel flow", *KSME International Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 195-207.
- (11) Mo, J. D., and Duke, Jr., 1993, "Numerical investigation of cylinder wake flow with a rear stagnation jet", *AIAA Journal*, Technical Notes, Vol. 32, No. 5, pp. 1095-1098.