Synthetic Jet을 이용한 유동제어 특성연구

홍 우 람,[1] 김 상 훈,[2] 김 우 레,[2] 김 유 신,[3] 김 종 암*[4]

A STUDY ABOUT FLOW CONTROL CHARACTERISTICS USING A SYNTHETIC JET

Wooram Hong,[1] Sang Hoon Kim,[2] Woore Kim,[2] Yushin Kim[3] and Chongam Kim*[4]

To develop an aerodynamic performance, two groups of studies have been achieved widely. One is about the geometric design of vehicles and the other is about aerodynamic devices. Geometric design is a credible and stable method. However, it is not flexible and each part is related interactively. Therefore, if one part of geometry is modified, the other part will be required to redesign. On the other hand, the flow control by aerodynamic devices is flexible and modulized method. Even though it needs some energy, a relatively small amount of input makes more advanced aerodynamic performance. Synthetic jet is one of the method in the second group. The device repeats suctions and blowing motions in constant frequency. According to the performance, the adjacent flow to flight surface are served momentum. This mechanism can reduce the aerodynamic loss of boundary layer and separated flow. A synthetic jet actuator has several parameters, which influences the flow control. This study focuses on the parameter effects of synthetic jet - orifice geometry, frequency, jet speed and etc.

Key Words : Synthetic jet, Multi-block, vorticity.

1. 서 론

익형을 비롯한 형상들은 유동과의 마찰과 압력손실로 인하여 주위에 경계층을 형성하거나 유동박리가 발생한다.

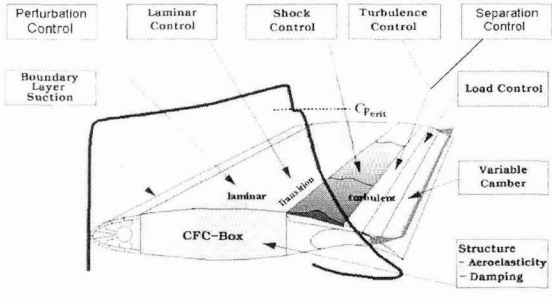

Fig. 1 Various devices for flow control

접수일: 2007년 3월 15일, 심사완료일: 2007년 6월 21일.
1 학생회원, 서울대학교 계산과학 협동과정
2 서울대학교 기계항공공학부
3 한국항공우주연구원
4 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부
* Corresponding author, E-mail: chongam@snu.ac.kr

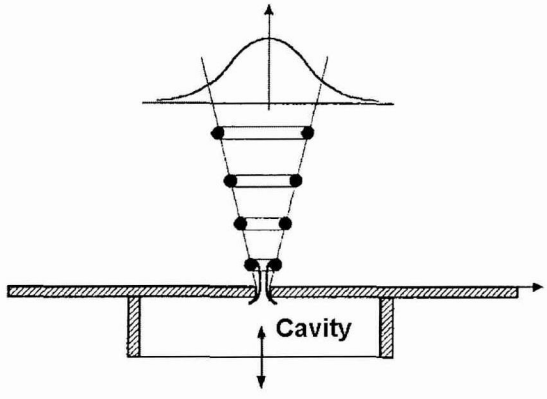

Fig. 2 Synthetic jet actuator

이는 형상설계를 통한 수동제어방법을 이용하여 많은 부분의 손실을 낮추고 박리를 지연할 수 있으나 유동제어를 적용하는 시점과 대상이 고정되어 있어 한계가 있다. 이런 점은 형상 주위의 유동상태 및 목적에 따라 일시적이고 가변적인 능동제어로 보완이 가능하다. 이러한 요구에 synthetic jet은 적합한 장치이다.

Fig. 2에서 보여주듯이 Synthetic jet은 일정한 양의 유동을 같은 주기로 suction과 blowing을 반복하여 유동을 제어하는 장치이다. 이 장치는 유량을 공급하지 않고 에너지만을 유체에 공급한다. 별도의 유량공급이 필요 없기 때문에 장치의 형상과 구동 메커니즘이 단순하고 소형화 할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 synthetic jet의 parameter study를 수행하였다. synthetic jet은 몇 가지 parameter로 이루어져있다. 그 중 에너지를 유동에 공급하는 방식에 가장 직접적으로 영향을 주는 parameter는 주기, jet의 속도, 오리피스의 형상(폭 & 깊이), 오리피스 기울기 등이 있다. jet에서 공급되는 에너지가 클수록 유동에 전달되는 양도 커지게 된다. 그러나 같은 에너지를 전달할 때에도 parameter의 배열과 조합에 따라 다른 유동특성이 나타난다. 본 연구는 각 parameter의 변화에 따라 경계층 두께의 변화와 박리가 지연되는 정도를 알아보고 이에 효과적인 parameter를 설정하는데 초점을 두었다.

2. 배경이론

2.1 비압축성 Navier-Stokes 방정식

압축성을 고려한 N-S (Navier-Stokes) 방정식에서 비압축성이라 가정하여 밀도 ρ를 상수로 취급함으로써 얻어지는, 에너지 방정식을 제외한 2차원 비압축성 유동장의 지배방정식은 다음과 같다.

연속 방정식

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j}=0 \tag{1}$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(u_j u_i)=-\frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i}+\nu\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}+g_i+\frac{\boldsymbol{f}_\sigma}{\rho} \tag{2}$$

비압축성 유동을 계산하는데 있어서, 열전달이 중요한 요소로 작용하지 않을 시에는 N-S 방정식에서 에너지 방정식을 고려하지 않아도 문제가 없다.

비압축성 N-S 방정식에서 연속 방정식은 시간 도함수 항이 없으므로 압력장을 구할 수 없다. 가상압축성법에 의해 연속 방정식에 시간에 대해 종속적인 압력항을 인위적으로 첨가하면 연속방정식은 다음과 같은 형태로 변환된다.

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{1}{\tau}\frac{\partial u_j}{\partial x_j}=0 \tag{3}$$

여기서 τ는 인공압축성(artificial compressibility)을 의미하며 다음과 같이 인공밀도(artificial density)를 도입하여 나타낼 수 있다.

$$\tau=\frac{1}{a^2}$$

$$a^2=\frac{p}{\rho}$$

이 경우 a는 가상음속(pseudo-speed of sound)을 의미한다. 가상 시간을 사용하여 가상압축성법을 적용한 연속 방정식과 운동량 방정식을 표현하면 다음과 같다.

연속 방정식

$$\frac{\partial \hat{p}}{\partial \tau}+\beta\frac{\partial u_j}{\partial x_j}=0 \tag{4}$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial u_i}{\partial \tau}+\frac{\partial}{\partial x_j}(u_j u_i)=-\frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i}+\nu\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}+g_i+\frac{\boldsymbol{f}_\sigma}{\rho}-\frac{\partial u_i}{\partial t} \tag{5}$$

2.2 $k-\omega$ SST(Shear Stress Transport) 모델

$k-\omega$ SST 모델은 경계층 내부에서는 $k-\omega$ 모델이 정확하고 자유류에서는 $k-\epsilon$ 모델이 정확하다는 점에 착안하여, blending function F_1을 이용하여 $k-\omega$ 모델과 $k-\epsilon$ 모델을 조합한 형태이다. $k-\omega$ 난류모델에 F_1을 곱하고, $k-\epsilon$ 난류모델에는 $(1-F_1)$을 곱하여 $k-\omega$ 난류모델 형태로 다시 쓰면 아래의 식과 같게 된다. 따라서 벽면 근처에서는 blending function 값이 0이 되어 $k-\omega$ 난류모델이 되고, 자유류에서는 blending function이 1이 되어 $k-\epsilon$ 난류모델이 된다.

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho k}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) &= \\ \tau_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_j}-\beta^* \rho w k+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\sigma_{k1}\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho w}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho w u_j) &= \\ \frac{\alpha w}{k}\tau_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_j}-\beta\rho w^2+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\sigma_w\mu_t)\frac{\partial w}{\partial x_j}\right] & \\ +2(1-F_1)\rho\sigma_{w2}\frac{1}{w}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial w}{\partial x_j} &\end{aligned} \tag{7}$$

$$\nu_t=k/w$$

각 난류 상수들은 blending function F_1에 의해서 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi = F_1\Phi + (1-F_1)\Phi_2$$

Φ_1 : $k-w$ 난류모델 상수

$$\beta^* = 0.09,\ \sigma_{k1} = 0.5,\ \sigma_{w1} = 0.5,\ \beta_1 = 0.075,\ \alpha_1 = \frac{5}{9}$$

Φ_2 : $k-\epsilon$ 난류모델 상수

$$\beta^* = 0.09,\ \sigma_{k2=1},\ \sigma_{w2} = 0.856,\ \beta_2 = 0.0828,$$

$$\alpha_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{w2}k^2}{\sqrt{\beta^*}},\ \kappa = 0.41$$

3. 유동해석조건

오리피스 목 유무에 따른 효과에 대해서는 선행된 연구들을 통해 연구된 바가 있다. 자유류의 속도 U는 8m/s, 오리피스의 폭은 1.91mm 경계층의 두께는 12.7mm, 300Hz의 진동수, 레이놀즈 수 1214, jet의 속도는 31.4m/s인 상태에서 계산을 수행하였다. 각 parameter에 대해 위에 제시한 조건에 일치하는 경우를 표준상태로 정의하였고 그 조건들을 기준으로 무차원하여 0.5인 상태 2인 상태에서의 결과를 비교하였다. 평판 부분의 격자는 오리피스의 폭으로 무차원된 길이를 기준으로 350 × 300의 크기로서 격자의 수는 261 × 75로 하였다. 기타 parameter의 조건은 다음 표와 같다.

각 결과에 대해서 오리피스의 중심으로부터 경계층의 두께로 무차원화 된 길이로 x축 방향 -0.5, 0.5, 3인 위치에서 y에 따른 속도분포를 비교하였다.

Table 1 Parameter study cases

parameter	rate of parameter controled
orifice depth	0.5
	1
	2
orifice width	0.5
	1
	2
jet frequency	0.5
	1
	2
jet speed	0.5
	1
	2

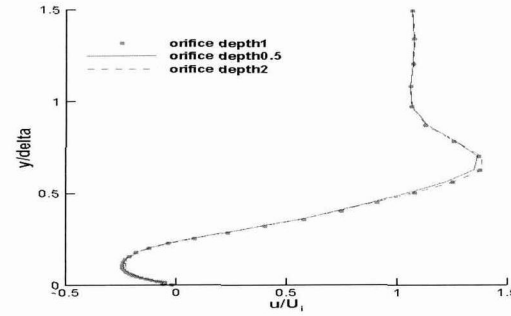

Fig. 3 Velocity profile comparison in different orifice depth (x/δ=0.5)

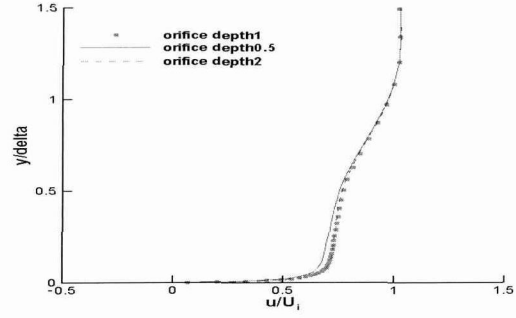

Fig. 4 Velocity profile comparison in different orifice depth (x/δ=3)

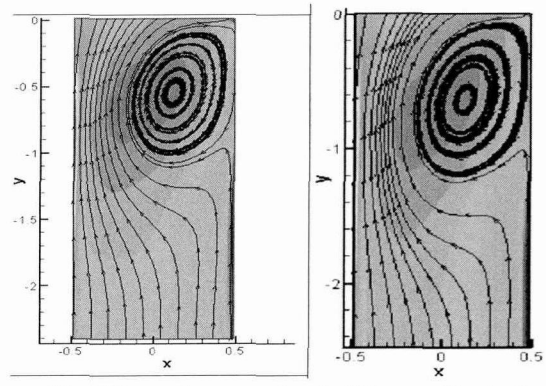

Fig. 5 Vortex size comparison in different orifice depth (left: depth 0.5 , right: depth 2)

4. 유동해석결과

4.1 오리피스 목 깊이

깊이를 변화시키는 경우 Fig. 3과 Fig. 4에서 확인 할 수 있는 바와 같이 표준상태의 결과와 거의 차이가 없음을 알 수 있었다. 그 이유는 오리피스 목의 벽면 효과에 의한 전단응력이 심화시키는 와도의 영향이 어느 정도의 오리피스 목

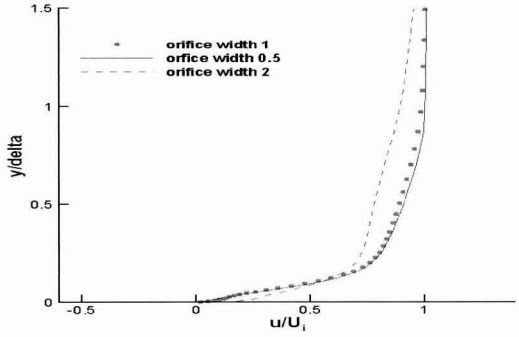

Fig. 6 Velocity profile comparison in different orifice width (x/δ=-0.5)

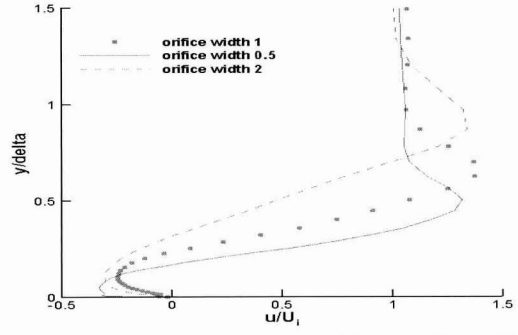

Fig. 7 Velocity profile comparison in different orifice width (x/δ=0.5)

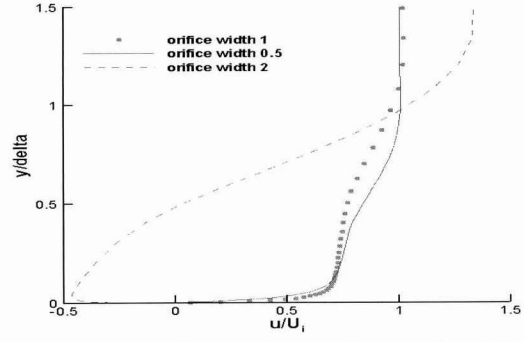

Fig. 8 Velocity profile comparison in different orifice width (x/δ=3)

깊이가 고려되면 충분한 효과를 나타내는 것으로 볼 수 있다. 다시 말해서 0.5이상의 깊이에 대해서는 synthetic jet이 거의 동일한 효과를 보인다. 계산결과 Fig. 5에서와 같이 오리피스의 고정된 폭에 의해서 와류의 크기가 결정된다.

4.2 오리피스 목 너비

유량은 $\dot{m}v$로 정의되며 에너지변화량은 $\dot{m}v^2$이 된다. 너비가 0.5가 되면 jet의 면적이 절반이 되어 $\frac{1}{2}\dot{m}v^2$이 되며 2가 되면 $2\dot{m}v^2$이 된다. 너비가 2인 경우 -0.5 위치에서의 속도 분포를 보면 앞에서 불어오는 유동이 jet의 위치에 도달하기 전 jet의 영향을 받고 있는 것을 확인할 수 있으며 1과 0.5의 너비인 경우에는 그렇지 않음을 Fig. 6을 통해 알 수 있다. 따라서 표준 상태 이상의 에너지가 공급되면 jet보다 앞쪽의 유동까지도 영향을 주게 됨을 확인할 수 있다. Fig. 7, 8에서처럼 0.5와 3인 위치를 보면 너비가 0.5인 경우에서 2인 경우로 갈수록 더 큰 경계층을 갖는 것을 볼 수 있다. 이는 보다 강하고 큰 와류가 형성되어 속도가 최대인 부분의 위치를 더 높은 곳으로 가져가게 하며 또한 더 먼 곳까지 eddy가 살아남아 에너지를 전달하기 때문으로 해석된다.

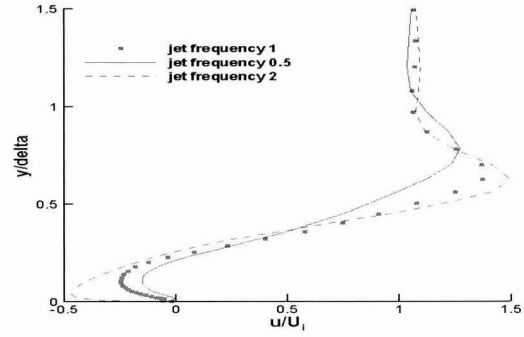

Fig. 9 Velocity profile comparison in different jet frequency (x/δ=0.5)

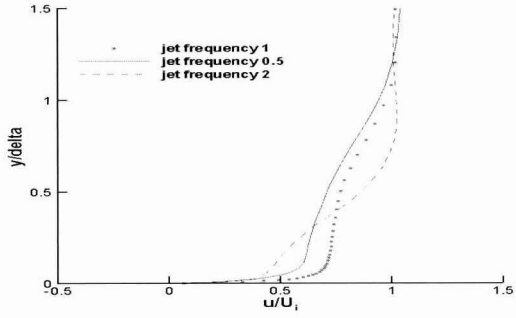

Fig. 10 Velocity profile comparison in different jet frequency (x/δ=3)

4.3 Jet frequency

주기의 변화는 에너지에는 영향을 주지 않으나 jet에 의해 발생하는 eddy의 크기에 영향을 준다. Fig. 11을 보면 알 수 있듯이 주기가 클수록 작은 eddy를 형성한다.

그러므로 Fig. 9, 10과 같이 보다 높은 y지점에서 빠른 속도가 나타나는 것은 와류의 크기에 따라 다른 y 위치에서 와

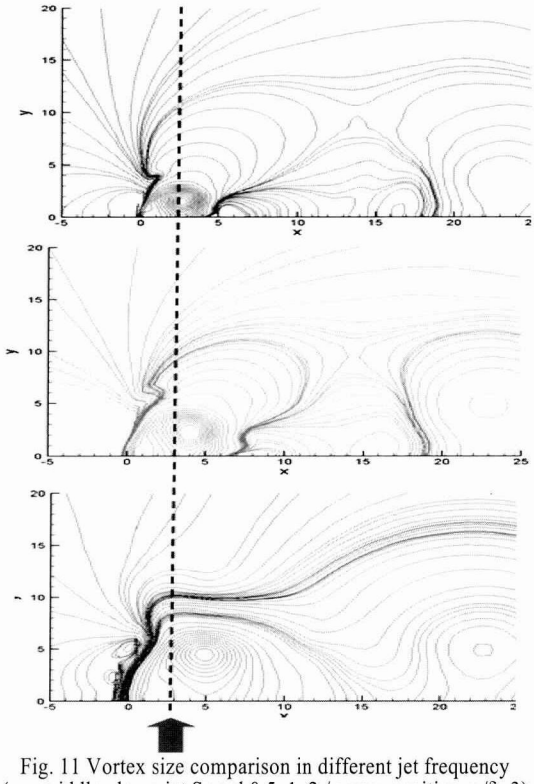

Fig. 11 Vortex size comparison in different jet frequency
(up, middle, down jet Speed 0.5, 1, 2 / arrow position x/δ=3)

도의 각속도 방향이 주유동의 방향과 일치하여 속도를 증가시키기 때문이다. 작고 강한 와도를 가진 eddy는 벽면에서의 유동방향이 전체 유동의 방향과 달라 속도 구배가 큰 값을 가지도록 한다.

4.4 Jet 속도

Jet 속도는 $\dot{m}v^2$으로 표현되는 에너지변화량에서 속도에 해당하는 부분이므로 parameter 변화에 따라 제곱배의 효과가 나타난다. Jet 속도를 조절함에 따라 와류의 크기는 많은 차이를 나타내며 와도의 강도도 달라진다. 0.5 위치에서 jet 속도에 따라 최대 속도를 갖는 위치의 차이는 와류의 크기 차이로 볼 수 있으며 jet 속도가 클수록 높은 y지점에서 속도 최대점이 나타남을 Fig. 13을 통해 알 수 있다. Fig. 14는 와류가 평판 먼 곳까지 유지됨을 보여준다.

4.5 오리피스 목 기울기

오리피스 목의 경사가 유입류에 대해 순방향으로 기울어 있을 때 jet으로부터 공급되는 에너지변화량은 유동에 효과적으로 전달되어 와도의 크기를 작게 만들면서 동시에 경계층의 두께를 얇게 한다. 오리피스 목의 경사가 유입류에 대해

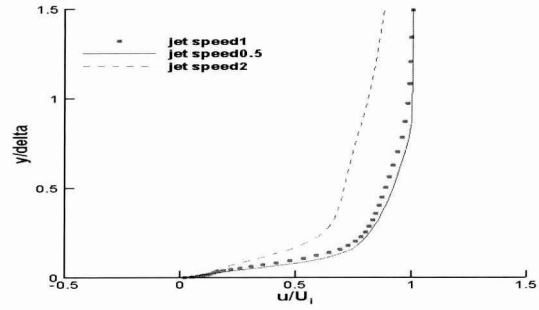

Fig. 12 Velocity profile comparison in different jet Speed
(x/δ = -0.5)

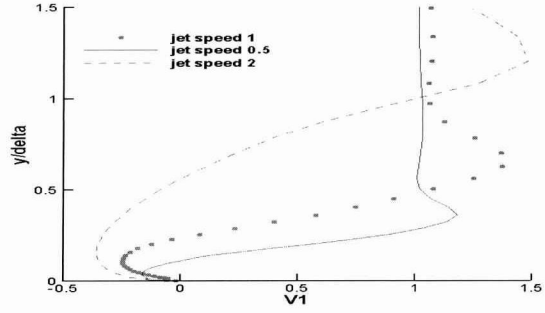

Fig. 13 Velocity profile comparison in different jet speed
(x/δ=0.5)

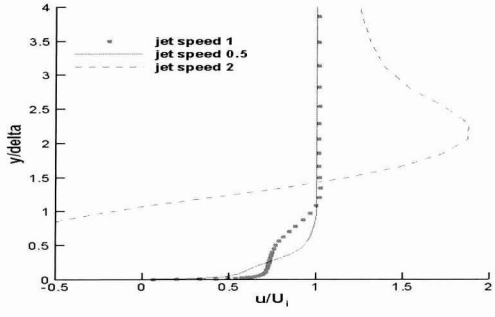

Fig. 14 Velocity profile comparison in different jet speed
(x/δ=3)

역방향으로 기운 경우 jet으로부터 공급되는 에너지변화량은 유동의 에너지변화량과 상쇄되어 유동의 박리를 만들어 낸다. Fig. 15, 16을 보면 jet의 방향이 순방향일 경우 jet과 유동의 방향이 같은 방향이 되어 평판으로부터 가까운 곳의 유동속도를 발달시킨 것을 알 수 있다. 반대로 역방향이 되면 유동의 속도가 상쇄되어 평판으로부터 멀리 떨어진 곳까지 에너지가 소산되었음을 확인할 수 있다.

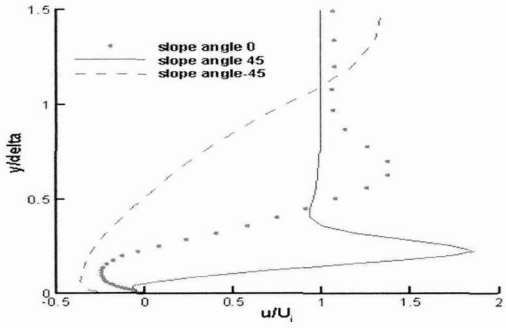

Fig. 15 Velocity profile comparison in different orifice slope angle (x/δ=0.5)

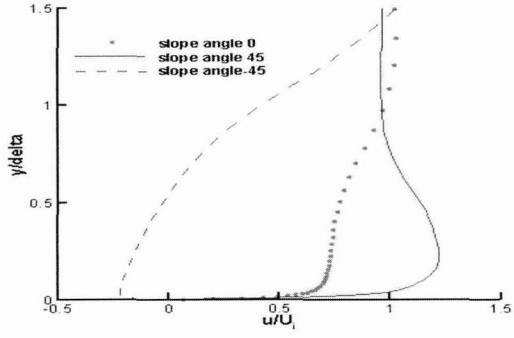

Fig. 16 Velocity profile comparison in different orifice slope angle (x/δ=3)

4.6 오리피스 목 기울기를 고려한 상태에서 jet 속도와 폭변화

Jet 속도와 오리피스 목은 에너지공급량의 크기에 영향을 주는 parameter이다. 오리피스 목의 기울기가 있는 경우에 대하여 에너지를 공급하는 방법에 따라 유동특성의 차이가 있는지를 알아보았다. 폭이 증가하면 그에 비례하여 유량이 증가하므로 에너지 또한 비례하게 된다. Jet 속도의 경우 $\dot{m}v^2$에 비례하게 되므로 에너지변화량이 제곱에 비례하게 된다. 이는 Fig. 17에서 최대속도의 위치와 velocity profile이 같은 에너지변화량에서 유사하게 형성되는 것을 통해 수치적으로도 확인할 수 있다.

에너지변화량을 표준상태를 기준으로 동일한 양이 되도록 속력 $\sqrt{2}\,v$에 대해 폭 0.5, 속력 $\frac{1}{\sqrt{2}}v$에 대해 폭 2의 경우를 비교해보았다. Fig. 18과 Fig. 19를 통해서 알 수 있듯이 같은 에너지를 공급해 준 경우에도 폭을 증가시킨 경우 넓은 영역의 유동에 에너지를 공급하게 되어 최대속도의 위치가 높은 곳에 위치한다. 반면 jet 속도를 증가시킨 경우 벽면에 가까운

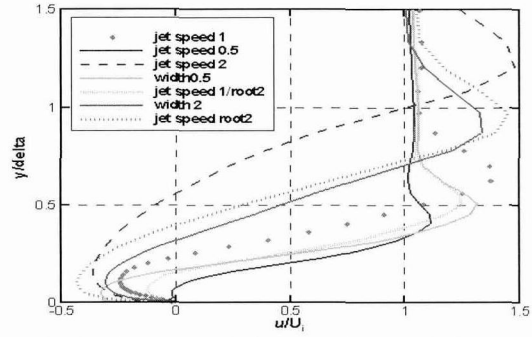

Fig. 17 Velocity profiles in various jet speed (x/δ=0.5)

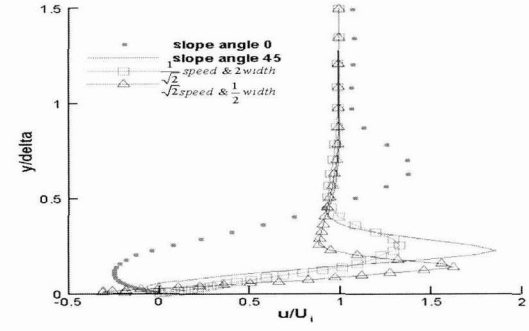

Fig. 18 Velocity profile comparison speed $\frac{1}{\sqrt{2}}v$ & width 2, speed $\sqrt{2}\,v$ & width 0.5 (x/δ=-0.5)

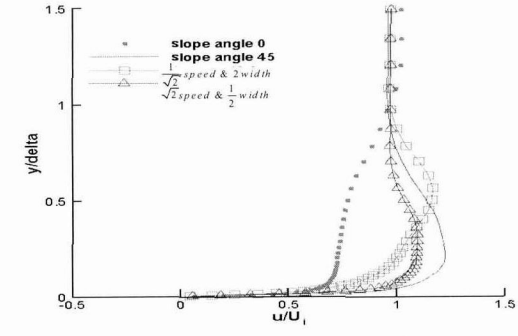

Fig. 19 Velocity profile comparison speed $\frac{1}{\sqrt{2}}v$ & width2, speed $\sqrt{2}\,v$ & width 0.5 (x/δ=3)

부분의 속도분포가 발달한 것을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

이제까지 synthetic jet의 오리피스의 형상을 비롯하여 주기

와 jet 속도 등의 parameter에 대한 변화와 유동에 미치는 영향에 대한 결과를 비교, 분석해 보았다. 오리피스 형상의 경우 깊이에 관한 parameter는 오리피스 목의 벽면 부분에서 작용하는 shear stress에 의한 와도강화 현상이 일정한 깊이 이상에서는 거의 동일한 효과를 나타내는 것으로 나타났다. 폭을 변화시키는 경우와 jet 속도를 변화시키는 경우는 유동에 제공하는 에너지의 크기를 바꾸는 효과를 확인할 수 있었다. 두 경우 모두 더 많은 에너지를 짧은 시간에 공급할수록 강한 와류가 형성되며 큰 eddy를 형성한다. 각각의 경우에 대한 특성도 차이점을 발견할 수 있었는데, 폭 의 경우 증가시키면 넓은 영역의 유동으로 에너지를 공급하기 때문에 상대적으로 소산이 더 발생하여 경계층보다 높은 곳의 유동의 속도분포를 발달시킨다. 따라서 동일한 에너지를 공급할 경우 유량을 증가시켜 공급하는 것 보다 유속을 증가시켜 에너지를 공급하는 편이 경계층을 더 얇게 만들고 박리를 지연하는데 유리할 것으로 보인다. 주기는 와류의 크기를 결정하는 parameter로 보인다. 주기가 클수록 작은 eddy를 형성하고 클수록 큰 eddy를 형성한다. 위와 같은 속성을 고려하여 익형에 적용한다면 각각의 경우를 바탕으로 비행성능에 보다 효율적인 jet을 설정할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구사업(스마트무인기기술개발)과 방위사업청과 국방과학연구소(계약번호 UD070041AD) , BK21 사업 및 서울대학교 항공우주 신기술 연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] H. Ok, 1993, "Development of an incompressible Navier-Stokes Solver and Its Application to the Calculation of Separated Flows," Ph. D. Dissertation, *Dep's of Aeronautics and Astronautics Eng.*, Univ. of Washington.

[2] C. Hirsch, 1990, "Numerical Computation of INTERNAL AND EXTERNAL FLOWS," *Vol. 2: computational Methods for Inviscid and Viscous Flows*, John Wiley & Sons.

[3] Kunwoo Lee, "Principles of CAD/CAM/CAE systmes," *Addison Wiley.*

[4] Frank M. White, "Viscous Fluid Flow," *McGRAW-HILL.*

[5] Lin D. Kral, John F. Donovan, Alan B. Cain, and Andrew W. Cary. 1997, "Numerical Simulation of Synthetic. Jet Actuators," *AIAA 97-1824.*

[6] H. Tennekes and J.L. Lumley "A First Course in Turbulence," *MIT.*

[7] Lin D. Kral, John F. Donovan, Alan B. Cain, and Andrew W. Cary., 1997, "Numerical Simulation of Synthetic Jet Actuators," *AIAA 97-1824.*

[8] Donald P. Rizzetta, Miguel R. Visbal and Michael J. Stanek., 1998, "Numerical Investigation of Synthetic Jet Flowfields," *AIAA 98-2910.*

[9] B.L. Smith and A. Glezer, 1997, "Jet vectoring using synthetic jets," *AIAA 97-1824.*

[10] Jongmin Nho, Chongam Kim, 2005, "Active Flow Control Using the Synthetic Jet Actuator," *한국전산유체공학회 춘계 학술 발표대회.*