

## Synthetic jet을 이용한 유동제어 특성연구

홍우람,<sup>1</sup> 김상훈,<sup>2</sup> 김우레,<sup>2</sup> 김유신,<sup>3</sup> 김종암<sup>4</sup>

## STUDY OF FLOW CONTROL CHARACTER USING SYNTHETIC JET

Wooram Hong,<sup>1</sup> Sang Hoon Kim,<sup>2</sup> Woore Kim,<sup>2</sup> Yushin Kim<sup>3</sup> and Chongam Kim<sup>4</sup>

To develop the aerodynamic performance, there are widely two group of studies are achieved. The first one is about design of the vehicles geometry and the second one is about aerodynamic devices. Geometry design is highly credible and stable method. But it is not flexible and each parts are related interactively. So if one part geometry are modified, the other parts are required to be redesigned. The other hand, flow control by aerodynamic device is flexible and modulized method. Though it needs energy, relatively little input makes far advanced aerodynamic performance. Synthetic Jet is one of the second group method. The device repeats suction and blowing motion in constant frequency. According to the performance, the flow which are near the flight surface are served momentum. This mechanism can reduce the aerodynamic loss by boundary layer and separated flow. Synthetic jet actuator has several parameters, that influence the flow control. This study focus the parameters effects of the synthetic jet - orifice geometry, frequency, jet speed and etc.

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

## 1. 서 론

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

이는 geometry design을 통한 passive flow control을 이용하여 많은 부분의 손실을 낮추고 박리를 지연할 수 있으나 flow control을 적용하는 시점과 대상이 고정되어 있어 한계가 있다. 이런 점은 형상 주위의 유동상태 및 목적에 따라 일시적이고 가변적인 active control로 보완이 가능하다. 이러한 요구에 synthetic jet은 적합한 장치이다.

synthetic jet은 일정한 양의 유동을 같은 주기로 suction과 blowing을 반복하여 유동을 제어하는 장치이다. 이 장치는 유량을 공급하지 않고 momentum만을 유체에 공급한다. 별도의 유량공급이 필요 없기 때문에 장치의 형상과 구동 메커니즘

이 단순하고 소형화 할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 synthetic jet의 parameter study를 수행하였다. synthetic jet은 몇 가지 parameter로 이루어져있다. 그 중 momentum을 유동에 공급하는 방식에 가장 직접적으로 영향을 주는 parameter는 frequency, jet velocity, jet geometry(width & depth), jet slop 등이 있다. jet에서 공급되는 momentum이 클수록 유동에 전달되는 양도 커지게 된다. 그러나 같은 momentum을 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  $\rho$ 를 상수로 취급함으로써 얻어지는, 에너지 방정식을 제외한 2차원 비압축성 유동장의 지배방정식은 다음과 같다.

1 서울대학교 계산과학 협동과정 박사과정  
2 서울대학교 기계항공공학부 박사과정  
3 항공우주연구원 선임연구원  
4 서울대학교 기계항공공학부 부교수

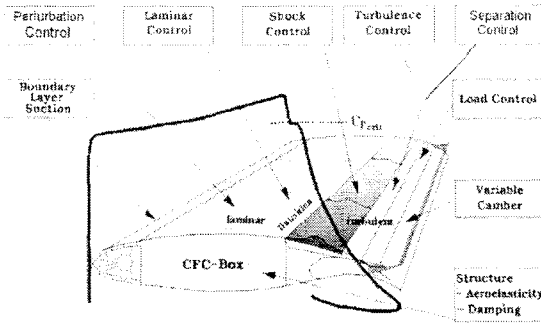


Fig. 1 경계층 제어 장치와 날개의 유동제어 장치

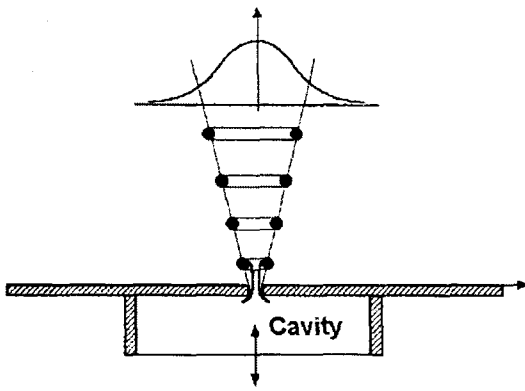


Fig. 2 Synthetic Jet Actuator

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

여기서  $\tau$ 는 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  $a$ 는 가상음속(pseudo-speed of sound)을 의미한다. 가상 시간을 사용하여 가상압축성법을 적용한 연속 방정식과 운동량 방정식을 표현하면 다음과 같다.

연속 방정식

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

운동량 방정식

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

연속 방정식

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식

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

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.

2.2 k-w SST(Shear Stress Transport) 모델

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

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

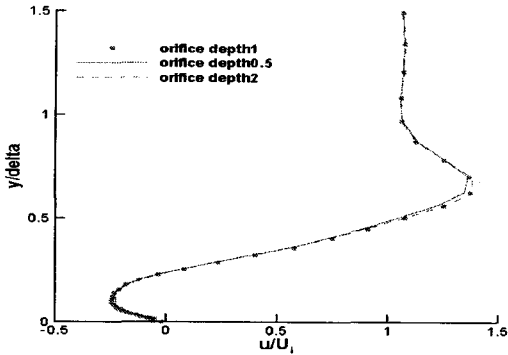


Fig. 3 neck 깊이 변화에 따른 효과 비교 (x/delta=0.5)

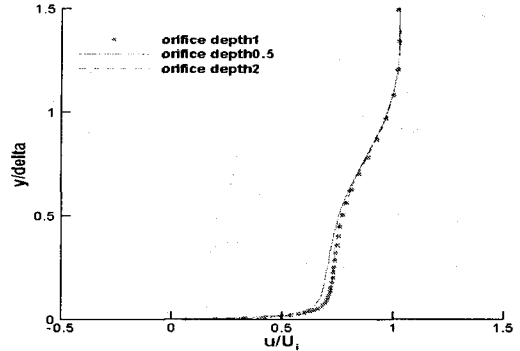


Fig. 4 neck 깊이 변화에 따른 효과 비교 (x/delta=3)

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

$$\nu_t = k/w$$

각 난류 상수들은 blending function  $F_1$ 에 의해서 다음과 같이 표현된다.

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

$\Phi_1$  :  $k-w$  난류모델 상수

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

$\Phi_2$  :  $k-\epsilon$  난류모델 상수

$$\begin{aligned} & \beta^* = 0.09, \sigma_{k2} = 1, \sigma_{w2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828, \\ & \alpha_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{w2} k^2}{\sqrt{\beta^*}}, \kappa = 0.41 \end{aligned}$$

### 3. 유동해석조건

neck 유무에 따른 effect에 대해서는 선행된 연구들을 통해 연구된 바가 있다. Cross flow의 속도 U는 8m/s, 오리피스의 width는 1.91mm 경계층의 두께는 12.7mm, 300Hz의 진동수, 레이놀즈 1214, jet의 속도는 31.4m/s인 상태에서 계산을 수행하였다. 각 parameter에 대해 위에 제시한 조건에 일치하는 경

우를 표준상태로 정의하였고 그 조건들을 기준으로 무차원하여 0.5인 상태 2인 상태에서의 결과를 비교하였다. plat plate 부분의 격자는 오리피스의 width으로 무차원된 길이를 기준으로 350 x 300의 크기로서 격자의 수는 261 x 75로 하였다. 기타 parameter의 조건은 Table 1과 같다.

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

## 4. 유동해석결과

### 4.1 Orifice 깊이

깊이를 변화시키는 경우 표준상태의 결과와 거의 차이가 없음을 알 수 있었다.

이는 neck의 벽면 효과에 의한 shear stress가 심화시키는

Table 1 제어된 parameter와 그 정도

parameter	parameter 변화정도(표준상태를 1)
orifice의 깊이	0.5
	1
	2
orifice의 너비	0.5
	1
	2
jet frequency	0.5
	1
	2
jet speed	0.5
	1
	2

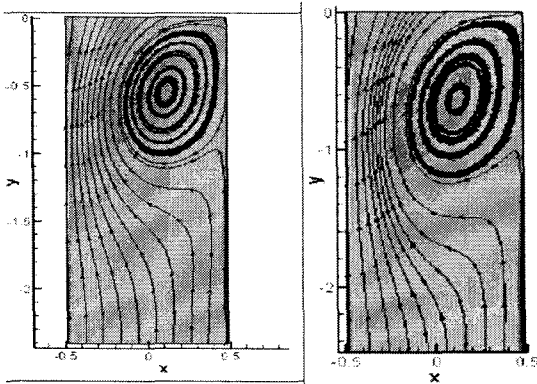


Fig. 5 neck 깊이에 따른 vortex의 크기 (좌: 깊이 0.5, 우: 깊이 2)

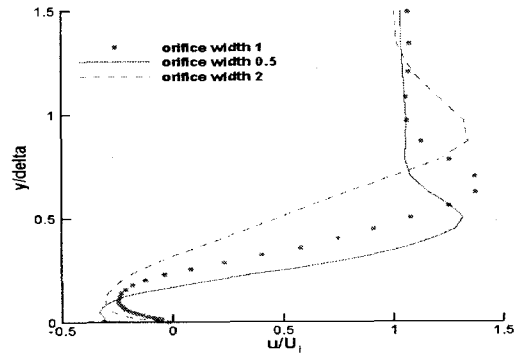


Fig. 7 orifice width 변화에 따른 효과 비교 (x/delta=0.5)

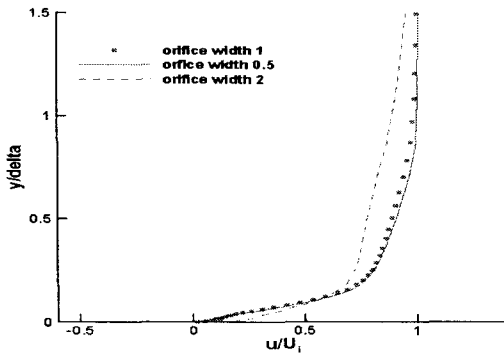


Fig. 6 orifice width 변화에 따른 효과 비교 (x/delta=-0.5)

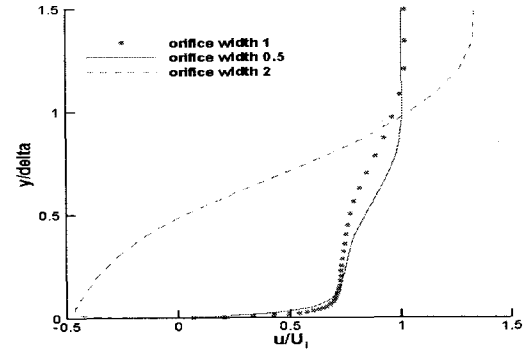


Fig. 8 orifice width 변화에 따른 효과 비교 (x/delta=3)

vorticity의 영향이 어느 정도의 neckrivi가 고려되면 충분한 효과를 나타내는 것으로 볼 수 있다. 다시 말해서 0.5이상의 깊이에 대해서는 synthetic jet이 거의 동일한 효과를 보인다.

#### 4.2 Orifice 너비

유량은  $mv$ 로 정의되며 momentum은  $mv^2$ 이 된다. 너비가 0.5가 되면 jet의 면적이 절반이 되어  $\frac{1}{2}mv^2$ 이 되며 2가 되면  $2mv^2$ 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. 0.5와 3인 위치를 보면(Fig. 7, 8) 너비가 0.5인 경우에서 2인 경우로 갈수록 더 큰 경계층을 갖는 것을 볼 수 있다. 이는 보다 강하고 큰 vortex가 형성되어 velocity가 maximum인 부분의 위치를 더 높은 곳으로 가져가게 하며 또한 더 먼 곳까지 eddy가 살아남아 에너지를 전달

하기 때문에 해석된다.

#### 4.3 Jet frequency

frequency의 변화는 energy에는 영향을 주지 않으나 jet에 의해 발생하는 eddy의 크기에 영향을 준다. frequency가 클수록 작은 eddy를 형성한다. 그러므로 보다 높은 y지점에서 빠른 속도가 나타나는 것은 vortex의 크기에 따라 다른 y 위치에서 vorticity의 각속도 방향이 main flow의 방향과 일치하여 속도를 증가시키기 때문이다.(Fig. 9, 10) 작고 강한 vorticity를 가진 eddy는 벽면에서의 유동방향이 전체 유동의 방향과 달라 속도 구배가 큰 값을 가지도록 한다.

#### 4.4 Jet speed

jet speed는  $mv^2$ 으로 표현되는 momentum에서 v에 해당하는 부분이므로 parameter 변화에 따라 제곱배의 효과가 나타난다. jet speed를 조절함에 따라 vortex의 크기는 많은 차이를 나타내며 vorticity의 강도도 달라진다. 0.5 위치에서 jet speed에 따라 최대 속도를 갖는 위치의 차이는 vortex의 크기 차이로 볼 수 있으며 jet speed가 클수록 높은 y지점에서 속도 최

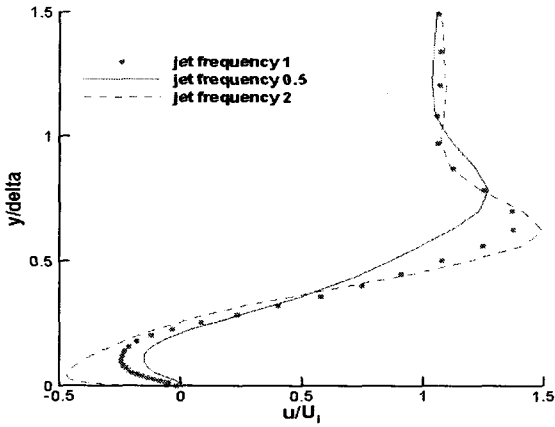


Fig. 9 jet frequency 변화에 따른 효과 비교 ( $x/\delta=0.5$ )

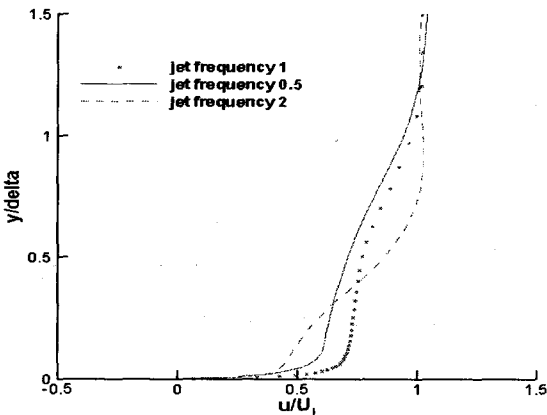


Fig. 10 jet frequency 변화에 따른 효과 비교 ( $x/\delta=3$ )

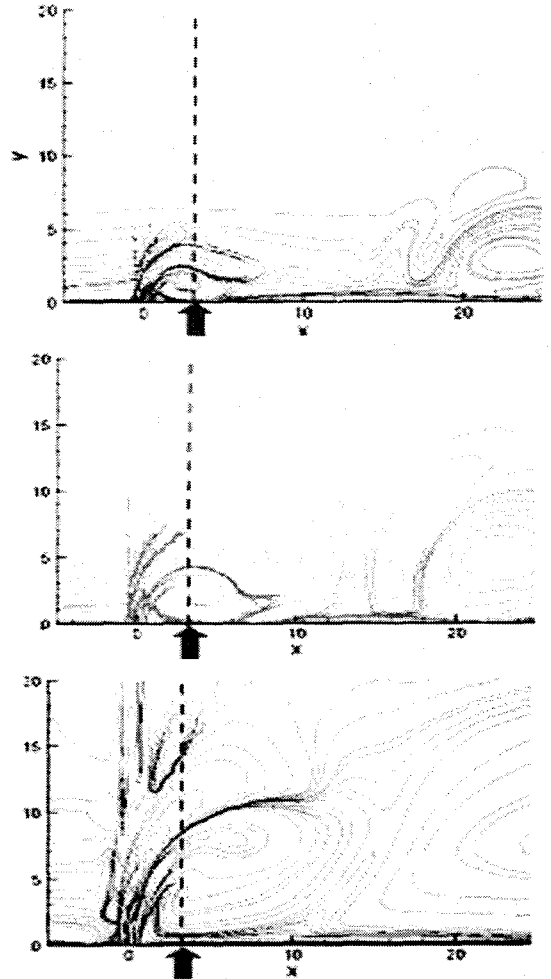


Fig. 11 jet frequency 변화에 따른 vortex eddy의 크기비교 (왼쪽부터 차례로 Jet Speed 0.5, 1, 2 / 화살표위치  $x/\delta=3$ )

대점이 나타난다.(Fig. 13) 또한 vortex가 plate 면 곳까지 유지됨을 확인 할 수 있다(Fig. 14).

#### 4.5 Neck slop

neck의 경사가 cross flow에 대해 순방향으로 기울어 있을 때 jet으로부터 공급되는 momentum은 유동에 효과적으로 전달되어 vorticity의 크기를 작게 만들면서 동시에 경계층의 두께를 얇게 한다. neck의 경사가 cross flow에 대해 역방향으로 기울 경우 jet으로부터 공급되는 momentum은 유동의 momentum과 상쇄되어 유동의 박리를 만들어 낸다.

#### 4.6 Neck slop을 고려한 상태에서 jet speed와 width변화

jet speed와 neck은 momentum의 크기에 영향을 주는 parameter이다. neck의 slop이 있는 경우에 대하여 momentum공급하는 방법에 따라 유동특성의 차이가 있는지를 알아보았다. width가 증가하면 그에 비례하여 유량이 증가하므로

momentum 또한 비례하게 된다. jet speed의 경우  $mv^2$ 에 비례하게 되므로 momentum이 제공에 비례하게 된다. 이는 Fig. 17에서 peak velocity의 위치와 velocity profile이 같은 momentum에서 유사하게 형성되는 것을 통해 수치적으로도 확인할 수 있다.

momentum을 표준상태를 기준으로 동일한 양이 되도록 speed  $\sqrt{2}v$ 에 대해 width 0.5, speed  $\frac{1}{\sqrt{2}}v$ 에 대해 width 2의 경우를 비교해보았다. Fig. 18과 Fig. 19를 통해서 알 수 있듯이 같은 momentum을 공급해 준 경우에도 width를 증가시킨 경우 넓은 영역의 유동에 momentum을 공급하게 되어 peak velocity의 위치가 높은 곳에 위치한다. 반면 jet speed를 증가시킨 경우 wall에 가까운 부분의 velocity profile이 발달한 것을 확인 할 수 있다.

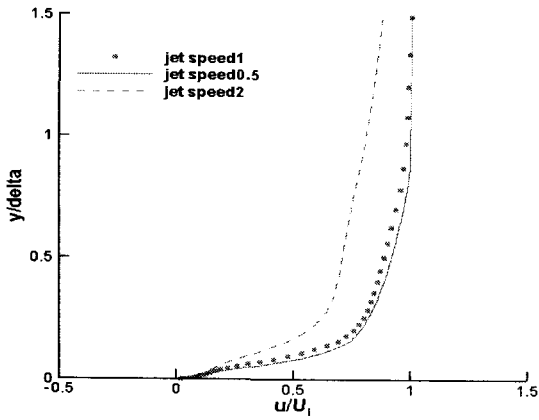


Fig. 12 jet speed 변화에 따른 효과 비교( $x/\delta=0.5$ )

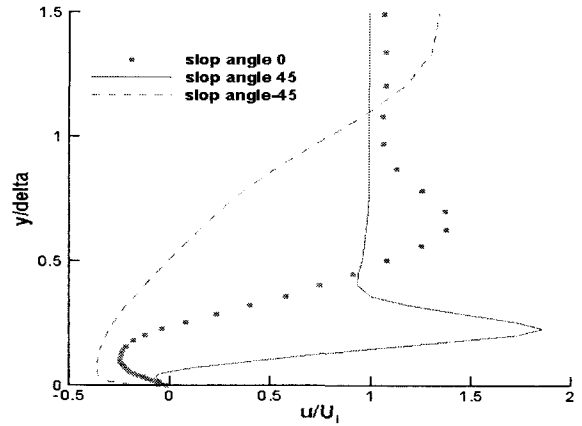


Fig. 15 orifice slop angle에 따른 효과 비교( $x/\delta=0.5$ )

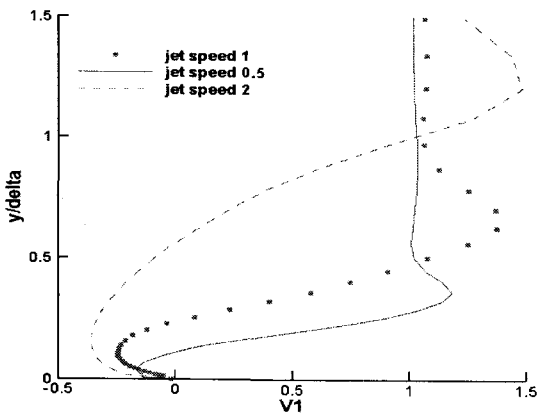


Fig. 13 jet speed 변화에 따른 효과 비교( $x/\delta=0.5$ )

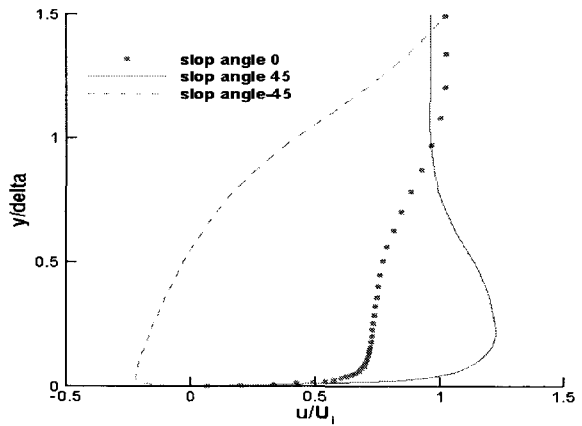


Fig. 16 orifice slop angle에 따른 효과 비교( $x/\delta=3$ )

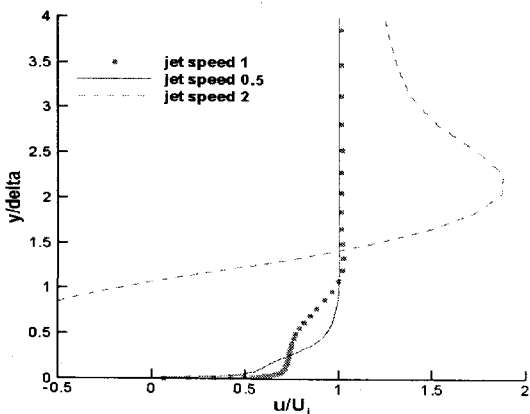


Fig. 14 jet speed 변화에 따른 효과 비교( $x/\delta=3$ )

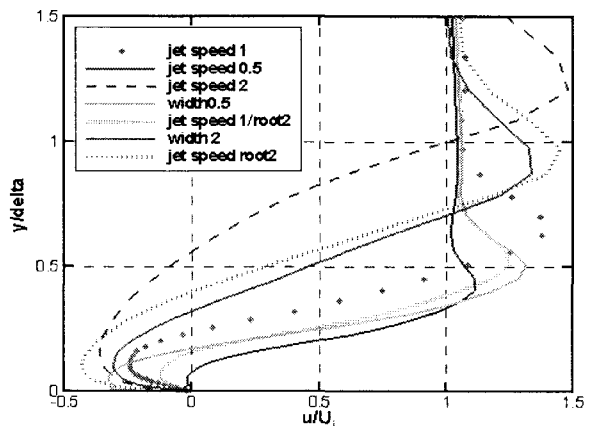


Fig. 17 다양한 jet speed 효과 비교( $x/\delta=0.5$ )

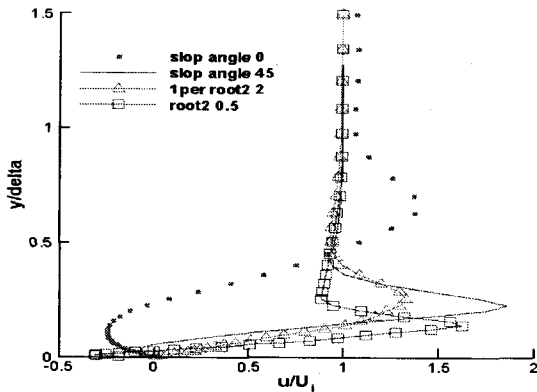


Fig. 18 neck slop에 대해  $\frac{1}{\sqrt{2}}v$  & width2,  $\sqrt{2}v$  & width0.5의 비교(x/delta=-0.5)

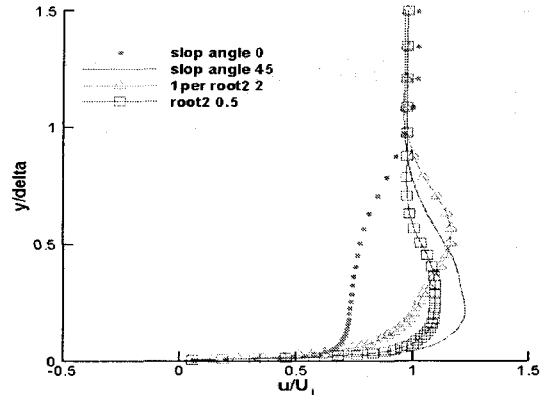


Fig. 19 neck slop에 대해  $\frac{1}{\sqrt{2}}v$  & width2,  $\sqrt{2}v$  & width0.5의 비교(x/delta=3)

### 5. 결 론

이제까지 synthetic jet의 orifice의 형상을 비롯하여 주기와 jet speed 등의 parameter에 대한 변화와 유동에 미치는 영향에 대한 결과를 비교, 분석해 보았다. orifice 형상의 경우 깊이에 관한 parameter는 neck의 벽면 부분에서 작용하는 shear stress에 의한 vorticity강화 현상이 일정한 깊이 이상에서는 거의 동일한 효과를 나타내는 것으로 나타났다. width를 변화시키는 경우와 jet speed를 변화시키는 경우는 유동에 제공하는 momentum의 크기를 바꾸는 효과를 확인할 수 있었다. 두 경우 모두 더 많은 에너지를 짧은 시간에 공급할수록 강한 vortex가 형성되며 큰 eddy를 형성한다. 각각의 경우에 대한 특성도 차이점을 발견할 수 있었는데, width parameter의 경우 증가시킬 경우 넓은 영역의 유동으로 momentum을 공급하기 때문에 상대적으로 diffusion이 더 발생하여 wall boundary 보다 높은 곳의 유동의 velocity profile을 발달시킨다. 따라서 동일한 momentum을 공급할 경우 유량을 증가시켜 공급하는 것 보다 유속을 증가시켜 momentum을 공급하는 편이 boundary layer를 더 얇게 만들고 박리를 지연하는데 유리할 것으로 보인다. frequency는 vortex의 size를 결정하는 parameter로 보인다. frequency가 클수록 작은 eddy를 형성하고 클수록 큰 eddy를 형성한다. 위와 같은 속성을 고려하여 airfoil에 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 국방과학연구소 및 서울대

학교 비행체특화연구센터, BK21 사업의 연구비 지원에 의한 연구결과입니다.

### 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," *computational Methods for Inviscid and Viscous Flows, John Wiley & Sons, Vol.2.*
- [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, *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, "Numerical Simulation of Synthetic Jet Actuators," *AIAA 97-1824.*
- [8] Donald P. Rizzetta, Miguel R. Visbal and Michael J. Stanek, "Numerical Investigation of Synthetic Jet Flowfields," *AIAA 98-2910.*
- [9] B.L.Smith and A. Glezer, "Jet vectoring using synthetic jets," *AIAA 97-1824.*
- [10] Jongmin Nho, 2004, "Active Flow Control Using the Synthetic Jet Actuator."