

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.7.585

사각형 및 원형 출구 Synthetic Jet의 유동 특성에 대한 수치적 연구

김민희*, 김우례**, 김종암***, 정경진****

Numerical Study on Flow Characteristics of Synthetic Jet
with Rectangular and Circular Slot Exit

Minhee Kim*, Woore Kim**, Chongam Kim*** and Kyungjin Jung****

ABSTRACT

The flow characteristics of synthetic jet depending on rectangular and circular jet exit configuration are investigated using numerical computation with cross flow. In rectangular slot, synthetic jet generates the strong vortex but supplies fewer momentum and effectiveness of flow control is reduced along flow direction. In circular slot, regular vortex is formed from slot center to end. It affects the wider region than rectangular slot. The distribution of wall shear stress is considered in order to indicate the effectiveness of flow control device for flow separation delay. Consequently, circular slot is a more suitable candidate for delaying flow separation. In order to derive the optimal shape of a circular slot exit, hole gap and diameter that affect the flow structure and flow control were analyzed. As a result, consider the hole diameter and gap of circular slot exit design, effectiveness of the flow control can be increased.

초 록

사각형 및 원형 출구 형상 synthetic jet의 수치적 연구를 통하여 유입류가 존재할 경우 평판에서의 유동 구조 및 유동 제어 효과를 분석하였다. 사각형 출구 형상의 경우, jet 직후에 강한 vortex가 생성되지만 주변에 적은 momentum을 공급하기 때문에 유입류 방향으로 갈수록 유동제어 효과가 감소하게 된다. 원형 출구 형상의 경우, 규칙적인 vortex의 형태가 slot 중앙부터 끝까지 나타나고 보다 멀리까지 jet vorticity의 영향이 미치게 된다. 유동제어 효과를 예상하기 위하여 위치 별 wall shear stress를 비교하였다. 이에 원형 출구 형상이 사각형 출구 형상보다 유동제어 효과가 더 클 것으로 판단된다. 또한 최적의 원형 출구 형상을 도출하기 위하여, hole gap과 diameter의 변화에 따른 유동 구조 및 유동 제어 효과를 비교 분석하였다. 그 결과, hole diameter와 gap를 고려하여 원형 출구 형상을 설계할 경우 유동제어 효과를 극대화 할 수 있음을 밝혔다.

Key Words : Synthetic jet(Synthetic 제트), Flow control(유동제어), Wall shear stress(전단응력), Flow structure(유동구조)

† 2011년 5월 2일 접수 ~ 2011년 6월 24일 심사완료

* 정회원, 서울대학교 계산과학협동과정 대학원

** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

*** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부
교신저자, E-mail : chongam@snu.ac.kr
서울시 관악구 관학로 599

**** 정회원, 국방과학연구소

1. 서 론

유동제어는 고성능, 고효율 항공기 개발에 전제되는 핵심기술이고, 동시에 성능, 안전성 등의 요구를 만족시킴으로써 차세대 항공기의 패러다

임의 변화를 앞당길 수 있는 선도적 기술로 평가되고 있다. 이에 시대적 개발 요구에 따라 보다 높은 양항비를 안정적으로 얻기 위한 공기역학적 연구는 그 중요성이 커지고 있다. 특히, 박리 현상은 특히 고기동성을 요구하는 받음각에서 주로 발생되며 심각한 박리의 경우 비행체 실속으로 인하여 비행 조종성마저 상실하게 된다. 박리 현상 내의 압력 변화는 양력 감소 및 항력 증가를 야기하므로 결과적으로 비행체의 양항비 성능에 치명적인 결과를 가져오기도 한다. 이에 유동 박리를 효과적으로 제어하기 위한 유동 제어 기법 및 장치에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 그 중 능동 유동 제어 기법 중 하나인 synthetic jet에 대한 연구가 최근 활발하게 수행되고 있다.

Smith[1], Zaman and Milanovic[2], C.Kim[3]은 유입류가 있을 경우 경계층과 synthetic jet의 유동구조간의 상관관계에 대한 실험적 연구를 수행하였다. Synthetic jet은 국부적인 위치에서 vortex를 생성시키며 이로 인하여 유입류 유동과의 flow interaction을 발생시켜 유동 제어에 효과가 있음을 밝혔다. 이를 통하여 synthetic jet을 이용한 유동제어에 관한 기초적인 자료를 얻을 수 있었지만, 실험으로는 유동 구조 및 벽면 근처에서의 유동제어 효과에 대한 구체적인 사항에 대해서는 정보를 얻는데 충분하지 못하였다.

이에 전산 수치 해석을 이용하여 실험에서 얻은 정보를 바탕으로 synthetic jet의 특성을 파악하고자 하는 연구가 수행되었다. F.M. Najjar[4] 등은 DNS를 이용하여 synthetic jet 내부의 cavity 유동과 외부 경계층과의 유동을 모사하였고, 사각형 출구 형상의 가로세로비 변화에 대한 연구를 수행하였다. 또한 R.K. Agarwal[5]은 유입류가 있을 경우 단일 원형 출구 synthetic jet의 속도 분포를 모사할 수 있는 난류 모델을 파악하기 위하여 수치 해석을 수행하였다. Zhou and Zhong [6]은 유입류 속도 변화에 따라 단일 원형 출구 형상 synthetic jet의 유동 구조 변화를 파악하고 이 때 발생하는 vortex와의 상관관계에 대해서 수치적, 실험적으로 모사하였다.

본 연구에서는 실험에서의 결과를 바탕으로 전산 수치 해석을 통하여 유입류가 있을 경우 synthetic jet의 출구 형태에 따른 유동구조를 파악하고 이를 통하여 유동제어 성능을 파악하고자 한다. 이에 먼저 사각형 및 원형 출구 형상에 대해서 유동 구조의 차이와 유동 제어의 효과를 살펴보고자 한다. 또한 유동 제어 효과를 향상시킬 수 있는 원형 출구 형상을 도출하기 위하여 hole gap과 diameter의 변화에 따른 연구를 수행하였다.

II. 본 론

2.1 지배방정식 및 수치기법

2.1.1 지배 방정식 및 수치기법

본 연구에서는 3차원 비정상 비압축성 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 이용하여 해석을 수행하였으며, 지배방정식은 다음과 같다. 여기서 뎀자 (—)는 레이놀즈 평균값을 나타낸다.

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\nabla \bar{p} + (\mu + \mu_t) \nabla^2 \bar{u} \quad (2)$$

비압축성 방정식은 속도장과 압력장이 연결되어 있지 않으므로 각 sub-iteration 마다 연속방정식을 만족시키는 pseudo compressibility 방법 [7, 8]을 적용하였다.

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = -\beta \nabla \cdot \bar{u} \quad (3)$$

여기서 τ 는 pseudo-time, β 는 pseudo compressibility parameter를 나타낸다. 비정상 유동장을 해석하기 위하여 이중시간 전진법(dual time stepping)을 사용하였으며 비점성항은 flux difference splitting 방법에 기초한 풍상차분법을, 점성항은 중앙 차분하였다. 또한 MUSCL을 이용하여 비점성항은 3차 정확도, 점성항은 2차 정확도로 계산하였다. 난류 유동장 해석을 위해서 k- ω SST 난류 모델[8]을 사용하여 유동장 방정식과 결합하여 구하였다. 시간 전진은 내재적 시간 적분법인 LU-SGS 방법[9]을 사용하였다. 또한 난류 천이 과정에서의 유동을 모사하기 위하여 Total stress limitation (TSL)을 사용하였다[10]. 계산에 사용된 코드는 in-house 코드로 충분히 검증되었다[11-15].

2.1.2 Synthetic jet actuator 경계 조건

Synthetic jet은 orifice를 통하여 외부의 공기를 흡입하고 그 유체를 그대로 분출하는 방식으로 외부로 부터의 질량공급 없이 유동을 제어한다.

Synthetic jet actuator를 모델링하기 위해서 흡입/분출 형태의 경계조건을 사용하였으며, Jet의 속도 크기는 다음과 같다.

$$u_{jet}(\xi, \eta = 0, t) = A_j f(\eta) \sin(\omega t) \quad (4)$$

여기서 ξ 는 synthetic jet의 속도 방향을 나타내고, η 는 그 방향에 수직 방향이다. 그리고

$f(\eta)$ 는 jet 출구에서의 속도 분포를 나타내는 함수이다.

L. Kral 등의 연구에 의하여 외부 유동장의 유동이 없을 경우 top-hat 형태의 속도 분포가 적절하다고 제안 하였다[16]. 본 연구에서는 L. Kral 이 제안한 top-hat 속도 분포를 사용하였으며, 이 모델은 jet 운동량이 난류 소산으로 외부 유동장에 전달되는 물리현상을 포함하고 있으므로 synthetic jet의 유동 제어 경향성을 파악하는데 적절하다고 판단된다.

2.2 코드 검증

2.2.1 Synthetic jet의 출구 형상 및 좌표

Synthetic jet은 blowing과 suction을 반복하며 주기적으로 vortex를 생성하며 외부 유동으로의 모멘텀 전달을 통하여 vortex interaction을 야기한다. 주기적인 vortex 구조는 모멘텀 전달에 많은 영향을 미치며 이는 박리 유동 제어의 효율성을 결정한다. 또한 출구 형상이 synthetic jet의 vortex 구조에 영향을 미치기 때문에 출구 형상은 유동 제어 가능성과 밀접한 연관이 있게 된다. 이에 사각형 출구 형상 및 단일 원형 출구 형상은 각기 다른 vortex 구조를 생성하기 때문에 두 가지의 출구 형상을 고려해왔다. 사각형 출구 형상은 끝단을 제외하면 2차원 vortex pair 구조를 가지며, 단일 원형 출구 형상은 축대칭 vortex ring의 형태를 갖는다. 이에 vortex pair와 vortex ring의 간섭 효과를 살펴보기 위하여 다음과 같이 출구 형상을 정하였다.

Synthetic jet 출구 형태는 Fig. 1과 같으며 각각의 출구 형상의 출구 면적과 slot의 길이는 동일하다. 좌표는 Fig. 2와 같이 유입류 방향이 x-방향, slot의 centerline을 중심으로 slot 방향이 y-방향, xy평면에 수직인 방향이 z-방향이다. 좌표는 synthetic jet slot의 centerline을 기준으로 설정하였다. 해석 영역은 half-plane으로 하였으며, 격자는 사각형 출구 형상의 경우 800만개, 원형 출구 형상의 경우 1300만개 이며, slot diameter 기준으로 x, y, z 방향으로 각각 170배, 150배, 150배 확장하여 격자를 구성하였다.

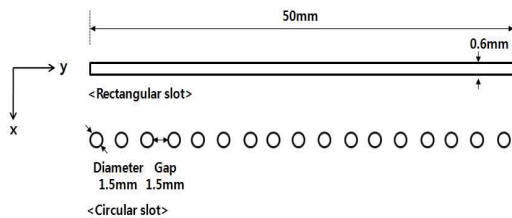


Fig. 1. Synthetic jet 출구 형태

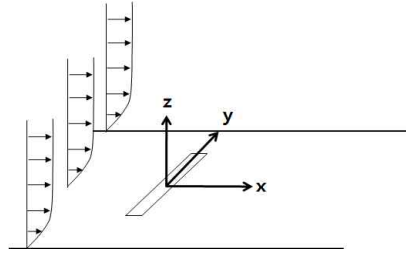


Fig. 2. 좌표계

2.2.2 코드 검증

유동 해석 조건은 참고 문헌[3]을 참조하여 유입류 속도 10m/s, jet peak velocity 40m/s, jet frequency 50Hz로 정하였으며 레이놀즈수는 유입류 속도 및 circular diameter를 기준으로 동일하게 적용하였다. 유입류 조건은 실험을 통하여 구한 경계층 두께를 이용하여 power law of incompressible turbulent mean flow의 velocity profile을 적용하였다. 또한 $k-w$ SST turbulence model의 free-stream boundary condition을 적용하였다. Fig. 3은 동일한 위치에서 수치 해석을 통해서 구한 유입류 조건과 실험값을 비교한 결과이다. 유입류 방향으로의 위치에서 비교하였으며, 그 위치는 $x=45, 90, 120$ mm이다. 이는 유입류 방향으로 slot의 중심 부분에서 측정된 값이다. 사각형 및 원형 출구 형상에 대해서 유동제어를 했을 때와 하지 않았을 때의 평균 속도값을 실험값과 각각 비교한 결과 Fig. 4, 5에서와 같이 유사하게 일치하는 것을 알 수 있다. 효과적으로 시간 정확도를 유지시키기 위하여 subiteration은 고정된 physical time에서 수렴된 해를 얻을 수 있을 정도로 수행하였으며, 1.0×10^{-5} 이하로 하였다. Time step은 Fig. 6에서와 같이 synthetic jet period를 60, 90, 120으로 나누어 테스트하였다. 그 결과 90, 120 time step의 결과 차이가 2% 미만이기 때문에 유동장을 효과적으로 해석할 수 있다고 판단되는 90 time step을 선택하였다.

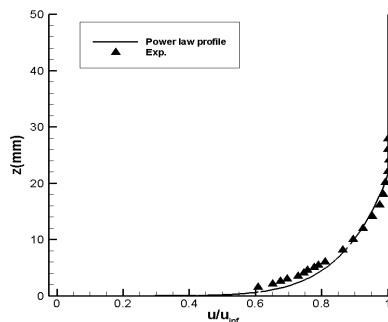


Fig. 3. 유입류 조건

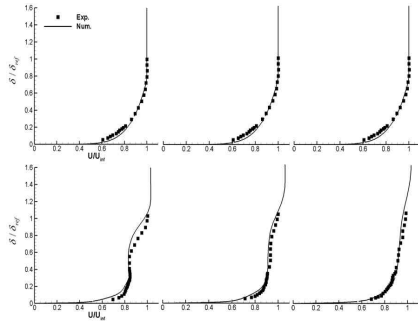


Fig. 4. 사각형 출구 형상의 속도 분포 (위: control off, 아래: control on)

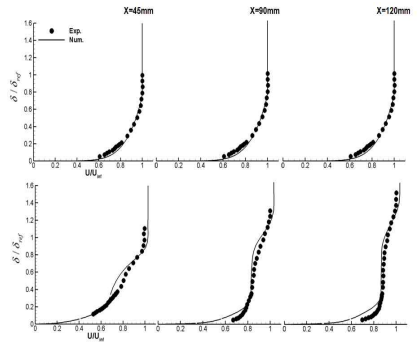


Fig. 5. 원형 출구 형상의 속도 분포 (위: control off, 아래: control on)

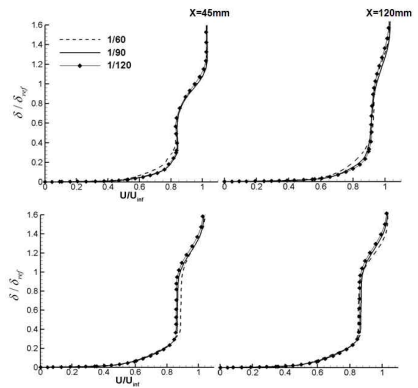


Fig. 6. Time step에 따른 속도 분포 (위: 사각형 출구, 아래: 원형 출구)

2.3 사각형 및 원형 출구 형상 유동 구조 분석

2.3.1 Phase averaged iso-surface vorticity

Fig. 7~10은 사각형 및 원형 출구 형상의 phase averaged iso-surface vorticity를 나타낸 것이다. jet이 발생하는 위치는 y=0~25mm까지이

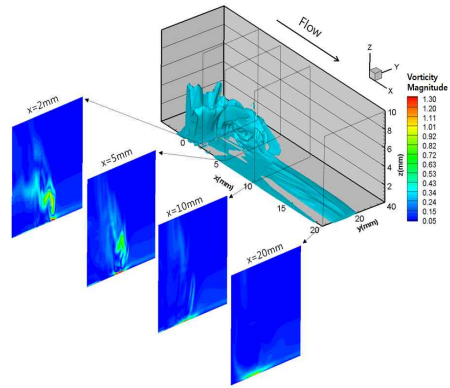


Fig. 7. 사각형 출구 형상의 x-방향 유동 구조

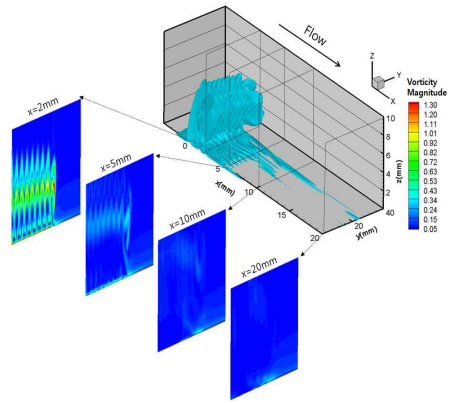


Fig. 8. 원형 출구 형상의 x-방향 유동 구조

다. Jet이 발생하는 위치에서 contour를 비교해보면 원형 출구 형상이 사각형 출구 형상보다 더 큰 vortex를 균일하게 형성한다.

x-방향 유동 구조를 살펴보면 다음과 같다. Fig. 7에서 보면, 사각형 출구 형상의 경우 slot 끝단에서만 vorticity가 크게 나타나게 되고 유동이 유입류 방향으로 진행될수록 바닥면에 jet vortex가 커지게 된다. 또한 이는 유입류의 방향으로 진행될수록 slot 중앙으로 퍼지는 것을 확인할 수 있다. 또한 slot 끝단에서만 jet vortex가 강하게 나타나게 된다. Fig. 8에서와 같이 원형 출구 형상의 경우 jet이 위치해 있는 영역뿐만 아니라 유입류 방향으로 이동하더라도 jet에 의한 vortex 강도가 균일하게 된다. 원형 출구 형상의 경우에도 끝단에서 유동이 말리는 현상이 발생하는 하지만 그 정도가 크지 않기 때문에 slot 끝단에서 발생하는 jet vortex의 크기 감소가 적게 된다. 또한 각각의 x위치에 상관없이 상대적으로 균일한 jet vortex를 갖는다.

z-방향 유동 구조도 x-방향 유동 구조와 유사

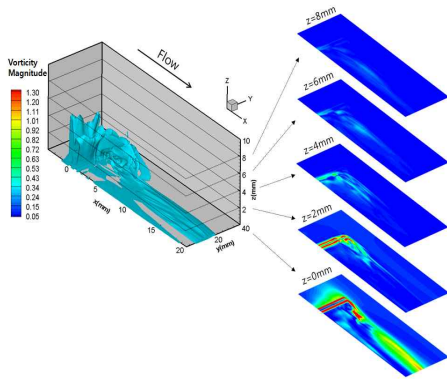


Fig. 9. 사각형 출구 형상의 z-방향 유동 구조

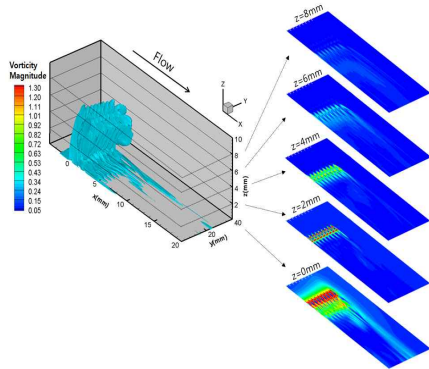


Fig. 10. 원형 출구 형상의 z-방향 유동 구조

한 특징을 갖는다. Fig. 9, 10에서 살펴보면, 원형 출구 형상의 경우 균일한 jet vortex가 더 높은 위치까지 영향을 미치게 된다.

2.3.2 사각형 출구 형상의 유동구조 분석

Fig. 11은 synthetic jet phase의 변화에 따른 iso-vorticity 유동장이다. 사각형 출구 형상의 blowing phase를 보면, slot 중심보다 끝단으로 갈수록 jet에 의한 vortex가 크게 생기게 됨을 확인할 수 있다. Jet 출구 직후에 생기는 강한 vortex는 유동의 난류도를 증가시켜 주위의 유동을 혼합시키는 역할을 하게 된다. 이에 Jet 출구 직후의 유동제어 효과가 크게 나타날 것으로 판단된다. 또한 끝단의 강한 jet vortex에 의해서 반시계 방향으로 회전하는 유동이 발생하게 되고 이는 평판에 수직한 방향으로 발달하게 된다. 사각형 출구 형상의 경우, jet에 의한 vortex가 크게 생성되기는 하지만 주변에 공급되는 momentum이 적어지게 되어 유입류 방향으로 갈수록 유동제어 효과가 급격하게 감소할 것으로 예상된다.

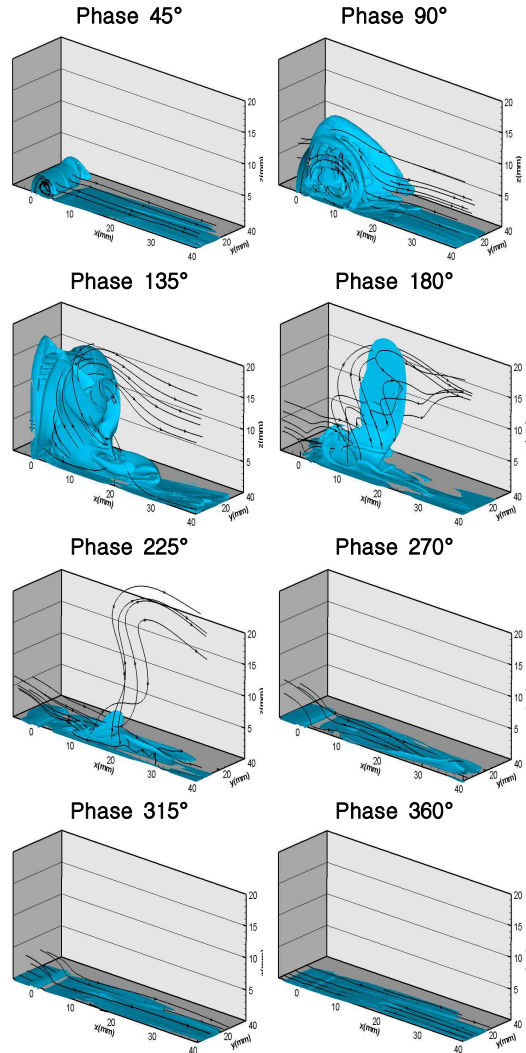


Fig. 11. Phase에 따른 사각형 출구 형상의 유동 구조

2.3.3 원형 출구 형상의 유동구조 분석

Fig. 12는 사각형 출구 형상과 동일한 방법으로 나타낸 원형 출구 형상의 유동장이다. 사각형 출구 형상과 비교해보면, 사각형 출구는 slot 끝단으로 갈수록 jet에 의해서 vortex가 크게 나타나는 반면, 원형 출구 형상은 규칙인 vortex의 형태가 slot 중앙에서 끝까지 나타나게 된다. 이는 phase averaged contour에서도 동일하게 나타난다. 또한, jet에 의해서 공급되는 vortex가 유입류 방향으로 말리는 형태가 아니라 x방향으로 발달되게 되어 jet slot에서 보다 먼 거리까지 jet에 의해 발생하는 vorticity의 영향이 미칠 것으로 생각된다. Phase 135°를 보면, jet interaction에 의해

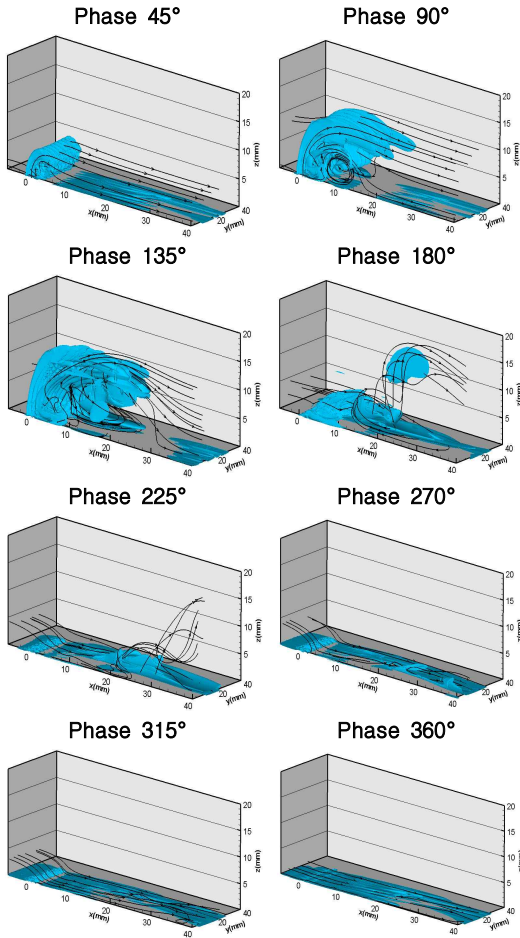


Fig. 12. Phase에 따른 원형 출구 형상의 유동 구조

서 반시계 방향으로 발생하는 유동이 나타나기는 하지만 그 크기가 작기 때문에 상대적으로 주변에 공급되는 momentum이 크게 되어 유동제어 효과가 더 클 것으로 예상된다.

2.4 사각형 및 원형 출구 형상의 유동제어 성능 파악

Synthetic jet의 vortex에 의해서 야기되는 wall shear stress의 변화를 살펴보고 이를 통하여 유동제어 효과를 예측해볼 수 있게 된다[17]. 또한 참고 문헌에서와 마찬가지로 유동 제어를 하지 않았을 경우의 wall shear stress($\tau_{w_{ref}}$)와 유동제어를 수행했을 경우의 wall shear stress(τ_{wall})의 비는 synthetic jet에 의해서 변화하는 유동 특성을 나타낼 수 있게 된다. Wall shear stress는 마찰 항력과 밀접한 관계가 있으므로 박리 제어 가

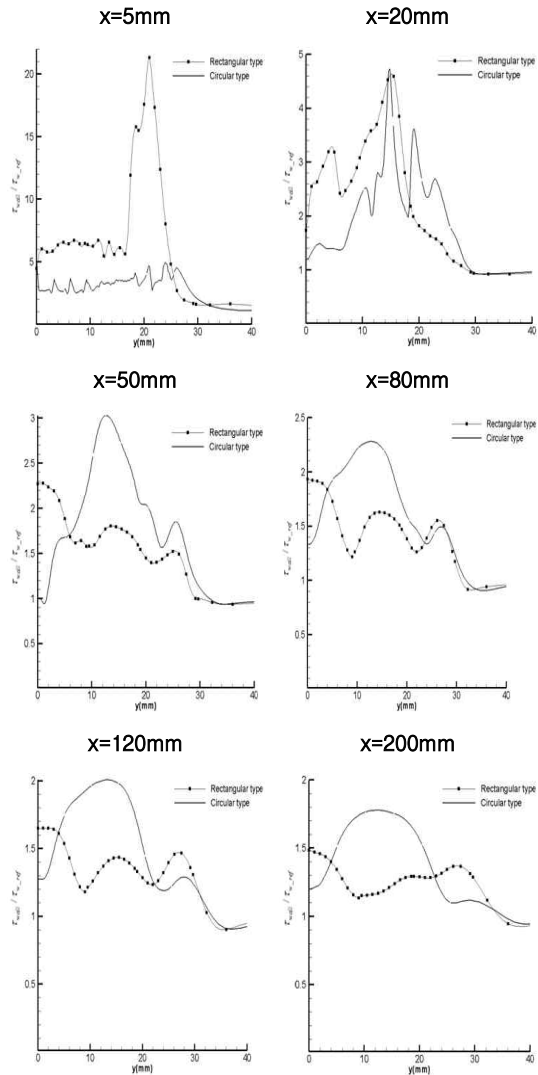


Fig. 13. x의 위치에 따른 phase averaged WSSD

능성을 예측해볼 수 있고, 특히 평판 유동에서는 jet에 의한 vortex에 의해서만 발생하는 유동 특성을 반영할 수 있는 지표라고 판단된다. Synthetic jet의 출구 형상에 따른 박리 유동제어 성능 평가에 앞서 평판에서의 유동 특성 파악을 통하여 보다 효과적으로 유동제어를 수행할 수 있는 출구 형상을 도출하기 위하여 wall shear stress를 유동제어 지표로 참고하였다.

유입류 방향에 따른 유동제어 효과를 분석하기 위해서 Fig. 13에서와 같이 사각형 및 원형 출구 형상의 x 위치별 phase averaged WSSD를 각각 비교해 보았다. 유동구조 분석에서 비교한

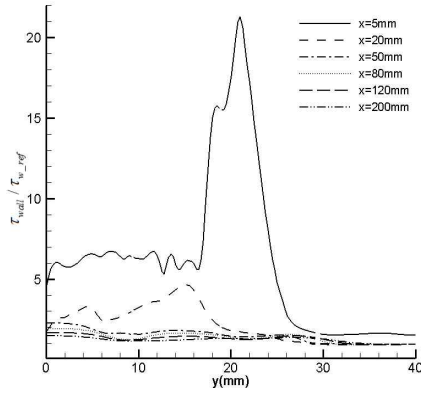


Fig. 14. 사각형 출구 형상의 phase averaged WSSD

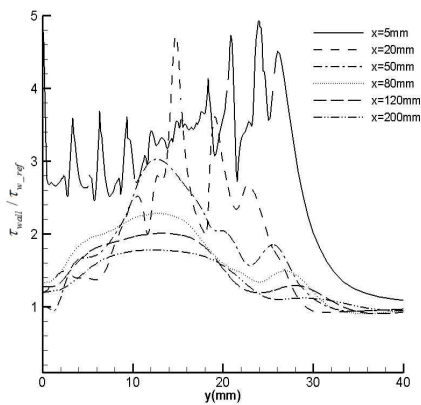


Fig. 15. 원형 출구 형상의 phase averaged WSSD

것과 마찬가지로 jet slot 직후에서는 사각형 출구 형상이 현저하게 큰 값을 가지고 있지만 유입류 방향으로 진행될수록 평균적으로 원형 출구 형상이 더 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 사각형 출구 형상의 경우 jet의 끝단 (\$y=25mm\$) 지점에서 WSSD가 상대적으로 더 큰 것을 확인할 수 있는데, 유동 구조 분석에서도 파악한 바와 같이 반 시계 방향으로 회전하는 유동에 의한 것임을 알 수 있다.

참고 문헌[17]에 따르면, 레이놀즈수가 동일할 경우, WSSD의 감소폭은 near wall vortex structure의 지속성을 나타내고 WSSD의 값은 absolute strength를 나타낸다고 할 수 있다. Fig. 14, 15에서 \$x=5mm\$와 \$x=200mm\$를 비교해보면, WSSD의 감소율은 사각형 출구 형상의 경우 83%, 원형 출구 형상의 경우 54%이다. 또한 유입류 방향으로 진행될수록 원형 출구 형상의 절대적인 WSSD 값이 사각형 출구 형상 보다 커짐

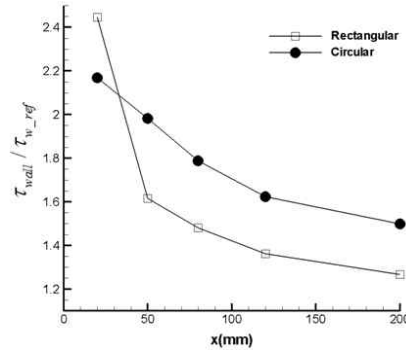


Fig. 16. 사각형 및 원형 출구 형상의 x위치에 따른 phase averaged WSSD

을 알 수 있다. 이에 원형 출구 형상의 경우 상대적으로 낮은 강도이지만 vortex의 지속성이 계속해서 유지되어 사각형 출구 형상에 비해 박리 지연 효과가 더 크게 발생할 가능성이 있게 된다.

Fig. 16은 x방향 위치에 따른 사각형 및 원형 출구 형상의 phase averaged wall shear stress distribution (WSSD)를 정량적으로 비교한 것이다. 이때 \$y\$는 0~40mm까지로 jet slot 끝단에서 발생하는 유동의 영향을 포함할 수 있도록 설정하였다. 그림에서와 같이 jet slot 직후에는 사각형 출구 형상이 상대적으로 더 큰 값을 보이고 있지만, 유입류 방향으로 진행될수록 원형 출구 형상이 더 큰 유동제어 효과를 가짐을 확인할 수 있다. \$x=50\sim 200mm\$ 사이에서의 값을 비교해보면 약 15~18% 더 크게 나타나게 된다.

2.5 원형 출구 형상 변화에 따른 유동구조 분석 및 유동제어 성능 파악

2.5.1 원형 출구 형상 조건

앞에서 실험한 원형 출구 형상 조건을 바탕으로 hole의 diameter, gap을 변화시켜보았다. 전체 jet momentum을 동일하게 하기 위하여 jet peak velocity를 조절하였다. 각각의 slot 형상에 따른 표시 및 jet peak velocity는 Table 1과 같다. Reference length는 원형 출구 형상의 지름인 1.5mm로 설정하였다.

Table 1. 각각의 원형 출구의 jet peak velocity

	Jet peak velocity
G1D1	U_{peak}
G0.5D1	$0.88U_{peak}$
G2D1	$1.12U_{peak}$
G0.5D0.5	$1.43U_{peak}$
G0.5D2	$0.57U_{peak}$

2.5.2 Circular hole gap (G)

2.5.2.1 Iso-vorticity contour in quiescent condition

Hole gap가 1.5mm일 때를 reference length 1로 정하여 $G=0.5$, 2일 경우를 비교하여 원형 출구 형상의 gap의 변화에 따른 유동 구조를 살펴 보았다. 좌표는 앞에서와 동일하다. 유입류가 없을 경우의 synthetic jet의 blowing phase에서의 유동구조는 Fig. 17과 같다. Hole gap이 좁아질수록 hole에서 나오는 유동 간의 interaction이 발생하게 되고 이로 인하여 vortex가 더 크게 발생함을 확인할 수 있다. 또한 phase 0~180° 까지 blowing phase 임을 생각해 봤을 때, gap이 작을수록 jet vortex가 더 오랫동안 유지된다.

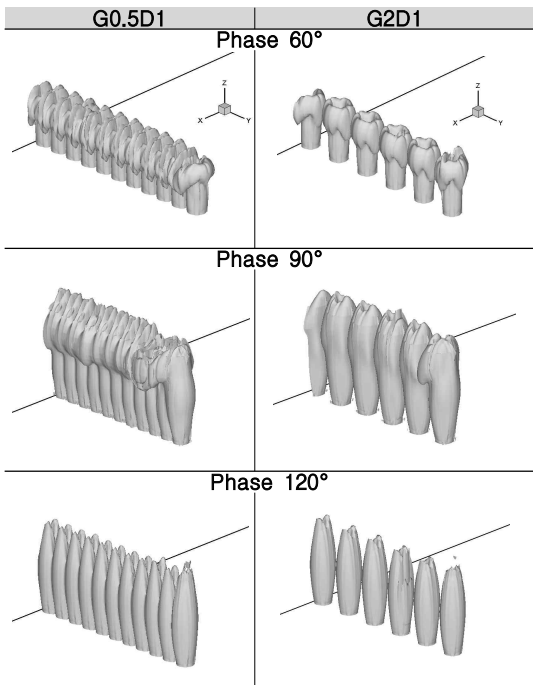


Fig. 17. 유입류가 없을 때의 hole gap에 따른 유동 구조

2.5.2.2 Phase averaged iso-surface vorticity

Fig. 18, 19는 앞에서와 마찬가지로 유입류가 있을 경우의 phase averaged iso-surface vorticity이다. 유사한 vortex 형태를 가지고 있지만 jet 끝단에서의 유동 구조의 차이를 보인다. Hole gap이 넓은 경우 단일 원형 출구에서의 jet이 서로 간의 interaction을 발생시키지 않기 때문에 jet slot 중앙에서 끝단까지 균일하게 분포하지만, hole gap이 감소하게 되면 slot 끝단에서 반 시계방향으로 말리는 현상이 조금 더 크게 발

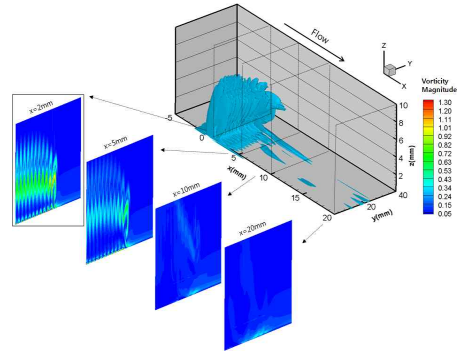


Fig. 18. G0.5D1에서의 유동구조

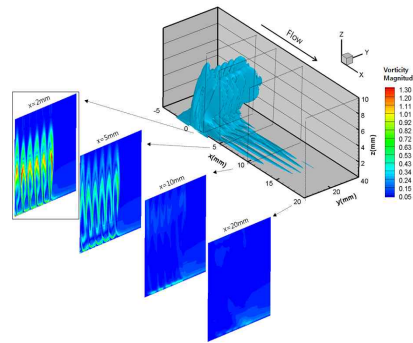


Fig. 19. G2D1에서의 유동구조

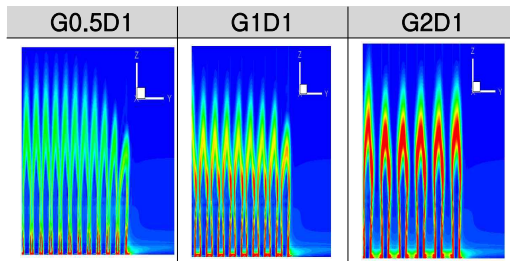


Fig. 20. $x=1\text{mm}$ 에서의 iso-surface vorticity contour

생하기 때문에 slot 중앙보다 끝단에서의 vortex의 크기가 작게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 20은 hole gap의 변화에 따라서 jet 직후의 vorticity contour를 나타낸 것이다. jet 출구 형상의 직후에서의 yz 평면에서의 단면을 살펴 보면 hole gap에 따라서 유동 분포가 조금 다른 것을 확인할 수 있다. Jet의 세기가 다르게 보이는 까닭은 앞에서 설명한 바와 같이 total jet momentum을 동일하게 유지하기 위하여 jet peak velocity를 다르게 했기 때문이다. 각각의 출구 형상에 따라서 jet peak velocity가 다름에도 불구하고 jet의 vorticity는 유사한 형태를 띠고 있게 된다. 하지만, hole의 간격이 좁아질수록

서로간의 interaction이 발생한다. hole의 간격이 2L일 경우에는 hole이 끝나는 부분에서는 interaction이 일어나지 않게 된다. 앞서 원형 출구 형상의 유동구조 분석 및 유동제어 효과에서 설명한 바와 같이 원형 출구 형상의 경우 유입류 방향으로 유동이 흐를수록 jet에 의한 interaction에 의해서 유동제어 효과가 커지게 된다. 즉, 단일 원형 출구 간 interaction이 발생하지 않더라도 유입류 방향으로 유동이 흐르게 되면 interaction이 발생하는 것이다. 하지만 초기에 hole gap의 변화로 jet interaction을 높게 하여 유동의 난류도를 더 높게 한다면 유동 제어 효과를 크게 할 수 있을 것이라 예측 가능하다.

2.5.2.3 Iso-surface vorticity at blowing peak

Fig. 21은 원형 출구 형상의 hole gap 변화에 따른 blowing peak에서의 iso-surface vorticity이다. 사각형 출구 형상과 원형 출구 형상의 유동 구조를 비교해보면, 사각형 출구 형상의 경우 slot 끝부분에서 말리는 유동이 발생하기 때문에 반 시계 방향으로 유동이 말리게 된다. 반면, 원형 출구 형상(G1D1)의 경우에는 단일 원형 출구 형상의 slot 끝부분에서만 유동이 말리게 된다. Hole gap이 줄어들수록 slot 끝부분에서 말리는 유동이 크게 발생하게 되고 이는 jet 직후에서 rectangular slot과 유사한 유동 제어 효과를 가질 것으로 판단된다. G2D1의 경우 hole 간의 interaction이 작기 때문에 slot 끝부분에서 유동이 말리는 현상이 크게 나타나지 않게 된다.

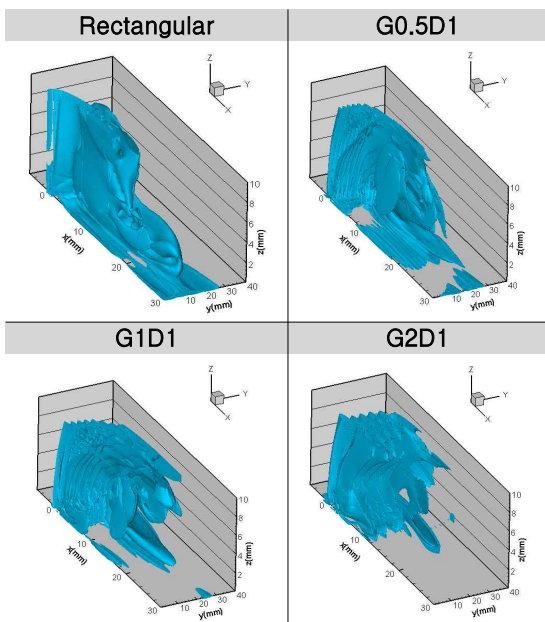


Fig. 21. Hole gap의 변화에 따른 vorticity

2.5.2.4 유동 제어 성능 파악

Fig. 22는 원형 출구 형상의 hole gap의 변화에 따른 유동 제어 성능을 파악하기 위해서 x의 위치에 따른 사각형 및 원형 출구 형상의 phase averaged wall shear stress를 정량적으로 비교한 그래프이다. 앞서서와 마찬가지로 y=0~40mm의 WSSD 값을 평균하여 비교하였다.

G2D1은 jet 사이의 간격이 크기 때문에 interaction이 일어나지 않아 jet이 분출된 직후에는 효과가 미미하다가 유입류 방향으로 진행될수록 interaction이 발생하여 200mm 지점에서는 G1D1과 거의 유사한 유동 제어 효과를 기대할 수 있게 된다. Hole gap의 크기에 따른 유동 제어 가능성을 살펴본 결과, gap는 jet 직후의 유동 제어 효과에 크게 영향을 끼치며 jet 간의 간격이 좁을수록 초기에 유동제어 효과가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이에 hole gap이 좁은 원형 출구 형상을 이용할 경우에는 near wall structure의 지속성 및 강도를 동시에 만족시켜, 초기에 유동제어 효과가 큰 사각형 출구 형상과 유입류 방향으로 진행될수록 jet 사이의 interaction으로 인해 난류도를 증가시켜 유동제어 효과를 크게 하는 원형 출구 형상의 synthetic jet의 효과를 동시에 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

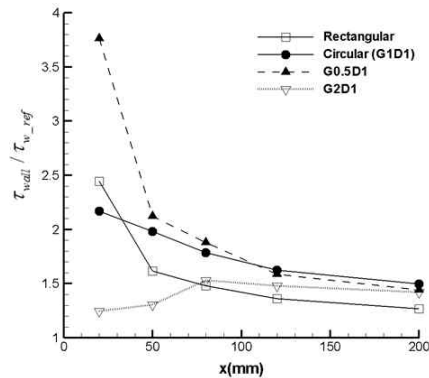


Fig. 22. Hole gap의 변화에 따른 phase averaged WSSD

2.5.3 Circular hole diameter (D)

2.5.3.1 유동 제어 성능 파악

원형 출구 형상의 경우, hole gap를 0.5L로 고정시켰을 때 hole diameter의 변화는 유동 구조에는 크게 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 phase averaged wall shear stress를 비교해 보았을 때에는 Fig. 23과 같이 차이가 있게 된다. G0.5D0.5의 경우, G0.5D1과

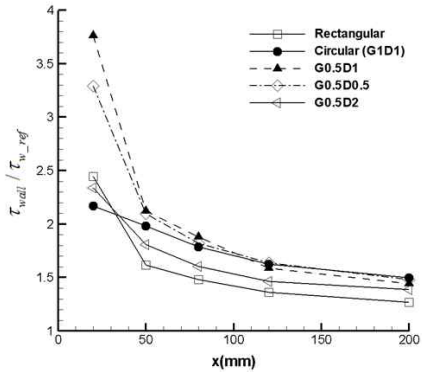


Fig. 23. Hole diameter의 변화에 따른 phase averaged WSSD

유사한 WSSD를 갖는다. 이는 hole diameter가 작아져도 전체 jet momentum을 맞추기 위하여 jet peak velocity가 커지기 때문으로 판단된다. G0.5D2의 경우, 다른 원형 출구 형상보다 사각형 출구 형상과 유사한 유동제어 효과를 갖는 것을 확인할 수 있다. Hole gap이 동일하다면 유사한 그래프의 형태를 갖지만 diameter에 절대적인 크기의 차이만 나타나게 된다. 이에 원형 출구 형상의 경우, 유동 제어 효과를 크게 하기 위해서는 Diameter/Gap이 1~2사이로 하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

III. 결 론

Synthetic jet의 출구 형상에 따른 유동 구조 분석 및 유동제어 효과를 알아보기 위하여 사각형과 원형 출구 형상에 대하여 수치적 연구를 수행하였다. 사각형 출구 형상의 경우, jet 직후에 강하게 vortex가 생성되며 이는 jet interaction에 의해 반시계 방향으로 회전하는 유동을 발생시키며 이로 인하여 jet 직후에 유동제어 효과가 클 것으로 판단된다. 하지만, jet에 의한 vortex가 크게 생성되어 주변에 공급되는 momentum이 적어지기 때문에 유입류 방향으로 갈수록 유동제어 효과가 급격하게 감소하게 된다. 원형 출구 형상의 경우, 규칙적인 vortex가 slot 중앙부터 끝까지 나타나고 jet에 의해서 공급되는 vortex의 형태가 유입류의 방향으로 발달되게 되어 jet slot에서 보다 먼 거리까지 jet에 의해 발생하는 vorticity의 영향이 미치게 된다. 유동제어 효과를 예상하기 위하여 사각형 및 원형 출구 형상의 위치별 wall shear stress을 비교하였다. 그 결과, 원형 출구 형상이 사각형 출구 형상보다 약

15~18%가 더 높게 나타났다. 따라서 reynolds수가 동일하고, jet momentum이 일정한 경우의 사각형 및 원형 출구 형상의 유동구조 분석 및 유동제어 효과를 살펴본 결과, 사각형 출구 형상보다 원형 출구 형상이 유동제어 효과가 더 클 것으로 예상된다.

또한 원형 출구 형상의 경우, hole의 gap의 크기에 따른 유동 제어 가능성을 살펴본 결과, hole gap는 jet 직후의 유동제어 효과에 크게 영향을 끼치며 jet 간의 간격이 좁을수록 초기에 유동제어 효과가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이에 hole gap이 좁은 원형 출구 형상을 이용할 경우에는 초기에 유동제어 효과가 큰 사각형 출구 형상과 유입류 방향으로 진행될수록 jet 사이의 interaction으로 인해 난류도를 증가시켜 유동제어 효과를 크게 하는 원형 출구 형상의 효과를 동시에 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 원형 출구 형상의 hole diameter는 wall shear stress distribution의 크기에 영향을 미친다. hole diameter가 작을수록 제어 효과가 커지게 된다. 이에 hole diameter와 gap을 고려하여 원형 출구 형상을 설계할 경우 유동제어 효과를 극대화할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 방위 사업청과 국방 과학 연구소의 지원(UC100031JD), 슈퍼 컴퓨팅 센터(KSC-2010-C1-0030), 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(No. 20090084669)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 1) Smith, D. R., "Interaction of a Synthetic Jet with a Crossflow Boundary Layer", AIAA Journal, Vol. 40, No. 11, 2002, pp. 2277-2288.
- 2) Zaman, K. B. M. Q., and Milanovic, I. M., "Synthetic Jets in Cross-Flow. Part I: Round Jet", AIAA pp. 2003-3714, June 2003.
- 3) W. Kim., S. Kim., K. Choi, C. Kim, "Experimental and Computational Study on Flow Characteristics by Synthetic Jets Configuration", 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, AIAA 2010-864, Orlando, Florida, 4-7 January 2010.

- 4) B.R.Ravi, R. Mittal, F.M. Najjar, "Study of Three-Dimensional Synthetic Jet Flowfields Using Direct Numerical Simulation", 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, 5-8 January 2004.
- 5) J. Cui, R. Agarwal, "3-D CFD Validation of an Axisymmetric Jet in Cross-Flow (NASA Langley Workshop Validation: Case 2)", 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, 2005.
- 6) J. Zhou, S. Zhong, "Coherent Structures Produced by the Interaction Between Synthetic Jets and a Laminar Boundary and Their Surface Shear Stress Patterns", *Computers & Fluids*, Vol. 39, Issue 8, September 2010, pp. 1296-1313.
- 7) Chorin, A. J., "A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems", *Journal of Computational Physics*, Vol. 2, Issue 1, August 1967, pp. 12-26.
- 8) Kim, C. S., Kim, C., Rho, O. H., "Parallel Computations of High-Lift Airfoil Flows Using Two-Equation Turbulence Models", *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 8, 2000, pp. 1360-1368.
- 9) Yoon, S. and Kwak, D., "Three-Dimensional Incompressible Navier-Stokes Solver Using Lower-Upper Symmetric Gauss Seidel Algorithm", *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 6, 1991, pp. 874-875.
- 10) Zheng, X., Liu, C., Liu, F., and Yang, C., "Turbulent Transition Simulation Using the $k-\omega$ Model", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 42. No. 5, 1998, pp. 907-926.
- 11) Sang Hoon Kim, Chongam Kim, "Separation Control on NACA23012 using Synthetic Jet", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 13, Issues 4-5, June-July 2009, pp. 172-182.
- 12) Kim, C. S., Kim, C., Rho, O. H., "Sensitivity Analysis for the Navier-Stokes Equations with Two-Equation Turbulence Models", *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 5, 2001, pp. 838-845.
- 13) 김민희, 김상훈, 김우례, 김종암, 김유신, "Synthetic jet을 이용한 스마트 무인기 유동제어 Part 1 : 정지 비행 모드에서 synthetic jet을 이용한 유동제어", *한국항공우주학회지*, Vol. 37, pp. 1173-1183, 2009.
- 14) 김민희, 김상훈, 김우례, 김종암, 김유신, "Synthetic jet을 이용한 스마트 무인기 유동제어 Part 2 : 천이 비행 모드에서 synthetic jet을 이용한 유동제어", *한국항공우주학회지*, Vol. 37, pp. 1184-1191, 2009.
- 15) Minhee Kim, Sanghoon Kim, Woore Kim, Chongam Kim, Yushin Kim, "Flow Control of Tiltrotor Unmanned-Aerial-Vehicle Airfoils Using Synthetic Jets", *Journal Of Aircraft*, Vol. 48, No. 3, May-June 2011.
- 16) L. D. Kral, J. F. Donovan, A. B. Cain and A. W. Cary, "Numerical Simulation of Synthetic Jet Actuators", 4th AIAA Shear Flow Control Conference, AIAA, Snowmass Village, USA, 1997.
- 17) Jue Zhou, Shan Zhong, "Numerical Simulation of the Interaction of a Circular Synthetic Jet With a Boundary Layer", *Computers & Fluids*, Vol. 38, Issue 2, February 2009, pp. 393-405.