# 배열된 원형 출구 Synthetic Jet의 박리 유동 제어 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Flow Characteristics of Synthetic Jet with Circular Exit Array in Separated Flow

**이병현*, 김민희, 이준희, 김우례, 김종암**

**서울대학교[1], 기계항공공학부[2]**

## 초 록

Piezo-electric diaphragm으로 작동되는 synthetic jet을 박리 유동 제어에 적용하기 위한 실험을 수행하여 전산 수치 해석 결과와 유동 현상을 비교 분석하였다. 외부 유동이 없는 조건에서 열선 유속계를 활용한 출구 속도 측정 실험을 통해 작동 주파수와 출구 지름이 출구 유속 변화에 중요한 역할을 하고 있음을 검증했다. 출구 단면적이 동일한 조건의 실험에서는 동일한 유량이 출구를 통해 분출되더라도 출구 둘레의 길이가 커질수록 점성의 영향이 증가하여 출구 유속이 감소함을 알 수 있었다. 외부 유입류가 있는 inclined flat plate에서 synthetic jet 작동 전/후의 압력 계수 분포를 비교하여 유동 제어 성능을 결정하는 핵심 파라미터의 역할을 검증했다. 그 결과 주어진 박리 발생 조건에서 최적의 유동 제어 성능을 발휘하는 작동 주파수, 출구 지름, 출구 간격을 발견할 수 있었다.

## ABSTRACT

The control of separated flow on an inclined flat plate using synthetic jet which actuated by piezo-electric diaphragm was investigated experimentally. Experimental results were compared with computational results in order to analyze flow physics. According to the result of jet velocity using hot wire anemometry with no cross flow, we found that actuation frequency and orifice diameter played important role in jet velocity. On the condition of same exit area, jet velocity was decreased because of exit perimeter which related with viscous effect. According to the result of measuring static pressure on the inclined flat plate with cross flow, we found that actuation frequency and orifice diameter and gap between orifices played important role in separation control performance.

Key Words : Synthetic jet(합성 제트), Flow control(유동 제어), Piezo-electric actuator(압전 구동기), Circular exit array(원형 출구 배열), Inclined flat plate (꺾인 평판)

## 1. 서 론

Synthetic jet은 밀폐된 공간으로부터 주기적으로 jet을 흡입/분출하는 원리를 이용한 능동 유동 제어 장치로서 suction, blowing 등의 고전적인 장치에 비해 소비 에너지는 작으면서도 우수한 제어 효과를 발휘하기 때문에 차세대 유동 제어 기술로 활발히 연구되고 있다.

Collins와 Zelenvitz는 주기적인 간섭으로 유동 박리를 제어할 수 있음을 발견하였고, 그 후 Seifert, Wygnanski, Glezer 등 많은 학자들이 synthetic jet의 성능을 결정하는 핵심 파라미터들을 연구하였다.(1)

Synthetic jet 연구 동향 중 출구 형태에 관한 것을 살펴보면 대부분 직사각형(rectangular slot) 출구에 관한 연구이고, 원형(circular slot)에 대한 연구도 일부 수행되고 있다. 그런데 직

사각형 출구는 가로세로비가 커지면 span 중앙 부분에서 jet 속도가 감소하는 단점이 있고,[2] 원형 출구는 동일한 출구 속도를 얻기 위한 작동 전압이 직사각형 보다 작지만 외부에 영향을 미치는 vortex의 범위가 작다는 단점이 있다.[3] 이와 같은 배경으로 인해 배열된 원형 출구 형태가 연구되었고, jet 속도를 결정하는 중요 파라미터로서 출구 지름과 간격이 발견되었다.[4]

본 논문에서는 배열된 원형 출구 synthetic jet을 박리 유동 제어에 적용하기 위하여 실험적 연구를 수행하고, 전산 수치 해석 결과와 비교하여 유동 특성을 분석했다. Piezo-electric 구동 방식의 synthetic jet을 inclined flat plate에서 발생하는 박리 유동 제어에 적용함으로써 배열된 원형 출구의 핵심 파라미터인 출구 지름과 간격이 박리 유동 제어 성능에 미치는 영향을 연구하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험 장치 및 절차

#### 2.1.1 Synthetic jet 구조 및 원리

본 연구에서 제작한 synthetic jet의 구조는 Fig. 1과 같다. Piezo-electric diaphragm이 주기적으로 진동하여 밀폐된 공간의 유체가 출구를 통해 분출과 흡입을 반복하는 원리이다. 관련 논문의 제작 방법을 참조하여 piezo-electric diaphragm의 변위가 cavity의 체적 변화를 유발하여 jet을 분출하도록 설계하였다.[5]

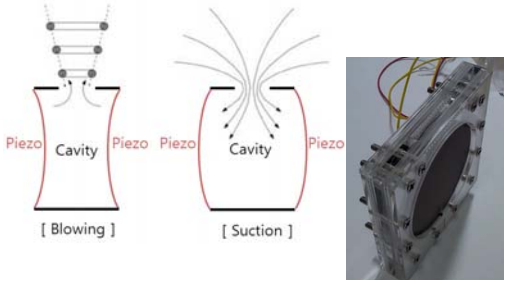



Fig. 1. Synthetic jet configuration

본 연구에서 사용한 piezo-electric diaphragm은 지름 63.5mm, 공진주파수 290Hz, 최대 변위 0.476mm의 상용 제품으로서 그 구조는 Fig. 2와 같다. Diaphragm의 최대 변위는 공진주파수 근처에서 발생하는 것으로 알려져 있으며 작동 전압은 제조사에서 제공한 data sheet와 선행 연구를 통하여 Vpp = ±180V로 설정했다.

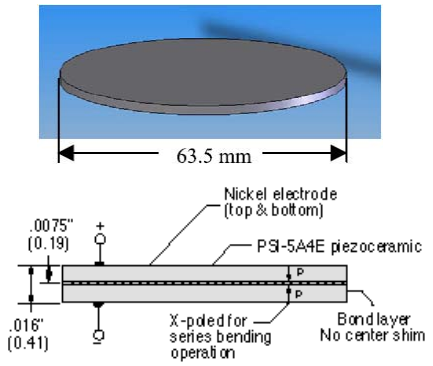



Fig. 2. Bimorph piezo-electric diaphragm

#### 2.1.2 정적 유동 특성 실험 구성

각 실험 조건에서 synthetic jet이 외부로 전달하는 momentum coefficient의 양을 판단하기 위해서 Fig. 3과 같이 외부 유동이 없는 조건의 실험을 수행했다. 입력 주파수(f)를 diaphragm의 공진 주파수 근처까지 변화시키며 열선 유속계(I-type hot wire)로 jet 속도를 측정했다. 출구 주변의 suction 효과로 인한 오차 및 열선 유속계의 손상을 방지하기 위해 측정 지점의 최소 높이는 출구 중앙 지점에서 z축 방향 3mm로 설정했다. 열선 유속계에서는 blowing 속도만 감지되며 입력 신호에 대한 측정 속도 파형은 Fig. 4와 같다.

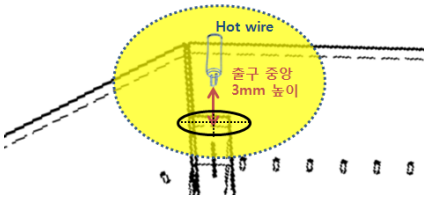



Fig. 3. Jet velocity measurement

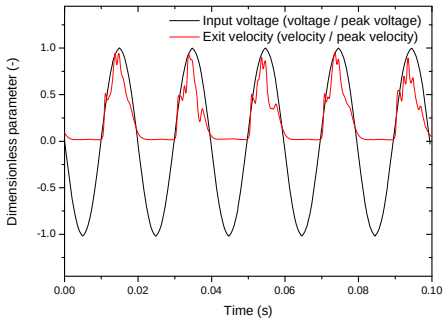



Fig. 4. Input voltage and exit velocity (f=50Hz)

### 2.1.3 박리 유동 제어 실험 구성

Fig. 5와 같이 인위적인 박리 발생 조건에서 유동 제어 성능을 확인하기 위한 실험 장치를 제작했다. 전산 수치 해석 결과를 토대로 유입류 조건($U_\infty = 10m/s$)과 inclined flat plate의 각도($\beta = 20^\circ$)를 설정했다. Plate 표면의 정압을 측정하기 위해 synthetic jet 출구 후방 13mm 지점부터 15mm 간격으로 압력탭을 제작했다. Pressure systems사의 net scanner를 이용하여 1초당 100개의 샘플을 취득해서 20,000개 샘플의 평균값을 구했다.

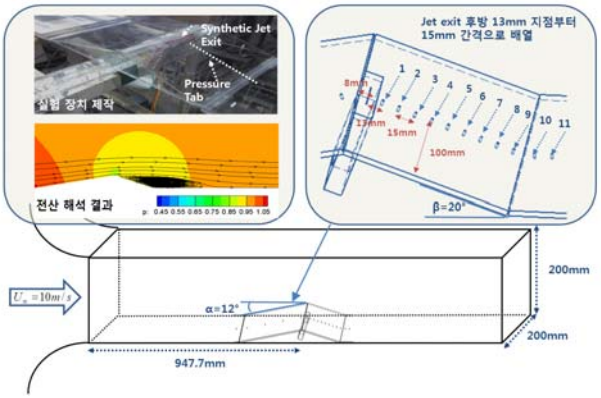



Fig. 5. Wind tunnel experiment set

### 2.1.4 실험 절차

Synthetic jet 출구 형상의 핵심 파라미터인 출구 지름(D) 및 간격(G) 변화에 따른 유동 제어 특성을 관찰을 바탕으로 최적 출구 형상을 찾기 위해 Fig. 6과 같이 실험 절차를 구성했다. 각 실험 결과를 토대로 Fig. 7의 기준 좌표에 따라 유동 특성을 분석했다.

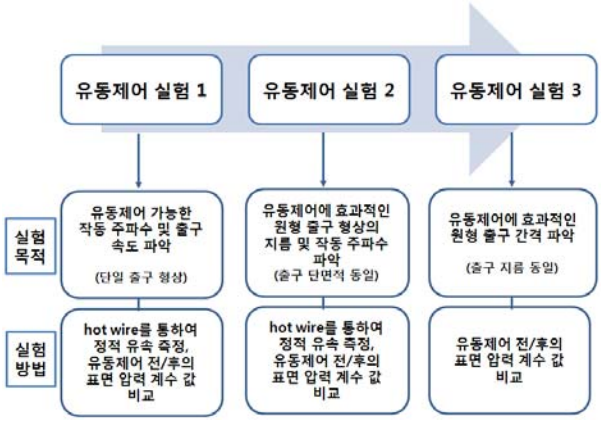



Fig. 6. Experimental procedure

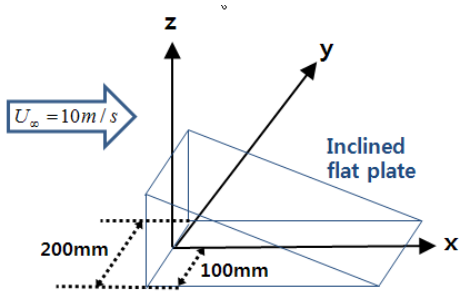



Fig. 7. Coordinate system

## 2.2 실험 결과

### 2.2.1 유동 제어 실험 1

배열된 원형 출구 synthetic jet의 작동 가능한 주파수와 이에 따른 유동 제어 성능을 관찰하기 위한 실험을 수행했다. Table 1과 같은 단일 출구 형상을 제작하였고, 2.1절에 언급된 조건으로 실험을 수행했다. Piezo-electric diaphragm의 고유 성능을 확인하기 위해 single diaphragm을 작동시켰다.

Table 1. Synthetic jet exit configuration

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 출구 규격 | 지름 (D) | 간격 (G) | Hole 개수 | 단면적 | 둘레 길이 |
| | $1mm$ | $1mm$ | 15개 | $11.78mm^2$ | $47.12mm$ |
| 출구 형상 | | | | | |
| 작동 조건 | Vpp = ±180V, f = 50~350Hz, sine wave | | | | |

Fig. 8은 유입류가 없는 조건에서 출구 속도를 측정한 그래프이다. 입력 주파수가 증가함에 따라 diaphragm의 변위가 커지게 되고, 더 많은 유량이 짧은 시간 동안 출구를 통해 분출되므로 연속 방정식에 의해 peak 속도가 증가한다. 이와 같은 경향은 공진주파수 근처까지 계속되었고, 그 이상의 주파수에서는 piezo의 허용 범위를 초과하는 변형이 발생하여 diaphragm 표면의 균열이 발생했다. 한편 입력 주파수 증가에 따라 peak 속도는 증가했지만 f = 200Hz 이후에서는 RMS(root mean square) 속도 증가율이 둔화되었다. 이와 같은 현상은 주파수가 커질수록 blowing cycle이 지속되는 시간이 짧아져 peak 속도의 지속 시간이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

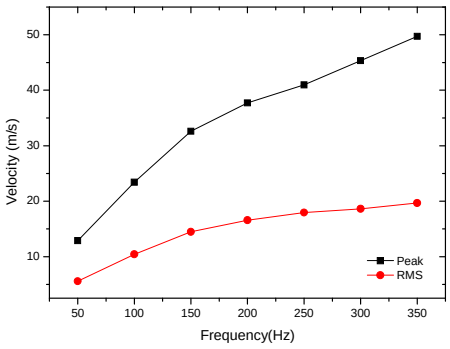



Fig. 8. Actuation frequency and exit velocity

Fig. 9는 박리 유동 제어 실험 사진이고, Fig. 10은 synthetic jet 작동 전/후의 압력 계수(Cp) 분포를 나타내고 있다. 공기역학적 이론에 따르면 평판 위에서 박리가 발생하면 x축 방향으로 흐르지 못하는 dead air region이 형성되고,[6] 이 영역에서는 Fig. 10의 jet off 곡선과 같은 형태를 보인다. 박리 발생 상태에서 synthetic jet을 작동시키면 출구 뒤쪽부터 압력 계수가 낮아지고 x축 방향으로 흐를수록 압력을 회복하였다.

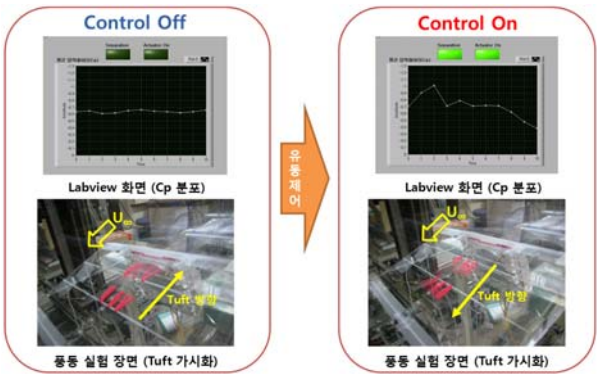



Fig. 9. Wind tunnel experiment (f=150Hz)

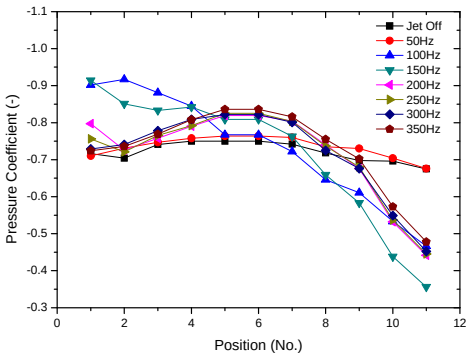



Fig. 10. Cp distribution on the inclined flat plate

본 실험 조건에서는 f = 100~150 Hz 범위에서 유동 제어 성능이 가장 우수했는데 그 원인을 관련 논문을 참조하여 분석했다. 유동 제어 성능을 결정하는 주요 계수는 momentum coefficient ($C_\mu$)와 reduced frequency(F+)이며 다음과 같이 정의된다.[7]

$$C_\mu = \left(\frac{2h}{c}\right)\left(\frac{U_{jet}(\mathrm{RMS})}{U_\infty}\right)^2, \quad F+ = \frac{f \times x}{U_\infty}$$

여기서 h는 출구의 높이(출구의 지름), c는 chord 길이(평판의 길이), $x$는 synthetic jet 출구로부터 평판 끝까지의 길이를 의미한다. 또한 2차원 모델의 박리 유동 제어를 위한 무차원 계수의 대략적인 범위는 $1 \le F+ \le 2$, $0.01\% \le C_\mu \le 3\%$ 이고, 적정 수준 이상의 momentum은 박리 제어에 작은 영향을 미치는 것으로 알려져 있지만,[1] 박리 발생 조건에 따라 무차원 계수 값의 지배적인 영향이 달라질 수 있다. Fig. 10을 살펴보면 f = 100 Hz, f = 150 Hz 조건에서 유동 제어 성능이 우수하고, f = 200 Hz 이상에서는 유동 제어 효과가 정체되고 있다. 유동 제어 성능이 우수할수록 출구 뒤편의 압력 계수값이 작고, x축 방향으로 압력 계수 기울기가 크다.

Table 2. Dimensionless coefficient

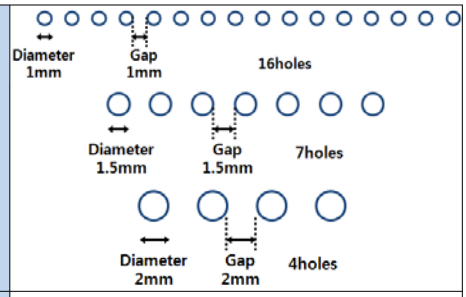
| Frequency (Hz) | RMS Velocity (m/s) | F+ (-) | $C_\mu$ (%) |
|---|---|---|---|
| 50 | 5.56 | 0.75 | 0.412 |
| 100 | 10.42 | 1.5 | 1.447 |
| 150 | 14.48 | 2.25 | 2.795 |
| 200 | 16.57 | 3 | 3.662 |
| 250 | 17.95 | 3.75 | 4.294 |
| 300 | 18.64 | 4.5 | 4.633 |
| 350 | 19.67 | 5.25 | 5.160 |

Table 2는 각각의 작동 주파수별 무차원 계수를 나타낸 것이다. 이를 Fig. 10의 결과와 비교하면 f = 50 Hz에서는 낮은 $C_\mu$ 값으로 인해 제어 성능이 저조했고, f = 200 Hz 이상의 범위에서는 적절한 reduced frequency(F+) 범위를 벗어난 것으로 판단된다. 이와 같은 실험 결과를 바탕으로 유동 제어 성능을 향상시키기 위해서 낮은 주파수 범위에서도 출구 속도를 증가시킬 필요가 있다고 판단하였고, 실험 2에서부터는 dual diaphragm 작동 방식을 선택하여 실험을 수행했다.

### 2.2.2 유동 제어 실험 2

Synthetic jet 외부로 공급되는 유량이 동일한 조건에서 출구 지름 변화에 따른 유동 제어 성능을 관찰하기 위한 실험을 수행했다. Table 3과 같이 출구 단면적이 동일하고, 출구 지름이 상이한 3종류의 출구 형태를 제작하였다. Fig. 11은 외부 유동이 없는 조건에서 입력 주파수 변화에 따른 RMS 속도를 나타낸 그래프이다. 입력 주파수 증가에 따른 속도 변화 경향은 각각의 출구가 유사했으나, D = 2mm 인 경우 속도가 가장 높았다.

Table 3. Exit configuration and operating condition

| | |
|---|---|
| 출구 형상 |  |
| 작동 조건 | Vpp = ±180V, f = 50~200Hz, sine wave, 출구 단면적 12.57$mm^2$ |

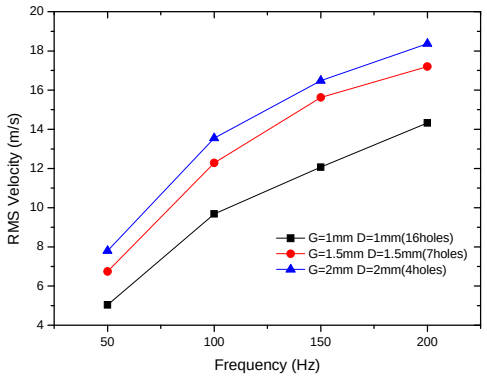



Fig. 11. Input frequency and RMS velocity

그 원인은 Table 4에서 볼 수 있듯이 각 출구의 둘레 길이가 차이가 있기 때문으로 판단된다. 원형 출구에서는 Fig. 12와 같이 vortex ring이 형성되는데, 이 때 orifice의 두께(2mm)로 인한 점성의 영향을 받는다. 이 면적은 둘레의 길이가 작을수록 감소하게 되므로 둘레의 길이가 가장 작은 D = 2mm 형태가 가장 높은 속도를 나타내고 있다.

Table 4. Dimensions of each exit configuration

| 지름 ($mm$) | 간격 ($mm$) | Hole 개수 (개) | 둘레 길이 ($mm$) |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 16 | 50.27 |
| 1.5 | 1.5 | 7 | 32.99 |
| 2 | 2 | 4 | 25.13 |

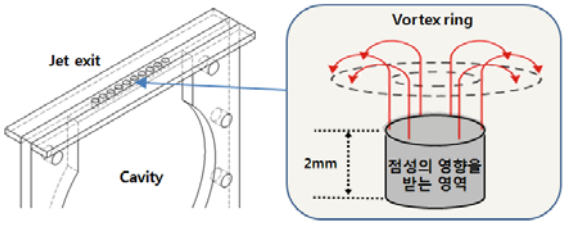



Fig. 12. Vortex ring configuration

각 출구 형태의 유동 제어 성능을 비교하기 위해 관련 논문[8]을 참고하여 1~9번 압력탭 지점에서 synthetic jet 작동 전/후의 차이 값을 합산했다. 합계가 클수록 제어 성능이 우수함을 나타낸다. Fig. 13을 살펴보면 Fig. 11에서 출구 속도가 가장 높은 D = 2mm 인 경우가 제어 성능이 가장 우수하지는 않다. D = 2mm 인 경우 정적 출구 속도는 가장 높지만 둘레 길이가 가장 작기 때문에 출구에서 발생된 vortex ring이 영향을 미치는 범위가 작기 때문이다. D = 1.5mm 인 출구 형태가 f = 50Hz와 f = 100Hz에서 가장 우수한 제어 성능을 나타냈다.

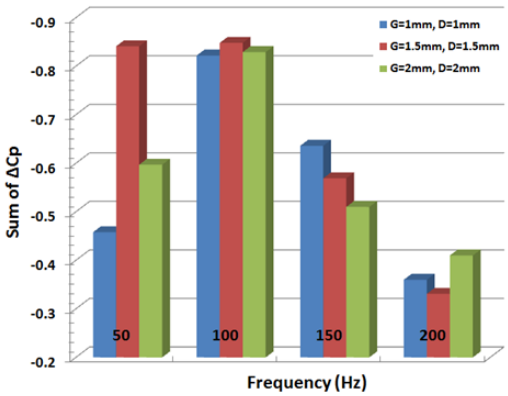



Fig. 13. Summation of Cp on the plate

출구 속도는 외부 유동으로 공급되는 momentum flux를 결정하고, 둘레 길이는 vortex ring이 영향을 미치는 범위를 결정한다. 이와 같은 결과를 토대로 볼 때 외부 유동에 공급되는 유량이 정해

져 있는 조건에서는 적절한 출구 속도와 출구의 둘레 길이가 조합되어야 유동 제어 성능이 향상됨을 알 수 있다.

### 2.2.3 유동 제어 실험 3

출구 지름이 동일한 조건에서 출구 간격 변화에 따른 유동 제어 성능을 실험 했다. Table 5와 같은 실험 조건에서 synthetic jet 작동 전/후의 압력 계수 변화를 관찰했다.

Table 5. Exit configuration and operating condition

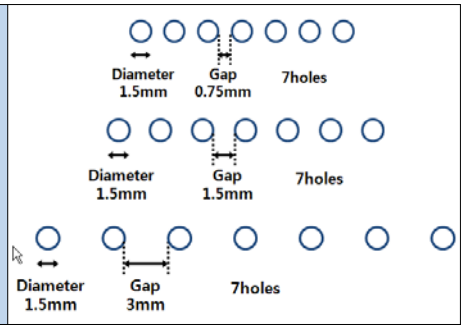
| | |
|---|---|
| 출구 형상 |  |
| 작동 조건 | Vpp = ±180 V, f = 50~100 Hz, sine wave, 출구 단면적 $12.57mm^2$ |

Fig. 14~15는 plate 표면의 압력 계수 분포를 나타낸 그래프이다. f = 50Hz와 f = 100Hz 조건에서 G = 1.5mm 인 형상이 가장 우수한 유동 제어 성능을 보였다.

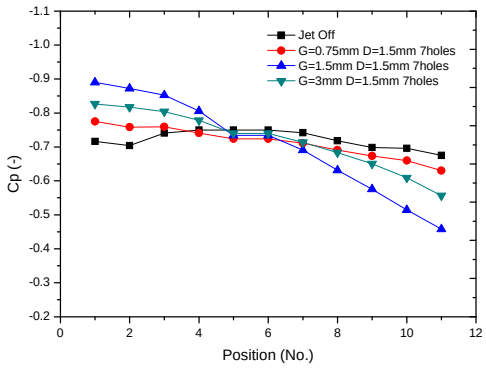



Fig. 14. Cp distribution (f = 50Hz)

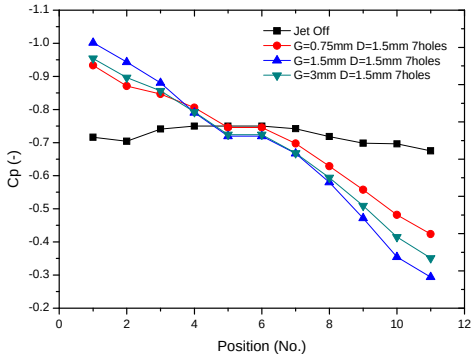
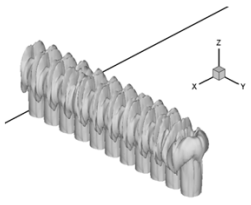
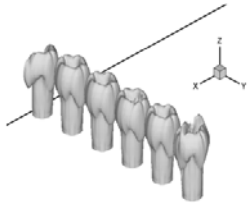
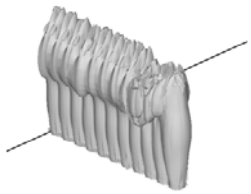
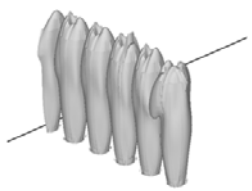



Fig. 15. Cp distribution (f = 100Hz)

출구 간격 변화에 따라 유동 제어 성능 차이가 발생한 원인을 분석하기 위해 관련 논문[9]을 참고했다. Table 6은 D = 1.5mm를 reference length 1로 정하여 전산 수치 해석을 수행한 결과이다. Synthetic jet의 blowing phase (0~180°) 중 60°와 90° phase의 iso-surface vorticity contour를 나타내고 있다.

Table 6. Iso-surface vorticity contour ($U_\infty = 0m/s$)[9]

| G/D = 0.5 | G/D = 2 |
|---|---|
| Phase 60 ° | |
|  |  |
| Phase 90 ° | |
|  |  |

해석 결과에 따르면 출구 간격이 좁은 경우에는 출구 사이에서 interaction이 발생하여 vortex 형태가 납작하게 변함을 알 수 있다. 또한 원형 출구에서는 Fig. 16과 같은 형태로 vortex가 발생하게 되는데[10] 출구 간격이 좁아지면 출구 사이에서 서로 반대 방향 성분이 충돌하여 회전 방향의 vortex 성분이 감소한다. 이로

인해 x축 방향으로 전달되는 vorticity가 감소하여 유동 제어 효과가 감소한 것으로 판단된다. 반면 출구 간격이 넓은 경우에는 각 출구에서 발생한 vortex가 서로 영향을 주지 않는다. 하지만 출구 간격이 좁은 경우 보다 출구 사이에서 상대적으로 약한 vorticity가 작용하기 때문에 출구 근처의 외부 유입류에 대한 유동 제어 성능이 감소하는 것으로 판단된다.

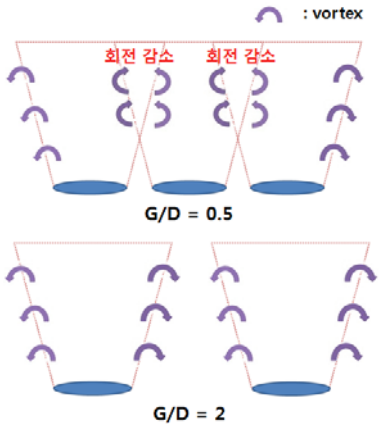



Fig. 16. Vortex formation

Fig. 17은 참고 논문[9]과 동일한 해석 조건으로 inclined flat plate 형상에 대해 전산 수치 해석을 수행한 결과이다.

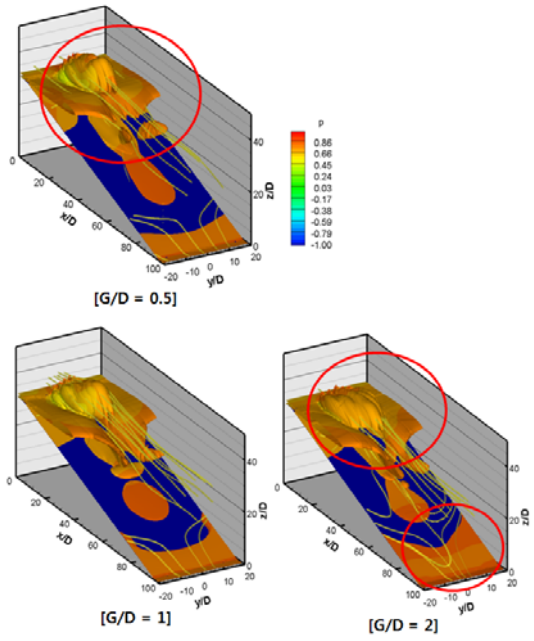



Fig. 17. Iso-surface vorticity contour (phase 135°, $U_\infty = 10m/s$)

G/D = 1 인 경우 출구 근처에서 jet vortex가 균일하게 발생하여 x축 방향으로 연속적으로 생성되어 있다. G/D = 2 인 경우 각 출구 사이의 jet interaction이 없어 출구 근처에서 약한 jet vortex가 발생하였고, 후류의 박리 유동 영역이 넓게 형성되어 있다. G/D = 0.5 인 경우 각각의 출구 사이 jet interaction으로 인해 출구 근처에서는 강한 jet vortex가 형성되었으나 x축 방향으로 진행될수록 불연속적으로 jet vortex가 유지되고 있다.

## 2.3 토의 및 고찰

### 2.3.1 정적 성능

Piezo-electric diaphragm의 입력 주파수가 증가함에 따라 diaphragm 변위가 증가하여 출구 속도도 증가했다. 하지만 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 f = 200Hz 이상에서는 peak 속도의 지속 시간 감소에 따라 RMS 속도의 증가율이 둔화된다. 그런데 외부 유동에 공급되는 momentum flux는 RMS 속도에 의해 결정된다. 따라서 본 실험 조건의 유동 제어에 적합한 momentum flux의 크기와 Piezo-electric diaphragm의 구조적 안정성을 고려한 가용 주파수는 f = 50~200Hz 정도로 판단된다.

### 2.3.2 박리 유동 제어 성능

Fig. 12~15에서 볼 수 있듯이 외부 유입류 속도에 의한 박리 발생 조건에 synthetic jet 작동 조건이 부합되어야 유동 제어 성능을 발휘했다. 본 실험 조건에서는 f = 50~100Hz에서 우수한 유동 제어 성능이 발휘되었다. 하지만 유입류 속도가 변하게 되면 적절한 reduced frequency(F+)와 momentum coefficient($C_\mu$)의 범위를 만족시키는 주파수도 달라지기 때문에 synthetic jet의 가용 주파수 범위 내에서 적절하게 작동시켜야 한다. 출구 지름에 관해서는 D = 1.5mm 인 경우에 출구 유속과 출구 둘레 길이가 적절하게 조합되어 우수한 제어 성능을 나타났다. 출구 간격에 관해서는 G = 1.5mm 인 경우에 각 출구의 vortex interaction이 적절하게 발생하여 우수한 유동 제어 성능을 발휘했다. 출구 형상에 의한 유동 특성은 유입류의 속도와 관계없이 적용될 수 있다. 따라서 synthetic jet을 이

용한 유동 제어 연구의 최근 동향[11]을 고려하면 본 연구에서 설계한 actuator를 다른 박리 유동 제어 조건에 적용할 경우에도 D = 1.5mm G = 1.5mm 인 원형 출구 배열을 사용하여 우수한 박리 유동 제어 성능을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 3. 결 론

Piezo-electric diaphragm으로 작동되는 synthetic jet을 박리 유동 제어에 적용하기 위한 실험을 수행하여 전산 수치 해석 결과와 유동 현상을 비교 분석하였다. 먼저 외부 유동이 없는 조건에서 열선 유속계를 활용한 출구 속도를 측정하는 실험을 통해 작동 주파수가 증가할수록 diaphragm의 변위가 커지고, 이에 따라 peak 속도가 증가하지만 특정 주파수 이후에는 RMS 속도가 정체된다는 사실을 확인했다. 또한 출구 단면적이 동일한 조건의 실험에서는 동일한 단면적의 출구를 통해 유량이 분출되더라도 출구 둘레의 길이가 커질수록 점성의 영향이 증가하여 출구 유속이 감소함을 알 수 있었다. 외부 유입류가 있는 inclined flat plate에서 synthetic jet 작동 전/후의 압력 계수 분포를 비교하여 핵심 파라미터 변화에 따른 유동 제어 성능 변화를 관찰했다. 그 결과 주어진 박리 발생 조건에서 최적의 유동 제어 성능을 발휘하는 작동 주파수, 출구 지름, 출구 간격을 발견할 수 있었다. 본 연구를 통해 배열된 원형 출구를 piezo-electric diaphragm actuator에 적용하기 위한 핵심 파라미터들의 역할을 검증하였고, 이를 통해 synthetic jet을 활용한 박리 유동 제어 성능을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 향후에는 실제 비행체에 적용할 수 있는 synthetic jet 유동 제어 기법에 좀 더 가까워지기 위해 2차원 에어포일의 다양한 유속 조건에서 발생하는 박리 제어 특성을 연구할 계획이다.

### 후 기

본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소 (UC100031JD), 슈퍼컴퓨팅센터(KSC-2010-C1-0030), 항공 우주 신기술 연구소, BK 21의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

(1) Greenblatt, D. and I.J. Wygnanski, The control of flow separation by periodic excitation. Progress in Aerospace Sciences, 2000. 36(7): pp. 487-545.
(2) Abdou, S. and S. Ziada, Spanwise Characteristics of High-Aspect-Ratio Synthetic jets. AIAA JOURNAL, 2006. 44(7).
(3) Kim, W., et al., Experimental and Computational Study on Flow Characteristics by Synthetic jets configuration, in 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2010, AIAA: Orlando, Florida.
(4) 이병현, 김우례, 김종암, 원형 출구 Synthetic Jet의 유동 특성 연구, 추계항공우주학회, 2010. pp 1-4.
(5) Yang, A., et al., Investigation of piezoelectrically generated synthetic jet flow. Journal of Visualization, 2009. 12(1): pp. 9-16.
(6) Torenbeek and Wittenberg, 2009 E. Torenbeek and H. Wittenberg, Flight Physics: Essentials of Aeronautical Disciplines and Technology, with Historical Notes, Springer, New York (2009) p. 110
(7) McVeigh, M.A., et al., Full-Scale Flight Tests of Active Flow Control to Reduce Tiltrotor Aircraft Download. Journal of aircraft, 2011. 48(3): pp. 786-796.
(8) Smith, D.R., et al., Modification of Lifting body aerodynamics using synthetic jet actuators. AIAA JOURNAL, 1998. 98-0209.
(9) 김민희, 김우례, 김종암, 정경진, 사각형 및 원형 출구 Synthetic Jet의 유동 특성에 대한 수치적 연구, 한국항공우주학회지, Vol. 39, p 592, 2011.
(10) Zhou, J., et al., Vortex Roll-Up Criterion for Synthetic Jets. AIAA JOURNAL, 2009. 47(5): pp. 1252-1262.
(11) Kim, M., et al., Flow Control of Tiltrotor Unmanned-Aerial-Vehicle Airfoils Using Synthetic Jets, Journal of Aircraft, AIAA, Vol. 48 No. 3, pp. 1045-1057, May-June 2011.