

PIV를 이용한 DBD 플라즈마 유도 유동장 운동량의 예측

손준하* · 김남훈* · 김경연* · Michiko Ahn Furudate[†]

Momentum Measurement of Induced Flow by DBD Plasma Using PIV

Jun Ha Sohn*, Namhoon Kim*, Kyungyeon Kim* and Michiko Ahn Furudate[†]

Abstract Particle image velocimetry is performed in order to analyze flowfield induced by a dielectric barrier discharge plasma actuator. The velocity vector fields are obtained for the two different input voltage conditions; the voltage 3 and 5 kV at the frequency 10 kHz. The obtained flowfields show that the air is accelerated and its speed increase almost linearly over the covered electrode. The amount of momentum induced by the DBD plasma actuator is estimated from the obtained velocity fields, and the estimated values reasonably agree with the previous experiment.

Key Words : Particle Image Velocimetry (PIV) (입자영상유속계), Dielectric Barrier Discharge (DBD) (유전체장벽방전), Plasma Actuator(플라즈마 액츄에이터)

1. 서론

무인 비행기 등 소형 수송체의 발달함에 따라, 소형 흐름 제어 시스템에 대한 요구가 최근 들어 커지고 있다. 물체 표면에 부착한 전극에 전압을 부하하여 유동을 제어하는 유전체장벽방전(Dielectric barrier discharge, DBD) 플라즈마 액츄에이터는 기계적인 가동 부분이나 모터 등을 가지지 않아, 경량 및 소형인 유동 제어 시스템으로 응용 가능한 기술로 기대가 된다.

플라즈마 액츄에이터는 Fig. 1에 나타내는 바와 같이, 시트 모양의 두개의 전극을 일정 간격을 두어 평행하게 설치한 구조를 가지며, 한쪽의 전극은

유전체로 덮여 있으며 (이하 절연전극) 반대쪽의 전극은 대기에 노출되어 있다 (이하 노출전극). 이 전극 간에 고전압을 인가하면 절연과파괴가 일어나 방전된다. 이 때 공기 중에 방출된 전자는 전기장으로 인해 가속되며, 공기 중의 분자들과 충돌하여 분자를 이온화시켜 플라즈마 상태가 된다. 이 플라즈마의 하전입자들도 역시 전기장으로 인해 가속되며 중성입자들과 충돌한다. 그 결과 중성입자들

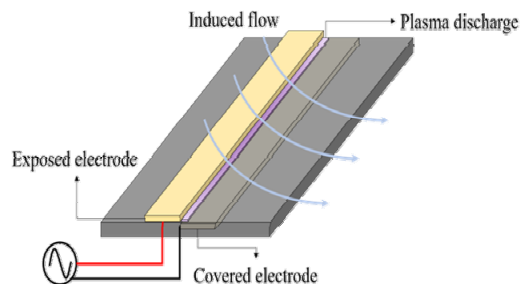


Fig. 1. Schematic of plasma actuator

[†] Dept. of Mechatronics Engineering,
Chungnam National University
E-mail: furu@cnu.ac.kr

* Dept. of Mechatronics Engineering,
Chungnam National University

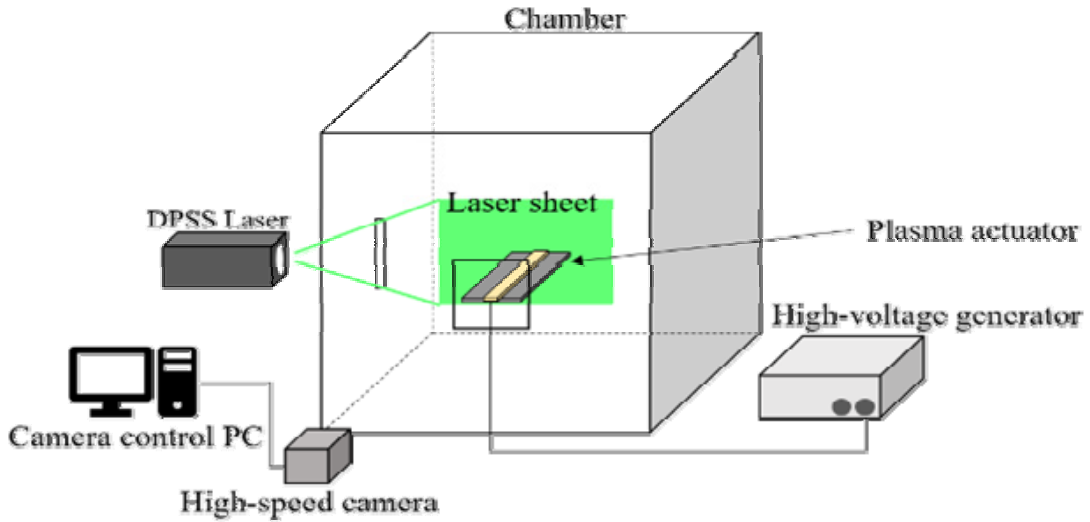


Fig. 2. Schematic of experimental set-up for PIV for flow by plasma actuator

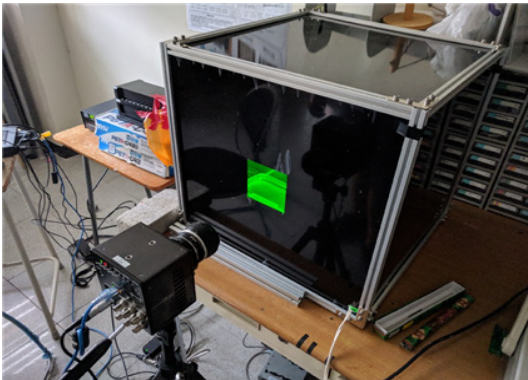


Fig. 3. Experimental set-up

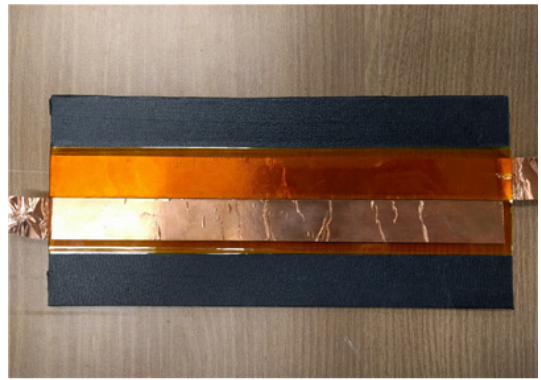


Fig. 4. Plasma actuator

도 운동량을 얻게 되어 움직이는데, 이것이 바로 절연전극으로 흐르는 공기의 유동으로 관찰이 된다. 이러한 성질을 이용하여 날개 표면에 DBD 플라즈마 발생기를 설치하여 경계층 박리를 억제하는 등 유동 제어의 액츄에이터 역할을 할 수 있다.⁽¹⁾

이 DBD 플라즈마 액츄에이터를 이용한 실용적인 유동 제어를 위해서는, DBD로 인해 유도된 유동장을 면밀히 분석할 필요가 있다. 특히, DBD 플라즈마가 유도하는 운동량은 전극 간에 인가하는 교류 신호의 전압과 주파수에 의존하는 것으로 알려져 있으며, 여러 연구 그룹에서 이에 대한 연구가 진행되어 왔다.⁽²⁻³⁾

입자영상유속계 (Particle Image Velocimetry, PIV)는 유동장의 흐름을 가시화된 데이터로 보여주는 기법이다.⁽⁴⁾ PIV는 유동 내의 추적 입자를 레이저 광면으로 비추고, 고속 카메라로 촬영함으로써 이루어진다. 여기서 얻은 데이터는 추적 입자의 시간별 움직임을 분석하는데 쓰이며, 이는 곧 유동장의 속도 벡터로 나타나게 된다. 유동의 속도를 측정하기 위해 유동 내에 직접 장비를 설치하는 다른 방법들과는 달리, PIV는 관측 프로세스에 장비가 유동에 영향을 주지 않는다. 즉, PIV는 액츄에이터로 유도된 전극 근처에 국한된 작은 영역의 유동장을 계측하기에 적합하다.

이 연구에서는 정지된 대기 중에서 DBD 액츄에이터가 유도한 유동을 PIV 기법으로 속도 벡터장으로 표시하고, DBD가 유도한 운동량을 도출하는 것을 목표로 한다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용되는 실험 시스템의 개념도와 사진을 각각 Fig. 2와 3에 제시한다. 실험 장치는 플라즈마 액츄에이터가 설치되는 실험용 챔버와 광원인 DPSS CW (Diode Pumped Solid State Continuous Wave) 레이저 (LVI, LVI-532-5VD-IA), 플라즈마 액츄에이터의 전극과 전선으로 연결된 고전압 발생기 (KITECH, PSI-PG1040F), 고속카메라 (Photron, FASTCAM Mini UX 50), 카메라 제어용 컴퓨터로 구성된다. Fig. 4은 본 실험에 사용한 플라즈마 액츄에이터를 나타낸다. 이 플라즈마 액츄에이터는 $100 \times 210 \text{ mm}^2$ 크기의 아크릴 평판으로 제작되었다. 전극은 20 mm 폭의 구리테이프를 사용하여 1 mm 간격으로 평행하게 위치하였다. 이 두개의 전극은 유전체인 폴리이미드 테이프로 절연되어 있다. 유동을 관찰하기 위한 추적 입자로 향 연기를 사용하였다.

2.2 유동장의 PIV계측

실험용 챔버 내부에 추적 입자를 주입한 후 평면 레이저 광원으로 이를 가시화한다. 플라즈마 액츄에이터 전극에 고전압을 인가하여 DBD 현상을 발생시키고 유동이 발생하는 플라즈마 액츄에이터 전극 위로 고속카메라의 초점을 맞춰 추적 입자의 움직임을 촬영한다. 이 때, 이미지의 해상도는 $1280 \times 1024 \text{ dpi}$ 가 되며, 물리적으로 $0.1 \times 0.08 \text{ m}^2$ 의 영역을 가진다. 동영상 촬영 속도는 2000 fps로 설정하였으며, Photron사의 소프트웨어인 FASTCAM View를 통해 촬영된 이미지를 모니터링 및 저장한다.

촬영된 이미지들은 2.4절에서 설명할 후처리 프로그램으로 분석된다. 촬영된 동영상 이미지 중 연속된 두개의 프레임—선별하여 이 이미지 쌍에

촬영된 입자의 위치를 비교하여 입자들의 움직임을 분석한다. 각 입자의 이동 방향과 이동 거리에서 그 위치의 극소 유동속도벡터를 결정한다.

2.3 플라즈마 액츄에이터 유도 운동량 계산

속도벡터장에서 플라즈마 발생에 의한 기체의 운동량 증가를 플라즈마 액츄에이터에 밀착하여 설정된 검사체적(Control Volume, CV)에 대한 운동량방정식

$$\frac{d(mv)_{CV}}{dt} = \int_{CS} \rho v(v \cdot n) dA \quad (1)$$

으로 계산한다. 여기서 ρ 는 대기의 밀도, v 는 속도, n 는 검사체적 표면(Control surface, CS)의 단위 법선벡터이다.

2.4 후처리 프로그램

고속 카메라로 촬영된 유동의 이미지에서 속도벡터장을 도출하고 운동량 증가를 계산할 후처리 프로그램은 Python 3.6으로 코딩하였다. 이때, 일반적인 영상처리에는 OpenCV, 이미지 상에서 입자들의 위치 특정 및 각 입자들의 이동 속도 결정에는 OpenPIV 라이브러리를 사용 하였다.

2.5 실험 조건

본 연구에서 DBD액츄에이터에 인가되는 전압의 파형은 의사 사인파이며, 주파수 10 kHz에서 3 kV 및 5 kV의 두개의 조건에 대한 유동장에 대하여 PIV 실험을 진행하였다. 속도벡터장 및 유도 운동량은 DBD액츄에이터를 작동시킨 후 유동장이 정상상태가 된 후의 동영상에서 도출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 플라즈마 액츄에이터 유도 유동장의 PIV

실험에서 촬영된 플라즈마 액츄에이터 유도 유동장의 전형적인 이미지를 Fig. 5에 나타낸다. Fig.

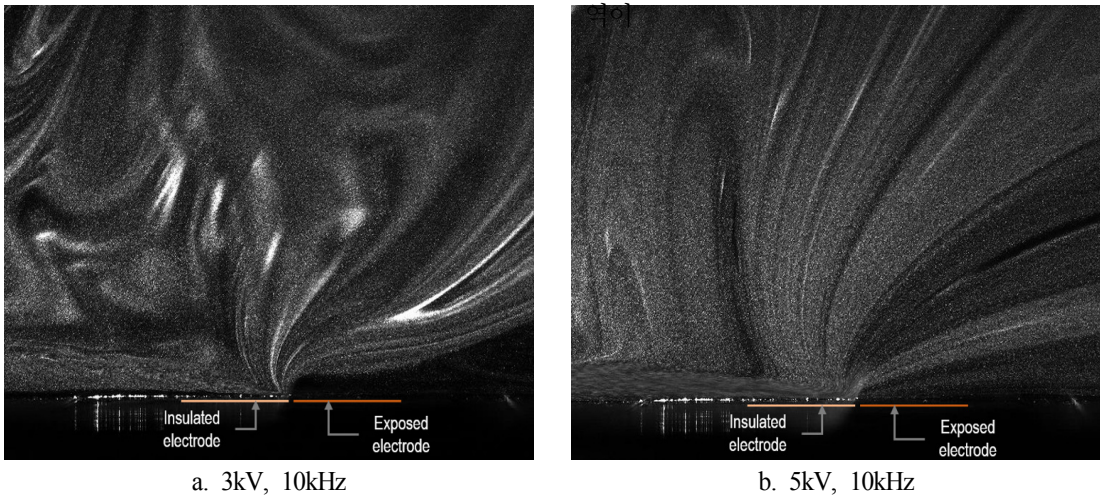


Fig. 5. Typical images of flowfield obtained in the experiment

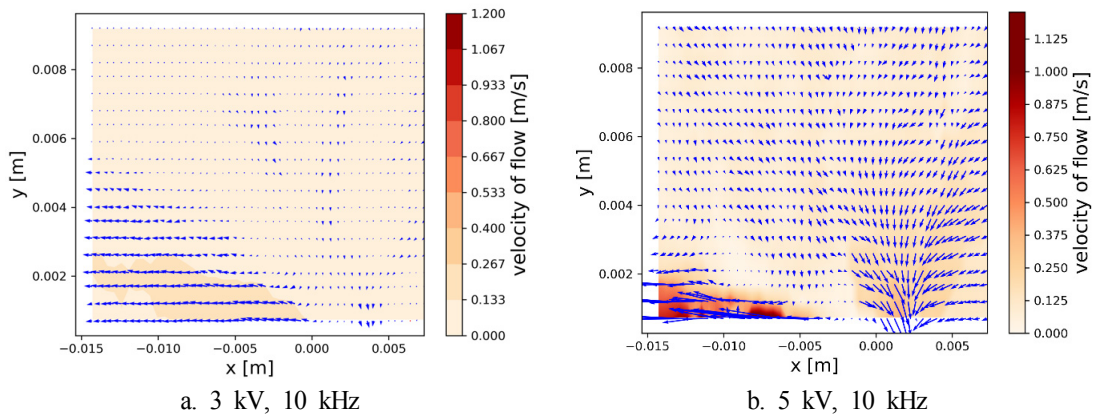


Fig. 6. Velocity vector fields obtained in the present study

5a 및 5b는 동일한 주파수 10 kHz에서 각각 전압 3 kV 및 5 kV를 인가했을 때 촬영된 유동장이다. 이 그림들에서 아래 변이 플라즈마 액츄에이터 표면과 일치하며, 추적 입자의 유맥선(streakline)을 흰색의 줄무늬로써 볼 수 있다. 양 조건에서 그림 왼쪽 하부의 표면에 병행한 유맥선을 확인 할 수 있다. 이 영역이 플라즈마 액츄에이터 절연전극 위를 흐르는 공기의 유동이다. 또, 여러 방향으로부터 액츄에이터 전극의 틈 근처를 향해 흐르는 유동도 확인 할 수 있다. 인가 전압이 낮은 Fig. 5a에서는 이 전극의 틈을 향한 유동이 있는 영역이 Fig. 5b 보다 한정적이다. 따라서, 인가 전압이 높아지면 플라즈마 액츄에이터가 영향을 주는 주위의 영

보다 넓어지는 것이 확인된다.

이러한 이미지들에서 후처리 프로그램을 통해 얻어진 속도벡터장과 등속도 선도를 두개의조건에 대해 Fig. 6에 제시한다. 이 그림들에서 x - y 좌표의 원점이 플라즈마 액츄에이터의 전극 틈에 위치하며, 노출전극은 $x > 0$, 절연전극은 $x < 0$ 영역에 배치되어 있다. Fig. 6의 모든 그림에서 전극 틈을 향해 수직적으로 흐르는 유동과, 전극의 틈에서 절연전극 표면을 흐르는 유동이 확인된다. 최대 유속은 절연전극 근처의 영역에서 관측되며, 인가 전압이 5 kV, 주파수 10 kHz의 조건에서의 최대 유속은 1.2187 m/s이었다.

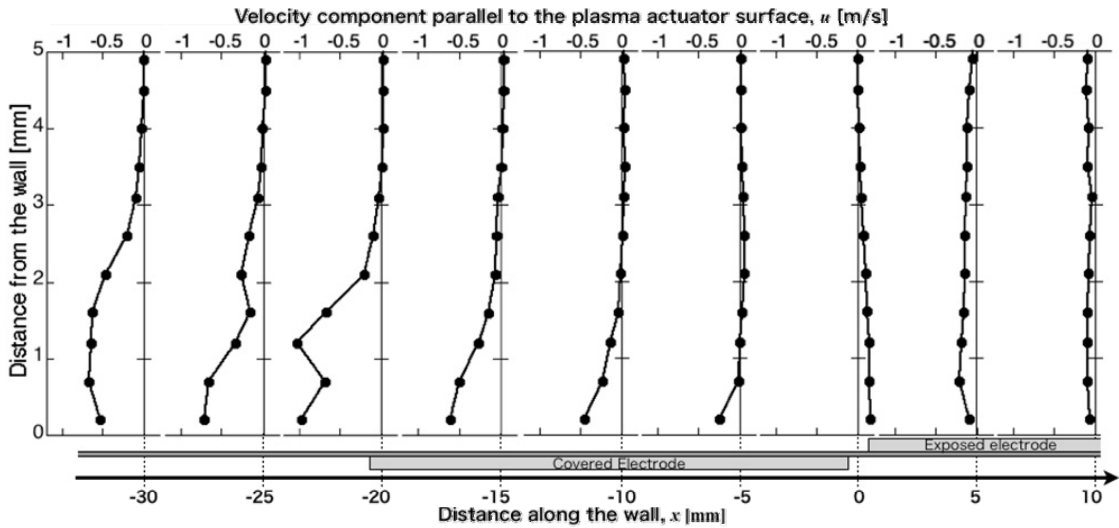


Fig. 7. Velocity distribution at various positions on the plasma actuator (5 kV, 10 Hz)

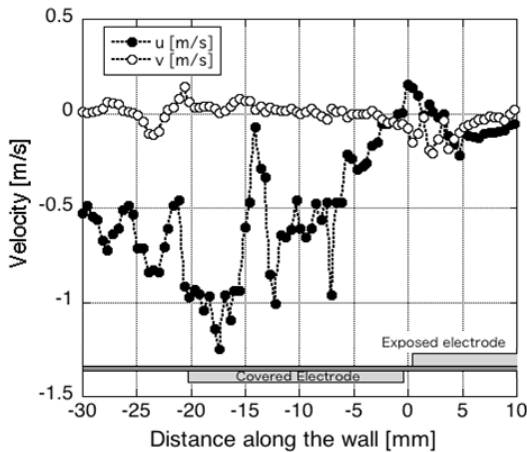


Fig. 8. Velocity distribution in the vicinity of the plasma actuator surface

3.2 플라즈마 유도 유동 속도 및 운동량

Fig. 6b에 제시된 인가 전압이 5 kV, 주파수 10kHz의 조건에서 발생한 플라즈마 유동장의 x방향 속도 성분 분포를 Fig. 7에 나타낸다. 이 그림에서, $x = -20.5 \sim -0.5$ mm에 위치한 절연전극 위에서는 전극표면 근처에서 속도가 최대이고, 표면에서의 거리에 따라 단순 감소하는 분포를 얻었다. 반면, 절연전극 하류에 위치한 $x < -20.5$ mm 영역에서는 속도의 최대치가 y방향으로 이동하여, 전극표

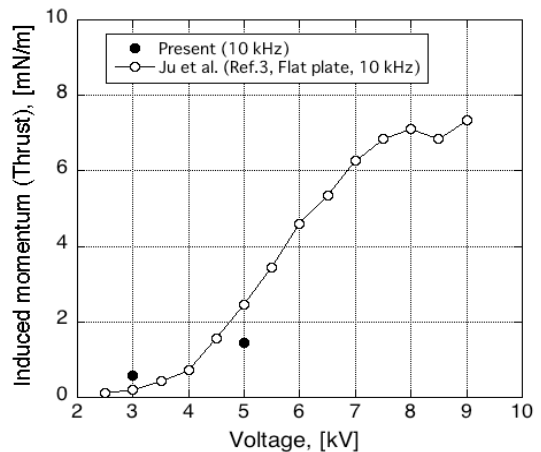


Fig. 9. Comparisons of the momentum induced by plasma actuator

면 근처의 속도가 감소되고 경계층이 발달하고 있는 것을 볼 수 있다. 속도가 1 m/s인 표준상태의 공기유동을 가정하면 $x = -30.5$ mm의 위치에서 계산되는 Reynolds수는 약 2,000 이고, 층류의 경계층두께를 으로부터 구하면 약 3 mm이다. Fig. 7에 $x = -30.5$ mm의 속도분포로부터 속도가 유도된 영역의 두께는 약 3 mm이며, 경계층두께와 유사한 것이 확인 되었다.

플라즈마 액츄에이터 표면 근처의 속도 분포를 Fig. 8에 나타낸다. 이 그림의 x방향 속도인 u의 분포를 보면, 공기가 전극틈새에서 x의 음 방향으로

흐르고, 그 속력은 틸새부터 절연전극의 끝단까지 선형적으로 증가하고 절연전극의 끝에서 감소로 돌아선다. 전극틈새에 가까운 노출 전극에서는 x 의 양 방향 유동을 볼 수 있지만, 전반적으로는 x 의 음방향으로 느린 속력으로 흐르고 있다. 이런 경향은 Forte⁽⁵⁾의 결과 등과 일치한다.

x 방향 속도인 u 가 일부 큰 진동이 보이는 영역도 있으나 이것이 물리적인 현상인지, 촬영 이미지의 노이즈나 액츄에이터 설치 시의 문제 등에 의한 것인지는 추가적인 실험을 통해 분석할 필요가 있다. 또, y 방향 속도인 v 의 분포를 보면, 전극들의 끝에서 약 ± 0.2 [m/s]의 진동이 있으나 나머지 영역에서는 미소이다.

Fig. 9에는 플라즈마 액츄에이터에 의해 증가한 운동량을 식(1)을 이용하여 계산한 값과 Ref. 3에서 동일한 주파수 조건에서 저울을 이용해 추력으로써 측정된 실험값을 비교하였다. 본 실험에서는 인가전압 3 kV일때는 0.591 mN/m, 5 kV일때는 1.406 mN/m의 운동량 증가량, 즉 추력이 측정되었으며, 이 값은 Ref. 3의 실험값과 비슷한 수준이었다.

이러한 결과로부터 플라즈마 액츄에이터는 유동을 유도하고 그 흐름은 절연전극 위에서 가속되어 전극이 없는 평면에서는 점성에 의해 감속되는 것이 관찰되며, 이 결과는 과거의 연구에서 관찰된 현상과 일치하였다. 하지만, 플라즈마 액츄에이터 유동장에 대한 더욱 정확한 이해와 신뢰성이 있는 데이터 수집을 위해, 본 연구에서의 실험 방법은 약간의 개선이 필요하다. 첫째, 표면 근처의 영역을 확대하여 정밀하게 측정해야 한다. 현재의 결과에서는 Fig. 7에서 보듯이 테두리에서 몇 픽셀 정도에서만 플라즈마에 의해 유도된 속도가 관측되고 있다. 이를 위해서는 보다 작은 영역을 확대해서 이미지를 얻을 수 있는 렌즈를 사용해야 한다. 둘째, PIV 결과를 검증하기 위해서 PIV 측정과 동시에 플라즈마 액츄에이터에 가해진 힘을 측정하고, PIV기법으로 도출한 운동량 증가량과 비교할 필요가 있다. 이러한 개선사항은 이후 연구에서 고려할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 DBD 플라즈마 액츄에이터로 유동장을 유도하고, 이를 PIV를 통해 가시화하여 벡터들을 통해 유동의 운동량 증가량을 계산하였다. 가시화된 이미지 및 벡터장으로부터 공기가 플라즈마 액츄에이터의 절연전극 위에서 가속된 것을 확인되었다. 또, 본 연구에서 도출한 플라즈마 액츄에이터로 인한 유도 운동량은 과거의 결과와 유사하며, 본 연구의 실험법의 유효성이 검증되었다. 더욱 정확한 유동장의 이해와 신뢰성이 있는 데이터 수집을 위해, 플라즈마 액츄에이터 표면에 한정된 유동장으로 근접한 이미지 촬영법에 대한 검토가 필요하다.

후 기

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF-2015R1D1A1A01058637).

REFERENCE

- 1) Roth, J. R., 2003, "Aerodynamic flow acceleration using piezoelectric and peristaltic electrohydrodynamic effects of a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma", *Physics of Plasmas*, vol.10, No.5, pp. 2117-2126.
- 2) Ju, C., Kim, J. H., Furudate, M. A., 2017, "Measurement of Thrust Induced by the Dielectric Barrier Discharge in Cylinder Pipes", *Journal of Aerospace System Engineering*, vol.11, No.6, pp. 56-63.
- 3) Enloe, C. L., McLaughlin, T. E., Van Dyken, R. D., Kachner, K. D., Jumper, E. J., Corke, T. C., Post, M., Haddad, O., 2014, "Mechanisms and Responses of a Dielectric Barrier Plasma Actuator: Geometric Effects", *AIAA Journal* vol.42, No.3, pp. 595-604.
- 4) Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S. T., Kompenhans, J., 2007, *Particle Image Velocimetry*,

2nd ed., Springer, Berlin Heidelberg.

- 5) Forte, M., Jolibois, J., Pons, J., Morequ, E., Touchard, G., Cazalens, M., 2007, "Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control", *Experiments in Fluids*, vol.43, No.6, pp. 917-928.