◎ 논 문

DOI: http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2012.15.3.046
ISSN (Print): 1226-9883

전극 재료 및 두께가 DBD 플라즈마 액추에이터의 성능에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

이승엽* · 신유환*†

Experimental Study on Effect of Electrode Material and Thickness in a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator Performance

Seungyeob Lee*, Youhwan Shin*†

Key Words : Plasma Actuator(플라즈마 액추에이터), Dielectric Barrier Discharge(유전체 장벽 방전), Flow Control(유동 제어)

ABSTRACT

Plasma actuator makes parallel flow on the wall surface by the interaction between plasma and neutral air particles. Dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuator is widely studied as one type of plasma actuators, which consists of one electrode exposed to the environmental gas and the other encapsulated by a dielectric material. This paper is experimentally focused on the performance of DBD plasma actuator mounted on a flat plate, which depends on kinds of the electrode materials, their thicknesses and the supplied voltage including its frequency. We measured the velocity magnitudes of the induced flow by a stagnation probe as a performance parameter of the plasma actuators. The velocity profiles of the flow induced by the plasma actuators are similar in all measurement cases. The magnitude of the induced velocity is strongly influenced by the thickness of the electrodes and the frequency of the input voltage. The performance of DBD plasma actuators is related to the electric properties of the electrode materials such as the ionization energy and the electrical resistivity.

1. 서 론

플라즈마 액추에이터(Plasma Actuator)는 본격적인 연구가 시작된 지 약 10년 정도밖에 되지 않은 유동제어 분야 의 최첨단 기술이다. 기존의 유동제어 방법들과 비교하여 많은 장점을 가지는 효율적인 시스템으로써 앞으로 발전 가능성이 많다.[1] 플라즈마 액추에이터는 기본적으로 간격이 있는 두 개의 전극에 고전압이 공급될 때 방전에 의해 전극 사이에 생성되는 플라즈마와 주변 유동 사이의 상호작용을 이용하는 장치이다. 플라즈마 액추에이터는 전극 두 개로 구성되어있어서 구조적으로 매우 간단하여 쉽게 원하는 위치에 설치 할 수 있다. 또한 크기가 작아서 경계층 내의 유동제어에 손쉽게 응용 할 수 있다. 사용되는 에너지의 측면에서도 소비 전력이 기존 시스템과 비교하여 크지 않으며 빠른 응답특성을 통해 실시간 제어가 가능하다. 더욱이 수학적 모델링을 통해 시뮬레이션도 가능하다.[2]

플라즈마 액추에이터는 공급되는 전압의 종류(AC / DC)와 전극의 모양과 배치에 따라 분류되고 각각의 종류마다 유동제어의 방법과 사용 환경이 달라진다. 크게 저속 유동에서의 유전체 장벽(Dielectric Barrier Discharge) 방식과 고속 유동에서의 DC 방전 방식으로 구분되어진다.[3]

유전체 장벽 방전 (DBD) 플라즈마 액추에이터는 1990년대 중반 미국의 J R Roth (University of Tennessee)에 의해 유전체 장벽 방전을 이용한 OUAGDP (One Atmosphere Uniform Glow discharge Plasma) 개발로 본격적으로 연구가 시작되었다.[4] DBD 플라즈마 액추에이터는 저속의 유동에서 전기장의 영향을 받아 이동하는 플라즈마와 중성의 대기입자의 충돌을 통해 주변 대기에 모멘텀을 전달하여 유동제어를 하게 된다. Fig. 1은 DBD 플라즈마 액추에이터의 가장 기본적인 형상이다.

* 한국과학기술연구원
† 교신저자, E-mail : yhshin@kist.re.kr

2011 유체기계 연구개발 발표회 발표 논문, 2011년 11월 30일-12월 2일, 경주

유체기계저널:제15권, 제3호, pp. 46~50, 2012(논문접수일자: 2011.09.23, 심사완료일자: 2012.01.24)

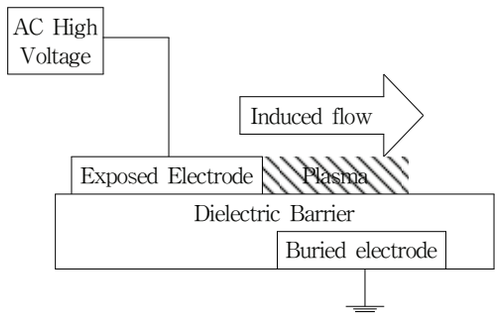


Fig. 1 Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator

유전체 장벽 방전은 Fig. 1과 같이 한 개의 전극을 공기 중에 노출, 다른 전극을 유전체 내부에 삽입하여 비대칭적으로 배치하고 수 십 kV의 교류 전원을 공급한다. 유전체에 삽입되어 절연된 전극 위쪽에 플라즈마가 발생하고 노출된 전극에서 절연된 전극의 방향으로 유동이 발생한다. 이 때 유동의 속도는 수 m/s까지 이르게 된다.

유전체 장벽 방전 플라즈마 액추에이터의 성능을 결정하는 중요 변수는 여러 가지가 있다. 주요 전기적 변수는 전압과 주파수, 파형의 형태 등이 있다.[5, 6] 유전체의 변수는 두께, 재료 등이 있고 전극의 변수는 전극의 두께, 크기, 재료 등이 있으며 두 전극의 간격과 배치 형태 등도 성능의 차이를 발생시키는 변수이다.[7]

이번 연구는 가장 기초적인 DBD 플라즈마 액추에이터 연구로 주변 유동이 없는 곳에서 평판에 설치된 DBD 플라즈마 액추에이터의 여러 가지 변수와 성능과의 상관관계에 대해 실험적으로 연구하였다. 전극의 종류와 두께, 공급 전압 주파수를 변화시켜가며 플라즈마 액추에이터의 성능을 측정하였다. 성능 측정은 플라즈마 액추에이터에 의해 생성된 유동의 속도를 측정하는 방법으로 이루어졌다. 이 연구를 통해 기본적인 DBD 플라즈마 액추에이터의 특성과 앞으로의 DBD 플라즈마 액추에이터 성능 최적화 연구를 위한 기초적인 자료들을 얻을 수 있었다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 플라즈마 액추에이터

본 실험에서 사용한 플라즈마 액추에이터는 유전체 장벽 방식의 플라즈마 액추에이터로 Fig. 1과 같은 구조를 가진다. 여기서 유전체는 아크릴(PMMA)을 사용하였으며 폭 방향(stream-wise)으로 60 mm, 길이(span) 방향으로 170 mm, 두께 3 mm로 제작되었다. 유전체와 전극은 에폭시 수지를 이용하여 부착하였다. 위 쪽 전극은 공기 중에 노출되었으며 아래 쪽 전극은 kapton tape을 이용하여 공기와의 접촉을 차단하였다.

두 전극의 크기는 폭 방향으로 10 mm, 길이 방향으로 80 mm로 제작되었다. 두 전극은 비대칭적으로 부착되었으며 2 mm의 간격을 가지고 배열되었다.

Table 1 Electrode case

	Nickel	Aluminum	Copper
Thickness (mm)	0.025	0.01	0.01
	0.05	0.05	
	0.1	0.03(tape)	

Table 2 Electrode electric properties

	Al	Ni	Cu
Ionization energy (kJ/mol)	577.5	737.1	745.5
Electrical resistivity (nΩm)	28.2	69.3	16.78

전극은 재료와 두께 별로 총 7가지로 Table 1은 각각의 전극의 재료와 두께를 나타낸 것이다. 전극의 재료는 니켈, 알루미늄, 구리를 사용하였으며 두께는 최소 0.025 mm부터 최대 0.1 mm까지를 사용하였다. 두께 0.03 mm의 알루미늄 tape을 제외하고 모든 전극은 순도 99 % 이상의 순수 물질로 만들어졌다.

각각의 전극의 전기적 특성은 Table 2와 같다.

전극의 전기적 특성과 플라즈마 액추에이터 성능의 상관관계를 조사하기 위하여 두께를 일정하게 하고 전극의 종류만 바꾸어서 플라즈마 액추에이터가 만드는 유동 속도를 비교 하였다.

전극의 두께에 대한 플라즈마 액추에이터의 성능 조사는 동일 재료의 전극을 두께만 변화 시키면서 생성 유동의 속도를 비교하였다.

플라즈마 액추에이터의 공급 전압과 주파수에 관한 영향은 하나의 전극 종류와 두께를 선정하여 생성 유동의 속도를 측정하는 방법으로 조사하였다.

모든 플라즈마 액추에이터 실험은 주변 장치의 영향과 대기의 흐름을 최소화하고 안전을 확보하기 위해서 350 mm x 350 mm x 600 mm x 15 mm(W x H x L x T)의 아크릴 케이스 안에서 수행되었다.

2.2 전기 공급 / 측정 장치

플라즈마 액추에이터의 전기 공급은 공기 중에 노출된 전극에는 고전압의 교류전원을 공급하고 노출되지 않은 전극은 접지 시키는 방법으로 이루어졌다. 전압 공급 장치는 Function generator와 Power amplifier(Trek 20/20C) 를 이용하여 최대 18 kV 전압까지 공급할 수 있다.

이 때 발생하는 전압과 전류는 오실로스코프를 이용하여 측정되었다. 전압은 실험 장치에 공급되는 전압을 측정하였으며 전류는 노출되지 않은 전극과 접지 사이에 1 kΩ의 저항

을 연결하여 그 사이의 전압을 측정하고 이를 전류로 환산하였다.

전극의 종류, 두께의 영향에 대한 모든 실험에서 전압 15 kV, 주파수 1 kHz의 정현파가 공급되었다.

공급 주파수와 전압의 영향에 대한 실험에서는 공급 전압 15 kV, 주파수 500 Hz, 1 kHz 및 1.5 kHz의 정현파가 사용되었다.

2.3 성능 (속도) 측정 장치

Fig. 2는 전압력 프로브(stagnation probe)를 이용하여 플라즈마 발생에 따라 유도되는 유속을 측정하기 위한 방법을 나타낸 것이다. 이 때 Stagnation probe는 플라즈마와 반응하지 않게 하기 위하여 전기가 통하지 않는 유리 재질을 사용하였으며 probe 끝단의 외경과 내경은 각각 0.9 mm, 0.6 mm이다. Stagnation probe는 Micro manometer와 연결하여 압력을 측정하고 이를 통해 속도로 환산하였다. 실험에 사용된 Micro manometer(Furness사의 FCO12)는 ±19.99 mmH_2O 범위에서 ±0.5 %의 정확도로 압력을 측정한다.

우선 한 가지 전극 / 전원 상태(Al 0.01 mm / 15 kV)에서 플라즈마 액추에이터 인근 유동장의 속도분포를 측정하였다. Fig. 2의 점선 영역(100 x 100 mm)을 x축으로 1 mm, y축으로 0.2 mm 간격으로 이동하며 속도 값을 측정하였다.

측정 영역의 속도 분포 결과를 통해 최대 유속 측정 부근의 속도 분포를 전극의 재료와 두께, 공급 주파수를 변화시켜가며 측정하여 비교 분석하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 플라즈마 액추에이터의 전압, 전류와 주파수

Fig. 3은 공급전압 15 kV 주파수 1 kHz 정현파가 공급 되었을 때의 오실로스코프로 측정한 플라즈마 액추에이터의 전압과 전류이다. 전류는 1 kHz의 전압과 같은 주파수의 파형을 보이며 관찰되지만 전류의 크기는 1 mA 이하로 펄스 형태로 전압과 비교하여 위상이 π/2 만큼 빨랐다.

Fig. 4는 DBD 플라즈마 액추에이터에 15 kV 전압과 각각 주파수 0.5 kHz와 1 kHz의 정현파가 공급될 때의 플라즈마 생성 사진이다. 이 사진을 통해 주파수가 증가할수록 생성 플라즈마의 세기가 밝아지는 것을 확인할 수 있다.

3.2 Pitot 관을 이용한 속도 측정

Pitot 관을 통해 속도를 측정하여 0.01 mm 두께의 알루미늄의 전체 유동장을 관찰한 결과 공기에 노출된 전극으로부터 x축으로 7~10 mm, 유전체 표면으로부터 y축으로 약 0.5 mm~1 mm 떨어진 지점에서 최대 유속이 측정되었다. 전극의 종류 및 두께가 다른 경우의 실험에서도 0.01 mm 두께의 알루미늄에 대한 실험 결과와 유사한 지점에서 최대 유속이

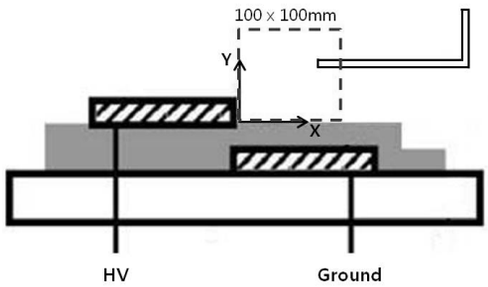


Fig. 2 Induced velocity measurement

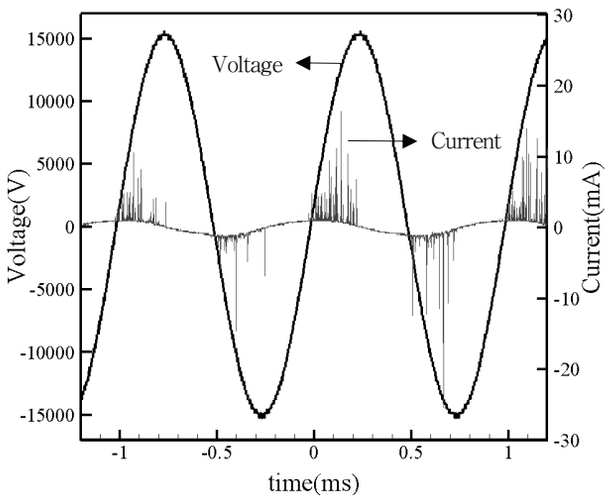
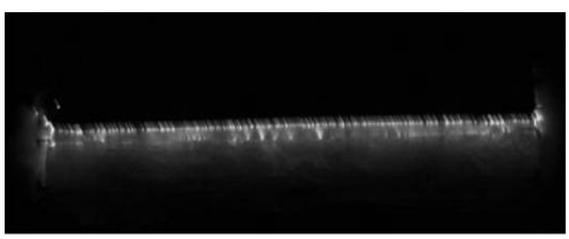
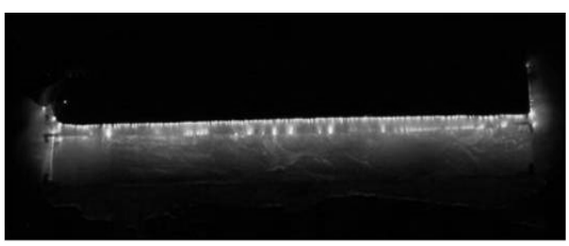


Fig. 3. Voltage and Current at AC 15kV, 1kHz sine-wave



(a) 0.5 kHz



(b) 1 kHz

Fig. 4 Plasma actuator photograph of 15 kV input voltage.

측정되었다. 따라서 노출 전극에서 x축으로 8 mm 떨어진 지점에서 전극의 종류와 두께, 공급 전원을 바꾸어가며 표면에서 y축 방향으로 이동하며 유속을 측정하여 속도 분포를 측정하여 비교하였다.

3.2.1 전극 종류에 따른 생성 유동 속도

Fig. 5는 x=8 mm에서 두께 0.01 mm 알루미늄과 구리 전극을 사용한 플라즈마 액추에이터의 속도 분포를 나타내는 그림이다. 두 다른 재료의 전극 모두 y=0.5~0.7 mm 지점에서 최대 속도가 측정 되었다. 알루미늄 전극이 만드는 유동의 최대 속도는 약 3.5 m/s 이며 구리 전극이 만드는 유동의 최대 속도는 약 2.5 m/s로 측정되었다. 또한 발생되는 속도가 y축으로 알루미늄은 2.7 mm, 구리는 2.3 mm 지점까지 발생되는 것을 볼 수 있다. 전체적인 속도 분포의 모양은 비슷하지만 알루미늄 전극이 만드는 유동 속도가 약 1 m/s 정도 빠르게 측정되며 더 넓은 지역의 유동을 만들어내고 있다. 이를 통해 알루미늄 전극이 구리 전극보다 좋은 성능의 플라즈마 액추에이터를 만든다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 x=8 mm에서 두께 0.05 mm 알루미늄과 니켈 전극의 플라즈마 액추에이터의 속도 분포를 나타내는 그림이다. 두 전극 모두 최대 속도는 y=0.5~1 mm 부근에서 약 3.1 m/s 정도로 측정되었으며 y=2.5 mm까지 유동의 속도가 측정되었다. 전반적으로 두 전극의 속도 분포는 거의 비슷한 형태로 나타났으며 이를 통해 알루미늄과 니켈은 거의 비슷한 성능의 플라즈마 액추에이터를 만든다는 것을 알 수 있다.

Table 2의 전극 재료의 전기적 특성과 속도 분포 측정 결과 비교를 통해 둘 사이의 상관관계를 분석해보았다. 알루미늄과 구리의 경우 플라즈마 액추에이터의 성능이 상대적으로 좋은 알루미늄이 구리보다 이온화 에너지는 더 작으며 전기 저항은 더 큰 것을 볼 수 있다. 또한 알루미늄과 니켈의 경우 플라즈마 액추에이터의 성능이 비슷하게 측정되는데 각각의 전기적 특성을 비교해보면 이온화 에너지는 알루미늄이 더 작고 니켈의 이온화 에너지는 구리와 비슷한 값이다. 하지만 니켈의 전기 저항이 더 알루미늄의 전기 저항보다 약 3배 큰 것을 볼 수 있다. 이를 통해 플라즈마 액추에이터는 전기적 특성으로 볼 때 이온화 에너지가 작고 전기 저항이 클수록 성능이 좋다는 결론을 얻을 수 있다.

3.2.2 전극 두께에 따른 생성 유동 속도

Fig. 7은 두께가 다른 니켈 전극의 플라즈마 액추에이터의 x=8 mm 지점에서의 속도 분포를 나타내는 그림이다. 전극의 두께가 0.025 mm, 0.05 mm, 0.1 mm인 3가지 경우를 비교한 것으로 모든 두께의 전극에서 y=0.5~1 mm 지점에서 최대 속도가 측정되었고 각각 3.5 m/s, 3 m/s, 2.8 m/s 정도의 최대 속도 값을 보였다. 전반적으로 보면 전극의 두께가 얇을수록 빠른 유동 속도 분포를 보이며 더 넓은 영역까지 유동을 만드는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 x=8 mm 지점에서 알루미늄 두께에 따라 플라즈마 액추에이터가 만드는 속도 분포를 나타내는 그림이다. 알루미늄의 두께는 0.01 mm, 0.05 mm 두 가지를 비교하였으며 각각의 두께에서 최대속도는 3.5 m/s, 3 m/s 정도로 측정되

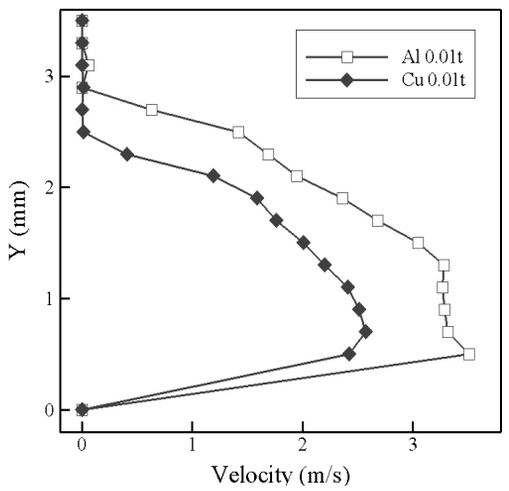


Fig. 5 Induced flow velocity distribution of aluminum and Copper at x=8 mm

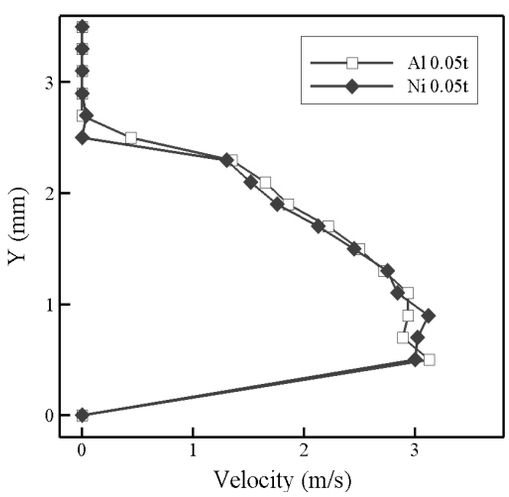


Fig. 6 Induced flow velocity distribution of aluminum and Nickel at x=8mm

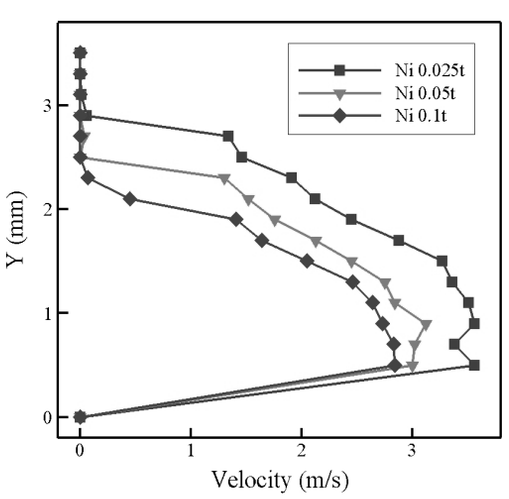


Fig. 7 Induced flow velocity distribution of various thicknesses Nickel at x=8mm

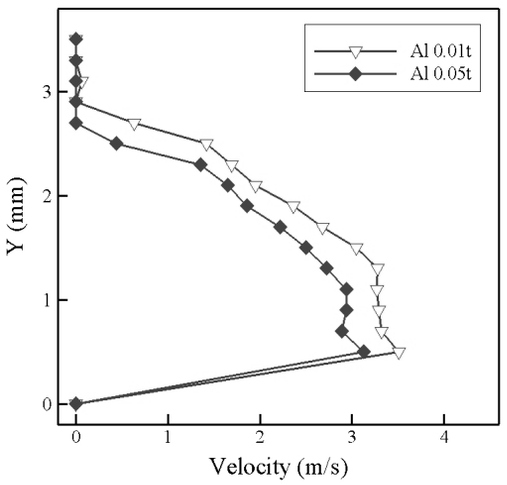


Fig. 8 Induced flow velocity distribution of various thicknesses Aluminum at x=8mm

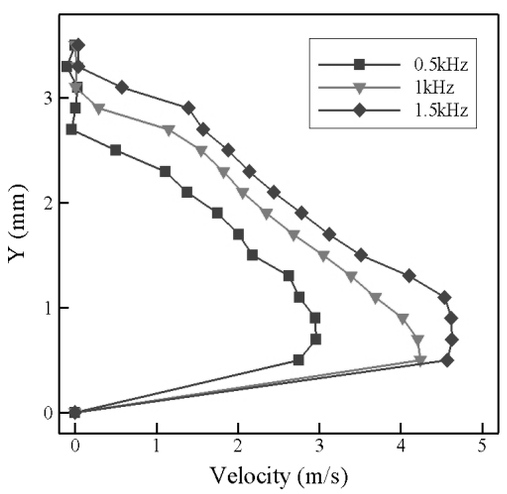


Fig. 9 Induced flow velocity distribution of various frequency at x=8mm in the aluminum tape(0.03mm)

었다. 니켈 전극과 마찬가지로 알루미늄 전극에 서도 역시 전극의 두께가 얇을수록 빠른 유동 속도 분포와 넓은 영역까지의 플라즈마 액추에이터의 영향이 측정되었다.

전극의 두께에 따른 플라즈마 액추에이터의 성능을 확인하는 실험을 통해 두께가 얇을수록 좋은 성능의 플라즈마 액추에이터를 얻을 수 있다는 결론을 얻었다.

3.2.3 공급 주파수에 따른 생성 유동 속도

Fig. 9는 주파수에 따른 플라즈마 액추에이터의 속도 분포를 나타낸 그림이다. 사용된 전극은 두께 0.03 mm의 알루미늄 테이프이며 정현파 15 kV의 전압을 공급하였다. 주파수는 500 Hz, 1 kHz, 1.5 kHz를 실험하였으며 x=8 mm에서 y축으로의 속도분포를 얻었다. 1.5 kHz 주파수에서 최대 속도는 4.5 m/s, 1 kHz 주파수에서 4.2 m/s 그리고 0.5 kHz 주파수에서 3 m/s까지 측정되었으며 y축으로 각각 3.1 mm.

4. 결 론

본 연구에서는 DBD 플라즈마 액추에이터의 성능에 영향을 미치는 변수에 대해 실험적으로 평가하고자 하였다. 특히 액추에이터 전극의 재질, 두께 등 기본적인 변수를 포함하여 공급 전압의 세기 및 주파수 변화에 따른 성능 특성을 고찰하였다. 본 연구결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 플라즈마 액추에이터의 성능과 전극 재료에 관한 영향은 이온화 에너지가 낮고 전기 저항이 높은 재료일수록 생성 유동장의 속도가 크며, 그 유동장이 영향을 미치는 범위가 크다.
2) 플라즈마에 의해 유도되는 유동 속도의 분포 형태는 전극의 재료, 두께 그리고 공급 주파수와는 무관하며, 유동속도가 최대인 지점은 유동방향으로는 전극에서 약 8 mm 떨어진 지점, 수직방향으로는 0.5 mm~1 mm 떨어진 영역으로 관찰되었다. 특히 알루미늄 테이프(두께 0.03 mm) 전극을 사용한 플라즈마 액추에이터의 경우 공급 전압과 주파수가 각각 15 kV, 1.5 kHz 일 때 최대 약 4.7 m/s의 속도를 얻을 수 있었다.
3) 전극의 두께와 플라즈마 액추에이터의 성능 관계는 두께가 작은 전극일수록 생성 유동장의 속도가 크며, 넓은 범위의 유동장이 생성되었다. 또한 액추에이터에 공급되는 전압의 주파수가 커질수록 유동장의 속도가 증가하고 넓은 영역까지 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) Eric Moreau, 2007, “Airflow control by non-thermal plasma actuators,” J. Phys. D: Appl. Phys. 40, pp. 605~636.
(2) Louis N. Cattafesta III, 2011, “Actuators for Active Flow Control,” Annu. Rev. Fluid Mech, 43, pp. 247~272.
(3) 신지철, 2009, “플라즈마를 이용한 유동 제어,” KASA09-2114, pp. 77~79.
(4) J. Reece Roth, 2000, “Electrohydrodynamic Flow Control with a Glow-Discharge Surfece Plasma,” AIAA Journal Vol. 38, No. 7, pp. 1166~1172.
(5) Dmitry F. Opaits, 2007, “Experimental Investigation of DBD Plasma Actuators Driven by Repetitive High Voltage Nanosecond Pulses with DC or Low-Frequency Sinusoidal Bias,” 38th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference.
(6) N Benard, 2010, “Capabilities of the dielectric barrier discharge plasma actuator for multi-frequency excitations,” J. Phys. D: Appl. Phys. 43.
(7) C. L. Enloe, 2004, “Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator: Geometric Effects,” AIAA JOURNAL, Vol. 42, No. 3, pp. 595~604.