

전압과 전극형상이 DBD 플라즈마 작동기 성능에 미치는 영향

박기웅* · 유인상* · 김기문* · 곽재수*†

Effects of Voltages and Electrode Shapes on the Performance of the DBD Plasma Actuator

Gi Ung Park*, In Sang You*, Gi Mun Kim*, Jae Su Kwak*†

Key Words : Dielectric Barrier Discharge(유전체 장벽 방전), Electrode Shapes(전극형상), Induced Flow(유도 유동), Plasma Actuator(플라즈마 작동기)

ABSTRACT

The DBD (Dielectric Barrier Discharge) plasma actuator generates momentum that artificially induces adjacent flow towards certain directions. With this characteristics of the DBD plasma actuator, it is widely used in heat and fluid engineering to actively control the flow patterns. However, basic researches on manipulating DBD plasma actuator still remain to be investigated further. In this paper, therefore, parametric study on the performance of the DBD plasma actuator was experimentally investigated. As a parameter, input voltage and the shape of the exposed electrode were selected. Four different voltages (6, 7, 8, and 9 kV) and five shapes for the electrode were considered. To evaluate its performance, velocities of the flow induced by the DBD plasma actuator were measured using hot-wire anemometer. As results of study on the effect of input voltages, it was found that the velocity of the induced flow increased as the input voltage increases. Also, the case of sharp edge electrode, such as sawtooth shape, showed higher velocity of the induced flow than that of smooth edge electrode.

1. 서 론

유동을 제어하는 방법은 크게 수동적인 방법과 능동적인 방법으로 나눌 수 있다. 수동적인 방법에는 기하학적 형상 변경이나 부가장치 부착 방식 등이 있으나 중량 증가, 소음, 진동발생과 같은 문제점들을 지니고 있다. 반면, 능동적인 방법은 유동 제어 대상체의 내부에 장치를 설치하여 유동조건에 맞게 대상체를 변형하거나 분출/흡입과 같은 다양한 작동을 하여 수동적인 방법들의 문제점을 보완한 방식이다. 그러나 능동적인 방법도 외부동력 요구 및 사용 시간의 제약이 발생하는 단점이 있다. 이러한 관점에서 플라즈마 작동기는 능동제어에 수반되는 단점을 보완시킨 장치로서 유동 제어 분야에서 다양하게 연구되고 있다.⁽¹⁾

플라즈마는 국부적으로 전기적인 극성을 가지며 중성입자, 이온, 전자로 구성된 이온화된 기체가 존재하는 상태를

말하며, 전도체의 특성을 가지고 자기장을 발생시킨다. 이것은 고체, 액체, 기체와 구분되는 물질로 제 4의 물질이라고 불리기도 한다.

DBD (Dielectric Barrier Discharge) 플라즈마 작동기의 기본 구동원리는 작동기를 통한 공기의 국부적인 이온화와 전극 배치에 의해 생성된 전기장의 조합으로 인해 생성되는 체적력을 이용한다. 플라즈마 작동기는 간격이 있는 두 개의 전극에 고전압의 교류전원이 공급될 때 방전에 의해 전극 사이에 생성되는 플라즈마를 이용하는 장치이다. 플라즈마 작동기는 두 개의 전극으로 구성되어 있기 때문에 구조적으로 단순하여 대상체에 설치하는 과정에 있어 용이성을 가지고 있다. 또한 작동기의 소형화가 가능하기 때문에 경계층 내의 유동제어에 손쉽게 응용 될 수 있다. 또한 플라즈마 작동기는 다른 장치들에 비해 소비전력이 적고, 빠른 응답특성을 통해 실시간 제어가 가능하다는 장점이 있다.⁽²⁾ 그 외에도 먼

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부(School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University)

† 교신저자, E-mail : jskwak@kau.ac.kr

지 흡착에 의한 오염이 잘 되지 않으며 방전전극 배치에 따라 표면 전체에서 방전을 일으킬 수 있다. 또한, 방전전극은 다양한 형태의 패턴으로 설계가 가능하다.⁽³⁾

Corke 등⁽⁴⁾은 단일 DBD 플라즈마 작동기를 이용하여 공력향상을 위한 설계를 제시하였고, 플라즈마 작동기의 성능을 극대화 할 수 있는 접근법을 제안하였다. DBD 플라즈마 작동기의 성능을 결정하는 변수들에는 여러 가지가 있는데, 그 중 가장 주요한 변수로 알려진 입력 신호에 따른 요인은 전압과 주파수, 방전파형이 있다. Forte 등⁽⁵⁾과 Thomas 등⁽⁶⁾은 전압과 주파수에 관한 연구를 통하여 두 변수가 플라즈마 작동기 성능과 밀접하게 관련이 있음을 보였다. 또한 플라즈마 작동기의 배치와 개수가 다중 플라즈마 작동기에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다. Opaitis 등⁽⁷⁾은 파형을 특성화하고 플라즈마와의 매칭을 최적화하기 위해, 임피던스의 부하를 갖는 짧은 펄스 계산을 위한 수치 코드를 개발하여 새로운 파형을 제안하고, 그에 대한 장점을 실험적으로 입증하였다.

입력신호에 따른 요인 외에도 플라즈마 작동기를 구성하는 유전체와 전극의 재료와 형상, 배치 등도 DBD 플라즈마 작동기 성능에 큰 영향을 미친다. Lee 등⁽²⁾은 전극의 두께, 크기, 재료에 따른 영향을 실험적으로 수행하였고, Enloe 등⁽⁸⁾은 전압과 전극의 크기가 DBD 플라즈마 작동기 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. Yun 등⁽⁹⁾은 전극의 배치 간격, 전극의 폭, 전극 길이에 관한 변수연구도 진행하였다. 그 외에 유전체의 영향에 대한 연구로 Forte 등⁽⁵⁾은 유전체 두께에 관한 연구를 진행하였고, Lee 등⁽²⁾, Forte 등⁽⁵⁾과 Thomas 등⁽⁶⁾은 유전체 재료에 따른 플라즈마 작동기에 관한 연구를 진행하였다.

DBD 플라즈마 작동기의 응용과 운용에 관한 몇몇 연구들이 수행되었으나, 플라즈마 작동기의 성능에 대한 변수연구는 부족하다. 따라서 본 연구에서는 입력전압의 세기와 노출전극의 형상 변화가 DBD 플라즈마 작동기에 의한 유도유동 속도에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 실험에 사용된 노출전극은 다섯 가지 형상이 고려되었으며, 인가전압의 크기와 노출전극의 형상에 따른 유도유동의 속도는 열선유속계로 측정하였다.

2. 실험장치 구성

2.1 DBD 플라즈마 작동기와 유도유동 측정 장치

2.1.1 DBD 플라즈마 작동기

Fig. 1은 본 연구에 사용된 DBD 플라즈마 작동기의 형상 인자를 2차원 평면에 나타낸 개략도이다. Fig. 1에서와 같이 두 개의 전극은 유전체 상·하부에 비대칭적으로 설치되었고, 전극의 길이(z 방향)는 50 mm이다. 이 때 유전체 상부

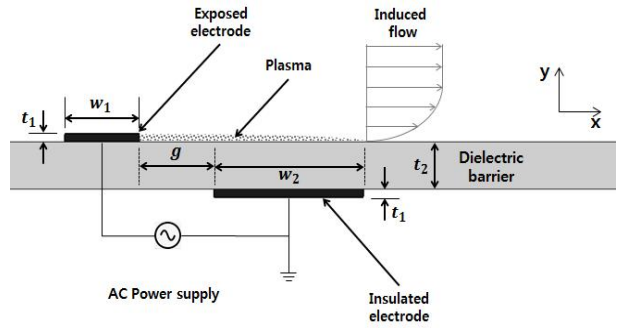


Fig. 1 Schematic of the DBD plasma actuator (not to scale)

Table 1 Shape parameters of DBD plasma actuator

Parameters	Dimensions
Electrode gap (g)	5 mm
Exposed electrode width (w_1)	5 mm
Insulated electrode width (w_2)	10 mm
Electrode thickness (t_1)	0.08 mm
Dielectric thickness (t_2)	3 mm

에 설치된 전극은 공기 중에 노출된 상태로 설치되어 있으며, 노출전극이라 부른다. 반면 잠입전극이라고 불리는 유전체 하부에 설치된 전극은 공기와의 접촉을 차단하여 설치되어 있다. 이와 같이 비대칭으로 배치된 두 전극을 통하여 수 kV의 교류전원을 공급하면 유전체 상부, 즉 노출전극과 잠입전극 사이에 영역에 걸쳐 플라즈마가 발생하고, 노출전극에서 잠입전극 방향으로 운동량이 발생한다. 이와 같이 발생한 운동량은 주변 공기를 잠입전극 방향으로 유도시켜 인위적으로 유도유동(Induced flow)을 형성하며, 그 속도는 수 m/s까지 이르게 된다.

본 연구에서는 전기전도의 영향이 적은 아크릴을 유전체로 사용하였으며, 노출전극과 잠입전극은 전기저항이 적은 구리를 사용하였다. Fig. 1의 각 형상 인자에 대한 수치는 Table 1에 제시되어 있다.

실험에 사용된 노출전극은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 직사각형, 큰 톱니, 작은 톱니, 날카로운 물결, 둥근 물결 형상의 서로 다른 다섯 가지 전극형상을 선정하였으며, 플라즈마를 이용하여 공기를 이온화시키기 위해 공기에 노출시켰다. 작은 톱니 형상(Fig. 2(c))은 큰 톱니 형상(Fig. 2(b))과 비교했을 때 산의 높기와 너비가 1/2 배인 형상이며, 날카로운 물결 형상(Fig. 2(d))은 둥근 물결 형상(Fig. 2(e))을 뒤집어 놓은 형상이다.

한편, 유전체 하부에 부착된 절연전극은 0.06 mm 두께의 캡톤(Kapton) 테잎을 이용하여 공기와의 접촉을 차단하였다. Fig. 2에 제시된 각각의 노출전극 형상에 대한 치수는 Table 2에 제시되어 있다.

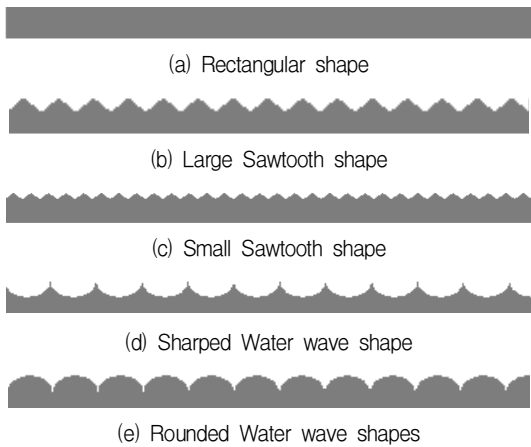


Fig. 2 Tested exposed electrode shapes

Table 2 Detailed dimensions for exposed electrodes

Electrode shapes	Thread height	Thread width
Rectangular (R)	-	-
Large Sawtooth (LS)	2 mm	5 mm
Small Sawtooth (SS)	1 mm	2.5 mm
Sharped Water wave (SW)	2.5 mm	6.5 mm
Rounded Water wave (RW)	2.5 mm	6.5 mm

2.1.2. 유도유동 유속측정 장치

Fig. 3 은 DBD 플라즈마 작동기에 의해 발생한 유도유동의 속도를 측정하기 위한 시험부의 개략도이다. 함수발생기 (AFG 3022C, Tektronix)를 이용하여 실험조건에 부합하는 교류전압을 인가하고, 이 입력신호의 교류전압은 고전압증폭기(Trek 20/20C - HS, Trek)를 통과하며 2000배 증폭되어 유전체 상부에 부착된 노출전극으로 인가된다. 이 때, 본 실험의 최대 인가전압인 9 kV가 함수발생기와 고전압증폭기로부터 전극에 인가되었을 때의 전압의 불확도는 약 1.2%로 계산되었다.

고전압이 인가된 상태의 노출전극의 끝단과 절연전극 사이의 영역에 걸쳐 플라즈마가 발생하고, 이러한 플라즈마 발생으로 인해 주변의 공기가 이온화되면서 유동이 발생한다.

본 연구의 실험조건에서는 DBD 플라즈마로 인해 유도된 유동의 유속이 수 m/s 내외의 비교적 느린 유속을 보이기 때문에 정밀한 유속 측정을 위하여 열선유속계를 사용하였다. 한편, 열선유속계의 보정과정과 전압측정을 통하여 계산된 유속이 약 2.25 m/s인 경우의 측정 불확도는 약 6.8%로 계산되었다.

유속의 측정 위치는 절연전극의 끝단으로부터 하류방향으로 40 mm 떨어진 위치(x=40 mm)에서 유전체 바닥면으로부터 1 mm 이격된 지점부터 y축 방향으로 10 mm 떨어진 위치까지 1 mm 간격으로 측정하였다.

열선유속계를 이용한 유속측정은 외기의 유동교란 등과 같은 영향에 민감하기 때문에 유속측정 실험은 크기 300×

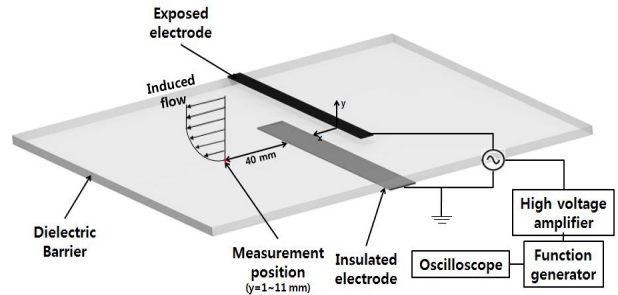


Fig. 3 Test section with DBD plasma actuator

600×300 mm³의 아크릴 상자 내부에서 수행되었다. 또한 외기의 온도변화에 의한 오차요인을 제거하기 위하여 아크릴 내부의 온도변화는 ±0.5℃로 일정하게 고정시켰다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 노출전극의 형상과 인가전압의 크기에 따른 유도유동의 속도를 측정하여 비교함으로써 DBD 플라즈마 작동기의 성능을 평가하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 다섯 가지 노출전극 형상(Fig. 2)에 대하여 네 가지의 교류전압 (6, 7, 8, 9 kV)을 인가했을 때의 유도유동의 속도를 측정하였다.

또한 노출전극의 형상과 인가전압의 영향만을 확인하기 위하여 인가된 교류전압의 파형과 인가주파수는 각각 sine 파와 1 kHz로 고정하여 다른 변수들에 대한 영향은 배제하였다. 실험변수인 전극형상을 한 가지 형상으로 고정시켜놓고 전압을 6 kV에서 9 kV까지 증가시키며 입력 전압의 영향을 파악하고 다른 노출전극 형상들에 대해 동일한 실험과정을 진행하였다. 그리고 같은 크기의 인가전압에 대한 다섯 가지 노출전극 형상에 따른 DBD 플라즈마 작동기의 성능을 비교하였다.

3. 결 과

3.1. 입력 전압의 영향

전압에 따른 영향을 확인하기 위하여 DBD 플라즈마 작동기의 다섯 가지 노출전극(Fig. 2) 각각의 형상에 대해 인가전압 변화에 따른 유도유동 속도를 측정하였고, 그 결과는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4와 나타난 바와 같이, 최대유속측정지점은 노출전극 형상에 무관하게 바닥에서 약 2~3 mm 위치에서 형성되었다. 또한 본 실험에서 DBD 플라즈마 작동기는 노출전극이 위치한 유전체 윗면의 측정부 바닥면으로부터 y축 방향으로 11 mm 부근에 걸쳐 주변유동에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

작은 톱니(SS) 형상의 노출전극에 대한 결과(Fig. 4(c))를

전압과 전극형상이 DBD 플라즈마 작동기 성능에 미치는 영향

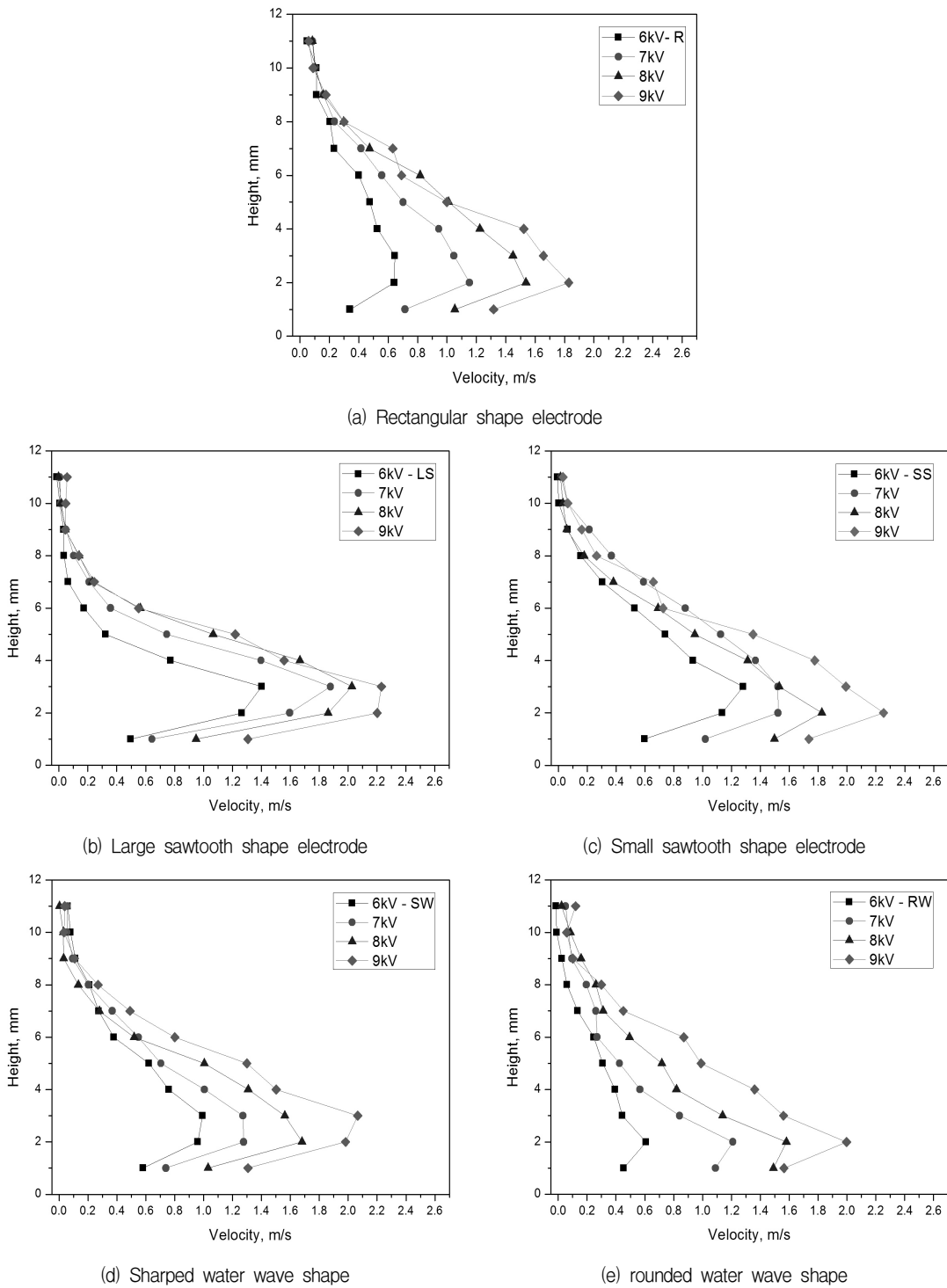


Fig. 4 Velocity profiles of the induced flow for various electrode shapes

제외하면, 모든 노출전극 형상에 대해서 인가전압이 증가할수록 유도유동의 속도가 증가하는 경향을 보였으며, 바닥면으로부터 멀어질수록 플라즈마의 영향이 감소하기 때문에 유속은 점차 감소하는 모습을 확인할 수 있었다. 인가전압의 크기와 유동의 속도의 이러한 비례관계는 Enloe 등⁽⁸⁾이 수행한 선행연구와 일치하는 결과를 보였다. 그러나 작은 톱니(SS) 형상의 노출전극의 경우에는 바닥면으로부터 4~10

mm 부근에서 8 kV 보다 7 kV의 경우에 유속이 조금 더 높게 측정되었다(Fig. 4(c)).

3.2 전극 형상의 영향

노출전극의 형상에 따른 영향을 확인하기 위해 DBD 플라즈마 작동기에 6~9 kV의 전압을 인가했을 때 각 전압에서

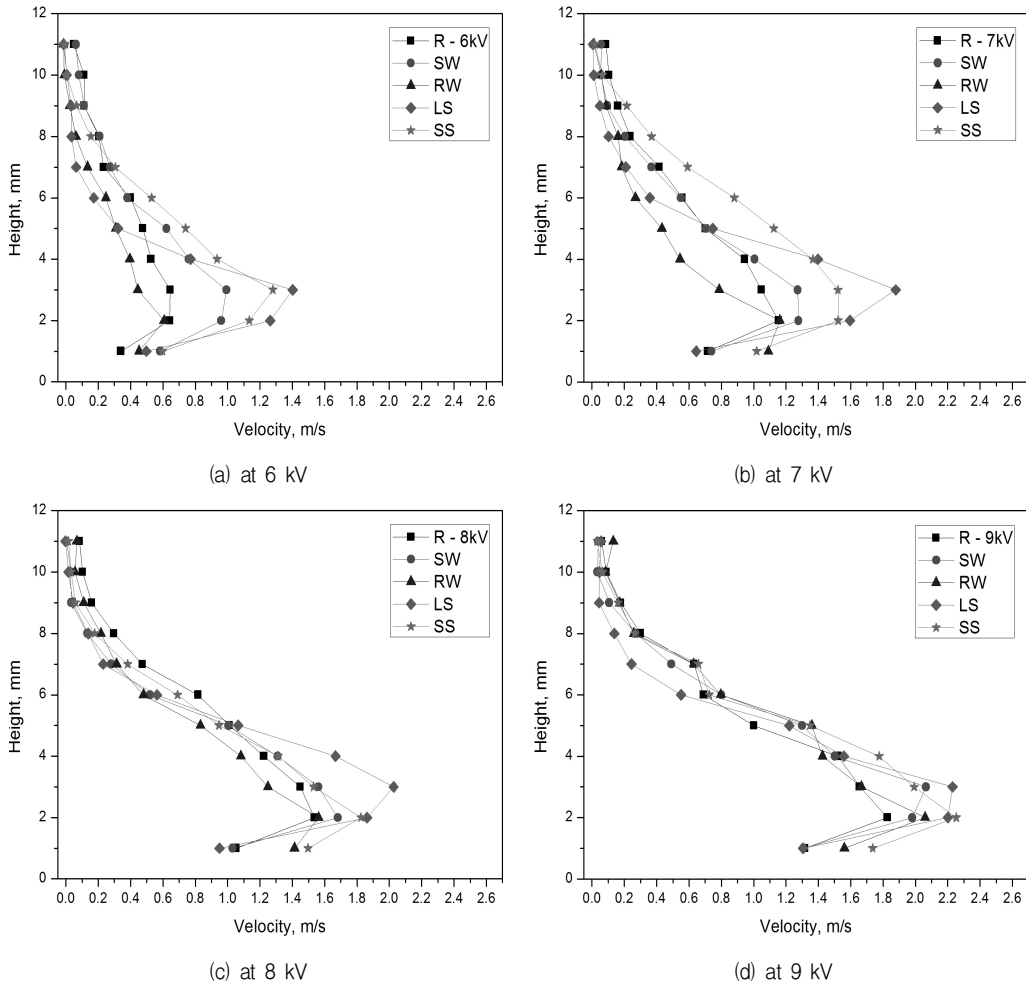


Fig. 5 Velocity profiles of the induced flow for various input voltages

다섯 가지 노출전극 형상에 대한 유속을 비교하였다.

6 kV(Fig. 5 (a))에서는 바닥으로부터 1~11 mm 부근까지 둥근 물결, 직사각형, 날카로운 물결, 작은 톱니 순으로 평균 유속이 증가하는 것을 확인하였으며, 큰 톱니형상의 경우에는 평균유속은 비교적 낮았지만 바닥면으로부터 2~3 mm 부근에서의 최대유속은 약 1.4 m/s로 측정되어 다른 노출전극 형상보다 높은 유속을 보였다.

7 kV(Fig. 5 (b))에서는 둥근 물결, 직사각형, 날카로운 물결, 작은 톱니순으로 평균유속이 증가하는 경향을 보이고, 이는 6 kV 인가조건의 경우와 동일했으며, 큰 톱니의 경우에도 평균유속은 비교적 낮았지만 최대유속은 1.9 m/s로 다른 형상보다 높게 측정되었다.

8 kV(Fig. 5 (c))에서는 6, 7 kV 경우 보다 형상별 성능 격차가 조금 더 줄어들었다. 하지만 둥근 물결과 직사각형 형상은 상대적으로 낮은 유속을 가지고 날카로운 물결, 큰 톱니, 작은 톱니형상은 상대적으로 높은 유속을 가진다는 점은 6, 7 kV에서의 결과와 유사하였고 큰 톱니 형상의 경우, 최대유속은 대략 2.0 m/s 까지 측정되었다.

한편, 9 kV (Fig. 5 (d))에서는 노출전극 형상에 따른 유속

은 여전히 차이를 보이지만, 상대적으로 낮은 전압에서의 결과(Fig. 5(a)-(c))와 비교했을 때, 높은 전압에서는 노출전극 형상에 따른 유속의 차이가 감소했다. 즉, 높은 전압에서는 노출전극의 형상이 유속에 미치는 영향은 상대적으로 적다고 판단된다.

3.3 인가전압, 전극형상에 따른 성능비교

3.3.1 성능(최대유속) 비교

DBD 플라즈마 작동기의 최대유속을 비교한 결과는 Table 3에 제시되어 있다. 대체적으로 전극 형상에 관계없이 전압이 증가할수록 성능은 향상되었다. 같은 전압이 인가된 경우에는 노출전극의 끝단의 형상이 날카로울수록 더 좋은 성능을 보였으며, 전압이 증가함에 따라 전극 형상에 대한 영향은 점차 감소하였다. 바닥에서 2~3 mm 부근에서 최대유속이 측정되었고 플라즈마에 의한 유동은 약 11 mm 부근까지 발생되었다.

Table 4는 입력 전압의 크기와 노출 전극 형상별로 DBD 플라즈마 작동기의 작동에 요구되는 소모전력을 나타낸 것이다. 소모전력 계산에 필요한 전압과 전류는 디지털 오실로스코

Table 3 Maximum flow velocity table on DBD plasma actuator as voltages and electrode shapes (m/s)

Electrode shapes \ Voltages	6 kV	7 kV	8 kV	9 kV
Rectangular	0.64	1.04	1.53	1.82
Large sawtooth	1.40	1.87	2.02	2.23
Small sawtooth	1.28	1.58	1.82	2.25
Sharped water wave	1.06	1.27	1.61	2.10
rounded water wave	0.61	1.21	1.58	2.06

Table 4 Apparent power table on DBD plasma actuator as voltages and electrode shapes (Watt, J/s)

Electrode shapes \ Voltages	6 kV	7 kV	8 kV	9 kV
Rectangular	39.60	53.76	70.54	89.64
Large sawtooth	39.64	53.76	71.04	89.64
Small sawtooth	39.60	54.08	71.62	89.96
Sharped water wave	39.60	54.60	72.00	90.72
rounded water wave	39.56	52.92	70.08	88.56

코프(TBS 1072B, Tektronix)를 사용하여 측정하였으며, 이를 이용하여 계산된 소모전력은 9 kV의 전압이 인가된 경우에 약 4.4%의 불확도를 갖는 것으로 계산되었다. Table 4에서 확인할 수 있듯이 DBD 플라즈마 생성에 의한 소모 전력은 노출 전극의 형상변화보다는 인가전압의 크기에 더 의존한다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 유동의 능동제어를 위해 사용되는 DBD 플라즈마 작동기의 성능향상을 위한 변수연구를 실험적으로 수행하였다. 실험에서 고려된 DBD 플라즈마 작동기의 성능 변수로는 노출전극의 형상과 인가전압을 선정하였으며, 각각 다섯 가지 전극형상과 네 개의 인가전압에 따른 유도유동의 유속을 측정하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) DBD 플라즈마 작동기에 인가되는 전압의 크기가 증가할수록 전극형상에 관계없이 유도유동의 유속은 증가하였다. 이는 전압의 크기가 생성된 플라즈마의 강도와 더불어 전극 주변의 공기의 이온화에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 한편, 인가전압의 크기가 증가함에 따라 소모전력 또한 증가하였다.
- 2) 동일한 전압조건에서 노출전극의 형상에 따라 각각 다른 유도유동의 유속이 측정되었다. 직사각형이나 둥근

물결 형상일 때보다 큰 톱니나 작은 톱니, 날카로운 물결과 같이 끝단이 날카로운 형상일 때 대체로 성능이 우수한 것으로 측정되었다. 그러나 인가전압의 크기가 증가할수록 전극형상에 따른 유도유동의 유속의 차이는 점차 감소하였다.

아울러 DBD 플라즈마 작동기의 성능에 영향을 미치는 여러 가지 인자들에 대하여 해석적 연구가 수행된다면, DBD 플라즈마의 발생 메커니즘에 대한 상세분석은 물론 인자들에 대한 최적화를 통하여 DBD 플라즈마 작동기의 성능을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. NRF-2015R1A2A2A01002636)과 방위사업청, 국방과학연구소의 기초연구(2015-05-042) ‘플라즈마 작동기와 Coanda 효과를 이용한 막냉각 효율 향상’ 과제의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- (1) Santhanakrishnan, A., Pern, N. J., Ramakumar, K., Simpson, A., and Jacob, J. K., 2005, "Enabling flow control technology for low speed UAVs," AIAA Infotech @Aerospace, Arlington, Virginia, AIAA 2005-6960.
- (2) Lee, S. Y. and Shin, Y. H., 2011, "Experimental Study on Effect of Electrode Material and Thickness in a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator Performance," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 15, No. 3, pp. 46~50.
- (3) Shin, S. M., Kim, Y. J., Kim, J. S., Choi, J. H., and Choi, W. H., 2014, "A Study of The Surface Dielectric Barrier Discharge Design Conditions for Generating Negative Air Ions," Journal of KIIEE, Vol. 28, No. 1, pp. 114~122.
- (4) Corke, T. C., Post, M. L., and Orlov, D. M., 2007, "SDBD plasma enhanced aerodynamics : concepts, optimization and applications," Prog. Aerospace Sci. Vol. 43, No. 7~8, pp. 193~217.
- (5) Forte, M., Jolibois, J., Pons, J., Moreau, E., Touchard, G., and 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," AIAA Flow Control Conference, San Francisco, California, AIAA 2006-2863.
- (6) Flint O. T., Corke, T. C., Iqbal, M., Kozlov, A., and Schatzman, D., 2009, "Optimization of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Active Aerodynamic

- Flow Control,” AIAA Journal, Vol. 47, No. 9, pp. 2169~2178.
- (7) Opaitis, D. F., Neretti, G., Likhanskii, A. V., Zaidi, S., Shneider, M. N., and Miles, R. B. 2007, “Experimental Investigation of DBD Plasma Actuators Driven by Repetitive High Voltage Nanosecond Pulses with DC or Low-Frequency Sinusoidal Bias,” AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference, Miami, Florida, AIAA 2007-4532.
- (8) Enloe, C. L., McLaughlin, T. E., VanDyken, R. D., and Kachner, K. D., 2004, “Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator: Geometric Effects,” AIAA Journal, Vol. 42, No. 3, pp. 589~594.
- (9) Yun, S. H., Kwon, H. B., and Kim, T. G., 2012, “Study on Characteristics of DBD Plasma Actuator as Design Parameters for Plasma Flow Control,” Journal of KSAS, Vol. 40, No. 6, pp. 492~498.