

## 論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.6.492>

# 플라즈마 유동제어를 위한 DBD 플라즈마 액츄에이터의 설계변수에 따른 특성 연구

윤수환\*, 권혁빈\*, 김태규\*\*

## Study on Characteristics of DBD Plasma Actuator as Design Parameters for Plasma Flow Control

Su Hwan Yun\*, Hyeok Bin Kwon\* and Taegy Kim\*\*

### ABSTRACT

Characteristics of DBD(Dielectric Barrier Discharge) plasma actuator as design parameters were investigated for plasma flow control. Flow velocity and power consumption of the DBD plasma actuator were measured according to the design parameters such as discharge voltage and frequency, gap, width and length of electrode, and the thickness of dielectric barrier. The flow velocity and power consumption increased as the discharge voltage and frequency increased. As the electrode gap increased, the flow velocity increased with decreasing the power consumption, whereas high voltage was required for the plasma discharge. The flow velocity increased as the upper-electrode width decreased, and as the lower-electrode width increased at the constant power consumption. The performance of the DBD plasma actuator can be estimated at the given discharge and geometry conditions.

### 초 록

DBD(Dielectric Barrier Discharge) 플라즈마 액츄에이터의 설계 파라미터에 따른 특성을 연구하였다. 방전전압, 주파수, 전극의 간격, 폭, 길이, 유전체 두께에 따른 DBD 플라즈마 액츄에이터의 유속 및 소모전력을 측정하였다. 방전전압과 주파수가 클수록 유속과 소모전력은 증가하였다. 전극간격은 클수록 소모전력은 감소하면서 유속은 증가하였으나, 플라즈마 방전을 위해 높은 전압이 요구되었다. 상부전극폭은 좁을수록, 하부전극폭은 넓을수록 일정한 소모전력으로 유속을 증가시킬 수 있었다. 주어진 방전조건과 전극형상에서 DBD 플라즈마 액츄에이터의 성능을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

**Key Words** : Plasma flow control(플라즈마 유동제어), Dielectric barrier discharge(유전체장벽방전), Plasma Actuator(플라즈마 구동기)

### 1. 서 론

플라즈마는 국부적으로 전기적인 극성을 갖는 이온화된 기체가 존재하는 상태를 말하며, 고체,

† 2012년 3월 23일 접수 ~ 2012년 5월 25일 심사완료

\* 한국철도기술연구원

\*\* 정희원, 조선대학교 항공우주공학과  
교신저자, E-mail: taegy@chosun.ac.kr  
광주광역시 동구 서석동 375

액체, 기체 상태와 구분되기 때문에 플라즈마를 제 4의 상태라고 부르고 있다. 자연현상에서 관찰되는 플라즈마는 번개, 오로라, 태양 등이 있으며, 인공적인 방법으로는 방전(Discharge)을 통해 플라즈마를 발생시킬 수 있다. 방전 형태와 특성에 따라 다양한 플라즈마를 발생시킬 수 있는데, 압력조건에 따라 진공 및 상압 플라즈마가 있고, 전원장치종류에 따라 직류(DC), 교류(AC), RF, Microwave 플라즈마가 있으며, 1000K 내외의 가

스온도를 기준으로 고온 및 저온 플라즈마로 분류된다. 아크(Arc)와 같이 가스 및 전자온도가 동시에 높은 플라즈마를 고온 플라즈마로 분류하고, 글로우(Glow) 방전과 같이 가스온도는 낮으나 전자온도는 높은 경우를 저온 플라즈마로 분류하고 있다.

플라즈마는 이온(Ion), 라디칼(Radical), 들뜬 분자(excited molecule) 등을 발생시켜 매우 빠른 화학반응을 가능케 하기 때문에 가스처리, 연료 개질에 주로 활용되고 있다. 최근에는 가속된 플라즈마 입자와 가스의 충돌을 통해 유동을 제어할 수 있는 기법이 개발되어 경계층제어, 표면 마찰저감 등에 플라즈마를 이용하기 위한 노력들이 활발히 진행되고 있다[1].

플라즈마 유동제어의 기본적인 원리는 플라즈마가 발생되면 양이온은 전기장의 방향으로 전자는 전기장의 반대방향으로 가속한다. 이때 전자는 중성입자와 충돌하면서 드리프트(Drift)함으로써 플라즈마 내에서 전류가 흐르는데, 이와 같은 전기장 드리프트에서 전하  $e$ 를 갖는 이온의 운동량을 이용하여 유동의 운동량을 변화시킬 수 있다. 즉, 플라즈마를 발생시키면 전극사이에서 이동하는 이온과 가스분자와의 충돌로 인해 물체력(Body force)이 발생되고, 이로 인해 유발되는 유동을 “전기바람(Electric wind)” 또는 “이온바람(Ionic wind)”이라고 부른다[2]. 이러한 전기바람을 이용하여 경계층 천이지연, 와류생성, 표면마찰저감 등에 이용할 수 있다. 일반적으로 이와 같은 플라즈마의 원리를 이용한 전기바람 발생장치를 “플라즈마 액츄에이터”라고 부른다. 특히 상온, 상압에서 글로우 방전을 발생시키는 DBD(Dielectric Barrier Discharge) 플라즈마 액츄에이터를 유동제어에 주로 활용하고 있다.

기존 능동유동제어방식에 비해 DBD 액츄에이터는 상온, 상압에서 발생하는 글로우 방전을 사용하여 소모동력이 작고, 구동부가 없어 수명이 길고, 유지보수가 편리하며, 높은 동적특성을 가지고, 장착성이 용이하며, 컴팩트한 장점이 있다[8]. 이러한 장점 때문에 선박, 철도, 항공기 등의 연료절감을 위한 공기저항저감 방안으로 활발히 연구되고 있다.

DBD 플라즈마를 이용한 유동제어는 최근 주목받기 시작한 기술로 주로 가능성 탐색이나 기초적인 연구가 수행되고 있다. H. Velkoff 등[3]과 F.O. Thomas 등[4]은 평판과 실린더를 지나가는 유속에 대한 플라즈마 유동제어를 통해 표면 마찰항력 저감과 유동박리 제어에 대한 연구를 각각 수행하였다. J.R. Roth [5]는 항공분야에 적

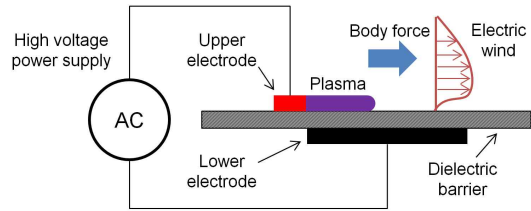


Fig. 1. DBD 플라즈마 액츄에이터 작동원리

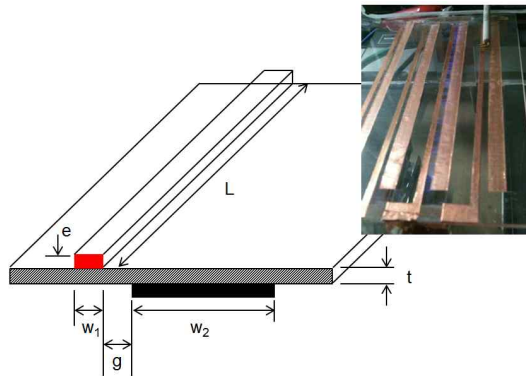


Fig. 2. DBD 액츄에이터 설계 파라미터

용하기 위해 플라즈마 유동제어를 통한 에어포일 공력성능향상 연구를 수행하였으며, C. Thomsa 등[6]은 터빈 블레이드의 유동박리제어를 위해 플라즈마 액츄에이터를 이용하였다.

DBD 플라즈마 유동제어 성능은 DBD 액츄에이터의 형상적인 설계변수와 방전조건에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있으나, 이에 대한 설계 파라미터 연구가 부족하여 유동제어 성능을 예측하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 DBD 액츄에이터에 대한 설계 파라미터를 분석하고 성능시험을 수행하였다.

## II. 실험

### 2.1 DBD 액츄에이터 설계

플라즈마 유동제어를 위한 DBD 액츄에이터의 작동원리는 Fig. 1과 같다. 유전체장벽(Dielectric barrier)을 기준으로 윗면과 아랫면에 비대칭적으로 전극이 각각 위치하게 되고, 전극 사이에 플라즈마가 형성되면 상부전극에서 하부전극 방향으로 물체력이 발생된다[7].

DBD 액츄에이터의 성능은 방전전압, 전원종류(DC 혹은 AC), 전압파형, 주파수와 같은 방전조

Table 1. DBD 액츄에이터 전극형상변수

전극형상	기호	수 치
전극두께( $\mu\text{m}$ )	$t_e$	80
상부전극폭(mm)	$w_1$	1 ~ 10
하부전극폭(mm)	$w_2$	2 ~ 10
전극간격(mm)	$g$	0 ~ 5
전극길이(mm)	$l$	35 ~ 110
유전체두께(mm)	$t_b$	2 ~ 4

Table 2. DBD 액츄에이터 방전조건

방전조건	기호	수 치
방전전압(kV)	$V$	5 ~ 20
방전전류(mA)	-	0 ~ 20
전압파형	-	Sine
주파수(kHz)	$f$	0.5 ~ 5.0

건과 전극간격, 전극크기, 유전체 두께와 같은 전극형상에 크게 의존한다. 전극형상에 따른 성능시험을 위해 Fig. 2와 같은 DBD 액츄에이터를 설계하였고, Table 1에 전극형상변수를 나타내었다. Table 2에는 DBD 액츄에이터 성능시험을 위한 방전조건을 나타내었다. 본 연구에서는 전극으로  $80\mu\text{m}$  두께의 구리 테이프를 사용하였고, 유전체로는 아크릴을 사용하였다.

### 2.2 DBD 액츄에이터 성능시험

Fig. 3과 같이 DBD 액츄에이터의 설계 파라미터 분석을 위한 성능시험 장치를 구성하였다. 외부유동에 의한 영향을 최소화하기 위해 아크릴 박스 내부에 DBD 액츄에이터를 장착하였으며, 열선 풍속계(IHW-100)를 이용하여 유속을 측정하였다. 열선 탐침의 이동을 위해 2축 이송장치를 이용하였고, x-y축에 따른 유속 프로파일을 측정하였다. 플라즈마가 탐침으로 방전되는 것을 방지하기 위해 DBD 액츄에이터 후방(x축) 10mm 이후에서 유속을 측정하였고, DBD 액츄에이터 바닥면( $y=0\text{mm}$ )을 기준으로 수직방향(y축) 5mm까지 유속을 측정하였다. 유속은 5회 반복 측정된 값을 평균하여 제시하였다.

플라즈마 발생을 위해 고전압 증폭기(Trek

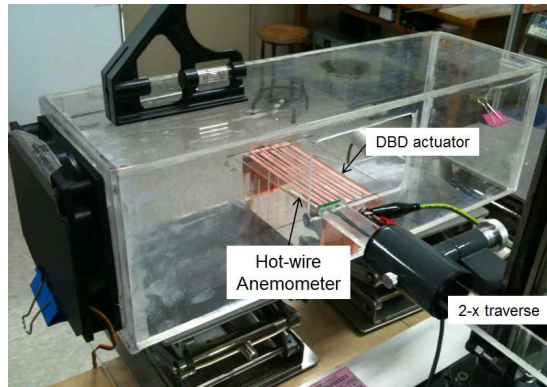
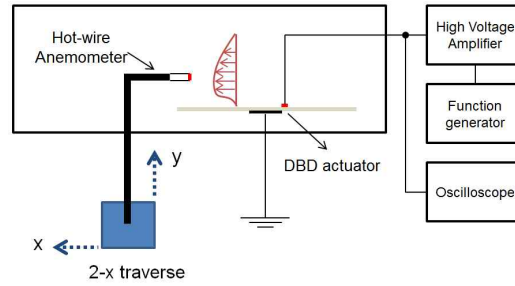


Fig. 3. DBD 액츄에이터 설계 파라미터 분석을 위한 성능시험장치의 개략도 및 제작된 사진

20/20C)를 사용하였으며, 전압, 주파수, 파형은 함수발생기(Agilent 33220A)를 통해 제어하였다. DBD 액츄에이터의 방전전압과 전류측정을 위한 센서를 장착하였고, 오실로스코프(LeCory)를 통해 측정하였다.

## III. 결과 및 토론

### 3.1 방전조건에 따른 DBD 액츄에이터의 유속발생 성능

동일한 전극형상에서 방전조건에 따른 DBD 액츄에이터의 성능시험을 수행하였다. Fig. 4는 방전전압 및 주파수에 따른 DBD 액츄에이터의 y축 방향 유속 프로파일을 보여주고 있다. 유속 프로파일을 보면 모든 방전전압 및 주파수 조건에서 바닥면 근처( $y=1\sim 1.5\text{mm}$ )에서 가장 유속이 빠르며 상부로 갈수록 유속이 낮았다. 이는 기존 문헌[2]과 동일한 결과이며, 유동해석 결과와도 일치하였다[9].

방전전압이 증가할수록 방전강도가 커지면서 유속이 증가하지만, 5.5kV에서 최대 유속을 보였

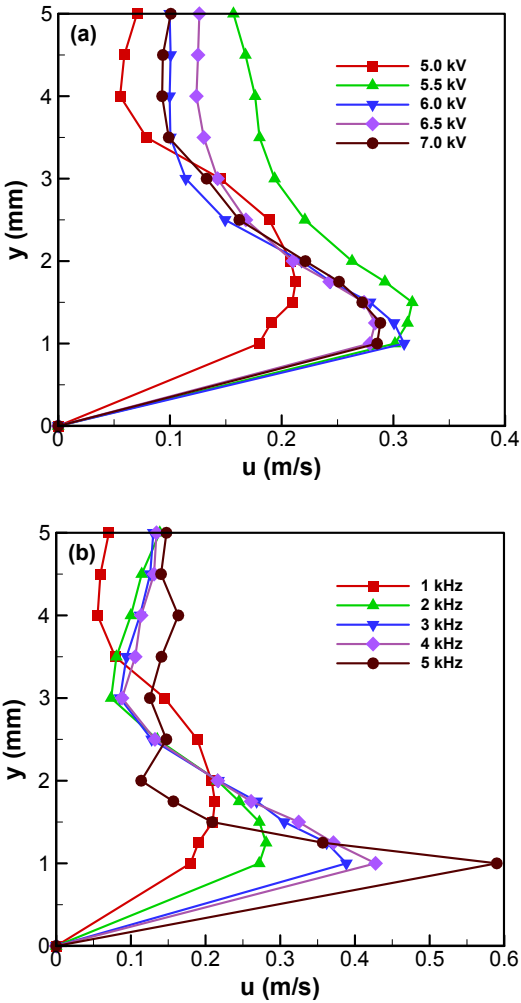


Fig. 4. DBD 액츄에이터의 유속 프로파일 ( $w_1=2\text{mm}$ ,  $w_2=5\text{mm}$ ,  $g=0\text{mm}$ ,  $l=110\text{mm}$ ,  $t_b=2\text{mm}$ ); (a) 방전전압 변화 ( $f=1\text{kHz}$ ), (b) 방전주파수 변화 ( $V=5\text{kV}$ )

으며, 그 이상의 전압에서는 더 이상 유속이 증가되지 않았다. 더 높은 방전전압에서는 하부전극에서 상부전극으로의 역방전으로 인해 모멘텀 손실을 초래하기 때문으로 판단된다. 따라서 이 전극구조에서는 5.5kV가 가장 이상적인 방전전압 조건이다.

반면 방전주파수가 1kHz에서 5kHz로 증가할수록 유속은 0.21m/s에서 0.52m/s로 2.5배 증가하였다. 방전주파수는 시간당 방전횟수를 의미하고, 방전횟수가 증가할수록 방출된 전자와 기체와의 충돌횟수가 증가함을 의미하므로, 방전주파

수가 증가할수록 더욱 큰 모멘텀을 발생하여 유속이 증가하게 된다.

Fig. 5는 DBD 액츄에이터의 방전전압에 따른 최대유속 및 소모전력을 보여주고 있다. Fig. 4에서는 최대유속이 발생하는 방전전압이 5.5kV로 낮기 때문에 최대유속이 0.32m/s로 매우 낮았다. 유속을 더욱 증가시키기 위해서는 높은 방전전압에서 역방전이 발생되지 않도록 전극간격을 증가시킬 필요가 있다. 따라서 본 실험에서는 1mm의 전극간격에서 실험을 수행하였다. 이때 방전에 필요한 최소전압은 6kV였다.

방전전압이 높을수록 유속은 지수함수로 증가함을 알 수 있으며, 15kV에서 유속은 3.9m/s였다. 방전전압이 증가할수록 전극사이에 전자의 이동이 많아지면서 가스와의 충돌이 증가하여 모멘텀이 커지기 때문에 유속이 증가하게 되며, 전류도 증가하기 때문에 소모전력 또한 증가하여, 최대유속이 발생하는 15kV에서 소모전력은 21.6W였다.

Fig. 6은 DBD 액츄에이터 후류방향(x축)으로 유속의 변화를 보여주고 있다. x축 방향으로 플라즈마 이온이 가속되면서 유속은 증가하였다. 3.9m/s의 최대유속을 보인  $x=20\text{mm}$  지점까지가 플라즈마의 발달영역으로 볼 수 있다. 최대유속 지점 이후에는 이온이 더 이상 가속되지 못하므로 유속은 점차 감소하여  $x=45\text{mm}$  지점에서 유속은 2.2m/s였다.

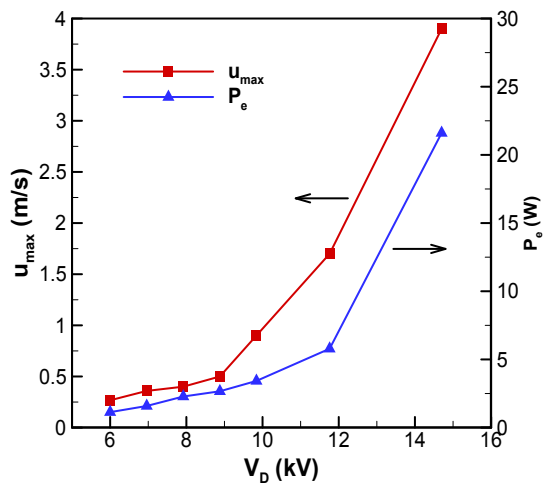


Fig. 5. 방전전압에 따른 DBD 액츄에이터의 최대유속 및 소모전력 ( $w_1=2\text{mm}$ ,  $w_2=5\text{mm}$ ,  $g=1\text{mm}$ ,  $l=110\text{mm}$ ,  $t_b=2\text{mm}$ ,  $f=1\text{kHz}$ )

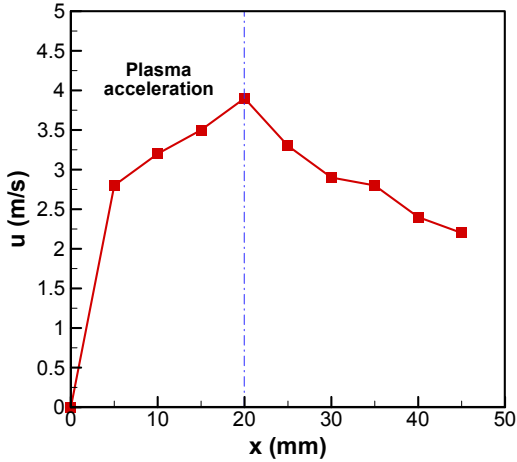


Fig. 6. DBD 액츄에이터 x축 방향으로 유속의 변화( $w_1=2\text{mm}$ ,  $w_2=5\text{mm}$ ,  $g=1\text{mm}$ ,  $l=110\text{mm}$ ,  $t_b=2\text{mm}$ ,  $V=15\text{kV}$ ,  $f=1\text{kHz}$ )

### 3.2 전극형상에 따른 DBD 액츄에이터의 유속발생 성능

Fig. 7은 전극간격에 따른 DBD 액츄에이터의 최대유속 및 소모전력을 보여주고 있다. 다른 전극형상은 동일조건( $w_1=2\text{mm}$ ,  $w_2=5\text{mm}$ ,  $l=110\text{mm}$ ,  $t_b=4\text{mm}$ )이다. 방전전압과 주파수는 15kV와 1kHz로 고정하였다. 전극간격을 1mm에서 5mm까지 증가함에 따라 유속은 1.5m/s에서 2.5m/s로 증가하였다. 이는 전극간격이 커지면 방전에 필요한 더 높은 전압이 요구되지만, 전자의 드리프트에 의한 가스분자와의 충돌에 의한 모멘텀은 더욱 커지기 때문이다. 전극간격이 커짐에 따라 유속이 증가하는 반면, 소모전력은 1.35W에서 1.26W로 오히려 감소하였다. 따라서 전극간격을 크게 할수록 소모전력을 줄이면서 유속을 증대시키는 방안을 알 수 있다. 하지만 전극간격이 클수록 더욱 높은 방전전압이 필요하므로, 적절한 방전전압과 전극간격을 선정해야만 DBD 액츄에이터 효율을 높일 수 있다.

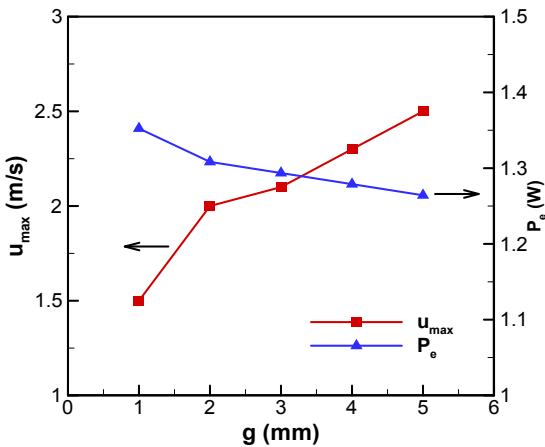


Fig. 7. 전극간격에 따른 DBD 액츄에이터의 최대유속 및 소모전력( $w_1=2\text{mm}$ ,  $w_2=5\text{mm}$ ,  $l=110\text{mm}$ ,  $t_b=4\text{mm}$ ,  $V=15\text{kV}$ ,  $f=1\text{kHz}$ )

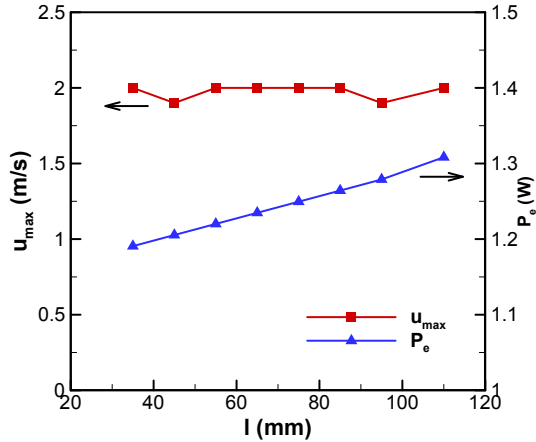


Fig. 8. 전극길이에 따른 DBD 액츄에이터의 최대유속 및 소모전력( $w_1=2\text{mm}$ ,  $w_2=5\text{mm}$ ,  $g=2\text{mm}$ ,  $t_b=4\text{mm}$ ,  $V=15\text{kV}$ ,  $f=1\text{kHz}$ )

Fig. 8은 전극길이에 따른 DBD 액츄에이터의 유속을 보여주고 있다. 다른 전극형상은 동일조건( $w_1=2\text{mm}$ ,  $w_2=5\text{mm}$ ,  $g=2\text{mm}$ ,  $t_b=4\text{mm}$ )이다. 방전전압과 주파수는 15kV와 1kHz로 고정하였다. 기본적으로 전극표면의 거칠기로 인해 코로나형태의 플라즈마가 형성되면서 유속이 증가하는 구간이 존재하였으나, 전극길이를 35mm에서 110mm로 증가하여도 유속은 2m/s로 일정하였다. 이는 플라즈마 방전에 따른 전자방출이 전극 길이 방향에 따라 균일함을 의미한다. 반면 전극이 길어짐에 따라 방출되는 전자의 양도 증가하므로 소모전력은 1.19W에서 1.31W로 일정하게 증가하였다.

Fig. 9는 DBD 액츄에이터의 상부전극폭에 따른 유속을 보여주고 있다. 다른 전극형상은 동일조건( $w_2=5\text{mm}$ ,  $g=2\text{mm}$ ,  $l=110\text{mm}$ ,  $t_b=4\text{mm}$ )이다. 방전전압과 주파수는 15kV와 1kHz로 고정하였다. 상부 전극폭은 10mm에서 4mm까지 좁아질수록 유속은 2m/s에서 2.4m/s로 증가하였으나, 1~4mm 폭에서는 유속은 2.4m/s로 일정하였다.

Fig. 9는 DBD 액츄에이터의 상부전극폭에 따른 유속을 보여주고 있다. 다른 전극형상은 동일조건( $w_2=5\text{mm}$ ,  $g=2\text{mm}$ ,  $l=110\text{mm}$ ,  $t_b=4\text{mm}$ )이다. 방전전압과 주파수는 15kV와 1kHz로 고정하였다. 상부 전극폭은 10mm에서 4mm까지 좁아질수록 유속은 2m/s에서 2.4m/s로 증가하였으나, 1~4mm 폭에서는 유속은 2.4m/s로 일정하였다.

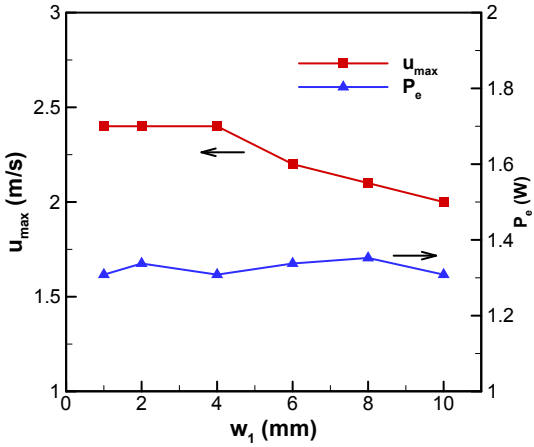


Fig. 9. 상부전극폭에 따른 DBD 액츄에이터의 최대유속 및 소모전력 ( $w_2=5\text{mm}$ ,  $g=2\text{mm}$ ,  $l=110\text{mm}$ ,  $t_b=4\text{mm}$ ,  $V=15\text{kV}$ ,  $f=1\text{kHz}$ )

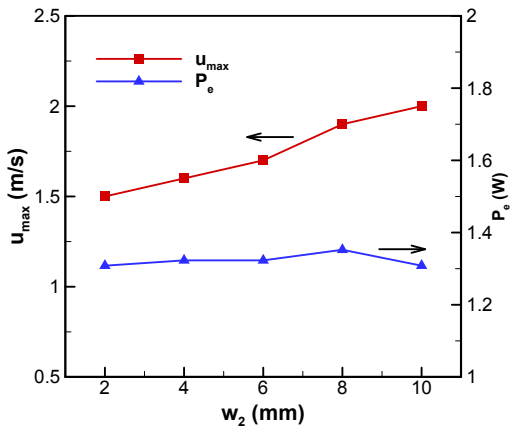


Fig. 10. 하부전극폭에 따른 DBD 액츄에이터의 최대유속 및 소모전력 ( $w_1=2\text{mm}$ ,  $g=2\text{mm}$ ,  $l=110\text{mm}$ ,  $t_b=4\text{mm}$ ,  $V=15\text{kV}$ ,  $f=1\text{kHz}$ )

방전전압과 주파수는 15kV와 1kHz로 고정하였다. 하부전극폭은 2mm에서 10mm로 넓어질수록 유속은 1.5m/s에서 2m/s로 일정하게 증가하였다. 이는 상부전극에서 발생된 플라즈마 이온이 하부전극 방향으로 가속하면서 유동을 발생하기 때문에 하부전극이 넓을수록 유속은 증가하게 된다. 방전에너지는 동일하고 하부전극에서 이온의 가속에 의해 유속이 증가되었기 때문에 하부 전극폭에 따른 소모전력은 평균 13.2W로 일정하였다.

Table 3. 방전조건과 전극형상에 따른 유속과 소모전력과의 관계

설계변수	유속	소모전력
방전전압(V)	▲	▲
방전주파수(f)	△	△
상부전극폭( $w_1$ )	▲	×
하부전극폭( $w_2$ )	△	×
전극간격(g)	▲	▽
전극길이(l)	×	△
유전체두께( $t_b$ )	▼	▼

▲ : 비례관계 매우 큼, △ : 비례관계 큼, × : 관계 없음, ▼ : 반비례관계 매우 큼, ▽ : 반비례관계 큼

위 실험결과로부터 DBD 액츄에이터의 성능은 방전조건과 전극형상에 크게 영향을 받음을 알 수 있었다. 최적의 DBD 액츄에이터를 설계하기 위해서는 정해진 전압에서 방전이 가능한 전극간격을 결정하고 소모전력을 최소화할 수 있는 전극형상을 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. DBD 액츄에이터의 성능시험 결과로부터 Table 3에 방전조건과 전극형상에 따른 유속과 소모전력과의 관계를 정리하였다.

#### IV. 결 론

플라즈마 유동제어를 통한 공기저항저감을 위해 DBD 플라즈마 액츄에이터의 설계 파라미터를 분석하고, 방전조건과 전극형상변수에 따른 DBD 플라즈마 액츄에이터의 성능평가를 수행하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1)  $g=1\text{mm}$  조건에서 방전전압과 주파수가 클수록 방전에너지가 커지므로 유속이 증가하였다. 반면 소모전력도 함께 증가한다.  $V=15\text{kV}$ ,  $f=1\text{kHz}$  조건에서 최대 3.9m/s의 유속을 발생하였다.
- (2) 전극간격은 클수록( $1 < g < 5\text{mm}$ ) 낮은 소모전력으로 유속을 증가시킬 수 있었으나, 높은 방전전압이 요구된다.
- (3) 상부전극폭( $1 < w_1 < 10\text{mm}$ )은 좁을수록 전자

가 강하게 방출되면서 유속은 증가한다. 반면 하부전극폭( $2 < w_2 < 10\text{mm}$ )은 넓을수록 플라즈마의 가속이 지속되기 때문에 유속은 증가한다.

- (4) 전극길이( $35 < w_1 < 110\text{mm}$ )와 유속과의 상관관계는 없었으며, 전극길이가 길수록 방전량이 증가하므로 소모전력은 증가한다.

도출된 DBD 플라즈마 액츄에이터의 설계 파라미터 연구결과는 공기저항저감을 위한 플라즈마 유동제어 시스템을 설계하기 위한 기본 데이터로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 한국철도기술연구원의 '레일방식 초고속철도(500kph급 이상) 핵심기술 개발'과 국토해양부 미래철도기술개발사업의 차세대고속철도 기술개발사업 '분산형 고속철도 시스템 엔지니어링 기술개발'의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 1) E. Moreau, "Airflow control by non-thermal plasma actuators," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 40, 2007, pp. 605-636.
- 2) J. Pons, E. Moreau and G. Touchard, "Asymmetric surface dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: electrical properties and induced airflow characteristics," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 38, 2005, pp. 3635-3642.
- 3) H. Velkoff and J. Ketchman, "Effect of an electrostatic field on boundary layer transition," AIAA J., Vol. 16, 1968, pp. 1381-3.
- 4) F.O. Thomas, A. Kozlov and T.C. Corke, "Plasma actuators for bluff body flow control," AIAA Meeting (San Francisco, USA, June 2006), paper #2006-2845.
- 5) J.R. Roth, "Aerodynamic flow acceleration using paraelectric and peristaltic electrohydrodynamic effects of a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma," Phys. Plasmas, Vol. 10, 2003, pp. 2117-2126.
- 6) Thomas C. Corke, Flint O. Thomas, and Junhui Huang, "Documentation and Control of Flow Separation on a Low Pressure Turbine Linear Cascade of Pak-B Blades Using Plasma Actuators," NASA Technical Report, NASA/CR-2007-214677.
- 7) C. Kwing-So, T. Jukes and R. Whalley, "Turbulent boundary-layer control with plasma actuators," Phil. Trans. R. Soc. A, Vol. 369, 2011, pp. 1443-1458.
- 8) C. Young-Chang and S. Wei, "Adaptive flow control of low-Reynolds number aerodynamics using dielectric barrier discharge actuator," Progress in Aerospace Sciences, Vol. 47, 2011, pp. 495-521.
- 9) 이창욱, 윤수환, 김태규, "플라즈마 유동제어를 위한 DBD 액츄에이터 해석 및 성능평가," 한국추진공학회 2012년도 춘계학술대회 논문집, 2012, pp. 290-293.