

## 실린더 내부 유전체 장벽방전에 의해 발생된 추력 측정

주찬규<sup>1\*</sup> · 김종훈<sup>1\*\*</sup> · Michiko Ahn Furudate<sup>1,†</sup><sup>1</sup>충남대학교 메카트로닉스공학과Measurement of Thrust Induced  
by the Dielectric Barrier Discharge in Cylinder PipesChan Kyu Joo<sup>1,\*</sup>, Jong Hoon Kim<sup>1,\*\*</sup> and Michiko Ahn Furudate<sup>1,†</sup><sup>1</sup>Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

## Abstract

Thrust force induced by the dielectric barrier discharge inside of cylinder pipes is measured for various conditions. The input peak-to-peak voltage and frequency are varied from 2 to 9 kVpp and from 5 to 15 kHz, respectively. The height of cylinder is varied from 50 to 100 mm. The results of the measurements show that the magnitude of the generated thrusts increases as the voltage and the frequencies increase. It also shows that the generated thrusts are decreased according to the increase in the height of the cylinder. The cause of the thrust decrease is discussed in terms of energy losses due to the frictions on the wall surface.

## 초 록

유전체 장벽방전에 의해 발생하는 추력을 실린더 형상의 파이프 내부에서 여러 조건에 대해 측정하였다. 입력 전압 및 주파수는 각각 2에서 9 kVpp 및 5에서 15 kHz를 적용하였으며, 높이가 50 mm부터 100 mm 범위의 실린더에 대해 실험을 수행하였다. 측정 결과에 따르면, 발생된 추력의 크기는 전압 및 주파수를 증가시킬 경우 각각 증가하였으나 실린더의 높이가 증가하면 감소하였다. 실린더 높이가 증가할 때 발생된 추력의 감소는 벽면과의 마찰로 인한 유동의 에너지 손실이 원인이지만, Coandă 효과의 감소 등 그 외의 추가적인 원인이 있다고 추정된다.

**Key Words:** Dielectric Barrier Discharge (유전체장벽방전), Thrust Measurement (추력측정), Flow control (유동제어)

## 1. 서 론

Dielectric Barrier Discharge (DBD)는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 전극 사이를 유전체로 절연하여 전극에 교류전압을 인가하면, 어떤 전압 이상에서 절연과파괴가 일어나 방전이 되는 현상이다. 이때, 전극 주위의 기체 분자가 전극에서 방출된 전하 입자와 충돌로 인해 이

온화 하며 플라즈마 영역이 생성된다. 이 플라즈마에서 하전입자들이 전극간의 전압으로 가속되며 중성 입자와 충돌을 통해 유체역학적인 운동량, 즉, 유동이 유도된다. 이 성질을 이용하기 위하여 물체표면에 전극을 붙인 후 경계층 유동에 DBD 플라즈마를 발생시켜 발생된 운동량으로 박리를 방지 하는 등, DBD 플라즈마를 이용한 유동 제어에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다<sup>1,2)</sup>. 이러한 DBD 플라즈마를 이용한 유체제어 디바이스를 DBD Plasma Actuator (DBD-PA)라고 한다.

Received: Nov. 17, 2017 Revised: Dec. 22, 2017 Accepted: Dec. 28, 2017

† Corresponding Author

Tel: +82-42-821-7789, E-mail: [furu@cnu.ac.kr](mailto:furu@cnu.ac.kr)

© The Society for Aerospace System Engineering

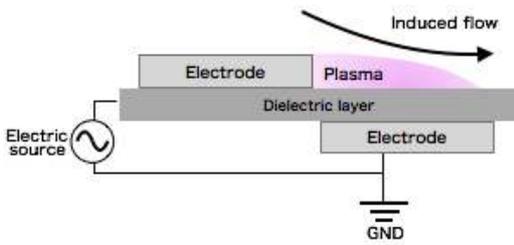


Fig. 1 Schematic of DBD-PA

전통적으로 유동 제어는 항공기 에어포일의 플랩 등 기계적인 가동부를 가지는 디바이스를 이용하는 경우가 많았다.<sup>3,4)</sup> 이에 반해, DBD-PA는 기계적인 구조가 없어 제작성 관점에서 조립이 용이하고, 유동 방향으로 설치할 수 있어 유동과 수직한 표면에 설치되는 플랩 등과 같은 일부 기계적 디바이스에 비해 역학적 강도 요건이 많이 완화될 수 있으며, 또한 어떤 형상의 물체에서도 대응이 쉽다는 장점을 가지고 있다. 반면, 작동의 물리적인 원리에는 아직 불명확한 점도 있고, 또, 입력 에너지 대비 제어 효과의 효율이 낮다는 문제 등 실용화에는 해결해야 하는 과제가 많다.

DBD-PA의 실용화를 위해서는 수많은 조건에 대한 경제적 해석이 가능한 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics, CFD)이<sup>5,6)</sup> 필수적이다. CFD를 이용해 DBD-PA에서 유도된 유동의 영향을 해석 할 때는, 일반 유동의 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식에 외력항을 추가하여 DBD-PA가 유체에 줄 체적력을 모델링한다<sup>7,8)</sup>. 이 때, 외력항 모델에 포함되는 전기장과 관련된 계수는 실험으로 측정된 체적력으로 적용하는 경우가 대부분이다. 예를 들어, Suzen이 제안한 모델은 플라즈마로 인한 체적력을 전하 밀도와 전자장의 곱으로 나타내는데 이 전하밀도를 실험결과로부터 결정한다.<sup>7)</sup> 따라서, 여러 형상과 해당 형상에서 여러 조건에 대해 DBD-PA가 발생시키는 체적력을 측정할 필요가 있으며, 측정결과의 확보는 DBD-PA를 실용화하는데 큰 도움이 될 것이다. 현재까지 많은 연구자들이 외부 유동에 대한 체적력 측정을 수행한 바 있다<sup>9,10)</sup>. 내부 유동에 대한 측정은 비교적 한정적인데, DBD-PA를 이용한 내부 유동제어는 물체가 주위의 유동에서 받은 힘의 제어 뿐 아니라, 관 내부에서 여러 종류의 기체 혼합을 촉진하는 방법 등 여러 응용이 기대가 된다.

따라서 본 연구에서는, 실린더 내부 유동을 발생시켜 측정한다. 이를 위해 DBD-PA를 실린더 내부에 부착하고, 전압을 가할 때 발생하는 체적력, 즉 추력을 측정한다. 다양한 인가 전압, 주파수 및 실린더 높이에 대하여 발생 추력의 변화를 측정하고 고찰하고자 한다.

## 2. 실험 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 2은 본 연구에 사용한 DBD 플라즈마 유도 유동의 추력 측정 장치의 개념도를 나타낸다. 고전압 공급기에 연결된 플라즈마 발생 장치를 정밀 저울위에 설치하여 플라즈마 발생 시의 하중의 시간에 따른 변화를 컴퓨터에 저장하였다. 고전압 공급기는 PSI사의 PSI-PG1040F를, 정밀저울은 A&D사의 GF600를 사용하였다. 장비 측정부의 외관을 Fig. 3에 나타낸다. 플라즈마 발생장치의 실험모형은 아크릴제 받침에 부착하여 계량대 위에 설치하였다. 실험장비 주위의 공기유동이 실험에 주는 영향을 줄이기 위해 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 저울 및 플라즈마 발생 장치를 방풍 케이스로 반 밀폐된 공간 내에 설치하여 실험을 수행하였다.

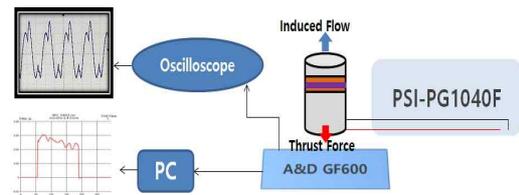
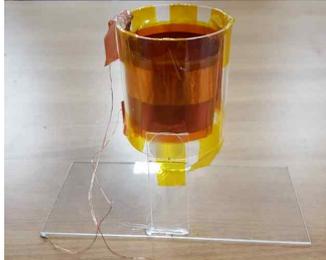
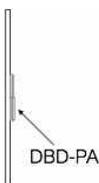
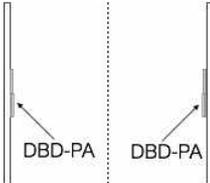
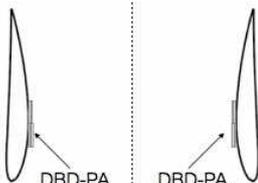


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus



Fig. 3 Experimental apparatus

**Table 1** 본 연구에 사용한 플라즈마 발생 장치

	모형1	모형2-1/2-2/2-3	모형 3
폭 / 내경	220	60	60
높이	100	50/75/100	50
전극 길이	188	183	183
사진			
모형단면도			

로 변환한 후 전극의 길이로 나누어서 전극 단위 길이 당의 추력으로 평가를 한다.

**2.2 실험모형**

본 연구에서는 전극 및 부착부의 모양에 따른 유도 추력의 차이를 알아내기 위해 Table. 1에 제시한 바와 같이 세 개의 형상의 실험 모형을 사용하였다. 모형 1은 아크릴제 평판에 150 mm 길이의 전극을 부착하였으며, 모형 2 시리즈는 아크릴제 실린더 내부에 모형 1과 동일한 길이의 전극을 부착하였다. 원통의 내경은 60mm이며 동일한 내경에서 높이가 50, 75 및 100mm를 가진 모형이 각각 모형 2-1, 2-2, 및 2-3이다. 모형 3은 NACA4412 에어포일을 축방향으로 회전시킨 형상의 실린더 내부에 전극을 부착하였다. 모형 3의 최소 내경은 60 mm이고, 실린더 입구 및 출구 내경은 약 70 mm이다. 전극은 모든 모형에 공통적으로 폭이 20 mm의 구리 테이프를 사용하였으며, 유전체로서 전극 사이에 폴리이미드 테이프를 10층으로 적층하여 사용하였다.

**2.3 실험조건**

주파수는 5, 10, 및 15 kHz 각 주파수에서 전압은 2.5 kV부터 9 kV까지 0.5 kV 간격으로 증가 시켰고, 30kHz까지 5kHz 간격으로 증가시켰다. 저울에서 그램단위로 측정된 값은 중력가속도를 곱해서 mN 단위

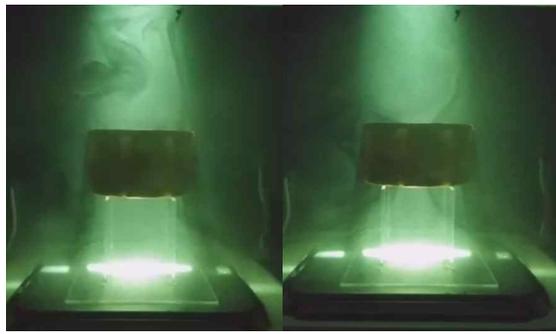
**3. 결 과**

**3.1 DBD로 인해 유도된 흐름의 모양**

Fig. 4는 실험 공간을 스모크로 충전하여, 모형 3의 전극에 전압을 인가한 전후의 실험 공간을 촬영한 사진을 나타낸다. 전압을 인가하기 전에는 무질서하게 분포한 스모크가 전압 인가 시에는 모형의 개구부 중심에 집중하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 전압 인가 시에 모형 내부를 통과하는 흐름이 생성되지만, 전극이 부착되어 있는 모형내부 벽면의 흐름이 중심부 보다 빠르게 흐르는 것으로 판단된다.

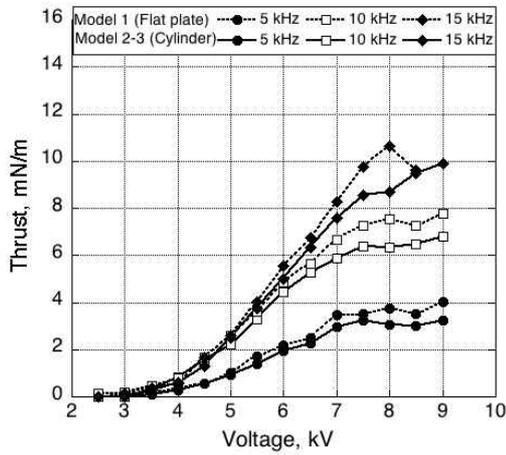
**3.2 평판과 실린더 모형의 발생 추력**

전극 모양에 따른 발생된 추력의 차이를 확인하기 위해, 모형 1과 모형 2에 대한 추력측정 결과를 Fig. 5에서 비교하였다. 모형 1 및 모형 2-1에서는 전압 및 주파수의 증가에 따라 발생 추력이 증가되는 공통적인 경향이 확인 되었다. 동일한 주파수 조건에서 비교를 하면 전압이 7 kV<sub>pp</sub> 이하인 경우에는 모형에 따

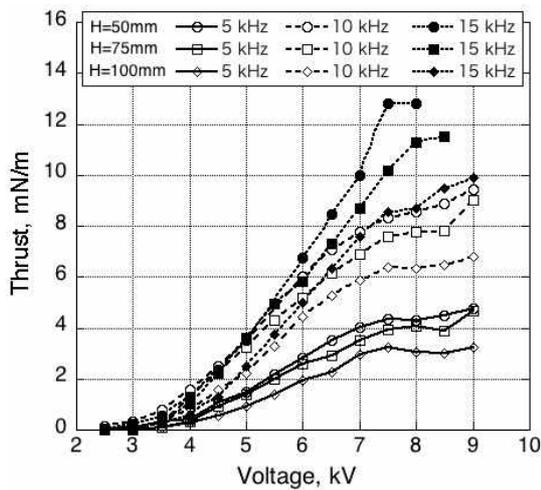


(a) DBD off (No flow)      (b) DBD on (Induced flow)

**Fig. 4** Visualized flowfield induced by DBD-PA inside Model 3



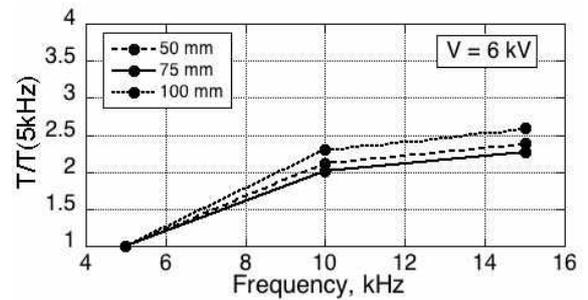
**Fig. 5** Comparisons of measured thrusts for Model 1 and Model 2-3.



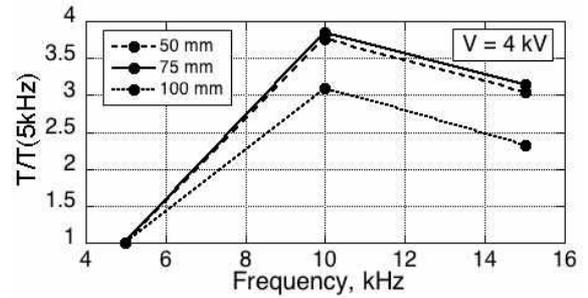
**Fig. 6** Comparisons of measured thrusts for Model 2.

른 발생 추력의 차이는 거의 보이지 않았다. 인가 전압이 7 kV<sub>pp</sub>보다 큰 경우에는 평판에 전극을 부착한 모형 1의 추력이 실린더 내부에 전극을 부착한 모형 2보다 큰 추력이 측정 되었다.

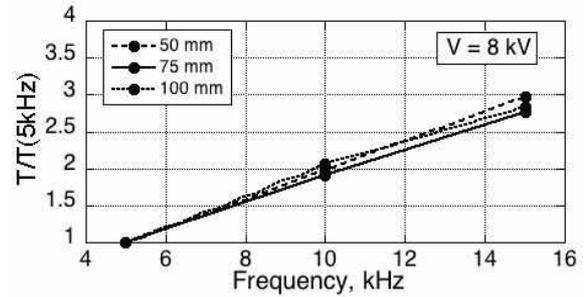
정밀저울의 최소표시가 1 mg 인 것을 감안 하면 약 ±0.0261 mN/m의 불확실성을 가지므로, 본 실험의 측정오차는 측정 추력이 1 mN/m일 때 최소 약 ±2.61 %, 5 mN/m일 때 최소 약 ±0.52 %으로 추정 된다.



(a) 4 kV



(b) 6 kV



(c) 8 kV

**Fig. 7** Normalized thrusts variation of Model 2 as a function of frequency.

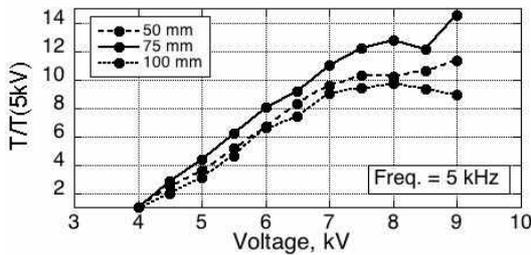
### 3.3 실린더 모형의 발생 추력

같은 내경을 가지고 높이가 다른 모형 2-1, 2-2 및 2-3의 3개의 실린더 모형에 대해 측정된 추력을 Fig. 6에 나타낸다. 모든 모형에서 전압에 증가에 따라, 또 주파수의 증가에 따라 추력이 증가함을 확인 하였다. 전반적으로 실린더의 높이가 작아지면 추력이 커지는 경향도 보였다.

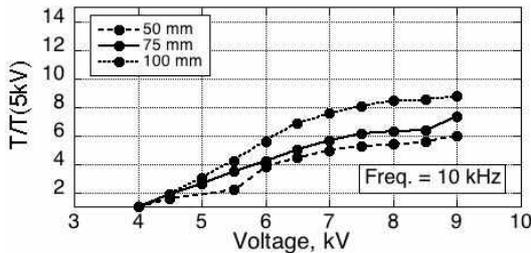
일정한 전압에서 주파수 5 kHz일 때의 값으로 무차원화 한 추력의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 전압이 4 kV일 때는 주파수가 5에서 10 kHz로 증가 했을 때 추력이 증가하였으나, 10에서 15kHz로 증가했을 때는 추력이 감소하였다. 전압이 6 kV<sub>pp</sub>일 때는 주파수의 증가에 따라 단조적으로 증가하되, 그 상승률은 10에서 15kHz로 증가했을 때 5에서 10kHz로 증가 했을 때

보다 작았다. 전압이 8 kV일 때는 주파수가 5에서 15kHz까지 증가함에 따라 선형적으로 증가 하였다. 이런 경향은, 정도에 다소의 차이가 있으나 모든 높이의 모형에서 동일하였다. 이 결과는 주파수 증가에 따라 발생 유동의 최대속도는 점근적으로 증가하며, 에너지 변환효율에 대한 최적 주파수가 존재한다는 Forte의 실험 결론과 일치하며<sup>9)</sup>, 그 최적 주파수는 전압이 높을수록 크다는 것을 시사하고 있다.

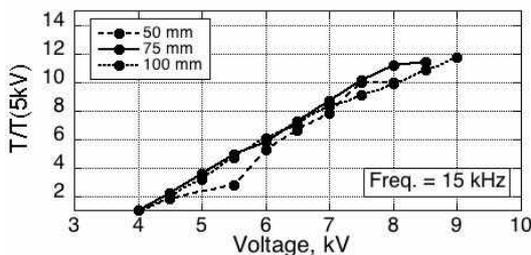
Fig. 8에는 일정한 주파수에서 전압의 변화에 따른 추력의 변화를 나타낸다. 추력은 각 주파수 조건에서 전압을 4 kV일 때의 값으로 무차원화 하였다. 4 kV부터 전압을 증가했을 때, 발생 추력은 모든 주파수에서 처음은 선형적으로 증가하며, 어느 전압 이상에서는 증가율이 감소한다. 이 결과는 전압에서도 또한 발생



(a) 5 kHz

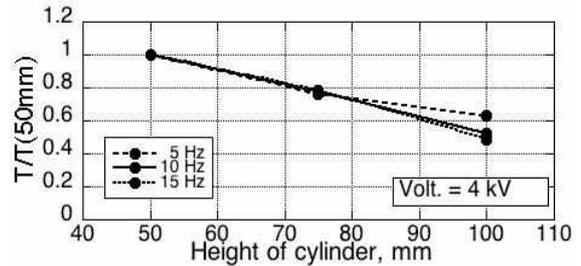


(b) 10 kHz

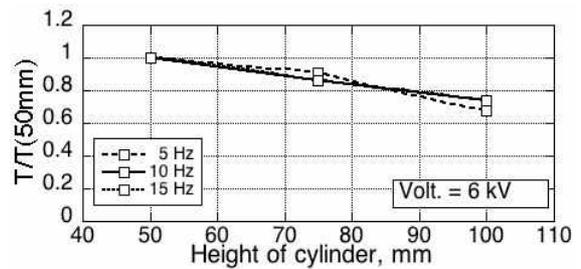


(c) 15 kHz

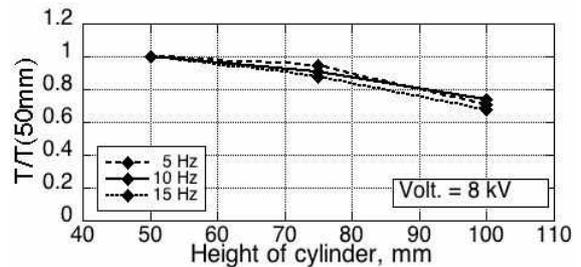
Fig. 8 Normalized thrusts variation of Model 2 as a function of voltage.



(a) 4 kV



(b) 6 kV



(c) 8 kV

Fig. 9 Normalized thrusts variation as a function of cylinder height at fixed voltages

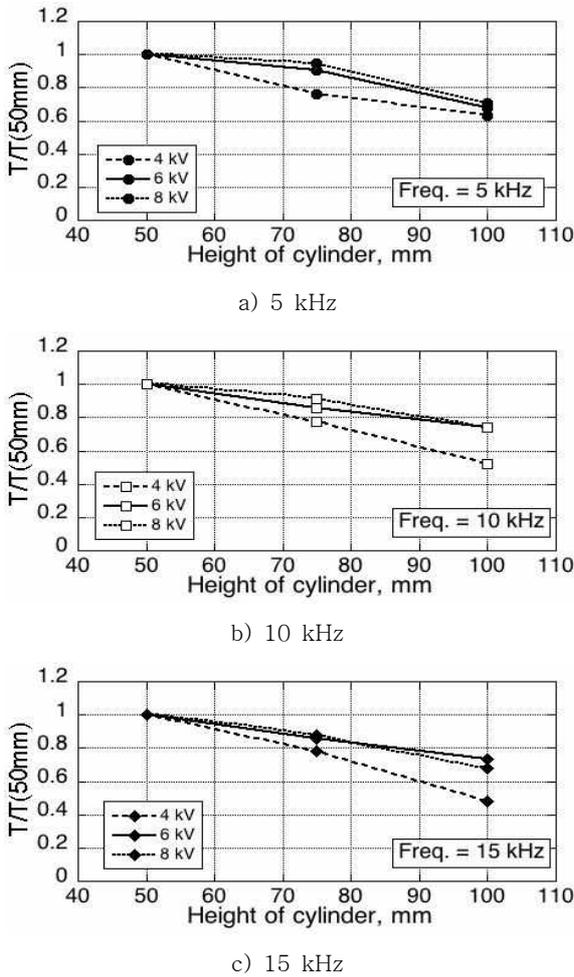


Fig. 10 Normalized thrusts variation as a function of cylinder height at fixed frequencies

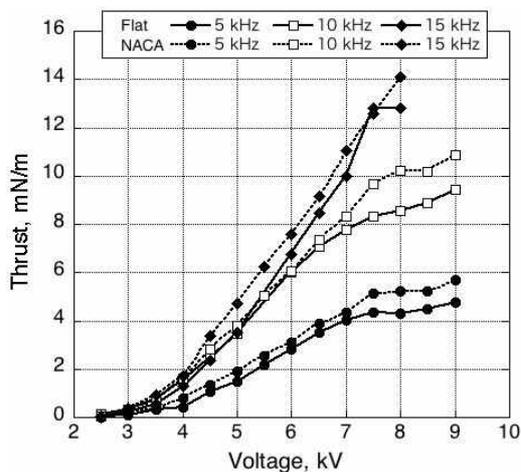


Fig. 11 Comparisons of measured thrusts for Model 2-1 and Model 3.

추력에 대한 최적치가 존재한다는 Forte의 결과와 일치한다<sup>9)</sup>. 또, 주파수가 크면 그 최적치도 커지는 것으로 나타났다. 이런 경향은, 정도에 다소의 차이가 있으나 모든 높이의 모형에서 동일하였다.

Fig. 9에는 일정한 전압에서 실린더 높이의 변화에 따른 추력의 변화를 나타낸다. 추력은 각 전압 조건에서 높이 50mm일 때의 추력 값으로 무차원화 하였다. 발생 추력은 모든 주파수에서 실린더 높이에 따라 감소하였다. 그 감소의 정도는 전압이 크면 작아지는 것으로 측정되었다. Fig. 10에는 일정한 주파수에서 실린더 높이의 변화에 따른 추력의 변화를 나타낸다. 추력은 각 주파수 조건에서 높이 50mm일 때의 추력 값으로 무차원화 하였다. 발생 추력은 모든 전압에서 실린더 높이에 따라 감소하며, 그 감소의 기울기는 모든 주파수 조건에서 큰 차이가 없었다.

실린더 벽 단면의 형상에 따른 발생 추력의 차이를 알아내기 위해, NACA4412 에어포일을 실린더의 축방향으로 회전시킨 형상의 모형 3를 사용해서 측정된 추력을 같은 높이를 가진 실린더인 모형 2-3의 측정값과 Fig. 11에 비교하였다. 전체적으로 모형 3에서 더 강한 추력이 발생됨을 알 수 있다.

#### 4. 고 찰

본 논문의 실험에서는 같은 사이즈의 전극에 동일한 주파수와 전압을 인가해도, 실린더 높이에 증가에 따라 발생 추력이 감소하는 것을 확인 하였다. 그 원인의 하나로 실린더 길이에 증가에 따라 표면마찰에 의한 유도 유동의 압력 손실이 있었기 때문으로 예상된다. 이를 확인하기 위해, 실린더 높이 50 mm인 모형 2-3를 사용한 실험에서 전압 7kV 및 주파수 10kHz 일 때의 유도된 유동에 대해 압력 손실을 계산하였다. 실린더 입구의 속도가 출구 속도에 비해 매우 작으므로 발생 추력은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$T = \rho(V_{out}^2 - V_{in}^2)A \approx \rho V_{out}^2$$

이 식으로 발생된 추력으로부터 실린더 출구의 평균 속도를 계산하면 0.6424 m/s 이다. 이때 측정 추력은 1.430 mN 이며, 공기의 밀도는 1 기압, 온도 15 °C 일 때의 값인 1.225 kg/m<sup>3</sup>를 사용 하였다. 이 흐름의 Reynolds 수는

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu}$$

에서 공기의 점성계수  $1.802 \times 10^{-5}$  kg/m-s 를 사용하여 약 2,600이며, 이는 실린더에서의 난류 천이 임계 Reynolds수 2,300과 비슷하다. 먼저, 층류 유동을 가정할 때 Friction factor  $f$  는

$$f = \frac{64}{Re}$$

에서 0.0244로 계산되며, 압력 손실은

$$\frac{\Delta p}{L} = f \frac{\rho V^2}{2} \frac{1}{D}$$

에서  $\Delta p/L = 0.1029$  Pa/m이고 실린더의 높이가 25 mm 증가하면 압력이 2.575 mPa 감소하는 것으로 나타난다. Bernoulli 방정식에서 중력의 영향을 무시하면 실린더 입구와 출구에서 압력이 대기압에서 동일하므로

$$\Delta p = \frac{\rho \Delta (V^2)}{2}$$

이다. 따라서, 압력 손실에 의해 감소하는 추력은

$$\Delta T = \rho \Delta (V^2) A = 2 \Delta p A$$

에서 0.0145 mN로 추정된다. 만약 난류 유동을 가정하고, 아크릴 벽면의 표면 조도를 무시하면, Colebrook방정식

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} - \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

에서  $f=0.04538$ 로 계산되어, 감소추력은 0.0270 mN로 추정된다. 같은 방법으로 실린더 높이 75 mm인 모형 2-2의 전압 7 kV<sub>pp</sub> 및 주파수 10 kHz인 조건에서는 실린더의 높이가 25 mm 증가하면 추력이 층류 가정 시 0.137 mN, 난류 가정 시에는 0.6798 mN 감소하는 것으로 추정된다.

이 값을 측정치와 Table 2에 비교하였다. 실린더 높이가 증가했을 때, 추력이 마찰로 인해서 감소하는 추정 감소량은 측정값과 동일한 차수범위로 평가 되었다. 하지만 추정 감소량이 측정값보다 작고, 또한 추정 감소량은 실린더 높이 증가에 따라 작아지는 반면 측정값에서는 증가하였다. 이러한 결과는 실린더 높이에 따른 발생 추력의 차이는 마찰로 인한 유동의 에너지 손실에서도 오지만, 다른 원인도 존재할 수 있음을 의미한다. 예를 들어, 노즐에서 제트가 나올 때 제트 주

위에서 공기가 제트에 휩쓸리는 유동이 발생되어 제트의 유량이 증가 하는 현상인 Coandă 효과는 제트의 속도가 높을수록 크다. 본 실험에서는 실린더의 높이가 크면 실린더에서 나오는 제트의 속도가 낮아져 이 Coandă 효과도 약해지며 추력 감소의 원인이 될 가능성이 있다. 또, 본 논문에서는 플라즈마 발생장치의 전극부분의 크기, 소재, 전극 간격 등이 모든 실험 조건에서 동일하므로 발생한 플라즈마의 특성도 동일하다고 가정하였으나, 정밀한 분석을 위해서는 발생한 플라즈마의 특성에 따른 고려도 필요하다. 더욱 자세한 분석은 향후 유동 가시화 실험 및 수치해석 등을 통해 후속 연구로 진행할 예정이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는, 실린더 내부에 DBD-PA를 부착하고, 전압을 인가하였을 때 발생하는 추력을 측정하였다. 일반적으로 인가 전압이 높을수록, 또 인가 전압의 주파수가 높을수록 발생 체적력, 즉 추력이 증가되는 것을 확인 하였다. 동일 조건이더라도 실린더의 높이가 높을수록 발생 추력이 감소되는 것도 확인하였다. 이 추력 감소는 실린더 내부의 유동이 벽면과의 마찰로 인한 에너지 손실이 원인이지만, Coandă 효과의 감소 등 그 외의 추가적인 원인이 있다고 추정된다. 추가적인 가시화 실험 및 CFD를 이용한 유동해석을 통해 더 자세한 후속 연구를 진행하여 추력 발생 메카니즘을 규명하면, 같은 소비 전력으로 발생한 추력을 높일 수 있는 디바이스 개발에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

**Table 2** Measured and calculated thrust differences

Height mm	$T$ mN	$\Delta T_{ex}$ mN	$\Delta T_{vis lam}$ mN	$\Delta T_{vis turb}$ mN
50	1.430	0.164	0.0145	0.0270
75	1.266			
100	1.077	0.189	0.0137	0.0244

## 후 기

This study was financially supported by research fund of Chungnam National University in 2015.

## References

- [1] Y. Sung, W. Kim, M. G. Mungal, and M. A. Cappelli, "Aerodynamic modification of flow over bluff objects by plasma actuation," *Experiments in Fluids*, vol. 41, no. 3, pp. 479-486, Aug. 2006.
- [2] K.-S. Choi, T. Jukes, and R. Whalley, "Turbulent boundary-layer control with plasma actuators," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 369, no. 1940, pp. 1443-1458, Apr. 2011.
- [3] W.-R. Shim, E.-J. Park, K.-D. Kim, Y.-S. Kim, S.-H. Park, J.-H. Roh, "Design of flap devices driven by SMA spring actuators," *Jouranl of Aerospace System Engineering*, Vol.4, No.4, pp.11-17, December, 2010.
- [4] .Y. Park\*, H. Kang\*\*, J. Chung\*, H.-C. Lee, "Optimization of Flap Shape and Position for Two-dimensional High Lift Device," *Jouranl of Aerospace System Engineering*, Vol.7, No.3, pp.1-6, September, 2013.
- [5] .A. V. Likhanskii, M. N. Shneider, S. O. Macheret, and R. B. Miles, "odeling of dielectric barrier discharge plasma actuator in air," *Journal of Applied Physics*, vol. 103, no. 5, p. 053305, Mar. 2008.
- [6] D. P. Rizzetta and M. R. Visbal, "Large Eddy Simulation of Plasma-Based Control Strategies for Bluff Body Flow," *AIAA Journal*, vol. 47, no. 3, pp. 717-729, Mar. 2009.
- [7] Y. Suzen and G. Huang, "Simulations of Flow Separation Control using Plasma Actuators," *AIAA paper 2006-877*, 2006.
- [8] D. Guillaume and R. Francois, "Numerical Modeling of Dielectric Barrier Discharge Based Plasma Actuators for Flow Control the COPAIER/CEDRE Example," *Aerospace Lab*, Issue 10, AL10-05, ONERA, 2015.
- [9] M. Forte, J. Jolibois, J. Pons, E. Moreau, G. Touchard, and M. Cazalens, "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, Dec. 2007.
- [10] A. R. Hoskinson, N. Hershkowitz, and D. E. Ashpis, "Force measurements of single and double barrier DBD plasma actuators in quiescent air," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41, no. 24, p. 245209, 2008.