

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(1), 10-17(2018)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.1.10

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 유동 박리를 지연시키기 위한 합성제트 구동기 연구

권오현\*, 변선우\*, 노진호\*\*

Experimental Study on Synthetic Jet Actuators  
for Separation DelayO-Hyun Kwon\*, Seon-Woo Byun\* and Jin-Ho Roh\*\*  
Korea Aerospace University\*,\*\*

## ABSTRACT

The size of commercial wind turbines has been increased. Generally, the pitch control is used to increase the efficiency of wind turbine. However, the pitch control has difficulty to control the local unsteady flow control which makes fatigue load and decreases the efficiency. In this research, Synthetic Jet Actuators(SJAs) are manufactured and applied into a wing section to delay flow separation and increase aerodynamic performances. The SJAs as a kind of zero-net mass-flux actuators injects and removes fluid through a small orifice with a given frequency. The SJA modules actuated by piezoelectric disks are manufactured and the aerodynamic performances are measured according to the shape of the orifice and the velocity of the jets through the wind tunnel test. It is confirmed that as the velocity of the jets are increased using rectangular shape orifice, drag force is decreased and lift force in increased.

## 초 록

풍력발전기의 효율을 증가시키기 위하여 피치제어가 주로 사용되어 왔으나 피로파괴와 효율의 감소를 일으키는 날개의 국부적인 유동을 제어할 수 없는 단점이 있다. 본 논문에서는 기존의 풍력발전기 블레이드에 합성제트 구동기 모듈을 설치하여 국부 유동을 제어하고 날개의 공력성능을 향상시키고자 한다. 합성제트 구동기는 작은 구멍을 통해 유체를 흡입/분출하여 유동 박리를 지연시켜 공력성능을 향상시킨다. 압전디스크를 사용하여 탈부착이 가능한 합성제트 구동기 모듈을 제작하고 풍동실험을 통해 오리피스 형상과 합성제트 속도에 따른 공력성능을 측정하였다. 직사각형 오리피스 형상을 사용하고 합성제트 속도가 커질수록 날개의 항력이 감소하고 양력이 증가하는 것을 확인하였다.

**Key Words** : Delaying Separation(유동 박리 지연), Active Flow Control(능동 유동 제어), Synthetic Jet Actuators(합성 제트 구동기)

† Received : August 2, 2017    Revised : December 26, 2017    Accepted : December 26, 2017

\*\* Corresponding author, E-mail : jinhoroh@kau.ac.kr

## 1. 서 론

지난 25년간 풍력발전량이 50 kW에서 5 MW로, 풍력발전기의 지름이 10-15 m에서 120 m로 커지는 등 풍력발전산업이 급격하게 발전하고 있다[1]. 이에 따라 풍력발전기의 효율을 증가시키기 위해 블레이드의 받음각을 제어하는 피치제어가 사용되어져 왔다. 하지만 블레이드의 크기가 증가함에 따라 블레이드의 부분적인 효율제어가 불가능하여 풍력발전기의 효율을 증가시키는데 한계가 있다[2]. 이러한 단점을 해결하기 위해 유동제어 작동기를 사용하여 블레이드의 부분적인 유동을 제어하여 블레이드의 효율을 증가시키는 기술이 연구되고 있다.

Figure 1은 유동제어 작동기를 사용하여 블레이드의 효율을 증가시키는 개념을 나타낸다. 블레이드 루트 쪽으로 갈수록 에어포일의 형상이 두꺼워져 유동박리가 많이 일어나게 되어 에어포일의 공력성능이 저하되는 경향이 있는데 피치제어를 사용하면 루트 쪽과 팁 쪽 에어포일의 받음각이 동시에 움직이기 때문에 두 에어포일의 최대공력효율을 동시에 갖기 힘들다. 하지만 유동제어 작동기를 블레이드 루트 쪽에 설치하면 팁 쪽 에어포일의 성능은 그대로 두면서 루트 쪽 에어포일의 유동 박리를 지연시켜 블레이드의 효율을 높일 수 있다.

최근 활발히 연구가 진행되고 있는 유동제어 기술은 와류발생기(Vortex Generators), 합성제트 구동기(Synthetic Jet Actuators, SJAs), 플라즈마 구동기(Plasma Actuators)가 있다. 와류발생기는 에어포일에 붙어있는 작은 핀(fin)을 말하며 핀과 핀을 구멍위로 올라오게 하는 작동기로 이루어져 있다[4]. 와류발생기는 유동박리가 생기기 전에 임의로 와류를 발생시켜 기존의 유동장에 혼합하여 에너지를 가해 유동의 박리를 지연시킨다[5]. 와류발생기의 형상에 따라 성능이 달라지며 작동 방식은 모터, 형상기억폴리머, 형상

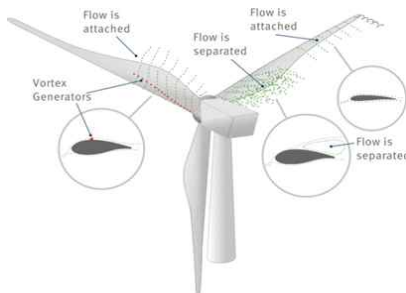


Fig. 1. Delaying flow separation[3]

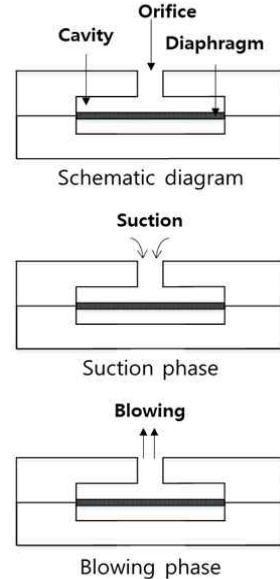


Fig. 2. Schematic diagram of synthetic jet actuators

기억합금 등이 있다. 플라즈마 구동기는 두 전도체와 그 사이에 있는 비전도체로 이루어져 있다. 두 전도체에 고전압이 가해지면 전도체 주위에 노출되어 있는 공기를 이온화 시키고 유체와 같은 방향으로 힘이 작용하여 유동 박리를 지연시킨다[6].

합성제트 구동기는 Fig. 2와 같이 유동을 분출·흡입시키는 진동판(diaphragm), 유동이 출입하는 구멍인 오리피스(orifice), 외부 구조물에 갇혀 있는 공간인 캐비티(cavity)로 구성되어있다. 진동판이 아래로 내려가는 흡입 과정에서 오리피스 주위의 유체가 합성제트 구동기 내부로 흡입되고 진동판이 위로 올라가는 분출과정에서 내부의 유체가 오리피스를 통해 위로 분출된다. 이러한 유체를 합성제트라고 부른다. 합성제트 구동기는 기존의 유동에 질량의 증가 없이 모멘텀을 추가시켜 유동을 제어하기 때문에 zero-mass flux actuator라고도 한다. 기존 연구들은 합성제트 구동기를 날개에 장착하여 공력 성능을 향상시켜 왔으며 진동판의 진동수가 특정 받음각에만 효과가 있음을 확인하였다[7,8].

본 연구에서는 유동제어 작동기 중 유동제어 작동기의 위험성이 낮고 구조가 간단하여 날개와의 통합성이 좋은 합성제트 구동기 모듈을 제작하여 기존의 날개에 장착하여 공력성능을 향상시키고자 한다. 기존에 제작되어 있는 풍력 발전기 블레이드에 설치 할 수 있는 합성제트 구동기 모듈을 설계하고 제작하였고 구동기 작동 실험으로

구동기의 성능을 확인하였다. 그리고 NREL 5 MW 급 블레이드에 사용된 에어포일의 날개 섹션을 제작하여 설치하였다. 합성제트 구동기의 합성제트 속도 및 오리피스 형상을 변경했을 때 날개 섹션의 공력 특성을 합성제트 구동기 장착 전의 공력 특성과 비교하였다.

## II. 단위 합성제트 구동기

### 2.1 단위 합성제트 구동기 성능 설계

합성제트 구동기 성능 설계를 위해 고려해야 할 특성에는 합성제트의 속도, 구동기의 공명주파수 및 진동판의 공명주파수가 있다. 진동판의 공명주파수는 진동판의 재료 및 크기에 따라 달라지며 합성제트의 속도와 구동기의 공명주파수는 구동기 설계에 따라 달라진다.

#### 2.1.1 합성제트의 속도

진동판의 끝이 고정되어있다고 가정 할 때 진동판의 시간에 따른 진동 속도는 식 (1)과 같다[9].

$$u(r, t) = \pi \Delta f \left[ 1 - \frac{r^2}{r_c^2} + \frac{2r^2}{r_c^2} \ln \frac{r}{r_c} \right] \sin 2\pi f t \quad (1)$$

여기에서  $r$ ,  $f$ ,  $r_c$  그리고  $\Delta$ 는 각각 오리피스의 반지름, 진동판의 진동 주파수, 진동판의 반지름 그리고 진동판의 최고-최저 변위의 차이이다. 합성제트의 속도를 계산하기 위해 진동판에 의해 감소하는 캐비티의 유체의 질량변화량과 오리피스를 통해 배출되는 유체의 질량변화량이 같다고 가정한다. 오리피스에서 발생하는 합성제트의 최대 속도는 식 (2)와 같은 식으로 계산된다.

$$U_{peak} = \frac{\pi}{4} \Delta f \left( \frac{D_c}{D_o} \right)^2 \quad (2)$$

여기에서  $D_c$ 와  $D_o$ 는 각각 진동판의 지름과 오리피스의 지름이다. 원형 형상을 갖는 오리피스가  $n$ 개 있는 경우와 직사각형 오리피스가  $n$ 개 있는 경우 오리피스의 최대 속도는 식 (3)과 식 (4)로 계산된다.

$$U_{peak} = \frac{\pi}{4n} \Delta f \left( \frac{D_c}{D_o} \right)^2 \quad (3)$$

$$U_{peak} = \frac{\pi}{4n} \Delta f \left( \frac{D_c^2}{bh} \right) \quad (4)$$

여기에서  $n$ ,  $b$  그리고  $h$ 는 오리피스 개수, 직사각형 오리피스의 폭 그리고 길이이다.

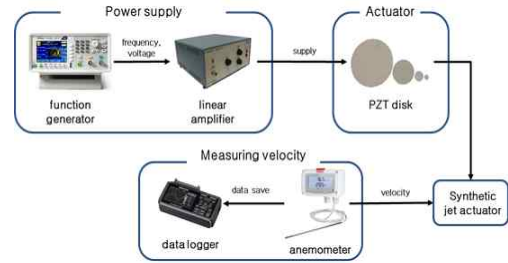


Fig. 3. Control and measurement systems

#### 2.1.2 구동기 공명 주파수

구동기의 공명 주파수는 식 (5)와 같은 식으로 계산된다.

$$f_H = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{A_{sj}}{h_{eff} V}} \quad (5)$$

여기에서  $a$ ,  $h_{eff}$ ,  $A_{sj}$  그리고  $V$ 는 각각 음속, 오리피스의 길이, 오리피스의 표면적 그리고 캐비티의 부피이다. 구동기의 공명주파수와 진동판의 공명주파수를 고려하여 작동 주파수를 정하고 그에 따른 설계속도를 계산하였다.

### 2.2 단위 합성제트 구동기 성능 측정

#### 2.2.1 제어 및 측정 시스템 구성

합성제트 구동기를 제어하고 합성제트의 속도를 측정하기 위한 시스템을 Fig. 3과 같이 구성하였다. 압전디스크는 캐퍼시터 원리로 작동되기 때문에 일정한 주파수를 갖는 전압을 발생시킬 수 있는 함수발생기를 사용하였다. 하지만 함수발생기의 최대 전압이 10 V로 낮기 때문에 선형증폭기를 사용하여 압전디스크의 최대 허용 전압인 180 V로 증폭하였다. 합성제트의 속도를 측정하기 위해 열전대를 이용한 프로브(probe) 타입의 풍속계를 사용하였고 데이터로거(data logger)를 사용하여 속도에 따른 전압 데이터를 저장하였다.

#### 2.2.2 압전디스크의 변위 측정 실험

합성제트의 속도를 예측하기 위해 합성제트 구동기에 장착된 압전디스크의 변위를 Fig. 4와 같은 방식으로 측정하였다. 압전디스크는 Piezo system사의 T216-A4NO-573X를 사용하였으며 재원은 Table 1과 같다. 합성제트의 속도를 최대한 크게 만들기 위해 압전디스크의 상·하에 고무 오링을 부착하여 캐비티를 밀폐시켰다. 압전디스크의 변위를 측정하기 위해 0.001 mm의 분해능을 갖는 레이저 거리 측정 장치를 최대 변위를 갖는 압전디스크의 중앙 아래에 위치시켰다. 전압은 0~180 V까지 30 V 단위로 주파수를 갖지 않는 정적 전압

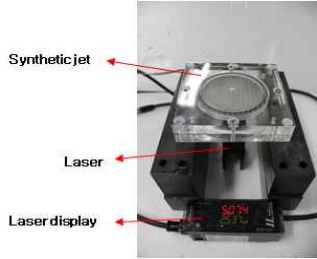


Fig. 4. Displacement measuring setup

Table 1. Properties of the piezo disk

Weight	9.8 g
Stiffness	$5 \times 10^3$ N/m
Capacitance	107 nF
Rated voltage	$\pm 180$ Vp
Resonant frequency	290 Hz
Free deflection	$\pm 476$ $\mu$ m
Blocked force	$\pm 2.4$ N

을 가하였고 각 전압에서 측정된 압전디스크의 변위를 구속되어 있지 않는 상태의 변위와 비교하였다. 캐비티를 감싸는 구조물의 볼트 체결 토크는 0.8 Nm이며 변위 측정 결과는 Fig. 5와 같다. 압전디스크에서 발생하는 변위는 전압에 정비례하며 변위의 크기는 구속되어 있지 않은 상태에서 발생하는 변위의 절반이다. 캐비티를 밀폐시키기 위해 압전디스크 상·하에 장착한 고무 오링으로 인해 변위가 작게 측정되는 것으로 보이며 캐비티를 감싸는 구조물 상·하판의 볼트 체결 토크를 조절하여 변경할 수 있다. 같은 전압을 가했을 때 압전디스크의 변위가 커지도록 하기 위해 토크를 0.4~1.2 Nm까지 0.2 Nm 단위로 변경하여 120 V일 때 변위를 측정하였으며 결과는 Fig. 6과 같다. 토크가 0.8 Nm보다 큰 경우 압전디스크를 과하게 누르기 때문에 같은 전압에서

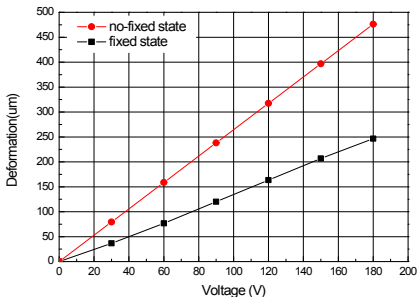


Fig. 5. Deformation of piezo disk with various voltage

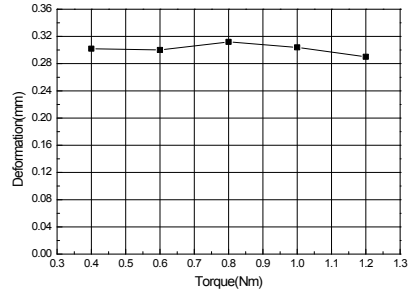


Fig. 6. Deformation of piezo disk with various torque

변위가 줄어든다. 토크가 작은 경우 측정되는 변위는 큰 차이가 없지만 캐비티가 밀폐되지 않으면 오리피스 유동속도가 작게 나올 수 있으므로 0.8 Nm의 토크로 고정해야 한다. 이때 압전디스크 하나에 원형 오리피스 2개를 갖는 구동기의 경우 운용 주파수(60~240 Hz)에서 발생시킬 수 있는 합성제트의 속도를 계산하면 4.3~17.4 m/s가 된다. 압전디스크의 변위가 레퍼런스에 비해 절반만큼 발생했지만 날개의 유동제어에 사용될 만큼 충분한 속도의 합성제트를 발생시킬 수 있으므로 고무 오링을 제거하지 않고 실험을 진행하였다.

2.2.3 합성제트의 속도 측정 실험

일정한 주파수를 갖는 전압을 주었을 때 설계속도와 합성제트의 속도를 비교하기 위해 오리피스에서 발생하는 속도를 측정하였다. 두 개의 압전디스크를 사용하여 4개의 오리피스를 갖는 구동기를 제작하여 합성제트의 속도를 측정하였다. 프로브 타입의 풍속계를 사용했기 때문에 오리피스 중앙에서 높이 2 mm 위치의 속도가 측정되며 흡입되는 유속은 측정되지 않고 분출되는 유속이 측정된다. 180 V의 크기와 130 Hz의 주파수를 갖는 전압을 가하였으며 이때 설계 속도는 9.5 m/s이다.

Figure 7은 10초 동안 발생하는 합성제트의 속도를 측정한 결과이다. 합성제트의 속도는 6초

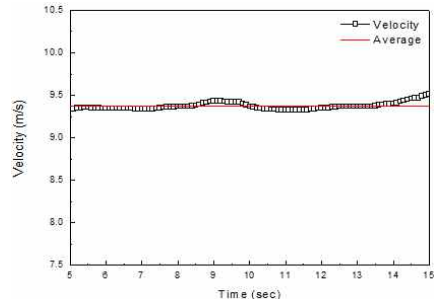


Fig. 7. Velocity of the unit SJAs

주기로 증감하는 경향을 보였지만 평균 속도에 비해 최대 0.3 m/s로 약 3%의 오차를 보였다. 그리고 합성제트의 10초 동안 평균 속도는 9.3 m/s로 설계속도와 약 2%의 오차를 나타내었다. 따라서 합성제트 구동기에서 설계속도와 차이가 없는 안정적인 유동을 발생시킨다 할 수 있다.

### III. 풍동실험

#### 3.1 합성제트 구동기 구조 설계

##### 3.1.1 오리피스 형상

오리피스의 유동속도가 동일할 때, 오리피스의 형상, 개수, 날개 표면과 이루는 각도에 따라 날개 공력성능에 미치는 영향이 달라진다. 오리피스와 날개 표면이 이루는 각도에 따라 공력 성능 변화의 차이는 2% 미만으로 나타나 거의 차이가 없다[10]. 따라서 구동기 제작에 용이하도록 오피스와 날개 표면이 이루는 각도가 90°가 되도록 제작하였다. 오리피스의 형상은 원형과 직사각형 두 가지로 설계하였으며 오리피스 사이의 간격 및 크기는 Fig. 8, 9와 같다. 3개의 진동판을 사용하여 원형 오리피스 6개, 직사각형 오리피스 3개가 부착 되도록 설계하였다. 합성제트의 속도는 오리피스의 단면적에 따라 달라지므로 총 면적은 동일하게 설계하였다.

##### 3.1.2 합성제트 구동기 재료 및 구조

합성제트 구동기는 가공하기 쉽고 가벼운 아크릴을 사용하였다. 진동판을 설치하기 위해 캐비티를 감싸는 구조물을 상·하로 나누어 볼트로 체결하도록 설계하였고 체결 토크는 앞선 실험 결과를 참고하여 0.8 Nm를 사용하였다. 오리피스와 진동판 사이를 밀폐시키기 위해 고무 O링을 사용하였다. 오리피스의 형상에 따라 두 가지 구동기를 제작하였고 구동기를 설치할 날개 색션의 내부 크기를 고려하여 구동기의 크기를 결정하였다. 합성제트 구동기의 구조와 설계 정보는 Fig. 10과 Table 2에 나타내었다. 이러한 설계 조건에

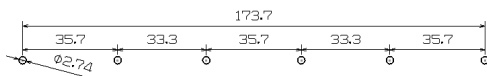


Fig. 8. Circular orifice shape

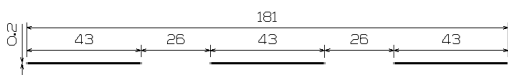


Fig. 9. Rectangular orifice shape

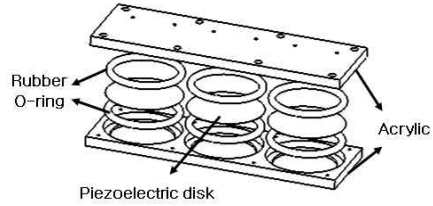


Fig. 10. Structure design of SJAs

Table 2. Design parameters of the SJAs

Parameters	Dimensions
Actuators	212 mm × 70 mm × 16 mm (length × width × height)
Cavity	26.3 mm × 8.87 mm (radius × height)
Orifice Area	25.8 mm <sup>2</sup>
Orifice Height	2 mm
Resonance frequency	12.72 Hz (SJAs)
	290 Hz (Piezoelectric disk)
Circular Orifice	2.74 mm × 6 (diameter × number)
Rectangular Orifice	43 mm × 0.2 mm × 3 (length × width × number)

서 공명 주파수를 고려한 압전디스크 전압의 허용 주파수는 60~240 Hz이다.

#### 3.2 풍동실험장치 구성 및 실험 조건

합성제트 구동기가 날개의 공력 성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 구동기를 날개 색션에 설치하여 작동전과 후의 공력성능을 비교하였다.

##### 3.2.1 양력 및 항력 측정 장치

풍동 실험 장치 내부에 설치하여 날개 색션의 공력 특성을 측정할 양·항력 측정 장치의 구조는 Fig. 11과 같다. 로드셀을 날개 색션이 부착된 구조물의 아래와 뒤에 설치하여 양·항력을 측정하도록 제작하였다. 양력을 측정하기 위해 최대 측정 하중 20 N인 로드셀을 4개 사용했고 항력을 측정하기 위해 최대 측정 하중 5 N인 로드셀을 2개 사용했다. 각 로드셀의 분해능은  $1 \times 10^{-5}$  N이다. 각도 조절 장치를 사용하여 날개 색션에 원하는 받음각을 줄 수 있고 날개 색션의 양 옆에 에어포일의 2배에 달하는 면적을 갖는 아크릴판을 부착하여 날개 끝 와류의 영향을 방지하였다. 각각의 이동부에는 선형 가이드(linear guide)와 샤프트 부싱(shaft bushing)을 사용하여 마찰에 의한 공력 측정 손실을 최대한 감소시켰다.

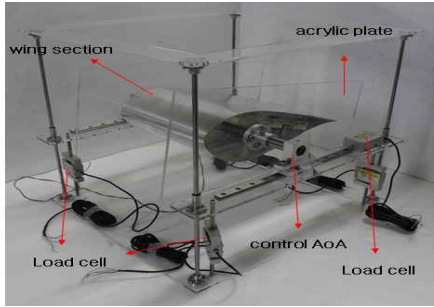


Fig. 11. Lift and drag measuring system

3.2.2 날개 섹션 및 풍동시험 조건

풍동시험을 위한 날개 섹션의 에어포일은 NREL에서 만든 5 MW급 풍력발전기에 사용된 DU35를 사용하였다. DU35의 실속 받음각은 13°이며 풍동 실험 장치의 성능과 내부 면적을 고려하여 시위길이(chord length, c)는 300 mm, 날개 길이(length)는 212 mm로 제작하였다. 날개의 받음각(angle of attack)을 11°에서 25°까지 2°씩 증가시키며 실험을 진행하였고 이때 풍동실험속도와 레이놀즈 수는 11.5 m/s와 257,538 이다. 오리피스 위치는 0.8c에 위치하였으며 압전디스크를 작동시키기 위해 75 Hz와 180 V의 전압을 사용하였다. 날개 섹션과 작동기의 유격으로 인해 날개표면에서 합성제트의 속도는 작동기에서의 속도에 비해 2 m/s의 손실이 발생했다. 날개 스킨에서 합성제트의 속도는 최대 속도인 7.5 m/s와 최대 속도의 절반인 4 m/s이고 풍동시험 조건 및 구동기 구동 조건은 Table 3와 같다.

3.3 풍동실험 결과

3.3.1 오리피스 형상에 따른 공력성능 비교

풍동실험 결과는 합성제트 구동기를 사용하지 않았을 때 날개섹션의 공력성능에 대한 증감량으

Table 3. Wind tunnel test and actuator operating conditions

Wind tunnel test conditions	
Flow velocity	11.5 m/s
Angle of attack	11°~25°
Reynolds number	257,538
Actuating conditions for SJAs	
Diaphragm frequency	75Hz, 130Hz
Synthetic jet velocity	4m/s, 7.5m/s

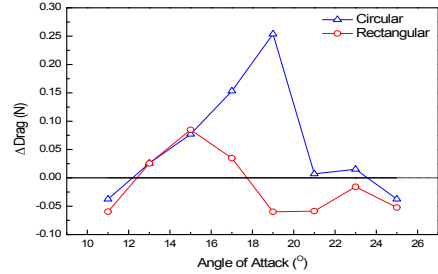


Fig. 12. Effect of orifice configuration on drag

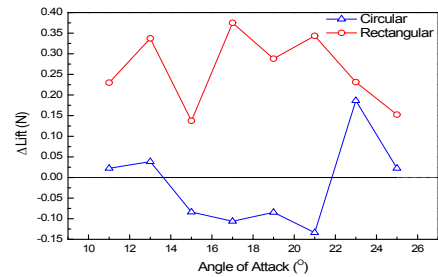


Fig. 13. Effect of orifice configuration on drag

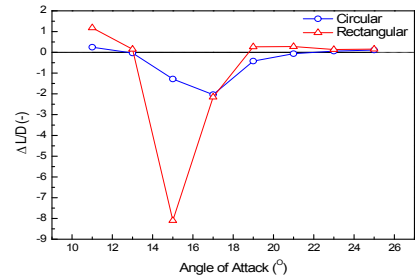


Fig. 14. Effect of orifice configuration on L/D

로 나타내었다. 원형과 직사각형 오리피스의 유동속도는 7.5 m/s로 동일하고 항력 및 양력, 양항비 측정 결과는 Fig. 12, 13, 14와 같다. 모든 받음각에서 오리피스가 직사각형 형상일 경우가 원형 형상일 경우보다 낮은 항력과 높은 양력을 가진다. 받음각이 15°일 때 에어포일의 형상 특성에 의해 날개의 밑면에도 유동박리가 일어나기 때문에 합성제트 구동기가 역효과를 가지는 것으로 판단되며 특히 직사각형 오리피스일 때 양항비가 합성제트 구동기를 사용하지 않을 때에 비해 8(25%)만큼 감소한다.

3.3.2 합성제트의 속도에 따른 공력성능 비교

합성제트의 속도에 따른 공력성능을 측정하기 위해 공력성능에 큰 영향을 끼치는 직사각형 오리피스를 사용한 구동기를 사용하였다. 합성제트의 속도는 4 m/s와 7.5 m/s를 사용하였으며 항력 및 양력, 양항비는 Fig. 15, 16, 17과 같다. 합

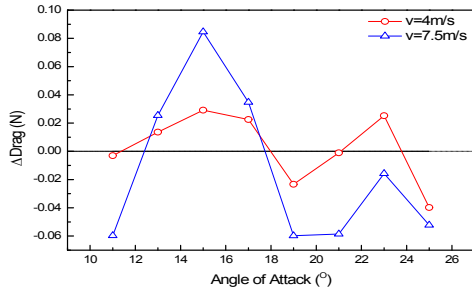


Fig. 15. Effect of jet velocity on drag

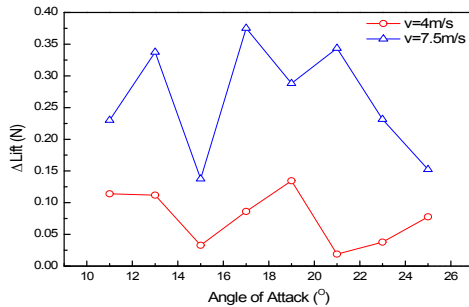


Fig. 16. Effect of jet velocity on lift

성체의 속도에 관계없이 합성제트 구동기를 작동시키면 양력이 증가하며 받음각이 커질수록 유동속도에 의한 양력변화 차이는 줄어든다. 합성제트의 속도가 작은 경우에도 에어포일의 형상특성에 의해 받음각 15° 부근에서 양력의 증가폭이 줄어든다. 오리피스 유동속도가 커지면 공력 성능에 대한 합성제트 구동기의 영향이 커져서 받음각 15° 부근에서 양력이 급격히 증가하고 다른 받음각에서는 양력이 감소한다. 그리고 양력과 마찬가지로 받음각이 커질수록 양력의 감소차이가 줄어든다.

### III. 결 론

풍력발전 블레이드에 피로파괴 및 효율 저하를 일으키는 유동을 제어하기 위해 합성제트 구동기 모듈을 제작하고 날개 섹션에 부착하여 공력 성능 변화를 측정하였다. 압전디스크를 사용하여 합성제트 구동기의 오리피스를 통해 유동을 발생시켰으며 설계 속도와 비교하고 발생하는 유동속도의 안정성을 평가하였다. 그리고 합성제트 구동기 모듈을 NREL의 5 MW급 풍력발전기에 사용된 DU35 에어포일 형상으로 제작된 날개 섹션에 설치하여 변화하는 공력 성능을 측정하였다. 오리피스의 형상이 원형과 직사각형인 경우, 그리고 유동의 속도가 4 m/s와 7.5 m/s인 경우

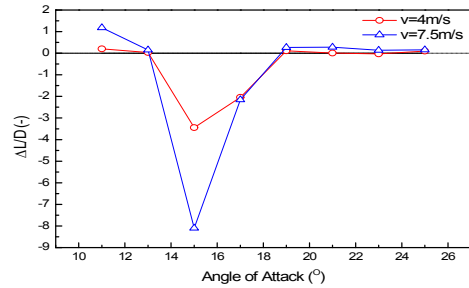


Fig. 17. Effect of jet velocity on L/D

에 대한 실험을 진행하였다. 오리피스의 형상이 원형인 경우 양력이 증가하고 양력이 감소하는 경향을 보였으며, 직사각형인 경우 고 받음각에서 양력이 최대 0.06 N(4%) 감소하고 양력이 최대 0.4 N(5.5%) 증가하였다. 그리고 합성제트의 속도가 클수록 양력과 양력의 증감폭이 커졌다. 받음각 15° 부근에서 양항비가 급격히 감소했지만 받음각에 따라 합성제트 구동기를 제어할 수 있기 때문에 공력 성능이 좋아지는 받음각에서 사용한다면 기존 풍력발전기의 효율을 개선할 수 있다. 또한, 추후 연구를 통해 더 높은 속도를 발생시키는 합성제트 구동기를 제작한다면 풍력발전기의 효율을 효과적으로 증가시키는 방안으로 활용할 수 있다.

### 후 기

본 연구는 2017년도 정부(산업통상자원부)의 지원으로 에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 에너지기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다 (10066055).

### References

- 1) Hansen, M. O. L., et al. "State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity," *Progress in aerospace sciences*, Vol. 42, No. 4, 2006, pp.285~330.
- 2) Barlas, Thanasis K., and G. A. M. Van Kuik. "Review of state of the art in smart rotor control research for wind turbines," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 46, No. 1, 2010, pp.1~27.
- 3) <http://smart-blade.com/products-services/vortex-generators.html>
- 4) Seshagiri, Amith, Evan Cooper, and Lance W. Traub. "Effects of vortex generators on an airfoil at low Reynolds numbers," *Journal of*

*Aircraft*, Vol. 46, No. 1, 2009, pp.116~122.

5) In-Su Kang., Dong Liu., Hyoung-Bum Kim., "Experimental Study of the Vertical Fence Wake Control using Vortex Generators," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, November 2009, pp.2190~2194

6) Nelson, R. C., et al. "A smart wind turbine blade using distributed plasma actuators for improved performance," *Proceedings of the 46th Aerospace Sciences Meeting*, Jan, 2008, pp. 7~10.

7) Alan, M. L. "Experimental Study of Delay of Separation on a NACA 0015 Wing Model

Using Synthetic Jet Actuators," PhD Thesis. *California Polytechnic State University*, 2014.

8) Mejia, O. D. L. "Computational Study of a NACA4415 airfoil using synthetic jet control," The University of Texas at Austin, 2009.

9) Tang, Hui, and Shan Zhong. "Development of a prediction model for synthetic jets in quiescent conditions," *AIAA*, 2005, Paper 104.

10) Hassan, Ahmed. A., and Edwin A. Munts. "Transverse and near-tangent synthetic jets for aerodynamic flow control," *AIAA*, 2000, paper 4334.