



# 익형의 전 범위 받음각에서 공력특성 시험이 가능한 디지털 풍동의 개발 및 속도장 측정

강상균<sup>1)</sup> · 김진옥<sup>2)</sup> · 김용수<sup>2)</sup> · 신원식<sup>3)</sup> · 이상일<sup>4)</sup> · 이장호<sup>5)</sup>\*

## Airfoil Testing to Obtain Full-range Aerodynamic Characteristics based on Velocity Field Measurements Utilizing a Digital Wind Tunnel

Sangkyun Kang<sup>1)</sup> · Jin-Ok Kim<sup>2)</sup> · Yong-Su Kim<sup>2)</sup> · Won-Sik Shin<sup>3)</sup> · Sang-Il Lee<sup>4)</sup> · Jang-Ho Lee<sup>5)</sup>\*

Received 21 February 2022 Revised 25 May 2022 Accepted 28 June 2022 Published online 29 July 2022

**ABSTRACT** A wind tunnel provides artificial airflow around a model throughout the test section for investigating aerodynamic loads. It has various applications, which include demonstration of aerodynamic loads in the building, automobile, wind energy, and aircraft industries. However, owing to the high equipment costs and space-requirements of wind tunnels, it is challenging for numerous studies to utilize a wind tunnel. Therefore, a digital wind tunnel can be utilized as an alternative for experimental research because it occupies a significantly smaller space and is easily operable. In this study, we performed airfoil testing based on velocity field measurements utilizing a digital wind tunnel. This wind tunnel can potentially be utilized to test the full-range aerodynamic characteristics of airfoils.

**Key words** Digital wind tunnel(디지털 풍동), Wind tunnel test(풍동 시험), Airfoil(익형), Angle of attack(받음각)

### 1. 서론

풍력발전기의 성능을 결정하는 중요 요소인 풍력 블레이

드의 공기역학적 특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 점점 대형화되는 추세에서 실제 풍력발전기를 실험할 수 있는 시험설비는 매우 희귀하기 때문에, 풍동을 활용한 축소모형 실험으로 대체된 연구가 진행되고 있다.<sup>[1]</sup>

풍력발전기의 축소모형 풍동시험은 축소모형의 크기에 따라 운용되는 Re 수가 다르며, Fig. 1과 같이 Small-scale의 경우 Re 수는 30,000~100,000, Medium-scale의 경우 Re 수는 100,000~200,000에 해당한다.<sup>[2]</sup> 이는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 smooth 익형의 양향력 최댓값이 급격하게 변화하는 천이영역에 해당한다.<sup>[3]</sup> 따라서 해당 천이영역의 공력특성 실험을 통해 풍력발전기 축소모형 실험에서 발생할 수 있는 오류에 대한 이해가 필요하다.

또한 현재 공개되어있는 대부분의 익형들은 실속 이후의

1) Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University

2) MS Student, Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University

3) Manager, Power Service Wind Turbine O&M Team, Doosan Enerbility

4) Professor, Offshore Wind Energy Institute, Kunsan National University

5) Professor, School of Mechanical System Engineering, Kunsan National University

\*Corresponding author: [jangho@kunsan.ac.kr](mailto:jangho@kunsan.ac.kr)

Tel: +82-63-469-4869

Fax: +82-63-469-7433

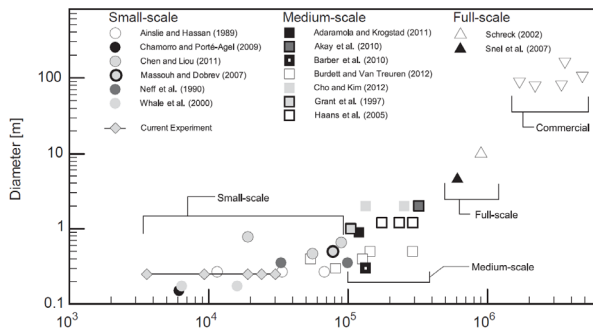


Fig. 1. Summary of the Reynolds numbers and rotor diameters considered in existing experiments based on representative data<sup>[2]</sup>

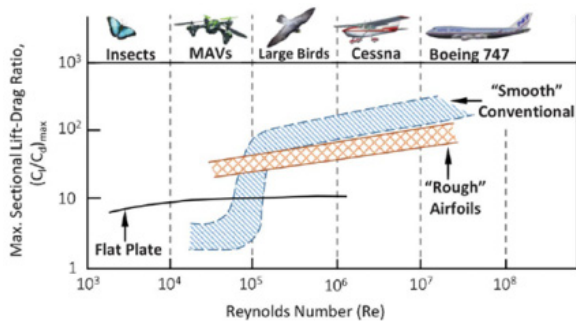


Fig. 2. Effect of Reynolds number on airfoil maximum sectional lift-to-drag ratio<sup>[3]</sup>

공력데이터가 부족하여, 탈 설계점 또는 일부 DLC(Design Load Case) 해석 시 오류를 범할 수 있으므로 익형의 받음각 전 범위(-180~180도)에 대한 공력데이터가 필수적으로 확보되어야한다.<sup>[4]</sup> 하지만 대부분의 연구에서는 전 범위 받음각에 대한 실제 실험 데이터가 부족하여 Viterna-corrigan equation<sup>[5]</sup> 등을 활용하여 그 값을 유추하거나,<sup>[6]</sup> 낮은 레이놀즈수에서 실험한 공력자료를 해당 레이놀즈수에 맞도록 외삽하여 사용하기도 한다.<sup>[7]</sup> 따라서 풍력 블레이드 설계 이전에 실험을 통한 익형의 공력특성 분석은 필수적으로 이루어져야한다.

본 연구는 천이영역에서 익형의 표면거칠기가 공력특성에 미치는 영향을 연구하기 위한 기초 단계로, Re 수 40,000~140,000에서 익형의 전 범위 받음각에 대한 공력특성 시험이 가능하도록 디지털 풍동이 보완/개발되었다.

DC fan의 단계적 조절을 통해 원하는 풍속을 만들 수 있도록 개발된 디지털 풍동은 최소 0.9 m/s부터 최대 6.7 m/s까지 0.2 m/s 간격으로 풍속 조절이 가능하며, 기존의

일반적인 풍동들과는 달리 실내의 좁은 환경에 설치하여 익형 연구·개발 및 축소모형의 풍력발전기 성능 실험 등에 활용을 위해 실험실 규모에서의 풍동 시험 목적으로 개발되었다. 디지털 풍동의 송풍부에는 96개의 소형 DC fan이 12개씩 8그룹으로 나뉘어있으며, 각 그룹별로 개별 제어 및 풍속의 가변이 가능하도록 PWM 제어 시스템이 적용되어 있다.

익형 공력특성 실험에 앞서, 익형 공력특성 실험에 적용되는 최대풍속 조건인 6.7 m/s에 대한 디지털 풍동 내부의 속도장이 분석되었으며, 풍동의 활용성 검토를 위해 추가적으로 시험부에서 최소풍속과 중간풍속이 검토되었다. 또한 대칭형 익형인 NACA0015에 대한 사전 실험을 통해 디지털 풍동의 성능이 검증되었다. 본 연구를 통해 추후 익형의 최대 양항비가 급격하게 변화하는 천이영역에서 다양한 익형들의 서로 다른 표면거칠기가 공력특성에 미치는 영향을 전 범위 받음각에서 실험하고, 이를 통해 익형들의 공력특성을 이해하는 기초자료로 활용하고자 한다. 해당 디지털 풍동의 베이스 모델은 익형과 풍력터빈 축소모형에 대한 선행연구를 통해 성능이 확인된 바 있다.<sup>[8~12]</sup>

## 2. 디지털 풍동

### 2.1 개요

풍동이란 공기가 흐르는 현상이나 공기의 흐름이 물체에 미치는 힘 또는 흐름 속에 있는 물체의 운동 등을 조사하기 위해 인공적으로 공기가 흐르도록 만든 장치로, 건축물, 자동차, 풍력터빈 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.<sup>[13~15]</sup> 풍동은 성능에 따라 초음속, 아음속, 환경 시험, 음향, 경계층 풍동 등으로 분류되고,<sup>[16]</sup> 이 중 풍력터빈이나 익형의 실험에 부합하는 풍동은 아음속 풍동으로 우리가 일상생활에서 느끼는 바람의 속도로, 음속보다 느린 속도를 형성하여 주는 풍동이다.

풍동은 Fig. 3과 같이 흡입식, 분출식, 폐쇄형 풍동 등 다양한 형태가 존재한다.<sup>[17]</sup> 이러한 풍동들은 시험부의 흐름이 정상상태를 유지하고, 시험부 전체 단면에 걸쳐 흐름을 균질하게 하기 위해 송풍부(Fan), 확산부(Wide angle diffuser), 스크린(Screen), 허니콤(Honeycomb), 정체실

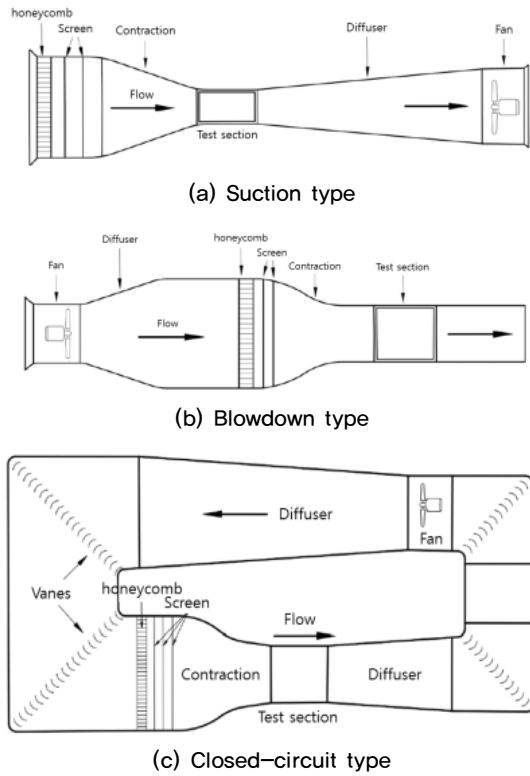


Fig. 3. Wind tunnel type<sup>[17]</sup>

(Settling chamber), 수축부(Contraction section), 시험부(Test section) 등으로 구성 되어있다. 확산부는 유체의 속도를 감소시키고, 정체실과의 연결을 위해서 필요하며, 정체부에서는 스크린과 허니콤을 설치하여 흐름을 정류시키는 기능을 한다. 수축부는 시험부에서의 경계층 두께, 흐름의 균질성에 관계되며, 시험부에서 다양한 모형을 이용한 실험이 이루어진다.<sup>[18]</sup>

디지털 풍동은 분출식 풍동으로 외형은 알루미늄 프로파일과 아크릴로 제작되었다. 제작의 간편성과 비용 및 장소의 경제성을 고려하여 일반적인 풍동의 구조와는 달리 확산부, 정체실 등이 구분되어있지 않고, 96개의 고유량의 DC fan에서 발생하는(송풍부) 유동이 바로 시험부로 이어지고 유동이 재순환하지 않고 밖으로 배출되는 개회로 형식의 풍동이다.<sup>[8]</sup> 또한 송풍부와 시험부를 결속하는 위치에 난류강도 조절용 스크린 1장이 부착되어있으며, 실내 설치 조건을 고려하여 탈·부착이 용이한 구조로 제작되어 있어, Fig. 4와 같이 실험 목적에 따라 스크린, 조도블럭, 베리어, 스파이어 등의 추가/변경을 통해 풍동의 난류경계층 조절이 가능하다.

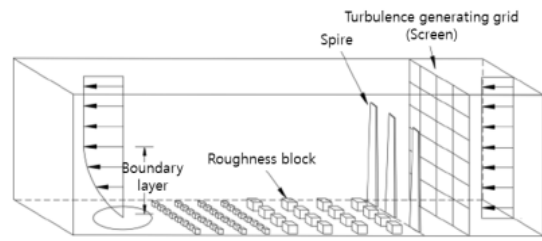


Fig. 4. Examples of turbulence generators<sup>[17]</sup>

## 2.2 보완된 디지털 풍동

기존에 개발된 디지털 풍동은 최대 유량 145 CFM(Cubic feet per minute)의 DC fan이 활용되었으며, 익형 개발, 풍력터빈의 실험 등 다양한 연구에 활용되었으나,<sup>[9~12]</sup> 평균풍속이 4.5 m/s로 비교적 낮아 익형의 시위길이 0.3m 기준으로 최대 레이놀즈수는 약 90,000으로 제한된다. 따라서 Table 1과 같이 200.9 CFM의 고유량 DC fan을 적용하여 풍속의 증가를 통해 실험이 가능한 레이놀즈 수 영역을 약 140,000으로 확장시켰다. 해당 DC fan의 기대수명은 최대 70,000 시간이다.

풍동 실험시 시험 모델에 유입되는 풍속의 측정이 필요한데, 시험체의 대표길이(H) 기준 3.5 H 이상의 거리에서 측정해야 풍속의 왜곡을 피할 수 있으나,<sup>[19]</sup> 기존 디지털 풍동의 길이 때문에 실험이 제한이 있어 Table 2와 같이 풍동의 길이를 증가시켜, 기준 풍속 측정이 용이하도록 하였다.

Table 1. Specification for DC fan of Digital wind tunnel

Item	Digital wind tunnel-base	New Digital wind tunnel
Rated voltage	48 VDC	24 VDC
Input currents	0.4 A	0.88 A
Rotational speed	2900 RPM	4,600 RPM
Max. flow	145 CFM	200.9 CFM
Life expectancy	-	70,000 hr (at 45°C, 15~65% RH)

Table 2. Size of digital wind tunnel (unit: mm)

Item		Digital wind tunnel-base	New Digital wind tunnel
External size	Height	1,548	1,470
	Width	1,058	1,565
Inner size (testable size)	Length	1,610	3,250
	Height	1,450	985

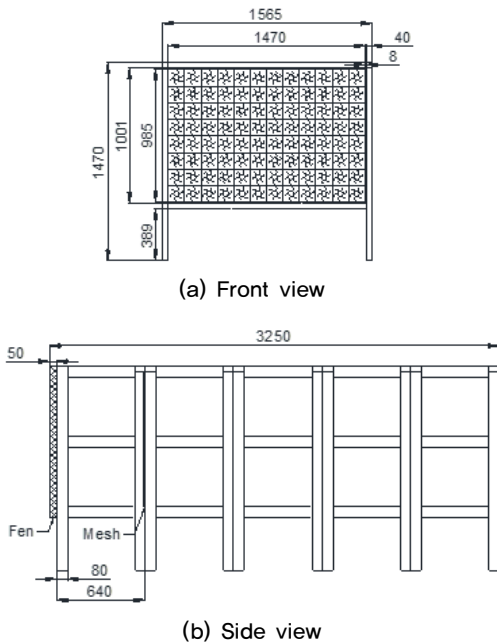
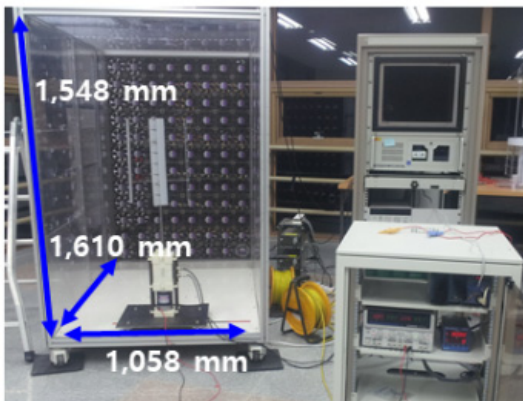
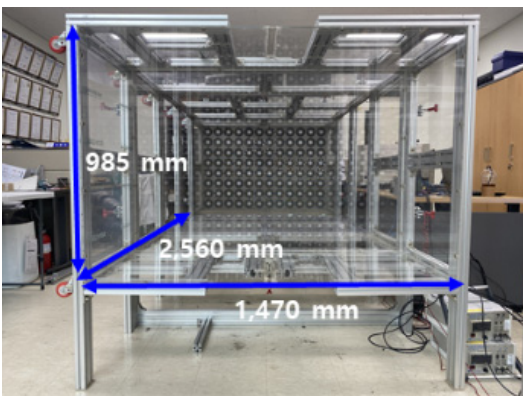


Fig. 5. New digital wind tunnel 2D drawing



(a) Base digital wind tunnel



(b) New digital wind tunnel

Fig. 6. Comparison of the base digital wind tunnel and the new digital wind tunnel



Fig. 7. PWM control system of the new digital wind tunnel

보완된 디지털 풍동의 제원은 Fig. 5에 나타내었으며, Fig. 6에 베이스 모델과 보완된 디지털 풍동의 모습을 비교하여 나타내었다.

또한 베이스 모델 디지털 풍동의 풍속은 4.5 m/s로 가변이 불가하지만, 새롭게 개발된 디지털 풍동은 DC fan이 12개씩 8그룹으로 나뉘어져 각 그룹별로 개별 제어 및 풍속의 가변이 가능하도록 PWM 제어 시스템이 적용되었다. 구현 가능한 풍속 범위는 최소 0.9 m/s부터 최대 6.7 m/s까지이며, 약 0.2 m/s 간격으로 풍속 조절이 가능하도록 개발되었으며, Fig. 7에 풍속 컨트롤러를 나타내었다.

### 3. 속도장 측정

#### 3.1 풍속 계측기

새로운 디지털 풍동의 풍속 분포 측정을 위해서 계측범위와 측정하고자 하는 물리적 응답신호에 따라 적절한 계측기기(피토관, 마노미터, 분력계, 열선풍속계 등)를 선택하여야 한다.<sup>[17]</sup> 본 연구에서는 Table 3과 같이 OMEGA사의 HHF-SD1 열선풍속계가 활용되어 1 Hz 간격으로 측정되었다. 측정 전에 센서는 교정성적서를 발급 받았고(성적서 번호: 21-039318-01-1), 신뢰수준은 약 95%, 상대측정 불확도는 약 2.6%로 확인되었다.

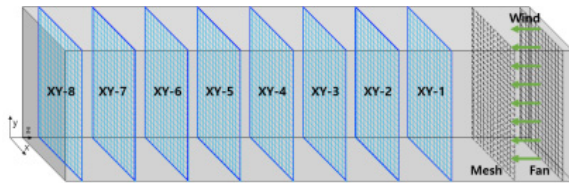
Table 3. HHF-SD1 Specification

Measurement	Range	Resolution	Accuracy
Wind speed [m/s]	0.2 ~ 5.0 m/s	0.01 m/s	$\pm(5\%+a)$ measure or $\pm(1\%+a)$ full scale, whichever is greater.
	5.1 ~ 25.0 m/s	0.1 m/s	(a=0.1m/s)

### 3.2 풍속 분포 측정

디지털 풍동은 기존의 풍동들과는 구조적으로 다르기 때문에 내부 유동에 대한 균질성 및 성능 확인이 필요하다. 이를 위해, Fig. 8(a)와 같이 XY를 평면 8개, Fig. 8(b)와 같이 YZ 평면을 6개로 분류하고, Fig. 8(c), (d)와 같이 측정 지점을 선정하여, 총 192개 지점의 측정을 통해 내부 유동이 관측되었다.

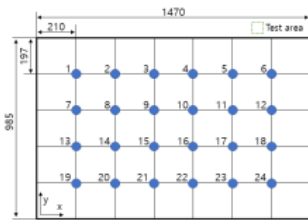
풍속 측정시 높이 8 cm × 길이 9 cm의 알루미늄 프로파일 에 3D 프린터로 제작한 높이 2 cm × 길이 16 cm의 거치대를 결합하여 열선풍속계 지그가 제작되었다. 풍동 내부의 바닥과 벽면에 마스킹테이프를 부착하여 측정 위치를 표시하였으며, 풍속 측정 시 해당 위치를 반복 확인하여 위치에 대한



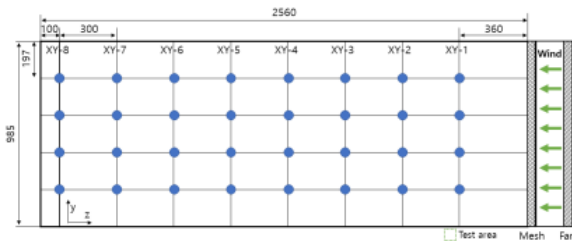
(a) Measurement XY Plane in the wind tunnel



(b) Measurement YZ Plane in the wind tunnel



(c) Measurement point in the XY Plane



(d) Measurement point in the YZ Plane

Fig. 8. Measurement plane and point

오차를 최대한 감소시켰다. 또한 레이저 수직기를 활용하여 프로브의 정방향과 송풍부가 일직선으로 정렬되도록 하였다.

### 3.3 풍속 분포 측정 결과

#### 3.3.1 최대 풍속 조건하에서의 풍속 분포

각 지점의 측정에 앞서 풍속이 안정화되는 시간을 확인 하였으며, Fig. 9와 같이 디지털 풍동을 작동시키고 약 12 초 후 풍속이 안정화되는 것으로 확인되었다(0~10초 풍동 정지 상태, 10초 풍동 작동 시작, 10~22초 풍속 증가, 20~300초 풍속 안정화). 본 연구에서는 풍동 작동 후 약 60초 후부터 180초까지의 데이터를 활용하여 식 (1)~(3) 과 같이 평균풍속( $\bar{u}$ ), 표준편차( $\sigma$ ), 난류강도(TI)를 산출 하였으며, [20] 총 192개 측정 포인트에서 평균풍속은 6.26~ 6.91 m/s, 표준편차는 0.117 m/s 이하, 난류강도는 1.83% 이하로 확인되었다.

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u_i^2}{n} - \bar{u}^2} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

$$TI = \frac{\sigma}{\bar{u}} \times 100\% \quad [\%] \quad (3)$$

이때  $u$ 는 풍속,  $n$ 은 표본의 개수이다

각 측정 지점에서 측정된 풍속을 활용하여 XY 평면들과 YZ 평면들에 대한 풍속 분포가 확인되었다.

XY 평면의 경우 Fig. 10과 같이 XY-1(송풍부)부터 XY-8(토출부)까지 모든 평면의 좌측 부분이 상대적으로

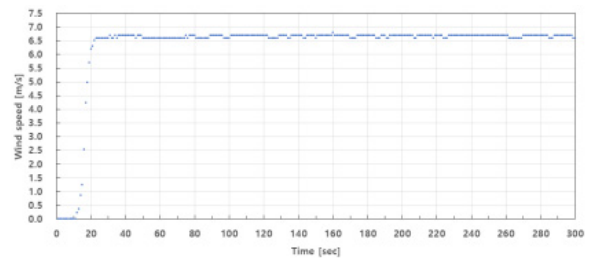


Fig. 9. Wind speed settling time measurements

낮은 풍속 분포를 나타내고, 우측 부분은 상대적으로 높은 풍속 분포를 나타내는 것으로 확인되었으며, XY-1에서 부터 XY-8로 근접할수록 고풍속 분포가 줄어들고, 비교적 균질한 풍속으로 변화하는 것으로 확인되었다. 이는 송풍부에서부터 측정위치가 멀어질수록 풍동 내부 영역이 정체 실 역할을 하기 때문에, 토출부로 갈수록 균질한 풍속으로 변화하는 것으로 판단되며, 유사한 형태를 갖는 풍동의 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

익형 실험시 풍속 분포가 비교적 균질하고, 기준풍속 측정이 용이한 XY-7를 시험부로 선정하였다. XY-8은 익형 시위길이의 크기가 0.1 m를 초과할 경우 시험체가 풍동의 외부에 위치하기 때문에 시험부 선정시 제외되었다.

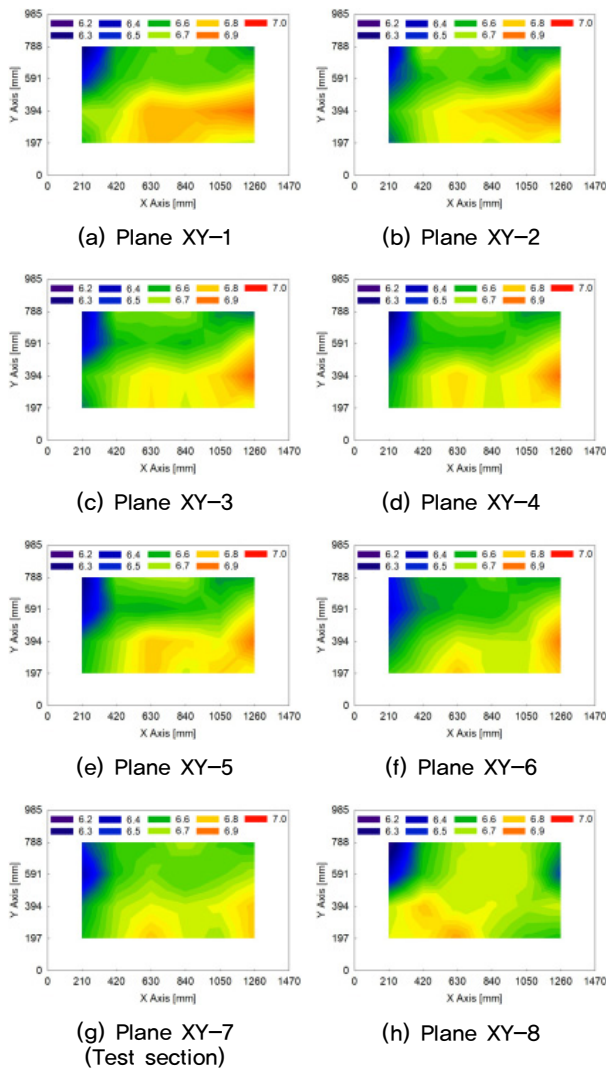


Fig. 10. Wind distribution of XY planes at maximum wind speed condition

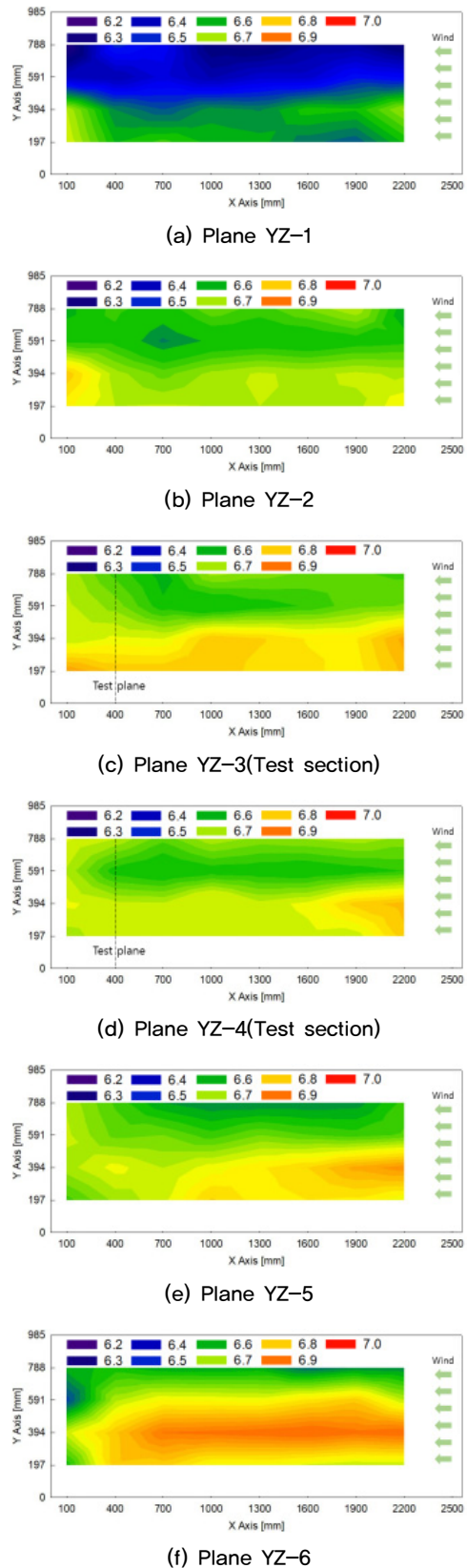


Fig. 11. Wind distribution of YZ planes at maximum wind speed condition

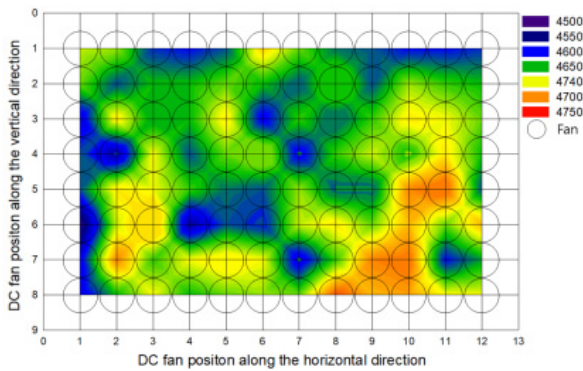


Fig. 12. Rotational speed of DC fans [unit: RPM]

YZ 평면의 경우 Fig. 11과 같이 XY 평면의 좌측부분인 YZ-1에서 낮은 풍속 분포를 보이며, 우측으로 갈수록 풍속이 증가한다. YZ-4에서는 비교적 균질한 풍속으로 변화 후 YZ-6(풍동의 우측)에서 높은 풍속 분포를 나타내는 것으로 확인되었다. 익형 시험은 풍속이 비교적 균질한 YZ-3과 YZ-4에서 진행될 예정이다.

디지털 풍동의 풍속분포 확인 결과 풍동 좌측의 저풍속으로 인해 풍동 내부에서 풍속 분포 비대칭이 확인되었다. 원인 파악을 위해 LUTRON 사의 디지털 스트로보스코프를 활용하여 각 96개 DC fan의 회전수가 측정되었으며, 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12의 x축과 y축은 DC fan의 배열을 나타낸다. 풍동 좌측에 위치한 DC fan들이 정격 회전수 4,600 RPM보다 30~70 RPM 정도 낮게 확인되었다. 일부 상부와 중간 부분의 DC fan에서도 낮은 회전수가 확인되었으나, 인근 DC fan들이 정격 회전수(4,600 RPM)보다 높아 해당 부분에서는 낮은 풍속 분포는 보이지 않는 것으로 확인되었다. DC fan의 회전수 차이로 인해 속도편차가 발생하지만, 익형 실험이 진행되는 시험부 단면적 내의 풍속 편차와 난류강도가 풍동실험평가를 위한 실무표준의 풍속 요구조건인<sup>[17]</sup> 1% 미만을 만족하기 때문에 풍동 실험에는 큰 무리가 없을 것으로 판단된다. 풍속에 대한 상세 내용은 3.4절에 추가 기술하였다.

### 3.3.2 그 외 풍속 조건하에서의 풍속 분포

디지털 풍동의 활용성 검토를 위해 추가적으로 시험부(XY-7)에서 최소풍속과 중간풍속 조건의 풍속분포가 분석되었으며, 그 결과는 Fig. 13에 나타내었다. 최소풍속의 경

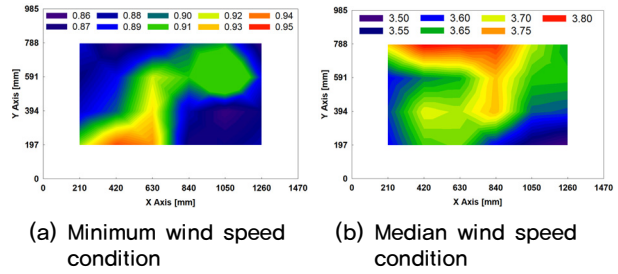


Fig. 13. Wind distribution of XY planes in various wind speed conditions

우, 최대풍속 조건하에서의 분포와는 달리 풍동의 왼쪽 하층부에서의 상대적으로 높은 풍속인 0.95 m/s로 나타났으며, 왼쪽 상층부와 오른쪽 하층부는 상대적으로 낮은 0.86 m/s로 나타났다. 중간풍속의 경우도 최대풍속 조건하에서의 분포와는 달리 풍동 상층부에서의 풍속이 상대적으로 높은 3.8 m/s로 나타나며, 오른쪽 하층부와 왼쪽 부근이 상대적으로 낮은 3.5 m/s로 확인되었다.

## 3.4 각 평면의 대표 풍속 산출

### 3.4.1 최대 풍속 조건하에서의 대표 풍속

3.3장에서 확인된 결과를 통해 각 평면에서의 대표 풍속( $\bar{u}_R$ ), 대표 표준편차( $\sigma_R$ )가 산출되었다. 이때 식 (4), (5)가 사용되었고,  $u$ 는 풍속,  $n$ 은 표본의 개수이다.

$$\bar{u}_R = \frac{\sum_{i=1}^n u_{Ri}}{n} \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

$$\sigma_R = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{Ri}}{n} \quad [\text{m/s}] \quad (5)$$

Table 4와 같이 각 XY 평면들의 대표 풍속들은 6.65~6.68 m/s, 표준편차는 0.03~0.05 m/s, 난류강도는 0.53~

Table 4. Wind speed measurement results of XY Plane at maximum wind speed condition (unit: m/s)

Item	XY-8	XY-7	XY-6	XY-5	XY-4	XY-3	XY-2	XY-1	average
$\bar{u}$	6.66	6.66	6.65	6.66	6.65	6.66	6.67	6.68	6.66
$\sigma$	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04
TI [%]	0.53	0.56	0.60	0.61	0.66	0.70	0.68	0.72	0.63

0.72의 범위로, XY 평면들은 전체적으로 유사한 풍속을 갖는 것으로 확인되었다. XY 평면들의 전체 평균풍속은 6.66 m/s, 표준편차는 0.04 m/s, 난류강도는 0.63으로 확인되었다.

8개의 XY 평면 중 XY-8 평면의 난류강도가 가장 낮지만, 해당 영역은 토출부와 매우 근접해있어, 시험 모델 크기 및 상황에 따라 모델의 일부가 디지털 풍동을 벗어날 수 있다. 따라서, 그 다음으로 난류강도가 낮고, 시험 모델의 구축이 용이한 XY-7 평면에서 시험이 진행될 예정이며, 해당 평면의 평균풍속은 6.66 m/s, 표준편차는 0.04 m/s, 난류강도는 0.56으로 확인되었다. XY-7 평면 또한 풍속의 비대칭이 존재하지만, 시험모델이 위치하는 중앙부는 풍속편차가 0.2m/s이하이기 때문에 시험에 문제가 없다고 판단된다.

Table 5와 같이 각 YZ 평면들의 대표 풍속들은 6.49~6.72 m/s, 표준편차는 0.03~0.06 m/s, 난류강도는 0.51~0.91의 범위로, 풍동의 YZ-1 평면(풍동의 왼쪽)에서 비교적 낮은 풍속을, YZ-6 평면(풍동의 오른쪽)에서 비교적 높은 풍속을 갖는 것으로 확인되었다. YZ 평면들의 전체 평균풍속은 6.66 m/s, 표준편차는 0.04 m/s, 난류강도는 0.63으로 확인된다. 6개의 YZ 평면 중 양 측면은 평균풍속과의 편차가 비교적 크기 때문에 디지털 풍동의 가운데에 위치한 YZ-3, YZ-4 평면을 시험부로 선정하였으며, YZ-3, YZ-4 평면의 평균풍속은 각각 6.71 m/s, 6.69 m/s, 표준편차는 2곳 모두 0.4 m/s, 난류강도는 0.57, 0.60으로 확인되었다.

3.4.2 최소 풍속 조건하에서의 대표 풍속

최소풍속 조건으로 시험부(XY-7)에서 측정시 0.86~0.95 m/s의 풍속분포를 나타내었고, 평면 전체의 평균풍속은 0.89 m/s로 확인되었다. 표준편차는 0.01 m/s이며,

Table 5. Wind speed measurement results of Yz Plane at maximum wind speed condition (unit: m/s)

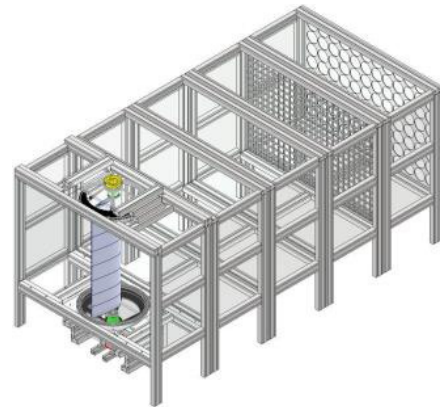
Item	YZ-1	YZ-2	YZ-3	YZ-4	YZ-5	YZ-6	average
$\bar{u}$	6.49	6.66	6.71	6.69	6.68	6.72	6.66
$\sigma$	0.06	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04
$TI$ [%]	0.91	0.57	0.60	0.51	0.66	0.55	0.63

난류강도는 0.92%로 확인되었다. 중간풍속 조건으로 시험부(XY-7)에서 측정시 3.5~3.8 m/s의 풍속분포를 나타내었고, 평면 전체의 평균풍속은 3.66 m/s로 확인되었다. 표준편차는 0.02 m/s이며, 난류강도는 0.56%로 확인되었다.

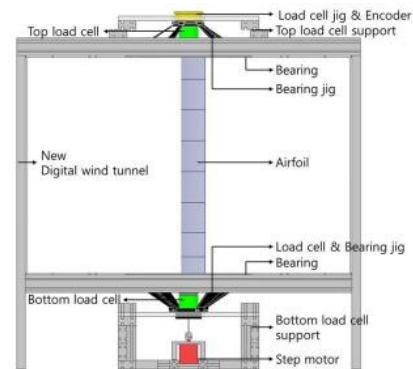
4. 디지털 풍동 재구성 및 성능 평가

4.1 익형의 전 범위 받음각 공력특성 실험을 위한 풍동 재구성

익형의 전 범위 받음각 공력특성 실험을 위해 3장에서 선정된 시험부가 재구성되었다. 풍동의 시험부 상·하단에 대형 베어링을 설치하여 익형을 회전시켜 받음각 전 범위에 대해 실험이 가능하며, 익형 공력특성 실험의 가상 모습을 Fig. 14(a)와 같이 3D 모델링을 통해 나타내었다. 시험부는 Fig. 14(b)와 같이 풍동의 상·하단에 각각 3분력 로드



(a) Expected appearance of airfoil test



(b) Diagram of new digital wind tunnel test section

Fig. 14. 3D model of new digital wind tunnel for airfoil test



셀, 지그, 베어링 등으로 구성되어 있으며, 최하단의 스텝 모터를 회전시켜 익형의 각도를 조정할 수 있다. 최상단에는 익형의 받음각을 측정할 수 있는 엔코더가 부착되어 있다.

익형은 AR(Asspect ratio)에 따라 그 공력특성이 변화하기 때문에, 익형의 상·하부가 풍동을 관통하도록 설치하여 무한대의 AR로 모사하여 3차원 효과를 최소화하였다. 또한 다양한 종류의 익형 실험이 가능하도록 시험부의 상·하부는 탈부착이 가능하도록 제작되었다. 또한 풍동 실험시 익형들은 Markforged 사의 3D 프린터(모델명: Mark Two)가 활용될 예정이다.

익형에 작용하는 하중을 측정하는 3분력 로드셀의 정확도는  $\pm 0.2\%$ , 받음각을 측정하는 엔코더(성적서번호: 21-067556-01-1)의 정확도는 0.05% 이다. 또한 밀도를 산출하기 위해 온도, 습도, 대기압이 측정되며, 각각의 측정정확도는  $0.8^{\circ}\text{C}$ ,  $\pm 3\%$ ,  $\pm 2 \text{ hpa}$ 이다(성적서번호: 21-067556-01-3, 21-067556-01-4). 해당 장비들의 사양과 정확도는 Table 6에 나타내었다.

최종적으로 Fig. 15에 익형의 전 범위 받음각 공력특성 실험이 가능하도록 개발된 디지털 풍동을 나타내었다.

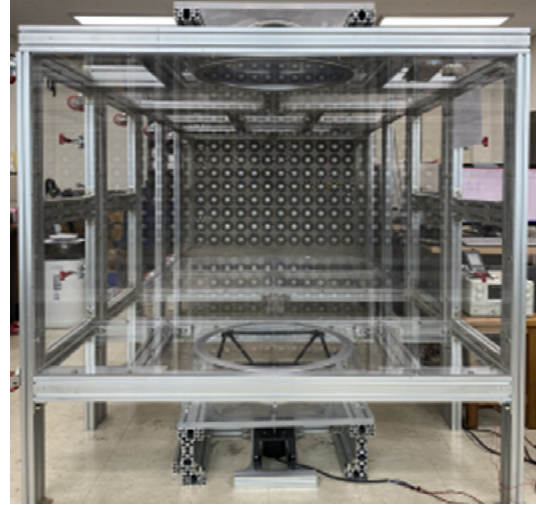
#### 4.2 디지털 풍동 검증을 위한 익형 공력특성 실험

디지털 풍동의 검증을 위해 대칭형 익형인 NACA0015에 대한 전 범위 받음각에서의 공력특성 실험이 진행되었다. 실험은 Table 7과 같이 디지털 풍동의 최대풍속인 6.66 m/s 조건에서 진행되었으며, Re 수는 약 45,000이다. 3분력 로드셀에 측정된 수직항력(N), 접선방향의 힘(A)은 식 (6)~(10)이 활용되어 양력계수, 항력계수로 산출되었다.

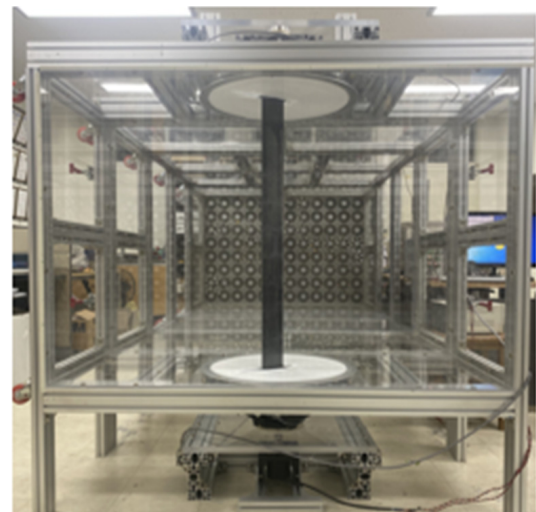
$$L = N \cos \alpha - A \sin \alpha \tag{6}$$

$$D = N \sin \alpha + A \cos \alpha \tag{7}$$

$$S = c \times l \tag{8}$$



(a) Wind tunnel without airfoil



(b) Wind tunnel with airfoil

Fig. 15. The final appearance of the new wind tunnel

Table 6. Specifications of wind tunnel equipments

Equipment	Model	Specification	Accuracy
Load cell	MCL-3A02-50N	50 N	$\pm 0.2\%$
Encoder	RI-QR24	0~360 deg	0.05%
Data logger	SDL-360R	16ch, 1,000 Hz	-
Step motor	34HE31-6004S	Step angle: 1.8 deg	$\pm 5.0\%$
Thermo-hygrometer	MHB-382SD	0~50°C, < 85% R.H.	0.8°C, $\pm 3\%$
Barometer		10.0 ~ 1,100 hpa	$\pm 2 \text{ hpa}$

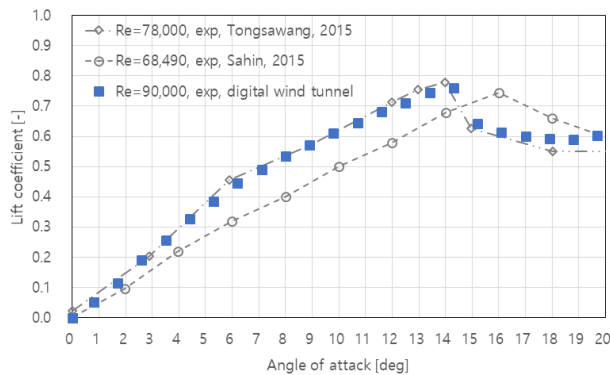
Table 7. Experimental condition

Conditions	Value
Wind speed [m/s]	6.66
Chord length, c [m]	0.1
Reynolds number [-]	45,000
Span length, l [m]	0.985
Roughness	smooth

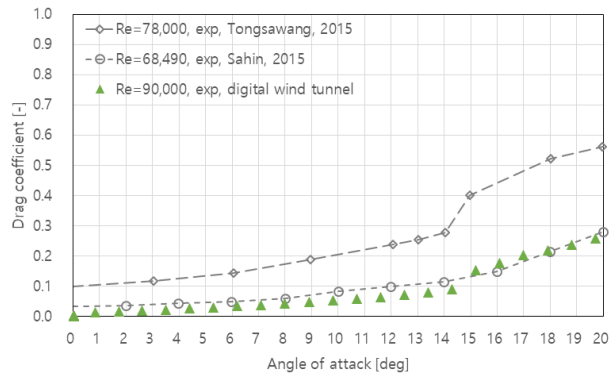
$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (9)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (10)$$

0도에서 20도까지의 실험결과, 12도에서 양력계수가 감소하는 실속이 발생하였으며, 이때 항력계수도 해당 지점 이후 증가하는 것으로 확인되었다. 이를 Re 수가 유사한 참고문헌과 비교하여 Fig. 16에 나타내었다. 양력계수 비교 결과, 코드길이가 20 cm로 동일하고, 풍속이 6 m/s로 본 연구와 유사한 실험 조건을 갖는 Tongswang(2015)<sup>[21]</sup>의 결과와 일치하는 것으로 확인되었다. Sahin and Acir(2015)<sup>[22]</sup>와 비교 결과 본 실험보다 실속각도는 크고, 양력계수는 낮게 확인되었는데, 이는 AR가 1.0으로 낮아 유한한 익형의 스패길로 인한 3D 효과가 발생하기 때문인 것으로 판단된



(a) Lift coefficient



(b) Drag coefficient

Fig. 16. Comparison of lift and drag coefficient with references at 0–20 degrees angle of attack<sup>[21,22]</sup>

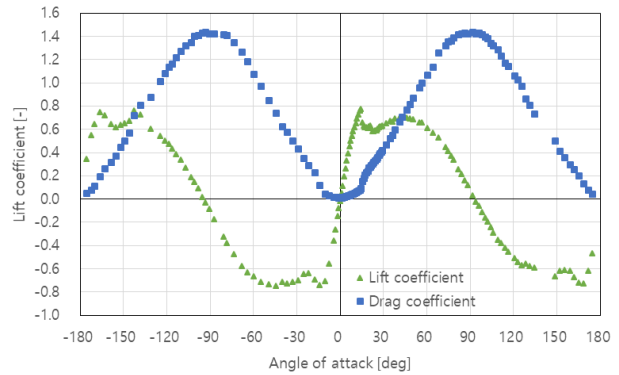


Fig. 17. Lift and drag coefficient at full range angle of attack

다.<sup>[23]</sup> 항력계수의 경우 양력계수와는 다르게 Tongswang (2015)<sup>[21]</sup>의 결과와 큰 차이를 나타내는데, 익형의 표면거칠기 때문으로 항력이 증가한 것으로 판단되나,<sup>[24]</sup> 추가적인 연구를 통해 정확한 검증이 필요하다.

익형 전범위 받음각의 실험 결과, Fig. 17과 같이 -180도에서 0도, 0도에서 180도의 양력, 항력계수가 대칭으로 확인되어 전 범위 받음각에 대한 실험이 가능함이 검증되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 익형의 전 범위 받음각에 대한 실험이 가능하도록 기존에 개발된 디지털 풍동의 단점이 보완된 디지털 풍동이 개발되었다. 개발된 디지털 풍동은 최대풍속 조건하에 내부 192개 지점에서 풍속을 측정하여 속도장이 분석되었으며, 그 결과 시험위치에서 디지털 풍동의 대표 풍속은 6.66 m/s, 표준편차는 0.04 m/s, 난류강도는 0.63 인 것으로 확인되었다. 또한 대칭형 익형인 NACA0015의 전 범위 받음각에서의 공력특성 실험을 통해 디지털 풍동의 성능이 검증되었다.

추후, 익형의 최대 양항비가 급격하게 변화하는 천이영역에서 다양한 익형들의 서로 다른 표면거칠기가 공력특성에 미치는 영향을 전 범위 받음각에서 실험하고, 이를 통해 익형들의 공력특성을 이해하는 기초자료로 활용될 것이다.

## 감사의 글

This work was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government (MOTIE) (20213030020380, Development of adhesive -type modular blades over 70m for overcoming onshore transportation limitation) and by the Ministry of Education(NRF-2017R1D1A3B06032145).

## References

- [1] Cho, T.H., Kim, Y.W., Park, Y.M., and Chang, B.H., 2008, "Wind tunnel test for scaled wind turbine model (Scale effect correction)", *New. Renew. Energy*, **4**(2), 87-93.
- [2] McTavish, S., Feszty, D., and Nitzsche, F., 2013, "Evaluating Reynolds number effects in small-scale wind turbine experiments", **120**, 81-90.
- [3] Winslow, J., Otsuka, H., Govindarajan, B., and Chopra, I., 2018, "Basic understanding of airfoil characteristics at low Reynolds numbers ( $10^4$ - $10^5$ )", *Journal of aircraft*, **55**(3), 1050-1061.
- [4] Kang, S.K., Kim, J.O., Lee, S.I., and Lee, J.H., 2020, "Analysis on the aerodynamic characteristics of unique airfoil KA2", *Proc. Spring Conference of Korea Wind Energy Association*, 100-101.
- [5] Viterna, L. A., and Corrigan, R. D., 1982, "Fixed pitch rotor performance of large horizontal axis wind turbines", *NASA Technical reports*, N83 19233.
- [6] Jonkman, J., Butterfield, S., Mucial, W., and Scott, G., 2009, "Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development", *NREL (National Renewable Energy Lab) Technical reports*, <https://doi.org/10.2172/947422>.
- [7] Ryu, K.W., and Jang, K.H., 2021, "Aerodynamic design of 20 MW class offshore wind turbine blade", *Proc. Fall Conference of Korea Wind Energy Association*, 223-224.
- [8] Kang, D.H., Woo, Y.J., and Lee, J.H., 2011, "A study on the development for the airfoil of wind turbine blade using digital wind tunnel", *Proc. KFMA Annual Meeting*, 579-585.
- [9] Kang, D.H., 2012, "Study on the development of wing shape for wind turbine using digital wind tunnel", M.S. thesis, Graduate school of Kunsan national university, Kunsan.
- [10] Kang, D.H., Shin, W.S., and Lee, J.H., 2014, "Experimental study on the performance of urban small vertical wind turbine with different types", *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, **17**(6), 64-68.
- [11] Jang, C.M., Kim, Y.G., Kang, S.K., and Lee, J.H., 2015, "An experiment for the effects of the distance and rotational direction of two neighboring vertical Savonius blades", *Int. J. Energy Res.*, Special issue paper, 1-7.
- [12] Woo, Y.J., Kang, D.H., and Lee, J.H., 2014, "Aerodynamic characteristics of the original airfoil KA2 for the application of wind turbine blade", *Journal of wind energy*, **5**(1), 33-42.
- [13] Cho, K.P., Shin, S.H., Lee, J.H., and Kim, Y.Y., 2010, "Investigation of local wind around buildings by wind-tunnel tests", *Journal of wind energy*, **1**(2), 10-19.
- [14] Kang, J.M., Lee, Y.H., and Lee, K.C., 2011, "A comparative performance test for turbine in wind tunnel and towing tank", *New. Renew. Energy*, **7**(4), 42-49.
- [15] Kim, M.H., Kim, J.M., and Jeong, Y.K., 2018, "Numerical simulation and wind tunnel evaluation on the parameter contribution to the aerodynamic drag of express bus", *Transactions of the KSAE*, **26**(6), 728-735.
- [16] Choi, J.S., Lee, J.H., and Lee, J.H., 2011, "The history and types of wind tunnels", *Journal of the KSME*, **51**(6), 32-36.
- [17] SPS-F KOCED 0023-2020, 2020, "Wind tunnel test practical protocol for aerodynamic force estimation of buildings", *Korea construction engineering and transport development collaborative management institute*.
- [18] Cho, O.C., Yoo, S.S., and Lee, D.H., 1988, "Engineering design and manufacture of educational small wind tunnel", *J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci.*, **16**(2), 59-67.
- [19] Jeong, H.H., 2016, "Blockage correction and wake model of vertical axis wind turbines", Ph.D. thesis, Graduate school of Jeonbuk national university, Jeonju.

- [20] KS C IEC 61400-12-1: 2005(2018), 2018, Wind energy generation systems-Power performance measurements of electricity producing wind turbines.
- [21] Tongsawang, K., 2015, "Stall control of a NACA0015 aerofoil at low reynolds numbers", M.S. thesis, The university of sheffield, Sheffield.
- [22] Şahin, I., and Acir, A., 2015, "Numerical and experimental investigations of lift and drag performances of NACA 0015 wind turbine airfoil", *IJMMM*, **3**(1), 22-25.
- [23] Trivedi, A., 2013, "Aerospace vehicle design: Regional jet transport-An aerodynamics perspective", MEng in Aeronautical Engineering, Technical report CID 00637814.
- [24] Chakroun, W., Al-Mesri, I., and Al-Fahad, S., 2004, "Effect of surface roughness on the aerodynamic characteristics of a symmetrical airfoil", *Wind Engineering*, **28**(5), 547-564.