

풍동장치 내 공기 유동장과 속도 균일도 특성에 대한 분석

한석중* · 이상호[†] · 이재규*^{*}

A Study on the Characteristics of Air flow Fields with Velocity Uniformity in a Wind Tunnel

Seok Jong Han^{*}, Sang Ho Lee[†], and Jae Gyu Lee^{**}

Abstract Numerical simulations were carried out to analyze the flow characteristics of the wind tunnel. Flow field characteristics with velocity uniformity at the test sections are largely affected by inlet conditions of air flow rate and temperature. Axial average velocity of the flow field inside the test area was almost linearly decreased by 0.026% each 1m. The uniformity distributions of axial velocity showed the highest reduction rate of about 24% between nozzle outlets 1 ~ 2m. In addition, average velocity and the uniformity are increased with air temperature in the wind tunnel due to density variation. The results of this paper are expected to be useful for the basic design of wind tunnel and to be used for efficient design.

Key Words : Air Flow(공기흐름), Wind Tunnel(풍동), Velocity Distribution(속도분포), Uniformity(균일도), Numerical Analysis(수치해석)

1. 서론

최근 풍동장치는 차량을 포함한 다양한 운송기기의 연비개선과 안정성 검토 등 공기 유동과 밀접한 관계가 있는 다양한 시스템의 연구 개발에 중요한 설비로서 공기역학적 성능의 최적화를 위한 필수적인 데이터를 제시한다.

기존의 주요 연구로서 김세환 등⁽¹⁾은 풍동의 설계에 있어서 기본적으로 적절한 유로 및 유량을

예측하여 시험부에서 요구되는 유동을 얻을 수 있도록 하는 것이 필요하다고 제안하였다. 이를 위해 유동 속도를 얻기 위한 적절한 압력조건과 함께 풍동의 크기 및 요구 유동 속도를 만족하도록 안정적인 유량의 공급, 시험부 유동의 응축, 그리고 액화 방지를 위한 충분한 제습 등이 필요하다고 제안하였다. 이러한 중요 설계변수를 고려하여 수치 해석을 통해 풍동 노즐의 유동 특성을 평가하였다. 이와 함께 오석형⁽²⁾과 이진호⁽³⁾ 등은 풍동장치의 시험부는 축 방향 속도의 균일한 분포와 낮은 경계층 두께 및 난류강도 등의 성능들을 필요로 하기 때문에, 이에 적합한 전체적인 형상을 결정하는 것이 주요 설계목표로 된다고 제안하였다.

차량 연구개발에 풍동이 사용된 주요 연구로서 김대훈 등⁽⁴⁾은 풍동장치를 사용하여 태양광 자동차

[†] Department of Mechanical Engineering,
Wonkwang University

E-mail: lsheagle@wku.ac.kr

* Graduate School of Mechanical Engineering
Wonkwang University

** ATICS Engineering

차의 공기 저항을 감소시키기 위한 차량의 자세 결과와 요잉 모멘트의 변화를 분석하였다. 김영덕 등⁽⁵⁾은 풍동실험을 통해 정지 및 주행상태에서 차량이 풍속에 의해 영향을 받는 과정을 모형자동차 실험을 통해서 얻은 결과를 도로의 설계, 운영하는 데 기초적인 지침을 제안하였다.

또한 풍동은 운송수단의 연구 개발에만 활용될 뿐만 아니라 다양한 분야에서 사용되고 있다. 환경 분야에서 박성규 등⁽⁶⁾은 도시 내 거리의 협곡에서 대기질상태 예측을 위한 경험적인 모델을 제안하였다. 이를 위해 풍동실험을 적용하여 넓은 협곡인 경우와 도로와 수직방향으로 이동하는 바람의 영향으로 도시거리의 대기상태가 향상됨을 보여주었다. 강중훈 등⁽⁷⁾은 환기효율을 극대화 하며 빗물 유입을 최소화 할 수 있는 건물모형을 제작하고 풍동실험장치를 이용하여 건물 내로 유입되는 환기유동의 속도장을 측정하였다. 국내의 경우 '재생에너지 3020 이행계획(안)'이 발표됨에 따라 재생에너지 관심이 급증하고 있다. 재생에너지 중 풍력의 경우 발전 비중을 2030년 17.7GW까지 공급하기로 계획되어 있다 (Shin et al, 2018). 또한 정진욱 등⁽⁹⁾은 풍력발전기 상부지지구조물인 타워의 경우 바람의 풍하중에 대한 고려가 설계과정 중에 필수적이라며 강조하였다. 풍력발전기의 성능 연구 및 풍하중에 의한 발전지지구조물의 안정성 검토 등 앞으로 풍동장치는 공기 흐름을 이용하는 실제 현상을 재현시킴으로써 복잡한 공기역학적인 현상을 분석하여 설계에 반영하기 위한 필수적인 장비 중 한 가지 이다.

이와 같이 다양한 분야에서 풍동이 사용되고 있다. 효율적인 풍동장치의 개발을 위하여 많은 연구가 진행되었으며 아직까지 주요 시험부 및 바닥 등의 기하학적 형상과 단열성능, 최대풍속, 그리고 유속 균일도 등 여러 가지 특성들이 함께 필수적으로 고려가 되어야 한다.

본 논문에서는 풍동장치 내 시험부의 공기 유동장과 속도 균일도의 특성 분석을 위해 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 입구의 유동조건에 따른 풍동장치 내 공기 유동장 특성에 대한 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 풍동장치 내 공기의 3차원 유동장을 분석하였다. 유체는 정상상태의 압축성, 난류 유동으로 가정하였으며, 다음과 같은 지배방정식들을 이용하여 수치해석을 수행하였다.

연속방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + \rho g_i \quad (2)$$

운동에너지 및 소산율 방정식:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\alpha_k \mu_{eff}) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \\ &+ G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m + S_k \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\alpha_\epsilon \mu_{eff}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \\ (G_k + G_3 \epsilon G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \end{aligned} \quad (4)$$

이상기체상태방정식:

$$P = \rho RT \quad (5)$$

이와 함께 난류모델로서 일반적인 RNG k-ε 모델을 사용하였고, 모든 해석에서 동일하게 입구의 난류 강도를 5%로 가정하였다.

2.2 경계조건

입구에는 일정한 상태의 유량이 2500~2900 m³/min 범위에서 변화하며 풍동장치 시험부의 유동 특성

을 분석하였다. 풍동장치의 정류실 내에는 공기의 온도를 설정하는 열교환기와 유동 균일화를 위한 허니콤과 스크린이 있는데 격자 구성 시 다공성 매체로 설정하였다. 다공성 매체는 각각의 두께와 가정한 공극률과 입출구의 압력차이를 이용하여 속도 관계식을 계산하였다. 계산에 사용된 다공성 매체의 두께와 공극률을 Table. 1에 제시하였다.

또한 공기 온도에 따른 풍동장치의 균일도를 분석하기 위해 유동장 내외의 열전달은 없으며, 유동장에 균일한 온도 조건으로 283.15K ~ 333.15K에서 시험부의 축 방향 속도분포를 분석하였다.

2.3 해석방법

풍동장치의 3차원 내부 유동장의 해석을 위해 Dassault systemes社의 Soildworks (2016)와 범용 CFD 해석 프로그램인 ANSYS社의 Fluent (Release 19)를 이용해 전산해석을 수행하였다. 지배방정식들을 풀기위해서 Coupled알고리즘과 함께 2차 상류차분법 (Second Order Upwind Scheme)을 적용한 유한체적법이 사용되었다. 다음 Fig. 1은 전산해석을 수행한 풍동장치 시험부 형상이며, 폭(x 방향)은 10 m, 높이(y 방향) 8.85 m, 축 방향(z 방향)으로 18.8 m이다.

2.4 격자 시스템

풍동 전체 형상에 대해 수치해석을 수행하였으며, Fig. 2는 해석에 사용된 수축부와 시험부의 계산격자시스템을 나타낸 것이다. 전체적으로 격자 수는 약 2038만개로 유동이 복잡한 형상에는 부분적으로 사면체 비정렬 격자로 구성하였고, 시험부에는 주로 직육면체격자를 적용하였다. 해석에 사용된 격자의 약 2배인 4266만개의 격자로 해석 시 노즐 출구 1 m 면에서 축 방향 평균속도가 1%내의 오차로 격자의존도를 파악하였다.

Table 1. Porous media specifications

	Heat exchanger	Honey comb	Screen
Thickness [mm]	300	300	0.5
Porosity	0.5	0.65	0.65

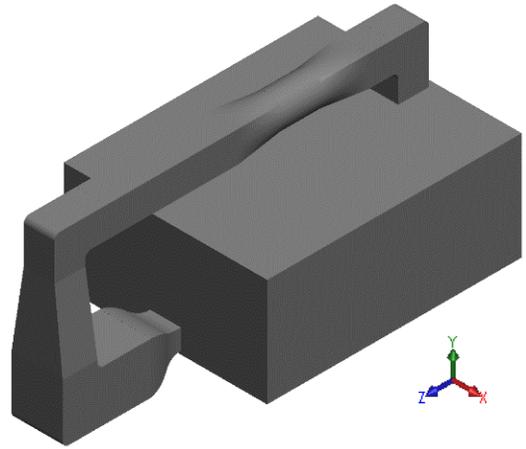


Fig. 1. Wind tunnel geometry

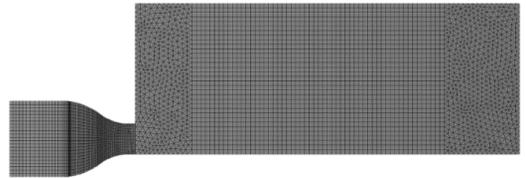


Fig. 2. Numerical mesh generation

3. 결과 및 고찰

시험부 축 방향의 속도분포와 균일도를 분석하기 위하여 시험부내에 노즐 출구 면적과 동일한 크기의 면을 노즐 출구로부터 1 m 간격으로 배치하였다. 총 9개의 축 방향의 수직한 면에서 다음과 같이 속도분포와 균일도를 분석하였다.

3.1 시험부 축 방향 평균속도성분의 분포

Fig. 3은 풍동의 입구 유량에 따른 시험부 내 축 방향 평균속도 변화를 나타낸 것이다. 노즐의 수력 직경을 사용하여 시험부 내 단면의 위치를 계산하였고, 유량 별 노즐 출구면의 평균속도를 이용하여 축 방향 단면의 무차원화 평균속도를 나타낸 것이다. 전체적으로 노즐 출구에서 멀어질수록 평균속도는 점차 감소하였고, 1m 간격으로 약 0.026 %씩 점차 감소하였다. 유량이 증가할수록 동일한 단면에서 평균속도는 증가하였고, 2600 m³/min과 2800 m³/min을 비교하였을 때 낮은 유량에서 노즐 출

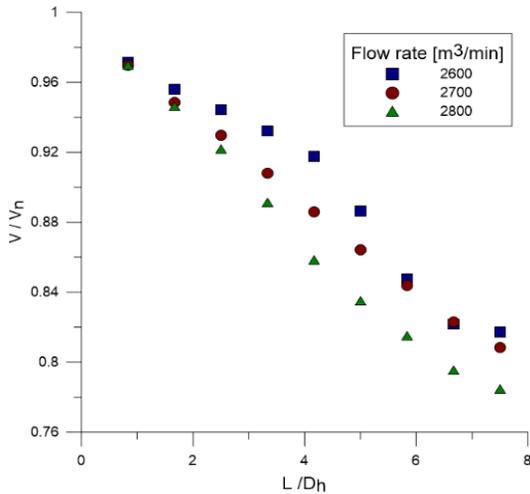


Fig. 3. Mean velocity variation with flow rate

구 평균속도대비 각 위치의 속도가 높게 나타났다. 4 m 부근에서 약 6.9%로 가장 높은 차이를 보였다.

3.2 유량에 따른 축 방향 풍속 균일도

입구 유량에 따른 시험부 축 방향 풍속의 균일도를 분석한 결과 전체적으로 Fig. 4와 같이 높은 압력이 나타나는 정류실을 통과하여 수축부를 지나면서 점차 낮아지며 시험부 내부에서는 거의 균일하게 유지되었다. 입구 유량이 증가할수록 입구와 출구의 압력차이가 증가하였으며 최대 약 0.69% 차이를 보였다. Fig. 5는 공기의 속도분포를 나타낸 것이다. 수축부를 지나며 압력이 낮아지며 풍속은 급격히 증가하였다. 또한 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 노즐 출구에서 멀어지면서 유속이 퍼지는 현상이 관찰되었다.

Fig. 7은 입구유량 2900 m³/min일 때 노즐 출구 위치부터 축 방향으로 수직인 면에서 속도분포를 비교한 것이다. 노즐 출구에서 멀어 질수록 각 단면의 평균속도가 점차 감소하였고, 1m 단면과 9m 단면에서 약 24% 감소율이 나타났다. Fig. 8은 입구 유량에 따른 각 단면 속도의 균일도를 나타낸 것이다. 축 방향의 균일도(를 다음과 같은 식을 통하여 결정하였다. 여기서 은 노즐 출구 면적이며, 는 1m 간격의 각 단면 최고속도의 +/- 3%의 면적이다.

$$\xi = \frac{A_{m \max}}{A_n} \quad (6)$$



Fig. 4. Pressure distributions



Fig. 5. Velocity vector distributions

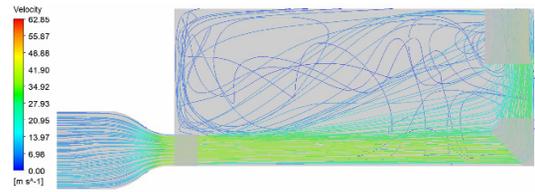


Fig. 6. Streamline distributions in the test section

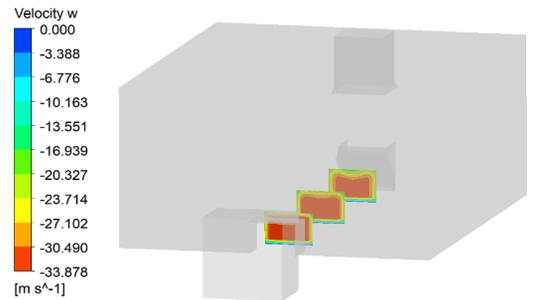


Fig. 7. Axial velocity distributions

모든 유량에 대해 노즐 출구 1 m에서 가장 높은 균일도로 약 54%를 나타냈고 노즐 출구에서 멀어 질수록 점차 감소하였으며, 9 m 부근에서 가장 낮은 약 18%의 균일도를 보여주었다. 특히 1 m ~ 2 m 단면에서 약 24%로 가장 높은 감소율을 보여주었다.

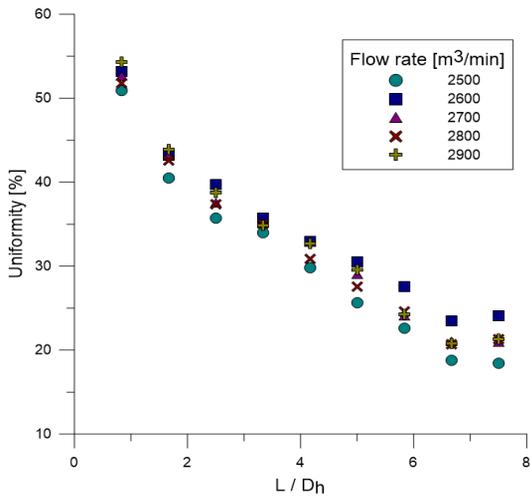


Fig. 8. Uniformity variation with flow rate

3.3 공기온도에 따른 균일도

Fig. 9는 시험부 내 공기의 밀도분포를 나타낸 것이다. 노즐 출구에서 멀어지며 높은 밀도의 면적이 줄어들며 각 단면의 평균밀도가 감소하였고, 노즐 출구로부터 1m 간격으로 평균 약 0.028%의 감소율을 보였다. Fig. 10은 동일한 입구 유량에서 공기 온도에 대한 시험부 축 방향 균일도를 나타낸 것이다. 초기 2 m부근까지는 283.15K의 균일도가 높게 나타났다. 2 m이후로는 333.15K의 균일도가 높게 나타났고 9 m부근에서 약 3.4배의 가장 높은 차이를 보였다. 고온공기의 경우 상대적으로 부피가 커지면서 밀도가 낮아지기 때문에 노즐 출구에서 멀어질수록 균일도가 증가하는 것으로 판단된다.

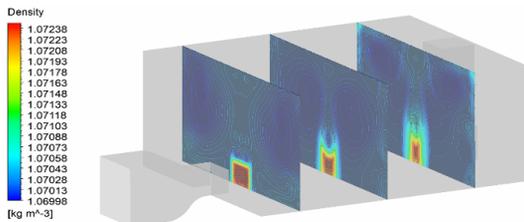


Fig. 9. Air density distributions in the test section

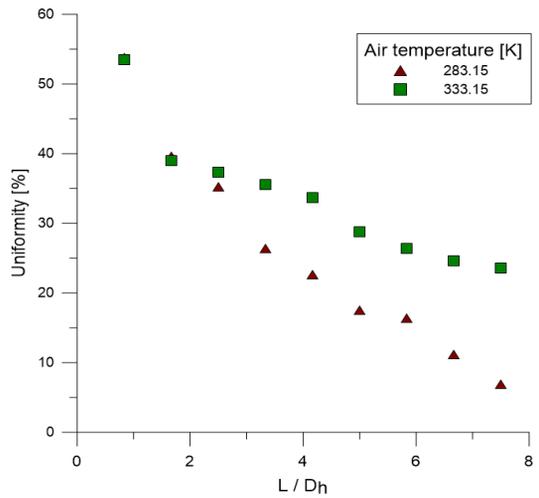


Fig. 10. Uniformity variation with air temperature

4. 결론

본 연구에서는 풍동장치의 입구유량에 따른 시험부 내부 공기의 유동 특성과 균일도에 대해 전산해석을 이용하여 분석하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 노즐 출구로부터 멀어질수록 각 단면의 평균 속도는 점차 감소하였으며, 약 24%로 시험부에서 가장 큰 감소율이 나타난다.
2. 시험부 축 방향 균일도는 전체적으로 약 54 ~ 18%를 보여 주었다. 노즐 출구의 1~2m 사이에서 가장 높은 감소율 약 24%을 나타냈으며 전체적으로 거의 선형적으로 감소하였다.
3. 공기온도 증가에 따라 균일도가 높아지며 노즐 출구 2 m 지점부터 고온의 조건에서 점차 증가하였다.

본 연구의 결과는 풍동장치의 개발에 필요한 기초적인 설계데이터로 활용이 가능할 것으로 기대되며 추후 실험을 통해 얻은 데이터와 비교가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 중소벤처기업부 구매조건부신제품개발사업인 “소형풍동의 구조체 모듈화 기술 개발 (과제번호: 20180125)”의 지원으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

REFERENCE

- 1) Kim, S.H., Park, J.H., Lee, S.B., Jeung, I.S., Lee, H.G., 2011, “Development and Operating Test of the Supersonic Wind Tunnel with 25cm × 20cm Test Section”, The Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 2011 No.11, pp.777-780
- 2) Oh, S.H., Kim, J.K., 2018, “Numerical Analysis on the Internal Flow Field Characteristics of Wind Tunnel According to the Change of Contraction Length,” Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 22(4), pp. 81~88.
- 3) Lee, J.H., Huh, C.J., Bae, K.J., Bae, Y.W., Byun, Y.H., Lee, J.W., Chang, J.W., 2004, “A Study on the Development and Performance Test of Supersonic Wind Tunnel for Education,” Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 32(8), pp.129~137.
- 4) Kim, D.H., Lee, H.W., 1999, “Aerodynamic Characteristics of 1/5-scale Solar Car with Wind Tunnel,” The Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 1999(11), pp. 471~477.
- 5) Kim, Y.D., Park, K.Y., Lee, J.K., Choi, J.Y., 2007, “A Wind Tunnel Test on Effects of Cross Winds on Vehicles,” Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 11(2), pp. 161~170.
- 6) Park, S.K., Kim, S.D., Lee, H.K., 2005, “Development of Empirical Model for the Air Pollutant Dispersion in Urban Street Canyons Using Wind Tunnel Test,” Journal of Korean Society of Environmental Engineers, Vol. 27(8), pp. 852~858.
- 7) Kang, J.H., Lee S.J., 2005, “Improvement of Natural Ventilation in a Factory Building Using PIV Technique”, The Korean Society of Visualization, pp.46~49
- 8) Shin, W.S., Park, S.S., You, S.H., Lee, J.H., 2018, “A Study on Development and Performance Evaluation of Digital Wind Tunnel for Small Laboratory Usage,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.8 (4), pp. 138~139.
- 9) Joung, J.W., Kim, Y.M., Sin, S.H., 2015, “Study on Wind Loads for the Various Cross-sectional Shapes of a Wind Turbine Tower through a Wind Tunnel Test and a CFD Simulation,” Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 19(1), pp. 3~10.
- 10) Solidworks User’ Manual, 2016, Dassault System.
- 11) FLUENT User’s Guide, 2017, FLUENT Inc.