94 설비공학논문집 제 25 권 제 2 호(2013)/pp. 094-100
Korean J. Air-Conditioning and Ref. Eng. 2013. 2.: 25(2)
http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2013.25.2.094

수직구조물 후방의 와류현상이 구조물에 설치된 벤투리관의 유체가속 효과에 미치는 영향에 관한 해석 연구

정 광 섭, 김 철 호*†, 조 현 성**
서울과학기술대학교 건축학부, *서울과학기술대학교 기계·자동차공학과, **서울과학기술대학교 NID 융합대학원

Effect of Rear-Vortex of a Convergent-Divergent Duct on the Flow Acceleration Installed in a Vertical Structure

Kwang-Seop Chung, Chul-Ho Kim*†, Hyun-sung Cho*
School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea
**Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea*
***NID Fusion Graduate School, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea*

(Received November 26, 2012; revision received January 8, 2013)

ABSTRACT: A convergent-divergent nozzle or venturi nozzle has been used to accelerate the wind speed at its throat. The wind speed at the throat is inversely proportional to its area according to the continuity equation. In this numerical study, an airflow phenomena in the venturi system placed at a vertical structure was investigated to understand the vortex effect occurred at the rear-side of the vertical structure on the air speed increment at the throat of the venturi system. For this study, a venturi system sized by 20(m)×20(m)×6(m) was modelled and the area ratio(AR) of the model venturi was 2.86. To see the vortex effect on the air flow acceleration in the venturi throat, two different boundary conditions was defined From the study, it was found that the pressure coefficient(CP) of the venturi system with the vortex formed at the exit of the venturi was about 2.5times of the CP of the venturi system without the vortex effect. The velocity increment rate of the venturi system with the vortex was 61% but 9.5% only at the venturi system without the vortex. Conclusively, it can be said that the venturi system installed in a vertical structure has very positive effect on the flow acceleration at its throat due to the vortex formed at the rear-side of the vertical structure.

Key words: Venturi duct(벤투리관), Computational Fluid Dynamics(전산유체동력학), Vortex effect(와류효과)

기 호 설 명

C_P : pressure coefficient
A_R : area ratio
R_{VI} : velocity increment rate
V_{wind} : wind velocity
V_{th} : velocity at throat,
V_{in} : velocity at the inlet of venturi nozzle

† Corresponding author
Tel.: +82-2-970-6347; fax: +82-2-979-7032
E-mail address: profchkim@seoultech.ac.kr

1. 서 론

자연계에서 유체의 흐름 속도를 가속시키기 위해 수축-확대 노즐(convergent-divergent nozzle)인 벤투

리관을 활용한다. 본 연구는 벤투리관이 설치되는 수직구조물에서 유체가 벤투리관의 목(throat)을 통과할 때 유체의 흐름이 가속되는 원리를 이해하고 가속에너지원의 원인분석을 통해 흐름의 에너지를 극대화하는 벤투리관 구조물을 설계하는 기법을 도출하는데 연구의 목적을 두고 있다. 일반적으로 유체가 벤투리관을 통과할 때 유체의 가속원리는 단순히 유체동력학의 이론인 연속방정식의 개념에 따라 유로의 단면적에 반비례하여 흐름 속도가 가속되는 것으로 산출된다. 그러나 Fig. 1에서처럼 수직구조물 내부에 설치된 벤투리의 경우는 구조물의 후방에서 와류(vortex)가 발생하게 되며 이러한 와류의 현상에 의해 벤투리관의 입·출구에서 압력차가 발생하여 벤투리 목에서의 유체의 속도에 영향을 미치게 된다는 물리적 현상을 예측할 수 있다.

본 해석 연구에서는 이러한 수직구조물의 후방에서 발생하게 되는 흐름의 와류현상이 벤투리관을 통과하는 유체유동의 특성에 미치는 영향을 수치해석 기법을 이용하여 정성, 정량적으로 분석하였다.

2. 수치해석 연구를 위한 벤투리유로를 포함하는 수직구조물의 형상

유동장내에서 유속에너지를 증대시키기 위해 적용되는 벤투리관 내부에서의 유체유동 현상을 이해하기 위해 Fig. 2와 같은 벤투리관의 유동장을 설정하였다. 폭과 길이가 각각 20 m이며 높이 6 m인 벤투

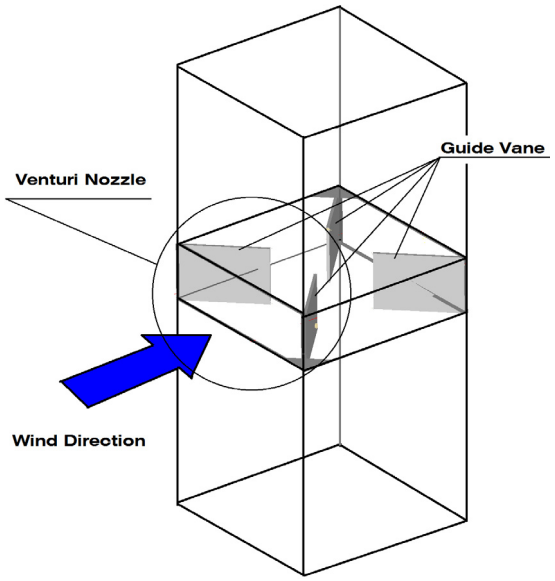


Fig. 1 Prospective view of the proposed cross flow vertical wind turbine system.

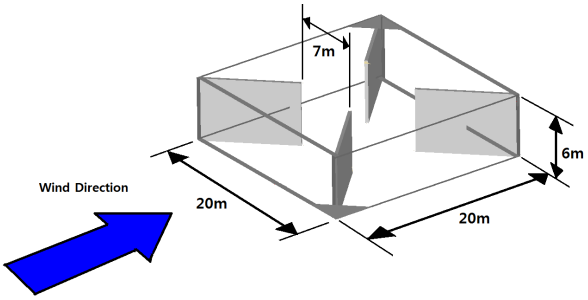


Fig. 2 Physical domain of the model flow field : 20 m(W)×20 m(L)×6 m(H).

리관 형상을 기준으로 바람의 속도를 6.0~16.0 m/s로 변화시켜가며 유동장의 특성변화와 벤투리 목에서의 가속특성을 분석하였다. 벤투리관의 목와 입구의 면적비($A_R = A_{th}/A_{in}$)는 0.35로 설정하였으며, 유입되는 바람은 STP 상태의 공기로 가정하였으며, 바람의 세기와 방향은 일정하다고 가정하였다.

벤투리관의 가속효과를 평가하기위해 다음의 두 가지 항을 비교 평가하였다.

(1) 벤투리 목에서의 가속효과

(2) 벤투리 입 출구에서의 압력계수(C_P)

에너지 산출을 위한 이론정리 :

• Pressure Coefficient (C_P)

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho V^2} \tag{1}$$

여기서 ΔP는 벤투리 출구와 목에서의 압력차

• Velocity Increment Rate(R_{VI})

$$R_{VI}(\%) = \frac{V_{th} - V_{in}}{V_{in}} \tag{2}$$

여기서

V_{th} : velocity at throat,

V_{in} : velocity at the inlet of venturi nozzle

3. 해석연구를 위한 주요변수 및 해석조건

본 해석연구는 저속의 바람을 가속시키기 위해 적용하는 벤투리관을 수직구조물에 설치하였을 경우 바람의 속도가 가속되는 원리를 구체적으로 이해하

고, 가속 효과가 어느 정도인지를 정량적으로 판단하기 위해 CFD(computational fluid dynamics)기법을 이용하여 수치해석 연구를 실시하였다.

3.1 수치해석연구를 위한 벤투리관의 주요 형상변수

벤투리관의 입구와 목의 면적비(A_R)는 0.35로 고정하였으며, 풍속은 벤투리관이 설치되어있는 수직구조물의 전방 20 m에서 균일하게 불어온다고 가정하고 6~16 m/s로 변화시켰다. 특히 수직구조물 후방에서 발생하게 되는 와류(vortex) 유동 현상이 벤투리관 내부에서 유체의 가속효과에 미치는 영향에 관해 알아 보기위해 수직 타워구조물의 해석 시 경계조건을 타워 후방의 와류효과를 고려한 모델(WTO, open model)과 무시한 모델(WTC, closed model) 2가지로 정의하였다. Table 1은 본 해석 연구를 위해 적용한 벤투리 모델의 종류와 해석조건을 보여준다.

3.2 유동장 해석을 위한 수치해석 기법

수직구조물 내부에 설치된 벤투리관에서의 유동현상을 수치 해석적으로 묘사하기 위해 유한체적법(Finite Volume Method)[1]을 적용한 PHOENICS (ver. 2011)[2] CFD 프로그램을 사용하였으며 해석을 위한 공기 유동 장은 다음과 같이 정의하였다.

- 3차원 난류유동(3D Turbulent Flow)
- 비압축성유동(Incompressible Flow)
- 정상유동(Steady Flow)
- 등온유동(Isothermal Flow)

검사체적내의 비압축성 난류유동장 해석을 위해 3차원 Navier-Stokes 방정식[3]을 풀었으며, 난류해석을 위해 표준(κ-ε) 모델[4]을 사용하였다. 점성효과에 의한 고체 표면에서의 대류 열전달의 현상은 무시할 수 있으므로 에너지 방정식은 풀지 않았다.

Table 1 Important geometrical variables of the model venturi system and its boundary and initial conditions

	Area Ratio(A_R)	V_{wind}(m/s)	Vortex Effect
WTO	0.35	6~16	with vortex
WTC			w/o vortex
model venturi size : 20 m(W)×20 m(L)×6 m(H)			

유동해석의 수렴성 판단을 위해 각 변수들의 계산 잉여율(residual fraction)이 10^{-4}이하로 떨어질 때까지 충분히 반복적으로 계산하였다. 정상, 비압축성, 난류 유동장의 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다.

지배방정식(Governing Equations)

- 연속방정식

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i}+\frac{\partial U_j}{\partial y_i}+\frac{\partial U_k}{\partial z_i}=0 \tag{3}$$

- 운동량방정식

$$\frac{\partial U_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(U_iU_j)=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[v\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)-\overline{u_iu_j}\right]-g_i \tag{4}$$

- 난류운동에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(U_jk)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(v+\frac{v_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G-\epsilon \tag{5}$$

- 소산방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(U_j\epsilon)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(v+\frac{v_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right]+\frac{\epsilon}{k}(C_{\epsilon1}G-C_{\epsilon2}\epsilon) \tag{6}$$

여기서 $-\overline{u_iu_j}=v_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_i}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}k\delta_{ij}$

$$G=-\overline{u_iu_j}\frac{\partial U_i}{\partial x_j},\ v_t=C_\mu\frac{k^2}{\epsilon}$$

($C_\mu=0.09$, $C_{\epsilon1}=1.44$, $C_{\epsilon2}=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.0$)

해석 공간의 격자생성을 위해 CAD-to-CFD 격자생성법[5]을 이용하였다. 유동장내의 벤투리관 모델 형상(physical model)을 수치해석 모델(numerical model)로 만들기 위해 먼저 3D CAD 프로그램인 ProEngineers를 이용하여 3차원의 실제 형상을 만들고 이 캐드파일을 해석 공간인 수치해석 도메인

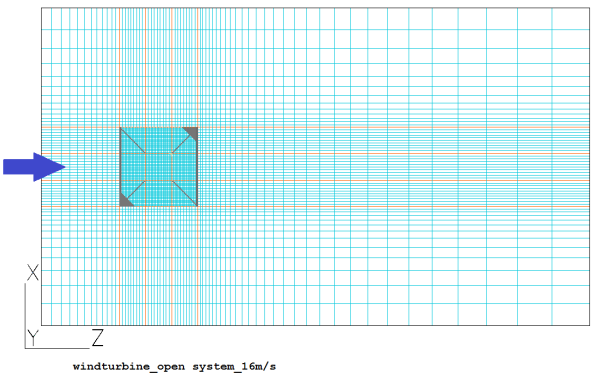


Fig. 3 A typical 2-D numerical grad of the open channel with the model venturi system(WTO).

으로 불러와 직각 좌표계 상에서 정방격자(rectangular grid)를 생성하여 해석을 위한 격자 파일을 생성하였다. Fig. 3은 벤투리시스템을 설치한 해석 도메인의 2차원 수치 격자계의 예를 보여준다. 해석격자의 크기는 격자시험을 거쳐 최종적으로(56×1×69)의 값으로 결정하였다. 벤투리시스템 후방 부위에 충분한 계산영역을 주어 검사체적의 출구에서 유동장이 충분히 발달되도록 하였다.

3.3 수치해석의 경계 및 초기조건

유동장 내의 압력산출을 위해 SIMPLE 알고리즘[4]을 적용하였으며 운동방정식과 난류 방정식(standard-turbulent model)의 대류항(convection term) 계산을 위해 하이브리드(hybrid scheme) 방법을 사용하였다.

해석을 위한 경계 및 초기조건 :

- Inlet : 속도경계조건으로 바람의 속도범위를 6.0 ~16.0 m/s로 변화시킴.
- Outlet : 압력경계조건으로 출구의 바깥쪽은 유동이 완전히 발달하였다고 가정함.
- 모든 고체의 표면은 미끌림이 없는 경계조건(No-slip boundary condition)으로 정의함.
- 해석 영역의 좌우 측면과 위쪽 면 역시 유동장이 완전히 발달하였다고 가정하여 압력경계조건으로 정의함.

4. 연구결과 및 분석

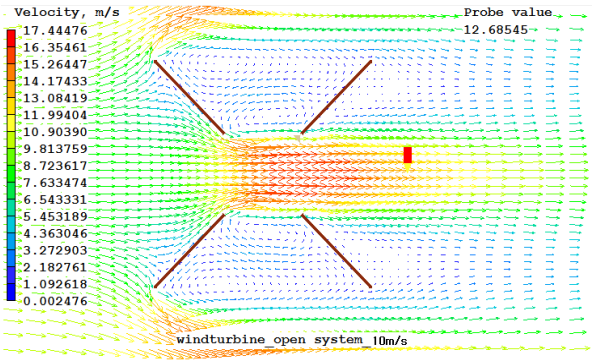
수직구조물 내부에 설치된 벤투리관에서 공기흐름의 가속효과를 분석하기 구조물 후방에서의 와류가 있는 모델과 와류의 효과를 무시할 수 있는 2개의 모델을 설정하고 벤투리 관내의 입구와 목(throat)에서의 속도의 변화율과 압력계수(C_P)의 변화를 정량적으로 분석하여 보았으며, 또한 공기의 가속원리를 정성적으로 분석해 보았다.

4.1 수직구조물 후방의 와류(vortex)현상 유무에 따른 유동특성 분석

Fig. 4는 수직구조물 후방에서의 와류유동의 유무에 따른 벤투리관 유동장 내부에서의 공기 유동현상을 보여 준다. 유동 패턴을 유사하게 보이나 와류의 영향이 있는 경우가 벤투리 후방에서의 압력저감으로 속도가 증가한다는 사실을 보여 준다. 이로 인해 벤투리관 목에서의 속도가 크게 가속될 수 있다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 5는 위와 같은 조건에서 벤투리관 주위에서의 정압분포를 보여준다. 와류의 효과가 있는 경우가

(with swirl)



(without swirl)

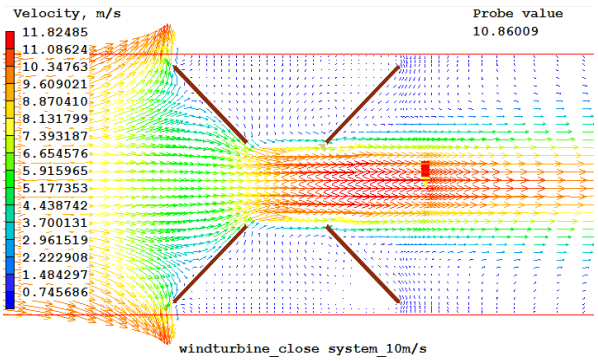
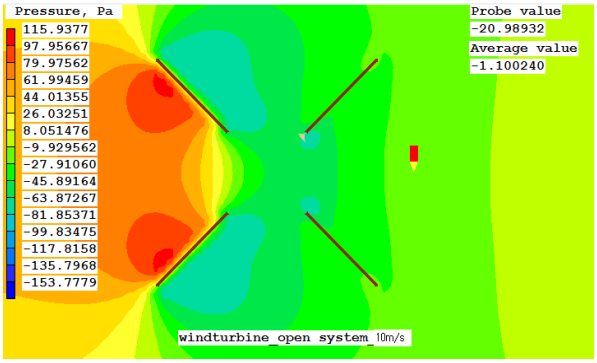


Fig. 4 Compression of the air speed distribution at the flow field with and without the vortex effect at the rear-side of the vertical stack : V_{wind} = 10 m/s.

(with swirl)



(without swirl)

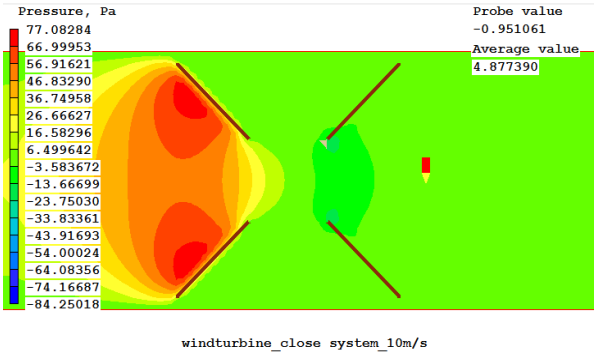
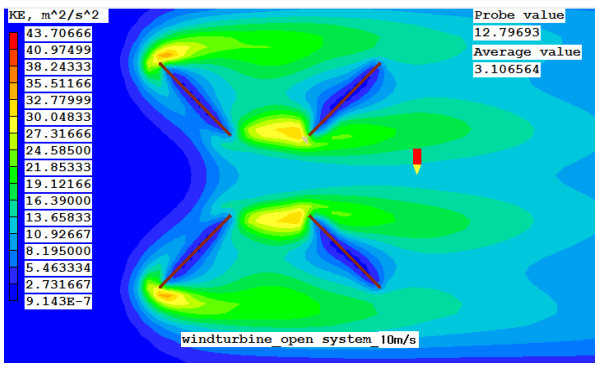


Fig. 5 Compression of the static pressure distribution at the flow field with and without the vortex effect at the rear-side of the vertical stack : V_{wind} = 10 m/s.

(with swirl)



(without swirl)

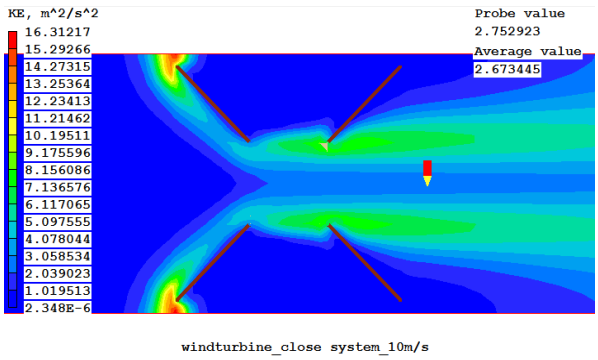


Fig. 6 Compression of the turbulent kinetic energy distribution at the flow field with and without the vortex effect at the rear-side of the vertical stack : V_{wind} = 10 m/s.

벤투리관 후방에서의 정압이 훨씬 낮게 걸린다는 사실을 알 수 있다.

즉 벤투리관의 전후방의 압력차이가 크게 유발하므로 목에서의 공기속도가 크게 증가할 수 있다고 판단된다.

Fig. 6은 와류효과의 유무에 따른 벤투리관 유동장 내부에서의 난류운동에너지 분포를 비교하는 그림이다. 와류의 효과가 있는 경우가 벤투리관 내부에서의 난류운동에너지가 높다는 사실을 알 수 있다. 즉 벤투리관 후방에서의 난류운동에너지의 강도가 높다는 의미이며 이로 인해 관의 출구에서의 정압이 낮아지는 원인이 되며 이는 벤투리관의 목에서 속도가 증가하게 되는 원인이 된다.

4.2 수직구조물 후방의 와류(vortex)현상 유무에 따른 공기의 가속효과 분석

Fig. 7은 벤투리관 입구와 목에서의 차압의 크기 변화를 나타내는 선도이다. 차압이 클수록 벤투리관

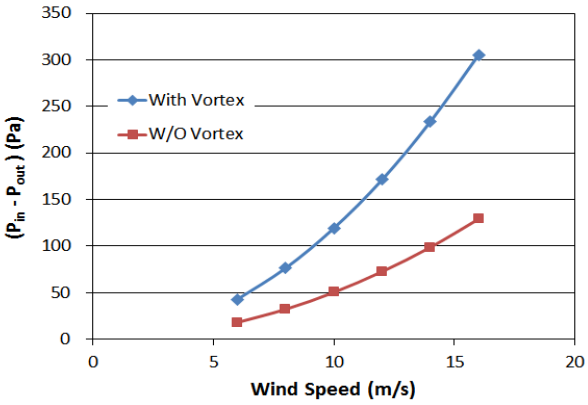


Fig. 7 Variation of the pressure difference between inlet and throat of the venturi duct with the wind speed.

에서의 공기가속 효과가 증대됨을 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 수직구조물 후방에서 와류현상이 있을 때가 차압의 크기가 증가한다는 사실을 알

수 있다. 이는 후방의 와류현상이 압력을 떨어뜨려 벤투리관 목에서의 공기의 흐름을 가속시키는데 역할을 하게 된다.

Fig. 8은 수직구조물 후방에서 와류효과의 유무에 따른 벤투리관에서의 압력계수(Cp)의 크기를 보여준다. 수직구조물 후방에 와류가 발생하는 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 압력계수가 2배 이상 된다는 사실을 알 수 있다. 이 역시 압력계수가 클수록 벤투리관 목에서 유체를 가속시키는 압력에너지의 크기가 크다는 것을 의미한다.

Fig. 9는 바람의 유입속도변화에 따른 벤투리관 목에서 공기의 속도변화를 나타내는 그림이다. 수직구조물 후방에서의 와류효과는 앞에서 언급되었듯이 벤투리관 목에서 유체를 가속시키는데 긍정적인 효과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 벤투리관 후방에서의 와류현상은 목에서의 공기흐름의 속도

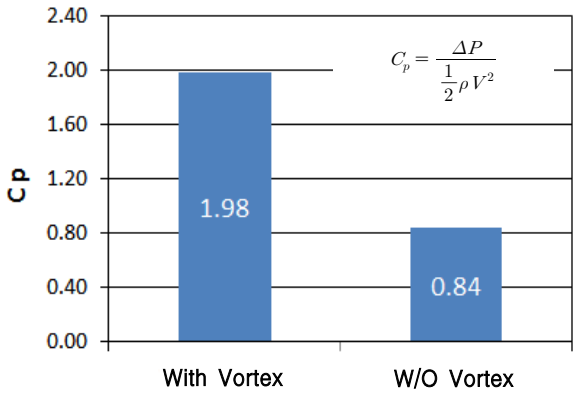


Fig. 8 Comparison of pressure coefficient(C_P) of the venturi duct with or without the vortex effect at the rear of a vertical structure.

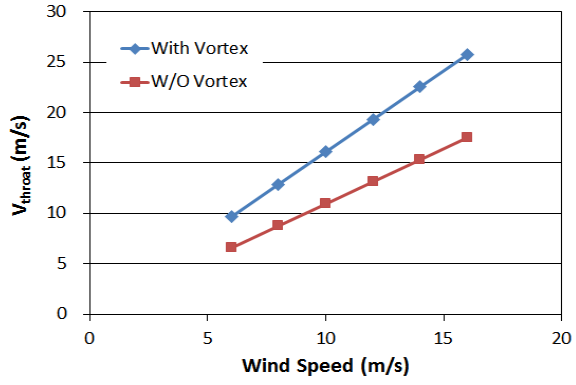


Fig. 9 Variation of the air speed at the venturi throat with the inlet wind speed.

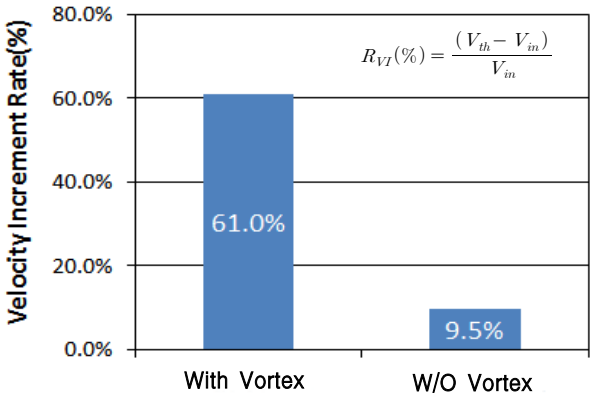


Fig. 10 Comparison of velocity increment rate(R_{VI}) of the venturi duct with or without the vortex effect at the rear of a vertical structure.

를 가속시키는데 긍정적인 효과를 나타냄을 알 수 있다. 또한 바람의 속도가 증가할수록 벤투리관 목에서의 공기의 속도가 커진다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 10은 벤투리관에서 공기의 속도증가율을 나타내는 선도이다. 수직구조물 후방에서 와류효과가 존재할 때 벤투리관 목에서 공기속도가 입구속도에 비해 61% 정도 증가한다는 사실을 알 수 있으며, 그렇지 않은 경우는 입구와 목의 면적비를 2.86배 정도로 축소하였음에도 불구하고 속도는 9.6% 정도 증가함을 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 수직구조물 내부에 설치되는 벤투리관 목에서의 공기속도의 가속효과에 관해 알아보았다. 수직구조물의 후방에는 공기의 와류현상이 발생하게 되며 이러한 와류현상은 벤투리관의 출구부에 낮은 압력을 형성하여 벤투리관 목에서의 공기의 속도를 증가시키는 역할을 하게 된다. 본 연구 결과에 의하자면,

(1) 벤투리관에서의 압력계수(Cp)값은 바람의 속도에 상관없이 와류의 현상이 존재할 때는 1.98, 와류의 현상을 무시할 경우 0.84로 일정한 값을 나타내었다. 즉 수직구조물 후방의 와류효과는 구조물 후방에서의 압력을 2배 이상 낮추는데 기여하였다고 판단할 수 있다.

(2) 와류효과가 존재할 경우 벤투리관의 입구와 목의 면적비가 2.86배임에도 불구하고 목에서의 바람 속도 증가율이 61% 정도 된다는 사실을 알 수 있었

으며, 와류현상이 존재하지 않을 경우는 바람속도증가율은 불과 9.5% 정도 된다는 사실을 알 수 있었다.

즉 타워형 구조물에 설치되는 벤투리관에서 유체가 가속되는 원리는 단순한 연속방정식에 의한 벤투리관 입출구의 면적비에 의해 결정되는 것이 아니라 타워후방에서 발생하게 되는 와류현상의 에너지가 벤투리관의 목에서 유체 속도를 증가시키는데 6배 이상 매우 크게 작용한다는 사실을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 “12첨단도시C12”)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Douglas, J. F. et al., 2001, Fluid Mechanics, Prentice Hall, pp. 406-447.
2. PHOENICS PIL Manual, 2011, Version 2010, CHAM Ltd.
3. Cengel, Y. A. and Cimbala, J. M., 2009, Fluid Mechnaics Fundamentals and Applications, Mc-Graw-Hill International, 2nd edition, pp. 472-476.
4. Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp.
5. Thompson, R. L., 1991, Body Fitted Coordinate, John Wiley and Sons, Inc.