

# 풍황탑 차폐영향 분석을 위한 3차원 전산유동해석

이희남\*, 김태성\*, 전완호\*\*, 김현구\*\*\*

\*국립순천대학교 우주항공공학과, \*\*(주)세딕, \*\*\*한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부

## Three-Dimensional Computational Flow Analysis on Meteorological-Tower Shading Effect

Rhee, Hui-Nam\* Kim, Tae-Sung\* Jeon, Wan-Ho\*\* Hyun-Goo\*\*\*

\*Dept. of Aerospace Engineering, Suncheon National University,

\*\*CEDIC Co. Ltd.,

\*\*\*New & Renewable Energy Division, Korea Institute of Energy Research

### Abstract

It is difficult to avoid measurement errors caused by the shading effect of the meteorological tower, which is used for wind resource assessment according to the IEC Standard. This paper presents a validation of the computational flow analysis results by comparing the results with the wind tunnel experiment conducted for Reynolds numbers in the  $10^4$  to  $10^5$  range, for the preparation of a database for use in an automatic method of correcting met-tower shading errors. A three-dimensional simulation employing the MP (Modified Production)  $k-\epsilon$  turbulence model predicted a wind speed deficit in the wake region according to minimum wind speed ratio, within an MAE (Mean Absolute Error) of 2.4%.

Keywords : Meteorological-tower(풍황탑), Shading effect(차폐영향), Wind resource assessment(풍력자원평가), CFA(Computational Flow Analysis; 전산유동해석)

### 1. 서론

풍력발전단지 건설을 위한 타당성 조사를 위해서는 건설 후보지 내 풍황 대표지점에 풍황탑을 설치하고 최소한 1년 이상의 계측자료를 확보한 후 풍력자원평가를 실시하여야 한다<sup>1)</sup>. 풍황탑에 풍속계를 장착할 때, 주풍향

방향으로 뺀 수평 붐(boom)을 설치하고 그 끝단에 풍속계(anemometer)를 장착하여 풍황탑 구조물로 인하여 형성되는 후류에 의한 차폐영향을 최소화 하여야 한다. 그러나 계절에 따라 주풍향이 변화하기도 하므로 현실적으로 차폐영향을 완전히 회피하기는 어렵다. 이러한 이유로 풍력발전기 성능평가를 위한

Submit date : 2012. 8. 8, Judgment date : 2012. 9. 4, Publication decide date : 2012. 12. 28  
Communication author : Kim, Hyun-Goo(hyungoo@kier.re.kr)

풍황탐 계측 시에는 차폐영향이 발생하는 풍향범위의 계측자료를 측정오차로 판단하여 해석에서 제외시키도록 규정하고 있다.<sup>2)</sup> 한편 김현구 등<sup>3)</sup>에 의하면 풍황탐 차폐오차는 2.5% 이상의 풍력밀도(wind power density) 과소평가를 유발하기 때문에 풍력자원평가 시 반드시 고려되어야 할 측정불확도 요인임을 지적하고 있다.

본 논문에서는 전산유동해석을 이용한 풍황탐 차폐오차 보정방법<sup>4)</sup>을 개발함에 있어서, 풍황탐에 설치된 풍속계 주위의 대기유동장을 전산유동해석으로 수치해석하고 신뢰할 만한 풍동실험 결과와 정량비교를 하였다. 이를 통하여 전산유동해석이 풍황탐 차폐오차 보정에 유효한 방법인지를 검증할 뿐 아니라 풍황탐 구조물에 의한 후류예측에 적합한 난류모델을 선정하였다.

## 2. 풍황탐 차폐영향 풍동실험

본 연구에서는 3차원 전산유동해석과의 정량비교를 위해 Orlando et al.<sup>5)</sup>이 캐나다 워털루 대학의 개방형 풍동에서 수행한 풍동실험 자료를 사용하였다. 풍동 실험부의 단면적은 7.9m x 7.9m이며 길이는 19.5m로, 그 중앙 바닥면에 3.66m 높이의 지름  $D=15.2, 20.3\text{cm}$ 인 폴(pole)을 설치하고 바닥면으로부터  $H=1.33\text{m}$  높이에 지름 0.038m, 길이 1.91, 1.93, 2.44m인 수평 붐을 설치하였다(Fig. 1).

Orlando et al.<sup>5)</sup>은  $x=L/D$  및 상류풍속 ( $U_{\text{upstream}}=5.7, 8.6, 11.5\text{m/s}$ ; Fig. 2 참조) 조합에 의해 폴 직경과 상류풍속을 기준으로 한 레이놀즈 수  $Re=5.8 \times 10^4$  부터  $1.6 \times 10^5$  까지 총 9 가지 경우에 대한 풍동실험을 수행하였다. 참고로  $x = (L + 0.5D)\cos\theta$  이며  $z=0$ 은 풍동 바닥면이 된다.

풍동실험에서는 풍속계의 각도( $\theta$ )를  $-30^\circ$ 에서  $+30^\circ$ 까지  $5^\circ$  간격으로 변화시켜가며 10분-평균풍속을 측정하였다.

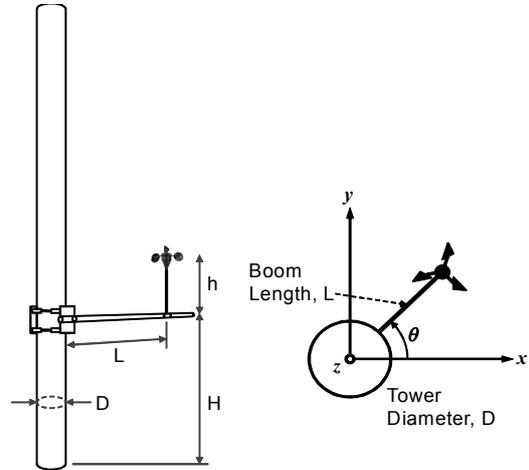


Fig. 1. Configuration of meteorological-tower for wind tunnel experiment and coordinate system.

차폐효과는 식 (1)과 같이 상류풍속과 풍황탐 차폐영향을 받은 하류풍속의 풍속비(wind speed ratio;  $\beta$ )로 나타낼 수 있으며, 이때 최대 차폐오차에 해당하는 최소 풍속비는  $\beta_{\text{min}}$ 으로 표기하기로 한다.

$$\beta(\theta) = \frac{U(\theta)_{\text{downstream}}}{U_{\text{upstream}}} \quad (1)$$

풍동실험에 의하면 후류영역에서 풍속비 변화는  $x/D < 3$  구간에서 크게 나타나며  $3 < x/D < 8$  구간에서 서서히 회복되어 자연풍과 동일한 풍속 즉  $\beta=1$ 로 근접하게 된다. 풍속계의 각도에 따른 풍속비 변화는 이론적으로  $\theta = 0^\circ$ 에서  $\beta_{\text{min}}$ 이 되지만 컵 풍속계(cup anemometer)의 일방향 회전특성에 의해 실제로는 약간 치우친 각도에서 풍속비 최소값이 측정되었다.

Orlando et al.<sup>5)</sup>의 풍동실험 조건은 Table 1과 같으며, 본 연구에서는 이 중 대표적인 조합인 Case 4, 5, 6, 7, 8, 9에 대하여 풍동실험부 전체에 대한 3차원 전산유동해석을 수행한 후 풍속비를 정량비교하였다. 참고로 풍동실험에서 난류강도는 6.54% 수준으로 모든

경우에 동일하게 유지되었다.

Table 1. Conditions for wind tunnel experiment cases.

Case	L/D	Re
4	9.5	$7.7 \times 10^4$
5	9.5	$1.2 \times 10^5$
6	9.5	$1.6 \times 10^5$
7	12	$7.7 \times 10^4$
8	12	$1.2 \times 10^5$
9	12	$1.6 \times 10^5$

### 3. 풍황탑 차폐영향 전산유동해석

풍황탑 차폐오차를 보정하기 위한 방법으로 전산유동해석을 사용할 경우 풍동실험과 비교하여 다음과 같은 장점을 갖는다. 즉, 다양한 형상의 풍황탑에 대한 고려가 용이하며 레이놀즈 수 및 난류강도의 변화에 따른 수치모의를 사전에 수행하여 이를 데이터베이스화 함으로써 풍황탑 차폐오차 보정 프로세스를 자동화할 수 있다.<sup>4)</sup>

본 연구에서 전산유동해석은 상용프로그램인 Cradle SC/Tetra<sup>6)</sup>를 사용하였다. Fig. 2는 계산영역 및 격자계 의존도가 배제된 비정렬 격자계를 보여준다. 총 격자수는 약 7000만개이며 계산시간은 32개의 Intel Xeon® CPU E5420(2.5GHz) 클러스터에서 55시간이 소요되었다.

풍황탑 후류의 정확한 해석을 위한 난류모델의 결정을 위해 다수 난류모델에 대한 해석을 수행하였으며, 오차분석을 통해 최종적으로 MP(Modified Production)  $k-\epsilon$  난류모델을 선정하였다. 적합한 난류모델 선정을 위해 표준  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$ , Realizable  $k-\epsilon$ , SST(Shear-Stress Transport)  $k-\omega$ , MP  $k-\epsilon$  난류모델 등의 해석결과를 상호비교하였다. 참고로 방조제 후단에서 유동박리를 수반하는 대기유동에 대한 Kim et al.<sup>7)</sup>의 풍동실험과 전산유동해석의 비교검증 연구에서도 이들 중 MP  $k-\epsilon$  난류모델이 타 난류모델에 비하여 가장 정확한 것으로 비교평가된 바 있다.

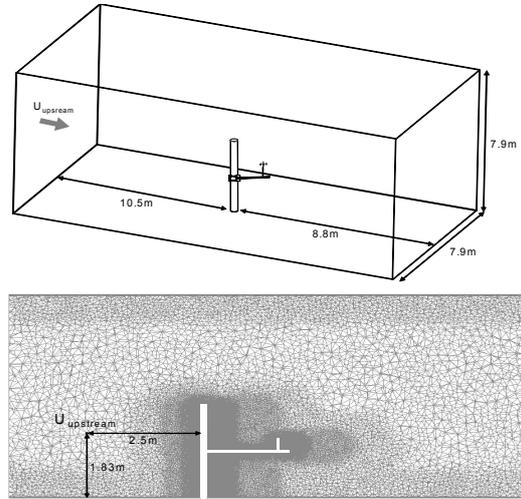


Fig. 2. Computational domain (top) and computational grids at  $y=0$  plane (bottom).

MP  $k-\epsilon$  난류모델은 벽면 근처 유동의 곡률 효과를 보정함으로써 유동박리와 같이 유선곡률이 크게 나타나는 경우에 정확한 해석결과를 제시한다. 식 (2)는 각각 MP 난류모델의 난류에너지( $k$ ) 및 난류소산률( $\epsilon$ ) 전달방정식이다.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_s - \rho \epsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} + G_s$$

여기서,

$$G_s = \rho \tilde{C}_t \frac{k^2}{\epsilon} S \Omega$$

$$S^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\Omega^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$S = \min \left[ 20, S \frac{k}{\epsilon} \right]$$

$$\tilde{C}_t = \min \left[ 0.09, \frac{0.3}{1 + 0.35 \underline{S}^{1.5}} \right]$$

$$\mu_t = \tilde{C}_t \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

식에서  $\rho$ 와  $\mu$ 는 각각 유체의 밀도와 점성 계수,  $u_j$ 는  $x_j$  좌표방향으로의 평균풍속,  $C_1$ ,  $C_2$ 는 난류상수이다.

#### 4. 풍향탑 차폐영향 비교검증

전산유동해석 결과 중 풍속계의 측정높이인 xy-수평면과 풍향탑이 설치된 중앙 xz-수직단면에서의 풍속분포도를 Fig. 3에 제시하였다. 풍속분포도를 보면 풍향탑의 차폐영향은 하류 방향으로 매우 길게 지속되며 범의 영향으로 인하여 3차원적 유동특성도 나타남을 알 수 있다.

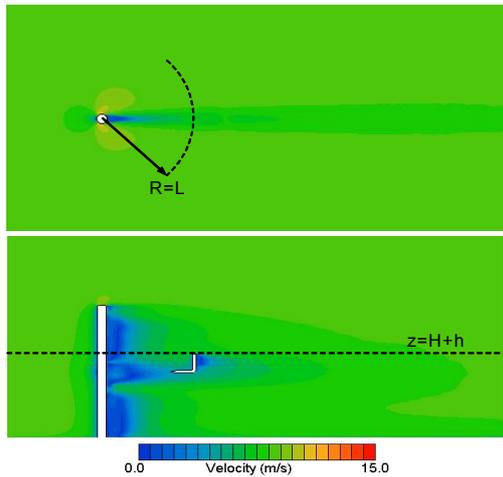
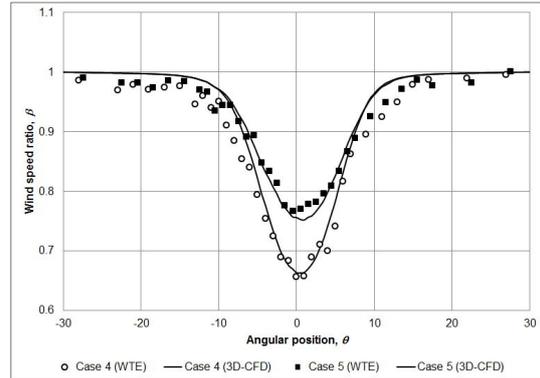


Fig. 3. Mean wind speed distribution for case 5 (top: xy-plane, z=H+h; bottom: xz-plane, y=0).

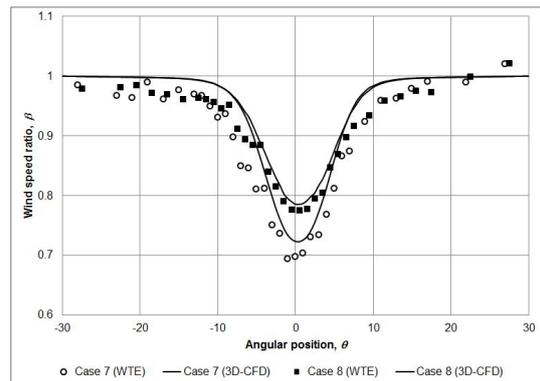
Fig. 4에 도시된 그래프는 풍동실험(WTE; Wind Tunnel Experiment)과 전산유동해석(CFD; Computational Fluid Dynamics)의 풍속비를 비교한 것으로, Case 4, 5, 7, 8 모두 최소 풍속비를 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다. 그런데 Case 4, 5보다 하류에서의 풍속비를 도시한 Case 7, 8은 다소 후류의 폭을 풍동실험보다 좁게 예측한 것으로 판단된다.

Table 2는 풍동실험과 전산유동해석의 최소 풍속비를 비교한 것으로, 평균절대오차(MAE; Mean Absolute Error)는 2.4% 수준

이다. 한편, 레이놀즈 수에 따른 최소 풍속비의 변화를 도시한 Fig. 5를 보면, 레이놀즈 수의 증가에 따라 최소 풍속비가 증가하지만  $10^5$  이상인 경우에는 그 증가폭이 둔화되는 경향을 보인다.



(a) Cases 4, 5 (L/D=9.5)



(b) Cases 7, 8 (L/D=12)

Fig. 4. Wind speed ratio along angular direction at the downstream of meteorological-tower.

Table 2. Minimum wind speed ration ( $\beta_{min}$ ).

Case	WTE	CFD	Error
4	0.65	0.66	1.6%
5	0.77	0.76	-1.3%
6	0.80	0.77	-3.3%
7	0.69	0.72	4.5%
8	0.77	0.78	1.8%
9	0.82	0.81	-1.8%

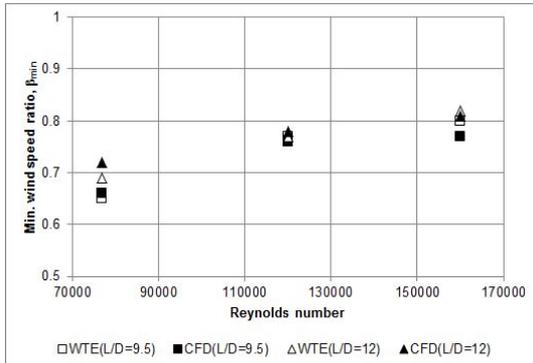


Fig. 5. Variation of wind speed ratio by Reynolds number.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 풍력자원조사에 필수적으로 설치하여야 하는 풍황탑 중 원형단면 폴 형식의 풍황탑 구조물에 의해 발생하는 대기유동의 차폐영향을 3차원 전산유동해석으로 예측하고 그 결과를  $10^4 \sim 10^5$  레이놀즈 수 구간에 대한 풍동실험과 비교하였다.

3차원 비정렬 격자계와 MP  $k-\epsilon$  난류모델에 의한 전산유동해석은 평균절대오차 2.4% 이내로 최소 풍속비를 예측하였으며 풍황탑 후류의 풍속감속 분포도 근사하게 예측하였다. 그러나 레이놀즈 수  $10^5$  이상에서는 전산유동해석이  $\pm 5^\circ \sim 25^\circ$  구간에서 후류영역의 폭을 다소 과소예측하는 경향이 나타났으나, 이러한 과소예측이 컵 풍속계라는 구조물을 배제한 전산유동해석에 의한 것인지에 대해서는 추가적인 풍동실험을 통하여 규명되어야 할 것으로 사료된다. 즉, 풍동실험에서도 컵 풍속계를 제거한 후 열선유속계로 측정을 하여야 본 연구의 전산유동해석과 동등한 비교가 될 것이며 풍속차에 대한 물리적인 설명이 가능할 것으로 판단된다.

풍동실험과의 정량적 상호비교를 통하여 전산유동해석에 의한 풍황탑 차폐영향 분석의 유효성을 검증하였다. 따라서 레이놀즈 수, 난류강도, 풍황탑 구조물의 형상 등의 변화요인에 따른 차폐영향을 전산유동해석으로

유효하게 예측할 수 있으며, 그 결과를 바탕으로 차폐오차를 보정하기 위한 데이터베이스를 구축하고자 한다.

#### 후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원 산업연계형 주요사업(B1-2416-3) 및 부처임무형 주요사업(B2-2441)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (주)쎬딕과 순천대학교는 참여기업 및 위탁연구기관으로 참여하였습니다.

#### 참 고 문 헌

1. Kim, Y.H., Lim, H.C., Study on Development of Onshore Wind Farm and Estimation of Wind Energy Production, J. of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 14, No. 1, pp. 9-17, 2010.
2. IEC(International Electrotechnical Commission), International Standard IEC 61400-12-1 Wind Turbines - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines, 1st Ed., 2005-12, 96p.
3. Kim, H.G., Kim, J.H., Jang, M.S., Ko, S.H., Correction of Met-Tower Shading Error by Computational Flow Analysis, Proceedings of the 13th Wind Eng. Institute of Korea Symposium, Jeonju, Korea, 2010-05.
4. Kim, H.G., Wind Speed Measurement System with Tower Shading Correction by Using Computational Flow Analysis, Korea Patent Pending, 2008-10-0009392.
5. Orlando, S., Bale, A., Johnson, D. A., Experimental study of the effect of tower shadow on anemometer readings, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Vol. 99, pp. 1-6, 2011.

6. Software Cradle Co., SC/Tetra Version 9 User's Guide, 2011.
7. Kim, H.G., Lee, B.H., Ha, Y.C., Jeon, W.H., Wind Tunnel Experiment and Computational Flow Analysis on a Wind Farm Constructed Beyond Dyke, The 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Incheon, Korea, 2012-03.