

새만금 방조제에 의한 풍력터빈 입사풍 변화의 전산유동해석

우상우*, 김현구**

Computational Flow Analysis on Wind Profile Change Projected to a Wind Turbine Behind Saemangeum Seawall

Sang-Woo Woo* and Hyun-Goo Kim**

Abstract

Jeollabuk-do has announced a future plan for the Saemangeum Wind Farm which includes the installation of fourteen wind turbines in a single line, located 500m back from the Saemangeum Seawall. It is anticipated as a positive effect that, for sea breeze blowing toward land, the average wind speed could be accelerated and the wind speed distribution could be uniformized by dint of the seawall, an upstream structure of the turbines. At the same time it is also anticipated as a negative effect that the strength of wind turbulence could be increased due to the flow separation generated at the back end of the seawall. According to the results of the computational fluid dynamics analysis of this paper, it has been observed that, at the 50m zone on the road surface located at the uppermost part of the Saemangeum Seawall, the average wind speed has been accelerated by approximately 6~7% and that wind shear has been decreased by 70%, but this positive effect disappears in the zone situated beyond the 100m from the back end of the seawall. It has also been observed that flow separation exists to a limited extent only below the bottom of the blade-sweeping circle and, furthermore, does not extend very far downstream of the wind. As a conclusion, it can be said that the seawall neither positively nor negatively affects the proposed Saemangeum Seawall Wind Farm layout.

Key words

Saemangeum Seawall(새만금 방조제), Wind Farm(풍력단지), Speedup Effect(가속효과), Computational Flow Analysis(CFD; 전산유동해석)

(접수일 2012. 9. 25, 수정일 2013. 1. 22, 게재확정일 2013. 3. 6)

* 두산중공업 풍력기술개발팀 (Doosan Heavy Industries & Construction Co. / Wind Turbine Development & Engineering Team)

■ E-mail : sangwoo.woo@doosan.com ■ Tel : (042)712-2256 ■ Fax : (042)712-2229

** 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터 (Korea Institute of Energy Research / New & Renewable Energy Resource Center)

■ E-mail : hyungoo@kier.re.kr ■ Tel : (042)860-3376 ■ Fax : (042)860-3462

1. 서론

전라북도는 풍력발전단지, 연구·개발(R&D) 센터, 산업단지가 유기적으로 연계된 새만금 풍력산업 클러스터를 조성하

려는 계획을 정부에 제출하였으며 한국개발연구원(KDI)이 수행한 예비타당성 조사를 통과한 바 있다⁽¹⁾. 새만금 풍력산업 클러스터 조성사업의 1단계에는 새만금 방조제에서 내측으로 500m 떨어진 생태환경용지에 40MW 규모의 풍력발전



Fig. 1 Masterplan for Saemangeum wind industry cluster project proposed by Jeollabukdo

단지를 조성하는 계획이 포함되어 있다. 새만금 풍력발전단지는 비응도와 야미도를 연결하는 새만금 방조제의 북쪽 11.4km 구간인 4호 방조제의 내측에 설치될 전망이며, 준공이 된다면 국내에서는 최초로 준해상에 설치되는 풍력발전단지가 된다⁽²⁾.

Fig. 1은 새만금 4호 방조제 내측 후방 500m에 2.5MW 또는 3MW 국산 풍력발전기 14대를 500m 간격의 일렬로 총연장 6.5km 구간에 설치하는 새만금 풍력발전단지 계획안을 보여주고 있다. 풍력발전단지를 방조제 내측에 설치할 경우, 조류 및 파도로부터 풍력발전기를 보호할 수 있다.

한편 Deaves⁽³⁾, Hauf & Neumann-Hauf⁽⁴⁾, Shiau & Hsieh⁽⁵⁾ 등은 방조제에 의한 언덕효과로 방조제 상부 및 후방에 풍속이 증가하는 현상을 연구한 바 있다. Kim et al.⁽⁶⁾ 이 새만금 방조제와 동일한 배치상황인 군산 풍력단지에서 방조제에 의한 가속효과로 인해 풍력발전량이 증가함을 풍동 실험 및 전산유동해석을 통하여 입증한 바 있으며, 김현구와 장문석⁽⁷⁾은 풍상부 지면설치 구조물을 이용하여 가상적 언덕 효과를 유도함으로써 블레이드 회전구간에서 풍속전단을 감

소시켜 풍력발전기의 피로파괴를 완화하고 구조적 안전성을 향상시키는 특허를 등록한 바 있다.

새만금 방조제 내측 풍력단지의 경우, 동계 주풍향인 북서풍이 방조제 길이방향과 직각으로 입사되기 때문에 언덕효과에 의한 풍속의 가속효과를 기대할 수 있다. 그러나 경우에 따라서는 방조제 구조물에 의해 발생된 유동박리가 난류강도를 상승시킴으로써 오히려 풍력발전기 구조안전성에 역효과를 미치는 상황도 생각할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 서해상의 대표적 구조물인 새만금 방조제가 풍하부의 풍력발전단지에 미치는 영향을 파악하기 위하여 전산유동해석을 수행하였다. 해석결과로부터 방조제에 의한 풍속증가 및 유동박리 효과의 영향범위를 분석함으로써 제안된 새만금 방조제 풍력발전단지의 배치안을 평가하고자 한다.

2. 연구방법

연구대상인 새만금 방조제는 전라북도 군산, 김제, 부안 앞바다를 연결하는 총연장 33.9km의 세계 최장 방조제이다. Fig. 2는 새만금 방조제의 단면도로 대조시 저조(간조)평균 조위의 기본수준면상 높이를 나타내는 대조평균저조위(LWOST: Low Water Ordinary Spring Tide)일 때 해수면 위로 드러나는 방조제의 모습으로, 높이는 14m, 폭은 178m이다. 참고로 군산 외항에서 관측된 평균해면은 364.7cm, 대조평균고위조는 668.7cm, 대조평균저위조는 60.7cm로 대조평균고위조위는 평균해면보다 약 3m 높으며 대조평균저위조위는 평균해면보다 약 3m 낮다.

방조제가 풍력발전기의 장애물로서 가장 큰 영향을 미치는 경우는 방조제 전면적(frontal area)이 가장 큰 경우이다. 즉, 해수면 위로 방조제가 가장 많이 노출되는 대조평균저위조를 해석기준으로 하였다.

새만금 방조제에 의한 대기유동장의 변형특성을 해석하기 위하여 중립상태 대기유동장의 지배방정식인 레이놀즈-평균

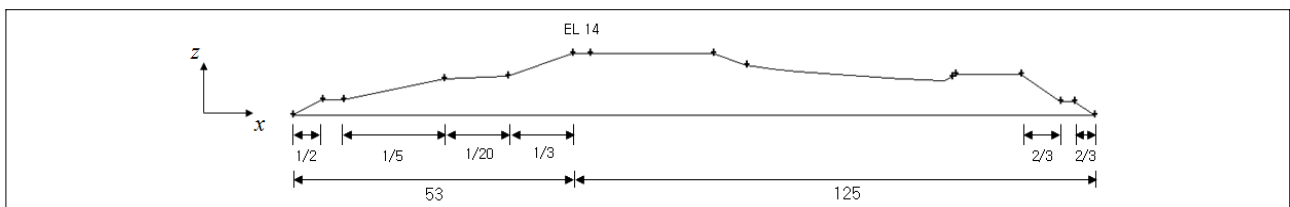


Fig. 2 Dimensions of Saemangeum seawall exposed over sea surface

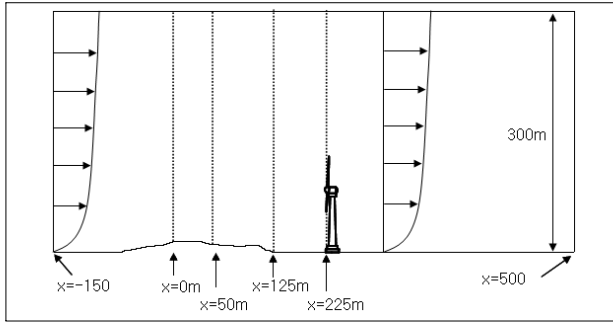


Fig. 3 Computation domain and positions of interest

나비에-스톡스(RANS; Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 유한차분법으로 해석하는 전산유체역학 해석프로그램인 Cradle SC/Tetra를 이용하였다. 난류모델로는 유동박리를 수반하는 언덕 및 방조제를 지나는 대기유동장 수치모의에 적합한 것으로 검증된⁽⁸⁾ $k-\epsilon$ RNG 난류모델을 사용하였다.

전산유동해석은 동계 주풍향인 북서풍에 의해 방조제 x -축 길이방향과 수직(또는 y -축 폭방향과 수평)으로 해풍이 입사하는 상황에 대하여 2차원 해석을 수행하였으며, 해풍의 연직분포는 해당지역의 국가바람지도⁽⁹⁾ 격자점 자료를 이용하여 다음의 풍속식으로 부과하였다.

$$U_{\infty}(z) = 6.6 \times \left(\frac{z}{234}\right)^{0.175} \quad (1)$$

식에서 U_{∞} 는 원방 해풍의 풍속이며 z 는 해수면(또는 지면)으로부터의 수직방향 높이이다.

전산유체역학 해석영역과 좌표계를 Fig. 3에 도시하였는데, x -축 원점은 방조제 전단 최정상(summit) 지점의 모서리로 정하였으며 도로면 끝단($x=50m$), 방조제 후단($x=125m$) 및 후단으로부터 100m 하류($x=225m$) 지점이 표시되어 있다. MW급 풍력발전기의 일반적인 제원인 허브높이 80m, 블레이드 회전구간의 하단과 상단 높이가 각각 40m, 120m인 것으로 가정하였다. 참고로 방조제의 형상이 길이방향으로 동일하며 입사풍이 방조제 길이축과 수직이기 때문에 2차원 가정이 유효하다. 상류면 이외의 경계조건으로 원방 하류에는 노이만(Neumann) 완전발달조건, 지면과 해수면에서는 점착조건(no-slip condition), 상부면에는 고정압력조건(fixed-pressure condition)을 부과하였다.

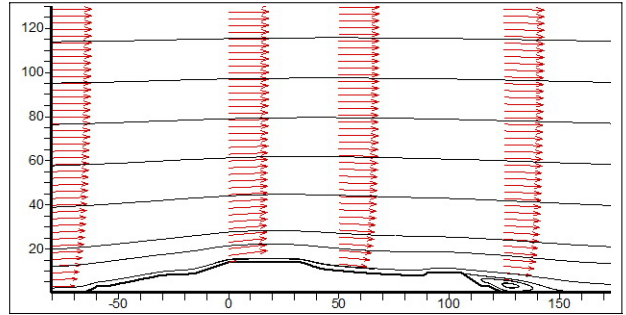


Fig. 4 Wind vectors around the seawall

3. 연구결과

새만금 방조제 주위의 풍속벡터를 도시한 Fig. 4를 보면, 방조제 전단의 1:3 경사면에 의해 대기경계층 하단부에서 가속효과가 크게 발생하여 $x=0m$ 에서는 풍속전단이 거의 사라지는 것을 볼 수 있으며, 경사도가 가장 급한 후단 1:1.5 경사면에서 유동박리가 발생함을 알 수 있다. 박리기포의 길이(또는 재부착 지점)는 후단 높이의 약 5배로 예측되었다. 한편 라인(Rhine) 강변 둔덕(escarpment) 현장실측⁽⁴⁾에 대한 전산유동해석⁽⁵⁾에서는 둔덕 후단 박리기포의 길이가 둔덕 높이의 7배로 예측되었다. 참고로 라인강변 둔덕의 전단 및 후단 경사도는 각각 1:2.5와 1:3.25이다. 새만금 방조제 후단의 박리기포 길이가 상대적으로 짧게 예측된 것은 새만금 방조제는 다단계 경사로 이루어졌으며 상대적으로 상부폭이 길기 때문에 $x=0m$ 에서 균일한 풍속전단으로 변형된 대기경계층이 후단 경사면에 도달할 때 이미 풍속전단이 상당히 회복되었기 때문으로 추론된다.

새만금 방조제 주위에서의 평균풍속 및 난류운동에너지(turbulence kinetic energy, k) 분포를 도시한 Fig. 5를 보면, 방조제 경사면에 의한 가속효과는 방조제 최상부에서 최대가 되며 그 이후 완만하게 원방 입사풍의 풍속분포로 회귀함을 확인할 수 있다. 난류운동에너지는 풍속전단이 가장 크게 발생하는 유동박리점에서 집중적으로 생성되어 하류로 이동되며 소산되지만 그 영향범위는 풍력발전기 블레이드의 회전부 하단인 40m 높이보다 훨씬 낮은 높이로 제한되고 있음을 볼 수 있다. 단, 불안정 대기조건에서는 유동박리의 비정상(unsteady) 거동에 의한 영향이 보다 상부까지 확산될 수 있겠으나 정상상태를 가정한 본 해석에서는 이러한 현상을 모의하지는 못하였다.

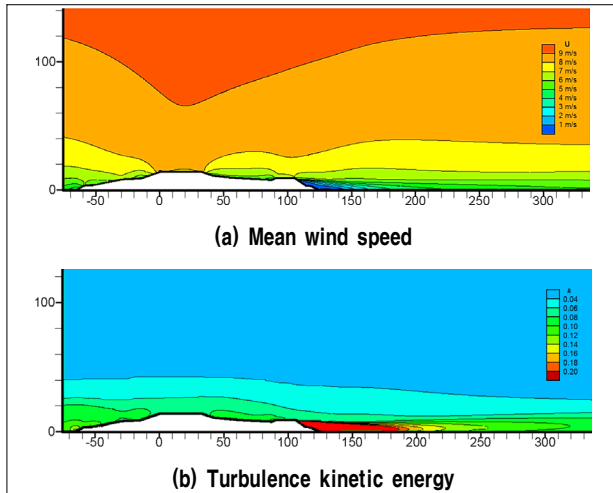


Fig. 5 Contour plots around the seawall

각 지점에서의 풍속 연직분포를 비교한 Fig. 6을 보면, 방조제 상단부 $x=0m$ 에서의 풍속분포는 가장 균일(uniform)할 뿐 아니라 가속효과도 가장 큰 것으로 확인된다. 그러나 하류로 진행해 갈수록 전단효과가 회복되어 $x=225m$ 에 이르러서는 거의 원방 입사풍과 유사한 풍속분포로 회귀함을 확인할 수 있다.

방조제에 의한 가속효과를 보다 명확하게 분석하기 위하여 전산유체역학 해석결과로부터 원방 입사풍과 하류 (x, z) 지점에서의 풍속분포 $U(x, z)$ 와의 차이를 계산하였다.

즉, 풍속차 ΔU 는 다음과 같다.

$$\Delta U(x, z) = U(x, z) - U_{\infty}(z) \quad (2)$$

원방($x=-150m$) 풍속분포와 관심지점($x=0m, x=50m, x=125m, x=225m$) 풍속분포의 차이를 도시한 Fig. 7을 보면, 앞서 설명한 것과 마찬가지로 $x=0m$ 에서는 경사면에 의해 풍력발전기 허브높이인 80m까지 풍속의 가속효과가 발생하였다가 $x=125m$ 이후로는 20m 이하 높이를 제외하면 가속효과가 사라지는 것을 알 수 있다. 그리고 풍속 가속효과는 특히 지면부근에서 급격하게 발생한다.

방조제 가속효과의 정량분석을 위하여 Table 1에 풍력발전기 허브($z=80m$), 블레이드 회전구간 상단($z=120m$) 및 하단($z=40m$) 높이에서의 풍속을 지점별로 비교하였다.

블레이드 회전구간의 평균풍속(Rotor-plane averaged wind speed) 변화를 살펴보면, 경사면에 의한 가속효과로 최

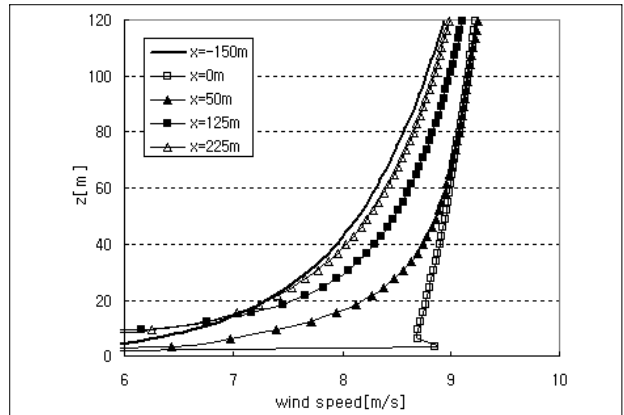


Fig. 6 Vertical wind speed profiles at upstream and positions of interest

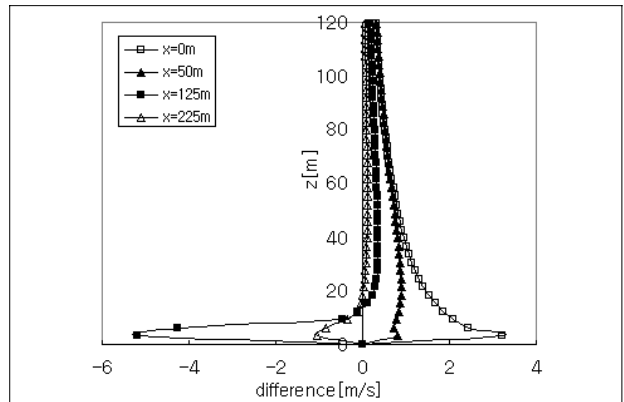


Fig. 7 Wind speed difference between upstream and positions of interest

상단(summit) 도로면에서 6~7%의 평균풍속 증가가 발생하였다가 점차 감소하여 방조제 후단으로부터 100m 후방($x=225m$)에서는 가속효과가 1% 미만으로 사라지는 것을 알 수 있다. 단, 블레이드 회전구간의 평균풍속은 $z=40m, 80m, 120m$ 높이에서의 풍속의 산술평균으로 정의하였으며, 괄호안의 비율은 원방 입사풍 대비 평균풍속 증가율이다.

블레이드 회전구간 상단과 하단의 풍속차(rotor-plane wind speed difference)를 살펴보면, 원방 입사풍인 해상풍은 회전구간의 평균풍속 대비 12%의 풍속차 즉 풍속전단이 있었으나 방조제에 의한 가속효과로 인하여 최상부 도로면에서 4~6%로 풍속차가 대폭 줄어들어 균일한 풍속분포가 형성됨을 알 수 있다. 풍속차이는 평균풍속과 마찬가지로 하류로 갈수록 방조제의 영향이 감쇄하여 원래의 원방 입사풍으로 회복됨을 알 수 있다.

Table 1 Speedup at positions of interest (unit: m/s)

Wind speed U(x,z)	Positions of interest (x)				
	-150m	0m	50m	125m	225m
At z=40m	7.94	8.90	8.74	8.29	8.03
At z=80m	8.57	9.08	9.08	8.83	8.65
At z=120m	8.93	9.23	9.25	9.11	8.98
Rotor-plane averaged*	8.48	9.07 (+7%)	9.02 (+6%)	8.74 (+3%)	8.56 (+1%)
Rotor-plane difference**	0.99 (12%)	0.33 (4%)	0.51 (6%)	0.82 (9%)	0.95 (11%)

* Rotor-plane averaged = {U(120)+U(80)+U(40)}/3

** Rotor-plane difference = U(120)-U(40)

4. 결론

본 연구는 전라북도의 새만금 방조제 내측에 풍력발전단지를 조성하는 설계안의 적정성을 검토함에 있어서, 방조제의 가속효과가 풍하측의 풍력발전기에 미치는 영향을 전산유체역학적으로 분석하였으며, 해석결과로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

대기경계층 내에서 풍력발전기 블레이드가 회전할 때 그 상단과 하단의 풍속차에 의한 불균일한 풍하중이 주기적으로 작용하게 된다. 이러한 주기적 굽힘(bending) 모멘트는 블레이드와 타워의 피로파괴를 촉진하여 수명을 단축시킨다.

본 연구의 전산유체역학 해석결과에 의하면 풍속분포를 균일화시켜서 불균일한 풍하중의 영향을 최소화 할뿐 아니라 평균풍속의 가속효과에 의한 복합적인 이득을 기대할 수 있는 풍력발전기 설치위치는 방조제 상부 도로면인 x=0~30m 구간인 것으로 나타났다. 그러나 전라북도의 풍력단지 계획안인 방조제 내측 500m 이격지점은 유동박리에 의한 난류강도 증가효과도 영향을 미치지 못하지만 풍속의 가속효과 역시 영향을 미치는 못하는 것으로 분석되었다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 부처임무사업인 「신재생에너지 자원지도 활용시스템 구축사업」의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] 한겨레신문, 2009년 10월 7일자, “새만금 풍력클러스터 예비타당성 조사 통과”.
- [2] 전북일보, 2011년 6월 30일자, “새만금 풍력단지 9월초 밀그림 나온다”.
- [3] Deaves, D. M., 1980, “Computations of Wind Flow Over Two-Dimensional Hills and Embankments”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol. 6, pp. 89-111.
- [4] Hauf, T., Neumann-Hauf, G., 1982, “The Turbulent Wind Flow Over an Escarpment”, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 24, pp. 357-369.
- [5] Shiau, B. S., Hsieh, C. T., 2002, “Wind Flow Characteristics and Reynolds Stress Structure Around the Two-Dimensional Embankment of Trapezoidal Shape with Different Slope Gradients”, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 90, pp. 1645-1656.
- [6] Kim, H.-G., Lee, B.-H., Ha, Y.-C., Jeon, W.-H., 2012, “Wind Tunnel Experiment and Computational Flow Analysis on a Wind Farm Constructed Beyond Dyke”, The 8th KSME-JSME Thermal & Fluids Engineering Conference, Incheon, Korea.
- [7] 김현구, 장문석, 2010, 풍속보정용 구조물, 대한민국 특허 10-0969595.
- [8] Kim, H.-G., Patel, V.C., 2000, “Test of Turbulence Models for Wind Flow Over Terrain with Separation and Recirculation”, Boundary-Layer Meteorology, Vol. 94, No. 1, pp. 5-21.
- [9] 한국에너지기술연구원, 국가버림지도 웹서비스, KIER-WindMap™, www.kier-wind.org

우 상 우



2006년 한국해양대학교
냉동공조 · 에너지시스템공학과 공학사
2008년 냉동공조공학과 공학석사
2009년 한국에너지기술연구원 위촉연구원
2011년 두산중공업(주)

현재 두산중공업(주) Power 풍력기술개발팀 대리
(E-mail : sangwoo.woo@doosan.com)

김 현 구



1997년 포항공과대학교 기계공학과 공학박사
1998년 미국 아이오와대학교 IIHR 연구원
2000년 포항산업과학연구원 책임연구원
2005년 한국에너지기술연구원 책임연구원

현재 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터
(E-mail : hyungoo@kier.re.kr)