해상 풍력발전기의 전자기파 산란에 관한 수치 시뮬레이션

김국현*, 조대승^{†**}, 최길환^{***}

동명대학교 조선공학과*
부산대학교 조선해양공학과**
현대중공업 선박해양연구소***

Numerical Simulation of Electromagnetic Wave Scattering from Offshore Wind Turbine

Kook-Hyun Kim*, Dae-Seung Cho^{†**} and Gil-Hwan Choi^{***}

Department of Naval Architecture, TongMyong University*
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University**
HMRI, Hyundai Heavy Industries Co., LTD***

Abstract

The performance of radars operated near an offshore wind farm region may be degraded due to the distorted signals by wind turbines. This degradation of radar systems includes ghost effects and doppler effects by a tower, nacelle, and turbine blades consisting of the wind turbine. In this paper, electromagnetic wave backscatterings from a offshore wind turbine are numerically simulated in terms of temporal radar cross section and radar cross section spectra, using a quasi-static approach based on physical optics and physical theory of diffraction. The simulations are carried out at 3.05 GHz for the seven yaw angles and four blade pitch angles. From the results, radar cross section values and doppler effect as turbine blades rotate are investigated.

※Keywords: Offshore wind turbine(해상풍력발전기), Radar cross section(레이더 단면적), Doppler effect(도플러 효과), Physical optics(물리광학법), Physical theory of diffraction(물리광학 회절이론)

1. 서론

기후변화 위협에 대처하기 위한 세계 각국의 신재생 에너지 개발 노력에 따라 풍력발전단지가 유럽과 미국을 중심으로 육상뿐 아니라 해상에 대규모로 조성되고 있다.

풍력발전기는 최근 들어 고용량, 대형화되고 있는 추세이며, Fig. 1에 보인 바와 같이 풍력발전기의 레이더 단면적(radar cross section)은 대형 항공기 또는 선박과 비슷한 수준으로 나타난다(Poupart 2003). 특히, 풍력발전기의 회전하는 날개는 주파수 변이를 유발해 도플러 효과를 이용해 이동하는 표적을 추적하는 도플러 레이더(doppler radar)의 성능을 저하시키는 원인이 되기도 한다(Poupart 2003). 이에 해상 풍력발전기로 인해 항공기와 선박의 안전운항 문제발생 가능성(Kent et al. 2008)이 제기되어 미국, 영국 등 대규모 풍력발전단지를 운용중인 나라에서는 풍력발전기가 레이더시스템에 미치는 영향에 대한 체계적인 조사가 이루어져 왔으며(Brenner et al. 2008), 그 영향을 최소화할 수 있는 연구가 활발히 진행되고 있다(Appleton 2005).

Fig. 1 Typical radar cross section value of wind turbine.

최근 신성장 동력산업 발전방향에 맞춰 국내에서도 해상 풍력발전단지에 대한 관심이 증대되고 있으며, 앞서 언급한 풍력발전기와 레이더 간섭현상에 대한 정량적 평가기법에 대한 연구가 필요한 시점으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 풍력발전기 전자기파 산란에 대한 시뮬레이션기법을 정립하고 이를 바탕으로 작성된 수치해석 프로그램을 이용해 가상의 풍력발전기에 대한 수치시뮬레이션을 수행한 후, 그 결과를 바탕으로 날개 회전에 따른 시계열 레이더 단면적 변화 특성과

도플러 변이 특성을 고찰한다.

한편, 본 연구에서는 전자기파 산란이론으로 고주파수 해석이론인 물리광학법(Choi and Boo 2000, Kim et al. 2005, Kim et al. 2007b)과 물리광학회절이론(Kim et al. 2007a)을 적용한다. 시간에 따른 변화특성은 전자기파의 전달속도가 풍력발전기 날개 회전 속도보다 충분히 크다는 점에 착안하여 준 정적 방법(quasi-stationary method, Tardy et al. 1996)을 적용한다.

2. 해석이론

2.1 레이더 단면적

임의 표적에 대한 전자기파 산란특성은 식 (1)에 정의된 레이더 단면적 $\sigma_{u,v}$ 으로 정량화될 수 있다(Knott et al. 1993).

$$\sigma_{uv} = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[4\pi R^2 \frac{|\vec{E}_{s,u}|^2}{|\vec{E}_{i,v}|^2} \right], (u \text{ or } v = x \text{ or } y) \quad (1)$$

여기서, R 은 레이더와 표적간의 이격거리를 나타내며, $\vec{E}_{i,v}$ 와 $\vec{E}_{s,u}$ 는 입사 및 산란 전기장 벡터의 u -편파성분 또는 v -편파성분을 의미한다.

본 연구는 풍력발전기의 시계열 레이더 단면적 해석을 수행하기 위해 전자기파의 전달속도가 표적의 회전속도보다 충분히 빨라서 산란점이 순간적으로 정지해 있다고 가정하는 준 정적 방법을 기반으로 매 시각의 레이더 단면적 해석을 고주파수 해석기법인 물리광학법과 물리광학회절이론으로 수행하였으며, 그 세부내용은 2.2절에 기술하였다(Kim et al. 2007a).

2.2 물리광학법 및 물리광학회절이론

전자기파가 임의 표적면에 평면파로 입사하는 경우, 표적면에 유기되는 전기장 $\vec{E}$ 와 자기장 $\vec{H}$ 를 알 수 있다면, 식 (2)의 간략화된 Stratton-Chu 적분식을 이용해 표적면 상의 임의 위치에서의 산란 전기장 벡터 $\vec{E}_s$ 를 구할 수 있다(Knott et al. 1993).

$$\vec{E}_s = \frac{-jke^{-jkR}}{4\pi R} \int_S [\hat{\zeta}_s \times \{\hat{n} \times \vec{E} - \eta(\hat{\zeta}_s \times (\hat{n} \times \vec{H}))\}] \cdot e^{jk\vec{r} \cdot (\hat{\zeta}_s - \hat{\zeta}_i)} dS \quad (2)$$

여기서, j 는 단위허수($=\sqrt{-1}$), k 는 파수(wave-number, $k=\omega/c$), ω 는 각주파수, c 는 광속을 각각 나타내며, $\hat{n}$ 은 표적면 S 에 대한 단위 법선벡터, $\hat{\zeta}_i$ 와 $\hat{\zeta}_s$ 는 전자기파의 입사 및 산란방향을 나타내는 단위 벡터, $\vec{r}$ 은 표적면상 임의의 점의 위치벡터이다. 또한, η 는 매질 임피던스이다.

한편, Fig. 2에 보인 바와 같이 완전반사면을 갖는 평면표적이 xyz -직교좌표계 상에 있고 이로부터 상당한 거리에 레이더가 위치하고 있다면, 입사파를 평면파로 간주할 수 있다. 또한, 표적의 크기가 전자기파의 파장보다 충분히 클 경우, Kirchhoff 근사이론을 식 (2)에 적용해 식 (1)에 대입하면 레이더 단면적 σ_{uv} 는 식 (3)과 같이 산정할 수 있다.

$$\sigma_{uv} = \begin{cases} \frac{k^2}{\pi} \left| \int_S e^{2jkz'} dx' dy' \right|^2, & uv = xx, yy \\ 0, & uv = xy, yx \end{cases} \quad (3)$$

여기서, (x', y', z') 는 표적면 임의의 점에 대한 좌표값을 나타낸다.

한편, 물리광학법은 스펙큘러 반사(specular reflection) 방향과 수신레이더 방향이 이루는 각이 커질수록 후방산란 신호 해석의 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 모서리 회절 효과를 물리광학 회절이론을 적용하여 고려하였다.

Fig. 3은 두 개의 면으로 형성되는 3차원 모서

Fig. 2 Coordinate system

Fig. 3 Three dimensional edge diffraction

리에 의한 회절을 도식적으로 나타낸 것이다. 이 때, 모서리 회절에 의한 전기장 벡터 $\vec{E}_d$ 는 식 (4)로부터 계산할 수 있다(Knott et al. 1993).

$$\vec{E}_d = \frac{jke^{-jkR}}{4\pi R} \int_t [\eta I_e \{\hat{\zeta}_s \times (\hat{\zeta}_s \times \hat{t})\} + I_m (\hat{\zeta}_s \times \hat{t})] e^{jk\vec{r} \cdot \hat{\zeta}_s} dt \quad (4)$$

여기서, t 와 $\hat{t}$ 는 모서리 길이와 모서리의 단위방향벡터를, $\vec{r}$ 은 모서리 임의의 점의 위치벡터를 나타낸다. 또한, I_e 와 I_m 은 전기장과 자기장에 의해 모서리에 유기되는 등가 전류(equivalent current)로서 식 (5)와 같이 산정된다.

$$I_e = \frac{2j(\hat{t} \cdot \hat{e}_i) \mathbf{f}}{\eta k \sin \beta_i \sin \beta_s} E_0 e^{-jk\vec{r} \cdot \hat{\zeta}_i} \quad (5)$$

$$I_m = \frac{2j(\hat{t} \cdot \hat{h}_i) \mathbf{g}}{k \sin \beta_i \sin \beta_s} E_0 e^{-jk\vec{r} \cdot \hat{\zeta}_i}$$

여기서, E_0 는 입사 전기장 크기이며, $\hat{\zeta}_i$ 는 전자기파 입사 방향벡터를 나타낸다. 또한, $\hat{e}_i$ 와 $\hat{h}_i$ 는 입사파의 전기장 및 자기장 단위 방향벡터로서, $\hat{e}_i = \hat{h}_i \times \hat{\zeta}_i$ 의 관계가 있다. β_i 와 β_s 는 모서리와 전자기파 입사방향 및 산란방향이 이루는 각도를, $\mathbf{f}$ 와 $\mathbf{g}$ 는 Ufimtsev 회절계수를 각각 나타낸다.

표적의 모서리가 유한 직선인 경우, 식 (4)를 Fig. 1에서 정의한 좌표계에 대해 정리하고, 식 (1)에 대입하면, 모서리 회절로 인한 레이더 단면적은 식 (6)과 같이 간략화된다.

$$\sigma_{uv} = -\frac{k}{2\pi} \{\hat{u} \cdot \vec{W}(\hat{v})\} e^{2jk\vec{z}} L \text{sinc}(kL \cos \beta) \quad (6)$$

여기서,

$$\vec{W}_d(\hat{v}) = -\frac{j}{k\sin^2\beta} [(\hat{t} \cdot \hat{v})\{\hat{z} \times (\hat{z} \times \hat{t})\}\mathbf{f} + \{\hat{t} \cdot (\hat{z} \times \hat{v})\}(\hat{z} \times \hat{t})\mathbf{g}] \quad (7)$$

이고, L 은 모서리 길이, $\bar{Z}=(b+a)/2$ 는 모서리 중심의 z -축 성분을, β 는 z -축과 모서리와 사이 각을 나타낸다(Fig. 4).

Fig. 4 Variable exchange for finite-straight edge

3. 수치시뮬레이션 및 고찰

전술한 해석기법을 이용해 Table 1에 제원을 나타낸 실물 크기의 풍력발전기 모델에 대한 시계열 레이더 단면적을 해석하였다. 또한, 해당 결과를 스펙트럼 분석하여 회전 날개에 의한 도플러 효과를 관찰하였다. 본 연구에서 사용한 풍력발전기 모델은 Fig. 5에 보인 바와 같이 타워(tower), 나셀(nacelle), 허브(hub), 날개(blade) 등으로 구성되어 있으며, $x-y$ 평면과 날개의 뒤틀림을 의미하는 피치각도(blade pitch angle) ϕ 를 0° 에서 90° 까지 30° 도 간격으로 변화시켜 모델링하였다. 대상모델의 날개 형상은 Table 2에 나타내었다.

수치해석에 있어서 레이더 주파수는 3.05 GHz, 펄스반복주파수(pulse repeat frequency, PRF)는 3 kHz를 적용하였다. 이때, 레이더는 표적을 향해 정지해 있는 것으로 가정하였으며, 해석 결과는

Table 1 Characteristics of wind turbine model

Maximum Height		87.25 m
Tower	Height	60.00 m
	Dia.	Top 2.00 m
		Base 5.00 m
Blade	Radius, R_B	27.25 m
	Section	NACA63-418
	Number	3
Hub Diameter		4.00 m
Rotating Speed		25 rpm
Pitch Angle		0, 30, 60, 90°

Fig. 5 Virtual wind turbine model and coordinates(ϕ :blade pitch angle, θ :blade rotating angle, ψ :yaw angle)

yy -편파 결과만을 제시하였다. 여기서, PRF는 1 초 동안에 펄스 형태의 레이더파를 송수신하는 횟수로서, 대상표적의 회전수를 고려하면 날개회전 각도 0.15° 마다 풍력발전기의 RCS 값을 계산하

였음을 의미한다.

Table 3에는 피치 각도별, 요각 별 레이더 단면적 해석결과를 평균한 값을 나타내었다. 이로부터 대상모델의 레이더단면적은 최소 23 dBsm에서 최대 47 dBsm 사이의 수준을 나타냄을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 1에 나타낸 전형적인 풍력발전기의 레이더단면적에 비해 비슷하거나 큰 수준이다. 이는 본 연구에서는 날개를 완전 반사체로 가정한 반면에 실제 풍력발전기 날개는 완전반사체가 아닌 복합재료로 제작되기 때문이다. 레이더 단면적은 $\phi=0^\circ$ 이고 $\psi=180^\circ$ 일 때의 값이 가장 크게 나타났으며, $\psi=0^\circ$, 90° 일 때 전반적으로

높은 값을 나타냈다. 이는 날개 단면 형상의 곡률에 의한 영향인 것으로 추정된다.

한편, 해석 대상 풍력발전기는 날개수가 3개이므로 해석결과는 120° 를 주기로 동일한 결과를 나타내었다. 이에 Figs. 6~9에는 120° 주기에 해당하는 0.0~0.8초 동안의 시계열 레이더 단면적 해석결과를 피치각도별, 요각별로 구분하여 나타내었다.

상기의 결과로부터 날개의 피치각 $\phi=0^\circ$ 인 경우 $\psi=0^\circ$, 90° , 180° 일 때 다른 요각에 비해 레이더 단면적은 크지만 시간변동폭은 작게 나타남을 확인할 수 있다. 또한, $\psi=60^\circ$ 일 때 약 0.71초에 값이 급격한 감소하다가 다시 증가하고, $\psi=180^\circ$ 일 때, 0.4sec를 전후로 값이 작아짐을 확인할 수 있다. 이는 날개 1개가 타워에 의해 가려지기 때문인 것으로 파악되었다. 또한, Figs. 7~9 ($\phi=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)에서는 $\psi=30^\circ$ 일때 0.4초를 전후로 값이 급격히 증가 후 감소하는 것을 제외하면 Fig. 6과 유사한 경향을 보인다.

한편, 풍력발전기 날개 회전에 의한 도플러 효과를 고찰하고자 날개가 2회전하는 동안(4.8초)의

Table 2 Twist angle and chord length of the turbine blade sections

Section Position	Twist Angle (deg)	Chord Length (mm)
0.2 R _B	17.9	2629.25
0.3 R _B	11.7	2418.94
0.4 R _B	8.14	2208.63
0.5 R _B	5.83	1998.32
0.6 R _B	4.24	1788.01
0.7 R _B	3.08	1577.71
0.8 R _B	2.17	1367.40
0.9 R _B	1.35	1157.09
1.0 R _B	0.83	946.78

Table 3 Mean radar cross section of wind turbine for blade pitch angle ϕ and yaw angle ψ in dBsm

$\psi(^{\circ}) \backslash \phi(^{\circ})$	0	30	60	90
0	37.3	39.7	42.4	41.1
30	23.6	24.7	23.2	23.2
60	26.5	26.4	27.0	26.7
90	42.0	41.9	41.9	41.9
120	26.4	26.5	26.7	26.6
150	23.6	23.4	23.2	22.5
180	47.4	33.4	26.3	27.4

Fig. 6 Temporal variation of radar cross section of wind turbine during 120° blade rotation when blade pitch angle is 0° .

Fig. 7 Temporal variation of radar cross section of wind turbine during 120° blade rotation when blade pitch angle is 30°.

Fig. 9 Temporal variation of radar cross section of wind turbine during 120° blade rotation when blade pitch angle is 90°.

Fig. 8 Temporal variation of radar cross section of wind turbine during 120° blade rotation when blade pitch angle is 60°.

시계열 레이더 단면적에 STFT(short time Fourier transform, Son et al.(2001))를 취한 시계열 스펙트럼 분석결과를 Figs. 10~13에 나타내었다. 이때, 분석간격(time-step)과 분석창(window)은 각각 30 msec와 128 msec으로 겹침(overlap)시간은 98 msec이다. 이로부터 요각에 따라 날개의 위치에 따라 주파수 변이특성이 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 한편, $\psi = 0^\circ$ 에서는 날개와 타워가 겹쳐져 일시적인 위상차가 발생하는 시간대를 제외하고는 주파수 변이가 나타나지 않는다. 이는 날개 회전방향이 레이더 방향과 정확히 직각이 되기 때문이다. 또한, 요각이 증가함에 따라 주파수 변이량은 증가해 $\psi = 90^\circ$ 일 때 최대로 나타나고, 그 이후로는 다시 감소하는 현상과 함께 날개 끝단의 영향이 두드러지게 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Poupart(2003)의 실측결과와 유사한 패턴이다. 아울러, $\psi = 90^\circ$ 일때 최대 ± 1.45 kHz의 주파수 변이는 날개 끝단 속도에 의한 도플러 변이 $f_d (=2v_r/(c/f))$, v_r : 표적속도)와 일치하는 값이다. 한편, 요각이 $90^\circ \sim 180^\circ$ 의 결과

Fig. 10 Temporal radar cross section spectra during three rotations of wind turbine blade when blade pitch angle is 0° .

가 나머지 요각에서 보다 주파수 변이 현상이 명료하게 나타나는데, 이는 요각이 $0^\circ \sim 60^\circ$ 일 경우 날개가 기동을 부분적으로 가리면서 나타나는 잡음효과가 요각이 $90^\circ \sim 180^\circ$ 일 경우에는 상대적으로 작게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 11 Temporal radar cross section spectra during three rotations of wind turbine blade when blade pitch angle is 30° .

4. 결 론

본 연구에서는 고주파수 전자기파 해석이론인 물리광학법과 물리광학회절이론을 바탕으로 한 준정적 해석기법을 이용해 가상의 풍력발전기에 대한 요각과 날개 피치각도 별 시계열 레이더 단면적과 날개 회전에 의한 도플러 효과를 수치해석하

Fig. 12 Temporal radar cross section spectra during three rotations of wind turbine blade when blade pitch angle is 60° .

였다. 이를 통해 풍력발전기 레이더 단면적은 대형 항공기 및 선박과 비슷하거나 높은 수준이고, 날개 회전에 의한 도플러 효과는 회전방향이 레이더 방향과 직각을 이루는 경우 가장 작고, 평행한 경우 가장 높음을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서 적용한 수치 시뮬레이션 기법이 실제 해상 풍력발전기의 전자기파 산란현상 규명에 유용하게

Fig. 13 Temporal radar cross section spectra during three rotations of wind turbine blade when blade pitch angle is 90° .

적용될 수 있다고 사료한다.

한편, 본 연구에서는 레이더가 회전하지 않고 풍력발전기에 대해 일정한 방향을 향하고 있는 것으로 가정하였다. 따라서 레이더와 바람 방향에 따른 풍력발전기의 동특성을 고려할 수 있는 기법 개발에 대한 추가연구가 필요하다. 또한, 다양한 복합재료가 사용되는 실제 풍력발전기의 전자기파

산란현상을 정확하게 해석하기 위해서는 반사율을 고려할 수 있는 전자기파 해석이론 정립이 필요하다고 판단한다..

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었으며, 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Appleton, S.G., 2005, Design and Manufacturing Radar Absorbing Wind Turbine Blade – Final Report, DTI W/44/00636/00/REP, URN 05/1409, QinetiQ.
- Choi S.W., and Boo S.Y., 2000, "Computation of Radar Cross Section of Ship's Structure using a Physical Optics Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 37, No. 4, pp. 82–91.
- Brenner, M., Cazares, S., Cornwall, M.J., Dyson, F., Eardley, D., Horowitz, P., Long, D., Sullivan, J., Vesecky, J. and Weinberger, P.J., 2008, Wind Farms and Radar, JSR-08-126 JASON.
- Kent, B.M., Hill, K.C., Buterbaugh, A., Zelinski, G., Hawley, R., Cravens, L., Tri-Van, Vogel, C., and Coveyou, T., 2008, "Dynamic Radar Cross Section and Radar Doppler Measurements of Commercial General Electric Windmill Power Turbines Part 1: Predicted and Measured Radar Signature," IEEE Ant. and Prop. Magazine, Vol. 50, No. 2, pp. 211–219.
- Kim, K., Kim, J.H. and Cho, D.S., 2005, "RCS Analysis of Complex Structure Using Object Precision Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 2, pp. 159–164.
- Kim, K., Cho, D.S. and Kim, J.H., 2007a, "High-frequency Back-scattering Cross Section Analysis of Rotating Targets," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 10, No. 3, pp. 16–24.
- Kim, K., Cho, D.S., and Kim, J.H., 2007b, "Broad-band Multi-layered Radar Absorbing Material Design for Radar Cross Section Reduction of Complex Targets Consisting of Multiple Reflection Structures," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44 No. 4, pp. 445–450.
- Knott, E.F., Shaeffer, J.F. and Tuley, M.Y., 1993, Radar Cross Section, 2nd Ed. Artech House.
- Poupart, G.J., 2003, Wind Farms Impact on Radar Aviation Interests – Final Report, DTI FES W/14/00614/00/REP, URN 03/1294, QinetiQ.
- Son, J.S., Thomas, G. and Flores, B.C., 2001, Range-Doppler Radar Imaging and Motion Compensation, Artech House.
- Tardy, I., Chabrat, P. and Rouch, J., 1996, "Computational and Experimental Analysis of the Scattering by Rotating Fans," IEEE Tran. on Ant. Prop., Vol. 44, No. 10, pp. 1414–1421.

< 김 국 현 >

< 조 대 승 >

< 최 길 환 >