

# 풍력 터빈에 의한 전자기 간섭 환경 문제의 수학적 모델링

장 세 명

군산대학교 기계공학과 파동공학실험실

(2009년 5월 28일 접수; 2009년 6월 19일 수정; 2009년 7월 22일 채택)

## Mathematical Models of Environmental Problems on the Electromagnetic Interference for Wind Turbines

Se-Myong Chang

Wave Engineering Laboratory, Department of Mechanical Engineering,  
Kunsan National University, Jeonbuk 573-701, Korea

(Manuscript received 28 May, 2009; revised 19 June, 2009; accepted 22 July, 2009)

### Abstract

Electromagnetic interference (EMI) is defined as the interaction phenomena of electromagnetic waves scattered from a large structure or complex terrain. In this study, the propagation of linear wave is modeled with ray theory, direct simulation Monte Carlo (DSMC), and some classical theories on flat plates. The wave physics of reflection, refraction, and diffraction are simulated for the investigation of front and back scattering of the one-dimensional plane wave from a tower with ray theory and DSMC, respectively. The effect of rotating disk idealized from the real wind-turbine blades is modeled with a simplified version of the classical electromagnetic theory as well as DSMC based on the ray theory.

**Key Words :** Electromagnetic interference, Ray theory, Direct simulation Monte Carlo, Maxwell equations.

### 1. 서 론

지난 한 세기 동안 정보 통신 기술(IT)의 비약적 성장으로 인하여 라디오, TV, 휴대전화, 통신 위성, GPS, 마이크로 파 통신을 비롯한 전자기파를 이용한 통신기들이 인류의 생활과 밀접한 관계를 갖게 되었다. 전파를 사용하는 통신에서 전달 파동의 교란에 대한 연구는 매우 중요하다. 예컨대 거대한 구조물 근처에서 있는 아날로그 TV 안테나에서는 비디오 왜곡(video distortion)과 지글거림(jittering) 등

이 발생한다<sup>1)</sup>. 이는 전자기파가 구조물에 부딪쳐 산란되는 과정에서 파동 강도의 불균일, 주파수 변형, 위상 지연 등의 바람직하지 못한 효과들을 발생시키기 때문이다.

한편 최근 '저탄소 녹색성장'의 실천 방안으로 대두되고 있는 신·재생에너지(new and renewable energy) 분야 중에서 풍력은 현실적으로 기술의 수준이 성숙 단계에 있고 가장 경제성이 있는 자원으로 평가되고 있다<sup>2)</sup>. 도시 주거지 근방의 거대 풍력 단지(wind farm)는 TV나 휴대폰 등의 무선 중계국, 군레이더 기지 등과 같은 기 설치된 통신 시설과의 마찰을 일으킬 수 있고 여러 곳에서 이와 관련된 환경 문제들이 보고되고 있다<sup>3)</sup>.

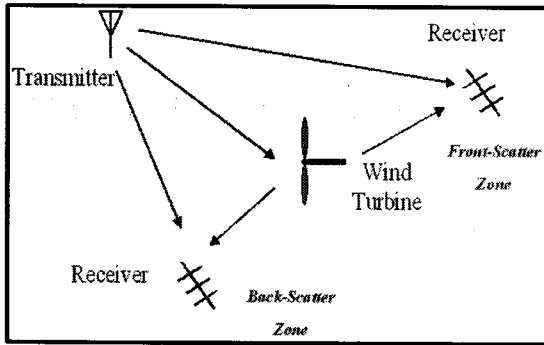


Fig. 1. Schematic of electromagnetic interference.

Fig. 1은 풍력 발전 시스템에서 발생하는 전자기 간섭(EMI, electromagnetic interference)에 대한 개념도이다<sup>1)</sup>. 송신기(transmitter)에서 발생한 전파는 수신기(receiver)에서 직접 수신되는 전파와 풍력 터빈에 의해 산란되는 전파의 중첩(superposition)으로 생각할 수 있고, 이 두 파동은 서로 간섭을 일으킬 수 있다. 수신 안테나의 방향에 따라 산란의 영향은 전면(front-scatter) 또는 후면(back-scatter) 지역으로 나뉜다.

일반적으로 전파 거리 100 m를 기준으로 했을 때, 풍력 발전 시스템의 첩탑(pylon)에 의해 100 MHz 전파는 3 dB 만큼 감쇠하는 반면, 1 GHz 전파는 8.5 dB 만큼이나 감쇠한다고 한다<sup>4)</sup>. 따라서 주파수가 클수록 전자기 간섭의 영향이 커진다. 현재 CDMA, PCS, IMT-2000 등의 이동국 및 기지국 주파수가 수 GHz에 이르는 점을 감안한다면, 고주파에 대한 신호 감쇠가 통신 품질에 영향을 미쳐서 새로운 종류의 환경 공해로 작용할 것으로 예상된다<sup>5)</sup>. 현재 사용되고 있는 무선 기기의 주파수는 Table 1. 과 같다. 무선 기기의 발달에 따라 사용 주파수 대역이 높아지고 있기 때문에, 전파의 직진성은 증가하는 반면, 신호의 산란이 예전에 비하여 심각한 문제가 되고 있다. 더구나 GPS와 같은 정밀 기기들은 이러한 전자기 간섭과 산란의 영향에 대해 더 큰 영향을 받는다.

본 연구에서는 이와 같은 배경으로부터 풍력 터빈 블레이드와 같은 거대 회전 구조물로부터 발생하는 전자기파 신호 저감에 대하여 파동공학의 관점에서 해석하고, 풍력 발전 시스템 혹은 단지가 통신 환경에 미치는 영향에 대해 탐구하는 기초 도구

Table 1. Frequency range of various communicative facilities

Media	Frequency (Unit: MHz)	
FM radio	88~108	
TV	VHF	54~88, 174~216
	UHF	470~890
CDMA	Receiver	824~849
	Base Station	869~894
PCS	Receiver	1,750~1,780
	Base Station	1,840~1,870
IMT-2000	Receiver	1,920~1,980
	Base Station	2,110~2,170

로서 활용하고자 한다. 선 이론(ray theory), 직접모사법(DSMC, direct simulation Monte Carlo) 등과 같은 기초적인 파동 이론과 Maxwell 방정식에 기초한 파동 산란 이론에 이르기까지 여러 고전 이론들을 수학적 모델로 하여 전자기파의 감쇠량을 추정한다<sup>6)</sup>.

## 2. 기초 파동 이론

전자기에 대한 일반적인 지배 방정식은 다음의 Maxwell 방정식이다<sup>6,7)</sup>.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{2}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{3}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu\epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \tag{4}$$

여기에서 전기장( $\mathbf{E}$ )과 자기장( $\mathbf{B}$ )을 서로 각각 분리해낼 수 있다. 식 (3)의 양변에 공간 좌표에 대한 회전 미분 연산자(curl)를 적용하면, 식 (4)에 의하여

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \tag{5}$$

식 (5)의 좌변은 벡터 항등식에 의해

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} \tag{6}$$

와 같이 쓸 수 있으며, 식 (6)의 우변 첫 번째 항은 식 (1)에 의해 소거된다.

이상을 정리하면 다음의 독립된 벡터 쌍곡형 편

미분 방정식(hyperbolic PDE)을 얻는다.

$$\nabla^2 E = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (7)$$

비슷한 방법으로

$$\nabla^2 B = \mu\epsilon \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (8)$$

식 (6)~(7)에 공통적으로 적용되는 파동의 전파 속도는 다음과 같다.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (9)$$

### 2.1. 선 이론

선 이론에서는 1차원적으로 전파되는 파동들의 다발인 선관(ray tube)을 먼저 정의한다. 초기에 일정한 세기(intensity)를 지닌 에너지 교란이 전파한다고 가정하면, 선관의 단면적이 늘어남에 따라 세기가 줄어든다. 즉, 선관의 단면적(A)을 단일 독립 변수로 하여 세기(I<sub>0</sub>)를 예측할 수 있는 방정식을 세울 수 있다.

식 (7)에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있다<sup>8)</sup>.

$$E = I_0 e^{j\omega[t - \tau(x,y,z)]} \quad (10)$$

여기에서 τ는 파동원에 대한 측정 위치의 지연 시간(retarded time)으로 다음 관계를 만족시킨다.

$$\left(\frac{\partial \tau}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \tau}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \tau}{\partial z}\right)^2 = \frac{1}{c^2} \quad (11)$$

즉, 파동의 선단(wavefront)에서는 τ = const인 관계가 성립하면서, 선단의 구배-gradient) 방향을 향한다. 따라서 식 (10)을 선관 내부의 평균 파동 강도에 대해 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{I_0 A}{c} = const \quad (12)$$

선 이론을 이용하면 파동의 강도 뿐만 아니라, 회절(diffraction), 반사(reflection), 굴절(refraction) 등과 같은 파동 물리 현상들도 수학적 모델로 표현할 수 있다. 반사의 경우 상호 원리(reciprocal principle)에 의해 등방질의 고체 표면에서 전자기파의 입사각과 반사각은 서로 일치해야 한다. 굴절의 경우에 입사각과 굴절각은 Snell의 법칙을 따른다. 즉, Fermat의 원리에 의해 전자기파는 최단 시간 경로로

전파된다.

### 2.2. 직접 모사법

선 이론을 사용하여 복잡 형상의 구조물과 지형 데이터를 다루고자 할 때, 모든 좌표계의 점들에 적용하기에는 계산 시간의 한계가 있다. 임의 방향으로 선들을 발생시켜서 단극자 안테나로부터 나오는 전자기파를 직접 수치 모사할 수도 있다. TV 안테나 처럼 송신기가 지향성을 갖는 경우, 각 선에 대한 확률 밀도 함수의 적절한 배치를 통하여 이를 구현할 수 있다. 지표면이나 구조물과 같은 고체 표면에는 반사 또는 굴절 경계 조건을 사용한다.

### 3. 전자기 간섭의 수학적 모델

풍력 블레이드에 대한 모델은 Fig. 2에서 제시하고 있다. 전자기파에 의한 산란은 크게 타워에 의한 것과 풍력 블레이드에 의한 것이 있다.

타워에 의한 전자기 산란은 앞에서 설명한 선 이론이나 직접 모사법을 사용하여 비교적 쉽게 해결할 수 있다. 타워가 원기둥과 같은 매우 단순한 형상이거나 얇은 파이프들의 트러스 구조로 구성되기 때문에 전자기 간섭 관점에서 그 중요도가 상대적으로 떨어진다<sup>1)</sup>.

블레이드의 경우, 최근에는 금속 대신 복합재료(composite material)를 사용하여 만들기 때문에 전자기파의 표면 반사에 의한 산란량은 줄었지만, 대형 블레이드의 경우 낙뢰 방지(lightning protection)를 위해 금속 심을 넣기 때문에 이것으로 인한 전자기 간섭이 있을 수 있다.

Fig. 2의 원반면(disk plane)에서 블레이드는 회전하고 있으며 풍차의 회전 속도가 전자기파의 전파 속도에 비하여 매우 느리므로 그 산란 효율(η<sub>s</sub>)은 블레이드의 평면적(A<sub>p</sub>, planform area)에 대한 기하학적 점유율에 해당한다.

$$\eta_s = \frac{Rc}{A_p} \quad (13)$$

공간상의 한 점에 직접 전파되는 파동에 대한 산란되어 수신되는 파동의 크기 비를 신호 산란 비(Z, signal scatter ratio)라고 한다. 블레이드를 평판(flat plate)으로 해석하는 고전 이론에 의하면 이상적인

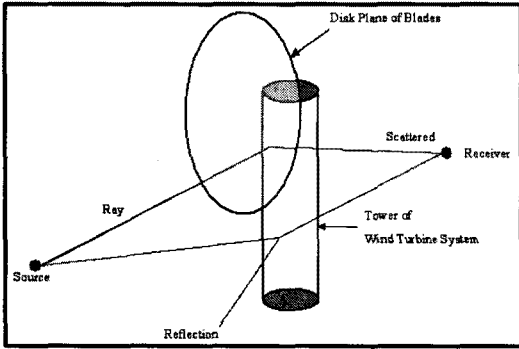


Fig. 2. EMI model for wind turbine system.

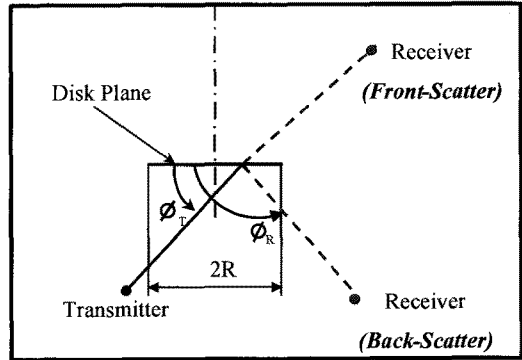


Fig. 3. Notation of angles in front and back scatter.

신호 산란 비는 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>1)</sup>.

$$Z_I = \eta_s \frac{B_E A_E}{\lambda \zeta} \cos(k\phi_{RT}) \quad (14)$$

여기에서  $\lambda$ 는 파장,  $\zeta$ 는 수신기와 풍력 터빈 사이의 거리, 그리고  $\phi_{RT}$ 는 송신기와 수신기 사이의 방향각 차를 의미한다.

Fig. 3을 보면, 전면 산란(front scatter)은 원반면에 굴절되면서 투과되는 파동에 의하여, 그리고 후면 산란은 원반면에 반사되어 나온 파동에 의해 파동 강도가 결정된다. 이러한 기하학적 관계를 적용하여 참고문헌<sup>1)</sup>에서는 다음과 같은 모델을 식 (14)에 적용하였다.

$$\phi_{RT} = \phi_R - \phi_T$$

$$k = 0.5 : -0.8\pi \leq \phi_{RT} \leq 0.8\pi \quad (15a)$$

$$k = 2 : 0.8\pi \leq \phi_{RT} \leq 1.2\pi \quad (15b)$$

식 (14)에서  $B_E$ 는 유효 블레이드 개수로서 실제 블레이드의 개수( $2 \leq B \leq 4$ )에 관계없이 다음 식과 같이 근사할 수 있다.

$$B_E = 1 + \frac{\sin\left\{\frac{2\pi R}{\lambda} \sin(2\theta) \cos\left(\frac{\phi_{RT}}{2}\right)\right\}}{\frac{2\pi R}{\lambda} \sin(2\theta) \cos\left(\frac{\phi_{RT}}{2}\right)} \leq B_{E,max} \quad (16)$$

여기에서

$$B_{E,max} = \begin{cases} \lambda R / A_p, & \text{HAWT} \\ 2, & \text{VAWT (Darriustype)} \end{cases} \quad (17)$$

식 (16)에서  $\theta$ 는 블레이드 축과 회전 축이 이루는 각(coning angle)이다. 일반적인 수평축 풍력 터빈

(HAWT: horizontal-axis wind turbine)에 대하여 식 (13)을 비틀림 각( $\Delta\beta$ , twist angle)을 고려하여 수정하면 다음과 같다.

$$\eta_s = \begin{cases} 0.80e^{-2.30\Delta\beta}, & \text{Metallic} \\ 0.33e^{-2.30\Delta\beta}, & \text{Nonmetallic} \end{cases} \quad (18)$$

복합재료 등 비금속 재료의 경우, 산란률이 약 41% 정도로 낮아진다. 또한 식 (14)의 결과는 실제 필드 데이터와 비교하면 많은 차이점을 갖는다. 지면 효과(ground effect) 등에 의해 산란량이 더 많아지기 때문이다. 따라서 모델의 수정을 위하여 다음과 같은 통계 데이터를 제안한다<sup>1)</sup>.

$$Z = Z_I + 3.5 - 9.0 Y_E \quad (19)$$

여기에서  $Y_E$ 는 데이터의 초과 확률(probability of exceedance)을 의미하며, 보통 1% 내외의 값을 갖는다.

비금속 재료를 사용하는 비틀림이  $\Delta\beta = 8^\circ$ 인 블레이드에 대하여,  $B_E = B_{E,max}$ 인 경우를 가정하여 식 (19)에 의한 신호 산란 비를 구해서 Fig. 4에 도시하였다. 그림에서 'T'라고 표시한 화살표가 송신파의 방향이다. 이 데이터에 의하면 풍력 터빈 로터 반경의 약 8 배 정도 떨어진 거리에서 최대 -12 dB (파동 강도로 약 6%에 해당) 정도의 전자기파 산란이 존재하고 있음을 보여준다.

식 (14)와 (19)의 수학적 모델에 의하면 파장( $\lambda$ )이 짧을수록, 즉 주파수가 클수록 신호 산란 비 ( $Z$ )는 더 커진다. Table 1의 사용기기의 종류에 따라 산란 비의 크기는 변화한다. 앞에서 서술한 바와 같이 Fig. 4를 그리기 위해서는 신호 산란 비가 최대가 되

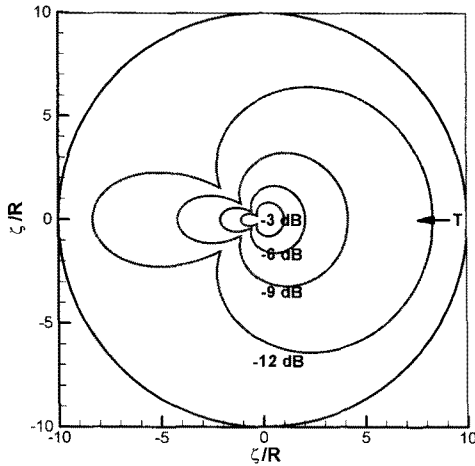


Fig. 4. Signal scatter ratio around the model.

도록 가정했으므로, 실제 필드 데이터는 이 그림에서보다 산란 비의 값이 더 작아야 한다.

이와 같이 기존 고전 이론으로 묘사되는 회전 구조물에 의한 전자기 간섭을 앞서 설명한 선 이론과 직접모사법으로 수치모사(simulation)하기 위하여 Fig. 5와 같이 모델링한다. 블레이드의 회전 원반면은  $xy$  평면 위에 있으며, 그 회전축은  $z$  축이다.

풍력 터빈의 블레이드는 원반면에서 주어진 반경 ( $r_b$ )에 대해 일정한 기하학적 점유율을 갖고, 이 양을 국지 고형도( $\sigma_l$ , local solidity)라고 하여 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma_l = \frac{Bc}{2\pi r_b} \quad (20)$$

여기에서  $c$ 는 블레이드 코드 길이를 의미한다. 그리고 블레이드의 개수는 일반적으로  $B=3$ 을 사용한다. 파동의 전파 속도가 로터의 회전 속도에 비해 매우 빠르므로, 이 값은 곧 임의의 선이 블레이드와 충돌할 확률을 나타낸다.

지금 지향성이 없는 단극자 안테나를 사용한다고 가정하면, 전후 신호비(back-to-front ratio)가 0인 이론적인 경우에 해당한다<sup>7)</sup>. 안테나가 지향성을 가지더라도 산란율은 여기에서 제시하는 최대값을 지침값으로 사용할 수 있다. Fig. 5에서 원반면 위에서 임의로 발생하는 반사선(reflected ray)과 투과선(transmitted ray)을 구분할 수 있다.

예들 들어 3차원 공간에서 투과선을 나타내는 직

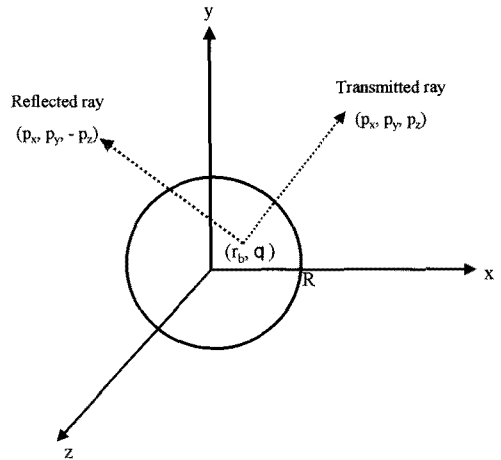


Fig. 5. Electromagnetic interference from a rotating disk plane.

선의 방정식은 다음과 같다.

$$x = p_x s + r_b \cos \theta \quad (21a)$$

$$y = p_y s + r_b \sin \theta \quad (21b)$$

$$z = p_z s \quad (21c)$$

여기에서  $(p_x, p_y, p_z)$ 는 투과선의 방향 벡터이고,  $(r_b, \theta)$ 은 원반 면과의 교점의 극좌표이다.

원반 면에서 발생한 선과 임의의 구면

$$x^2 + y^2 + z^2 = \zeta^2 \quad (22)$$

과의 교점을 구하면, 매개 변수  $s$ 에 대한 다음과 같은 2차 방정식을 얻는다.

$$|P|^2 s^2 + 2(P \cdot B)s + |B|^2 - \zeta^2 = 0 \quad (23)$$

여기에서

$$P = p_x i + p_y j + p_z k$$

$$B = r_b (\cos \theta i + \sin \theta j)$$

식 (23)을 풀어 이 중에서  $s > 0$ 를 만족하는 해를 구한 다음, 식 (21a)~(21c)에 대입, 정리하면, 원하는 좌표를 얻을 수 있다. 같은 방법을 반사선에 대해서도 적용할 수 있다.

구획이 나누어진 식 (22)와 같은 구면에서 선이 충돌하는 확률을 계산하면 산란비의 분포를 얻을 수 있다. 원반면에서 선이 초기 조건을 가질 확률 분포는 식 (20)을 독립 시행으로 적용하면 된다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1. 타워에 의한 전자기파의 산란

풍력 터빈의 타워는 지상의 기지국에 비해 고도가 상당히 높으므로 부분적으로 2차원으로 가정해도 무방하다. 따라서 Fig. 6(a)와 같이 우측으로부터 입사하는 평행한 선관들을 추적하여 식 (12)에 의한 강도의 감쇠를 예측하면,  $\zeta = 10R$  지점에서 각 방위각 별로 Fig. 6(b)의 실선과 같은 데이터를 얻는다. 전반적으로 고전 이론으로 예측되는 전면 및 후면 산란 영역을 뚜렷하게 관찰할 수 있다.

직접 모사법에 의해서도 전자기파의 감쇠 영역을 구할 수 있다. 초기에 Fig. 6(a)의 큰 반원의 원호를 따라 구간을 6도 간격으로 나누고, 난수 발생기

(random number generator)를 사용하여 임의의 방위각으로의 선을 추적한다. 원호 위의 각 구간과 충돌하는 확률을 계산하면 Fig. 6(b)의 사각형 점과 같은 분포를 얻는다. 타워가 금속 재질이라 대부분의 전자기파를 반사한다고 가정하면, 에너지의 전달 효율이  $E_s = 1$ 이라고 놓고 계산한다. 선 이론과 직접 모사법에 의한 계산 결과는 거의 일치하는 것으로 보인다.

이 문제에서는 2차원 평면파에 대한 회절만을 고려하므로, 안테나는 전후 지향성(즉, 1차원)만을 갖는 매우 이상적인 경우이다. 따라서 실제 필드 데이터는 Fig. 6(b)보다 그림자(전방 산란)영역에서의 감쇠가 분명하게 나타나지는 않는다<sup>1)</sup>. 이는 평면파가 장애물을 만나 구면파로 회절(diffraction)하는 현상 때문이다.

#### 4.2. 블레이드에 의한 전자기파의 산란

블레이드에 의한 전자기파 산란은 앞 절에서 사용한 수학적 모델들을 그대로 사용한다. 그러나 식 (20)과 같이 곡지 고형도에 의한 영향을 반영해야 하기 때문에, 계산의 편의상 주로 직접 모사법을 사용하기로 한다. 이 문제에서 입사파는 임의의 방향에서 확률적으로 발생하므로, 안테나의 지향성이 거의 없는 경우에 해당한다.

블레이드의 평균 코드 길이는  $0.05R$ 이라고 놓는다. 원반면에 충돌한 전자기파의 선은 약 70%가 반사되고 나머지는 그대로 투과된다고 가정한다. 단, 반사 및 투과되는 확률은 모두 합해서 1이 되어야 한다.

그러나 Fig. 7에 제시된 직접 모사법과 고전이론에 의한 전자기파 산란은 정성적인 경향은 비슷하지만 정량적으로 정확히 일치하지는 못하는 것으로 나타났다. 직접 모사법에 의한 수치 계산이 전면 및 후면 산란 영역에서 이상 신호 산란 비를 과도하게 예측하는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 사용한 수치 모델이 선의 소산(dissipation)을 반영하지 못했기 때문으로 해석된다. 따라서 전자기파 회절(diffraction)에 대한 적절한 모델이 필요하다.

그러나 고전 이론조차도 실측 데이터와 비교하여 보면, 최대 5~10 dB 정도의 오차는 통상적으로 존재한다<sup>1)</sup>. 따라서 본 연구에서 개발된 수학적 모델은 비록 상당한 오차가 있으나 실용적으로 사용하는

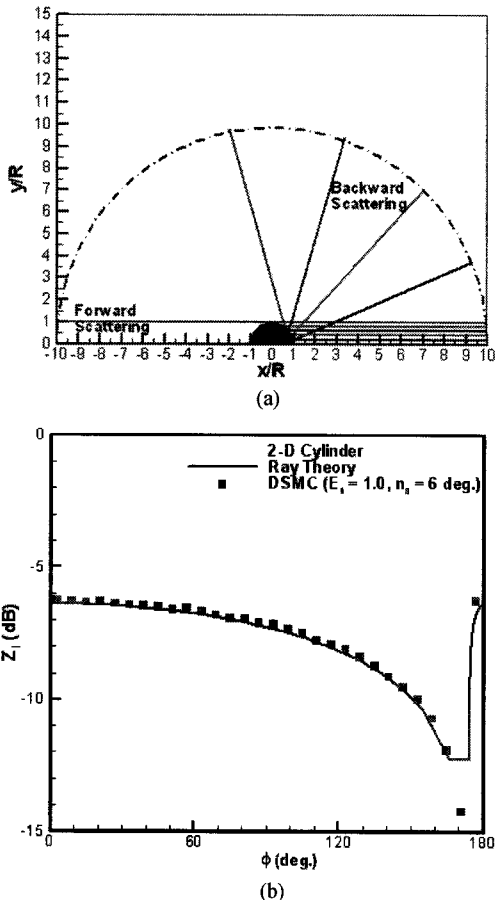


Fig. 6. Scattering from a cylindrical shape: (a)example of rays, (b)ideal signal scatter ratio in the far field.

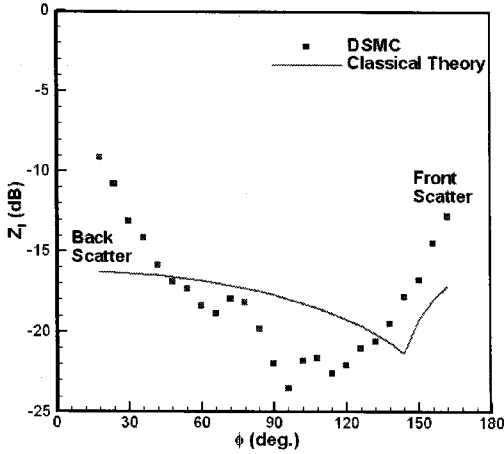


Fig. 7. Scattering from a rotating disk.

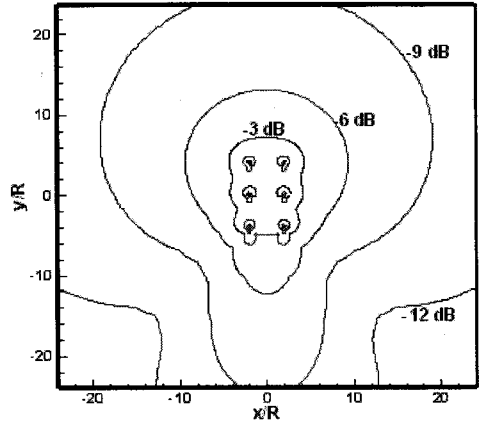
데에 별다른 문제가 없는 것으로 보인다.

직접 모사법의 경우, 3차원 모델에 대해서는 상당한 계산 시간이 필요하다. Fig. 7의 데이터의 경우 약  $10^7$ 회의 반복 계산을 통하여 수렴 검증(convergence test)을 끝낸 다음 결과를 제시하였다. 고전 이론의 계산 결과는 식 (14)를 그대로 사용하였다.

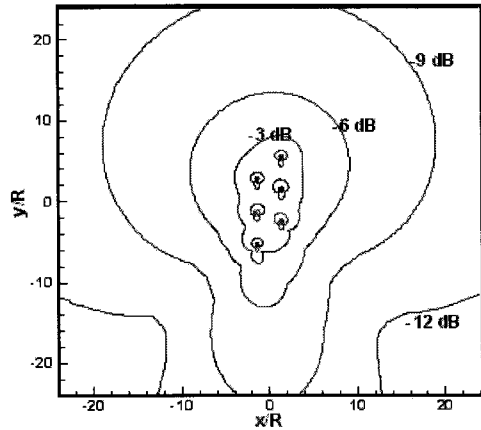
이 방법이 MoM(Method of Moment, 모멘트법)<sup>11)</sup>과 같은 기존의 연구 방법과 다른 점은 기본적으로 격자를 사용하지 않는 무격자 법(gridless method)이며, 계산 시간이 빠르다는 장점이 있다. 또한 DSMC 방법은 적분 방정식을 풀지 않고 대수적인 연산만을 반복하므로 알고리즘이 매우 단순하다. 반면에 MoM은 연산 도중 거대한 행렬을 풀어야 하므로, LU 분해법과 같은 행렬 풀이(matrix solver) 알고리즘이 부가적으로 필요하고, 기억 용량 등이 많이 소모된다는 단점이 있다.

### 4.3. 풍력 단지 배치에의 응용

본 연구에서 수행하는 계산 방법은 한 개의 풍력 시스템 뿐 아니라 복수의 풍력 시스템의 배치에도 응용될 수 있다. Fig. 8(a)-(b)에서 서로 다른 풍력 발전 시스템의 배치에 대한 전자기파 산란 분포가 제시되어 있다. 식 (7)과 그의 해인 식 (10)은 선형 방정식(linear equation)이므로 중첩 원리(principle of superposition)가 성립한다. 각각 시스템에 의한 산란 효과를 더하면 전체 단지의 모든 풍력 발전 시스템에 의한 영향이 구해진다.



(a)



(b)

Fig. 8. Effect of the distribution of wind turbines: (a)regular, (b)staggered.

대부분 대형 풍력 발전 시스템의 타워 반경은 블레이드 반경에 비해 5% 미만으로 매우 작다. 따라서 Fig. 6과 같은 타워에 의한 산란은 발전기의 설치 지점과 매우 가까운 영역에 한정된다. 원 거리에서 대부분의 전자기파 산란 효과는 회전하는 블레이드에 의한 것이다<sup>1)</sup>.

따라서 Fig. 8과 같이 블레이드에 의한 신호 산란비의 분포를 주어진 단지 배치에 대해 도시할 수 있다. 풍력 단지 조성 전에 이런 식으로 미리 주위 환경에 대한 영향을 평가할 수 있다.

한편 여러 개의 풍력 발전기와 각 풍력 발전기의 높이와 입사되는 전자기파의 주파수의 관계에 따라 공진(resonance)을 일으킬 수 있고, 단지의 설치 시

에는 이에 대한 충분한 고려가 필요하다<sup>9)</sup>. 이른바 Fresnel 해석으로부터 전자기 산란에 의한 보강 간섭 및 상쇄 간섭 영역에 대한 정보를 얻을 수 있다. 실제로 이러한 영역에서는 풍력 발전기를 설치하면 안 된다. 본 연구에서는 아직 주파수의 영향을 고려하지 않았으므로, 이에 대해서는 현재의 연구 범위를 벗어나기 때문에 후속 연구를 통하여 이를 체계적으로 규명해 나갈 예정이다.

## 5. 결 론

풍력 발전은 태양광이나 수소연료전지, 바이오 에너지와 같은 신·재생에너지원의 일종으로서, 현재 실용화 및 상용화에 가장 근접한 경제성 있는 자원이다. 그러나 최근까지도 풍력 단지 조성 이전의 환경 영향 평가나 청정에너지로서의 이미지 또는 사회 수용성 제고를 위한 노력은 매우 부족했다. 환경 민원 문제에 대해 참고문헌<sup>3)</sup>과 같은 외국 사례 뿐 아니라 국내에서도 풍력 발전에 대한 환경 문제가 자주 논쟁거리가 되고 있는 실정이다.

풍력 발전기에 의한 환경 문제는 생태계 교란, 낙뢰에 의한 피해, 조경 및 경관에의 영향, 환경 소음, 그리고 전자기 간섭 등이 있다. 이중 전자기파는 대기 중을 전파하는 파동으로서 전파 간섭은 최신 첨단 통신 기기들의 작동에 막대한 피해를 입힐 수 있다.

본 연구에서는 이러한 전자기 간섭 문제에 대해 기본 지배 방정식으로부터 수학적 모델링을 통하여 선 이론을 직접 모사법에 의해 구현하는 수치 모사 기법을 개발하였다. 기존의 고전 전자기 산란 이론을 이용하여 본 문제에 적용할 수 있도록 하였고, 타워와 회전하는 블레이드의 원반면에 의한 전자기 산란에 대해 체계적으로 연구하였다.

본 연구에서 개발된 방법들은 비교적 간단한 기하학적 형상들에 대해 그 신뢰성이 검증되었으며, 타워와 블레이드에 의한 전자기 산란을 모사할 수 있었다. 전자기파 회절에 대한 적절한 모델이 추가로 개발된다면 풍력 단지 설계 단계에서 다수의 풍력 발전기 또는 복잡 지형에 대해 실용적으로 이용 가능한 예측 기법을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

## 감사의 글

본 연구는 지식경제부(한국에너지관리공단)의 신·재생에너지분야 학술진흥과제(2002-N-WD03-P-02-0-000-2003) 지원을 받았습니다. 저자는 이러한 학술 연구에 대한 재정 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 1) Sengupta D. L., Senior T. B. A., 1994, Electromagnetic Interference from Wind Turbines, *In Spera D. A. (ed.), Wind Turbine Technology*, ASME Press, 447pp.
- 2) IEA(International Energy Association), 2008, IEA Wind Energy: Annual Report 2007, 77pp.
- 3) Electromagnetic Interference, Telecommunications, and Infrastructure, <http://www.vortex.uk.net>
- 4) Salema C., Fernandes L. F., 2000, TV Interference from Wind Turbine, Instituto de Telecomunicacoes, Portugal.
- 5) 장세명, 이기재, 김필진, 2004, 회전하는 대형 구조물에 의한 전자기 간섭 연구, 제2회 풍력발전정책 및 기술 Workshop, KWEDO(Korea Wind Energy Development Organization), 122-127.
- 6) Lonngren K. E., Savov S. V., Jost R. J., 2007, Fundamentals of Electromagnetics with MATLAB, 2nd ed., Scitech Publishing, Inc., 297pp.
- 7) 김동일, 나정용, 박동철, 2002, 전파공학, 청문각, 6pp.
- 8) Guenther R., 1990, Modern Optics, John Wiley and Sons, 87pp.
- 9) 장세명, 2004, 환경친화적 풍력시스템 구현을 위한 파동공학 문제들의 연구, 산업자원부 19pp.
- 10) 장세명, 2003, 환경친화적 풍력시스템 구현을 위한 파동공학 해석, 제1회 풍력발전정책 및 기술 Workshop, KWEDO(Korea Wind Energy Development Organization), 150-153.
- 11) Lewke B., Kindersberger J., Stromberger J., Krug F., Kramer S., 2008, MoM Based EMI Analysis on Large wind Turbines, 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 19-20 May, Singapore, 196-199.
- 12) Chang S. M., Chang K. S., Lee S., 2004, Reflection and Penetration of a Shock Wave Interacting with a Starting Vortex, *AIAA J.*, 42(4), 796-805.