

# Cuban-8형 수평축 풍력터빈의 수학적 모델링에 관한 연구

황창수\*, 조환기\*\*, 정형석

## A Study on the Mathematical Modelling of Cuban-8 Type Horizontal Axis Wind Turbine

Changsu Hwang\*, Hwankee Cho\*\* and Hyungsuk Chung

**Abstract** This paper discusses about the mathematical modelling of a new conceptual shape of horizontal axis wind turbine. The geometrical characteristic of wind turbine is studied for the variation of azimuthal angles and elevation angles. The projecting trajectories of Cuban-8 blade due to rotation are analyzed on the each plane in the Cartesian coordinate system. Trajectories show several interesting graphical patterns since the geometrical shape is complicated with the rotational motion of two twisted circumferential blades with elevation angles.

**Key words** Cuban-8 blade(C8 블레이드), Horizontal Axis(수평축), Wind Turbine(풍력터빈), Modelling(모델링), Geometrical characteristic(기하학적 특성), Trajectory(궤적)

(접수일 2008. 7. 18, 수정일 2008. 8. 5, 게재확정일 2008. 8. 11)

\* 공군사관학교 물리학과  
E-mail : cshwang@afa.ac.kr Tel : (043)290-6455 Fax : (043)297-0479

\*\* 공군사관학교 항공우주공학과  
E-mail : hkcho@afa.ac.kr Tel : (043)290-6455 Fax : (043)297-0479

### Nomenclature

$V$  : wind speed, m/s  
 $D$  : rotor diameter, m  
 $R$  : radius, m  
 $\phi$  : azimuthal angle, rad.  
 $\theta$  : elevation angle, rad.

### Subscript

$A$  : position  
 $O$  : origin, original point  
 $L$  : left  
 $R$  : right

## 1. 서론

최근 들어 유가의 급등과 화석연료의 고갈 및 탄소배출량 규제 등의 환경변화에 따라 신재생에너지에 대한 관심이 점차 높아지고 있으며 우리나라처럼 에너지 자원이 부족한 국가는 신재생에너지 개발을 위한 노력을 집중해야만 하는 시기를 맞이하고 있다. 신재생 에너지란 바람과 물과 태양과 같은 무한재생이 가능한 에너지원으로부터 인간생활에 유익한 에너지원으로 재생가능한 에너지를 말하는 것으로 지구환경의 오염을 최소화할 수 있다는 측면에서 녹색에너지라고도 불린다. 이들 신재생 에너지 중에서 풍력에너지는 태양광 에너지와 함께 무한한 자원과 공해오염이 없는 에너지원으로 부존자원의 한계와 지구 온난화 현상에 매우 효과적으로 대응할 수 있는 대체 에너지 개발의 한 분야를 차지하고 있다. 풍력에너지 이용의 이점은 저비용으로 전력의 생산이 가능하며, 핵, 화석 및 가스 연료에 비하여 경쟁력을 갖추기 시작하였으며, 가동연료가 불필요한 무한 재생에너지일 뿐만 아니라 이산화탄소의 배출이 없고 연료가격변동에 무관하며 신뢰성이 있는 에너지원이라 할 수 있다.

풍력에너지를 활용하는 풍력발전은 발전시스템 주변의 일상적인 생활공간을 포함하여 농업 및 산업 활동에 지장을 주지 않는 친환경 발전이므로 에너지의 고갈이 없는 재생에너지이다. 풍력발전은 유럽을 중심으로 수 메가와트급의 풍력시스템의 대형화를 추진하고 있으며 미국을 중심으로 수 백 킬로와트급 이하의 소형풍력발전시스템의 개발이 활발히 이루어져 오고 있다.<sup>(1)</sup> 우리나라 내륙지역의 경우에는 유럽과 미국에 비하여 열악한 풍환경으로 인하여 일부 특정지역을 제외하고는 대형풍력발전기 가동에 한계가 있으며 무엇보다도 막대한 설치비에 비하여 투자비의 회수가 장기간이라는데 그 운용의 한계가 있다. 또한 대부분의 대형 시스템의 기술을 유럽으로부터 도입하고 있는 실정이다. 이러한 상황에서 선진 기술과의 큰 기술격차 없이 접근할 수 있는 분야가 소형풍력발전시스템 개발 분야이다. 소형 풍력발전시스템은 우리나라의 풍환경에 오히려 적합하며 활용도가 높고 기술자립은 물론 첨단기술 축적이 가능한 분야라고 생각된다. 근래에 국내에서도 2-3개의 회사 및 연구소에서 수평축의 소형 풍력발전기를 개발한 것으로 알려져 있으나 대부분이 발전시스템에 집중되어 있으며 풍력터빈에 대한 연구는 아주 미흡하므로 보다 더 광범위하게 풍력터빈에 대한 체계적인 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 환경에 적합하고 국지적인 지형특성에 적합한 독창적인 소형풍력발전기 회전체인 풍력터빈의 개발과 풍력특성에 관한 분석에 관심을 두었다. 본 연구를 위한 풍력터빈의 모형은 수평축 방식으로 숫자 8자 모형의 회전자(Cuban-8 type blade)의 풍속에 대한 회전특성에 대하여 기하학적 표현이 가능한 수학적 모델을 개발하고자 한다.<sup>(1)</sup>

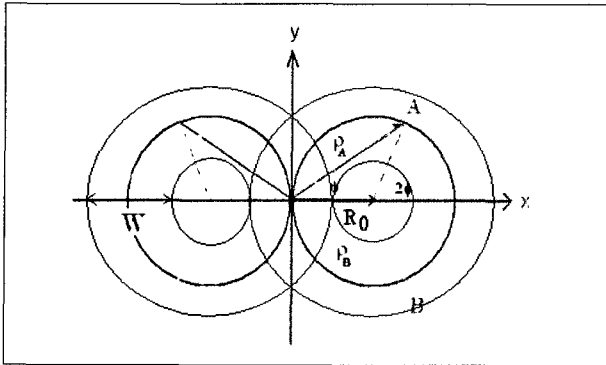
## 2. C8 블레이드 중심궤적의 수학적 정식화

새로운 형태의 풍력터빈 모형으로 선택된 Cuban-8(C8) 형태의 블레이드(blade)의 운동현상을 이해하기 위하여 블레이드의 기하학적 형태에 대한 분석이 필요하며, C8 블레이드를 풍력터빈으로 효율적으로 적용하기 위해서는 먼저 블레이드 모형의 형태 및 궤적특성에 대한 수학적 정식화가 필요하다.

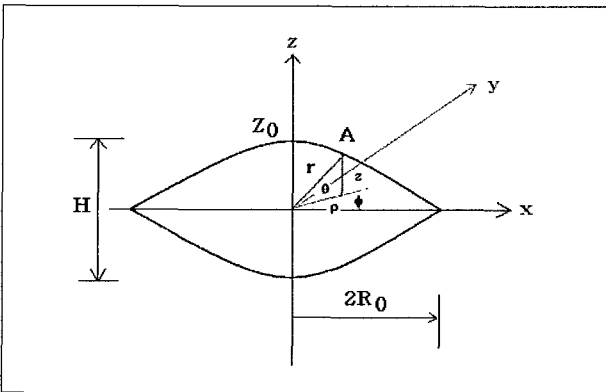
수학적 모델을 도출하고 특성을 분석하기 위하여 Fig. 1과 같이 C8 블레이드의 중심궤적에 대한 3차원 구조의 각 축 방향 투영모습을 개략적으로 나타내었다. 회전축을 z축으로 설정하면 C8 블레이드의 중심궤적에 대한 xy 평면상의 투영단면의 모양은 Fig. 1(a)에서와 같이 반경이  $R_0$ 인 두 개의 원형 고리가 회전축에 대하여 인접하여 교차하는 8자와 같은 형상을 하며 이때 블레이드의 폭은 W이다. 회전축으로부터 xy 투영평면에서 블레이드의 중심궤적 상의 임의의 지점 A까지의 거리는  $\rho_A$ 이며 x축에 대한 회전각은  $\phi$ 이다. Fig. 1(b)에 표시된 C8 블레이드의 측면의 구조는 럭비공 형상이다. 3차원 좌표계에서 A점의 위치는 회전축의 중심(원점)으로부터 거리는 r, xy 평면에서 z축에 대한 경사각은  $\theta$  그리고 xy 평면에서의 회전각은  $\phi$ 로 표현하였다. z 축상에서 블레이드의 최대 정점( $z_0$ ) 및 최소 정점( $-z_0$ )사이의 거리를 블레이드의 높이 H로 표시하였다.

Fig. 1(b)는 x-z 평면에 투영된 모습을 나타내고 있으며 럭비공 형상을 하고 있다. Fig. 1(c)는 y-z 평면에 투영된 블레이드 중심선의 모습으로 교차하는 나선형 구조를 나타내고 있다. C8의 형상은 가로누운 8자 형상의 3차원 구조 블레이드 형태로 두 개의 원형 고리가 교점이 없이 연결되어 교차하고 있다.

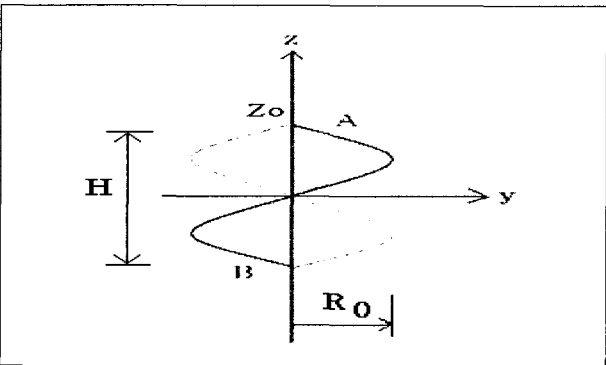
C8의 형상을 결정하는 기하학적 파라미터는 Fig. 1에 표시한 것과 같이 회전축으로부터 블레이드의 중심반경  $R_0$ , 블레



(a) Top view of Cuban-8 blade projected on the xy plane<sup>(3)</sup>



(b) Side view of spiral blade projected on the xz plane



(c) Side view of Cuban-8 blade projected on the yz plane

Fig. 1 The Projection views of a Cuban-8 blade.

이드의 높이  $H(=2z_0)$  및 블레이드의 폭  $W$ 이다. 블레이드의 높이  $H$ 가 0인 경우는 Fig. 1(a)에 표현된 것과 같이 C8 블레이드의 중심선은  $xy$  평면에서 두 개의 원이 접하여 있는 숫자 8과 같은 형상이 된다. 일반적으로 높이  $H$ 가 0이 아니면 C8은 투영 단면은 Fig. 1(a)과 같이 완전한 원이 아닌 타원형상이 되며,  $H$ 를 증가시킬수록  $x-y$  평면에서의 투영 단면은 중심 쪽으로 수축되고, Fig. 1(b)에서 A점의 경사각은 증가하게

된다. 높이  $H$ 가 반경  $R_0$ 에 비하여 매우 큰 경우 Fig. 1(c)에서 C8는 중심 쪽으로 심하게 찌그러지면서 이중 나선구조 형상으로 변한다.  $x-y$  평면에서 C8 블레이드 중심원 내부의 투영 단면적의 최대값은  $2\pi R_0^2$ 이며  $H$ 값이 증가할수록 감소한다.

Fig. 1(b)에 표시된 C8 블레이드 중심궤적상의 임의의 한 점 A의 위치를  $\vec{r}_A$ 를 직각좌표계( $x, y, z$ )를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\vec{r}_A = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k} \quad (1)$$

각각의 좌표는 독립적이지 아니며 반경  $R_0$ 와 높이  $z$ 값에 따라 종속관계를 이룬다.  $x$ 와  $y$ 의 종속관계는  $x-y$  평면상의 투사단면인 Fig. 1(a)로부터 근사적으로 확인할 수 있다. 여기서, 편의상  $x-y$  평면으로 투사된 A점의 위치 벡터를  $\vec{\rho}_A$ 로 표현하면 다음과 같다.

$$\vec{\rho}_A = x\hat{i} + y\hat{j} \quad (2)$$

$x$ 와  $y$ 를 회전각  $\phi$ 에 대한 함수로 표현하고,  $x$ 에 대한  $y$ 의 궤적은 다음과 같이 주어진다.

$$x = R_0[1 + \cos(2\phi)] \quad (3)$$

$$y = R_0 \sin(2\phi) \quad (4)$$

위의 식 (3)과 (4)에서 회전각  $\phi$ 를 소거하고  $x$ 와  $y$ 의 좌표값을 함수로 표현하면 아래 식과 같다.

$$x = R_0 \pm \sqrt{R_0^2 - y^2}, \quad y = \pm \sqrt{x(2R_0 - x)} \quad (-2R_0 \leq x \leq 2R_0) \quad (5)$$

위에 주어진 식을 이용하여 임의의 점 A까지의 직선거리를 구하면 아래 식과 같이 변환된다.

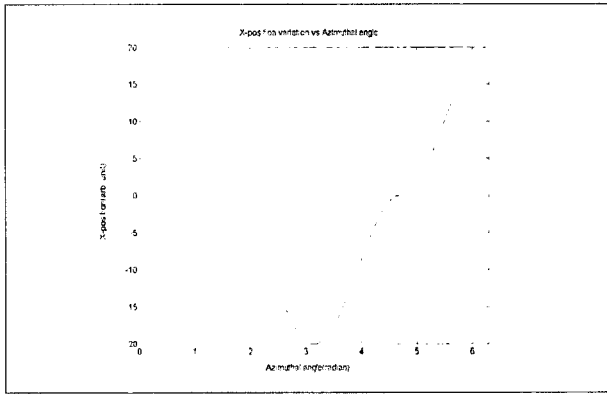
$$\rho_A = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{2R_0x} \quad (6)$$

수식 (3), (4), (6)에서  $x$ ,  $y$ , 및  $\rho_A$ 를 각각 회전각  $\phi$ 의 함수로 표현하였으며,  $\phi$  값의 범위는 0부터  $2\pi$ 까지이다. 회전각  $\phi$ 에 대한  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 의 궤적을 Fig. 2에 나타내었다. 회전각  $\phi$ 에 대한  $x$ 축 위치의 변화는 Fig. 2(a)에서 처럼 1/4분면에서 출발하여 3/4분면과 2/4분면을 거쳐서 4/4분면으로 이동한다. 위상의 변화를 고려하여  $x$ 축 및  $y$ 축의 부호변화를 삽입

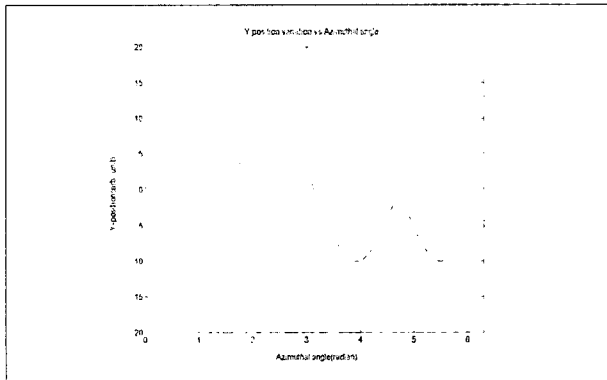
하여 표현하면 수식 (3)과 (4)는 다음과 같다.

$$x = R_0 [1 + \cos(2\phi)] \frac{\cos(\phi)}{|\cos(\phi)|} \quad (7)$$

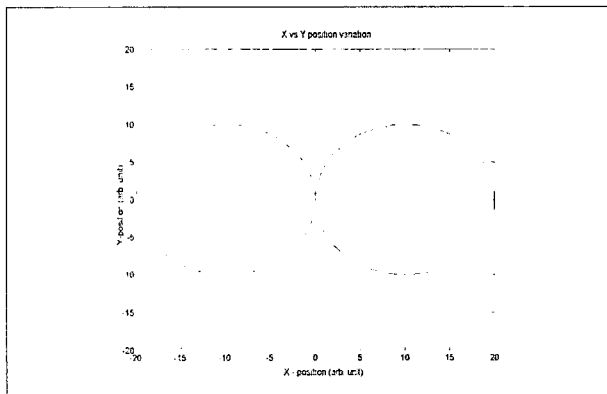
$$y = R_0 \sin(2\phi) \frac{\cos(\phi)}{|\cos(\phi)|} \quad (8)$$



(a) A trajectory in the x axis



(b) A trajectory in the y axis



(c) A trajectory in the z axis

Fig. 2 The projecting trajectories in the axis direction with azimuthal angles.

위의 수식 (8)에서  $y$ 를  $x$ 에 대하여 표현하면 다음식과 같으며  $x$ 축에 대한  $y$ 축의 상대적인 위치 변화를 Fig. 2(c)에 나타내었다.

$$y = \sqrt{x(2R_0 - x)} \cdot \frac{\sin\phi}{|\sin\phi|}$$

회전각에 대하여  $x$ 축의 위치 변화는  $2R_0$ 에서  $-2R_0$ 까지  $y$ 축의 위치변화는  $R_0$ 에서  $-R_0$ 까지 변화된다. 회전각에 대한  $x$ 와  $y$ 축에서 위치 부호는 1/4분면과 3/4분면에서는 같은 부호를 2/4분면과 4/4분면에서는 서로 다른 부호를 갖는다. 만약 Fig. 2(c)에서 두 원이 교차되는 지점의 간격을 띄우면 같은 부호를 갖는 두 개의 사분면은 항상 연결되어져 떨어진다. 교차점을 떨어뜨리는 경우 위치 구배는 항상 같은 부호를 갖는 사분면에서 다른 부호를 갖는 사분면으로(혹은 그 반대로) 형성된다.  $xz$  평면에서 A점의 위치표현은 Fig. 1(b)와 같이  $x$ 가 0일 때  $z$ 는  $z_0$ 이며,  $z$ 가 0일 때  $2R_0$ 이다. 두 지점을 연결하는 블레이드의 중심궤적은 근사적으로 기울기가  $z_0/2R_0$ 인 직선식으로 표현된다. 블레이드의 높이  $H(=2z_0)$ 를 변화함에 따라 블레이드의 중심궤적에 대한 근사적 표현인 직선식의 기울기는 연동되어 변화된다. 높이  $H$ 가 0인 경우 블레이드는  $xy$  평면에서 평탄하며, 높이  $H$ 를 증가시키면  $xz$  평면의 네 개의 사분면에서 블레이드의 중심궤적들은 근사적으로 아래 수식 (9)와 같은 네 개의 직선 식으로 표현될 수 있으나, 직선 식 (9)에 대하여 회전축 부근에서 원점으로 약간 휘어진 비선형 곡선이 된다.

$$z = z_0 \left( \mp \frac{x}{2R_0} \pm 1 \right) \quad (9)$$

먼저 식 (9)를 회전각 혹은 경사각을 변수로 하여 표현하는 것이 필요하다.  $x$ 축을 따라 회전각에 대한 좌표 값의 변화는 수식 (7)에 표현되어 있다.  $x$  값의 변화에 대응되는  $z$  값은 경사각  $\theta$ 에 대한 부호변화를 표현하면 수식 (10)과 같다. 회전각  $\phi$ 에 대한  $x$  값의 변화는 경사각  $\theta$ 의 변화에 대한  $x$  값의 변화와 같으므로 수식 (10)에서  $z$  및  $x$ 값의 부호 변화를 결정하는 항은 경사각  $\theta$  대신에 회전각  $\phi$ 를 대입하여도 일치하는 결과를 준다.

$$z = -\frac{\sin\theta}{|\sin\theta|} \frac{z_0}{2R_0} \left[ x - \frac{\cos\theta}{|\cos\theta|} \cdot 2R_0 \right] \quad (10)$$

이때 경사각의 변화에 대하여 대한  $z$ 축 상의 위치 변화는

Fig. 3(a)에, x에 대한 z 값의 변화는 Fig. 3(b)에, y에 대한 z 값의 변화는 Fig. 3(c)에 각각 나타내었다. 그러나 이 그림은 날개의 연속적인 변화를 나타내는 것은 아니며 회전각 변화에 대한 x, y, z 좌표값을 일치시키기 위하여 표현한 것이다. Fig. 3(b)에서 회전각  $\phi$ 의 단조 증가에 대한 xz 평면상의 위상변화는 1/4분면으로부터 3/4분면과 2/4분면을 거쳐서 4/4분면의 순서로 변화된다. Fig. 3(b)에서 x축 상의 위치가 날개의 반경에 해당되는  $R_0$  보다 상대적으로 큰 경우 z의 변화율은  $x=0$  근방에서 크지만  $x=2R_0$  부근에서는 작다.  $z=0$  근방에서 x에 대한 z의 변화율은 완만하게 변화한다.

기울기 변화는 1/4분면 및 3/4분면에서는 음이며 2/4분면 및 4/4분면에서 양이다.

C8 모형은 직선 식  $z = z_0(-x/2R_0 + 1)$  아래로 약간 휘어진 곡선이다. C8 모형을 나타내기 위하여 elliptical type of the hypocycloid of four cups 수식 (11)를 이용하여 Fig. 3(b)의 x-z 그림에 휘어진 곡선으로 나타내었다.

$$x = 2R_0 \cos^3 \theta, \quad z = z_0 \sin^3 \theta \quad (11)$$

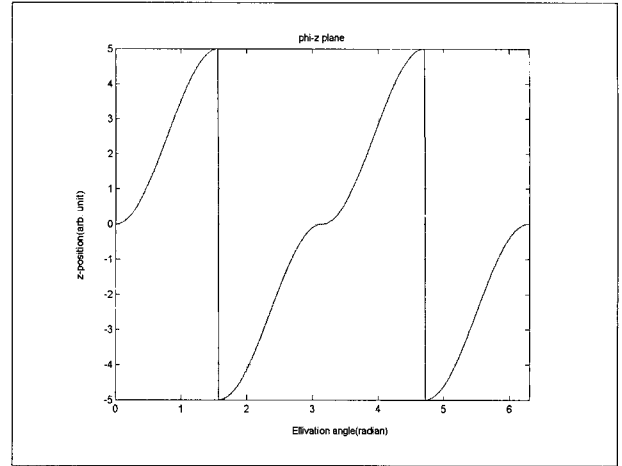
보다 일반적인 표현으로 이차방정식을 이용하여 C8 모형에 근접하는 곡선을 근사적으로 표현하면 아래 수식 (12)와 같다. 같이 쓸 수 있다.

$$z = \pm \frac{z_0}{2R_0 b} (\pm x - 2R_0)(\pm x - b), \quad (b \geq |2R_0|) \quad (12)$$

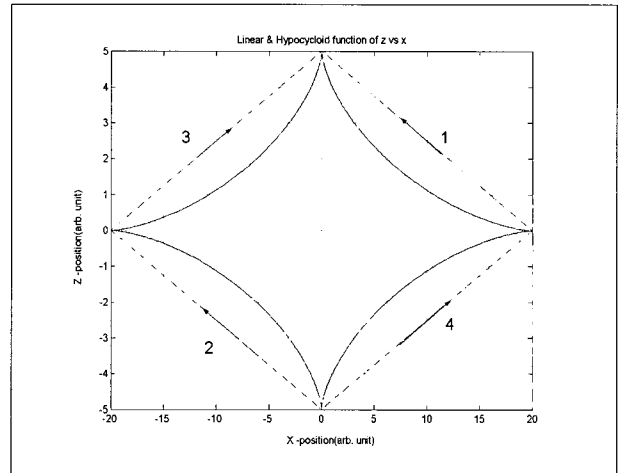
위의 식에서 상수 b는 직선 수식 (9)에 수렴하기 위한 parameter로 b값에 따라 수식 (11)에 의한 포물선의 궤적변화는 직선식에 대비하여 휘어짐 정도가 다르게 나타난다. b값이  $2R_0$ 보다 큰 경우는 수식 (11)에 의한 포물선은 Fig. 3(b)에서와 같이 직선 안쪽으로 휘어진 곡선을 나타낸다. b값이  $2R_0$ 와 같은 경우 직선에 대하여 휘어짐이 가장 큰 곡선이 되며, b값이 무한대인 경우 위의 식은 휘어짐이 없는 직선으로 근접한다.

수식 (11)을 z축에 대하여 대칭이동하면( $x \rightarrow -x$ ) 아래와 같이 2/4분면에서의 곡선식이 된다.

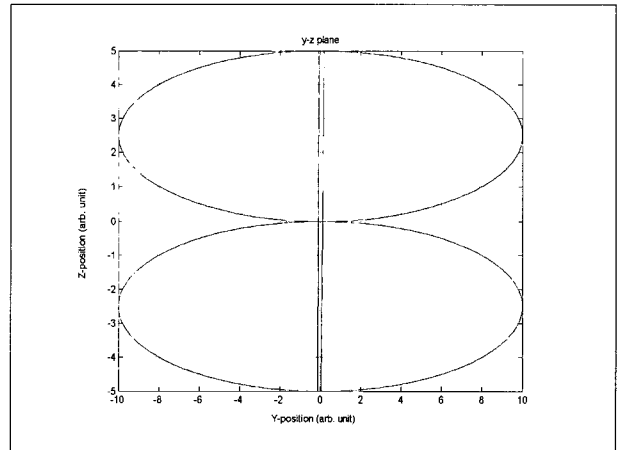
$$z = \frac{z_0}{2R_0 b} (x + 2R_0)(x + b), \quad (b \leq -2R_0) \quad (13)$$



(a) A trajectory in the x axis



(b) A trajectory in the y axis



(c) A trajectory in the z axis

Fig. 3 The projecting trajectories in the axis direction with elevation angles.

위의 식을 수식 (9)에서  $z = z_0(x/2R_0 + 1)$ 의 직선에 대하여 대칭이동하기 위하여  $x \Rightarrow z_0(\frac{z}{2R_0} + 1)$ ,  $z \Rightarrow 2R_0(\frac{x}{z_0} - 1)$ 을 대입하면 4/4분면에 대한 곡선궤적식을 구할수 있다.

C8 블레이드의 중심궤적상의 임의의 한 점인 A지점의 z축 상 투영위치인 좌표값 z를 경사각  $\theta$ 에 대하여 표현하면 아래 수식 (14)와 같다.

$$z = z_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4R_0}x\right) \quad (14)$$

$$(-2R_0 \leq x \leq 2R_0; 1 \text{ period}; 2R_0 \rightarrow -2R_0 \rightarrow 2R_0)$$

따라서 C8 블레이드 중심궤적에서 임의의 한 점인 A점의 위치  $\vec{r}_A$ 는 수식 (6)과 (14)의 벡터 합  $\vec{r}_A = \vec{\rho}_A + z\hat{k}$ 으로 표현된다.

$$r_A = \sqrt{2Rx + z_0^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi x}{4R}\right)} \quad (15)$$

위의 결과로부터 xy 평면 및 yz평면에서 A점의 투영(projection)을 각각 y를 변수로 표현하는 수식은 아래와 같다.

$$x = R_0 \pm \sqrt{R_0^2 - y^2} = R_0 [1 \pm \sqrt{1 - y^2/R_0^2}]$$

$$z = z_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4} [1 \pm \sqrt{1 - y^2/R_0^2}]\right) \quad (16)$$

### 3. 비대칭 경계점의 회전궤적 분석

C8 blade는 중심궤적에 대하여 폭이 W이나, 파배기 형태로 꼬여있기 때문에 대칭성이 없다. blade의 경계를 이루고 있는 임의의 지점들은 중심궤적으로부터 최단거리는 W/2 만큼 떨어져 있으나 경사각 및 회전각에 대한 대칭성이 없어 대칭적인 표현이 어렵다. 따라서 경계면에서 임의의 지점들은 비대칭성을 가지며, 이점들에 대한 회전궤적 분석은 C8 blade의 중심궤적상의 임의의 한 지점이 A점에 대한 궤적표현으로부터 해석적으로 분석할 수 있다.

C8 blade의 중심원주상의 임의의 한 점인 A점의 궤적을 회전각  $\phi$ 와 x의 함수로 표현하면 다음과 같다. 이때 cs 및 ss는 회전각 $\phi$ 의 위상 변화에 따른 부호 변화를 나타낸다.

$$x_A = R_0 \cdot (1 + \cos(2\phi)) \cdot cs$$

$$y_A = (\sqrt{2R_0 \cdot x_A \cdot cs - x_A^2}) \cdot ss \quad (17)$$

$$z_A = \left(-\frac{z_0}{2R_0}x_A \cdot cs + x_A^2\right) \cdot ss;$$

여기서,  $ss = \frac{\sin\phi}{|\sin\phi|}$ ,  $cs = \frac{\cos\phi}{|\cos\phi|}$ 이다.

C8 blade의 xy 평면에서 투영단면은 y축에 대하여 두 개의 원이 대칭을 이루고 있으며, 중심원주상의 좌표는 위의 수식 (17)으로 축약하여 표현된다. 따라서 C8의 Left-half blade와 Right-half blade는 y축에 대하여 대칭적인 구조로 표현 가능하며, 각각의 blade의 중심에 대한 회전각을 도입하여 표현하면 xy 평면상의 투영단면은 다음과 같이 표현된다.

오른쪽 blade 폭 W 내의 임의의 한 점 A'의 좌표:

$$x_{A'} = R_0 + R_{A'} \cdot \cos(\phi_R),$$

$$y_{A'} = R_{A'} \cdot \sin(\phi_R) \quad (18)$$

왼쪽 blade 폭 W 내의 임의의 한 점 L'의 좌표:

$$x_{L'} = -R_0 + R_{L'} \cdot \cos(\phi_{L'}),$$

$$y_{L'} = R_{L'} \cdot \sin(\phi_{L'}) \quad (19)$$

위의 식에서  $R_0 \leq R_{A'}, L' \leq R_0 + W$ 이다.

양쪽 blade는 각각의 원의 중심( $R_0, 0$ ) 및  $(-R_0, 0)$ 에 대하여 동심원들을 그리며 y축에 대하여 서로 대칭적인 구조를 이루고 있다. 그러나 이 경우 위상변수  $\phi_R, \phi_L$ 은 x축 상에 평행 이동된 두개의 직각좌표계를 독립적으로 필요로 하며, 양쪽 blade 상의 모든 점들을 하나의 연속적인 좌표계로 표현할 수 없다. 따라서 C8 blade 상의 임의의 점의 좌표를 원점 및 중심축에 대한 x 및 회전각  $\phi$ 의 연속적인 변수 값으로 표현하기 위해서는 C8 blade상의 비대칭 점들의 궤적을 좌표 이동에 의하여 y축에 대하여 비대칭 동심원들이 접하는 형태로 구조 분석이 필요하다.

양쪽 blade의 임의의 동심원들이 서로 접하는 지점은 x축 상에서  $\Delta x$ 만큼 평행이동한 지점이다. 이 지점을 통과하는 평행이동된 y'축에 대하여 접하는 왼쪽 및 오른쪽의 한 쌍의 동심원들의 반경은 서로 그 크기가 다르다. C8 blade는 왼쪽 blade의 최대 동심원과 오른쪽 blade의 최소 동심원이 접하는 지점은 x축 상의 원점에서 blade의 폭의  $+W/2$ 만큼 오른쪽으로 이동된 지점이며, 왼쪽 blade의 최소 동심원과 오른쪽

쪽 blade의 최대 동심원이 접하는 지점은 x축 상의 원점에서 blade 폭의  $-W/2$ 만큼 왼쪽으로 이동한 지점이다. 따라서 양쪽 blade 동심원들이 접하는 지점은  $[-W/2, W/2]$  영역 속에 있으며, 반경의 크기 변화는 원점에서  $\pm \Delta x$  만큼 이동된 접점에 대하여 다음과 같이 표현된다.

x축으로  $+\Delta x$  만큼 이동한 오른쪽 동심점원의 반경은  $R_{A'} = R_0 - \Delta x$  만큼 감소하며, 왼쪽 동심점원의 반경은  $R_{L'} = R_0 + \Delta x$  만큼 상보적으로 증가한다.

좌표축 y를  $+\Delta x$ 만큼 이동한  $y''$  축에 대하여 C8 blade의 좌표변환은 우측 반쪽 블레이드(Right half blade)에서는 식 (20)과 같다.

$$\begin{aligned} x_{A''} &= x_{A'} - \Delta x, \\ y_{A''} &= (\sqrt{2R_{A'} \cdot x_{A'} \cdot cs - x_{A'}^2}) \cdot ss, \\ z_{A''} &= [-\frac{z_0}{2R_{A'}} \cdot x_{A'} + z_0 \cdot cs] \cdot ss, \end{aligned} \quad (20)$$

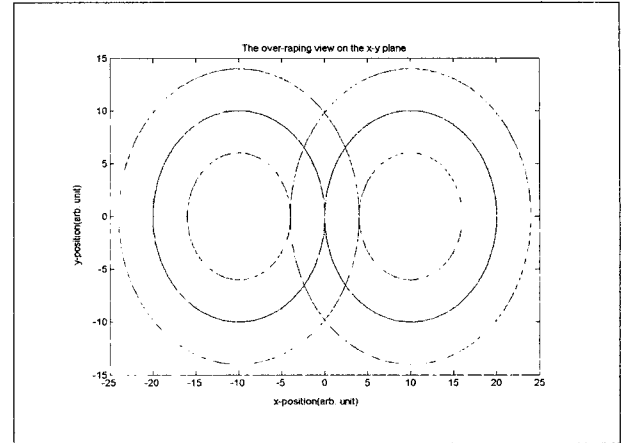
여기서,  $x_{A'} = R_{A'} \cdot (1 + \cos(2\phi)) \cdot cs$ ,  
 $R_{A'} = R_0 - \Delta x \cdot cs$ .

좌측 반쪽 블레이드는 식 (21)와 같다.

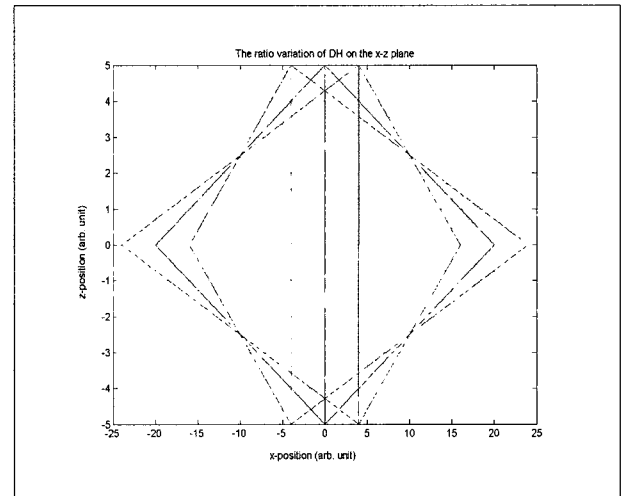
$$\begin{aligned} x_{L''} &= x_{L'} + \Delta x, \\ y_{L''} &= (\sqrt{2R_{L'} \cdot x_{L'} \cdot cs - x_{L'}^2}) \cdot ss, \\ z_{L''} &= [-\frac{z_0}{2R_{L'}} \cdot x_{L'} + z_0 \cdot cs] \cdot ss, \end{aligned} \quad (21)$$

여기서,  $x_{L'} = R_{L'} \cdot (1 + \cos(2\phi)) \cdot cs$ ,  
 $R_{L'} = R_0 + \Delta x \cdot cs$

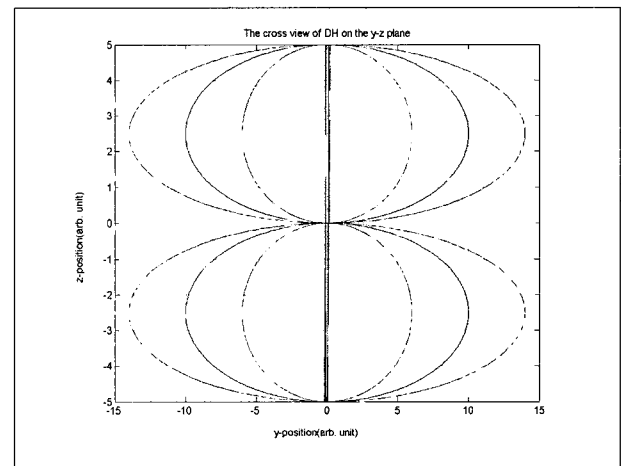
위의 수식을 이용하여 회전각에 대한 비대칭점들의 궤적을 계산한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. C8 blade의 3차원 근사 구조에 대한 xy, xz 및 yz 평면에서 투영단면은 위에서 서술된 수식 (20)과 (21)을 이용하여 재현하였다. Fig. 4(a)에 나타난 xy 평면에서 C8 투영단면은 8자 모양을 이루며, 반경이 서로 상보적인 좌측 및 우측 동심원들이 세 쌍의 짝을 이루어 접하고 있으며 접점 사이의 최대 간격이 blade의 폭 W와 같다. z 방향으로 입사 하는 공기 입자에 대하여 Fig. 4(b)와 (c)에 나타낸 것과 같이 C8 blade의 좌우측 경사각은 서로 반대로 되어있으며, 양쪽 blade의 z축에 대한 경사각은 근사적으로  $\theta \approx \pm \tan^{-1}(0.3H/R_0)$  정도이다.



(a) Trajectories on the xy plane



(b) Trajectories on the xz plane



(c) Trajectories on the yz plane

Fig. 4 The projecting trajectories on the plane in C8 blade asymmetric boundary.

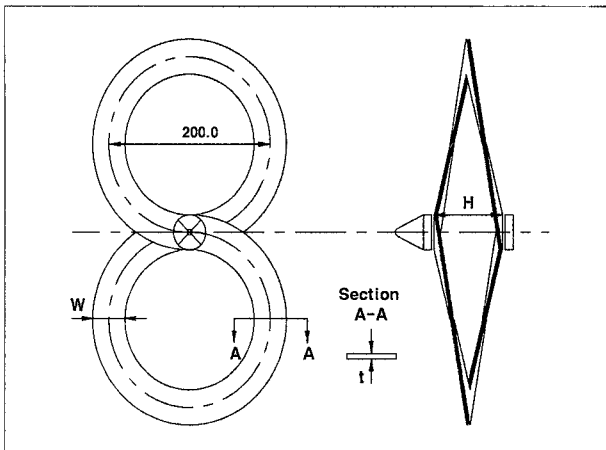


Fig. 5 The Conceptual diagram of Cuban-8 Blade<sup>[12]</sup>.

입사되는 공기 입자로부터 에너지를 획득하기 위한 C8 블레이드 에너지 전환 특성은 높이  $H$ 와 중심궤적 반경  $R_0$ 에 의하여 형성되어지는 블레이드 경사면의 양면을 공기 입자가 동시에 통과할 때 발생할 수 있는 양력발생에 의한 회전 토크와 Fig. 4(a)에 나타난  $z$ 축 방향으로 입사되는 공기와 좌우측 블레이드의 비대칭 경사면에서 탄성충돌 후 항력발생에 의한 회전토크 이득을 동시에 획득할 수 있는 복합형 구조로 이해된다.

Fig. 5는 Cuban-8 블레이드의 개념도를 나타낸 것으로 바람입자가 블레이드 면에 작용하면 충격력과 바람방향의 변환에 의한 반동력에 의해 회전력을 발생시켜 블레이드가 회전하게 된다. 블레이드 면은 경사져 있으며 회전축을 중심으로 서로 엇갈려서 지나가 우측의 그림에서 보듯이 블레이드 중심선이 중앙에서 만나지 않는 구조이다.

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 복잡한 구조를 갖는 가로누운 8자형의 Cuban-8(spiral blade) 수평축 풍력터빈 블레이드의 기하학적 구조에 대한 수학적 모델링과 그 특성에 대하여 규명하였다. C8 블레이드의 궤적의 복잡성은 바람의 작용에 의한 회전력의 발생 메커니즘이 복잡적이라는 사실에 기인된다고 볼

수 있다. 즉, 블레이드 회전궤적에 대한 이해는 회전운동현상에 대한 보다 완벽한 이해를 도와주며 이는 회전력 발생 메커니즘에 대한 이해를 가능하게 해준다. 수평축 풍력터빈 블레이드로서 C8 블레이드는 구조가 매우 단순하면서도 변화되는 풍향 및 풍속에 효과적으로 바람에너지를 기계적 에너지로 변환함으로써 모든 풍환경에서 효율적으로 운용할 수 있는 소형풍력발전시스템의 가능성을 보여줄 것으로 판단된다. 다만 구조적 취약성과 대형화의 어려움 등이 문제점이 될 수 있을 것이다. 이러한 문제점에도 불구하고 본 논문에서는 풍력시스템 설계에 사용할 수 있는 풍력터빈 블레이드의 기하학적 특성을 분석하였다.

향후 연구방향으로 본 연구를 통하여 기하학적으로 분석된 풍력터빈 블레이드의 동력학적 특성을 분석하고 풍력실험을 통하여 풍력발전용 터빈의 효율성을 연구하는 것이 필요할 것이다.

#### References

- [1] Hong, K. D., 1992, "Stability Improvement of Center Lathes", J. of KSPE, Vol. 2, No. 2, pp. 123-126.
- [2] F. R. Eldridge, 1980, Wind Machines, 2nd ed., Litton Educational Series.
- [3] G. L. Johnson, 1985, Wind Energy Systems, Prentice-Hall.
- [4] B. F. Blackwell, R. E. Sheldahl, L. V. Feltz, 1976, "Wind Tunnel Performance Data for Two and Three Bucket Savonius Rotors", SAND 76-0131.
- [5] 손충렬, 2000, 풍력발전의 현황과 미래, 인하대 산업과학기술연구소.
- [6] WWW.AWEA.org., 2001, Wind Energy Application Guide, AWEA.
- [7] Wind Performance Characteristics, 1997, Wind Energy Series No. 10.
- [8] 김현규외, 2003, 포항 호미곶 풍력발전 단지설계 및 전파간섭 영향평가에 대한 연구, RIST 연구논문 제17권2호.
- [9] www.windpowerigamerica.gov
- [10] www.awea.org/smallwind.html
- [11] Ari Reeves, www.repp.org, Wind Energy for Electric Power.
- [12] 황창수, 정형석, 조환기, 2007, Cuban-8 형상의 소형 풍력터빈 블레이드의 공력특성 연구, 공군사관학교 논문집, 제58집 1권, pp. 115-124.



**황 창 수**



1985년 공군사관학교 물리학과 이학사  
1993년 서울대학교 물리학과 이학석사  
2001년 미국 켄터키 주립대학 물리학과 이학박사

현재 공군사관학교 물리학과 교수  
(E-mail : cshwang1@paran.com)

**조 환 기**



1983년 공군사관학교 항공공학과 공학사  
1987년 서울대학교 항공공학과 공학석사  
1997년 미국 조지아공과대학 항공우주공학과  
공학박사

현재 공군사관학교 항공우주공학과 교수  
(E-mail : hkee04@hanmail.net)

**정 형 석**



1989년 공군사관학교 항공공학과 공학사  
1994년 서울대학교 항공우주공학과 공학석사  
2004년 미국 스탠포드대학 항공우주공학과  
공학박사

현재 미국 공군사관학교 교환 교수  
(E-mail : hschung@afa.ac.kr)