

풍력발전용 연의 비행제어를 위한 퍼지 제어기 설계

조동현*, 김종철**

Fuzzy Controller Design for Kite Flight Control

Dong-Hyun Cho*, Jong Chul Kim**

Abstract

In recent years, the interest in a various energy sources is increasing. Among these energies, there are many kinds of researches for the kite which can generate the energy from high-altitude wind power. There are many attempts to apply the kite to the wind power generation and ship salvage, and it must require the flight control of the kite for this applications. In this paper, we suggest this flight controller based on the flight technique of sport kite. For this controller based on the human controller, we design the simple fuzzy controller with simple fuzzy rules.

초 록

최근 다양한 에너지원에 대한 관심이 증가하고 있으며, 연을 이용하여 고공풍력 에너지를 활용하는 방법에 대한 연구가 이루어지고 있다. 연을 이용한 풍력 발전 및 선박 인양 등의 다양한 분야에 적용하기 위해서는 연에 대한 비행제어가 필요하다. 본 논문에서는 이러한 연의 비행제어를 위해 기존의 Sport Kite의 비행기술의 원리를 이용한 지능제어 이론을 적용해보고자 한다. 이를 위해서 적절한 퍼지 룰을 생성하고 퍼지 제어기를 구성하여 연에 대한 비행제어 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

키워드 : 연 (kite), 퍼지제어 (fuzzy control), 8자 비행(lying eight), 고공풍력(high-altitude wind power)

1. 서 론

최근 유가의 급등으로 인한 에너지 공급가격의 상승으로 산업 전반적으로 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 에너지 문제는 산업뿐만 아니라 인류의 기본적인 생활에 막대한 영향을 끼치고 있

기에 인류최대의 과제로 인지하고 화석연료의 고갈에 대비한 다양한 대체 에너지 개발이 가속화되고 있는 실정이다. 여러 대체 에너지들 중에서 풍력은 가장 오랫동안 인류가 활용해온 청정에너지 중의 하나이다. 현재 일부 지역에서는 풍력발전소를 건립하여 전력을 생산하고는 있으나 그

접수일(2013년 5월 2일), 수정일(1차 : 2013년 6월 7일, 게재 확정일 : 2013년 7월 1일)

* 융합기술연구팀/dhcho99@kari.re.kr

** 융합기술연구팀/jckim@kari.re.kr

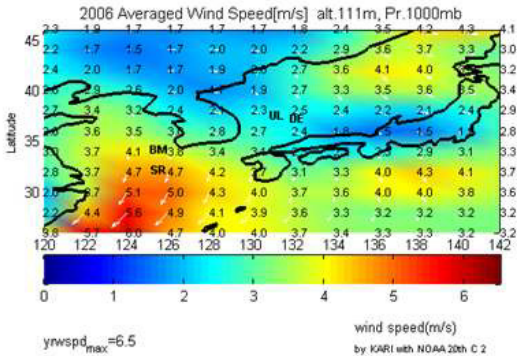


그림 1 2006년 한반도 상공 111m 에서의 평균 풍속^[10]



그림 2 탑고정형 풍력발전의 문제

생산량이 미약한 수준이다. 그러나 최근 1.5km 고도의 편서풍대에서 채취 가능한 풍력에너지가 47TW로 현대 인간이 사용하는 에너지인 15TW의 세배를 능가할 수 있다는 보고 등을 통해 고공풍력을 활용하고자 하는 노력이 이루어지고 있다.^[1] 그림 1에서는 2006년도 한반도 주변 상공의 연평균 풍속을 나타내고 있으며, 지상에 비해 높은 잠재적 가치를 가지고 있음을 보여주고 있다. 이러한 잠재적 에너지원을 기존의 풍력발전기 시스템으로 모두 활용하고자 하는 경우 풍력발전기의 회전자 및 타워에 인가되는 하중으로 인해 그림 2와 같이 발전기의 고장을 야기할 수 있기 때문에 보다 효율적으로 고공풍력 자원을 활용하고자 하는 연구가 다양하게 이루어지고 있다.^[2]

최근 연(Kite)을 이용한 고공풍력을 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 연의 에너지를 이용하는 가장 오래된 방법으로 선박의 항해가 있다. 종래의 풍력을 이용한 항해이후, 연을 이용한 선박의 인양 및 운영에 활용하고자 하는 연구가 이루어지고 있으며,^[3] 최근 독일에서는 바람을 이용한 선박의 운영에 활용할 수 있는 제품인 "Skysail"이라는 상용제품을 출시한 바 있으며, 이에 대한 국내 활용 가능성에 대한 연구를 수행한 바도 있다.^[4]

최근에는 연을 이용해서 고공풍력에너지를 전기에너지로 바꾸는 연구도 진행되고 있다.^[5-9] 연을 이용한 발전의 경우 연의 운동을 누운 8자 형태의 비행으로 제어함으로써 장력을 증대시켜 발

전을 돌리는 방식을 주로 사용하고 있다. 이러한 연의 운동은 바람의 방향 및 속도 등의 외부 환경에 의한 외란요소가 크기 때문에 누운 8자 형태의 비행을 제어하기 위해서 다양한 형태의 제어가 제시되고 있으며, 그 중 대표적으로 활용되고 있는 것이 NMPC (Nonlinear Model Predictive Control)를 이용한 제어기이다.^[9]

연을 이용한 풍력발전을 위해 국내에서는 한국항공우주연구원(이하 항우연)에서도 선행연구가 진행되고 있으며, 2012년에 그림 3과 같이 연을 제어하기 위한 하드웨어를 제작하여 RC(Radio Controller)를 이용한 수동조종에 성공한 바 있다.

본 논문에서는 연의 자동비행을 위한 제어를 설계하고자 한다. 앞에서 언급한 바와 같이 연의 경우 외부 환경에 대한 외란요소가 크기 때문에 고전적인 PD 기반의 제어기 적용이 어렵다. 하지만 사람에 의한 조정이 가능하며, 이를 이용한 Sport kite가 이미 레저용으로 판매되고 있는 상황인 점에 착안하여 사람이 연을 날리기 위해 조종하는 제어방식과 유사한 지능제어기법을 적용해보고자 한다. 이를 위해 본 논문에서는 가장 간단한 룰 기반의 퍼지 제어(Rule based Fuzzy control) 기법을 적용하여 연의 운동을 제어해보고자 하며, 누운 8자 비행을 위한 2축 제어가 아닌 높은 장력의 생성에 초점을 맞춰서 횡(좌우)방향 제어만을 고려하고자 한다.

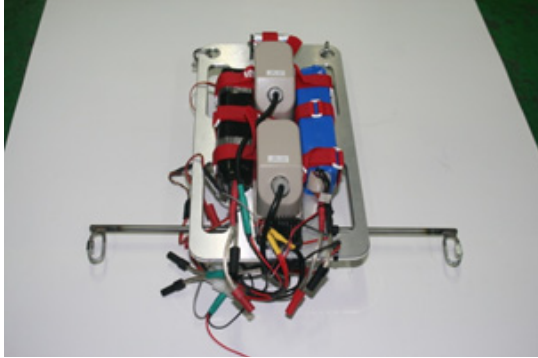


그림 3 항우연에서 개발 중인 Kite 제어장치

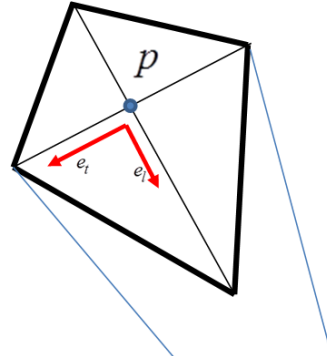


그림 4 Kite 운동방정식 유도를 위한 좌표계

2. 연의 제어기 설계

2.1 연의 운동방정식

연은 종류에 따라 2줄, 혹은 4줄로 제어를 하게 된다. 본 논문에서는 2줄을 사용하는 연에 대해 다루고자 한다. 해당 모델에 대한 운동방정식은 참고문헌[9]에서 제시한 다음의 모델을 사용하고자 한다.

$$\begin{aligned} \ddot{p} &= e_\theta(r\ddot{\theta} - r\sin\theta\cos\theta\dot{\phi}^2 + 2\dot{r}\dot{\theta}) \\ &+ e_\phi(r\sin\theta\ddot{\phi} + 2r\cos\theta\dot{\phi}\dot{\theta} + 2\sin\theta\dot{r}\dot{\phi}) \\ &+ e_r(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 - r\sin^2\theta\dot{\phi}^2) \end{aligned} \quad (1)$$

$$= \frac{F_\theta}{m}e_\theta + \frac{F_\phi}{m}e_\phi + \frac{F_r}{m}e_r$$

여기서 r , ϕ , θ 는 각각 거리(Range), 방향각(Azimuth angle), 고도각(Elevation angle)을 의미하며, e_r , e_ϕ , e_θ 는 각각의 축에 대한 단위벡터를 의미한다. F 는 아래첨자 방향의 외력을 의미하며, m 은 연의 질량을 의미한다.

연의 거리방향에 대한 운동의 경우 연줄에 의해 항상 평형을 이루고 있다고 가정할 경우, 연의 운동은 ϕ , θ 에 대해서만 고려하게 된다. 또한 연에 작용하는 외력을 중력과 공기에 의한 양력과 항력으로 한정할 경우 ϕ , θ 방향에 대한 외력은 다음과 같이 구성된다.

여기서 공기역학적 힘을 구하기 위해서 그림 4에서와 같이 연의 종축(e_t)과 횡축(e_ϕ)에 대해 표현해보도록 하겠다. 연의 운동에 대해 연에 영향을 미치는 바람(w_e)은 항상 e_t 방향과 일치한다고 가정하여 양력(F_l)과 항력(F_d)을 구하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} F_\theta &= F_\theta^{gra} + F_\theta^{aero} = mg\sin\theta + F_\theta^{aero} \\ F_\phi &= F_\phi^{aero} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} F_l &= \frac{1}{2}\rho C_l \|w_e\|^2 A \\ F_d &= \frac{1}{2}\rho C_d \|w_e\|^2 A \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 ρ 는 공기 밀도, C_l, C_d 는 각각 양력계수 및 항력계수, A 는 연의 단면적을 나타내며, 이를 이용한 식(2)의 공기역학적 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F_\theta^{aero} &= F_l((e_t \times e_t) \cdot e_\theta) + F_d(e_t \cdot e_\theta) \\ F_\phi^{aero} &= F_l((e_t \times e_t) \cdot e_\phi) + F_d(e_t \cdot e_\phi) \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 상태변수 $\theta, \dot{\theta}, \phi, \dot{\phi}$ 에 대한 운동방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.



그림 5 Sport Kite

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \frac{F_{\theta}^{aero}}{rm} + \sin\theta \frac{g}{r} + \sin\theta \cos\theta \dot{\phi}^2 \\ \frac{F_{\phi}^{aero}}{rm} - 2\cot\theta \dot{\phi} \dot{\theta} \end{pmatrix} \quad A(5)$$

참고문헌[9]에 보다 자세한 유도과정이 나와있다.

2.2 Sport Kite 비행기술

연을 이용하여 레저용으로 활용한 것이 Sport Kite이다. Sport Kite는 사용자의 간단한 조정을 통해 연을 원하는 방향으로 이동시키면서 생성되는 인장력을 이용하여 수상스키 및 수상보드 등의 다양한 형태의 스포츠를 즐기는 레저방법이다. 이러한 Sport Kite의 경우 주로 2줄, 4줄의 형태를 사용하고 있으며, 본 논문에서 사용하고 자 하는 모델은 그림 5의 오른쪽 그림과 같은 2 줄로 연을 제어하는 방식을 사용한다. 그림 5의 경우 하나의 바(bar)의 양쪽 끝에 연결된 2개의 줄로 연의 운동을 제어하고, 가운데 연결된 줄은 사용자의 몸에 연결하여 갑자기 불어오는 강풍에 의해 사용자가 견디기 힘든 인력을 받게 되거나 제어 바를 놓칠 경우에 자동으로 당겨지면서 연의 양력, 항력을 현저히 줄이면서 연을 착륙시키는 역할을 담당한다. 따라서 사용자는 제어바를 좌우로 비틀면서 양끝의 줄의 길이를 조절함으로써 연의 좌우 운동을 조정하여 비행한다.

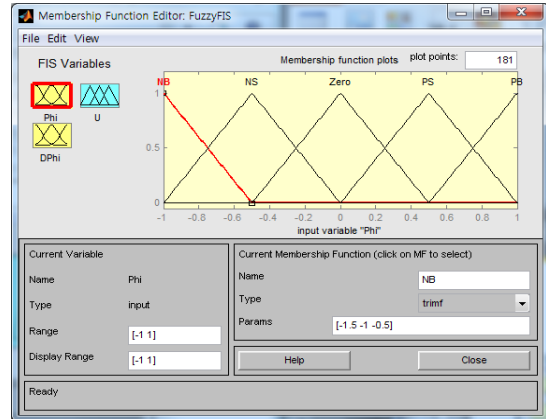


그림 6 MATLAB의 Membership Function 설정 화면

2.3 연의 비행제어용 퍼지 제어기 설계

Sport Kite의 경우 조작 방법이 간단하며, 실제 조정을 했을 경우 외부의 바람 방향의 변화 등의 외란력에 쉽게 적응할 수 있다. 이러한 비교적 간단한 인간의 제어 룰을 적용하기 위해서 본 논문에서는 퍼지 제어기를 이용한 비행제어를 수행해 보고자 한다.

이러한 퍼지 제어기를 설계하기 위해서 다양한 방법들이 있다. 이 중에서 본 논문에서는 Sport Kite의 제어 룰을 기반으로 한 제어기를 설계하고자 한다. 이를 위해서 공학용 소프트웨어인 MATLAB의 Fuzzy Logic Toolbox를 활용하여 퍼지 제어기를 설계하였다.

2.3.1 Membership Function

퍼지 제어기를 설계하기 위해서 먼저 상태변수 및 제어변수에 대한 멤버십 함수(Membership Function)를 설정해야한다. 본 논문에서는 연의 횡축(ϕ)방향만을 제어해서 좌우로 계속적으로 움직이는 비행을 설계하고자 한다. 따라서 이를 위해서 상태변수 $\phi, \dot{\phi}$ 에 대한 멤버십 함수를 그림 6과 같이 MATLAB의 멤버십 함수 설정환경을 이용하여 설정하였다. 상태변수의 범위는 $-1 \sim 1$ rad 및 $-1 \sim 1$ rad/s의 범위에 대해서 5개의 삼각형 형태의 성분 (NB(Negative Big), NS(Negati

표 1 연의 비행제어를 위한 Fuzzy Rule Table

		ϕ				
		NB	NS	Z	PS	PB
$\dot{\phi}$	NB	PB	PB	NS	NS	NB
	NS	PB	PS	NB	NB	NB
	Z	PB	PS	Z	NS	NB
	PS	PB	PB	PB	NS	NB
	PB	PB	PS	PS	NB	NB

ve Small), Z(Zero), PS(Positive Small), PB(Positive Big))으로 균등하게 설정하였다. 이와 동일하게 제어입력의 경우도 -14~14 의 범위에 대해서 5개의 삼각형 형태의 성분으로 균등하게 설정하였다.

2.3.2 퍼지 룰 (Fuzzy Rule)

앞 절에서 설정한 멤버십 함수에 대해서 연의 제어를 위해 실제 Sport Kite의 비행제어 경험에 기반한 제어 룰(Rule)을 정할 수 있었다.

먼저 연이 좌측 혹은 우측으로 멀리 떨어졌을 경우 반대방향 연줄을 당겨서 가운데로 이동을 시키기 위해서 다음과 같이 룰을 설정한다.

If ϕ is NB Then u is PB
 If ϕ is PB Then u is NB

다음으로 연이 중간지역에 있으며, 현재 위치와 동일 방향으로 움직이면 반대방향의 제어를 크게 수행하고, 반대 방향으로 움직이면 반대방향 제어를 적게 수행한다. 또한 현재 위치와 반대 방향의 속도를 가질 경우 반대 방향으로 넘어갈 수 있도록 약간의 가속을 시켜준다.

If ϕ is NS(or PS) and $\dot{\phi}$ is NB(or PB)
 Then u is PB(or NB)
 If ϕ is NS(or PS) and $\dot{\phi}$ is NS(or PS)
 Then u is PS(or NS)
 If ϕ is NS(or PS) and $\dot{\phi}$ is PS(or NS)
 Then u is PB(or NB)
 If ϕ is NS(or PS) and $\dot{\phi}$ is PB(or NB)
 Then u is PS(or NS)

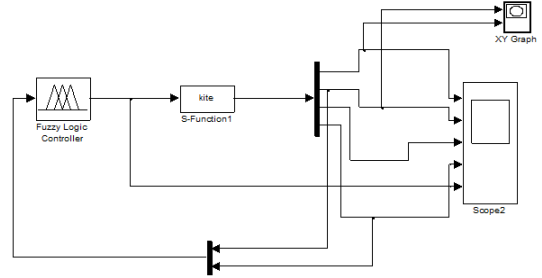


그림 7 퍼지 제어를 이용한 연의 제어 시뮬레이션 블록선도

마지막으로 연이 중심지역에 있을 경우 속도 방향으로 가속을 시켜줌으로써 연이 좌우로 계속적으로 움직일 수 있도록 한다.

If ϕ is Z and $\dot{\phi}$ is NB(or PB) Then u is NS(or PS)

If ϕ is Z and $\dot{\phi}$ is NS(or PS) Then u is NB(or PB)

이상의 내용을 정리하여 표 1과 같은 전체 퍼지 제어 룰을 작성할 수 있다.

3. 시뮬레이션

앞 절에서 설계한 퍼지 제어를 이용해서 연의 비행제어에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위해서 사용된 운동방정식 모델은 참고문헌 [9]에서 사용한 시뮬링크(Simulink) 모델을 그대로 적용하였으며, 이에 대한 전체 시뮬링크 구성도는 그림 7과 같다. 이 때 사용된 시뮬레이션 파라미터는 표 2에 정리하였다.

 표 2 시뮬레이션 파라미터^[9]

Parameter Name	Symbol	Value
Line Length	r	50 m
Kite Mass	m	1 kg
Wind Velocity	v_m	6 m/s
Density of Air	ρ	1.2 kg/m ³
Characteristic Area	A	0.5 m ²
Lift Coefficient	C_l	1.5
Drag Coefficient	C_d	0.29

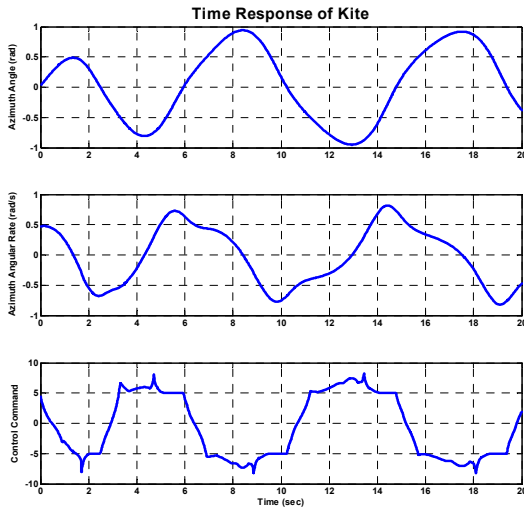


그림 8 퍼지 제어기를 이용한 시뮬레이션 결과. 위에서부터 ϕ , $\dot{\phi}$, u 에 대한 시간에 대한 그래프

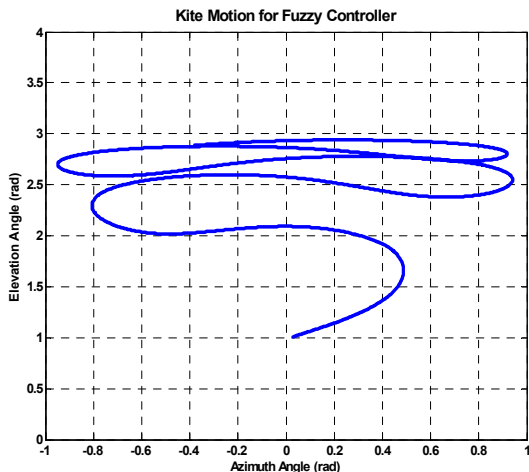


그림 9 퍼지 제어기를 이용한 시뮬레이션이 2차원 비행궤적

이러한 시뮬레이션을 20초 동안 수행한 결과 그림 8와 그림 9의 결과를 얻을 수 있었다. 그림 8의 첫 번째 그래프는 ϕ 의 시간 그래프로 연의 좌우측 방향의 위치가 된다. 본 시뮬레이션에서는 연의 좌우측 방향으로 ± 1 rad 이내에서 왕복운동을 하는 것이 목적이며, 위의 그래프에서 확인해 볼 수 있듯이 좌우 운동이 원하는 영역내에서 움직이는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 움직임에 대해서 2차원 평면($\phi-\theta$ 평면)에 대한 궤적은 그림 9와 같다. 이 그래프에서 확인 할 수 있듯이 연의 움직임이 좌우 ± 1 rad 이내에서 움직이면서 좌우로 지속적으로 반복운동을 하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

에너지 문제는 인류가 지속적으로 해결해야 되는 주요 과제이다. 이러한 에너지 문제의 해결을 위한 작은 노력의 일환으로 연을 고공풍력 채집 방법에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있는 가운데 본 논문에서는 Sport Kite의 제어 경험을 바탕으로 한 퍼지 제어기를 설계하였으며, 시뮬레이션에 적용해 보았다. 그 결과 인장력을 증가시켜 발전기를 돌릴 수 있는 좌우 비행에 대한 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 앞으로 본 논문에서 제시한 퍼지제어 룰을 좀 더 분석하고 발전시켜 보다 안정적인 제어가 가능하도록 노력해야 함과 동시에 상하 방향의 제어도 같이 적용하여 누운 8자 비행과 같이 안정적인 궤적으로 제어할 수 있도록 노력해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Jong Chul Kim and Chul Park, "Wind power generation with a parawing on ships, a proposal", Energy, Vol.35, Issue 3, 2010, pp.1425-1432
2. 김석우, 김현구, "고공 풍력발전 기술개발 현황", 한국태양에너지학회 Vol.30, No.1, 2010, pp.19-24
3. Lorenzo Fagiano, Mario Milanese, Valentino Razza, and Mario Bonansone, "High-Altitude Wind Energy for Sustainable Marine Transportation", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.13, No.2, 2012, pp.781-791
4. 박우석, 박진희, "국내연안에서의 SkySails 시스템 활용에 대한 검토와 효용분석", 한국항

- 해항만학회지, 제32권 제10호, 2008, pp.813-819
5. M. Canale, L. Fagiano, M. Ippolito, and M. Milanese, "Control of tethered airfoils for a new class of wind energy generator", IEEE Conference on Decision & Control, 2006
 6. Gabriel Weilenmann and Frederick Tischhauser, *Preliminary Study on Kite Autonomy*, Master Thesis, Swiss Federal Institute of Tech. Zurich, 2007
 7. M. Canale, L. Fagiano and M. Milanese, "KiteGen: A revolution in wind energy generation", Energy Vol.34, 2009, pp.355-361
 8. Mariam Ahmed, Ahmad Hably and Seddik Bacha, "Grid-connected Kite Generator System: Electrical Variables Control with MPPT", IECON 2011, 2011
 9. Moritz Mathias Diehl, *Real-Time Optimization for Large Scale Nonlinear Processes* Ph.D Thesis, University of Heidelberg, Germany, 2001, pp.139-152
 10. 권재욱, 문상만, 김중철, 최지웅, "풍력발전을 위한 시제품 Kite 비행체 개발", 한국항공우주학회 2012년도 추계 학술대회, 2012, pp.28-31