

# 기존 시스템의 단점을 보완한 Dual-rotor 풍력발전시스템 혁신 기술

## Innovative technique of Dual-rotor wind turbine system against the existing wind turbine system

김성주\*

Kim Sung Ju

### I. 서론

신·재생에너지는 석유, 석탄으로 대표되는 화석연료의 고갈과 기후변화협약과 같은 국제환경 규제 강화에 대비하여 세계적인 관심이 집중되고 있는 환경 친화적인 에너지원이다. 에너지 고갈로 인한 미래의 에너지위기와 지구대기환경오염이라는 문제를 해결하기 위해 에너지 사용을 억제하는 정책은 한계가 있기 때문에, 주요 선진국들을 중심으로 풍력, 태양광 및 연료전지와 같은 신·재생에너지의 개발과 보급에 힘을 기울이고 있는 실정이다. 특히 신·재생에너지 중의 하나인 풍력발전시스템이 가장 경제성이 우수하고 유용성이 높은 기술로 입증됨에 따라 향후 기후협약에 대비한 청정에너지원으로써 현재 유럽은 물론 미국, 일본, 중국, 인도 등 전 세계적으로 시스템 개발과 보급에 많은 투자가 이루어지고 있다. 그러나 이러한 투자에도 불구하고 한국, 중국 및 일본 등의 아시아 지역에는 보급 측면에서는 활발한 움직임이 이루어지지 못하고 있다. 국가적으로 보급정책을 시행하고 신·재생에너지를 활성화할 수 있는 제도를 계속해서 마련하고 수행하고 있으나, 아시아지역의 풍력발전시스템은 낮은 경제성과 높은 고장률이라는 한계에 부딪쳐 실제 설치/보급은 쉽지 않은 것이 사실이다. 이는 싱글로터 풍력발전시스템으로 부를 수 있는 기존 시스템의 경우 유럽에서 기술이 시작되었고, 보급 역시 유럽과 미국을 중심으로 이루어져 아시아와 같이 풍황의 질이 좋지 못한 지역에 맞는 설계가 이루어지지 못했기 때문이다. 현재 상용화되어 보급되고 있는 시스템은 풍황의 질이 상대적으로 우수한 지역에서 운용 시 충분한 경제성을 가지고 있으나 풍황의 질이 상대적으로 낮은 즉, 풍속변화가 심하고 풍향변화가 심한 지역에서는 빈번한 고장과 유지보수에 많은 비용과 시간이 소요되어 경제성 확보가 어렵다. 예를 들어 국내에 설치되고 있는 외국의 싱글로터 시스템들의 운용 결과를 보면 풍황의 질이 좋은 일부지역에서는 경제성을 확보하고 있으나 대부분의 지역에서는 돌풍으로 인한 시스템의 고장과 잦은 풍향변화로 인한 시스템 효율 저하, 유지보수 시 외국 의존에 의한 많은 시간과 비용이 들고 있다. 일본의 경우는 자체 기술을 확보로 자국 시스템 개발에 성공하였으나, 이 역시 기존 시스템의 한계로 인해 해외 수출은 가능하나 자국 내 보급은 하지 못하는 문제점을 안고 있다. 마지막으로 중국은 드넓은 국토와 풍부한 풍력에너지를 보유하고 있음에도 잦은 고장률과 낮은 경제성으로 인해 보급이 미진한 상태이다. 이러한 문제점들을 토대로 전 세계지역으로 설치지역을 넓히고자 많은 노력들이 이루어지고 있으나 싱글로터 시스템이 가지고 있는 원천적인 문제로 인해 이러한 단점을 극복하기는 쉽지 않은 것이 현실이다. 바람은 지구가 보유하고 있는 청정·무한정의 에너지원이다. 이러한 에너지원을 최대한 활용하는 것은 현재와 미래의 지구에 있어서 대단히 중요한 사안이다.

---

\* 김성주, 서남대학교 컴퓨터응용수학과, 063-213-9876, [sjk1113@yahoo.com](mailto:sjk1113@yahoo.com)

본 논문에서는 풍력발전시스템의 일반적인 소개와 특징을 다루고, 싱글로터 풍력발전시스템을 분석하여 풍력발전시스템의 설치 가능 지역을 전 세계로 넓히는 데 문제가 되고 있는 것들을 파악하고자 한다. 또한 기존 시스템의 단점을 극복하고 전 세계로 나아갈 수 있는 대안으로 혁신 기술로 개발되고 있는 (주)코윈텍의 Dual-rotor 풍력발전시스템의 특징을 소개하고자 한다.

## II. 기존 싱글로터 풍력발전시스템 분석

### 1. 풍력발전시스템의 역사 및 발전 원리

#### 1) 풍력발전시스템의 역사

바람의 힘은 흐르는 물의 힘을 이용하는 수차와 아울러 가장 오래된 에너지원으로 사용되어왔다. 풍력발전의 기원은 중국, 인도, 아프가니스탄과 페르시아의 아시아 문명에서 시작된 것으로 전해진다. BC 2-3 세기경 오르간 연주에 동력을 사용한 것이 문자로 기록된 최초의 풍력을 사용한 예로 알려지고 있다. BC 7세기 페르시아 사람들에 의해 수직축 터빈이 사용되어졌으며 이후 풍력의 이용이 유럽으로 확산되어 11세기와 12세기에 영국과 독일에서 풍차를 사용하기 시작했다. 중세기 이후로 유럽 전역에 걸쳐 풍력기술이 사용되기 시작했다. 18세기의 증기기관의 등장은 동력 생산을 열역학적 공정에 의존하게 만들었으며, 이로 인해 풍차의 사용은 화석연료에 비해 상대적으로 줄어들게 되었고 19세기에 들어서면서 풍력에너지의 중요성은 현저히 감소하게 되었다. 풍력의 이용이 러시아를 비롯한 몇몇 국가에서만 농업에 필요한 동력을 얻을 목적으로 이용하고 있던 중 19세기 덴마크의 Poul La Cour와 2차 세계대전 이후의 J.Juul의 등장으로 풍력발전시스템의 획기적인 변화가 일어나기 시작했다. Poul La Cour는 원시적 풍동을 이용하여 실험적인 관찰을 수행함으로써 실험방법의 개척자적인 역할을 하였다. 이 두 사람을 필두로 풍력발전시스템 관련 기술은 유럽을 중심으로 본격적으로 발달하기 시작하였다. 풍력발전기의 제작초기에는 시스템이 대부분 목재로 제작되었으며, 그 후 격자 첩탑이 세워지고, 첩로 제작된 블레이드가 등장했다. 1920년대와 30년대 프랑스의 Darrieus와 핀란드의 Savonius에 의해 새로운 개념의 수직축 풍력발전기에 대한 설계와 시험이 수행되기도 하였다. 1920년대 독일의 Albert Betz 교수에 의해 현대 풍력발전시스템의 연구가 본격적으로 시작되었다. 또한 Glauert에 의해 공기역학적인 이론을 바탕으로 한 연구의 기틀이 마련되기도 하였다. Betz와 Glauert의 이론은 모두 현대의 풍력발전시스템에 사용되는 블레이드의 설계와 분석 이론의 기초가 되었다. 이들에 의해 이론의 기본체계가 구축되었으며, 이를 바탕으로 현재까지 유럽과 미국을 중심으로 무수히 많은 연구가 수행되고 있다. 현재 많은 상용화 풍력발전시스템이 전 세계적으로 설치됨으로 무한정의 환경친화적인 에너지원인 바람을 인류가 효율적으로 이용하고 있다.

원시적 풍력에너지 이용시기부터 현재까지의 풍력발전기의 발전사를 표.1 에 요약하였다.

[표.1 풍력발전기의 발전사]

1970년대 이전	원시적 풍력에너지 이용시기	<ul style="list-style-type: none"> <li>고대페르시아의 풍력에너지 이용 - 곡식분해</li> <li>범선, 목장 등의 풍압이용 - 동력 및 양수</li> <li>초보적 풍력발전기기 등장</li> </ul>
1970년대	풍력발전기술 태동시기	<ul style="list-style-type: none"> <li>연구시험용 수십kW~수백kW 제작 및 시험</li> <li>요소기술개발의 부진으로 연구시험용으로만 제작</li> </ul>

1980년대	풍력발전기술 성장시기	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 수kW~수십kW급의 소형 풍력발전기기 상용화 개발</li> <li>· 1,2차 석유파동에 의한 풍력발전기술 부각</li> <li>· 독립전원형 위주의 요소기술 개발</li> </ul>
1990년대	풍력발전기술 실용화시기	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 수백kW~수MW급의 초대형 풍력발전기기 실용화</li> <li>· Off-shore 풍력단지개발로 가용 풍력 에너지원 증대</li> <li>· 첨단요소기술의 개발 및 전문화</li> <li>· 계통연계형 위주의 요소기술개발</li> </ul>
2000년대	풍력발전기술의 환경기술 선도시기	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 수MW급 초대형 풍력발전기기 상용화</li> <li>· 수십MW규모의 Off-shore 풍력단지운영</li> <li>· 수십MW규모의 내륙풍력단지 대형화</li> <li>· 21C 지구환경대응 선도기술로서 입지 구축</li> <li>· 2020년 전세계 전력소비 12% 공급 목표</li> </ul>

## 2) 풍력발전시스템의 발전 원리



풍력발전시스템은 회전자, 즉 블레이드를 통해서 바람의 운동에너지를 회전에너지 또는 기계적 에너지로 변환하고 다시 발전기를 통해 전기에너지로 변환해서 전기를 생산하는 시스템이다. 풍력발전시스템은 무한정의 청정에너지인 바람을 동력원으로 하므로 기존의 화석연료나 우라늄 등을 이용한 발전방식과 달리 발열에 의한 열공해나 대기오염, 방사능 누출 등과 같은 문제가 없는 무공해 발전방식으로 기후협약과 같은 국제 규제에 적절하게 대처할 수 있는 하나의 신·재생에너지로서의 특징을 가지고 있다.

## 2. 풍력발전시스템의 종류와 기본 구성

### 1) 풍력발전시스템의 종류

풍력발전시스템은 다양한 형태로 분류가 가능하다. 첫째 바람을 이용하는 방법에 따라 양력시스템과 항력시스템으로 나눌 수 있으며, 로터 축과 발전기 축에 따라 수평축시스템과 수직축시스템으로, 로터가 불어오는 바람에 대해 어디에 위치하느냐에 따라 Up-wind 방식과 Down-wind 방식으로 구분한다. 또한 제어 방식에 따라 피치제어시스템과 실속제어시스템으로, 요 구동 방식에 따라 수동요시스템과 자동요(Free Yaw)시스템으로 나누기도 한다. 시스템에 의해 발전된 전기를 사용하는 방법에 따라 계통연계방식과 독립운전방식으로 구분하기도 한다.

양력시스템은 바람을 비행기나 헬리콥터의 날개에 사용되는 익형을 이용하여 바람 입자의 속도 차이를 이용한 압력 차이에 의해 풍력발전시스템의 블레이드를 회전시킴으로 에너지를 생산하는 시스템을 말한다. 항력시스템은 돛단배나 물레방아와 같이 평평한 매개체가 바람을 막음으로 인해 발생하는 에너지를 이용하여 전기 에너지를 생산하는 시스템이다. 일반적으로 양력시스템이 항력시스템에 비해 높은 효율을 가지고 있다.

수평축시스템은 로터 회전축과 발전기 축이 지면에 수평인 장치로써 현재 상용화되어 사용되고 있는 대부분의 풍력발전시스템에서 적용하고 있는 것이다. 수직축시스템은 수평축시스템이 가지고

있는 단점을 극복하고자 고안된 시스템으로 로터 회전축과 발전기 축이 지면과 수직을 이루는 장치이다. 그러나 수평축에 비해 효율이 낮고, 설치면적이 크다는 단점 등으로 인해 현재는 개발이 이루어지지 않고 있다.

Up-wind 방식은 불어오는 바람에 대해 로터 블레이드가 타워 앞쪽에 위치하는 시스템으로 현재의 대부분의 대형시스템에서 사용하고 있다. 이 방식은 바람의 방향의 변화에 대해 능동적으로 대처하지 못하기 때문에 시스템과 풍향이 일정 각 이상 벗어나는 경우 별도의 선회장치 즉, 요 메카니즘을 사용하여 시스템과 풍향을 일치시키는 특징이 있다. Down-wind 방식은 불어오는 바람에 대해 로터 블레이드가 타워 뒤쪽에 위치하는 시스템으로 풍향의 변화에 대해 능동적으로 대처하지 못하는 Up-wind 방식의 단점을 극복하고자 고안된 것이다. 그러나 타워 뒤에 위치함으로 타워 그림자 효과에 의해 불규칙한 하중이 시스템에 작용하고, 효율이 상대적으로 낮다는 단점으로 인해 현재는 소형풍력발전기에서만 채택되고 있다.

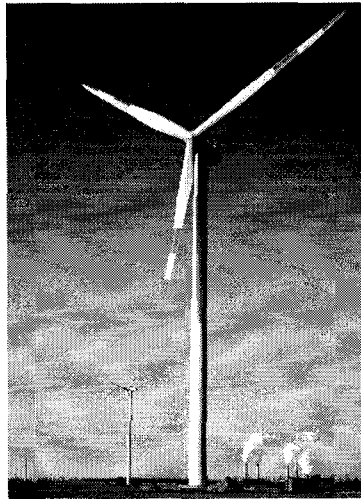


그림 1. 수평축 풍력발전시스템



그림 2. 수직축 풍력발전시스템

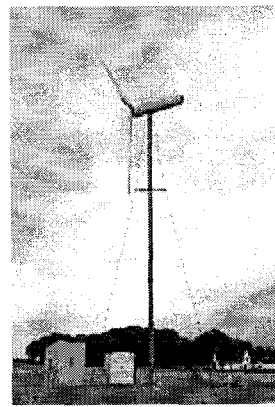


그림 3. Down-wind 방식 풍력발전시스템

풍력발전시스템은 다양하게 변화하는 풍속과 풍향에 따라 운전양상이 달라지는 특징을 가지고 있다. 따라서 제어방식을 어떻게 결정하고 얼마나 제어를 잘 하느냐에 따라서 시스템의 효율과 안전성을 높일 수 있다. 피치제어방식과 실속제어방식은 사용되는 발전기의 형태에 따라 적용되어 왔다. 로터에서 발생하는 운동에너지를 전기에너지로 바꾸는 발전기는 유도발전기, 동기발전기, 이 중여자 유도발전기와 영구자석형 발전기 등이 사용되고 있다. 유도발전기는 정속운전 방식으로 초

기에 많이 사용되었다. 유도발전기는 발전기의 특성상 일정 회전속도 이상에서 발전을 하는 방식으로 실속제어를 통해 충분히 제어가 가능하였다. 그러나 유도발전기는 낮은 풍속에서의 발전이 어렵고 실속제어는 높은 풍속에서의 효율이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 동기발전기는 유도발전기에 비해 낮은 풍속에서의 발전이 가능하다. 보통 동기발전기를 장착한 시스템에서는 피치제어방식을 채택하고 있다. 그러나 동기발전기의 경우 유도발전기를 사용하는 풍력발전시스템에 없는 인버터가 필요하고 가격이 높다는 단점이 있다. 이중역자 유도발전기는 유도발전기와 동기발전기의 장단점을 결합한 형태로 동기발전기에 사용되는 인버터에 비해 작은 인버터를 사용하고 낮은 풍속에서의 발전이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 영구자석형 발전기는 가장 진화된 발전기로서 피치제어와 함께 최대의 성능을 가지는 장점을 가지고 있으나 아직은 가격적인 면에서 부담이 크다는 단점이 있다. 피치제어는 별도의 피치제어장치를 구성함으로써 블레이드의 각을 변화시켜 풍속의 변화에 따라 시스템이 최대의 효율을 가질 수 있도록 해주며, 높은 풍속에서 블레이드의 각을 변화시켜 운전 가능한 풍속까지 일정한 정격발전을 할 수 있도록 도와준다. 또한 풍력발전시스템이 감당할 수 없는 풍속에서 블레이드의 각을 변화시켜 시스템이 안전하도록 해주는 역할을 담당한다. 실속제어는 블레이드의 설계 시 높은 풍속에서 블레이드가 스스로 실속영역에 들어가게 함으로써 풍력발전시스템의 발전량을 제어하고 시스템이 안전할 수 있도록 해 주는 제어장치이다. 실속제어는 피치제어에 비해 비용 부담이 적고, 시스템이 간단하다는 장점이 있는 반면, 피치제어에 비해 효율이 낮다는 단점을 가지고 있다.

요제어는 풍향의 변화에 대해 시스템이 최대의 효율을 낼 수 있도록 하는 기능과 극한풍속에서 시스템의 손상을 최소화하는 기능을 가진다. 일반적으로 사용하는 방식은 수동요제어로서 Up-wind 시스템에서 사용하고 있다. 수동요제어는 바람과 로터 블레이드의 방향이 일정 각 이상을 벗어나 일치하지 않을 때 요 모터를 사용하여 방향을 일치시켜준다. 자동요제어방식은 Down-wind 시스템에서 사용할 수 있으며, 바람과 로터 블레이드의 방향을 공기역학적 특성을 이용하여 자동으로 방향을 맞출 수 있다는 특징을 가진다.

풍력발전기에서 생산된 전기에너지는 크게 두 가지 형태로 소비자에게 제공된다. 계통연계형 시스템은 발전기가 기존 계통에 연결되어 소비자가 계통을 통해 전력을 공급받는 형태이다. 독립전원형 시스템은 도로나 산간 오지 등 계통이 연결되지 않은 곳에 적용되는 것으로 축전기와 함께 설치하여 생산된 전기를 축전기에 저장하고 저장된 전기를 소비자가 사용하는 방식이다. 일반적으로 독립전원형 시스템은 디젤발전기 등과 같이 조합해서 사용한다.

## 2) 풍력발전시스템의 기본 구성

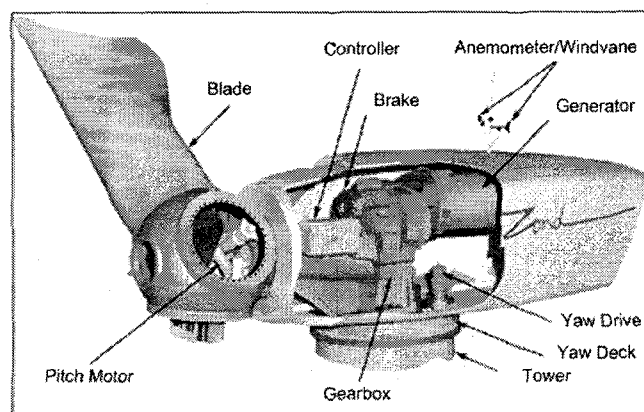


그림 4. 풍력발전시스템의 기본 구성

풍력발전시스템은 그림 4에서 보이는 바와 같이 바람의 운동에너지를 회전에너지로 전환시키는 블레이드, 블레이드의 각을 제어하여 발전효율을 향상시키고 시스템의 안전성을 제공하는 피치 모

터 및 컨트롤러, 운용 중 비상시에 시스템을 정지시킬 수 있는 브레이크로 구성되어 있다. 또한 현재의 풍향조건을 측정하여 시스템의 운용에 사용하기 위한 풍속계와 풍향계, 블레이드의 회전속도를 증속하여 발전기가 발전을 할 수 있는 회전속도로 높여주기 위한 증속기어, 바람의 에너지를 실제 전기로 바꾸어 주는 발전기로 구성되어 있다. 그리고 바람의 방향이 계속해서 바뀌기 때문에 보다 높은 효율을 낼 수 있도록 시스템의 방향을 바람의 방향과 일치시켜 주기위한 요 드라이브 및 요 모터, 각 하부 주요 구성품들을 보호하는 나셀로 구성되어 있다. 이러한 주요 구성품들은 1MW 시스템의 경우 지상 50미터에서 60미터 사이에 위치하고 이를 위해서는 타워가 필요하다. 일반적으로 타워는 스틸로 제작되며, 형식은 크게 격자(Lattice) 형식과 튜블러(Tubular) 형식으로 구분된다. 그림 5는 Vestas사의 1.65MW급 V82의 주요 구성품을 나타낸 그림이다.

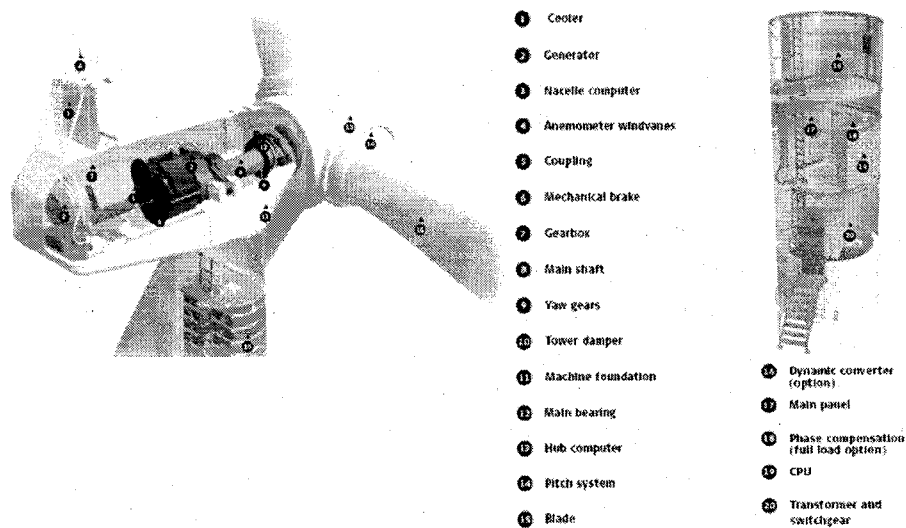


그림 5. 풍력발전시스템 구성 [Vestas V82 - 1.65MW]

앞에서 설명한 풍력발전시스템의 주요 구성품들을 다시 정리하면 다음과 같다.

- **Nacelle:** 로터와 타워 사이에 있으며 기어박스, 발전기 등을 보호
- **RotorBlades:** 바람의 에너지를 기계적 에너지로 바꾸어 허브에 전달
- **Hub:** 저속축에 연결되며, 블레이드 제어 방식에 따라 설계
- **LowSpeedShaft:** 허브와 기어박스를 연결하며, 저속으로 회전하는 축
- **GearBox:** 저속축을 발전기 정격회전 속도에 맞추어 고속축을 회전시키는 장치
- **HighSpeedShaft:** 고속으로 회전하여 발전기를 구동시키는 축으로 비상시 기계적 디스크 브레이크에 의해 정지 가능
- **Mechanicaldiscbrake:** 풍력발전시스템의 유지보수나 공기역학적 브레이크를 보조하여 사용
- **Electrical Generator:** 발전기로 Induction generator, Asynchronous generator, Doubly-fed induction generator, Synchronous generator, Permanent Magnetic generator 등이 있다
- **Electroniccontroller:** 풍력발전시스템 상태를 연속적으로 모니터링하고 요 장치를 제어
- **Hydraulicssystem:** 풍력발전시스템의 공기역학적 브레이크 리셋에 사용
- **Coolingunit:** 발전기의 cooling 및 기어박스 오일의 cooling에 사용하는 것으로 보통은 electric fan을 사용
- **Tower:** Nacelle과 로터를 지탱하는 역할을 하는 타워는 보통 튜블러 또는 트러스 모양으로

설계 튜블러 모양 타워는 유지보수에 안전하고 트러스 타입의 타워는 주로 값이 저렴하다는 장점을 가진

■ **YawMechanismSystem:** 바람에 대해 로터가 방향을 맞출 수 있도록 나셀의 방향을 전기 모터를 사용하여 회전

■ **Anemometer and The Wind Vane:** 풍향과 풍속을 측정하는 장치, 풍속의 전기신호는 전기제어 장치로 보내어져 풍력발전시스템의 작동과 정지에 사용하고, 풍향 신호는 로터가 바람의 방향에 맞출 수 있도록 Yaw Mechanism을 작동시키는데 사용

### 3. 풍력발전시스템의 제어 장치

풍력발전시스템의 성능을 향상시키고 시스템 보호를 위한 많은 제어 장치들이 있다. 주요 제어 시스템은 피치제어 시스템, 실속제어 시스템, 요제어 시스템, 주제어 시스템 및 브레이크 시스템 등이다. 피치제어 시스템은 블레이드의 피치 각을 조절함으로써 발전 출력이 너무 높으면 블레이드의 피치 각을 조절하여 발전량을 조절하는 기능을 가진다. 피치제어 풍력발전시스템의 설계는 로터 블레이드가 요구하는 피치 각의 정확한 피치를 공학적으로 명백히 하는 것을 요구한다. 피치제어에 사용하는 컴퓨터는 모든 풍속에서 최대의 결과를 위해 최적의 각을 로터 블레이드가 유지하도록 매 시간 바람의 변화에 따라 피치를 조절한다. 피치 메커니즘은 일반적으로 전기식 방식과 유압방식을 사용한다.

실속제어 시스템은 수동실속제어와 능동실속제어로 구분된다. 수동실속제어 풍력발전시스템은 로터 허브에 블레이드를 임의의 각으로 고정하여 정격이상의 동력을 생산하지 못하도록 공기역학적 설계를 적용한 시스템으로 사용되는 블레이드의 형상은 높은 풍속에서의 모멘트를 견딜 수 있도록 공기역학적으로 설계되어 로터 블레이드의 측면에 turbulence를 생성한다. 실속은 로터 블레이드에 작용하는 양력의 발생을 억제한다. 실속제어용 블레이드는 피치제어용 블레이드에 비해 아주 작은 비틀림 각을 가진다. 이는 갑자기 풍속이 임계값에 도달할 때 로터 블레이드에 실속이 점차적으로 일어나게 하기 위함이다. 실속제어의 장점은 로터 블레이드의 일부분이 움직이는 것을 피해 피치제어 블레이드가 가지는 매우 복잡한 공력 설계의 문제점을 피하고, 아울러 실속에 의해 야기되는 진동을 만들어내는 구조 동역학적인 측면에서의 도전적인 설계이다. 단점은 피치제어 방식에 비해 풍력발전시스템의 효율이 떨어지는 것이다. 1MW급 이상의 풍력발전시스템이 증가하면서 능동실속제어 메커니즘이 개발되어 왔다. 기술적으로 능동실속제어 시스템은 피치제어 시스템과 비슷하다. 저 풍속에서 큰 토크를 얻기 위해 저속의 바람에서 피치제어 시스템과 같이 블레이드 피치를 조절하도록 프로그램 된다. 피치제어 시스템과 다른 점은 일정한 풍속에서 피치를 고정하는 단계를 포함한다는 것이다. 풍력발전시스템이 정격 출력에 도달하면, 피치제어와는 다른 점이 나타나는데, 만일 발전기가 과부하에 도달하면, 피치제어와는 다른 방향으로 블레이드의 피치 각을 조절하게 되는데, 이는 블레이드의 받음각을 증가시켜 실속을 일으킴으로 초과에너지를 소비하는 것이다. 능동실속제어 방식은 수동실속제어 방식에 비해 보다 정확한 파워 출력을 조절할 수 있는 장점과 높은 풍속에서 정격 출력을 유지할 수 있다는 장점을 가진다.

바람과 로터의 방향이 일치하지 않을 때 요제어 시스템이 사용된다. 방향의 불일치로 인해 발생하는 요 에러는 바람 에너지의 일부분을 사용하지 못하게 할 뿐만 아니라 로터 각 부분에 작용하는 힘의 차이를 발생하게 하여 결국 시스템은 상당히 큰 피로하중을 받게 된다. 이러한 요 에러를 최소화하기 위하여 수동요제어의 경우 요 베어링, 요 모터, 요 컨트롤러 및 요 브레이크로 구성된 기계 메커니즘을 사용하고, 자동요제어의 경우 요 베어링과 요 브레이크로 구성하고 공기역학적 특성을 이용한다.

주제어 장치는 풍력발전시스템 운용 시의 환경들을 연속적으로 모니터링하고, 통계 자료를 얻을 수 있도록 몇 개의 컴퓨터로 이루어진 시스템으로 많은 스위치와 유압펌프, 밸브, 모터, HVAC 시

스텝 등을 제어한다. 모니터링 대상으로는 다음과 같은 것들이 있으며 그림 6에서 보이는 것이 주 제어 장치의 일반형상이다.

■ 모니터링대상

- 회전 속도: 로터, 발전기
- 전압, 전류
- 온도
- 외부의 공기
- Electronic cabinets 내부
- 기어박스의 오일과 베어링
- Generator windings
- Hydraulic 압력
- 각 블레이드의 피치 각
- Yaw Angle
- 전력선의 꼬임 횟수
- 풍속과 풍향
- 나셀과 로터 블레이드에서 발생하는 진동의 크기와 주기
- 브레이크 라이닝 두께

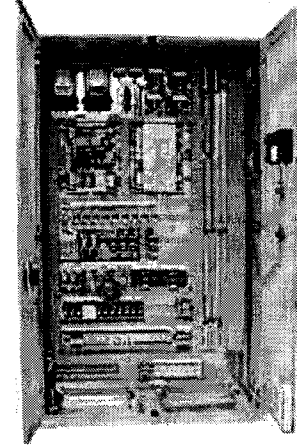


그림 6. 주 제어 시스템

브레이크 시스템은 풍력발전시스템 운용 시 극한 풍황조건에서 운용 한계를 넘어설 경우와 유지보수 시의 안전한 작업을 위해 설치한다. 주로 기어박스 앞쪽의 저속축과 기어박스과 발전기 사이의 고속축에 장착한다.



그림 7. 브레이크 시스템

### III. 싱글로터 풍력발전시스템과 듀얼로터 풍력발전시스템

#### 1. 기존 싱글로터 풍력발전시스템의 문제점

현재 전 세계적으로 설치/보급되고 있는 시스템은 싱글로터 풍력발전시스템이다. 보급이 이루어지면서 기존에 가지고 있던 단점들을 극복하고자 많은 노력이 진행되어 왔다. 그럼에도 불구하고 기존 싱글로터 시스템이 초기부터 현재까지 유럽이나 미국 등의 풍황여건에 맞게 설계가 되어왔다는 점에서 획기적인 개선이 이루어지지 않는 실정이다. 따라서 아시아지역과 같이 풍황여건이 좋지 않은 지역에서의 설치/보급에는 많은 어려움이 있는 것이 현실이다. 전 세계지역으로의 보급이 어려운 이유를 기존 싱글로터 수평축 풍력발전시스템의 Up-wind 형식과 Down-wind 형식의 장단점을 비교하고, 아울러 싱글로터 풍력발전시스템의 한계를 분석함으로써 알



아보았다.

## 1) 기존 싱글로터 풍력발전시스템의 단점 및 한계

### ◎ Up-wind 형식

- 장점: 타워 그림자 효과에 의한 효율 감소 없음
- 단점
  - 타워 상부인 나셀에 주요 구성품이 설치되어 상단무게 과다로 인해 자동요제어 불가
  - 전력선 꼬임현상 발생으로 인해 자동요제어 불가
  - 자동요제어가 불가능하여 요 에러로 인한 시스템 효율 감소
  - 운용환경을 넘는 풍속조건 하에서 자동요제어가 불가능하여 극한하중 증가 -> 시스템 고장 유발
- \* 우수한 풍황조건을 가진 지역에 설치 시 유리

### ◎ Down-wind 형식

- 장점: Free Yaw가 가능하여 극한하중 감소 -> 시스템 고장 감소
- 단점
  - 타워 그림자 효과에 의한 시스템 효율 감소
  - 타워 상부인 나셀에 주요 구성품이 설치되어 상단무게 과다로 인해 자동요제어 제한
  - 운용환경 하에서 타워 그림자 효과로 인해 피로하중 증가 -> 시스템 고장 유발
- \* 열악한 풍황조건을 가진 지역에 설치 시 고장발생 감소

### ◎ 기존 싱글로터 시스템의 한계

- 유럽이나 미국 등의 풍황여건에 맞게 설계 ⇒ 아시아 지역과 같은 풍황여건에서 운용 중 많은 고장 발생 ⇒ 유지보수 비용 및 시간 과다 소요 ⇒ 이용률 저하 ⇒ 풍력발전시스템 경제성 악화
- 나셀 상부위에 모든 주요 시스템 설치 ⇒ 나셀 상부 무게 과다 ⇒ 자동요제어 시스템구현 불가 또는 제한 ⇒ 풍향 변화에 실시간 적응 곤란 ⇒ 이용률 저하 ⇒ 경제성 악화
- Free Yaw 구현 시 ⇒ 타워 그림자 효과로 인한 효율 손실 발생 ⇒ 경제성 악화

## 2. 듀얼로터 풍력발전시스템

### 1) 듀얼로터 풍력발전시스템 장점

기존 싱글로터 시스템의 한계를 극복할 수 있는 듀얼로터 시스템은 보다 높은 이용률과 낮은 고장률을 확보함으로써 기존 제품에 비해 경제성 우위를 확보할 수 있으며, 세계 유일의 독자적인 혁신 신기술 시스템으로 기존 기술의 문제점을 획기적으로 극복하고 기술 종속을 탈피하여 세계 최고의 경쟁력 확보가 가능한 제품으로 주요 특징은 다음과 같이 정리할 수 있다.

### ◎ 듀얼로터 시스템의 장점

- 아시아지역을 포함한 전 세계 지역에 설치/운용 가능하도록 설계
- 나셀 상부의 무게 감소 설계 ⇒ Free Yaw 시스템 구현
- Free Yaw 시스템 구현

- ⇒ 잦은 풍황변화에 적응 가능 ⇒ 보다 높은 이용률 확보
- ⇒ 심한 풍황변화에 적응 가능 ⇒ 보다 낮은 고장률 확보 ⇒ 유지보수 비용 및 시간 절감

○ 듀얼로터 채택으로 사각지대 보상 ⇒ 보다 높은 시스템 효율 확보

## 2) 듀얼로터 풍력발전시스템 소개

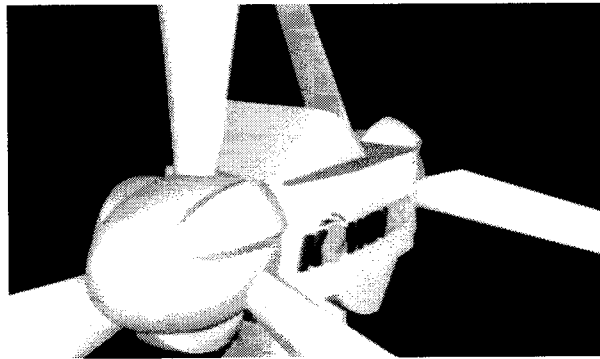


그림 8. 듀얼로터 풍력발전시스템 외형

기존 싱글로터 풍력발전시스템이 가지고 있는 단점을 보완하기 위해 (주)코원텍은 듀얼로터 풍력발전시스템을 개발하고 제작하여 왔다. 현재까지 소형 시스템을 이용하여 수차례 풍동실험을 수행하였으며, 30kW급 시스템을 설계하여 시제품을 전북부안에 설치하여 운영하고 있다. 산자부로부터 실증연구비를 받아 30kW급 시스템에 대한 실증시험을 수행하였으며, 성공평가를 받은 경험이 있다. 또한 1,000kW급 대형시스템을 축적된 자체기술을 활용하여 국내외 협력업체와 2002년부터 개발하기 시작하였으며, 2006년 말 설치계획 중에 있다. 그림 8은 현재 제작중인 1,000kW급 듀얼로터 풍력발전시스템의 외형이다.

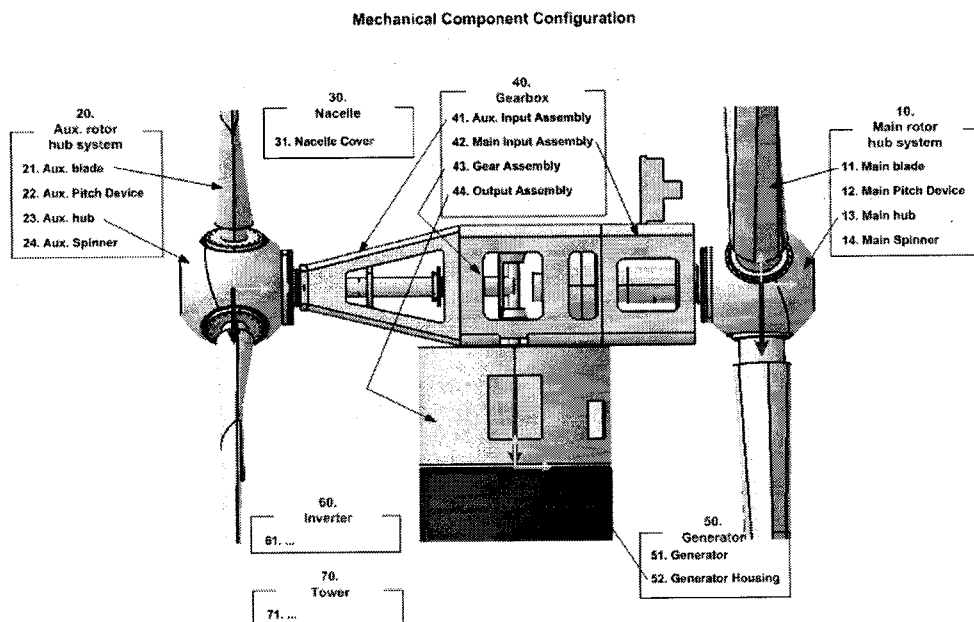


그림 9. 듀얼로터 풍력발전시스템 주요 하부 시스템

그림 9는 듀얼로터 풍력발전시스템의 주요 하부 시스템을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같

이 듀얼로터 시스템은 기존의 싱글로터 시스템과는 외형상으로 다르게 두 개의 로터블레이드를 가지는 특징을 가진다. 타워 앞에 있는 Up-wind 형식의 보조 로터 허브 시스템과 Down-wind 형식의 주 로터 허브 시스템으로 구성되어 있다. Up-wind 시스템에서 가질 수 있는 가장 큰 단점인 자동요제어 불가를 보완하기 위해 주 로터 허브 시스템을 설계하였으며, Down-wind 시스템에서 가질 수 있는 효율저하라는 단점을 보완하기 위해 풍력시스템에서 사각지대라 일컬어지는 블레이드 회전 안쪽 면에 보조 로터 블레이드 시스템을 설계하였다. 공기역학적인 측면에서 바람 불 때 보조로터 블레이드를 통과한 후류가 주로터 블레이드의 바깥쪽 영역에서 풍속을 증가시키는 역할을 함에 따라 Down-wind 시스템에서 가질 수 있는 효율저하를 극복할 수 있다. 두 개의 로터에서 발생하는 회전에너지를 한 개의 축으로 모으기 위한 베벨-유성 기어시스템을 가지고 있으며, 발전기는 나셀의 무게를 감소하고 자동요제어의 제약을 없애고자 나셀 하부, 즉 타워 상부에 설치하였다. 타워 높이는 약 50m이며, 튜블러 형식을 적용하였다. 발전기에서 생산된 전기를 계통에 연계하기 위한 인버터와 계통연계장치가 구성되어 있으며, 높은 효율과 안전성을 확보하기 위해 제어방식으로 피치제어를 채택하였다.

### 3. 싱글로터 시스템과 듀얼로터 시스템의 시뮬레이션

기존 싱글로터 풍력발전시스템의 특징과 듀얼로터 풍력발전시스템의 특징을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 사용한 프로그램은 상용소프트웨어인 블레이디드를 사용하였다. 시뮬레이션은 Up-wind 시스템과 Down-wind 시스템의 발전효율비교, 운용 중에 블레이드에 작용하는 하중비교를 수행하였다. 또한 공기역학적인 듀얼로터의 효과를 보조로터를 지나는 후류에 대한 실험을 했던 콜로라도 대학의 데이터를 이용하여 듀얼로터 시스템이 싱글로터 시스템의 효율을 비교하였다. 그림 10은 시뮬레이션에 사용된 평균풍속 12.0m/s를 가지는 600초 동안의 풍속과 풍향데이터이다.

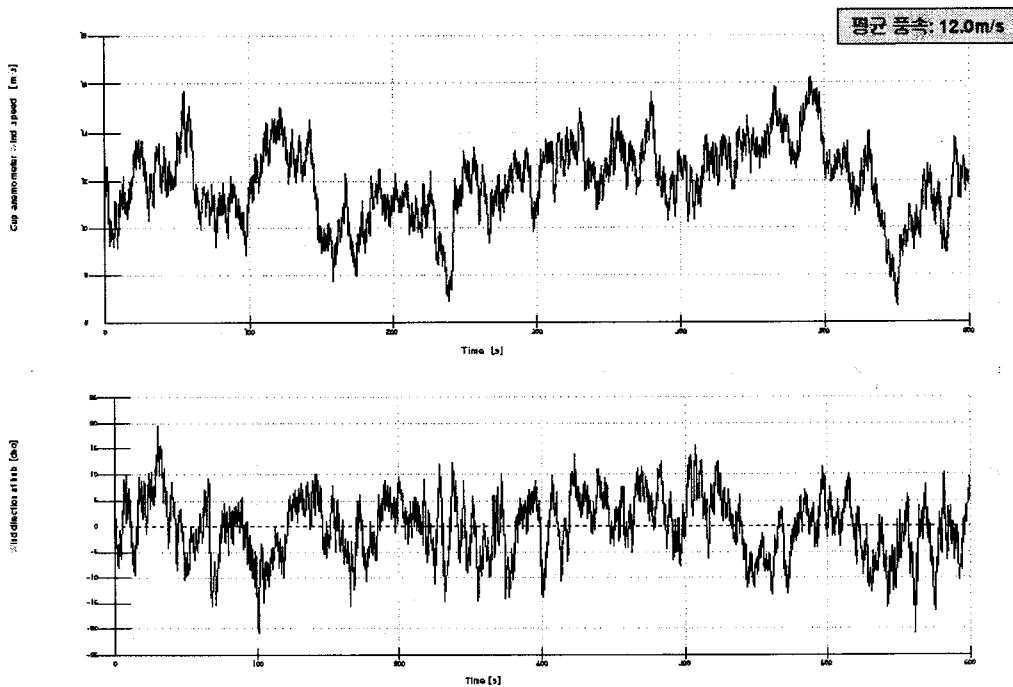


그림 10. 시뮬레이션에 사용된 풍속과 풍향 데이터

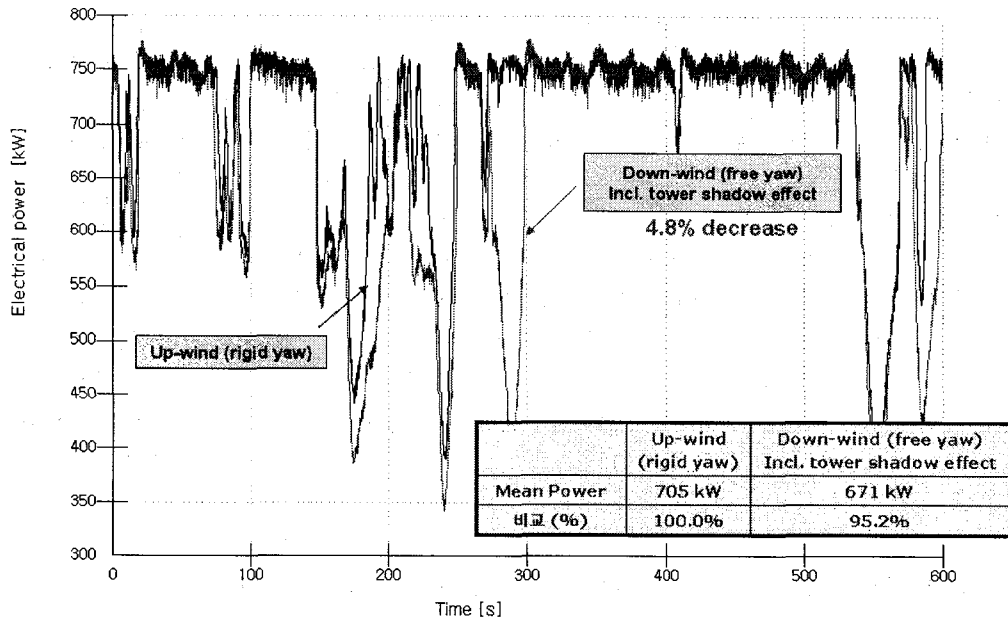


그림 11. Up-wind 시스템과 Down-wind 시스템의 발전 효율 비교

그림 11은 수동요제어를 사용하는 Up-wind 시스템과 자동요제어를 사용하는 Down-wind 시스템의 발전효율을 비교한 그래프이다. 시뮬레이션 결과 타워 그림자 효과를 포함하는 Down-wind 시스템이 평균발전 출력 값으로 671kW를 나타냄으로 Up-wind 시스템에 비해 4.8% 감소함을 알 수 있다. 그림 12는 운용 중에 블레이드에 작용하는 하중을 비교한 결과로써 Up-wind 시스템이 x축 방향의 모멘트에서 3%, y축 방향의 모멘트에서 9.7% 및 z축 방향의 모멘트에서 47% 정도 Down-wind 시스템에 비해 큰 하중이 작용함을 알 수 있다.

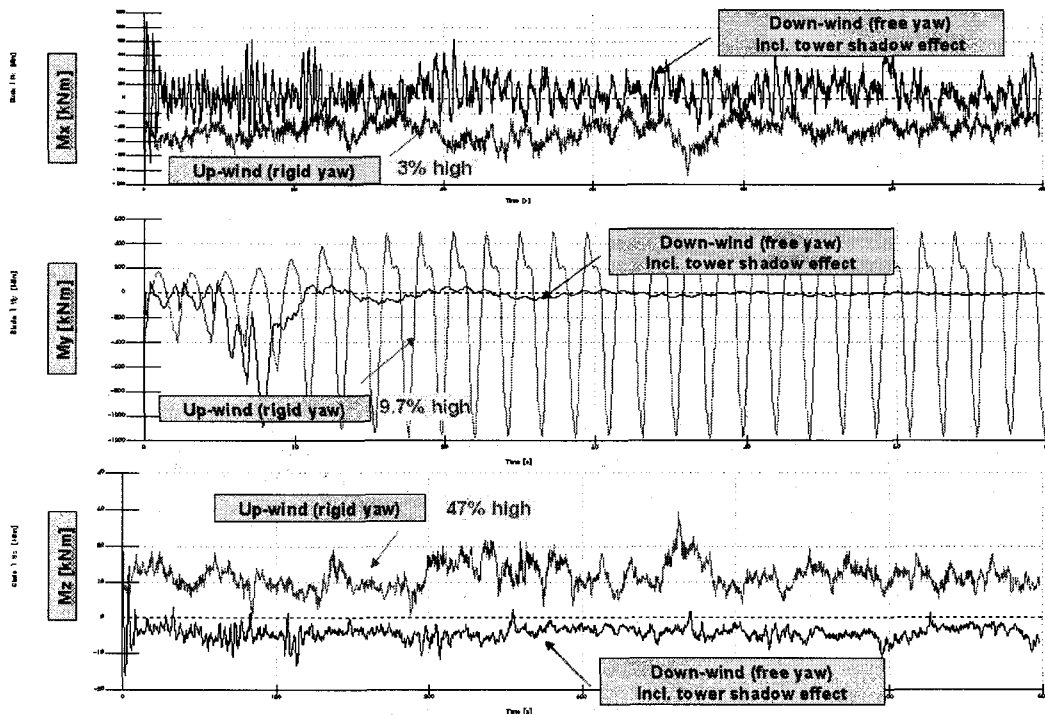
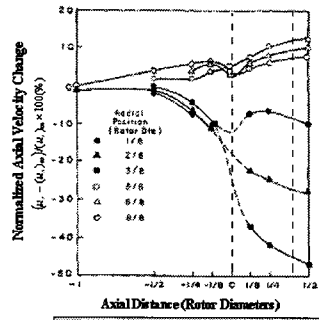
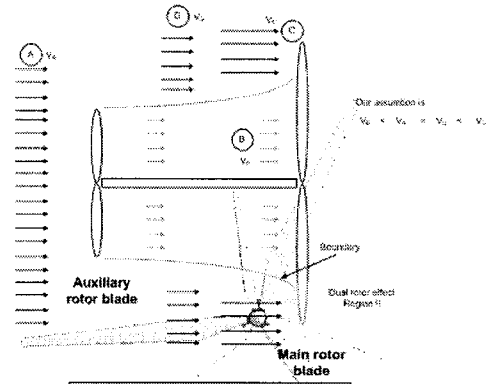


그림 12. Up-wind 시스템과 Down-wind 시스템의 작용 하중 비교

### Dual-rotor 효과



미국 콜로라도 대학 풍동실험 자료



Stream Tube 바깥 영역 풍속 증가

• 풍속 증가 영역을 고려하여 풍력발전 능력 계산 ( $P \propto V^3$ )

• Single 로터 블레이드 시스템에 비해 12% 효율 증가 예상

• Down wind 시스템에 의한 효율 감소 약 5% + 듀얼로터 효과에 의한 효율 증가 약 12%

• 전체 시스템 효율 약 7% 증가 기대 및 극한 하중 감소로 인한 고장률 감소 효과

그림 13. 듀얼로터 풍력발전시스템의 듀얼로터 효과 및 기존 시스템과의 비교

그림 13은 미국 콜로라도 대학의 풍동실험 자료를 이용하여 듀얼로터 시스템의 효율을 예상하고 기존 시스템과의 비교를 요약한 것이다. 보조 로터 블레이드를 통과하는 후류는 스트림튜브 바깥 영역에서 풍속 증가 효과를 내부 영역에서는 풍속 감소 효과가 나타난다. 풍력발전 시스템의 경우 블레이드의 바깥쪽 30% 영역에서 총 발전량 중 약 70%를 담당하게 된다. 따라서 내부영역에서의 풍속감소로 인한 발전량 감소는 바깥쪽 영역에서의 풍속증가로 인한 발전량 증가와 비교할 때 매우 작은 값을 가지게 된다. 시뮬레이션 결과 싱글로터 시스템에 비해 듀얼로터 시스템이 약 12%의 효율 증가가 가능한 것으로 나타났다. 그러나 이 결과는 듀얼로터 시스템이 Down-wind 시스템이 가지는 타워 그림자 효과로 인한 효율 감소량이 고려되지 않았다. 시뮬레이션 결과에 감소량을 적용하면 결과적으로 전체 시스템 효율은 약 7% 증가가 가능한 것으로 분석되며, 효율 증가와 아울러 풍력발전시스템이 감당해야 하는 극한 하중 감소로 인한 고장률 감소 효과도 기대할 수 있다.

### 참고문헌

- [1] 동경민, 『상반회전 풍차 블레이드의 공력성능 및 구조 동역학 해석에 관한 연구』, 2002.
- [2] Glauert, H., *Aerodynamic Theory*, Vol. IV, Berlin, 1935.
- [3] Wilson, R. E., Lissaman PBS, and Walker S. N., *Aerodynamic Performance of Wind Turbines*, Report No. NSF/RA-760228, NTIS, Chapters I-III, Oregon State Univ., June 1976.
- [4] *Guidelines for Design of Wind Turbines*, DNV/Risø, 2002.
- [5] David A. Spera, Ph.D., *WIND TURBINE TECHNOLOGY*, 1994.
- [6] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins and Ervin Bossanyi, *WIND ENERGY HANDBOOK*, 2001.
- [7] [www.windpower.org](http://www.windpower.org)