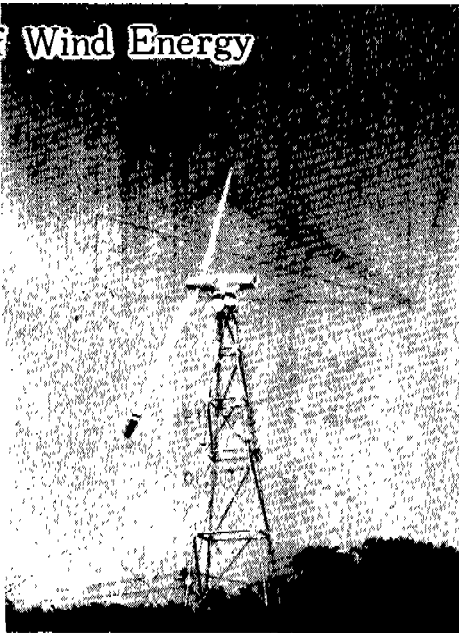


# 風車發電 實用化 試驗에 關하여

(上)

## An Experiment in Utilization of Wind Energy



韓電用役으로 개야도에 설치된 10kW級 風車

李 春 植

KAIST 機械 · 電子工學 研究部長  
工博

## I. 序 論

### 1. 風力利用의 歷史

人類가 地球에 거주하기 시작한 태초에는 유일한 에너지源으로서 자신의 힘 밖에는 動力으로 利用할 것이 없었다. 그후 인류의 역사를 보면 우리 인간은 輸送手段으로 가축을 이용하고 불을 사용했으며 돛단배를 만들어 바람(風力)을 이용하기에 까지 이르렀다.

중세기 부터 산업혁명의 초기까지 이러한 에너지의 이용은 점차로 증가하였다.

근세에 와서 스팀엔진을 발명하여 化石燃料를 사용하게 되었고 현대에 이르러 第3의 에너지혁명이 라고 불리는 우라늄을 에너지源으로 사용하게 되었다. 에너지의 이용은 늘어나고 지구상의 에너지는 枯竭되어 감에 따라 풍력은 그 量이 무한대이며 무공해라는 점에서 각광을 받기 시작했다.

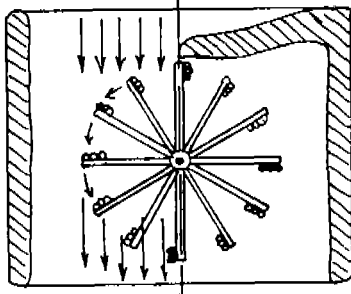
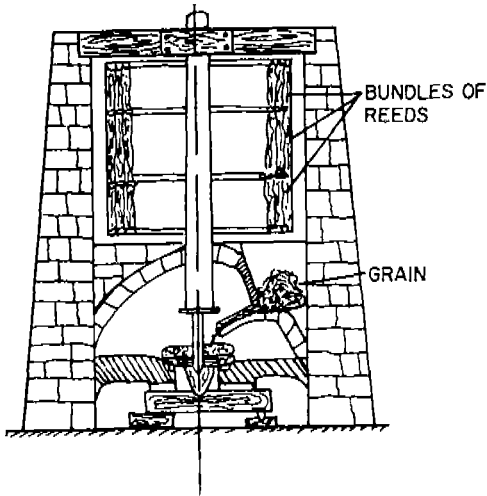
바람을 이용하기 시작한 초기에는 배에 돛을 달아 航海하거나 풍차를 만들어 불을 푸거나 곡식을 도정하는데 사용하였다.

우리에게 알려진 가장 오래된 풍차로는 紀元前 200년경의 페르시아 풍차가 있다(그림-1). 이것은 곡물을 갈기위해 고안된 것으로 수직축에 바람을 받는 면을(SAIL) 갈대로 만들어 붙여 이 회전하는 수직축이 멧들을 돌리도록 하였다. 이러한 垂直軸風車가 중국에도 있었고, 이란에는 현재도 유사한 수직축풍차가 사용되고 있다.

西洋에는 훨씬 후에 다른 형태의 풍차가 出現했는데 문헌에 의하면 1040 A. D. (화란), 1105 A. D. (프랑스), 1180 A. D. (노르만디), 1191 A. D. (영국)으로 되어 있고, 이들은 모두 水平軸風車인 데 십자군 원정때 모슬렘지방에서 유럽으로 전해졌다는 기록은 없다.

13세기경 서유럽에는 많은 풍차가 이용되었는데 대부분이 수평축이고, 화란인들이 風車設計에 두각을 나타내었다. 네덜란드, 북부독일, 덴마크 등에는 바람은 많으나 수력이 적어 풍차가 큰 역할을 했다. 특히 네덜란드의 경우는 물을 퍼내 땅을 넓히는데 풍차를 사용하였다.

풍차는 날개가 달린 회전축이 地面과 이루는 각도에 따라 수평축과 수직축으로 나뉘는데, 이때에 이용된 수평축풍차의 형태가 몇가지 있다.



〈그림-1〉 페르시아 풍차의 단면도

첫째는 화란형 풍차로 화란에서 물을 퍼 내는데 주로 사용하여 화란형이라 불리우며, 11세기에서 12세기경 대량생산이 아닌 개별적으로 목수들에 의해 만들어졌다.

이 풍차는 바람방향이 바뀌면 수동으로 회전시킬 수 있도록 가운데 기둥에 지지되어 있다.

스팀엔진이 발명되기 까지 풍차는 主動力原으로 이용되었고 네덜란드가 가장 앞서 있었다. 風車製作에 있어서 뛰어난 나라로 또 한나라를 든다면 영국을 꼽을 수 있다.

19세기에 이르러 만여개의 풍차가 영국의 여러 지역에서稼動되었고 특히 주목할 것은 이때부터 木材部分을 金屬으로 대체하기 시작하였다. 영국이 공헌한 것중 가장 가치있는 것의 하나는 에드먼드에 의해 고안된 풍향판(Fantail)이다.

이것은 주축에 직각으로 여러개의 날개가 달린 제 2의 회전축을 붙여 이 축의 회전에 의해 主軸이 回轉하여 바람방향과 일치하도록 고안된 장치이다.

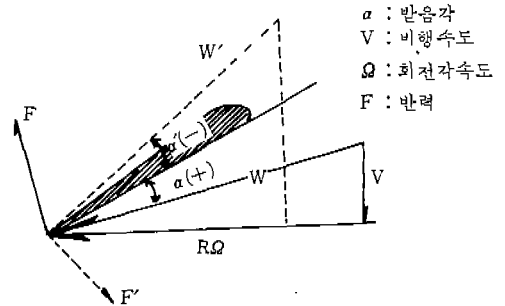
이밖에도 자동조절장치가 고안되어 풍속의 변화에 따라 安定된 運轉을 하도록 풍차날개의 회전을

조정하기 위해 원심력을 이용한 장치를 붙이거나 날개에 슬래트(Slat)를 붙여 바람의 변화에 비해서 어느정도까지는 일정한 회전을 기대하게 되었다.

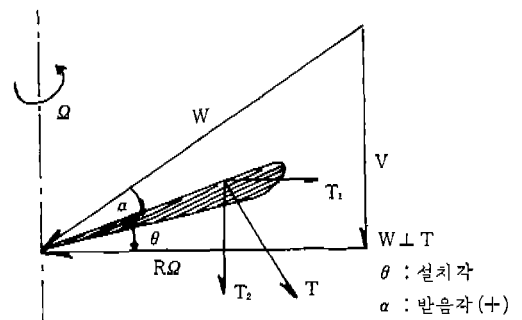
15세기경에 스페인의 탐험가나 거주자들이 미국에 풍차를 소개하였다. 19세기 중엽에 이르러 미국에서 개발되어 물을 푸는데 주로 사용된 풍차로 多翼型風車가 있는데 이것이 두번째 형태이다.

화란형은 날개가 주로 2~4개이었는데 多翼型은 십여개 또는 수십개의 날개가 圓周상에 일정한 간격으로 배열되도록 하였다. 날개는 나무로 사용하거나 또는 금속을 사용해 공장에서 만들었고 제작된 것 중 가장 큰것은 직경이 9.15m이고 풍속 7 m/s 에서 출력이 3 kW정도이었다.

세번째 형태로 프로펠러형 풍차가 있다. 날개는 (Blade) 2~3개이고 주로 發電用으로 사용되며 화란형이나 다익형에 비해 공기역학을 이용하여 설계했기 때문에 효율이 좋고 재료의 이용 또한 효율적이다. 소형은 1920~1940년대에 생산되었고 미



〈그림-2〉 항공기의 프로펠러



〈그림-3〉 풍차의 날개

국에서만도 수백만대의 풍차가 팔렸다.

풍차의 발달은 歷史적으로 볼때 技能과 科學에 의해 점차적으로 이루어졌다. 페르시아와 중국의 垂直軸風車와 유럽의 水平軸風車는 숙련된 匠人이나 發明家 또는 機能工들의 소산이었다.

그러나 1891년 세계최초로 덴마크에 風洞(Wind Tunnel)이 세워졌고, 풍차날개의 공기역학에 대해 과학적인 연구가 시작되었으며 1920~1930년대에 독일의 괴팅겐(Göttingen)에서 대대적인 실험과 연구가 이루어졌다.

현대에 이르러 에너지위기와 함께 각광을 받기 시작한 풍차는 설계제작에 있어 工學의 一翼을 담당하고 있으며 용량이나 크기 또한 크게 발전되었다.

이상의 내용을 종합하면 풍차는 인간이 풍력을 이용하려는 노력의 과정에서 얻어진 소산으로 수평축과 수직축이 있고 수직축은 시초이었던 뿐 거의 모두가 수평축이다. 수평축풍차가 발달과정에서 처음에는 관계용수용으로 사용되다가 다이형 이후 프로펠러형에 이르러 발전용으로 대형화되면서 본격적인 연구와 함께 실용화의 길을 걷고 있다.

## 2. 風車의 理論

풍차의 이론은 풍차를 구성하고 있는 모든 부품에 대한 이론을 말한다. 예를들면 풍차는 크게 나누어 탑, 날개, 발전기 등으로 구성되므로 이들 각각에 대하여 기술하는 것이 바람직하지만 여기서는 가장 핵심을 이루는 부분이 날개이므로 날개에 대한 기본적인 이론만을 수식의 전개없이 다루기로 한다.

풍차의 날개이론이란 날개가 어떻게 동력을 얻으며, 또한 주어진 여전에서 최대의 동력을 얻으려면 날개와 다른 구성품간의 어떤 관계를 만족시켜야 하는가를 이론적으로 해석하는 일이다.

풍차는 항공기의 프로펠러와 비교할 때 역할이 다를 뿐 근본적으로는 동일하다. 항공기의 프로펠러는 엔진에서 동력을 전달받아 일정한 회전을 함으로써 주위 공기의 반력에 의한 날개의 추력을 얻는 것이고, 풍차날개는 에너지를 가진 주위의 공기가 날개를 지나면서 에너지를 전달해 이 전달받은 에너지가 날개를 회전하는 힘을 발생하므로, 이 회전동력으로 발전기를 돌려 원하는 전기적인 에너지를 얻는 것이다. 따라서 엔진에 의하여 회전하는

항공기의 프로펠러가 엔진을 끈 상태에서 풍속에 의하여 회전한다면 이 경우는 풍차의 날개 역할을 하게 된다.

그림 2에서와 같이 항공기가 엔진을 끄고 다이빙할 때 날개는 공회전하고 받음각( $\alpha$ )은 반대가 되어 추력 또한 반대가 된다. 이 반대의 힘이 프로펠러를 돌리는 힘이 된다.

한가지 부언할 사항은 이때는 받음각이 음의 값을 취하여 추력이 발생하지만 양의 받음각일 때보다 그 값이 절대값으로 보아 작아지므로 풍차의 날개는 그림 3과 같이 설치한다.

이해를 돕기 위하여 어느 순간에 풍속  $V$  (m/s), 회전각속도가  $\Omega$  (rad/sec), 설치각(회전면과 날개의 Chord Line이 이루는 각)이  $\theta$  (deg) 이라면 받음각은  $\alpha$ 가 되고 반력  $T$ 가 발생한다.

이 반력  $T$ 는 분력  $T_1$ 으로 나누어지는데  $T_1$ 이 곧 회전시키는 힘이 된다. 받음각은 그림에서 알 수 있는 바와 같이 풍속과 회전각속도에 따라 변하고 이 받음각에 따라  $T$ 의 값이 변한다.

이와같은 해석은 날개요소이론(Blade Element Theory)으로 많은 가정을 기초로 한다. 풍차는 바람이 갖고 있는 운동에너지를 날개를 통해 기계적인 에너지로 바꾸고 다시 발전기를 통해 전기적인 에너지를 얻는다.

풍차를 설계하는 경우에는 어떠한 형상의 날개를 얼마의 속도로 회전시킬 것인가에 따라 기타 구성품이 결정되고 효율도 정해지므로 최대의 효율을 얻기 위한 풍속에 따른 RPM의 결정은 매우 중요하다.

## 3. 世界 風車 開發現況

### 가. 미 국

현재 미국에서의 Wind Energy Program은 DOE의 후원아래 여러 민간업체가 협력하여 이루어지고 있으며 風力을 常用化하는데 매우 성공적이라고 할 수 있다.

미국의 대형 풍차의 개발은 1941년 Vermont의 Grandpa's Knob에 설치된 1.25MW의 Smith Putnam 풍력발전기로 부터 시작되었다. 그후 1951년 Percy H. Thomas는 FPC(Federal Power Commission)와 6.5MW급 풍력발전기를 개발할 계획이었으나 한국전쟁으로 예산이 확보되지 않아 취소하

었다.

DOE 를 위해 건설된 2 MW의 MOD-1은 1979년 7월부터 North Carolina에서 실험되고 있으며 Washington 주의 Goldendale 가까운 곳에 3개의 MOD-2(2.5MW)로 구성된 Wind-Farm이 건설되어 1981년 봄부터 모두 운전되고 있으며 현재 Bonneville Power Administration에 전력을 공급하는데 약 3000호의 가정에 송전이 가능하다.

DOE는 1981년초에 Megawatt급 풍력발전기 시대의 마지막 개발품을 지원할 계획이었으나 Reagan 행정부는 정부 지원이 없어도 그 일을 진행시킬 수 있을만큼 풍력기술이 충분히 개발되었다는 이유로 이 계획을 취소했다.

현재로는 기존 풍력발전기(MOD-2와 같은)를 이용하여 거대한 Wind Farm을 건설, 계통선과 연결하는 것을 계획하고 있다.

다음에는 미국에서 그동안 수행된 대표적인 풍력 발전 Droject 와 현황을 알아 보기로 한다(표 1).

### 1) 과거의 실적

#### ◎ Smith-Putnam 풍력발전기

Central Vermont Public Service Co.의 계통선에 전기를 공급하기 위해 Vermont 주의 Grandp's Knob에 건설되어 1941년 10월부터 가동되었으나,

1945년 3월 Rotor Blade 1개가 파손되어 운전을 중지했다.

### 2) DOE 지원사업

#### 가) 100kW MOD- 0 풍력발전기

풍력에너지 이용계획의 기초로 사용하기 위한 기술적인 자료를 제공함과 동시에 시스템개발을 위한 Test Bed으로 사용할 목적으로 개발되었다.

#### 나) 200kW MOD-0A 풍력발전기

풍력발전기를 계통선에 연결하여 사용하는 경우에 발생하는 여러가지 문제점을 연구하기 위해 설치되었으며 제원은 MOD-0와 유사하다.

#### 다) 2MW MOD- 1 풍력발전기

계통선의 전력가격과 경쟁할 수 있는 수준으로 전력을 공급할 수 있는 최적화된 풍력발전기의 설계 및 실험을 목적으로 개발되었으며 이 사업에는 산업계의 관련자들도 포함시켰다.

#### 라) 2.5MW MOD- 2 풍력발전기

열가의 전기를 공급할 수 있는 대형풍차의 개발을 목적으로 하고 있다.

#### 마) Wind Farm

Washington 주의 Goldendale 가까운 곳에 건설되

〈표 - 1〉 미국과 Canada의 대형 풍력 발전기 개발현황

| 풍차명칭                      | 건설연도 | 설치장소                              | 정격출력 (kW) | 정격풍속 (m/s) | 날개직경 (m) | Hab높이 (m)  | 날개 수 (개) | 형 식         | 현 황            |
|---------------------------|------|-----------------------------------|-----------|------------|----------|------------|----------|-------------|----------------|
| SMITH-PUTNAM              | 1941 | Grandpa's Knob, Vt.               | 1250      | 14         | 53       | 36         | 2        | 수평 하류형      | 1945년 Blade 파손 |
| DOE/NASA MOD- 0           | 1976 | Plum Brook, Oh                    | 100       | 8          | 38       | 30         | 2        | 수평 하류형      | 가동중            |
| DOE/NASA MOD- 1           | 1979 | Boone, NC                         | 2000      | 11         | 58       | 42         | 2        | 수평 하류형      | 가동중            |
| DOE/NASA MOD- 2           | 1980 | Goldendale, Wash.                 | 2500      | 12         | 91       | 61         | 2        | 수평 하류형      | 가동중            |
| DOE/Sandia 17-m Darrieus  | 1977 | Sandia Lab New Mexico             | 60        | 12.5       | 16.7 φ   | 17 (날개 높이) | 2 (3)    | 수직 Darrieus | 설충합상 용위해서 험가동중 |
| Edision's Bendix-Schachle | 1981 | Palm Spring's Southern California | 3000      | 18         | 10       | 61         | 3        | 수평축         | 가동중            |
| Alcoa Darrieus            | 1981 | Palm Springs S. C.                | 500       | 16         | 25 φ     | 37 (날개 높이) | 3        | 수직 Darrieus | 고장 수리중         |
| NRC/IREO DAF Darrieus     | 1977 | Magdalem Island                   | 200       | 13.5       | 24 φ     | 37 (날개 높이) | 2        | 수직 Darrieus | 가동중            |

있으며 3개의 MOD-2로 구성되어 있다. Boeing Engineering & Construction Co.에 의해 건설되었으며 현재 발전단가는 8 ¢/kWh 미만이지만 100대 이상 생산한다면 100번째 부터는 5 ¢/kWh 가 될 것이라고 NASA-Lewis의 설계자들을 예상하고 있다.

또한 발전단가를 충분히 낮추기 위해 20세기말까지 25, 50 또는 100개의 풍차로 구성된 Wind Farm을 건설할 계획이다.

바) DOE/Sandia 17m Diameter Darrieus 풍차

1977년 3월부터 운전을 시작했으며 저렴하고 신뢰성 있는 풍차의 설계기술을 개발함으로써 상용화를 위해 산업계에 필요한 정보를 제공하는데 목적을 두고 있다.

처음 10개월 동안은 Kammam사가 제작한 복합재료의 Strutted Blade를 사용했으며 1979년 3월부터

터는 Alcoa사가 Strut가 없는 Aluminium Extrusion Blade를 사용하여 실험한 결과 공기역학적 성능이 증가되었으며 Blade 무게감소와 제작 비용을 감소시킬 수 있게 되었다. 성능향상을 위해 현재 계속적인 실험과 연구가 수행되고 있다.

사) DOE Rocky Flats

1978년부터 기존의 상용 소형풍차들에 대한 성능 실험을 수행했다(표 2). 그 목적은 소형풍차의 제작자 및 수요자에게 다음과 같은 기본자료를 제공함을 목적으로 했다.

○장기간에 걸친 풍차의 성능시험과 기상자료

○강풍 기타 불순한 기상조건에서의 풍차 작동상태

대부분의 경우 보통의 기상조건에서는 별 문제가 없지만 강풍(38 m/s 이상)에서는 매우 심하게 파손되었다.

〈표-2〉 Commercially Available Wind Machines at the Doe Rocky Flats Small Wind System Test and Development Center (January 1, 1979)

| MACHINE                    | RATING                   | CONFIGURATION                                   |
|----------------------------|--------------------------|---|
| Aeropower                  | 1kW @ 20 mph             | 3 blade, 10' dia. upwind rotor                  |
| Altos (formerly Amerenalt) | 2.5kW @ 40 mph           | Multi-blade, upwind, 8' dia. rotor (Chalk type) |
| American Wind Turbine      | 2.0kW @ 20 mph           | 16' dia., multi-blade rotor                     |
| Dunlite 81/002550          | 2.0kW @ 25 mph           | 3 blade, 13.5' dia. upwind rotor                |
| Elektro WVG-50G            | 6.0kW @ 26 mph           | 3 blade, 16.4' dia. upwind rotor                |
| Grumman Windstream 25      | 15kW @ 26 mph            | 3 blade, 25' dia. downwind rotor                |
| Jacobs J47 (North Wind)    | 3.0kW @ 27 mph           | 3 blade, 14' dia. upwind rotor                  |
| Kedco 1200                 | 1.2kW @ 22 mph           | 3 blade, 12' dia. downwind rotor                |
| Millville 10-3-IND         | 10.0kW @ 25 mph          | 3 blade, 25' dia. upwind rotor                  |
| Parris-Dunn* (North Wind)  | 0.8kW @ ? mph            | 2 blade, 10' dia. upwind rotor                  |
| Pinson Cyclo-Turbine       | 2.0kW @ 24 mph           | 3 blade, 12' dia. vertical axis giromill        |
| Sencenbaugh 1000           | 0.8kW @ 18 mph           | 3 blade, 12' dia. upwind rotor                  |
| Sparco Water Pumper        | 30 gph @ 7 mph (7' lift) | 2 blade, 4' dia. upwind rotor                   |
| Tetrahelix *               | 7 watts @ 25 mph         | Vertical axis nylon sail rotor                  |

3) 대표적 상용 개발사업

가) Pacific Gas & Electric Company

(1) California Fairfield에 1990년까지 80MW급 풍차설치 계획

(2) Windfarms, Ltd., California Department of Resources와 함께 1989년까지 350MW급 풍력개발을 위한 Project에 참여

나) Southern California Edison Company

Southern California의 Palm Springs 근처에 Bendix Corporation에 의해 설계된 3 MW 수평축 풍차와 ALCOA의 500kW Darrieus 풍차를 설치하여 운전중이다. 그러나 ALCOA Darrieus 풍차는 초기 시운전중 풍차를 제어하는 Computer의 고장으로 파손되어 수리중이다.

다) Windfarm, Ltd

Hamilton Standard Div.와 함께 Hawaii의 Oahu에 4 MW급 풍력발전기 20개를 설치하여 80MW급의 전력을 생산하여 Hawaiian Electric Co.에 공급할 계획이며 600,000 Barrel의 원유를 절약할 수 있을 것으로 전망하고 있다.

라) Small Wind Machine Company

현재 미국내에는 100kW급 이하의 작은 풍차를 약 40개 업체에서 제작·판매하고 있으며 연간 약 2,000대의 풍차가 판매되고 있다.