

풍력에너지 개발현황 및 유압기술(1)



윤 소 남 (KIMM 산업기술연구부)

- '86.2 제주대학교 기계공학(학사)
- '90.2 부산수산대학교 유압제어(석사)
- '94.2 부경대학교 유압제어(박사)
- '94.7 - 현재 한국기계연구원 유공압연구그룹 선임연구원

1. 서 론

1973년 가을부터 시작된 석유파동 이후로 세계 각국에서는 석유대체에너지에 관한 연구개발이 활발해졌으며, 특히 태양에너지 및 풍력에너지에 대한 관심이 높아지기 시작했다. 그 중에서 풍력에너지와 관련된 국내의 연구로는 1975년 경기도 화성군 잇섬에 설치한 2kW급 풍력발전기가 그 효시라 볼 수 있으며, 그 후 미흡하나마 간헐적인 연구가 이루어졌지만 본격적인 연구는 1980년 이후라 할 수 있다. 1980년 이후에는 국내 연구기관 등에서 소형풍력 발전 시스템에 대한 연구가 활발하였으며, 이러한 연구가 중용량 혹은 대용량의 풍력발전을 이루는 기초가 되었다고 볼 수 있다.^{[1][2][3]}

풍력에너지는 순수한 자연에너지이며, 생태계에 미치는 영향과 환경공해가 없는 청정한 에너지로서 50년 이내에 부존 석유자원이 완전히 고갈될 것으로 예측되는 한 그 연구의 가치가 매우 중요하다. 그런데 자연에너지를 활용하는 기술은 세계적으로 보아도 아직 지속적인 연구 단계에 있으며, 상업적으로 자연에너지를 이용할 수 있으려면 더욱 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 예측된다. 다행히도 국내에서는 에너지 취약성의 극복과 에너지 자원의 다양화를 도모하여 장기적인 에너지 수급안정을 기하며 환경오염의 개선을 목적으로 1987년 12월 대체에너지 개발촉진법을 제정하고 1988년 6월 중장기 대체에너지 기술개발 기본계획을 발표하였다.^[4]

이 기본계획은 계획의 최종년도를 2001년으

로 하고 대체에너지 공급량을 국내 총에너지 수요의 3[%]로 설정하고 있으며, 기술자립 달성을 기본목표로 하고 있다(표 1 참조). 현재 에너지자원 기술개발 지원센터, 한국전력 및 한국에너지 기술연구소를 주축으로 과제가 수행되고 있다.

표 1. 대체에너지 기술개발 기본목표

구분	전단계(실적)	제1단계	제2단계
계획기간	~ '91	'92~'96	'97~2001
개발목표	연구기반 구축	실용화 기반 구축	기술자립 달성
보급목표	금융지원	수요개발, 시범보급	시장형성과 관리
총에너지 대체비율	0.5%	1.0%	3.0%
총연구비 (정부지원)	412억원 (288억원)	1,467억원 (770억원)	3,033억원 (1,570억원)

이 중에서 풍력에너지 개발을 위하여 '94년까지 약 35억원 정도가 투입되었으며(표 2 참조), 제2단계인 시점으로 평가해보면 98년까지 약 100억원 이상이 투입되었다는 결론이 나온다.

그런데, 표 3을 보면 풍력을 이용한 대체에너지 개발은 모두 풍력 발전 시설 개발에만 집중되어 있는데, 이외에도 새로운 연료의 생성 및 관계용 그리고 온수 혹은 난방 등 응용분야는

매우 많다. 연구자는 풍력발전 이외에 풍차의 유압시스템인 유압식 가변피치 제어기와 유압식 열변환 시스템 대해서 기술하고자 한다. 또한 유압식 가변피치 제어기에 대해서는 제 2편에 상세 내용을 게재하고, 이번 논고에서는 근래에 주목을 받고 있는 유압식 열변환 시스템의 구조 및 성능특성, 그리고 유압시스템 개발의 필요성에 대해서 서술하고자 한다.

2. 풍차와 유압기술

그림 1은 캘리포니아주 풍력단지(wind farm) 내의 풍차들^[5]을 보이는 것으로 외국선진국에서는 이미 오래전부터 풍차의 밀집화를 지향하여 매우 큰 전력을 생산하고 있으며, 풍차 제어기술 또한 완성단계에 있다고 볼 수 있다.

풍차는 본질적으로 변동하는 에너지원으로부터 파위를 도출하는 에너지 변환기이다. 따라서 효율이 좋으면서 안전하게 파위를 도출하기 위해서는 바람의 변동에 대처하는 제어시스템이 필요하게 된다. 또한 얻어진 파위를 유효하게 이용하기 위해 변환장치나 저장장치도 매우 중요하다. 이 장에서는 풍차시스템에 적용되는 유압기술에 대해서 간단히 기술하고 본 논고의 주제인 열변환 시스템에 대해서는 3장에서 기술하기로 한다.

표 2. 대체에너지 기술개발비 지원 현황

구분	'88~'91	'92	'93	'94	합계
태양광발전	11,911(5,880)	635(401)	1,306(754)	1,284(581)	15,136(7,616)
연료전지	4,104(849)	2,734(1,583)	3,563(2,071)	3,221(1,818)	13,622(6,321)
풍력	283(-)	776(593)	785(849)	1,766(1,220)	3,536(2,325)

*단위는 백만원이며, ()내는 민간부담금액임.

표 3. 풍력을 이용한 대체에너지 범위

1단계('88~'91)	2단계('92~'96)	3단계('97~2001)
- 풍력자원조사 - 20kW 풍력발전 시설 개발	- 중형풍력발전 시설 - 50~100kW급 - 풍력 시범단지 운영	- 300kW급 발전시설 상용화 - MW급 풍력단지 운영

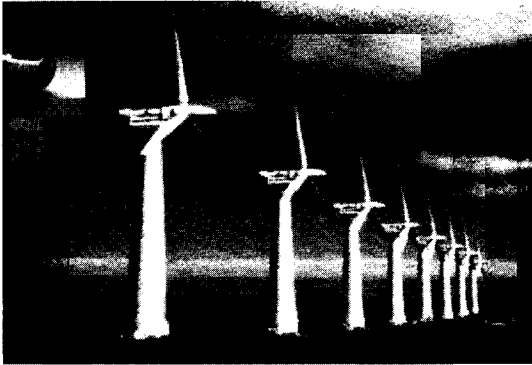


그림 1. 캘리포니아 풍력단지(wind farm)내의 풍차들

2.1 풍차의 제어 및 안전기구⁶⁾

풍차 로터에 가해지는 토크, 스러스트(thrust), 모멘트를 제어하기 위해서는 블레이드의 피치 변환이나 이외에 여러 가지의 방법들이 필요하게 된다. 블레이드의 피치 변환은 기동시에는 피치각을 크게하여 기동성을 좋게하고 운전시에는 최고의 효율을 유지하며 강풍시에도 블레이드 각을 제어하여 블레이드나 발전기에 과부하가 걸리지 않도록 하는 방법이다. 대형풍차에서는 거의 유압구동방식을 채택하고 있으며, 유압구동 방식의 간단한 예를 그림 2에 도시하였다.

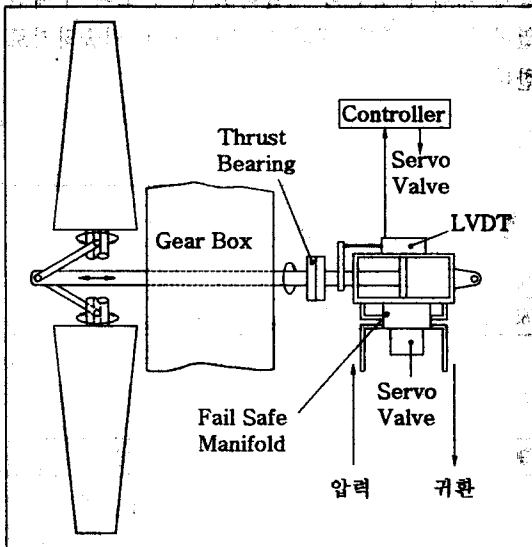


그림 2. 유압식 피치변환 기구

2.2 풍력 열변환 시스템

풍력과 같이 변동이 큰 입력에 대해서는 에너지 저장이 불가결하지만 이것을 열의 형태로 변환하여 저장조에 안전하면서 값싸게 저장할 수 있다. 풍력 열변환의 또 하나의 이점은 열역학 제2법칙에서 알 수 있는 바와 같이 어떤 에너지로부터 열에너지로 변환하는 경우의 열변환율은 100[%]로 효율이 매우 높다(3장에서 상세히 설명). 따라서 이용목적이 열변환인 경우에는 전기적인 변환 후에 열변환하는 것이 아니라 풍력을 직접 열로 변환하는 방법이 손실없이 모두 열로 변환되기 때문에 매우 유리한 방법이라 말할 수 있다.

풍력을 직접 열로 변환하는 방법은 여러 가지가 있으나 그림 3과 같이 유압펌프와 오리피스를 조합한 방식이 많이 사용된다. 유압펌프의 특성상 저속에서도 큰 토크를 흡수할 수 있기 때문에 풍차와 직결이 가능하고, 유량조정밸브를 삽입하여 유압이 어느 설정치 이상이 되면 유량을 일정히 제어하고, 풍차회전수가 설정치 이상으로 되는 경우에는 급격한 부하를 발생시켜 회전수의 폭주를 방지하는 역할까지 한다.

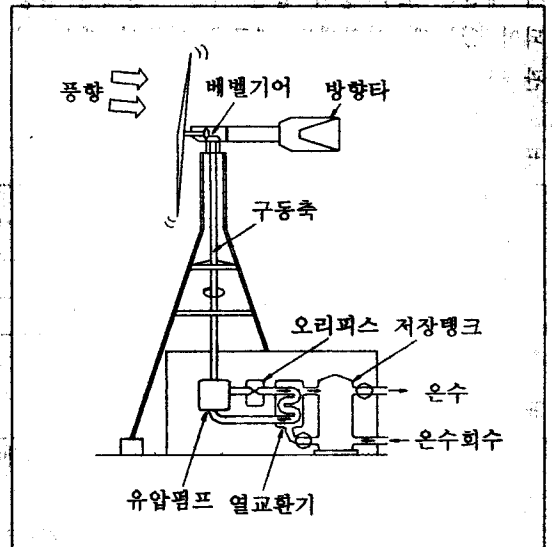


그림 3. 유압식 풍력 열변환 시스템

2.3 풍력 에너지 저장

풍력에너지를 열로 변환한 경우에는 필요에 따라서 온실이나 목욕용으로 양수를 하고 그외는 저장탱크를 이용하여 저장하는 방법을 채택하고 있는데, 그림 4와 같이 펌프의 소음도 차단하면서 열도 완벽히 차단할 수 있는 방법을 채택하고 있다.

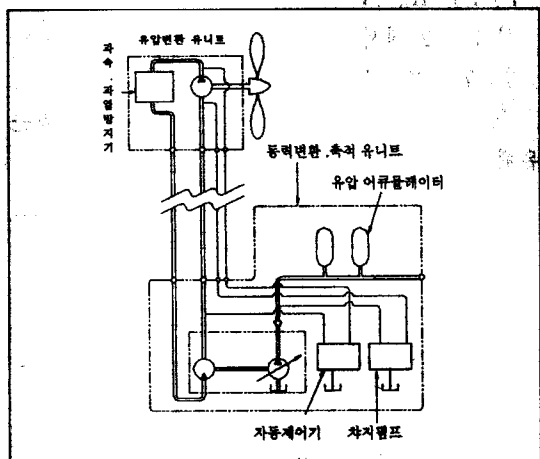


그림 4. 풍력에너지 유압변환 및 축적 시스템

3. 유압식 열변환 시스템

3.1 유압식 열변환 시스템의 원리

유압식 열변환 시스템은 풍차에 유압펌프와 오리피스(orifice)만을 삽입하여 열을 얻는 장치로 그림 5와 같이 매우 간단한 구조로 되어 있다. 전술한 바와 같이 유압펌프는 저속에서도 큰 토크를 흡수할 수 있기 때문에 이 장치에서는 바람의 세기에 관계없이 높은 풍차 효율이 얻어진다. 열변환 시스템의 열변환 원리를 설명하면 다음과 같다^[7].

풍차가 유압펌프를 회전시키면 풍차의 구동토크에 비례하는 압력이 발생하며, 펌프출구에서 송출되는 압력유가 관로속의 오리피스를 지날 때 압력이 강하되면서 열이 발생하게 된다. 이

때 열이 발생하는 것은 그림 6에 나타낸 바와 같이 교축로 출구에서 기름 분자들 사이에 격렬한 마찰이 일어나기 때문이다. 따라서 오리피스 전후에서 압력은 P_1 으로부터 P_2 로 강하하고 발생한 열이 관속으로 흐르는 기름 자체를 가열하므로 온도는 T_1 으로부터 T_2 로 상승한다. 이 열변환장치에서는 외부로의 열전달을 완전히 차단하면 유체의 압력에너지는 모두 열에너지로 바뀌게 되므로, 에너지 손실은 영(0)으로 된다. 펌프에서의 내부누설, 기계적 마찰, 관로내 벽면에서의 마찰 등에 의하여 발생하는 에너지는 모두 열에너지로 변환될 뿐이므로 이로 인하여 에너지 변환 효율이 낮아지는 일은 없다.

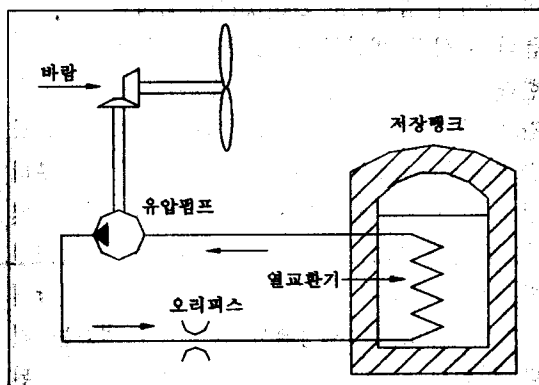


그림 5. 풍차의 열변환 시스템의 원리

그림 6은 기름의 관속에서 오리피스를 통해 흐르는 것을 나타낸다. 기름은 비압축성 유체이므로 오리피스 전후 관로 단면적이 동일하면 흐름의 평균속도 V 는 오리피스 전후에서 같다. 그러므로 기름이 오리피스를 지날 때의 속도 V_1 는 오리피스 전후의 평균속도 V 보다는 훨씬 높은 값이 된다. 따라서 오리피스를 통과한 기름분자와 오리피스 하류의 기름분자 사이에는 격렬한 충돌과 마찰이 발생하며, 이러한 충돌과 마찰이 열을 발생시키게 된다.

기름이 오리피스를 통과할 때 압력이 낮아지지만 이 압력에너지는 어떠한 유효한 일을 수행하지는 않으며 전적으로 열로 변해 기름자체의

온도를 상승시킨다. 유압유가 오리피스를 지나면서 압력이 강하함에 따라 유온이 상승하는 과정을 정량적으로 해석하면 다음과 같다.

그림 7은 대표적인 유압유에 대한 엔탈피(h)~엔트로피(s) 선도이며, 그림의 아래부분에는 간략한 기름순환 유로를 병기하였다. 그림에는 등압선과 등온선이 그려져 있으며, 등압선 및 등온선의 기울기와 선 사이의 간격은 유압유의 물성에 따라 달라질 수 있다. 그러나 석유계 유압유이면 제조 회사에 따라 물성치의 차이는 근소하므로 실용상 그림 7을 사용하여도 무리가 없다.

지금, 펌프가 회전하여 기름이 오리피스를 거쳐서 순환할 때, 그림에서와 같이 점 2에서 압력이 게이지 압력으로 200[bar]라 하자. 이 때, 기름의 물성치 변화를 h~s 선도상에 표시하기로 한다. 예를 들어, 펌프 입구 유온이 38[°C]인 순간으로부터 시작하여 기름 순환에 따른 온도 상승 사이클을 해석해 본다. 유압유가 점 1로부터 점 2로 이 이동하는 사이의 변화는 내부누설 및 내부마찰에 의한 에너지 손실이 없는 이상적인 펌프를 가정하면 기계적 에너지는 모두 엔탈피 증가로 되며, 이 과정에서 엔트로피 변화는 없다. 따라서 1→2 사이는 등 엔트로피 과정이 된다. 또한 2→3 사이의 과정에서는 외부와의 에너지 출입이 없기 때문에 엔탈피는 불변하며, 압력 에너지는 모두 열로 바뀌어 엔트로피가 증가한다. 즉, 이 과정은 등 엔탈피 과정이다. 기름이 순환이 반복됨에 따라 1'→2'→3'와 같이 물성치 변화가 계속되겠지만, 점 3과 점 1 사이에 적당한 용량의 열교환기를 설치하여 증가한 열 에너지를 회수하면 동일한 지점을 순환하는 직삼각형 모양의 사이클이 발생할 수 있다. 이러한 직삼각형 모양의 사이클에서는 삼각형 각 변 사이의 각이 정해지면 각 변 길이의 비가 일정하므로 압력변화(점1~점2)와 온도변화(점2~점3) 사이의 관계는 비례관계가 성립함을 알 수 있다. 따라서 오리피스 전후의 온도차와 압력차 사이의 관계는 식(1)과 같은 비례식으로 표시할 수

있다.

$$T_2 - T_1 = K_t(P_1 - P_2) \quad (1)$$

여기에서 T_1, T_2 는 오리피스 전후의 온도[°C]이며, K_t 는 압력·온도 계수[°C/(kgf/cm²)]이다. 한편, 오리피스 전후의 압력차는 유체 평균속도의 제곱에 비례한다고 알려져 있으므로 오리피스의 저항계수[kgf/cm²]/(m²/s²)] K_p 를 사용하면 다음 관계식이 성립한다.^[8]

$$P_1 - P_2 = K_p \cdot V^2 \quad (2)$$

식(1), (2)에서

$$T_2 - T_1 = K_t \cdot K_p \cdot V^2 \quad (3)$$

즉, 오리피스를 통과하는 유체의 온도변화는 유체평균속도의 제곱에 비례함을 알 수 있다.

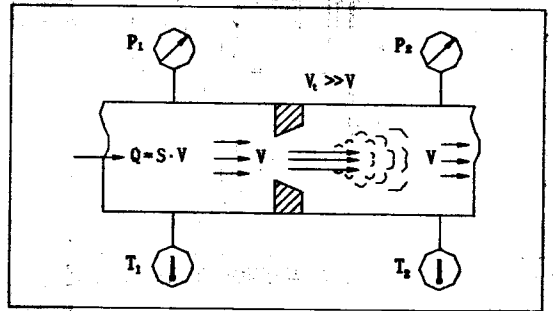


그림 6. 오리피스에 의한 열발생 원리

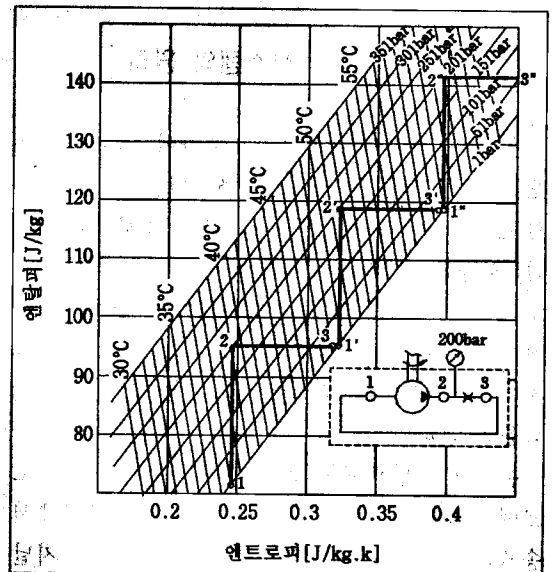


그림 7. 엔탈피 - 엔트로피 선도

3.2 유압식 열변환 시스템의 성능

그림 8은 풍차를 이용한 열변환장치의 성능을 예측하기 위한 시험장치를 보인 것으로 그림 3의 풍차와 열변환시스템에서 동력원인 풍차 대신에 전동기를 사용한 것이다. 전동기는 정격출력 5마력, 4극 3상유도전동기이며, 유압펌프로는 용량 22.4[cc/rev], 정격압력 170[kgf/cm²]의 기어펌프를 사용하여 실험을 수행하였으며, 동력발생과 열변환 관계를 입력동력 L_p , 오리피스 전후의 압력차 ΔP , 유량 Q 를 사용하여 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$L_p = \frac{\Delta P \cdot Q}{612} \text{ [kW]} = \frac{\Delta P \cdot q_{th} \cdot N}{612000} \text{ [kW]} \quad (4)$$

$$L_p = \frac{\Delta P \cdot Q}{612 \times 4.187} \text{ [kcal/s]} = \frac{\Delta P \cdot q_{th} \cdot N}{612000 \times 4.187} \text{ [kcal/s]} \quad (5)$$

여기에서, q_{th} : 유압펌프의 1회전당 송출유량 [cc/rev]

N : 유압펌프의 회전수[RPM] 이다.

따라서 이론적 총발생 열량 H_{th} 는 다음식으로 표시된다.

$$H_{th} = \int L_p dt = \frac{60 \cdot q_{th} \cdot N}{612000 \times 4.187} \times \Delta P \times \Delta t \text{ [kcal]} \quad (6)$$

여기에서, Δt 는 실험장치(풍차)의 운전시간을 의미한다. 한편, 실험에서 구해지는 총발생 열량 H 는 다음과 같이 표시된다.

$$H = H_o + H_w + H_s + H_l \quad (7)$$

여기에서, H_o : 장치속의 기름이 갖는 열량의 변화량[kcal],

H_w : 장치속의 물이 갖는 열량의 변화량[kcal],

H_s : 장치속의 구조물(파이프, 탱크 등)이 갖는 열량 변화량[kcal],

H_l : 장치 운전중의 손실(방열) 열량[kcal]이다.

그림 9는 실험 시간 경과에 따른 수온(T_w)의 변화를 나타낸 것으로, 오리피스의 압력차가 20[kgf/cm²]인 경우에는 1시간 동안 처음 20[°C]인 물의 수온이 13[°C] 만큼 상승하여 33[°C]가 된 것이고, 압력차가 35[kgf/cm²]인 경우는 20[°C], 압력차가 50[kgf/cm²]인 경우는 28[°C], 압력차가 65[kgf/cm²]인 경우는 35[°C]의 상승효과를 보였다.

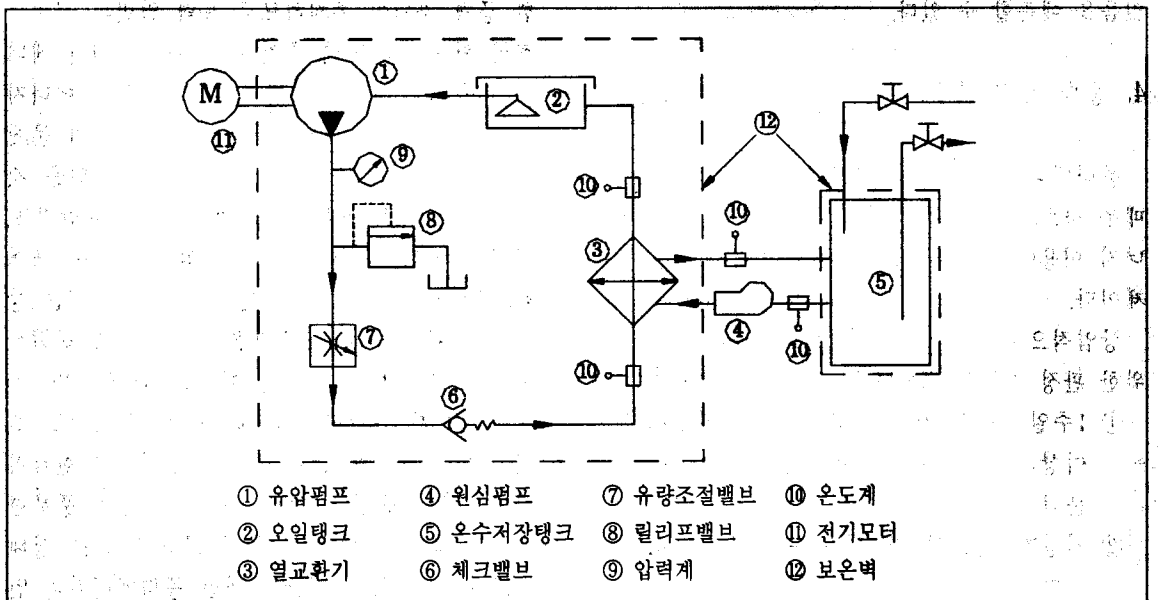


그림 8. 유압식 열변환 시험장치

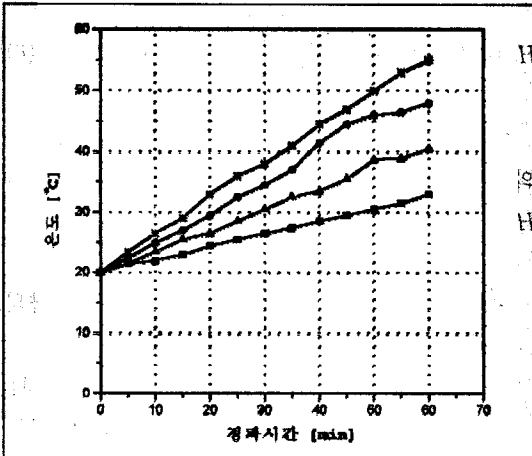


그림 9. 오리피스 전후의 압력차에 의한 온도 상승 효과

열변환 효율에 있어서도 거의 100[%]에 이르는 결과를 얻을 수 있었는데, 다소 이론과의 차이가 있는 것은 그림 8. 에 보인 바와 같이 온도계의 위치가 보온벽 내에 있으며, 온도 계측이 수동으로 이루어지는 관계로 계측의 오차와 보온벽의 개방에 따른 열의 차단이 100[%] 정확히 이루어지지 않았기 때문이라 사료되며, 실제 시스템에 있어서도 외부와 완전한 단열이 이루어진다면 에너지 전달 효율이 100[%]가 될 수 있음을 예측할 수 있다.

4. 풍력 열변환장치의 활용에 관한 고찰

풍력에너지의 밀도는 지역과 위치에 따라서 매우 다르므로, 풍차의 설치 위치 결정은 풍력에너지 이용에 관한 가장 기초적이고도 중요한 문제이다.

상업적으로 이용 가능한 풍력에너지가 되기 위한 판정 기준으로는 다음 사항들이 있다.^[9]

- ① 1주일 중 2~3일간, 풍속 4.0~5.0[m/sec] 이상의 바람이 하루에 적어도 2~3시간 분다.
- ② 기상청 발표의 연 평균 풍속이 3.5[m/s] 이다.
- ③ 연간 4[m/s] 이상의 바람이 2000 시간 이

상 분다.

이러한 조건들이 만족된다면 어떠한 풍차로도 경제성 있는 에너지 생산이 가능하다고 한다. 그런데, 우리나라의 풍력에너지 자원에 관한 연구는 매우 드물어서, 많은 자료를 근거로 하여 풍력에너지 자원을 평가하기는 어려우나, 1986년 제주대학교 고장권교수의 연구자료에 의하면, 제주도 제주 측후소, 대정 측후소에서의 풍력 자원은 위의 기준을 충분히 만족하고 있는 것으로 밝혀졌다.^[10]

종래의 풍력발전장치 연구자들의 연구 결과에 의하면, 지상 25[m] 높이의 철탑을 세우고직경 18[m]의 3매 프로펠러형 풍차를 설치 했을 때, 풍속 5[m/s]에서 15[kW]의 전력을 얻고 있다. 이 경우, 1대의 풍차만으로 약 13000[kcal/h]의 에너지가 얻어지고, 시간당 0.43톤의 물을 10[°C]로부터 40[°C]로 가열할 수 있으며, 생산된 온수는 상업적 뿐 만 아니라 온실장치를 이용하여 과일이나 화초 재배를 목적으로 사용한다해도 그 효과가 클 것이라 기대된다.

우리나라에서도 에너지 밀도가 높은 북서 계절풍이 많이 불어 상업적으로 이용 가능한 풍부한 풍력 자원이 존재하므로 풍력 열변환 장치를 적극 활용하게 되면 초기 투자비를 제외한 에너지 비용이 들지 않고 환경 오염이 없는 에너지를 이용하여 우리나라가 안고 있는 에너지 문제와 환경 문제 해결에 큰 도움이 될 수 있을 것이라 사료된다. 또한 그림 8에 보였던 유압펌프, 릴리프 밸브, 유량조절밸브(오리피스)들은 세계적으로 이미 상용화되어 널리 시판되고 있는 상태이기 때문에 비교적 저렴한 가격으로 신뢰성이 우수한 열변환 장치를 제작할 수 있으며, 국내에서는 대기업뿐만 아니라 중소기업에서도 현재 개발에 흥미를 보이고 있는 상태이고 한국기계연구원 유공압 그룹에서는 수년간의 풍부한 경험과 축적된 설계기술을 확보하고 있는 상태이므로 순수 국내 기술에 의한 풍력에너지의 열변환장치는 매우 긍정적이라 판단된다.

4. 결 론

본 논고에서는 풍력 시스템의 개발 현황에 대해서 간단히 살펴보았으며, 풍력 시스템과 관련된 유압장치에 대하여 살펴보았다. 또한, 풍력 시스템에 유압기술을 접목시키는 연구과제와 관련하여 정리를 하면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

① 공해가 전혀없는 천연자원의 이용관점에서 볼 때, 현재의 국가계획에 의하면 풍차의 설계 및 상품화 계획이 완료단계에 있으므로 현재 상품화 되어 있는 유압장치들을 이용하면 유압식 열변환 장치로의 수정은 매우 쉽게 할 수 있다.

③ 열변환장치의 구성중에서 핵심기술인 유압 펌프, 유량제어밸브(오리피스), 압력제어 밸브의 설계기술은 수년간 축적되어 왔기 때문에 어려운 기술이 아니고, 국가적인 차원에서 대체에너지 개발 및 관광자원의 활용을 목적으로 지원을 하게 되면, 3~4년 이내에 모두 상용화되리라 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] 이춘식, "풍차발전 실용화 시험에 관하여 (상)", 전기협회지, pp.19~23, 1982. 8.
- [2] 이춘식, "풍차발전 실용화 시험에 관하여 (중)", 전기협회지, pp.14~17, 1982. 9.
- [3] 이춘식, "풍차발전 실용화 시험에 관하여 (하)", 전기협회지, pp.17~21, 1982. 10.
- [4] 강원구, "풍력발전 기술 동향", 전기저널, pp.18~31, 1996. 4.
- [5] MOOG, MOOG Catalogue, 1996.
- [6] 牛山, "風力發電の現狀と油壓技術", 油壓と空氣壓, pp.25~33, 1986. 7.
- [7] 공태희, "풍력에너지 이용을 위한 유압식 열변환장치에 관한 연구", 부산수산대 석사 학위논문, 1993. 8.
- [8] 손병진, 유압공학, 선중당, 1991.
- [9] 牛山 泉, 小型風車 핸드북, 파워社, 1980.
- [10] 고장권, 허종철, "제주도에서의 풍력에너지 이용을 위한 공학적 예측에 관한 연구", 86대한기계학회 학술대회 논문집, pp.561~566, 1986.