

유체마찰에너지를 이용한 풍력열발생조의 성능 분석

Performance Analysis of the Wind Power Heat Generation Drum Using Fluid Frictional Energy

김영중	유영선	강금춘	백 이	윤진하	이건중
정회원	정회원	정회원	정회원	정회원	정회원
Y. J. Kim	Y. S. Ryou	K. C. Kang	Y. Baek	J. H. Yun	K. J. Rhee

SUMMARY

This study was conducted in order to develop wind-water heating system where frictional heat is created between the rotor and working fluid when they are rotating in the cylindrical heat generator. The wind-water heating system is composed of rotor, stator, working fluid, motor, inverter and heat generation tank. Instead of wind turbine, we have used an electrical motor of 30kW to rotate the rotor in this system. Two working fluids and six levels of rotor rpm were tested to quantify heat amounts generated by the system. Generally, as motor rpm goes up heat amount increases that we have expected. At the same rpm, viscous fluid showed up better performance than the water, generating more heat by 10°C difference. The greatest heat amount of 31,500kJ/h was obtained when the system constantly drained out the hot water of at the flow rate of 500 l/h. Power consumption rate of the motor was measured by three phase electric power meter where the largest power consumption rate was 14kW when motor rpm was 600 and gained heat was 31,500kJ/h, that indicated total thermal efficiency of the wind power water heating system was 62%.

Keywords : Wind energy, Alternative energy, Greenhouse heating, Fluid friction, Wind heating.

1. 서 론

시설하우스 면적증가와 더불어 가온면적의 확대로 시설하우스의 난방유류사용량이 급격히 증가하고 있으며, 최근 유류가 상승으로 값싸고 환경오염을 줄일 수 있는 대체에너지의 개발이 절실한 실정이다. 현재 시설하우스, 축사 등에 사용하는 태양열온수난방시스템은 주간 태양열을 수집하여 야간에 이용하는 방식으로 초기설치비용이 비싸고 효율이 낮은 문제점이 있지만 풍력은 태양에

너지와는 달리 24시간 이용 가능한 무한청정자연 에너지로 선진외국에서는 풍력이용 연구가 매우 활발하다. 풍력-열변환은 풍력을 전기로 바꾸는 과정없이 직접적으로 압축열 또는 마찰열로 변환시켜 온수 또는 난방열로 이용하는 방식으로 자원 이용효율면에서 풍력발전보다 우월하다고 볼 수 있다.

10kW 풍력발전에 필요한 풍속은 3m/s로 가능하며 열로 직접변환시에는 이보다 더 작은 풍속으로도 가능할 것으로 사료된다. 유압회로와 수직축풍

차를 이용한 풍력-열변환 연구에 의하면 1일 평균 풍속 8.1m/s에서 24.19MJ, 4.3m/s에서 3.59MJ의 적산 열에너지가 얻어질 수 있는 것으로 추정되었고, 이때 풍력-열변환효율은 68%로 계산되었다(Mohri 등 1982). 이는 수평축풍차의 이론최대효율, Betz limit 59%(Gipe, 1993)를 상회하는 것으로 나타났다. Matzen(1978)은 풍력-마찰열변환 연구결과 15 kW급 워터브레이크로 67°C의 물 130 l를 장기적으로 확보할 수 있었으며, 연간 총생산열량은 25,000kW로 추정하였고 워터브레이크의 회전수 및 지름과 발생동력에 관한 실험식을 개발하였다. 한편, 풍력자원이 충분하지 못한 지역의 소규모 풍력이용시스템으로는 히트펌프, 디젤, 솔라셀 등을 보조동력으로 하는 복합시스템이 있으며, 이에 대한 지역적 풍력자원 특성을 고려한 연구개발이 필요하다. 이 연구의 마스터플랜은 풍력과 히트펌프를 보조열원으로 하는 농가보급형 풍력이용 온수공급시스템 개발에 있다(그림 1).

본 연구의 목적은 풍력이용 온수공급시스템 개발에서 가장 중요한 부분인 풍력열변환장치를 제작하고 그 열변환성능에 미치는 몇 가지 요인에 대해 시험하는데 있다.

2. 재료 및 방법

가. 열변환조에서의 이론열발생량

열변환조에서 열발생량은 유체가 원통 안을 동심원을 그리면서 마찰에 의해 야기되는 것이라 할 수 있다(그림 2). 동심원으로 회전하는 유체의 유동으로 인한 단위체적당 열발생량은 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$\phi = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \quad (1)$$

식 (1)은 동심원사이의 유체유동은 Couette Flow (Linear Velocity Profile in the Radial Direction)로서, 반경 방향으로 선형적속도 감소분포를 가지며 유체의 점도는 일정하고 원통의 외경은 유체의 두께에 비해 무한히 크며 원주 방향 유속은 또한 축방향 유속보다 매우 크다는 가정 하에서다.

전체 열발생량(Φ)은 식 (2)와 같이 표시할 수 있고, 원통의 각속도는 ω 이므로 원통의 속도는 R ω 가 되므로 식 (3)이 성립된다.

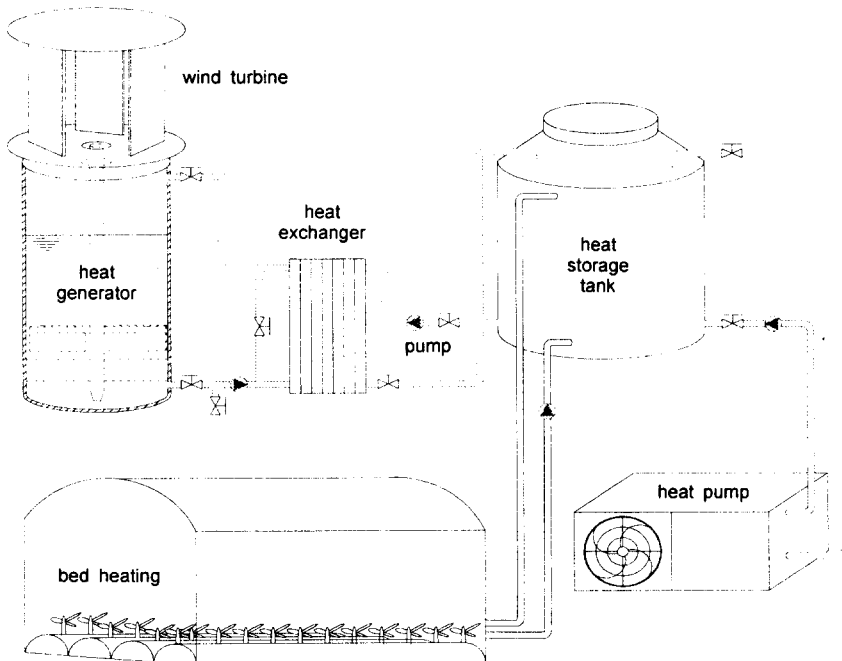


Fig. 1 Conceptual design of the wind heating system for greenhouse bed heating.

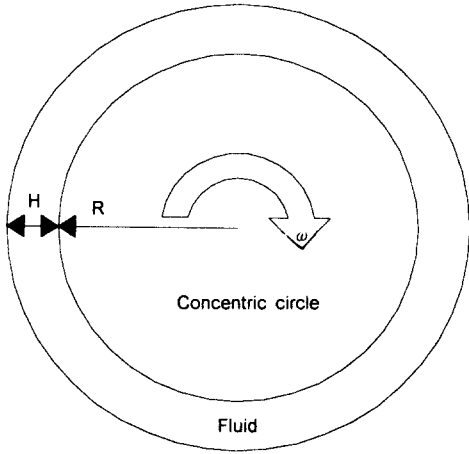


Fig. 2 Fluid flow in the concentric circles.

$$\Phi = \int_{\Omega} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 d\Omega \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\omega R}{H} \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하여 적분하면 전체발열량은 식 (4)로 표시된다.

$$\Phi = \frac{\mu \pi \omega^2 R^3 L}{H} \quad (4)$$

여기서 원통의 회전수 $N(\text{rpm})$ 을 식 (4)에 대입하면 전체발열량은 식 (5)와 같다.

$$\Phi = \frac{\mu \pi^3 N^2 R^3 L}{900 H} \quad (W) \quad (5)$$

전체 열발생량은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (5)와 (6)을 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\Phi = q c_p \Delta T \quad (6)$$

$$\Delta T = \frac{\mu \pi^3 N^2 R^3 L}{900 H q c_p} \quad (7)$$

여기서, R : 실린더의 반지름 (m)

L : 실린더의 높이 (m)

H : 유체의 두께 (m)

ω : 실린더의 각속도 (rad/s)

μ : 유체의 동점도 (Pas)

P : 유체의 압력 (Pa)

q : 유체의 유량 (kg/s)

c_p : 유체의 비열 (kcal/kg °C)

ΔT : 유체의 온도차 (°C)

식 (5)에서 원통에서 동심원 운동유체의 발열량은 작동유체의 두께에 반비례하고 유체의 동점도, 회전수의 제곱, 원통반경의 3승, 유체의 높이에 비례함을 알 수 있다. 따라서, 식 (5)와 300평 온실의 지중난방부하 50,400kJ/h (12,000kcal/h)을 (Kim et al. 2000) 고려하여 열변환조의 각 요소의 제원을 결정하였다.

나. 풍력-열변환시험장치

그림 3은 풍력열변환시험장치로 주요부분은 열변환조, 열교환기, 모터와 인버터, 순환펌프 및 축열수조로 구성되어 있다. 각부의 제원은 표 1에 표시되어 있다. 열발전원리는 열변환조(heat generator) 내부에 위치한 모터직결 로터가 회전하면서 열변환조 축벽에 고정된 스테이터 사이의 유체와 주위유체가 회전하면서 전단마찰열을 발생시키는 구조로 되어 있다. 로터에는 축에 고정되었으며 형상은 원형철판에 6개의 날개를 부착한 형태이다. 스테이터는 8개의 날개를 가진 바퀴모양으로 열변환조 벽면하단에 볼트로 부착하였다.

발생된 열은 순환펌프에 의해 열교환기로 이동하고 축열수조에서 유입되는 물과 열교환이 일어난다. 본 시험에서는 열교환기에서 나오는 온수는 열저장조에 저장하지 않고서 연속적으로 폐기시켰다. 열발생량은 모터의 회전수, 로터의 형상, 스테이터와 로터와의 간격, 유체의 종류 및 높이 등에 따라 다를 수 있다고 가정하였다. 모터는 30kW로 풍차를 대신하여 로터를 회전시켰고 모터회전속도는 인버터(Sungnam Eng., SPD3000)로서 조정하였다. 차후 시험에서는 적절한 풍차를 고안하여 성능시험을 할 계획이다.

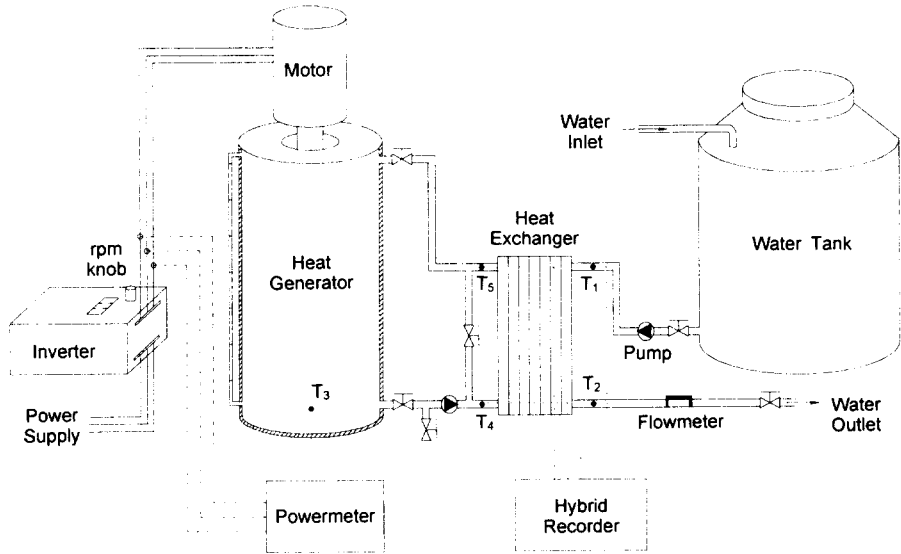


Fig. 3 Schematic diagram of wind heat generating system.

Table 1 Specifications of each component in the heat generating system

Component		Size and dimension (mm)	Remark
Heating part	axle	rod	wind energy → heat energy
	heat generator	$\Phi 500 \times 900L$	
	rotor	350×6	
	stator	400×8	
Driving part	motor	30kW	rpm adjustment
	inverter	0 ~ 1000Hz	
Heat exchange part	flat plate type heat exchanger	84.000kJ/h	water or viscous fluid

다. 실험설계

본 요인시험은 마찰유체의 종류 및 용량, 모터의 회전수로 이에 따른 발생열량을 계측하였다. 표 2는 각 요인과 그 수준을 나타낸다.

물은 일반 수돗물, 열매체유는 shell thermia oil 을 선정하였고 모터의 회전수는 인버터로 조정하였다. 열매체유는 시험설계단계에서는 2종류로 선정했는데 점성이 $1,000 \times 10^{-6} m^2/s$ 인 Shell valvata oil

은 유동성이 부족하여 본 시험에서 제외하였다. 열변환조의 최대수용 물용량은 130 l로 측정되었다.

각 처리에 따라 유체의 온도는 T형 서모커플과 데이터수집장치(Yokogawa DA100)로 10초 단위로 저장하고 모터의 회전수는 인버터로 조정하면서 레이저타코메타(Ono Sokki HT-4100)로 확인하였으며 소비전력은 3상전력분석계(algodue UPM6000)로 측정하였다. 열교환기로 순환하는 유체의 유량은

Table 2 Factors investigated in this experiment that affect on the heat amount generated in the experimental set-up

Factor	Level	Remark
Friction fluid	2 (water and oil)	water : $1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ @20°C oil : $136.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ @40°C
Fluid amount	2 (70 and 90 ℓ)	water and oil
rpm of motor	6 (200, 300, 400, 500, 600, 660)	adjusted by inverter

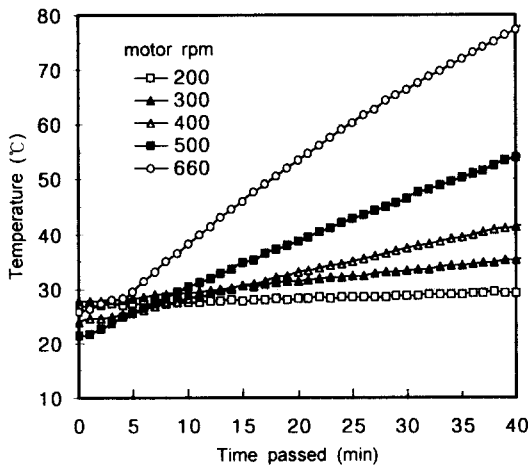


Fig. 4 Temperature rises of 70 ℓ water in the heat generator depending on the rpm of the motor.

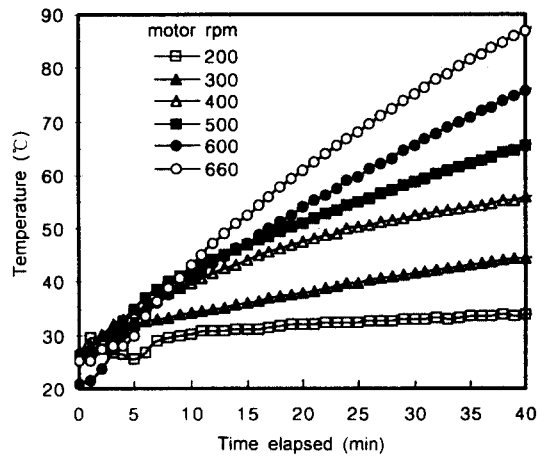


Fig. 5 Temperature rises of 70 ℓ oil in the heat generator depending on the rpm of the motor.

유량조절밸브로 조정하면서 초음파유량계(Pana-metrics Transport Model PT868)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 작동유체에 따른 유체의 온도

그림 4와 5는 물과 열매체유를 마찰열유체로 사용했을 때 각 모터회전속도에서 모터운전시간이 경과함에 따라 유체의 온도변화를 보여주고 있다. 이 때 마찰유체는 열교환기로 순환시키지 않고 다만 열변환조의 하단부에서 측정한 온도다. 경과시간 40분에서 모터의 회전수가 660rpm 일 때 물의 온도는 78°C 까지 상승되었고 한편 같은 유체량과 회전수조건에서 열매체유의 온도는 87°C 까지 도달

하였다. 전체 회전수조건에서도 열매체유의 발열 성능은 물보다 우수함을 알 수 있었다. 일반적으로 모터의 회전수가 증가할수록 온도가 증가하였다. 이는 예상했던 대로 열매체유의 동점도가 물의 동점도보다 훨씬 높아 유체의 전단마찰력이 컸기 때문이라 사료된다. 그림 7은 70 ℓ 물, 70 ℓ 열매체유, 90 ℓ 열매체유를 채운 열변환조에서 시간에 따른 온도증가율을 표시한다. 200rpm에서 물 70 ℓ 와 열매체유 70 ℓ 의 시간에 대한 온도증가율은 각각 0.06, 0.18°C/min로 열매체유의 온도증가율이 2배 이상으로 크게 나타났고 회전수가 증가할수록 그 차이는 작아져 660rpm에서는 1.37, 1.62°C/min가 되었다. 따라서, 마찰열유체로는 점성이 있는 열매체유의 선택이 합리적이라 할 수 있겠다.

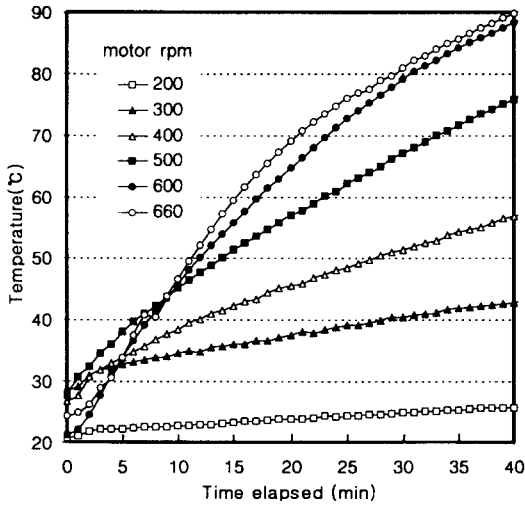


Fig. 6 Temperature rises of 90 ℓ oil in the heat generator depending on the rpm of the motor.

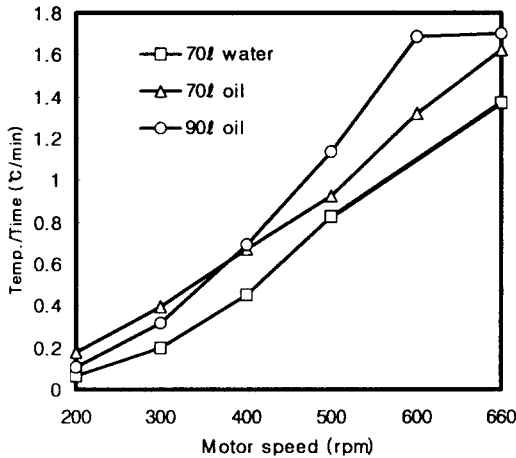


Fig. 7 Temperature gradient vs time of the three different heat generation trials.

나. 마찰유체의 유량에 따른 온도상승

그림 6은 열매체유 의 양을 90 ℓ로 채웠을 때 온도상승을 나타낸다. 열매체유 의 양 70 ℓ에서(그림 5) 최고온도는 660rpm에서 87℃로 나타났고 90 ℓ에서는 90℃까지 상승하였다.

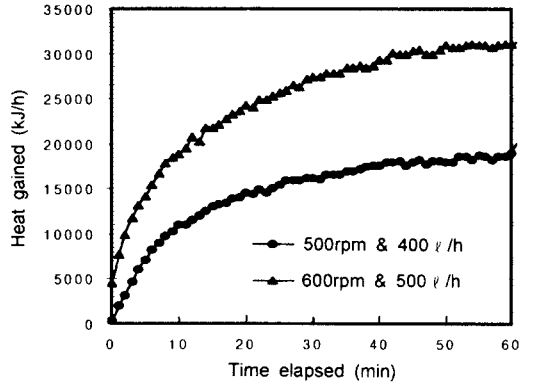


Fig. 8 Heat exchange amounts between the oil of the heat generator and water in the flat plate type heat exchanger.

그림 5와 6을 비교하면 유체의 양이 많을수록 400rpm 이상부터 유체온도가 높았고 이는 로터의 회전속도가 400rpm 이상에서 마찰에너지가 상대적으로 가파르게 상승되었다고 볼 수 있다.

그림 7의 회전수 200rpm에서 열매체유 70 ℓ와 열매체유 90 ℓ의 시간에 대한 온도기울기는 각각 0.18, 0.11℃/min로 열매체유량이 작은 경우가 온도증가 기울기가 컸고 이는 발열량이 어느 한계에서 일정하다면 지극히 당연한 결과라 여겨진다. 하지만 600rpm에서는 1.32, 1.68℃/min이 되었고 660rpm에서는 1.6, 1.7℃/min으로 되어 그 간격이 점차 좁아지는 것을 발견했다.

다. 열교환량

그림 8은 순환펌프로 마찰유체를 판형열교환기로 강제순환 시켰을 때 물이 얻은 열량을 나타낸다. 물과 열매체유의 열교환은 열교환기에서 대향류방식으로 이루어졌으며, 모터의 가동과 동시에 열교환이 시작되었다. 모터의 회전속도가 500rpm, 물의 순환량이 시간당 400 ℓ일 때 물이 얻은 열량은 18,900kJ가 되었고 600rpm - 500 ℓ에서는 31,500kJ의 열량이 얻어질 수 있었다.

600rpm-500 ℓ 열교환시험에서 경과시간 40분에서 판형열교환기 입구 물온도는 22℃에서 출구 36℃

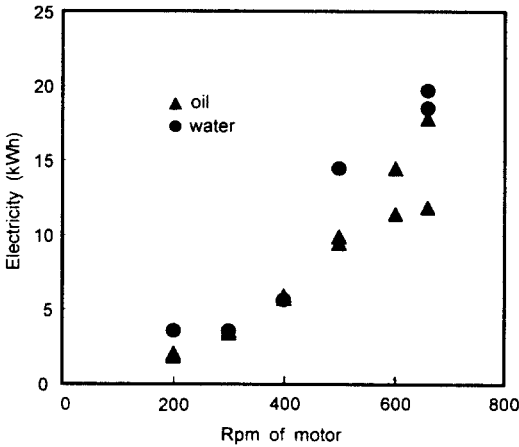


Fig. 9 Electricity consumed by the different fluid in the heat generator depending on the rpm of the motor.

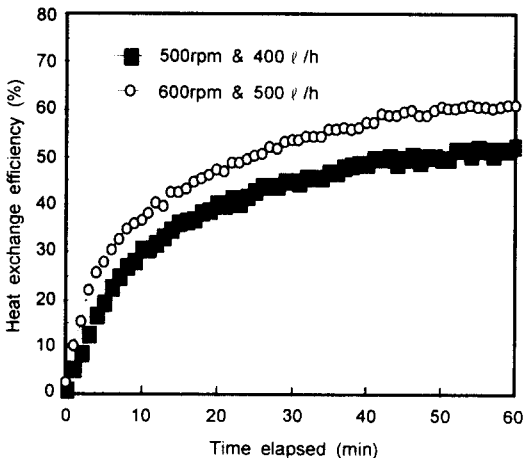


Fig. 10 System efficiency of the heat generating system.

로 증가되었고 반면 열매체유의 온도는 입구 55℃에서 출구 46℃로 감소되면서 열교환이 이루어졌다. 모터의 소요동력은 600rpm, 400rpm에서 각각 12~14.5kW, 5~6kW로 나타났다 (그림 9). 열변환시스템의 최고효율은 62%로 나타났다 (그림 10). 이는 모터를 소비한 전기동력의 62%가 온수를 생산하는 열에너지로 변환했다는 의미로 일반적 풍력이용기에서 풍력에너지를 전기에너지로 변환시켰

을 때의 최대이론변환효율이 59% 이하인 점으로 미루어 보아 상당히 높은 수준의 에너지이용효율이라 할 수 있을 것이다.

이 열교환성능시험으로 열변환장치에서 모터 대신 풍차를 설치할 경우 소요풍력에 관한 지식을 얻을 수 있고 본 시스템에 필요한 풍차크기는 최소한 15kW의 풍력을 수집할 수 있어야 한다는 결론에 도달했다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서 열변환조, 모터, 로터와 스테이터, 순환펌프, 열교환기로 구성된 풍력-열변환시스템을 제작하여 작동유체의 종류 및 양, 모터의 회전수가 열변환조의 열발생능력에 미치는 영향에 관해 시험하였다. 주요결과는 다음과 같다.

1) 풍력-열변환장치는 열변환조, 모터-인버터, 로터-스테이터, 관형열교환기, 순환펌프, 축열조 등으로 구성하였다.

2) 열변환조에서 유체의 회전으로 전단마찰열에 의해 발생하는 이론발열량은

$$\phi = \frac{\mu \pi^3 N^2 R^3 L}{900 H} \quad (W)$$

으로 나타낼 수 있었고, 발열량은 유체의 동점도, 유체회전수 제곱, 반경의 3승, 유체의 높이에 비례하고 유체의 두께에 반비례함을 알 수 있었다.

3) 열변환조 내의 유체의 온도는 모터-로터의 회전속도가 빠를수록 유체량이 많을수록 높게 나타났다. 용적량 70ℓ 물, 70ℓ 열매체유의 최고 온도는 각각 78, 87℃까지 상승하였다. 따라서, 열변환조의 유체는 점성열매체유를 선택하는 것이 발열성능이 우수할 것으로 판단된다.

4) 열교환 성능시험에서 모터-로터 회전속도를 600rpm, 물순환량 500ℓ/h의 경우 최대 열교환량은 31,500kJ/h로 나타났으며 이 때 소비전력은 14 kW로서 열변환 효율은 62%가 되었다.

참 고 문 헌

1. Kim, Y. J., Y. S. Ryou, J. T. Chang, K. C. Kang, K. J. Lee and C. W. Shin. 2000. Heat Recovery Characteristics of the hot water supply system with exhaust heat recovery unit attached to the hot air heater for plant bed heating in the greenhouse. J. of the KSAM 25(3):221-226.
2. Mohri, K, S. Umeda and T. Terada. 1982. Heat energy conversion system of wind power J. of the JSAM 45(1):137-141.
3. Matzen R. 1978. Wind energy- Heat generation. Second International Symposium on WIND ENERGY SYSTEMS. p. 17.
4. Gipe Paul. 1993. Wind Power for Home and Business. Chelsea Green Publishing Company, White River Junction, Vermont. p. 61.