

발열시스템 열적 성능의 정밀측정에 관한 연구

최창용*, 김홍건†

(논문접수일 2002. 10. 21, 심사완료일 2002. 11. 8)

A Study on the Precise Measurement of the Performance in the Heating System

Chang-Yong Choi*, Hong Gun Kim†

Abstract

A precise measurement of field test was performed to estimate the thermal performance of the forced convection electric air heater by experiment. Air temperature, flow rate and electrical power input were measured with the related measurement sensors, and acquisition methods for the measured data were studied to estimate the thermal performance of the tested air heater effectively. To determine the mean air temperature at the flow cross-section, measuring positions were chosen by considering the flow velocity profile and the equally divided cross-sectional area. From the experimental results, thermal efficiency was obtained accurately as an indication of the tested heating system performance.

Key Words : Precise Measurement(정밀측정), Forced Convection Electric Air Heater(전기온풍기), Thermal Performance(열적 성능), Mean Air Temperature(평균 공기온도), Flow Rate(유량), Electrical Power Input(입력전력), Thermocouple(열전대), Orifice Flowmeter(오리피스 유량계)

1. 서론

현재 각종 산업 및 농업시설의 공간 난방을 위해 사용되고 있는 난방장치는 석탄, 경유, 등유 등의 화석에너지를 이용한 난방장치라 대부분을 차지하고 있으며 이러한 화석에너지 사용은 지속적인 원가상승에 따라 겨울철 난방비용에 커다란 부담으로 작용하고 있다. 또한 화석에너지를 이용한 난방장치에서 배출되는 배기가스가 실내로 유입되는

경우, 생산품의 품질저하 및 작업자의 환경문제를 초래하는 경우가 발생하는 등의 취약점들이 대두되고 있다. 따라서 최근에는 이러한 문제점들을 대처하기 위해 전기를 이용한 난방장치 즉 대형 전기온풍기의 사용이 늘어나는 추세이고 이러한 전기 난방장치에 대한 에너지의 효율적 사용 측면에서 경제성과 안전성을 높이기 위한 지속적 연구개발이 이루어지고 있다⁽¹⁻²⁾.

전기온풍기는 전류를 통과시켜 주열열(Joule heat)을 발

* 주저자, 전주대학교 공학부 기계공학전공 (cychoi@jeonju.ac.kr)
주소: 560-759 전북 전주시 완산구 효자동3가 1200번지
† 전주대학교 공학부 기계공학전공

생시키는 열발생 장치, 공기로 열을 전달하는 열교환기, 공기의 강제유동을 위한 송풍장치와 가열공기의 이송을 위한 덕트 등으로 구성되며, 이러한 난방장치들의 상업화를 위해서는 최종적으로 시스템의 열적 성능이 정량적으로 확인되고 장치의 특성에 따른 다양한 실험적 성능평가와 분석이 요구되고 있다⁽³⁻⁷⁾. 따라서 본 논문에서는 공기온도, 공기유량, 입력전력 등의 측정에 관련된 열유체 계측센서 및 자료획득방법(data acquisition method)을 통해 대형 전기온풍기의 정상상태 열적 성능평가 실험을 수행하였다.

대형 전기온풍기에는 대용량의 교류전기가 공급되었고 실험은 온도, 유량 및 입력전력의 측정 장치와 자료획득시스템으로 구성된 실험장치를 통해 수행되었다. 온풍기의 열출력을 구하기 위해서 흡입공기의 온도 및 열원에 의해 가열된 배출공기의 온도가 각각 열전대를 통해 시간에 대한 연속적

인 변화값으로 측정되었으며, 이때 측정위치들은 정확한 평균온도값이 계산되도록 유동단면에서 균등 분할면적에 따라 선정되었다. 공기유량은 오리피스(orifice)형 유량계를 사용하여 오리피스 전후단의 차압(pressure difference)을 측정함으로써 환산되었고, 유량계가 부착된 덕트 출구에서는 평균온도 계산에 필요한 유동속도가 측정되었다. 또한 입력전력의 실시간 측정에는 Watt Transducer가 사용되었다.

실험은 항상 측정자료를 얻기 전에 1시간이상 온풍기를 가동하여 정상상태(steady state)가 유지된 후 수행되었다. 일정시간동안 실시간으로 연속 측정된 온도, 유량, 입력전력으로부터 전체 시간에 대한 평균값과 흡입 및 배출 공기의 평균온도를 구해서 열출력이 계산되었고 이를 통해 열적 성능평가가 이루어졌으며, 실험 결과로부터 대형 전기온풍기의 열적 성능에 영향을 미치는 요소들이 분석되었다.

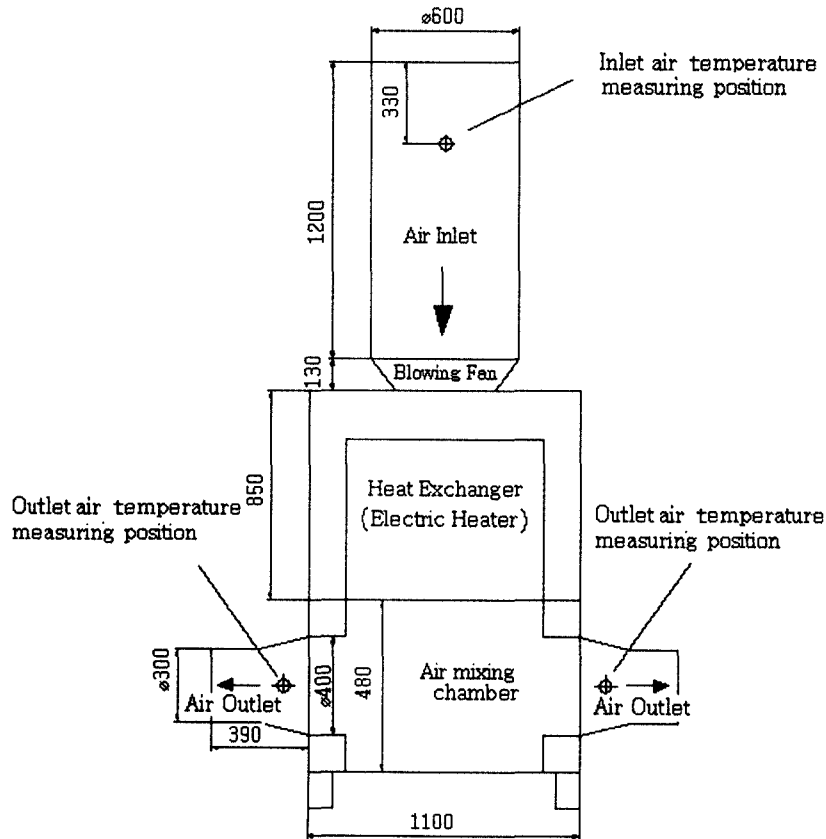


Fig. 1 Schematic diagram of the forced convection electric air heater tested

2. 실험장치

본 논문에서의 실험대상 대형 전기온풍기는 Fig. 1에 나타낸 바와 같고 본체는 길이 1100mm, 폭 900mm, 높이 1330mm의 크기로 되어있다. 온풍기의 상부에 설치된 흡입형 송풍기의 구동에 따라 수직상부에 위치한 흡입구를 통하여 외부공기가 유입되고 전기히터가 담겨져 있는 열교환기(heat exchanger)를 통하여 공기는 가열된다. 또한 가열된 공기는 온풍기의 하부에 있는 좌, 우 2개의 배출구를 통하여 난방공간으로 강제 방출되어진다. 상부의 흡입 공기유로는 내경 600mm, 길이 1200mm의 원형덕트로 되어있고 하부의 배출공기 유로는 직경이 각각 300mm인 원형 덕트가 온풍기 본체 좌우에 부착되어 구성된다.

흡입공기의 온도는 유로 입구측에서 330mm 떨어진 지점에서, 배출공기의 온도는 본체에서 100mm 떨어진 원형덕트 좌, 우 2개의 지점에서 각각 열전대(thermocouple)를 이용하여 측정되었다. 공기의 유량측정은 수직 상단의 입구 유로에서 보다는 비교적 측정하기 편리한 위치에 있는 배출 유로가 선정되었고, 배출구 좌, 우측에 오리피스 유량계가 설치되었다. 공기의 체적유량은 오리피스 전후단의 정압(static pressure) 차이를 아날로그 마노미터로서 측정함으로써 얻어지며, 유동속도는 오리피스 유량계 출구에서 프로펠러식 풍속계를 사용하여 얻어졌다. 한편 온풍기에 입력되는 전력량은 온풍기 Control Box에서 CT(current transducer)를 이용하여 공급전류를 측정 가능한 영역의 작은 전류로 변

환시킨 후, Watt Transducer를 이용하여 측정하였다. Fig. 2는 실험장치에 대한 사진이다.

본 실험에서는 특히 공기의 체적유량 측정 정확도가 열적 성능의 평가에 크게 영향을 미치는 것으로 나타나기 때문에 직경 330mm의 대형 원형 덕트를 통해 배출되는 공기유량은 정확히 측정되어야 한다. 그러나 일반적으로 기체유량의 측정은 액체유량의 측정보다 어렵고 또한 높은 난류특성을 갖는 대용량의 공기유량을 효율적으로 정확하게 측정하는 것은 상당한 주의가 요구된다. 따라서 비교적 저렴하고 또한 실험 목적에 맞는 정확도를 갖는 것으로 판단된 Fig. 3의 오리피스 유량계를 유량 측정용 계기로 선정하였다⁽⁸⁻⁹⁾. 유량계의 총 길이는 4m이고 유동의 균일화를 위해 내경 210mm, 외경 310mm인 오리피스 부착지점에서 900mm 전단에 허니콕이 부착되어 있다. 오리피스 하우징에는 오리피스 전후단의 압력 차이를 측정할 수 있도록 압력 측정탭이 원주방향으로 균등하게 4개씩 전후단에 각각 만들어져 있고 4개의 압력탭(pressure tap)을 통한 평균압력이 측정될 수 있도록 압력 측정관(measuring tube)을 연결하였다. 오리피스 유량계의 차압측정에는 압전효과를 가진 재료를 사용해서 기계적 에너지를 전기적인 에너지로 변환하는 Bexhill사의 전기식 아날로그 마노미터를 사용하였으며, 온풍기의 구동에 공급되는 입력전력 측정에는 공급전류가 대용량이고 전류와 전압의 상이 일치하지 않기 때문에 CT를 이용하여 전류를 강하시킨 후 Watt Transducer를 이용하였다. 한편 입력전력은 열적 성능평가에 있어서 입력에너지에 해당하고 측정의

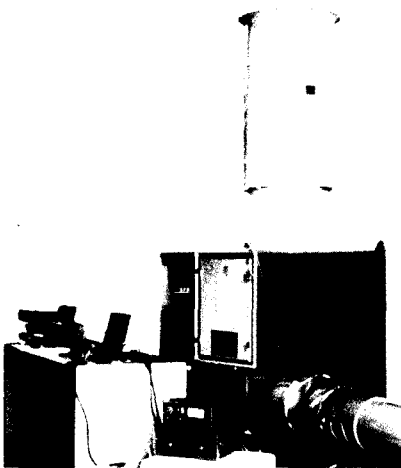


Fig. 2 Photograph of the experimental apparatus

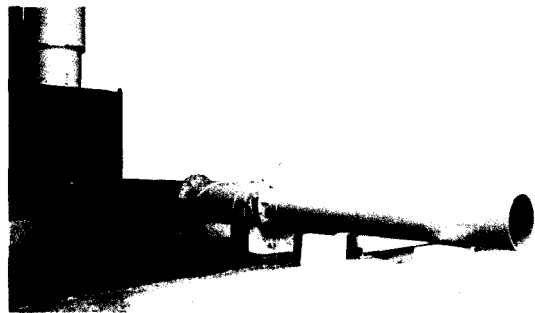


Fig. 3 Photograph of the orifice flowmeter

Table 1 List of measuring instruments used in the experiment

Instrument	Measuring Parameter	Manufacturer	Calibration
T type thermocouple	Air Temperature	OMEGA	Hart High Precision Bath
Orifice flowmeter	Flowrate	Sewon	Manufacturing Company
Manometer	Orifice Pressure Difference	Bexhill	Manufacturing Company
Watt transducer DY-W	Electrcal Power Input	Daeyeon	BMI 3030A Power Profiler
HP 34970A data acquisition/switch unit	Data Acquisition	Hewlett Packard	
TDS-303 data logger	Data Acquisition	Tokyo Sokki Kenkyujo	
MiniAir2	Air Flow Velocity	Schiltknecht	Manufacturing Company

정확도가 성능계산에 크게 영향을 미치므로 정밀 보정용 전력 측정기기인 BMI 3030A Power Profiler를 사용하여 보정을 수행하였다. 온도측정에는 OMEGA사의 T Type 열전대가 온도센서로서 사용되었다⁽¹⁰⁾. Table 1은 본 실험에서 사용된 측정장비들을 명시한다.

3. 실험방법

3.1 적용이론

온풍기의 열적 성능은 열발생장치 및 송풍기에 공급되는 입력전력 대비 배출되는 공기에 가해지는 열전달률의 비율로서 평가된다. 공급되는 입력전력은 Watt Transducer를 사용하여 직접 측정되며, 배출공기의 총 열전달률(q_{total})은 흡입공기의 평균온도($T_{m,i}$)와 배출공기의 평균온도($T_{m,o}$) 사이의 온도차이(ΔT_m) 그리고 배출공기 체적유량(Q_o)을 측정하여 정상상태에서의 검사체적에 대한 열역학 제 1 법칙으로부터 유도되는 다음 식으로서 계산된다⁽⁹⁾.

$$q_{total} = q_L + q_R = (\rho \times Q_o \times C_p \times \Delta T_m)_L + (\rho \times Q_o \times C_p \times \Delta T_m)_R \quad (1)$$

여기서 하첨자 L과 R은 좌측 배출구와 우측배출구를 각각 나타내며, 공기의 밀도 ρ 와 정압비열 C_p 는 일정한 것으로 가정한다.

한편 공기의 평균온도는 단면을 통해 유동하는 유체에 의해 수송되는 열에너지로서 정의되며 유동단면적을 A_c 로 표시할 때 유동속도 u 와 온도 T 에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T_m = \frac{\int_{A_c} \rho u C_p T dA_c}{\dot{m} C_p} \quad (2)$$

이때 밀도 ρ 와 정적비열 C_p 를 일정한 것으로 간주하고 질량유량 \dot{m} 를 평균속도 u_m 으로 나타내면, 유한한 개수 i 의 온도와 유동속도 측정점에 대하여 식 (2)는 다음으로 정리된다⁽¹²⁾.

$$T_m = \frac{\int_{A_c} u T dA_c}{u_m A_c} = \frac{\sum u_i T_i \Delta A_i}{u_m A_c} = \frac{\sum u_i T_i}{u_m N} \quad (3)$$

여기서 ΔA_i 는 측정점 i 가 대표하는 부분 유동단면적이며, 전체 유동단면적은 N 개의 동일 단면적으로 나뉘어질 수 있다. 또한 평균속도는 체적유량 $Q_o = A_c u_m$ 으로부터 쉽게 계산된다.

공기의 체적유량은 오리피스 유량계에서 오리피스 전후단의 차압 측정을 통해 계산되며, 차압을 마노미터의 mmH₂O 수두 Δh_o 로서 측정하면 실제 체적유량 계산식은 다음과 같이 얻어지게 된다⁽⁸⁾.

$$Q_o = K \times \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \times \sqrt{2 \times g \times \frac{\Delta h_o}{\rho}} \quad (m^3/s) \\ = C \times A_2 \times \sqrt{2 \times g \times \frac{\Delta h_o}{\rho}} \quad (4)$$

위 식에서 A_1 은 유량계 덕트의 유동단면적(m^2), A_2 는 오리피스의 유동단면적(m^2), g 는 중력가속도(m/s^2)를 각각 나타내며, 유량계수 K 는 접근 인자속도(velocity of approach

factor)와 결합되어 하나의 유량계수 C 로서 표시되었다.

3.2 측정 방법

실험은 온풍기를 1시간 이상 가동시켜 정상상태가 확인된 후에 매 30초마다 한번씩 측정량을 1시간동안 측정하고 이를 디지털 자료획득 시스템으로 실시간 저장하였다. 흡입 공기는 대기상태로 유입되므로 측정위치에 따른 온도변화는 미미할 것으로 생각되지만 평균온도 측정은 측정오차를 줄이기 위하여 온풍기 상부의 흡입공기 유로에서 330mm 떨어진 지점의 유동단면에 Fig. 4(a)와 같이 선정된 5개 측정점에서 수행되었다. 온도센서인 열전대는 가는 철심을 이용하여 만들어진 십자형태의 프레임에 부착되었으며, 또한 각 측정위치에서의 유동속도 변화는 무시할 정도이므로 측정온도를 단순히 산술평균하여 흡입공기 평균온도를 계산하였다.

배출공기는 온풍기 본체 내부의 열교환기를 통해 복잡한 난류유동을 형성하고 선정된 덕트 단면에서의 측정위치에 따라 상당한 온도차이가 존재하기 때문에 평균온도의 계산에 상당한 주의가 기울여졌다. 배출공기 온도측정을 위해서는 온풍기 본체에서 좌우로 약 100mm 떨어진 배출구 원형 덕트 위치의 유동단면이 선정되었다. 측정위치는 원형덕트 유동단면에서 볼 때 각 측정점이 대표하는 유동면적이 균등하도록 Fig. 4(b)와 같이 좌우측 배출구 각각 모두 10개로 선정하여 열전대를 부착하였다⁽¹³⁻¹⁴⁾. 한편 열손실 문제는 본 논문의 연구목적과 관계없지만 배출구의 덕트 표면에는 단열재를 부착하여 열손실을 최소화하였다.

또한 공기의 체적유량은 온풍기 좌우측 공기 배출구에 오

리피스 유량계를 부착하고, 오리피스 전후단에서 원주방향으로 균등 분배된 각각 4개 위치에서의 압력을 평균하여 얻어지는 압력차(차압)를 아날로그 마노미터의 2개 채널을 통하여 동시 측정하였고, 전체 측정시간동안의 평균값으로부터 식 (4)를 적용하여 계산하였다. 측정된 체적유량으로부터 평균 유동속도가 계산되고 유량계 출구에서 선정된 위치⁽¹³⁻¹⁴⁾에서의 유동속도가 측정되었으며 이로부터 식 (3)을 통하여 좌우측 배출공기의 평균온도가 계산되었다. 열발생 장치로 직접 입력되는 전력은 Watt Transducer를 사용하여 측정하였고, 송풍기로의 입력전력은 Watt Meter를 사용하여 측정하였다.

마지막으로 공기로의 열전달률 계산에 필요한 공기 비열은 정압비열(C_p)로서 내부 압력변화에 따른 영향은 미미하므로 무시하고 단지 대기압에서의 배출공기 온도변화만을 고려하여 참고문헌⁽¹¹⁾의 열물성치 값을 적용하였으며, 공기의 밀도도 마찬가지로 압력변화의 영향은 무시하고 단지 대기압에서 배출구 공기온도의 변화만을 고려하였다.

4. 결과 및 고찰

공기의 체적유량은 오리피스 전후단의 차압을 측정하여 계산할 수 있다. 차압의 측정을 위해 아날로그 마노미터를 사용하였으며 측정시간동안의 좌우측 배출구 평균 차압은 20.5 mmH₂O로 측정되었다. 유량계 덕트의 내경 $D_1=0.298m$ 이고, 오리피스 내경 $D_2=0.210m$ 이므로 덕트 유동단면적은 $A_1=0.06975m^2$, 오리피스 유동단면적 $A_2=0.03464m^2$ 이며 해당하는 유량계수 $C=0.695$ 를 적용하면 밀도 $\rho=1.0909kg/m^3$ 일

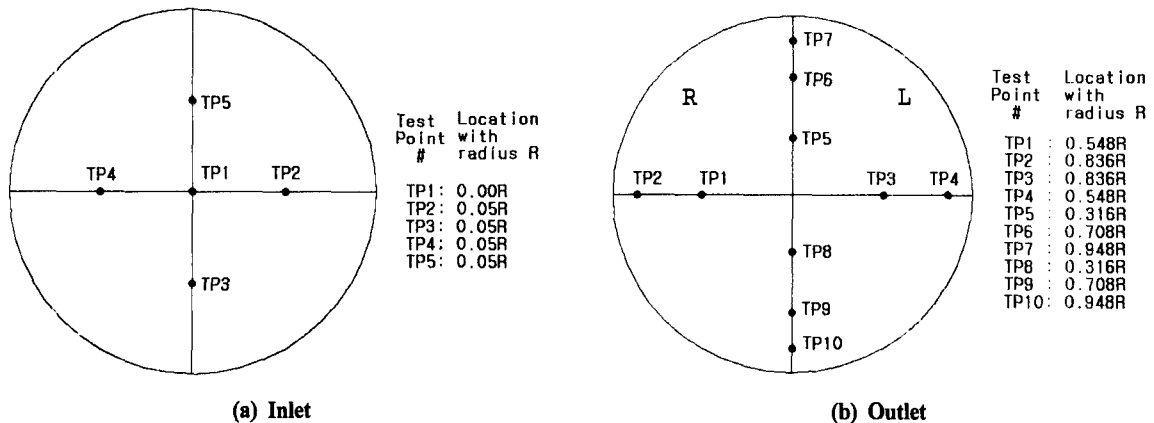


Fig. 4 Selected test points(TP) at the flow cross-sections

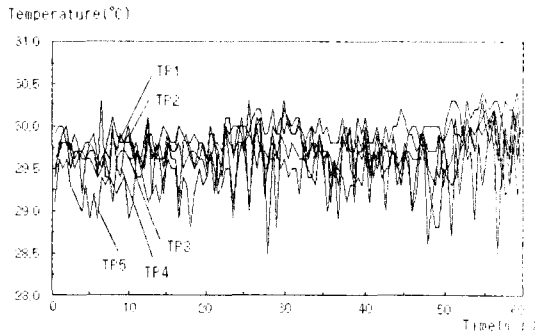


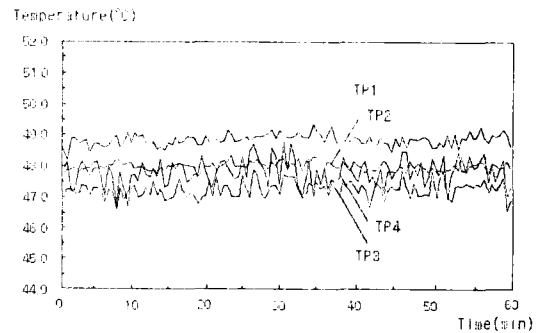
Fig. 5 Transient of the inlet air temperature at test points

때 식 (4)로부터 체적유량은 $Q_0=0.4620\text{m}^3/\text{s}$ 로 계산된다. 한편 이때의 평균유속은 $u_m=Q_0/A$ 식으로부터 $6.624\text{m}/\text{s}$ 로 얻어진다.

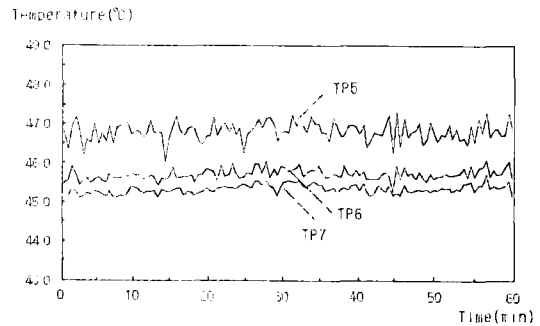
흡입공기의 온도는 5개 측정위치에서 측정되었고 Fig. 5에 나타난 바와 같이 각 위치에서의 온도편차는 약 1°C 이내의 범위로서 거의 일정한 온도를 유지하고 있다. 또한 측정시간동안의 산술평균 온도변화는 Table 2에 나타난 바와 같고 따라서 입구 평균온도는 29.69°C 로 계산되었다. 한편 배출공기의 온도는 좌우측 출구 각 10씩 모두 20개 위치에서 측정되었고 각 위치에서의 실시간 측정온도변화는 각각 Fig. 6와 Fig. 7에 표시되었다. 온도변화는 좌우측 모두 최저 약 45°C 에서 최고 약 50°C 정도로서 약 5°C 이내 범위의 편차를 보이고 있다. 좌우측 배출구 각 유동단면에서 볼 때 오른쪽 하단의 중심부 온도가 모두 높게 나타나는데 이는 공기가 충돌제트(impinging jet) 현상과 유사하게 수직상단에서 유입되어 열교환기를 거친 후 좌우로 연결된 배출구로 갈라지는 유동현상에 기인한 것으로 판단된다. 결과적으로 Table 2에 정리된 바와 같이 식 (3)에 따른 평균온도는 각각 좌측 49.91 , 우측 49.26°C 로 계산되고 따라서 공기의 유출입 평균온도 차이 ΔT_m 는 각각 좌측 20.22°C , 우측 19.57°C 로 얻어지고 있다. Fig. 8은 1시간의 측정시간동안 공기의 평균온도 변화를 나타낸 것이다.

위에서 측정 계산된 값들과 공기의 정압비열 $C_p=1.008\text{kJ}/\text{kgK}$, 밀도 $\rho=1.0909\text{kg}/\text{m}^3$ 을 식 (1)에 대입하여 실험에 사용된 대형 전기 온풍기의 열출력 즉 공기로의 열전달률을 계산하면 좌측 10.27kW , 우측 9.94kW 로서 총 열출력 q_{total} 은 20.21kW 로 평가된다. 한편 에너지의 소요입력 대비 출력에 따른 열효율을 산정하기 위해서 온풍기에 공급된 입력전력이 동시에 측정되었으며, 이에 따라 입력전력은 Fig. 9과 같이 전기히터에 공급된 교류전력이 Watt Transducer를

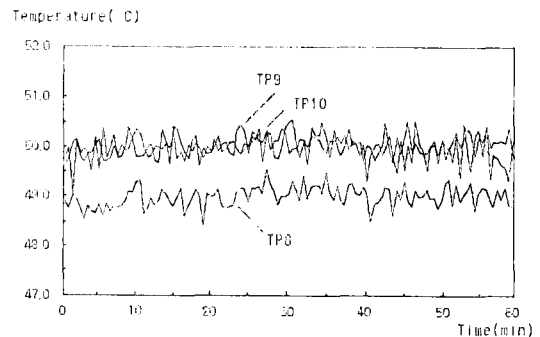
통한 볼트(V) 단위로서 연속적으로 측정되었고 여기에 별도 측정된 송풍기 구동전력이 합산되었다. 측정된 전기히터 센서신호는 평균 2.716V 이며 환산된 전력은 20.79kW 에 해당된다. 여기에 송풍기 구동에 공급된 전력 1.0kW 를 합하면 전기온풍기에 공급된 총 입력전력은 21.79kW 로서 계



(a) Test points on the horizontal line

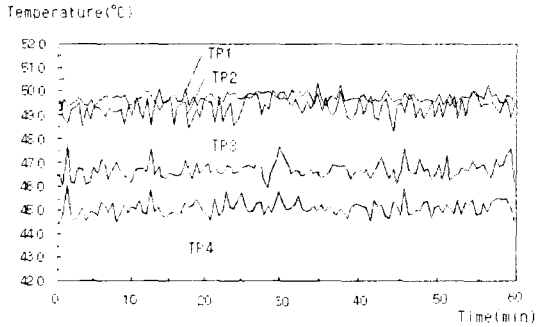


(b) Test points on the upper vertical line

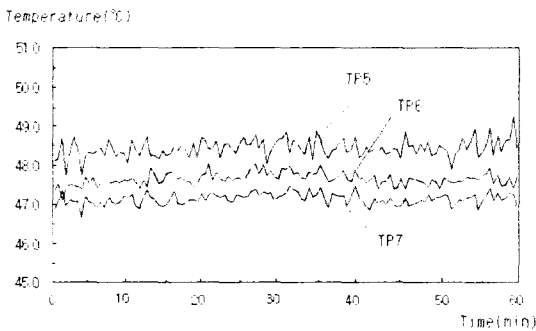


(c) Test points on the lower vertical line

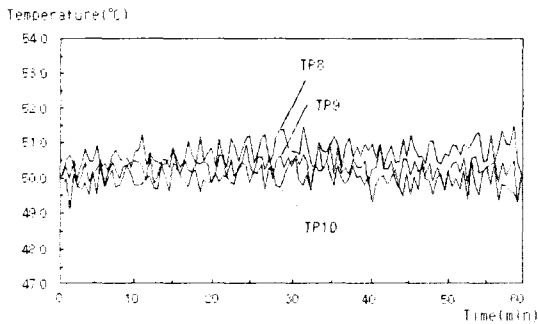
Fig. 6 Transient of the left side outlet air temperature at test points



(a) Test points on the horizontal line



(b) Test points on the upper vertical line



(c) Test points on the lower vertical line

Fig. 7 Transient of the right side outlet air temperature at test points

산된다. 따라서 최종적으로 실험대상 온풍기의 열적 성능을 표시하는 열효율은 92.75%로서 평가될 수 있으며 약 7% 정도의 열에너지가 온풍기 본체표면을 통해 손실되는 것으로 판단된다. 추가적으로 단열향상을 통한 열손실의 감소문제는 본 논문의 연구목적에서 벗어남을 언급하고자 한다.

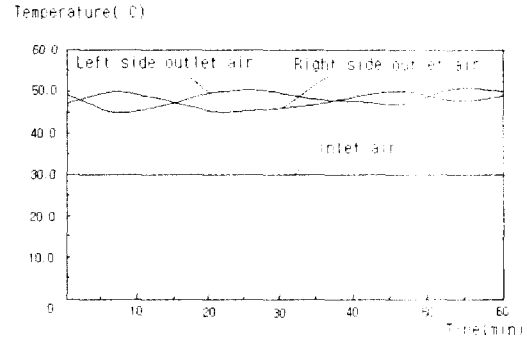


Fig. 8 Transient of the mean air temperature at the inlet and outlet flow cross-sections

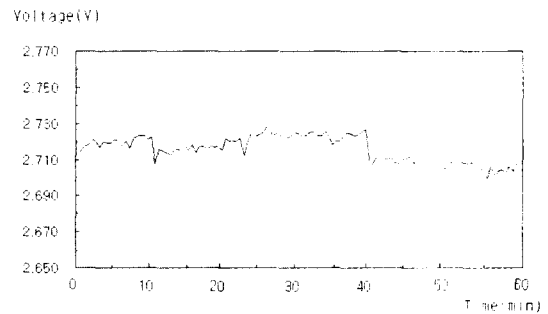


Fig. 9 Transient of the electrical power input's sensor signal

5. 결론

이 연구에서는 대형 전기온풍기의 정상상태 열적 성능평가를 실험적으로 수행하였으며 실험대상 온풍기는 열적 성능평가에 영향을 미치는 요소들인 공기온도, 유량, 유속 및 입력 전력의 측정장치와 자료획득시스템으로 구성된 실험장치를 통해 이루어졌고 적절한 측정방법과 이와 관련된 자료획득방법을 실험적으로 연구하여 열적 성능의 평가 및 정밀계측 방법을 제시하였다. 실험대상 온풍기는 평균온도 29.69°C의 공기를 0.4620 m³/s의 유량으로 흡입하고 좌우측 배출구를 통해 좌측 평균온도 49.91°C, 우측 평균온도 49.26°C로 약 20°C 정도 공기를 가열시켜 평균유속 6.624m/s로서 배출하는 것으로 정밀하게 측정되었으며 이에 따른 열출력은 20.21 kW로 계산되었다. 측정된 입력전력은 21.79kW이므로 따라서 본 온풍기의 열적 성능은 열효율 92.75%로서 평가되었다.

Table 2 Summary of the measured temperature and flow velocity at test points

Test Point Number	Inlet Air Temperature (Time Average, °C)	Left Side Outlet Air Temperature (Time Average, °C)	Right Side Outlet Air Temperature (Time Average, °C)	Outlet Flow Velocity (Time Average, m/s)
1	29.40	49.73	48.83	7.17
2	29.93	49.31	47.99	6.56
3	29.62	46.68	47.24	7.19
4	29.73	45.07	47.81	6.64
5	29.76	48.43	46.81	7.32
6		47.13	45.71	6.82
7		47.65	45.34	6.28
8		50.74	48.99	7.24
9		50.30	50.02	6.75
10		49.96	50.02	6.19

참고 문헌

- (1) 최동호, 양창남, 양정훈, "심야전력을 이용한 축열식 전기 온풍기의 난방특성에 관한 연구", 대한건축학회 논문집 계획계, 제15권 제11호, pp. 235~244, 1999.
- (2) 김문기, 남상운, 서원명, 윤용철, 이석건, 이현우, 농업시설 공학, 향문사, 2000.
- (3) A.K. Kar and K.M. Al-Dossary, "Thermal performances of water heaters in series", Applied Energy, Vol. 52, pp. 47~53, 1995.
- (4) H.P. Garg, G. Datta, and A.K. Bhargava, "Performance studies on a finned-air heater", Energy, Vol. 14, No. 2, pp. 87~92, 1989.
- (5) B.F. Parker, M.R. Lindley, D.G. Colliver, and W.E. Murphy, "Thermal performance of three solar air heaters", Solar Energy, Vol. 51, No. 6, pp. 467~479, 1993.
- (6) 홍성오, "접촉 센서를 이용한 CNC 선반 열변형에 따른 위치오차 개선에 관한 연구", 한국공작기계학회논문집, Vol. 11, No. 4, pp. 102~106, 2002.
- (7) 이정환, 이기백, 조동현, 이종선, "경사열사이폰의 절삭유 냉각성능에 관한 연구", 한국공작기계학회논문집, Vol. 11, No. 5, pp. 38~44, 2002.
- (8) J.P. Holman, Experimental methods for engineers, 7th Ed., McGraw-Hill, pp. 287~354, 2001.
- (9) H.S. Bean, Fluid Meters: Their Theory and Application, 6th Ed., American Society of Mechanical Engineers, 1971.
- (10) Practical temperature measurements, Hewlett Packard Application Note 290, USA, 1980.
- (11) F.P. Incropera and D.P. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th Ed., John Wiley & Sons, 1996.
- (12) R.S. Figliola and D.E. Beasley, Theory and Design for Mechanical Measurements, John Wiley & Sons, pp. 442~444, 1995.
- (13) R. Jorgensen, Fan Engineering, 7th Ed., Buffalo Forge Company, pp. 73~77, 1976.
- (14) R.S. Curl, Analyzing field measurements: Air conditioning & Heating, 2nd Ed., The Fairmont Press, Lilburn USA, pp. 134~142, 1997.