

공기압축기 소비에너지 평가에 관한 연구

A Study on the Evaluation of Energy Consumption of the Air Compressor

장지성^{1*}

Ji Seong Jang^{1*}

Received: 13 May 2020, Accepted: 19 May 2020

Key Words : Energy Consumption of Compressor(압축기 소비에너지), Regular Diagnosis(정기적 진단), Optimal Efficiency Driving(최적효율 구동), Low Cost Evaluation Method(저비용 평가기술)

Abstract: Various efforts have been initiated to reduce the energy consumption of the compressor as it is one of the approaches to saving a large portion of the fixed cost of the production site. Various results of reducing the energy consumption of the compressor have been reported, but to reduce the energy consumption of the compressors fundamentally, regular management of the compressor should ensure optimum operation. This requires periodic on-site visits by experts, but is often overlooked as a cost issue, resulting in the use of the compressor in low-efficiency conditions. Thus, it is necessary to develop a low-cost evaluation technology for compressor condition monitoring and efficiency analysis to ensure that the compressor is always driven at the optimum efficiency without imposing undue burden on the compressor user. In this study, a sensor was installed at the inlet, outlet, and power supply of the compressor, and a method for evaluating the energy consumption of the compressor using the minimum sensor was derived. The experimental results are presented to show the validity of the proposed method. It was confirmed that the energy consumption of the compressor can be easily as well as efficiently evaluated by using the method developed in this study.

1. 서 론

공기압축기는 압축공기를 생산하는 핵심설비로서 제조업 현장 전력 소비량의 상당한 부분을 차지하고 있는 것으로 알려져 있다.^{1,2)} 그러므로 공기압축기의 소비전력 절감은 기업 입장에서 고정비용의 큰 부분을 절감할 수 있는 방법 중의 하나로 인식되어 압축기의 소비에너지를 절감하는 다양한 노력이 지속적으로 실시되고 있다.³⁻⁷⁾ 이러한 노력의 결과 압축기의 소비에너지 절감에 대한 다양한 연구결과

가 보고되고 있다.⁸⁾ 그러나 압축기 소비에너지를 근본적으로 절감하기 위해서는 압축기의 유지보수, 정기적인 관리 등을 통해 압축기가 최적의 상태로 구동될 수 있도록 해야 한다. 이를 위해서는 전문가의 정기적 현장방문을 통한 구동상태 진단이 필요하지만 비용적인 문제로 이를 간과하는 경우가 많으므로 압축기가 최적의 효율로 사용되지 못하거나 저효율 상태로 사용되는 문제가 발생하고 있다. 따라서 압축기가 항상 최적의 상태로 구동될 수 있도록 압축기의 상태 모니터링 및 효율 분석 등이 압축기 사용자의 큰 부담 없이 가능한 저비용 평가 기술개발이 필요하다.

본 연구에서는 압축기 입·출구측과 전력공급부에 압력센서와 온도센서, 유량센서 및 전력계를 설치하고 설치한 센서 중 최소한의 센서를 이용하여 압축기 소비에너지 평가가 가능한 방법을 도출하였다. 본

* Corresponding author: jangjs@pknu.ac.kr

1 Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, Busan 48547, Korea

Copyright © 2020, KSFC

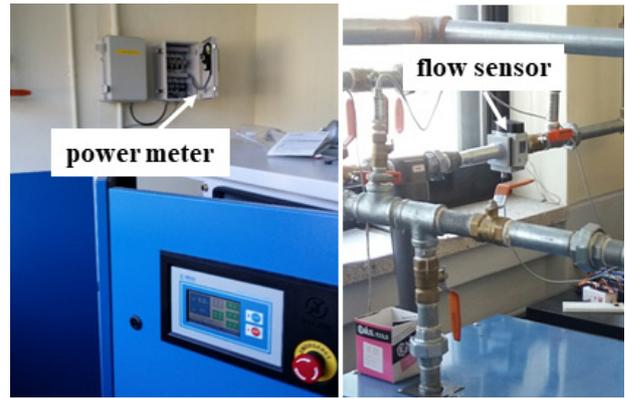
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연구에서 개발한 압축기 소비에너지 평가 방법의 유효성은 실험을 통하여 평가하였고, 본 연구에서 개발한 방법을 이용하면 압축기 소비에너지를 용이하게 평가할 수 있음을 확인하였다.

2. 실험장치

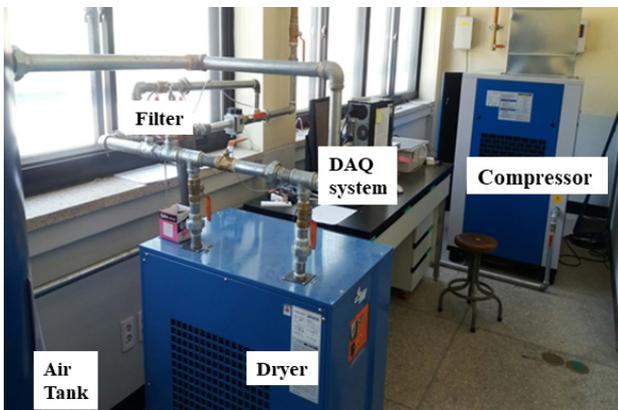
Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 구성을 나타낸다.

Fig. 1의 (a)~(d)에 나타낸 바와 같이 압축기의 공기 흡입부와 토출부에 공기의 온도 및 압력을 계측하기 위한 온도센서(흡입부 및 토출부: PT100)와 압

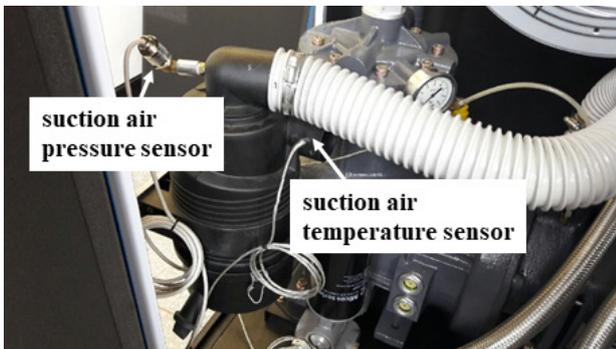


(d) Power and flow sensor

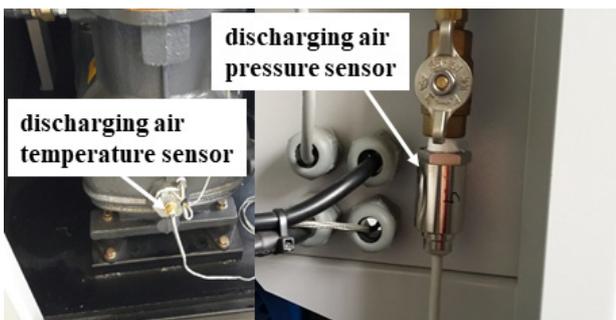
Fig. 1 Experimental apparatus



(a) Configuration

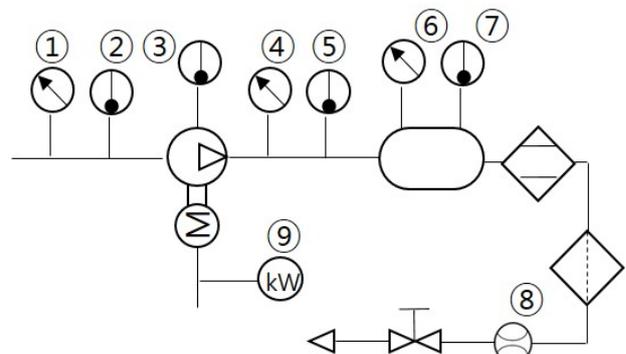


(b) Sensor in air suction of compressor



(c) Sensor in air discharging of compressor

력센서(흡입부: SMC, PSE563-02, 토출부: SMC, PSE560-01)를 설치하였다. Fig. 1에 나타내지는 않았지만 공기탱크 내부 압력계측을 위한 압력센서(SMC, PSE560-01)와 공기탱크 내부 온도와 압축기 표면온도 계측을 위한 온도센서(PT100Ω)를 공기탱크 및 압축기 상부에 각각 설치하였다. 압축기 토출유량은 압축기 토출부측에 설치한 유량센서(Festo, SFAM-62-5000L)를 이용하여 계측하였다. 압축기 구동에 사용된 소비전력은 압축기 입력전력단자에 전력계(Light star, KDY-A)를 설치하여 계측하였다. Fig. 2는 Fig. 1에 나타낸 실험장치의 개략도를 나타낸다.



- ①, ② Pressure and temperature sensor in air suction
- ③ Temperature sensor for compressor surface
- ④, ⑤ Pressure and temperature sensor in air suction
- ⑥, ⑦ Pressure and temperature sensor in air tank
- ⑧ flow sensor, ⑨ Power meter

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1은 실험에 사용한 압축기의 주요 사양을 나타낸다.

Table 1 Compressor specification

discharging pressure	max. 1.1013[MPa]
operating temperature	max. 80[°C]
discharging flow rate	max. 0.055[m ³ /s]
consumption power	max. 22[kW]
volumetric displacement	1.115·10 ⁻³ [m ³ /rev]

3. 소비에너지 평가

흡입압력에서 토출압력까지 폴리트로픽 압축하기 위하여 필요한 에너지는 다음 식으로 나타낼 수 있다. 이하에서 아래첨자 s 는 흡입부, d 는 토출부를 나타내고, 압력은 절대압력, 온도는 절대온도를 나타낸다.

$$E_c = \frac{n}{n-1} \frac{p_s}{\rho_s} \left\{ \left(\frac{p_d}{p_s} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} \quad (1)$$

$$n = \frac{\log(p_d/p_s)}{\log(\rho_d/\rho_s)} \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 E_c 는 압축기 소비에너지[J], n 은 폴리트로픽 지수, p 는 공기압력[Pa], ρ 는 공기밀도[kg/m³]를 나타낸다.

p_s 에서 p_d 까지 압축하기 위한 압축기의 단위시간당 소비에너지의 최소치는 식 (1), (2)와 토출 공기 질량 유량을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_c = \frac{n}{n-1} \dot{m}_d \cdot R \cdot T_s \left\{ \left(\frac{p_d}{p_s} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} \quad (3)$$

$$\dot{m}_d = \rho_d \cdot Q_d \quad (4)$$

식 (3), (4)에서 L_c 는 압축기의 단위시간당 소비에너지의 최소치[W], \dot{m} 는 공기질량유량[kg/s], R 은 기체상수[J/(kg·K)], T 는 공기온도[K]를 각각 나타낸다.

압축기 전효율 η 는 압축기로의 단위시간당 입력에너지 L_i [W]를 이용하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{L_c}{L_i} = \eta_m \cdot \eta_v \quad (5)$$

식 (5)에서 η_v 는 압축기 체적효율, η_m 은 압축기 기계효율을 나타낸다.

식 (5)에 나타난 압축기의 실제 소비에너지를 의미하는 L_i 는 전력계를 Fig. 2의 ⑨와 같이 설치하여 측정할 수 있다. 또한, 압축기 입·출구부에 설치한 압력 센서(Fig. 2 ①, ④)와 온도센서(Fig. 2 ②, ⑤) 및 유량 센서(Fig. 2 ⑧)로부터 측정한 데이터를 식 (3)에 적용하여 단위시간당 소비에너지를 계산한 후 식 (5)를 이용하면 압축기 전효율 η 를 확인할 수 있다.

압축기의 전효율은 유량계를 사용하지 않으면 다음과 같이 평가할 수 있다.

식 (6)은 압축기 흡입유량을 나타낸다.

$$\dot{m}_s = \rho_s \cdot V_{th} \cdot N = \dot{m}_d / \eta_v \quad (6)$$

식 (6)에서 V_{th} 는 압축기 행정용적[m³/rev], N 은 압축기 회전수[rev/s]를 나타낸다.

압축기 흡입유량을 이용하면 압축기 소비에너지를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{c1} = \frac{n}{n-1} \eta_{v1} \cdot \dot{m}_s \cdot R \cdot T_s \left\{ \left(\frac{p_d}{p_s} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} \quad (7)$$

$$\eta_{v1} = f_1(p_s, p_d, T_s, T_d) \quad (8)$$

$$\eta_1 = \frac{L_{c1}}{L_i} \quad (9)$$

식 (7)~(9)에서 L_{c1} 은 유량계를 사용하지 않고 평가한 압축기의 단위시간당 소비에너지의 최소치[W], f_1 은 식 (6)을 이용하여 도출한 체적효율 η_v 를 압축기 입·출구부 압력 및 온도 데이터를 이용하여 피팅한 함수를 나타낸다. η_{v1} 은 f_1 을 이용하여 추정된 체적효율을 나타낸다. η_1 은 유량계를 사용하지 않고 평가한 압축기의 전효율을 나타낸다.

유량계와 전력계를 모두 사용하지 않는다면 압축기 소비에너지를 다음과 같이 평가할 수 있다.

$$L_{i2} = f_2(p_s, p_d, T_s, T_d) \quad (10)$$

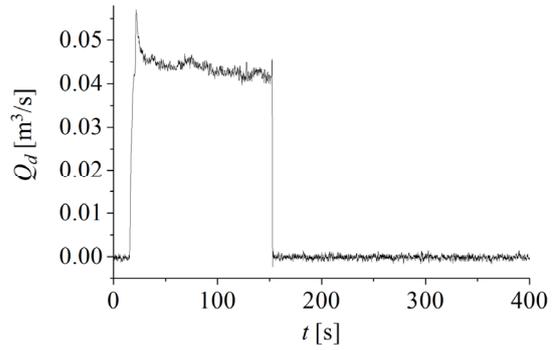
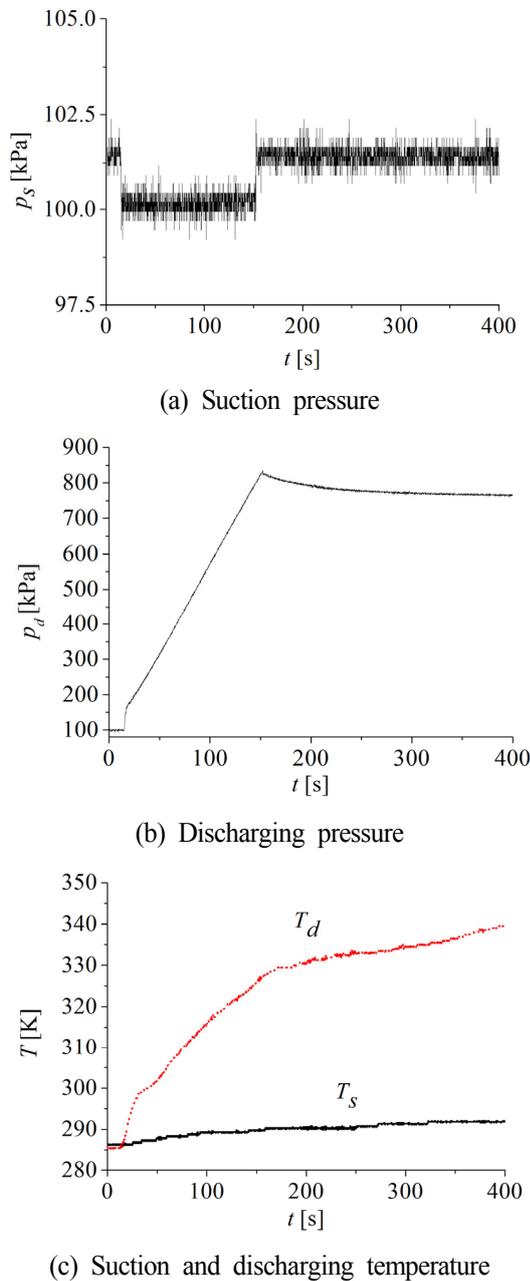
$$\eta_2 = \frac{L_{c1}}{L_{i2}} \quad (11)$$

식 (10)에서 f_2 는 압축기로의 단위시간당 입력에너지 L_{i2} 를 압축기 입·출구부 압력 및 온도 데이터를 이용하여 피팅한 함수를 나타내고, η_2 는 L_{i2} 를 이용하여

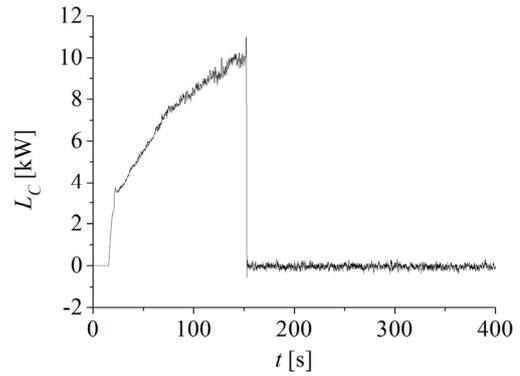
추정한 전효율을 나타낸다. 식 (10)에 나타낸 L_{i2} 는 유량센서와 전력계를 사용하지 않고 f_2 를 이용하여 평가한 압축기로의 단위시간당 입력에너지[W]로서 압축기의 실제 단위시간당 소비에너지의 추정치를 나타낸다.

4. 실험결과 및 고찰

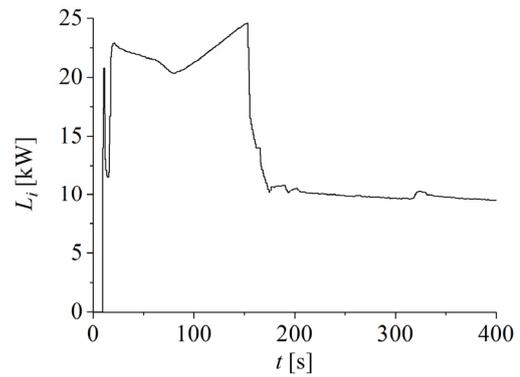
Fig. 3은 압축기 실험결과의 일부를 나타낸다. 실험에 사용한 압축기는 토출압력의 상한치를 801.315 [kPa]로 설정했으므로 토출압력이 상한치에 도달하면 무부하 운전으로 전환된다.



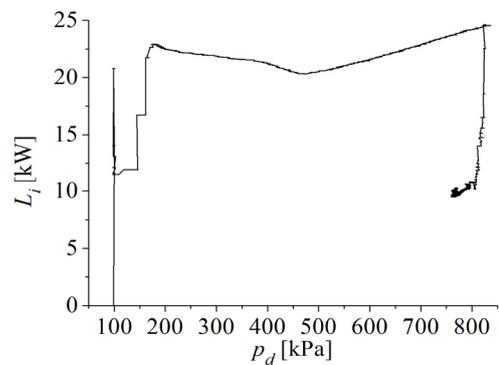
(d) Discharging flow-rates



(e) Minimum value of energy consumed per unit time



(f) Total consumption energy per unit time



(g) Relationship between total consumption energy per unit time and discharge pressure

Fig. 3 Example of compressor operation data

Fig. 3에서 (a)와 (b)는 압축기의 흡입압력과 토출압력 계측결과를 나타낸다. 실험에 사용한 압축기는 토출압력의 상한치를 801.315[kPa]로 설정하였다. 그러므로 토출압력이 상한치에 도달하면 무부하 운전으로 전환되어 흡입압력과 토출압력이 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. (c)는 흡입온도와 토출온도 계측결과를 나타낸다. (c)의 결과에서는 압축기가 무부하 운전으로 전환되어도 흡입온도와 토출온도가 상승하는 것을 알 수 있는데 이러한 현상은 압축기 내부 공기가 주변 공기와의 열평형상태에 도달하지 않았기 때문으로 판단된다. (d)는 토출유량 계측결과를 나타내고, 토출압력 상승에 따라 토출 공기량이 감소하다가 압축기가 무부하 운전으로 전환되면 토출 공기가 0이 됨을 알 수 있다. (e)는 (a)~(d)의 데이터와 식 (3)을 이용하여 도출한 단위시간당 소비에너지의 최소치를 나타내고, 토출압력 증가에 따라 증가하다가 압축기가 무부하 운전으로 전환되면 0이 됨을 알 수 있다. (f)는 전력계를 이용하여 단위시간당 입력에너지에 해당하는 소비전력을 계측한 결과를 나타낸다. Fig. 3의 (g)는 소비전력과 압축기 토출압력과의 관계를 나타낸다. (g)로부터 구동 초기에 소비전력이 급격히 증가하다가 토출압력이 약 200[kPa]에 도달하면 소비전력이 20[kW]에서 23[kW] 사이에서 변화하고, 토출압력의 상한치에 도달하면 무부하 운전으로 전환되어 소비전력이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이하에서는 구동 초기에 소비전력이 급격히 증가하는 구간을 시동구간, 토출압력이 약 200[kPa]에 도달한 이후에 무부하 운전으로 전환되기 이전 구간을 부하운전구간으로 정의한다.

일반적으로 압축기를 사용할 때에는 작업이 완전히 종료할 때까지 지속적으로 구동되며 작업 종료 후 운전이 중단되었다가 다음 작업 개시 일에 운전이 재개될 때까지는 Fig. 3의 (f), (g)에서 나타낸 시동구간이 재현되지 않는다. 또한, 무부하운전 구간에 진입하면 Fig. 3의 (f)에 나타낸 바와 같이 거의 일정한 전력이 소비된다. 그러므로 이하에서는 압축기의 부하운전 구간을 대상으로 고찰을 진행한다.

Fig. 4는 유량센서를 이용한 토출유량 계측결과와 식 (4), (6)을 이용하여 분석한 압축기의 체적효율을 나타낸다. 실험에 사용한 압축기의 회전수는 3550 [rpm]이다. 그림에서 점선은 실험결과를 나타내고, 실선은 실험결과를 피팅한 함수 f_1 을 나타낸다.

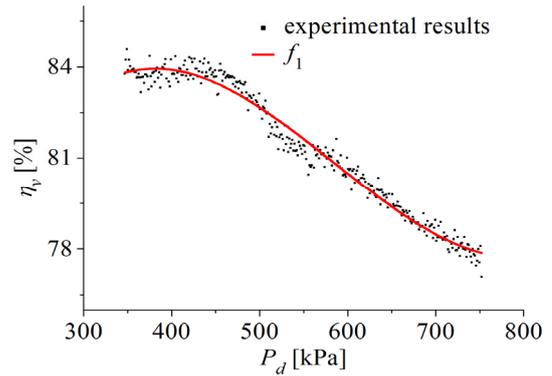
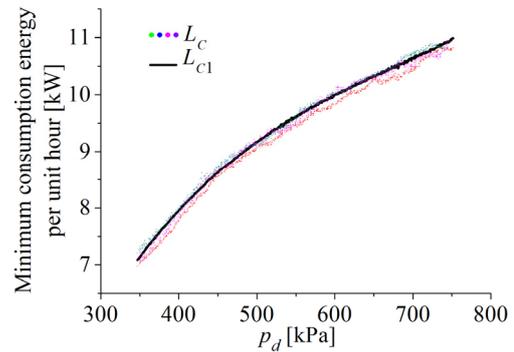
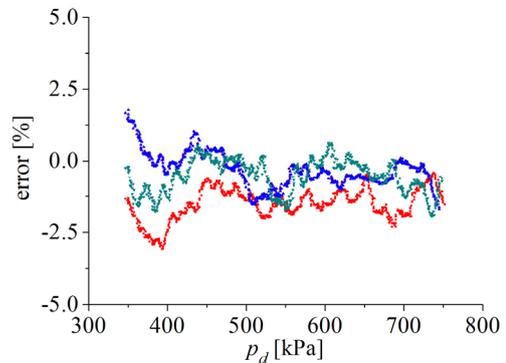


Fig. 4 Measurement and fitting results of volumetric efficiency

식 (8)에서 f_1 은 입·출구부 압력 및 온도 데이터의 함수로 정의하였으나 Fig. 3의 (a)~(c) 및 (e)에 나타낸 바와 같이 압축기 구동동력이 변하여도 흡입압력은 부하운전구간 및 무부하 운전구간에서 거의 일정하게 유지되고, 흡입 공기 온도와 토출 공기 온도 역시 부하운전구간 및 무부하 운전구간에서 확연한 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 f_1 을 다음과 같이 토출압력의 함수로 도출하였다.



(a) Measurement and estimation results of minimum consumption energy per unit time



(b) Estimation error of minimum consumption energy per unit time $([(L_{cl} - L_c)/L_{cl}] \cdot 100)$

Fig. 5 Estimation results of minimum consumption energy per unit time without flow sensor

$$f_1(p_s, p_d, T_s, T_d) = 0.5727 + 1.66839 \cdot 10^{-6} \cdot p_d - 3.24646 \cdot 10^{-12} \cdot p_d^2 + 1.85127 \cdot 10^{-18} \cdot p_d^3 \quad (12)$$

Fig. 5(a)는 압축기에 대한 단위시간당 소비에너지의 최소치 평가 결과이다. 점선은 실험결과, 실선은 식 (12)를 이용한 추정결과를 각각 나타낸다. Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)에 대한 오차평가 결과를 낸다.

Fig. 5로부터 유량계를 사용하지 않아도 압축기의 단위시간당 소비에너지의 최소치를 ±3[%]이내의 오차로 추정할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 전력계를 이용한 압축기로의 단위시간당 입력에너지 계측결과와 이를 추정하기 위한 피팅 함수 f_2 를 나타낸다.

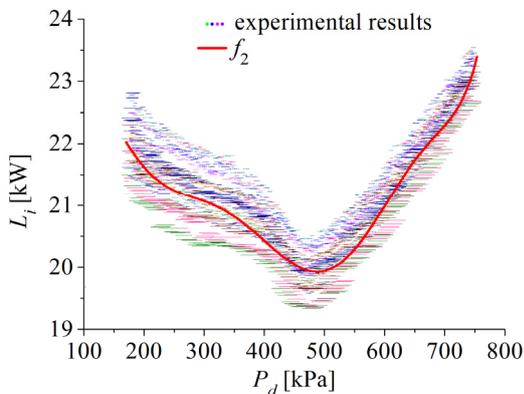


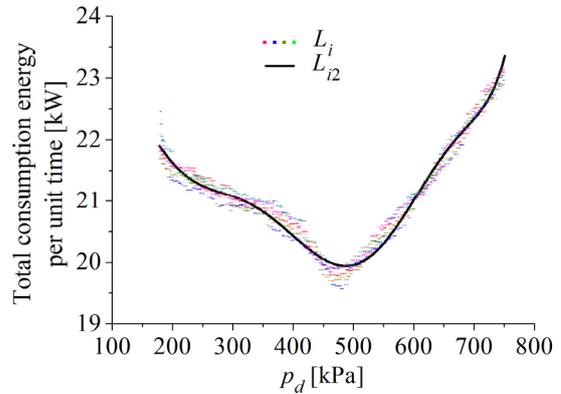
Fig. 6 Measurement and fitting results of total efficiency

그림에서 점선은 실험결과이고, 실선은 f_2 를 이용한 결과를 나타낸다. 식 (10)에서 f_2 는 입·출구부 압력 및 온도의 함수로 정의하였으나 전술한바와 같이 입·출구부 온도 및 입구부 압력은 Fig. 6에 나타난 결과와 상관관계가 작았다. 그러므로 본 논문에서는 f_2 를 식 (13)과 같이 토출압력의 함수로 도출하였다.

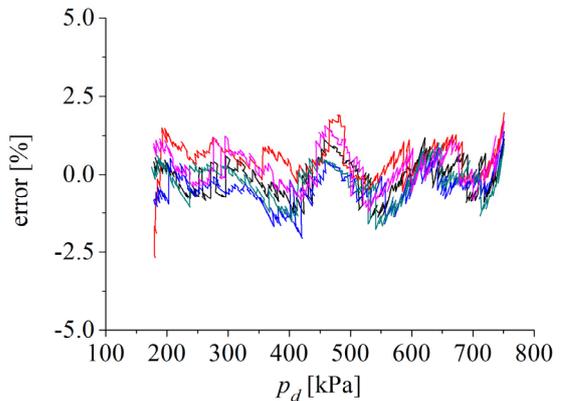
$$f_2(p_s, p_d, T_s, T_d) = 5429.01325 + 0.4633 \cdot p_d - 4.77193 \cdot 10^{-6} \cdot p_d^2 + 2.44207 \cdot 10^{-11} \cdot p_d^3 - 6.90521 \cdot 10^{-17} \cdot p_d^4 + 1.09064 \cdot 10^{-22} \cdot p_d^5 - 8.98595 \cdot 10^{-29} \cdot p_d^6 + 3.00586 \cdot 10^{-35} \cdot p_d^7 \quad (13)$$

Fig. 7은 압축기로의 단위시간당 입력에너지 평가 결과를 나타낸다. Fig. 7(a)에서 점선은 압축기 계측 결과를 이용한 실험결과, 실선은 식 (13)을 이용한 추정결과를 각각 나타낸다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)를 이용한 오차평가 결과를 나타내고, 유량센서와 전력계,

입·출구부 온도 및 입구부 압력 센서를 사용하지 않아도 압축기로의 단위시간당 입력에너지를 ±2.5[%]이내의 오차로 추정할 수 있음을 알 수 있다.



(a) Measurement and estimation results of total consumption energy per unit time



(b) Estimation error of total consumption energy per unit time $([(L_{i2} - L_i)/L_{i2}] \cdot 100)$

Fig. 7 Estimation results of total consumption energy per unit time without flow sensor and power meter

5. 결 론

본 논문에서는 압축기 사용자의 큰 비용 부담 없이 압축기 소비에너지 평가가 가능한 저비용 평가 기술을 개발하였다. 본 논문에서 얻어진 성과는 다음과 같다.

(1) 압축기 성능 평가를 위한 데이터를 토대로 압축기 토출 공기 압력을 변수로 하는 체적효율 및 압축기 단위시간당 소비에너지의 최소치 추정 함수를 도출하였고, 도출한 함수를 이용하면 유량센서를 사용하지 않아도 압축기 단위시간당 소비에너지의 최소치를 ±3[%]이내의 오차로 추정할 수 있음을 알 수 있었다.

(2) 압축기 토출 공기 압력을 변수로 하는 압축기 로의 단위시간당 입력에너지 추정 함수를 도출하였고, 본 논문에서 제시한 방법을 이용하면 유량센서와 전력계, 입·출구부 온도 및 입구부 압력 센서를 사용하지 않아도 압축기로의 단위시간당 입력에너지를 $\pm 2.5\%$ 이내의 오차로 추정할 수 있을 알 수 있었다.

본 논문에서 얻어진 성과를 활용하면 압축기 출구부 압력센서 만을 사용하여 압축기 소비 동력에 대한 평가가 가능하다. 이 때, 압축기 출구부 압력센서는 기본적으로 압축기에 장착되어 있으므로 본 논문에서 제시한 방법을 사용하면 센서를 추가적으로 장착하지 않아도 압축기 소비에너지 평가가 가능하여 소비에너지 평가 시에 압축기 사용자의 부담이 거의 없을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) T. Takahashi, "Energy Saving for Pneumatic Systems", Journal of the Japan Hydraulics and Pneumatics Society, Vol.27, No.3, pp.362-365, 1996.
- 2) B. H. Kim and J. S. Jang, "Transient Response Analysis of a Control Valve for CO₂ Refrigerant", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.4, pp.11-16, 2018.
- 3) X. Shen and M. Goldfarb, "Energy Saving in Pneumatic Servo Control Utilizing Interchamber Cross-Flow", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.129, pp.303-310, 2007.
- 4) Y. X. Yu, E. J. Jeong and K. K. Ahn, "Review of Energy Saving Technology of Hybrid Construction Machine", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.4, pp.91-100, 2018.
- 5) S. Mousavi, S. Kara and B. Kornfeld, "Energy Efficiency of Compressed Air Systems", Procedia CIRP, 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Vol.15, pp.313-318, 2014.
- 6) D. D. Šešlija et al., "Improving Energy Efficiency in Compressed Air Systems - Practical Experiences", Thermal Science, Vol.20, Suppl.2, pp.S355-S370, 2016.
- 7) J. S. Jang, S. H. Han and S. W. Ji, "Effect of the Suction Air Temperature on the Performance of a Positive Displacement Air Compressor", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol.21, No.2, pp.89-94, 2017.
- 8) C. Aprea, R. Mastrullo and C. Renno, "Determination of the Compressor Optimal Working Conditions", Applied Thermal Engineering, Vol.29, pp.1991-1997, 2009.