

회전기계용 비접촉식 토크 측정법 성능 평가

김영환¹ · 김영호² · 조경래³ · 김의간³ · 도덕희^{3,†}

¹NVH Korea, ²한국선급, ³한국해양대학교 공과대학 기계공학부

Evaluations on Performances of a Non-Contact Torque Measurement Technique for Rotatory Machinery

YEONGHWAN KIM¹, YEONGHO KIM², GYEONGRAE CHO³, UEIKAN KIM³, DEOGHEE DOH^{3,†}

¹NVH Korea, 207-14 Modulehwa saneop-ro, Buk-gu, Ulsan 44246, Korea

²Korean Register, 36 Myeongji ocean city 9-ro, Gangseo-gu, Busan 46762, Korea

³Division of Mechanical Eng., Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea

†Corresponding author :
doh@kmou.ac.kr

Received 3 September, 2018
Revised 12 December, 2018
Accepted 30 December, 2018

Abstract >> Gas compressors are mostly driven by motors. It is important to measure the power of motors to evaluate their power efficiency, because the mechanical loads of gas compressors are always varied. In order to measure the power given to the driving motors, the torque should be measured. Manufacturers of compressors usually use the torque data to calculate the compressors qualities such as power consumption, efficiencies and failures. In general, measurements for the shaft torque of the compressors have been based upon contact types, strain gauges. In the cases of larger compressors, the contact type of strain gauges have several disadvantages such as large size and high cost. In this study, a relatively inexpensive and simple torque sensing technique that is not restricted to shaft diameter is introduced using visualization technique. Particle image velocimetry (PIV) has been adopted to complete non-contact torques measurements for rotating motors. In order to compare the performance of the newly constructed torque measurement technique, torque measurement by a transducer based on MEMS technology has been performed simultaneously during experiments.

Key words : Torque measurements(토크 측정), Non-contact type(비접촉식), PIV(입자 영상유속계), Performance comparison(성능비교)

1. 서 론

가스압축기는 출력축의 부하상태에 따라 가스압축기를 구동하는 모터의 출력토크를 변동시켜 운전

의 안전성능을 저하한다. 또한 가스압축기와 같이 부하변동이 심한 경우, 압축기와 구동모터의 회전축에 진동을 유발시켜 시스템 전체에 불안정성을 야기하게 한다. 이에 대한 대응을 위하여 회전축의 토크

를 실시간으로 측정하여 압축기의 운전부하를 제어할 필요가 있다. 이를 위해서는 회전하고 있는 축에 대한 실시간의 토크 측정이 필요하게 된다. 지금까지 토크는 여러 가지 방식으로 측정되어왔는데, 대부분의 경우 회전축의 비틀림 각 측정을 요하게 된다.

토크측정 방식으로서 일반적으로는 기계적 방식^{1,2)} 또는 광학적 방식³⁾에 의하여 많이 사용되고 있다. 기계식 방식은 주로 스트레인센서로 구성된 미세한 시스템이 회전축에 직접 부착되어 토크를 얻어내는 관 계로 가스압축기 원동기와 같이 커질수록 장비 또한 커지며 무겁고 비싸지는 문제가 있다. 광학적 방식은 신호를 얻어내기 위하여 회전축에 광섬유(optical fiber)가 내장되거나³⁾, 회전축 인근에 광학신호를 얻어내는 장치와 케이블이 설치⁴⁾되어야 하는 복잡한 과정이 필요하다.

한편, 카메라영상을 이용한 미세진동 분석⁵⁾과 음원복원⁶⁾에 관한 연구를 통하여 상기의 단점을 극복하고자 하는 시도가 있다. 이들 연구는 영상으로부터 진동분석을 통하여 진동원의 특성을 분석하는 응용 사례로서 측정대상을 향하여 카메라를 설치하기만 하면 비접촉식으로 원하는 물리량을 제공한다는 관점에서 접촉식보다 매우 실용적 의미가 있다.

본 연구에서는 이와 같이 카메라 영상을 이용하여 가스압축기와 같은 회전기기의 회전축 토크를 실시간으로 측정할 수 있는 기법을 개발하여 이의 성능을 평가하는 것을 연구의 목적으로 삼고자 한다.

2. 토크 측정

2.1 토크 측정 이론

본 논문은 축계에 가해지는 토크를 가시화로 측정해내는 것에 있다. 따라서 가시화로 얻어낼 수 있는 물리량인 각도(θ) 변위를 가지는 수식을 필요로 하게 된다. 축에 토크가 가해지면 축이 회전하면서 회전 축 중심과 회전 축 표면상의 비틀림 각도가 생기게 되는데 이를 나타낸 것이 Fig. 1이다.

축이 회전하지 않을 때는 축의 양 끝 단의 질점 a와

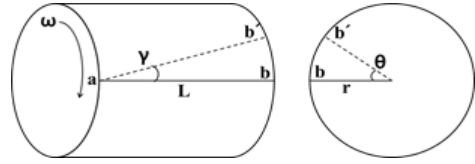


Fig. 1. Torsional angle diagram

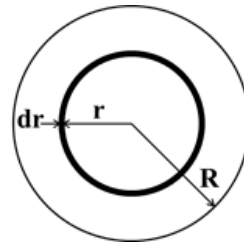


Fig. 2. Relation of ring radius

b는 같은 선상에 있지만, 축이 회전을 시작하면 축의 강성에 따라 축이 비틀어지면서 질점 a가 질점 b보다 앞서 움직이게 된다. 따라서 축이 비틀어진 만큼 질점 b가 b'로 변하게 된다. 이때 두 질점 b와 b' 사이의 각도를 비틀림 각(θ)로 표시한다.

축의 비틀림 각은 다음과 같이 산출된다. Fig. 1의 두 선 ab와 ab' 사이의 각을 γ 로 둔다면 호 bb'는 축의 길이 L과 γ 의 관계로 나타낼 수 있다. 또는 같은 호의 길이를 원의 반지름 r과 θ 의 관계로도 나타낼 수 있으며 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$\text{Arc length } bb' = L\gamma = r\theta \quad (1)$$

전단 변형률과 전단응력과의 비를 사용하여 전단 탄성계수를 구하면 식 (2)와 같다.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2)$$

식 (1)에 식 (2)를 적용하면 전단응력 식 (3)을 구할 수 있다.

$$\tau = \frac{G\theta r}{L} \quad (3)$$

Fig. 2는 기본적인 원형 링의 반지름 r에 전단응력이 가해지고 있는 그림을 나타낸다. 링의 넓이는

식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$dA = 2\pi r dr \tag{4}$$

링의 접하는 전단력을 구하기 위해서 식 (4)에 식 (3)의 전단응력을 적용하여 식 (5)를 도출한다.

$$dF = \tau dA = \tau 2\pi r dr \tag{5}$$

식 (5)의 힘에 길이 r 을 곱하여 링에 가해지는 토크 식 (6)을 구할 수 있게 되며 식 (6)에 식 (3)을 적용하면 축의 비틀림 각과 토크의 관계를 나타내는 식 (7)이 얻어진다.

$$dT = \tau 2\pi r^2 dr \tag{6}$$

$$dT = \frac{G\theta}{L} 2\pi r^3 dr \tag{7}$$

식 (7)을 사용하여 링 전체 단면의 토크를 구한 식은 식 (8)로 나타낼 수 있다. 적분 부분의 2차 관성 모멘트를 J 로 나타내면 식 (9)을 얻게 된다.

$$T = \frac{G\theta}{L} 2\pi \int_0^R r^3 dr \tag{8}$$

$$T = \frac{G\theta}{L} J \tag{9}$$

식 (9)을 통하여 축의 비틀림 각과 토크의 상관관계를 나타낼 수 있으며 전단탄성 계수는 비틀림 강성도(k)와 2차 관성 모멘트(J)의 관계로 나타낼 수 있다.

$$G = \frac{kL}{J} \tag{10}$$

식 (10)을 식 (9)에 적용하면 다음 식 (11)을 얻게 된다.

$$T = k\theta \tag{11}$$

식 (11)은 토크(T)가 비틀림 강성도(k) 그리고 축

비틀림 각도(θ) 두 가지 상수만으로 계산될 수 있음을 시사하며, 일반적으로 축의 강성도는 축 제작단계에서 재료에 따라 결정됨으로 주어진 물성치로 볼 수 있다. 반면에 축의 비틀림 각은 축을 실제로 구동을 해야 알 수 있는 변수이며 비틀림 각만 구한다면 축의 토크를 계산할 수 있게 된다.

위의 토크 식들을 통하여 축에 가해지는 동력을 계산할 수 있다. 축동력은 회전기계의 설계시 값과 안정성 검사시 값과의 차이를 확인하기 위한 필수변수 중 하나이며 토크를 알면 손쉽게 구할 수 있는 변수이다. 토크와 동력의 상관관계는 다음과 같은 식 (12)로 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{2\pi\omega T}{60} \tag{12}$$

2.2 카메라 영상기반 토크 측정

Fig. 3은 카메라 영상기반 회전기계(모터) 토크 측정 장치의 구성을 나타낸다. 측정장치는 두 대의 고속고해상도카메라(Phantom, 20,000 fps)와 호스트컴퓨터로 구성된다. 회전축의 구동원은 DKM 모터사의 9SDD2-60F2 유도전동기를 사용하였다.

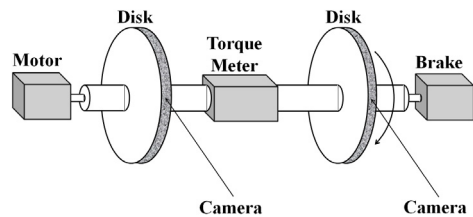


Fig. 3. Measurement system schematic

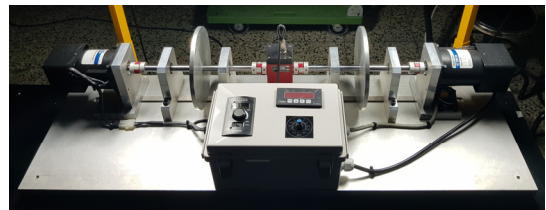


Fig. 4. Photo of the measurement system

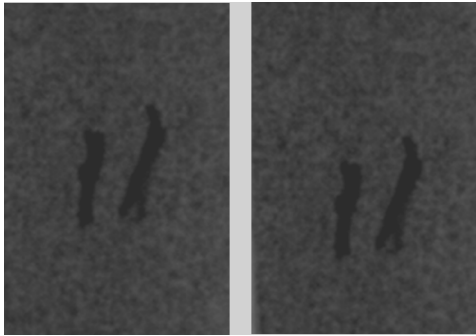


Fig. 5. Random pattern (left camera image, right camera image)

회전축의 지름은 1.5 cm이고, 길이는 40 cm이다. 축의 지름이 작아 축의 비틀림이 관측되지 않는 관계로, 축의 양 끝 단에 지름 12 cm의 원판을 장착하였으며, 이들 원판의 둘레의 영상을 두 대 카메라로 기록하였다. 카메라 영상으로부터 회전축의 비틀림량을 정량화 및 극대화하기 위하여 원판의 둘레에 랜덤패턴(random pattern)을 부착하였다. 본 연구에서는 카메라의 초당 프레임수를 20,000장으로 설정하였고 가시화를 위한 조명에는 LED를 사용하였다.

또한, 회전축 중간에 토크 트랜스듀서를 설치하여 실제 토크 값을 같이 측정하였고, 그 결과를 본 연구에서 구축한 비접촉식 토크 측정 결과와 비교함으로써 그 성능을 평가하였다. 모터의 회전 속도는 RPM의 변동 폭이 최대한 작은 사양을 선택하였다.

구축된 측정장치를 이용하여 토크 측정에 필요한 회전축의 비틀림 각을 얻어내기 위하여, 모터의 회전수를 200 RPM, 300 RPM, 400 RPM, 500 RPM, 600 RPM, 700 RPM, 800 RPM으로 변경하였고, 두 가지의 다른 부하를 회전축에 가하였다. 부하는 Fig. 3과 Fig. 4에 보이는 바와 같이 brake로 조정하였다. 이어서 각각의 회전수(RPM)에서 부하가 걸린 회전축에 설치된 원판상의 패턴에 대한 카메라영상 분석을 통하여 비틀림 각을 정량화하였다.

Fig. 5는 전술한 바의 회전원판 둘레에 부착된 종이 상에 나타난 랜덤패턴에 검은색 페인트로 가늘게 표시한 것을 나타낸다. 스프레이 페인트에서 나오는 페인트는 무작위로 종이에 뿌러지기 때문에 본 실험

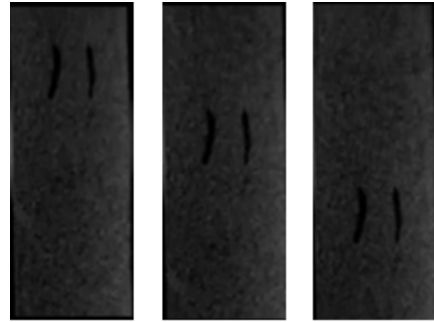


Fig. 6. Images taken at each torsional angle

에 적합 랜덤패턴이 나타난다. 한편, 카메라의 노출 시간은 1 μ s로 설정하였다.

먼저 비틀림 각이 없는 정지된 상태를 촬영하여 프로그램에 패턴을 인식시킨 다음, 축을 천천히 회전시켜 각각의 패턴과 상응하는 각도를 사전에 설정해 두었다(Fig. 6). 이어서 축의 회전에 의하여 변동하는 패턴의 위치와 저장된 패턴의 위치와의 변위 비교로 비틀림 각을 계산하였다. 이와 같은 각 비틀림 각에서의 교정작업(calibration)을 완료한 다음 본 실험을 실시하였다. 유도전동기의 회전수를 200 RPM으로 맞춘 다음 축이 일정한 200 RPM으로 회전 중일 때 부하를 가하여 토크(torque)를 유발시켰다. 토크로 인해 비틀어진 축을 두 대의 고속 카메라로 촬영하였고, 얻어진 영상에 대하여 particle image velocimetry [PIV; 입자영상유속계]기법⁷⁾을 적용함으로써 비틀림 각을 계산하였다. 300 RPM부터 800 RPM까지의 비틀림 각 계산도 동일한 방법으로 수행하였다. 이하는 비틀림 각 계산에 필요한 카메라 영상 간의 이동량(displacement)을 계산하는 PIV 원리를 간략히 기술하였다.

2.3 영상 이동량 계산 원리

본 연구에서는 영상에서의 이동량 계산을 위하여 입자영상유속계(PIV) 원리를 적용하였으며, 계산 알고리즘 중의 하나인 제조치상호상관법⁸⁾을 적용하였다.

제조치상호상관법은 두 시각의 입자상 패턴의 영

상이 이동한 변위량을 정량적으로 계산해 내는 기법 중 하나인데, 다음과 같이 계산하였다. 계조치상호상관법은 시간 연속의 두 영상의 밝기 정보인 계조치 $f(X,Y)$ 와 $g(X,Y)$ 사이에 입자패턴으로부터 이동량 $(\Delta X, \Delta Y)$ 은 다음 식 (13)으로부터 구하였다.

$$CC_{fg}(\Delta X, \Delta Y) = \int_{-N}^N \int_{-N}^N f(X, Y)g(X + \Delta X, Y + \Delta Y) dx dy \quad (13)$$

여기서, X와 Y는 영상의 픽셀좌표를 나타내며, 한편, 계산에 사용되는 데이터는 픽셀(pixel)영상인 관계로 각각의 영상에서 1픽셀 이내에까지 이동량을 계산할 수 있는 sub-pixel 계산법의 하나인 가우시안 보간법⁹⁾을 적용하였다.

3. 토크 측정 결과 및 분석

Table 1과 Table 2는 각각 두 가지 부하(load 1: 10 W, load 2: 15 W)에 있어서의 토크 측정 결과에 대한 비교표를 나타낸다. 즉, Fig. 3의 실험장치에서 회전축 중심부에 설치된 토크 트랜스듀서(torque transducer, Polytech사)로 측정된 토크와 본 연구에서 구축한 비접촉식 토크 측정 시스템으로 측정된 토크를 나타낸다. 결과에서 알 수 있듯이 동일한 회전수에서 부하가 큰 load 2의 경우의 토크 측정 결과가 load 1의 경우에서의 값보다 크게 측정됨을 알 수 있다. 또한,

Table 1. Torque measured by torque transducer and by PIV method for load 1

RPM	Torque-transducer (Nmm)	PIV method (Nmm)	Ratio
200	432.47	395.57	0.91
300	448.16	374.16	0.83
400	471.7	374.17	0.79
500	482.49	493.69	1.02
600	500.14	523.02	1.05
700	542.31	559.11	1.03
800	555.06	533.81	0.96

낮은 RPM에 해당되는 200, 300, 400 RPM에서는 본 연구에서 구축한 비접촉식 토크 측정법(PIV)에 의한 결과가 토크 트랜스듀서의 값보다 전반적으로 낮게 측정되었고, 500 이상의 RPM에서는 거의 동등한 결과를 보였다.

Load 1에서의 최대 오차는 21%였으며 최소 오차는 2%였다. Load 2에서의 최대 오차는 19%이며 최소 오차는 4%로 나타났다. 이상으로부터 얻어진 토크 값을 이용하여 2개의 부하가 걸린 회전축에 가해진 동력을 계산한 결과를 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 한편, 본 연구에서 구축된 토크 측정 시스템의 측정 가능한 최대회전속도는 카메라성능(프레임속도 fps와 밝기)에 의거하는데, 구축된 PIV 측정 알고리즘에 의한 패턴인식 가능한 해상도는 0.5픽셀이다.

두 개의 부하에 있어서 본 연구에서 구축한 비접촉식 토크 측정법(PIV)에 의한 축동력 계산 결과는 토크 트랜스듀서로부터 구한 축동력 계산 결과와 모

Table 2. Torque measured by torque transducer and by PIV method for load 2

RPM	Torque-transducer (Nmm)	PIV method (Nmm)	Ratio
200	519.8	451.82	0.87
300	535.4	435.58	0.81
400	538.4	493.12	0.92
500	567.8	665.21	1.17
600	586.4	613.95	1.05
700	642.3	566.68	0.88
800	730.6	762.84	1.04

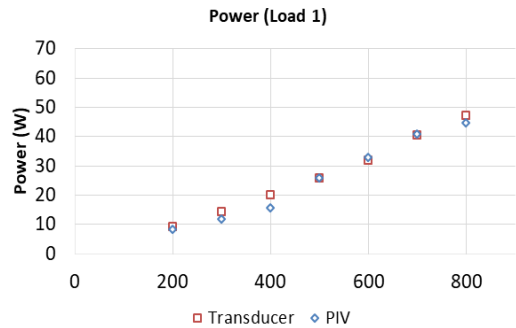


Fig. 7. Power comparison for load 1

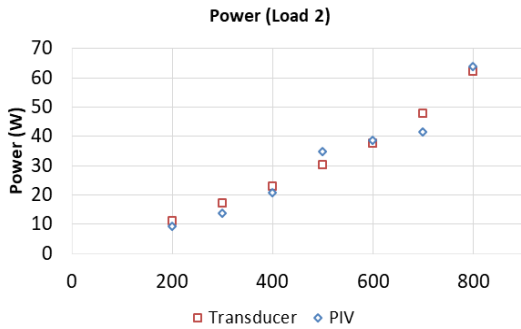


Fig. 8. Power comparison for load 2

든 RPM에 있어서 거의 선형적으로 일치하고 있음을 알 수 있으나, PIV의 결과에서 다소 선형성이 떨어지는 부분이 있는데 이는 회전시스템 전체의 진동에 의한 것으로 파악된다. 전반적으로 같은 경향을 보이는 것으로 보아, 본 연구에서 구현한 비접촉식 토크 측정법(PIV)의 유효성이 있음이 사료된다.

4. 결론

본 논문은 입자영상유속계(PIV) 기술을 이용한 비접촉 회전축계 토크 측정법을 개발하여 이에 대한 성능을 평가하는 내용을 담고 있다. 그 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고속카메라를 이용하여 비접촉식으로 토크 측정 및 회전축의 동력을 추정할 수 있었다.
- 2) 정량적 가시화기술인 PIV를 이용하여 회전축계의 비틀림 각도를 정량적으로 측정할 수 있었다.
- 3) 토크 트랜스듀서와 PIV로 측정한 토크 결과에 대한 비교로부터 낮은 부하(load 1)에서의 평균 오차는 6%이며 높은 부하(load 2)에서의 평균 오차는 4%로 PIV 기법에 의한 토크 측정 신뢰 범위를 확인할 수 있었다.
- 4) 측정된 토크로부터 각 RPM별 회전축의 동력을 구할 수 있었으며, 추정된 동력 또한 5% 정도의 오차를 가지는 것으로 확인하였다.

본 연구에서 구축된 비접촉식 토크 측정법은 향후 가스압축기와 같이 동력변동이 심한 회전축의 동력 추정에도 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 중견연구(No.2017-R1A2B2010603) (2018R1A2B6009387)의 지원으로 수행되었다. 또한, 중소기업 월드클래스 R&D과제(S2415805)와 산업통상자원부 취업특화산업육성기술개발사업(R0006323)과 비즈니스협력형 R&D사업(R0006261)의 지원으로 수행되었다.

References

1. W. Jun and W. Yezheng, "Start-up and Shut-down Operation in a Reciprocating Compressor Refrigeration System with Capillary tubes", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 13, No. 3, 1990, pp. 187-190.
2. P. K. Stein, "Strain Gauge History and the End of the Twentieth Century", *Experimental Techniques*, 2001, pp. 15-16.
3. N. Burgwin, "Development of a Fiber Optic Torque Sensor and a Single Channel, High Precision Optical Strain Measurement Platform", Ms Thesis, Ryerson Univ., 2016.
4. P. L. Swart, A. A. Chtcherbakov, and A. J. van Wyk, "Dual Bragg Grating Sensor for Concurrent Torsion and Temperature Measurement", *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, 2006, pp. 1057-1064.
5. M. G. Jeon, G. R. Cho, K. K. Lee, and D. H. Doh, "A Monitoring System Based on an Artificial Neural Network for Real-Time Diagnosis on Operating Status of Piping System", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 39, No. 2, 2015, pp. 199-206.
6. Z. Zalevsky, Y. Beiderman, I. Margalit, S. Gingold, M. Teicher, V. Mico, and J. Garcia, "Simultaneous Remote Extraction of Multiple Speech Sources and Heart Beats from Secondary Speckles Pattern", *Opt. Express*, Vol. 17, No. 24, 2009, pp. 21566-21580.
7. R. J. Adrian, "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 23, 1991, pp. 261-304.
8. G. R. Cho, "Improvement of Stereoscopic PIV and its Application on the Two Types of Impeller of Multi-blade Fan", PhD. Thesis, Saitama University, 2004, pp. 11-15.
9. F. Scarano, "Iterative Image Deformation Methods in PIV", *Institute of Physics Publishing Meas. Sci. Technol.*, Vol. 13, 2002, pp. R1-R19.