

컴프레서 체결용 볼트의 적정 토크 설정에 관한 연구

공유식 · 김태완*

부경대학교 A⁺LINC 사업단, *부경대학교 기계공학과

A Study on Setting of Torque for Compressor Jointing Bolt

Yu Sik Kong and Tae Wan Kim*[†]

A⁺LINC, Pukyong National University

*Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University

(Received May 17, 2013 ; Revised June 15, 2013 ; Accepted June 19, 2013)

Abstract – When a threaded fastener is tightened, the torque-tension relationship is highly sensitive to two friction components: thread friction and head friction. In this study, we carried out friction experiments and analyses to determine the optimum clamping torque setting for bolt joints. First, we measured the coefficients of thread friction and head friction under the same running conditions of the bolt clamping process for lubricated and non-lubricated bolts. We also measured axial tension through bolt clamping tests using lubricated and non-lubricated bolts attached to a strain gauge. Finally, we compared the experiment and theoretical results.

Keywords – jointing bolt(체결볼트), clamping torque(체결토크)

1. 서 론

일반적으로 볼트의 체결 방법은 각도법과 토크법으로 알려져 있는데 각도법은 체결의 신뢰성은 높으나 너트회전각의 측정 시작점을 결정하기가 어려우며 체결축력은 소성역에 도달해 있어 엔진용이나 건설용 고장력 볼트 등에만 국한되어 사용되고 있으며 토크법은 볼트 축에 발생하는 예장력을 일정하도록 하는 체결방법으로 체결토크만을 일정하게 관리함으로써 쉽게 적용시킬 수 있어 현재 가장 널리 사용되고 있다[1, 2]. 하지만, 이러한 토크법은 예장력의 분산이 큰 결점이며 또한 무급유 체결시에 볼트가 파괴를 일으키거나 또는 적절한 후기 체결력을 유지시키지 못하는 등의 많은 문제점을 일으키고 있다[3-6].

본 연구에서는 컴프레서의 조립에 사용되는 볼트의 적정 토크 설정에 관한 연구를 수행하였다. 현재 컴프레서에 적용되고 있는 볼트의 체결은 무윤활 체결시 볼

트가 파괴를 일으키거나 또는 적절한 후기 체결력을 유지시키지 못하는 등의 많은 문제에 기인하여 불가피하게 오일 도포 방식을 채택하고 있다. 그러나 이러한 볼트 체결을 위한 오일 도포 방식은 조립라인에 오일 도포 공정을 추가해야 함으로 오일 분사 공정에 걸리는 시간과 비용이 상당하고 청정성을 유지해야 할 조립라인의 환경에 악영향을 미치고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 오일 도포 공정을 제거시켜 무윤활 볼트 체결 조건을 설정하고자 한다. 이를 위해 볼트의 체결에 가장 큰 영향을 미치는 볼트와 피체결체의 마찰계수를 실제 볼트를 체결하는 조건과 동일한 조건으로 하여 마찰계수값을 산출하였다. 체결시 실제로 볼트에 작용하는 스트레인 게이지를 부착하여 축력을 측정하였다. 아울러 이론적인 검증을 수행하여 적정 체결토크의 설정을 위한 체결선도를 제시하였다.

2. 체결 토크

체결용 1줄 3각 나사로 된 볼트로 피체결물을 체결

[†]Corresponding author : tw0826@pknu.ac.kr

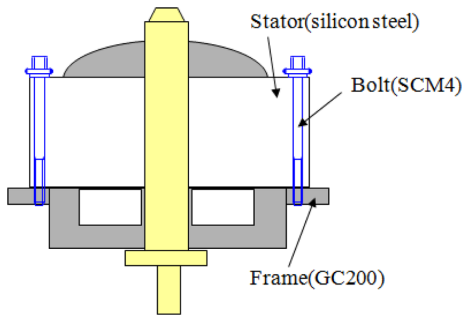


Fig. 1. Compressor jointing bolt.

할 때 볼트의 축력 F_f 를 내기 위한 체결토크 T_f 는 나사면토크 T_s 와 자리면토크 T_w 로 나누어 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$T_f = T_s + T_w = \frac{F_f \left(\frac{P}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha' + \mu_w D_w \right)}{2} \quad (1)$$

여기서, P 는 피치, μ_s 와 μ_w 는 나사면과 자리면의 마찰계수이며 d_2 와 D_w 는 나사면과 자리면의 유효지름, α' 는 나사의 리드각이다.

Fig. 1은 컴프레서 체결에 적용되는 볼트의 개략도를 도시한 것으로 SCM 4 소재의 볼트가 자리부에서는 적층된 규소강판(silicon steel)과 접촉하며 나사부에서는 주철 프레임(GC200)과 접촉되는 상황이다. 따라서 식 (1)에서 보는 바와 같이 적정 체결토크의 설정을 위해서는 마찰계수의 정확한 측정이 선행되어야 한다.

3. 마찰계수 측정

마찰계수의 측정을 위해서 핀-온-디스크(pin-on-disk) 타입의 유압식 마멸시험기를 사용하였고 실험을 위해 볼트는 핀의 형태로 가공하였으며 규소강판과 주철 프레임은 실제 적용되는 부품을 디스크 형태로 절취하여 사용하였다. 마찰계수는 미끄럼 속도에 대해 영향을 받을 것으로 생각되나 본 연구에서는 미끄럼 속도를 모든 경우에 대해 실제 공압식 볼트 체결기의 체결속도로서 0.05 m/s로 설정하였다. 접촉압력은 미지수인 마찰계수의 함수이기 때문에 일정하게 가정할 수 없으므로 다양한 압력조건(6.37-44.56 kg/mm²)으로 윤활 상태와 무윤활 상태에서 각각 실험하였다.

Fig. 2는 볼트와 스테이트(규소강판)의 마찰 실험 결과를 도시한 것으로 무윤활 조건일 때는 초기 마찰계수의 변동 폭이 매우 크며 접촉압력에 따라서도 평균

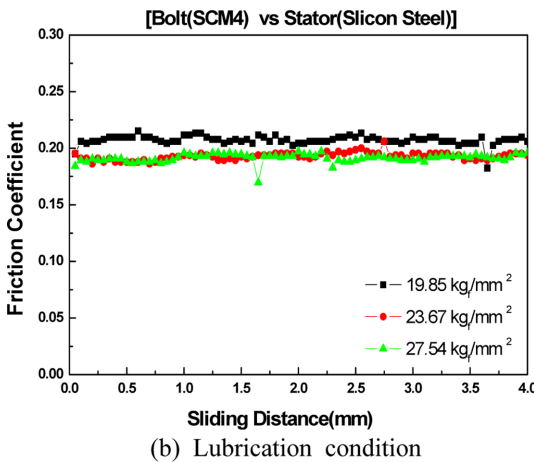
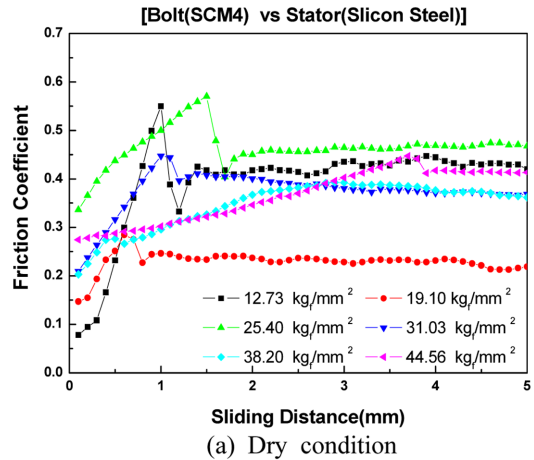


Fig. 2. Friction coefficients for the contact of bolt and stator.

마찰계수의 차이가 크게 나타나고 있음에 반해 윤활 조건일 경우는 접촉압력의 차이에도 거의 일정한 평균 마찰계수를 보임을 알 수 있다.

Fig. 3은 볼트와 주철프레임과의 미끄럼 접촉시의 마찰계수 결과로서, 무윤활 조건일 경우에도 어느 정도의 마찰계수의 변동폭은 있지만 평균마찰계수의 차이가 크게 나타나지 않고 윤활된 경우에서도 무윤활 조건일 때 보다 상대적으로 낮은 마찰계수를 보일 뿐 평균 마찰계수의 편차는 무윤활 조건의 경우와 거의 비슷함을 알 수 있다. Table 1은 Fig. 2와 Fig. 3의 그래프로부터 평균 마찰계수의 범위를 정리한 것으로 무윤활 조건이 윤활 조건보다는 높은 마찰계수를 보이며 특히 볼트 자리부인 스테이트와의 마찰계수는 무윤활시 매우 큰 마찰계수의 산포를 보이고 있음을 알 수 있다.

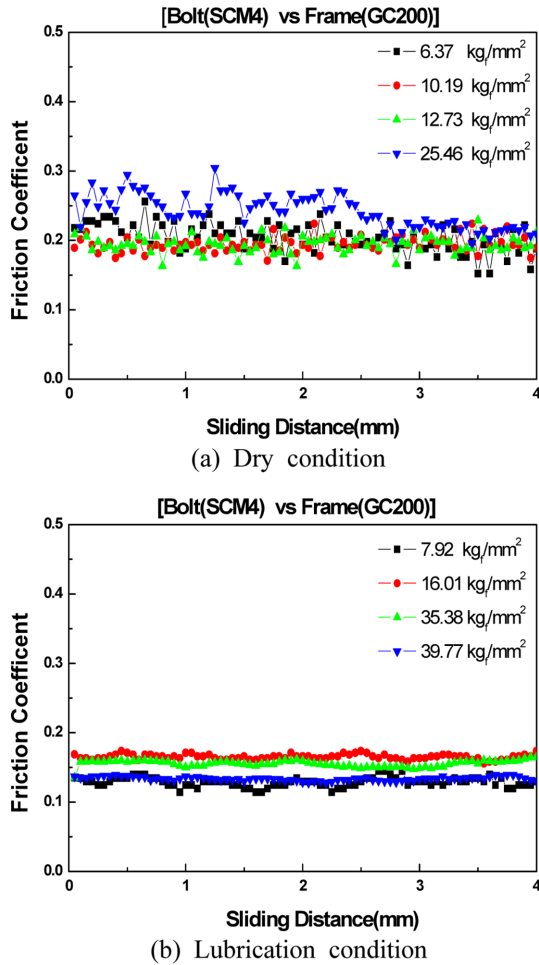


Fig. 3. Friction coefficients for the contact of bolt and frame.

Table 1. Comparisons of friction coefficients

Materials pairs		Dry	Lubrication
Bolt (SCM4)	Stator (Silicon steel)	0.21 - 0.45	0.20 - 0.23
	Frame (GC200)	0.19 - 0.23	0.12 - 0.16

4. 볼트 축력 실험

볼트를 체결하는 동안 볼트의 축부에 걸리는 축력을 측정하기 위하여 Fig. 4와 같이 볼트의 축부(shank)에 180°의 위상차를 두고 스트레인게이지(strain gage)를 부착시키고 볼트의 자리면 아래부분의 축부로부터 볼

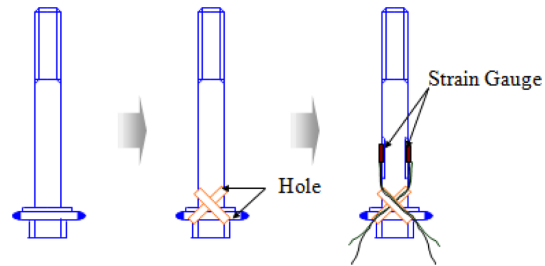
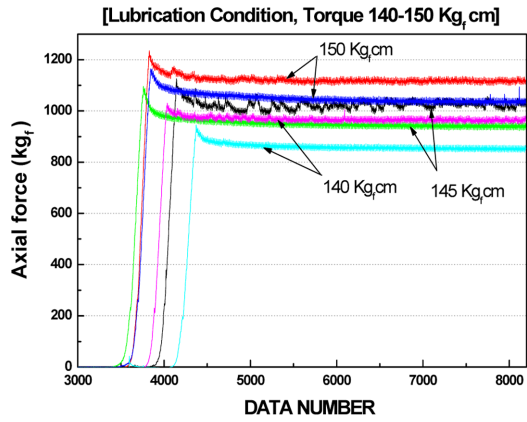


Fig. 4. Attachment of strain gauge on bolt shank.

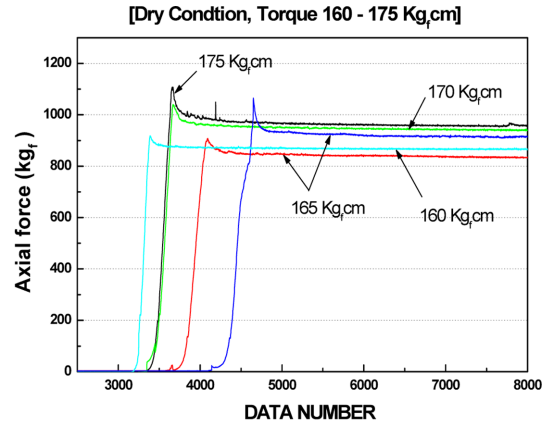
트 헤드부를 사선으로 가로 지르는 미세한 크기의 드릴 구멍을 가공하여 그 구멍 내부로 스트레인게이지 선을 빼내어 측정하였다. 축력 측정방법은 볼트 체결 실험 전, 볼트의 생크부위에 축방향으로 단축 스트레인게이지를 부착시키고 노이즈의 영향을 막기 위해 센서 주위와 홀 주위를 실링(sealing)하였다. 여기서 사용된 볼트 체결기는 공압식 체결기이며 토크 가변형이며 스트레인게이지는 gauge factor가 2.11±1%인 정밀측정용이다. 스트레인게이지를 통해 들어오는 신호는 A/D 컨버터를 통하여 신호를 변환하여 데이터를 획득하였으며 샘플링 주파수는 5 KHz로 하였다. 이러한 방법을 통해 실제 컴프레서의 볼트 체결시 발생하는 축력을 실시간으로 계측할 수 있다.

현재의 윤활조건에서의 체결을 무윤활 조건으로 전환하기 위해서는 무엇보다 동일한 축력의 확보가 전제되어야 한다. 즉, 동일한 체결토크상에서 윤활 조건에서 무윤활 조건으로의 전환은 단지 겉보기 체결 토크치만 동일할 뿐 현저한 축력의 저하를 가져오게 된다. 여기서 체결토크와 체결력의 관계를 나타내는 식 (1)을 살펴보면 동일한 체결토크라 하더라도 무윤활 상태의 마찰계수가 훨씬 크므로 축력의 저하를 가져올 것이라는 것을 쉽게 알 수 있다.

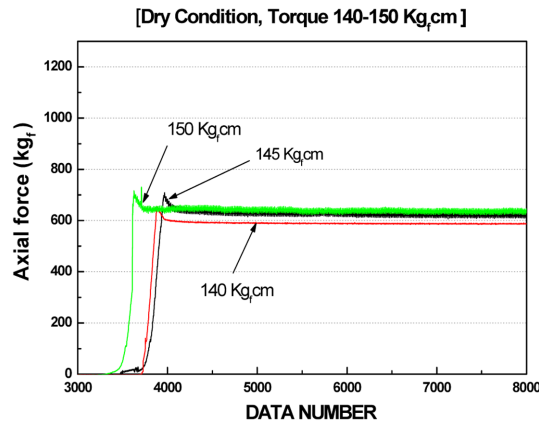
이러한 사실을 검증하기 위해 현재 컴프레서 조립라인에서 적용되고 있는 140 kg_r·cm에서 150 kg_r·cm의 체결토크하에서 윤활상태와 무윤활 상태의 체결축력 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 체결 축력의 그래프에서 체결직후 2-3초이내의 짧은 시간내에 최대 축력으로부터 적게는 50 kg_r에서 많게는 100 kg_r 정도의 축력저하가 일어남을 알 수 있다. 또한 그림에서 보는 바와 같이 동일한 체결토크이지만 발생하는 체결축력을 무윤활 상태의 경우 윤활상태 보다 300-400 kg_r 정도의 적게 나타나는 것을 알수 있으며 따라서 동일한 축력을 내기 위해서는 체결토크의 인상이 불가피한 것



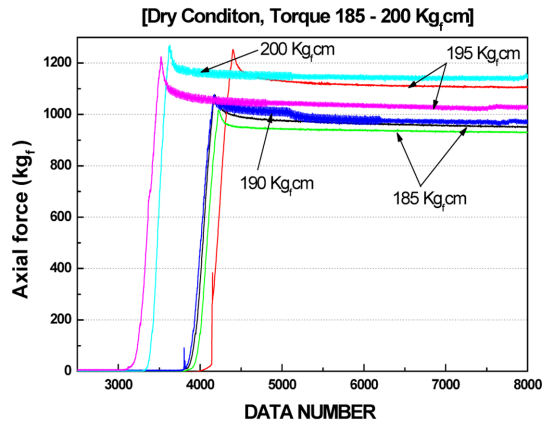
(a) Lubrication condition



(a) 170 kg_f·cm, Avg.



(b) Dry condition



(b) 190 kg_f·cm, Avg.

Fig. 5. Axial forces of bolt under the clamping torque of 140 to 150 kg_f · cm.

Fig. 6. Axial forces of bolt under the increased clamping torque at dry condition.

이다. 따라서 Fig. 6은 160 kg_f · cm에서 200 kg_f · cm의 인상된 체결토크로 체결한 결과를 도시한 것이다. Fig. 6(b)의 무윤활시 평균 190 kg_f·cm의 체결토크 조건인 범위가 윤활상태일 때의 140 kg_f · cm에서 150 kg_f·cm의 체결토크조건과 거의 비슷한 수준의 축력이 발생함을 알 수 있다.

5. 볼트 체결선도

현재의 윤활조건에서의 체결에서 무윤활 조건으로의 전환을 위해서는 체결 토크의 인상이 필수적이란 것을 이미 확인하였다. 여기서는 마찰 실험 결과들을 토대로 제안한 높은 체결 토크에 대한 검증 및 체결선도를 통한 적정 체결토크를 설정하고자 한다.

Table 2. the range of the axial force of bolt under the clamping torque of 140 to 150 kg_f · cm at lubrication condition

Torque (kg _f · cm)	F _r (kg _f)	
	Max. friction coef. (μ _w = 0.23, μ _s = 0.16)	Min. friction coef. (μ _w = 0.2, μ _s = 0.12)
140	1091	926
145	1130	960
150	1170	992

우선 앞서 측정된 볼트 체결체의 마찰계수들을 사용하여 현재 윤활 조건의 체결 토크 편차를 고려하여 체결축력을 계산하였다. 각 체결토크들에 대한 마찰계수가 최소일 경우(μ_w=0.23, μ_s=0.16)와 최대일 경우

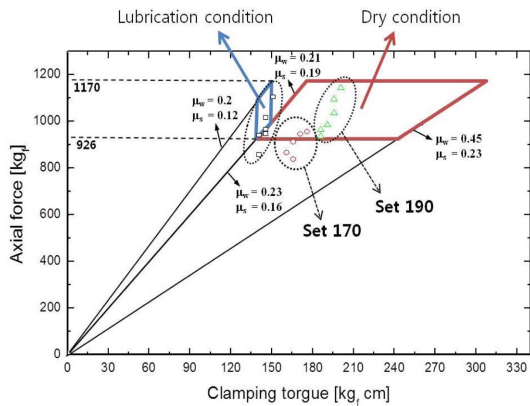


Fig. 7. Comparison of calculated results with experimental ones using the map of clamping torque vs axial force of bolt.

($\mu_w=0.2$, $\mu_s=0.12$)의 이론적인 최대 축력치는 다음과 같다.

즉, 현재 윤활 조건에서의 이론적인 축력의 범위는 926-1170 kg_f 이므로 이 축력의 범위가 무윤활시 적정 체결토크값 설정을 위한 기준값이 된다. 볼트 체결부의 무윤활조건일 때의 마찰계수의 범위는 최대 $\mu_w=0.45$, $\mu_s=0.23$ 이고 최소 $\mu_w=0.21$, $\mu_s=0.19$ 이므로 식 (1)을 통해 축력값 926-1170 kg에 대한 무윤활 체결토크의 값을 계산할 수 있다.

이러한 계산 절차를 거쳐 Fig. 7과 같은 체결선도를 작성할 수 있다. 즉, 그림 왼쪽의 작은 사각영역은 현재의 윤활 조건에 대한 체결력 및 체결토크의 범위이며 오른쪽의 큰 사각영역은 현재의 윤활 조건의 데이터를 토대로 계산한 무윤활 조건의 체결력 및 체결토크의 범위를 뜻한다. 이론식의 결과를 검증하기 위해 앞 절에서 제시한 실제 볼트 체결의 볼트 축력의 값들을 Fig. 7에 함께 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 현재 윤활 조건의 축력 결과와 이론적인 체결범위가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 앞서 체결실험에서 호조건으로 판별된 평균 체결토크 170 및 190 kg_f·cm의 축력실험결과도 같이 도시 하였는데, 170 kg_f·cm의 경우는 약간 벗어나지만 190 kg_f·cm의 경우는 축력 실험결과가 체결범위에 모두 만족하고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 컴프레서의 조립에 사용되는 볼트의

체결시 현재 윤활 상태에서 적용되는 공정을 무윤활 상태로 적용하기 위한 적정 토크 설정에 관한 연구를 수행하였다. 볼트의 체결에 가장 큰 영향을 미치는 볼트와 피체결체의 마찰계수를 측정하였으며 체결시 실제로 볼트에 작용하는 스트레인게이지를 부착하여 축력을 측정하였다. 아울러 이론적인 검증을 수행하여 적정 체결토크의 설정을 위한 체결선도를 제시하였다. 동일한 체결토크이지만 발생하는 체결축력을 무윤활 상태의 경우 윤활상태보다 300-400 kgf·cm 정도의 적게 나타나는 것을 알 수 있으며 이는 마찰계수의 차이에 의한 것이라 할 수 있다. 따라서 동일한 축력을 내기 위해서는 체결토크의 인상을 불가피하며 윤활 조건의 축력을 내기 위해서는 평균 190 kgf·cm의 체결토크가 필요함을 확인하였다. 아울러 마찰실험의 결과를 이용하여 이론적인 체결토크와 체결축력과의 체결선도를 작성하였고 이론적인 체결영역과 실험적인 결과가 비교적 잘 일치되고 있음을 확인하였다. 따라서 나사 체결부의 마찰계수의 측정을 통해 체결선도를 작성할 수 있고 이를 통해 윤활 또는 무윤활 조건에서의 적정 체결토크를 결정할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2012-67).

References

1. Bickford, J. H., "An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints," *Marcel Dekker, Inc.*, New York, 1990.
2. Ikeda, K., Nakagawa, G. and Mitunaga, K., "Tightening of Bolts," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 36, No. 2, pp. 1735, 1970.
3. Sakai, T. "Coefficient of Friction for the threaded fastener," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 43, No. 7, pp. 370, 1977.
4. Yoshimoto, I., Maruyama, K., and Hasegawa, H., "Comparison of Control Methods for Screw Tightening," *J. Japan Soc. Prec. Eng.*, Vol. 44, No. 2, pp. 204, 1978.
5. McNeill, A., "An Integrated Approach to Bolted Joint Design to Obtain Targeted Clamp Loads," *SME Paper*, AD 86-881, 1986.
6. Bickford, J. H., "An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints," *2nd ed.*, *Marcel Dekker*, 1990.