

소성역 체결 볼트의 기계적 거동 유한요소해석

조성산* · 신천세

홍익대학교 기계시스템디자인공학과

Finite Element Analysis of Mechanical Behavior of Bolt Tightened in Plastic Region

Sung-San Cho* · Chunse Shin

Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received 4 May 2009 / Accepted 16 November 2009)

Abstract : Plastic region tightening is widely used in critical bolted joints in internal combustion engines in order to reduce the engine weight by maximizing the use of load-carrying capacity of bolt. Mechanical behavior of bolt tightened in plastic region under external axial tensile load is investigated for various friction conditions using three dimensional finite element analysis. The behavior of bolt tightened in elastic region as well as that in tensile test are investigated for comparison. Tightening process is simulated by rotating the bolt in order to examine the friction effect realistically. It is revealed that the bolt tightened in plastic region can carry more external load until the joint is opened, and yields at lower bolt load than the bolt tightened in elastic region. The friction coefficient has effect on the yield load, but not on the load-carrying capacity. Moreover, the scatter in the bolt preload due to friction begins with plastic deformation of bolt in the angle tightening control, whereas it begins with the onset of tightening in the torque tightening control. The observations are interpreted with the residual torsional stress in the bolt generated during the tightening.

Key words : Plastic region tightening(소성역 체결), Elastic region tightening(탄성역 체결), Bolt preload(볼트 초기 체결축력), Yield(항복), Finite element analysis(유한요소해석)

1. 서론

자동차 엔진 조립에 이용되는 볼트 중에서 헤드 볼트, 커넥팅 로드 볼트, 메인 베어링 캡 볼트를 주요 볼트(critical bolt)라고 부른다. 엔진 주요 볼트의 초기체결축력(preload)이 적절하지 못하면 엔진 성능 및 내구성이 떨어지므로, 볼트가 수행할 역할과 외력 등을 고려하여 초기체결축력의 최적값을 결정하고, 결정된 초기체결축력을 체결과정에서 정확하게 발생시키는 것이 매우 중요하다.¹⁾

최근에는 엔진 연비를 향상시키기 위해, 엔진을 가능한 가볍게 설계하려고 한다. 이를 위해, 가능한 작은 볼트를 사용하여 이음부의 크기를 줄여준다. 이음부의 기능 및 내구성을 보장하려면 볼트의 체결축력이 적정 수준을 유지해야 하므로, 볼트 크기를 줄이면 볼트의 최대인장하중에 대한 초기체결축력의 비율은 증가한다. 소성역 체결(plastic region tightening)은 볼트가 소성변형될 때까지 체결하는 방법이다. 따라서 볼트의 하중지지능력을 최대한 이용할 수 있는 소성역 체결은 엔진 주요볼트의 체결에 널리 이용되고 있다.

*Corresponding author, E-mail: sscho@wow.hongik.ac.kr

소성역 체결에 관한 실험적 연구에 의하면, 볼트를 체결할 때 볼트에 인장하중과 토크가 동시에 작용하므로, 인장하중만 작용하는 경우에 비해 더 낮은 볼트 축력에서 볼트의 항복이 발생한다.²⁾ 볼트에 작용하는 토크가 클수록, 볼트의 항복점 축력은 더 낮아진다.³⁾ 볼트에 작용하는 토크는 볼트 머리 밑면과 나사면에 작용하는 마찰력에 의해 발생한다⁴⁾ 마찰토크는 마찰계수, 나사산과 볼트의 형상, 그리고 볼트 체결축력의 영향을 받는다.⁵⁾ 마찰계수는 볼트 재질의 영향을 가장 많이 받으며,⁶⁾ 볼트를 체결하는 동안에 변화한다.⁷⁾ 볼트 이음부에 외력이 작용하면, 체결 과정에서 볼트에 생성된 비틀림 응력은 감소하며, 그 결과 소성역 체결 볼트도 탄성변형을 하면서 외력을 지탱한다.⁸⁾ 탄성역 체결 이음부에 비해 소성역 체결 이음부는 접촉면이 분리되기 전까지 더 큰 외력을 지탱할 수 있고,¹⁾ 이음부의 피로강도도 더 높다.^{2,9)}

한편, 이론 및 해석적 연구는 문제의 복잡성 때문에 대부분 체결과정에 국한되어 있다.^{3,7,10,11)} 즉, 외력이 작용할 때 이음부의 거동에 관한 이해도가 미흡한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 소성역 체결 볼트 이음부에 인장 외력이 작용할 때 볼트의 기계적 변형 거동을 유한요소해석으로 고찰한다. 비교를 위해 탄성역 체결 이음부도 고찰한다. 볼트의 체결 특성에 지대한 영향을 미치는 마찰계수의 영향도 고찰한다.

2. 유한요소해석

유한요소해석은 범용 코드 ABAQUS로 수행하였다. Fig. 1(a)는 본 연구에서 고려한 볼트 이음부 형식을 보여준다. 암나사가 가공된 피체결물에 볼트가 체결되고, 그 사이에 다른 피체결물이 고정된다. 이러한 이음부 형식은 엔진 주요 볼트의 이음부 형식과 동일하다. Fig. 1(b)는 볼트 모델을 보여준다. 나사산 형상은 표준형 미터나사 M12xP1.5의 형상과 동일하게 모델링하였다. 볼트의 탄소성 변형거동은 볼트 인장시험(ASTM F606M)으로 얻은 응력-변형률 곡선(Fig. 2)으로 정의하였다. 시험에 사용된 볼트는 냉간전조로 성형한 후, 담금질과 템퍼링을 한 고장력 볼트이다. 볼트 재료는 SCM435이며, 표면에 인산염피막이 코팅되어 있다. 볼트의 탄성계

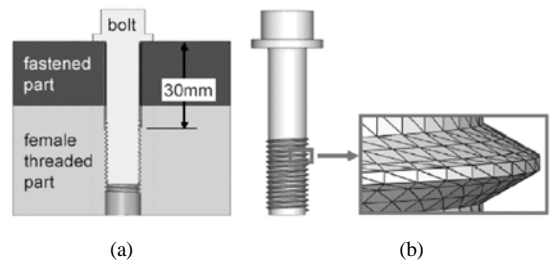


Fig. 1 Finite element model

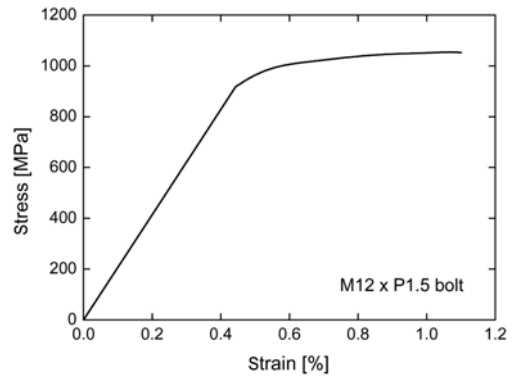


Fig. 2 Stress-strain curve of bolts

수는 207 GPa, 인장강도는 1058 MPa, 포와송 비는 0.3이다. 암나사가 가공된 피체결물과 중간에 끼워진 피체결물의 탄성계수는 110 GPa와 73 GPa, 포와송비는 0.26과 0.32를 사용하였다. 이 값들은 엔진 블록과 헤드의 물성값이다. 일반적으로 볼트 이음부는 피체결물의 소성변형이 발생하지 않도록 설계되므로, 피체결물을 탄성체로 가정하였다. 볼트와 피체결물이 접촉하는 면의 마찰계수는 0.15, 0.2, 0.25를 가정하였고, 두 피체결물 간의 접촉면 마찰계수는 0.3을 가정하였다.

해석은 볼트를 체결한 후, 외력을 가하는 순서로 진행되었으며, 각 단계는 정적 증분 방식으로 해석하였다. 체결과정은 피체결물을 고정된 상태에서 볼트 머리를 회전시켜 볼트 축력을 생성시키는 방법으로 해석하였다. 실제 소성역 체결에서는 피체결물을 밀착시키기 위해 초기 토크(snug torque)를 가한 후, 볼트의 회전각으로 최종 축력을 제어하는 토크-각도 제어법을 주로 사용한다.¹⁰⁾ 그러나 해석에서는 밀착 토크가 불필요하므로, 볼트의 과도한 소성변형을 발생시키지 않는 체결각 85도로 체결하

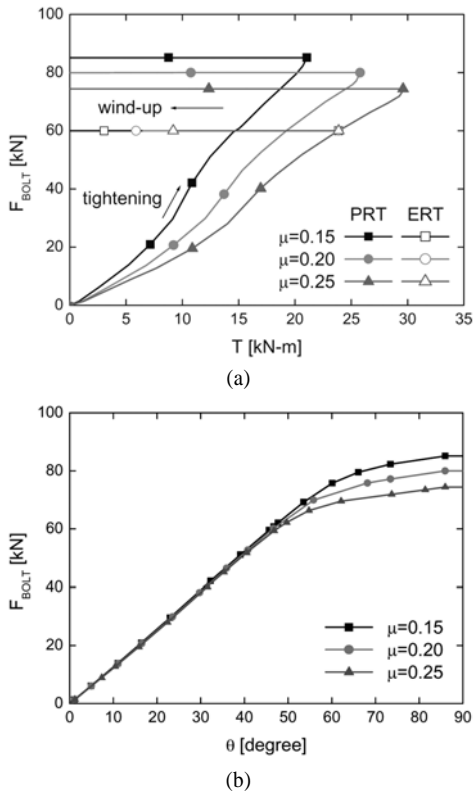


Fig. 3 Evolution of bolt load with (a) tightening torque and (b) tightening angle. PRT and ERT mean plastic and elastic region tightening, respectively

였다. 탄성역 체결은 일반적으로 볼트 최대인장하중의 60% 이상에서 선정되므로, 해석에서는 약 60%에 해당되는 60kN의 볼트 축력이 생성되도록 체결하였다. 외력이 작용할 때 이음부 거동을 고찰하는 해석은 암나사가 가공된 피체결물의 밀면을 고정된 상태에서 중간에 고정된 피체결물의 바깥 가장자리에 볼트 축방향 인장하중을 가하는 방법으로 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3(a)는 소성역 체결과 탄성역 체결에서 체결토크와 볼트 축력의 관계를 보여준다. 소성역 체결의 경우, 일정한 볼트 회전각으로 체결했으므로 마찰계수에 따라 체결 후 볼트 축력의 차이가 발생한다. 탄성역 체결의 경우, 볼트 체결축력 60kN이 생성되도록 볼트 회전각을 조정했기 때문에 마찰계수

와 무관하게 동일한 체결축력이 생성된다. 체결토크가 증가하면 볼트 축력이 증가한다. 체결토크를 제거(wind-up)하면 볼트 축력이 감소하지만 감소량은 매우 적다. 체결 토크가 일정할 때, 마찰계수가 클수록 낮은 볼트 축력이 생성된다. 마찰계수값의 차이에 의해 발생하는 볼트 축력의 차이는 체결 토크가 증가할수록 더 커진다. 예를 들어, 체결 토크가 20kN-m일 때, 마찰계수 0.1의 차이는 대략 체결축력 30kN의 차이를 발생시킨다. 이 결과는 체결 토크로 볼트 축력을 제어하는 토크 제어법을 사용하면 마찰계수의 변화에 의해 체결축력이 크게 변화한다¹⁰⁾는 기존의 실험적 결과를 확인시켜준다.

Fig. 3(b)는 볼트 체결각과 볼트 축력의 관계를 보여준다. 볼트 축력이 탄성역 내에 있을 때 마찰계수의 영향은 거의 없다. 그러나 마찰계수가 클수록 볼트는 더 낮은 축력에서 소성변형을 시작하고, 그 결과 마찰계수의 차이에 따른 볼트 축력의 차이가 발생한다. 그러나 소성역에서 체결각이 일정 값 이상이 되면 볼트 축력의 차이는 일정하게 유지된다. 이 결과는 다음 사실을 알려준다. 각도 제어법¹⁰⁾으로 탄성역 체결을 하면 마찰계수가 변화해도 볼트 축력의 차이는 발생하지 않는다. 그러나 소성역 체결을 하면 마찰계수의 차이에 의해 볼트 축력의 차이가 발생한다.

일반적으로 소성역 체결은 토크-각도 제어법으로 수행된다. 즉, 피체결물을 밀착시키기 위해 일정 토크를 가한 후, 볼트 회전각으로 최종 볼트 축력을 생성시킨다. 이 사실과 Fig. 3의 결과를 종합하면 다음 결론이 도출된다. 토크-각도 제어법으로 소성역 체결을 할 때, 초기 토크를 가능한 낮게 유지하면 마찰계수의 변화에 의한 볼트 축력의 산포를 줄일 수 있다.

Fig. 4는 볼트 체결과정과 체결 후 외력이 작용할 때 볼트 축력과 신장량의 관계를 보여준다. 소성역 및 탄성역 체결 완료점을 별표로 표시하였으며, 그 이후가 외력에 대한 볼트의 거동을 나타낸다. Fig. 4는 순수 인장하중만 작용하는 인장시험의 경우를 해석한 결과도 보여준다. 인장시험 해석결과는 마찰계수의 영향이 거의 없었기 때문에 마찰계수 값을 표시하지 않았다. 탄성역 체결 볼트의 항복점 축력은 인장시험의 경우보다 낮으며, 소성역 체결과

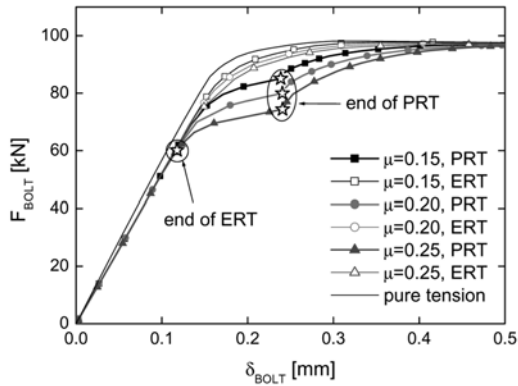


Fig. 4 Evolution of bolt load with bolt elongation during tightening followed by external tensile loading

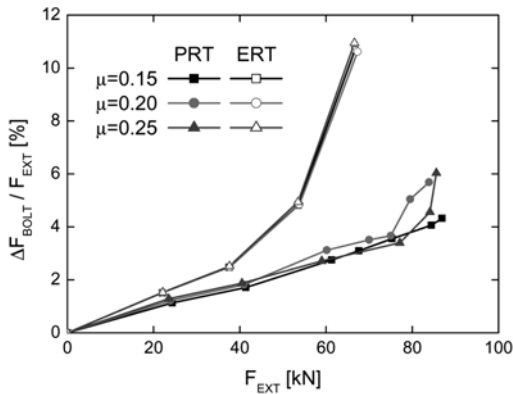


Fig. 5 Ratio of bolt load increment to external load

정에서 발생하는 볼트의 항복점 축력은 앞의 두 경우보다 더 낮다. 그러나 볼트 이음부 외력이 증가하면, 모든 곡선이 인장시험의 곡선에 접근한다. 한편 탄성역 체결과 소성역 체결 모두에서 마찰계수가 클수록 볼트의 항복점 축력이 낮아지며, 그 영향은 소성역 체결에서 더 크다. 이러한 결과가 발생하는 이유는 마찰계수가 클수록, 그리고 탄성역 체결보다는 소성역 체결에서 볼트에 더 큰 비틀림 응력이 작용하기 때문이다.

Fig. 5는 볼트를 체결한 후 이음부에 인장외력이 작용할 때 피체결물 접촉면이 완전히 분리되기 직전까지 볼트 하중분담률과 외력의 관계를 보여준다. 볼트 하중분담률은 이음부에 작용하는 외력에 대한 볼트 축력 증가량의 비율로 정의된다. 외력이 증가하면 탄성역 체결 볼트와 소성역 체결 볼트 모두 외력 분담률이 증가한다. 그러나 소성역 체결 볼

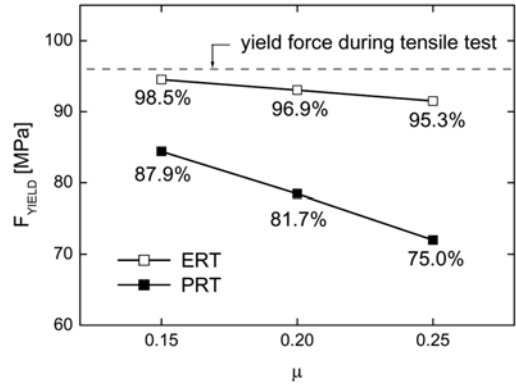


Fig. 6 Effect of friction coefficient on yield force of bolt

트의 외력 분담률이 탄성역 체결 볼트보다 서서히 증가한다. 즉, 동일한 외력이 작용할 때, 탄성역 체결 볼트에 비해 소성역 체결 볼트에 더 적은 하중이 전달된다. 따라서 이음부 접촉면이 분리되기 전까지 소성역 체결 볼트가 지탱할 수 있는 최대 외력은 탄성역 체결 볼트보다 더 크다. 한편, 마찰계수 변화에 따른 볼트 하중분담률의 변화는 미미하므로, 마찰계수가 달라도 이음부의 외력 지지능력은 거의 동일하다.

Fig. 6은 소성역 체결 볼트와 탄성역 체결 볼트가 이음부에 작용하는 외력에 의해 항복점에 이르렀을 때의 볼트 축력을 보여준다. 항복점 하중은 0.2% 윗셋 항복점으로 산출하였다. 비교를 위해, 볼트 인장 시험 0.2% 윗셋 항복하중도 보여준다. 탄성역 체결 볼트에 비해 소성역 체결 볼트는 더 낮은 볼트 축력에서 항복이 발생한다. 마찰계수가 클수록 볼트의 항복은 더 낮은 볼트 축력에서 발생한다. 예를 들어, 마찰계수가 0.25일 때 소성역 체결된 볼트의 항복점 축력은 인장시험 항복하중의 약 75% 수준이다.

Fig. 7은 볼트 체결과정과 체결 후 외력이 작용할 때 볼트 샹크 단면에 작용하는 전단응력의 분포를 보여준다. 최대 체결토크가 가해졌을 때(Fig. 7(a)), 샹크 표면에 가장 큰 전단응력이 작용하고, 중심으로 갈수록 전단응력이 작아진다. 체결토크를 제거하면(Fig. 7(b)), 전단응력이 전반적으로 약간 감소한다. 이후 외력을 증가시켜도 이음부 접촉면이 완전히 분리되기 직전(Fig. 7(c))까지 전단응력의 감소는 미미하다가, 체결면이 완전히 분리된 후(Fig. 7(d))

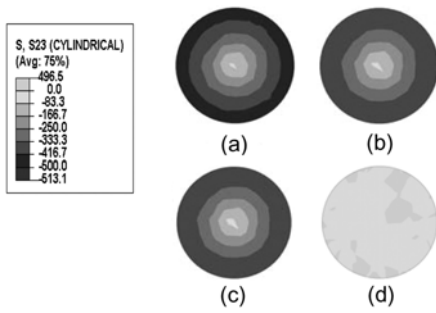


Fig. 7 Shear stress distribution on the cross-section of bolt shank tightened in plastic region at friction 0.25: (a) end of tightening, (b) wind-up, (c) just before and (d) after opening of interface

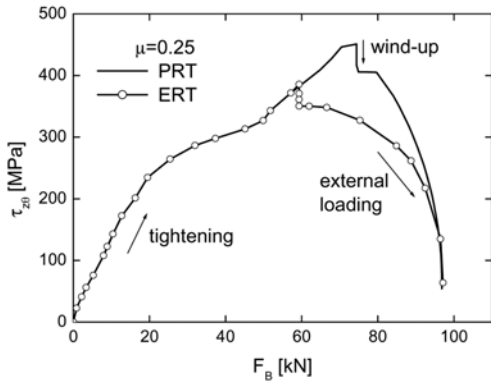


Fig. 8 Relation between shear stress at the surface of bolt shank and bolt load

에 전단응력은 급격히 감소하고 동심원 형태의 응력분포가 사라진다.

Fig. 8은 볼트 체결과정과 체결 후 외력이 작용할 때 볼트 생크 표면의 전단응력과 볼트 하중의 관계를 보여준다. 체결이 진행되면서 볼트축력이 증가하면 동시에 전단응력도 증가한다. 체결토크를 제거할 때, 볼트 축력의 감소는 미미하지만, 전단응력은 약간 감소하며, 그 결과 곡선은 거의 수직으로 하강한다. 이음부에 외력이 작용하면, 초기에 볼트 축력은 증가하지만 전단응력의 감소는 거의 없으며, 그 결과 곡선은 수평으로 이동한다. 수평선 부분이 끝나는 부분에서 체결면이 완전히 분리되며, 이후 외력이 증가하면 전단응력이 빠른 속도로 감소한다. 이러한 전단응력의 특징적 변화는 소성역 체결과 탄성역 체결 모두에서 동일하게 나타난다.

Fig. 9는 이음부에 작용하는 외력과 볼트 생크 표

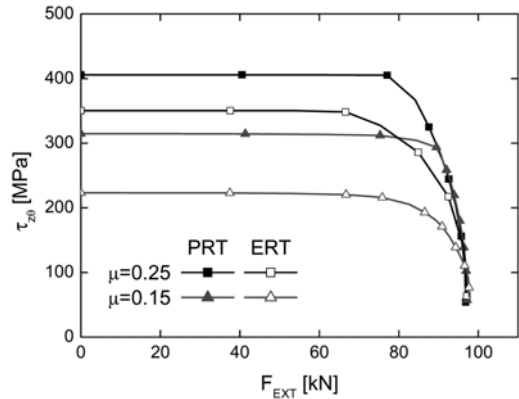


Fig. 9 Relation between shear stress at the surface of bolt shank and external load

면 전단응력의 관계를 보여준다. 외력이 증가해도 전단응력은 거의 변화가 없다가, 이음부 접촉면이 완전히 분리된 후에 급격히 감소한다. 한편 외력이 작용하지 않을 때, 마찰계수가 클수록, 그리고 탄성역 체결보다 볼트 체결 축력이 큰 소성역 체결에서 더 큰 전단응력이 생성된다.

Fig. 7에서 Fig. 9까지의 결과를 종합하면, 볼트 체결과정에서 볼트 내에 생성된 전단응력은 체결 종료 후 체결토크를 제거하는 과정에서 일부 감소하지만 대부분은 볼트 내에 잔류한다. 잔류 전단응력은 이음부에 외력이 작용해도 이음부 접촉면이 완전히 분리되기 전까지 거의 감소하지 않는다. 볼트 이음부는 외력에 의해 이음부 접촉면이 분리되지 않도록 설계되므로, 볼트는 비교적 큰 잔류 전단응력이 존재하는 상태에서 외력을 지탱한다. 따라서 볼트 내에 존재하는 잔류 전단응력 때문에, 체결된 볼트는 볼트 인장시험의 항복점 축력보다 낮은 축력에서 항복이 발생(Fig. 6)한다. 그리고 탄성역 체결보다 소성역 체결에서 그리고 마찰계수가 클수록 잔류 전단응력의 크기가 증가하므로 볼트의 항복점 축력이 더 많이 감소(Fig. 6)한다.

4. 결론

소성역 체결 볼트 이음부와 탄성역 체결 볼트 이음부에 인장 외력이 작용할 때, 볼트의 기계적 거동을 유한요소해석으로 고찰하여 아래의 결론을 얻었다.

- 1) 볼트 이음부에 인장 외력이 작용할 때, 소성역 체결 이음부는 탄성역 체결 이음부보다 접촉면이 분리되기 전까지 더 많은 외력을 지탱할 수 있다. 즉, 소성역 체결을 하면 이음부의 외력 지지능력을 증가시킬 수 있다.
- 2) 볼트 이음부의 외력 지지능력은 볼트 마찰계수의 영향을 거의 받지 않는다.
- 3) 체결과정에서 볼트 내에 생성된 전단응력의 대부분은 외력에 의해 이음부 접촉면이 분리되기 전까지 잔류한다.
- 4) 볼트 내의 잔류 전단응력 때문에 체결된 볼트는 더 낮은 축력에서 소성변형을 시작한다.
- 5) 토크-각도 제어법으로 볼트를 소성역 체결할 때, 이음부를 밀착시키기 위한 초기 토크를 가능한 낮게 유지하면 마찰계수의 변화에 의한 볼트 축력의 산포를 줄일 수 있다.

References

- 1) S.-S. Cho, H. Chang and K. W. Lee, "Procedure for Computer-Aided Preload Selection of Engine Connecting-Rod Bolts," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.8, No.3, pp.319-325, 2007.
- 2) I. Chapman, J. Newnham and P. Wallace, "The Tightening of Bolts to Yield and Their Performance Under Load," *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, Vol.108, pp.213-221, 1986.
- 3) T. Fukuoka and T. Takaki, "Elastic Plastic Finite Element Analysis of Bolted Joint During Tightening Process," *Journal of Mechanical Design*, Vol.125, pp.823-830, 2003.
- 4) J. M. Monaghan, "The Influence of Lubrication on the Design of Yield Tightened Joints," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol.26, No.2, pp.123-132, 1991.
- 5) Y. Jiang, J. Chang and C. Lee, "An experimental study of Torque-Tension Relationship for Bolted Joints," *International Journal of Materials and Product Technology*, Vol.16, pp.417-429, 2000.
- 6) S. A. Nassar, H. El-Khiamy, G. C. Barber, Q. Zou and T. S. Sun, "An Experimental Study of Bearing and Thread Friction in Fasteners," *Journal of Tribology*, Vol.127, pp.263-272, 2005.
- 7) T. Fukuoka and T. Takaki, "Mechanical Behaviors of Bolted Joint during Tightening Using Torque Control," *JSME International Journal, Series A*, Vol.41, No.2, pp.185-191, 1998.
- 8) J. Newnham and L. Curley, "Bolted Joints Under Tensile Service Loads: The Effect of Torsion in the Bolt on In-Service Clamping Loads," *Journal of Mechanical Design*, Vol.115, pp.36-40, 1993.
- 9) T. Okubo, S. Tanaka and K. Gorumaru, "Reliability Evaluation of Bolts Tightened in Plastic Region and Their Application to Diesel Engines," *SAE 840505*, 1984.
- 10) G. R. Toth, "Torque and Angle Controlled Tightening Over the Yield Point of a Screw-Based on Monte-Carlo Simulation," *Journal of Mechanical Design*, Vol.126, pp.729-736, 2004.
- 11) S. A. Nassar, P. H. Matin and G. C. Barber, "Thread Friction Torque in Bolted Joint," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.127, pp.387-393, 2005.