

리드스크루에 사용되는 베어링 스크루의 전산내구해석[§]

김민건^{*†} · 조석수^{**} · 김동열^{***} · 김요섭^{****}

* 강원대학교 기계의용공학과, ** 강원대학교 자동차공학과, *** 강원대학교 메카트로닉스공학과,
**** 강원대학교 대학원 기계의용공학과

Computational Analysis of Bearing Screw Used in Lead Screw

Min-gun Kim^{*†}, Seok-swoo Cho^{**}, Dong-youl Kim^{***} and Yo-seb Kim^{****}

* Dept. of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon Nat'l Univ.,

** Dept. of Vehicle Engineering, Kangwon Nat'l Univ.,

*** Dept. of Mechatronics Engineering, Kangwon Nat'l Univ.,

**** Graduate school, Dept. of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

(Received June 21, 2011 ; Revised October 7, 2011 ; Accepted October 10, 2011)

Key Words : Bearing Screw(베어링 스크루), Lead Screw(리드스크루), Computational Fatigue Analysis(전산 내구해석), X-Ray CT(X선 단층촬영기)

초록: 리드스크루에 사용되는 베어링 스크루의 강성을 평가하기 위해서, 먼저 베어링의 응력과 피로수명의 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과의 값을 바탕으로 베어링 스크루의 피로수명이 향상된 모델을 제안하였다. 이 개선된 모델은 베어링 스크루 응력집중부의 응력을 분산시키기 위한 필릿을 도입한 것이다. 또한, W사에서 제작된 베어링 스크루가 단층촬영기에 사용되었을 때 강도측면에서의 적합성 여부를 검토하였다.

Abstract: In order to assess the stiffness of bearing screw used for lead screw, finite element analysis on stress and fatigue life of bearing screw has been performed. Based on these analysis, fatigue life dominant model of bearing screw was proposed. This improved model introduces a fillet to release the concentrated stress generated in the vicinity of bearing screw hole. This paper also considered the strength suitability when the bearing screw manufactured in W company was applied to X-ray CT.

1. 서 론

산업현장의 생산성향상과 품질향상을 위하여 공작기계의 고속화, 고정도화 및 자동화의 연구가 빠르게 진행되고 있으며, 이러한 공작기계의 성능향상은 운전시간 단축과 복합화를 통하여 고효율의 생산공정을 가능케 함으로써 제품의 경쟁력을 확보하게 한다.^(1,2)

리드스크루장치에도 여러 종류가 있지만, 현재 직선운동계에 볼 스크루가 가장 많이 사용되고 있다. 볼 스크루(ball screw) 방식은 다른 것에 비해 나사축과 너트 사이의 마찰계수가 아주 작기

때문이다.⁽³⁻⁵⁾ 그러나 볼 스크루는 고속으로 작동하게 되면 열변형으로 인한 정밀도 저하, 소음 발생 등의 문제를 안고 있다.^(6,7)

이러한 문제점을 해결하기 위하여 베어링 스크루(bearing screw) 방식이 개발되었는데, 베어링 스크루는 베어링이 스크루의 홈 부위를 따라 구르는 방식이므로 마찰에 의한 열발생을 최소화할 수 있고 따라서 마찰소음도 줄일 수 있다. 그러나 아직 이러한 베어링 스크루의 구조강성이 평가되지 않았고, 내구수명의 평가 역시 이루어지지 않았다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 베어링 스크루의 구조강성을 평가하기 위해서 먼저 유한요소법을 이용한 응력해석을 수행하였고, 뒤이어 피로수명을 예측하였다(내구해석전용 솔루션인 FEMFAT 이용). 이러한 해석을 바탕으로 하여 내구성이 향상된 베어링

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 강원지회 춘계 학술대회(2011. 5. 20., 강원대) 발표논문임

† Corresponding Author, kmg@kangwon.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

스크루의 형상을 제시하였다.

또한, 베어링 스크루를 실제 X선 단층촬영기에 적용할 경우의 강도 측면에서의 적합 여부를 유한요소해석을 통하여 검토하였다.

2. 베어링 스크루 보트(boat)의 강도해석 방법

2.1 피로균열 발생사례

Fig. 1에 W사에서 제작한 베어링 스크루와 분리한 보트의 모델을 제시하였다. 내구시험 중 보트의 노치부에서 피로균열이 발생하는 사례가 있었다(Fig. 2). 피로균열의 발생 원인으로는 노치효과에 의한 응력집중일 것으로 예상된다.

2.2 보트의 응력 및 내구해석 방법

보트의 응력해석을 위한 수치해석기법은 유한요소법을 사용하였다. 베어링 스크루의 너트 전체에서 보트를 분리하여 모델링 후 해석하였다. 응력해석을 위해서 유한요소해석 프로그램인 NXNASTRAN을 사용하였다.

보트의 재질인 S55C의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 베어링 스크루의 경계조건은 스크루의 동정격하중의 최대값을 베어링의 개수만큼 나누어 각 홀에 Z방향으로 주었으며, 플랜지와 결합되는 부위에 대한 자유도는 완전히 구속하였다. 해석에 따른 하중조건도 도시되어 있다.

베어링 스크루의 동정격하중에 대한 해석을 진행하여 보트의 최대 변형량과 Von-Mises 응력을 계산하였다.

NXNASTRAN에 의한 응력해석 결과를 피로해석 전용 솔루션인 FEMFAT을 적용하여 반복하중 100만회에 상응하는 손상(damage)를 계산하고, 피로수명의 식 (1)의 마이너 법칙(Miner's law)에 의해서 계산하여 피로수명을 예측하였다.

일정진폭 피로시험에서, N회의 피로수명을 가진 응력수준에서 1사이클이 가지는 손상 D는 다음과 같다.

$$D = \frac{1}{N}, \quad \therefore N = \frac{1}{D} \quad (1)$$

Table 1 Mechanical properties

Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	Density (kgf/mm ²)
205e+003	0.29	7.8e-009

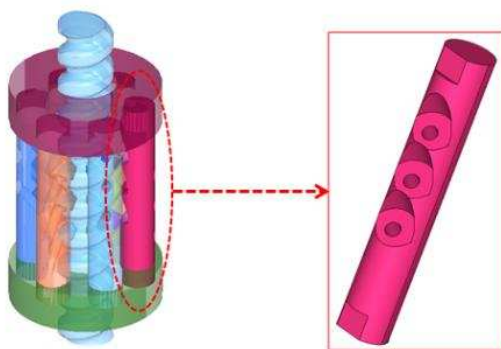


Fig. 1 Bearing screw model

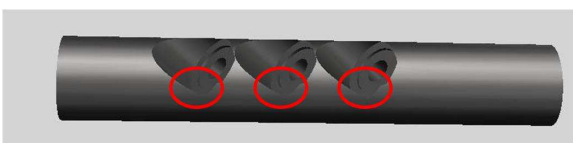


Fig. 2 Fatigue cracks initiated at notch of boat

피로해석에 사용된 소재의 물성값은 FEMFAT의 데이터베이스를 활용하였으며, 그 값을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Material properties

Material	UTS (MPa)	Endurance limit (MPa)	FEMFAT Material
S55C	680	305	Material Database

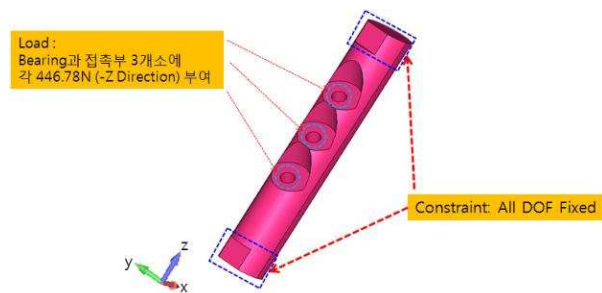
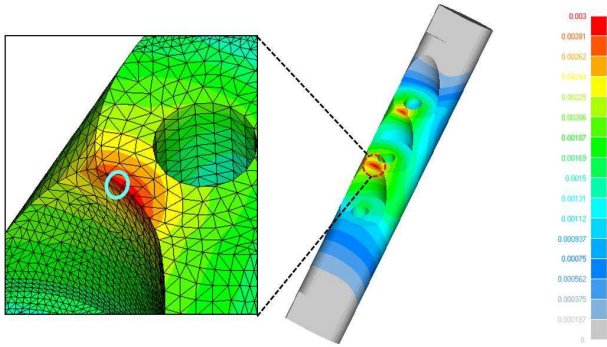
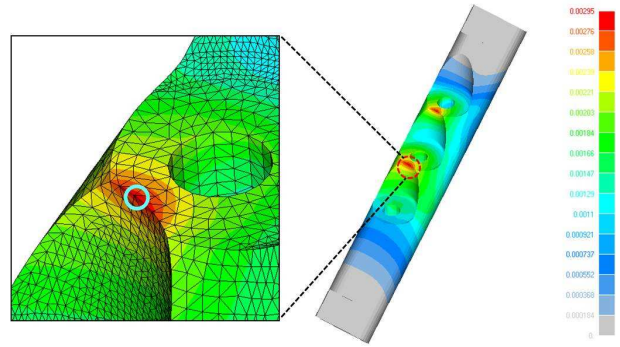


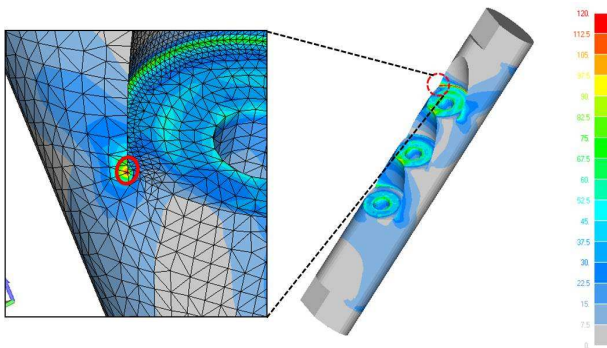
Fig. 3 Load, boundary and restriction conditions



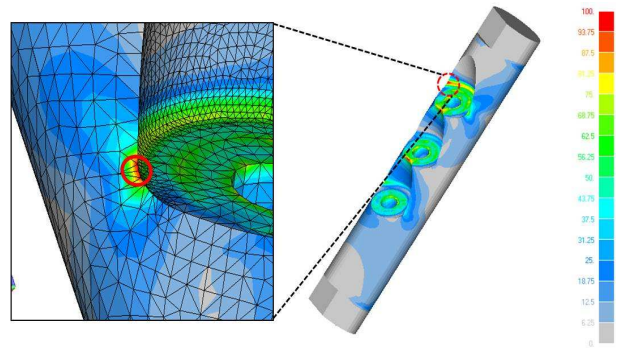
(a) Max. displacement



(a) Max. displacement



(b) Max. Von-Mises stress



(b) Max. Von-Mises stress

Fig. 4 Stress analysis results of existing model

Fig. 6 Stress analysis results of improved model

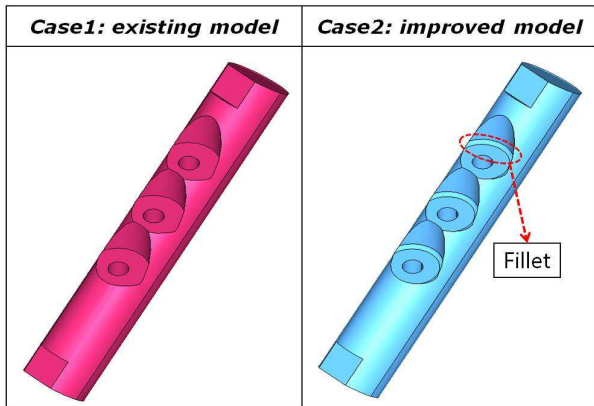


Fig. 5 Existing model and improved model

3. 베어링 스크루 보트의 강도해석 결과 및 고찰

3.1 보트의 응력해석

해석결과에 따른 기존 보트 모델의 최대 변형량과 Von-Mises 응력을 Fig. 4에 나타내었다. 해석결과에 의하면, 최대변형량은 0.003 mm으로, 베어링 결합 홀의 앞부분에서 발생하였다.

최대 응력은 베어링 결합 홀 부근의 날카로운 모서리 부분에서 발생하였으며, 실제로 베어링 스크루의 내구시험 중 피로균열이 발생한 장소와 일치하였다.

이러한 응력집중을 완화하기 위하여, 베어링 결합 홀 부근에 필릿(fillet)을 추가한 개선모델을 도입하여 Fig. 5에 나타내었다. 개선된 보트 모델에 대하여 해석을 수행한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

보트 개선 모델의 최대변형량은 0.0029 mm로 기존모델의 최대변형량 0.003 mm와 거의 비슷하다. 그러나 Von-Mises 응력은 개선모델이 110 MPa로, 기존 모델의 177 MPa 보다 약 38 %감소한 것을 알 수 있다.

3.2 보트의 피로수명

FEMFAT에 의한 기존 보트 모델의 피로수명 해석 결과를 Fig. 7에, 개선된 보트 모델의 피로수명을 Fig. 8에 나타내었다. 해석의 결과에 의하면, 기존 보트의 최대 손상(max. damage)은 최대 응력과 동일한 위치에서 발생하였으며 그 값은

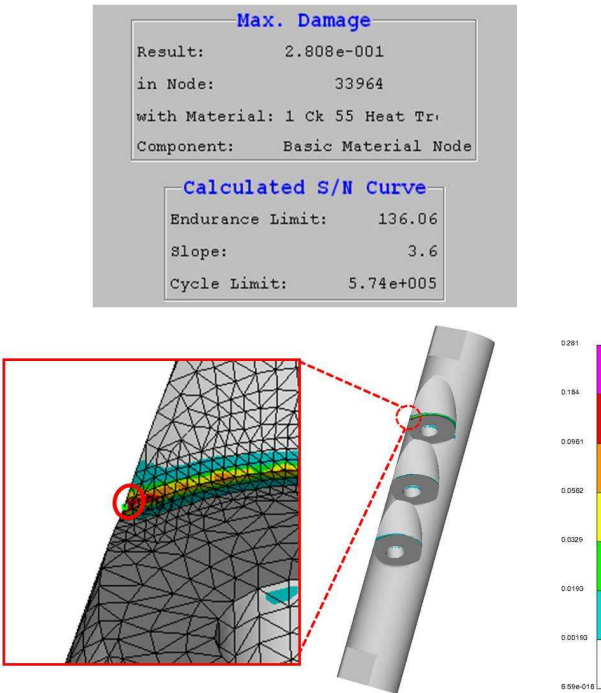


Fig. 7 Fatigue analysis results of existing model

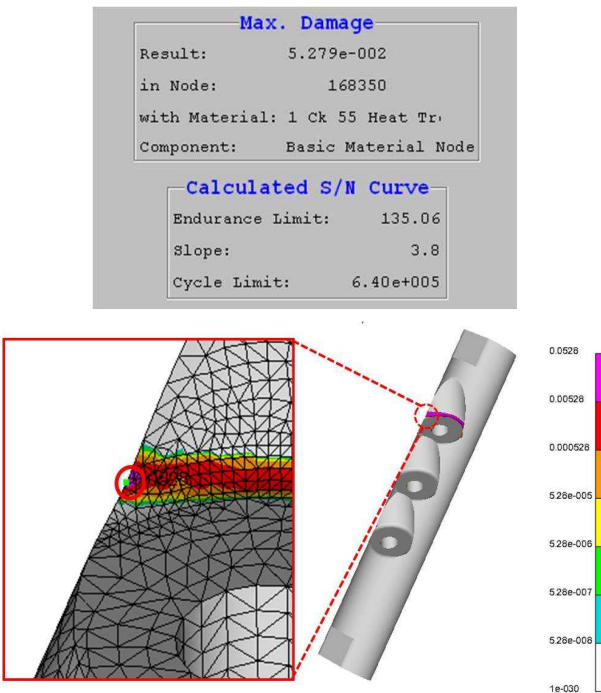


Fig. 8 Fatigue analysis results of improved model

2.808e-001 이다. 개선모델의 최대 손상부위 역시 동일한 위치이며 그 값은 5.279e-002 이다.

최대손상값으로 마이너 법칙에 의해서 내구수명을 계산하였을 때, 기존 모델은 3,561,000cycle,

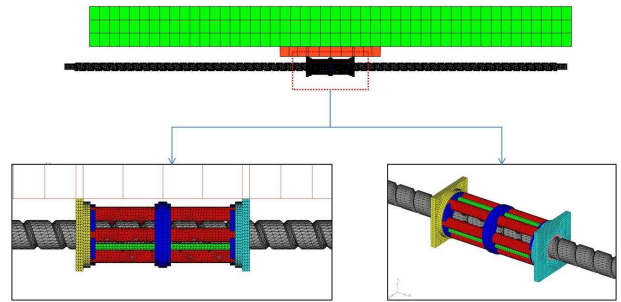


Fig. 9 Full model

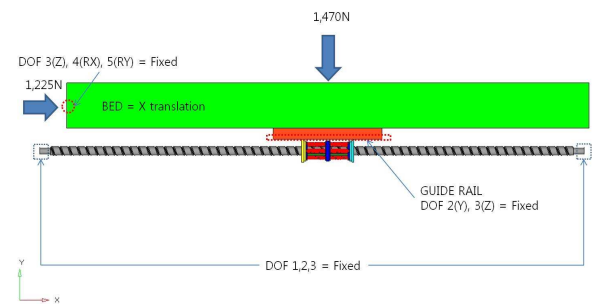


Fig. 10 Load, boundary and restriction conditions

개선 모델은 18,942,000cycle로, 개선 모델이 기존 모델에 비하여 내구수명이 약 5배 증가함을 알 수 있다.

4. X선 단층촬영기용 베어링 스크루의 유한요소해석

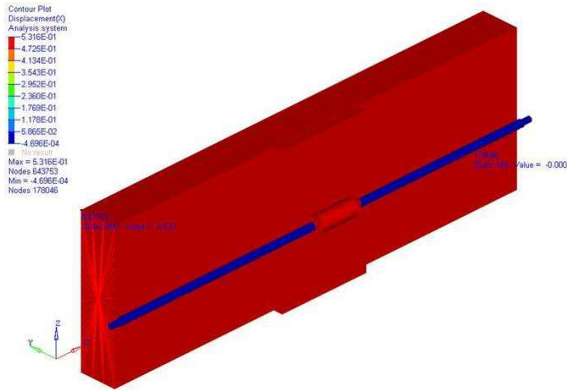
4.1 단층촬영기의 이송모듈의 모델링

베드에 베어링 스크루의 가이드가 설치된 형태의 이송모듈을 Fig. 9처럼 모델링하였다. W사의 베어링 스크루 5VR과 가이드 SERO101 을 모델링 하는데 사용하였다.

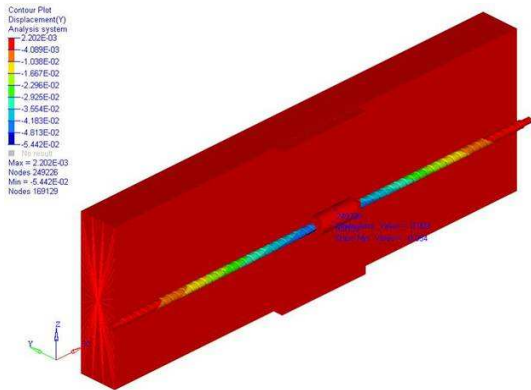
4.2 이송모듈의 응력해석

해석에 적용된 하중은 사용자(환자)를 고려하여 대한민국 성인남성의 평균몸무게(75 kgf)의 2배의 하중을 최대하중으로 적용하였고, 베드가 이송될 때의 최대 가속도 약 0.8G를 적용하여 구조강성 해석을 진행하였다. 나머지 해석조건을 Fig. 10에 도시하였다.

해석결과에 따른 X축 방향과 Y축 방향의 최대 변형량을 Fig. 11에 도시하였고, Von-Mises응력을 Fig. 12에 도시하였다. 너트의 X축 방향의 최대 변형량은 0.51 mm, Y축 방향은 0.054 mm로 계산 되었으며, 최대 Von-Mises 응력은 66 MPa이다.



(a) Displacement (X-direction)



(b) Displacement (Y-direction)

Fig. 11 Max. displacement

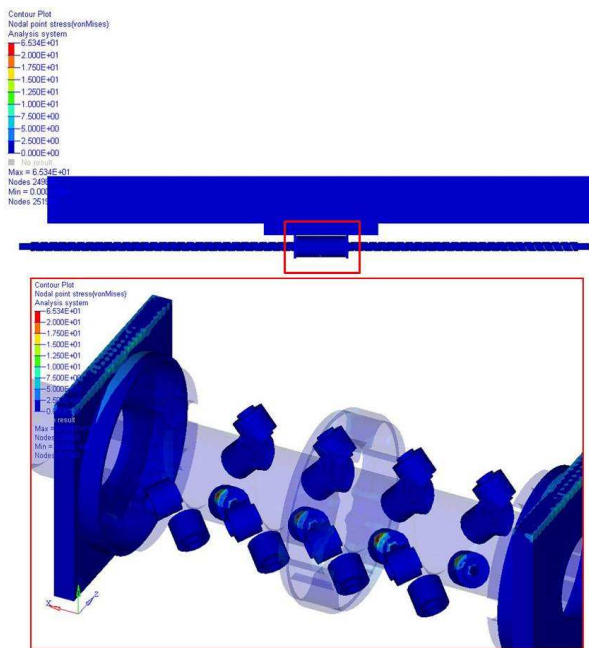


Fig. 12 Max. Von-Mises stress

해석의 결과를 고찰하면, 베드가 이송중인 경우에 가속도에 의한 베어링 스크루는 압축 응력과 변형을 받게 된다. 본 해석에서는 0.8G의 가속도에 해당하는 해석을 수행하여 최대 66 MPa의 값을 얻었는데, 열처리가 된 베어링 강도의 경우 압축강도는 최대 3,000 MPa이므로, 5VR 베어링 스크루의 모듈은 하중대비 과다 설계임이 판명되었다.

또한, 해석을 통하여 X방향의 변형량이 최대 0.51 mm까지 발생하는 것을 알 수 있는데, 이는 위치정밀도에서는 좋지 않다는 것을 의미한다. 그러나 최대 Von-Mises응력이 66 MPa임을 고려하면 저속이면서 큰 부하용 의료장비에 사용하는 것은 가능하다고 본다.

5. 결론

볼 베어링의 변형인 베어링 스크루를 대상으로 하여, 그 주요 부분인 보트의 역학적 상황에 대한 유한요소해석 및 피로내구해석을 수행하였다. 계산된 결과를 토대로 하여 내구성이 향상된 개선모델을 제시하였고, 개선안을 기존 모델과 비교분석하였다. 또한, 실제 장비에 적용가능성을 유한요소해석을 통하여 검토하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 최대 Von-Mises응력은 베어링 결합 홀 부근의 날카로운 모서리 부분에서 발생하였으며, 실제로 베어링 스크루의 내구시험 중 피로균열이 발생한 장소와 일치하였다.

(2) 이러한 응력집중을 완화하기 위하여, 베어링 결합 홀 부근에 필릿(fillet)을 추가한 개선 모델을 제안하였다. 개선 모델이 기존 모델에 비하여 보트에서의 응력집중이 38 % 감소하였다. 이는 약 5배의 피로수명의 증가로 이어졌다. 이러한 결과는 보트에서의 피로균열의 발생은 노치부의 형상에 따른 응력집중에 기인하고 있음을 알 수 있다.

(3) 해석에 사용된 W사의 5VR 베어링 스크루는 X선 단층촬영기용 이송모듈로 사용하였을 때, 하중대비 과다 설계임이 밝혀졌다. X방향의 최대 변형과 Von-Mises응력을 고려할 때, 위치정밀도에서는 불리하지만 저속이면서 큰 부하용 의료장비에 사용하는 것은 적합하다.

참고문헌

(1) Ko, G. J., Park, S. H. and Jung, Y. K., 1999,

- "Design of High Speed Feed Drive System in Machine Tools," *KSMTE*, pp. 39~44.
- (2) Kim, H. G., 1999, "High Speed Machine Tools and Element Technique", (*Ltd.*)*Technique Information*.
- (3) Oozuka Jiro, 1992, "Positioning Technic and Practice using Ball Screw" *Machine Design*, Vol. 36, No.16, pp. 17~24.
- (4) 2003, "Computational Manufacturing Theory," *Human Resources Development Service Of Korea*.
- (5) Lee, Y. H., 1993,, "CIM·FA Dictionary," *TECHNIQUE*.
- (6) Ninomia, 1987, "Heating of Ball Screw and its Countermeasure," *Advanced Mechanical Engineering*, Vol. 28, No. 4, pp. 98~103.
- (7) Cho, G. J., Hong, S. O. and Lee, S. C., 2008, "A Study on the Relationship Between Pretension and Thermal Strain of the Lathe Ball Screw," *KSMPE*, pp. 320~324.
- (8) Rasel, S. M., Kim, H. K. and Song, J. I., 2010, "Structural Analysis of a High Load Ball Screw System," *KSME*, pp. 71~72.