

평행부 내에서 회전 운동을 하는 스피ndl의 운동 구속에 대한 연구

임종현*, 한근조#, 심재준*, 한동섭*, 이성욱*, 김태형**

A Study on Motion Constraint of Rotating Spindle in the Parallel Part at the Blocking Plate

Jong Hyun Lim*, Geun Jo Han#, Jae Joon Shim*, Dong Seop Han*,
Seong Wook Lee* and Tae Hyung Kim**

ABSTRACT

The function of main starting valve for marine engine is to supply cylinder with the air to start marine engine. But, if the spindle, one of the main starting valve components, doesn't rotate accurately at the designated air pressure, the marine engine may have some trouble in starting. So, to resolve the problem due to spindle rotation in the main starting valve, the blocking device (blocking plate, limit switch, etc.) is installed in the upper part of spindle to constrain the rotation. So, in this paper we introduced the rotation constraining ability of blocking plate prevent the spindle from mis-working in the main starting value of the marine engine.

Key Words : Rotation constraining ability(회전 구속 능력), Blocking device(제한 장치), Elastic-plastic analysis(탄소성 해석), Contact analysis(접촉 해석)

1. 서론

박용 엔진용 시동 밸브의 기능은 엔진의 기동을 위해 필요한 혼합기 생성을 위한 공기를 엔진에 공급하는 것이다. 시동 밸브에 작용하는 공압이 설정 압력에 도달하였을 때 시동 밸브에 마주 보며 설치된 두 개의 피스톤에 의해서 스피ndl이 회전하게 되면 시동 밸브 하부에 설치된 볼 밸브를 개방하여 혼합기의 생성을 위한 공기를 엔진에 공급하게 된다. 이런 박용 엔진용 시동 밸브는 제한 장치(blocking plate, spindle), 리미트 스위치, 볼 밸브, 액추에이터

등으로 구성되는데 원활한 엔진의 기동을 위해 스피ndl의 회전이 혼합기 생성에 필요한 조건에 맞게 작동되어야 한다. 스피ndl의 회전이 적당량을 초과하거나 또는 혼합기 생성 조건에 맞지 않게 작동하게 되면 시동 밸브의 기능을 발휘할 수 없게 되므로 과도한 스피ndl의 회전을 구속하고 스피ndl의 작동을 조절하기 위하여 스피ndl의 상부에 blocking plate가 설치되는 구조로 제한 장치가 이루어져 있다. 스피ndl의 회전을 blocking plate가 구속할 때 스피ndl의 모서리 부분이 blocking plate의 평행부(parallel part)와 최초로 접촉하는데 이 때 평행부의

접수일: 2004년 2월 4일; 게재승인일: 2005년 6월 29일

- * 동아대학교 기계공학과 대학원
- # 교신저자: 동아대학교 기계공학과
- E-mail gjhan@dau.ac.kr Tel. (051) 200-7650
- ** 경남정보대학 기계자동차산업계열

접촉 부분에 응력 집중이 발생하게 된다. 이 응력 집중으로 인해 평행부가 소성 변형하게 되면 blocking plate의 회전 구속 능력을 상실하게 되어 스피들이 회전하게 된다. 이런 스피들의 오작동으로 인하여 제한 장치의 기능을 상실하게 되어 주시동 밸브의 역할을 수행할 수 없게 된다.

따라서 본 논문은 박용 엔진용 시동 밸브의 제한 장치에서 blocking plate의 평행부 내에서 회전운동을 하는 스피들의 과도한 회전으로 인한 오작동을 방지하고 제한 장치의 기능을 충분히 발휘하기 위한 blocking plate의 회전 구속 능력을 스피들의 회전량에 따른 blocking plate에 발생한 반발 토크를 통하여 분석하였다.

시동 밸브의 양 피스톤에 공압의 작용으로 인한 우력 때문에 발생하는 스피들의 회전을 blocking plate가 구속하게 되므로 본 연구에서는 blocking plate와 스피들의 유한 요소 모델을 구성하고 이 모델에 실제의 작동과 같은 blocking plate와 스피들의 거동을 위한 경계 조건을 부여하였다. 그리고 blocking plate의 구속 점에서의 반력을 산출하기 위하여 스피들에 회전 변위를 가하였다. 이론적 접촉 응력과 유한 요소법을 통한 접촉부의 응력을 비교하였으며 또한 blocking plate와 스피들의 접촉 높이 비, 평행부 측면의 원공 직경 비와 blocking plate의 폭 비의 변화에 따라 blocking plate와 스피들의 접촉면에서 발생하는 접촉 응력에 의한 소성 변형을 고려하여 blocking plate의 회전 구속 능력을 연구하였다.

2. 유한 요소 해석

2.1 유한 요소 모델

Fig.1(a), (b)에 본 논문에서 사용한 blocking plate와 스피들의 기하학적 모델과 유한 요소 모델을 각각 나타내었다. blocking plate의 길이, 폭, 높이는 각각 500mm, 100mm, 20mm이다.

Blocking plate의 평행부와 스피들과의 초기 간격을 0.1mm로 설정하였으며 스피들의 회전을 구속하기 위하여 스피들의 상부에 blocking plate를 설치하여 두 요소의 접촉으로 인해 발생하는 응력과 변위 해석을 위해 접촉 해석 방법을 본 논문에 적용하였다.

Blocking plate는 SS400, 스피들은 SM45C로 제

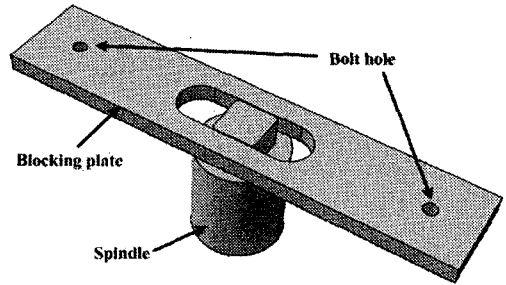


Fig. 1(a) Geometrical models of blocking plate and spindle

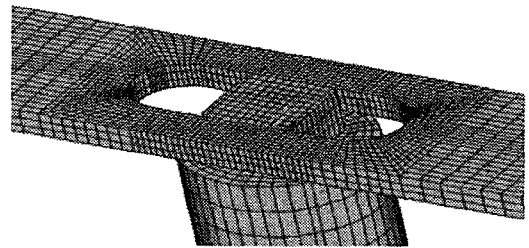


Fig. 1(b) Finite element models of blocking plate and spindle

작되었으며 Table 1과 같은 기계적 성질을 갖는다. 따라서 두 재료의 상이함으로 인하여 소성 변형 해석을 수행함으로써 더 정확한 결과를 얻고자 하였다.

Table 1 Mechanical properties of each material

Division	Spindle	Blocking plate
Material	SM45C	SS400
Elastic modulus	210 GPa	210 GPa
Poission's ratio	0.3	0.3
Yield strength	490 MPa	235 MPa
Tensile strength	686 MPa	450 MPa

2.2 하중 및 경계 조건

본 논문에서 blocking plate의 스피들 회전 구속 능력을 연구하기 위하여 우선 볼트 홀의 내부 벽면 절점들의 자유도(U_x , U_y , U_z)를 모두 구속한 후 blocking plate의 평행부와 접촉하는 스피들에 강제 회전 변위를 주고 유한 요소 해석을 수행하여 구속된 절점들에서의 반발 토크를 산출하였다.

2.3 유한 요소 해석의 설계 변수

Fig. 2는 해석에 사용한 blocking plate와 스피ndl의 정면도와 평면도를 평행부를 기준으로 간략히 도시하여 blocking plate의 회전 구속 능력에 영향을 끼칠 것이라고 판단되는 해석에 적용한 설계 변수를 나타낸 것이다.

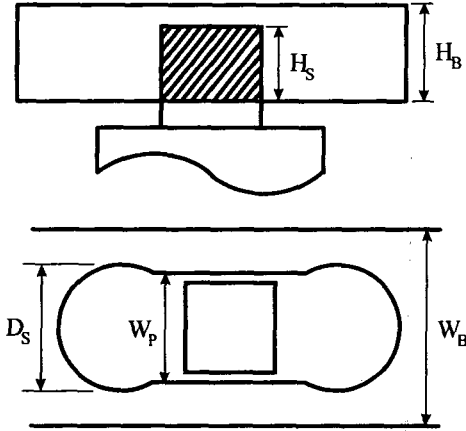


Fig. 2 Front and top view of model and parameters

2.3.1 접촉 높이 비(R_{CH})

식 (1)에서와 같이 접촉 높이 비(R_{CH})는 blocking plate의 두께($H_B=20\text{mm}$)와 스피ndl이 평행부와 접촉되는 높이(H_S)와의 비이다.

$$R_{CH} = \frac{H_S}{H_B} \quad (1)$$

본 논문에서 접촉 높이 비(R_{CH})를 0.4, 0.6, 0.8, 1.0로 변화 시켜 접촉 높이의 변화에 따른 blocking plate의 반발 토크를 분석하였다.

2.3.2 평행부 원공 직경 비(R_{SD})

식 (2)는 평행부의 원공 직경 비(R_{SD})를 나타낸다. 원공 직경 비는 blocking plate의 폭($W_P=50\text{mm}$)과 평행부 직경(D_S)의 비이다.

$$R_{SD} = \frac{D_S}{W_P} \quad (2)$$

평행부 원공의 직경 변화에 따른 반발 토크를 분석하기 위하여 원공 직경비(R_{SD})를 1.0, 1.1, 1.2, 1.3으로 변화시켰다.

2.3.2 Blocking plate의 폭 비(R_{BW})

식 (3)은 blocking plate의 폭 비(R_{BW})를 나타낸 것으로 평행부의 폭($W_P=50\text{mm}$)과 blocking plate의 폭(W_B)비를 나타내었다.

$$R_{SD} = \frac{W_B}{2W_P} \quad (3)$$

Blocking plate의 폭 비(R_{BW})를 1.0, 1.2, 1.4, 1.6으로 변화 시키면서 blocking plate의 폭 변화에 따른 반발 토크를 분석하였다.

3. 접촉부 이론적 배경

Fig. 3은 스피ndl이 θ 만큼 회전했을 때의 blocking plate와의 접촉 상태를 도시한 것이다. 평행부와 접촉하는 스피ndl이 하중을 가하는 부분의 길이 L_3 는

$$L_3 = L - L_1 - L_2 - L_4 \quad (4)$$

식 (4)와 같으며 식 (5)와 같은 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} L &= S(\cos \theta - \sin \theta) \\ L_1 &= (P - S \sin \theta) \tan \theta \\ L_2 &= B - X \\ L_4 &= \frac{P - S \cos \theta}{\tan \theta} \\ X &= \frac{[A \sin \theta (45 + \alpha + \theta) - P] B}{D} \\ A &= \sqrt{S^2 + (S - C)^2} \quad B = \frac{C}{\cos \theta} \\ D &= \frac{1}{3\sqrt{2(45 - \theta)}} \end{aligned} \quad (5)$$

θ : Spindle rotation angle

α : Half of spindle rotation angle

C : Chamfer length

D : Sum of contact depth and clearance

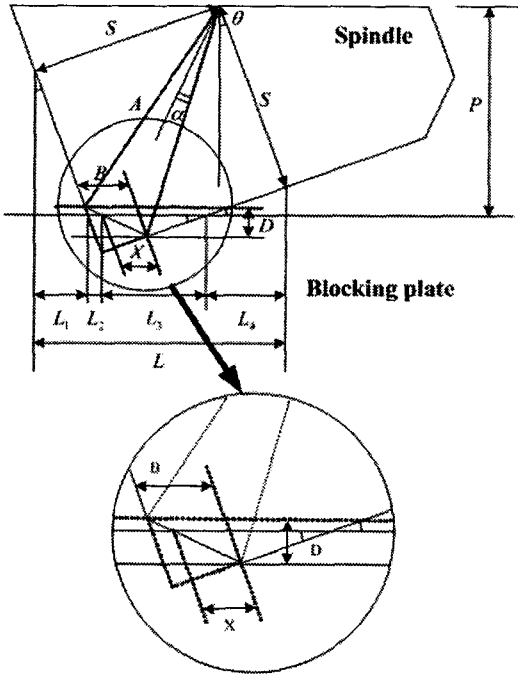


Fig. 3 The schematic of contacting part between a spindle and a blocking plate

식 (4)에서 구한 스핀들과 평행부의 접촉 길이로부터 평행부에 발생하는 이론적 평균 응력 σ_{avg} 는 식 (6)이 된다.

$$\sigma_{avg} = \sigma_y \left[1 - \left(\frac{x}{L_3/2} \right)^2 \right] \quad (6)$$

Fig. 4에서 접촉으로 인한 평행부에 발생하는 최대 응력 σ_y 을 로 정의 한다면 평행부에 발생하는 응력 분포는 포물선과 같은 경향을 보일 것이다. 따라서 평균 응력 σ_{avg} 는 최대 응력 σ_y 의 2/3 과 같다고 할 수 있다. 이론적 해석 결과와 유한 요소법을 통한 blocking plate에 발생한 응력 결과를 검증해 보기 위하여 Fig. 5에 스핀들의 회전각에 따른 이론적 평균 응력 σ_{avg} 와 유한 요소법을 통해 얻은 최대 응력 및 평균 응력을 나타내었으며, Table 2는 이론적 응력 분석 결과와 유한 요소 해석에 의한 결과를 비교한 것이다. Blocking plate의 평행부와 스핀들이 접촉 후 스핀들이 0.4도 회전할 때까지는 이론적 결과 값과 유한 요소 해석에 의한 결

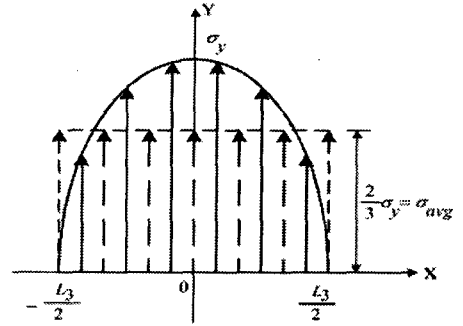


Fig. 4 The relationship of between contact stress and average stress

과 값에 25% 정도의 오차가 있었으나 0.4도 이상의 결과는 재료의 항복 강도인 235 MPa에 이르는 0.8도내에서 이론적 해석 결과와 유한 요소 해석에 의한 결과가 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다.

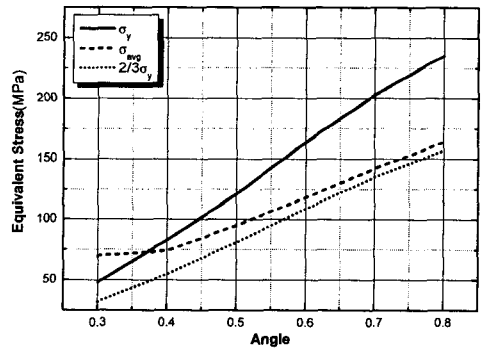


Fig. 5 The relationship between contact stress and average stress

Table 2 Comparison of FEM and theoretical result

Angle [deg]	σ_y [MPa]	$2 \sigma_y/3$ [MPa]	σ_{avg} [Mpa]	Error [%]
0.3	48	32	70	54.3
0.4	83	55	74	25.2
0.5	121	81	95	15.1
0.6	164	109	118	7.3
0.7	203	135	142	4.7
0.8	236	157	164	4.1

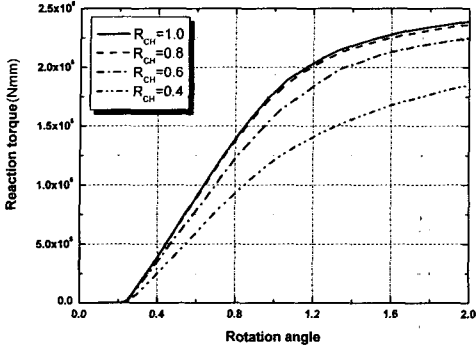


Fig. 6 The reaction torque characteristic with respect to the contact height ratio (R_{CH})

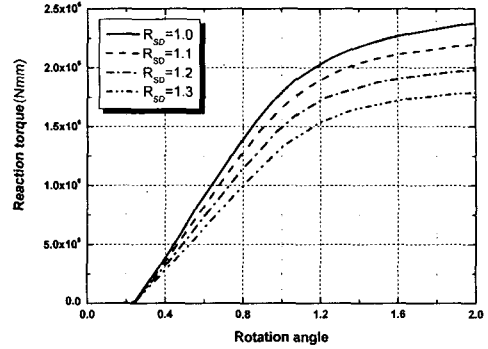


Fig. 8 The reaction torque characteristic with respect to the side circle diameter ratio (R_{SD})

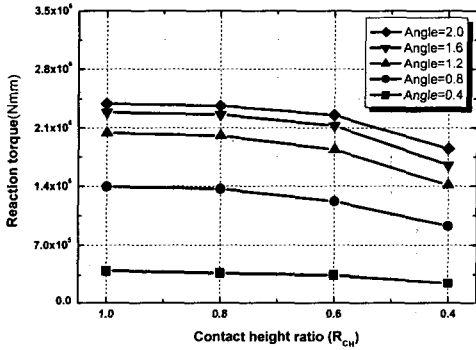


Fig. 7 The reaction torque characteristic with respect to the rotation angle

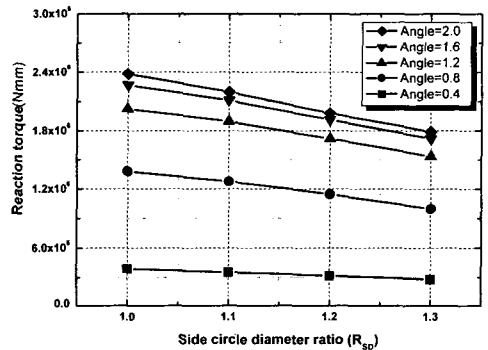


Fig. 9 The reaction torque characteristic with respect to the rotation angle

4. 해석 결과 및 고찰

4.1 접촉 높이 비(R_{CH})에 따른 영향

볼트 홀의 내부 벽면의 절점에서 얻은 blocking plate의 반발 토크를 접촉 높이 비에 따라 Fig. 6에 도시하였다. 평행부 원공 직경비와 blocking plate의 폭 비를 각각 1로 하고 스핀들과 평행부의 초기 간격을 0.1mm로 설정하여 스핀들이 0.25도 회전하면 blocking plate에 반발 토크가 발생하게 하였다. blocking plate에서 발생한 반발 토크가 스핀들이 평행부와 접촉 후 0.8도 회전 할 때까지는 선형적인 발생을 하였으나 그 이상의 스핀들 회전에서는 반발 토크의 발생이 비선형적인 경향을 보였다. 이는 스핀들이 0.8도까지 회전할 때 평행부와 접촉하면

서 발생한 등가 응력이 blocking plate 재료(SS400)의 항복 강도를 넘지 않으며 0.8도 이상의 회전에서는 항복 강도를 초과하여 나타나는 현상으로 판단되며 이때부터 접촉 부분에서는 소성 변형이 발생하여 blocking plate의 절절한 작동을 보장할 수 없게 된다. 그러므로 이런 문제의 해결을 위하여 스핀들의 회전을 0.8도 이하로 제한해야 한다.

Fig. 7은 접촉 높이의 변화에서 blocking plate에 발생한 반발 토크를 스핀들의 회전각에 따라 나타내었다. R_{CH} 가 작아짐에 blocking plate의 회전 구속 능력이 작아지는 현상을 볼 수 있다. 스핀들의 회전각이 0.8도 일 때 스핀들의 임계 회전각이라 할 수 있으며 R_{CH} 가 1.0에서 0.4까지 감소할 때 반발 토크도 2~34%로 감소하였다.

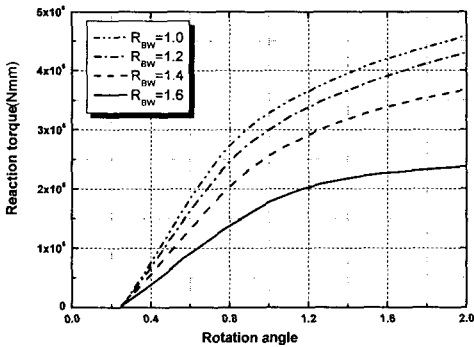


Fig. 10 The reaction torque characteristic with respect to the width of blocking plate ratio (R_{BW})

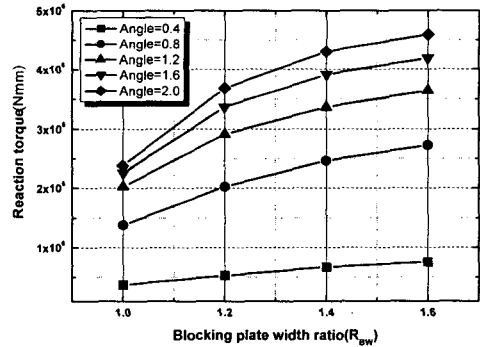


Fig. 11 The reaction torque characteristic with respect to the rotation angle

4.2 평행부 원공 직경 비(R_{SD})에 따른 영향

Fig. 8에서와 같이 평행부 원공 직경 비(R_{SD})에 따른 영향도 접촉 높이 비(R_{CH})와 유사한 결과가 나타났다. 회전각이 0.8도 까지는 반발 토크의 발생이 선형적인 증가 현상을 보였으나 그 이상의 회전에서는 발생 토크의 증가가 감소하였다. 평행부 원공 직경 비(R_{SD})가 커짐에 따라서 blocking plate의 회전 구속 능력이 떨어진다. 이런 현상은 R_{SD} 가 1보다 커지게 되면 평행부의 길이와 평행부 원공에서 blocking plate의 폭까지의 길이가 짧아지게 되어 나타난 것이라 판단된다.

Fig. 9는 원공 직경의 변화에서 스펀들의 회전각에 따라 blocking plate에서 발생한 반발 토크를 나타내었다. 스펀들의 임계 회전각 0.8도인 경우 R_{SD} 가 1에서 1.3까지 증가 할 때 반발 토크는 거의 선형적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 평행부 원공의 직경 비(R_{SD})는 1이 되게 설계되어야 한다.

4.3 Blocking plate의 폭 비(R_{BW})에 따른 영향

Fig. 10에서 나타난 것과 같이 blocking plate의 폭 비에 따른 영향도 접촉 높이 비(R_{CH})와 원공 직경 비(R_{SD})의한 영향과 유사한 경향을 보였다. 역시 회전각이 0.8도 까지는 반발 토크의 발생이 선형적인 증가 현상을 보였으나 그 이상의 회전에서는 발생 토크의 증가가 감소하였다.

Fig. 11은 폭 변화에서 스펀들의 회전각에 따른

blocking plate에서 발생한 반발 토크를 나타내었다. R_{BW} 가 커지게 되면 blocking plate의 회전 구속 능력도 커지게 되고 0.8도의 스펀들 회전각에서 R_{BW} 가 1에서 1.6까지 증가하는 동안 반발 토크도 97%까지 증가하였다. 이런 결과로부터 다른 어떤 파라미터에 따른 반발 토크의 변화보다 폭 비(R_{BW})에 따른 반발 토크의 변화가 가장 크기 때문에 blocking plate의 폭 비(R_{BW})가 가장 중요한 설계 파라미터라 판단된다.

5. 결론

본 논문에서 시동 밸브에서 스펀들의 과도한 회전을 구속하고 적절한 기능을 보장하기 위해 사용되는 blocking plate의 스펀들 회전 구속 능력에 대하여 각각의 설계 변수에 대한 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 스펀들과 평행부의 초기 간격을 0.1mm로 설정한 blocking plate에서 적절한 기능을 보장할 수 있는 스펀들의 임계 회전각은 0.8도였다.
2. Blocking plate의 회전 구속 능력은 평행부와 스펀들의 접촉 높이가 감속함에 따라 비선형적인 감소 현상을 보였다.
3. Blocking plate의 평행부 원공 직경이 평행부보다 커지게 되면 blocking plate의 회전 구속 능력은 거의 선형적인 감소현상을 보였다. 따라

서 평행부 원공의 직경이 평행부 폭과 같게 설계되면 더 좋은 회전 구속 능력을 가질 수 있다.

4. Blocking plate의 폭 비(R_{bw})에 따른 반발 토크의 변화가 접촉 높이 비(R_{ch}), 평행부 원공 직경비(R_{sd})의 변화에 따른 토크 변화보다 더 크게 나타남으로 blocking plate의 폭이 가장 중요한 설계 변수라고 판단된다.

Under the Compressive Loading," J. of KSPE, Vol. 18, No. 7, pp. 91-97, 2001.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 동아대학교 지능형 통합항만관리연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Skrzypek, acek J. "Plasticity and Creep : Theory, Example, and Problems," CRC Press Inc., 1993.
2. Jeon, B. H., and Kim, D. W. "A Study on the Elastic-Plastic Contact Problem for Large Deformation," J. of KSME, Vol. 17, No. 7, pp 1658-1667, 1993.
3. Kang, S. Y., and Lim, J. K. "Finite Element Analysis of Mechanical Parts Using the Contact Element," J. of KSME A, Vol. 22, No. 10, pp 1894-1901, 1998.
4. Moro, T., Hami, A. El, and Moudni, A. El, "Reliability Analysis of a Mechanical Contact Between Deformable Solids," Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 17, pp 227-232, 2002.
5. Barber, J. R., and Ciavarella, M., "Contact Mechanics," Int. J. of Solids and Structures, Vol. 37, pp 29-43, 2000.
6. Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N., "Theory of Elasticity," McGraw-Hill, 1987.
7. Kim, W. T., Koo, Y. P., and Cho, Y. J., "The Elastic Contact Analysis of 3D rough Surface of Nongaussian Height Distribution," J. of KSPE, Vol. 18, No. 10, pp. 53-60, 2001.
8. Kim, B. W., Kim, Y. K., and Lee, K. S., "Friction Contact Analysis of the Crack surface