

고정도 Spindle Screw 전조공정에서의 최적 소재경 선정

김광호*, 김동환**, 김병민***
(2002년 8월 26일 접수)

Determination of Optimal Blank Diameter for the High Precision of Spindle Screw

K. H. Kim, D. H. Kim and B. M. Kim

Abstract

This paper describes the numerical determination of optimum blank diameter for sound material flow and high precise thread profile of a spindle screw through external thread rolling using two-three roll dies. Initial blank diameter affects the dimensional accuracy and surface finish qualities of a spindle screw in thread rolling process, therefore it is very important to determine the optimum blank diameter in thread rolling process. In order to determine the optimum blank diameter, this paper suggests the calculation method of initial blank diameter considering the real shape of tooth. The finite element code DEFORM is applied to analyze the metal flow of tooth, and these analytical results are verified by thread rolling experiment for spindle screw.

Key Words : Spindle Screw, Thread Rolling, Initial Blank Diameter, Thread Profile, Roll Dies

1. 서론

나사전조는 금속의 가소성을 이용하여, 2개 또는 여러 개로 된 전조다이스 사이에 나사소재를 강재로 둘러서 점진적으로 나사산을 성형시키는 방식이다. 둥근다이스(roll dies) 나사전조기는 전조중에 소재가 일정위치에 있고, 2~3개의 둥근다이스 중에서 한 다이스가 접근 하면서 전조되는 방법으로, 다이스의 회전이동에 의해 소재

가 회전하면서 전조되는 방식이다.

Fig. 1은 한쪽 다이스는 회전축에 고정하고 다른쪽의 다이스 회전축을 유압식 캠기구로 이동하여 소재에 다이스 나사산을 압입하면서 전조하는 둥근다이스 전조기를 나타내며, 둥근다이스 전조방식에서 초기 소재경의 선정은 매우 중요하다. 초기 소재경 치수가 스피들 스크류(spindle screw) 표면 및 치수정밀도에 절대적인 영향을 미치기 때문이다.

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
** 부산대학교 정밀 정형 및 압형가공 연구소
*** 부산대학교 정밀 정형 및 압형가공 연구소

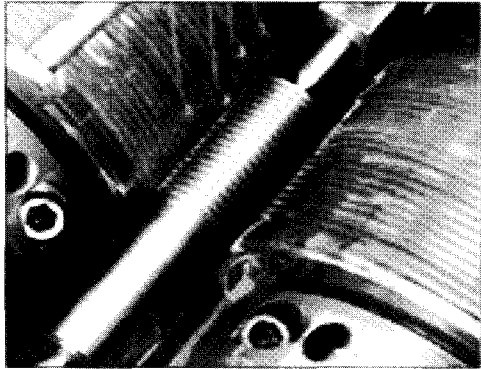


Fig. 1 Thread rolling through roll dies

A. Yamamoto⁽¹⁾, M. Masuda⁽²⁾ 등은 단순 나선형태에 대한 소재경 계산방법을 연구하였다. 또한, Yoshimoto⁽³⁾ 은 초기 소재경을 결정하기 위해 전조시 소재의 밀도변화 및 소재 축방향으로의 연신이 없는 체적일정 조건으로 가정하여 ISO 미터나사산에 적용했다. 그러나 스핀들 스크류 같이 치형형상이 복잡한 경우에는 성형되는 나사산의 끝부분이 편평하다고 가정한 A. Yamamoto 나 Yoshimoto의 가정 모델을 그대로 적용하기가 어렵다. 지금도, 현장에서는 시행착오법으로 초기 소재경을 선정하고 있다. 본 연구에서는 기존의 소재경 계산식을 수정 보완하여 실제 스핀들 스크류의 외형형상을 고려한 초기 소재경 결정 계산식을 제시하고자 한다. 또한, 상용유한요소 코드인 DEFORM을 이용하여 스핀들 스크류 치형의 성형거동을 파악하고, 스핀들 스크류 전조실험을 수행하여 제안된 계산식을 검증하였다.

2. 전조공정의 소재경 결정

2.1 소재경

나사전조시의 초기 소재경은 성형되는 나사 치수정밀도와 나사산의 표면결함에 직접적인 영향을 주기 때문에 초기 소재경의 결정은 나사전조 중에서 매우 중요하다. 초기 소재경은 나사의 종류, 호칭경, 피치, 등급에 따라 다르기 때문에 이에 대한 각각의 적절한 소재경이 결정되어야 한다. 전조가공시 소재경이 작으면 전조 치형의 높이가 낮게 되고 소재경이 크면 전조시 소재 내부에 인장응력을 많이 받게 되므로 치형부 내부에 크랙이 발생한다.

실제 현장에서는 시행착오법으로 나사의 유효경을 공차범위에 들게하기 위해서 여러 가지 소재경을 선삭가공

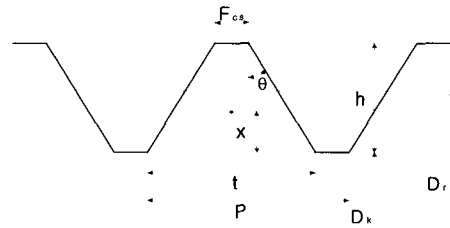


Fig. 2 Thread profile used for calculation of blank diameter by volume constancy

하여 최종제품규격 기준에 적합한 초기 소재경을 결정한다. 전조시 초기소재의 치수공차가 최종 제품의 치수공차에 직접적인 영향을 주는 것이 전조가공의 특이성이고 절삭가공과 다른 점이다.

2.2 소재경 계산

본 연구에서는 초기 소재경을 이론적으로 결정하기 위해 2가지 방법을 제시하였다. 체적일정 조건을 이용한 소재경 계산방법과 치형부의 기하학적인 형태에 대한 적분을 이용한 방법이 있다. Fig. 2는 체적일정 조건을 이용한 초기 소재경 계산을 위한 나사산을 나타낸 것으로, 전조 다이스의 진입으로 인한 골지름의 체적과 나선치형의 체적 합과 동일한 체적을 같은 조건하에서의 소재경 D_r 은 아래의 식(1)과 같이 구해질 수 있다.

$$D_r = \sqrt{\frac{4}{\pi} (V_1 + V_2)}$$

$$\text{여기서, } V_1 = \frac{\pi}{4} D_k^2$$

$$V_2 = 0.5hn(t + F_{cs})\sqrt{[\pi(D_k + 2x)]^2 + P^2} \quad (1)$$

$$t = 2h \tan \theta + F_{cs}$$

$$x = \frac{h}{3} (2F_{cs} + t) / (F_{cs} + t)$$

여기서, D_k 는 골지름, h 는 나사산의 높이, n 는 축방향 단위길이당 나사산수, P 는 피치, θ 는 나사산의 반각 (flank angle), x 는 골지름부터 산형의 중심까지의 거리이며 V_1 은 축방향 단위길이당 골지름 체적이고, V_2 는 축방향 단위길이당 나선치형의 체적을 나타낸다. 하지만 실제 식(1)은 단순나사 형태로 가정하고 계산된 식이므로 형상이 복잡한 스핀들 스크류에 적용하기는 적합하지 않다.

식(2)는 치형부의 기하학적인 형상에서 적분을 이용한

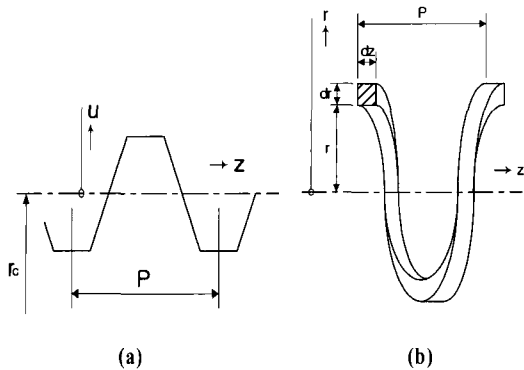


Fig. 3 Picture for blank diameter calculation in integral equation

여 소재경 구하는 식이다. 나사부의 초기 소재경 결정에 있어서 축방향으로의 연신이 발생한다고 가정하면 이론상 초기 소재경은 나사 완성품에서의 유효경보다 크지 않으면 안된다. Fig. 3에서 z축은 나사의 축방향, r축은 반경방향, 그리고 r_c를 나사의 유효반경, u는 유효반경에서 외경까지의 거리라고 하면, 미소 단면적 dr · dz의 반경 r에 대한 코일의 1피치당의 체적 dV는 식(2)로 구하여진다.

$$dV = (2\pi r) dr \cdot dz \quad (2)$$

Fig. 3(b)에 표시된 유효경 위치를 나타내는 선을 기준선으로 하고 나사산의 치형단면은 z와 u를 변수로 나타내며, 소재길이 1피치당의 체적 V_s는 식(2)를 적분한 것이다. 식(2)를 적분하면 소재길이 1피치당의 체적 V_s는 아래의 식과 같다.

$$V_s = \int_0^P \left(\int_0^{r_c+u} 2\pi r \cdot dr \right) dz = \pi \left(r_c^2 \cdot P + 2r_c \int_0^P u dz + \int_0^P u^2 dz \right) \quad (3)$$

또한, 소재반경을 r_k라고 하면, 소재길이 1피치당의 체적 V_k는 식(4)와 같다.

$$V_k = \int_0^P \left(\int_0^{r_k} 2\pi r \cdot dr \right) dz = \pi r_k^2 P \quad (4)$$

여기서, V_s = V_k 조건에 의해 소재반경 r_k에 대해 다시 정리하면 다음과 같다.

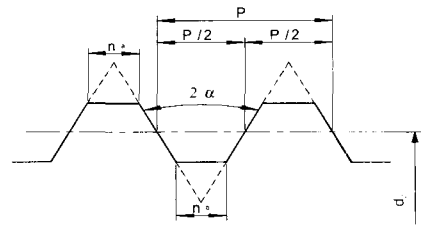


Fig. 4 Dimension for blank diameter calculation in spindle screw

$$r_k = \sqrt{r_c^2 + 2r_c \left(\int_0^P u dz / P \right) + \left(\int_0^P u^2 dz / P \right)} \quad (5)$$

각각의 반경 기호를 2r_c=d_c, 2r_k=d_k로 하여 소재경에 대해 식(5)를 정리하면 식(6)과 같다. Fig. 4에 나타낸 n_a, n_b, a, P, d_k는 각각 이끝 길이, 이뿌리 길이, 나사산의 반각, 피치, 유효경을 나타낸다.

$$d_k = \sqrt{(d_c)^2 + 4d_c \left(\int u dz / P \right) + 4 \left(\int u^2 dz / P \right)}$$

여기서,

$$\int u dz / P = (n_b^2 - n_a^2) \frac{\cot \alpha}{4} P \quad (6)$$

$$\int u^2 dz / P$$

$$= \left\{ \frac{1}{48} - \frac{1}{8} (n_a^2 + n_b^2) + \frac{1}{6} (n_a^3 + n_b^3) \right\} P^2 \cot^2 \alpha$$

식(6)을 유도하기 위해 계산상에서 가정한 형태는 Fig. 5(a)이나 실제 전조후 치형 형상은 Fig. 5(b) 형태로 나타난다. 따라서, 실공정에 가까운 소재경을 산정하기 위해서는 나사산 치형부의 기하학적인 형태를 최대한 근접하게 고려되어야 한다.

실제 전조를 하면 일반적으로 Fig. 5(b)같이 중심 부분이 오목한 형태로 전조가 완료되므로 실험으로 전조된 스피들 스크류 이끝부분 형상에서 Fig. 5(b)의 중심부 오목한 부분을 뺀 점선모양과 같이 가정하여 식(6)을 수정하면 식(7)과 같은 소재경 계산식이 구해진다.

$$d_k = \sqrt{(d_c)^2 + 2d_c \left(\int u dz / P \right) + \left(\int u^2 dz / P \right)} \quad (7)$$

3. 스피들 스크류의 전조공정

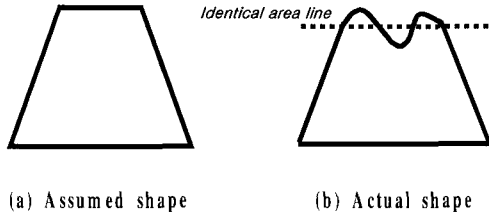


Fig. 5 Tooth profiles for initial blank diameter calculation

3.1 스피들 스크류 소재의 기계적 특성

각종 기계 및 구조물의 체결에 사용되어지는 스피들 스크류 재료는 탄소강, 합금강 및 스테인레스강이 많이 사용된다. 스피들 스크류 부품은 선재로 부터 일정한 크기로 절단한 다음 양단을 곡률 성형시킨 후 전조기에 의해 치형이 성형된다.

전조는 일반적으로 냉간상태에서 제조되지만 특수한 경우에는 온간 또는 열간 가공에 의해 제조되는 경우도 있다. 전조가 행하여지기 전에 적절한 경도를 맞추어야 하므로 많은 경우 전조중 또는 전조후 열처리 공정에 의해 경도를 조절한다. 일반적으로 스피들 스크류 소재는 S철가로 캐삭성이 양호하며 내소삭성이 우수한 SUS303이 사용되는데, 소재의 기계적 성질 및 화학적 조성은 Table 1 과 Table 2 와 같다.

3.2 스피들 스크류의 이론적인 초기 소재경

Fig. 6은 본 연구에서 고려한 스피들 스크류의 치형 치수를 나타내고 있다. 앞에서 제시한 식(6)을 이용하여 Fig. 6의 스피들 스크류에 대한 초기 소재경을 구하면 Ø2.80mm을 얻을 수 있다. 그러나 계산상에서 가정한 형태는 Fig. 5(a)이나, 실제 전조후 치형 형상은 Fig. 5(b) 형태로 나타난다. 따라서, 실제 전조후 치형 형상에 근접하게 수정보완한 식(7)을 이용하여 초기 소재경을 계산하면 Ø2.80mm보다 약간 작은 Ø2.77mm을 얻을 수 있다.

Table 1 Mechanical properties of SUS303

Material	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Hardness (HRC)
SUS 303	24.6	62.3	24-31

Table 2 Chemical composition of SUS303 (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
<0.15	≤1.00	≤2.00	≤0.20	>0.15	8.00-10.00	17.00-19.00

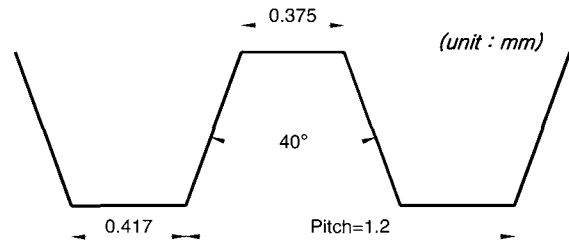


Fig. 6 Dimensions of a spindle screw

3.3 스피들 스크류의 성형해석

해석에 사용된 재료는 SUS303 이며, 유동응력식은 인장시험을 통해 식(8)과 같이 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 94.86 \epsilon^{0.0984} \quad (\text{kgf/mm}^2) \quad (8)$$

성형해석은 상용유한요소 코드인 DEFORM을 이용했으며 다이스와 소재 사이에서 마찰상수가 작으면 미끄럼이 발생하기 때문에 미끄럼 현상을 억제하고 원활한 치형성형을 해석하기 위해 건마찰상태에 가까운 마찰상수(friction factor) m 을 0.9^[1]로 가정하였다. Fig. 7은 마찰상수를 0.9로 해석시 속도분도를 나타낸 그림이다. 속도분포를 보면 둥근다이스의 각속도는 128.23mm/sec 이고 소재의 각속도는 127.3mm/sec로써 미끄럼 현상이 없이 원활하게 전조되는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 초기 소재경 Ø2.77mm일 경우 FEM 해석 결과를 나타낸 것으로 나사산 끝단부의 중심부분이 완전하게 성형되지 않음을 알 수 있다. 나사산 끝단부에서 중심부분에 불완전 성형부가 발생하는 이유는 소재가 다이스 벽면을 따라서 유동하기 때문에 나사산 끝단부의 중앙은 상대적으로 늦게 차오르게 된다.

전조공정에서 나사산 끝단부의 가운데 움푹 들어간 지름(Fig.11, F)이 상대적으로 중요하다. 전조후 나사산 형상의 정밀도를 향상시키기 위해 끝단부의 움푹 들어간 지점까지 연삭을 하기 때문에 최종제품 외경과 직접적인 관계가 있기 때문이다.

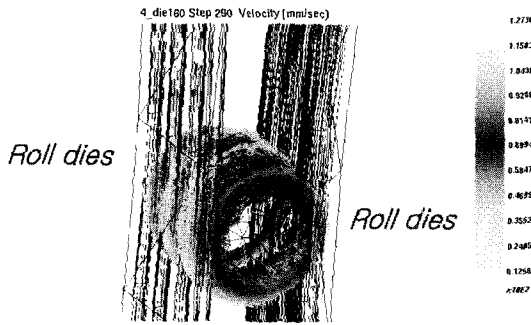


Fig. 7 Velocity distribution by FEM analysis

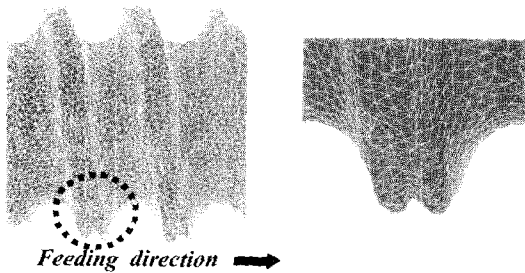


Fig. 8 Deformation made by FEM analysis

3.4 실험결과 및 고찰

실제 스피들 스크류 제조를 위한 생산공정 순서도를 Fig. 9에 나타내었다. 스피들 스크류 전조 실험에 사용된 전조기의 용량은 20ton이며 통과전조(through feed thread rolling) 방식으로써 주축속도는 30rpm이다. 전조실험결과 전조력은 8ton 정도로 측정되었으며 연신율은 4%로 나왔다. 유한요소 해석결과에서는 전조력은 약 9.37ton 정도로 나왔고 연신율은 4.3%로 측정되었다. 초기 소재경은 각각 $\varnothing 2.70\text{mm}$, $\varnothing 2.77\text{mm}$, $\varnothing 2.80\text{mm}$ 의 3가지 조건으로 하여 실험하였다. Table 3은 초기 소재경이 $\varnothing 2.77\text{mm}$ mm 경우에 대해 FEM 해석결과와 실험결과를 비교한 것이다. 비교적 해석결과와 실험결과가 치수가 잘 일치하므로 FEM 해석에 의한 최적 소재경 결정방법도 유효함을 알 수 있다.

Table 3 Comparison of experiment and FEM analysis for $\varnothing 2.77\text{mm}$ spindle screw (Fig. 11)

	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)
Experiment	3.33	3.20	3.11	1.96
FEM	3.33	3.27	3.11	1.97

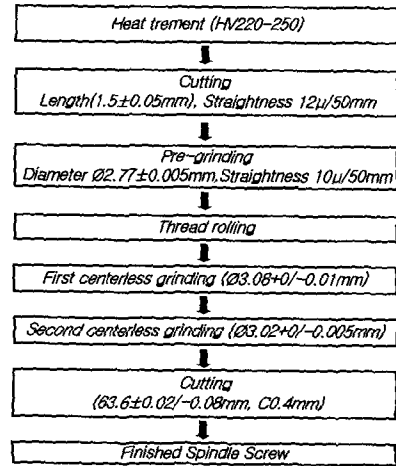


Fig. 9 Manufacturing process for a spindle screw

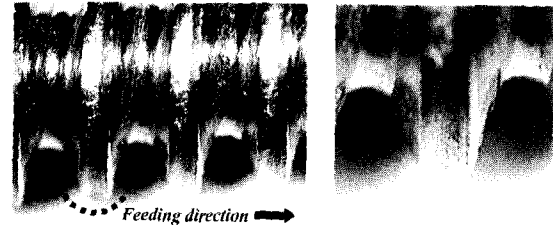


Fig. 10 Photograph of a spindle screw

Fig. 10은 해석한 결과와 동일한 공정 조건하에 실험한 초기 소재경 $\varnothing 2.77\text{mm}$ 스피들 스크류 사진이다. 나사산 끝단부의 형상을 비교해 볼 때 해석결과와 상당히 비슷하다. Table 4는 각각의 소재경에 대하여 실험을 세 번씩 수행하여 평균값을 나타낸 것이다. 누적피치 측정은 전조된 스피들 스크류의 임의적 세부분 나사산을 선정해서 A, B, C로 나타냈었다. 측정에 사용한 장비는 형상투영기로 나사산 10개에 대한 길이를 측정하여 누적피치를 계산하였으며 초기 소재경 $\varnothing 2.77\text{mm}$ 일 때 누적피치 오차가 거의 없는 1.20mm를 나타내고 있다.

본 연구에서의 스피들 스크류의 최종제품 외경은 $\varnothing 3.0\text{mm}$ 이며 전조후에 표면정도를 높이기 위해서 센터리스 원통연삭(centerless grinding) 공정이 추가되는데 연삭 가공을 하기 위한 최소한 연삭 가공여유가 0.05mm 정도는 되어야 연삭이 가능하다. Fig. 11에 표시된 F까지 연삭을 하므로 F의 직경이 최소한 $\varnothing 3.10\text{mm}$ 은 되어야 연삭이 가능하다. 그러므로, Table 4에 나타난 스피들 스크류의 실험결과와 같이 $\varnothing 2.77\text{mm}$ 일때가 F가 가장 $\varnothing 3.10\text{mm}$ 에 가까운 것을 알 수 있다.

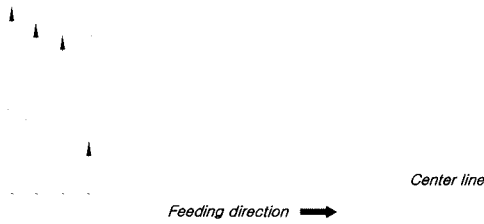


Fig. 11 Schematic geometry of a spindle screw after thread rolling

Table 4 Experimental results for three initial blank diameters (mm)

Dia meter	Pitch			D	E	F	G
	A	B	C				
Ø2.70	1.20	1.21	1.21	3.19	3.06	2.98	1.95
Ø2.77	1.20	1.20	1.20	3.33	3.20	3.11	1.95
Ø2.80	1.21	1.21	1.21	3.42	3.32	3.22	1.94

따라서, 실험결과에서 확인 할 수 있듯이 최적소재경은 Ø2.77mm이다. Fig. 11에서 D와 E의 외경이 다른 이유는 소재가 이송되면서 이송되는 방향 즉 D쪽의 다이스에 압력이 더 많이 가해지므로 D쪽의 외경이 조금 더 커지게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 스피들 스크류의 정밀도 향상을 위한 방법으로 최적 소재경 선정에 대한 연구를 하였다. 우선 이론적으로 소재경을 계산하고 계산값의 소재경으로 부터 실험과 FEM 시뮬레이션을 통해 본 연구에서 제시한 초기 소재경 결정 방법의 타당성을 검증하였다. 실험결과 Ø2.77mm 이외의 소재경에서는 누적피치와 외경이 제품규격 기준에 적합하지 않음을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구 결과를 정리하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 통과전조방식으로 전조할 경우 소재가 이송하게 되므로 최적 소재경보다 작거나 클 경우 전조중 소재의 이송속도 차에 의한 누적피치 오차가 발생하게 됨을 알 수 있다.
- (2) 스피들 스크류 전조시 항상 발생하게 되는 치형 끝단부의 기하학적인 형상을 고려한 기존의 초기 소재경 계산식을 보완하여 스피들 스크류에 적합한 초기 소재경 계산식을 제시하였고, 제시된 계산식을 이용하여 계산된

초기 소재경 값으로 전조실험한 결과 최적 소재경임을 알 수 있다.

- (3) 최적 소재경 선정을 위한 FEM 해석결과 치수와 실험결과 치수가 잘 일치하므로 FEM 해석에 의한 최적 소재경 결정방법도 유용함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소의 지원에 의하여 수행 되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 山本 著：東京工業大學學報, No. 1, 1957, 1.
- (2) 益田 著：精密機械, 19-4, 1953, p. 143.
- (3) 吉本 著：精密機械, 30 12, 1964, p. 930.
- (4) 東京：コロナ社 1990, "回轉加工：轉造とスピニング" 日本塑性加工學會 編, pp. 12~21, p. 72.
- (5) 葉山 益次郎 著, 1981 "回轉塑性加工學", 東京：近代編集社, 昭和56, pp. 128~149.
- (6) 姜명순 저, 大學書林, 1979, 機械工作法 pp. 162~163.
- (7) Bishop, J. F. W. and Watkins, M. T., 1958, "The effect of specimen diameter on the straining of a cylindrical load cell", MERL Plasticity Report Nos. 105 and 109; Brit. J. appl. Phys. pp. 38~40.
- (8) V. Ivanov, V Kirov., 1997 "Rolling of internal threads: Part 1", Journal of Materials Processing Technology 72, pp. 214~220.
- (9) V. Ivanov., 1997 "Rolling of internal threads: Part 2", Journal of Materials Processing Technology 72, pp. 221~225.
- (10) P. Domblesky, F. Feng., 2002 "A parametric study of process parameters in external thread rolling", Journal of Materials Processing Technology 121, pp. 341~349.
- (11) 김광호, 김동환, 김병민., 2002 "전조시 Spindle Screw의 정밀도 향상을 위한 최적 소재경 선정", 한국소성학회 2002년도 춘계학술대회 논문집, pp. 133~137.