

전조시 Spindle Screw의 정밀도 향상을 위한 최적 소재경 선정

김광호* · 김동환** · 김병민***

Determination of optimum blank diameter for the high precision of Spindle Screw

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

Abstract

This paper summarizes the results of a numerical study conducted to analyze the determination of optimum blank diameter on material flow and thread profile for Spindle Screw in external thread rolling. Initial blank diameter affect a quality of 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 suggest the calculating method of initial blank diameter considering real shape of tooth. The finite element code DEFORM is applied to analyze the metal flow of tooth. then the analytical results are verified by experiment of thread rolling for Spindle Screw.

Key Words : Spindle Screw, Thread Rolling, Blank Diameter, FEM

1. 서 론

나사전조는 금속의 가소성을 이용하여, 2개 또는 여러 개로 된 전조다이스 사이에 나사소재를 굴러서 나사산을 성형시키는 방식이다. 둥근다이스 나사전조반은 전조중에 소재가 일정위치에 있고, 2~3개의 둥근다이스 중에서 한 다이스가 접근 하면서 전조되는 방법으로, 다이스의 회전이동에 의해 소재가 회전하면서 전조되는 방식이다. Fig. 1은 한쪽의 다이스는 회전축에 고정하고 다른 쪽의 다이스 회전축을 유압식 캠기구로 이동하여 소재에 다이스의 나사산을 압입하면서 전조하는 two-dies 전조반이다. 이 방식으로의 전조공정에서는 소재경 선정이 중요하다. Akira Yamamoto⁽¹⁾, Makoto Masuda⁽²⁾ 등은 단

순 나사형태에 대한 소재경 계산방법을 연구하였다. 그리고, Yoshimoto⁽³⁾은 소재경을 결정하기 위해 전조중에는 소재의 밀도변화 및 소재의 축방향의 연신이 없으며, 체적일정 조건으로 가정하여 ISO 미터나사산에 적용했다. 그러나 Spindle Screw 같이 형상이 복잡한 경우에는 이와 같은 가정들을 그대로 적용하기가 어렵다. 지금까지, 현장에서는 시행착오법으로 초기 소재경을 선정하고 있다. 본 연구에서는 기존의 소재경 계산식을 수정 보완하여 실제 Spindle Screw의 외형형상을 고려한 초기 소재경결정 계산식을 제시하였다. 또한, 상용유한요소 코드인 DEFORM을 이용하여 Spindle Screw 치형의 성형이동을 파악하고, Spindle Screw 전조실험을 수행하여 제안된 계산식을 검증하였다.

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
** 부산대학교 정밀 정형 및 금형가공 연구소
*** 부산대학교 기계공학부

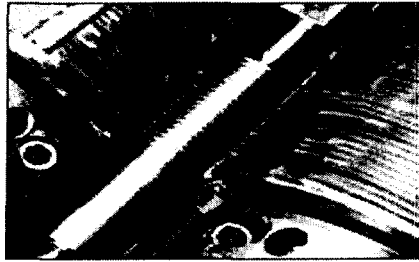


Fig. 1 Two-dies thread rolling

2. Spindle Screw

2.1 Spindle Screw 소재의 기계적 특성

각종 기계 및 구조물의 체결에 사용 되어지는 Spindle Screw 재료는 탄소강, 합금강 및 스테인레스강이 많이 사용된다. Spindle Screw 부품은 선재로 부터 일정한 크기로 절단한 다음 양단을 곡률 성형시킨후 전조반 또는 전조장치에 의한 치형이 성형된다. 이것들은 일반적으로 냉간가공에서 수행되지만 특수한 경우에는 온간 또는 열간 가공에 의해 양산된다.

전조가 행하여 지기 전에 적절한 경도를 맞추어야 하므로 많은 경우 전조중 또는 전조후 열처리 공정에 의해 경도를 조절한다. 본 연구에 사용한 소재는 S첨가로 패삭성이 양호하며 내소착성이 우수한 SUS303을 사용하였다. 기계적인 성질은 Table 1에 표시했으며, 화학적인 조성은 Table 2에 나타내었다.

2.2 소재직경

나사전조전의 소재직경은 성형되는 나사정도와 나사산의 표면결합에 직접적인 영향을 주기 때문에 소재직경 결정은 나사전조 중에서 중요한 부분중에 하나이다. 소재직경은 나사의 종류, 호칭경, 피치, 등급에 대해 각각 적절한 소재직경이 결정되어야 한다.

Table 1 Mechanical properties of SUS303

Material	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Hardness (HRC)
SUS 303	246	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

전조가공시 소재경이 작으면 치형이 낮게 되고, 크면 갈라지기 쉽다. 나사의 유효경을 공차내에 들게하기 위해서 여러 가지 소재경을 시험 제작하여 재료에 가장 적합한 수치를 결정한다. 기계요소의 소성가공에서 소재의 치수공차가 제품의 치수공차보다 엄격한 것은 전조가공의 특이성이라고 보아 절삭가공과 다른 점이다.

2.3 소재직경 계산

소재경을 이론적으로 결정하기 위해 적용되는 방법은 체적일정 조건으로의 소재경 계산방법과 치형부의 기하학적인 형태를 적분을 이용한 방법이 있다. Fig. 2는 체적일정 조건을 이용한 소재경 계산 방법이다. 공구가 파고 들어서 배제되는 재료의 체적과 부풀어 오르는 체적을 같다고 하면 소재경 D_r 을 아래의 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$D_r = \sqrt{\frac{4}{\pi} (V_1 + V_2)} \quad (1)$$

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

$$V_2 = 0.5hn(t + F_{cs})\sqrt{[3.14(D_k + 2x)]^2 + P^2}$$

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

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

여기서, V_1 은 축방향 단위길이 마다의 풀밀원주 체적이고, V_2 는 축방향 단위길이마다의 산의 체적을 나타낸다. Fig. 2에 각 기호를 표시하였으며, D_k 는 풀지름, h 는 나사산의 높이, n 은 축방향 단위길이 마다의 산수, P 는 피치, θ 은 나사산의 반각(flank angle)을 나타낸다. x 는 풀밀원부터 산형의 중심까지의 거리이다.

식(2)는 치형부의 기하학적인 형상에서 적분을 이용하여 소재경 구하는 식이다. 나사부의 직경에 있어서 체적 변화의 원인이 축방향으로의 연신율이 생기는 것이라고

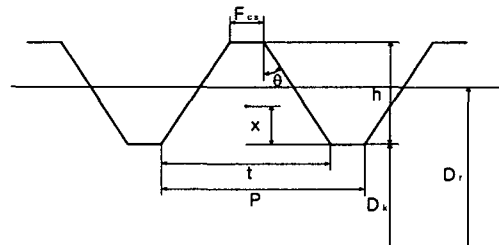


Fig. 2 Picture of blank diameter calculation for volume constant

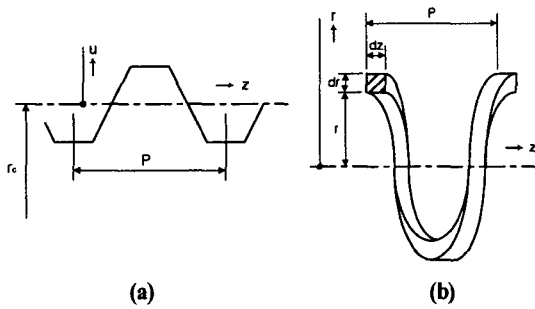


Fig. 3 Picture of blank diameter calculation in integral calculus

한다면 이론상 소재직경은 나사의 완성품에서의 유효경보다 크지 않으면 안된다. Fig. 3에 나타낸 것과 같이, 나사의 축방향을 z , 반경방향을 r 좌표라 하면 단면적 $dr \times dz$ 을 반경 r 에 대한 코일의 1피치당의 체적 dV 는 식(2)로 구하여 진다.

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

나사의 유효반경은 r_c 로 Fig. 3 (b)에 표시된 유효경 위치를 나타내는 선을 기준선으로 하고 나사산의 치형단면은 z 와 u 를 변수로 사용하고 소재길이 1피치당의 체적 V_s 는 식(2)을 적분한 것이다.

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

단, P 는 피치이고 소재길이는 단위길이로 한다. 소재 반경을 r_k 라고 하고 소재길이 1피치당의 체적인 V_k 는 식(2)을 적분하여 구하면 식(4)이 된다.

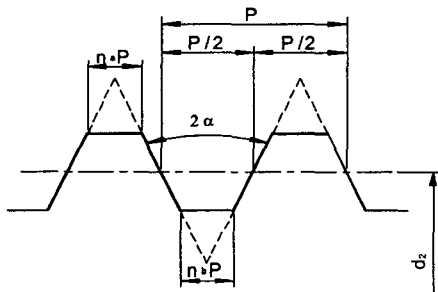


Fig. 4 Dimension of blank diameter calculation in Spindle Screw



(a) Calculation shape (b) The actual shape of tooth

Fig. 5 The shape of tooth

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

$V_s = V_k$ 라고 놓고 r_k 에 대해 정리한다.

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

단순화하면, $\int_0^P u dz / P$, $\int_0^P u^2 dz / P$ 는 각각 $\int u dz / P$, $\int u^2 dz / P$ 이고, 각각의 반경 기호를 $2r_c = d_c$, $2r_k = d_k$ 로 해서 직경에 대해 식(5)을 정리하면 식(6)과 같다.

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

where,

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

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

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

Fig. 6을 참조해서 식(6)으로 소재경을 구하면 $\varnothing 2.80\text{mm}$ 로 구해진다. 현장에서는 $\varnothing 2.76\text{mm}$ 을 실공정에서 사용하고 있으므로 오차가 크다. 이렇게 소재경이 차이가 나는 이유는 나사산 끝단부의 불균일한 형상에 있다. Fig. 5에서의 치형 형상을 보면 계산상에서 가정한 치형형태는

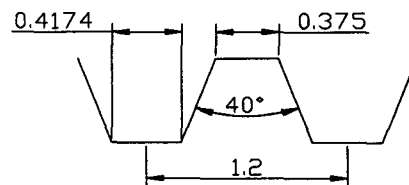


Fig. 6 Dimension of Spindle Screw

Fig. 5(a) 형상이지만 실제 전조후 치형형상은 Fig. 5(b) 형태로 나타난다. 따라서, 실공정에 가까운 소재경을 산정하기 위해서는 나사산 치형부의 기하학적인 형태를 최대한 근접하게 고려 하여야 한다. 따라서, 식(6)을 보완하면 아래의 식(7)과 같다.

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

식(6)을 이용하여 구한 소재경의 값은 Ø2.80mm 인 반면 식(7)으로 소재경을 구하면 Ø2.77mm 이 나온다. 따라서, 현장에서 사용하는 소재경 Ø2.76mm 에 상당히 근접함을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Spindle Screw 의 성형해석

해석에 사용된 재료는 SUS303 이며, 유동응력식은 식(8)과 같다.

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

성형해석은 상용유한요소 코드인 DEFORM을 이용했으며 다이스와 소재의 마찰계수는 $m=0.9$ 로 해석을 수행했다. Fig. 7은 FEM 해석 결과를 나타낸 것으로 나사산 끝단부의 형상이 건전하지 못함을 알 수 있다. 나사산

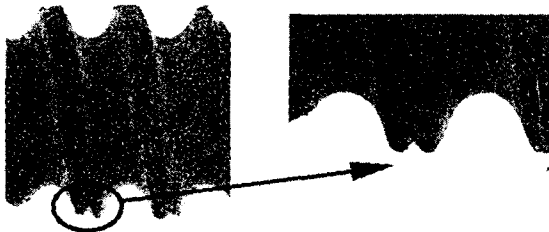


Fig. 7 Analysis of FEM simulation



Fig. 8 Photograph of Spindle Screw

Table 3 Comparison of experiment and FEM analysis for Ø2.76mm Spindle Screw (Fig. 9)

Ø2.70mm	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)
Experiment	3.33	3.20	3.11	1.96
FEM	3.326	3.274	3.106	1.971

끝단부에서 중심부분에 불완전 성형부가 발행하는 이유는 소재가 다이스 벽면을 따라서 유동하기 때문에 나사산 끝단부의 중앙은 상대적으로 늦게 차오르게 된다. 전조공정에서 나사산 끝단부의 가운데 움푹 들어간 지름 (Fig. 9, F)이 상대적으로 중요하다. 전조후 나사산 형상의 정밀도를 향상시키기 위해 끝단부의 움푹 들어간 지점까지 연삭을 하기 때문에 외경과 직접적인 관계가 있다.

3.2 실험결과 및 고찰

Spindle Screw 전조 실험에서 사용된 전조기 용량은 20ton이며 통과전조 방식으로써 주축속도는 30rpm이다. 전조시 필요한 전조력은 8ton 정도로 나왔다. 소재직경은 각각 Ø2.70mm, Ø2.76mm, Ø2.80mm 하여 실험하였다. Table 3에서는 FEM 해석결과와 실험결과를 비교해 놓았다. 비교적 해석결과와 실험결과와 치수가 잘 맞는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 해석한 결과와 동일한 공정 조건하에 실험한 Spindle Screw 사진이다. 나사산 끝단부의 형상을 비교해 볼 때 해석결과와 상당히 비슷하다. Table 4는 각각의 소재경에 대해 실험결과이다. 누적피치 측정은 전조되어서 나온 Spindle Screw에 임의적으로 세부분을 선정해서 A, B, C로 나타냈었다. 측정에 사용한 장비는 형상투영기로 나사산 10개에 대한 길이 측정하여 누적피치를 계산하였다. 본 연구에서의 Spindle Screw의 최종 SPEC 기준은 Ø3.0mm 이다. 그러므로, 전조후에 표면정도를 높이기 위해서 연삭 (centerless grinding) 공정이 추가된다. 연삭(centerless grinding) 가공을 하기 위해서는 최소한 연삭할 부분의

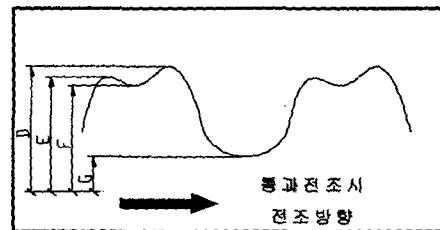


Fig. 9 Geometric of Spindle Screw

Table 4 Results of Spindle Screw experiment (mm)

Dia meter	Pitch			D	E	F	G
	A	B	C				
Ø2.70	1.20	1.21	1.21	3.19	3.06	2.99	1.95
Ø2.70	1.19	1.20	1.20	3.20	3.07	2.98	1.96
Ø2.76	1.20	1.20	1.20	3.33	3.20	3.11	1.95
Ø2.80	1.19	1.20	1.20	3.40	3.29	3.20	1.96
Ø2.80	1.21	1.21	1.21	3.42	3.32	3.22	1.94

Table 5 Feeding velocity and percentage of elongation

Dia meter	Before testt (mm)	After test (mm)	Time (sec)	Elongation (%)
Ø2.70	1000	1045	62.99	4.5
	997	1040	63.05	4.31
Ø2.76	1000	1041	70.35	4.1
	1003	1043	69.57	3.99
Ø2.80	1005	1044	75.75	3.98
	1000	1040	76.58	4

두께가 0.05mm 정도는 되어야 가능하다. Fig. 9에 표시된 F까지 연삭을 하므로 F의 직경이 최소한 Ø3.10mm은 되어야 연삭이 가능하다. 그러므로, Table 4에 나타난 Spindle Screw의 결과와 같이 Ø2.76mm 일때가 F가 가장 Ø3.10mm에 가까운 것을 알 수 있다. 따라서, 실험 결과에서 확인 할 수 있듯이 최적소재경은 Ø2.76mm이다. Fig. 9에서 D, E가 다른 이유는 소재가 이송되면서 다이스부의 영향으로 직경의 차이가 생긴 것이다. Table 5는 소재경 Ø2.70mm, Ø2.76mm, Ø2.80mm 일때의 연신율과 이송 속도를 측정된 결과이다. Fig. 10은 실제 Spindle Screw의 생산공정 순서를 나타내었다.

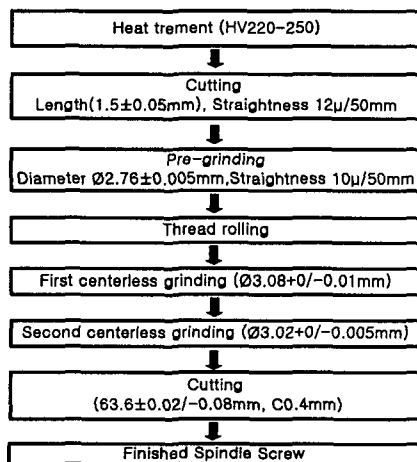


Fig. 10 Process drawing of Spindle Screw

4. 결론

본 연구에서는 Spindle Screw의 정밀도 향상을 위한 방법으로 적정 소재경 선정에 대한 연구를 하였다. 우선 이론적으로 소재경을 계산하고 계산값의 소재경으로 부터 실험과 FEM simulation을 통해 타당성을 검증하였다. 실험결과 Ø2.76mm 이외의 소재경에서는 피치와 외경이 SPEC 기준에서 맞지 않는 것을 알 수 있었다. 본 연구 결과를 정리하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) Two-dies 전조에서 통과식으로 전조할 경우 소재가 이송하게 되는데 적정 소재경을 선정하지 못하면 누적피치 오차가 크다.

(2) Two-dies 전조에 의한 Spindle Screw의 초기소재경을 결정하는 기존의 수식을 보완해서 치형의 소재유동을 고려한 소재경 결정 계산식을 제시하였고, 실험결과와 잘 일치하였다.

(3) 선정된 최적 소재경을 사용하여 실험결과와 FEM 해석결과를 비교해 볼 때 나사산 끝단부의 형상과 치수가 잘 일치함을 알 수 있었다.

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, 143.
- (3) 吉本 著 : 同上, 30-12, 1964, 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, p. 12~21.
- (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, p. 128~149.
- (6) 姜명순 저, 文運堂, 1977, (最新) 機械工作法 p. 218-1~218-6.
- (7) 姜명순 저, 大學書林, 1979, 機械工作法 p. 162~163.