

〈論 文〉

고속탭핑에 있어서 절삭토크에 관한 연구

최 만 성*

(1994년 5월 27일 접수)

A Study on Tapping Torque in High Speed Tapping

Man-Sung Choi

Key Words : High Speed Tapping(고속탭핑), Tapping Torque(절삭토크), Tapping Model(탭핑모델), Tapping Speed(절삭속도)

Abstract

In order to analytically predict tapping torque and thrust force in high speed tapping, a cutting model for main cutting edge with a uniformly restricted tool-chip contact area were developed. From this model equations are derived for the prediction of tapping torque given the cutting conditions, tap geometry, and an empirical factor which is related to the workmaterial. Computed values of torque is shown to compare favorably with those obtained from tapping tests on 16MnCr5. The applied torque about the cutting edge of teeth at lead chamfer is estimated respectively and it is shown that observed value is gradually decreased with following teeth.

1. 서 론

탭핑은 다른 여러 절삭가공 중에서도 대단히 복잡한 절삭기구를 가지고 있고 이에 관한 연구는 주로 공구 제조업자에 의해 이루어져 왔다. 그리고 이것의 연구결과는 다른 공구업체의 경쟁으로 인해 노하우로 취급되어 온 실정으로 인해 유용한 절삭자료나 연구결과 보고가 미흡한 실정이다.^(1~3) 탭핑에 있어서 주요 문제는 짧은 공구수명이고 특히 고강도 재료의 나사절삭을 할 때 일어난다. 탭핑에 있어서 챔프기구의 절삭력에 관한 연구는 Doyle,⁽⁴⁾ Carl⁽⁵⁾에 의해 절삭토크는 Rocek,⁽⁶⁾ F. Tikal⁽⁷⁾에 의해 이미 정성적으로 논의된 바 있고 나사산의 정도는 宇尾⁽⁸⁾에 의해 밝혀져 있지만 탭핑의 절삭력 및 절삭토크를 예측하기 위한 정량적인 해석은 아직 없다. 탭공정에 있어서 탭은 탭나

사와 같은 형상을 생성하기 위해 정확한 피치로 전진해야 한다. 약간의 오차가 있어도 탭의 플랭크절삭에 의해 유효효율을 증가시키게 된다. 플랭크절삭은 축추력이 존재하면 역시 발생하는데 이것은 탭형상, 탭퍼신의 설계, 작업자의 영향을 받게된다. 만약 탭의 조건이 좋으면 마모가 적게 발생되지만 심하면 절삭토크, 축추력이 함께 증가한다.⁽⁴⁾ 또한 역으로 토크가 증가하면 탭마모가 심하게 되고 공구수명이 짧아지게 된다. 절삭토크에 영향을 미치는 인자는 탭의 종류와 경사각의 대소, 구배부의 길이 등 탭의 형상에 관한 것과 피삭재의 종류나 나사부의 길이, 밀구멍의 크기, 절삭조건에 관한 것 등 상호 복잡하게 얽혀서 탭핑 시의 저항으로 나타난다. 절삭토크는 크게 두 가지 이유로 발생되는데 하나는 칩이 탭의 공구경사면 상으로 미끌어지면서 생기는 마찰에 의한 것으로 이것은 사용되는 절삭유제와 탭의 형상에 영향을 받는다. 다른 하나는 금속의 내부마찰과 전단에 의해 생기며 주로 금속의 절삭성에 관계된다.

*정회원, 한국기술교육대학 생산기계공학과

이런 복잡한 절삭변수에 의해 국내에서의 일반적인 탭가공속도는 S45C인 경우 10~20 m/min이고 고속 탭가공속도는 30~40 m/min이 한계이지만 실제 난삭재 가공인 경우는 더욱 낮아지게 된다. 탭가공은 거의 최종 가공 단계인만큼 중요한 가공이고 이런 측면에서 본 연구에서는 외주 선삭자료만 주어지면 고속탭핑에 있어서 탭의 절삭토크를 해석할 수 있는 정량적인 해석을 시도하였다.

2. 탭핑에 있어서 절삭기구 해석

탭핑시 공구날에 작용하는 힘의 성분은 Fig. 1에 나타내듯이 접선력 F_c , 반경력 F_p , 축추력 F_f 로 나눌 수 있다. F_p 과 F_f 의 변동은 생성되는 나사의 형상정도에 영향을 미치는데 축추력 F_f 의 언밸런스는 주로 플랭크절삭에 의해 나사형상을 해치고 반경력 F_p 는 토크의 증가, 플랭크면의 산 과치수 (over sized), 짧은 탭수명, 탭파손을 야기시킨다. 절삭토크는 구배부의 원주접선방향에 걸리는 저항으로써 접선력 F_c 에 의해 결정된다.

탭의 절삭작용은 구배부에서 되고 구배부의 길이는 절삭성, 내구성, 암나사의 정도, 다듬질면 등에 영향을 미친다. 일반적으로 뚫린 구멍에는 구배부가 긴 탭을 막힌 구멍에는 짧은 탭을 사용하는데 본 연구에서는 구배부 길이 2.5산, 구배각 15°, 3개의 비틀린 홈(flute)을 가진 스파이럴 탭을 사용하였다.

Fig. 2는 이 탭의 구배부에 있어서 나선형의 불완전 산을 가진 공구면을 좌표축 중심으로 투영시켜 절삭하는 순서를 나타낸 것이다. 이 그림에서 음영으로 된 부분이 탭의 불완전 나사부로써 구배

부가 되며 탭가공시 절삭이 행해지는 순서대로 절삭날 번호를 1번에서 9번까지 표시하였다. 이후의 탭 부분은 완전 나사부로써 탭설계시 이미 생성된 나사산과 함께 탭자체를 안내하는 역할 즉 자진작용을 하게된다. Fig. 2(a)에서 보듯이 구배부의 각 절삭날은 탭의 회전과 함께 주어진 절입량 만큼 절삭을 하게되고 절삭날 9번이 절삭을 마치면 완전한 나사산을 형성하게 된다. Fig. 2(b)는 각 공구면의 칩-공구 접촉면적이 일정한 비율의 절삭면적을 가짐을 보여준다. 또한 이 불완전 나사부의 절삭날 각각의 절삭메카니즘을 보면 선삭의 내경절삭과 유사하고 이 점에서 Kienzle⁽⁹⁾의 비절삭저항을 이용하여 다음식과 같이 절삭력을 계산할 수 있다.

$$F_c = K_{c1.1} \times b \times h^{(1-z)} \quad (1)$$

$$F_f = K_{f1.1} \times b \times h^{(1-x)} \quad (2)$$

$$F_p = K_{p1.1} \times b \times h^{(1-y)} \quad (3)$$

여기에서, F_c , F_f , F_p 각각 탭이송 방향의 이송분력(축추력), 주절삭력(접선력), 배분력(반경력),

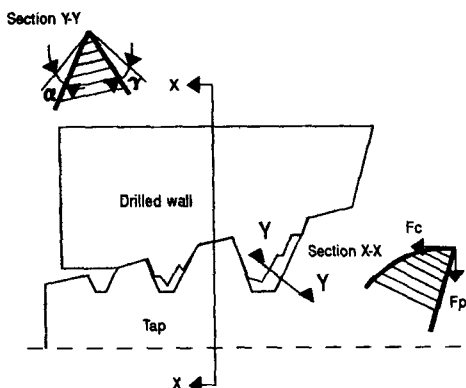


Fig. 1 Forces exerted during tap

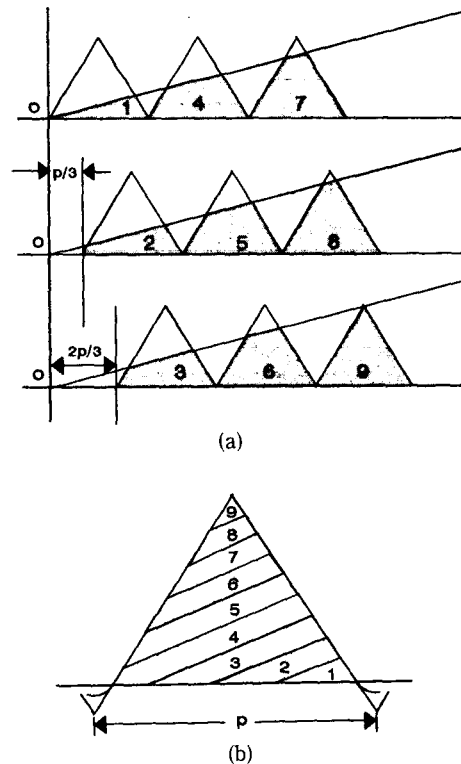


Fig. 2 (a) Positions of cutting faces on the chamfer of a tap
(b) Cutting area of individual teeth in tap

b 는 절삭폭, h 는 칩의 두께, K_i 는 비절삭저항이고 피삭재료, 절삭조건, 공구의 형상에 크게 영향을 받는다. 그리고 x, y, z, c 는 절삭속도 등에 의한 비절삭저항에 영향을 미치는 인자이며 $(1-x), (1-y), (1-z)$ 는 절삭깊이, 피삭재료와 공구재료의 조합에 의해 달라진다. 다음에 절삭토크 M_s 는 식(1)의 이송분력만 알면 다음과 같이 구해진다.

$$M_s = F_c \times r_s \quad (4)$$

여기서, r_s 는 공구의 중심선에서 절삭면적 무게중심까지의 거리를 나타낸다. 절삭토크 M_s 를 계산하기 위해 각 절삭날의 절삭면적을 구해야 하는데 이에 따른 공구의 기하학적 관계를 나타내면 Fig. 3과 같이 된다.

그림에서 δ 는 구배각(chamfer angle), β 는 나사산의 반각을 나타낸다. Fig. 3에 의한 각 좌표점은 다음식으로 구할 수 있다.

$$x_{h,i} = \frac{1}{\tan\beta - \tan\alpha} \times \frac{p \times \tan\beta \times (i-1)}{3} \quad (i=1,9) \quad (5)$$

$$y_{h,i} = \frac{p \times \tan^2\beta \times (i-1)}{3(\tan\beta - \tan\alpha)} - p \times \tan\beta \times (i-1)/3 \quad (6)$$

$$x_{f,i} = \frac{1}{\tan\beta + \tan\alpha} \times (4p \times \tan\beta \times (i-1)/3) \quad (i=1,9) \quad (7)$$

$$y_{f,i} = \frac{-4p \times \tan^2\beta \times (i-1)}{3(\tan\beta + \tan\alpha)} + (4p \times \tan\beta \times (i-1)/3) \quad (8)$$

$$x_{g,i} = \{4p \times \tan\beta \times (i-1)/3 - y_{f,i}\} / \tan\beta \quad (i=1,9) \quad (9)$$

$$y_{g,i} = y_{f,i} \quad (10)$$

여기에서, i 는 홈이 3개인 절삭의 경우 절삭을 하

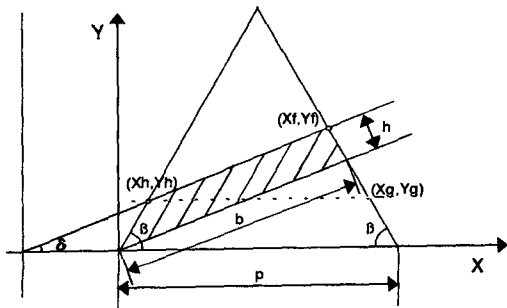


Fig. 3 The geometry of tap for predicting cutting forces and torque

는 각 1번에서 9번까지의 절삭날을 의미한다. 식(5~10)에 따라 각 공구날 상면의 투명면적을 구하면 다음과 같다.

$$A_i = \{p + (x_{g,i} - x_{h,i})\} \times y_{h,i}/2 + (x_{g,i} - x_{h,i}) \times (y_{f,i} - y_{h,i})/2 \quad (11)$$

따라서 실제의 절삭면적은 A_r 는 다음과 같이 된다.

$$A_r = A_{i+1} - A_i \quad (i=1,9) \quad (12)$$

여기서, 식(1~3)의 절삭면적 $A = b \times h$ 대신에 식(12)를 이용하면 더욱 정확한 절삭력 및 절삭토크를 얻을 수 있다. 칩두께 h 는 절삭모델의 기하학적인 관계로부터 다음과 같이 구해진다.

$$h = P \times \sin\beta / z \quad (13)$$

식(13)의 P 는 암나사의 피치, z 는 홈 수이다. 탭핑시 120도 회전마다 각 탭절인의 절삭기구는 다르고 비틀림각이 존재하면 이에 따른 절삭력 및 절삭토크 또한 달라지지만 탭핑방향의 축추력 및 절삭토크는 일정하고 탭의 반경력 및 접선력은 큰 영향을 받게 된다.

3. 실험방법

선삭에 있어서 비절삭저항은 W. König⁽¹⁰⁾의 실험자료를 인용하였다. 인용된 자료에 있어서 경사각 γ 는 1° 감소(증가)할 때 주분력 F_c 는 1.5%, 이송분력 F_f 는 5.0%, 배분력 F_p 는 4.0% 증가(감소)한다. 또한 기울기각(inclination angle) λ 는 1° 증가(감소)시 주분력 F_c 가 1.5%, 이송분력 F_f 가 1.5%, 배분력 F_p 이 10.0% 증가(감소)한다. 사용된 피삭재는 16MnCr5이다. 다음 Table 1은 각 공구의 형상에 따라 초경공구 P10을 사용하여 얻은

Table 1 Cutting data from the [10]

Cutting speed m/min	Specific cutting force N/mm ²	Slope value 1-z	Specific feeding force N/mm ²	Slope value 1-x	Specific passive force N/mm ²	Slope value 1-y
50	1608.	0.6937	385.	0.2495	263.	0.4360
100	1596.	0.7699	291.	0.2691	215.	0.5192
200	1535.	0.8054	254.	0.2889	226.	0.6129

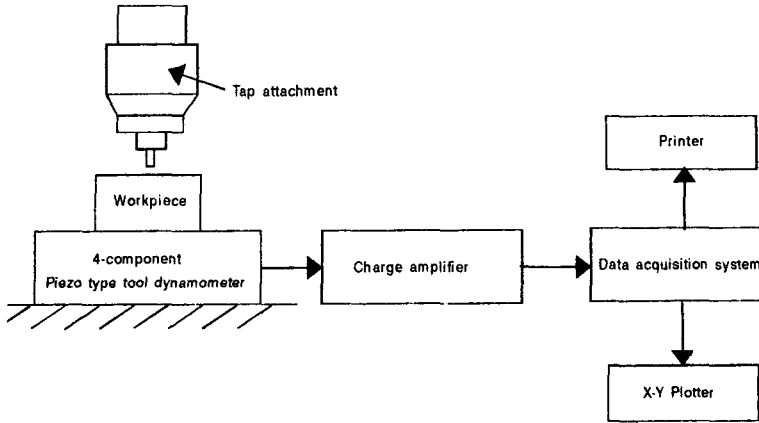


Fig. 4 Experimental setup

비절삭저항을 나타낸 것이다. 절삭속도는 50 m/min, 100 m/min, 200 m/min이다.

여기서, 공구경사각 $\gamma=6^\circ$, 여유각 $\alpha=5^\circ$, 기울기각 $\lambda=0^\circ$, 절입각 $\chi=70^\circ$, 노즈반경 r 는 0.8 mm이다. 탭핑에 있어서 절삭토크를 실험하기 위해 사용된 공작기계는 Maho AG의 NC 밀링머신이고 공구는 3홈의 스파이럴 탭으로써 구조상 칩의 휘말림에 따른 완전 산의 이빠짐이 일어나기 쉬운 탭이다. 이 탭은 절삭속도를 적정하게 함에 따라 칩의 배출상태를 안정시키고 휘말림을 최소화할 수 있다.

실험장치에 대한 개략도를 Fig. 4에 나타낸다.

4. 실험결과 및 고찰

비절삭저항에 관한 König⁽¹⁰⁾의 실험자료에서 Fig. 5는 칩의 두께가 비절삭저항에 어떻게 영향을 미치는가를 보여주는 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 칩의 두께가 두꺼워질수록 비절삭저항은 점차 감소한다. 이것은 주어진 절삭면적에서 절삭폭이 일정하다고 하였을 때 칩의 두께는 비절삭저항과 반비례 관계가 있음을 보여주는 것이다.

또한 비절삭저항은 절삭속도가 증가할 때 더욱 적음을 알 수 있다. 이것은 절삭속도가 증가할 때 전단면의 전단각이 증가하고 아울러 칩의 두께가 감소하면서 절삭저항이 감소하기 때문이다. 그러나 이것도 칩의 두께가 1.6 mm 정도되면 일정하게 됨을 볼 수 있는데 전단면에서의 변형률속도(strain rate)와 절삭온도가 상쇄되는 효과로 생각된다.

Fig. 6은 절삭속도 50 m/min와 100 m/min로 식

(4)를 이용하여 탭핑초기에서 정상상태까지 절삭토크를 계산한 것이다. 절삭속도가 증가하면 절삭토크가 감소하는 일반적인 경향을 여기서 볼 수 있다.

Fig. 7은 16MnCr5를 절삭속도 55 m/min로 탭핑하였을 때 절삭시간에 따른 토크를 측정된 것이며 여기서 공구경사각 γ 는 6° 이고 릴리프각 α 는 1.95° 이다. 절삭모델에 따른 절삭토크의 해석결과와 실험결과를 비교하기 위해 Fig. 6과 Fig. 7을 도표로 수치화하면 Table 2와 같다.

Table 2에서 볼 수 있듯이 이론적으로 예측한 값과 실험에서의 절삭토크의 변화는 거의 비슷한 경향을 보이고 토크의 크기도 거의 같음을 볼 수

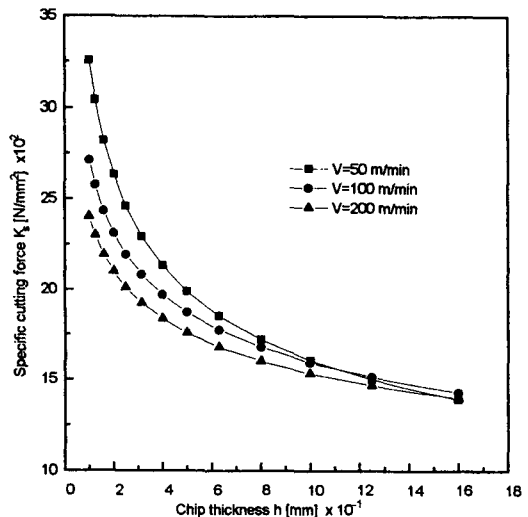


Fig. 5 The effect of chip thickness on specific cutting forces

Table 2 Comparison of predicted torque and experimental data

No. of teeth	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	Predicted	Experiment
Torque (Nm)	3.0	1.9	1.7	1.5	1.3	1.1	0.8	0.5	0.2	Total : 12.1	12-13

있다.

각종의 절삭공구에 피삭재에 적합한 경사각 (rake angle)이 있는 것처럼 탭에도 각 피삭재에

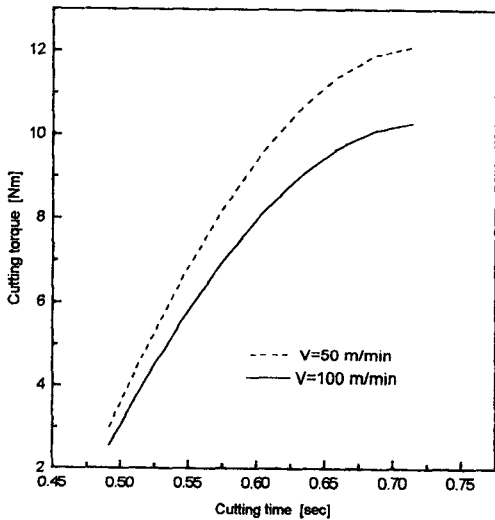


Fig. 6 Variation of calculated torque with cutting time

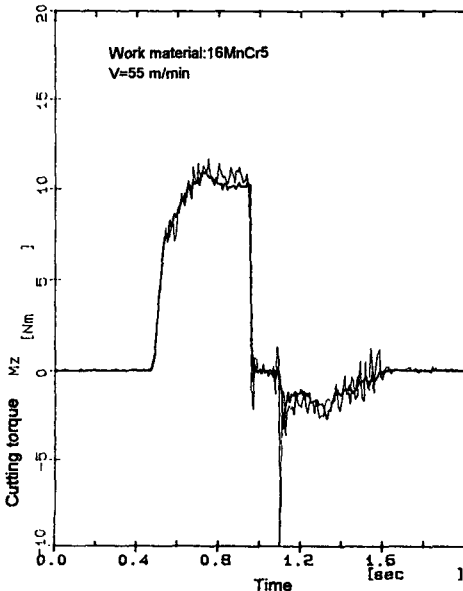


Fig. 7 Variations of cutting torque in $V_c=55$ m/min

적합한 경사각이 있다. 보통 경사각이 크면 절삭성도 좋게 되고 가공면도 향상되지만 절삭날이 손상되기 쉽고 피삭 암나사의 정도도 불량하게 된다.

Fig. 8은 공구경사각 γ 를 $4^\circ, 6^\circ, 9^\circ$ 로 바꾸었을 때 각 절삭날에 작용하는 절삭토크를 나타낸 것인데 공구경사각이 클수록 각 절삭날에 걸리는 토크가 감소함을 알 수 있다.

또한 여기서 절삭날 1,2번에 가장 큰 토크가 작용하고 그 크기의 기울기 또한 가장 급격한 변화를 보이며 이후의 탭의 토크는 완만하게 감소한다. 절삭날 1,2번에 가장 큰 토크가 작용하는 것은 공구날의 절삭면적과 공구의 중심선에서 절삭면적 무게 중심까지의 거리의 곱이 최대가 되기 때문이다. 여기서 탭핑토크 M_s 를 계산해보면 $\gamma=4^\circ$ 일 때 M_s 는 12.5 Nm, $\gamma=6^\circ$ 일 때 $M_s=12.1$ Nm, $\gamma=8^\circ$ 일 때 11.7 Nm였다. 따라서 전체적으로는 공구경사각이 증가하면 절삭토크는 감소하는 현상을 알 수 있다.

Fig. 9는 구배각 δ (chamfer angle)를 각각 $9^\circ, 12^\circ, 15^\circ$ 로 바꾸었을 때 각 절삭날에 작용하는 토크를 계산한 것이다. 탭의 공구날 1번과 2번까지의 변화는 Fig. 8과 비슷한 현상을 보이는데 반하여 이후의 공구날이 받는 절삭토크는 구배각이 클수록

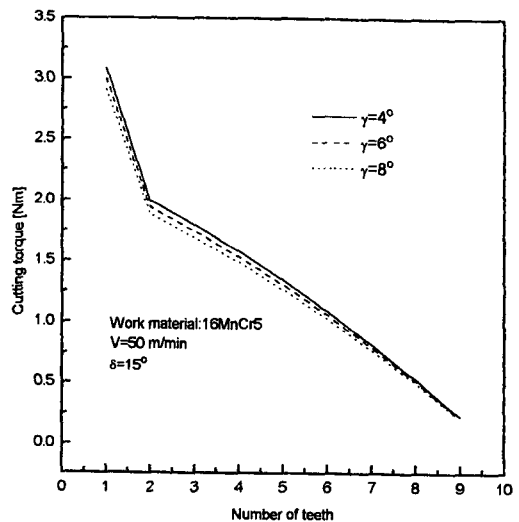


Fig. 8 Variation of calculated cutting torque with rake angle

급격히 감소하게 된다. 이것은 칩의 두께 h 가 일정하다고 가정하였을 때 배출되는 칩의 폭 b 가 급격히 감소함으로써 절삭면적이 감소함을 의미하고 실제의 칩폭을 측정하였을 때 유사한 결과를 보였다. 구배각이 달라질 때 탭핑토크 M_s 를 알아보면 $\delta=9^\circ$ 일 때 $M_s=11.3$ Nm, $\delta=12^\circ$ 일 때 $M_s=12.2$ Nm이고 $\delta=15^\circ$ 일 때 $M_s=12.1$ Nm로써 구배각이 어떤 정도의 범위 내에서는 일정해지는 것으로 추측된다.

Fig. 10은 16MnCr5를 절삭속도 10,25,40,55,70

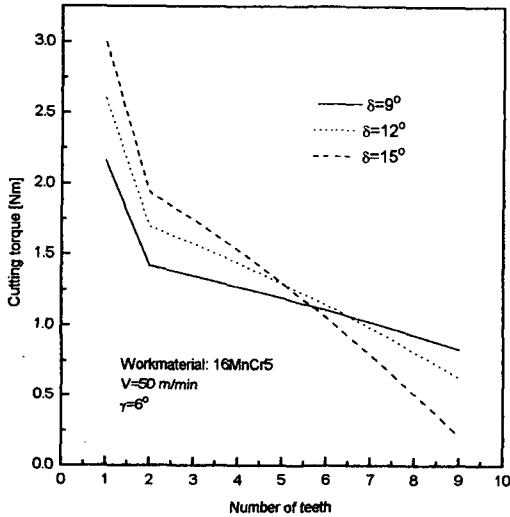


Fig. 9 Variation of calculated cutting torque with chamfer angle

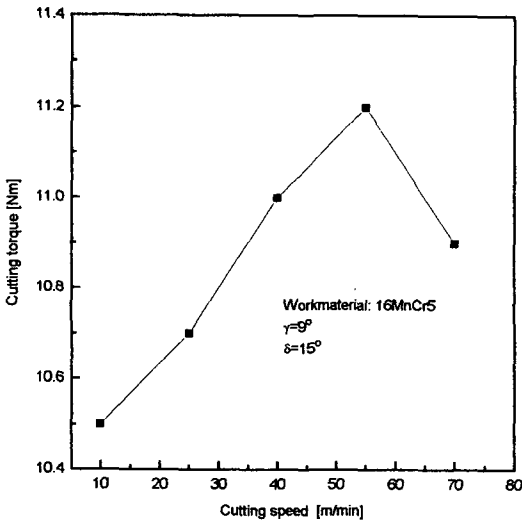


Fig. 10 The effect of cutting speed on cutting torque

m/min로 탭핑하였을 때 탭핑토크를 측정된 것이다. 절삭속도 55 m/min까지는 토크가 증가하는데 이것은 배출되는 칩이 두꺼운 이유로 칩배출이 원만하지 못한데서 오는 이유로 생각된다.

Fig. 11은 구배각 $\delta=15^\circ$ 의 탭을 절삭속도 40, 55, 100 m/min로 변화시켰을 때 공구경사각에 대한 토크의 변화인데 Fig. 8에서 고찰한 것과 같이 공구경사각이 증가하면 토크가 감소하는 해석결과와 같은 경향을 볼 수 있다. 또한 여기서 볼 수 있듯이 경사각 8° 까지는 급격한 변화를 보이지만 이후는 음의 기울기가 완만한데 이론적인 결과로 볼 때 절삭날의 절삭면적이 감소하는 측면과 비절삭저항이 점차 감소하기 때문이라 여겨진다.

그러나 실제 탭핑시 칩의 배출이 크게 영향을 미치는 효과를 고려하면 이러한 현상은 공구경사각이 8° 이상일 때 칩과 탭 주벽의 구속이 약해지는 점도 하나의 원인으로 생각할 수 있다.

5. 결론

고속 탭핑에 있어서 절삭토크를 예측할 수 있는 탭의 절삭모델과 16MnCr5로 탭가공 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 탭의 주 절삭날에 작용하는 공구-칩의 접촉면적, 즉 절삭면적에 관한 절삭모형을 설정하고 비절삭저항의 데이터로써 탭핑 시 발생하는 절삭력과 절삭토크를 구할 수 있는 해석적인 식을 유도하였다.

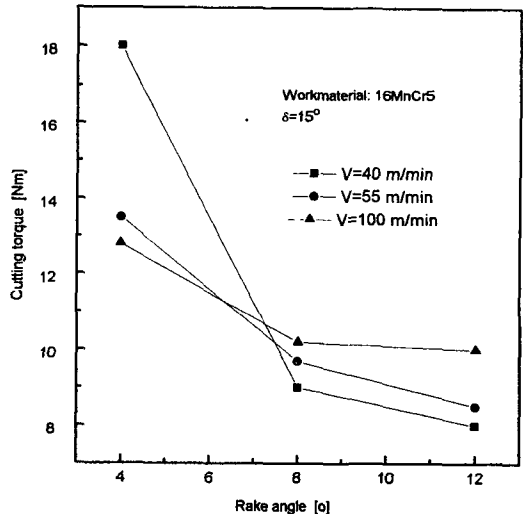


Fig. 11 The effect of rake angle on cutting torque

(2) 공구의 형상, 절삭속도를 변화시킨 외주선삭 데이터를 이용하여 탭의 각 절삭날에 작용하는 절삭토크를 구하고 16MnCr5의 탭핑실험을 통하여 얻어진 결과로 상호의 관련에 대해서 정성적 검토를 하였다.

(3) 절삭모델에 따른 절삭토크를 해석한 결과 탭의 구배부에 있어서 각 절삭날에 걸리는 절삭토크는 각 절삭날이 순서대로 점차 감소한다.

참고문헌

- (1) Zielinski, Z., 1964, "A Method of Testing Tap Performance," *Machinery*, 105, pp. 1364~1377.
- (2) Lorenz, G., 1963, "The Effect of Rake Angle in Nut Tapping," *C.I.R.P. Annals*, Vol. 12, pp. 116~119.
- (3) Lorenz, G., 1978, "A Study on the Effect of Tool Geometry," *Mech. Engg. Transaction, Inst. Eng., Australia*, Me, Vol. 3, pp. 101~104.
- (4) Doyle, E. D. and Dean, S. K., 1974, "Effect of Axial Forces on Dimensional Accuracy During Tapping," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 14, p. 325.
- (5) Carl, J., 1978, "Fundamentals of Drilling, Tapping and Reaming," *Int Symp. Influence Metal Hole Making Operation*, Vol. 5.
- (6) Rocek, V. and Boleslav, M., 1984, "Maschinelles Gewindebohren," *Werkstatt und Betrieb*, Vol. 117, No. 1, pp. 51~53.
- (7) Scherm, W. and Tikal, F., 1993, "Gewinde auf Bearbeitungszentren mit Synchrospindel Bohren," *Werkstatt und Betrieb*, Vol. 126, No. 5, pp. 287~290.
- (8) 宇尾平二, 1954, "タツプの擴大しろについて," 平二越技報, Vol. 13, No. 1, pp. 44.
- (9) Kienzel, O. and Victor, H., 1954, "Spezifische Schnittkräfte bei der Metallbearbeitung," *Werkstattstechnik und Maschinenbau*, Vol. 47, pp. 224~225.
- (10) König, W., 1982, *Spezifische Schnittkraftwerte für die Zerspanung Metallischer Werkstoffe*, Verlag Stahleisen MBH, Düsseldorf.