

냉간인발된 쾌삭강의 외경선삭시 칩-공구 마찰 및 전단 특성

이영문*, 조삼규**, 최수준***, 송태성****, 박태준****

Chip-Tool Friction and Shear Characteristics of Cold Drawn Free Machining Steels in Turning

Young Moon Lee*, Sam Kyu Cho**, Soo Joon Choi***, Tae Seong Song****, Tae Joon Park****

ABSTRACT

In this study, chip-tool friction and shear characteristics of cold drawn free machining steels in turning were assessed. To do this, a newly developed equivalent oblique cutting model was adopted. And for comparison with those of free machining steels, chip-tool friction and shear characteristics of conventional carbon steels were also investigated. The Pb-S free machining steel shows superior machinability to others. In case of the Bi-S free machining steel, the shear stress and the specific friction energy are relatively lower than those of conventional carbon steels, but its shear strain is relatively high, so it does not show any remarkable improvement of machinability.

Key Words : Free machining steel (쾌삭강), Single point tool (단인공구), Oblique cutting (경사절삭), Specific friction energy (비마찰에너지), Specific shear energy (비전단에너지), Specific cutting energy (비절삭에너지)

1. 서론

1920년 미국에서 병기, 기계산업의 요구에 의해 S 쾌삭강이 개발된 이래 1939년 미국 Inland Steel사와 벡텔 메모리얼 연구소의 공동연구에 의해 Pb 쾌삭강, 1960년 독일 아헨공대에서 Ca 쾌삭강, 1961년 미국 Inland Steel사에서 Te 쾌삭강, 1980년대 중반 미국 Inland Steel사와 일본 Nippon Steel사 공동으로 Pb-Bi 계 쾌삭강이 개발되었으며, 그 종류는 수십종에 이르고 있다⁽¹⁾.

쾌삭강의 개발과 더불어 절삭성에 대한 연구가 병행되었으며 발표된 연구보고서, 논문만 하더라도

일일이 열거할 수 없을 정도의 방대한 양에 이르고 있으며, 최근 쾌삭강의 고속절삭기구에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다⁽²⁾.

한편 국내에서의 쾌삭강 개발현황은 80년대 중반 창원특수강, 포항제철에서 S 쾌삭강의 개발이 이루어졌으며, 최근 포항제철 기술연구소에서 Bi-S 계 쾌삭강의 개발이 시도되고 있다⁽³⁾.

그러나 쾌삭강의 절삭특성에 대한 연구는 극히 미미한 실정이다.

최근 이영문⁽⁴⁾등은 단인공구에 의한 3차원 절삭의 전단소성변형특성과 칩-공구경사면의 마찰거동특성 해석을 위하여, Shaw⁽⁵⁾의 경사절삭해석모

* 경북대학교 기계공학부

** 포항제철 기술연구소

*** 창원기능대 전산응용기계기술학과

**** 경북대학교 대학원

델을 확장하여 대표적인 3 차원 절삭과정인 외경 선삭과정에 상당하는 등가경사절삭모형을 설정하였다.

본 연구에서는 상기의 외경선삭과정에 상당하는 등가경사절삭모형을 도입하여 최근 국내에서 개발된 냉간인발된 Bi-S 계 쾌삭강의 마찰 및 전단 특성 평가를 시도하였다. 또한 비교평가를 위해서 일본에서 제조된 냉간인발된 Pb-S 계 쾌삭강과 국내에서 제조된 기계구조용강 SM45C 및 일반구조용강 SS41 에 대한 절삭실험을 병행하였다.

2. 외경선삭과정에 대한 절삭력 해석

3 차원적으로 이루어지는 외경선삭과정에서의 칩-공구 마찰 및 전단 특성의 해석을 위해서는 통상적으로 측정되는 절삭 3 분력을 좌표변환을 통하여 공구 경사면 및 전단면에 작용하는 힘의 성분을 결정하여야 한다⁽⁴⁾.

2.1 공구경사면에 작용하는 절삭력 성분

외경선삭시 칩과 공구 경사면사이의 마찰 상태를 해석하기 위해서는 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 공구 인선을 원점으로 하고 주절삭날에 해당하는 등가측면절삭날 방향 x_3 , 공구경사면상에서 등가측면절삭날에 수직한 방향 z_3 , 및 공구경사면에 수직한 방향 y_3 으로 이루어지는 새로운 오른손 좌표계 $x_3y_3z_3$ 를 설정하여 x, y 및 z 축방향의 3 개 절삭력성분을 x_3, y_3 및 z_3 방향의 절삭력 성분인 $F_{R_x}, F_{R_y}, F_{R_z}$ 로 나타내는 것이 필요하다. xyz 좌표계를 새로운 좌표계 $x_3y_3z_3$ 로 변환하기 위해서는 y 축을 중심으로 등가측면절삭날 각 C_{seq} 만큼 회전시키고, 새로운 z_1 축을 중심으로 등가 기울임각 i_{eq} 만큼 회전시킨 후, x_2 축을 중심으로 등가 수직경사각 α_{neq} 만큼 회전시킨다. 이 때의 좌표 변환행렬은 식(1)에 나타난 바와 같다.

공구경사면상에 작용하는 합력 F_c 는 $\sqrt{F_{R_x}^2 + F_{R_z}^2}$ 이다. 그러나 F_c 가 작용하는 방향과 칩흐름방향이 이루는 각을 ρ 라 하면 공구경사면상에 작용하는 마찰력

$$\begin{bmatrix} F_{R_x} \\ F_{R_y} \\ F_{R_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos i_{eq} \cos C_{seq} & \sin i_{eq} & -\cos i_{eq} \sin C_{seq} \\ -\cos \alpha_{neq} \sin i_{eq} \cos C_{seq} - \sin \alpha_{neq} \sin C_{seq} & \cos \alpha_{neq} \cos i_{eq} & \cos \alpha_{neq} \sin i_{eq} \sin C_{seq} - \sin \alpha_{neq} \cos C_{seq} \\ -\sin i_{eq} \sin \alpha_{neq} \cos C_{seq} + \cos \alpha_{neq} \sin C_{seq} & \sin \alpha_{neq} \cos i_{eq} & \sin i_{eq} \sin \alpha_{neq} \sin C_{seq} + \cos \alpha_{neq} \cos C_{seq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} F_{S_x} \\ F_{S_y} \\ F_{S_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos i_{eq} \cos C_{seq} & \sin i_{eq} & -\cos i_{eq} \sin C_{seq} \\ -\cos(90 - \phi_{neq}) \sin i_{eq} \cos C_{seq} + \sin(90 - \phi_{neq}) \sin C_{seq} & \cos(90 - \phi_{neq}) \cos i_{eq} & \cos(90 - \phi_{neq}) \sin i_{eq} \sin C_{seq} + \sin(90 - \phi_{neq}) \cos C_{seq} \\ \sin(90 - \phi_{neq}) \sin i_{eq} \cos C_{seq} + \cos(90 - \phi_{neq}) \sin C_{seq} & -\sin(90 - \phi_{neq}) \cos i_{eq} & -\sin(90 - \phi_{neq}) \sin i_{eq} \sin C_{seq} + \cos(90 - \phi_{neq}) \cos C_{seq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

성분 F 는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \sqrt{F_{R_x}^2 + F_{R_z}^2} \cos \rho \quad (3)$$

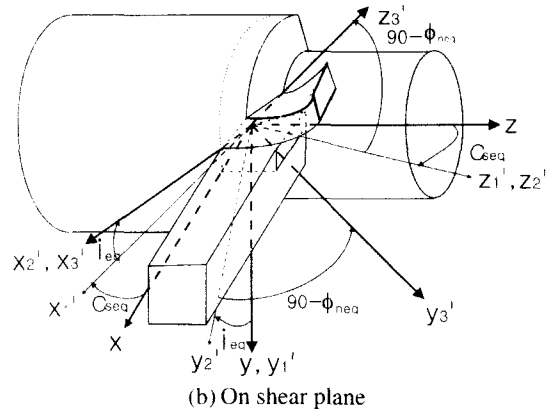
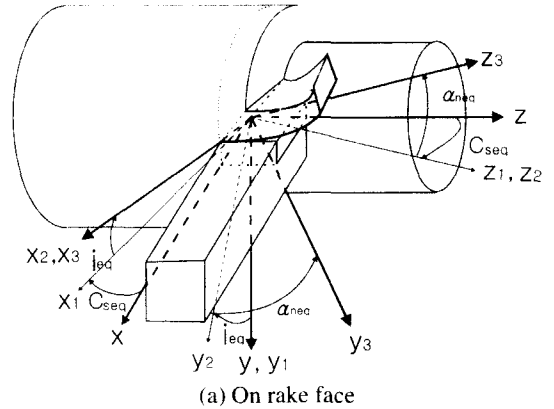


Fig. 1 Coordinate systems in turning⁽⁴⁾

2.2 전단면에 작용하는 절삭력 성분

한편 전단과정을 해석하기 위해서는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 절삭날방향 (x_3' 방향), 전단면상에 절삭날에 수직한 방향 z_3' , 및 전단면상에 수직한 방향 y_3' 으로 이루어지는 새로운 오른손 좌표계 $x_3'y_3'z_3'$ 를 설정하는 것이 필요하다. 즉 xyz 좌표계를 새로운 좌표계 $x_3'y_3'z_3'$ 로 변환시키기 위해서는 y 축을 중심으로 등가측면절삭날 각 C_{seq} 만큼 회전시키고, 새

로운 z_1' 축을 중심으로 등가기울임각 i_{eq} 만큼 회전시킨 후, x_2' 축을 중심으로 등가수직전단각 ϕ_{neq} (6)의 여각 $(90 - \phi_{neq})$ 만큼 회전시켜야 한다. 변환행렬은 식(2)에 나타낸 바와 같다.

전단면상에서 전단흐름각 η_c 와 전단면상에서의 합력 $F_c = \sqrt{F_{Sx}^2 + F_{Sx}^2}$ 의 방향이 이루는 각을 ρ_s 라 하면 전단면에 작용하는 전단응력 τ 및 전단변형률 γ 는 각각 식(4) 및 (5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = \frac{F}{fd} \sin \phi_{neq} \cos i_{eq} \cos \rho_s \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{\cot \phi_{neq} + \tan(\phi_{neq} - \alpha_{neq})}{\cos \eta_c} \quad (5)$$

여기서 d 는 절삭깊이, f 는 이송이다.

2.3 절삭에너지

2.3.1 비절삭에너지 u_f

단위 체적당 소요되는 마찰에너지로 정의되는 비마찰에너지 u_f 는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_f = \frac{\sqrt{F_{Rc}^2 + F_{Rc}^2} \cos \rho_c V_c}{fdV} \quad (6)$$

여기서, V_c 는 칩의 마찰 속도, V 는 절삭속도이며 이들 사이에는 식(7)의 관계가 성립한다. 여기서, η_c 는 칩흐름각이다.

$$\frac{V_c}{V} = \frac{\cos i_{eq} \sin \phi_{neq}}{\cos \eta_c \cos(\phi_{neq} - \alpha_{neq})} \quad (7)$$

식(7)과 Stabler 의 칩흐름법칙(7)으로부터 단위 체적당 마찰에너지 u_f 에 관한 식(6)는 식(8)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_f = \frac{\sqrt{F_{Rc}^2 + F_{Rc}^2} \cos \rho_c \sin \phi_{neq}}{fd \cos(\phi_{neq} - \alpha_{neq})} \quad (8)$$

2.3.2 비전단에너지 u_s

단위체적당 소요되는 전단에너지를 비전단에너지 u_s 라 하며 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_s = \frac{\sqrt{F_{Sx}^2 + F_{Sx}^2} \cos \rho_s V_s}{fdV} \quad (9)$$

여기서, V_s 는 전단속도이며, 절삭속도 V 와는 식(10)의 관계가 성립한다.

$$\frac{V_s}{V} = \frac{\cos i_{eq} \cos \alpha_{neq}}{\cos \eta_s \cos(\phi_{neq} - \alpha_{neq})} \quad (10)$$

식(10)으로부터 단위 체적당 전단에너지 u_s 에 관한 식(9)는 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_s = \frac{\sqrt{F_{Sx}^2 + F_{Sx}^2} \cos \rho_s \cos i_{eq} \cos \alpha_{neq}}{fd \cos \eta_s \cos(\phi_{neq} - \alpha_{neq})} \quad (11)$$

2.3.3 비절삭에너지 u

단위 체적당 소요되는 절삭에너지를 비절삭에너지라 하며 식(12)와 같이 정의된다.

$$u = \frac{F_y}{fd} \quad (12)$$

3. 절삭실험

냉간인발된 쾌삭강의 전단 및 마찰 특성을 해석하기 위하여 선반에서 외경선삭실험을 행하여 3 차원 절삭이 이루어지도록 하였다.

피삭재는 최근 국내에서 개발된 냉간인발된 Bi-S 계 쾌삭강(Bi-S), 일본에서 제조된 Pb-S 계 쾌삭강(Pb-S), 그리고 국내에서 제조된 기계구조용 및 일반구조용강 SM45C, 및 SS41 을 사용하였다. Table 1 에는 이들 강의 화학조성을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition(wt%) of workpiece materials

	C	Si	Mn	P	S	Bi	Pb
Bi-S	0.06	0.01	1.27	0.075	0.291	0.08	-
Pb-S	0.08	0.04	1.11	0.079	0.303	-	0.28
SS41	0.160	0.218	0.562	0.013	0.015	-	-
SM45C	0.427	0.218	0.679	0.011	0.015	-	-

절삭공구로는 홈형 칩포머(groove type chip former)가 성형되어 있는 CNMG120408 인서트를 사용하였으며, 공구홀더로는 PCLNR2525M12 를 사용하였다.

실험조건으로는 절삭속도 100m/min 에서 절삭깊이를 2mm 로 하였으며, 이송은 0.067, 0.148, 0.234, 0.296, 0.345, 0.444, 및 0.542mm/rev 의 7 단계로 하였다.

공구동력계(Kistler, 9257A)에서 나오는 절삭력 신

호를 전하증폭기 (kistler, 5807A)를 통해 증폭시키고, 이것을 데이터레코드에 저장하는 동시에 A/D 변환기를 통하여 PC에서 신호분석기능을 갖고 있는 소프트웨어 패키지(Global Lab)를 사용하여 분석하였다.

Fig. 2는 실험에 사용한 공구의 사진과 단면형상을 나타낸 것이다.

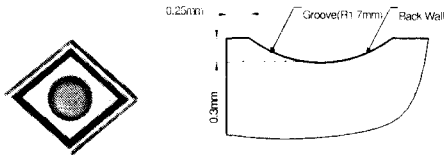


Fig. 2 Photograph and section view of the insert used

4. 실험결과 및 고찰

절삭실험에서 얻어진 칩두께와 절삭 3분력의 측정결과를 이영문등⁽⁴⁾에 의해 개발된 외경선삭해석 소프트웨어 패키지에 입력하여 냉간인발된 쾌삭강의 마찰 및 전단특성을 고찰하였다.

마찰특성을 나타내는 인자로 공구면상에서의 마찰력 F 및 비마찰에너지 u_f 를 구하고, 전단특성을 나타내는 인자로 전단변형률 γ , 전단응력 τ , 및 비전단에너지 u_s 를 구하였다.

4.1 마찰특성

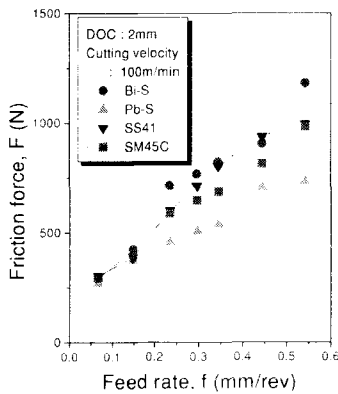


Fig. 3 The friction force(F) vs. feed rate(f)

Fig. 3은 이송에 따른 마찰력성분 F의 변화를 나타낸 것이다. 마찰력성분 F는 대략적으로 이송이 증가함에 따라 비례하여 증가한다. 낮은 이송영역에서 모든 피삭재는 거의 비슷한 값을 나타내고 있다. 그러나 이송이 0.234mm/rev 이상에서는 Pb-S 계 쾌삭강이 가장 낮은 값을 나타내며, 그 밖의 피삭재는 Pb-S 계

쾌삭강에 비해 상당히 높은 값을 나타낸다.

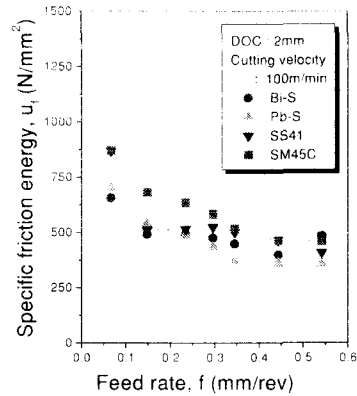


Fig. 4 The specific friction energy(u_f) vs. feed rate(f)

Fig. 4는 비마찰에너지 u_f 를 나타낸 것이다. 모든 피삭재가 이송이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 절삭에서의 치수효과⁽⁵⁾에 기인한 것으로 판단된다. 전체적으로 Pb-S 계 쾌삭강이 가장 낮은 비마찰에너지를 나타내고 있으나, 다른 재료와의 차이는 마찰력의 경우처럼 크게 나타나지 않는다.

4.2 전단특성

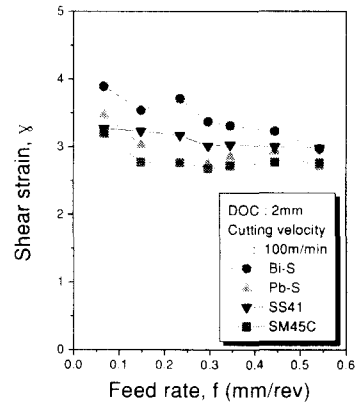


Fig. 5 The shear strain(γ) vs. feed rate(f)

Fig. 5는 피삭재에 따른 전단변형률 γ 를 나타낸 것이다. 이송이 증가함에 따라 전단변형률은 약간 감소하는 경향을 나타낸다. SM45C가 가장 낮은 값을 나타내 칩이 얇게 배출되며, Pb-S 계 쾌삭강 또한 낮은 값을 나타내고 있다. 반면, Bi-S 계 쾌삭강은 상대적으로 높은 값을 나타내고 있다.

Fig. 6은 전단응력 τ 를 나타낸 것이다. 그림에서

보는 바와 같이 SM45C가 가장 높은 전단응력을 나타내고 있다. 이는 SM45C의 경우 탄소함유량이 Table 1에서 보는 바와 같이 높기 때문으로 판단된다. Pb-S계 쾌삭강은 낮은 전단응력을 나타내고 있으며, Bi-S계 쾌삭강 또한 고이송영역을 제외하고는 낮은 전단응력을 나타내고 있다. 이는 이들 쾌삭강의 낮은 탄소함유량과 Fig. 7에 나타낸 쾌삭첨가물에 의해 전단응력이 저하되었기 때문으로 판단된다.

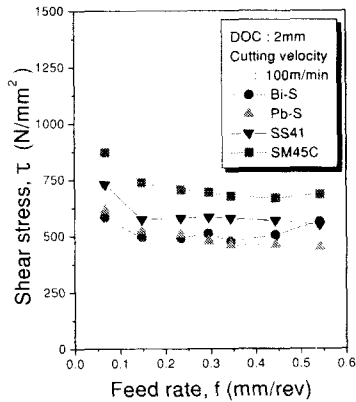


Fig. 6 The shear stress(τ) vs. feed rate(f)

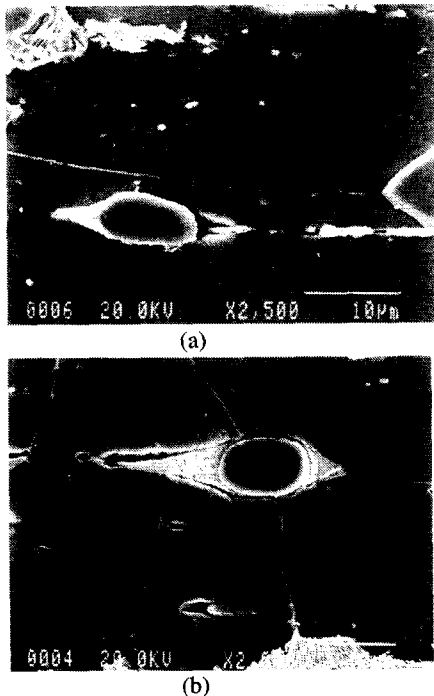


Fig. 7 SEM micrography of the Bi-S(a) and Pb-S(b) free machining steels

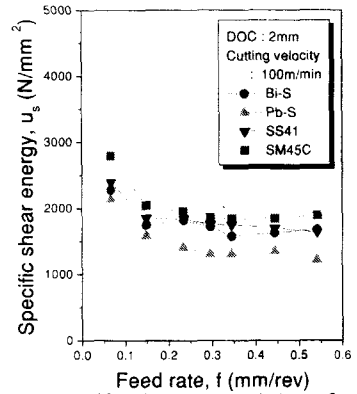


Fig. 8 The specific shear energy(u_s) vs. feed rate(f)

Fig. 8은 비전단에너지 u_s 를 나타낸 것이다.

SM45C가 가장 높은 값을 나타내며, Pb-S계 쾌삭강이 가장 낮은 값을 나타내고 있다.

4.3 비절삭에너지에 대한 비마찰에너지와 비전단에너지의 비 (u_f/u and u_s/u)

절삭입력조건에 따른 절삭성능의 종합적 평가를 위해서 가장 일반적으로 채택되는 파라미터는 식(12)와 같이 정의되는 비절삭에너지이다⁽⁹⁾.

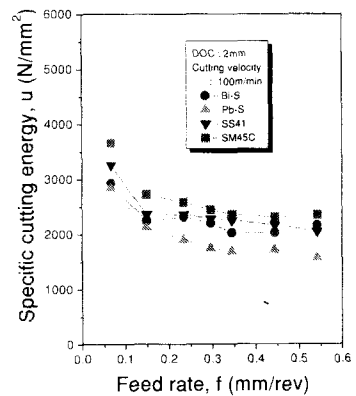


Fig. 9 The specific cutting energy(u) vs. feed rate(f)

Fig. 9는 절삭실험을 통하여 구한 비절삭에너지를 나타낸 것이다.

식(12)를 이용하여 각 절삭조건에서 구해진 비절삭에너지 값은 각 절삭조건에서의 비마찰에너지 u_f [식(8)] 및 비전단에너지 u_s [식(11)]의 합과 정확하게 일치한다.

그림에서 보는 바와 같이 비절삭에너지 u 는 이송이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이

러한 실험결과는 절삭에서의 치수효과⁽⁸⁾를 나타내는 것이다.

피삭재 중 SM45C 가 가장 높은 값을 나타내고 있으며, Pb-S 계 쾌삭강이 가장 낮은 값을 나타내고 있다.

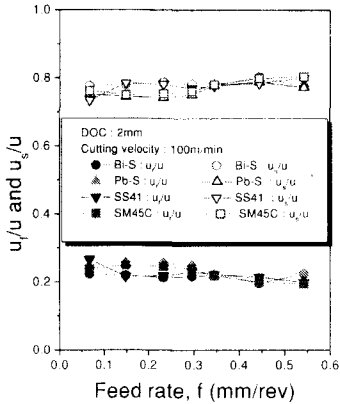


Fig. 10 u_c/u and u_c/u_s

Fig. 10는 비절삭에너지 u_c 에 대한 비마찰에너지 u_c 와 비전단에너지 u_s 의 비를 나타낸 것이다.

u_c/u 는 모든 피삭재에 대해 낮은 이송에서는 비교적 큰 0.3 정도이며, 이송이 증가함에 따라 작아져 높은 이송영역에서는 0.2 정도의 값을 나타낸다. 한편 u_c/u_s 값은 낮은 이송에서는 0.7 정도이며, 이송이 큰 영역에서는 0.8 정도의 값을 나타낸다.

이러한 실험결과는 2차원절삭⁽⁹⁾ 및 경사절삭⁽⁵⁾의 실험결과에 대한 해석결과와도 잘 일치하는 경향을 나타내고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 냉간인발된 Bi-S 및 Pb-S 쾌삭강과 SM45C 및 SS41 강외경선삭시 칩-공구 마찰 및 전단특성을 평가하기 위해서 등가경사절삭모델을 도입하였다.

Pb-S 계 쾌삭강의 경우 전단변형률 γ 와 전단응력 τ 가 상대적으로 낮아, 가장 낮은 비절삭에너지값을 나타내고 있다.

Bi-S 계 쾌삭강의 경우는 전단응력 τ 와 비마찰에너지 u_c 는 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있으나, 전단변형률 γ 가 상대적으로 큰 값을 나타내기 때문에 구조용강에 비해 절삭성능의 향상이 크게 이루어지

지 않는다.

또한 해석결과 쾌삭강 및 구조용강 모두 비절삭에너지 u_c 에 차지하는 비마찰에너지 u_c 및 비전단에너지 u_s 의 비는 각각 0.2~0.3 및 0.7~0.8로 기존의 2차원 및 경사절삭의 결과와 일치한다.

참고문헌

1. Debanshu Bhattacharya, "Machinability of Steel," J. of Metals, pp. 32 - 35, 1987.
2. J. C. Hamann, V. Grolleau, and F. Le Maitre, "Machinability Improvement of Steels at High Cutting Speed - Study of Tool/Work Material Interaction," Annals of the CIRP, Vol. 45/1, pp. 87 - 92, 1996.
3. 조삼규, "Bi-S 계 쾌삭강의 고온연성에 대한 열간 압연 및 Bi의 영향," 대한금속학회지, 제 34 권, 제 7 호, pp. 822-829, 1996.
4. 이영문, 송태성, 박태준, 장은실, "3 차원 절삭시 칩-공구 마찰 및 전단 특성 해석," 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 6 호, pp. 190 - 196, 1999.
5. M. C. Shaw, N. H. Cook, and P. A. Smith, "The Mechanics of Three Dimensional Cutting Operation," Trans. of the ASME, Vol. 74, pp. 1055-1064, 1952.
6. 이영문, 최수준, 우덕진, "선삭가공의 칩형상 해석 (I)," 대한기계학회논문집, 제 15 권, 제 1 호, pp.139 - 144, 1991.
7. G. V. Stabler, "The Chip Flow Law and Its Consequences," Pro. 5th. Int. Mach. Tool. Des. Res. Conf., Birmingham, pp. 243 - 251, 1964.
8. M. C. Shaw, and I. Finnie, "The Shear Stress in Metal Cutting," Trans. of the ASME, Vol. 77, pp. 115 - 125, 1955.
9. I. S. Jawahir, N. Qureshi, and J. A. Arsecularatne, "On the Interrelationships of some Machinability Parameters in Finish Turning with Cermet Chip Forming Tool Inserts," Int. J. Mach Tools Manufact. Vol. 32/5, pp. 709-723, 1992.
10. M. E. Merchant, "Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip," Journal of Applied Physics, Vol. 16, pp. 267-275, 1945.