

냉간 인발된 쾌삭강의 칩절단특성

장은실*, 최원식**, 이용주***, 강태봉****, 이영문*****

Chip Breaking Characteristics of Cold-Drawn Free Machining Steel

E. S. Jang*, W. S. Choi**, Y. J. Lee***, T. B. Kang**** and Y. M. Lee*****

Abstract

In this study, to assess chip breaking characteristics of cold-drawn free machining steels, a newly developed non-dimensional parameter, chip breaking index, C_B has been adopted. And for comparison with free machining steels, chip breaking characteristics of conventional carbon steels were investigated. Properly controlled chips were produced with the C_B value of 0.05~0.2, regardless of steel types. In case of cold-drawn free machining steels, however, cycle times of chip breaking are relatively shorter than those of conventional steels. And properly controlled chips were obtained from wider range of feed rate.

Key words : Chip breaking index(칩절단지수), Free machining steel(쾌삭강), Chip breaking cycle time(칩절단주기)

1. 서 론

최근 절삭공정의 무인화 추세로 인하여 절삭시 생성되는 칩의 효율적 처리는 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 고속절삭시 생성되는 연속형 칩은 처리자체의 어려움이 있을 뿐만 아니라 절삭가공표면을 손상시키며, 공작기계자체 또는 공작물에 영커 정상적인 절삭작업을 방해하기 때문에 원활한 절삭가공이 이루어지기 위해서는 적절한 칩의 제어가 이루어져야 한다.^(1~4)

칩의 절단특성에 대한 연구는 Henriksen⁽⁵⁾의 방해물

형 칩브레이커(obstruction type chip breaker)의 기하학적인 형상과 절삭조건에 따른 칩의 굴곡 및 절단특성에 대한 체계적인 연구이래 각종 형상의 칩브레이커의 칩절단특성에 대한 연구결과가 보고되고 있다.

Nakayama⁽⁶⁾는 칩표면의 변형률이 칩재료의 파단 변형률에 달했을 때 칩의 절단이 이루어진다는 전제하에, 칩의 절단 여부를 결정하는 요소로서 공작물재질, 칩두께 및 칩굴곡반경을 제시하였다. 공구 설계기술의 발달과 더불어 칩브레이커의 형상도 방해물형에서 홈형 및 랜드앵글형으로 이행하였으며 칩제어의 범위도 상당히 넓어졌으나, 이

* 경북대학교 대학원 기계공학과

** 경일대학교 기계공학과

*** 대구서부공업고등학교

**** 경북기계공업고등학교

***** 경북대학교 기계공학부

와 같은 개선은 아직도 비과학적인 시행착오법에 의존하고 있는 실정이다.⁽⁷⁾

최근 李등⁽⁸⁾은 칩절단특성 평가를 위한 파라미터로서 칩절단지수, C_B 를 제시하였으며, 칩의 과잉제어 여부에 대한 한계 설정을 위하여 칩형상 및 비절삭에너지에 대한 고찰을 행하였다.

본 연구에서는 상기의 칩절단지수, C_B 를 도입하여 최근 국내 P사에서 개발된 냉간 인발 Bi-S계 쾌삭강의 칩절단 거동특성 평가를 시도하였다. 또한 비교평가를 위해서 일본 N사에서 제조된 냉간 인발 Pb-S계 쾌삭강과 국내에서 제조된 기계구조용강 SM20C, SM45C 및 일반구조용강 SS41에 대한 절삭실험을 병행하였다.

2. 칩절단특성평가를 위한 파라미터

2.1 Nakayama의 칩절단 한계조건

Nakayama⁽⁶⁾는 칩표면의 변형률이 파단변형률(ϵ_f)이상 이 되면 칩의 절단이 이루어진다는 전제하에 칩의 파단변형률, 칩두께 및 칩굴곡반경에 대한 식(1)을 제시하였다.

$$\epsilon_f \leq \frac{t_c}{2} \left(\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_L} \right) \quad (1)$$

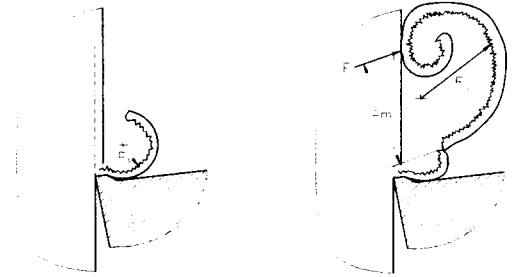
여기서, ϵ_f 는 칩의 파단변형률, t_c 는 칩두께, R_o 는 절단이 이루어지기 전의 칩의 굴곡반경, R_L 은 절단이 이루어진 후의 칩의 굴곡반경이다.

Fig.1은 2차원 절삭시 칩의 절단이 이루어지기 전의 칩굴곡반경 R_o 와 칩의 절단이 이루어진 후의 칩굴곡반경, R_L 을 나타낸 것이다.

Fig.1(a)에서 보는 바와 같이 절단전의 칩의 형상은 공구를 떠난 후 아무런 방해받지 않으므로 진원에 가깝게 생성되며, 이 때의 칩굴곡반경, R_o 는 고속카메라 촬영등에 의해 측정가능하나 실용적이지 못하다.⁽⁷⁾

칩의 선단이 공작물 표면에 닿게 되면 Fig.1(b)에 나타난 바와 같이 피삭재가 칩에 작용하는 반력 F 에 의한 굽힘 모멘트가 발생하고, 모멘트 값이 칩의 절단에 필요한 크기에 다다를 때까지 칩은 계속 생성되며 이러한 과정에서 칩의 형상은 변하게 된다. 따라서 절단 후의 칩의 형상은 진원에서 벗어나며 칩굴곡반경 R_L 을 결정하기가 어렵게 된다.

현재까지 절단된 칩의 굴곡반경에 대한 통일된 기준이 마련되어 있지 않은 실정이다.



(a) Before chip breaking (b) After chip breaking

Fig. 1 Chip curl radius.

2.2 칩절단지수(C_B)

칩의 절단정도를 나타내기 위하여 본 연구에서는 칩절단지수(chip breaking index), C_B ⁽⁸⁾를 도입하였다.

Fig.1(b)에서 보는 바와 같이 칩의 절단이 이루어지는 순간 피삭재가 칩에 작용하는 반력을 F , 절단지점까지의 수직거리를 A_m 이라 하면 칩절단 굽힘모멘트 $M = A_m F$ 이다. 모멘트 암, A_m 이 절단칩의 길이 l_c 에 비례하고 ($A_m = k l_c$), 두께 t_c , 폭 b_c 인 칩에 작용하는 반력 F 가 칩의 단면적에 비례한다고 가정하면 칩절단 굽힘모멘트, M 은 식(2-1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = A_m F = k l_c b_c t_c F_u \quad (2-1)$$

여기서, A_m 은 모멘트 암(mm), F 는 칩에 작용하는 반력(N), F_u 는 칩단면 단위면적당 작용하는 반력(N/mm^2), k 는 비례상수 ($0 < k < 1$)이다.

한편, 칩의 파단응력을 $\sigma_f(N/mm^2)$ 라하면, 칩절단 굽힘모멘트 M 은 식(2-2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \frac{\sigma_f b_c t_c^2}{6} \quad (2-2)$$

식(2-1), 식(2-2)를 등치시킨 후, 측정가능한 값과 결정하기 어려운 값을 분리하여 정리하면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다. 식(3)에서 C_B 가 선행연구⁽⁸⁾에서 정의된 칩절단지수(chip breaking index)이다.

$$C_B = \frac{6 k F_u}{\sigma_f} = \frac{t_c}{l_c} \quad (3)$$

식(3)에서 보는 바와 같이 칩절단지수, C_B 는 기존의 칩절단 한계조건을 결정하는 인자중 결정하기 애매한 칩굴곡

반경과 절삭깊이에 따라 달라지는 칩의 폭이 배제되었으며, 측정 용이한 절단칩 두께, t_c 와 길이, l_c 에 의해 결정되는 무차원 파라미터이다.

3. 절삭실험

절삭실험은 CNC선반에서 외경 선삭을 행함으로써 3차원 절삭이 이루어지도록 하였다.

3.1 피삭재 및 절삭공구

피삭재는 최근 국내 P사에서 개발된 냉간 인발된 Bi-S계 쾌삭강, 및 일본 N사에서 제조된 Pb-S계 쾌삭강 그리고 국내에서 제조된 기계구조용 및 일반구조용강 SM20C, SM45C 및 SS41을 사용하였다. Table.1에는 이들 강 의 화학조성을 나타내었다.

절삭공구로는 홈형 칩포머(groove type chip former)가 성형되어있는 국내 T사의 CNMG120408 인서트를 사용하였으며, 공구홀더로는 PCLNR2525M12를 사용하였다. Fig.2에는 공구의 형상과 절단단면을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition(wt%) of workpiece materials.

	C	Si	Mn	P	S
Bi-S	0.040	0.052	1.200	0.081	0.312
Pb-S	0.080	0.004	1.110	0.079	0.303
SS41	0.160	0.218	0.562	0.013	0.015
SM20C	0.273	0.221	0.514	0.033	0.029
SM45C	0.427	0.218	0.679	0.011	0.015

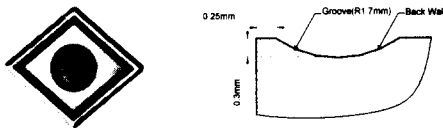


Fig. 2 Photograph and section view of the insert used.

3.2 절삭조건

절삭실험에 사용한 절삭조건과 CNC선반의 주요사양을 Table.2에 나타내었다.

Table 2 Cutting conditions and lathe specifications.

Cutting conditions

Cutting speed (m/min)	Depth of cut (mm)	Feed rate (mm/rev)
100, 200	2	0.07, 0.15, 0.24 0.30, 0.35, 0.45 0.54

Lathe specification

Model	MECCA-3
RPM	20~4500 rpm
Power	7.5 HP (5.5kW)

4. 칩절단특성

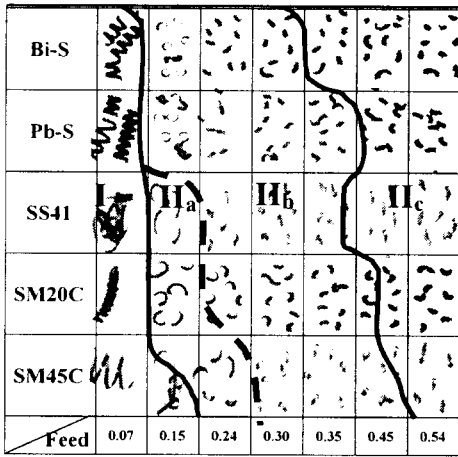
4.1 칩형태

Fig.3(a), (b)는 각각 절삭속도 100m/min, 200m/min 절삭실험시 생성된 칩의 사진이다. 생성된 칩은 피삭재에 따라 다소 차이를 보이고 있으나, 크게 절단되지 않은 연속형 칩(unbroken chip)과 절단이 이루어진 절단형 칩(broken chip)으로 구분된다.

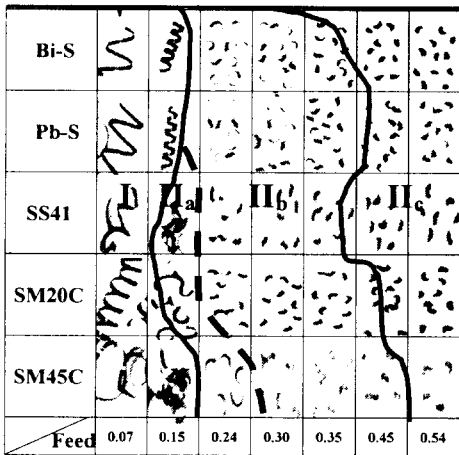
연속형 칩은 낮은 이송범위에서 얻어지며 생성되는 칩 두께가 얇기 때문에 칩의 선단이 공작물이나 공구 여유면 등과 접촉하여도 절단이 일어나지 않으며 본 절삭실험에서는 주로 불규칙의 스넬드형(snarled type)과 튜블라형(tubular type)이 생성되었다. 연속형 칩인 스넬드형과 튜블라형 칩은 칩제어 관점에서 제어되지 않은 칩(uncontrolled chip)으로 분류할 수 있으며, Fig.3(a), (b)에 I로 표시한 영역에서 발생하였다.

본 실험에서 생성된 절단형 칩은 대부분 칩형태 분류도⁽⁹⁾에 의하면 아크형 칩으로 분류할 수 있으나 이송의 크기에 따라서 형상적으로 상당한 차이를 나타낸다. 비교적

낮은 이송 범위에서는 생성되는 절단형 칩의 두께가 얇아, 칩의 선단이 공작물이나 공구의 여유면등과 접촉하여도 칩에 작용하는 모멘트가 작아 접촉 즉시 절단이 이루어지지 않고 어느 정도 성장한 후 6또는 9자 형태를 나타내며 절단된다. 6또는 9자형 칩은 칩형상의 관점에서 과소제어된 칩(under controlled chip)으로 분류할 수 있으며, Fig.3(a), (b)에 Π_a 로 표시한 비교적 좁은 영역에서 발생하였다.



(a)



(b)

Fig. 3 Chip diagram for (a) $v=100m/min$ and (b) $v=200m/min$.

이송이 커짐에 따라 칩은 두꺼워지며, 칩의 선단이 공작물이나 공구 여유면등과 접촉하게 되면 지연이나 역굴곡 없이 안정적으로 절단이 이루어지며, C자 형태를 나타낸다. C자형 칩은 칩형상의 관점에서 적정제어된 칩(proper controlled chip)으로 분류할 수 있으며, Fig.3(a), (b)상의 Π_b 영역에서 발생하였다.

아크형 칩중 높은 이송 범위에서 생성되는 칩은 칩이 두껍고 굴곡이 심하기 때문에 Fig.4에 나타낸 바와 같이 칩의 자유표면에 큰 주름이 생성되거나(SM45C), 칩의 측면중 길이가 짧은 쪽에 부분적으로 전단파괴된 형태(Bi-S, Pb-S, SS41, SM20C)를 나타내며 칩이 비산하는 경향이 있다.⁽¹⁰⁾ 또한 칩의 절단이 완전히 이루어지지 않고 연결된 아크형(connected arc type)을 나타내는 경우가 종종 발생한다. 칩형상의 관점에서 이러한 형상의 칩은 과잉제어된 칩(over controlled chip)으로 분류할 수 있으며, Fig.3(a), (b)상의 Π_c 영역에서 발생하였다.

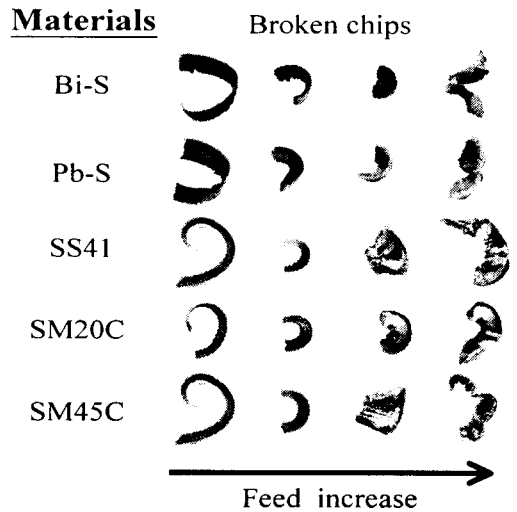


Fig. 4 Types of broken chips.

절삭속도가 $100m/min$ 일 때, 피삭재의 종류에 따른 칩형상은 Bi-S, Pb-S인 경우 이송이 $0.15mm/rev$ 에서 적정제어된 칩이 생성되기 시작하며, SS41과 SM20C인 경우 이송이 $0.24mm/rev$ 에서 적정제어된 칩이 생성되며, SM45C는 $0.30mm/rev$ 에서 적정제어된 칩이 생성되기

시작한다. 절삭속도가 200m/min일 때, Bi-S, Pb-S, SS41, SM20C인 경우 이송이 0.24mm/rev에서 적정 제어된 칩이 생성되기 시작하며, SM45C 인 경우 이송이 0.30mm/rev에서 적정 제어된 칩이 생성되기 시작한다.

절삭속도가 200m/min으로 증가하면 쾌삭장에서 제어되지 않은 칩의 발생범위가 넓어지는데, 이는 절삭속도가 증가하면 칩의 두께가 상대적으로 얇아지기 때문이다.

쾌삭장의 경우 저이송 영역에서 제어된 칩이 일찍 생성되는 반면 고이송 영역에서 과잉제어된 칩의 발생범위가 넓다. 이는 저이송 영역에서는 개재물의 효과⁽¹¹⁾가 크고 고이송 영역에서는 기저의 높은 연성에 기인한다고 판단된다.

4.2 칩절단주기

이송이 커짐에 따라 칩은 연속형에서 불연속형(절단)칩으로 생성되며 칩이 절단되는 주기도 짧아지는 경향을 나타낸다. 절삭 조건에 따른 칩의 절단특성을 나타내기 위해 칩절단주기(chip breaking cycle time, T_B)를 식(4)와 같이 정의하였다.

$$T_B = \frac{w_c}{\rho v f d} \quad (4)$$

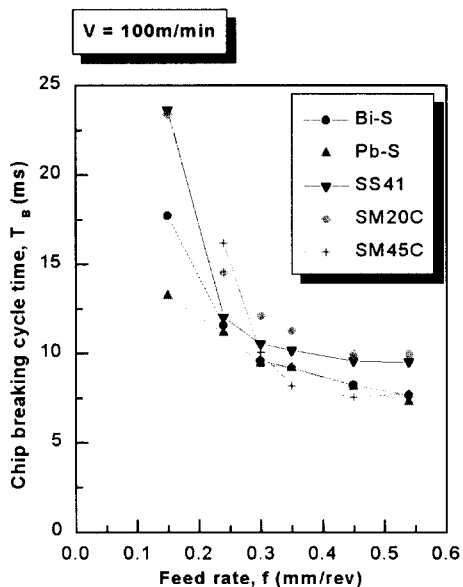
여기서, T_B 는 칩절단주기(ms), w_c 는 절단된 칩의 무게(g), ρ 는 칩의 밀도(g/mm^3), v 는 절삭 속도(m/s), f 는 이송(mm/rev), d 는 절삭깊이(mm)이다.

Fig.5(a), (b)는 각각 절삭속도가 100m/min과 200m/min에서 절단칩이 생성된 경우 절삭조건에 따른 칩절단주기의 변화를 나타낸 것이다.

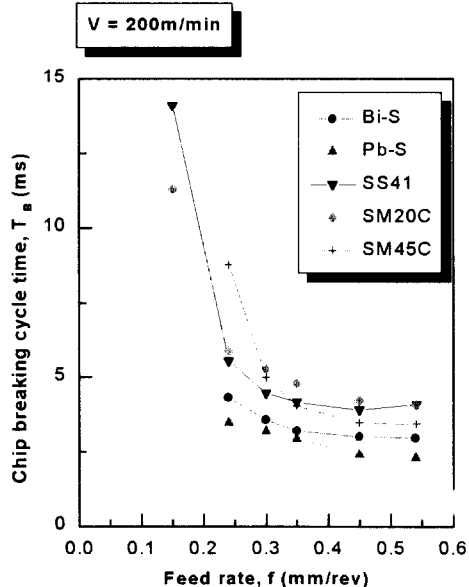
이송이 증가함에 따라 칩절단주기는 급격하게 감소하다가 일정해 지는 경향을 나타내고 있으며, 칩절단주기가 급격하게 감소하는 이송영역에서는 파소제어된 6 또는 9형 칩이 생성되었으며, 칩절단주기가 일정해지는 영역에서는 적정제어된 C형칩과 과잉제어된 아크형칩이 생성되었다.

이송이 커짐에 따라 적정제어된 C형칩에서 과잉제어된 아크형칩으로 이행되나, 칩절단주기로서 구분하기는 어렵다. 이는 이 영역에서 칩의 두께는 비교적 급격히 증가하지만, 칩의 길이 감소는 완만하게 일어나기 때문이다.

절삭속도가 100m/min인 경우 Fig.5(a)에서 SM45C 경우는 이송이 0.24mm/rev인 조건에서부터 칩절단이 일어나기 시작하였으며, 나머지 파삭재들은 이송이 0.15mm/rev에서 칩절단이 이루어지기 시작하였다.



(a)



(b)

Fig. 5 Chip breaking cycle time, T_B (ms) vs. Feed rate, f (mm/rev) of cutting (a) $v=100$ m/min (b) $v=200$ m/min.

절삭속도가 200m/min인 경우 Fig.5(b)에서 보는 바와 같이 Bi-S, Pb-S는 각각 0.24mm/rev에서 칩의 절단이 시작되었으며, 이송이 커짐에 따라 칩절단주기는 급격히 감소하다가 일정해지는 경향을 나타내고 있다.

또한 그림에서 보는 바와 같이 칩절단주기는 절삭속도 100m/min의 경우 절삭속도 200m/min의 경우에 비해 대략적으로 2배의 값을 나타내고 있다. 이러한 현상은 절삭속도가 증가함에 따라 칩의 배출속도도 비례하여 증가하지만, 절삭속도가 변하더라도 주어진 절삭깊이 및 이송하에서 절단칩의 길이는 거의 변하지 않기 때문이다.

절삭속도가 100m/min인 경우 SM45C의 칩절단주기가 가장 작은 값을 나타내는데, 200m/min인 경우에는 쾌삭강의 칩절단주기가 더 작아진다.

동일한 절삭조건하에서 칩절단주기는 쾌삭강이 일반강에 비하여 낮은 값을 나타내며, SM20C의 칩절단주기가 가장 크며 Pb-S의 칩절단주기가 가장 짧다.

4.3 칩절단지수(C_B)에 의한 칩절단특성 평가

Fig.6(a), (b)는 각각 절삭속도가 100m/min과 200m/min의 절삭실험에서 생성된 절단칩의 칩절단지수 C_B 를 이송에 대해 나타낸 것이다.

각각의 피삭재 모두 칩절단지수, C_B 의 값은 이송의 증가와 더불어 대략 직선적으로 증가한다.

저이송영역 중 비교적 좁은 이송 범위에서 생성되는 6 또는 9자형 칩은 두께에 비해 길이가 길기 때문에 C_B 값은 작으며, 피삭재 모두 0.05이하의 낮은 값을 나타내었다.

이송이 증가함에 따라 칩의 형태는 C형의 적정제어된 칩이 발생하며, C형칩이 생성되는 절삭조건에서 C_B 값의 범위는 0.05~0.2이었다. C형칩에서 과잉제어된 아크형 칩으로 전환되는 이송영역에서는 전술한 바와 같이 칩의 두께는 이송의 증가와 더불어 비교적 급격히 증가하지만, 칩길이 증가는 완만하게 일어나 거의 일정한 값을 나타내기 때문에 C_B 값은 이송과 함께 계속 증가하며, C_B 값이 0.2이상에서는 피삭재 모두 과잉제어된 아크형칩이 생성되었다.

Bi-S의 경우 다른 피삭재에 비해 동일 이송에서 다소 높은 C_B 값을 나타내고 있다. 이는 동일 이송에서 생성된 절단칩의 두께가 상대적으로 크기 때문이다.

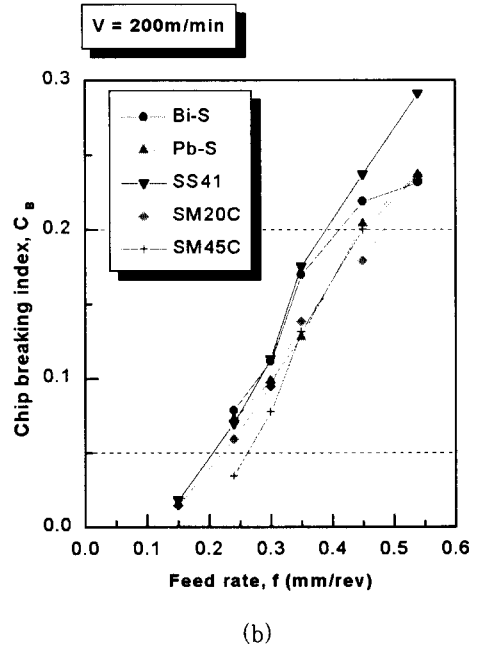
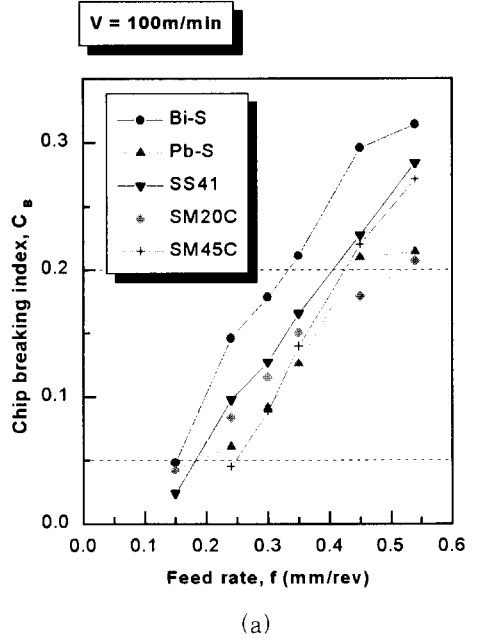


Fig. 6 Chip breaking index, C_B vs. Feed rate, f (mm/rev) of cutting (a) $v=100$ m/min (b) $v=200$ m/min.

Pb-S는 적정제어된 칩이 발생하는 0.05~0.2 영역에 포함되는 이송이 가장 많았으며, Bi-S는 과잉제어된 칩이 발생하는 0.2 이상 영역에 포함되는 이송이 가장 많았다.

5. 결 론

본 연구에서는 냉간 인발된 쾌삭강의 칩절단특성평가를 위하여 무차원 파라미터, C_B 를 이용하였다. 또한 기계구조 용강 및 일반구조용강과 비교평가하였다.

적정제어된 칩의 형상은 C형이며, 냉간 인발된 Pb-S계 쾌삭강에서 가장 많이 생성되었으며, 칩절단주기값 또한 작은 값을 나타내었다.

적정제어된 칩이 발생하는 C_B 값은 강종에 관계없이 0.05~0.2 이며, 냉간 인발된 Pb-S계 쾌삭강이 가장 넓은 이송범위조건에서 적정제어된 칩이 발생하였다.

참 고 문 헌

- (1) Worthington, B., 1976, "A Comprehensive Literature Survey of Chip in Turning Process," *Metal Cutting Machining Tools*, Vol. 1, pp. 103~116.
- (2) Kluft, W., Konig, W., Luttermelt, C. A., Nakayama, K., and Pkelharing, A. J., 1979, "Present Knowledge of Chip Control," *Annals of the CIRP*, Vol. 28/2, pp. 441~455.
- (3) Rotberg, J., Ber, A., and Wertheim, R., 1991, "Chip control in cut-off tools," *Annals of the CIRP*, Vol. 40/1, pp. 73~77.
- (4) 손명환, 이호철, 1992, "신형 칩절단구에 관한 실험적 연구(1)," *대한기계학회논문집* 제16권 제6호, pp. 1121~1140.
- (5) Henriksen, E. K., 1953, "Chip Breaking-a Study of Three Dimensional Chip Flow," *ASME*, pp. 53~59.
- (6) Nakayama, K., 1962, "A Study of the Chip Breaker," *Trans. of JSME*, Vol. 5, pp. 142~150., Vol. 34, No. 7.
- (7) Jawahir, I. S., 1990, "On the Controllability of Chip Breaking Cycles and Modes of Chip Breaking in Metal machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 39/1, pp. 47~51.
- (8) 이영문, 최원식, 장승일, 허인호, , 1998, "칩절단지수에 의한 칩절단특성 평가", *대한기계학회논문집* A 권, 제22권 제11호, pp. 1989~1997.
- (9) ISO, 1972, "Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools," 5th Draft Proposal, ISO /TC29/WG 22 (Secretariat 37) 91.
- (10) Bator, J. S., 1975, "Power Reduction through Efficient Chip Control," *Cutting Tool Engineering*, pp. 4~8.
- (11) 조삼규, 1996, "Bi-S계 쾌삭강의 고온연성에 대한 열간압연 및 Bi의 영향", *대한금속학회지* Vol.34, No.7, pp. 822~829.