

STS304 선삭시 절삭조건에 의한 Chip형태 예측에 관한 연구
(A Study on the Prediction of the Chip Type by the Cutting Condition in Turning STS304)

삼기중*, 유기현, 정진용, 시남섭
(전북대학교 기계공학과)

1. 서론

최근들어 공작기계의 급속한 발전은 절삭작업의 자동화와 무인화를 가능하게 만들었으며 이에따라 절삭가공의 완전한 무인화를 실현하기 위해서는 절삭가공중 발생하는 각종 이상 상태를 in-process로 감시하고 검출하는 것이 매우 중요하게 되었다. 이상 상태는 절삭공구의 미모나 파손^(1,2), 채터진동의 발생⁽³⁾, 절삭가공에 방해를 주는 절삭칩^(4,5)등을 들수 있으며 이 같은 현상을 검출하기 위한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.

공작기계의 고속화와 강인한 인서트의 개발은 생산성의 증가를 가져오는 단위 시간당 칩의 생산량을 증가시켜 칩 처리 문제를 제기하기에 이르렀다. 특히 연속칩의 경우 가공물, 공구, 작업자 등 절삭가공 시스템 전반에 큰 손상을 줄 수 있다. 자동화나 사람의 감시가 없는 무인화된 절삭가공 시스템에서 절삭공정을 방해하는 연속칩의 제어는 필수적이라 할 수 있다. 절삭가공중 칩 형태를 감시하며 연속칩의 발생시 칩처리가 양호하게 절단되는 절삭조건으로 전환 될 수 있는 시스템이나 칩 형태의 예측에 대한 연구와 개발의 필요성이 절실히 요구되고 있으나 아직은 미진한 단계이다.

본 연구에서는 내식성, 내마모성, 내열성 및 기계적 성질이 우수하나 절삭시 가공 경화성이 크고, 열 전도성이 불량하며, 공구재료와 윤활이 쉬워 난색재로 알려지고 톱니형 연속칩이 주로 발생하는 STS304를 선택하여 절삭 실험을 하였다. 절삭 조건에 따른 칩 형태를 관찰하여, 절삭조건과 절삭력을 이용하여 칩의 형태를 분류하였으며, 절삭가공중에 칩형태를 검출할 수 있는 가능성에 대하여 연구 하였다.

2. 칩 형태 분류 및 데이터 처리 방법

2.1 칩 형태 분류






만곡된 칩은 반드시 가공물이나 공구에 부딪치며 이때 큰 strain을 받고 그 칩은 꺾어져 분절된다. 선삭에서 칩의 절단은 다음의 4가지의 양식을 가진다.

- 1)가공물 장애형 : 주로 상향으로 만곡 되는 칩으로 가공물의 transient surface에 부딪쳐 바깥쪽으로 급침모멘트를 받아 절단된다. 절단시 힘의 변동이 크며 진동을 유발하거나 공작물 장애를 일으키기 쉽다.
- 2)나선형: 상향으로만 만곡되는 칩으로 transient surface에 부딪쳐 칩이 그대로 감겨 나선형으로 된다.
- 3)여유면 장애형 : 상향 만곡과 횡형 만곡이 혼합되어 나선상으로 발생하며 칩의 끝이 공구 여유면에 부딪쳐 절단된다. 칩 브레이커가 있는 공구에서 많이 나타나고 절단시 힘이 비교적 적지만 공구를 손상한다.
- 4)횡형 만곡형 : 횡형 만곡의 대표적인 것으로 공구 여유면에 부딪쳐 절단된다.

인자들의 복합된 영향을 받아 생성되는 칩의 형태를 분류하고 예측하는 것은 매우 어려운 문제이다. 따라서 많은 조건을 단순화하여 칩 형태를 예측하는 방향으로 연구가 하여지고 있다.

본 실험에서 칩분류는 ISO3685에 근거하여 실험에서 주로 발생한 5종으로 하였으며 Fig. 1과 같다. 그림에서 type 1은 작업자에게 위험하고 공작기계, 공구, 가공물에 손상을 주는 형태이며 type 2에서 4는 처리성이 양호한 칩이며 type5는 너무 짧거나 단단하여 비산시 작업자나 공작기계의 운동부에 영향을 주고 가공물이나 공구에도 손상을 준다.

Fig. 1 Classification of the chip type

classification	chip type	chip form	remarks
1 type	continuous, straight, snarl chips		unfavourable
2 type	short continuous chips		preferred favourable
3 type	short chips		
4 type	arc chips		
5 type	elemental chips		

2.2 표준편차

평균값이 측정데이터의 크기를 나타내는데 비해 데이터의 변동성 즉 데이터의 분포가 그 중심에서 어느 정도 퍼져 있는가를 나타내는데 표준편차를 사용한다. 실험에서 측정한 절삭력 데이터의 형태가 Fig. 2와 같이 나타나기 때문에 절삭력의 표준편차를 이용하여 절삭력 데이터를 해석하였다.

표준편차(s)는 아래와 같이 표현된다.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

n : 데이터의 갯수

x_i : i번째 데이터의 크기

\bar{x} : n개 데이터의 평균

절삭시 발생하는 절삭력은 절삭 가공 상태를 가장 민감하게 나타내는 요소이며 이런 절삭력의 표준편차를 이용하여 칩 형태의 분류를 시도하였다.

2.3 The BPN(back propagation network)

현재 neural network으로 가장 널리 이용되는 형태중 하나가 BPN이다. BPN은 입력과 출력 사이에 은닉층을 도입한 구조로 초기 입력은 출력 방향으로 전달된다. 초기에 임의로 결정된 가중치(W) matrix에 의해서 임의의 출력값이 발생하며, 이 출력값과 목표값을 비교하여 그 오차를 구하고 이로부터 역방향으로 오차를 줄이는 방향으로 가중치를 보정해준 후, 다시 입력을 넣어 계산하는 과정을 반복하여 오차를 최소로 되게 하는 것이다. 여기서 가중치의 보정값은 오차에 비례하게 취하며 이것을 "delta rule"이라 한다.

1) 학습규칙(Learning rule) 은 $\Delta W_{ij} = -K \frac{\partial E_i}{\partial W_{ij}}$

같이 표현되고.

2) Total Error, E는

$$E = \sum_i \sum_j (t_{ij} - o_{ij})^2 = \sum_i E_i \dots \dots (1)$$

s = input patterns 의 수 (학습을 위한)

i = output units 의 수

E_i = pattern s의 error 를 나타냄

t_{ij} = s pattern 의 i 번째 output unit 의 목표값

o_{ij} = s pattern 의 i 번째 output unit 의 실제값

이다.

식 (1)을 미분하면

$$\Delta W_{ij} = \epsilon \cdot \delta_{ij} \cdot i_{ij} \quad (\epsilon = 2K, \delta_{ij} = t_{ij} - o_{ij}) \text{ 이다.}$$

3) 활성화수(activation function) 는 $a_{ij} = \frac{1}{1 + e^{-\sum w_{ij} \cdot a_{ij}}}$

$$\frac{da_{ij}}{dact_{ij}} = a_{ij}(1 - a_{ij}) = f_i'(act_{ij})$$

$$\delta_{ij} = (t_{ij} - a_{ij}) a_{ij}(1 - a_{ij}) \text{ 이다.}$$

4) 가중치(weight) 변화

$$\Delta W_{ij} = \epsilon \cdot \delta_{ij} \cdot a_{ij} \text{ 에서 } (\delta_{ij} = (t_{ij} - a_{ij}) \cdot f_i'(act_{ij}))$$

각 layer에서의 가중치는 δ_{ij} 의 양에 비례해서 변화되어진다.

$$\text{단 } act_{ij} = \sum_j W_{ij} \cdot a_{ij} + bias_i$$

학습율을 증가시키는 방법은 모멘텀항을 추가하여 역전파 학습 규칙을 수정하는 것이다.

$\Delta W_{ij}(n+1) = \epsilon (\delta_{ij} \cdot a_{ij}) + \alpha \Delta W_{ij}(n)$ 의 식으로 가능하다.

3. 실험 장치 및 방법

고속정밀선반을 사용한 선삭에서 절삭력을 측정하기 위하여 공구대 위에 공구 동력계를 설치하고 출력된 전압 데이터를 charge amplifier에 보내어 증폭하고 A/D변환기를 거쳐 IBM-PC486으로 보내어 저장하여 해석하였다. 절삭가공 재료는 단삭재인 STS304이며, 진동의 영향을 적게 하기 위하여 가공물 길이를 250mm 이내로 하였다. Fig.3은 본 실험에서 사용한 실험 장치의 개략도이다. 공구는 코팅 초경공구 KT 계열을 사용하였으며, 칩 브레이커가 있는 경우와 없는 경우 2종류의 인서트공구를 사용하고 각각에 대하여 칩형태를 분류하고 비교하였다.

실험에 사용한 인서트와 홀더의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of insert and tool holder

classification	TPGN (Non chip breaker)	TNMG (KC type chip breaker)
grade	KT300	KT250
standard	160304GN	160404KC
tool holder	CTGPR	PTGN2020K16

공구설치시 공구의 기하학적 크기는 Table 2와 같고 실험에서 선택한 절삭조건은 table 3과 같다.

Table 2. Tool geometry

classification	TPGN	TNMG
major cutting edge	0°	0°
back rake angle	0°	-6°
effective rake angle	6°	-6°
side relief angle	11°	0°
nose radius	0.4(mm)	0.4(mm)
inclination angle	0°	-6°

Table 3. Cutting condition

cutting speed (m/min)	depth of cut (mm)	feed (mm/rev)
50, 100, 150	0.4, 0.8, 1.2	0.05, 0.10, 0.15, 0.25 (0.05, 0.10, 0.25, 0.38)

* ()의 이송은 칩브레이커가 없는 경우

절삭중 가공물의 표면에 발생하는 가공경화를 고려하여 0.05mm로 수회 전 절삭(pre-cutting) 후 table 3의 조건에서 건절삭하여 데이터를 받았다. 절삭속도는 가공물의 직경의 변화에

따라 절삭속도가 변하므로 선반 주축의 회전수를 조절하여 $\pm 5\%$ 정도의 오차 범위를 유지 하였으며, 절삭시 insert의 마모나 파손이 칩 형태에 미치는 영향을 고려하여 인서트 날 하나에 3회의 절삭을 하였다. 절삭 상태가 비교적 안정되었을때 데이터를 받기 위하여 각 조건에서 절삭은 5-10초 동안 절삭하고, 데이터를 받는 시간은 0.1초로 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 일반적 절삭특성

실험에서 발생한 칩은 주로 상향 만곡이 약간 더해진 평형 만곡의 와셔형 칩형태로 배출된다. 또한 절삭 3분력은 크기는 차이가 있지만 비슷한 경향을 보이고 절삭특성 분석은 표준편차의 칩형태 분류에서 가장 특성이 잘 나타나는 배분율을 이용하였다.

Fig. 4, Fig. 5는 칩브레이커가 있는 경우와 없는 경우에서 물림깊이가 $a=1.2\text{mm}$ 일때 이송과 속도 변화에 의한 절삭력의 경향을 나타낸다. 칩브레이커가 있는 경우(KC) 같은 이송에서 속도변화에 따른 절삭력의 변화가 거의 없으나 칩브레이커가 없는 경우(GN) 이송이 커지면 속도가 증가함에 따라 약간씩 절삭력이 감소 하였다. 또한 이송이 증가하면 모든 절삭속도에서 절삭력은 급격히 증가하였다.

Fig. 6, Fig.7은 절삭속도 100m/min에서 물림깊이와 이송의 변화에 따른 절삭력의 변화를 보여준다. 칩브레이커가 있는 경우와 없는 두가지 모두 같은 물림깊이에서 이송의 증가에 따라 절삭력이 크게 차이가 있으며 물림깊이의 증가와 함께 절삭력이 증가한다.

Fig. 8, Fig. 9는 이송 0.25mm/rev일때 속도와 물림깊이가 변할때 절삭력의 변화를 나타내었다. 칩브레이커가 있는 경우와 없는 경우 모두 절삭속도가 증가하면서 모든 물림깊이에서 절삭력은 감소한다. 같은 절삭속도에서는 물림깊이가 큰 경우 절삭력이 약간씩 크다.

Fig. 10, Fig. 11은 속도 100m/min에서 물림깊이와 이송의 변화에 따른 절삭력 표준편차 값의 변화를 보여주고 있다. 물림깊이가 증가하면 표준편차 값이 증가하는 경향을 보이며 이송의 증가에 따라서 값이 크게 증가한다. 특히 칩브레이커가 없는 경우 이송 0.25mm/rev이상, 물림깊이 0.8mm이상에서 급격한 증가가 보인다. 이것은 작은 이송과 물림깊이에서는 칩이 연속형으로 나오다가 물림깊이와 이송이 커지면서 짧게 분절되는 칩으로 바뀌어 절단시 절삭력이 크게 변동하기 때문인 것으로 추정된다. 또한 그림에서 이송의 변화에 따라 칩의 형태가 크게 변하는 것을 알 수 있고 칩브레이커가 없는 경우 작은 이송과 물림깊이에서 연속형칩이 생성되나 칩브레이커가 있는

경우 작은 이송과 물림깊이에서도 칩처리에 좋은 칩이 발생함으로써 칩브레이커의 효과를 알 수 있다.

Fig. 12는 물림깊이 0.8mm에서 속도와 이송의 변화에 따른 표준편차 값의 변화를 보여주고 있다. 절삭력과 같은 경향으로 속도의 증가와 함께 표준편차 값이 감소하며 이송의 증가에 따라 큰 차이가 있다. 칩 형태도 속도가 증가하고 이송이 작아짐에 따라 점차 연속형에 가까워진다.

Fig. 13은 같은 절삭속도에서 물림깊이가 클때 표준편차 값이 약간 크지만 속도가 증가하면 모든 물림깊이에서 표준편차 값은 감소한다.

이상의 결과에서 속도의 증가는 칩 형태의 변화에 큰 영향이 없으며 이송의 증가가 큰 영향을 주어 연속형칩에서 짧게 분절 되는 칩으로 된다.

4.2 절삭력의 표준편차와 칩의 형태

Fig. 14, Fig. 15는 각각의 칩형태를 분류 할 수 있는 표준편차의 범위를 나타낸다. Fig. 14, Fig. 15에 나타낸 범위 내에서 칩의 인식 상태는 86%이상의 정확성을 얻었고 오차는 작은 이송과 3, 4번칩의 분류에서 발생하였다. 결과는 table 4와 같다

Table 4. Performance of cutting force standard deviation

classification	KC type chip breaker	Non-chip breaker
number of samples	36	36
number of errors	5	4
accuracy percent(%)	86	89

칩 브레이커가 있는 경우 각 칩의 형태에 따라 거의 비슷한 분포로 표준편차 값이 증가하여 칩의 형태를 분류하기가 비교적 용이했다. 칩의 형태가 연속형칩 일때 절삭력 변동이 작아 작은 표준편차 값을 갖는 반면 4번 5번칩인 경우는 비교적 높은 표준편차 값을 나타낸다. 이것은 칩이 잘게 절단될수록 절삭력의 변동이 크다는 것을 나타낸다. 칩브레이커가 없는 경우 3가지 칩형태로(3번과 5번은 거의 발생하지 않음) 분류할 수 있었으며 각 칩형태에 따른 표준편차의 범위가 칩 브레이커가 있는 경우에 비해서 넓고 큰 경향을 보이고 있다. Fig. 14와 Fig. 15로부터 broken chip과 unbroken chip의 경계를 구분 할 수 있었다. 그 범위는 칩 브레이커가 있는 경우 표준편차 값이 0.5, 칩브레이커가 없는 경우 표준편차 값이 2 정도이다. 0.1초의 짧은 시간동안 획득한 데이터로 실제 육안으로 관찰한 칩형태와 표준편차를 이용하여 분류한 칩형태 사이의 정확성이 높기 때문에 절삭력 데이터를 실시간으로 처리하면 절삭가공중 칩형태를 근사적으로 판별 할 수 있다.

4.3 BPN 이용한 예측 결과 고찰

실험에서 사용한 BPN의 구조와 입력 조건은 table 5, table 6과 같다.

Table 5. Structure of BPN for training neural network

classification	KC type chip breaker	Non-chip breaker
number of input units	3	3
number of hidden units	6(3,3)	6(3,3)
number of output units	5	3
number of hidden layers	2	2
inputs(cutting speed, depth of cut, feed)	3	3
outputs(chip type)	1(5)	1(3)

Table 6. Input conditions for learning

cutting condition	1	2	3
cutting speed (m/min)	50	100	150
feed (mm/rev)	0.05 (0.10)	0.15 (0.25)	0.25 (0.38)
depth of cut (mm)	0.4	0.8	1.2

* ()의 이층은 칩브레이커가 없는 경우

BPN은 실험을 통하여 얻은 절삭조건에 따른 칩형태를 표본으로 학습을 시켰다. 학습은 25개의 patterns을 표본으로 total error 값을 0.02 수준으로 학습을 시켰으며 학습결과는 table 7, table8과 같다.

Table 7. Learning condition and results(KC chip breaker)

cutting condition			actual chip type					chip type of learning results				
cutting speed	depth of cut	feed	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
3	1	1	1	0	0	0	0	0.99	0	0	0	0
1	2	1	0	1	0	0	0	0	0.98	0.02	0	0
3	3	2	0	0	1	0	0	0	0.01	0.96	0.02	0
2	3	2	0	0	0	1	0	0	0	0.04	0.93	0
1	3	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0.02	0.98

Table 8. Learning condition and results(Non chip breaker)

cutting condition			actual chip type			chip type of learning results		
cutting speed	feed	depth of cut	1	2	4	1	2	4
2	1	2	1	0	0	0.99	0.03	0
3	2	1	1	0	0	0.98	0	0
1	3	1	0	1	0	0	0.96	0
1	3	3	0	0	1	0	0.03	0.99
2	3	2	0	0	1	0	0.01	0.99

학습결과를 이용하여 실험하지 않은 절삭조건을 테스트하여 보았다. 테스트 결과는 table 9와 같다.

Table 9. Performance of neural network

classification	KC type chip breaker	Non-chip breaker
number of learning patterns	25	25
number of test patterns	25	25
number of errors	2	3
accuracy percent(%)	92	88

BPN을 이용하여 절삭조건을 가지고 칩형태를 예측 분류한 결과는 양호하게 나타났다. table 9에서 총 25개의 test 패턴중 칩브레이커가 있는 경우 2개, 칩브레이커가 없는 경우 3개의 error가 나왔으며 약 90% 정도의 정답율을 보였다. table 10, table 11에서 test 값이 0.90 이하인 경우를 error로 하였으며 error는 절삭조건 3, 2, 2.5 나 3, 2, 2와 같은 경우를 들 수 있다. 이 방법을 이용하면 절삭가공을 하기전에 칩형태를 예측할 수 있으며 절삭시 발생하는 절삭력의 표준편차와 보완하여 칩형태를 예측한다면 좀더 신뢰성 있는 칩형태의 검출 방법이 될 수 있으리라 생각된다.

Table 10. Test results (KC type chip breaker)

cutting condition			test results					actual chip type
cutting speed	depth of cut	feed	1	2	3	4	5	
1	3	1	0	0.98	0.03	0	0	2
1	2	3	0	0	0	0.08	0.98	5
3	2	2.5	0	0	0.80	0.99	0	4
3	3	1	0	0.98	0.02	0	0	2
2	2.5	3	0	0	0	0.02	0.98	5

Table 11. Test results (Non-chip breaker)

cutting condition			test results			actual chip type
cutting speed	feed	depth of cut	1	2	4	
2	0.5	2	0.99	0.03	0	1
3	2	3	0	0	0.99	4
3	2	2	0.08	0	0.50	4
0.5	2	3	0.32	0.88	0	2
2	1	2.5	0.99	0.03	0	1

5. 결론

본 실험은 STS304를 2가지 형상의 인서트를 사용하여 선삭 가공을 실시하고 가공중 발생하는 칩 형태를 분류·예측하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 절삭 조건중 칩의 형태 변화에 미치는 영향은 칩브레이커가 있는 경우와 없는 경우 모두 이송의 영향이 가장 크고 칩브레이커의 효과는 양호하게 나타났다.
2. 절삭력의 표준편차를 이용하여 칩 형태를 86% 정도로 양호하게 분류할 수 있으며 broken chip과 unbroken chip으로 구별 할 수 있는 절삭력 표준편차 값은 칩브레이커가 없는 경우 2, 칩브레이커가 있는 경우 0.5 이다.
3. BPN을 이용한 칩형태의 예측에서 total error를 0.02로 학습한 결과를 사용하여 임의의 절삭 조건을 실험해 본 결과 칩브레이커가 있는 경우 약 92%, 칩 브레이커가 없는 경우 88%의 정답율을 얻었다.

참고 문헌

1. K. Iwata, "Estimation of Cutting Tool Life by Processing Tool Image Data with neural network," Annals of the CIRP, Vol. 42, 1. 1993, pp. 59 - 62.
2. David A. Dornfeld, M. F. Devries, "Neural Network Sensor Fusion for Tool Condition Monitoring," Annals of the CIRP, Vol. 39, 1. 1990, pp. 102 - 105.
3. M. Wang, J. Y. Zhu, Y. Z. Zhang, "Fuzzy Pattern Recognition of the Metal Cutting States," Annals of the CIRP, Vol. 34, 1. 1985, pp. 133 - 136.
4. W. Kluff, W. konig, C. A. van Lutternvelt, K. Nakayama, A. J. Pekelharing, "Present Knowledge of Chip Control," Annals of the CIRP, Vol. 28, 2. 1979, pp. 441-455.
5. J. L. Andreasen, L. De Chiffre, "Automatic Chip-Breaking Detection in Turning by Frequency Analysis of Cutting Force," Annals of the CIRP, Vol. 42, 1. 1993, pp. 45 - 48.

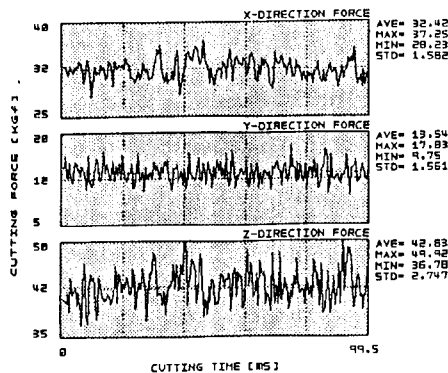


Fig. 2 Dynamic component of cutting force

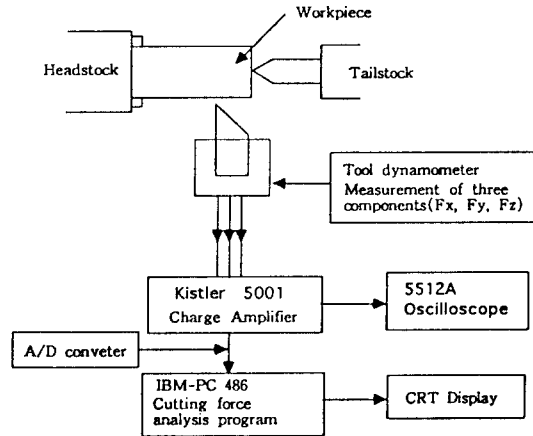


Fig. 3 Block diagram of the data acquisition

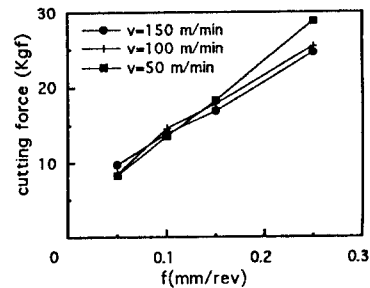


Fig. 4 Cutting force vs. feed with cutting speed (a = 1.2 mm, KC)

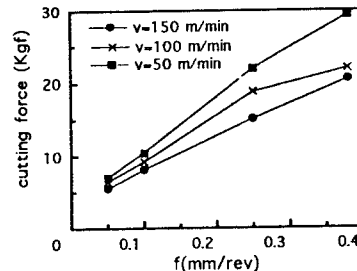


Fig. 5 Cutting force vs. feed with cutting speed (a = 1.2 mm, GN)

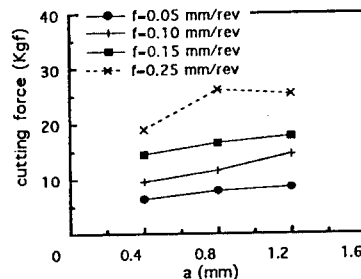


Fig. 6 Cutting force vs. depth of cut with feed (v = 100 m/min, KC)

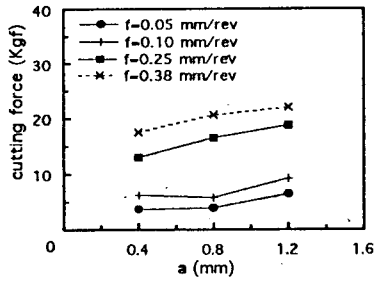


Fig. 7 Cutting force vs. depth of cut with feed ($v = 100$ m/min, GN)

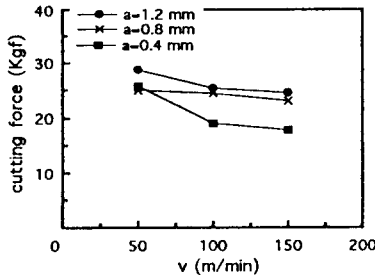


Fig. 8 Cutting force vs. cutting speed with depth of cut ($f = 0.25$ mm/rev, KC)

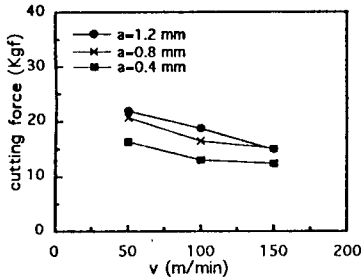


Fig. 9 Cutting force vs. cutting speed with depth of cut ($f = 0.25$ mm/rev, GN)

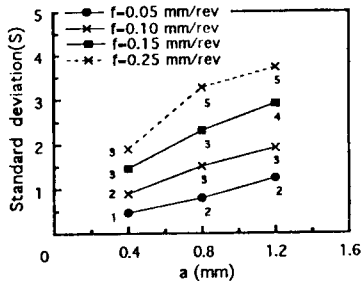


Fig. 10 Standard deviation vs. depth of cut with feed ($v = 100$ m/min, KC)

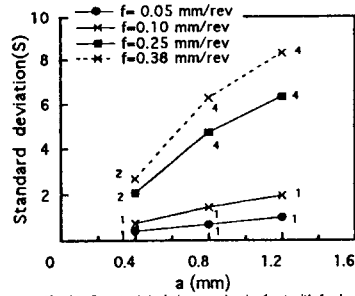


Fig. 11 Standard deviation vs. depth of cut with feed ($v = 100$ m/min, GN)

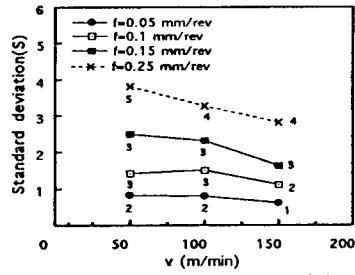


Fig. 12 Standard deviation vs. cutting speed with feed ($a = 0.8$ mm, KC)

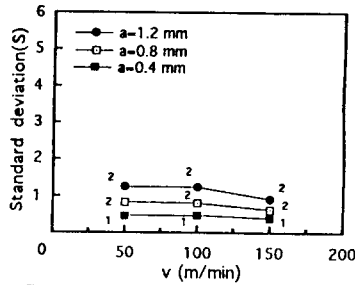


Fig. 13 Standard deviation vs. cutting speed with depth of cut ($f = 0.05$ mm/rev, KC)

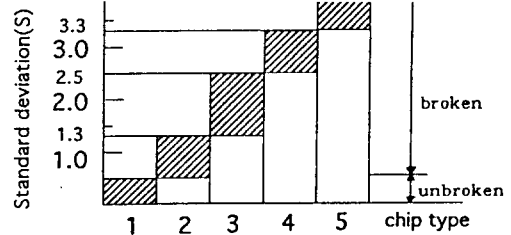


Fig. 14 Standard deviation range relation with chip type (KC type chip breaker)

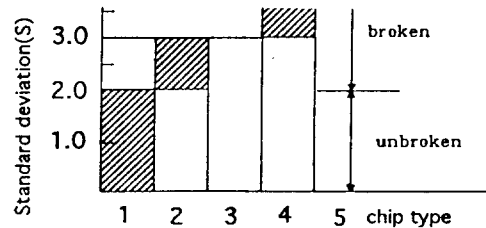


Fig. 15 Standard deviation range relation with chip type (Non-chip breaker)