

난삭재 고속가공에서의 엔드밀링 공정의 절삭력 해석

Cutting Force Analysis in End Milling Process for High-Speed Machining of Difficult-to-Cut Materials

전태수*, 김남규(한양대학교 대학원), 정성중(한양대학교 기계공학부)

T.S. Jun*, N.K. Kim (Hanyang Univ. Graduate School), S.C. Chung(Hanyang Univ.)

Abstract

Due to rapid growth of die and mould industries, it is urgently required to maximize the productivity and the efficiency of machining. In recent years, owing to the development of new kinds of material, die and mould materials are much harder and it is more difficult to cut.

In this study, the workpiece SKD11 (HRC45) is cut with TiAlN coated tungsten-carbide cutting tools. To find the general characteristics of difficult-to-cut materials, orthogonal turning test is performed. Orthogonal cutting theory can be expanded to oblique cutting model.

The oblique cutting process in the small cutting edge element has been analyzed as orthogonal cutting process in the plane containing the cutting velocity vector and chip-flow vector. Hence, with the orthogonal cutting data obtained from orthogonal turning test, the cutting forces can be analyzed through oblique cutting model. The simulation results have shown a fairly good agreement with the test results.

1. 서론

급속히 발전하는 금형산업에서 생산성 향상과 가공능률의 극대화는 절실히 요구되고 있는 과제이다. 과거 금형 재료가 고경도일 때 연삭가공이나 방전가공이 대부분을 차지하였고 이에 따라 금형 제작에 있어서 경제적인 측면과 가공능

률에서 획기적인 향상을 기대할 수 없었지만 최근 공작기계의 성능이 향상되어 고속 절삭 및 이송을 가능하게 하였다. 이러한 의미에서 고속가공은 금형제작에 있어서 대부분을 차지하고 있는 절삭시간과 최종 다듬질 작업에 드는 시간을 단일 공정으로 하여 제작 시간을 단축할 수 있고 형상 정밀도 향상이라는 측면에서 많은 연구가 진행되고 있으며 실제로 항공산업에서 알루미늄 등 경합금의 경우 주축회전수 100,000 rpm 이상의 절삭 예에 대한 보고도 있다.

최근 신소재의 개발에 따라 금형 재료가 고경도화, 난삭화되고 있으며 이들을 절삭할 때 가공의 어려움을 극복하고 신속 정밀한 금형을 만들기 위해 고속가공의 필요성은 더욱 증가할 것이다. 그러나 고속 단속절삭에 관한 절삭 메커니즘이 아직 명확히 밝혀지지 않았으므로 이에 대한 연구가 필요한 실정이며 공작기계의 가공속도가 고속화되고 있는 상황에서 절삭공구의 형상에 따른 금형 재료의 절삭 특성에 관한 데이터는 적절한 절삭조건의 선정을 가능하게 하여 고속가공을 실현하게 할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 코팅초경공구(WC)로 난삭재인 SKD11을 가공하였다. 난삭재 가공시 생기는 일반적인 특성을 보기 위해 2차원 절삭 실험을 수행하고 그 데이터를 이용하여 3차원 절삭모델로 확장하였다. 2차원 절삭원리를 3차원 절삭모델로 확장하려는 시도는 Shirase⁽²⁾, 양⁽⁴⁾, Altintas⁽⁶⁾ 등 많은 연구자들이 행해 왔고 실험적인 절삭력 해

석에 비해 다른 이점을 갖고 있다.

2차원 절삭 실험을 통해 SKD11의 가공특성과 2차원 절삭데이터를 구하고 난후 3차원 절삭 모델로 확장한다. 확장된 모델을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

2. 난삭재 고속가공

본 연구에서 피삭재로 사용하는 난삭재란 글자 그대로 깎기 어려운 재료, 즉 절삭이 어려운 재료를 말한다. 생산현장에서 실제 절삭가공을 수행하는 기술자들에게 절삭이 곤란한 재료는 반드시 어떤 것을 지칭하는 것은 아니다. 따라서 재료 자체가 난삭성을 불러 일으키거나 그 재료의 절삭데이터가 없는 피삭성이 명확하지 않은 재료를 좁은 의미의 난삭재라 한다. 난삭재가 가지는 재료특성으로는 고경도·고강도이며, 취성이 있으며, 고온강도가 크고, 가공경화가 생기기 쉬운 것 등을 들 수 있다. 이러한 재료특성이 원인이 되어 절삭시에 절삭력 및 절삭온도가 높고 공구의 마모가 급진전하며 표면이 거칠고, 칩 배출이 용이하지 않게 된다.

본 연구에 사용된 피삭재인 냉간 금형용 합금강 SKD11(HRC45)는 탄소(C)와 크롬(Cr)이 많은 강으로서 부식에 강하고 상온에서 내마모성이 커 금형 및 공구제작에 널리 사용되고 있다.

SKD11의 절삭특성 및 2차원 절삭계수 등을 구하기 위해 선반에서 선삭실험을 수행한 결과 Fig.1과 같은 결과를 볼 수 있다. 이송방향과 절삭방향 절삭력이 어떤 절삭속도부터 낮아지는 경향을 볼 수 있다. 다양한 조건(rake angle ; -5° ~ -15° , Cutting Speed ; 9 ~ 65 m/min, Depth of cut ; 0.05~0.2mm)에서 실험한 결과 위와 같은 경향이 실험 전반에 걸쳐 나타났다.

절삭속도가 높을 때 절삭력이 낮아지는 것으로 미루어 SKD11의 절삭가공이 고속에서 더욱 잘 수행된다는 결과를 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 난삭재인 SKD11의 고속 불엔드밀 가공

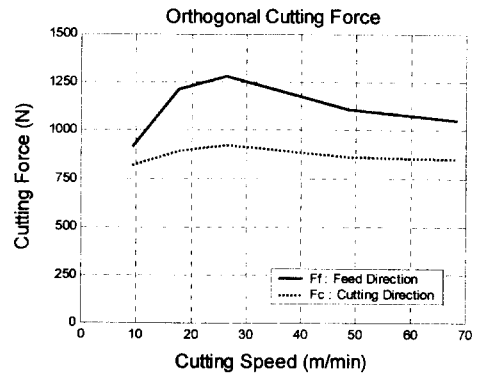


Fig. 1 Orthogonal cutting forces (depth of cut : 0.15, rake angle : 0)

의 절삭력을 해석하고 그 결과의 타당성을 살펴 보겠다.

3. 절삭력 해석

본 연구에서는 종래의 2차원 절삭이론을 적용하여 3차원 절삭으로 모델을 확장하는 방법을 사용하였다. 2차원 절삭이론은 Merchant's theory를 이용하여 세 방향의 절삭력을 구할 수 있다. 절삭날이 공작물에 절입되었는지 알기 위해 공작물을 Z-map화하였다. Z-map은 공작물의 XY평면을 격자로 나누어 각 좌표에서의 높이를 Z값으로 저장하는 방법이다. 이는 불엔드밀의 3차원 절삭시에 공구의 위치와 공작물의 상태를 표현하는데 유용하다.

본 연구에서는 2차원 절삭실험을 수행하여 얻은 2차원 절삭 데이터를 토대로 공구형상과 가공조건에 따른 3차원 절삭력 해석을 수행한다. 이러한 접근법은 공구설계나 공정계획시 해당 조건에서의 절삭력을 실험을 하지 않고 2차원 절삭 데이터를 변환하여 실질적 절삭력을 추정할 수 있다는 이점이 있다.

3.1 2차원 절삭

3차원 절삭해석을 위해서는 2차원 절삭 데이

터를 필요로 하는데 이는 공구와 피삭재 사이의 특성을 잘 나타내 줄 수 있는 실험 데이터이어야 한다. 본 연구에서는 공구의 재종으로 초경(WC)을 사용하였고, 피삭재의 재종으로는 난삭재인 SKD11을 사용하였다. 공구와 공작물의 특성은 Table.1과 같다.

2차원 절삭을 통하여 구하는 계수는 전단응력, 전단각, 마찰각, 그리고 칩압축률이다. 이들 4개의 계수들은 절삭속도, 절삭두께, 공구의 rake angle의 함수로 나타낼 수 있다. 이들을 분석함에 있어 마찰각과 칩압축률의 함수는 다음과 같이 가정하였다.

$$\beta = a_0 V^{a_1} f^{a_2} + a_3 \alpha + a_4 \quad (3.1)$$

$$r = c_1 t^{c_2} \quad (3.2)$$

$$c_1 = b_0 V^{b_1} f^{b_2} + b_3 \alpha + b_4$$

$$c_2 = b_5 V^{b_6} f^{b_7} + b_8 \alpha + b_9$$

각각의 계수 a_i 와 b_i 는 최소자승법을 이용하여 구할 수 있다.

본 연구에서는 비선형성을 가지면서 구속 조건을 갖지 않는 함수인 식 (3.1)과 식 (3.2)의 계수를 구하기 위해 유전자 알고리즘을 이용하였다. 식 (3.1)과 식 (3.2)는 다음과 같은 오차식으로 나타낼 수 있다.

$$e_\beta = \sum (\beta - (a_0 V^{a_1} f^{a_2} + a_3 \alpha + a_4))^2$$

$$e_r = \sum \left(r - (b_0 V^{b_1} f^{b_2} + b_3 \alpha + b_4) t^{(b_5 V^{b_6} f^{b_7} + b_8 \alpha + b_9)} \right)^2$$

위 식들을 최소화하는 계수 a_i 와 b_i 를 구하는데 유전자 알고리즘을 이용한다. 이 과정의 흐름은 Fig.2와 같다.

Table 1 Compositions of tool and workpiece

Tool	WC (3 μm TiAlN coated)						
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni
SKD11	1.51	0.59	0.59	12.2	1.03	0.34	0.47

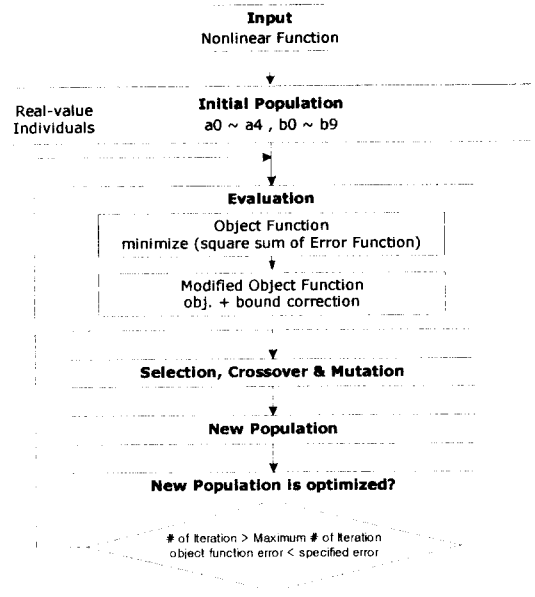


Fig. 2 Flow chart of Genetic Algorithm

이렇게 하여 구해진 마찰각과 칩압축률은 Table 2와 같다. 모델과 실제 실험치 사이의 평균오차는 마찰각의 경우 0.35%, 칩압축률의 경우 0.30%이다.

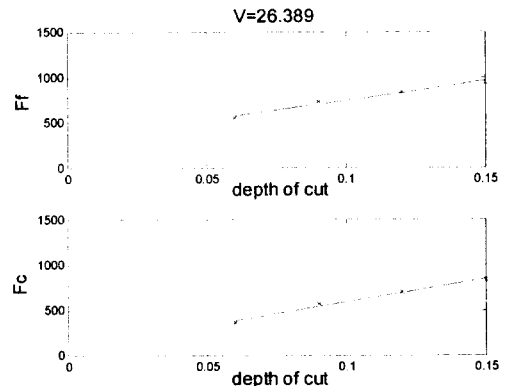


Fig. 3 Edge force extrapolation from cutting forces

Table 2 Orthogonal cutting data of SKD11(HRC45)

Shear Stress	1144.20 Mpa
Friction Angle	$47.60V^{-3.33}f^{0.66}+1.28\alpha+0.6381$
Chip Ratio	$c_1t^{c_2}$
	$c_1=49.8260V^{-0.76}f^{0.36}+4.66\alpha+10.00$ $c_2=19.12V^{-0.33}f^{0.33}+0.16\alpha+1.12$
Edge Force	$K_{te}=14.99$ N/mm
Coefficients	$K_{re}=60.56$ N/mm

또한 절삭날 모서리부분에 걸리는 절삭저항은 단위길이 당 절삭저항계수로서 주로 절삭날 저항계수는 절삭두께가 0일 때의 절삭력을 절삭폭으로 나눔으로써 구할 수 있다. Fig. 3은 절삭속도 26.389 m/mm일 때의 절삭방향과 이송방향의 절삭력을 나타낸다. 외삽법을 이용하여 절삭두께가 0일 때의 절삭력을 구할 수 있다. 이런 과정으로 얻어진 2차원 절삭데이터는 Table 2와 같다.

3.2.3차원 절삭

각 미소절삭날에 발생하는 3차원 절삭현상을 해석하기 위해 2차원 절삭현상을 해석하는 방법을 확장하여 이용하는 방법을 사용한다. Shirase 등이 선삭과 엔드밀링 과정에 대해 그 타당성을 입증하는 방법으로서 절삭속도와 칩유출속도로 이루어진 평면에서 2차원 절삭이론을 적용하여 미소절삭날의 절삭력을 구하고 좌표변환을 통해 원하는 방향의 절삭력을 구하는 방법을 채택하였다. 양민양, Altintas 등이 이러한 접근법을 이용하였다. 식 (3.3), (3.4) 그리고 (3.5)는 3차원 절삭력 해석의 기본식이다.

$$\begin{aligned}
 K_{ic} &= \frac{\tau \cos(\beta_n - \alpha_n) + \tan \eta_c \sin \beta_n \tan i}{\sin \phi_n c} \\
 K_{rc} &= \frac{\tau \sin(\beta_n - \alpha_n)}{\sin \phi_n \cos i c} \\
 K_{ac} &= \frac{\tau \cos(\beta_n - \alpha_n) \tan i - \tan \eta_c \sin \beta_n}{\sin \phi_n c}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

K_{ic}, K_{rc}, K_{ac} 는 비절삭저항을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 dF_i &= K_{ic} dS + K_{ic} h(t) db \\
 dF_r &= K_{rc} dS + K_{rc} h(t) db \\
 dF_a &= K_{ac} dS + K_{ac} h(t) db
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

dF_i, dF_r, dF_a 는 미소절삭날 각 방향의 절삭력을 나타내는 것으로 다음 식을 통해 xyz좌표계로 변환된다.

$$\begin{aligned}
 [T] &= \begin{bmatrix} -\sin \kappa \sin \varphi & -\cos \varphi & -\cos \kappa \sin \varphi \\ -\sin \kappa \cos \varphi & \sin \varphi & -\cos \kappa \cos \varphi \\ \cos \kappa & 0 & -\sin \kappa \end{bmatrix} \\
 \{dF\}_{xyz} &= [T] \{dF\}_{rta} \\
 F_{xyz} &= \sum_0^a dF_{xyz}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

식 (3.5)는 해석된 3차원 절삭력을 나타낸다.

Fig. 4는 반경 8mm인 두날 엔드밀의 이송시 실제 절삭칩 두께의 변화를 보인다. 절삭두께를 적게 주고 고속으로 가공하는 난삭재의 고속가공에서는 실절삭두께의 영향을 무시할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 트로코이드(trochoid) 운동을 하는 절삭날의 위치에 따른 절삭두께를 계산하여 절삭력을 해석한다.

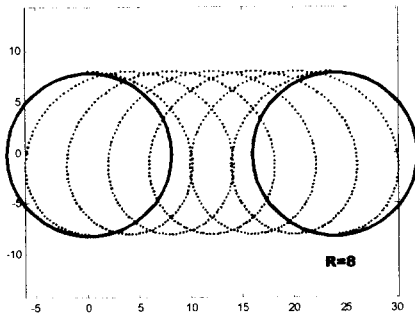


Fig. 4 Actual chip thickness of 2 flute end mill

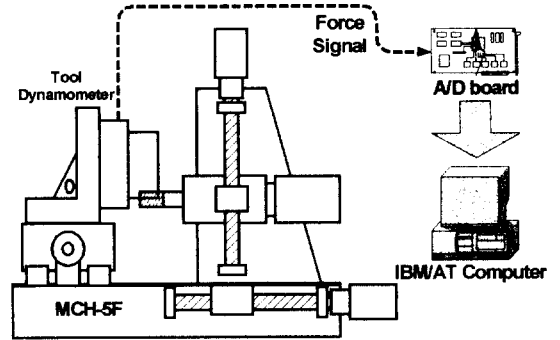


Fig. 6 Experimental setup for ball end milling process

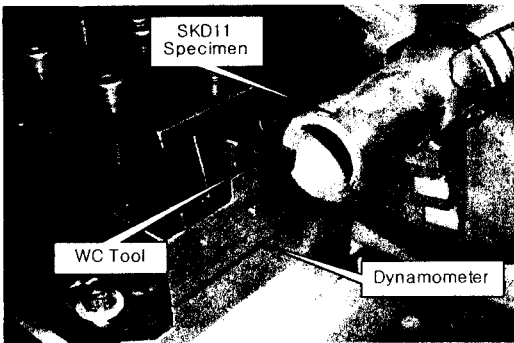


Fig. 5 Experimental setup for orthogonal cutting

4. 실험 장치

4.1 2차원 절삭 실험 장치

본 실험에서는 화천기공의 HL-380 범용선반에서 Kistler 9257B 공구동력계와 Kistler 5011B 공구동력계 앰프, LeCroy 9314A 디지털 오실로스코프, A/D보드, IBM PC를 사용하여 공구의 절삭날에 걸리는 이송방향과 절삭방향의 절삭력을 측정하였다. 그리고, 발생된 칩의 압축률을 측정하기 위해 마이크로미터, 버니어캘리퍼스 그리고 확대경을 이용하였다. 일정한 두께의 관 형태로 만들어 열처리한 시편을 가지고 Fig. 5와 같이 2차원 절삭실험을 수행하였다. 그리고 위의 실험을 통해 SKD11 (HRC45)과 코팅초경공구에 대한 2차원 절삭력 데이터를 구하였다.

Table 3 Cutting conditions for ball end milling

		Spindle Speed (RPM)	
		3000	5000
Feedrate (mm/min)	40	Exp#1	Exp#4
	80	Exp#3	Exp#2

4.2 볼엔드밀링 절삭 실험

본 실험에서는 수평형 머시닝센터(MCH-5F)에서 볼엔드밀의 Slot Cutting을 수행했다. 가공시 발생하는 절삭력은 공구동력계와 A/D 보드를 통해 측정되어 저장된다. 실험장치의 개략도는 Fig. 6과 같고 Table 3에 절삭조건을 나타내었다.

5. 실험결과 및 해석의 검증

본 연구에서 얻어진 3차원 절삭모델은 2차원 절삭 원리에서 변환되어진 것이다. 따라서 2차원 절삭실험에서와 같이 3차원 절삭인 실제 볼엔드밀 가공에서도 다음과 같이 좋은 결과를 얻었다.

Fig. 7은 주축속도 3000rpm, 이송속도 40mm/min, 축방향 절삭깊이 1mm의 절삭조건을 주었을 때 공구 1회전시의 절삭력을 보여 준다. 실험에서 얻어진 절삭력을 분석 후 시뮬레이션 결과와 비교해 보았을 때 추정오차가 대략 11% 정도가 나온다. 이는 피삭재가 난삭재임을 고려했을 때 양호한 해석 결과이다.

Fig. 8은 주축속도 5000rpm, 이송속도 80mm/

min, 축방향 절삭깊이 1mm의 절삭조건을 주었을 때 공구 1회전시의 절삭력을 보여 준다. 이 경우에도 추정오차가 대략 12% 정도이다. 여기서 주축속도 5000rpm에서 절삭력이 전체적으로 낮게 나오는 것을 볼 수 있다. 이는 난삭재인 SKD11의 고속가공의 필요성을 나타낸다.

그러나 현실적으로 SKD11의 고속가공은 절입량을 많이 줄 경우 채터 및 마모, 파손이 쉽게 나타나므로 실제 실험계획을 수립할 때 많은 시행착오가 필요하다.

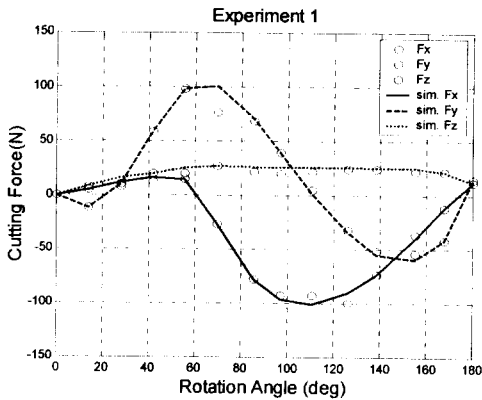


Fig. 7 Cutting forces in experiment #1
(S=3000RPM, f=40mm/min)

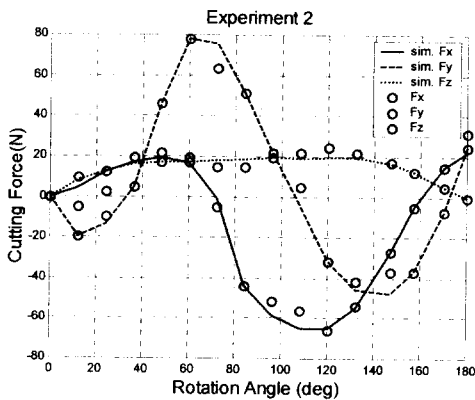


Fig. 8 Cutting forces in experiment #2
(S=5000RPM, f=80mm/min)

6. 결론

본 연구에서는 난삭재인 SKD11(HRC45)을 공작물로 하여 절삭실험을 수행하였고, 2차원 절삭 실험을 통해 2차원 절삭데이터를 얻었다. 이 데이터를 바탕으로 3차원 절삭 모델을 구성하고 실험 및 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.
(1) 피삭성이 모호한 것이 특징인 난삭재인 SKD11 가공에서 속도가 높을 때 절삭력이 감소하는 경향을 보였다. 이로부터 절삭의 정밀도를 높이기 위해서는 SKD11의 고속가공이 필요함을 알 수 있다.

(2) 2차원 절삭 시험에서 얻은 절삭데이터를 이용하여 3차원 절삭력을 해석한 결과 실제 절삭력과 잘 일치함을 볼 수 있다.

참고문헌

- (1) Trusty, J. and MacNeil, P., 1975, "Dynamics of Cutting Forces in End Milling", CIRP, Vol.24, No.1, pp.21~25.
- (2) Shirase, K., Inamura, T. and Yasui, T., 1987, "Model Based Analysis of Machining Error in End Milling Operation", JSPE-53-097, pp.97~103.
- (3) Usui, E. and Hirota, A., 1978, "Analytical Prediction of Three-Dimensional Cutting Process", ASME J. of Eng. For Ind., Vol.100, No.2, pp.229~235.
- (4) 박희덕, 양민양, 1989, "불 엔드 밀에 의한 곡면가공의 절삭력 예측에 관한 연구", 대한기계학회논문집 제13권 제3호, pp.433~442.
- (5) P.Lee, Y.Altintas, 1996, "Prediction of Ball-End Milling Forces from Orthogonal Cutting Data", Int. J. Mach. Tools. Mfg., Vol.36, No.9, pp.1059~1072.
- (6) P.Lee, Y.Altintas, 1996, "A General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Mills", CIRP, Vol.45, No.1, pp.59~64.
- (7) Michalewicz, Z., 1994, "Evolutionary Computation techniques for Nonlinear Programming Problems", Int. Transactions in Operational Research, Vol.1, No.2, pp.223~240.