

인장실험을 통한 엔드밀링 작업에서의 절삭력 예측에 관한 연구

A Study on the Prediction of End Milling Cutting Force by Tensile Test

신근하*, 이광필**

* 아주대학교 기계 및 산업공학부
* * 아주대학교 기계공학과 대학원

Abstract

On End Milling Process predict the cutting force is important. Dynamics the shear stress is the main parameter influencing the energy requirement in machining. It is well known that a nonzero force is obtained when cutting forces measured at different feed rates but otherwise constant cutting conditions are extrapolated to zero feed rate. In this paper, the cutting force measured in end-milling is compared with the simulated force models. The result show that stresses measured in cutting is consistent with that stresses predicted.

keywords : Tensile Test (인장시험), Cutting Force (절삭력), Shear Stress(전단응력), End-milling(엔드밀링), Energy method(에너지이론)

1. 서론

현재 산업계에서의 제조 공정은 대기업은 물론, 중소기업에 이르기까지 생산라인을 NC, CNC 공작기계로 이루어지고 있다. 이러한 생산공정 중에 공구 및 공작물의 형태, 재질 등에 적합하지 못하게 가공조건을 정해주었을 경우에 절삭

공구에 과도한 부하가 걸리거나 경제적인 작업을 할 수 없게된다. 이로 인해서 공구, 공작물뿐만 아니라 기계에도 손상을 주어 공구의 파손, 채터의 발생, 이송 및 주축계의 축의 휨, 베어링의 손상 등의 심각한 결과를 초래하게된다. 따라서 공작기계를 이용한 공작물 가공 공정에 있어서 절삭조건을 결정하는 것은 작업능률향상과, 제품가공 시 경제성 등을 고려할 때 중요한 사항이다. 그러나 실제로 소재의 다양성과 조직의 불균일성 등의 이유로 절삭조건을 예측하기란 쉽지 않다. 종래에는 숙련자의 경험에 의존하던 지시사항들을 비 숙련자도, 각 소재에 따라서 예측할 수 있는 간단한 시험방법이 있다면 편리할 것이다.

절삭력 예측에 관한 연구는 주로, 절삭력 측정장치(Dynamometer)를 이용하거나, 주축전류변화를 이용해서 절삭력을 간접측정하고 제어하는 연구들이 되고 있다.¹⁾ 그러나 이러한 실험은 실험장치의 복잡성과, 간접적인 추측방법이기 때문에 한계가 있다. 반면에, 절삭력을 추측하기 위한 직접적인 실험방법으로 인장실험과 경도시험을 이용한 연구가 J.T.Lapsley, Jr.R.C.Grassi and E.G.T-homsen에 의해서 이루어 졌지만²⁾, 기본적인 Distortion-energy 이론에 의한 것이었으며, 저속절삭에 해당하는 작업환경에서 2차원 절삭이

이루어진 것으로 가정한 것이었으므로 상당한 에러를 가지고 있다는 단점이 있다. 이 후에도 공력을 이용하여 절삭력을 예측하기 위한 연구들은, Marshall과 Shaw에 의해서, distortion energy 이론은 연성재료에 알맞고, maximum-shear-stress 이론은 경한 재료에 알맞다는 것이 밝혀졌다.³⁾ Kobayashi, E.G Thomsen 등은 선반작업시 여러 가지 재료에 대해서 위의 이론값들을 비교 검증 하였다.⁴⁾ Turkovich는 전위모델을 이용하여 전단응력을 예측하였다.⁵⁾ 또한 금속절삭에서 전단면에 작용하는 평균 전단응력은 절삭속도, 절삭깊이, 이송, 경사각에 관계없이 일정하지만 수직응력은 절삭조건에 따라서 변한다는 것이 E.G. Thomsen에 의해서 알려졌다.⁴⁾

본 연구에서는 인장시험 결과 값과, CNC를 이용한 엔드밀 작업시, 공구동력계(Dynamo-meter)를 통해서 얻은 공력과와의 관계를 도출하고 이를 이용하여 절삭력을 예측할 수 있도록 한다.

2. 관련이론

2.1 엔드밀의 절삭력 모델

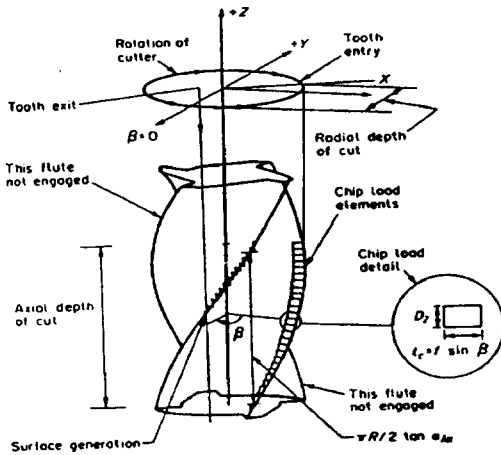


Fig. 1 Uncut chip area in end milling

절삭력 모델은 Fig1.에서 보는 것과 같이 Kline과 DeVor의 절삭력 모델을 이용하였다.⁶⁾ 접선분력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_t = \sum_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^{n_i} (K_t \cdot t_{cij}(t) \cdot \Delta z) \right] \quad (1)$$

여기서, n_i 는 커터 날 수, K_t 는 실험에서 얻은 절삭 압력 값, Δz 는 커터의 날을 N 등분했을 때 각 요소의 높이, $t_{cij}(t)$ 는 t 시간에 j 번째 날의 i 요소의 칩의 두께이다.

$$t_{cij}(t) = f_t \cdot \sin \beta_{ij}(t) + d_{rij}(t) + n_j \quad (2)$$

여기서, $\beta_{ij}(t)$ 는 t 시간에 j 번째날의 i 번째요소의 맞물림 각도이다.

$$\beta_{ij}(t) = -\theta(t) + (k-l) \cdot \gamma + z_i \cdot \frac{\tan(\alpha_{hx})}{r_{ij}(t)} \quad (3)$$

여기서, γ 는 플롯과 α_{hx} (절삭날의 나선각)사이의 각 간격이다. $d_{rij}(t)$ 는 공구가 먼저번 플롯 j 의 i 번째 요소로부터 회전시 반경변화량이다.

$$d_{rij}(t) = r_{ij}(t) - r_{i-1,j}(t) \quad (4)$$

여기서, $r_{ij}(t)$ 는 i 번째 플롯의 j 번째 요소의 순간반경

$$r_{ij}(t) = R + \rho \cdot \cos \left[\delta\xi - \xi + (j-1) \cdot \frac{2\pi}{n_t} \right] \quad (5)$$

$$\delta\xi = z_i \cdot \frac{\tan(\alpha_{hx})}{r_{ij}(t)} \quad (6)$$

여기서, ξ 는 재료포인트로부터의 회전각이다. 그리고, z_i 는 절삭날의 끝에서 부터의 i 번째 요소의 축높이 이다.

$$z_i = \left[1 - \frac{1}{2} \right] \cdot \Delta z \quad (7)$$

이때,

$$\Delta z = \frac{D_2}{N}$$

여기서, D_2 는 절삭깊이 이다.

비절삭 에너지 (u_s)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_s = \frac{F_t}{f \cdot d} \quad (8)$$

여기서 f 는 회전당 이송속도, d 는 플러트당 절삭깊이 이다.

이 절삭력 모델을 이용하여 실험한 데이터의 신뢰성을 검증 할 것이다.

2.2 전단응력

인장실험을 통해서 얻은 재료의 고유 물성치인, 최대인장 응력값과, 절삭시 전단면에 작용하는 전단응력과의 관계를 M. C. SHOW 는 다음과같은 실험식으로 유도하였다.⁷⁾

$$\tau = 85500 - 311 [T(36.2 - \ln \dot{\gamma})]^{1/2} \quad (9)$$

여기서, T 는 절대온도, $\dot{\gamma}$ 는 변형률이다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 시험편의 준비

본 실험에서 사용한 재료는 일반 연강으로서 가격이 싸고 가장 널리 사용되는 SM45C 와 항공재료 및, 자동차부품등에 널리 사용되는 두랄루민인 Al 6061-T6를 사용하였다. 시편은 KS B 0801 14A호 비례시험편를 사용하였다. 시험편의 형상은 Fig. 2에 나타내었고, 시험편의 합금조성은 Table 1에 나타내었다.

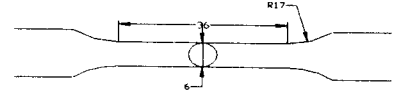


Fig. 2 Design of specimen

Table 1 Components of the materials

	SM45C		Al6061
C	0.42-0.48	Fe	0.7
Si	0.15-0.35	Si	0.4-0.8
P	≤0.03	Ti	0.15
Mn	0.6-0.9	Mn	0.15
Cr	≤0.2	Cr	0.15-0.35
Mo		Mg	0.8-1.2
Ni	≤0.2	Ni	
Cu	≤0.3	Cu	0.15-0.4
S	≤0.035	Zn	0.25
Fe	Balance	Al	Balance

3.2 인장 실험

본 실험을 수행하기 위하여 사용한 시험기와 실험 조건은 다음과 같다.

Work : Instron Corporation Canton

Massachusetts Model 1350

Load Cell : 10000 lb(Max)

Stroke : 1 inch (Max)

Temperature : Room Temp.

Control : Stroke Control

실험은 시편 별로 각각 3번씩 수행하 였고, 그 결과는 Fig.3-4에 나타내었다.

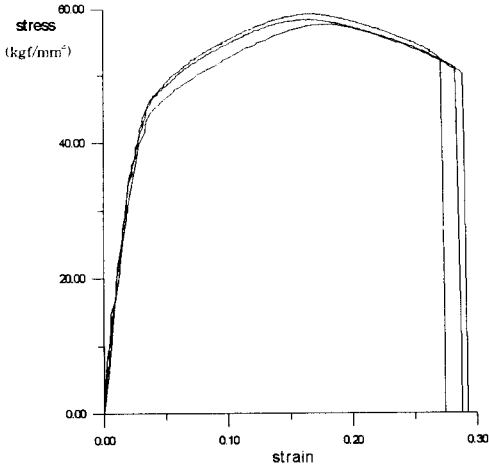


Fig. 3 Tensile testing curve (SM45C)

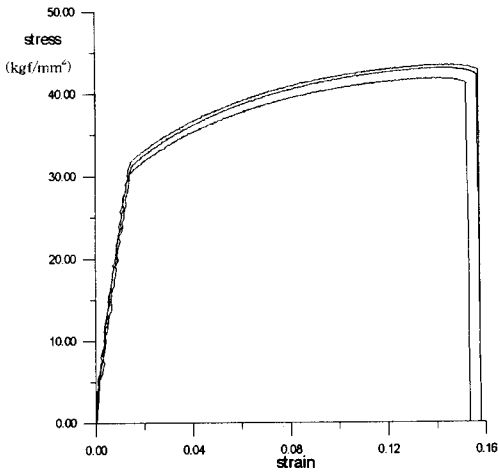


Fig. 4 Tensile testing curve (Al 6061)

3.3 절삭력 측정실험

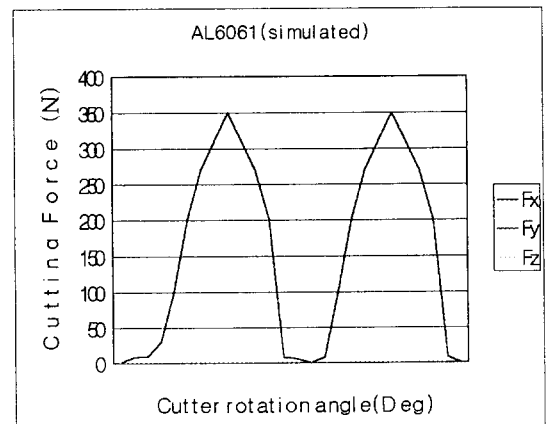
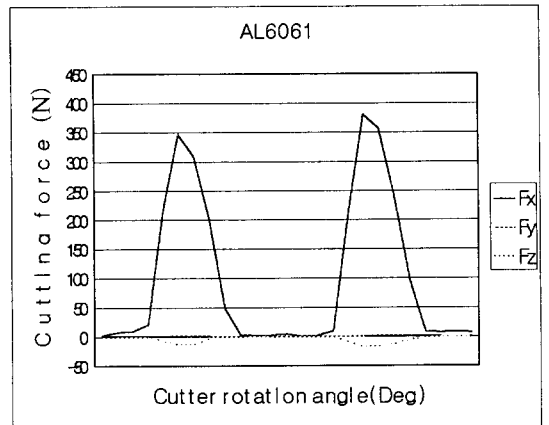
절삭력 측정실험은 CNC DAEWOO ACE-V35 모델을 사용하였으며, 측면절삭을 실행하였다. 절삭력은 Piezoelectric Force Transducers인 Kistler

Type9257B형을 사용하여 측정하였다.

사용된 공구는 직경12인 HSS 엔드밀을 사용하였다. 알루미늄 경우 2날엔드밀, 회전수:2500rpm, 이송속도: 338 mm/min, 절입깊이:6mm, 측면가공하였고, SM45C의 경우는 2날엔드밀, 회전수:1500 rpm, 이송속도: 106 mm /min, 절입깊이:3mm, 측면 가공 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

절삭력 실험을 통해서 얻은 실험값과 시뮬레이션을 통해서 얻은 결과값을 비교하면 아래와 같다.



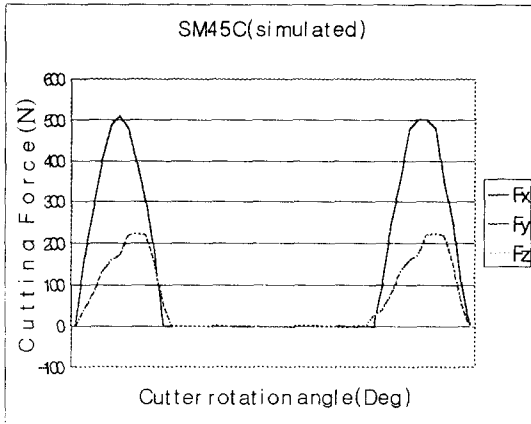
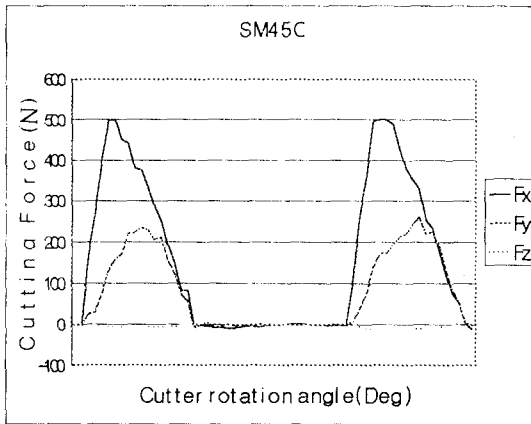


Fig. 5 Comparison of simulated cutting forces with measured forces

Fig. 5에 보는바 같이 위에서 제시한 절삭력모델은 실제 실험에서 얻은 절삭력과 비슷한 경향을 보였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 SM45C와 Al6061의 인장실험 결과를 나타낸다. 이 그림에서 얻은 에너지량과 절삭력 실험에서 얻은 단위 면적당 전단면상에서 소모되는 에너지량이 유사함을 알 수 있었다.

그 이유는 절삭은 기본적으로 소성변형을 하기

때문에 여기에 소모되는 에너지량 (주로 칩의 전단면에서 발생하는 전단 에너지량) 은 재료 시험 방법인 인장시험을 통하여 얻은 최대 응력값과 유사하게 되는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 엔드밀 작업시 절삭력의 소모가 전단면상에서의 소성변형에 의한 재료의 변형률과 응력을 구하면, 위의 관계식들을 이용하여, 절삭력을 예측할 수 있다.

5. 참고 문헌

1. 김기대, 권원태, 주중남 “주축모터 전류를 통한 절삭력의 간접 측정 및 절삭력 추종제어”, 한국정밀공학회지 제14권 제10호 pp.15-27,1999
2. J. T. Lapsley, Jr., R. C. Grassi, and E. G. Thomsen, "Correlation of Plastic Deformation During Metal Cutting With Tensile Properties of the Work Material" Trans. ASME ,vol.44,1952,pp.979-986.
3. E.R. Marshall and M. C. Shaw, "The Determination of Flow Stress From a Tensile Specimen,"Trans.ASM,vol.44, 1952, pp.705-720
4. S. KOBAYASHI, R. P. HERZOG, D. M. EGGLESTON, E. G. THOMSEN, "A Critical Comparison of Metal-Cutting Theories With New Experimental Data", Journal of Engineering for Industry pp.333-347,1960
5. B. F. VON TURKOVICH, "Shear Stress in Metal Cutting", Journal of Engineering for Industry pp.151-157,1970

Metal Cutting", Journal of Engineering for Industry pp.151-157,1970

6. W. A. Kline and R. E. DeVor, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling" Int.J.MTDR 23(1983) pp.123-140
7. M. C. SHAW "Metal Cutting Principles", Oxford Science Publications pp.183-201,1984
8. D. A. Stephensen "Material Characterization for Metal-Cutting Force Modeling" Trans. ASME, vol.111,1989,pp.210-219