정면 밀링 가공에서의 절삭력 예측을 위한 비절삭 저항 모델링

주정훈, 김국원
순천향대학교 기계공학과
e-mail:kimkug1@sch.ac.kr

Modeling of the Specific Cutting Pressure to Predict the Cutting Force in Face Milling

Joo Jung Hoon, Kim Kug Weon
Dept of Mechanical Engineering, Soonchunhyang University

요 약

본 논문은 정면 밀링 가공에서의 절삭력 예측을 위한 수학적 모델을 설정하고 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 실험으로 얻은 절삭력 데이터를 이용하여 비절삭 저항을 모델링하였고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 절삭력을 예측하였다. 예측된 절삭력은 실제 실험을 통해 얻은 절삭력과 비교하여 본 모델의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

정면 밀링 가공(face milling operation)은 다른 금속절삭 작업에 비해 상대적으로 높은 금속 제거율을 가지고 있어 재료 가공에 많이 사용되는 효율적인 가공법이다. 기계 가공 중에 발생되는 절삭력에 대한 지식은 변형, chatter, 진동들과 이러한 현상들이 가공을 마친 생산물의 질에 미치는 영향을 해석하는데 유용하다. Martellotti[1]는 평균 미변형 칩 두께, 절삭조건 및 비절삭 저항(specific cutting pressure) 사이의 관계를 수립하여 정면 밀링에서의 절삭력을 해석하였다.

본 논문에서는 실험적인 접근 방법을 이용하여 간단한 실험을 통해 얻어진 절삭력 데이터를 이용하여 비절삭 저항을 모델링하였다. 얻어진 비절삭 저항을 통해 절삭력을 예측하고 이 예측된 값을 실제 실험을 통해 얻은 절삭력과 비교하여 본 모델의 타당성을 검증하려 한다.

2. 본론

2.1 절삭력계의 모델 선정

2.1.1 절삭력 계산

각 날에 걸리는 순간적인 칩 두께 C_L 은 회전위치를 $\Theta(i,\phi)$, 이송량을 Sr 이라고 하면 아래와 같이 유도 될 수 있다.

$$\Theta(i , \phi) = (i-1)*2*\pi / Nt + \phi - 2*n*\pi \quad (1)$$

여기서 n : $\Theta(i , \phi)/2*\pi$ 의 정수값
Nt : 삽입날의 수

$$C_L = St*\sin(\Theta(i , \phi)) \quad (2)$$

여기서 St : 각 날당 이송량(Sr/Nt)

순간적인 칩단면적(Ac)은

$$Ac = C_L * d = St*\sin(\Theta(i , \phi))*d \quad (3)$$

각 날당 이론적인 Ft 와 Fr를 구하면

$Ft = Kt * C_L * d$

$Fr = Kr * Ft$ (4)

여기서 Kt = 비절삭 저항(N/mm^2)

Kr = 무차원 수

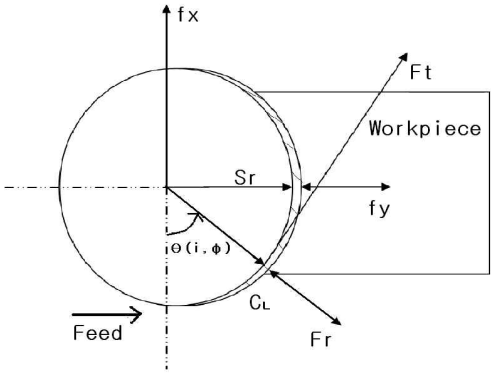

그림 1. Cutting force at tool edge

절삭날의 기하학적 조건에 의해 Ft 와 Fr 즉, tangential force와 radial force는 적당한 변환을 필요로 하게 된다. 절삭날의 axial rake angle을 γ_1, radial rake angle을 γ_3, lead angle을 γ_2 라고 하면

$R=Rot(R,\gamma_3)*Rot(R,\gamma_2)*Rot(R,\gamma_1)$ (5)

이를 이용하여 Fr, Ft 를 변환하면

$$\begin{pmatrix} Fr \\ Ft \\ Fa \end{pmatrix}_A' = R \bullet \begin{pmatrix} Fr \\ Ft \\ Fa \end{pmatrix}_B \quad (6)$$

이를 직교 좌표계로 바꾸면

$$\begin{pmatrix} Fx \\ Fy \\ Fz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(\theta(i,\phi)) & \cos(\theta(i,\theta)) & 0 \\ -\cos(\theta(i,\phi)) & \sin(\theta(i,\phi)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} Fr \\ Ft \\ Fa \end{pmatrix}_A' \quad (7)$$

multi-tooth cutter에 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} Fx \\ Fy \\ Fz \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^{M} \delta(i,\phi) \bullet \begin{pmatrix} Fx \\ Fy \\ Fz \end{pmatrix}_i \quad (8)$$

2.1.2 비절삭 저항과 무차원 상수의 모델링

비절삭저항에 대하여 가장 많이 사용되는 관계식은 다음과 같다.

$Kt = a*AC_L^{\,b}$

$Kr = c*AC_L^{\,d,}$ (9)

여기서 AC_L : 평균칩 부하

평균 칩 부하는 실제로 C_L을 모두 합하여 한회전당의 총 절삭길이로 나눔으로써 구할 수 있다. Kt의 평균값이 순간력을 계산하기 위해 사용된다면 해준 일량과 절삭력에 의한 일이 같음을 보일 수가 있다. 실험에 의해 측정된 평균절삭력을 이용하면 Kt 와 Kr을 구하는 것이 가능하다는 점이다.

$Fr' = R11*Fr + R12Ft$

$Ft' = R21*Fr + R22Ft$

$Fxi = \sin(\Theta(i,\phi))*Fr' + \cos(\Theta(i,\phi))*Ft'$

$Fyi = -\cos(\Theta(i,\phi))*Fr' + \sin(\Theta(i,\phi))*Ft'$ (10)

이 식에 $Ft=Kt*C_L*d$, $Fr=Kr*Ft$ 를 대입하면

$Fxi = A*kt*kr + B*kt$

$Fyi = C*kt*kr + D*Kt$ (11)

여기서, $A = CL*d*(\sin\Theta(i,\phi))*R11+\cos(\Theta(i,\phi))*R21)$

나머지 B, C, D 도 같은 방식으로 구할 수 있다.

Fx 와 Fy를 이용하여 평균 절삭력 AFx, AFy를 구하면

$AFx=A^**kt*kr + B^**kt$

$AFy=C^**kt*kr + D^**Kt$ (12)

$$A^* = \sum_{\phi=0}^{\phi_e} \frac{A'}{\phi_e}$$

나머지 B^*, C^*, D^* 도 같은 방식으로 구할 수 있다.

식 (11)을 이용하여 Kt , Kr 을 구하면

$$Kr = \frac{D^* \bullet AFx - B^* \bullet AFy}{A^* \bullet AFy - C^* \bullet AFx} \quad (13)$$

$$Kt = \frac{AFx}{A^* Kr + B^*}$$

2.2 실험 조건, 장비 및 방법

절삭력 측정을 위해 밀링머신에 공구동력계를 설치하고 각 실험조건에 따라 절삭 가공 후 받은 신호를 Amplifier를 통해 증폭하여 DAQ 보드에서 저장하고 디지털 신호화 하여 데이터 값을 확인 하였다.

- Workpiece ·material : SM20C
  ·geometry :길이100mm, 폭 50mm
- Cutter ·cutter body : radius 50 mm
  ·insert material : CT3000(대구텍)
  ·insert geometry : axial rake angle : 10°
  lead angle : 15°
  radial rake angle : 5°

표 1. Cutting conditions

test No . set	날수	depth of cutting (mm)	feedrate (mm/r)	RPM
1	3	0.3	0.117	520
2	3	0.6	0.117	520
3	3	0.3	0.511	520
4	3	0.6	0.511	520
5	3	0.3	0.061	990
6	3	0.6	0.061	990
7	3	0.3	0.270	990
8	3	0.6	0.270	990

표 2. Equipments for Experiments

Equipment	Specification	Maker
Milling Machine	HMV-F1100	Hwacheon
Tool Dynamometer	9257B	KISLER
Charge Amplifier	Type5019	KISLER
A-D converter	6035E	National Instruments
Soft program	Dynoware_k	LABVIEW(NI)

2.3 실험 결과 및 고찰

실험으로 얻어진 평균 절삭력을 이용하여 구한 비절삭 저항 Kt와 Kr의 계수와 지수값을 표4에 나타내었다. 이를 이용하여 완성된 비절삭 저항과 무차원 상수의 모델은 다음과 같다

$Kt = 1519 * AC_L^{-0.3904}$

$Kr = 1.095 * AC_L^{0.1383}$

이 모델을 이용하여 예측한 Kt 와 Kr 값과 실험을 통해 얻은 Kt 와 Kr값을 표3에 나타내었고 본 논문에서는 이 비절삭 저항 모델과 무차원 상수 모델을 절삭력을 예측하는 알고리즘에 사용하였다.

표 3. Kt, Kr의 실험값 과 예측값 비교

test	kt		kr		AC_L (mm)
	실험	예측	실험	예측	
1	5483.8	5502.5	0.4548	0.6940	0.037
2	4593.2	5502.5	0.6869	0.6940	0.037
3	3436.2	3084.2	0.8268	0.8520	0.163
4	2467.6	3084.2	0.8293	0.8520	0.163
5	7014.5	7137.7	0.7082	0.6329	0.019
6	7665.8	7137.7	0.7023	0.6329	0.019
7	5263.2	3958.7	0.9333	0.7799	0.086
8	3804.1	3958.7	0.8564	0.7799	0.086

표 4. Modeling constants of Kt, Kr

constants	a	b	c	d
value	1519.1	-0.3904	1.095	0.1383

표 5. 절삭력의 실험값과 예측값 비교

test	AFx (N)		AFy (N)	
	실험	예측	실험	예측
1	47.1732	58.9163	38.0309	32.7651
2	98.0040	117.8330	54.8664	65.5303
3	179.8330	163.9940	81.8402	72.0592
4	258.0819	327.9901	117.3062	144.1183
5	39.6862	37.9144	21.3382	22.8934
6	86.3259	75.8284	46.8372	45.7869
7	155.9965	104.8723	60.6995	51.4611
8	213.5692	198.3020	93.3132	102.9222

표 6. Coefficients of Kt, Kr

test	A^*	B^*	C^*	D^*
1	0.0088	0.0046	-0.0041	0.0088
2	0.0176	0.0092	-0.0082	0.0176
3	0.0387	0.0202	-0.0180	0.0387
4	0.0774	0.0404	-0.0360	0.0774
5	0.0046	0.0024	-0.0022	0.0046
6	0.0092	0.0048	-0.0044	0.0092
7	0.0204	0.0106	-0.0095	0.0204
8	0.0408	0.0212	-0.0190	0.0408

3. 결론

정면밀링 절삭력 데이터로부터 비절삭 저항을 계산하였고 이에 대한 타당성을 검토하였다. 약간의 절삭력 데이터로부터 얻어진 비절삭 저항을 이용하여 다양한 조건에서의 정면밀링 절삭력을 예측할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

[1] Matellotti.M.E,"An Analysis of the Milling Process", ASME, Vol.63, pp.667-...,1941

[2] "Face Milling가공에서의 절삭력 예측에 관한연구" 서울대학교 대학원, 1989