

밀링가공에서의 온도분포와 절삭력 예측을 위한 연구

강재훈^{*}, 송준엽[†], 박종권⁺⁺

A Study on the Prediction of Temperature Distribution and Machining Force in the Milling Process

Jae-Hoon, Kang*, Jun-Yeup, Song[†], Jong-Kwon, Park⁺⁺

Abstract

This paper presents a simple analytic method using 2D simulation program for predictions of cutting force and machining temperature in dry type milling process. And also, comparison of cutting force and machining temperature obtained from experiment and simulation work is accomplished to distinguish of suitability.

Key Words : Dry type, milling process, End-mill, Cutting Force, Machining Temperature, Prediction

1. 서 론

금형제작을 비롯한 다양한 기계부품 및 구조물 등의 생산제조 현장에서 폭넓게 적용되고 있는 밀링가공은 절삭깊이량이 일정하게 부가되는 선삭과 같은 연속형 절삭방식과는 달리 고속으로 회전하는 공구의 날끝이 공작물의 침형성 부위에 대하여 형성되는 각도가 연속적으로 변화하여 진행됨으로써 소성변형이 이뤄져 제거되는 즉, 칩의 두께가 주기적으로 변화되는 단속형 절삭방식의 가공공정이라고 할 수 있다.

다수의 절삭날끝을 지니는 볼엔드밀 공구를 이용한 밀링가공에 있어서는 특히, 일정하게 반복되는 매우 짧은 주기에 집중적으로 발생되는 전단소성변형에 의하여 단

속절삭이 이뤄지는 형태가 나타나며, 전단소성변형이 형성되는 국부적인 부위에서는 발생되는 높은 가공열에 의하여 칩의 융착 및 가공면의 품위저하, 과대한 공구의 마멸현상 등이 나타나기도 한다.

일반적으로 절삭깊이량을 많이 부가하는 중절삭가공과 고속가공 등에 있어서는 상대적으로 더 높은 가공열이 발생될 것으로 예측되므로 작업자의 경험에 의존하여 과다한 절삭유를 막연하게 사용하고 있는 실정이다. 또한, 비교적 많은 절삭깊이량을 부가하는 일반적인 건식가공에 있어서는 공구날끝에 융착되는 칩으로 인하여 치평제거작용이 원활하게 형성되지 않아 가공제거 궤적이 명확하게 나타나지 않으며 가공면의 품위가 현저하게 악화된다.

* 발표자, 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 (jhkang@kimm.re.kr)

주소: 305-600 대전광역시 유성구 장동 171

+ 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

++ 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

따라서 적용하고자 하는 가공조건 범위 내에서 발생하는 가공열을 정량적으로 파악함으로써, 이를 충분히 억제할 수 있는 절삭유의 적정한 공급조건이나 가공조건을 설정할 필요가 있다. 그러나 가공조건들의 다양한 변화에 대한 각각의 신뢰성이 높은 실험데이터를 확보하기 위해서는 과대한 시간이 요구되므로 시뮬레이션 해석결과와의 검증을 통하여 적정성을 검토한 후에 간접적으로 예측하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 가공면의 온도분포와 절삭저항을 해석하는 한편, 측정실험에 의한 결과들과 비교고찰함으로써 적정성 여부를 검토하고자 하였다.

2. 건식밀링의 등가해석과 가공실험

2.1 밀링가공공정의 등가해석

볼엔드밀을 이용한 밀링가공 공정에 대한 등가해석을 위하여 상용해석 프로그램인 Third Wave Co.의 AdvantEdge를 공동활용하였다.

볼엔드밀을 이용한 밀링가공의 경우에 있어서는 회전하는 공구날끝 부분에 의하여 전단소성 변형에 따른 단속절삭 작용이 이뤄진다. 단속절삭이 이뤄지는 부분의 가공궤적을 2차원적으로 임의의 평면상에 모델링하면 선삭가공에서의 경우와 유사하게 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 공구날끝 부분에 대하여 단순화하고 기하학적인 선삭가공 모델로 등가변환하여 정상절삭과정에서의 해석을 실시하였다.

Fig.1에는 등가해석을 위한 기하학적인 모델링을 나타내었다.

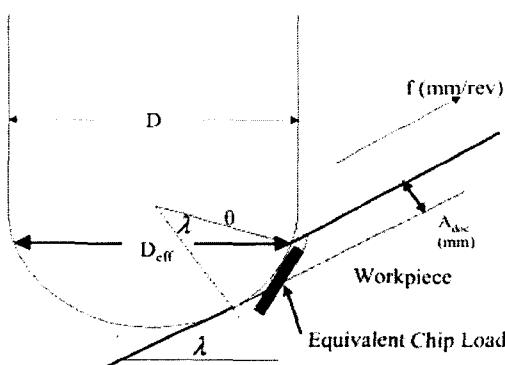


Fig.1 Equivalent modeling for milling process

Fig. 1에서 공작물 표면으로부터 공구선단의 반구까지의 여각과 공구의 유효지름을 각각 θ 와 D_{eff} 로 표기하였으며, 기하학적인 방식으로 식(1),(2)과 같이 유도하여 나타내었다.

$$\theta = \sin^{-1}(1 - (2A_{doc} / D)) - \lambda \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$D_{eff} = D \cos(\theta) \quad \dots\dots\dots(2)$$

식(1),(2)에서 밀링 가공 공정의 등가해석 입력변수로 변화하기 위하여 유효직경을 설정하여 적용하였다.

반경 r 은 식(3)와 같이 나타내었다.

$$r_n = D/2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

등가 절삭깊이량인 A_{doc}' 는 식(4)과 같이 나타내었다.

$$A_{doc}' = r_n (\pi/2 - \varphi + \sin^{-1}(f/2r_n)) + w_2 \quad (4)$$

여기서 $A_{doc} < r_n(1 - \sin(\gamma_L))$ 일 경우에는

$$\varphi = \sin^{-1}(1 - A_{doc} / r_n), w_2 = 0 \text{이며}$$

$A_{doc} \geq r_n(1 - \sin(\gamma_L))$ 일 경우에는

$$\varphi = \gamma_L, w_2 = \frac{A_{doc} - r_n(1 - \sin(\gamma_L))}{\cos(\gamma_L)} \text{이다.}$$

등가이송량인 f' 은 식(5)와 같이 나타내었다.

$$f' = f \times A_{doc}' / A_{doc} \quad \dots\dots\dots(5)$$

Table. 1에는 실제의 가공 조건을 밀링 가공 공정의 등가해석 변수로 변환시킨 예를 나타내었다.

Table 1. Transformed equivalent values from experimental condition values

Machining condition	Experimental value	Equivalent value
Depth of cut	700mm/min	0.027mm/rev.
Feed-rate	2mm	6.479mm
Tool speed	4,000rpm	150m/min

2.2 건식밀링 가공실험

가공조건들을 변화하며 건식밀링 가공실험을 수행하

며 In-process 방식으로 절삭저항과 가공열을 측정하였다. Fig.2에는 측정장치가 부착된 가공실험 시스템의 개략도를 나타내었다.

수직형 NC머시닝센터(Daewoo M/C Co., Type FZ25)를 이용하였으며, 절삭 저항은 공구 동력계(KISTLER Co., Type 9257A)를 사용하여 측정한 후, 증폭기(KISTLER Co., Type 5019A)를 거쳐 데이터 해석용 S/W(KISTLER Co., Type 2825D1-2)로 분석하는 한편, 가공 온도는 공작물에 직접 열전대(T-type)를 설치하여 측정한 후, 온도 해석용S/W (Agilent Co., Type 34970A)로 분석하여 각각 비교하였다.

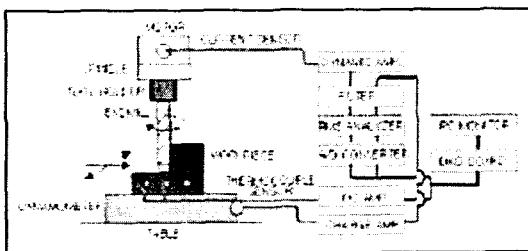


Fig.2 Schematic diagram of experimental system with measuring tool unit

Fig.3에는 3D로 모델링한 공작물과 열전대 및 공구동력계가 설치된 가공준비 상태를 나타내었으며, Fig.4는 측정장치가 장착된 실험시스템과 전식가공 공정의 사진을 나타내었다. Al소재를 대상으로 하여 직경 20mm의 초경합금 코팅형 불엔드밀(Taegu Tec Co., Type BBZ220)을 사용하여 실험을 수행하였다. 가공 실험은 4,000rpm의 공구 회전속도, 0.7m/min의 이송속도, 1.0, 2.0mm/pass의 절삭깊이양 조건 범위 내에서 수행하였다.

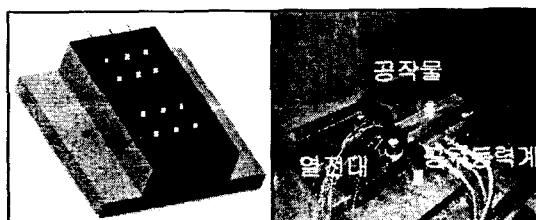


Fig.3 3D modeling status of workpiece and setup with measuring sensors



Fig.4 Experimental system and dry type milling process

3. 해석과 가공실험 결과의 비교

3.1 가공면의 온도분포

공구의 절삭날끝과 공작물의 절삭간섭영역에 대하여 국부적이고 정확한 가공 발생열을 직접적으로 측정한다는 것은 실제적으로 곤란하므로, 가공 경로에서 약 1.5 mm정도 떨어진 곳에 열전대를 설치하여 가능한 한 칩이 생성되는 근접한 위치에서의 가공면 온도를 측정하였다.

Fig.4,5에는 가공실험과 시뮬레이션을 통하여 얻은 가공공정중의 가공면 온도분포 및 변화 거동을 각각 나타내었다. 또한, 시뮬레이션과 접촉식 열전대를 이용하여 실험적으로 얻어진 가공면의 온도를 비교하여 Table.2에 나타내었다.

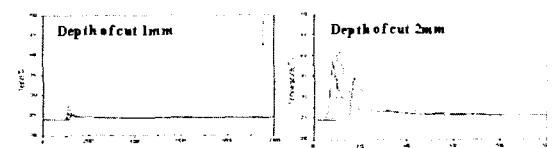


Fig.4 Measured surface temperature distribution

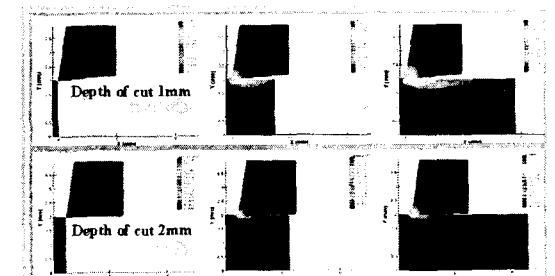


Fig.5 Simulated surface temperature distribution

Table 2. Comparison of measured and simulated temperature values (°C)

	DOC 1mm		DOC 2mm	
	M.V	S.V	M.V	S.V
Cutting zone	-	170	-	180
Distance 1.5mm	25 ~ 29	25 ~ 28	35 ~ 43	32 ~ 40
Distance 5.0mm	25	25	25	25

Table 2.로부터 실험에 의하여 측정한 가공면의 온도가 시뮬레이션에 의한 가공면의 온도보다 최대 약 8%정도 더 높은 값을 가지고 있음을 확인 할 수 있다.

3.2 절삭저항

Fig.6에는 가공실험과 시뮬레이션에 의한 법선 저항 분력의 과형을 비교하여 나타내었다. Fig.5의 (a)와 (b)는 시뮬레이션과 공구동력계를 사용하여 실험적으로 얻어진 법선 저항의 과형을 각각 나타낸 것으로 거의 유사한 형태로 나타난다는 것을 확인할 수 있다.

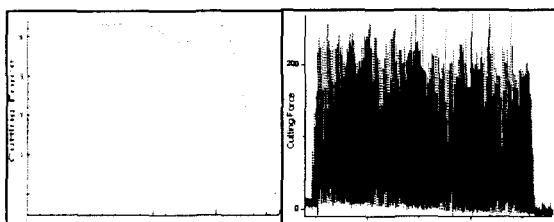


Fig.6 Comparison of simulated and measured machining force waveform

또한, 시뮬레이션과 공구동력계를 이용하여 실험적으로 얻어진 절삭저항을 비교하여 Table.3에 나타내었다. 시뮬레이션을 통한 계산 값은 법선 저항 분력과 토크값으로 계산되므로 실제적인 실험에 의한 측정값을 법선 저항 분력과 토크값으로 변환하여 비교하였으며 측정값과 시뮬레이션값이 거의 유사하게 나타남을 확인할 수 있다.

Table 2. Comparison of measured and simulated machining forces

	DOC 1mm		DOC 2mm	
	M.V	S.V	M.V	S.V
F _n (N)	130.0	123.8	220	209
F _t (Nm)	1.8	1.5	3.6	3.5

Table.3으로부터 가공실험에 의하여 측정한 법선 저항 분력이 시뮬레이션에 의한 법선 저항 분력보다 약 5%정도 더 높은 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다

4. 결 론

본 연구에서는 건식 밀링 가공공정에 있어서의 가공온도 분포와 절삭 저항을 예측하고 동일한 가공 조건에서의 실험결과와 비교함으로써 다음과 같은 주요한 결과들을 얻을 수 있었다.

- 1) 절삭 저항은 실험과 시뮬레이션 결과가 약 5%의 오차 범위 내에서 일치함을 확인할 수 있었다.
- 2) 가공온도 분포는 실험과 시뮬레이션 결과가 약 8%의 오차 범위 내에서 일치함을 확인할 수 있었다.
- 3) 향후 다양한 가공 조건과 다양한 재질의 공작물을 이용한 해석과 실험을 수행하여 신뢰성과 적합성을 판별할 계획이다.

참 고 문 헌

- (1) J .H. Kang., et al, 2003, "A Study on the Establishment of Proper Supply Method Using Minimum Quantity MMF", *KSME Conference 2003*, pp. 300~303
- (2) C. T. Ching, H. F. Kuang, 1995, "Model for Cutting Force in Ball-end Milling", *International Journal of Machine Tool and Manufacturing*, No.35, pp. 511~534