

엔드밀 가공시 공구 변형에 관한 유한요소해석

정성찬 · 김국원

순천향대학교 기계공학과

e-mail: ymochan98@empal.com

Finite Element Analysis of Tool Deformation in End-Mill Process

Sung-Chan Jung · Kug Weon Kim

Department of Mechanical Engineering,

SoonChunHyang University

요 약

본 연구에서는 절삭 가공시 공구가 받는 절삭력과 칩-공구 사이에서 발생하는 절삭 열에 의한 공구의 변형을 예측하였다. 3D CAD를 이용하여 공구를 모델링 하였으며 절삭력과 절삭 열을 하중조건으로 부여하여 유한요소해석을 수행하였다. 하중조건으로 사용한 절삭력과 절삭 열은 절삭이론을 이용한 절삭력 모델을 사용하여 예측하였으며 실험을 통해 모델의 타당성을 검증한 결과이다. 그러므로 본 연구는 어떠한 사전 실험도 없이 절삭조건과 재료 물성치 그리고 공구 형상만을 알면 이에 따른 절삭력 성분 및 절삭열 등을 얻을 수 있고, 이를 이용하여 절삭 가공시 공구의 변형을 예측할 수 있다.

1. 서론

공작기계의 고속화와 고강성화 그리고 고정도화와 더불어 공작기계의 제어능력 향상, 새로운 공구 소재의 개발 등은 여러 가공 공정 단계의 변화를 가져오고 있다. 또한 CAD/CAM 기술의 발전에 힘입어 물품 납기의 단축과 저가화가 시장 경쟁력의 중심으로 보이고 있다. 특히, 고속가공기의 보급에 따른 고속 가공기술의 발달은 기존의 후가공 공정을 최소화하고 있으며, 이에 따라 밀링 가공에서의 가공면 거칠기와 형상 정밀도 등이 점차 중요시 되고 있다. 이런 시점에서 가공 중 공구의 변형과 가공오차의 연구[1-6]들이 수행되었으며 본 연구에서는 절삭이론[7]을 이용하여 엔드밀이 밀링 가공 중에 받는 힘과 열을 예측하며 이를 기초로 엔드밀의 변형을 유한요소 해석하여 가공 중에 엔드밀의 변형을 살펴보았다.

2. 절삭이론

본 연구의 Oxley의 절삭이론[7]을 기초로 하였다. 이 이론은 사전의 실험 없이 절삭조건과 재료

물성치 그리고 공구 형상만으로 절삭력을 예측하는 것이다. 이 이론을 통하여서 2차원 절삭력을 예측하였으며, 이를 이용하여 3차원 절삭력과 절삭 열을 예측하였다. 예측한 절삭력은 공구동력계를 이용한 실험을 통해서 타당성을 검증하였다.

2.1. 절삭력의 이론치와 실험치 비교

3차원 절삭이론을 이용하여 절삭력 모델을 형성하였다. 이를 통하여 3차원 엔드밀 가공에서 공구가 받는 힘을 예측하였다. 이 모델을 통해서 구한 절삭력을 검증하기 위해서 공구 동력계를 이용한 실험을 수행하였으며 그 결과는 아래의 Figure 2.1과 같다.

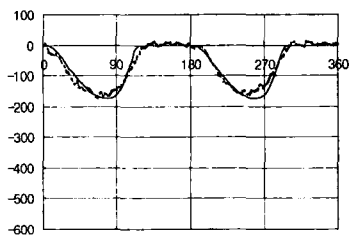
실험 방법에 대한 자세한 사항은 아래의 Table 2.1에 나열하였다.

Figure 2.1의 결과는 직경 6mm, 2날 엔드밀을 사용한 실험으로써 피삭재는 SM20C를 이용하였다. 밀링 머신은 화천기계의 HVM-F를 이용하였으며, 공구동력계는 KISTLER Type 9275B, Charge Amp는 KISTLER의 Type 5019를 이용하였다. NI사의 6035E 보드를 통해 데이터를 받았으며 LabVIEW를

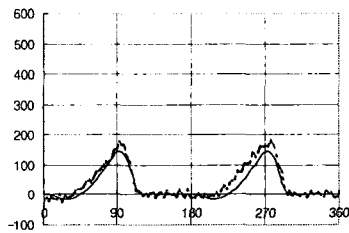
통해 데이터를 저장하였다.

Table 2.1 Cutting conditions

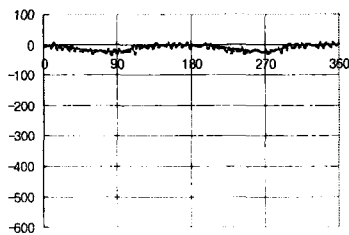
Cutter body	Spindle speed [rpm]	Feedrate [mm/min]	절삭 형태	Axial depth of cut [mm]	CASE
Diameter: 6mm Helix angle: 30°	990	41 127	up	2	1 2
	750 1400	41	up	2	3 4



(a) Fx



(b) Fy



(c) Fz

Figure 2.1 Predicted(solid line) and experimental(dot line) cutting forces for CASE1

위의 결과로 이론치와 실험치의 최대치와 파형이 유사한 것을 볼 수 있다. 이로써 절삭력 모델의 타당성을 검증하였으며 아래의 Table 2.2는 각 CASE에 해당하는 절삭력을 보여준다.

Table 2.2 Results of cutting forces

CASE	Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)
CASE1	-174.22	100.87	-20.506
CASE2	-510.54	281.29	-69.346
CASE3	-231.01	140.68	-26.933
CASE4	-121.59	80.078	-15.082

2.2. 절삭 열

가공 중 칩-공구 사이 접촉 길이에서 발생하는 열을 절삭 열이라 한다. 본 연구에서는 직접적인 절삭 열에 대한 실험을 하지 않고 절삭이론을 이용하여 칩-공구 사이의 접촉 길이와 평균 절삭 열을 예측하였으며 아래의 Table 2.3과 같이 나열하였다.

Table 2.3 Tool-chip interface temperature

CASE	contact length(mm)	temperature (°C)
CASE1	0.1255	914.0332
CASE2	0.3994	836.8671
CASE3	0.1717	866.3508
CASE4	0.0890	971.3403

3. 유한요소해석

앞 절에서 절삭력과 절삭 열을 구하였으며 이를 하중조건으로 엔드밀의 변형을 알기위해 유한요소해석을 수행하였다.

3.1. 연성해석

절삭 열에 의한 변형을 고려하여야 한다. 그러므로 절삭 열을 이용한 열 해석을 수행한 후 이에 따른 변형을 포함하는 구조해석을 수행하였다. 아래의 Figure 3.1은 모델링 한 엔드밀이다.

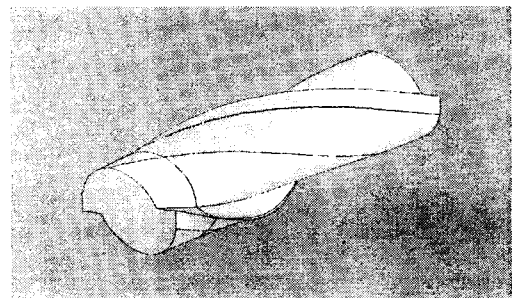


Figure 3.1 Modelling of endmill

위에서 구한 절삭력과 절삭 열을 이용하여 연성해석을 수행한 결과 아래의 Figure 3.2와 Table 3.1에 나타낸 결과를 얻게 되었다.



Figure 3.2 Displacements result of CASE1

Table 3.1 Results of FEM

CASE	Stress(N/m ²)	Strain	Displacement (mm)
CASE1	3.00883×10 ⁹	0.00721584	0.069387
CASE2	8.23905×10 ⁹	0.0125873	0.130054
CASE3	4.0592×10 ⁹	0.00658068	0.077699
CASE4	2.27113×10 ⁹	0.00657776	0.064618

위의 결과로부터 엔드밀이 받는 응력과 그에 따른 변형과 변위를 알 수 있다.

4. 결론

1. 절삭력 모델을 이용하여 엔드밀 가공시 절삭력과 칩-공구 사이의 절삭열 등을 예측하였다.
2. 예측된 절삭력은 공구동력계를 이용한 실험을 통해서 그 타당성을 검증하였다.
3. 엔드밀 가공시 절삭력과 절삭 열에 의한 공구 변형을 유한요소법을 이용하여 해석하였다.
4. 본 연구를 통하여 어떠한 절삭실험 없이 절삭조건과 재료 물성치 그리고 공구 형상만으로 절삭력과 절삭 열을 예측할 수 있으며 또한 절삭력과 절삭 열을 하중조건으로 하는 유한요소해석을 수행하여 가공 중에 발생하는 공구 변형까지 예측할 수 있다.

참고문헌

- [1] 홍민성, “엔드밀 작업에서 공구의 열변형에 관한 연구,” *한국공작기계학회지*, Vol. 8, No. 5, 1993.
- [2] 엄철만, 신근하, 홍민성, “선삭에서 공구열변형이 표면 형상에 미치는 영향에 관한 연구,” *한국공작기계학회지*, Vol. 10, No. 4, 2001.
- [3] 이상규, 고성림, “엔드밀 가공시 공구변형을 고려한 표면형성 해석,” *한국정밀공학회 1996년도 춘계학술대회 논문집*, pp.119-124.
- [4] 이승일, 맹민재, 정준가, “엔드밀 변위에 의한 공구파손검출,” *한국공작기계학회지*, Vol. 8, No. 2, 1999.
- [5] 류시형, 주종남, “측벽 엔드밀 가공에서 공구 변형을 고려한 형상 오차 예측,” *한국정밀공학회지*, Vol. 21, No. 6, 2004.
- [6] Oxley, P.L.B., 1989, *Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability*, Ellis Horwood, Chichester.
- [7] 김국원, “2차원 절삭이론을 이용한 정면밀링 절삭력 예측,” *한국정밀공학회지*, Vol. 19, No. 12, 2002.
- [8] Hong-Tsu Young., P. Mathew and P.L.B Oxley, 1994, “Predicting cutting forces in face milling,” *International Journal of machine tool and manufacture*, Vol. 34, pp. 771-783.
- [9] X.P. Li, A.Y.C. Nee, Y.S. Wong, H.Q. Zheng, 1999, “Theoretical modelling and simulation of milling forces,” *Journal of Materials Technology*, Vol. 89-90, pp. 266-272.
- [10] H.Z. Li., W.B. Zhang., X.P. Li., 2001, “Modelling of cutting forces in helical end milling using a predictive machining theory,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp. 1711-1730.
- [11] Tugrul Ozel, Taylan Altan, 2002, “Process simulation using finite element method-prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in high speed flat end milling,” *International Journal of machine tool and manufacture*, Vol. 40, pp. 713-738.