

## 엔드밀 가공에서의 공구 변형에 대한 유한요소해석

정성찬<sup>1\*</sup> · 김국원<sup>2</sup>

### A study on Finite Element Analysis of Tool Deformation in End Milling

Sung Chan Jung<sup>1\*</sup> and Kug Weon Kim<sup>2</sup>

**요약** 본 연구에서는 절삭 가공시 공구가 받는 절삭력과 칩-공구 사이에서 발생하는 절삭온도에 의한 공구의 변형을 예측하였다. 3D CAD를 이용하여 공구를 모델링 하였으며 절삭력과 절삭온도를 하중조건으로 부여하여 유한요소해석을 수행하였다. 하중조건으로 사용한 절삭력과 절삭온도는 절삭이론을 이용한 절삭력 모델을 사용하여 예측하였으며 실험을 통해 모델의 타당성을 검증하였다. 그러므로 본 연구는 절삭조건과 재료 물성치 그리고 공구 형상만을 알면 이에 따른 절삭력 성분 및 절삭온도 등을 얻을 수 있고, 이를 이용하여 절삭 가공시 발생하는 공구의 변형을 예측할 수 있다.

**Abstract** This study is predicted tool deformation by cutting forces and chip-tool interface temperature in machining process. Modeling of tool is made using 3D CAD software, finite element method is performed by cutting forces and temperature. Cutting forces and temperature used load conditions are predicted using the cutting force model based on machining theory. Experimental milling tests have been conducted to verify the cutting force model. Finally, this study is predicted cutting force components and temperature using cutting conditions, material property, tool geometry without experiment and tool deformation is predicted by cutting forces and temperature in machining process.

**Key Words** : machining theory, cutting temperature, cutting force, end milling, finite element analysis, tool deformation

## 1. 서 론

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 연구는 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 절삭온도를 예측하였다. 보다 정확한 절삭력 모델을 개발하기 위해서 공구 끝단의 영향을 고려하였다. 예측한 절삭력은 공구동력계를 이용한 실험을 통해서 타당성을 검증하였다. 절삭이론을 이용한 절삭력 모델에 대한 자세한 내용은 참고문헌[8-9]를 참고하길 바란다.

### 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 그림 1과 같다. 실험 조건에 대

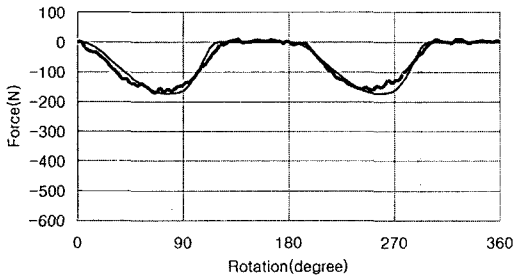
<sup>1</sup>순천향대학교 기계공학과 대학원

<sup>2</sup>순천향대학교 기계공학과

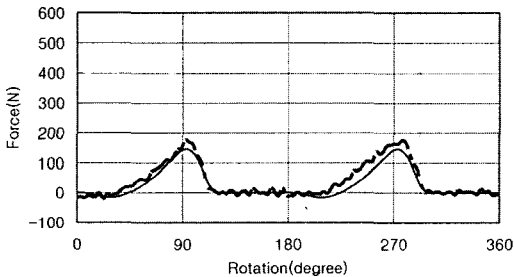
\*교신저자: 정성찬(ymochan98@empal.com)

표 1. Cutting conditions

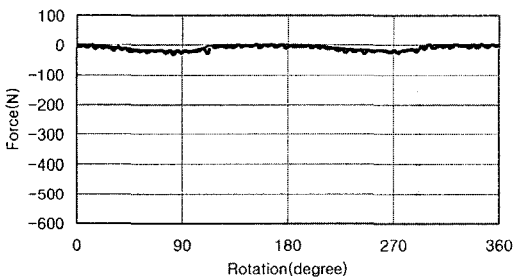
Cutter body	Spindle speed [rpm]	Feedrate [mm/min]	cutting process	Axial depth of cut [mm]	CASE
Diameter : 6 mm Helix angle : 30° Rake angle : 0° Cs : 0°	990	41	up	2	1
		127			2
	750	41	up	2	3
	1400				4



(a) Fx



(b) Fy



(c) Fz

Fig. 1. Predicted(solid line) and experimental(dot line) cutting forces for CASE1.

한 자세한 사항은 아래의 표 1에 나열하였다.

실험은 직경 6 mm, 2날 엔드밀을 사용하였으며 피삭재는 SM20C를 이용하였다. 밀링 머신은 화천기계의 HMV-F를 이용하였으며, 공구동력계는 KISTLER Type 9275B, Charge Amp는 KISTLER의 Type 5019를 이용하였다. NI사의 6035E 보드를 통해 데이터를 받았으며

표 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

표 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

LabVIEW를 통해 데이터를 저장하였다.

그림 1은 공구가 1회전 했을 때의 결과 파형이다. 위의 결과에서 이론치와 실험치의 최대치와 파형이 유사한 것을 볼 수 있다. 이로써 절삭력 모델의 타당성을 검증하였으며 아래의 표 2는 각 CASE에 해당하는 절삭력을 보여준다.

### 2.2 절삭온도

가공 중 칩-공구 사이 접촉 길이에서 발생하는 열을 절삭온도라 한다. 본 연구에서는 직접적인 절삭온도에 대한 실험을 하지 않고 절삭이론을 이용하여 칩-공구 사이의 접촉 길이와 평균 절삭온도를 예측하였으며 아래의 표 3과 같이 나열하였다.

## 3. 공구변형에 관한 유한요소해석

가공시 발생하는 공구 변형은 공구가 받는 절삭력과 칩-공구 사이에 발생하는 절삭온도가 동시에 작용하면서 발생하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 절삭력 모델을 이용하여 예측한 절삭력과 절삭온도를 이용하여 가공시 발생하는 공구 변형에 대해 예측하고자 한다.

### 3.1 엔드밀의 물성치

해석에 사용할 엔드밀은 아래의 표 4와 같은 물성치를 갖는다.

그림 2는 3D CAD 프로그램인 Solidworks를 이용하여 모델링 한 엔드밀이다. 사용된 유한요소해석 프로그램은 CosmosWorks이다.

표 4. Material property of Tool

Tool	Material name	AISI 1020
	Tool length	15 mm
	Depth of cut	2 mm
	Elastic modulus	$2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
	Poisson's ratio	0.29
	Shear modulus	$7.7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
	Thermal expansion coefficient	$1.5 \times 10^{-5} / \text{K}$
	Mass density	$7900 \text{ kg/m}^3$
	Thermal conductivity	$47 \text{ W / (m.K)}$
	Specific heat	$420 \text{ J / (kg.K)}$
	Yield strength	$3.5157 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
	Tensile strength	$4.2051 \times 10^8 \text{ N/m}^2$

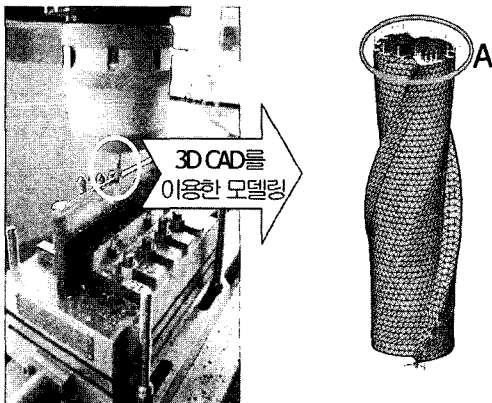


그림 2. Modelling of endmill.

### 3.2 열해석

칩-공구 사이에 발생하는 절삭온도에 의한 열해석을 수행한다. 경계조건을 부여하기 위해서 그림 2에서 칩과 연결된 부분인 “A” 부분의 온도를 알아야한다. “A” 부분의 온도는 써미스터를 부착하여 표 1에서와 같은 조건의 실험을 통해서 구할 수 있었다. 각 경우 모두  $45.15^\circ\text{C}$ 의 온도가 측정되었다.

칩-공구 접촉면에 표 3에서 나열한 절삭온도와 그림 2의 “A”부분에 온도를 입력하여 해석을 수행한다.

그림 3은 열해석을 수행한 결과이다. 공구 내에서의 온도분포를 볼 수 있다.

### 3.3 구조해석

절삭력에 의한 공구의 변형을 살펴보기 위해서 구조해석을 수행하였다. 이는 공구가 절삭에 참여하는 끝

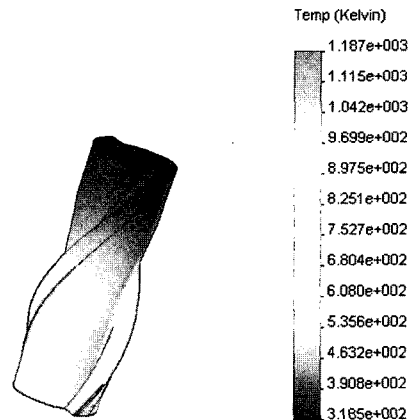


그림 3. Result of thermal analysis of CASE1.

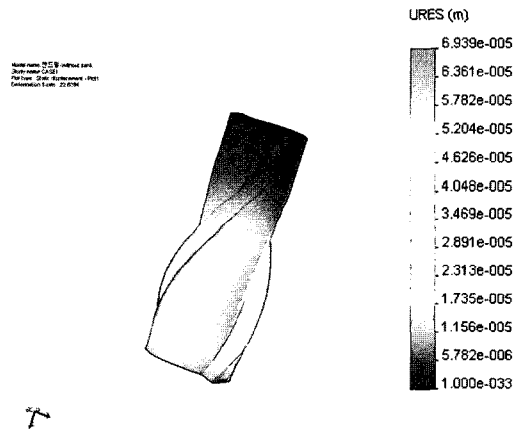


그림 4. Result of structural analysis of CASE1.

부분에 표 2에서 나열한 절삭력을 하중조건으로 부여한 유한요소해석을 수행하였다.

이 해석은 앞 절에서 열해석의 결과를 포함한 것이다.

그림 4는 절삭력을 이용하여 절삭온도에 의한 열해석의 결과를 포함하는 구조해석의 결과이다. 해석의 결과를 통하여서 공구가 가공 중에 받는 응력과 변형정도를 그리고 공구 변위를 예측하였다.

표 5는 엔드밀 가공시 공구 변형에 관한 유한요소해석을 수행한 결과이다. 각 경우의 결과를 보면, 동일한 공구 회전 속도를 기준으로 이송속도만을 변화시킨 경우인 CASE1과 CASE2를 비교할 때 CASE1에 비해서 CASE2에 더 많은 응력과 변위가 발생한 것을 볼 수 있다. 또한 동일한 이송속도에서 공구 회전 속도만을 변화시킨 경우인 CASE3와 CASE4를 비교할 때 CASE3가 CASE4에 비해서 공구 변위와 응력이 더 많이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이로써 절삭이론을 이용하여 얻은 절삭력과 절삭온도를 하중 조건으로 엔드밀 가공 시

표 5. Results of FEM

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

공구 변형에 대해서 유한요소해석을 수행하여 공구의 변형을 예측하였다.

### 4. 결 론

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

### 참고문헌

[1] 홍민성, “엔드밀 작업에서 공구의 열변형에 관한 연구”, 한국공작기계학회지, 제8권, 제5호, pp. 25-29, 1999.  
 [2] 염철만, 신근하, 홍민성, “선삭에서 공구열변형이 표면형상에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국공작기계학회 논문집, 제10권, 제4호, pp. 33-39, 2001.  
 [3] 이상규, 고성림, “엔드밀 가공시 공구변형을 고려한 표

면형성 해석”, 한국정밀공학회 1996년도 춘계학술대회 논문집, pp.119-124.  
 [4] 이승일, 맹민재, 정준가, “엔드밀 변위에 의한 공구파손 검출”, 한국공작기계학회지, 제8권, 제2호, pp. 100-107, 1999.  
 [5] 류시형, 주중남, “측벽 엔드밀 가공에서 공구 변형을 고려한 형상 오차 예측”, 한국정밀공학회지, 제21권, 제6호, pp. 43-51, 2004.  
 [6] Oxley, P. L. B., Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability, Ellis Horwood, Chichester, 1989.  
 [7] 정성찬, 김국원, “절삭이론을 이용한 엔드밀 가공에서의 절삭력 모델링에 관한 연구”, 2004년도 한국정밀공학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 1385-1388.  
 [8] 정성찬, 김국원, “절삭이론을 이용한 엔드밀 가공에서의 절삭력 예측에 관한 연구”, 2004년도 대한기계학회 추계 학술대회 논문집, pp. 928-933.  
 [9] 김국원, “2차원 절삭이론을 이용한 정면밀링 절삭력 예측”, 한국정밀공학회지, 제19권, 제12호, pp. 150-157, 2002.  
 [10] Hong-Tsu Young, P. Mathew and P. L. B. Oxley, “Predicting cutting forces in face milling”, International Journal of machine tool and manufacture, Vol. 34, pp. 771-783, 1994.  
 [11] X. P. Li, A. Y. C. Nee, Y. S. Wong, H. Q. Zheng, “Theoretical modelling and simulation of milling forces”, Journal of Materials Technology, Vol. 89-90, pp. 266-272, 1999.  
 [12] H. Z. Li., W. B. Zhang., X. P. Li., “Modelling of cutting forces in helical end milling using a predictive machining theory”, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 43, pp. 1711-1730, 2001.  
 [13] Tugrul Ozel, Taylan Altan, “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, 2002.

정 성 찬(Sung Chan Jung)

[정회원]



• 2003년 2월 : 순천향대학교 기계공학과 (공학사)  
 • 2005년 2월 : 순천향대학교 기계공학과 (공학석사)  
 • 2005년 2월~현재 : 한국야금생산기술연구소 연구원  
 <관심분야>  
 CAD/CAM/CAE, 정밀가공

김 국 원( Kug Weon Kim)

[정회원]



• 1988년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)  
 • 1990년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학석사)  
 • 1995년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학박사)  
 • 2001년 3월~현재 : 순천향대학교 기계공학과 조교수

<관심분야>  
 정밀가공, 전산역학, 제품설계