

고속가공용 엔드밀의 동특성 분석

임경화*, 유중학*, 이우영**, 장현탁*

Analysis of Dynamic Characteristics of End Mill for High Speed Cutting

Kyung-Hwa Rim*, Joong-Hak Ryu⁺, Woo-Young Lee⁺⁺, Heon-Tak Jang⁺

Abstract

Performance Evaluation of end mills for high speed cutting has been performed in a view of dynamic characteristics and noise-vibration under operation. The tools tested in this research consist of three foreign country made and one korean made. In addition, numerical models using finite element method are established, which are confirmed by experimental results. The evaluation results has been feedback for developing high performance end mills for high speed cutting tools.

Key Words : end mill, high speed cutting, dynamic characteristics, vibration, finite element method

1. 서론

전 세계적으로 고속가공기술이 급속히 보급되고, 공작 기계의 성능향상, 공구기술의 발전, 생산성 및 정밀도 향상의 요구로 인해 고속가공에 관한 관련 연구 및 개발이 매우 활발하게 이루어지고 있다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 본 연구에서는 현재 개발되어 시판중이거나 개발 중인 국내 고속가공용 엔드밀 공구(평엔드밀, 볼엔드밀)의 성능 평가를 통하여 향후 더욱 효율적인 엔드밀 공구의 방향을 제시하고자 한다.

고속가공용 엔드밀을 평가하는데 있어 본 연구에서는 동특성 성능을 평가하기 위해 본 공동연구에서 개발한 엔드밀(S사) 동특성과 함께 주요 선진회사(K사, F사, H사)

의 엔드밀 동특성(고유진동수, 감쇠비)을 측정하고, 고속 밀링속도에서 진동의 차이를 조사한다. 또한 유한 요소법을 이용하여 엔드 밀의 동특성을 구한 뒤에 실험치와 비교하고자 한다.

2. 엔드밀의 동특성 평가

공구(평 볼엔드밀)의 동특성 성능을 평가하기 위하여 고정부에 공구길이 $L=4D$ (볼엔드밀의 경우 $L=31\text{mm}$)가 되도록 설치한 뒤에 모드시험(Modal Test)을 통하여 공구만의 고유진동수와 감쇠비를 측정하였다. 그리고 측정된 주요 선진회사(K사, F사, H사)공구의 동특성(고유진동수

* 발표자, 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부(rim@kut.ac.kr)

주소: 330-708 충남 천안시 병천면 가전리 307

+ 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

++ 한국기술교육대학교 기계정보공학부

감쇠비)과 비교 분석하였다.

2.1 실험 방법

Fig. 1과 같이 충격해머(Impact Hammer)와 가속도센서(볼랜드밀의 경우 레이저센서 이용)를 이용한 모드시험(Modal Test)방법을 이용하였다. 고속가공기 회전축의 동특성을 배제하기 위하여 고속가공기 대신에 자체적으로 제작한 강성이 상당히 큰 지그(Jig)에 엔드밀을 각각 설치한 뒤에 모드시험을 통하여 동특성의 주요항목인 고유진동수와 감쇠비를 구하였다.

감쇠비를 정확히 규명하기 위하여 측정된 주파수 응답함수(Frequency Response Function)에서 반치점(Half Power Point)을 이용하여 감쇠비를 구하였다.

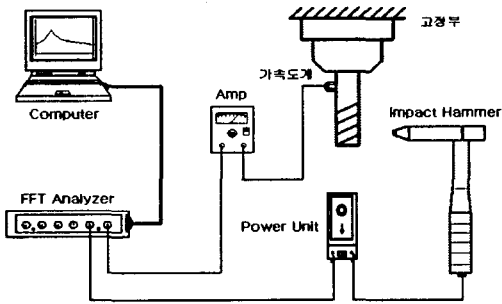


Fig. 1 모드시험장치

측정한 공구는 국내 S사 제품을 비롯하여 3개 선진회사(K사, F사, H사)제품이고, 각 회사제품의 두 종류 모델($\varnothing 6$, $\varnothing 10$)에 대해서 실험을 실시하였다. 볼랜드밀의 경우 국내 S사 제품의 3종류 모델($\varnothing 1$, $\varnothing 3$, $\varnothing 6$)에 대해 실험을 수행하였다.

2.2 실험 결과 및 검토

고정 지그상에서 고속 가공용 공구의 동특성만을 측정할 때 주파수 응답함수가 Fig. 2와 같이 측정되었다. 전체적으로 기여도 함수(Coherence Function)도 양호한 것을 보아 측정은 정확하게 되었음을 알 수 있다. 또한 고주파수 영역까지 측정하였음에도 불구하고 1차 모드만 측정되었다. Fig. 3은 레이저 센서를 이용하여 측정된 볼랜드밀의 주파수응답함수를 보여주고 있으며, 진동가속도센서를 이용하는 것 보다 감쇠비가 실제값에 근접하게 나옴을 알 수 있다. 측정된 주파수 응답함수에서 구한 고유진동수와 감

쇠비는 Table 1-3과 같다. 현재 실험조건은 실제 작업조건 중에서 공구의 세장비가 가장 큰 경우인 L=4D조건임에도 불구하고, 대부분 고속가공용 공구의 고유진동수는 고속가공기 회전축의 1차 고유진동수(약 1000Hz 내외)에 비해 상당히 큼을 알 수 있다. 직경이 작은 소형공구일수록 고유진동수가 높아서 밀링 안정성이 상대적으로 높을 것임을 예상할 수 있다. 공구의 안정성은 고유진동수와 감쇠비의 곱으로 평가할 수 있는 것을 고려하면, 초기 개발된 S사의 공구는 타사의 제품과 공구와 동특성이 유사함을 확인할 수 있다. 임계속도에 의한 공진을 피하기 위해서 실제 회전속도는 1차 임계속도보다 훨씬 작도록 작업회전속도를 설정해야 하므로 본 연구의 최종회전속도 사양을 달성하기 위해서는 공구의 동특성도 설계시점에서 고려되어야 함을 알 수 있다.

Table 2는 개선된 S사의 공구로서 초기 개발된 공구에 비해 다소 고유진동수가 크거나 비슷한 결과가 측정되었음을 알 수 있다.

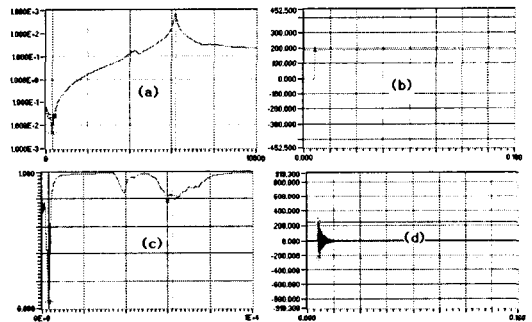


Fig. 2 평엔드밀의 동특성 측정 (S사 $\varnothing 6$)
(a) 주파수응답함수 (b) 충격력 시간데이터
(c) 기여도함수 (d) 충격반응 시간데이터

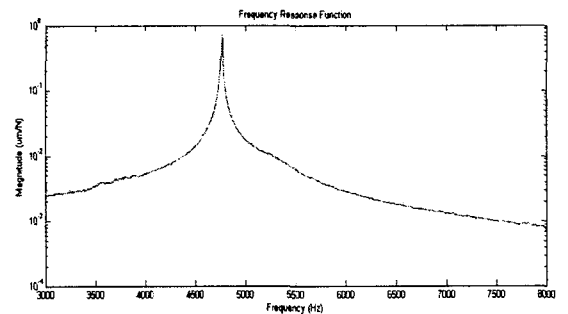


Fig. 3 볼랜드밀의 동특성(주파수응답함수)측정(S사 $\varnothing 6$)

Table 1 평엔드밀의 동특성 비교

엔드밀 Maker	제품 직경	고유진동수 (Hz)	감쇠비	날개수	1차임계 속도(rpm)
K사	6	6362	0.014	6	63620
	10	4025	0.024	6	40250
F사	6	6175	0.007	6	61750
	10	4095	0.018	6	40950
H사	6	6494	0.009	6	64940
	10	3881	0.023	6	38810
S사 (초기)	6	6155	0.018	6	61550
	6	6030	0.016	6	60300
	10	3940	0.017	6	39400
	10	4082	0.018	6	40820

Table 2 평엔드밀의 동특성 비교(개선된 공구)

엔드밀 Maker	제품 직경	고유진동수 (Hz)	감쇠비	날개수	1차임계 속도(rpm)	
S사	A	6	6683	0.026	6	66830
	B	6	6507	0.018	6	65070
	C	6	6463	0.024	6	64630
	D	6	6581	0.022	6	65810
	E	6	6600	0.022	6	66000
	F	10	3942	0.012	6	39420
	G	10	4001	0.005	6	40010

Table 3 볼엔드밀의 동특성 비교

엔드밀 Maker	제품 직경	고유진동수 (Hz)	감쇠비	날개수	1차임계 속도(rpm)	
S사	H	1	6296	0.0019	2	188880
	I	1	6340	0.0019	2	190200
	J	1	6324	0.0019	2	189720
	K	3	5904	0.0013	2	177120
	L	3	6132	0.0016	2	183960
	M	3	6264	0.0019	2	187920
	N	6	4768	0.0008	2	143040
	O	6	4732	0.0013	2	141960
	P	6	4668	0.0013	2	140040

3. 진동 및 소음 평가

고속 밀링속도에서 선진회사(K사, F사, H사)의 공구와 국내개발(S사) 공구에 대해서 진동 차이 조사를 하고, 절삭력과 진동가속도의 관계를 주파수 관점에서 비교하고자

한다.

3.1 실험 방법

Table 4와 같은 고속밀링조건 아래에서 절삭공구종류에 따른 진동가속도를 측정하였다. Fig. 4와 같이 피절삭재에 3축가속도 센서를 설치한 뒤에 진동가속도를 측정하였다. 소음측정인 경우는 고속가공기의 보호문을 닫은 후 실제 작업자의 청각위치에서 dB(A)를 측정하였다. 공구의 길이는 L=4D로 통일하였다.(단, 볼엔드밀의 경우 L=31mm)

Table 4 밀링조건

엔드밀	피삭재	Ad (mm)	Rd (mm)	N (rpm)	V (m/min)	F (mm/min)	
평엔드밀	∅6	STD11	6	0.3	10,000	188	1,080
	∅10	STD11	10	0.5	6,000	188	1,080
볼엔드밀	∅1	STD11	0.03	0.05	37,500	118	1,500
	∅3	STD11	0.09	0.15	32,000	302	2,560
	∅6	STD11	0.18	0.3	16,000	302	1,920

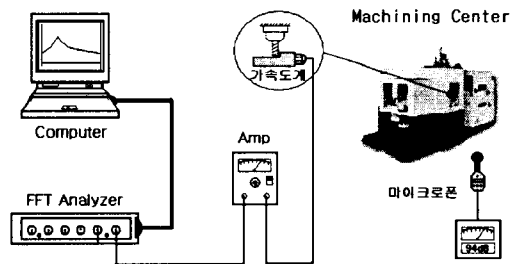


Fig. 4 진동 및 소음 실험장치의 구성

3.2 실험결과 및 검토

3.2.1 소음 크기

환경 문제를 고려한 소음 측정이므로 운전자 위치(거리 1m, 높이 1.5m)에 소음기를 설치하고 인간의 청각 특성과 유사한 dB(A) 보정곡선을 이용하여 소음을 측정하였다. 암소음은 일반 CNC밀링 가공기(65dB)에 비해 고속가공기 소음이 크게 발생함을 알 수 있다. 소음크기를 회사별로 비교하면 약간의 차이만 존재하고, 오히려 공구 직경에 따라

소음이 많이 차이가 남을 알 수 있다.

Table 5 소음의 크기 (단위: dB)

공구직경 (mm)	Maker						비고 (암소음)
	F사	K사	H사	S사			
				No.1	No.2	No.3	
∅6	79	78	78	-	77	78	71
∅10	76	76	77	75	74	-	71

3.2.2 진동 크기

Table 4와 같이 공구회사와 직경별로 시간영역에서 진동가속도(0-peak)를 측정하였다. 이는 일반 밀링 작업조건에서 측정된 값에 비해 크게 발생함을 알 수 있다.

초기 개발된 S사의 공구에 의한 진동이 타 회사와의 다소 차이는 있지만 거의 비슷한 수준으로 나옴을 알 수 있다. 대부분 공구에서 법선배분력 방향(Z방향)이 이송분력 방향(Y방향)에 비해 높게 나오고 있다.

Table 6에서는 최종적으로 개발된 직경 ∅10인 최적 공구(A Type) 등은 초기 개발된 S사 공구에 비해 진동이 상당히 작아졌음을 알 수 있다. 볼엔드밀의 경우 각 직경별로 비슷한 수준의 크기를 가지지만 ∅6에 비해 ∅3의 진동이 크게 나온 것이 특이하다. 이는 밀링조건에 따른 차이 즉, Ad, Rd의 증가율에 비해 N, V, F의 변화율이 일정치 않기 때문인 것으로 추정된다. 볼엔드밀 또한 Y방향에 비해 Z방향의 진동값이 크게 나옴을 알 수 있다. 이는 공구의 마모와 직접적인 관련이 있다. 이 값을 줄이는 것 또한 공구설계의 중요 factor로 여겨진다.

Table 6 진동가속도의 크기 (단위: G)

공구직경 (mm)	엔드밀 모델	측정방향*			
		X	Y	Z	
평 엔 드 밀	∅6	A	0.65	1.10	1.18
		B	0.41	0.71	0.81
		C	0.34	0.54	0.62
		D	0.38	0.57	0.63
		E	0.39	0.58	0.64
∅10	F	1.28	2.32	2.36	
	G	1.27	2.10	2.17	

볼 엔 드 밀	∅1	H	0.102	0.052	0.136
		I	0.121	0.054	0.144
		J	0.128	0.059	0.155
	∅3	K	0.314	0.130	0.752
		L	0.316	0.116	0.730
		M	0.302	0.122	0.729
	∅6	N	0.141	0.087	0.207
		O	0.142	0.091	0.209
		P	0.133	0.086	0.203

* X:법선분력방향, Y:이송분력방향, Z:접선분력방향

3.2.3 진동의 주요 주파수

주파수별로 에너지 분포를 파악하기 위하여 스펙트럼 밀도함수(Spectrum Density Function)를 Fig. 5-7 과 같이 측정하였다. 그림은 각 주파수별 에너지를 보여주고 있다. 주요 주파수 분포에 대해서는 각 회사별로 차이가 없으며, 대체로 고주파수 성분으로 갈수록 에너지가 많음을 알 수 있다. 특히 회전주파수와 공구날수의 곱(6Ω)의 배수(12Ω, 18Ω, 24Ω, 30Ω)에 해당하는 성분이 크다. 진동의 주요 주파수는 공구의 종류와 상관없이 주축회전속도에 상관하여 일정한 값들을 나타내고 있다.

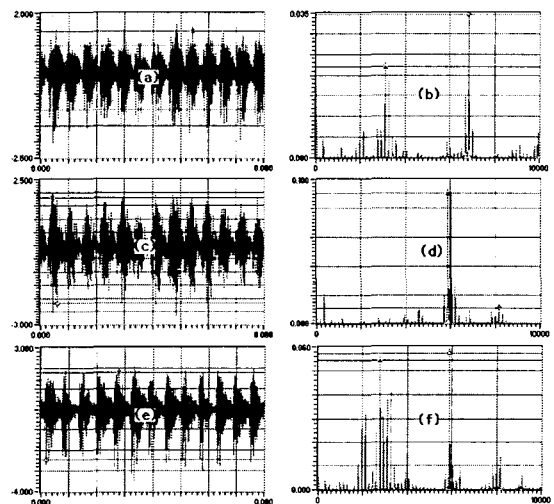


Fig. 5 밀링 작업시 측정데이터(S사 평엔드밀 ∅6)
(a)법선 분력방향 시간데이터 (b)법선 분력방향 Auto Spectrum
(c)이송 분력방향 시간데이터 (d)이송 분력방향 Auto Spectrum
(e)접선 분력방향 시간데이터 (f)접선 분력방향 Auto Spectrum

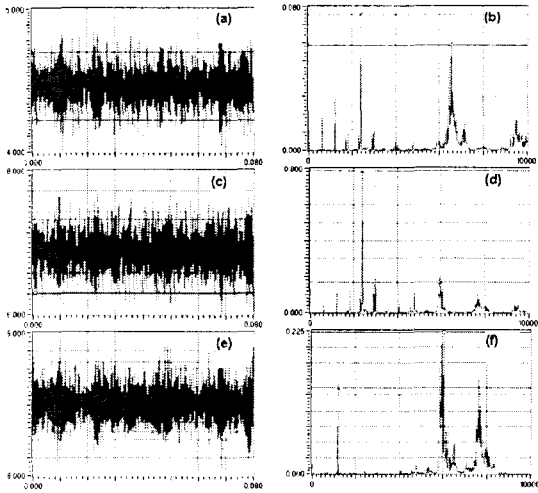


Fig. 6 밀링 작업시 측정데이터(S사 평엔드밀 $\varnothing 10$)
 (a)법선 분력방향 시간데이터 (b)법선 분력방향 Auto Spectrum
 (c)이송 분력방향 시간데이터 (d)이송 분력방향 Auto Spectrum
 (e)접선 분력방향 시간데이터 (f)접선 분력방향 Auto Spectrum

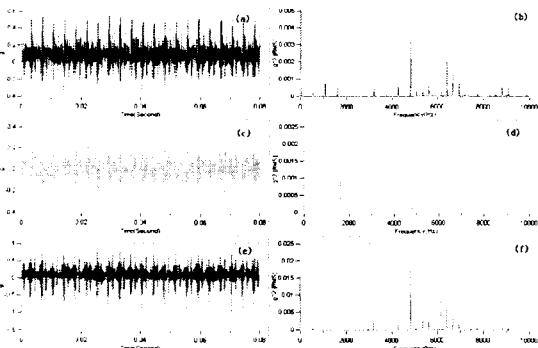


Fig. 7 밀링 작업시 측정데이터(S사 볼엔드밀 $\varnothing 6$)
 (a)법선 분력방향 시간데이터 (b)법선 분력방향 Auto Spectrum
 (c)이송 분력방향 시간데이터 (d)이송 분력방향 Auto Spectrum
 (e)접선 분력방향 시간데이터 (f)접선 분력방향 Auto Spectrum

4. 엔드밀의 유한요소 해석

4.1 모델링 및 해석

공구 설계 단계에서 공구 치수와 형상 변경에 의한 동특성 변화를 조사하기 위하여, 유한요소법(Finite Element Method) 전용프로그램인 ANSYS를 사용하여 엔드밀의 유한요소 모델을 수립하였다. 세부적인 날의 형상 변화는 일

반적으로 고유진동수와 모드형상의 결과에 큰 영향을 미치지 않으므로, 날 형상을 단순화시켜 모델링 하였다. 본 해석에서 사용된 엔드밀은 평엔드밀 $\varnothing 6$ 와 $\varnothing 10$ 이며, 공구 돌출길이는 각 직경의 4배로 간주하였다. 공구 경계조건은 실험 경계조건과 같게 하기 위하여 한쪽 끝단에 스프링 요소(Spring Element)를 이용하여 경계조건을 부여하였다. 해석에 사용한 엔드밀의 재료 특성치는 Table 7와 같다.

Table 7 재료 특성치

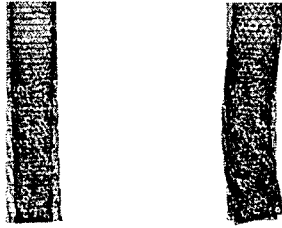
항목	특성치
탄성계수(N/m ²)	6.25×10^{11}
밀도(kg/m ³)	1.43×10^4
프와송비	0.28

고유진동수의 해석 결과는 Table 8에 나타내었다. 수치 해석 고유진동수는 모드시험의 측정치와 거의 유사함을 알 수 있다. 이에 따라 실제 동특성을 반영할 수 있는 수학적 모델의 정확성을 검증할 수 있다. 이에 검증된 모델에서 날 수를 변경하면서 고유진동수의 변화를 살펴보았는데 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 공구의 형상은 입력 가진력에는 영향을 줄 수 있지만 시스템의 동특성에는 거의 영향이 없음을 알 수 있다.

Fig. 8의 모드형상에서 1차 모드는 휘어지는 굽힘모드이고, 2차 모드는 S자 형태로 휘어지는 굽힘모드임을 알 수 있다.

Table 8 유한요소법에서 구한 고유진동수

엔드밀 종류		해석치 (Hz)	
직경	날수	1차 모드 (실험치)	2차 모드
$\varnothing 6$	2날	6299	39500
	6날	6306 (6155)	39620
$\varnothing 10$	2날	4066	22050
	6날	4046 (4082)	22040



(a) 1차 모드 형상 (b) 2차 모드 형상

Fig. 8 엔드밀($\varnothing 10$)의 모드형상

5. 결론

공동연구에서 개발된 고속용 엔드밀과 선진제품 엔드밀의 동특성과 절삭 중에 발생하는 진동을 측정하여 비교 평가하였다. 개발된 엔드밀의 성능은 비슷하거나 다소 양호한 것을 확인하였다. 또한 유한요소법을 이용하여 구한 고유진동수의 해석치를 실험치와 비교하여 비슷함을 확인함으로써, 실험한 결과의 정확성을 입증하였다.

참고 문헌

- (1) Kitaura, et al., 1999, "Dry Cutting Performance of (Al,Ti)N Coated Carbide Endmills for High Speed Machining," TOOL & TECH, No,2, pp. 4-7.
- (2) Ito, 2000, "In-process measurement of cutting force and its application to identification of machining status", KISTLER seminar, 2000.
- (3) Yoshimi Ito, 2000, "In-process measurement of cutting force and its application to identification of machining status", KISTER seminar.