

주축 진동특성을 이용한 정밀가공 성능평가

박보용*, 김종관**

Evaluation of Precision Cutting Performance by Bending Vibration Mode Shapes of Main Spindle

Bo-Yong Park*, Jong-Gwan Kom**

ABSTRACT

In this paper, experimental studies are mainly carried out for the evaluation of precision cutting performance of a machine tool spindle running at high speed with the low load, in consideration fo the bending vibration characteristics. As a result a process is presented for the practical application in the machine tools industry to evaluate the cutting performance in design stage of spindles.

Key Words : Evaluation of precision cutting performance(정밀가공 성능평가), Bearing stiffness ratio & span(베어링 강성비, 배치간격), Vibration mode average & slope(진동모우드 산술평균치, 경사도), Correlation coefficient(상호 상관계수)

1. 서 론

산업기술의 발달과 함께 기계 가공부품의 고정밀화요구는 절삭시에 이들 부품의 형상 및 치수정밀도를 더욱 개선시키므로써 가능하며, 특히 사용 공구에 대한 최적 절삭조건을 유지시킬 수 있도록 주축의 고속화가 이루어져야 한다. 그러나, 현재 국내 공작기계 주축의 최고 도달 회전속도인 DN 50만 이내에서는 요구되는 부품의 정밀가공은 불가능한 실정이다.

절삭에 의한 부품의 정밀가공은 주축 고속화를 통해서 가능하며, 이를 정밀가공을 위한 전용주축은 진동모우드 특성이 고려된 주축계 구조설계가 이루어져야 한다. 따라서, 설계된 주축조건에서 이들 진동모우드 특성의 고찰을 통해서, 해당 주축의 정밀가공 성능을 예측 및 평가할 수 있겠다.

주축의 정밀가공 성능평가에 대한 국내 연구발표는 저조한 실정이나, 외국의 경우에는 주축계 동적상태에서의 굽힘 고유진동수와 진동모우드 해석으로 주축 진동 형태를 파악할 수 있는 전산 프로그램 SPILAD⁽¹⁾의 개발, SMT 기법으로 주축계 정·동적 거동을 해석하여 주축설계에 응용하고, 실제 절삭실험으로 가공물의 진원도측정을 통해서 주축 가공성능을 확인하는 방법⁽²⁾ 등이 발표되었지만, 이들은 주로 이론적 연구내용으로 실험적 근거제시가 부족하다.

본 논문은 주축의 굽힘진동 특성해석을 통해서 정밀가공 성능을 평가하기 위하여 연삭수준의 정밀가공을 목적으로 자체 개발한, 최고 회전속도가 국내에서 사용되는 상용주축 보다 약 50% 향상된, 실험용 주축⁽³⁾(최고 회전속도: DN 75만)과, 대체 채용을 목표로 하는 유사한 주축구조를 갖는 수직형 머시닝센터 상용주축

* 인천대학교 공과대학 기계공학과

** 조선대학교 공과대학 기계공학과

A (DN 48만) 와, 기타 유사한 주축구조로 사용조건이 동일한 수직형 주축으로 실험의 일관성을 고려하여 상용 주축 B (DN 35만) 및 상용주축 C (DN 30만) 를 대상으로, 동일한 조건으로 주축의 굽힘 진동모우드르 해석하여, 이들 결과의 고찰을 통해서 해당주축의 정밀가공 성능을 예측하고 평가하는 방안을 제시하고자 한다. 참고로 이들 상용주축들은 실험의 편의성을 고려하여 국내 회전가공 모델을 사용하였다.

이를 위하여, 본 논문에서 수행한 실험내용은, 첫째로, 실험용 주축과 대체사용을 목표로 하는 상용주축 A 및 기타 상용주축 B, C에 대하여 동일한 조건으로 회전속도를 제어시키면서 주축 가동상태에서 굽힘 진동 진폭 크기를 주축단에서 측정하였으며, 둘째로, 실험환경상 상용주축들 만으로 최적의 절삭조건에서 가공시편에 절삭실험을 실시하여, 이들의 정밀도 측정결과와 진동모우드와의 관계를 고찰하였다⁽⁴⁾.

그 결과, 주축의 설계단계에서 수행된 진동모우드 특성 해석결과에서 정밀가공에 유리한 진동모우드를 갖는 주축조건을 제시할 수 있었으며, 모우드 특성이 우수한 주축이 절삭실험 결과에서 정밀가공 성능도 우수함을 확인할 수 있었고, 이들 진동모우드 상태로 해당주축의 정밀가공 성능을 예측 및 평가할 수 있었다.

2. 주축의 베어링 조건에 따른 진동모우드 해석결과

절삭가공에서 부하하중이 주축의 정·동강성⁽⁵⁾에 되도록 적은 영향을 주도록 경절삭 전용의 고속·정밀가공용 주축으로 자체 개발된 실험용 주축조건에서, 정밀가공에 유리하여 양호한 진동모우드 특성을 갖는 주축조건을 찾기 위하여, 먼저 주축이 베어링이 지지되어 회전하는 동적상태로 가정하고, Table 1과 같이 베어링 반경방향 강성값... 실험용 주축의 베어링조건을 비교상 중강성으로 하고, 고강성과 저강성으로 구분하고, 또한 앞·뒤 베어링 강성비도 구분함..., 배치간격, 주축의 경의 세가지 파라미터를 변경시키면서, 주축 해석전용 전산 프로그램 SPILAD를 이용하여 각 주축조건에서의 굽힘 진동모우드 해석^(1,6)을 실시하였다.

여기서, 진동모우드 해석이란 구조물의 동적특성을 나타내는 시스템의 모달량(고유진동수, 댐핑, 고유모우드 등)을 구하는 것으로, 시스템의 전달함수 상태로부터

Table 1. Configuration of spindle and bearing conditions

앞·뒤 베어링 강성비	베어링 강성의 구분 (N/μm)			
	고강성	중강성*	저강성	
1 : 1*	앞	600×2	400×2	300×2
	뒤	600×2	400×2	300×2
2 : 1*	앞	800×2	540×2	400×2
	뒤	400×2	270×2	200×2
3 : 1*	앞	900×2	600×2	450×2
	뒤	300×2	200×2	150×2
베어링간격(mm)	232, 252, 272*, 292, 312			
주축 외경(mm)	65, 70, 75*, 80			

주 : *는 실험용 주축조건을 나타내며,

- 베어링 강성은 중강성조건, 앞·뒤 강성비는 1 : 1임.
- 베어링 간격은 272mm, 주축외경은 75mm임.

해석적 또는 실험적 방법으로 계산 및 측정하여 모달량을 구명함을 뜻한다.

본 논문에서는 주축계 진동특성에 대한 해석결과에 의해서 주축들의 정밀가공 성능을 평가하기 위하여, 첫 번째 진동모우드 특성의 판단기준으로 베어링 지지점에서 발생하는 정규화된 굽힘 진동모우드 크기의 산술적 모우드 평균치(이하 모우드 평균치라함)를 선정하였으며, 이들 해석결과는 Fig. 1과 2에 나타났다.

Fig. 1은 실험용 주축조건에서, 베어링 반경방향 강성값을 3종류로 구분한 후, 다시 앞·뒤 강성비를 다르게 배치시켜서, 베어링 강성과 배치간격별 모우드 평균치를 해석한 결과이다.

모우드 평균치는 고강성 베어링을 1 : 1 강성비로 배치한 경우가 가장 적었으며, 3 : 1 배치에서는 커지는 경향을 보이고 있었다. 배치간격 272mm 이후부터 모우드 평균치는 급격히 커지며, 또한 저강성 베어링에서 모우드 평균치가 커지므로, 진동특성도 나쁠 것으로 예측된다.

따라서 실험용 주축조건에서 고강성 베어링을 사용하고, 앞·뒤 강성비를 적게 배치할수록 모우드 평균치는 적어지는 양호한 결과를 얻을 수 있었으며, 적정 배치간격은 주축개발시 이미 고려하여 계산한 결과와 같이, 주축 구조상 272mm 내외가 가장 적당함을 확인할 수 있었다.

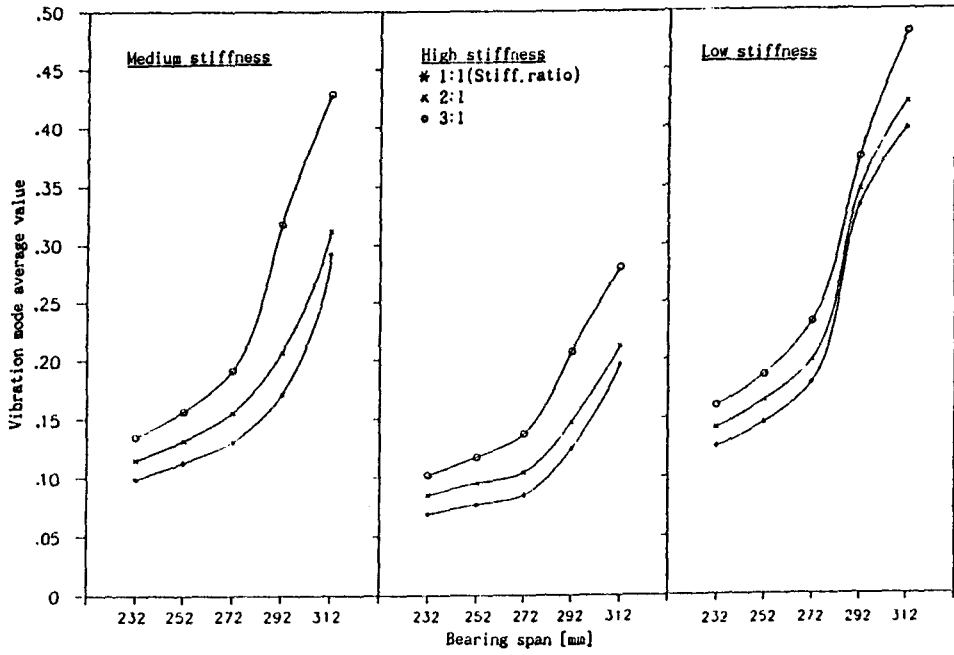


Fig.1 Bending vibration mode average values due to variation of bearing span of experimental spindle(HS 430)

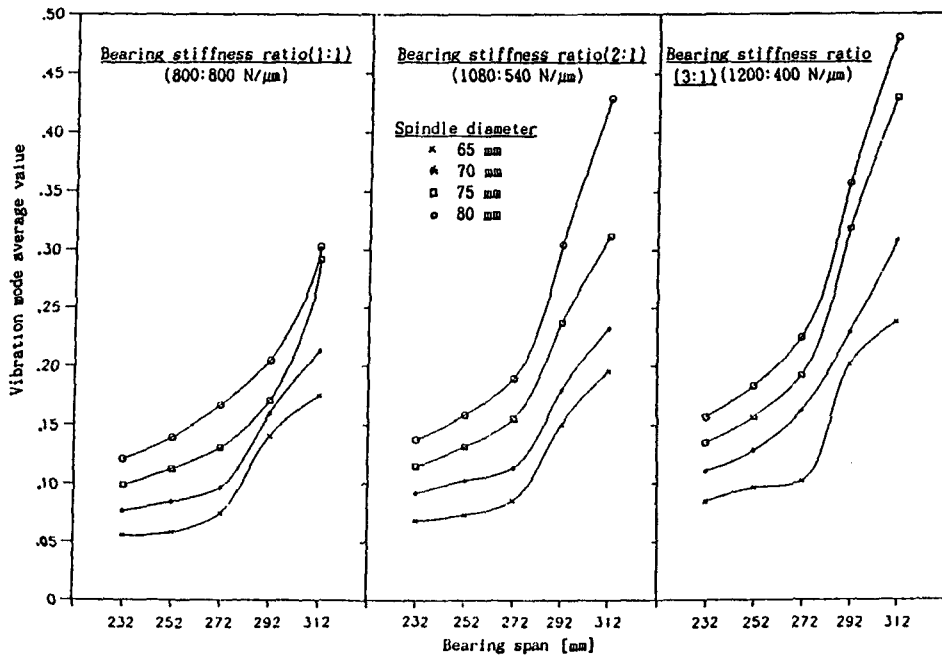


Fig.2 Vibration mode average values due to variation of bearing span and spindle diameter of experimental spindle(HS 430)

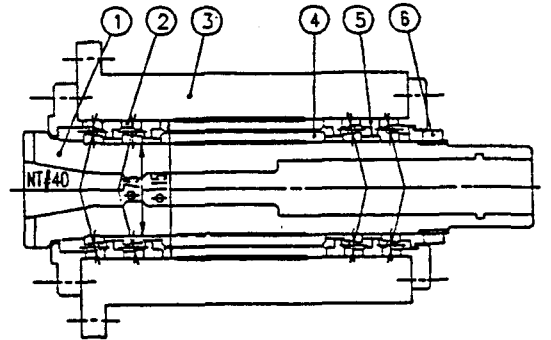
Fig. 2는 주축외경과 베어링 강성비 및 배치간격의 변경에 따른 모우드 평균치 해석결과로, 주축외경과 배치간격이 커짐에 따라 모우드 평균치는 커지며, 1:1 강성비에서 가장 양호하고, 1:1과 2:1 강성비에서의 모우드 평균치는 배치간격 272mm까지는 완만하게 증가되지만, 3:1 강성비에서는 급격한 증가를 보이고 있다.

따라서 베어링 강성과 주축외경의 변경을 통해서도 Fig. 1의 결과에서와 같이, 고강성 베어링을 사용하되, 그 앞·뒤 강성비가 1:1에 가깝게 하고, 최적 베어링 간격을 갖는 주축이 모우드 평균치가 적어지는 양호한 주축조건임을 알 수 있었다. 그러나 1:1에 가까운 앞·뒤 베어링 강성비를 갖는 주축은 3:1의 강성비를 갖는 주축에 비하여 주축강성은 저하되나, 정밀가공은 저부하 절삭에서 가공이 이루어지므로, 상기 주축강성 저하가 높은 주축강성이 요구되는 고부하 강력절삭의 황삭주축에 비하여 주축 운용상에 큰 영향은 미치지 않는다.

3. 주축 정밀가공 성능평가를 위한 실험결과와 고찰

주축 굽힘 진동특성으로 정밀가공 성능 평가방안을 제시하기 위하여 Fig. 3과 같은 실험용 주축장치로 실험 환경상 기존 CNC 공작기계에서 사용된 동일한 구동 제어장치에 의해 가동시키면서 각 회전수별 굽힘 진동진폭의 크기를 측정하였다. 여기서 실험용 주축은 실험단계의 주축유닛으로 절삭실험은 불가능한 상태이며, 실험용 주축과 유사한 형상구조로 대체사용을 고려하는 기존 상용주축 A는 진동진폭 크기 측정과 절삭실험을 실시하였다. 또한 절삭실험의 비교를 위하여 상용주축 B 및 C를 선정하여 절삭실험을 수행하는 한편, 진동진폭 크

기도 측정하였으며, 측정된 결과와 2장에서 해석된 진동모우드와 관계를 고찰하였다. Table 2는 진동실험과 절삭실험에 사용된 측정장비들이며, Fig. 4는 상용주축에 대한 진동 스펙트럼측정에 사용된 분석장비들의 사진으로 ①은 Tracking FFT 분석기이며, ②는 속도검출기, ③은 기록장치이다.



- ① Main spindle ② Spindle bearing (HS 7015 C)
- ③ Housing ④ Preload spacer
- ⑤ Injection nozzle
- ⑥ Precision locknut (FKD-ZMV 75)

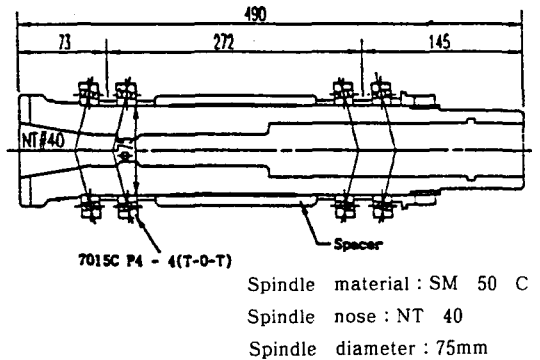


Fig. 3 Prototype of an experimental spindle

Table 2. Measuring equipment list

항 목	기 기 명	규 격	비 고
진동특성 실험	Accelerometer	B & K 4384	주파수 : 0.1-12.6kHz
	Charge amplifier	B & K 2636	
	Photoelectric probe	MM 0024	동작거리 : 50~800mm
	Order tracking multiplier	B & K 5050	Tacho 형
	Thacking FFT analyzer	CF 880	ONO SOKKI CO.,
절삭성능 실험	Surface roughness tester	SE-34	
	Roundness tester	M50A-350	

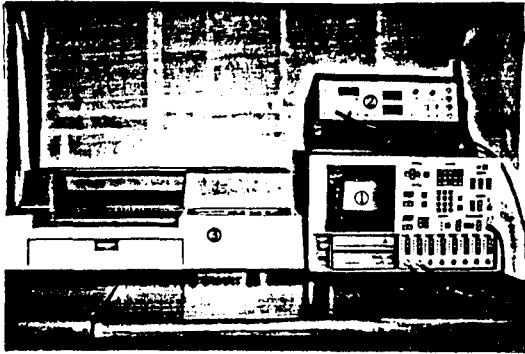


Fig. 4 Measuring equipment of vibration spectrum

1) 주축 회전수별 굽힘 진동진폭 측정결과와 고찰

허용된 실험조건에서 상기 측정장비들로 실험용 주축은 DN 75만(10000 rpm)까지, 상용주축 A는 DN 48만(6000 rpm)까지, 상용주축 B는 DN 35만(3500 rpm)까지, 상용주축 C는 DN 30만(3000 rpm)까지 가동시키면서, 주축단위 하우징 반경방향에 부착시킨 가속도계(B & K 4384)와 증폭기(B & K 2636)로 측정되는 진동 응답신호와, 광전탐침자(MM 0024) 및 추적 신호검출기(B & K 5050)로 측정된 속도신호를 Tracking FFT 분석기(ONO SOKKI CF-880)로 해석하여, 각 회전수별로 측정된 진동 스펙트럼에서 차수별 굽힘 진동진폭 크기를 측정된 결과는 Fig. 5 및 6과 같으며, 주축 진동특성으로 고유진동수, 진동진폭, 모우드 평균치, 모우드 경사도의 측정결과를 비교한 내용과, 다음절에서의 절삭실험 결과를 Table 3에 정리하였다.

여기서 본 논문에서 정밀가공에 대한 성능평가를 위하여, 주축 진동모우드 특성의 두번째 판단기준으로 진동모우드 곡선에서의 경사도를 선정 사용하였으며, 이것은 주축 전체길이에서 발생한 진동모우드 곡선을 대상주축의 특성상 10mm 단위로 분할하고, 각 분할구간에서 그려지는 모우드 곡선에서의 경사도에 대한 산술적 평균치(이하 모우드 경사도라 함)로 나타낼 수 있는 객관적인 평가 단위이다.

Fig. 5은 실험용 주축의 진동진폭을 측정된 결과로, 각각 회전수 기본주파수(Fundamental frequency)에 해당하는 1차 고차 조화진동 성분이 가장 큰 진동진폭을 나타내므로, 이 주축 구동에서 잡음(Noise)의 영향은 미소함을 뜻하며, 구조 및 조립불량에 의한 이상 진동원은 없음을 알 수 있겠다. 이 주축에서 전체 진동

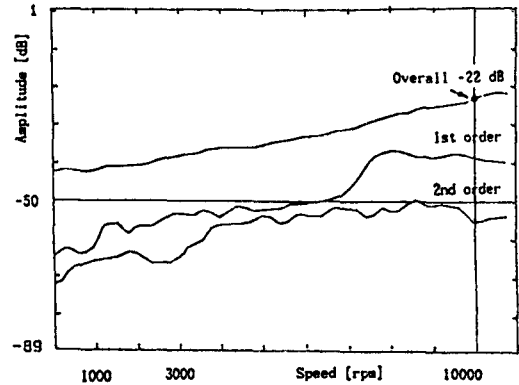


Fig. 5 Bending vibration amplitude due to variation of rotational speed to experimental spindle

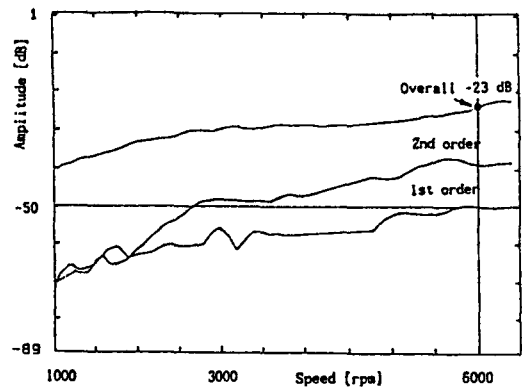


Fig. 6 Bending vibration amplitude due to variation of rotational speed to commercial spindle A

진폭 크기는 최고 회전수(DN 75만)에서 -22 dB이었다. 여기서 사용된 dB 단위는 진동진폭의 상대적 크기를 대수적으로 나타낸 것으로, 예로서, 1 dB(= 9.8m/s²) 가속도에 해당한다.

Fig. 6은 상용주축 A의 진동진폭을 측정된 결과로, 1차 고차 조화진동 성분에서의 가장 큰 진동진폭은 최고회전수 6000 rpm에서 약 -50 dB를 나타내지만, 동일 회전수에서 2차 성분이 1차보다 큰 약 -37 dB를 나타내고 있다. 이 주축에서 전체 진동진폭 크기는 최고회전수 6000 rpm(DN 48만)에서 -23 dB로써, 이 크기는 실험용 주축 최고회전수(DN 75만)에서의 진동진폭 크기와 같은 수준(-22 dB)에 해당된다. 따라서 실험용 주축의 진동특성이 상대적으로 양호함을 확인할 수 있었다.

Table 3. Cutting accuracy of commercial spindle

상용주축 종 류	주축계 진동특성				절삭면 표면조도 (Ra)	
	고유진동수 [Hz]	진동진폭 [dB]	모 우 드 평 균 치	모 우 드 경사도[°]	알루미늄 [a]*	탄 소 강 [a]*
상용주축 A	1626.00	-23	0.237	0.403	0.35	0.50
상용주축 B	1223.05	-24	0.218	0.245	0.25	0.40
상용주축 C	1090.18	-32	0.188	0.223	0.20	0.30
실험용주축	1357.74	-22	0.131	0.152		

주 : *는 중심선 평균조도(Ra) 값 임.

그림에서와 같이 1차 보다 2차 조화진동 성분의 진동 진폭이 더 큰 이유는 1차 조화진동 성분은 주축의 회전 주파수에 해당되며, 여기서 주축에 조립되는 치차와 축 사이의 틈새로 인해서 회전 주파수의 2배에 해당되는 주파수대로 증폭되는 비선형 진동진폭 때문으로 판단될 수 있다.

2) 절삭실험 결과와 고찰

진동모우드 평균치와 모우드 경사도으로써 주축 정밀가공 성능을 평가할 수 있음을 확인하기 위하여, 머시닝 센터 상용주축 A와 B 및 C로, 알루미늄과 탄소강 시편에 동일한 조건으로 절삭실험을 실시하였다. 이들 주축의 진동모우드 특성과 절삭실험 결과는 1)절의 Table 3과 같으며, 절삭시편의 가공면 표면조도 측정결과는 Fig. 7과 같다.

동일한 절삭조건과 시편으로 평면가공을 실시한 결과, Table 3과 같이 진동모우드 평균치가 0.237, 모우드 경사도가 0.403°인 상용주축 A에서 가공된 표면조도 (Ra) 결과는 알루미늄 절삭에서 0.35 a, 탄소강 절삭에서 0.50 a 이었으며, 모우드 평균치가 0.218, 경사도가 0.245°인 상용주축 B에서는 0.25 a, 0.40 a와, 모우드 평균치가 0.188, 경사도가 0.223°의 상용주축 C에서는 0.30 a와 0.20 a로 측정되었다. 따라서 진동 모우드 평균치와 모우드 경사도가 적어 진동특성이 좋을 것으로 예측된 주축이 절삭실험에서도 가공정밀도가 우수함을 확인할 수 있었다.

진동모우드 평균치가 0.131이고, 경사도가 0.152°로 상용주축 보다 진동특성이 우수한 실험용 주축으로 동일한 조건에서 절삭한다면, 연삭수준(중심선 평균조도 Ra = 0.2 a 이내)의 가공정밀도를 기대할 수 있겠으며, 따라서 이들 진동모우드 특성으로 주축 정밀가공 성능을 예측하고 평가할 수 있었다.

여기서 정밀가공 성능평가를 위하여 본 논문에서 진

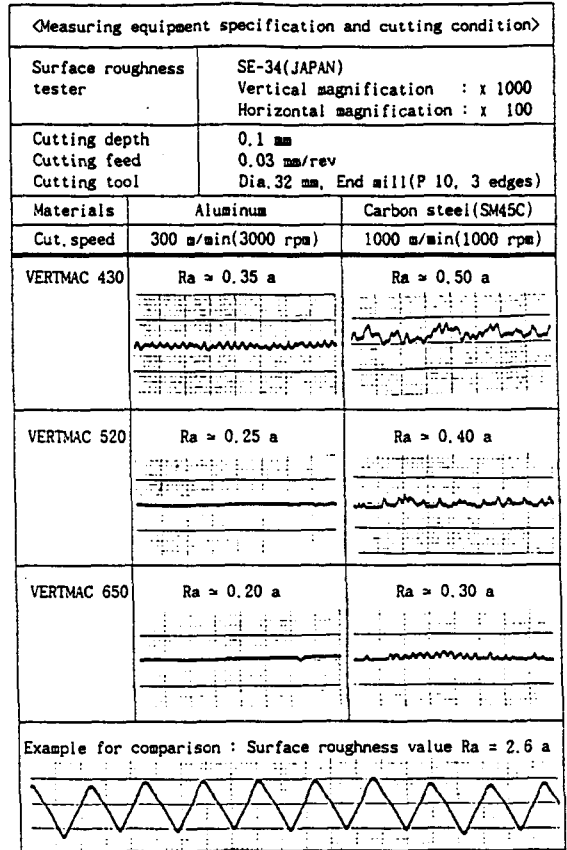


Fig. 7 Cutting surface roughness due to vibration mode conditions of spindles

동모우드 특성의 두가지 판단기준으로 고려한 각 주축들에서 계산된 진동모우드 평균치와 모우드 경사도의 두 변수에 대한 상호 상관계수(Correlation coefficient)를 계산한 결과는 0.884로서, 따라서 이들 두 변수로 주축에 대한 정밀가공 성능을 평가한다면 상호 신뢰도는 88.4%가 되므로, 어느쪽 변수로도 주축이 정밀가공 성능을 평가하여도 큰 차는 없다고 할 수 있겠다.

또한, 가장 양호한 진동모우드 특성을 갖는 실험용

주축의 모드 결과를 상관계수 1로 기준할 때, 각 상용주축의 진동모우드 결과에 대한 상관계수는 상용주축 A는 0.331이고, 상용주축 B는 0.497, 상용주축 C는 0.826로서, 여기서 상관계수 값이 큰 경우가 진동모우드도 더 양호하다고 판단할 수 있겠으며, 따라서 상용주축 C가 A 보다 진동모우드 특성이 더 양호하며, 정밀가공 특성도 좋다고 할 수 있겠다.

이상의 주축 정밀가공 성능평가를 위한 절차를 요약하여 흐름도로 표시하면 Fig.8과 같다.

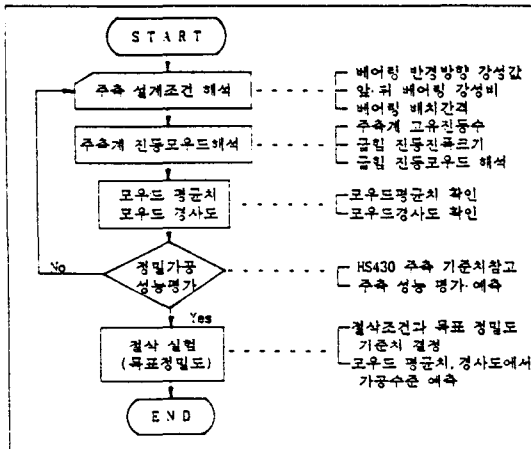


Fig.8 Flow chart for the performance evaluation of main spindles

4. 결 론

정밀가공 전용주축으로 개발한 실험용 주축조건에서 굽힘 진동모우드 해석을 실시하여 진동특성이 우수한 주축조건을 제시할 수 있었다. 또한 이들 진동특성으로 주축의 정밀가공 성능을 예측하고 평가하기 위하여, 상용주축들로 가동상태에서 굽힘 진동진폭 크기를 측정하였고, 최적 절삭조건에서 가공시편에 절삭실험을 실시하여 진동특성이 우수한 주축이 정밀가공 성능도 우수함을 확인하였다.

이들 실험해석 결과를 요약하면 다음과 같다:

- 1) 주축 진동특성으로 모드 평균치, 모드 경사도를 계산하고, 굽힘 진동진폭 크기를 측정한 결과, 자체 개발한 실험용 주축의 진동특성이 가장 우수함을 확인할 수 있었다(Table 3).
- 2) 본 논문에서 주축 진동특성 판단기준으로 고려한 모드 평균치와 모드 경사도에 대한 상호 상관계수는 0.884로서, 이것은 어느 한쪽의 판단기준을 적용한 진동특성 해석이 약 12% 이내의 오차임을

뜻한다. 그리고 실험용 주축의 진동모우드를 기준으로, 상용주축들의 진동모우드에 대한 상호 상관계수를 계산하여 해당 상용주축의 정밀가공 성능을 상대적으로 평가할 수 있었다.

- 3) 실험 환경상 상용주축들로 알루미늄과 탄소강 시편에 절삭실험을 실시한 결과, 진동모우드 평균치와 경사도가 적은 주축의 가공정밀도 결과가 양호함을 확인하였으며, 또한 이들 해석결과로 해당 주축의 정밀가공 성능을 예측 및 평가할 수 있었다.

따라서, 제시된 진동모우드 특성에 의한 주축 정밀가공 성능평가 기법은 실제 생산현장에서 기술적 경제적으로 용이하게 응용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 부수적으로 안정된 진동모우드 특성을 가지며 정밀가공에 유리한 주축조건으로는 고속회전 특성을 갖는 초정밀급 고강성 베어링을 적정 간격범위에서 앞·뒤 강성비를 1:1에 가깝게 배치해 주어야 함을 확인하였다. 그러나 황삭과 정밀가공을 동시 처리하는 기존 상용주축들은 앞·뒤 베어링 강성비를 2:1 이상으로 배치시킨 고강성위주의 주축구조들로서, 이들 진동모우드는 강성비가 커질수록 불량해지므로, 정밀가공에는 불리한 주축조건임을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Weck, M., SPILAD Program Manual, WZL TH Aachen, 1988.
2. Lee, C. H., Statische und dynamische Optimierung von Spindel-Lager-Systemen, Diss., TU Berlin, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1991.
3. 박보용, 김종관, "진동특성을 고려한 고속주축 설계", 한국정밀공학회 논문집, 92-9, pp.149~156, 1992.
4. 김종관, "진동특성을 고려한 공작기계의 정밀 고속주축 개발에 관한 연구", 인천대학교 대학원 박사학위 논문, pp.77~92, 1992.
5. Pittroff, H., Rimrott, U. A., "Stiffness of Machine Tool Spindle", ASME, 77-WA/Prod-42, pp.1~12, 1977.
6. Ewins, D. J., Modal Testing Theory and Practice, B & K Report, pp.19~85, 94~111, 1990.