

〈論 文〉

# 고속주축의 회전정밀도 성능평가에 관한 연구

A Study on the Evaluation of Rotational Accuracy of High Speed Spindle

김 종 관\* · 이 중 기\*\*

Kim, Jong Kwan and Lee, Jooung Kie

〈1995년 4월 24일 접수 ; 1995년 9월 11일 심사완료〉

**Key Words :** Rotational Accuracy (회전정밀도), Oil Viscosity (유지점도), GAP-Sensor (비접촉식 변위계), Motion Behavior (운동거동)

## ABSTRACT

For evaluation of rotational accuracy performance of high speed machine tool spindle system, the characteristics of main spindle and tool motion behavior are presented by means of three point accuracy testing method. The results of experiments and analyses are as follows: (1) The high speed spindle rotational accuracy can be evaluated by the combination of the spindle and tool motion behavior. (2) The spindle motion behavior increases up to more than 4 times the tool motion behavior. (3) For the influence of oil viscosity on spindle and tool taper application, 32 cSt of oil viscosity showed the most satisfactory result for rotational accuracy. (4) In order to improve the rotational accuracy of high speed machine tool spindle system, it is needed to reduce the combination error. This can be achieved by improving the working accuracy and supplying the proper lubrication with contact area at the spindle and tool.

## 1. 서 론

최근 절삭가공능률 향상을 위하여 공작기계의 주축은 고속화 되고 있으며<sup>(1)</sup>, 특히 자동 공구교환을 하는 머시닝 센터에서의 가공정밀도는 주축과 공구간의 테이퍼(taper) 부의 결합상태가 중요한 문제이다<sup>(2)</sup>. 즉 공구교환에 의한 공구 결합부의 오차는 주축 회전시에 진동을 일으키는 큰 원인이 되기 때문

이다. 또한 주축은 회전시에 회전수의 2승에 비례하는 원심력이 생기므로 미소한 편심오차가 발생해도 고속회전시에는 불안정한 진동현상이 생기게 되어 가공정밀도는 물론이고 안전성 면에서도 좋지 못한 결과를 나타내게 된다. 따라서 고속회전시 회전정밀도의 향상을<sup>(3)</sup> 위해서는 주축의 테이퍼 결합부에 공구를 장착시킨 상태에서 주축과 공구 사이의 회전정밀도 상관관계에 대해서도 연구할 필요가 있다고 생각되지만, 결합부의 이들 특성에 관한 연구<sup>(4)</sup>의 예는 많지 않는 실정이다. 또한 머시닝 센터의 자동 공구교환 장치에서 공구교환시 테이퍼 부에 도포되어 있는 유지점도가 회전정밀도에 큰 영향을 미치지만 이

\*정회원, 조선대학교 공과대학 기계공학과

\*\*조선대학교 대학원

들 특성도 깊은 연구가 되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실험을 위해 특별히 제작된 주축전용 실험장치를 이용해서 저속역(300 rpm), 중속역(6000 rpm), 고속역(12000 rpm)에서 주축계 회전정밀도 평가방법으로 주축축과 공구축의 인선 운동거동(radial 흔들림) 및 축심의 운동거동을 실험 및 고찰하여 주축과 공구접촉면 조건이 주축과 공구의 회전정밀도에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

## 2. 주축 회전정밀도 측정방법

공작기계 주축계 회전정밀도 측정방법으로 주축의 반경방향 회전정밀도를 마스터 볼(master ball)을 이용하여 측정된 결과를 극좌표로 표시하는 방법과<sup>(5)</sup>, 정압 공기 베어링등의 회전오차를 측정하기 위한 광학적 측정법, 진원도 측정원리에 의해 공작물의 단면형상을 측정하므로써 주축의 회전 오차성분을 정밀하게 측정할 수 있는 3점법에 의한 회전정밀도 측정법<sup>(6,7,8)</sup> 마스터 볼과 검출기를 0° 위치와 180° 회전시킨 상태에서 회전축의 회전오차와 마스터 볼의 형상오차를 비교분석하는 반전법등이 사용되고 있다. 본 연구에서는 이들 방법중 3점법에 의한 회전정밀도 측정법을 사용하여 주축회전수와 주축과 공구접촉면 조건과 회전정밀도 관계를 해석하였다.

지금 Fig. 1에서와 같이 3개 변위 센서  $S_a, S_b, S_c$  가 각도  $\psi$  및  $\tau$ 의 간격으로 중심  $O$ 를 향하여 배치되어 있다. 점  $O$ 를 통과하는 직교좌표계를  $X-Y$ 라 하고  $X$ 축에서 회전각을  $\theta$ 로 한다. 피 측정물의 회전중심  $O'$ 는 일반적으로 점  $O$ 와는 일치하지 않지만 근방에 있으므로, 피 측정물의 평균반경을  $r_0$ 라 하면 피 측정물의 형상은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(\theta) = r_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos k\theta + B_k \sin k\theta)$$

각 변위센서의 출력  $S_a, S_b, S_c$ 는 다음과 같이 된다.

$$S_a(\theta) = Ra - r(\theta) - y(\theta)$$

$$S_b(\theta) = Rb - r(\theta - \psi) - y(\theta) \cos \psi + x(\theta) \sin \psi$$

$$S_c(\theta) = Rc - r(\theta + \tau) - y(\theta) \cos \tau + x(\theta) \sin \tau$$

여기서  $Ra, Rb, Rc$ 는 변위계와 점  $O$  사이의 거리,  $x(\theta), y(\theta)$ 는  $x, y$  방향의 흔들림을 나타낸다. 센서의 출력에 계수 1,  $a, b$ 를 각각 곱하여 합계출력  $S$ 를 다음식에서 계산한다.

$$S(\theta) = Sa(\theta) + aSb(\theta) + bSc(\theta)$$

따라서 윗식을 이용하여  $X$  방향 및  $Y$  방향의 레이디얼(radial) 흔들림을 다음식에서 구할 수 있다.

$$x(\theta) = [Sb(\theta) + r'(\theta - \psi) \cos \tau - (Sc(\theta) + r'(\theta + \tau) \cos \psi)] / \sin(\psi + \tau)$$

$$y(\theta) = -r'(\theta) - Sa(\theta)$$

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

주축의 회전정밀도 실험에 사용한 주축구조는 Fig. 2와 같이 built-in형 AC 스피들 모터가 내장되어 조립된 초고속용 수평식 머시닝센터 구조로, 주축 내부에 조립된 접시 스프링 탄성력으로 인장되는 draw bar로 공구를 주축 테이퍼 면에 접촉시키며, 장착된 공구의 반경방향 단면은 셀프커팅(self cutting)하여 편심오차 성분 및 불균형질량을 완전제거시킨 상태에서 Fig. 3과 같이 주축축 3개( $S_1 \sim S_3$ ), 공구축 3개( $S_4 \sim S_6$ )의 변위측정용 갭 센서를 분할

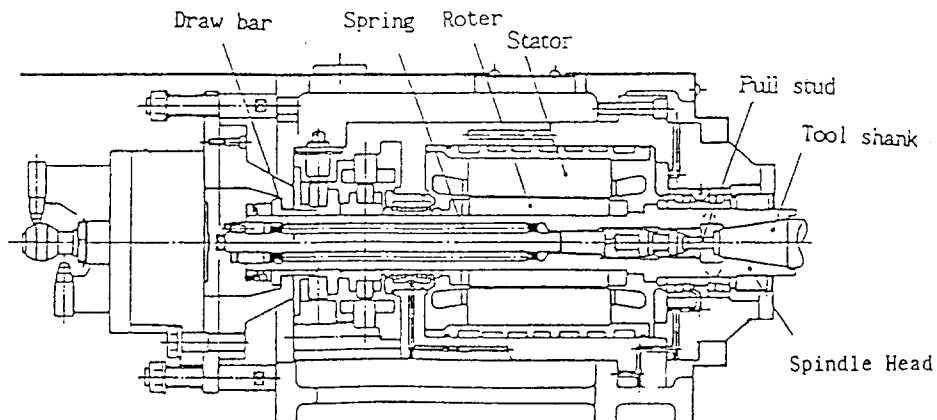


Fig. 1 The principle of three point method of measuring rotational accuracy

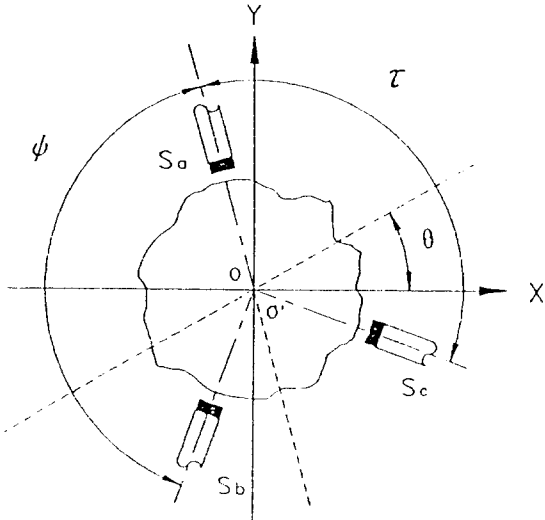


Fig. 2 Structure of experimental spindle(Max. speed 12000 rpm, NT40)

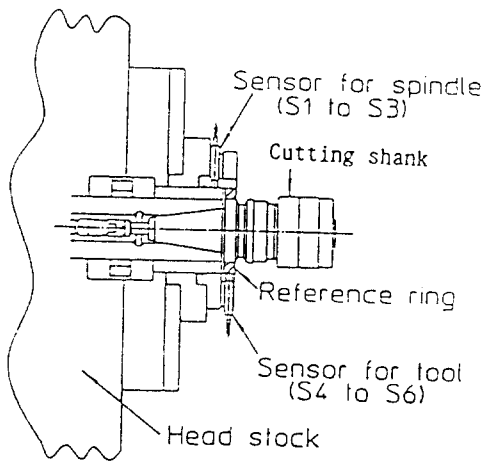


Fig. 3 Three point method of measuring rotation accuracy

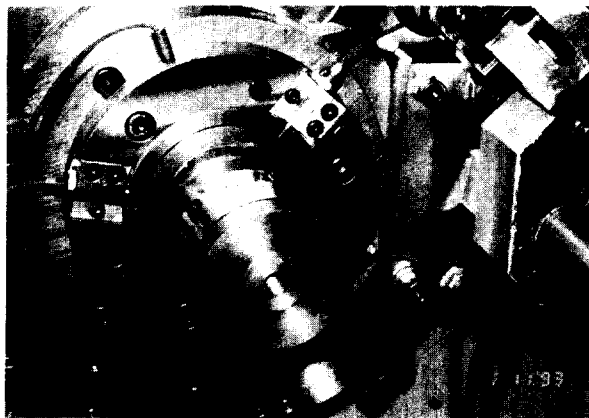
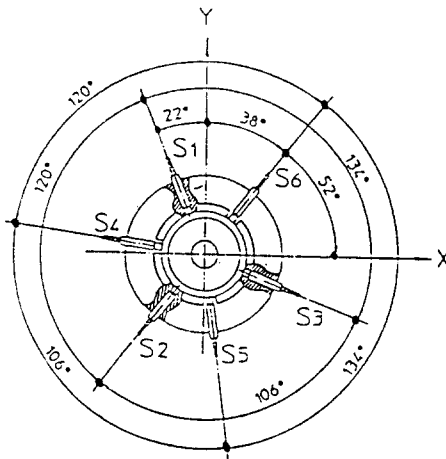


Fig. 4 General view of measuring equipments

배치시켜 실험하였다.

Fig. 4는 측정장치의 형상이고, Fig. 5는 회전정밀도 측정해석 시스템 구성도이다.

상기 Fig. 5에서 실험에 사용된 비접촉식 와전류 변위 갭 센서의 명세는 AEC-5505형으로 측정범위 0~2 mm, 출력  $\pm 5V(5mV/\mu m)$  Rout 250  $\Omega$ , 분해능 0.5  $\mu m$ , 주파수 특성 DC 20 kHz-2db, 진직성  $\pm 0.5\%$  이내이며, 갭센서 conector는 와전류 방지용 AEC-25PS-6을 사용하였다. DC 증폭기 KYOWA YA-506B 형, 저 패스 필터는 KYOWA MS 523을 사용하였으며, Intelligent signal processing system으로 CANOPUS사 HYP AQ-6200 자료 수집 장치를 사용하였다.

### 3.2 실험방법 및 실험

실험주축에 자체제작하여 셀프 커팅시킨 공구를

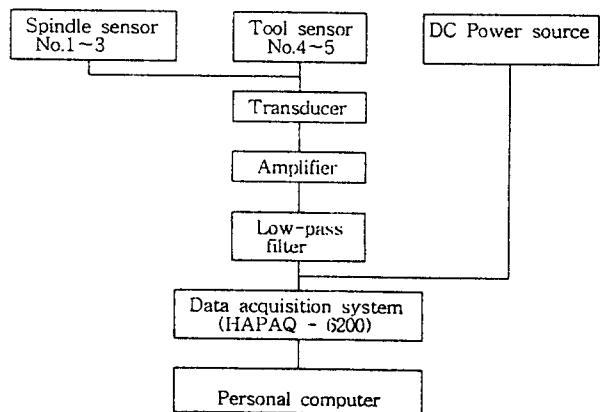


Fig. 5 The arrangement of the measuring equipments

**Table 1** Rotational accuracy testing parameters

측정실험 내용	측정실험 조건
주축과 공구접촉면 조건	건조면, 32cSt 유지도포, Grease 도포
주축회전수	저속역(300rpm), 중속역(6000rpm), 고속역(12000rpm)
회전정밀도 측정내용	주축과 공구인선의 운동거동(Radial진동) 주축과 공구축심의 운동거동

장착시킨 상태에서 저속(300rpm), 중속(6000rpm), 고속(12000rpm)의 3종류로 회전시키면서 주축과 공구축에 설치된 6개의 와전류변위 갭 센서에서 얻은 출력으로 주축의 회전정밀도 평가지표로 주축의 진동 레벨과 레이디알 흔들림을 측정하기 위하여, 회전수와 관계없이 주축 1회전당 거동상태를 256점으로 샘플링하여 주축과 공구축 X, Y 방향의 측정면 형상, 축심궤적의 측정 자료를 증폭기와 필터, 그리고 초고속 자료 수집 장치(HAPAQ-6200)를 이용하여 해석하였으며, 또한 주축과 공구 테이퍼 결합면에 도포한 유지점도 조건(건조면, 점도 32cSt oil, 그리스 상태)이 주축과 공구축의 회전 정밀도에 어떠한 영향을 미치는가 실험을 통하여 평가했다.

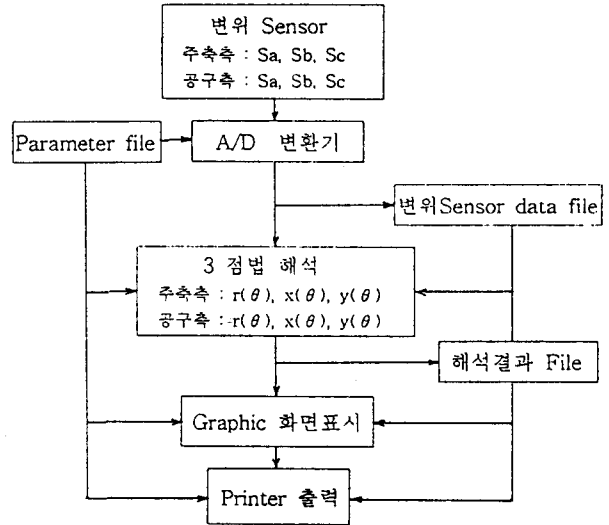
실험에서 주축 1회전당 거동상태의 샘플링 파라메터로 샘플링 시간과 해석 가능 주파수는 300 rpm에서 780 $\mu$ sec, 512 Hz, 6000 rpm에서 39.0 $\mu$ sec, 10240Hz, 1200 rpm에서 19.5 $\mu$ sec, 20480 Hz가 된다.

여기서 건조면 상태란 주축과 공구축 접촉면을 아세톤만으로 닦아낸 상태를, 유지 점도 32 cSt와 그리스 도포는 양쪽 접촉면에 고르게 도포한 상태를 말한다.

본 실험에서 회전정밀도 측정실험 조건은 Table 1과 같다.

### 3.3 측정결과와 처리

측정된 자료를 2장의 3점법 해석이론에 의하여 Fig. 6과 같이 처리하였다. 처리방법은 Fig. 3의 주축축과 공구축에 장착되어진 변위 센서( $S_a, S_b, S_c$ )에서 측정되어진 자료들을 해석하여 피측정물 형상으로 주축과 공구축 단면형상  $r(\theta)$ 와 레이디알 흔들림  $x(\theta), y(\theta)$ 를 구하게 되며, 여기서 얻어진 값들은 그래픽 화면과 프린터에 의해서 출력시켰다.



**Fig. 6** Flow chart of process analysis

## 4. 측정결과 및 고찰

주축의 회전정밀도를 진원도 측정원리에 의하여 주축과 공구축 회전 오차성분을 정밀하게 측정하기 위하여 3점법에 의한 회전정밀도 측정법을 사용하였으며, 주축회전수별(저속 : 300 rpm, 중속 : 6000 rpm, 고속 : 12000 rpm), 유지점도별(건조면, 32 cSt, Grease 도포)로 주축의 회전정밀도 평가를 주축과 공구의 인선운동거동, 축심운동거동을 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 7~9과 같다.

Fig. 7은 주축과 공구접촉면이 건조면상태의 경우로 저속, 중속, 고속에서 주축축의 변위 센서( $S_1 \sim S_3$ )와 공구축 변위 센서( $S_4 \sim S_6$ )에서 측정된 출력 파형 측정 자료에서 해석된 주축과 공구의 운동거동으로 (1)은 주축과 공구인선의 운동 거동, (2)는 주축과 공구축심의 운동거동 결과이다.

본 논문에서 주축계 회전정밀도의 평가지표인 인선 운동거동 (1)에서는 궤적의 내권, 외권의 수로서 축이 1회전하는 동안에 몇번의 진동이 생기는지를 알 수 있고, 축심 운동궤적의 재현성을 평가할 수 있으며, 직교좌표로 나타낸 축심의 운동거동 (2)는 주축과 공구 및 공구의 주축에 대한 상대운동의 합성으로 나타나는 평균적 운동궤적으로써, 주축 베어링이나 하우징 및 테이퍼 결합부 강성의 방향의존성으로 어느 쪽으로 흔들림이 쉬운가를 평가할 수 있다.

주축과 공구 인선의 운동거동 측정결과 (1)에서 주축축의 운동거동은 레이디알 방향 흔들림이 저속

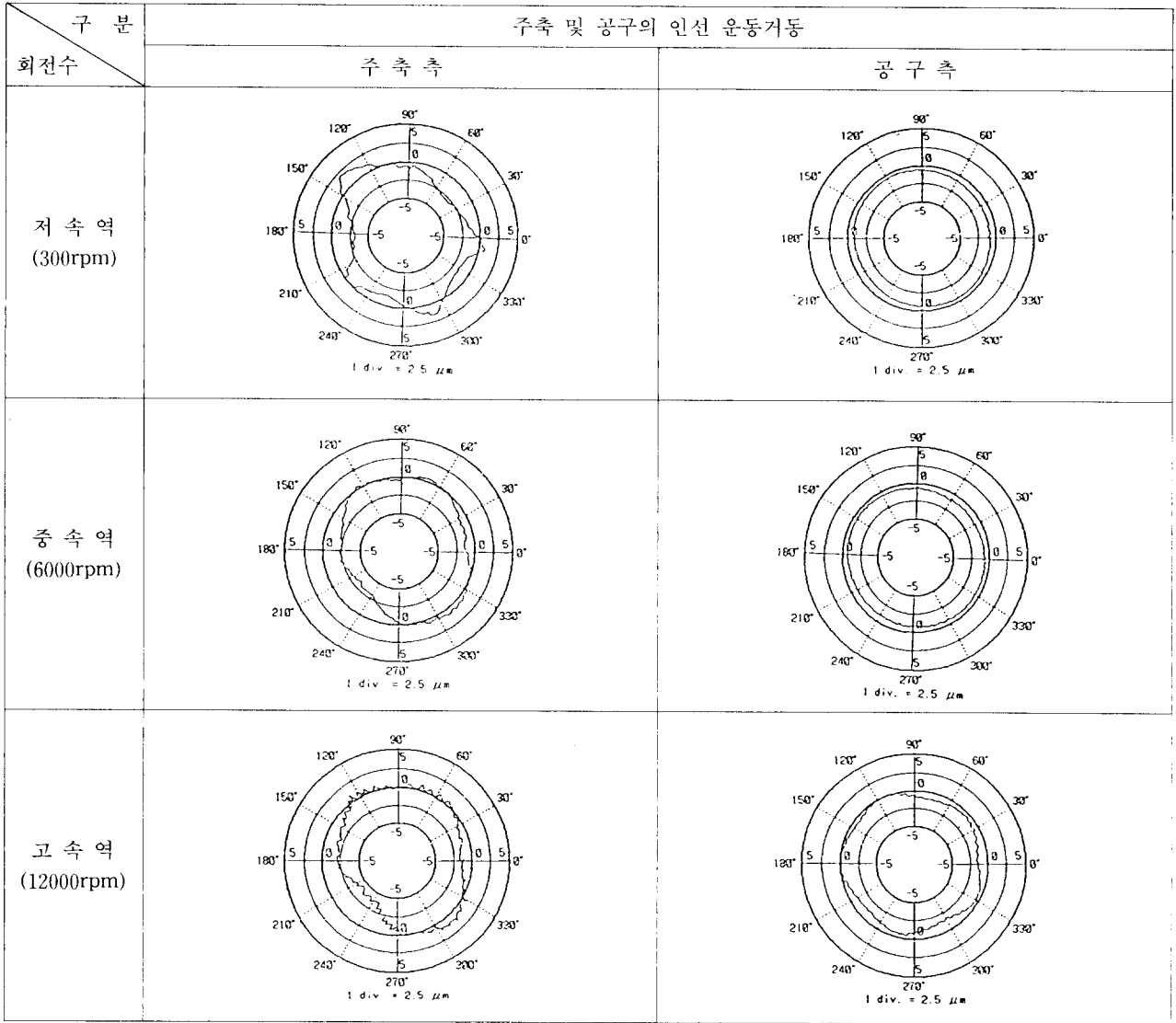


Fig. 7 Spindle and tool motion behavior in dry condition(1)

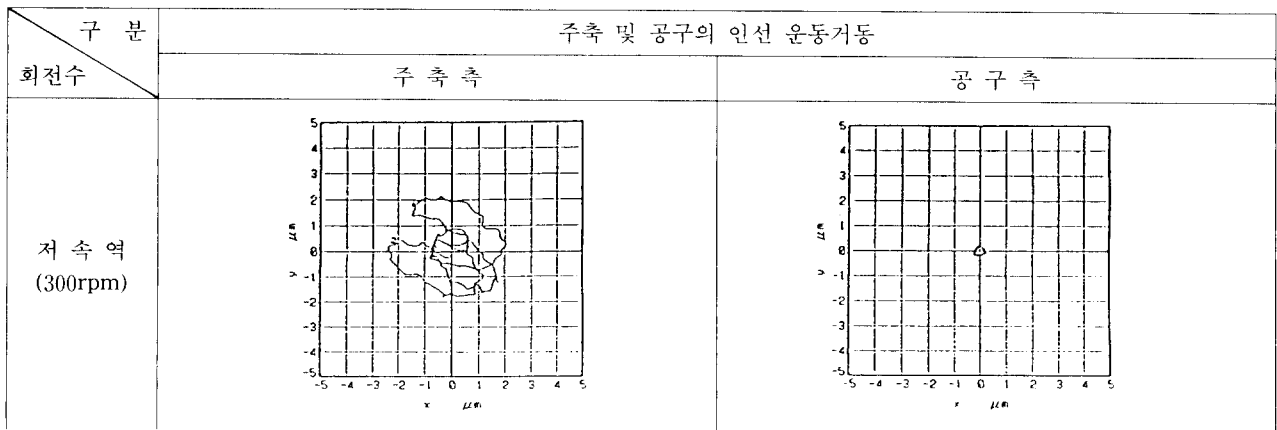


Fig. 7(2) Continue

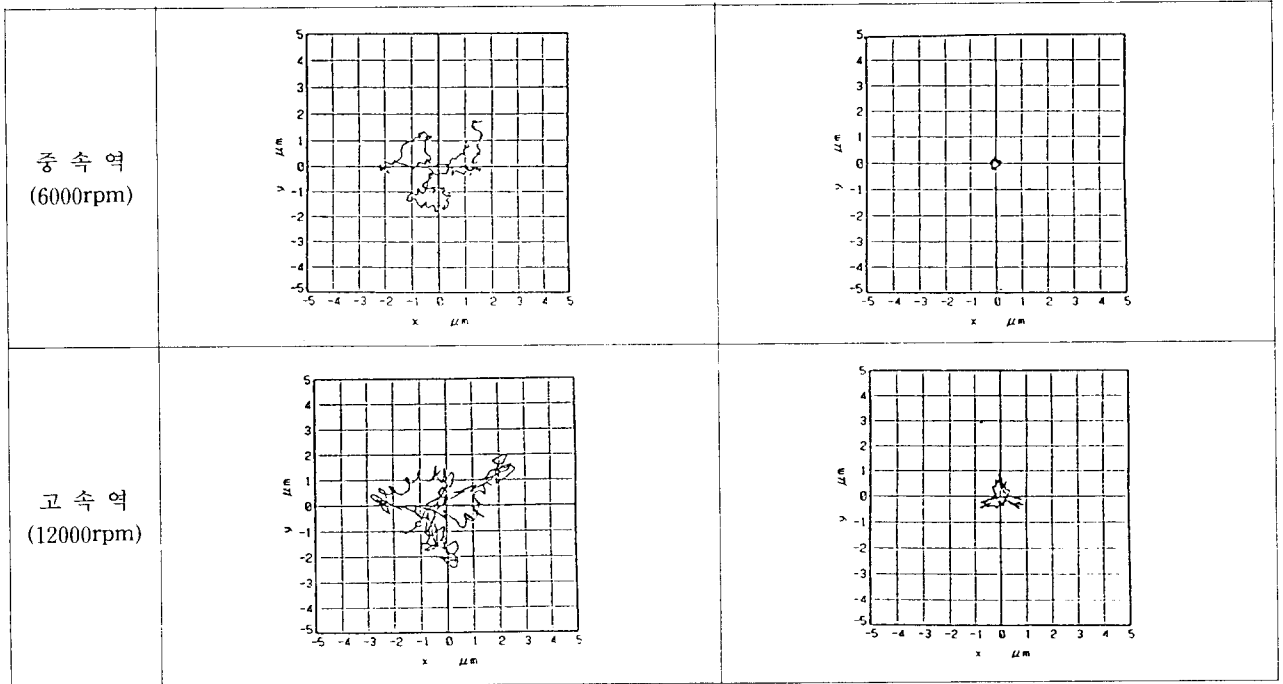


Fig. 7 Spindle and tool motion behavior in dry condition(2)

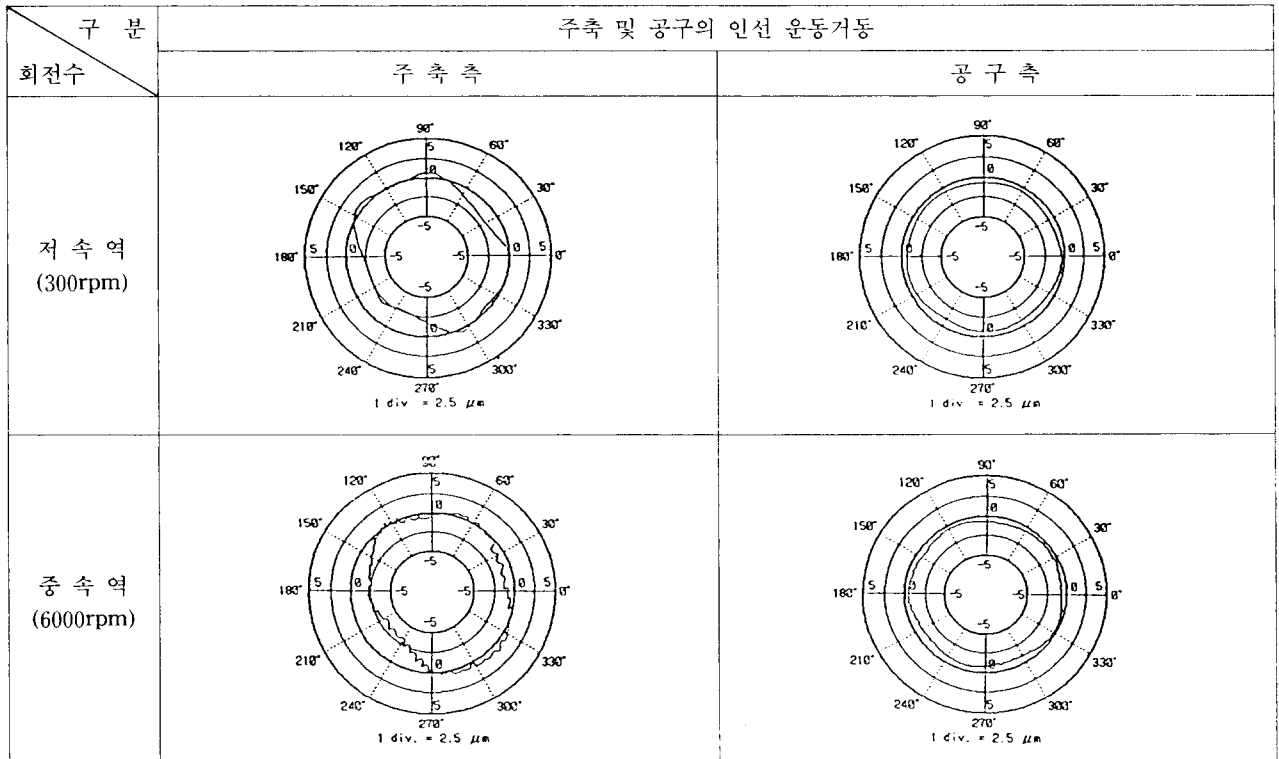


Fig. 8(1) Continue

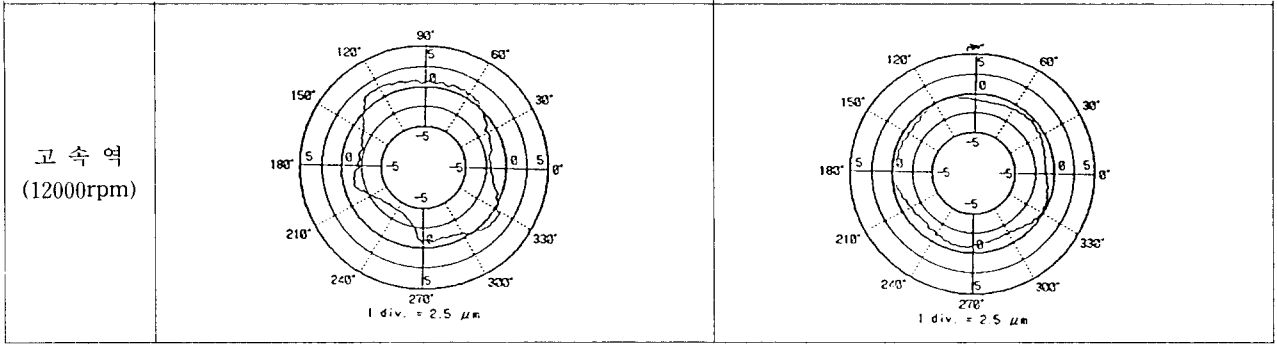


Fig. 8 Spindle and tool motion behavior in 32 cSt oil application(1)

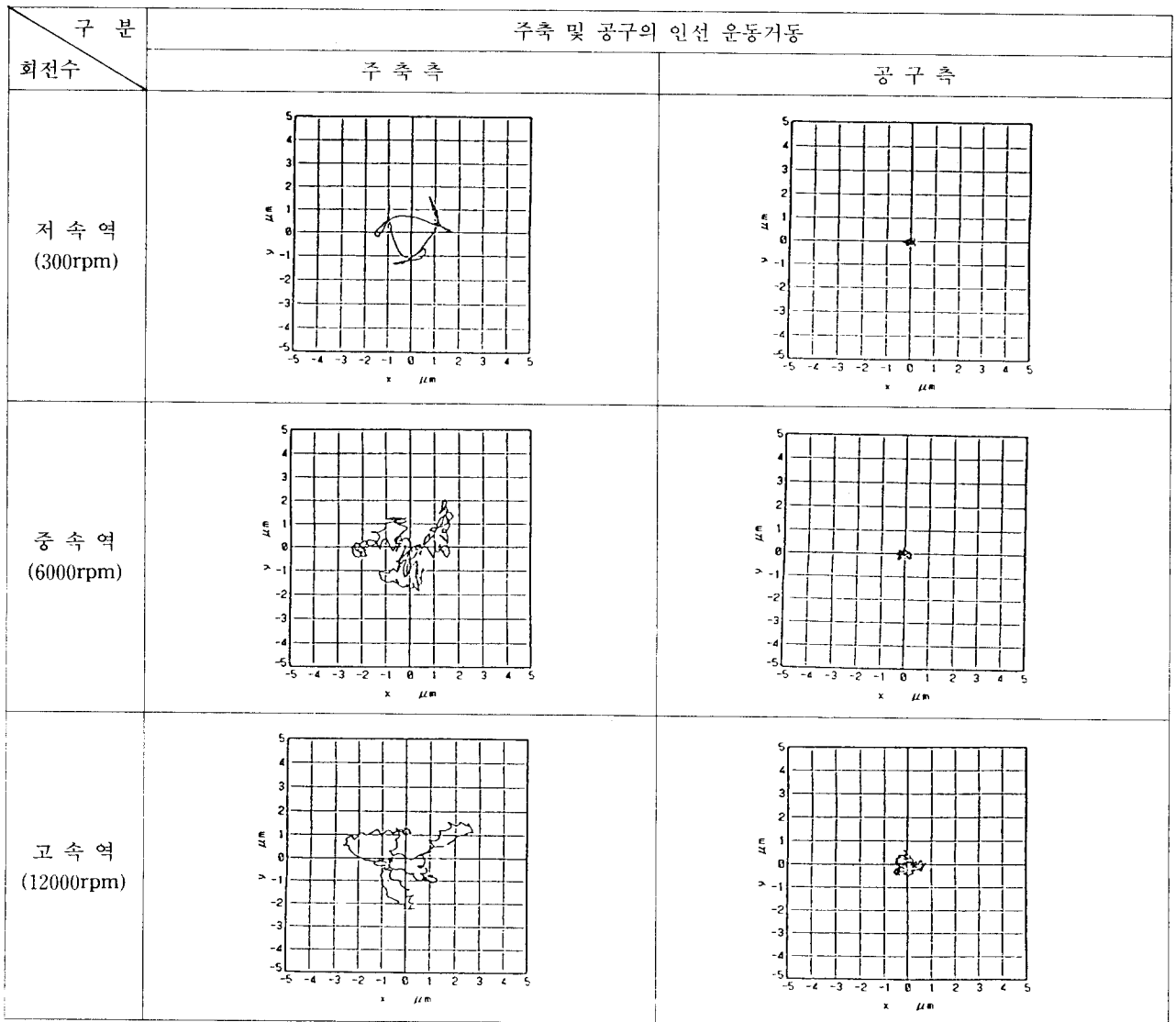


Fig. 8 Spindle and tool motion behavior in 32 cSt oil application(2)

에서는 약  $3.5\mu\text{m}$ , 중속  $4.0\mu\text{m}$ , 고속  $6.0\mu\text{m}$ 으로, 저·중속도역에서는 회전정밀도에 큰 영향을 받지 않지만 고속역에서 중속에 비해서 약 50% 증가되는 경향을 나타내고 있다. 공구측의 결과는 저속과 중속에서는 주축의 경우와 같이 약  $0.5\sim 0.6\mu\text{m}$ 으로 거의 유사한 결과를 나타내고 있으나 고속에서는 약  $1.5\mu\text{m}$ 으로 급격히 회전정밀도가 불량해짐을 알 수 있다. 여기서 공구측의 레이디얼 방향 흔들림이 주축측에 비해 아주 양호한 이유는 공구측의 측정공구를 장착시킨 상태에서 셀프커팅을 실시하였기 때문임을 고려하여야 한다.

같은 조건의 주축과 공구 축심의 운동거동 측정결과 (2)에서도 저속, 중속역에서는 (1)의 경우와 거

의 유사한 결과를 나타내고 있으나, 고속역에서는 약간 완만히 증가됨을 확인하였다.

Fig. 8은 주축과 공구접촉면이 유지점도 32 cSt의 경우로, 주축과 공구 인선의 운동거동 측정결과 (1)에서는 Fig. 6의 건조면 상태와 거의 유사한 결과이나 고속역에서는 오히려 더 양호한 결과를 확인할 수 있었으며, 공구측의 경우 역시 건조면 상태에서와 유사한 결과를 확인하였다.

같은 조건의 주축과 공구 축심의 운동거동 측정결과 (2) 역시 건조면 경우와 유사한 결과를 확인하였으며, 여기서 주축과 공구 접촉면이 건조면 보다는 유지점도 32 cSt 도포의 경우가 전반적으로 레이디얼 방향 흔들림이 적으므로 주축 회전정밀도가 양호할

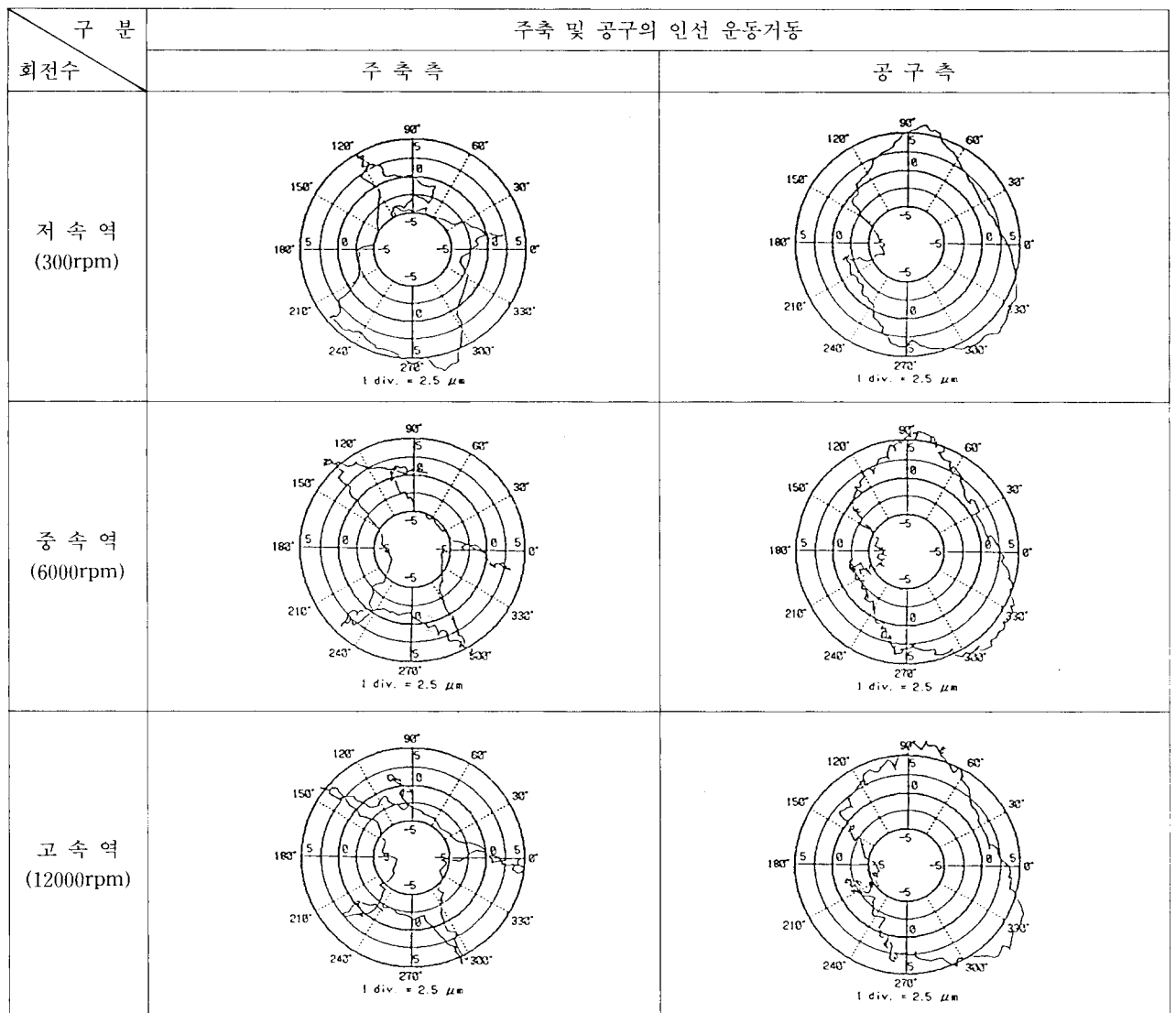


Fig. 9 Spindle and tool motion behavior in grease application(1)



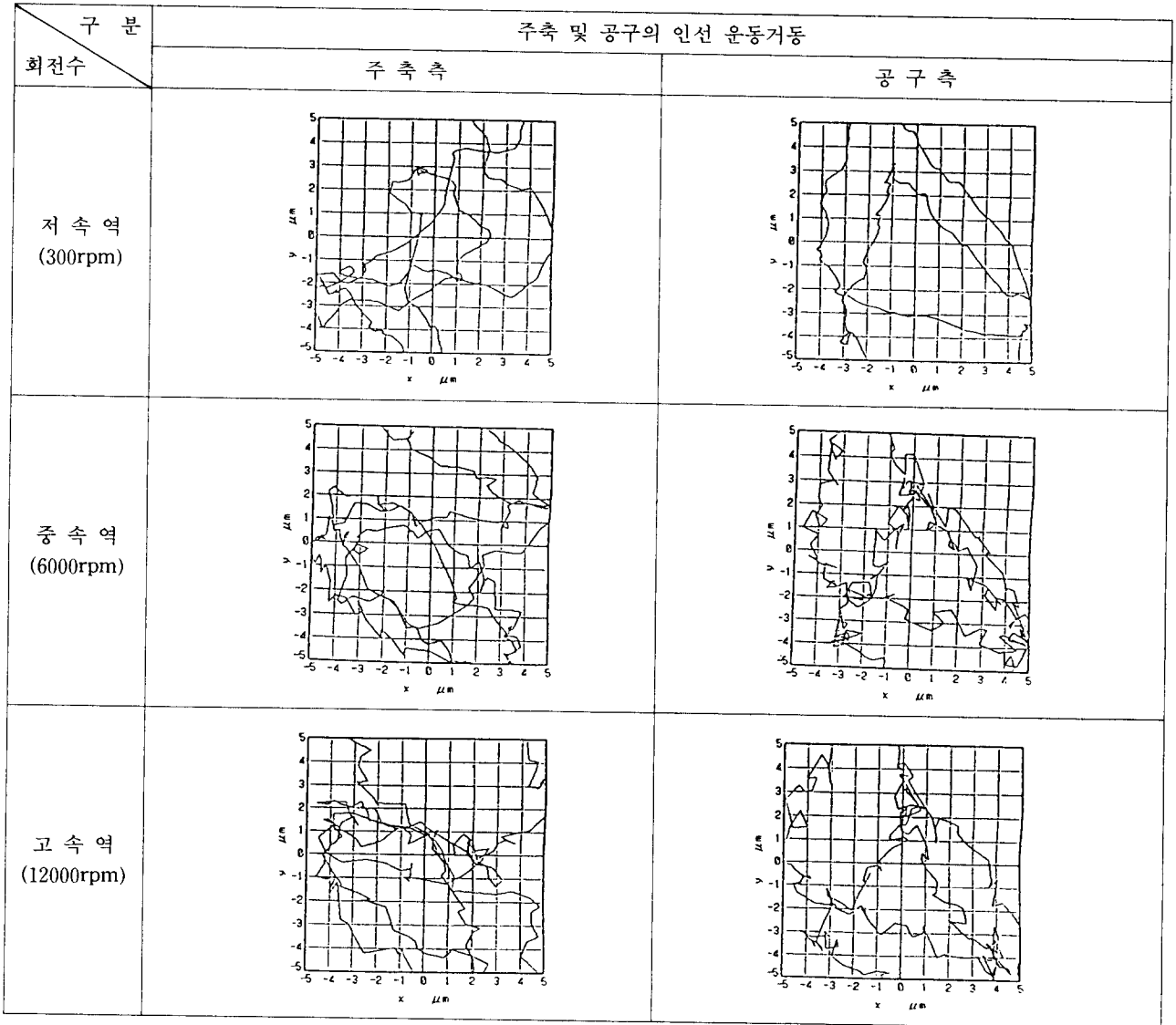


Fig. 9 Spindle and tool motion behavior in grease application(2)

것으로 생각된다.

Fig. 8은 주축과 공구접촉면에 그리스를 도포한 경우로, 앞서의 측정결과와 다르게 주축과 공구 인선의 운동거동 측정결과 (1)에서 저속과 중속에서  $13\mu\text{m}$ , 고속에서는  $15\mu\text{m}$ 로 앞서와 비교하여 약 3배의 큰 값을 나타냈으며, 공구측의 경우는 주축의 경우보다 오히려 큰값으로 저속, 중속에서  $15\mu\text{m}$ 을, 고속역에서는 약간 적은  $14\mu\text{m}$ 으로, 이는 앞서와 비교하여 약 15배의 큰 값을 나타내고 있다.

같은 조건의 주축과 공구 축심의 운동거동 측정결과 (2) 역시 본 실험에서는 확인할 수 없을 정도의 큰값으로, 주축과 공구접촉면에 그리스 사용은 주축의 회전 정밀도에 나쁜 영향을 확인할 수 있었다.

이상의 동일한 측정조건의 실험결과에서 주축계 회전정밀도 지표로 표시한 인선의 레이디얼 방향 흔들림과 축심 운동거동은 주축측의 경우 저속역(300 rpm)에서 중속역(6000 rpm)까지는 거의 유사한 결과를 나타냈지만, 본 실험장치의 최고회전수인 고속역(12000 rpm)에 이르면 급격히 불량해짐을 확인하였으며, 공구측 경우도 저속에서 중속역까지는 거의 유사한 결과이나, 고속역에서는 급격히 증가되는 결과를 확인할 수 있었다. 또한 주축과 공구접촉면의 3가지 조건에서 건조면 상태와 유지점도 32cSt 도포의 경우는 유사한 측정결과를 나타냈으나, 전반적으로 유지점도 32cSt을 도포한 경우가 공구장착에 기름이 감쇄효과를 주어서 더 양호함을 확인할 수 있

**Table 2** Rotational accuracy value of spindle and tool

도포조건	주축회전수 (rpm)	회전정밀도(인선의 운동거동)측정결과	
		주 축 측	공 구 측
건조면	300	3.5 $\mu$ m	0.5 $\mu$ m
	6000	4.0 $\mu$ m	0.6 $\mu$ m
	12000	6.0 $\mu$ m	1.5 $\mu$ m
32 cSt	300	4.0 $\mu$ m	0.5 $\mu$ m
	6000	4.5 $\mu$ m	1.0 $\mu$ m
	12000	5.5 $\mu$ m	1.5 $\mu$ m
Grease	300	13.0 $\mu$ m	14.5 $\mu$ m
	6000	13.0 $\mu$ m	15.0 $\mu$ m
	12000	15.0 $\mu$ m	14.0 $\mu$ m

있으며, 그리스 도포의 경우는 유막두께에 의한 주축과 공구간의 틈새 발생과 고르지 못한 도포조건 등으로 주축 및 공구측 모두 회전정밀도가 불량해진다고 생각된다.

지금까지 측정실험을 통해서 고찰되어진 정량적인 주축과 공구의 회전정밀도 측정결과를 변수별로 정리하면 Table 2와 같다.

### 5. 결 론

공구회전형 공작기계인 머시닝센터 주축계의 회전정밀도 성능을 평가하기 위하여 주축 및 공구거동 특성을 3점법을 이용하여 측정하고, 주축계 회전 정밀도 측정 전용프로그램을 사용하여 해석하였다. 주축의 회전수별(저속: 300 rpm, 중속: 6000 rpm, 고속: 12000 rpm), 주축과 공구접촉면의 상태별(건조면, 유지점도 32 cSt 도포면, 그리스 도포면)로 측정 실험 및 해석결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주어진 실험조건에서 주축의 회전정밀도는 주축의 운동거동과 공구운동거동의 합성으로 평가할 수 있다.
- (2) 실험조건에서 저속, 중속역까지는 주축과 공구의 운동거동 평가결과가 유사하게 나타났으며, 고속역에서는 Table 2에서와 같이 증가됨을 확인하였다.

(3) 주축과 공구접촉면이 건조면이나 32 cSt 유지도포의 경우가 운동거동 결과가 양호하였으며, 그리스 도포면은 불량한 결과를 확인하였다. 또한 건조면 보다는 32 cSt 유지도포의 경우가 더 양호한 회전정밀도를 갖게됨을 확인하였다.

4) 고속회전시 주축의 회전정밀도를 보다 향상시키기 위해서는 주축과 공구의 결합오차를 줄여야 하며, 따라서 이들 접촉부의 가공정밀도 향상과 함께 3)항에서 확인된바와 같이 적당한 점도의 유지도포가 필요하다.

### 후 기

이 논문은 1993년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

### 참 고 문 헌

- (1) 西村眞禎, 1988, マシニングセンタにおける高速化—機械構造と要素—, 機械と工具, 第32卷, 第7號, p. 24.
- (2) 堤政臣, 阿武芳郎, 江幡延男, 1982, 1983, 7/24 テ-ハ 結合部の剛性に關する 研究(第一報, 第二報, 第三報), 日本機械學會論文集(C編) 第48卷, 第431號, p. 1050, 第49卷, 第442號, p. 1101.
- (3) 澤邊雅二, 1979, 高精度回轉軸の回轉精度測定法との問題点 精密機械, 第45卷, 第10號, p. 80.
- (4) Juan M. Porrás Martiez, 1980, 齊藤義夫, 伊東諒: 工作機械主軸のテ-ハ結合部の剛性, 精密機械, 第46卷, 第2號, p. 242.
- (5) 垣野ほか, 1977, 軸回轉精度に關する研究(第1報) —工具回轉型の半徑方向 回轉精度の新しい測定法— 精密機械, 第43卷, 第6號, p. 720.
- (6) 三井, 1982, 精度診斷技術の研究(3点式主軸回轉精度測定裝置の開發), 日本機械學會論文集(C編), 第48卷, 第425號, p. 115.
- (7) 貴木, 大園, 1966, 3点眞圓度測定法の一展開, 精密機械, 第32卷 第12號, p. 831.
- (8) 三井公之: 精度診斷技術の研究(3点式主軸回轉精度測定裝置の開發), 日本機械學會論文集(C編), 第48卷, 第425號, p. 115.