

공압식 소재물림 가이드부쉬 시스템의 설계 및 가공정도 평가

이재훈⁺, 이수민⁺, 박성훈⁺, 이시복⁺⁺
(논문접수일 2010. 04. 23, 심사완료일 2010. 11. 05)

Design and Machining Precision Evaluation of Pneumatic Clamping Type Guide-bush System

Jae-Hoon Lee⁺, Su-Min Yi⁺, Seonghun Park⁺, Shibok Lee⁺⁺

Abstract

Generally, a fixed type guide-bush system is installed during machining miniature work-pieces with high precision in the multi-task CNC lathe. But a conventional guide-bush system does not provide a constant clamping force under the condition of varying work-piece diameters. It is important to maintain a constant clamping force for guaranteeing machining precision. This paper proposes a new guide-bush system with a pneumatic clamping device for the CNC Swiss-turn lathe to keep constant clamping force with changes in work-piece diameters. Through performance tests, new clamping system developed in the study showed better machining precision at the cost of a small increase in the temperature of the system than conventional systems due to an increase in the frictional heat and a change in the heat transfer route.

Key Words : Pneumatic clamping type guide-bush(공압식 소재물림 가이드부쉬), CNC Swiss-turn lathe(스위스형 CNC 선반), High speed machining center (고속 머시닝 센터), Machining precision (가공정도)

1. 서론

최근의 정밀부품들에 대한 수요증가 경향과 맞물려서 정밀부품 가공용 공작기계의 생산성과 정밀성 향상을 위한 연구가 많이 이루어지고 있다. 생산성 향상을 위해서 주로

머시닝 센터(machining center)의 고속화가 이루어지고 있으며, 머시닝 센터의 고속 회전수에 의해 발생하는 회전축의 밸런싱(balancing)과 기어의 마찰 및 마모의 문제를 해결하기 위해서 내장형 모터(built-in motor) 방식이 사용되고 있다⁽¹⁾. 그리고 이러한 모터 내장형 스핀들 시스템의 동특성⁽²⁾,

⁺ 부산대학교 기계공학부
⁺⁺ 교신저자, 부산대학교 기계공학부 (sblee@pusan.ac.kr)
주소: 609-735 부산시 금정구 장전2동 부산대학교

벨런싱⁽³⁾, 동강성(dynamic stiffness), 채터(chatter) 및 최적화 등에 대한 많은 연구가⁽⁴⁻⁷⁾ 이루어지고 있다.

하지만 이런 연구들과 비슷하게 내장형 모터 시스템이 채용되고 있지만 독특한 소재물림과 가공방식을 가진 스위스형 CNC 자동선반(CNC Swiss-Turn Lathe)에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이며, 스위스형 CNC 자동선반에서 필수적인 장치로, 선삭 지점 근처에서 가공 소재를 지지하는 가이드부쉬(Guide bush)에 대한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구는 스위스형 CNC 자동선반에서 소재를 안정적으로 지지하여 가공정밀도 향상에 기여하는 가이드부쉬 시스템에 대한 설계를 변경하여 가공정밀도를 향상시키는데 목적이 있다. 이번 연구에서 기존의 고정식 가이드부쉬 시스템과 달리 소재의 미세한 직경변화에 대해서 일정한 소재 물림력을 유지해 줄 수 있는 공압식 소재물림장치를 설계/제작하였으며 가공정밀도 향상에 대해 직접 가공실험을 통하여 검증하였다.

2. 스위스형 CNC 자동선반 및 가이드부쉬 시스템

2.1 스위스형 CNC 자동선반

본 연구에서의 스위스형 CNC 자동선반의 스핀들 시스템은 가로 길이가 약 300-400mm인 소형이며 치과 및 정형외과용 임플란트 및 정밀 전자기판의 검사장비용 탐침(probe)^(8,9)과 같이 작고 정밀한 제품을 만드는 용도로 사용된다.

이러한 자동선반은 스핀들의 중심축에 위치한 중공에 소재가 삽입되어 척(chuck)에 의해 체결되며, 이 상태에서 스핀들과 소재가 함께 회전하면서 소재의 절삭이 이루어진다. 소재는 주로 가늘고 긴 원형 단면의 봉재(bar) 형상으로 후위에서 바-피더(bar-feeder)를 통해 자동 공급되며, 소재의 전위 가공 완료 후 가공품이 절단되면 바-피더에 의해서 가공 소재를 필요한 만큼 앞으로 밀어내어 공급한 후, 다시 가공하는 과정이 반복적으로 이루어진다. 목적하는 가공품의 길이가 항상 일정하지 않을 수 있으므로 긴 소재를 필요한 길이만큼 가공한 후 잘라내는 것이 가공소재의 낭비를 막고 소재의 장/탈착 시간을 줄일 수 있어 생산성이 향상될 수 있다^(10,11).

스위스형 CNC 자동선반의 스핀들, 소재, 가이드부쉬, 가공 툴 및 바-피더와 같은 요소들의 배치와 구성이 Fig. 1에 개념적으로 잘 나타나 있다. 전술한 바와 같이 직경이 작고 길이가 긴 소재가 스핀들 중심부의 중공을 가로질러 장착되고 이를 지지하기 위해 전위에 가이드부쉬, 후위에 바-피더

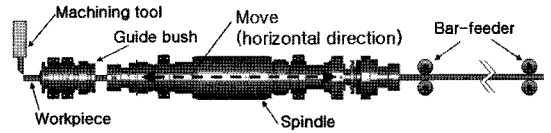
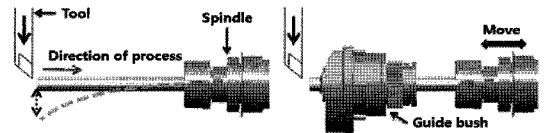


Fig. 1 Spindle system with a long work-piece



(a) Typical lathe without guide-bush (b) Swiss-type lathe with guide-bush

Fig. 2 Typical and Swiss-turn lathe

가 각각 설치된다. 바-피더는 볼러 형태 또는 파이프형태로 이루어져 있으며 긴 소재를 지지하고 소재를 뒤쪽에서 앞으로 공급하는 역할을 한다. 스핀들은 가공 중 전후로 수평 이동하여 가공품의 선삭지점을 변경시킬 수 있다.

2.2 가이드부쉬 시스템

일반적인 선반은 주축이 소재와 함께 회전하지만 수평 이동하지는 않으므로 만약에 직경이 작고 직경에 비해 길이가 긴, 즉 세장비가 큰 소재를 가공하게 된다면 소재의 강성이 낮아져 Fig. 2(a)와 같이 가공지점에 절삭력에 의한 처짐이 발생할 수 있다. 스위스형 자동선반의 경우 Fig. 2(b)와 같이, 가공지점 말단에서 가이드부쉬에 의해 소재를 지지하여 절삭력에 의한 소재의 처짐을 막을 수 있으며 이에 따라 정밀한 가공을 수행할 수 있다. 또한 긴 소재가 자동으로 스핀들의 중공을 통해서 공급될 수 있어 효율성 측면에서도 유리하다.

가이드부쉬를 크게 2가지로 분류하면 소재 지지부가 소재와 함께 회전하는 Fig. 3(a)와 같은 회전형과 정지되어 있어서 소재와 마찰 접촉되는 Fig. 3(b)와 같은 고정형으로 분류된다. 회전형 가이드부쉬는 스핀들과 가이드부쉬가 동기화되어 회전하는 Fig. 3(c)와 같은 동기화 시스템에 의해 소재와 가이드부쉬 접촉면 사이의 마찰을 줄여 준다. 하지만 동작기계의 회전속도가 고속화될수록, 가공소재의 직경이 작아질수록(10mm 이하) 회전형 가이드부쉬 보다는 고정형 가이드부쉬를 선택하는 추세이다. 이는 고속화에 따라 가이드부쉬 내의 베어링과 가이드부쉬-스핀들 간의 동기화 장치에 의한 진동과 소음 등이 문제가 될 수 있고, 또한 직경이 작은 소재에 적용할 수 있는 작은 내륜을 가진 베어링을 수급해

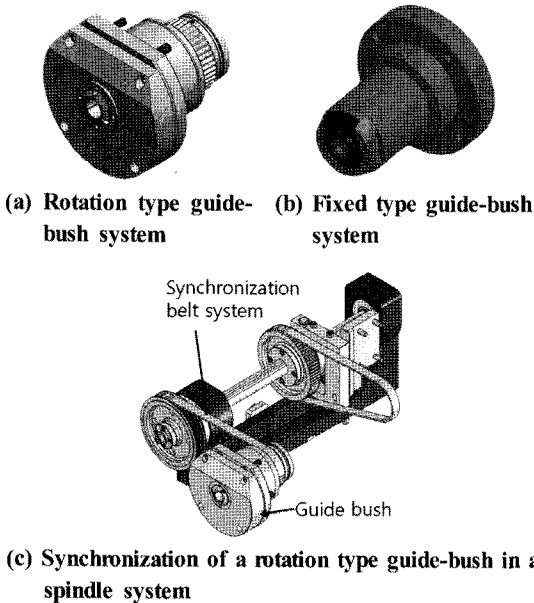


Fig. 3 Guide-bush systems

야 하는 부담도 줄일 수 있기 때문이다. 본 연구의 대상은 가공 소재가 4~7mm 직경을 가지는 소형 복합 CNC 자동선반의 가이드부쉬 시스템으로 가공소재의 직경이 작고 최고 15,000~20,000rpm의 고속에서 작동해야하므로 고정형 가이드부쉬를 채택하고 있다.

공작기계의 스핀들 시스템이 점차 고속화됨에 따라 가이드부쉬 시스템 역시 소음, 진동 및 열 발생 등과 같은 근본적인 문제가 대두되고 있는 실정이다.

3. 공압식 고정형 가이드부쉬의 설계

스위스형 CNC 선반에 공급되는 가공소재는 직경이 작고 길이가 긴 특징이 있으며, 소재의 생산 시에 소재 자체의 원통도, 진직도, 직경 등의 치수공차에서 비롯된 결함도 지니고 있다. 기존에 사용되던 가이드부쉬 시스템은 가공을 시작하기 전에 가이드부쉬에 설치된 너트를 수동으로 조여주어 콜릿(collet)을 오므라들게 만들어서 콜릿에 의해 소재에 작용하는 물림력(clamping force)을 조절할 수 있었다. 너트를 조여줄 때는 토크계지를 이용하여 콜릿의 변위를 조절하여 적절한 물림력이 작용하도록 만든다. 하지만 스위스형 선반의 특성은 가공 중 연속적으로 소재가 공급되므로 가공초기에 콜릿과 소재의 직경에 의해 초기의 물림력이 결정되고

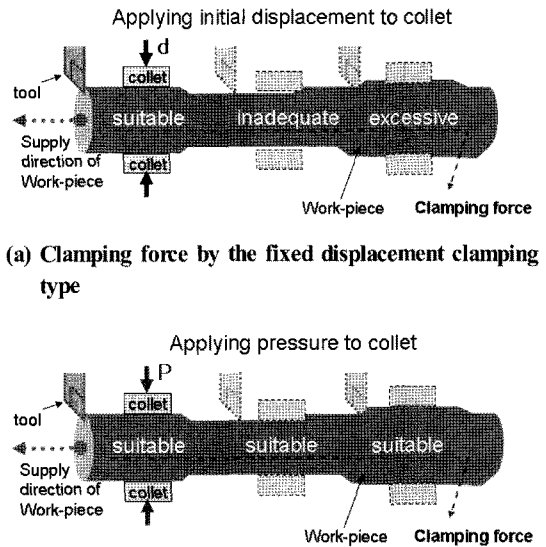
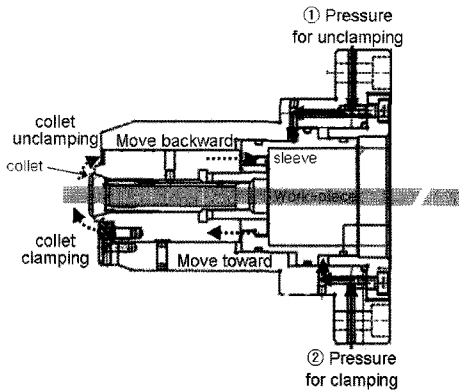


Fig. 4 Comparison of clamping system

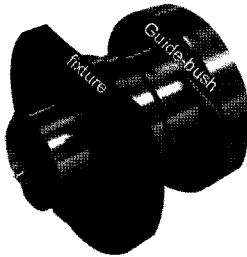
나면, 이후에 소재의 직경에 미세한 변화가 일어나게 되었을 때 소재의 물림력도 변화하게 된다. 소재의 직경변화에 따라 콜릿의 물림력은 Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 경우에 따라 작아지기도 하고 커지기도 한다.

고정형 가이드부쉬는 콜릿이 소재와 함께 회전하지 않으므로 마찰에 의한 콜릿의 마모와 마찰열에 의한 소재와 콜릿의 응착을 막기 위해 소재의 물림력을 크게 설정하지 않는다. 그러므로 가공 소재의 직경이 감소했을 때 소재와 콜릿 사이에 공극이 발생할 우려가 있고, 이에 따라 가공 시 소재의 처짐이 증가하여 가공정밀도를 떨어뜨리는 요인이 될 수 있다. 또한 소재의 직경이 작으므로 공극의 크기는 상대적으로 더 크게 작용할 수 있으며 직경이 큰 소재보다 강성이 낮으므로 같은 절삭력에서 소재의 처짐이 더 크게 발생하게 되어 가공정밀도를 떨어뜨릴 수 있다.

이러한 문제점은 고정밀도로 가공된 소재를 사용하면 어느 정도 피할 수 있겠지만 고정밀 소재는 생산단가가 높은 단점이 있다. 그러므로 낮은 단가의 저정밀도 소재를 사용하면서도 소재의 물림력을 일정하게 유지할 수 있는 가이드부쉬 시스템이 요구된다. 기존의 고정형 가이드부쉬를 고정변위식 소재물림(fixed displacement clamping type) 가이드부쉬라 할 때, 이를 개선하기 위해 소재의 직경 변화에도 소재 물림력이 일정하게 작용할 수 있도록 Fig. 4(b)와 같은 개



(a) Operation mechanism of the pneumatic clamping type

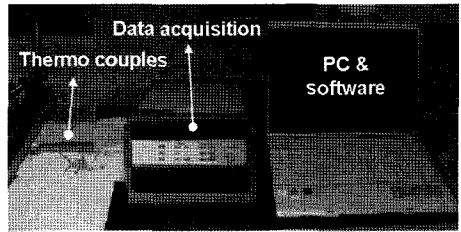


(b) External shape of the guide-bush system

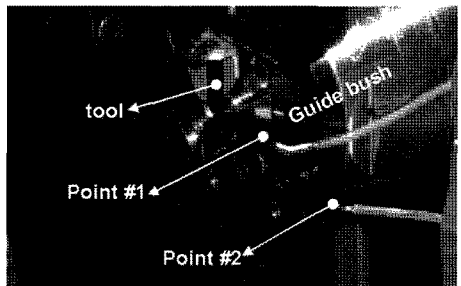
Fig. 5 Pneumatic clamping type guide-bush system

념의 공기압을 이용한 공압식 소재물림 (pneumatic clamping type) 장치를 적용하여 고정형 가이드부쉬의 성능을 개선하려 한다.

공압식 소재물림 방식이 적용된 가이드부쉬의 단면과 함께 공압에 따라 소재물림이 일어나는 구조가 Fig. 5(a)에 나타나 있다. 그림에서 ①, ②에 각각 공압이 작용할 때 슬리브가 압력을 받아 각각 전방 또는 후방으로 이동하게 되며, 이러한 이동이 콜릿으로 전달되어 소재를 물기도하고 풀기도 한다. 공압에 의해 슬리브에 일정한 압력이 전달되므로 콜릿은 일정한 물림력을 소재에 작용시키게 된다. 이러한 공압식 소재물림 방식을 적용하여 설계 변경 및 제작된 시제품이 Fig. 5(b)에 나타나 있다. 기존의 가이드부쉬와 공압식 가이드부쉬는 외부형태는 거의 동일하지만 가공 시의 실제적인 성능차이를 확인하기 위해 공작기계에 실제 장착하여 작동에 따른 발열 특성 및 가공정밀도를 평가하여 성능개선 정도를 정량적으로 확인하였다.



(a) Thermal experimental devices



(b) Measured location

Fig. 6 Thermal experimental setup

4. 성능 비교평가 실험 및 결과

4.1 가동 중 발열특성 실험방법 및 결과

공압식 소재물림 장치를 적용한 고정형 가이드부쉬 시스템을 직경 12mm이하의 소재 가공이 가능한 상용 CNC 자동선반에⁽⁹⁾ 장착하여 성능평가를 위한 실험 시스템을 구성하였다. 가이드부쉬의 가동 중 발열특성 실험을 위해 가이드부쉬 시스템에 열전대 (thermocouple)를 부착하고 그 신호를 데이터 습득장치(Data acquisition)를 사용하여 증폭(amp), A/D 변환하여 PC로 데이터를 저장하였다. 데이터 습득장치로 Agilent 34825A를 사용하여 다수의 센서에서 들어오는 신호를 다중 접속 방식으로 처리할 수 있었으며, 이에 따라 저장된 데이터를 바탕으로 시간에 따른 온도변화와 각 지점간의 온도 분포를 확인할 수 있었다.

실제 실험의 구성장치들이 Fig. 6(a)에 나타나 있고, 센서는 Fig. 6(b)와 같이 측정 가능한 위치 중 발열원과 가장 가까운 가이드부쉬의 외부부와 가이드부쉬와 케이스 부의 경계면에 부착하고, 실온이 20℃로 유지 가능한 항온 항습실에서 실험을 수행하였다.

실험은 우선 기존에 사용되었던 고정형 가이드부쉬 (고정 변위식 소재물림 방식)에 대해 소재가 물려져 있는 상태에서

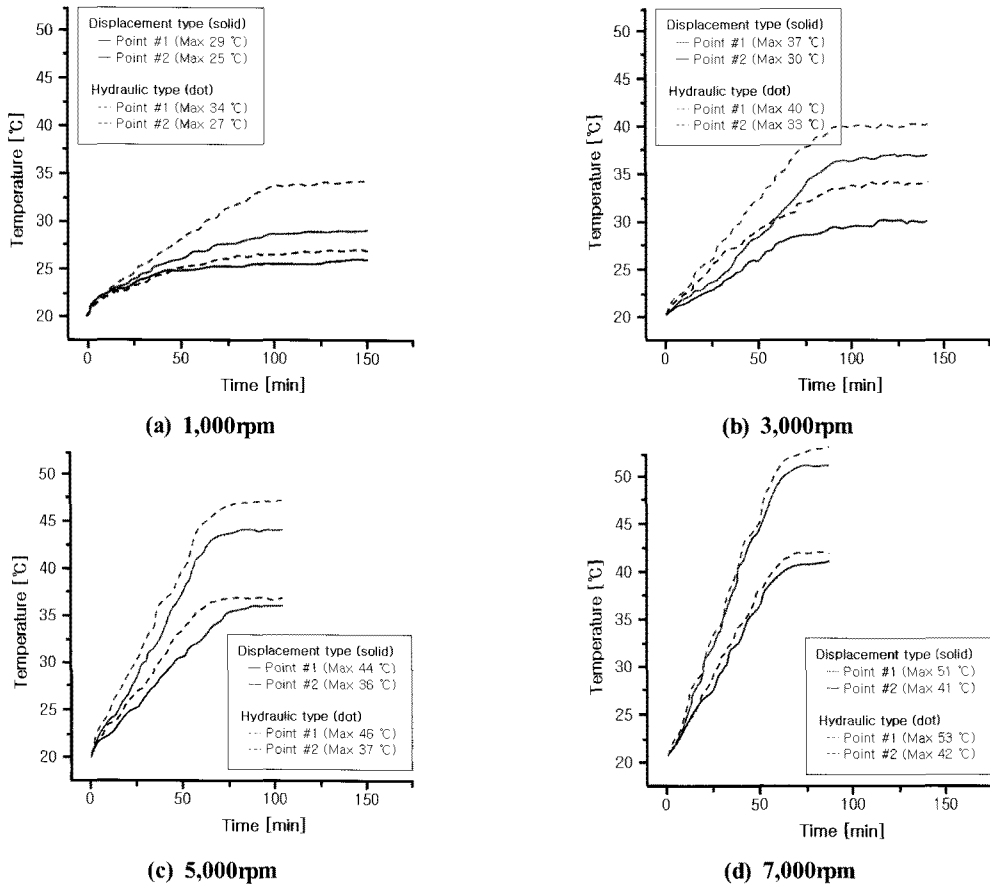


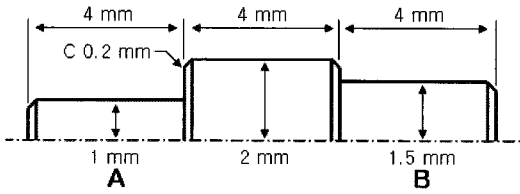
Fig. 7 Thermal experimental results

운전조건이 각각 1,000, 3,000, 5,000, 7,000rpm의 회전속도일 때 공작기계의 가동 후 온도변화를 측정하였으며, 이때 각 회전수에서 온도가 거의 평형 상태에 도달했을 때 실험을 중단하고 실험기계의 온도가 실온인 20°C 까지 떨어졌을 때 다음 실험을 실시하였다. 이후에 실험장치 내에서 가이드부쉬만을 공압식으로 교체 후 동일한 실험방법으로 실험을 수행하여 기존의 방식과 공압식으로 설계 변경된 가이드부쉬의 구동 시 온도 특성을 비교할 수 있게 하였다.

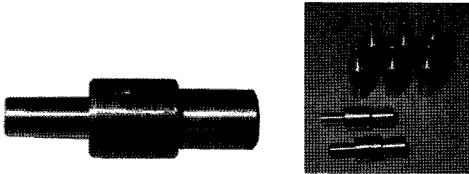
온도측정 실험결과에서 각각의 운전속도에 따른 온도-시간 분포를 Fig. 7에 정리하였다. 각 그래프에서 실선은 기존의 고정식 가이드부쉬인 고정 변위식 소재물림 방식을 나타내고 점선은 공압식 소재물림 방식을 나타낸다. 각각의 실험에서 Point #1이 Point #2보다 발열원에 가깝기 때문에 더 높은 온도가 측정되었으며, 운전속도가 상승함에 따라 정상 상태에 도달하는 시간이 줄어들고, 두 측정지점 간의 온도

Table 1 Temperature measurements (steady state, °C)

Condition		Guide-bush Type		Difference
RPM	Point	Fixed displacement	Pneumatic	
1,000	# 1	29	34	+5
	# 2	25	27	+2
3,000	# 1	37	40	+3
	# 2	30	33	+3
5,000	# 1	44	46	+2
	# 2	36	37	+1
7,000	# 1	51	53	+2
	# 2	41	42	+1
Average				+2.375



(a) Dimension of the machining sample



(b) Machined samples

Fig. 8 Machining samples

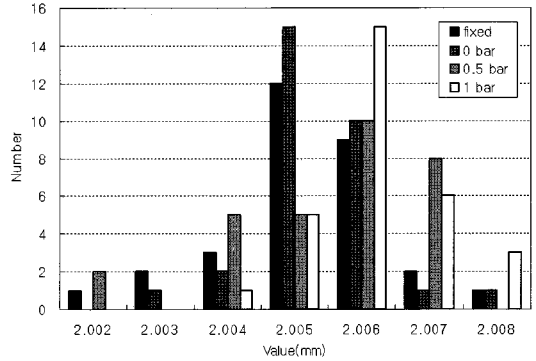
차이는 증가하는 경향을 보였다. 또한 각 운전속도별 실험에서 공압식 소재물림 방식이 고정 변위식 소재물림 방식 보다 더 높은 온도분포를 나타냈다.

각 운전 조건에서 정적상태에 도달했을 때의 온도를 Table 1에 나타내었으며, 기존방식의 가이드부쉬와 공압식으로 개선된 고정형 가이드부쉬 사이의 온도 차이에서 공압식 가이드부쉬가 Point #1과 Point #2에서 각각 평균 3°C와 1.75°C 높은 온도를 나타냈으며, 전체적으로는 평균 2.375°C 높은 온도차이를 보였다.

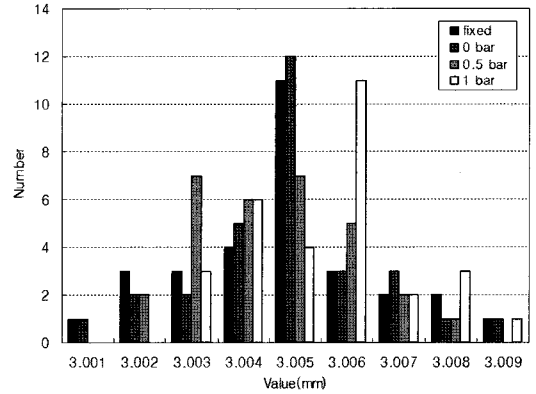
4.2 가공정도 평가 실험방법 및 결과

기존의 고정형 가이드부쉬에서 공압식으로 개선된 고정형 가이드부쉬로의 교체에 따른 가공정도 변화를 측정하기 위해 실제 가공실험을 수행하였고 가공샘플의 외경을 측정하였다. 먼저 고정변위식 가이드부쉬를 사용하여 가공실험을 실시하고 이후 공압식 가이드부쉬에 대한 실험을 실시할 때 고정변위식 가이드부쉬의 소재물림에 상응하는 공압을 가하여 실험을 실시하였으며, 공압식 가이드부쉬의 압력을 변경할 때의 가공정도 변화를 관찰하기 위해 추가적으로 압력을 0.5와 1.0 bar 상승시키며 가공실험을 수행하였다.

실험용 샘플의 치수를 Fig. 8(a)에 나타내었고, 영문자로 표시된 부분이 가공결과물의 측정지점을 나타낸다. 소재의 물림력에 따라서 가장 크게 영향을 받는 부분이 외경변화이므로 가공 샘플의 A, B 두 지점에 대한 외경을 측정하였다. Fig. 8(b)는 가공실험을 통한 샘플의 모습을 나타내며 가공 소재의 재료는 Brass를 사용하였다.



(a) Position A(φ 2mm)



(b) Position B(φ 3mm)

Fig. 9 Histogram of the measured dimensions of samples

실험은 한 회에 30개의 샘플을 반복 가공하였으며 각 실험 횟수에서 연속적으로 가공을 실시하였으며 다음 회로 넘어갈 때 유희시간을 30분 정도 삽입하여 절삭유와 소재를 교체하도록 하였다.

가공샘플의 A, B 측정지점에서 측정한 값을 Fig. 9에 히스토그램으로 나타내었으며, 여기서 fixed는 고정변위식 가이드부쉬, 그리고 0 bar, 0.5 bar, 1 bar는 공압식 가이드부쉬에서 추가적으로 인가한 공압을 나타낸다. Table 2는 전체 샘플에서 최대값, 최소값, 최대-최소값의 차이 그리고 평균값과 표준편차 및 표준편차의 변화량(%)을 나타냈다.

Table 2에 나타난 수치에서 추가 압력(additional pressure)이 0 bar 일 때의 가공결과를 보면 A, B 지점에서는 가공물의 최대 최소값의 변폭은 6 μ m에서 5 μ m로, 또 8 μ m에서 8 μ m로 감소 또는 일정한 값을 나타내었다. 또한 가공치수의 평균값은 약간 상승하였지만 표준편차 값은 두 지점에서 모두

Table 2 Experimental results of machining precision (mm)

Guide-bush type	Fixed displacement		Pneumatic (additional pressure)					
			0 bar		0.5 bar		1 bar	
Measured position	A	B	A	B	A	B	A	B
Max. value	2.008	3.009	2.008	3.009	2.007	3.008	2.008	3.009
Min. value	2.002	3.001	2.003	3.001	2.002	3.002	2.004	3.003
Max-Min	0.006	0.008	0.005	0.008	0.005	0.006	0.004	0.006
Average	2.0052	3.0048	2.005367	3.0049	2.0055	3.004533	2.006167	3.005533
Standard deviation	0.001243	0.001883	0.000928	0.001729	0.001408	0.001525	0.00095	0.00157
Variation (%, Standard deviation)	-	-	-25.348	-8.16399	13.29087	-18.9882	-23.575	-16.6213

감소하였으며, 기존대비 평균 17% 감소하여 가공정도가 향상되었음을 관찰할 수 있다.

공압식 가이드부쉬에 추가적으로 공기압을 0.5 bar와 1 bar 증가시켰을 때는 각 지점의 표준편차가 감소하였지만 0.5 bar의 A지점에서는 오히려 가공샘플 치수의 표준편차가 고정변위식보다 커졌음을 확인할 수 있어서 공압을 증가시켰을 때 일률적으로 상승된 가공정도를 보장한다고 말하기는 어렵다. 이러한 이유는 고정변위식 가이드부쉬에 의한 가공 시에 이미 어느 정도 최적화된 소재 물림력을 적용하고 있기 때문이고, 길고 직경이 작은 소재에 과도한 물림력이 작용할 때 물림력이 스핀들에 의한 소재의 원활한 수평방향 이동을 방해하여 가이드부쉬와 스핀들 사이에서 소재의 굽힘이 일어 날 수 있기 때문이다.

5. 결론

스위스형 CNC 자동선반의 가장 큰 특징 중 하나는 세장비가 큰 소재를 한 공정(One process)에 가공하는 것이며 이를 위한 강성 보강 장치인 가이드부쉬가 사용되며, 기존의 고정형 가이드부쉬의 경우 초기의 소재 물림력이 연속 가공 중 소재의 직경변화에 따라 변화할 수 있는 단점을 지닌다. 낮은 직경 공차의 정밀한 소재가 이러한 문제를 해결하는데 도움이 될 수 있지만 높은 단가에 의해서, 생산한 제품의 가격 경쟁력에서는 불리한 측면이 있다. 이에 따라 공기압을 통해 소재의 직경변화에도 일정한 소재 물림력을 제공할 수 있는 공압식 소재물림 방식의 가이드부쉬를 설계/제작하였으며 실험을 통해 구동 중 열적인 특성과 가공정도를 측정하였다.

실험결과에서 공압식 가이드부쉬의 경우 기존의 가이드부쉬 보다 구동에 따른 온도분포는 동일한 측정지점에서 3.125℃ 높은 결과를 보였지만 가공 정도 측면에서는 가공물들의 외경에 대한 최대 최소값 차이를 감소시키고 평균 17% 감소된 표준편차를 보여 개선된 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 추가적으로 공압을 증가시켜 가공한 실험에서는 최대 최소값의 차이는 줄어들었지만 표준편차는 일률적으로 감소하는 경향을 보이지 않았다.

향후 공압식 소재물림장치의 열적인 성능 개선을 위한 냉각장치 설계나 구조적 변경에 의해 냉각효율을 높일 수 있는 설계 방안에 대한 연구와 함께 소재의 재료와 직경에 따라 가공정도를 높일 수 있는 최적의 공압 범위를 찾는 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- (1) Cho, J. J., Kim, S. I., and Choi, D. B., 1993, "The dynamic analysis of spindle with a built-in motor," *Proc. of KSPE Autumn Conference*, pp. 91~95.
- (2) Park, K. B., Chung W. J., and Lee, C. M., 2007, "Model updating of high-speed spindle," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 2, pp. 7~12.

- (3) Moon, J. D., Kim, B. S., and Lee, S. H., 2006, "Development of the active balancing device for high-speed spindle system using influence coefficient," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, No. 9, pp. 978~987.
- (4) Altintas, Y. and Cao, Y., 2005, "Virtual design and optimization of machine tool spindles," *Annals of CIRP*, Vol. 54, No. 1, pp. 379~382.
- (5) Altintas, Y. and Week, M., 2004, "Chatter stability of metal cutting and grinding," *Annals of CIRP*, Vol. 53, No. 2, pp. 619~642.
- (6) Schulz, H. and Würzb, T., 1998, "Balancing Requirements for Fast Rotating Tools and Spindle Systems," *Annals of CIRP*, Vol. 47, No. 1, pp. 321~324.
- (7) Cao, Y., 2006, *Modeling of High speed machine tool spindle systems*, Doctor of Philosophy, The University of British Columbia, Canada.
- (8) Leeno Industrial inc., n.d., viewed 5 August 2009, <www.leeno.co.kr>.
- (9) Hanwha TechM, n.d., viewed 3 April 2009, <www.hanwhatechm.co.kr>.
- (10) Lee, J. H., Kim, M. S., Park, S. H., and Lee, S. B., 2008, "A study on natural vibration characteristics of small and high speed spindle system with a long workpiece," *Proc. of the KSNVE Annual Autumn Conference*, pp. 184~185.
- (11) Lee, J. H., Kim, M. S., Park, S. H., and Lee, S. B., 2008, "Natural vibration characteristics of the high speed spindle system with a long work piece due to supporting conditions of bar-feeders based on using FEM analysis," *Proc. of KSPE Autumn Conference*, pp. 585~586.