

# 초고속/초정밀 공작기계용 터빈구동형 에어스핀들 개발

\*이덕영<sup>1</sup>, 전창모<sup>2</sup>, 윤성진<sup>2</sup>

<sup>1</sup>대구대학교 자동차산업기계공학부, <sup>2</sup>(주)하이드롬

## Development of Air Spindle Driven by Turbine for The Ultra High Speed and Precision Machine Tool

\*D. Y. Lee<sup>1</sup>, C. M. Jun<sup>2</sup>, S. J. Yun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Div. of Automotive, Industrial & Mech. Eng. Daegu Univ. , <sup>2</sup>HYDROM Co., LTD.

Key words : Air Bearing, Spindle, Turbine

### 1. 서론

초고속/초정밀 스피들(spindle)은 내경 연삭기 및 미소 구멍 가공용 드릴링 머신과 같은 정밀 공작 기계와 섬유 기계, 원심분리기 등 다양한 산업기계에 적용되는 주요 핵심 요소이다. 따라서 일본, 미국 등 선진공업국에서는 초고속/초정밀 스피들에 대한 연구를 심도 깊게 수행하고 있으며, 일부 주요 산업분야에 이미 상용화하여 현장에 적용하고 있다. 그러나 이 분야에 대한 우리나라의 기술수준은 선진국에 대하여 설계 및 제작 면에서 초기단계에 있는 실정이다.

일반적으로 초정밀 가공을 위해서는 스피들의 속도가 60,000 rpm이상의 초고속 운전이 가능하여야 한다. 그리고 미세가공 및 초정밀 연삭을 위한 공구는 소형이므로 선삭 및 연삭 가공 작업을 할 때 주축의 속도를 높이기 위해 스피들의 성능이 고속에서도 안정된 고강성 즉 초저흔들림이 확보되어야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 주로 초고속/초정밀 가공분야에는 비접촉 베어링 형식인 에어베어링(air bearing) 구조의 스피들을 사용하는 것이 바람직하다. 에어베어링이 적용된 에어스핀들은 비접촉식이므로 저마찰로 인해 ①발열이 적어 초고속 회전이 가능하고, ②초정밀 회전 및 이송이 용이하며, ③고정밀도를 유지할 수 있으므로 공작기계의 성능 향상과 내구성을 증가시킬 수 있는 특징점을 가지고 있다.

그리고 기존에 사용되고 있는 에어스핀들의 경우, 대부분 모터 부가 스피들에 내장된 빌트인(built-in) 모터 구조로 되어있다. 빌트인 모터를 장시간 사용하면 쉽게 발열되어 스피들의 내구성 감소 등의 성능 저하 문제가 발생되고, 모터의 장착으로 스피들의 소형화가 어려우며, 초고속 모터의 사용으로 인한 원가 상승요인 등의 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 과제에서는 에어스핀들의 구동 형식을 에어를 동력으로 한 터빈(turbine) 형식을 적용하였다. 즉 앞서 언급한 빌트인 모터 에어스핀들의 여러 문제점들을 해결하기 위하여 스피들에 공급되는 에어의 유량에 의해 속도를 제어할 수 있는 터빈 형식을 적용하였다.

본 과제에서 개발한 터빈구동형 에어스핀들의 기본적인 성능을 확인하기 위해 틈새조건이 다르게 제작된 2 세트의 에어스핀들을 이용하여 정강성과 회전속도를 측정하였다. 먼저 정강성은 로드셀(load cell)을 이용하여 축의 선단부에 하중을 가했을 때 축의 변위량을 측정하였으며, 스피들 전체 변형 오차값을 보정하여 정강성을 구하였다. 그리고 상용회전속도 영역에서 공진이 발생하는지 확인하기 위하여 스피들의 위험속도를 주파수응답함수로 확인하였다.

### 2. 에어스핀들의 설계 및 제작

초고속/초정밀 회전에 적합한 에어베어링은 초정밀 기계가공기의 근본적인 성능을 결정해주는 주요 핵심 요소라고 할 수 있다. 에어베어링은 비접촉식이므로 축방향 및 반경방향의 하중 모두를 고려해야 한다. 에어 스피들의 구성 부품을 고려하여 오리피스(Orifice) 형태의 베어링으로 Table. 1과 같은 조합으로

결정하였다.

Table. 1 The constitution of bearing in air spindle

	Orifice No.	Direction	Remarks
Front Journal Bearing	6 x 2	circumferential	1 Set (J+J)
Rear Journal Bearing	6 x 2	circumferential	
Thrust Bearing	12 x 1 3 x 1	longitudinal	1 Set

에어스핀들의 각 부품은 샤프트(shaft), 하우징(housing), 베어링, 캡(cap), 스페이서(spacer), 공급부 등으로 구성되며 Fig. 1과 같이 3D 솔리드 모델을 이용한 형상설계를 적용, 조립 용이성과 상호 부품간의 간섭 등 설계착오부분을 제작 전에 검토하였다.

또한 베어링의 소재는 초정밀 회전에 유리한 고강도 황동으로 선정하였으며, 샤프트, 하우징, 스페이서 등의 구성 부품은 내마모 및 내식성 등에 유리한 조건을 갖추기 위해 SUS, Al7075 등의 소재를 적용하였다. 단 가공성의 문제점을 해결하기 위하여, 여러 조건을 적용하여 제품정밀도를 향상시키는 실험을 통하여 시제품 제작을 진행하였다.

구동부인 터빈은 18개의 반원형 형상의 홈으로 이루어져 있으며 샤프트와 일체형으로 제작하였다. 그리고 초고속/초정밀 에어스핀들 각 부품들은 그 특성상 높은 정밀도를 필요로 하기 때문에, 부품제작 후 정밀치수 측정으로 개별부품의 오차값이 2 μm이내에 있는지 확인하였다.

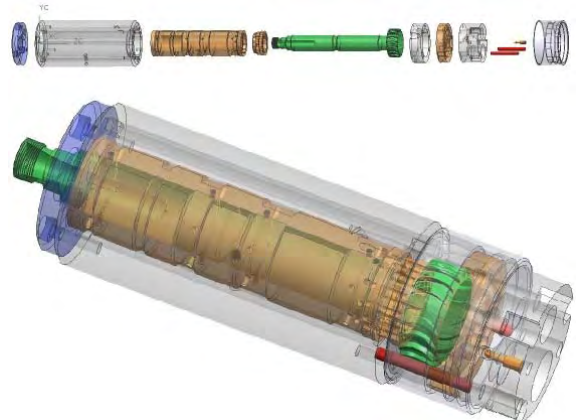


Fig. 1 3D modeling of air spindle driven by turbine



Fig. 2 Prototype of air spindle

Fig. 2는 제작된 에어스핀들 시제품이며 상용되는 스프링 콜릿(collet : ER8)을 장착하여 초소형의 다양한 툴이 사용가능하도록 고려하였다. 그 이유는 공작기계의 다양한 용도를 고려하여 차후 여러 소재의 연삭, 드릴링 등의 실장 테스트를 하기 위해서다.

### 3. 에어스핀들의 정강성 및 동강성 시험

본 과제에서 개발한 에어스핀들의 기본적인 성능을 알아보기 위해 틈새조건이 다르게 제작된 2 세트의 에어스핀들을 이용하여 정강성과 회전속도를 측정 한 결과는 Fig. 3과 Fig. 4와 같다. 여기서 틈새(clearance) 1은 틈새 2에 비해 베어링 틈새가 상대적으로 수  $\mu\text{m}$  작은 값이 유지되도록 조립하였다.

Fig. 3의 정강성 테스트 결과, 상대적으로 작은 틈새를 가지는 틈새 1은 3.03 kgf/ $\mu\text{m}$ , 틈새 2는 2.5 kgf/ $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이로부터 베어링 틈새가 클수록 강성은 낮아짐을 알 수 있으며, 일반적인 에어베어링의 특성인 강성과 틈새량이 반비례함을 확인할 수 있다. 틈새가 적을수록 강성 값은 올라가지만, 틈새를 적게 하기 위해서는 높은 가공정도가 뒷받침되어야 하기 때문에 동일 모델 에서 강성 값의 향상은 가공기술과 관련이 있다고 볼 수 있다.

회전 속도 테스트를 위해 베어링 에어 공급 압력을 5 kgf/ $\text{cm}^2$ 로 유지하고 터빈측의 에어는 유량 조절 밸브 시스템으로 조절하였으며, 반사식 타코메타(tachometer)로 주축의 회전속도를 측정하였다. Fig. 4에서 틈새가 큰 틈새 2의 회전 속도가 동일한 유량 조건에서 조금 더 증가한 것을 볼 수 있다. 즉 속도는 일반적인 에어베어링의 경향과 같이 틈새에 비례하는 것을 확인하였다. 단, 틈새가 클수록 상대적으로 강성이 떨어지므로 그 상관관계에서 성능과 부합하는 적정 틈새량의 선정이 필요하다. 개발된 에어스핀들은 약 100,000 rpm 정도의 최대 회전 속도를 가지며 사용가능 회전 속도 영역은 10,000 ~ 100,000 rpm이다.

상용 회전 속도 영역의 검증을 위해 에어스핀들의 고유진동수를 측정하여 위험속도영역을 확인하여 보았다. 충격해머로 가진하고 응답으로 가속도를 측정하였으며, 주파수응답함수는 Table 2와 같이 B&K의 Pulse 시스템을 사용하여 구하였다.

Fig. 5의 주파수응답함수 결과에서와 같이 피크 값이 얻어지는 주파수는 2.4 kHz이며, 회전수로 변환하면 약 144,000 rpm이다. 이는 개발한 에어스핀들의 상용회전속도 영역인 10,000 ~ 100,000 rpm에서 큰 문제없이 구동할 수 있다는 것을 보여준다.

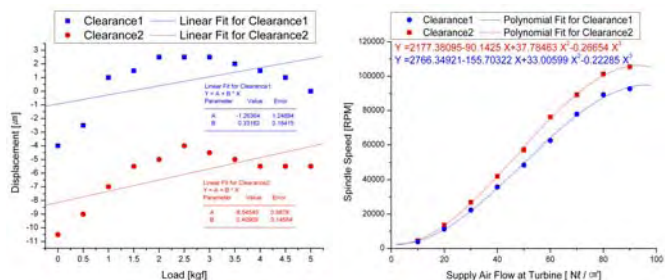


Fig. 3 Test results of static stiffness Fig. 4 Test results of spindle speed

Table. 2 Equipment lists of critical speed test

Contents	Equipment spec.
Impact Hammer	B&K 8202
Accelerometer	B&K DeltaTron 4508
Signal Conditioner	B&K NEXUS
Front-end	B&K 3560B
Signal Analyzer	B&K Pulse Labshop
Notebook	HP nc 8230

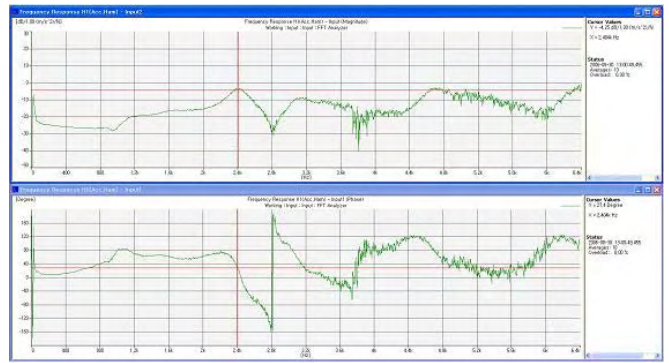


Fig. 5 Frequency response function and phase of air spindle(FRF test)

### 4. 결론

개발한 초고속/초정밀 에어스핀들은 회전 안정성을 위하여 외부 가압 방식인 정압 에어 베어링 형식을 적용하였으며, 기존의 빌트인 모터 타입에서 문제가 되는 발열을 해결하여 고정밀도 유지 및 내구성 향상을 위하여 스프인들의 구동에 터빈을 적용한 에어 구동 시스템으로 개발하였다. 그 성능은 Table.3과 같다.

Table. 3 Specification of air spindle driven by turbine

Contents		Specification
Input air condition	Bearing air pressure	5 kgf/ $\text{cm}^2$
	Turbine air pressure	3.5 kgf/ $\text{cm}^2$
	Temperature	20 $^{\circ}\text{C}$
	Filter	0.5 ~ 1.0 $\mu\text{m}$
	Bearing air consumption	22 N l/min
	Turbine air consumption	20 ~ 90 N l/min
Operational speed range		10,000 ~ 100,000 rpm
Static stiffness		3 kgf/ $\mu\text{m}$
Collet system		Spring collet ER8 (useful tool Dia. $\phi$ 0.5 ~ 5.0mm)
Outer size (outer dia. $\times$ length)		$\phi$ 41 $\times$ 141 mm

본 과제에서 개발한 에어스핀들을 전량 수입에 의존하고 있는 반도체 가공용 초고속/초정밀 스프인들에 적용한다면 국산화로 인한 수입대체 효과를 기대할 수 있다. 그리고 현재 고가의 에어스핀들이 적용된 정밀 가공 수입 장비에도 적용이 가능하므로 이러한 장비들의 국산화에도 일조할 수 있을 것으로 기대한다.

### 후기

본 연구는 중소기업청에서 시행한 2005년 중소기업기술혁신 개발사업의 결과로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 김경용, 한국과학기술원, “ 초고속정밀 스프인들 시스템의 해석, 설계 및 제작기술개발에 관한 연구-제3차년도 최종보고서, ” 과학기술처, 1993.
- 과학기술처, “ 초정밀 에어 스프인들 유닛 및 에어 슬라이드 유닛의 개발, ” 과학기술처, 1989.
- 전원석 외 4, “ 고속 터보 로터 시스템의 자유진동 특성 분석, ” 한국정밀공학회, 04 춘계학술대회 논문요약집, 185-185, 2004.
- 이득우 외 3, “ 고속 스프인들용 공기베어링의 열특성에 관한 연구, ” 한국정밀공학회, 00 춘계학술대회 논문집(II), 1021-1026, 2000.