

## 미세부품가공을 위한 소형 초고속에어스핀들 개발

이승준\*, 신인동<sup>+</sup>, 최수창<sup>+</sup>, 김용우<sup>+</sup>, 이종렬<sup>++</sup>, 이득우<sup>+++</sup>

(논문접수일 2010. 01. 13, 심사완료일 2010. 03. 12)

### Development of Miniaturized High-Speed Air Spindle for Micro-Meso Components

Seung-jun Lee\*, In-dong Shin<sup>+</sup>, Soo-chang Choi<sup>+</sup>, Yong-woo Kim<sup>+</sup>,  
Jong-Ryul Lee<sup>++</sup>, Deug-woo LEE<sup>+++</sup>

#### Abstract

The development of high-speed spindle have been studied extensively for micro machining in advanced industrial countries. The research of miniaturized high-speed air spindle is important part which needs for the micro machining process of high quality. So, This study was to carry out results about design characteristics of miniaturized high-speed air spindle. We had designed 4type turbines and shaft. They were simulated in use the computer simulation programs. We made them as products. They measured RPM (revolutions per minute). As a result of experiments, there was a contrast among 4type Turbines. it reached 384,000rpm in 4.5bar of air pressure. And, We tried to compare the results of measurement whit the results of computer simulation.

**Key Words** : Miniaturized high-speed air spindle(소형고속에어스핀들), Micro machining(미세 가공), High-speed machining(고속 가공), Turbine & Shaft(터빈과 축), Palton wheel(펠튼휠), Rotor(회전축)

## 1. 서론

최근 산업기술 분야의 꾸준한 연구 개발 결과, 생활의 질적 향상, 에너지 문제의 해결, 지구 환경 문제의 해결 등이

진행되는 가운데, 각 분야에서는 한층 더 향상된 산업기술의 개발과 진보를 거듭하고 있다. 특히, 신소재는 모든 분야에서 기반이 되는 핵심 기술로서 전자, 생물공학, 우주·항공, 해양개발, 에너지 분야에서 새로운 돌파의 열쇠를 쥐고 있다

\* 부산대학교 나노융합기술학과

+ 부산대학교 나노융합기술학과

++ 테크노라이즈(주)

+++ 교신저자, 부산대학교 나노메카트로닉스공학과 (dwoolee@pusan.ac.kr)

주소: 627-706 경남 밀양시 삼랑진읍 청학리 50

고 해도 과언이 아니다.

이러한 세계적 기술흐름으로 인해, 전 세계 글로벌화의 촉매제로 작용하는 광 통신 부품, Mobile Phone, TFT-LCD 등의 미세부품에 대한 IT산업의 수요가 증대되고 있으며, 인간의 질적 생명력 증대를 위한 최첨단, 초정밀 의료장비와 생명유지 장치 및 치·의료기 Dental handpiece, 임플란트 등의 미세부품 관련 BT 산업 확대로 기능성 신소재의 개발과 초소형 다기능 미세가공기의 역할 및 수요도 증가하고 있다.

이처럼 IT/BT 부품의 중요성이 강조되고 있는 추세임에도 불구하고 소형 미세부품 생산을 위한 초정밀 미세가공기와 가공기술에 대한 핵심은 미국, 일본, 유럽 등 선진국에 의존하고 있는 것이 우리나라의 실정이다. 이렇게 관련분야 산업발전이 따라 그 중요성이 부각되고 있는 신기술 중에서 초고속 스피들의 중요성은 가공기술의 기본이라 할 수 있다.

특히, 미세가공을 위한 소형 초고속에어스핀들의 중요성은 앞으로도 더 증대 될 전망이다. 소형 초고속에어스핀들은 사용목적에 따라 다양한 분야에 적용 및 응용이 가능하다. 주로 의료분야에서 많은 활용도를 가지고 있으며, 산업현장에서 기공용으로 활용이 증대되고 있다. 의료분야 중 치의료 분야는 소형 초고속에어스핀들의 활용도가 가장 높은 대표적인 분야라 할 수 있겠다. 핸드피스는 치료용 드릴로서 초고속화의 선두주자라 할 수 있다.<sup>(1-3)</sup>

이러한 일련의 이유로 인해 소형 초고속에어스핀들의 가장 중요한 부분을 이루는 주축부 회전체의 설계적 요소를 파악하기 위해 연구를 시작하였으며, 400,000rpm 목표 회전수를 설정하여 설계, 제작하였다. 스피들의 설계는 Turbine의 형상에 따라 총 4가지 타입으로 나누었으며 전산해석을 통하여 토크 및 임계속도를 계산하였다. 계산된 전산해석 결과 값이 회전수(rpm)에 미치는 영향을 알아보기 위해 4가지 타입을 모두 제작하여 성능평가를 실시하였다.

## 2. Shaft 설계 및 제작

### 2.1 Shaft 전산해석 방법

임계속도란, 국제규격 ISO 1925(1990)에서는 「계의 공진 점에 있어서 현저한 응답이 발생하는 특정 속도」라고 정의하고 있다. 다시 설명하면, 회전속도가 축계(軸系)의 고유진동수(固有振動數)와 같아지면, 축이 이상한 진동을 일으키는 데 위험속도라고도 한다. 이는 고속으로 회전하는 축(전동기, 터빈, 내연기관 등의 축)에 생기기 쉬운데, 이상한 진

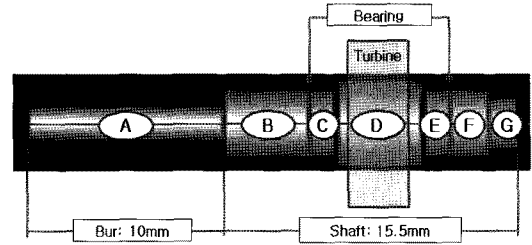


Fig. 1 Rotor design for critical speed computation

동이 나타나면 축이 파괴되는 경우가 있다.<sup>(4,7,8)</sup> 그러므로, 소형 에어스핀들의 초고속화 실현을 위해 Shaft설계의 검증이 요구되었다.

설계된 Shaft의 임계속도를 산출하기 위하여 사용된 시뮬레이터는 Rotor Dynamic Analysis이다. 이 프로그램은 이론적 수식을 근거로 회전체 베어링 계에 대한 유한요소해석으로 이루어져 있으며, 다음과 같은 과정으로 임계속도를 산출하였다.

Fig. 1은 Shaft설계의 적합성을 검증하기 위한 개념도이다. 임계속도에 도달했을 때 Shaft의 변화를 알아보기 위해 A~G까지 총 7구간으로 나누었다. 제작 후 사용 시 가공 Tool을 Chucking한 상태에서 회전시키므로, A는 공구에 해당되는 Tool이고, B~G구간이 주축이다. D는 동력 에너지를 받는 Turbine이며, B와 C, E와 F 사이는 Bearing의 중심부가 각각 위치하는 구간이다.

재질은 의료용기기 제작에 주로 사용되는 STS420(KS규격)계열에서 선택하였다. 사용된 소재의 물성치에서 영률과 밀도 등을 입력, 설정하여 임계속도를 계산하였다.

### 2.2 Shaft 전산해석 결과 및 제작

Fig. 2는 계산된 임계속도를 보여주는 그래프이다. 임계속도 1번, 50,000rpm과 2번, 70,000rpm에서 Rigid mode의 고유진동이 발생한다. 축의 파괴에 따른 우려는 임계속도 3번, 600,000rpm에서 Multi mode로 고유진동이 발생하는 시점부터이다. Tool을 기점으로 bending형태로 회전하는 것을 알 수 있다.

이는 Tool을 Shaft에 Chucking했을 경우, 길이가 10mm나 돌출되고 Bearing의 위치가 한쪽으로 치우쳐져 발생하는 것으로 추론되었다. 그러나 초고속용 Bearing을 사용하여 고정됨으로써 제작, 실험에 미치는 영향이 미소할 것으로 판단하였다. 이러한 전산해석 결과를 통하여 본 연구에서 목표한 회전수 400,000rpm은 임계속도 허용치에 속한다는 것을

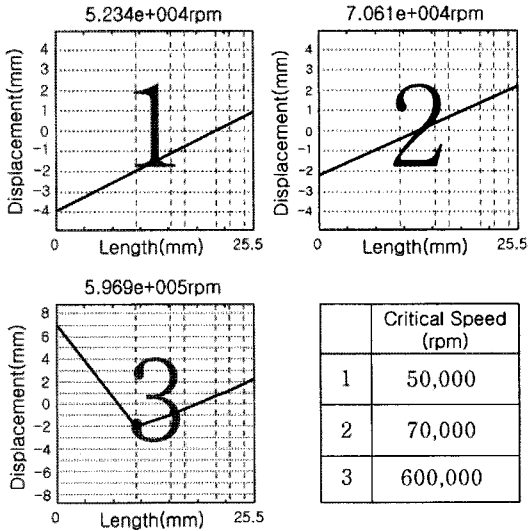


Fig. 2 Computing results of critical speed

확인하였다.

부품 설계는 일상에서 필기구로 흔히 쓰이는 샤프에서 기본 모터브를 가져왔으며, 제작은 정밀선반가공, 외경 정밀연마, 내경 지그그라인딩, 와이어 커팅 등으로 하였다. 또, 스프링은 미니어처 스프링을 제작, 외경 정밀연마를 거쳤다.

### 3. Turbine 설계 및 제작

#### 3.1 Turbine 구성 및 Type별 설계

소형 초고속 에어스핀들개발의 핵심부품인 Turbine은 총 8개의 Blade로 구성되어 있으며, 외경  $\varnothing$  8.9mm, 폭 2.6mm의 초소형이다. Blade의 디자인은 수력학분야에서 사용되는 Palton wheel의 공식에서 참고하였다.

$$F_B = 2\rho V_j A_j (V_j - V_B)(1 - \cos\theta) \quad (1)$$

$\rho$  : 유체의 밀도,  $V_j$  : 유체의 속도,  $A_j$  : 단면적

$V_B$  : Bucket의 회전속도  $\theta$  : 반사각

식(1)은 Fig. 3과 같이 Control Volume을 잡았을 때 공급되는 유체에 의해 Bucket에 발생하는 x방향의 힘을 나타내는 공식이다. 앞의 식에서 알 수 있듯이 Bucket에 부딪혀 다시 돌아오는 반사각에 의해 성능이 좌우됨을 알 수 있다.<sup>(5)</sup> 이러한 Palton wheel의 공식이 공기역학에서도 적용될 것으

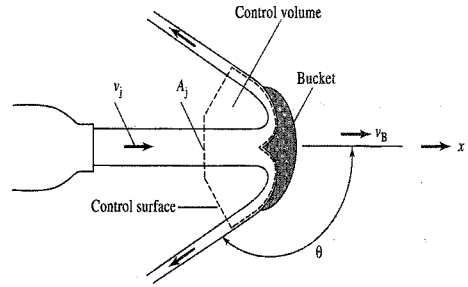


Fig. 3 Concept of Palton wheel<sup>(5)</sup>

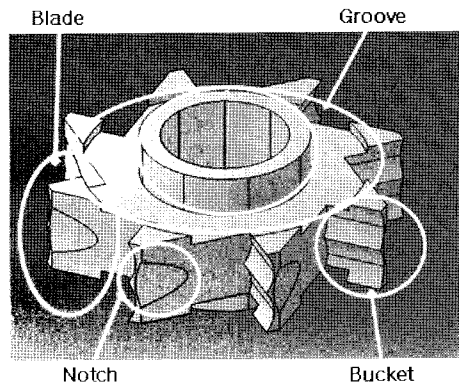


Fig. 4 Part names of Turbine





로 예측하여 형상을 설계하였으며 성능의 차이를 알아보기 위해 4가지 Type으로 나누어 설계하였다.

Fig. 4에 Turbine의 각 부분별 명칭이 나타내었다. 각 45°마다 압축 공기와 부딪히는 총 8개의 Blade를 설계하였고 유입되는 고압의 공기를 바로 받아 회전에너지로 전환시켜주는 Bucket의 모양은 듀얼익(翼)형과 익(翼)형으로 구분하여 설계하였다. 각각의 Blade가 회전 시 앞의 Blade에 압축공기의 효과를 더해 주기 위한 Notch, 유입된 고압의 공기를 빠르게 배출해 다음 공기의 유입을 원활하게 공급받기 위한 Groove를 설계하였다.

각각의 정의된 디자인이 성능에 미치는 영향의 정도를 알아보기 위해 Groove의 유(有)무(無)와 Bucket의 디자인을 듀얼익(翼)형과 익(翼)형으로 구분, 설계변수를 적용하여 총 4가지 타입의 Turbine을 설계하였다. Turbine의 타입별 설계를 A, B, C, D의 4가지로 구분하였고 Table 1에서 각각의 디자인특징과 제원을 보여준다.

Turbine의 외경은  $\varnothing$ 8.9mm로서 Type별로 모두 동일하다. Type A, C는  $\varnothing$ 7mm, 깊이(Dp)0.3mm의 Groove를 더

Table 1 Four Type design of Turbines (mm)

	A	B	C	D
Type				
Groove (mm)	Yes Ø7 Depth:0.3	No	Yes Ø7 Depth:0.3	No
Notch	Yes	Yes	No	No
Bucket (mm)	Dual Wing R:1.16	Dual Wing R:1.16	Wing R:3.6	Wing R:3.6

자인하였고, Type B, D에서는 Groove를 제외시켰다. Type A, B는 R1.16mm의 듀얼익(翼)형의 Bucket으로 설계하였으며, Type C, D는 R3.6mm의 익(翼)형으로 설계하였다. Type A, B는 Bucket의 형상이 듀얼익(翼)형으로 설계하여 중심선을 따라 Notch를 설계할 공간이 있었으나, Type C, D는 공간이 없어 설계에서 제외하였다.

3.2 Turbine 전산해석 방법

본 연구에서 전산 해석을 위해 사용된 프로그램은 터보 기계의 유동 해석을 위해 개발된 전산 유체 해석 프로그램인 FINE<sup>TM</sup>/Turbo이다. FINE의 수치기법은 현재 널리 사용되고 있는 유한 체적법(FVM)을 기반으로 하고 있으며, 비점성 유동(Euler), 점성 층류 운동(Laminar Navier-Stokes Flow), 점성 난류 유동(Turbulent Navier-Stokes Flow)의 3가지 수학적 모델을 지원하고 있다. 또한 Baldwin-Lomax, k-epsilon(Extend Wall Function, Low Re Chien) 등 많은 난류 모델(Turbulent Model)을 지원하며, 시간에 대한 차분법은 2, 4차 Runge-Kutta 적분법을 사용하며, 공간에 대한 차분법은 중앙차분법(Central) 및 1, 2차의 상류 차분법(1st, 2nd Order Upstream Scheme)을 사용한다. 또한 수렴성 및 계산속도 문제를 해결하기 위해 예조전화 기법(Pre-Condition) 방법 및 다중 격자법(Multi-Grid)을 지원한다.<sup>(6)</sup> Fig. 5는 FINE<sup>TM</sup>/Turbo를 실행시켜 전산 해석하기 위해 그에 따른 조건 값으로 3D모델링을 한 것이다.

공기유동입구는 Ø1mm로 하였고 공기 유동출구는 Ø3mm로 설계하였다. 완성된 3D모델링을 .igg(확장자명)파일로 변환시켜 총 1,945,018그리드가 사용되었으며 제한조건으

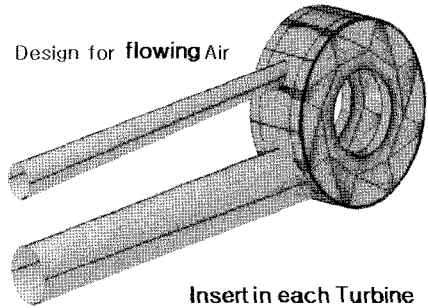


Fig. 5 3D Modeling by CATIA V5

Table 2 Computing results by FINE<sup>TM</sup>/Turbo

Type	Torque [mNm]	Average Pressure [Pa]	Flux [kg/s]
A	0.000649	0.1243	0.1068
B	0.000648	0.1149	0.1068
C	0.000650	0.1189	0.1068
D	0.000653	0.1068	0.1068

로는 공기유입부에 3bar의 전압력, 293K의 전 온도를 설정 해주고, 계산영역 출구에 대기압(1bar)의 정압력을 부여하였다. 외곽 케이스 주변과 공기 유입로, 공기배출로 부분을 제외한 터빈과 그 주위 영역에 200,000rpm의 회전조건을 주어 계산하였다.

하나의 Turbine에는 각도 45°마다 1개의 Blade가 설계되어 있으므로 직접적인 압축공기의 영향을 받을 수 있는 각도는 45°구간이라 할 수 있다. 이런 전제로 계산은 45°구간을 5단계로 나누어 각각의 결과 값을 구하고 이를 다시 평균값을 산출하였다.

3.3 Turbine 전산해석 결과 및 제작

일련의 시뮬레이션 과정을 거쳐 얻어낸 최종 Turbine Type별 평균 결과 값은 Table 2에 정리하였다. Type별 평균 전산 해석 값을 살펴보면 평균정압력은 B > D > C > A 순으로 나열되며, 평균토크는 A > C > B > D 순으로 차이가 나는 것을 알 수 있다.

평균유량은 모두 근사치로서 차이를 보이지 않았으며, 평균정압력과 평균토크의 결과 값을 보면 Type B, D를 제외

하고 반대의 결과가 나왔음을 확인할 수 있다. 4가지의 디자인 중, Type A는 평균토크가 가장 높게 나왔으면서도, 평균 정압력은 가장 낮은 것으로 나타났다. 평균토크와 평균정압력 중, 회전수(rpm)와 가장 밀접한 관계가 있는 것을 찾기 위해 4가지 타입 모두 제작하였다.

Turbine의 제작은 외경 연삭과 내경의 정밀공차를 적용하여 지그그라인딩을 이용한 가공블럭을 만들어 5축 CNC 가공기에서 최종 형상가공을 완성하였다. 소재는 무게의 경량화를 도모하고 가공이 용이한 알루미늄(Al) 중, 강성이 높은 Al7075를 채택했으며 코발트색 아노다이징(Anodizing)으로 표면처리 하였다.

#### 4. RPM측정을 통한 성능평가

일련의 과정을 거쳐 완성된 소형 초고속에어스핀들의 Type별 성능을 평가하기 위해 우선 RPM을 측정하였다. 회전체(Bur)의 측정공간이 Ø1.6mm의 소형이고 초고속의 측정을 요하므로 일반 측정기로는 측정이 불가능하였다. 이러한 전제로 인해 측정기를 제작하여 실험을 진행하였다. 측정은 광(光)센서를 활용한 주파수 분석법을 이용하였다.

Fig. 6은 소형 초고속에어스핀들의 Type별 조립완성 모습이다. 초고속용 미니어치 베어링과 조립된 각각의 소형 초고속에어스핀들은 Type별로 핸드피스 Head부에 조립되고 측정용 Tool을 스핀들에 Chucking하게 된다. 이렇게 조립된 핸드피스는 고정 시스템에 클램핑하여 실험을 실시하였다.

소형 초고속에어스핀들의 RPM측정은 공기 공급압력을 단계적으로 증가시키며 실시하였고, 1,000rpm단위로 절삭하여 Table 3에 그래프로 정리하였다.

결과를 살펴보면, 공기 공급압력이 0.5bar일 때 자력으로 회전을 시작하게 되는 것을 알 수 있었다. 회전수는 모두 120,000rpm이상으로 회전을 시작했으며 Shaft 설계시 수행한 전산해석 결과에서 임계속도 50,000rpm과 70,000rpm의 Rigid mode고유진동을 넘어 시작된 회전을 볼 때, Shaft의 전산해석 결과와 유사한 결론을 얻을 수 있었다.

측정결과, 실험 목표치였던 400,000rpm에 근사치인 최고 384,000rpm에 도달하였다. 동일 압력상의 Type별 RPM의 변화를 살펴보면, A > C > B > D 순으로 나타났으며, 공급압력 변화에 따른 측정에서도 비슷한 양상을 보였다. 이는 Turbine의 Type별 평균 전산 해석 결과와 비교해 볼 때, 평균토크의 순서와 일치함을 알 수 있다. 이는 평균토크가 회전수에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 유추해볼 수 있다.

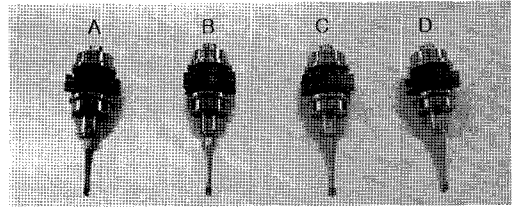
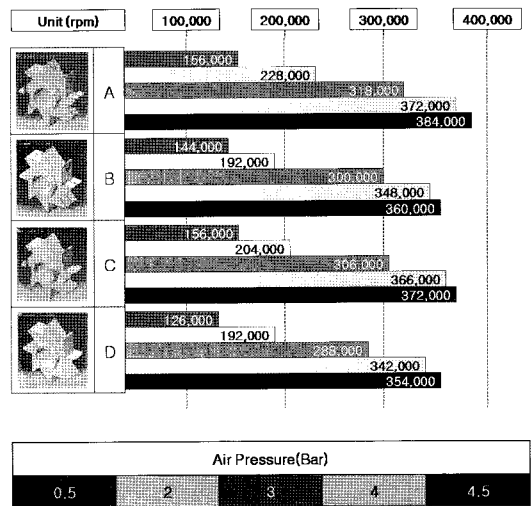


Fig. 6 Miniaturized high-speed air spindles

Table 3 RPM (revolutions per minute) measurement results



#### 5. 결론

본 연구에서는 소형 초고속에어스핀들의 개발과 관련하여 Shaft와 Turbine의 전산 해석값과 제작실험 결과와의 차이점에 대해 알아보았다. 그리고 Turbine의 설계변수에 따른 RPM의 차이에 대해 실험하였다. 일련의 실험과정에서 내린 결론은 다음과 같다.

- (1) 설계 및 제작에 있어서 전산해석 결과와 성능평가 실험 결과가 일치 했으며, 이론적 해석을 통한 소형 초고속에어스핀들의 설계 방법을 제안 하였다.
- (2) 소형 초고속에어스핀들의 RPM측정에서 Type\_A가 384,000rpm으로 가장 높은 회전수를 보였다. 이는 Turbine의 설계변수 중, 듀얼 익(翼)형의 Bucket과 Groove의 디자인 효과라 할 수 있다. 따라서 에어스핀들의 설계에서 공기의 흐름을 원활하게 하고 토크를 극

대화 시킬 수 있는 유체역학적 Turbine의 설계가 중요함을 확인하였다.

- (3) 개발된 모든 스피너들은 공기 공급압력 0.5bar에서 자력으로 회전을 시작하였으며, 4.5bar이상에서는 이상진동이 발생하였다. 이는 개발된 소형 초고속에어스피너들의 최소, 최대 압력 수용량으로 추정되며, 압력에 따른 성능의 변수도 설계에서 고려되어야 할 중요한 요소임을 유추할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 자유 과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Yueui, S. J., 2000, *Advanced materials application strategy*, Sungindang, Korea, a foreword.
- (2) Lee, S. J., Kim, Y. I., Choi, S. C., Lee, D. W., and Lee J. R., 2007, "A study on the design technology of 300,000rpm air bearing spindle for Micro-meso components", *Proceedings of the KSMPE Spring Conference 2007*, pp. 43~44.
- (3) Lee, S. J., Kim, Y. W., Kim, K. S., Lee, D. W., Han, M. C., and Lee J. R., 2007, "The dental handpiece : Consideration of the design and manufacture", Korea, *Proceedings of the KSMPE autumn conference 2007*, pp. 105~106.
- (4) Balancetech corp., 1998, Balancetech staff, viewed 20 January 2009, <www.balancetech.co.kr>, technical data.
- (5) Roberson, J. A., Cassidy, J. J., and Chaudhry, M. H., 1998, "*Hydraulic engineering, 2<sup>nd</sup> edition*", Wiley, New York.
- (6) Fine<sup>TM</sup>/Turbo, 2004, *Fine<sup>TM</sup>/Turbo User manual Version 7*, NUMECA Inc., Belgium.
- (7) Small Business Training Institute in Small Business Corporation, *Balancing measurement Technology*, Small business training institute in Small Business corporation, Korea, pp. 39~40.
- (8) Silva, D. and Clarence, W., 2000, *Vibration : Fundamentals and Practice*, CRC press, New York.