

## 공기동압베어링의 성능 해석 및 가공특성 평가

백승엽<sup>1\*</sup>, 김광래<sup>2</sup>

<sup>1</sup>인덕대학교 기계설계과, <sup>2</sup>인덕대학교 기계자동차과

### Evaluation of Machining Characteristics and Performance Analysis of Air-Lubricated Dynamic Bearing

Seung-Yub Baek<sup>1\*</sup> and Kwang-Lae Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept of Mechanical design, Induk University

<sup>2</sup>Dept of Mechanical & Automotive Engineering, Induk University

**요 약** 산업의 발달에 따른 각종기기 장치들의 고속화, 소형화, 정밀화로 인해 고속 스피ndl의 필요성은 점점 커지고 있다. 또한 공기동압베어링은 스테이지 모션에 대해서 무마찰 실현을 위해서 웨이퍼 생산용 광학 리소그래피 분야에도 적용된다. 공기동압베어링은 마찰에 의한 동력손실과 열 발생이 적어 고속회전에 유리하고 고정밀 회전이 가능하기 때문에 고속 고정밀 스피ndl 시스템 및 하드 디스크 드라이브에 사용될 수 있다. 본 연구에서는 축 하중 지지를 위해 헤링본 홈 형상을 가지는 공기동압베어링의 성능에 대한 수치해석을 수행하였다. 또한 본 연구에서는 공기동압베어링을 제작하기 위해서 기존의 기계 가공방법과는 다른 비접촉식 초정밀 가공 방법인 마이크로 전기화학가공에 의한 방법으로 마이크로 그루브 가공을 수행하였고, 수치해석 프로그램을 이용하여 전극의 간극, 전해용액 농도, 가공시간 등 이론적인 수치를 시뮬레이션 하였다.

**Abstract** The need is growing for high-speed spindle because various equipment are becoming more precise, miniaturization and high speed with the development of industries. Air-lubricated dynamic bearings are widely used in the optical lithographic manufacturing of wafers to realize nearly zero friction for the motion of the stage. Air-lubricated dynamic bearing can be used in high-speed, high-precision spindle system and hard disk drive(HDD) because of its advantages such as low frictional loss, low heat generation, averaging effect leading better running accuracy. In the paper, numerical analysis is undertaken to calculate the performance of air-lubricated dynamic bearing with herringbone groove. The static performances of herringbone groove bearings which can be used to support the thrust load are calculated. Electrochemical micro machining(EC $\mu$ M) which is non-contact ultra precision machining method has been developed to fabricate the air-lubricated dynamic bearing and optimum parameters which are inter electrode gap size, concentration of electrolyte, machining time are simulated using numerical analysis program.

**Key Words** : Air-lubricated dynamic bearing, Herringbone groove, Current density, Electrolyte, EC $\mu$ M

### 1. 서론

초고속, 저소음 특성을 가지는 하드 디스크 드라이브(HDD) 모터의 신기술 중 하나인 공기동압베어링은 공기를 윤활제로 사용하기 때문에 볼 베어링의 단점인 접촉으로

인한 소음, 발열, 마모 등이 적다. 또한 공기동압베어링은 고속 경량화 회전체의 지지에 적합하므로 컴퓨터 산업과 멀티미디어 산업의 발전에 따라 레이저 프린터, 스캐너, 하드 디스크 등에서 볼 베어링을 대체하여 사용될 전망이다. 이러한 동압베어링에 대한 여러 연구가 진행되었다.

본 논문은 인덕대학 연구비에 의해 수행되었음.

\*교신저자 : 백승엽(sybaek@induk.ac.kr)

접수일 11년 11월 15일

수정일 11년 12월 12일

게재확정일 11년 12월 13일

공기 윤활 나선형 홈의 반구형 베어링의 부하하중, 진동특성, 압력분포와 성능 실험과 해석[1-5]등 공기동압베어링에 관련된 여러 연구가 발표되었다. 마이크로 형상의 기능부품들을 효과적으로 제작하기 위해서 새롭게 마이크로 가공으로 대두되고 있는 마이크로 전기화학가공 기술이 대두되고 있다[6,7].

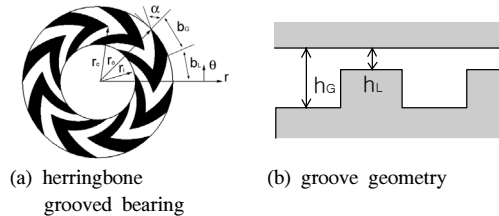
마이크로 전기화학가공 기술은 전기적·화학적 반응을 이용해서 기계적인 가공과 복합적으로 가공효과를 일으키면서 금속 용출을 이용하여 원하는 표면형상을 도출하는 특수가공기술로서 항공우주분야나 터빈 블레이드, 로켓 엔진 부품에 사용되어 왔으나 최근에는 초소형 회전체인 베어링에 마이크로 단위의 홈을 가공하는데 많이 사용되고 있다[8,9]. 전기화학 가공에서는 전기적 특성이 주된 역할을 하고 화학적인 특성이 보조적인 역할을 한다. 기존에는 직류전원을 사용했지만, 마이크로 전기화학가공은 펄스 전원을 사용하여 정밀한 간극의 유지와 형상 정밀도를 높이고 표면 거칠기를 양호하게 하는 연구가 진행되고 있다[10,11]. 지금까지 초경량화 소재에 대한 전기화학가공에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 본 연구는 초소형 회전체인 공기동압베어링의 설계 변수에 대한 해석을 수행하였고, 초경량 소재인 알루미늄에 대해서 각각의 가공 변수 즉 전압, 전류, 전극의 간극, 전해액 농도, 가공 시간, duty factor에 따른 시뮬레이션과 실험을 수행하여, 마이크로 전기화학가공 특성을 연구하였다.

## 2. 이론

### 2.1 해석 모델

회전하는 원형 평판이 스러스트 베어링으로 사용되기 위해서는 평판의 기하학적 형상이 동압을 발생시킬 수 있는 형상이어야 한다. 평판에 그루브가 가공된 스러스트 베어링은 그루브의 가공만으로 동압을 발생시킬 수 있으므로 비교적 제작이 용이하고 가격도 저렴하므로 소형기에 적합하다. 본 연구에서는 헤링본 그루브 베어링(Herringbone grooved bearing)에 대해서 각각의 형상에 따른 설계 변수를 찾아내어 최적의 성능을 가질 수 있는 설계변수 값들을 제시하고 그에 따른 베어링의 성능을 해석한다. 그림 1은 선정된 베어링의 기하학적 형상을 나타낸다. 헤링본 그루브 형상은 inward 타입과 outward 타입을 적절히 혼합한 것으로 기체를 베어링 가운데 방향으로 펌핑(pumping)하여 압력을 발생시키게 된다. 헤링본 그루브 베어링의 형상을 결정하는 설계 변수는 그림 1(b)의 그루

브 높이비(groove height ratio,  $H = h_G/h_L$ )와 그림 1(a)의 그루브각(groove angle,  $\alpha$ ), 그루브길이비(groove length ratio,  $G = b_G/(b_L + b_G)$ ), 중심반지름비(center radius ratio,  $CR = (r_e - r_i)/(r_o - r_i)$ )이 있다.



[그림 1] 스러스트 베어링의 계략도

[Fig. 1] Schematic diagrams of thrust bearing

### 2.2 정특성 해석

스러스트 베어링의 정특성을 해석하기 위해서 공기는 이상 기체, 공기막의 온도와 압력은 일정, 공기의 점도는 일정하다고 가정하여 원통 좌표계에서의 반경 방향과 원주 방향의 Navier-stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \mu \frac{\partial^2 \nu_r}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} = \mu \frac{\partial^2 \nu_\theta}{\partial z^2} \quad (2)$$

여기서  $r, \theta, z$ 는 각각 원통의 좌표계에서의 반경 방향, 원주 방향, 높이 방향의 좌표이며,  $\nu_r$ 는 반경 방향의 속도,  $\nu_\theta$ 는 원주 방향의 속도이다.  $\mu$ 는 공기의 점도이며  $p$ 는 압력이다. 식(1)과 식(2)를 두께 방향으로 두 번 적분한 후, 베어링의 아래면에서  $\nu_r = \nu_\theta = 0$ , 베어링의 윗면에서  $\nu_r = 0, \nu_\theta = \omega r$ 을 대입하면 식(3)과 식(4)을 얻을 수 있다.

$$\nu_r = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial r} z(z-h) \quad (3)$$

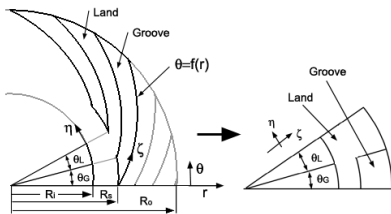
$$\nu_\theta = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial r} z(z-h) + \frac{\omega r}{2} \quad (4)$$

$\omega$ 는 평판의 회전 속도,  $h$ 는 공기막의 높이이다. 이 식을  $z$ 방향으로 적분한 뒤 밀도를 곱하면  $r$ 방향과  $\theta$ 방향으로 단위 길이를 통과하는 공기의 질량유량이 되고 식(5)와 식(6)으로 나타난다.

$$M_r' = -\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (5)$$

$$M_\theta' = -\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{r \text{ Partial} \theta} + \frac{\rho \omega r h}{2} \quad (6)$$

헤링본 그루브 베어링은 그루브와 랜드 지역이 스파이럴 형태로 경계 지어져 있기 때문에 그루브 경계를 따라 가는 일반 좌표계 ( $\zeta, \eta$ )를 그림 2와 같은 좌표계를 이용하여 해석하였다.



(a) bearing geometry in  $(r, \theta)$  (b) transformed to  $(\zeta, \eta)$

[그림 2] 헤링본 스러스트 베어링의 좌표변환  
[Fig. 2] Coordinate transformation of thrust bearing for herringbone type

$(r, \theta)$ 와  $(\zeta, \eta)$ 좌표계 사이의 변환식은 아르키메디안 나선의 관계식으로부터 다음과 같이 유도된다.

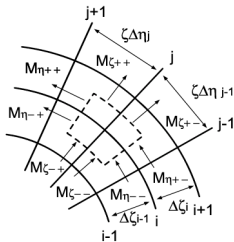
$$\zeta = r \tag{7}$$

$$\eta = \theta - f(r) = \theta - \tan\alpha \ln \frac{r}{r_i} \tag{8}$$

여기서,  $r_i$ 는 베어링의 내경이다. 그림 3에 나타난 좌표 변환된 검사체적에 대해  $\zeta$ 방향과  $\eta$ 방향으로 단위 길이를 통과하는 질량유량을 각각  $M'_\zeta, M'_\eta$ 라하고 식(9)과 식(10)로 구해진다.

$$M'_\zeta = M'_r \tag{9}$$

$$M'_\eta = (M'_\theta - \tan\alpha M'_r) \tag{10}$$



[그림 3] 검사체적 및 질량 유량  
[Fig. 3] Control volume and mass flux

식(5)와 식(6)의  $M_r, M_\theta$ 는 식(7)과 식(8)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M'_r = -\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial \zeta} + \tan\alpha \frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\zeta \partial \eta} \tag{11}$$

$$M'_\theta = -\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\zeta \partial \eta} + \frac{\rho \omega r h}{2} \tag{12}$$

식(11)과 식(12)를 식(9)와 식(10)에 대입하면 좌표 변환된 검사체적에 대한  $\zeta, \eta$  방향으로의 단위 길이를 통과하는 질량유량을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M'_{\zeta} = -\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial \zeta} + \tan\alpha \frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\zeta \partial \eta} \tag{13}$$

$$M'_{\eta} = -(1 + \tan^2\alpha) \frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\zeta \partial \eta} + \tan\alpha \frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial \zeta} + \frac{\rho \omega r h}{2} \tag{14}$$

베어링 내부의 공기가 이상기체이며 등온이고, 또한 정상 상태라는 가정을 하면 그림 3의 검사체적에 대해 다음과 같은 질량 보존식이 성립된다.

$$\begin{aligned} & (M'_{\zeta++}) \frac{\zeta \Delta \eta_j}{2} + (M'_{\zeta\pm}) \frac{\zeta \Delta \eta_{j-1}}{2} - (M'_{\zeta\mp}) \frac{\zeta \Delta \eta_j}{2} \\ & - (M'_{\zeta--}) \frac{\zeta \Delta \eta_{j-1}}{2} + (M'_{\eta++}) \frac{\Delta \zeta_i}{2} + (M'_{\eta\mp}) \frac{\Delta \zeta_{i-1}}{2} \\ & - (M'_{\eta\pm}) \frac{\Delta \zeta_i}{2} - (M'_{\eta--}) \frac{\Delta \zeta_{i-1}}{2} = 0 \end{aligned} \tag{15}$$

식(15)에 이상기체의 상태 방정식  $p = \rho RT$ 를 대입하고 식(16)과 같은 압력 경계 조건을 적용하여 식(17)과 같이 무차원 부하용량을 정의하여 베어링의 정특성을 해석하였다[12].

$$P|_{R=1} = P|_{R=r_j/r_o} = 1 \tag{16}$$

$$P|_{\varnothing=0} = P|_{\varnothing=2\pi}$$

$$\overline{W} = \frac{W}{\pi p_o r_o^2} = \int_0^{2\pi} \int_{r_j/r_o}^1 P R dR d\varnothing \tag{17}$$

### 3. 마이크로 전기화학가공

#### 3.1 마이크로 전기화학가공 메커니즘

일반적으로 마이크로 전기화학가공 중에 전기화학가공 반응으로 인하여 발생하는 수소가스, 발열 등의 문제로 초기 전극간극을 작게 설정하고 이를 일정하게 유지시키기 어렵다. 이를 해결하기 위해서 펄스 전원을 사용하여 초기 전극간극을 마이크로 단위까지 설정이 가능해졌다. 전해용액의 전도도는 마이크로 전기화학가공 중에 저항의 역할을 하는 중요한 파라미터로서 온도상승이나 수소가스의 발생 등에 영향을 받는 인식되어 있는데 옴 법칙(Ohm's law)에 따르면 다음과 같이 정의된다[6].

$$k_c = \frac{Si}{E} \quad (18)$$

$k_c$ 는 전해용액의 전도도이고,  $i$ 는 전류 밀도,  $E$ 는 전압,  $S$ 는 전극간극을 나타내고 있다.

Faraday의 법칙에 따라서 펄스 on-time에서의 금속제거량은 다음과 같다[6].

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Ak_c(E_0 - \Delta E)}{Sz\rho_a F} - f \quad (19)$$

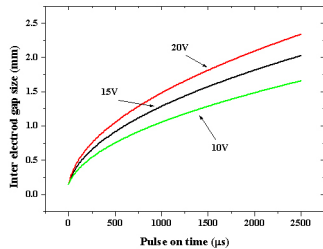
본 연구에서는 마이크로 전기화학가공의 실현을 위해 미소한 전극간극과 전압 값을 적용하였으므로 전극은 이송시키지 않았다. 따라서  $\tau_{on}$  시점에서  $\tau_{off}$  시점까지의 금속제거에 의한 전극간극은 다음과 같이 정의된다.

$$\int_{\tau_{on}}^{\tau_{off}} S ds = \int_{\tau_{on}}^{\tau_{off}} \frac{Ak_c(E_0 - \Delta E)}{z\rho_a F} dt \quad (20)$$

$$S_1 = \sqrt{S_0^2 + 2K_v k_c E t} \quad (21)$$

$$K_v = \frac{A}{zF\rho_a} \quad (22)$$

여기서,  $K_v$ 는 전기화학의 유효 체적 증가로서 공작물에 따라 결정되는 상수이고 초기조건은  $t=0\text{sec}$  일 때  $S=S_0$ 이다. 해석 결과로 볼 때 그림 4와 같이 전극간극은 적용 전압과 시간에 따라 루트곡선을 비례하여 증가함을 알 수 있다.



[그림 4] 펄스전압에 따른 전극간극의 변화량  
[Fig. 4] Results of gaps variations with pulse duration  $\tau_{on}$  and voltage  $E_0$

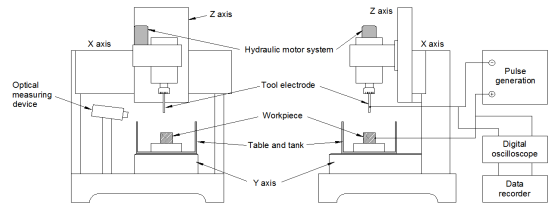
### 3.2 실험 장치 및 가공 조건

그림 5는 마이크로 전기화학가공을 위한 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 가공 시스템은 X, Y, Z축으로 자동이송이 가능하게 구성되었다. 전극은 Z축에 고정되어 있고 진동을 최소화하기 위해서 유체 베어링을 적용하였다. 공작물은 X축과 Y축이 동시 제어가 가능하도록 하였다.

펄스 전원 공급기에서 공작물과 전극에 각각 양극과

음극의 전원을 공급하고 알칼리성 전해액을 공작물에 분사시켜주면서 가공부의 전기화학 반응을 일으켜 가공을 수행하였다. 가공부에 균일한 전기화학 용출 작용을 일으키고, 공작물에서 배출된 칩이 전극에 부착되는 것을 방지하기 위해 전해액은 전극과 공작물 사이에 10%~60%의 속도로 분사되게 하였다. 사용된 전해액은 필터에 의해서 적절한 필터링을 하고 재공급되도록 순환하여 사용하였다.

실험 결과의 신뢰성을 높이기 위해서 동일한 조건에서 2회 반복 실험을 수행하였으며 가공된 시편에 대해서는 4회 반복 측정하였다. 대표적인 실험 조건은 Table 1과 같다.



[그림 5] 마이크로 전기화학가공 시스템 개략도  
[Fig. 5] Schematic diagram of experimental set-up for micro ECM

### [표 1] 실험 조건

[Table 1] Experimental condition

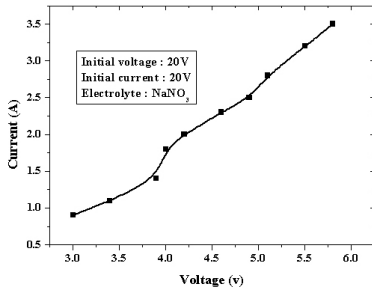
Workpiece(anode)	Al2024
Electrolyte	Aqueous NaNO <sub>3</sub> (240g/l ~ 400g/l)
Electrode(cathode)	Bronze
Surface roughness tester	Taylor Hobson Surtronic 3+
Surface measurement	Kan scope 3.0

## 4. 실험결과 및 고찰

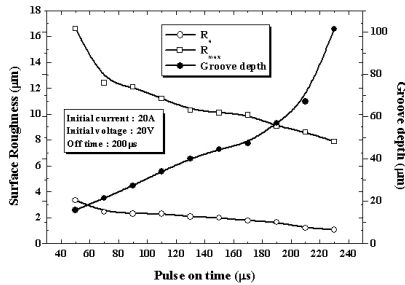
### 4.1 전류-전압에 따른 전원 특성

그림 6은 실험을 통해서 전원 공급기에서 초기 전원을 공급할 때 실제 가공 영역에서 전류 및 전압의 변화를 보여주고 있다. 실제로 마이크로 전기화학가공을 수행할 때 전압과 전류 등 가공 변수들에 따라서 가공 깊이가 달라지기 때문에 이런 변수들은 실험을 통해 전류 및 전압을 효율적으로 변화시켜 그루브 가공 깊이를 정밀하게 제어할 수 있다. 그림 7은 펄스 전압의 변화에 따른 그루브 가공 깊이와 그루브 표면의 거칠기를 보여주고 있다. 초기 전류와 전압은 20A와 20V로 설정하였고 펄스 off time은 200 $\mu$ s이다. 펄스 on time 값이 커질수록 그루브 가공 깊이

는 더 커지고 표면 거칠기는 작아지는 것을 알 수 있다. 펄스 on time 210 $\mu$ s에서 그루브 가공 깊이가 급격하게 증가하는 경향을 보이는데 이는 가공 영역에서 온도가 높아지면서 재료의 연화작용 때문이다.



[그림 6] 전압에 따른 전류의 변화량  
[Fig. 6] Variation of current according to the voltage

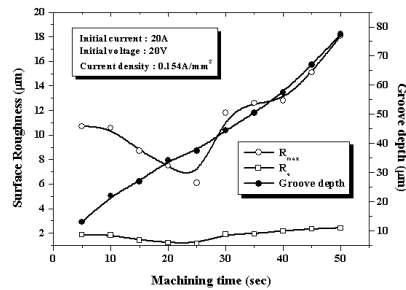


[그림 7] 펄스전원에 따른 가공깊이와 거칠기 변화량  
[Fig. 7] Variation of roughness and groove depth and according to pulse on time

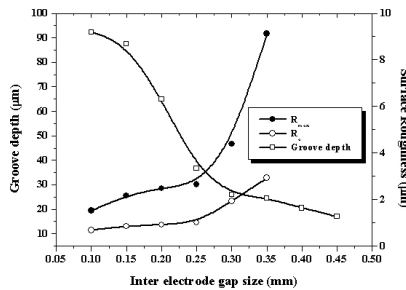
#### 4.2 가공시간-전극간극에 따른 가공 특성

그림 8은 가공시간에 따른 그루브 가공 깊이와 표면 거칠기를 나타내고 있다. 가공시간이 증가할수록 가공 깊이가 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 가공면의 표면 거칠기는 가공시간이 25초까지는 약 6 $\mu$ m 정도였다가 그 이후에는 가공 표면이 더 거칠어지는 경향을 보이고 있다. 가공시간 25초 이후에는 전해 폴리싱 영역을 넘어서 피팅(pitting)현상에 의해서 가공 표면이 거칠어지는 것을 알 수 있다.

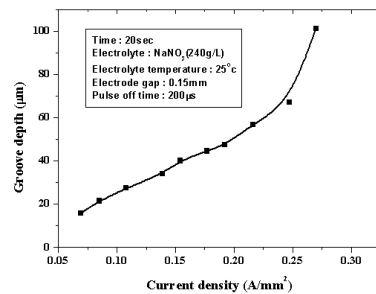
그림 9는 전극의 간극 변화에 따른 가공 깊이를 나타내고 있다. 전극의 간극이 0.45mm 이상에서는 그루브 가공 깊이의 변화가 거의 없는 것을 본 실험에서 알 수 있었다. 그 이유는 간극이 일정 한계를 벗어나면서 저항이 증가하고 이로 인해 전류가 분산되어 더 이상의 반응이 일어나지 않기 때문이다. 가공면의 표면 거칠기는 0.35mm 이상에서는 전기화학반응이 발생되지 않아 가공이 되지 않았기 때문에 측정이 불가능하였다.



[그림 8] 가공시간에 따른 가공깊이와 거칠기 변화량  
[Fig. 8] Variation of roughness and groove depth according to machining time



[그림 9] 전극간극에 따른 가공깊이와 거칠기 변화량  
[Fig. 9] Variation of roughness and groove depth according to electrode gap size



[그림 10] 전류밀도에 따른 가공깊이 변화량  
[Fig. 10] Variation of groove depth according to current density

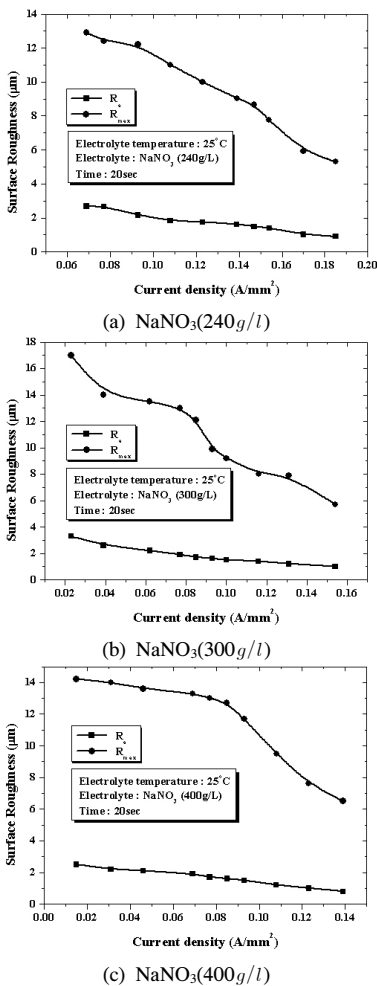
#### 4.3 전류밀도에 따른 가공 특성

그림 10은 전류밀도에 따른 가공 깊이를 나타내고 있다. 가공시간은 20초로 하였고, 전극간극은 0.15mm로 유지시키면서 가공을 수행하였고, 전류밀도가 0.07 A/mm<sup>2</sup>일 때 그루브 깊이는 14 $\mu$ m로 측정되었다.

가공의 효율성을 고려할 때 가공 시간을 조절하기보다는 전류밀도를 조절해서 가공을 하는 것이 더 좋은 가공 효율성을 가진다.

그림 11은 각각의 전해액 농도에 따른 전류밀도와 표

면 거칠기를 나타내고 있다. 마이크로 전기화학가공 후에 가공물에 가공 변질층이 생긴다. 따라서 전해액의 전기전도도, 전류 및 전압 등과 같은 반응변수를 적절히 조절하면 가공 변질층의 제거 및 평활한 표면을 얻는 것이 가능하며 별도의 후처리 없이 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있다. Schultze는 가공 변수를 적절히 조절하여 표면 거칠기를 향상시키는 연구를 하였다[14]. 본 연구에서는 전기화학가공 후 발생하는 가공 변질층을 제거하기 위해서는 전류밀도를 높여서 가공 변질층을 제거 할 수 있었다. 그림 12는 낮은 전류밀도에서 가공을 하고 난 후 발생한 가공 변질층의 모습과 전류밀도를 높여서 가공 변질층을 제거한 모습을 보여주고 있다.



[그림 11] 다양한 전해액 농도에 따른 전류밀도와 표면 거칠기 변화량

[Fig. 11] Variation of surface roughness and current density according to several types of electrolyte concentration



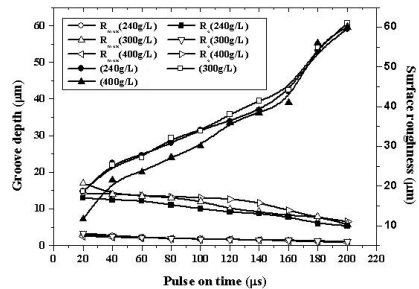
(a) low current density (b) high current density

[그림 12] 전류밀도에 따른 형상정밀도 비교

[Fig. 12] Microscopic photographs of groove pattern accuracy according to current density

#### 4.4 전해액에 따른 가공 특성 평가

그림 13은 전해액의 농도에 따른 가공 깊이와 표면 거칠기를 나타내고 있다. 전해액 농도 변화를 시켰음에도 불구하고, 가공 깊이와 표면 거칠기는 변화가 거의 없음을 보여주고 있다. 하지만 전해액의 농도에 따라서 형상정밀도가 다르게 나타났다. 그림 14는 전해액 농도 변화를 통한 가공 형상 정밀도를 나타내고 있다. 본 연구에서 공작물과 전극 사이에 정밀한 간극제어시스템을 이용하여 가공 전압과 전해액 농도를 낮게 하여 마이크로 전기화학가공의 형상 정밀도를 높일 수 있었다. McGeough, Chikamori는 전해액 농도에 따라서 가공 효율이 어떻게 달라지는가에 대해서 언급을 하였다[13,15]. Amalnik는 펄스 on time이  $0.1\mu\text{s} \sim 0.5\mu\text{s}$ , 펄스 off time이  $5\mu\text{s} \sim 50\mu\text{s}$ 일 때 금속 용출이 일어나는 펄스 전해가공이 더 좋은 형상정밀도를 얻을 수 있다고 언급하였다[16].



[그림 13] 전해액에 따른 가공깊이와 거칠기 변화량

[Fig. 13] Variation of surface roughness and groove depth according to pulse on time for electrolyte concentration



(a)  $\text{NaNO}_3(240\text{g/l})$  (b)  $\text{NaNO}_3(400\text{g/l})$

[그림 14] 전해액에 따른 형상정밀도 비교

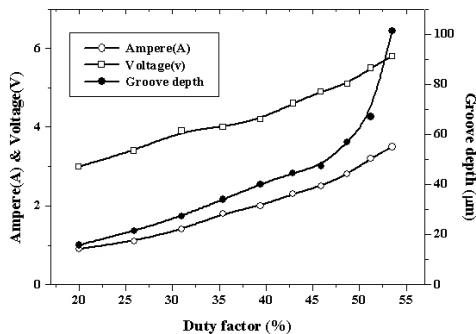
[Fig. 14] Microscopic photographs of groove pattern accuracy according to electrolyte concentration

### 4.5 Duty factor에 따른 가공 특성 평가

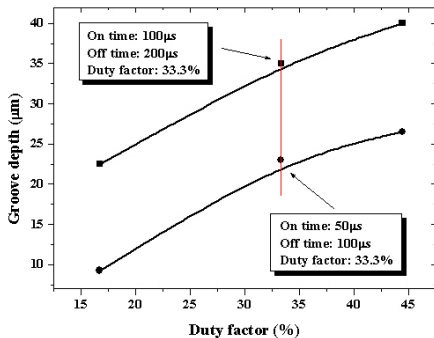
일반적으로 펄스 전원을 사용할 경우에는 각각의 가공 조건을 구분하기 위해서 duty factor를 적용하는데 이는 다음과 같다.

$$Duty\ factor = \frac{\tau_{on}}{\tau_{on} + \tau_{off}} \quad (23)$$

그림 15는 duty factor에 따른 가공 깊이와 전원 조건을 보여주고 있다. duty factor가 증가함에 따라서 전류, 전압 및 가공 깊이가 증가하는 것을 보여주고 있다. 그림 16은 동일한 duty factor에 따라서 가공 깊이가 다르게 나타나는 결과를 보여주고 있다. 33.3%의 동일한 duty factor를 가지지만 펄스 on, off time은 다르다. 즉, 펄스 전해가공에 있어서 duty factor에 따라서 가공 깊이가 결정되는 것이 아니라, 펄스 on, off time에 의해서 가공 깊이가 달라지는 것을 알 수 있다.

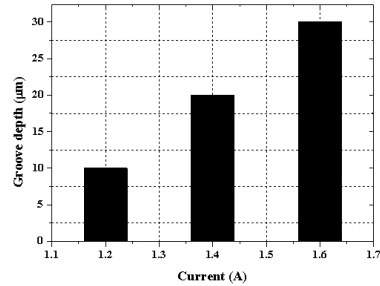


[그림 15] Duty factor에 따른 가공깊이 변화량  
[Fig. 15] Variation of groove depth according to duty factor



[그림 16] 다른 펄스전원을 적용한 duty factor에 따른 가공깊이 변화량  
[Fig. 16] A comparison of groove depth according to duty factor for different pulse on-off time

그림 17은 마이크로 전기화학가공이 일어나는 전류 영역을 나타내고 있다. 1A 이하의 전류 영역에서는 전해가공이 일어나지 않았다. 1.1~1.3A 영역에서는 약 10 $\mu$ m, 1.3~1.5A 영역에서는 약 20 $\mu$ m, 1.6~1.7A 영역에서는 30 $\mu$ m 정도의 가공 깊이를 보였다.



[그림 17] 마이크로 전기화학가공을 위한 전류영역  
[Fig. 17] A region of groove depth according to current for electrochemical micro machining

## 5. 결론

본 연구에서는 초정밀 회전체인 공기동압베어링 설계에 필요한 변수들에 대한 정특성을 해석하였고, 제작을 위해서 경량화 소재인 Al2024에 대한 마이크로 전기화학가공을 수행한 후 가공인자에 따른 특성을 평가하였다. 헤링본 그루브 형상을 결정하는 주요 변수들은 베어링의 부하용량에 영향을 주는 중요한 인자로 해석을 통해 알 수 있었고 공기동압베어링을 가공할 수 있는 마이크로 전기화학가공 방법을 제시하였다. 마이크로 전기화학가공 후 발생할 수 있는 가공 변질층은 적절한 전류밀도를 조절하여 제거할 수 있었다. 실험을 통해 전해액 농도가 낮을수록 가공량은 거의 변화가 없지만 형상 정밀도가 더 높게 나타났고, 정밀한 전극간극 조절과 적절한 가공 변수를 조절함으로써 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다. 가공물의 가공 깊이를 결정하는 전원의 영역을 실험을 통해서 결정하였고 이를 통해 효율적인 가공을 수행할 수 있었다. 본 연구 결과를 토대로 초소형 고정밀 부품 가공에 적용할 수 있고 기존의 가공법을 대체하여 양산비용 절감효과가 기대된다.

## References

[1] Y. Saito, H. Makino, and A. Tamura., "Characteristics of Gas-Lubricated Spherical Spiral Groove Bearings",

Journal of JSLE, Vol. 28, No. 3, pp. 221-227, 1983.

[2] T. Czyzewski and P. Titus., "Analysis of an Arbitrarily Misaligned Self-Acting Gas Film Journal Bearing of Finite Length", Wear, Vol. 114, pp. 367-379, 1987.

[3] J. Bootsma., "Spherical and Conical Spiral Groove Bearings", ASME Journal of Lubrication Technology, pp. 236-249, 1975.

[4] N. Kawabata, I. Ashino, M. Sekizawa, and S. Yamazaki., "Spiral grooved Bearing Utilizing the Pumping Effect of a Herringbone Journal Bearing", JSME Int. Journal, Series III, Vol. 34, No. 3, pp. 411-418, 1991.

[5] W. C. Choi, K. H. Park, J. H. Choi, K. H. Kim, and B. C. Koh., "Study on the Performance of Spiral-Grooved Semi-Spherical Air Bearings Using Taguchi Method", JSME Int. Journal, Series C, Vol. 43, No. 1, 2000.

[6] J. A. McGeough., "Principles of Electrochemical Machining", Chapman and Hall, Ltd., 1974.

[7] M. Datta., "Applications of Electrochemical Microfabrication: An Introduction", IBM Journal of Research & Development, Vol 42, Issue 5, pp. 563, 1998.

[8] K. P. Rajurkar, D. Zhu, and B. Wei., "Minimization of Machining Allowance in Electrochemical Machining", CIRP, Vol 47, No. 1, pp. 165-168, 1998.

[9] K. P. Rajurkar, D. Zhu, J. A. McGeough, J. Kozak, and A. De Silva., "New Developments in Electrochemical Machining", CIRP, Vol 48, No. 2, pp. 567-580, 2000.

[10] Rolf Schuster, and Viola Kirchner., "Electrochemical Micromachining", Science, Vol. 289, pp. 98-101, 2000.

[11] B. Wei, K. P. Rajurkar, and S. Talpallikar., "Identification of Interelectrode Gap Sizes in Pulse Electrochemical Machining", The Electrochemical society, Vol. 144, No. 11, pp. 3913-3918, 1997.

[12] J. H. Kang, K. W. Kim., "A Comparison study on the Performance of Several Types of Air Lubricated Hydrodynamic Thrust Bearings", Journal of the KSTLE, Vol. 18, No. 5, pp. 364-370, 2001.

[13] Chikamori, K., "Possibilities of Electrochemical Micromachining", Int. Journal of JSPE, Vol. 32, pp. 37-38, 1998.

[14] J. w. Schultze, and A. Bressel., "Principle of electrochemical micro and nano system technologies", Electrochemica Acta 47, pp. 3-21, 2001.

[15] A. K. M. De Silva, H. S. J. Altena, and J. A. McGeough., "Precision ECM by Process Characteristic Modelling", Annals of the CIRP Vol. 49/1, pp. 151-155, 2000.

[16] M. S. Amalnik, and J. A. McGeough., "Intelligent Concurrent Manufacturability Evaluation of Design for Electrochemical Machining", Journal of Materials Processing Technology 61, pp. 130-139, 1996.

**백 승 업(Seung-Yub Back)**

[정회원]



- 2003년 2월 : 인하대학교 기계공학과(공학석사)
- 2007년 2월 : 인하대학교 기계공학과(공학박사)
- 2008년 2월 ~ 2009년 2월 : 유한대학 금형설계과 전임강사
- 2009년 3월 ~ 현재 : 인덕대학교 기계설계과 전임강사

<관심분야>

초정밀나노가공, CAD/CAM/CAE

**김 광 래(Kwang-Lae Kim)**

[정회원]



- 1987년 2월 : 송실대학교 기계공학과(공학석사)
- 1996년 2월 : 송실대학교 기계공학과(공학박사)
- 1998년 9월 ~ 1999년 8월 : State University of New York at Stony Brook 객원교수

- 1989년 3월 ~ 현재 : 인덕대학교 기계자동차과 교수

<관심분야>

마이크로 정밀가공, 절삭가공, 자동차채시, 세라믹공구