

동압베어링의 그르브 가공용 양방향 펄스 파워 전해가공시스템 개발

論 文
54P-4-10

Development of Bidirectional Pulse Power Electrochemical Etching System for the Groove Manufacturing of the Dynamic Bearings

李 龍 根[†]
(Yong-Geun Lee)

Abstract - This paper presents a bidirectional pulse power electrochemical etching system for groove manufacturing of the dynamic bearings. To manufacture the dynamic bearing for the groove, it is very important to consider the depth and roughness. If the precision of the groove is not exact, we can not get the desirable performance for the target of the dynamic bearing. To make the groove of bearing precise, we propose the method of electrochemical etching system. In order to design the depth and roughness exactly, the bidirectional pulse power converter is proposed. With the bidirectional pulse power converter, we obtain the condition and the parameters of converter such as frequency, duty ratio, time, temperature, velocity, pressure and so on. In this paper, we get the experimental results to verify the precise groove manufacturing.

Key Words : bidirectional pulse power, converter, electrochemical etching system, dynamic bearing, groove

1. 서 론

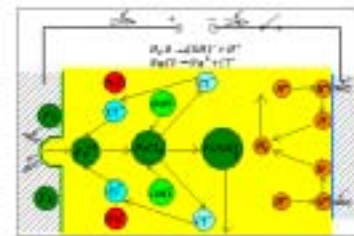
정보기억장치용 및 프린터 용 초정밀 회전기기는 나노(nano) 미터 단위의 회전정밀도를 유지하면서 컴퓨터, 음향 및 영상 등의 데이터 저장 매체(HDD, CD, DVD, VCR, Camcorder 등)와 레이저 빔 프린터의 구동원으로 사용되는 브리시리스 직류모터 등을 포함한 회전기기를 말한다. 21세기 정보화 사회가 도래함에 따라 정보기억장치와 프린터용 초정밀 회전기기는 그 사용범위가 확대되고 있다. 특히 대용량, 초소형 정보기억장치 개발 등과 같은 미래 산업을 주도하기 위해서는 초정밀 회전기기의 공통 기반 기술 중 진동 및 소음저감된 베어링기술의 개발이 주요한 기술 개발의 과제로 떠오르고 있다. 이를 위하여 공기 동압(Aero Dynamic) 베어링 및 유체 동압(Fluid Dynamic) 베어링이 개발되고 있으나, 이를 위하여 그르브의 가공은 초정밀의 가공이 이루어져야 한다. [1-4]

그러나 일반적으로 그르브 가공을 위하여 정밀 CNC 머신을 사용하고 있으나, 생산설비가 고가이고 가공시간이 길어 고비용이 소요된다. 화학적 에칭가공의 경우 생산하는 과정이 복잡하고, 초정밀을 요구하는 곳에는 부적합하며, 전조 방식의 경우 전조할 때 고속회전시 양 끝에 흠집이 생기는 문제점을 가지고 있다. 국내의 경우 그르브 가공이 요구되는 초정밀 동압베어링 회전기기는 수입에 전적으로 의존하고 있는 실정이다.[5],[6]

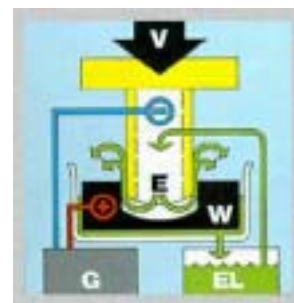
따라서 본 연구 개발에서는 양방향 펄스 파워 전해 가공기를 개발하여 동압 베어링의 그르브 가공을 하였으며, 이의 타당성을 위하여 실험을 통하여 시스템의 성능을 보였다.

2. 전해가공시스템

2.1 전해가공기의 동작원리



(a) 전해가공의 화학반응



(b) 전해액 공급방법과 동작 원리

그림 1 전해가공기의 기본 원리

Fig. 1 Basic principal of electrochemical etching system

[†] 교신저자, 正會員 : 仁荷工業專門大學 電氣情報科學科副教授
E-mail : leeyong@inhac.ac.kr
接受日字 : 2005년 7월 25일
最終完了 : 2005년 10월 10일

전해가공이란 전기의 용해작용을 이용하여 구멍가공, 금형조각가공, 연삭가공, 절단작업 등과 같은 전기화학가공(electrochemical machining)방법을 말하며, 전해 가공기계, 전해연삭기계, 전해 드릴링 머신 등이 있다.

그림 1 (a)에서 전해가공기의 기본원리를 보여주고 있다.

전해가공은 패러디(faraday)의 전기 분해법칙을 근거로 제작된 것으로, 일반적인 도금장치와는 반대의 화학작용이 적용된다.

전해가공시의 화학반응은 다음과 같다.

- 양극(+)
: $Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^{-}$
- 음극(-)
: $2H_2O + 2e^{-} \rightarrow 2(OH) + H_2 \uparrow$
- 전해액
: $2NaCl \rightarrow 2Na^{+} + Cl^{-}$
: $2Na^{+} + 2(OH)^{-} \rightarrow 2NaOH$
: $Fe^{++} + 2Cl \rightarrow FeCl_2$

전해 가공의 특징은 다음과 같다.

- 전기 분해가 되는 재료면 어느 것이나 가공이 가능하다.
- 재료의 강도 및 경도는 가공에 영향을 주지 않는다.
- 가공 종류에 따라 정밀가공은 절삭가공보다 가공속도가 빠르다.
- 절삭가공 시 절삭공구에 해당하는 전극의 소모가 거의 없다
- 복잡한 형상의 가공에 효과적이다.

금속재료의 전기화학적 용해에는 그 진행을 방해하는 양극생성물인 금속산화물막이 생기는데 이를 분류에 의해 제거하면서 가공하는 것이 전해가공이며, 내열강, 초경합금, 고장력강 등 기계가공이 어려운 가공물을 양극으로 하고, 음전극과 함께 알칼리성의 전해액에 넣어 가공부를 전해시켜 구멍을 뚫거나 홈파기 등을 수행한다. 음극은 경면(鏡面; mirror surface)으로 가공되어야 하며, 공구인 음극과 공작물인 양극간에 충분한 전류밀도를 유지하게 하고, 전해액의 공급방법은 그림 1 (b)와 같다. 그림과 같이 공구에 전해액이 흐르도록 공구 중앙에 구멍이 필요하며, 이 구멍에 전해액이 일정한 속도로 흐르도록 유지하는 것이 중요하다. 개발된 양방향 펄스파워 컨버터는 전해가공 시스템에서 공구에 음극을, 전해액에 양극을 인가하도록 한다.

2.2 양방향 펄스파워 전원공급장치의 동작원리

일반적인 경우, 부하에 공급되는 전력은 평균치로서 관리되어 지지만, 일부 특수한 용도의 부하에 대하여는 평균전력 뿐만 아니라 순시전력 역시 중요한 관리대상의 하나가 된다. 즉, 도금용 전원장치 혹은 오페수 처리용 전원장치와 같은 경우, 평균전력을 제어함과 동시에 사용자가 원하는 임의의 순간에 임의의 고전압 혹은 고전류의 순시전력을 공급함으로써, 동일한 전력이 입력되는 것에 비하여 전반적인 시스템의 효율 증대를 기대할 수 있다.

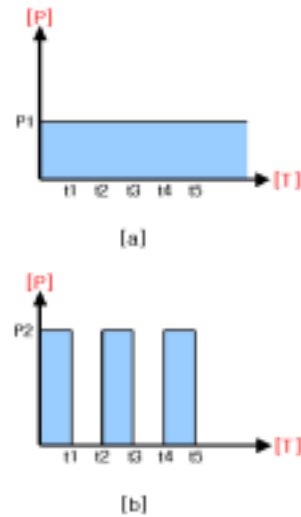


그림 2 전력제어
Fig. 2 Power control

만일, 다음과 같은 관계를 만족하는 t1, t2 및 P2 가 선정된다면, 그림 2의 (a), (b) 두 시스템에 동일한 평균전력이 인가됨을 알 수 있다. 즉,

$$P1 = P2 \times \frac{t1}{t2} \tag{1}$$

의 경우, 두 시스템의 평균전력은 각각 P1 이 되어 동일함을 확인할 수 있다.

$$P1(ave) = P2(ave) = P1 \tag{2}$$

반면, 두 시스템에 인가되는 순시전력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Pa(max) &= P1 \\ Pb(max) &= P2 \end{aligned} \tag{3}$$

2. 3 전해 가공 시스템 구성

전해가공을 위한 전체 시스템 구성은 양방향 펄스파워 전원 공급 장치와 전해가공기로 나눌 수 있으며, 전해가공시스템의 조건은 아래 표와 같다.

표 1 전해가공시스템의 조건
Table 1 Conditions for Electrochemical etching system

구분	내용
형태	양방향 펄스
전압	5 ~ 30 V
전류	50 A
전류밀도	10 ~ 50 A/cm ²
출력주파수	50 KHz
전해액	NaCl
온도	20 ~ 50 도
Flow rate	l/min/100A [0.264 gal/min/100A]
속도	1500 ~ 3000 m/min
Inlet Pressure	0.15 ~ 3 MPa
Outlet Pressure	0.1 ~ 0.3 MPa

2. 4 양방향 펄스파워 전해가공기의 제어모드

개발된 양방향 펄스파워 전해 가공기는 처리공정의 효율이 극대화 될 수 있도록 다음과 같이 4가지 형태의 출력모드를 가지고 있으며, 그림 3에서 그림 6과 같이 각 모드별 출력파형을 나타내었다.

- 직류 모드
- 정 방향 펄스모드
- 직류 바이어스 모드
- 양방향 펄스모드

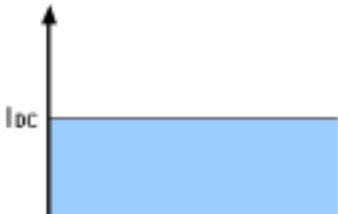


그림 3 직류모드의 전류 지령치
Fig. 3 Current reference of DC mode

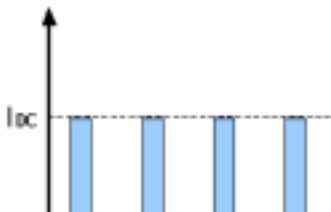


그림 4 정방향 펄스모드의 전류 지령치
Fig. 4 Current reference of positive direction pulse mode

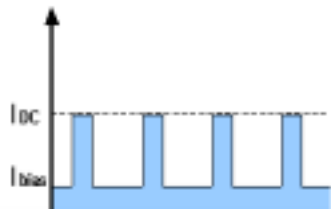


그림 5 직류 바이어스모드의 전류 지령치
Fig. 5 Current reference of DC bias mode

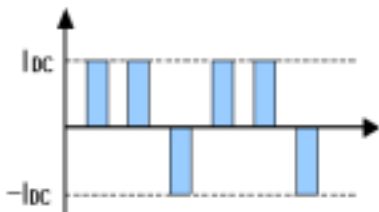


그림 6 양방향 펄스모드의 전류 지령치
Fig. 6 Current reference of bi-directional pulse mode

2. 5 양방향 펄스파워 컨버터

펄스파워 전원공급장치의 전력부 구성은 정격용량, 출력전압의 크기, 주파수, 모드 설정 등 다양한 방법으로 구성하는 것이 가능하며, 양방향 펄스파워 전해가공기의 전력 시스템은 아래 그림 7과 같으며, 구성은 다음과 같다.

- 전압감압용 주 변압기

- 3상 다이오드 정류부
- 전압 및 전류 평활용 L-C 필터 부
- 전압 및 전류 미세제어용 FET 스택(Stack)
- 출력전압 극성제어용 IGBT 스택(Stack)
- 각종 전압 및 전류 검출부 [7-10]

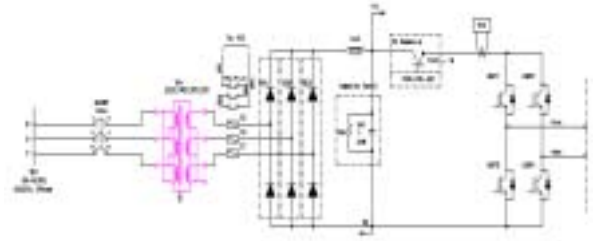


그림 7 양방향 펄스파워 전해가공기의 전력 시스템
Fig. 7 Power system of bi-directional pulse power electrochemical system

주 변압기는 MCCB1의 투입과 동시에 입력되는 선전압 (60 [Hz] / 3상 / 220 [V]) 을 제어에 적절한 저전압 (30 [V]) 으로 감압시키는 역할을 담당하며, 각종 제어부 및 스위치 구동용 전원은 별도의 제어전원용 변압기를 사용한다. 주 변압기의 입력은 현재 220 [V] 단일입력으로 제작되어 있으나, 현장의 상황에 맞추어 380/220 [V] 전원을 Tab 전환방식으로 모두 사용할 수 있도록 설계되어 있다.

다이오드 정류부는 교류로 입력되는 3상전원을 직류로 변화해주는 역할을 담당하고 있으며, 정류를 필요로 하는 주전원이 60 [Hz] 의 비교적 낮은 주파수를 가지므로 정격 전류용량 및 내전압 특성만을 고려하여도 충분한 것으로 판단하였다.

전압·전류 평활용 L-C 필터의 입력은 3상 전압을 전파정류 하였으므로, 출력 단에 나타날 수 있는 전압 리플 (Ripple) 의 주파수는 360 [Hz] 이지만, 경우에 따라 단상전압을 입력으로 사용하는 경우를 고려하여 전압 평활용 커패시터 C 는 충분히 큰 값으로 선정하도록 하였다. 그러나, 전류 평활용 리액터 L 은 실제 전류의 평활기능 보다는 시스템 전원투입 초기에 커패시터 C 를 충전하기 위한 돌입전류의 크기 제한이 그 목적이므로, 실험을 통하여 그 성능을 평가하였다.

출력전압 극성제어용 IGBT 스택(Stack)은 단상 브리지 형태를 갖고 있으며, 시스템의 정격이 일반적인 IGBT 특성으로도 충분히 제어가 가능하므로 정격 전류용량 및 내전압 특성만을 고려하여도 충분할 것으로 판단하여 선정하였다. 단, 게이트 드라이버(Gate Driver)의 설계에 따라, 실제 게이트 신호로부터 IGBT 의 실제 도통까지 발생할 수 있는 On-Delay 와 Off-Delay 가 변화될 수 있으므로, 이 지연시간을 게이트 드라이버(Gate Driver)의 평가항목으로 채택한다.

전압·전류 미세제어용 FET 스택(Stack)은 본 시스템의 핵심부로 입력조건, 출력조건 및 부하의 상태에 따라 가변 제어될 수 있도록 조건이 선정되어야 한다. 즉, 기존의 전력스위치는 포화(Saturation) 상태를 그 운전영역으로 활용하였으나, 본 시스템에서는 전력스위치의 선형(Linear) 구간을 운전영역으로 활용하여 전력소자가 전력제어의 관점에서 전류제한 및 전압제어용 저항과 동일한 역할이 될 수 있도록

를 제어하고 있으므로, 각 소자들의 제어정도, 발열량, 방열 상태, 각종 Gain 조정 등이 모두 원활히 이루어질 수 있도록 설계되었다. [11],[12]

따라서, 선형 구간을 이용한 전류제어기능이 기존의 PWM 전류제어 방식을 채택한 전력시스템보다 전류제어 폭(수mA 이하) 및 미세 전류제어(수mA 이하)가 더욱 양호한 특징을 가지고 있다.

본 연구를 통하여 전해가공 시스템 전용 양방향 펄스파워 전원 공급 장치의 개발은 국내에서 처음으로 연구 개발이 되었으며, 기존의 전력 시스템으로 응용 가능한 전원 공급 장치의 기능보다 전류제어, 주파수제어, 선형 미세 전류제어, 온-오프 듀티(On-OFF Duty) 시간제어 기능 등과 더불어 직류 모드, 정 방향 펄스모드, 직류 바이어스 모드, 특히 양방향 펄스모드 등이 자유롭게 설정 가능하도록 설계된 것이 개선된 특징이다. 또한, 사용자 측면에서의 조건 설정 등이 쉽게 사용할 수 있도록 디지털 스위치 입력이 가능하도록 설계되었다.

3. 실험결과

그림 8은 개발된 양방향 펄스파워 전원공급장치의 외형과 내부의 사진을 나타내었다. 개발된 전해가공시스템은 그림 9와 같다. 그림 10에서 그림 13은 양방향 펄스파워 전원공급 장치의 제어모드에 따라 출력되는 실험파형을 나내고 있는 파형으로, 그림 10은 정방향 펄스모드의 30[A] 출력전류파형을 나타내고 있으며, 그림 11은 직류 바이어스모드의 출력전류파형으로 펄스전류 10[A], 바이어스전류 5[A]를 보여주고 있다.

그림 12와 그림 13은 양방향 펄스모드의 출력전류파형으로 각각 양방향 펄스전류 20[A]와 음방향 펄스전류 20[A], 양방향 펄스전류 30[A]와 음방향 펄스전류 30[A]를 나타내고 있다. 파형에서 볼 수 있듯이 오버슈트 없이 지령된 전류에 양호하게 응답함을 볼 수 있다. 또한, 정상상태에서 전류의 리플이 거의 없이 동작하고 있음을 볼 수 있다.

그림 14는 운전 중 사용자의 부주의 등 여러 가지 원인에 의하여 발생할 수 있는 부하 단락 시 보호기능 동작에 따른 출력전류 제한되었을 때의 파형을 나타내었다. 파워소자의 파손 없이 보호회로에 의해 동작되고 있음을 볼 수 있다.

그림 15는 표 2와 같이 양방향 펄스파워 전원공급장치의 설정 조건에 따라 가공된 그르브 베어링의 상태를 보여주고 있다. 설정 조건은 유량속도, 전해액농도, 전류, Duty ratio로 하였으며, 설정 주파수는 40[KHz]로 일정하게 하였다. 표 2와 같이 설정 조건에 따라 그르브 깊이가 각각 3, 12, 36 [mm]로 가공되었음을 볼 수 있었으며, 이로부터 원하는 그르브 깊이의 조건을 찾을 수 있었다.

따라서 개발된 전해가공 시스템과 양방향 펄스파워 전원 공급장치를 이용하여, 초기에 제어모드 및 설정조건에 따라 가공하고자하는 그르브 깊이의 상태를 확인하고, 이로부터 원하는 베어링 그르브의 최적 조건을 찾을 수 있었다.

그림 13은 전해가공에 필요한 전극봉을 나타내었다. 그림 14는 개발된 전해가공 시스템과 양방향 펄스파워 전원 공급장치를 이용하여 베어링 슬리브(Sleeve)의 내부에 그르브(groove)가 가공된 베어링 부품을 나타내었다.

브(groove)가 가공된 베어링 부품을 나타내었다.

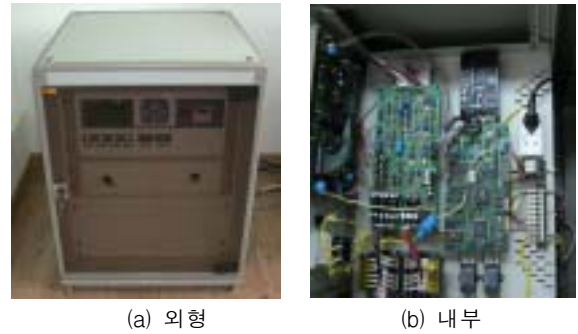


그림 8 양방향 펄스파워 전원공급장치 외형 및 내부
Fig. 8 Outside figure and inside circuits of bi-directional pulse power supply

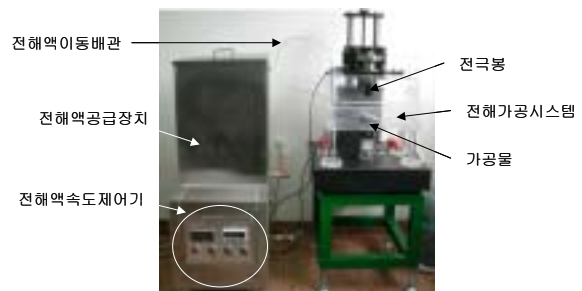


그림 9 전해가공 시스템
Fig. 9 Electrochemical etching system

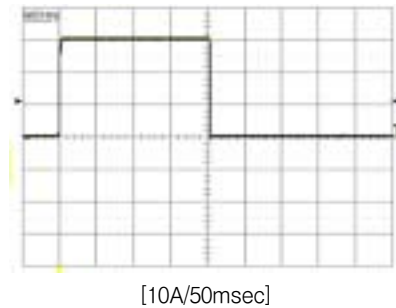


그림 10 정방향 펄스모드의 출력전류파형 (30[A] 지령시)
Fig. 10 Output current waveform of positive directional pulse mode (30[A] reference)

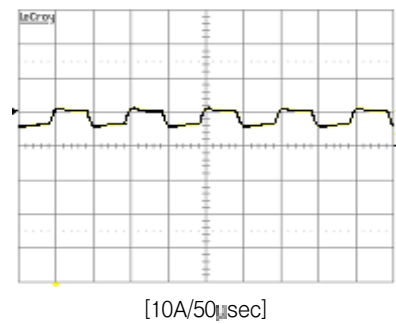


그림 11 직류 바이어스모드의 출력전류파형 (펄스전류 10[A], 바이어스전류 5[A] 지령시)
Fig. 11 Output current waveform of DC bias mode (Pulse current 30[A], bias current 5[A] reference)

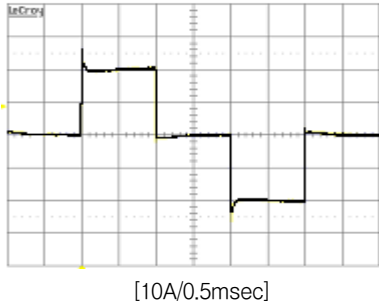


그림 12 양방향 펄스모드의 출력전류파형
(양방향 펄스전류 20[A], 음방향 펄스전류 20[A] 지령시)
Fig. 12 Output current waveform of bi-directional pulse mode
(Positive direction pulse current 20[A], negative pulse current 20[A] reference)

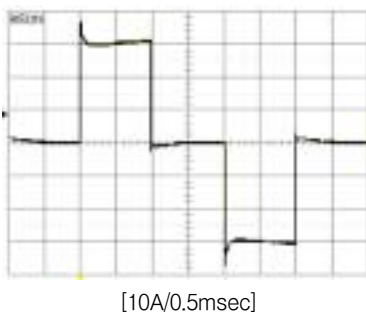


그림 13 양방향 펄스모드의 출력전류파형
(양방향 펄스전류 30[A], 음방향 펄스전류 30[A] 지령시)
Fig. 13 Output current waveform of bi-directional pulse mode
(Positive direction pulse current 30[A], negative pulse current 30[A] reference)

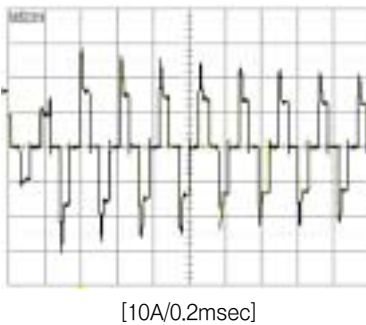


그림 14 운전중 부하단락시의 보호동작파형
Fig. 14 Protection waveform when the load is short in driving

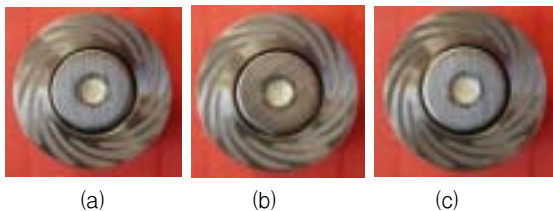


그림 15 양방향 펄스파워 전원공급장치의 설정 조건에 따라 가공된 그르브 베어링
Fig. 15 Grooved bearing according to the setting condition of bi-directional pulse power supply

표 2 양방향 펄스파워 전원공급장치의 설정 조건과 가공된 그르브 깊이

Table 2 Setting condition of bi-directional pulse power supply and grooved bearing depth

인자/결과	(a)	(b)	(c)
유량속도(ℓ /min)	1.5	1.5	3
전해액 농도(%)	20	30	40
전류(A)	20	25	30
Duty Ratio(%)	30	40	50
그르브 깊이(μ m)	3	12	36



그림 16 전해가공을 위한 전극봉
Fig. 16 Tool electrode for electrochemical manufacturing



그림 17 그르브가 가공된 동압베어링
Fig. 17 Grooved dynamic bearing

4. 결 론

정보저장 장치에 사용되는 스피들모터의 경우 높은 속도와 저진동, 저소음 등을 요구한다. 이를 구현하기 위하여 일반적으로 동압베어링을 적용하며, 동압베어링은 운동물체의 상대운동으로 자체 발생하는 유체 및 공기의 펌핑 작용에 의하여 스스로 부양한다. 이를 위하여 초정밀 가공을 요구하는 그르브가 필수적이다.

동압베어링의 그르브 가공을 위하여 본 연구에서는 양방향 펄스 파워 전해 가공기를 개발하였으며, 개발된 양방향 펄스 파워 시스템은 기존의 시스템보다 전류제어, 주파수제어, 선형 미세 전류제어, 온-오프 듀티(On-OFF Duty) 시간 제어 기능 등과 더불어 직류 모드, 정 방향 펄스모드, 직류 바이어스 모드, 특히 양방향 펄스모드 등이 자유롭게 설정 가능하도록 개선되었다.

또한, 선형 구간을 이용한 전류제어기능이 기존의 PWM 전류제어 방식을 채택한 전력시스템보다 전류제어 폭(수mA 이하) 및 미세 전류제어(수mA 이하)가 더욱 양호한 특징을 가지고 있었다.

개발된 전해가공 시스템과 양방향 펄스파워 전원공급장치를 이용하여, 제어모드 및 설정조건에 따라 양호하게 동작하고 있음을 볼 수 있었으며, 가공하고자하는 그르브 깊이의 최적 조건을 실험을 통하여 입증하였다.

본 연구개발을 통하여 정밀가공분야에 대한 필수 요소기술 확보, 펄스파워 전원장치의 설계 및 제작에 관련한 기술 확보, 정밀가공 기술 확보, 정밀 베어링 부품의 대량생산을 통한 초정밀 회전기기 시장개척, 초정밀 가공부품의 수입대체효과, 대량생산 시스템을 통한 가격경쟁력 확보 등을 기대할 수 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Hamrock, B. j., 1994, "Fundamentals of Fluid Film Lubrication, "McGRAW -HILL series in Mechanical Engineering, International Editions, pp. 218-277
- [2] Fuller. D. D., 1984, "Theory and Practice of Lubrication For Engineers," John Wiley & Sons, inc., A Wiley-Interscience Publication," pp. 198-548
- [3] 강경필, 1997, "오일윤활 빗살무늬 저어널 베어링에 대한 정특성 및 안정성 해석", 연세대학교 기계공학과 박사학위논문
- [4] Shin, D. W., 1999, "A Study on the Characteristics of the Oil-Lubricated Herringbone Groove Journal Bearing Using Finite Element Method," M. Eng. Thesis, Yonsei University.
- [5] Nidec Interim Results, Fy2001, Nidec Corporation, 2001.10
- [6] Tsugio Yamamoto, Minebia Investor Meeting In US, 2001.7
- [7] J.R. Hendershot Jr and Tje Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Clarendon Press, 1994.
- [8] "Motor Application Note", Ansoft, 2000.
- [9] Alan Jack at el, " Permanent Magnet Machines with Powdered Iron Sores and Pre-pressed Windings"IEEE IAS, 1999.
- [10] Jang, G. H., Kim Y. J., "Calculation of dynamic coefficients in a hydrodynamic bearing considering five degrees of freedom for a general rotor-bearing system," ASME Journal of Tribology, Vol.121, pp. 499-505, 1999
- [11] 양승현, 강병희, 전윤석, 목형수, 최규하, "전류제어형 펄스 전원장치를 이용한 수산화가스 발생 특성연구", 전력전자학술대회 논문집, pp. 257-262, 2000.
- [12] 강필순, 이정환, 박성준, 김철후, "양방향 전력수수가 가능한 이동식 전원장치의개발", 전력전자논문집 제7권 제4호, pp. 339-345, 2002.

저 자 소 개



이 용 근 (李 龍 根)

1960년 11월 6일생. 1985년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1989년 미국 University of Missouri-Columbia 전기공학 졸업(석사). 1993년 동 대학원 졸업(공학박). 1995. 3 - 현재

인하공업전문대학 전기정보과학과 부교수.

Tel : 032-870-2196

E-mail : leeyong@inhac.ac.kr