

Airfoil Bearing 이 장착된 초고속 BLDC 모터 제어

A Control of the High Speed BLDC Motor with Airfoil Bearing

정연근, 김한솔, 백광렬*
(Yeon-Keun Jeong¹, Han-Sol Kim¹, and Kwang Ryul Baek^{1,*})

¹Department of Electronics Engineering, Pusan National University

Abstract: The BLDC motor is used widely in industry due to its controllability and freedom from maintenance because there is no mechanical brush in the BLDC motor. Furthermore, it is suitable for high-speed applications, such as compressors and air blowers. For instance, for a compressor with a small impeller due to miniaturizing, the BLDC motor has to rotate at a very high speed to maintain the compression ratio of the compressor. Typically, to reach an ultra-high speed, airfoil bearings must be used in place of ball bearings because of their friction. Unfortunately, the characteristics of airfoil bearings change drastically depending on the revolution speed. In this paper, a BLDC motor with airfoil bearings is controlled with a PID controller. To analyze and determine the PID coefficients, the relay-feedback method is used. Additionally, for adaptive control, a fuzzy logic controller is used. Furthermore, the auto-tuning and self-tuning techniques are combined to control the BLDC motor. The proposed method is able to control the airfoil-bearing BLDC motor efficiently.

Keywords: BLDC motor, airfoil bearing, relay-feedback, auto-tuning, fuzzy, self-tuning, PID

I. 서론

BLDC 모터는 산업용 공기압축기, 가스터빈, 대형 터보냉동기, 고압 송풍기 등 다양한 컴프레서 산업분야에서 사용되고 있다[1]. 최근 몇 년 동안 국내 기술로 생산된 산업용 컴프레서의 출고량은 점점 증가하고 있는 추세다[2]. 현재 산업 현장에서 쓰이는 대부분의 산업용 컴프레서는 100마력 이상급이다. 100마력 이상의 컴프레서는 설치비용이 많이 들고 차지하는 공간이 크다. 컴프레서의 압축비를 유지하면서 소형화, 경량화하여 제작하는 것은 산업용 컴프레서 시장에서 경쟁력을 높이기 위한 하나의 방법이다. 컴프레서의 소형화, 경량화는 임펠러의 크기도 작아지는 것을 의미한다. 임펠러가 작아지면 유량이 감소하기 때문에 기존의 압축비를 유지하기 위해 BLDC 모터는 초고속으로 회전해야 한다.

BLDC 모터를 초고속으로 동작하기 위해 중요한 것 중 하나는 회전축을 지지하는 베어링 시스템이다[3]. BLDC 모터에 사용되는 베어링은 ball bearing, magnetic bearing, airfoil bearing 등이 있다. Ball bearing은 회전축과의 마찰로 인해 내구성이 떨어져 모터를 초고속으로 회전하는데 한계가 있다. 또한 회전축과의 마찰로 인해 오일 시스템이 필요하고 유지 보수에 많은 비용이 든다. Magnetic bearing은 제어가 복잡하고 A/S 비용이 많이 필요한 단점이 있다. 그러나 airfoil bearing은 특정한 속도부터 베어링과 회전축 사이에 공기가 유입되어 마찰로부터 보호받을 수 있기 때문에 초고속으로 회전이 가능하며 내구성이 높다[4]. 또한 airfoil bearing과 회전축이 접촉하지 않기 때문에 오일 시스템에 대한 비용을 줄일 수 있고

magnetic bearing에 비해 시스템이 단순하다. 그러나 airfoil bearing은 저속에서 베어링과 회전축 사이에 공기층이 형성되기 전에는 마찰이 크기 때문에 초기 구동이 반복되면 airfoil bearing의 내구성이 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 airfoil bearing이 장착된 BLDC 모터를 제어하기 위해 일반적으로 모터 제어에 적용하는 PID제어를 이용하였다[5]. 시스템 특성을 분석하고 PID 계수 값을 결정하기 위하여 auto-tuning 방법인 Ziegler-Nichols' closed loop method를 사용하였다. Ziegler-Nichols' closed loop method는 지속적인 출력 진동으로부터 시스템의 특성을 파악하여 PID 계수 값을 결정하는 방법이다[6]. 본 논문에서는 플랜트 출력을 제한할 수 있어 시스템의 안정성이 보장되는 relay-feedback 방법을 이용하여 출력 진동을 발생시켰다[7]. Airfoil bearing이 장착된 BLDC 모터는 특정 속도에서부터 베어링과 회전축 사이에 공기층이 형성되어 초고속으로 동작하기 때문에, relay-feedback의 기준점을 특정 속도 이상의 구간으로 설정하였다. 또한 초고속으로 동작 시, 속도에 따라 모터의 부하 토크와 시스템 특성이 급격히 달라지므로, 변화되는 부하 토크에 대한 안정적인 제어와 시스템 응답을 개선하기 위해 self-tuning 방법 중 하나인 퍼지 제어를 결합하였다. 퍼지 제어기의 규칙 베이스는 제어 구간별 PID 계수 값의 변화에 대한 시스템 응답 반응 특성을 고려하여 설정하였다.

II. AIRFOIL BEARING BLDC 모터의 동작 특성

Airfoil bearing은 그림 1과 같이 정지 상태일 때 모터의 회전축과 접촉되어 있다. 정지 상태에서 속도가 증가하면 그림 2와 같이 회전축과 airfoil bearing 사이에 공기층이 형성되어 마찰이 급격하게 감소하면서 정상 상태로 동작한다. 초기에 정상 상태로 동작 할 때까지, 회전축과 airfoil bearing의 마찰이 크기 때문에 초기 구동을 자주하면 airfoil bearing의 내구성은 낮아진다.

* Corresponding Author

Manuscript received August 17, 2016 / revised September 12, 2016 / accepted September 28, 2016

정연근, 김한솔, 백광렬: 부산대학교 전자공학과

(busker@pusan.ac.kr/hsv138@pusan.ac.kr/krbaek@pusan.ac.kr)

※ 본 연구는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

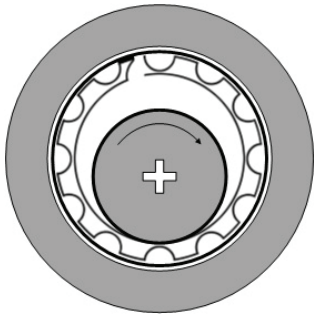


그림 1. 정지 상태에서의 회전축 위치.
Fig. 1. Shaft location in stop state.

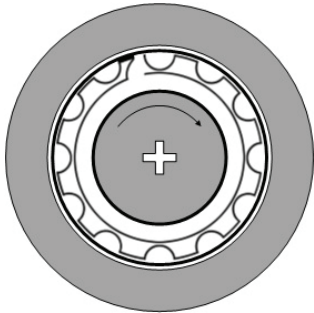


그림 2. 정상 상태에서의 회전축 위치.
Fig. 2. Shaft location in steady state.

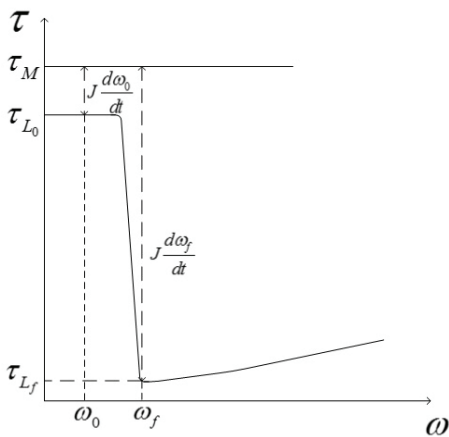


그림 3. Airfoil bearing BLDC 모터의 속도-토크 특성.
Fig. 3. Speed-torque characteristic of airfoil bearing BLDC motor.

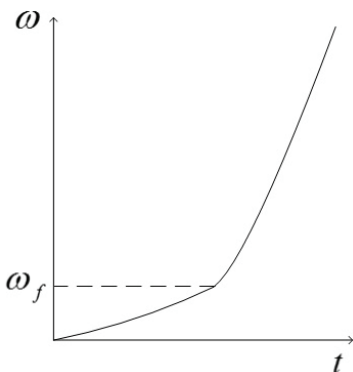


그림 4. 일정한 공급 토크에 대한 속도-시간 특성.
Fig. 4. Speed-time characteristic for constant torque input.

Airfoil bearing을 장착한 모터의 속도-토크 특성은 그림 3과 같다. 부하 토크 τ_{L_0} 는 초기 구동 시 회전축과 bearing이 접촉되어있을 때 매우 크다. 일정한 구동 토크 τ_M 로 구동하였을 때, 모터에 발생하는 토크는 $\tau_M - \tau_{L_0} = Jd\omega_0/dt$ 로 변화가 거의 없다. 일정한 토크가 모터에 공급되면 속도가 일정하게 증가하다가 특정한 속도 ω_f 지점부터 회전축과 airfoil bearing 사이에 공기층이 형성되면서 정상 상태로 동작한다. 정상 상태에서 동작 할 때, 부하 토크는 τ_{L_f} 로 급격하게 감소하고, 모터에 발생하는 토크는 $\tau_M - \tau_{L_f} = Jd\omega_f/dt$ 가 된다. 이때 그림 4와 같이 정상 상태로 진입하는 순간인 ω_f 지점에서부터 속도는 급격히 증가한다.

III. AIRFOIL BEARING BLDC 모터 제어

본 논문에서 airfoil bearing이 장착된 BLDC 모터는 기본적으로 PID 제어를 이용하여 속도를 제어한다. 목표 속도가 결정되면, 속도 PID 제어기에 의해 목표 전류가 결정되고 전류 PID 제어기에 의해 모터의 토크를 제어한다. 속도 PID 제어기와 전류 PID 제어기로 구성된 시스템 블록도는 그림 5와 같다.

1. Relay-feedback을 이용한 auto-tuning 방법

모터 제어를 위한 PID 계수 값을 모터 시스템을 모델링하고 수식을 통해 이론적으로 구할 수 있으나 정확한 모델링이 어려워 일반적으로 특성을 파악하기 위해 반복적인 실험을 통하여 얻을 수 있다. 그러나 airfoil bearing 특성상, PID 계수 값을 획득하기 위한 잦은 실험은 정지 상태 또는 지속에서의 반복적인 구동이 발생하기 때문에 airfoil bearing의 내구성을 떨어뜨릴 수 있다. 본 논문에서는 auto-tuning 방법인 Ziegler-Nichols' closed-loop method를 이용하여 최초 1회 구동으로 시스템 특성을 파악하고 PID 계수를 결정하였다. Ziegler-Nichols' closed-loop method는 지속적인 출력 진동으로부터 시스템 특성을 파악하여 PID 계수 값을 결정하는 방법이다[6]. 지속적인 출력 진동을 발생시키기 위해서 relay-feedback 방법을 적용하였다. Relay-feedback 방법은 relay의 동작에 의해 출력의 기준점과 출력의 오차로부터 지속적인 진동을 발생시킬 수 있다. 발생된 진동으로부터 ultimate 계수를 획득하여 Ziegler-Nichols PID 계수 테이블에 적용하여 PID 계수 값을 결정할 수 있다[4].

본 논문에서는 모터의 회전이 필요 없는 전류 PID 계수 값을 실험적으로 얻고, 속도 PID 계수 값을 relay-feedback로 구하였다. 일반적으로 relay-feedback의 기준 값은 0이다[8]. 모터제어의 경우 기준 값을 0으로하면 출력 진동이 양수, 음수가 되어 모터는 정방향과 역방향으로 교차되어 회전하면서 진동해야 한다. 그러나 airfoil bearing을 이용할 경우 모터

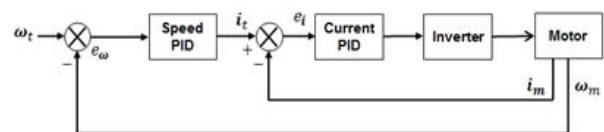


그림 5. 전류 및 속도 PID 블록도.
Fig. 5. Current and speed PID control schematic.

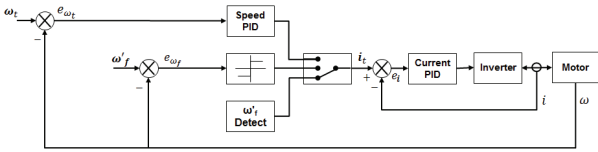


그림 6. Relay-feedback이 결합된 PID 제어 시스템 블록도.
Fig. 6. Relay-feedback PID system schematic.

의 방향이 자주 바뀌면 저속상태에서 동작을 반복하므로 airfoil bearing을 이용한 제어에는 적합하지 않다. 또한, airfoil bearing은 저속일 때와 고속의 정상 상태에서의 특성이 급격하게 바뀐다. 따라서, airfoil bearing이 정상 상태에서 고속으로 동작할 때의 특성을 파악하여 최적의 PID 계수를 획득하여야 한다. 그러므로 relay-feedback의 기준 값은 bearing의 정상 상태 구간으로 설정해야 하며, 출력 진동의 범위 또한 정상 상태 안에 존재하여야 한다. 그림 6은 기존의 PID 제어 블록도에 기준 값 ω'_f 검출과 relay-feedback이 포함된 시스템 블록도이다. 기준 값 ω'_f 는 그림 4에서 보는 것과 같이 모터에 일정한 토크를 공급하였을 때, 속도가 급격하게 바뀌는 지점인 ω_f 를 정상 상태의 시작점으로 두고, relay에 의한 출력 진동이 정지 상태로 들어가지 않을 만큼의 오프셋을 주어 정한다.

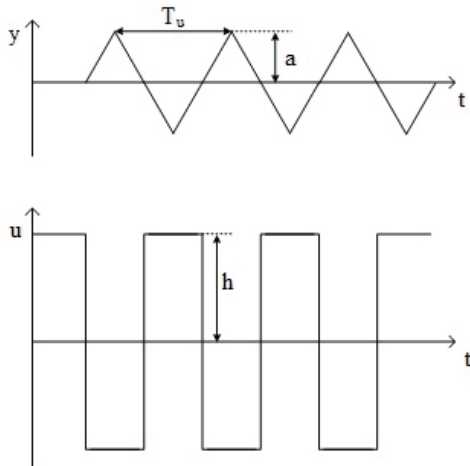


그림 7. Relay 출력에 대한 출력 진동.
Fig. 7. Oscillation of plant for relay output.

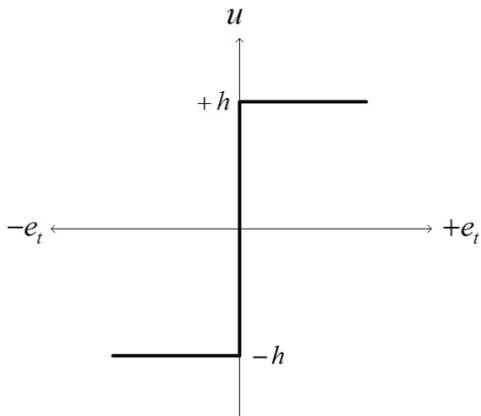


그림 8. 오차에 대한 relay 출력 동작.
Fig. 8. Relay output operation for error.

그림 7은 relay-feedback 시스템에서 relay출력에 대한 출력 진동을 나타낸 것이다. 플랜트 출력 y와 기준 값의 오차의 극성에 따라 relay 출력 u는 진폭 h의 크기를 가지고 극성이 바뀐다. 초기 동작 시 relay 출력이 high일 때, 플랜트 출력은 증가하여 기준 값보다 커지므로 기준 값과의 오차는 음수가 된다. 그림 8과 같이 정해진 오차에 대한 relay 출력 동작에 의해, 기준 값과 플랜트 출력의 오차가 음수일 때, relay 출력은 -h가 되면서 플랜트의 출력은 감소한다. 플랜트의 출력이 감소되어 다시 기준 값의 오차가 양수가 될 때, relay 출력은 +h가 되면서 플랜트의 출력은 증가하고 기준 값과의 오차는 다시 음수가 된다. 이러한 오차에 대한 relay의 동작으로 인해 플랜트의 출력은 진동한다. Relay-feedback과 출력 진동의 파라미터를 이용하여 ultimate 계수 K_u 와 출력 진동의 주기 T_u 는 식 (1)과 같이 구할 수 있고, 구해진 K_u 와 T_u 를 Ziegler-Nichols PID 계수 테이블에 적용하면 PID 계수 값을 결정할 수 있다[9].

$$K_u = \frac{4h}{\pi a}, \quad T_u = \frac{2\pi}{\omega_u} \quad (1)$$

2. 퍼지 제어를 이용한 self-tuning 방법

Airfoil bearing BLDC는 airfoil bearing이 정상 상태에서 동작할 때, bearing과의 마찰이 거의 없고 초고속으로 회전하며 모터의 속도가 증가함에 따라 부하 토크의 특성이 비선형적으로 변한다. 따라서 auto-tuning으로 획득한 PID 계수 값을 실시간으로 self-tuning하여 적응 제어할 필요가 있다. 본 논문에서 적용한 self-tuning 방법으로는 대표적으로 많이 사용하는 퍼지 제어를 적용하였다. Relay-feedback 방법과 퍼지 제어가 결합된 전체 시스템 블록도는 그림 9와 같다.

퍼지 제어기의 입력은 속도 오차와 오차의 변화율이고 출력은 PID 계수 조정 값인 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 가 된다. 퍼지 제어기의 출력이 적용된 최종적인 속도 PID 계수 값은 식 (2)와 같이 이전의 계수 값에 퍼지 제어기의 출력이 더해진 값으로 실시간 업데이트 된다.

표 1. Ziegler-Nichols PID 계수 테이블.

Table 1. Ziegler-Nichols PID coefficients table.

	K_p	K_i	K_d
P	$0.5 \times K_u$	-	-
PI	$0.45 \times K_u$	$1.2 \times K_p / T_u$	-
PID	$0.6 \times K_u$	$2 \times K_p / T_u$	$K_p \times T_u / 8$

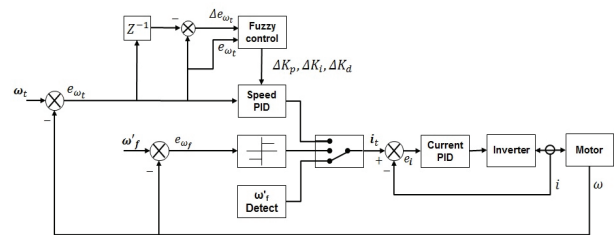


그림 9. Airfoil bearing BLDC 모터 제어 시스템 전체 블록도.
Fig. 9. A whole schematic of airfoil bearing BLDC motor control system.

$$\begin{aligned}
 K_p[n] &= K_p[n-1] + \Delta K_p \\
 K_i[n] &= K_i[n-1] + \Delta K_i \\
 K_d[n] &= K_d[n-1] + \Delta K_d
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

퍼지 제어기는 그림 10과 같이 퍼지화(fuzzification), 규칙 베이스(rule base), 추론(inference), 비퍼지화(defuzzification)로 구성된다[10]. 퍼지화는 수치적으로 표현되는 크리스프(crisp) 값이 입력되면, 소속 함수(membership function)에 의해 퍼지 집합(fuzzy set)으로 정의하는 과정이다. 소속 함수는 일반적으로 삼각형이나 자연로그의 형태를 가진다[11]. 본 논문에서는 구현이 간단하고 연산량이 적은 삼각형 형태의 소속 함수를 사용하였다[12]. 추론 과정은 그림 11과 같이 MAX-MIN 연산을 통해 구해진 각 규칙에 대한 소속 함수 출력 값을 “AND” 연산 하여 최종 소속 함수의 결과를 얻을 수 있다. 퍼지 규칙은 두 개 혹은 여러 개의 조합인 선행 집합과 출력의 결과 집합으로 정의된다[13]. 디퍼지화는 일반적으로 많이 사용하는 COA (Center of Area) 방법을 사용하였다[13].

퍼지 제어기의 모든 과정은 규칙 베이스에 의해 동작한다. 규칙 베이스는 시스템에 대한 지식과 경험에 의해서 정의된다. 본 논문에서는 PID 계수 값에 대한 규칙을 정의해야 하

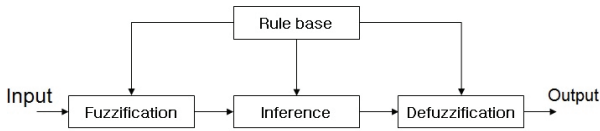


그림 10. 퍼지 제어기 블록도.
Fig. 10. Fuzzy controller block diagram.

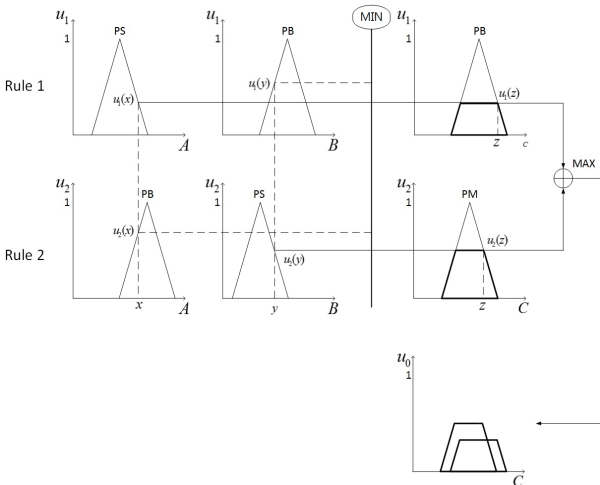


그림 11. 각 규칙들에 대한 MAX-MIN 연산 과정.
Fig. 11. Process of MAX-MIN operation for each rules.

표 2. PID 계수 증가에 대한 시스템 응답 특성.
Table 2. System response for increasing a PID coefficients.

	Rising time	Overshoot	Settling time	Steady-state error
K_p	Decrease	Increase	Small change	Decrease
K_i	Decrease	Increase	Increase	Eliminate
K_d	Minor change	Decrease	Decrease	No effect

므로 각각의 규칙은 PID 계수의 특징에 의해서 결정이 되어야 한다. 제어 시스템에서 PID 계수 값 증가에 따른 시스템 응답 특성은 표 2와 같다[14]. 표 2에서 볼 수 있듯이, PID 계수 값 증가에 대한 시스템 응답의 특성을 고려하여, 그림 12와 같이 제어 구간을 크게 3부분으로 나누어서 규칙을 정의하면 표 3과 같다[15]. 그림 12에서 보는 것과 같이 제어 시작 구간에서는 오차가 제일 크기 때문에 이때의 응답은 목표 값에 빨리 도달해야 하므로 비례 계수인 K_p 의 값을 더 크게 변경하여야 한다. 마찬가지로 적분 계수와 미분 계수도 각 계수의 특성을 고려하여, 규칙 베이스를 표 4와 같이 정의하였다[15].

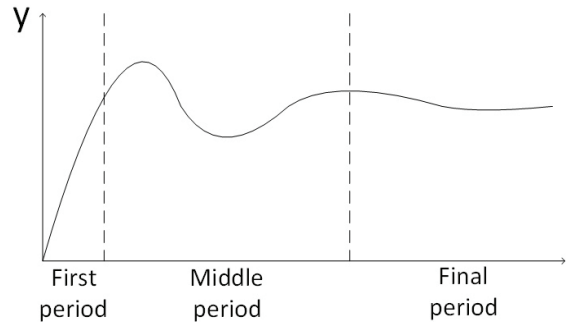


그림 12. 제어 구간별로 나눈 출력 파형 특성.
Fig. 12. A characteristic of output wave shape for each control period.

표 3. 제어 구간에 대한 각 계수 값들의 이상적인 변화 특성.

Table 3. Ideal change values of PID coefficients for control period.

	First	Middle	Final
K_p	Larger	Middle	Smaller
K_i	Smaller	Middle	Larger
K_d	If the change of the force error is larger → larger If the change of the force error is smaller → smaller		

표 4. 각 계수에 대한 규칙 베이스.

Table 4. Rule bases for each PID coefficients.

(a) Rule base of P coefficient.

ec/e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

(b) Rule base of I coefficient.

ec/e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZO	PS	PS	PM	PM	PB	PB

(c) Rule base of D coefficient.

ecle	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

IV. 실험 및 결과

Airfoil bearing이 장착된 초고속 BLDC 모터를 제어하기 위한 순서도는 그림 13과 같다. 일정한 토크를 공급하여 ω_f 를 검출하고 relay-feedback 방법을 이용하여 정상 상태의 시스템 특성을 분석하여 PID 계수를 결정한다. 모터 회전 속도에 따라 달라지는 부하 토크와 시스템 특성에 대해 안정적으로 제어하기 위해 퍼지 제어를 결합한 PID 제어를 한다.

1. 실험 환경

Airfoil bearing이 장착된 BLDC 모터의 파라미터는 표 5와 같다. 그림 14와 같이 고속으로 모터를 구동하기 위해 보호 장치인 강판으로 케비넷을 제작하고 그 안에 모터와 속도 측정을 위한 타코미터를 설치하였다.

Airfoil bearing이 장착된 BLDC 모터를 초고속을 제어하기 위해 공급 전력은 310V-100A 31kW급으로 목표하였다. 그림 15는 컨트롤러 보드이다. 프로세서는 TI(Texas Instrumental)사의 TMS320F28335를 사용하였다.

그림 16은 컨트롤러의 제어 명령을 인버터로 전달하는 드라이버 보드이다. 게이트 드라이버는 CONCEPT사의 2SC0435T를 사용하였다. 션트 저항을 이용하여 모터에 흐르는 전류를

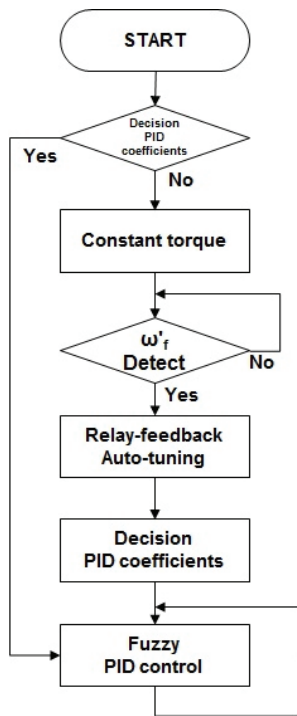


그림 13. Airfoil bearing이 장착된 BLDC 모터 제어 흐름도.
Fig. 13. Flowchart for BLDC motor control with mounted airfoil bearing.

측정하여, 과전류 검출 시 시스템을 강제 정지시킴으로써 시스템의 안정성이 보장되도록 설계하였다.

그림 17은 BLDC 모터의 3상을 스위칭하는 인버터 모듈이다. 인버터 단에는 고속으로 스위칭이 가능하면서 정격 전류가 600A인 infineon사의 FF330R12KT4 IGBT를 사용하였다. 정격 전압은 1200V로 높은 전력으로 구동이 가능하다. 모터의 잡음을 제거하기 위해 인버터 전원 양단에 정격 전압이 높은 마일러 커패시터와 저항을 병렬로 연결하였다.

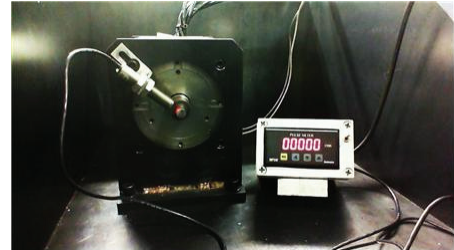


그림 14. Airfoil bearing BLDC 모터 설치 환경.
Fig. 14. Setup environment of airfoil bearing BLDC motor.

표 5. Airfoil bearing이 장착된 BLDC 모터 파라미터.
Table 5. BLDC motor parameters with mounted airfoil bearing.

Parameter	Value
Rated power	31(kW)
DC link	310(V)
Stator resistor	21(ohm)
Stator inductance	0.3533(mH)
Number of pole-pairs	2(pole)
Rotor weight	3.4(kg)
Rotor type	IPM

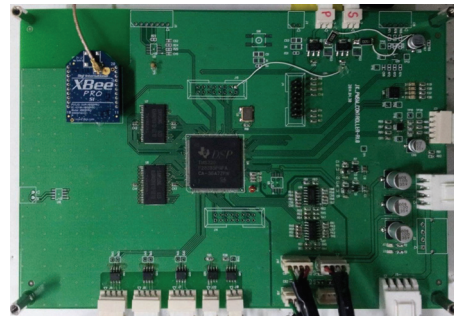


그림 15. 컨트롤러 보드.
Fig. 15. Controller board.

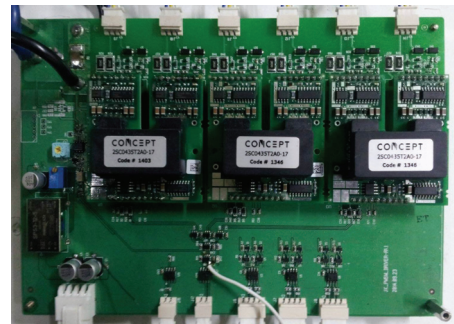


그림 16. 드라이버 보드.
Fig. 16. Driver board.

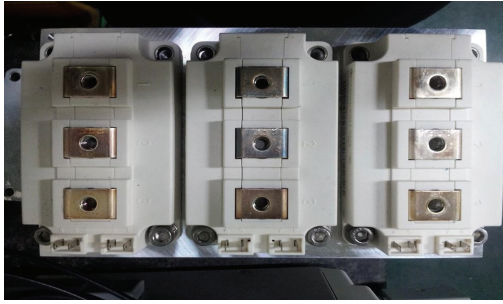


그림 17. 인버터 모듈.
Fig. 17. Inverter module.

2. 실험 결과

그림 18은 relay-feedback의 기준점인 ω_f 를 검출하기 위해, airfoil bearing이 장착된 BLDC 모터에 일정한 토크를 공급하였을 때의 속도 그래프이다. 가속도가 급격하게 바뀌는 지점인 ω_f 에서 회전축과 airfoil bearing 사이에 공기층이 형성되어 정상 상태에서 동작하는 것으로 볼 수 있다. Relay-feedback의 기준점은 relay 출력의 진폭을 고려하여 정상 상태에서 충분히 동작할 수 있는 ω_f 로 결정하였다.

그림 19는 airfoil bearing이 장착된 BLDC 모터에 relay-feedback 방법을 적용시킨 결과이다. Relay의 입력은 기준점과 속도 출력의 오차이고, 출력은 목표 전류가 된다. Relay의 출력 진폭은 0.2(A)단위로 증가시키면서 플랜트의 출력 진동이 나타날 때의 값으로 결정하였다. 실험 결과 relay의 출력 진폭 $h=8$ 일 때 플랜트의 출력 진동이 나타났으며, 출력 진동은 현재 주기의 최고 값과 이전 주기의 최고 값의 비가 약 1/4 이상일 때 안정화된 진동으로 검출할 수 있다[6]. 본 논문에서는 Relay-feedback의 적용 결과를 바탕으로, 오프라인으로 직접 PID 계수 값을 계산하여 적용하였다. 플랜트 출력 $a = 17.1311$, $T_u = 0.31$ 이다. 각 파라미터로부터 구해진 PID 계수 K_p, K_i, K_d 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_p &= 1.6367 \\ K_i &= 10.5595 \\ K_d &= 0.0634 \end{aligned} \quad (3)$$

그림 20은 relay-feedback 방법으로 결정된 PID 계수 값을 적용하여, airfoil bearing이 정상 상태로 동작할 때부터 제어한 결과이다. 시스템의 응답을 빠르게 하기 위해, 초기 구동 시에는 최대 토크를 공급하여 모터를 구동하였다.

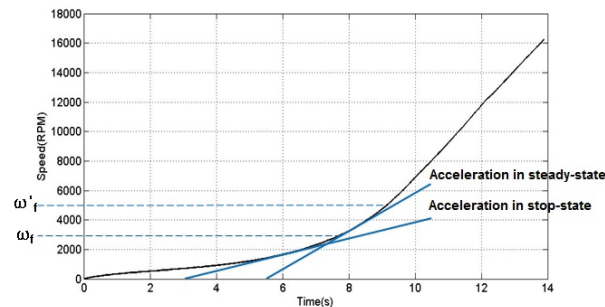


그림 18. 일정한 공급 토크에 대한 속도 측정 결과.
Fig. 18. Result of motor speed for constant supply torque.

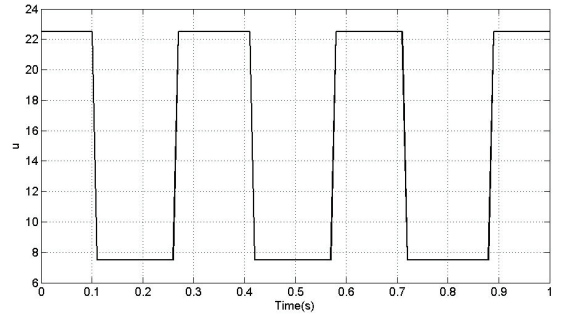
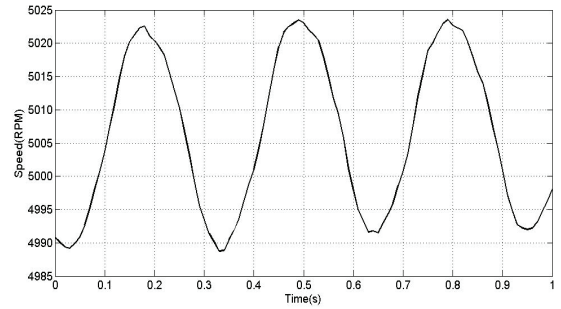


그림 19. Relay 동작에 의한 출력 진동 결과.
Fig. 19. Result of output oscillation for relay operation.

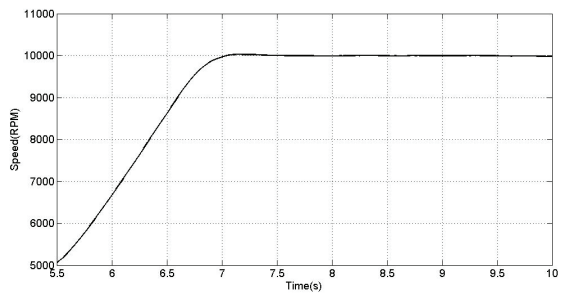


그림 20. 정상 상태에서부터 relay-feedback이 적용된 PID 제어 결과.
Fig. 20. Result of PID control with relay-feedback method from steady state.

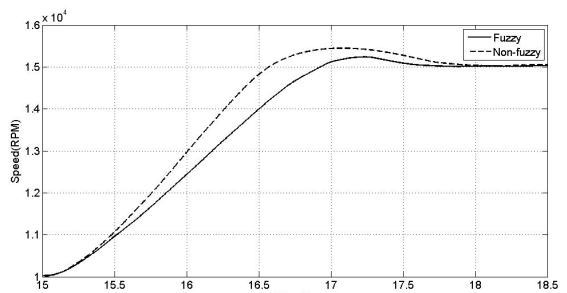


그림 21. 퍼지 제어 결합 유무에 대한 결과 비교.
Fig. 21. Comparison between the result of fuzzy control and non-fuzzy control.

표 6. 퍼지 제어 결합 유무에 대한 결과 비교표.
Table 6. Comparison table between the result of fuzzy control and non-fuzzy control.

	Non-fuzzy	Fuzzy
Overshoot	2.9739%	1.5827%
Settling time	2.465s	1.77s

그림 20과 표 6은 퍼지 제어를 적용한 것과 적용하지 않은 것의 비교 결과이다. 점선은 relay-feedback으로 획득한 PID 계수 값만을 적용시킨 것이다. 실선은 relay-feedback으로 획득된 PID 계수 값에 퍼지 제어를 결합하여 실시간으로 업데이트하면서 제어한 결과이다. 두 방법의 성능을 검증하기 위해 목표 속도 10,000RPM으로 동작 중인 상황에서 목표 속도를 15,000RPM으로 가변하여 실험하였다. Relay-feedback으로 획득한 고정된 PID 계수 값을 가지고 제어한 결과보다 퍼지 제어를 결합한 결과가 더 우수한 성능임을 검증하였다.

V. 결과

Airfoil bearing이 장착된 초고속 BLDC 모터를 제어하기 위해 airfoil bearing의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 일정한 토크가 모터에 공급되면 특정한 속도에서 회전축과 airfoil bearing 사이에 공기층이 형성되어 정상 상태로 동작한다. 정상 상태에서 부하 토크가 급격하게 감소하면서 시스템 특성이 크게 바뀐다.

정상 상태로 동작 할 때의 시스템 특성을 파악하여 PID 계수 값을 결정하기 위해 auto-tuning 방법 중 하나인 relay-feedback 방법을 사용하였다. Relay-feedback 방법은 지속적인 출력 진동으로부터 시스템 분석을 통해 PID 계수 값을 결정한다. Airfoil bearing이 장착된 BLDC 모터는 속도에 따라 부하 토크가 달라진다. 따라서 self-tuning 방법을 auto-tuning 방법과 결합하여 적응 PID 제어를 하였다. 본 논문에서는 self-tuning 방법 중 하나인 퍼지 제어를 결합하여 PID 계수 값을 실시간으로 갱신하였다. 실험 결과 relay-feedback 방법과 퍼지 제어를 결합하여 제어했을 때, relay-feedback 방법을 이용하여 획득한 PID 계수만으로 구동했을 때보다 속도의 변화에 더 안정적으로 제어가 되는 것을 확인하였다.

본 논문에서는 airfoil bearing이 장착된 초고속 BLDC 모터를 안정적으로 제어할 수 있는 시스템을 구축하였고, 앞으로 airfoil bearing이 장착된 BLDC 모터를 초고속으로 동작하기 위한 기기에 응용 할 수 있다. 향후 연구 과제로 임펄스를 부착하여 부하가 변동되었을 경우에 대한 연구가 필요하다. 또한 초고속 동작에 대한 다이내믹 시스템과 관련된 연구가 필요하다.

REFERENCES

- [1] J.-S. Kang, B.-J. Lim, B.-J. Cha, and S.-S. Yang, "Technology trends of centrifugal compressor," *Industrial and Technological Trends in Aerospace*, vol. 2, no. 1, pp. 64-69, 2004.
- [2] N. S. Kim and S. Y. Jeong, "Industrial air compressors shipments," KOAMI, K.R., Report, 2013.
- [3] P. Imoberdorf, C. Zwysig, S. D. Round, and J. W. Kolar, "Combined radial-axial magnetic bearing for a 1 kW, 500,000 rpm permanent magnet machine," *Applied Power Electronics Conference*, pp. 1434-1440, 2007.
- [4] G. L. Agrawal, "Foil air/gas bearing technology," *American Society of Mechanical Engineers*, Publication 97-GT-347, 1997.
- [5] Y. J. Ko, Y. J. Kim, and J. S. Kim, "Robust speed control of an autonomous vehicle using disturbance observer," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 22, no. 5, pp. 339-345, Mar. 2016.
- [6] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *Trans, ASME*, vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [7] A. Leva, "PID autotuning algorithm based on relay feedback," *IEE Proceedings of Control Theory and Applications* 1993, vol. 140, no. 5, pp. 328-338, 1993.
- [8] J. Kocijan, "Survey of the methods used in patents on auto-tuning controllers," *Recent patents on Electrical Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 201-208, 2008.
- [9] Mary Jermila M, Anju Iqbal, Soumya Raj. L, "Pid Auto Tuning Using Relay Feedback," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 2, no. 4, Apr. 2013.
- [10] L. A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3, pp. 28-44, 1973.
- [11] Y. J. Park and S. Jeong, "Neuro-fuzzy control for balancing a two-wheel mobile robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 40-45, Jan. 2016.
- [12] "Design of Lateral Fuzz-PI Controller for Unmanned Quadrotor Robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 2, pp. 164-170, Feb. 2013.
- [13] LIANFANG TIAN, "Intelligent self-tuning of PID control for the robotic testing system for human musculoskeletal joints test," *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 32, no. 6, pp. 899-909, Jun. 2004.
- [14] J. Zhong, *PID Controller Tuning: A Short Tutorial*, Mechanical Engineering Purdue University, Spring 2006.
- [15] R. P. Copeland and K. S. Rattan, "A fuzzy logic supervisor for PID control of unknown systems," *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pp. 22-26, Aug. 1994.



정연근

2013년 동명대학교 정보통신공학과 졸업. 2015년 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 석사. 2015년~현재 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 박사과정. 관심분야는 제어 및 계측 시스템.



김한술

2011년 부산대학교 전자전기공학부 졸업. 2013년 부산대학교 전자공학과 석사. 2013년~현재 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 박사과정. 관심분야는 제어 및 계측 시스템.



백광렬

1984년 부산대학교 전기기계공학과 졸업. 1986년 KAIST 전기 및 전자공학과 석사. 1989년 KAIST 전기 및 전자공학과 박사. 1994년~현재 부산대학교 전자공학과 교수. 컴퓨터 및 정보통신연구소 연구원. 관심분야는 영상처리 및 디지털 시스템 설계.