

---

# 복합연막탄 선회구동장치를 위한 정밀 BLDC 서보 위치 제어기 개발

구본민\* · 최승진\* · 최중경\*

Development of a Precision BLDC Servo Position Controller for Composite Smoke Bomb  
Azimuth Driving System

Bon-Min Koo · Sung-Jin Choi · Jung-Keyung Choi

---

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신 사업[RTI04-01-03] 지원으로 수행되었습니다.

---

## 요 약

본 논문은 BLDC 서보 모터를 채택하는 복합연막탄 선회구동 장치를 제어하기 위한 정밀 시스템설계 및 위치 제어 알고리즘 개발을 목적으로 하고 있다. 복합연막탄은 상대편 전차의 시계를 가리는 역할을 해야 하므로 짧은 시간 안에 상대방의 존재를 감지하고 연막탄을 발사할 수 있는 빠른 응답성이 요구된다. 따라서 300[Hz] ~ 500[Hz]의 빠른 전류 응답 능력을 보이는 시스템 설계가 제안된다. 그리고 연산 속도의 증가를 위해 MIX-MAX PWM 기법이 사용된다. 발사각 제어를 위해서는 지령 속도 궤적의 적분치를 활용하는 정밀 위치제어 알고리즘을 제안한다. 또한, 이러한 특성들이 전류, 전압, 위치, 속도 등의 파라미터 그래프를 보여주는 PC기반의 프로그램에 의해 모니터링 되고 평가된다. 부동소수점 방식의 고성능 DSP인 TMS320VC33을 사용하여 제어기를 구성 하였으며 PWM 발생부는 CPLD인 EPM7128을 사용하여 구현 하였다.

## ABSTRACT

This study has been done to design a precise system and develop position control algorithm to control a Composite Smoke Bomb Azimuth driving apparatus of a BLDC servo motor. Having to Blind the sight of opposite tank, the Smoke Bomb Rotational driving system needs instant response that is able to detect opponent appearance and blast the bomb at a short time. So a design that shows fast current response capability of 300[Hz] ~ 500[Hz] is proposed. In the MIN-MAX PWM technology is used to increase the operational speed. In order to control the blasting position, a precision position control algorithm that utilizes the integral value of speed trajectory is suggested. Also these characteristics are monitored and assessed by the PC based monitoring program which shows the graphs of current, voltage, position, and speed parameters .The main controller is based on a TMS320VC33 high performance floating-point DSP(Digital Signal Process) and the PWM generator utilizes EPM7128 CPLD.

## 키워드

BLDC모터 제어, 위치제어기, 벡터제어, 위치제어알고리즘

## I. 서 론

정밀한 제어 특성을 요구하는 산업용 혹은 가정용 기기의 구동을 위한 서보용 분야에 DC 모터 대신 BLDC 모터 사용이 급격히 증대되고 있다[1]. BLDC 모터 구동 시스템은 기존의 DC 모터를 사용한 서보 시스템에서의 브러시 및 정류자편의 기계적인 마모에 의한 유지 보수 문제와 이로 인한 소음, 분진, 스파크가 없어 사용환경에 제약이 없으며 속응성, 제어성, 신뢰성이 우수하다. BLDC 모터를 원활히 제어하기 위해서는 항상 정확한 회전자 위치 정보를 알아야 하고 이 위치 정보를 통해 3상 입출력 변수 관계식을 단상의 입출력 변수 표현식으로 바꾸어 제어 입력 계산을 용이하게 해주는 벡터 제어방법이 많이 사용되고 있으며 현대의 전자 제어 기술의 도움으로 그 유용성이 한층 커지고 있다. 회전자의 위치정보를 획득하기 위해서 회전자에 레졸버나 엔코더, 또는 홀소자와 같은 위치 검출기를 부착하여야 한다. 구현된 시스템에서는 회전자의 절대 위치 검출을 위해 레졸버를 사용하였으며 아날로그 형태의 레졸버 출력력을 RDC(Resolver to Digital Converter)를 통해 디지털 신호로 변환하여 그 절대 위치를 검출했다. 전체적인 제어 시스템의 하드웨어 구성은 DSP(TMS320VC33)를 중심으로 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)와 IGBT의 게이트을 구동하기 위한 PWM펄스를 생성하는 CPLD부, 드라이버, 정류기와 평활용 콘덴서를 사용한 컨버터부, 전동기의 각 상전류를

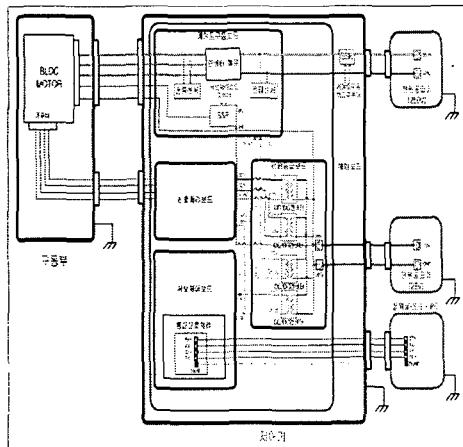


그림 1. 서보제어시스템 구성도  
Fig. 1 Block diagram of servo control system.

센싱하는 회로부, DC 링크 전압의 변동을 검출하는 회로부, 과전압과 과전류로 인한 시스템 보호회로, 절대 위치 검출을 위한 레졸버 인터페이스부 등으로 크게 구성되어 있다. 본 논문에서는 BLDC모터를 사용하여 복합연막탄의 선회구동부를 제어 하는 것을 그 목적으로 하고 있으므로 빠른 응답특성을 갖는 시스템의 구성에 큰 비중을 두고 설계 되었다. 그림 1에 전체 시스템 구성도를 보였다.

## II. 제어 방법

### 1. BLCD모터의 벡터제어기법

고정자에 인가되는 전원은 3상의 서로 120도 위상차를 갖는 전압, 전류 이지만 타여자 직류전동기와 같은 특성을 갖게 하기 위해 한 축( $qe$  축)이 회전자 영구자석 자계와 직각을 유지하면서 회전자와 같은 속도로 회전하는 2상의 직각 동기회전축을 제안하고, 이 직각 축 상에서 토크 발생 전류( $iqe$ )를 계산한 후 다시 이를 구현할 수 있는 3상 전류를 만드는 것이 BLDC 전동기의 벡터제어 임을 알 수 있다.

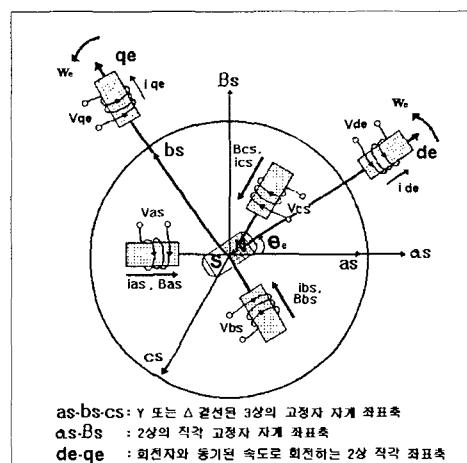


그림 2. 2차원공간에서의 좌표계  
Fig. 2 Coordinate with the two dimension.

### 2. 제어 시스템 구성

본 연구의 BLDC 모터 구동 시스템의 전체 블록도는 그림 3과 같다.

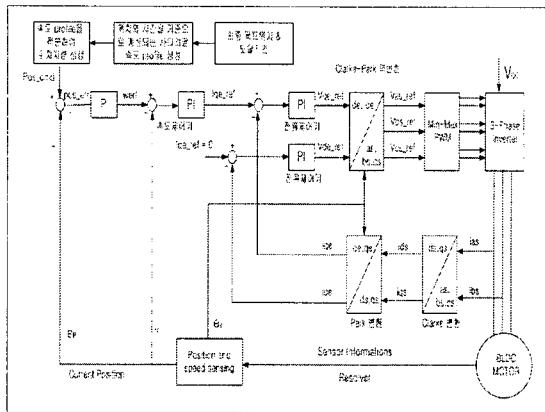


그림 3. 제어 블록도  
Fig. 3 Control blockdiagram

크게 위치 및 속도 센싱부, 속도제어기, 전류제어기, MIN-MAX PWM을 위한 좌표변환, 인버터를 통한 출력 등으로 구성되어 있다. 속도 및 전류 제어기는 PI제어기로 구현하였으며 각각의 제어기 이득값은 현대 제어 이론을 근거로 설정하였다. 전류제어는 51.2[us]마다, 속도와 위치제어는 1ms마다 수행되도록 하였다. 제어를 위해 사용되는 상전류와 회전자의 절대위치 정보를 얻기 위한 RDC값을 기준 DSP에 의해 제어 신호를 만들고 그 시점이 결정되어지는 방법을 사용하지 않고 CPLD를 사용하여 CPLD가 ADC와 RDC의 제어 신호를 만들고 10[us] 이후에 DSP에 인터럽트를 요청하여 변환된 디지털 값을 받아 가는 형식으로 구성되어 있다.

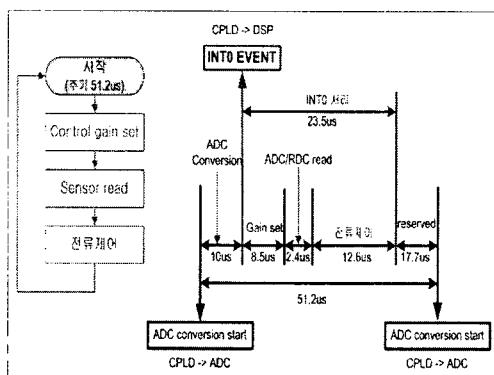


그림 4. 전류제어 인터럽트 처리  
Fig. 4 Interrupt service routine for current control.

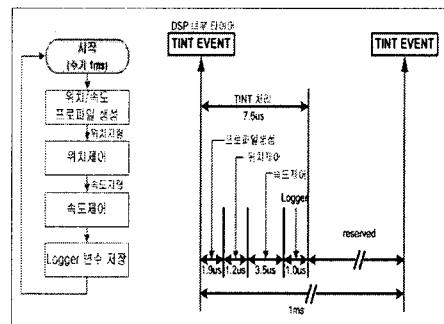


그림 5. 속도·위치제어 타이머 인터럽트 처리  
Fig. 5 Timer interrupt service routine for speed · position control.

이러한 방식을 사용할 경우 DSP가 변환 시작 신호를 보낸 이후에 변환이 완료될 때 까지 대기하는 시간을 다른 연산에 사용할 수 있는 장점이 있고 타이밍에 맞게 제어 신호를 생성해 낼 필요도 없어 DSP에 걸리는 부하를 줄이는 효과를 얻을 수 있다. 그림 4와 그림 5에 전류제어에 사용되는 외부 인터럽트와 속도제어에 사용되는 타이머 인터럽트의 처리과정을 나타내었다.

### 3. 전류 제어기 설계

본 시스템에서는 전류 제어기를 비례 적분 전류제어기로 구성하였으며 그 블록선도는 그림 6과 같다. 역기전력을 전류 제어기의 출력에 전향 보상(Feedforward compensation) 함으로써 블록도에서 역기전력의 영향을 완전히 없앨 수 있다. 이와 같이 역기전력의 영향을 배제하고 비례 적분 제어기의 영점이 시스템의 극점을 상쇄하도록 설계하면 전류 제어기의 폐루프 응답 특성을 (1)식과 같다. 여기서 추가될 보상기의 영점과 시스템의 극점을 서로 상쇄 되도록  $K_P, K_I$ 를 선정하면 식(2), (3)와 같다.

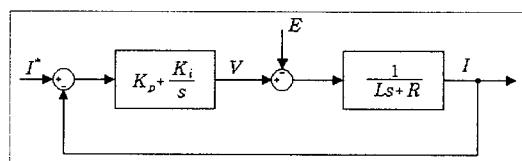


그림 6. 비례 적분 전류제어기  
Fig. 6 Proportional integral current controller.

$$\frac{I}{I_{ref}} = \frac{w_{\alpha c}}{s + w_{\alpha c}} = \frac{1}{T_{\alpha} s + 1} \quad (1)$$

$$K_p = L w_{\alpha c} \quad (2)$$

$$K_I = R w_{\alpha c} \quad (3)$$

본 시스템의 주파수 응답 시험 결과는 아래와 같다.

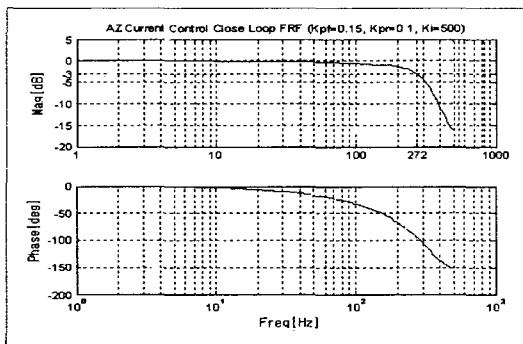


그림 7. 주파수 응답  
Fig. 7 frequency response.

#### 4. 속도제어기 설계

그림 8에 보인 속도제어 시스템의 개루프 전달함수를 구하면 식(4)과 같고 그림 8에 개루프 전달 함수를 이용한 보드 선도를 나타내었다.

$$G_{sc}(s) = (K_{sp} + \frac{K_{si}}{s}) \cdot (\frac{1}{T_{\alpha} s + 1}) \cdot (\frac{K_T}{J_m s}) \quad (4)$$

블록선도와 보드 선도를 통해 적분이득과 비례 이득을 구하면 다음과 같이 계인을 얻을 수 있다.

$$K_{si} = K_{sp} \cdot w_{\pi} \cong K_{sp} \frac{w_{sc}}{5} \quad (5)$$

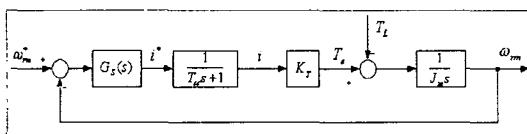


그림 8. PMSM 속도 제어 시스템  
Fig. 8 PMSM speed control system.

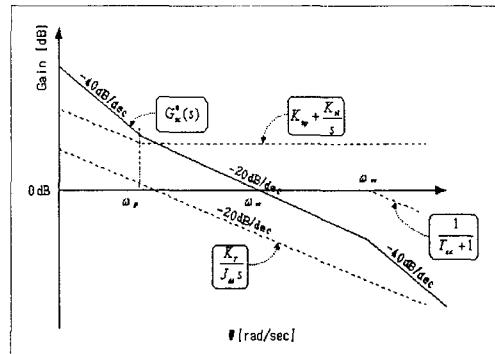


그림 9. PI 속도제어계의 개루프 주파수 특성

Fig. 9 Open loop characteristics of the PI speed control system in the frequency domain.

#### 5. 위치제어 알고리즘

본 시스템에 사용된 전체적인 제어주기는 51.2[us]를 기준으로 전류제어를 수행하며 1[ms]마다 속도제어와 위치제어를 수행하는 형태로 구성되어 있다.

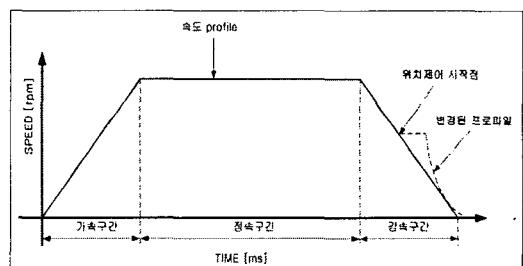


그림 10. 일반적인 위치제어 방법  
Fig. 10 Normal position control method.

일반적인 위치제어 방법으로는 그림9에서와 같이 가속구간과 정속구간에서는 정해진 속도 프로파일(Profile)에 의해 속도제어를 통하여 목표 위치를 추종하다가 위치 오차가 일정 범위 안에 들어오는 순간부터 위치제어를 시작하는 것이다. 이 방법의 경우 위치제어를 시작하기 전까지는 계속해서 위치 오차가 누적되므로 위치제어를 시작하는 시점에 누적된 위치오차에 의한 제어 입력이 크게 들어가게 되어 전류의 급격한 변화를 가져오게 되고 위치 추종 시간이 증가하게 된다.

본 시스템에 제안된 위치제어 방법은 일반적인 위의 방법 대신 초기에 위치 지령으로부터 가속구간, 정속구간, 감속구간을 지정한 뒤 각 구간별로 세분화된 위치 지

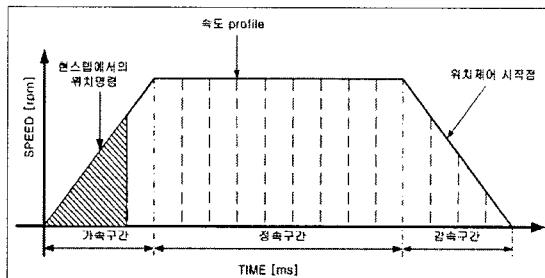


그림 11. 제안된 위치제어 방법  
Fig. 11 Proposed position control method.

령을 형성하는 방법을 제안하였다. 따라서 위치제어가 진행되어감에 따라 현재 구간이 가속, 정속, 감속 중 어느 구간인지를 판별한 뒤 각 구간별로 그 스텝에 해당하는 면적을 통해 위치 지령을 생성해 내고 그 위치 지령과 센싱된 현재 위치로부터 위치오차를 계산하여 속도 지령을 만들어 내는 방법을 사용하였다. 이러한 형태로 제어를 할 경우 계산량이 많아지는 단점이 있으나 고속의 DSP를 사용하므로 그것은 그다지 큰 문제가 되지 않았으며 단순한 P 제어만을 사용하여 만족할 만한 제어 특성을 보였으며 일반적인 위치제어에서 나타나던 위치제어 시작 시점까지 위치 오차가 크게 누적되어 전류의 급격한 변화를 가져오던 문제를 줄일 수 있었다.

### III. 실험결과

본 연구에서 구성된 시스템의 성능을 확인해 보기 위해 속도, 전류, 위치에 대한 결과를 실제 시스템을 구동하여 그래프로 도시 하였다. 속도와 전류제어 실험은 2500[rpm]으로 회전과 정지를 반복하는 실험을 수행하였고 3000[rpm]에서는 1회만 수행하는 실험을 수행하였다. 각 그래프에서 (A)는 속도 지령프로파일 (B)는 BLDC모터가 지령을 추종한 결과 (C)는 q축 전류 지령 (D)는 BLDC 모터가 전류 지령을 추종하여 보인 결과를 나타내고 있다. 그림 12와 그림 13을 통해서 알 수 있듯이 속도와 전류 모두 약간의 리플은 존재 하지만 지령 속도와 전류를 잘 추종함을 확인 할 수 있었고 프로그램에서 생성한 속도 프로파일을 정확히 지켜서 구동 되고 있음을 두 그래프의 비교를 통해 알 수 있었다. 그림 14와 그림 15는 각각 DC링크 전압을 달리 하면서 90°까지 위치 제어를 수행하여 나

온 결과를 그래프로 나타내고 있다. DC링크 전압에 따라 생성된 위치 프로파일이 약간 차이를 보이나 두 실험 결과 모두 원하는 위치까지 잘 추종됨을 확인 할 수 있다.

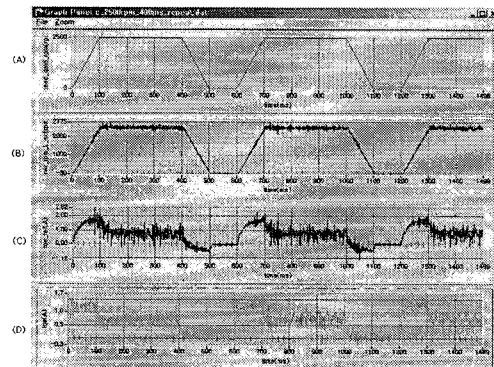


그림 12. 2500[rpm]에서의 속도와 전류  
Fig. 12 Speed and current at 2500[rpm].

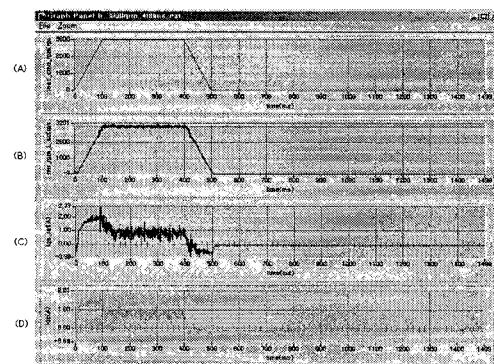


그림 13. 3000[rpm]에서의 속도와 전류  
Fig. 13 Speed and current at 3000[rpm].

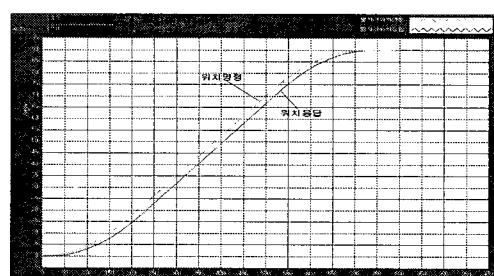


그림 14. DC링크 150[V] 위치제어  
Fig. 14 Dc link position control with 150[V].

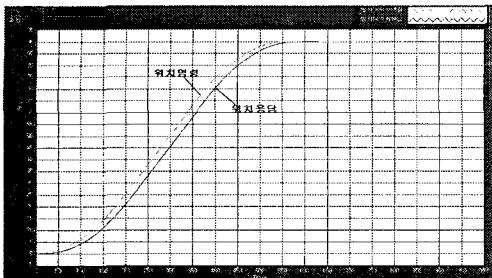


그림 15. DC 링크 300[V] 위치제어  
Fig. 15 Dc link position control at 300[V].

#### IV. 결 론

본 논문은 BLDC 모터를 사용하여 복합연막탄 선회구동 장치에 사용될 정밀 위치제어기를 설계하는데 그 목적을 두고 연구 되었다. 빠른 응답 특성과 정밀한 위치제어를 위해 많은 연산량이 요구됨에 따라 섹터 판별을 위해 많은 연산이 요구되는 공간벡터 변조 방법 대신 옵셋 전압을 이용한 전압 변조 방식을 사용하여 연산량을 줄이고 고속의 부동 소수점 연산 전용의 DSP인 TMS320VC33을 사용하여 빠른 처리가 가능한 제어 시스템을 구성하였다. PWM 발생부는 CPLD(EPM7128)를 사용하여 소프트웨어적으로 구현하였다. 이러한 시스템을 토대로 정밀 위치제어에 사용될 위치제어 알고리즘을 제안 하였으며 실제 실험을 통해 빠르고 정확한 위치제어가 이루어짐을 확인하였고, 실제 부하 조건의 시스템에 장착하여 우수한 성능을 검증하였다.

#### 참고문헌

- [1] Rechard Valentine "Motor Control Electronics Hand Book", McGraw-Hill 1998.
- [2] 서울대학교 기초전력공학 공동연구소 하계 강좌, "전동기 구동 시스템의 설계 및 실습"
- [3] Dorf, *Modern Control System*, Addison Wesley Publishing Company, 1992.
- [4] Bahram Shahian and Michael hassul, *Control System Design Using matlab*, Prentice-Hall International Inc. 1993.

- [5] Mohan, *Power Electronics*, Wiley, 1999.
- [6] Texas Instruments, "TMS320VC33 Digital Signal Processor", SPRS087B
- [7] Texas Instruments , "TMS320C3X User's guide"

#### 저자소개



구 본 민(Min-Bin Koo)

1999년 2월 창원대학교 전자공학  
과 공학사  
2001년 2월 창원대학교 전자공학  
과 공학석사  
2004년 3월 창원대학교 전자공학과 공학박사수료  
2002년 2월 ~ 현재 KnTech 대표  
※ 관심분야: 서보모터제어, DSP보드설계, 이동로봇제어



최 승 진(Sung-Jin Choi)

2000년 2월 창원대학교 전자공학  
과 공학사  
2002년 2월 창원대학교 전자공학  
과 공학석사  
2006년 3월 창원대학교 전자공학과 공학박사과정  
2004년 2월 ~ 현재 C&C 개발팀 차장  
※ 관심분야: 서보기기제어, DSP응용



최중경(Jung-Keyung Choi)

1986년 2월 고려대학교 전기공학  
과 공학사  
1988년 2월 고려대학교 전기공학  
과 공학석사  
1992년 3월 고려대학교 전기공학과 공학박사  
1992년 ~ 현재 창원대학교 전자공학과 정교수  
※ 관심분야: 서보기기제어, 자동동조제어, 마이크로  
프로세서응용, 영상제어