

## 산업용 전기차량의 주행 모터용 보상된 Bang-Bang 전류제어기 개발

양 순 용  
자동차공학과

### 〈요 약〉

본 논문에서는 직류직권모터에 대한 견실한 전류제어기의 설계를 목적으로 부하의 부적당한 변수 하에서 직류직권모터를 이용한 최소시간 토오크 제어를 할 때 PID + Bang-Bang 제어기 보다 간단한 하드웨어구조와 실시간 소프트웨어 부담이 적은 보상된 Bang-Bang 전류제어기를 one chip 마이크로프로세서를 이용하여 구현하였다. 디지털 스위칭 소자의 비선형 동작특성에 기술합수법을 도입하여 보상된 Bang-Bang 전류제어기의 실시간 구현 및 제어알고리즘과 PWM 발생알고리즘을 제안하였다.

## Development of Compensated Bang-Bang Current Controller for Travel Motor of Industry Electrical Vehicle

Soon Yong Yang  
Dept. of Automotive Engineering

### 〈Abstracts〉

This paper proposes a method of compensated Bang-Bang current control using a series wound motor driver system under improperly variable load to get minimum time torque control. A compensated Bang-Bang current controller structure is simpler than the structure of PID plus Bang-Bang controller. This paper shows that a general one chip microprocessor be used efficiently implementing such an algorithm. The calculation time of the software is extremely small when compared with conventional PID plus Bang-Bang controller. Both nonlinear operating characteristics of digital switching elements and describing function methods are used for the analysis and synthesis. Real time implementation of the

compensated Bang-Bang current control is achieved. Concept design strategy of the controller and PWM waveform generation algorithms is presented in the paper.

## 1. 서 론

직류직권 모터는 그 자체의 우수한 기동 토크 발생특성으로 인하여 속도·토크 제어용으로 물류 산업계에서 널리 사용되어 왔다. 본 논문은 부하의 부적당한 변수 하에서, 직류직권 모터를 이용한 최소시간 토크제어를 할 때, PID + Bang-Bang 제어기보다 간단한 하드웨어구조와 실시간 소프트웨어부담이 적은 전류형 디지털 PWM 제어기를 구현하기 위해, 비선형 Bang-Bang 제어의 우수한 응답특성과 모델링 오차 및 외란 등에 의한 시스템의 불확실성이 존재하더라도 원하는 제어 성능을 얻을 수 있는 궤환제어의 강인한 특성을 접목한 보상된 Bang-Bang 제어기를 구성하였다. 본 논문에서는 전동지게차 주행모터 토크제어를 위하여 one chip 마이크로프로세서를 이용하여 실제 제어기를 개발하여 본 논문에서 제안한 제어알고리즘을 적용하였다.

## 2. 시스템 해석 및 구성

### 2.1 직류직권 모터와 토크제어

본 장에서는 토크제어를 위해 전압제어에서의 문제점들을 들고 그 해결책으로 전류제어에 대하여 설명하면, 전압제어에서의 문제점은 유한한 크기의 입력단 콘덴서 필터 및 모터 내부저항의 온도에 따른 변화, 전류에 따른 모터 내부 인덕턴스의 변화 때문에 나타난다. 이와 같은 문제를 해결하는 전류제어는 실제 부하를 포함한 모터 시스템의 전기적인 시정수가 기계적인 시정수에 비하여 무시할 만큼 작기 때문에 가능하며, 그리고 중요한 것은 전류제어기가 사용되면 부하를 포함한 전체 모터 시스템이 1차 미분방정식으로 표현되므로, 마이크로컴퓨터를 이용하여 실시간으로 최적 제어 알고리즘을 실현할 수 있다.<sup>1)</sup>

### 2.2 전압제어와 전류제어

Fig. 1은 2상한에서 동작이 가능한 직류직권 모터를 위한 초퍼 전력회로(Chopper Power Circuit)이다. 여기서, PWM 증폭기는 전압원이나 전류원 어느 것으로도 사용이 가능하며, 그리고 전압제어의 문제점은 배터리 전압원으로 되어 있는 제어시스템을 해석하는 경우, 전력 증폭기의 입력 전압(콘덴서 필터전압)은 일정한 값으로 계산되는 것이 보통이다. 그러나 전력 증폭기의 입력단은 콘덴서 필터로 되어 있으므로 기동시나 제동시 증폭기의 입력전압이 크게 변하게 되는데, 이때의 전압리플은 출력의 속도나 토크에 직접 영향을 미친다. 따라서 입력전압의 변화를 측정할 필요성이 생기는데, 이것 역시 모터 내부저항의 온도에 따른 변화, 전류에 따른 모터 내부의 인덕턴스 변화, 하드웨어 복잡성 및 소프트웨어에서의 부담 이외에도 모터가 전압에 의하여 구동되는 경우, 제어시스템의 차수가 높아지므로 해석이 복잡하게 되며, 실시간 계산 또한 힘들게 되므로, 본 연구에서는 전류제어를 다루게 되었다.<sup>1)</sup>

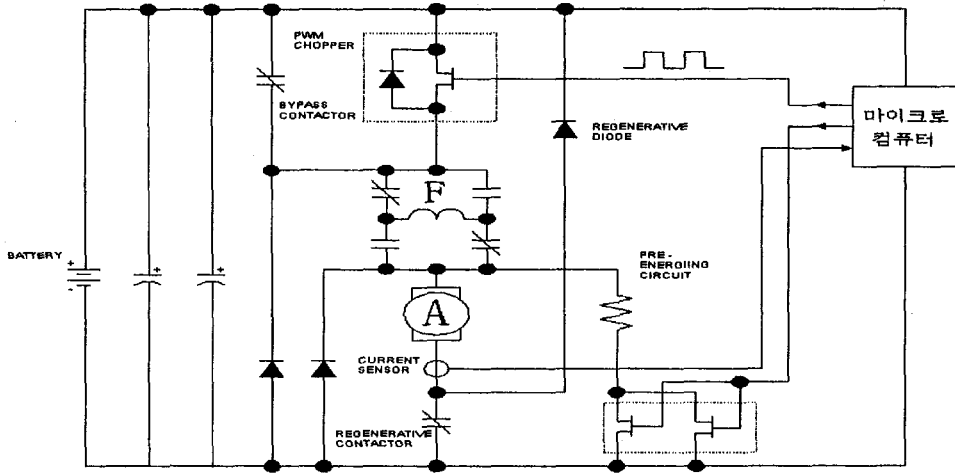


Fig. 1 The power circuit for DC series wound motor driving.

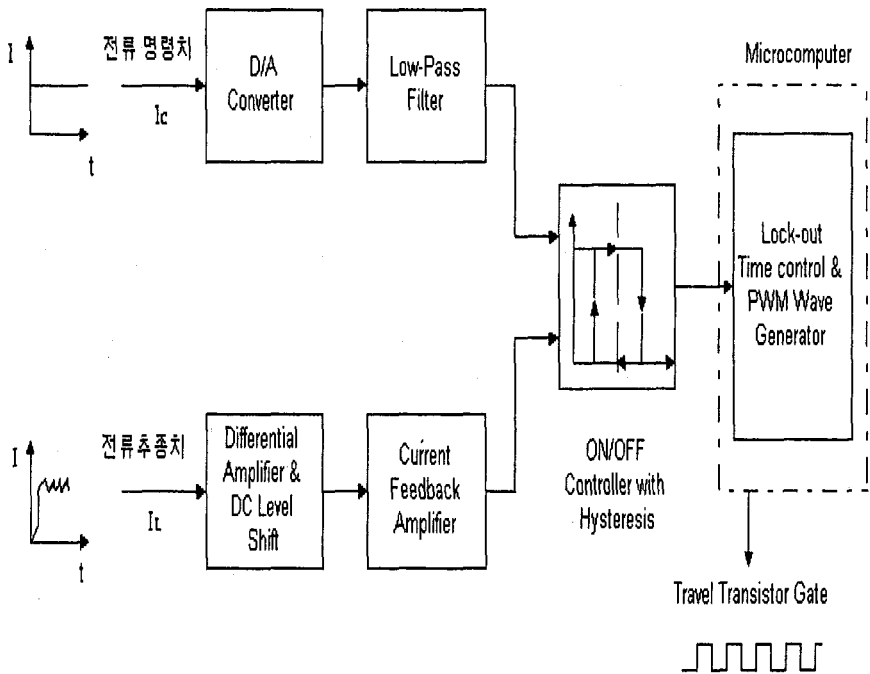


Fig. 2 The configuration of compensated Bang-Bang current controller.

### 2.3 마이콤을 이용한 보상된 Bang-Bang 전류제어기

대부분의 모터는 제어기나 모터 자체를 보호할 필요성으로 인하여 어떠한 형태이던지 전류의 제한이 필요하므로 전압제어에서의 문제점을 해결하는 빠른 응답특성의 전류제어기로서 흔히 사용되는 것은 모터 속도제어에서 2위치 ON/OFF 제어루프(Two Position ON/OFF Control Loop)에 사용되는 히스테리시스를 이용한 Bang-Bang 제어기이다.

본 논문에서의 보상된 Bang-Bang 전류제어기의 구성은 Fig. 2와 같으며, Bang-Bang 루프는 제어변수인 모터 전류의 평균값을 조절하기 위해 히스테리시스 특성을 갖는 제어소자인 비교기를 케환루프에 적용하여 포화영역 ON/OFF로 동작을 수행시키므로써 출력값이 결정되는 ON/OFF 제어기이다.<sup>2)</sup>

### 2.4 R-L부하와 보상된 Bang-Bang 전류제어기

일반적인 R-L부하에서의 보상된 Bang-Bang 제어기의 부하전류 응답특성을 살펴보면, 스텝입력의 전류명령( $I_c$ )에 따른 스텝응답의 부하전류( $I_a$ )와 Unipolar PWM 증폭기( $K_2$ )의 전압파형( $V_a$ )을 Fig. 3에 나타내었다.

여기서,  $\alpha$ 는 전류 케환이득이고,  $E_{DS}$ 는 오차 불감영역(Error Dead Space)이다. Lockout Time은 PWM 증폭기의 최대 스위칭 주파수와 듀티 사이클을 조절하기 위해서 마이크로 컴퓨터의 Foreground Loop에서  $250[\mu\text{sec}]$ 의 인터럽트를 이용하여 처리되며 비선형동작에 대한 보상과 함께 PWM의 듀티길이(Duty Length)가 결정된다.

Fig. 3에서 보는 것과 같이  $V_p$ 의 리플(Ripple)은  $I_L$ 에서의 Limit Cycle 주파수에만 영향이 있으며, 평균값인  $I_c/\alpha$ 에는 영향이 없음을 알 수 있다. 즉, 히스테리시스를 이용한 Bang-Bang 전류제어기는 입력의 전압리플에 무관한 전류제어기이다. 그리고, 이 전류제어기의 평균 출력전류는  $I_c/\alpha$ 이므로 평균의 관점에서 준선형증폭기(Quasi-Linear Amplifier)라고 할 수 있다.

Bang-Bang 전류제어기를 갖는 시스템은 비선형시스템이며, 전류출력은 입력의 전류명령에 대하여  $E_{DS}$ 만 정의되므로, 이 시스템을 주파수영역에서 해석하는 것은 곤란하다. 이 제어기는 Fig. 4에서 보는 바와 같이, 제어기의 출력 전압이 전류의 명령에 따라 주파수와 듀티가 적응적으로 변화하는 Adaptive Current Control PWM제어기<sup>3)</sup>와는 달리, 저전력 소비형 PWM Chopper회로를 구현하기 위해 초평주파수(250Hz)의 PWM 신호를 마이크로 컴퓨터의 I/O Port에서 발생하며, 듀티 사이클은 ON/OFF 제어기의 출력정보를 검출한 후 실시간 인터럽트 서브루틴에서 순차적으로 처리하여 모터의 평균 출력전류가 전류 명령치와 같아지도록 한다. 그리고 이 시스템에서는 스위칭주파수를 제한하기 위한 하드웨어적인 Lockout기능이 ON/OFF 제어기의 출력정보의 샘플링시간( $T_{S2}$ )에 의해 마이크로컴퓨터에서 소프트웨어적으로 결정된다.

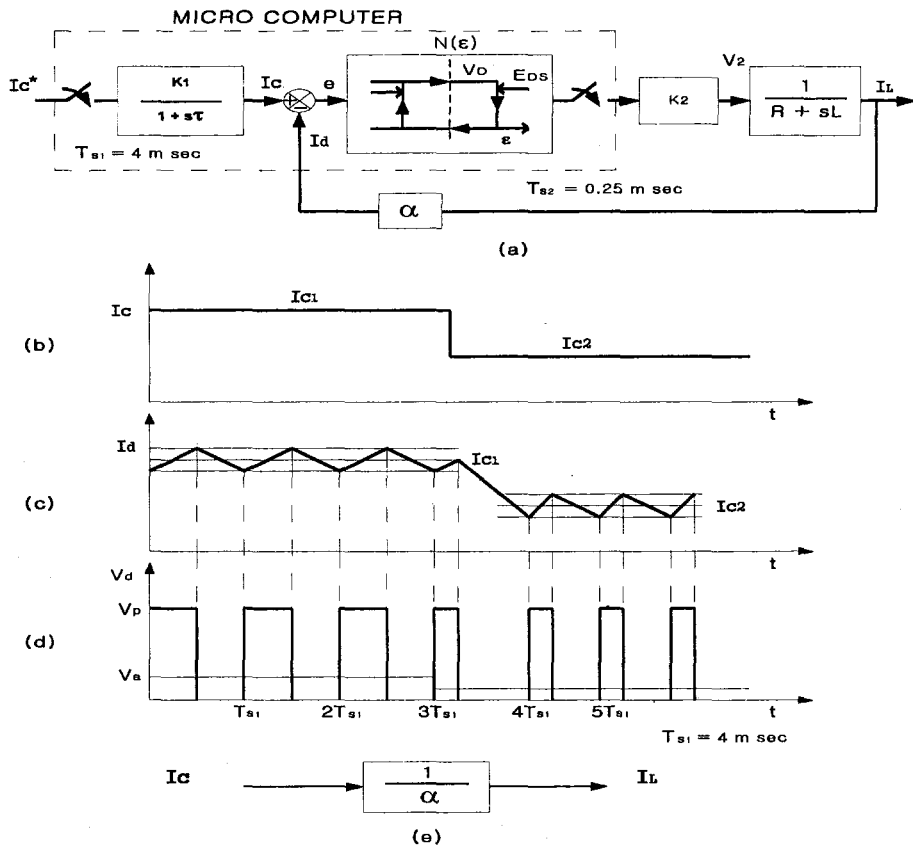


Fig. 3 R-L loader of compensated Bang-Bang current controller.

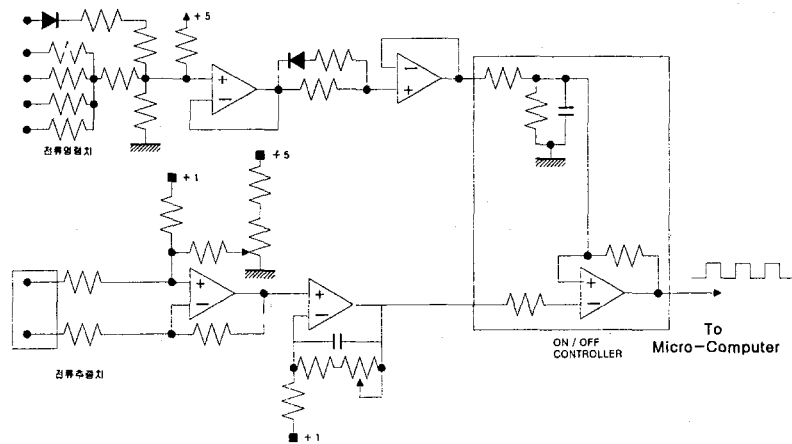


Fig. 4 The circuit of Bang-Bang control loop.

## 2.5 직류직권 모터와 보상된 Bang-Bang 전류제어기

본 장에서는 직류직권 모터에 전달함수 기법을 적용하여 해석하였다. 부하를 포함하는 모터시스템의 직류직권 모터 방정식을 유도하면 다음과 같다.<sup>4)</sup>

$$v_a = K_2 \cdot v, \quad (2.1.a)$$

$$e_g = Kv \cdot i_a \cdot \bar{\omega} \quad (2.1.b)$$

$$v_a = R_m \cdot i_a + L_m \frac{di_a}{dt} + e_g \quad (2.1.c)$$

$$T_d = K_t \cdot (i_a)^2 \quad (2.1.d)$$

$$= J \frac{d\bar{\omega}}{dt} + B\bar{\omega} + T_L \quad (2.1.e)$$

모터방정식(2.1.d)에서 가변·비선형(variable-type nonlinearity)특성을 나타내므로 전달함수 해석기법을 적용하기 위해 제한된 작동범위 내에서만 비선형시스템을 선형화하여 제어기 설계를 한다. 따라서 작동점 부근에서 시스템 파라미터를 다시 정의하고 라플라스영역으로 변환하면 다음과 같이 주어진다.<sup>4)</sup>

$$\Delta v_a(S) = K_2 \cdot \Delta v_r(S) \quad (2.2.a)$$

$$\Delta E_g(S) = Kv [I_{\omega\omega} \cdot \Delta \bar{\omega}(S) + \bar{\omega}_o \cdot \Delta I_a(S)] \quad (2.2.b)$$

$$\Delta v_a(S) = R_m \cdot \Delta I_a(S) + SL_m \Delta I_a(S) + \Delta E_g(S) \quad (2.2.c)$$

$$\Delta T_d(S) = 2Kv \cdot I_{\omega\omega} \cdot \Delta I_a(S) \quad (2.2.d)$$

$$= SJ\Delta \bar{\omega}(S) + B\Delta \bar{\omega}(S) + \Delta T_L(S) \quad (2.2.e)$$

위 식으로 부터 Bang-Bang 전류제어기를 사용한 시스템 블록선도는 Fig. 5와 같다. 모터 임피던스는  $R_m$ 과  $L_m$ 으로 구성되며, 인덕턴스  $L_m$ 는 모터 내부인덕턴스와 외부인덕턴스를 모두 포함한 성분이다. 상기 시스템의 전류제어에서  $I_c(S)$ 가 입력일 때 직류직권 모터 시스템의 전달함수는 다음과 같이 된다.<sup>3)</sup>

$$\frac{\Delta \omega(S)}{\Delta I_c(S)} = \frac{N(\epsilon) \cdot K_2 \cdot 2K_v \cdot I_{\omega\omega}}{[(R_m + SL_m)(B + Sf) + N(\epsilon)K_2a(B + Sf) + K_v \omega_o(B + Sf) + 2K_v^2 I_{\omega\omega}^2]} \quad (2.3.a)$$

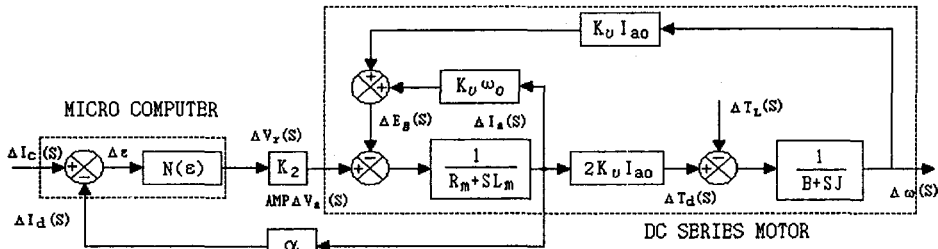
이 시스템에서 전력증폭기의 이득( $K_2$ )과 기술향수 $N(\epsilon)$ 은 일반적으로 매우 큰 값을 갖기 때문에 전달함수는 다음과 같이 간략화시킬 수 있다.<sup>3)</sup>

$$\lim_{N(\epsilon) \rightarrow \infty} \frac{\Delta \omega(S)}{\Delta I_c(S)} = \frac{2K_v I_{\omega\omega}}{a \cdot (B + Sf)} \quad (2.3.b)$$

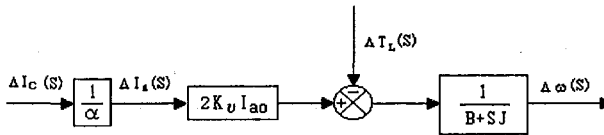
따라서 간략화된 전류제어기의 전달함수는 Fig. 5.b와 같으며, 간략화된 등가모델에 대한 해석은 스위칭 PWM 증폭기에서의 순방향 고이득(Forward High Gain)에 기인하며 그의 응답은 케환회로에 의해 결정되어진다. 또한 간략화된 전류제어기의 모델은 R-L부하에서의 전류 제어회로인 Fig. 3.e와 같아지므로 직류직권 모터에서의 전류제어기는 R-L부하에서와 같이 동작한다. 일반적으로 모터는 기계적인 관점에서 전기적인 동역학은 무시할 수 있다. 즉 전기적인 관점에서 역기전력은 일정한 전압원으로 볼 수 있으며, 입력전압의 리

플, 내부저항 및 인덕턴스에 무관하게 평균 전류의 제어가 가능하여진다. Fig. 5.b에서와 같이 전류를 입력, 속도를 출력으로 하는 경우 직류직권 모터시스템은 1차 미분방정식이 된다. 전류 제한이득을  $\alpha(S)$ 의 동적소자로 변화시킬 때 이 등가 전달함수(2.3.c)가 시스템에서 어떤 동적특성을 갖는지 예측할 수 있다.<sup>5)</sup>

$$\frac{\Delta \omega(S)}{\Delta I_c(S)} = \frac{2K_U I_{ao}}{\alpha(S) \cdot (B+S)} \quad (2.3.c)$$



(a) 직류직권모터 전력회로의 블록선도



(b) 간략화된 등가 블록선도

Fig. 5 The block diagram of DC series wound motor system.

## 2.6 소프트웨어 구조 및 제어알고리즘

본 장은 보상된 Bang-Bang제어 알고리즘의 개요 및 초퍼 전력회로 구동용 PWM 발생 알고리즘을 개략적으로 서술하고, 소프트웨어 구조는 Fig. 6과 같으며 Foreground/Background 시스템을 적용하여 Foreground Part에 실시간 인터럽트 루틴이 수행되고, Background Part에 표준 프로그램이 Non-scheduled 형식으로 수행되도록 하였다.<sup>6)</sup>

### 2.6.1 제어 알고리즘 개요

대량 급전송(Mass Rapid Transit, MRT)시스템에서의 제어 특성은 마찰 및 무게와 같은 부하 변수의 변화가 있는 상황에서, 고속 응답특성을 갖는 속도제어, 토오크제어를 필요로 한다.

제어구간을 제어변수의 크기에 따라 Bypass Mode와 Fine Mode의 2개 구간으로 나누고 첫번째 구간은 제어변수의 오차가 큰 경우의 거친( Coarse)제어이며, 이 때 Bang-Bang 제어방식을 이용한다. 이 때의 동작모드는 다음과 같은 ON/OFF 제어모드라고 존재한다.

- 1) Current Bypass Mode
- 2) Voltage Bypass Mode
- 3) Over-drive Mode (모터 정격 속도 이상으로 주행시 동작하는 모드)

두번째 구간은 위의 거친 Bang-Bang 제어가 끝나고 오차가 작은 경우의 정밀(Fine)제어이며, 이 때 보상된 Bang-Bang 제어방식을 이용한다.

이 보상된 Bang-Bang 제어방식은 고속 주행시 최대 전압을 모터에 인가하여 가속하고, 등판시에는 차량(전동지게차)의 속도에 따라 최대 전류를 조절하여 속도와 토크가 동시에 제어되도록 정밀한 전류제어를 수행한다. 평시 정상주행시는 정전압 제어에 의한 전류제어를 수행한다. 이 때의 전류 모드는 다음과 같은 제어 모드가 존재한다.

- 1) Power (Acceleration) Control Mode
- 2) Regenerative/Brake Control Mode
- 3) Torque Boost Mode (최대 등판시 최대 전류 상한치를 높일 때 동작하는 모드)

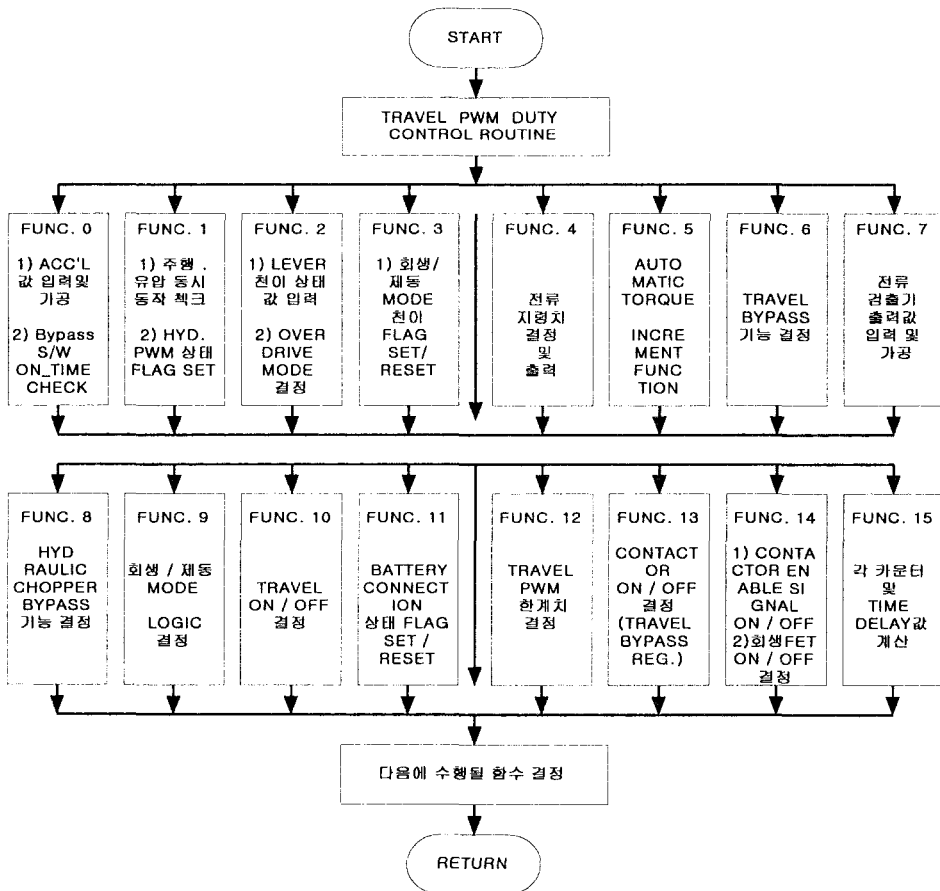


Fig. 6 The interrupt program configuration of current controller.



### 2.6.2 PWM 신호발생 알고리즘 개요

전류제어기는 실시간 동작이 요구되는 시스템이므로 이를 동작시키기 위한 소프트웨어도 실시간 운영체제를 갖추어야 한다. 이를 위해서 개발한 컨트롤러의 소프트웨어는 주로 R.T.S. (Real Time Scheduler)에 의한 250 [ $\mu$ sec] 인터럽트 서비스루틴의 실행으로 동작된다.

인터럽트 발생시 각 기능구현을 위한 16단계의 프로그램 모듈(Program Module)이 마련되어 현재 시스템의 전류상태 및 동작모드를 검출하여, 초퍼 전력회로의 Gate Drive용 Signal인 PWM파형의 ON/OFF Pulse 상태결정 및 신호출력을 수행하고, 실시간 인터럽트의 적산치계수 즉, 16-Unit ( $250 \mu\text{sec} \times 16 = 4\text{ms}$  : 250Hz PWM주파수)를 1주기(4 msec)로 PWM 신호의 On Duty Length를 (1/16)의 단위로 가변하여, 동작 시스템의 상태검출에 따른 비선형 동작에 대한 보상과 함께 적절한 디지털 PWM 신호파형을 적응적으로 발생시킨다. Fig. 7에서는 PWM 신호의 순차적인 발생을 위한 Time Chart를 제시하였다.<sup>7-8)</sup>

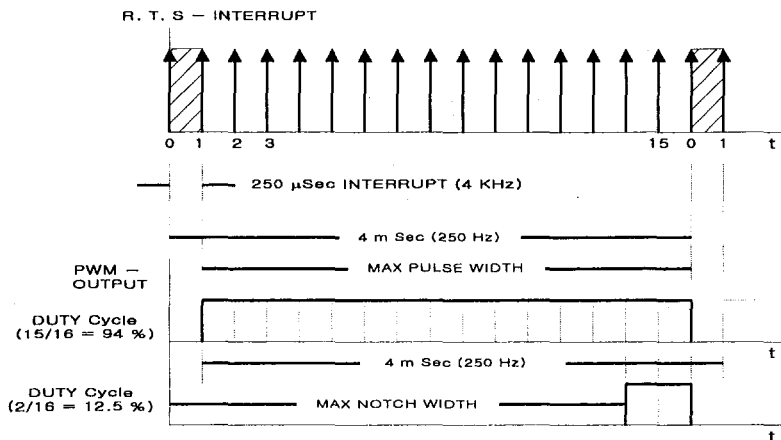


Fig. 7 The PWM waveform time chart.

## 3. 실험 및 고찰

본 논문에서 제안된 제어방법의 유효성을 입증하기 위하여 다음과 같은 실험을 행하였다. 제2장에서 언급한 보상된 Bang-Bang 전류제어기와 초퍼 전력회로를 제작하였으며, 속도와 토크의 검출을 위하여 Pickup Sensor와 Torque Transducer를 사용하였다. 실험에 사용된 모터는 13.4 [kw], 1325 [rpm] 직류직권 모터이며, 실시간 디지털제어를 위하여 80C196KC Single Board Computer를 제작하여 어셈블리 언어로 프로그래밍 하였다. 실험에 사용된 모터의 사양은 Table. 1과 같다. 전체 제어알고리즘의 흐름도는 Fig. 6 과 같으며, 전체 하드웨어의 구성도는 Fig. 8과 같이 구성하였다.

Table. 1 Specification of DC series wound motor.

항목	사양
Power [kW]	13.4 kW
Speed [RPM]	1325 RPM
Voltage [V]	44.5 V DC
Current [A]	370 A
Winding	Series Wound
Time rating [min]	60 min at 140 °C

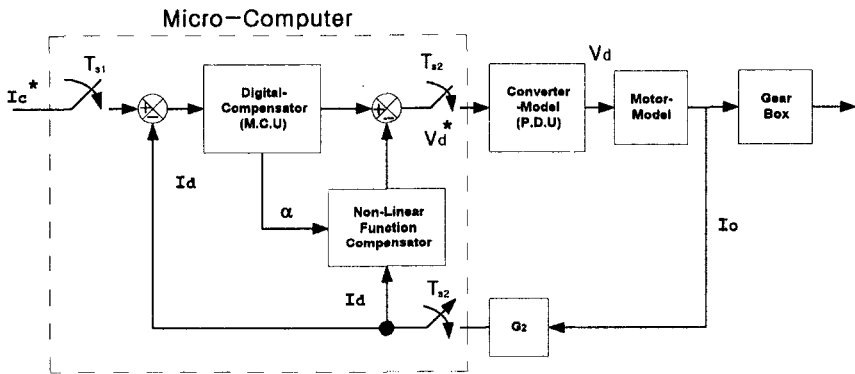
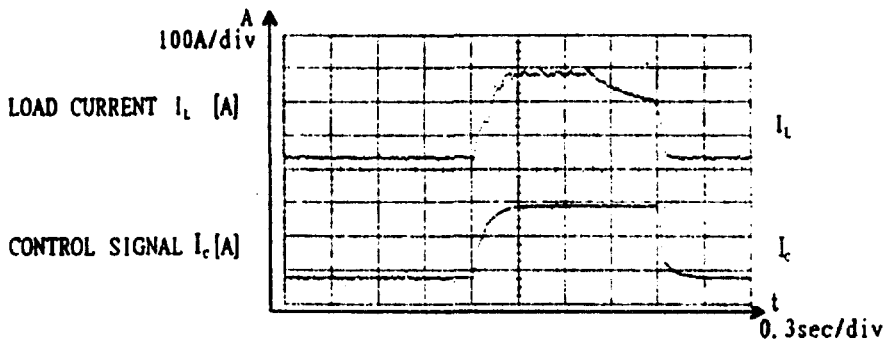
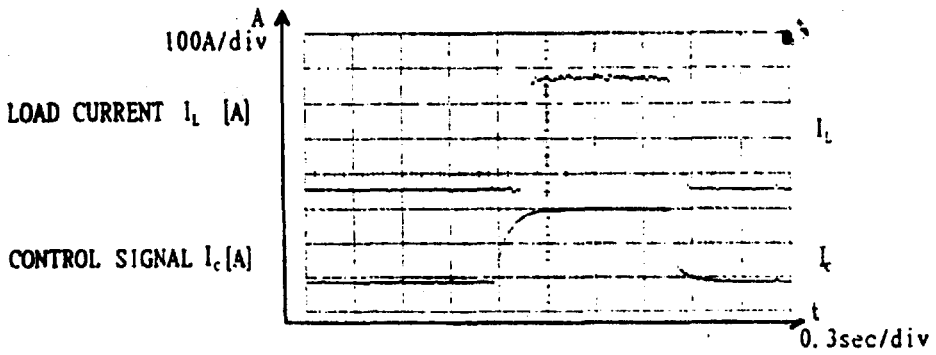


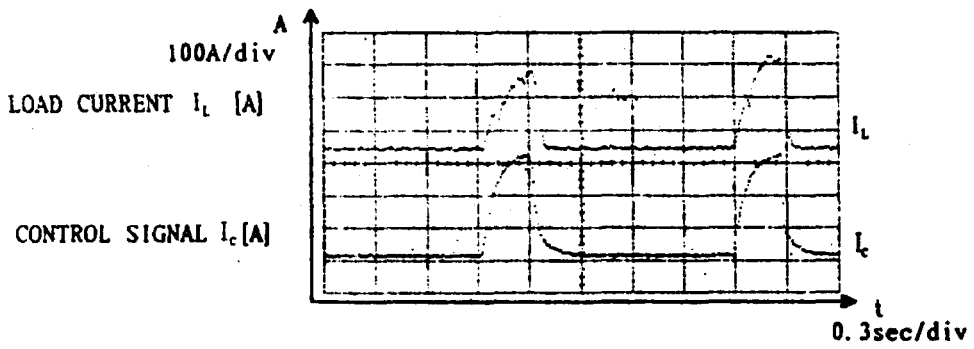
Fig. 8 Total system block diagram for the current control of the real system.



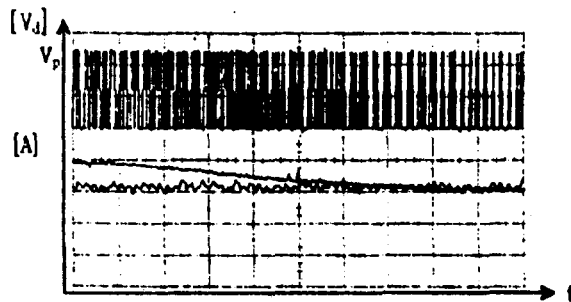
(a) load current response caused by step in control voltage. (unload condition)



(b) load current response caused by step in control voltage. (load condition)



(c) load current response caused by ramp in control voltage supply 48V



(d) current and voltage wave form during continuous current mode.

Fig. 9 The load current response characteristic when current command is changed.

이 실험 결과에서 초기 구동시의 Soft Start와 보상된 Bang-Bang제어가 끝난 후의 전류오차는 적으며 오버슈트가 없다는 것을 Fig. 9의 부하전류 응답특성에서 잘 보여주고 있다. 그리고 전류의 최적값은 주어진 시스템 계통과 샘플링 시간을 고려하여 Trial and Error방식으로 구하였다. 제시된 알고리즘은 오버슈트 및 정착시간 등의 설계사양을 만족하는 제한이득상수를 비교적 쉽게 얻을 수 있었으며, 마이크로프로세서를 이용하여 쉽게 구현 할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 직류직권 모터시스템의 토오크제어시 전류제어 방식이 전압제어 방식에 비하여 보다 더 적절함을 보였다. 이와 같은 결과는 전류원으로 직류직권 모터를 구동함으로써 PWM 증폭기 입력전원의 변동, 모터 내부 파라미터인 저항과 인덕턴스의 열적 변화에 영향을 받지 않는 것이 그 중요한 요인이었다. 그리고 이 실험에서 나타난 결과로서 Fig. 9의 부하전류( $I_L$ )과 제어신호( $I_c$ )가 일치하지 않는 이유는 직류직권 모터에 충분한 부하를 가하지 않으면 모터의 기동특성이 매우 좋아서 모터가 급속하게 폭주상태(과속도)에 도달하는 경우가 발생하여 모터의 역기전력에 의해 전류가 감소함을 관찰할 수 있었다. 이 전류제어기는 전압제어시 필요한 전류 제한의 기능까지 겸하고 있으므로 전압, 전류 병용제어가 가능하며 하드웨어에서의 복잡성을 크게 증가시키지 않고도 간단한 회로로 구성하는 것이 특징이다. 그러나 이런 방법들은 시스템의 비선형성이 높아지고 규모가 커짐에 따라 시스템의 안정성 및 Limit Cycle의 결정에 대한 연구가 추후에 보완되어야 할 사항으로 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] H. J. Park, "A Study on Performance Improvement for The Time Optimal Position Control Using DC Servo Motor," Conference Record, KAIST Press. pp. 3~12, 1986.
- [2] E. O. Doebelin, *Control System Principles and Design*, John Wiley & Sons Inc., pp. 221~238, 1985.
- [3] B. K. Bose, *Power Electronics and AC Drivers*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 149~152, 1986.
- [4] M. H. Rashid, *Power Electronics Circuits, Device, and Applications*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 326~328, 1988.
- [5] DC Motor, Speed Controls, Servo Systems, *Engineering Handbook* (3rd Ed.), Electro-Craft Corp., Minnesota, pp. 4-32~36, 1975.
- [6] S. Bennett, *Real Time Computer Control*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 137~145, 1988.
- [7] J. J. Slotine, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 203~205, 1991.
- [8] NASA Tech Briefs September, Vol. 18, No 9, pp. 52~54, 1994.