

모터 제어회로의 설계

목표 : 약 30VDC로 최대 2000rpm 이상의 회전속도 유지, 출력 30W 정도의 DC 모터 사용
토크 1.5 kgfcm이상 , 속도를 일정하게 유지하는 속도 제어기 설계

설계 사양

1) 제어회로

속도 가변비 : 100:1 이상

제어 가능한 회전 수 : 20 ~ 2000rpm

속도지령신호 : -5V ~ +5V 까지

회전방향 : 0 ~ +5V 입력시 시계방향, -5 ~ 0V 입력시 반시계 방향

PWM 주파수 : 16KHz

응답성 : 스텝 입력시 상승시간 30ms

설계 사양(계속)

2) 전원전압

파워 MOSFET 게이트 구동전압 : 15V

모터 전원전압 : 30V

로직 전원전압 : 5V

모터(브러시 있는 DC 모터)

토크 정수 : $K_t=0.62\text{kgfcm/A}$

로터 관성 : $J_M = 0.12 \times 10^{-3} \text{kgf} \cdot \text{cm}^2$

샤프트에 부착되어 있는 부하의 관성: $J_L = 0.369 \times 10^{-3} \text{kgf} \cdot \text{cm}^2$ 직경 42mm, 두께 15mm의 철제

1. 설계 시스템의 개요

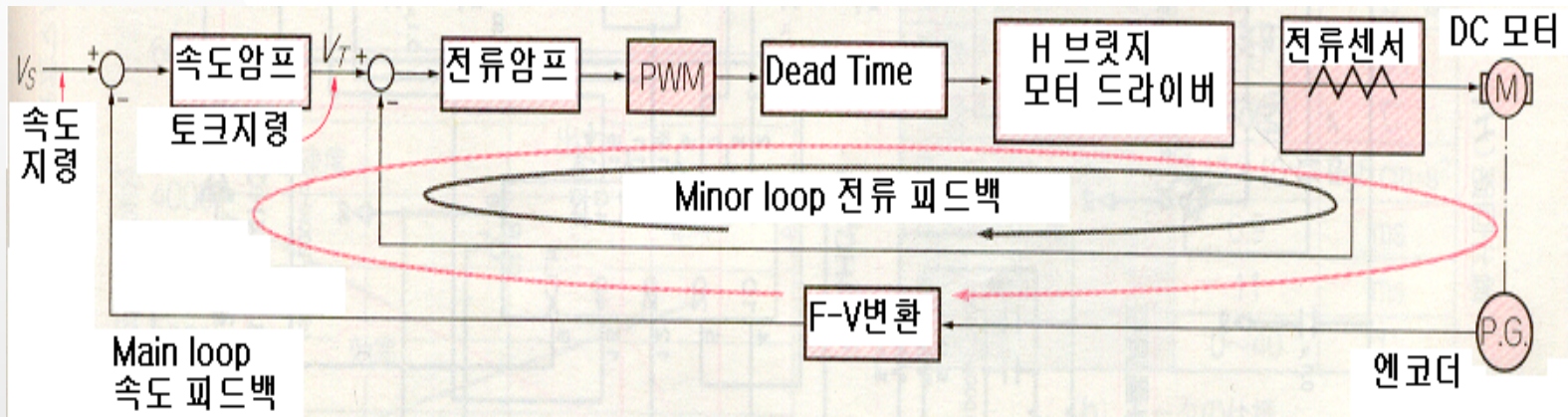
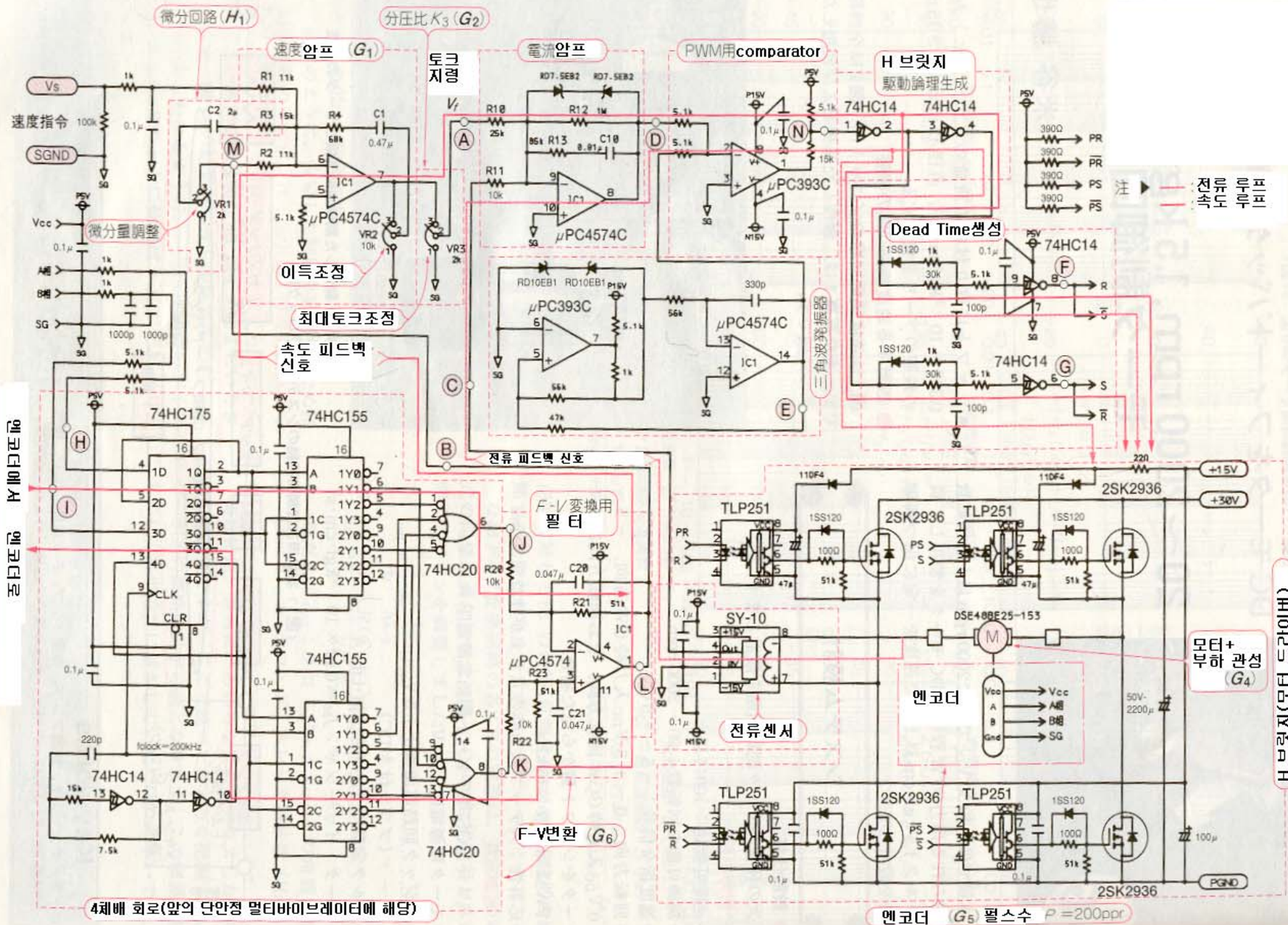


그림
속도 제어 회로의 시스템 블록도



전류 피드백 신호
속도 피드백 신호

모터+부하
관성 (G4)

H 브릿지(모터 드라이버)

2. 각 블록도의 회로와 부품

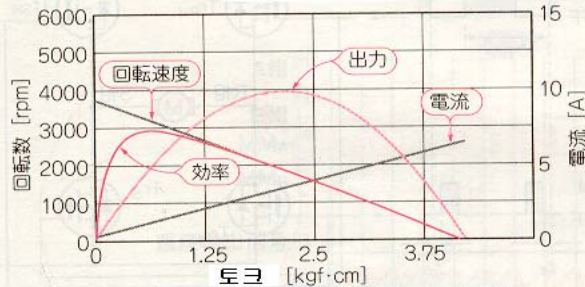
1) 모터 구동회로

모터 구동용 파워 소자를 선정하는 과정

- (1) 어떤 모터를 사용하고 그 모터에 어느 정도의 전압과 전류를 인가할지 파악
- (2) 사용 모터가 결정되면 필요한 회전수를 얻기 위한 전압과, 필요한 필요한 토크를 얻기 위한 전류를 구함.
- (3) H 브릿지에 사용하는 파워 소자의 용량은 이들 전류, 전압에 약간의 여유를 더해서 발열을 고려해서 선정

項目	値	單位
電源電圧	5±0.25	V _{DC}
消費電流	100	mA
出力펄스	200	ppr
出力相	A相, B相, Z相	—
出力回路方式	TTL	—
応答周波数	50	kHz

(a) 엔코더 사양



(c) 토크-회전수, 토크-전류 특성곡선

項目	値	單位
定格出力	25	W
定格電圧	24	V
定格電流	2.0	A
定格토크	1.0	kgf·cm
定格회전속도	2770	rpm
토크定数	0.62	kgf·cm/A
誘起電圧定数	6.4×10 ⁻³	V/rpm
電機子抵抗	3.4	Ω
電機子인덕턴스	2.9	mH
電機子溫度上昇限度	70	℃
로터 이너셔	0.12×10 ⁻³	kgf·cm·s ²
電氣的時定数	0.9	ms
機械的時定数	11	ms
周囲溫度	0~40	℃

(b) 모터 사양

최대구동전류

그림 사용할 DC모터의 사양

(예) 1.5 kgfcm이상의 토크 → 2.4A 이상의 전류가 필요

모터에 로터의 3배의 관성의 부하를 단 상태에서 상승시간 $t_{rm} = 30ms$ 를 내기위한 필요한 **가속토크 계산**

$$T_R = \frac{GD^2 N}{37500 t_{rm}} = \frac{(GD_M^2 + GD_L^2) N}{37500 t_{rm}} \cong 3.4 \quad J = J_L + J_M = \frac{1}{980} \cdot \frac{GD^2}{4}$$

단, GD^2 [kgf·cm²]: 모터

로터와 부하를 합친 관성 모멘트

N[rpm] : 모터의 회전수

J [kgf·cm·s²]: 관 성

→ 필요한 전류 : 5.5A 이상의 전류

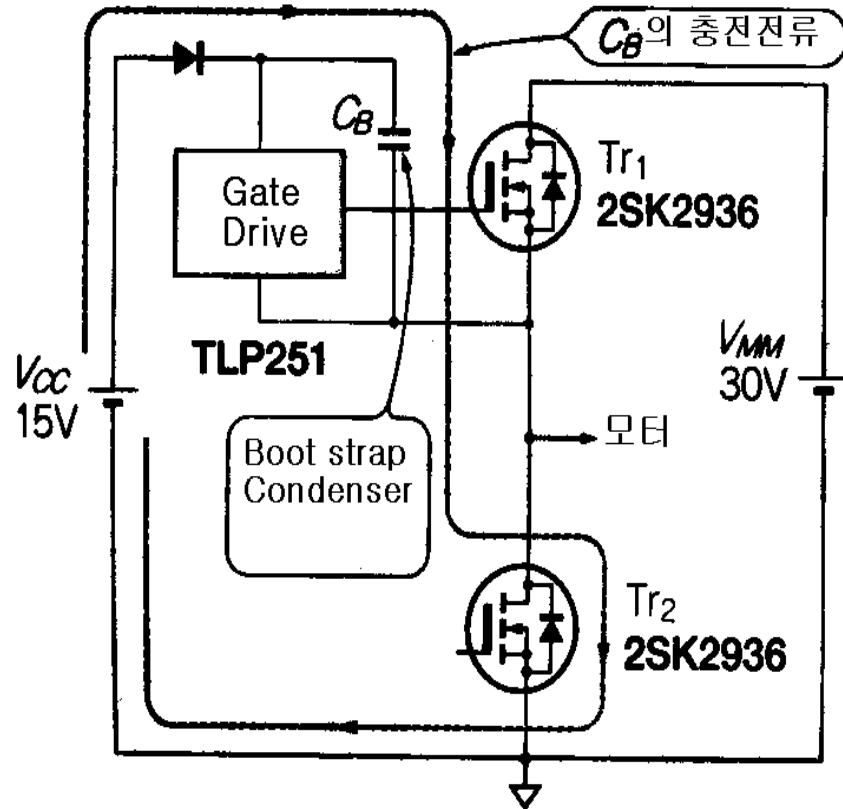
→ 기판의 전류량 고려 (만약 5A가

한계라면 원하는 가속이 불가능)

파워 MOSFET 구동회로

포토 카플러로 속도제어 회로부와
파워라인을 절연 → 잡음의 영향을 받지
않도록 설계

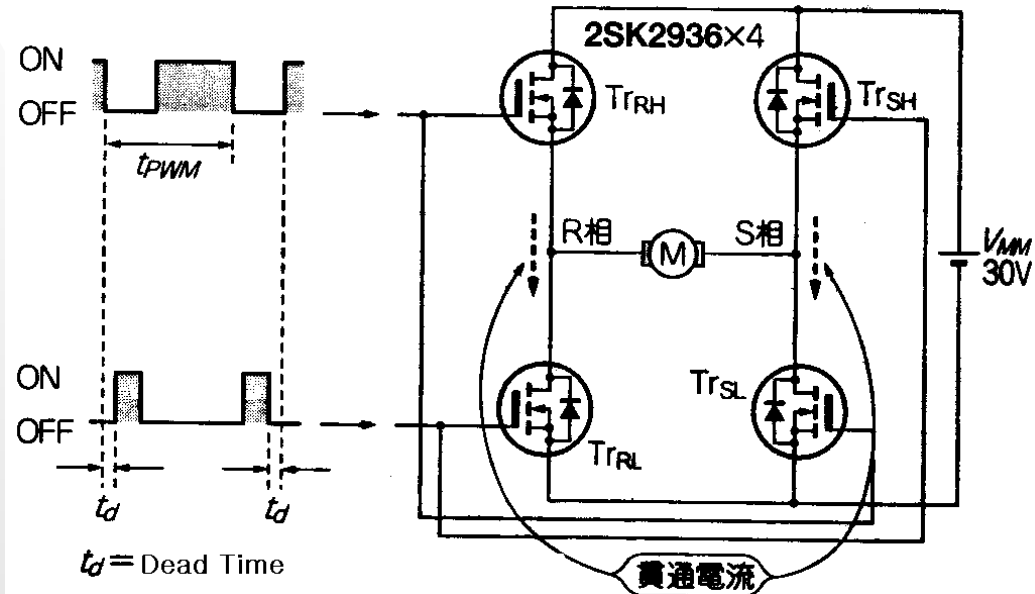
- 위쪽 아암의 bootstrap 구동
위쪽 아암 FET의 소스 기준의 전원을
만들어서 위측 FET를 구동 →
TR1의 gate에 전위 공급
TR1의 on주기가 길어지면 C_B 가 방전되어
Tr1의 thresh hold 전압 이하로 되어
구동이 불가능
→ 일정주기로 아래쪽 아암의
트랜지스터를 on해서 C_B 의 refresh
동작을 수행
→ PWM의 On duty가 100%보다는 적게
PWM 주기마다 적어도 1usec 아래쪽
아암 On



2) PWM 변조회로

전류앰프의 출력과 삼각파(진폭 8.5V, 주파수 16KHz)를 comparator로 비교

3) Dead Time 회로



상하 TR의 on /off 변경시 지연시간 때문에 상하 동시에 on이 되는 현상 발생 →
과대한 도통 전류 → 동시에 on 되는 현상을 막아주는 dead time 삽입 → 포토 커플러의
응답속도, Tr의 turn off 지연시간 등을 고려 2~3 μs

4) 속도검출회로

Encoder의 A,B상의 2개의 펄스를 이용, 단안정 멀티 바이브레이터의 출력을 4체배해서 적분

$$\text{전달함수 : } G_6(s) = \frac{V_{OE}}{\omega_{PG}} = \frac{R_{21}K_{FV}}{R_{20}(1+sC_{20}R_{21})} \quad , \quad K_{FV} = \frac{V_{AM}}{\omega_{PG(\max)}} = \frac{2V_{AM}t_{AM}}{\pi}$$

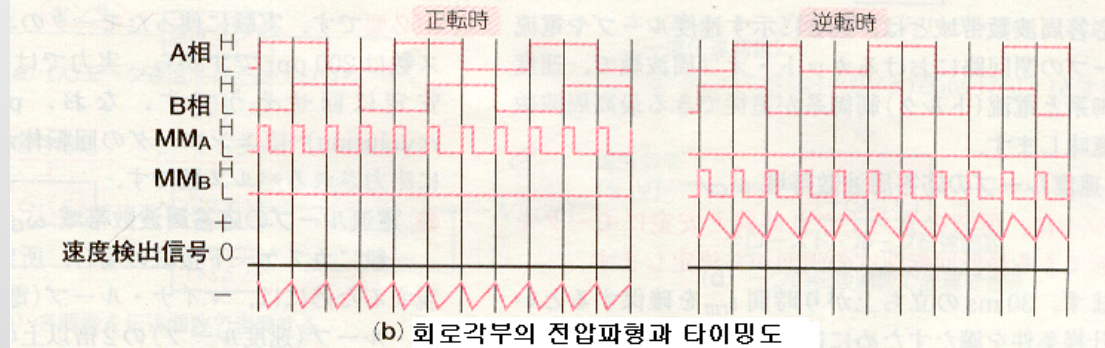
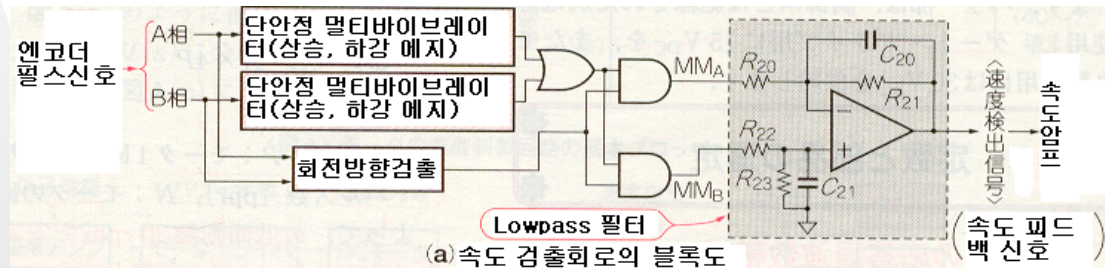
단, $\omega_{PG} [rad / s]$: Encoder 펄스의 각주파수

$\omega_{PG(\max)} [rad / s]$: 단안정 멀티바이브레이터의 출력펄스의 간격이 0일 때 encoder 펄스의 각 주파수

$V_{AM} [V]$: 단안정 멀티 바이브레이터 출력 펄스의 최대값

$t_{AM} [s]$: 단안정 멀티바이브레이터의 펄스폭

$V_{OE} [V]$: F-V변환회로의 출력전압



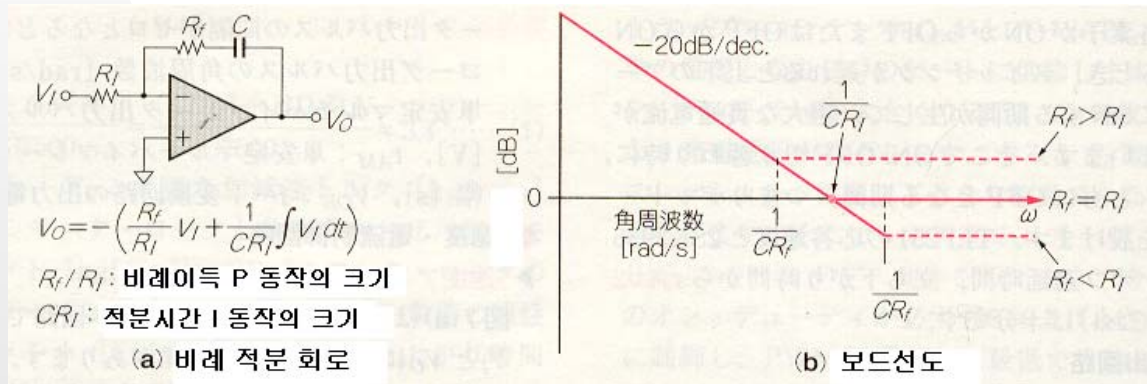
5) 속도· 전류제어회로

속도 앰프

비례적분(PI) 회로
$$G_1(s) = \frac{V_o(s)}{V_I(s)} = -\frac{1 + sCR_f}{sCR_I}$$

저주파대역 : I 보상, 고주파 대역 : P보상

정상상태의 보상은 I 보상, 제어계의 안정성이나 응답특성은 P보상으로 적정화



V_{R3} 로 피드백 회로에 **속도의 미분 삽입** 가능 → 오버슈트 제어

전류 앰프

불안전 적분형

모터 전류 검출 : 홀 전류 센서(SY-10) 이용

3. 정수와 부품의 선정

1) 시스템의 응답 주파수 대역

속도루프나 전류 루프의 cut off 주파수, 제어계가 추종할 수 있는 최고 주파수

속도루프의 응답 주파수 대역 : ω_{CV}

원하는 상승시간, 안정하게 모터를 회전 시킬 수 있는 최저 회전 속도 두 가지로부터 결정

$$t_{rm} (= 30ms) = \frac{\pi}{\omega_{CV}} \rightarrow \omega_{CV} = \text{약 } 100 \text{ rad/s}$$

시스템의 대역폭은 encoder 펄스 폭 만큼의 지연을 극복할 수 있도록

회전 펄스 주파수 = 대역폭의 10배 이상

$$\omega_P = \frac{2\pi}{60} N \times 4P \geq 10\omega_{CV}$$

단 P(ppr) : 모터 1회전 당의 encoder 펄스 수

N(rpm) : 모터 회전 수

→ 최저 회전수 20 rpm에서 안정하게 제어하기 위해서는 119[ppr] 이상의 encoder 펄스 수가 필요

전류루프의 응답 주파수 대역 : ω_{CI}

전류루프(minor loop)는 속도루프(main loop)의 2배 이상의 응답 속도

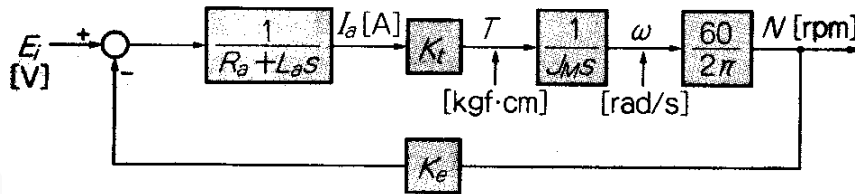
일반적으로 ω_{CI} 는 ω_{CV} 의 10~50배 이상

설계 목표 : 500Hz(=3100 rad/s)이상 → 최종적으로 3660 rad/s로 설정

2) 전류루프, 속도루프의 전달함수와 회로소자 정수

전류루프

모터의 전달함수

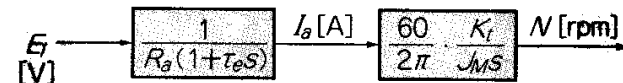
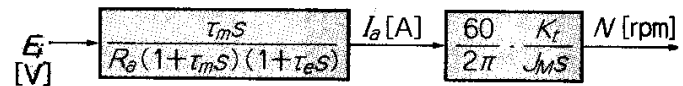
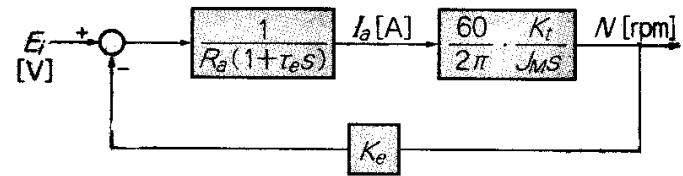


그림

전달함수로 나타낸 DC모터의 블록도

전기적 시정수 : $\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$

기계적 시정수 : $\tau_m = \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{J_M R_a}{K_t K_e}$



그림

DC모터 블록도의 변환

전류루프 각 부의 회로 정수와 전달함수

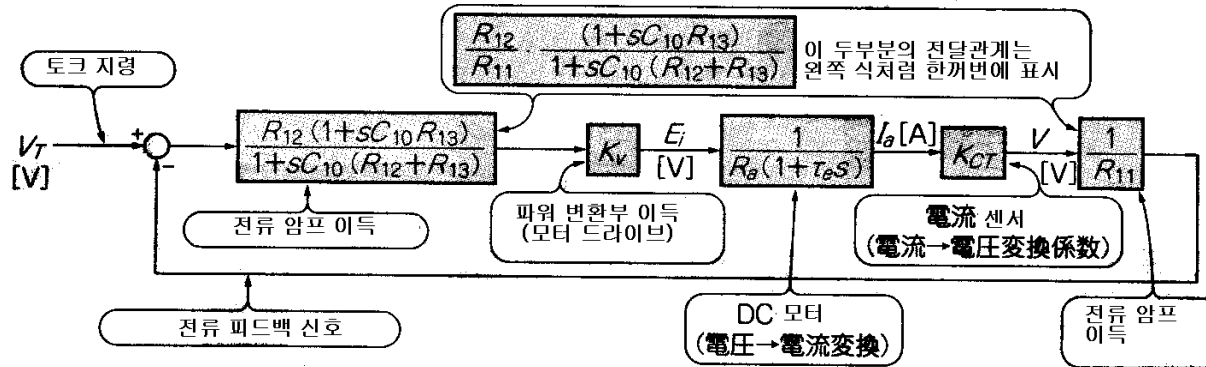


그림 전류루프의 블록도

전류 앰프 저항 R_{10}, R_{11} 계산

토크지령 V_T 가 5V일 때 전기자 전류가 5A가 되도록

$R_{10} : R_{11} = 5 : 2$ ($R_{10} = 25K\Omega, R_{11} = 10K\Omega$)

토크지령이 5V일 때 전류 검출기의 출력 2V

가능한 한 루프 이득을 올리기 위해서 $R_{12} = 1M\Omega$

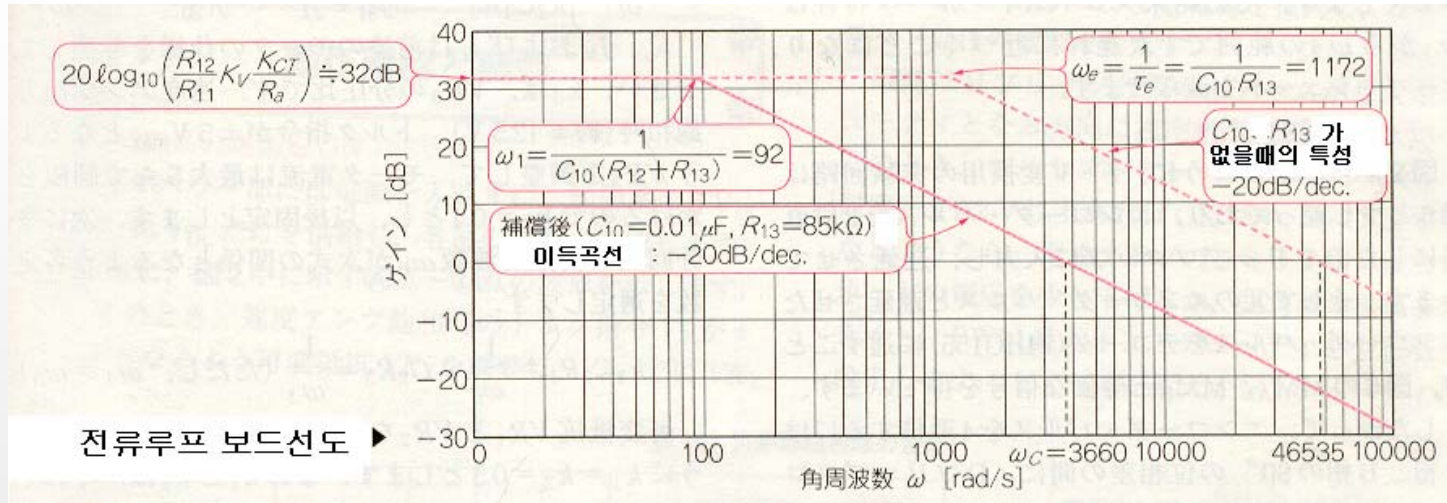
PWM의 최대 듀티 : dead time $3\mu s$, refresh time $1\mu s$ 로 하면 90%(16kHz)

모터의 구동전압 30V, 전류 앰프의 출력범위 8V

$$\rightarrow K_V = 30V \times 0.9 / 8V = 3.37$$

전류 센서의 이득 : $K_{CT} = 4V / 10A = 0.4$

이상의 정수로부터 전류 루프의 보드 선도



$\omega_C = 3660 \text{ rad/s}$ 이 되도록 $\rightarrow C_{10} = 0.01 \mu F, R_{13} = 85 K\Omega$

전류 루프의 전달함수 $G_3(s) = \frac{I_a}{V_T} = \frac{1}{1 + \frac{s}{3660}}$

속도루프

보드선도

속도지령과 피드백의 비를 1:1 ($R_1 = R_2$)

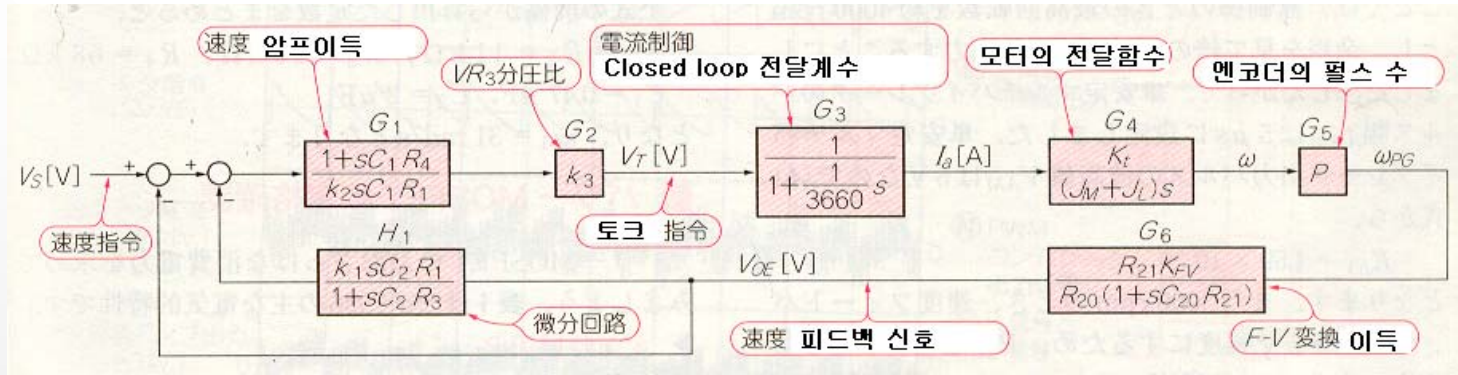
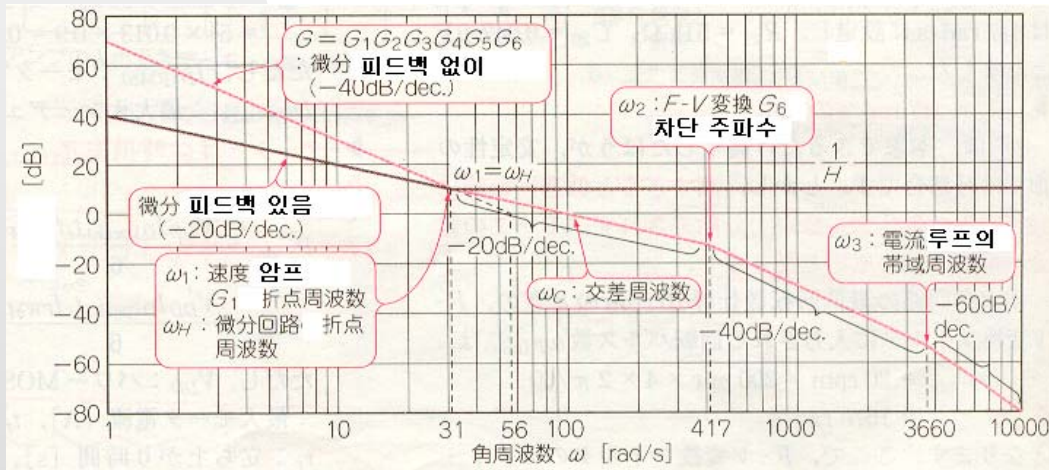


그림 속도 루프의 블록도

이 전달함수로부터 위상여유(표준, 40~75°)를 만족하는 보드선도



그림

속도 루프의 보드선도

안정성을 확보하기 위해서는 -20dB/dec 경사에서 ω_C 가 존재

-20dB/dec 의 영역이 넓을수록 위상여유가 커짐 \rightarrow 안정한 제어계

ω_1 (속도 앰프의 절점 주파수)과 ω_2 (F-V의 차단 주파수)중간을

$$\omega_C \text{ 로 설정 } \rightarrow \omega_1 \leq \frac{\omega_C}{3}, \omega_2 \geq 3\omega_C$$

F-V변환회로 정수

단안정 멀티바이브레이터의 펄스폭 $t_{AM} = 5\mu\text{s}, V_{AM} = 5\text{V}$

$$\rightarrow K_{FV} = \frac{V_{AM}}{\omega_{PG(\max)}} = \frac{2V_{AM}t_{AM}}{\pi} = 1.59 \times 10^{-5}$$

3000 rpm 일 때 속도 피드백 전압을 5V로 하기 위해

$$R_{21} / R_{20} = 5 \text{ 배}$$

F-V변화필터의 차단 주파수 : $\omega_2 = 417\text{rad/s}$

가능한 한 높을수록 좋지만, 너무 높으면 저속회전 시에 회전 펄스의 리플이 제거되지 않아서 모터의 잡음이나 진동의 원인이 됨

20rpm일 때 입력회전 펄스 주파수 :

$$\omega_p(\text{min}) = 20\text{rpm} \times 200\text{ppr} \times 4 \times 2\pi / 60 = 1676\text{rad/s}$$

이제 F-V변환 필터의 cut off 주파수 결정

■ $\omega_2 = \omega_p(\text{min})$ 로 설정 →

20rpm일 때의 F-V변환 필터에 의한 감쇄량 = -3dB

■ $\omega_p = \omega_p(\text{min}) / 3$ 으로 설정 →

ω_2 에서 약 -10 dB의 감쇄량을 가짐

두 번째의 경우가 경험적으로 모터에서의 잡음이나 진동을 줄일 수 있음

$$3\omega_c (= 300) < \omega_2 < \omega_p(\text{min}) / 3 (= 558.5) \rightarrow 410 \sim 430 \text{ rad/s}$$

$$\rightarrow R_{21} = 51\text{K}\Omega, C_{20} = 0.047 \mu\text{F}$$

속도 앰프의 정수 확인

-40dB/dec 라인과 와 -20dB/dec 라인이 만나는 교점에 ω_1

$$\omega_1 = \frac{1}{C_1 R_4}, \quad \frac{\omega_c}{\omega_1} = \frac{1}{K_2 C_1 R_1} \cdot K_3 \cdot \frac{K_t}{J_M + J_L} \cdot P \cdot \frac{R_{21}}{R_{20}} \cdot K_{FV} \cdot \frac{1}{\omega_1^2}$$

단, K_3 는 가변저항 V_{R3} 의 분압비

속도앰프 포화시(약 $\pm 12.5V$), 토크지령이 $\pm 5V$ 로 되도록

V_{R3} 를 조정해서, 모터의 전류는 최대 5A로 제한하기 위해 $K_3 = 0.4$

미분회로의 절점 주파수 $\omega_H (= \omega_1)$ 선정

$$K_1 C_2 R_1 = \frac{1}{\omega_c}, \quad C_2 R_3 = \frac{1}{\omega_1}$$

V_{R1} 과 V_{R2} 의 분압비 $K_1 = 0.5$, $K_2 = 0.5$ (가변저항 중앙)

→ $R_1 = R_2 = 11K\Omega$ $R_3 = 15K\Omega$ $R_4 = 68K\Omega$ $C_1 = 0.47\mu F$ $C_2 = 2\mu F$

→ $\omega_1 = 31 \text{ rad/s}$

3) 파워 MOSFET의 정격 확인

표 1. 파워 MOSFET의 주요 정격과 전기적 특성

항목	기호	값
허용 채널 손실	P_{ch}	35W
채널 온도	T_{ch}	150°C
드레인-소스간 전압	V_{DSS}	60 V
드레인 전류	I_D	45 A
최대 드레인 전류($I_D = 20A, V_{GS} = 10V$)	$I_{D(pulse)}$	180 A
온 저항	$R_{DS(on)}$	10~13 mΩ
채널-케이스 간 열저항	$R_{th(ch-c)}$	3.571°C/W
패키지-공기 간 열저항	$R_{th(c-a)}$	62.5°C/W

On 시 손실 $P_{on} = I_{D(RMS)}^2 R_{DS(on)} D_{ON(max)} = 5^2 \times 0.013 \times 0.9 \cong 0.29W$

$I_{D(RMS)}$: 모터 전류의 실효치, $D_{ON(max)}$: 최대 on 듀티

Turn On 시 손실 과 Turn off 시 손실

$$P_{S(on)} = \frac{V_{DD} I_{D(peak)} t_f f_{PWM}}{6}$$

$$P_{S(off)} = \frac{V_{DD} I_{D(peak)} t_r f_{PWM}}{6} = \frac{30 \times 5 \times 0.25 \times 10^{-6} \times 16 \times 10^3}{6} = 0.1W$$

→ 전손실 $P_{ch} = P_{on} + P_{S(on)} + P_{S(off)} = 0.5W$

→ 공기온도에 대한 채널 상승 온도

$$T_{ch} = P_{ch} (R_{th(ch-c)} + R_{th(c-a)}) = 0.5 \times (3.571 + 62.5) \cong 33^\circ C$$

외기온도가 $40^\circ C$ 라면 $73^\circ C$ 까지 상승

4. 동작확인 및 조정

제어계의 전원을 ON

파워부에 전원을 넣지 말고 제어계에 5V, $\pm 15V$ 를 공급한 다음, ㉠ ~ ㉡의 파형을 확인

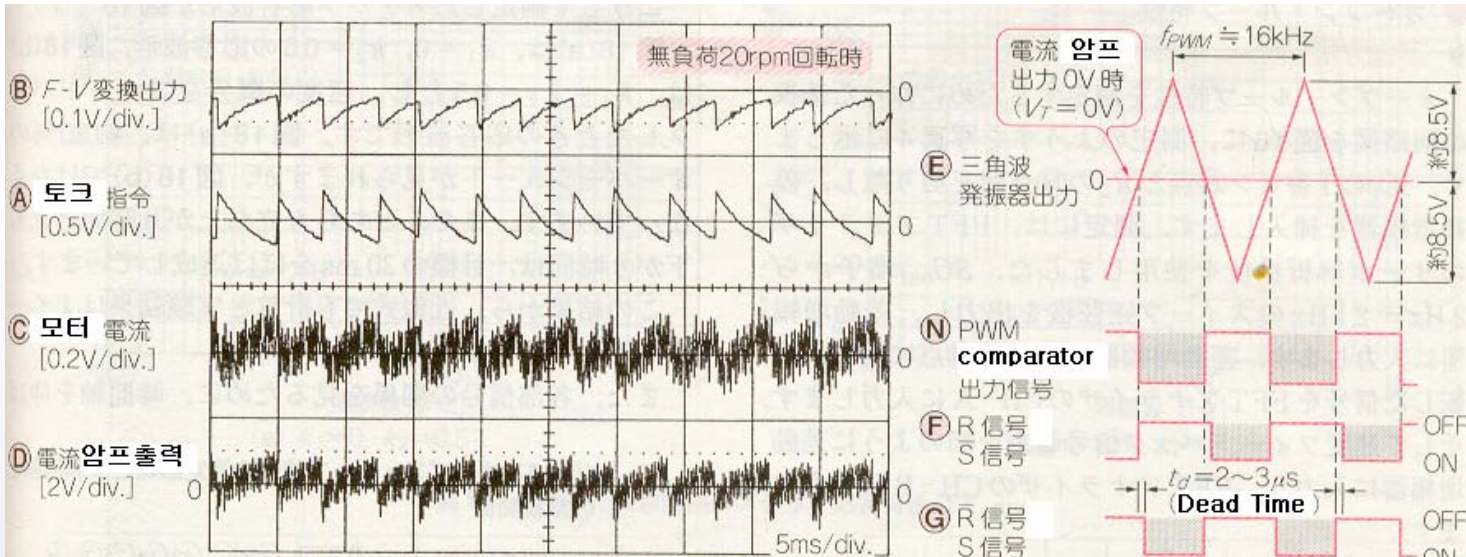
속도 앰프 포화시의 토크지령 V_T 가 $\pm 5V$ 가 되도록 V_{R3} 를 조정
 V_{R1} , V_{R2} 도 중앙의 위치로 세트

파워 MOSFET 구동부 ON

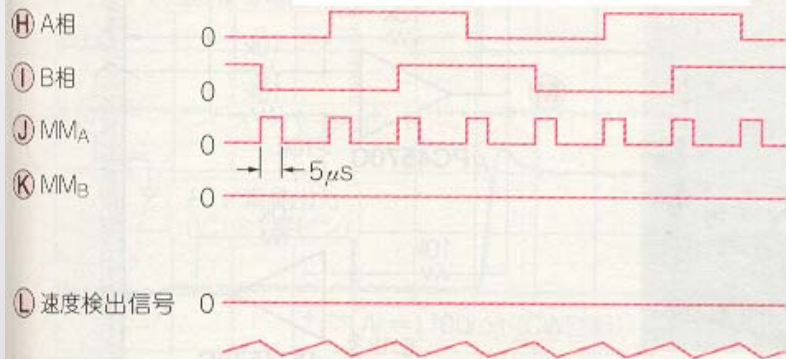
제어계의 확인이 끝난 후 파워 MOSFET 구동부에 15V 인가 bootstrap을 확인
각 상의 아암이 최대의 ON duty가 되도록 속도지령(V_s) 인가 했을 때 C_b 단자의 전압이 12V
이상이면 OK. 이하이면 전류 앰프의 제너 다이오드 전압을 조금 낮추거나 삼각파의
PWM ON duty를 약간 적게

모터 구동부 전원 ON

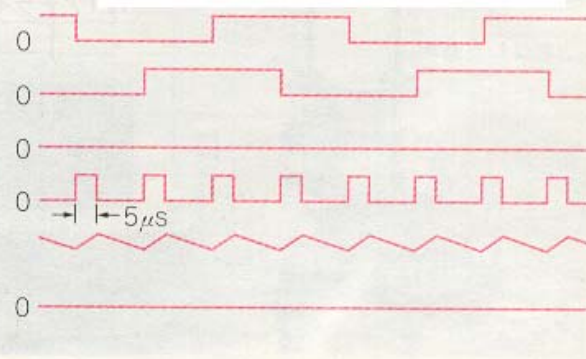
속도지령 V_s 를 0 으로 두고 모터 구동용 전원 30V 인가



모터 출력측에서 보아서 CW 방향회전시



모터 출력측에서 보아서 CCW 방향 회전시



(c) 4 체배 회로의 각부 파형

그림 실험회로 각부의 파형

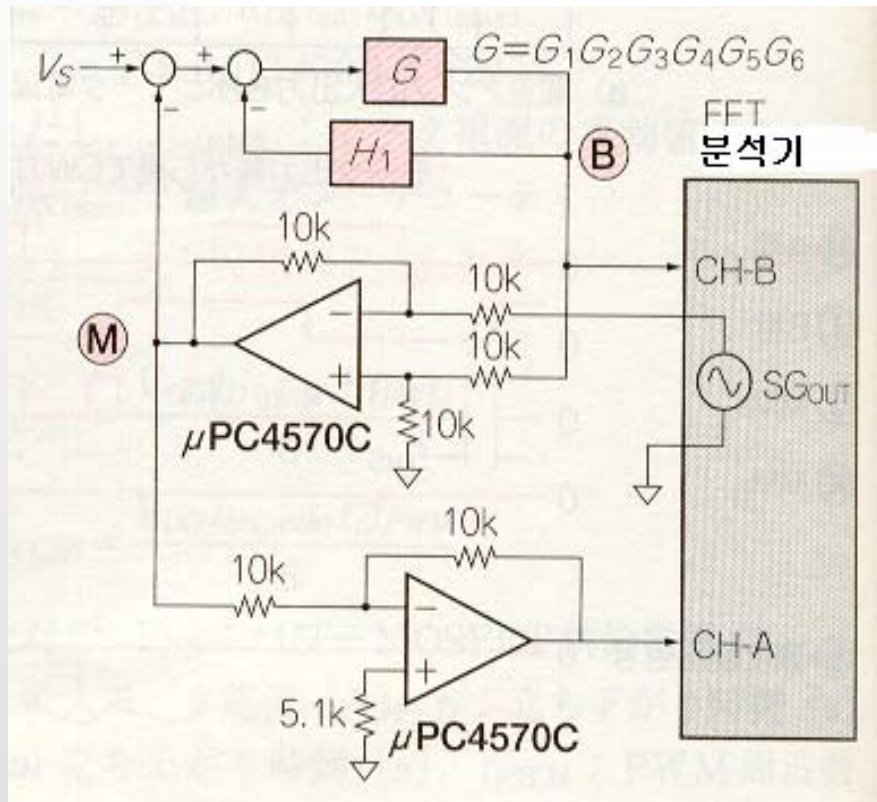
모터제어회로(서보 드라이버) 설계

5. 특성의 측정

1) 오픈루프 특성

FFT analyzer 이용 2 Hz ~ 2 KHz sweep 정현파 이용

위상여유 체크



2) 스텝응답

속도 검출기의 출력 측정 상승시간 체크

3) N - T 특성

그림

오픈루프 특성의 측정회로와 접속방법