

2018 서보제어 실험

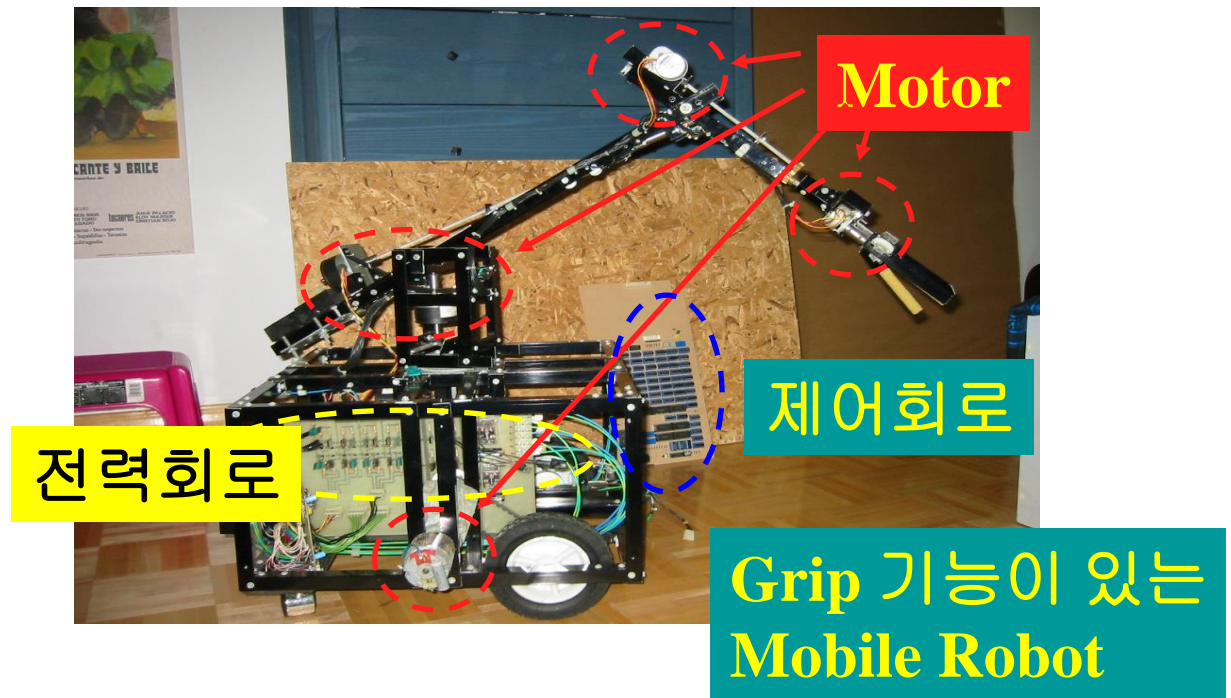
동양미래대학교
로봇자동화공학부



서보 제어계

- 서보 제어계의 구성 요소

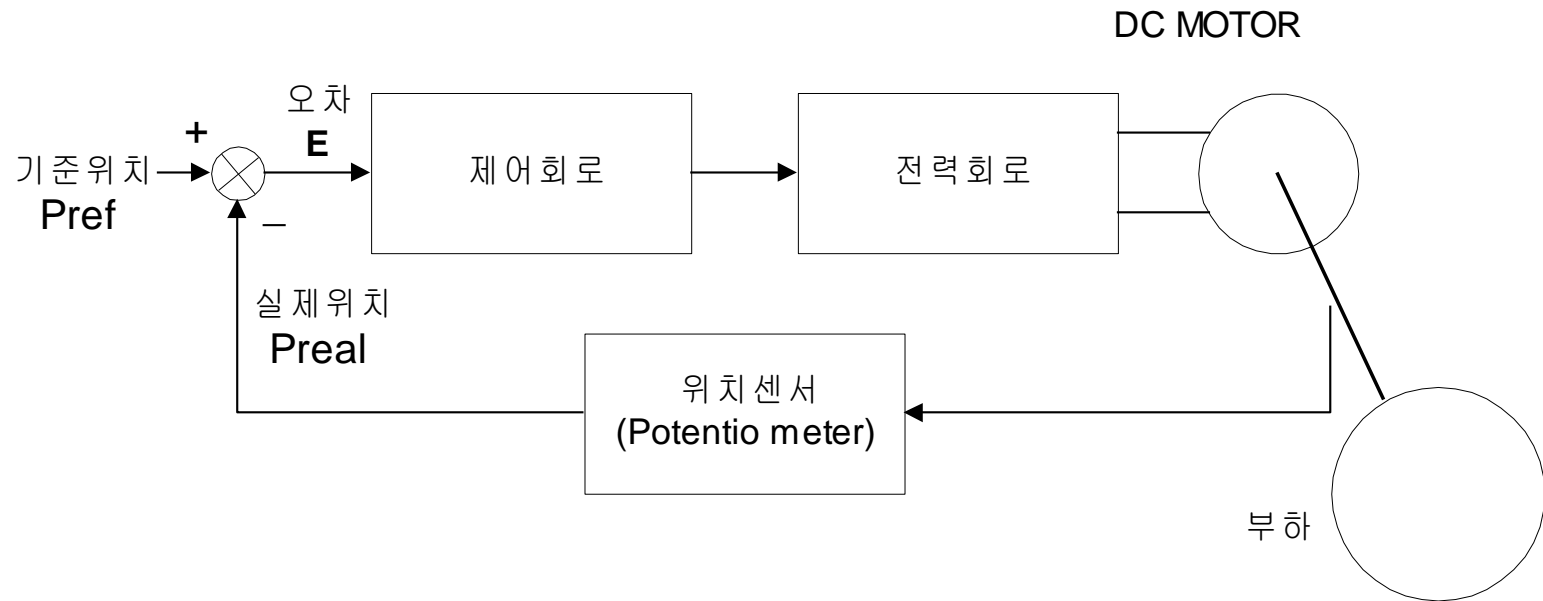
- (1) Motor
- (2) 전력회로
- (3) 제어회로
- (4) 센서



서보 제어계

- 폐회로 제어(서보 제어)

정밀한 위치 및 속도를 제어하기 위하여 센서를 이용하여 실제 위치 및 속도를 측정하여 원하는 위치나 속도를 벗어나는 경우에는 오차 신호를 발생시켜 이 오차가 0이 되도록 제어함.



서보 제어계

- 모터 제어계의 구성요소

- (1) 모터

- 대용량 : 직류기, 교류기(유도기, 동기기)

- 소용량 : DC 서보모터, 브러쉬리스 DC 모터, 스테핑 모터

- (2) 전력회로

- Linear 방식, Switching 방식

- (3) 센서

- Tachogenerator, Potentiometer, Optical Encoder

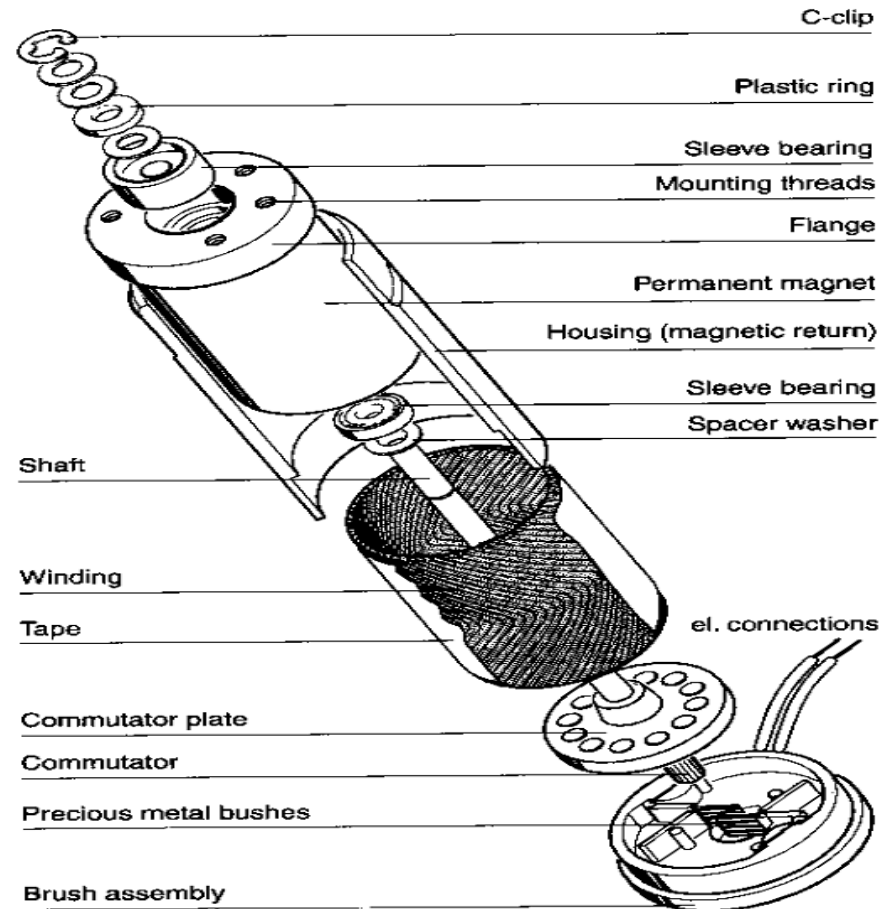
- (4) 제어회로

- Analog 방식 : OP Amp

- Digital 방식 : Microprocessor

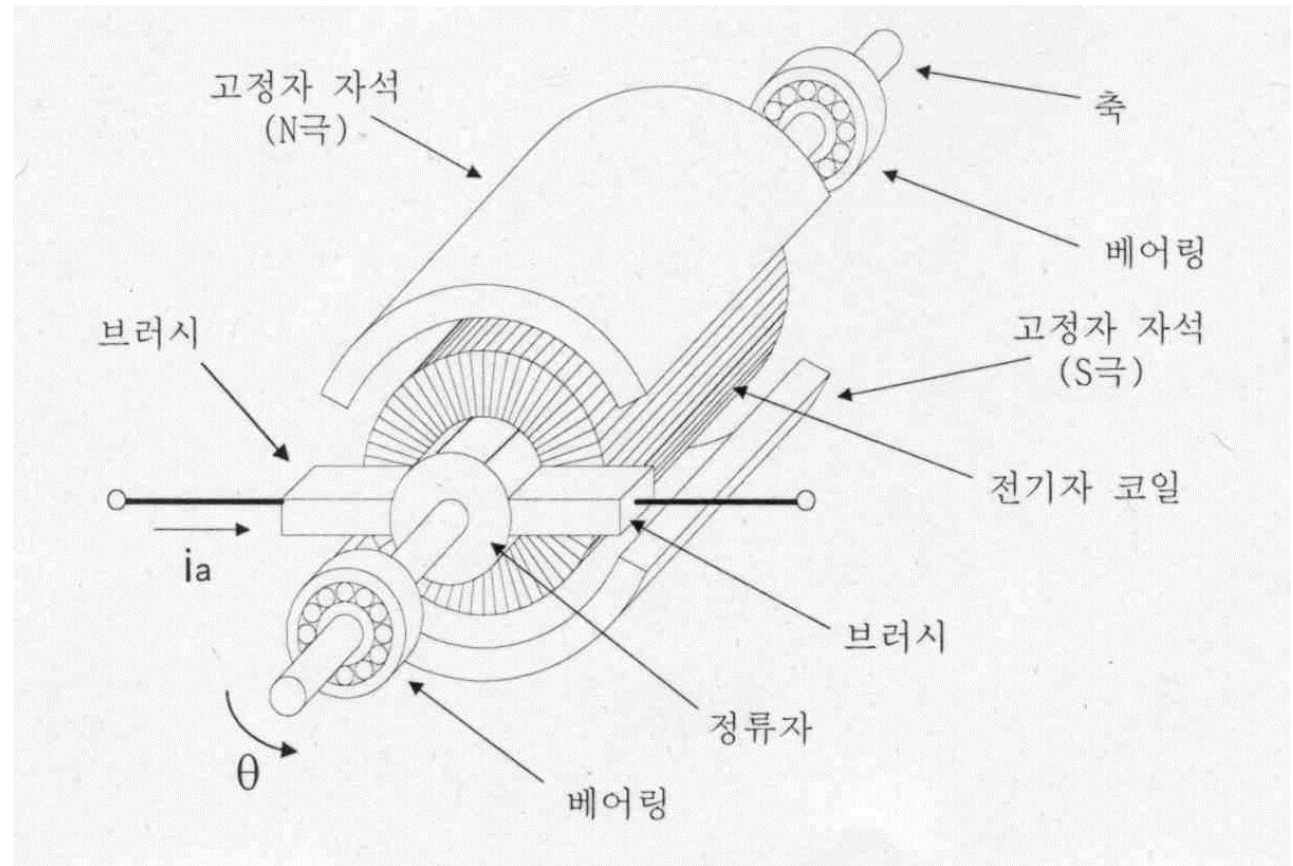
서보 제어계 (DC 서보 모터)

DC 서보모터의 구조



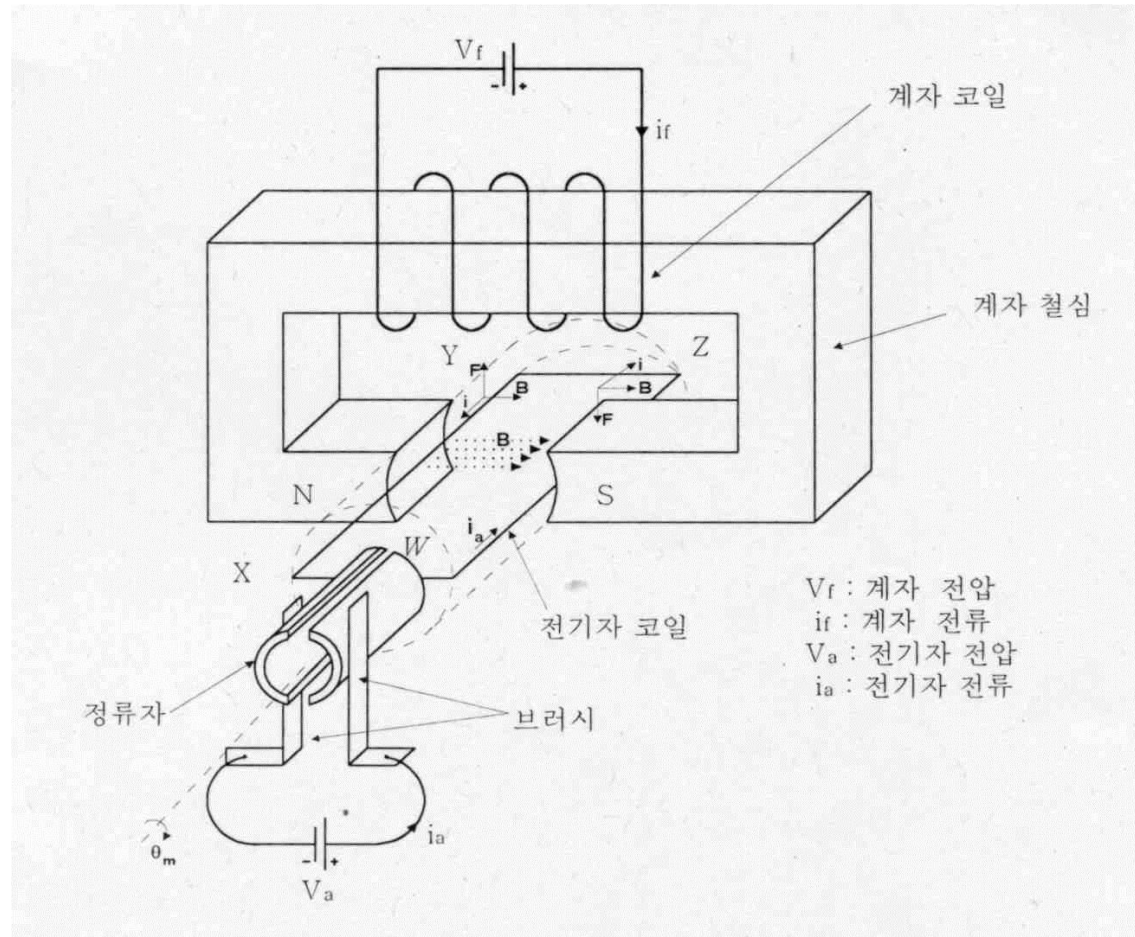
서보 제어계 (DC 서보 모터)

DC 서보모터의 구조



서보 제어계 (DC 서보 모터)

DC 서보모터의 동작원리



서보 제어계 (DC 서보 모터)

- Motor의 발생 토크 (플레밍의 왼손 법칙)

$$F = i_a l \times B$$

$$T = R \cdot F = R l i_a \times B = K_t i_a \Rightarrow T = K_t i_a$$

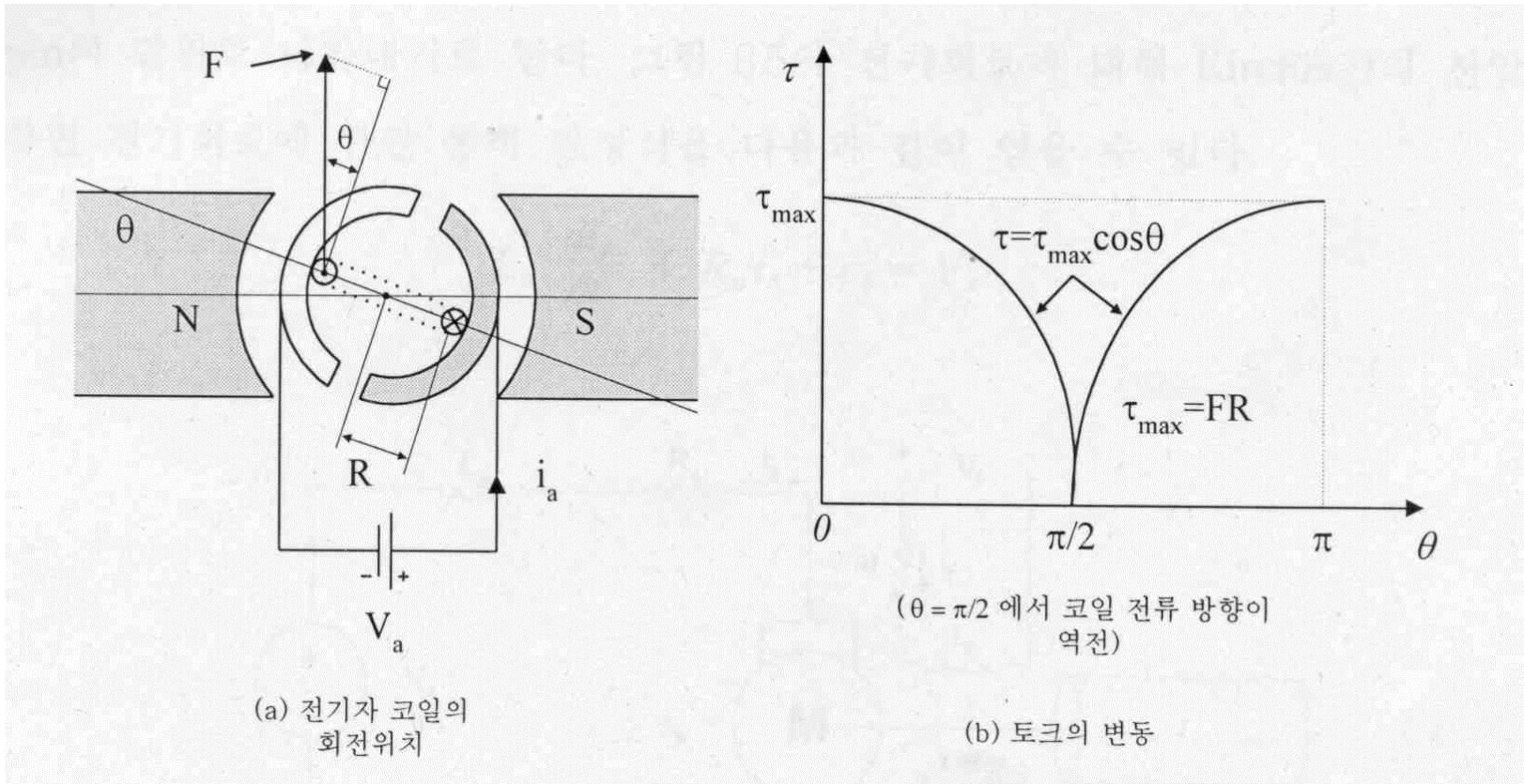
R : 전기자 코일과 축 중심사이의 거리, K_t : 토오크 상수

- Motor의 역기전력 (플레밍의 오른손 법칙)

$$E = v l \times B = K_e w \Rightarrow E = K_e w$$

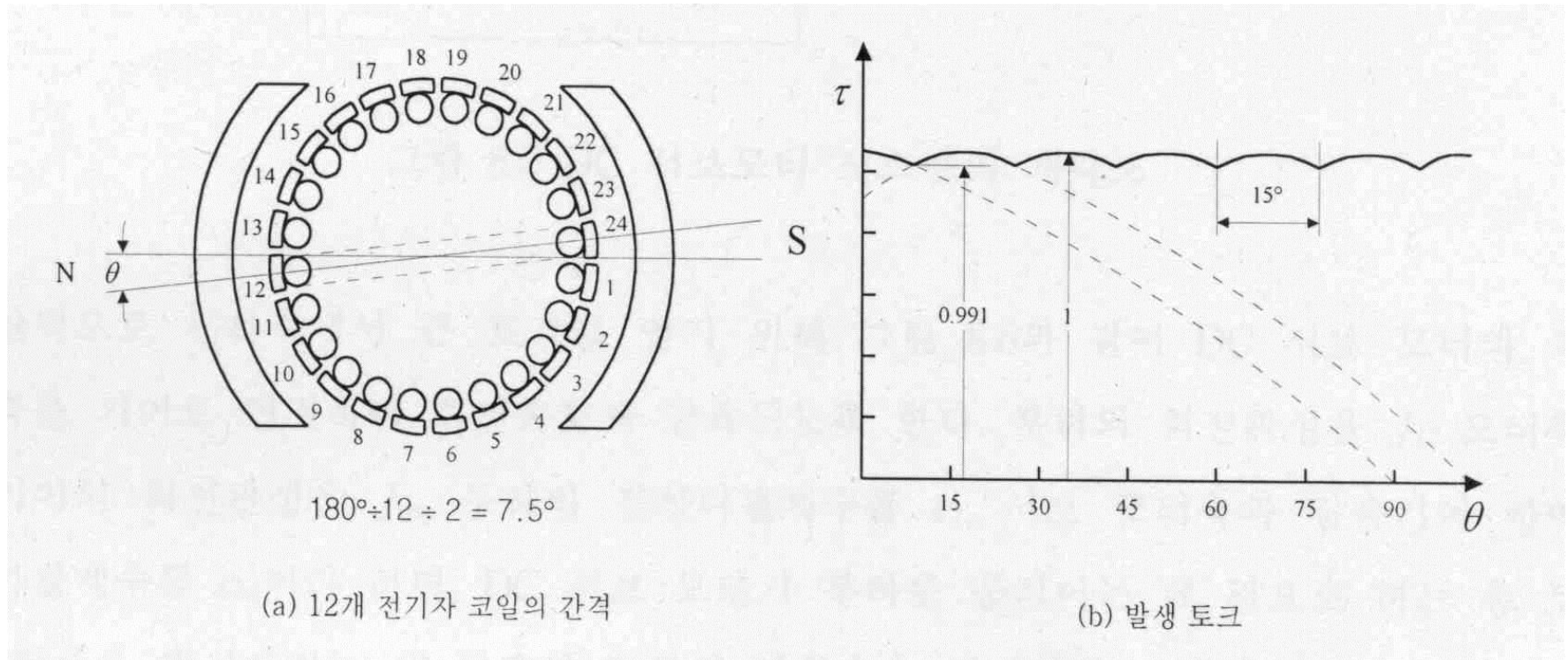
v : 전기자 코일의 속도, w : 각속도, K_e : 토오크 상수

서보 제어계 (DC 서보 모터)



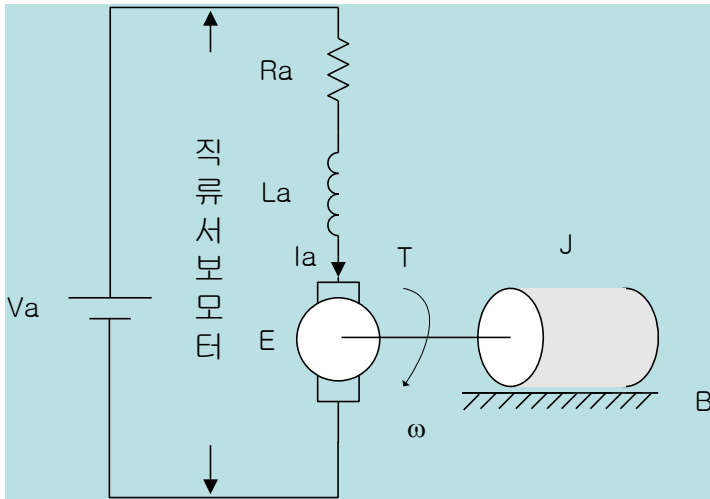
전기자 코일의 위치변화 따른 발생 토오크의 변화

서보 제어계 (DC 서보 모터)



복수개의 전기자 코일이 등간격으로 배치된 경우의 발생토크

서보 제어계 (DC 서보 모터)



$$V_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E(t) \quad \text{모터의 회로방정식}$$

$$E(t) = K_e w(t) \quad \text{모터의 역기전력 관계식}$$

$$T(t) = K_t I_a(t) \quad \text{모터의 토오크 관계식}$$

$$J \frac{dw(t)}{dt} + Bw(t) = T(t) \quad \text{부하 방정식}$$

(J : 부하의 관성모멘트, B : 속도성분의 마찰계수)

* DC 서보 모터의 속도 토오크 특성곡선

$$V_a = R_a I_a + E$$

$$E = K_e w$$

$$T = K_t I_a$$



$$V_a = R_a \frac{T}{K_t} + K_e w$$



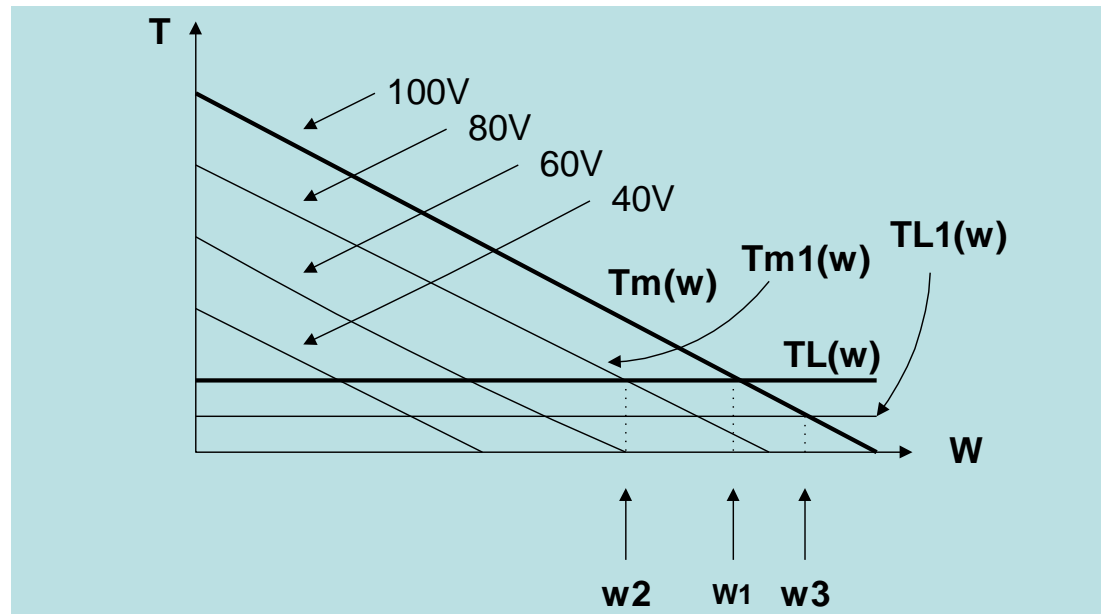
$$T = -\frac{K_t K_e}{R_a} w + \frac{K_t}{R_a} V_a$$

$$(y = -ax + b)$$

서보 제어계 (DC 서보 모터)

-정상상태에서의 모터 속도의 결정

$T_M(\omega) = T_L(\omega)$ 의 조건에서 속도 결정됨



모터의 속도 토크 특성곡선과 부하 토크의 관계

서보 제어계 (DC 서보 모터)

■ DC 서보모터의 규격 및 관련용어의 정의

M 1:4

RE 75 □75 mm, Graphite Brushes, 250 Watt

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request!)

Order Number

		118819	118820	118821	118822	118823	118824	118825	118826	118827	118828	118829				
Motor Data																
1	Assigned power rating	W	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250				
2	Nominal voltage	Volt	12.0	24.0	36.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0				
3	No load speed	rpm	1850	2770	2890	3100	2480	2300	1940	1550	1270	1150	1020			
4	Stall torque	Nm	6.27	10.9	11.4	12.3	9.72	8.83	7.87	6.23	4.93	4.48	3.91			
5	Speed / torque gradient	rpm / mNm	0.314	0.263	0.259	0.257	0.260	0.264	0.250	0.253	0.261	0.261	0.265			
6	No load current	mA	571	520	367	306	214	190	147	105	79	69	58			
7	Starting current	A	108	136	98.4	84.5	53.5	45.0	33.9	21.4	13.8	11.4	8.82			
8	Terminal resistance	Ohm	0.111	0.176	0.366	0.568	0.897	1.07	1.42	2.24	3.47	4.21	5.44			
9	Max. permissible speed	rpm	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000			
10	Max. continuous current	A	10.00	9.70	7.23	5.98	4.89	4.53	3.98	3.21	2.61	2.38	2.10			
11	Max. continuous torque	mNm	581	775	841	869	889	888	924	933	928	933	930			
12	Max. power output at nominal voltage	W	273	748	838	973	618	521	393	249	161	133	103			
13	Max. efficiency	%	77	84	85	86	86	86	86	85	84	84	83			
14	Torque constant	mNm / A	58.1	79.9	116	145	182	196	233	291	356	392	443			
15	Speed constant	rpm / V	164	119	82.1	65.7	52.6	48.7	41.1	32.9	26.8	24.3	21.5			
16	Mechanical time constant	ms	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
17	Rotor inertia	gcm ²	1400	1460	1420	1400	1380	1360	1420	1400	1360	1360	1340			
18	Terminal inductance	mH	0.04	0.08	0.16	0.25	0.39	0.46	0.64	1.01	1.51	1.83	2.34			
19	Thermal resistance housing-ambient	K / W	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3			
20	Thermal resistance rotor-housing	K / W	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6			
21	Thermal time constant winding	s	100	110	100	100	99	97	100	100	97	97	95			

Maxon사의 DC 서보모터 Specification sheet



서보 제어계 (DC 서보 모터)

Line 1 ● Assigned power rating P_{2T} [W]

This figure represents the maximum power output when operating within the recommended output power range. It is dependent on motor type and can be correlated with the presentation in our Selection Guide (Please refer also to pages 50 - 146 under "Operating Ranges").

Line 2 Nominal voltage U [V]

All nominal values refer to operation at this voltage. It is normally chosen so as not to exceed the maximum recommended no load condition. Motor application is of course not limited to this voltage. To reach the assigned power rating (line 1), higher operating voltages are permissible. Maximum output power will increase accordingly (line 12).

Line 1 정격 전력

메이커에서 권장하는 사용조건하에서 허용되는 최대 전력

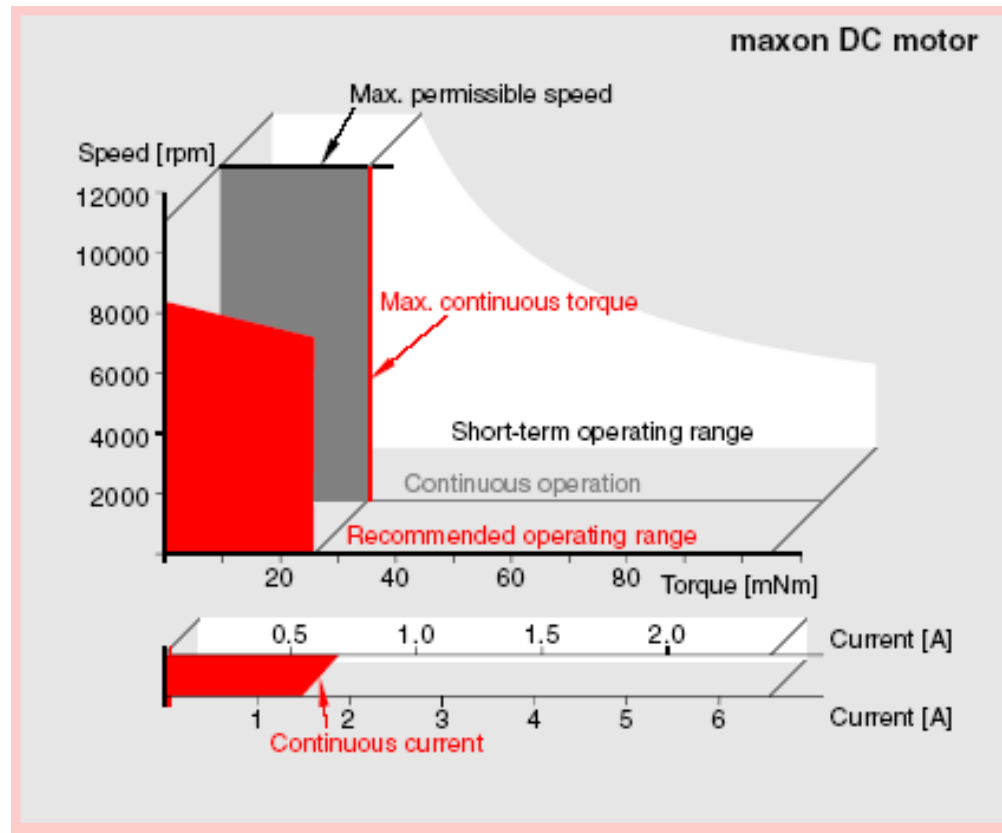
$$P = T(\text{torque}) \times N(\text{speed})$$

Line 2 정격 전압

모터를 일반적으로 사용하는데 가할 수 있는 전압

서보 제어계 (DC 서보 모터)

사용 동작 영역 : 일반적으로 높은 토크를 낼 경우 속도는 낮추어 사용하게 됨



서보 제어계 (DC 서보 모터)

Line 3 No load speed n_0 [rpm]

This is the speed at which the motor turns at nominal voltage and without load. For practical purposes, this speed is proportional to the voltage applied.

Line 4 Stall torque M_H [mNm]

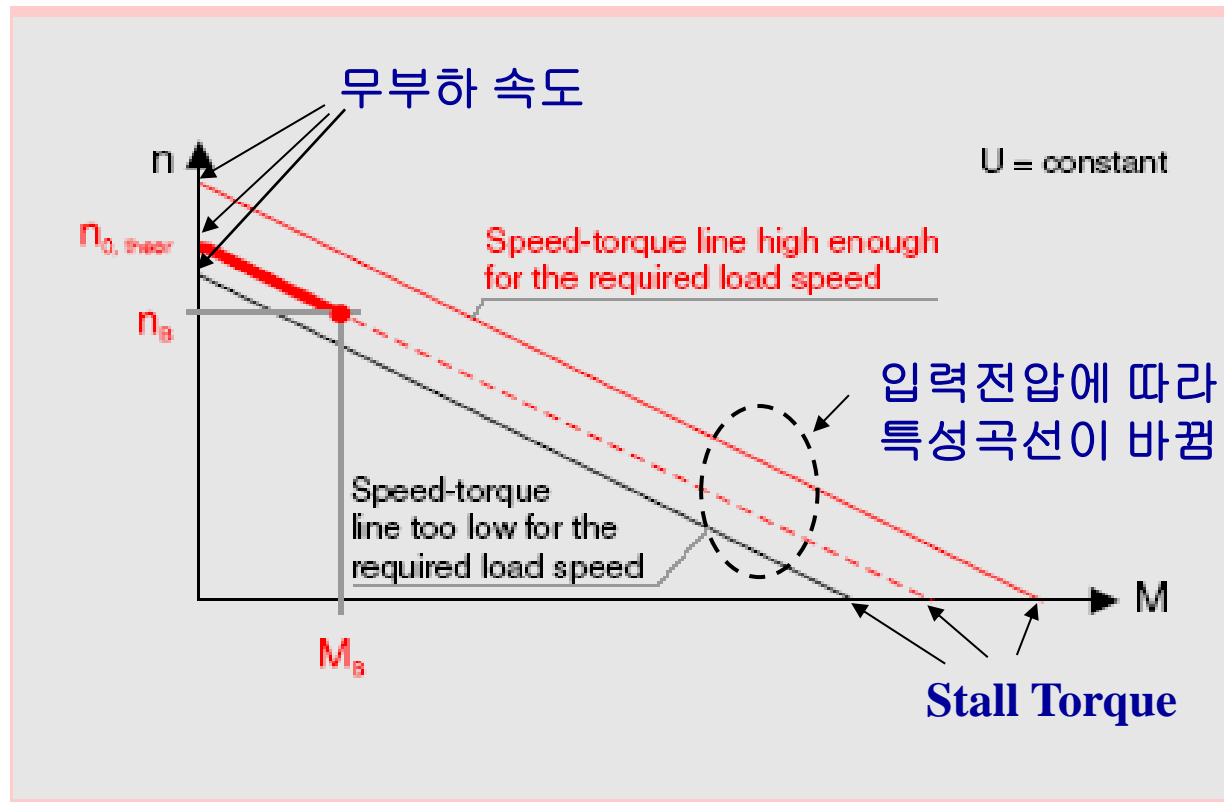
This is the torque produced by the motor in a stand-still condition, also called starting torque. The rapidly rising motor temperature leads to a corresponding decrease in the stall torque (see also "Heat behaviour" page 38).

Line 3 무부하 속도
정격전압을 가하고 기계부하가
연결안된 경우의 모터 속도
무부하 속도는 가해진 전압에
비례함

Line 4 Stall torque
모터가 정지시 발생하는 토오크로
기동토오크와 같다.

서보 제어계 (DC 서보 모터)

속도 토오크 특성곡선



서보 제어계 (DC 서보 모터)

Line 5 Speed / torque gradient
 $\Delta n / \Delta M$ [rpm / mNm]

This gradient says a lot about the power capability of a motor. The flatter the gradient, the less speed variation is experienced during load variations. The speed / torque gradient is calculated at 25°C winding temperature.

Line 6 No load current I_0 [mA]

This is the current the unloaded motor draws. It depends on brush and bearing friction and varies slightly with varying speed.

Line 7 Starting current I_s [mA], [A]

is the quotient "Voltage at terminals / DC-resistance" and is proportional to stall torque.

Line 5 속도토크 특성곡선의 기울기

Line 6 무부하 전류
정격전압을 가하여 무부하 속도로 회전할 때 모터에 흐르는 전류

Line 7 기동 전류
모터가 기동시 흐르는 전류
모터의 권선저항으로 모터 입력전압 값을 나눈 것과 같음

서보 제어계 (DC 서보 모터)

Line 8 Terminal resistance R [Ω]

is the resistance at the terminals at 25°C and determines the starting current at a given voltage. In the case of graphite brushes it must be noted that contact resistance varies depending on the load.

Line 9 Maximum permissible speed n_{\max} [rpm]

This speed should not be exceeded during normal operation. Commutation problems may be expected at higher speeds, in turn, this could lead to premature motor failure.

Line 8 단자 저항

모터의 전기자 권선의 저항값
기동전류값과 관계가 밀접함.

Line 9 최대 허용 속도

일반적으로 속도가 빨라지면
정류자에서 문제가 발생할 수
있으므로 제한함

서보 제어계 (DC 서보 모터)

Line 10 Maximum continuous current
 I_{cont} [mA], [A]

Operating the motor continuously at this current level and at 25°C ambient will cause the winding to ultimately reach the specified max. winding temperature. This assumes no heat sinking. Depending how the motor is mounted, this value can be increased substantially.

Line 11 Max. continuous torque M_{cont} [mNm]

is the torque that can be supplied continuously or on an average, thereby heating up the winding to the maximum permissible temperature; based on an ambient temperature of 25°C.

Line 10 최대 연속 전류
모터에 흘릴 수 있는 연속적인 직류
전류값으로 발열문제와 관련이 있음

Line 11 최대 허용 토크
모터가 연속적으로 낼 수 있는
최대 토크

서보 제어계 (DC 서보 모터)

Line 12 Maximum power output

P_{\max} [mW], [W]

is the theoretical maximum output at 25°C rotor temperature. Permissible limits are frequently below this level (see max. continuous current and max. permissible speed).

Line 13 Maximum efficiency

η_{\max} [%]

Efficiency is power or torque-dependent (see page 35 efficiency characteristics). Maximum efficiency is derived from the relationship between no load and starting current

Line 14 Torque constant

k_M [mNm / A]

This may also be referred to as "specific torque" and represents the quotient from generated torque and applicable current.

Line 12 최대 전력 출력
모터가 낼 수있는 최대 출력

Line 13 최대 효율

Line 14 토크 상수
전기자 전류와 발생토크의
비례관계를 나타내는 비례상수

서보 제어계 (DC 서보 모터)

Line 15 Speed constant

k_n [rpm / V]

shows the specific speed per volt of applied voltage, disregarding any frictional losses. The reciprocal of the speed constant is known as the voltage constant or back-EMF constant.

Line 16 Mechanical time constant

τ_m [ms]

is the time required by the rotor to accelerate from standstill to 63 % of its no load speed.

Line 17 Rotor moment of inertia

J_R [gcm²]

is the mass moment of inertia of the rotor, based on the axis of rotation.

Line 15 속도 상수

역기전력 상수로 모터의 회전수에 비례하여 발생하는 역기전력과
의 비례관계를 나타내는 비례상수

Line 16 기계적 시정수

정지시에서 속도가 무부하속도의
63%에 도달할 때까지 걸리는
시간

Line 17 로터의 관성모멘트

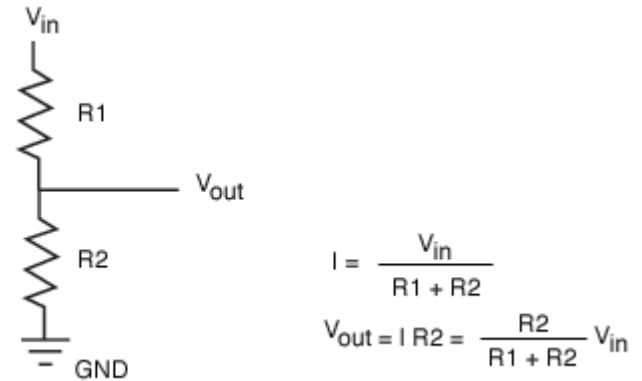
회전자 부위의 관성모멘트

서보 제어계 (센서)

- Potentiometer : 가변저항과 동일한 원리로 측정된 전압으로부터 회전 각도 (또는 위치)를 알아낼 수 있음.

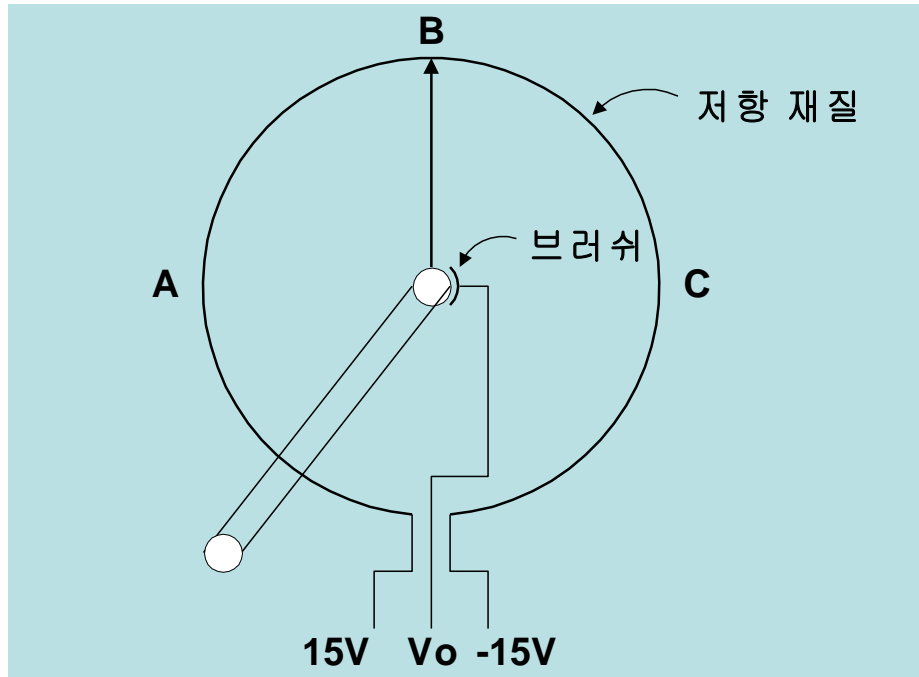


Potentiometer 의 외관



Potentiometer 의 원리

서보 제어계 (센서)



Potentiometer 의 구성도

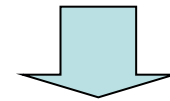
가변저항의 양단(고정부위)에
 $+15, -15[V]$ 의 전압 가함.

V_o 에 출력되는 전압 측정

A위치(90도) : $V_o=7.5[V]$

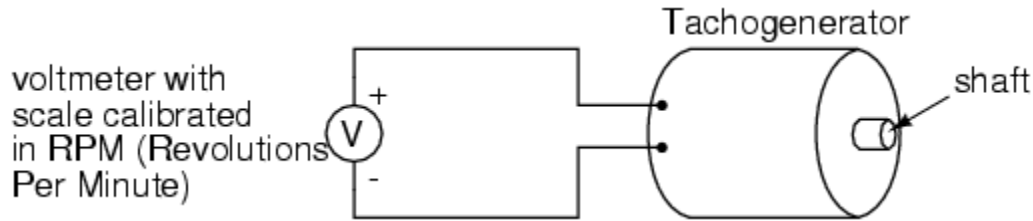
B위치(180도) : $V_o=0[V]$

C위치(270도) : $V_o=-7.5[V]$



각도 (위치)를 파악할 수 있음.

서보 제어계 (센서)



Tachogenerator의 동작원리



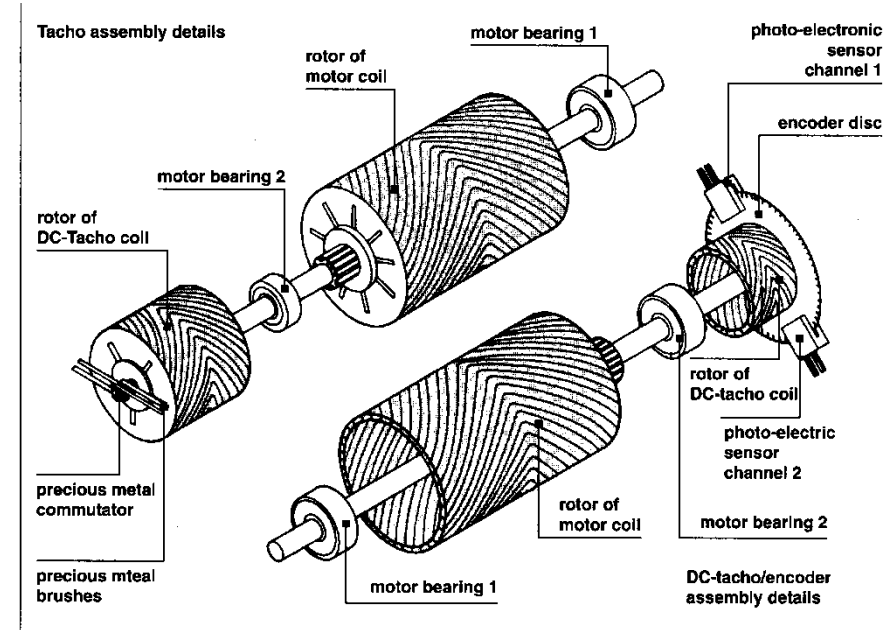
Tachogenerator의 외관

Tachogenerator는 발전기와 동일함.
속도에 비례하는 전압 발생.

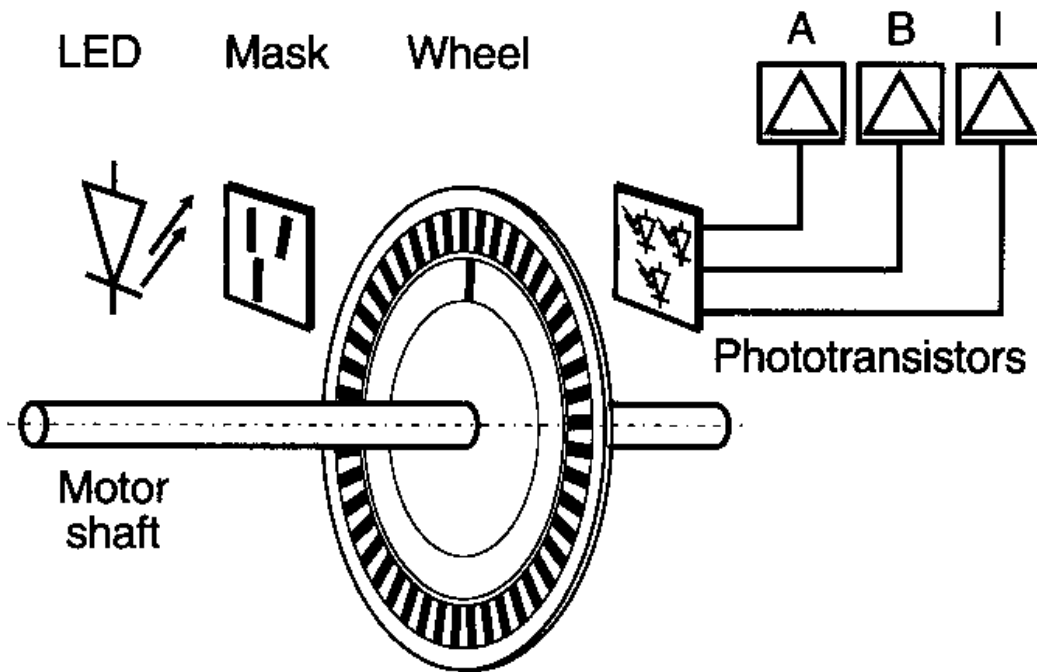
$$E = K\Phi N$$

(K:비례상수, Φ :자속(고전된 값, N:회전속도)

따라서 측정한 전압으로부터 회전속도를
알 수 있음.



서보 제어계 (센서)

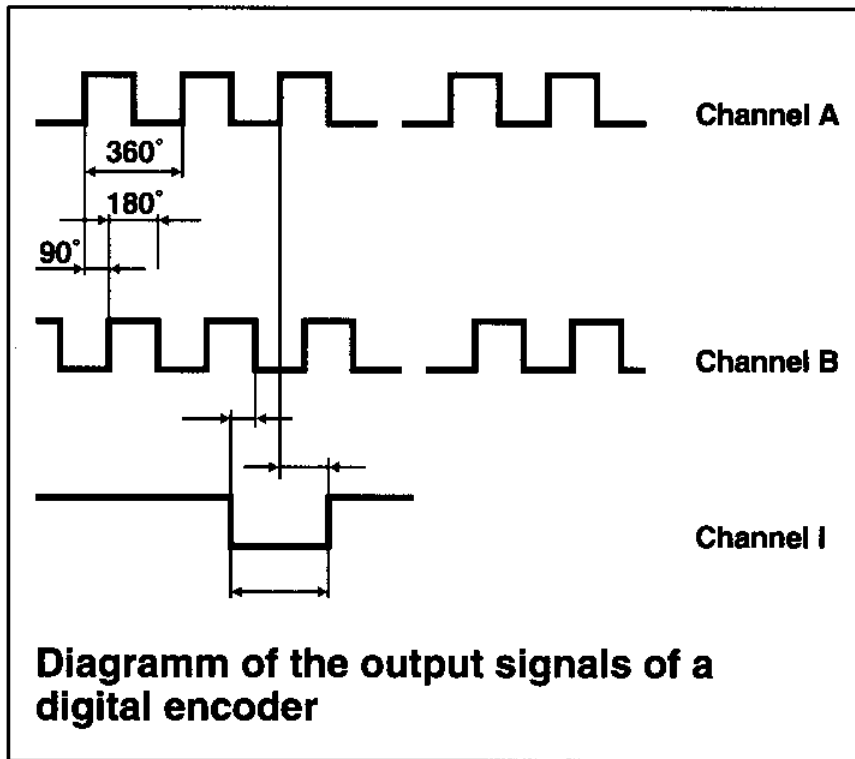


Incremental Type Optical Encoder의 내부 구성도



Optical Encoder의 외관

서보 제어계 (센서)

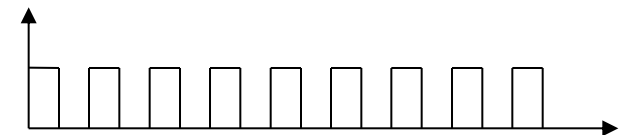


Incremental Type Optical Encoder의 출력신호

- 출력신호파형의 주기측정에 따른 속도 측정이 가능
- 펄스 갯수를 계측하면 이동거리도 측정 가능함.

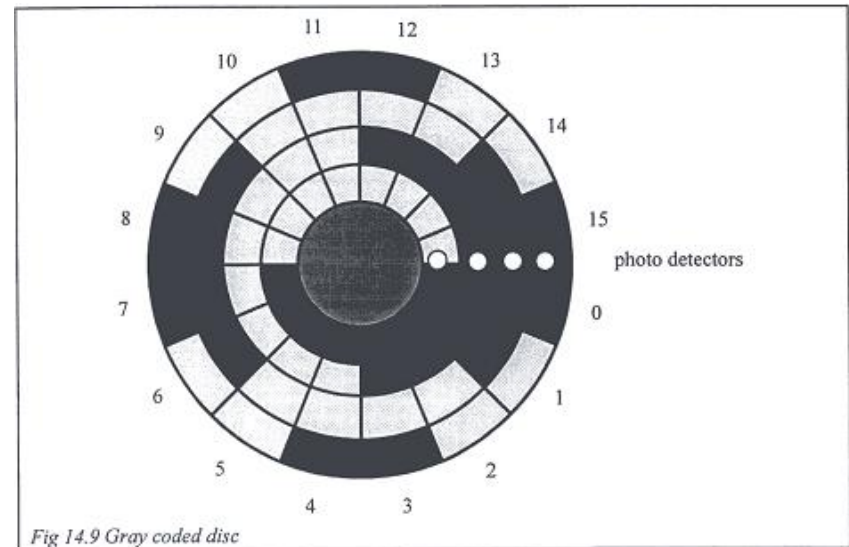
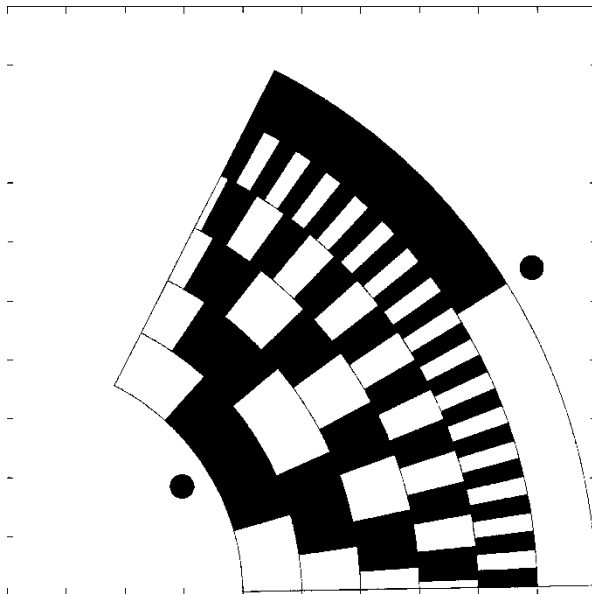


속도가 느린 경우의 출력 파형



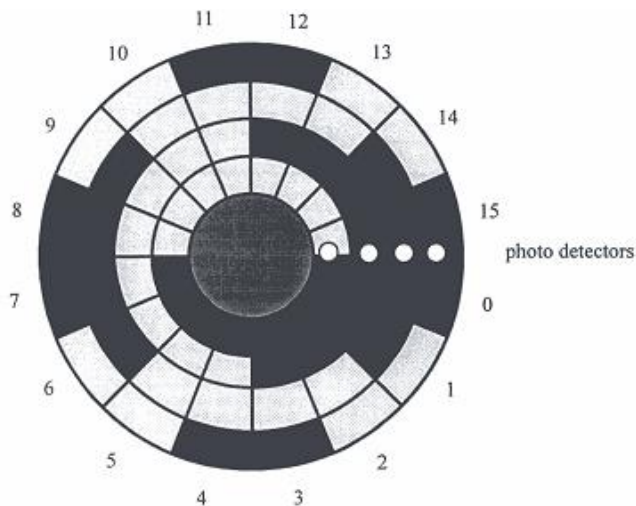
속도가 빠른 경우의 출력 파형

서보 제어계 (센서)



Absolute Type의 Optical Encoder의 내부 디스크 패턴 모양

서보 제어계 (센서)



Position	Angle	D3	D2	D1	D0	Change
0	0 → 22.5	0	0	0	0	D3
1	22.5 → 45	0	0	0	1	D0
2	45 → 67.5	0	0	1	1	D1
3	67.5 → 90	0	0	1	0	D0
4	90 → 112.5	0	1	1	0	D2
5	112.5 → 135	0	1	1	1	D0
6	135 → 155.5	0	1	0	1	D1
7	155.5 → 180	0	1	0	0	D0
8	180 → 202.5	1	1	0	0	D3
9	202.5 → 225	1	1	0	1	D0
10	225 → 245.5	1	1	1	1	D1
11	245.5 → 270	1	1	1	0	D0
12	270 → 295.5	1	0	1	0	D2
13	295.5 → 315	1	0	1	1	D0
14	315 → 337.5	1	0	0	1	D1
15	337.5 → 360	1	0	0	0	D0

Absolute Type Optical Encoder의 그레이 코드(4bit인 경우)

서보 제어계 (센서)

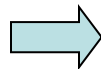
-그레이 코드(Gray Code)를 사용하는 이유

패턴 사이를 센서부가 통과할 때 검출되는 코드는 그림에서처럼 항상 1bit 변화만 있게 되면 잘 못 읽어도 인접한 2개의 코드 중 한 개의 코드로 검출된다.

그러나 일반 Binary Code를 사용하면 전혀 다른 코드로 검출될 경우가 발생한다.

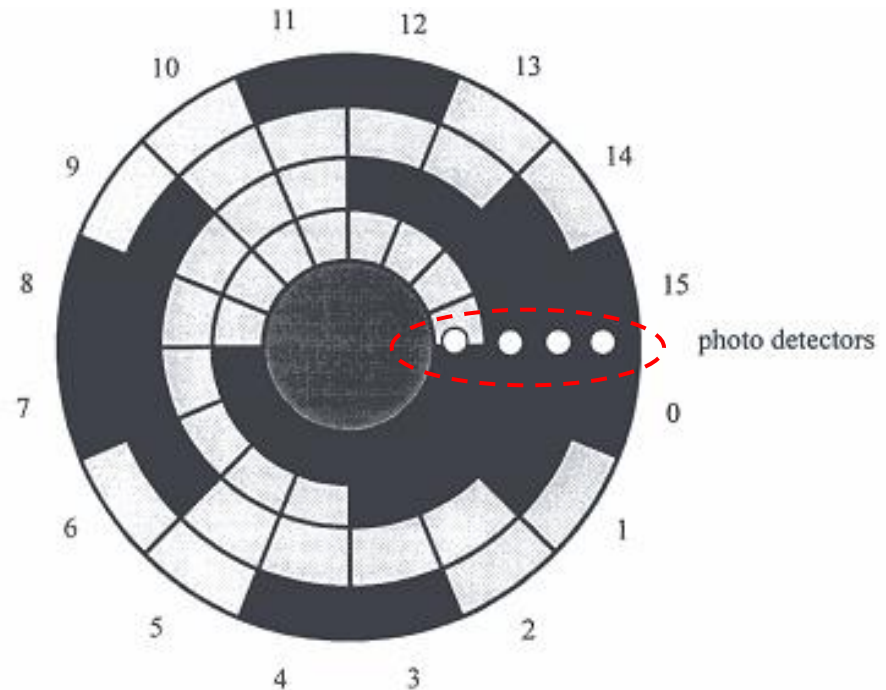
<잘못 검출되는 경우의 예>

0	1	1	1
1	0	0	0



잘못 검출된 code

0 0 0 0

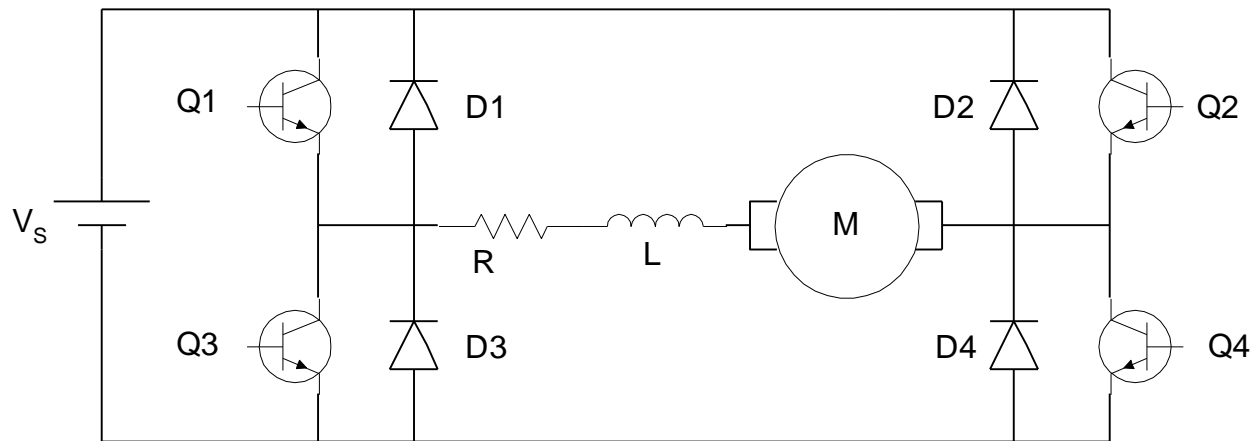


서보 제어계 (전력회로)

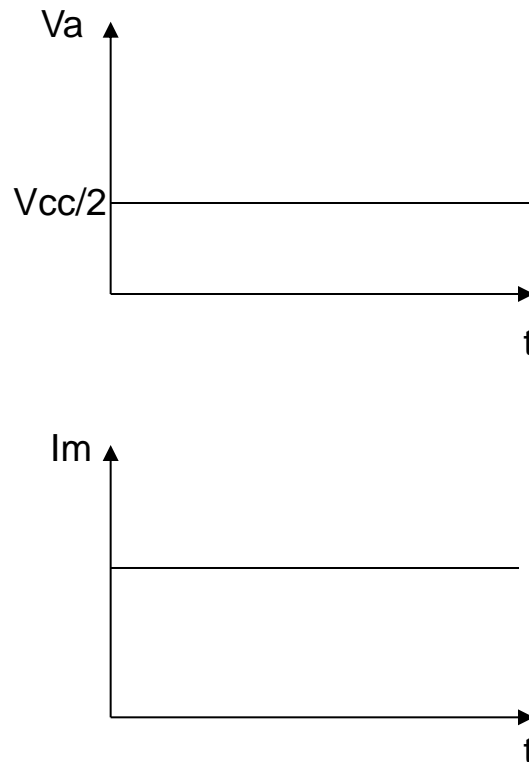
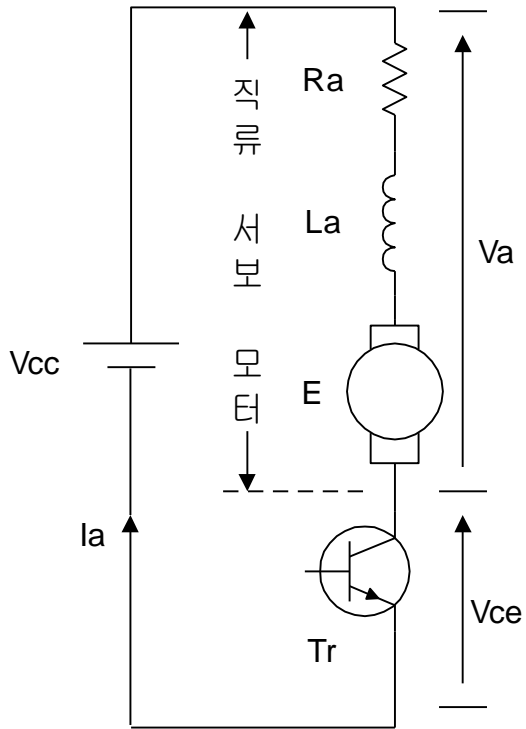
- H 브리지 회로는 DC 서보모터 정 역회전 제어에 주로 사용
- 제어방식

(1) PWM 방식 (일반)

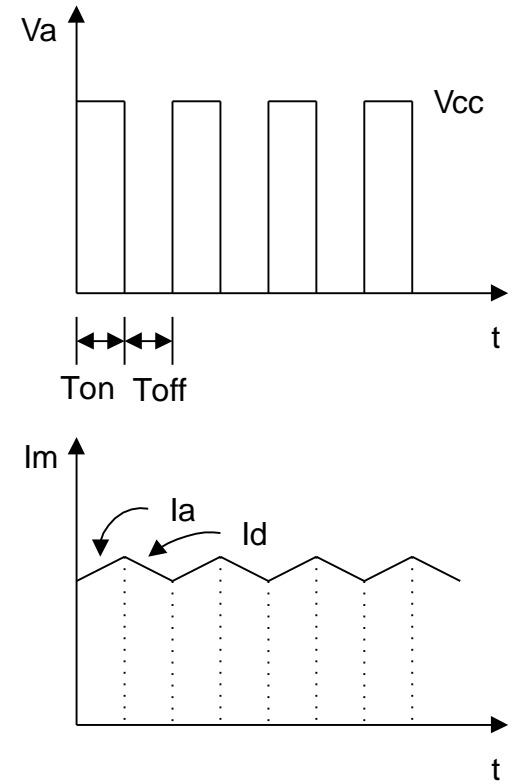
(2) Linear 방식 (저전류, 저전력인 경우)



서보 제어계 (전력회로)



Linear 방식



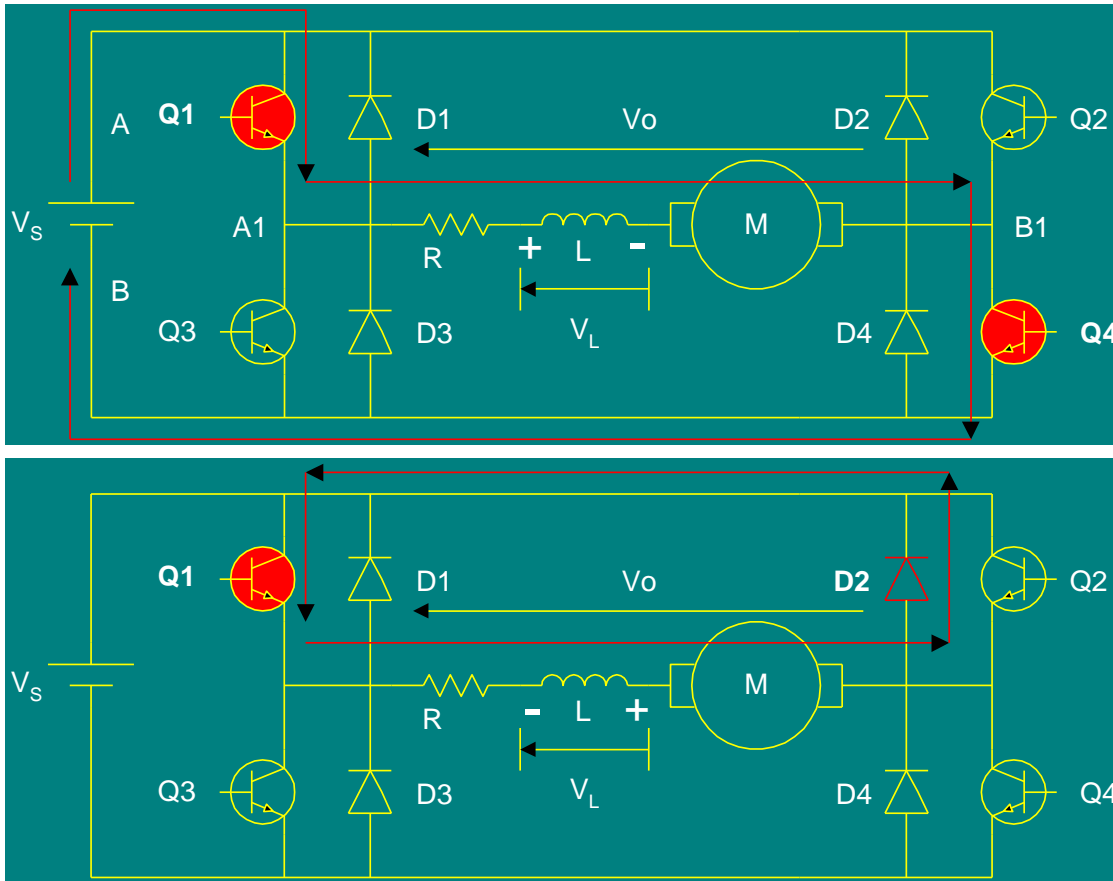
PWM 방식

서보 제어계 (전력회로)

- Linear 방식과 PWM 방식의 비교

	장 점	단 점
Linear 방식	전류 리플이 없다. 고속응답 소전류 용량에 적합.	전력소비가 많다. 사이즈가 커짐.
PWM 방식	전력소비가 적음. 사이즈가 적음. 대전류 용량에 적합.	전류 리플이 있다.

서보 제어계 (전력회로)

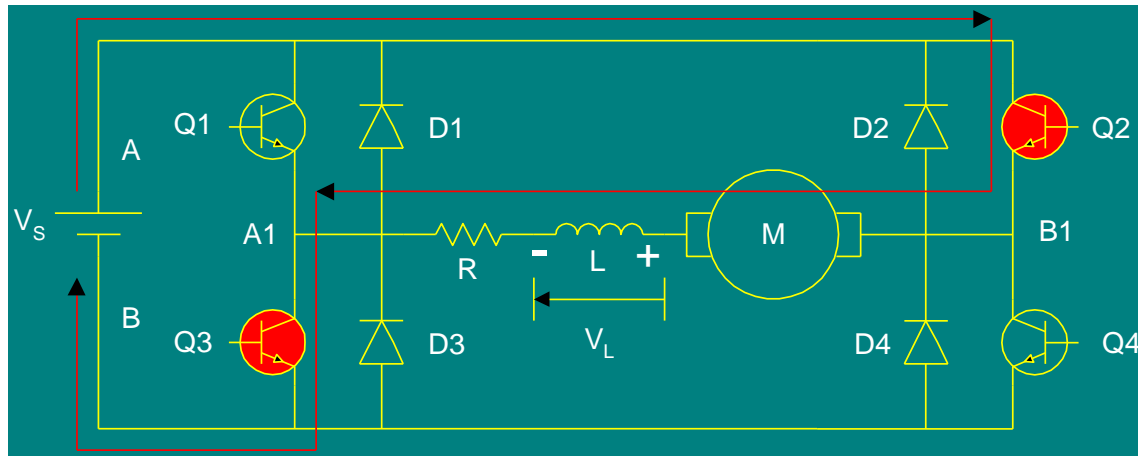


<정방향 전동기
의 구동>

(1) Q1, Q4 On
 $Q1 \rightarrow R \rightarrow L \rightarrow$
 $M \rightarrow Q4 \rightarrow V_s$
 전원에서
 전력공급

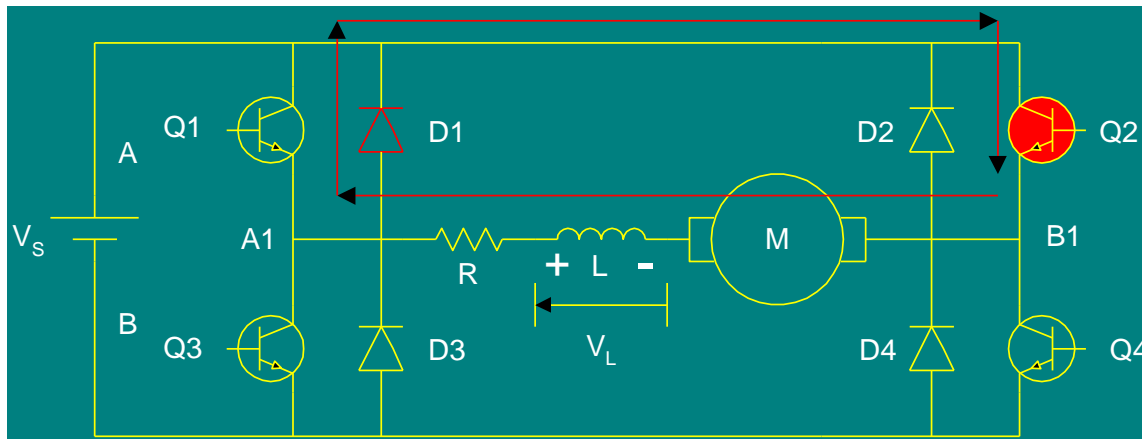
(2) Q1 On, Q4 Off
 $L \rightarrow M \rightarrow D2 \rightarrow$
 $Q1 \rightarrow R$
 L에서 에너지
 방출

서보 제어계 (전력회로)



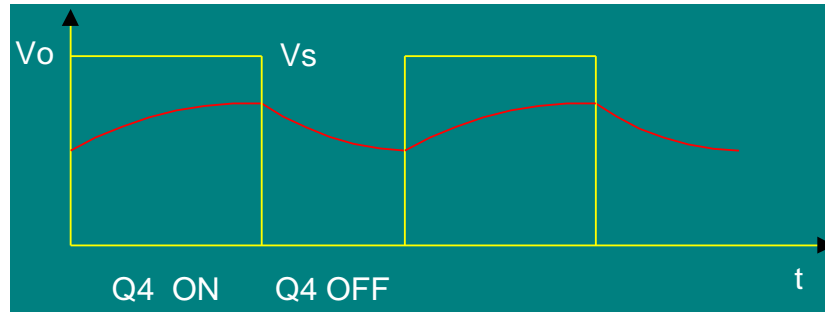
<역방향 전동기
의 구동>

(1) Q2, Q3 On
 $Q2 \rightarrow M \rightarrow L \rightarrow$
 $R \rightarrow Q3 \rightarrow V_s$
 전원에서
 전력공급

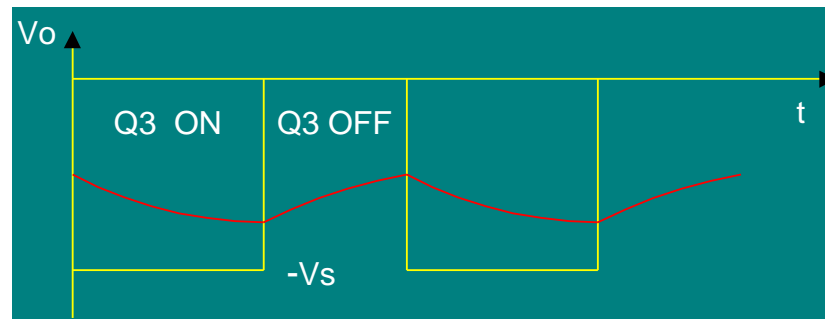


(2) Q2 On, Q3 Off
 $L \rightarrow R \rightarrow D1 \rightarrow$
 $Q2 \rightarrow M$
 L에서 에너지
 방출

서보 제어계 (전력회로)

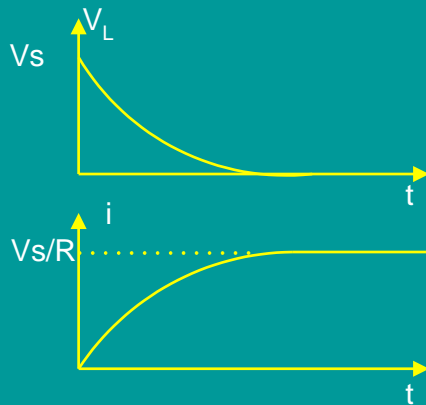
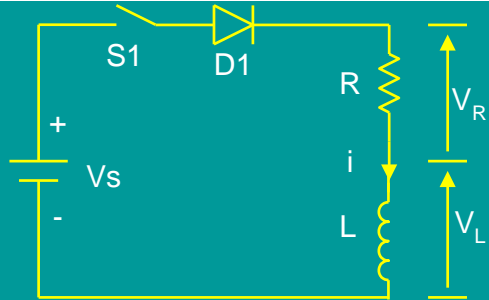


<정방향 전동기의 구동 시 전압 전류 파형>



<역방향 전동기의 구동 시 전압 전류 파형>

서보 제어계 (전력회로)



정성적 해석

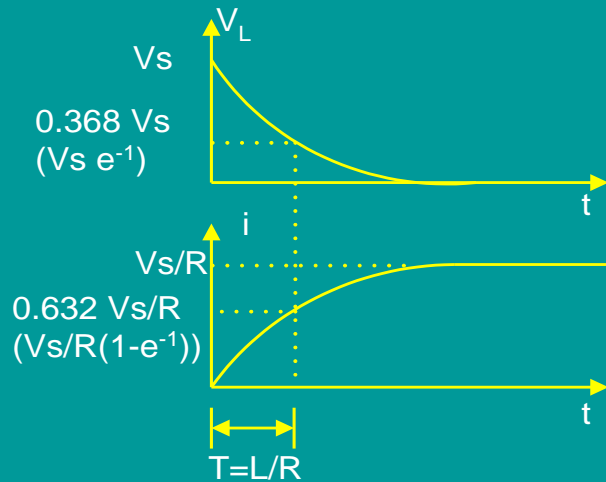
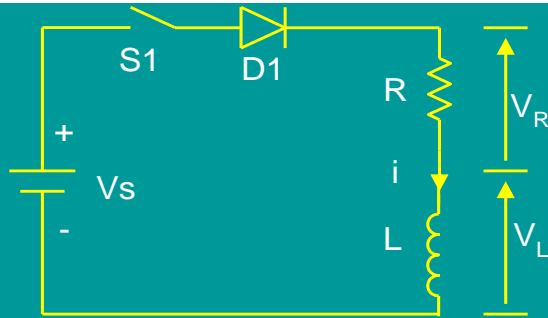
초기에 흐르는 전류 및 인덕터 전압값은 다음식에서

$$\begin{aligned} V_S &= V_R(t) + V_L(t) \\ &= i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} \end{aligned}$$

초기전류 : $i(t=0)=0$

초기에는 L 이 전류의 변화를 억제하는 특성이 있으므로 $i(t)=0$ 이고 따라서 L 에 걸리는 전압은 V_S 이다. 한참 시간이 경과하면 전류의 변화율은 0이 되므로 최종적으로 회로에 흐르는 전류 $i(t)=V_S/R$ 가 되고 L 에 걸리는 전압은 0가 된다.

서보 제어계 (전력회로)



정량적 해석

다음의 폐회로 방정식에서 미분방정식을 푼다.

$$\begin{aligned} V_S &= V_R(t) + V_L(t) \\ &= i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} \end{aligned}$$

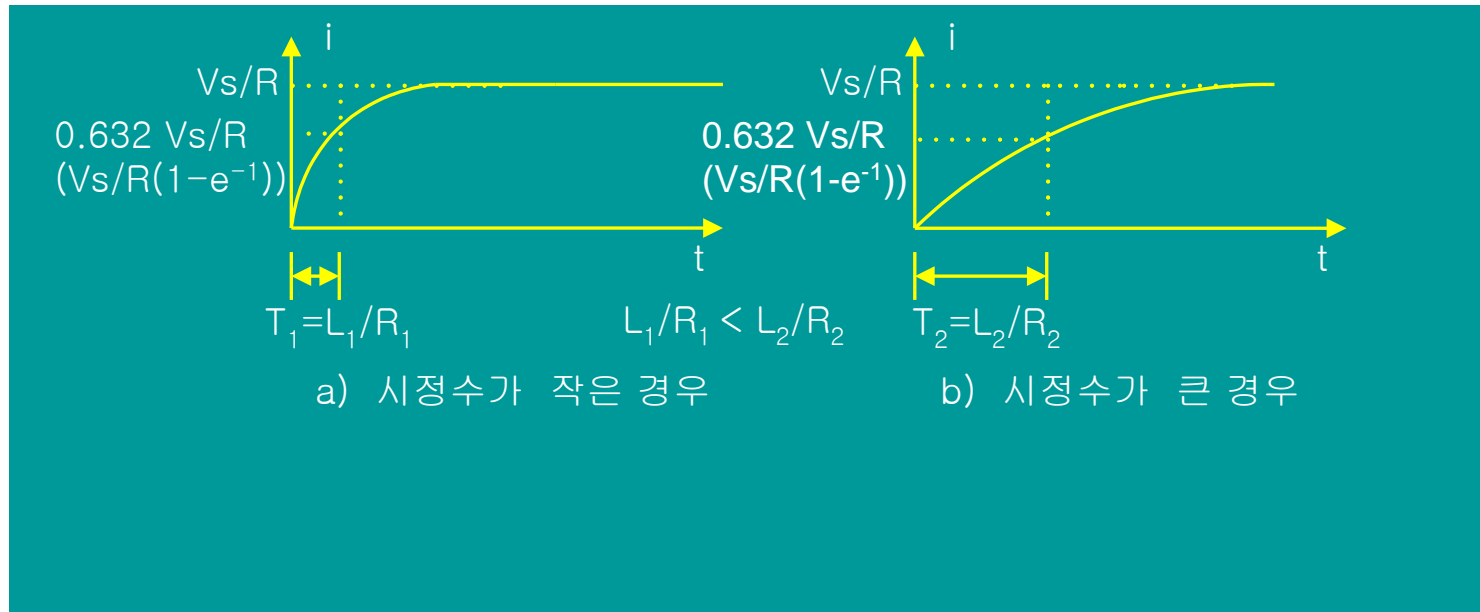
초기전류 : $i(t=0)=0$

그 결과로 구한 전류식은 다음과 같다.

$$i(t) = \frac{V_S}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$

서보 제어계 (전력회로)

RL 부하를 갖는 회로



서보 제어계 (전력회로)

•L의 특성

회로에 전류가 흐르고 있을 때 스위치 S1을 차단(OFF)시키면 어떠한 일이 발생하는가?

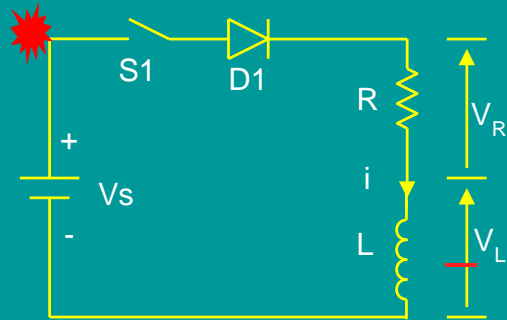
스위치 양단에서 불꽃 방전이 일어남을 관찰 할 수 있다. → 그 이유는?

높은 전압에 의한 아아크 방전



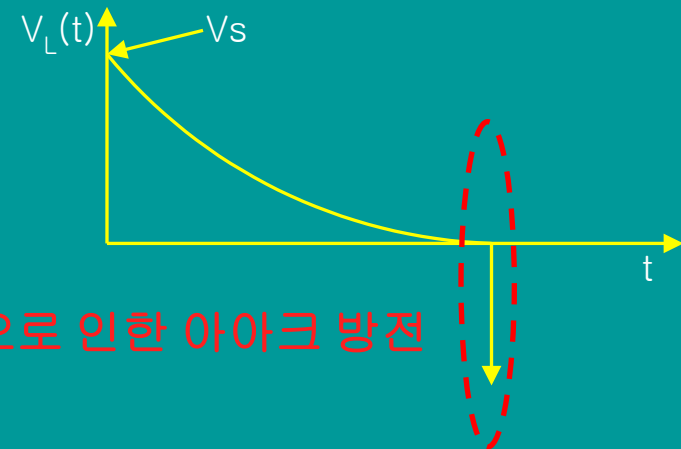
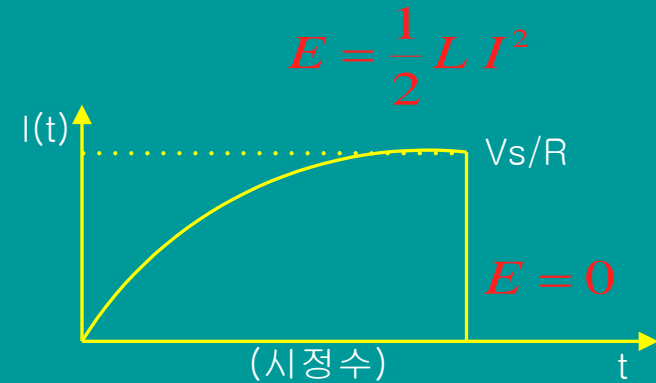
스위치에 좋지 않은 영향을 준다 (특히 반도체 사용시 소자파괴의 원인이 된다.)
따라서 보호회로가 필요하다.

서보 제어계 (전력회로)



+

$$V_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$



높은 유기전압으로 인한 아아크 방전

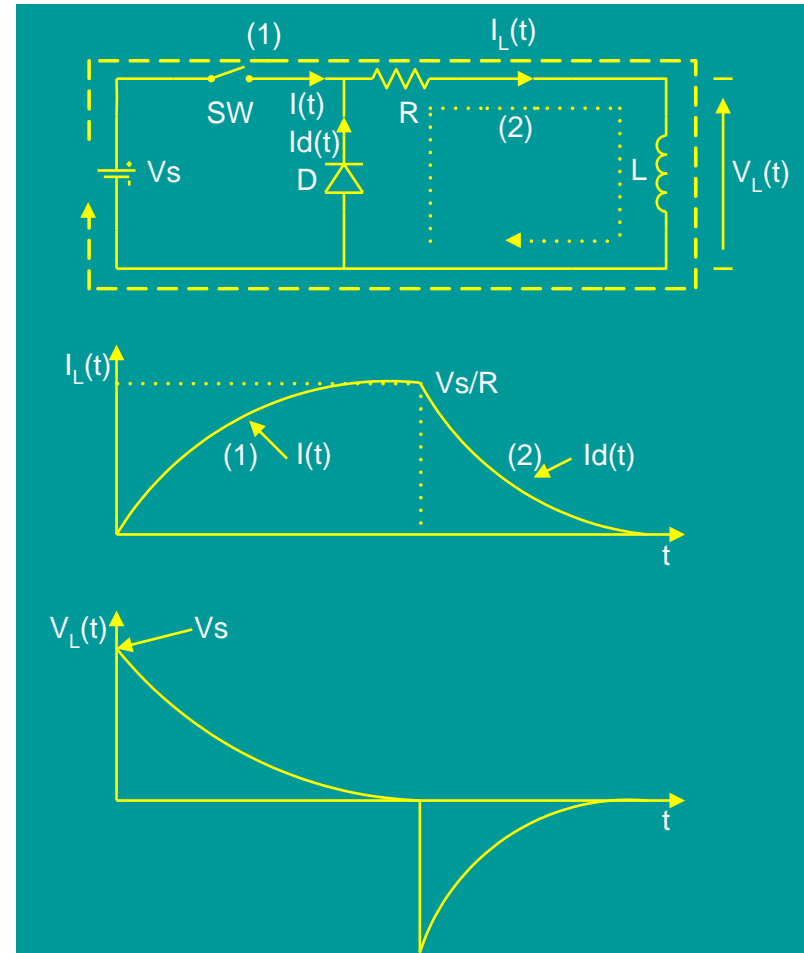
서보 제어계 (전력회로)

환류 다이오드 (Freewheeling Diode)

동작

1. 스위치가 도통되면 (1)번 경로로 전류가 흐르며 지수함수적으로 전류가 증가하여 V_s/R 값으로 된다.

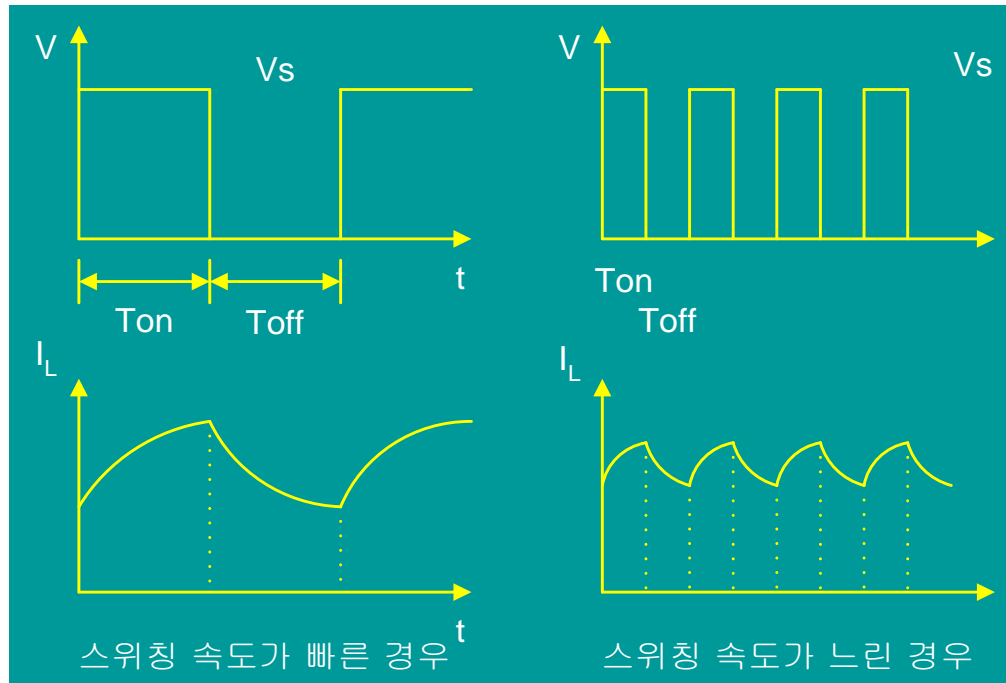
2. 스위치가 차단되면 L 에서 유기된 전압에 의하여 환류다이오드가 도통되어 (2)번 경로로 전류가 흐르게 된다. 이때 L 에 저장된 에너지는 전류가 흐름에 따라 저항 R 에서 $W=I^2R$ 로 열에너지로 소비되어진다.



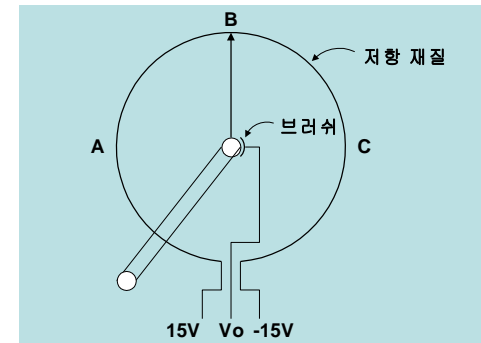
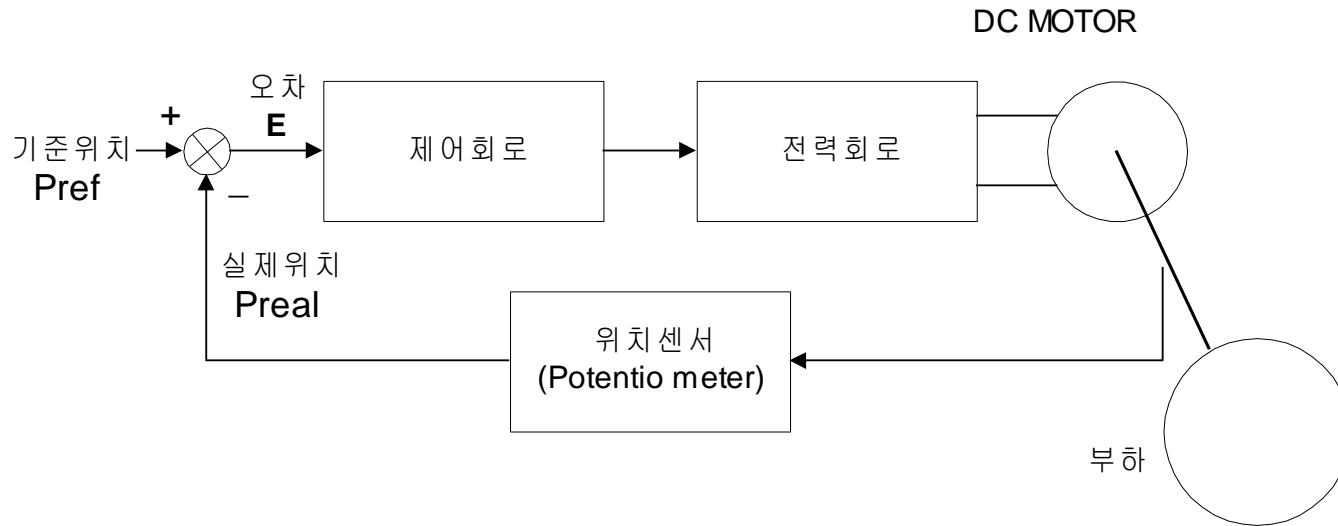
서보 제어계 (전력회로)

환류 다이오드 (Freewheeling Diode)

일반적으로 회로의 스위칭 동작을 빠르게 하면 다음과 같이 흐르는 전류를 평활화할 수 있다. \longrightarrow 초퍼회로에 사용



서보 제어 실험 (위치제어의 동작원리)



기준위치	실제 위치	오차	전력회로 출력전압
4[V]	0[V] (초기값)	+ 4[V]	+ 40[V]
4[V]	2[V]	+ 2[V]	+ 20[V]
4[V]	3[V]	+ 1[V]	+ 10[V]
4[V]	4[V] (최종값)	0[V]	0[V]

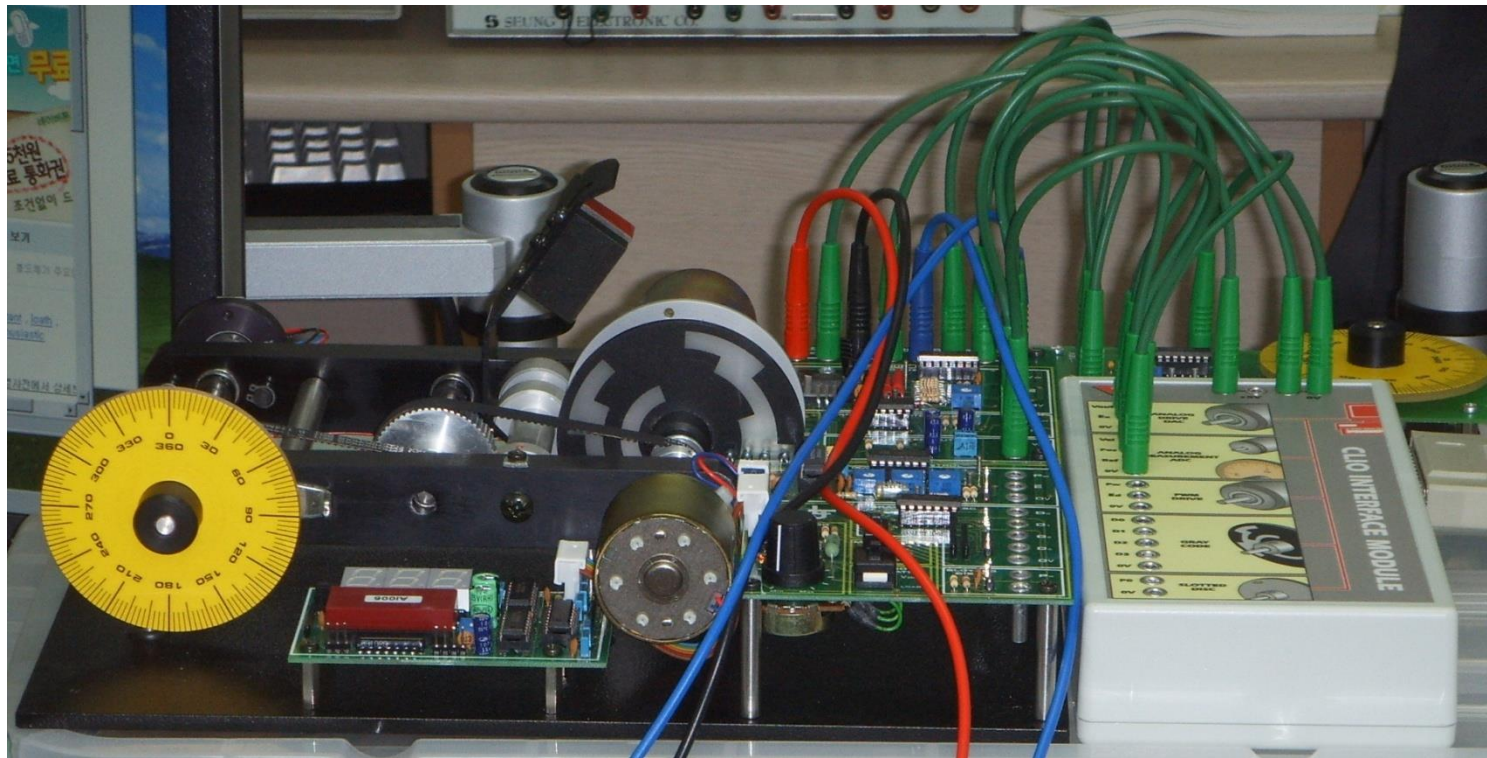
서보 제어 실험 (위치제어의 동작원리)

- 기준위치에서 실제위치를 뺀 오차에 비례하는 전압을 증폭시켜 전력회로에 출력시키면, 오차 크기에 비례하여 모터에 가해지는 전압이 결정되므로, 오차가 결국 0이 되어야 모터에 전압이 가해지지 않아서 정지하게 된다.
- 만일 실제위치가 5[V]와 같이 목표위치를 넘어간 경우에는 반대방향으로 모터가 회전하도록 - 오차신호가 발생하게 된다.
- 결국 오차가 0인 지점에 모터가 위치할 수 밖에 없도록 하는 것이다.

기준위치	실제 위치	오차	전력회로 출력전압
4[V]	2[V]	+ 2[V]	+ 20[V]
4[V]	3[V]	+ 1[V]	+ 10[V]
4[V]	4[V]	0[V]	0[V]
4[V]	5[V]	- 1[V]	- 10[V]
4[V]	6[V]	- 2[V]	- 20[V]

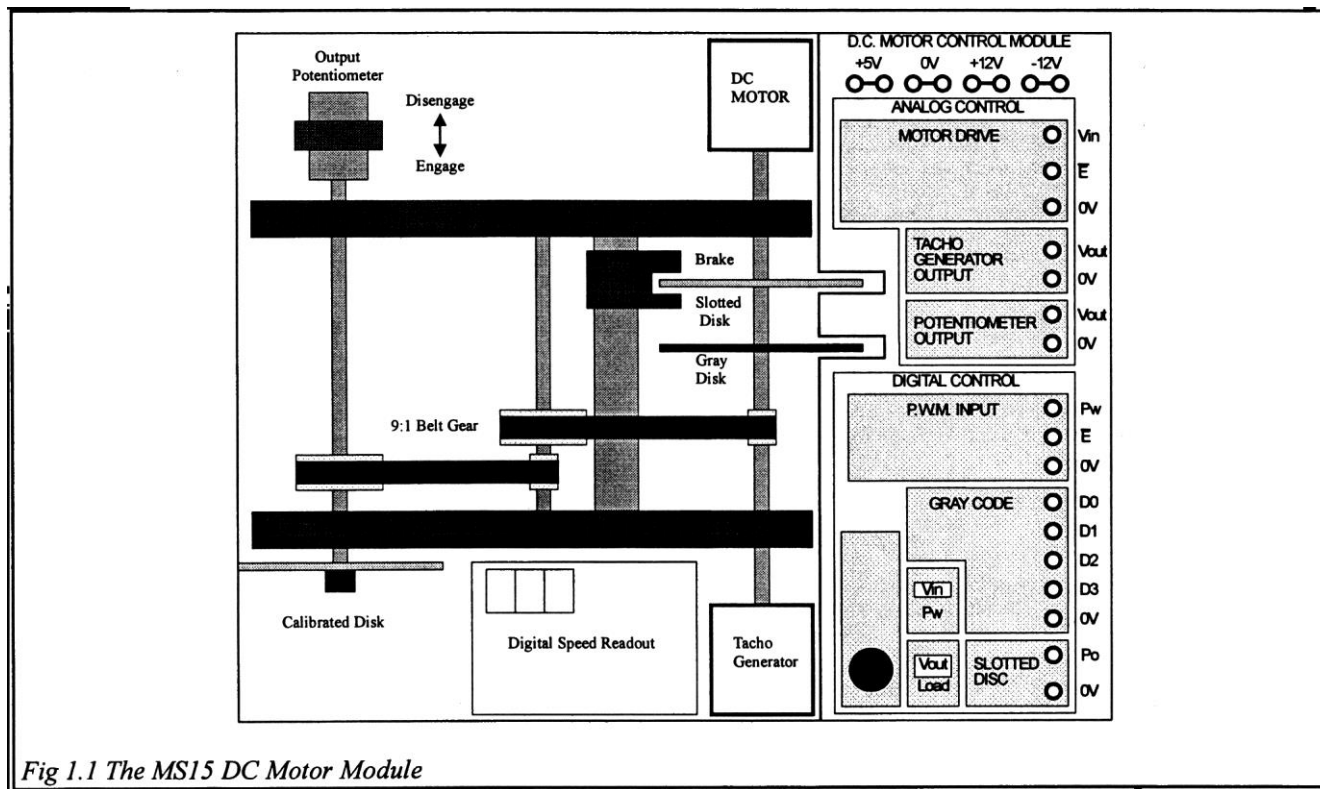
서보 제어 실험 (서보 제어 실험장비)

- 서보제어 실험장비(사진)



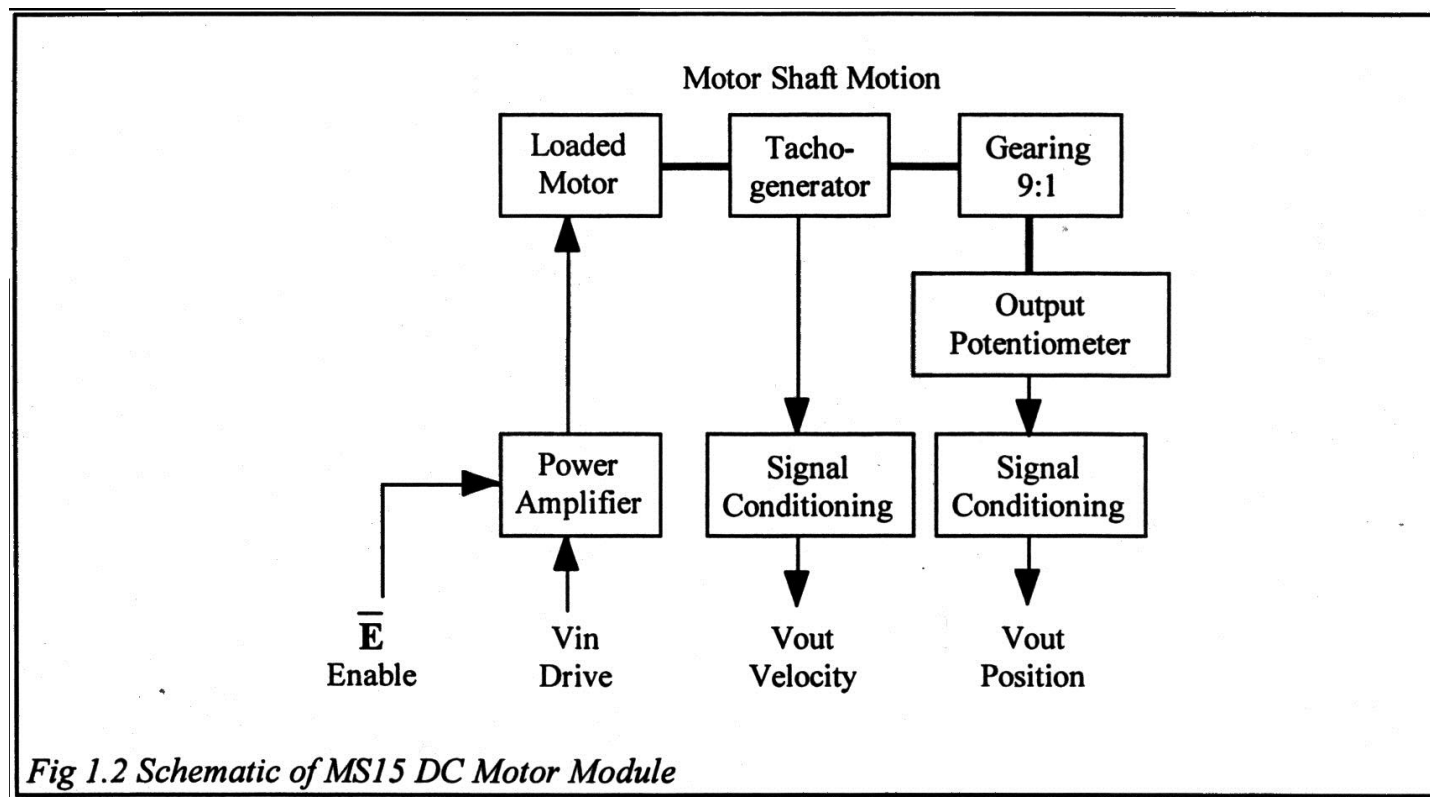
서보 제어 실험 (서보 제어 실험장비)

- DC Motor Module



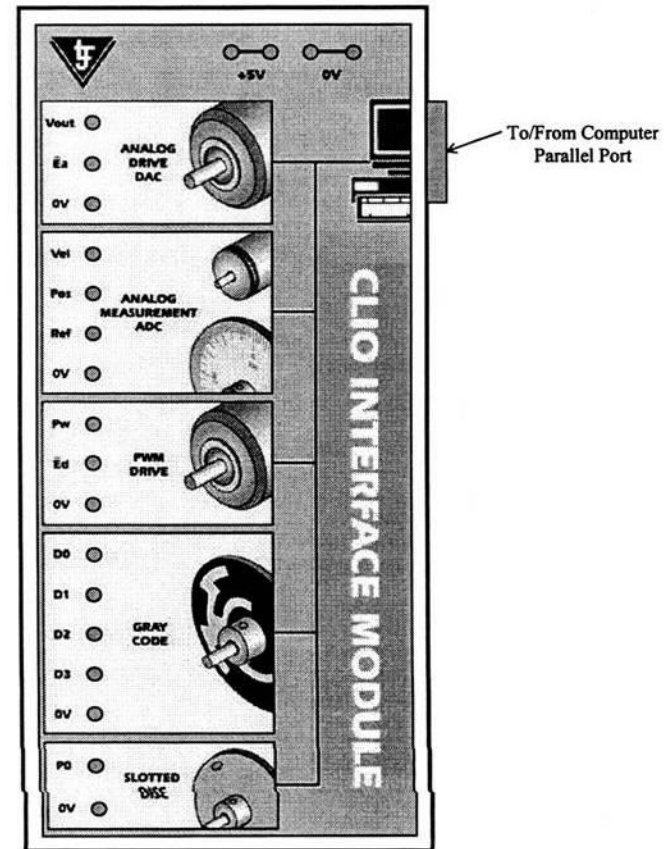
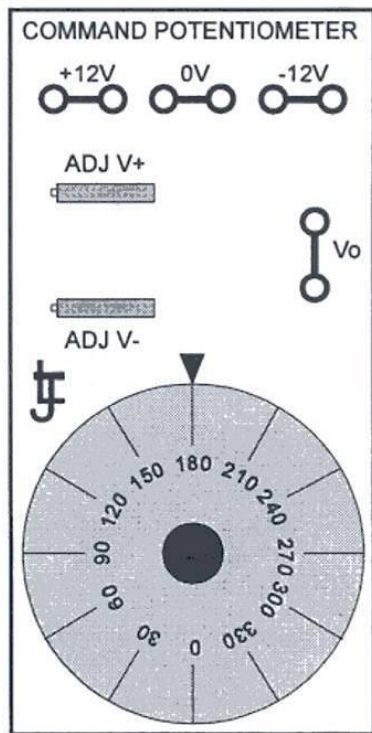
서보 제어 실험 (서보 제어 실험장비)

- DC Motor Module의 신호 흐름도

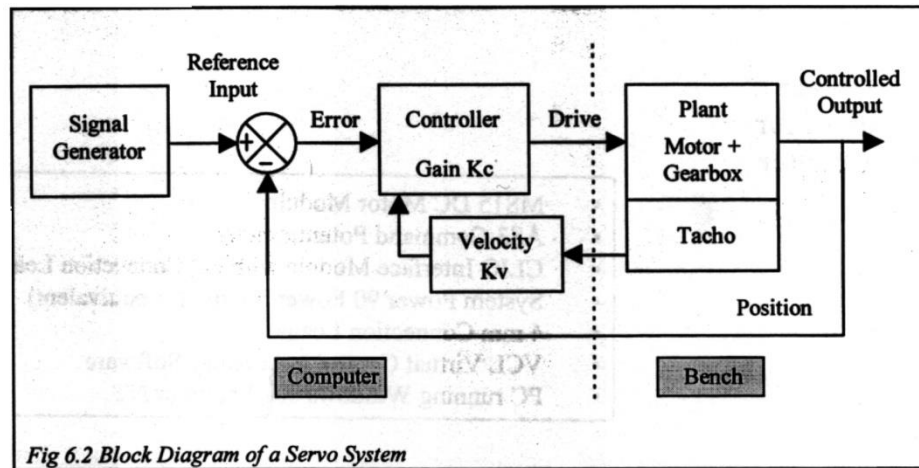
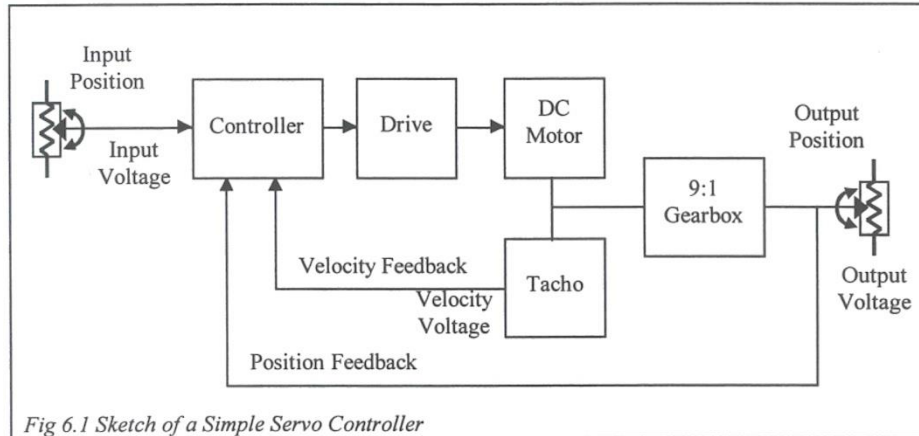


서보 제어 실험 (서보 제어 실험장비)

- 입력 Potentiometer, PC Interface Module



서보 제어 실험 (위치제어의 구성도)



서보 제어 실험 (위치제어 실험 결선도)

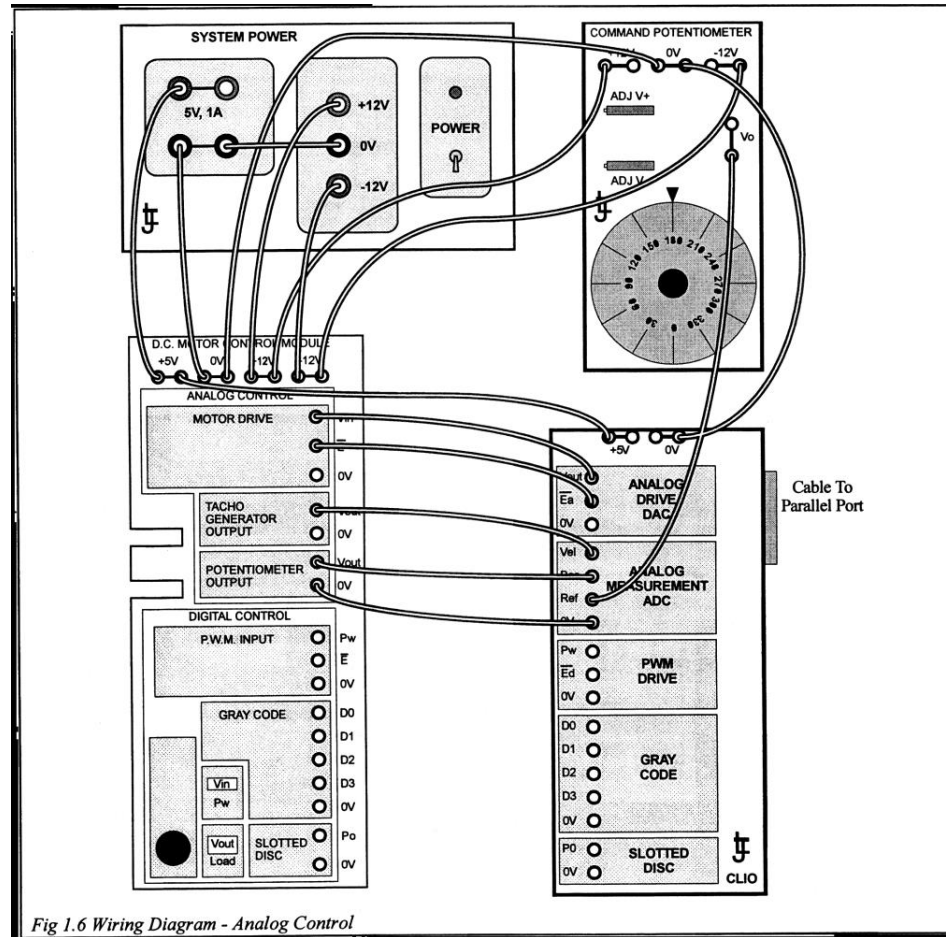


Fig 1.6 Wiring Diagram - Analog Control

서보 제어 실험 (위치제어 실험순서)

- (1) VCL 소프트웨어를 시작하고 Setup|CA06PE06을 로드하라.
(다음과 같은 화면이 PC의 모니터에 발생한다.)

File	Controller	Plant	Display
CA06PE06	Servo	MS15 Analog	Graph
Signal Generator		Graph	
<i>Signal</i>	Step	1 Input	ON
<i>Level</i>	20%	2 Position	ON
<i>Offset</i>	0%	3 Error	OFF
<i>Rate</i>	10 msec	4 Velocity	OFF
Reference	External		
DC Motor		Output Potentiometer	Engage
Brake	0	Command Potentiometer	180°

서보 제어 실험 (위치제어 실험순서)

- (2) P 제어기의 이득 K_c 는 0.8, VFB(속도 피드백)이 Off 되도록 조정하라.
- (3) 입력 Potentiometer를 30도에서 300도로 회전시키고 출력 Potentiometer 가 돌아가는 것을 확인하라. K_c (P제어기 이득)를 5로 증가시키고 입력 Potentiometer를 다시 돌려라. 이번에는 출력 Potentiometer가 보다 빨리 움직인다. 그러나 안정된 값에 이르기 전에 다소 진동한다. 이 두 값 사이의 어떤 지점에 최적 조절점 (진동이 없고 가장 빠르게 목표위치에 도착하는 순간) 이 있다.

서보 제어 실험 (위치제어 실험순서)

- (4) Reference 입력을 internal로 바꾸어라. 신호 발생기는 20%의 step
으로 한다. 파란 궤적에서 닫힌 루프 위치 시스템의 단계 응답을 볼
수 있을 것이다.
- (5) K_c 값을 증감시키면서 다음의 표를 완성하라.

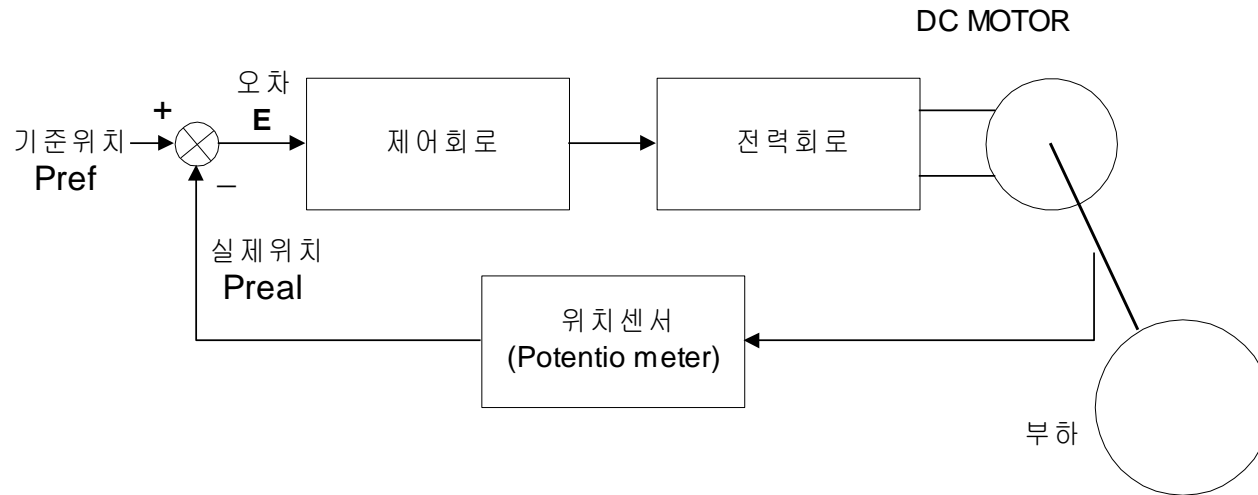
K_c	궤적 1의 값	궤적 2의 최대 오버슈트 값	궤적2의 정상상태에서의 값
0.8			
2			
3			
4			
5			
6			

서보 제어 실험 (위치제어 실험순서)

(6) Kc값을 5로 놓은 후, Kv값을 다음 표 8.2와 같이 변경하면서 다음 표를 완성하여라. Kv 값이 증가하면서 궤적2의 파형의 변화는 어떠한 형태로 변화해 가는지 관찰하라.

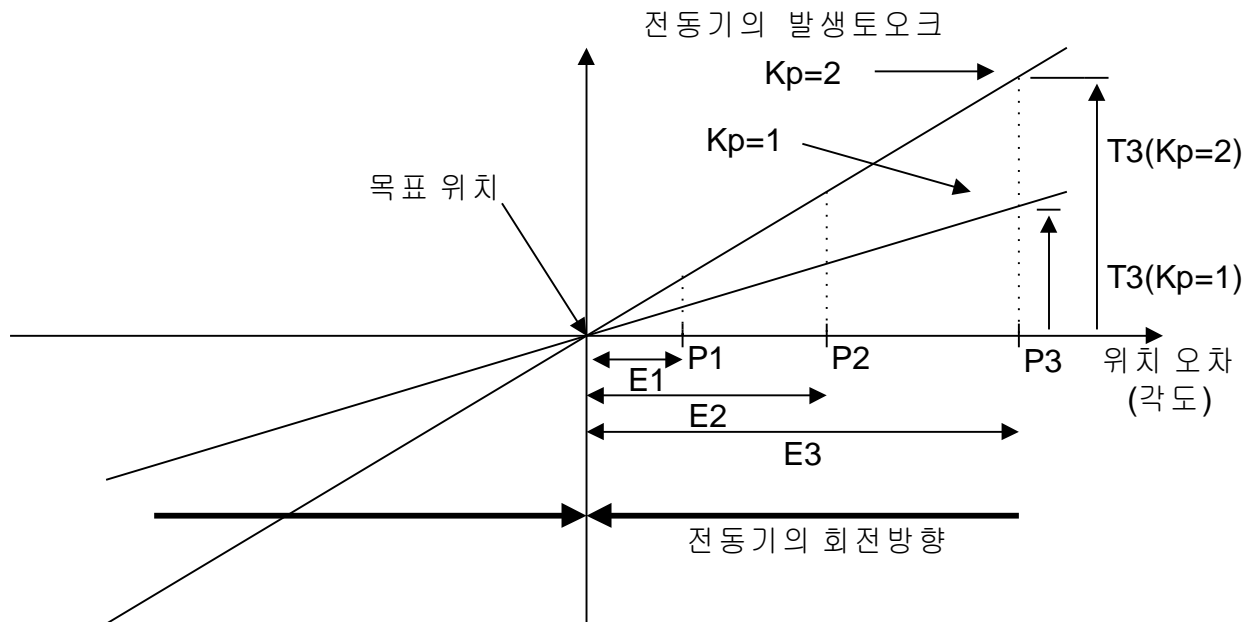
Kv	궤적 1의 값	궤적 2의 최대 오버슈트 값	궤적2의 정상상태에서의 값
0.5			
1			
2			
3			
4			
5			

서보 제어 실험 (정상상태 오차의 이해)



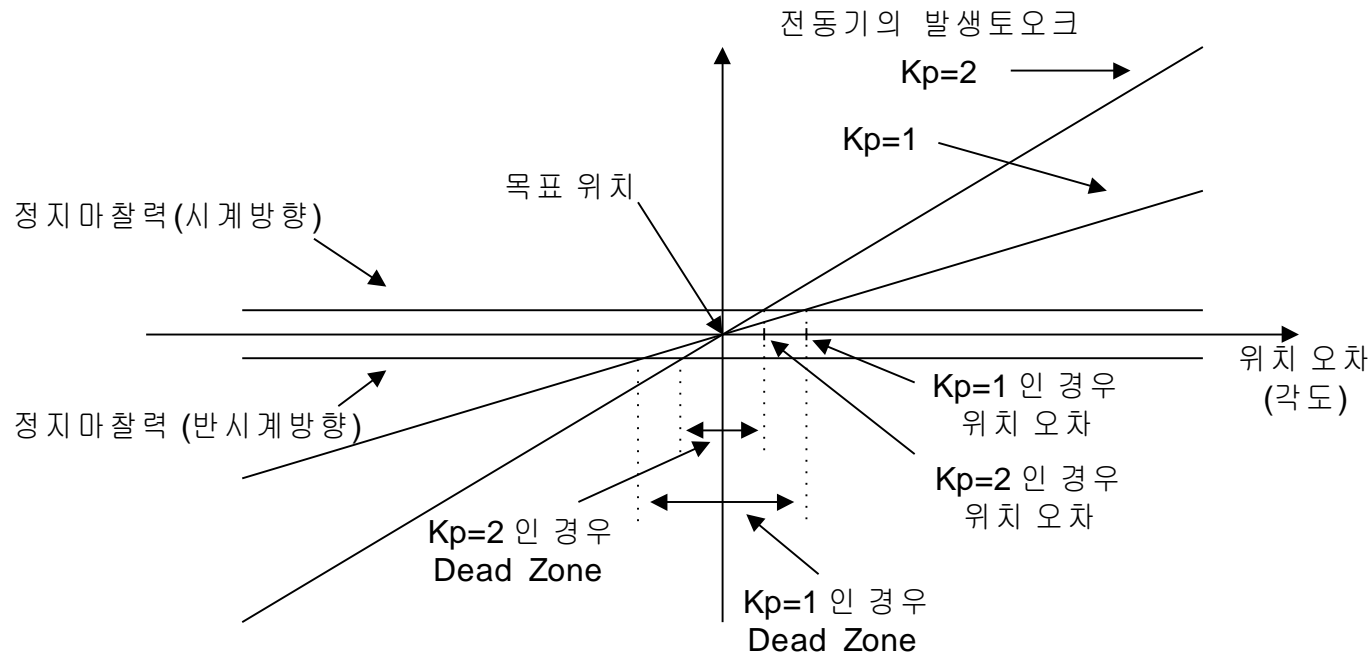
기준위치	실제 위치	오차	전력회로 출력전압
4[V]	0[V] (초기값)	+ 4[V]	+ 40[V]
4[V]	2[V]	+ 2[V]	+ 20[V]
4[V]	3[V]	+ 1[V]	+ 10[V]
4[V]	3.5[V] (최종값)	+0.5[V]	+5[V](모터의 발생토크와 마찰력이 같다면 정지함)

서보 제어 실험 (정상상태 오차의 이해)



오차와 P제어기 이득의 변화에 따른 모터의 발생토크의 변화

서보 제어 실험 (정상상태 오차의 이해)



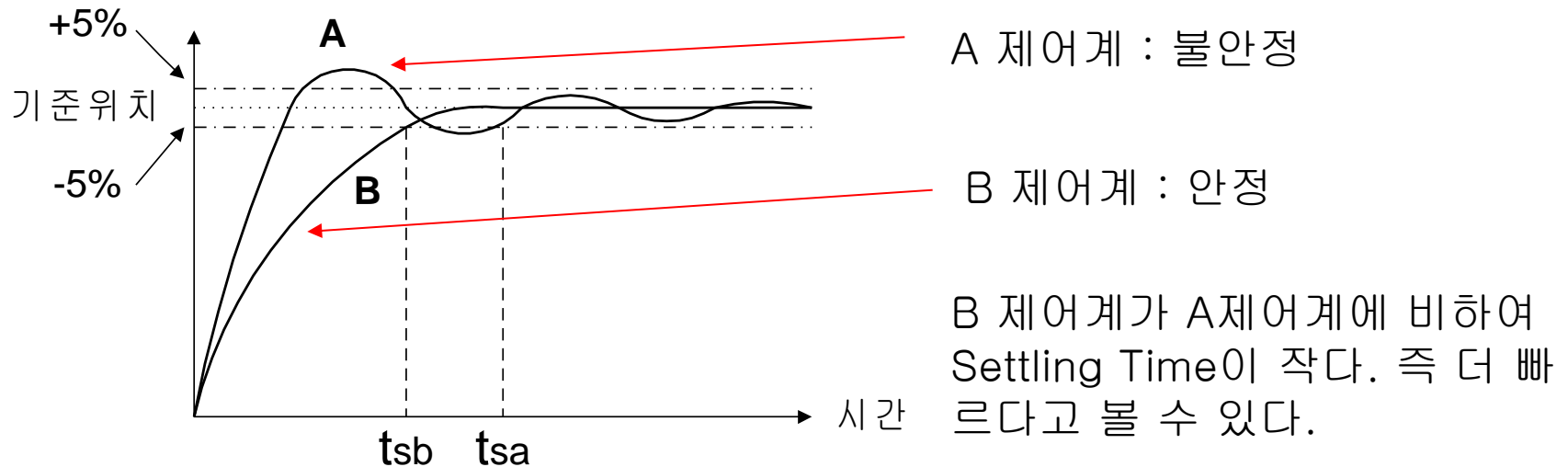
정지마찰력에 의한 정상상태 오차와 P제어기 이득의 관계

서보 제어 실험 (정상상태 오차의 이해)

- P제어기 사용시 이득의 증가는 다음과 같이 제어계에 영향을 준다.

- (1) 정상상태 오차의 감소
- (2) 모터의 이동속도의 증가
- (3) 오차에 민감해진다.
- (4) 안정도가 문제가 될 수 있다.

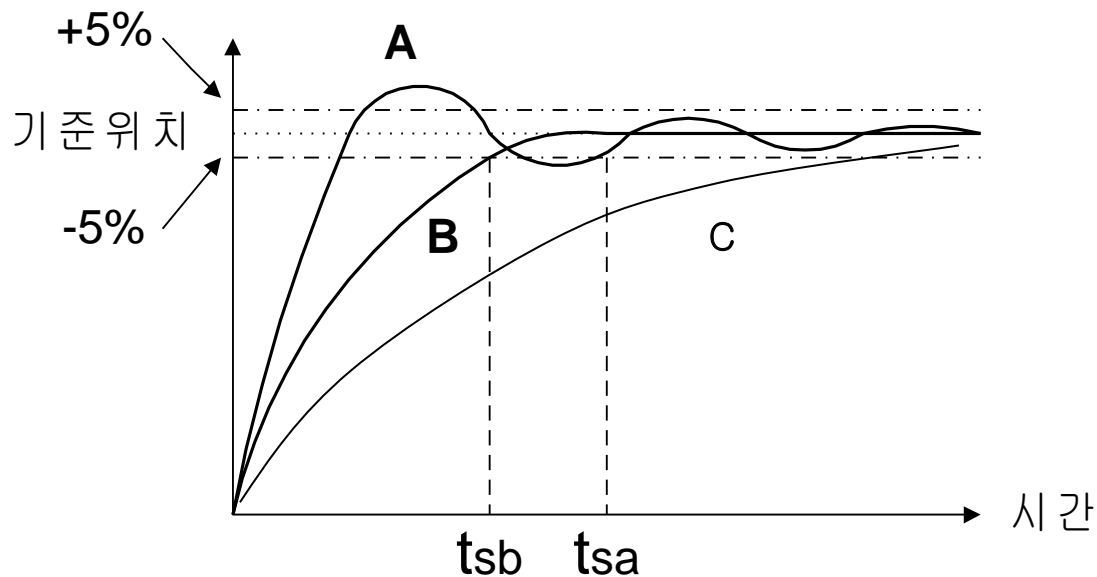
서보 제어 실험 (과도상태 응답의 이해)



-Settling Time

최종 목표치의 $\pm 5\%$ 이내로 오차가 정착되는데 걸리는 시간
제어계의 빠르기를 평가하는 척도

서보 제어 실험 (과도상태 응답의 이해)

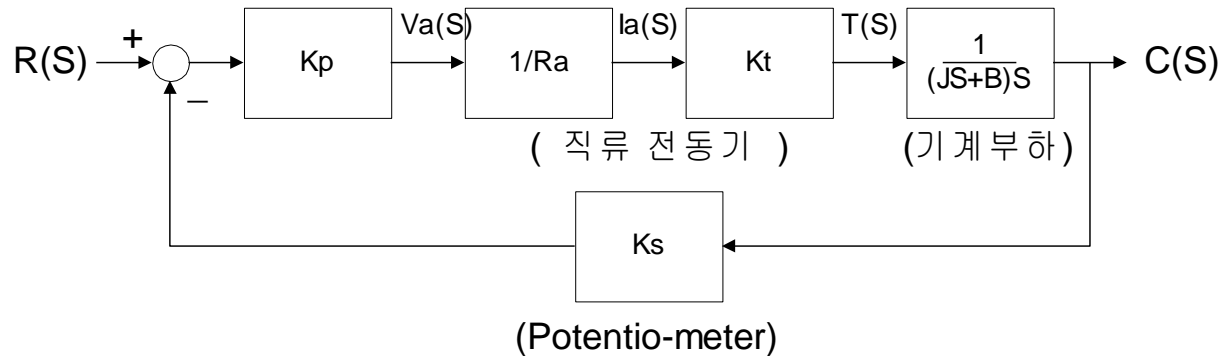


A 제어계 : 부족제동 (응답이 불안정한 진동형태를 가진다.)

B 제어계 : 임계제동 (가장 효과적인 응답형태)

C 제어계 : 과제동 (안정적이거나 응답속도가 너무 느리다.)

서보 제어 실험 (과도상태 응답의 이해)



$$D = B^2 - 4JK_p K_s K_t / R_a$$

D는 판별식으로 D의 값이 -값으로 가게 되면 부족제동 형태를 가지게 되고, + 값으로 가게 되면 과제동이 되는 응답을 보임.

B(마찰계수) 가 커짐 \Rightarrow 과제동이 되는 방향으로 응답

J(관성 모멘트)가 커짐 \Rightarrow 부족제동이 되는 방향으로 응답
 Kp, Kt, Ks (이득)이 커짐

서보 제어 실험 (디지털 제어)

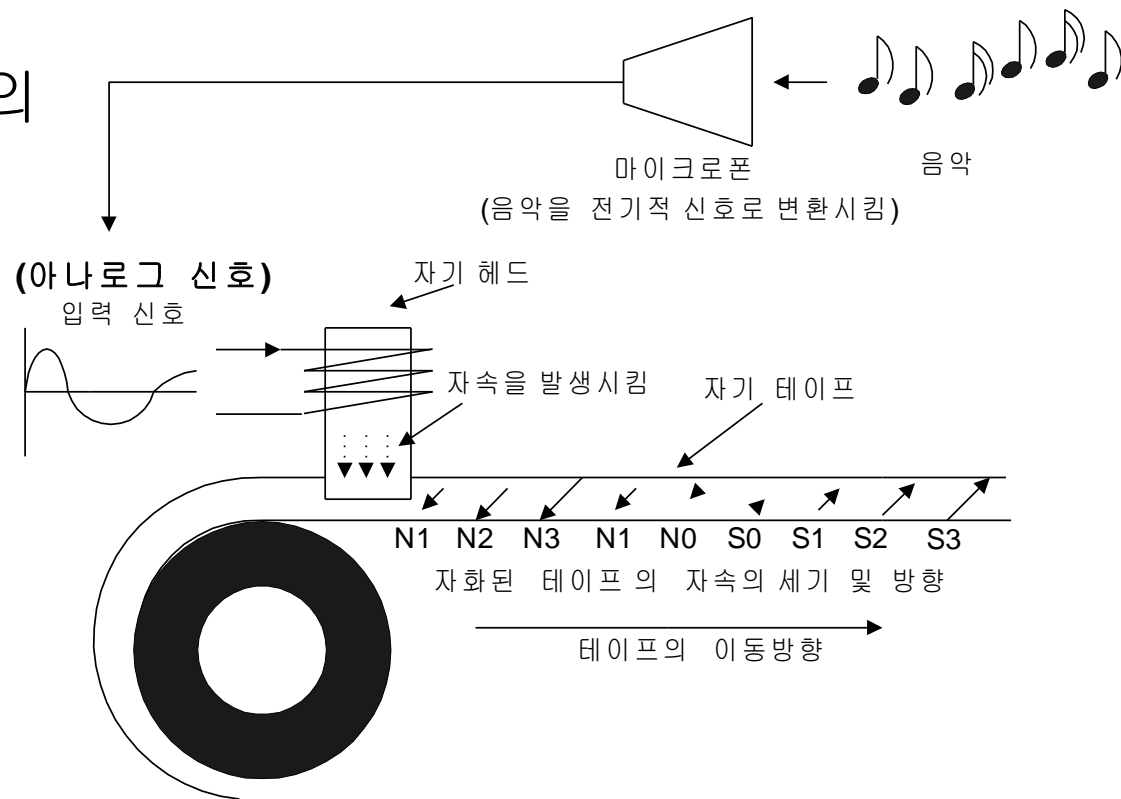
- 디지털 방식의 서보 제어계

■ 디지털 제어계의 장점

- (1) 복잡한 제어 알고리즘을 구현하기 쉽다.
- (2) 수정 및 보완작업이 용이하다.
- (3) 하드웨어적인 오차를 줄일 수 있다.
- (4) 전기적 잡음에 강인하다.

서보 제어 실험 (디지털 제어)

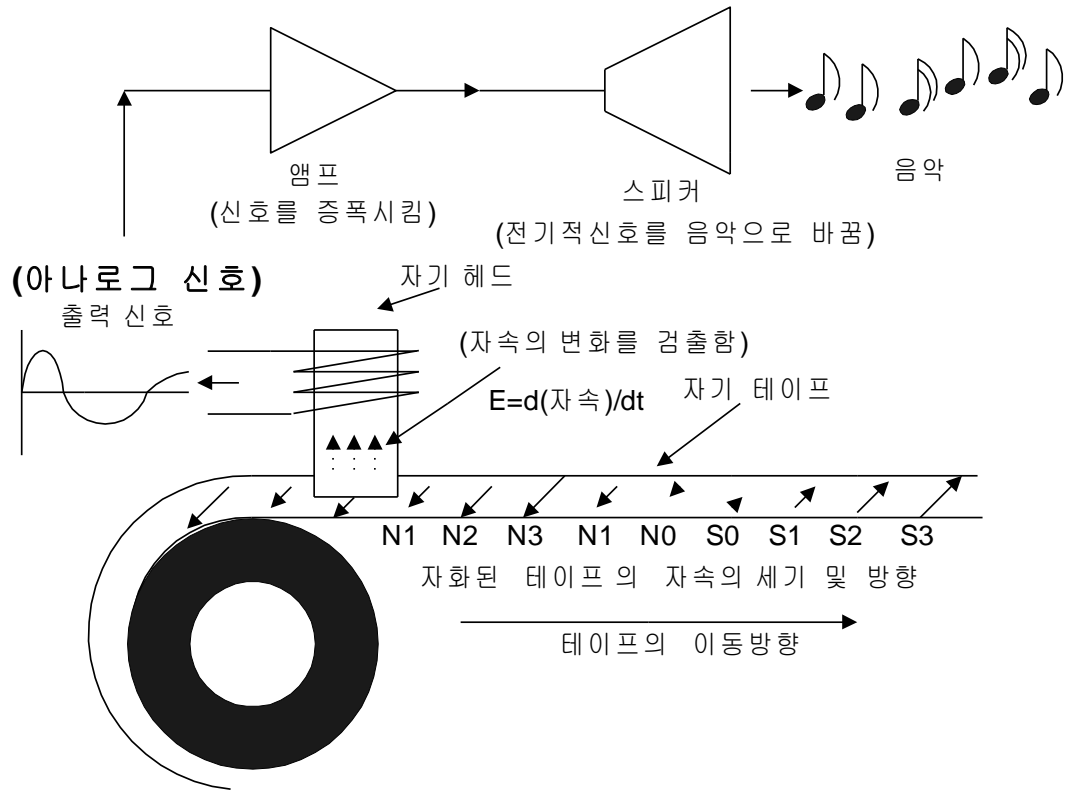
아날로그와 디지털의 차이점



테이프 레코더의 녹음과정 (아날로그 방식)

서보 제어 실험 (디지털 제어)

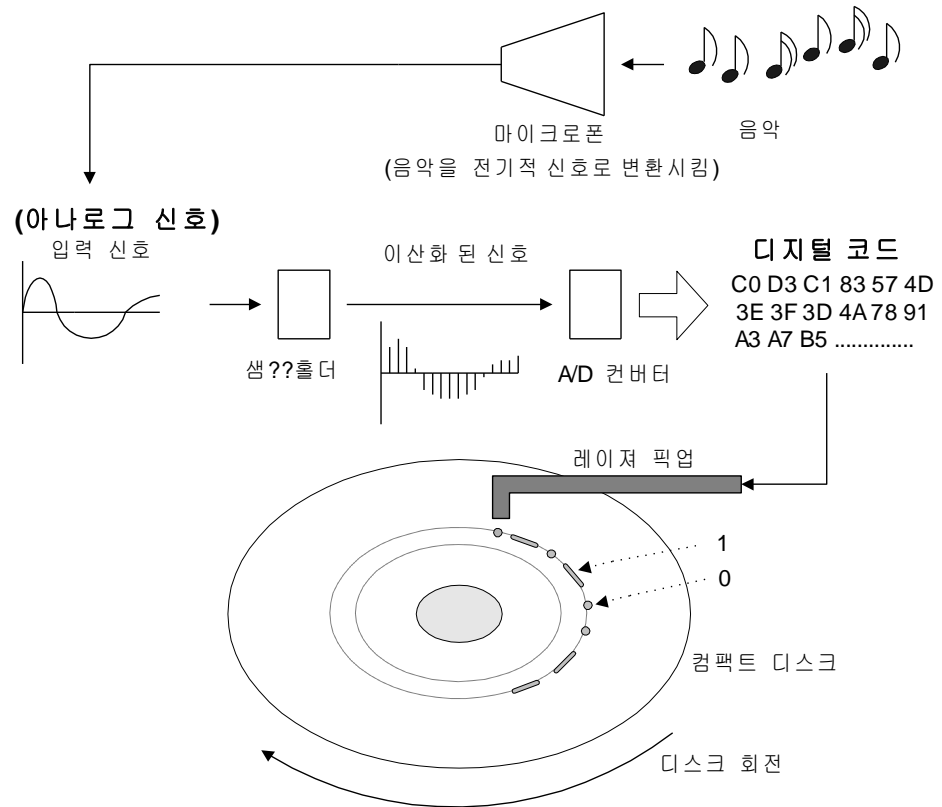
아날로그와 디지털의 차이점



테이프 레코더의 재생과정 (아날로그 방식)

서보 제어 실험 (디지털 제어)

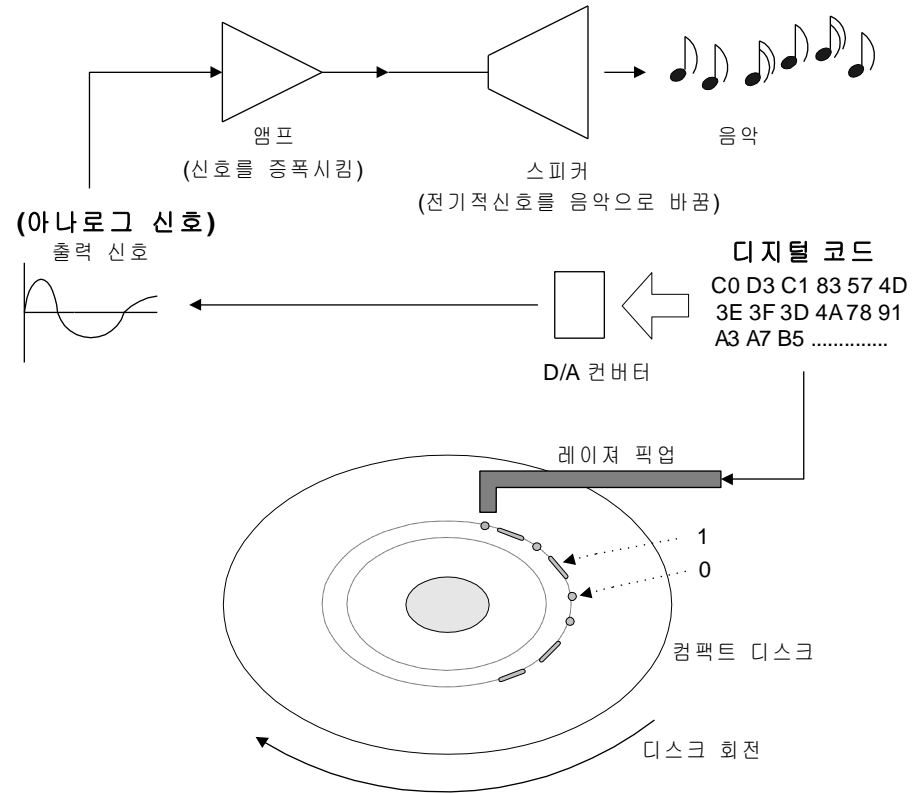
아날로그와 디지털의 차이점



CD의 녹음과정 (디지털 방식)

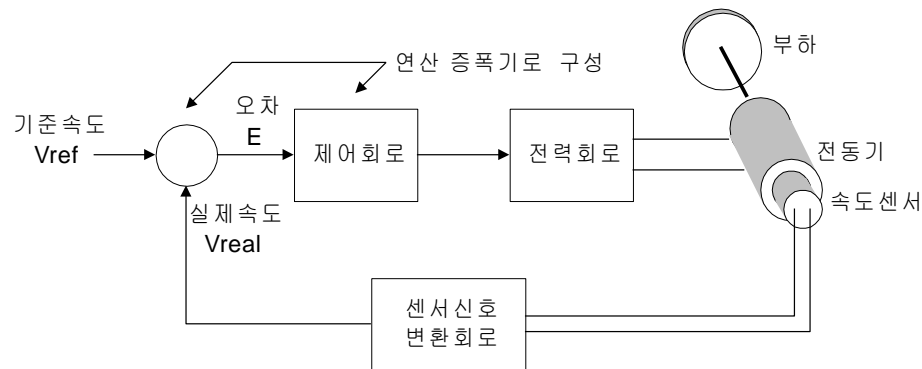
서보 제어 실험 (디지털 제어)

아날로그와 디지털의 차이점

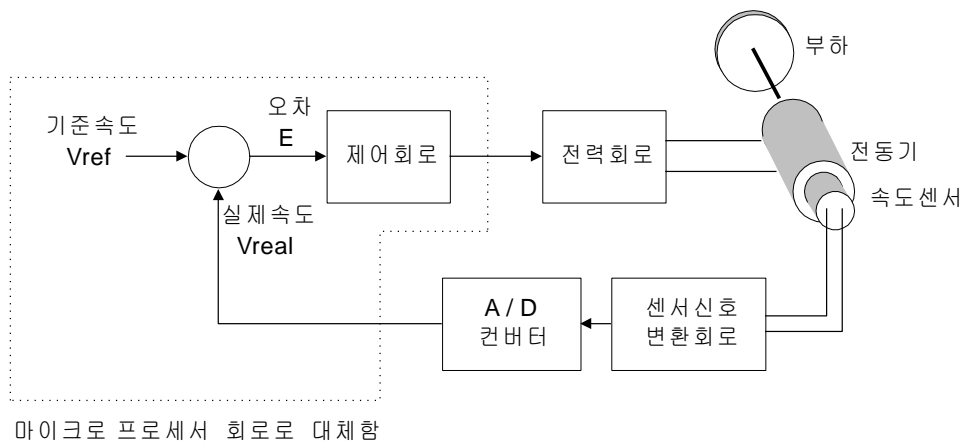


CD의 재생과정 (디지털 방식)

서보 제어 실험 (디지털 제어)

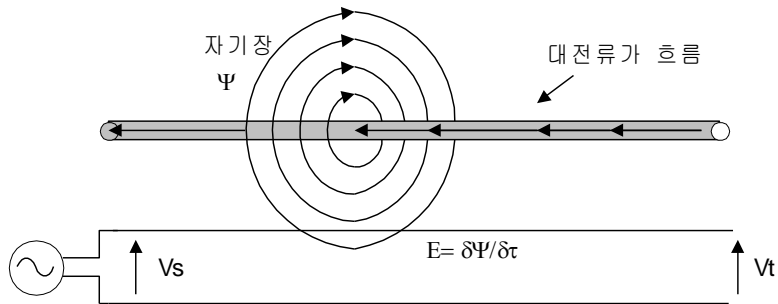


아날로그 제어계와
디지털 제어계의 구성

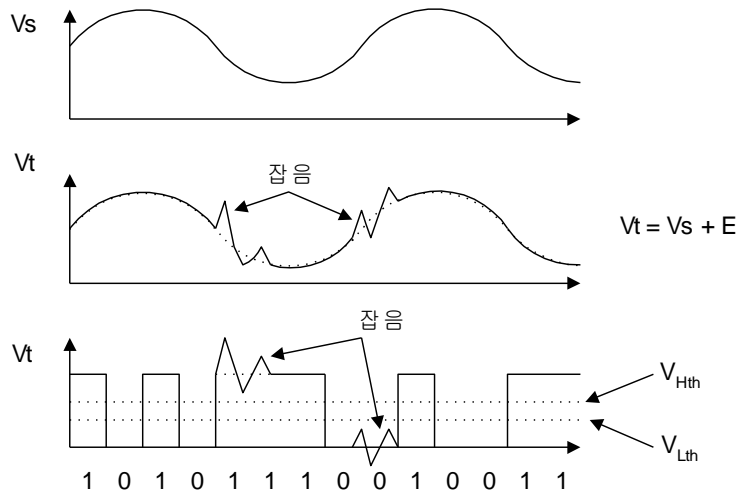


마이크로 프로세서 회로로 대체함

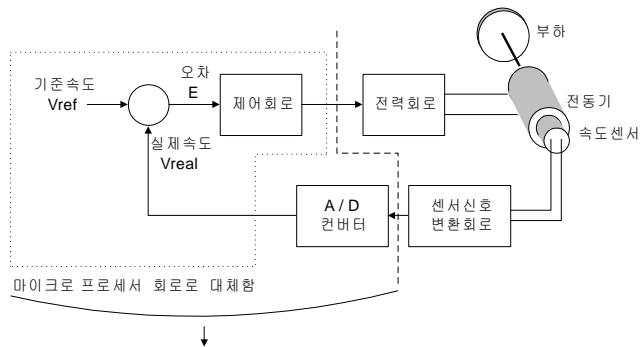
서보 제어 실험 (디지털 제어)



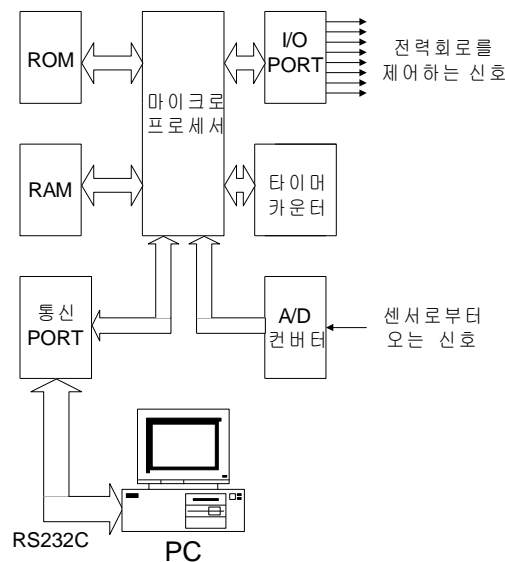
아날로그 제어계와
디지털 제어계의 잡음에 대한 영향



서보 제어 실험 (디지털 제어)

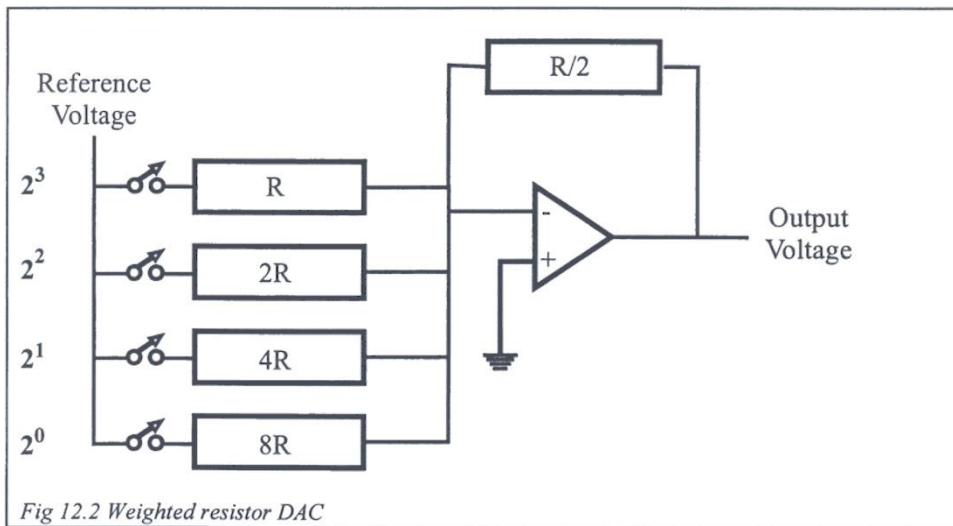


마이크로프로세서를 이용한
디지털 제어계의 구성도



서보 제어 실험 (디지털 제어)

단원 9 DAC 와 ADC



DAC의 내부구성도

1010 이란 비트가 입력된 경우 출력전압

$$V_{out} = \frac{R/2}{R} V_{ref} + \frac{R/8}{R} V_{ref} = \frac{1}{2} V_{ref} + \frac{1}{8} V_{ref} = \frac{5}{8} V_{ref} = \frac{10}{16} V_{ref}$$

(1) 2^0 디지털만 ON된 경우

$$V_{out} = \frac{R/2}{8R} V_{ref} = \frac{1}{16} V_{ref}$$

(2) 2^1 디지털만 ON된 경우

$$V_{out} = \frac{R/2}{4R} V_{ref} = \frac{1}{8} V_{ref}$$

(3) 2^2 디지털만 ON된 경우

$$V_{out} = \frac{R/2}{2R} V_{ref} = \frac{1}{4} V_{ref}$$

(4) 2^3 디지털만 ON된 경우

$$V_{out} = \frac{R/2}{R} V_{ref} = \frac{1}{2} V_{ref}$$

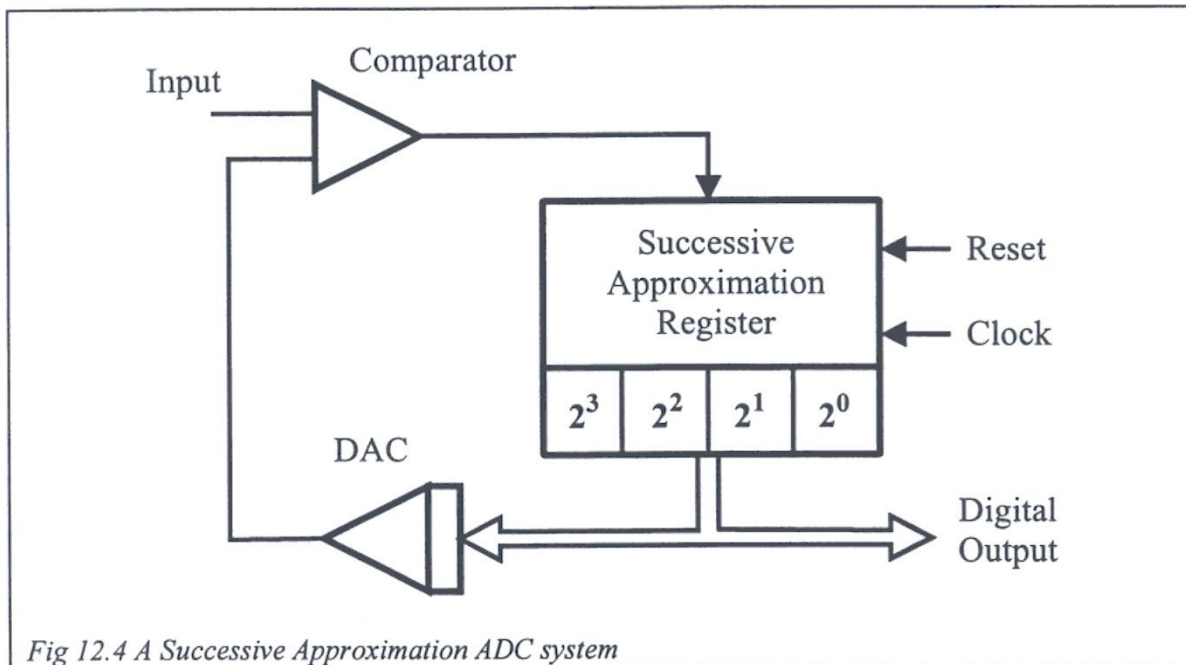
서보 제어 실험 (디지털 제어)

디지털 입력(이진수)				십진수	출력전압
2^3	2^2	2^1	2^0		$V_{ref} = 5V$ 인 경우
0	0	0	0	0	0 [V]
0	0	0	1	1	(1/16) 5 [V]
0	0	1	0	2	(2/16) 5 [V]
0	0	1	1	3	(3/16) 5 [V]
0	1	0	0	4	(4/16) 5 [V]
0	1	0	1	5	(5/16) 5 [V]
0	1	1	0	6	(6/16) 5 [V]
0	1	1	1	7	(7/16) 5 [V]
1	0	0	0	8	(8/16) 5 [V]
1	0	0	1	9	(9/16) 5 [V]
1	0	1	0	10	(10/16) 5 [V]
1	0	1	1	11	(11/16) 5 [V]
1	1	0	0	12	(12/16) 5 [V]
1	1	0	1	13	(13/16) 5 [V]
1	1	1	0	14	(14/16) 5 [V]
1	1	1	1	15	(15/16) 5 [V]

DAC의 입력데이터와 과 출력전압의 관계

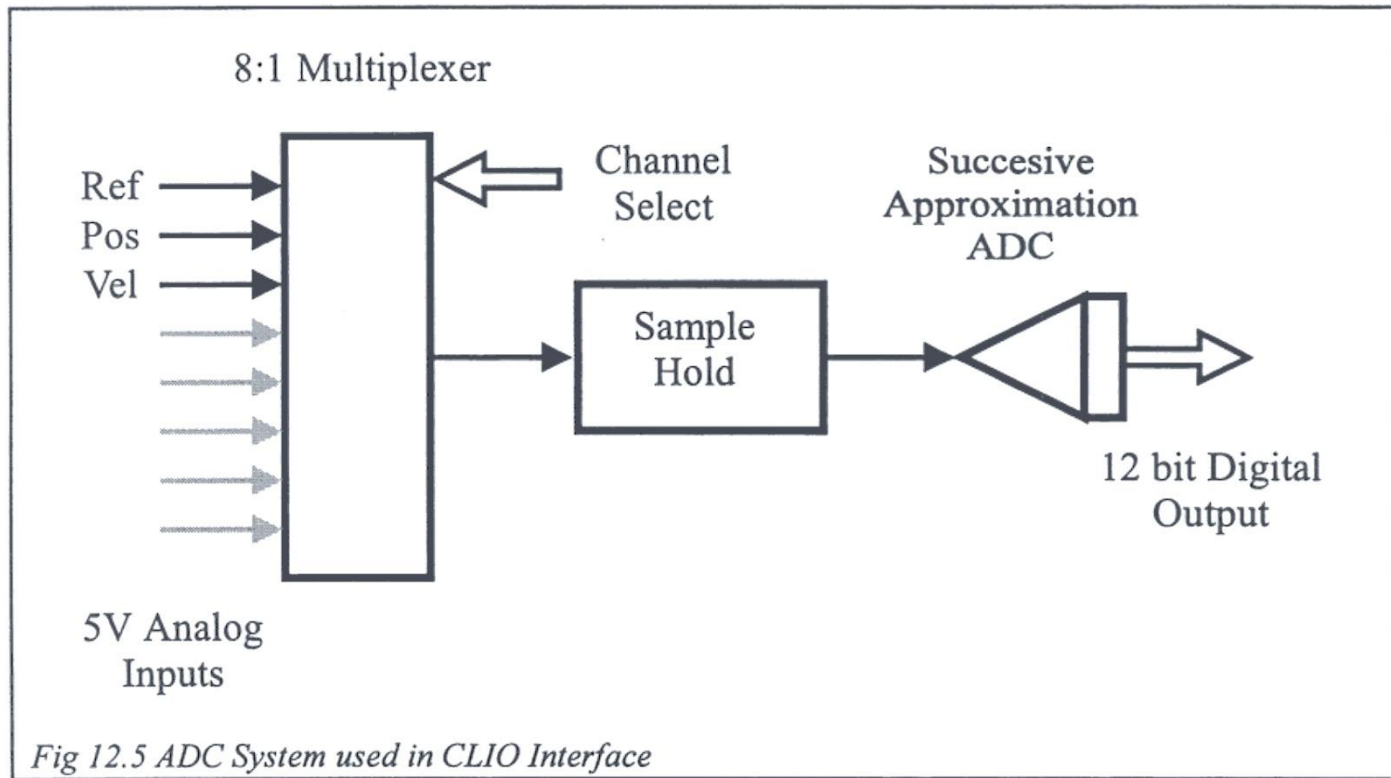


서보 제어 실험 (디지털 제어)



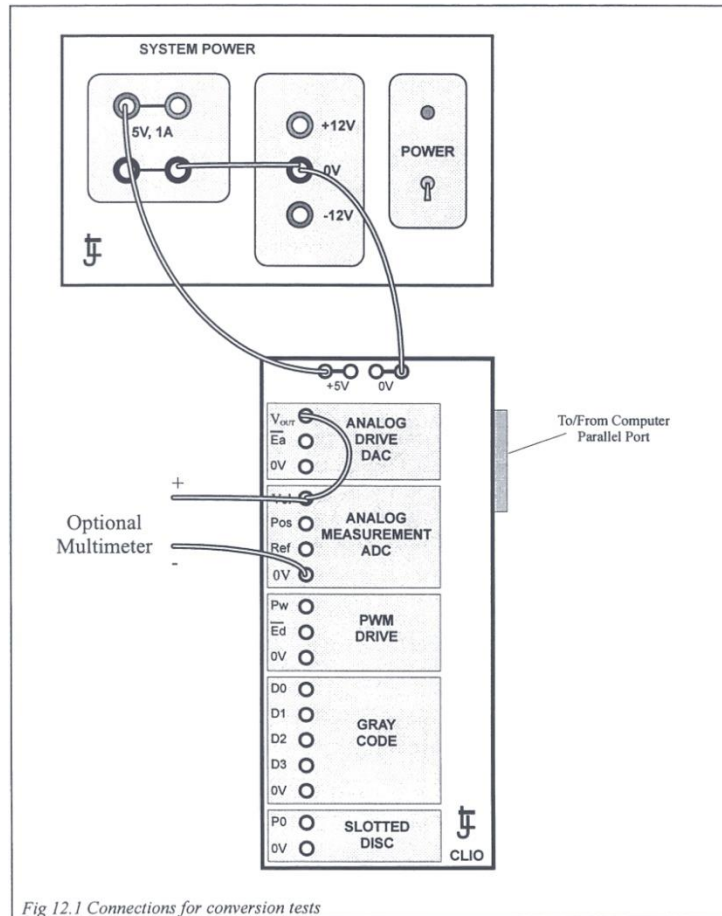
ADC의 내부 구성도

서보 제어 실험 (디지털 제어)



CLIO Interface 부의 구성도

서보 제어 실험 (디지털 제어)



실험결선도 (DAC와 ADC)

서보 제어 실험 (디지털 제어)

1. VCL 프로그램을 시작하고 CA06PE12.INI 파일을 LOAD하라.

File CA06PE12	Controller DAC	Plant MS15 Analog	Display Meter
Signal Generator Signal DC-Level Level 0% Offset 0% Rate 100msec		Graph 4 Velocity ON	
Reference	Internal		
DC Motor		Output Potentiometer	Disengage
Brake	0	Command Potentiometer	180°

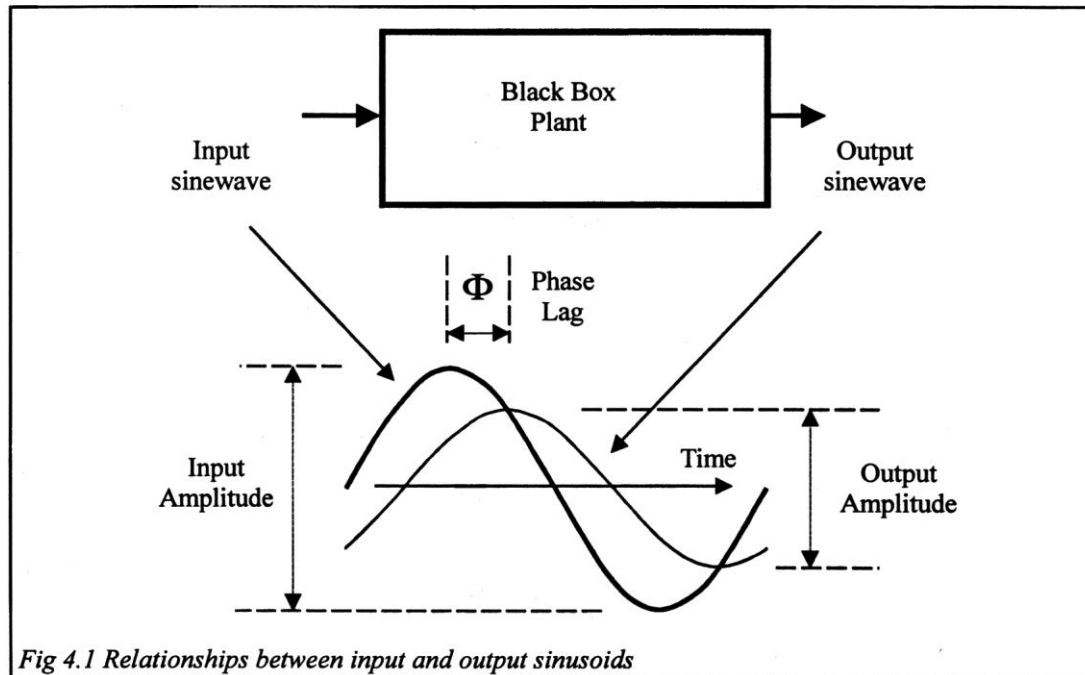
서보 제어 실험 (디지털 제어)

(2) 다음의 표에서 보여지는 상태로 비트들을 클릭하여 설정하고 그때 측정된 전압을 표에 기입하고 이론값과 비교하라.

bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0 80mV	Decimal Value	Expected Output	Voltage Reading
0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	1	1	80mV	
0	0	0	0	1	0	2		
0	0	0	1	0	0			
0	0	1	0	0	0			
0	1	0	0	0	0			
1	0	0	0	0	0			
1	0	0	0	0	1			
1	1	1	1	1	1	63	5.04V	

서보 제어 실험 (주파수 응답)

단원 8 제어계의 주파수 응답



시스템에 정현파입력을
가했을 때 입력의 크기에 대한
정상상태에서의 출력의 크기의 비,
그리고 입력과 출력 사이의 위상 차.

주파수 응답

서보 제어 실험 (주파수 응답)

제어계의 특성 파악을 위한 테스트 방법

(1) 시간 영역에서의 응답 테스트

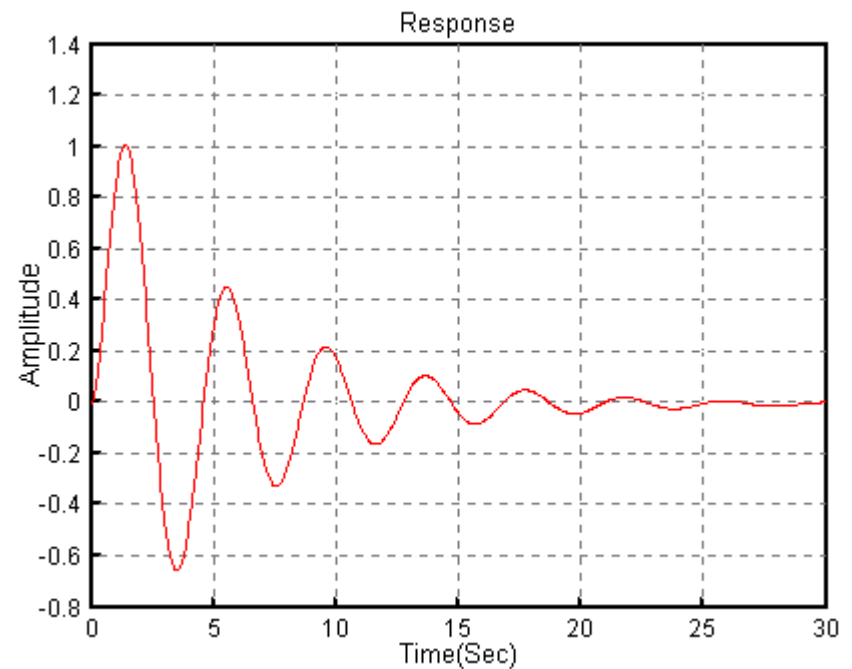
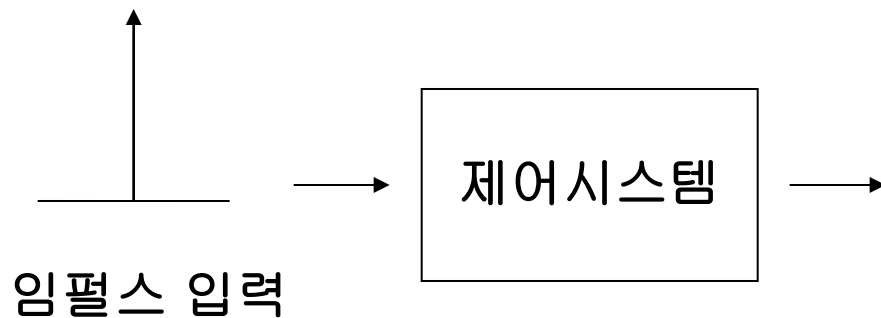
- 임펄스 응답
- 스텝 응답
- 램프 응답

(2) 주파수 영역에서의 응답 테스트

- 보드 선도

서보 제어 실험 (주파수 응답)

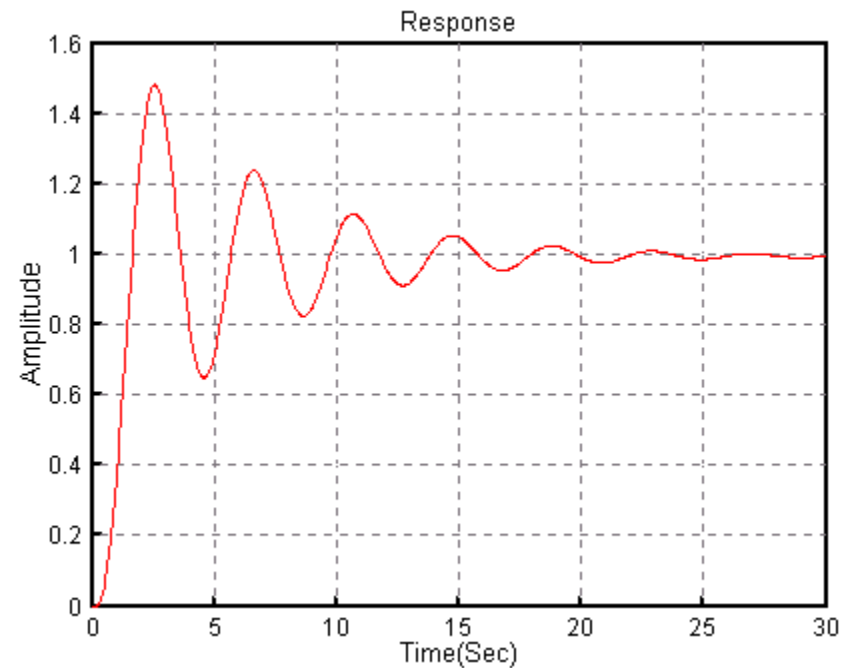
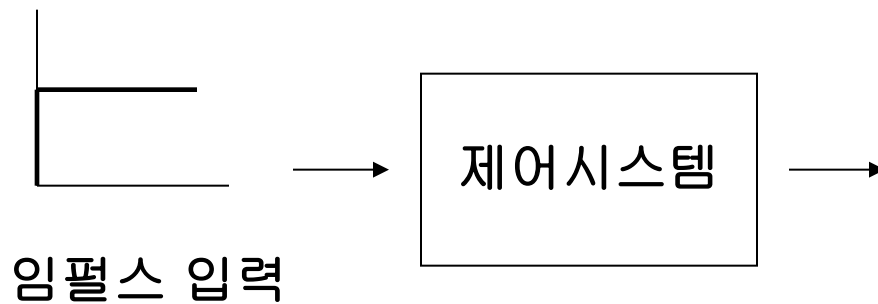
- 임펄스 응답



제어시스템 출력

서보 제어 실험 (주파수 응답)

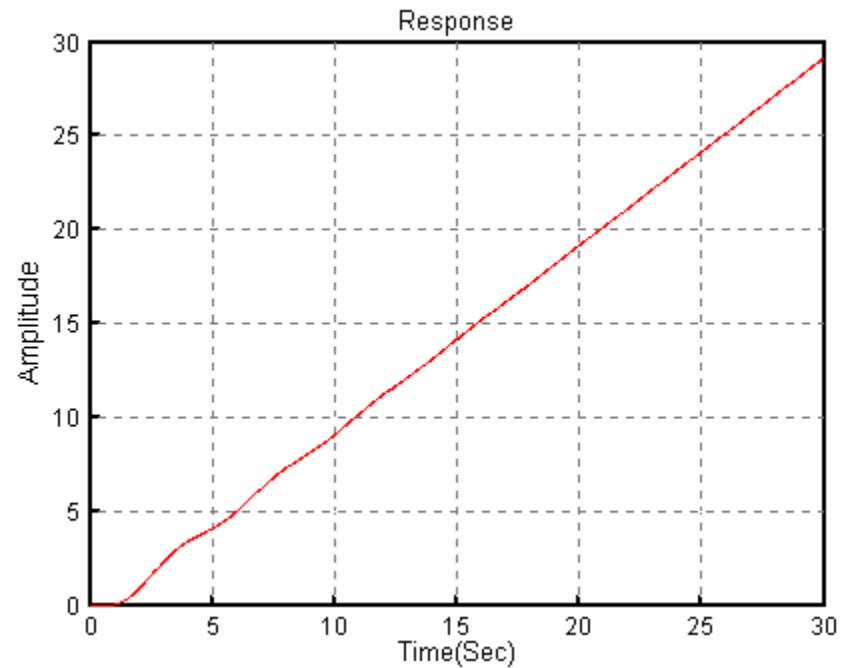
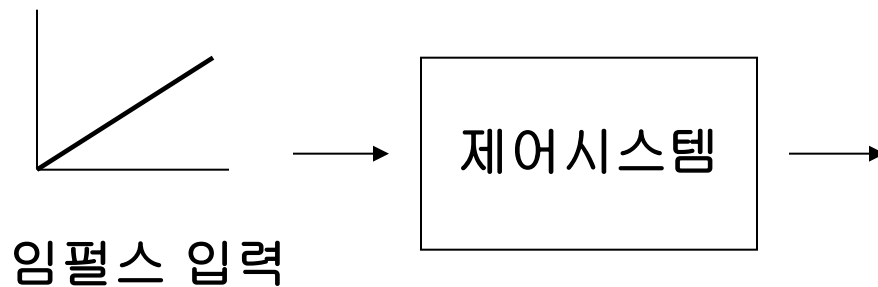
- 스텝 응답



제어시스템 출력

서보 제어 실험 (주파수 응답)

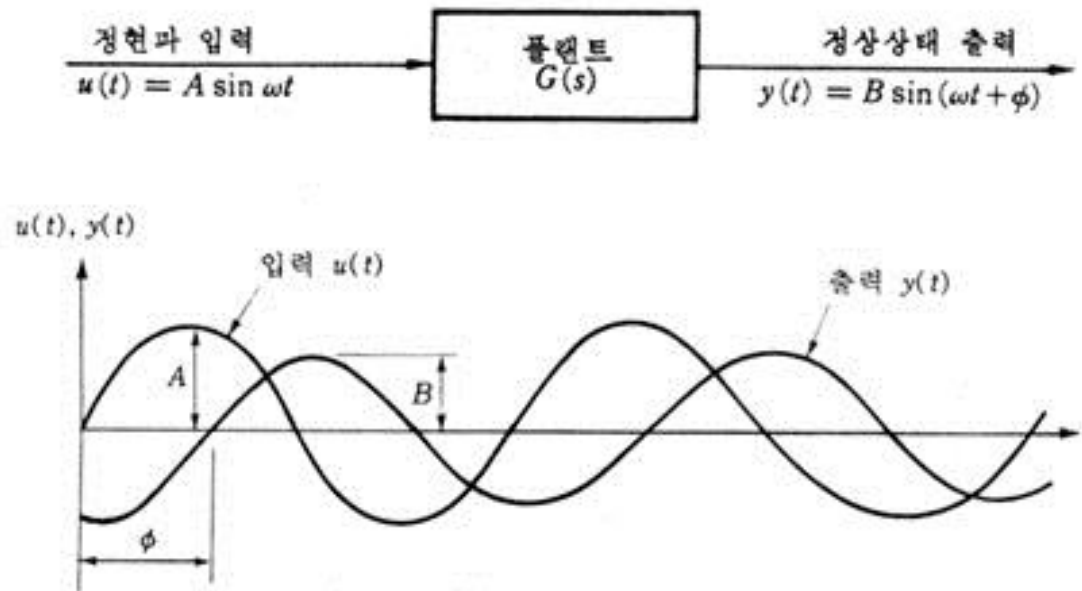
- 램프 응답



제어시스템 출력

서보 제어 실험 (주파수 응답)

- 주파수 응답 (보드 선도)

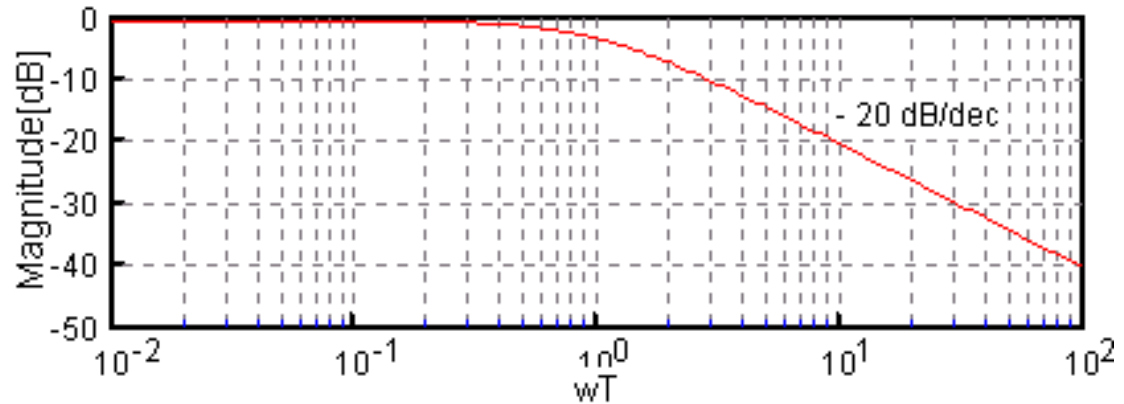


- 시스템에 정현파입력(sinusoidal input)을 저주파수에서 수 KHz까지 변화 시키면서 가했을 때 입력의 크기에 대한 정상상태에서의 출력의 크기의 비, 그리고 입력과 출력 사이의 위상 차를 각 주파수에 따라 구하여 그림.

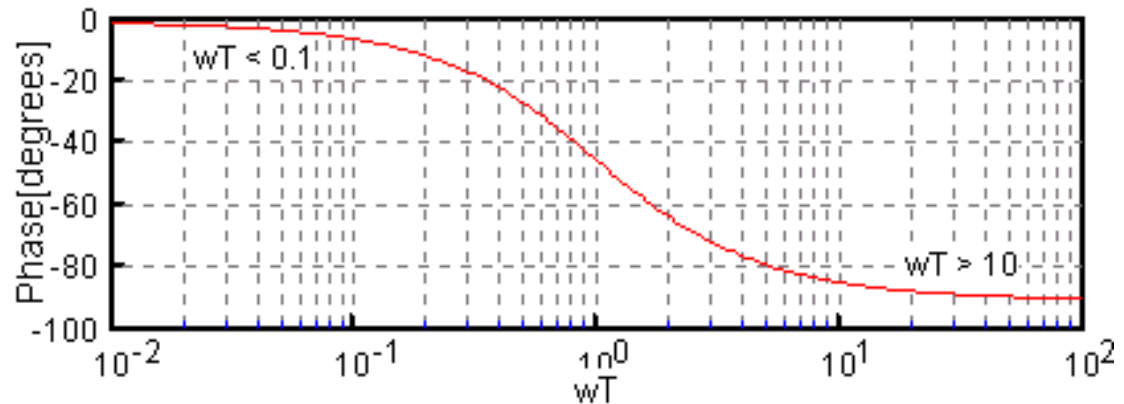
서보 제어 실험 (주파수 응답)

- 보드 선도

이득



위상



서보 제어 실험 (주파수 응답)

Log 눈금의 사용 이유

Log 눈금의 사용은 이득의 큰 변화에서 작은 변화까지를 눈에 보이게 쉽게 한장의 그래프에 표현하기 위함

$$\text{이득[dB]} = 20 \log \frac{\text{Output Amplitude}}{\text{Input Amplitude}}$$

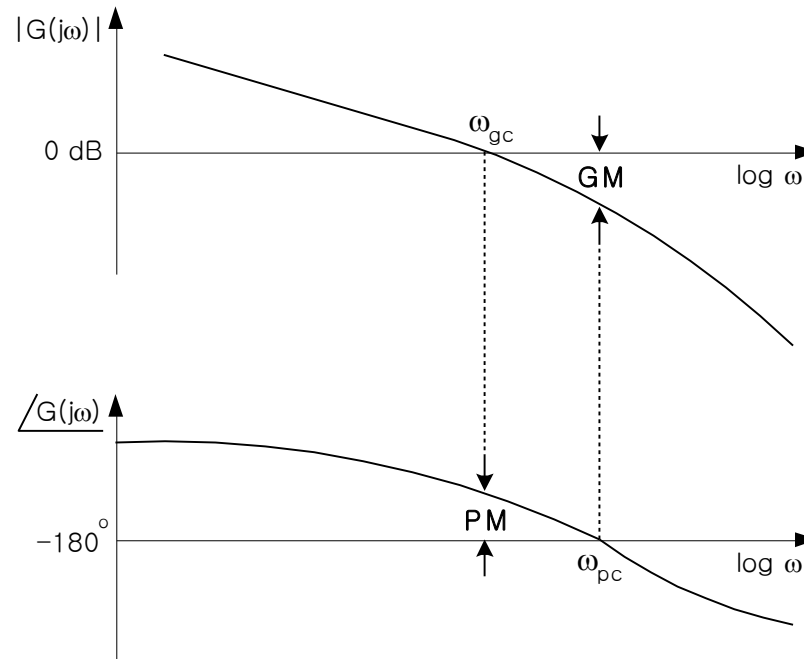
$$20 \log 1 = 0 [dB]$$

$$20 \log 10 = 20 [dB]$$

$$20 \log 100 = 20 \log 10^2 = 40 \log 10 = 40 [dB]$$

서보 제어 실험 (주파수 응답)

Gain Margin(이득 여유)과 Phase Margin(위상 여유)



바람직한 위상여유는 $30 \sim 60[^\circ]$
바람직한 이득여유는 6 dB 이상

서보 제어 실험 (주파수 응답)

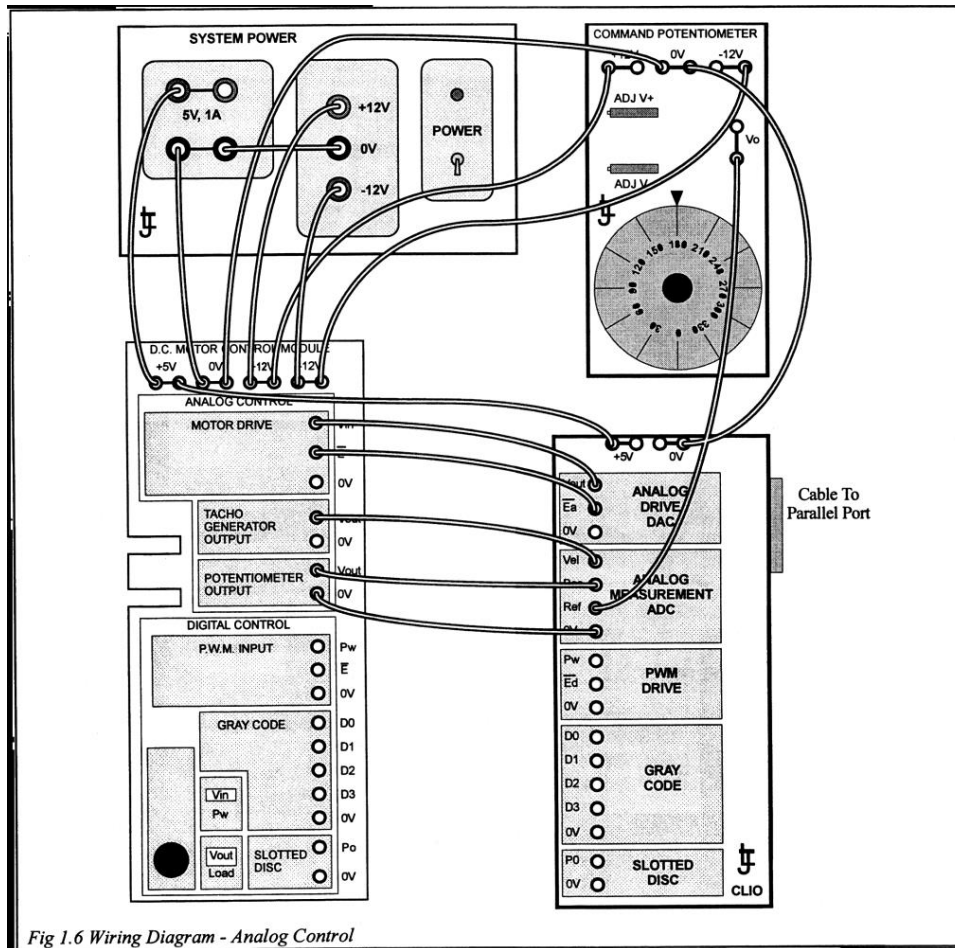


Fig 1.6 Wiring Diagram - Analog Control

실험결선도 (주파수 응답)

서보 제어 실험 (주파수 응답)

- (1) VCL 소프트웨어를 시작하고 Setup|CA06PE06을 로드하라.
(다음과 같은 화면이 PC의 모니터에 발생한다.)

File CA06PE04	Controller Open-loop	Plant MS15 Analog	Display Graph
Signal Generator		Graph	
<i>Signal</i>	Sine	1 Input	ON
<i>Level</i>	60%	2 Position	OFF
<i>Offset</i>	0%		
<i>Freq</i>	100 mHz	4 Velocity	ON
Reference	Internal		
DC Motor		Output Potentiometer	Disengage
Brake	0	Command Potentiometer	180°

- (2) 다음의 표에서 보여준 주파수의 범위에서 속도신호의 크기와 위상을 측정하라.

서보 제어 실험 (주파수 응답)

주파수 (Frequency) [Hz]	출력전압 크기 Peak to Peak [V]	위상 지연 [Degree]	진폭비율(A) (출력전압크기/ 입력전압)	진폭비율 $20 \log A$ [dB]
10mHz				
20mHz				
50mHz				
100mHz				
200mHz				
500mHz				
1Hz				
2Hz				
5Hz				
10Hz				

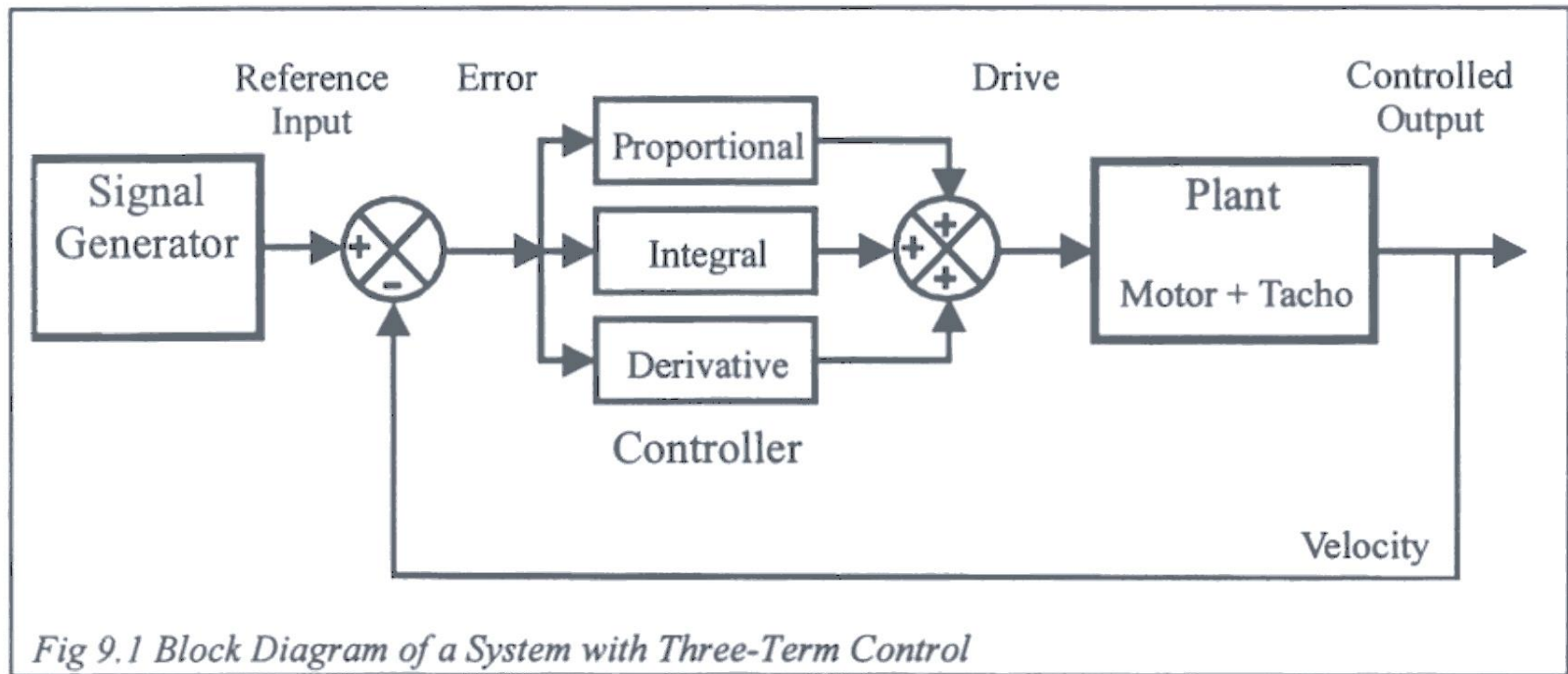
서보 제어 실험 (주파수 응답)

- 실험 결과에 대한 분석

- (1) 주파수가 높아짐에 따라 출력신호의 파형의 크기가 감소하는 것을 관찰 할 수 있다.
- (2) 주파수가 높아짐에 따라 입력신호와 출력신호의 위상차가 커지는 것을 관찰 할 수 있다.
- (3) 낮은 주파수에서 측정할 때 입력신호가 사인파로 변하게 될 때 출력신호가 완벽한 사인파가 아닌 사인파의 시작 부분이 찌그러지는 부분이 관찰된다. 이는 정지 마찰력의 영향이다.

서보 제어 실험 (PID 제어)

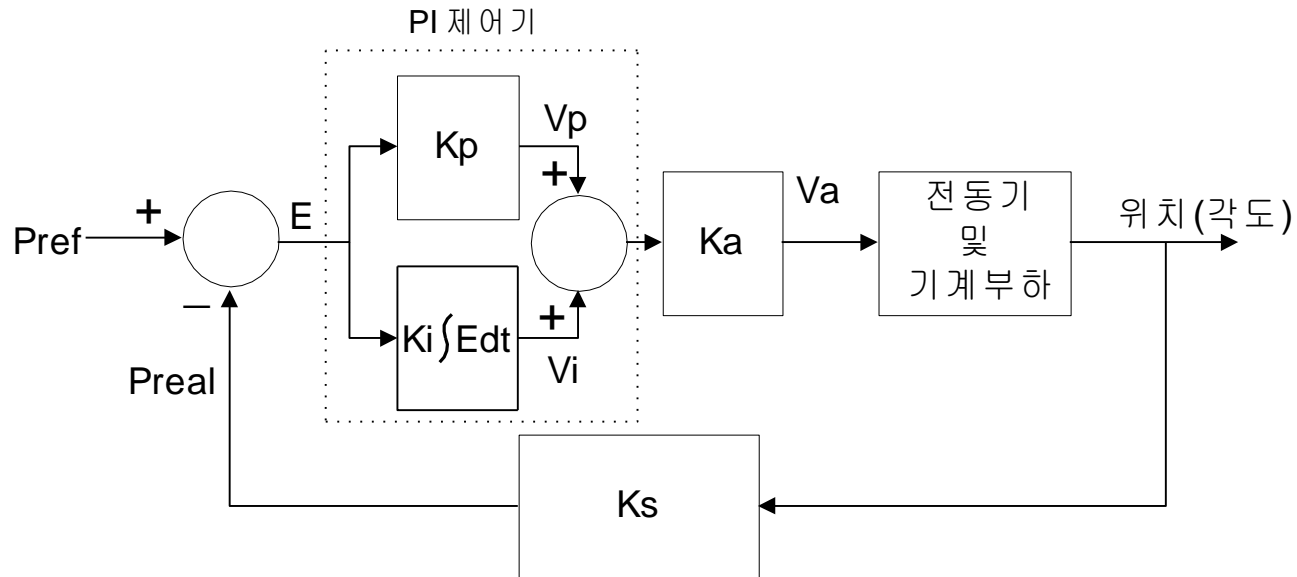
단원 10 PID 제어



PID 제어기를 포함한 제어시스템

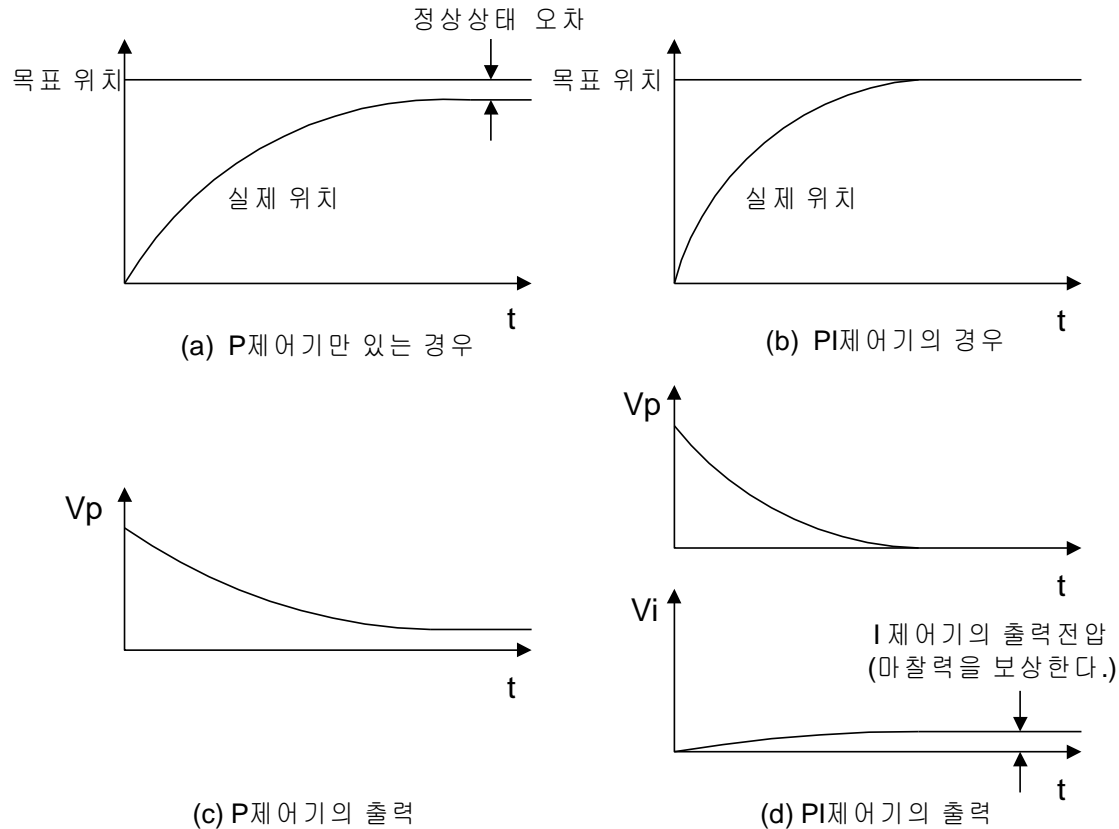
서보 제어 실험 (PID 제어)

PI 제어기



PI 제어기를 이용한 폐회로 위치제어계

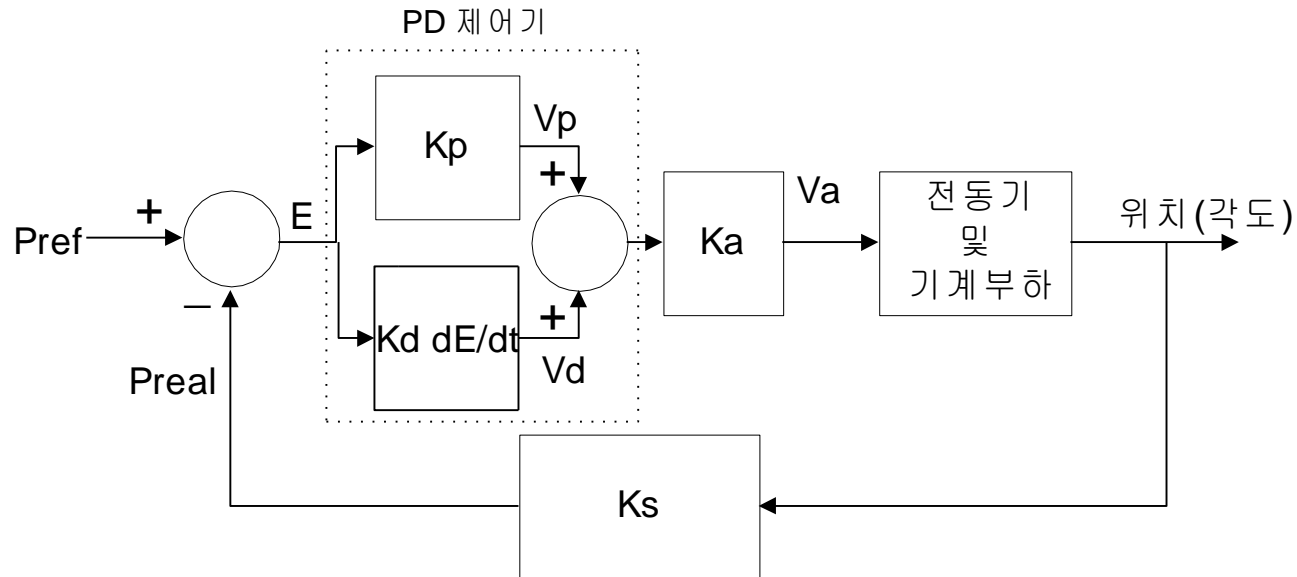
서보 제어 실험 (PID 제어)



P제어기와 PI 제어기의 출력신호

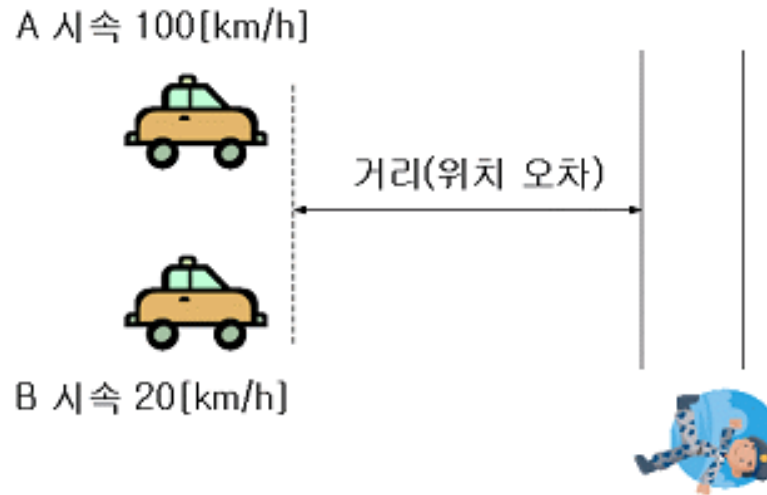
서보 제어 실험 (PID 제어)

PD 제어기



PD 제어를 이용한 폐회로 위치제어계

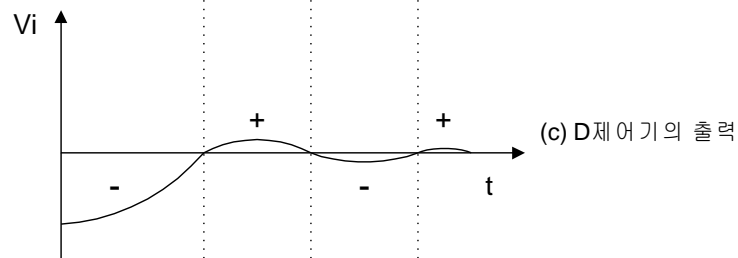
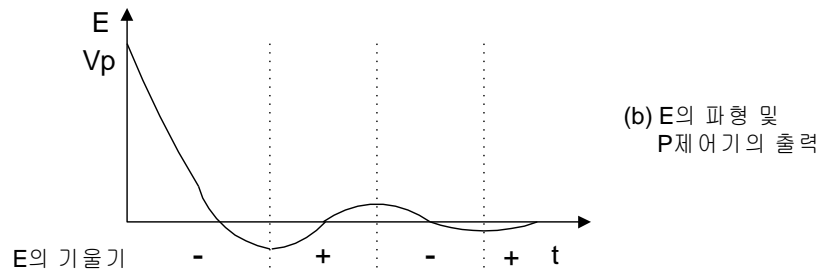
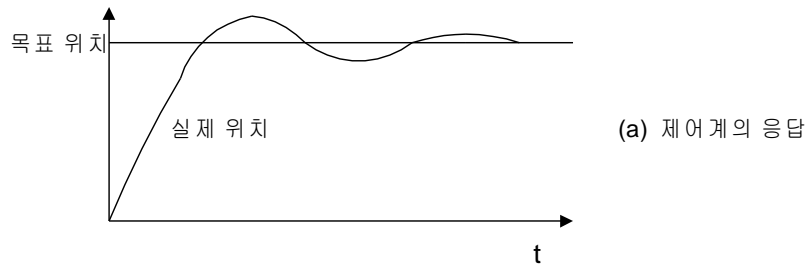
서보 제어 실험 (PID 제어)



운전할 때 건물목에서부터 남아있는 거리만 고려하여 운전하는 경우 \rightarrow P 제어

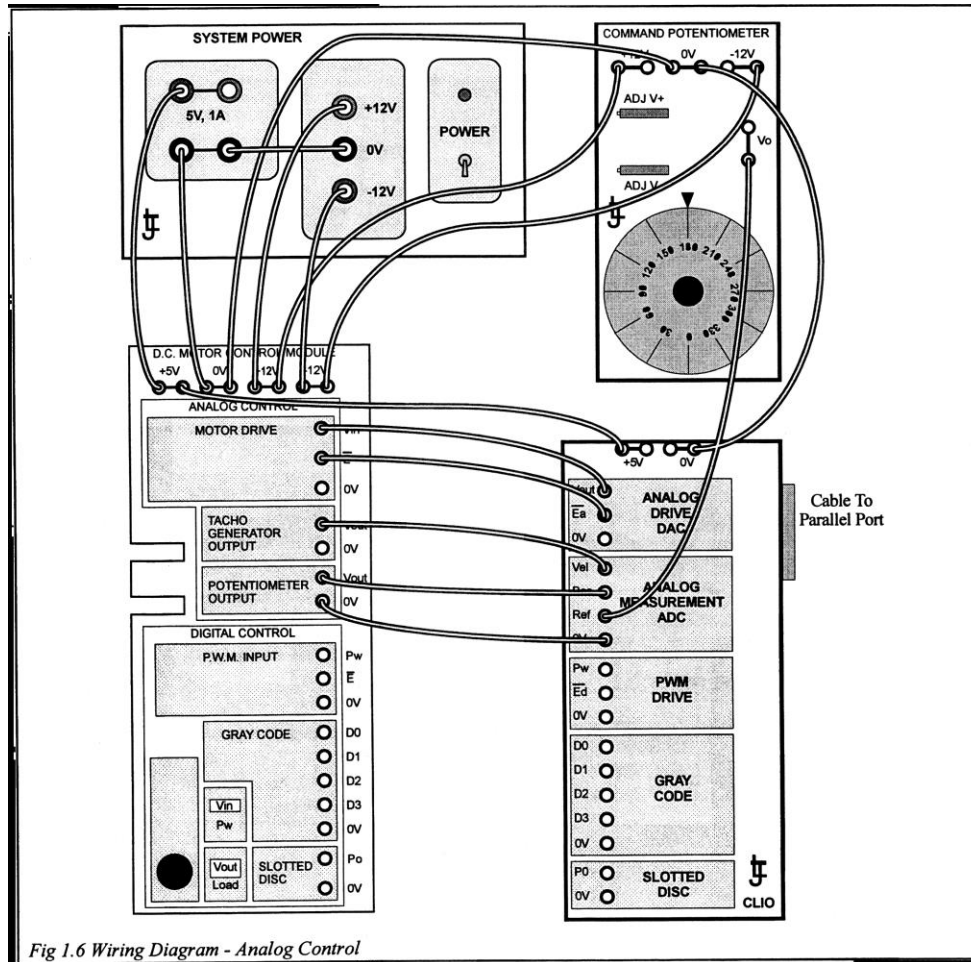
차량의 속도까지 감안하여 운전하는 경우 \rightarrow PD 제어

서보 제어 실험 (PID 제어)



PD 제어기의 출력신호 파형

서보 제어 실험 (PID 제어)



실험 결선도 (PID 제어)

서보 제어 실험 (PID 제어)

- (1) 실험결선도(PID제어)와 같이 결선하라.
- (2) VCL을 시작하고 CA06PE09.INI 파일을 로드하라.

File	Controller	Plant	Display
CA06PE09	PID	MS15 Analog	Graph
Signal Generator		Graph	
<i>Signal</i>	Step	1 Input ON	5 Drive OFF
<i>Level</i>	50%		6 PB OFF
<i>Offset</i>	0%	3 Error ON	7 Integral OFF
<i>Rate</i>	10 msec	4 Velocity ON	8 Deriv OFF
Reference	Internal		
DC Motor		Output Potentiometer	Disengage
Brake	0	Command Potentiometer	180°

서보 제어 실험 (PID 제어)

- (3) 적분 시정수와 미분 시정수를 0으로 두자. 그러면 제어기는 비례제어만 수행하게 된다.
비례제어는 PB라고 할 수 있다. PB는 Proportional Band(비례 대역)을 나타낸다. 비례 대역은 이득의 역함수와 같다. 퍼센트로 표현될 때 $\% PB = 100/K_c$ 이다.
- (4) PB를 100%($K_c=1$)로 만들고 시스템전원을 ON시킨다. 입력과 속도 사이에 상당한 에러가 보일 수도 있다.
- (5) PB를 40%($K_c=2.5$)로 하여 제어기의 이득을 2.5로 늘리자. 에러가 줄어들었는지 여전히 상당히 남아 있는지 관찰하자. 또한 시스템이 빨라진 것을 알리는 응답시간이 줄어드는 것을 관찰할 수 있을 것이다.
- (6) PB를 4%($K_c=25$)로 줄이자. 이득이 증가되면 정상상태 오차가 더욱 줄어들고 응답시간도 더욱 줄어드는 것을 관찰할 수 있다.

서보 제어 실험 (PID 제어)

PB(K_c)	정상상태 오차 [V]	출력 파형의 간략한 그림
100% ($K_c=1$)		
40% ($K_c=2.5$)		
4% ($K_c=25$)		

서보 제어 실험 (PID 제어)

적분 제어

- (7) 입력 레벨을 30%로 줄이고 PB를 40%로 놓자. 이젠 적분 시정수를 1초로 놓고 적분제어기를 on시킨다. 채널 7은 on으로 클릭하자.
- (8) 적절한 응답이 얻어질 때까지 적분 시정수를 감소시키자. 적분 시정수(Itc)가 0.1s 일때까지 조정하면서 관찰하라. 적분 Action은 정상 상태의 에러를 제거한다. 시정수는 적분기의 응답속력을 설정한다. 적분시간이 짧아질수록 적분이득은 높아진다.

적분시정수(Itc)	정상상태 오차 [V]	출력 파형의 간략한 그림
1[sec]		
0.5[sec]		
0.1[sec]		

서보 제어 실험 (PID 제어)

미분 제어

(9) 화면에서 Plant를 Process로 설정하라.

(직류서보모터의 속도제어계에서는 진동이 잘 보이지 않으므로 Simulation Mode로 설정하여 미분제어의 효과를 보려고 함.)

(10) PB=30%, Itc=0.24s로 놓자. 출력은 진동하는 형태를 보일 것이다.

(11) 이 진동이 줄어들도록 미분 시정수를 증가시키자.

적절하게 진동이 줄어들었을 때 미분 세팅을 다음에 기록하라.

Dtc = _____ s

미분제어의 사용은 진동을 줄이는 제동의 효과가 있음을 실험을 통해 파악할 수 있다.

서보 제어 실험 (샘플링 타임의 영향)

샘플링 타임 및 데이터 레졸류션의 영향

1. 샘플링 타임

위치 및 속도 정보를 받은후 제어출력이 나가는 데 걸리는 시간으로 마이크로프로세서에서 제어 소프트웨어가 수행 되는 속도에 영향을 받는다. 이 샘플링 타임이 길어질 경우 제어계는 불안정해진다.

2. 데이터 레졸류션

위치 및 속도정보를 디지털 코드로 변환시의 비트수에 관련된 것으로 레졸류션이 적으면 정밀한 제어가 불가능해진다.

서보 제어 실험 (샘플링 타임의 영향)

(1) VCL을 기동하고 CA06PE13.INI 파일을 로드한다.

File	Controller	Plant	Display
CA06PE13	PID	MS15 Analog	Graph
Signal Generator		Graph	
Signal	Step	1 Input ON	5 Drive Off
Level	50%		6 Proportional Off
Offset	0%	3 Error ON	7 Integral Off
Rate	10 msec	4 Velocity ON	8 Derivative Off
Reference	Internal		
DC Motor		Output Potentiometer	Disengage
Brake	0	Command Potentiometer	180°

서보 제어 실험 (샘플링 타임의 영향)

- (2) 비트셋팅을 12비트에서 5비트로 변경하고 변화에 따른 결과를 관찰하라 . 다음과 같은 다른 효과가 나타날 것이다.
1. 과도 응답은 1비트(320mV) 정도의 차이를 가지는 정도로 변화를 보일 것이다.
 2. 정상상태는 안정되게 그대로 유지되지 않는다. 1 Bit(320mV)정도로 위 아래로 진동한다. 레졸류션이 줄어들면 정밀도가 떨어지는 결과를 가져온다.
- (3) 리솔루션을 12비트로 변경하라.
다음 표에 따라 신호 발생기 rate를 감소시키고 시스템 응답을 관찰해 기록한다.

서보 제어 실험 (샘플링 타임의 영향)

- 샘플간의 시간이 증가함에 따라 시스템의 응답은 점차 불안정해진다. 결국 샘플링 속도는 너무 느려서 시스템 제어를 유지할 수 없게 하며, 진동을 유발한다.

Rate msec	error 파형	Velocity 파형	안정도(Stability)
10			
20			
50			
100			
200			
300			