

공통 이미터 증폭기

실험 개요

BJT를 이용한 공통 이미터 증폭기의 동작 원리를 공부하고, 실험을 통하여 특성을 측정한다. 공통 이미터 증폭기는 베이스가 입력 단자, 컬렉터가 출력 단자, 이미터가 공통 단자인 증폭기이고, 높은 전압 이득을 얻을 수 있다는 장점이 있어 널리 사용되고 있다. 이 실험에서는 공통 이미터 증폭기의 입력-출력 특성 곡선을 구하고, 소신호 등가회로의 개념을 적용하여 전압 이득을 구하고, 이를 실험에서 확인하고자 한다.

실험 기자재 및 부품

- DC 파워 서플라이
- 디지털 멀티미터
- 오실로스코프
- 함수 발생기
- Q2N4401(npn형 BJT) (1개)
- 저항
- 커패시터

6.1 배경 이론

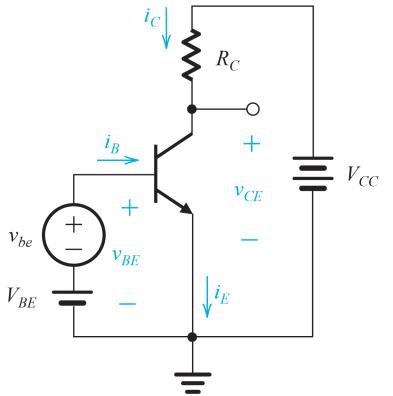
BJT의 소신호 등가회로

[그림 6-1(a)]와 같이 입력에 DC 바이어스와 소신호 전압을 인가할 경우, 식 (6.1)과 같이 나타낼 수 있다.

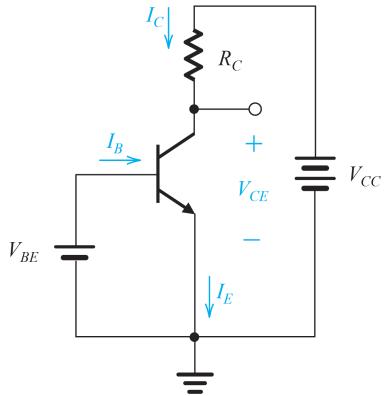
$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be} \quad (6.1)$$

식 (6.1)을 BJT의 전류식에 대입하면 식 (6.2)와 같이 전개할 수 있다.

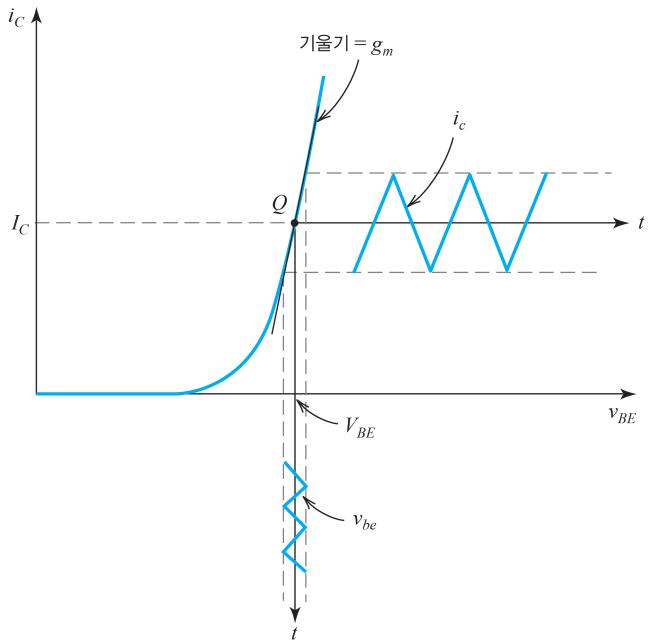
$$\begin{aligned}
i_C &= I_S e^{v_{BE}/V_T} \\
&= I_S e^{(v_{BE} + v_{be})/V_T} \\
&= I_S e^{(V_{BE}/V_T)} e^{(v_{be}/V_T)} \\
&= I_C e^{(v_{be}/V_T)} \\
&\approx I_C \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T}\right) \quad (v_{be} < 10\text{mV} \text{라고 가정}) \\
&= I_C + i_c
\end{aligned} \tag{6.2}$$



(a) 입력에 DC 바이어스와 소신호 전압을 인가한 경우



(b) 입력에 DC 바이어스 전압만 인가한 경우



(c) BJT 증폭기의 전류-전압 특성

[그림 6-1] BJT 증폭기의 DC 및 소신호 동작

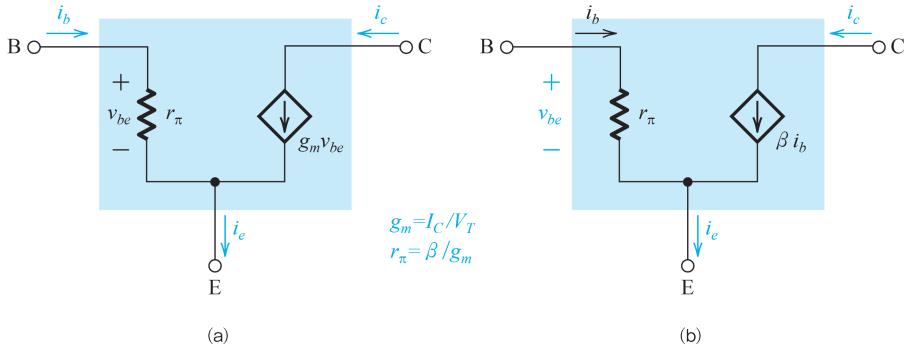
식 (6.2)에서 I_C 는 DC 전류를 의미하고, i_c 는 소신호 전류를 의미한다. i_c 는 식 (6.3)과 같이 표현할 수 있다.

$$i_c = \frac{I_C}{V_T} v_{be} = g_m v_{be} \quad (6.3)$$

식 (6.3)에서 g_m 을 트랜스컨덕턴스 transconductance라고 하며, 식 (6.4)와 같이 정의된다.

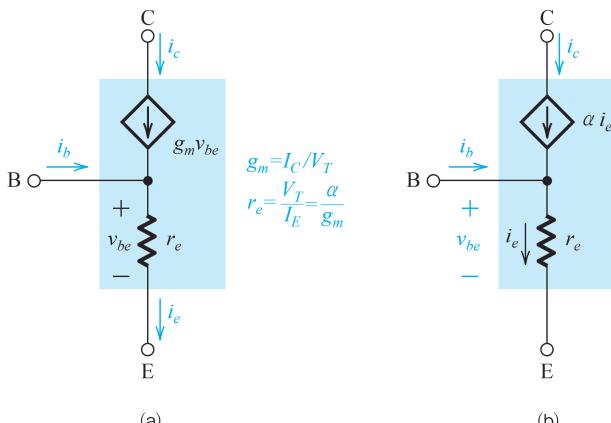
$$\begin{aligned} g_m &= \frac{\partial I_C}{\partial v_{BE}} \Big|_{i_C=I_C} \\ &= \frac{I_C}{V_T} \end{aligned} \quad (6.4)$$

[그림 6-2]는 BJT의 π -모델이다. [그림 6-2(a)]는 트랜스컨덕턴스 증폭기의 형태로 나타낸 모델이고, [그림 6-2(b)]는 전류 증폭기의 형태로 나타낸 모델이다.



[그림 6-2] BJT의 π -모델

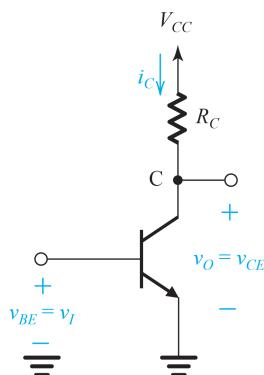
[그림 6-3]은 BJT의 T-모델이다. [그림 6-3(a)]는 트랜스컨덕턴스 증폭기의 형태로 나타낸 모델이고, [그림 6-3(b)]는 전류 증폭기의 형태로 나타낸 모델이다.



[그림 6-3] BJT의 T-모델

공통 이미터 증폭기의 동작 원리

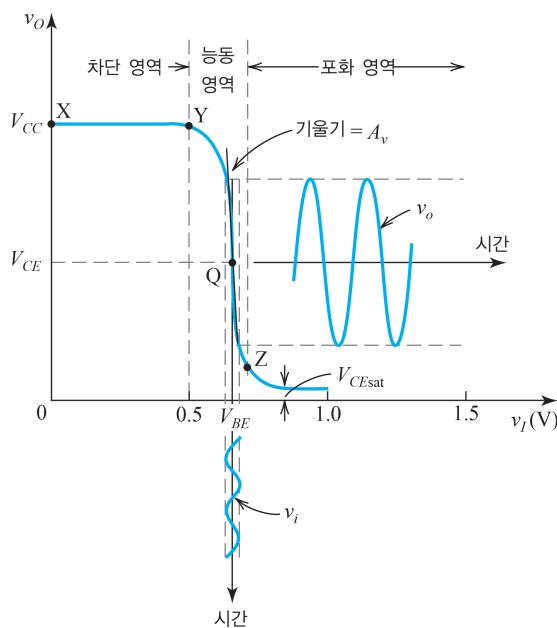
[그림 6-4]와 같은 기본적인 공통 이미터 증폭기에서 입력 v_I 는 베이스-이미터 전압 v_{BE} 이고, 출력 v_O 는 컬렉터-이미터 전압 v_{CE} 이다. 베이스-이미터 사이의 소신호 입력 전압에 비례하는 전류가 컬렉터에 흐르고, 이 전류가 출력 쪽의 저항 R_C 에 의해서 전압으로 변환되면서 전압이 증폭된다.



[그림 6-4] 공통 이미터 증폭기

[그림 6-5]는 공통 이미터 증폭기의 전압 전달 특성을 보여주고 있다. 출력 전압은 식 (6.5)와 같이 표현할 수 있으며, v_I 전압에 따라서 BJT의 동작 영역을 크게 세 가지로 나눌 수 있다.

$$v_O = V_{CC} - i_C \times R_C \quad (6.5)$$



[그림 6-5] 공통 이미터 증폭기의 입력-출력 전달 특성 곡선

- ① 차단 cut-off 영역** : v_I 전압이 X와 Y 점 사이일 경우에는 BJT가 차단 영역에서 동작하며, 컬렉터 전류가 흐르지 않는다.
- ② 능동 active 영역** : v_I 전압이 Y와 Z 점 사이일 경우에는 BJT가 능동 영역에서 동작하며, 컬렉터 전류 및 출력 전압은 식 (6.6), 식 (6.7)과 같이 표현할 수 있다. 일반적으로 이 영역에서 주로 증폭기로 사용된다.

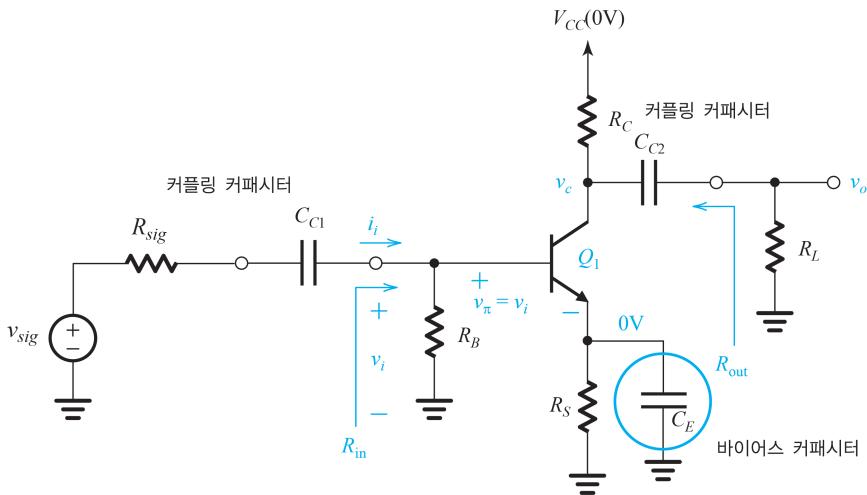
$$i_C = I_S \exp\left(\frac{v_I}{V_T}\right) \quad (6.6)$$

$$v_O = V_{CC} - I_S \exp\left(\frac{v_I}{V_T}\right) \times R_C \quad (6.7)$$

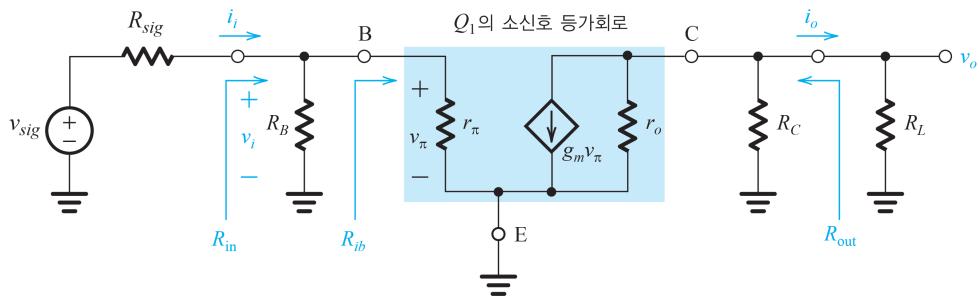
- ③ 포화 saturation 영역** : v_I 전압이 Z 점 이상일 경우에는 BJT가 포화 영역에서 동작하며, 출력 전압의 값은 v_{CEsat} 이다.

공통 이미터 증폭기의 특성 분석

[그림 6-6]과 같이 소신호 분석을 위해서는 DC 전압원(예를 들어, V_{CC} 전압) 같은 접지시키고, 커플링 커패시터와 바이패스 커패시터 등은 저항을 0으로 간주하고 연결한다. 따라서 소신호 분석을 할 때 R_S 저항은 없다고 볼 수 있다.



[그림 6-6] 소신호 분석을 위한 공통 이미터 증폭기 회로



[그림 6-7] 공통 이미터 증폭기의 소신호 등가회로

[그림 6-7]의 소신호 등가회로에서 입력 저항 R_{in} 을 구하면 식 (6.8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 R_{in} &\equiv \frac{v_i}{i_i} \\
 &= R_B \parallel R_{ib} \\
 &= R_B \parallel r_\pi \\
 &\approx r_\pi \quad (R_B \gg r_\pi \text{라고 가정})
 \end{aligned} \tag{6.8}$$

전압 이득을 구하기 위해서 식 (6.8)의 결과를 이용한 후, 식 (6.9)와 식 (6.10)을 거치면, 식 (6.11)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 v_i &= v_{sig} \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} \\
 &= v_{sig} \frac{(R_B \parallel r_\pi)}{(R_B \parallel r_\pi) + R_{sig}} \\
 &\approx v_{sig} \frac{r_\pi}{r_\pi + R_{sig}} \quad (R_B \gg r_\pi \text{ 일 때})
 \end{aligned} \tag{6.9}$$

$$\begin{aligned}
 v_o &= -g_m v_\pi (r_o \parallel R_C \parallel R_L) \\
 &= -g_m v_i (r_o \parallel R_C \parallel R_L) \quad (v_\pi = v_i \text{ } \circ| \text{므로})
 \end{aligned} \tag{6.10}$$

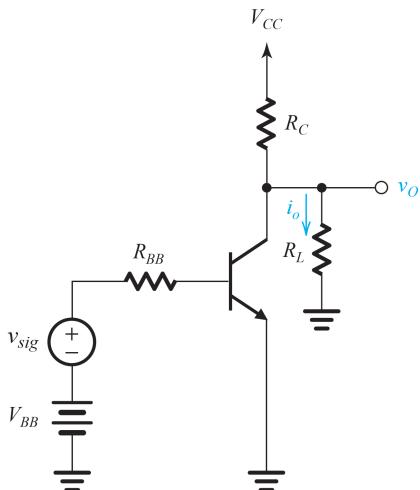
$$\begin{aligned}
 A_v &= \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{v_i}{v_{sig}} \times \frac{v_o}{v_i} \\
 &= -\frac{r_\pi}{r_\pi + R_{sig}} \times g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L)
 \end{aligned} \tag{6.11}$$

전압 이득 A_v 는 식 (6.11)과 같으며, 부하 저항 R_L 에 따라서 값이 달라지므로 $R_L \circ| \infty$ 일 경우의 전압 이득 A_{vo} 를 구하면 식 (6.12)와 같이 근사화할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 A_{vo} &= -\frac{r_\pi}{r_\pi + R_{sig}} \times g_m (r_o \parallel R_C) \\
 &\approx -\frac{r_\pi}{r_\pi + R_{sig}} \times g_m R_C \quad (r_o \gg R_C \text{ 일 경우})
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

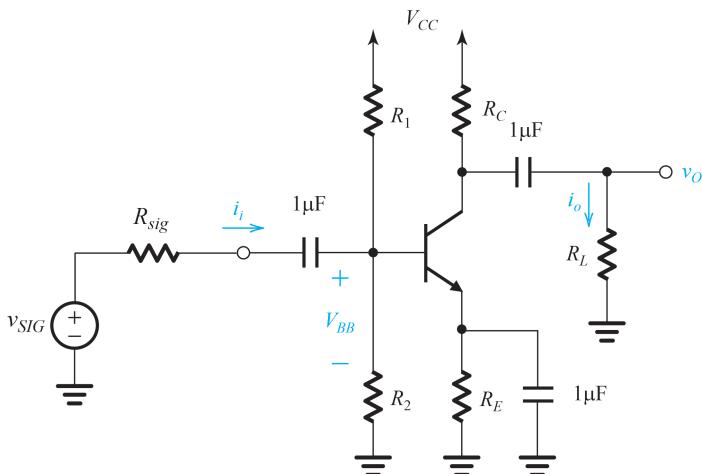
6.2 실험회로 및 PSpice 시뮬레이션

[그림 6-8]은 입력에 DC 바이어스 전압 V_{BB} 와 소신호 전압 v_{sig} 가 인가된 공통 이미터 증폭기 회로이다. 출력인 컬렉터 단자에는 컬렉터 저항 R_C 와 부하 저항 R_L 이 연결되어 있다.



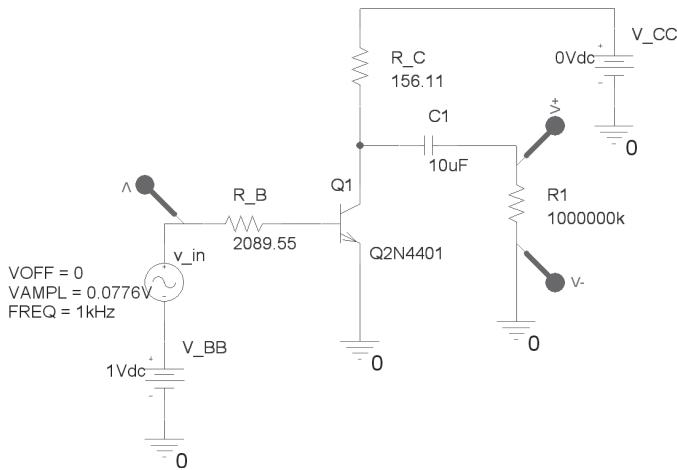
[그림 6-8] 공통 이미터 증폭기 회로(실험회로 1)

[그림 6-9]는 [그림 6-8]의 공통 이미터 증폭기 회로와 [실험 05]의 바이어스 회로([그림 5-7])를 포함한 완성된 공통 이미터 증폭기 회로이다.



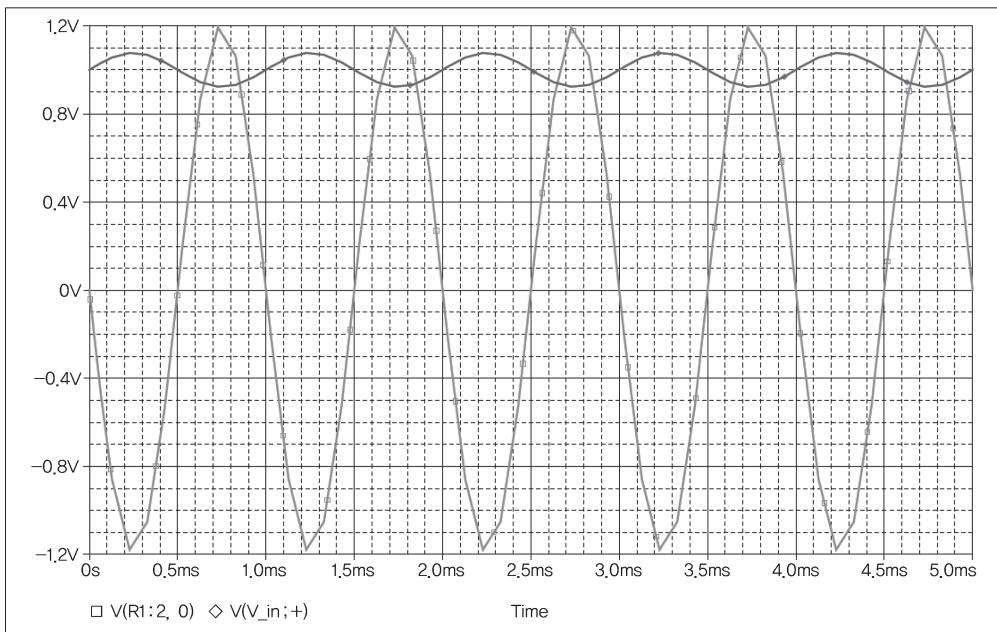
[그림 6-9] 바이어스 회로를 포함한 공통 이미터 증폭기 회로(실험회로 2)

공통 이미터 증폭기 회로를 PSpice 모의실험을 위한 회로도로 구현하면 [그림 6-10]과 같다.



[그림 6-10] PSpice 모의실험을 위한 공통 이미터 증폭기 회로도

[그림 6-11]은 공통 이미터 증폭기의 PSpice 모의실험 결과이다. 입력 파형 v_{in}의 크기는 0.0770V이고 출력 파형 v_{out}의 크기는 1.1951V이므로, 이는 15배 정도 증폭된 것을 볼 수 있다.



[그림 6-11] 공통 이미터 증폭기의 PSpice 모의실험 결과

6.3 실험 절차

- 1 실험회로 1([그림 6-8])에서 V_{CC} 값을 12V, v_{sig} 값을 0V, V_{BB} 값을 4V로 두고, R_{BB} 저항값이 $2k\Omega$ 인 경우 v_O 의 DC 값이 6V가 되도록 하는 R_C 값을 결정한다. 이 경우 BJT의 각 단자들의 전압(V_C , V_B , V_E) 및 전류(I_C , I_E , I_B)를 구하고, [표 6-1]에 기록하시오. 각 단자들의 전압을 바탕으로 BJT가 능동 영역에서 동작하는지 확인하시오.
- 2 v_{sig} 값을 0V로 두고, V_{BB} 전압을 0V, 12V, 3V~9V는 500mV 간격으로 변화시키면서 v_O 의 DC 전압을 측정하여 [표 6-2]에 기록하고, 실험회로 1의 입력-출력($V_{BB}-v_O$) 전달 특성 곡선을 [그림 6-12]에 그리시오.
- 3 능동 영역에서 회로가 동작하는 경우 BJT의 트랜스컨덕턴스 g_m 값, 입력 저항 r_π , 이미터 저항 r_e , 전류 증폭도 β 를 구하여 [표 6-3]에 기록하시오. 이를 이용하여 소신호 등가회로를 그리고, 실험회로 1의 공통 이미터 증폭기의 이론적인 전압 이득을 구하시오.
- 4 전압 이득이 최소 $10V/V$ 이상 나오는지 실험하기 위해 입력에 10kHz의 $0.01V_{p-p}$ 정현파의 입력 전압을 인가한다. 이때 공통 이미터 증폭기의 입력-출력 전압의 크기를 [표 6-4]에 기록하여 전압 이득을 구하고, 크기와 위상을 고려하여 v_{sig} , 입력 전압(BJT 베이스 전압 v_{BE}), 출력 전압(BJT 컬렉터 전압 v_{CE})의 파형을 캡처하여 [그림 6-13]과 같은 형태로 결과 보고서에 기록하시오.
- 5 실험회로 1의 입력 저항과 출력 저항을 직접 측정하여 [표 6-5]에 기록하시오. 입력 저항을 측정하기 위해 입력의 DC 전압을 변화시키면서 입력 쪽에 흘러 들어가는 DC 전류를 측정한다. 출력 저항을 측정하기 위해 입력에 0V를 인가하고, 출력 쪽에 DC 전압을 변화시키면서 출력 쪽에 흘러 들어가는 DC 전류를 측정한다.
- 6 실험회로 1과 [실험 05]의 바이어스 회로([그림 5-7])를 결합한 실험회로 2를 구성한다. 입력에 10kHz의 $0.01V_{p-p}$ 정현파의 입력 전압을 인가한다. 이때 공통 이미터 증폭기의 입력-출력 전압의 크기를 [표 6-6]에 기록하여 전압 이득을 구하고, 크기와 위상을 고려하여 v_{sig} , 입력 전압(BJT 베이스 전압 v_{BE}), 출력 전압(BJT 컬렉터 전압 v_{CE})의 파형을 캡처하여 [그림 6-14]와 같은 형태로 결과 보고서에 기록하시오.
- 7 실험회로 2([그림 6-9])의 입력 저항과 출력 저항을 직접 측정하여 [표 6-7]에 기록하시오. 입력 저항을 측정하기 위해 입력의 DC 전압을 변화시키면서 입력 쪽에 흘러 들어가는 DC 전류를 측정한다. 출력 저항을 측정하기 위해 입력에 0V를 인가하고, 출력 쪽에 DC 전압을 변화시키면서, 출력 쪽에 흘러 들어가는 DC 전류를 측정한다.

6.4 고찰 사항

- (1) [그림 6-9]에서 입력 쪽과 출력 쪽의 커패시터의 역할을 설명하시오.
- (2) 예비 보고 사항에서 PSpice를 이용하여 구한 전압 이득과 실험을 통해서 측정한 전압 이득 사이의 차이가 발생하는 원인을 설명하시오.

◆ 요약

이 실험에서는 BJT를 이용한 기본적인 증폭기 중에서 가장 널리 사용되고 있는 공통 이미터 증폭기 회로를 구성하고, 실험을 통해 그 동작을 확인하였다. 그리고 증폭기의 전압 이득, 입력 임피던스 및 출력 임피던스를 구하기 위한 소신호 등가회로의 개념을 공부하였고, 소신호 등가회로를 이용한 이론적인 계산치를 바탕으로 측정을 통해서 특성을 확인하였다. BJT 증폭기의 전압 이득을 증가시키기 위해서는 컬렉터 전류를 키워서 트랜스컨덕턴스를 증가시켜야 하므로, 전류와 전압 이득 사이에는 상충 관계가 있음을 확인할 수 있었다. 이 실험의 공통 이미터 증폭기는 가장 기본적이면서도 많이 사용되고 있는 증폭기라서 중요한 실험이라고 할 수 있다.

◆ 퀴즈

- (1) 트랜스컨덕턴스^{transconductance} 식은?
① $\frac{I_C}{V_T}$ ② $\frac{V_T}{I_B}$
③ $\frac{I_E}{V_T}$ ④ $\frac{V_T}{I_C}$
- (2) 증폭기로 가장 많이 사용하는 BJT의 동작 영역은?
① 차단 영역 ② 능동 영역
③ 포화 영역 ④ 반전 영역
- (3) 공통 이미터 증폭기의 특성이 아닌 것은?
① 전압 이득이 비교적 크다.
② 비교적 높은 입력 임피던스를 가진다.
③ 출력 임피던스가 매우 낮다.
④ 비교적 높은 전력 이득을 가진다.

- (4) 공통 이미터 증폭기의 전압 이득을 증가시키기 위한 방법으로 올바른 것은?
- DC 바이어스 전류를 감소시킨다.
 - BJT 트랜지스터의 면적을 감소시킨다.
 - 부하 저항의 크기를 증가시킨다.
 - 커플링 커패시터의 크기를 감소시킨다.
- (5) 공통 이미터 증폭기에서 커플링 커패시턴스의 역할은?
- DC 성분을 통과시킨다.
 - AC 성분을 막는다.
 - 전압 이득을 키운다.
 - DC 성분을 막는다.
- (6) 공통 이미터 증폭기의 입력 임피던스는?
- r_π
 - g_m
 - r_e
 - $\frac{1}{g_m}$
- (7) 공통 이미터 증폭기에서 바이пас스 커패시턴스의 값이 감소될 때의 특성 변화로 맞는 것은?
- | | |
|------------------|------------------|
| ① 전압 이득이 감소된다. | ② 출력 임피던스가 감소된다. |
| ③ 입력 임피던스가 감소된다. | ④ DC 동작점이 변한다. |
- (6) 실험회로 1에 제시된 공통 이미터 증폭기의 전압 이득, 입력 임피던스 및 출력 임피던스는 얼마인가?



예비 보고 사항

- npn형 BJT의 소신호 등가회로에 대해서 설명하고, g_m 과 r_o 는 컬렉터 전류와 어떤 관계인지 유도 하시오.
- 실험회로 1([그림 6-8])에서 PSpice를 이용하여 R_{BB} 를 $10k\Omega$ 으로 고정하고, v_{sig} 에 6V의 DC 전압을 인가한 후, v_o 전압이 6V인 DC 전압이 나오는 RC 값을 구하시오.
- 실험회로 1에서 PSpice를 이용하여 전압 이득, 입력 임피던스 및 출력 임피던스를 구하시오.
- 실험회로 1에 제시된 공통 이미터 증폭기의 전압 이득, 입력 임피던스 및 출력 임피던스를 이론적으로 계산하고, PSpice 모의실험 결과와 비교하시오.
- 실험회로 1과 [실험 05]의 바이어스 회로를 결합한 실험회로 2([그림 5-7])에서 PSpice를 이용하여 i_B , i_C , i_E , v_B , v_C , v_E 를 구하고, 전압 이득을 구하시오.

m.e.m.o

→ 실험 06 실험 결과

[실험 절차]에 따라 [실험 결과]를 작성하시오.

1

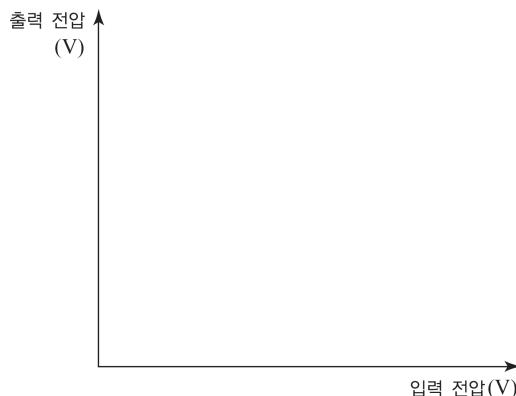
[표 6-1] 공통 이미터 증폭기의 DC 조건

R_C 값 (PSpice)	R_C 값 (측정)	V_{sig} 전압	V_B 전압	V_O 전압	I_B 전류	I_C 전류	I_E 전류	동작 영역

2

[표 6-2] 실험회로 1의 입력-출력 전달 특성 확인을 위한 측정 데이터

입력 전압(V_{BB})	출력 전압(v_O)	동작 영역	입력 전압(V_{BB})	출력 전압(v_O)	동작 영역
0V			6.5V		
3V			7V		
3.5V			7.5V		
4V			8V		
4.5V			8.5V		
5V			9V		
5.5V			12V		
6V					



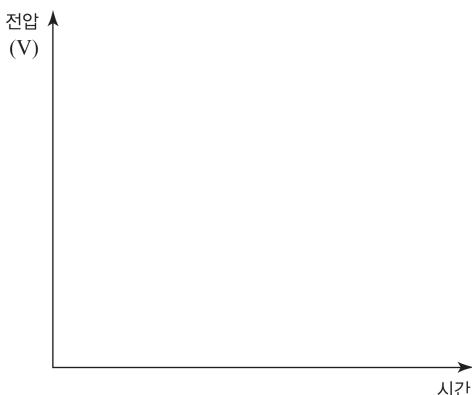
[그림 6-12] 공통 이미터 증폭기의 입력-출력 전달 특성 곡선

3

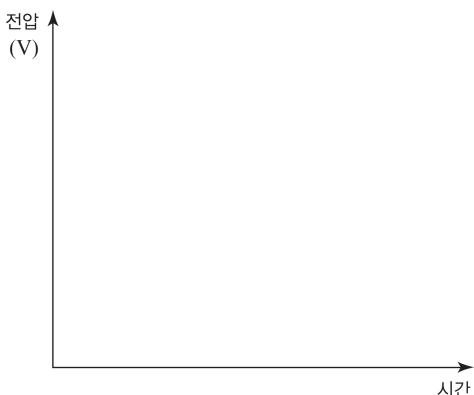
[표 6-3] 실험회로 1의 소신호 파라미터

4

[표 6-4] 공통 이미터 증폭기의 전압 이득을 계산하기 위한 측정 데이터



(a) 입력 파형



(b) 출력 파형

[그림 6-13] 실험회로 1의 입력 파형과 출력 파형



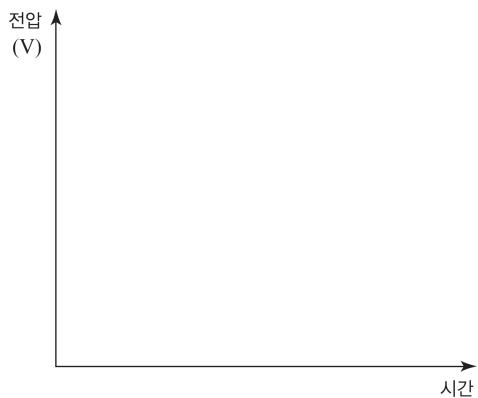
25

5

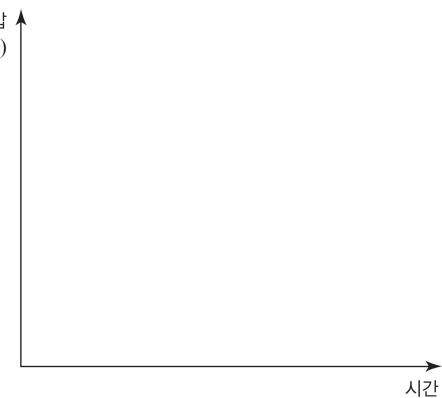
[표 6-5] 공통 이미터 증폭기의 입력 저항과 출력 저항

6

[표 6-6] 실험회로 2의 전압 이득을 계산하기 위한 측정 데이터



(a) 입력 파형



(b) 출력 파형

[그림 6-14] 실험회로 2의 입력 파형과 출력 파형

7

[표 6-7] 실험회로 2의 입력 저항과 출력 저항