

PART

7

트랜지스터의 특성

목적 : 트랜지스터의 특성을 이해한다.

트랜지스터의 작동을 이해한다.

작동점의 역할을 이해한다.

7.1 트랜지스터의 특성

7.2 트랜지스터 물성

7.3 트랜지스터 특성 곡선

7.4 작동점 (Q point)

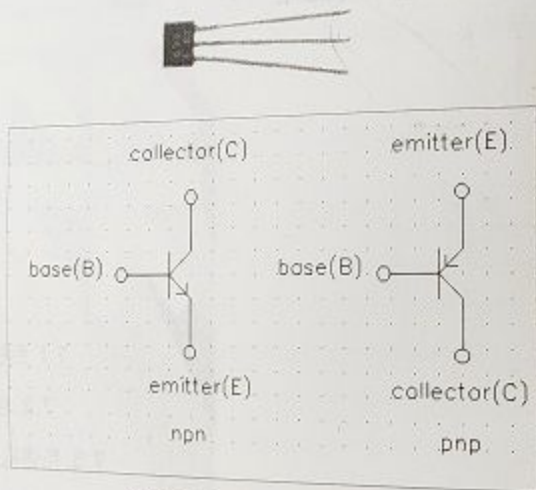
7.5 증폭 모드

7.6 스위칭 회로

1 트랜지스터의 특성

트랜지스터는 3단자가 있는 소자로 pn 접합 다이오드 두 개를 붙여 놓은 형태이다. pn 접합소자를 어떻게 붙이느냐에 따라 npn형, pnp형으로 나뉜다. 그림 7.1에서 트랜지스터의 심벌과 구조가 나타나 있다. 각 단자의 이름은 전자를 방출하는 단자인 에미터(E), 전자를 모으는 단자인 컬렉터(C), 그리고 전자의 흐름을 조절하는 베이스(B) 단자로 구성되어 있다.

npn 트랜지스터의 예를 들어 전류의 흐름을 살펴보면 다음과 같다.
먼저 베이스에 흐르는 전류의 양은 증폭되어 컬렉터의 전류로 나타나므로 베이스의 전류를 조절하므로 컬렉터에 흐르는 전류의 양을 조절할 수 있는 **증폭 작용**이 있다. 또한 베이스의 전류를 흐르지 않게 하므로 컬렉터 전류도 흐르지 않게 되어 개회로가 된다. 한 면에 무시할 정도의 작은 베이스 전류를 흐르게 하여 컬렉터의 전류가 그대로 에미터의 전류와 같도록 하여 폐회로를 이루는 **스위칭 작용**을 한다.



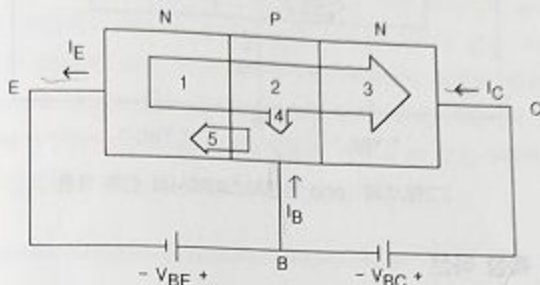
[그림 7.1] 트랜지스터의 심벌

7.2 트랜지스터 물성

일반적으로 트랜지스터의 전류를 형성하는 요소는 크게 두 가지이다. 하나는 diffusion 전류이고 다른 하나는 drift 전류이다. BJT(Bipolar Junction Transistor)에서는 drift 전류가 열에 의해 소수 캐리어가 생성되므로 나타나는데 diffusion 전류에 비해 아주 작으므로 보통 무시된다. 따라서 BJT 트랜지스터에서의 전류의 흐름은 diffusion 전류가 다수라 할 수 있다. 예를 들어 npn 트랜지스터의 diffusion 전류의 흐름을 살펴보면 다음과 같다. 그림 7.2에

나타난 것처럼 전류의 흐름은 크게 두 가지 요소에 의해 결정된다. 따라서 에미터의 전류는 베이스와 컬렉터의 전류의 합으로 나타난다.

$$I_E = I_C + I_B \quad (7.1)$$



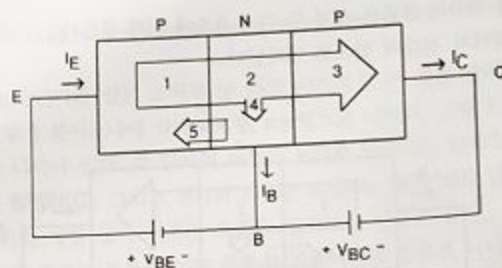
[그림 7.2] npn 트랜지스터에서의 전류 흐름

Bipolar 트랜지스터는 Bipolar란 이름에서 알 수 있듯이 전자와 정공 모두에 의해 전류의 흐름이 영향을 받는다. npn 트랜지스터의 경우에는 전자의 흐름에 의해 전류의 흐름이 결정된다.

그림 7.2에서 보면 전자의 흐름과 전류의 방향은 반대로 되어 있다.

- ① n형 반도체의 다수 캐리어인 전자는 에미터의 음전압의 밀치는 힘에 의해 베이스로 인젝션된다.
- ② 베이스로 인젝션된 전자들 대부분은 diffusion에 의해 공핍층의 경계면으로 간다.
- ③ 이 때 컬렉터의 단자는 양의 전압이 걸려있어 전자들을 당겨 컬렉터 전류를 형성한다.
- ④ 인젝션된 전자들 중 소수는 베이스의 다수 캐리어인 정공과 재결합하게 된다.
- ⑤ 베이스의 정공은 에미터로 인젝션되어 베이스 전류를 형성한다.
- ⑥ 또한 베이스에서 재결합에 의해 소멸된 정공들을 메우기 위해 외부로부터 정공이 공급되어야 하는데 이는 베이스 전류의 또 한 부분을 이룬다.

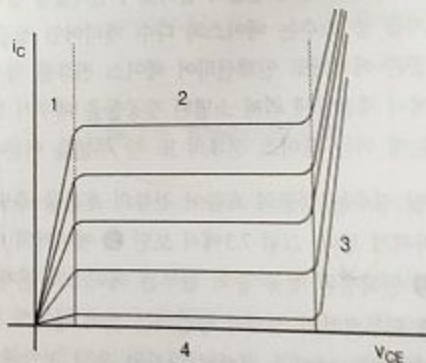
pnp 트랜지스터일 경우는 정공의 흐름이 전류의 흐름을 주도하므로 npn에서의 전자의 역할이 정공으로 바뀌게 된다. 그림 7.3에서 보면 ① 에미터의 다수 캐리어인 정공이 베이스로 인젝션되고 ② 인젝션된 정공 중의 일부는 베이스의 전자와 재결합을 이루어 ③ 그 빈자리 메우기 위해 외부로부터 전자가 공급되는 것이 베이스 전류를 이루게 된다. ②, ③ 대부분의 정공은 컬렉터로 넘어가 컬렉터 단자의 음의 전압에 의해 끌려 컬렉터 전류를 형성한다. 마찬가지로 베이스의 전류는 에미터로 인젝션되어 베이스 전류를 형성한다.



[그림 7.3] pnp 트랜지스터에서의 전류 흐름

7.3 트랜지스터 특성 곡선

트랜지스터 특성 곡선은 컬렉터-에미터 전압 v_{CE} 와 컬렉터 전류 i_C 와의 관계를 나타낸 그래프이다. 트랜지스터 모드는 작동영역에 따라 크게 활성화 모드(active:2), 포화 모드(saturation:1), 컷 오프(cut-off:4) 모드, breakdown(3) 으로 나뉜다. 활성화 모드는 증폭 작용을 나타내는 것이고 포화 모드는 닫힌 회로를 컷오프 모드는 개회로를 나타내므로 스위칭 작용을 한다. 그림 7.4에서 보면 각 영역이 나타나 있다. x축 가까이는 $I_B = 0$ 이므로 $I_C = 0$ 인 트랜지스터가 꺼진 상태인 컷오프 모드를 나타내고 $v_{CE(sat)}$ 전압까지의 y축 $I_C = I_E$ 이므로 포화모드 그리고 x축과 y축을 제외한 나머지 영역은 활성화 모드 즉 $I_C = \beta I_B$ 를 나타내어 증폭 작용을 한다. 트랜지스터는 비선형이므로 특성 곡선이 비선형적으로 나타난다.

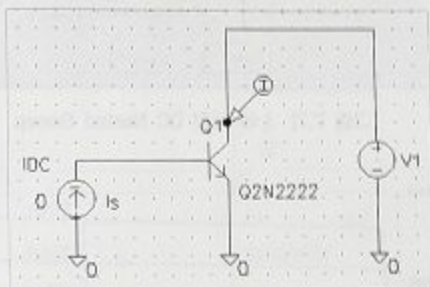


[그림 7.4] 트랜지스터의 특성 곡선

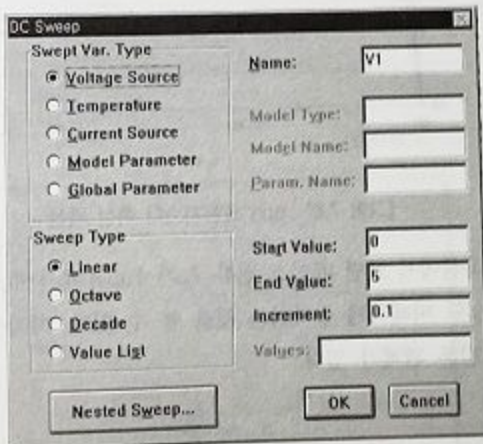
PSpice 예제 7.1

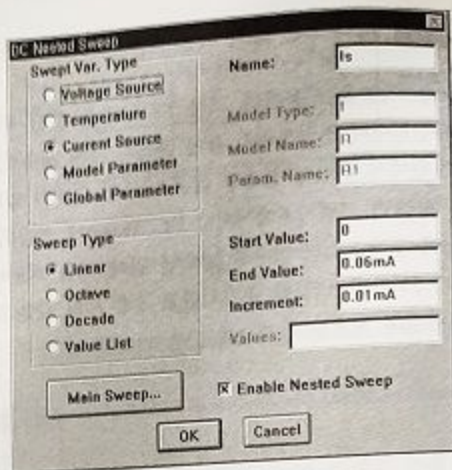
npn 트랜지스터 특성 곡선

PSpice의 DC Sweep 기능을 사용하면 그림 7.8과 같은 응답 곡선을 그릴 수 있다. DC Sweep 기능은 전류전원이나 전압전원의 값이 바뀔 때 따른 계속적인 응답을 나타내도록 해 준다. 따라서 각 전원에서 화면에 설정한 값은 아무런 의미가 없다. 이때 x축을 전압으로 y축을 전류값으로 하려면 그림 7.6에서처럼 DC Sweep에 전압의 변수들을 넣고 DC Nested Sweep에 전류소스의 변수를 넣으면 된다. 다음 회로에서 전류 프로브는 전압 V_1 의 값을 0V에서 5V까지 0.1V씩 증가시켰고 전류 I_s 의 값을 0에서 60uA까지 10uA씩 증가시켰을 때 컬렉터에 흐르는 전류 I 의 값을 나타낸다.

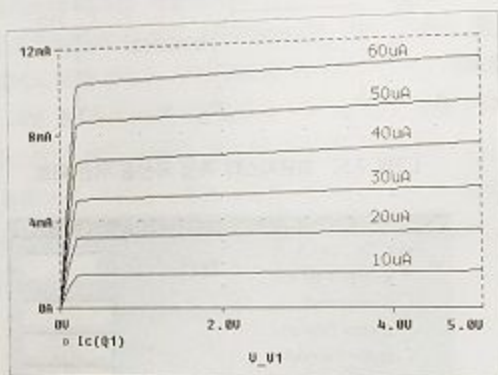


[그림 7.5] 트랜지스터 특성 곡선을 위한 회로

[그림 7.6] V_1 에 대한 DC Sweep



[그림 7.7] I_s 에 대한 DC Nested Sweep



[그림 7.8] npn 트랜지스터 특성 곡선

그림 7.8의 특성 곡선에서 보면 베이스 전류 I_B 가 $10\mu A$ 에서 $60\mu A$ 로 증가함에 따라 y축의 컬렉터 전류 I_C 도 비례하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 컬렉터와 베이스 전류 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} \quad (7.2)$$

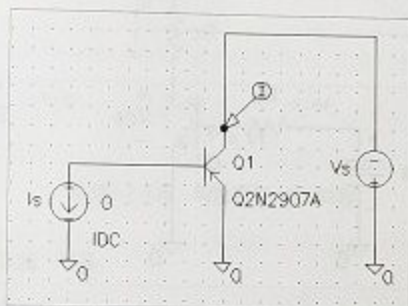
여기서 β_{dc} 를 DC 전류 증폭 이득이라 한다. 또한 β_{ac} 값은 소신호 전류 증폭 이득이라 하고 다음과 같이 변화율로 정의한다.

$$\beta_{ac} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{I_{C_2} - I_{C_1}}{I_{B_2} - I_{B_1}} \quad (7.3)$$

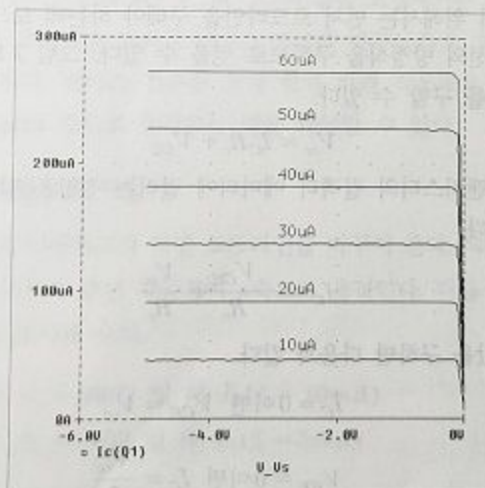
따라서 β_{dc} 와 β_{ac} 의 값은 서로 다르게 나타난다. 하지만 편의상 하나의 β 로 간주하여 같다고 가정하는 경우가 있다.

PSpice 예제 7.2 pnp 트랜지스터 특성 곡선

마찬가지로 pnp 트랜지스터의 경우도 예제 7.1에서처럼 DC Sweep에 전압의 변수 V_s 를 넣고 DC Nested Sweep에 전류전원의 변수 I_s 를 넣으면 된다. 다음 회로에서 전류 프로브는 전압의 값을 0V에서 -5V까지 -0.1V씩 증가시켰고 전류의 값을 0에서 $60\mu A$ 까지 $10\mu A$ 씩 감소시켰을 때 컬렉터에 흐르는 전류의 값을 나타낸다.

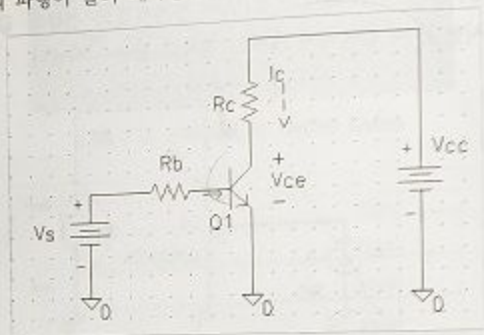


[그림 7.9] pnp 트랜지스터



[그림 7.10] pnp 트랜지스터 특성 곡선

트랜지스터의 특성 곡선에서 나타난 것처럼 전원전류의 값, 즉 베이스 전류, I_B 의 값에 따라 컬렉터의 전류 I_C 의 값이 비례하게 증폭되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 그렇다면 적당한 베이스 전류의 값은 무엇일까? 베이스 전류의 값이 너무 작거나 크면 어떻게 될까? 이 질문의 답이 바로 작동점의 설정이다. 트랜지스터에 있어서 작동점의 설정은 매우 중요하다. 작동점은 입력의 DC 바이어스 회로에 의한 베이스 전류에 의해 결정되는데 이는 입력의 소신호가 출력될 때 파형의 형태에 중요한 영향을 미친다. 작동점을 잘못 선정하면 출력되는 신호의 파형이 잘려 왜곡된다.



[그림 7.11] 작동점을 구하기 위한 트랜지스터 회로

작동점을 구하기 위해서는 먼저 로드라인을 구해야 하는데 로드라인은 다음과 같이 컬렉터 전류 i_C 의 선의 방정식을 구하므로 얻을 수 있다. 그림 7.11의 회로로부터 KVL을 적용하면 식 (7.4)를 구할 수 있다.

$$V_{cc} = I_C R_c + V_{CE} \quad (7.4)$$

여기서 v_{CE} 는 트랜지스터의 컬렉터 에미터에 걸리는 전압을 말한다. 위 식에서 컬렉터 전류는 다음과 같다.

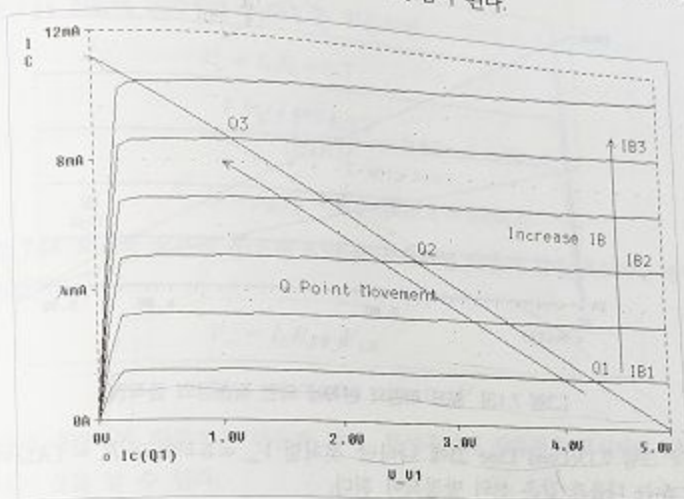
$$I_C = -\frac{V_{CE}}{R_c} + \frac{V_{cc}}{R_c} \quad (7.5)$$

그래프의 절편값을 구하면 다음과 같다.

$$I_C = 0 \text{ 이면 } V_{CE} = V_{cc}$$

$$V_{CE} = 0 \text{ 이면 } I_C = \frac{V_{cc}}{R_c}$$

그림 7.12의 트랜지스터 특성 곡선 그래프에 주어진 베이스 전류에 해당하는 특성 곡선에 로드라인을 그렸을 때 만나는 한 점이 바로 작동점이 된다.



[그림 7.12] 작동점의 y축 이동

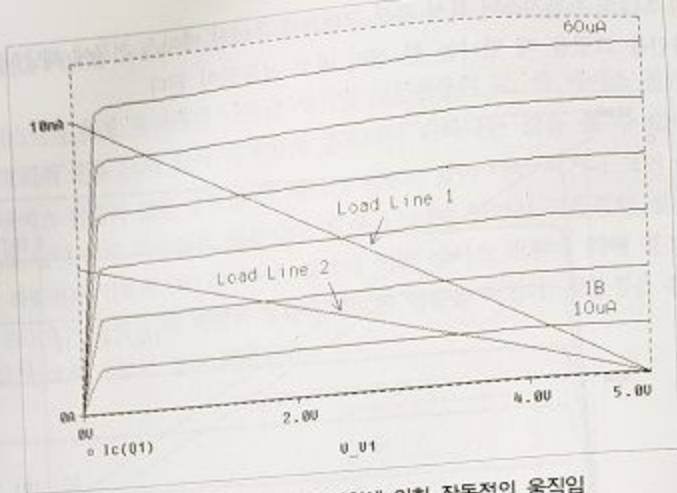
7.4.1 작동점을 y축으로 이동

로드라인 선상에서 작동점을 y축으로 이동하기 위해서는 베이스 전류를 증가시키면 된다. 즉, 로드선을 고정시키기 위해서는 V_{cc} 와 R_C 의 값을 고정시키는 것과 같다. 트랜지스터의 특성 곡선으로부터 로드선을 그리고 베이스 전류를 바꾸어주면 그림 7.12처럼 작동점이 y축으로 움직이게 된다. 베이스 전류를 크게 함에 따라 작동점은 cut-off 모드에서 active 모드를 거쳐 saturation 모드로 움직이는 것을 확인할 수 있다.

7.4.2 작동점을 x축으로 이동

작동점을 x축으로 이동하고자 하면 로드라인을 바꾸어 준다. 따라서 V_{cc} 와 I_B 를 고정하고 R_C 의 값을 바꾸어 주면 작동점이 x축으로 움직인다. 다음 두 가지 예를 고려하여 작동점의 움직임을 조사해 보자.

- ① $V_{cc} = 5V$ 이고 $R_C = 500\Omega$ 일 때 $L_2(I_C = 10mA)$
- ② $V_{cc} = 5V$ 이고 $R_C = 1K\Omega$ 일 때 $L_1(I_C = 5mA)$

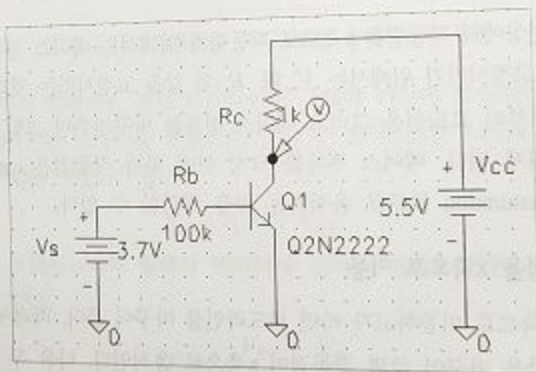


[그림 7.13] 로드 라인의 변화에 의한 작동점의 움직임

만약 그림 7.13(Load Line 2)에 나타난 것처럼 $V_{ce} = 5V$ 이고 $R_c = 1K\Omega$ 이면 컬렉터 전류 I_C 는 다음과 같은 선의 방정식이 된다.

$$I_C = -10^{-3} V_{CE} + 0.005 (A)$$

그림 7.14의 회로에서 작동점을 계산해 보자.



[그림 7.14] 트랜지스터 회로

먼저 한 트랜지스터의 작동점을 구하기 위해서는 그 트랜지스터 고유의 전류 증폭 이득 값 β 을 알아야 한다. $\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B}$ 로 직류 전류 증폭 이득값이고 $\beta_{ac} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ 로 교류 전류 증폭 이득 값인데 위의 특성곡선 그래프를 통하여 대략적인 교류 증폭 이득을 구해보자.

$$\beta_{ac} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{1.7mA}{10\mu A} = 170$$

그림 7.14 회로의 왼쪽루프에 KVL을 적용하면

$$V_s = I_B R_b + 0.7$$

$$I_B = \frac{3.7V - 0.7V}{100K\Omega} = 0.03mA = 30\mu A$$

$$I_C = \beta_{ac} I_B = 170 \cdot 30\mu A = 5.1mA$$

그림 7.14 회로의 오른쪽 루프에 KVL을 적용하면 다음과 같은 로드라인 방정식을 구할 수 있다.

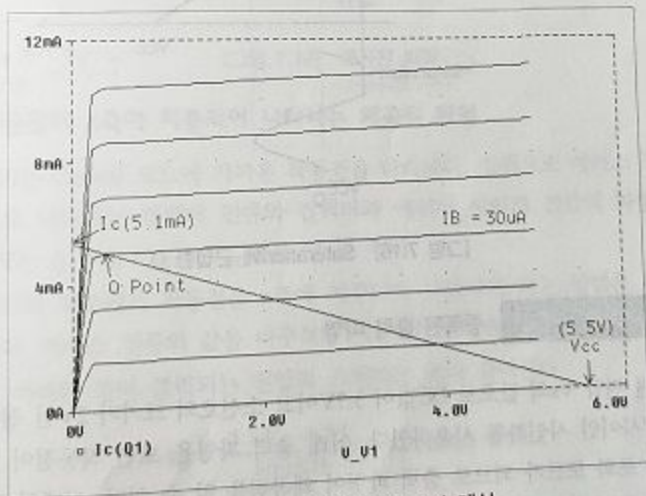
$$V_{cc} = I_C R_c + V_{CE}$$

$$V_{CE} = 5.5 - 5.1 \cdot 1 = 0.4V$$

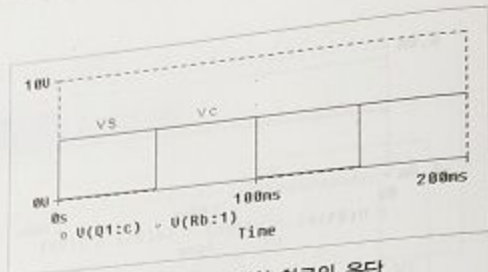
따라서 대략적인 작동점은 다음과 같다. 특성곡선에 작동점을 표시하면 y축에 가까이 나타나는 것을 알 수 있다.

$$Q(I_C, V_{CE}) = (5.1mA, 0.4V)$$

이처럼 작동점이 y축에 가까이 있을 때 출력에 미치는 영향은 어떠한가?



[그림 7.15] 작동점 (Q point) 계산



[그림 7.32] 스위칭 회로의 응답

실험 9

트랜지스터 특성 곡선

1. PSpice 예제

① 그림 7.8의 npn 트랜지스터의 특성곡선을 구하시오

② 그림 7.22에서 $V_{cc} = 10V$, $R_b = 100K\Omega$, $R_c = 220\Omega$ 일 때 출력 파형을 그리시오

2. 트랜지스터로 실험할 경우에는 먼저 트랜지스터의 베이스와 컬렉터 그리고 에미터 핀을 먼저 확인해야 한다. 실험에 주어진 트랜지스터의 에미터, 컬렉터, 베이스를 확인하고 그리시오

3. 특성 곡선의 Y축 그리기

그림 7.11의 회로에서 $V_{cc} = 10V$, $R_b = 100K\Omega$ 이고 $R_c = 220\Omega$ 일 때 다음 회로를 구성하시오

① 베이스 전류 $i_B = 20\mu A$ 가 되도록 V_s 의 값을 구하고 $Q(i_B, v_{CE})$ 점을 구하시오

② 베이스 전류 $i_B = 40\mu A$ 가 되도록 V_s 의 값을 구하고 $Q(i_B, v_{CE})$ 점을 구하시오

③ 베이스 전류 $i_B = 60\mu A$ 가 되도록 V_s 의 값을 구하고 $Q(i_B, v_{CE})$ 점을 구하시오

	전원 전압 V_S			컬렉터 전류 I_C			컬렉터에미터 전압, V_{CE}		
베이스 전류	계산	측정	오차	계산	측정	오차	계산	측정	오차
20 μA									
40 μA									
60 μA									

4. 특성곡선의 X축 그리기

그림 7.13의 회로에서 $R_b = 100K\Omega$ 이고 $R_c = 220\Omega$ 일 때 다음 회로를 구성하시오

① 베이스 전류 $i_B = 20\mu A$ 이고 $V_{cc} = 5V$ 일 때 $Q(i_B, v_{CE})$ 점을 구하시오

② 베이스 전류 $i_B = 40\mu A$ 이고 $V_{cc} = 5V$ 일 때 $Q(i_B, v_{CE})$ 점을 구하시오