

---

# BJT

## (Bipolar Junction Transistor)

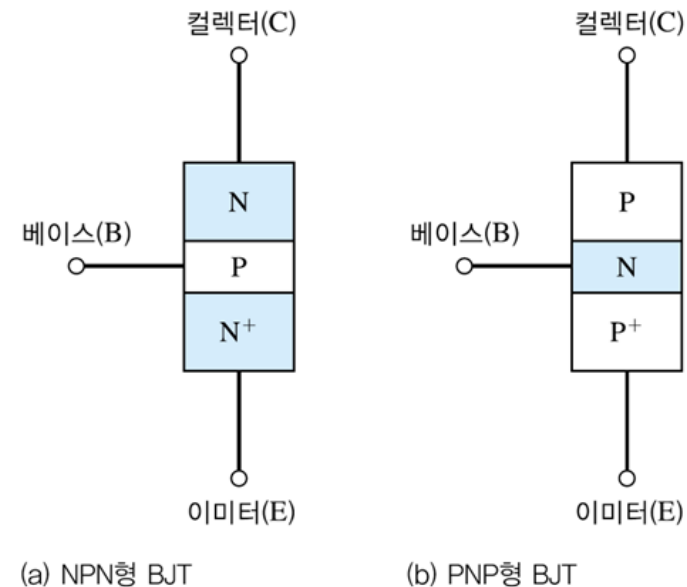
# BJT의 구조 및 동작모드

## □ BJT의 기본구조

- 바이폴라 접합 트랜지스터(BJT)는 N형과 P형으로 도핑된 3개의 반도체 영역과 이들에 의해 형성되는 두개의 PN 접합으로 구성(그림 3-1 참조)
- 각 도핑영역 : 이미터(Emitter), 베이스(Base), 컬렉터(Collector)라고 불림
- BJT는 이미터, 베이스, 컬렉터의 도핑 형태에 따라

➡ NPN형과 PNP형으로 구분

- NPN형 BJT는 그림(a)처럼 이미터가 N형, 베이스가 P형, 컬렉터가 N형으로 구성되고, PNP형 BJT는 그림 (b)처럼, 이미터가 P형, 베이스가 N형, 컬렉터가 P형으로 구성됨

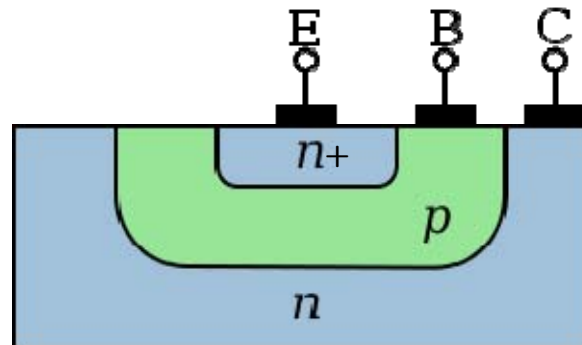


[그림 3-1] BJT 소자의 구조

# BJT의 구조 및 동작모드

- 실제 BJT는 그림3-1(a)와 같이 이미터 영역과 컬렉터 영역의 기하학적 구조가 다르며, 세 영역의 도핑 농도도 각기 다르게 만들어진다.
- 도핑농도: (이미터)>(베이스)>(컬렉터)
- 이미터: 전류운반 캐리어(전자 또는 정공)를 제공
- 컬렉터: 베이스 영역을 지나온 캐리어가 모이는 영역
- 베이스: 이미터에서 주입된 캐리어가 컬렉터로 도달하기 위해 지나가는 영역

BJT의 전류 증폭률을 크게 만들기 위해 폭이 매우 얇게 만들어진다.



Simplified cross section of a planar *NPN* bipolar junction transistor

<http://en.wikipedia.org/wiki/BJT>

# BJT의 구조 및 동작모드

## □ BJT 회로 기호와 전류, 전압의 극성

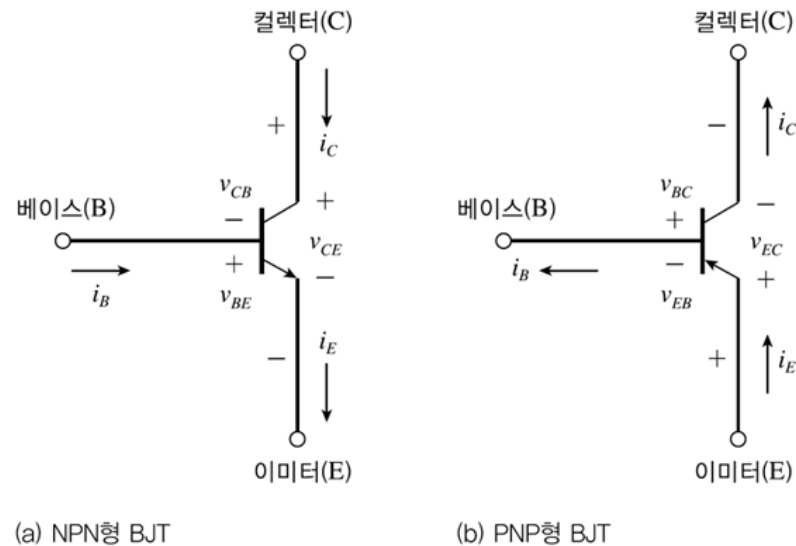
- NPN형 : 베이스가 P형이고 이미터가 N형

➡ 베이스에서 이미터로 향하는 화살표로 표시( [그림 3-2(a)] )

- NPN형 BJT에서 각 단자에 흐르는 전류 : 베이스와 컬렉터 단자로 들어간 전류가 이미터로 나가는 동작(그림 참조)

- PNP형 : 베이스가 N형이고 이미터가 P형

➡ 이미터에서 베이스로 향하는 화살표로 표시 ([그림 3-2(b)])



[그림 3-2] BJT의 회로기호와 전류, 전압 표시

# BJT의 구조 및 동작모드

## □ BJT의 동작 모드

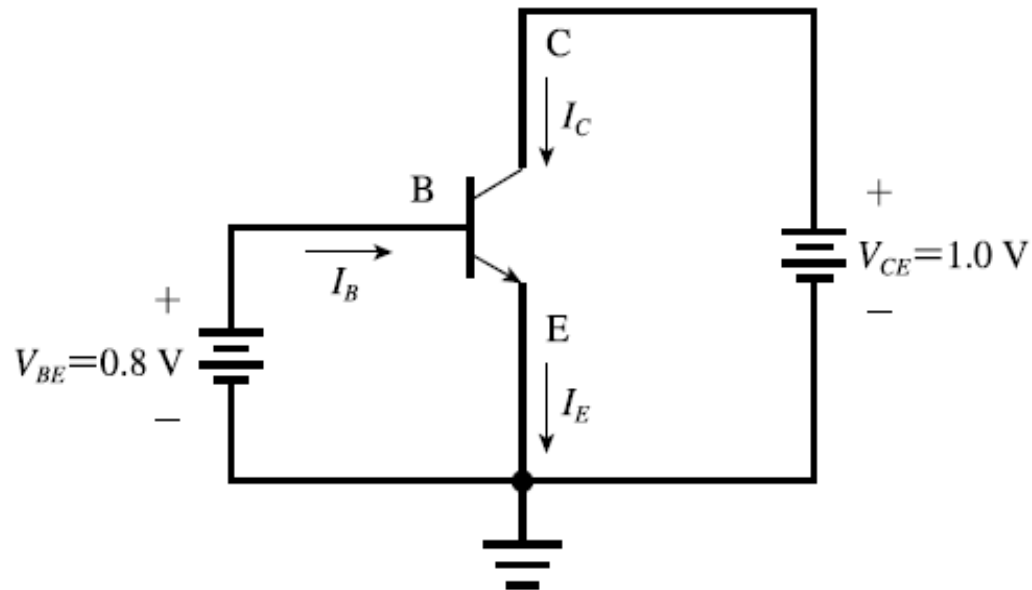
- NPN형과 PNP형이 반대임에 유의

동작모드	B-E 접합	B-C 접합	동작
차단모드	역방향 바이어스	역방향 바이어스	개방 스위치
활성모드	순방향 바이어스	역방향 바이어스	증폭기
포화모드	순방향 바이어스	순방향 바이어스	도통 스위치
역활성모드	역방향 바이어스	순방향 바이어스	-

# BJT의 구조 및 동작모드

## □ 활성모드

- B-E 접합은  $V_B > V_E \Rightarrow V_{BE} > 0$
- B-C 접합은  $V_B < V_C \Rightarrow V_{BC} < 0$
- 예를 들어  $V_{BE} = 0.8 \text{ V}$ ,  $V_{CE} = 1 \text{ V}$  일 때  
 $V_{CB} = V_C - V_B = 0.2 \text{ V}$ 되어 활성모드임



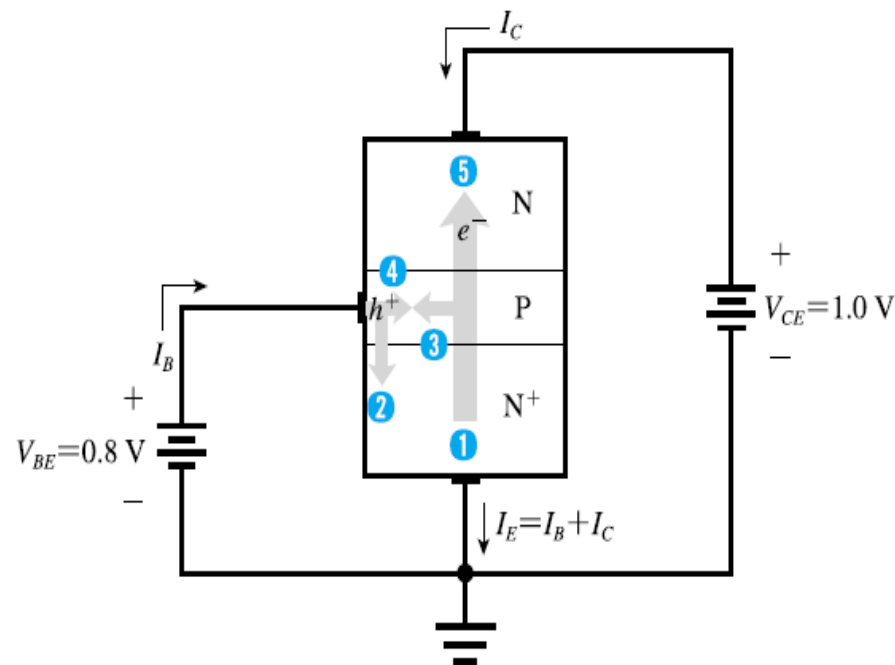
(a) 활성모드 바이어스

# BJT의 구조 및 동작모드

## □ 활성모드의 전류성분

B-E, B-C를 각각 PN 접합 다이오드로 생각할 수 있음.

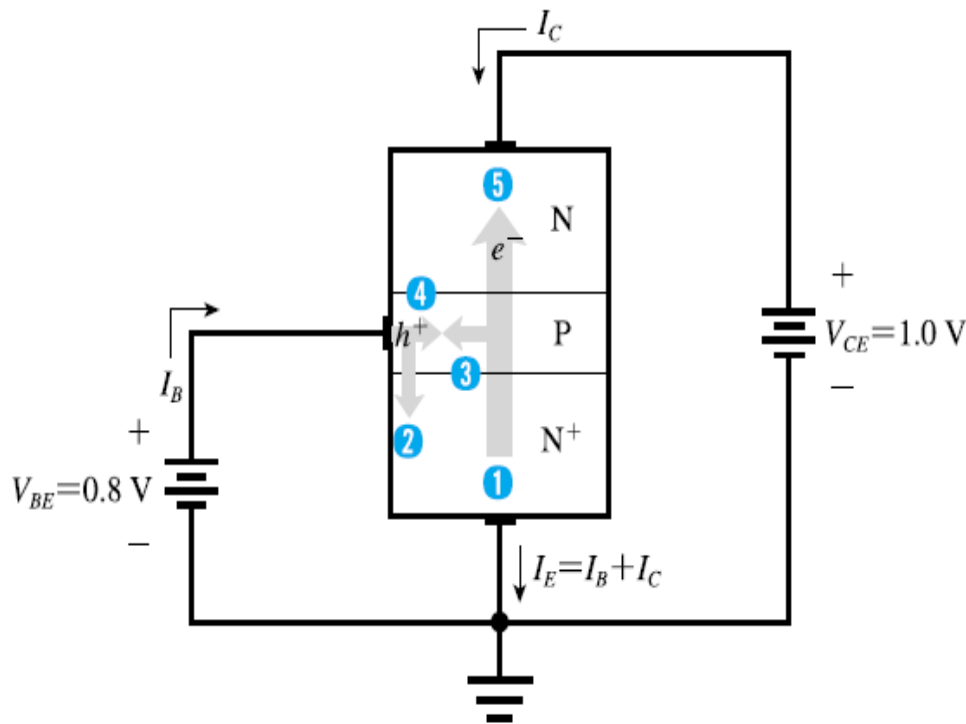
개별 PN 다이오드에 역방향 바이어스가 인가되면 전류가 흐르지 못하지만, **BJT에서 역방향 바이어스된 B-C 접합에는 이미터에서 주입된 전자가 베이스를 통과하여 컬렉터로 이동하므로 B-C 접합에 컬렉터 전류가 흐른다는 사실에 유의.**



(c) 활성모드에서 BJT의 전류성분

# BJT의 구조 및 동작모드

## □ 활성모드의 전류성분



(c) 활성모드에서 BJT의 전류성분

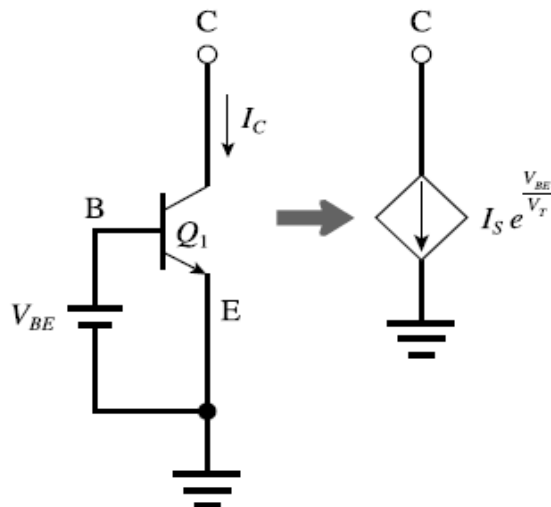
- B-E 접합에 순방향 바이어스 → 이미터 영역의 다수 캐리어인 전자가 베이스 영역으로 주입(①로 표시)
- 베이스 영역의 다수 캐리어인 정공은 이미터 영역으로 주입(②로 표시)
- **이미터 영역의 도핑농도가 베이스 영역의 도핑농도보다 월등히 높기 때문에, ①이 ②보다 월등히 많다.**
- 이미터에서 베이스로 주입된 전자 중 일부(③으로 표시)는 베이스 영역의 정공(④로 표시)과 재결합하여 소멸된다.
- 이미터에서 베이스로 주입된 전자 중, 베이스에서 재결합된 일부를 제외한 나머지(⑤로 표시)는 컬렉터로 넘어가 컬렉터 전류  $I_C$ 를 형성한다.



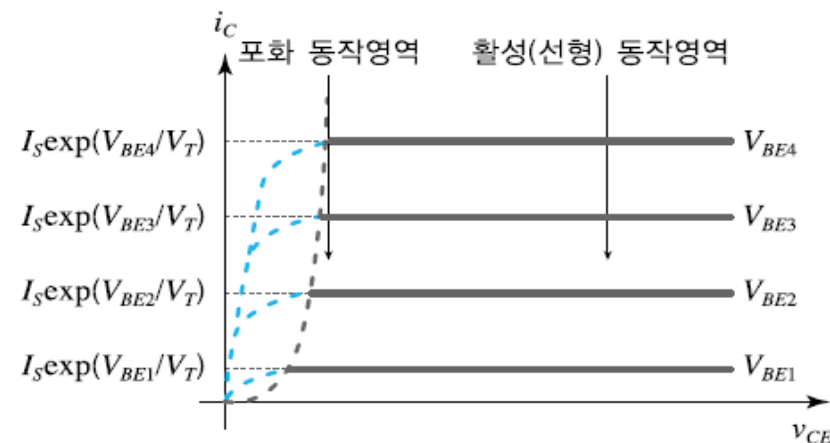
# BJT의 구조 및 동작모드

## □ 활성모드의 컬렉터 전류

- $I_C = I_S \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$
- $V_T$  는 상온(300°K)에서 일정한 값을 갖는 열전압이고,  $I_S$  는 역방향포화전류
- $V_{BE}$  에 의해 제어되는 전압제어 전류원 모델링가능
- 컬렉터 전류  $I_C$  는 컬렉터 전압  $V_C$  와 무관하다.



(a) 전압제어 전류원으로 동작하는 BJT



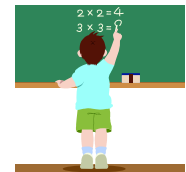
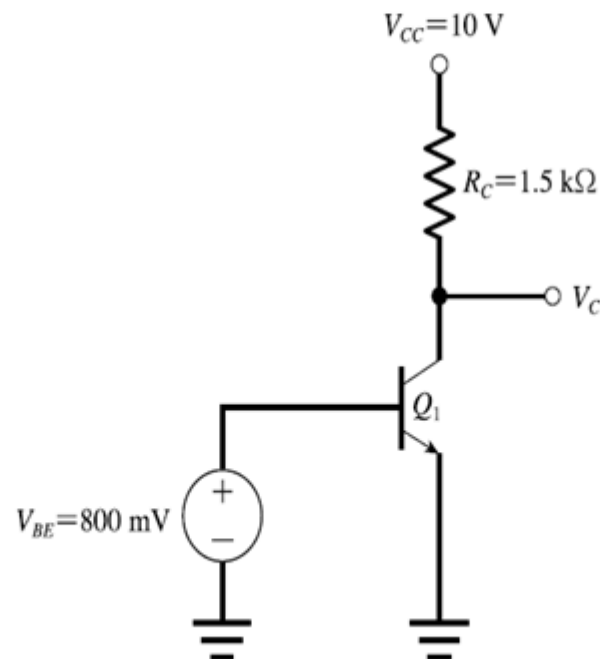
(b) 활성모드의 전류-전압 특성

# BJT의 구조 및 동작모드

## 예제 3-1

### □ 동작점 판별

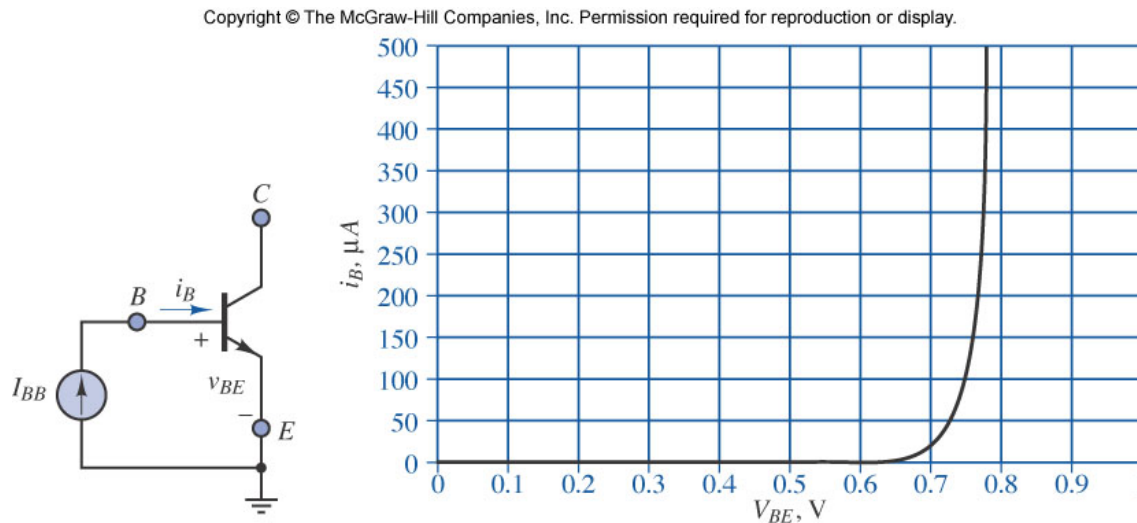
다음 회로의 컬렉터 전압을 구하고 BJT Q1이 활성모드에서 동작함을 확인하라.  
단,  $I_S = 2 \times 10^{-16} \text{ A}$  이다.



# BJT의 구조 및 동작모드

## □ 활성모드의 컬렉터 전류

- $I_C = I_S \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$
- $V_T$  는 상온(300~K)에서 일정한 값을 갖는 열전압이고,  $I_S$  는 역방향포화전류
- $V_{BE}$  에 의해 제어되는 전압제어 전류원 모델링가능



Rizzoni Ch.10, Fig. 10.8

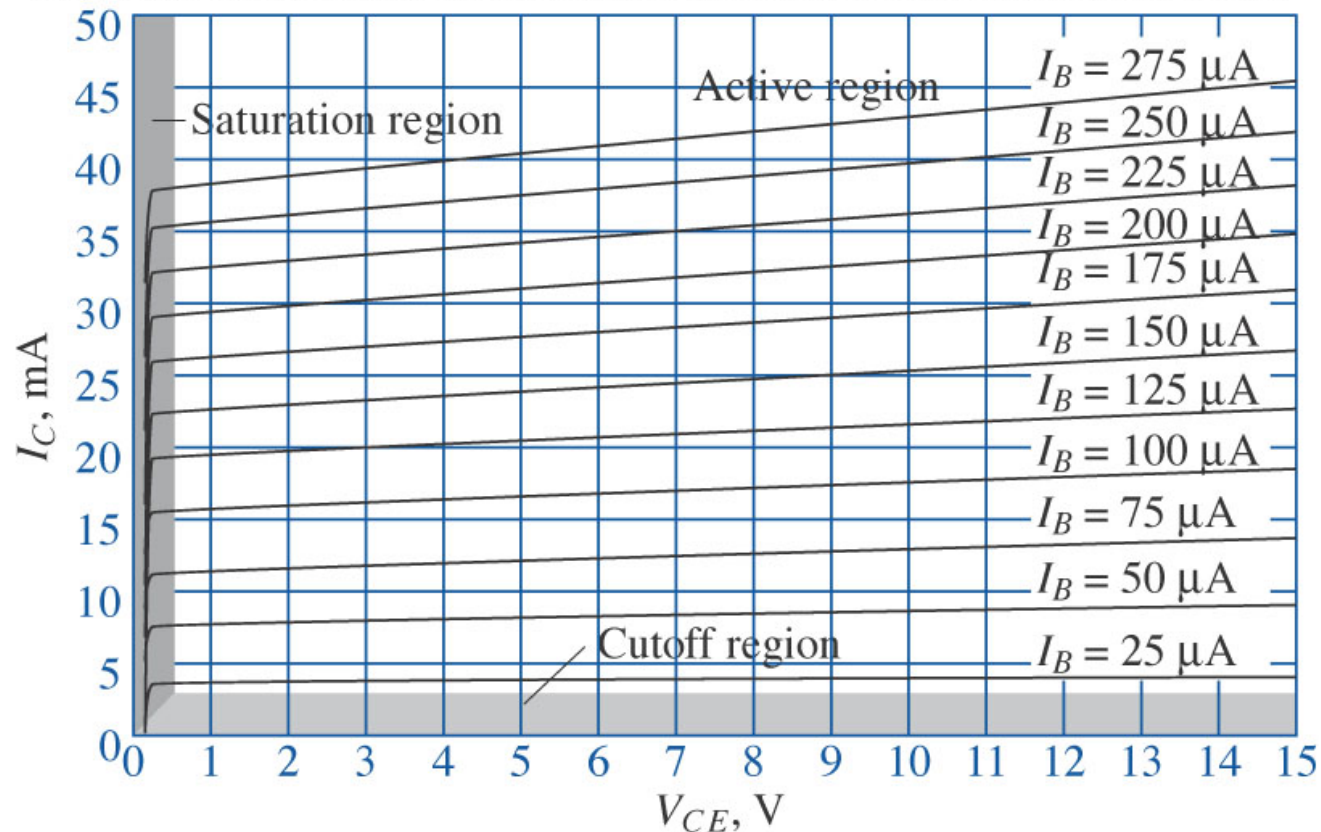
$$I_C = \beta_{DC} I_B$$

$\beta_{DC}$  : 공통 이미터 DC 전류이득

# BJT의 구조 및 동작모드

$$I_C = \beta_{DC} I_B$$

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



Rizzoni Ch.10, Fig. 10.9(b)

# BJT의 구조 및 동작모드

$$I_C = \beta_{DC} I_B$$

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_E = (1 + \beta_{DC}) I_B = (1 + \frac{1}{\beta_{DC}}) I_C$$

- 이미터 전류와 컬렉터 전류의 비

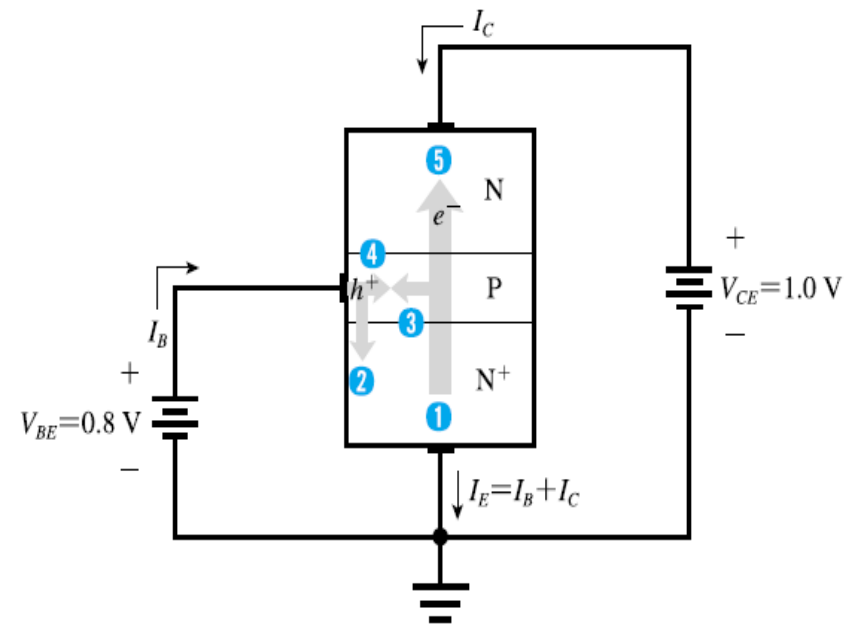
$$\alpha \equiv \frac{I_C}{I_E}$$

- $\alpha$ 는 공통 베이스 전류이득이며,  $\beta_{DC}$ 와의 관계는

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{\beta_{DC}}{1 + \beta_{DC}}$$

- $\alpha$ 가 1에 가까워지면  $\beta_{DC}$ 가 커짐

$$\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$



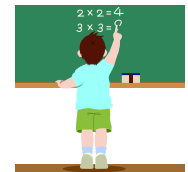
(c) 활성모드에서 BJT의 전류성분

# BJT의 구조 및 동작모드

## 예제 3-2

### □ 활성모드에서 베이스와 이미터 전류

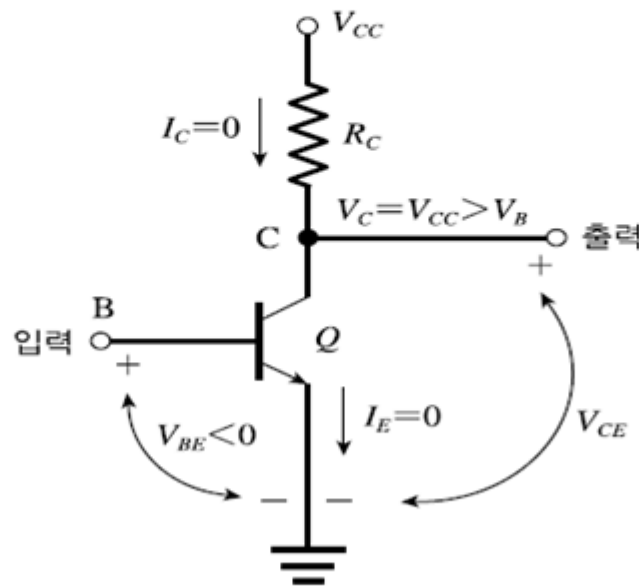
$I_S = 2 \times 10^{-17} \text{ A}$  인 BJT가  $V_{BE} = 850 \text{ mV}$ 로 순방향 활성 동작영역에서 바이어스 되어 있다. 전류이득  $\beta_{DC}$ 가 80~200의 범위에서 변할 때, 단자 전류들의 최대값과 최소값을 구하라.



# BJT의 구조 및 동작모드

## □ 차단모드

- $V_B < V_E$  가 되어야 함. 즉  $V_{BE} < 0$
- $I_C = 0$  이므로 컬렉터 전압은  $V_C = V_{CC} - I_C R_C = V_{CC}$  임. 즉  $V_B < V_{CC}$
- 개방형 스위치로 동작

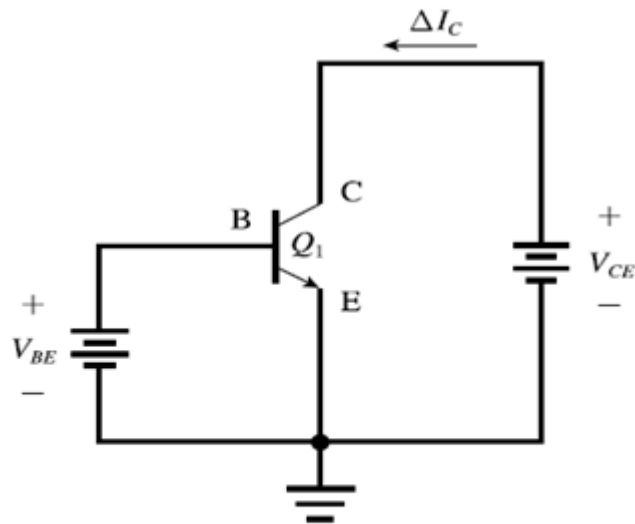


BJT의 차단모드 전압조건과 전류

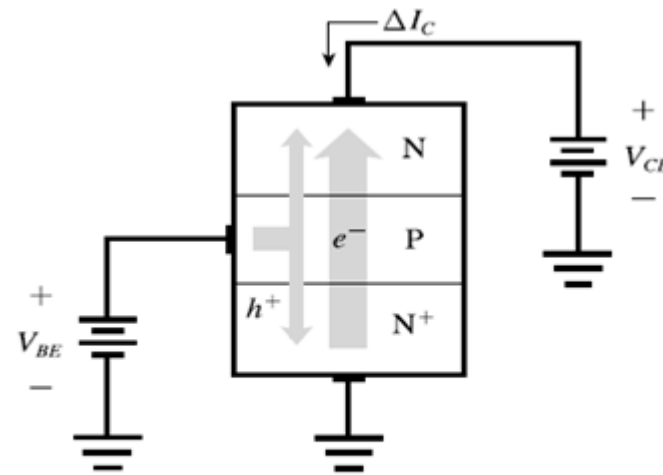
# BJT의 구조 및 동작모드

## □ 포화모드

- B-E접합과 B-C접합이 모두 순방향 바이어스인 경우
- $V_{CE} < V_{BE}$ 가 되는 순간, 즉  $V_{BC} > 0$  이 되는 순간 포화모드가 됨
- $\beta_{DC}$ 는 활성모드의  $\beta_{DC}$ 보다 매우 작아짐



(a) 포화모드의 전압조건

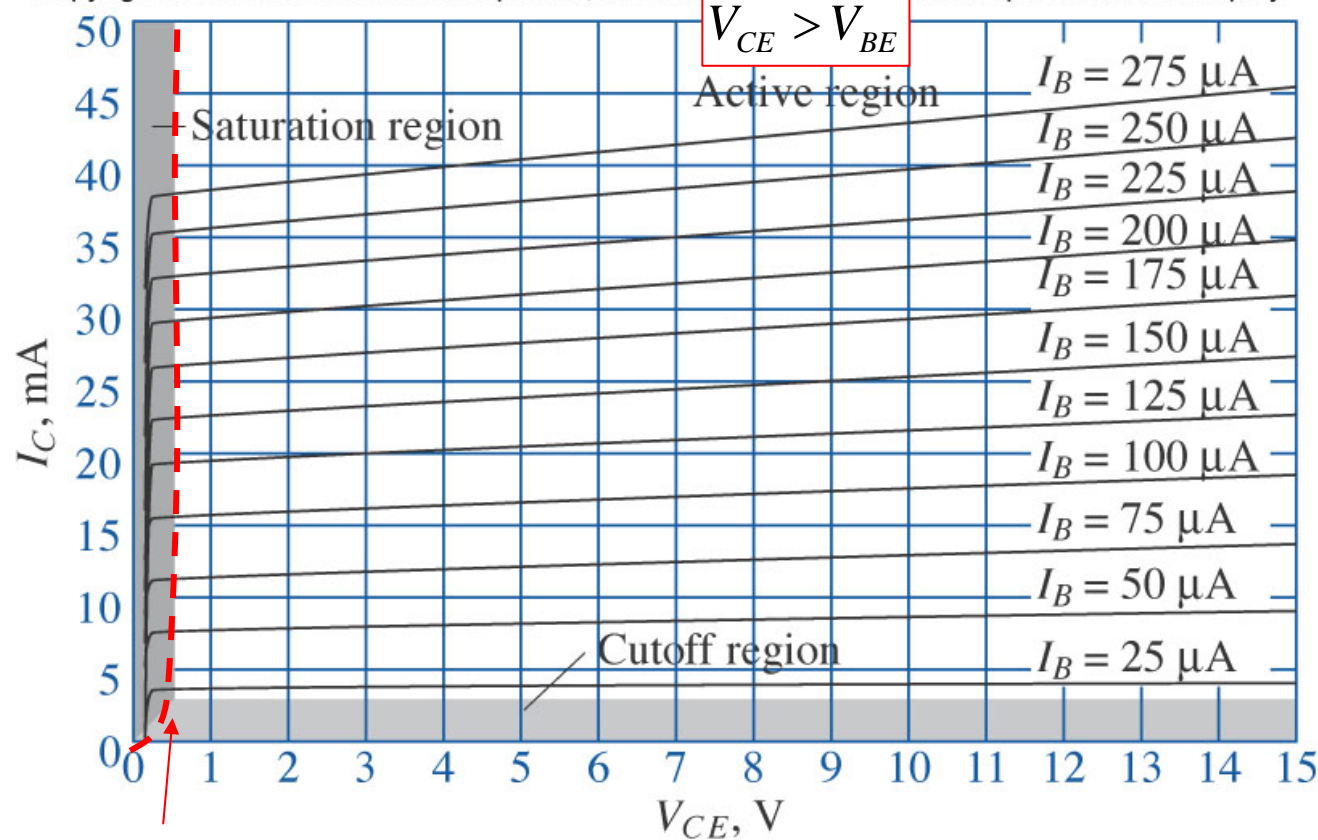


(b) 컬렉터로의 정공 흐름



# BJT의 구조 및 동작모드

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



$$I_C = \beta_{DC} I_B$$

$$V_{CE} < V_{BE}$$

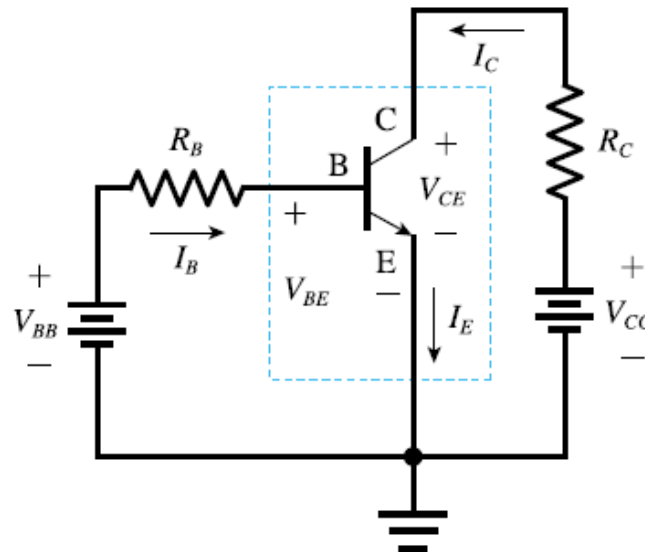
(b)

# BJT의 DC 해석과 등가모델

NPN형 BJT가 활성모드로 동작하려면  $V_{BE} > 0$ 와  $V_{BC} < 0$ 가 만족되어야 한다는 것은 앞 절에서 강조하였다.

그림3-10(a)는 NPN 트랜지스터의 이미터가 접지로 연결된 공통 이미터 회로이며, 가장 기본적인 증폭기 회로이다.

공통 이미터(common-emitter) 회로에 대해 DC 해석과 등가모델에 대해 알아보자.

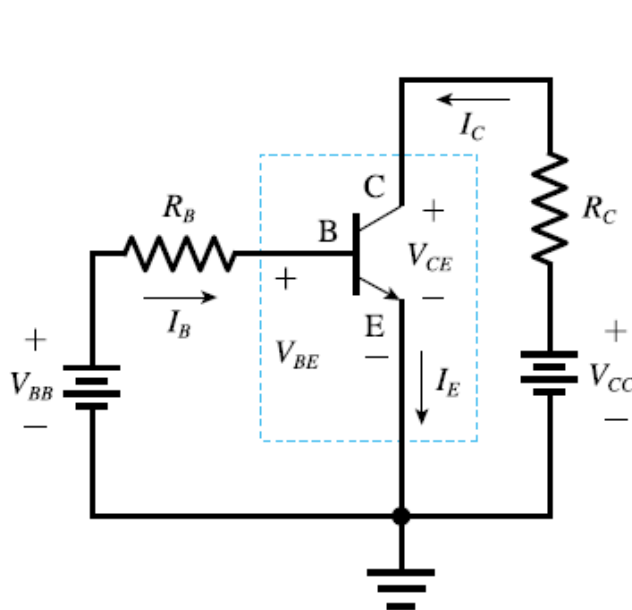


(a) NPN형 BJT 공통 이미터 회로

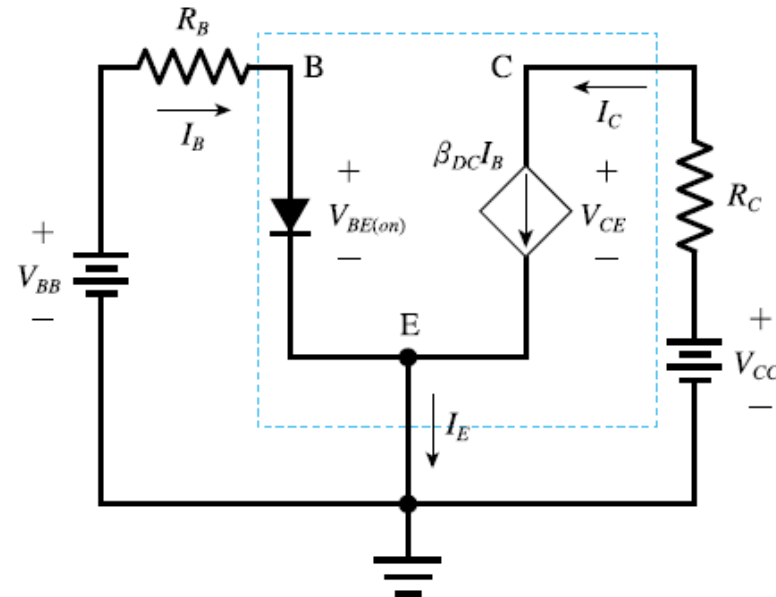
# BJT의 DC 해석과 등가모델

## □ DC 해석과 등가모델

- BJT가 활성모드로 동작할 때, 순방향 바이어스가 걸린 B-E 접합은 턴-온(turn-on) 전압  $V_{BE(on)}$ 을 갖는 PN 다이오드로 모델링할 수 있다.
- 활성모드의 컬렉터 전류는 베이스 전류의 함수인 제어전류원  $\beta_{DC}I_B$ 로 모델링할 수 있다.



(a) NPN형 BJT 공통 이미터 회로



(b) 변환된 DC 등가회로

# BJT의 DC 해석과 등가모델

$V_{BB} - V_{BE(on)} < 0 \rightarrow$  차단 모드  $I_B = 0$

$V_{BB} - V_{BE(on)} \geq 0 \rightarrow$  활성 모드

$$I_C = \beta_{DC} I_B \quad I_E = (1 + \beta_{DC}) I_B$$

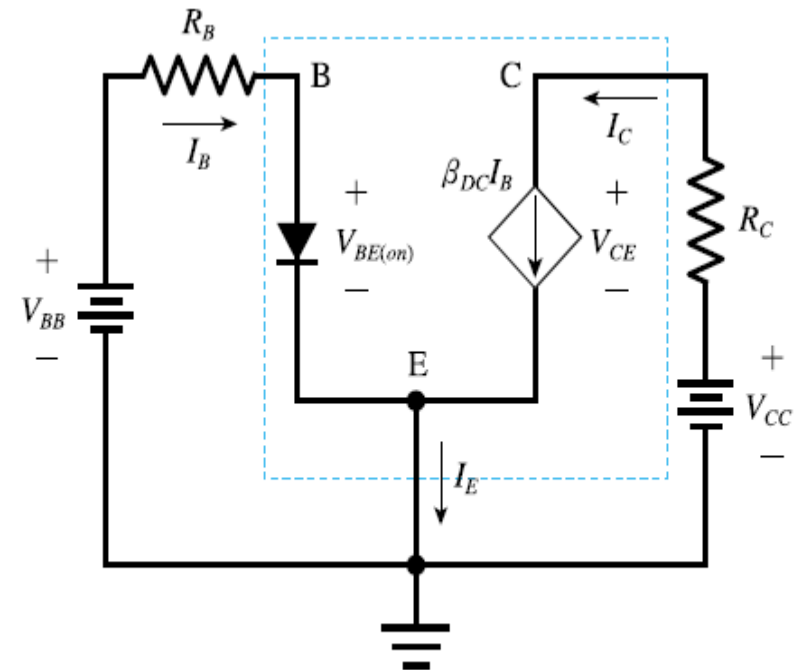
B-E 루프에 KVL을 적용하면,

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE(on)}}{R_B}$$

C-E 루프에 KVL을 적용하면,

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$



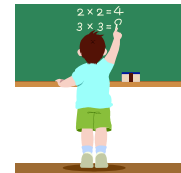
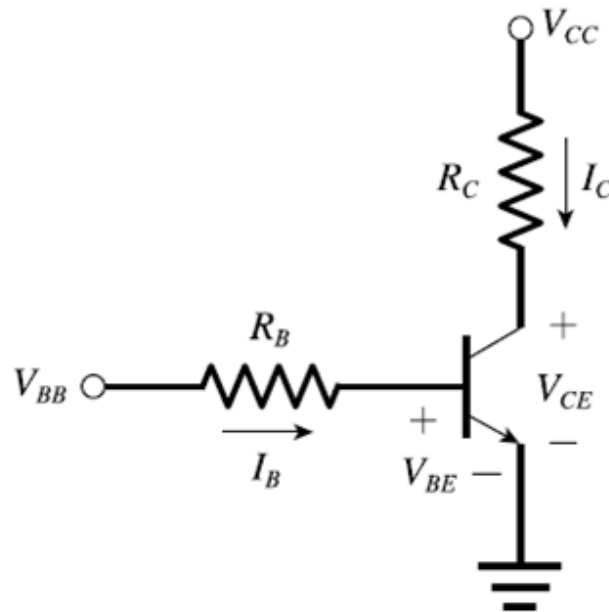
(b) 변환된 DC 등가회로

# BJT의 DC 해석과 등가모델

## 예제 3-3

### □ DC 해석과 등가모델

이 회로의 베이스 전류, 컬렉터 전류, 이미터 전류와, C-E 전압  $V_{CE}$ 를 구하라.  
사용되는 파라미터 값은 각각  $V_{BB}=3\text{ V}$ ,  $R_B=220\text{ k}\Omega$ ,  $R_C=3\text{ k}\Omega$ ,  $V_{CC}=10\text{ V}$ ,  
 $V_{BE(on)}=0.7\text{ V}$  그리고  $\beta_{DC}=150$  으로 가정하라.

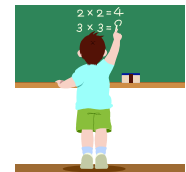


# BJT의 DC 해석과 등가모델

## 예제 3-4

### □ DC 해석과 등가모델

이 PNP형 BJT공통 이미터 회로에서  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $I_E$ 의 값을 구하고,  $V_{EC} = \frac{1}{2}V_{EE}$ 가 되도록  $R_C$ 의 값을 구하라. 단,  $V_{BB} = 2\text{ V}$ ,  $R_B = 800\text{ k}\Omega$ ,  $V_{EE} = 5\text{ V}$ ,  $V_{EB(on)} = 0.6\text{ V}$ ,  $\beta_{DC} = 120$ 으로 가정하라.



# BJT의 DC 해석과 등가모델

---

## □ 부하선과 동작점

부하선 (load line): 선형회로가 비선형 소자(트랜지스터)에 대해 나타낼 수 있는 부하의 모든 궤적을 나타내는 직선

트랜지스터의 동작점(Q점)이 부하선 상에 설정된다.

BJT의 경우

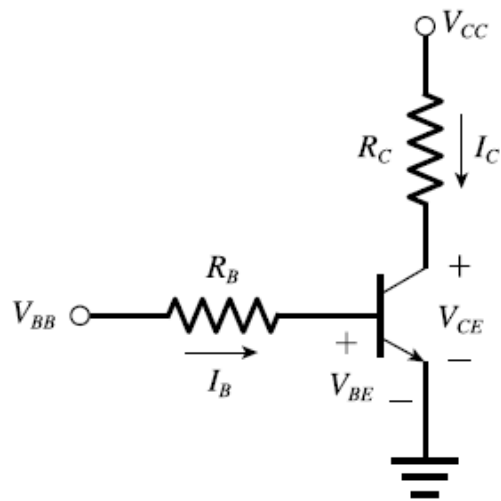
- B-E 특성에 대해 그려지는 입력 부하선
- E-C 특성에 대해 그려지는 출력 부하선

# BJT의 DC 해석과 등가모델

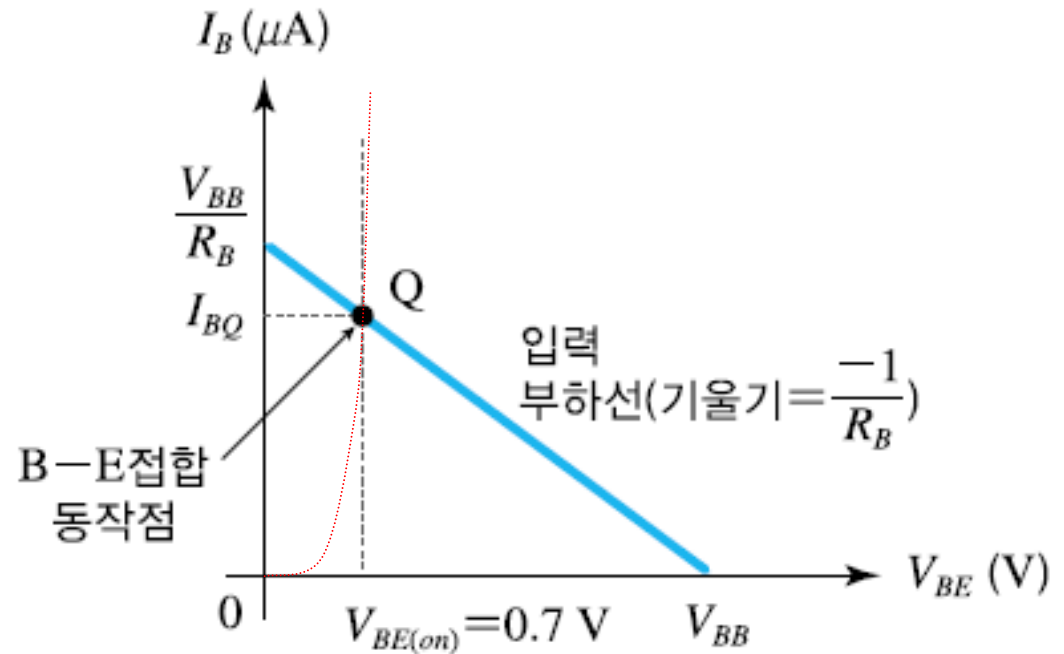
## □ 부하선과 동작점

### 입력 부하선

B-E 루프에 KVL을 적용하여 얻어지는 다음 수식에 의해 그려진다.



$$I_B = \frac{V_{BB}}{R_B} - \frac{V_{BE}}{R_B}$$



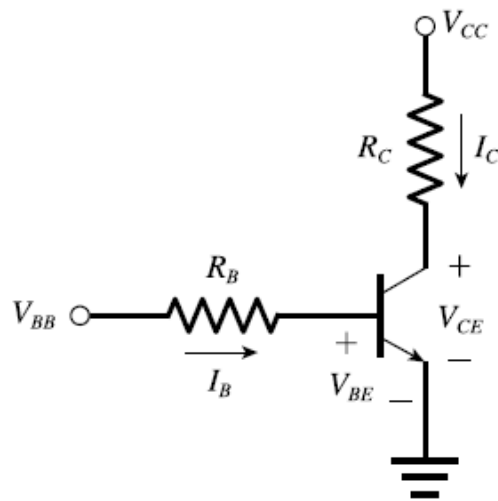


# BJT의 DC 해석과 등가모델

## □ 부하선과 동작점

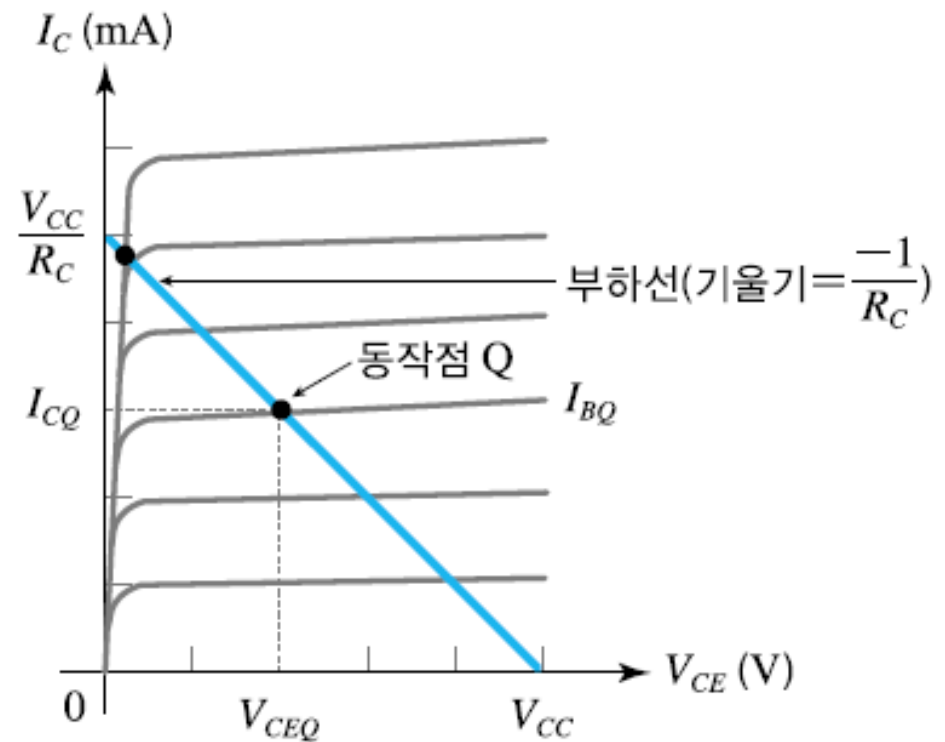
### 출력 부하선

E-C 루프에 KVL을 적용하여 얻어지는 다음 수식에 의해 그려진다.



$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} - \frac{V_{CE}}{R_C}$$

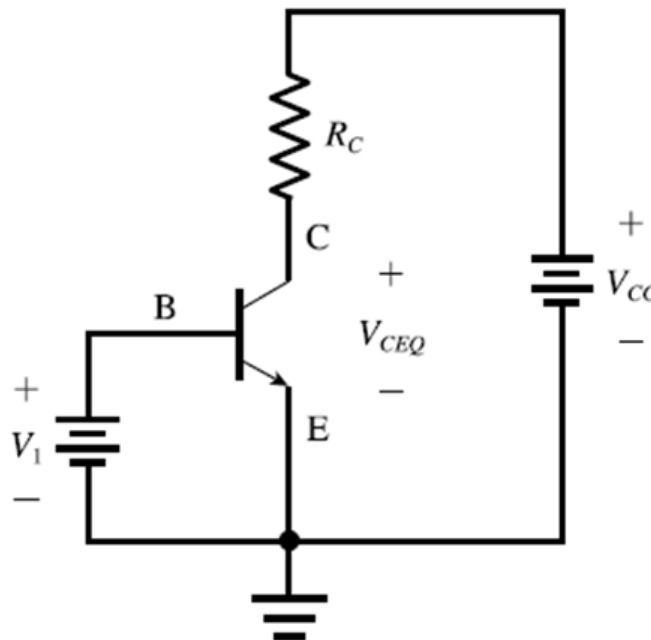


# BJT의 DC 해석과 등가모델

## 예제 3-5

### □ 부하선과 동작점

이 회로에서  $V_1 = 800 \text{ mV}$ ,  $R_C = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $V_{CC} = 15 \text{ V}$  일 때 동작점 전류와 전압을 구하고, 부하선을 그려 표시하라.  $\beta_{DC} = 100$ ,  $I_S = 10^{-16} \text{ A}$ ,  $V_T = 26 \text{ mV}$ 로 가정하라.



# BJT의 DC 해석과 등가모델

## 예제 3-5(풀이)

- ① 트랜지스터가 순방향 활성모드에서 바이어스 된다 가정 후  $I_{CQ}$ 를 구한다.

$$\begin{aligned} I_{CQ} &= I_S \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \\ &= 10^{-16} \times \exp\left(\frac{800 \text{ mV}}{26 \text{ mV}}\right) = 2.31 \text{ mA} \end{aligned}$$

- ② 전압  $V_{CEQ}$ 를 구한다.

$$V_{CEQ} = V_{CC} - R_C I_{CQ} = 15 - (5 \times 2.31) = 3.45 \text{ V}$$

따라서  $V_{CE} > V_{BE}$ 이므로, BJT가 순방향 활성모드임이 확인된다.

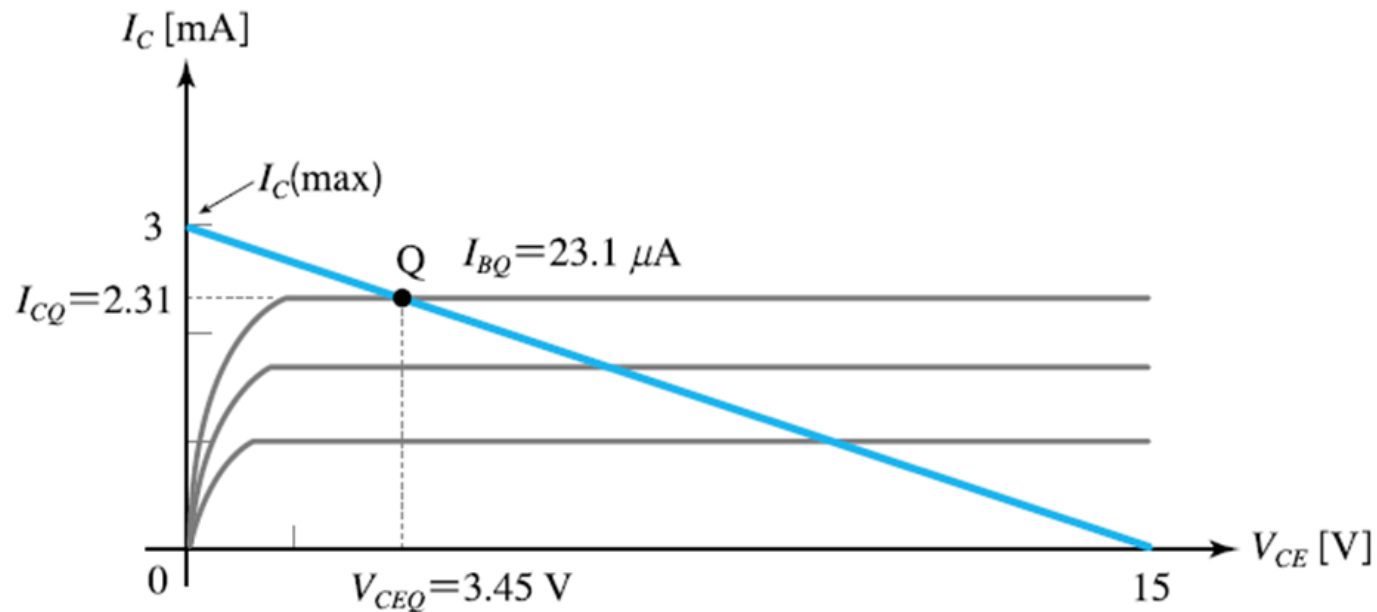
- ③ 베이스 바이어스 전류

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta_{DC}} = \frac{2.31 \text{ mA}}{100} = 23.1 \mu\text{A}$$

# BJT의 DC 해석과 등가모델

## 예제 3-5 (풀이)

### ① 부하선과 동작점 그래프

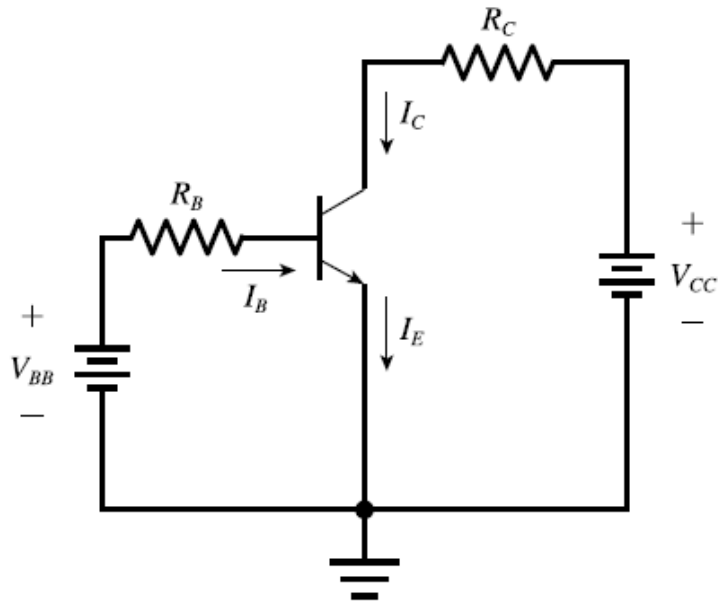


[예제 3-5] 회로의 부하선과 동작점

# 바이어스 회로

BJT는 인가되는 바이어스에 의해 동작모드가 결정되며,  
증폭기 회로에 사용되기 위해서는 **활성모드로 바이어스가 설정되어야 한다.**

증폭기에서는 입력신호와 출력신호 사이의 선형성이 중요한 요소이므로, **선형 동작영역의 중앙 근처에** BJT의 동작점이 설정되도록 바이어스를 인가한다.



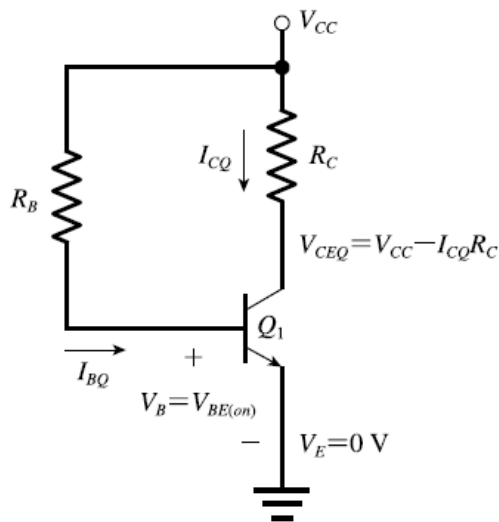
$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - V_{BE(on)}}{R_B}$$

$$I_{CQ} = \beta_{DC} I_{BQ}$$

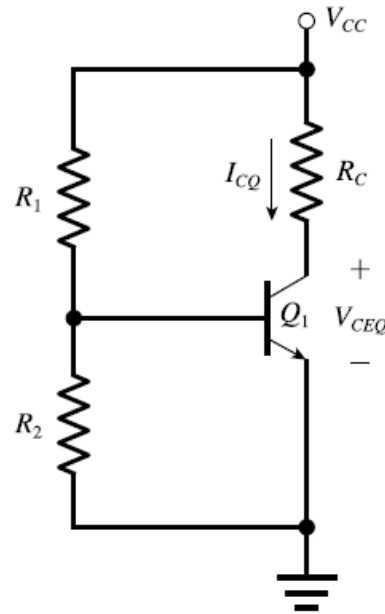
$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C$$

# 바이어스 회로

## □ 바이어스 회로의 종류



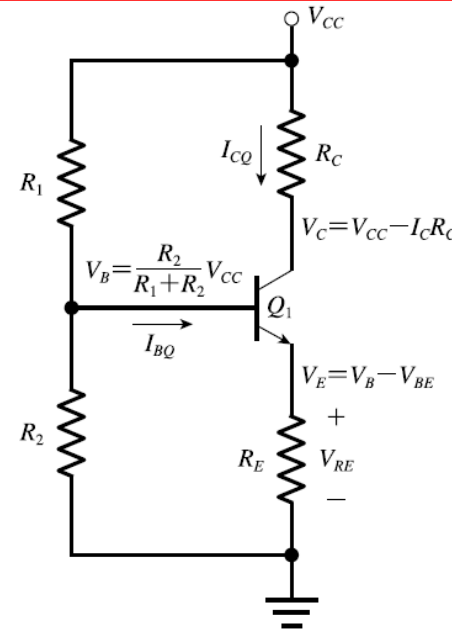
고정 바이어스  
(Fixed bias)



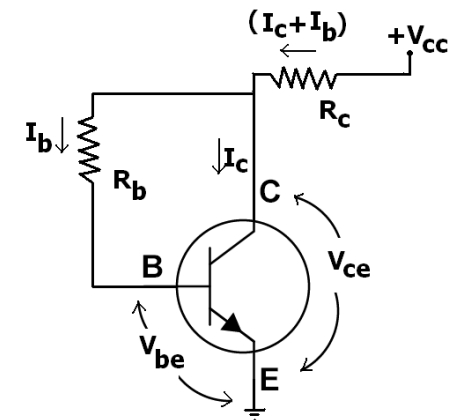
전압분배 바이어스  
(Voltage divider bias)

BJT의  $\beta_{DC}$ 와  $V_{BE(on)}$ 은 트랜지스터마다 다르고, 온도에 민감하게 영향을 받는다.

$\beta_{DC}$ 와  $V_{BE(on)}$ 에 무관하게 하여 바이어스 안정도 향상



자기 바이어스  
(Self bias)



Collector-to-base bias

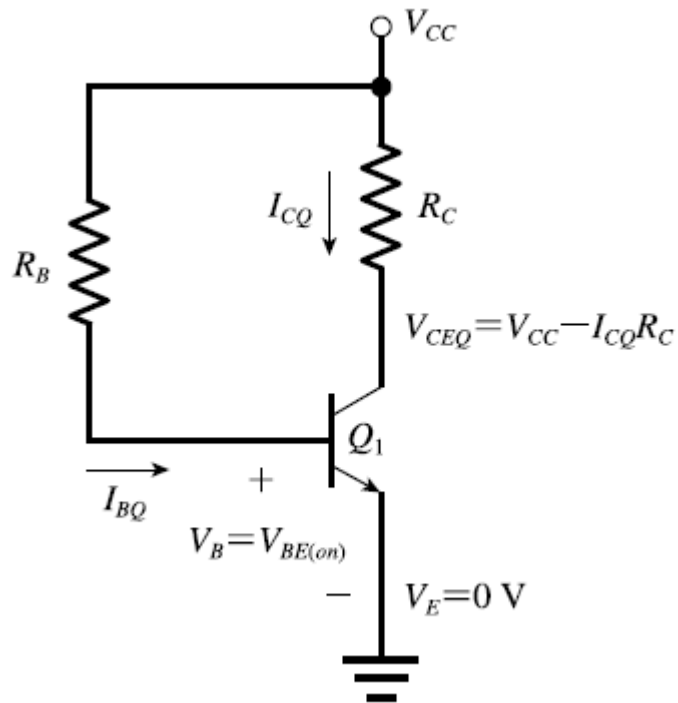
[http://en.wikipedia.org/wiki/Bipolar\\_transistor\\_biasing](http://en.wikipedia.org/wiki/Bipolar_transistor_biasing)

# 바이어스 회로

## □ 고정 바이어스 회로

하나의 전원  $V_{CC}$ 를 이용하여 바이어스

동작점 전류, 전압 값들이  $\beta_{DC}$ 와  $V_{BE(on)}$ 에 직접적 영향을 받아 바이어스 안정도가 좋지 않다.



B-E루프에 KVL적용 :

$$V_{CC} = R_B I_{BQ} + V_{BE(on)}$$

베이스 바이어스 전류 :

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE(on)}}{R_B}$$

컬렉터 전류 :

$$I_{CQ} = \beta_{DC} I_{BQ} = \beta_{DC} \frac{V_{CC} - V_{BE(on)}}{R_B}$$

C-E루프에서 KVL적용 :

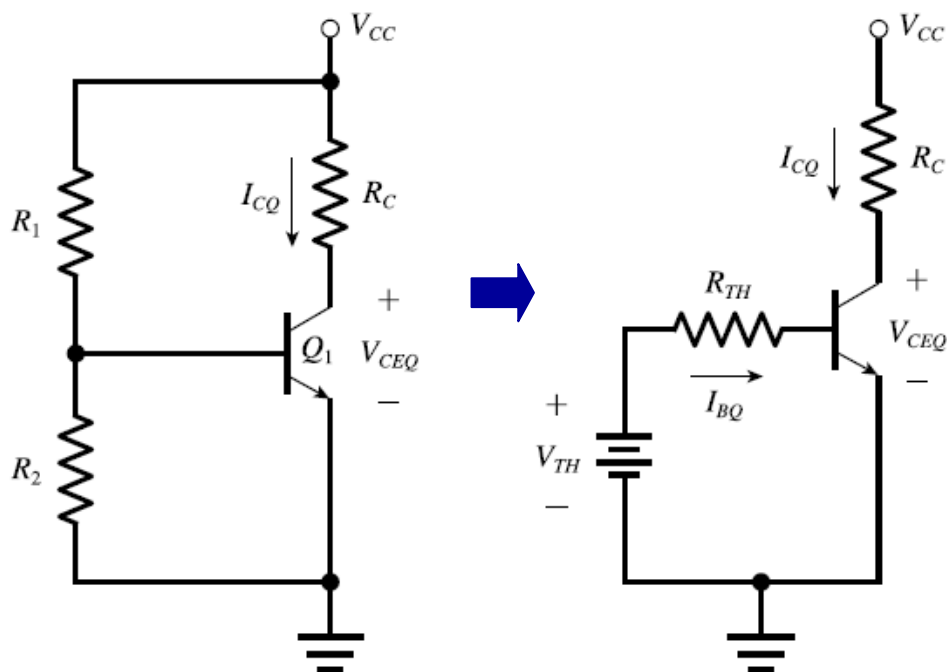
$$V_{CEQ} = V_{CC} - R_C I_{CQ}$$

# 바이어스 회로

## □ 전압분배 바이어스 회로

두 개의 저항으로 전원전압 분배

동작점 전류, 전압 값들이  $\beta_{DC}$ 와  $V_{BE(on)}$ 에 직접적 영향을 받아 바이어스 안정도가 좋지 않다.



(a) 전압분배 바이어스 회로

(b) 등가회로

테브넨 등가회로

$$V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad R_{TH} = R_1 \parallel R_2$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{TH} - V_{BE(on)}}{R_{TH}}$$

$$I_{CQ} = \beta_{DC} I_{BQ} = \frac{\beta_{DC} (V_{TH} - V_{BE(on)})}{R_{TH}}$$

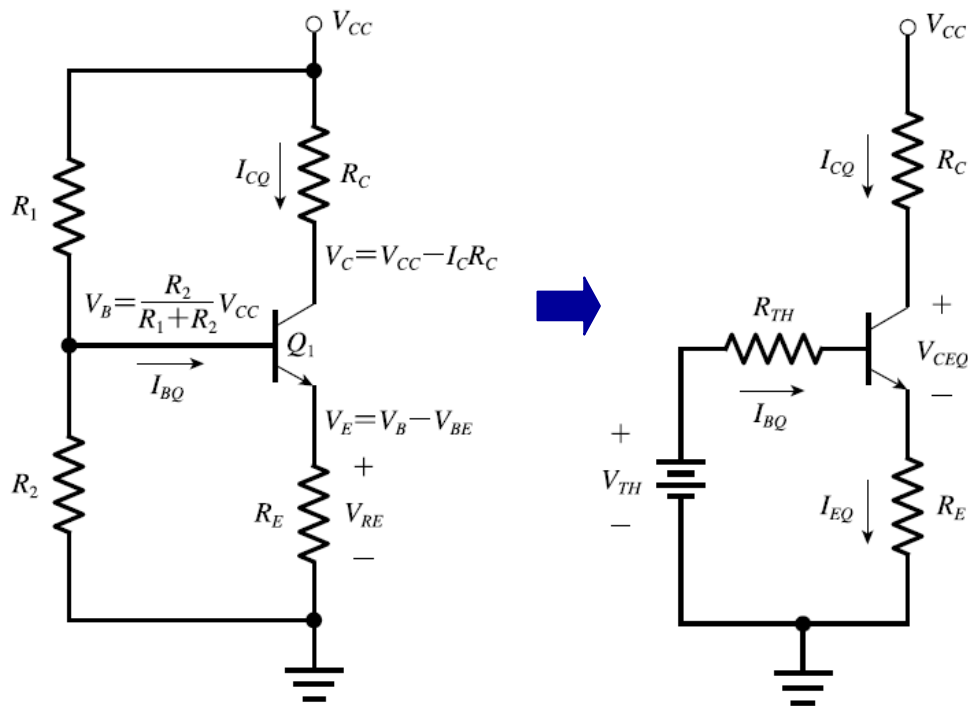
$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C$$



# 바이어스 회로

## □ 자기 바이어스 회로

이미터 저항 추가, 바이어스 안정도 개선



(a) 자기 바이어스 회로

(b) 등가회로

테브넵 등가회로

$$V_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \quad R_{TH} = R_1 \parallel R_2$$

등가회로 B-E 루프에 KVL 적용

$$V_{TH} = I_{BQ} R_{TH} + V_{BE(on)} + I_{EQ} R_E$$

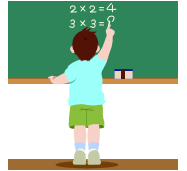
$$I_{CQ} = \beta_{DC} I_{BQ}$$

$$V_{TH} = I_{BQ} R_{TH} + V_{BE(on)} + (1 + \beta_{DC}) I_{BQ} R_E$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{TH} - V_{BE(on)}}{R_{TH} + (1 + \beta_{DC}) R_E}$$

$$I_{CQ} = \beta_{DC} I_{BQ} = \frac{\beta_{DC} (V_{TH} - V_{BE(on)})}{R_{TH} + (1 + \beta_{DC}) R_E}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C - I_{EQ} R_E$$



# 바이어스 회로

---

## □ 자기 바이어스 회로

$$I_{CQ} = \beta_{DC} I_{BQ} = \frac{\beta_{DC} (V_{TH} - V_{BE(on)})}{R_{TH} + (1 + \beta_{DC}) R_E}$$

$(1 + \beta_{DC}) R_E \gg R_{TH}$  이고  $\beta_{DC} \gg 1$  이면,

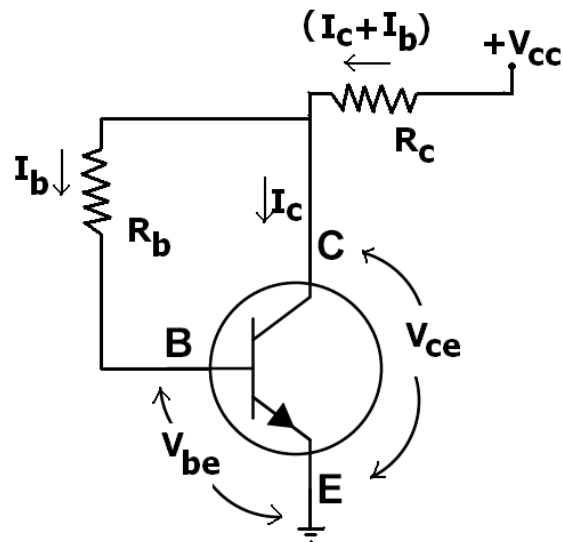
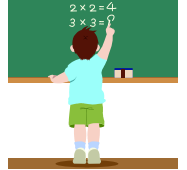
$$I_{CQ} \simeq \frac{V_{TH} - V_{BE(on)}}{R_E}$$

컬렉터 바이어스 전류  $I_{CQ}$ 가 근사적으로  $\beta_{DC}$ 에 무관하게 되어 동작점이 안정화된다.

# 바이어스 회로

## □ Collector-to-Base Bias

베이스 저항을 컬렉터에 연결, 바이어스 안정도 개선



$V_{CC}$ 에서  $R_C, R_B$  거쳐 B-E로 이어지는 루프에 KVL 적용

$$V_{CC} = R_C(I_{CQ} + I_{BQ}) + I_{BQ}R_B + V_{BE(on)}$$

$$I_{CQ} = \beta_{DC} I_{BQ} \text{ 이므로,}$$

$$V_{CC} = R_C(\beta_{DC} I_{BQ} + I_{BQ}) + I_{BQ}R_B + V_{BE(on)}$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE(on)}}{R_B + (1 + \beta_{DC})R_C}$$

$$I_{CQ} = \frac{\beta_{DC}(V_{CC} - V_{BE(on)})}{R_B + (1 + \beta_{DC})R_C} \approx \frac{V_{CC} - V_{BE(on)}}{R_C}$$

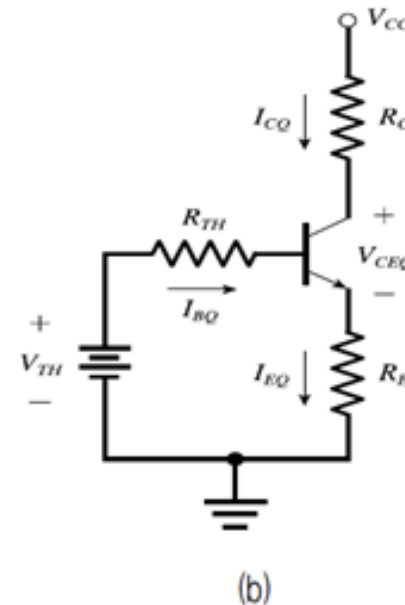
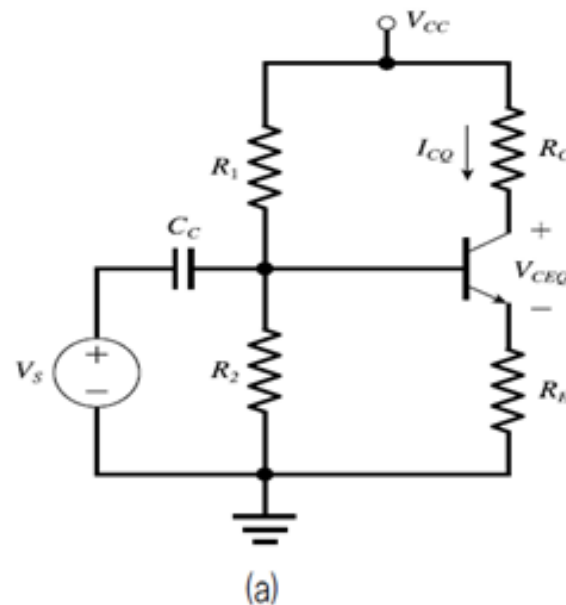
$$R_B \ll (1 + \beta_{DC})R_C \text{ 이고, } 1 \ll \beta_{DC} \text{ 이면,}$$

# 바이어스 회로

## 예제 3-7

### □ 자가 바이어스 회로의 동작점

이 회로의 동작점 전류와 전압을 구하라. 단,  $R_1=50\text{ k}\Omega$ ,  $R_2=10\text{ k}\Omega$ ,  $R_C=2\text{ k}\Omega$ ,  $R_E=0.5\text{ k}\Omega$ ,  $V_{CC}=12\text{ V}$ ,  $V_{BE(\text{on})}=0.7\text{ V}$ ,  $\beta_{DC}=100$ 이다. 또한  $\beta_{DC}$ 값이 10% 증가할 때 동작점의 변동에 대하여 설명하라.

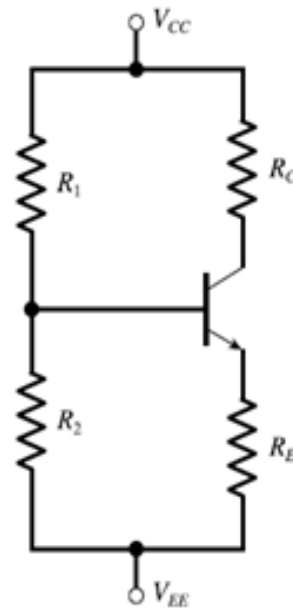


# 바이어스 회로

## 예제 3-8

### □ 자가 바이어스 회로의 동작점

이 회로는 두 개의 전원  $V_{CC}=10\text{ V}$  와  $V_{EE}=-10\text{ V}$  에 의해 바이어스 된다. 동작점 전류와 전압을 구하라. 단,  $R_1=24.8\text{ k}\Omega$ ,  $R_2=4.2\text{ k}\Omega$ ,  $R_C=1\text{ k}\Omega$ ,  $R_E=0.2\text{ k}\Omega$  이고,  $\beta_{DC}=190$ ,  $V_{BE(on)}=0.7\text{ V}$  이다.



# BJT의 소신호 등가회로

---

BJT가 활성영역에서 동작하는 경우에 동작점을 중심으로 신호가 작은 크기로 변하면 선형적인 특성을 가지며, 이를 소신호(small-signal) 특성이라고 한다.

# BJT의 소신호 등가회로

---

## □ 전달컨덕턴스와 소신호 공통 이미터 전류이득

활성영역의 컬렉터 전류는 전압  $V_{BE}$ 에 의해 제어되는 일정한 값을 가지므로 전압제어 전류원 (voltage controlled current source)으로 동작하며,

이 특성을 전달컨덕턴스(transconductance)로 모델링할 수 있다.

# BJT의 소신호 등가회로

## □ 전달컨덕턴스

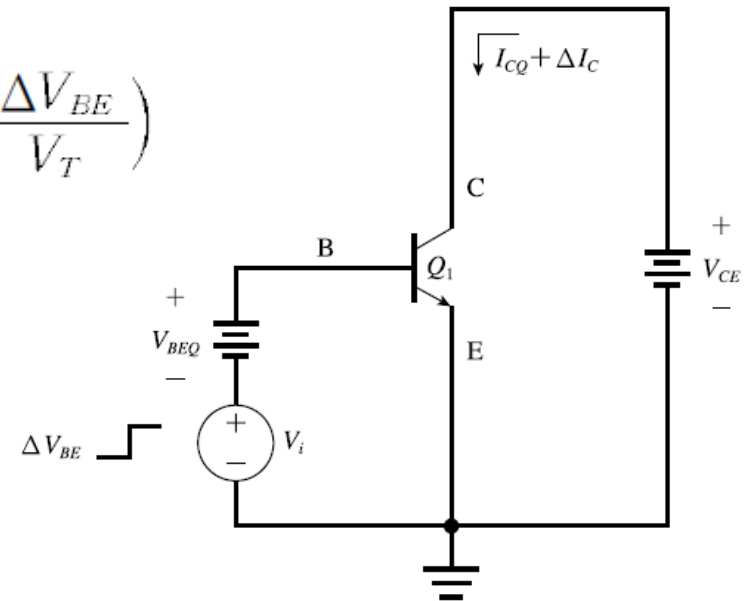
BJT가 전압  $V_{BEQ}$ 에 의해 활성모드로 바이어스되어 있을 때,  
 $V_{BE}$ 가  $\Delta V_{BE}$ 만큼 변할 때, 컬렉터 전류  $I_C$ 의 변화량  $\Delta I_C$  구하기.



$$\begin{aligned} I_{CQ} + \Delta I_C &= I_s \exp\left(\frac{V_{BEQ} + \Delta V_{BE}}{V_T}\right) \\ &= I_s \exp\left(\frac{V_{BEQ}}{V_T}\right) \exp\left(\frac{\Delta V_{BE}}{V_T}\right) = I_{CQ} \exp\left(\frac{\Delta V_{BE}}{V_T}\right) \end{aligned}$$

테일러 급수를 이용하여 근사화하면,

$$I_{CQ} + \Delta I_C \approx I_{CQ} \left(1 + \frac{\Delta V_{BE}}{V_T}\right)$$





# BJT의 소신호 등가회로

## □ 전달컨덕턴스

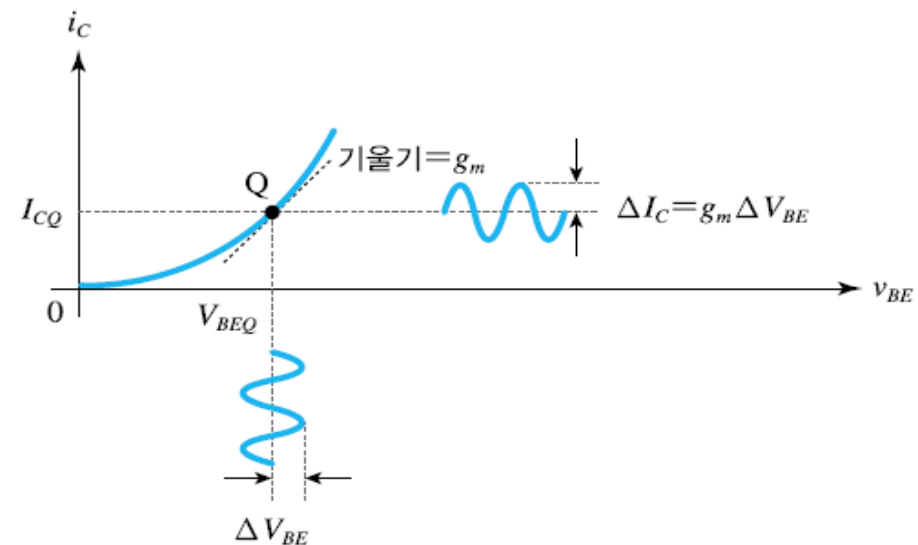
$V_{BE}$ 가  $\Delta V_{BE}$ 만큼 변할 때, 컬렉터 전류  $I_C$ 의 변화량  $\Delta I_C$ 는

$$\Delta I_C = \frac{I_{CQ}}{V_T} \Delta V_{BE}$$

이때  $\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}}$ 가 작은 변화인 경우에  $\frac{di_C}{dv_{BE}}$ 에 수렴하는 값을 가지므로, 이를 전달컨덕턴스라고 하며 기호  $g_m$ 으로 나타낸다.

$$g_m \equiv \left. \frac{di_C}{dv_{BE}} \right|_{Q\text{점}} = \frac{I_{CQ}}{V_T}$$

$$\Delta I_C = g_m \Delta V_{BE}$$

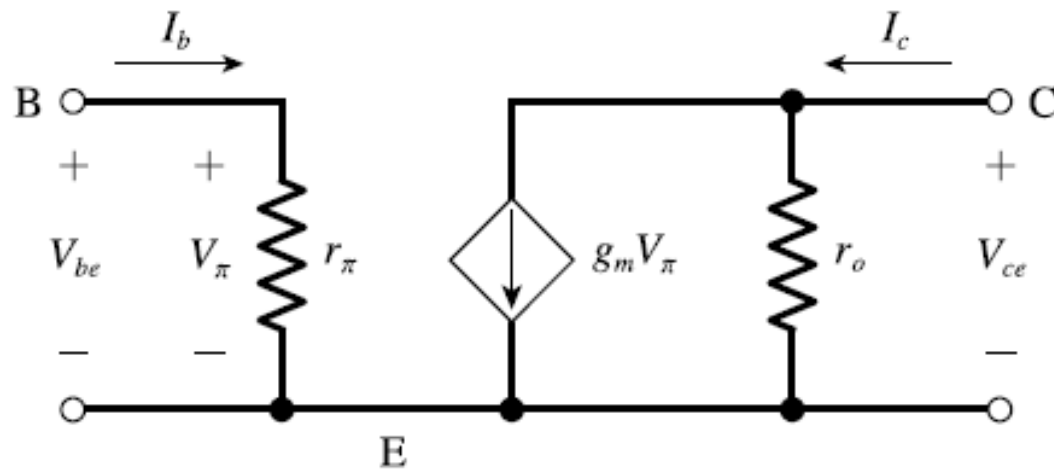


# BJT의 소신호 등가회로

## □ 하이브리드- $\pi$ 등가모델

BJT 증폭기의 해석에 가장 널리 사용되고 있는 저주파 소신호 등가모델

여기서, 저주파란 BJT 내부의 기생 정전용량(parasitic capacitance)을 고려하지 않기 때문.



# BJT의 소신호 등가회로

## □ 하이브리드- $\pi$ 등가모델

B-E 접합은 순방향 바이어스된 PN 접합으로 동작

순방향 바이어스된 PN 접합은 등가저항  $r_d$ 로 모델링 가능  $\rightarrow$  비슷한  $r_\pi$

- 소신호 전류이득

$$\beta_{ac} \equiv \left. \frac{di_C}{di_B} \right|_{Q점} = \frac{i_c}{i_b}$$

컬렉터 전류 변화 :  $\Delta I_C = g_m \Delta V_{BE} = \Delta I_B \beta_{ac}$

$\Delta V_{BE}$ 와 베이스 전류 변화  $\Delta I_B$ 의 비 :

$$\frac{\Delta I_B}{\Delta V_{BE}} = \frac{g_m}{\beta_{ac}}$$

$r_\pi$ 의 정의 :

$$r_\pi \equiv \left. \frac{dv_{BE}}{di_B} \right|_{Q점} = \frac{\beta_{ac}}{g_m} \quad \xrightarrow{g_m = \frac{I_{CQ}}{V_T}} \quad r_\pi = \frac{\beta_{ac} V_T}{I_{CQ}} = \frac{V_T}{I_{BQ}}$$

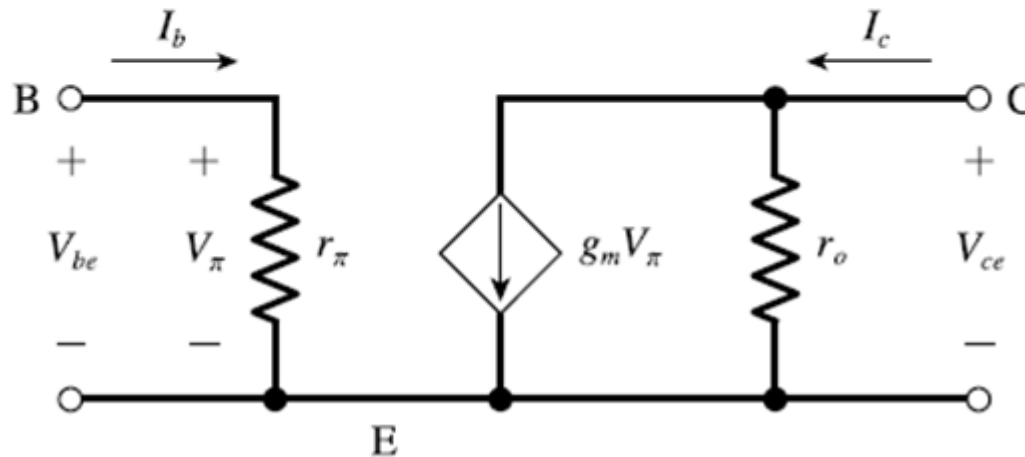
# BJT의 소신호 등가회로

## □ 하이브리드- $\pi$ 등가모델

- 컬렉터 전류의 변화( $v_\pi$ 는  $\Delta V_{BE}$ 의 소신호 성분)

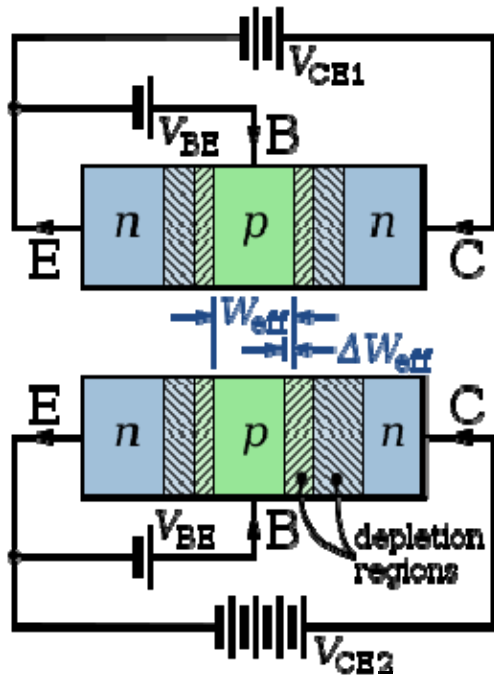
$$i_c = g_m v_\pi$$

$$i_c = g_m r_\pi i_b = \beta_{ac} i_b$$



# BJT의 소신호 등가회로

## □ 하이브리드- $\pi$ 등가모델



Top: NPN base width for low collector-base reverse bias; Bottom: narrower NPN base width for large collector-base reverse bias. Hashed regions are depleted regions.

<http://en.wikipedia.org/wiki/BJT>

활성모드에서 BJT의 B-C PN 접합은 역방향 바이어스되며,

- ➔ 컬렉터 전압  $V_C$ 가 증가할수록 ( $V_{CE}$ 가 증가할수록) B-C 접합의 공핍영역 확대
- ➔ 얇은 두께의 베이스로 공핍영역이 침투하여 유효 베이스 폭 감소: 베이스 폭 변조
- ➔ 이미터에서 주입된 캐리어가 컬렉터까지 도달하는 비율 증가: 컬렉터 전류 증가 (Early 효과)
- ➔ 컬렉터 전압이 증가하면 컬렉터 전류가 증가: 저항으로 모델링

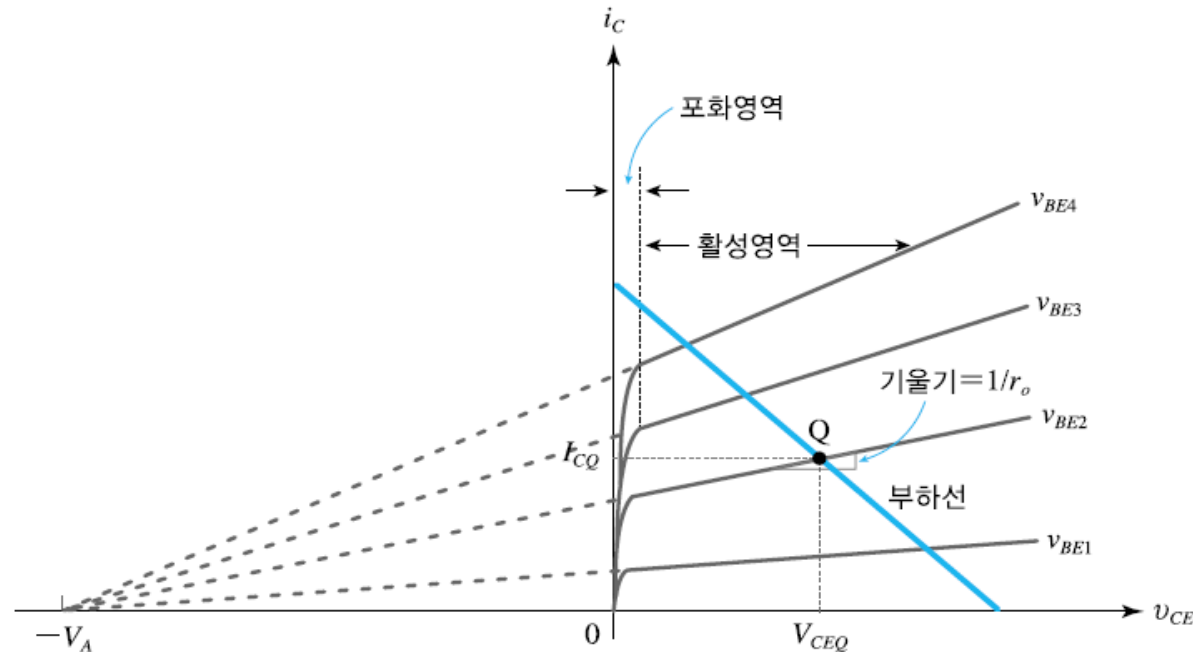
# BJT의 소신호 등가회로

## □ 하이브리드- $\pi$ 등가모델

컬렉터 전압이 증가하면 컬렉터 전류가 증가: 저항으로 모델링

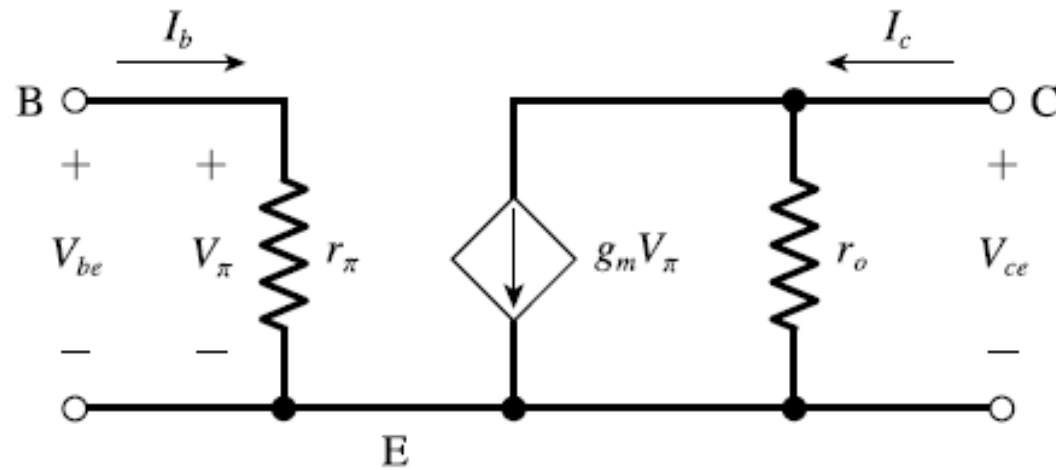
$$\frac{1}{r_o} \equiv \left. \frac{di_c}{dv_{CE}} \right|_{Q\text{점}} \simeq \frac{I_{CQ}}{V_A}$$

$V_A$ : 얼리 전압  
(typically 15 V to 150 V; smaller for smaller devices)



# BJT의 소신호 등가회로

## □ 하이브리드- $\pi$ 등가모델



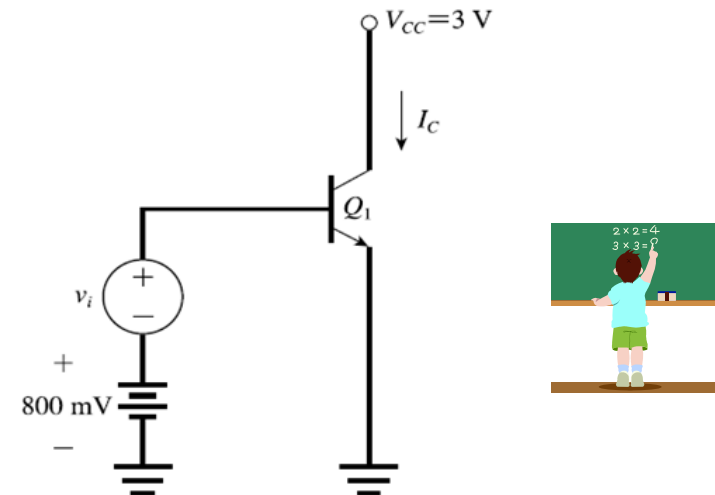
$$r_{\pi} = \frac{\beta_{ac}}{g_m} = \frac{V_T}{I_{BQ}} \quad g_m = \frac{I_{CQ}}{V_T} \quad r_o = \frac{V_A}{I_{CQ}}$$

# BJT의 소신호 등가회로

## 예제 3-9

### □ 하이브리드- $\pi$ 저주파 소신호 등가모델

회로에서 입력  $v_i$ 은 마이크로폰에서 발생하는 신호이다.  $v_i=0$  일 때,  $Q_1$ 의 하이브리드- $\pi$  소신호 등가회로 파라미터  $g_m$ 과  $r_\pi$ 의 값을 구하라. 마이크로폰에서 발생하는 신호의 크기가 2mA라면 컬렉터 전류와 베이스 전류의 변화는 각각 얼마인가? 단,  $I_S=2 \times 10^{-16} \text{ A}$ ,  $\beta_{ac}=120$  이고  $r_o \rightarrow \infty$ 로 가정하며, 트랜지스터는 활성  $Q_1$ 코드에서 동작한다고 가정한다.



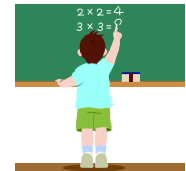
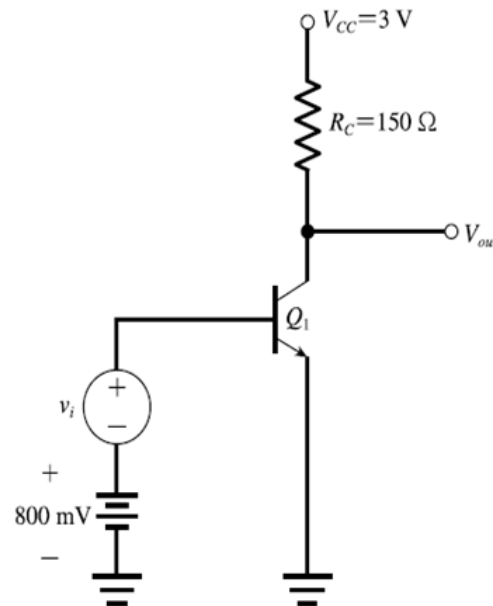


# BJT의 소신호 등가회로

## 예제 3-10

### □ 하이브리드- $\pi$ 저주파 소신호 등가모델

이 회로는 [예제 3-9]의 회로에 컬렉터 저항  $R_C$ 을 추가한 회로이다. 저항  $R_C$ 은 컬렉터 전압으로 변환시킨다. 이때 트랜지스터가 활성모드에서 동작하는지 여부를 판단하라. 또한 마이크로폰에서 1.5mV의 신호를 발생시킬 때의 출력전압은 얼마인가?



# BJT의 소신호 등가회로

## □ r 파라미터 소신호 등가모델

- 하이브리드- $\pi$ 가 일반적으로 사용되나, 경우에 따라 r 파라미터 소신호 등가모델이 사용됨
- 옴의 법칙과 같은 회로 기본법칙을 적용

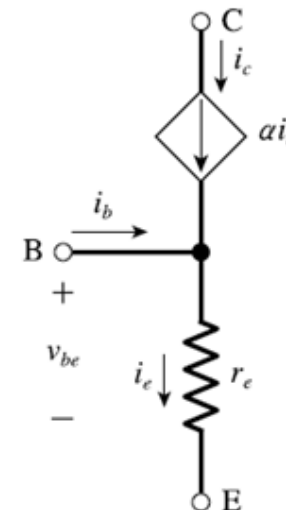
공통 베이스 소신호 전류 증폭률 :  $\alpha \equiv i_c/i_e$

소신호 이미터 저항 (이미터-베이스 전압  $v_{be}$ , 이미터 전류 비  $i_e$ ):

$$r_e \equiv \left. \frac{v_{be}}{i_e} \right|_{Q점} = \frac{V_T}{I_{EQ}}$$

소신호 파라미터	설 명
$\alpha$	공통 베이스 소신호 전류 증폭률( $i_c/i_e$ )
$\beta_{ac}$	공통 이미터 소신호 전류 증폭률( $i_c/i_b$ )
$r_e$	소신호 이미터 저항
$r_x$	베이스 단자에서 본 B-E 소신호 입력저항
$r_o$	소신호 컬렉터 저항
$g_m$	소신호 전달컨덕턴스

BJT 소신호 등가모델의 파라미터



BJT의 r 파라미터 소신호 모델