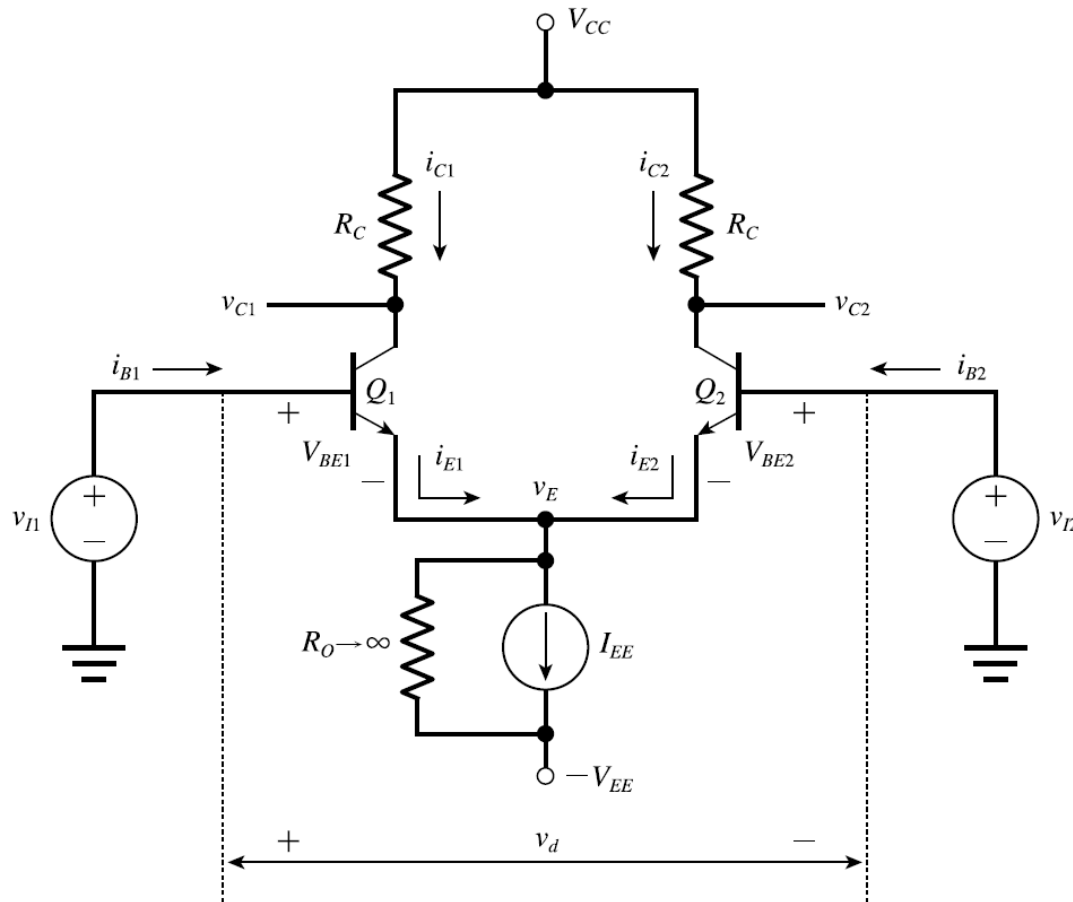

차동 증폭기

7.1 차동 증폭기 개요

- 차동 증폭기(differential amplifier)는 아날로그 집적회로(IC: integrated circuit)를 구성하는 기본적인 기능 블록으로서 연산 증폭기와 비교기 IC의 입력단으로 사용된다.
- 차동 증폭기는 두 개의 입력단자와 한 개 또는 두 개의 출력단자를 가지면, 두 입력신호의 차를 증폭하는 기능을 갖는다.

7.1 차동 증폭기 개요



[그림 7-1] BJT 차동 증폭기의 기본 구조

그림 7-1은 BJT 차동 증폭기의 기본적인 구조.

두 개의 NPN 트랜지스터 Q_1 , Q_2 가 이미터 결합 차동쌍을 구성하고 있으며, 이 트랜지스터들은 정전류원 I_{EE} 에 의해 선형영역으로 바이어스되어 있음.

차동쌍을 구성하는 두 트랜지스터는 특성이 정합(matched)되었다고 가정.

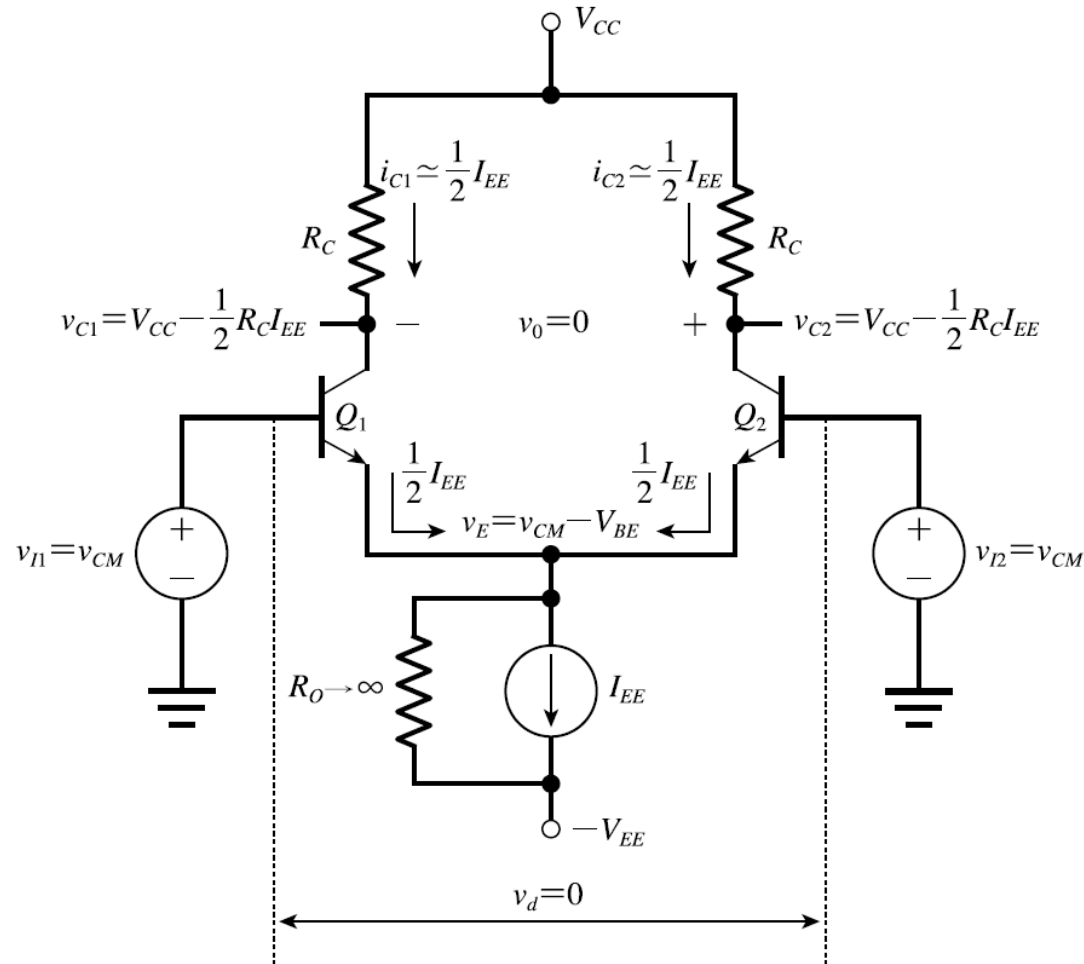
정전류원의 출력저항 R_o 는 클수록 바람직하며, 여기서는 $R_o = \infty$ 인 이상적인 정전류원을 가정.

입력: v_{I1} , v_{I2}

출력: v_{C1} , v_{C2}

7.1 차동 증폭기 개요

차동 증폭기의 구조 및 동작원리



(a) 공통모드 신호가 인가되는 경우

공통모드전압(common-mode voltage)

v_{CM} 이 인가된 경우:

$$i_{E1} = i_{E2} = I_{EE}/2$$

$$v_E = v_{CM} - V_{BE}$$

여기서, 전압 $V_{BE} = 0.7V$, $\beta_{o1} = \beta_{o2} \gg 1$ 이라고 하면, $i_{E1} \approx i_{C1}$, $i_{E2} \approx i_{C2}$ 이므로,

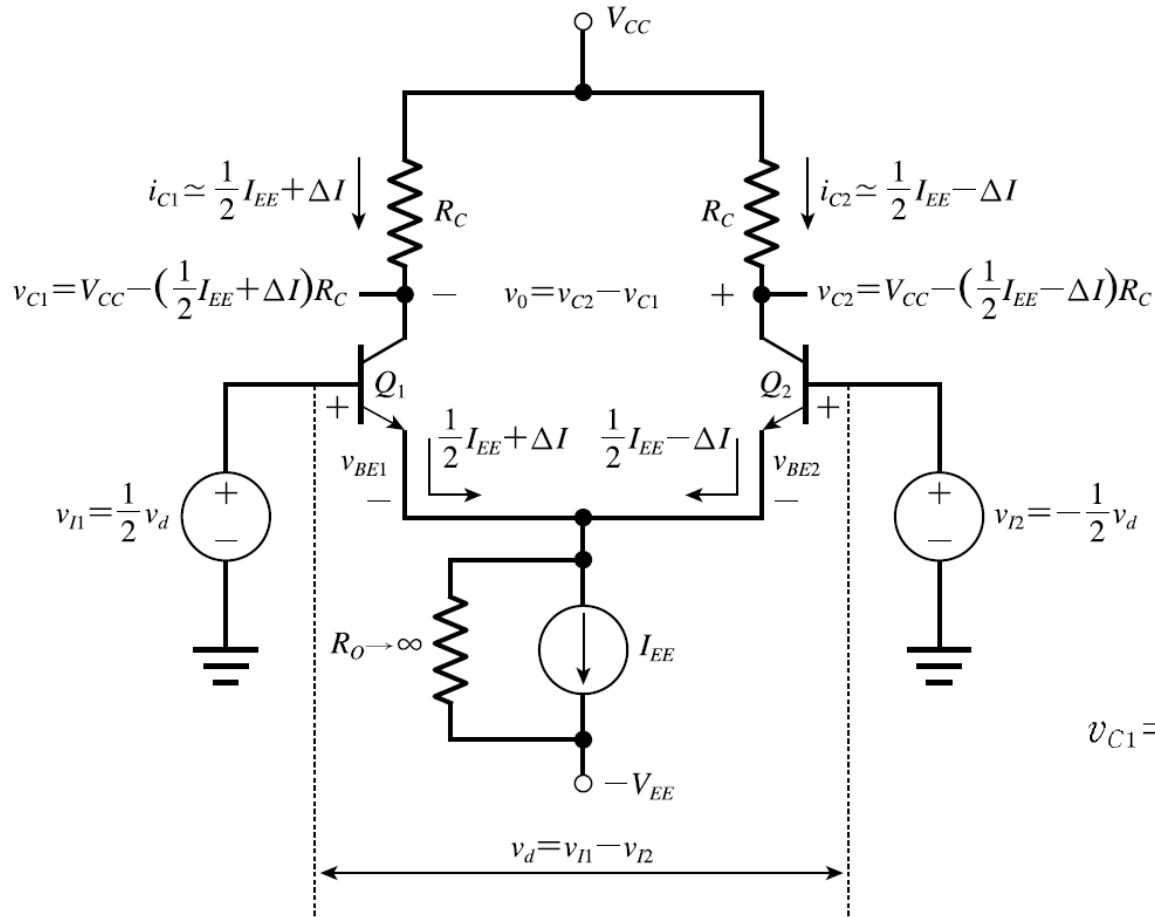
$$v_{C1} = v_{C2} = V_{CC} - R_C I_{EE}/2$$

따라서, 두 컬렉터 전압의 차는

$$v_{C2} - v_{C1} = 0$$

7.1 차동 증폭기 개요

차동 증폭기의 구조 및 동작원리



(b) 차동모드 신호가 인가되는 경우

차동모드 전압(differential-mode voltage) v_d 이 인가된 경우:

$v_d = v_{I1} - v_{I2}$ 가 수 mV 정도로 작다고 가정.

Q_1 과 Q_2 의 이미터가 공통이므로 $v_{BE1} > v_{BE2}$



$$i_{C1} \simeq I_{EE}/2 + \Delta I$$

$$i_{C2} \simeq I_{EE}/2 - \Delta I$$



$$v_{C1} = V_{CC} - \left(\frac{I_{EE}}{2} + \Delta I \right) R_C \quad v_{C2} = V_{CC} - \left(\frac{I_{EE}}{2} - \Delta I \right) R_C$$



$$v_{C2} - v_{C1} = 2 \Delta I R_C$$

7.1 차동 증폭기 개요

차동 증폭기의 입출력 전달특성



$$i_{C1} = I_S e^{(v_{I1} - v_E)/V_T} \quad (7.6a)$$

$$i_{C2} = I_S e^{(v_{I2} - v_E)/V_T} \quad (7.6b)$$

이미터 전류의 합은 바이어스 전류 I_{EE} 가 되므로,

$$I_{EE} = i_{E1} + i_{E2} = \frac{1}{\alpha} (i_{C1} + i_{C2}) \quad (7.7)$$

$$= \frac{I_S}{\alpha} [e^{(v_{I1} - v_E)/V_T} + e^{(v_{I2} - v_E)/V_T}]$$

$$\frac{i_{C1}}{I_{EE}} = \frac{I_S e^{(v_{I1} - v_E)/V_T}}{\frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{I1} - v_E)/V_T} + \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{I2} - v_E)/V_T}} = \frac{\alpha}{1 + e^{(v_{I2} - v_E - v_{I1} + v_E)/V_T}} = \frac{\alpha}{1 + e^{(v_{I2} - v_{I1})/V_T}}$$

$v_d = v_{I1} - v_{I2}$ 이므로,

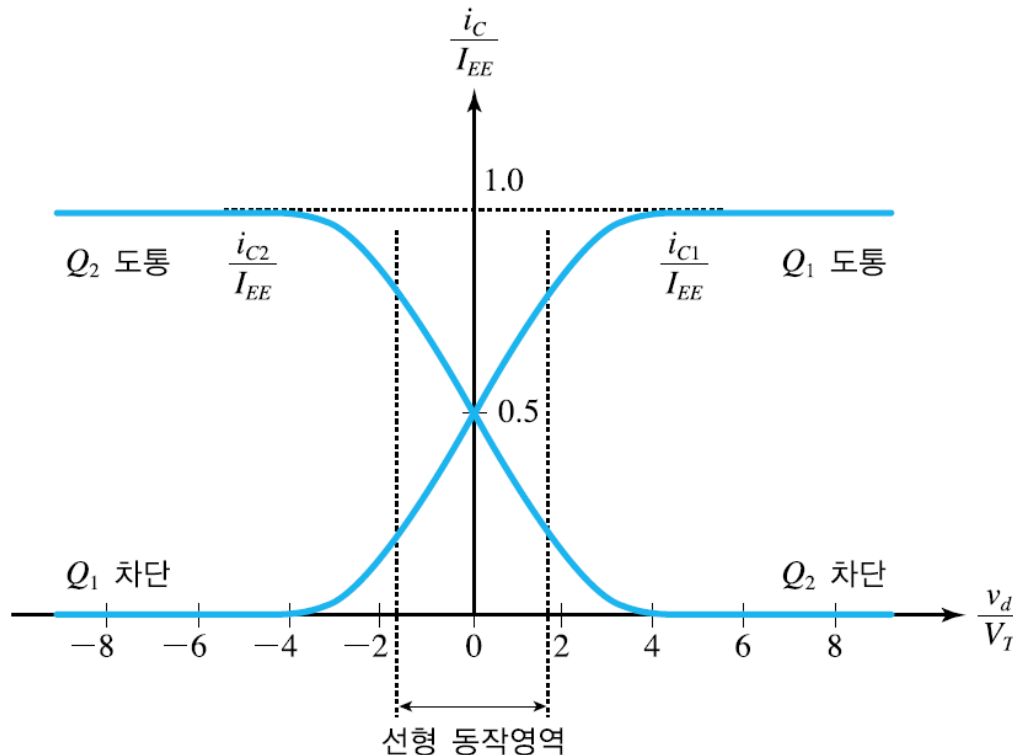
$$\frac{i_{C1}}{I_{EE}} = \frac{\alpha}{1 + e^{-v_d/V_T}} \rightarrow i_{C1} = \frac{\alpha I_{EE}}{1 + e^{-v_d/V_T}}$$

$$\frac{i_{C2}}{I_{EE}} = \frac{\alpha}{1 + e^{v_d/V_T}} \rightarrow i_{C2} = \frac{\alpha I_{EE}}{1 + e^{v_d/V_T}}$$

7.1 차동 증폭기 개요

차동 증폭기의 입출력 전달특성

$$i_{C1} = \frac{\alpha I_{EE}}{1 + e^{-v_d/V_T}} \quad i_{C2} = \frac{\alpha I_{EE}}{1 + e^{v_d/V_T}}$$



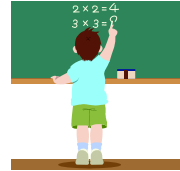
- $v_d=0$ (즉, y축과의 교점)에서 두 트랜지스터의 컬렉터 전류는 동일하며, $i_{C1}=i_{C2}=\alpha I_{EE}/2$ 가 된다.
- 컬렉터 전류 i_{C1} 과 i_{C2} 는 상보적(complementary)인 관계를 가져 한쪽이 증가하면 다른 쪽은 감소한다.
- 차동 입력전압의 작은 범위(즉, $-2V_T < v_d < 2V_T$)에서 차동쌍 트랜지스터의 컬렉터 전류는 선형을 유지하며, 차동 증폭기의 이득은 $v_d=0$ 인 점에서의 기울기(즉, 전달컨덕턴스)에 비례한다.
- 큰 차동 입력전압(즉, $|v_d| \gg 2V_T$)에 대해서 두 트랜지스터 중 하나는 차단되고 다른 하나는 도통되며, 바이어스 전류 I_{EE} 는 도통된 트랜지스터를 통해 흐른다.

[그림 7-3] 차동 증폭기의 DC 전달특성

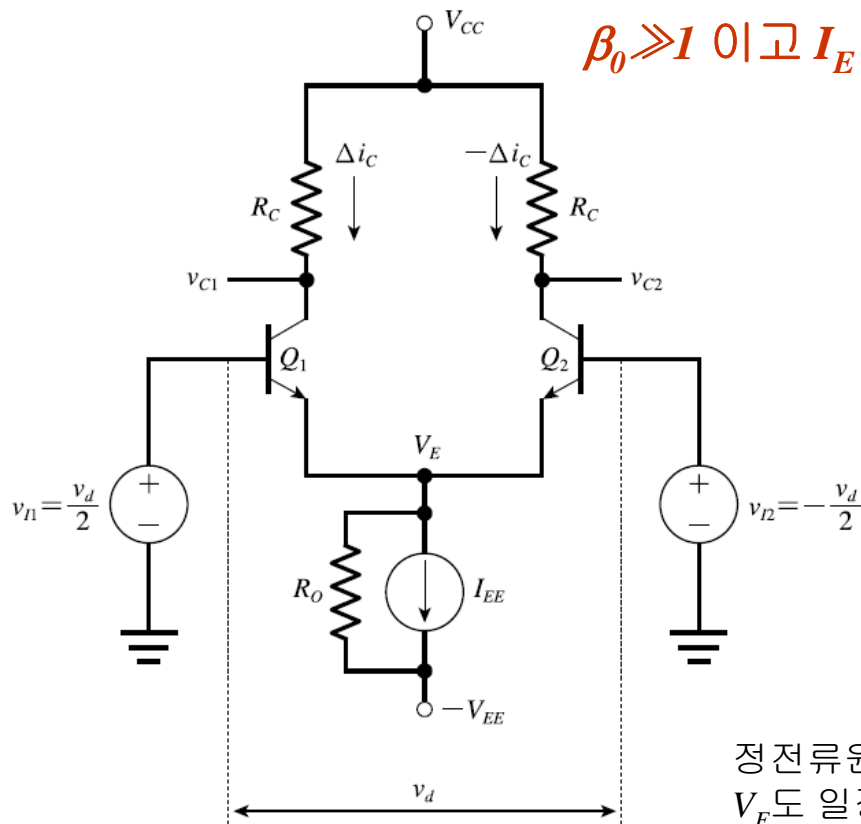
7.2 BJT 차동 증폭기

차동모드 이득

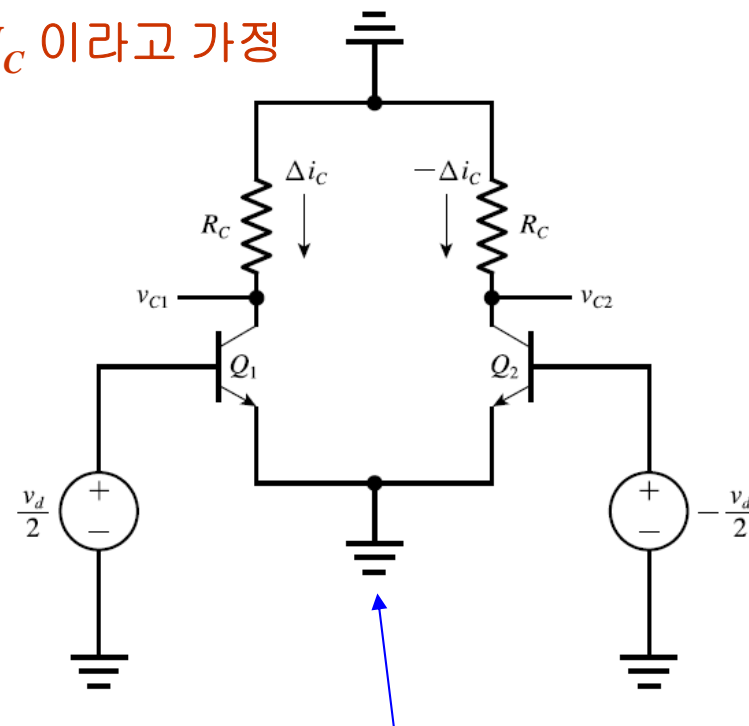
$$A_{dm} \equiv \frac{v_{o,dm}}{v_d} = \frac{v_{C2} - v_{C1}}{v_d} \quad (7.10)$$



$\beta_0 \gg 1$ 이고 $I_E \approx I_C$ 이라고 가정



(a) 차동모드 입력

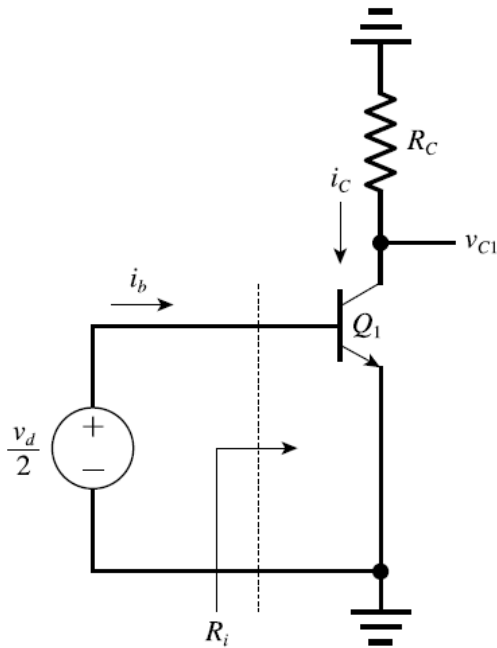
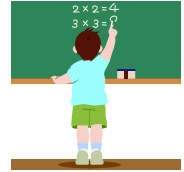


정전류원의 출력저항 R_o 에 흐르는 전류는 변하지 않으므로, 차동쌍의 이미터 전압 V_E 도 일정한 DC 값을 유지한다. DC 전압은 소신호 해석에서 단락회로로 취급.

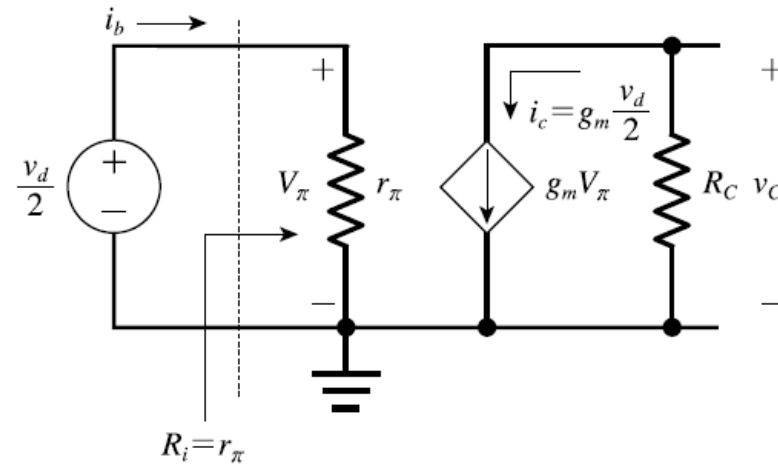
(b) 차동모드 소신호 등가회로

7.2 BJT 차동 증폭기

차동모드 이득



(c) 차동모드 반쪽 회로



(d) 차동모드 반쪽 회로의 소신호 등가회로

- Q1의 컬렉터 전류

$$i_c = g_m V_\pi = g_m \frac{v_d}{2}$$

- Q1의 컬렉터 전압

$$v_{c1} = -R_C i_c = -\frac{v_d}{2} g_m R_C$$

- 차동모드 반쪽 회로의 전압이득

$$A_v = \frac{v_{c1}}{v_d/2} = -g_m R_C$$

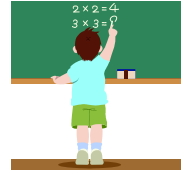
- 차동모드 전압이득

$$v_{c2} = -v_{c1} \text{ 이므로, } A_{dm} = \frac{v_{c2} - v_{c1}}{v_d} = g_m R_C$$

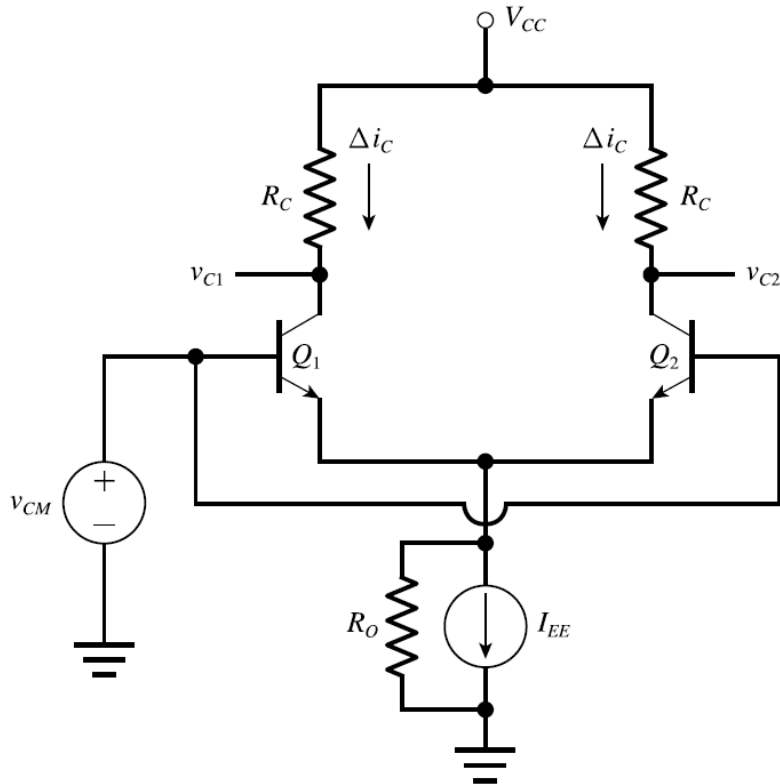
7.2 BJT 차동 증폭기

공통모드 이득

$$A_{cm} \equiv \frac{v_{o,cm}}{v_{CM}} = \frac{v_{C2} - v_{C1}}{v_{CM}} \quad (7.11)$$



정전류원의 출력저항 R_O 가 무한대가 아닌 유한한 값을 갖는다고 가정



Q_1 과 Q_2 의 컬렉터 전류 i_{C1} , i_{C2} 가 동일하게 Δi_C 만큼 증가.

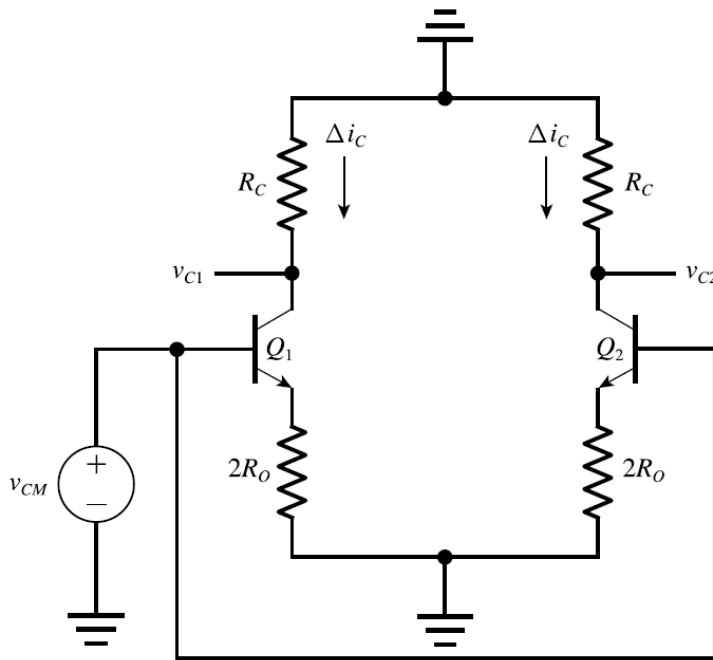
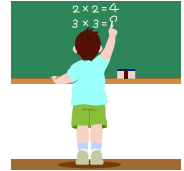
정전류원의 전류는 I_{EE} 로 일정하게 유지되므로, R_O 에 흐르는 전류가 $2\Delta i_C$ 만큼 증가.

V_E 도 $2R_O\Delta i_C$ 만큼 증가.

(a) 공통모드 입력

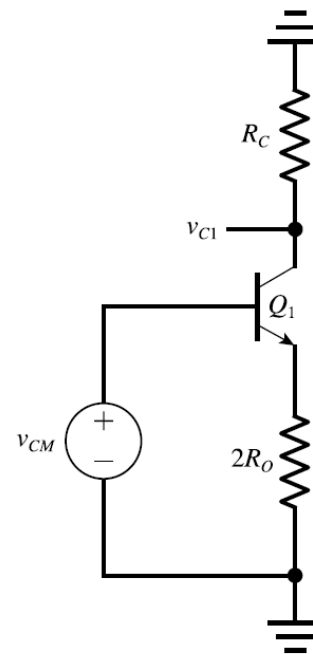
7.2 BJT 차동 증폭기

공통모드 이득

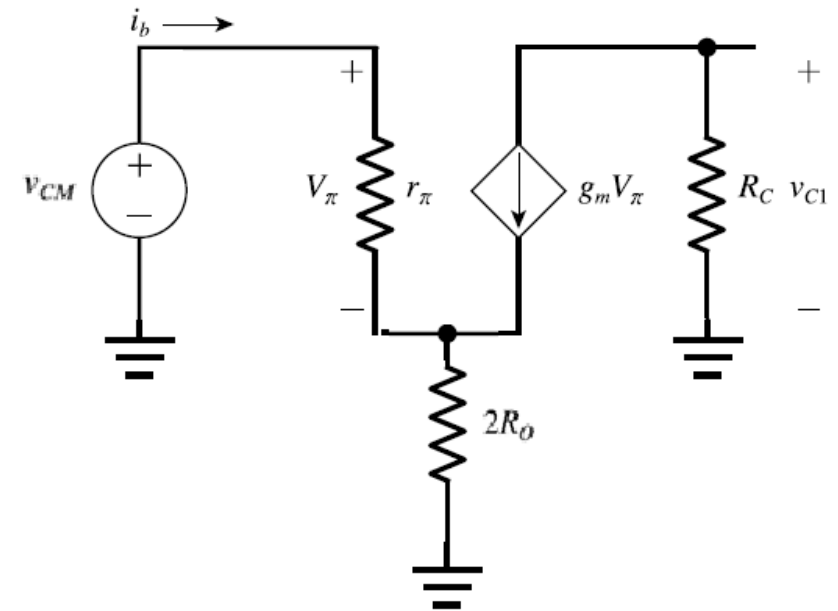


(b) 공통모드 소신호 등가회로

[그림 7-8] 공통모드 소신호 해석

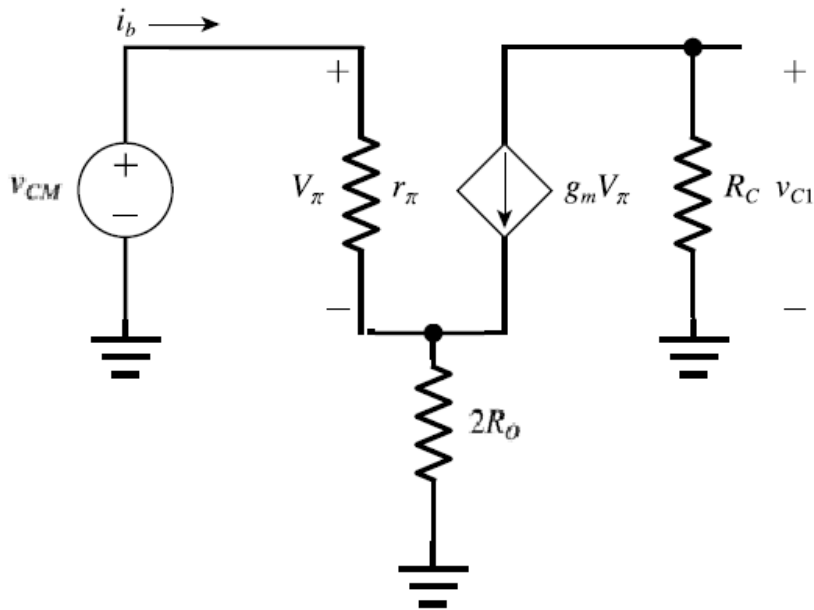


(c) 공통모드 반쪽 회로



7.2 BJT 차동 증폭기

공통모드 이득



$$v_{c1} = -\beta_o i_b R_C$$

$$v_{CM} = r_{\pi} i_b + (1 + \beta_o)(2R_O) i_b$$

$$i_b = \frac{v_{CM}}{r_{\pi} + (1 + \beta_o)(2R_O)}$$

$$v_{c1} = -\frac{\beta_o R_C v_{CM}}{r_{\pi} + (1 + \beta_o)(2R_O)}$$

v_{CM} 이 공통이므로, $v_{c2}=v_{c1}$ 이 되며,

단일 종단 출력에 대한 공통모드 이득은

$$A_v = \frac{v_{c1}}{v_{CM}} = -\frac{\beta_o R_C}{r_{\pi} + (1 + \beta_o)(2R_O)}$$

$r_{\pi} \ll 2(\beta_o + 1)R_O$ 이고 $\alpha = \beta_o / (\beta_o + 1) \approx 1$ 를 이용하여 간략화

$$A_{cm} = \frac{v_{c1}}{v_{CM}} = \frac{-\beta_o R_C}{r_{\pi} + 2(\beta_o + 1)R_O} \simeq -\frac{\alpha R_C}{2R_O} \simeq -\frac{R_C}{2R_O} \quad (7.22)$$



7.2 BJT 차동 증폭기

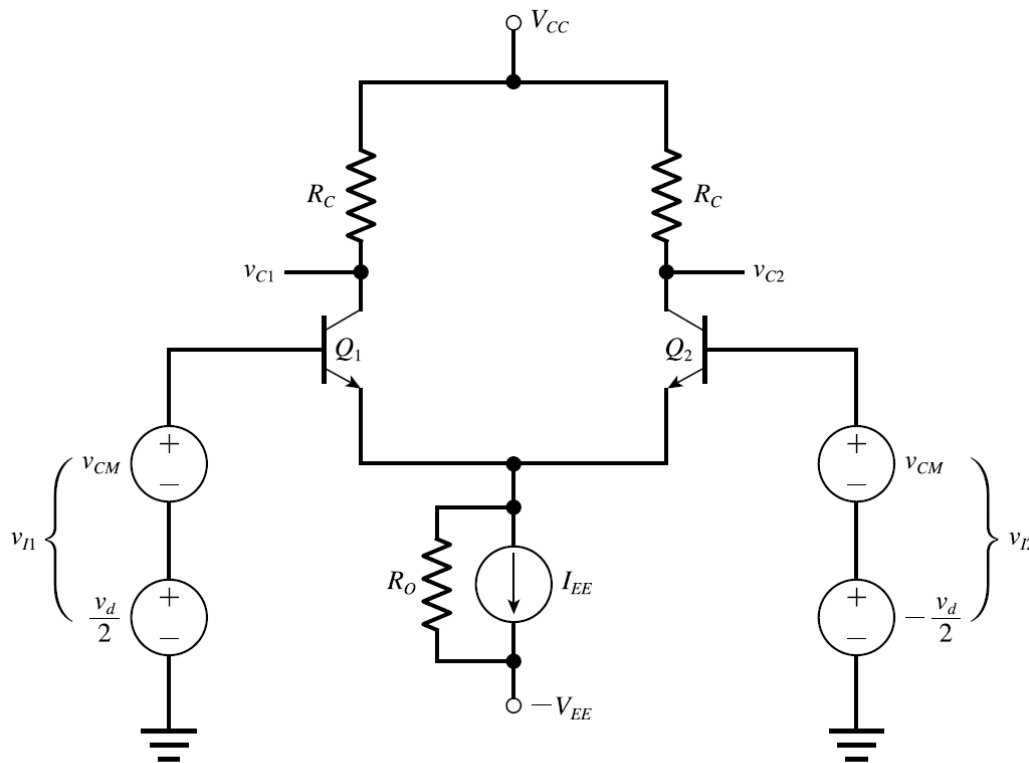
공통모드 제거비(CMRR: Common Mode Rejection Ratio)

$$\bullet \text{ 차동출력 : CMRR} = \left| \frac{A_{dm}}{A_{cm}} \right| = \frac{g_m R_C}{\frac{R_C}{2R_O}} = 2g_m R_O \quad (7.23a)$$

차동 증폭기의 성능을 나타내는 CMRR을 크게 하기 위해서는 큰 출력 저항을 갖는 정전류원 회로를 사용해야 함.

7.2 BJT 차동 증폭기

공통모드 신호와 차동모드 신호가 함께 존재하는 경우



[그림 7-9] 차동 증폭기에 임의의 입력이 인가되는 경우

- 차동모드 입력전압과 공통모드 입력전압

$$v_d = v_{I1} - v_{I2}$$

$$v_{CM} = \frac{v_{I1} + v_{I2}}{2}$$

- 차동 증폭기의 두 입력전압

$$v_{I1} = v_{CM} + v_d/2$$

$$v_{I2} = v_{CM} - v_d/2$$

- 컬렉터 전압(중첩의 정리를 적용)

~~$$v_{C1} = -A_{dm}v_{DM} + A_{cm}v_{CM} = -\frac{A_{dm}}{2}\left(v_d - \frac{v_{CM}}{CMRR}\right)$$~~

~~$$v_{C2} = A_{dm}v_{DM} + A_{cm}v_{CM} = \frac{A_{dm}}{2}\left(v_d + \frac{v_{CM}}{CMRR}\right)$$~~

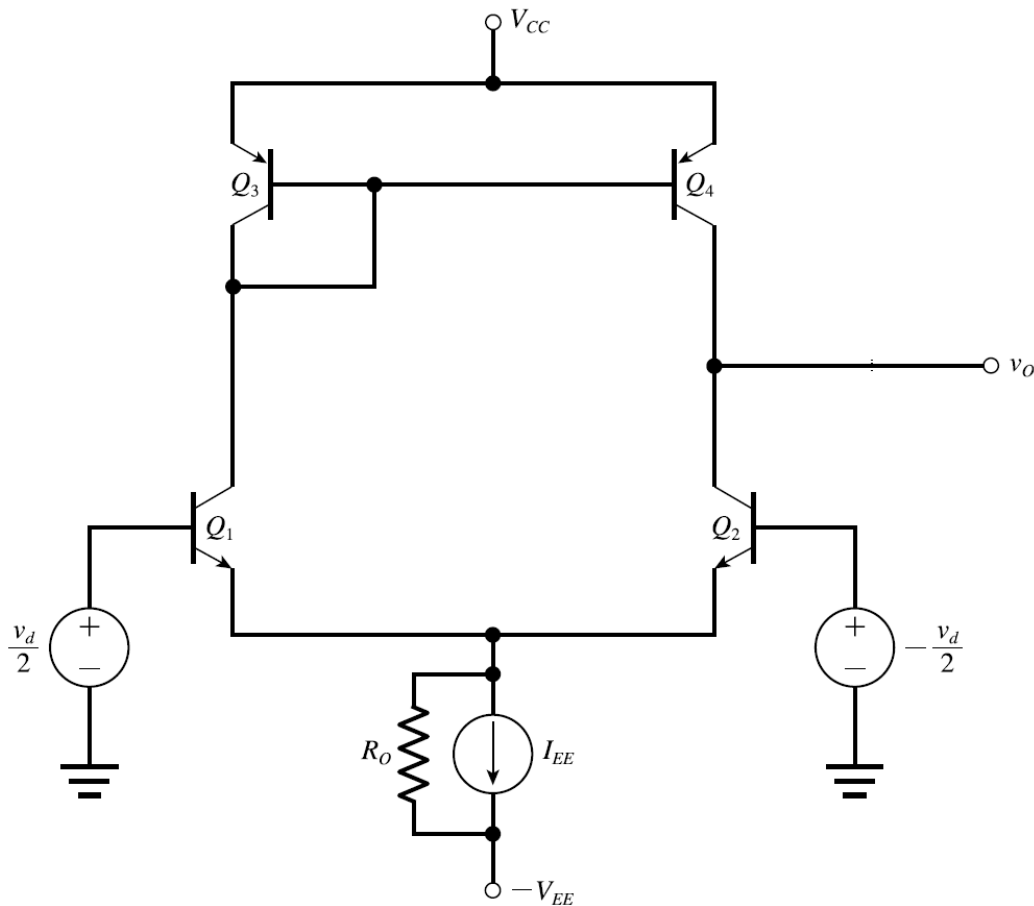
- 출력전압

$$v_o = v_{C2} - v_{C1} = A_{dm}v_d = A_{dm}(v_{I1} - v_{I2})$$

→ 두 입력전압의 차를 차동이득 A_{dm} 만큼 증폭함

7.2 BJT 차동 증폭기

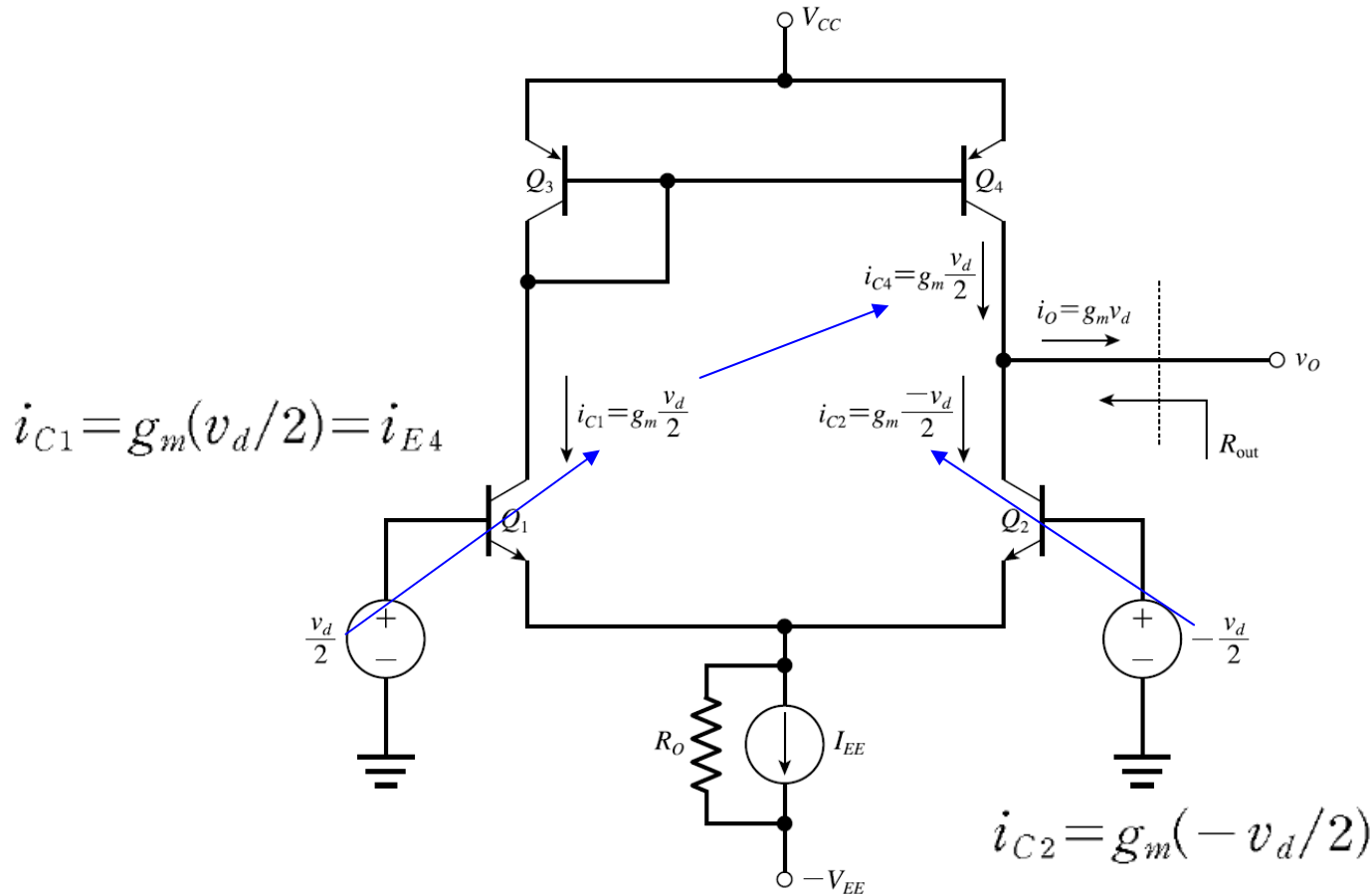
능동부하를 갖는 BJT 차동 증폭기



- 차동모드 이득을 크게 하기 위해 컬렉터 저항 R_C 대신에 트랜지스터를 이용한 능동부하(active load)가 사용됨
- Q_3, Q_4 는 전류거울(current mirror) 형태의 능동부하로 사용됨

7.2 BJT 차동 증폭기

능동부하를 갖는 BJT 차동 증폭기



$$i_o = i_{E4} - i_{C2} = g_m v_d$$

$$v_o = g_m v_d R_{out}$$

- 차동 증폭기의 출력저항

$$R_{out} = r_{o2} \parallel r_{o4}$$

($r_{o4} = r_{o2}$ 라고 가정)

$$v_o = g_m v_d (r_{o2} \parallel r_{o4}) = \frac{g_m r_o}{2} v_d$$

- 차동모드 이득

$$A_{dm} = \frac{v_o}{v_d} = g_m \frac{r_o}{2}$$

$$A_{dm} = \frac{V_A}{2V_T}$$