

2023학년도 MDP 교수·학습 교재

정보 통신 H/W 설계

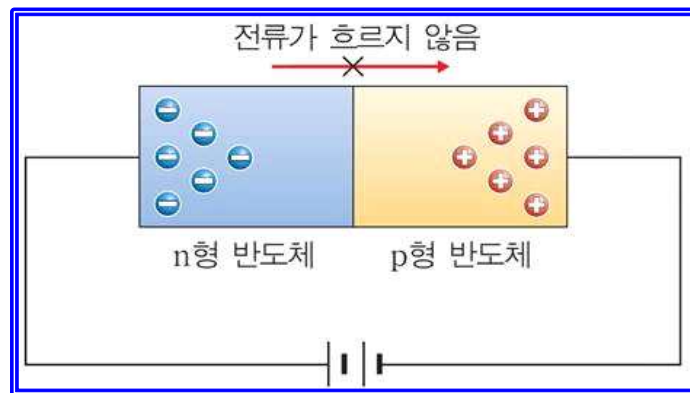


인천전자마이스터고등학교

다이오드와 트랜지스터

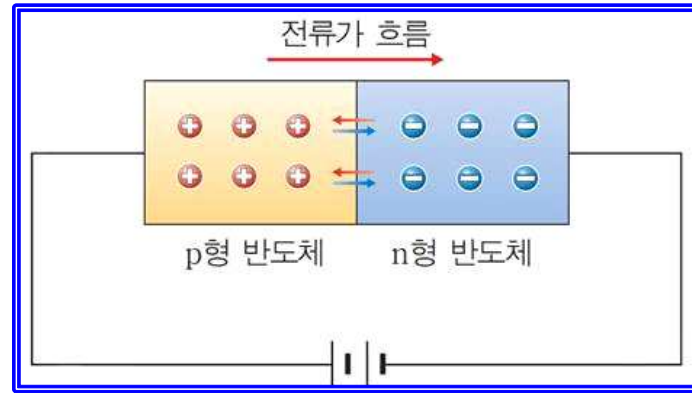
1. 역방향 바이어스

P형 반도체와 N형 반도체를 결합해 PN접합이라는 구조로 만들면 다이오드가 되며, P형 반도체의 전극을 애노드(양극)라고 하고 N형 반도체의 전극을 캐소드(음극)라고 한다. 이 다이오드는 전류를 한 방향으로 흐르게 하는 정류작용을 할 수 있으며, PN접합의 접합부에선 P형 반도체 방향으로 정공이, N형 반도체 방향으로 자유전자가 이동하면서 정공과 자유전자가 존재하지 않는 전위장벽(금지대)이 존재한다. 이 전위장벽은 정공과 자유전자의 이동을 차단하는 역할을 하는데 여기에 에너지를 가하면 전위장벽을 통과할 수 있게 된다. 다이오드의 애노드(양극)에 전원의 (-)극을 연결하고 다이오드의 캐소드(음극)에 (+)를 연결하면 P형 반도체의 정공과 N형 반도체의 자유전자는 각각 전극으로 이동하여 전위장벽(금지대)이 커지면서 전류는 거의 흐르지 않게 된다. 이런 방법을 역방향 바이어스라고 한다.



2. 순방향 바이어스

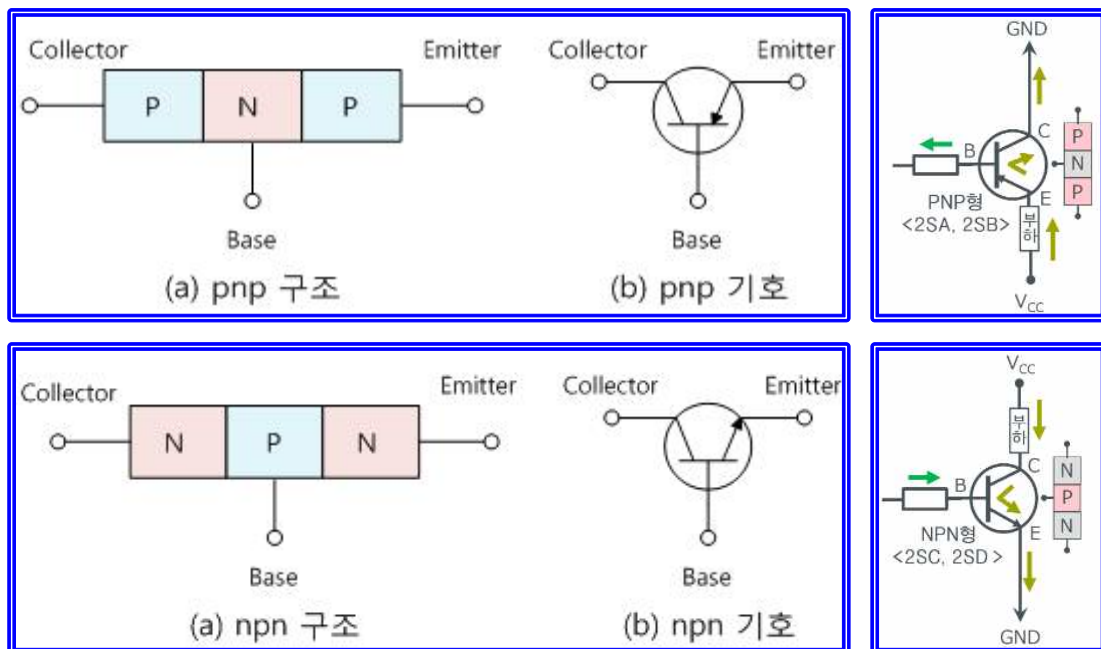
다이오드의 애노드(양극)에 전원의 (+)를, 다이오드의 캐소드(음극)에 전원의 (-)를 연결하면 N형 반도체의 자유전자는 (-)극에서 나온 전자에 밀려 전위장벽을 넘어 애노드(양극) 쪽으로 이동하게 되고, P형 반도체의 정공도 (-)극으로 끌려와서 N형 반도체인 캐소드(음극)쪽으로 이동하게 된다. 이렇게 되면 전자의 이동 방향과는 반대의 방향으로 전류가 흐르게 되며 이런 방식을 순방향 바이어스라고 한다. 결과적으로 순방향 바이어스에서만 전류가 흐르게 되므로 교류를 직류로 변환하는 정류작용을 구현할 수 있다.



다이오드에 순방향으로 전류가 흐르면 PN접합 부위에서 빛을 내는 성질이 있는데 이것을 발광 다이오드(LED: Light Emitting Diode)라고 한다. 발광 다이오드에 순방향 바이어스를 걸어 전류를 흘리면 PN접합 부분에서 전자와 정공이 결합해 소멸하게 되고 이 과정에서 전자와 정공이 충돌하면서 발생하는 에너지가 빛으로 방출하게 된다.

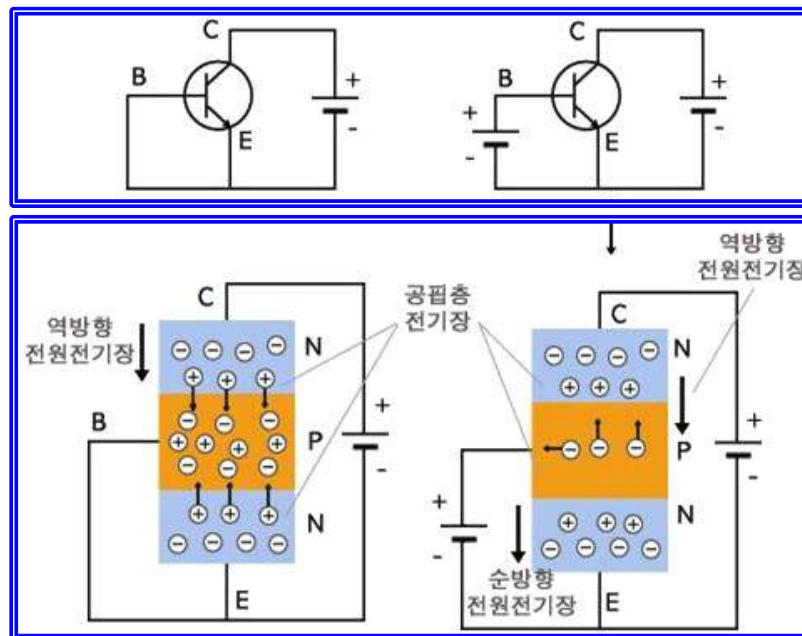
3. 트랜지스터

트랜지스터는 전극에 가해진 전압이나 전류를 제어해서 신호를 증폭하거나 스위치 역할을 하는 반도체 소자이다. 트랜지스터에는 NPN형과 PNP형이 있으며 베이스(Base), 컬렉터(Collector), 에미터(Emitter)라는 3개의 전극을 가지고 있다.



NPN형 트랜지스터의 컬렉터(Collector)에 (+)극을, 이미터(Emitter)에 (-)극을 연결하게 되면 컬렉터(Collector) 안의 전자는 (+)극에 모이고 이미터(Emitter) 안의 전자는 (-)극에 의해 베이스(Base)와 이미터(Emitter)의 접합면 부근에 모이게 된다. 이때 베이스(Base) 내부의 정공은 컬렉터(Collector)의 (+)극과 이미터(Emitter)의 (-)극의 영향을 받아 베이스(Base)와 이미터(Emitter)의 접합면 부근에 모이게 되어 베이스(Base)와 이미터(Emitter)의 접합면 부근에는 전자나 정공이 존재하지 않으므로

전류가 흐르지 않게 된다. 이때 전류를 흐르게 하려면 전원을 추가하여 (+)극에 베이스(Base)를, (-)극에 이미터(Emitter)를 각각 연결하면 베이스(Base)에서 이미터(Emitter)로 전류가 흐르게 된다.



위 그림에서 전자가 이미터(Emitter)에서 베이스(Base)로 이동해가면 이 전자들의 일부는 베이스(Base) 내의 정공과 결합하지만 나머지는 베이스(Base)와 컬렉터(Collector)의 접합면 부근으로 이동하여 (+)극으로 흐른다. 베이스(Base)에서 이미터(Emitter)로 흐르는 전류를 베이스(Base) 전류(I_B)라고 부르며, 베이스(Base) 전류(I_B)가 흐름으로써 컬렉터(Collector)에서 이미터(Emitter)로 전류가 흐르게 되는데 이 전류를 컬렉터(Collector) 전류(I_C)라고 한다. 즉 베이스(Base) 전류(I_B)가 흐르면 컬렉터(Collector) 전류(I_C)도 흐르게 된다. 트랜지스터에서는 컬렉터(Collector) 전류(I_C)가 베이스(Base) 전류(I_B)에 비해 훨씬 크므로 컬렉터(Collector) 전류(I_C)는 베이스(Base) 전류(I_B)가 약간만 변해도 크게 변화하게 된다. 이것은 베이스(Base) 전류(I_B)를 통해 컬렉터(Collector) 전류(I_C)를 조절할 수 있다는 것으로 바로 트랜지스터의 증폭작용이며, PNP형 트랜지스터의 경우는 전류의 흐름이 NPN형 트랜지스터와는 반대이지만 기본적인 동작 원리는 동일하다. 트랜지스터는 증폭작용뿐만 아니라 접점이 없는 스위치로 사용이 가능하다. 컬렉터(Collector)와 이미터(Emitter) 사이에 발광 다이오드(LED)와 같은 부하를 전원과 함께 연결하여 베이스(Base)와 이미터(Emitter) 사이를 스위치 대신 사용하면 약간의 베이스(Base) 전류(I_B)를 이용하여 컬렉터(Collector)와 이미터(Emitter) 사이의 큰 전류(I_{CE})를 제어할 수 있다.

4. 트랜지스터의 기본 설계법

가. 트랜지스터 회로 설계 시 유의 사항

1) 몇 볼트까지 사용할 것인가?

: 컬렉터와 이미터 사이 최대 정격전압(V_{CE})을 기준으로 하며 실제로 컬렉터와

이미터 사이 최대 정격전압(V_{CE})의 $1/2$ 이하인 전압에서 사용하는 것이 좋다.

2) 몇 암페어까지 흐르게 할 것인가?

: 이것은 2 가지 관점에서 고려해야 한다.

먼저 컬렉터 최대 정격전류 (I_C)를 초과하면 안되며 실제 사용 시에는 “ $1/2$ ” 이하에서 사용해야 한다. 또 하나는 컬렉터의 최대 전력(P_C)을 초과하여 사용하지 않는 것이다. 이것은 “사용전압 X 전류”로 계산하여 역시 “ $1/2$ ” 이하에서 사용해야 한다.

그러나 이것은 방열판의 유무와 주위 온도에 따라 큰 차이가 있으므로 데이터 쉬트를 확인하는 것이 좋다.

3) 증폭률을 얼마로 사용할 것인가?

: 직류 전류 증폭률(h_{fe})로 단순히 입력전류의 몇 배가 되어 출력되는지 계산하면 되지만 트랜지스터마다 편차가 있으므로 최소값을 기준으로 한다.

4) 어느 정도의 주파수까지 증폭할 것인가?

: 이득 대역폭 (f_T)을 기준으로 하여 다음과 같이 산출한다.

사용 가능한 주파수 = 이득 대역폭(f_T) ÷ 직류 전류 증폭률(h_{fe})

나. 디지털 트랜지스터 회로 설계 시 유의 사항

트랜지스터를 디지털 회로에서 사용하는 목적은 주로 다음과 같은 것이 있으며, 이에 따른 사용법을 설명한다.

1) 큰 전류나 높은 전압의 제어

가) 세그먼트 발광 다이오드의 제어, 모터나 릴레이 등의 구동, 전원의 On/Off, 조명 등의 제어

나) 전압 레벨의 변환

: 광센서나 마이크의 신호 증폭 및 변환

다) 직류 전압 증폭

: A/D 변환 입력 신호 증폭 및 센서 출력의 증폭

2) 큰 부하 제어

: 여기서 말하는 큰 부하라는 것은 수 10[mA] 이상의 전류가 흐르거나 5[V] 이상의 전압이 필요한 부하를 말하며, 디지털 IC로 직접 구동할 수 없는 모터의 제어나 릴레이 또는 솔레노이드 코일 등의 구동이 해당 된다.

3) 트랜지스터의 사용법

가) 다음의 그림과 같이 사용하는 것이 기본이며 부하전류의 방향에 따라서 두 가지 사용 방법이 있고 사용하는 트랜지스터도 NPN형과 PNP형으로 각각 구분하여 사용한다.

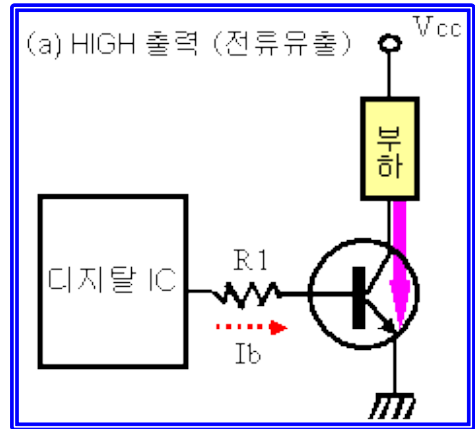
나) 트랜지스터의 선정은 드라이브하는 전압과 전류를 고려하여 선정하며 전류 증폭률이나 주파수 특성은 생각할 필요가 없다.

다) NPN형 트랜지스터의 사용 방법

① 디지털 IC의 출력이 “High”가 되면 트랜지스터의 베이스와 이미터 사이의

전압(V_{BE})이 “4.5[V]” 이상으로 이 전압이 저항을 통하여 트랜지스터의 베이스 전류(I_B)를 인가하므로, 트랜지스터의 컬렉터 전류(I_C)가 흐르게 되어 부하가 동작한다.

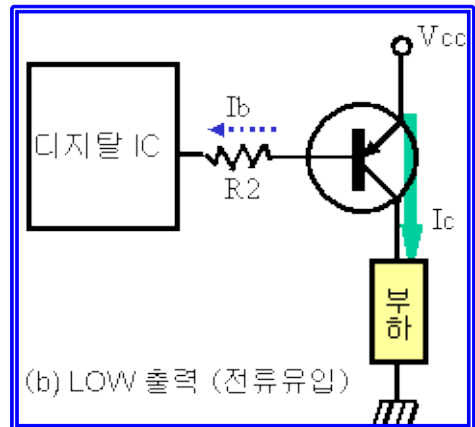
- ② 반대로 디지털 IC의 출력이 “Low”가 되면 트랜지스터의 베이스와 이미터 사이의 전압($V_{BE} = 0.6[V]$ 정도) 보다 작은 출력전압(0.2[V] 정도)이 되어 트랜지스터의 베이스 전류(I_B)가 흐르지 못하여, 트랜지스터의 컬렉터 전류(I_C)가 차단되어 부하가 동작하지 않는다.



라) PNP형 트랜지스터의 사용 방법

: 디지털 IC의 출력이 “High”가 되면 트랜지스터는 “Off” 되어 부하전류는 흐르지 않으며, 디지털 IC의 출력이 “Low”가 되면 트랜지스터가 “On” 되어 부하에 전류가 흐른다.

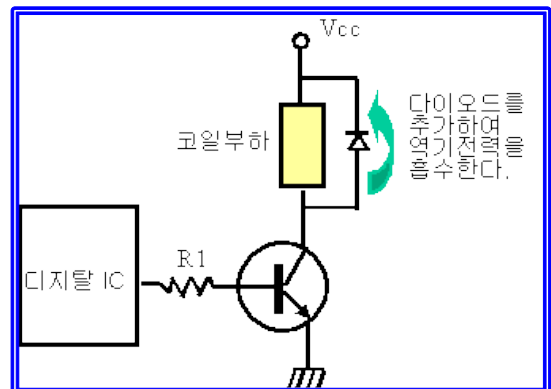
- 마) “R2” 저항값의 결정은 트랜지스터가 “On” 되었을 때, “베이스 전류(I_B) = 컬렉터(부하) 전류(I_C) ÷ 직류 전류 증폭률(h_{fe})”로 정해지는 베이스 전류(I_B)보다 약간 큰 전류가 흐르도록 저항값을 설정해야 하며, 만약에 이 저항이 없으면 디지털 IC에 과전류가 흘러 디지털 IC의 발열로 파손된다.



예를 들어 컬렉터(부하) 전류(I_C)가 100[mA]이고 직류 전류 증폭률(h_{fe}) = 100, 베이스 전류(I_B) = 1[mA], 디지털 IC의 전원을 5[V]라고 하면, 베이스와 이미터 사이의 전압(V_{BE})은 약 0.6[V]로 일정이기 때문에 $R1 = R2 = (5[V] - 0.6[V]) \div 1[mA] = 4.4[k\Omega]$ 이나 여유를 주어 “3.3[k Ω] ~ 3.9[k Ω]” 정도로 설정한다.

바) 주의사항

트랜지스터로 드라이브하는 부하가 모터나 릴레이처럼 코일 부하일 때는 역기전력에 주의할 필요가 있다. 즉 코일의 전류를 “On/Off” 할 때 순간적으로 역방향의 높은 전압이 코일의 양단에 발생하는데 이것을 방치하면 트랜지스터의 컬렉터와 이미터 사이에 가해져 트랜지스터가 파손될 수도 있으며, 이 역기전력은 노이즈로 작용하여 주변 회로의 오동작을 유발할 수도 있으므로 이것을 방지하기 위해 다음과 같이 코일 양단의 최대한 가까운 위치에 다이오드를 병렬에 접속하여 역기전력을 흡수하



여야 한다.

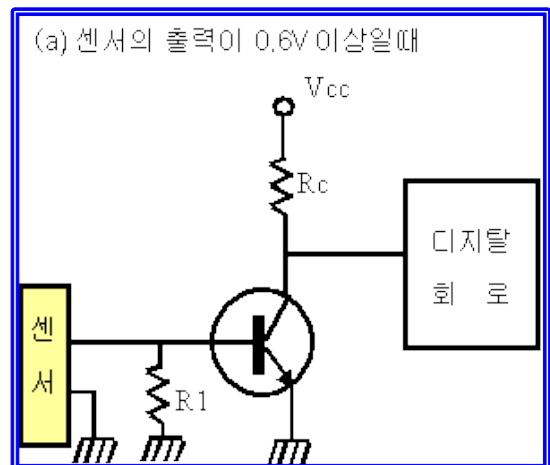
4) 전압 레벨 변환 방법

가) 각종 센서류는 출력전압이 낮아서 디지털 회로에 직접 사용하기에 부적절한 경우가 많으므로 트랜지스터를 이용하여 전압 레벨을 증폭하여 사용한다. 이때는 결국 직류 전압증폭기로 사용하는 것이 되기 때문에 본래의 기본증폭 회로로 구성하면 되지만 “On / Off” 또는 “High / Low”를 구별하는 정도로 충분하므로 회로를 간략화할 수 있다.

나) 실제로 사용하는 회로는 그림과 같이 되며 입력으로 사용된 센서의 출력전압이 정상시는 거의 0[V]이고, 검출 시에는 0.6[V] 이상일 경우와 0.6[V] 이하일 경우에 회로가 약간 다르게 구성된다.

다) “0.6[V]” 이상일 경우

- ① (a) 회로에서 센서의 출력이 정상시 0[V]에 가까우므로 트랜지스터는 “Off”가 되어 디지털 IC의 입력은 거의 동작전압에 가까워 “High”가 되고, 센서의 출력이 검출(0.6[V] 이상) 되었을 시에는 트랜지스터가 “On”으로 되어 디지털 IC의 입력은 거의 0[V]가 되어 “Low”로 된다.



② “R1”과 “Rc”의 저항값 결정방법

㉠ 먼저 “Rc”의 저항값은 디지털 IC

의 입력전류는 “수 십[μ A]” 이하이기 때문에 트랜지스터가 “Off” 되었을 때 “Rc”를 경유하여 디지털 IC에 전류가 흐를 수 있도록 “수 십[k Ω]” 이하의 저항이면 적당하며 보통은 “5[k Ω] ~ 20[k Ω]” 정도가 사용된다.

- ㉡ “R1”의 저항값은 센서의 출력 전류에 의하여 결정되며, 너무 작게 하면 센서에 무리를 주어 감도가 떨어질 수 있다. 대부분은 “수 십[k Ω]” 정도면 적당하며 일반적으로 “10[k Ω] ~ 50[k Ω]” 정도가 사용 되지만 센서의 규격에 “최적 부하 저항값”이 있으면 이에 따른 저항값을 사용하며 이때는 센서의 부하는 “R1”과 “트랜지스터의 입력저항”이 “병렬”이 되므로 이점도 주의하여 결정해야 하며, 참고로 트랜지스터의 입력저항은 “수 십[k Ω]” 정도이다.

라) “0.6[V]” 이하일 경우

① “R1”과 “Rc”의 저항값 결정방법

: “R1”과 “Rc” 저항값의 결정방법 “(a)와 동일”하다.

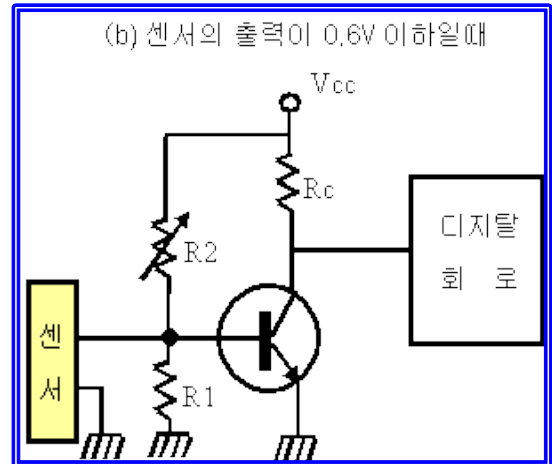
- ② “R2”는 “수 십[k Ω]”의 “가변 저항”을 사용하여 정상 시에 트랜지스터가 “Off”되고 센서의 감지 시에 “On”이 되도록 조정하는 것이 필요하며, 이때 “R1”과 “R2”의 비율이 “0.6[V] 대 Vcc”의 비와 거의 같은 정도가 되는 것이

준다.

③ “R1”과 “트랜지스터 입력저항(수 십 [kΩ])”의 병렬 저항이 센서의 부하가 되기 때문에 센서의 부하 드라이브 능력을 넘지 않게 “R1”이 “수 [kΩ](2 [kΩ] ~ 5[kΩ]정도)”이 되도록 한다.

④ 센서의 출력 신호가 “1 [ms]” 이하의 짧은 펄스인 경우 사용할 트랜지스터의 주파수 특성을 고려하여야 하지만, 그 이외의 주파수 특성은 걱정

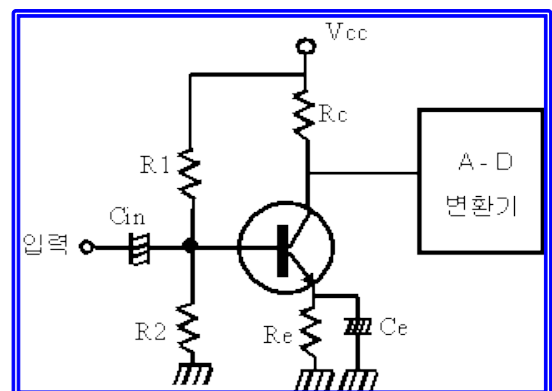
할 필요가 없으며 사용전압과 직류 전류 증폭률(h_{fe})이 적당한 것을 사용하면 된다. 출력 전류는 디지털 IC 정도라면 “수 십[μA]” 정도면 충분하다.



다. 아날로그 트랜지스터 회로 설계 시 유의 사항

1) 아날로그 신호를 증폭하기 위한 기본 회로는 대부분 이미터 접지 회로를 사용하며 최대한 깨끗하게 입력 신호를 증폭하여야 한다.

2) 기본 회로는 다음과 같으며 회로정수의 결정방법은 아래의 순서로 진행한다. 여기에서 사용할 전원(V_{CC})은 정해 있으므로, 사용할 트랜지스터의 직류 전류 증폭률(h_{fe})은 100으로 가정한다. 트랜지스터의 선정시 주파수 특성이 중요하고 이득 대역폭(f_T)이 높은 것을 사용할 필요가 있다.



예를 들어 트랜지스터의 주파수 이득 대역폭(f_T)이 200[MHz], 직류 전류 증폭률(h_{fe})

이 100 이라면, “200[MHz] ÷ 100 = 2[MHz]” 이므로 실제로 사용할 수 있는 주파수는 2[MHz] 정도가 된다.

따라서 10[MHz] 이상의 주파수로 사용하려면 트랜지스터의 주파수 이득 대역폭(f_T)은 1[GHz] 이상이 필요하다.

3) 컬렉터 저항(R_c)의 결정

가) 컬렉터 저항(R_c)은 컬렉터(부하) 전류(I_c)를 고려해서 결정해야 한다.

나) 전력증폭 회로인 경우에 “수 백[mA]” 정도의 전류가 필요하지만, 통상적으로 “수 [mA] ~ 수 십 [mA]” 정도가 일반적으로 사용되므로 “컬렉터 저항(R_c)”은 “무 신호” 시 출력전압이 전원의 “절반(1 / 2)”이 되도록 한다.

즉, “ $R_c = (V_{CC} / 2) \div I_c$ ” 로 계산하여 결정한다.

다) 예를 들어, 전원(V_{CC}) = 5[V], 컬렉터(부하) 전류(I_c) = 2 [mA] 이라면. 컬렉터 저항(R_c) = 1.25[kΩ] = 약 1[kΩ] 이 된다.

4) 이미터 저항(R_e)의 결정

가) 이미터 저항(R_e)은 입력 신호가 1[V] 이상이 되어도 출력이 포화하지 않도록 하여 신호를 깨끗하게 증폭할 수 있도록 한다. 이미터 저항(R_e)값의 결정은 통상 “컬렉터 저항(R_c)”의 “1/5 ~ 1/10” 정도로 설정한다.

나) 예를 들어, 컬렉터 저항(R_c) = 1[k Ω]이면, 이미터 저항(R_e)값은 “100[Ω] ~ 200[Ω]” 정도이다.

5) 베이스 저항(R_1 과 R_2)의 결정

가) 제일 먼저 필요한 “베이스 전압(V_B)”을 구한다.

무 신호시 이미터 저항(R_e)에는 컬렉터(부하) 전류(I_C)가 흐르고 있고 베이스와 이미터 사이의 전압(V_{BE})은 약 0.6[V]로 거의 일정하므로 “ $V_B = I_C \times R_e + V_{BE}$ ”가 된다. 따라서 “ $V_B = 2 \text{ [mA]} \times 200 \text{ [}\Omega\text{]} + 0.6 \text{ [V]} = 1.0 \text{ [V]}$ ”가 된다.

나) 베이스 전류(I_B)를 직류 전류 증폭률(h_{fe})에 의해 계산하면, “ $I_B = I_C \div h_{fe}$ ” 이므로, “ $I_B = 2 \text{ [mA]} \div 100 = 0.02 \text{ [mA]}$, ($h_{fe} = 100$)”가 된다.

다) 여기에서 베이스 저항(R_B)은 베이스 전류(I_B)가 “10”배 이상의 전류가 흐르게 하여 베이스 전류(I_B) 및 베이스 전압(V_B)이 변동하지 않도록 하며 “ R_1 ”과 “ R_2 ”는 다음과 같이 계산한다.

$$\textcircled{1} R_1 = (V_{CC} - V_B) \div (10 \times I_C) \Rightarrow R_1 = (5 \text{ [V]} - 1 \text{ [V]}) \div 10 \times 0.02 \text{ [mA]} = 20 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

$$\textcircled{2} R_2 = (V_B) \div (10 \times I_C) \Rightarrow R_2 = 1 \text{ [V]} \div (10 \times 0.02 \text{ [mA]}) = 5 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

5) 커플링 콘덴서(C_{in})의 용량 결정

가) 교류신호를 증폭하는 경우에는 직류전압의 영향을 받지 않기 위해 커플링 콘덴서(C_{in})가 필요하다.

나) 이 값은 입력 신호의 최저 주파수(f_c)에 대하여 충분히 무시할 수 있는 임피던스가 되도록 결정하여야 한다. 입력용 커플링 콘덴서(C_{in})은 트랜지스터의 입력 임피던스를 “ R_{in} ”이라고 한다면, “ $f_c > 1 \div (2\pi \times R_{in} \times C_{in})$ ” 이 되도록 정해야 하며, 입력 임피던스(R_{in})는 대략 “ R_1 ”과 “ R_2 ”의 병렬 저항값이 된다.

다) 예를 들어, “ $f_c = 20 \text{ [Hz]}$ ”이면, “ $C_{in} > 1 \div (6.28 \times 4 \text{ [k}\Omega\text{]} \times 20 \text{ [Hz]}) = \text{약 } 2 \text{ [}\mu\text{F]}$ ” 이므로 “ C_{in} ”은 “2.2[μF] ~ 4.7[μF]” 정도를 사용하면 된다.

6) 바이패스 콘덴서(C_e)의 용량 결정

가) 이미터의 콘덴서도 최저 주파수에 대하여 충분히 낮은 임피던스가 되도록 정해야 하므로, “ $C_e > 1 \div (2\pi \times f_c \times R_e)$ ”로 구한다.

나) 예를 들어, “ $f_c = 20 \text{ [Hz]}$ ”이면, “ $C_e > 1 \div (6.28 \times 20 \text{ [Hz]} \times 200 \text{ [}\Omega\text{]}) = \text{약 } 40 \text{ [}\mu\text{F]}$ ”이므로 “ C_{in} ”은 “47[μF] ~ 100[μF]” 정도를 사용하면 된다.

7) 참고적으로 직류신호의 증폭 시에는 “커플링 콘덴서(C_{in})” 및 “바이패스 콘덴서(C_e)”는 사용하지 않는다.

* 참고 사항(데이터 시트 참조)

1. 베이스와 이미터간의 항복전압은 대략 5~7[V](트랜지스터마다 상이함.) 정도이다. 따라서 5[V] 또는 7[V]의 제너 다이오드로 사용할 수 있다.

2. 베이스와 컬렉터 사이의 항복전압은 수십 ~ 수백[V](트랜지스터마다 상이함.) 정도이다. 따라서 스위칭 다이오드로 사용할 수 있다.