

트랜지스터와 집적회로

IoT 응용 설계

청주대학교 전자공학과
한철수

개요

- 트랜지스터는 전류의 흐름을 제어하는 데 사용된다.
- 디지털 전자부품으로서 트랜지스터의 전류 흐름 제어는 온/오프 작동의 형태를 띈다.
- 이때 트랜지스터는 전자 스위치의 역할을 한다.

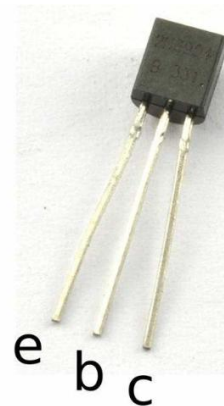
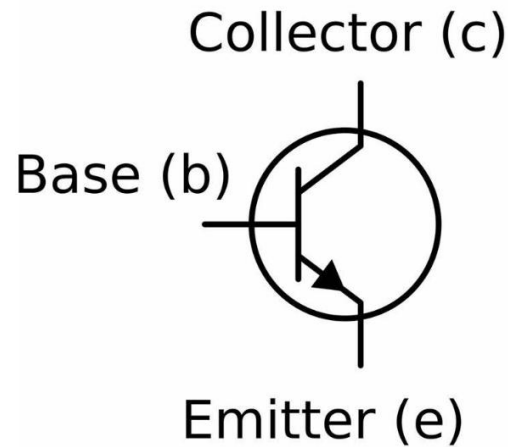
-
- 아날로그 전자부품으로서 트랜지스터는 신호를 선형으로 증폭시키는 데 사용된다.
 - 그러나 오늘 날 신호 증폭에 더 바람직한(더 싸고 안정적인) 방법은 다수의 트랜지스터와 다른 부품을 하나의 패키지 안에 내장한 집적회로 칩을 사용하는 것이다.

-
- 이 장에서는 다이오드와 트랜지스터와 같은 반도체의 작동 원리를 의도적으로 다루지 않고 넘어간다.
 - 반도체와 관련된 물리학에 관심이 있다면 반도체 이론을 다룬 다른 책이나 인터넷 자료를 참고하자.
 - 트랜지스터를 사용하고 싶을 뿐이라면 전자, 정공, 도핑 등을 반드시 알아야 할 필요는 없다.
 - 이 장에서는 디지털 회로에서 트랜지스터를 사용하는 방법에 초점을 맞춘다.

약한 전류를 사용해서 강한 전류 스위칭하기

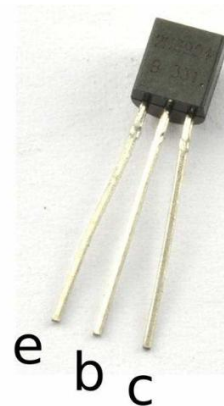
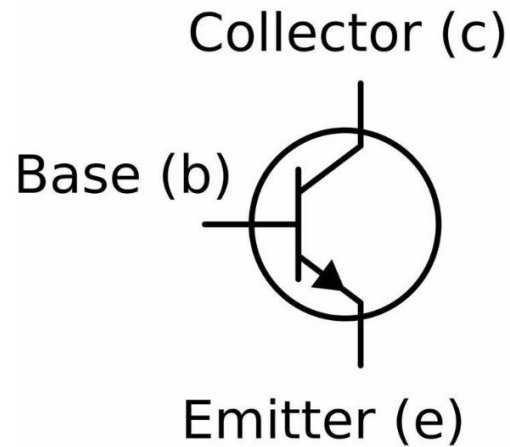
- 디지털 스위치가 필요하다면 가격이 저렴한 양극성 접합 트랜지스터(Bipolar junction transistor, BJT)를 사용한다.
- 2N3904와 같은 BJT는 몇 백원이면 구입할 수 있고, 마이크로컨트롤러의 출력 핀과 연결해 전류의 흐름을 제어할 수 있다.

- BJT 회로도 기호와 2N3904의 모습은 아래 그림과 같다.
- 트랜지스터의 기호는 보통 원으로 둘러싸인 형태를 하고 있지만, 원 안의 기호만 사용하는 경우도 있다.
- 2N3904는 TO-92라고 불리는 검은 플라스틱 패키지를 사용한다.
- 여러 저전력 트랜지스터들이 TO-92 패키지로 공급된다.



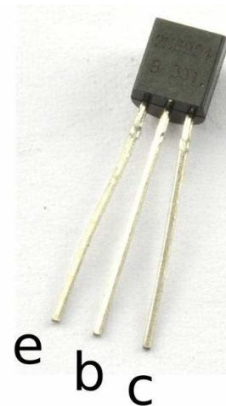
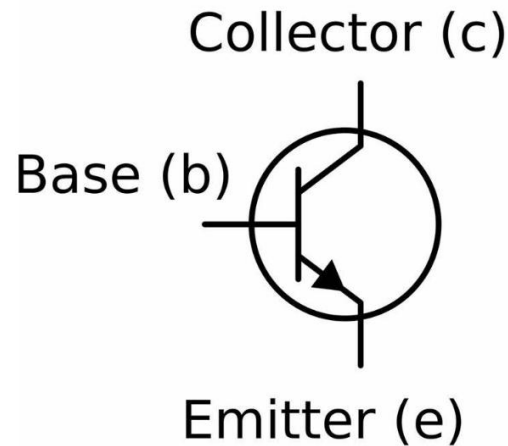
2N3904
Transistor

- 컬렉터
 - 제어할 주 전류는 컬렉터로 흘러 들어온다.
- 베이스
 - 제어용 전류 연결
- 이미터
 - 주 전류는 이미터를 통과해 흘러 나간다.



2N3904
Transistor

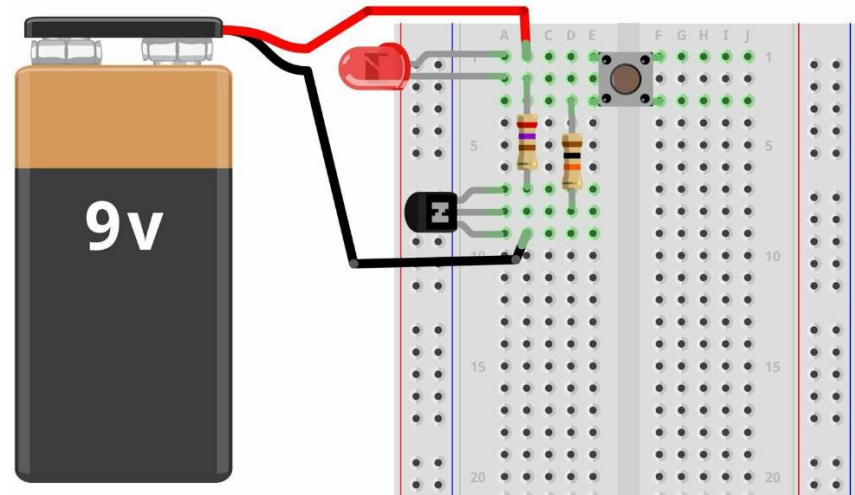
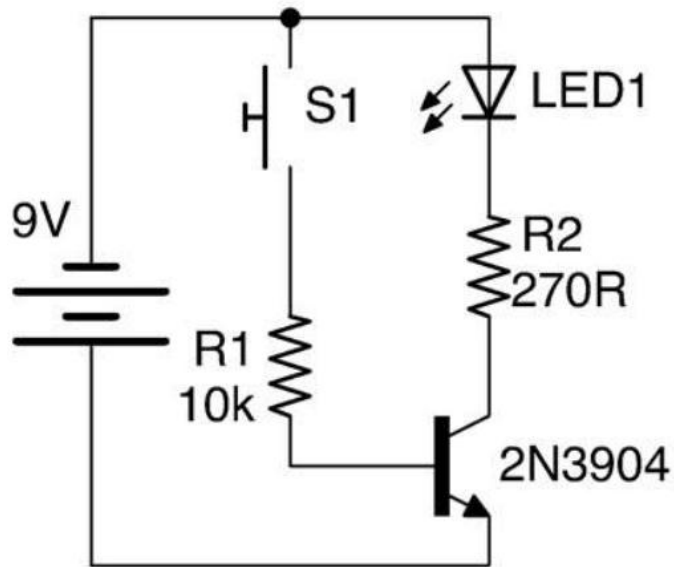
- 컬렉터로 들어가 이미터로 나오는 주 전류를 제어하기 위해 베이스로 들어가 이미터로 나오는 훨씬 작은 전류가 사용된다.
- 베이스 전류와 컬렉터 전류의 비를 트랜지스터의 전류 이득 (gain)이라고 하고, 그 크기는 보통 100~400이다.
- 이득이 100인 트랜지스터라면 1mA의 전류가 베이스에서 이미터로 흐를 때 컬렉터에서 이미터로 100mA의 전류를 흘려 보낼 수 있다.



2N3904
Transistor

BJT의 논의 사항

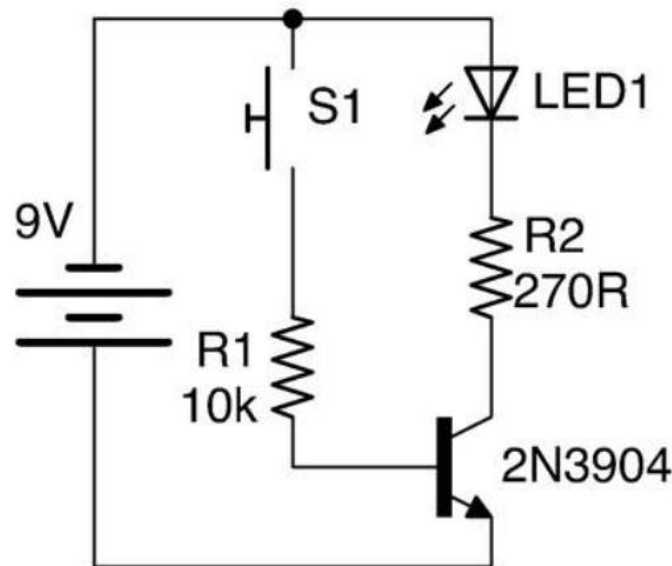
- 아래 회로에서 푸시 버튼을 누르면 LED가 켜진다.



- R1과 베이스를 통과해 흐를 수 있는 최대 전류 계산

$$I = \frac{V}{R} = \frac{9V}{10k} = 0.9mA$$

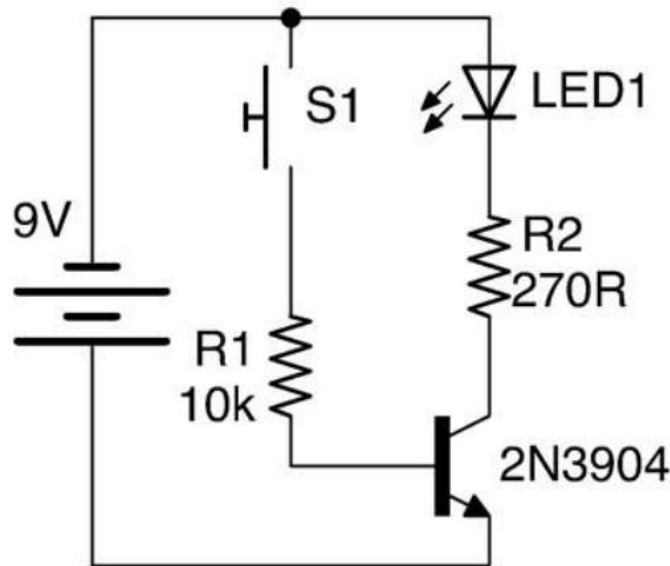
- 실제 전류는 이보다 더 작다. 트랜지스터의 베이스와 이미터 사이에 0.6V의 전압이 걸리는 것을 무시했기 때문이다.



- 실제 전류 값

$$I = \frac{V}{R} = \frac{(9V - 0.6V)}{10k} = 0.84mA$$

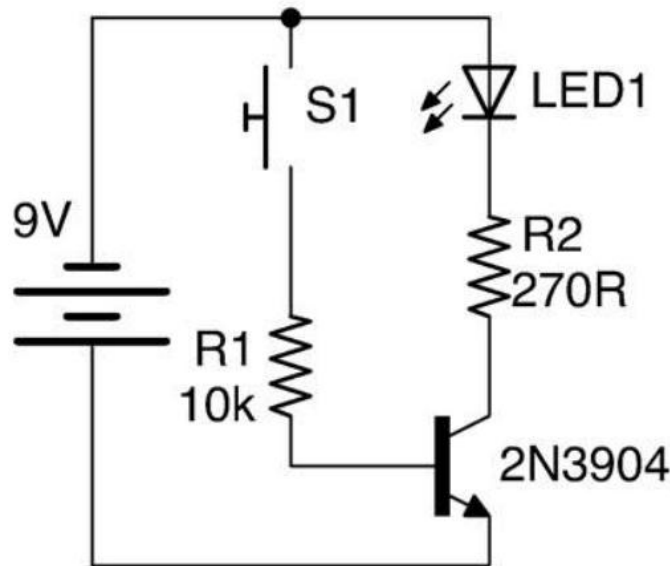
- 다이오드와 마찬가지로 BJT가 사용될 때 베이스와 이미터 연결 사이에 전압이 거의 일정하게 0.5V~1V 정도 줄어든다.



- 트랜지스터의 주 전류 값 (LED의 V_f 는 1.8V)

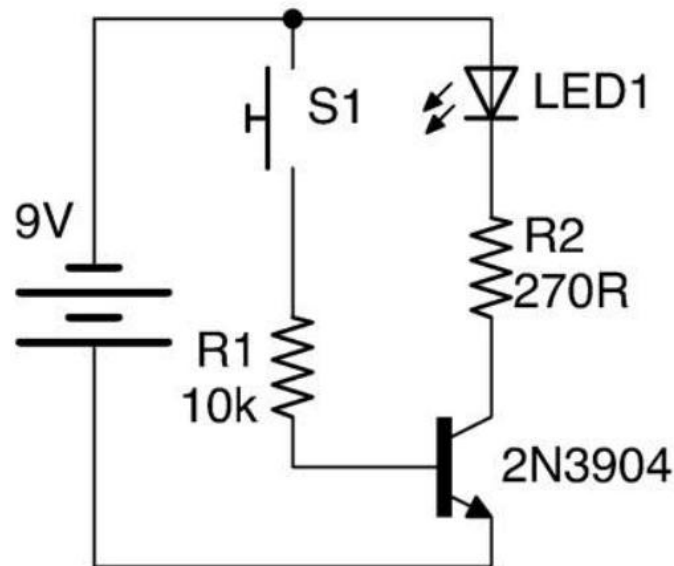
$$I = \frac{V}{R} = \frac{9V - 1.8V}{270} = 26.67mA$$

- 0.84mA의 작은 전류로 26.67mA의 큰 전류를 제어한다.

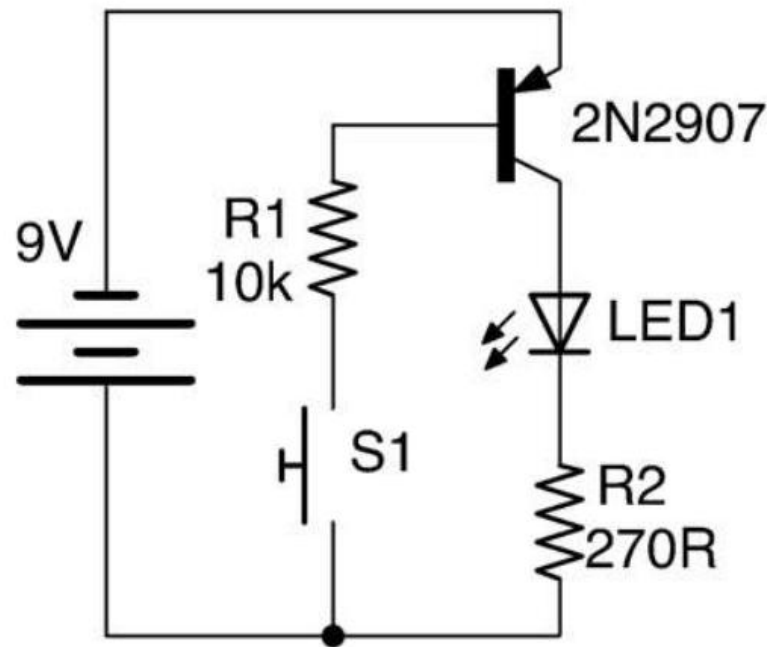


-
- 베이스로 흘러 들어가는 전류를 제한하기 위해 저항을 반드시 사용해야 한다.
 - 지나치게 높은 전류가 베이스로 들어가면 트랜지스터가 과열 되다가 결국 연기를 내며 타 버린다.
 - 베이스에 걸리는 전압이 약 $0.6V$ 를 넘으면 베이스는 자기 파괴적일 정도로 커다란 전류를 끌어 온다.
 - 따라서 항상 베이스에 저항을 사용해 주어야 한다.

- 아래 회로에서 BJT는 가장 일반적인 NPN(음극-양극-음극) 유형이다.
- N형 반도체라는 빵과 P형 반도체라는 속으로 만든 샌드위치처럼 생겼음을 뜻한다.
- BJT는 사용 빈도가 조금 낮지만 PNP(양극-음극-양극) 유형도 있다.



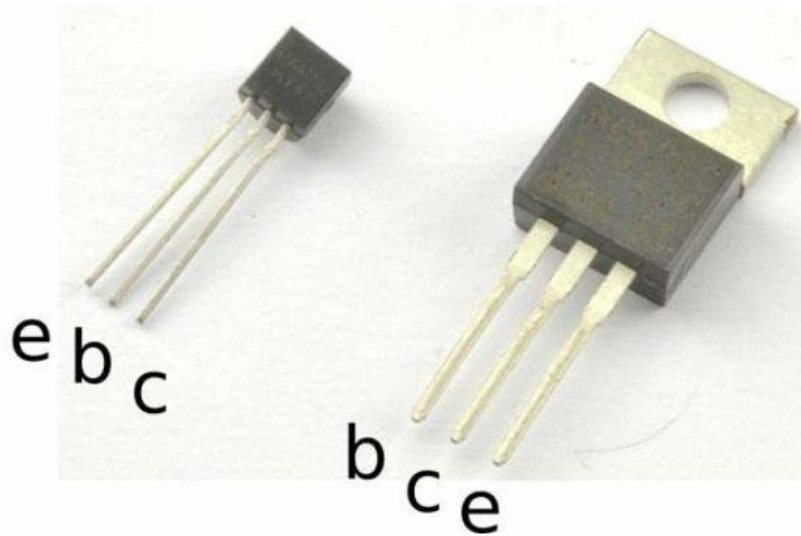
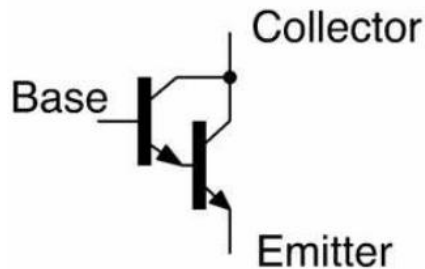
- PNP 유형은 P형 반도체라는 빵과 N형 반도체라는 속으로 만든 샌드위치처럼 생겼음을 뜻한다.
- PNP 유형은 NPN 유형과 모든 것이 반대이다.



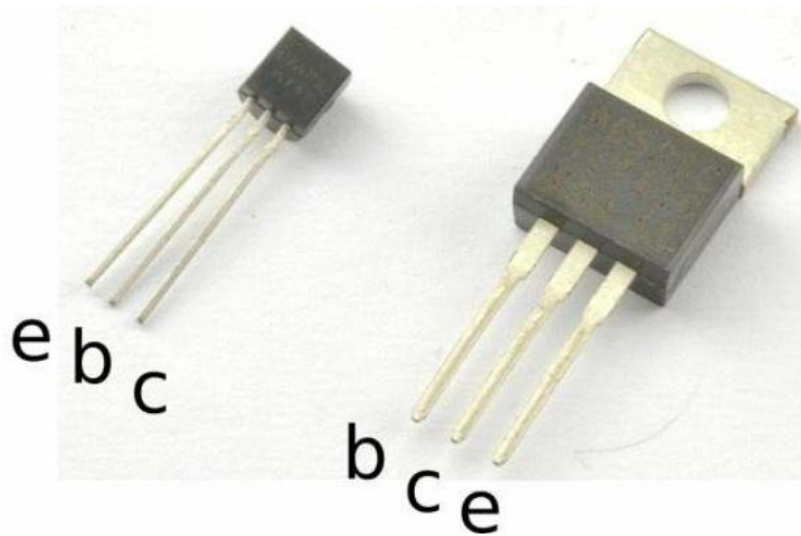
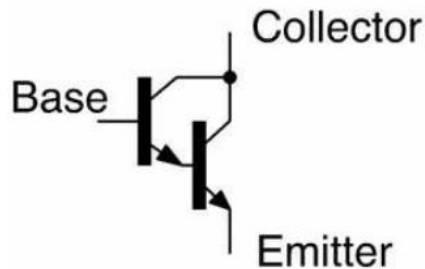
최소 제어 전류로 전류 스위칭하기

- 아주 소량의 제어 전류로 주 전류를 스위칭하려면 BJT보다 더 큰 이득이 필요하고, 이때 달링턴(Darlington) 트랜지스터를 사용한다.
- 일반적인 BJT의 이득은 약 100 정도이다.
- 대부분의 경우 이 정도의 이득으로 충분하지만, 더 큰 이득이 필요한 경우도 있다.
- 이득을 높이는 가장 간단한 방법은 이득이 보통 10,000이 넘는 달링턴 트랜지스터를 사용하는 것이다.

- 달링턴 트랜지스터는 BJT 2개를 하나의 패키지에 넣은 형태로 구성된다.
- 달링턴 트랜지스터는 두 가지 유형이 있다.
- 작은 쪽이 MPSA14, 큰 쪽이 TIP120이다.



- 달링턴 트랜지스터의 전류 이득은 첫 번째 트랜지스터의 이득에 두 번째 트랜지스터의 이득을 곱한 값이다.
- 두 번째 트랜지스터의 베이스가 첫 번째 트랜지스터의 주 전류를 공급 받기 때문이다.



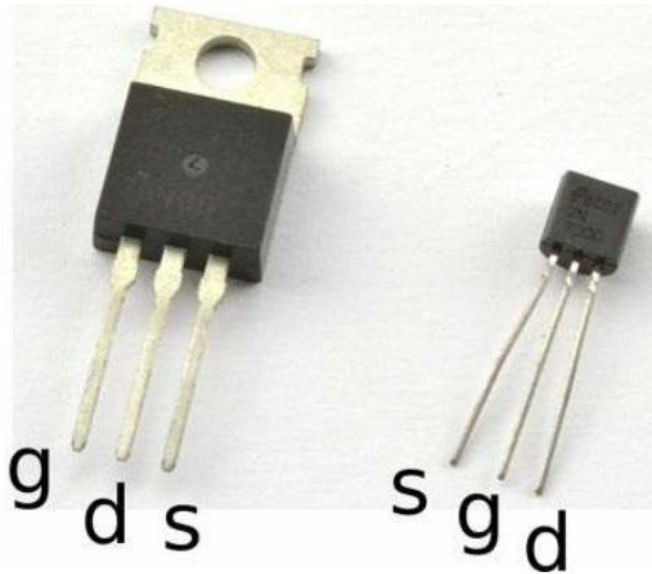
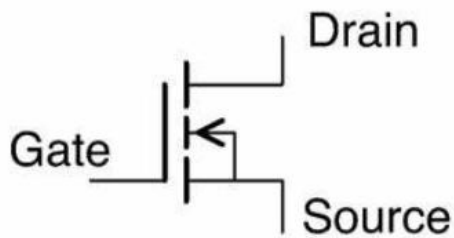
달링턴 트랜지스터의 논의 사항

- 회로 설계 시 BJT를 사용하는 것처럼 달링턴 트랜지스터를 사용할 수 있지만, 베이스와 에미터 사이에 전압 강하가 2번 일어날 수 있다.
- 매우 이득이 높은 NPN BJT와 비슷한 행동을 보이지만, 베이스와 에미터 사이에 전압 강하가 2배가 된다.
- 달링턴 트랜지스터 중 TIP120이 많이 사용된다.
- TIP120은 높은 전력에서 동작할 수 있고, 최대 5A의 주 전류를 처리할 수 있다.

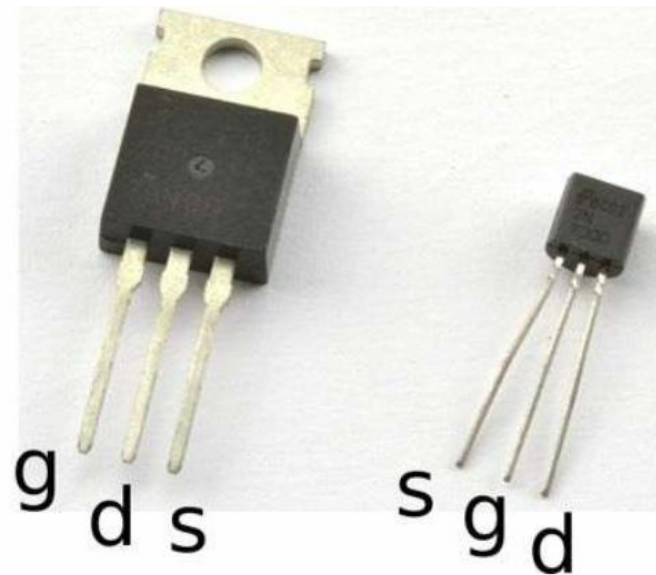
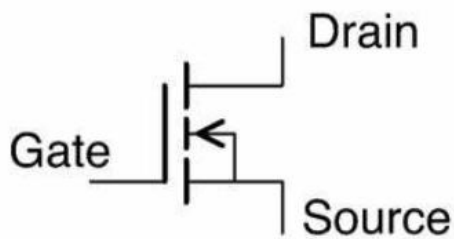
높은 전류 부하를 효율적으로 스위칭하기

- 모터처럼 정말 크고 잡음이 많은 부하를 스위칭하면서도 발열을 줄이고 효율성을 높이고 싶다면 MOSFET를 사용한다.
- MOSFET(metal-oxide semiconductor field effect transistor)에는 컬렉터, 베이스, 이미터 대신 드레인, 게이트, 소스가 있다.
- BJT의 NPN, PNP 유형처럼 MOSFET은 N채널과 P채널의 2가지 유형이 있다.

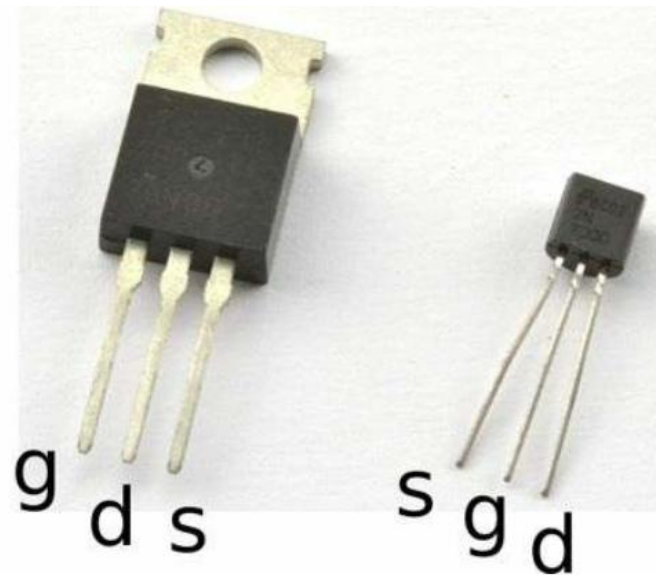
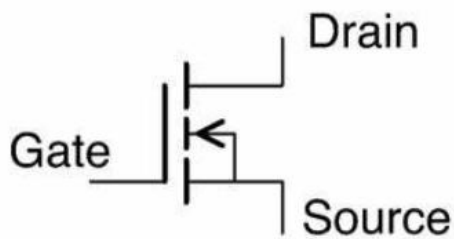
- 가장 널리 사용되는 MOSFET은 N채널 유형이다.
- 아래에 N채널 MOSFET의 회로도 기호와 보통 이용되는 두 가지 유형의 MOSFET을 나타낸다.



- 그림에서 큰 것(TO-220 패키지)이 FQP30N06 MOSFET이다.
- 60V 전압에서 30A의 전류를 스위칭 할 수 있다.
- TO-220 패키지에 난 구멍은 히트 싱크에 나사로 고정할 때 사용된다.
- 히트 싱크는 큰 전류를 스위칭 할 때만 필요하다.

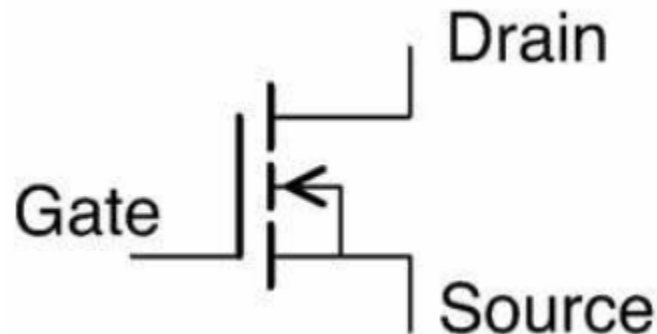


- 그림에서 작은 것은 2N7000 MOSFET이다.
- 60V 전압에서 500mA의 전류를 스위칭 할 수 있다.



-
- BJT에서는 베이스-이미터, 베이스-컬렉터 사이에 연결이 존재하고 그 사이에 흐르는 전류가 이득 배가 된다.
 - 그러나 MOSFET의 게이트-드레인, 게이트-소스 사이에는 아무런 연결이 없다.
 - 그 사이에 절연층이 놓여 있어 그 사이가 분리된다.

- 게이트-드레인 사이의 전압이 문턱 전압(threshold voltage)을 넘으면 MOSFET은 전도 상태가 되고, 드레인-소스 사이에 대량의 전류가 흐를 수 있다.
- 문턱 전압은 2V-10V 사이이다.
- 마이크로 컨트롤러의 디지털 출력을 처리하기 위해 고안된 MOSFET은 로직 레벨(logic-level) MOSFET이라고 불리고, 게이트의 문턱 전압은 3V를 넘지 않는다.



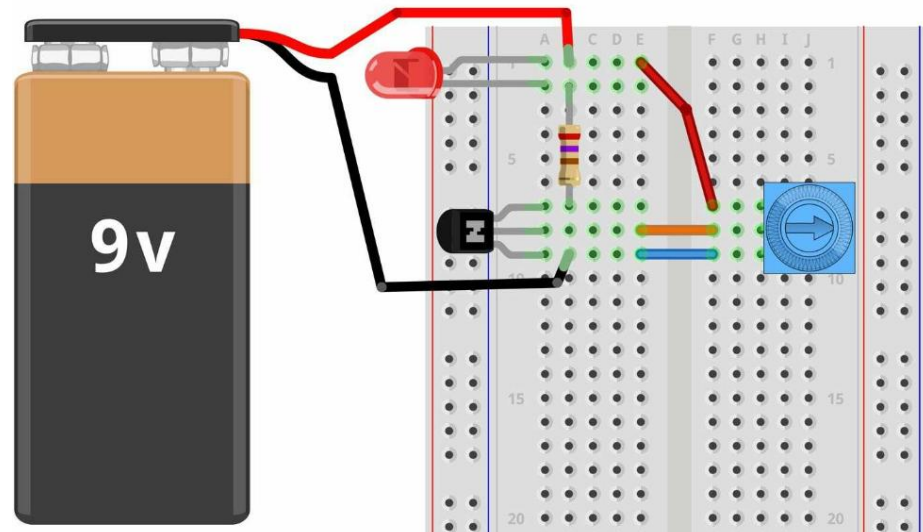
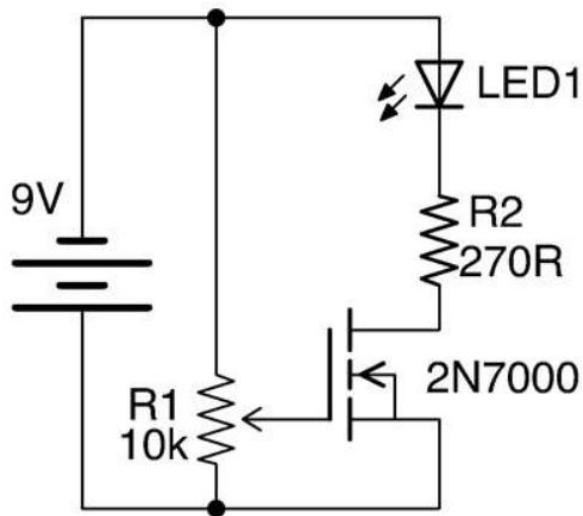
-
- MOSFET의 데이터시트를 보면 트랜지스터의 온(on)/오프(off) 저항을 명시하고 있다.
 - 온 저항은 수 $m\Omega$ 로 매우 작고, 오프 저항은 수 $M\Omega$ 에 달한다.
 - 따라서 MOSFET이 BJT보다 훨씬 더 큰 전류를 스위칭하더라도 발열이 시작되기까지 더 여유가 있다.

-
- MOSFET을 통과해 흐르는 전류와 온 저항을 알면 발생하는 열 에너지의 크기를 계산할 수 있다.

$$P = I^2 R_{on}$$

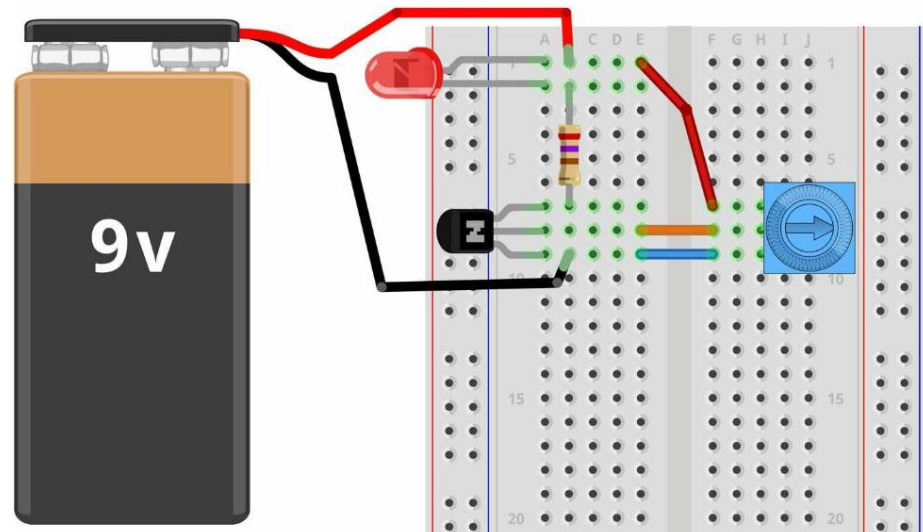
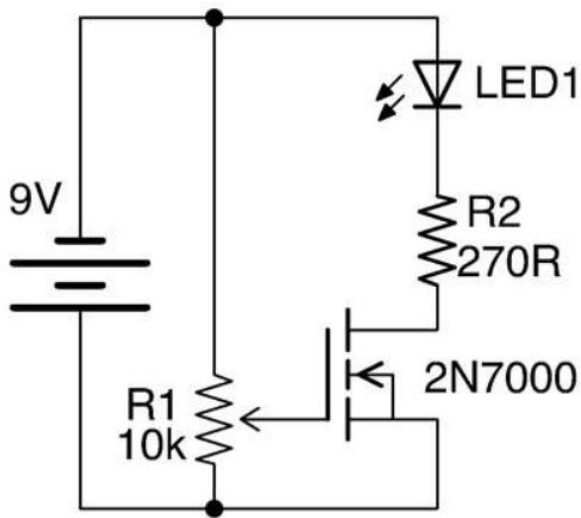
MOSFET의 논의 사항

- 가변 저항을 사용해서 게이트 전압을 0V와 배터리 전압 사이의 값으로 설정할 수 있다.
- 가변 저항의 일종인 트림팟(trimpot)의 손잡이 부분을 트랙의 0V 쪽으로 끝까지 돌리면 LED가 꺼진다.
- 게이트 전압을 약 2V로 증가시키면 LED는 빛을 내기 시작하고, 게이트 전압이 2.5V 정도가 되면 LED의 밝기가 최고가 된다.



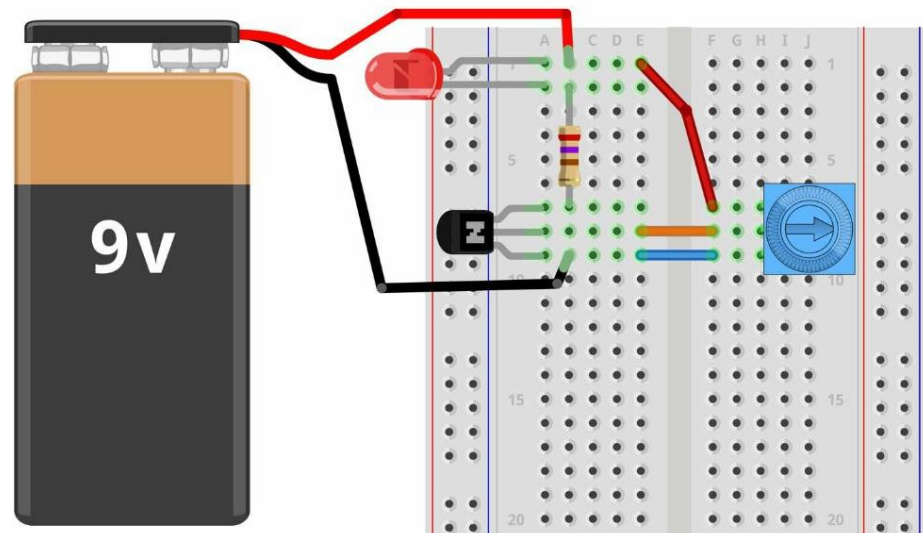
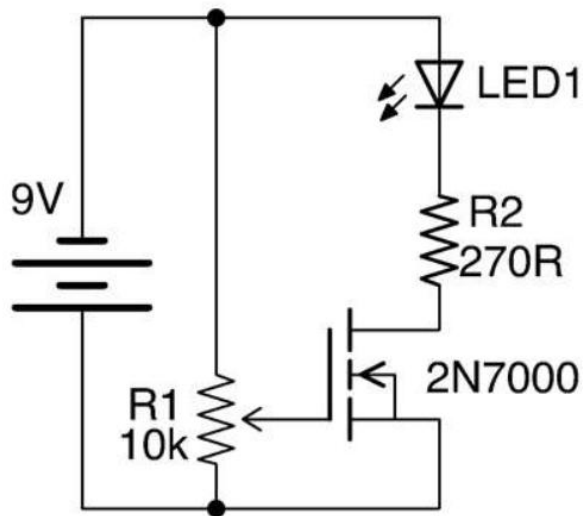
MOSFET의 논의 사항

- 가변 저항의 슬라이더에 연결된 리드선의 한쪽 끝을 분리하여 배터리의 양극(+) 단자에 대어 보자.
- 그러면 LED가 켜질 것이고, 게이트에 연결했던 리드선을 양극 단자에서 떼어내더라도 LED는 계속 켜진 상태를 유지할 것이다.
- 이는 MOSFET의 게이트에 축적된 전하가 게이트 전압을 문턱 전압 이상으로 유지하기에 충분하기 때문이다.



MOSFET의 논의 사항

- 게이트를 접지에 닿게 하면 축적된 전하가 접지로 빠져나가면서 LED가 꺼지게 된다.



MOSFET의 논의 사항

- MOSFET은 전류가 아닌 전압으로 제어되는 소자이다.
- 그러나 특정 상황에서는 게이트로 유입되는 전류를 고려해야 한다.
- 이는 게이트가 커패시터의 한쪽 단자처럼 동작하기 때문입니다.
- 커패시터는 충전과 방전 과정을 거치므로, 고주파 펄스가 인가 될 때 게이트 전류가 상당한 수준에 이를 수 있다.
- 따라서 게이트에 전류 제한 저항을 사용하여 과도한 전류가 흐르는 것을 방지한다.

MOSFET의 논의 사항

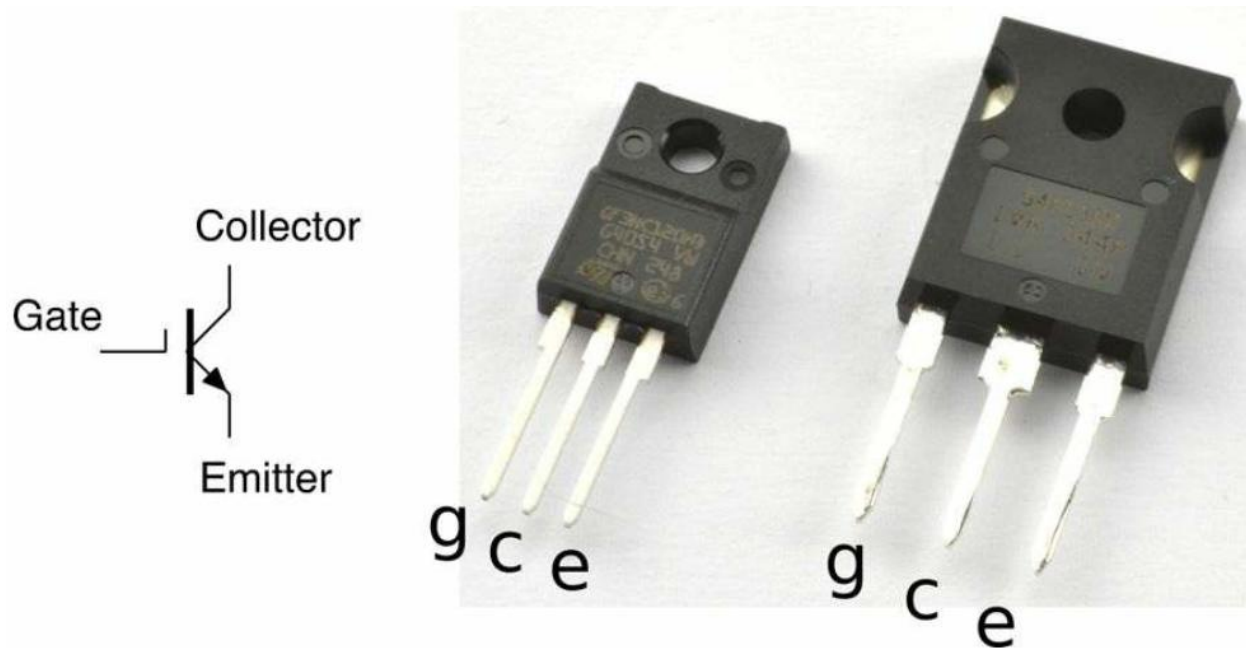
- MOSFET과 BJT 사용 시의 또 다른 차이점은 MOSFET의 게이트 연결이 플로팅(floating) 상태로 방치될 경우, 의도치 않게 MOSFET이 켜질 수 있다는 것이다.
- 이는 MOSFET의 게이트와 소스 사이에 저항을 연결함으로써 방지할 수 있다.

아주 높은 전압 스위칭하기

- 절연 게이트 양극성 트랜지스터 (insulated gate bipolar transistor, IGBT)는 흔히 사용되는 트랜지스터 유형은 아니지만, 고전력, 고전압 스위칭 장치에서 사용된다.
- IGBT는 스위칭이 빠르며, 일반적으로 동작 전압 값에 특화되어 있다.
- IGBT의 경우 스위칭 전압이 1,000V인 경우도 있다.

-
- BJT에는 베이스, 이미터, 컬렉터 단자가 있다.
 - MOSFET에는 게이트, 소스, 드레인 단자가 있다.
 - IGBT는 이들 두 유형을 결합한 형태로, 게이트, 이미터, 컬렉터 단자가 있다.

- 아래에 IGBT의 회로도 기호와 두가지 유형의 IGBT 제품을 나타낸다.
- 둘 중 작은 쪽(STGF3NC120HD)은 1.2kV 전압에서 7A의 전류를 스위칭할 수 있다.
- 큰 쪽(IRG4PC30UPBF)은 600V 전압에서 23A의 전류를 스위칭할 수 있다.



IGBT의 논의 사항

- IGBT는 MOSFET과 마찬가지로 전압 제어 소자이다.
- 그러나 트랜지스터의 스위칭 동작 측면에서는 BJT와 유사하게 작동한다.
- 또한 IGBT의 게이트는 MOSFET과 마찬가지로 문턱 전압을 갖습니다.

-
- IGBT는 고전력 MOSFET과 동일한 용도로 사용되기도 한다.
 - 그러나 MOSFET에 비해 동일한 수준의 대전류 조건에서 더 높은 전압을 스위칭할 수 있다는 장점이 있다.

딱 맞는 트랜지스터 선택하기

- 선택할 수 있는 트랜지스터가 아주 많을 때, 어떻게 딱 맞는 트랜지스터를 고를 수 있을까?
- 먼저 대부분의 경우에 사용할 수 있는 기본적인 트랜지스터 위주로 선택한다.
- 이후에 조금 더 예외적인 사양이 필요할 때에 그에 해당하는 제품을 찾는다.

- 제일 먼저 고려해 볼 트랜지스터 목록

Transistor	Type	Package	Max. Current	Max. Volts
2N3904	Bipolar	TO-92	200mA	40V
2N7000	MOSFET	TO-92	200mA	60V
MPSA14	Darlington	TO-92	500mA	30V
TIP120	Darlington	TO-220	5A	60V
FQP30N06L	MOSFET	TO-220	30A	60V

- FQP30N06L을 구입할 경우, MOSFET이 부품 번호의 마지막 이 'L'이 붙어 있는 논리용 버전인지 확인해야 한다.
- 그렇지 않으면 게이트의 문턱 전압 요건이 지나치게 높아서 마이크로 컨트롤러의 출력에 연결했을 때, 특히 동작 전압이 3.3V일 때 문제가 될 수 있다.

Transistor	Type	Package	Max. Current	Max. Volts
2N3904	Bipolar	TO-92	200mA	40V
2N7000	MOSFET	TO-92	200mA	60V
MPSA14	Darlington	TO-92	500mA	30V
TIP120	Darlington	TO-220	5A	60V
FQP30N06L	MOSFET	TO-220	30A	60V

- MPSA14는 사실 최대 1A의 전류에서라면 어디에서나 상당히 유용하게 사용할 수 있는 장치이다.
- 그러나 1A 전류 크기에서는 3V에 가까운 전압 강하가 발생하고 장치의 온도가 최대 120°C까지 올라 갈 수 있다.
- 500mA에서는 전압 강하가 조금 더 적절한 수준인 1.8V이고, 온도도 60°C 정도 까지만 올라간다.

Transistor	Type	Package	Max. Current	Max. Volts
2N3904	Bipolar	TO-92	200mA	40V
2N7000	MOSFET	TO-92	200mA	60V
MPSA14	Darlington	TO-92	500mA	30V
TIP120	Darlington	TO-220	5A	60V
FQP30N06L	MOSFET	TO-220	30A	60V

- 정리하자면, 약 100mA의 전류를 스위칭 하는 정도라면 2N3904로 충분하다.
- 최대 500mA의 전류를 스위칭한다면 MPSA14를 사용하자.
- 그 이상일 경우, 가격을 고려하지 않는다면 FQP30N06L이 제일 좋은 선택지이다.
- TIP120은 FQP30N06L보다 훨씬 저렴하다.

Transistor	Type	Package	Max. Current	Max. Volts
2N3904	Bipolar	TO-92	200mA	40V
2N7000	MOSFET	TO-92	200mA	60V
MPSA14	Darlington	TO-92	500mA	30V
TIP120	Darlington	TO-220	5A	60V
FQP30N06L	MOSFET	TO-220	30A	60V

트랜지스터 선택의 논의 사항

- 앞선 표에 수록되지 않는 트랜지스터를 찾아야 하는 이유로는 다음과 같은 것들이 있다.
- 고주파수에서 스위칭해야 한다.
 - RF용으로 명시된 BJT나 FET를 찾아본다.
- 더 높은 전압을 스위칭해야 한다.
 - 최대 400V까지 지원하는 BJT나 MOSFET를 쉽게 구할 수 있다.
 - 그 이상의 전압이 필요할 때는 IGBT를 고려해 본다.
- 높은 전류에서는 MOSFET이 심한 부하를 받는다.
 - 온(on) 저항이 가장 낮은 것을 찾는다.
 - 저항은 장치가 얼마나 뜨거워지는지를 결정하는 주요 요소이다.
 - 따라서 고장 나기 전에 얼마나 많은 전류를 견딜 수 있는지를 결정한다.

트랜지스터의 데이터시트(datasheet)

- 회로를 설계할 때는 실험을 시작하기에 앞서 해당 부품이 실제로 어떻게 동작하는지 정확히 파악해야 한다.
- 모든 부품에는 최소한 '절대 최대 정격(absolute maximum ratings)'을 명시한 데이터시트가 있다.
- 이 정보는 해당 부품을 확실하게 파괴하려면 어떻게 해야 하는지를 알려준다.

- 예를 들어, 2N3904 트랜지스터의 데이터시트를 살펴보면 아래 표에 제시된 정보를 담고 있는 '절대 최대 정격(absolute maximum ratings)' 항목을 확인할 수 있다.
- 이러한 한계치 이내로만 사용한다면, 데이터시트는 해당 소자가 정상적으로 작동할 것임을 사실상 보장한다.
- 물론, 항상 안전을 고려하여 여유를 두는 것이 바람직하다.

Symbol	Parameter	Value	Units
V _{cb0}	Collector-Base Voltage	60	V
I _c	Collector Current	200	mA
P _{tot}	Total Dissipation at 25 degrees C	625	mW
T _j	Max. Junction Temperature	150	C

- 데이터시트에는 정상적인 조건에서 해당 소자가 어떻게 작동하는지를 설명하는 '전기적 특성(electrical characteristics)' 항목도 포함되어 있다.
- 트랜지스터의 경우, 가장 주목해야 할 항목은 DC 이득(DC gain)입니다.
- 2N3904 데이터시트의 DC 이득은 아래 표와 같다.

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
hFE	DC Current Gain	Ic=0.1mA (all Vce=1V)	60		300	
		Ic=1mA	80			
		Ic=10mA	100			
		Ic=100mA	30			

- 10mA에서 기대할 수 있는 최소 이득이 100이라는 것을 의미한다.
- 즉, 컬렉터 전류가 10mA일 때 베이스 전류는 0.1mA만 있으면 된다는 뜻이다.
- 반면 컬렉터 전류가 100mA가 되면 이득이 30으로 급격히 떨어진다는 점에 주목하자.
- 이는 3.33mA의 베이스 전류가 필요함을 의미한다.

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
hFE	DC Current Gain	Ic=0.1mA (all Vce=1V)	60		300	
		Ic=1mA	80			
		Ic=10mA	100			
		Ic=100mA	30			

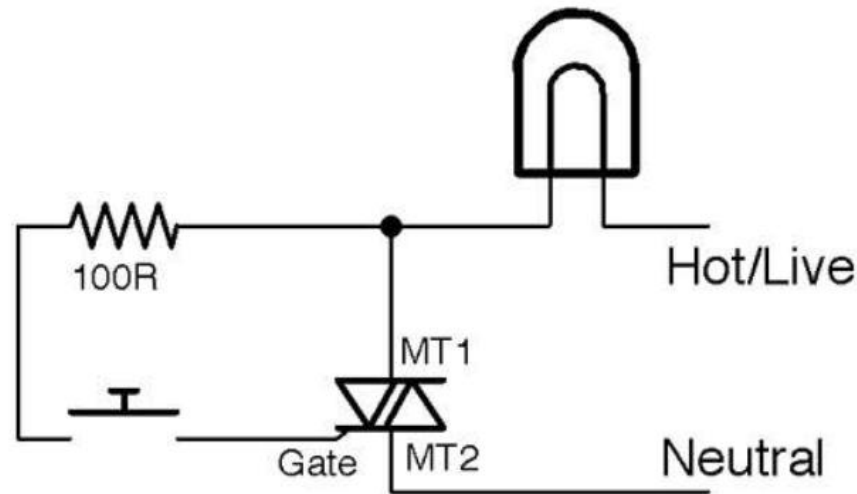
- 실제로는 이득이 이보다 훨씬 클 수 있지만, 설계 시 이를 전제로 해서는 안 된다.
- 특정 트랜지스터의 개별 특성에 의존하게 될 위험이 있기 때문이다.
- 즉, 다른 제조 시설에서 생산된 동일 모델의 트랜지스터를 사용하여 회로를 구현할 경우 설계가 제대로 작동하지 않을 수 있다.

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
hFE	DC Current Gain	Ic=0.1mA (all Vce=1V)	60		300	
		Ic=1mA	80			
		Ic=10mA	100			
		Ic=100mA	30			

교류 스위칭하기

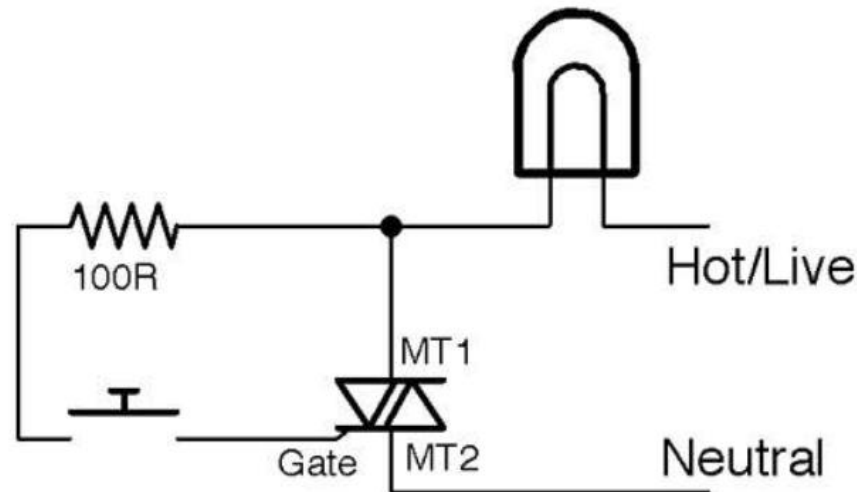
- 트라이악(TRIode for alternating current, TRIAC)은 교류를 스위칭하기 위해 특별히 설계된 반도체 스위칭 소자이다.
- BJT나 MOSFET은 교류를 스위칭하는 데 적합하지 않다.
- 이들을 사용하여 교류를 스위칭하려면 사이클의 양의 구간과 음의 구간을 분리한 뒤 각각 별도의 트랜지스터로 제어해야만 한다.

- 따라서 서로 반대 방향으로 연결된 다이오드 한 쌍을 스위치로 제어하는 것과 같은 원리로 작동하는 트라이악(TRIAC)을 사용하는 편이 훨씬 낫다.
- 아래 그림은 소전류 스위치를 사용하여 대용량 AC 부하를 스위칭하는 데 TRIAC이 어떻게 활용될 수 있는지를 보여준다.
- 이와 같은 회로는 소형 저전력 기계식 스위치로 대용량 AC 전류를 제어할 수 있도록 하기 위해 흔히 사용된다.



트라이악의 논의 사항

- 스위치를 누르면 수십 mA 정도의 미세한 전류가 트라이악의 게이트로 흐른다.
- 이때 트라이악은 도통 상태가 되며, 교류 전압이 다시 0V를 지날 때까지 그 상태를 유지한다.
- 이러한 방식은 전압이 0에 가까운 낮은 전력 상태에서 전원이 차단되도록 하므로, 모터와 같은 유도성 부하를 스위칭할 때 발생할 수 있는 전력 서지(surge)와 전기적 노이즈를 줄여주는 이점이 있다.



-
- 하지만 여전히 회로 내 어느 지점에서든 부하가 켜질 수 있으며, 이로 인해 상당한 소음이 발생할 수 있다.
 - 이때 제로 크로싱 스위치 회로(Zero-crossing switch circuit)를 사용하면 교류 전압이 다음 제로 크로싱 지점에 도달할 때까지 기다렸다가 부하를 켜게 되므로, 전기적 소음을 더욱 줄일 수 있다.

교류를 스위칭하는 것은 위험하다

- 안전하게 작업할 수 있다는 확신이 있고 위험 요소를 충분히 이해하고 있는 경우가 아니라면 고전압을 다루는 작업을 해서는 안 된다.

Q&A