

# 제3장 특수 목적 다이오드

## 3.1 제너다이오드(Zener Diode)

- 역방향 항복영역에서 동작하여 부하에 정전압을 공급하도록 설계된 다이오드  
 ⇒ 그림 3.1은 제너다이오드의 도식적 기호를 표시

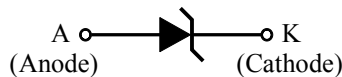


그림 3.1 제너다이오드의 기호

### • 제너항복(Zener Breakdown)

- pn접합 다이오드의 3가나 5가의 불순물 농도를 매우 높게 도핑할 경우  
 ⇒ 공핍층의 폭이 좁아져 작은 역전압에 의해서 항복현상 발생  
 ⇒ 제너항복(zener breakdown) 또는 제너효과(zener effect)
- 제너효과를 이용하여 부하에 정전압을 공급할 목적으로 설계된 다이오드  
 ⇒ 제너다이오드(zener diode)
- 그림 3.2는 일반 정류다이오드와 제너다이오드의 전압-전류 특성곡선을 표시  
 ⇒ 제너다이오드가 순방향 바이어스되면 정류다이오드와 같은 동작  
 ⇒ 역방향 항복영역에서 전류가 급격히 증가해도 전압은 거의 일정

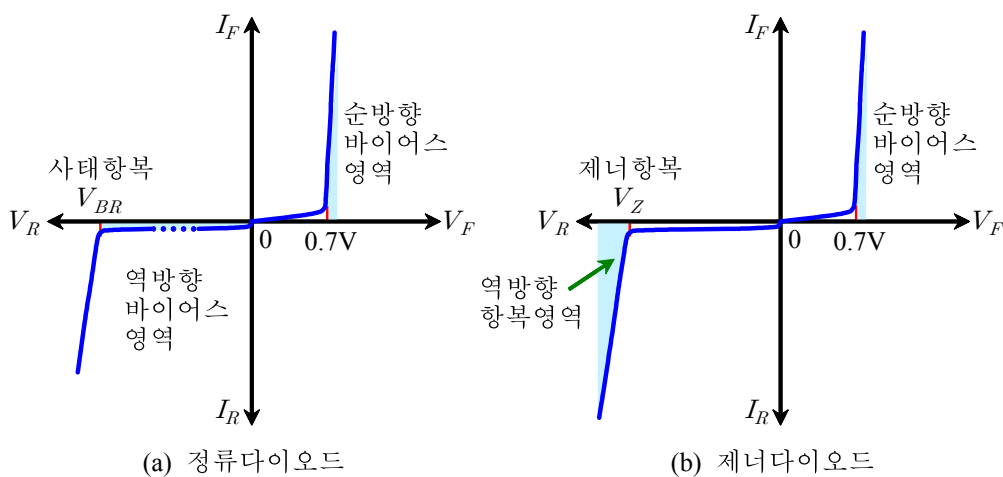


그림 3.2 제너다이오드의 V-I 특성곡선

• 항복특성

- 그림 3.3은 제너다이오드의 역방향 항복특성을 설명하기 위한 특성곡선을 표시
  - ⇒  $V_R$ 이 증가하면  $I_R$ 은 곡선의 변곡점까지 극히 적은 값을 유지
  - ⇒ 변곡점에 이르기까지 수  $\mu A$ 정도의 제너전류  $I_Z$ 가 형성
- $V_R$ 이 증가하여 변곡점에 도달하면 제너항복이 시작되어 제너임피던스  $Z_Z$  감소
  - ⇒  $I_R$ 은 급격히 증가하지만 제너전압  $V_Z$ 는 거의 일정하게 유지
- 제너다이오드가 제너항복을 일으키기 시작할 때의 역방향 전류(제너전류)
  - ⇒ 제너무릎전류(zener knee current),  $I_{ZK}$
- 제너다이오드의 정격을 넘지 않고 흐를 수 있는 역방향 최대 다이오드 전류
  - ⇒ 최대 제너전류(maximum zener current),  $I_{ZM}$
- $I_{ZK} \sim I_{ZM}$ 의 범위에서 제너다이오드 양단의 전압은 일정하게 유지(정전압 작용)
  - ⇒  $I_{ZT}$ 는 제너시험전류(zener test current)

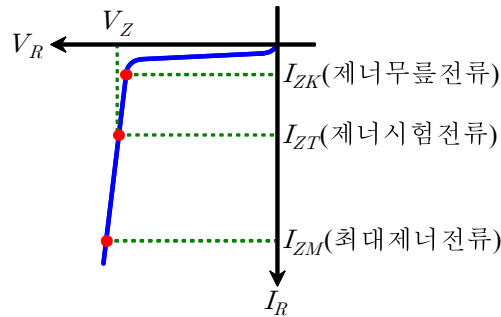


그림 3.3 제너다이오드의 항복특성

• 제너다이오드의 등가회로

- 그림 3.4(a)는 역방향 항복영역에서 제너다이오드의 이상적인 등가회로를 표시
  - ⇒ 제너전압  $V_Z$ 와 등가의 전압을 갖는 직류 전압원으로 대치
  - ⇒ 제너다이오드 양단에 나타나는 일정한 전압을 표시
- 그림 3.4(b)는 제너임피던스  $Z_Z$ 를 포함한 제너다이오드의 실용 모델을 표시
  - ⇒ 그림 3.4(c)와 같이 제너전류의 변화는 제너전압의 변화를 형성
  - ⇒ 제너임피던스  $Z_Z$ 는  $\Delta V_Z$ 와  $\Delta I_Z$ 의 비로 표시

$$Z_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z} \tag{3.1}$$

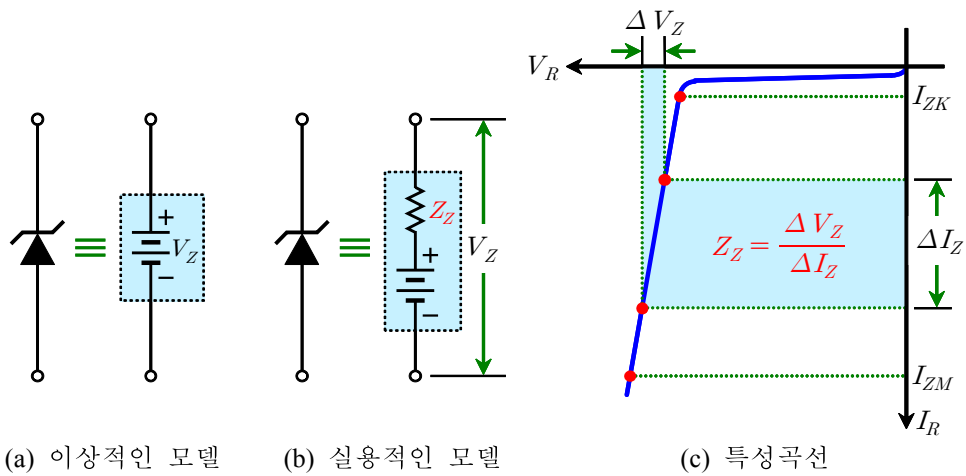


그림 3.4 제너다이오드의 등가회로 모델과 특성곡선

【예제 3.1】 그림 3.5에서 나타낸 것처럼  $I_{ZK}$ 와  $I_{ZM}$  사이에 선형 특성곡선 부분에  $V_Z$ 와  $I_Z$ 의 변화를 갖는 제너다이오드가 있다. 제너임피던스는 얼마인가?

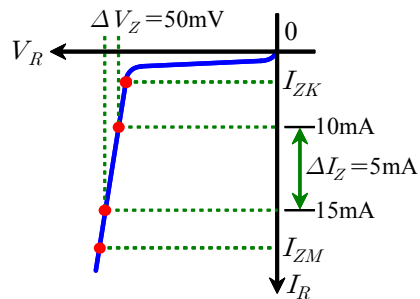


그림 3.5 예제 3.1의 특성곡선

$$Z_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z} = \frac{50 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-3}} = 10[\Omega]$$



【예제 3.2】 1N4736 제너다이오드가  $Z_{ZT}=3.5\Omega$ ,  $I_{ZK}=1\text{mA}$ 을 갖는다.  $I_{ZT}=37\text{mA}$ 에서  $V_{ZT}=6.8\text{V}$ 이다. 전류가 50mA일 때와 25mA일 때 제너다이오드 양단의 전압은 얼마인가? 그림 3.6은 제너다이오드를 나타낸 것이다.

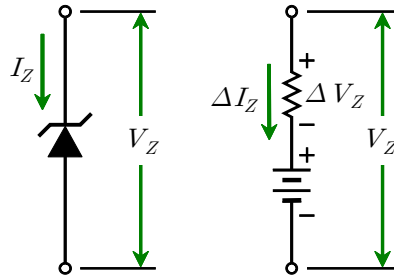


그림 3.6 예제 3.2의 회로

-  $I_Z=50\text{mA}$ 의 전류는  $I_{ZT}=37\text{mA}$ 보다 13mA 증가한 것,  $Z_{ZT}=3.5\Omega$

$$\Delta I_Z = I_Z - I_{ZT} = 50 - 37 = 13[\text{mA}]$$

$$\Delta V_Z = Z_{ZT} \Delta I_Z = 3.5 \times (13 \times 10^{-3}) = 45.5 \times 10^{-3} = 45.5[\text{mV}]$$

$$V_Z = V_{ZT} + \Delta V_Z = 6.8 + 0.0455 = 6.8455 \approx 6.85[\text{V}]$$

-  $I_Z=25\text{mA}$ 의 전류는  $I_{ZT}=37\text{mA}$ 보다 12mA 감소한 것

$$\Delta I_Z = I_Z - I_{ZT} = 25 - 37 = -12[\text{mA}]$$

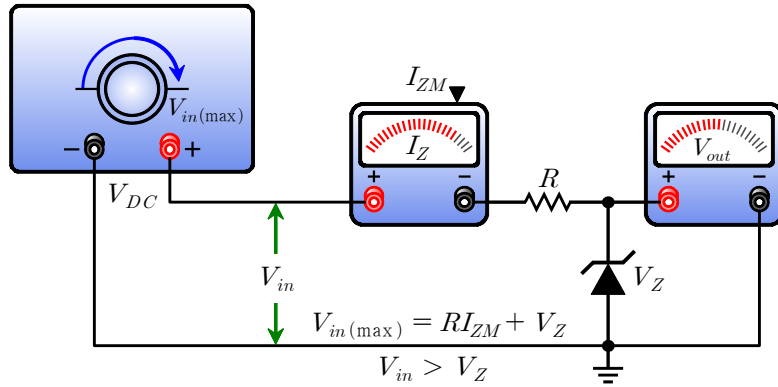
$$\Delta V_Z = Z_{ZT} \Delta I_Z = 3.5 \times (-12 \times 10^{-3}) = -42 \times 10^{-3} = -42[\text{mV}]$$

$$V_Z = V_{ZT} + \Delta V_Z = 6.8 - 0.042 = 6.758 \approx 6.76[\text{V}]$$

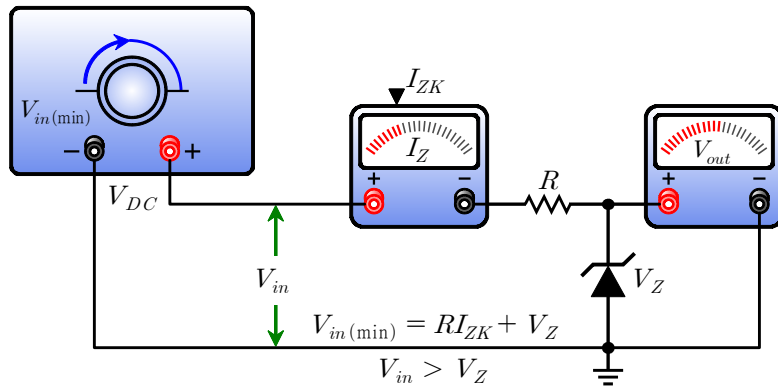
■

### 3.2 제너다이오드 응용

- 그림 3.8은 입력전압의 변화에 따른 제너다이오드의 정전압 작용을 표시



(a) 입력 전압이 증가하는 경우



(b) 입력 전압이 감소하는 경우

그림 3.8 입력전압의 변화에 따른 제너 정전압 작용

- 제너 다이오드가 항복영역 즉, 제너전류  $I_{ZK} \leq I_Z \leq I_{ZM}$ 에서 동작할 경우
  - ⇒ 입력전압의 증가 또는 감소시 다이오드 양단의 전압은 일정
  - ⇒  $I_{ZK} \leq I_Z \leq I_{ZM}$ 는 정전압을 유지하기 위한 제너전류의 범위
- $I_{ZK}$ 가 흐를 때의 입력전압의 최소값과  $I_{ZM}$ 이 흐를 때의 입력전압의 최대값

$$V_{in(min)} = RI_{ZK} + V_Z$$

$$V_{in(max)} = RI_{ZM} + V_Z$$

- 입력전압이  $V_{in(min)} \leq V_{in} \leq V_{in(max)}$ 의 범위에서 변하면 정전압 작용이 유지

- 그림 3.9에서 제너다이오드의  $I_{ZK}=0.25\text{mA}$ ,  $I_{ZM}=100\text{mA}$ ,  $V_Z=10\text{V}$ 일 경우  
 $\Rightarrow$  정전압을 유지하기 위한 입력전압의 최소값 및 최대값

$$V_{in(\min)} = RI_{ZK} + V_Z = 220 \times (0.25 \times 10^{-3}) + 10 = 10.055[\text{V}]$$

$$V_{in(\max)} = RI_{ZM} + V_Z = 220 \times (100 \times 10^{-3}) + 10 = 32[\text{V}]$$

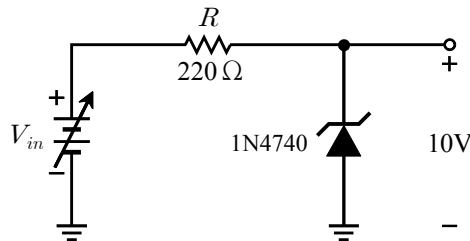


그림 3.9 정전압 회로

【예제 3.5】 그림 3.10에서 제너다이오드에 의하여 전압을 정전압으로 유지시킬 수 있는 최대와 최소 입력전압을 구하라.

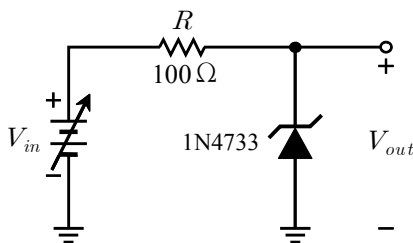


그림 3.10 예제 3.5의 회로

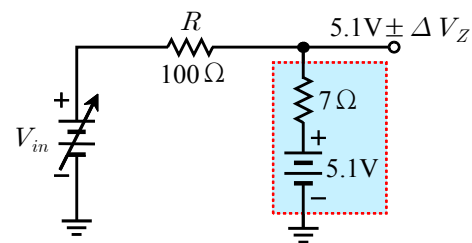


그림 3.11 그림 3.10의 등가회로

$$I_{ZT} = 49[\text{mA}], V_Z = 5.1[\text{V}], I_{ZK} = 1[\text{mA}], Z_Z = 7[\Omega], P_{D(\max)} = 1[\text{W}]$$

$$V_{out(ZK)} = V_Z - \Delta V_Z = V_Z - \Delta I_Z Z_Z = 5.1 - (49 - 1) \times 10^{-3} \times 7 = 4.76[\text{V}]$$

$$V_{in(\min)} = RI_{ZK} + V_{out(ZK)} = 100 \times (1 \times 10^{-3}) + 4.76 = 4.86[\text{V}]$$

$$I_{ZM} = \frac{P_{D(\max)}}{V_Z} = \frac{1}{5.1} = 0.196[\text{A}] = 196[\text{mA}]$$

$$V_{out(ZM)} = V_Z + \Delta V_Z = V_Z + \Delta I_Z Z_Z = 5.1 + (196 - 49) \times 10^{-3} \times 7 = 6.13[\text{V}]$$

$$V_{in(\max)} = RI_{ZM} + V_{out(ZM)} = 100 \times (196 \times 10^{-3}) + 6.13 = 25.7[\text{V}]$$



• 부하 변동에 따른 제너 정전압 작용

- 그림 3.12는 단자 양단에 가변 부하저항을 연결한 제너 전압조정기를 표시  
 ⇒ 출력단자 개방시( $R_L = \infty$ ) 부하전류는  $I_L = 0$ ,  $I_Z = I_T$
- 부하 연결시 전체 전류의 일부는 다이오드를 통해, 나머지는  $R_L$ 을 통해 흐름  
 ⇒  $R_L$ 이 감소하면 부하전류  $I_L$ 은 증가하고  $I_Z$ 는 감소  
 ⇒  $R_L$ 이 증가하면 부하전류  $I_L$ 은 감소하고  $I_Z$ 는 증가  
 ⇒ 제너다이오드는  $I_{ZK} \leq I_Z \leq I_{ZM}$ 에서 정전압 유지

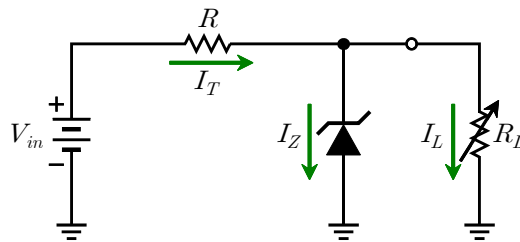


그림 3.12 가변부하를 갖는 제너 정전압 회로

【예제 3.6】 그림 3.13에서 제너다이오드가 정전압을 유지하기 위한 최대, 최소 부하전류를 구하라. 또 사용 가능한 최소  $R_L$ 은 얼마인가? 단,  $V_Z = 12V$ ,  $I_{ZK} = 1mA$ ,  $I_{ZM} = 50mA$ ,  $Z_Z = 0\Omega$ 이다.  $V_Z$ 는 전류 허용범위에서 12V를 유지한다.

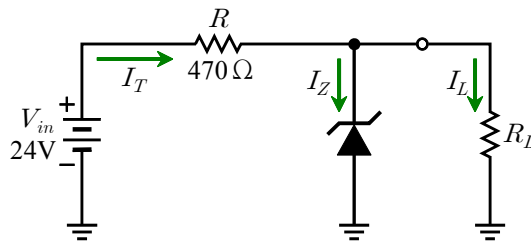


그림 3.13 예제 3.6의 회로

$$I_{Z(\max)} = I_T = \frac{V_{in} - V_Z}{R} = \frac{24 - 12}{470} = 25.5[\text{mA}], \quad I_{L(\min)} = 0[\text{A}]$$

$$I_{L(\max)} = I_T - I_{ZK} = 25.5 - 1 = 24.5[\text{mA}]$$

$$R_{L(\min)} = \frac{V_L}{I_{L(\max)}} = \frac{V_Z}{I_{L(\max)}} = \frac{12}{24.5 \times 10^{-3}} = 490[\Omega]$$



【예제 3.7】 그림 3.14의 회로에서, (a)  $I_{ZK}$ 와  $I_{ZM}$ 에서  $V_{out}$ 을 결정하라, (b) 사용될 수 있는  $R$ 의 값을 계산하라, (c)  $R_L$ 의 최소값을 구하라.

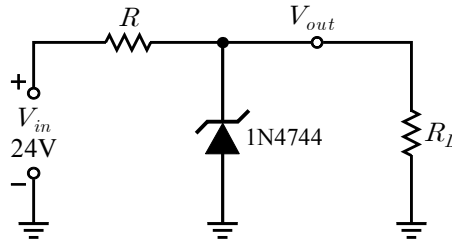


그림 3.14 예제 3.7의 회로

$$I_{ZT}=17\text{mA}, V_Z=15\text{V}, I_{ZK}=0.25\text{mA}, Z_Z=14\Omega, P_{D(\text{max})}=1\text{W}$$

$$V_{out(ZK)} = V_Z - \Delta I_Z Z_Z = 15 - (17 - 0.25) \times 10^{-3} \times 14 = 14.76[\text{V}]$$

$$I_{ZM} = \frac{P_{D(\text{max})}}{V_Z} = \frac{1}{15} = 0.0667[\text{A}] = 66.7[\text{mA}]$$

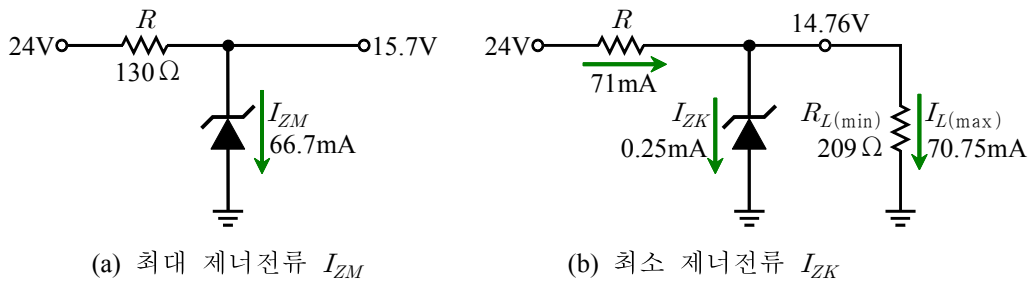
$$V_{out(ZM)} = V_Z + \Delta I_Z Z_Z = 15 + (66.7 - 17) \times 10^{-3} \times 14 = 15.7[\text{V}]$$

$$R = \frac{V_{in} - V_{out(ZM)}}{I_{ZM}} = \frac{24 - 15.7}{66.7 \times 10^{-3}} = 124[\Omega] \approx 130[\Omega]$$

$$I_T = \frac{V_{in} - V_{out(ZK)}}{R} = \frac{24 - 14.76}{130} = 0.071[\text{A}] = 71[\text{mA}]$$

$$I_{L(\text{max})} = I_T - I_{ZK} = 71 - 0.25 = 70.75[\text{mA}]$$

$$R_{L(\text{min})} = \frac{V_{out(ZK)}}{I_{L(\text{max})}} = \frac{14.76}{70.75 \times 10^{-3}} = 209[\Omega]$$



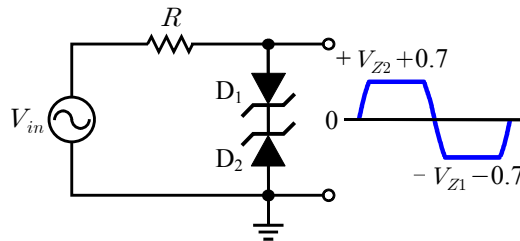
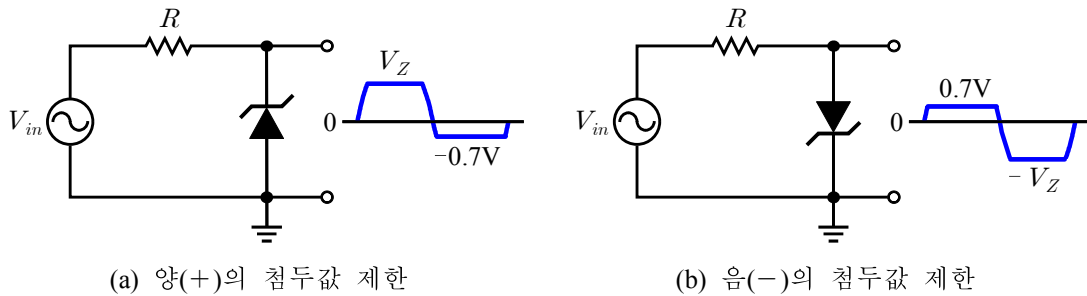
(a) 최대 제너전류  $I_{ZM}$

(b) 최소 제너전류  $I_{ZK}$

그림 3.15 예제 3.7의 회로

• 제너다이오드의 출력제한 작용

- 제너다이오드는 교류 출력전압의 첨두값을 원하는 제너전압으로 제한 가능  
 ⇒ 제너다이오드의 출력 제한 작용
- 그림 3.16(a)는 제너다이오드가 출력의 양의 첨두 부분을 제너전압으로 제한  
 ⇒  $V_Z \leq V_{in} \leq V_p$ 에서 제너다이오드는 항복영역 동작,  $V_{out} = V_Z$   
 ⇒  $-V_p \leq V_{in} \leq -0.7$ 에서 다이오드는 ON 상태,  $V_{out} = -0.7V$   
 ⇒  $-0.7 < V_{in} < V_Z$ 에서 다이오드는 OFF 상태,  $V_{out} = V_{in}$
- 그림 3.16(b)와 같이 다이오드의 방향을 바꾸면 그림 3.16(a)와 반대로 작용  
 ⇒  $-V_p \leq V_{in} \leq -V_Z$ 에서 제너다이오드는 항복영역 동작,  $V_{out} = -V_Z$   
 ⇒  $0.7 \leq V_{in} \leq V_p$ 에서 다이오드는 ON 상태,  $V_{out} = 0.7V$   
 ⇒  $-V_Z < V_{in} < 0.7$ 에서 다이오드는 OFF 상태,  $V_{out} = V_{in}$



(c) 양(+)  
과 음(-)  
의 첨두값 제한

그림 3.16 정현파 입력전압에 대한 제너 출력제한 작용

- 그림 3.16(c)와 같이 두 개의 제너다이오드를 반대방향으로 연결할 경우  
 ⇒  $V_{Z2} + 0.7 \leq V_{in} \leq V_p$ 에서  $D_1$ 은 ON,  $D_2$ 는 항복영역,  $V_{out} = V_{Z2} + 0.7$   
 ⇒  $-V_p \leq V_{in} \leq -V_{Z1} - 0.7$ ,  $D_2$ 는 ON,  $D_1$ 은 항복영역,  $V_{out} = -V_{Z1} - 0.7$   
 ⇒  $0 \leq V_{in} < V_{Z2} + 0.7$ 에서  $D_1$ 은 ON,  $D_2$ 는 OFF 상태,  $V_{out} = V_{in}$   
 ⇒  $-V_{Z1} - 0.7 < V_{in} \leq 0$ 에서  $D_1$ 은 OFF,  $D_2$ 는 ON 상태,  $V_{out} = V_{in}$

【예제 3.8】 그림 3.17에서 각 제너 제한 회로에 대해 출력전압을 구하라.

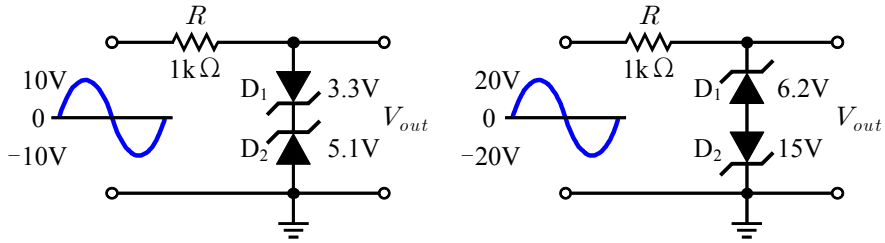


그림 3.17 예제3.8의 회로

- $5.8 \leq V_{in} \leq 10$ 일 때  $D_1$ 은 순방향 바이어스 상태,  $D_2$ 는 항복영역에서 동작  
 $\Rightarrow$  출력전압  $V_{out} = V_{Z2} + 0.7 = 5.1 + 0.7 = 5.8[V]$
- $-10 \leq V_{in} \leq -4$ 일 때  $D_1$ 은 항복영역에서 동작,  $D_2$ 는 순방향 바이어스 상태  
 $\Rightarrow$  출력전압  $V_{out} = -V_{Z1} - 0.7 = -3.3 - 0.7 = -4[V]$
- $0 \leq V_{in} < 5.8$ 에서  $D_1$ 은 순방향 바이어스,  $D_2$ 는 역방향 바이어스 상태  
 $\Rightarrow$  출력전압  $V_{out} = V_{in}$
- $-4 < V_{in} \leq 0$ 에서  $D_1$ 은 역방향 바이어스,  $D_2$ 는 순방향 바이어스 상태  
 $\Rightarrow$  출력전압  $V_{out} = V_{in}$
- $6.9 \leq V_{in} \leq 20$ 일 때  $D_1$ 은 항복영역에서 동작,  $D_2$ 는 순방향 바이어스 상태  
 $\Rightarrow$  출력전압  $V_{out} = V_{Z1} + 0.7 = 6.2 + 0.7 = 6.9[V]$
- $-20 \leq V_{in} \leq -15.7$ 일 때  $D_1$ 은 순방향 바이어스 상태,  $D_2$ 는 항복영역에서 동작  
 $\Rightarrow$  출력전압  $V_{out} = -V_{Z2} - 0.7 = -15 - 0.7 = -15.7[V]$
- $0 < V_{in} < 6.9$ 일 때  $D_1$ ,  $-15.7 < V_{in} \leq 0$ 일 때  $D_2$ 가 역방향 바이어스 상태  
 $\Rightarrow$  출력전압  $V_{out} = V_{in}$

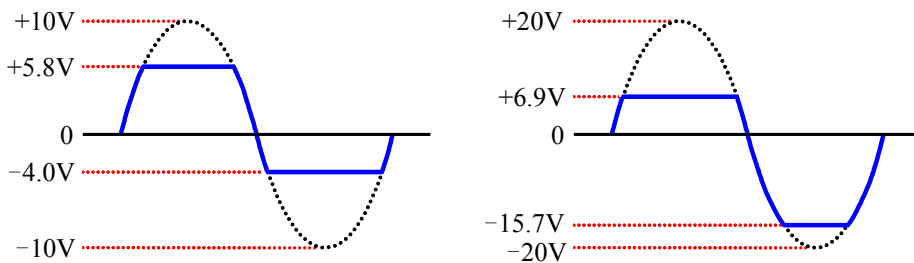


그림 3.18 그림 3.17 회로의 출력파형



### 3.3 버랙터 다이오드(Varactor Diode)

- 그림 3.19와 같이 역방향 바이어스를 인가하면 접합면 근방에 정전용량이 발생
  - ⇒ 접합 정전용량은 역방향 바이어스의 크기에 따라 가변
  - ⇒ p와 n영역은 전도되어 커패시터의 극판과 같은 작용
  - ⇒ 공핍층은 비전도 특성 때문에 유전체와 같은 작용

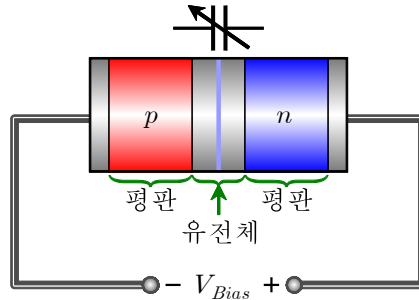


그림 3.19 역바이어스된 버랙터 다이오드는 가변 커패시터

- 그림 3.20(a)와 같이 역방향 바이어스 전압을 증가시키면 공핍층이 확대
  - ⇒ 유전체의 두께가 증가하여 정전용량이 감소
- 그림 3.20(b)와 같이 역방향 바이어스 전압을 감소시키면 공핍층이 축소
  - ⇒ 유전체의 두께가 감소하여 정전용량이 증가

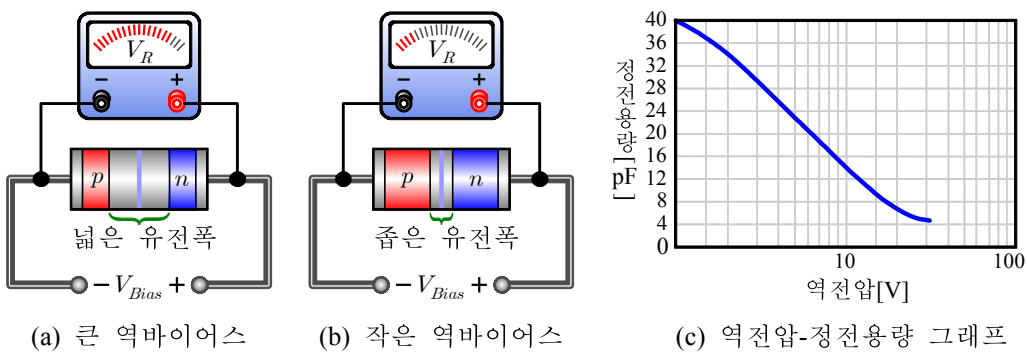


그림 3.20 버랙터 다이오드의 바이어스에 따른 정전용량의 변화

- 커패시턴스는 pn접합의 도핑 방법과 다이오드 구조, 모양, 크기에 의해 조절
  - ⇒ 그림 3.21은 버랙터 다이오드의 기호를 표시

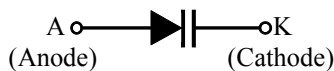


그림 3.21 버랙터 다이오드의 기호

### 3.4 광 다이오드(Photo Diode)

• 발광다이오드(LED)

- 그림 3.25는 발광다이오드(light-emitting diode; LED)의 구조와 기호를 표시  
 ⇒ 전기에너지를 빛에너지로 변환하는 발광 소자

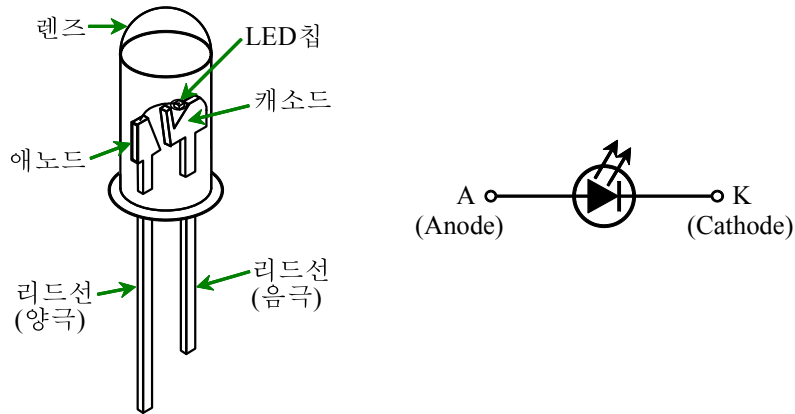


그림 3.25 LED의 구조와 기호

- 그림 3.26과 같이 LED가 순방향 바이어스되면 n영역의 전자가 p영역으로 이동  
 ⇒ p영역에서 전자들이 정공과 재결합할 때 빛과 열에너지를 방출  
 ⇒ 불순물의 종류에 따라 파장이 다른 여러 가지 색깔의 빛을 방출  
 ⇒ 전계발광(electroluminescence)

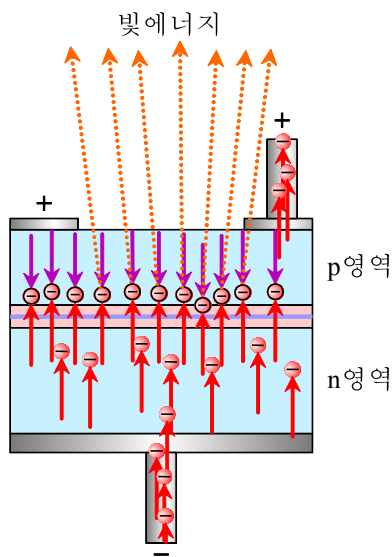
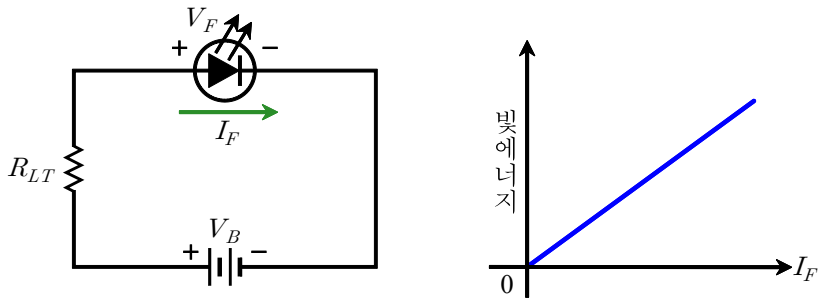


그림 3.26 LED의 전계발광

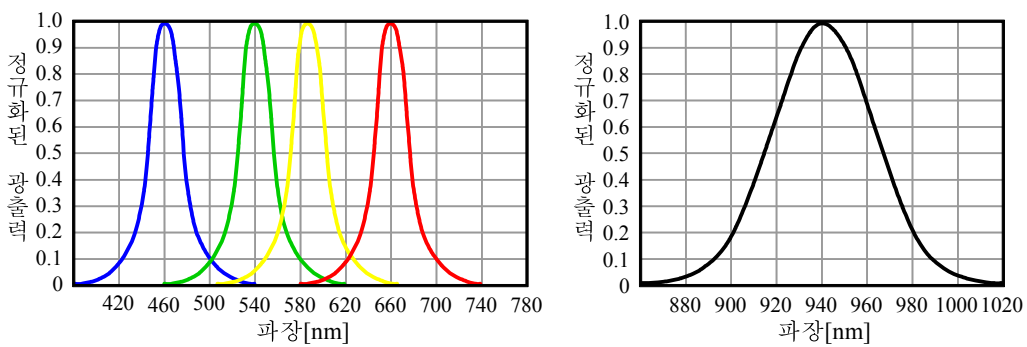
- 그림 3.27(a)와 같이 순방향 바이어스되어 순방향 전류가 흐르면 LED가 발광
  - ⇒ 그림 3.27(b)와 같이 LED의 빛의 출력량은 순방향 전류에 비례
  - ⇒ LED의 순방향 전압은 정류 다이오드보다 高,  $1.2 \leq V_F \leq 3.2[V]$
  - ⇒ LED의 역방향 항복전압은 훨씬 小,  $3 \leq V_{BR} \leq 16[V]$



(a) 순방향 바이어스 동작      (b) 순방향 전류에 대한 빛의 출력량

그림 3.27 LED의 기본 동작

- 그림 3.28은 빛의 파장(wavelength)에 따른 빛의 방출 스펙트럼 곡선을 표시
  - ⇒ 그림 3.28(a)는 가시광 LED에 대한 파장 대 광출력을 표시
  - ⇒ 그림 3.28(b)는 적외선 LED에 대한 파장 대 광출력을 표시
  - ⇒ 파란색 가시광의 규정(normalized) 출력은 460nm에서 최대
  - ⇒ 녹색은 540nm, 노란색은 590nm, 적색은 660nm에서 최대
  - ⇒ 그림 3.28(b)에서 적외선 광의 출력은 940nm에서 최대



(a) 가시광

(b) 적외선 광

그림 3.28 LED에 대한 전형적인 스펙트럼

- 그림 3.29의 그래프는 전형적인 LED의 일반적인 방사(radiation) 패턴을 표시
  - ⇒ LED 렌즈의 형태에 따라 어떤 방향으로 빛이 방출되는지를 표시
  - ⇒ 방사 패턴이 좁을수록 특정 방향으로 더 많은 빛을 조사(照射)

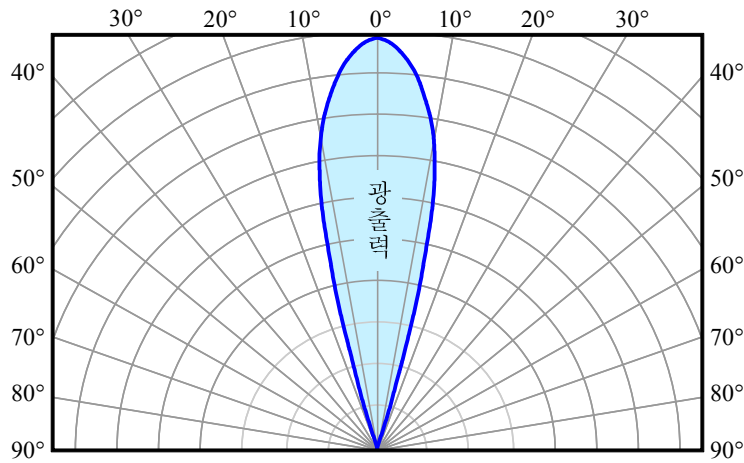
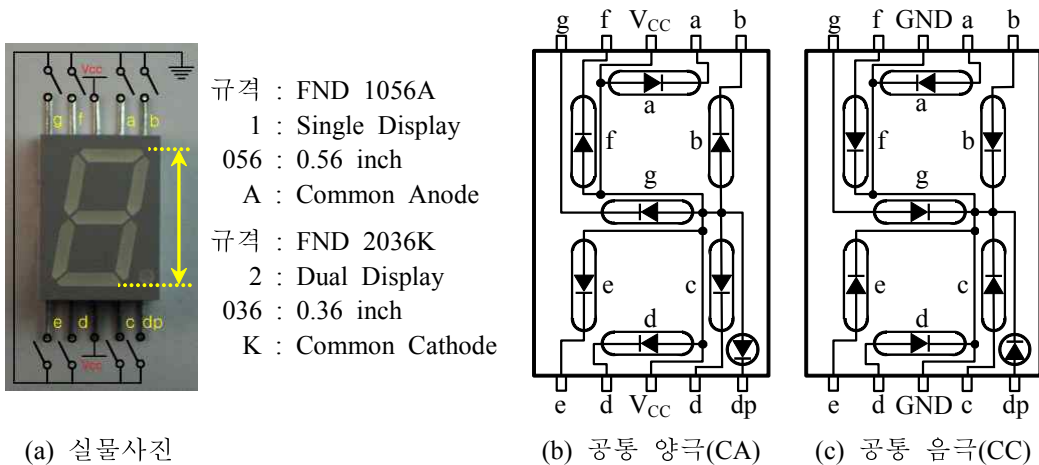


그림 3.29 전형적인 LED의 일반적인 방사 패턴

• 7-세그먼트 표시기(7-Segment Display)

- 그림 3.32는 7-세그먼트 LED 표시기의 실물 사진과 내부 회로도를 표시
  - ⇒ 7-세그먼트 표시기의 각각의 세그먼트는 한 개의 LED로 구성
  - ⇒ 세그먼트의 조합에 따라 10진수와 10진수의 소수점을 표시
  - ⇒ 그림 3.32(b)는 공통 양극(common anode) 방식의 표시기
  - ⇒ 그림 3.32(c)는 공통 음극(common cathode) 방식의 표시기



(a) 실물사진

(b) 공통 양극(CA)

(c) 공통 음극(CC)

그림 3.32 7-세그먼트 LED 표시기

• 포토다이오드(Photodiode)

- 그림 3.33(a)와 같이 역방향 바이어스로 동작, 빛에너지를 전기에너지로 변환  
 ⇒ 빛을 받아들여 투과할 수 있는 작은 투명 렌즈를 보유

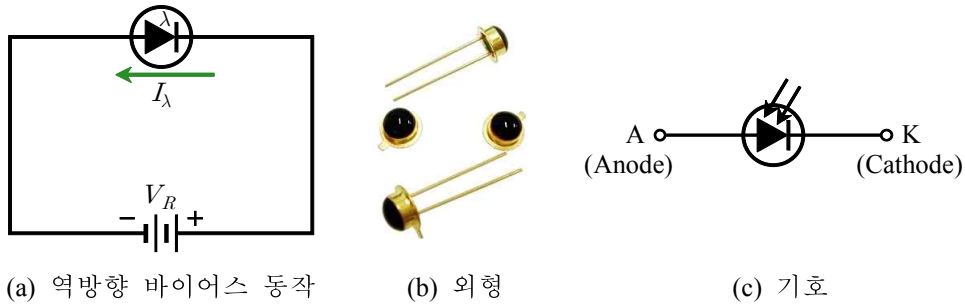


그림 3.33 포토다이오드

- 그림 3.34(a)와 같이 빛이 없을 때는 극소의 **암전류(dark current)**만 형성  
 ⇒ pn접합이 빛에 노출될 때 빛의 강도에 따라 역전류  $I_\lambda$ 가 증가  
 ⇒ 포토다이오드는 빛의 강도에 따라 내부저항이 변화  
 ⇒  $H=0.5\text{mW/cm}^2$ 의 빛에 대해  $V_R=10\text{V}$ 에서  $I_\lambda=1.4\mu\text{A}$   
 ⇒  $H=20\text{mW/cm}^2$ 의 빛에 대해  $V_R=10\text{V}$ 에서  $I_\lambda=55\mu\text{A}$

$$R_R = \frac{V_R}{I_\lambda} = \frac{10}{1.4 \times 10^{-6}} = 7.14[\text{M}\Omega] \quad : H=0.5\text{mW/cm}^2$$

$$R_R = \frac{V_R}{I_\lambda} = \frac{10}{55 \times 10^{-6}} = 182[\text{k}\Omega] \quad : H=20\text{mW/cm}^2$$

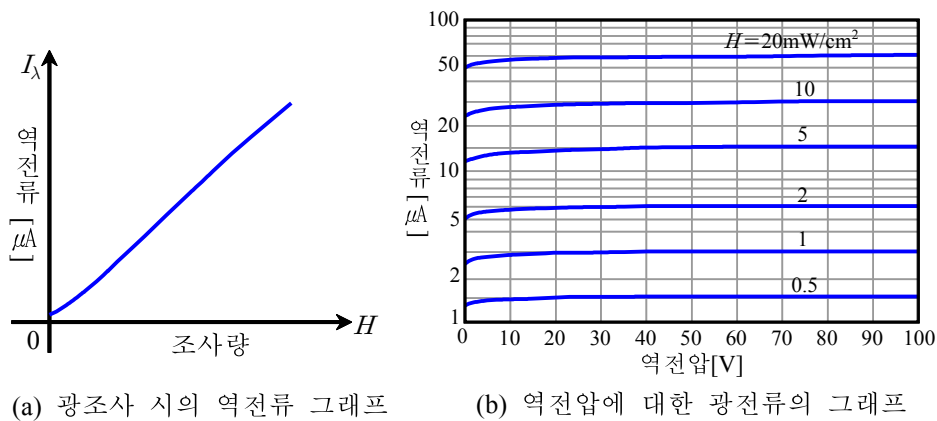


그림 3.34 전형적인 포토다이오드의 특성

- 그림 3.35는 포토다이오드에 입사광이 없을 때 역전류가 흐르지 않음을 표시  
 ⇒ 입사광이 있을 때 빛의 강도에 비례하는 역전류가 발생

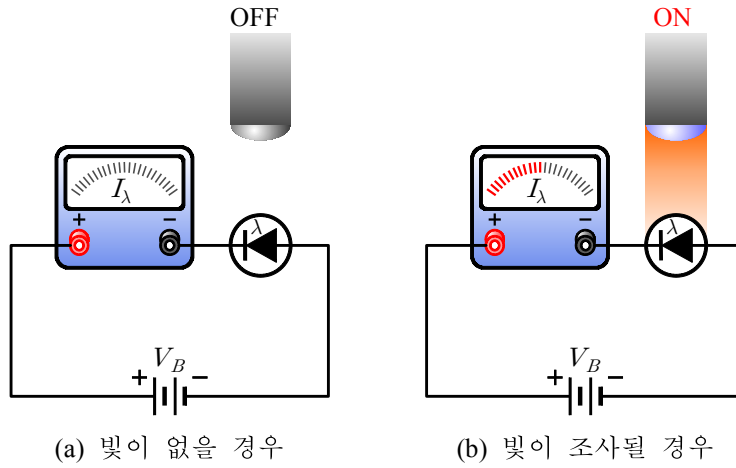


그림 3.35 포토다이오드의 동작