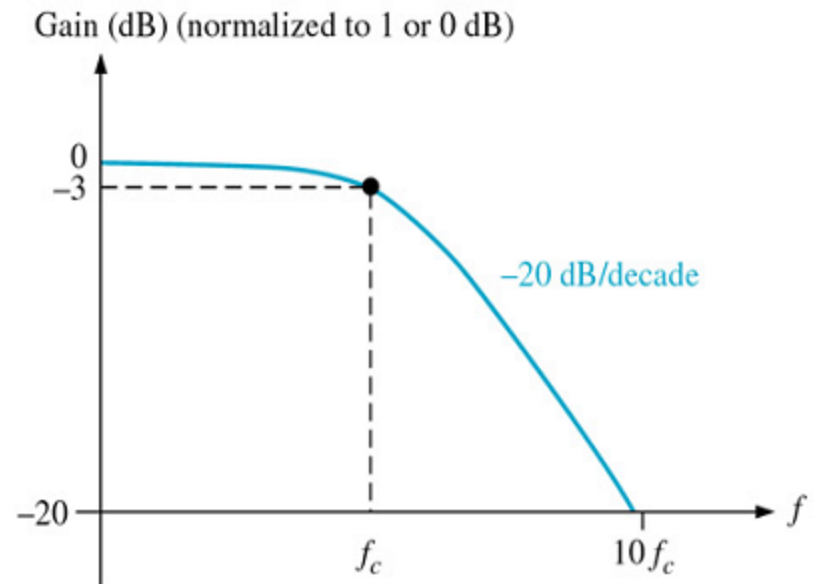
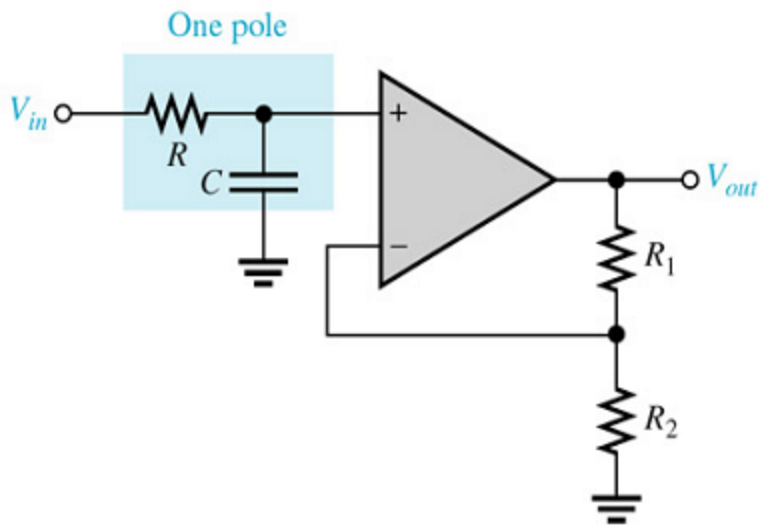
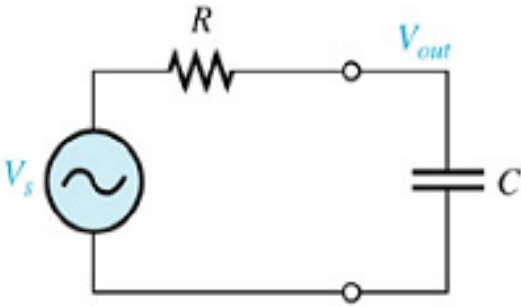


Chap. 15 능동 필터



기본적인 필터 응답

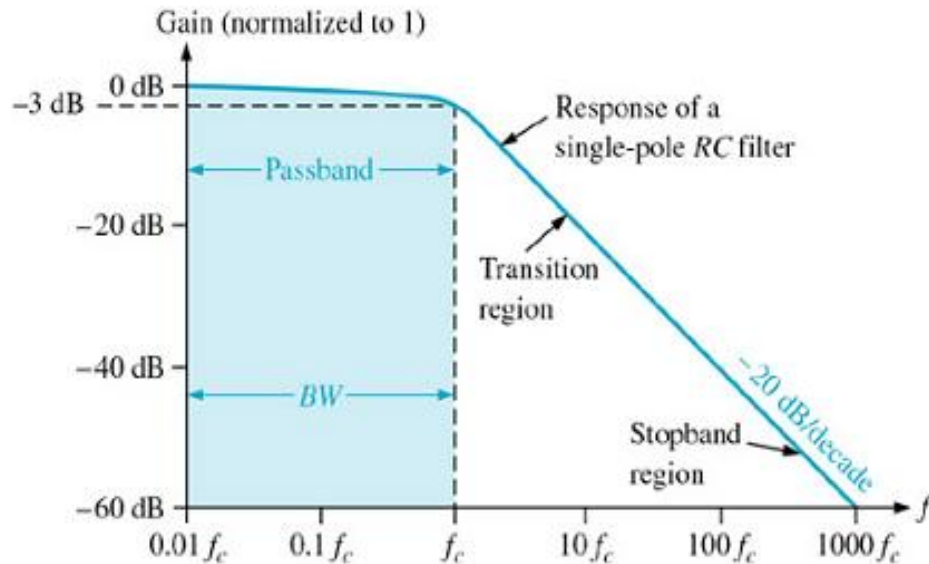
- 저역통과 필터 응답 (low-pass filter (LPF) response)



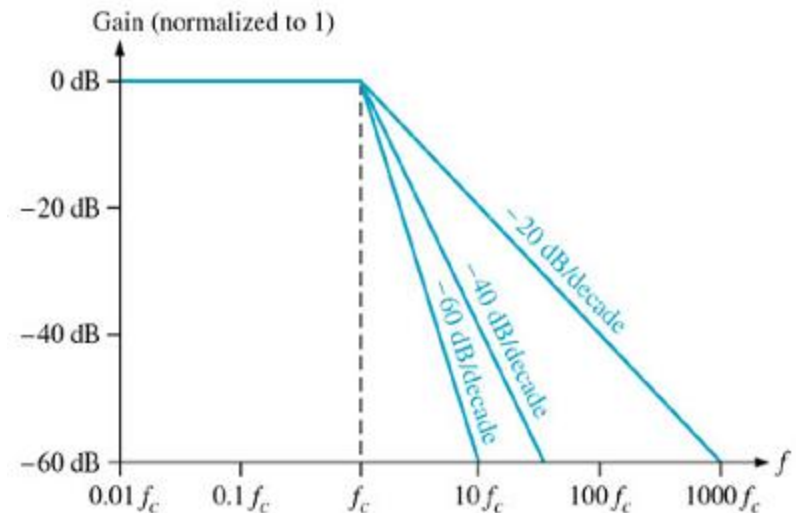
$$A_{v(db)} = 20 \log \frac{V_{out}}{V_s} = 20 \log \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R^2}{X_C^2}}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi fRC)^2}}$$

$$\text{when } R = X_C = \frac{1}{2\pi fC} \rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Basic LPF response

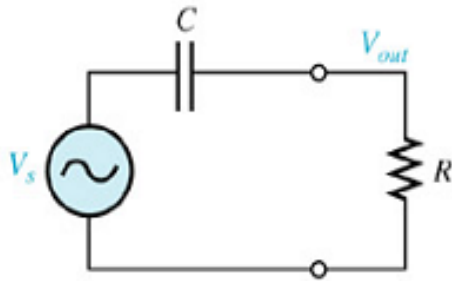


LPF with different roll-off rates



기본적인 필터 응답

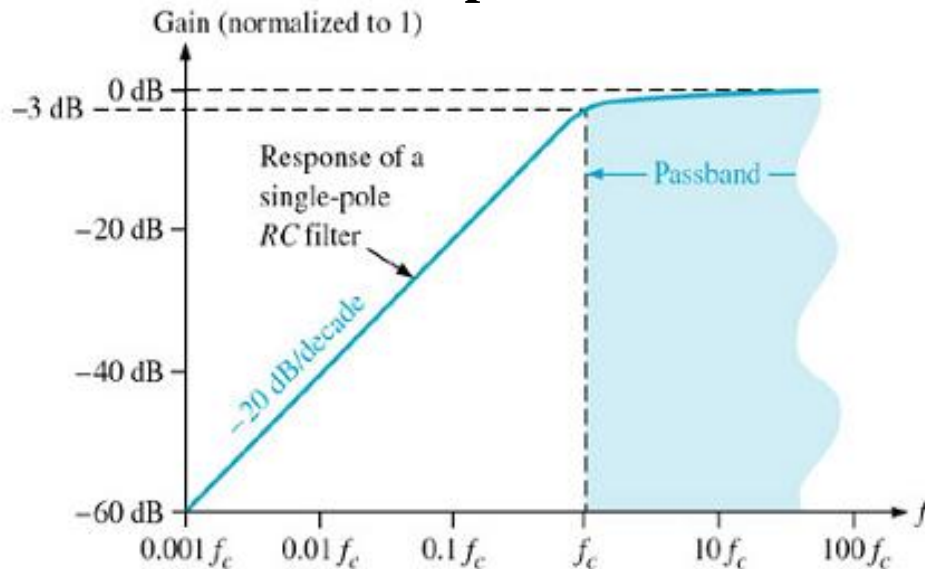
- 고역통과 필터 응답 (high-pass filter (HPF) response)



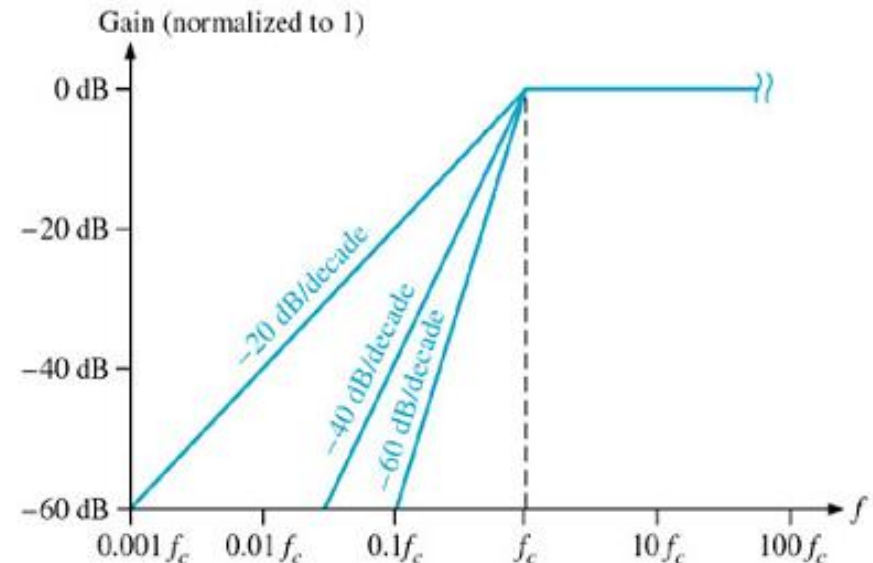
$$A_{v(db)} = 20 \log \frac{V_{out}}{V_s} = 20 \log \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{X_C^2}{R^2}}} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2\pi fRC}\right)^2}}$$

$$\text{when } R = X_C = \frac{1}{2\pi f_c C} \rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Basic HPF response

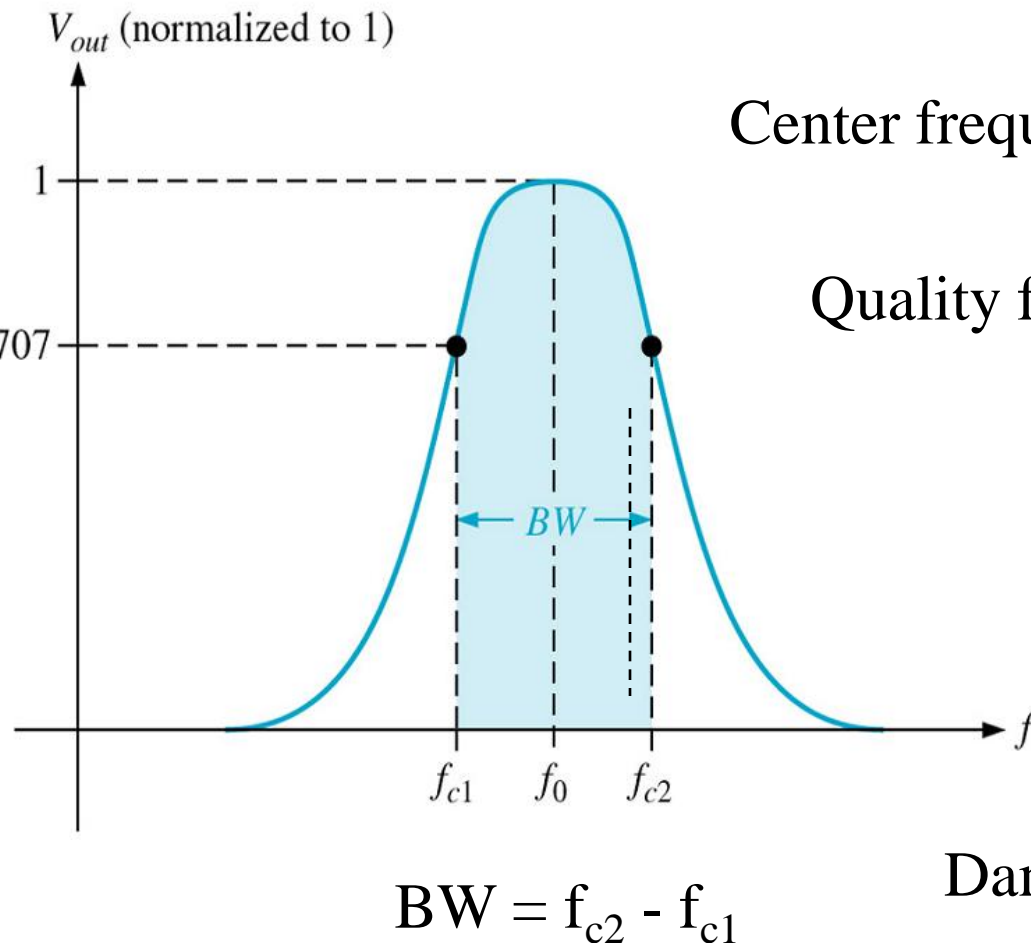


HPF with different roll-off rates



기본적인 필터 응답

- 대역통과 필터 응답 (band-pass filter (BPF) response)



Center frequency:

$$f_o = \sqrt{f_{c1} f_{c2}}$$

Quality factor:

$$Q = \frac{f_o}{BW}$$

Q is an indication of the selectivity of a BPF.
Narrow BPF: $Q > 10$.
Wide-band BPF: $Q < 10$.

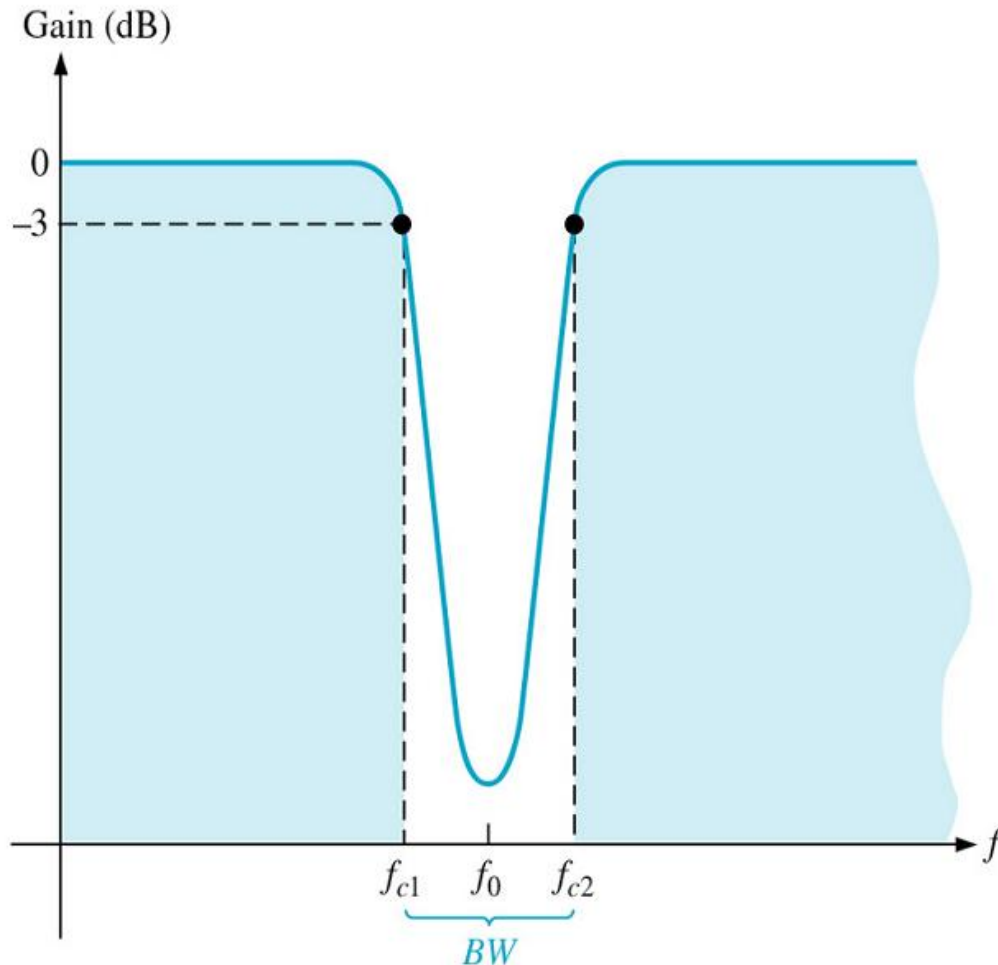
Damping Factor: $DF = \frac{1}{Q}$

- $f_o = 15 \text{ kHz}$, $BW = 1 \text{ kHz}$, Q ?

$$Q = \frac{f_o}{BW} = \frac{15\text{k}}{1\text{k}} = 15 > 10 \rightarrow \text{협대역 (narrow BW)}$$

기본적인 필터 응답

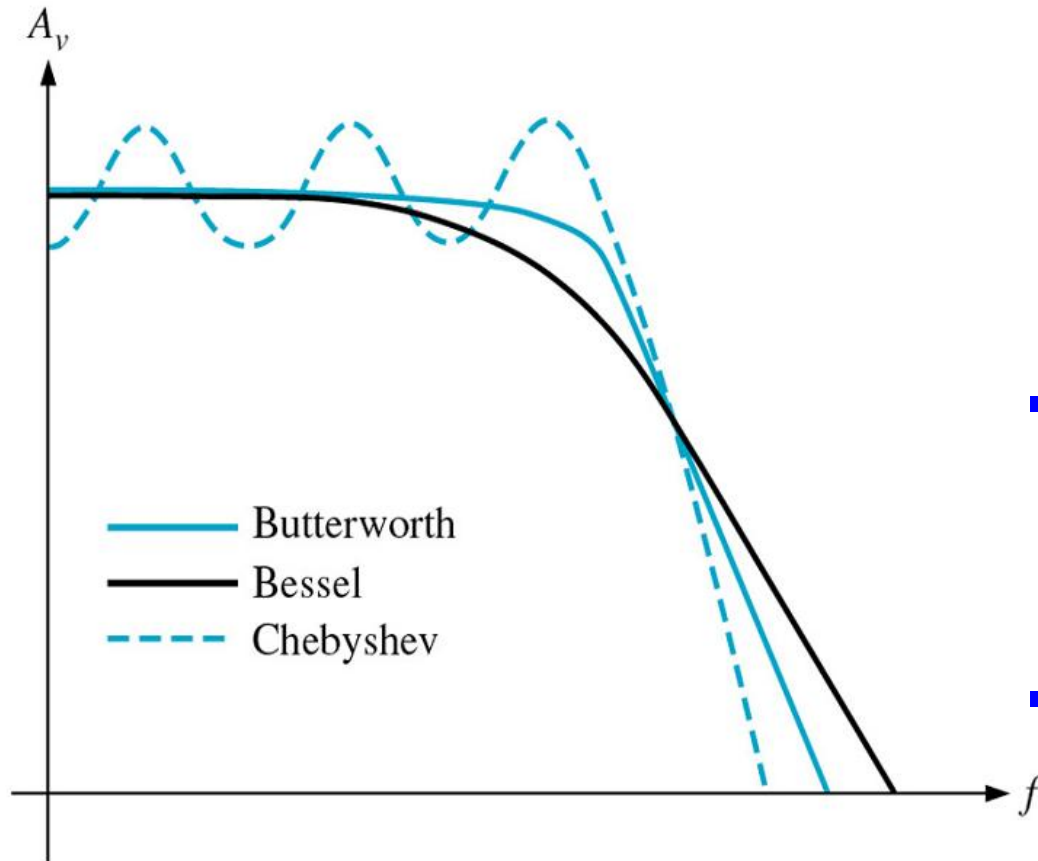
- 대역저지 필터 응답 (band-stop filter response)



- Band-reject, or notch filter.
- 어떤 특정 주파수 대역만
저지하고 그 외 주파수
대역은 통과 시키는 필터

필터 응답 특성

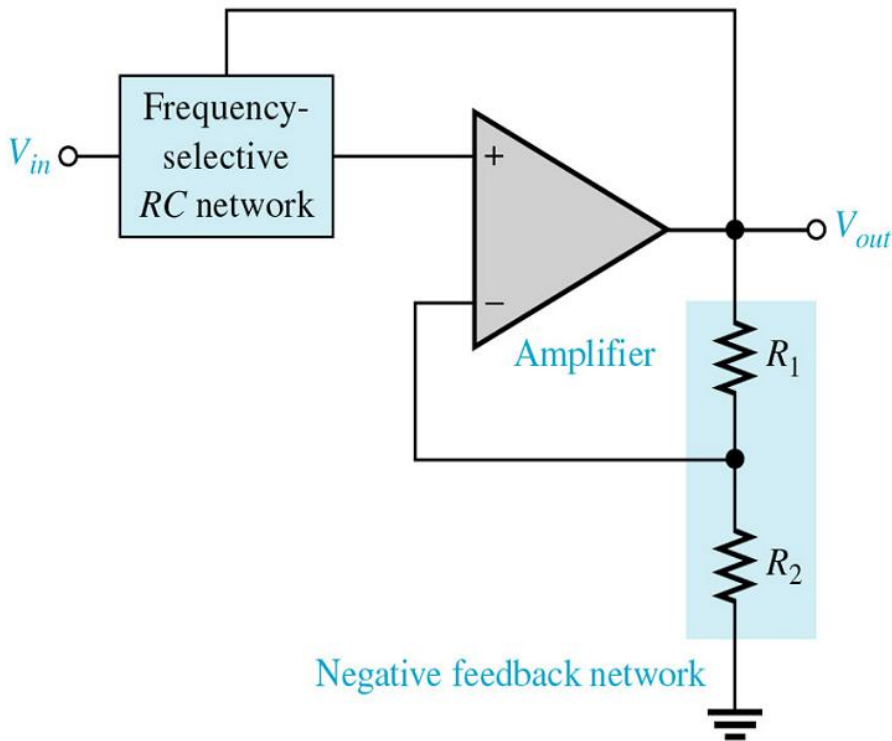
■ 기본 필터 응답 특성



- **Butterworth:** 통과 대역 매우 평탄
 - roll-off rate: -20 dB/dec/pole
 - 위상지연: 비선형
 - 펄스의 상승, 하강 edge의 주파수 부품들의 서로 다른 위상지연 → 출력의 overshoot
 - 통과 대역의 모든 주파수의 이득이 모두 같아야 할 때
- **Chebyshev:**
 - roll-off rate $> -20 \text{ dB/dec/pole}$
 - 통과대역 리플 → 비선형 위상 응답
- **Bessel:** 선형적인 위상 응답
 - No overshoot 출력
 - roll-off rate $< -20 \text{ dB/dec/pole}$.

- 댐핑 계수 (damping factor: DF)

General diagram of active filter



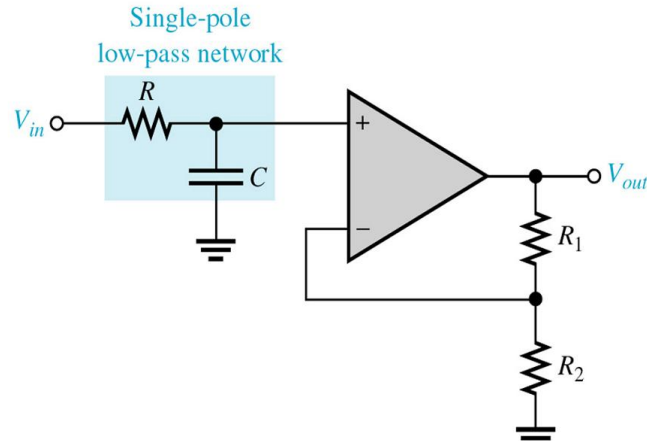
DF: 필터의 응답 특성을 결정

$$DF = 2 - \frac{R_1}{R_2}$$

- 부귀환 동작으로 필터응답에 영향
- 필터의 차수 (극점 수)와 관련된 올바른 응답 특성을 구현하기 위해서 댐핑계수 값이 요구
- ← 표 16-1 참고

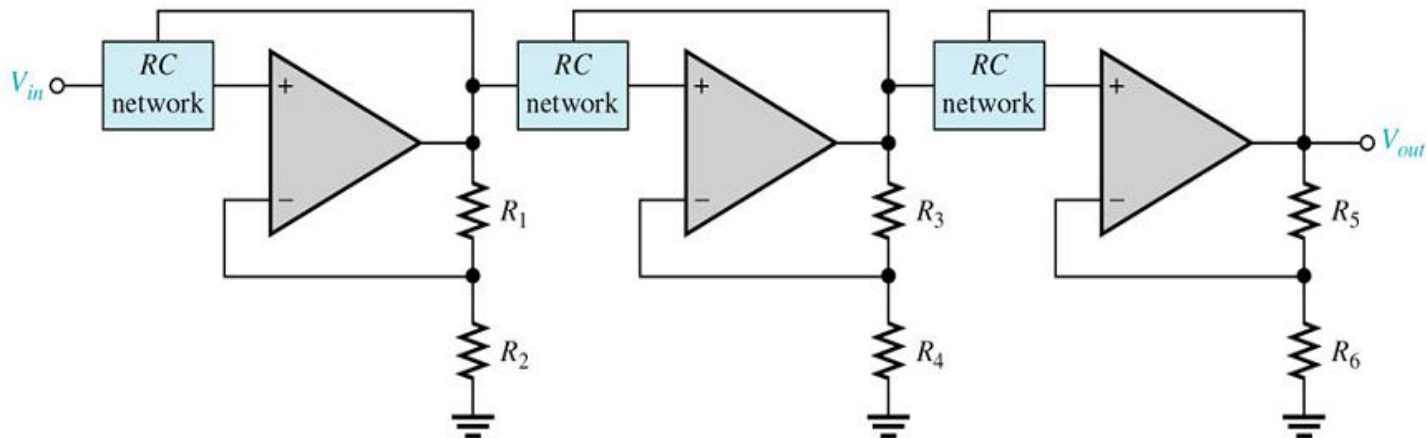
- 댐핑 계수 (damping factor: DF)
 - 극점 (pole): 한 개의 저항과 캐패시터로 구성된 간단한 회로
 - Roll-off: -20dB/decade/pole
 - 예제: 2차 버터워스 (Butterworth) 응답
 - 극점: 2개 \rightarrow $DF = 1.414 \leftarrow$ 표16-1
 - $R_1/R_2 = 2 - DF = 2 - 1.414 = 0.586$
 - 비반전 증폭기 전압이득 $A_{cl(NI)} = 1 + R_1/R_2 = 1.586$
 - 만약 $R_2 = 10\text{ k}\Omega \rightarrow R_1 = 5.86\text{ k}\Omega$

■ 차단 주파수와 기울기



$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Roll-off: -20 dB/dec



-20 dB/dec

-40 dB/dec

-60 dB/dec

능동 저역 통과 필터

- 능동 필터의 장점

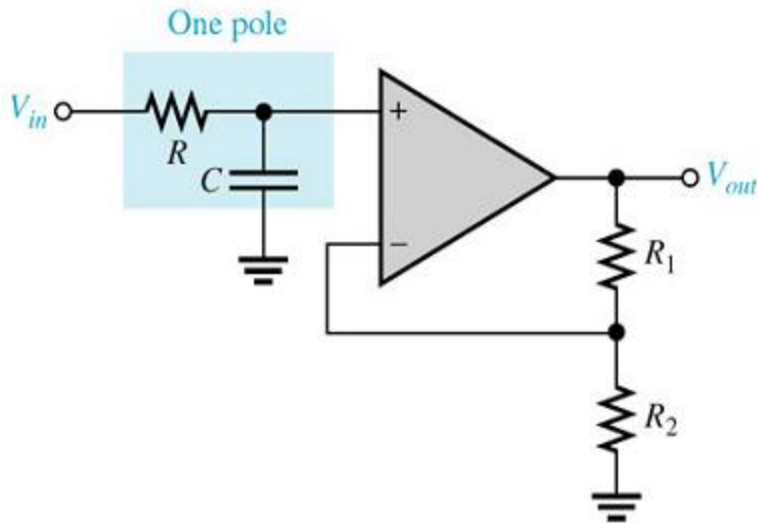
- 연산 증폭기는 필터를 통과에 의한 이득 감소를 고려하여 높은 전압 이득 제공
- 높은 입력 임피던스: 구동원의 과부하를 막아줌
- 낮은 출력 임피던스: 필터가 구동될 때 부하의 영향으로부터 필터를 보호
- 요구되는 응답을 수정할 필요 없이 넓은 주파수 범위에서 조정하기 쉽다

- 단점

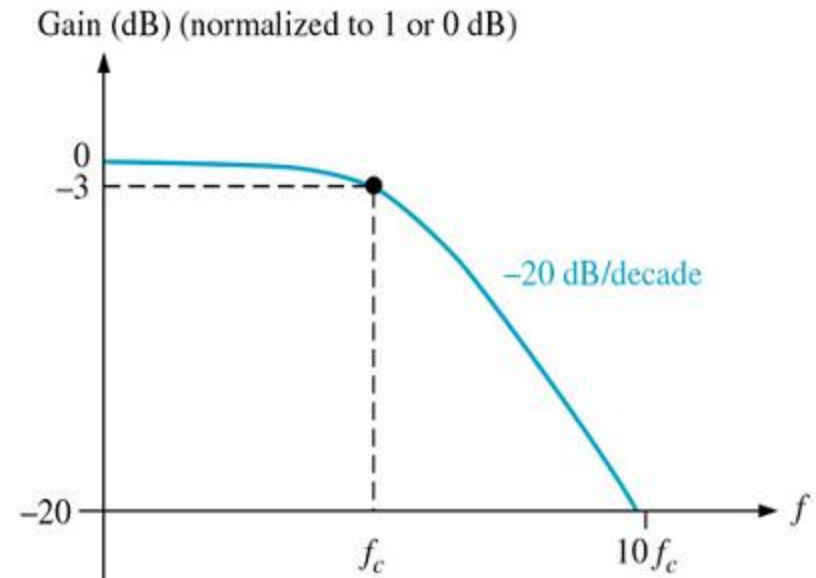
- dc 전원 필요
- 연산증폭기의 주파수 응답에 의해서 제한되어질 수 있다.

능동 저역 통과 필터

■ 1차 단극 필터



$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$
$$A_{cl} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

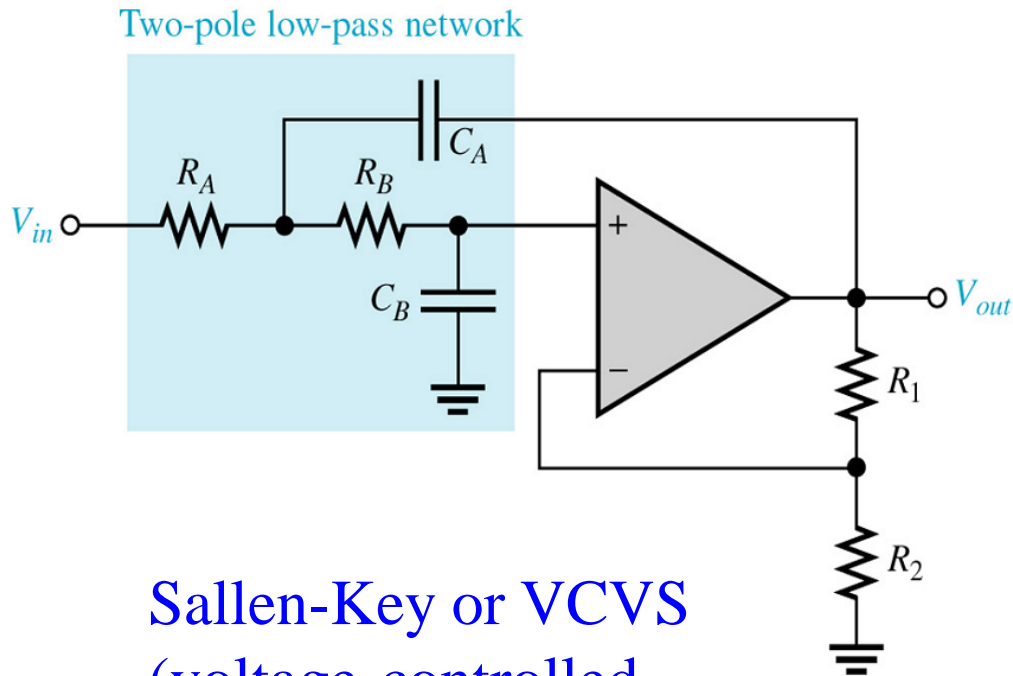


Roll-off rate for a single-pole Filter: -20 dB/decade.

A_{cl} : selectable since DF is optional for single-pole LPF

능동 저역 통과 필터

■ Sallen-Key 저역통과 필터



- -40dB/decade의 기울기를 가지는 2개의 저역통과 필터
- C_A 에 의해서 통과대역 모서리 근처에서 예리한 응답을 갖는다

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_A R_B C_A C_B}}$$

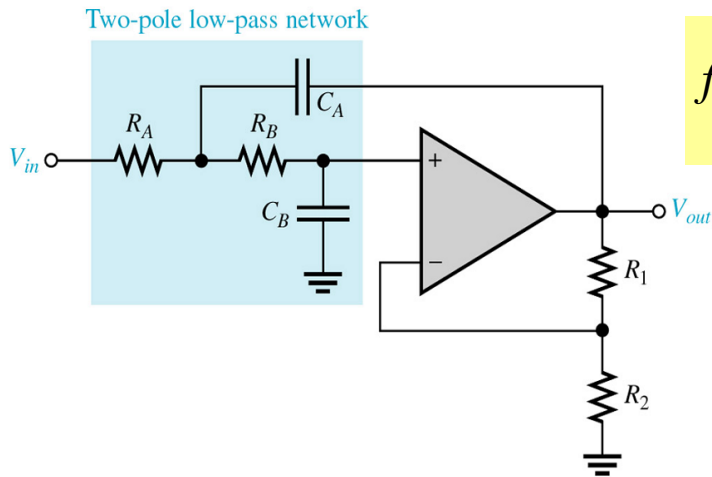
만약 $R_A = R_B = R$, $C_A = C_B = C$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

For a Butterworth 2nd-order response, $DF = 1.414$; therefore, $R_1/R_2 = 0.586$.

예제 16-3

- 저역 통과 필터 \rightarrow 차단주파수 f_c ?, R_1 (버터워스 응답)?
 - $R_A = R_B = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, $C_A = C_B = 0.02 \text{ }\mu\text{F}$



$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_A R_B C_A C_B}} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(1\text{k})(0.02\mu)} = 7.96\text{kHz}$$

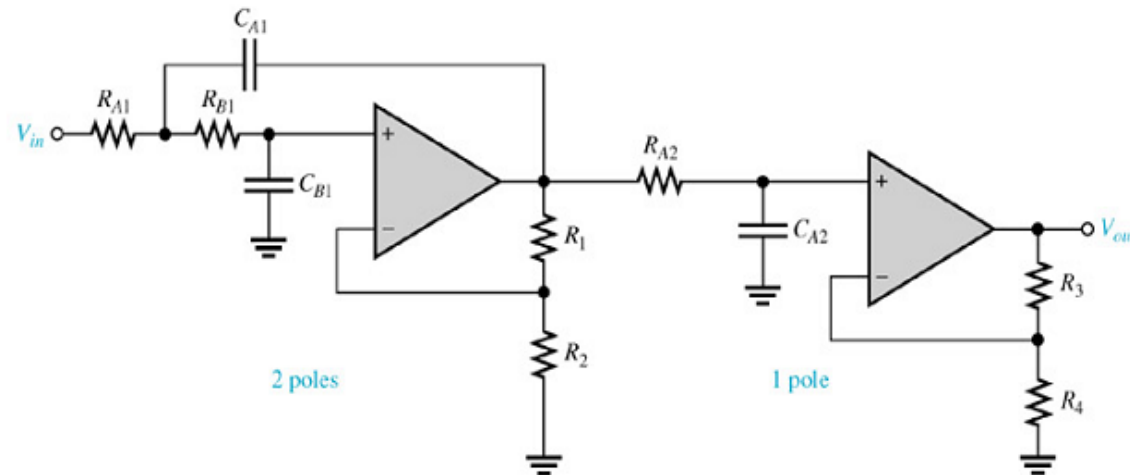
2차 버터워스 \rightarrow $DF = 1.414$

$$\rightarrow R_1/R_2 = 2 - DF = 2 - 1.414 = 0.586$$

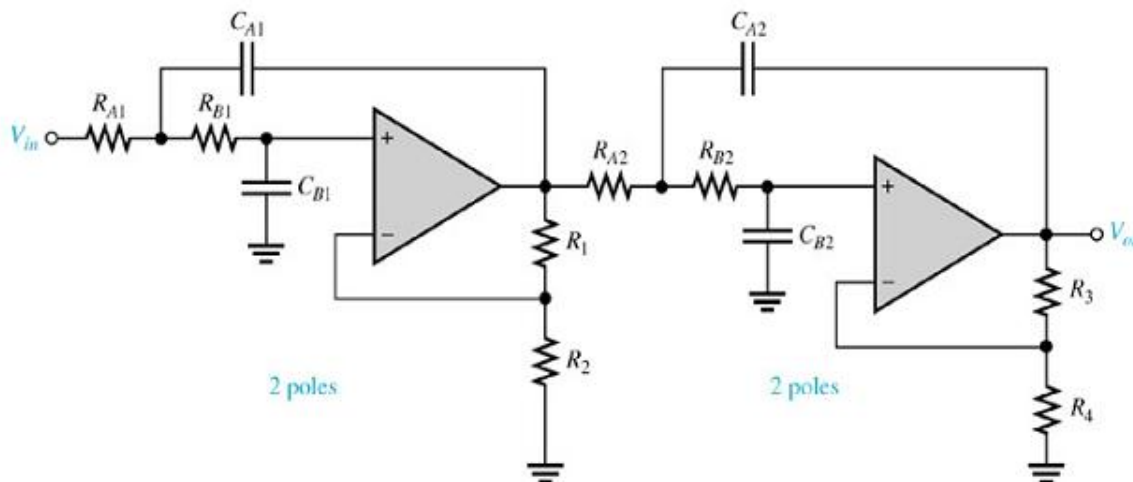
$$\rightarrow R_1 = 0.586R_2 = (0.586)(1\text{k}) = 586 \text{ }\Omega$$

능동 저역 통과 필터

- 높은 기울기를 얻기 위해서 저역통과 필터를 종속 연결함



3극: -60 dB/dec

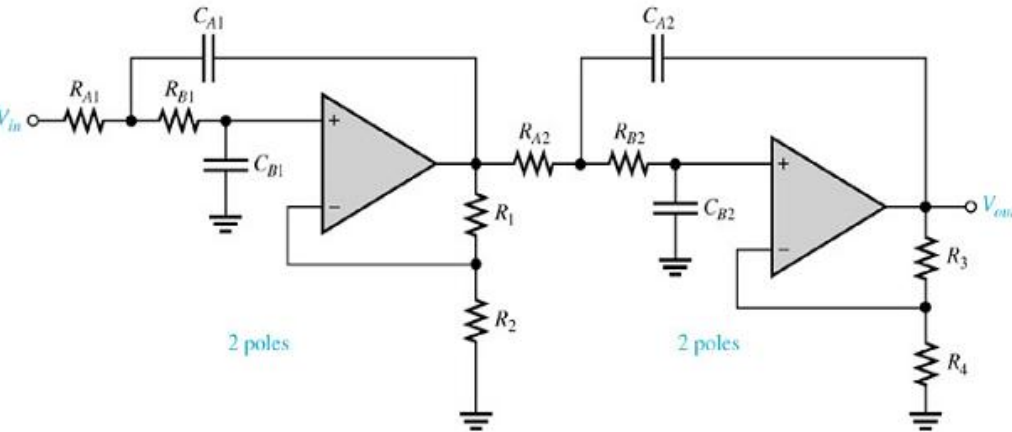


4극: -80 dB/dec

예제 16-4

- 4차 저역통과 필터 $\rightarrow C$?, $R_1 = R_3$ (버터워스 응답)?

- $R_{A1} = R_{B1} = R_{A2} = R_{B2} = R_2 = R_4 = 1.8 \text{ k}\Omega$
- $C_{A1} = C_{B1} = C_{A2} = C_{B2} = C$
- $f_c = 2680 \text{ Hz}$ 라 하자



4차 버터워스:

- 첫째 단: $DF = 1.848$

$$\rightarrow R_1/R_2 = 2 - DF = 2 - 1.848 = 0.152$$

$$\rightarrow R_1 = 0.152R_2 = (0.152)(1.8\text{k}) = 274\Omega$$

- 둘째 단: $DF = 0.765$

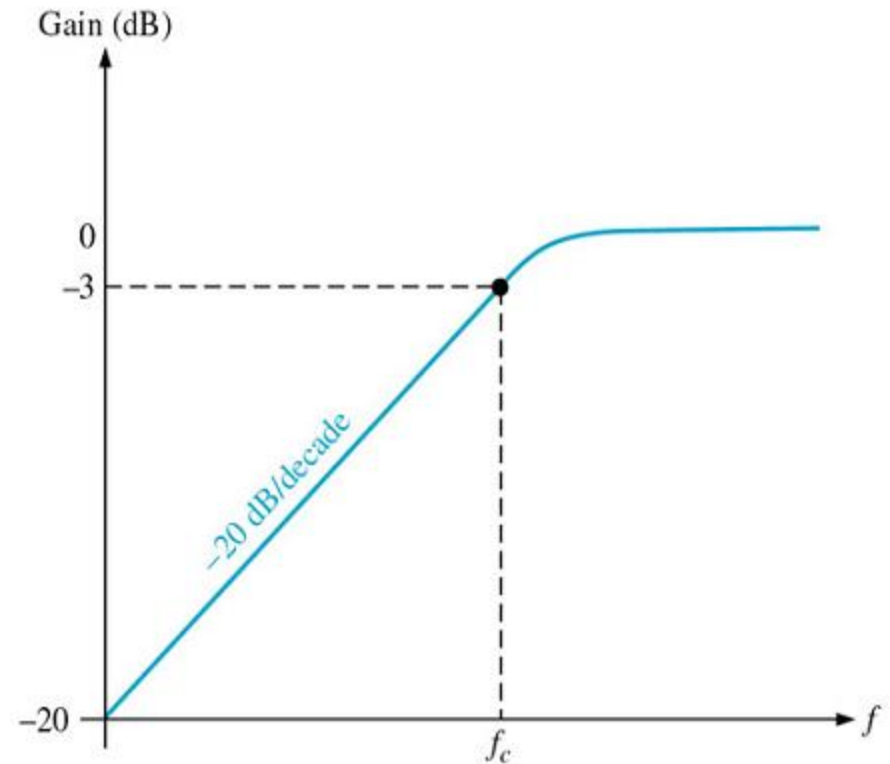
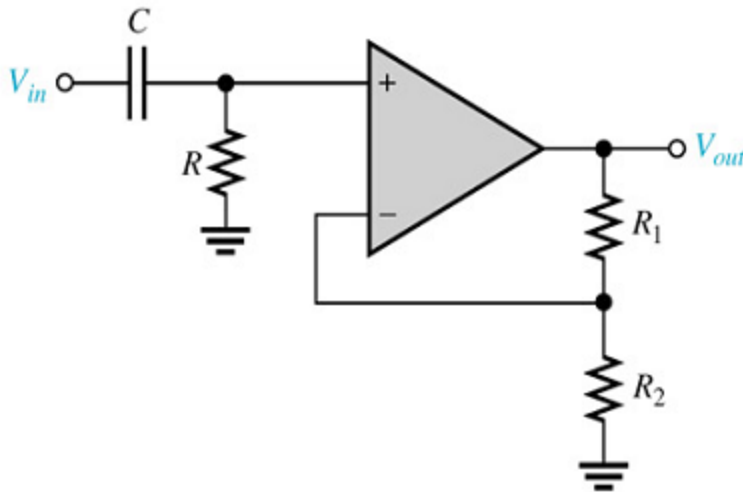
$$\rightarrow R_3/R_4 = 2 - DF = 2 - 0.765 = 1.235$$

$$\rightarrow R_3 = 1.235R_4 = (1.235)(1.8\text{k}) = 2.22\text{k}\Omega$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_A R_B C_A C_B}} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(1.8\text{k})C} = 2.68\text{kHz} \rightarrow C = \frac{1}{2\pi(1.8\text{k})(2.68\text{k})} = 0.033\mu\text{F}$$

능동 고역 통과 필터

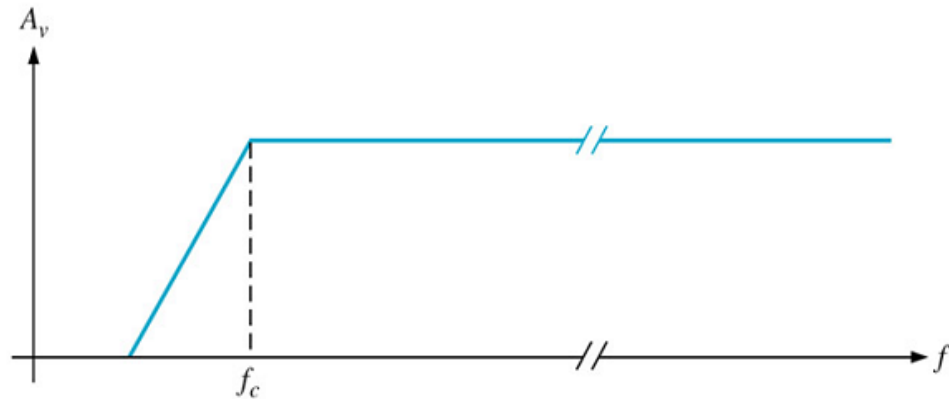
■ 1차 (단극) 필터



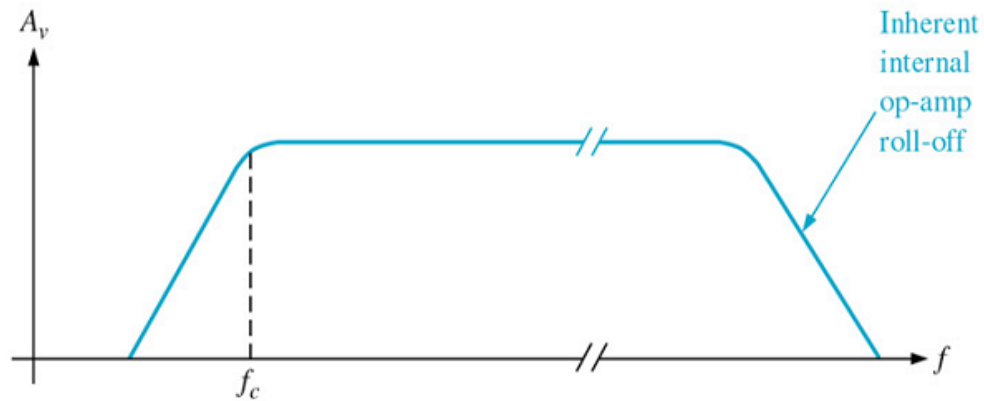
- Roll-off rate, f_c , A_{cl} : LPF와 비슷 .
- 이상적인 HPF는 f_c 이상의 주파수는 모두 통과
- 그러나, 연산증폭기는 고주파에서 연산증폭기의 내부 RC로 인해 고주파에서 roll-off가 일어난다.

능동 고역 통과 필터

- 1차 (단극) 필터



(a) Ideal

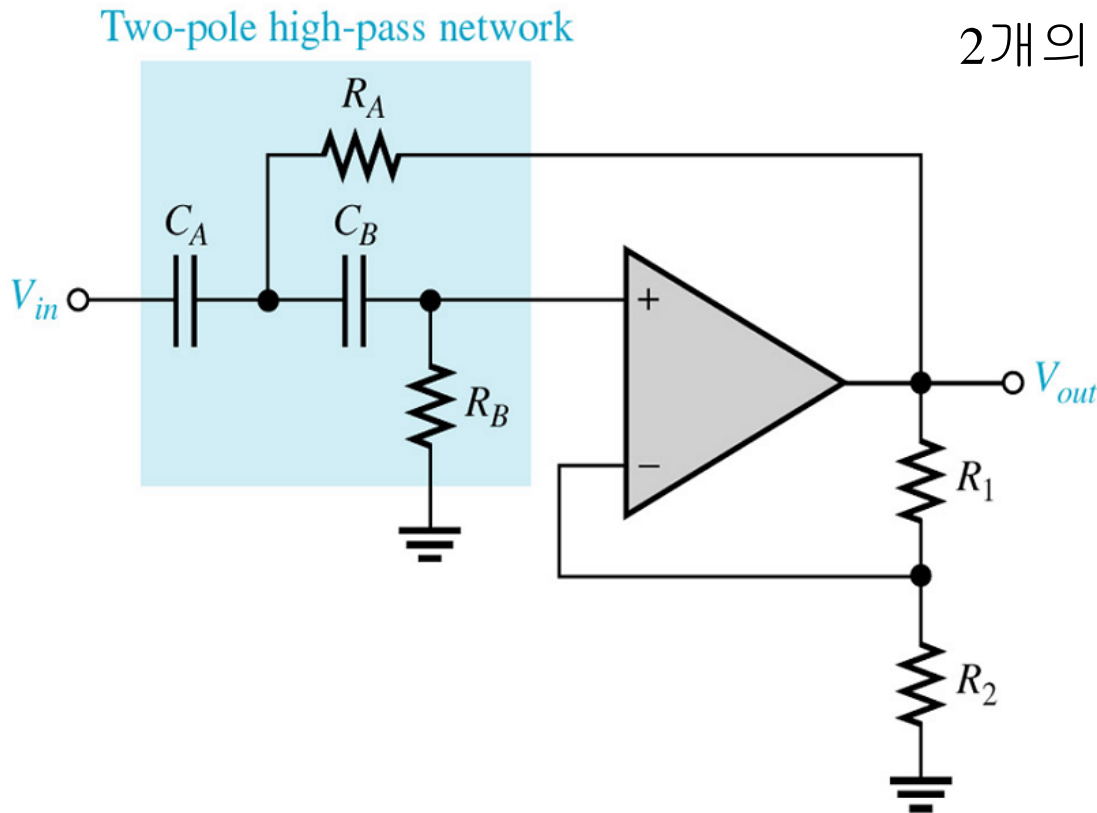


(b) Nonideal

능동 고역 통과 필터

- Sallen-Key 고역통과 필터

→ -40dB/decade의 기울기를 가지는
2개의 고역통과 필터



- 종속접속한 고역통과 필터: roll-off 기울기를 증가

예제 16-5

- Shallen-key 고역통과 필터
 - $f_c = 10 \text{ kHz}$, 2차 버터워스 응답
 - $R = R_A = R_B = R_2 = 3.3 \text{ k}\Omega$
 - $C = C_A = C_B$ 라 하자

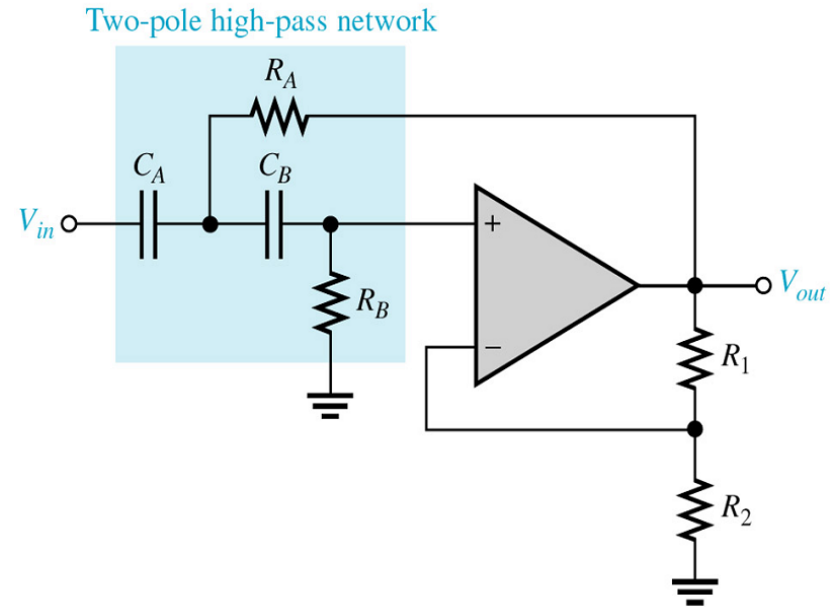
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(3.3\text{k})C} = 10\text{kHz}$$

$$\rightarrow C = \frac{1}{2\pi(3.3\text{k})(10\text{k})} = 0.0048 \mu\text{F}$$

2차 버터워스 $\rightarrow DF = 1.414$

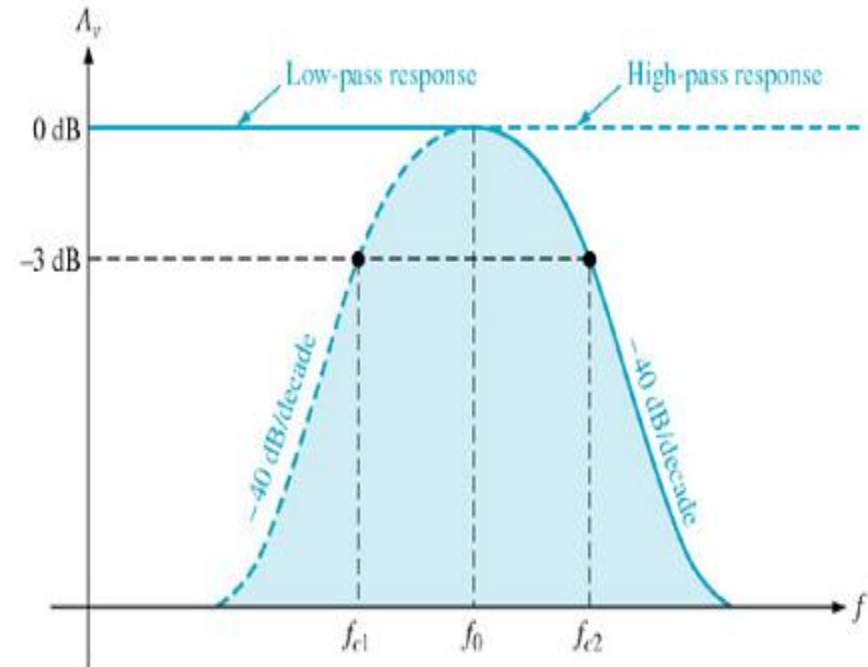
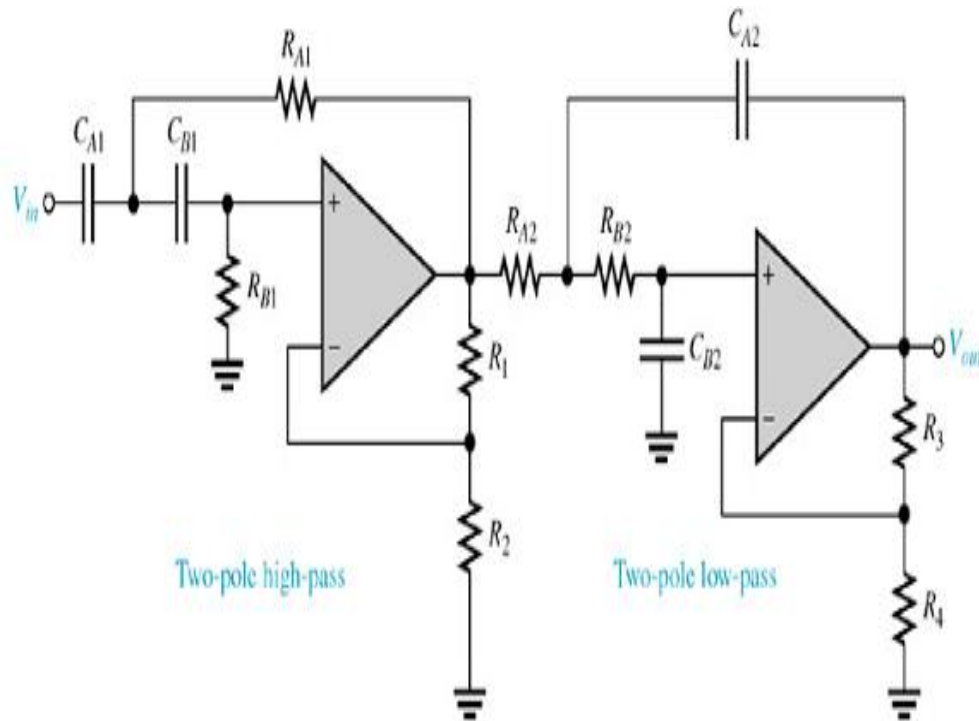
$$\rightarrow R_1/R_2 = 2 - DF = 2 - 1.414 = 0.586$$

$$\rightarrow R_1 = 0.586R_2 = (0.586)(3.3\text{k}) = 1.93 \text{ k}\Omega$$



능동 대역 통과 필터

- 저역통과 필터 + 고역통과 필터 (종속 연결)

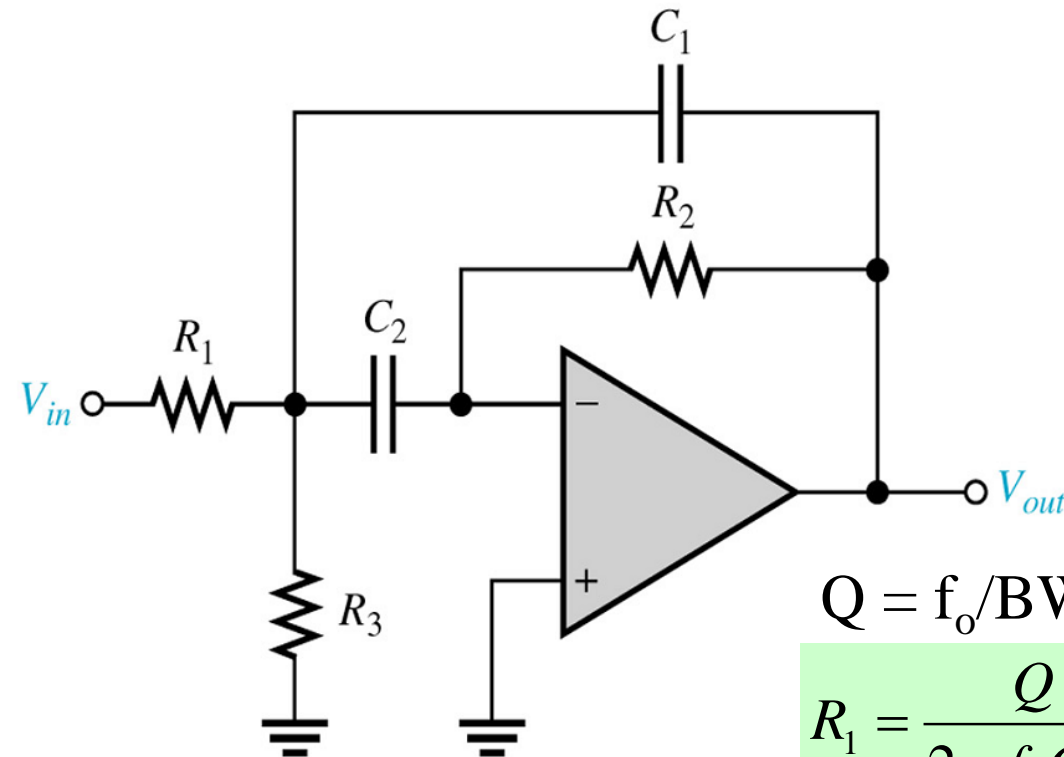


조건: 두 필터의 임계주파수가 충분히 떨어져야 한다.

$$\rightarrow f_{c2} \gg f_{c1}$$

능동 대역 통과 필터

■ 다중 귀환 대역통과 필터



$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{(R_1 \parallel R_3) R_2 C_1 C_2}}$$

Making $C_1 = C_2 = C$,

$$f_o = \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{R_1 + R_3}{R_1 R_2 R_3}}$$

$$Q = f_o / \text{BW}$$

$$R_1 = \frac{Q}{2\pi f_o C A_o}; R_2 = \frac{Q}{\pi f_o C}$$

Max. gain:

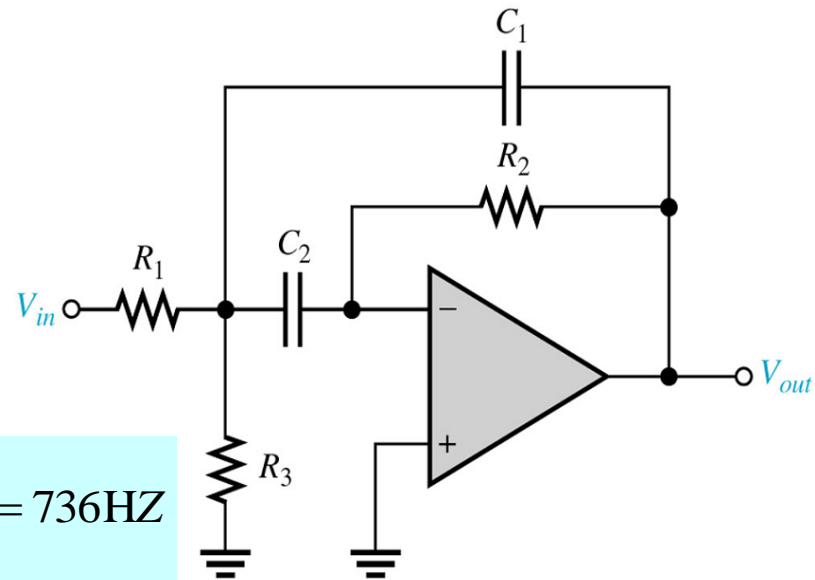
$$A_o = \frac{R_2}{2R_1}$$

R_1, C_1 - LP section
 R_2, C_2 - HP section

$$R_3 = \frac{Q}{2\pi f_o C (2Q^2 - A_o)} > 0 \rightarrow A_o < 2Q^2$$

예제 16-6

- 다중 귀환 대역 통과 필터
 - $R_1 = 68 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 180 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 2.7 \text{ k}\Omega$
 - $C = C_1 = C_2 = 0.01 \mu\text{F}$
 - f_o , A_o , Q , BW ?



$$f_o = \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{R_1 + R_3}{R_1 R_2 R_3}} = \frac{1}{2\pi(0.01\mu)} \sqrt{\frac{68\text{k} + 2.7\text{k}}{(68\text{k})(180\text{k})(2.7\text{k})}} = 736\text{HZ}$$

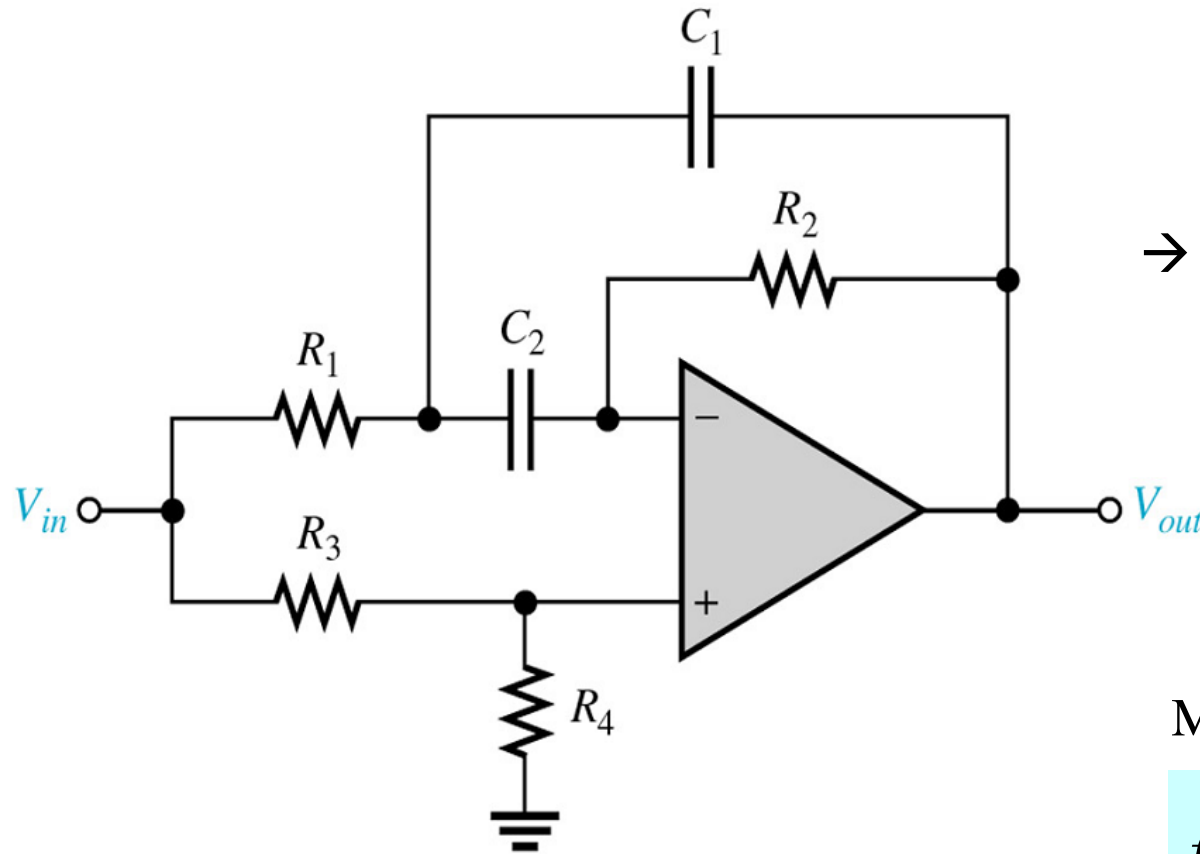
$$A_o = \frac{R_2}{2R_1} = \frac{(180\text{k})}{(2)(68\text{k})} = 1.32$$

$$R_2 = \frac{Q}{\pi f_o C} \rightarrow Q = \pi f_o C R_2 = \pi(736)(0.01\mu)(180\text{k}) = 4.16$$

$$Q = f_o/\text{BW} \rightarrow \text{BW} = f_o/Q = 736/4.16 = 177 \text{ Hz}$$

능동 대역 저지 필터

- 다중 귀환 대역저지 필터



→ R_3, R_4 를 제외하면 다중 귀환 대역통과 필터와 동일

Making $C_1 = C_2 = C$,

$$f_o = \frac{1}{2\pi C \sqrt{R_1 R_2}}$$