

OTA를 이용한 회로망 합성

The Composition of Network Utilizing OTA

(下)

전북대학교 전기공학과 부교수
金 東 龍

전북대학교 회로망합성 및 필터 개발 연구실
申 鈞 太

4. OTA를 이용한 2차 능동 C필터의 합성

가. 최소개의 소자를 이용한 2차 능동 C필터의 합성법

일반적으로 2차 필터를 합성하기 위한 방법은 상태변수법, 즉 신호흐름선도(Signal Flow Graph)가 사용되지만 이 방법은 다소 소자를 많이 필요로 한다. 따라서 최소개의 소자를 이용하여 필터를 합성하기 위해서 다음과 같은 방법을 제시한다.

최소개의 소자를 이용하여 2차 필터를 설계하기 위해서는 OTA 2개와 커패시터 2개가 필요하다. 이때 2개의 OTA와 2개의 커패시터를 사용하여 2차 필터를 얻기 위해서는 다음과 같은 전달함수를 만족해야 한다.

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{ds^2 + es + f}{as^2 + bs + c} \quad (13)$$

$$V_0 = \frac{ds^2 V_i + es V_i + f V_i}{as^2 + bs + c} \quad (14)$$

여기서 $V = V_1, V_2, V_3$ 이고, $a \sim f$ 는 임의의 상수이다. 그러므로 윗식을 합성하기 위하여 다음과 같은 합성절차를 따른다.

(1) 파라미터를 설정한다. 본 절에서는 2개의 OTA와 2개의 커패시터로 설계하므로 4개의 파라미터, 즉 g_{m1}, g_{m2}, c_1, c_2 가 존재하게 된다 [이때 파라미터는 어드미턴스로 $Y_i (i=1, 2, 3, 4)$ 로 잡는다].

(2) 식 (13)을 만족할 수 있는 행렬을 구하고, 식 (13)을 만족시키도록 파라미터를 설정하여 행렬에 대입한다.

(3) (2)에서 구한 행렬은 각 절점(OTA의 출력 단자)에서 세운 KCL 방정식이므로 각 방정식으로부터 같은 변수끼리 묶어 방정식을 다시 쓴다.

(4) (3)에서 구한 방정식을 토대로 회로를 합성한다.

위에 제시된 합성절차에 따라 2차 필터를 합성하기 위하여 다음과 같은 행렬들을 생각한다.

$$\begin{bmatrix} -(Y_1 + Y_3) & Y_1 \\ -Y_4 & Y_2 + Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Y_3 \\ Y_2 \end{bmatrix} V \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} Y_1 + Y_3 & -Y_1 \\ Y_4 & -(Y_2 + Y_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_3 \\ -Y_2 \end{bmatrix} V \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} Y_1 & -(Y_1 + Y_3) \\ Y_2 + Y_4 & -Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Y_3 \\ Y_2 \end{bmatrix} V \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} -Y_1 & Y_1 + Y_3 \\ -(Y_2 + Y_4) & Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_3 \\ -Y_2 \end{bmatrix} V \quad (18)$$

여기서 Y_i ($i=1, 2, 3, 4$)는 g_{m1} , g_{m2} , sC_1 , sC_2 이고 V 는 임의의 절점전압이다. 이 행렬들은 모두 다음과 같은 전달함수 식을 갖는다.

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{Y_1 Y_2 + Y_2 Y_3 + Y_3 Y_4}{Y_1 Y_2 + Y_2 Y_3 + Y_3 Y_4} \quad (19)$$

따라서

$$Y_1 = g_{m1}, Y_2 = g_{m2}, Y_3 = sC_1, Y_4 = sC_2 \quad (20)$$

또는

$$Y_1 = sC_1, Y_2 = sC_2, Y_3 = g_{m1}, Y_4 = g_{m2} \quad (21)$$

일 때 식 (13)과 같은 전달함수를 얻을 수 있다. 즉 파라미터를 식 (20)과 식 (21)과 같이 택할 경우 각각 다음과 같은 전달함수를 갖게 된다.

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{s^2 C_1 C_2 + s C_1 g_{m2} + g_{m1} g_{m2}}{s^2 C_1 C_2 + s C_1 g_{m2} + g_{m1} g_{m2}} \quad (22)$$

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{s^2 C_1 C_2 + s C_2 g_{m1} + g_{m1} g_{m2}}{s^2 C_1 C_2 + s C_2 g_{m1} + g_{m1} g_{m2}} \quad (23)$$

따라서 식 (20)을 식 (15), (17)에 대입하고, 식 (21)을 식 (16), (18)에 대입하여 합성절차 (3)에 따라 방정식을 정돈하면,

식 (15)의 경우 :

$$\begin{aligned} -g_{m1} (V_i - V_0) + sG (V - V_i) &= 0 \\ -g_{m2} (V - V_0) + sC_2 (V_0 - V_i) &= 0 \end{aligned} \quad (24)$$

식 (16)의 경우 :

$$\begin{aligned} -g_{m1} (V - V_i) + sC_1 (V_i - V_0) &= 0 \\ -g_{m2} (V_0 - V_i) + sC_2 (V - V_0) &= 0 \end{aligned} \quad (25)$$

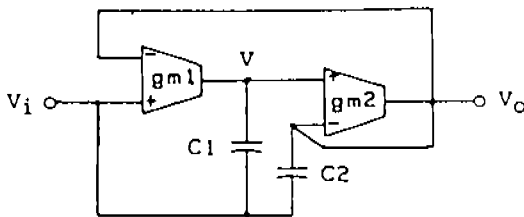
식 (17)의 경우 :

$$\begin{aligned} -g_{m1} (V_0 - V_i) + sC_1 (V - V_0) &= 0 \\ -g_{m2} (V - V_i) + sC_2 (V_i - V_0) &= 0 \end{aligned} \quad (26)$$

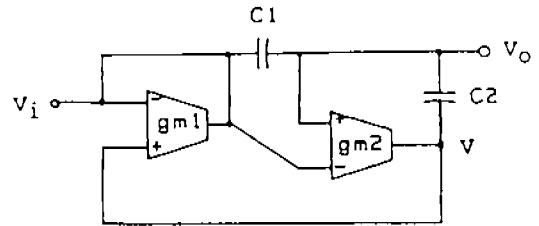
식 (18)의 경우 :

$$\begin{aligned} -g_{m1} (V - V_0) + sC_1 ((V_0 - V_i)) &= 0 \\ -g_{m2} (V_i - V_0) + sC_2 (V - V_i) &= 0 \end{aligned} \quad (27)$$

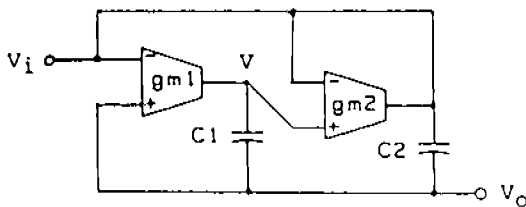
와 같다. 위의 식들은 모두 KCL 방정식이므로



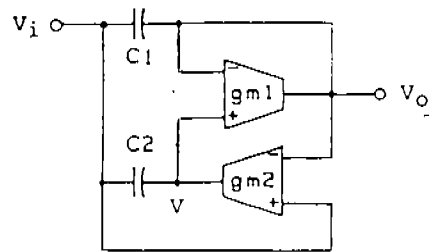
(a) 24의 경우



(b) 25의 경우



(c) 26의 경우



(d) 27의 경우

(그림 5) 최소개의 소자를 이용한 2차 능동C필터

각 방정식에 따라 회로를 합성하면 그림 5와 같은 회로를 각각 얻을 수 있다.

나. 능동 C Notch 필터의 합성법⁽¹²⁾

가. 절에서 언급한 방법과 유사하게 다음과 같은 행렬을 생각해 본다.

$$\begin{bmatrix} -A \\ -D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ D+B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C \\ B \end{bmatrix} V \quad (28)$$

여기서도 마찬가지로 소자의 수를 최소로 하기 위하여 파라미터를 4개 사용하였다. 이때 전달함수는

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{AB+CD}{AB+BC+CD} \quad (29)$$

어고, 여기서 만약 $A=g_{m1}$, $B=g_{m2}$, $C=C_1s$, $D=C_2s$ 또는 $A=C_2s$, $B=C_1s$, $C=g_{m2}$, $D=g_{m1}$ 이면

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{s^2C_1C_2 + g_{m1}g_{m2}}{s^2C_1C_2 + sC_1g_{m2} + g_{m1}g_{m2}} \quad (30)$$

가 된다. 그러므로 각각 그림 6 (a), (b)와 같은 회로를 합성할 수 있다.

식 (30)에서 분자항의 상수항과 분모항의 상수항은 같으므로 그림 6의 회로들은 Highpass Notch (HPN)와 Lowpass Notch (LPN) 회로로 사용되지 못한다. 그러나 분자항의 상수항이 분모항의 상수항 보다 크거나 또는 작게 하기 위하여 OTA를 하나 더 첨가함으로써 HPN과 LPN을 합성할 수 있다. 즉, 그림 6 (a)의 회로

에서 OTA g_{m2} 를 넣어 HPN과 LPN 회로를 합성하면 각각 그림 7 (a), (b)와 같고, 이때의 전달함수를 구하면 각각 다음과 같다.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{s^2C_1C_2 + g_{m1}g_{m2}}{s^2C_1C_2 + sC_1g_{m2} + g_{m2}(g_{m1} + g_{m3})} \quad (31)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{s^2C_1C_2 + g_{m2}(g_{m1} + g_{m3})}{s^2C_1C_2 + sC_1g_{m2} + g_{m1}g_{m2}} \quad (32)$$

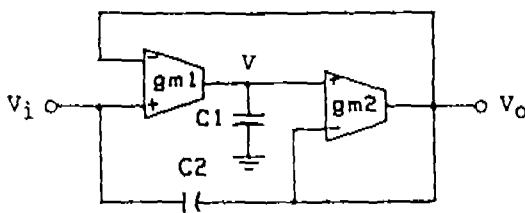
한편 그림 6 (b)에서도 마찬가지로 OTA g_{m3} 를 넣어 HPN과 LPN 회로를 합성하면 그림 7 (c), (d)와 같고, 이 회로의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{s^2C_1C_2 + g_{m1}g_{m2}}{s^2C_1C_2 + sC_1g_{m2} + g_{m2}(g_{m1} + g_{m3})} \quad (33)$$

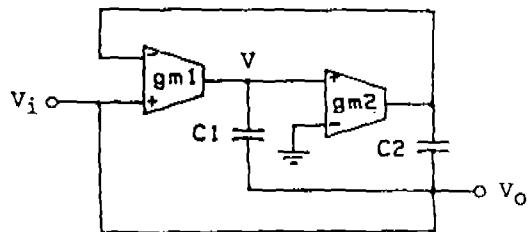
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{s^2C_1C_2 + g_{m2}(g_{m1} + g_{m3})}{s^2C_1C_2 + sC_1g_{m2} + g_{m1}g_{m2}} \quad (34)$$

5. 프로그램이 가능한 능동 C 필터 합성법

식 (14)를 잘 살펴보면 입력전압 V_i 는 분자항에서 s^2 항, s 항, 상수항에 각각 곱해져 있으므로 이때 V_i 를 차례로 V_1 , V_2 , V_3 라고 하면 V_1 만을 택할 때 (나머지 V_2 와 V_3 는 접지된 것으로 가정한다)는 고역통과, V_2 만을 택할 때는 대역통과, V_3 만을 택할 때는 저역통과 그리고 V_1 과 V_3 를 동시에 택할 때는 Notch 필터를 각각 얻을 수 있게 된다. 그러므로 항 4 가 절에 제시된 합성 절차에 따라 설계된 회로(그림 5)에서 입력전압

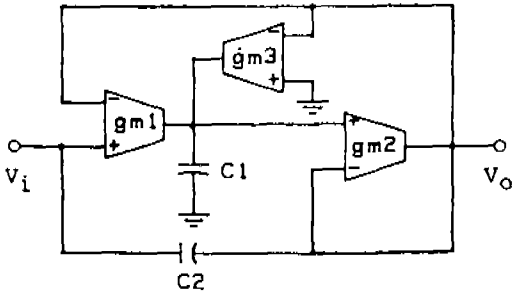


(a) $A=g_{m1}$, $B=g_{m2}$, $C=C_1s$, $D=C_2s$ 인 경우

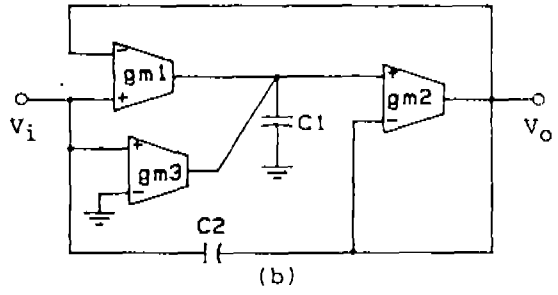


(b) $A=C_2s$, $B=C_1s$, $C=g_{m2}$, $D=g_{m1}$ 인 경우

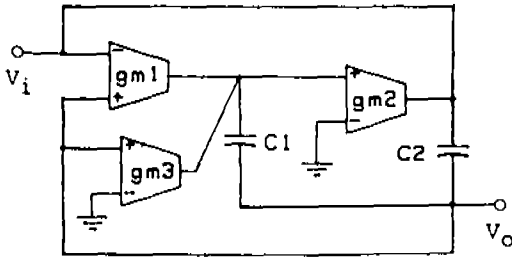
(그림 6) 2개의 OTA와 2개의 C를 사용한 SN회로



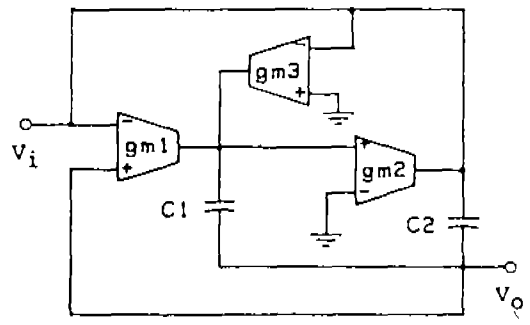
(a) HPN



(b) LPN



(c) HPN



(d) LPN

(그림 7) 3개의 OTA와 2개의 C를 사용한 HPN과 LPN 회로

V_i 와 연결된 곳에 $V_i (i=1, 2, 3)$ 로 임의의 전압을 표기하고 입력전압 V_i 와 연결되거나 접지되도록 스위치를 연결한다. 즉 그림 8은 그림 5의 회로에 대한 한 예이다. 그리고 표 1은 그림 8에서 입력상태 변환에 따른 필터형태 및 함수식을 요약해 놓은 것이다.

표 1에서 알 수 있듯이 그림 5 (또는 그림 8)에서 중심주파수 f_0 와 Quality Factor Q 는

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} : \text{그림 8 (a), (b), (c), (d)} \quad (35)$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_2g_{m1}}{C_1g_{m2}}} : \text{그림 8 (a), (c)} \quad (36)$$

$$= \sqrt{\frac{C_1g_{m2}}{C_2g_{m1}}} : \text{그림 8 (b), (d)} \quad (37)$$

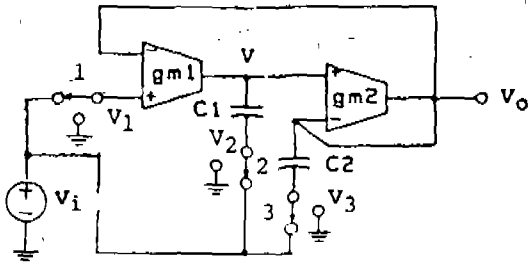
이므로 각 소자값의 변동에 따른 감도는 0 또는 ± 0.5 가 되어 회로들은 안정하다. 이러한 점

을 고려하여 표 1보다 더 많은 필터특성을 얻기 위하여 그림 8에 OTA를 1개 더 첨가해 보자. 예를 들어 그림 8 (a)에 OTA를 1개 더 첨가한 회로(여기서는 위에서 구한 감도특성을 그대로 유지하기 위하여 분자항의 상수항을 첨가시켰다)를 그림 9에 나타냈다. 그림 8의 나머지 회로에서도 유사한 방법이 적용된다. 표 2는 그림 9에서 입력변환에 따른 필터의 형태 및 함수를 요약한 것이다.

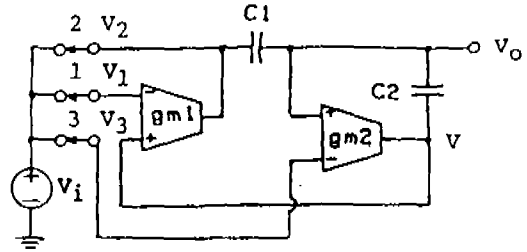
그리고 그림 10은 표 2에 표시한 각 필터의 특성곡선을 나타낸 것이다. 그림 10 (a), (b)의 경우는 Lowpass 1, Lowpass 2의 경우로서 $C_1 = C_2 = 130\text{nF}$, $g_{m1} = 1.536\text{mmho}$ 로 고정하고, $g_{m2} = 0.192, 0.384, 0.768, 1.536, 3.072, 6.144\text{mmho}$ 로 가변시키면서 측정한 것이고, 그림 10 (c)의 경우는 Bandpass의 경우로서 Q 를 조

정하기 위해 $g_{m1} = 1.536\text{mmho}$, $C_2 = 130\text{nF}$ 으로 고정하고 그림 10(c)에 표시한 것과 같이 g_{m2} 와 C_1 을 조절하여 주파수 특성을 구한 것이다. 그림

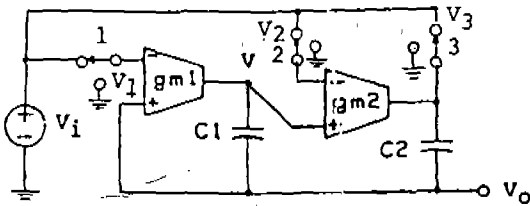
10(d)의 경우는 Lowpass 1, 2와 같이 g_{m2} 만을 변화시켜 f_0 와 Q 를 변화시킴으로써 Bandpass 필터 특성을 얻을 수 있다는 것을 보여주기 위한



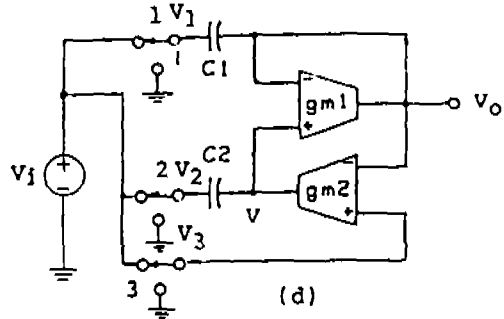
(a) 그림 5 (a)의 회로



(b) 그림 5 (b)의 회로



(c) 그림 (c)의 회로



(d) 그림(d)의 회로

〈그림 8〉 그림 5에 대한 입력에 따른 상태를 나타낸 회로

〈표 1〉 입력에 따른 필터 형태 및 함수

필터 형태	그림 8 (a)의 회로			그림 8 (b)의 회로			그림 8 (c)의 회로			그림 8 (d)의 회로		
	분자다항식	입력접점	접지점	분자다항식	입력접점	접지점	분자다항식	입력접점	접지점	분자다항식	입력접점	접지점
Lowpass	$g_{m1}g_{m2}$	1	2, 3	$g_{m1}g_{m2}$	3	1, 2	$g_{m1}g_{m2}$	1	2, 3	$g_{m1}g_{m2}$	3	1, 2
Bandpass	sC_1g_{m2}	2	1, 3	sC_2g_{m1}	1	2, 3	sC_1g_{m2}	2	1, 3	sC_2g_{m1}	2	1, 3
Highpass	$s^2C_1C_2$	3	1, 2	$s^2C_1C_2$	2	1, 3	$s^2C_1C_2$	3	1, 2	$s^2C_1C_2$	1	2, 3
Notch	$s^2C_1C_2 + g_{m1}g_{m2}$	1, 3	2	$s^2C_1C_2 + g_{m1}g_{m2}$	2, 3	1	$s^2C_1C_2 + g_{m1}g_{m2}$	1, 3	2	$s^2C_1C_2 + g_{m1}g_{m2}$	1, 3	2

그림 8 (a)와 (c)의 경우 분모다항식은 $s^2C_1C_2 + sC_1g_{m2} + g_{m1}g_{m2}$ 이고, 그림 8 (b)와 (d)의 경우 분모다항식은 $s^2C_1C_2 + sC_2g_{m1} + g_{m1}g_{m2}$ 이다.