

[연습문제]

<< 5.2 연산증폭기가 포함된 회로의 해석 >>

<< 5.2.1 반전증폭기와 비반전증폭기 >>

[5.1] 그림 p5.1의 회로에서, $v_o(t)$ 를 구하여라.

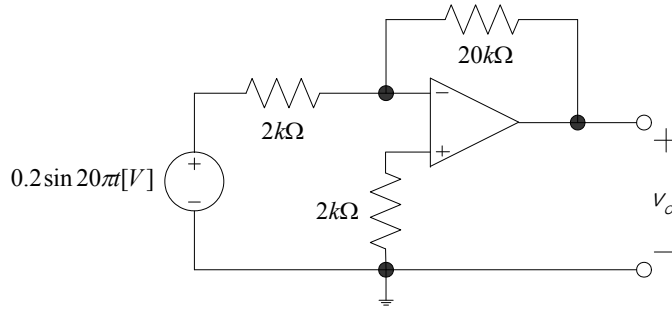


그림 p5.1

[풀이]

[5.1] $v_o(t) = -\frac{20k}{2k} v_i(t) = -10 \times 0.2 \sin 20\pi t = -2 \sin 20\pi t$ [V]이다.

[5.2] 그림 p5.2의 회로에서, $v_o(t)$ 를 구하여라.

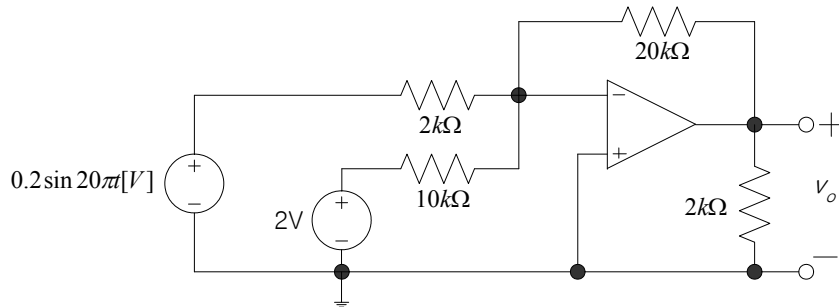


그림 p5.2

[풀이]

[5.2] $v_o(t) = -\frac{20k}{2k} \times 0.2 \sin 20\pi t - \frac{20k}{10k} \times 2 = -2 \sin 20\pi t - 4$ [V]이다.

[5.3] 그림 p5.3의 회로에서, $v_o(t)$ 와 $i_o(t)$ 를 구하여라.

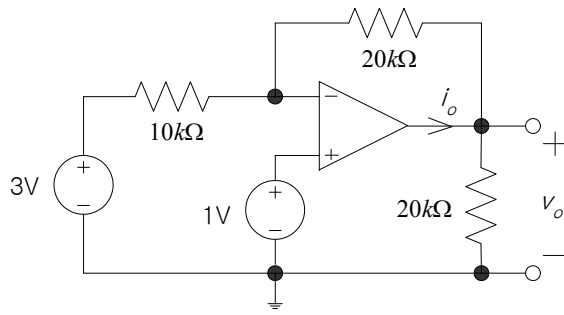


그림 p5.3

[풀이]

[5.3] OP앰프의 반전단자의 전압 v_- 는

$$v_- = v_+ = 1[\text{V}]$$

이다. KCL에 의하여

$$\frac{3 - v_-}{10k} = \frac{v_- - v_o}{20k}$$

이다. 따라서, $v_o = -3[\text{V}]$ 이다.

i_o 는 KCL에 의하여

$$i_o = \frac{v_o - v_-}{20k} + \frac{v_o}{20k} = -\frac{4}{20k} - \frac{3}{20k} = -0.35[\text{mA}]$$

이다.

[5.4] 그림 p5.4의 회로에서, $v_o(t)$ 를 구하여라.

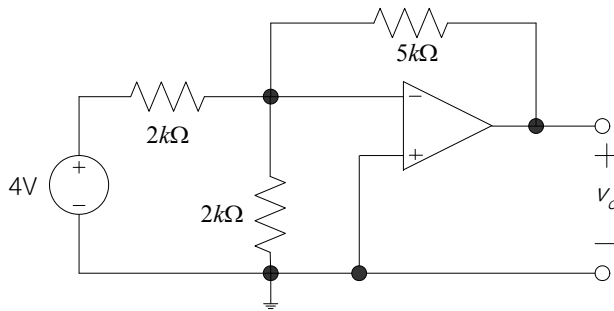


그림 p5.4

[풀이]

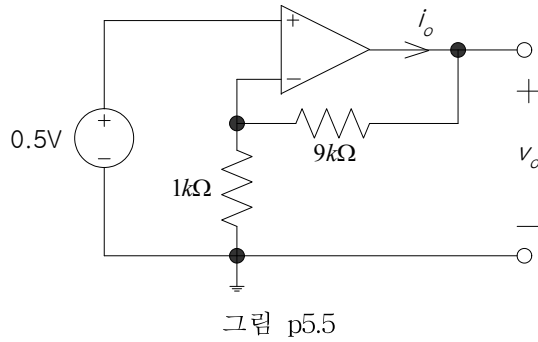
[5.4] OP앰프의 반전단자가 연결된 마디에서 KCL을 적용하면

$$\frac{4 - 0}{2k} = \frac{0}{2k} + \frac{0 - v_o}{5k}$$

에서, $v_o = \frac{5}{2} \times 4 = -10[\text{V}]$ 이다.

[5.5] 그림 p5.5의 회로에 대하여 다음 물음에 답하여라.

- (1) v_o 와 i_o 를 구하여라.
- (2) 출력단자에 $1k\Omega$ 의 부하저항을 달았을 때, v_o 와 i_o 를 구하여라.
- (3) 출력단자에 $1k\Omega$ 의 부하저항 2개를 병렬로 달았을 때, v_o 와 i_o 를 구하여라.
- (4) (1) ~ (3)의 결과를 이용하여 OP앰프의 출력단자에 부하저항을 연결하면 v_o 와 i_o 가 어떻게 되는 지를 설명하여라.



[풀이]

[5.5]

- (1) $v_o = (1 + \frac{9}{1}) \times 0.5 = 5[V]$ 이고,

$$i_o = \frac{v_o}{9k+1k} = 0.5[mA] \text{ 이다.}$$

- (2) 출력단자에 $1k\Omega$ 의 부하저항을 달면,

$$v_o = (1 + \frac{9}{1}) \times 0.5 = 5[V] \text{ 이고,}$$

$$i_o = \frac{v_o}{9k+1k} + \frac{v_o}{1k} = 0.5 + 5 = 5.5[mA] \text{ 이다.}$$

- (3) 출력단자에 $1k\Omega$ 의 부하저항 2개를 병렬로 달았을 때,

$$v_o = (1 + \frac{9}{1}) \times 0.5 = 5[V] \text{ 이고,}$$

$$i_o = \frac{v_o}{9k+1k} + \frac{v_o}{1k} \times 2 = 0.5 + 5 \times 2 = 10.5[mA] \text{ 이다.}$$

- (4) (1) ~ (3)의 결과로부터, 다음의 두 사실을 알 수 있다.

(a) 출력전압 v_o 는 출력단자에 연결된 부하저항에 관계없이 $v_o = 5[V]$ 이다.

(b) OP앰프의 출력단자에 n 개의 $1k\Omega$ 부하저항을 연결하면, OP앰프의 출력전류 i_o 는 $i_o = 0.05 + 5n[mA]$ 이다. 즉, 부하를 병렬로 많이 연결할 수록 출력전류는 커진다.

[5.6] 그림 p5.6의 회로에서, 부하저항 R_L 에 흐르는 전류 i_L 을 V_S 의 함수로 표시하고,

i_L 이 부하저항 R_L 의 값에 영향받는 지를 설명하여라.

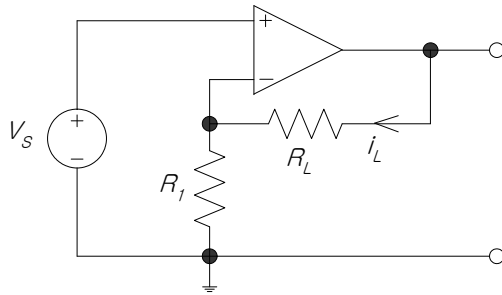


그림 p5.6

[풀이]

[5.6] OP앰프의 입력단자로 유입하는 전류는 0이므로 R_L 에 흐르는 전류와 R_1 에 흐르는 전류는 같다. 따라서, $i_L = \frac{v_-}{R_1} = \frac{V_s}{R_1}$ 이다. i_L 은 부하저항 R_L 의 값에 영향받지 않는다. 이 경우 이 회로는 전압원을 전류원으로 변환하는 회로로 동작한다.

[5.7] 그림 p5.7 회로에서 전압이득 $\frac{V_o}{V_i}$ 를 구하여라.

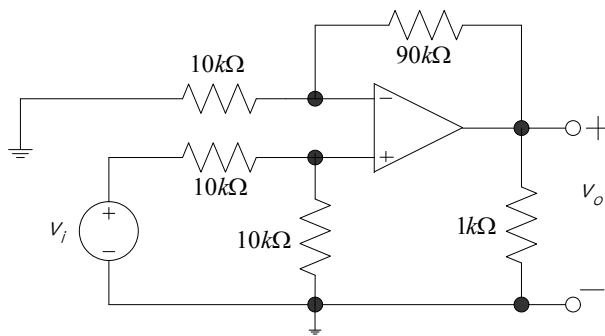


그림 p5.7

[풀이]

[5.7] OP앰프의 반전단자가 연결된 마디에서 KCL을 적용하면

$$\frac{0 - v_-}{10k} = \frac{v_- - v_o}{90k}$$

이다. 따라서,

$$v_o = 10 v_- \quad \text{-----} \quad \textcircled{1}$$

이다.

OP앰프의 비반전단자가 연결된 마디에서 KCL을 적용하면

$$\frac{v_i - v_+}{10k} = \frac{v_+}{10k}$$

이다. 따라서,

$$v_+ = \frac{1}{2} v_i \text{ ----- ②}$$

이다. $v_- = v_+$ 이므로 식①과 식②로부터

$$v_o = 10 \times \frac{1}{2} v_i = 5 v_i$$

이다. 따라서, 전압이득은

$$\frac{v_o}{v_i} = 5$$

이다.

[5.8] 그림 p5.8 회로에서 전압이득 $\frac{v_o}{v_i}$ 를 구하여라.

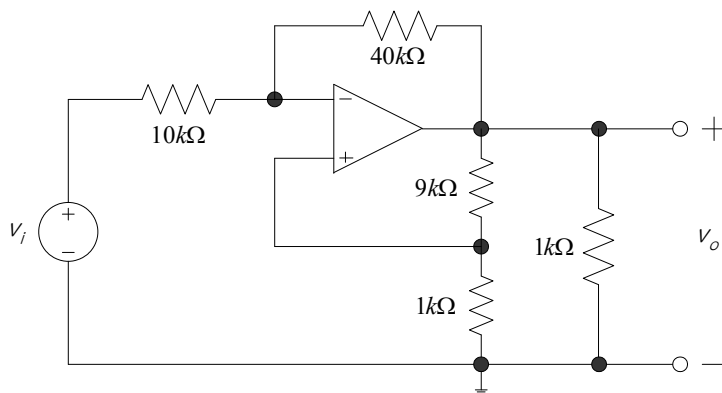


그림 p5.8

[풀이]

[5.8] OP앰프의 반전단자가 연결된 마디에서 KCL을 적용하면

$$\frac{v_i - v_-}{10k} = \frac{v_- - v_o}{40k}$$

이다. 따라서,

$$v_- = \frac{4 v_i + v_o}{5} \text{ ----- ①}$$

이다.

OP앰프의 비반전단자가 연결된 마디에서 KCL을 적용하면

$$\frac{v_+}{1k} = \frac{v_o - v_+}{9k}$$

이다. 따라서,

$$v_+ = \frac{1}{10} v_o \text{ ----- ②}$$

이다. $v_- = v_+$ 이므로 식①과 식②로부터

$$8 v_i + 2 v_o = v_o$$

이다. 따라서, 전압이득은

$$\frac{v_o}{v_i} = -8$$

이다.

<< 5.2.2 가산증폭기 >>

[5.9] 그림 p5.9의 반전 가산증폭기에 대하여 다음 물음에 답하여라.

(1) 출력신호 v_o 를 입력신호 v_1 과 v_2 의 함수로 나타내면 $v_o = -(a_1 v_1 + a_2 v_2)$ 임을 보여라.

(2) $v_o = -(2 v_1 + 5 v_2)$ 인 반전 가산증폭기를 설계하고자 한다. $R_f = 20[\text{k}\Omega]$ 일 때,

$\frac{R_f}{a_1}$ 와 $\frac{R_f}{a_2}$ 의 값을 결정하여라.

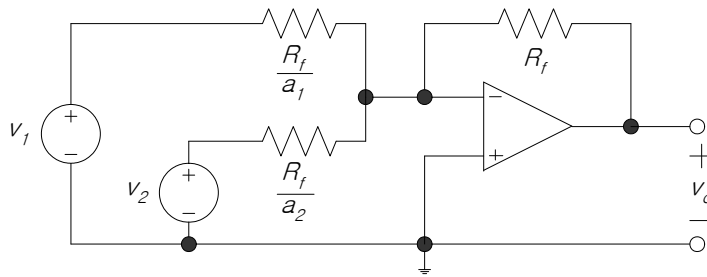


그림 p5.9

[풀이]

[5.9]

(1) OP앰프의 반전단자가 연결된 마디에서 KCL을 적용하면

$$\frac{v_1 - 0}{\frac{R_f}{a_1}} + \frac{v_2 - 0}{\frac{R_f}{a_2}} = \frac{0 - v_o}{R_f}$$

에서, $v_o = -(a_1 v_1 + a_2 v_2)$ 이다.

(2) $v_o = -(2 v_1 + 5 v_2)$ 에서 $a_1 = 2$ 이므로 $\frac{R_f}{a_1} = 10[\text{k}\Omega]$ 이고,

$a_2 = 5$ 이므로 $\frac{R_f}{a_2} = 4[\text{k}\Omega]$ 이어야 한다.

[5.10] 그림 p5.10의 비반전 가산증폭기에 대하여 다음 물음에 답하여라.

(1) 출력신호 v_o 를 입력신호 v_1 과 v_2 의 함수로 나타내면

$$v_o = (1 + b) \frac{a_1 v_1 + a_2 v_2}{a_1 + a_2}$$

임을 보여라.

(2) $v_o = 2v_1 + 5v_2$ 인 비반전 가산증폭기를 설계하고자 한다. $R_f = 24[\text{k}\Omega]$ 일 때,

$\frac{R_f}{a_1}$, $\frac{R_f}{a_2}$, $\frac{R_f}{b}$ 의 값을 결정하여라.

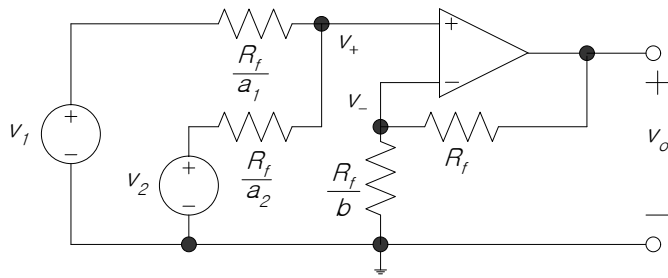


그림 p5.10

[풀이]

[5.10]

(1) v_+ 표시된 마디에서 KCL을 적용하면

$$\frac{v_1 - v_+}{\frac{R_f}{a_1}} + \frac{v_2 - v_+}{\frac{R_f}{a_2}} = 0$$

에서, $v_+ = \frac{a_1 v_1 + a_2 v_2}{a_1 + a_2}$ 이다.

v_- 표시된 마디에서 KCL을 적용하면

$$\frac{v_o - v_-}{R_f} = \frac{v_-}{\frac{R_f}{b}}$$

에서, $v_- = \frac{v_o}{1 + b}$ 이다.

$v_- = v_+$ 이므로 v_o 는 $v_o = (1 + b) \frac{a_1 v_1 + a_2 v_2}{a_1 + a_2}$ 이다.

(2) $v_o = 2v_1 + 5v_2$ 에서, $a_1 = 2$, $a_2 = 5$ 로 하고 $1 + b = a_1 + a_2$ 로 하면 원하는 증폭기가 된다. 즉, $a_1 = 2$, $a_2 = 5$, $b = 6$ 으로 하면 설계하고자 하는 증폭기가 되므로

$$\frac{R_f}{a_1} = \frac{24}{2} = 12[\text{k}\Omega],$$

$$\frac{R_f}{a_2} = \frac{24}{5} = 4.8[\text{k}\Omega],$$

$$\frac{R_f}{b} = \frac{24}{6} = 4[\text{k}\Omega]$$

이어야 한다.

[5.11] 그림 p5.11의 일반적인 가산증폭기에 대하여 다음 물음에 답하여라.

(1) 출력신호 v_o 를 입력신호 v_1 과 v_2 의 함수로 나타내면

$$v_o = -a v_1 + \frac{a+c+1}{b+d} b v_2$$

임을 보여라.

(2) $v_o = -5 v_1 + 2 v_2$ 인 가산증폭기를 설계하고자 한다. $R_f = 20[\text{k}\Omega]$ 일 때, R_a , R_c , R_b , 및 R_d 의 값을 결정하여라.

(3) $v_o = -2 v_1 + 5 v_2$ 인 가산증폭기를 설계하고자 한다. $R_f = 30[\text{k}\Omega]$ 일 때, R_a , R_c , R_b , 및 R_d 의 값을 결정하여라.

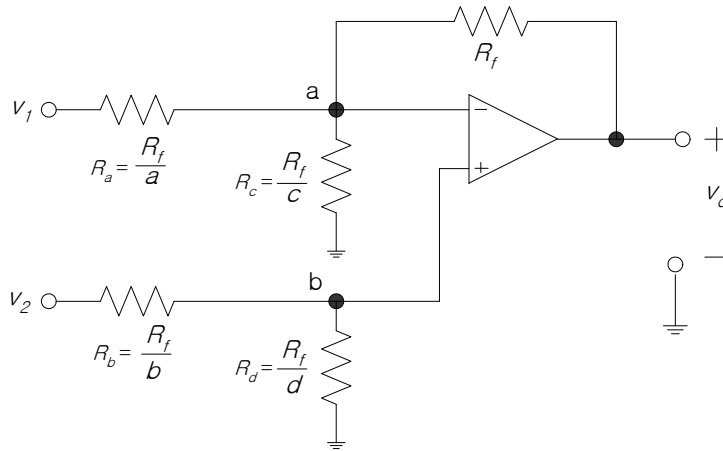


그림 p5.11

[풀이]

[5.11]

(1) 마디 a에서 KCL을 적용하면

$$\frac{v_1 - v_-}{\frac{R_f}{a}} = \frac{v_-}{\frac{R_f}{c}} + \frac{v_- - v_o}{R_f}$$

이고, 위의 식을 정리하면

$$v_- = \frac{a v_1 + v_o}{a + c + 1}$$

이다. 마디 b에서 KCL을 적용하면

$$\frac{v_2 - v_+}{\frac{R_f}{b}} = \frac{v_+}{\frac{R_f}{d}}$$

이고, 위의 식을 정리하면

$$v_+ = \frac{bv_2}{b+d}$$

이다. $v_- = v_+$ 이므로

$$\frac{av_1 + v_o}{a+c+1} = \frac{bv_2}{b+d}$$

이다. 따라서,

$$v_o = -av_1 + \frac{a+c+1}{b+d}bv_2$$

이다.

(2) $v_o = -5v_1 + 2v_2$ 에서 $a=5$, $b=2$ 라 하면, c 와 d 는 다음과 같이 구한다.

- ① c 와 d : $5+c+1 = 2+d$ 이 성립하도록 c 와 d 를 구하되,
 $d-c=4 > 0$ 이므로 $c=0$ 로 선택하면 $d=4$ 이다.

- ② $R_f = 20[\text{k}\Omega]$ 이면

$$R_a = \frac{20}{5} = 4[\text{k}\Omega], \quad R_c = \frac{20}{0} = \infty (\text{즉, 개방}), \quad R_b = \frac{20}{2} = 10[\text{k}\Omega],$$

$$R_d = \frac{20}{4} = 5[\text{k}\Omega] \text{ 이어야 한다.}$$

(3) $v_o = -2v_1 + 5v_2$ 에서 $a=2$, $b=5$ 라 할 때, c 와 d 는 다음의 과정으로 구한다.

- ① c 와 d : $2+c+1 = 5+d$ 이 성립하도록 c 와 d 를 구하되,
 $d-c = -2$ 이므로 $d=1$ 로 선택하면 $c=3$ 이다.

- ② 2, 3, 5, 1의 초소공배수는 30이므로 R_f 를 30kΩ으로 선택하면

$$R_a = \frac{30}{2} = 15[\text{k}\Omega], \quad R_c = \frac{30}{3} = 10[\text{k}\Omega], \quad R_b = \frac{30}{5} = 6[\text{k}\Omega],$$

$$R_d = 30[\text{k}\Omega] \text{ 이어야 한다.}$$

<< 5.2.3 차동증폭기 >>

[5.12] 그림 p5.12의 회로에서 v_o 를 v_{o1} 과 v_{o2} 의 함수로 나타내어라.

(수정된 그림)

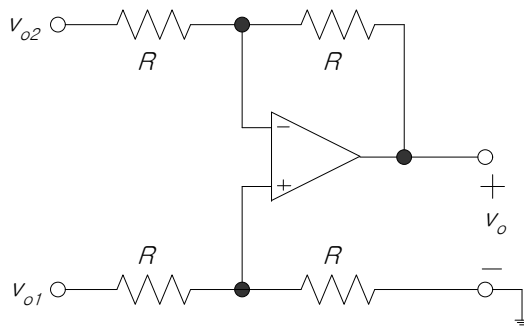


그림 p5.12

[풀이]

[5.12] OP앰프의 반전단자가 연결된 마디에서 KCL을 적용하면

$$\frac{v_- - v_-}{R} = \frac{v_- - v_o}{R}$$

이다. 따라서,

$$v_- = \frac{v_{i2} + v_o}{2} \quad \text{-----} \quad \textcircled{1}$$

이다.

OP앰프의 비반전단자가 연결된 마디에서 KCL을 적용하면

$$\frac{v_{i1} - v_+}{R} = \frac{v_+}{R}$$

이다. 따라서,

$$v_+ = \frac{1}{2} v_{i1} \quad \text{-----} \quad \textcircled{2}$$

이다. $v_- = v_+$ 이므로 식①과 식②로부터

$$v_o = v_{i1} - v_{i2}$$

이다.

[5.13] 그림 p5.13의 회로에서 $v_o = (1 + \frac{2R}{R_G})(v_1 - v_2)$ 임을 보여라.

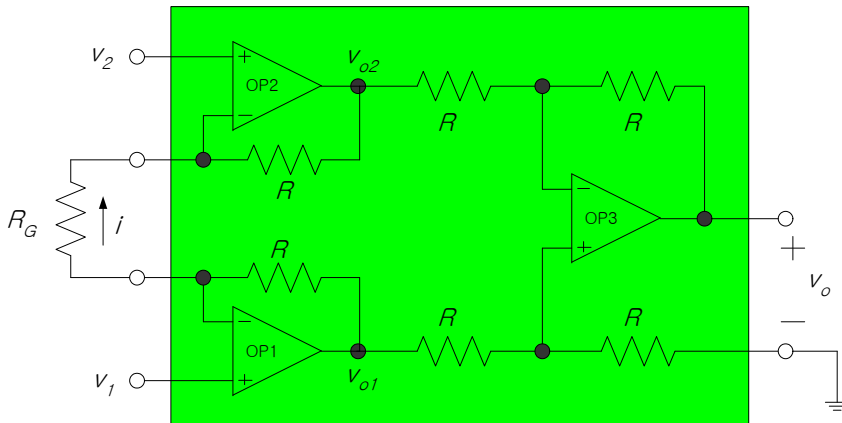


그림 p5.13

[풀이]

[5.13] OP3의 반전단자가 연결된 마디에서 KCL을 적용하면

$$\frac{v_{o2} - v_-}{R} = \frac{v_- - v_o}{R}$$

이다. 따라서,

$$v_- = \frac{v_{o2} + v_o}{2} \quad \text{-----} \quad \textcircled{1}$$

이다.

OP3의 비반전단자가 연결된 마디에서 KCL을 적용하면

$$\frac{v_{o1} - v_+}{R} = \frac{v_+}{R}$$

이다. 따라서,

$$v_+ = \frac{1}{2} v_{o1} \quad \text{-----} \quad ②$$

이다. $v_- = v_+$ 이므로 식①과 식②로부터

$$v_o = v_{o1} - v_{o2} \quad \text{-----} \quad ③$$

이다.

저항 R_G 에 흐르는 전류를 i 라고 하면 OP앰프의 반전단자로 유입되는 전류는 0이므로

$$v_{o1} - v_{o2} = (R + R_G + R) i = (2R + R_G) i \quad \text{-----} \quad ④$$

이다. 그리고 OP앰프에서 $v_- = v_+$ 이므로

$$i = \frac{v_1 - v_2}{R_G} \quad \text{-----} \quad ⑤$$

이다. 식⑤를 식④에 대입하고 정리하면

$$v_o = \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) (v_1 - v_2)$$

이다.

<< 5.3 연산증폭기가 종속접속된 회로의 해석 >>

[5.14] 그림 p5.14의 회로에 대하여 다음 물음에 답하여라.

- (1) 전압이득 $\frac{v_o}{v_i}$ 를 구하여라.
- (2) $v_i = 2[V]$ 일 때 v_o 와 i_o 를 구하여라.

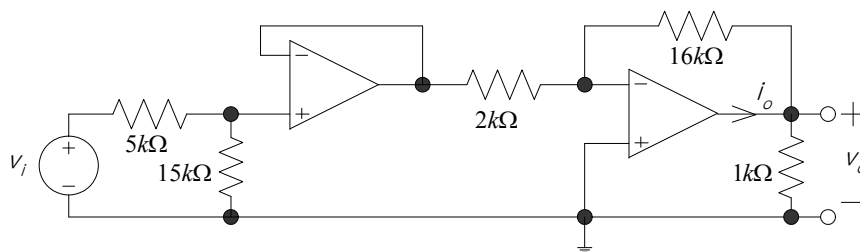


그림 p5.14

[풀이]

[5.14]

(1) 첫 번째 OP앰프의 출력은 $\frac{15}{5+15} v_i = \frac{3}{4} v_i$ 이므로,

$$v_o = \frac{3}{4} v_i \times (-8) = -6 v_i \quad \text{이다. 따라서, } \frac{v_o}{v_i} = -6 \quad \text{이다.}$$

(2) $v_i = 2[\text{V}]$ 일 때 $v_o = -12[\text{V}]$ 이고, i_o 는 $i_o = \frac{v_o - 0}{16k} + \frac{v_o}{1k} = -12.75[\text{mA}]$ 이다.

[5.15] 그림 p5.15의 회로에 대하여 다음 물음에 답하여라.

(1) 전압이득 $\frac{V_o}{V_i}$ 를 구하여라.

(2) $v_i = 0.5 \sin 120\pi t [\text{V}]$ 일 때 v_o 와 i_o 를 구하여라.

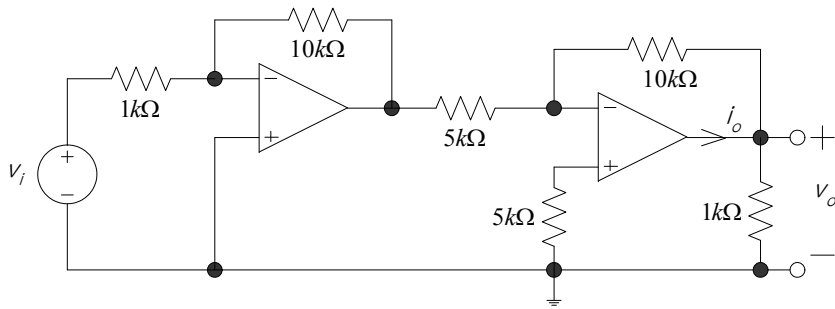


그림 p5.15

[풀이]

[5.15]

(1) 전압이득 $\frac{V_o}{V_i}$ 는 $\frac{V_o}{V_i} = (-10) \times (-2) = 20$ 이다.

(2) $v_i = 0.5 \sin 120\pi t [\text{V}]$ 일 때,

$$v_o = 20 v_i = 10 \sin 120\pi t [\text{V}],$$

$$i_o = \frac{v_o}{10k} + \frac{v_o}{1k} = 11 \sin 120\pi t [\text{mA}]$$

이다.

[5.16] 그림 p5.16의 회로에 대하여 다음 물음에 답하여라.

(1) v_o 를 v_1 과 v_2 의 함수로 나타내어라.

(2) $v_1 = 2[\text{V}]$, $v_2 = 0.4 \sin 200\pi t [\text{V}]$ 일 때, $v_o(t)$ 를 구하여라.

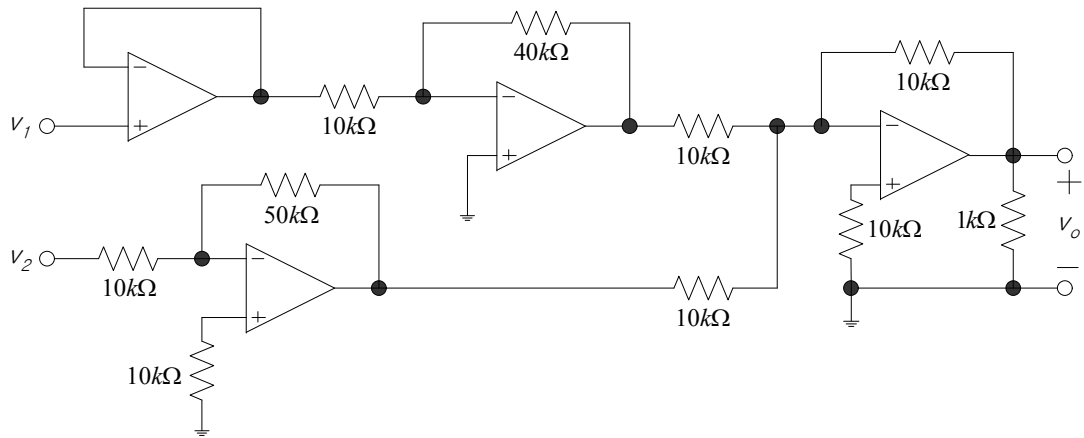


그림 p5.16

[풀이]

[5.16]

$$(1) v_o = (-4 v_1) \times (-1) + (-5 v_2) \times (-1) = 4 v + 5 v_2$$

$$(2) v_1 = 2[\text{V}], v_2 = 0.4 \sin 200\pi t [\text{V}] \text{ 일 때,}$$

$$v_o(t) = 8 + 2 \sin 200\pi t [\text{V}] \text{ 이다.}$$

[5.17] 2개의 OP앰프와 저항들을 이용하여, 입력이 v_1 과 v_2 일 때, 출력 v_o 가

$$v_o = 8 v_1 - 4 v_2$$

인 회로를 설계하여라.

[풀이]

[5.17] 출력이 $v_o = 8 v_1 - 4 v_2 = (-8 v_1) \times (-1) - 4 v_2$ 이므로 이득이 -1 인 반전증폭기 1개와 반전가산기 1개로 그림 s5.17a 또는 그림 s5.17b와 같이 구성할 수 있다. $R = 24[\text{k}\Omega]$ 이면 적당하다.

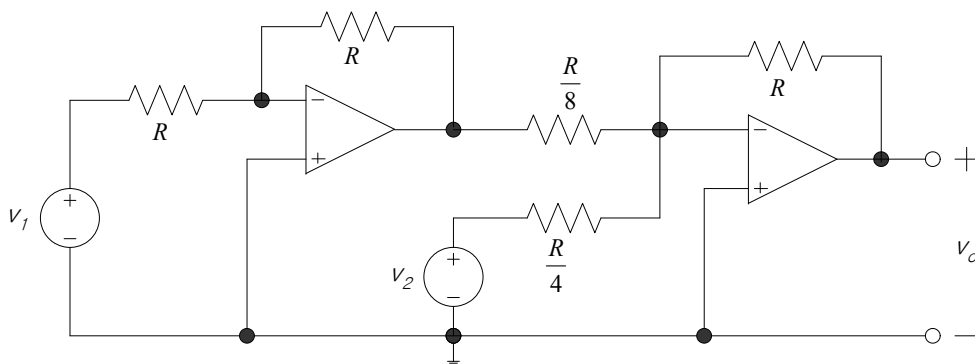


그림 s5.17a

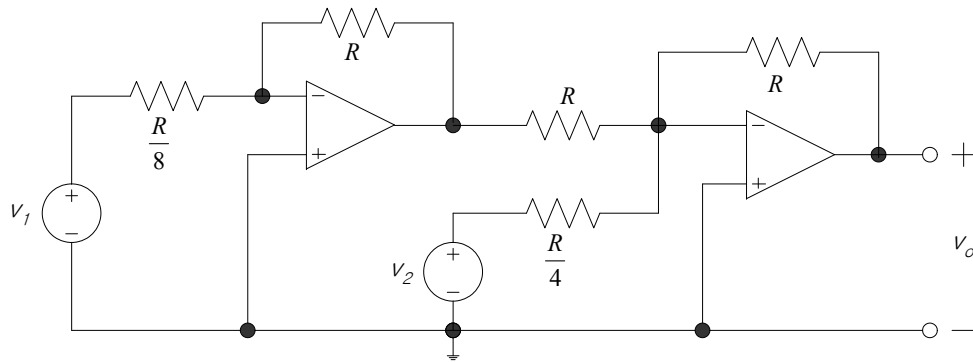


그림 s5.17b

[5.18] 2개의 OP앰프와 저항들을 이용하여, 입력이 v_1 과 v_2 일 때, 출력 v_o 가

$$v_o = 8v_1 + 4v_2$$

인 회로를 설계하여라.

[풀이]

[5.18] 출력이 $v_o = 8v_1 + 4v_2 = (-8v_1 - 4v_2) \times (-1)$ 이므로 반전 가산증폭기 1개와 이득이 -1 인 반전증폭기 1개로 그림 s5.18과 같이 구성할 수 있다. $R = 24[\text{k}\Omega]$ 이면 적당하다.

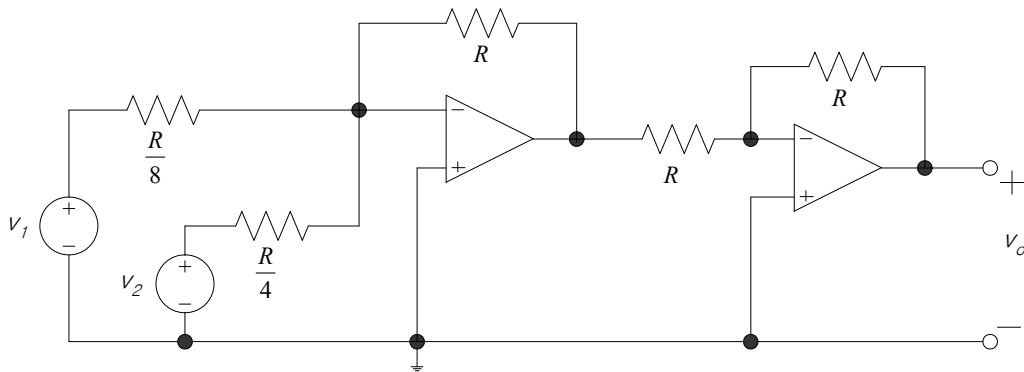


그림 s5.18