EDDI
Electronic Design
Development Institute

에디로봇아카데미

임베디드 마스터 Lv2 과정

제 1기

2022. 06. 11

손표훈

CONTENTS

- OP-AMP의 등가회로 해석
  - ➢ Negative feedback 특성
    - ✓ 비반전 증폭기의 입/출력 관계식
    - ✓ 반전 증폭기의 입/출력 관계식
- OP-AMP의 응용회로
  - ➢ 가산기
  - ➢ 감산기(차동증폭기)
  - ➢ 미분기
  - ➢ 적분기

OP-AMP의 등가회로 해석

➢ Negative feedback 특성

→ 우선 Negative Feedback특성을 알아보기 위해 이상적인 op-amp의 특성을 알아보자

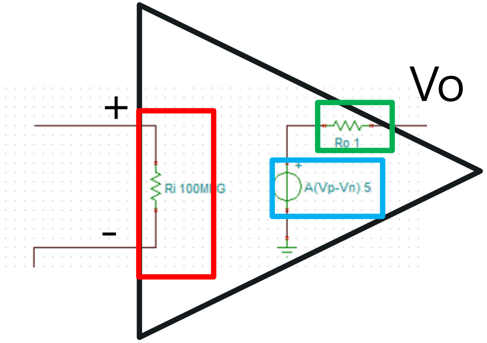
(1) 입력 임피던스는 무한대에 가깝다

(2) 출력 임피던스는 0에 수렴한다

(3) 오픈루프 전압이득은 무한대에 가깝다

→ Negative Feedback으로 인해 +입력과 -입력의 전위차는 0이 된다. 즉, Vp = Vn이 된다.

→ Negative Feedback을 사용하게 되면 OP-AMP는 "Linear region"으로 동작한다

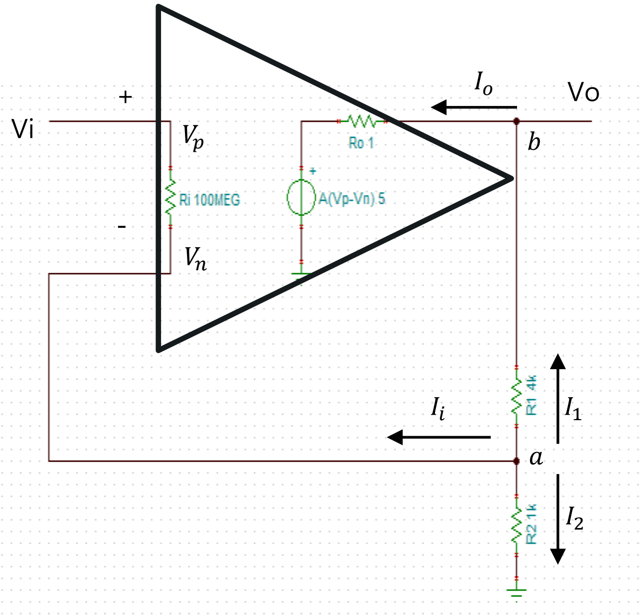


OP-AMP의 등가회로 해석

➢ Negative feedback 특성

✓ 비반전 증폭기의 입/출력 관계식

→ 아래와 같이 출력이 저항에 분배되어 반전입력에 feedback되고, 비반전 입력에 전압이 인가 되는 회로를 비반전 증폭기라 한다



→ 옆 회로로 부터 다음을 알 수 있다

(1) a점에서의 전압은 Vn과 같고, Vn = Vp = Vi가 된다.

(2) 출력 임피던스가 낮으므로 Io = I1이 된다.

이를 통해 다음이 성립된다

$$I_o = \frac{V_o - A(V_p - V_n)}{R_o} \qquad I_1 = \frac{V_n - V_o}{R_1} \longrightarrow \frac{V_o - A(V_p - V_n)}{R_o} = \frac{V_n - V_o}{R_1}$$

(3) a점에서 KCL을 적용하면 다음과 같다 $I_i = -I_1 - I_2$

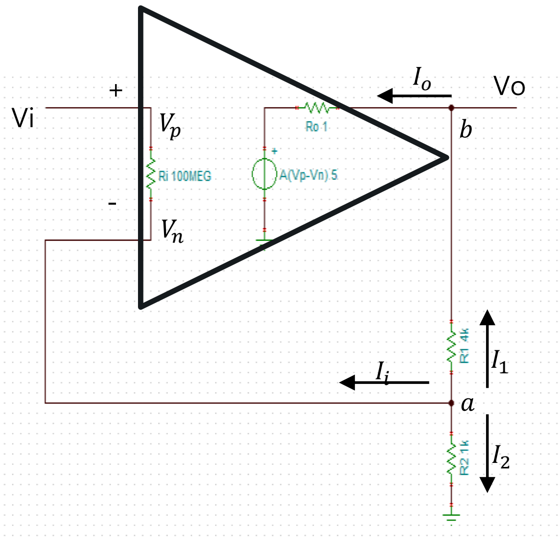
$$\frac{V_p - V_n}{R_i} = -\frac{V_n - V_o}{R_1} - \frac{V_n}{R_2} \longrightarrow \frac{V_p - V_n}{R_i} + \frac{V_n - V_o}{R_1} + \frac{V_n}{R_2} = 0$$

(4) (2)와 (3)의 식을 연립 방정식으로 풀면 Vo와 Vi의 관계식을 알 수 있다

OP-AMP의 등가회로 해석

➢ Negative feedback 특성

✓ 비반전 증폭기의 입/출력 관계식



→ 다음 식을 정리하면

$$\frac{V_o - A(V_p - V_n)}{R_o} = \frac{V_n - V_o}{R_1} \longrightarrow \frac{V_o}{R_o} - \frac{A(V_p - V_n)}{R_o} = \frac{V_n - V_o}{R_1} \longrightarrow \frac{A(V_p - V_n)}{R_o} = -\frac{V_n - V_o}{R_1} + \frac{V_o}{R_o}$$

→ Ro를 양변에 곱해주고 A로 나누면

$$A(V_p - V_n) = -\frac{R_o(V_n - V_o)}{R_1} + V_o \longrightarrow (V_p - V_n) = \frac{V_o}{A} - \frac{R_o(V_n - V_o)}{AR_1} = \frac{V_oR_1 - R_o(V_n - V_o)}{AR_1}$$

→ Vp에 대해 식을 정리하면 다음과 같다

$$V_p = \frac{V_oR_1 - R_o(V_n - V_o)}{AR_1} + V_n = \frac{V_oR_1 - R_o(V_n - V_o) + AR_1V_n}{AR_1} = \frac{V_oR_1 - R_oV_n + R_oV_o + AR_1V_n}{AR_1}$$

→ a점에서 KCL을 적용한 식을 Vp-Vn을 대입하여 정리하면 다음과 같다

$$\frac{V_p - V_n}{R_i} = -\frac{V_n - V_o}{R_1} - \frac{V_n}{R_2} \longrightarrow \frac{\frac{V_oR_1 - R_o(V_n - V_o)}{AR_1}}{R_i} = -\frac{V_n - V_o}{R_1} - \frac{V_n}{R_2} \longrightarrow \frac{V_oR_1 - R_o(V_n - V_o)}{AR_1R_i} = -\frac{V_n - V_o}{R_1} - \frac{V_n}{R_2}$$

→ Vo에 대한 식으로 정리하면

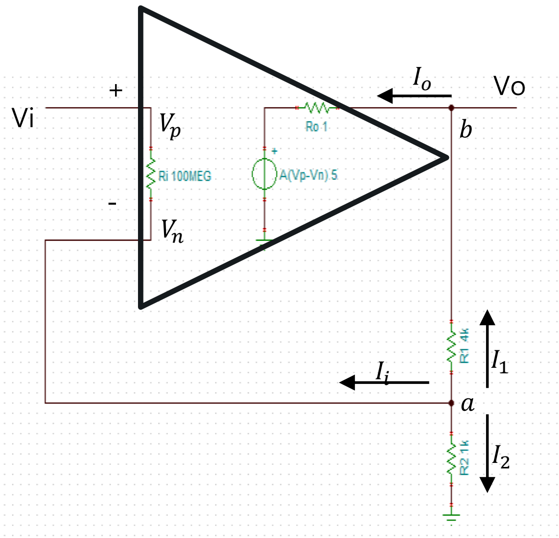
$$\frac{V_oR_1}{AR_1R_i} - \frac{R_oV_n}{AR_1R_i} + \frac{R_oV_o}{AR_1R_i} + \frac{V_n}{R_1} - \frac{V_o}{R_1} + \frac{V_n}{R_2} = 0 \longrightarrow \frac{V_oR_1R_2}{AR_1R_iR_2} - \frac{V_nR_oR_2}{AR_1R_iR_2} + \frac{V_oR_oR_2}{AR_1R_iR_2} + \frac{V_nAR_iR_2}{AR_1R_iR_2} - \frac{V_oAR_iR_2}{AR_1R_iR_2} + \frac{V_nAR_iR_1}{AR_1R_iR_2} = 0$$

$$\left(\frac{R_1R_2}{AR_1R_iR_2} + \frac{R_oR_2}{AR_1R_iR_2} - \frac{AR_iR_2}{AR_1R_iR_2}\right)V_o = \left(\frac{R_oR_2}{AR_1R_iR_2} - \frac{AR_iR_2}{AR_1R_iR_2} - \frac{AR_iR_1}{AR_1R_iR_2}\right)V_n$$

OP-AMP의 등가회로 해석

➢ Negative feedback 특성

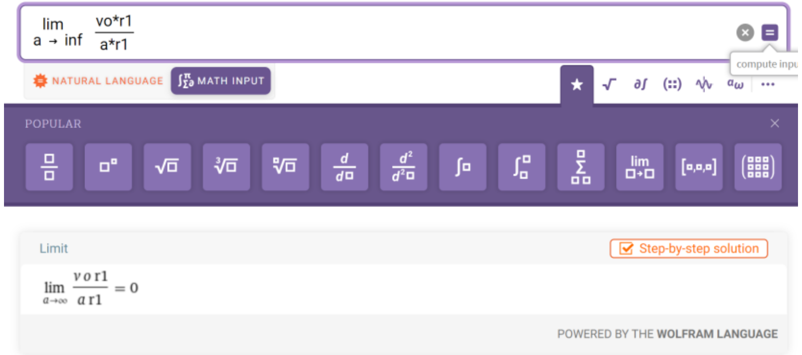
✓ 비반전 증폭기의 입/출력 관계식



→ 아래 식을 통해 negative feedback의 중요한 특성을 알 수 있다

$$(V_p - V_n) = \frac{V_o}{A} - \frac{R_o(V_n - V_o)}{AR_1} = \frac{V_oR_1 - R_o(V_n - V_o)}{AR_1}$$

→ 이상적인 opamp라 할 때 Ro는 0으로 가정하고 오픈루프 이득 A를 무한대로 했을 때 아래와 같은 결과를 알 수 있다



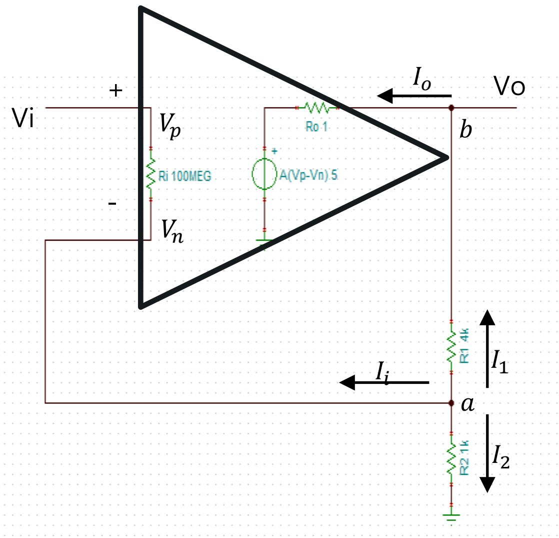
→ 즉 Vp와 Vn의 전위차가 없으며 Vp = Vn이라는 "가상접지"라는 개념을 확인 할 수 있다

→ opamp 응용회로 해석 시 "negative feedback"인 경우 Vp=Vn으로 해석 할 수 있다

OP-AMP의 등가회로 해석

- Negative feedback 특성

✓ 비반전 증폭기의 입/출력 관계식



→ Vo에 대한 식으로 정리하면

$$\left(\frac{R_1R_2}{AR_1R_iR_2}+\frac{R_oR_2}{AR_1R_iR_2}-\frac{AR_iR_2}{AR_1R_iR_2}\right)V_o = \left(\frac{R_oR_2}{AR_1R_iR_2}-\frac{AR_iR_2}{AR_1R_iR_2}-\frac{AR_iR_1}{AR_1R_iR_2}\right)V_n$$

$$(R_1R_2+R_oR_2-AR_iR_2)V_o = (R_oR_2-AR_iR_2-AR_iR_1)\,V_n$$

$$V_o = \frac{(R_oR_2-AR_iR_2-AR_iR_1)V_n}{R_1R_2+R_oR_2-AR_iR_2}$$

→ 최종적으로 얻은 식에 대해 정리하면 다음과 같다

$$V_o = \frac{(R_oR_2-AR_iR_2-AR_iR_1)V_n}{R_1R_2+R_oR_2-AR_iR_2} \qquad V_n = \frac{(R_1R_2+R_oR_2-AR_iR_2)V_o}{R_oR_2-AR_iR_2-AR_iR_1}$$

$$V_p = \frac{V_oR_1-R_oV_n+R_oV_o+AR_1V_n}{AR_1} \longrightarrow V_p = \frac{V_oR_1}{AR_1}-\frac{R_oV_n}{AR_1}+\frac{R_oV_o}{AR_1}+\frac{AR_1V_n}{AR_1}$$

→ Vn에 위 에서 정리된 식을 대입하면

$$V_p = \frac{V_oR_1(R_oR_2-AR_iR_2-AR_iR_1)}{AR_1(R_oR_2-AR_iR_2-AR_iR_1)}-\frac{R_o(R_1R_2+R_oR_2-AR_iR_2)V_o}{AR_1(R_oR_2-AR_iR_2-AR_iR_1)}+\frac{R_oV_o(R_oR_2-AR_iR_2-AR_iR_1)}{AR_1(R_oR_2-AR_iR_2-AR_iR_1)}+\frac{AR_1(R_1R_2+R_oR_2-AR_iR_2)V_o}{AR_1(R_oR_2-AR_iR_2-AR_iR_1)}$$

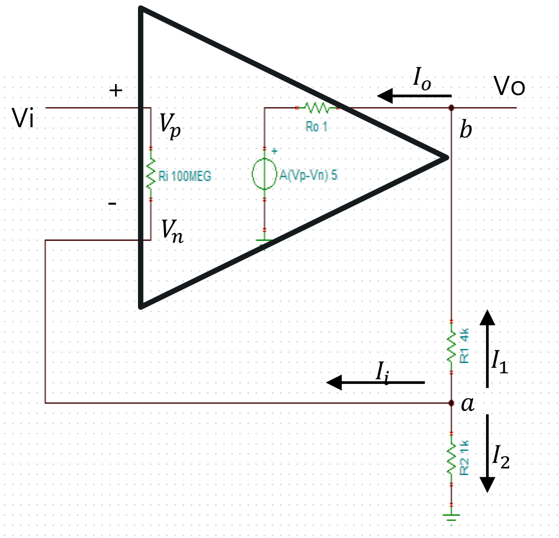
$$V_p = V_o\left(\frac{R_1(R_oR_2-AR_iR_2-AR_iR_1)-R_o(R_1R_2+R_oR_2-AR_iR_2)+R_o(R_oR_2-AR_iR_2-AR_iR_1)+AR_1(R_1R_2+R_oR_2-AR_iR_2)}{AR_1(R_oR_2-AR_iR_2-AR_iR_1)}\right)$$

$$V_p = V_o\left(\frac{R_1(\cancel{R_oR_2}-AR_iR_2-AR_iR_1)-R_o(\cancel{R_1R_2}+\cancel{R_oR_2}-\cancel{AR_iR_2})+R_o(\cancel{R_oR_2}-\cancel{AR_iR_2}-AR_iR_1)+AR_1(R_1R_2+R_oR_2-AR_iR_2)}{AR_1(R_oR_2-AR_iR_2-AR_iR_1)}\right)$$

OP-AMP의 등가회로 해석

- Negative feedback 특성

  ✓ 비반전 증폭기의 입/출력 관계식



→ 다음 식을 정리하면 이득 G를 얻을 수 있다

$$V_p = V_o\left(\frac{R_1(R_oR_2 - AR_iR_2 - AR_iR_1) - R_o(R_1R_2 + R_oR_2 - AR_iR_2) + R_o(R_oR_2 - AR_iR_2 - AR_iR_1) + AR_1(R_1R_2 + R_oR_2 - AR_iR_2)}{AR_1(R_oR_2 - AR_iR_2 - AR_iR_1)}\right)$$

$$V_p = V_o\left(\frac{-AR_iR_1R_2 - AR_iR_1^2 - R_oAR_iR_1 + AR_1^2R_2 + AR_oR_1R_2 - A^2R_1R_iR_2}{AR_1(R_oR_2 - AR_iR_2 - AR_iR_1)}\right)$$

$$V_p = V_o\left(\frac{-R_iR_2 - R_iR_1 - R_oR_i + R_1R_2 + R_oR_2 - AR_iR_2}{(R_oR_2 - AR_iR_2 - AR_iR_1)}\right)$$

$$V_p = V_o\left(\frac{-R_iR_2 - R_iR_1 - R_oR_i + R_1R_2 + R_oR_2 - AR_iR_2}{(R_oR_2 - AR_iR_2 - AR_iR_1)}\right)$$

$$G = \frac{V_o}{V_p} = \frac{R_oR_2 - AR_iR_2 - AR_iR_1}{-R_iR_2 - R_iR_1 - R_oR_i + R_1R_2 + R_oR_2 - AR_iR_2}$$

$$G = \frac{V_o}{V_p} = \frac{R_oR_2 - AR_i(R_2 + R_1)}{R_2(R_1 + R_o) - R_i(AR_2 + R_2 + R_1 + R_o)}$$

→ 출력저항은 0이라 하면 다음과 같이 근사 된 식을 얻을 수 있다

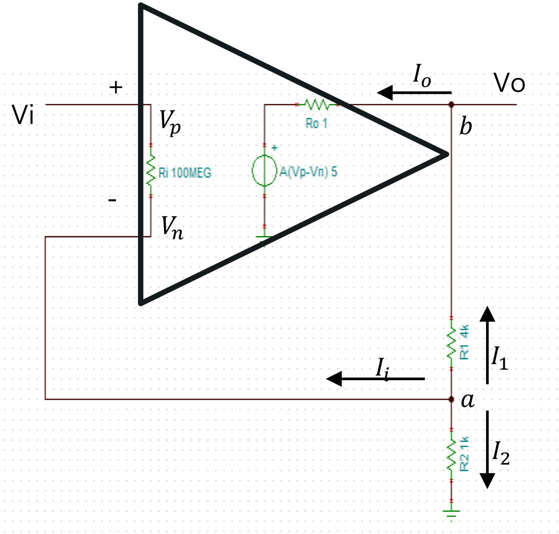
$$G = \frac{V_o}{V_p} = \frac{-AR_i(R_2 + R_1)}{R_1R_2 - R_i(AR_2 + R_2 + R_1)}$$

→ 입력 저항과 오픈루프 이득은 모두 무한대에 가까워지므로 x로 두고 wolfram alpha로 계산하면

OP-AMP의 등가회로 해석

➢ Negative feedback 특성

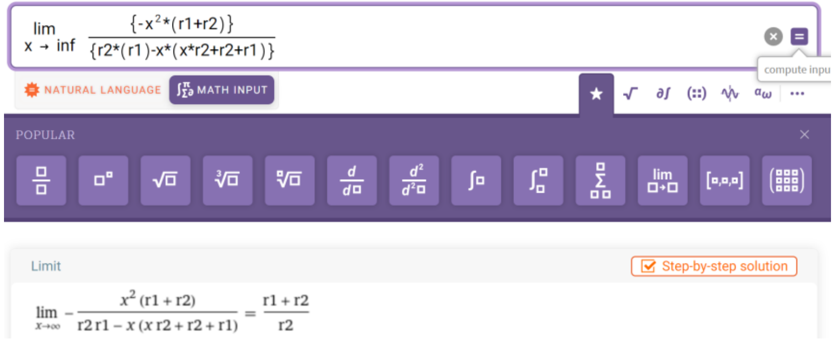
✓ 비반전 증폭기의 입/출력 관계식



→ 출력저항은 0이라 하면 다음과 같이 근사 된 식을 얻을 수 있다

$$G = \frac{V_o}{V_p} = \frac{-AR_i(R_2 + R_1)}{R_1R_2 - R_i(AR_2 + R_2 + R_1)}$$

→ 입력 저항과 오픈루프 이득은 모두 무한대에 가까워지므로 x로 두고 wolfram alpha로 계산하면 다음과 같이 비반전 증폭기의 이득 값을 알 수 있다

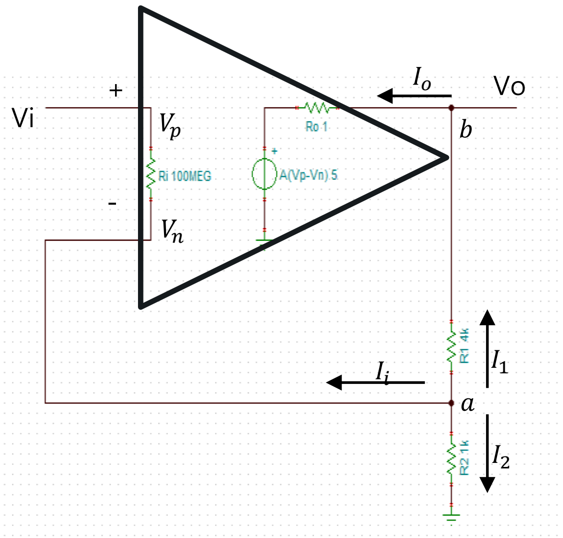


→ 전류의 방향은 Ii가 반대여도 동일한 결과가 나옴

OP-AMP의 등가회로 해석

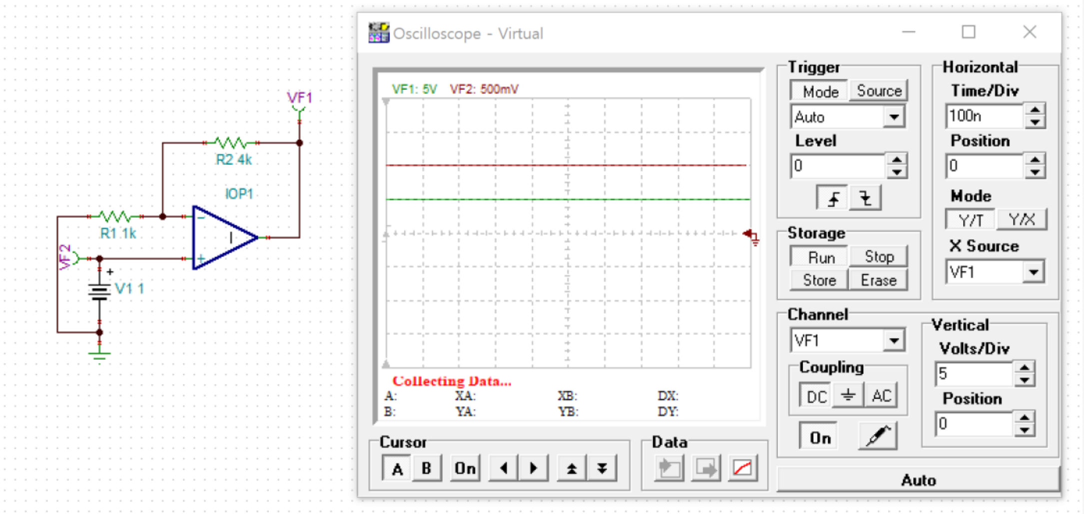
➢ Negative feedback 특성

✓ 비반전 증폭기의 입/출력 관계식



→ 시뮬레이션 결과는 아래와 같다

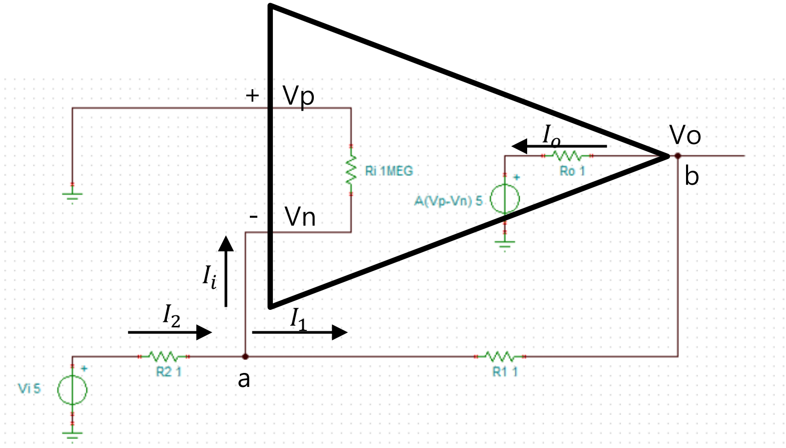
→ 입력 : 1V, 증폭비 : 5일 때 출력 : 5V임을 볼 수 있다



OP-AMP의 등가회로 해석

- Negative feedback 특성

✓ 반전 증폭기의 입/출력 관계식



→ 옆 회로로 식을 정리해 보면 다음과 같다

$I_o = \frac{V_o - A(V_p - V_n)}{R_o}$, $I_1 = \frac{V_n - V_o}{R_1}$

→ $I_o = I_1$ 이고 Vp=0 이므로

$$\frac{V_o - A(V_p - V_n)}{R_o} = \frac{V_n - V_o}{R_1} \longrightarrow (V_p - V_n) = \frac{V_o}{A} - \frac{R_o(V_n - V_o)}{R_1} = \frac{V_oR_1 - AR_o(V_n - V_o)}{AR_1}$$

$$V_n = -\frac{V_o}{A} + \frac{R_o(V_n - V_o)}{R_1} = \frac{-V_oR_1 + AR_o(V_n - V_o)}{AR_1} \longrightarrow AR_1V_n = -V_oR_1 + AR_o(V_n - V_o)$$

$$(AR_1 + AR_o)V_n = -(R_1 + AR_o)V_o \longrightarrow V_n = \frac{-(R_1 + AR_o)V_o}{AR_1 + AR_o}$$

→ KCL에 의해 $I_2 = I_i + I_1$

$$I_2 = \frac{V_i - V_n}{R_2}, I_i = \frac{V_n - V_p}{R_i}(V_p = 0) = \frac{V_n}{R_i}, I_1 = \frac{V_n - V_o}{R_1}$$

$$\frac{V_i - V_n}{R_2} = \frac{V_n}{R_i} + \frac{V_n - V_o}{R_1} \longrightarrow R_iR_1V_i - R_iR_1V_n = R_1R_2V_n + R_iR_2V_n - R_iR_2V_o$$

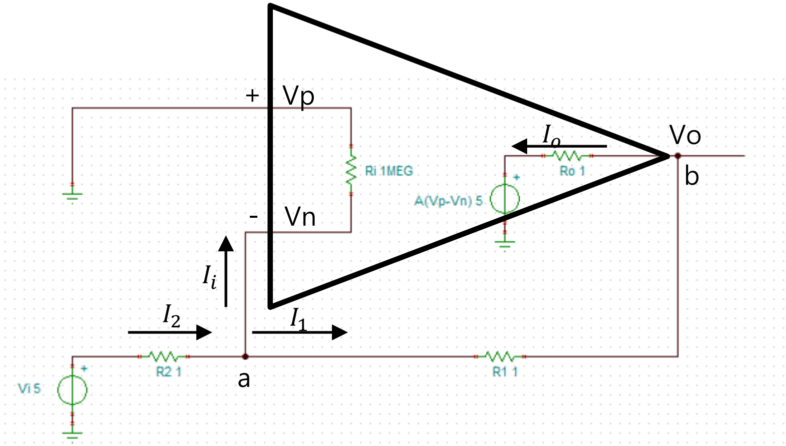
$$R_iR_1V_i + R_iR_2V_o = (R_1R_2 + R_iR_2 + R_iR_1)V_n$$

OP-AMP의 등가회로 해석

EDDI
Electronic Design
Development Institute

➢ Negative feedback 특성

✓ 반전 증폭기의 입/출력 관계식



$$V_n = \frac{-(R_1+AR_o)V_o}{AR_1+AR_o}$$

$$R_iR_1V_i + R_iR_2V_o = (R_1R_2 + R_iR_2 + R_iR_1)V_n$$

$$-R_iR_1V_i = \{(R_1R_2 + R_iR_2 + R_iR_1)\frac{(R_1 + AR_o)}{AR_1 + AR_o} + R_iR_2\}V_o$$

$$-R_iR_1V_i = \{(R_1R_2 + R_iR_2 + R_iR_1)\frac{(R_1 + AR_o)}{AR_1 + AR_o} + R_iR_2\}V_o$$

→ Ro는 0으로 수렴하므로 식을 다시 정리하면

$$-R_iR_1V_i = \{(R_1R_2 + R_iR_2 + R_iR_1)\frac{1}{A} + R_iR_2\}V_o$$

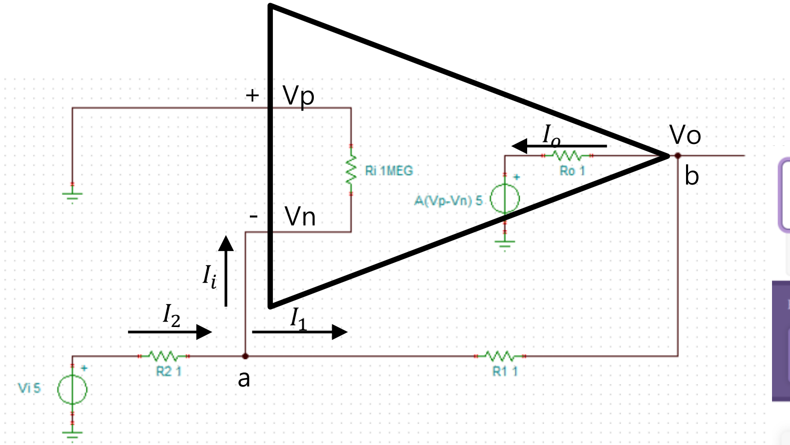
$$-R_iR_1V_i = \frac{(R_1R_2 + R_iR_2 + R_iR_1 + AR_iR_2)}{A}V_o$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{AR_iR_1}{(R_1R_2 + R_iR_2 + R_iR_1 + AR_iR_2)}$$

OP-AMP의 등가회로 해석

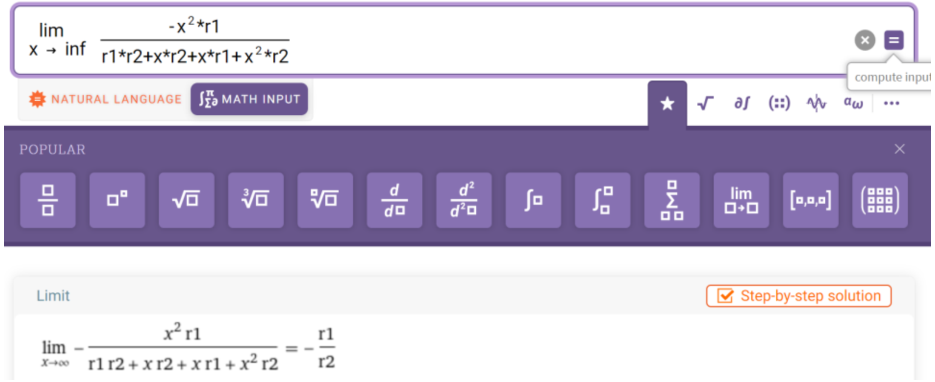
➢ Negative feedback 특성

✓ 반전 증폭기의 입/출력 관계식



→ 최종 식에서 Ri와 A가 모두 무한한 값이라 한다면 다음과 같이 정리된다

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{AR_iR_1}{(R_1R_2 + R_iR_2 + R_iR_1 + AR_iR_2)}$$



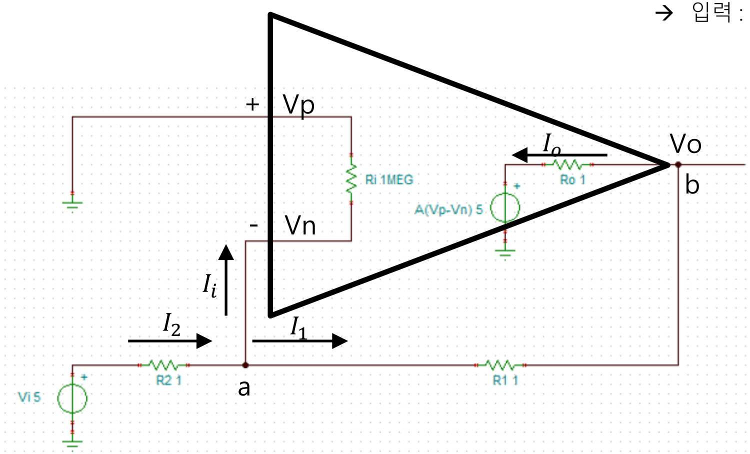
→ 전압이득은 $-\frac{R_1}{R_2}$가 되는 것을 볼 수 있다

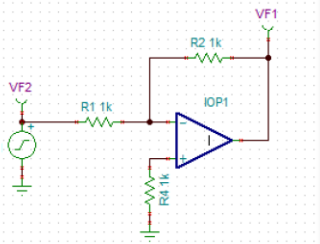
OP-AMP의 등가회로 해석

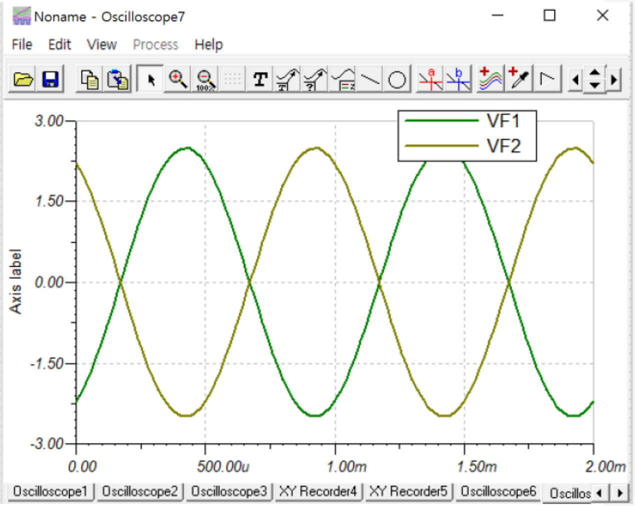
➢ Negative feedback 특성

✓ 반전 증폭기의 입/출력 관계식

→ 시뮬레이션 결과는 아래와 같다
→ 입력 : 2.5Vp-p(sine wave), 증폭비 : -1일 때 출력이 반전된 사인파임을 볼 수 있다





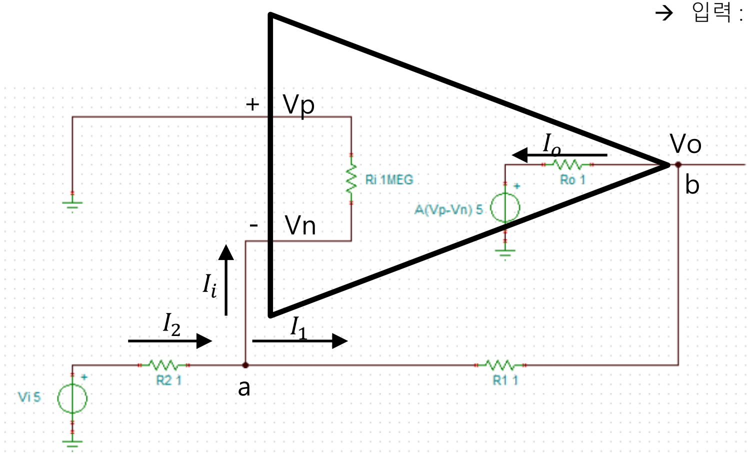


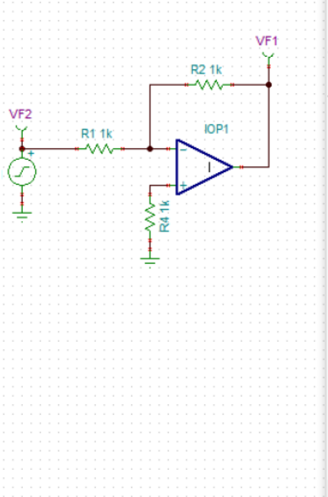
OP-AMP의 등가회로 해석

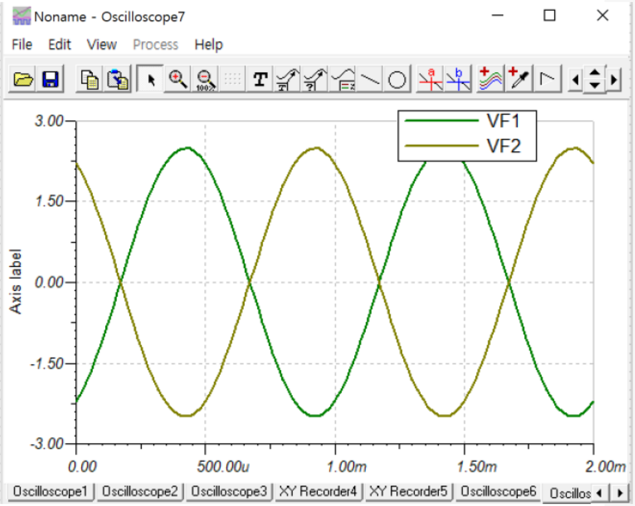
➢ Negative feedback 특성

✓ 반전 증폭기의 입/출력 관계식

→ 시뮬레이션 결과는 아래와 같다
→ 입력 : 2.5Vp-p(sine wave), 증폭비 : -1일 때 출력이 반전된 사인파임을 볼 수 있다



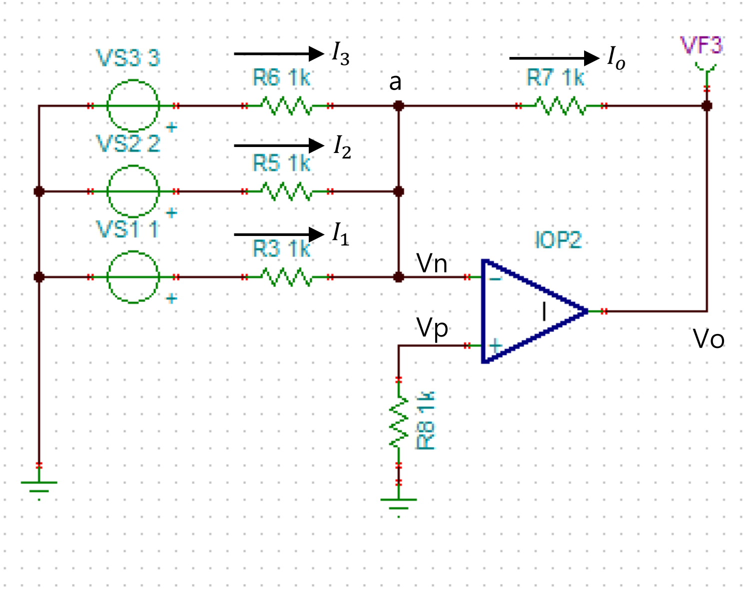




OP-AMP의 응용회로

➢ 가산기

→ 이상적인 OPAMP의 특성을 이용하여 가산기 회로를 해석 할 수 있다



→ negative feedback특성에 의해 Vn=Vp=0가 된다

→ +, -입력 단자로 흐르는 전류는 0이다

→ $I_o = I_1 + I_2 + I_3$이 된다.

$I_o = \frac{V_n - V_o}{R_7}$ 여기서 Vn은 0이므로 $I_o = -\frac{V_o}{R_7}$

$I_1 = \frac{V_1}{R_3}, I_2 = \frac{V_2}{R_5}, I_3 = \frac{V_3}{R_6}$

$$I_o = -\frac{V_o}{R_7} = \frac{V_1}{R_3} + \frac{V_2}{R_5} + \frac{V_3}{R_6} \longrightarrow V_o = -\left(\frac{R_7 V_1}{R_3} + \frac{R_7 V_2}{R_5} + \frac{R_7 V_3}{R_6}\right)$$

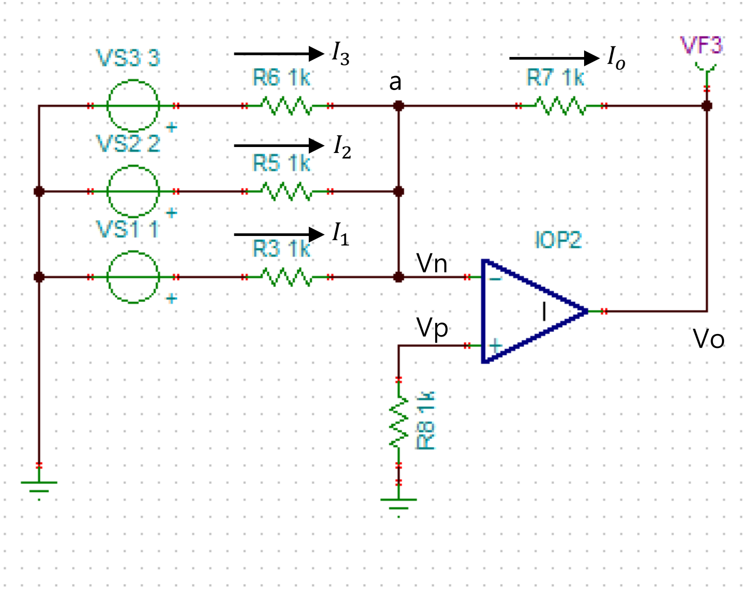
→ 여기서 R3,R5,R6 = Rs, R7=Rf라면 식은 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$-\frac{V_o}{R_f} = \frac{1}{R_s}(V_1 + V_2 + V_3) \longrightarrow V_o = -\frac{R_f}{R_s}(V_1 + V_2 + V_3)$$

OP-AMP의 응용회로

➢ 가산기

→ 이상적인 OPAMP의 특성을 이용하여 가산기 회로를 해석 할 수 있다

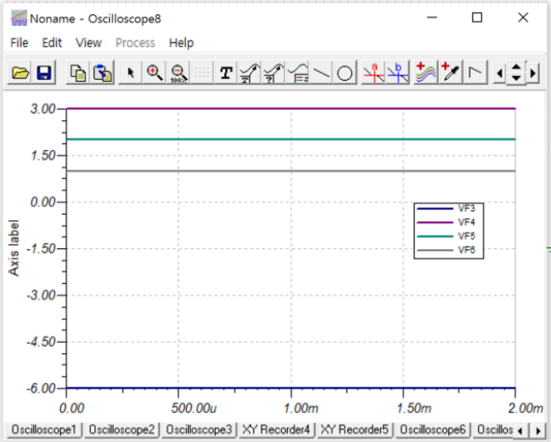


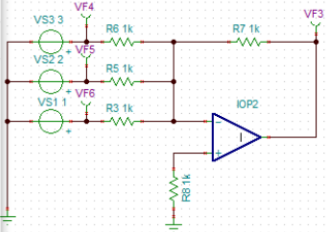
→ 시뮬레이션 결과는 아래와 같다

→ 입력 : V1=1V, V2=2V, V3=3V

증폭비 : -1

출력 : -6V

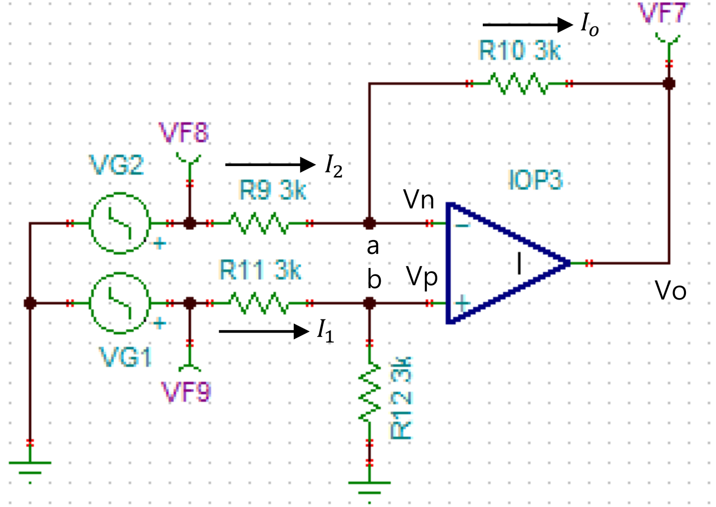




OP-AMP의 응용회로

➢ 감산기(차동증폭기)

→ 이상적인 OPAMP의 특성을 이용하여 감산기 회로를 해석 할 수 있다



→ negative feedback특성에 의해 Vn=Vp가 된다

$$V_p = V_n = \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}} V_1$$

→ +, -입력 단자로 흐르는 전류는 0이다

→ $I_o = I_2$이 된다.

$$I_o = \frac{V_n - V_o}{R_{10}}, \qquad I_2 = \frac{V_2 - V_n}{R_9}$$

$$\frac{V_n - V_o}{R_{10}} = \frac{V_2 - V_n}{R_9} \longrightarrow R_9V_n - R_9V_o = R_{10}V_2 - R_{10}V_n$$

$$V_o = (\frac{R_{10}}{R_9} + 1)V_n - \frac{R_{10}}{R_9}V_2$$

→ 위에서 구한 Vn을 대입하여 식을 정리하면 다음과 같다

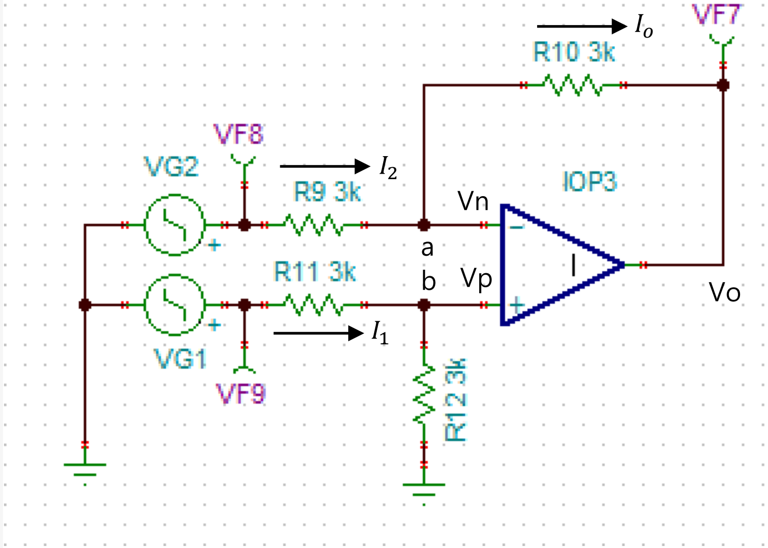
$$V_o = (\frac{R_{10}}{R_9} + 1)(\frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}})V_1 - \frac{R_{10}}{R_9}V_2$$

→ 여기서 R9=R11=Rs, R10=R12=Rf라면 다음과 같이 정리할 수 있다

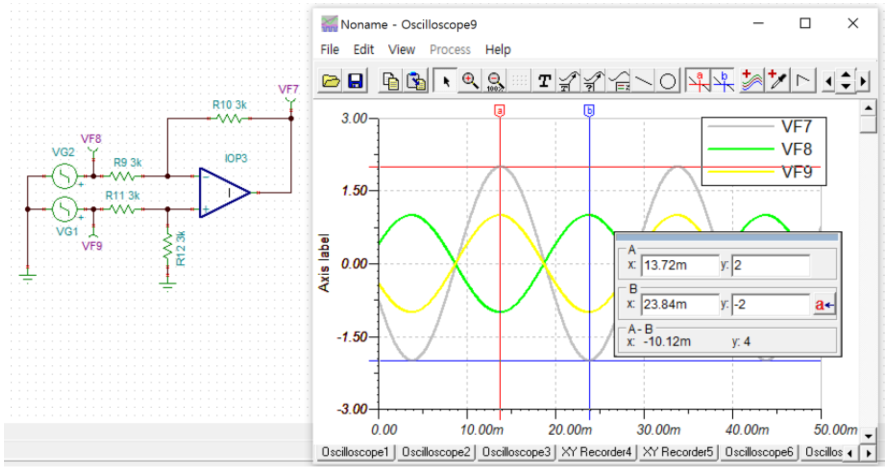
$$V_o = (\frac{\cancel{R_f + R_s}}{R_s})(\frac{R_f}{\cancel{R_s + R_f}})V_1 - \frac{R_f}{R_s}V_2 \longrightarrow V_o = \frac{R_f}{R_s}(V_1 - V_2)$$

OP-AMP의 응용회로

➢ 감산기(차동증폭기)



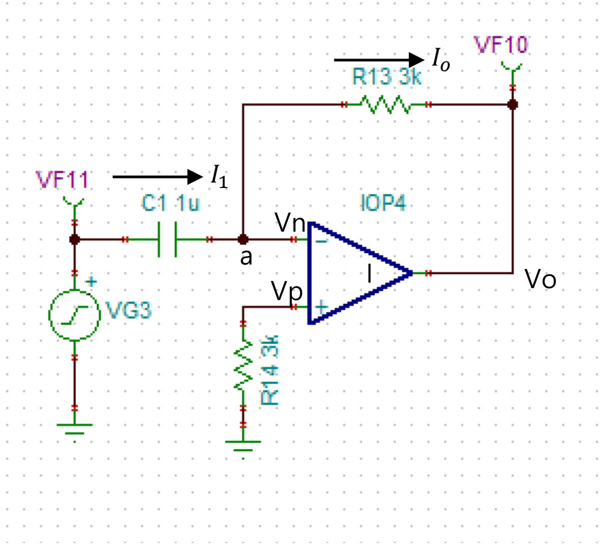
→ 시뮬레이션 결과는 아래와 같다
→ 입력 : V1 = $\sin(2\pi 50t)$, V2 = $\sin(2\pi 50t + 180°)$
증폭비 : -1
출력 : $2\sin(2\pi 50t)$



OP-AMP의 응용회로

➢ 미분기

→ 이상적인 OPAMP의 특성을 이용하여 미분기 회로를 해석 할 수 있다



→ negative feedback특성에 의해 Vn=Vp=0가 된다

→ $I_o = I_1$이 된다.

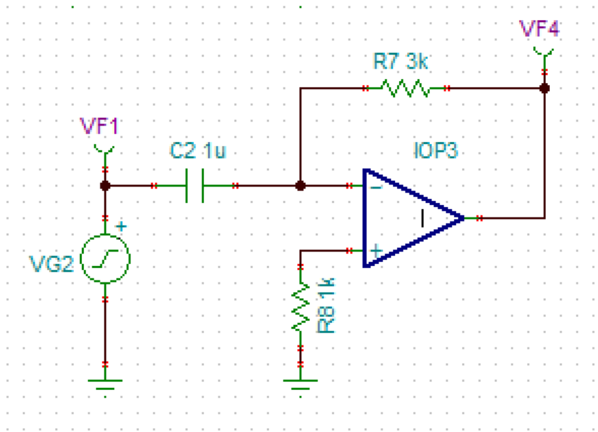
$$I_o = -\frac{V_o}{R_{13}}, \qquad I_1 = C_1\frac{dV_3}{dt}$$

$$-\frac{V_o}{R_{13}} = C_1\frac{dV_3}{dt} \longrightarrow V_o = -R_{13}C_1\frac{dV_3}{dt}$$

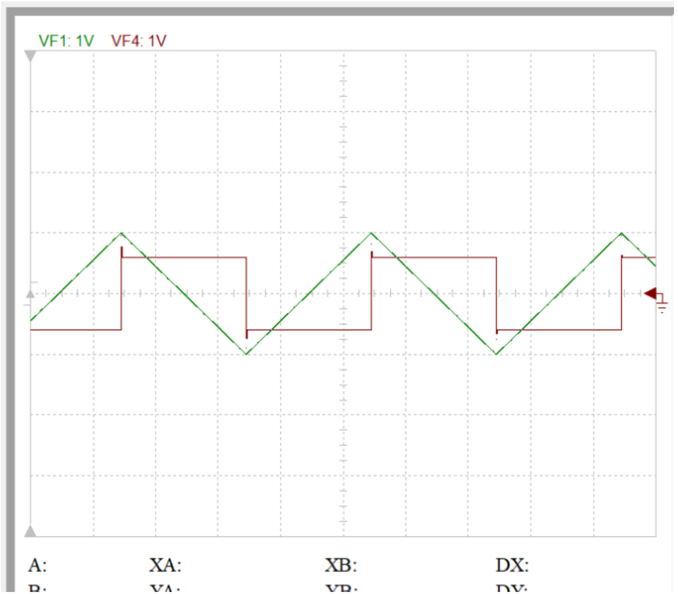
OP-AMP의 응용회로

➢ 미분기

→ 이상적인 OPAMP의 특성을 이용하여 미분기 회로를 해석 할 수 있다



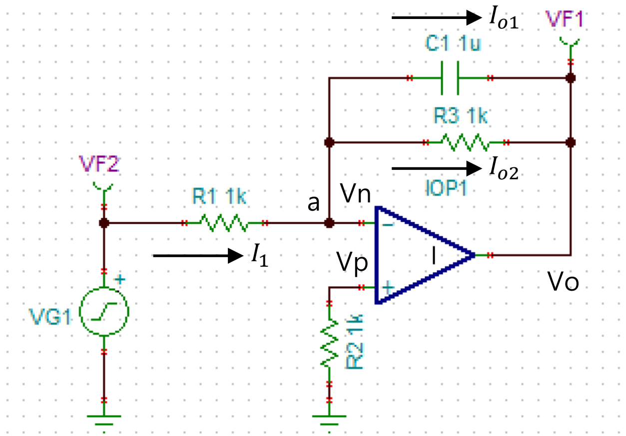
→ 시뮬레이션 결과는 아래와 같다
→ 입력 : V1 = 1V, 1kHz 삼각파
→ 삼각파 미분결과 구형파가 되는 것을 볼 수 있다



OP-AMP의 응용회로

➢ 적분기

→ 이상적인 OPAMP의 특성을 이용하여 적분기 회로를 해석 할 수 있다



* 위와 같은 실용적인 적분기를 lossy integral circuit이라 한다

→ negative feedback특성에 의해 Vn=Vp=0가 된다

→ $I_{o1} + I_{o2} = I_1$이 된다.

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1}, \qquad I_{o1} = -C_1\frac{dV_o}{dt}, \qquad I_{o2} = -\frac{V_o}{R_3}$$

$$-C_1\frac{dV_o}{dt} - \frac{V_o}{R_3} = \frac{V_1}{R_1} \longrightarrow C_1R_3\frac{dV_o}{dt} + V_o = -\frac{R_3V_1}{R_1}$$

→ 위 비제차 상미분방정식을 라플라스 변환을 통해 해석하면 다음과 같다

$$C_1R_3\frac{dV_o}{dt} + V_o = -\frac{R_3V_1}{R_1} \xrightarrow{L} sC_1R_3V_o(s) + V_o(s) = -\frac{R_3}{R_1}V_1(\mathrm{s})$$

$$(sC_1R_3 + 1)V_o(s) = -\frac{R_3}{R_1}V_1(\mathrm{s}) \longrightarrow G(s) = \frac{V_o(s)}{V_1(\mathrm{s})} = -\frac{R_3}{R_1}\frac{1}{sC_1R_3 + 1}$$

→ 우선 s가 0일 때, 즉 s->jw이고 w = 2πf이므로 주파수가 0인 DC의 경우

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_1(\mathrm{s})} = -\frac{R_3}{R_1}$$

→ 회로의 전달함수(이득)는 R3와 R1에 의해 제한되는 것을 볼 수 있다.

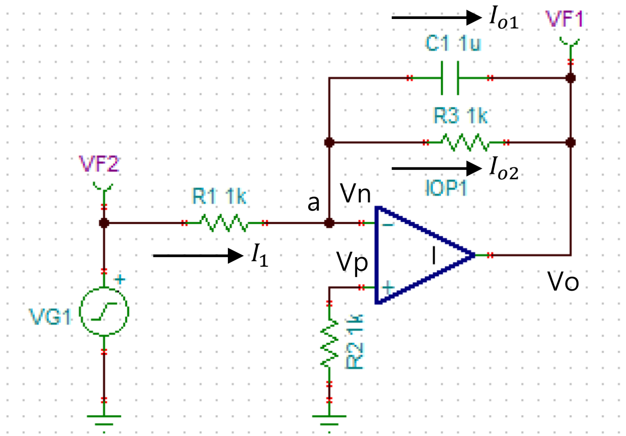
→ 만약 R3가 없는 이상적인 적분기라면 피드백이 오픈루프가 되어 이득이 무한대가 된다

→ 결국 실제 회로에서 출력은 saturation만 된다

OP-AMP의 응용회로

➢ 적분기

→ 이상적인 OPAMP의 특성을 이용하여 적분기 회로를 해석 할 수 있다



→ 회로의 전달함수(이득)는 R3와 R1에 의해 제한되는 것을 볼 수 있다.

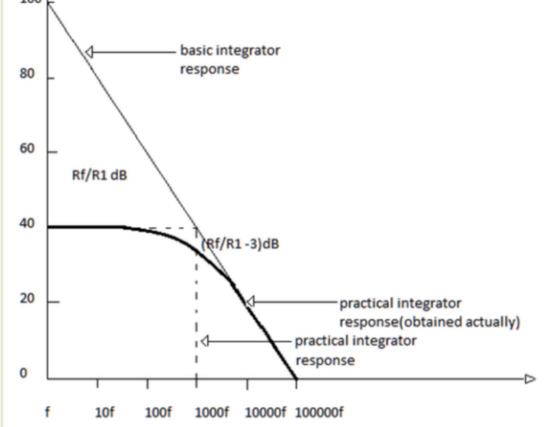
→ 만약 R3가 없는 이상적인 적분기라면 피드백이 오픈루프가 되어 이득이 무한대가 된다

→ 결국 실제 회로에서 출력은 saturation만 된다

→ 위 결과에서 알 수 있듯이 실제 opamp는 입력 DC offset이 있다

→ 이로 인해 피드백이 open된 상태이므로 출력은 –Vcc만큼 saturation된다

출처 : https://www.edaboard.com/threads/opamp-integrator-practical-circuit.378305/

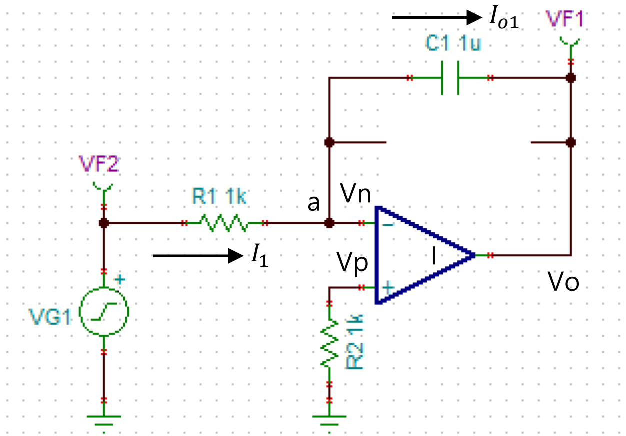


* 위와 같은 실용적인 적분기를 lossy integral circuit이라 한다

OP-AMP의 응용회로

➢ 적분기

→ 이상적인 OPAMP의 특성을 이용하여 적분기 회로를 해석 할 수 있다



* 위와 같은 실용적인 적분기를 lossy integral circuit이라 한다

→ 반대로 f가 0이 아니라면 C1의 주파수 특성으로 인해 C1 << R3가 되면서 R3를 open(저항 값이 무한대)으로 볼 수 있다.

→ 회로는 좌측의 그림과 같이 해석 할 수 있다

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_1(\mathrm{s})} = -\frac{R_3}{R_1}\frac{1}{sC_1R_3 + 1} \cong -\frac{1}{sC_1R_1}$$

$$\frac{V_o(s)}{V_1(\mathrm{s})} = -\frac{1}{sC_1R_1} \longrightarrow V_o(s) = -\frac{1}{C_1R_1}\frac{1}{s}V_1(\mathrm{s})$$

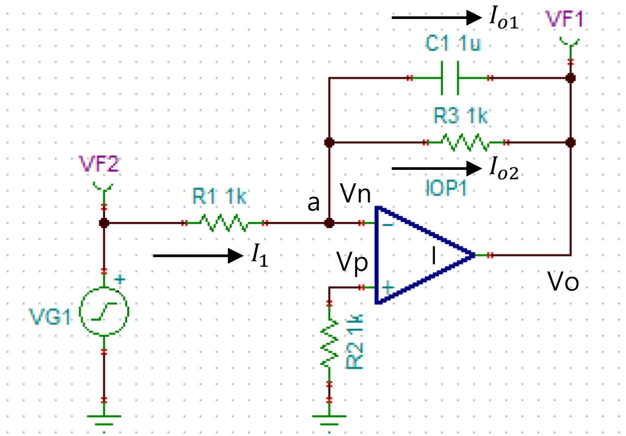
→ 역라플라스 변환을 하면 1/s는 적분기이므로 출력은 다음과 같이 정리할 수 있다

$$V_o(s) = -\frac{1}{C_1R_1}\frac{1}{s}V_1(\mathrm{s}) \xrightarrow{L^{-1}} V_o(t) = -\frac{1}{C_1R_1}\int V_1(\mathrm{t})\,dt$$

OP-AMP의 응용회로

➢ 적분기

→ 이상적인 OPAMP의 특성을 이용하여 적분기 회로를 해석 할 수 있다



→ 라플라스 변환식을 통해 차단주파수를 알 수 있다

$$G(s)=\frac{V_o(s)}{V_1(\mathrm{s})}=-\frac{R_3}{R_1}\frac{1}{sC_1R_3+1}$$

→ s->jw이고 w = 2πf일 때 20log|G(j2πf)|가 -3dB(|G(j2πf)| =0.707)이 되는 f가 차단주파수가 된다

$$G(\mathrm{j}2\pi\mathrm{f})=-\frac{R_3}{R_1}\frac{1}{\mathrm{j}2\pi\mathrm{f}C_1R_3+1}=\frac{R_3}{R_1}\frac{-\mathrm{j}2\pi\mathrm{f}C_1R_3+1}{(2\pi\mathrm{f}C_1R_3)^2+1}$$

$$|G(\mathrm{j}2\pi\mathrm{f})|=\frac{R_3}{R_1}\sqrt{\frac{(2\pi\mathrm{f}C_1R_3)^2+1}{\{(2\pi\mathrm{f}C_1R_3)^2+1\}^2}}=\frac{R_3}{R_1}\sqrt{\frac{1}{(2\pi\mathrm{f}C_1R_3)^2+1}}$$

$$20\log|G(\mathrm{j}2\pi\mathrm{f})|=20\log\frac{R_3}{R_1}+20\log\boxed{\sqrt{\frac{1}{(2\pi\mathrm{f}C_1R_3)^2+1}}}$$

0.707이 되는 f가 차단주파수

$$0.707=\sqrt{\frac{1}{(2\pi\mathrm{f}C_1R_3)^2+1}}\longrightarrow 0.707^2=\frac{1}{(2\pi\mathrm{f}C_1R_3)^2+1}$$

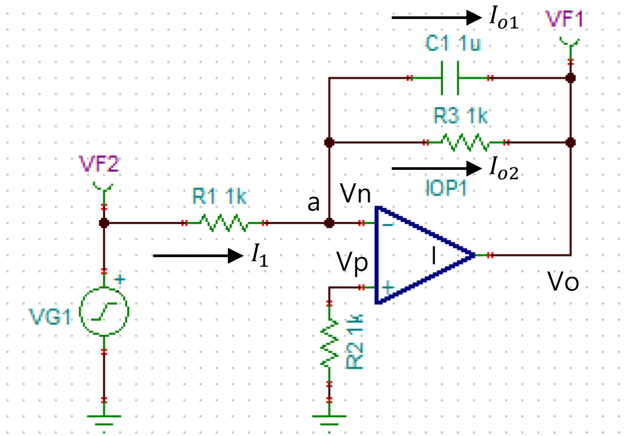
$$0.707^2\{(2\pi\mathrm{f}C_1R_3)^2+1\}=1\longrightarrow(2\pi\mathrm{f}C_1R_3)^2=\frac{1}{0.707^2}-1$$

OP-AMP의 응용회로

EDDI Electronic Design Development Institute

➢ 적분기

→ 이상적인 OPAMP의 특성을 이용하여 적분기 회로를 해석 할 수 있다



→ 다음식을 정리하면

$$0.707^2\{(2\pi f C_1 R_3)^2 + 1\} = 1 \longrightarrow (2\pi f C_1 R_3)^2 = \boxed{\frac{1}{0.707^2} - 1} \cong 1$$

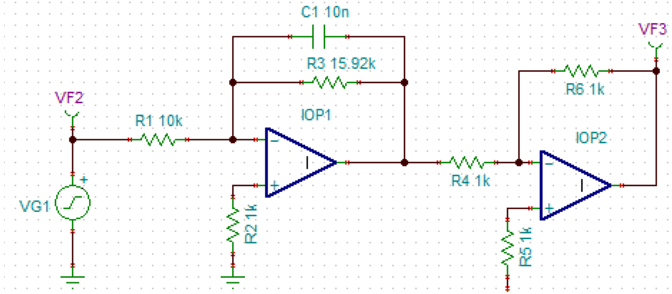
→ 양변을 root하여 차단주파수 f를 구하면 다음과 같다

$$2\pi f C_1 R_3 = 1 \longrightarrow f = \frac{1}{2\pi C_1 R_3}(Hz)$$

OP-AMP의 응용회로

➢ 적분기

→ 이상적인 OPAMP의 특성을 이용하여 적분기 회로를 해석 할 수 있다



→ 시뮬레이션 결과는 아래와 같다
→ 입력 : V1 = 1V+$\sin(2\pi 50t)$
DC 증폭비 : -1.59
차단주파수 : 1kHz
→ 차단주파수 지점에서 위상마진 -45도, 이득은 -3dB가 되는 것을 볼 수 있다