

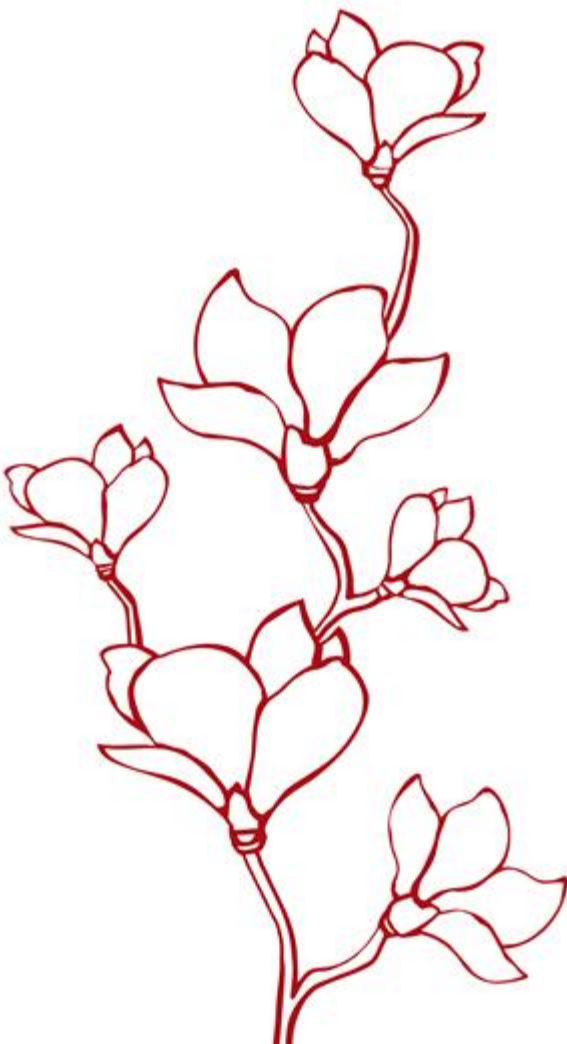
OrCAD 실습

생체의공실험 (BME20800)

예비 및 결과 보고서



KYUNG HEE
UNIVERSITY



담당 교수	이상민 교수님
담당 조교	오지현 조교님, 한승주 조교님
제출일	2020. 09. 16. 수.
소속	경희대학교 전자정보대학 생체의공학과
학번	2019103877
이름	이규린

1. 실험 주제

OrCAD 실험

2. 실험 관련 기초 이론

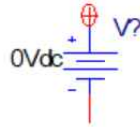
가. 회로

전류는 전기의 흐름이며, 전기가 흐르도록 만들어 준 길을 전기회로라고 할 수 있다. 전기회로는 일반적으로 전류의 흐름을 제어하는 회로요소를 우선 배치하고, 이 회로요소들을 도선들로 연결함으로써 이루어진다. 전기회로를 구성하는 이유는 회로에 전기에너지를 가해 주고 원하는 형태의 에너지로 다양하게 변환시키거나, 전기적인 신호를 원하는 대로 처리하기 위함이다. 회로를 구성하는 기본 요소로는 가해 주는 전기에너지에 해당하는 전원(power), 전기에너지를 받아 원하는 기능을 수행하는 부하(load), 이 둘을 연결해주는 전선(conducting wire) 등이 있다.

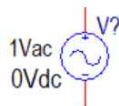
나. 전압원

회로 요소에서 그 요소를 흐르는 전류에 관계 없이 일정하게 전압이 유지토록 하는 것. 이상적인 전압원은 내부 임피던스가 없는 발전기로서 표현된다. Vdc, Vac, Vsin, Vpulse 등이 있다.

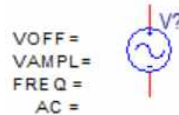
1) Vdc는 직류전압원으로, OrCAD에서 analysis 시 transient (time-domain) 해석과 DC sweep으로 주로 해석한다. AC sweep에는 이용되지 않는다.



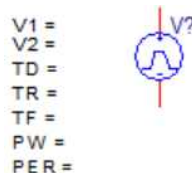
2) Vac는 교류전압원. 주로 주파수 해석에서 사용. 진폭의 크기로 주로 해석한다. 주파수에 따른 감쇄되는 효과 등을 확인 가능하다.



3) Vsin은 time-domain에서 주로 많이 사용. 교류전압원 특성을 띤다. VOFF는 여기로 수렴하게 되는 값을 의미. 예컨대 VOFF가 1이면 1V로 수렴하고, VOFF가 0이면 0V를 기준으로 수렴한다는 것이다. VAMPL는 진폭, FREQ는 진동수, 즉 초 당 몇 번 반복하는지를 의미한다.



4) VPulse는 사각파. Rise time이랑 Fall time을 줄이면 ideal한 사각파가 된다. V0은 initial, V1은 pulse voltage, TD는 delay time, TR은 rise time, TF는 fall time, PW는 pulse width, PER은 period를 의미한다.



다. 저항 (Resistor)

전류가 흐르는 것을 막는 작용. 단위는 옴(Ω). $1\Omega=1V$ 의 전압을 가한 때, $1A$ 의 전류가 흐르는 도체의 저항.



라. 축전기 (Capacitor)

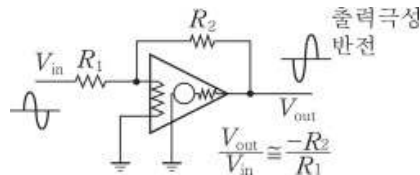
절연체를 사이에 둔 두 개의 금속으로 이루어져 전하 혹은 전기에너지를 저장할 수 있는 장치이다. 두 도체판 사이에 두고 전압을 걸면 음극에는 (-)전하가, 양극에는 (+)전하가 같은 크기로 모인다. 이때 모이는 전하량은 전압에 비례한다. 축전기는 이런 원리를 이용하여 전자회로에서 전하를 충전하거나 방전하는 역할을 한다. 전기용량의 단위는 coulomb/volt 이며 이것을 주로 F(farad)라고 한다. farad는 보통 크기의 축전기의 용량의 단위로서는 크기 때문에 μF 나 pF 의 단위로 사용한다.



마. OP amp.

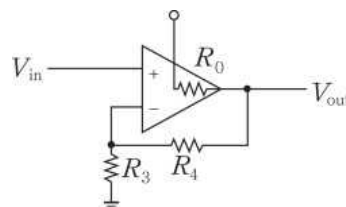
연산 증폭기는 두 개의 입력단자와 한 개의 출력단자를 갖는다. 연산증폭기는 두 입력단자 전압간의 차이를 증폭하는 증폭기이기에 입력단은 차동 증폭기로 되어있다. 연산증폭기를 사용하여 사칙연산이 가능한 회로 구성을 할 수 있으므로, 연산자의 의미에서 연산증폭기라고 부른다. 연산증폭기를 사용하여서 미분기 및 적분기를 구현할 수 있다. 연산증폭기가 필요로 하는 전원은 기본적으로는 두 개의 전원인 $+V_{cc}$ 및 $-V_{cc}$ 가 필요하다.

바. Inverting amplifier



연산 증폭기의 기본적인 회로구조의 하나이다. 증폭기 본체의 입출력 임피던스를 각각 R_{in} , R_{out} 로 하면 그림의 증폭기의 입출력 임피던스는 각각 R_1 및 $R_{out}/(1+A\beta)$ 로 된다. 여기서 A 는 증폭기 본체의 전압 이득이고 $\beta=R_1/(R_1+R_2)$ 이다. 페루프 전압이득 A_c 는 $A_c = -\frac{R_2}{R_1}\left(1-\frac{1}{A\beta}\right)$ 이며, $A\beta \gg 1$ 이면 $A_c \approx -R_2/R_1$ 이다. 출력전압 극성은 반전한다.

사. non-Inverting amplifier



연산 증폭기의 기본적인 회로구조의 하나로, 아래 그림에서와 같이 접속된 것. 증폭기 본체의 입출력 임피던스를 각각 R_{in} , R_{out} 로 하면, 페루프의 입출력 임피던스는 각각 $R_{in}(1+A\beta)$ 및 $R_{out}(1+A\beta)$ 로 된다. A 는 증폭기 본체의 전압 이득이고 β 는 $R_3/(R_3+R_4)$ 와 같다. 또 $R_{in} \gg R_3+R_4$, $R_{out} \ll R_4$ 로 한다. 특징은 다음과 같다. ① 입력 임피던스가 크다. ② $A\beta \gg 1$ 이면 페루프 전압 이득 V_{out}/V_{in} 은 거의

$(R3+R4)/R3$ 과 같고 1보다 크다. ③ 동작 주파수 대역이 넓다. ④ 출력 극성은 입력극성과 같다(반전하지 않는다).

아. High pass filter (고주파 필터)

일정 주파수(차단 주파수) 이상의 모든 주파수의 파를 전송함과 동시에 그 이외의 주파수 파는 모두 감쇠하도록 한 필터.

자. Gain (이득)

입력에 대한 출력의 비. 증폭기의 기능을 나타내는 특성의 하나로, 보통 입출력 전압의 크기의 비를 사용하고, 이것을 게인이라 한다. 통상 데시벨[dB]로 표시한다. 전력으로 비교하는 것이 원칙이지만 실제로 전압으로 비교하는 경우가 많다.

차. Bandwidth (대역폭)

증폭기에서 고역 차단 주파수(상한 주파수)와 저역 차단 주파수(하한 주파수) 사이의 주파수폭을 말한다. 바꾸어 말하면 주파수 특성에 있어서 이득이 그 최댓값에서 3dB 저하하는 2점 간의 주파수폭이다.

카. Gain-bandwidth product (이득 대역폭 곱)

이득 대역폭 곱을 말한다. 증폭 회로의 이득 G와 대역폭B사이에는 서로 상반되는 성질이 있으며, 이득을 크게 하려고 하면 대역폭은 좁아지고 대역폭을 넓게 하려면 이득은 저하한다. 따라서 증폭 회로의 성능은 양자의 곱에 의해 나타내어진다. 이것을 GB곱이라 한다. 증폭 회로의 설계에서는 어느 한쪽에 중점을 두면 되는 경우도 많지만 GB곱을 크게 하고 싶은 경우에는 f_T (이미터 접지 이득 대역폭 곱)가 큰 트랜지스터를 선정하면 된다.

타. Notch filter

특정 주파수 대역의 성분만을 제거하는 필터. 특정 주파수 대역만 통과하게 하는 밴드 패스 필터(BPF, band pass filter)의 반대 특성을 나타내는 필터로, 송신기에서 발사되는 간섭파나 고조파 같은 원하지 않는 신호를 없앨 때 쓴다.

파. FFT

푸리에 변환은 푸리에(Fourier, J. ; 1768 ~ 1830)가 처음 제안한 것으로 신호(signal)를 진동수(frequency)의 성분으로 분해(decomposition)하는 수학적 기법이다. 즉 시간에 대한 함수(신호)를 푸리에 변환하면 진동수에 관한 함수가 된다.

3. 실험 방법

가. EXAMPLE #1

- Apply $V1 = 10V$, $V2 = 0V$
- Perform bias point analysis
- Perform sensitivity analysis for $V(R2)$ & analyze the result

나. EXAMPLE #2

- $V1 = V\sin$ (sinusoidal, amplitude 100 mV, frequency 1000 Hz)

- Perform time domain analysis
- From simulation result, plot input voltage (V1) & output voltage (V6)
- Find the voltage gain & measure the phase difference between the two waveforms
- Set frequency for V1 at 2 MHz, plot the input & output voltage & analyze the result

다. EXAMPLE #3

- Perform AC sweep analysis (sweep range: 1 Hz ~ 10 MHz, point: 1000)
- Find the frequency characteristics of the gain
- Plot the magnitude (dB scale) & phase of the output individually
- Find the 3dB cut-off frequency & bandwidth
- Find the roll-off rate (dB/decade)

라. EXAMPLE #4

- Perform AC sweep analysis (sweep range: 1 Hz ~ 10 kHz, point: 1000)
- Find the frequency characteristics of the gain
- Plot the magnitude (dB scale) & phase of the output individually

마. EXAMPLE #5

- Perform time domain analysis & FFT
- Sum voltage source V1, V2, V3
- sinusoidal, amplitude 1 V, frequency = 10 kHz, 100 kHz, 300kHz
- Calculate cut-off frequency ($f = 1/2\pi RC$)
- Apply the calculated values to RC filter (1)
- Remove the sinusoidal input with frequency of 300 kHz
- Calculate cut-off frequency ($f = 1/2\pi RC$)
- Apply the calculated values to RC filter (2)
- Remove the sinusoidal input with frequency of 10 kHz
- From simulation result, plot input voltage (V1+V2+V3) & compare with the output voltage

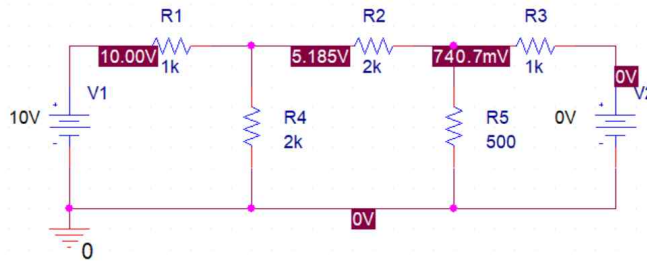
4. 실험 실행 과정

가. 실험 장비 및 부품

OrCAD : OrCAD Systems사에서 개발하였으며, 전자 회로 설계와 회로 시뮬레이션, 회로기판 설계 등이 쉽게 이루어져 강력한 기능에 비해 사용이 간편하여 널리 이용되고 있는 전자 회로 설계 전용 캐드 프로그램.

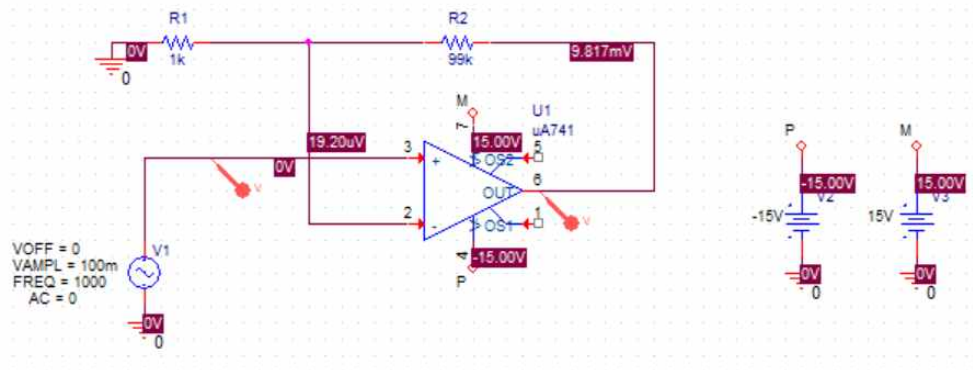
나. 실험 회로

1) EXAMPLE #1

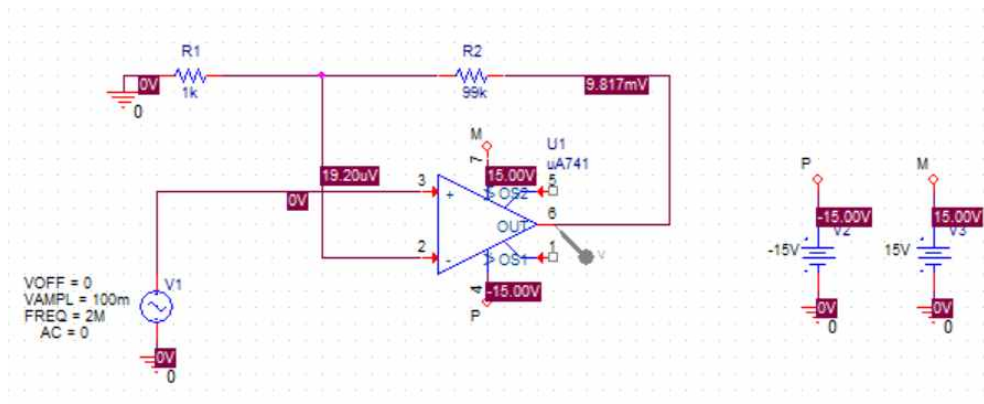


2) EXAMPLE #2

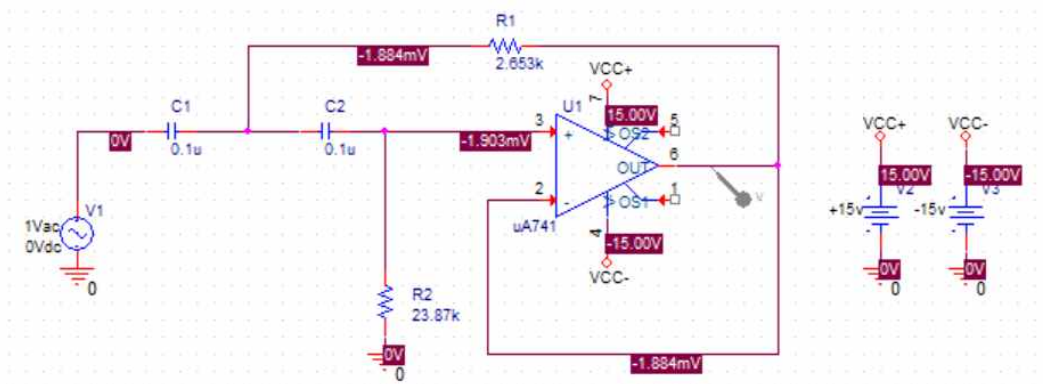
(1) Vsin의 frequency = 1000 Hz로 설정



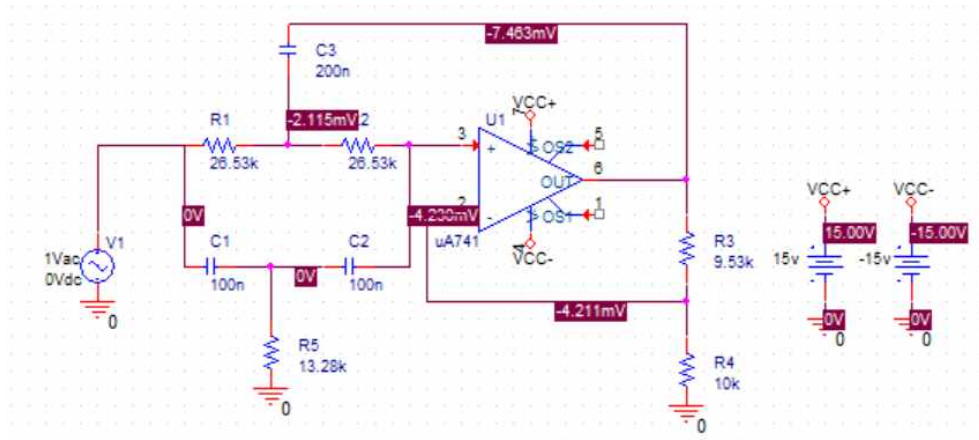
(2) Vsin의 frequency = 2M Hz로 설정



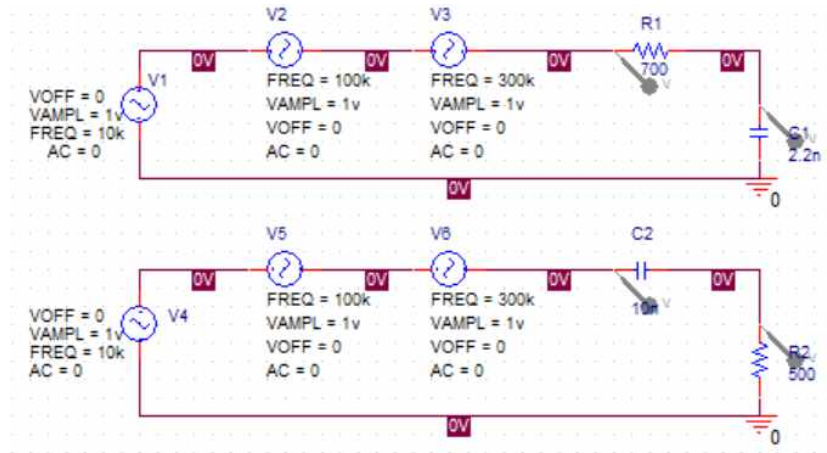
3) EXAMPLE #3



4) EXAMPLE #4



5) EXAMPLE #5



5. 실험 결과

가. EXAMPLE #1

1) 회로 분석

이 회로는 10V와 0V의 DC 전원과 저항들로 구성되어 있다. Bias point analysis를 시행한 결과 R1에는 10V, R2에는 5.185V, R3에는 740.7mV의 전압이 걸림을 확인할 수 있다.

2) Sensitivity Analysis for V(R2)

DC SENSITIVITIES OF OUTPUT V(R_R2)

ELEMENT NAME	ELEMENT VALUE	ELEMENT SENSITIVITY (VOLTS/UNIT)	NORMALIZED SENSITIVITY (VOLTS/PERCENT)
R_R1	1.000E+03	-2.140E-03	-2.140E-02
R_R2	2.000E+03	7.407E-04	1.481E-02
R_R3	1.000E+03	-1.646E-04	-1.646E-03
R_R4	2.000E+03	5.761E-04	1.152E-02
R_R5	5.000E+02	-6.584E-04	-3.292E-03
V_V1	1.000E+01	4.444E-01	4.444E-02
V_V2	0.000E+00	-2.222E-01	0.000E+00

Pspice의 view simulation output file 기능을 통해 확인한 결과, V(R_R2)의 element value, element sensitivity, normalized sensitivity의 값들은 위와 같았다. 이때 element name은 각각의 소

자, element value는 소자의 값, element sensitivity는 단위 유닛당 해당 소자에 대한 전압을 기준으로 주변 회로 변화의 민감도를 나타낸 것이다. Normalized sensitivity는 소자 sensitivity에 대한 퍼센트 값, 즉 백분율로 표현한 값이다. 해석을 하는 방법은 어떤 값이 1 volt 변화할 때의 변화값이다. 예컨대 V_V1의 element sensitivity가 0.444(volts/unit) 인데, 이 말은 V1의 값이 1 volt 변화할 때, V(R_R2)의 값은 0.444 volt 만큼 변화한다는 것으로 해석하면 된다. 다음의 사진은 해당 output file에 대한 print preview 화면을 캡처한 것이다.

```
C:\OrCAD\OrCAD_16.6_Lite\tools\capture\0912_test1-PSpiceFiles\SCHEMATIC1\simulation1\simulation1.out.1
```

```
*****

#
**** 09/12/20 13:58:59 ***** PSpice Lite (October 2012) ***** ID# 10813 ****

** Profile: "SCHEMATIC1-simulation1" [ C:\OrCAD\OrCAD_16.6_Lite\tools\capture\0912_test1-PSpiceFiles\SCHEMATIC1\simulation1.sim ]

****    DC SENSITIVITY ANALYSIS          TEMPERATURE = 27.000 DEG C

*****

DC SENSITIVITIES OF OUTPUT V(R_R2)

      ELEMENT      ELEMENT      ELEMENT      NORMALIZED
      NAME          VALUE        SENSITIVITY  SENSITIVITY
                        (VOLTS/UNIT) (VOLTS/PERCENT)

      R_R1          1.000E+03      -2.140E-03    -2.140E-02
      R_R2          2.000E+03       7.407E-04     1.481E-02
      R_R3          1.000E+03      -1.646E-04    -1.646E-03
      R_R4          2.000E+03       5.781E-04     1.152E-02
      R_R5          5.000E+02      -8.584E-04    -3.292E-03
      V_V1          1.000E+01       4.444E-01     4.444E-02
      V_V2          0.000E+00      -2.222E-01     0.000E+00

      JOB CONCLUDED

#
**** 09/12/20 13:58:59 ***** PSpice Lite (October 2012) ***** ID# 10813 ****

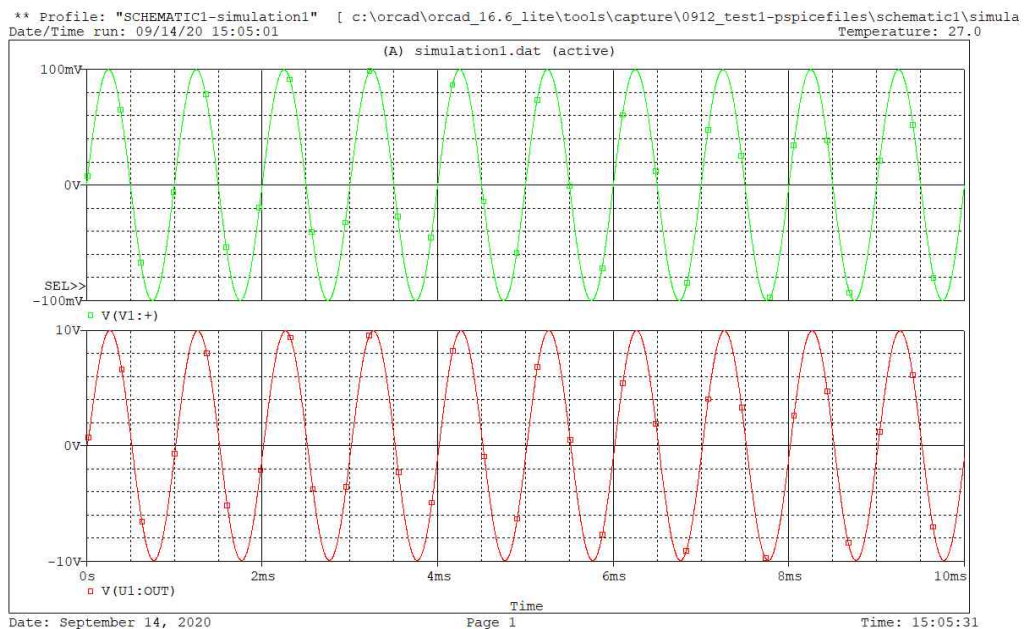
** Profile: "SCHEMATIC1-simulation1" [ C:\OrCAD\OrCAD_16.6_Lite\tools\capture\0912_test1-PSpiceFiles\SCHEMATIC1\simulation1.sim ]

Page: 3
```

나. EXAMPLE #2

1) Vsin의 frequency = 1000 Hz로 설정

(1) 회로 해석 및 그래프 분석



Vsin, DC 전원, 저항, OP AMP (UA741)이 사용되었다. 위 그래프는 input voltage (V1) (연두색) 와 output voltage (V6) (빨간색)를 time-domain 방식으로 analysis한 결과이다. Vsin의 frequency를 1000 Hz로 설정한 결과, 두 그래프의 파형은 주기가 1ms인 sin파 모양을 나타내었다. 1ms에 한 번 진동하므로 진동수 1000Hz로 잘 나타났음을 확인할 수 있다. 그래프의 위상을 살펴보면 input voltage의 경우 100mV가 최댓값, -100mV가 최솟값이고, output voltage의 경우 10V가 최댓값, -10V가 최솟값임을 알 수 있다. 즉, 전압의 증폭이 100배 이루어졌다. 또 같은 시간에 전압값이 반전되지 않은 것으로 보아 비반전 증폭기(non-inverting amplifier)임을 확인할 수 있다.

(2) Voltage Gain

비반전 증폭기(non-inverting amplifier)의 전압 증폭비율은 $V_{out} = (1 + \frac{R_f}{R_i}) V_{in} = (1 + \frac{99k\Omega}{1k\Omega}) V_{in} = 100 V_{in}$ 이므로, 이 회로의 voltage gain은 $20\log(\frac{V_{out}}{V_{in}}) = 20\log(100) = 40$ [dB] 이다.

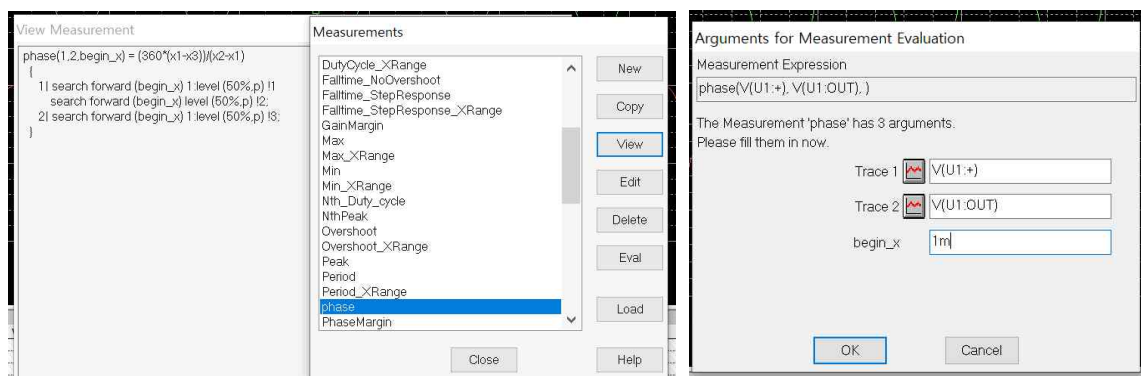
(3) Phase Difference

- 방법 ① phase difference 구하는 함수 생성.

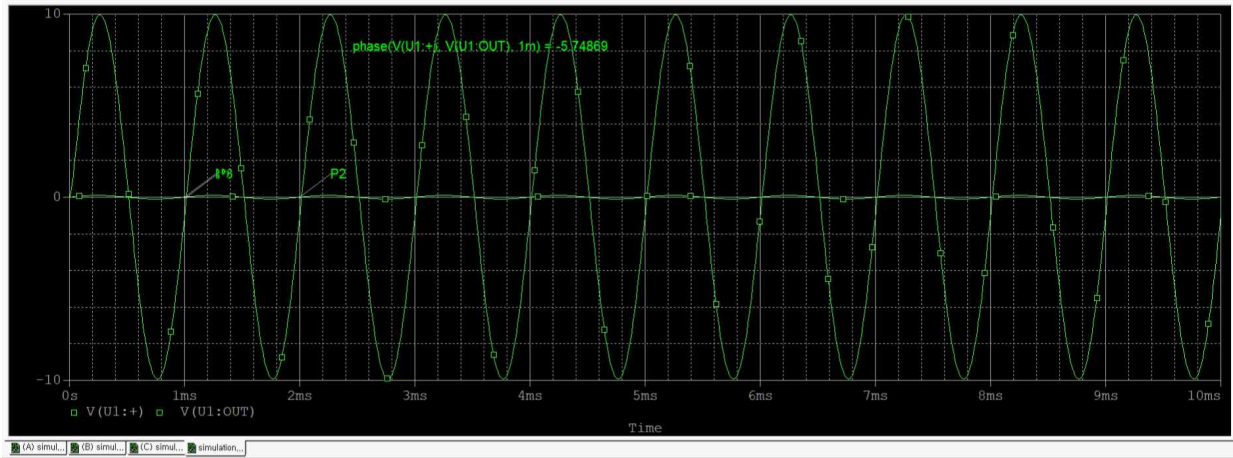
output voltage 그래프와 input voltage 그래프의 phase difference (위상차)를 알아보기 위해, Simulation 창에서 Measurement 중 'phase(1,2,begin_x)'라는 이름의 새로운 함수를 추가해주었다. 추가한 함수의 식¹⁾은 다음과 같다. 이 함수의 파라미터 중 1과 2는 비교하고자 하는 변수, 그리고 begin_x는 x축의 어느 지점에서 두 그래프의 위상차를 비교할 것인지를 지정해주는 변수이다.

```
phase(1,2,begin_x) = (360*(x1-x3))/(x2-x1)
{
    1| search forward (begin_x) 1:level (50%,p) !1
        search forward (begin_x) level (50%,p) !2;
    2| search forward (begin_x) 1:level (50%,p) !3;
}
```

그리고 다음의 과정을 통해 phase 함수의 첫 번째 파라미터와 두 번째 파라미터에 각각 input voltage와 output voltage를 넣어주고, begin_x 파라미터엔 1m(s)의 값을 넣어주었다.



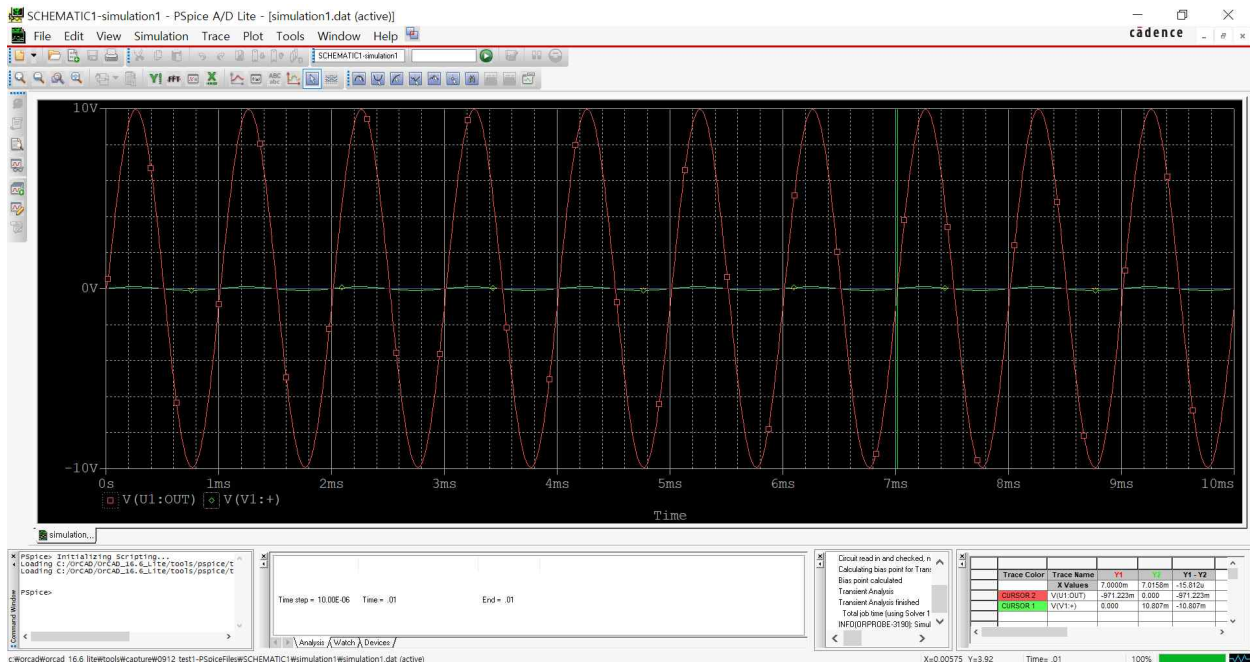
1) <https://m.blog.naver.com/PostView.nhn?blogId=kingreddrake&logNo=220756122063&proxyReferer=https:%2F%2Fwww.google.com%2F>



Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	phase(V(U1:+) - V(U1:OUT), 5m)	-5.74868
<input checked="" type="checkbox"/>	phase(V(U1:+) - V(U1:OUT), 1m)	-5.74869

시행 결과, input voltage와 output voltage 그래프의 위상차는 약 -5.74868 degree가 나왔다.

- 방법 ② '360 * 파형의 시간차 = 위상차 * 한 주기' 공식 이용



Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2
	X Values	7.0000m	7.0158m	-15.812u
CURSOR 2	V(U1:OUT)	-871.223m	0.000	-871.223m
CURSOR 1	V(U1:+) -	0.000	-10.807m	-10.807m

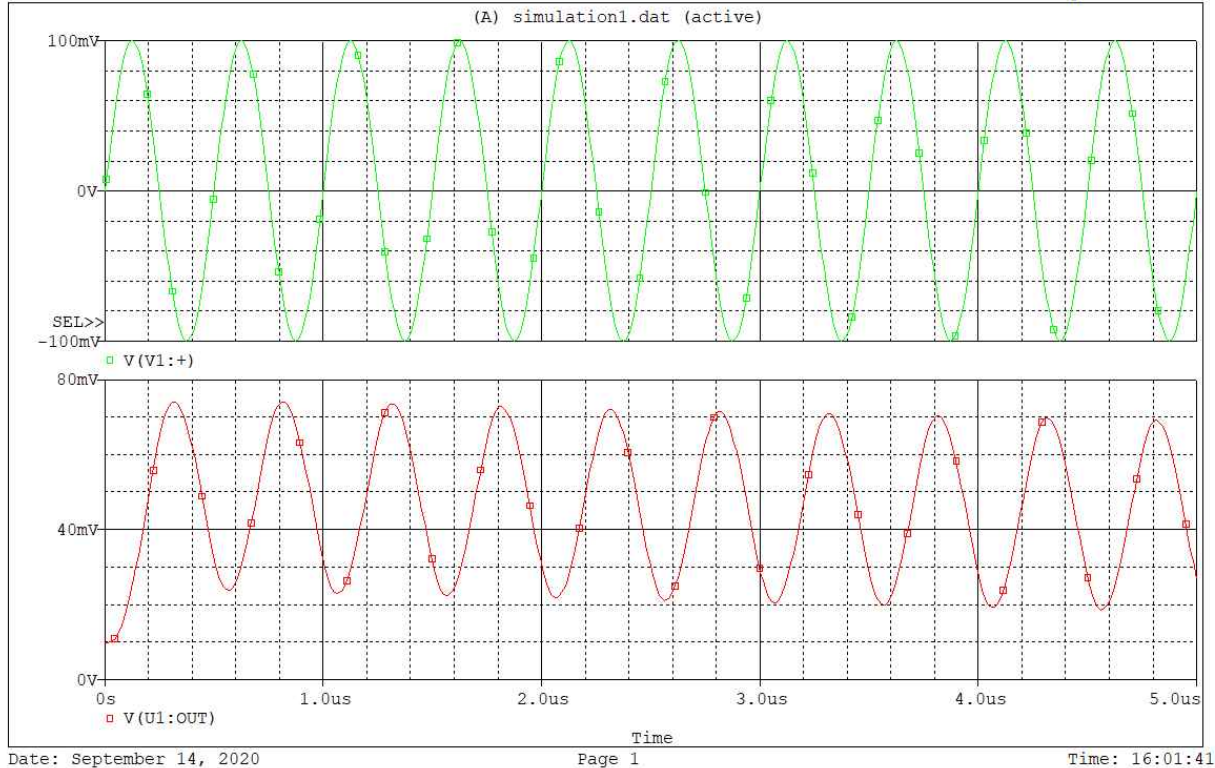
'360[°] * 파형의 시간차[s] = 위상차[°] * 한 주기[s]'의 공식을 활용하여 위상차를 구할 수 있다. input voltage와 output voltage의 임의의 가장 가까운 0 volt 지점을 잡아주었다. 두 지점의 (시간, 전압 값)은 (7.0000ms, 0V), (7.0158ms, 0V)이므로 시간차는 0.0158ms이다. 따라서 공식에 대입해 주면 $360^\circ * 0.0158\text{ms} = \text{위상차} * 1\text{ms}$, 즉 위상차 = 5.688° 이다.

두 방법 모두 위상차가 약 5.7° 로 나왔다. 이는 input voltage가 OP AMP가 들어간 후 증폭하여 output voltage가 나올 때까지 약간의 시간의 차가 발생하였고, 그 차이가 5 degree만큼이라는 것으로 해석할 수 있다.

2) Vsin의 frequency = 2M Hz로 설정

(1) 회로 해석 및 그래프 분석

** Profile: "SCHEMATIC1-simulation1" [c:\orcad\orcad_16.6_lite\tools\capture\0912_test1-pspicefiles\schematic1\simul
Date/Time run: 09/14/20 16:00:18 Temperature: 27.0



앞선 회로와 동일한 조건에서 Vsin의 frequency만 2M로 올려준 결과, input voltage는 진폭 100mV 이라는 값은 같았지만, out voltage가 증폭 되지 않고 오히려 진폭이 작아졌음을 확인할 수 있다. 또, 그래프의 phase(위상)가 이동하였다는 점도 차이가 있다. 이는 UA741가 받아들이지 못하는 주파수이기 때문이다.

(2) Gain Bandwidth

Number of channels (#)	1	Rating	Catalog
Total supply voltage (Max) (+5V=5, +/-5V=10)	36	Operating temperature range (C)	0 to 70
Total supply voltage (Min) (+5V=5, +/-5V=10)	7	Offset drift (Typ) (uV/C)	0
Rail-to-rail	No	Features	—
GBW (Typ) (MHz)	1	Input bias current (Max) (pA)	500000
Slew rate (Typ) (V/us)	0.5	CMRR (Typ) (dB)	90
Vos (offset voltage @ 25 C) (Max) (mV)	5	Output current (Typ) (mA)	25
Iq per channel (Typ) (mA)	1.7	Architecture	Bipolar
Vn at 1 kHz (Typ) (nV/rHz)	20		

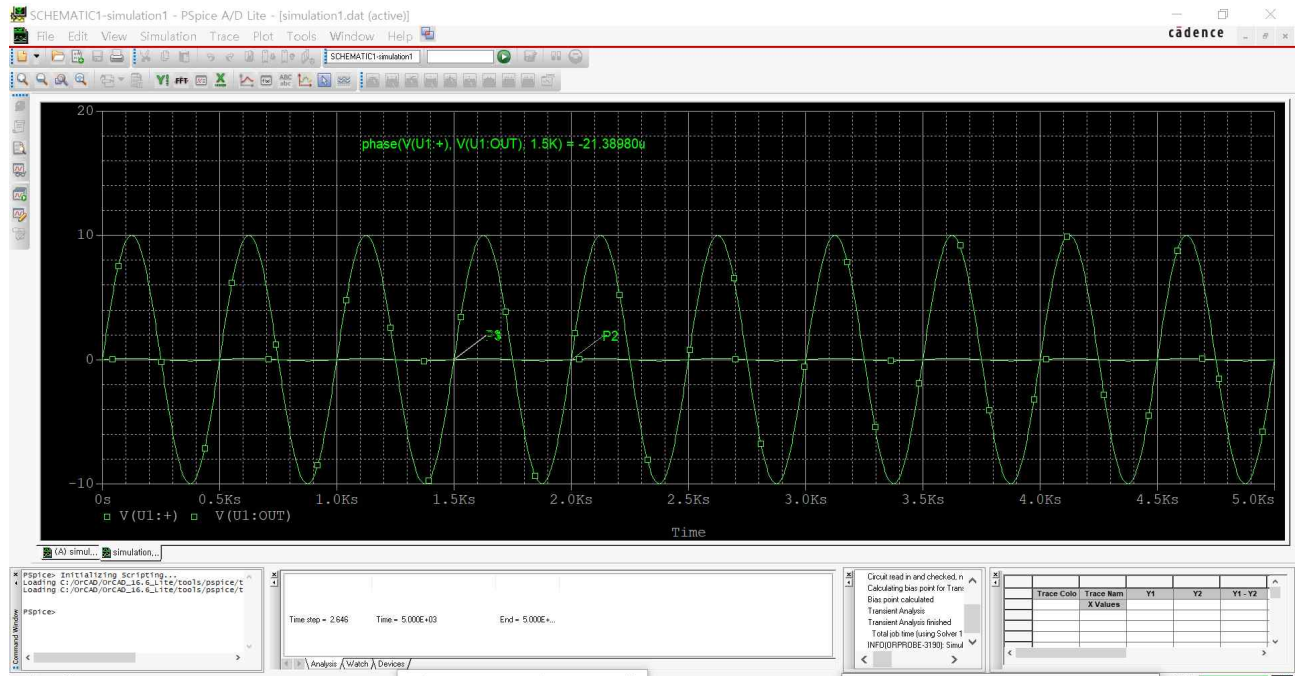
UA741의 datasheet²⁾을 살펴보면, GBW가 typically 1M Hz라고 되어 있다. GBW는 gain bandwidth frequency, 즉 이득 대역폭 주파수의 줄임말이다. 'Gain Bandwidth Product Rule'은, 모든 증폭기는 이득과 대역폭의 곱이 일정하다는 규칙이다. UA741이라는 amplifier를 다룰 때 있어서 bandwidth(대역폭)은 어느 주파수 신호까지 증폭할 수 있는지를 알려주는 지표로, gain bandwidth 항목은 증폭비 1배를 기준으로 할 때, 1M Hz까지는 1배의 증폭이 가능하다는 말이다. 2배 증폭을 원한다면, 대역폭이 1/2배로 줄고, n배 증폭을 원한다면 대역폭이 1/n 배까지 제한된다.

따라서 EXAMPLE #2의 (2) 실험에서 2M Hz의 주파수를 입력했기에 증폭이 불가했음을 gain bandwidth product rule을 통해 설명할 수 있다. 한편, EXAMPLE #2의 (1) 실험에서는 1000 Hz의

2) <https://www.ti.com/product/UA741#product-details##params>

주파수를 입력했으므로 기존 bandwidth의 1/100배로 제한했기 때문에 전압의 100배 증폭(100mV에서 10V로 증폭)이 가능했던 것이다.

(3) Phase Difference



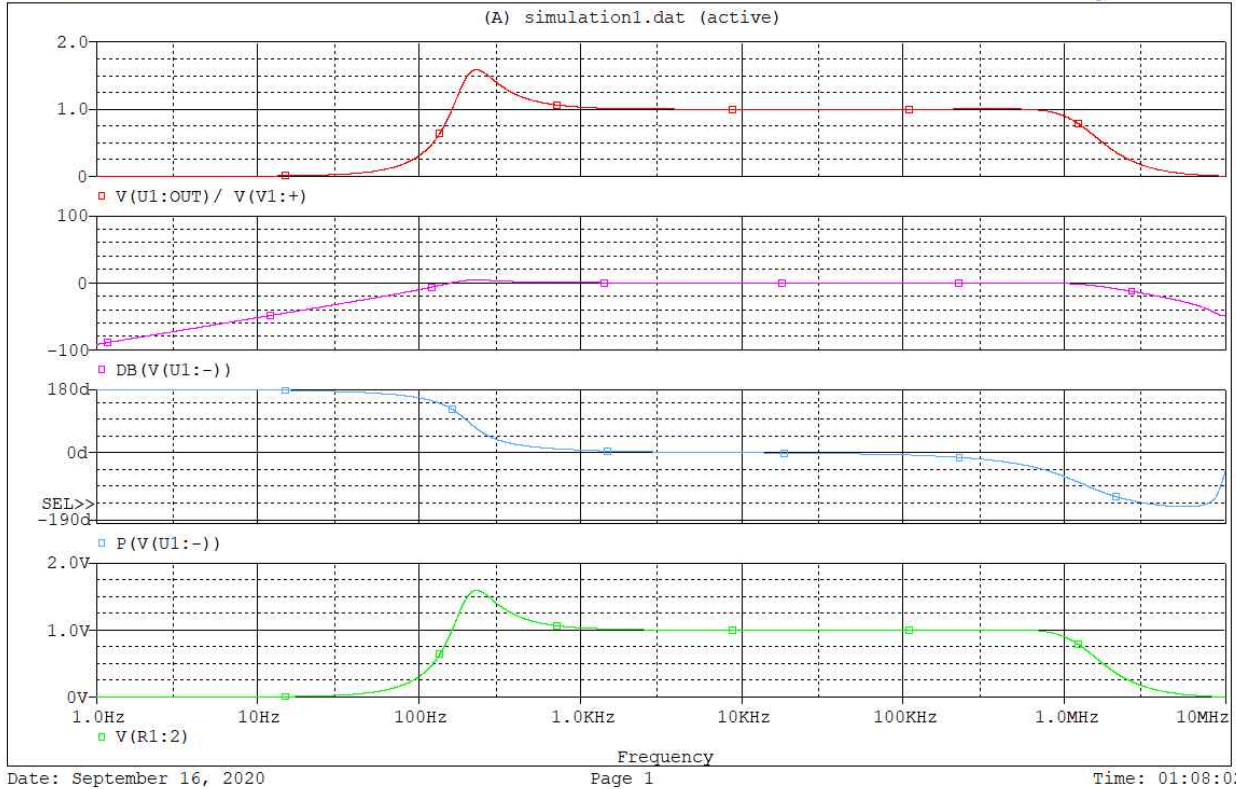
	Evaluate	Measurement	Value
	<input checked="" type="checkbox"/>	phase(V(U1:+), V(U1:OUT), 5m)	-21.39203u
	<input checked="" type="checkbox"/>	phase(V(U1:+), V(U1:OUT), 1m)	-21.39203u
	<input checked="" type="checkbox"/>	phase(V(U1:+), V(U1:OUT), 1.5K)	-21.38980u

앞서 언급했던 방법과 마찬가지로 위상차를 측정하였다. 시행 결과, input voltage와 output voltage 그래프의 위상차는 약 -21.39203u degree가 나왔다. frequency가 1000 Hz 일때보다 2M Hz 일 때 위상차가 더 작게 나왔다.

다. EXAMPLE #3

1) 회로 분석

이 회로는 High-pass filter(Sallen-Key topology)로, Vac, 저항, 축전기, OP AMP (UA741)가 사용되었다.



위 사진의 연두색 그래프는 AC sweep analysis 결과로, Vac의 frequency를 1 Hz에서 10 MHz 까지 변화시키며 UA741의 output voltage를 나타낸 것이다. 분홍색 그래프와 파란색 그래프는 각각 UA741의 output voltage를 dB scale 값, Phase 값을 나타낸 것이다. 그리고 주황색 그래프는 gain의 그래프를 나타내기 위해 output voltage / input voltage를 나타낸 것이다.

2) Output Voltage

연두색 그래프, 즉 output voltage에 대한 그래프를 확인해보면 특정 주파수 이하의 값에서는 output voltage가 0 volt이고 특정 주파수 이상에서는 output voltage가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 OP AMP에서 특정 주파수 이하의 전압을 차단하는 High pass filter이기 때문이다. 그리고 또 일정 주파수 이상 주파수가 커지면 다시 output voltage가 0 volt로 수렴하는데, 이는 OP AMP가 일정 주파수 이상의 주파수를 받아들이지 못하기 때문이고, 앞서 EXAMPLE #2에서 언급했던 Gain Bandwidth Product Rule과 관련이 있다. 또 특이한 점은 통과되는 처음 부분 주파수 영역에서는 1 volt 이상의 voltage 값으로 뛰는 overshooting 된 그래프 위상을 확인할 수 있다.

3) Voltage Gain

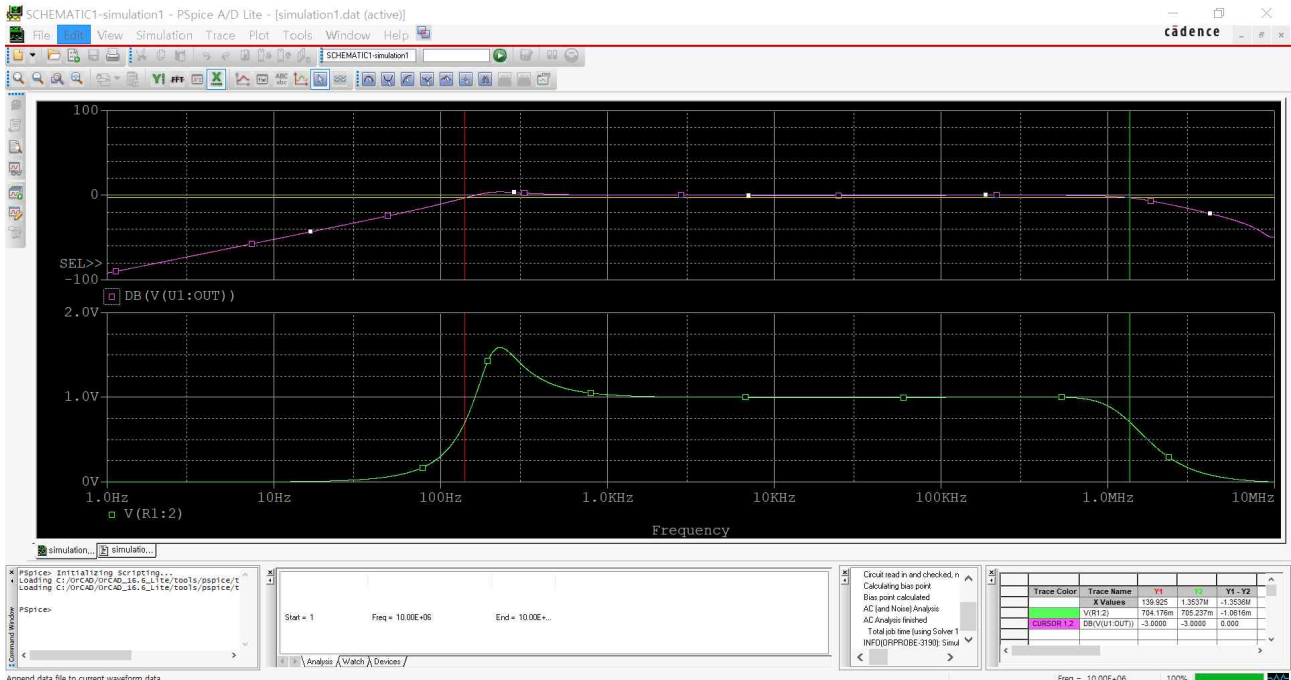
주황색 그래프, 즉 gain의 그래프를 연두색 그래프(; output voltage)와 비교하여 살펴보면 완벽히 같은 위상임을 알 수 있다. 이는 input voltage가 1 volt로 일정하기 때문이다. 즉 이 회로의 gain은 특정 주파수 구간에서만 gain이 있다는 것을 확인할 수 있다.

4) Phase

파란색 그래프, 즉 Phase 그래프를 살펴보면 차단된 주파수 범위의 신호는 180° 반전된 값이, 통과된 주파수 범위에서는 위상이 반전되지 않게 (0 degree) 나왔다.

5) 3dB cut-off frequency & Bandwidth

분홍색 그래프, 즉 UA741의 output voltage를 dB scale 값으로 나타낸 그래프를 통해 이 회로의 3dB cut-off 주파수를 알아낼 수 있다. 3dB cut-off 주파수란 frequency characteristic이 기준 주파수에 대한 값보다 3dB만큼 낮아지는 주파수로, 전압과 전류는 $1/\sqrt{2}$, 즉 약 0.707배 감소하고, output 전력이 input 전력의 50% 미만이 되는 지점이다.



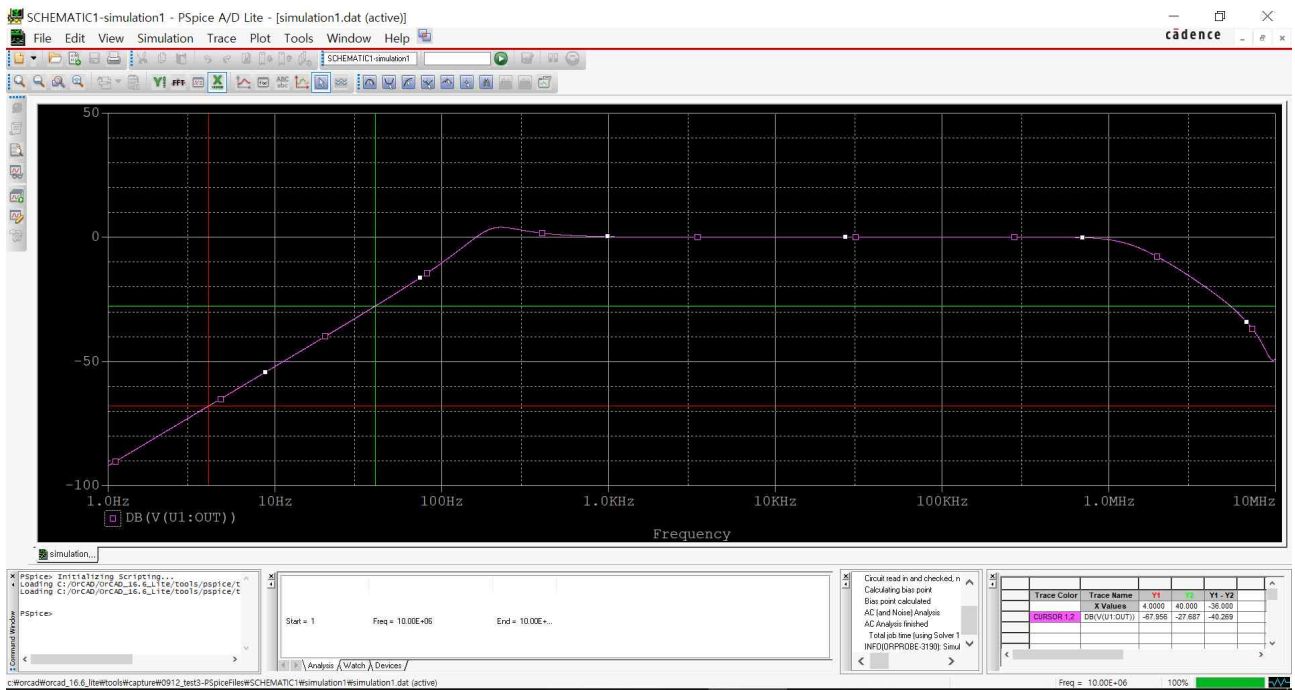
Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2
	X Values	139.925	1.3537M	-1.3536M
	V(R1:2)	704.176m	705.237m	-1.0616m
CURSOR 1,2	DB(V(U1:OUT))	-3.0000	-3.0000	0.000

Simulation 창에서 'search forward level(-3)' 기능을 통해 분홍색 그래프에서 -3dB인 곳을 찾은 결과 그 때의 x values는 139.925였고, 이는 이 회로의 3dB cut-off frequency가 139.925 Hz라는 뜻이다. 이 지점에서 V 값은 약 0.704 volt로, 기준 전압 1 volt보다 $1/\sqrt{2}$ 을 만족함도 확인할 수 있다.

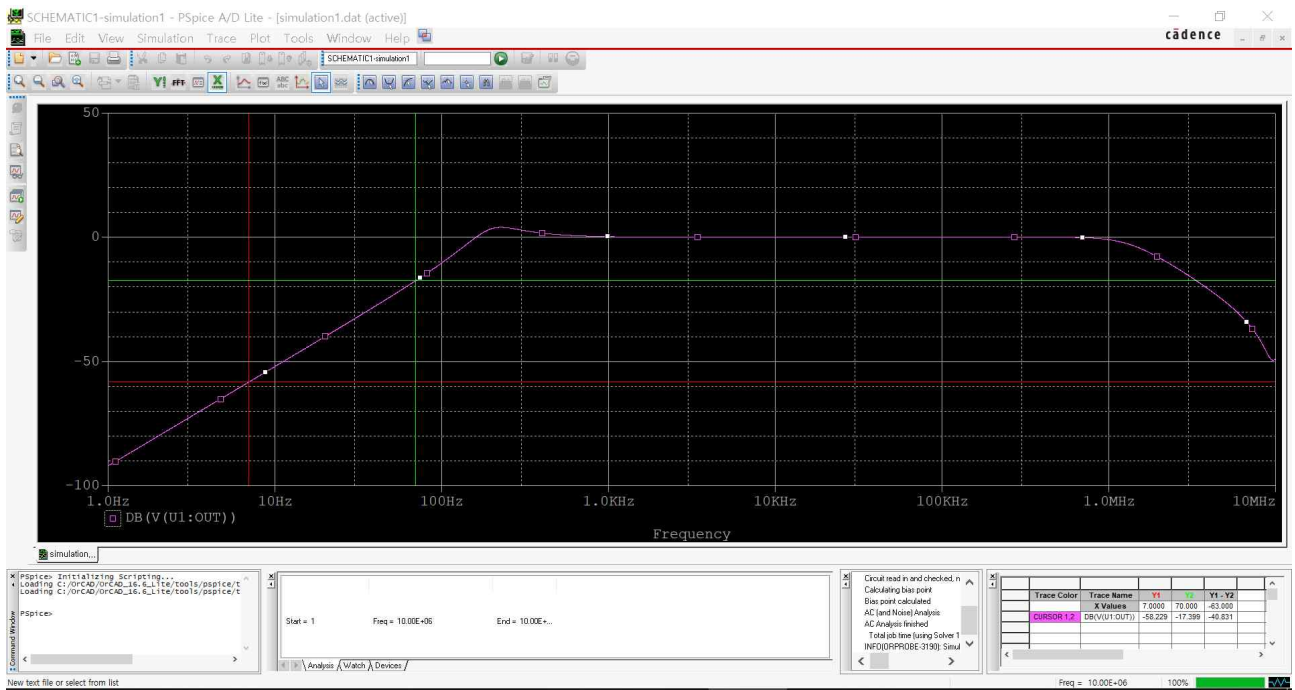
그리고 3dB Bandwidth는 기준 주파수보다 -3dB인 두 주파수 사이의 거리이므로 139.853Hz와 1.3537MHz의 차, 1.3536M Hz이다. 다시 말해 이 회로의 3dB Bandwidth는 1.3536M Hz이다.

그런데, High-pass filter (Sallen-Key topology)에서 3dB cut-off frequency의 이론값은 $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$ 이므로 각각의 값($R_1=2.653k\Omega$, $R_2=27.87k\Omega$, $C_1=0.1\mu F$, $C_2=0.1\mu F$)을 대입해 주면 약 199.9978Hz이다. 실험값(: pspice를 통해 simulation 한 결과)과 비교해보았을 때 약 60 Hz 정도의 오차가 발생하였다.

6) Roll-off rate



Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2
	X Values	4.0000	40.000	-36.000
CURSOR 1,2	DB(V(U1:OUT))	-67.956	-27.687	-40.269



Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2
	X Values	7.0000	70.000	-63.000
CURSOR 1,2	DB(V(U1:OUT))	-58.229	-17.399	-40.831

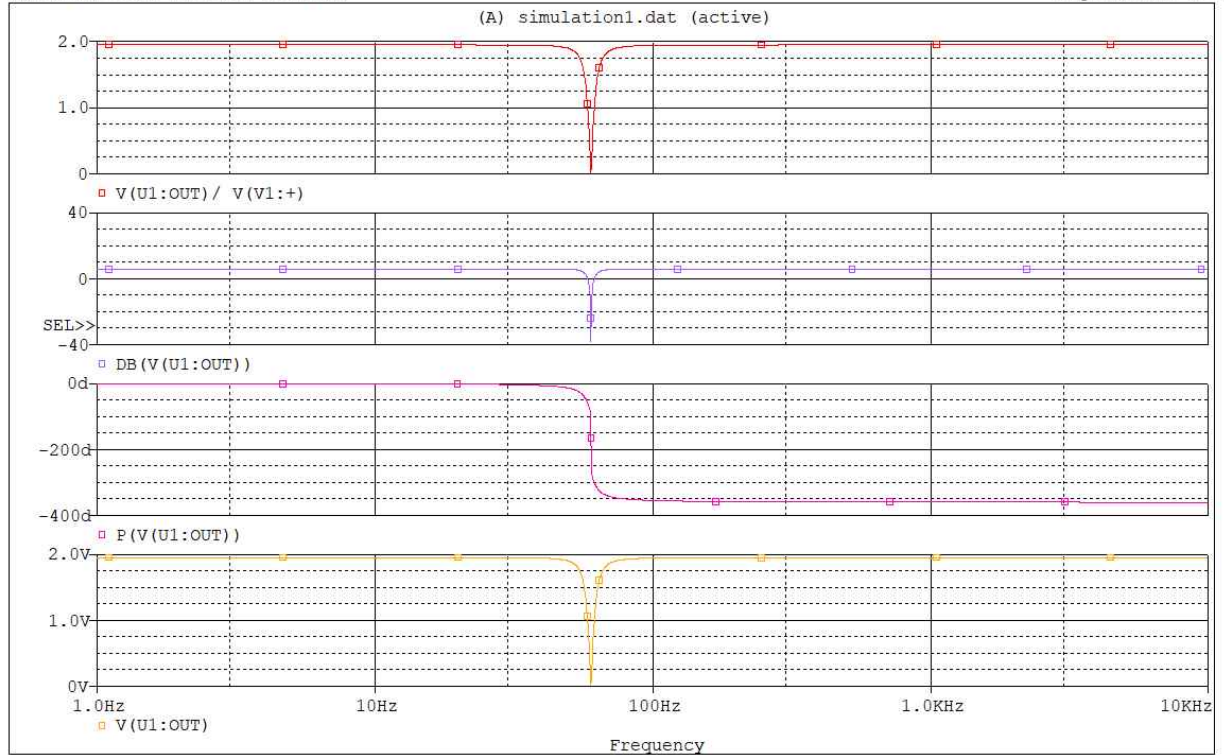
Roll-off rate는 차단된 주파수 범위 내 그래프의 기울기를 말하므로 차단 주파수 139.925 Hz 보다 작은 두 지점을 선택한다. 그리고 Roll-off rate의 단위는 [dB/decade]이므로 편의상 주파수 차이가 10배 차이나는 두 지점을 선택해주었다. (Simulation 창에서 'search forward xvalue()'의 기능을 사용

하였다.) 첫 번째 시도는 4Hz와 40Hz인 구간, 두 번째 시도는 7Hz와 70 Hz인 구간을 설정하였다. 첫 번째 두 점의 (주파수, dB(output voltage))의 좌표값은 (4, -67.956), (40, -27.687)이므로 roll-off rate는 40.296 [dB/decade]이다. 두 번째 두 점의 (주파수, dB(output voltage))의 좌표값은 (7, -58.229), (70, -17.399)이므로 roll-off rate는 40.83 [db/dacade]이다. 지점마다 약간의 차이는 있었지만 이 회로의 roll-off rate는 약 40 [dB/decade]라는 것을 확인할 수 있다.

라. EXAMPLE #4

1) 회로 분석

** Profile: "SCHEMATIC1-simulation1" [C:\OrCAD\OrCAD_16.6_Lite\tools\capture\0915_test4-PSpiceFiles\SCHEMATIC1\simula
Date/Time run: 09/15/20 19:01:06 Temperature: 27.0



Date: September 15, 2020

Page 1

Time: 19:30:45

이 회로는 Notch filter로, Vac, 저항, 축전기, OPAMP (UA741)이 사용되었다. Notch filter란 특정 주파수 대역의 성분만을 제거하는 필터이다. 위 사진에서 노란색 그래프는 AC sweep analysis 결과로, Vac의 frequency를 1 Hz에서 10k Hz까지 변화시켜가며 UA741의 output voltage를 나타낸 것이다. 보라색 그래프와 분홍색 그래프는 각각 UA741의 output voltage를 dB scale 값, Phase 값을 나타낸 것이다. 그리고 주황색 그래프는 UA741의 output voltage / input voltage 에 대한 그래프이다.

2) Output Voltage & Magnitude

Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2
	X Values	59.979	1.0000	58.979
CURSOR 1.2	V(C3.2)	12.393m	1.9529	-1.9405

노란색 그래프, 즉 즉 output voltage에 대한 그래프를 확인해보면 특정 주파수에서만 output voltage가 차단된 것을 확인할 수 있다. 'Cursor Min'의 기능으로 이 값을 찾아보니 약 58.979 Hz일 때가 통과되지 않는 주파수임을 확인할 수 있었다. 또한 차단된 영역 외 구간에서는 1 volt의 input voltage보다 증폭된 약 2 volt의 output voltage가 나왔다. 보라색 그래프, 즉 magnitude의 dB scale

그래프에서도 역시 특정 주파수 구간에서만 차단되어 있음을 알 수 있다.

3) Gain

주황색 그래프, 즉 output voltage / input voltage 에 대한 그래프로, Gain은 입력 전압에 대한 출력 전압의 비이므로 Gain 그래프라고 할 수 있다. 입력 전압은 1V로 일정하기에 output voltage 그래프와 양상이 같고, 차단 주파수인 58.979 Hz에서만 Gain 값이 작아지는 것을 확인할 수 있다.

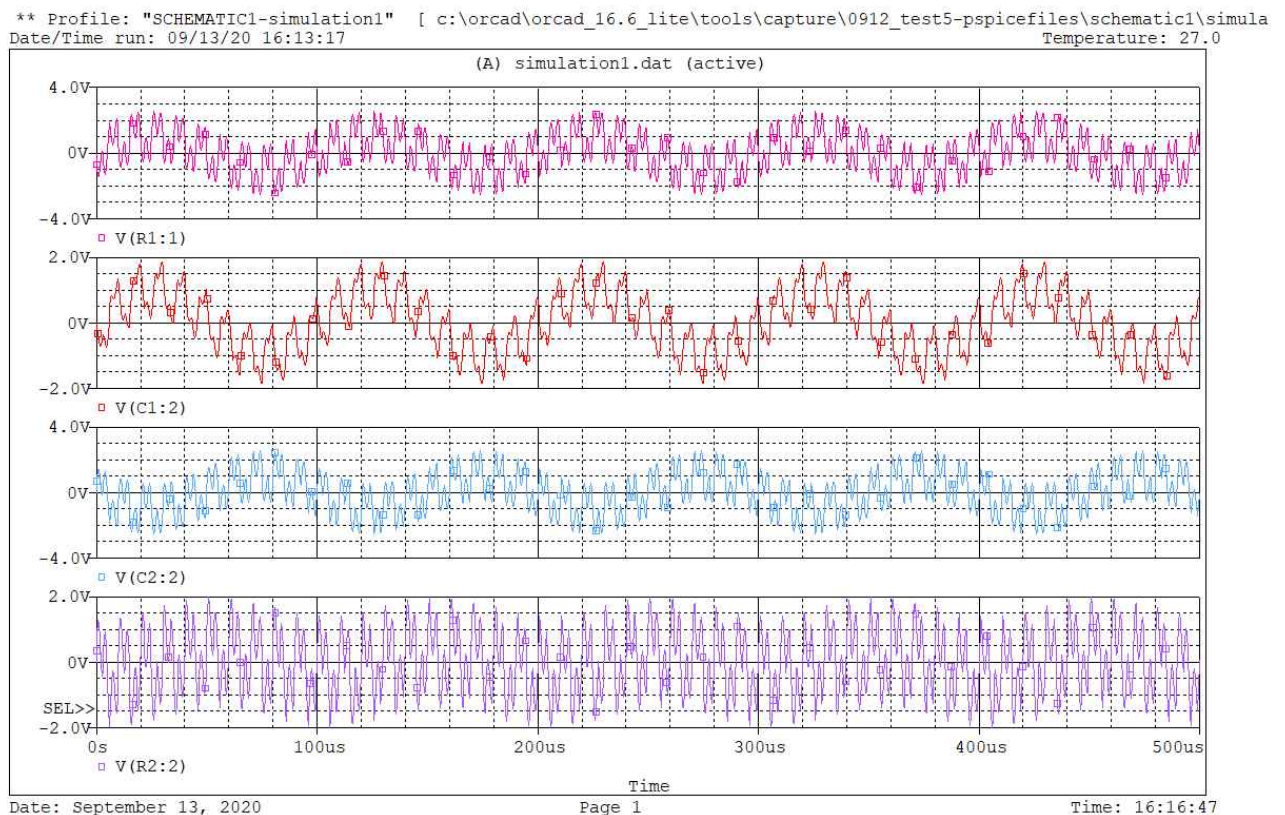
4) Phase

분홍색 그래프, 즉 phase 그래프를 확인해보면 전압이 차단된 주파수 구간에서 위상이 반전되는 것을 확인할 수 있다. 주파수가 차단되는 범위의 중앙값, 즉 58.979 Hz가 중심 주파수이고 이 주파수 때 위상이 180° 반전된다.

마. EXAMPLE #5

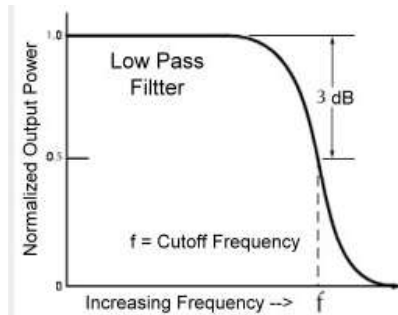
1) 회로 분석

이 회로는 frequency가 각각 10 kHz, 100 kHz, 300kHz인 Vsin 3가지, R, C로 이루어진 RC filter이다. R과 C의 값을 조절하여 회로(1)은 300k Hz, 회로(2)는 10k Hz 영역을 차단하는 것이 목적인 문제로, 결과적으로 filter(1)에서는 $R1=700\Omega$, $C1=2.2nF$ 으로, filter(2)에서는 $C2=10nF$, $R2=500\Omega$ 으로 조정해주게 되었다. 다음 그래프는 그렇게 하였을 때 각 소자 전후 걸리는 전압에 대한 time-domain 그래프이다.



2) RC filter (1)

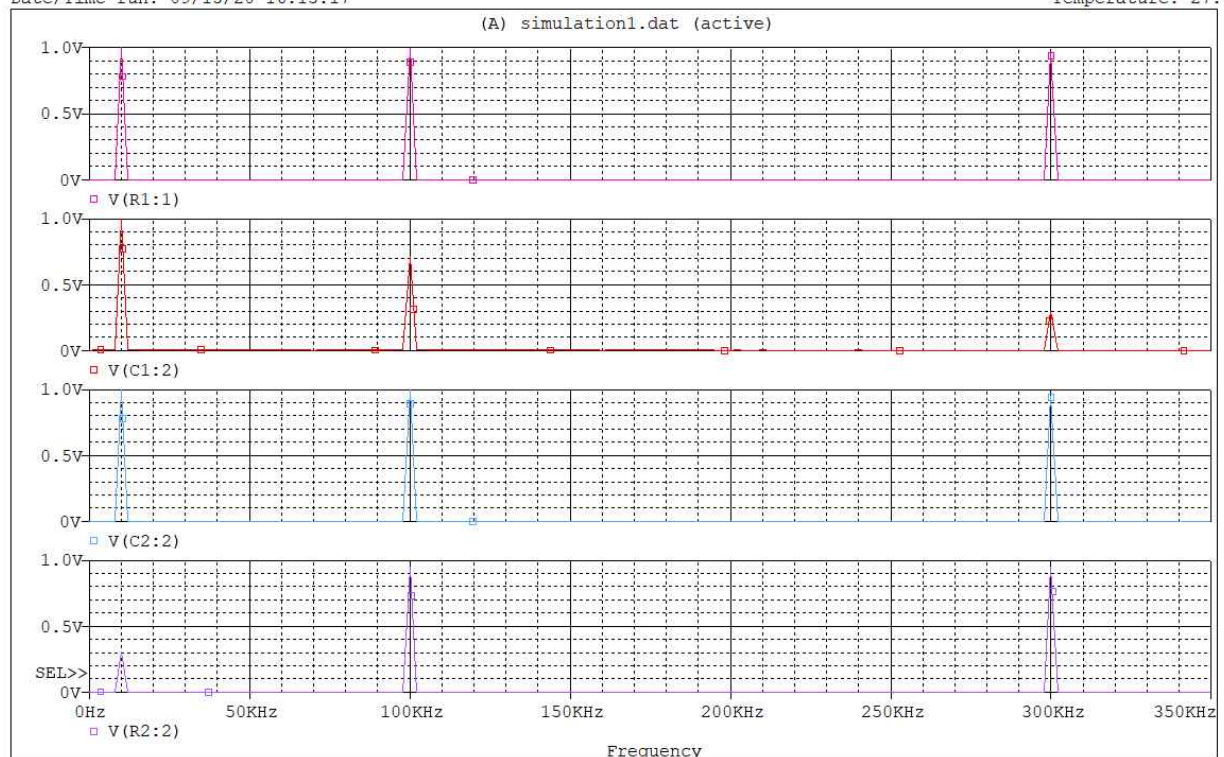
(1) Cut-off Frequency



$R1=700\Omega$, $C1=2.2nF$ 으로 설정하였을 때 이 RC filter의 cut-off frequency는 $f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 103347.3656 \text{ Hz}$ 이다. 즉 frequency가 100k 인 Vsin까지는 차단되지 않을 것임을 알 수 있다.

(2) Removing the sinusoidal input with frequency of 300 Hz

** Profile: "SCHEMATIC1-simulation1" [c:\orcad\orcad_16.6_lite\tools\capture\0912_test5-pspicefiles\schematic1\simula
Date/Time run: 09/13/20 16:13:17 Temperature: 27.0



Date: September 13, 2020

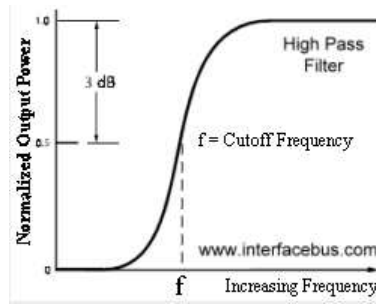
Page 1

Time: 16:15:59

분홍색 그래프는 RC filter(1)에서 filtering 되기 전, 주황색 그래프는 filtering 된 후의 전압 값을 주파수가 변화됨에 따라 나타낸 것이다. filtering 되기 전에는 10k Hz, 100k Hz, 300k Hz 영역 모두 통과되지만, filtering 된 후에는 10k Hz, 100k Hz 영역 대는 통과되지만 300k Hz에서 0.5v에 못미치는 것을 알 수 있다. filter에서 입력 전압의 50%에 못 미치는 것은 통과되지 않았다고 간주되기 때문에 이 회로의 입력 전압은 1 volt 이므로 0.5 volt를 넘기지 못한 300k Hz는 잘 filtering 되었다고 해석할 수 있다.

3) RC filter (2)

(1) Cut-off Frequency



$C2=10\text{nF}$, $R2=500\Omega$ 으로 설정하였을 때, 이 RC filter의 cut-off frequency는 $f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 31830.9886 \text{ Hz}$ 이다. 즉 31830.9886 Hz 이하의 주파수 영역은 차단되고, 초과인 주파수 영역은 차단되지 않는다는 것을 알 수 있다.

(2) Removing the sinusoidal input with frequency of 300 Hz

이전의 그래프 중 하늘색과 보라색 그래프를 살펴보도록 하겠다. 연두색 그래프는 RC filter(2)에서 filtering 되기 전, 보라색 그래프는 filtering 된 후의 전압 값을 주파수가 변화됨에 따라 나타낸 것이다. filtering 되기 전에는 10k Hz, 100k Hz, 300k Hz 영역 모두 통과되지만, filtering 된 후에는 100k Hz, 300k Hz 영역 대는 통과되지만 10k Hz에서 0.5v에 못미치는 것을 알 수 있다. filter에서 입력 전압의 50%에 못 미치는 것은 통과되지 않았다고 간주되기 때문에 이 회로의 입력 전압은 1 volt 이므로 0.5 volt를 넘기지 못한 10k Hz는 잘 filtering 되었다고 해석할 수 있다.

6. 결과 검토, 분석 및 결론

EXAMPLE #1의 회로는 pspice를 동작시키는 방법을 알아보고, 회로에서 센서들이 어떻게 동작하는지, 또 각 센서들의 민감도를 측정하였다. EXAMPLE #2에서는 non-inverting 증폭기를 만들고 voltage gain, input voltage와 output voltage 간 phase difference를 확인해 보았다. 또 Vsin의 frequency를 바꾸어 결과를 해석해보았다. EXAMPLE #3은 high pass filter로, 회로의 gain, magnitude(dB scale), phase, 3dB cut-off frequency, bandwidth, roll-off rate을 알아보았다. EXAMPLE #4는 Notch filter로, 회로의 gain, magnitude(dB scale), phase에 대해 알아보았다. EXAMPLE #5에서는 RC filter를 구성하고 FFT을 시행했다. R값과 C값을 조절하여 특정 주파수가 filtering되지 않도록 하는 과정을 겪었다.

7. 배운 점 및 느낀 점

Pspice와 OrCAD에 대해 처음 접해보았고, OP AMP나 필터, cutt-off 주파수, bandwidth, roll-off rate 등에 대해 잘 모르는 상태에서 예제의 회로들과 simulation 결과 그래프들을 해석하려다 보니 많은 노력이 필요했다. 관련 배경지식이 얇다 보니 각 회로를 해석하기 위해 많은 자료 조사 과정을 거쳤는데, 그 과정에서 새롭게 알게 된 것도 많고 내가 어느 부분에서 부족한지 알게 되었다. 또, 앞으로 회로에 대해 배우게 될 때 어떤 것을 중점적으로 공부해야 할지 감을 익힌 것 같다. 그리고 여러 회로의 구성을 설계해보면서, 처음엔 OrCAD 사용 방법이 미숙했지만 점점 유연하고 빠르게 프로그램을 작동시킬 줄 아는 나를 발견하게 되었다. 앞으로의 생체의공실험 과목에서의 OrCAD 사용 시, 혹은 응용전자회로 실험 등 다른 과목에서도 이 프로그램을 유용하게 잘 사용할 수 있을 것 같다.

8. 참고 문헌

- [네이버 지식백과] Or 캐드 [OrCAD] (컴퓨터인터넷IT용어대사전, 2011. 1. 20., 전산용어사전편찬위원회)
- [네이버 지식백과] 회로 [Circuit] (물리학백과)
- [네이버 지식백과] 전압원 [voltage generator, 電壓源] (전자용어사전, 1995. 3. 1., 월간전자기술 편집위원회)
- [네이버 지식백과] 축전기 [capacitor/condenser] (두산백과)
- [네이버 지식백과] 반전 증폭기 [inverting amplifier, 反轉增幅器-] (전기용어사전, 2011. 1. 10., 김동희, 유도현, 육재호, 윤만수, 이상희, 임경범, 정해상)
- [네이버 지식백과] 비반전 증폭기 [non-inverting amplifier, 非反轉增幅器] (전기용어사전, 2011. 1. 10., 김동희, 유도현, 육재호, 윤만수, 이상희, 임경범, 정해상)
- [네이버 지식백과] 노치 필터 [Notch Filter] (IT용어사전, 한국정보통신기술협회)
- [네이버 지식백과] 푸리에 변환 (수학백과, 2015.5)
- [네이버 지식백과] 이득 대역폭곱 [gain-bandwidth product, 利得帶域幅-] (전자용어사전, 1995. 3. 1., 월간전자기술 편집위원회)
- <http://cad.knu.ac.kr/micro/opamp/op-detail.html>
- <https://cafe.naver.com/carroty/198575>
- https://www.experimentalistsanonymous.com/ve3wwg/doku.php?id=rc_simple_filter
- <http://sim.okawa-denshi.jp/en/OPseikiHikeisan.htm>