
Final project

Strain Gauge Measurement Circuit

- **수강과목: 제어회로 실험**
- **분반: 02분반**
- **개설학과: 기계제어공학부**
- **담당교수: 김영근교수님**
- **기계제어공학부 21600372 송윤경**

[Index]

I . Introduction

I -1. Purpose of the project

I -2. Part List

II. Design Process

II-1. Part 1: Wheatstone Design

a) Strain Gauge

b) Voltage Divider

c) Wheatstone Bridge

II-2. Part 2: Instrumentation Amplifier

II-3. Part 3: Instrumentation Amplifier

III. Experimental Result and Analysis

III-1. Strain Gauge Total Circuit

III-2. Experimental Result and Analysis

IV. Conclusion

<Appendix>

I . Introduction

I -1. Purpose of the project

이번 프로젝트를 통해서 Strain Gauge의 원리와 물리적인 사용법을 이해하고 Strain Gauge의 내부 회로를 디자인 한다. Strain Gauge Circuit은 Wheatstone Design, Instrumentation Amplifier, Instrumentation Amplifier로 내부 회로를 구성하며 이를 적용하여 디자인하기 위해 위와 같은 각각의 파트들의 이론을 이해하고 결과적으로 실험에 적용하여 Strain Gauge의 내부 회로를 디자인 한다. 그리고 실험을 통해 이론 값과 실험 값을 비교하고 그 원인을 알아 본다.

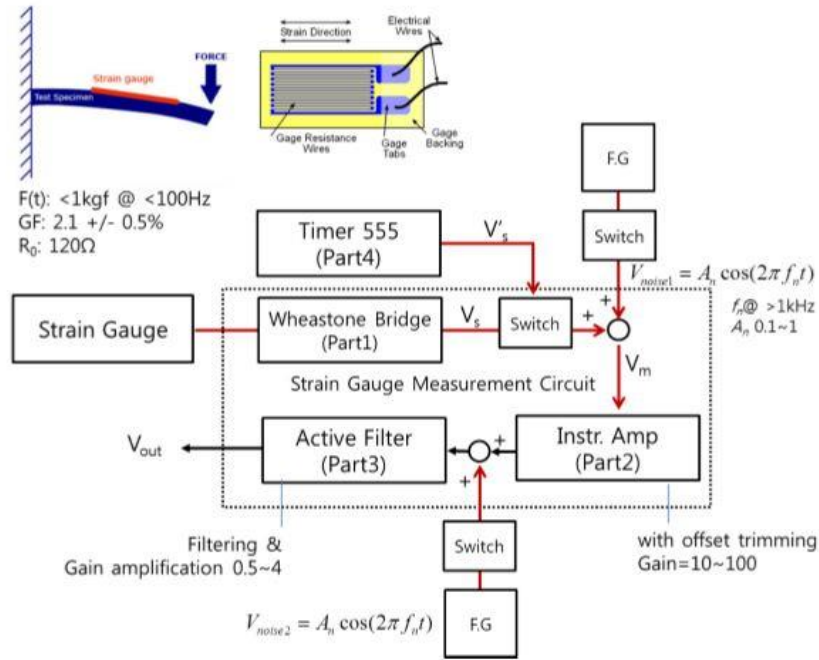
I -2. Part List

Parts	Specification	Quantity	Measured	P.R.E	Validation check
Op-amp	UA741	7	-	-	-
Potentiometer	5[k Ω]	3	-	-	-
	200[Ω]	3	-	-	-
Resistor	330[Ω]	1	329[Ω]	-0.30%	0
	1[k Ω]	16	0.996[k Ω] x 3	-0.40%	0
			0.998[k Ω] x 2	-0.20%	0
			0.999[k Ω] x 4	-0.10%	0
			1[k Ω] x 4	0%	0
			1.002[k Ω] x 3	0.20%	0
Capacitor	0.47[μ F]	1	-	-	-
Switch	KSP04H	1	-	-	-

< Table 1. Part List >

II. Design Process

이번 프로젝트를 통해서 디자인할 Strain Gauge의 내부회로는 다음 그림과 같다. Figure 1의 조건을 모두 만족시키는 회로를 디자인하는 과정을 설명한다.

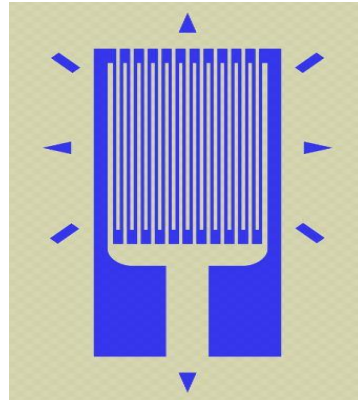


< Figure 1. Purpose of Strain Gauge Circuit >

II-1. Part 1: Wheatstone Design

a) Strain Gauge

Strain Gauge은 어떤 개체의 변형을 측정하는 장치로, 가장 일반적인 유형은 1938년에 Edward E. Simmons 와 Arthur C. Ruge가 발명하였다. 이 Strain Gauge은 금속 호일로 지지되는 절연에 유연한 판으로 이루어져 있다. Strain Gauge를 측정하고자 하는 물체에 부착하여 그 물체가 변형되면 부착된 호일이 같이 변형되며 전기저항에 변화가 생긴다.



< Figure 2. Strain Gauge >

Strain Gauge는 전기 전도도에 대한 기하학적 구조에 의존하지 않는다는 이점을 가진다. Strain Gauge가 늘어나면 전기 저항의 간격이 좁아지고 길어져 저항이 증가된다. 이 때, 전기 전도체가 끊어지거나 변형되지 않도록 해야 한다. 또한 반대로 압축시키면 전기 저항의 간격이 넓어지고 짧아져서 저항이 감소된다. 이렇게 Strain Gauge의 저항의 변화로 물체의 변화의 양을 추론할 수 있다.

Strain Gauge의 Gauge Factor는 기계적 스트레인에 대한 전기저항의 상대적 변화 비율을 뜻하며 다음과 같이 정의 된다. (이 때, ΔR 는 변형에 의한 저항의 변화를 나타내고 R_G 는 변형되기 전의 저항 값을 나타내며 ϵ 는 스트레인을 나타낸다.)

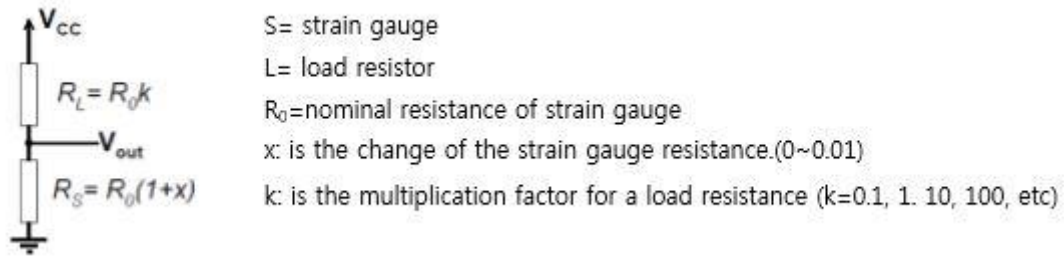
$$\text{Gauge Factor(GF)} = \frac{\Delta R / R_G}{\epsilon}$$

Strain Gauge는 온도의 변화에 큰 영향을 받는다. 물체는 열에 의해 팽창되어 크기가 변하고 이것이 센서에서 변형으로 감지되어 Strain Gauge의 저항이 변하게 된다. 위에서 정의된 Strain Gauge는 Gauge Factor는 온도에 영향이 없는 경우 저항의 변화에 대한 것이다. 실제로, 온도가 변하는 경우에는 다음과 같이 정의 된다. (이 때, α 는 온도 계수이고 θ 는 온도 변화이다.)

$$\frac{\Delta R}{R_G} = \text{GF} \epsilon + \alpha \theta$$

Strain Gauge의 연결은 Wheatstone Bridge에서 각각 상단, 중단, 하단에 연결한다. 그 이유는 이러한 연결 방법이 wire가 가진 저항을 막아주기 때문이다. 따라서 이렇게 하지 않으면 정확한 값을 판독하는 데에 영향을 미친다. 또 다른 가능성은 각각 상단, 중단, 하단을 나타내는 것일 수도 있다. wire사이의 저항을 측정해보면 쉽게 판단할 수 있는데 즉 두 개의 wire의 저항의 차이가 존재하지 않을 수도 있다. 그래서 Strain Gauge를 잘 판단한 후에 회로에 연결해야 한다.

b) Voltage Divider (전압 분배기)



< Figure 3. Voltage Divider >

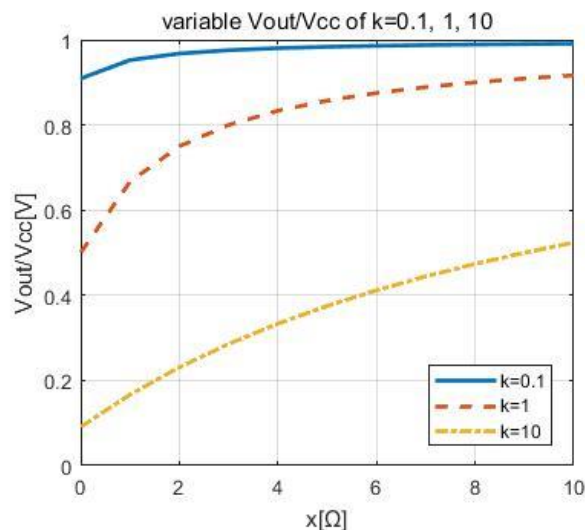
저항의 변화는 간단한 Voltage Divider를 통해서도 확인할 수 있는데 위의 Figure 3와 같은 회로로 해석해 볼 수 있다. 위의 회로에서 V_{out} 을 전압분배에 따라 계산하여 V_{cc} , x , k 로 나타내면 다음과 같은 식이 도출된다.

$$V_{out} = \frac{R_S}{R_L + R_S} V_{cc} = \frac{R_0(1+x)}{kR_0 + R_0(1+x)} V_{cc}$$

$$V_{out} = \frac{(1+x)}{k + (1+x)} V_{cc}$$

이러한 방법으로 미세한 x 의 변화를 전압의 변화를 통해 확인 할 수 있는 것이다. x 는 Strain gauge를 통해 입력 받는 값이다. 그렇다면 k 에 따라서 V_{out} 의 결과가 달라지게 된다. 위의 식을 전달 함수로 바꾸면 다음과 같다.

$$\frac{V_{out}}{V_{cc}} = \frac{(1+x)}{k + (1+x)}$$



< Figure 4. MATLAB Graph of Voltage Divider According to k >

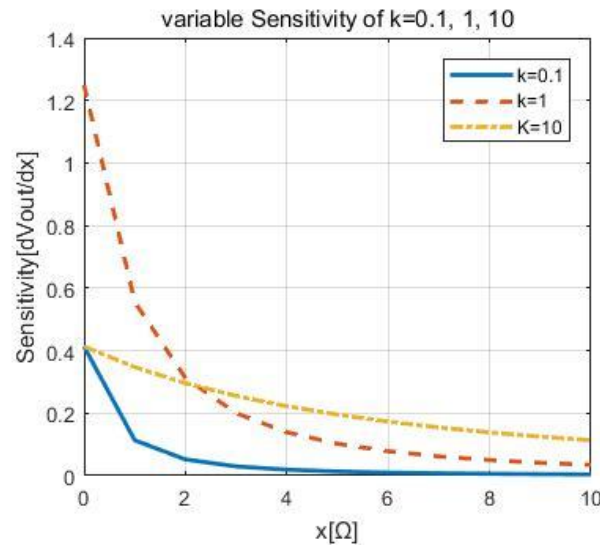
위의 Figure 4는 k 값에 각각 0.1, 1, 10을 대입하여 그래프로 나타낸 것이다. x 의 값이 무한대로 커질수록 k 의 값과 상관없이 1에 수렴한다. 하지만 Strain gauge에서 측정되는 저항은 매우 작은 값으로 k 값에 따른 V_{out}/V_{cc} 값의 차이가 크게 나타난다. 그래프를 통해 k 의 값이 클수록 V_{out}/V_{cc} 의 값이 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

만약 R_L , R_S 이 제거가 된다면 저항이 존재하지 않으므로 소자 양단에 걸리는 전압 역시 없다. 따라서 같은 node에서는 전압이 같으므로 V_{out} 은 항상 5[V]가 출력될 것이다.

민감도($S = dV_{out}/dx$)는 측정된 신호의 작은 변화에 의한 output 신호의 변화량을 나타내는 지표이다. 민감도를 계산해 보면 다음과 같은 식이 도출된다.

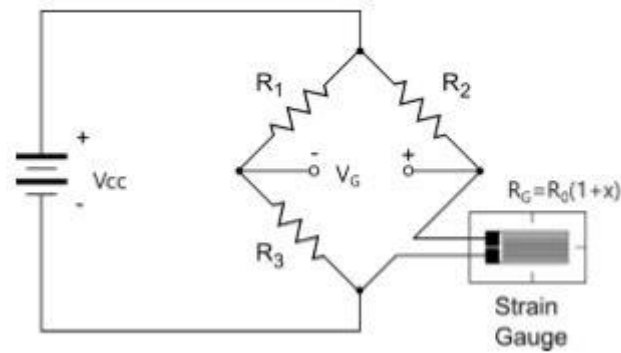
$$S = \frac{dV_{out}}{dx} = \frac{k}{(k + (1 + x))^2} V_{cc}$$

이를 V_{cc} 가 5[V]로 가정하고 (실험에서 5V regulator를 사용하기 때문) x 의 변화에 따른 민감도 변화를 그래프로 나타내면 아래와 같다. 그래프를 살펴보면 x 가 무한대로 갈수록 0에 수렴하고 k 값이 클수록, 혹은 작을수록 민감도가 커지고 작아지는 것이 아니라 다음 세 경우 중에는 k 가 1일 때 민감도가 가장 크다고 나타난다. 따라서 작은 신호변화에도 민감하게 반응하게 하기 위해서는 k 가 1일 때, 즉 $R_L = R_S$ 가 되도록 디자인 하는 것이 좋다.



< Figure 5. MATLAB Graph of Sensitivity V_{out} According to k >

c) Wheatstone Bridge



< Figure 6. Wheatstone bridge with Strain gauge Circuit >

Wheatstone Bridge 회로는 전압 공급단자와 그라운드 사이에 연결된 저항의 직렬-병렬 배열로 평행일 때 두 개의 병렬 사이의 전압 차이를 측정한다. 간단한 방법으로 저항을 측정하지만 매우 낮은 값의 저항을 측정할 수 있는 것이 Wheatstone Bridge의 장점이다. Wheatstone Bridge와 Op-amp를 사용하여 회로를 구성하여 다양한 분야에서 적용되고 있다.

Wheatstone Bridge의 V_G 를 null mode로 만들기 위해서는 위에서 언급한 Voltage Divider를 적용해야 하는데 R_3 와 R_G 에 걸리는 전압은 각각 다음과 같다.

$$V_3 = \frac{R_3}{R_1 + R_3} V_{cc}, \quad V_{strain\ gauge} = \frac{R_G}{R_2 + R_G} V_{cc}$$

$$V_G = V_{strain\ gauge} - V_3 = \frac{R_G}{R_2 + R_G} V_{cc} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} V_{cc}$$

V_G 가 0이 되기 위해서는 그라운드로부터 연결된 R_3 와 R_G 가 같아야 하므로 $R_1 = R_2$, $R_3 = R_G$ 인 경우에 null mode가 된다.

평형 상태일 때, ratio k는 다음과 같으므로

$$k = \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_0}$$

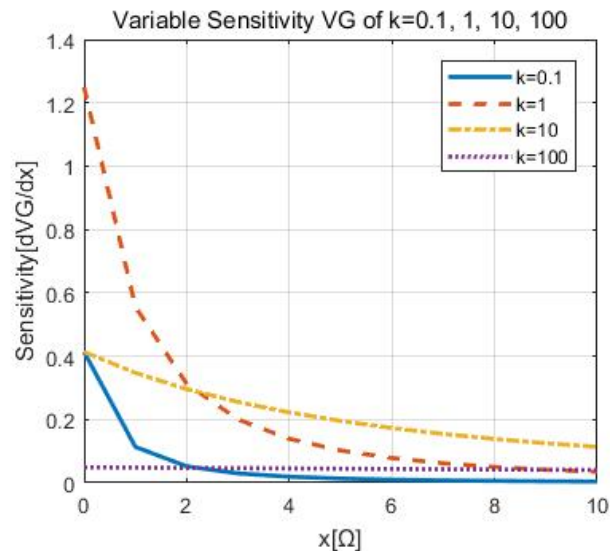
위 식을 사용하여 V_G 를 k와 x로 나타내면 다음과 같다.

$$V_G = \frac{(1+x)}{k + (1+x)} V_{cc} - \frac{1}{k+1} V_{cc}$$

민감도를 알아보기 위해 V_G 를 미분하면 다음과 같은 식이 도출된다.

$$S = \frac{dV_G}{dx} = \frac{k}{(k + (1+x))^2} V_{cc}$$

이 역시 그래프로 나타내면 아래와 같다. 이번에도 위의 Voltage Divider의 민감도와 마찬가지로 x 가 무한대로 가면 민감도는 0에 수렴하고 k 가 1일 때의 민감도가 가장 크다. 따라서 민감도를 증가시키기 위해서는 k 값이 1에 가까워야 한다는 것을 알 수 있었다.

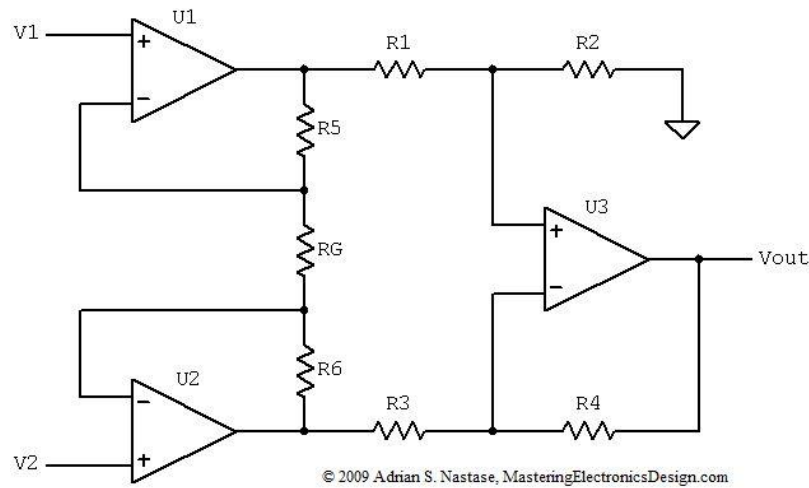


< Figure 7. MATLAB Graph of Sensitivity V_G According to k >

Wheatstone Bridge에서 민감도를 높이기 위해선 k 가 1이 되도록 저항 값을 설계하는 것이 좋다. DMM을 사용하여 Strain Gauge의 저항을 측정한 결과 $120[\Omega]$ 정도로 값이 측정되었다. 따라서 가변저항을 사용하여 $R_1 = R_2 = R_3 = 120[\Omega]$ 으로 회로를 디자인 했다. ($V_{CC} = 5[V]$)

II-2. Part 2: Instrumentation Amplifier (계측 증폭기)

Instrumentation Amplifier를 하기 전에, 데이터를 측정하다 보면 물체의 충격이나 진동으로 인해 생기는 원하지 않는 noise로 신호가 오염되는 경우가 많다. noise는 보통 비교적 높은 주파수 영역인 경우가 많은데 이를 확실하게 눈으로 알아보기 위해서 adder circuit을 사용하여 noise를 더해준다. Noise는 크기가 $0.1[V]$, 주파수가 $1[kHz]$ 인 사인파이다.



< Figure 8. Instrumentation Amplifier Circuit >

민감도를 더 끌어올리기 위해 Figure 8과 같은 Instrumentation Amplifier를 설계한다. Instrumentation Amplifier는 buffer Amplifier가 장착된 일종의 Differential Amplifier로 입력 임피던스 정합을 필요로 하지 않아 증폭기 측정 및 테스트 장비에 사용하기 좋다. DC 오프셋이 매우 낮고 gain이 매우 높은 등 다양한 장점이 있어 Instrumentation Amplifier는 정확성과 안정성이 중요한 곳에 많이 쓰인다.

Figure 8과 같은 Instrumentation Amplifier는 가장 일반적인 구성 중 하나로 U1, U2 증폭기의 설계로 피드백 저항 R_5, R_6 및 R_G 를 통해서 전류를 공유한다. 이로 인해 R_G 하나를 변경하여 계측 증폭기의 gain을 변경할 수 있다. 그래서 R_G 에 5[k Ω]까지 변화 가능한 가변저항을 넣어 설계하였다.

공통모드오류를 최소화하고 CMRR(공통 모드 제거 비)을 높이기 위해서는 Differential Amplifier 저항비가 동일해야 한다. 또 입력 바이어스 전류 때문에 오류가 발생하기도 한다. 이론적으로 Op-amp를 분석할 때 입력 전류는 0으로 간주되지만 실제로는 그렇지 않다. 작은 입력전류가 흐르고 저항에 의해 전압으로 변환되어 증폭되어 전송된다. 이를 해결하기 위해서는 다음과 같은 조건으로 저항 값을 설계해야 한다.

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \Rightarrow R_1 = R_3, R_2 = R_4$$

Instrumentation Amplifier의 전달함수는 Super position에 의해 증명될 수 있는데 Differential Amplifier의 원리를 이용하여 풀면 다음과 같다.

$$V_{out1} = \frac{R_2}{R_1} \left(V_1 \left(\frac{R_5}{R_G} \right) + V_1 \left(\frac{R_5}{R_G} \right) \frac{R_6}{R_5 + R_6} \right) = V_1 \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{2R_5}{R_G} \right)$$

$$V_{out2} = -V_2 \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{2R_5}{R_G} \right)$$

$$V_{out} = V_{out1} + V_{out2} = (V_1 - V_2) \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{2R_5}{R_G} \right)$$

R_G 에 가변저항을 사용하여 gain값을 원하는 대로 줄 수 있으므로

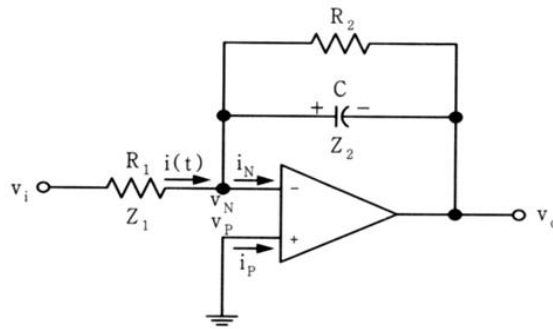
$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 1[k\Omega]$$

으로 저항 값을 설정한다. Gain 값을 10~100배 정도 얻어야 한다. Wheatstone Bridge에서 발생한 input이 10[mV]정도 이므로 10의 gain을 얻기 위해 가변저항의 값을 200[Ω]으로 설정하였다.

확실하게 보기 위해 먼저 설계해 놓 Adder circuit을 통해 noise를 넣어 보면 noise가 발생해 사인파처럼 구불거리던 값이 서로 중첩되면서 DC값처럼 깨끗하게 output이 출력된다. 또한 입력 Op-amp 중 하나에 5[kΩ]의 가변저항 하나를 사용하여 offset trimming을 할 수 있도록 연결하여 준다.

II-3. Part 3: Instrumentation Amplifier

위의 part2와 마찬가지로 데이터를 측정하다 보면 noise로 신호가 오염된다. 이번에도 이를 확실하게 눈으로 알아보기 위해서 adder circuit을 사용하여 noise를 더해준다. Noise는 크기가 0.1[V], 주파수가 1[kHz]인 사인파이다.



< Figure 9. Active Low Pass Filter Circuit >

그리고 난 후 Active Low Pass Filter를 설계하여 noise를 제거하고자 한다. Low Pass Filter의 전달함수는 다음과 같다.

$$H_{LPF}(j\omega) = -\frac{R_2}{R_1} \left(\frac{1}{1 + j\omega R_2 C} \right)$$

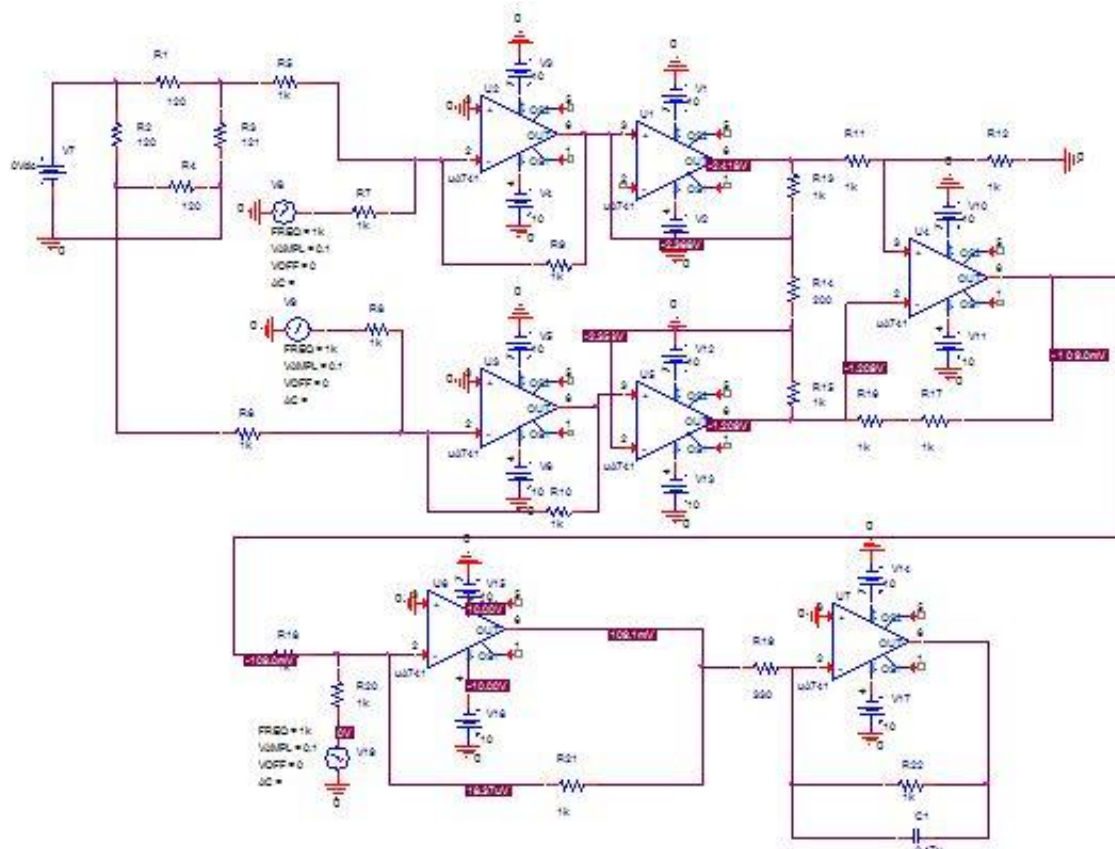
따라서 이때의 Gain과 차단 주파수(f)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Gain = \frac{R_2}{R_1}, \quad f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C} = \frac{1}{2\pi\tau} \text{ [Hz]}$$

설계 목적에 따라 gain이 $\times 0.5$ 에서 $\times 2$ 가 되어야 하고 고 주파수를 차단해야 하므로 $330[\Omega]$ 저항을 선택했다. 이 저항을 사용하면 gain은 $\times 3.03$ 이고 차단주파수는 $338.62[\text{Hz}]$ 이다.

III. Experimental Result and Analysis

III-1. Strain Gauge Total Circuit



< Figure 10. Strain Gauge Total Design Circuit >

III-2. Experimental Result and Analysis

a) Part 1: Wheatstone Design

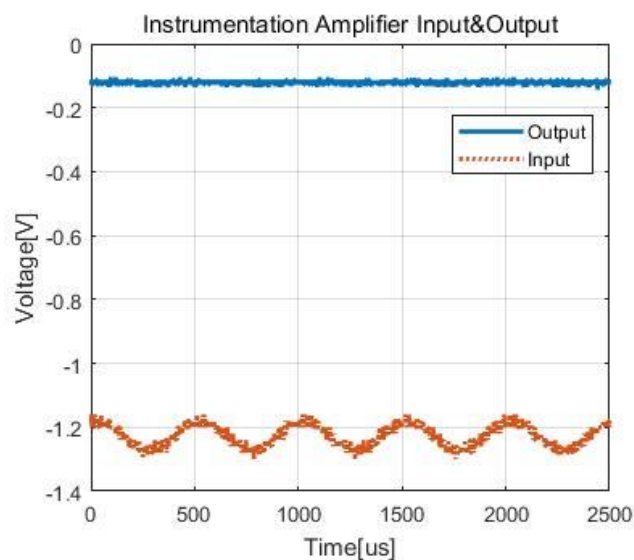
Wheatstone Bridge는 Strain Gauge와 $120[\Omega]$ 으로 맞춰 놓은 가변저항으로 이루어져있기 때문에 실험을 시작하기 전에 최대한 0에 가깝게 맞춰놓고 시작한다. 대체적으로 part1에서는 실험 값과 이론 값이 크게 차이가 생기지 않았다.

Case	Element	Experimental measurement	Theoretical calculation	Simulated value	P.R.E	Validity check
null mode	V_s	2.56[V]	2.5[V]	2.5[V]	2.4%	O
	V_3	2.44[V]	2.5[V]	2.5[V]	-2.4%	
	V_G	0.08[V]	0[V]	0[V]	-	-
Adder1	$V_{noise1-1}$	-2.41[V]	-2.5[V]	-2.5[V]	3.6%	O
	$V_{noise1-2}$	-2.46[V]	-2.5[V]	-2.5[V]	1.6%	

< Table 2. Comparative value of Wheatstone Design >

b) Part 2: Instrumentation Amplifier

Part 2 역시 디자인한 대로 실험한 결과 이론 값과 실제 값의 차이가 크지 않았다. Gain은 10을 얻었고 noise1 역시 제거되어서 DC값과 같은 형태의 output이 출력되었다.



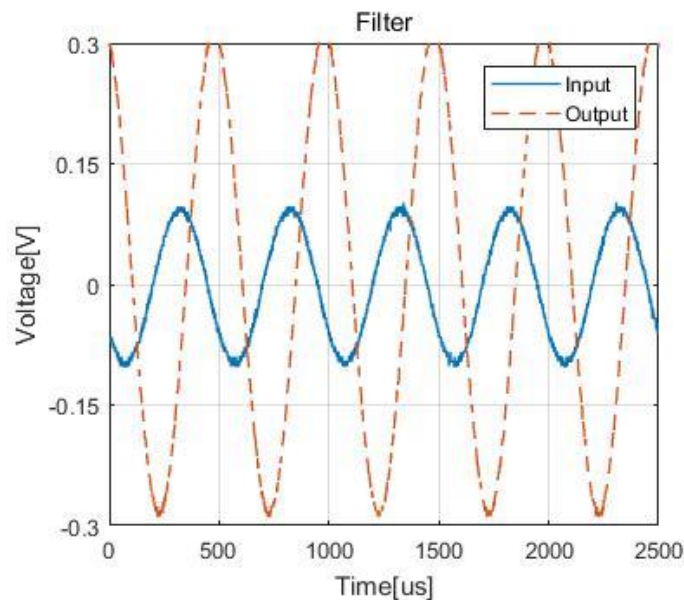
< Figure 10. Experiment value of Instrumentation Amplifier >

Case	Element	Experimental measurement	Theoretical calculation	Simulated value	P.R.E	Validity check
Instrumentation Amplifier	V_{inpit}	-1[mV]	-109[mV]	-109[mV]	-1%	O
	V_{out}	-1.23[mV]	-1.21[mV]	-1.21[mV]	-0.83%	

< Table 3. Comparative value of Instrumentation Amplifier >

c) Part 3: Filter

Filter는 다른 part들에 비해 조금 오차가 있는 편인데 축전기의 사용으로 인한 오차 발생인 것 같다. 하지만 축전기의 오차범위가 크므로 사용 가능한 범위 안에 있다. Filter를 통해서 Gain값을 3.03 정도 얻을 수 있었고 noise2는 확실하게 잡을 수 없었던 것 같다. 여러 차례 필터를 거치면서 noise를 잡는 것이 좋은 것 같다.



< Figure 10. Experiment value of Filter >

Case	Element	Experimental measurement	Theoretical calculation	Simulated value	P.R.E	Validity check
Filter	V_{inpit}	106[mV]	109[mV]	109[mV]	-2.75%	O
	V_{output}	312[mV]	330[mV]	330[mV]	-5.45%	O

< Table 4. Comparative value of Filter >

IV. Conclusion

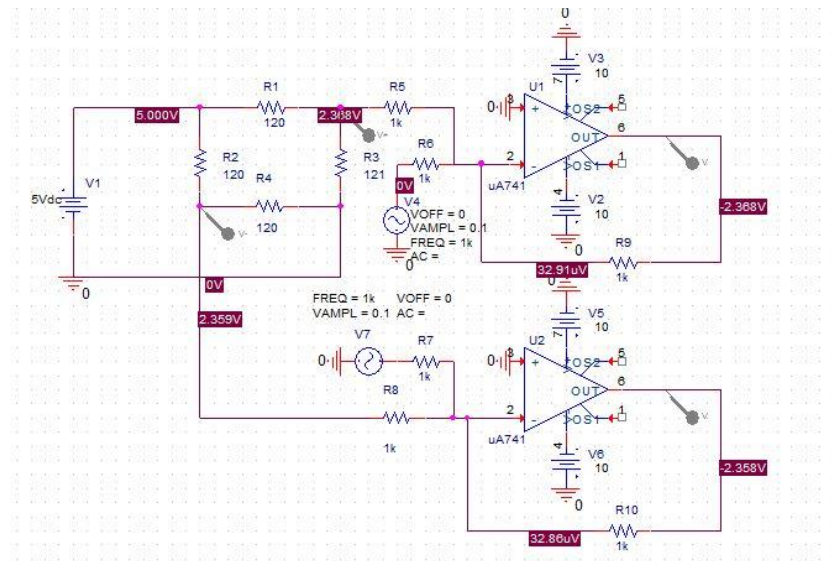
이번 Final Project는 Strain Gauge를 설계하는 것이다. Strain Gauge은 어떤 물체의 변형된 정도를 측정하는 센서로, Project를 통해 Strain Gauge를 이해하고 또 그것을 증폭하고 보존하기 위해 여러 회로들을 구상하고 설계하였다. 그러기 위해 사용된 회로들이 Wheatstone Bridge, Instrument Amplifier, Active Low Pass Filter를 사용하여 Strain Gauge를 완성할 수 있었다.

Wheatstone Bridge는 간단한 방법으로 저항을 측정하지만 매우 낮은 값의 저항을 측정할 수 있다는 장점을 가졌다. 이 회로를 설계하기 위해서는 먼저 voltage divider를 이해하고 전압 분배에 따른 output을 측정한 결과 저항 값은 ' $R_1 = R_2, R_3 = R_G$ ' 이 조건을 만족해야 하고 k 의 값에 따라 그래프를 그려본 결과 가장 민감하게 반응하기 위해서는 k 값을 1로 설정해야 한다는 것을 알 수 있었다.

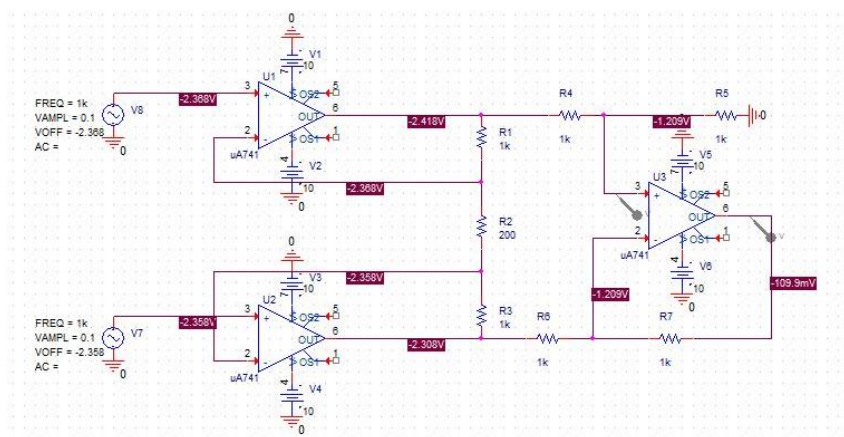
Instrument Amplifier는 DC 오프셋이 매우 낮고 gain이 매우 높은 등 다양한 장점이 있어 정확성과 안정성이 좋다. Strain Gauge 또한 센서이므로 Instrument Amplifier를 통해 증폭시킨다. Instrument Amplifier에서는 저항 값에 따라 gain을 조절 할 수 있는데, R_G 하나만 가변저항으로 연결시켜 놓아도 원하는 input에 따라 gain을 바꿀 수 있다. 또한 Differential Amplifier의 중첩의 원리로 인해서 noise도 제거할 수 있었다.

Noise는 일반적으로 고주파수 영역인 경우가 많다. 이 때, Active Low Pass Filter를 통해서 원하는 회로의 신호만 남겨두고 다른 noise를 제거할 수 하고 R 과 C 값을 조절하여 cutoff frequency를 설정해 특정 주파수를 기준으로 원하는 신호를 남길 수 있었다. 한 학기 동안 제어회로 수업을 통해 배운 것을 적용해보는 시간이었다.

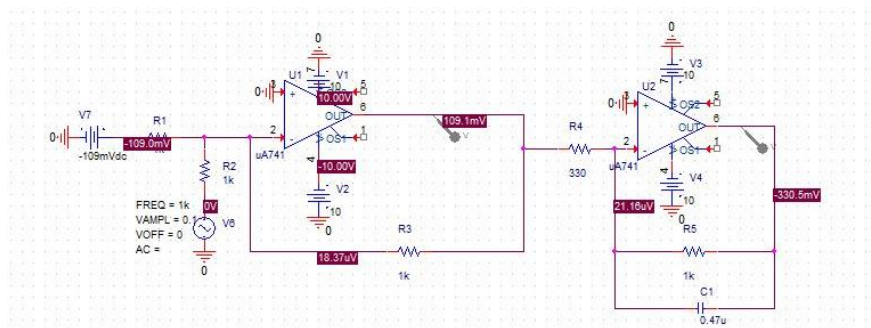
<Appendix>



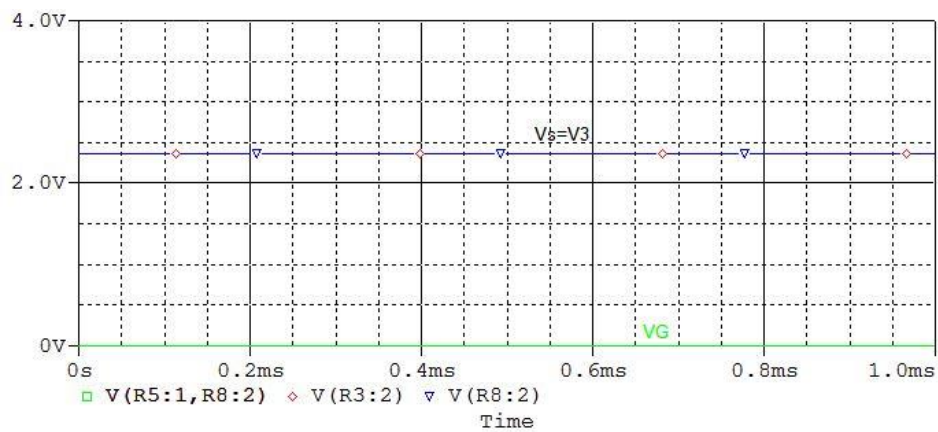
< Figure 12. Wheatstone Bridge and Adder1 pspice Circuit >



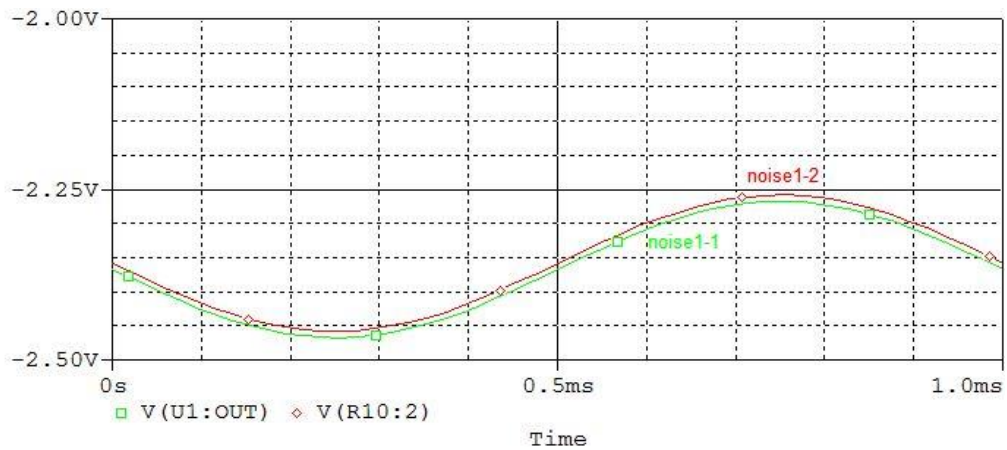
< Figure 13. Instrumentation Amplifier pspice Circuit >



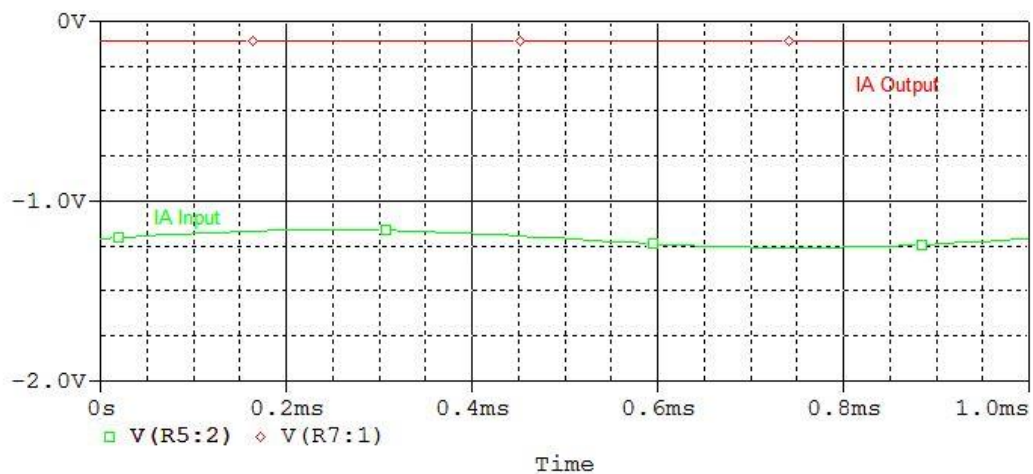
< Figure 14. Adder2 and Filter pspice Circuit >



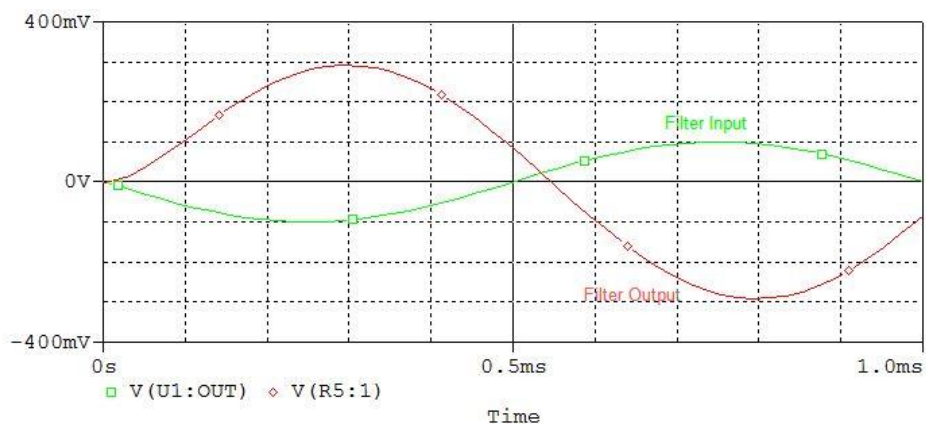
< Figure 15. Wheatstone Bridge null mode pspice Graph >



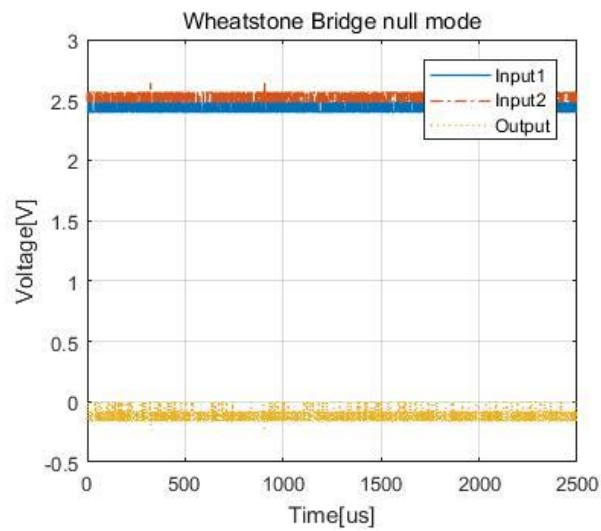
< Figure 16. Adder1 pspice Graph >



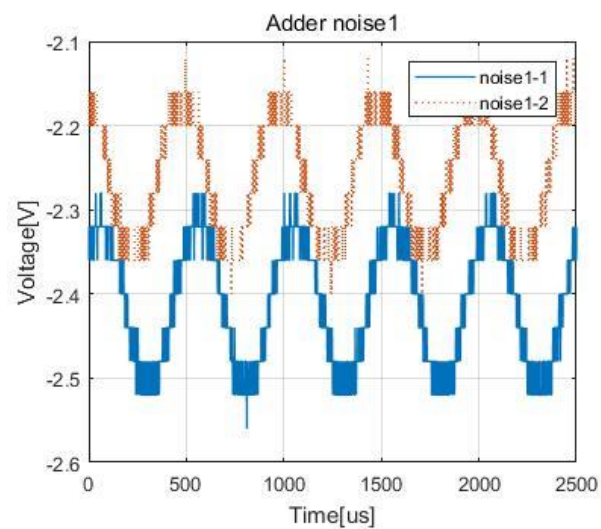
< Figure 17. Instrumentation Amplifier pspice Graph >



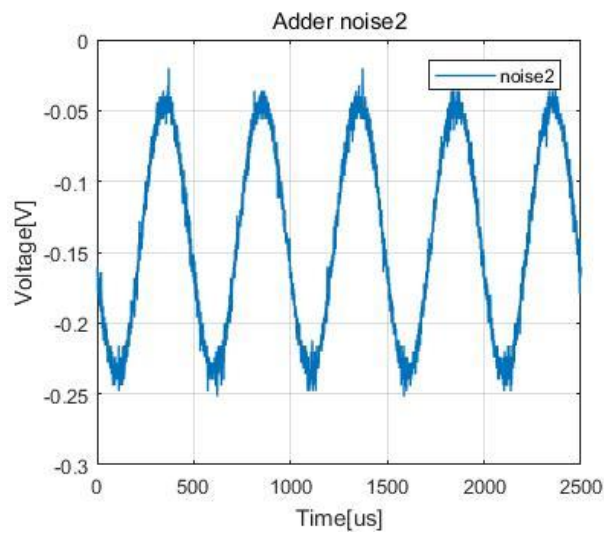
< Figure 18. Filter pspice Graph >



< Figure 19. Wheatstone Bridge null mode MATLAB Graph >



< Figure 20. Adder1 MATLAB Graph >



< Figure 21. Adder2 MATLAB Graph >

Final Project 2017: Strain Gauge Measurement Circuit (Project pdf파일)

[Figure 1. Purpose of Strain Gauge Circuit], [Figure 3. Voltage Divider], [Figure 6. Wheatstone bridge with Strain gauge Circuit]

Wikipedia - https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge

[Figure 2. Strain Gauge]

Mastering electronics design - <https://masteringelectronicsdesign.com/how-to-derive-the-instrumentation-amplifier-transfer-function/>

[Figure 8. Instrumentation Amplifier Circuit]

Lab #11. RC Circuit: Passive and Active Filter

[Figure 9. Active Low Pass Filter Circuit]