

Eq Ckt Maxpower Transfer

생체의공실험 (BME20800)

예비 및 결과 보고서



KYUNG HEE
UNIVERSITY



담당 교수	이상민 교수님
담당 조교	오지현 조교님, 한승주 조교님
제출일	2020. 11. 19. 목.
소속	경희대학교 전자정보대학 생체의공학과
학번	2019103877
이름	이규린

1. 실험 주제

Eq ckt maxpower transfer

2. 이론

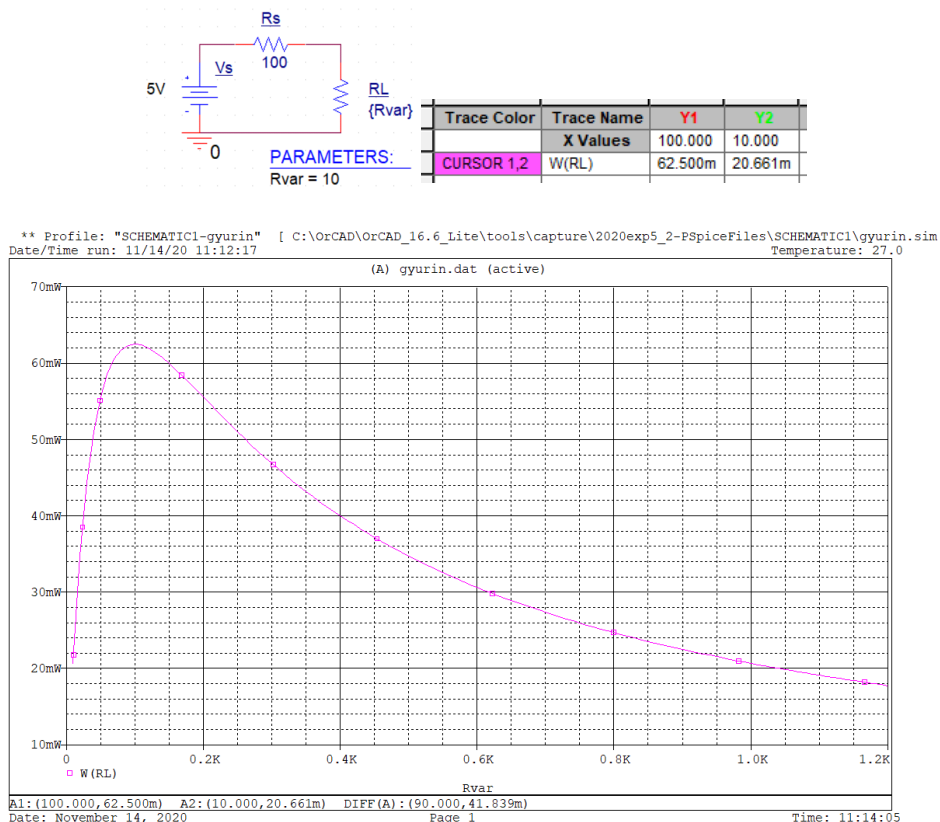
1) independent source

독립 전원은 말 그대로 다른 요소들의 영향을 받지 않는 전원을 의미한다. 즉 그 어느 때라도 일정한 양으로 (혹은 일정한 함수 꼴로) 변하지 않고 전류나 전압을 공급하는 전원이다. 일정한 양으로 전류를 공급해 주는 것이 independent current source, 일정한 양으로 전압을 공급해주는 것이 independent voltage source이다.

2) Primary sweep

Pspice Orcad에서 다음과 같이 PARAMETER를 설정해서 원하는 값을 바꾸어가며 simulation 창을 띄울 수 있게 해주는 유용한 기능이 있다. 예컨대 R을 바꾸어 가며 simulation하고 싶을 때에는 원하는 그 저항 소자의 value를 {Rvar}라고 입력을 해준 뒤 PARAM 소자를 주변에 하나 두어서 Rvar가 parameter라는 것을 입력을 해주고, simulation 설정 창에서 Rvar의 list를 적어주면 된다, 혹은 첫 값과 끝 값을 입력해 linear한 value로 설정해주어도 된다. Rvar 외에도 Vvar 등 다른 여러 소자의 값을 바꾸어줘서 실험 simulation에 유용히 쓸 수 있다.

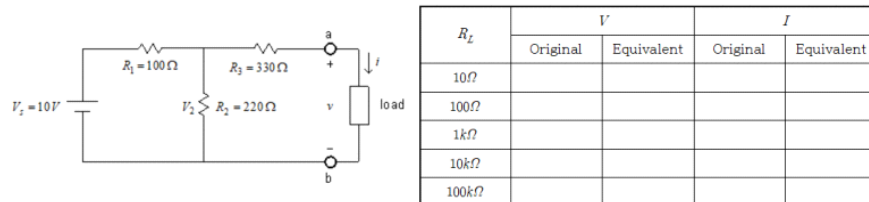
다음 예시는 RL 소자의 value를 파라미터로 하는 것을 연습해보는 예제이다. Rvar를 linear한 값으로 설정을 해주고 가로축을 Rvar, 세로축을 W_{RL}로 하는 그래프를 그려주었더니 Rvar=100 (Ω)일 때 그것의 W(RL) 값이 62.5 mW로 가장 높게 측정되었음을 simulation을 통해 확인할 수 있다. 이는 테브닌 등가회로와 같은 모양의 회로이므로 $R_s=R_L$ 일 때 최대 전력이라는 것을 orcad simulation을 통해 확인할 수 있다.



3. 실험 방법

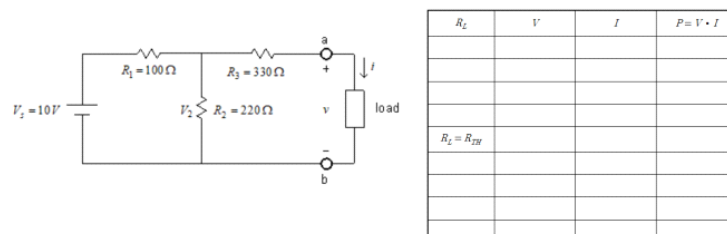
가. EXPERIMENT #1

- Thevenin equivalent circuit
- Configure the circuit
- While changing the load value as shown in the table, measure the voltage and current of the load using a multimeter
- Measure the voltage (VOC) when terminal a-b is open
- Measure the current (ISC) when terminal a-b is shorted
- Calculate Thevenin resistance (RTh-1)
- Replace the voltage source with a short circuit, and measure the resistance (RTh-2) with the multimeter
- Compare RTh-1 and RTh-2
- Consider that a practical DC power supply has a certain amount of internal resistance
- From the above result, configure the Thevenin equivalent circuit
- Use a variable resistor to set RTh accurately
- While changing the load of Thevenin equivalent circuit as shown in the table, measure the voltage and current of the load using a multimeter
- Analyze the results
- Verify that the circuit in the schematic and Thevenin equivalent circuit are equivalent



나. EXPERIMENT #2

- Maximum power transfer theorem
- Configure the circuit
- While changing R_L of the circuit, measure V and I
- Choose your own R_L values, considering RTh in Exp. #1
- Calculate the power delivered to R_L by $P=VI$
- Using the results in the table, draw a graph of the power delivered to R_L and find R_L -max where the maximum power is transferred
- Compare the value obtained in the above process with the value of RTh obtained in Experiment #1



다. Discussion

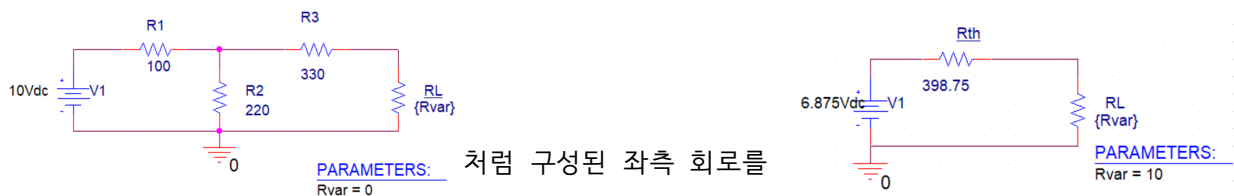
- Equivalent circuits and maximum power transfer theorem
- Based on the circuit theory from the preliminary report, analyze the experiment results
- If the results are inconsistent with what you expected, discuss about the reason and analyze them
- Explain the characteristics of Thevenin equivalent circuit based on the experiments performed
- Explain the 'maximum power transfer theorem' theoretically based on the experiments performed

4. 실험 과정, 결과 및 해석

가. EXPERIMENT #1

1) 회로 분석

이 실험은 저항들과 직류전원으로 이루어진 회로(좌측)와 Load 저항 하나로 구성된 회로(우측)이다. 로드 저항의 값이 바뀔에 따라 당연히 이 저항에 인가되는 V 값이 달라지는데, 이 값을 찾기 위해 좌측의 회로를 간단하게 바꾸는 것이 테브닌 등가회로 등의 방식이다. 예컨대, 우리는



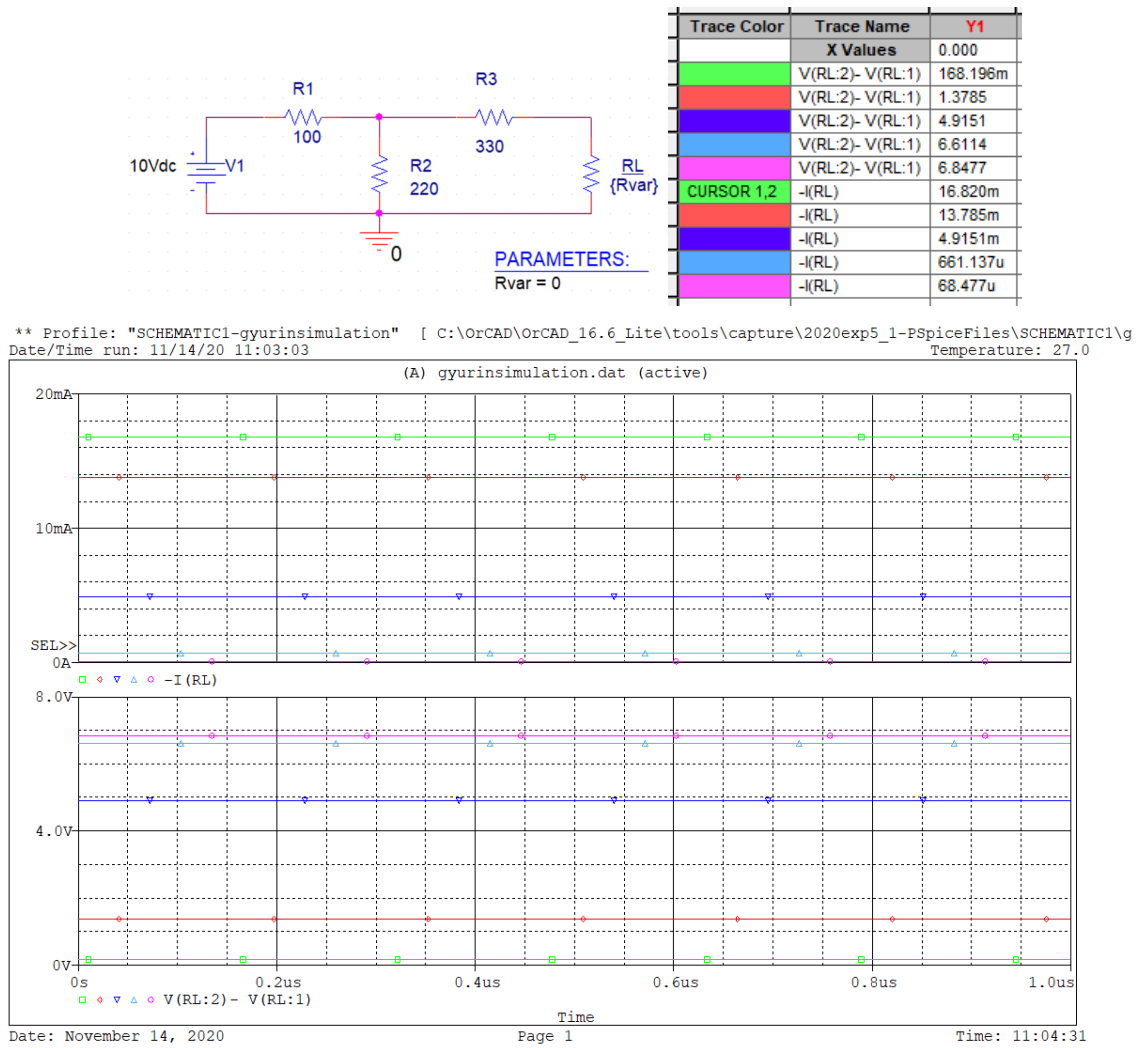
이렇게 V_{th} 와 R_{th} 로 이루어진 간단한 회로로 바꿀 수 있다.

참고로, thevenin 등가 회로를 만들어보기 위해 R_{th} 와 V_{th} 를 구하는 방법은 다음과 같다. R_{th} 를 구하기 위해서는 전압원을 단락시켜주고, $R1$, $R2$, $R3$ 를 하나의 저항값으로 표현해주면 되는데, 우선 $R1$ 과 $R2$ 가 병렬이고, 이게 $R3$ 와 직렬이므로 $R_{th} = (R1 || R2) + R3$ 이다. 즉, $R_{th} = \{ 1 / ((1/100) + (1/220)) \} + 330 = 398.75 [\Omega]$ 이다. 그리고 V_{th} 를 구하기 위해서는 로드 저항에 걸리는 전압이기 때문에, 또 로드 저항부분은 개방되어있다고 가정하고 구하기 때문에 10Vdc 전압원, $R1$, $R2$ 로만 이루어진 회로가 남게 된다. 여기서 $R1$ 과 $R2$ 사이의 node에서 KCL 법칙으로 구해보면 $(10 - V_{th})/R1 = V_{th}/R2$, $2200 - 220V_{th} = 100V_{th}$, $V_{th} = 6.875[V]$ 이다.

이 실험은 이렇게 기존 좌측 회로처럼 회로를 꾸미고 R_L 이 바뀔에 따라 R_L 에 인가되는 전압이 얼마인지 측정하고, 또 테브닌 등가 회로를 꾸미고 R_L 이 바뀔에 따라 이 R_L 에 인가되는 전압이 얼마인지 측정을 해서 두 V_{RL} 값을 비교해보는 것이다. 전압값과 저항 값이 잘 계산된 테브닌 등가회로는 기존의 회로에서의 V_{RL} 과 새로운 V_{RL} 이 같은 값이다.

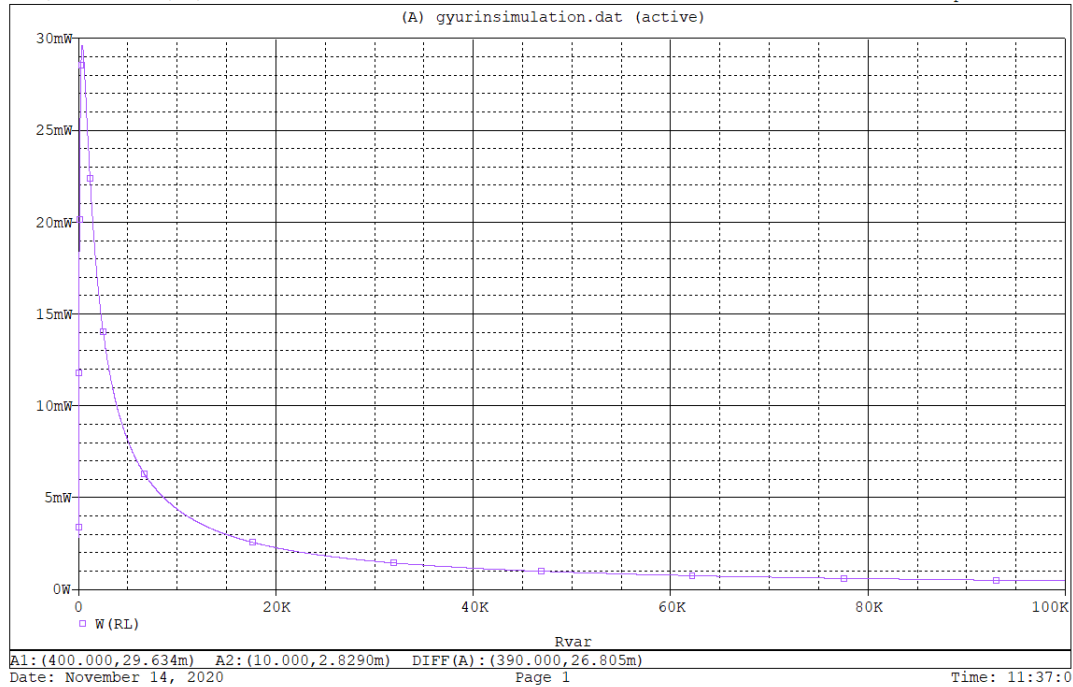
2) Pspice 회로 구성 및 simulation

① 기존 회로에서 V_{RL} , I_{RL} 측정. $Rvar$ 는 list of 10(연두), 100(다홍), 1k(보라), 10k(하늘), 100k(분홍)이다.



② 기존 회로에서 W_{RL} 측정; RL의 범위는 10~100K

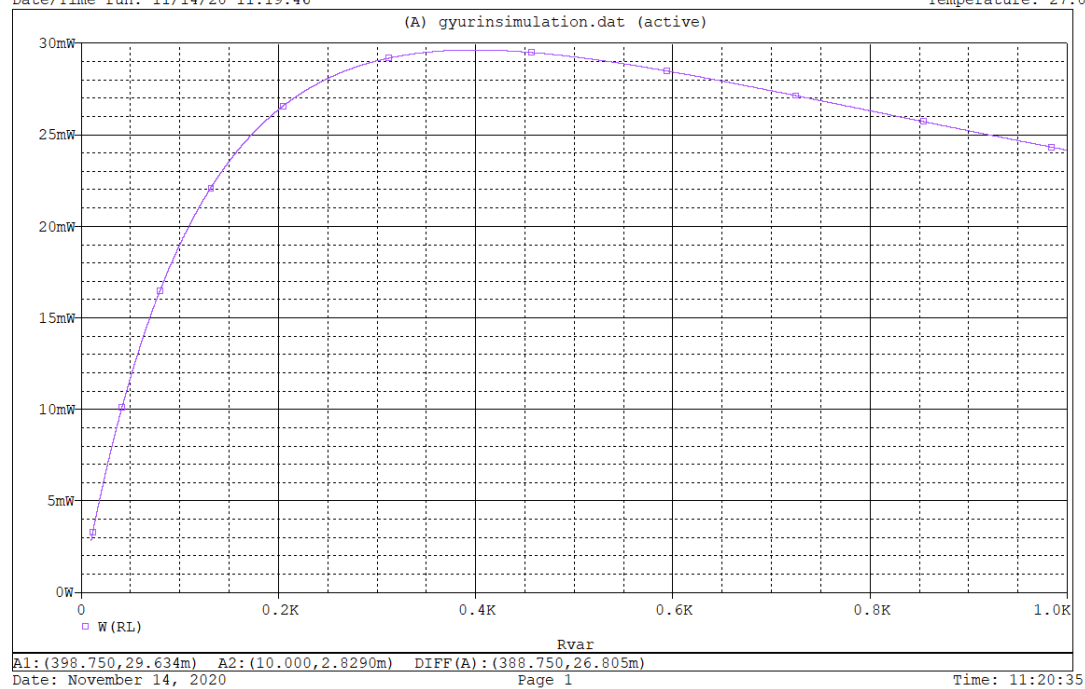
** Profile: "SCHEMATIC1-gyurinsimulation" [C:\OrCAD\OrCAD_16.6_Lite\tools\capture\2020exp5_1-PSpiceFiles\SCHEMATIC1\g
Date/Time run: 11/14/20 11:36:48 Temperature: 27.0



Trace Color	Trace Name	Y1	Y2
	X Values	400.000	10.000
CURSOR 1,2	W(RL)	29.634m	2.8290m

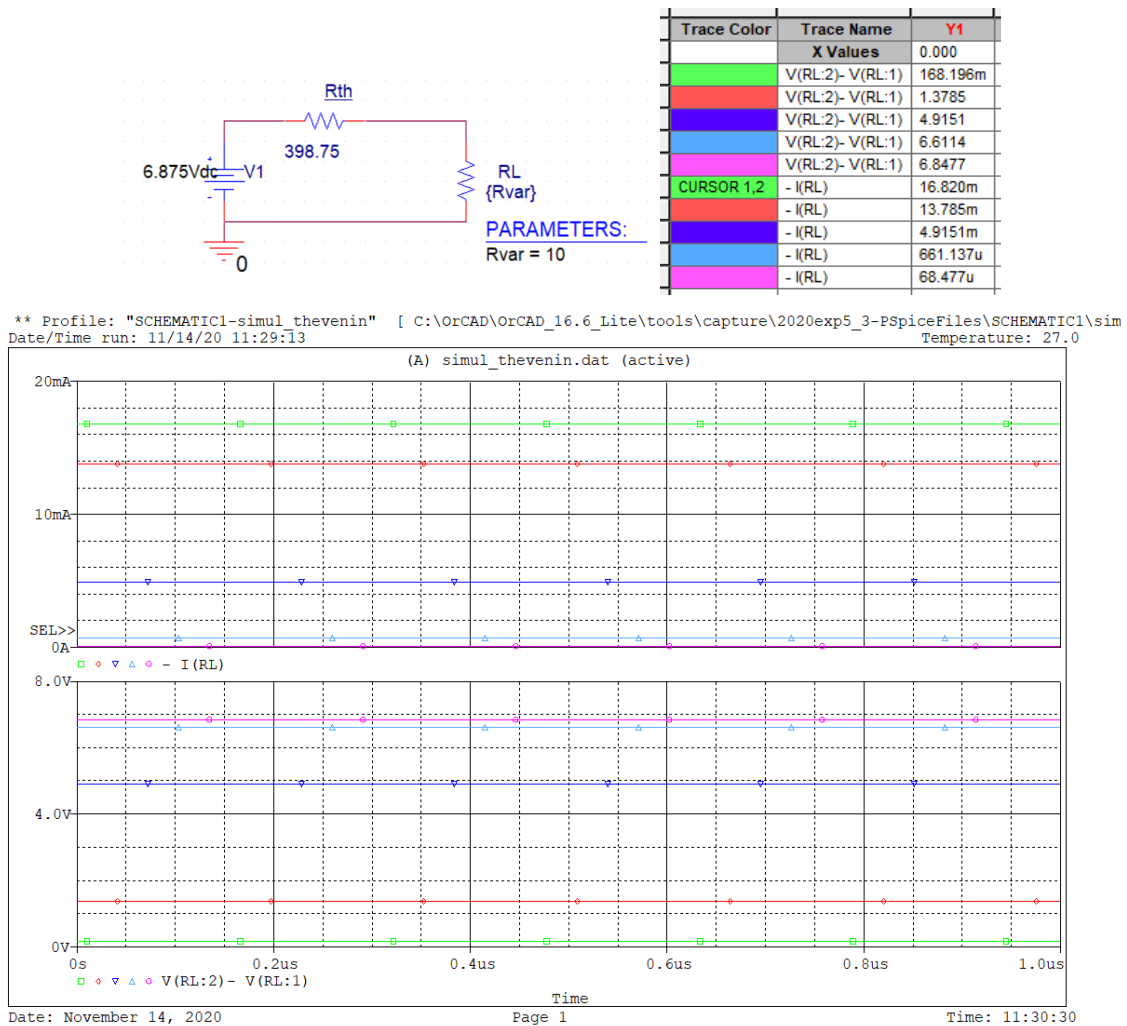
③ 기존 회로에서 W_{RL} 측정; RL의 범위는 10~1K

** Profile: "SCHEMATIC1-gyurinsimulation" [C:\OrCAD\OrCAD_16.6_Lite\tools\capture\2020exp5_1-PSpiceFiles\SCHEMATIC1\g
Date/Time run: 11/14/20 11:19:46 Temperature: 27.0



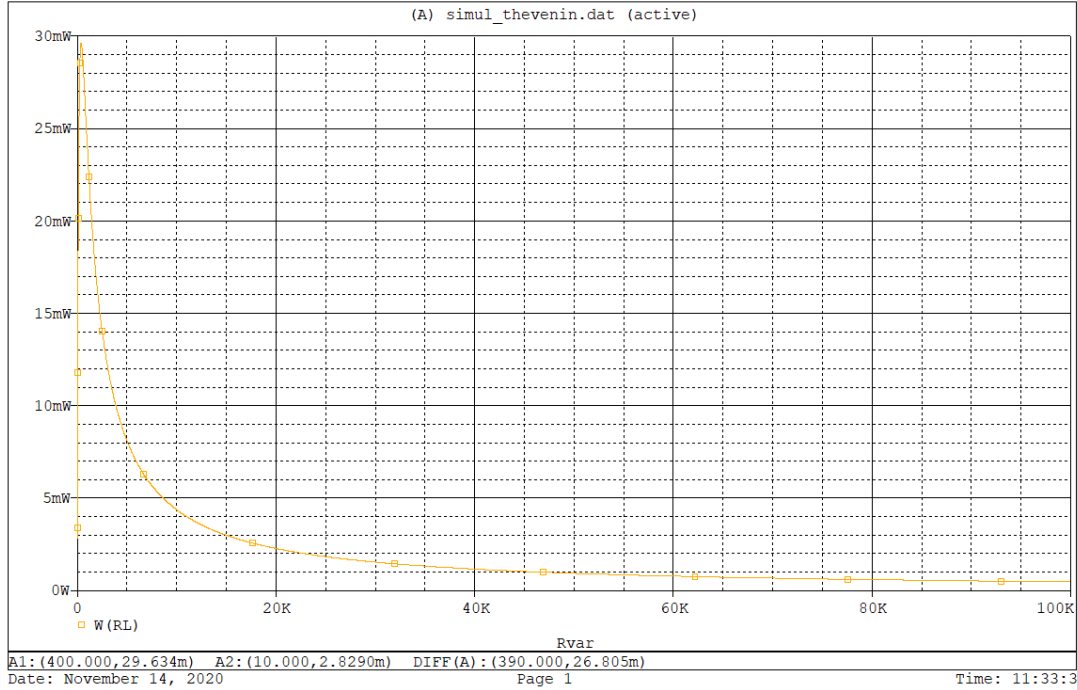
Trace Color	Trace Name	Y1	Y2
	X Values	398.750	10.000
CURSOR 1,2	W(RL)	29.634m	2.8290m

④ 테브닌 등가회로. V_{RL} 과 I_{RL} 측정. Rvar는 list of 10(연두), 100(다홍), 1k(보라), 10k(하늘), 100k(분홍)이다.



⑤ 테브닌 등가회로. W_{RL} 측정; RL의 범위는 10~100K

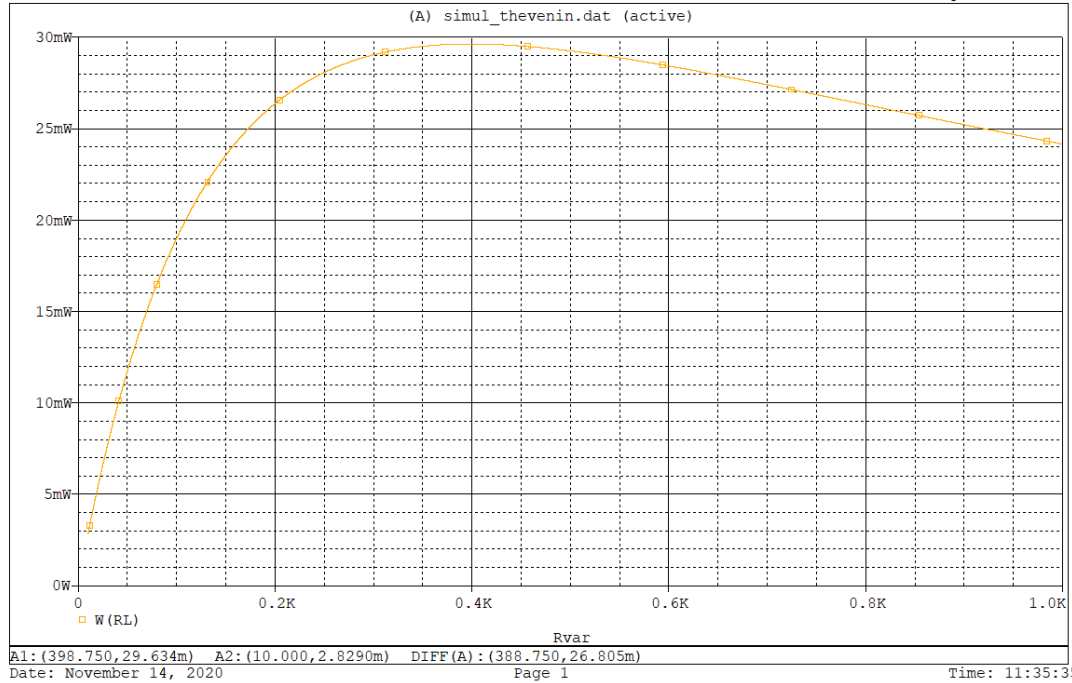
** Profile: "SCHEMATIC1-simul thevenin" [C:\OrCAD\OrCAD_16.6_Lite\tools\capture\2020exp5_3-PSpiceFiles\SCHEMATIC1\sim
Date/Time run: 11/14/20 11:32:42 Temperature: 27.0



Trace Color	Trace Name	Y1	Y2
	X Values	400.000	10.000
CURSOR 1,2	W(RL)	29.634m	2.8290m

⑥ 테브닌 등가회로. W_{RL} 측정; RL의 범위는 10~1K

** Profile: "SCHEMATIC1-simul thevenin" [C:\OrCAD\OrCAD_16.6_Lite\tools\capture\2020exp5_3-PSpiceFiles\SCHEMATIC1\sim
Date/Time run: 11/14/20 11:34:55 Temperature: 27.0



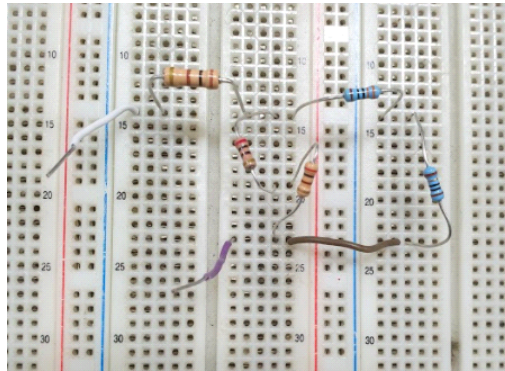
Trace Color	Trace Name	Y1	Y2
	X Values	398.750	10.000
CURSOR 1,2	W(RL)	29.634m	2.8290m

3) 소자 측정

저항 번호	R1	R2	R3	Rth
이론값 (단위 Ω)	100	220	330	398.75
측정값 (단위 Ω)	98.1	216.8	328.9	388.4

저항 번호	R㉑	R㉒	R㉓	R㉔	R㉕
이론값 (단위 Ω)	10	100	1k	10k	100k
측정값 (단위 Ω)	10.2	99.1	0.996	9.98k	99.8k

4) Bread board 회로 구성



5) 이론값

R_L [Ω]		10	100	1k	10k	100k
V[V]	Original (R_ori, V_ori)	0.1628	1.378	4.915	6.611	6.848
	Equivalent (Rth, Vth)	0.1628	1.378	4.915	6.611	6.848
I[mA]	Original	16.82	13.78	4.915	0.6611	0.0684
	Equivalent	16.82	13.78	4.915	0.6611	0.0684

6) 실험값

R_L [Ω]		10.2	99.1	0.996k	9.98k	99.8k
V[V]	Original (R_ori, V_ori)	0.169	1.366	4.890	6.547	6.8
	Measure (Rth, V_ori)	0.251	2.002	7.18	9.62	9.96
	Equivalent (Rth, Vth)	0.173	1.376	4.936	6.614	6.85
I[mA]	Original	16.568	13.784	4.9096	0.656	0.0681
	Equivalent	16.961	13.885	4.9558	0.6627	0.0686

7) 결과 해석

① 실험 결과표 해석

실험값 표에서 Original은 기존 회로(전체 저항 성분은 R_{ori} , V_{source} 는 V_{ori} 일 때)에서 R_L 에 걸리는 전압을 측정해준 것이다. 실험값 표에서 Measure은 기존 회로에서 전체 저항 성분만 단일저항 R_{th} 으로, V_{source} 는 $V_{ori} = 10V$ 로 설정했을 때 R_L 에 걸리는 전압을 측정해준 것이다. 실험값 표에서 Equivalent은 기존 회로의 테브닌 등가회로로서, 저항 성분은 R_{th} 로, V_{source} 는 V_{th} 로 인가해 준 상황에서의 R_L 에 걸리는 전압이다. (Measure과 비교했을 때 Equivalent은 V_{source} 가 10V에서 6.875V로만 바뀐 상황이므로 V_{RL} 도 measure에서 6.875/10을 곱해주면 계산이 된다.) 그리고 Original과 Equivalent에 있는 V_{RL} 값들을 각각의 load 저항값들로 나누어 그 load 저항에 흐르는 I 를 계산해주었다.

② 바꾼 회로가 등가회로인지에 관한 여부

기존 회로에서 R_L 에 걸리는 V 를 측정한 값과 이론적으로 계산한 R_{th} 와 V_{th} 를 적용해 R_L 에 걸리는 V 를 측정한 값이 같으므로 (혹은, 기존 회로에서 R_L 에 흐르는 I 값과 이론적으로 계산한 R_{th} 와 V_{th} 를 적용해 R_L 에 흐르는 I 를 측정한 값이 같으므로) 우리가 이론적으로 계산한 회로는 테브닌 등가회로임을 확인되었다.

③ 오차

$R_L[\Omega]$		10	100	1k	10k	100k
$V[\%]$	Original (R_{ori}, V_{ori})	3.808	0.871	0.509	0.968	0.701
	Equivalent (R_{th}, V_{th})	6.265	0.145	0.427	0.045	0.029
$I[\%]$	Original	1.498	0.029	0.110	0.771	0.439
	Equivalent	0.838	0.762	0.830	0.242	0.292

이론값 표와 실험값 표의 값들을 이론값을 기준으로 오차율을 계산해본 결과 오차율이 대개는 1% 미만의 값이고 R_L 이 10 Ω 일 때의 V 값은 최대 6% 정도까지로 오차율이 나타났다. 이러한 작은 오차는 저항값의 부정확함, 아날로그인 회로 안에 있는 여러 소자들 자체의 저항들 등이 있다. 약간의 오차가 있기는 하지만 결과 해석에 무리가 없고, 테브닌 등가회로가 잘 구성되었음을 확인할 수 있다.

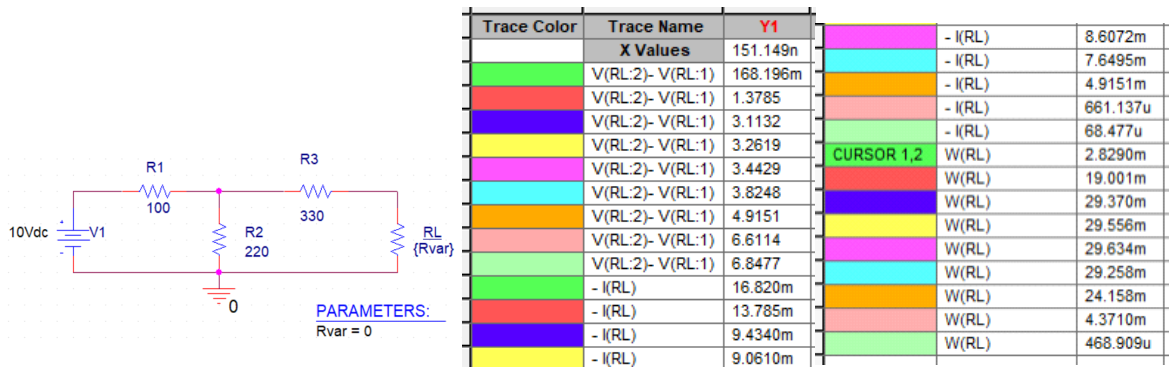
나. EXPERIMENT #2

1) 회로 분석

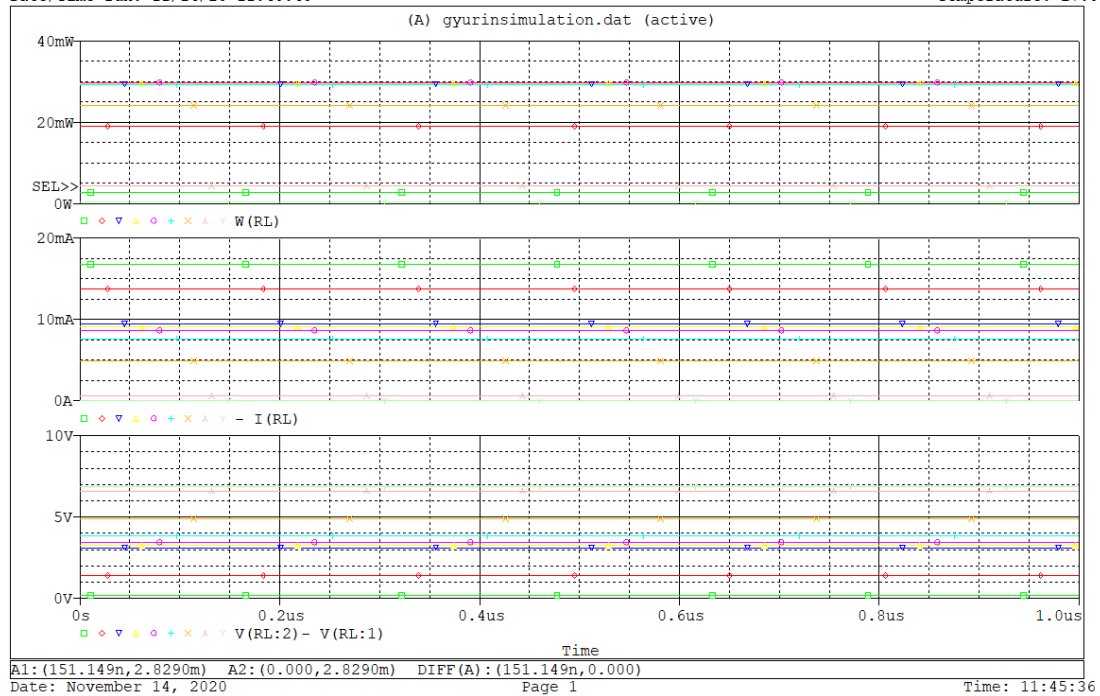
이 실험은 Experiment #1에서의 회로를 그대로 쓰되, R_L 의 값을 변화시켜가며 그 R_L 에 걸리는 Power를 계산해보는 것이다. 이론적으로 한 회로의 테브닌 등가회로에서의 R_{th} 값과 값이 같은 load 저항을 쓰면 최대 power가 나온다. 앞서 구한 이 회로의 테브닌 등가 저항은 398.75 Ω 이다. 따라서 R_L 에 398.75 Ω 짜리 저항을 쓰면 그 저항에 최대 전력이 된다. 이 실험에서는 R_L 을 여러 값으로 바꾸어가보며 그 R_L 의 power를 계산해봄으로써 정말 $R_{th} = R_L$ 일 때 power가 최대가 될지 알아본다.

2) Pspice 회로 구성 및 simulation

기존 회로에서 R_L 에서의 V 와 I , 그리고 W 까지 측정하였다. 이때, Rvar는 list of 10(연두), 100(다홍), 330(보라), 360(노랑), 400(분홍), 500(하늘), 1k(귤색), 10k(복숭아색), 100k(연한 연두색)이다.



** Profile: "SCHEMATIC1-gyurinsimulation" [C:\OrCAD\OrCAD_16.6_Lite\tools\capture\2020exp5_1-PSpiceFiles\SCHEMATIC1\g
Date/Time run: 11/14/20 11:40:48 Temperature: 27.0

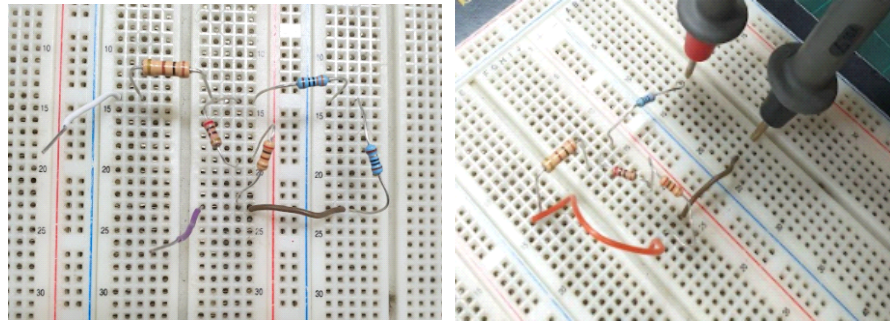


3) 소자 측정

저항 번호	R1	R2	R3
이론값 (단위 Ω)	100	220	330
측정값 (단위 Ω)	98.1	216.8	328.9

저항 번호	R⑩	R⑪	R⑫	R⑬	R⑭	R⑮	R⑯	R⑰	R⑱
이론값 (단위 Ω)	10	100	330	360	400	500	1k	10k	100k
측정값 (단위 Ω)	10.2	99.1	329.1	359.9	397.8	506.7	0.996k	9.98k	99.8k

4) Bread board 회로 구성



5) 이론값

R _L [Ω]	10	100	330	360	400	500	1k	10k	100k
V[V]	0.1628	1.378	3.113	3.262	3.443	3.825	4.915	6.611	6.848
I[mA]	16.82	13.785	9.434	9.061	8.607	7.649	4.915	0.661	0.068
P[mW]	2.829	19.001	29.370	29.556	29.634	29.258	24.158	4.371	0.468

6) 실험값

R _L [Ω]	10.2	99.1	329.1	359.9	397.8	506.7	996	9.98k	99.8k
V[V]	0.169	1.366	3.086	3.248	3.317	3.835	4.890	6.547	6.8
I[mA]	16.568	13.784	9.377	9.025	8.338	7.569	4.910	0.656	0.068
P[mW]	2.8	18.829	28.938	29.312	27.658	29.026	24.008	4.2949	0.4633

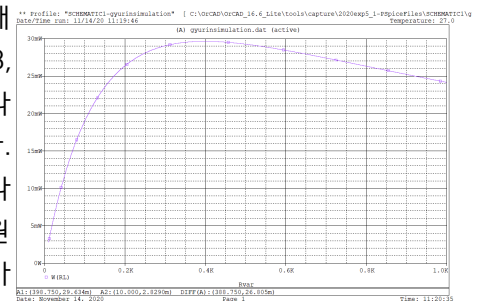
7) 결과 해석

① R_L의 max power

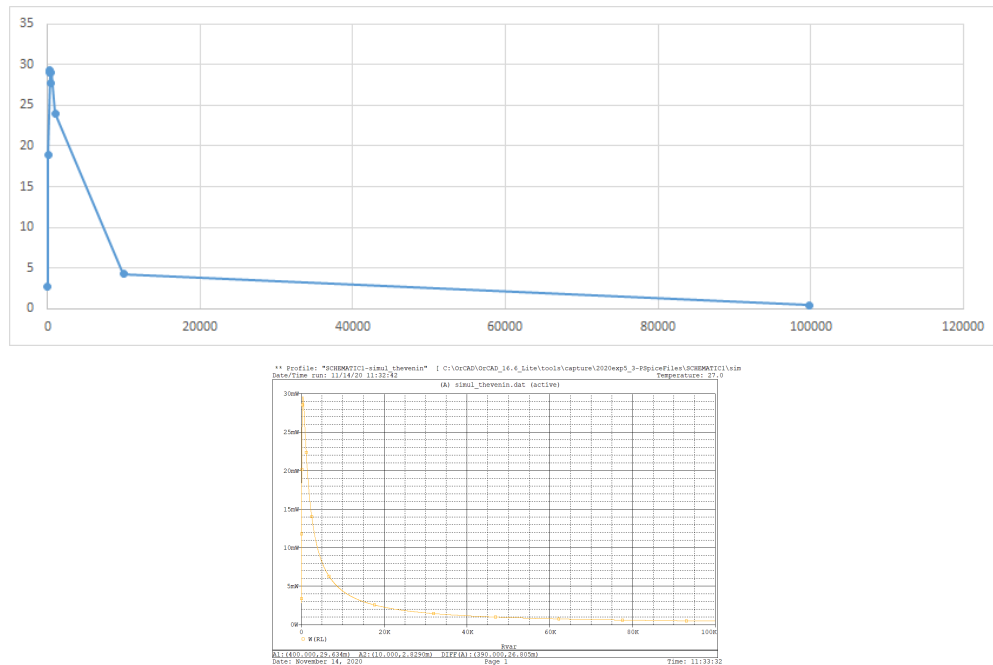
R_L이 변함에 따라 그 로드 저항에 걸리는 V와 그 로드 저항에 흐르는 I가 바뀌면서 그 로드 저항에 인가되는 power값도 바뀐다. R_L이 커질수록 V_{RL}은 커지고, I_{RL}은 작아진다. P=VI인데 이 Power 값이 max가 되는 R_L은 약 359.9Ω으로 측정이 되었는데, 이론적으로는 398.75Ω일 때 power가 최대가 되어야 맞다.

그런데 실험 측정값을 확인해보니 R_L를 397.8Ω의 저항으로 해주었을 때 살짝 작은 power로 측정이 되었다. 359.9, 397.8, 506.7의 R_L에 대한 P의 크기를 비교해보면 이론적으로는 올라갔다가 내려가야 하는데 측정된 값은 내려갔다가 다시 올라간다. 이는 R_L를 397.8Ω의 저항으로 해주었을 때 이상적인 상황보다 더 작은 power로 측정이 되었음을 뜻한다. 이와 같은 오차의 원인은 회로 안에 있는 여러 소자들에서 교섭이 일어나 에너지가 어디선가 손실이 되었거나, 혹은 멀티미터로 V_{RL}을 측정해준 것이기 때문에 순간적으로 멀티미터 화면에 표시된 값이 변화될 때 값을 기록했거나 등의 이유가 가장 클 것이다.

그렇지만 대체적으로 확연히 작은 R_L 값에 대해선 power도 작게, 확연히 큰 R_L 값에 대해선



power도 작은 값으로 뚜렷이 나타났다. 이로써 max power는 thevenin equivalent의 resistor, 즉 R_{th} 와 R_L 이 같을 때의 R_L 에 인가되는 power라는 것을 확인할 수 있었다. 다음 파란색 선의 그래프는 가로축이 R_{load} , 세로축이 Power인 측정값(실험값) 그래프이다. pspice orcad로 simulation한 노란색 그래프와 개형이 상당히 유사함을 확인할 수 있다.



② 오차

$R_L[\Omega]$	10.2	99.1	329.1	359.9	397.8	506.7	996	9.98k	99.8k
V[%]	3.808	0.871	0.867	0.429	3.660	0.261	0.509	0.968	0.701
I[%]	1.498	0.007	0.604	0.397	3.125	1.046	0.102	0.756	0
P[%]	1.025	0.905	1.471	0.826	6.668	0.793	0.621	1.741	1.004

앞서 언급했듯 R_L 이 397.8 Ω 일 때 V가 오차가 있는 값으로 측정되어서 이에 따라 계산된 I와 P도 오차가 생기게 되었다. 하지만 이외의 값은 거의 1% 미만의 작은 오차율로, power 값의 경향이 이론과 같게 잘 측정이 되었음을 확인할 수 있다.

5. 결과 검토, 분석 및 결론

5차 실험의 주제는 Equivalent circuit, maxpower transfer로, 어떤 회로(A)의 테브닌 등가회로(B)를 구성하여 A회로에서 load에 걸리는 전압과 흐르는 전류가 B회로에서 load에 걸리는 전압과 흐르는 전류가 같은지를 Experiment #1을 통해 실험적으로 확인해보았다. 확인 결과 R_{Load} 를 여러 값으로 바꾸어 측정해보아도 A회로와 B회로는 V_{RL} 과 I_{RL} 에 대해 같은 결과를 낳는다는 것을 알게 되었다. 또 Experiment #2는 #1의 회로에서 더 확장적으로 생각해서, R_L 에 인가되는 power까지 측정(혹은 계산)을 해보았다. power는 $P=VI$ [W]로서, 테브닌 등가회로에서는 $R_{th} = R_L$ 일 때 그 파워가 가장 세다는 것이 이론적인 사실이다. 이게 실제로도 그러한가 실험을 통해 V_{RL} 을 측정해 P_{RL} 을 계산해 본 결과 정말 $R_{th}=R_L$ 일 때 max power를 갖게 됨을 알 수 있었다.

6. 배운 점 및 느낀 점

테브닌 등가회로에 관한 실험으로, 현재 내가 이번 학기에 생체의공실험과 동시에 수강하고 있는 기초 전자회로에서 배웠던 테브닌 등가회로를 실험을 통해 확인해볼 수 있어서 재미도 있고 의미도 있었다. 기초전자회로 시간 때 테브닌 등가회로와 노턴 등가회로에 대해 배웠는데, 테브닌 등가회로에 대해서만 실험을 하고 확인을 해보았기 때문에 다음에 기회가 된다면 노턴 등가회로에 대해서도 실험을 해보고 비교해보면 좋을 것 같다는 생각이 들었다.