

논문 2024-4-14 <http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2024.12.14>

마이크로 컨트롤러를 이용한 RC 회로의 시정수 측정에 관한 연구

염효영*†

A Study on the Time Constant Measurement of an RC Circuit Using a Microcontroller

Hyo-Young Yeom*†

요 약

본 논문은 시정수 측정에 필요한 측정장치를 스마트폰 세대에 맞게 웹을 기반으로 측정 제어와 자료수집을 하도록 웹서버가 내장된 마이크로 컨트롤러를 이용해서 개발했다. RC 회로에서 충전 또는 방전 과정에서 시간에 따른 전압의 변화를 마이크로 컨트롤러의 내부 인터럽트를 이용해서 일정한 시간 간격으로 측정하고 기록했다. 제작한 측정장치를 시험하기 위해 두 개 저항과 두 개 축전기를 이용해서 실험했고 시정수를 구하기 위해 두 가지 분석 방법을 이용했다. 첫 번째는 5개의 시정수 배수일 때 축전기 전압을 계산하고 이 전압에 해당하는 시간을 읽어서 시간대 시정수 배수 그래프에서 시정수를 구한다. 이 방법으로 학생들이 시정수 개념을 좀 더 쉽게 이해하길 기대한다. 두 번째는 예측한 시정수로 충전 또는 방전시간에 대한 전압을 계산하고 계산된 전압과 실험에서 얻은 전압에서 오차 제곱의 합이 최소가 되는 시정수를 찾는 방법이다. 두 가지 분석 방법으로 구한 시정수의 오차 제곱의 합을 보면 두 번째 방법이 5배에서 17배 작아 매우 정확한 시정수를 얻을 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a time constant measurement device was developed using a microcontroller with an embedded web server to facilitate measurement control and data collection via the web. In the RC circuit, the voltage change over time during the charging or discharging process was measured and recorded at regular intervals using the internal interrupt of the microcontroller. To test the measurement device, experiments were conducted using two resistors and two capacitors, and two analysis methods were used to determine the time constant. The first method involves calculating the capacitor voltage at five multiples of the time constant and reading the corresponding time to determine the time constant from the time vs. time constant multiple graph. This method aims to help students understand the concept of the time constant more easily. The second method involves calculating the voltage for the charging or discharging time based on the predicted time constant and finding the time constant that minimizes the sum of squared errors between the calculated voltage and the voltage obtained from the experiment. Comparing the sum of squared errors for the two analysis methods shows that the second method is 5 to 17 times smaller, indicating that a very accurate time constant can be obtained.

한글키워드 : RC회로, 축전기, 시정수, 시정수 측정, 마이크로 컨트롤러, ESP32

keywords : RC Circuit, Time Constant, Time Constant Measurement System, Micro-controller, ESP32

* 청주대학교 교양대학

접수일자: 2024.11.14. 심사완료: 2024.11.22.

† 교신저자: 염효영(email: hyeom@cju.ac.kr)

게재확정: 2024.12.20.

1. 서론

시정수는 RC 회로에서 충전과 방전의 시간 특성을 규정하는 아주 중요한 물리량이다. 대학 물리실험 수업에 축전기 충전과 방전 회로에서 시정수를 측정하는 실험이 있다. 실험 방법을 살펴보면 크게 다음 두 가지 방법을 사용한다. 하나는 오실로스코프와 함수발생기를 이용해서 빠른 시간에 충전과 방전을 반복하고 그 파형을 분석해서 시정수를 얻는 방법[1]과 다른 하나는 충전 또는 방전하면서 시간에 따라 전압을 수동으로 측정하는 방법[2, 3]이다. 오실로스코프를 사용한 방법은 시정수가 작을 때 사용하고, 수동 시간 측정 방법은 시정수가 2-3 초 이상으로 클 때 측정이 가능한 방법이다.

본 연구에서는 마이크로 컨트롤러를 이용해서 충전 또는 방전 과정에서 시간에 따른 전압의 변화를 일정한 시간 간격으로 측정해서 기록할 수 있는 측정장치를 개발했다. 측정 명령과 모니터링 그리고 측정된 데이터를 스마트폰으로 받기 위해 웹서버가 내장된 ESP32 마이크로 컨트롤러를 사용했다. 측정된 데이터를 마이크로 컨트롤러에 내장된 플래시 메모리에 저장하면 데이터를 메모리에 쓰는 데 시간이 많이 소요되어 측정 시간 간격을 0.05초 이하로 줄이는 것은 불가능하다. 따라서 측정 시간 간격을 0.01초 이하로 줄이기 위해 외부에 SRAM을 연결하여 사용했다.

마이크로 컨트롤러에 연결한 스마트폰에 실시간으로 측정된 데이터를 보여주기 위해 websocket을 이용해서 서버와 통신하도록 했다. 서버 측 마이크로 컨트롤러 코어 프로그램은 C를 사용했고, 프론트엔드는 html과 자바스크립트를 사용해서 프로그램했다. 측정된 데이터는 다음의 두 가지 방법으로 분석했다. 하나는 다섯 개의 시정수 배수에 해당하는 전압에 해당하는 시간을 찾아서 시간 vs 시정수 배수 그래프를 그

리고 추세선의 기울기를 구해 시정수를 찾는 방법이고, 두 번째 방법은 예측한 시정수로 측정된 충전 또는 방전시간에 대한 전압을 계산하고 계산된 전압과 실험에서 얻은 전압에서 오차 제곱의 합을 계산하고 예측한 시정수를 변화시키면서 계산한 오차 제곱의 합이 최소가 되는 시정수를 찾는 방법이다. 두 방법으로 측정된 시정수를 비교 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 이론적 배경

그림 1은 축전기 충전과 방전 과정에서 축전기 전압 변화를 나타낸 그림이다[4]. 축전기에 걸리는 전압은 충전 또는 방전 과정과 관계없이 축전기에 충전된 전하량에 비례한다. 충전 시 시간에 따른 축전기에 저장되는 전하량을 미분방정식으로 표현하면 식(1)과 같고, 그 해를 구하면 식(2)와 같다.

$$R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = V_0 \quad (1)$$

$$V(t) = V_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (2)$$

식(2)를 그래프로 나타내면 그림 1(a)와 같다. 식(2)에서 R 은 축전기에 직렬 연결된 전류 제한용 저항으로 단위는 Ω 이고, C 는 축전기 용량으로 단위는 F(farad)이다. t/RC 값이 1이 되는 시간 t 가 시정수로 정의되면 $(1 - e^{-1})$ 값이 약 0.63으로 전체 전압의 약 63%에 도달했을 때의 시간이 시정수가 된다.

$$V(t) = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$

방전시 축전기 전압 변화는 식(3)과 같고 그래

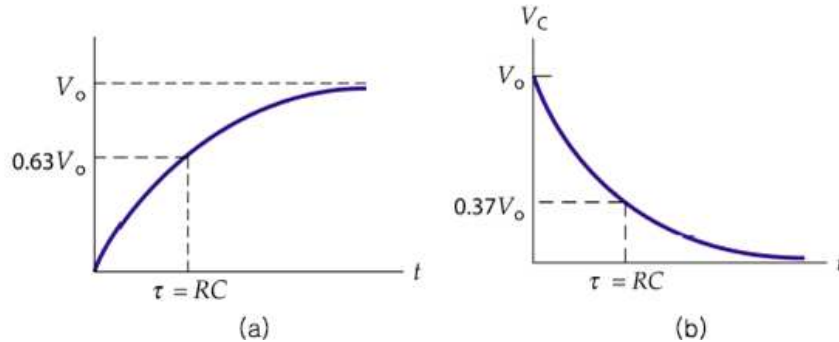


그림 1. RC 회로에서 충전(a)과 방전(b)할 때 시간에 따른 축전기 양단 전압의 변화
 Fig 1. Voltage Change Across a Capacitor in an RC Circuit During (a) Charging and (b) Discharging Over Time

프로 나타내면 그림 1(b) 와 같다.

2.2 측정장치 개발

측정장치는 Espressif System사의 ESP32[5] 마이크로 컨트롤러를 사용해서 개발했다. ESP32는 웹서버가 내장된 마이크로 컨트롤러로 코어 프로그램과 웹서버에 프로그램을 넣으면 데이터를 받는 클라이언트에 별도의 프로그램일 필요 없이 스마트폰과 같은 장치에서 웹 브라우저를 이용해서 데이터를 받을 수 있다. 전압 측정은 마이크로 컨트롤러에 내장된 12비트 AD 컨버터를 사용했고, 내부 인터럽트를 사용해서 정확한 시간 간격으로 측정했다. 인터럽트를 0.01 초 즉, 10ms 간격으로 발생시키는 명령은 다음과 같다[6].

```
void StartTimer()
{
    timer = timerBegin(0, 80, true);
    timerAttachInterrupt(timer, &onTimer, true);
    timerAlarmWrite(timer, 10000, true);
    // 1000 1ms, 10000 10ms
    timerAlarmEnable(timer);
}
```

인터럽트가 발생하면 인터럽트 백터가 onTimer()를 호출하므로 여기에서 내장된 AD 컨버터를 이용해 전압을 측정하는 프로그램을 넣으면 된다. 인터럽트 명령에서 10000 대신 20000을 넣으면 20ms 간격으로 측정하게 된다.

그림 2는 인터럽트 간격을 10 ms 즉 0.01초 간격으로 놓고 내부에서 인터럽트가 발생하면 15번 포트를 high로 놓고 측정 후에 15번 포트를 low로 놓도록 프로그램하고, 15번 포트를 오실로스코프에 연결하면 그림 2와 같이 정확히 10 ms 간격으로 측정이 되는 것을 확인 할 수 있다. 인터럽트 간격은 프로그램에서 조정할 수 있고 최소 1 μs까지 설정된다.

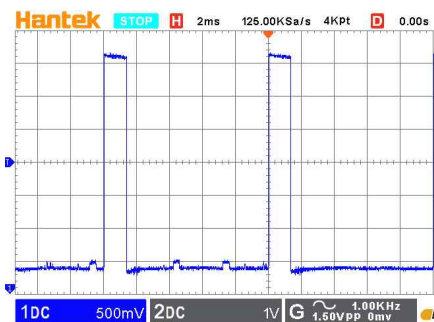


그림 2. 측정 주기 확인
 Fig. 2. Check Measurement Interval

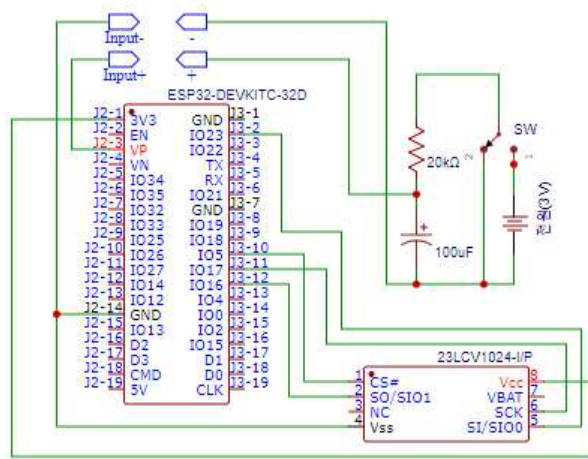


그림 3. 측정장치 회로도

Fig. 3. Measurement Device Schematic Diagram

그림 3은 본 연구에서 개발한 측정장치의 회로도이다. 기능의 대부분은 소프트웨어로 구현해서 회로는 매우 간단하다. 축전기의 전압을 측정하기 위해서 축전기의 +에 AD 컨버터 입력단을 연결하고 -는 GND로 연결했다. 측정 데이터를 임시로 저장하기 위해서 SRAM을 SPI로 연결했다.

ESP32 마이크로 컨트롤러는 웹서버를 내장하고 있어서 클라이언트에서 사용할 프로그램을 작성해서 웹서버에 넣어야 한다[7]. 클라이언트에서 사용할 프로그램은 html 기반으로 자바스크립트로 만들었다[8]. 클라이언트에서 명령을 주고 데이터를 실시간으로 받아 스크린에 표시하기 위해 websocket을 이용해서 서버와 통신하도록 했다. 서버 WiFi는 STA 모드로 설정하고 SSID는 ESP32_001, 패스워드는 생략해서 개방하고, 서버 IP는 192.168.11.1로 정했다.

ESP32 마이크로 컨트롤러는 4MB 플래시 메모리를 내장하고 있다. 내장된 플래시 메모리를 LittleFS 파일시스템으로 설정해서 사용하면 클라이언트에서 쉽게 저장된 파일을 내려받을 수 있다. 그러나 플래시 메모리는 쓰는 데 시간이 걸려

서 원하는 측정 속도에서 사용할 수 없는 문제가 있다. 물론 코어 프로그램의 효율성에도 문제가 있을 수 있지만 실제로 10 ms 간격으로 측정한 경우 데이터 100개 중에 2~3개를 잃어버리는 것을 알았다. 이 문제를 해결하기 위해 쓰기 시간이 수 ns인 SRAM을 사용했다. 여러 종류의 SRAM중에서 SPI 인터페이스가 내장된 것을 선택했다[9]. 이를 이용해서 측정된 데이터를 먼저 SRAM에 저장하고 측정이 끝나면 SRAM에서 데이터를 읽어서 플래시 메모리의 LittleFS 파일시스템에 data.csv 파일로 저장해서 클라이언트에서 저장된 데이터에 접근이 편리하게 했다.

2.3 시정수 측정실험

제작한 측정장치를 사용해서 100 μF, 220 μF 축전기와 10 kΩ, 20 kΩ 저항을 사용해서 충전과 방전에서 시정수의 약 10배 정도 시간 동안 축전기에 걸리는 전압을 측정했다. 이때 전압은 3.04 V를 사용했고 측정 주기는 100 Hz, 10 ms 간격으로 전압을 측정했다. 실험 방법은 먼저 그림 3 같이 축전기 회로를 연결하고 장치의 전원을 켜

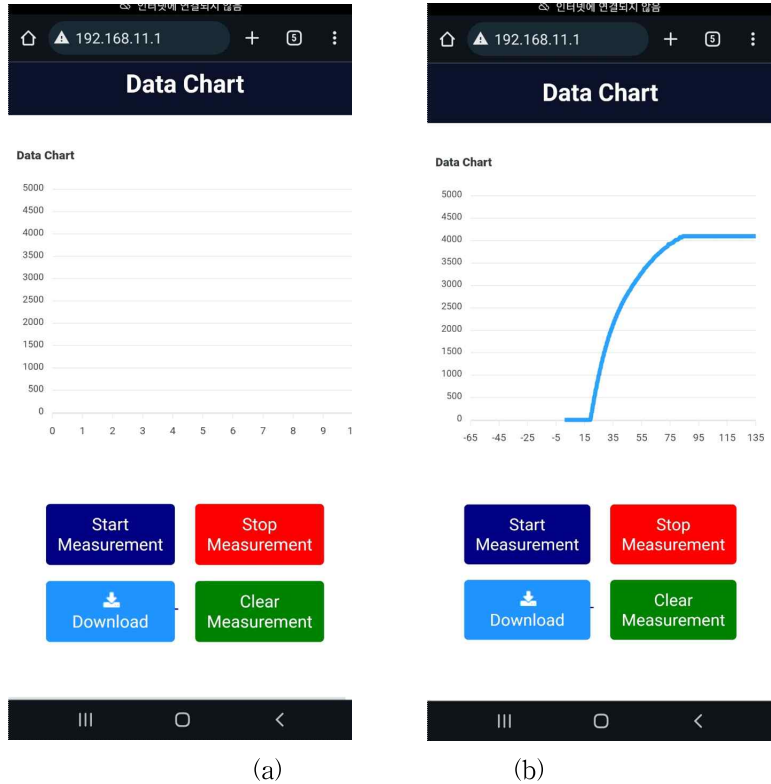


그림 4. (a) 웹서버 접속 화면 (b) 측정 실행 화면
 Fig. 4. (a) Web Server Access Screen (b) Measurement Screen

다. 스마트폰에서 WIFI를 ESP32_001에 연결한다. 연결되면 스마트폰에서 웹 브라우저를 실행하고 주소창에 장치 IP주소 192.168.11.1을 넣으면 그림 4(a) 같이 측정 창이 열린다. 브라우저 창에서 Start Measurement 버튼을 누르고 데이터가 들어오면 2초 정도 0점 데이터를 받고 그림 3회로의 스위치를 전원으로 연결해서 충전을 시작한다. 측정이 진행되면 그림 4(b)와 같이 시간에 따라 측정된 전압이 그래프로 표시된다. 측정이 끝나면 Stop Measurement 버튼을 눌러서 측정을 끝낸다. 측정 후에 Download 버튼을 누르면 측정된 데이터가 data.csv 파일로 스마트폰에 저장된다. 이 파일을 PC로 옮겨서 분석하면 된다.

3. 연구 결과

3.1 데이터 0점 조정

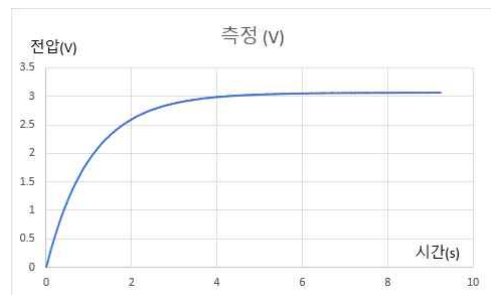


그림 5. 0점 조정된 충전 시 시간에 따른 축전기 전압 그래프
 Fig. 5. Graph of Capacitor Voltage Over Time During Charging After Zero Adjustment

측정을 시작한 0초 위치와 스위치를 넣어 충전
을 시작한 0초 위치가 다르므로 스위치를 넣어서
충전이 시작되는 시간을 0초로 조정된 데이터를
사용해서 분석해야 한다. 0점이 조정된 그래프가
그림 5에 있다.

3.2 충전실험 분석 방법 1

식(2)에서 충전율은 $(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$ 로 나타나며
시정수는 t/RC 값이 1이 되는 시간 t 이다. 즉
RC값이 시정수다.

충전 시 시간에 따른 축전기에 걸린 전압은 식
(2)을 사용해서 계산할 수 있고 이 식에서 시간
(t)에 RC 값을 넣으면 시정수 시간이 지났을 때
전압을 계산할 수 있고 실험 데이터에서 이 전압
에 해당하는 시간을 찾으면 시정수를 알 수 있
다. 같은 방법으로 2배 시정수에서 5배 시정수까
지 시정수 배수에 해당하는 충전율을 계산하고
걸어준 전지 전압으로 축전기 전압을 계산하고
시간을 찾으면 각 시정수 배수에 해당하는 시간
을 찾을 수 있다. 이 분석 방법은 시정수에 해당
하는 축전기 전압을 계산하고 그 전압에 해당하
는 시간을 실험 데이터에서 직접 찾는 방법으로
학생들에게 시정수 개념을 이해시키는데 좋은 방
법이다.

표 1. 시정수 배수에 따른 전압과 측정된 시간
Table 1. Voltage and Measured Time as a Function
of Time Constant Multiples

시정수 배수	충전율	전압(V)	시간(s)
1	0.63212	1.916	2.07
2	0.86466	2.615	4.17
3	0.95021	2.889	6.42
4	0.98168	2.986	8.77
5	0.99326	3.019	10.78

표 1에 시정수 배수에 따른 충전율과 축전기

전압을 계산하고 실험 데이터에서 이 전압에 해
당하는 측정된 시간을 읽어서 표시했다. 계산에
사용된 전지 전압은 3.04 V, 저항값은 20 kΩ, 그
리고 정전용량은 100 μF이다. 표 1의 데이터를
시정수 배수 대 시간 그래프로 그리고 추세선과
추세선 방정식을 찾아서 그림 6에 넣었다.

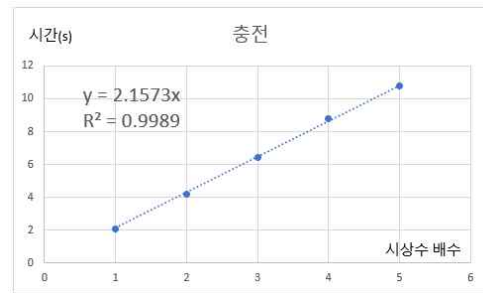


그림 6. 추세선의 기울기에서 구한 시정수
Fig. 6. Time Constant Determined from the Slope of
the Trendline

추세선 방정식을 구할 때 0초에서는 0V 조건
을 넣었다. 시정수 배수에 대한 시간 그래프에서
그래프가 선형이므로 그래프의 기울기는 1 시정
수 변화에 대한 시간 변화로 시정수가 된다. 이
그래프에서 추세선의 기울기가 시정수이므로 이
분석 방법으로 얻은 시정수는 2.2초다.

3.3 충전실험 분석 방법 2

이 분석 방법은 엑셀을 이용해서 식(2)에서 축
전기 전압을 측정된 시간 구간 전체에 대해 시간
에 대한 축전기 전압을 계산하고 수동으로 시정
수를 바꾸면서 오차 제곱의 합이 최소가 되는 시
정수 값을 찾는 방법과 작성된 커프핏 프로그램
을 이용해서 시정수를 찾는 방법이다. 전자는 학
생들이 커프핏 프로그램의 알고리즘에 대한 이해
를 돕기 위한 방법이고 후자는 프로그램 작성 동
기를 제공하는 방법이다.

표 2. 오차 제곱의 합이 최소가 되는 시정수 찾기
Table 2. Finding the Time Constant that Minimizes the Sum of Squared Errors

RC(시정수(s))	오차 제곱의 합(s ²)
2	1.2
2.1	0.075
2.2	1.1
2.1	0.075
2.11	0.087
2.1	0.075
2.09	0.085
2.101	0.075
2.1	0.075

측정된 데이터에서 충전을 시작하는 0초부터 완전히 충전된 시간까지 측정된 각각의 모든 시간에 대해 예상하는 RC 값으로 식(2)를 이용해서 충전기 전압을 모두 계산한다. 그리고 실험값과 계산값 차이의 제곱을 모두 더해서 오차 제곱의 합을 구한다. 표 2에 RC 값을 2초로 예상하고 넣었을 때 오차 제곱의 합이 1.180이고 RC 값을 2.1로 바꾸어 계산하면 오차 제곱의 합은 0.075로 작아진다. 오차 제곱의 합이 작아지므로 같은 방향으로 RC 값을 바꾸어서 계산한다. 이런 방법으로 RC 값을 찾아가는 과정을 표 2에 기록했다. 이 방법으로 찾은 시정수는 2.1초다[10]. 그림 7에 시정수가 2.1초일 때 계산 결과와 실험 데이터를 함께 그래프로 나타냈다. 이 그래프에서 두 결과가 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.

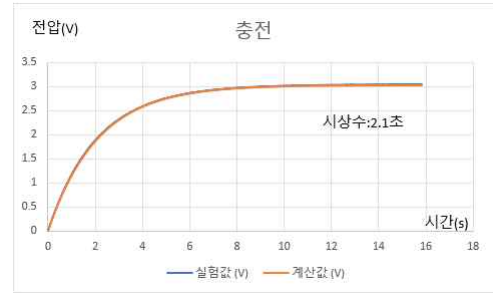


그림 7. 충전 시 측정 자료와 오차 제곱의 합이 최소가 되도록 찾은 시정수로 만든 그래프 비교.

Fig. 7. Comparison of Graphs Created Using Measured Data During Charging and the Time Constant Found to Minimize the Sum of Squared Errors

4. 방전 실험 분석

방전 실험 분석 결과를 표 3에 넣었다. 방전 실험 분석의 경우는 충전 실험 분석과 사용하는 수식만 다르고 모든 과정은 동일하다. 충전 실험 분석은 식(2)를 사용하고 방전 실험 분석은 식(3)을 사용한다. 그림 8은 방전 시 프로그램으로 찾은 시정수로 계산한 결과와 실험 데이터를 함께 그래프로 표시했다. 이 그래프에서 방전의 경우도 두 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

10 kΩ 저항과 100 μF 축전기, 20 kΩ 저항과 220 μF 축전기로 충전과 방전에서 같은 실험을 하고 그 결과를 표 3에 넣었다.

표3 분석 방법에 따른 시정수와 오차 제곱의 합

Table 3. Time Constant and Sum of Squared Errors According to Analysis Method

R (kΩ)	C (μF)	충전				방전			
		분석 방법1		분석 방법2		분석 방법1		분석 방법2	
		시정수 (s)	오차 제곱의 합(s ²)	시정수 (s)	오차 제곱의 합(s ²)	시정수 (s)	오차 제곱의 합(s ²)	시정수 (s)	오차 제곱의 합(s ²)
20	100	2.2	0.43	2.1	0.08	2.2	1.7	2.1	0.10
10	100	1.1	0.33	1.1	0.05	1.1	1.1	1.1	0.07
20	220	4.6	0.11	4.7	0.05	4.8	0.9	4.7	0.09

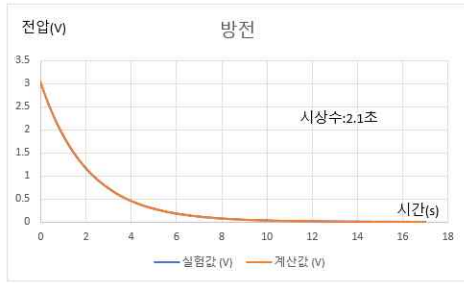


그림 8. 방전 시 측정 자료와 오차 제곱의 합이 최소가 되도록 찾은 시정수로 만든 그래프.

Fig. 8. Comparison of Graphs Created Using Measured Data During Discharging and the Time Constant Found to Minimize the Sum of Squared Errors

4.1 두 가지 분석 방법을 이용한 결과 비교

20 kΩ 저항과 100 μF 축전기의 경우 분석 방법1의 추세선 기울기에서 얻은 시정수는 2.2초다. 분석 방법 2의 전체 데이터를 계산해서 오차 제곱의 합이 최소를 찾는 방법으로 얻은 시정수는 2.1초다. 두 결과를 비교하기 위해 2.2초를 시정수로 넣고 오차 제곱의 합을 구하면 0.43이고, 2.1초로 구한 오차 제곱의 합이 0.08로 분석 방법 2로 구한 시정수가 더 정확함을 알 수 있다. 방전의 경우도 오차 제곱의 합이 각각 1.7과 0.1로 분석 방법 2에서 더 정확한 결과를 얻었다. 다른 저항과 축전기를 사용해도 모두 분석 방법2로 구한 시정수가 더 정확함을 표 3에서 확인했다.

5. 결론

본 연구에서는 RC 회로의 시정수 측정에서 대학생 세대에 맞는 측정장치를 개발하고 이를 이용해서 학생들에게 시정수의 개념을 좀 더 정확히 이해시키도록 했다. 학생들은 스마트폰과 매

우 친하므로 장치 개발에 웹서버가 내장된 마이크로 컨트롤러를 사용해서 스마트폰을 이용해서 쉽게 장치에 접근하도록 했다. 웹서버를 사용하므로 프론트 엔드 프로그램은 html과 자바스크립트를 사용했고, 마이크로 컨트롤러 코어에 들어가는 서버 프로그램은 C를 사용했다. 측정 데이터는 마이크로 컨트롤러에 내장된 플래시 메모리에 저장하고 측정이 끝나면 스마트폰의 브라우저를 통해서 스마트폰으로 쉽게 내려받을 수 있도록 했다.

데이터 분석 방법에서 추세선의 기울기를 이용한 방법은 시정수 위치에서 축전기 전압을 계산하고 그 전압에 해당하는 시간을 찾으면 이 시간이 시정수가 되므로 좀 더 직관적으로 시정수에 대한 이해를 돕기 위해 선택한 해석방법이다. 오차 제곱의 합이 최소가 되도록 시정수를 찾는 방법은 측정된 실험 결과에서 가장 정확한 시정수를 얻는 방법이고, 최소제곱법의 개념과 추세선을 구한 방법의 기본 원리를 이해하는데 도움이 될 것을 기대한다. 또한 실험에서 얻은 하나의 결과에서 분석 방법에 따라 결과값이 다를 수 있고 이를 비교와 분석하는 것에서 교육적 의미를 찾을 수 있다.

본 논문에서 데이터 분석에 엑셀을 이용했고 오차 제곱의 합이 최소가 되도록 시정수를 찾는 프로그램은 엑셀에 내장된 비주얼 베이식으로 간단히 만들어 사용했다. 이 방법은 학생들에게 프로그래밍을 공부해야 하는 좋은 동기 제공이 되기를 기대한다.

참고 문헌

- [1] H.Y.Kim, S.R.Moon, D.G.Hur, Basic Experiments in Electronics Chapter 23 Voltage and Frequency measurements

- with Oscilloscope Intervention, (2012)
ISBN:9788997231256
- [2] K.Y.Jang, D.H.Yoon, W.T.Kim, S.H.Lee,
P.W.Jang, M.S.Lee, T.H.Yeom,
Experimental College Physics, Chapter 28
Capacitor Charging and Discharging
Experiment Sang Hak Dang (2013)
ISBN 9788965870708
- [3] K.S.Jin, Basic Experiments in Electronics.
Chapter 23 Transient Response
Characteristics of an RC Circuit Han Ol
Press (2000) ISBN:9791156852841
- [4] K.Y.Jang, D.H.Yoon, W.T.Kim, S.H.Lee,
P.W.Jang, M.S.Lee, T.H.Yeom, College
Physics, Chapter 18 Basic Electric
Circuits, Sang Hak Dang (2010)
ISBN:9788993383775
- [5] Espressif Systems Co., Ltd. (2024)
[https://www.espressif.com/sites/default/files/
/documentation/esp32_datasheet_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)
- [6] H.Y.Yeom, Measurements and Control in
Experiments. Chapter 2.8 Interrupt Sang
Hak Dang (2023) ISBN:9788965872399
- [7] R.Santos, S.Santos, Build eb Servers with
ESP32 and ESP8266, Module 3 ESP32 and
ESP8266 Web Servers (2020)
[https://randomnerdtutorials.com/build-web-
servers-esp32-esp8266-ebook/](https://randomnerdtutorials.com/build-web-servers-esp32-esp8266-ebook/)
- [8] H.Y.Yeom, IOT with ESP8266
Microcontroller. Chapter 3 Filesystem
Uoloader, Sang Hak Dang (2024)
ISBN:9788965872498
- [9] Microchip Technology Inc, (2021)
23LCV1024 Datasheet
[https://ww1.microchip.com/downloads/en/D
eviceDoc/25156A.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/25156A.pdf)
- [10] Philip R. Bevington and D. Keith
Robinson, Data Reduction and Error
Analysis for The Physical Science.
Chapter 4 Estimates of Mean and Error,
McGraw-Hill (1992) ISBN:0072472278

저 자 소 개



염효영(Hyo-Young Yeom)

1986.2 단국대 물리학과 학사
1988.2 단국대 물리학과 석사
1994.8 단국대 물리학과 박사
2000.2-2006.8 Brown University Division
of Engineering Research
Associate.
2020-현재 청주대학교 교양대학 교수
<주관심분야> 마이크로컨트롤러, 임베디
드, IOT, 데이터베이스