

중력 가속도 실험을 위한 시간 측정 시스템 개발

이 현희, 김성곤, 진달복
원광대학교 전기전자 및 정보공학부

Development of Time Measure System for Acceleration of Gravity Experiment

Lee hyeon-hee, Kim seong-gon, Chin dal-bok
Department of Electric, Electronic & Information Engineering of Wonkwang University

Abstract - This study is to develop a time measure system for acceleration of gravity verification. The system can measure time interval between two points when an object passes through the points. The system has 1 μ sec time resolution. The AT90S8515 microprocessor, product of ATMEL, can make 1 μ sec time resolution possible connected with the 8 MHz fine crystal oscillator. The two external signals called 'start' and 'stop' have AT90S8515 that counted time intervals of the two signals.

Sensors are composed of the IR beam emitting diode, TNL108 and the IR beam receiving photo diode, TNL601, produced by NEC company.

In order to acquire the measurement of exactitude of the system, measure the pendulum period. Experimental result, the average period $\langle T \rangle = 3.0406$ sec with pendulum length of 2.314m.

The acceleration of gravity $g = 9.8821 \pm 6.416 \times 10^{-4} \text{m/s}^2$

1. 서 론

물리학 전공 실험에서 속도와 가속도의 측정 시에는 반드시 시간 간격을 측정하는 계측기가 필요하다. 현재 많은 시간 간격 측정 장비들이 시판되어 지고 있고 연구 개발 중에 있다. 그 중 대표적으로 물리 실험에 쓰여지고 있는 장비는 미국의 PASCO사에서 판매하는 Photogate timer이고 국내에서 개발된 장비는 없다. 이 장비의 분해능은 msec단위가 일반적이다. 그리고 표시 장치가 7-segment로 되어 있어서 시스템이 상태를 표시할 때 사용자들이 읽기가 불편하다. 그러므로 좀 더 실험자가 시스템을 다루기 편하고 판독하기 쉬우며 분해능이 더 높은 장치의 개발이 요구되었다.

본 연구에서는 중력 가속도를 측정하기 위하여 두 지점간의 시간 간격을 측정하는 계측장비를 개발하였다. 분해능은 μ sec단위까지이며, 매 실험마다 실험 결과를 저장하며 실험이 끝나면 평균치를 출력하도록 하였다. 표시장치는 LCD를 사용하여 실험자들이 시스템의 상태와 실험 결과를 판독하기 쉽게 하였다. 가능한 실험모드는 gate mode, pulse mode, pendulum mode, stop watch mode 이다.

2. 중력 가속도 측정 이론

2.1 자유 낙하시의 중력 가속도 측정

두 점 사이의 거리 s 를 알고, 두점을 통과하는 시간 간격 t 를 측정하면, 통과한 물체의 속도 v 는

$$v = s/t \quad (1)$$

로 주어진다. 또한 자유 낙하하는 물체의 중력 가속도의 측정은 자유 낙하한 두점 사이의 거리 s 를 알면

$$s = 1/2gt^2 \quad (2)$$

로 중력가속도 g 를 구할 수 있다.

$$g = \frac{2S}{t^2} \quad (3)$$

물체가 자유 낙하할 때 중력가속도를 구하는 또 다른 방법은

$$v_f^2 - v_o^2 = 2aS \quad (4)$$

를 이용한다. 자유 낙하시 $v_o^2 = 0$ (초기속도)는 0이고 가속도 a 는 g 가 된다. 따라서 중력 가속도 g 는

$$g = \frac{v_f^2}{2S} \quad (5)$$

이 된다. 여기서 S 는 낙하 거리, v_f 는 그 변위 점에서 낙하하는 물체의 순간 속도이다.

낙하 물체의 순간 속도 v_f 는

$$v_f = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (6)$$

이며, Δd 는 순간 거리이며 Δt 는 순간 속도이다.

2.2 진자 운동을 통한 중력 가속도의 측정

진자 운동을 하는 물체의 중력 가속도를 알기 위해서는 물체가 왕복운동을 하는 동안 그 물체의 주기를 측정하여야 한다. 주기를 측정하기 위해서는 시간 간격을 측정할 시스템이 필요하다. 진자의 길이 L 을 알고 운동 에너지가 위치에너로 전환되는 각 θ 을 안다면, 운동 방정식은 다음과 같다.

$$ms = mgsin \theta \quad (7)$$

여기서 m 은 물체의 질량이다.

위의 방정식에서 일반각($\sin \theta \approx \theta$ 의 근사를 취하지 않는 경우)에 대한 단진자의 주기 공식은 다음과 같다.

$$T = 4\sqrt{\frac{L}{g}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} \quad (8)$$

여기서 k 는 $\sin \frac{\theta_0}{2}$ 을 의미하며 θ_0 는 진자의 초기 위치에서의 θ 값이다. 이를 급수 형태로 나타낸다면

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} [1 + (\frac{1}{2})^2 k^2 + (\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4})^2 k^4 + \dots] \quad (9)$$

이 된다. 식 (9)에서 우변의 두 번째 항까지만 고려한

다. 그 이후의 항들의 값은 10^{-8} 차원의 작은 값들이므로 측정된 g 의 값에 대한 영향이 무시될 수 있기 때문에 세 번째 항부터는 무시하게 된다.

위의 식 (9)을 진자에 대한 중력 가속도의 식으로 표현하면

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} \left(1 + \frac{\sin^2 \theta_0}{4} \right)^2 \quad (10)$$

이 된다.

3. 시스템 설계

본 연구의 중력가속도 측정 시스템은 소프트웨어의 설계부와 하드웨어의 설계부로 나눌 수 있다. 시스템 설계시에 고려된 것은 시간 측정 모드를 어떻게 설계할 것인가인데, gate mode, pulse mode, pendulum mode, stop watch mode, 총 4개의 모드를 설정하였다. 시스템 블록도는 그림 1에서 보였으며, 입력은 모드 선택을 위한 switch 입력부가 있고, 두 지점간의 물체의 속도를 구하기 위해서 두 지점을 검출할 수 있는 센서 입력부가 있다. 마이크로프로세서부는 ATEML 사의 AT90S8515로 구성되어 있다. AT90S8515는 4개의 모드를 제어하며, 시간을 연산하고 연산 결과를 메모리에 저장하여 LCD 표시부에 출력을 한다.

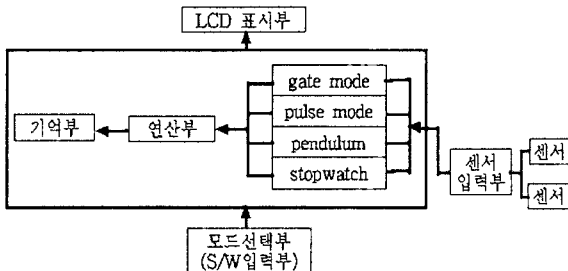


그림 1. 시스템 블록도
Fig 1. Block diagram of system

3.1 시스템 소프트웨어의 설계

그림 2에 프로그램 순서도를 보였다. 소프트웨어는 4개의 모드에서 센서로부터 입력된 값을 연산하고 그 계산된 값을 저장한다. 2개의 센서 중 1개의 센서에 먼저 신호가 들어오면 이것을 start 신호로 하며 그 때의 시간 값을 캡처하여 저장하게 된다. 다음 신호가 들어오면 stop 신호가 되고 그 때의 시간 값을 캡처하여 저장한다. 시간의 캡처는 AT90S8515 마이크로프로세서의 CCP(capture, pulse width modulation) module에서 capture mode가 담당하게 되고 연산은 마이크로프로세서의 타이머를 가지고 하게 된다.

AT90S8515는 16bit up count 타이머(TMR1)를 내장하고 있는데 16bit 타이머가 표현 할 수 있는 수는 0~65535 까지 이다.

AT90S8515의 외부 클럭을 8MHz로 사용하고 내부 타이머 분주비를 8분주로 하여 타이머의 클럭을 1MHz 가 되게 하였다.

$t = \frac{1}{f}$ (f : 주파수, t : 시간)에 의하여 TMR1은 $1 \mu\text{sec}$ 마다 하나씩 증가하게 된다. 따라서, 표현할 수 있는 최대의 시간은 $65536 \mu\text{sec}$ 이다.

AT90S8515의 16비트 타이머 TMR1은 65535에서 0으로 되는 순간 Timer overflow 인터럽트(T1ovf)가 발생하게 되는데 Timer overflow 인터럽트(T1ovf)가

몇 번 발생했느냐를 가지고 시간 계산을 하게 된다. 계산된 결과는 AT90S8515의 DATA 메모리 영역에 저장한다. 20번까지 실험한 데이터를 저장하도록 하였다.

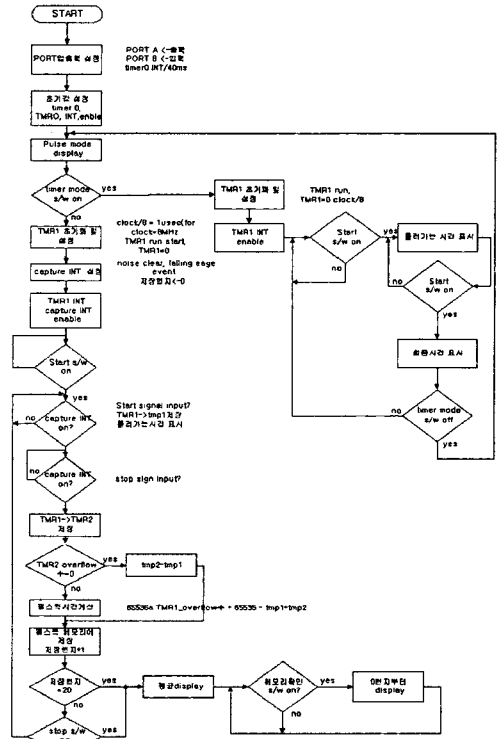


그림 2. 시스템 소프트웨어 순서도
Fig 2. Flow chart of system software

3.1.1 시간 계산 소프트웨어

시간 계산은 CCP module에 의해서 캡처되어 저장된 'start' 신호 때의 TMR1 값과 'stop' 신호 때의 TMR1 값을 사용하여 계산한다.

시간 캡처를 위해서는 AT90S8515의 I/O 레지스터 중에서 TMR1 관련 레지스터를 설정한다. TCCR1B 레지스터의 6번 BIT(ICES1)는 ICP단자(AT90S8515의 31번 핀)의 입력 캡처 예지 선택 비트로써 0 일때는 'start' 신호에 의하여 검출된 신호가 ICP단자에서 하강 예지가 발생했을 때 TMR1의 값을 캡처하게 되고 ICES1이 1 일때는 'stop' 신호에 의하여 ICP단자에서 상승 예지가 발생했을 때 TMR1의 값을 캡처하게 된다.

두 지점간의 시간 계산법을 그림 3에 나타내었고, 계산식은 식 (11)에 나타내었다.

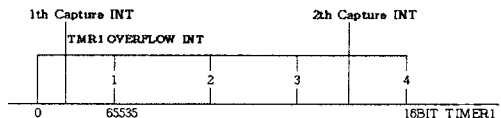


그림 3. 두 지점간의 시간 계산
Fig 3.

$$\begin{aligned} \text{두 Capture(두 지점) 사이의 시간 값} = & \{(\text{TMR1 overflow INT}) - 1\} \times 65536 \\ & + (\text{65535} - \text{1th Capture INT}) \\ & + \text{2th Capture INT} \end{aligned} \quad (11)$$

3.1.2 gate mode

gate mode는 하나의 입력 센서로부터 입력된 펄스의 간격을 캡처하여 시간으로 표현한다. 이것은 물체가 센서에 검출되어서 빠져나가는 시간을 측정하는 것이다.

센서에서의 입력은 센서 입력부에서 전기적으로 low(0V)상태 즉, 0 상태를 만든다. 다시 물체가 센서를 완전히 빠져나가면 high(5V)상태 즉, 1 상태가 된다. 그림 4은 gate mode에서의 시간 캡처를 나타낸다.

Gate mode의 시간 캡처를 위해서 ICES1 비트의 설정은 초기 상태에서는 '0'으로 설정하고 'start' 신호가 들으면 '1'로 설정한다. 'start'신호에 의해서 캡처된 TMR1값과 'stop' 신호에 의해서 캡처된 TMR1값, 그리고 'start'와 'stop' 사이에 일어난 T1ovf를 가지고 식 (11)에 대입하여 두 지점간의 시간을 계산한다. 그리고 결과치를 AT90S8515의 DATA MEMORY 영역에 저장한다.

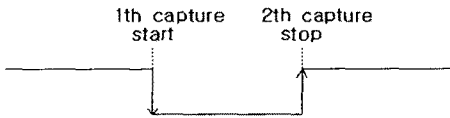


그림 4 gate mode에서 시간 캡처
Fig 4. Time capture of gate mode

3.1.3 pulse mode

pulse mode는 두 개의 입력 센서로부터 입력된 펄스의 시간 간격을 캡처하여 계산하는 일을 한다.

이것은 물체가 두 개의 센서를 지나가는 시간을 검출하는 것이다. 이 pulse mode에서 식 (3)을 이용하여 중력가속도를 검출 할 수 있다. 하나의 센서를 물체가 통과하면 그림 4과 같이 나타나므로 두 개의 센서를 통과한 물체는 그림 5와 같이 나타난다. 이 때 gate mode에서와 달리 'start'와 'stop' 신호는 하강 에지에서만 일어나도록 ICES1 비트를 '0'으로 고정시킨다. 'start'와 'stop' 신호 사이의 시간을 계산하여 저장한다.

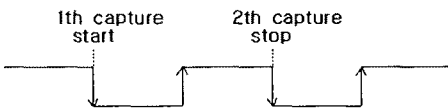


그림 5. pulse mode에서 시간 캡처
Fig 5. Time capture of pulse mode

3.1.4 pendulum mode

pendulum mode는 한 개의 입력 센서로부터 3번 입력된 펄스의 시간 간격을 캡처하여 계산하는 일을 한다. 이것을 pendulum 실험이라고 하는데 쇠 구슬에 실을 달아서 진자 운동을 할 때 센서를 3번 지나간 시간을 lpendulum이라 하며, 이 시간을 측정하는 실험이다.

pendulum mode에서는 시간 계산을 첫 번째 하강 에지 때의 캡처값과 세 번째 하강 에지 때의 캡처 값으로 계산하게 된다. 이것을 식 (12)에 나타내었다.

pendulum mode에서 식(10)을 이용하여 중력가속도를 계산 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{두 Capture(두 지점) 사이의 시간 값} = & \\ & \{(\text{TMR1 overflow INT})-1\} \times 65536 \\ & + (65535 - 1\text{th Capture INT}) \\ & + 3\text{th Capture INT} \end{aligned} \quad (12)$$

하나의 센서를 물체가 3번 통과하면 그림 6와 같이 나타난다. 이 때 하강 에지에서만 캡처가 일어나도록

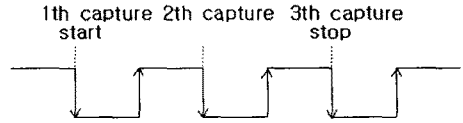


그림 6. pendulum mode에서 시간 캡처
Fig 6. Time capture of pendulum mode

ICES1 비트를 '0'으로 고정시킨다. 'start'와 'stop' 신호 사이의 시간을 계산하여 저장한다.

3.1.5 stop watch mode

stop watch mode에서의 입력은 system의 스위치 입력이다. 스위치 입력이 있으면 'start' 신호이고 한번 더 스위치 입력이 있으면 'stop' 신호이다. 이 두 시간 간격을 계산한다.

3.2 시스템 하드웨어 설계

본 연구에서 개발된 하드웨어는 크게 전원부, 스위치 입력부, 센서 입력부, 제어부, 표시부로 나눌 수 있다. 시스템의 전체 회로도를 그림 7에 나타내었다.

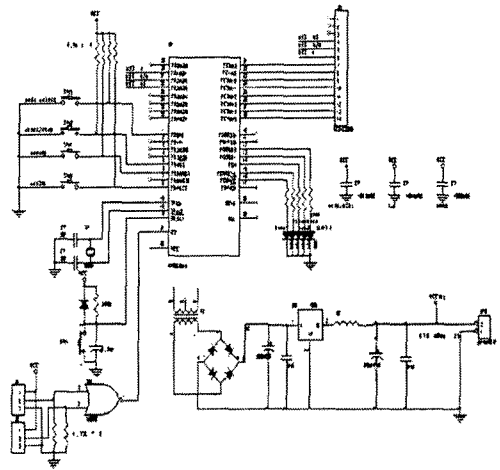


그림 7. 전체 회로도
Fig 7. Total circuit

3.2.1 전원부

전원부에서 전원은 5V를 전원을 만드는 일반적인 회로를 설계하였다.

3.2.2 스위치 입력부

Switch 입력부에서 스위치의 입력은 mode를 선택하고, mode의 시작과 정지를 구분하고, 메모리에 있는 데이터를 불러오게 한다. 스위치는 일반적인 push 스위치를 사용하였으며, Switch를 on 시켰을 때 low 신호가 입력되도록 설계하였다.

3.2.3 센서 입력부

센서 입력부의 입력이 되는 광 센서는 적외선 센서를 사용하였다. 발광 소자로는 NEC사의 TNL108을 사용하였으며, 수광 소자로는 NEC사의 TNL601를 사용하였다. 센서부는 실험하기 쉽도록 (주)세계과학에 제작된 모듈로 되어있는 제품을 사용하였다.

3.2.4 제어부

제어부는 마이크로컨트롤러 ATEL사의 AT90S8515가 사용 되었으며, 스위치 입력부와 센서에 받은 입력들을 소프트웨어적으로 처리하여 그 결과치를 표시부에 표시하는 역할을 한다.

3.2.5 표시부

표시부는 LCD 모듈을 내장한 18×2 LCD를 back light가 되도록 설계하여 사용하였다. LED는 현재 어떤 모드가 설정되었는지를 표시한다.

4. 실험 및 고찰

4.1 실험 장치

3가지 모드의 실험을 위하여 개발된 시스템에 실험 장치를 구성한 모습이 그림 8에 나타내었다. 센서 입력부는 각 모드에 따라서 사용법이 다르다. gate mode에서는 센서 모듈이 photogate 하나를 사용하여 쇠 구슬이 센서부를 빠져나가는 순간 속도를 측정한다. pulse mode는 photogate 두 개를 사용하여 두 지점 사이를 쇠 구슬이 지나간 시간을 측정한다. pendulum mode에서는 photogate 하나를 사용하여 쇠 구슬이 진자 운동 시에 센서를 3번 통과 했을 경우의 시간을 측정한다.

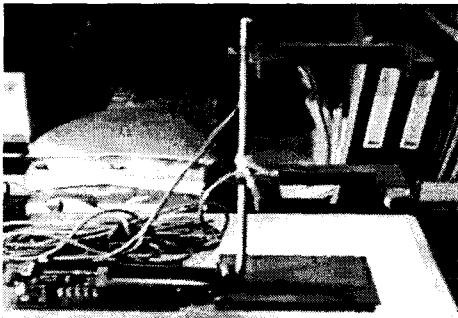


그림 8. 개발된 시스템
Fig 8. Developed system

4.2 고찰

중력가속도를 구하기 위해서는 식 (3), (5), (10)을 이용하여 구할 수 있다. 식 (3)에 의하여 중력 가속도를 구하려면 시스템의 pulse mode로 실험을 통하여 구할 수 있다. 식(3)에 의한 정확한 실험은 물체가 움직인 두 점 사이 거리 s 가 정확히 측정되어야 하는데 초기 속도가 0인 조건을 가지고 photogate1의 센서에서 정확하게 쇠 구슬이 출발하기가 어렵다. 왜냐하면 쇠구슬을 출발시키는 방법으로는 손으로 출발시킬 수 있고 실에 닿아서 출발시킬 수가 있는데, 출발 지점이 photogate1의 센서 앞에서는 직외선 빔이 나가고 있어서 눈으로 확인하기가 어려워 출발점을 찾기가 어렵고, 손에서 출발시 손과 쇠 구슬 사이의 마찰 때문에 순수한 자유 낙하가 이루어지지 않는다. 실에 닿아서 출발 시에도 실을 자를 때 실이 밀리면서 출발점을 이탈하게 되어 쇠 구슬의 이동 거리를 정확히 측정하기가 어렵다.

식(5)에 의한 중력 가속도의 측정은 순간 속도를 구해서 실험 할 수가 있다. gate mode에서 실험으로 순간 속도를 구하는 것이 가능하데 초기 순간 속도를 0으로 만들기 pulse mode의 실험에서와 같은 문제점을 가지고 있다.

식(10)에 의한 중력 가속도의 측정은 pendulum mode에서 진자 운동의 시간 측정으로 실험이 가능하다. 진자 운동에서의 문제점은 공기의 저항만이 문제가

된다. 쇠 구슬을 이용한 진자 실험에서 공기의 저항은 무시할 수 있기 때문에 식(10)에 의한 정확한 중력 가속도 실험이 가능하다.

4.2.1 중력가속도 측정

시스템의 시간 측정 정확도를 실험하기 위하여 중력가속도 실험을 식(10)에 대입시켜서 실험을 하였다. 진자의 길이를 $L=2.314m$ 이고, 진자가 연직과 이루는 각도는 $\theta=1.6592^\circ$ 였으며 10 pendulum을 1회 실험으로 하여 29회 실험했더니 평균주기값 $T=3.0406sec$ 가 되고 식(10)에 대입하여 중력가속도 $g=9.8821 \pm 6.416 \times 10^{-4}$ 의 값을 얻어 낼 수가 있었다. 표 1은 개발된 system과 수입제품을 같은 조건에서 pendulum mode로 실험한 실험치이다.

구분 회수	연구		구분 회수	타사	
	개발품	제품		개발품	제품
1	3.0401	3.039	18	3.0410	3.039
2	3.0402	3.039	19	3.0410	3.039
3	3.0395	3.040	20	3.0415	3.039
4	3.0408	3.039	21	3.0407	3.039
5	3.0417	3.039	22	3.0411	3.038
6	3.0402	3.037	23	3.0414	3.039
7	3.0405	3.039	24	3.0416	3.038
8	3.0409	3.038	25	3.0400	3.034
9	3.0406	3.039	26	3.0403	3.039
10	3.0393	3.039	27	3.0404	3.038
11	3.0404	3.039	28	3.0412	
12	3.0404	3.039	29	3.0409	
13	3.0403	3.040	평균 주 기값	3.0406	3.039
14	3.0403	3.038	중력가 속도 값 (%)	9.8811	9.895 ±
15	3.0401	3.035		± 6.416	4.365 ×
16	3.0411	3.040		0×10^{-4}	10^{-4}
17	3.0409	3.039			

표 1. pendulum mode에서 타사제품과의 비교 실험치
Table 1. experimental value compared product of other company at pendulum mode

3. 결 론

본 연구는 물리학 실험에 필요한 중력 가속도 측정용 위한 실험 장치를 개발하는 것이다. 중력 가속도를 구할 수 있는 실험 장비로써 좀 더 신뢰성 있고 실험자들이 실험하기 쉬운 방법으로 실험할 수 있는 시스템의 개발이 요구되었다. 그리고 식(3), (5), (10)를 만족시킬 수 있는 시스템이 요구되었다.

개발된 시스템은 4가지 모드가 있고 gate mode는 식(5)를 만족시킬 수 있도록 프로그램 되고 설계되었으며, pulse mode는 식(3)을 위하여 프로그램 되고 설계되었다. 식(10)을 만족시키기 위하여 pendulum mode가 프로그램 되고 설계되었다. 이 모든 mode를 제어하기 위하여 processor는 Atmel사의 AT90S8515를 사용하였으며 CCP module의 capture 기능을 이용하여 16bit timer TMR1의 시간을 저장하고 식(11)에 의하여 계산하였다. 이때 TMR1은 1μsec분해능을 가진다. 계산된 data는 20개까지 저장 가능하도록 하였다.

개발된 중력 가속도 측정 시스템의 정확도를 실험하기 위하여 pendulum mode에서 식(10)을 가지고 실험하였다. 진자의 길이를 $L=2.314m$ 이고, 진자가 연직과 이루는 각도는 $\theta=1.6592^\circ$ 였으며 10 pendulum을 1회 실험으로 하여 29회 실험했더니 평균주기값

$T=3.0406\text{sec}$ 가 되어 $g=9.8821\pm 6.416\times 10^{-4}$ 의 중력 가속도 값을 얻어 낼 수가 있었다. 현재 시중에서 가장 많이 쓰이고 있는 수입 제품을 가지고 비교 실험한 결과 정확도에서 더욱 정확하게 측정되는 것을 표1에서 알 수가 있었다.

pendulum mode에서의 실험은 공기의 저항 외에는 실험의 방해 요소가 없기 때문에 정확한 실험 data를 얻어 식(10)에 의하여 중력 가속도를 정확히 구할 수 있는 장점이 있다.

그러나 많은 양의 실험을 해야 하고 진자 운동의 pendulum 실험으로 중력가속도를 구해야 한다.

실험자들은 자유낙하시의 중력 가속도를 측정하고 확인하는 것이 편하게 여겨지므로 향후의 연구 방향은 좀 더 쉽고 간편하게 실험 할 수 있는 자유 낙하시의 중력 가속을 구할 수 있어야 한다.

자유 낙하시의 중력가속도 공식 식(3)과 식(5)를 위하여 초기 속도를 완전히 0로 만들 수 있는 실험 장치의 개발이 요구되고 자유 낙하시의 순간 속도를 측정할 수 있는 실험 장치를 개발이 필요하다.

(참 고 문 헌)

[1] ATMEL company, The manual of 8-bit AVR microcontroller with 8K Byte In-System Programmable Flash, ATMEL, Rev 0841 (2000) p1~51
 [2] 정기철·한홍석, Newtech 51, 도서출판 세화 p59~83
 [3] STEPHEN C. GATES, JORDAN BECKER, LABORATORY AUTOMATION USING THE IBM PC, PRENTICE-HALL, ENGELWOOD CLIFFS, NEW JERSEY, (1989), Appendix A.
 [4] 김석주, C로 하는 하드웨어 건드리기 1st, PC 어드밴스 p22~35
 [5] 가남사 편집부 역, INTERFACING TO THE IBM PERSONAL COMPUTER, 가남사 (1993), Chap 3, 9, 11
 [6] 황근창·김성곤, 컴퓨터 연동 시간 측정 기기의 개발, 원광대학교 기초자연과학연구소 (1997) p11
 [7] 황근창, 물리학 전공 실험을 위한 컴퓨터 연동 시간 측정 기기의 개발, 원광대학교 기초자연과학연구소 (1997) p11
 [8] 박용수·배효관·허기증·허윤석·황금주, 디지털 논리 설계와 응용, 북두출판사 Chap 6, 7
 [9] 진달복, 마이크로 컴퓨터, 청문각 Chap 4, 5
 [10] 진달복, 컴퓨터구조, 청문각 p192~195
 [11] 김종섭·유충용, 21세기 정보화 사회를 위한 Logic circuit, 광명출판사 p294~319
 [12] 김태현·김영민·윤근수, 알기 쉽게 해설한 논리 회로, 이한출판사 Chap 8, 9
 [13] 이두복, 디지털 시스템 공학, 상조사(尙潮社) Chap 8
 [14] 조영준, [AVR] AT90S8515, Ohm 사 Chap 2 부
 [15] 이태원·임인철 공역, 디지털회로설계, 사이텍 미디어 Chap 6, 7
 [16] N세대를 생각하는 교수 모임, N세대를 위한 전기 전자기초, (주)북스힐 p354~355