

Building a DIY Muon Detector Using Cherenkov Radiation with a PMT and Study on the Muon Screening in Lead

Hayoung OH · Jaehyeon WOO · Haewon LEE*

Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

(Received 23 March 2018 : accepted 27 April 2018)

Cherenkov radiation originating from charged particles moving fast in water can be detected by using photoelectron multiplier tubes. Using this fact and apparatuses easily obtained from the Physics Department, we were able to build a muon detector for educational purposes. With this detector, we tried to detect muons reaching Earth's surface from above. The kinetic energy of the muons decreases as they move in lead materials. Using the detector, we investigated how the number of muon signals varies with the shield thickness and the ways of placing the lead shields.

PACS numbers: 14.60.Ef, 29.40.Ka, 29.40.-n, 01.40.E-

Keywords: Cherenkov radiation, Muon detector, Photomultiplier tube, Lead shielding

체렌코프 복사와 광전자 증배관을 이용한 뮤온검출기 제작 및 납에 의한 뮤온 차폐 효과 연구

오하영 · 우재현 · 이해원*

충북대학교 물리학과, 청주 28644, 대한민국

(2018년 3월 23일 받음, 2018년 4월 27일 개재 확정)

빠른 전하입자가 물 속을 통과할 때 발생하는 체렌코프 광을 광전자증배관(photoelectron multiplier tube, PMT)으로 검출할 수 있다. 이 현상을 이용하여 비싼 기기 대신 물리학과에서 어렵지 않게 구할 수 있는 기기 만으로 교육용으로 사용할 수 있는 뮤온검출기를 자작(do-it-yourself, DIY) 하였다. 또한 이 뮤온 검출기를 사용하여 대기에서 발생하여 지상에 도달하는 뮤온을 간접적으로 확인하고자 하였다. 뮤온은 밀도가 높은 물질인 납(lead)을 통과할 때 운동에너지가 감소하는 것으로 알려져 있다. 따라서 검출기를 이용하여 납 차폐체의 두께와 배치 방향에 따른 뮤온 신호의 변화를 알아보는 실험을 하였다. 이 실험을 통해 납 두께가 두꺼워지면 신호가 감소하고 배치방향에 따라서도 신호가 달라지는 것을 확인하였다.

PACS numbers: 14.60.Ef, 29.40.Ka, 29.40.-n, 01.40.E-
Keywords: 체렌코프 복사, 뮤온 검출기, 광증배관, 납차폐

*E-mail: hwlee@chungbuk.ac.kr

I. 서론

지상에서 많은 우주선 (cosmic rays)이 발견되는데 그 중에 뮤온은 양성자와 전자와 더불어 많이 발견되는 약한 상호작용을 하는 매우 중요한 입자이다. 우주에서 날아오는 큰 에너지를 가진 입자들이 대기층의 원자와 충돌하고 여기서 뮤온이 발생하여 지상에 도달하는 것이다.

최근에 미국의 한 대학에서는 뮤온을 검출할 수 있는 휴대용 검출기를 100불 이하의 저렴한 비용으로 제작하는 방법을 개발하고 이를 일반인이나 학생들에게 교육용으로 널리 보급하고 있다 [1,2]. 이의 작동원리는 다음과 같다. 플라스틱 섬광체 (scintillator)와 실리콘으로 된 광증배기 (photomultiplier)를 사용하고 여기서 나오는 신호를 선형 증폭회로를 사용하여 증폭한 후 전자회로 개발 보드인 아두이노 (Arduino)로 분석하여 뮤온신호를 잡아내는 것이다.

우리 학과에서도 몇 학부 학생들이 모여 현재 물리학과에서 구할 수 있는 기기만을 사용하여 학부 수준의 교육용 뮤온검출기를 제작해보기로 하였다. 우리는 다른 원리를 사용하기로 하였다. 수명이 $2.2 \mu\text{s}$ 인 뮤온이 높은 곳에서 발생한 후 지상에 도달하려면 매우 빠른 속력을 가져야 한다. 왜냐하면 특수상대성이론의 시간지연 현상에 의해 더 먼 거리를 달려올 수 있기 때문이다. 빠른 전하가 물 속을 통과하면 그 궤적을 따라 체렌코프 복사가 일어난다. 물 속에서의 빛의 위상속도 ($0.75c$) 보다 빠른 속도를 가지면 된다. 뮤온이 물속을 지날 때 발생하는 체렌코프광이 광증 배관에 쪼여졌을 때 나오는 전자들이 만드는 전류신호를 찾아내어 뮤온을 검출하는 방법을 사용하기로 하였다.

또한 만약 납 두께가 충분하다면 뮤온의 운동에너지가 뮤온이 물 속에서 체렌코프 효과를 일으키는 에너지 하한값인 158.7 MeV 보다 낮아져서 검출되지 않을 것이라고 예상하였다. 그래서 뮤온에 의한 신호는 납 두께를 증가시키면 감소하는 경향을 보일 것이라 생각하여 납에 의한 차폐 효과를 조사하였다.

그리고 대기 발생 뮤온의 유량은 천정각 θ 에 따라 $\cos^2(\theta)$ 에 비례하는데, 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다 [3].

$$I(\theta) = I_0 \cos^2(\theta) [\text{s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-2}]$$

θ 가 커짐에 따라 뮤온 신호가 감소하는 경향을 보인다. 이를 확인하기 위해 납의 배치를 바꿔가면서 뮤온 신호가 달라지는 효과를 조사하였다.

검출기의 제작과 신호 분석 모두 학부생 수준 내에서 진행되었으며, 이를 물리교육용 데모장비로 개발하면 교육과정 내에서 중고등학생들이 입자물리와 특수상대성이론을 이해하는데 도움이 될 수 있을 것이라 생각한다.

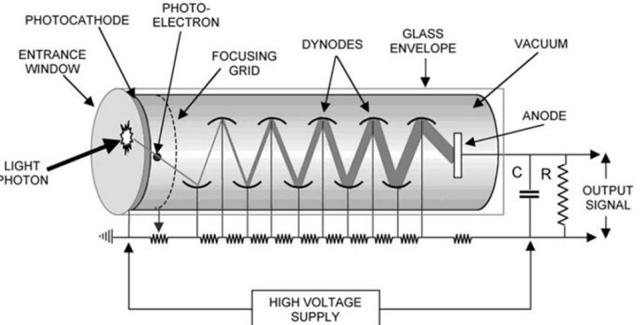


Fig. 1. Structure of the multiplier tube [8].

II. 이론적 배경

1. 광전자증배관의 구조와 원리

광전자증배관 (Fig. 1)은 약한 빛을 증폭시키는 기기로 광전음극 (photocathode), 다이노드 (dynode) 그리고 전극 (anode)으로 구성되어 있다. 광자가 광전음극에 도달하면 광전효과에 의해 전자가 방출된다. 이 전자들은 여러 다이노드를 거치면서 2차 방출 (secondary emission)에 의해 그 수가 점점 더 많아지면서 외부 장비로 읽을 수 있는 크기의 전류 신호를 만든다. 다이노드에서 나오는 전자의 수를 증폭시키기 위해 일반적으로 1000 V 이상의 고전압을 가한다.

2. 체렌코프 복사

하전 입자가 굴절률 n 인 유전체 매질을 통과할 때, 입자의 궤적을 따라서 유전 분극이 발생했다가 사라지며 빛의 형태로 에너지를 방출한다. 이때, 통과한 하전입자의 속도 (v)가 매질에서의 빛의 위상속도 (c/n)보다 빠르면, 하전입자보다 느리게 움직이던 광파가 하전입자가 앞서가서 만든 광파와 같은 파면을 이루게 된다. 이것을 체렌코프복사라고 한다. 이때 광파의 진행 방향과 하전입자의 진행 방향 사이의 각 (θ)은 하전입자의 속도와 다음 관계식을 만족한다 [4].

$$\cos(\theta) = \frac{1}{\beta n}$$

여기서 $\beta = \frac{v}{c}$ 이고 $\beta n > 1$ 이다.

3. 뮤온의 생성과 특성

우주에서 지구로 날아오는 우주선이 지상 10 km 이상의 높이에서 공기 분자와 충돌하면 2차 우주선 (secondary

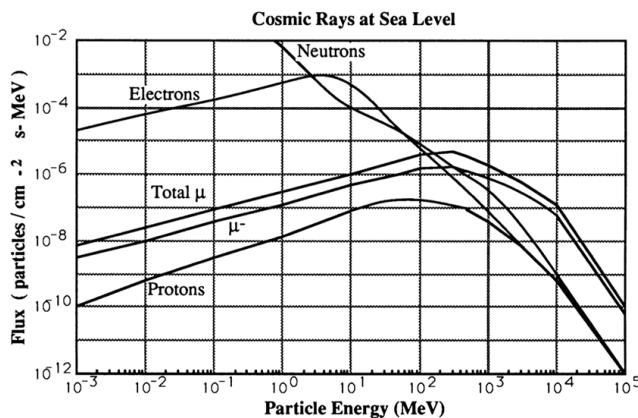


Fig. 2. Distribution of kinetic energy of muons reaching the ground [9].

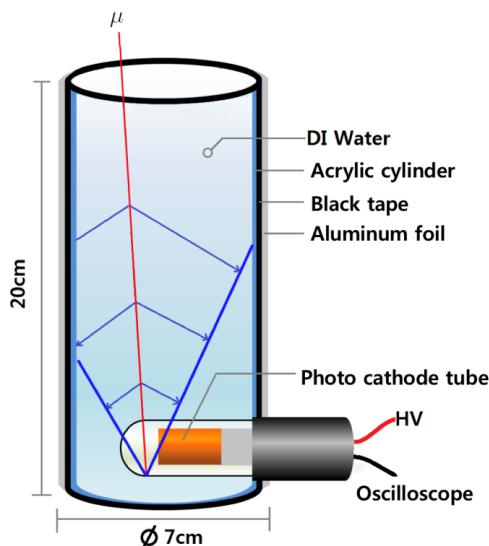


Fig. 3. (Color online) Schematic diagram of muon detector.

cosmicray)이 발생한다. 이들 중 π 중간자와 K 중간자가 붕괴할 때 뮤온이 생성된다. 뮤온은 전하량 $\pm e$ 의 전하를 갖는 페르미 입자로, 정지 질량 $105.7 \text{ MeV}/c^2$ 를 갖고 수명이 $2.2 \mu\text{s}$ 인 경입자이다. 높은 대기층에서 발생한 뮤온은 특수상대성이론의 시간지연효과에 의해 수명이 늘어나 먼 거리를 여행하여 지상에 도달한다.

예를 들어 속도 $0.9998c$, 즉 에너지 5 GeV 의 뮤온이 움직일 수 있는 거리는 다음과 같다.

$$\text{이동거리} = 0.9998c \times 2.2 \times 10^{-6} \text{ s} \times 50 = 32.934 \text{ km}$$

물론 이 뮤온이 대기속을 운동하는 동안 에너지를 잃어버려 실제로는 이보다는 짧은 거리를 여행하고 붕괴한다. 그러나 지상에 도달하기에는 충분하다.

Table 1. Properties of HAMAMATSU R636-10 model.

Spectral response	$185 \sim 930 \text{ nm}$
Wavelength response	$300 \sim 800 \text{ nm}$
Rise time	2 ns
Transit time	20 ns



Fig. 4. (Color online) Complete muon detector.

지상에 도달하는 뮤온의 운동에너지 분포는 Fig. 2와 같다. 또한 지상에 도달하는 뮤온의 평균 에너지는 대략 4 GeV 로 알려져 있다 [5].

4. 납에 의한 뮤온의 차폐효과

뮤온은 상대적으로 높은 질량을 갖기 때문에 물질을 통과할 때 에너지를 쉽게 잃지 않는다. 하지만 납과 같이 밀도가 높은 물질을 통과할 때에는 운동에너지의 손실이 높은 것으로 알려져 있다. 뮤온 입자가 납을 통과할 때 단위길이 당 잃어버리는 운동에너지는 다음과 같다 [7].

$$-\frac{dE}{dx} = 1.12 [\text{MeV } \text{cm}^2/\text{gr}] \times 11.3 [\text{gr}] = 12.7 [\text{MeV}/\text{cm}]$$

III. 검출기 제작 및 실험 설정

검출기의 모식도는 Fig. 3과 같다. 검출기의 제작에는 3차 증류수(deionized water), 원통형 아크릴관 그리고 광전자증배관을 활용하였다. 3차 증류수를 담은 원통형 아크릴관 하단에 광전자증배관을 위치시켜, 입자가 증류수를 통과

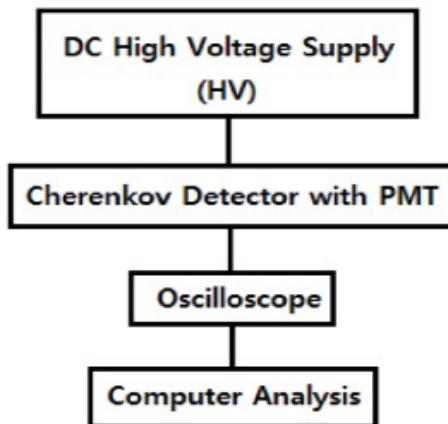


Fig. 5. Experimental Circuit.

할 때 발생되는 체렌코프 복사광을 증폭하여 외부 장비로 출력시켰다.

광전자증배관으로는 물리학과 광학실험실에서 사용되는 HAMAMATSU사의 R636-10 모델(side-on type)을 사용하였다. 그 특성은 Table 1과 같다. 아크릴관의 크기는 광전음극 부분이 검출기 중앙에 위치되도록 지름 7 cm로 설정하였고, 높이는 체렌코프 복사각과 뮤온이 주로 입사하는 방향을 고려하여 20 cm로 설정하였다. 또한, 검출기 외벽에 빛과 전자기파를 차단하기 위하여, 검정테이프와 알루미늄 호일로 처리하였다. 실제 뮤온 검출기의 모습은 Fig. 4에 나타내었다.

이 실험의 회로 구성은 Fig. 5과 같다. 직류 고전압 전원으로는 HAMAMATSU사의 C3360모델을 사용하였고, 이를 통해 광전자증배관으로 980 V의 고전압을 입력하였다. 광전자증배관을 거쳐 증폭된 신호는 오실로스코프 자체의 데이터저장 기능을 이용하여 저장하였다. 저장한 데이터는 컴퓨터로 옮겨 Python과 LabView를 이용하여 분석하였다.

1. 실험 1

납 두께에 따른 뮤온 신호의 변화를 확인하기 위하여, 검출기 위로 가로 20 cm, 세로 20 cm 그리고 두께 5 cm인 납 차폐체를 겹겹이 쌓아올렸다 (Fig. 6). 이때, 아무것도 올리지 않은 상태부터 최대 높이 50 cm까지 5 cm씩 납의 두께를 늘려가며 두께에 따른 신호의 경향을 조사하였다.

2. 실험 2

위에서 내려오는 뮤온의 방향, 즉 천정각에 따라 검출되는 뮤온 신호의 변화를 확인하기 위하여, 납을 다음과 같은 세 가지 방법으로 배치하고 데이터를 측정하여 비교하였다.

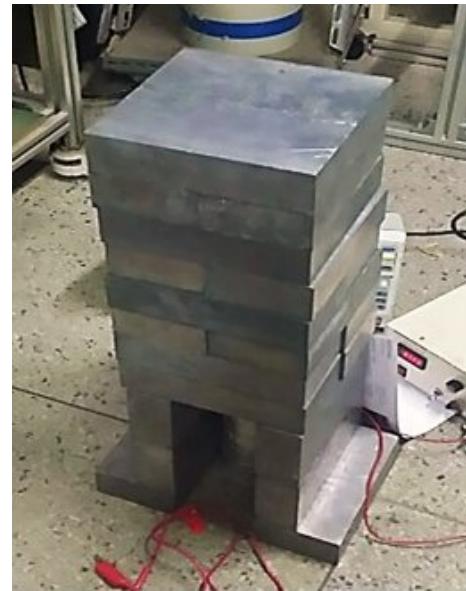


Fig. 6. (Color online) Experiment 1. Shape of the lead shield. The detector is located under the lead shield.

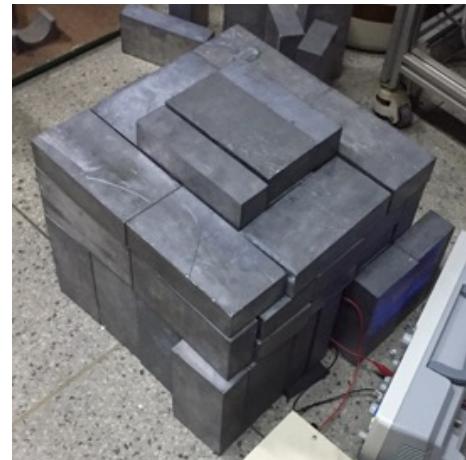


Fig. 7. (Color online) Case (iii) of Experiment 2. Shape of the lead shield. The detector is located inside the lead shield.

(i) 검출기에 차폐를 하지 않은 경우

(ii) 20 cm × 20 cm × 15 cm 크기를 가진 직육면체 형태의 납차폐 아래에 검출기를 위치시킨 경우

(iii) 가로, 세로와 높이가 40 cm × 40 cm × 35 cm이고 벽면의 두께가 15 cm 인 직육면체 형태의 차폐체 내부에 검출기를 위치시킨 경우 (Fig. 7)

배치 (ii)는 검출기 잇 방향에서 들어오는 뮤온의 신호를 감소시킬 수 있다고 생각하였고, 배치 (iii)은 지면위의 모든 방향에서 오는 뮤온의 신호를 감소시킬 수 있다고 생각하였다.

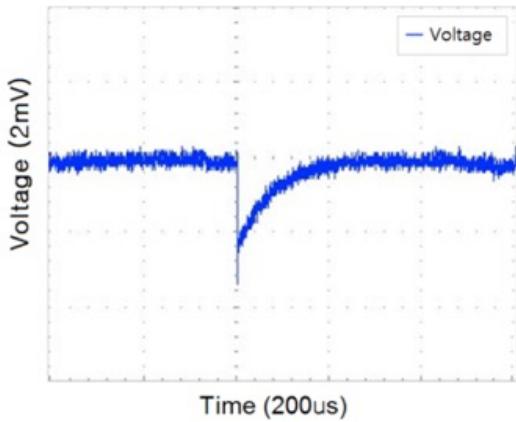


Fig. 8. (Color online) Typical pattern of signals on the oscilloscope screen.

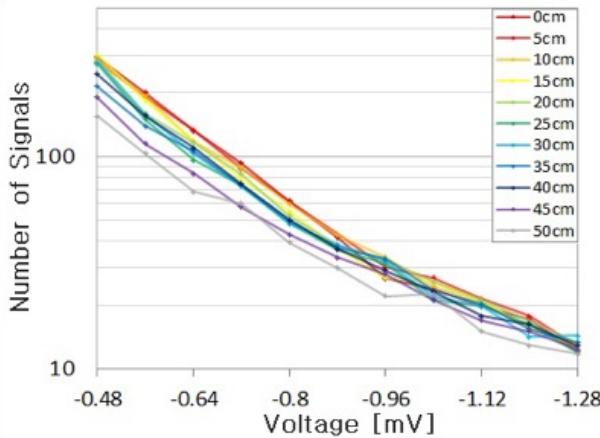


Fig. 9. (Color online) -0.48 mV to -1.28 mV range of signals according to lead thickness.

IV. 측정 및 분석

뮤온에 의한 전류 신호는 오실로스코프에 연결하여 얻었다. 이때 voltage scale은 0.08 mV 그리고 time/div는 50 μ s로 잡았다. 한 개의 데이터 파일에는 100초 분량의 200 만개의 데이터가 저장되었으며, 한 설정 당 측정을 10회 이상 반복하여 약 1000초 분량의 데이터를 수집하였다. 이때, 오실로스코프상에 나타나는 신호의 형태는 오실로스코프 내 RC회로의 특성상 $V = -V_0 e^{-t/RC}$ 의 지수함수 형태를 띠게 된다.

우리는 검출기에서 가장 출현 빈도가 높았던 Fig. 8의 신호 형태를 유의미한 신호로 가정하였다. 오실로스코프에서는 50 μ s마다 데이터를 측정하기 때문에 Fig. 8과 같은 신호는 지수함수의 형태적 특성에 따라 피크의 최하점보다는 복원 되고 있는 시점에서 데이터가 더 많이 측정된다. 따라서 실제 피크의 크기보다 작은 크기의 피크로 측정 될 가능성이 높다. 또한, 수집한 데이터에서 ± 0.4 mV이내 영

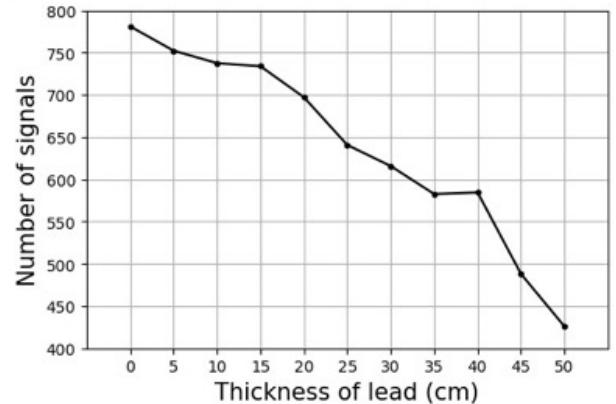


Fig. 10. Results of experiment 1. Graph when the thickness of lead shield is increased by 5 cm from 0 to 50 cm above the detector for 1000 seconds.

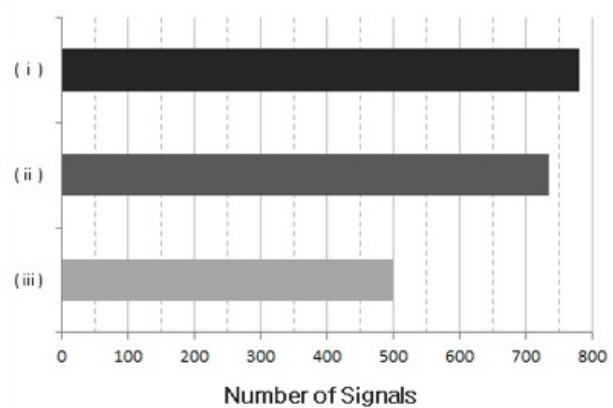


Fig. 11. Results of experiment 2. Graph of the number of signals according to the shape of the detector in each cases for 1000 seconds.

역은 외부에서 온 노이즈와 오실로스코프 자체의 노이즈가 존재하는 구간으로 생각하였다. 이러한 가정하에, -0.48 mV부터 -1.28 mV까지 0.08 mV 마다 해당하는 크기의 신호 갯수를 납의 두께에 따라 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9를 보면 크기가 큰 데이터일수록 경향성에서 벗어나는 것을 볼 수 있다. 큰 크기의 피크는 비교적 발생 빈도가 낮았는데 그 경향성을 보기에는 측정을 진행한 시간이 불충분하여 이러한 결과가 나왔다고 생각한다. 따라서, 우리는 경향성이 잘 보이는 -0.48 mV ~ 0.8 mV 구간을 유의미한 신호가 포함된 범위로 가정하여 분석을 진행하였다.

V. 실험 결과

Fig. 10을 보면, 실험 1에서 납 두께가 증가 함에 따라 신호의 수가 감소한다는 것을 알 수 있다. 대략 납 두께 5 cm마다 약 6.7%씩 감소하는 경향이 나타난다.

Fig. 11을 보면 실험 2에서, 납 차폐체가 없는 경우 (i)에 비해 납 차폐체를 (ii) 또는 (iii)과 같이 배치한 경우에 신호의 개수가 각각 6.0%과 36.0% 정도로 감소하는 것으로 나타났다.

VI. 토론

물에서 체렌코프 복사를 일으키는 뮤온의 에너지는 대략 159 MeV 보다 커야 한다. 159 MeV 일 때에는 복사광은 뮤온과 같은 진행 방향을 갖으나 에너지가 증가하면서 최대 42° 까지 벌어진다. 지상에 도달하는 뮤온의 평균에너지 4 GeV를 갖는 뮤온이라면 대략 42° 의 각을 가질 것이다. Fig. 3에서와 같이 옆으로 눕혀 설치된 원통형 PMT의 윗쪽 옆면에 $2 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 의 작은 센서창이 있는데 이곳에 도달한 체렌코프광에 의해 광전자들이 튀어나오게 되어있다. 검출기의 물통 안으로 진입한 충분히 빠른 대전입자가 만든 체렌코프광은 물전체에 퍼지고 위의 센서창에 도달하여 신호를 발생시킨다.

실험 1에서 납의 두께가 증가함에 따라 검출되는 신호가 줄어든다는 것을 확인하였다. 납 한 층의 두께가 5 cm이므로 이를 통과하는데 뮤온은 대략 60 MeV 보다 큰 에너지를 잃을 것이다. 10 층의 납을 모두 통과하고 체렌코프 복사를 일으키려면 760 MeV 보다 큰 에너지를 가져야 할 것이다. 9층의 납인 경우에는 대략 700 MeV이므로 줄어든 신호는 $700 \text{ MeV} \sim 760 \text{ MeV}$ 범위의 뮤온에 의한 것으로 볼 수 있다. 비스듬히 내려오는 뮤온의 경우에는 수치가 조금 달라질 것이다. Fig. 2를 보면 $160 \sim 760 [\text{MeV}]$ 범위에서 뮤온 flux가 대략 $3 \sim 4 \times 10^{-6} [\text{1/cm}^2 \cdot \text{MeV} \cdot \text{s}]$ 이다. 검출기의 윗 면적은 40 cm^2 이고 1000초 동안 쟁으니, 60 MeV 폭에서 뮤온의 갯수는 대략 10개 정도가 나온다.

Fig. 10의 실험 결과에 의하면 10층의 경우 대략 350개의 차이가 난다. 따라서 평균하면 한 층 차이로 35개 정도의 뮤온이 더 검출된다. 또한 두께가 증가할수록 (뮤온의 에너지가 증가할수록) 갯수가 증가하는 경향을 보인다. 이 결과는 위에서 계산한 알려진 결과에 비해 수배 크다. 뮤온이 비스듬히 내려오는 경우를 고려한 좀 더 자세한 분석이 필요하고 뮤온 외의 입자들에 의한 효과, 오실로스코프를 사용한 측정에서 샘플링 시간 그리고 의미있는 신호의 정의 등을 개선해야 한다. 또한 sea level에서의 알려진 결과와 비교하여 보정을 하는 과정을 거치는 것이 필요할 것 같다.

한편 본 실험에서 얻는 신호가 뮤온에 의한 것인지는 이 실험으로는 증명할 수 없지만 지상에 발견되는 우주선 입자의 분포를 볼 때 뮤온에 의한 것이 큰 부분을 차지할 것으로

생각한다. 또한 실험실에서 발생한 자연방사능 물질에 온 입자도 이런 체렌코프 복사를 일으킬 수 있다.

실험 2에서 납차폐의 형태에 따라서 검출되는 신호의 개수가 달라지는 것을 확인하였다. 차폐를 하지 않은 경우 (i)에 비해 검출기의 윗방향에 차폐체가 존재하는 경우 (ii), 같은 두께의 차폐체가 검출기의 사방에 존재하는 경우 (iii)를 비교하여보았을때, 신호의 수가 감소하는 것을 보아 우리가 검출한 신호는 윗방향 뿐 아니라 사방에서 들어온 신호라는 것을 알 수 있다. 그러나 천정각에 의존하는 뮤온의 신호 뿐 아니라 자연방사능 또한 방향성이 없이 사방에서 올 수 있는 신호로 알려져있다. 다만, 자연방사능에 의한 입자의 신호는 뮤온보다 차폐가 쉬운것으로 알려져 본 실험 결과의 다수는 자연방사능에 의한 것일 가능성이 높다고 생각한다. 하지만 대기 발생 뮤온의 운동에너지는 넓은 분포를 가지고 있기 때문에 낮은 운동에너지를 갖는 뮤온은 본실험에 의도대로 차폐되었을 수 있다고 생각한다.

본 실험에서는 쉽게 구할 수 있는 물을 이용하여 눈에 보이지 않는 입자들을 간접적으로 확인할 수 있는 체렌코프광 검출기를 저렴한 재료를 이용하여 간단하게 구현하였다. 이는 입자 실험용으로 쓰이는 목적 보다는 중등교육과정 학생들을 위한 교육용 장비로의 활용을 목적으로 하였다. 학생들이 직접 지도교사의 지도 아래 본 실험을 진행한다면, 입자물리와 특수상대성이론의 내용을 가시적으로 확인하면서 그 이해를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

이 실험의 개선사항으로, 전치 증폭기 (pre-amplifier)를 함께 사용하면 신호의 크기를 증폭시킬 수 있어 노이즈와의 구분이 명확해질 수 있을 것이다. 또한, 검출기에 물을 넣지 않고 측정을 하면 광전자증배관 자체의 노이즈를 확인하여 실험분석에 활용할 수 있을 것이다. 마지막으로, 검출기를 180° 뒤집은 상태에서 측정을 진행하면 대부분의 뮤온 체렌코프광이 광전자증배관의 광전음극에 도달하지 못하여, 자연방사능에 의한 신호를 확인할 수 있을 것이다. 이를 이용하면 검출기에 도달한 뮤온의 신호를 추려낼 수 있을 것이라고 생각한다.

REFERENCES

- [1] S. N. Axani, J. M. Conrad and C. Kirby, *Am. J. Phys.* **85**, 948 (2017).
- [2] S. N. Axani, *Phys. Today* **June** (2017).
- [3] L. Lulu and S. Pablo, *The Speed and Lifetime of Cosmic Ray Muons* (MIT undergraduate, 2007).
- [4] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics* (Wiley, 2012) pp. 637-640.

- [5] The Review of Particle Physics, *Cosmic Rays*, <http://pdg.lbl.gov/2017/reviews/rpp2017-rev-cosmic-ray.s.pdf> (accessed Mar. 12, 2018).
- [6] R. A. Schumacher, *Cosmic Rays*, http://www-meg.phys.cmu.edu/physics_33340/experiments/mpl_cosmicmuons.pdf (accessed Mar. 12, 2018).
- [7] W. Lohmann, R. Kopp and R. Voss, Energy Loss Of Muons in the energy range 1-1000GeV, CERN Report No. CERN **85-03**, 1985.
- [8] Structure of Photomultifier Tube, <https://www.sense-pro.org/ill-sensors/pmt> (accessed Mar. 12, 2018).
- [9] Distribution of Kinetic Energy of Muons Reaching the Ground, p. 13 in Ref. [6].