

뮤온 검출기의 측정 각도에 따른 뮤온 검출량 변화의 분석

배 기 훈*

무룡고등학교, 울산 683-804

(2015년 2월 3일 받음)

뮤온 검출기의 측정 각도에 따른 단위 시간당 뮤온 검출량의 변화를 분석하고, 감소 추세를 계산하여 결과값을 분석, 원인을 추론하였다. 실험 가설으로 “지표면에 도달하는 뮤온은 확률적으로 최소 이동 거리인 지표면에 대해 수직으로 입사하는 뮤온이 가장 많을 것이다” 를 설정하였으며, 그 근거로 뮤온의 이동 속도와 뮤온의 수명에 근거하여 뮤온의 한계 이동 거리를 계산하고, 뮤온의 형성 고도에 근거하여 뮤온의 지표면에 대한 최대 입사각($64.559-85.396^\circ$)을 계산하여 제시하였다. 이를 바탕으로 실험을 수행 후 실험 데이터를 최소자승법으로 분석하여 측정에 사용한 검출기의 각도가 10도씩 증가할 때마다 평균적으로 10분당 측정되는 뮤온의 개수가 약 9.0667개 감소함을 알아내었으며, $30^\circ-40^\circ$ 지점과 $50^\circ-60^\circ$ 지점에서 검출되는 뮤온의 개수가 급격하게 감소하는 것을 관찰하였다.

PACS numbers: 01.50.Pa, 95.55.Vj

Keywords: 최대 입사각, 한계 이동 거리, 뮤온 검출량

*E-Mail:ghb@10wonsoft.wo.tc

Analysis of Muon Count Variations According to Detector's Measuring Scale

Gi Hoon BAE

Muryong High School, Ulsan 683-804

(Received 3 February 2015)

I have analyzed muon count variations according to detector's measuring scale, calculated declining tendency and analyzed result value, inferring some reason, as a experiment hypothesis, "All muons which come to surface probably will result in those having a maximum of vertical incidences about a ground as a minimum distance." I calculated a limit moving distance based on muon's life span and muon's average velocity, and showed muon's maximum incidence scale for the earth's surface based on muon's average emergence altitude for the hypothesis' proof. After performing the experiment theoretically, I analyzed the measured data by LSM(Least Square Method). Conclusively, I discovered that as the detector's measuring scale gains each 10 degree, muons which are measured per 10 minute decrease averagely each 9.0667 approx, and I saw that on the $30^\circ-40^\circ$ point and $50^\circ-60^\circ$ point, muon counts are radically decreased.

PACS numbers: 01.50.Pa, 95.55.Vj

Keywords: maximum incidence scale, limit moving distance, muon count

I. 서론

방사선이란 방사성원소의 붕괴에 따라 방출되는 입자선 (Particle ray) 및 복사선 모두를 의미한다. [5] 이 중에서도 우주선(Cosmic ray)은 우주에서 기원하는 모든 방사선을 지칭하는 것으로 약 85%는 수소 원자핵(양성자), 약 2%는 헬륨 원자핵(α particle) [1] 로 구성되어 있다. 빅토르 헤스(Victor Franz Hess)가 우주선을 처음 발견 [2] 한 뒤 칼 앤더슨(Carl David Anderson)이 우주선에서 뮤온(μ)과 양전자(e^+)를 발견 [4] 하여 1936년 헤스와 노벨 물리학상을 공동 수상하였다. 또한 2002년에는 고시바 마사토시(小柴昌俊)와 레이몬드 데이비스(Raymond Davis, Jr.)가 고 에너지 우주선으로부터 중성미자를 처음 발견 [3] 하여 노벨 물리학상을 수상하였다. 이와 같이 우주선은 발견 이래 입자물리학 학문을 발전시키는 데 중요한 열쇠를 제공하여 많은 도움을 주었다. 입자물리학에서 우주선을 중요하게 다루는 이유 중 하나는 입자 가속기에서 얻을 수 없는 고 에너지 입자를 자연적으로 얻을 수 있다는 것이다. 이들이 가지는 에너지는 많게는 3×10^{20} eV 이상 에너지를 가지고 있는 입자도 있으며¹ 이는 길이 약 27 km의 양성자 충돌기 CERN의 LHC(Large Hadron Collider)가 입자를 최대한 가속시킴으로써 얻을 수 있는 에너지의 양인 10^{13} eV보다 10^7 배 이상 높은 에너지를 가지고 있는 입자라 볼 수 있다. 이 논문의 목적은 이러한 입자 중 지상에서 가장 흔하게 얻을 수 있는 입자인 뮤온(μ)을 통해 대기를 통과하여 지상으로 입사되는 고 에너지 우주선의 특징을 파악하고 특징에 대한 원인을 추론하는 것을 목적으로 한다.

II. 이론적 배경

우주선은 1912년 오스트리아의 헤스가 처음 발견하였다. 헤스는 직접 기구에 탑승하여 8,000m 상공까지 올라가고, 높은 산에 올라가 고도에 따른 대기의 전기 전도율을 비교하여 고도가 높아짐에 따라 전기 전도율이 빠르게 증가한다는 것을 발견하고 이로부터 우주에서 유래된 투과성이 높은 복사가 지구에 입사된다는 것을 증명하여 1936년에 노벨 물리학상을 수상하였다. [2] 그 후 칼 앤더슨이 1932년 뮤온(μ), 1937년 양전자(e^+)를 발견 [4] 하였고, 1938

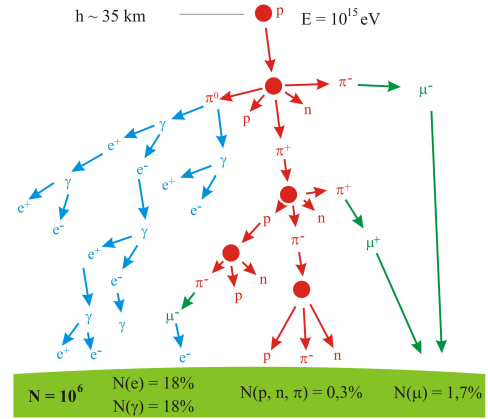


그림 1. Instrument Diagram of EAS [7]

년 오제(Pierre Auger)가 EAS(Extensive Air Shower)를 발견하여 우주선에 대한 연구가 시작되었다. 우주선의 대부분은 양성자(Proton, H^+), 헬륨 원자핵(α particle)으로 구성되어 있다. 이 입자들이 직접 지구 대기권의 상층부에 입사된 것을 1차 우주선이라 한다. 지구에 입사된 입자들은 지구의 대기 중 원자핵(주로 질소)들과 충돌하여 대기 샤워(EAS)라는 2차 입자의 다발이 생성된다. 이때 생성되는 입자는 주로 전자(e), 광자(γ), 뮤온(μ) 입자가 있다. 지상, 상공에서 관측되는 우주선의 범위로는 적게는 10^9 eV 부터 많게는 10^{20} eV 까지 관측되는데 10^9 eV 우주선의 입자의 경우 태양 활동에 의해 가속되는 것으로 추정하고 있으며, 10^{15} eV 이하의 우주선의 경우 우리 은하의 SNR(Supernova Remnant shock wave, 초신성 잔해 충격파)에서 가속되는 것으로 추정하고 있다. 10^{18} eV 이상의 초고에너지 우주선(UHECR, Ultra High Energy Cosmic Ray)의 경우 기원이 불확실하며 단지 우리 은하 내에서 이러한 에너지를 가지는 우주선이 가속될 수 없어 우리 은하 외부에서 가속되어 오는 것으로 추측하고 있다. [11] 10^{15} eV 이상의 입자가 상공 10 – 15km 에서 EAS를 형성하는데, 이 때 1차 우주선이 대기 중 원자핵과 충돌하여 2차 우주선을 만드는 과정은 그림 1을 따른다. EAS는 그림 1과 같이 중성 파이온(π^0)이 붕괴하면서 전자-광자 다발을 이루는 전자기 샤워(Electromagnetic shower)와 양성자(H^+), 케이온, 하전 파이온(π^\pm)등에 의해 형성되는 하드론 샤워(Hadronic shower)로 구성된다. 특히 뮤온(μ)은 케이온(K)과 파이온(π)의 붕괴에 의해 형성되며 그 과정은 다음과 같다.

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) [16] \quad (1)$$

¹ 미국 Fly's Eye 검출기와 일본 AGASA 검출기에서 3×10^{20} eV 에너지를 가진 입자가 검출된 기록이 있다. [10]

$$K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} (\bar{\nu}_{\mu}) \quad [16] \quad (2)$$

이 외에 전하를 띠는 2차 입자들에 의한 체렌코프 복사 (Cherenkov Radiation)와 1차 입자들이 대기 중 질소 입자들과 충돌할 때 형성된 질소의 형광 스펙트럼도 함께 발생한다. [14] 우주선 또한 방사선의 일종이므로 많은 양의 우주선(높은 고도)에 장시간 노출될 시 라듐에 노출된 것과 비슷한 증상을 보인다는 연구 결과가 있다. [12] 이에 대해 ICRP(The International Commission on Radiological Protection)는 항공 승무원에 대한 우주 방사선 노출을 직업상 방사선 노출로 규정하고 노출되는 양을 연간 20 mSv로 제한하도록 권고하고 있으며, [8] Transport Canada에서는 항공 승무원의 연간 피폭량을 6 mSv로 낮출 것을 권고하고 있다. [9] 우주선이 인체에 영향을 줄 수 있다는 연구 결과가 제시되면서 우주선에 많이 노출되는 우주 비행사, 항공 승무원에 대한 실용적인 우주선 차폐 방안이 논의되고 있다.

III. 실험 구축 과정

1. 가설 설정

실험 구축에 앞서 다음과 같은 가설을 설정하였다.

“지표면에 도달하는 뮤온은 확률적으로 최소 이동 거리인 지표면에 대해 수직으로 입사하는 뮤온이 가장 많을 것이다”

뮤온의 평균 수명은 $2.19 \pm 0.01 \mu\text{s}$ [13] 이며 EAS 중 Hadronic shower를 형성하는 과정에서 뮤온이 발생할 때의 속도는 $29.8 \pm 2.5 \text{ cm/ns}$ [13] 이다. 이는 빛의 속도 ($299.792, 458 \text{ m/s}$)와 비교하여 약 0.9940210037 배이다. 뮤온이 형성되는 지점을 지상에서 15 km 위 지점으로 가정하고 특수 상대성 이론에 근거한 시간 팽창 공식 ($t = t_0 \gamma = \frac{t_0}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}$) 에 속도를 대입, 계산하고, 길이 수축

공식 ($L = \frac{L_0}{\gamma} = L_0 \sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}$) (이 때 t_0 은 고유 시간이고, L_0 은 고유 길이이다)에 속도와 상공에서 지상까지의 거리를 대입하여 계산하면 지상 관측자 입장에서의 뮤온의 수명은 약 $20.05695998 \mu\text{s}$ 이고, 뮤온 입장에서의 상공에서 지상까지의 거리는 약 1637.835447 m 이다. 따라서 상공 15 km 위 지점에서 형성된 뮤온이 최대로 갈 수 있는 거리는 (뮤온 입장에서) 약 5976.974074 m 이므로 수직으로 지표면에 입사될 시 도달 가능하다. 이 때 파이온 중간자나 케이온 중간자가 뮤온으로 산란되는 과정에서 뮤온이 지표면과 수직하지 않게 입사될 수도 있으며 우주선은 지구의

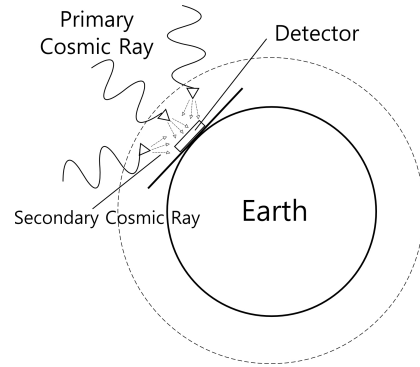


그림 2. Mimetic diagram of cosmic ray into earth

모든 면에서 들어오므로 비스듬하게 입사될 가능성도 있다. (그림 2 참조) 지상 관측자 입장에서의 뮤온이 최대로 갈 수 있는 거리(이하 뮤온의 한계 이동 거리)는 앞서 위에서 제시한 뮤온 입장에서 뮤온이 최대로 갈 수 있는 거리와 로런츠 인자 $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}$ 을 이용하여 계산하면 약 54.73969397 km 라는 값을 얻을 수 있다. 이 때 지표면에 대해 뮤온이 입사될 수 있는 최대의 각도를 그림 3와 같이 계산하였다. 먼저 지표면을 완전히 평평한 직선으로 가정한

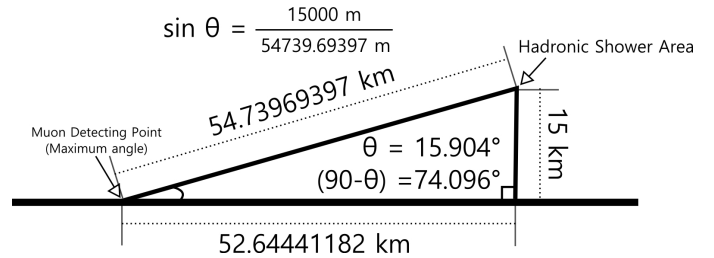


그림 3. Calculation diagram of maximum incidence angle about surface

뒤 지상 관측자 입장에서의 뮤온이 최대로 갈 수 있는 거리 54.73969397 km 를 빗변으로 하고 앞서 Hadronic shower로 인해 뮤온이 생성되는 지점으로 가정한 지표면 위 15 km를 높이로 하는 직각삼각형을 세운다. 이 때 직각삼각형의 밑변의 길이는 $\sqrt{54.73969397^2 - 15^2} \approx 52.64441182 \text{ km}$ 이다. 이는 지구를 완전한 구로 가정하였을 때의 직각삼각형의 밑변을 구성하는 지표면의 한 지점부터 다른 한 지점까지의 각도 차가 0.4729129945° 임을 의미한다. 따라서 지표면을 완전히 평평하다고 가정하여도 큰 오차가 발생하지 않는다. 따라서 그림 3에서 세운 직각삼각형의 각(지표면에 대해 뮤온의 최대 입사각)을 구하기 위해 θ 에 대한 삼각방정식 $\sin\theta = \frac{15}{54.73969397}$ 를 놓고 풀면 $\theta = 15.904^\circ$. 즉 뮤온의 최대 입사각 $(90 - \theta) = 74.096^\circ$ 가 나온다. EAS가 주로 상공 10 - 15 km 부근에서 일어나고, 뮤온의 평균

수명의 허용 오차 $\pm 0.01 \mu\text{s}$, 뮤온의 평균 속도의 허용 오차 $\pm 2.5 \text{ cm/ns}$ 를 감안하면 위 계산을 토대로 뮤온의 입사 각이 $64.559 - 85.396^\circ$ 이 되는 구간에서 측정되는 뮤온의 개수가 급격하게 줄어들 것으로 예상된다.² 따라서 불규칙한 입자의 산란 가능성, 대기 입자와의 상호 작용 등의 변수를 고려하면 지상에서 검출되는 뮤온 입자는 확률적으로 최소 거리인 지표면으로부터 수직인 방향으로 입사하는 양이 가장 높을 것이며, 검출이 가장 많이 될 것이다.

2. 실험 장비의 측정 원리

실험에 사용한 장비로 동시 계수법을 이용하는 Light Guide(빛 유도기), Plastic Scintillator(플라스틱 섬광판), Photomultiplier Tube(PMT, 광전자 증배관)로 구성된 간단한 뮤온 측정기를 직접 제작하여 사용하였다. 측정 원리는 다음과 같다. 대기 중 입자가 플라스틱 섬광판에 입사하면 플라스틱을 구성하는 H, C 및 O 원자들과 전자기적 상호 작용을 하면서 입자가 가지고 있는 에너지의 일부분을 손실, 자외선의 형태로 방출하며 통과한다. 이 때 섬광판에 첨가된 형광 발생 물질 POPOP가 자외선을 흡수하여 파장 420 nm 녹색 계열의 형광 광자를 발생시킨다. 이 광자들이 섬광을 형성하여 빛 유도기를 통해 PMT로 유도되면 광전 효과로 인하여 PMT의 음극판(Cathode)에서 전자가 형성된다.(그림 4) 이들은 연속적으로 배열된 다이노드

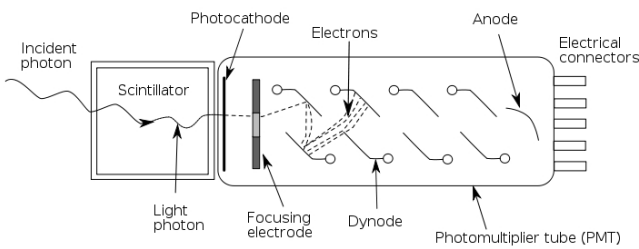


그림 4. Structure of photomultiplier tube [6]

(Dynode)에서 전자 증배 과정을 거쳐 양극판(Anode)에서

² $85.396^\circ (\theta = 4.604^\circ)$ 는 뮤온의 속도를 최대 속도인 29.9 cm/ns (참조한 논문에서 제시한 값은 최대 32.3 cm/ns 까지 가능하다고 나와 있으나 이는 빛의 속도를 넘어 특수 상대성 이론에 위배되는 값이다.) 로 두고, 뮤온의 수명을 최대 수명인 $2.2 \mu\text{s}$ 로 두고 계산한 값이며, $64.599^\circ (\theta = 25.441^\circ)$ 는 뮤온의 속도를 평균 속도인 29.8 cm/ns 에서 최대 속도의 편차 0.1만큼을 빼준 값 29.7 cm/ns (역시 참조한 논문에서 제시한 최소 속도인 27.3 cm/ns 를 식에 대입하면 삼각방정식의 sine값이 1을 넘어가게 되어 성립하지 않는 각이 나온다)로 두고, 뮤온의 수명을 최소 수명인 $2.18 \mu\text{s}$ 로 두고 계산한 값이다.

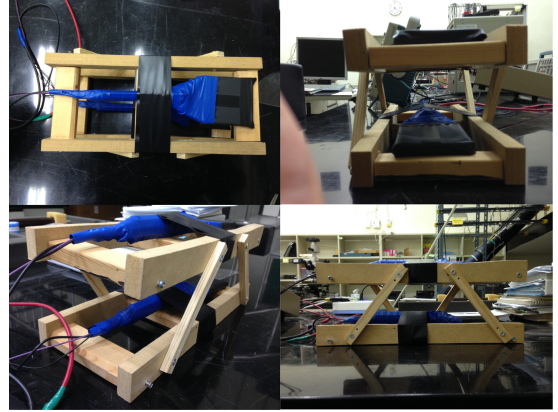


그림 5. Picture of muon detector which uses coincidence counting

전치 증폭기에 음의 전하 펄스 상태로 입력된다. 최종적으로 전치 증폭기에서 출력되는 전기 신호를 연구 목적에 따라 가공하여 사용한다. 동시 계수법은 2개의 섬광판-PMT 모듈을 그림 5와 같이 평행하게 설치하고 동시에 발생하는 신호만 입자의 개수에 반영하는 것이다. 동시 계수법을 이용하면 2개의 섬광판 중 위의 판에서만 에너지를 방출하여 광자를 PMT에 입력하게 하는 입자, 또는 전자기파로 인한 배경 전자기 잡음(Background electrical noise)으로부터 플라스틱 섬광판 위 아래 판을 모두 통과하는 뮤온만을 걸러낼 수 있어 실험 결과를 정확하게 할 수 있다. [15]

3. 실험 장비 구성

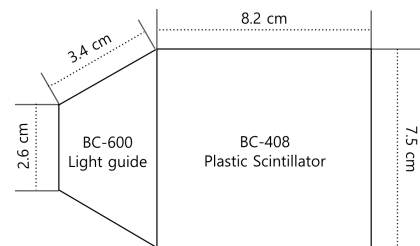


그림 6. Simple blueprint of plastic scintillator

섬광판-PMT 모듈³에서 PMT는 Hamamatsu사의 R647 1조를 사용하였고, 플라스틱 섬광판은 Saint-Gobain사의 BC-408 1조, 빛 유도기는 Saint-Gobain사의 BC-600 1조를 사용하였다. 섬광판의 크기는 가로 $82 * 75 * 10 \text{ (mm)}$

³ 섬광판과 빛 유도기, PMT로 구성되어 있는 부분(이하 섬광판-PMT 모듈)은 제작 시간 상의 문제와 Calibration(오차 교정) 문제로 한국 교원대학교 입자물리실험실에서 제작한 정확도가 검증된 모듈을 사용하였다.

으로 면적은 약 61.5cm^2 이다. (그림 6 참조) PMT-섬광판 모듈을 위해 제작한 받침대(그림 5)는 크기 $350 * 160 * 140$ (mm)이다. 섬광판 사이의 간격은 140 mm가 되도록 제작하였으며, 이 때 뮤온이 섬광판 사이를 통과하는 속도는 약 0.4717068013 ns 이다. 이 논문의 목적은 검출기를 제작하는 것이 아니기에 제작에 대한 자세한 설명은 생략한다. 실험 장비 구성도는 그림 7와 같이 세팅하였다. BC-408

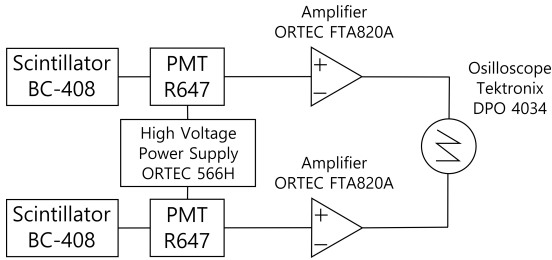


그림 7. Schematic block diagram of experiment equipment

섬광판 2개 각각에 입자가 통과하면 섬광이 발생하여 이로 인해 PMT에서 광전자가 발생하고, 이 전기 신호들이 전치 증폭기 역할을 하는 FTA820A를 거쳐 2개의 채널으로 오실로스코프에 입력된다. 이 중 채널 2개에서 동시에 발생하는 신호만 뮤온의 개수에 반영하였다. R647 PMT는 음극관과 양극관 사이에 걸리는 전압으로 -1000V가 필요하다. 따라서 566H High Voltage Power Supply를 이용하여 PMT 각각에 -1000V 바이어스 전압을 공급해주었다.

4. 실험 방법과 과정

방문 연구로 허락된 시간의 제한으로 인해 DAQ를 이용하여 데이터를 받아 분석하기에는 장비 세팅 시간이 많이 소요되는 관계로 핸드 카운터를 이용하여 오실로스코프에 나타나는 신호를 직접 보고 계수하였다. 섬광판-PMT 모듈을 움직이지 않게 단단하게 받침대에 고정하고 각 모듈을 오실로스코프의 채널 1(위 섬광판), 채널 3(아래 섬광판)에 연결하였다. 측정기의 각도를 0도로 놓은 뒤 10분 동안 측정되는 뮤온의 개수를 세고 10도씩 각도를 올리는 것을 1시행으로 하고 실험을 0도부터 90도까지 하여 총 10시행의 실험을 하였다. 장비 세팅 시간을 제외한 실험 시간은 약 3시간이 소요되었다. 2015-01-14 16:45:52 - 2015-01-14 19:44:22 동안 진행되었다. 그림 8은 섬광판의 윗면(채널 1)에만 섬광이 발생하여 신호가 검출되는 모습이다. 이는 배경 전자기 잡음으로 인해 나타나는 것이다. 그림 9는 뮤온 입자가 섬광판 위 아래 판을 동시에 통과하여 섬광이 동시에 발생, 동시 신호가 검출되는 모습이다. (위 그림은 매우

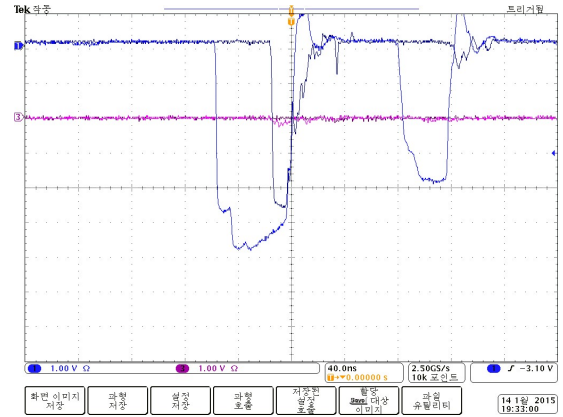


그림 8. Oscilloscope display (Background electrical noise)

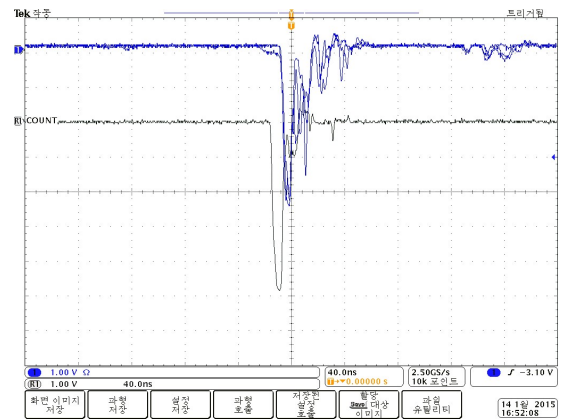


그림 9. Oscilloscope display (Detecting muon particle)

짧은 순간만 일어나므로 오실로스코프의 화면 캡처 기능이 이를 따라가지 못해 채널 3의 뮤온 검출 시 파형만 저장한 뒤 채널 1의 뮤온 검출 시 파형과 겹쳐 재현한 그림이다.)

IV. 실험 결과와 논의

1. 실험 결과 분석

측정기의 각도를 높일수록 대체적으로 검출되는 뮤온의 양이 감소하는 경향성을 보였으며 (표 1 참조), 이를 그래프로 나타내었을 시(그림 10) 단조 감소하는 1차 함수의 그래프를 따르는 분포를 보였다. Excel의 추세선 기능을 이용한 최소자승법 함수를 구하면 다음과 같은 1차 함수와 상관계수 R^2 의 값이 도출된다.

$$y = -9.0667x + 99.067 \quad (3)$$

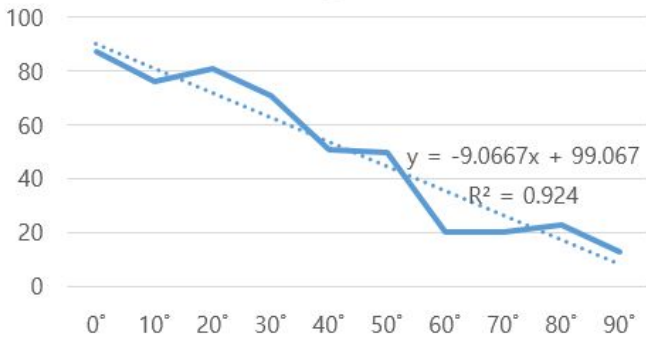


그림 10. Graph of measurement result value

Scale	Muon Count
0°	87
10°	76
20°	81
30°	71
40°	51
50°	50
60°	20
70°	20
80°	23
90°	13

표 1. Table of measurement result value

$$R^2 = 0.924 \quad (4)$$

최소자승법 함수 (3)에 따르면 측정기의 각도를 10도씩 증가시킬 때마다 평균적으로 9.0667개의 뮤온이 감소하고 있음을 알 수 있다. 상관계수 R^2 값 (4)은 표시한 함수가 실험 데이터를 얼마나 적합하게 표현하는가를 표시하는 상관계수이며, 1에 가까울수록 최적화된 함수임을 의미한다. 이 실험에서의 R^2 값은 0.924로 실험 결과 데이터의 분포 경향성이 아주 뚜렷하지는 않지만 주목할 만한 경향성을 띠고 있음을 나타낸다. 또한 30°-40° 지점, 50°-60° 지점에서 검출되는 뮤온의 양이 급격하게 감소하고 있다.

2. 실험 결과 논의, 원인 분석 및 추론

결과적으로 측정기의 각도를 높일수록 뮤온의 검출량이 감소하고 있으며, 이는 앞서 III-1. 가설 설정에서 설정한 바와 같이 뮤온의 수명과 뮤온의 한계 이동 거리가 주요한 원인으로 작용한 것으로 예상된다. 50°-60° 지점에서 검출되는 뮤온의 개수가 급격하게 감소한 것은 가설에서 뮤온

의 개수가 급격히 줄어들 것으로 예측한 64.559-85.396° 구간을 약간 벗어나는 값이나 가설에서 제시한 수치와 거의 근접하다. 그러나 해가 지는 시점에서 실험을 진행하였으므로 해가 지면서 태양 활동의 영향이 감소하여 관측되는 뮤온의 개수가 급격하게 줄어들었을 가능성도 배제할 수는 없다. 85.396° 이상 각도에서 뮤온이 검출되는 것은 EAS로 발생된 뮤온이 처음부터 지표면에 대해 85.396° 이상 입사각으로 접근한 것이 아니라 지표면에 접근하던 도중에 산란되었을 가능성도 있다. 이에 대해서는 좀 더 정밀한 연구가 필요할 것으로 예상된다.

V. 결론

지표면에 입사하는 뮤온 입자들의 지표면에 대한 입사각도에 따른 도달 빈도를 뮤온 검출기의 선풍관 측정 각도를 달리하여 뮤온의 검출량 변화를 측정하여 얻어낼 수 있었다. 실험을 통해 지표면에 도달하는 뮤온은 입사각이 0도인 뮤온이 제일 많다는 것을 알 수 있었다. 또한 이를 통해 우주에서 들어오는 고에너지 우주선들의 지상에서의 특징(입사각이 0도인 입자가 제일 많이 지표면에 도달한다)을 파악하는 것이 가능하였다. 가설에서는 이에 대한 근거로 뮤온 입자의 수명, 속도에 따른 최대 이동 거리를 구하여 이론적으로 도달할 수 있는 최대 거리를 구하고 이를 통하여 상공에서 형성된 뮤온이 직선으로 지표면에 접근할 때 도달 가능한 최대 입사각을 구하여 제시하였다. (뮤온의 입사각이 64.559-85.396° 이 되는 구간) 가설과 실험 결과가 일치하지 않는 예외적인 부분은 좀 더 많은 변수를 고려하여 정밀한 실험을 수행하면 이에 대한 이유를 찾을 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

이 실험을 위해 필요한 장비들이 현재 재학중인 고교(무릉고등학교)에는 갖추어져 있지 않아 충북 청주에 소재한 한국교원대학교 입자물리실험실(융합과학관 107호)을 2015-01-12 - 2015-01-14 동안 방문하여 연구하였습니다. 실험 장비를 사용할 수 있도록 허락해 주신 물리교육학과 김상년 교수님. 대학원 과제 준비로 바쁘신 중에도 불구하고 실험 장비를 세팅하는 데 도움을 주신 황정선 선생님께 감사드립니다. *We All Live Alive. For Catharina (Younha, Go)*

참고 문헌

- [1] Britannica dic. <http://bit.ly/15ln4on>. (accessed Jan. 30. 2015).
- [2] Britannica dic. <http://bit.ly/1dcc7hk>. (accessed Jan. 30. 2015).
- [3] Britannica dic. <http://bit.ly/1jomiwx>. (accessed Jan. 30. 2015).
- [4] Britannica dic. <http://bit.ly/1vaxziw>. (accessed Jan. 30. 2015).
- [5] Doosan dic. <http://bit.ly/1yf6c4j>. (accessed Jan. 30. 2015).
- [6] Wikimedia commons. <http://bit.ly/1chk5c9>. (accessed Jan. 30. 2015).
- [7] Wikimedia commons. <http://bit.ly/1zi3wxm>. (accessed Jan. 30. 2015).
- [8] M Bagshaw, D Irvine, and DM Davies. Exposure to cosmic radiation of british airways flying crew on ultralonghaul routes. *Occupational and environmental medicine*, 53(7):495–498, 1996.07.
- [9] Transport Canada. Measures for managing exposure to cosmic radiation of employees working on board aircraft. *Commercial and Business Aviation Advisory Circular No.0183R*, 2006.04.
- [10] H.S.Kang, S.W.Kim, Y.B.Kim, I.H.Park, and H.C.Bang et al. Cosmic ray research and education array. *Physics & High Technology*, 14(9), 2005.9.
- [11] I.H.Park and J.M.Yang. Cosmic rays and high energy astroparticle physics. *Physics & High Technology*, 17(6), 2008.6.
- [12] AT KREBS. The possibility of biological effects of cosmic rays in high altitudes, stratosphere and space. *The Journal of aviation medicine*, 21(6):481–494, 1950.12.
- [13] Lulu Liu and Pablo Solis. The speed and lifetime of cosmic ray muons. *MIT Undergraduate Report*, pages 1–6, 2006.04.
- [14] M.K.Bae. Measurement of a speed of the cherenkov radiation produced by the cosmic ray muon. *KNUE Master. Thesis*, 2012.02.
- [15] M.S.Kim, S.N.Kim, and J.J.Lee. Development of cosmic muon measurements system for use in korean high-school physics inquiry activities. *New Phys.: Sae Mulli*, 60(11), 2010.11.
- [16] B. Rao, M. Sreekantan. *Extensive Air Showers*. World Scientific, 1998.