



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

전기장이 인가된 폴리스티렌  
섬광검출기를 이용한  
신호파형판별법 개선에 대한 연구

濟州大學校 大學院

物理學科

羅 實 仁

2014年 6月




전기장이 인가된 폴리스티렌  
섬광검출기를 이용한  
신호파형판별법 개선에 대한 연구

指導教授 禹 鍾 瑄

羅 實 仁

이 論文을 物理學 碩士學位 論文으로 提出함  
2014 年 6 月

羅實仁의 物理學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長	김 용 주	
委 員	우 중 관	
委 員	이 흥 석	

濟州大學校 大學院

2014 年 6 月




# A Study of an Enhanced Pulse Shape Discrimination Method by Using Polystyrene Scintillator under Electric Field

Sil-In Na  
(Supervised by professor Jong-Kwan Woo)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree  
of Master of Natural Science

2014 . 6 .

This thesis has been examined and approved.

Yong Joo KIM	
Jong-Kwan Woo	
Hong Seok Lee	

.....  
Date

Department of Physics

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

## SUMMARY

Since a passing charged particle deposits energy into scintillator, it can be distinguished from neutral particles by using polystyrene detector with pulse shape discrimination method (PSD). However, it is hard to discriminate a charged particle from neutrons and backgrounds because of a number of background neutrons at lower energy. Therefore, we try to find an improved technique for discriminating a charged particle from background by applying the strong electric field. We found the difference between the signals from charged particles by applying the strong electric field or not. As a result, when muon passes through the 1.0 cm-thickness scintillator we can see that muon deposits energy about 20 keV/cm per 100 kV/m without deforming a signal shape.

## 요약

하전입자가 섬광검출기를 통과하며 에너지를 남길 때, 신호파형판별법 (Pulse Shape Discrimination; PSD)을 통해 중성입자와 구분할 수 있다. 하지만 많은 수의 저 에너지 중성입자가 남기는 신호 중에서 하전입자를 구분하는 일은 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 폴리스티렌 섬광검출기에 전기장을 인가하여 하전입자에 의해 발생하는 신호에 변화를 주어서 하전입자를 좀 더 잘 검출하고자 하였다. 전기장을 인가하였을 때 하전입자의 신호의 차이를 찾을 수 있었고 그 결과 뮤온 입자가 검출기에 남긴 에너지가 100 kV/m의 전기장 당 20 keV/cm 정도 높게 측정되었으며 신호파형판별법으로 파형의 변형 정도를 확인해 본 결과 파형의 모양은 유지되었다.

## <제목 차례>

제 I 장. 서론 .....	1
제 II 장. 높은 에너지에서의 뮤온 입자의 에너지 손실 .....	4
제 i 절. 이온화 (ionization)에 의한 에너지 손실 .....	6
제 ii 절. 쌍생성 (Pair Production)에 의한 효과 .....	8
제 iii 절. 제동복사 (Bremsstrahlung)에 의한 에너지 손실 .....	9
제 iv 절. 광핵반응(Photonuclear Reaction)에 의한 에너지 손실 .....	10
제 v 절. 전기장 내에서의 신호 변화 .....	12
제 III 장. 신호파형판별법 (Pulse Shape Discrimination; PSD) .....	18
제 IV 장. 가속기에서의 입자검출기 .....	21
제 i 절. 유기 섬광검출기 .....	21
제 1 항. 플라스틱 섬광검출기 .....	21
제 ii 절. 무기 섬광검출기 .....	22
제 iii 절. 광자검출기 .....	22
제 V 장. 실험구성 .....	24
제 i 절. 실험의 구성과 원리 .....	24
제 1 항. 실험장비의 구조 .....	24
제 2 항. 신호수집장비 (Data Acquisition System; DAQ) .....	31
제 ii 절. 배경사상 .....	32
제 1 항. 암 전류 (Dark Current) .....	32
제 2 항. 스타크 효과 (Stark Effect) .....	34
제 VI 장. 결과 및 분석 .....	35
제 i 절. 도수분포표에 의한 분석 .....	38
제 ii 절. 신호파형판별법에 의한 분석 .....	42
제 1 항. 신호왜곡분석 .....	42
제 2 항. 하전입자와 배경사상에 대한 증폭분석 .....	46
제 VII 장. 결론 .....	51
제 VIII 장. 참고문헌 .....	52

## <표 차례>

<표 1>. 뮤온의 붕괴모드 .....	4
<표 2>. 전기장에 의한 뮤온 입자의 속도 변화 .....	14
<표 3>. 폴리스티렌 플라스틱 섬광검출기의 특성 .....	27
<표 4>. 광전증배기의 특성 .....	28
<표 5>. 절연테이프의 상세정보 .....	30
<표 6>. 신호파형판별법에 따른 Head/Tail 비율 .....	42
<표 7>. 하전입자와 배경사상의 전압에 따른 변화 .....	46



## <그림 차례>

그림 1. 이온화에 의한 에너지 감소를 나타낸 그림 .....	5
그림 2. 이온화에 의한 뮤온 입자의 투과거리에 따른 저지능 .....	7
그림 3. 쌍생성에 의한 입자에 의한 효과를 설명하기 위한 모식도 .....	8
그림 4. 제동복사를 나타낸 그림 .....	9
그림 5. 광핵반응 모식도 .....	10
그림 6. 쌍생성, 제동복사, 광핵반응에 의한 뮤온 입자의 저지능 .....	11
그림 7. 뮤온 입자의 에너지에 따른 구리를 통과할 때 저지능 .....	13
그림 8. 섬광물질을 통과하는 하전입자 모식도 .....	16
그림 9. 전기장을 사용하여 신호를 증폭했을 때 예상도 .....	17
그림 10. 신호파형판별법 모식도 .....	20
그림 11. 광전증배기의 구조 .....	23
그림 12. 검출기의 모식도 .....	25
그림 13. 실험장비 구성 .....	26
그림 14. 광전증배기의 특성 그래프 .....	28
그림 15. 암 전류와 공급전압 특성 .....	33
그림 16. FADC를 거쳐 컴퓨터로 받아들인 한 개의 신호 .....	36
그림 17. 파형의 면적으로 구성된 주 검출기와 트리거용 검출기에서 측정된 신호 의 도수분포표 .....	37
그림 18. 검출기에 인가된 전압에 따른 FA값의 도수분포표 .....	39
그림 19. 검출기에 인가된 전압에 따른 하전입자에 대한 저지능의 변화 .....	40
그림 20. 검출기에 인가된 전압에 따른 도수분포표의 최대 빈도를 그린 그래프	41
그림 21. -3000 V에서의 신호파형분석 .....	43
그림 22. 0 V에서의 신호파형분석 .....	44
그림 23. +3000 V에서의 신호파형분석 .....	45
그림 24. -3000 V에서의 폴리스티렌 섬광검출기에 남긴 에너지에 대한 비율 ...	47
그림 25. 0 V에서의 폴리스티렌 섬광검출기에 남긴 에너지에 대한 비율 .....	48
그림 26. 3000 V에서의 폴리스티렌 섬광검출기에 남긴 에너지에 대한 비율 .....	49
그림 27. -3000 V, 0 V, 3000 V에서 하전입자에 대한 최대 빈도를 그린 그림	50

## 제 I 장. 서론

“물질세계가 무엇으로 이루어져 있는가?” 라는 질문은 수천 년이 지나도록 계속 탐구해오는 질문이다. 고대 그리스 철학자에서부터 현대의 힉스 입자를 발견하기까지 프루스트, 돌턴, 러더포드, 켈만 등으로 이루어진 수많은 과학자 및 철학자들이 “물질이 무엇으로 구성되어 있을까?”라는 질문에 대한 해답을 생각 및 실험해 왔고 그것을 위한 탐색기를 만들어 왔다. 육안으로 관찰하는 것에서부터 현미경, 전자현미경, 터널링주사현미경 등을 지나 현대에는 가속기라는 도구를 만들어 냈다 [1].

원자의 세계보다 작은 세계를 들여다보기 위해서는 단순히 관찰보다는 다른 방법이 필요하다. 가속기는 물질의 구조를 알기위해서 원자 속에다가 무언가를 집어넣어서 그 결과를 관찰해 낸다. 러더퍼드는 원자 속으로 알파입자를 쏘아 넣어 그 결과를 관찰하여 핵의 존재를 찾아냈다. 이와 같이 지금 시대와 같이 무언가를 원자 속에 쏘아 넣는 일은 쉬운 일이 아니다. 그 목적을 이루기 위해서 가속기가 개발되었으며 1947년 Mark I 이라는 최초의 선형가속기가 윌리엄 헨슨에 의해 만들어지면서 가속기에 대한 원자 구조 연구가 시작 되었다. 그로 인해 쿼크라는 기본 구성요소와 그것을 설명하는 표준이론이 등장하게 되었다. 그 후 1962년에 대형 가속기가 만들어지면서 좀 더 높은 에너지 좀 더 작은 세계에 대해서 연구하기 시작하였으며 현대에 이르러 대형 강입자 충돌기 (Large Hadron Collider ; LHC)가 만들어지기까지 이른다. 이 도구를 사용해 대형 강입자 충돌기에서 발견이 확실시되는 힉스입자의 이론적 배경을 제안한 피터 힉스 (영국 에든버러대 명예교수)와 프랑수아 앙글레르 (벨기에 브뤼셀 자유대 명예교수)가 노벨물리학상을 공동 수상하였다 [1].

가속기를 통해서 아주 작은 물질세계의 구조를 알아내는 방법은 먼저 전자나 양성자를 전기장과 자기장을 이용해서 가속시킨다. 이렇게 충분히 가속시킨 입자를 무거운 물질에 충돌시키면 탄성충돌과 비탄성충돌을 하는데 비탄성충돌을 할 경우

에 수많은 입자가 생성되어 나오게 된다. 현재 우리가 직접 측정할 수 있는 입자는 전자와 광자 정도이다. 따라서 다른 입자는 직접적인 측정이 불가능하기 때문에 섬광물질과 상호작용의 결과로 발생하는 전자와 광자를 측정한다. 관측하고자 하는 입자가 지나가는 경로에 섬광물질을 배치하고 입자가 섬광물질을 통과할 때 만들어 내는 전자 또는 광자로 어떤 입자가 검출기를 지나갔는가를 유추할 수 있다 [2].

측정을 위해서 입자의 경로에 배치하는 섬광물질로는 측정하고자하는 입자의 종류에 따라 적당한 섬광물질을 찾아 배치해야 한다. 입자의 정확한 에너지를 알기 위해서는 입자가 충분히 섬광물질 속에서 에너지를 잃게 만들어야 한다 [2]. 그러기 위해서 충분히 무거운 물질로 만들어 측정하고자 하는 입자가 충분히 에너지를 잃게 만든다. 반면에 하전입자의 경우에는 쿨롱의 힘에 의해 직접충돌보다는 원격작용으로 대부분의 에너지를 잃는다. 따라서 일정한 에너지 이상의 에너지를 물질에 남긴다. 그에 따라 중성입자와 하전입자가 동시에 지나는 경로에 위치한 검출기는 중성입자와 하전입자 중에서 하전입자만을 검출해야 하기 때문에 섬광물질의 핵과 직접 충돌하는 경우보다는 원격작용에 의해서 에너지를 잃도록 밀도가 작은 섬광물질을 택해 사용한다. 기체의 경우가 하전입자를 검출하는데 있어 가장 최상의 섬광물질이 되겠지만 관리가 비교적 힘들다. 따라서 고체섬광물질을 많이 사용하려고 하고 있다. 고체 섬광물질을 사용하게 되면 밀도가 낮은 즉 원자번호가 작은 물질을 이용해 측정하고자 하는 입자의 경로에 배치하게 된다. 플라스틱의 경우가 탄소와 수소로 이루어져 있어 다른 물질에 비해서 밀도가 작아서 하전입자를 검출하는데 비교적 좋은 편이다. 하지만 여전히 기체의 경우보다 중성입자의 충돌에 의한 신호가 많이 검출된다. 그로 인해 중성입자의 신호에 의해 하전입자의 신호가 파묻혀서 중성입자와 하전입자를 구분하기에 쉽지가 않다 [2].

일본 양성자 가속기 연구소 (Japan Proton Accelerator Research Complex; J-PARC)의 E-14 KOTO 검출기의 한 부분에서 폴리스티렌 플라스틱 섬광검출기와 CsI결정 섬광검출기등을 사용하여 가속기에서의 중성입자, 하전입자 등을 관찰하고 있다 [3,4]. 이때 E-14 검출기로 가속기에서 가속된 양성자가 표적인 니켈과 충돌해 만들어진 입자들이 검출기를 통과하게 되고 그 신호를 분석 하게 된다. 일본 양성자 가속기 연구소에서 사용하는 가속기는 최고 50 GeV (현재 30 GeV)의

에너지를 갖는 싱크로트론으로 케이온 (Kaon)을 포함한 다양한 입자를 만들어 하드론 홀에 있는 E-14 KOTO 팀의 검출기로 보내지게 된다 [3,4]. 최대 2.0 GeV/c의 운동량을 가지는 케이온 입자는 여러 입자로 붕괴된 후에 검출기로 들어가서 신호를 발생한다. 실제로 검출기에 측정된 중성입자와 하전입자가 신호의 구분이 모호한 구간이 존재한다 [3,4]. 보통 실험에서는 중성입자를 포함한 배경사상과 하전입자의 신호가 구분되는 에너지를 기준으로 문턱 값을 정하여 문턱 값 이상을 하전입자의 신호로 보고 그 이하를 중성입자로 보게 된다. 그럴 경우 중성입자의 신호 중 문턱 값을 넘는 신호는 하전입자로 인식하게 되어 중성입자의 일부가 하전입자인 것처럼 검출되게 된다. 현재까지 위 문제를 해결하는 방법으로 원격작용에 의해서 에너지를 잃는 하전입자와 달리 직접충돌에 의해서 에너지를 전달하는 중성입자의 성질을 이용하여 검출기의 두께를 조절하면서 중성입자의 검출율을 낮춰 중성입자와 하전입자를 최대한 구분하려고 하고 있다.

본 논문에서는 검출기의 두께를 조절하는 방법이 아닌 섬광검출기에 입사하는 하전입자에 영향을 줄 수 있는 전기장을 사용하여 하전입자의 신호를 중성입자 그리고 배경사상의 신호와 더욱 명확한 방향으로 조절하고자 한다. 또한 전기장으로 조절한 하전입자의 신호가 분석이 가능하려면 전체적으로 신호의 왜곡이 없어야 한다. 따라서 신호파형판별법 (Pulse Shape Discrimination; PSD)을 사용하여 신호가 왜곡이 되었는지를 알아보하고자 한다 [5-8].

## 제 II 장. 높은 에너지에서의 뮤온 입자의 에너지 손실

전기장에 의한 하전입자의 신호의 영향을 실험하기 위해서는 높은 에너지의 하전 입자가 필요하다. 자연에서 흔하게 관찰 할 수 있는 하전입자로 우주에서부터 오는 우주선을 생각할 수 있다. 항성이나 주변은하에서 발생한 고에너지 입자 중 붕괴시간이 매우 긴 양성자가 있다. 이 양성자는 지구에 도달하여 지구 대기권에 있는 물질과 상호작용한다. 그 결과 마치 입자 가속기와 같이 케이온, 파이온 (Pion) 등 수많은 입자를 만들어 내게 된다. 이 입자 중 뮤온 입자는 땅에까지 내려와 측정할 수 있다 [9].

뮤온은 가벼운 입자인 전자와 같은 경입자 (Lepton)에 속하는 입자로 스핀  $\hbar/2$  와 정지질량  $105.6583715 \text{ MeV}/c^2$ , 그리고 평균수명  $2.169811 \times 10^{-6} \text{ sec}$  을 가지며 <표 1>에서 보이는 붕괴모드를 가지고 있다. 주로 태양방사선이 지구의 대기권과 충돌하면서 만들어지거나 가속기에서 만들어진다. 섬광물질 속에서 뮤온이 잃는 평균에너지는 다음 식으로 적을 수 있다 [2].

$$-\frac{dE}{dx} (\text{MeV}/m) = a(E) + b(E)E \quad (1)$$

여기서  $a(E)$ 는 이온화에 의한 에너지 손실을 나타내며,  $b(E)$ 는  $e^+e^-$  쌍생성, 체동복사, 핵반응에 의한 에너지이다.  $\frac{dE}{dx}$ 의 단위는 MeV/m이다. 각각의 모형에 대하여 다음 절에서 좀 더 다루고자 한다 [10-12].

<표 1>. 뮤온의 붕괴모드 [2].

$\mu^-$ DECAY MODES	Fraction ( $\Gamma_j/\Gamma$ )	Confidence level	$p$ (MeV/c)
$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$	$\approx 100\%$		53
$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \gamma$	[d] $(1.4 \pm 0.4) \%$		53
$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu e^+ e^-$	[e] $(3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}$		53
<b>Lepton Family number (LF) violating modes</b>			
$e^- \nu_e \bar{\nu}_\mu$	LF [f] $< 1.2$	%	90% 53
$e^- \gamma$	LF $< 2.4$	$\times 10^{-12}$	90% 53
$e^- e^+ e^-$	LF $< 1.0$	$\times 10^{-12}$	90% 53
$e^- 2\gamma$	LF $< 7.2$	$\times 10^{-11}$	90% 53

제 i 절. 이온화 (Ionization)에 의한 에너지 손실

이온화 에너지는 식 (2)에서 보듯이 핵이 입사입자와의 충돌을 통해서 전자 하나가 제거되어 이온화 되는데 필요한 에너지이다.



<그림 1>에서 보듯이 입자가 핵과 충돌 또는 쿨롱 힘으로 전자에게 에너지를 잃으면서 전자가 핵의 구속에서 벗어나게 되어 입사 입자가 에너지를 잃는 것이다.

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - 2\beta^2 \right] \quad (3)$$

여기서  $c$ 는 광속,  $I$ 는 최소 들뜸 에너지,  $m_e$ 는 전자질량,  $z$ 는 입사입자의 전하량,  $Z$ 는 핵자번호,  $A$ 는 핵질량,  $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ ,  $\beta = v/c$ ,  $T_{\max}$ 는 충돌로 전달할 수 있는 최대 에너지이며,  $e$ 와  $m_e$ 는 전자 전하량과 정지질량이다.  $2\pi N_a r_e^2 m_e c^2$ 는 상수로 다음 식으로 나타낼 수 있다 [13].

$$2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 = 0.1535 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g} \quad (4)$$

위 식 (3)에 따르면 하전입자가 물질에 입사했을 때 전달하는 에너지는  $\beta$ 에 의존한다는 사실을 알 수 있다. 따라서 뮤온 입자가 물질을 통과할 때 속도를 변화시킬 수 있으면 뮤온 입자가 물질에 남기는 에너지를 변화시킬 수 있다. <그림 2>에서

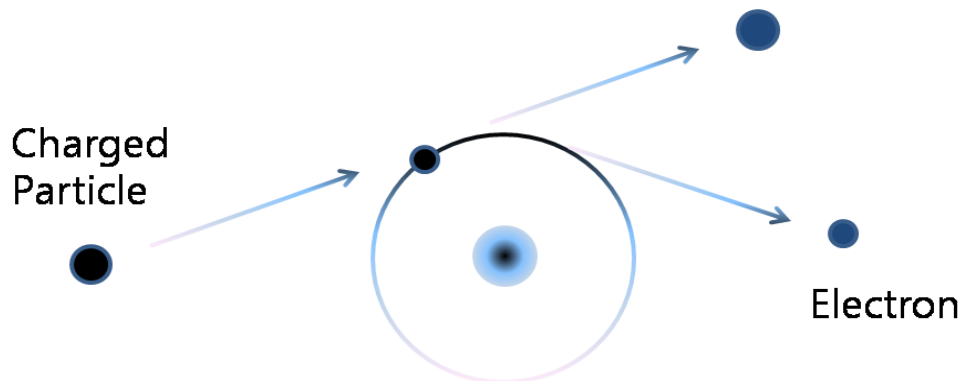


그림 1. 이온화에 의한 에너지 감소를 나타낸 그림.

물질에 따른 이온화과정에 의한 뮤온 입자의 물질을 통과하는 거리에 따른 에너지 잃은 양이 표현돼 있다. 뮤온 입자의 에너지에 따라 비례하는 그래프와 달리 이온화과정에 의한 에너지 감소는 저에너지에서 일정한 에너지를 잃음을 확인할 수 있다.

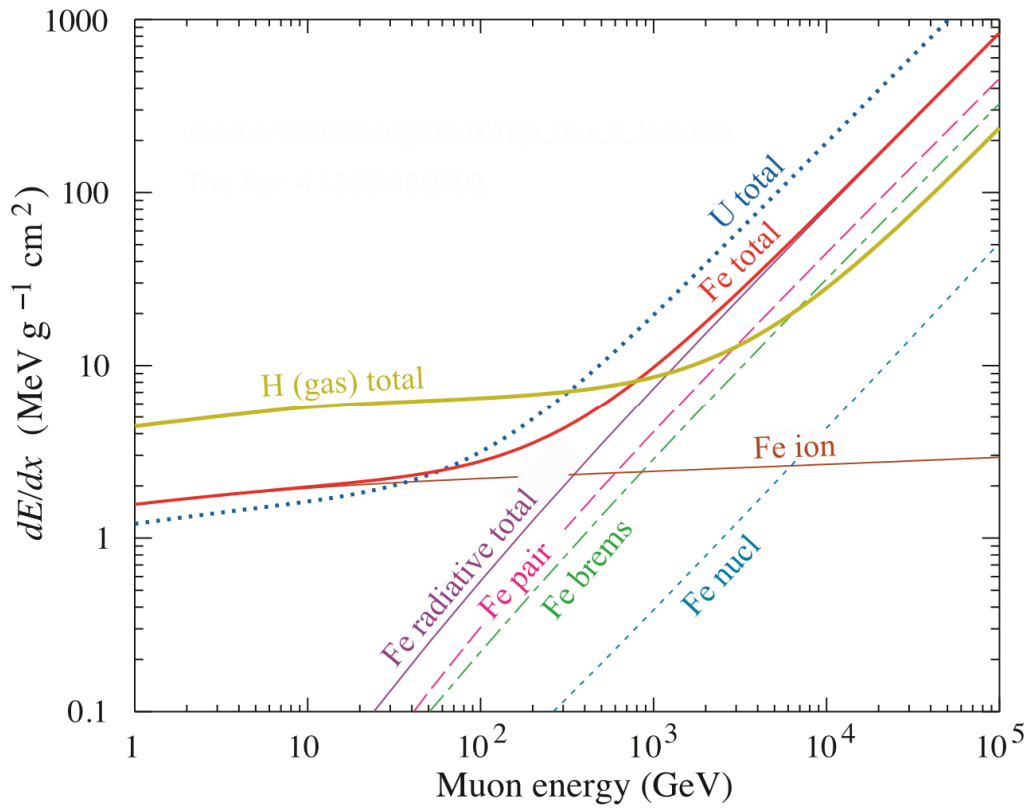


그림 2. 이온화에 의한 뮤온 입자의 투과거리에 따른 저지능 [14].



제 ii 절. 쌍생성 (Pair production)에 의한 효과

주로 감마선과 같은 1.02 MeV이상의 고에너지를 지닌 광자가 강한 전기장을 형성하는 핵 주위에서 소멸하면서 전자와 양전자를 만들어내는 과정을 말한다. 쌍생성이 일어날 확률은 입사광자의 에너지가 클수록 또는 물질의 원자번호가 높을수록 증가한다. 여기서 만들어진 전자와 양전자는 핵을 벗어나 다른 전자와 양전자를 만나 소멸하고 그 질량에 해당하는 에너지의 빛으로 다시 전환되게 된다. 1.02 MeV 이상의 에너지가 필요한 이유는 전자의 정지질량 에너지가 0.512 MeV 이므로 전자와 양전자의 정지질량 에너지를 더하면 1.02 MeV가 나온다. 따라서 그보다 작은 에너지에서는 쌍생성이 일어나지 않는다 [11]. <그림 3>에서 보여주는 것처럼 광자가 핵을 지날 때 전자와 양전자로 만들어진다. 이렇게 만들어진 양전자는 다시 전자와 만나 소멸하여 광자를 만들어 내고, 전자는 여기 되면서 다시 광자를 만들어 낸다 [12]. 하지만 쌍생성에 의해 생성된 전자와 양전자는 다시 광자를 만들어 내게 되어 측정할 수 있는 광자와 전자 상태로 남아 입사 입자의 총에너지는 변화하지 않는다.

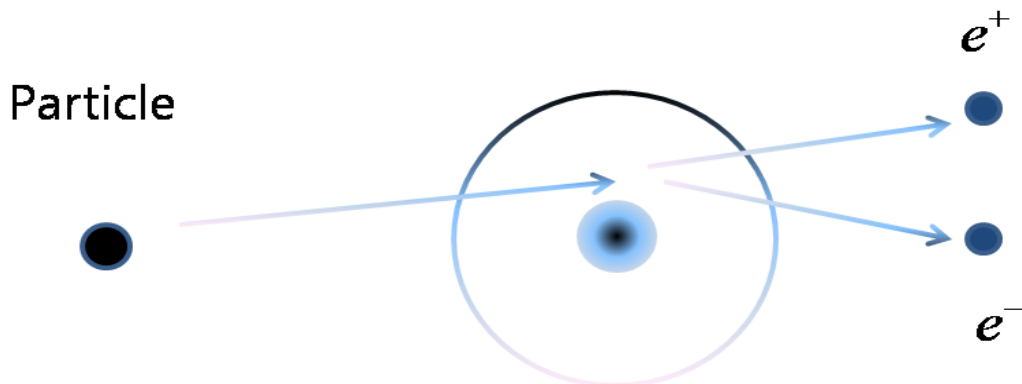


그림 3. 쌍생성에 의한 입자에 의한 효과를 설명하기 위한 모식도.

제 iii 절. 제동복사 (Bremsstrahlung)에 의한 에너지 손실

<그림 4>에서 보듯이 가속하는 하전입자는 전자기파를 방출한다. 하전입자가 원자핵 근처를 통과할 때, 핵의 쿨롱 힘에 의해 진로가 휘게 되고, 하전입자는 가속도를 얻어 광자를 발생한다. 원자핵의 근처로 최대한 붙어서 진행하는 하전입자의 경우에는 강한 쿨롱 힘에 의한 가속도를 받기 때문에 많은 에너지를 광자로 만드는데 사용하여 에너지를 잃어버린다. 같은 방법으로 핵과 어떻게 충돌하느냐에 따라서 에너지 손실이 연속적으로 분포한다 [13].  $m_e c^2 \ll E_0$  일 경우 제동복사에 의한 에너지 감소를 식(5)으로 표현할 수 있다.

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right) = NE_0\Phi, \quad \Phi = 4Z^2r_e^2\alpha\left(\ln\frac{2E_0}{m_e c^2} - \frac{1}{3} - f(Z)\right) \quad (5)$$

여기서  $E_0$ 는 초기 전자나 양전자의 에너지이며,  $E$ 는 전체 전자의 에너지이다.  $Z$ 는 원자번호,  $N$ 은  $\rho N_a/A$ 이며 단위는 number of atoms/cm<sup>3</sup>이다. 여기서 중요한 점은 제동복사에 의한 에너지 손실이 원자번호 ( $Z$ )에 의존한다는 사실이다. 따라서 외부전기장은 식(5)에 영향을 미치지 않으므로 외부전기장에 따른 영향은 적다 [19].

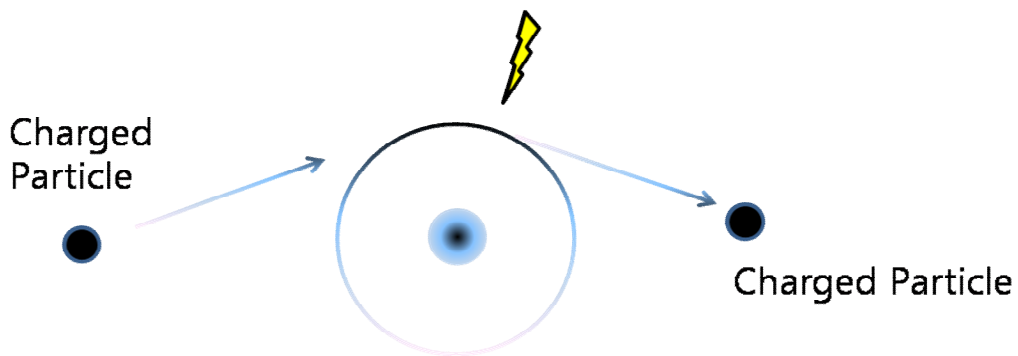
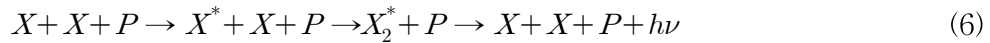


그림 4. 제동복사를 나타낸 그림.

제 iv 절. 광핵반응(Photonuclear reaction)에 의한 에너지 손실

<그림 5>에서 보듯이 입자가 핵과 충돌하여 일어나는 핵반응으로써 핵을 들뜨게 만들고 들뜬 핵이 다시 바닥상태로 내려오면서 광자를 방출하는 반응이다.



X는 검출기의 표적 핵이며 P는 입사하는 입자이다. 들뜬 핵이 다시 광자를 방출하는데 있어서 입사입자와 핵의 결합 상태에 따라 두 가지의 방출 모드가 있는데 핵이 단일항 (singlet state)에 있을 가능성과 삼중항 (triplet state)에 있을 가능성이다. 각각의 경우에 붕괴시간이 다르므로 광자를 방출하는 시간이 차이가 나게 되며 어떤 입자가 충돌했느냐에 따라서 핵이 단일 항과 삼중항으로 들뜨게 만드는 확률이 다르고 따라서 충돌입자의 종류에 따라서 광자가 방출되는 시간이 다르다. 삼중항상태는 단일항상태에 비해 불안정함으로 인해 빨리 붕괴하여 광자를 단일항 상태보다 빠르게 내놓는다. 이점을 이용해 신호파형판별법을 활용해 어떤 입자가 핵과 충돌했는지를 판별하는데 사용하게 된다.

<그림 6>은 뮤온 입자가 앞 절에서 살펴본 각각의 방법에 의한 에너지 잃음을 보여주고 있다.

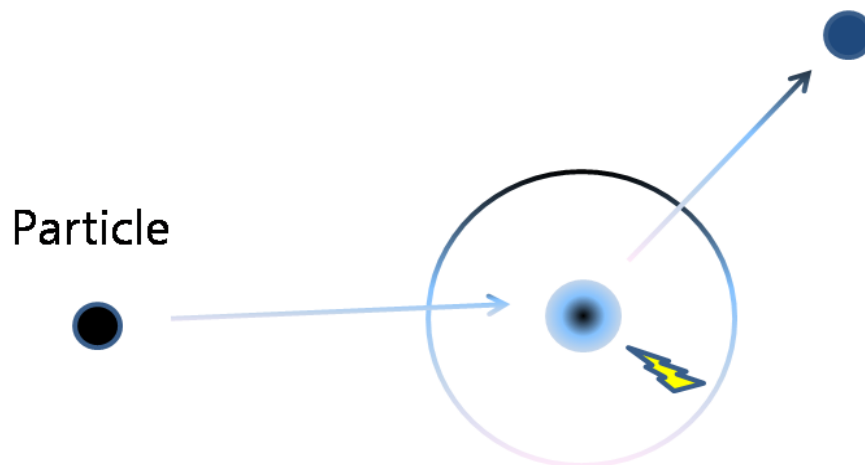


그림 5. 광핵반응 모식도.

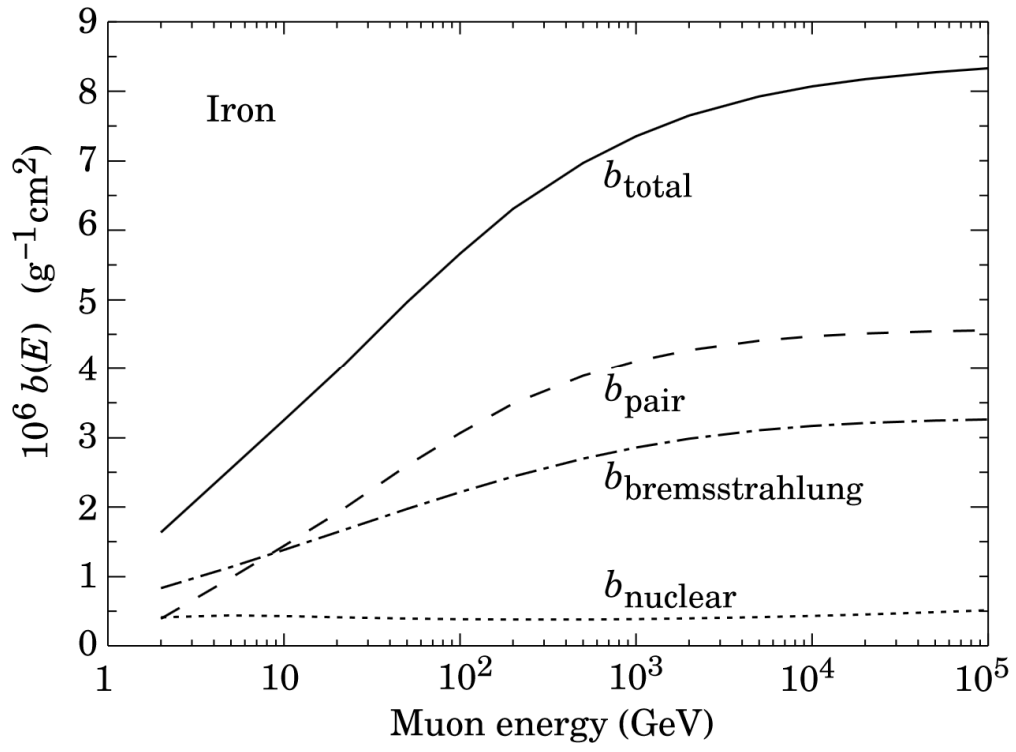


그림 6. 쌍생성, 제동복사, 광핵반응에 의한 뮤온 입자의 저지능 [14].

## 제 v 절. 전기장 내에서의 신호 변화

앞 절에서 살펴본 바와 같이 하전입자가 섬광물질을 통과하면서 여러 가지 모형 중에서 쿨롱힘에 의한 영향을 다룬 베테-블록식 (Bethe-Block formula)에 의해서 주된 감소가 이루어진다. 베테-블록식은  $\beta$  즉 속도에 비례하여 잃은 에너지를 계산한다. 우리가 하전입자의 속도를 바꿀 수 있다면 하전입자가 섬광물질 안에서 잃은 에너지를 조절할 수 있을 것이다 [13].

식 (3)에서처럼 위치에 따른 에너지 감소량은  $\beta$ 의 함수로 계산할 수 있다.  $\beta$ 는 기본적으로 속도에 대한 함수로 속도에 따른 에너지 감소량을 계산한다. <그림 7>은 뮤온 입자가 구리를 통과할 때의 에너지 감소그래프를 보여준다. 우주선인 뮤온 입자는 평균 1 GeV에서 10 GeV의 에너지를 가지고 지상에 도달한다. 1 GeV에서 10 GeV에 해당하는 저지능의 추세를 살펴보면 선형적으로 증가 하는 사실을 알 수 있다. 에너지가 표시된 곳에 에너지에 대응하는  $\beta\gamma$ 가 표시되어 있는데  $\beta$ 가 속도의 함수라는 것을 기억할 때 뮤온 입자의 속도를 변화시키면 대응하는 저지능도 선형적으로 변할 것이다 [13].

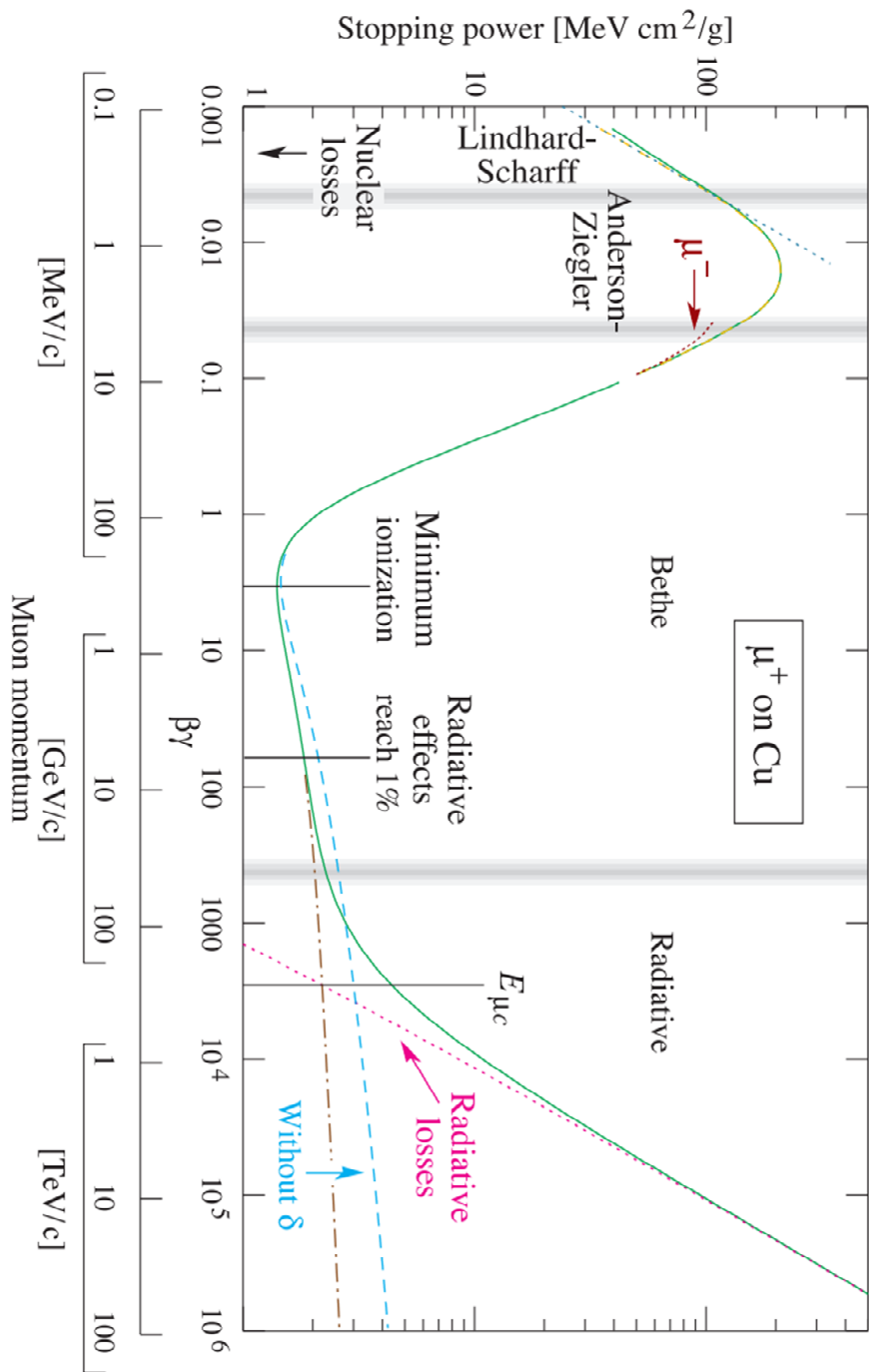


그림 7. 구리를 통과하는 뮤온 입자의 에너지에 따른 저지능 [2].

<그림 8>에서 섬광물질로 입사 하는 입자는 전압 V에 의해 전기장 E가 걸려있는 물질을 통과 하게 된다. 이때 입사 입자에 영향을 주는 전기장이 물질 내에 걸리는 E가 전부라고 가정하면 식 (7)처럼 전압에 따른 전기장 E에 영향을 받게 된다. 입사 입자가 뮤온 이라고 할 때 식 (8)을 통하여 식 (9)을 유도하여 가속도와 속도를 구할 수 있다.

$$E = \frac{V}{d} \quad (7)$$

$$F = e_{\mu}E = m_{\mu}a \quad (8)$$

$$a = \frac{e_{\mu}E}{m_{\mu}}, v = \frac{e_{\mu}E}{m_{\mu}}t \quad (9)$$

$$d = 0.994ct, \quad t = \frac{d}{0.994c} \quad (10)$$

입사 입자가 전기장에 의해 섬광 물질을 통과할 때 전기장의 영향을 받는다고 가정하였기 때문에 입사입자가 전기장에 영향을 받는 시간 역시 섬광물질을 통과할 때만 가지고 계산 하였다. 뮤온 입자인 경우에 평균적으로 광속의 0.994배로 지상에 도달한다. 따라서 식 (10)을 사용하여 섬광 물질을 지날 때의 시간을 구해 식 (9)에 대입 시켰다. 계산 결과 전기장에 의해서 입사 하전입자의 속도를 <표 2>와 같이 얻을 수 있었다. <표 2>의 결과는 섬광물질에 입사하기 전에 영향을 받는 부분과 물질 내에서 쿨롱산란(Coulomb scattering)에 의해 입사입자가 물질 내에서 진행거리가 길어지고 시간이 길어지는 효과에 의한 영향을 적용시키지 않은 최소한의 결과이다 [2]. 실제로는 이보다는 큰 영향을 받을 것이다. 하전 입자의 속도가

<표 2>. 전기장에 의한 뮤온 입자의 속도 변화.

전기장 (V/m)	-300000	-200000	- 100000	0	100000	200000	300000
속도변화	-8.37m/s	-5.58 m/s	-2.79 m/s	0 m/s	2.79 m/s	5.58 m/s	8.37 m/s

변화되게 되면 베타-블록식에 따른  $\beta$ 가 변화하게 되어  $\beta$ 에 의존하는 하전입자의 잃은 에너지가 변화하게 된다. 1 GeV에서 10 GeV사이에 해당하는 에너지와 0.994 c의 속도를 가지고 지상으로 도착한 뮤온 입자는 섬광검출기에 설치된 전기장의 영향에 의해 가속 또는 감속하게 되고 그 영향으로 섬광검출기에 남기는 에너지의 차이를 가져올 것이다 [2].

<그림 9>에서 1점 쇄선 (검정색)은 중성입자를 포함한 배경사상을 나타내며 실선 (검정색)은 전기장을 인가하기 전 하전입자에 의한 에너지 도수분포표를 나타내고 있다. 전기장을 인가하여 하전입자가 섬광검출기에 남기는 신호를 증폭했을 때 예상되는 그래프를 점선 (빨간색)으로 나타내었다.



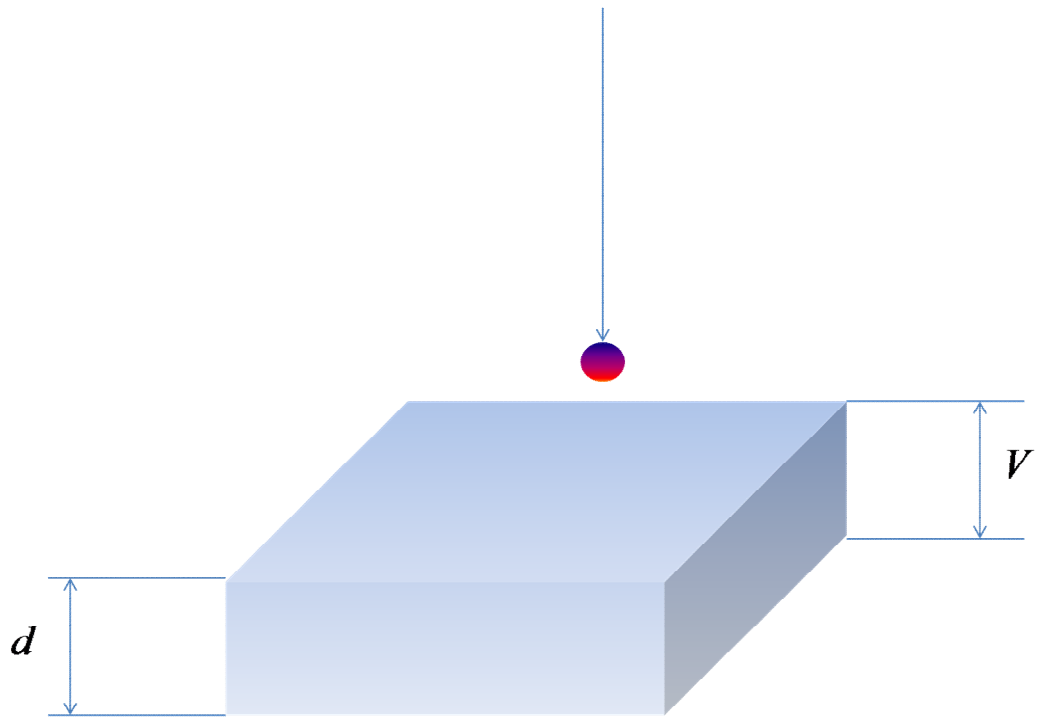


그림 8. 섬광물질을 통과하는 하전입자 모식도.

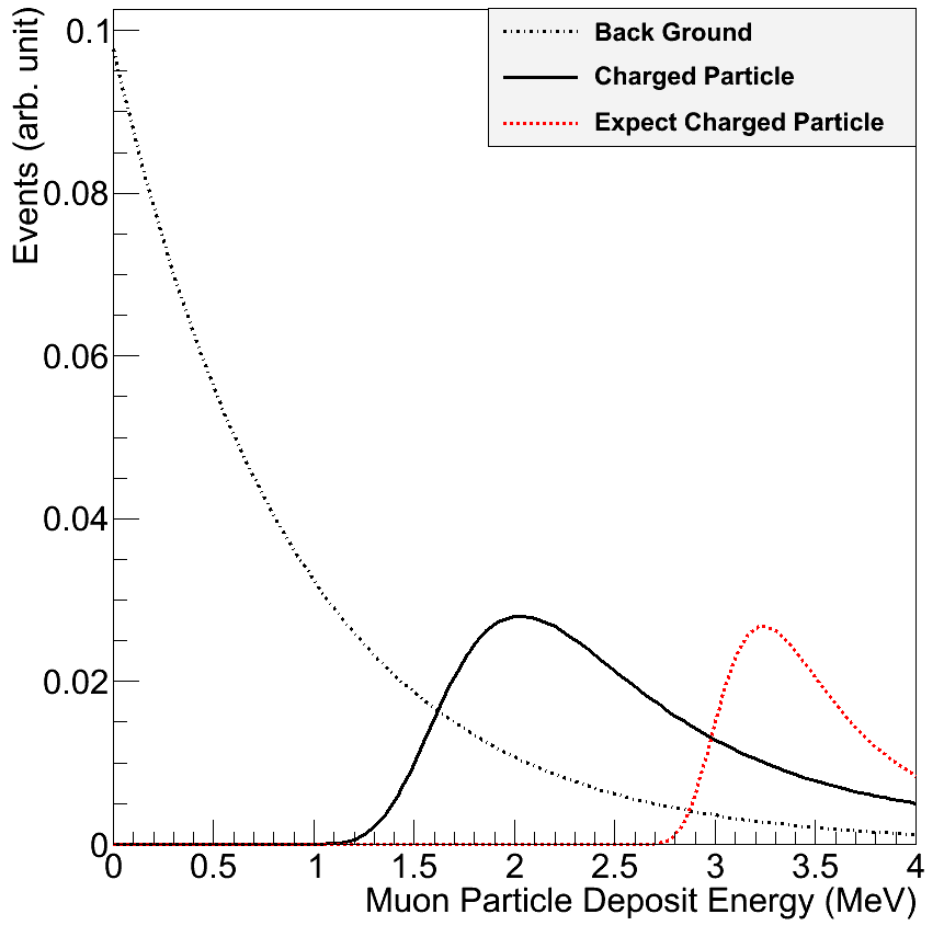


그림 9. 전기장을 사용하여 신호를 증폭했을 때 예상도.

### 제 III 장. 신호파형판별법 (Pulse Shape Discrimination; PSD)

신호파형판별법은 배경사상과 신호를 구분하기 어려울 때 주로 사용되어온 기술이다. 50년 가까이 중성자와 광자를 구분하기 위해서 사용되어 왔다. 중성자와 광자는 둘 다 중성입자이기 때문에 물질을 통과할 때 물질에 남기는 에너지만으로 그들을 구분하기엔 쉽지가 않다. 따라서 입사입자가 물질을 통과하면서 남긴 신호의 파형을 판별하여 중성자와 광자를 구분하는데 쓰인다 [2,6,7].

신호파형판별법은 입자가 물질을 통과할 때 상호작용을 통해서 빛을 발생시키는데 상호작용의 종류에 따라 빛이 만들어지는 시간이 다름을 이용하여 입사하는 입자를 구분하는 방법이다. 파형을 가지고 입사 입자를 구분하면 크게 두 가지로 구분하는데 Heavy Ionization Particle (HIP)과 Minimum Ionization Particle (MIP)으로 구분할 수 있다. HIP 계열의 입자로는 무거운 입자 (중성자, 알파입자, 뮤온 등)를 들 수 있고 MIP 계열에서는 가벼운 입자 (Gamma 등)가 있다. 입자가 물질을 통과할 때 상호작용을 하고 그 상호작용의 결과로 핵이나 전자를 들뜨게 만들어 바닥상태로 내려갈 때 빛을 방출한다. 각 상호작용마다 빛을 내는 시간이 다르게 되고 그 결과 입자마다의 빛을 내는 분포가 바뀌게 된다. 이 분포를 검출기를 사용하여 측정했을 때 다른 신호의 파형을 가지고 되고 이 파형의 다름을 이용해 입사 입자를 구분해 내게 된다 [8].

신호파형판별법은 보통 3가지 방법으로 분석할 수 있는데 에너지의 민감도, 반응 시간, 파형분석으로 나눌 수 있다. 본 논문에서 사용된 방법은 파형분석에 의한 방법으로 <그림 10>에서 보듯이 파형의 변곡점을 기준으로 파형의 앞과 뒤 부분으로 나누고 앞의 면적을 Head (검정색 실선), 뒤의 면적을 Tail (하늘색 1점 쇄선)로 삼고 그 비  $\left(\frac{Head}{Tail}\right)$ 로 입자를 구분하는데 사용한다 [2].

변곡점을 구하는 방법으로 신호의 FADC 값을 시간을 변수로 더해 적분형태로 만든 후 최대점에서 20 ns까지의 값을  $y = ax + b$ 로 신호가 끝나는 지점에서 20 ns전 지점까지의 구간을  $y = cx + d$ 로 최소제곱법을 사용한 후 연립방정식을 사용하여 식 (11)처럼 교점을 구한다. 이 교점이 변곡점이 되며 이 점을 기준으로 최

대점에서 변곡점까지 Head 변곡점에서 신호가 끝나는 지점까지를 Tail이라 정한다 [8].

$$x = -(b - d) / (a - c) \quad (11)$$

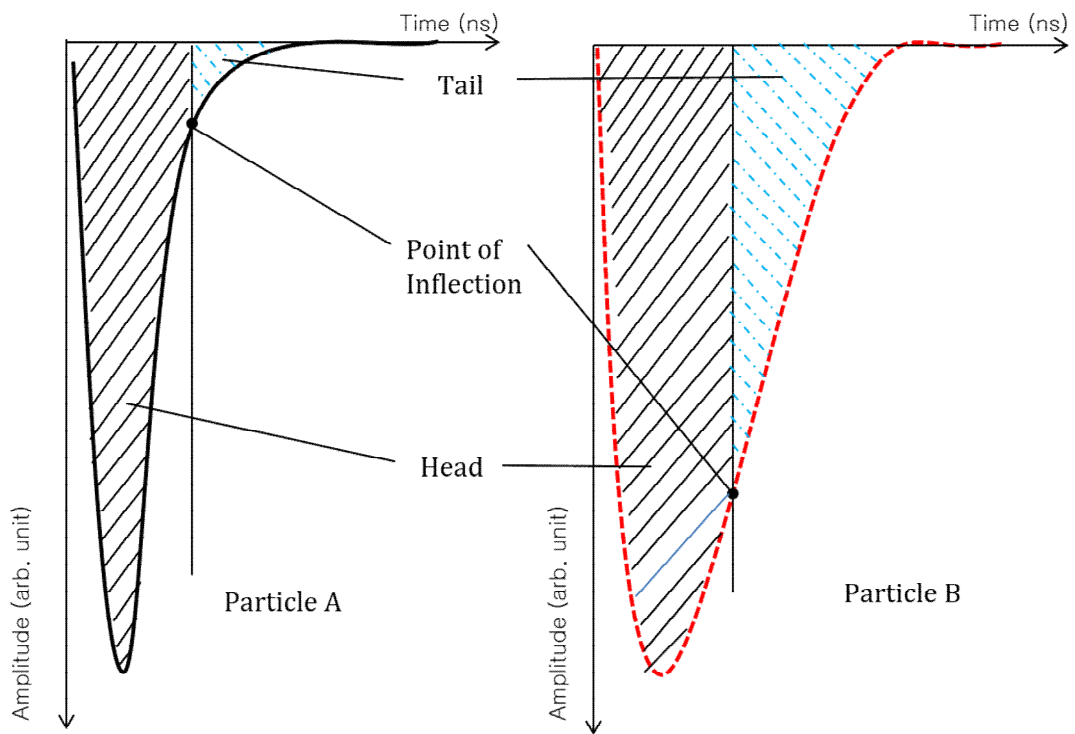


그림 10. 신호파형판별법 모식도.

## 제 IV 장. 가속기에서의 입자검출기

뮤온 입자와 같은 소립자를 검출하기 위해서는 검출기가 필요하게 된다. 이를 위해서 가속기에서 어떻게 입자를 검출하는지 알아볼 필요가 있다. 가속기에서 가속된 입자는 표적물질에 부딪혀 입자를 만들어 내게 되고 그 입자는 목적에 맞는 검출기에 들어가 붕괴하고 그 결과를 검출기는 기록하게 된다. 검출기로 쓰이는 물질로는 유기섬광검출기, 무기섬광검출기, 광자검출기, Cherenkov 검출기, gaseous 검출기로 나뉜다. 각각의 경우에 개별적으로 쓰이는 경우도 있으면 두 가지 이상의 검출기를 모아서 만드는 복합 검출기도 존재한다 [2].

### 제 i 절. 유기 섬광검출기

유기 섬광검출기는 세 가지로 나누게 된다. 결정형, 액체형, 플라스틱이다. 이들 섬광검출기는 하전입자가 섬광검출기로 들어갔을 때 이온화에 의해서 에너지를 잃고 광자를 만들어 내게 된다. 대체적으로 파란색에서 푸른 계열의 파장을 가진 빛을 만들어내게 된다. 결정형 섬광검출기는 고에너지입자를 검출할 때 주로 사용되고 플라스틱 섬광검출기는 대부분의 많은 곳에 널리 쓰이고 있다. 밀도는  $1.03 \sim 1.20 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  정도이며 하나의 광자당 100 eV 정도의 에너지로 나뉘게 된다. 본 논문에서는 폴리스티렌 섬광검출기를 사용하였다 [2].

### 제 1 항. 플라스틱 섬광검출기

중성입자의 경우에는 충돌 단면적이 같은 중성자나 양성자에 충돌을 한다. 광자나 전자와 같은 작은 입자들은 전자와 상호작용할 확률이 높다. 또한 하전입자의 경우에는 쿨롱 힘에 의해서 원격작용으로 에너지를 잃는다. 위에서 언급했던 것과 같이 하전입자의 경우에는 쿨롱 힘에 의한 이온화에 의해서 대부분의 에너지를 잃

고 중성입자의 경우에는 직접적인 충돌에 의해서 에너지를 잃는다. 따라서 하전입자만 주로 검출하고자 한다면 밀도가 작은 물질을 섬광검출기로 사용해야 중성입자 충돌에 의한 에너지가 검출되는 사건들을 최소화 할 수 있다. 위와 같은 이유로 기체의 경우가 가장 좋은 하전입자 섬광검출기가 된다. 하지만 기체는 관리와 제어하기가 쉽지 않다. 따라서 고체로 만들어진 섬광검출기의 사용이 필요하게 되었다. 폴리스티렌 플라스틱의 경우에는 분자식이  $[CH_2 - CH]_n$ 로 탄소와 수소로 이루어져 있다. 광자를 측정하기 위한 섬광검출기는 I, F 와 같은 비교적 무거운 원소로 이루어져 최대한 섬광검출기내에서 에너지를 잃도록 하지만 하전입자의 경우에는 폴리스티렌 플라스틱과 같은 가벼운 원소로 만들어진 섬광검출기를 이용하여 최대한의 중성자에 의한 사건을 최소화한다 [2].

#### 제 ii 절. 무기 섬광검출기

무기 섬광검출기의 경우 유기 섬광검출기에 비해  $4 \sim 8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  정도의 고밀도의 물질로 이루어져 있다. 고밀도로 이루어져 있다는 것은 원자 번호가 높은 물질로 이루어져 있다는 말과 같다. 고밀도로 이루어져 있기 때문에 입자가 섬광 물질 안으로 들어갔을 때 많은 에너지를 잃고 빛으로 방출하게 된다 [2].

#### 제 iii 절. 광자검출기

광자검출기는 기본적으로 광전효과를 이용하여 진공 속에서 빛이 금속에 들어갔을 때 일함수 이상의 빛에 대해 전자가 방출되는 현상을 이용한 것으로 광전증배기(Photo Multiplier Tube; PMT)에 사용된다. 광전증배기는 광자가 들어갔을 때 진공관의 금속에서 광전효과에 의한 전자가 나오고 이 전자를 전기장을 이용하여 전자의 개수를 늘려 신호를 증폭하는 장비이다. <그림 11>에서 보듯이 광전증배기를 들어간 빛은 높은 전압이 걸려있는 dynode와 증배기를 거치면서 anode에 이를 때까지 전자의 개수를 늘려나간다. 광전증배기에 사용되는 photocathode는 일함수가 작은 금속을 사용하여 쉽게 전자를 내놓을 수 있게 한다 [2,16,17].

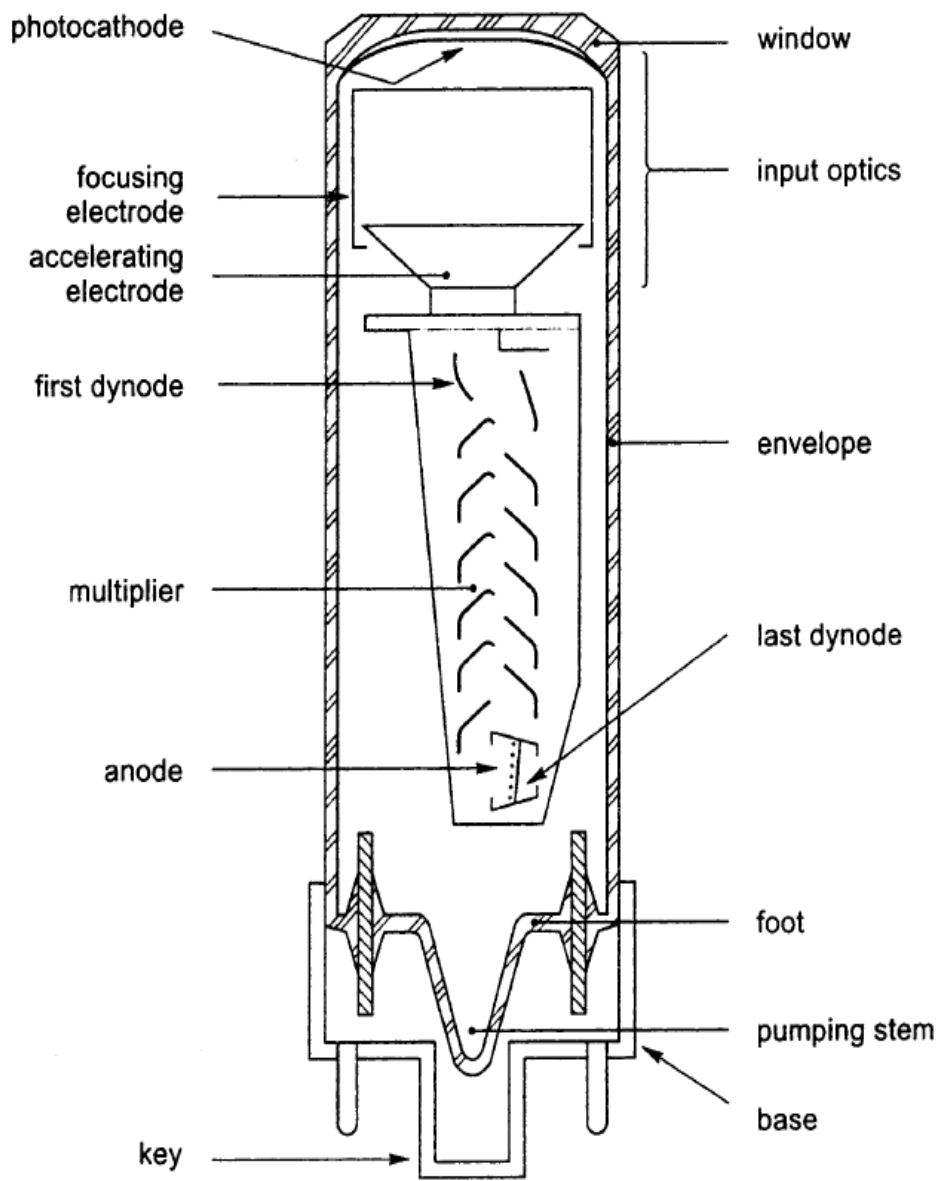


그림 11. 광전증배기의 구조.



## 제 V 장. 실험구성

### 제 i 절. 실험의 구성과 원리

#### 제 1 항. 실험장비의 구조

<그림 12> 에서 보듯이 태양에서 나온 입자가 지구의 대기권의 물질과 충돌하면서 생성된 입자들 중 뮤온 입자가 그림 위 방향에서 검출기로 입사해 오고 그 입자는 두 개의 도체로 샌드위치형태로 쌓여있는 플라스틱검출기를 통과하게 된다. 두 개의 도체는 서론에서 설명했듯이 플라스틱검출기에 전기장을 주기위한 전극이 된다. 배경사상과 신호를 분리하기 위해 뮤온 입자가 위에서 아래로 통과했는지를 확인해 줄 수 있게 하나의 플라스틱검출기를 추가로 설치하여 트리거 신호로 삼았다. 플라스틱검출기로 입자가 통과하여 생성되는 빛은 광전증배기에 가기까지 내부에 처리된 반사재에 반사되며 광전증배기의 Photocathode에 다다르게 된다. 이때 거리에 비례하여 신호가 감소하게 된다. 최대의 크기의 신호검출을 위해서 트리거용 플라스틱 섬광검출기와 주 섬광검출기를 광전증배기 가까이 교차시켜 붙였다.

<그림 13>에서 보여주는 것처럼 플라스틱 섬광검출기로 들어간 뮤온 입자는 섬광검출기 내의 핵과 전자들과의 상호작용으로 섬광을 만들어 내고 광전증배기에 사용되는 고전압에 의해 광자를 증폭하여 전기신호로 바꾸고 VME 버스에 있는 Logic과 FADC를 사용하여 컴퓨터로 전송된다.

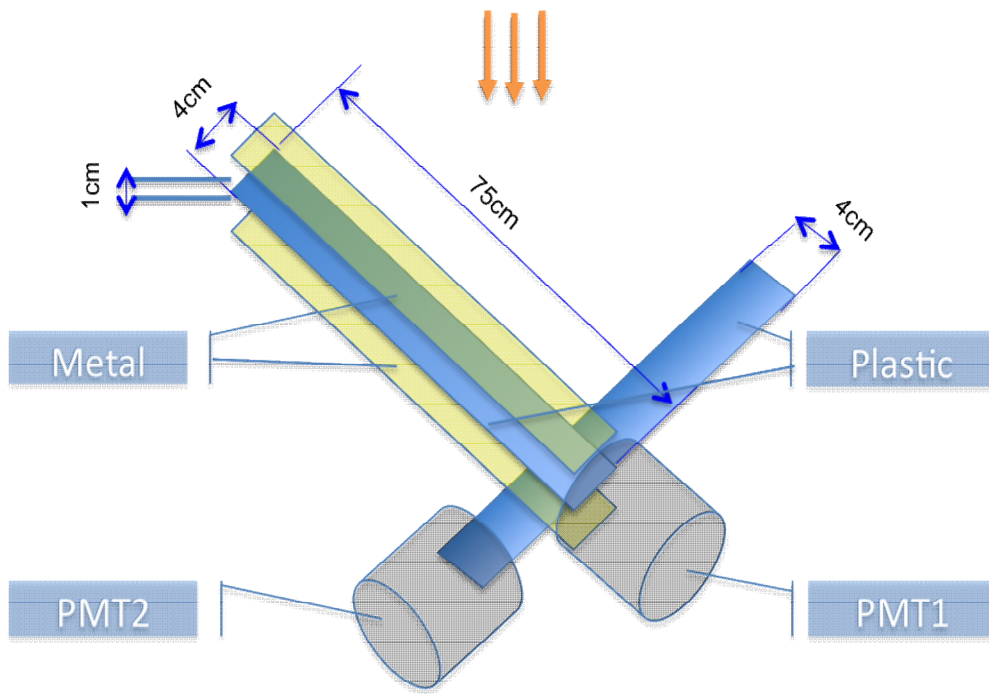


그림 12. 검출기의 모식도.

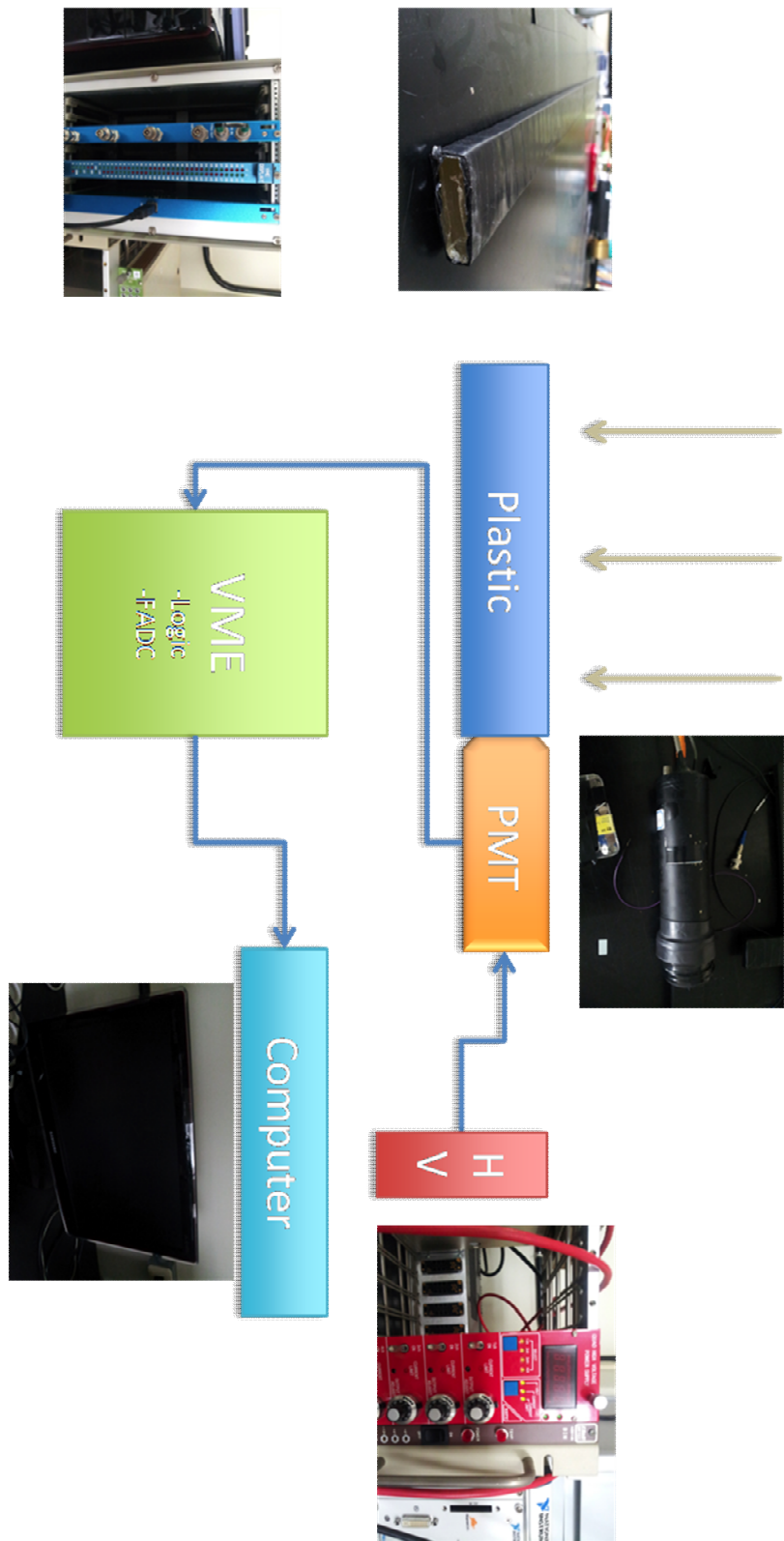


그림 13. 실험장비 구성.

- 폴리스티렌 플라스틱 섬광검출기

플라스틱 섬광검출기는 이온화되어 들뜬 전자에 의해 섬광하는 물질이다. 알파입자, 베타입자, 감마선, 중성자 검출용으로 널리 이용되고 있으며 가공하기 쉽기 때문에 다양한 장소에 사용할 수 있다. 보통 알루미늄 포일과 검은 비닐로 감싸 빛이 새어 들어가지 않게 막은 후 실험에 사용된다. 실험에 사용된 플라스틱 섬광검출기는 폴리스티렌 재질로 된 플라스틱으로 응답특성은 <표 3>와 같다.

<표 3>. 폴리스티렌 플라스틱 섬광검출기의 특성.

Base material	Polystyrene
Density(g/cm <sup>3</sup> )	1.05
Refractive Index	1.58
Soften temperature(°C)	75-80
Light output(%anthracene)	50-60
Emission peak(nm)	415
Decay time(ns)	2.4
Rise time(ns)	1.7
H/C ratio	1.1
Hygroscopic	None

- 광전증배기.

플라스틱 섬광검출기에서 방출되는 파장 415 nm의 빛은 광전증배기에 들어가 신호를 증폭하게 된다. 사용한 광전증배기는 HAMAMATSU사의 R329모델로써 <그림 14>에서 보듯이 400 nm 근처에서 최대 효율을 가진다 [16]. 그 특성으로는 <표 4>와 같다.

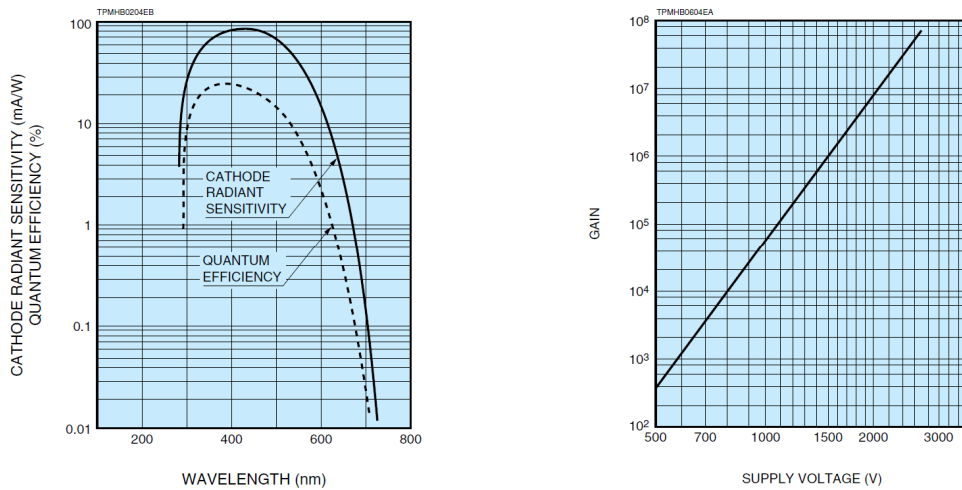


그림 14. 광전증배기의 특성 그래프.

<표 4>. 광전증배기의 특성.

Parameter	Description/Value	Unit
Spectral Response	300 to 650	nm
Wavelength of Maximum Response	420	nm
Photocathode	Material	Bialkali
	Minimum Effective Area	Φ46
Window	Material	Borosilicate glass
	Shape	Plano-concave
Dynode	Structure	Linear focused
	Number of Stages	12
Operating Ambient Temperature	-30 to +50	°C
Maximum Supply Voltage	2700	V
Average Anode Current	0.2	mA
Gain	$9.4 \times 10^4$	A/W

#### - 플라스틱 절연 테이프

플라스틱 섬광검출기에는 최대한 측정하고자 하는 입자만 들어가 검출되어야 한다. 그러기 위해서 측정하고자 하는 고에너지 입자는 투과 가능하고 배경사상이 되는 저에너지 입자를 막을 수 있는 가림 막을 놓게 된다. 이 가림 막으로 테플론 필름이나 알루미늄 포일을 이용하여 빛이 들어가지 않게 막고 이음새를 절연테이프를 사용하여 마감하게 된다. 본 실험에서는 빛을 막기 위한 금속 막에 전압을 걸어서 전위차를 주어야 하기 때문에 이음새 마감에 사용되는 테이프를 절연이 가능한 테이프를 사용하여 마감하였다.

<표 5>에서 3M사에서 제작한 각 테이프의 정보를 볼 수 있다. 본 실험에서는 절연에 목적을 두기 때문에 실험에 사용되는 0 V ~ 3000 V 사이에서의 전압에서 절연 테이프가 견딜 수 있는가를 살펴보았다. 실험에 사용한 Scotch Super 33 제품은 내압이 7000 V 까지로 충분한 전압에 견딜 수 있었다. 내압이 부족할 경우 여러 겹으로 테이프를 붙여서 충분한 내압을 확보 할 수 있기 때문에 Scotch Super 33을 사용해도 충분하다. 빛이 들어오는 부분에 대해서도 투명테이프로 마감하였는데 플라스틱으로 만들어진 테이프는 기본적으로 600 V 이상의 전압을 견딜 수 있었고 여러 겹으로 마감하여 충분한 내압을 확보하였다.

<표 5>. 절연테이프의 상세정보.

Number	Features	Backing Description	Adhesive	Operating Temperature (°C) †	Total Thickness (mils)/(mm)	Dielectric Breakdown (Volts)	Insulation Resistance (megohms)	Breaking Strength (lb/in)/(N/10 mm)	Elongation (% at Break)	Electrolytic Corrosion Factor	Adhesion to Steel (oz/in)/(N/10 mm)	UL 510 Flame Retardant	CTI Material Group
3M Scotch™ Super 22	Heavy-duty insulation designed for general purpose use where greater mechanical strength and abrasion resistance are required.	PVC	RN	80	10.0/0.254	12,000	>1 x 10 <sup>6</sup>	20/35	200	1.0	25/2.7	Yes	-
3M Scotch™ Super 33	Provides moisture-tight electrical and mechanical protection; good resistance to abrasion, moisture, alkalies, acids and varying weather conditions (including ultraviolet exposure).	PVC	RN	80	7.0/0.177	7,000	>1 x 10 <sup>6</sup>	17/30	200	1.0	24/2.6	Yes	-
3M Scotch™ Super 33+*	All-weather vinyl insulating tape; conformable for cold weather applications; excellent resistance to abrasion, moisture, alkalies, acids, UV rays and weather. Thicker for quicker build-up.	PVC	RN	80/105	7.0/0.177	8,750	>1 x 10 <sup>6</sup>	15/26	250	-	28/3.0	Yes	-
3M Scotch™ Super 35	Color coding tape available in 9 fade-resistant colors (see below); abrasion and weather resistant; for use in phase identification, color coding leads and piping systems, and for marking safety areas; resistant to moisture, alkalies, acids and copper corrosion.	PVC	RN	80/105	7.0/0.177	8,750	>1 x 10 <sup>6</sup>	17/30	225	-	20/2.2	Yes	-
3M Scotch™ Super 88	All-weather vinyl insulating tape; conformable for cold weather applications; excellent resistance to abrasion, moisture, alkalies, acids, and copper corrosion.	PVC	RN	80/105	8.5/0.215	10,000	>1 x 10 <sup>6</sup>	20/35	250	-	25/2.7	Yes	-
3M Scotch™ Super 1710	Good quality, economical general purpose insulating tape; good resistance to abrasion, moisture, alkalies, acid, copper corrosion and varying weather conditions (including ultraviolet).	PVC	RN	80	7.0/0.177	7,500	>1 x 10 <sup>6</sup>	17/30	200	-	24/2.6	Yes	-

Vinyl

## 제 2 항. 신호수집장비 (Data Acquisition System; DAQ)

### - 고속아날로그디지털변환기 (Flash Analog Digital Converter; FADC)

실험에서 사용된 FADC는 500 MHz의 아날로그 디지털 변환기로 0 V에서 3.2 V의 전압을 500 MHz의 속도로 디지털신호로 변환되어 메모리에 저장되었다가 제어 신호에 의해 그 신호를 USB를 통해 컴퓨터로 전송되어 ROOT 파일로 저장 된다. 4 채널의 신호를 사용할 수 있는 Notice사의 FADC500을 사용하였다. 이중 본 실험에 사용된 것은 2개의 채널이 사용되었다.

### - ROOT

ROOT는 중입자 실험에 대한 데이터를 처리하기 위해서 CERN에서 일하고 있는 Rene Brun에 의해 1995년에 제작된 수학 소프트웨어로 연구자들을 위해서 무료로 배포되고 Linux System을 사용하여 누구나 사용할 수 있게 제작되었다. 본 실험에 사용된 Notice사의 FADC를 사용하는 Library도 ROOT에서 제공하는 파일 포맷을 사용하도록 되어있으며 저장된 데이터를 ROOT 프로그램을 사용하여 그래프로 표현하는 등 다양한 수학소프트웨어로 활용할 수 있다. 관련 소프트웨어는 다음 <http://root.cern.ch/>에서 내려받을 수 있다.



## 제 ii 절. 배경사상

### 제 1 항. 암 전류 (Dark Current)

암 전류의 원인으로 다음 몇 가지를 들 수 있다.

- 광전 음극 (Photocathode)과 다이노드 (dynode)에서 나오는 열전자방출에 의한 암 전류
- 누설전류에 의한 암 전류
- 유리와 전극 고정대에서 섬광 되는 광전류
- 가스에서 나오는 이온전류
- 우주선에 의해 방출되는 잡음

암 전류는 공급 전압과 함께 증가한다. 하지만 증가비율은 상수가 아니다. <그림 15>에서 세 가지의 암 전류 유형을 나타내고 있는데 낮은 전압 영역 (<그림 15>에서의 a), 중간 전압 영역 (<그림 15>에서의 b), 높은 전압에서의 영역 (<그림 15>에서의 c)으로 나눌 수 있다. 낮은 전압 영역에서의 암 전류는 누설전류에 의한 잡음이 주도적으로 작용한다. 중간영역 b에서는 열전자에 의한 잡음이 대부분이 된다. c영역에서는 높은 전압으로 인해 유리라든지 전극을 지지하기 위한 물질들에 의해 전자가 튀어나와 잡음으로 작용하게 된다. 일반적으로 b 영역에서가 신호를 받기에 최적인 상태가 된다 [15].

암 전류의 영향을 최소화하기 위해서 어두운 곳에서 최소한 30분간 유지시킬 필요가 있다. 어두운 곳에서 오래 놓아둘수록 암 전류는 줄어들며 평균에 가까워져 측정하기 쉬워진다.

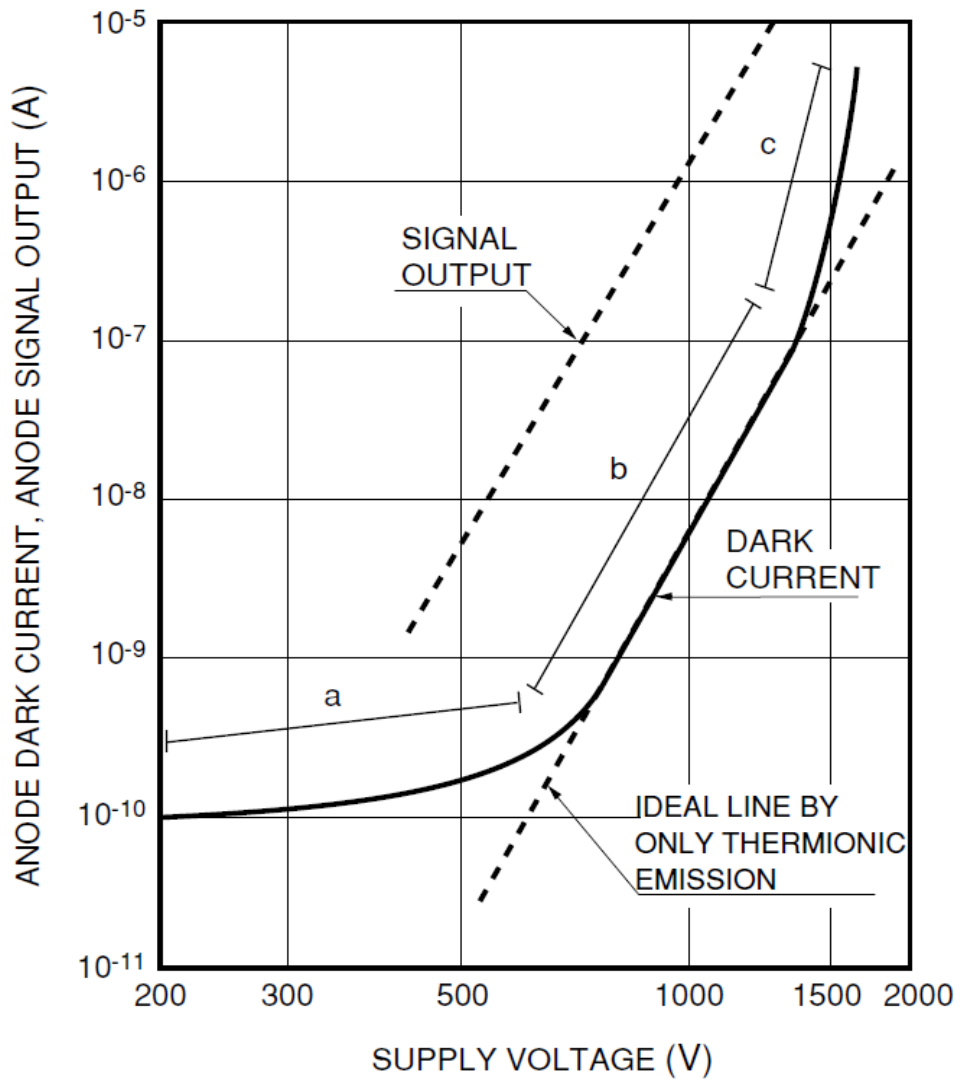


그림 15. 암 전류와 공급전압 특성.

## 제 2 항. 스타크 효과 (Stark Effect)

스타크 효과란 외부 전기장에 의해서 핵 또는 분자의 에너지 준위가 나뉘는 현상으로 요한네스 스타크에 의해 알려졌다. 이는 외부자기장에 의해서 에너지준위가 나뉘는 제만효과 (Zemann Effect)와 비슷하다.

하전입자가 섬광검출기에 들어갔을 때 입사 하전입자의 에너지가 감소하면서 그 에너지를 섬광검출기에서 여러 개의 광자로 변환한다. 이때 광자의 파장은 섬광검출기의 에너지 준위에 의해 결정되는데 스타크 효과에 의해서 에너지 준위가 갈라지면서 약간 다양한 파장의 광자를 만들어 낸다. 하지만 입사 입자가 섬광 물질을 통과하며 광자를 만들어 낼 때 광자의 총량은 변화가 없기 때문에 에너지 변화는 이뤄지지 않을 것이다 [18].

## 제 VI 장. 결과 및 분석

<그림 16>에서 컴퓨터로 읽어드린 한 개의 신호의 파형을 보여주고 있다. 이 신호를 5000번을 모아 도수분포표로 나타내고 그 특징을 분석해보았다. <그림 17>에서 에너지를 도수분포표로 나타내기 위해 FADC신호에 의한 에너지를 정할 필요가 있었다. 최대 빈도를 기준으로 한 에너지 값은 다른 신호와 구분이 잘 되지 않아 신호의 면적을 기준으로 삼고 면적을 전부 더한 값을 에너지 값으로 변환하였다. 신호의 면적에 대한 도수분포표의 최대 빈도를 ROOT에서 제공하는 Fit 라이브러리를 사용하여 Landau Fit을 하고 GetParameters함수로 최고점을 찾아낸다. FADC값이 3700 근처에서 최고점을 보이고 하전입자는 평균적으로 플라스틱을 지날 때 cm당 최대 2 MeV의 에너지를 잃는다는 점을 이용해서 FADC 3700와 2 MeV/cm의 비례상수를 얻는다. 얻은 비례상수 0.000537를 FADC에서 잃은 그래프의 면적을 FA라 하고 그 값에 비례상수를 곱해 에너지를 정하였다.

$$0.000537 \times FA = ENERGY \quad (12)$$

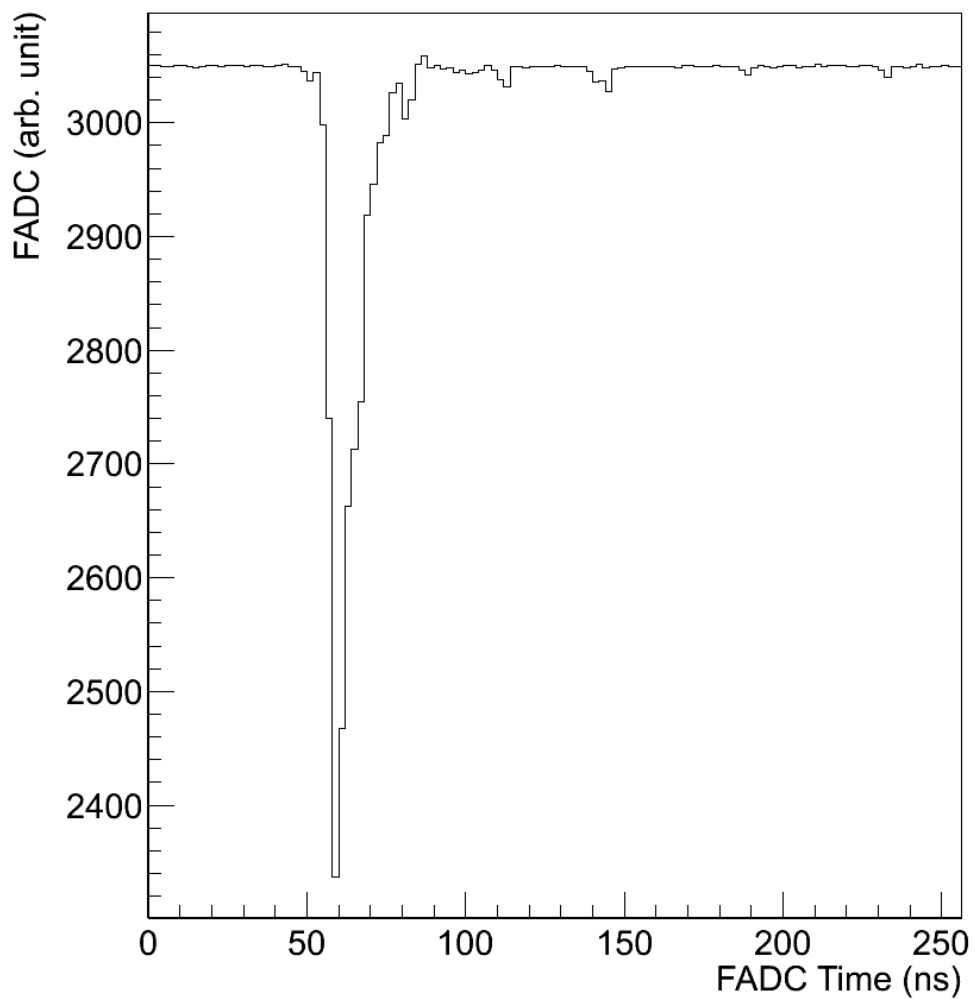


그림 16. FADC를 거쳐 컴퓨터로 받아들인 한 개의 신호.

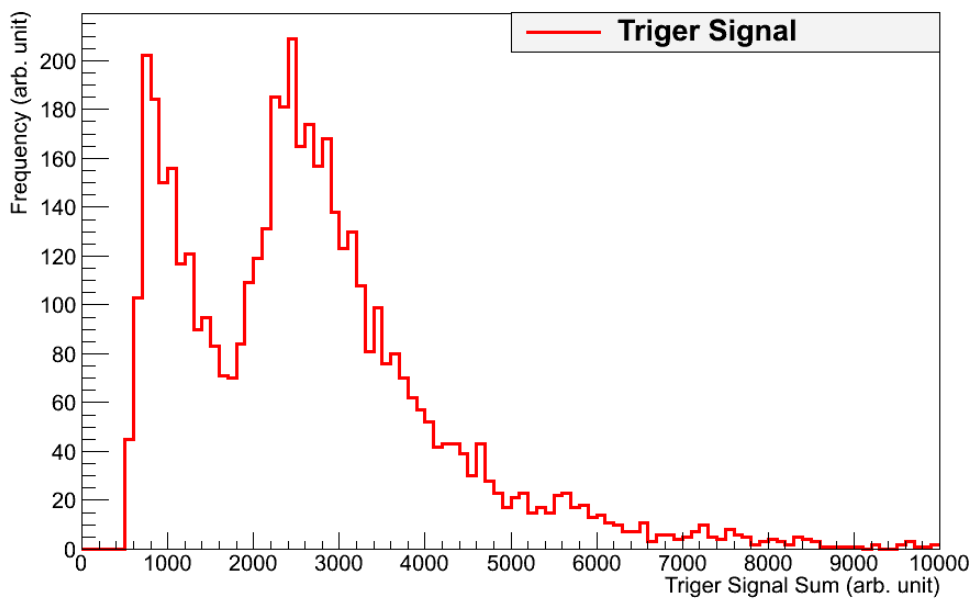
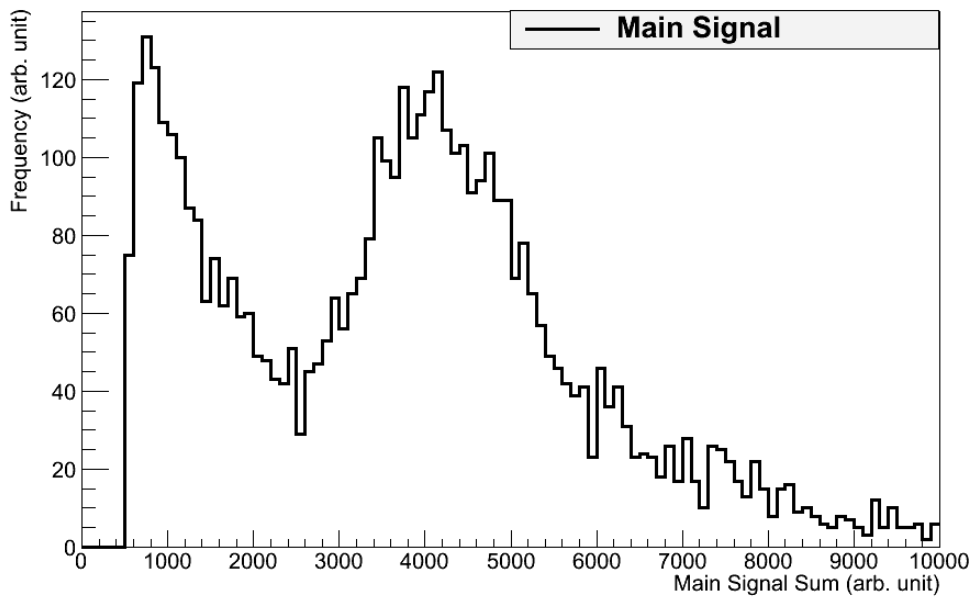


그림 17. 파형의 면적으로 구성된 주 검출기와 트리거용 검출기에서 측정된 신호의 도수분포표.

제 i 절. 도수분포표에 의한 분석

<그림 18>에서 FADC값을 에너지 값으로 변환시킨 도수분포표를 보여주고 있다. 전압에 의한 신호의 변화는 미미하여 <그림 18>로 충분히 구분하기 힘든 면이 있다. 따라서 Landau Fit을 하여 <그림 19>의 도수분포표로 나타내었다. 그림 19에서 나타난 앞부분의 신호는 배경사상에 의한 것이므로 그림 20에서는 포함시키지 않았다. 0 V를 기준으로 1000 V씩 전압이 증가 할 때 마다 높은 에너지 쪽으로 증가하여 2.05 MeV/cm의 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 반대로 0 V에서 -1000 V씩 -3000 V에 이를 때까지 낮은 에너지 쪽으로 이동하여 1.92 MeV/cm의 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 변화의 정도를 <그림 20>에서 보여주고 있다. 일차 함수로 최소제곱법을 사용한 결과  $y = 2.11 \times 10^{-5}x$ 를 얻을 수 있다. 1000 V의 전압 당 20 keV/cm의 증가를 볼 수 있다.

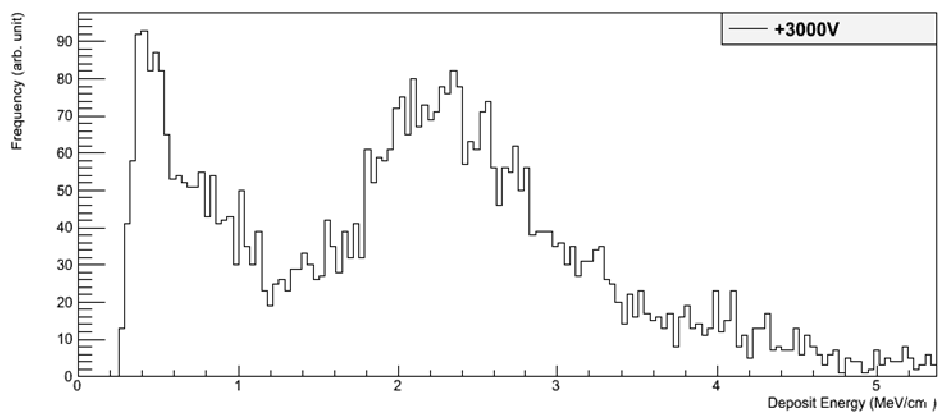
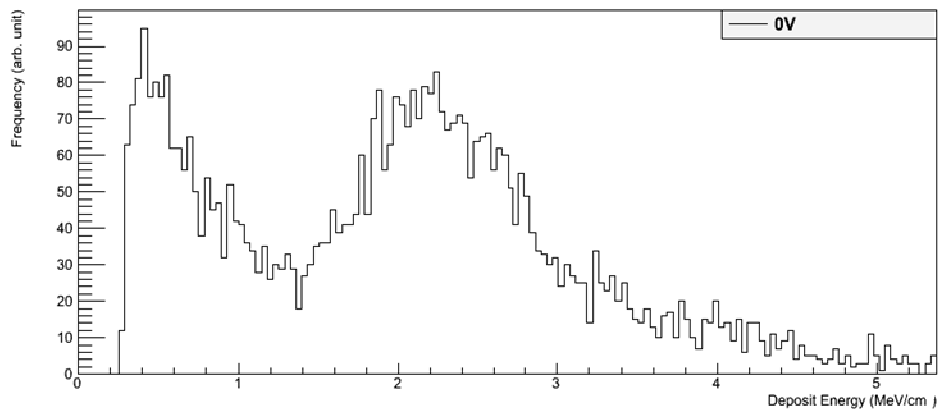
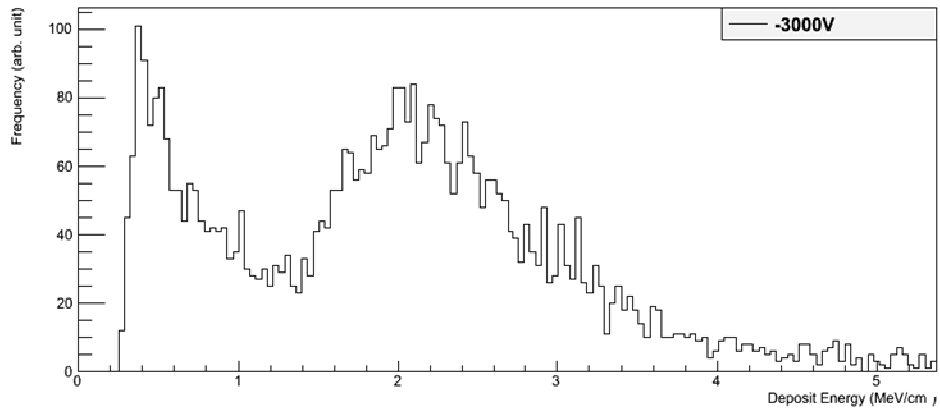


그림 18. 검출기에 인가된 전압에 따른 FA값의 도수분포표.



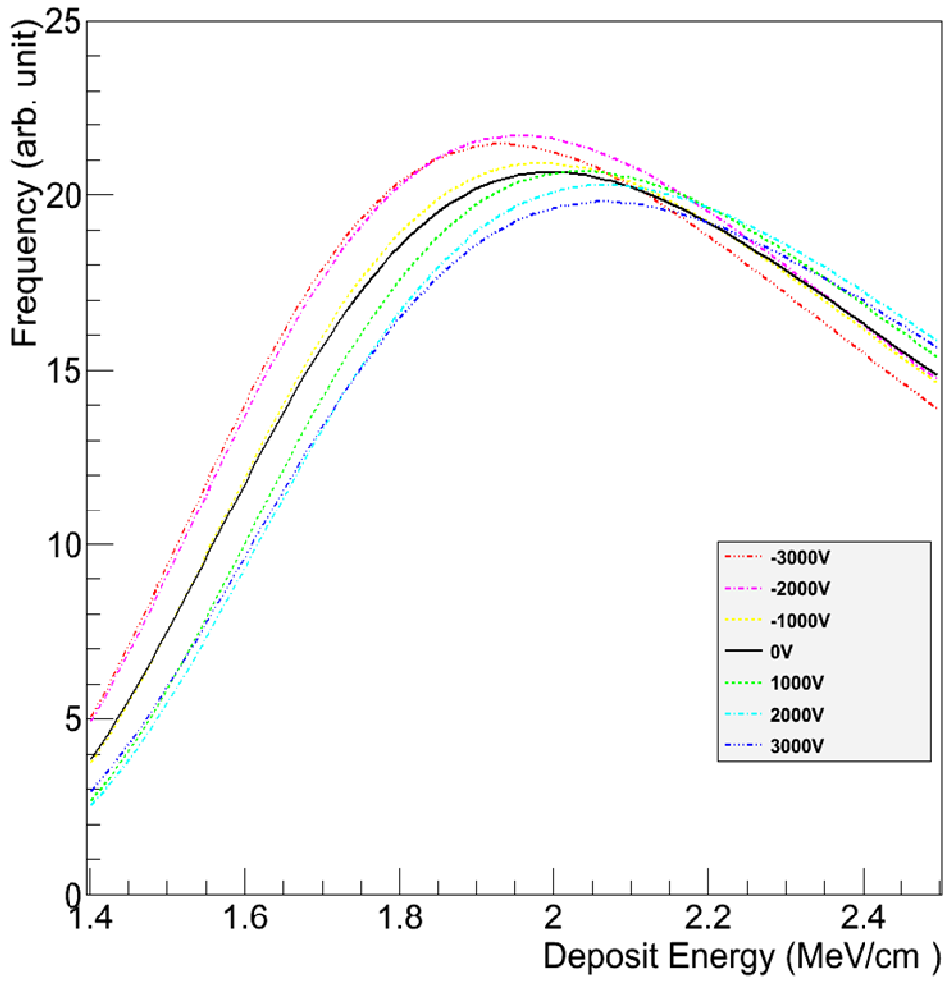


그림 19. 검출기에 인가된 전압에 따른 하전입자에 대한 저지능의 변화.

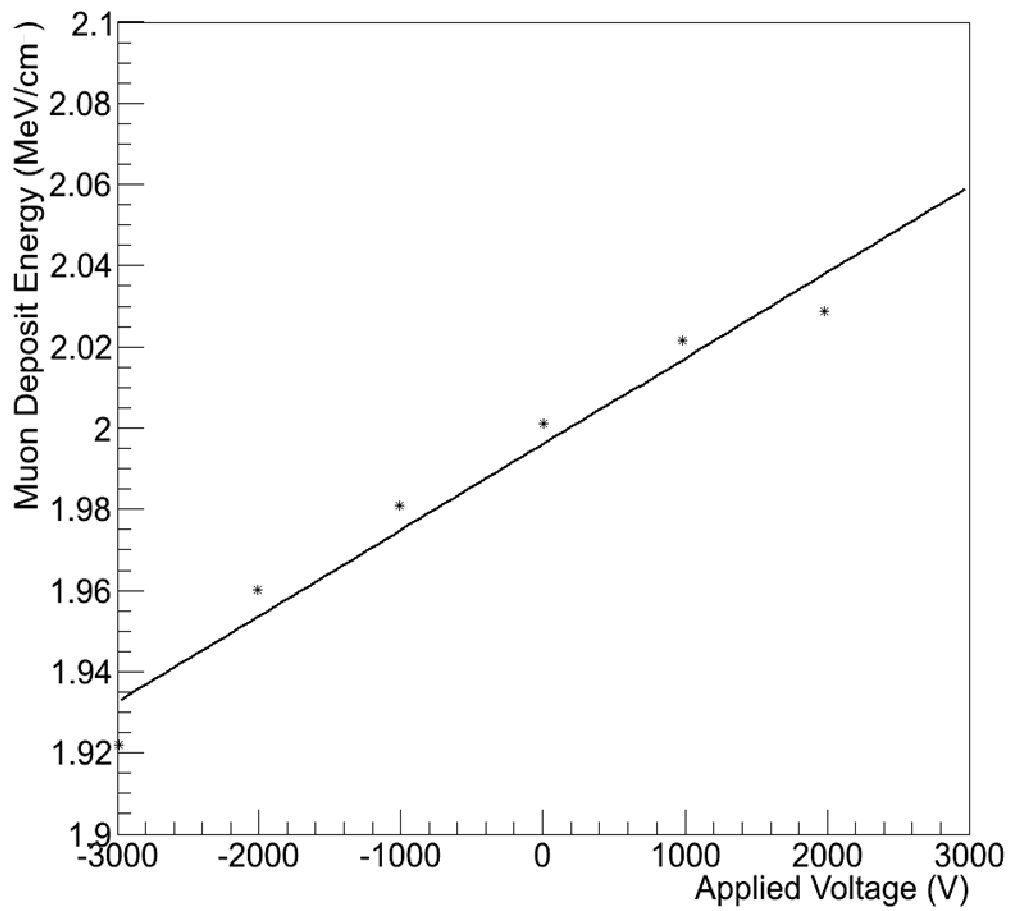


그림 20. 검출기에 인가된 전압에 따른 도수분포표의 최대 빈도를 그린 그래프.

제 ii 절. 신호파형판별법에 의한 분석

제 1 항. 신호왜곡분석

실험장비에 의해 신호가 전압의 방향에 따라 증폭 내지 감소했지만 그 신호가 왜곡되지 않아야 실험 결과로써의 의의를 가진다고 할 수 있다. 따라서 신호의 왜곡 유무를 알기 위해 신호파형판별법을 사용하였다. 3장에서 살펴본 바와 같이 신호의 파형은 입사 입자의 고유한 특징이 된다. 섬광검출기에 전압을 가하지 않았을 때와 전압을 가했을 때 차이가 없어야 폴리스티렌 섬광검출기에 가해진 전압은 신호증폭의 용도로 작용하고 신호왜곡을 시키지 않았다고 이야기 할 수 있다. 따라서 실험 결과에 신호파형판별법을 사용하여 신호 왜곡을 알아보았다. <그림 21~23>는 폴리스티렌 섬광검출기 사이에 -3000 V의 전압을 걸었을 때, 전압을 걸지 않았을 때, 3000 V의 전압을 걸었을 때의 신호파형판별결과이다.

<표 6>에 각각의 Head와 Tail에 대한 평균값을 기준으로 기울기를 보여주고 있다. 각각의 기울기는 15을 근처로 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 즉 폴리스티렌 섬광검출기의 전압이 변화됨에 따라서 신호의 Head 부분과 Tail 부분이 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

따라서 폴리스티렌 섬광검출기에 전압을 걸어 신호를 증폭하는데 신호는 변형되지 않고 증폭되었음을 확인할 수 있다. 설령 신호가 변화되었다고 하더라도 그 효과는 미미하다.

<표 6>. 신호파형판별법에 따른 Head/Tail 비율.

전압	Head 평균	Tail 평균	Head/Tail
-3000 V	2315	142.9	15.05
0 V	2319	143.9	15.03
3000 V	2385	147.3	15.05

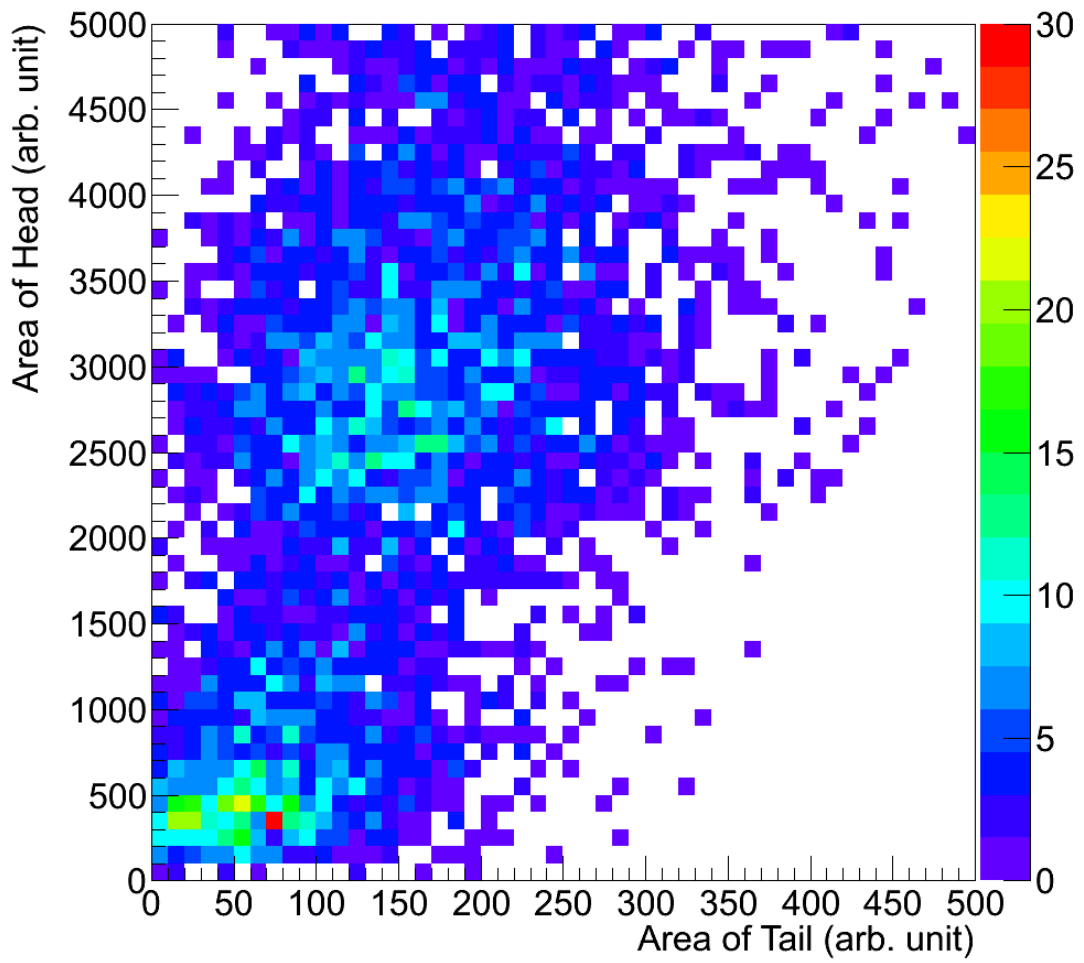


그림 21. -3000 V에서의 신호파형분석.

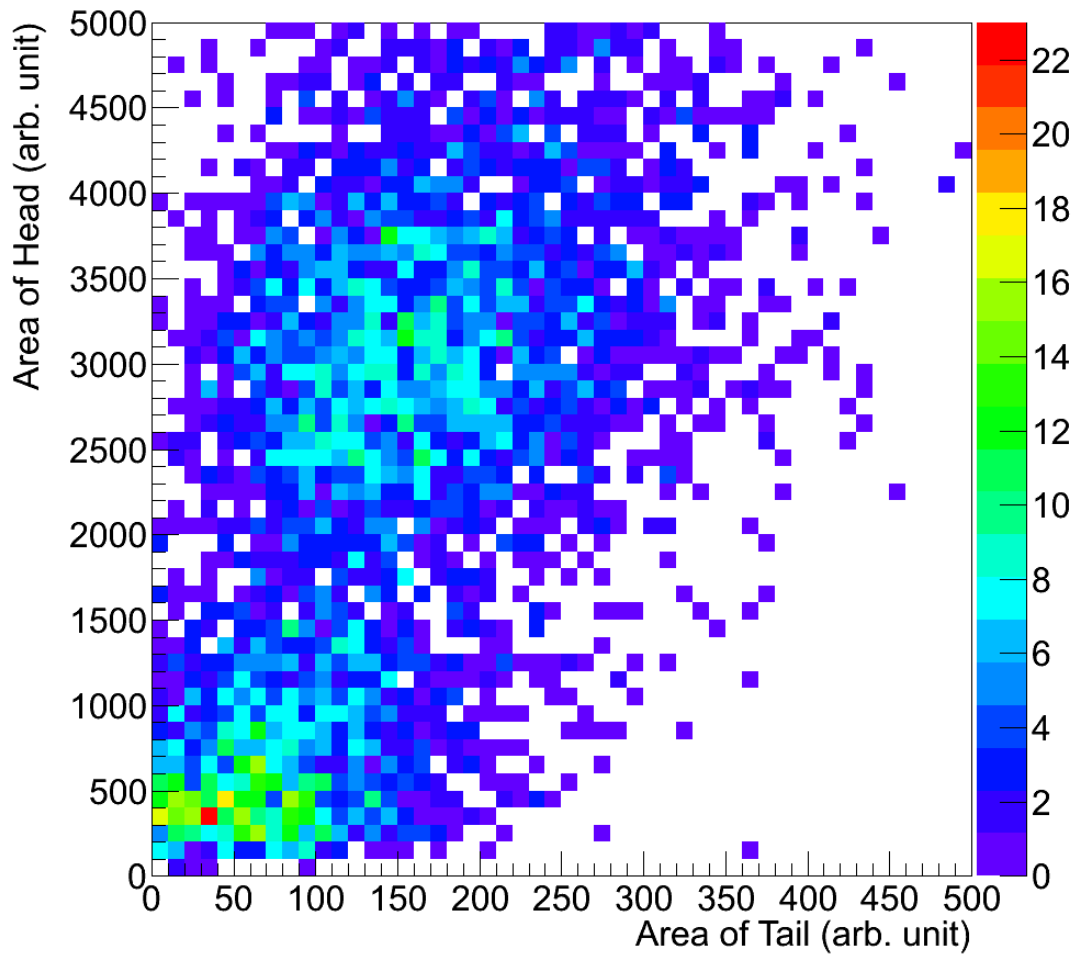


그림 22. 0 V에서의 신호파형분석.

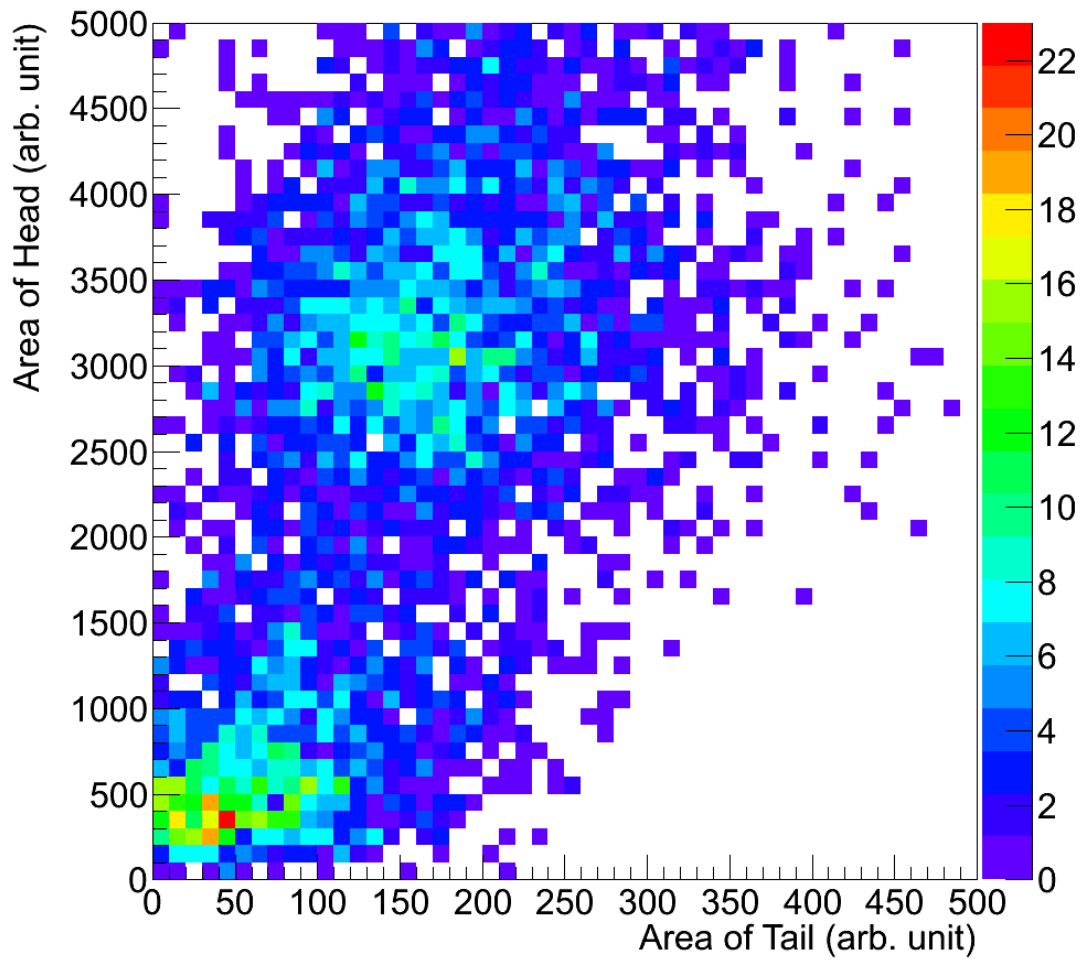


그림 23. +3000 V에서의 신호파형분석.

제 2 항. 하전입자와 배경사상에 대한 증폭분석

하전입자를 검출하는데 있어서 중성입자나 배경사상이 같이 변화가 된다면 하전입자를 더 잘 검출하려는 노력에 반하게 된다. 따라서 폴리스티렌 섬광검출기에 전압을 건 결과가 배경사상에 영향을 주지 않고 하전입자에 대해 증폭이 되었는지 확인할 필요가 있다. <그림 24~26>은 에너지에 따른 Head/Tail의 비율을 나타내고 있다. 그림으로 하전입자에 대한 집합과 배경사상에 대한 집합의 변화를 쉽게 알아채기 어려우므로 각각의 경우에 대해 하전입자에 의한 집합과 배경사상에 대한 집합에 대해 평균을 <표 7>에 나타내었다.

배경사상에 대한 에너지 평균과 비율의 평균은 거의 변화가 없다. 하지만 하전입자의 경우에는 - 3000 V에서 3000 V로 갈수록 비율평균은 거의 변하지 않았지만 에너지에 대해서는 에너지의 평균값이 0.13 MeV/cm 가량 차이를 보이며 증가 한다.

<표 7>. 하전입자와 배경사상의 전압에 따른 변화.

전압	하전입자		배경사상	
	cm당 에너지 평균	비율평균	cm당 에너지 평균	비율평균
3000 V	2.05 MeV/cm	15.05	0.45 MeV/cm	4.47
0 V	2.00 MeV/cm	15.03	0.30 MeV/cm	4.03
-3000 V	1.92 MeV/cm	15.05	0.30 MeV/cm	4.47

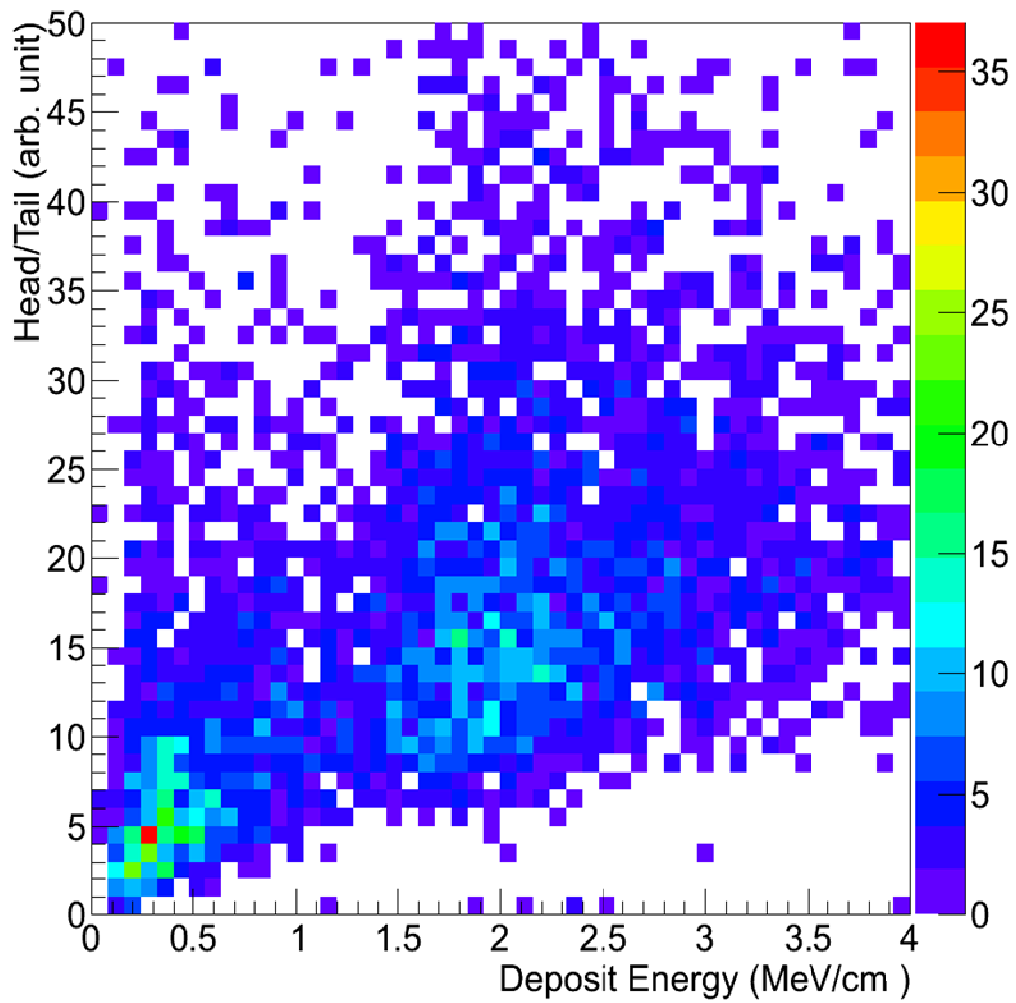


그림 24. -3000 V에서의 폴리스티렌 섬광검출기에 남긴 에너지에 대한 비율.



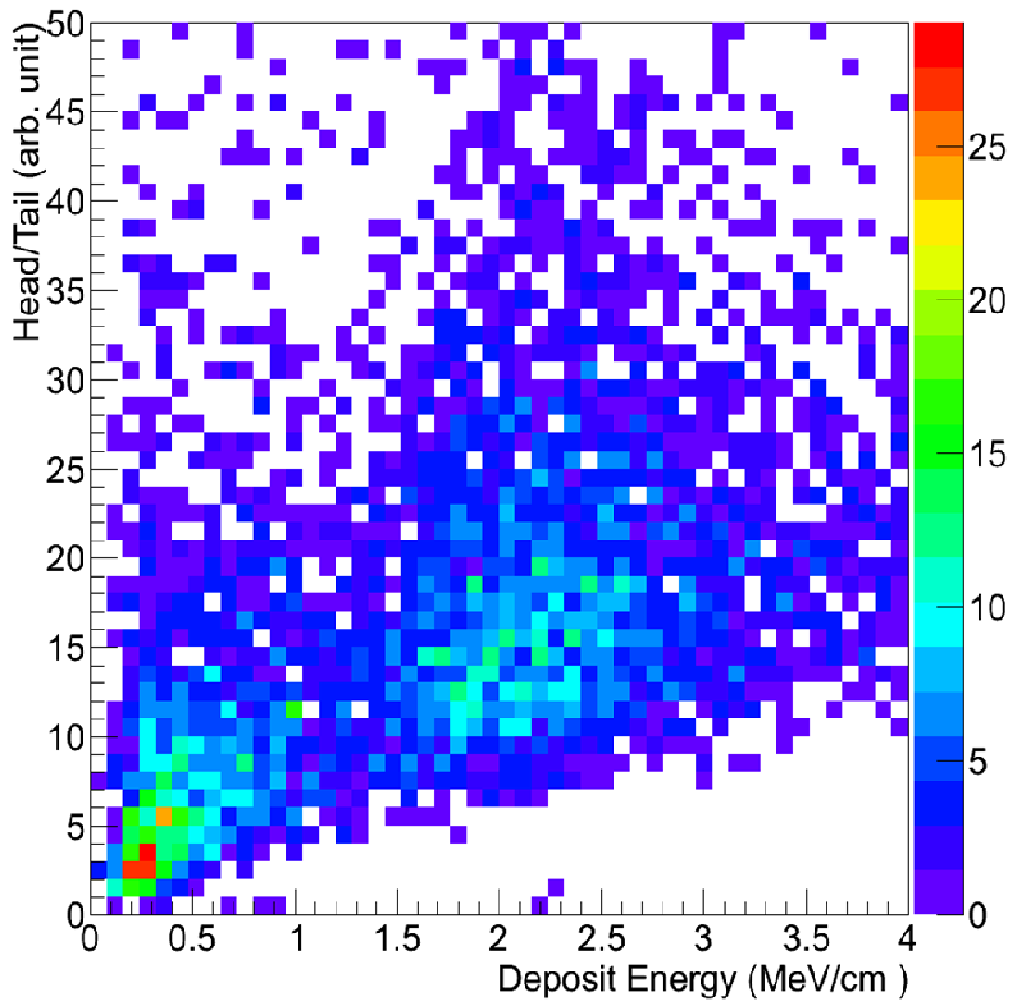


그림 25. 0 V에서의 폴리스티렌 섬광검출기에 남긴 에너지에 대한 비율.

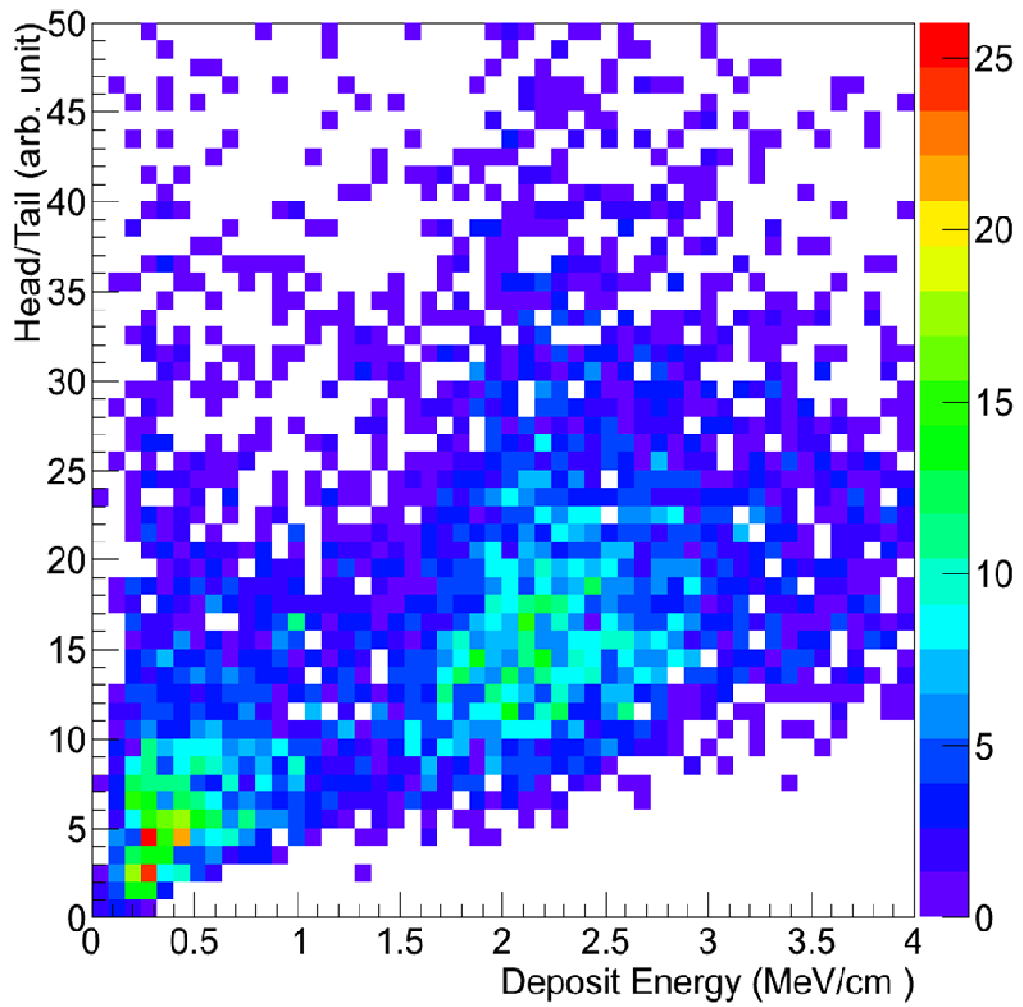


그림 26. 3000 V에서의 폴리스티렌 섬광검출기에 남긴 에너지에 대한 비율.

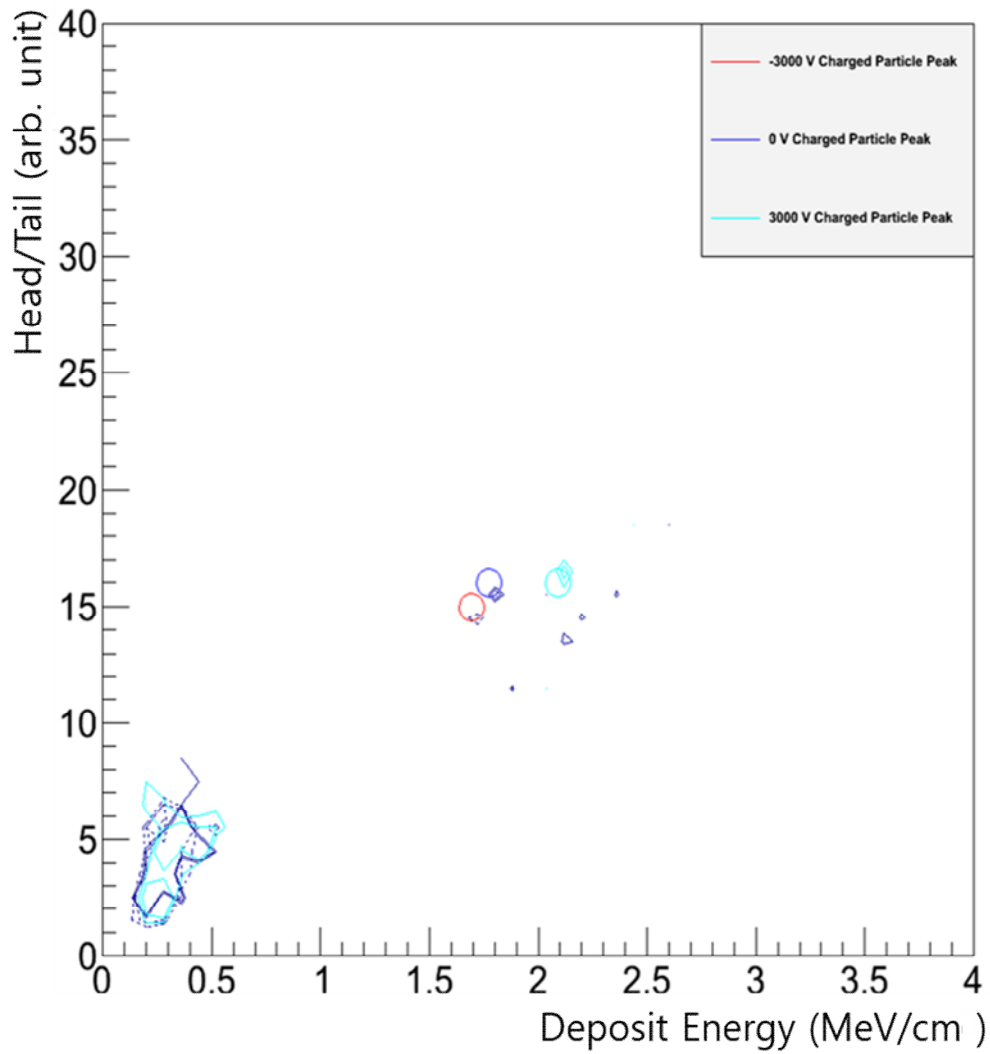


그림 27. -3000 V, 0 V, 3000 V에서 하전입자에 대한 최대 빈도를 그린 그림.

## 제 VII 장. 결론

가속기의 실험에서 생성되는 수 많은 입자를 측정하여 입자의 종류대로 구분하는 일은 쉽지 않다. 하전입자를 구분하고자 할 때 입자의 종류는 하전입자가 물질을 통과할 때 잃는 에너지를 가지고 구분할 수 있다. 하지만 중성입자가 상당히 많이 검출기에 입사했을 때 배경사상 신호가 하전입자의 신호와 겹쳐 검출율이 낮아지는 현상이 벌어진다. 따라서 중성입자를 포함한 배경사상의 신호와 하전입자의 신호를 구분하기 위해 실험을 진행했다.

하전입자가 물질과 상호작용하는 여러 가지 모형 중 하전입자의 이온화에 의한 상호작용을 나타내는 베테-블록식 (Bethe-Block formula)이 하전입자의 속도에 의존한다는 사실을 바탕으로 속도를 조절하여 하전입자가 물질에 남기는 에너지를 조절할 수 있을 거라는 생각에 대해 실험을 구성하고 결과를 얻었다. 폴리스티렌 섬광검출기에 전압을 걸었을 때 뮤온 입자는 전기장의 영향을 받아 전압을 걸지 않았을 때와 달리 남기는 에너지가 달랐다. 이것은 폴리스티렌 섬광검출기에 전압을 걸어 뮤온 입자가 남기는 에너지를 조절 할 수 있음을 의미한다. 검출되는 신호의 에너지 증가는 100 kV/m당 20 keV/cm이다. 이 전기력이 거리의 제곱에 반비례하는 힘임을 고려해 볼 때 폴리스티렌 섬광검출기의 두께를 줄이면, 즉 섬광검출기 위와 아래 위치한 전극사이의 거리를 좁히면, 같은 전압이어도 더 많은 전하가 전극에 모이게 되고 따라서 뮤온 입자를 가속 또는 감속하는데 더 영향을 줄 것이다. 또한 배경사상과 뮤온 입자에 대한 구분이 수월해져 높은 효율로 뮤온 입자를 검출하게 될 수 있다. 현재 가속기에서 관측하고자 하는 입자들은 매우 희귀한 입자로서 많은 시행횟수를 가지고 실험을 하게 되어 검출기에서의 효율이 중요하다. 검출기의 효율이 올라가면 희귀한 입자를 관측하는데 더 도움을 줄 수 있을 것이다.

더 높은 효율을 얻으려면 더 높은 전압과 전기장을 사용하여 입사입자에 영향을 주어야 하겠지만 높은 전압에 이르면 공기 중에서 방전이 일어나 섬광검출기의 두께를 줄여 효율을 높이는데 한계가 올 수 있다. 또한 전기장의 영향을 받지 않는 중성입자에 대한 실험도 진행되어야 한다.

## 제 VIII 장. 참고문헌

- [1] 이강영, *LHC 현대 물리학의 최전선*, (사이언스북스, 2011).
- [2] Beringer *et al.*, (Particle Data Group), Review of Particle Physics Phys. Rev. D **86**, 30-590 (2012).
- [3] Comfort, Joseph, J-PARC Proposal **14**, 24 (2006).
- [4] Yamanaka Taku, *et al.*, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* (Oxford University Press, 2012).
- [5] Jong-Kwan Woo, *et al.*, J. Korean Phys. Soc. **62**, 839-844 (2013).
- [6] F. D. Brooks, Nucl. Instr. and Meth. **4**, 151 (1959).
- [7] M. L. Roush, M. A. Wilson and W.F. Hornyak, Nucl. Instr. and Meth. **31**, 112 (1964).
- [8] Jong-Kwan Woo, *A WIMP Detector with Two-Phase Xenon to Search for Dark Matter* (UNIVERSITY OF CALIFORNIA, LOS ANGELES, 2000).
- [9] P. Lipari and T. Stanev, Phys. Rev. D **44**, 3543 (1991).
- [10] P. H. Barrett *et al.*, Rev. Mod. Phys. **24**, 133 (1952).
- [11] J. H. Hubbell, H. Gimm, and I. Øverbø, J. Phys. Chem. Ref. Data. **9**, 1023 (1980).
- [12] S. Klein, Rev. Mod. Phys. **71**, 1501 (1999).
- [13] H. A. Bethe, Ann. Phys. **5**, 325 (1930).
- [14] D. E. Groom, N.V. Mokhov, and S.I. Striganov, Atomic Data and Nuclear Data Tables **78**, 183-356 (2001).
- [15] H. A. Bethe, Phys. Rev. **89**, 1256 (1953).
- [16] Hamamatsu, *Hamamatsu PMT Handbook*, (Hamamatsu, 2009).
- [17] Glenn F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (John Wiley & Son, 2010).
- [18] E. U. Condon and G. H. Shortley, *The Theory of Atomic Spectra* (Cambridge University Press, 1935).
- [19] William R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments* (American Association of Physics Teachers, 1990).