



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

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

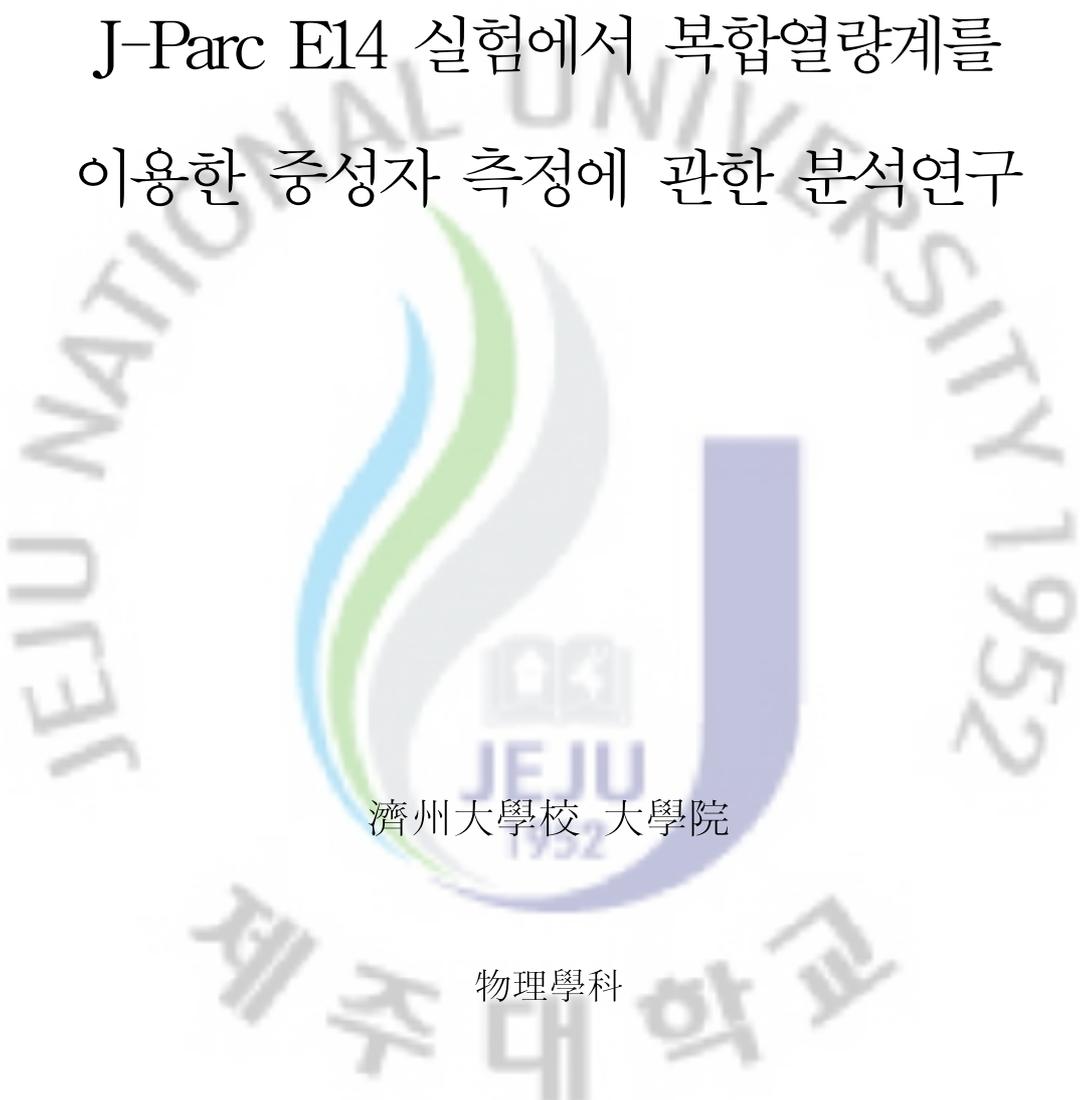
저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

J-Parc E14 실험에서 복합열량계를
이용한 중성자 측정에 관한 분석연구

The background features a large, faint watermark of the Jeju National University logo. The logo is circular, with the text 'JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952' around the top and '제주대학교' around the bottom. In the center is a stylized flame or 'U' shape in blue, green, and purple, with 'JEJU 1952' and a book icon below it.

濟州大學校 大學院

物理學科

高在愚

2011 年 2 月

J-Parc E14 실험에서 복합열량계를 이용한 중성자 측정에 관한 분석연구

指導教授 禹 鍾 瑄

高 在 愚

이 論文을 物理學 碩士學位 論文으로 提出함

2011 年 2 月

高在愚의 物理學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長	_____	①
委 員	_____	①
委 員	_____	①

濟州大學校 大學院

2011年 2月

Analysis of the Measurement of Neutron Beam with a Hybrid Calorimeter in E14 at J-Parc

Je-Wou Ko

(Supervised by Professor Jong-Kwan Woo)

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

2011. 2.

This thesis has been examined and approved.

Date

Department of Physics

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

SUMMARY

The neutral beamline for studying the charge-parity-time (CPT) violation in decay of $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ has been constructed at a Hadron hall at Japan proton accelerator research complex (J-Parc). It is critical to detect the neutrons in the beamline, because the neutrons in the beamline provide the major background. Also the neutral beamline contains gamma ray background. It is needed to discriminate signals induced by neutrons from ones induced by gamma ray. We used a hybrid calorimeter consisting of electronic and hadronic calorimeters to achieve this. The measured event rate of neutrons with a hybrid calorimeter in the neutral beamline is about 25% less than that from Monte Carlo simulation in the region of the low energy, about 50 MeV. The result shows the improvement of a method discriminating for neutron signal from gamma signal with a hybrid calorimeter.

요약

일본 Japan proton accelerator research complex (J-Parc)의 Hadron hall에 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 붕괴현상을 관측하는 실험 (Kaon at Tokai; KOTO)을 위한 중성 빔 라인이 건설되었다. 중성 빔 라인에 섞여 있는 중성자가 배경사상을 만드는 주요한 원인이므로 중성자에 대한 측정이 중요하다. 중성 빔 라인에서는 중성자뿐만 아니라 감마선도 함께 들어오기 때문에 감마선이 만드는 신호를 제거하고 중성자의 정보를 얻고자 한다. 이를 위해 전자기 열량계와 강입자 열량계가 결합된 복합열량계를 사용하였다. 중성 빔 라인에서는 복합열량계를 통한 중성자 측정 결과 약 50 MeV 에너지에서 몬테카를로 전산모사와 비교하였을 때 약 25% 적게 측정되었다. 이 결과, 복합열량계를 이용한 중성자와 감마선을 분리방법은 향상되었다.

<목 차>

제 I 장. 서론	1
제 II 장. E14 실험 개요	5
제 1 절. J-Parc의 전경과 실험실	5
제 2 절. E14 중성 빔 라인 모습	6
제 3 절. E14 실험 소개	9
제 III 장. 방사선과 물질의 상호작용	12
제 1 절. 감마선과 물질의 상호작용	12
제 2 절. 중성자와 물질의 상호작용	21
제 IV 장. 복합열량계의 구조와 중성자 응답특성	29
제 1 절. 복합열량계의 구조와 원리	29
제 2 절. 복합열량계를 통한 중성자 응답 결과	37
제 V 장. 결과 및 분석	55
제 1 절. 복합열량계의 에너지 해석	55
제 2 절. FT-ratio	58
제 3 절. 측정 결과 및 분석	59
제 VI 장. 결론	61

<그림 목차>

그림 1. K_L 붕괴에 대한 표준모형 모식도	4
그림 2. J-Parc 전경	5
그림 3. 빔 라인 배치 모습	6
그림 4. 강입자 시설의 내부 모습	7
그림 5. 빔 라인 전경	8
그림 6. 중성 케이온의 붕괴모습	9
그림 7. 빔 라인에서의 중성자 모습	11
그림 8. Compton 산란 운동	15
그림 9. 납에서의 총 감마선 흡수 단면적	16
그림 10. 감마선수에 따른 극에서의 그래프	17
그림 11. 감마선 반응의 세 가지 주요형태 그래프	19
그림 12. 물, 파라핀, 양성자와 중성자의 총 산란단면적	22
그림 13. 중성자와 핵의 탄성산란	24
그림 14. 다중 탄성 산란한 후 중성자의 에너지 분포함수	28
그림 15. 복합열량계의 구조	30
그림 16. 복합열량계에 신호가 들어올 때 데이터를 받기 위한 논리도	31
그림 17. 복합 열량계의 PMT 번호순서와 위치	32
그림 18. CsI 표면에서의 중성자 선속	38
그림 19. 1번 PMT의 뮤온에너지 분포	40
그림 20. 트리거 조건만의 첫 번째 모듈 에너지	41
그림 21. 트리거 조건만의 두 번째 모듈 에너지	42
그림 22. 트리거 조건만의 세 번째 모듈 에너지	43
그림 23. 트리거 조건만의 네 번째 모듈 에너지	44
그림 24. 트리거 조건만의 다섯 번째 모듈 에너지	45

그림 25. 트리거 조건만의 여섯 번째 모듈 에너지 -----	46
그림 26. FT-ratio만의 첫 번째 모듈 에너지 -----	47
그림 27. FT-ratio만의 두 번째 모듈 에너지 -----	48
그림 28. FT-ratio만의 세 번째 모듈 에너지 -----	49
그림 29. FT-ratio만의 네 번째 모듈 에너지 -----	50
그림 30. FT-ratio만의 다섯 번째 모듈 에너지 -----	51
그림 31. FT-ratio만의 여섯 번째 모듈 에너지 -----	52
그림 32. 복합열량계의 전체 모듈 에너지 -----	53
그림 33. 중성자와 감마선의 잔류에너지 -----	56
그림 34. 중성자와 감마선의 에너지 분해능 -----	57
그림 35. FT-ratio -----	58
그림 36. 몬테카를로 전산모사 그래프 -----	59
그림 37. 복합열량계 데이터와 몬테카를로 전산모사 결과 -----	60

<표 목차>

표 1. K_L 붕괴모드 -----	10
표 2. 첫 번째 모듈의 인가전압과 채널번호 및 복합열량계의 신호번호 -----	34
표 3. 두 번째 모듈의 인가전압과 채널번호 및 복합열량계의 신호번호 -----	34
표 4. 네 번째 모듈의 인가전압과 채널번호 및 복합열량계의 신호번호 -----	35
표 5. 세 번째 모듈의 인가전압과 채널번호 및 복합열량계의 신호번호 -----	35
표 6. 다섯 번째 모듈의 인가전압과 채널번호 및 복합열량계의 신호번호 -----	36
표 7. 여섯 번째 모듈의 인가전압과 채널번호 및 복합열량계의 신호번호 -----	36

제 I 장. 서론

J-Parc E14 (K0 at Tokai; KOTO)는 중성 케이온 (Kaon)의 붕괴 현상을 탐색하기 위해 2009년에 건설이 완료된 검출장치 및 실험의 이름이다. 중성 케이온의 붕괴는 이론적으로 계산이 간결하고 계산의 오차가 매우 적기 때문에 학계에서 많은 관심을 보이고 있다. 하지만, 실험적으로 측정하기에는 매우 어렵다는 단점이 있다 [1]. 그러나 계속해서 실험을 시도하여 일본 고에너지 연구소 (High Energy Accelerator Research Organization; KEK)에서 양성자 가속기 (proton synchrotron; PS)를 이용한 E391a 실험을 통하여 실험으로도 가능하다는 사실이 밝혀지게 되었다 [2-4]. E391a 실험을 통해 어느 정도 결과를 알아볼 수는 있으나 이 실험결과 역시 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 붕괴는 매우 적은 갈래비 (branching ratio)를 가진다 [5-7]. 이것을 확인하기 위해서는 그만큼 많은 수의 케이온 붕괴를 관찰해야 하며, 많은 수의 케이온을 관찰할수록 중성자에 의한 배경사상도 많이 생성되기 때문에 우리가 원하는 만큼의 결과를 제대로 얻을 수가 없었다.

E391a 실험에서도 이러한 사실 때문에 높은 전압을 이용하되 원하는 결과를 얻기 위한 보조적인 설비의 필요성이 대두되었다 [6]. 따라서 높은 전압의 수용과 빔의 진입 각도를 조정하고, 배경사상을 최소화할 수 있는 열량계를 사용하게 된 것이다. 물론 열량계는 E391a 실험에서도 사용되었지만 전압의 세기에 따라 열량계의 기능이 변동하기 때문에 정확한 열량계를 통한 중성자의 응답특성을 신뢰하기 어려웠다 [6]. 그러나 E391a 실험의 미비점을 보완하여 E14 실험을 하게 되었는데, 이 실험에는 높은 전압과 빔의 각도 그리고 복합열량계를 모두 적용한 실험을 하게 된 것이다. E14 실험에서 복합열량계를 통해 나온 감마선과 중성자의 응답 그리고 몬테카를로 전산모사 그래프를 이용한 중성자와의 비교 분석을 하여 E14 실험의 조건에서 복합열량계의 에너지 분해 능력이 어느 정도 되는지 알아보려고 한다.

중성 케이온이 파이 중간자와 중성미자 두 개로 붕괴하는 현상은 ($K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$)

간접적 관측에 있어서 가장 주목받고 있는 실험과제이다 [6-10]. $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 붕괴는 그림 1에서 보여주는 바와 같이 s 쿼크가 d 쿼크로 전이하는 맛 바꿈 중성류 (flavor changing neutral current; FCNC) 과정이다.

이 과정은 charge-parity-time (CPT) 대칭성을 파괴하는 과정이므로 [6-10], 중간과정에서 매개는 t 쿼크에 의해서 이루어진다. 표준모형에서 이 과정의 붕괴 진폭은 아래와 같이 간결하게 주어진다.

$$B(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = (2.20 \pm 0.07) \times 10^{-10} (\lambda/0.2248)^8 [Im(V_{ts}^* V_{td}) X_{x_t} / \lambda^5]^2$$

윗식에서 $X_{x_t} = 1.464 \pm 0.041$ 은 t 쿼크와 W 보손의 비율에 제곱으로 주어지는 변수 X_{x_t} 에 의해 정량화되는 Inami-Lim loop 함수의 값으로 양자색동역학 (quantum electrodynamics; QED) 보정을 포함하고 있다 [6-10].

결과적으로 s 쿼크가 t 쿼크를 매개하여 d 쿼크로 전이하는 과정과 반 s 쿼크가 반 t 쿼크를 매개하여 반 d 쿼크로 진행되는 과정의 위상차이($Im(V_{ts}^* V_{td})$)만이 붕괴 진폭을 결정하는 데 있어서 잘 알려지지 않은 물리량이 된다. 이 물리량이 표준모형에서는 CPT 대칭성을 파괴하는 파라미터인 η 이다 [6-10]. 따라서 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 의 붕괴진폭을 측정한다는 것은 CPT 대칭성 파괴의 크기를 결정하는 일이 된다. 이 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 붕괴는 3세대의 쿼크가 모두 참여하는 현상이므로, 쿼크들의 세대 간 관계를 이해하는 데 있어서 매우 중요한 현상이다 [6-10]. 일본 J-Parc의 Hadron hall에 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 붕괴현상을 관측하는 실험 E14를 위한 중성 빔 라인이 건설되었다. 2009년 10월부터 2010년 2월 사이에 이 빔 라인의 성능 평가 실험을 수행하였다. 중성 빔 라인에 섞여 있는 중성자가 배경사상을 만드는 주원인이므로, 이 중성자에 대한 정보를 얻는 것이 중요하다. 중성 빔 라인에는 중성자뿐만 아니라 감마선도 함께 들어오기 때문에 감마선이 만드는 신호를 제거하고 중성자만의 정보를 얻고자 한다. 이를 위하여 복합 열량계를 이용하였다.

따라서 본 논문의 제2장에서는 E14 실험의 시설과 실험에 대한 개요를 기술하고, 제3장에서는 방사선과 물질의 상호작용에 대한 이론을 살펴보았다. 제4장에서는 E14 실험에서 복합열량계를 통한 응답결과와 몬테카를로 전산모사의 중성자 응답결과 차이가 어떤지를 분석하여 제5장에서는 실험

결과에 대한 중성자에너지와 감마선에너지 해석과 전체 모듈에 들어온 에너지에 대한 전자기열량계에 들어온 에너지 비율(FT-ratio)이 어떤 의미가 있는가를 제시하고 결론을 맺으려고 한다.



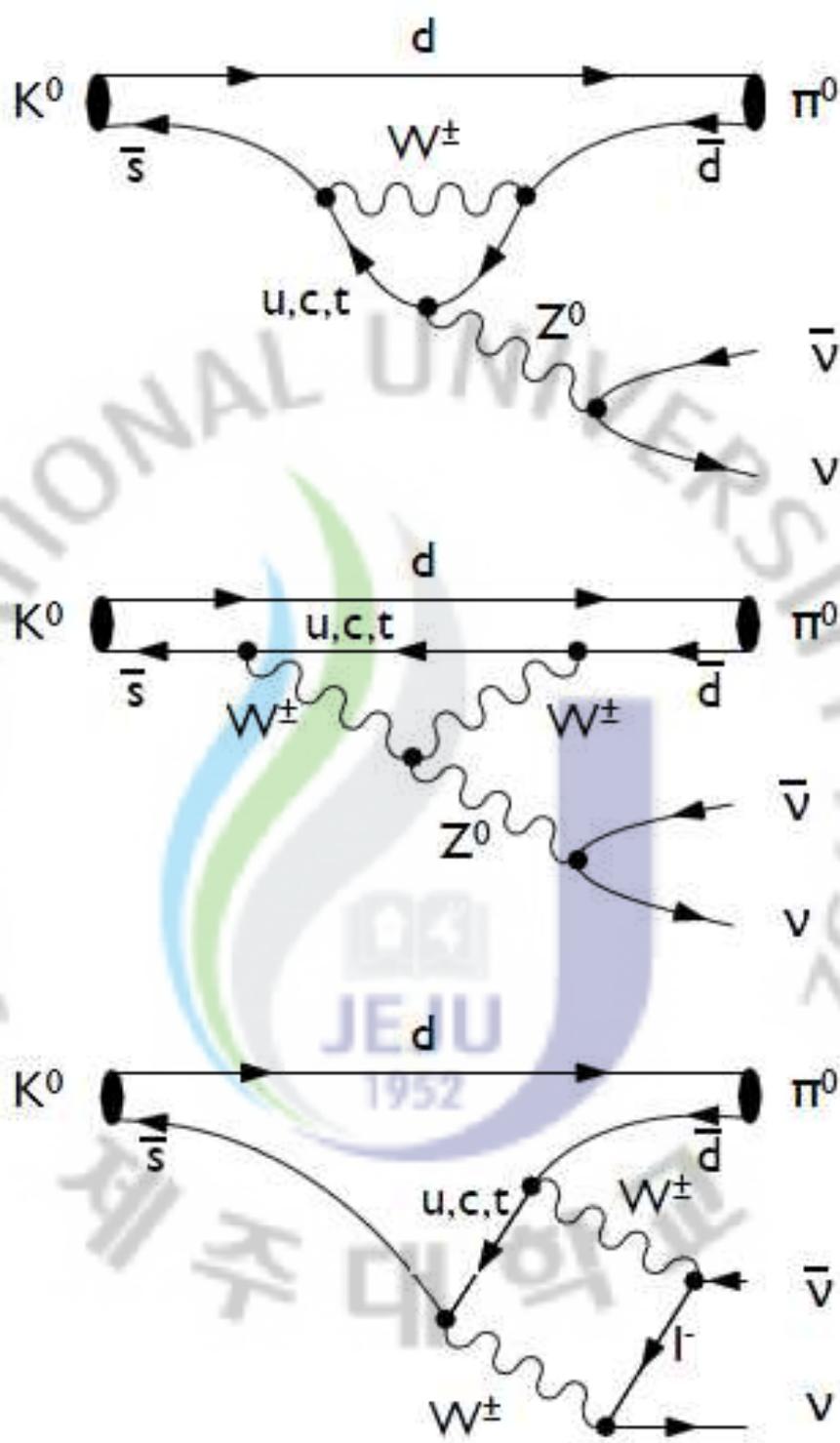


그림 1. $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 붕괴에 대한 표준모형 모식도 [7].

제 II 장. E14 실험 개요

제 1 절. J-Parc의 전경과 실험실

그림 2는 양성자가속기의 모습을 사진으로 찍었다. 이 양성자가속기가 제공하는 에너지 크기는 전력이 1 MW 일 때 생성된 입자의 에너지는 3 GeV이고, 전력이 0.74 MW 일 때 생성된 입자의 에너지는 50 GeV이다. 사진에서 가속기 가운데에 있는 건물은 물질 및 생명과학 연구시설 (materials and life science facility)이다. 우측 하단에 강입자 물리 연구시설 (Hadron facility)이 있고 이곳에서 E14 실험을 할 것이다. 사진 좌측부분에는 중성미자 빔 시설 (Neutrino facility)이 있다. 이 중성미자 빔은 약 395 km 떨어진 카미오카 (Kamioika)로 보내진다. 이처럼 각 시설에서는 여러 가지 실험이 이루어진다.



그림 2. J-Parc 전경.

제 2 절. E14 중성 빔 라인 모습

중성 빔 라인 건설의 중요성은 후광 중성자 (halo neutron)를 얼마만큼 억제할 수 있느냐는 것이다. 그림 3에서 배치되는 설비들은 처음 입자가 진입하는 곳에는 빔의 크기를 결정해 주는 조준기 (collimator)가 있으며, 이어서 하전입자를 제거하는 쌍극 자석 (dipole magnet)이 배치되고 이 과정에서 생성되는 후광 중성자를 제거하기 위한 두 번째 조준기가 설치되었고 그 뒤에 연구하기 위하여 향상된 열량계를 설치할 예정이다.

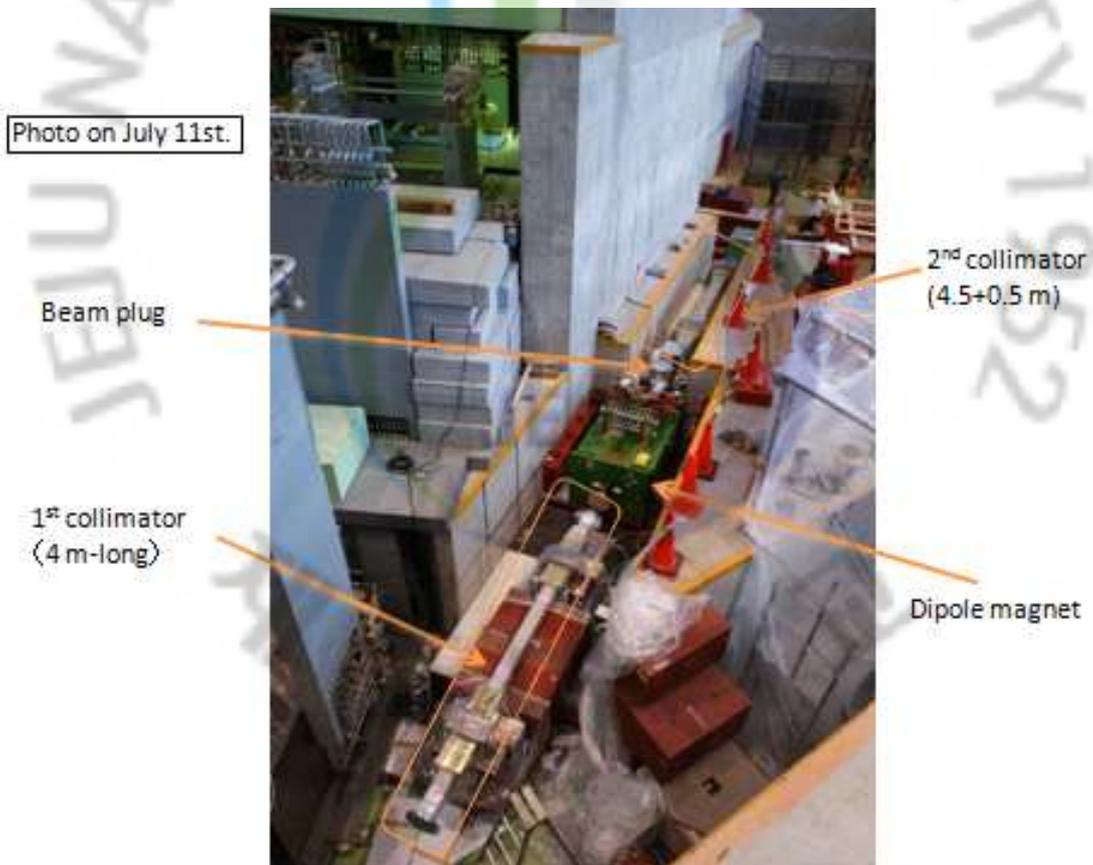


그림 3. 빔 라인 배치 모습.

그림 4는 30 GeV로 입사한 양성자가 Ni 원판으로 만들어진 표적에 충돌하여 생성된 중성 빔라인이 입사방향과 16° 의 각으로 편향됨을 보여주고 있다. 그 이유는 양성자의 진행에 대한 양성자 빔에 의한 방사선 차폐의 한계 때문이다. 이때 빔 라인 까지 거리는 10 m 이다. 이러한 큰 각 (E391a의 경우에는 4°)은 입사 K_L 의 양을 감소시키게 되기 때문에 양성자의 수가 100배 증가하는 경우에 대해서 K_L 의 증가는 30배에 그치게 되었다 [5-6]. 그러나 중성자의 입사량은 각도의 증가에 대하여 K_L 의 경우보다 더욱 급격하게 감소하여 중성자에 의한 배경 사상은 E391a의 경우에 비해 덜 심각하게 된다 [5-6].



그림 4. 강입자 시설의 내부 모습.

그림 5는 향상된 열량계를 설치하기 전에 들어오는 빔의 성능을 확인하기 위한 조사 현장이다. 빔이 들어오면 먼저 빔 특성 모니터로 중성자나 감마선의 특성을 확인할 수 있다. 두 번째 설치된 열량계로 케이온이 $\pi^+\pi^-\pi^0$ 를 측정하고 세 번째 설치된 분광학 장치로 케이온이 $\pi^+\pi^-$ 으로 붕괴하는 것을 측정한다. 마지막 세 번째에 있는 복합열량계로 빔라인에서의 중성자를 측정한다.

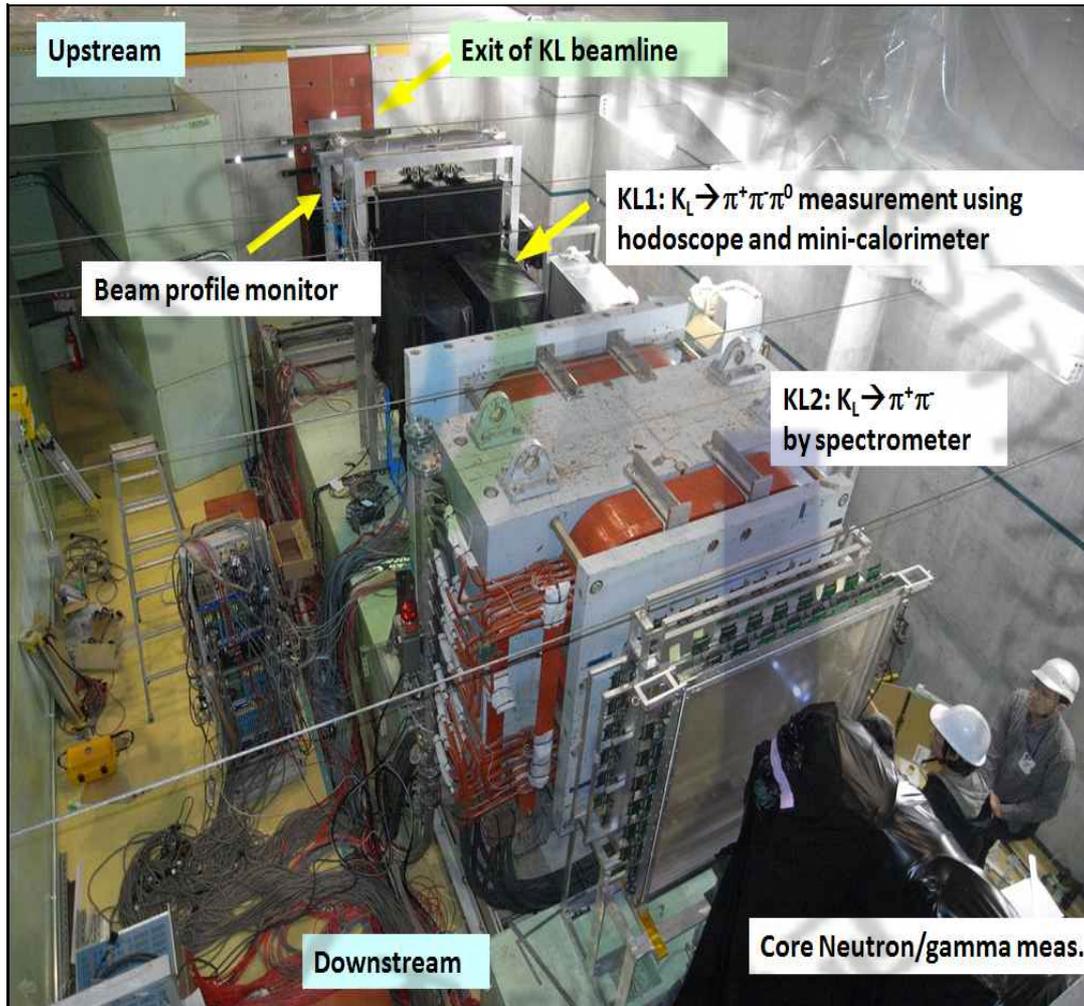


그림 5. 빔 라인 전경.

제 3 절. E14 실험 소개

1) $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 붕괴 현상의 관측

그림 6은 30 GeV로 가속된 양성자가 표적 핵에 부딪혀 생성하는 중성 케이온 (K_L)이 열량계로 들어오는 것을 보여준다. 이 K_L 은 하나의 π^0 와 두개의 중성미자로 붕괴하는 것 이외에 다른 붕괴 모드도 있다. 표 1은 이 K_L 의 붕괴모드 중에 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$, $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$, $K_L \rightarrow \gamma \gamma$, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$, ... 등과 같은 다른 붕괴모드도 보여준다 [11]. 중성미자의 검출효율은 너무나도 작기 때문에 측정이 제한되어 π^0 가 붕괴하면서 나오는 두 개의 감마선만을 측정하고자 한다. 두 개의 감마선만이 만들어지는 K_L 붕괴과정은 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 와 $K_L \rightarrow \gamma \gamma$ 뿐이다. $K_L \rightarrow \gamma \gamma$ 붕괴는 이체 붕괴의 특징을 이용하여 쉽게 구분된다.

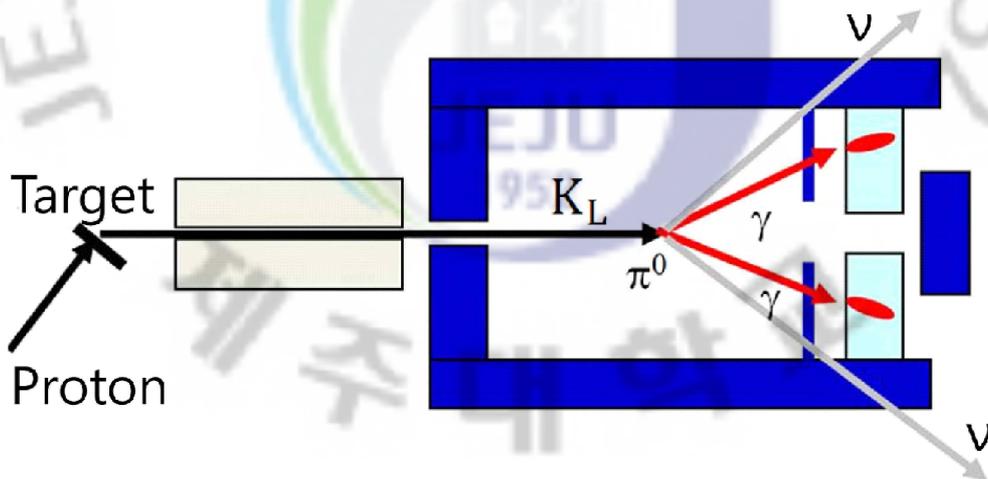


그림 6. 중성 케이온의 붕괴모습.

표 1. K_L 붕괴 모드 [11].

K_L^0 Decay Modes	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level
Semileptonic modes		
「1 $\pi^\pm e^\mp \nu_e$ (called K_{e3}^0)	(38.79±0.27)%	S=1.8
「2 $\pi^\pm \mu^\mp \nu_\mu$ (called $K_{\mu3}^0$)	(27.18±0.25)%	S=1.1
「3 $(\pi\mu\text{atom})\nu$	$(1.06\pm 0.11)\times 10^{-7}$	
「4 $\pi^0 \pi^\pm e^\mp \nu$	$(5.18\pm 0.29)\times 10^{-5}$	
「5 $\pi^\pm e^\mp \nu e^+ e^-$	1.28 ± 10^{-5}	
Hadronic modes, including Charge conjugation×Parity Violating (CPV) modes		
「6 $3\pi^0$	(21.08±0.27)%	S=1.7
「7 $\pi^+ \pi^- \pi^0$	(12.58±0.19)%	
「8 $\pi^+ \pi^-$	CPV $(2.084\pm 0.032)\times 10^{-3}$	S=1.6
「9 $\pi^0 \pi^0$	CPV $(9.42\pm 0.19)\times 10^{-4}$	S=1.8
Semileptonic modes with photons		
「10 $\pi^\pm e^\mp \nu_e \gamma$	$(3.53\pm 0.06)\times 10^{-3}$	
「11 $\pi^\pm e^\mp \nu_e \gamma$	$(5.7_{-0.7}^{+0.6})\times 10^{-4}$	
Hadronic modes with photons or $l\bar{l}$ pairs		
「12 $\pi^0 \pi^0 \gamma$	$< 5.6\times 10^{-6}$	CL=90%
「13 $\pi^+ \pi^- \gamma$	$(4.38\pm 0.13)\times 10^{-5}$	S=2.8
「14 $\pi^+ \pi^- \gamma$ (DE)	$2.84\pm 0.11\times 10^{-5}$	S=2.0
「15 $\pi^0 2\gamma$	$(1.68\pm 0.10)\times 10^{-6}$	S=3.6
「16 $\pi^0 \gamma e^+ e^-$	$(2.3\pm 0.4)\times 10^{-8}$	
Other modes with photons or $l\bar{l}$ pairs		
「17 2γ	$(5.96\pm 0.15)\times 10^{-4}$	S=1.2
「18 3γ	$< 2.4\times 10^{-7}$	CL=90%
「19 $e^+ e^- \gamma$	$(10.0\pm 0.5)\times 10^{-6}$	S=1.7
「20 $\mu^+ \mu^- \gamma$	$(3.59\pm 0.11)\times 10^{-7}$	S=1.3
「21 $e^+ e^- \gamma\gamma$	$(5.95\pm 0.33)\times 10^{-8}$	
「22 $\mu^+ \mu^- \gamma\gamma$	$(1.0_{-0.6}^{+0.8})\times 10^{-8}$	
Charge conjugation × Parity(CP) or Lepton Family number(LF) violating modes, or $\Delta S=1$ weak neutral current(S1) modes		
「23 $\mu^+ \mu^-$	S1 $(7.25\pm 0.16)\times 10^{-9}$	
「24 $e^+ e^-$	S1 $(9_{-4}^{+6})\times 10^{-12}$	
「25 $\pi^+ \pi^- e^+ e^-$	S1 $(3.5\pm 0.6)\times 10^{-7}$	
「26 $\pi^0 \pi^0 e^+ e^-$	S1 $< 6.6 \times 10^{-9}$	CL=90%
「27 $\mu^+ \mu^- e^+ e^-$	S1 $(2.6\pm 0.4)\times 10^{-9}$	

「28 $e^+e^-e^+e^-$	S1 $(3.75\pm 0.27)\times 10^{-8}$	
「29 $\pi^0\mu^+\mu^-$	CP,S1 $<3.8\times 10^{-10}$	CL=90%
「30 $\pi^0e^+e^-$	CP,S1 $<5.1\times 10^{-10}$	CL=90%
「31 $\pi^0\nu\bar{\nu}$	CP,S1 $<5.9\times 10^{-7}$	CL=90%
「32 $\pi^0\pi^0\nu\bar{\nu}$		CL=90%
「33 $e^\pm\mu^\mp$	LF $<4.7\times 10^{-12}$	CL=90%
「34 $e^\pm e^\pm\mu^\mp\mu^\mp$	LF $<1.23\times 10^{-10}$	CL=90%
「35 $\pi^0\mu^\pm e^\mp$	LF $<6.2\times 10^{-9}$	CL=90%

2) 중성자에 의한 배경사상

앞 장에서 논의한 바와 같이 $K_L\rightarrow\gamma\gamma$ 붕괴는 이체 붕괴의 특징을 이용하여 쉽게 구분됨으로 $2\gamma + \text{Nothing}$ 이 $K_L\rightarrow\gamma\gamma$ 붕괴의 신호가 된다. $K_L\rightarrow\pi^0\nu\bar{\nu}$ 붕괴 사상이 두 개의 감마선만이 존재하는 것이기 때문에 중성자가 물질과 상호작용하여 생성하는 π^0 는 배경사상이 되기 쉽다. 많은 양의 중성자가 K_L 과 함께 입사하므로, 이 중성자가 열량계 안에서 공기 분자와의 상호작용으로 π^0 가 생성된다. 열량계에는 빔이 통과하도록 중심부분을 비워 두지만, 빔 중심에서 벗어난 중성자 (후광중성자)는 열량계로 들어가서 π^0 를 생성함으로 열량계에서 멀어지게 정의하였다. (그림 7 참조) 열량계의 분해능 때문에 이러한 π^0 가 많아지면 배경사상이 나타날 수 있으므로 빔 중심에서 벗어난 중성자의 수를 감소시킨다. 그림 7은 빔 라인에서의 중성자 모습인데 중성자가 빔라인에 들어갈 때 후광중성자도 함께 들어간다.

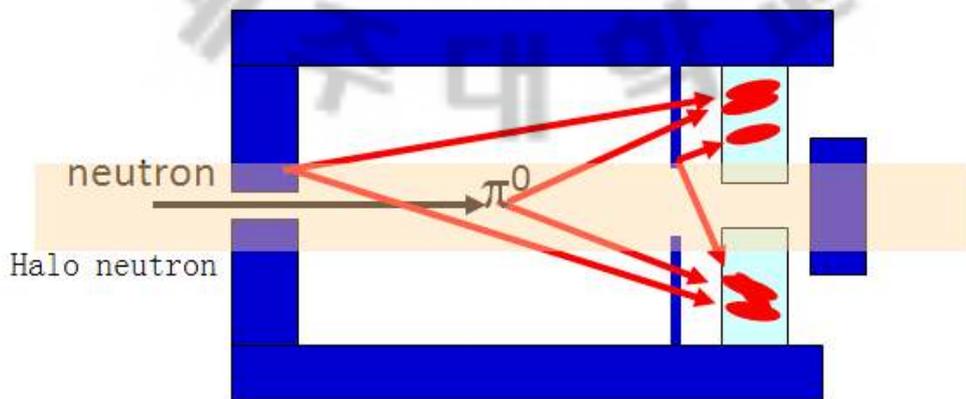


그림 7. 빔 라인에서의 중성자 모습.

제 III 장. 방사선과 물질의 상호작용

제 1 절. 감마선과 물질의 상호작용

물질 내에서 X-선이나 γ -선과 같은 감마선의 행동은 하전입자와 매우 다르다. 특히 감마선은 전하를 갖고 있지 않으므로 원자에 속박된 전자와의 여러 번에 걸친 비탄성산란이 불가능하다. 그 대신 광전효과 (photoelectric effect), 콤프턴산란 (Compton scattering) 그리고 쌍생성 (pair production) 등을 통하여 상호작용하게 된다. 이들 반응을 이용하면 (1) X-선이나 γ -선이 물질 안에서 하전입자보다 더 많이 진행한다는 사실, (2) 감마선이 물질 내를 진행할 때 에너지 감소가 없다는 사실 (오직 세기만 감소) 등을 설명할 수 있다. 첫 번째 결과는 위에서 나열한 세 가지 과정의 산란단면적이 하전입자-전자 충돌의 비탄성 산란단면적보다 훨씬 작다는 것으로부터 설명할 수 있다. 그리고 두 번째 결과는 위의 세 가지 과정이 흡수 또는 산란을 통하여 빔으로부터 감마선을 완전히 제거한다는 것으로부터 설명가능하다. 결국 물체를 뚫고 나온 감마선은 어떤 상호작용도 경험하지 않았으므로 원래의 빔 에너지를 그대로 가지고 있는 것이다. 하지만 물체 내에서 상호작용을 경험한 감마선은 이미 사라져 버렸으므로 결과적으로 세기가 줄어들었을 것이다. 물체의 두께 x 의 함수로 표현한 감마선의 세기는 다음과 같다 [12,13].

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x). \quad (3.1)$$

이때 I_0 는 입사빔의 세기, x 는 흡수체의 두께 그리고 μ 는 흡수계수이다. 광전효과와 원자에 속박된 전자가 감마선을 흡수한 후, 이 전자가 방출되는 현상이다. 광전효과에 대한 산란단면적은 대체로 입사에너지가 증가함에 따라 감소하지만 각각의 원자껍질 (K, L, M, ...)에너지 근처에서 급격히 증가한다 (그

림 9의 $\sigma_{K\ shell}$ 성분).

이론적으로 속박전자의 Dirac 파동함수가 매우 복잡하여 광전효과를 엄격히 다루는 것은 쉽지 않은 일이다. 그러나 K-껍질에너지보다 큰 감마선에너지에 대해서는 거의 K-전자만 반응하게 되므로, 상대적으로 낮은 에너지 ($h\nu \ll m_e c^2$)에서 보른근사를 이용하면 광전효과의 산란단면적을 계산할 수 있다. 이 경우 원자 하나당 다음과 같은 값을 가진다 [12,13].

$$\sigma_{photo} = 4\alpha^4 \sqrt{2} Z^5 \sigma_{Thomson} \left(\frac{m_e c^2}{h\nu} \right)^{7/2}, \quad (3.2)$$

여기서 α 는 미세구조상수로 $\alpha = 1/137$ 로 주어지고

$\sigma_{Thomson} = 8\pi r_e^2/3 = 6.651 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ 으로 Thomson 산란 단면적이다. 식 (3.2)의 Z 의존성을 보면 Z 가 큰 물질일수록 광전효과에 의한 흡수에 유리하다는 것을 알 수 있다. 이 말은 γ -선 열량계 등을 제작할 때 중요한 고려 사항이 된다 [12,13].

Compton 산란은 감마선과 유전자 사이에 일어난다. 물론 물질 속의 전자는 원자에 속박되어져 있다. 하지만 감마선의 에너지가 전자의 결합에너지보다 크다면 전자는 자유입자로 간주할 수 있다. 그림 8은 산란과정을 묘사하고 있다.

에너지 그리고 운동량 보존을 적용시키면 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\begin{aligned} h\nu' &= \frac{h\nu}{1 + \xi(1 - \cos\theta)}, \\ T &= h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\xi(1 - \cos\theta)}{1 + \xi(1 - \cos\theta)}, \\ \cos\theta &= 1 - \frac{2}{(1 + \xi)^2 \tan^2\varphi + 1}, \\ \cos\varphi &= (1 + \xi) \tan \frac{\theta}{2}, \end{aligned}$$

Klein-Nishina 공식으로 알려져 있는 양자색동역학에 기초한 Compton 미분 산란단면적은 다음과 같다 [12,13].

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \frac{1}{[1 + \gamma(1 - \cos\theta)]^2} \left[1 + \cos^2\theta + \frac{\gamma^2(1 - \cos\theta)^2}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)} \right] \quad (3.3)$$

여기서 $\gamma = h\nu/m_e c^2$ 이다. 분포도에 대한 그래프는 그림 10에 잘 나와 있다 [14].

Compton 산란과 관련하여 고전적인 Thomson 및 Rayleigh 산란이 있다. 자유전자에 의한 감마선산란이 비 상대론적 영역 ($h\nu \ll m_e c^2$)이 Thomson 산란에 해당한다. 이러한 낮은 에너지 극한에서 Klein-Nishina 공식은 Thomson 산란단면적 공식으로 바뀌게 된다.

$$\sigma_{Thomson} = \frac{8\pi}{3} r_e^2 \quad (3.4)$$

이 과정에서는 원자 내의 모든 전자가 결맞은 (coherent) 방식으로 산란에 참여하게 되므로 결맞은 산란 (coherent scattering)이라고도 부른다. 이 두 가지 산란의 특징은 물질에 에너지를 전혀 전달하지 않는다는 것이다. 그러므로 물질 내의 원자도 들뜨거나 이온화 되지 않고 단지 감마선의 진행방향만 바뀌게 된다. 수 백 keV 이상의 X-선이나 γ -선에 대하여 이 두 가지 산란과정의 공헌은 매우 적어 보통 무시한다 (그림 9의 $\sigma_{Rayleigh}$ 참조).

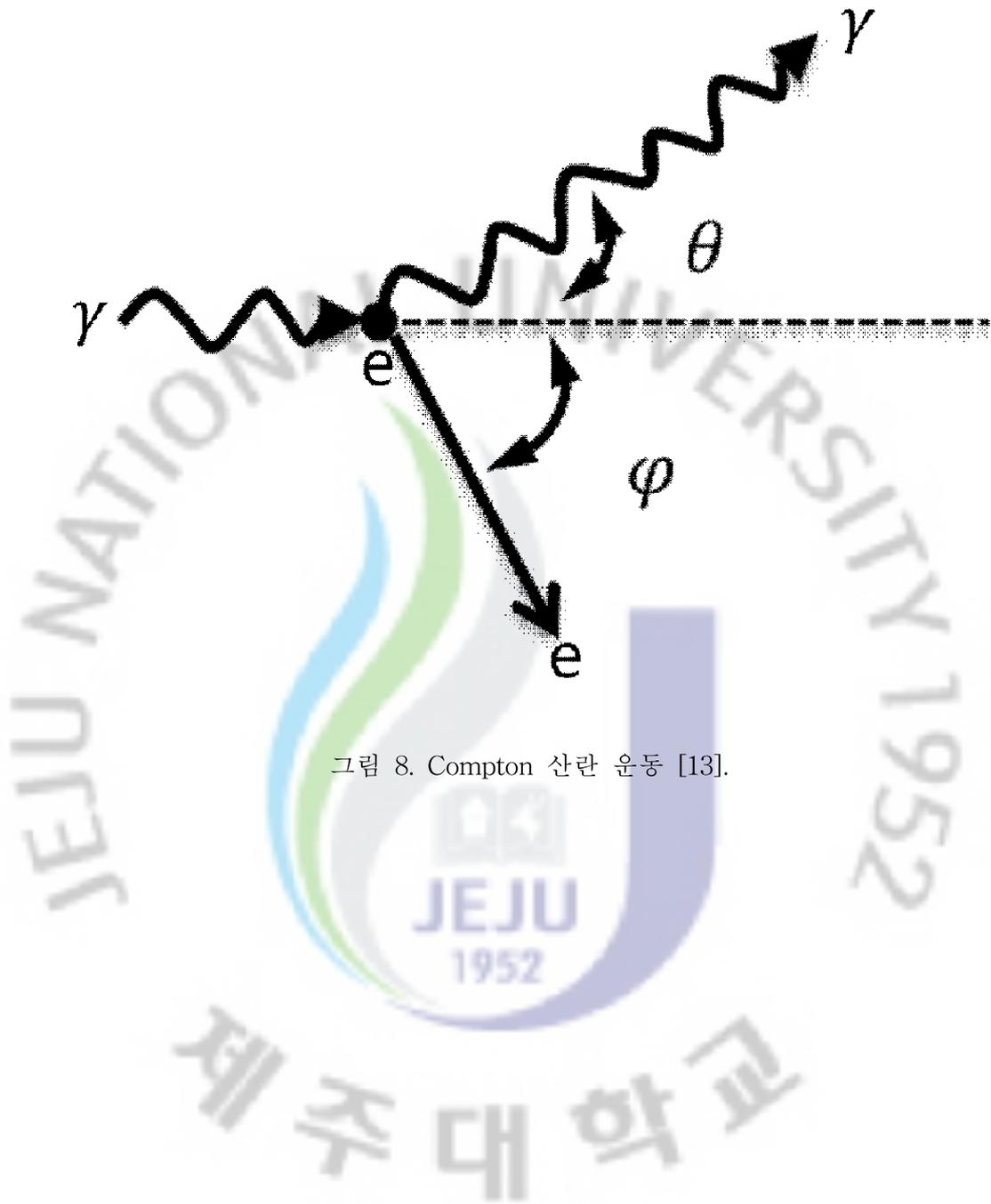


그림 8. Compton 산란 운동 [13].

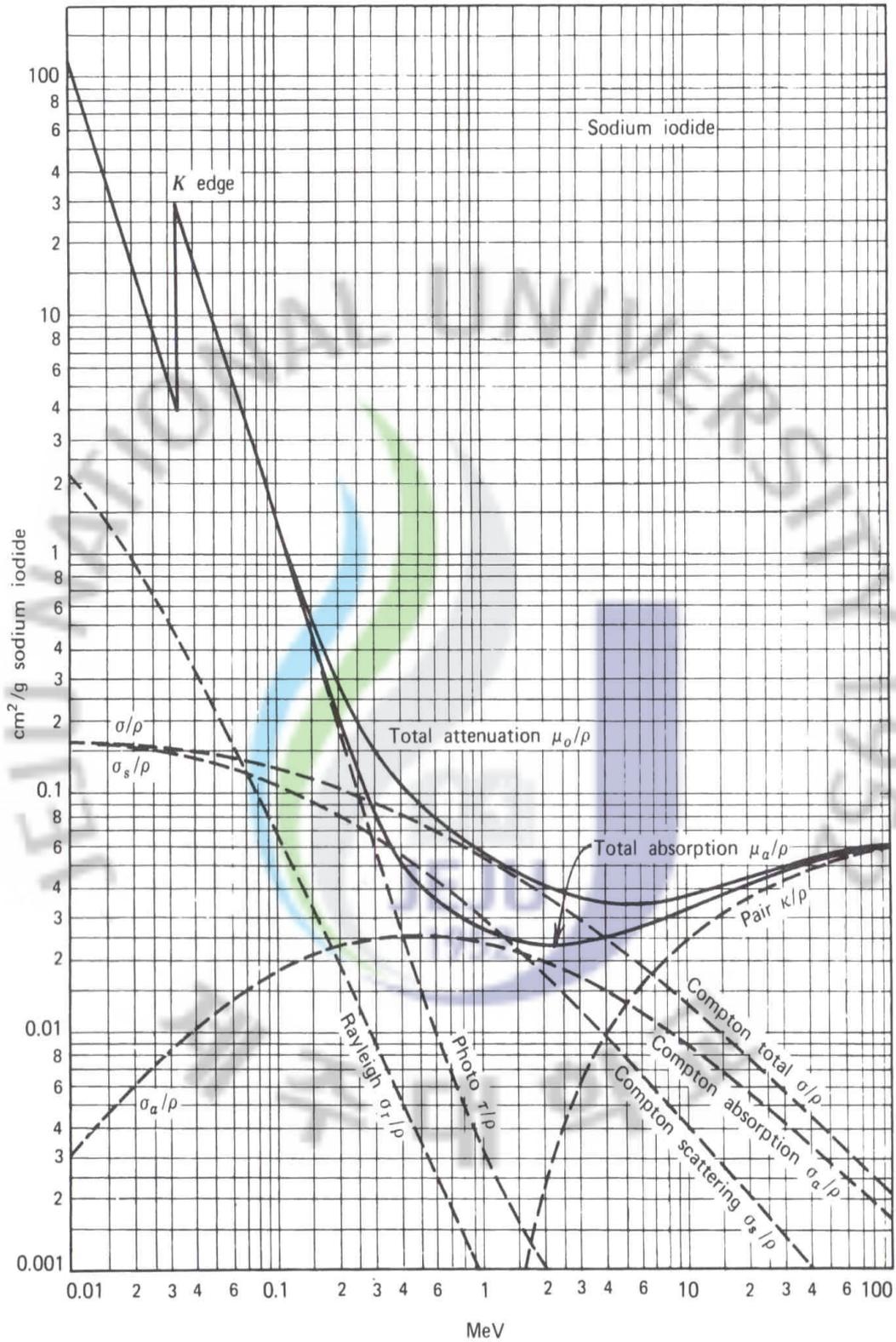


그림 9. 납에서의 총 감마선 흡수 단면적 [14].

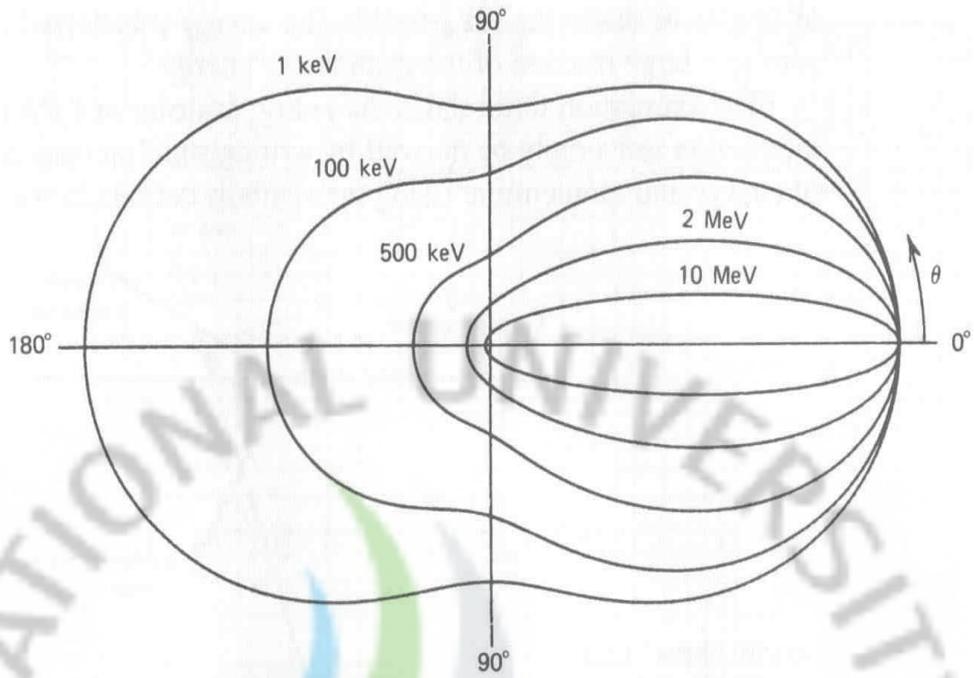


그림 10. 감마선수에 따른 극에서의 그래프 [14].

쌍생성은 감마선이 전자-양전자 쌍으로 전환되는 과정이다. 이때 선운동량 보존법칙을 만족하게 하기 위해서 제 3의 입자가 필요한데 주로 핵이 그 역할을 하게 된다. 그리고 쌍생성이 일어나기 위해서는 감마선의 에너지가 최소한 1.022 MeV가 되어야 한다. 이론적으로 쌍생성은 제동복사와 매우 밀접한 관계가 있다. 제동복사와 비슷하게 핵의 전기장 내에서 발생하는 쌍생성 과정에서도 핵을 둘러싸고 있는 전자에 의한 차폐가 중요한 역할을 한다. 따라서 쌍생성의 산란단면적은 제동복사의 산란단면적에 비례하는데 $\sigma_{\text{bremsstrahlung}} = \frac{100 m_e c^2 h \nu}{E_+ E_- Z^{1/3}}$ 에 관계있다. 여기서 E_+ 는 방출되는 양전자의 총 에너지이고, E_- 는 방출되는 전자의 총 에너지이다. 제동복사와 마찬가지로 쌍생성 과정 역시 원자에 속박되어 있는 전자의 전기장 때문에 발생할 수도 있다. 이 경우 산란단면적에 대한 결과는 비슷하나 크기가 $1/Z$ 요소만큼 줄어든다 [12,13]. 그림 11에서 왼쪽 영역은 광전자 흡수와 콤프턴 산란 그리고 오른쪽 영역은 콤프턴 산란 그리고 쌍생성을 나타낸 그래프이다. 이 세 가지 영역으로 우리는 광전자 흡수, 콤프턴 산란 그리고 쌍생성을 각각 나타낼 수 있다 [14].

고에너지 감마선과 전자에 의한 쌍생성 및 제동복사 현상의 중요한 특징은 동시에 전자-감마선의 입자소나기를 만든다는 것이다. 물질 내에서 고에너지 감마선은 전자-양전자 쌍으로 전환되고, 이들은 각각 제동복사 감마선을 방출한다. 그리고 이들 감마선은 다시 전자-양전자 쌍을 만든다. 그 결과 감마선, 전자, 양전자로 구성된 입자 다단계소나기 (cascade) 또는 입자소나기가 만들어지는 것이다. 이와 같은 입자소나기의 진행은 임계에너지 이하에서 전자와 반전자가 원자와의 충돌에 의해 모든 에너지를 잃어버릴 때까지 계속된다 [12,13].

물론 입자소나기의 형성은 통계적인 과정이다. 그러나 복사길이를 이용하면 입자의 평균 개수와 그들의 평균에너지를 물질 내 투과깊이의 함수로 구할 수 있는 간단한 모델을 만들 수 있다. 예를 들어, 에너지가 E_0 인 감마선으로부터 시작해 보자. 이 감마선은 평균 X_0 을 진행한 후, 각각 $E_0/2$ 의 에너지를 갖는 전자-양전자 쌍으로 전환된다. $2X_0$ 을 진행한 후에는 전자와 양전자가 각각 $E_0/4$ 의 에너지를 갖는 제동복사 감마선을 방출한다. $3X_0$ 을 진행한 후에 각각의 감마선은 다시 쌍생성을 하고, 전자와 양전자가 각각 $E_0/8$ 의 에너지를 갖는 제동복사 감마선을 방출한다 [12,13].

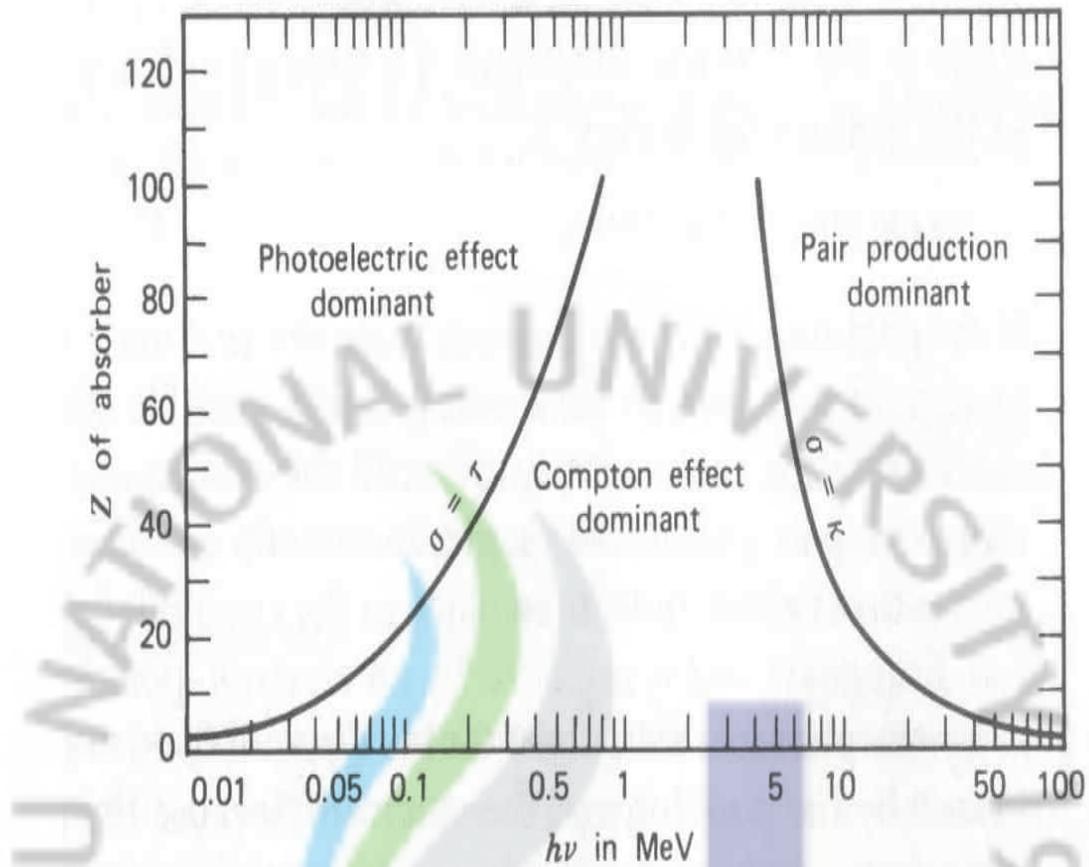


그림 11. 감마선 반응의 세 가지 주요형태 그래프 [14].

이렇게 계속 반복된다면 복사길이 t 를 진행한 후의 총 입자수와 각 입자의 평균에너지는 각각

$$N(t) \simeq 2^t, \quad (3.5)$$

$$E(t) \simeq \frac{E_0}{N(t)}, \quad (3.6)$$

가 된다. 감마선 대신 전자 또는 양전자로 시작하여도 똑같은 결과를 얻게 된다. 그렇다면 입자소나기에 의한 최대 투과깊이를 계산한다면 입자소나기의 진행이 임계에너지 E_c 에서 갑자기 끝난다고 가정하면

$$E(t_{\max}) = \frac{E_0}{2^{t_{\max}}} = E_c, \quad (3.7)$$

가 성립하고, t_{\max} 에 대하여 풀면,

$$t_{\max} = \frac{\ln(E_0/E_c)}{\ln 2}, \quad (3.8)$$

을 얻는다. 그러므로

$$N_{\max} \simeq \frac{E_0}{E_c}. \quad (3.9)$$

가 된다. 물론 이 간단한 모형은 입자소나기에 대한 대강의 정성적인 설명만 제공해 주고 있다. 이러한 소나기현상을 정확히 이해하기 위해서는 몬테카를로 전산모사 등을 이용해야만 한다 [12,13].

제 2 절. 중성자와 물질의 상호작용

중성자도 감마선과 같이 전하를 띠고 있지 않으므로 쿨롱 상호작용은 하지 않는다. 그 대신 핵과의 강력 (strong force)을 통하여 상호작용하게 된다. 강한 상호작용은 짧은 반응거리 때문에 전자기적인 상호작용보다 반응확률이 훨씬 낮다. 즉 중성자는 핵과 10^{-13} cm 이내로 접근해야 상호작용이 일어나는데, 보통 물질이 대부분 빈 공간으로 이루어져 있음을 고려할 때 중성자는 물질을 쉽게 투과하는 입자이다. 그러나 중성자가 일단 핵과 상호작용을 일으키면 다음과 같은 다양한 핵반응이 일어나게 된다 [12,13].

(a) 핵과의 탄성산란 $A(n, n)A$: MeV 영역에서 중성자 에너지 손실이 가장 중요한 과정이다.

(b) 핵과의 비탄성산란 $A(n, n')A^*$, $A(n, 2n')B$, 등: 이 과정에서는 핵이 들뜬 상태로 머물다가 나중에 γ -선 또는 다른 종류의 방사선을 방출하며 붕괴한다. 이러한 비탄성산란이 일어나기 위해서는 중성자가 1 MeV 이상의 충분한 에너지를 보유하고 있어야만 한다.

(c) 감마선을 방출하는 중성자 포획 $n + (Z, A) \rightarrow \gamma + (Z, A+1)$: 이러한 중성자 흡수과정의 산란단면적은 대략 중성자의 입사속도에 반비례하므로 주로 낮은 에너지에서 일어나게 된다. 그리고 특별한 입사에너지에 대해서는 공명 봉우리가 생기기도 하는데, 이 봉우리 근처에서는 흡수확률이 크게 증가한다.

(d) 하전입자를 방출하는 중성자 포획 (n, p) , (n, d) , (n, α) , (n, t) , $(n, \alpha p)$, 등: 이러한 과정은 주로 eV부터 keV 영역에서 발생한다. 산란단면적은 역시 중성자의 입사속도에 반비례하며, 특별한 입사에너지에 대해서는 공명 봉우리가 생기기도 한다.

(e) 핵분열: eV 영역에서 주로 발생한다.

(f) 고에너지의 강입자 소나기 생성: 중성자의 입사에너지가 100 MeV 이상인 고에너지 영역에서 발생한다.

중성자는 에너지에 따라 100 MeV 이상은 고에너지중성자, 수 백 keV 영역은 빠른중성자, 0.1 eV부터 100 keV까지는 고열중성자, 0.1 eV 이하의 열중성자(또는 느린중성자)로 분류한다. 여기서 열중성자라는 이름은 상온에서의 열적 운동에너지가 $E_{therm} \approx kT \approx 0.025$ eV라는 사실에서 온 것이다. 그리고 이보다 에너지가 더 낮을 때 (\sim meV)에는 차가운 중성자라고 부른다 [12,13].

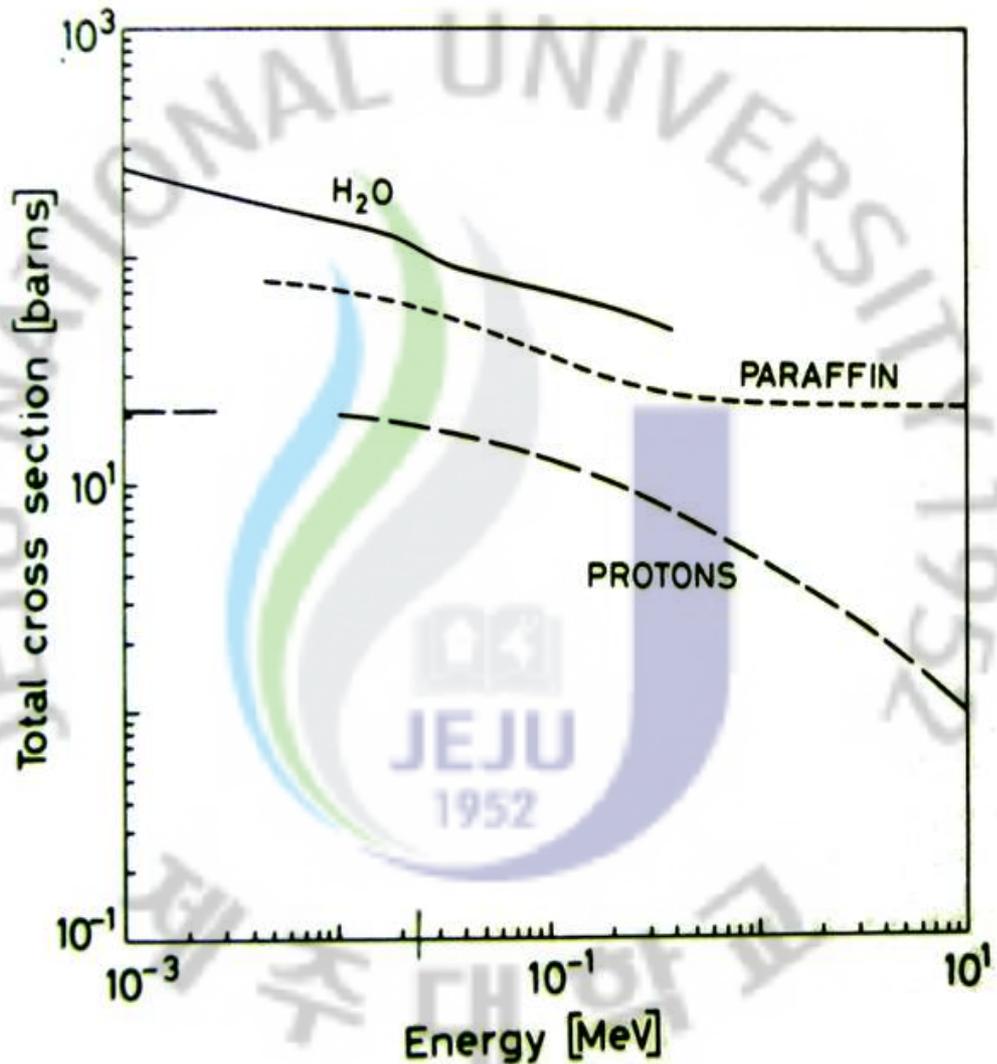


그림 12. 물, 파라핀, 양성자와 중성자의 총 산란단면적 [13].

물질 내에서 중성자가 상호작용 할 전체 확률은 앞에서 나열한 여러 과정에 대한 산란단면적의 합이다.

$$\sigma_{tot} = \sigma_{elastic} + \sigma_{inelastic} + \sigma_{capture} + \dots \quad (3.10)$$

그림 12는 물, 파라핀, 양성자에 대한 중성자의 총 산란단면적을 보여주고 있으며, 중성자에너지에 대한 의존성이 완만함을 알 수 있다. 식 (3.10)의 양변에 물질의 원자밀도를 (원자의 밀도 $N = N_0\rho/A$ 를 곱해주면 단위길이당 상호작용 확률 μ 를 얻게 된다. 상호작용 확률은 감마선의 평균자유경로의 역수가 된다) 곱해주면 물질 내에서 중성자의 평균자유행로 (λ) 를 구할 수 있다.

$$\frac{1}{\lambda} = N\sigma_{tot} = \left(\frac{N_0\rho}{A}\right)\sigma_{tot} \quad (3.11)$$

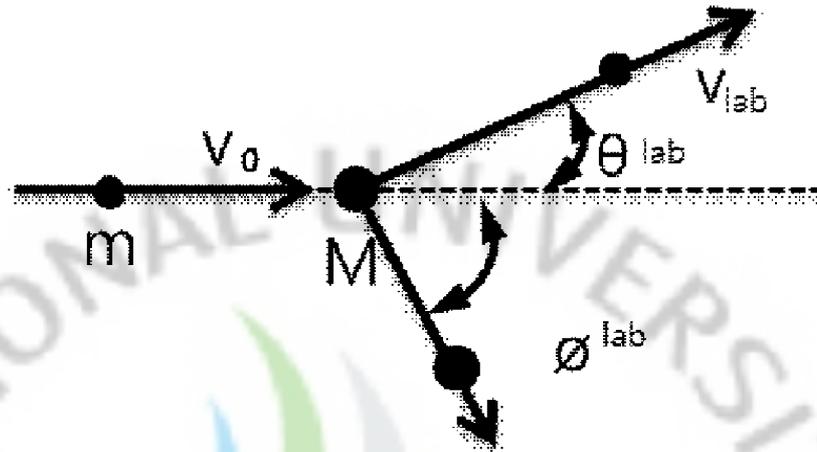
그리고 x 를 중성자의 투과거리라고 하면,

$$N(x) = N_0 \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right), \quad (3.12)$$

가 성립한다. 따라서 감마선과 같이 중성자도 물질 내에서 지수함수적으로 세기가 감소됨을 알 수 있다.

상호작용에 의한 빠른중성자의 감속은 핵공학 등에서 특히 중요하게 다루어진다. 대부분의 경우 빠른중성자는 물질 내에서 핵과의 탄성 또는 비탄성산란을 통해 주변의 원자들과 열적 평형상태에 도달할 때까지 에너지를 잃어버린다. 그리고 이들은 핵에 의한 포획이나 핵분열과 같은 반응이 일어날 때까지 물질 안에서 퍼지게 된다. 물론 중성자가 열적 평형상태에 도달하기 전에 특히 공명에너지 근처에서 포획 또는 분열 과정을 거칠 가능성도 있다. 그러나 이러한 산란단면적은 속도에 반비례하므로 일단 열적 평형상태에 먼저 도달할 확률이 더 높다.

LAB SYSTEM



CM SYSTEM

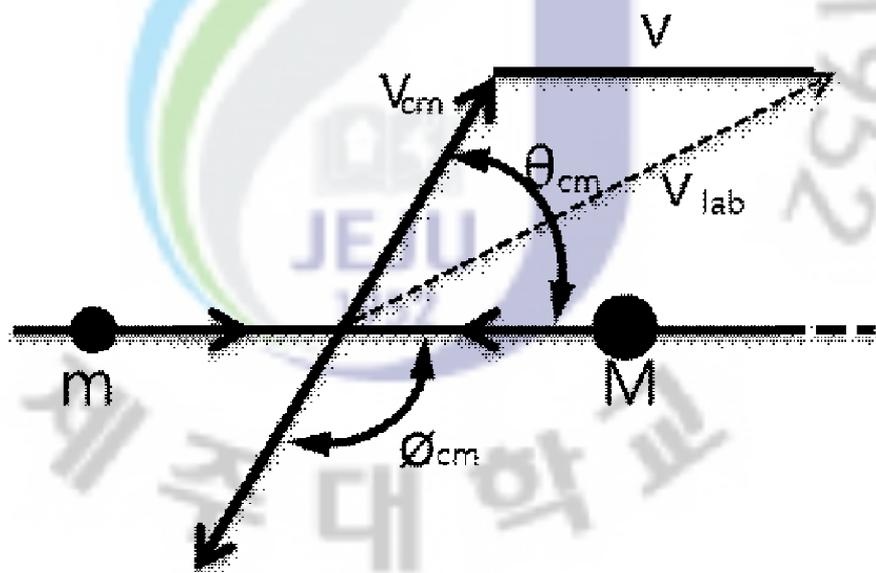


그림 13. 중성자와 핵의 탄성산란 [12,13].

탄성산란은 빠른중성자가 에너지를 상실하는 주요과정이다. 수 MeV의 중성자에 대해서 이 문제는 비상대론적으로 다루어질 수 있다. 여기서는 계산을 쉽게 하기 위하여 중성자 질량 (m)이 1인 단위를 사용하도록 하자. 예를 들어, 실험실계에서 속도가 v_0 인 중성자와 정지해 있는 질량이 M 이고 질량수가 A 인 핵의 탄성충돌을 가정해 보자 (그림 13 참조). 그러면 질량중심의 속도는

$$V = \frac{1}{A+1} v_0 \quad (3.13)$$

이 되고, 산란 전 질량중심계에서 본 중성자의 속도는

$$v_{cm} = \frac{A}{A+1} v_0, \quad (3.14)$$

이다.

탄성충돌 후에 질량중심계에서는 중성자의 진행방향은 바뀌지만, 속도는 그대로 유지된다. 코사인법칙을 이용하면 그림 13으로부터 실험실계 및 질량중심계에서의 여러 속도들 사이에 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있다.

$$v_{lab}^2 = v_{cm}^2 + V^2 - 2v_{cm} V \cos(\pi - \theta_{cm}), \quad (3.15)$$

여기서 θ_{cm} 은 질량중심계에서의 산란각이고, v_{lab} 은 실험실계에서의 산란 후 중성자속도이다. 식 (3.13)과 (3.14)를 식 (3.15)에 대입하면,

$$v_{lab}^2 = \left(\frac{A}{A+1}\right)^2 v_0^2 + \left(\frac{1}{A+1}\right)^2 v_0^2 - 2\frac{A}{(A+1)^2} v_0^2 \cos(\pi - \theta_{cm}), \quad (3.16)$$

을 얻을 수 있고, 중성자의 운동에너지가 비상대론적으로 $E = mv^2/2$ 임을 고려하면,

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{v_{lab}}{v_0} \right)^2 = \frac{A^2 + 1 + 2A \cos \theta_{cm}}{(A + 1)^2}, \quad (3.17)$$

임을 알 수 있다. 그리고 실험실계에서의 산란각 θ_{lab} 과 θ_{cm} 과의 관계는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_{cm}^2 = v_{lab}^2 + V^2 - 2v_{lab}V \cos \theta_{lab}, \quad (3.18)$$

$$\cos \theta_{lab} = \frac{A \cos \theta_{cm} + 1}{\sqrt{A^2 + 1 + 2A \cos \theta_{cm}}}, \quad (3.19)$$

이것은 표적핵이 입사중성자의 에너지를 모두 전달받을 수도 있다는 것을 의미한다. 일반적으로 가벼운 핵 일수록 입사입자로부터 더욱 많은 되튐에너지를 흡수하게 된다. 그러므로 중성자를 효과적으로 감속시키기 위해서는 양성자나 중양성자를 비롯한 가벼운 핵을 쓰는 것이 더 유리하다. 이것이 바로 원자로에서 중성자를 감속시키거나 차폐시키기 위하여 보통 물 (H_2O)이나 중수 (D_2O), 파라핀 (CH_2) 등 가벼운 원소를 많이 쓰는 이유이다. [12,13]

산란된 중성자의 에너지 분포를 계산하면, 너무 높지 않은 에너지에서 (≤ 15 MeV) 중성자산란은 등방적임이 알려져 있다. 따라서 중성자가 입체각 $d\Omega$ 내로 산란될 확률은 간단하게 다음과 같이 나타낼 수 있다 [12,13].

$$dw = \frac{d\Omega}{4\pi} = \frac{2\pi \sin \theta_{cm} d\theta_{cm}}{4\pi} = \frac{1}{2} \sin \theta_{cm} d\theta_{cm}. \quad (3.20)$$

식 (3.17)로부터

$$\frac{dE}{E_0} = \frac{2A}{(A + 1)^2} \sin \theta_{cm} d\theta_{cm}, \quad (3.21)$$

를 얻은 후, 이를 식 (3.20)에 대입하면

$$\frac{dw_1}{dE} = \frac{(A+1)^2}{4A} \frac{1}{E_0} = \frac{1}{E_0(1-\alpha)}, \quad (3.22)$$

이 된다. 이때 $\alpha = [(A-1)/(A+1)]^2$ 이다. 그러므로 어떤 일정한 입사에너지 (E_0)를 갖는 중성자가 물질 내의 핵과 한 번 산란한 후에는 에너지 범위 내에서 균일한 분포를 하게 된다. 이 결과를 이용하여 두 번 산란한 후의 중성자 에너지 분포는

$$\frac{dw_2}{dE} = \begin{cases} \int_E^{E_0} \frac{1}{\epsilon(1-\alpha)} \frac{dw_1}{d\epsilon} d\epsilon = \frac{1}{E_0(1-\alpha)^2} \ln\left(\frac{E_0}{E}\right) & \alpha E_0 < E < E_0 \\ \int_{\alpha E_0}^{E/\alpha} \frac{1}{\epsilon(1-\alpha)} \frac{dw_1}{d\epsilon} d\epsilon = -\frac{1}{E_0(1-\alpha)^2} \left[\ln\left(\frac{E_0}{E}\right) + 2 \ln \alpha \right] & \alpha^2 E_0 < E < \alpha E_0 \end{cases}, \quad (3.23)$$

이 되고, 세 번 산란한 후의 중성자 에너지 분포는

$$\frac{dw_3}{dE} = \begin{cases} \frac{1}{2E_0(1-\alpha)^3} \left[\ln\left(\frac{E_0}{E}\right) \right]^2 & \alpha E_0 < E < E_0 \\ -\frac{1}{2E_0(1-\alpha)^3} \left[2 \left\{ \ln\left(\frac{E_0}{E}\right) \right\}^2 + 6 \ln \alpha \ln\left(\frac{E_0}{E}\right) + 3 (\ln \alpha)^3 \right] & \alpha^2 E_0 < E < \alpha E_0 \\ \frac{1}{2E_0(1-\alpha)^3} \left[\ln\left(\frac{E_0}{E}\right) + 3 \ln \alpha \right]^3 & \alpha^3 E_0 < E < \alpha^2 E_0 \end{cases}, \quad (3.24)$$

이 된다 [12,13].

그림 14는 위의 식 (3.22), (3.23) 그리고 (3.24)을 비롯한 여러 에너지 분포함수가 그림 14에 나타낸 것이다. 그림에서 네모가 쳐진 $\alpha E_0 < E < E_0$ 은 한번 산란한 것이나 두 번 산란한 것이나 세 번 산란했을 경우 모두 포함된 영역이다. W_1 의 경우 한 번 산란, W_2 의 경우 두 번 산란, W_3 의 경우 세 번 산란, W_4 의 경우 네 번 산란, W_5 의 경우 다섯 번 산란, W_{10} 의 경우에 열 번 산란을 말한다 [12-14].

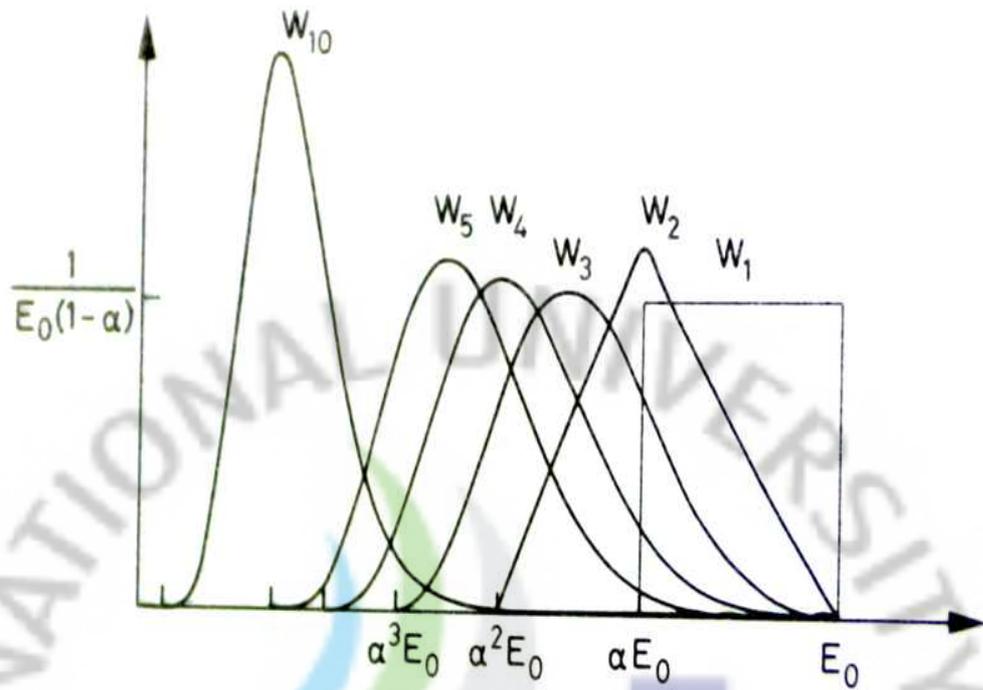


그림 14. 다중 탄성 산란한 후 중성자의 에너지 분포함수 [12,13].

제 IV 장. 복합열량계의 구조와 중성자 응답특성

제 1 절. 복합열량계의 구조와 원리

1) 복합열량계의 구조

그림 15는 본 실험에서 사용한 복합열량계는 총 6 개의 모듈을 가지고 있고, 인식 가능한 영역은 가로 40 cm 세로 40 cm이다. 첫 번째 모듈 (전자기열량계)에서 납은 4 mm, 섬광계 (scintillator)는 3.7 mm로 구성되어 모두 25 개의 층을 가지고 있고. 첫 번째 모듈의 층은 전자기 샤워를 일으키는 감마선을 인식하고 $18X_0$ (복사길이)와 $0.7\lambda_T$ (반응함수)를 가진다. 여기서 반응함수는 어떤 물리적 계의 특성이 외부작용에 대해서 어떻게 변화하는가를 기술하는 함수이다. 복사길이란 특정 물질의 변환과 상호 관련된 것을 말한다. 나머지 모듈 5 개 (강입자열량계)에서는 철이 4 mm, 섬광계는 3.7 mm로 구성되어 총 25 개의 층으로 구성되어있다. 그래서 $4.37\lambda_T$ (반응함수)를 갖고 있다. PMT는 모듈 당 8 개로 구성되어 있고, 종류는 3 inch R1652-01 (Hamamatsu) 이다.

2) 복합열량계의 논리도

그림 17은 복합 열량계에 신호가 들어올 때 데이터를 받기 위한 논리도이다. 이 논리는 각 모듈에 있는 PMT를 통해서 빔이 들어올 때의 신호를 받아들여서 기록하도록 설계를 한 것이다. (1-1), (1-2), ... 등은 각각의 PMT 번호를 나타내는 것이고 신호가 들어가면 판별기 (discriminator)를 거쳐서 신호를 구분해 주는데 (1-1), (1-2), (1-5) 그리고 (1-6)에 신호가 잡히면 전자기열량계에 신호가 들어온 것이라고 볼 수 있다. (1-3), (1-4), (1-7) 그리고 (1-8)를 통하면 강입자열량계에 신호가 들어온 것이라고 볼 수 있다. 전자기열량계와 강입자열량계에

동시에 신호가 들어오면 전자기열량계와 강입자열량계에 빔이 지나갔다고 판단한다. 이 모든 신호들은 트리거 (trigger)를 통해서 신호를 구분할 수 있다. 이렇게 구분한 신호를 입력하면 응답특성을 볼 수 있게 구성되어 있다.

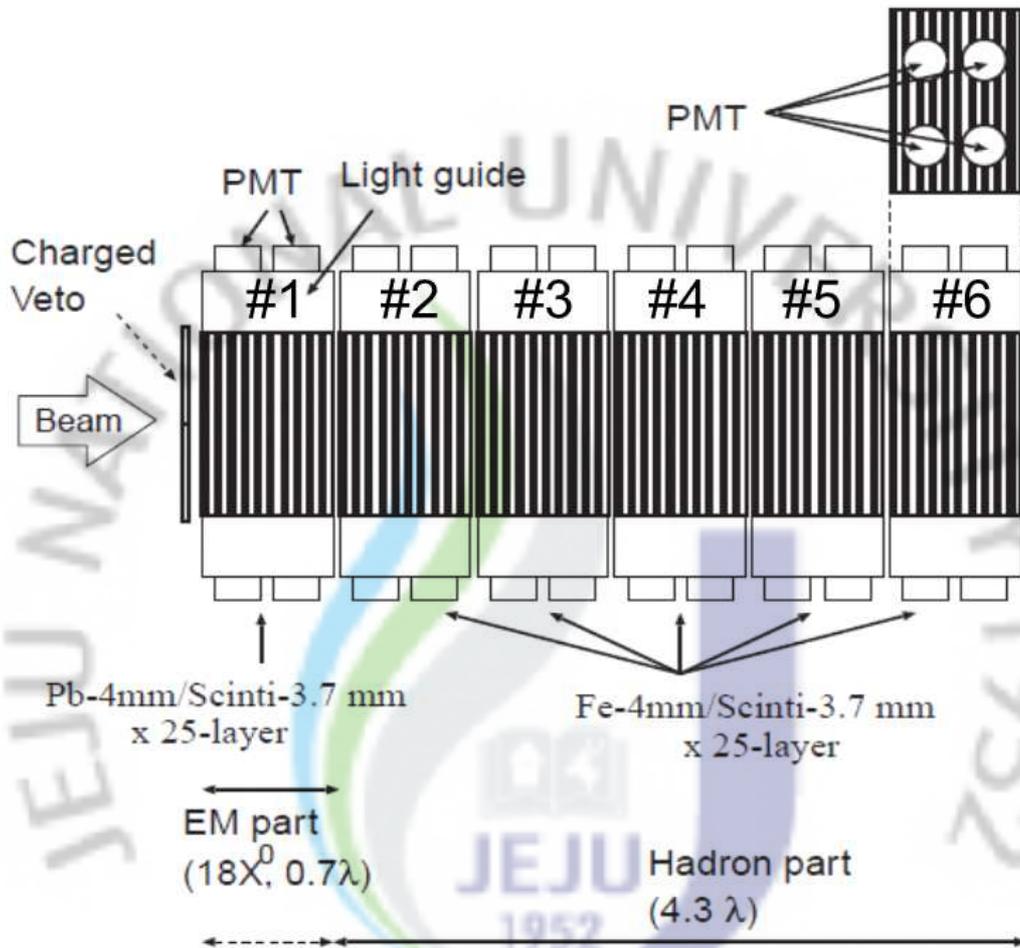


그림 15. 복합열량계의 구조.

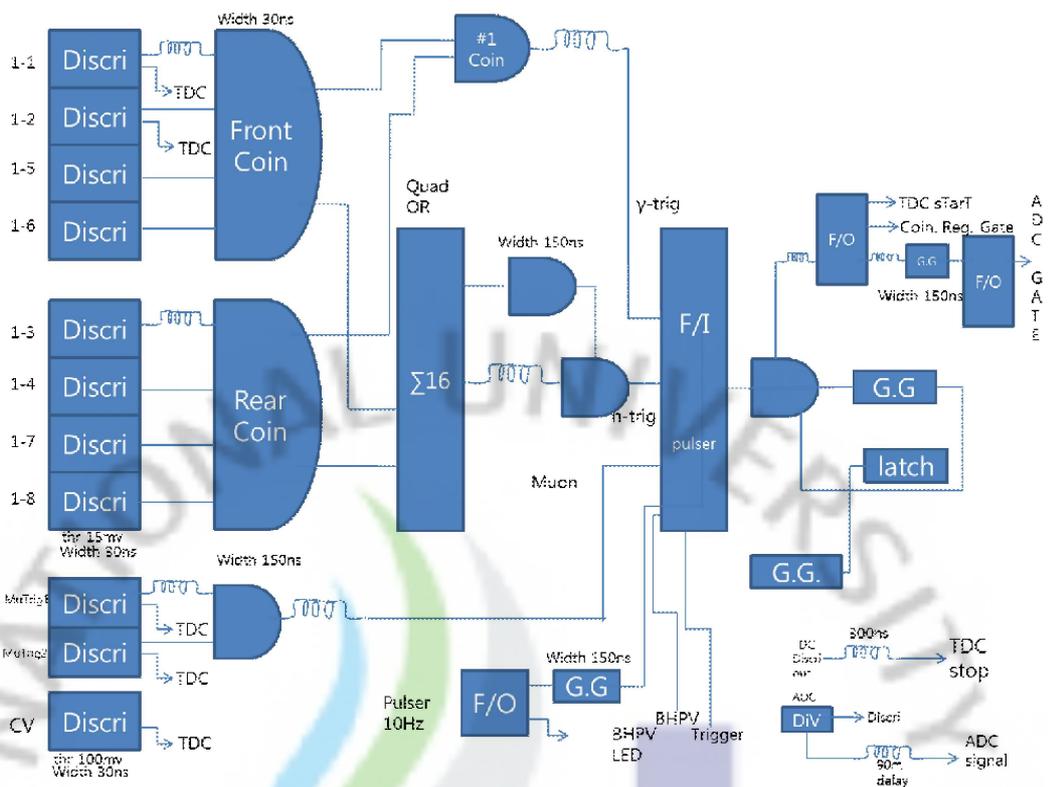


그림 16. 복합열량계에 신호가 들어올 때 데이터를 받기 위한 논리도.

3) 복합열량계의 모듈별 PMT 번호

그림 17은 복합 열량계의 PMT 번호순서와 위치를 나타낸 것이고 E14 실험을 하기 위해 조건을 정했는데 복합열량계의 첫 번째 모듈의 PMT 번호는 1번부터 8번까지, 두 번째 모듈의 PMT 번호는 9번부터 16번까지, 세 번째 모듈의 PMT 번호는 17번부터 24번까지, 네 번째 모듈의 PMT 번호는 25번부터 32번까지, 네 번째 모듈의 PMT 번호는 33번부터 40번까지, 마지막 모듈의 PMT 번호는 41번부터 48번으로 정했다.

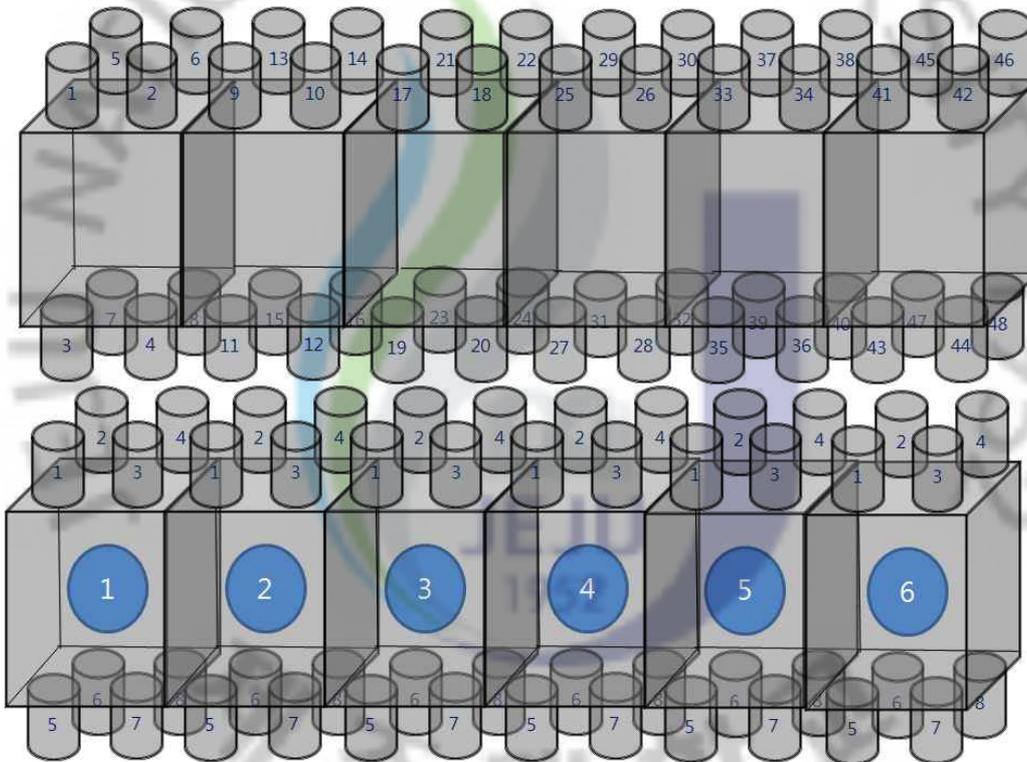


그림 17. 복합 열량계의 PMT 번호순서와 위치.

4) 복합열량계 각 모듈별 입력값 및 신호값

표 2에서 7까지는 첫 번째 모듈부터 여섯 번째 모듈까지 PMT의 번호와 그에 따른 인가전압과 신호를 받을 때의 번호를 표시한 것이다. 표 2에서 보여주듯이 첫 번째 모듈의 PMT에 인가된 전압은 1160 V에서 1300 V까지 이다. 각 PMT의 신호 숫자는 신호가 들어왔을 때 기록을 위해서 구분을 짓기 위한 번호이다. 표 3에서 보여주듯이 두 번째 모듈의 PMT에 인가된 전압은 1220 V에서 1320 V까지 이다. 표 4에서 보여주듯이 세 번째 모듈의 PMT에 인가된 전압은 1200 V에서 1360 V까지 이다. 표 5에서 보여주듯이 네 번째 모듈의 PMT에 인가된 전압은 1260 V에서 1360 V까지 이다. 표 6에서 보여주듯이 다섯 번째 모듈의 PMT에 인가된 전압은 1240 V에서 1360 V까지 이며 표 7에서 보여주듯이 여섯 번째 모듈의 PMT에 인가된 전압은 1240 V에서 1320 V까지 이다.

표 2. 첫 번째 모듈의 인가전압과 채널번호 및 복합열량계의 신호번호.

HV ch #.	HV value [V]	signal #.
1	1300	1-1
2	1160	1-3
3	1300	1-5
4	1300	1-7
5	1200	1-2
6	1260	1-4
7	1200	1-6
8	1200	1-8

표 3. 두 번째 모듈의 인가전압과 채널번호 및 복합열량계의 신호번호.

HV ch #.	HV value [V]	signal #.
9	1320	2-1
10	1240	2-3
11	1320	2-5
12	1320	2-7
13	1220	2-2
14	1320	2-4
15	1220	2-6
16	1240	2-8

표 4. 세 번째 모듈의 인가전압과 채널번호 및 복합열량계의 신호번호.

HV ch #.	HV value [V]	signal #.
17	1300	3-1
18	1280	3-3
19	1360	3-5
20	1340	3-7
21	1220	3-2
22	1320	3-4
23	1200	3-6
24	1280	3-8

표 5. 네 번째 모듈의 인가전압과 채널번호 및 복합열량계의 신호번호.

HV ch #.	HV value [V]	signal #.
25	1300	4-1
26	1260	4-3
27	1260	4-5
28	1260	4-7
29	1280	4-2
30	1360	4-4
31	1320	4-6
32	1240	4-8

표 6. 다섯 번째 모듈의 인가전압과 채널번호 및 복합열량계의 신호번호.

HV ch #.	HV value [V]	signal #.
41	1360	6-1
42	1300	6-3
43	1260	6-5
44	1260	6-7
45	1320	6-2
46	1260	6-4
47	1240	6-6
48	1320	6-8

표 7. 여섯 번째 모듈의 인가전압과 채널번호 및 복합열량계의 신호번호.

HV ch #.	HV value [V]	signal #.
33	1240	5-1
34	1280	5-3
35	1280	5-5
36	1320	5-7
37	1320	5-2
38	1240	5-4
39	1340	5-6
40	1240	5-8

제 2 절. 복합열량계를 통한 중성자 응답 결과

배경사상의 주요 원인이 되는 후광 중성자의 선속을 재는 것이 중요하나 워낙 그 양이 적기 때문에 실제 측정을 위해서는 가속기의 안정된 운전 등 많은 조건이 만족하여야 한다. 현재 J-Parc에서는 가속기 조정의 단계에 있고 간접적인 확인으로 빔 라인 몬테카를로 전산모사의 재현성을 확인하였다. 그림 18은 CsI 표면에서의 중성자 선속그림이다. CsI 중심에서 중성자가 약 10^4 개가 들어와 있다. 높이는 CsI 중심에서 선속은 10^{-2} 에서 10^{-4} Counts/mm/ 10^{10} P.O.T 정도의 크기를 가진다.

열량계 후방의 빔 라인에도 열량계를 설치하기 때문에 중성자의 선속을 측정할 필요가 있다. 중성자의 선속과 운동량 분포가 몬테카를로 전산모사 계산결과와 일치하는가를 확인하였다. 중성 빔 라인에는 K_L , 중성자뿐만 아니라 감마선도 함께 들어온다. 중성자의 정보를 정확하게 얻기 위해서는 감마선에 의해 만들어지는 배경사상을 제거해야 하기 때문에 복합열량계를 사용하였다.

먼저 빔이 첫 번째 모듈 (전자기열량계)을 통과했을 때 중성자와 감마선이 어느 정도의 에너지를 가지고 있는지 확인이 필요해서 가시에너지로 가지고 예측을 하는 것이 목표였다. 그러므로 실험에서 우주선은 언제든지 들어오지만 열량계의 반응을 모른다면 쓸 수가 없기 때문에 우주선 측정을 먼저 하었는데 뮤온은 높은 에너지 음이온이기 때문에 정해진 에너지를 남김으로 얼마만큼 에너지가 들어오게 되면 뮤온의 에너지를 볼 수가 있었다. 8 개의 트리거에서 에너지가 들어오게 되었을 때에 18.5 MeV로 피크가 있는 것을 볼 수가 있었다. (그림 19 참조)

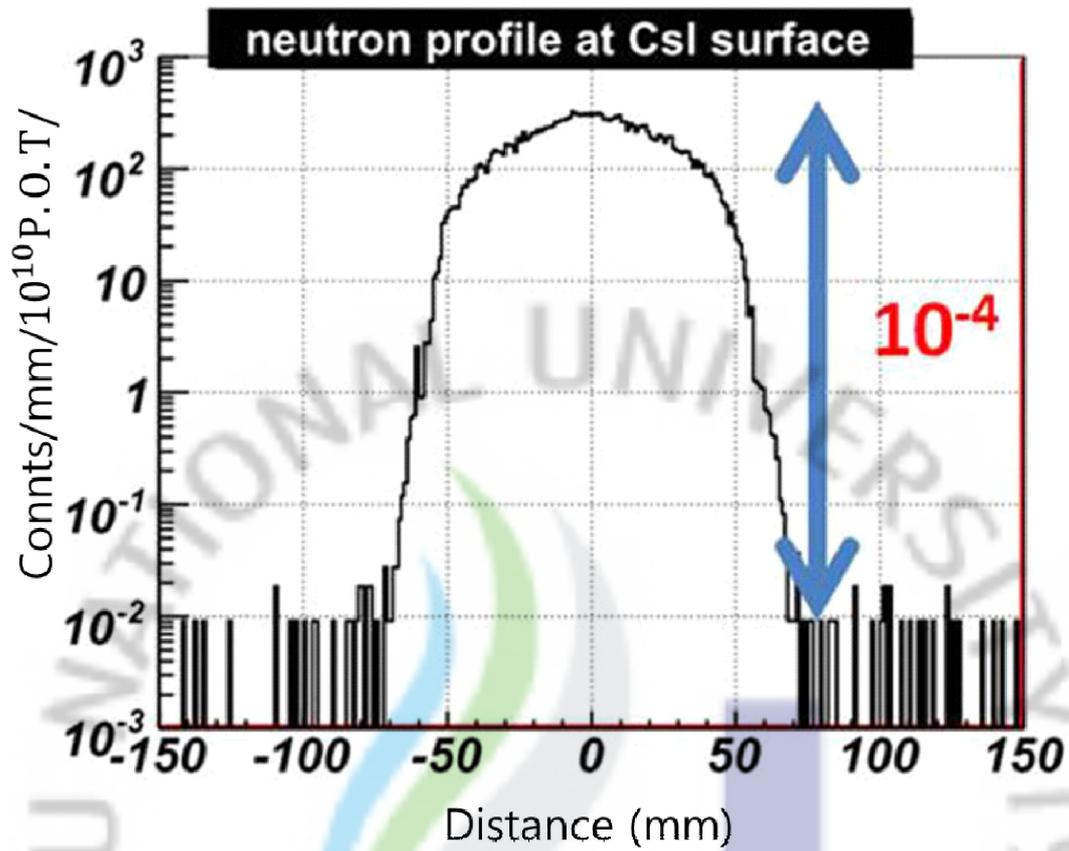


그림 18. CsI 표면에서의 중성자 선속.

우주선이 지나가면 들어온 에너지가 섬광계에서 1 cm당 2 MeV를 잃기 때문에 강입자 열량계에서 3.7 mm × 25 layer = 18.5 MeV를 잃게 되어서 18.5 MeV로 정하게 되었다. 이 결과를 바탕으로 중성 빔라인에 들어온 감마선과 중성자를 측정하였다. 분석은 ROOT를 사용하여 수행하였는데 ROOT란 입자 물리학에서 데이터 해석을 위한 프로그램이다. 먼저 통상적으로 사용되는 방법으로 뮤온을 조건 (그림 19는 1번 PMT의 뮤온에너지 응답특성) 으로 한 트리거를 가지고 중성자와 감마선을 구분하는 그림 (그림 20-25)을 그렸고 그다음에 나온 그림 (그림 26-31)은 E14에서 사용하는 FT-ratio를 사용하여 그림을 그렸다. 그래프에서 나타나는 점선은 중성자 에너지 분포이고 실선은 감마선에너지 분포를 나타낸다. FT-ratio는 다음과 같이 정의한다.

$$FT\text{-ratio} = \frac{\text{Energy deposit of EM calorimeter (First module)}}{\text{Total energy deposit}}$$

뮤온데이터를 기준으로 만든 트리거 조건을 가지고 그린 그림을 보면 감마선과 중성자 에너지가 각 모듈별로 일정하게 골고루 퍼져 있다. 반면 FT-ratio의 적용에 의한 첫 번째 모듈을 보면 중성자와 감마선의 에너지가 들어온 비율이 비슷하다가 두 번째 모듈에서부터 급격히 감마선에너지가 줄어드는 것을 볼 수가 있다. 이때 감마선 흡수체는 7 cm이고 표적은 니켈이다.

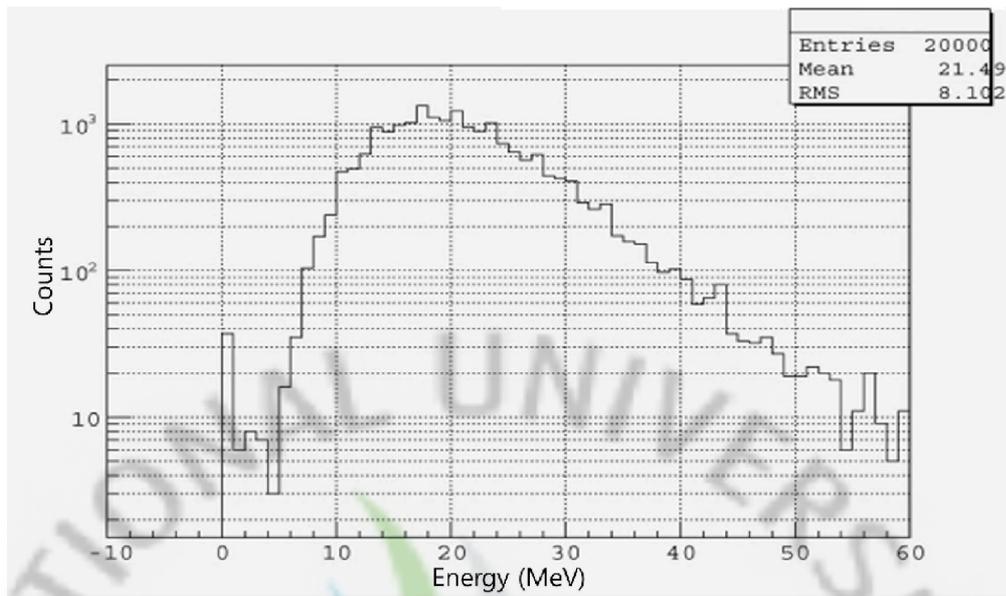


그림 19. 1번 PMT의 뮤온에너지 분포.

1) 트리거 조건에 의한 그래프

그림 20은 트리거 조건만의 첫 번째 모듈의 에너지를 나타낸 것이며 점선은 중성자를 나타내고 실선은 감마선을 나타낸 것이다. 첫 번째 모듈에 입사된 중성자와 감마선 에너지를 보면 0.1 MeV에서 측정된 중성자는 약 3×10^2 개이고, 감마선은 약 7×10^3 개이다. 감마선을 기준으로 보았을 때 중성자가 약 35.58% 작다. 중성자를 기준으로 감마선이 측정된 비율은 약 64.42% 이다. 0.3 MeV에서 중성자는 약 1.1×10^2 개이고, 감마선은 약 3×10^2 개이다. 감마선을 기준으로 보았을 때 중성자가 약 57.96% 작다. 중성자와를 기준으로 감마선이 측정된 비율이 42.04% 이다. 0.5 MeV에서 중성자는 약 4 개이고, 감마선은 25 개이다. 감마선을 기준으로 보았을 때 중성자가 약 56.93% 작다. 중성자를 기준으로 감마선이 측정된 비율이 43.07% 이다.

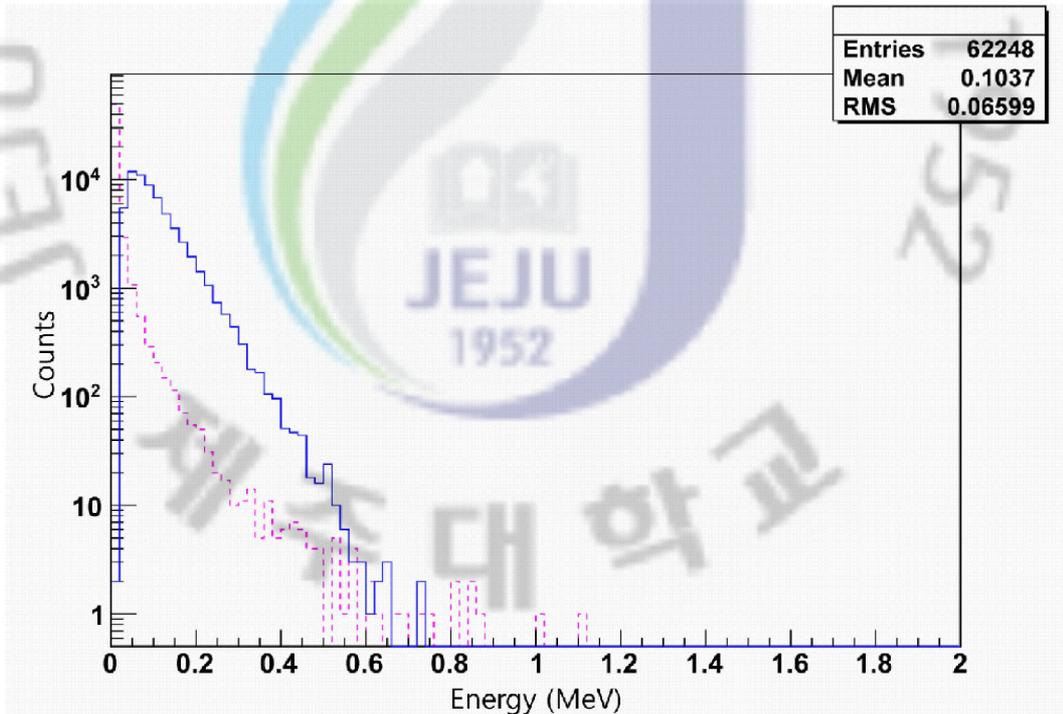


그림 20. 트리거 조건만의 첫 번째 모듈 에너지.

그림 21은 트리거 조건만의 두 번째 모듈의 에너지를 나타낸 것이며 점선은 중성자를 나타내고 실선은 감마선을 나타낸 것이다. 두 번째 모듈에 입사된 중성자와 감마선 에너지를 보면 0.1 MeV에서 측정된 중성자는 약 1.8×10^3 개이고, 감마선은 약 1.8×10^3 개이다. 감마선을 기준으로 보았을 때 중성자와 차이가 없다. 중성자를 기준으로 감마선이 측정된 비율은 약 100% 이다. 이는 중성자와 감마선이 구별이 안 됨을 보여준다. 0.3 MeV에서 중성자는 약 4.2×10 개이고, 감마선은 약 5×10^2 개이다. 감마선을 기준으로 보았을 때 중성자가 약 4.46%의 작다. 중성자와를 기준으로 감마선이 측정된 비율이 95.54% 이다. 0.5 MeV에서 중성자는 약 4 개이고, 감마선은 5 개이다. 감마선을 기준으로 보았을 때 중성자가 약 13.87% 정도 작다. 중성자를 기준으로 감마선이 측정된 비율이 86.13% 이다.

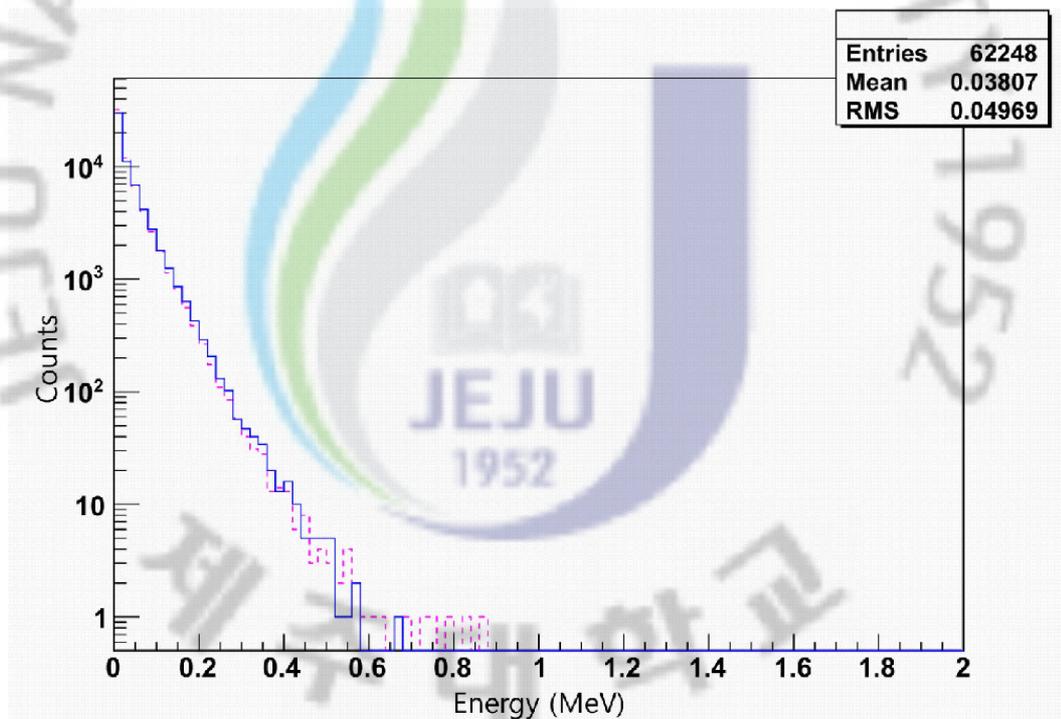


그림 21. 트리거 조건만의 두 번째 모듈 에너지.

그림 22에서 세 번째 모듈을 보면 0.1 MeV에서 중성자는 약 1.8×10^3 개이고, 감마선은 약 1×10^3 개이다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 약 7.85% 작다. 중성자를 기준으로 감마선이 측정된 비율이 약 92.15% 이다. 0.3 MeV에서 중성자는 약 5×10 개이고, 감마선은 약 1.9×10 개이다. 중성자를 기준으로 보았을 때 감마는 약 24.73% 작다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선의 비율이 약 75.27% 이다. 0.5 MeV에서 중성자는 약 3 개이고, 감마선은 없다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 없다.

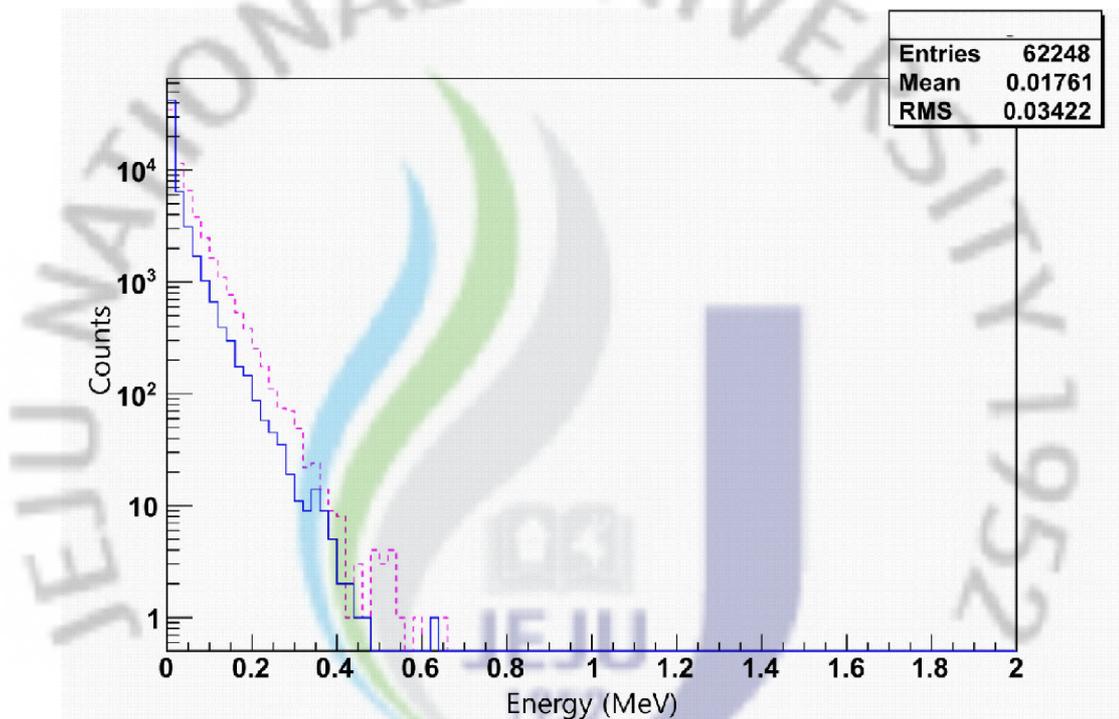


그림 22. 트리거 조건만의 세 번째 모듈 에너지.

그림 23에서 네 번째 모듈을 보면 0.1 MeV에서 중성자는 약 1×10^3 개이고, 감마선은 약 4.9×10^2 개이다. 중성자를 기준으로 보았을 때 감마선은 약 10.33% 작다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선의 비율이 약 89.67% 이다. 0.3 MeV에서 중성자는 약 20 개이고, 감마선은 약 7 개이다. 중성자를 기준으로 보았을 때 감마선은 약 35.04% 작다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선의 비율이 약 64.96% 이다. 0.5 MeV에서 중성자는 약 3 개이고, 감마선은 없다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 없다.

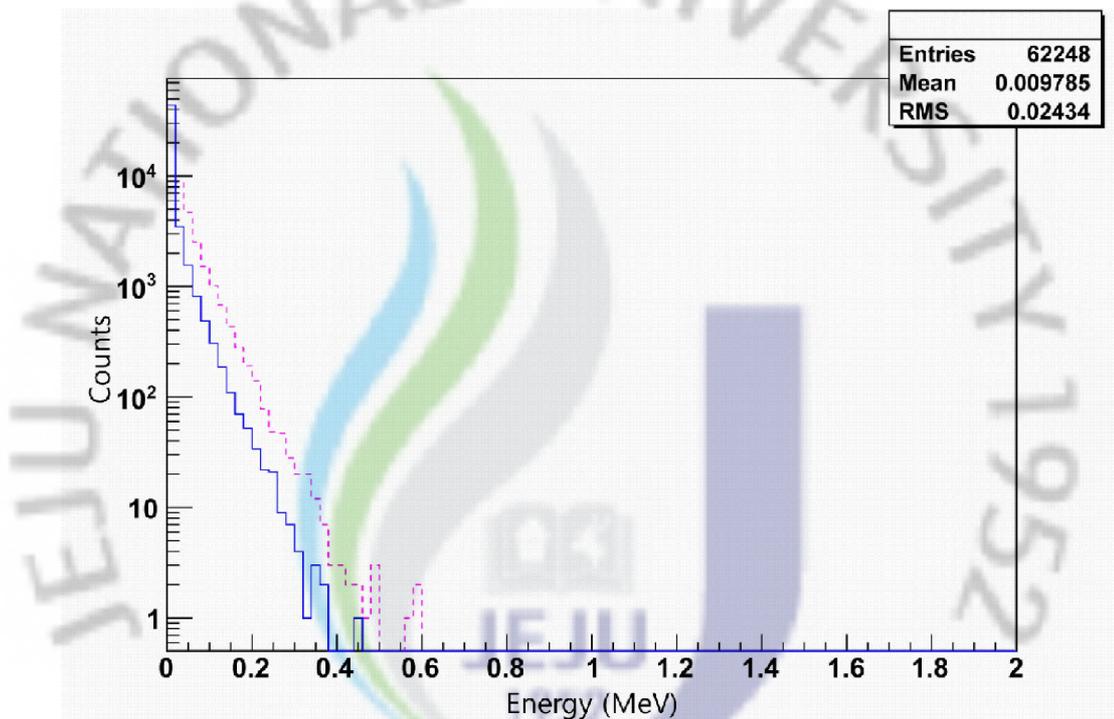


그림 23. 트리거 조건만의 네 번째 모듈 에너지.

그림 24에서 다섯 번째 모듈을 보면 0.1 MeV에서 중성자는 약 9×10^2 개이고, 감마선은 약 2.5×10^2 개이다. 중성자를 기준으로 보았을 때 감마선은 약 18.83% 작다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선의 비율이 약 81.17%이다. 0.3 MeV에서 중성자는 약 10 개이고, 감마선은 약 6 개이다. 중성자를 기준으로 보았을 때 감마선은 약 22.18% 작다. 중성자를 기준으로 보았을 때 감마선의 비율이 약 77.82%이다. 0.5 MeV에서 측정된 감마선과 중성자는 없다.

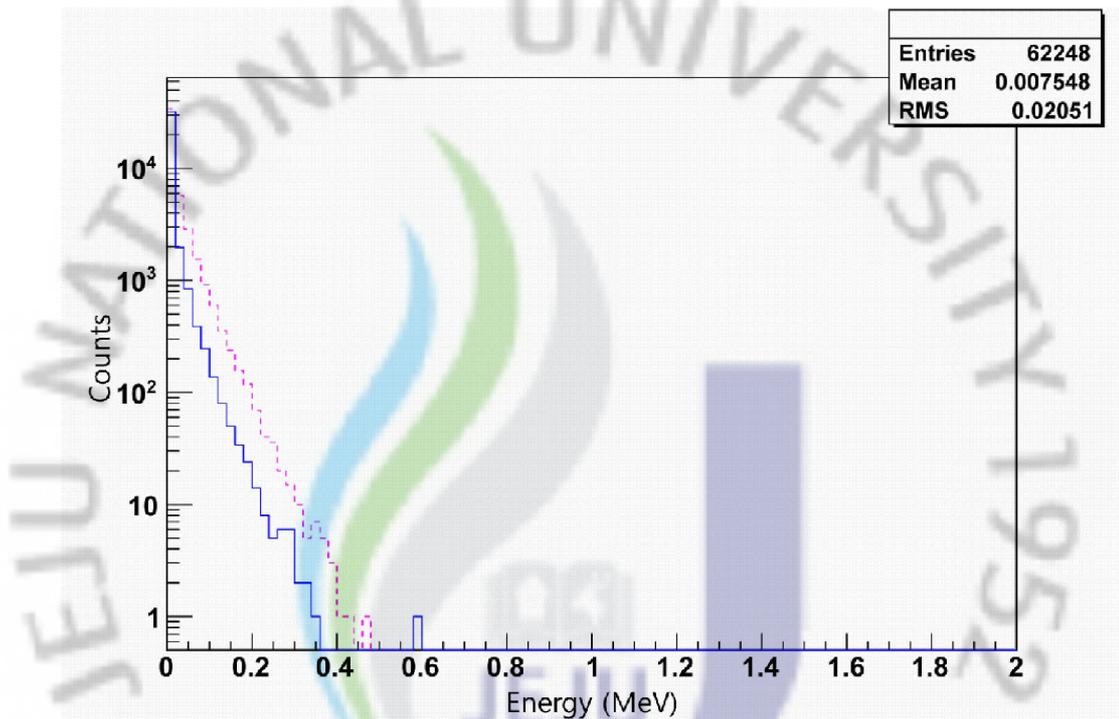


그림 24. 트리거 조건만의 다섯 번째 모듈 에너지.

그림 25에서 여섯 번째 모듈을 보면 0.1 MeV에서 중성자는 약 3.2×10^2 개이고, 감마선은 약 1×10^2 개이다. 중성자를 기준으로 보았을 때 감마선은 약 20.16% 작다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선의 비율이 약 79.84%이다. 0.3 MeV에서 중성자는 약 7 개이고, 감마선은 약 2 개이다. 중성자를 기준으로 보았을 때 감마선은 약 64.79% 작다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선의 비율이 약 35.61%이다. 0.5 MeV에서 측정된 중성자와 감마선은 없다.

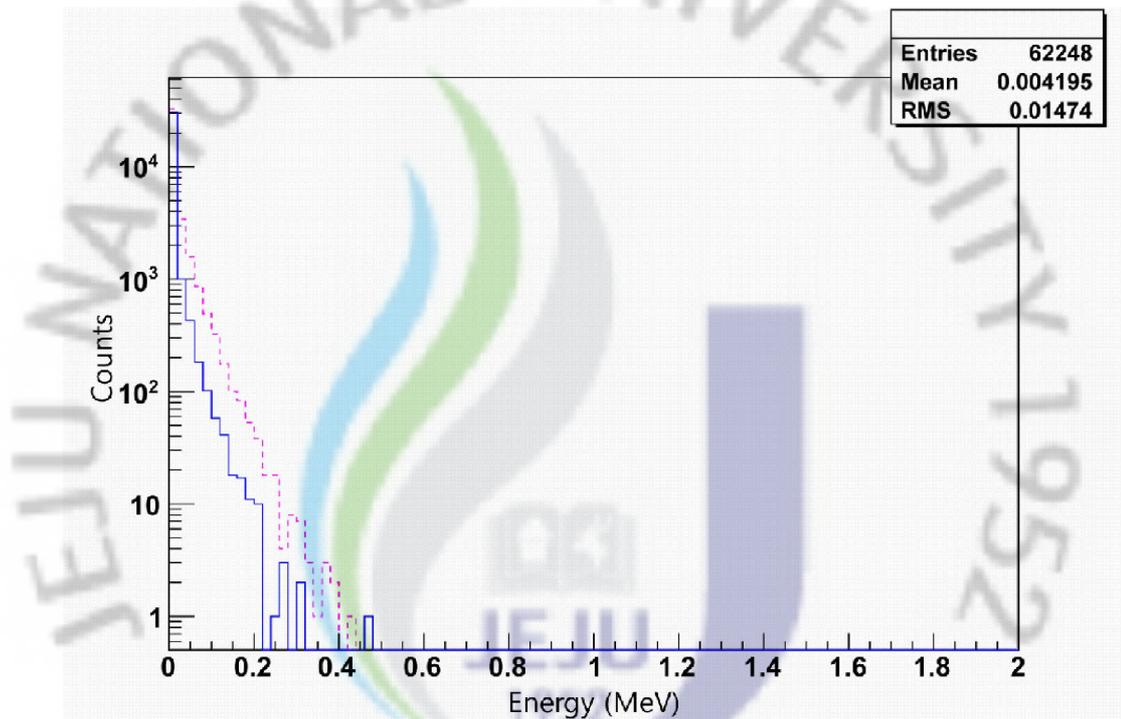


그림 25. 트리거 조건만의 여섯 번째 모듈 에너지.

2) FT-ratio에 의한 에너지 분포

그림 26은 FT-ratio 조건에 대해서 그린 그래프로 이 그림에서 실선은 중성자를 나타내고 점선은 감마선을 보여준다. 첫 번째 모듈을 보면 최고빈도인 0.1 MeV 이하 에너지 영역에서 중성자는 약 1.4×10^3 개이고, 감마선도 약 1.4×10^3 개이다. 중성자를 기준으로 측정된 감마선의 비율은 100% 이다. 0.3 MeV에서 중성자는 약 8.8×10 개이고, 감마선은 약 1×10^2 개이다. 중성자를 기준으로 보았을 때 감마선은 약 2.78% 작다. 중성자를 기준으로 측정된 감마선의 비율이 약 97.22% 이다. 0.5 MeV에서 중성자는 약 7.2 개이고, 감마선은 4 개이다. 중성자를 기준으로 보았을 때 감마선은 약 29.78% 정도 작다. 중성자를 기준으로 측정된 감마선의 비율이 약 70.22% 이다.

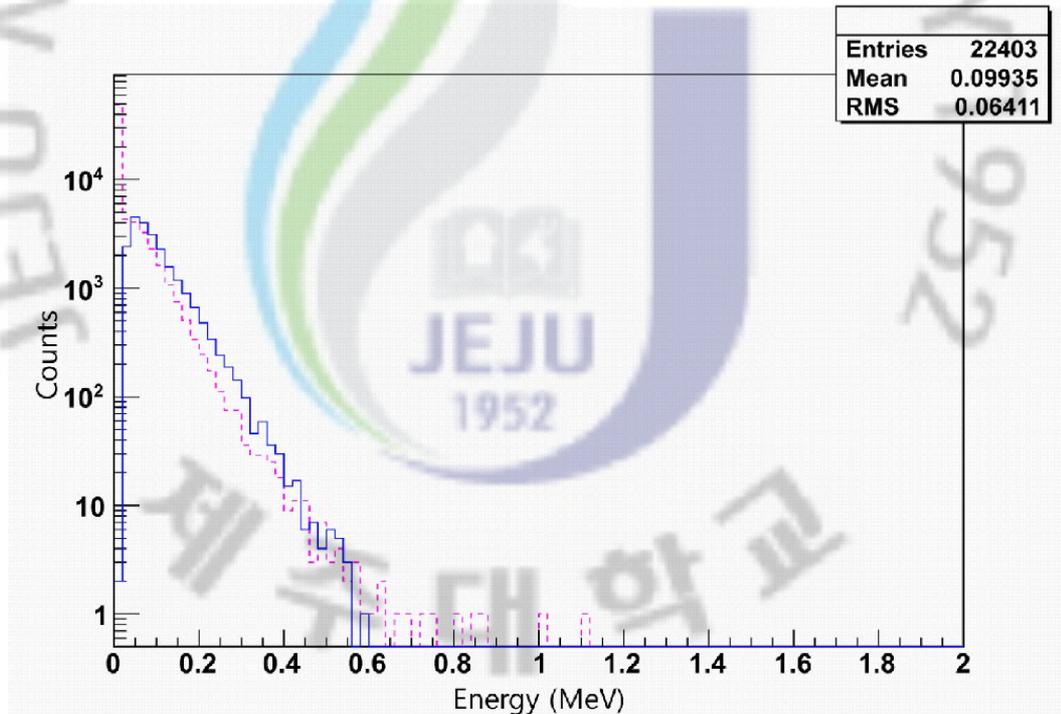


그림 26. FT-ratio만의 첫 번째 모듈 에너지.

그림 27에서 두 번째 모듈을 보면 0.1 MeV에서 중성자는 약 3×10^3 개이고, 감마선은 없다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 없다. 0.3 MeV에서 중성자는 약 8×10 개이고, 감마선은 없다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 없다. 0.5 MeV에서 중성자는 약 9 개이고, 감마선은 없다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 없다.

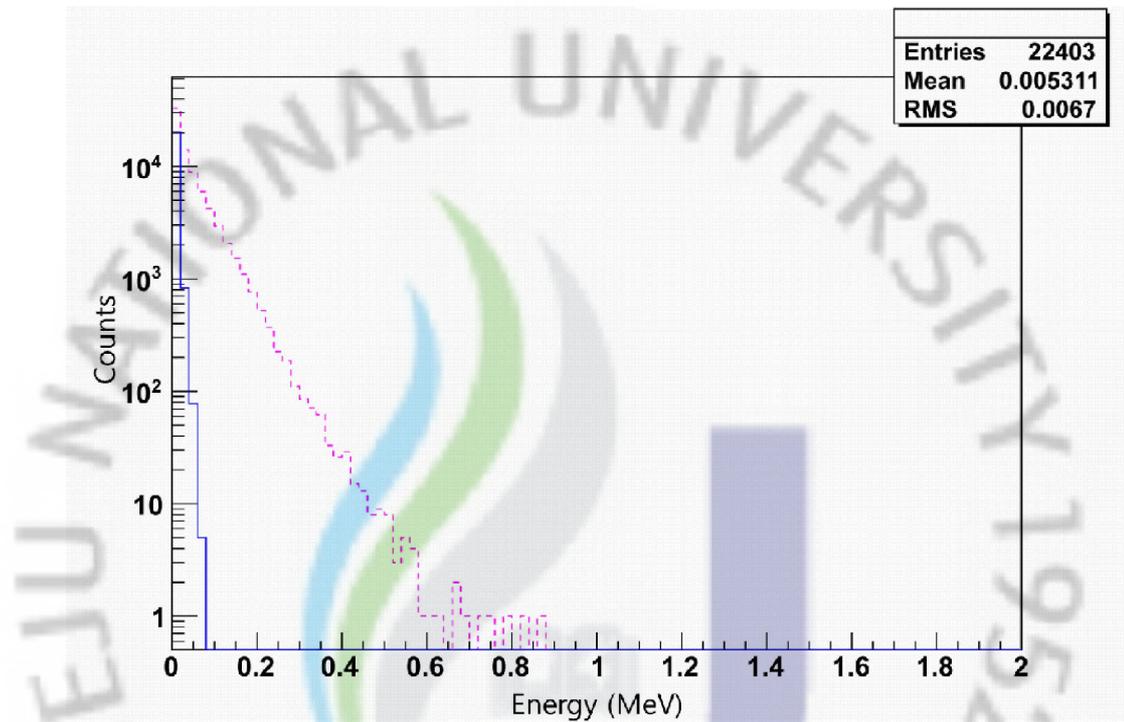


그림 27. FT-ratio만의 두 번째 모듈 에너지.

그림 28에서 세 번째 모듈을 보면 0.1 MeV에서 중성자는 약 2×10^3 개이고, 감마선은 없다. 중성자를 기준으로 측정된 감마선은 없다. 0.3 MeV에서 중성자는 약 2×10 개이고, 감마선은 없다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 없다. 0.5 MeV에서 중성자는 약 2 개이고, 감마선은 없다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 없다.

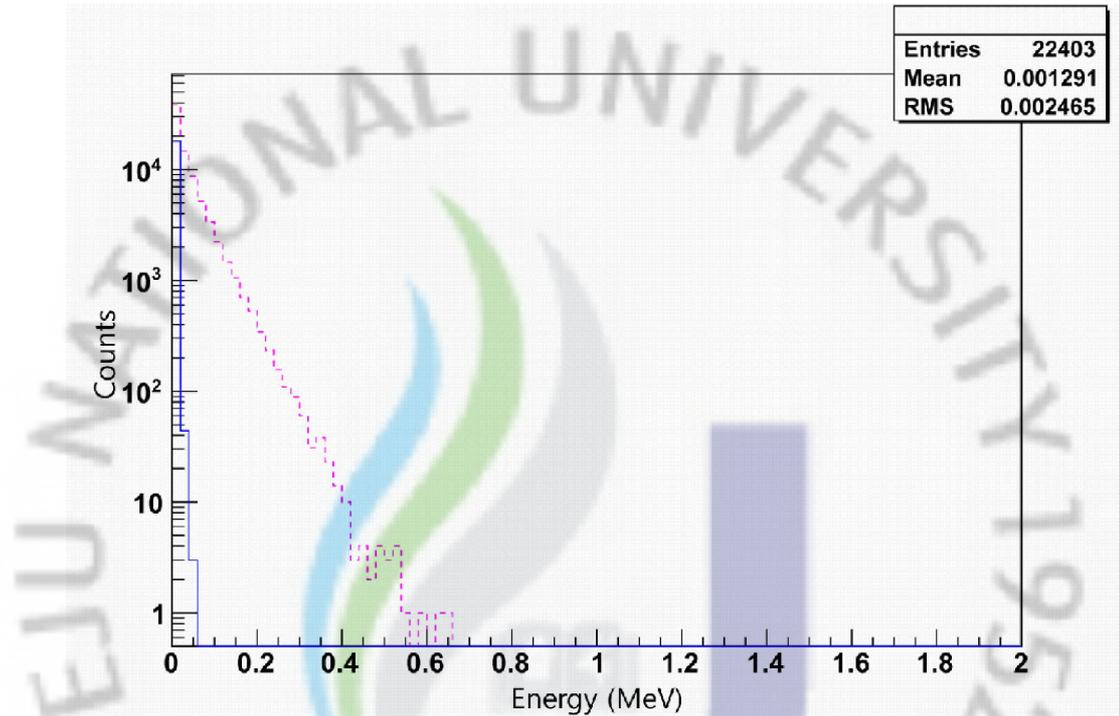


그림 28. FT-ratio만의 세 번째 모듈 에너지.

그림 29에서 네 번째 모듈을 보면 0.1 MeV에서 중성자는 약 1×10^3 개이고, 감마선은 없다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 없다. 0.3 MeV에서 중성자는 약 1.4×10^3 개이고, 감마선은 없다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 없다. 0.5 MeV에서 측정된 중성자와 감마선은 없다.

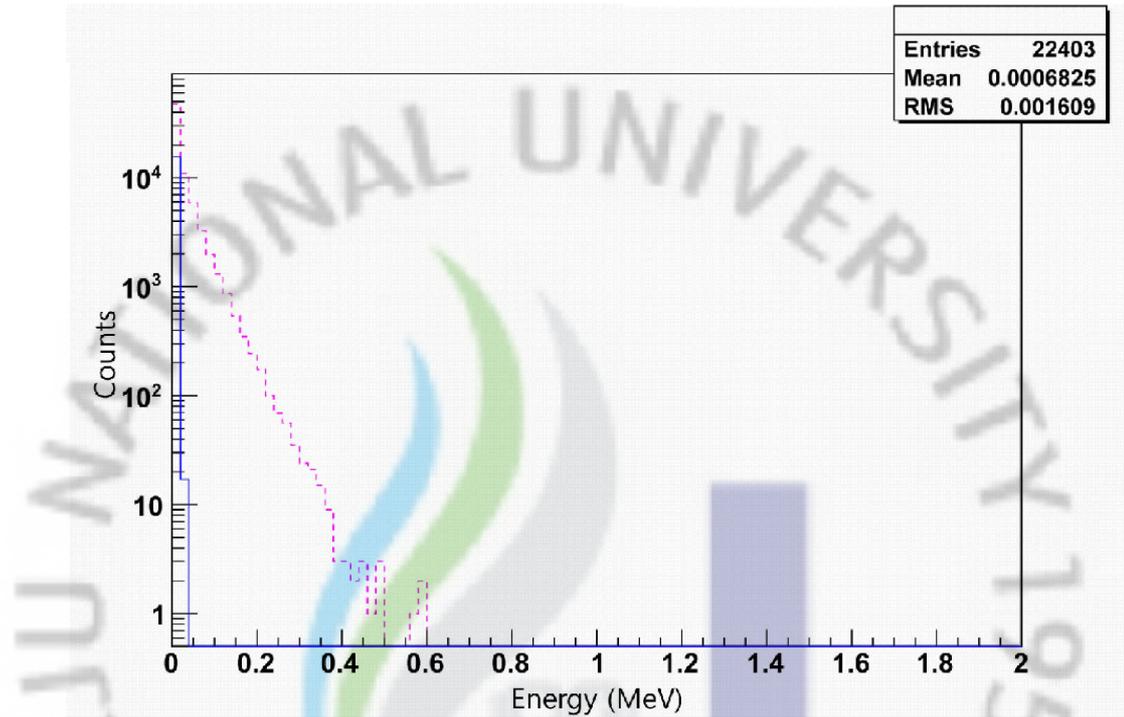


그림 29. FT-ratio만의 네 번째 모듈 에너지.

그림 30에서 다섯 번째 모듈을 보면 0.1 MeV에서 중성자는 약 7.5×10^2 개이고, 감마선은 없다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 없다. 0.3 MeV에서 중성자는 약 1.3×10 개이고, 감마선은 없다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 없다. 0.5 MeV에서 측정된 중성자는 없고, 감마선도 없다.

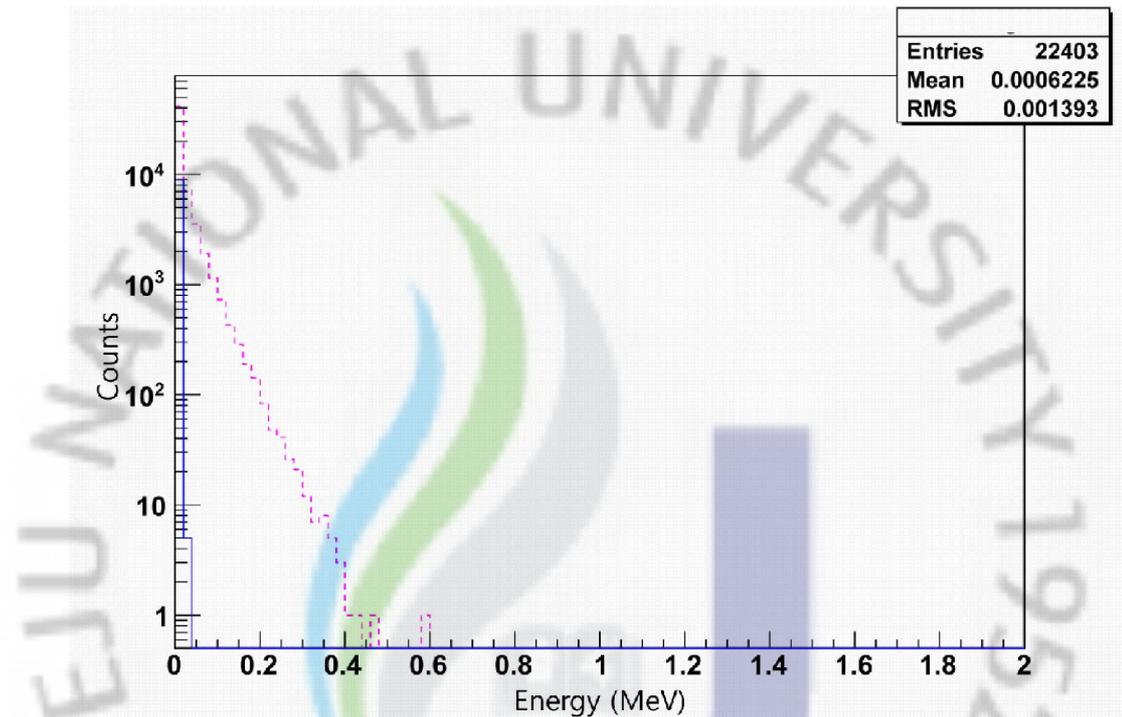


그림 30. FT-ratio만의 다섯 번째 모듈 에너지.

그림 31에서 여섯 번째 모듈을 보면 0.1 MeV에서 중성자는 약 3.9×10^2 개이고, 감마선은 없다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 없다. 0.3 MeV에서 중성자는 약 9 개이고, 감마선은 없다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 없다. 0.5 MeV에서 측정된 중성자는 없고, 감마선도 없다.

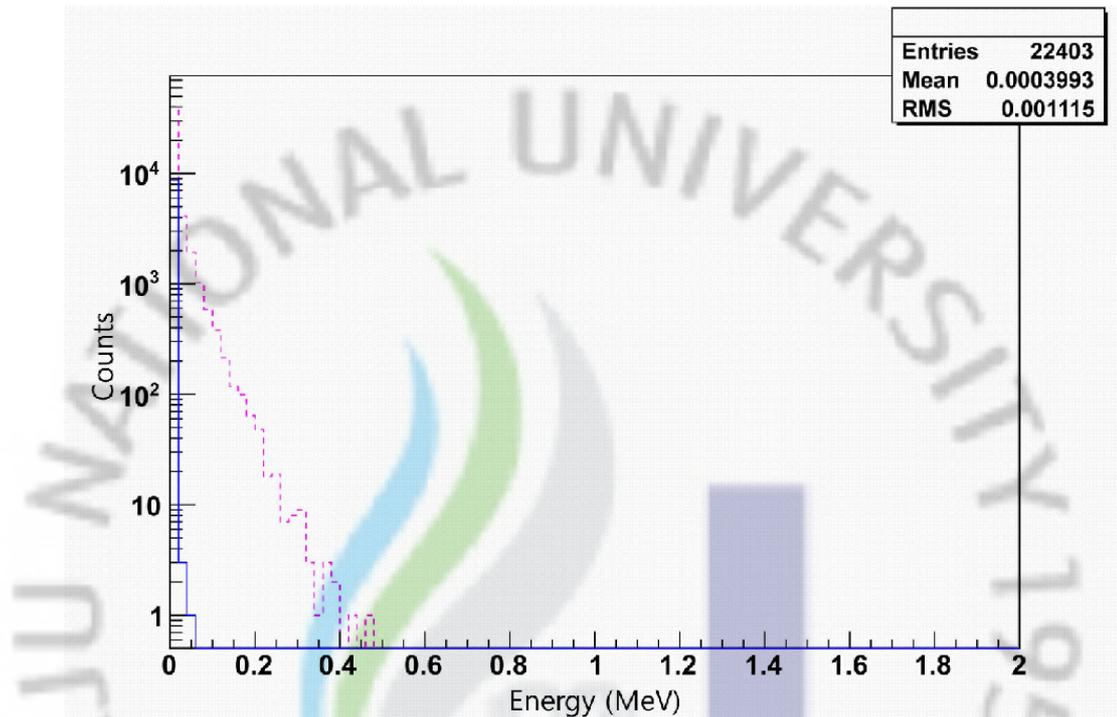


그림 31. FT-ratio만의 여섯 번째 모듈 에너지.

그림 32에서 전체 모듈을 보면 0.1 MeV에서 중성자는 약 7.8×10^3 개이고, 감마선은 약 3×10^3 개이다. 중성자를 기준으로 보았을 때 감마선은 약 10.66% 적다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선의 비율이 약 89.34% 이다. 0.3 MeV에서 중성자는 약 1.4×10^3 개이고, 감마선은 약 1.8×10^2 개이다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 약 28.32% 적다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선의 비율이 약 31.68% 이다. 0.5 MeV에서 중성자는 약 2.6×10^2 개이고, 감마선은 1.4×10 개이다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선은 약 52.55% 적다. 중성자를 기준으로 보았을 때 측정된 감마선의 비율이 약 47.45% 이다.

그림 32를 보면 감마선이 효과적으로 제거 되었고, 중성자 에너지가 주로 보이는 것을 알 수가 있다. 트리거 조건에 대한 그래프에서 첫 번째 모듈을 (그림 20) 보면 그림 33에 나온 전산모사 결과와 같이 첫 번째 모듈에서 주로 감마선 에너지가 남아 있는 것을 볼 수가 있다.

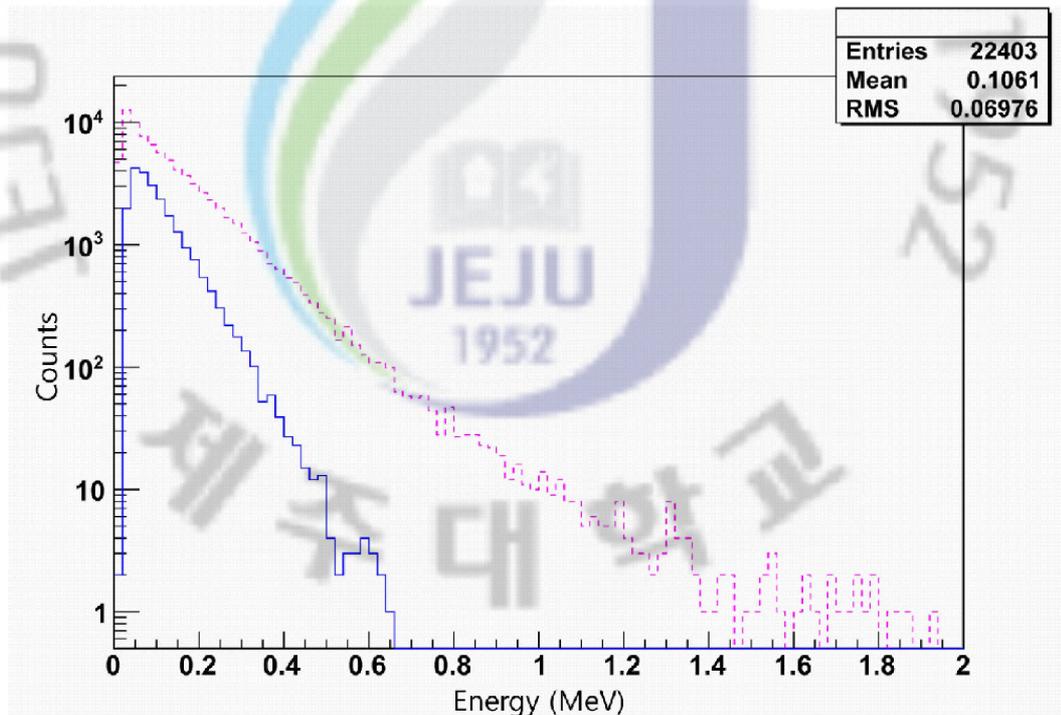


그림 32. 복합열량계의 전체 모듈 에너지.

두 번째 모듈 (그림 20)부터 마지막 모듈 (그림 25)까지의 에너지 분포를 보게 되면 주로 중성자가 보인다. 하지만 첫 번째 모듈에서부터 마지막 모듈까지 에너지 분포 그래프를 보면 감마선에너지와 중성자에너지가 모듈에 남아 있는 것을 분리해 내는 것이 쉽지가 않다. 그래서 FT-ratio 조건을 사용한 후의 첫 번째 모듈 (그림 26)을 보면 트리거 조건의 첫 번째 모듈만큼 감마선이 뚜렷이 보이지는 않지만 중성자 측정이 주 목표였으므로 FT-ratio 조건 후의 두 번째 모듈 (그림 27)부터 마지막 모듈 (그림 31)까지 보면 처음에 목표했던 중성자 측정에 있어서 감마선이 효과적으로 제거되어 있는 것을 알 수가 있다.



제 V 장. 결과 및 분석

제 1 절. 복합열량계의 에너지 해석

위에서 감마선이 효과적으로 제거된 중성자 에너지에 대한 그림결과를 종합하여 보면, 우리가 쓰고 있는 복합 열량계의 경우, 두 에너지 값의 구분능력을 나타내는 에너지 분해능은 입사된 방사선의 에너지를 측정하는데 가장 중요한 요소이다. 일반적으로는 하나의 에너지를 갖고 있는 방사선을 측정하는데, 절대적인 에너지 분해능은 일반적으로 측정분포의 full width half maximum (FWHM; ΔE)로 정의한다. 일반적으로 ΔE 보다는 에너지 E 에서 $\sigma_E = \Delta E/E$ 와 같이 정의한다. 총 에너지 분해능은 복합 열량계의 경우에

$(\frac{\sigma}{E})^2 = (\frac{S}{\sqrt{E}})^2 + (\frac{N}{E})^2 + C^2$ 로 주어지는데 여기서 S 는 확률 분포항, N 은 노이즈항, 그리고 C 는 정수항이다. 여기서 확률 분포항에는 세 가지 요소가 포함되는데 첫 번째는 소나기 후의 이벤트 별 변동을 방지하는 요소이며 두 번째는 감마선 확률의 2.1% 기여했을 때 경우이며 세 번째는 흡수체에 빔이 입사하기 전에 소나기를 실리콘열량계로 에너지 변동 측정 이 있다. 노이즈항에는 세 가지 요소 포함되는데 첫 번째 전자장비 노이즈, 두 번째는 디지털화 노이즈, 마지막으로 세 번째는 연쇄 충돌 노이즈가 있다. 정수항도 첫 번째는 일정하지 않은 종적 광량 모음 (longitudinal light collection), 두 번째는 내부 보정 오차를 말하고, 세 번째는 결정 뒤부터 발생하는 에너지손실이 있다 [15-16]. 그림 33은 복합 열량계의 중성자와 감마선 에너지 분해능을 보여준다.

그림 34는 복합열량계의 에너지분해능을 그린 그림인데 중성자는 $(\frac{\sigma}{E})^2 = (\frac{0.41}{\sqrt{E}})^2 + (0.005)^2$ 와 같이 에너지 분해능을 가지고 감마선은

$(\frac{\sigma}{E})^2 = (\frac{0.11}{\sqrt{E}})^2 + (0.0008)^2$ 와 같이 에너지 분해능을 가진다 [15-16].

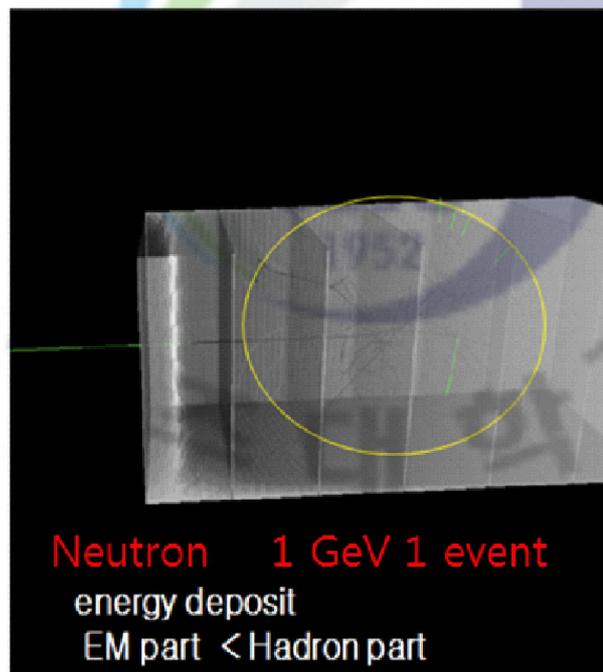
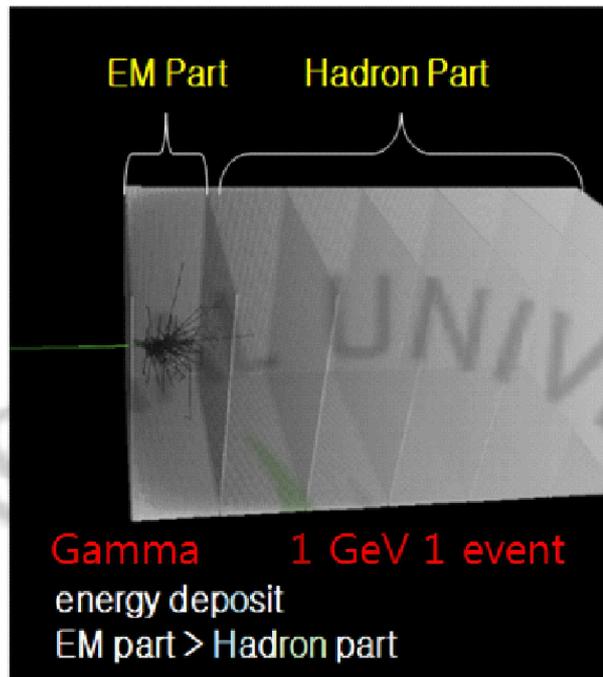


그림 33. 중성자와 감마선의 잔류에너지 [16-17].

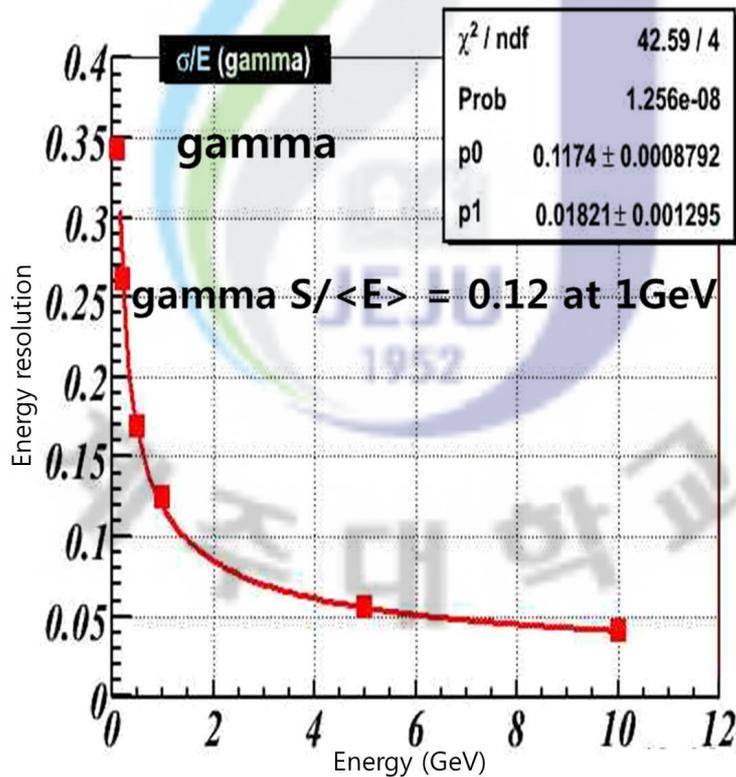
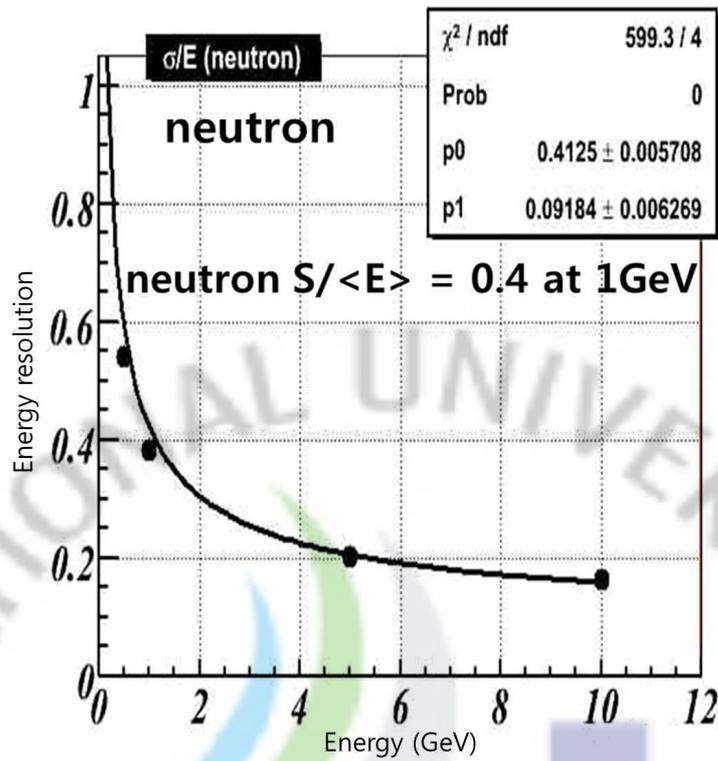


그림 34. 중성자와 감마선의 에너지 분해능 [16-17].

제 2 절. FT-ratio

FT-ratio는 우리가 본문 제 3장 제 2 절에서 사용했던 조건인데 그림 34에서 보는 바와 같이 FT-ratio의 정의는 첫 번째 모듈에 남아 있는 에너지를 전체 모듈 여섯 개에 남아 있는 에너지로 나눈 것이다. 이 조건을 적용한 결과 효과적으로 감마선을 제거할 수가 있었다. 적용한 방법은 ROOT를 이용하여서 FT-ratio의 식을 적용시켜서 판별하였다.

그림 35는 FT-ratio에 대한 각 에너지별 몬테카를로 전산모사를 결과이다. 이 결과에 따르면 FT-ratio가 0.5 이하일 때 중성자 검출효율이 약 60% 이었고, 감마선은 0.1% 이하였다. FT-ratio가 0.85 이상일 때 감마선 검출효율은 약 99% 이었고, 중성자는 약 10-30%를 보였다.

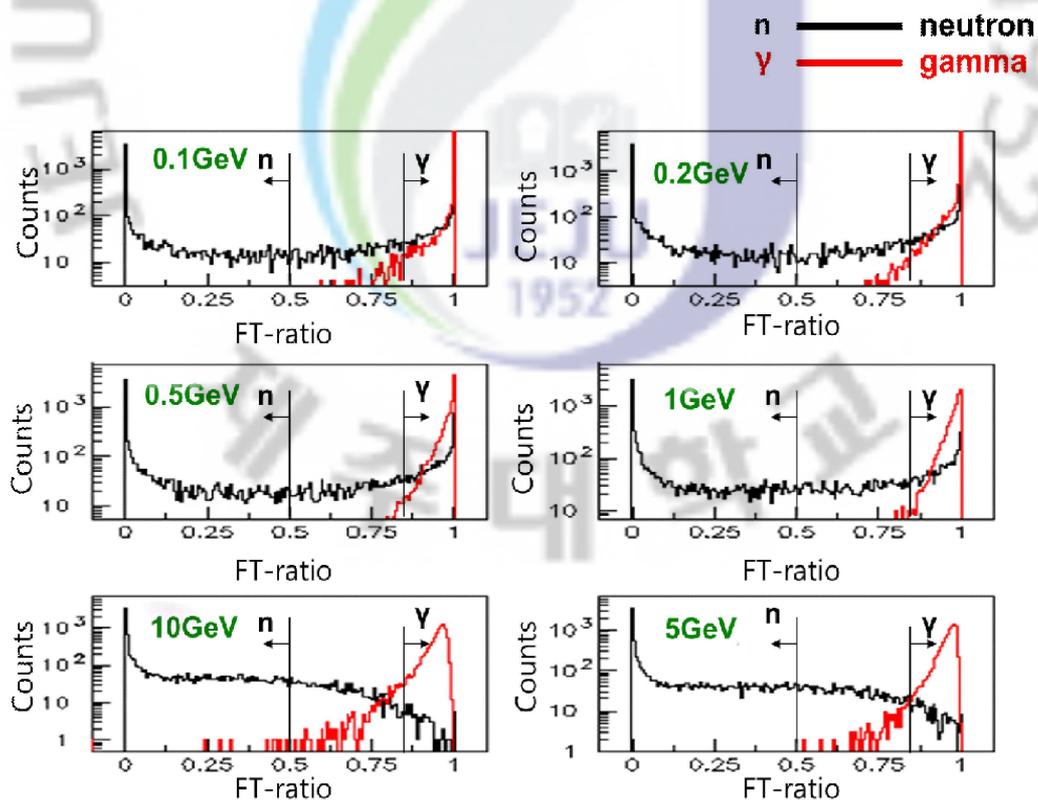


그림 35. FT-ratio.

제 3 절. 측정 결과 및 분석

그림 36은 전산모사 결과를 보여주는 그림이다. 이 그림에서 보면 FT-ratio 조건에서 0.5 이하영역을 중성자라고 본다. 그때의 검출효율은 60% 이상이고, 감마선은 0.1% 이하를 가진다. FT-ratio인 0.85 이상 부분에서는 감마선 이라고 판단했고 검출효율은 99%이고 중성자는 10%-30% 비율을 가진다. 이 전산모사의 결과를 바탕으로 FT-ratio가 0.85 이상으로 하면은 감마선 이라고 보고 0.5 이하라고 하면은 중성자라고 판단했다.

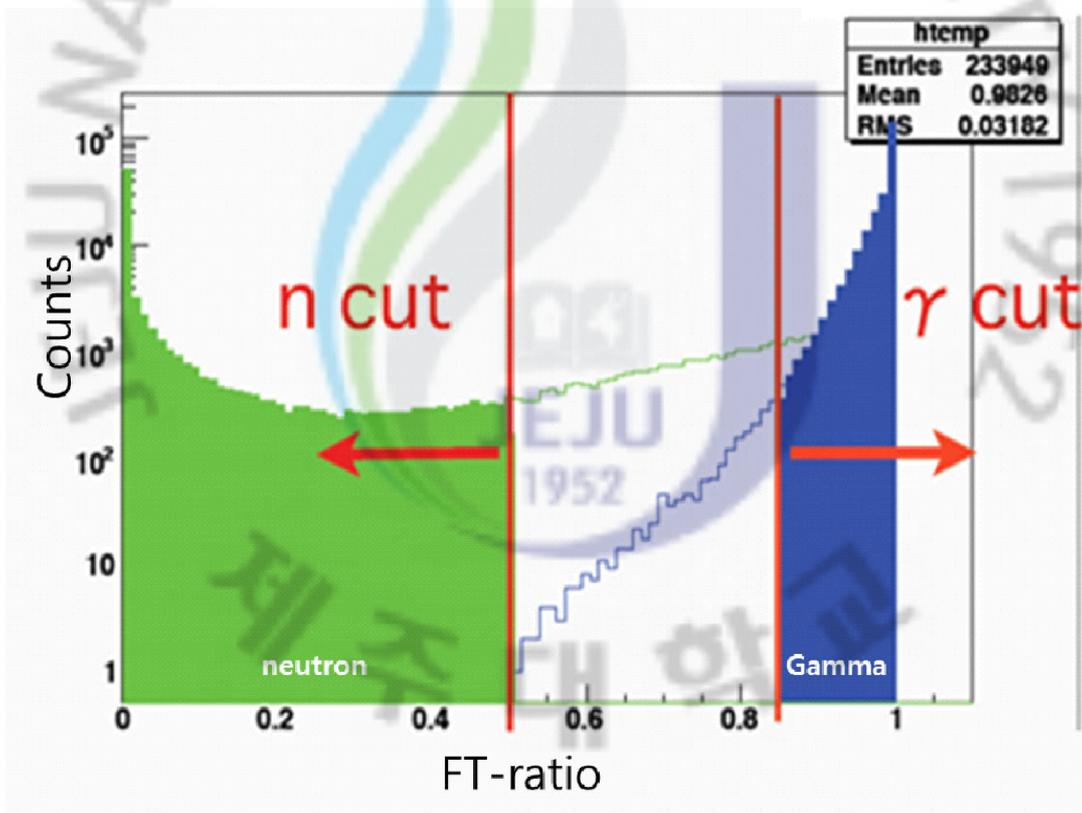


그림 36. 몬테카를로 전산모사 그래프.

그림 37은 복합열량계에 실제 들어온 에너지와 몬테카를로 전산모사에 에너지가 들어오는 결과를 보여주는 그림이다. FT-ratio를 이용한 감마선과 중성자의 판별 실험에 대한 결과는 그림 36과 같이 보인다. 중성자에 대한 열량계의 반응은 최고 빈도인 에너지에서 몬테카를로 전산모사 계산 예상치보다 약 25% 적게 관측되었고 약 75% 정도 일치율을 보인다. 에너지가 100 MeV에서는 약 28% 적게 관측되었고 약 72% 정도 일치율을 보인다. 에너지가 300 MeV에서는 약 26% 적게 관측되었고 74% 일치율을 보인다. 500 MeV에서는 47% 정도 차이를 보이고 53% 일치율을 보여준다. 그림 36에서 총 데이터 개수와 몬테카를로 전산모사에서 계산된 개수를 데이터 개수와 비교했을 때 38.45% 적었다. 최고빈도에서 25% 적게 관측된 것은 데이터 취득 시 트리거의 편견에 의한 것으로 판단된다. 자세한 연구는 진행 중에 있다.

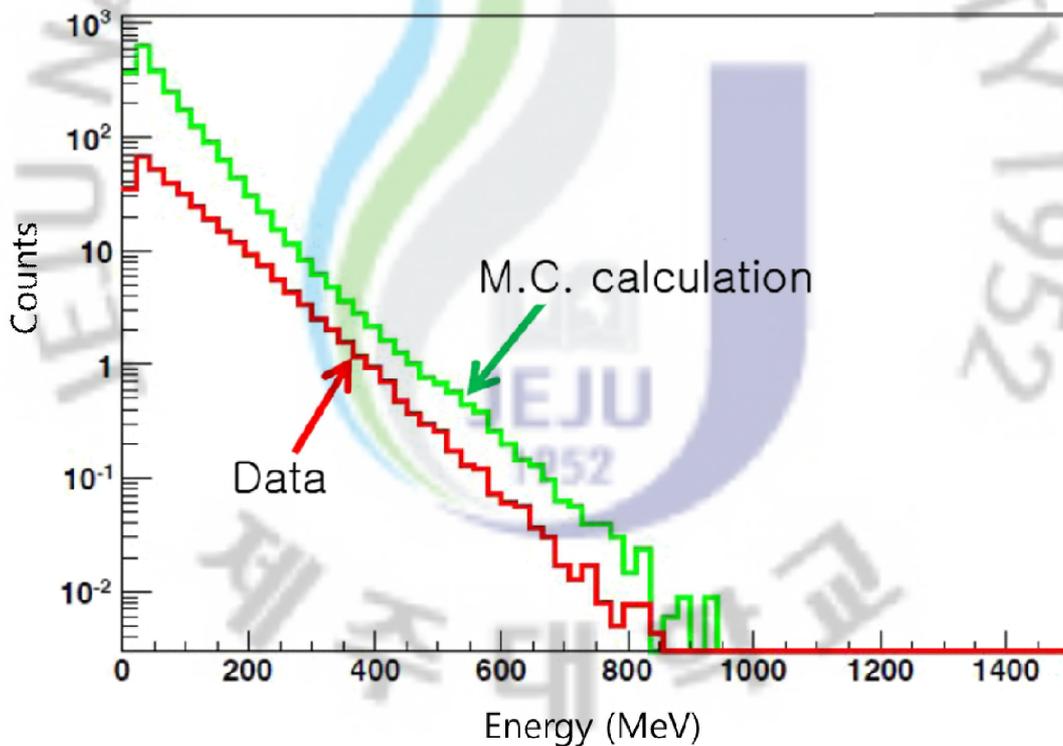


그림 37. 복합열량계 데이터와 몬테카를로 전산모사 결과.

제 VI 장. 결론

중성 빔 라인에서 중성자를 측정하는 목적은 빔 라인의 성능평가 그리고 중성자가 생성하는 π^0 가 배경사상이기 되기 때문이다. 하지만 고에너지 영역에서는 중성자와 감마선의 신호구별이 힘들기 때문에 중성자 측정하는 것이 매우 어렵다. 그래서 E14 (KOTO) 실험에서는 이런 문제점을 해결하기 위해서 복합열량계를 사용하여 본 것이다. 지금까지 복합열량계를 이용하여 중성자가 어떻게 측정되는지 살펴보았다.

전산모사 그래프와 측정데이터를 비교할 첫 번째 방법으로 중성 빔 라인에 들어온 빔 데이터를 트리거 조건으로 적용하여 중성자와 감마선의 에너지 그래프를 그렸다. 두 번째 방법으로 FT-ratio를 사용하여 중성자와 감마선 에너지 그래프를 그렸다. 첫 번째 방법으로 그린 중성자와 감마선에너지 그래프는 첫 번째 모듈에서부터 마지막 모듈까지 일정한 비율을 가진다. 하지만 두 번째 방법으로 그린 중성자와 감마선에너지 그래프는 두 번째 모듈에서부터 마지막 모듈까지 중성자에너지가 주로 보인다. 두 가지 방법을 비교해보면 FT-ratio 적용방법에 의한 감마선에너지 제거는 성공적이었다고 판단한다.

그러므로 데이터를 트리거 방법으로 중성자와 감마선을 분리하는 방법보다 FT-ratio를 이용한 감마선과 중성자를 분리하였을 경우가 확실하게 구분을 할 수가 있다. 또한 FT-ratio에 따른 중성자에 대한 복합열량계의 반응을 보았을 때, 약 50 MeV 에너지에서 몬테카를로 전산모사 예상보다 약 25% 적게 관측되었다. 이것은 데이터 취득 시 트리거의 편견으로 여겨지나 자세한 연구는 진행 중이다.

복합열량계를 이용한 중성자 응답 실험 결과, 성공적인 중성자와 감마선을 분리할 수 있는 것으로 나타남으로써 몬테카를로 전산모사와 비교시 측정된 중성자의 개수와 큰 차이가 없어서 효율적인 측정이 된 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] S. Podolsky, Ph.D. thesis, B.I. Stepanov Institute of Physics of the Belorussian Academy of Sciences (2007).
- [2] T. Inagaki *et al.*, KEK-PREPRINT-9626013, Nov 1996, 113pp.
- [3] H. Watanabe *et al.*, Nucl. Inst. Meth. **A** 545, 542 (2005).
- [4] T. Inagaki *et al.*, "Measurement of the $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ", KEK internal 96-13 (1996).
- [5] M. Doroshenko, Ph.D. thesis, The Graduate University for Advanced Science, (2005).
- [6] Joseph Comfort and Jeremy Figgins "Proposal for $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Experiment at J-Parc" (2006).
- [7] Gabriel N. Perdue, Ph.D thesis, University of Chicago (2008).
- [8] T. Inami and C. S. Lim, Progr. Theor. Phys. **65**, 297 (1981).
- [9] J. K. Ahn *et al.*, Phys. Rev. Lett. 201802, (2008).
- [10] Y. C. Tung *et al.*, Phys. Rev. Lett. 051802, (2009).
- [11] Phys. Lett. B, Volume 667, 1-5, 729 (2008).
- [12] <http://nuclear.korea.ac.kr/~bhong/class/>
- [13] William R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments", Springer-Verlag, chapter. 2, (1994).
- [14] Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement" Chapter. 2, Wiley, (1999).
- [15] The CERN Large Hadron Collider: Accelerator and Experiments Vol.2, Chapter 4, (2009).
- [16] 大津亞樹, 學士論文 "電子ビーム實驗による Cerberus の性能測定" 山形大學 (2009).
- [17] 上林 智亮, 修士論文, "J-Parc K_L ビームラインモニタ用n/γ檢出器 Cerberus 改良" 山形大學, (2009).