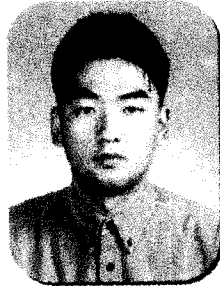


Mask를 이용한 CLAS TOF 검출기의 보정



· 김우영 ·
경북대
물리학과 부교수



· 추기호 ·
삼성전자
반도체 사업부



· 박기준 ·
경북대
물리학과 박사과정

1. 서론

전자산란 실험은 핵 구조를 연구하는데 귀중한 수단으로 지난 30년 동안 사용되어 왔다. 최근 연속 전자 빔을 만들 수 있는 기술이 발달함에 따라 산란된 전자뿐만 아니라 튀어나오는 핵자들을 동시에 검출하게 되어 핵의 구조와 반응역학을 더욱 정밀하게 규명하는데 기여하게 되었다. 또한 편극 전자 빔과 편극 핵과녁을 제작하는 기술이 발달됨에 따라 핵 및 핵자의 스핀구조를 파악할 수 있게 되었다. 반응 평면에서 산란 단면적만 구하던 종전의 핵물리학 실험이 이제 대형 입체각을 가진 검출기를 사용하여 각종 구조함수를 분리 추출해 낼 수 있게 되었다. 이처럼 편극 연속 전자빔, 편극 핵과녁 및 대형 입체각 검출기의 출현은 핵 구조 연구에 새로운 지평선을 넓혀주었다.

경북대 핵물리 그룹은 1996년 이래 세계적인 첨단 가속기 시설인 제퍼슨 연구소에서 핵구조 연구에 참여해 오고 있다. 경북대 그룹은 CLAS 검출기 시스템 중의 한 부분인 TOF 검출기의 레이저 보정 시스템을 구축하는 역할을 담당해 오고 있다. 우리는 이 논문에서 제퍼슨 연구소의 CLAS 검출기에 대한 설명과, 우리가 맡은 부분인 TOF 검출기의 보정에 대한 최근 연구를 발표한다.

2. Time of Flight 시스템

2.1 CLAS 검출기

제퍼슨 연구소의 Hall B 실험동에 설치된 CLAS 검출기는 그림 1과 같다. CLAS 검출기는 4π 검출기로서 6개의 Toroidal 자석, 입자의 운동량을 측정하는 3개의 drift chamber, e^-/π^- 판별용 Cerenkov 검출기, 입자의 비행시간 측정 및 트리거용 TOF 검출기, $e/\gamma/n$ 판별용 칼로리미터로 구성되어 있다[1].

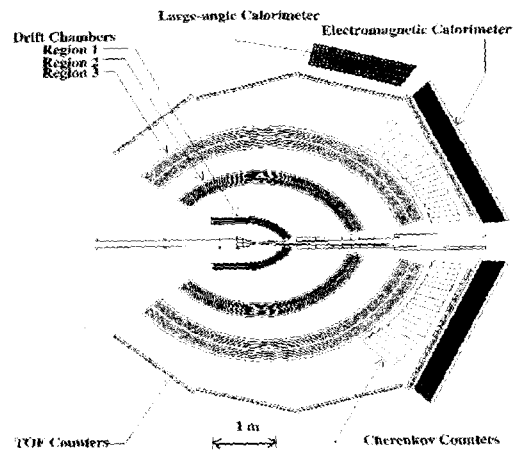


그림 1. 제퍼슨 연구소의 CLAS 검출기.

2.2 TOF 검출기

Time of Flight(TOF) 검출기는 입자의 비행시간을 측정하여 입자 판별과 트리거 역할을 한다. TOF 검출기의 주된 설계 목표는 최적화된 시간 분해능을 가지는 장치의 구축이다. 입자 판별 방법은 drift chamber로부터 획득한 입자의 궤적에 대한 자장 분석으로부터 얻어지는 운동량과, 과녁 핵에서 TOF 검출기에 이르는 입자의 비행시간을 측정하여 판별한다. 서로 다른 입자들의 무리들은 비행 시간과 입자 운동량을 축으로 하는 그래프 상에서 분리될 수 있다.

TOF 검출기는 다중 산란과 산란된 전자들의 생성을 극소화시키기 위해서 drift chamber와 Cerenkov 검출기 바깥에 위치한다. TOF 검출기들은 빔 방향에 수직하고, 모두 342개로 이루어져 있다. 그리고, 극각(θ)으로는 8° 에서 142° 까지, 방위각(ϕ)으로는 360° 의 모든 범위에 걸쳐서 위치한다. 그림 1과 같이 내부의 과녁, tracking 시스템과 Cerenkov 검출기를 둘러싸고, 칼로리미터 내부에 위치한다. TOF 검출기들은 그림 2와 같이 4개의 패널로 이루어진 6개의 조각으로 나누어져 빔 방향과 수직되게 설치되어져 있다.

TOF 검출기 시스템은 두께 5.08cm, 폭 15cm($\theta < 45^\circ$ 의 전방 검출기) 및 22cm(후방각도 $\theta \geq 45^\circ$ 의 검출기), 길이는 전방각도의 경우 32cm부터 후방각도의 경우 450cm까지 변하는 길이를 갖고 있다[1].

TOF 검출기들로부터 얻어지는 신호강도는 입자 판별에 중요한 에너지 손실도를 나타낸다. TOF 검출기로 얻어지는 에너지 손실에 대한 자료는 입자 비행시간의 분해능이 다중 산란에 의해 좌우될 때, 느린 입자에 대한 자장분석보다 입자의 에너지를 더 정확하게 측정한다.

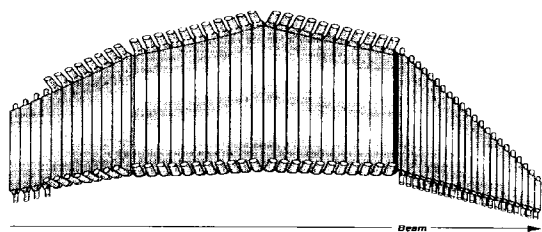


그림 2. 4개의 패널로 구성된 TOF 조각.

TOF 검출기의 시간 분해능을 향상시키기 위해서는 빠른 반응시간과 낮은 광 감쇠를 갖는 섬광물질이 요구된다. 이러한 이유로 섬광 재료는 Bicron BC-408 섬광체가 선택되어졌다. BC-408의 특성은 표 1과 같다. TOF 시스템의 모든 장치는 TOF의 평균 시간 분해능이 120ps 이하가 되어질 수 있도록 디자인 되어졌으며 이를 위해 많은 보정작업들이 수행되어지고 있다.

표 1. BC-408의 특성.

rise time	0.9 ns
decay time	2.1 ns
wavelength of maximum emission	425 nm

2.3 TOF 시스템의 보정

TOF 검출기에서 생성되어진 데이터는 ADC의 펄스 크기에 대한 정보와 TDC의 시간에 대한 정보로 구성되어져 있다. 데이터 보정을 위해서 ADC pedestal의 결정과 펄스 크기에 대한 gain-balancing, gain-matching, time-walk 보정 함수 결정 등의 여러 작업들이 수행된다. 이러한 보정작업을 수행하기 위하여 레이저나 우주선, 그리고 가속되어진 전자들과 액체 수소 과녁의 충돌에서 생성되는 입자들로부터의 데이터 등 다양한 데이터들이 사용된다. 일반적으로 레이저 시스템은 단일 검출기에 대한 특성을 연구할 때 사용되어지며 우주선이나 충돌실험으로부터의 데이터는 각 TOF 검출기들을 비교하고 차이점을 조사할 때 사용되어진다[2].

2.3.1 Time-walk 효과의 보정

Time-walk 효과는 TDC를 사용한 시간 측정시스템에서 발생하는 주된 실험적 오차요인이다. 그 원인은 TDC로 들어오는 신호들의 오름시간이나 최대 첨두치의 높이 차이에 때문에 생긴다. 그림 3은 일정한 문턱치를 가지고 있는 TDC에 생성 시간은 같으나 최대 첨두치의 높이가 다른 두 신호가 입사되는 상황을 묘사한다. 여기서 두 신호가 TDC에 기록되는 시간은 time-walk 효과로 인하여 $t_1 - t_2$ 만큼의 차이가 남을 알 수 있다[3].

제퍼슨 연구소의 Hall B 실험동에서는 time-walk 효과에 대한 보정과 left-right 시간차이 상수를 획득하

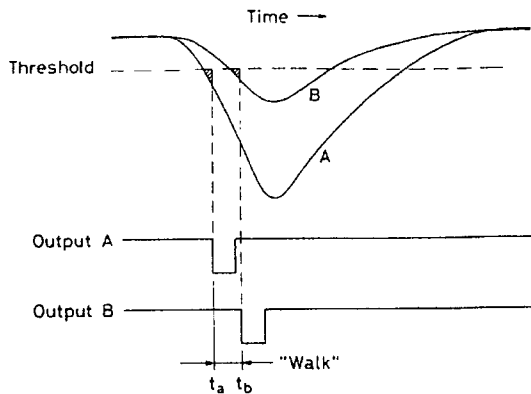


그림 3. 입자의 비행 시간 측정에서 발생하는 time-walk 현상.

기 위해 레이저 시스템을 사용하고 있다. 강도 조절이 가능한 레이저광을 각각의 검출기에 보내어 입사되는 레이저광의 세기에 따른 신호 측정 시간이 어떻게 차이가 나는지를 조사하고 있다[4].

2.3.2 Cross-talk 효과

Cross-talk 효과는 서로 가까이 있는 검출기의 검출 신호가 명확하게 분리되지 못하고 교차되는 현상을 말한다. 즉, 하나의 검출기에서 입자의 신호를 받아들리게 되면, 그 주위의 가까이 있는 검출기도 그 입자 신호로부터 영향을 받는 것을 의미한다. 이로 인해 입자의 정확한 이동경로가 주위에 있는 검출기들의 간섭 때문에 제대로 파악되지 못하는 경우가 생긴다. 각각의 검출기에 대한 cross-talk 효과를 조사하기 위해서 3장에서 설명되어질 TOF 레이저 보정 시스템의 구성요소중 하나인 mask를 개발 제작하였다.

3. 레이저 보정 시스템

3.1 레이저 보정 시스템의 구성

TOF 레이저 보정 시스템은 입자의 비행시간에 대한 정보를 획득하는 TDC에서 고유하게 발생하는 time-walk 효과를 보정하고, 검출기와 데이터 획득용 전자장치의 cross-talk를 보정하기 위해 개발되어졌다. 이 시스템은 left-right 시간차이 상수 등 각 검출기의 상태를 온라인으로 바로 알 수 있는 정보를 제

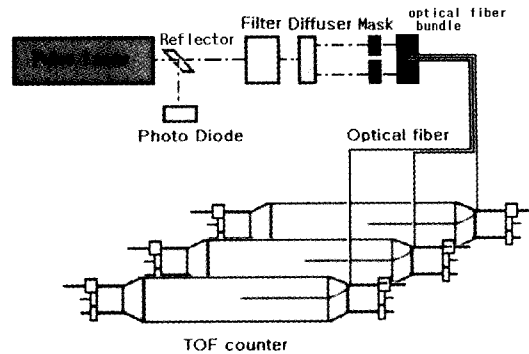


그림 4. 레이저 보정 시스템의 구성과 광 흐름.

공한다[5].

CLAS의 TOF 레이저 보정 시스템에는 모두 4개의 자외선 펄스형 레이저가 사용되어진다. TOF 레이저 보정 시스템은 레이저를 포함한 여러 광 장치들로 이루어져 있다. 그림 4는 레이저 보정 시스템의 전반적인 모습과 광 흐름을 보여준다.

레이저에서 방출된 빛은 강도를 조절하는 가변 필터와 빛을 광섬유 다발에 선택적으로 보낼 수 있게 광 경로를 조정하는 mask를 통과하여 지름 200 μm 의 광섬유를 따라 각각의 TOF 검출기의 중앙에 입사되어진다. 입사되어진 레이저 펄스로부터 각 검출기는 TDC와 ADC에 대한 자료를 제공한다. 이렇게 획득되어진 자료로부터 time-walk 보정과 cross-talk 보정 등이 수행되어진다.

3.2 광원

레이저 보정 시스템에 쓰이는 광원은 실제 입자에 의해 발생되어지는 신호와 비슷하여야 한다. 실제로 검출기의 PMT에 도달하는 신호의 파장은 자외선(UV) 영역에 가까운 400nm 이며 신호의 시간적 크기는 1ns 이하이다[6].

입사된 레이저는 섬광체와 반응하여 2차 광원을 생성시킨다. 이러한 조건을 감안하여 레이저 보정 시스템에서는 Photonics Laser 사의 LN 203C 레이저가 사용되어졌다. 이 레이저는 600ps 정도의 짧은 자외선 펄스광을 생성시키며 TOF counter와 반응하여 실제 입사되는 입자의 신호와 흡사한 펄스형 신호를 제공한다. LN 203C의 자세한 정보는 표 2에 잘 나타나 있다.

표 2. LN203C 질소레이저의 특성.

Spectral Output(nm)	337.1
Spectral Bandwidth (nm)	0.1
Pulsewidth (ps)(FWHM)	600
Energy/Pulse(muJ)	100
Peak Power(kW)	167
Repetition Rate(Max., Hz)	50
Average Power(Max., mW)	5
Beam Dimensions (hor. x vert., mm)	5.5×3.1

3.3 가변 필터

레이저에서 생성된 빛은 부분 반사경을 통과한 뒤 필터로 입사되어 진다. 이 필터는 time-walk 효과를 보정하기에 적합한 다양한 진폭을 가진 레이저 빛을 제공한다. 즉, 필터는 입사되어진 레이저 빛의 세기를 조절해 주는 역할을 한다. 레이저 보정 시스템을 위해 개발되어진 필터는 두 장의 linear variable neutral density glass filter로 구성이 되어져 있다. 이 두 개의 neutral density filter에 의한 광 밀도의 변화범위는 1 : 40 이다. 그림 5는 사용되어진 가변 필터의 거리에 따른 neutral density의 변화를 보여준다. 거리가 증가할수록 필터에 의해 나온 빛의 세기가 일정하게 증가함을 알 수 있다. 레이저 시스템의 필터는 이 두 장의 가변 필터를 동시에 양방향으로 교차 또는 분리되는 방향으로 움직임으로써 연속적으로 레이저 빛의 강도를 변화시킨다. 그림 6은 필터의 내부모습과 동작방향을 보여준다.

3.4 Mask

mask라 명명되어진 이 판은 레이저 빛을 선택적으

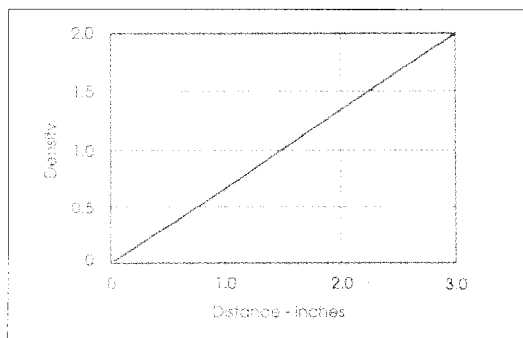


그림 5. 가변 필터의 특성.

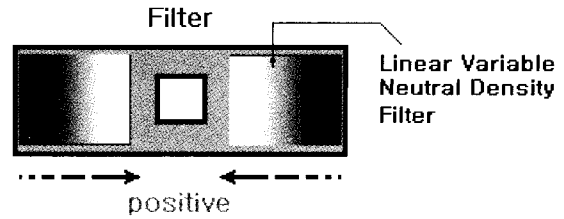


그림 6. 필터의 내부 모습과 동작 방향.

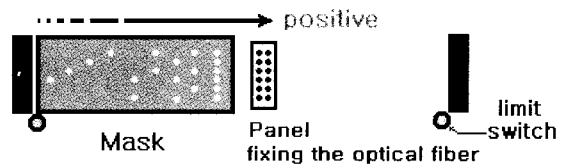


그림 7. Mask 제어기와 동작.

로 특정 광섬유에만 비춰줄 수 있도록 하는 역할을 담당하고 있다. 특정 검출기에만 레이저 빛을 보내고 다른 검출기에는 빛을 보내지 않으므로써 데이터 획득과정에서 발생하는 측정기기 사이의 cross-talk 효과를 조사할 수 있다. 그림 7에서는 mask에 뚫려진 다양한 구멍들의 조합을 볼 수 있다. mask 구멍의 크기는 광섬유다발 구멍의 크기와 일치한다. mask는 한쪽 방향으로 일정한 거리만큼 움직여서 mask 뒤쪽에 놓여있는 광섬유 다발의 구멍에 레이저 빛을 비추어 지도록 설계되어져 있다.

3.5 광섬유 다발

그림 8은 광섬유다발의 배열과 그 크기를 나타내고 있다. 각 광섬유 다발은 광섬유를 고정하는 지지대에 의해 고정되어져 있으며, 그 고정 지지대에는 그림 8처럼 6개의 열과 4개의 행으로 이루어져 있는 구멍이 뚫려져 있다. 각 구멍에는 7개의 광섬유가 들어있다. 이 중에서 6개의 광섬유는 각각의 TOF 검출기와 연결되어 있으며 나머지 1개의 광섬유는 spare로 사용되어 진다. 각 구멍의 직경은 2mm로 mask 구멍의 크기와 동일하다.

3.6 그 밖의 광부품

레이저광은 가변필터를 통과하기 전에 부분 반사경을 통하게 된다. 약 96% 정도의 레이저광은 그대

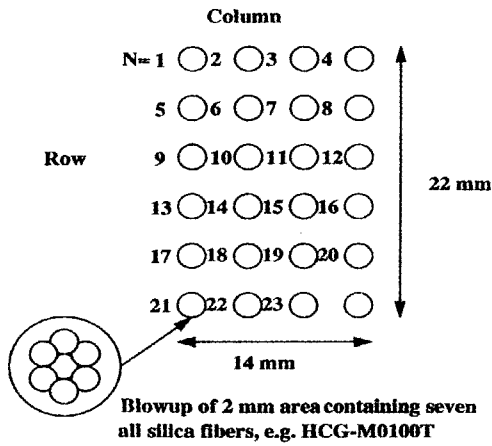


그림 8. 광섬유 다발의 배열과 크기.

로 통과하여 필터로 향하지만 나머지 4% 정도는 반사되어 광 다이오드가 있는 회로 기판을 비추게 된다. 광 다이오드와 그 회로 기판은 반사되어진 빛을 전기적 신호로 바꾸어 검출기를 거치지 않고 곧바로 데이터 획득 장치로 보낸다. 광 다이오드에 의해 생성되어진 신호는 다양한 진폭을 가지고 TDC에 의해 획득되어지는 신호들의 기준시간 혹은 출발 시간에 대한 자료로 사용되어진다. 그림 9는 광 다이오드를 작동시키기 위한 회로도도를 보여준다.

LN203C에서 생성되는 레이저 빛의 단면크기는 가로 세로가 각각 5.5mm×3.1mm 이다. 광섬유 다발을 비추기 위해 가변 필터와 mask 사이에 CTR 3 x 5의 빛 확산경이 놓여 있다. 빛 확산경에 의해 그 단면크

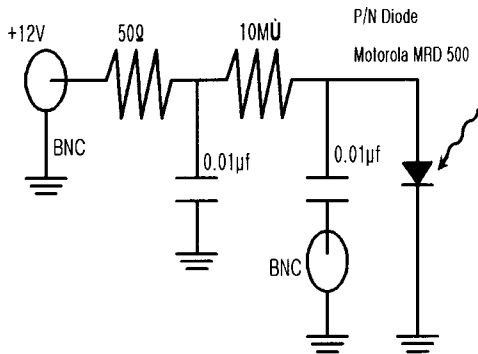


그림 9. 광 다이오드 시스템의 회로도.

기가 확장되어진 레이저 빛은 mask를 통과하여 광섬유 다발을 비추게 된다. 최종적으로 광섬유를 비추게 되는 레이저 빛의 세기에 대한 결정은 TOF 검출기의 최소 이온화 에너지에 의존한다[7].

4. 국내에서의 레이저 보정 시스템 개발

4.1 TOF 검출기 개발

TOF 검출기는 입자의 비행시간을 측정하는데 사용되어지는 검출기이다. 순간적인 입자의 신호를 이용하여 비행시간을 측정하기 때문에 빠른 timing을 필요로 한다. 우리는 3개의 TOF 검출기를 개발, 제작하였다. 제작한 TOF 검출기는 크게 3부분으로 이루어져 있다. 실제 입사되는 입자의 신호를 받는 섬광체 부분, 입사되어진 입자의 신호를 PMT로 보내는 light guide 부분, 그리고 입자의 신호를 데이터 획득 시스템이 검출할 수 있도록 증폭시켜 주는 PMT 부분으로 나누어진다. EGS4, GEANT 프로그램 등을 이용한 가상실험을 실시하여, 그 결과를 검출기 제작에 적용하였다. 이 결과를 이용하여 가로 세로 높이가 455×355×25mm³인 규격의 TOF 검출기를 제작하였다. TOF 검출기 중 섬광체 부분은 실제로 입사되는 입자를 검출하는 부분으로, 플라스틱의 한 종류인 아크릴을 이용하였다. 아크릴의 표면을 투명하게 가공하여 입사되는 입자의 신호를 검출하기 쉽도록 하였다. light guide는 표면을 투명하게 가공한 아크릴을 사용하였는데, 입사되어진 입자를 PMT로 보내는 역할을 한다. 그림 10은 제작되어진 light

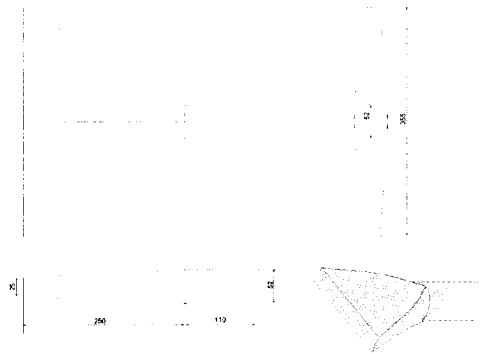


그림 10. 경북대에서 제작된 light guide의 설계도.

guide의 설계도를 보여준다.

light guide를 통해서 전달된 입자의 신호는 PMT를 거쳐서 실제 입자의 신호보다 훨씬 더 커지게 된다. 이렇게 증폭된 신호를 이용하여 데이터 획득 시스템에서는 입자의 비행시간에 대한 데이터가 얻어진다. 그리고, $-1700V$ 까지의 전압에서 작동하는 PMT를 이용하여 TOF 검출기로부터 나오는 입자의 신호를 증폭하도록 되어 있다. 그림 11은 실제 개발, 제작한 TOF 검출기들을 보여준다.

4.2 TOF 레이저 보정 시스템

4.2.1 펄스형 질소 레이저

우리는 제퍼슨 연구소의 레이저와 비슷한 성능을 내는 유사한 펄스형 질소 레이저를 찾던 중 Laser Technik Berin(LTB)사의 MNL200을 찾게되었다. 그리고 TOF 레이저 보정 시스템에 사용하기 위해서 이 LTB사의 레이저를 구입하여 설치하였다.

4.2.2 가변 필터

TOF 보정 시스템에서 레이저의 강도를 조절해 주기 위해서는 가변 필터 시스템이 필요하다. 우리는 국내에서 제작되어진 TOF 검출기에 적합한 가변 필터 시스템을 개발하여 제작하였다. 그림 12는 실제 제작한 가변필터 시스템을 보여준다. 본 연구에서 제작된 가변필터 시스템에는 연속적인 레이저 빛의 강도를 조절할 수 있는 Linear Variable Neutral Density

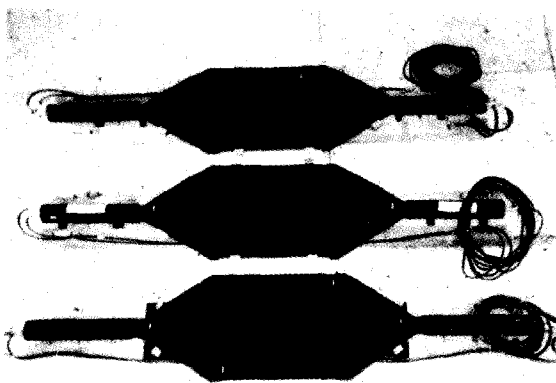


그림 11. 설계, 제작된 실제 검출기.

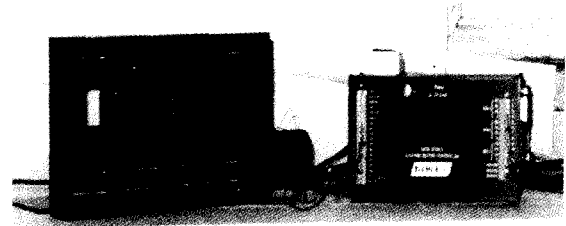


그림 12. 실제 제작한 가변 필터 및 Velmex 스텝 모터 제어 시스템.

Filter Glass가 장착되었다. 두개의 Neutral Density Filter Glass는 스텝모터로 작동되는 선형 이동기에 탑재되어 연속적인 레이저 빛의 강도를 조절할 수 있도록 제작되었다. 여기에 사용되는 스텝 모터는 Velmex 사의 모터로 1스텝에 0.9° 씩, 360° 를 도는데 총 400스텝을 필요로 하는 특징을 가진 모터이다. 스텝 모터를 제어하기 위한 모터 제어기로는 Velmex 사의 NF-90 시리즈가 사용되었다. NF-90 시리즈의 모터 제어기는 RS-232 통신신호를 통하여 모터를 제어하고 그 위치를 파악할 수 있는 장치이다[8].

4.2.3 광 다이오드

광 다이오드는 레이저의 신호를 데이터 획득 시스템에 전달해 주는 역할을 한다. 우리는 모토롤라사의 MRD 500 광 다이오드를 사용하였다. MRD 500은 300~1200nm의 파장 범위에서 입사되는 빛에 반응하여 작동하는 특징을 가지고 있다.

4.3 VME를 이용한 레이저 보정 시스템의 제어

가변필터 및 mask의 작동을 원격제어하기 위해 VME를 이용하여 네트워크 원격제어환경을 구축하였다. 가변필터는 레이저 빛의 강도를 조절할 수 있게 하고, mask는 레이저 빛의 선택적인 투과를 가능하게 한다. 원격제어 환경을 구축하기 위해 사용된 VME 모듈은 MVME 167로서 모토롤라사의 20 MHz CPU를 탑재한 일종의 single board 컴퓨터이다. 사용자가 명령을 내리면 VME가 그 명령을 인식하여 RS232 포트를 통해 Velmex 모터 컨트롤러에 그 명령을 전달해 준다[9, 10]. VME는 VxWorks라는 실시간 처리형 운영체제에 의해서 구동되는데, VxWorks는

UNIX 컴퓨터 및 일반 PC에서도 운영이 가능하도록 제작되어 있다. 우리는 Window용 Tornado를 사용하여 UNIX 컴퓨터가 아닌 Windows 기반의 PC에서 VxWorks를 제어 할 수 있도록 하였다[11]. VxWorks를 운영체제로 하는 VME는 네트워크로 연결되어진 다른 UNIX 컴퓨터에서도 제어 될 수 있다. 그 결과 네트워크로 연결하여 여러 위험요소가 존재하는 실험실에서 멀리 떨어진 안전한 곳에서도 원격제어를 할 수가 있다.

5. Mask를 이용한 TOF 검출기의 보장

5.1 Mask의 특성 및 필요성

mask는 3장 4절에서 논의한 바와 같이 일정한 패턴의 구멍이 뚫려 있는 금속판이다. 가변필터를 통과한 레이저 빛이 확산경을 통하게 되면 빛의 크기가 커지게 된다. 이 레이저 빛의 크기는 mask 뒤편에 놓여있는 광섬유 다발의 모든 부분을 비출 수 있을 만큼 충분히 크다. mask는 확산경을 통해 크기가 커진 레이저 빛을 광섬유 다발의 구멍에 선택적으로 조사해주는 역할을 한다.

그림 13은 mask 구멍의 배열상태를 보여준다. mask에는 일정한 구멍의 형태가 뚫려져 있는데, mask를 정면에서 바라보면, 오른쪽에서부터 하나의 구멍만 보이다가 왼쪽으로 갈수록 그 구멍의 갯수가



그림 13. mask 구멍의 배열 상태.

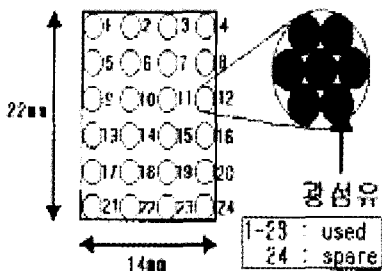


그림 14. 광섬유 다발 구멍의 배열상태.

많아지는 형태로 되어있다. 그리고, 왼쪽 마지막 열에는 한 개의 열 전체가 6개의 구멍이 나란하게 뚫려져 있는 것을 확인할 수 있다.

mask의 구멍은 바로 뒤편에 놓여있는 광섬유 다발의 구멍과 그 크기가 일치하도록 설계되어져 있다. 즉, mask 각 구멍들은 바로 뒤편에 놓여있는 광섬유 다발 구멍의 광섬유에 비추어 지도록 되어있다. 그림 14는 광섬유 다발 구멍의 구성을 보여준다.

광섬유 다발은 구멍의 구성이 6개의 열과 4개의 행으로 이루어져 있다. 각 광섬유 다발의 구멍 속에는 광섬유가 7개씩 짝을 이루며 들어있다. 여기서 6개의 광섬유는 각 TOF 검출기와 각각 한 개씩 연결되어 mask를 통해서 들어온 레이저 빛을 TOF 검출기에 전달해주는 역할을 한다. 그리고, 나머지 1개의 광섬유는 spare 역할을 담당한다.

Mask의 구멍 구성중 한 개씩 뚫려져 있는 구멍은 바로 뒤에 놓여져 있는 광섬유 다발의 각 구멍 한 개씩을 비추도록 되어있다. 그 다음의 한 열당 2개의 구멍이 나있는 구성은 뒷편 광섬유 다발의 2개의 구멍을 동시에 비추도록 되어있다. 이처럼 점진적으로 구멍 구성의 갯수를 더해 가는 형태로 되어 있으며, mask의 왼쪽 마지막 열에 위치한 6개의 구멍은 뒷편의 광섬유 다발 한 개의 열 전체를 비추도록 되어있다.

5.2 Mask 구멍과 광섬유 다발 구멍이 일치하는 모터스텝 찾기

Mask 구멍과 광섬유 다발 구멍이 일치하는 모터 스텝을 찾기 위해서 다음 두 가지의 방법을 사용하였다.

과정 1. Mask 구멍과 광섬유 다발 구멍이 일치하는 모터 스텝을 찾기에 앞서, 관측자의 눈과 휴대용 손전등을 이용하여 mask 구멍이 광섬유 다발 구멍과 일치되는 대략적인 위치를 찾았다.

과정 2. 관측자의 눈과 휴대용 손전등을 이용하여 구한 대략적인 위치를 중심으로 그 주위의 mask 모터 스텝에 대한 레이저 데이터를 수집하여 최종적으로 일치되는 스텝을 구하였다.

과정 1의 방법으로 측정할 때 연구자는 먼저 원격 제어를 이용하여 대략적인 위치로 mask를 이동시켰

다. 그리고, mask에 부착된 Velmex 모터를 1스텝씩 움직였다. 연구자의 눈으로 보아서 mask의 구멍과 광섬유 다발 구멍이 일치하는 대략적인 위치를 찾도록 시도하였다. 여기서 mask의 구멍과 광섬유 다발 구멍의 크기가 2mm 밖에 되지 않기 때문에 연구자의 눈으로 대략적으로 일치되는 스텝을 찾기가 힘들었다. mask 구멍에 휴대용 손전등의 빛을 조사하여 그 빛이 광섬유 다발의 구멍까지 비추는지를 확인할 수 있었다. 이 방법을 되풀이하여 대략적으로 일치하는 mask 모터의 스텝을 찾을 수 있었다.

대략적으로 일치하는 mask 모터의 스텝이 정해지면, 그 스텝을 기준으로 mask의 움직임을 10~20의 스텝만큼 늘이거나 줄여가면서 정확한 모터 스텝을 찾는 측정을 수행하였다. mask 모터의 정확한 스텝을 측정하는 동안 보정 시스템 중의 가변 필터는 움직이지 않았다. mask 모터를 이용하여 mask를 특정한 위치로 옮긴 후, 레이저 데이터를 얻었다. 본 연구에서 얻은 데이터 및 결과는 6장에서 소개되어진다. 그림 15는 mask의 움직임과 관측지점을 나타낸다.

6. 실험 결과

6.1 실험 데이터

Mask 구멍이 광섬유 다발의 구멍과 일치하는 모터 스텝을 찾기 위해서 레이저 보정 시스템을 운영하여 광섬유 다발의 ID 17번, ID 20번 광섬유에 대한 레이저 데이터를 얻었다. 여기서 ID 번호는 3장 그림 8의 광섬유 다발의 배열과 크기에서 각 구멍에 해당하는 숫자이다. 그리고, 레이저 데이터는 모터 위치를 스텝별로 변화시켜가면서 측정한 ADC의 count수를 나타낸다. 그림 16, 17은 ID 17번에 대한 레이저 데이터

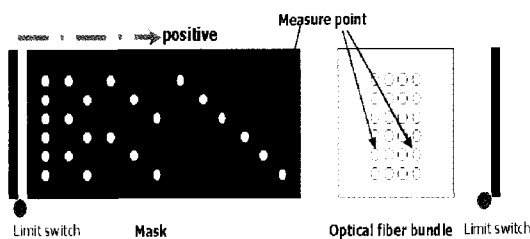


그림 15. Mask의 움직임과 관측지점.

를, 그림 18, 19는 ID 20번에 대한 레이저 데이터를 보여준다.

각각의 레이저 데이터들을 보면 각 ID 번호별로 2개의 레이저 데이터를 확인할 수가 있는데, 그 이유는 광섬유와 연결되어 있는 TOF 검출기들의 양 끝단에 PMT를 가지고 있기 때문이다. 즉, 각 TOF 검출기 한 개당 두 개의 PMT를 가지고 있다. 이런 이유로 각 ID에 해당되는 광섬유를 통한 레이저 신호는 왼쪽과 오른쪽의 2개의 데이터로 나뉘어져 받게 되어진다. 각각의 데이터가 6개의 그림을 보이는 이유는 광섬유 다발 구멍 한 개당 7개의 광섬유를 가지고 있기 때문이다. 그 중에서 6개의 광섬유는 1번부터 6번까지의 TOF 검출기와 연결되어 있고 나머지 하나는 spare 용으로 남아 있다. 즉, 레이저 데이터에서 섹터로 구분되어 있는 것이 바로 광섬유 다발 구멍 한 개당 연결되어 있는 TOF 검출기의 번호를 뜻하게 된다.

본 연구에서는 총 2개의 광섬유 다발 구멍에 대한 레이저 데이터를 가지고 mask 구멍과 광섬유 다발 구멍이 일치하는 mask의 모터 스텝을 찾는 연구를 수행하였다.

획득된 레이저 데이터는 일종의 정량화 되지 않은 데이터로, 그 안에 레이저의 입사 시간, 빛의 세기,

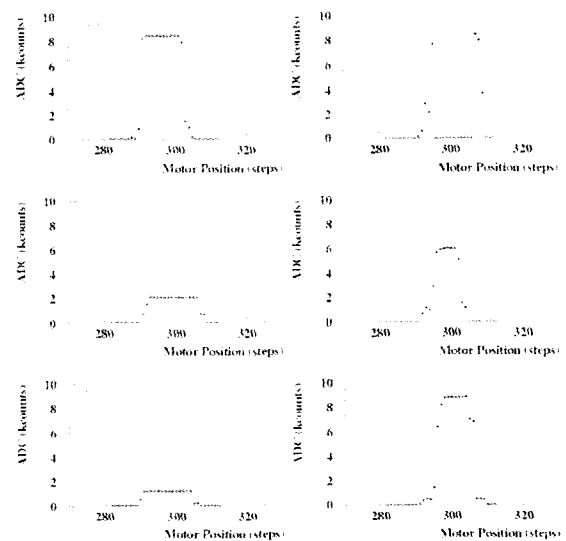


그림 16. ID 17 구멍을 통해 얻어진 레이저 데이터 (왼쪽 PMT).

ADC 및 TDC의 값과 같은 여러 정보가 담겨져 있다. 이러한 데이터를 연구과제에 필요한 데이터로 바꾸기 위해서는 데이터를 정량화 할 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구자는 Perl로 짜여진 프로그램을 이용하여 데이터의 정량화를 이루었다. 정량화된 데이터는 HBook 파일의 형태로 저장되어진다. 정량화된 데이터를 가지고 모터 스텝에 대한 ADC 값을 나타내기 위해서 PAW, PHYSICA와 같은 분석용 프로그램을 사용하였다.

그림 16과 17은 각각 ID 17번의 왼쪽, 오른쪽 PMT를 통해서 얻어진 레이저 데이터를 보여준다. 그림 16의 오른쪽 PMT에 의해 얻어진 레이저 데이터를 보면 섹터 2의 데이터가 거의 나오지 않은 것을 확인할 수 있는데, 이것은 광섬유 연결 상태의 문제로 인해 데이터가 제대로 획득되어지지 않은 것으로 유추할 수 있다.

그림 18과 19는 각각 ID 20번의 왼쪽과 오른쪽 PMT를 통해서 얻어진 레이저 데이터를 보여준다. 그림 18에서 섹터 5에 대한 레이저 데이터가 없는 것은 광섬유와 TOF 검출기의 연결이 끊어져 있음을 보여 준다.

6.2 결과

6장 1절의 레이저 데이터를 이용하여 그림 20과 같

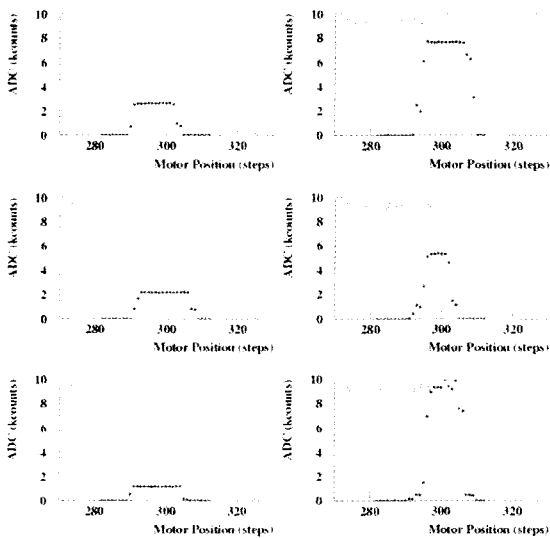


그림 17. ID 17 구멍을 통해 얻어진 레이저 데이터 (오른쪽 PMT).

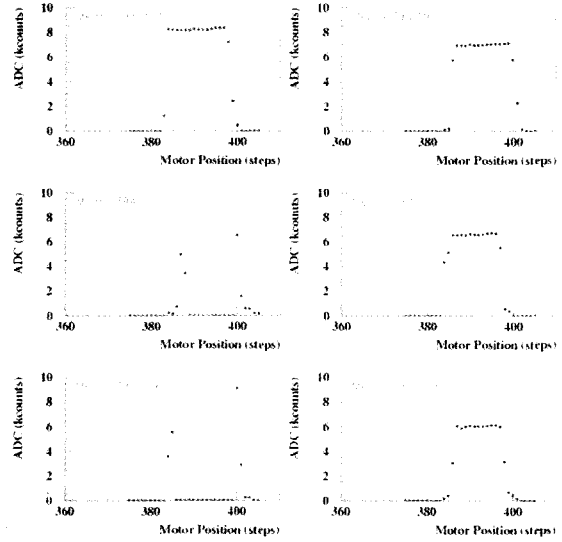


그림 18. ID 20 구멍을 통해 얻어진 레이저 데이터 (왼쪽 PMT).

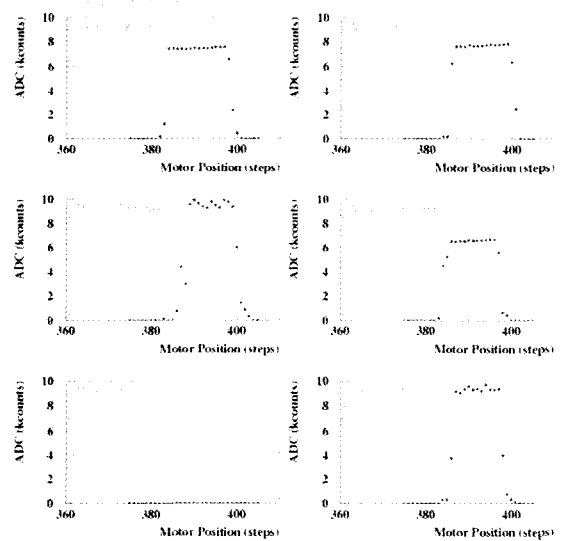


그림 19. ID 20 구멍을 통해 얻어진 레이저 데이터 (오른쪽 PMT).

은 결과를 얻었다. 그림 20을 보면 ID 17번에 대한 mask 모터의 정확한 스텝은 mask의 초기 위치에서 299 스텝만큼 떨어진 결과를 얻을 수 있었다. 또한, ID 20번에 대한 mask 모터의 정확한 스텝은 mask의 초기

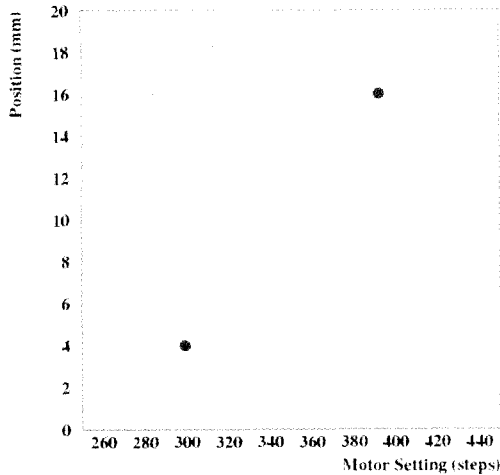


그림 20. ID 17번과 ID 20번 위치에 맞는 Mask 모터 스텝.

위치에서 392스텝이라는 결과를 얻을 수 있었다.

그림 20의 데이터를 이용하여 mask의 첫 번째 구멍이 광섬유 다발 구멍(ID : 21번)과 일치하는 mask 모터의 스텝을 찾을 수 있었다. 또한, 광섬유 다발 구멍 사이의 간격이 일정하기 때문에 광섬유 다발 구멍 사이의 모터 스텝만 알면 mask를 이용하여 레이저 빛을 각각의 광섬유 다발 구멍에 조사해주는 것이 가능하다.

만약 mask의 첫 번째 구멍이 광섬유 다발의 맨 아래 구멍의 첫 번째 구멍(ID : 21번)과 정확히 일치한 지점의 mask 모터 스텝을 X라하고, 광섬유 다발 구멍 사이의 간격을 mask의 모터 스텝으로 라고 정의하면, 식 (1), (2)와 같은 연립 방정식을 만들 수 있다. 그림 21은 mask와 광섬유다발 사이의 X, 간격을 보여준다.

$$X + 4 \Delta = 299 \quad (1)$$

$$X + 7 \Delta = 392 \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 이용하여 mask의 가장 오른쪽 편에 있는 구멍이 광섬유 다발의 맨 아래 구멍(ID : 21번)의 첫 번째 구멍과 정확히 일치한 지점의 mask 모터 스텝(X)은 175스텝, 광섬유 다발 구멍 사이의 간격에 대한 모터 스텝(Δ)은 31스텝이라는 결과를 얻을 수 있었다. 위의 결과를 가지고 mask의 대략적인 식 (3)

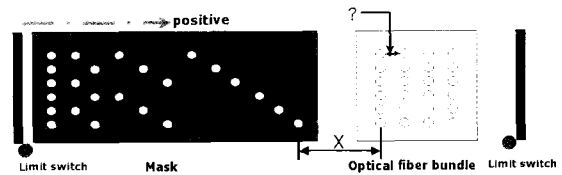


그림 21. mask와 광섬유다발 사이의 X, 스텝 위치.

과 같이 나타낼 수 있었다.

식 (3)은 실제 레이저 데이터가 아니라, 관측자가 휴대용 손전등으로 구한 데이터를 이용하여 mask의 위치를 나타내는 식이다.

$$P.F.C = -22mm + 0.12mm/step \times (step) \quad (3)$$

식 (4)는 실제 레이저 데이터를 통해 얻어진 결과를 가지고 데이터 분석을 통하여 구한 mask의 위치에 대한 식을 나타낸다.

$$P.F.C = -34.50mm + 0.1287mm/step \times (step) \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에서 P.F.C는 제퍼슨 연구소에 있는 TOF 레이저 보정 시스템 중 Forward Carriage에 있는 mask에 대한 위치(Mask Position of Forward Carriage)를 나타내고, step은 mask의 모터 스텝을 의미한다.

연구자의 눈으로 구한 mask 위치에 대한 식 (3)과 실제 레이저 데이터를 통하여 얻어진 결과를 이용하여 구한 mask 위치에 대한 식 (4)를 비교해 보면, X값의 경우 서로 일치하지 않고 많은 오차를 보이는 것을 알 수가 있다. 그 이유는 실제 레이저 데이터 분석을 통해서 얻어진 식 (4)의 경우, 확산경을 통해서 나온 레이저 빛의 크기가 커지게 되어 특정한 부분만을 비추지 않기 때문이다. 즉, 광섬유 다발의 구멍만 비추게 되는 것이 아니라, 광섬유 다발의 구멍주위도 비추게 되어 실제 레이저 데이터에는 주변의 데이터까지 포함되어진다. 이로 인해, 광섬유 다발 주위의 데이터를 포함한 레이저 데이터를 분석하면 X 값이 달라지는 것이다.

7. 결론

핵물리학의 기초 연구를 위해 설립된 제퍼슨 연구소의 Hall B 실험동에 설치되어진 TOF 레이저 보정 시스템은 모두 4개로 구성되어 있다. 이것은 TOF 검출기의 time-walk 효과의 보정 및 각 검출기의 cross-talk 효과를 조사하기 위해 제작되어 졌다. 현재 TOF 레이저 보정 시스템은 그 구성 요소 중 연속 가변 필터를 이용하여 레이저 빛의 강도를 조절하고 있지만, mask 구멍과 광섬유 다발 구멍 사이의 일치하는 정확한 mask 모터의 스텝을 알지 못하는 관계로 mask는 사용하지 못하고, 데이터의 보정을 수행해 오고 있었다. 본 연구에서는 mask 구멍과 광섬유 다발 구멍 사이의 서로 일치하는 mask 모터 스텝을 조사한 결과 mask의 위치까지 하나의 식으로 나타낼 수 있었다. 그 결과 앞으로는 mask의 위치를 나타내는 식을 이용한 TOF 레이저 보정 시스템의 전체적인 운영을 통하여 현재보다 더 효율적인 TOF 시스템의 보정을 할 수 있을 것이다. 즉, mask를 이용하여 각 검출기의 cross-talk 효과에 대한 조사 및 더 좋은 데이터의 보정을 기대할 수가 있을 것이다. TOF 레이저 보정 시스템에 대한 연구는 현재도 계속 진행되고 있으며, 이 보정 시스템을 이용한 실험은 계속 행해지고 있다.

참고 문헌

[1] E. S. Smith, et al., Nucl. Inst. and Meth. Vol. A432, p. 292, 1999.
 [2] 김정모, "CLAS TOF 검출기의 레이저 보정 및 원격제어 시스템", 경북대 석사논문, 2001.
 [3] William R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics periments", 318, Springer-Verlag, 1987.
 [4] E. S. Smith, et al., "Calibration of the CLAS TOF System", CLAS-NOTE-1999-011, August, 1999.
 [5] 이동훈, "CLAS 섬광검출기의 보정을 위한 레이저 제어 시스템 개발", 경북대 석사논문, 1998.
 [6] K. L. Giovanetti, et al., "Detailed report on the design and operation of the calibration for EC", CLAS-NOTE-99-006, June 3, 1999.
 [7] R. P. Myers, B. S. thesis, William & Mary, 1997,

(unpublished).

[8] "NF90 Series Stepping Motor Controller User's Guide", Velmex Inc.
 [9] "IP-Octal 232 User Manual", Green Spring Computers, 1993.
 [10] "XM Octal I/O User Manual", Green Spring Computer, 1993.
 [11] "Tornado User's Guide", WindRiver Systems, 1995.
 [12] Kiho Chu, et al., "Calibration of the mask of the TOF laser system", 2002, 경북대 석사논문 & CLAS, NOTE.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명 : 김 우 영

❖ 학력

- 1978년 서울대 물리학과 이학사
- 1986년 The Ohio State University 핵물리학 실험 이학박사

❖ 경력

- 1986년-1987년 미국 오하이오 주립대 강사 및 연구원
- 1997년-1992년 미국 뉴햄프셔대 연구원
- 1990년-1990년 러시아 두브나 핵물리 연구소 객원 연구원
- 1992년-1995년 미국 일리노이대 객원 조교수
- 1992년-1995년 미국 MIT 객원 과학자
- 1994년-1995년 재미한인 물리학회 핵물리 분과위원장
- 1995년-1996년 호서대 조교수
- 1996년-현재 경북대 물리학과 조교수, 부교수

성명 : 추 기 호

❖ 학력

- 1998년 경북대 물리학과 이학사
- 2003년 경북대 물리학과 이학석사

성명 : 박 기 준

❖ 학력

- 1998년 경북대 물리학과 이학사

❖ 경력

- 1998년-현재 경북대 물리학과 석·박사 통합과정