RENO 검출기

DOI: 10.3938/PhiT.19.055

김영덕·김우영·박강순

RENO Detector

Yeongduk KIM, Wooyoung KIM and Kangsoon PARK

The design criteria and construction details of RENO (Reactor Experiment for Neutrino Oscillation) detector is presented. Two identical detectors are installed inside the near and far tunnels at Yonggwang nuclear power plant. Each detector consists of 4 cylindrical layers, TARGET, Gamma Catcher, Buffer, and Veto. 354 PMTs with 25 cm diameter are installed at inner wall of Buffer tank, which will measure the faint lights from neutrino-proton interaction in the gadolinium loaded liquid scintillator inside the TARGET acrylic vessel.

검출 원리

원자로 중성미자 검출의 기본 원리는 역 베타 붕괴(inverse beta decay)이다. 독립된 입자로서의 중성자는 약 10분의 반감기로 베타 붕괴하는데 양성자, 전자, 그리고 반중성미자, 이렇게 3개의 입자가 방출된다. 이의 역 과정으로, 반중성미자가 양성자와 반응하여 양전자와 중성자가 되는 과정을 생각할 수 있는데, 이것이 역 베타 붕괴라고 불리는 과정이다. 이 반응을 이용하여 1956년 Reines와 Cowan이 처음으로 원자

Fig. 1. A schematic diagram showing the two signals from a neutrino interaction with the proton inside the liquid scintillator. positron energy is proportional to the incident neutrino energy, which enables the measurement of the neutrino energy event by event.

로 근처에 검출기를 설치하여 중성미자를 발견하였다.^[1] 저에너지의 반중성미자를 측정하는데, 이보다 쉽고, 깨끗한 반응은 없다. 그림 1에서 보듯이 양전자와 중성자가 동시에 발생하여, 양전자-전자 쌍소멸에 의하여 첫 번째 신호가 발생하고, 중성자는 생성 후 약 200마이크로초 정도 동안 양성자와의 충돌로 감속되어 에너지를 다 잃어버리고, 결국 주위의 양성자에 의해 포획된다. 이때 2.2 MeV의 감마선이 방출되어 두 번째 신호를 만들게 된다. 1 MeV는 한 전자가 백만 볼트의 전압으로 가속되었을 때 갖는 운동에너지이다. 양성자는 값싼 탄화수소 화합물로 되어 있는 액체섬광체에 충분히 있고, 짧은 시간 간격을 두고 두 개의 신호가 같은 장소에서 발생해야 한다는 조건까지 적용하게 되면, 빈도수가 훨씬 작은 중성미자에 의한 신호라도 우주선이나 다른 환경 방사능에 의한 신호와 잘 구별되어 측정하기가 비교적 쉽다. 최근에 다

저자약력

김영덕 교수는 미국 미시간 주립대학(East Lansing) 이학박사(1991)로서 인디애나대학, 일본고에너지물리연구소, 서울대학교 연구원을 거쳐 1998년부터 세종대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이다. 암흑물질 탐색, 중성미자 물리 등의 연구를 수행하고 있다. (ydkim@sejong.ac.kr)

김우영 교수는 미국 오하이오 주립대학교 이학박사(1986)로서 뉴햄프셔 대학, MIT의 연구과학자, 일리노이 대학의 연구교수를 거쳐 1996년부터 경북대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이다. 핵자의 스핀구조 연구, 편극 핵과 핵 및 검출기 개발 등을 수행하고 있다. (wooyoung@knu.ac.kr)

박강순 교수는 성균관대학교 이학박사(2005)로서 성균관대학교, 서울대학교 연구원을 거쳐 2009년부터 서경대학교 교양과정부 대우교수로 재직 중이다. RENO(Reactor Experiment for Neutrino Oscillation) 실험에 참여하여 중성미자 연구를 수행하고 있다. (heppark@gmail.com)

REFERENCES

- [1] C. L. Cowan *et al.*, Science **124**, 103 (1956).

Table 1. Components of RENO Detector: GdLS(Gadolinium Loaded Liquid Scintillator), LS(Liquid Scintillator), MO(Mineral Oil).

Component	Diameter (cm)	Height (cm)	Material	Mass (tons)
Target	275	315	GdLS	16.1
Gamma Catcher	394	434	LS	28.6
Buffer	539	579	MO	64.2
Veto	840	889	Water	355

른 중성미자간의 질량차를 정밀하게 측정할 수 있었던 일본의 KamLAND 실험그룹^[2]이 원자로 중성미자를 측정하는 과정에서 이 반응을 이용하였고, 프랑스의 Chooz 그룹^[3]이 측정할 때도 같은 반응을 이용하였다.

액체섬광체에 원소 중에서 열중성자의 흡수 단면적이 가장 높은 가돌리늄(Gd)을 약 0.1 % 정도 섞어 주면, 중성자가 흡수되기까지 걸리는 시간을 200 마이크로초에서 30 마이크로초까지 줄일 수 있고, 발생하는 에너지도 2.2 MeV에서 ~8 MeV로 증가되어서, 배경방사능과의 구별을 좀 더 쉽게 할 수 있다. 간단히 말해서 RENO 검출기는 가돌리늄을 첨가한 액체섬광체를 중성미자의 흡수체로 사용하고 PMT(Photomultiplier Tube, 광증배관)로 그 신호를 측정하는 검출기이다.

RENO 검출기의 구조

1. RENO 검출기의 설계 기준

RENO 실험은 동일한 검출기를 근거리와 원거리 두 곳에 위치시켜서, 두 검출기의 위치를 보정해 주었을 때 약 1% 정도의 중성미자 개수의 차이를 확인하고자 하는 것이다. 따라서 두 검출기의 검출효율의 차이에 대한 오차가 1 % 이하여야 한다. 또한 신호로 오인되는 배경방사능을 신호에서 빼주게 되는데, 이렇게 빼주는 배경방사능의 오차도 신호에 비하여 1% 이하로 해야 한다. 이 조건들을 만족시키기 위해서는 모든 점에서 근거리와 원거리에 설치되는 두 개의 검출기가 동일해야 한다.

그러나 검출기의 환경은 동일할 수 없다. 따라서 신호로 오인되는 배경방사능의 양도 다를 수밖에 없다. 깊이의 차이에서 오는 우주선의 밀도 차이 등은 동일하게 할 수 없는 요인들이기 때문이다. RENO 실험은 이들 가짜 신호의 양을 중성미자 신호의 양보다 훨씬 작게 함으로써 (< 2%) 그 보정의 오차를 1% 이하로 줄이고자 하였다. 비슷한 실험으로 이전에 행해진 Chooz 실험에 의하면, 주된 가짜 신호는 뮤온우주선에 의하여 암석에서 생성된 고에너지의 중성자이기 때문에,^[3] RENO 실험에서는 검출기의 가장 바깥을 1.5미터 두께의 초

Fig. 2. A schematic cross sectional view of the RENO detector. The outmost structure is VETO concrete container of 840 cm Dia × 889 cm height.

순수 물을 채워 허용한계까지 줄였다. 그리고 액체섬광체, 아크릴, 미네랄 오일, 스테인리스 탱크 등의 방사능을 측정하여 이들에 연유하는 가짜 신호의 빈도수도 고에너지 중성자에 의한 영향 이하가 되도록 설계에 반영하였다.

2. RENO 검출기의 구조 개요

그림 2에 RENO 검출기의 개략적인 구조를 도식적으로 나타내었다.^[4] 근거리와 원거리에 원통형의 구조를 가지는 동일한 검출기가 각각 한 개씩 설치되고, 각 검출기는 4개의 원통형 겹질 구조를 갖는다. 가장 안쪽에는 가돌리늄(Gd)이 함유된 액체섬광체가 차 있는 아크릴 원통이 위치하고(TARGET, 타겟), 이 액체섬광체를 다시 Gd가 함유되어 있지 않는 같은 액체섬광체로 둘러싸게 된다(Gamma Catcher, 감마캐처). 감마캐처도 아크릴 원통이며, 이들은 다시 스테인리스 스틸 원통 안에 위치하게 되는데, 이 스테인리스 스틸 원통(BUFFER, 버퍼)의 안쪽에는 중성미자에 의한 섬광신호를 측정하는 PMT가 각 검출기마다 354개씩 설치된다. 버퍼 안에는 미네랄 오일이라고 하는 투명한 기름이 차 있고, 액체섬광체와 아크릴, 그리고 미네랄 오일은 모두 비슷한 굴절률을 가지고 있어서

REFERENCES

- [2] K. Eguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **90**, 021802 (2003).
- [3] M. Apollonio *et al.*, Euro. Phys. J. C **27**, 331 (2003).
- [4] J. K. Ahn *et al.*, arXiv:1003.1391 (2010).

빛이 도중에 꺾이거나 소멸되지 않고 PMT까지 이르게 된다.

타겟과 감마캐처

타겟은 액체섬광체를 채우고 있는 원통형 구조의 아크릴이다. 두께는 2.5 cm이고, 타겟에 채워지는 액체섬광체의 질량은 약 16톤이다. 중성자가 가돌리늄에 흡수될 때 가돌리늄에서는 2 MeV 정도의 에너지를 갖는 4개 정도의 감마선이 방출되는데 (전체 ~ 8 MeV), 이 감마선이 액체섬광체에서 완전히 흡수되어 검출되기 위해서는 액체섬광체의 두께가 적어도 수십 cm 이상 되어야 한다. 중성미자가 타겟 원통의 아크릴 근처에서 흡수되었을 경우 중성자가 흡수되는 위치도 아크릴에서 멀지 않게 된다. 이 경우 타겟만 액체섬광체라면 타겟으로부터 빠져나간 감마선 때문에 시그널이 8 MeV보다 훨씬 낮아져서 중성미자 신호로 기록되지 않게 된다. 이를 보완하기 위하여 타겟 주위에 60 cm의 두께를 가지고 가돌리늄을 포함하지 않는 액체섬광체를 두어서 중성자 흡수에서 발생하는 감마선의 에너지를 전부 신호로 바꿀 수 있게 한다. 이 역할을 하는 검출기 요소가 감마캐처이다. 감마캐처는 3 cm의 두께를 갖는 아크릴 원통이고, 가돌리늄 없이 타겟의 액체섬광체와 동일한 액체섬광체가 채워진다.

버퍼

PMT는 그 내부가 진공이고, 파이프스라고도 불리는 보로 실리케이트라는 유리구로 되어 있다 (그림 3 참조). 이 유리는 온도에 따른 변화가 거의 없는 특징을 가지고 있는데, 우리의 재료가 되는 실리카 속에는 보통 우라늄, 토륨, 포타슘 등의 방사능을 가지는 원소가 포함되어 있다. PMT 내부에 있는 이들 방사능은 많은 수의 배경 신호를 만들어내서 우연히 중성미자 신호와 같은 가짜 신호(fake events)를 만들 수 있다. 이들 가짜 신호를 줄이기 위하여 저방사능의 유리를 사용한 PMT를 채택하였지만, 이들 PMT가 바로 감마캐처 내부에 있게 되면, 중성미자 신호의 빈도수와 비교하였을 때 무시할 수 없는 가짜 신호가 생성될 수 있다. 따라서 PMT는 빛을 내는 섬광체가 아닌 액체(Mineral Oil 같은) 속에 설치되어야 하고, 감마캐처는 PMT로부터 적어도 40 cm 정도의 간격만큼 떨어진 곳에 있어야 한다. 이와 같이 구성하여 시뮬레이션한 결과 가짜 신호의 빈도수가 현저히 줄어드는 것을 확인하였다.

비트

RENO의 근거리, 원거리 검출기는 산 쪽으로 터널을 뚫어서 가능한 지하 깊은 곳에 위치하도록 하였다. 이는 우주에서 날아오는 고에너지의 우주선들에 의해 만들어지는 많은 양의

Fig. 3. (Left) A picture of 10" Hamamatsu R7081 PMT with a PMT holder structure. (Right) A picture of PMT with a mu metal shielding structure.

뮤온 입자들이 암벽과 반응하여 그 에너지를 현저히 떨어뜨리거나 혹은 소멸되게 하기 위함이다. 따라서 지하 깊은 곳 검출기를 설치할 경우 우주선에 의한 가짜 신호들이 많이 줄어든다. 실제로 RENO 실험의 경우 원거리 검출기는 지하 200미터 정도에 위치하고 있다. 하지만 지하에 위치하고 있다고 해서 모든 가짜 신호들이 줄어드는 것만은 아니다. 암석의 우라늄, 토륨, 포타슘에서 발생하는 감마선과 우주선에 의해 만들어진 살아남은 뮤온과 중성자가 검출기 속으로 입사할 경우 역시 가짜 신호를 만들어 낼 수 있기 때문이다. 이러한 현상을 줄이기 위하여 버퍼 주위를 1.5 m 두께의 초순수 물로 차폐하였다. 이 물 속을 뮤온 우주선이 통과하게 되면 체렌코프 방사선(radiation)이 방출되게 되는데, 이를 PMT로 측정하면 언제 어느 곳을 뮤온이 지나갔는지 알 수 있고, 이에 연유한 가짜신호를 데이터에서 제거할 수 있다. 버퍼 외벽에서 1.5 m의 간격을 두고 콘크리트 구조물을 만들었고, 초순수 물이 이 콘크리트 원통 안에 채워지게 된다. 콘크리트 내벽에는 뮤온의 체렌코프 방사선을 측정하기 위하여 25 cm 직경의 PMT가 67개 설치되고, 뮤온의 측정효율을 높이기 위해서 빛을 반사하는 반사체(Tyvek)로 표면을 처리하였다 (그림 7 참조). 또한 물은 감마선을 차폐하는 기능은 좋지 않지만, 중성자를 차폐하는 능력은 뛰어나서, 1.5미터의 두께를 갖는 물이 가짜 신호의 빈도수를 충분히 낮출 수 있다는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

광센서와 신호처리

1. 광센서 - PMT

PMT는 RENO 검출기에서 가장 핵심적인 요소이다. 원자로 중성미자 검출기는 중성미자에 의하여 발생한 아주 약한 광신호를 측정할 수 있어야 한다. 빛은 광자라고 하는 알갱이로

Fig. 4. Single photoelectron spectra measured with a RENO 25 cm PMT and LED light source. The peak on right side is signals from single electrons generated by a photon incident to the PMT.

볼 수 있는데, 현실적으로 넓은 면적에서 광자 하나 하나를 측정할 수 있는 검출기는 PMT가 유일하다. 전 세계에서 가장 면적이 큰 PMT는 일본의 하마마츠 회사가 제작한 것으로 지름이 50 cm에 달하며, RENO 실험에 사용하는 PMT 역시 같은 회사에서 제작된 지름이 25 cm인 반구형의 모델명이 R7081이라는 제품이다 (그림 3 참조).

원자로 반증성미자는 에너지가 크지 않기 때문에 양성자와 상호작용할 때 방출되는 양전자에 의하여 액체섬광체에서 10 ns 동안 약 1만~10만 개의 광자가 발생한다. 방출된 광자들이 소멸하지 않고 모두 버퍼 안쪽 면에 설치되어 있는 PMT에 도달한다고 가정하면, 평균하여 PMT 한 개당 3~30개의 광자가 도달한다. 광자 한 개를 측정할 수 있는 양자효율이 약 20% 정도이고, 중간에 소멸하는 빛의 양을 생각하면, 실제로 PMT 한 개는 중성미자 신호를 내지 못하거나, 내더라도 광자 한 개~수 개에 해당하는 신호를 내게 된다. 중성미자 실험에서 광자 한 개를 측정할 수 있는 유일한 검출기인 PMT 설치가 필수불가결한 이유이다.

PMT의 유리면 안쪽에는 알칼리 1족의 얇은 금속막이 코팅되어 있어 입사하는 광자는 이 금속막에서 광전효과를 일으켜 전자를 방출하게 되고, 이 전자가 진공 중에서 거듭 가속되어 결국에는 측정이 가능한 큰 전기적 신호를 만들어 내게 된다 (그림 4 참조). PMT 내부에서 전자의 운동에너지는 크지 않기 때문에, 이러한 대구경의 PMT인 경우 지구자기장 정도의 자기장에 의해서도 전자의 경로가 영향을 받아 제대로 작동하지 않을 수 있다. 실제로 RENO PMT가 설치되는 지하에서 측정된 자기장의 세기는 PMT의 위치에 따라 지구자기장의 2~3배까지 높은 측정값을 보이는 곳이 있어서 PMT의 자기장 차폐가 필요하였다.

Fig. 5. Picture of the BUFFER stainless steel tank with PMTs installed. Two acrylic vessels are shown with two chimneys for source calibration.

자기장 세기에 따른 PMT에서의 광자측정효율을 측정·고려하여 자기장 차폐효과가 큰 0.3 mm 두께의 뮤메탈 금속판을 각 PMT 주위에 그림 3과 같이 둘러싸는 방법으로 자기장에 의한 광자측정효율의 감소율이 최대 15% 이하가 되도록 하였다. 그림 4에 RENO PMT로 얻은 단일광자에 대한 스펙트럼이 나타나 있다. 단일광자의 신호 크기를 PMT의 게인 (gain)이라고 하는데, 전기적 노이즈와 잘 구별되는 것을 볼 수 있고, 뮤메탈 차폐를 하지 않았을 경우, 자기장 방향이 가장 나쁜 쪽일 때 단일광자 스펙트럼은 노이즈와 구별되는 정도가 나빠지는 것을 알 수 있다.

PMT를 버퍼 탱크에 설치하기 전에 420 nm의 파장을 갖는 다이오드 레이저로 한 번에 10개씩, 각 PMT의 게인, dark current rate, 광자측정효율, 시간분해능 등을 측정하여, 작동하지 않거나 결과 값이 기준치에 미치지 못하는 PMT들은 설치과정에서 제외하였다 (그림 5).

2. 전자신호 처리

PMT에서 광자에 의한 신호를 발생하게 되면, 이들 신호의 크기와 신호 발생시간 등을 디지털화하여 데이터로 수집하는 전자 장비가 필요하다. 일본의 수퍼-K라고 하는 실험은 태양 중성미자와 대기 중성미자를 측정하여 중성미자가 질량이 있다는 사실을 처음 밝힌 것으로 유명한데, 최근에 이 그룹이 새로이 데이터 수집 장치를 개발하였고, RENO 실험에서는 이들 전자 장비를 채택하여 사용하고 있다. 이 전자 장비는 기본적으로 각 PMT에서 발생한 신호의 절대시간을 단일광자의 경우 0.3 ns의 정밀도로 기록하며 동시에 신호의 크기도 0.5광전자에서 1000광전자까지 기록할 수 있다. RENO 실험

Fig. 6. Calibration system for vertical loading of radioactive sources. One system has two loading system for both TARGET and Gamma Catcher chimneys.

의 경우 DAQ(data acquisition)의 최소에너지로 0.7 MeV에 해당하는 신호를 요구할 예정이다.

3. 보정 시스템

원자로 중성미자의 에너지는 최대 약 10 MeV에 이르고, 실제로 양성자에 흡수되는 중성미자의 에너지는 3-4 MeV인 것이 가장 많다. 전자 중성미자가 뮤온이나 타우 중성미자로 진동하는 정도는 원거리 검출기의 위치에서 중성미자의 에너지에 따라 달라진다. 또한 중성미자가 양성자와 상호작용할 때 양전자에 의한 첫 번째 신호의 크기는 최소 1.02 MeV이다. RENO 실험에서는 데이터 분석 후에 1.02 MeV의 최소 에너지를 요구하게 되는데, 이 조건이 근거리, 원거리 검출기에서 같은 조건이 되기 위해서는 에너지 보정(calibration)이 정확해야 한다. 양전자 신호의 에너지(또는 중성미자의 에너지)를 정확히 측정하기 위해서는 알고 있는 방사능 소스(Ge68-1.02 MeV, Co-60-2.5 MeV, Cs137-0.662 MeV)를 검출기 내부에 주입하여 각 방사능 소스가 만들어내는 신호의 크기에 이미 알고 있는 해당 에너지 값을 대응시키는 에너지 보정(energy calibration)이 우선되어야 한다. RENO 실험에서는 그림 2에 나타나 있듯이 외부로부터 타겟 아크릴 원통의 중심까지 이르는 원통이 하나가 있고, 또한 감마캐처 쪽에 접근할 수 있는 하나의 원통이 더 있다. 이 통로들을 이용하여 그림 6에 나타나 있는 시스템으로 방사능 소스를 수직 방향으로 주입할 수 있으며 이로서 에너지 보정이 이루어진다.

중성미자의 상호작용이 타겟의 중앙이 아닌 가장자리에서

Fig. 7. View of VETO container. 67 PMTs are installed on the inside wall of VETO concrete container. The surface of the wall was covered with Tyvek working as light reflector.

일어난 경우에는 약간 더 큰 크기의 신호가 예상된다. 이를 보정해 주기 위하여 검출기의 초기 테스트 과정에서 3차원적으로 소스를 위치시킬 수 있는 시스템을 보정 원통 안으로 넣어서 신호 크기의 3차원 위치에 따른 보정 인자를 구하게 된다. 또한 방사능 소스로 에너지 보정을 하는 것과는 별개로, PMT의 계인을 모니터링하고, PMT의 단일광자 스펙트럼을 얻기 위해서 검출기의 버퍼 내부 벽에 원하는 양의 빛을 PMT에 쬔어 줄 수 있는 레이저 보정 장치를 부착하였다. 파장이 420 nm인 레이저 빛이 다이오드 레이저에서 나오면 5개의 Multiplexer를 통하여 각각 다른 위치에서 2π의 입체각으로 빛을 발생하게 된다. 이 레이저 보정 장치는 PMT와 함께 항시적으로 검출기 내부에 존재하며, 주기적으로 시그널을 발생한다.

맺음말

2004년에 처음으로 한국에서의 원자로 중성미자 진동 실험을 논의하기 시작하고부터 6년여의 시간이 지나서, 이제 검출기의 완성을 눈앞에 두고 있다. 2004년 이전에도 한국의 핵, 입자 물리학자들은 외국에서의 중성미자 실험 연구에 참여해 왔으며, 이러한 경험을 바탕으로 국내 입자물리학 분야에서는 가장 큰 스케일의 검출기를 구축하는 프로젝트가 되었다. 국내 최초로 중성미자 검출기를 만들면서 제한된 예산과 인원으로 단기간에 완성하려고 하다 보니 여러 가지로 미흡한 점이 있다고 생각한다. 검출기의 완성과 성공적인 작동을 위해서 앞으로도 많은 일이 행해져야 하며, 본 연구가 추후 한국에서의 보다 발전된 중성미자 실험 연구에 밑거름이 될 것이라고 기대해 본다.