RENO 자료분석과 저속제어 및 모니터링 시스템

DOI: 10.3938/PhiT.19.057

김현수·박명렬·전은주

RENO Data Analysis and Slow Control & Monitoring System

Hyunsoo KIM, Myoung Youl PAC and Eun Ju JEON

The RENO Monte Carlo simulation studies provide valuable guidance to optimize and to determine various design parameters of the detector and develop the data analysis tools. During data taking, the quality of data will be monitored by the slow control & monitoring system. In this article, we describe development of data analysis and the slow control & monitoring system.

원자로에서 방출되는 중성미자

원자로의 핵 연료봉에서 핵종의 종류에 따라 핵 분열당 나오는 에너지의 세기가 알려져 있다. ^{235}U , ^{239}Pu , ^{238}U , ^{241}Pu 이 주된 핵종들이며 나머지 핵종은 0.1% 이하의 기여도를 보인다. 핵분열당 나오는 에너지와 원자력발전소의 총 열생산으로부터 핵분열 횟수와 그에 따른 중성미자 개수를 계산할 수 있게 된다. 우라늄의 경우, 핵분열 당 약 200 MeV의 에너지와 약 6개의 중성미자가 방출되므로, 1 GW의 열 생산 능력을 가진 원자로에서 방출되는 중성미자의 개수는 매초마다

저자약력

김현수 교수는 캐나다의 토론토 대학 이학박사(1999)로서 일리노이 대학교와 서울대학교의 연구조교수를 거쳐 2008년부터 전북대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이다. (hyunsoo.kim@chonbuk.ac.kr)

박명렬 교수는 전남대학교 이학박사(1992)로서 독일 전자싱크로트론 연구소(DESY)에서 전자-양성자 충돌 실험을 수행하였으며 일본 국립 고에너지 가속기 연구소(KEK)에서 중성미자 진동실험을 수행했다. 현재는 RENO 및 일본 양성자 가속기 복합연구센터(J-PARC)의 T2K 실험에 참여하고 있다. 현재 동신대학교에 재직 중이다. (pac@dsu.kr)

전은주 박사는 일본 종합연구대학원대학(綜合研究大學院大學) 이학박사(2003)로서 서울대학교 연구원을 거쳐 2008년부터 세종대학교 물리학과에서 초빙교수로 재직 중이다. RENO(Reactor Experiment for Neutrino Oscillation) 실험에 참여하여 중성미자 연구를 수행하고 있다. (ejjeon@sejong.ac.kr)

약 2×10^{20} 가 될 것이다. 영광 원자력 발전소는 6개의 원자로로 구성되어 있으며 각 원자로의 평균 열 생산 능력은 2.73 GW이다. 이처럼 원자력 발전소에서 나오는 막대한 양의 중성미자를 이용하여 원자로에 가까운 곳에 근거리 검출기를 설치하여 중성미자가 진동하기 전에 방출된 양을 정밀 측정하고 진동확률이 가장 큰 거리인 약 1.4 km 떨어진 거리에 동일한 원거리 검출기를 설치하여 진동 후의 양을 측정하여 두 검출기에서 측정된 개수와 스펙트럼을 비교함으로써 중성미자 진동현상을 관측하게 된다.

역베타 붕괴 과정

원자로에서 핵분열 반응에서 반전자 중성미자 ($\bar{\nu}_e$)가 생성되며, 검출기 내부에서 역베타 붕괴(inverse beta decay, $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$)의 과정을 통하여 양전자와 중성자를 내보낸다. 반전자 중성미자는 검출기를 채우고 있는 액체 섬광체의 양성자와 반응하여 양전자와 중성자를 발생하는데 양전자는 전자기 반응에 의하여 에너지를 잃고 마침내 전자와 만나 쌍소멸을 일으키며 각각 0.511 MeV의 에너지를 갖는 두 개의 감마선을 내게 된다. 중성자는 원자와의 충돌로 에너지를 잃고 대부분이 평균 30 μs 후 가돌리늄(Gd)에 포획되어 총 에너지가 약 8 MeV인 여러 개의 감마선을 방출한다.^[1,2] 이때 두 개의 감마선 신호를 일차신호(prompt signal)라 하고, 중성자포획에 의한 감마선 신호를 지연신호(delayed signal)라 하며 이 특성을 이용하여 역베타 붕괴 신호를 검출한다. 일차 신호에서 검출되는 에너지는 1.8 ~ 10 MeV 정도이며 반응을 일으킨 중성미자의 에너지에 거의 비례한다.

RENO 실험은 약 16톤의 액체 섬광체에서 반응하는 반전자 중성미자의 데이터를 이용하여 중성미자 진동변환 상수를 측정할 예정이다. 이는 검출기의 역베타 붕괴 신호 검출 효율을 고려할 때 1년 동안 근거리 검출기와 원거리 검출기에서

REFERENCES

- [1] C. H. Llewellyn Smith, Phys. Rep. **3**, 261 (1972).
- [2] P. Vogel and J. F. Beacom, Phys. Rev. D **60**, 053003 (1999).

각각 약 30만 개와 3만 개의 중성미자 신호를 관측할 수 있다.

사건의 재구성

역베타 붕괴를 통하여 생성된 입자들의 운동 에너지와 감마선의 에너지는 액체 섬광체에 의하여 광증배관(PMT: photomultiplier tube)이 검출하기 용이한 근자외선영역의 광자로 바뀐다. 이 광자들은 광증배관에 의하여 전기적인 신호로 바뀌어 데이터 수집 장치를 통하여 디지털화된 후 파일로 저장된다. 저장된 대용량의 신호 사건들 중에서 역베타 붕괴 현상과 부합하는 신호를 재구성하여 분석한다. 근거리 검출기와 원거리 검출기에서 재구성된 일차신호에서 얻어진 에너지 분포를 비교하여 중성미자 진동 변환 상수를 측정한다. 그러므로 정밀한 에너지의 측정은 매우 중요하다. 입자가 액체 섬광체에 에너지를 축적하여 그로부터 생성되는 근자외선 영역의 광자의 개수는 축적된 에너지의 크기에 비례한다. 하지만 검출기에서 실제로 검출되는 광자의 개수는 광자가 광증배관에 도달하기까지 거치는 매질에 의한 감쇄(attenuation)와 매질의 경계면에서 일어나는 반사 등의 효과로 인하여 검출기 내에서 사건이 일어난 지점의 위치의 함수가 된다. 그러므로 정확한 에너지의 측정을 위하여 정확한 광자의 개수뿐만 아니라 광자로부터 오는 시간을 측정하여 사건의 발생 위치(vertex)도 알아야 한다.

RENO의 사건 재구성은 두 개의 독립적인 방법을 이용하여 행해진다. 첫 번째는 가중치 방법(weighting method)으로 각 광증배관의 신호를 개개의 광증배관의 효율로 보정한 광전자 개수로 변환한 후 이를 질량 중심을 구하는 것과 같은 방법으로 사건 발생 위치를 계산한다. 가중치 방법은 계산이 간단하고 계산에서 실수가 발생할 가능성은 작지만 오차가 비교적 크고 에너지를 구하기 위해서는 별도의 위치에 따른 에너지 보정 함수가 필요하다. 이 때문에 최대공산법(maximum likelihood method)을 이용하여 좀 더 정밀한 사건 위치와 에너지를 동시에 계산한다. 최대공산법은 주어진 사건 발생 위치에 따라 각 광증배관에 도달할 것으로 예상되는 광자의 개수를 계산한 후, 이를 실제 측정된 광자의 개수와 비교하여 사건의 발생확률(likelihood)이 최대가 되는 사건 발생 위치와 사건 발생 위치에서 방출된 에너지를 얻는다. 최대공산법은 계산 전 변수들을 초기화시켜야 하는데 이는 위에서 언급한 가중치 방법에서 얻어낸 결과를 이용한다. 그림 1과 2는 최대공산법을 이용한 사건의 위치 및 에너지 분해능을 보여준다.

사건 신호를 재구성하기 위하여 여러 단계의 사건 추출 과

Fig. 1. The expected difference of the event vertex position calculated by the likelihood method and the true event vertex of a positron with a kinetic energy of 7 MeV.

Fig. 2. Energy resolution as a function of total energy (kinetic and pair annihilation) that positrons deposit in the liquid scintillator.

정들을 거치지만 효율이 완벽하지 않으며 또한 배경사건을 완전히 제거할 수 없다. 컴퓨터 시뮬레이션 연구는 이와 같이 신호사건 재구성을 위한 사건 추출과정들의 효율성과 배경사건을 정량적으로 이해하는 데 사용된다.

RENO 실험의 경우, 컴퓨터 시뮬레이션 연구를 통하여 사건 신호의 검출과정에 대한 효율성을 검사하였고, 그 결과를 표 1에 보였다. 근거리 검출기의 경우, 그 효율이 약 70%임을 알 수 있다.

중성자 배경사건의 정량적 이해

RENO 실험에서 주된 배경사건은 고 에너지의 우주선으로부터 발생하는 뮤온 입자들과 그에 의해서 부수적으로 생성되는 중성자들과 그리고 암석이나 검출기 내 존재하는 미량의 방사선 동위원소의 방사선 붕괴에 의한 감마선에 의한 것이

Table 1. Event selection efficiencies.

Cut	Efficiency(%)	
	CHOOZ	RENO
Positron energy	97.8±0.8	99.1±0.1
Positron-geode distance	99.9±0.1	—
Neutron capture	84.6±1.0	85.3±0.4
Capture energy containment	94.6±0.4	93.0±0.4
Neutron-geode distance	99.5±0.1	—
Neutron delay	93.7±0.4	95.0±0.0
Positron-neutron distance	98.4±0.3	—
Neutron multiplicity	97.4±0.5	—
Dead time	—	75.4(near) 95.8(far)
Total	69.8±1.5	56.3±0.5(near) 71.6±0.5(far)

Table 2. Summary of backgrounds for single hit events over 1 MeV and correlated neutrino-like events at both near and far detector.

	Near	Far
Gamma Single Rates (Hz)	~30	~30
$^8\text{He} + ^9\text{Li}$ (/day)	2.8	0.7
Correlated Neutron Backgrounds (/day)	3.0	1.0

다. 원자로에서 발생한 중성미자 사건을 오염시키는 이 배경 사건들을 줄이기 위하여 RENO 검출기는 산 아래의 지하에 위치하며 0.7 m 두께의 버퍼와 1.5 m 두께의 veto 층을 사용하고 있다. 배경사건의 비율을 정량적으로 이해하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션 연구를 통해 분석하였으며 그 결과는 표 2에 정리되어 있다.

RENO 실험의 경우, 배경사건의 비율을 0.5% 이하로 줄이고 실험의 계통오차를 약 1% 이내로 제어할 수 있다면 3년간 수집한 데이터를 이용하여 중성미자 변환상수를 $\sin^2 2\theta_{13} > 0.02$ 의 영역에서 90%의 신뢰도로 측정할 수 있을 것이다.

저속제어 및 모니터링 시스템

저속제어 및 모니터링 시스템(slow control and monitoring system)은 실험 결과에 영향을 주는 계통오차의 효과를 제어하고 광증배관 같은 기구에 걸리는 고전압 및 회로에 흐르는 전류와 같은 여러 매개변수들을 자동적으로 조사한다. 또한 이 시스템은 복잡한 실험 환경들을 진단하고 때때로 사용자에게 경고를 보내줄 수 있는 기능을 가지고 있어야 한다. RENO 실험에서는 광증배관의 시험과정에서 적정한 이득을 얻을 수 있도록 결정한 광증배관의 작동전압을 입력하고 감

Fig. 3. Schematic design of the slow control and monitor system for RENO.

시해야 한다. 또한 신호를 읽는 전자장비의 온도와 전류를 감시하는 것을 포함해야 하며 액체 섬광물질 및 물의 온도와 양, 그리고 인체에 유해한 기체들의 농도, 감시카메라 시스템 및 실험이 진행되고 있는 터널 내부의 환경을 감시할 수 있도록 하였다. 이 대부분의 기능은 National Instrument에서 제공하는 “DAQ chassis”와 “NI Developer Suite”를 통해 구현되었다. DAQ chassis를 통해 얻어진 다양한 데이터들은 SQL 및 PHP를 기반으로 하는 웹서버를 통해 사용자의 요구에 맞게 서비스되도록 구성하였다.

RENO 실험에서는 검출기가 가동될 때마다 검출기에 설치된 모든 광증배관에 대해 고전압이 동시에 입력되어야 하며, 실험이 진행되는 동안 광증배관의 출력특성의 변화를 감시할 수 있도록 하였다. 421개의 광증배관으로 이루어진 하나의 RENO 검출기는 CAEN SY1527 LC 전압공급기 2개를 이용하여 전압을 공급받는다. 전압공급기는 TCP/IP 프로토콜을 통해 각 광증배관의 전압을 제어할 수 있도록 설계되었으며 해당 정보를 외부에서 감시할 수 있도록 구성되어 있다. 서로 다른 프로토콜이나 라이브러리를 기반으로 하는 장치들과 프로그램들을 연결하기 위한 OPC(OLE for Process Control) 서버를 이용하면 전압공급기의 제어와 감시가 수월해진다. OPC 서버란 API(application program interface) 또는 프로토콜 변환기의 역할을 하는 서버로서 간단한 방법으로 사용자 인터페이스를 제공하기 때문에 프로그램의 작성이 수월해진다는 장점이 있다.

RENO 검출기의 표적은 액체 섬광물질로서 물질내의 양성자 개수가 중성미자의 반응을 연구하는데 중요하다. 따라서 액체 섬광물질의 밀도의 변화를 감시할 수 있어야 하며 데이터 분석 시 밀도의 변화에 따른 계통오차를 고려해 주어야 한다. RENO 검출기에는 백금-RTD(resistance temperature

Fig. 4. Displays of the various monitoring system based on a web browser. Upper left: PMT HV control and monitoring system. Upper right: temperature monitoring system. Lower left: Gas concentration monitoring system. Lower right: IR camera image of PMTs inside a detector.

detector)를 이용하여 검출기 내에 설치된 액체들의 온도를 감시하도록 하고 있다.

실험이 터널 내에서 이루어지기 때문에 실험터널의 거주환경과 관련하여 인체에 유해한 기체들의 농도를 지속적으로 감시해야 할 필요가 있다. 특히 Rn의 경우 Ra의 붕괴로부터 생성되며 반감기가 3.8일인 방사성 물질이다. Rn 기체는 인체에 지속적으로 흡입되는 경우 폐암을 일으키는 요인으로 확인되었기 때문에 미국의 경우, 4 pCi/L의 환경기준을 가지고 있으나 우리나라의 경우 아직 기준이 마련되어 있지 않다. RENO 터널에서는 평균 1.1 pCi/L의 Rn 농도가 측정되었으며, 미국 환경기준의 1/4 수준이었다. 현재 RENO 실험에서는 Rn 기체 이외에도 일산화탄소, 이산화탄소 및 산소의 적외선 흡수하는 정도를 이용하는 방식의 기체농도 검출기를 이용하고 있다.

터널과 검출기 내부의 상황을 감시하기 위하여 네트워크 카메라가 설치되어 있다. RENO 실험에 사용되는 네트워크 카메라는 상하 180°, 좌우 360°의 검색능력을 가지고 있으며, 광학적으로 10배의 확대 배율을 지원하는 720×480 (30 fps) 해상도를 갖는 고성능 카메라이다. 특히 검출기 내부에는 20 m의 oil proof 기능을 가지는 고해상도 적외선 카메라가 설치되어 있어 검출기 내부의 상황을 감시할 수 있도록 하였다.

Online event display는 ROOT를 기반으로 하며 광증배관

Fig. 5. Event display of a positron with a 7 MeV kinetic energy generated by Monte Carlo simulation. The size of the circle represents the size of the signal on PMTs and the color of the circle shows the signal arrival time. The smaller figure represent the veto detector.

을 원통 전개도와 같은 형식으로 배열하고 광증배관에 신호가 도달하는 시간을 색으로 나타내며 측정된 전하의 양을 원의 크기로 표현한다. Online event display는 검출기로부터 데이터 획득 시스템까지 가는 데이터 통로에서 별도의 소켓을 소프트웨어적으로 설치하고 event display에 필요한 정보를 우회시키도록 구성되어 있으며, RENO 검출기에서 중성미자 신호가 있을 때마다 주조정실의 모니터를 통해 보여줄 수 있도록 구성하였다.

나오는 글

RENO 실험에서 사용될 데이터 분석 시스템과 저속 제어 및 감시 시스템은 검출기가 최상의 상태로 작동되도록 하고 수집한 데이터를 실시간으로 확인하기 위한 장비이다. 실험이 진행되는 동안에도 RENO 실험을 성공적으로 수행하기 위하여 지속적으로 개선을 할 예정이다. 본 시스템을 준비하는 동안 얻어진 많은 경험들은 앞으로 국내에서 수행될 다양한 고에너지 물리 실험분야에 큰 기여를 할 것으로 기대하고 있다.