국내 최초의 중성미자 검출시설과 RENO 실험

DOI: 10.3938/PhiT.19.053

김 수 봉

The First Korean Neutrino Detector Facility and RENO Experiment

Soo-Bong KIM

The RENO(Reactor Experiment for Neutrino Oscillation) experiment is under construction to measure the value of the smallest and unknown neutrino mixing angle θ_{13} . The experiment will compare the measured fluxes of electron antineutrinos at two detectors located at 290 m and 1.4 km distances from the center of the Yonggwang nuclear reactors in Korea. The detectors are near completion, and data-taking is expected to start in early 2011. An estimated systematic uncertainty associated with the measurement is less than 0.6%, and an expected statistical error is about 0.3%. With three years of data, the experiment will search for the mixing angle values of $\sin^2 2\theta_{13}$ down to 0.02 in the 90% C. L. In this article, the history and status of RENO experiment are described.

국내 최초로 탄생하는 중성미자 검출시설

눈에 보이지 않지만 우주를 꽉 채우고 있는 중성미자의 성질을 밝혀내려는 쉽지 않은 이 경쟁에 우리도 과감히 뛰어 들었다. 중성미자는 우주 탄생 직후와 형성에 중요한 역할을 한 소립자 중의 하나이다. 그 중에서도 1998년 처음으로 발견된 중성미자 변환의 세기, 즉 변환상수가 그 실마리를 푸는 단서를 제공한다고 믿고 있다. 국내 10여 개 대학(경북대, 경상대, 동신대, 부산대, 서강정보대, 서경대, 서울대, 성균관대,

Fig. 1. Yonggwang nuclear power plant. It consists of six reactors, and produces the world-second largest thermal output of 16.4 GW.

세종대, 전남대, 전북대) 연구팀은 전남 영광원자력발전소 인근에 국내 최초의 ‘중성미자 변환상수 측정 장치’를 짓고 있다. 지난 6월 아테네에서 개최된 ‘중성미자 국제학회’와 7월 파리에서 개최된 ‘고에너지물리 국제학회’에서는 이 측정 장치와 향후 연구 결과에 주목하였다. 올 연말쯤 실험시설 설치가 완료되면 물리학적 최대 관심사 중의 하나인 미 측정된 변환상수 측정 연구를 본격화할 수 있을 예정이다.

표준모형을 뒤흔든 중성미자 변환

우주를 이루는 12개의 기본입자 중 3종류의 중성미자(전자 뉴트리노, 뮤온뉴트리노, 타우뉴트리노)는 매초마다 수백조 개가 우리 몸을 지나치면서도 아무런 상호작용을 하지 않는다. 우주가 탄생하면서 생겨난 중성미자는 우주 어디에나 퍼져 있으며, 현재도 태양의 핵융합이나 원자의 핵분열 등에서 만들어져 우주를 빛의 속도로 떠돌고 있다. 물질과 거의 반응하지 않아 측정하기가 너무 힘들고 이 입자의 성질을 알아내는 작업도 매우 어렵다. 그래서 오랫동안 실험 물리학자들을 골탕 먹였고, 입자물리의 표준모형이 틀렸음을 단적으로 드러낸 특별한 입자이기도 하다.

중성미자가 질량을 가지고 있는지 알아내는 것은 물리학계의 오랜 숙제였다. 입자물리학의 대표적인 이론인 표준모형은 중성미자가 질량이 없음을 전제로 만들어졌다. 표준모형은 우주와 물질의 근원이 되는 전자기력, 약력, 강력의 3가지 기본 힘을 함께 기술하면서 소립자의 존재와 상호작용을 설명해주는 이론이다.

1998년 일본 수퍼카미오칸데 실험에서 세 종류의 중성미자

저자약력

김수봉 교수는 미국 펜실베이니아대학(U. of Pennsylvania) 이학박사(1989)로서 미시간대에서 연구원으로 재직 중 톱쿼크를 발견하였으며 보스턴대학 연구조교수를 거쳐 1998년부터 서울대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이다. 수퍼카미오칸데 실험에서 중성미자 변환을 발견하였고 가속기 중성미자 빔으로 중성미자 변환상수를 측정하였다. 박사학위 연구로서 태양에서 방출되는 중성미자를 관측하던 중 1987년 초신성폭발의 중성미자를 관측하였다. (sbk@snu.ac.kr)

Fig. 2. Overall side view of RENO experimental setup. The near detector is under a 70 m hill whereas the far detector is located under a 200 m mountain.

들 사이에 서로 변환이 일어남을 발견하여 물리학계에 엄청난 파장을 일으켰다. 그 동안 이 입자의 질량을 측정하지 못했는데 중성미자 변환의 발견으로 적어도 질량이 있다는 사실을 확인하게 됨으로써 물리학에 지대한 영향을 미치게 되었기 때문이다. 중성미자가 변환하는 세기를 나타내는 세 가지의 변환상수 중 두 가지는 이미 측정되었으나 나머지 하나는 유독 작아 아직도 측정되지 않은 미지의 영역으로 남아있다.

미 측정된 중성미자 변환상수를 찾아서

이 마지막 변환상수를 측정하기 위해 2000년 초부터 일본은 약 2조원이나 드는 가속기를 건설하기 시작했다. 이 무렵 약 100여 명 중성미자 학자들이 모여 이 변환상수 측정을 위한 또 다른 묘안을 짜내고 있었다. 그 결론은 2004년 백서^[1]로 발간되었는데 이전에 원자로 부근에서 진행되었던 실험의 오차를 줄이기 위해 원전 가까운 곳에 근거리검출기를 하나 더 설치하면 가속기를 사용한 측정 효율만큼 된다는 놀라운 사실이었다.

이 백서의 결론을 접한 우리는 순간 우리에게 주어진 절호의 기회라는 사실을 알아챘다. 그 동안 우리나라 과학자들은 입자물리학의 여러 분야에서 괄목한 성과를 거뒀지만 관련 실험시설이 없어 남의 나라 연구에 더부살이를 할 수 밖에 없었다. 예를 들어, 노벨상은 실험시설을 보유한 국가의 과학자에게 돌아갈 뿐, 참여자에게는 아무런 영광이 돌아오지 않는다는 사실을 우리는 잘 알고 있었다. 짧은 시간 안에 타당성 조사를 마친 후 국제학회에 “한국이 이 변환상수 측정을 위한 실험을 추진하겠다”^[2]고 공표하였고 곧 이어 정부에 연구비 지원을 요청하였다. 이미 프랑스^[3]와 중국^[4]이 이 실험을 추진한지 3~4년이 지난 2006년 3월부터 교육과학기술부로부터 연구비 116억원을 받아 전남 영광원전 부근에 장비를 건설하기 시작했다.

순수 국내 기술로 설계, 제작되는 거대 검출장비

비록 프랑스, 중국의 경쟁 상대들보다 뒤늦게 뛰어 들었지만 세계 2번째로 중성미자 출력이 많은 영광원전과 주변의 산악지

Fig. 3. Layout of the RENO experimental site. Red dots and yellow dots represent reactors and detectors, respectively. Six reactors are equally spaced in a 1280 m span. The near and far detectors are 290 m and 1380 m away from the reactor array, respectively.

형에 터널을 뚫어 비교적 저렴하게 지하시설을 갖추 수 있다는 천혜의 조건은 우리가 더 나은 편이다. 꼬박 1년이 걸려 설득한 끝에 한국수력원자력(주)의 부지사용 허가를 얻어 내었다. 이를 위해 인근의 여러 환경 단체들을 이해시키고 지지를 얻어내어야만 했다. 터널 공사를 위한 군청의 인허가를 얻어내는데도 많은 노력과 시간이 필요했다. 더군다나 원전 안에 시설을 구축하는 데 필요한 원자력 시설 방호에 관련된 허가를 얻는데도 적잖은 시간이 걸렸다.

2006년 검출기 설계를 완료하였고, 2007년 지질조사와 터널 설계, 드디어 2008년 7월부터 터널 굴착 공사가 시작되어 그해 12월에 완공되었다. 2009년부터는 터널 속에 연구 부대 시설을 갖추기 시작했고 검출기 제작과 설치가 본격적으로 진행되었다.

부족한 연구비를 가지고 외국에서 추진 중인 실험에 경쟁력 있는 효율의 중성미자 검출기를 건설하는 것은 여간 어려운 일이 아니었다. 컴퓨터 모의시뮬(MC)을 바탕으로 약 1년간의 고민 끝에 그림 4와 같은 RENO 검출기의 설계가 완성되었다.

사실 중국의 Daya Bay 실험은 약 600억 원, 이미 원거리 터널이 존재한 프랑스의 Double-Chooz 실험은 약 350억 원이 지원되었으나 약 100억 원 남짓한 연구비로 비슷한 성능을 가진 검출설비를 구축할 수 있으리라 외국에서는 아무도 믿지 않았다. 심지어 국내 학자들도 그렇게 생각하였다. 하지만 이것이 가능했던 것은 효율적인 설계와 짧은 공사기간에 터널 공사를 마쳤고 검출기 제작 과정에 참여한 국내 중소기업의 헌신적 협조가 있었기 때문이었다. 특히, 시공회사의 우

Table 1. Planned reactor based neutrino oscillation experiments around the world. The detector distance represents the distance of the detector from the center of the reactor groups.

Experiments	Location	Thermal Power (GW)	Distances Near/Far (m)	Depth Near/Far (mwe)	Target Mass (tons)	Cost (US \$)
Double-CHOOZ	France	8.7	410/1050	115/300	10/10	~35M
RENO	Korea	17.3	290/1380	120/450	16/16	~10M
Daya Bay	China	11.6(17.4)	360(500)/1985(1613)	260/910	40×2/80	~60M

Fig. 4. A schematic view of RENO detector. A neutrino target of 16 ton LAB based liquid scintillator doped with 0.1% Gd is contained in a acrylic vessel, and surrounded by 30 ton unloaded liquid scintillator of gamma catcher and 65 ton non-scintillating buffer. There are 354 and 67 10-inch PMTs on buffer and veto vessel walls, respectively.

수한 기술과 작업자의 근면성에도 현지 암반의 강도가 매우 좋아 특별한 보강공사가 필요치 않아 제 시간에 터널공사를 마칠 수 있었다.

2008년에 검출기 제작에 앞서 약 1/10 정도로 축소된 검출기를 만들어 성능과 설계 및 제작 공정을 미리 검증하였다. 가능한 한 실제 검출기와 동일한 규격의 부품을 사용하여 현장에서 실제 검출기를 제작하기 전에 설계의 당위성, 성능의 검증, 제작 공정의 효율을 확인해보기 위함이었다. 특히, 이런 연구용 검출기를 만들어 본 적이 없는 우리의 중소기업에게는 본 검출기 제작에 필요한 기술 습득의 의미가 있었다. 외국과의 심각한 경쟁 관계에서 단 한 번의 축소형 검출기 제작으로 성공적인 검증과 본 검출기 제작에 대한 자신감을 얻을 수 있었다.

터널 공사가 완료된 후 검출기가 설치되는 수직터널이 완공되었고 2009년부터 전기, 통풍, 인터넷 등의 부대시설을 갖추면서 지하검출시설의 윤곽이 드러났다. 검출기 구조물이 2009년 중반에 설치되었고 버퍼 검출기의 스테인레스 스틸 구조물

Fig. 5. The entrance gate of a completed far detector tunnel. The underground laboratories are constructed with two horizontal tunnels, 100 m long for the near detector and 300 m long for the far detector.

Fig. 6. Picture of the mock-up detector with a volume of 1/10 relative to the RENO detector. 31 10-inch PMTs are mounted on the buffer vessel walls.

이 그해 11월에 완성되었다. 섬광액체(Liquid Scintillator)를 채울 대형 아크릴 통도 제작되기 시작하였다. 높이 4.4 m, 직경 4.0 m의 원통형 아크릴 감마캐처와 높이 3.2 m, 직경 2.8 m의 원통형 아크릴 타겟을 제작하는 것은 결코 쉬운 일이 아니었다. 아크릴의 두께가 2.5 cm와 3.0 cm 밖에 되지 않는 대형 구조물을 국내의 영세한 중소기업이 제작하기엔 벅찬 일이기도 하였지만 근거리와 원거리의 타겟 용적의 차이를 0.1% 이하로 만들고 확인하는 작업도 만만치 않았다.

2010년 6월, 대형 아크릴 구조물이 그림 7과 같이 설치되었다. 예상 공정기간보다 시간이 더 소요된 약 10개월에 걸친 힘든 작업이었다. 대형 검출장비를 국내 기술로 제작하는

Fig. 7. Picture taken after acrylic vessels are installed in the stainless steel buffer container.

Fig. 8. View of detector interior under PMT installation on the buffer vessel walls.

것이 얼마나 어려운가를 모두 실감하였다. 유일하게 국내 부품이 없는 광센서(PMT)는 일본 하마마추(Hammatsu) 회사에서 구입할 수밖에 없었다. 2006년 3월 연구비가 지원되기 시작할 때 100엔이 약 800원 정도였는데 그 이후 엔 환율이 급격히 상승하여 1400원 이상을 상회하면서 광센서 구입에 큰 어려움을 겪었다. 우여곡절 끝에 2010년 초부터 여러 차례로 나뉘어 광센서가 도착하였고, 2010년 6월부터 성능 검사를 한 후 8월부터 검출기에 설치하기 시작하였다.

RENO 실험의 내용과 예상 결과

현재 광센서가 설치가 마무리 단계에 있으며 데이터 수집 전자장치와 전원공급 장치가 설치되면 내년 초에 본격적으로 실험이 시작될 예정이고 약 3년간의 데이터가 모아지면 마지막 변환상수의 측정결과가 얻어지게 될 것으로 기대한다. 비록 프랑스와 중국보다 늦게 이 경쟁에 뛰어 들었지만 현재 상황대로라면 도리어 우리가 먼저 실험에 착수할 수 있으리라 기대된다.

RENO 실험은 원자로에서 가까운 위치와 먼 위치에 동일한 두 대의 검출기를 사용하여 중성미자가 다른 종류의 중성미자

로 바뀌면서 측정되는 양이 감소한 것을 찾아낸다. 우주선에 의한 배경사건을 줄이기 위해 검출기는 지하에 설치된다. 원자로에서 방출된 중성미자($\bar{\nu}_e$; 반전자중성미자)는 검출기 속의 섬광액체의 양성자에 의해 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ (역베타붕괴) 반응으로 관측된다. 이 반응에서 발생한 양전자는 주위의 전자와 쌍소멸하며 즉각적으로 감마선 신호를 내놓는다. 함께 발생한 중성자는 섬광액체에 용해시킨 Gd에 포획되어 평균 30 μ s 후에 약 8 MeV의 감마선을 내놓는다.

중성미자의 변환에 의해 감소된 양을 1% 이하까지 측정하기 위해 두 검출기는 가능한 서로 동일하게 만들어져 측정 오차가 서로 상쇄되도록 한다. 3년간의 데이터를 분석하게 되면 중성미자 변환상수(θ_{13})를 $\sin^2(2\theta_{13}) > 0.02$ 의 영역까지 측정하게 될 것이다. 이것은 이전 CHOOZ 실험 결과보다 약 10배가 개선된 것에 해당한다.

마지막 변환상수(θ_{13})의 측정은 가속기를 사용하여 CP 대칭성 깨짐 상수를 측정하려는 장기적 프로그램에 매우 중요한 역할을 한다. 만약 이 상수의 측정값이 충분히 큰 값으로 판명되면 가속기를 사용하는 중성미자 실험에서 새로운 판도를 열어놓게 될 것으로 기대된다.

RENO 실험 추진의 의미

한국 최초의 이 중성미자 검출장비는 그 동안 축적된 경험을 바탕으로 순수 국내 기술로 거대과학 장치를 설계에서부터 제작, 설치, 운영하는 것으로 큰 의의를 찾을 수 있다. 게다가 연구시설 구축비용 중 약 75%는 터널 공사비와 검출장비 제작비용으로 국내 건설회사와 장비 제작업체에 고스란히 지불되어 산업체로 환원된 셈이다. 이 중성미자 검출시설은 우리나라도 국내 과학 기술력에 걸맞는 거대 물리학 실험을 시작한다는 상징적 의미를 가지며 국내 연구진이 세계적 연구결과를 선점할 수 있는 계기를 마련했다고 본다. 먹고 살기에 바빠 돈 되는 연구에만 집중하던 우리가 기초연구에 116억 원을 투자한다는 것은 과거와 질적으로 달라진 연구개발 수준을 실감케 한다.

이를 계기로 그 동안 남이 이미 만들어 놓은 장비를 사다가 연구하는 추격형 연구에서 탈피하여 우리나라도 직접 장비를 개발하고 만들어 연구하는 개척형 연구에도 본격적인 투자가 이루어지길 기대해 본다.

REFERENCES

- [1] K. Anderson *et al.*, White paper, hep-ex/0402041 (2004).
- [2] J. K. Ahn *et al.*, RENO Proposal, hep-ex/1003.1391 (2010).
- [3] F. Ardellier *et al.*, Double Chooz Proposal, hep-ex/0606025 (2006).
- [4] X. Guo *et al.*, Daya Bay Proposal, hep-ex/0701029 (2007).