입자검출기의 의학물리에의 응용

DOI: 10.3938/PhiT.20.044

이 준 택

Application of Detectors in High-energy Physics to Medical Physics

June-Tak RHEE

Since the discovery of the X-ray by W. Röntgen (1895), detectors in physics experiments have shown new visions in medical diagnosis and in industrial development. The detectors, photo-multiplier tubes with some crystal scintillators, that are used in high-energy physics can also be adopted in positron emission tomography and gas electron multipliers.

원자핵 물리나 입자 물리학은 일상생활의 범주에서는 다루기 힘든 극히 작은 공간에 대한 연구이기도 하다. 작은 물체를 확대하여 보는 방법으로 현미경을 사용하였으나 그 공간 분해능은 가시광선의 파장(0.4~0.75 마이크로미터)을 넘지 못한다. 오늘날 의료용 초보 진단으로 사용하는 엑스선(X-ray)은 1895년 독일의 뢰트겐(W. Röntgen)에 의해 발견되었다(그림 1).

엑스선의 파장은 자외선보다 짧아서 그 영역은 약 50 나노미터($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)에서 0.01 나노미터에 이르고 그에 따르는 에너지 영역 또한 수 keV~수백 keV에 이른다. 그러므로 엑스선 회절 실험에 의하여 유전정보를 지닌 DNA 이중나선구조를 보게 된 것은 그 짧은 파장(큰 에너지) 때문이다. 엑스선으로도 탐사를 할 수 없는 원자핵은 엑스선보다 큰 에너지의 알파입자를 사용하여서 가능하였다(러더포드, 1909~1913). 잘 아는 바 핵보다 더 작은 극소의 입자들에 대한 연구를 위하여 더 큰 에너지의 우주선이나 입자가속장치를 사용하여 실험을 하면서 그 실험에 대한 검증 수단으로 검출장치(detectors)가 발전하여 왔다. 그러한 검출장치들은 가이거계수

저자약력

이준택 교수는 독일 마르부르크대학(Philipp-Universität Marburg)에서 1991년에 CERN SPS(Super Proton Synchrotron)에서 실시한 중이온(Heavy Ion) 실험으로 박사학위(Dr. rer. Nat.)를 취득하였다. 1992년 이후 건국대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이다. CERN, Fermilab, KEK 등에서 중이온, 타우렐론, 하이퍼론 등에 관한 국제 공동연구를 하고 있다. (jtthree@konkuk.ac.kr)

First medical X-ray by Wilhelm Röntgen of his wife Anna Bertha Ludwig's hand - 18951222.jpg

Fig. 1. First medical X-ray by Wilhelm Röntgen of his wife.

기(Geiger counter, 1913)에서부터 핵건판(nuclear emulsion plate), 기포함(bubble chamber), 샤팍(G. Charpack)의 다중선계수기(multiwire chambers), 형광결정체를 동반한 광증배관(PMT, Photo Multiplier Tube), 저항판검출장치(RPC, Resistive Plate Chamber), 기체전자증폭장치(GEM, Gas Electron Multiplier)와 그러한 장치들의 집합체 등 실로 다양하다. 직접 고 에너지 충돌에 의해 발생된 입자들의 비적을 보거나 혹은 그 입자들이 지나가는 경로에서 떨어져 나가는 전자들의 증폭되어진 신호 혹은 입자들의 이동에 의해 발생한 전자기파의 신호를 전자기적인 신호로 변환하여서 그에 대한 정보를 얻기도 한다.

선사시대부터 오늘날에 이르기까지, 알타미라 동굴의 벽화에서부터 르네상스 그리고 근대 회화 및 의학에 이르도록, 인류는 보여지는 대상들의 그림을 포함 사람의 외면적 모습과 직접 수술을 해서 알아낸 인체 내부의 해부학적인 정보도 그

Fig. 2. PMT(Photo Multiplier Tube) with Scintillator.

림으로 남겨 놓았다(Andreas Vesalius,^[1] 1514-1564). 그러나 인체 내부에 대한 정보는 단지 칼을 대어서 획득하던 방법이었다. 그러나 엑스선의 발견으로 인류는 외과적인 수술을 거치지 않고서 인체 내부에 대한 정보획득(진단)이 가능하였고 초음파(ultrasonic), MRI, X-ray CT, SPECT, PET 등 다양한 수단이 발전하게 된 것이다. 대부분의 진단방법들은 이미 잘 알려진 바 있으니 여기서는 물리실험장치(PMT)와 PET(Positron Emission Tomography)에 대한 연관된 내용과 그 원리를 알아보려고 한다.^[1]

광증배관(PMT)과 PET(Positron Emission Tomography)

광증배관(PMT)은 특정한 목적으로 제작된 유리관으로, 약한 빛(또는 photons) 신호를 전자로 변환시키고 증폭시켜서 그 신호를 검출할 수 있도록 만든 장치이다. 그 전형적인 구조는 진공상태($10^{-6} \sim 10^{-5}$ Pa)에서 광캐토드(photocathode)와 이차전자를 증폭시키는 다이노드들(dynodes)로 되어 있다(그림 2). 전자 하나가 갖는 전하는 극히 작아서(1.6×10^{-19} C) 증폭 과정을 거쳐야($10^5 \sim 10^6$ 배) 비로소 검출 가능한 펄스를 보이게 된다. 특히 섬광체(scintillator)와 결합된 장치는 일본의 카미오카 실험(Super-Kamiokande), AMANDA(Antarctic Muon And Neutrino Detector Array), IceCube 실험 등 중성미자(neutrino)와 같은 소립자들을 검출하는 데 사용하기도 하고, 감마선(gamma-ray) 검출에도 사용한다.

이와 같은 광증배관의 또 다른 응용으로 진단장치가 개발되었는데 양전자의 방출로 인하여 나오는 감마선을 검출하는 장치가 핵의학 영상장치인 PET이다. PET의 기본원리는 다음과 같다.

우선, 외부로부터 엑스선과 같은 방사선을 사람의 신체에 통과시킴으로써 인해서 의료영상을 얻는 장치로 엑스선 혹은

1) Andreas Vesalius(1514. 12. 31, Brussel - 1564. 10. 15, Zakynthos): 르네상스 시대의 의사로 근대 해부학의 창시자.

Fig. 3. Positron decay and pair-annihilation.^[2]

Photon Detector

- Photo Multiplier
- High amplification: 10^6 (1 photon to 10^6 electrons)
- Fast, robust, sensitive

Fig. 4. Structure of Photon Detector.^[2]

엑스선 CT가 있다면 PET은 몸 안으로 주입한 방사선동위원소(예, ^{18}F)의 붕괴에서 방출되는 양전자(positron, e^+)가 전자와 만나서 쌍소멸(pair-annihilation)하는 과정에서 나오는 한 쌍의 감마선에 의해 의료영상 정보를 얻는 것이다(그림 3, 4).

양전자 붕괴를 하는 ^{18}F 은 통상 가속장치(proton cyclotron)에 의하여 생산된다. ^{18}O 을 양성자로 때리면 ^{18}F 과 중성자가 나오게 되고(그림 5), 이 ^{18}F 은 ^{18}FDG (Fluor Deoxy Glucose)의 형태로 촬영 전에 몸 안에 투입이 된다. 이 ^{18}F 은 몸 안에서 민감한(예, 암세포가 모여있는) 부위에 축적이 되고 이때 ^{18}F 은 양전자 붕괴를 하게 되고, 뒤이어 두 개의 감마선($E = 0.511$ MeV 혹은 511 keV)이 방출된다. 180도 방향으로 방출된 두 감마선은 PMT로 가고, 그와 같은 과정을 통하여 모여진 전기적인 신호들은 컴퓨터에 의하여 재구성되어 영상

REFERENCES

- Michael E. Phelps, *PET, Molecular Imaging and Its Biological Applications* (New York, Springer-Verlag, 2004).
- C. Burger, Technical PET, Colloquium at Universitätsspital Zürich (2008).

Table 1. Comparison of Imaging Methods.^[3]

Method	Spatial resolution	Temporal resolution	function* mol. Imaging	contrast media concentration (mol/kg BW)
Sono	+++ ≥ 2 mm	+++++ ≥ 10 ms	++	10^{-3}
CT	+++++ ≥ 0.3 mm	+++ ≥ 300 ms	+	10^{-3}
Nuc Med	+ ≥ 10 mm	+ ≥ 5 s	+++++	10^{-9} – 10^{-12}
PET	++ ≥ 5 mm	+ ≥ 5 s	+++++	10^{-9} – 10^{-12}
MRI	++++ ≥ 0.8 mm	++++ ≥ 5 ms	+++	10^{-5}
MRS	+ ≥ 10 mm	+ ≥ 60 s	+++++	10^{-5}

(MRS: Magnetic Resonance Spectroscopy)

MRI: high concentration – low affinity receptors

NUC/PET: low concentration – high affinity receptors

Fig. 5. Production of ^{18}F by proton irradiation of ^{18}O .^[2]정보로 전환이 된다.^[2]

이러한 PET 장치를 다른 의료영상 진단장치와 비교하여 볼 필요가 있다(표 1). 공간분해능과 검사에 소요되는 시간적 측면이 다소 다른 장치에 비해서 뒤지나 기능적인 면과 정상적인 조직에 비해서 문제가 있는 부분에 대한 콘트라스트는 가장 탁월하다. 즉, 암의 초기진단 혹은 치료 후의 점검에 대한 기능은 제일 앞선다고 보겠다.

PET의 현황과 전망

질병에 대한 탁월한 진단 능력이 있음에도 불구하고 해부학적인 정밀도가 뒤지기 때문에 현재로는 CT와 PET의 결합된 영상정보 혹은 MRI와 융합한 영상정보를 얻고자 하는 시도가 대세이다. 또한 PET 자체의 완성도를 높이기 위한 시도로서 규모를 작게 만든 PET(small animal PET)처럼 상대적으로 저렴한 장치를 이용, 생쥐 같은 작은 포유류에 대한 뇌의 영상 등을 살아있는 상태(in vivo)로 실험, 보다 정교한 해부학적인 위치정보를 구할 수 있다고 한다. 기존의 공간정밀도 5 mm에 비해 약 1 mm 재구성한 공간 분해능(reconstructed spatial resolution)을 획득하였다 한다. 더 나아가

GE Advance

BGO-Crystals Square photo multipliers (2x2), coupled to several crystals

Fig. 6. PET Block Detector.

서 현재 PET scanner에 사용이 되는 검출장치는 결정섬광체를 접합한 PMT, PET block detector(그림 6)로 그 가격이 결코 싸다고 볼 수 없다.

현재, 양전자의 쌍소멸에 의해서 발생한 광신호(photon signal) 검출을 하는 검출기 부분에 대한 연구는 다중선비례검출기(MWPC, Multi Wire Proportional Chamber) 외에도 GEM, RPC 등 다양한 노력이 시도되고 있다. 실로, 경제적이면서도 효율적인 의료영상 장치에 대한 물리학자들의 관심은 평균수명이 길어지는 추세의 인류에 대한 커다란 기여가 될 것이다.^[4-7]

REFERENCES

- [3] G. K. von Schulthess, *One Century of Medical Imaging an Overview*, Workshop on Physics Medicine at CERN (2002).
- [4] A. Blanco, et al., *Resolution studies on a small animal RPC-PET prototype* (2005).
- [5] F. Sauli, Gas Electron Multiplier - General, <http://gdd.web.cern.ch/GDD/>.
- [6] G. Croci, et al., *Depth of Interaction in GEM-based multi-pplier PET detector* (2008).
- [7] P. Beltrame, *Demonstration of an Axial PET concept for Brain and Small Animal Imaging* (2010).