상대론적 중이온 충돌실험을 위한 검출기 개발

DOI: 10.3938/PhiT.19.006

권영일·김영진·유인권·홍병식

Development of the Detector for Relativistic Heavy-Ion-Collision Experiments

Youngil KWON, Young-Jin KIM, In-Kwon YOO and Byungsik HONG

The Korean relativistic heavy-ion-collision experiment-
alists are actively working on not only the data analy-
sis, but also the development of relevant detectors. We
have developed various detectors for the LHC experi-
ments at CERN, the RHIC experiments at BNL, and
the SIS experiments at GSI/FAIR. For some detector
components, we completed the mass production in
Korea, and finished the installation. As examples, we
introduce the tungsten-silicon calorimeter and the re-
sistive plate chambers for the PHENIX collaboration
and the ring imaging Cherenkov detector for the CBM
collaboration in this article.

들어가는 글

우리나라의 상대론적 중이온 충돌실험 연구원들은 데이터
분석이나 전산모사와 같은 소프트웨어적인 연구뿐만 아니라
입자검출기의 연구 개발도 활발하게 진행하고 있다. 특히 지
금까지 유럽핵입자물리연구소(CERN)의 대형 강입자 충돌가

저자약력

권영일 교수는 미국 뉴욕주립대학(Stony Brook) 이학박사(1997)로서 테네
시 주립대 연구교수를 거쳐 2006년부터 연세대학교 물리학과에서 교수
로 재직 중이다. (ykwon@yonsei.ac.kr)

김영진 박사는 고려대학교 이학박사(2004)로써 독일 다름슈타트 소재 중
이온 연구소(GSI)의 박사후 연구원을 거쳐 현재 미국 일리노이 주립대
(Urbana-Champaign)의 방문연구교수로 재직 중이다. 상대론적 중이온 충
돌실험, 편극 양성자 충돌실험을 이용한 양성자 스핀구조 분석, 관련 검출
기 개발연구를 수행하고 있다. (yjkim97@illinois.edu)

유인권 교수 약력은 21쪽 참조.

홍병식 교수 약력은 26쪽 참조.

Fig. 1. Simulation result for the electron-photon cascade as the 50-GeV electron, represented by red line, enters the PHENIX tungsten(black)-silicon(purple) calorimeter from left.

속기(LHC) 실험, 미국 브룩헤븐 국립연구소(BNL)의 상대론적
중이온 충돌가속기(RHIC) 실험, 독일 중이온 연구소(GSI) 및
반양성자-이온연구단지(FAIR)의 중이온가속기(SIS) 실험 등에
사용되는 다양한 입자검출기를 개발해 왔으며, 몇몇 검출기의
경우는 국내에서 대량생산하여 해외 가속기 연구소에 설치까
지 완료하였다. 이 글에는 이들 중 대표적인 사례로 PHENIX
텅스텐-실리콘 에너지 검출기 및 저항판 검출기, CBM 원모
양 체렌코프 검출기를 소개한다.

PHENIX 텅스텐-실리콘 에너지 검출기

고에너지의 광자가 물질에 입사하면 쌍생성을 통하여 진행
방향으로 이차 전자들을 생성시키고, 높은 에너지의 전자가
물질에 입사하면 제동복사를 통하여 이차광자를 만든다. 복사
길이(radiation length; X_0)란 입사 전자의 에너지가 복사에
의해 $1/e$ 로 줄어드는 거리이며, 입사 광자가 쌍생성을 하는
평균 거리의 $7/9$ 이기도 하다. 광자 또는 전자가 복사길이의
20배 정도에 해당하는 두꺼운 물질에 입사하는 경우, 동일한
과정이 반복되어 그림 1과 같이 입사 입자의 방향으로 다량의
전자와 광자로 구성된 폭포(cascade)를 만들게 된다. 텅스텐은
3.5 mm 정도의 작은 복사거리를 갖고 있으므로 고에너지 입
사 광자 등이 만드는 폭포를 작은 두께로 조밀하게 담아낼 수
있다. 이러한 이점 때문에 현재 PHENIX 실험에서는 FOCAL
(FOrward CALorimeter)이라고 명명한 텅스텐-실리콘 에너지
검출기의 연구 개발을 진행하는 중이고, LHC의 ALICE 실험

Fig. 2. Schematic side view of the PHENIX detector. The tungsten-silicon detectors (FOCAL) and the resistive plate chambers (RPC), which will be introduced in the next section, are added.^[1]

도 유사한 개념의 검출기 개발을 고려하는 중이다. 그림 2는 PHENIX 검출기 시스템 내부에서 FOCAL 검출기의 위치를 보여준다.

텅스텐-실리콘 에너지 검출기는 2 ~ 3 mm 두께의 텅스텐을 입자가 진행하는 방향으로 20 ~ 30층 정도 쌓고 각 층 사이에 300 ~ 500 μm 의 얇은 실리콘 검출기가 삽입되어 있다. 텅스텐 층은 전자-광자 폭포를 조밀하게 담고, 실리콘 검출기는 각 층을 지나가는 하전 입자들의 수직단면적 분포와 개수를 측정한다. 이러한 조합은 많은 수의 배경 입자들이 발생하는 고에너지 중이온 충돌에서 단일 광자나 π^0 입자의 붕괴에서 나오는 광자 쌍을 재구성하는 데 효과적이다. 따라서 PHENIX에서는 FOCAL이 완성될 경우 양성자의 스핀 및 쿼크-글루온 플라즈마 신호 탐색을 위한 광자 및 강입자 측정능력이 크게 향상될 것으로 기대하고 있다.

FOCAL의 실리콘 검출기는 실리콘 웨이퍼에 CMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor) 기술을 사용하여 줄(strip)이나 조각(pixel)과 같은 특정 모양을 갖는 다이오드들을 그림 3과 같이 규칙적으로 배열하여 만든다. 필요한 공간 분해능에 따라 개별 다이오드의 모양과 크기를 결정하는데, 최소 단위는 수 μm 정도이다. 고에너지 하전 입자용 실리콘 검출기는 5 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ 이상의 비저항을 갖는 순수한 웨이퍼를 사용하며, 앞면과 뒷면에 3족 및 5족 원소를 얇게 주입하여 핀(P-I-N) 형태로 제작한다. 완성된 다이오드를 동작 시킬 때는 100 ~ 200 V의 역방향 바이어스를 가한다. 이를 통해 웨이퍼 내부에 강한 전기장과 캐리어를 완전히 제거시킨 완전공핍(full depletion) 상태를 만든다.

300 μm 두께의 실리콘 결정을 투과하는 개개의 하전 입자

Fig. 3. Silicon detector packed and manufactured in Korea. The overall size is $6\times 6\text{ cm}^2$, and it is composed of 16 pads.

들은 이온화 과정을 통해 궤적 주변에 3.5 fC 정도의 전하를 만든다. 공핍 영역에서 발생한 전자들은 강한 전기장에 의하여 전극으로 빠르게 이동하며 수 ns의 폭을 갖는 전류 펄스를 형성한다. 이때 예상되는 펄스의 크기, 센서 다이오드의 충전 용량, 필요한 출력 신호 등을 고려하여 잡음을 최적화한 사전 증폭기를 제작해야 한다. 사전 증폭기를 사용하여 전류 펄스를 증폭된 전압 신호로 바꾼 뒤, 아날로그-디지털 변환기(ADC)를 사용하여 디지털 신호로 변환시켜 컴퓨터에 저장한다. 그런데 입사하는 입자의 에너지에 따라 전자-광자 폭포의 크기가 변하므로 텅스텐-실리콘 에너지 검출기에 사용되는 아날로그-디지털 변환기의 채널들은 넓은 동작 영역을 보유해야 한다.

PHENIX의 FOCAL 검출기 개발에는 우리나라에서 고려대, 명지대, 연세대, 이화여대, 전북대 (이상 가나다 순) 그룹이 실리콘 검출기 및 읽기체제와 관련하여 주도적인 연구를 수행하고

REFERENCES

- [1] B. Hong, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **602**, 644 (2009).

있다. 실리콘 검출기는 텅스텐-실리콘 에너지 검출기의 핵심으로써 반도체 기술이 앞선 우리나라가 커다란 기여를 할 수 있는 분야이다. 반면에 현실적으로 20 ~ 30층에 해당하는 많은 양의 실리콘 검출기 제작에 큰 비용이 소요되는 어려움도 있다.

현재 PHENIX의 FOCAL 검출기 개발은 국제 공동 연구를 통하여 진행되고 있다. 실리콘 검출기의 제작은 설계, 마스크 제작, CMOS 공정, 검출기 포장(packaging), 사전 증폭기 설계 및 제작, 검증 등의 단계를 거치며, 각 단계마다 엄격한 중간 검증 절차가 필요하다. 이를 위해 FOCAL 실리콘 검출기의 기본 설계는 BNL 연구소 등의 공동 연구자들이 제시하였고, 사전 증폭기는 국내의 연구자들이 함께 개발하는 중이다. 그리고 실리콘 검출기의 실제 제작은 우리나라 연구진에 의해 이루어지고 있으며, 다채널 아날로그-디지털 변환기에 대한 개발도 국내의 공동 연구로 추진되고 있다. 이러한 국제 공동 개발이 성공할 경우, 큰 규모의 실리콘 검출기 제작 체계를 국내에 모두 갖추게 된다. 이는 앞으로 우리나라에 건설 예정인 중이온 가속기 등 대형 연구시설에서 수행될 여러 실험에도 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

한편 기초과학을 위한 실리콘 검출기 개발은 우리나라의 경제발전에도 많은 기여를 할 것으로 보인다. 현재 반도체 검출기 시장과 가격은 유명한 기술 상표를 보유하고 있는 일본 등 선진국의 기업들이 주도하고 있다. 그러나 국내의 CMOS 기술력이 세계 최고라는 점에 주목할 필요가 있다. 현재 우리나라 기업들이 세계의 메모리 반도체 시장을 이끌고 있으며, 우리 정부가 전자통신연구원, 국가 나노종합팹센터, 나노소자 특화팹센터 등 이 분야의 연구 기반 시설을 직접 운영하고 있다. 이러한 기반 시설을 적극 활용한다면 텅스텐-실리콘 검출기의 고비용 문제를 효과적으로 해결하여 학문적인 기여를 하는 동시에 반도체 검출기와 관련된 기술 브랜드를 형성할 수 있다. 그리고 중장기적으로는 순수 학문 발전을 위한 기존 CMOS 기술의 활용이라는 일방적인 관계도 양방향 관계로 변화될 것이다.

오늘날 산업계에서는 빠르게 발달하는 CMOS 기술을 활용하여 다양한 실리콘 반도체 검출기와 읽기 회로용 ASIC 등이 계속 개발되고 있는 상황이다. 따라서 학문적인 목적으로 산학교류가 지속되고, 그 결과 실리콘 검출기에서 한국 CMOS 기술의 브랜드화가 이루어지면 아날로그 신호처리와 같은 비메모리 소자 영역에서 새로운 기술을 축적할 기회가 저절로 만들어질 것이다.

PHENIX 저항판 검출기

강한 상호작용 이론인 양자색소역학이 처음 제안되었을 당

Fig. 4. Schematic diagram for the production of lepton (muon or electron), decayed from W in proton-proton collision.

시, 양성자를 구성하고 있는 세 쿼크(u, u, d)의 스핀을 합하면 양성자의 스핀 1/2을 설명할 수 있을 것으로 기대하였다. 그러나 80년대 초 CERN의 실험결과는 놀랍게도 알짜쿼크(constituent 또는 valence quark)의 스핀이 양성자 전체 스핀의 1/3도 설명하지 못한다는 사실을 알려 주었으며, 이를 스핀위기라고 부른다.^[2,3] 이로부터 양성자는 알짜쿼크 외에도 많은 글루온과 함께 상대적으로 낮은 운동량의 바탕쿼크(sea quark) 및 반쿼크로 이루어져 있으며, 이들이 각각 양성자의 스핀에 중요한 공헌을 하는 것으로 짐작되고 있다.

RHIC 가속기는 상대론적 중이온 충돌을 통한 쿼크-글루온 플라즈마 연구뿐만 아니라 스핀이 정렬된 양성자 충돌을 이용하여 양성자 스핀의 기원도 연구하고 있다. 특히 바탕 쿼크와 바탕 반쿼크의 양성자 스핀 공헌에 대한 직접적인 측정 방법으로써 그림 4와 같이 편극 양성자와 비편극 양성자 사이의 충돌에 의해 W(약한 상호작용을 매개하는 입자)가 생성된 후, 이 입자의 붕괴로부터 방출되는 단일 뮤온의 측정이 이론적으로 제안되었다.

PHENIX 실험에서는 기존의 전방 뮤온 스펙트로미터를 이용하여 쿼크 및 반쿼크의 스핀 공헌도를 측정하고자 한다. 하지만 뮤온은 W 붕괴 외에도 매혹이나 바닥쿼크 등의 붕괴와 같은 다른 여러 가지 반응과정에 의해 훨씬 더 많이 생성된다. 그런데 전산모사에 의하면 W 붕괴로부터 생성된 뮤온은 대체로 매우 커다란 운동량을 갖고 있음이 알려졌다. 따라서 커다란 운동량의 뮤온을 효율적으로 판별하기 위한 저항판 검출기(Resistive Plate Chamber: RPC) 시스템을 설치할 필요가 대두되었다.^[1] 즉 PHENIX에서는 그림 2와 같이 뮤온 스펙트로미터 하나 당 2개씩의 저항판 검출기 스테이션을 설치하여, 실험자료 취득 초기에 이미 높은 운동량의 뮤온만 선

REFERENCES

- [2] EMC Collaboration, Phys. Lett. B **206**, 364 (1988).
- [3] EMC Collaboration, Nucl. Phys. B **328**, 1 (1989).

Fig. 5. Efficiency of the resistive plate chamber estimated by cosmic muons.

별적으로 골라내고자 한다.

그런데 PHENIX에서 설치하고자 하는 저항판 검출기 시스템은 우리나라 연구진이 LHC의 CMS 국제공동연구를 위하여 이미 개발, 생산 및 설치를 완료한 전방 저항판 검출기 시스템과 매우 흡사하다.^[4,5] 이에 따라 PHENIX 측은 고려대학교 연구진과 2005년부터 저항판 검출기 개발을 긴밀히 논의했으며, 2006년 10월에 모든 PHENIX 저항판 검출기의 핵심부품인 기체간극을 우리나라에서 생산한다는 양해각서(MOU)를 체결하였다. 이후 고려대학교는 PHENIX에 적합한 저항판 검출기를 연구개발하고 대량생산을 완료하여 2009년 10월에 모든 저항판 검출기의 기체간극을 BNL 측에 전달하였다.

현재 PHENIX에서는 BNL 내에 저항판 검출기 조립공장을 구축하여 우리나라에서 전달한 기체간극과 중국에서 전달한 검출기 부품, 그리고 미국에서 생산한 전단 전자장비 등을 조립하여 성능을 시험하고 있다. 그림 5는 우주선 뮤온을 이용하여 시험한 PHENIX 저항판 검출기의 성능을 보여주고 있으며, 9.6 kV 이상의 작동 고전압 영역에서 95% 이상의 뛰어난 검출효율을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이는 우리나라의 저항판 검출기 제작기술이 유럽뿐만 아니라 미국에서도 인정받게 되었음을 말해 준다. 특히 2009년 11월에는 PHENIX에서 건설하고자 계획하고 있는 4개의 저항판 검출기 스테이션 중 하나인 북쪽 RPC3의 설치가 완료되는 경사를 맞이하였다. 그림 6은 설치가 완료된 북쪽 RPC3의 모습을 보여준다.

앞으로의 PHENIX 저항판 검출기의 설치 계획은 2010년까지 남쪽의 RPC3 스테이션을 설치하고, 2011년에는 두 개의 RPC1 설치를 완료할 예정이다. 이러한 저항판 검출기의 조립, 설치, 운영을 담당하는 대부분의 연구원 및 대학원생이 한국인이라는 점은 우리나라의 핵물리학 발전을 위하여 매우 고무적인 사실이라 할 수 있다.

Fig. 6. Picture of the PHENIX north resistive plate chamber station completed in November, 2009.

CBM 원모양 체렌코프 검출기

아인슈타인의 상대성 이론에 의하면 진공 중에서 빛보다 빨리 움직이는 입자는 있을 수 없다. 그러나 물질 내에서는 빛의 속도가 굴절률에 반비례하여 감소하므로 입자가 빛보다 빨리 이동하는 것이 가능하다. 또한 공기 중에서 비행기가 음속을 넘어서면 마하 충격파가 발생하듯이, 입자가 물질 내에서 광속보다 빨라지면 체렌코프 충격복사파가 발생한다. 이 원리를 이용하여 입자의 진행속도를 측정하는 장치를 체렌코프 검출기라고 부른다.^[6]

일반적으로 체렌코프 복사에 의해 발생하는 광자의 양은 가시광선 영역을 포함하여 파장의 제곱에 반비례한다. 원자로의 핵 연료봉을 보관하는 거대한 수조가 푸른빛을 띠는 것도 이와 같은 원리이다. 이때 그림 7과 같이 오목거울 등을 이용하면 특정한 각으로 진행하는 체렌코프 복사파를 거울의 초점 근처에서 고리모양이 형성되도록 할 수 있다. 이와 같은 체렌코프 검출기를 특히 원모양 체렌코프 검출기(Ring Imaging CHerenkov: RICH)라고 한다. 이때 필요에 따라 다양한 굴절률을 갖는 기체 또는 물질을 이용함으로써 광범위한 운동량의 여러 가지 입자를 구별해 낼 수 있으므로 핵 및 고에너지 물리실험에 다양하게 활용되고 있다.

현재 부산대학교 중이온물리 연구실은 독일에 건설 중인 FAIR 가속기의 CBM 검출기에서 사용될 원모양 체렌코프 검

REFERENCES

- [4] B. Hong *et al.*, J. Korean Phys. Soc. **48**, 515 (2006).
- [5] S. Park *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **550**, 551 (2005).
- [6] P. A. Cherenkov, Dokl. Akad. Nauk SSSR **2** (1934).

Fig. 7. Principle of the ring imaging Cherenkov detector.

Fig. 8. Prototype of the CBM ring imaging Cherenkov detector.

출기를 연구개발하고 있다. CBM 검출기는 주로 고밀도 영역에서 핵물질의 상전이 현상 연구를 목적으로 설계되고 있다. (CBM 검출기에 대한 더 자세한 내용은 이전의 기사 ‘초기우 주로의 여행 - Mini Big Bang: 중이온 충돌실험’을 참고) 고밀도 하에서 핵물질의 상전이 연구를 위해서는 전자와 같은 경입자의 역할이 매우 중요하므로 RICH 검출기를 이용한 전자의 검출은 매우 중요하다.

구체적으로 CBM 원모양 체렌코프 검출기와 관련하여 우리나라 연구진이 집중하고 있는 연구내용은 좁은 공간에서 높은 운동량의 전자를 파이온과 같은 강입자들로부터 효과적으로 구별해 내기 위한 기계복사체의 최적화이다. 이를 위해 실제 CBM 실험과 비슷한 조건의 그림 8과 같은 시제품을 제작하여 성능시험을 하고 있다. 이 시제품 안에는 독일에서 제작한 반사체와 다중채널 광전자증배관 등이 설치되어 있다. 그리고 이 시제품의 시험을 위하여 포항 방사광가속기의 전자 선형가속기에 별도의 실험 장치를 그림 9와 같이 구축하

Fig. 9. Installation plan of the prototype CBM ring imaging Cherenkov detector in one of beam lines for the electron linear accelerator in Pohang light source facility.

였다. 현재 포항가속기연구소에서 제공하는 전자빔의 크기를 CBM 원모양 체렌코프 검출기 시험에 적절하도록 조정하는 한편 가능한 한 정밀한 소량의 전자빔 실험이 가능하도록 준비 중이다.

나오는 글

우리나라에서 상대론적 중이온 충돌 분야의 실험 연구진은 최근 10여 년 동안 괄목할 만한 성장을 해왔다. 각 대학에 관련 교수와 대학원생의 수가 함께 증가해 왔고 이러한 추세는 앞으로도 계속될 전망이다. 이러한 양적 증가와 더불어 학문적인 공헌도 크게 향상되었다. 즉 과거에는 외국의 중이온 가속기 연구소에 대학원생 등을 파견하여 실험자료 분석에만 집중하는 소극적인 연구가 주를 이루었으나, 현재는 대형 검출장치에 필요한 중요한 검출기 요소를 국내에서 직접 연구개발할 뿐만 아니라 대량생산하여 설치, 운영하는 단계에 도달했다.

앞에서는 우리나라의 핵물리학자들이 상대론적 중이온 충돌 연구를 위해 진행하고 있는 중요한 검출기 개발 연구 중 몇 가지를 소개하였다. 그러나 이 외에도 GSI의 FOPI 실험을 위한 대형 비행시간 검출기를 이미 개발하여 설치 완료하였으며, CBM 실험에서 사용될 다중간극 저항판 검출기의 개발도 진행 중이다. 그리고 이렇게 개발된 다양한 검출기들의 의학 및 산업적인 응용에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

참여 연구진의 증가와 함께 중이온 실험을 위한 핵심 검출기 개발에 대한 공헌의 확대는 우리나라 핵물리학 분야의 밝은 미래를 보여주고 있다. 멀지 않은 장래에 상대론적 중이온 충돌실험 분야에서 한국인 대표자가 이끄는 세계적인 국제공동연구실험이 탄생하기를 기대해 본다.