

우주 방사선을 이용한 한반도 화산의 구조 연구 제안 - Muon Tomography -

김도원
강릉원주대학교

<요약문>

북한에서는 최근 여러 차례의 인공지진이 관측되었다. 이미 10세기에 큰 폭발을 했던 것으로 알려진 백두산이 북한의 지속적인 핵실험에 의한 영향으로 다시 폭발할 수도 있다는 우려가 북한의 과학자들에 의하여 제기되었다. 한편 프랑스 Clermont-Ferrand의 Blaise Pascal 대학을 포함하는 공동연구진은 우주 방사선 검출 기술을 이용하여 프랑스 중부 지역의 대표적인 화산인 Puy de Dôme을 지속적으로 측정하는 TUMOVOL 프로젝트를 수행하였다. TOMUVOL에서 사용된 방법을 기반으로, 보다 성능이 향상된 우주선 검출기를 사용하여 한반도의 화산들 내부를 관찰하는 연구를 한국-스위스-프랑스-이탈리아 공동연구진이 제안하고 있어 이를 소개한다.

◆ 주제어 : 우주방사선, 뮤온, 저항판 검출기, 백두산, 국제공동연구

I. 서 론

지난 20년간 하전 입자의 도착 시간을 매우 정확하게 측정할 수 있는 입자 검출기에 대한 연구 개발이 활발하게 진행되어왔다^{[1]-[17]}. 수십 피코(pico, 1조 분의 1)초의 시간 분해능을 가지는 다중간극저항판검출기 (MRPC, Multigap Resistive Plate Chamber)는 ALICE (CERN, Geneva), STAR (BNL, Upton) 및 CBM (FAIR, Darmstadt) 실험과 같은 대규모 입자 가속기 실험을 위해 제작되어 대규모 비행시간 측정기로 활용되고 있거나 제작이 예정되어 있다.

한국 대학의 연구원들도 유럽입자물리연구소(CERN)에서 MRPC의 연구 개발 활동에 참여해 왔다. 스위스 제네바에 위치한 국제기구 World Laboratory는 한국의 연구 지원 재정이 부족한 초기(1990년대 말~2000대 초)부터 CERN에 와서 연구하는 한국인 학생들에게 장기간 재정을 지원했다.



<그림 1> CERN의 ALICE 실험에 사용될 TOF 검출기 연구개발. 양성자 가속기 빔을 이용한 검출기 특성 시험에 사용될 96 채널의 MRPC 들이 제작되어 큰 상자에 설치되고 있다.

한국인 물리학자들은 이탈리아 외무부와 한국 과학기술부의 과학 협력 프로그램에 의한 지원을 받아 INFN-볼로냐와 긴밀한 협조 하에 ALICE 실험의 160m² 면적의 입자 비행시간 측정 시스템 생산에 상당한 기여를 할 수 있었다. 이러한 장기적인 협력 노력의 결과, 2006년 CERN과 한국 정부가 협력 협정에 서명함으로써 보다 많은 한국인들이 상당한 액수의 연구비를 지원 받아 CERN에서 LHC 실험 참여할 수 있게 되었다.

EEE(Extreme Energy Event)라고 불리는 우주선 측정 실험은 이탈리아의 고등학생을 대상으로 수행되는 큰 규모의 과학 교육 프로그램이다. 이탈리아의 여러 지역에서 학생들이 과학

교사와 함께 CERN에 와서 MRPC의 작동 원리에 대해 배우고 현장의 전문가의 도움을 받아 스스로 검출기를 제작한다(<그림 2> 참고).



<그림 2> 이탈리아 고등학생들이 CERN에서 EEE 검출기를 제작하는 모습. 완성된 검출기 3개는 그 학생들의 학교로 운송된 후 설치되어 우주선 검출장치로 활용된다.

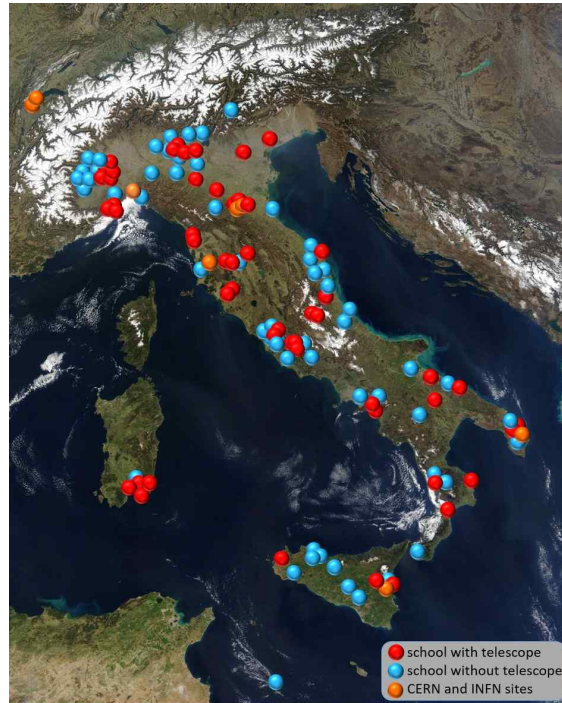
학생들에 의하여 제작된 검출기들은 그 학생들의 학교에 이송, 설치되어 우주선 중의 하전 입자를 검출하는 데에 활용된다. 로마에 소재한 페르미 센터 (Centro Fermi)는 EEE 실험의 본부 역할을 수행한다.

높은 시간 분해능을 제공하며 큰 면적으로 제작할 수 있는 MRPC는 우리가 다른 목적으로도 활용할 수 있다. 화산 주위에 설치하여 수행하는 뮤온단층촬영 (Muon Tomography)은 MRPC의 그러한 특성이 충분히 활용될 수 있는 응용 분야에 속한다. TOMUVOL Collaboration은 대기 중의 뮤온을 사용하여 프랑스의 Puy-De-Dôme 화산의 내부 구조를 측정했다. 유럽과 한국의 과학자들로 이루어진 연구진은 한국에 소재한 두 개의 큰 화산, 즉 북한의 백두산과 남한의 한라산에 대한 고 정밀 뮤온 단층 촬영 실험을 제안한다.

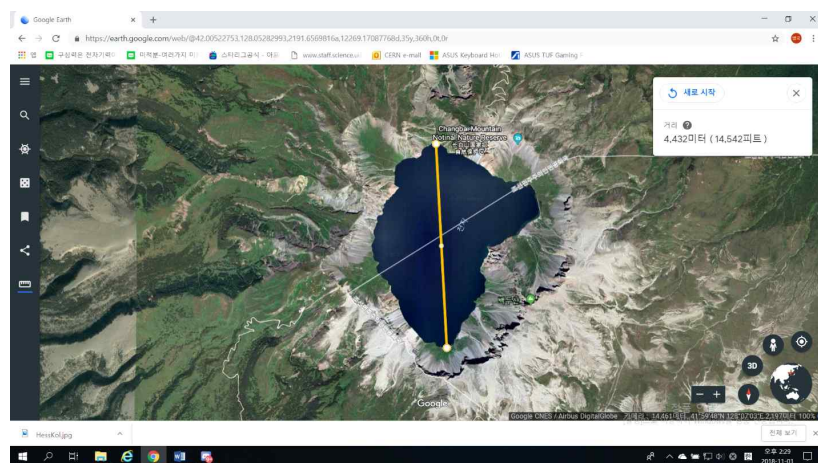
백두산은 북한과 중국의 경계에 있는 화산이다. 이 산은 북한 영토에 54.5 %, 중국 영토에 45.5 % 속해 있다. 한국 이름은 백두산인데, 그것은 '하얀 머리 산'을 의미한다. 중국 이름은 장백산이고, 이는 '눈이 쌓인 큰 산'을 뜻한다. 백두산의 정상에는 분화구가 있는데, 이를 한국인은 천지 (天地) 호수라고 부른다. 높이는 해발 2,744 미터이다. 천지는 969년 (± 20년) 거대한 분출로 만들어진 칼데라이다. Prominence : 2,593 m, 마지막 분출 : 1,903년(출처: 위키피디아)

한라산은 한국 제주도의 화산 남한에서 가장 높은 산이다. 산 주변 지역은 한라산 국립공원

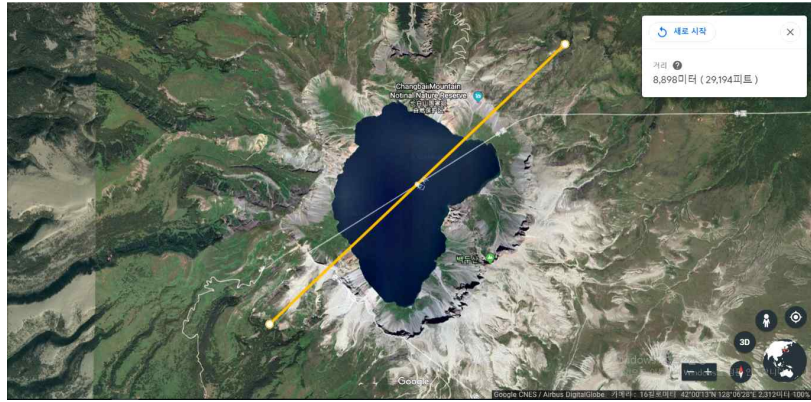
으로 지정되었다. 한라산은 일반적으로 지리산과 설악산과 함께 한국의 세 가지 주요 산 중 하나로 간주된다. Prominence : 1,950m, 마지막 분출 : 1,007년 (출처: 위키피디아)



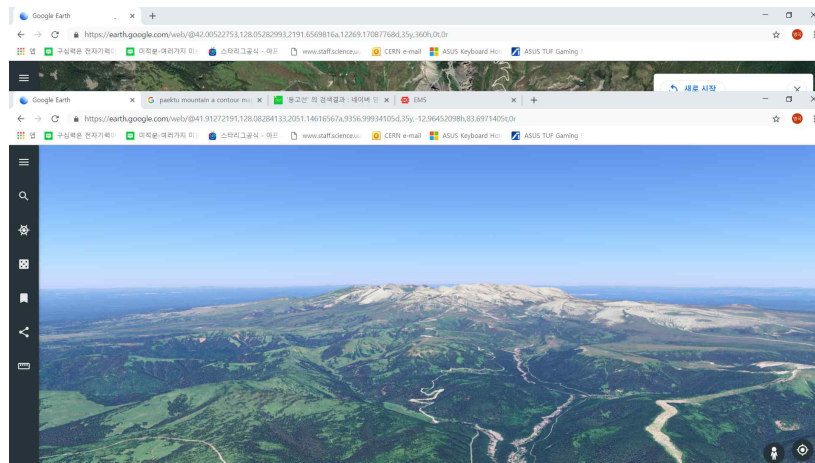
<그림 3> EEE 공동연구진의 소재지. 현재 이탈리아의 52 곳(적색)에 분포되어 있는 EEE 연구진에 우주선 측정장치가 설치되어 있다. 다른 53 곳(청색)의 기관들도 EEE 데이터의 분석에 참여한다. 지금까지 600억개의 우주선 입자들이 측정되었다. 이 사건들은 학생들과 전문 연구자들이 함께 분석을 하고 있다. 그러한 분석의 결과들 중 일부분은 다양한 국제 과학 학술지들에 발표되었다.



<그림 4a> 백두산. Google 지도 상 천지 호수 d=4,432 m.



<그림 4b> 백두산. 고도 2,000m에서 d=8,898. Google 지도



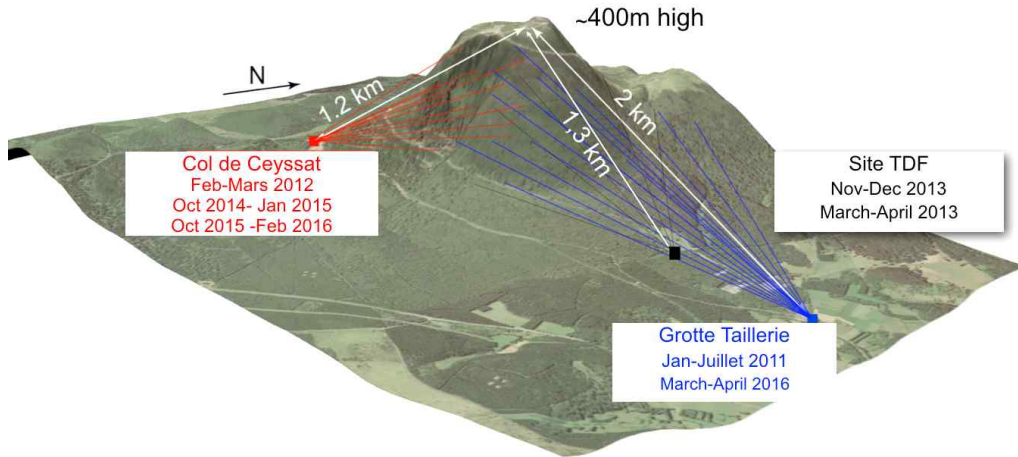
<그림 4c> 백두산의 측면 사진. Google 지도.

II. 프랑스의 TOMUVOL 프로젝트

지질 구조를 조사하기 위해 고 에너지 대기의 뮤온을 사용하는 것은 활동이 없는 화산을 연구하기에 좋은 수단이다. 뮤온을 관측하는 장치를 화산의 바깥쪽에 배치하고 원격으로 작동시키면 화산의 내부 구조 이미지를 실시간으로 얻을 수 있다. 화산학에서 뮤온단층촬영(Muography) 응용은 최근에 많이 발달하였다. 핵 에멀전, 섬광기(scintillator), 기체 검출기(gaseous detector)와 같은 다른 기술로써 세계의 여러 화산 지역이 연구되었다.

각 기술에는 장점과 단점이 있다. 폭이 수 킬로미터인 대형 화산을 촬영할 때 그 장치가 만족해야 할 중요한 사항은, 볼 수 있는 범위가 넓어야 하고 우주선 입자들 중에서 화산을 관통해 나오는 뮤온 입자를 잘 탐지할 수 있어야 한다. 단일 갭 및 멀티 갭 버전의 Glass Resistive Plate Chambers (GRPC)는 넓은 면적의 검출기를 만들기에 적합한 검출기로서, 높은 위치 및 시간 분해능을 제공한다. TOMUVOL 실험 연구에서는 대기 중의 뮤온을 이용하여

화산 이미지 측정 개념을 증명하기 위해 GRPC를 선택하였다. TOMUVOL은 클레르몽-페랑 (Clermont-Ferrand)에서 가까운 French Massif Central^[18]에서 Puy de Dôme 화산을 연구하였다.



<그림 4> TOMUVOL 개념도. 프랑스의 Massif Central에서 Puy de Dome 화산 주위 세 곳에 검출기를 설치

TOMUVOL이 개념 증명을 위해 사용한 검출기는 4개의 층으로 제작되었다(<그림 5> 참고). 유효 검출 영역 1m^2 의 각 층은 $50\text{cm} \times 33\text{cm}$ 크기의 GRPC 6개로 형성되었다. 각 층 사이의 거리는 대상을 이미지화하는 데 필요한 각 해상도와 개방 각도에 따라 조정할 수 있다. 각 검출기는 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 크기의 1536 (=24x64)개의 신호 픽업 패드를 가지고 있다. 이 검출기의 신호 처리를 위한 전자회로 보드는 국제 선형 충돌장치(International Linear Collider, ILC)를 위하여 고안된 SDHCAL (Semi Digital Hadronic CALorimeter)의 것을 사용하였다. 신호 픽업 패드는 PCB의 한 면에만 놓이며 검출기와 직접 접촉한다. 전자회로 보드는 8 층의 인쇄 회로 기판 (PCB)으로서 각각 24개의 HARDROC ASIC을 장착한다. HARDROC은 64 채널 ASIC으로서 5MHz 빈도로 신호의 Semi Digital 판독 값을 발생한다. Semi Digital 값은 0, 1, 2, 혹은 3 의 값을 의미한다.

검출기에 뮤온을 통과 시키면 RPC의 가스 간극에 눈사태(avalanche)가 생겨 하나 이상의 패드에 전하가 유도된다. 어떤 한 신호전극에 나타난 신호 값이 임계값 보다 높으면 사건이 기록된다. FPGA 기반의 동기식 DAQ 시스템이 사용된다. 검출기 모듈은 가볍고 운반하기 쉬운 기계 구조에 고정되어 있다. 신호 전극들 사이의 정렬이 잘 보장될 수 있도록 각 층의 검출기 위치가 정확하게 측정되었다.

저전압 전원, 고전압 전원 및 가스 혼합 시스템을 포함한 모든 탐지기에 관련된 서비스는 원격으로 제어되어 시스템 옆에 사람이 없어도 현장에서 운용될 수 있다. 이 원격 제어 시스템은 Puy-De-Dome에서 수 킬로미터 떨어진 3개의 다른 장소에 설치되었다(<그림 4> 참고). 각각의 위치에서 검출기로 발견된 화산을 가로 지르는 뮤온의 수를 분석하여 산의 2D 밀도 지도를 얻는다.



<그림 5> 24개의 RPC 들로 제작된 TOMUVOL 검출기의 모습. 각각의 RPC는 50cm x 33cm 크기이고, 이들이 6개씩 결합되어 1m x 1m 면적의 한 평면을 구성한다. 네 개의 평면으로 전체 검출기가 구성되었다.

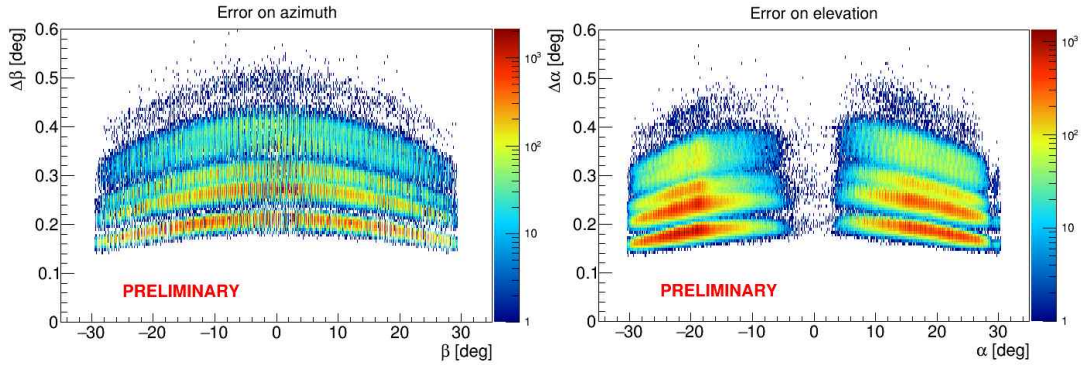
TOMUVOL 검출기로 2013년에 수집 된 첫 번째 데이터로부터 암석 두께가 수 백 미터를 초과하는 화산의 이미지를 위하여 저에너지 뮤온 사건들을 잘 처리하는 것임이 확인되었다^[18]. 즉, 대기를 진행하다가 화산 경사면이나 검출기 부근에서 산란되어 임의의 궤적으로 입사하는 뮤온들을 걸러내는 방식에 따라 이미지의 선명도가 좌우된다.

탐지기를 납으로 차폐하여 저에너지 뮤온의 대부분을 성공적으로 제거하였고, 화산의 실제 2D 밀도 맵을 얻었다^[19]. 데이터 분석에는 뮤온이 화산 안의 물질을 통과하는 과정을 역으로 해석하는 매우 계산 효율이 높은 방식, 즉 역 몬테카를로 방식을 사용하였다^[20]. 실제로, 각 방향의 누적 밀도의 최적 값은 여러 가지 밀도 값에 대하여 각각 그 방향에서 검출이 예상되는 뮤온의 수와 측정된 뮤온의 수를 비교함으로써 선택된다. 예상되는 뮤온의 수를 계산하기 위해서는 고에너지 뮤온 상호 작용의 확률, 산란 및 검출기 효과를 설명하는 몬테카를로 시뮬레이션을 사용한다. <그림 6>은 뮤온의 입사각 측정값들의 오차를 나타낸다.

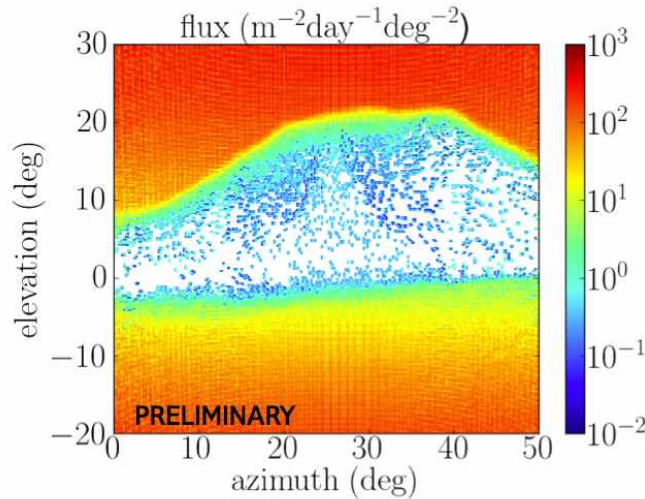
이러한 역 해석 방식의 유효성을 확인하기 위해 무게 측정(gravimetry), 전기 저항 및 자기장 측정이 동시에 수행되었다. 중력 측정법과 muography가 동일한 물리량을 다루는 것이므로, muon과 gravimetry 데이터를 공동으로 반전시키기 위한 몇 가지 방법을 시험하였다^[22,23]. 데이터 분석은 진행 중이지만 예비 결과는 이 모든 측정이 일관됨을 확인해 주고 있다.

TOMUVOL은 inverse muographic 문제가 확실하게 해결 될 수 있음을 보여 주었을 뿐 아니라 까다로운 환경에서 장시간 가스 방식 검출기인 저항판 검출기를 원격으로 작동시킬 수 있음을 확인해 주었다.

TOMUVOL 검출기로 얻어진 각도 분해능은 검출기의 공간적 확장에 달려 있다. 검출기를 1.8m 깊이로 만들 경우 각 분해능은 0.3도 정도이다. 이는 검출기가 산에서 1km 떨어진 곳에 설치되었을 때 산의 표면에서 약 5m 거리에 해당된다.



<그림 6> 뮤온의 고도각(왼쪽)과 방위각(오른쪽) 측정의 오차 분포도. 2015년 데이터. 검출기 평면들 사이의 거리 60cm. 신호가 나타난 검출기 신호전극의 수에 따라 여러 개의 띠들로 나뉜다.



<그림 7> Puy de Dôme 에서 2015년에 뮤온을 측정한 데이터로부터 재구성된 화산 구조 이미지.

Ⅲ. 새로운 검출 장치 제안

<그림 7>에서 확인할 수 있듯이 산을 가로 지르는 고 에너지 뮤온의 개수는 크지 않다. 따라서 뮤온으로 화산의 내부 구조를 탐사하기 위해서는 오랜 기간 관찰이 필요하다. 또한, 저 에너지 뮤온을 제거하고 산에서 검출기를 가로 지르는 뮤온만을 선택하기 위해서는 뮤온 입자들이 검출기의 각 평면을 통과하는 시간을 정확히 재는 것이 필요하다. 차세대 검출기 실험에

는 다음과 같은 사항들의 개선이 요구된다.

- 고 에너지 뮤온을 선택하고 수평선상의 뮤온의 탐지에 영향을 미치는 배경 뮤온을 제거할 수 있도록 입자 비행시간(Time of Flight, TOF) 측정 기능을 포함한다.
- 궤적(tracking) 판독 체계 개선. 저항판 검출기의 패드 판독 방식을 스트립 판독 방식으로 대체함으로써, 공간분해능을 개선하면서도 전자 채널의 수를 줄여 전자 장치 비용 및 검출기 전력 소비를 감소시킨다.
- 검출기 표면적을 증가시킨다.

시간 정보

단일 간격 RPC를 사용하여 얻을 수 있는 최적의 시간 해상도는 약 1ns이며, 이는 뮤온의 입사 방향을 확인하기에 충분하지 않다. 보다 정확한 시간 측정은 Multigap RPC (MRPC)로 얻을 수 있다. 간극의 크기가 250 μ m, 간극의 수가 6개인 MRPC를 사용하면 100ps 정도의 우수한 시간 해상도를 얻을 수 있다. 이를 위하여 NINO 또는 PETIROC과 같은 낮은 jitter의 전단증폭기 집적 회로와 HPTDC와 같은 고해상도 시간-디지털 변환기(TDC)가 필요하다. 스트립 형태로 검출기 신호 선을 제작할 경우, 신호 스트립의 양쪽 끝에 신호를 읽어 두 측정 시간 값의 평균으로 뮤온의 통과 시간을 측정하며, 그 차이로써 뮤온이 스트립을 통과 한 위치를 측정한다. MRPC를 최소 두 개 사용하여 TOF 시스템을 구성할 수 있으며, 세 개 이상 사용하여 뮤온의 궤적을 재구성할 수도 있다.

큰 면적 검출기

보다 정확한 공간 분해능을 얻기 위해, 단일 간격 GRPC를 여러 층 사용한다. 기존의 판독 칩과 동일한 HARDROC를 유지하고 전자 회로 채널의 수를 줄이기 위해 패드 대신 스트립형 전극을 사용한다. 현재의 패드 판독 값보다 위치 분해능을 5배 개선하면서 판독 채널의 수는 12분의 1로 줄일 수 있다. 현재 Clermont-Ferrand의 LPC에서 설계 중인 1m \times 2.8m 크기의 검출기는 비교적 폭이 넓고 편평한 백두산과 같은 화산을 측정하는 데에 적합하다. 검출기를 설치하는 공간의 크기에 따라 1m \times 2.1m 크기의 검출기를 배치할 수도 있다.

새로운 신호 읽어내기 방식을 생각할 수도 있는데, 이는 세 방향으로 규칙적인 모양(삼각형, 마름모, 육각형 등)의 전극들이 독특한 방식으로 연결된 패드 형태의 신호 판독 방식이다. 동일한 크기로 제작할 때 전자 채널이 적은 패드 유형 판독 시스템과 동일한 입도를 제공할 수 있습니다. 예를 들어 1cm²의 전극들로 분할된 4m \times 4m의 대형 검출기를 제작할 경우, 한 끝의 신호만을 읽어내는 경우 133분의 1, 양 끝의 신호를 읽어내는 경우에는 66분의 1로 신호 채널의 수를 줄일 수 있다.

검출기와 DAQ 시스템을 연결하기 위해 Bluetooth 또는 WiFi 프로토콜을 사용하는 무선 통신을 사용한다. 또한 가스 검출기에서 지구 온난화 가스의 배출을 줄이는 것이 중요하다.

이를 위하여 기존의 프레온 R-134a 대신 HFO-1234ze와 같은 낮은 GWP (지구 온난화 계수) 가스를 사용할 수 있다.

3D 재구성

화산 muography 프로젝트에서 얻은 2D 투영도는 많은 정보를 제공하나 내부의 화산 구조를 정확하게 특성화하기에는 아직 충분하지 못하다. 전체 3D 밀도 구조는 화산 주위에 고르게 배치된 여러 측정소에서 우주 방사선을 측정된 결과를 결합하여 추론할 수 있다^[22,23]. 의료용 컴퓨터 단층 촬영 (Computed Tomography)에서 사용되는 라돈 변형 기술 (Radon transform technique)을 기반으로 한 접근 방법도 고려할 것이다.

한국 화산들의 뮤온 단층촬영

백두산에 설치할 첫 번째 검출기의 건설과 배치에는 3년이 소요될 예정이다. 더 많은 검출기를 구축하고 획득한 데이터를 분석하는 이 프로젝트는 장기적으로 지속될 것이다. TOMUVOL에서 사용된 검출기보다 성능이 향상된 검출기로 백두산 단층촬영 프로젝트를 수행하는 데 필요한 자원은 남한과 북한의 과학적 협력의 틀에서 남한의 통일부에 의해 제공될 것으로 기대한다. 첫 번째 모니터링 기지(station)의 건설 및 유지 보수 예산은 최초 10년 동안 26MCHF(백만 스위스 프랑)으로 추정된다. 3개 이상의 관측소를 설치하면 화산의 밀도 분포를 3차원 적으로 재구성하고 데이터를 더 빠르게 수집할 수 있다. 첫 번째 검출 기지의 설치 및 유지보수 비용에는 다음 항목이 포함된다.

(a) 3개의 MRPC 검출기로 구성된 TOF 시스템

TOF 시스템의 감지기는 EEE 프로젝트에 사용되는 검출기와 유사하지만 보다 향상된 위치 분해능을 가지도록 설계, 제작한다. 10mm 간격 스트립을 사용할 때 $2\text{m} \times 1\text{m}$ 의 평면의 신호를 양 끝에서 읽으려면 8채널의 NINO 칩 50개가 필요하다. 평면(x, y) 검출을 위해서는 100개가 필요하다. 따라서 3개의 TOF 평면 구성을 위하여 300개의 NINO 칩이 필요하다. 시간을 25ps 분해능으로 측정하려면 동일한 수의 HPTDC가 필요하다 : 300 NINO, 300 HPTDC. (1.9MCHF / station)

(b) 6개의 GRPC 층으로 구성된 고정밀 궤적 측정 시스템

고정밀 GRPC 층은 $1\text{m} \times 0.7\text{m}$ 면적의 GRPC 3개 또는 4개로 구성된다. 이들은 가벼운 벌집 구조 재료의 상자 안에 제작된다. 신호 PCB ($0.5\text{m} \times 0.7\text{m}$)에는 2.4mm 폭의 스트립을 이중 (x 및 y)로 설치하여 위치를 측정한다. 각각의 PCM에는 16개의 HARDROC 칩이 사용된다. 평면 당 4개의 검출기를 사용하는 것을 고려한다(0.9MCHF / station).

(c) 지원시설

FPGA 기반의 동기화 DAQ 시스템 및 무선 통신 시스템, 가스 시스템 (0.6MCHF / station)을 갖춘 HV 및 LV 전원 공급 장치 전력 발전기 : 연료 전지, 태양 전지, 축전지 (0.6MCHF / station). 건물 건설 : 컨테이너 또는 터널 (2MCHF / station)

(d) 인력

MRPC 및 GRPC 생산을 위한 인력 6 MY, 전자 장치 제작 인력 5 MY, 가스 시스템을 포함한 기계 장치 제작 인력 4 MY, 검출기 작동, 교정, 시뮬레이션, 기계 학습, 이미지 재구성을 위한 물리학 및 컴퓨팅 인력 10 MY : 총 25 MY (2MCHF / 년)

IV. 결 론

고성능 우주 방사선 검출기를 사용하여 한반도의 화산 내부를 관찰하는 한국-스위스-프랑스-이탈리아 공동연구를 소개하였다. 제안자들은 이 연구의 실현을 위하여 남한의 통일부와 과학기술정보통신부와 협의하는 동시에 기존의 백두산연구진(MPGG, Mt. Paektu Geoscientific Group, 대표 James Hammond)과 협력하여 북한의 물리학자들과 엔지니어들의 공동연구 참여 가능성을 모색하고 있다. 아래는 ‘백두와 한라’ 공동연구의 제안서 표지이다.

Science for Peace
**Cosmic Muon Tomography of Volcanic Mountains
(Baekdu and Halla) in Korean peninsula**



Antonino Zichichi

World Federation of Scientists, Geneva, Switzerland

Imad Laktineh

Université de Lyon and Institut de Physique Nucleaire, Lyon, France

Cristina Carloganu

Laboratoire de Physique de Clermont, Clermont-Ferrand, France

M.C.S. Williams

INFN-Bologna, Bologna, Italy

Hyun-Sik Kim

Dankook University, Cheonan, Republic of Korea

Yongwook Baek

Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Republic of Korea

참고문헌

- 1) Yong Wook Baek, Do-Won Kim, Woo Sung Park, M. Crispin S. Williams, Roman Zuyewski. (2018). "MRPC with eco-friendly gas." 『Submitted to JINST』, arXiv:1806.00649.
- 2) F. Carnesecchietal. (2017). "Performance study of a large 1x1 m² MRPC with 1x1cm² readoutpads." 『Nucl.Instrum.Meth.』, A871, 113-117.
- 3) CALICE Collaboration (Z. Deng et al.). (2016). "Resistive Plate Chamber Digitization in a Hadronic Shower Environment." 『JINST 11』, no.06, P06014.
- 4) A. Akindinov et al. (2012). "The MRPC-based ALICE time-of-flight detector: Commissioning and first performance." 『Nucl.Instrum.Meth.』, A661, S98-S101.
- 5) K. Doroud, D. Hatzifotiadou, D.W. Kim, J.S. Kim, M.M. Kim, J. Seo, M.C.S. Williams, A. Zichichi. (2009). "Performance of multigap resistive plate chambers with pure Freon 134a." 『Nucl.Instrum.Meth.』, A629, 106-110.
- 6) A. Akindinov et al. (2009). "Final test of the MRPC production for the ALICE TOF detector." 『Nucl.Instrum.Meth.』, A602, 709-712.
- 7) A. Akindinov et al. (2009). "Construction and tests of the MRPC detectors for TOF in ALICE." 『Nucl.Instrum.Meth.』, A602, 658-664.
- 8) A. Akindinov et al. (2006). "The MRPC detector for the ALICE Time Of Flight system: Final design and performances." 『Nucl.Phys.Proc.Suppl.』, 158, 60-65.
- 9) A.N. Akindinov et al. (2004). "Operation of the multigap resistive plate chamber using a gas mixture free of flammable components." 『Nucl.Instrum.Meth.』, A532, 562-565.
- 10) A. Akindinov et al. (2004). "Space charge limited avalanche growth in multigap resistive plate chambers." 『Eur.Phys.J.』, C34, S325-S331.
- 11) A.N. Akindinov et al. (2004). "Design aspects and prototype test of a very precise TDC system implemented for the multigap RPC of the ALICE-TOF." 『Nucl.Instrum.Meth.』, A533, 178-182.
- 12) A.N. Akindinov et al. (2004). "Study of gas mixtures and ageing of the multigap resistive plate chamber used for the Alice TOF." 『Nucl.Instrum.Meth.』, A533, 93-97.
- 13) A.N. Akindinov et al. (2004). "Latest results on the performance of the multigap resistive plate chamber used for the ALICE TOF." 『Nucl.Instrum.Meth.』, A533, 74-78.
- 14) A. Akindinov et al. (2000). "The multigap resistive plate chamber as a time-of-flight detector." 『Nucl.Instrum.Meth.』, A456, 16-22.
- 15) E. Cerron Zeballos et al. (1999). "A very large multigap resistive plate chamber." 『Nucl.Instrum.Meth.』, A434, 362-372.
- 16) S.C. Lee, D.W. Kim. (1999). "Properties of a 3-gap resistive plate chamber." 『J.Korean Phys.Soc』, 34, 306-309.
- 17) E. Cerron Zeballos et al. (1998). "Effect of adding SF-6 to the gas mixture in a multigap resistive plate chamber." 『Nucl.Instrum.Meth.』, A419, 475-478.
- 18) F. Ambrosino et al. (2015). "Joint measurement of the atmospheric muon flux through the Puy de Dôme volcano with plastic scintillators and Resistive Plate

- Chambers detectors." 『J.Geophys.Res.Solid Earth』, 120, 7290-7307.
- 19) C Cârloganu et al. (2018). "Density Imaging of Puy de Dôme Volcano with Atmospheric Muons in French Massif Central as a Case Study for Volcano Muography." 『EGU』.
 - 20) V. Niess, A. Barnoud, Carloganu, E. Le Ménédeu. (2018). "Backward Monte-Carlo applied to muon transport." 『Comput.Phys.Commun.』, 229, arXiv:1705.05636, 54-67.
 - 21) Portal, A., Gailler, L.-S., Labazuy, P., & Lénat, J.-F. (2016). "Geophysical imaging of the inner structure of a lava dome and its environment through gravimetry and magnetism." 『Journal of Volcanology and Geothermal Research』, 320, 88-99.
 - 22) A. Barnoud, V. Cayol, V. Niess, C. Cârloganu, P. Lelièvre, Ph. Labazuy, E. Le Ménédeu, "Bayesian joint muographic and gravimetric inversion applied to volcanoes." to be submitted to Geophys, 『J. Int.』.
 - 23) P.G. Lelièvre, A. Barnoud, V. Niess, C. Cârloganu, V. Cayol , C. G. Farquharson, "Joint inversion methods with relative data offset correction for muon tomography and gravity data, with application to volcano imaging." to be submitted to Geophys, 『J. Int.』.
 - 24) TOMUVOL Collaboration. (2013). "Inner structure of the Puy de Dome volcano: cross-comparison of geophysical models (ERT, gravimetry, muon imaging)." 『Geosci. Instrum. Method. Data Syst.』, 2, 47-54.