

# 자동차 점화플러그를 활용한 시범실험용 소형 스파크 상자의 제작

김민성, 김상년\*

한국교원대학교 물리교육과, 충청북도 363-791

## Development of a Small Size Spark Chamber by use of Automobile Spark Plug for the Purpose of Educational Demonstration

Min Seong Kim, Sang Nyeon Kim\*

Department of Physics Education, Korea National University of Education, Chung-Buk 363-791, Korea

### 요약

고등학교에서 시범실험용으로 활용할 수 있는 소형 스파크 상자를 제작하였다. 스파크 상자의 핵심 부속장치인 고전압 펄스 시동장치는 자동차 점화플러그를 활용하여 제작하였다. 스파크 상자의 주전원은 코크로프트윌튼 회로를 이용하여 제작하였다. 스파크 상자의 충전기체는 순도 99%의 아르곤 가스를 사용하였다. 제작한 스파크 상자를 작동한 결과 우주선 뮤온 궤적을 관찰할 수 있었다.

**주제어** : 과학중점학교, 과학 관련 체험활동, 비교과 체험활동

### I. 서론

스파크 상자는 고에너지 하전입자의 궤적을 시각적으로 검출하기 위한 장치이다. 스파크 상자를 이용하면 우리 주변에 일상적으로 쏟아지고 있는 기본입자의 하나인 우주선(cosmic ray) 뮤온의 궤적을 관찰할 수 있다. 스파크 상자는 구조가 비교적 간단하며 시청각적 효과가 있어서 외국에서는 이미 중등학교현장의 시범실험용으로 연구, 제작하고 있다(Claus Grupen And Boris A. Shwartz, 2008).

한편 2009년 개정 고등학교 물리 교육과정은 물리학의 최신 연구 성과를 반영하고 일상생활의 친숙한 현상이나 첨단기기에 대한 과학적 이해를 돕는다는 취지가 고려되었다(오원근, 2010). 내용적으로는 물리 I 에 입자물리학, 상대성이론, 우주론 등이 추가되었고, 물리II에서는 양자 물리 분야가 추가되었다. 교육과정 해설서에 따르면 이러한 현대 물리학의 내용 도입이

나중에 과학자가 될 학생들만을 위한 것이 아니라 미래에 과학 기술 계열이 아닌 분야의 직업에 종사할 학생들을 위해 더 필요한 것이라고 명시하고 있다. 따라서 앞으로 교육현장에서는 모든 계열의 학생을 위한 현대 물리학과 관련한 탐구실험자료 및 시범실험 자료에 대한 요구가 더욱 증가할 것이라고 판단된다. 그러나 현재 학교 현장에서 손쉽게 활용할 수 있는 현대물리 분야와 관련된 탐구실험자료는 역학이나 전자기학 분야에 비해서 상대적으로 적은 편이다.

스파크 상자는 내용적으로 현대물리학과 직접적으로 연관되어 있으며 시청각적 효과가 크다. 따라서 과학기술 계열 학생에게는 좋은 탐구실험 소재가 될 뿐 아니라 과학기술계열이 아닌 학생에게도 학습동기를 자극할 수 있는 실험주제라고 할 수 있다. 최근 국내에서 대형 스파크 상자가 일부 과학관에서 전시용으로 중등학교 교사와 학생에게 소개되기 시작하였다. 이러한 과학전시물을 통한 비형식적교육에서 나아가 중등학교 현장의 형식적 교육에 도입되기 위해서는 몇 가지 요건이 필요하다. 우선 중등학교의 수업이나 발표 현장에서 시범실험용으로 쉽게 활용하기 위해서는 스파크 상자 및 필요한 제반 장비의

\* 교신저자: snkim@knue.ac.kr

• 2011년 1월 23일 접수, 2011년 5월 28일 1차 수정, 2011년 7월 19일 2차 수정, 2011년 7월 19일 통과

부피가 크지 않아서 이동하기 편리하여야 한다. 그리고 스파크 상자를 제작하는 데 필요한 부품은 구하기 쉬워야 한다. 마지막으로 제작 비용이 저렴하고 제작이 쉬워야 한다.

이 연구에서는 스파크 상자를 작동시키는 핵심 장치인 고전압 펄스 시동장치를 저렴하고 구하기도 쉬운 고전압 펄스 출력용 트랜지스터와 자동차용 점화플러그(spark plug)를 활용하여 제작하였다. 고전압 전원 장치는 일반적으로 알려진 코크로프트 윌턴(Cockroft-Walton) 회로를 이용하여 직류 10 kV 고전압 전원 장치를 제작하였다. 스파크 상자의 전극은 알루미늄판을 이용하였고, 스파크 상자 본체는 강도가 좋은 폴리카보네이트를 이용하여 제작하였다. 이 장치는 우주선 뮤온의 검출 과정에 대한 교사와 학생의 탐구활동에 기여함을 목적으로 하였다. 특히, 일반 고등학생에게 시범실험으로 사용할 수 있을 뿐 아니라, 과학 고등학교나 과학 중점고등학교에서 실제 제작하는 가능성도 충분히 고려하였다. 중등학교 현장에서 스파크 상자를 활용할 수 있는 2009년 개정교육과정의 학습단원으로는 1학년 과학의 '빅뱅과 기본입자', 물리의 '4가지 상호작용과 기본입자'가 있다. 그리고 물리의 '상대성이론'에서는 뮤온의 상대론적 속도에 의한 시간수축현상과 관련하여 활용할 수 있다.

## II. 이론적 배경

일반적인 스파크 상자는 그림 1과 같이 일정한 간격으로 배열된 전극 판 사이에 불활성기체가 충전되어 있는 가스 상자와 섬광검출기(scintillation detector), 동시신호 판별기(coincidence unit), 고전압 펄스 시동장치(high voltage pulse trigger unit) 및 고전압 전원 장치로 구성된다.

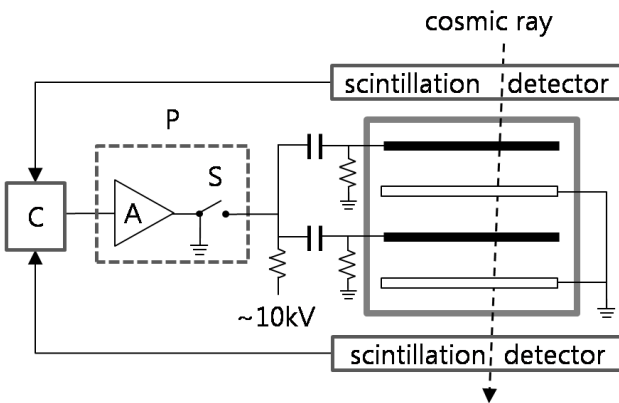


그림 1. 일반적인 스파크 상자의 개략적 구조도(C:뮤온신호 판별기, P:고전압 펄스 시동장치 A:증폭기 S:고전압 펄스 스위치).

우주선과 같은 하전 입자가 가스 상자의 위와 아래에 설치된 섬광검출기와 전극 판을 통과하면 섬광검출기에서는 신호가 출력되고 전극 판 사이의 기체는 이온화된다. 이 때 전극 판 사이에 생성된 불활성 기체의 이온쌍들은 수  $\mu\text{sec}$  동안 전극 판 사이에 남아 있게 된다. 한편 위와 아래의 섬광검출기에서 출력된 신호는 각각 동시신호 판별기에 입력되고 동시에 판별될 경우 수 볼트의 동시계수 신호가 출력된다. 동시계수 신호는 우주선 뮤온이 검출기로 입사되었음을 실험적으로 확인시키고 검증해주는 신호이다. 동시계수 신호는 고전압 펄스 시동장치에서 증폭되어 접지로 흘러 스위치 역할을 하게 되고, 고전압 펄스가 발생하여 고전압 전원 장치에서 가스 상자로 인가된다. 고전압 펄스는 전극 판 사이에 전자와 이온을 만들고 가속시킨다. 가속된 전자와 양이온의 궤적에는 스파크 방전이 긴 선으로 나타나며 시각적으로 입사된 입자의 궤적을 확인할 수 있다.

스파크 상자에서 주로 검출되는 것은 우주선 뮤온이다. 뮤온은 표준모형에서 3세대의 렙톤 중에서 두 번째 세대에 속한다. 뮤온은 전하를 띠고 있고 질량은 1세대 렙톤인 전자의 207배 정도 된다. 뮤온은 우주에서 직접 지구로 들어오는 고에너지의 1차 우주선과 지구 대기가 상호작용하여 주로 발생한다. 지상에서 관측되는 뮤온은  $1\text{cm}^2$  정도의 면적에 분당 1개 정도가 검

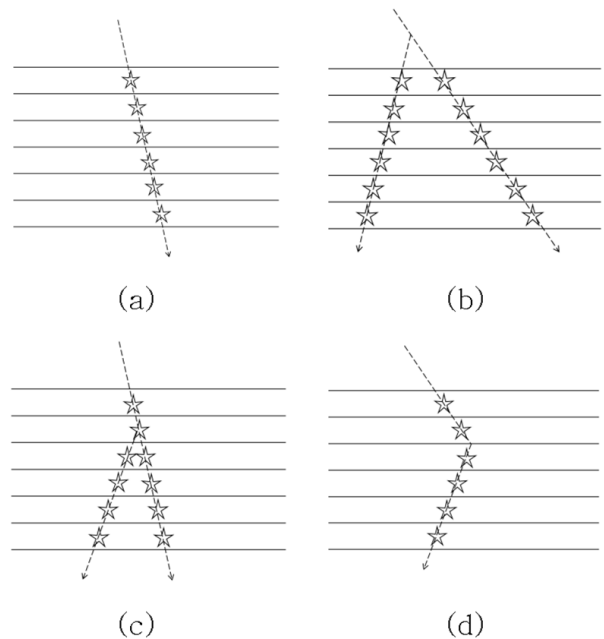


그림 2. 스파크 상자에서 관측 가능한 궤적 형태들 (a) 단일 궤적, (b) 이중 궤적, (c) 나무 뿌리 궤적, (d) 산란 궤적.

출되는 양이다(P.K.F. Grieder, 2001). 뮤온은 일상적인 상황에서 우리가 관측할 수 있는 단일의 기본 입자로서는 전자와 함께 거의 유일하다. 도체 판을 통과할 수 있는 고에너지의 뮤온과 같은 입자는 스파크 상자 내에서 원자들과 상호작용하여 산란하거나 붕괴할 수 있다. 그림 2는 스파크 상자에서 나타나는 여러 가지 형태를 나타낸 것이다.

그림 2의 (a)는 스파크 상자에서 가장 많이 관찰할 수 있는 단일 궤적이다. (b)는 이중 궤적으로서 스파크 상자 외부에서 상호 작용에 의해 거의 동시에 발생한 입자가 내부로 들어올 때 발생한다. (c)는 스파크 상자 내부에서 입자의 상호작용이 발생한 경우이다. (d)는 뮤온이 스파크 상자 내부에서 산란되었을 때 나타난다. 스파크 상자는 방사선 검출기 중에서 비교적 우수한 분해능을 가진다. 따라서 스파크 상자의 궤적을 이용하여 다양한 탐구가 가능하다. 스파크 상자를 정밀하게 제작하면 뮤온 입자의 붕괴 및 산란에 대한 탐구, 뮤온의 속도, 질량, 운동량 등을 측정하는 실험이 가능하다(Thomas Coan et al., 2006; Benjamin Brau, 2010; C. Amsler, 1974). 역사적으로는 1962년에 스파크 상자에서 레더만(Leon M. Lederman) 등이 기본 입자의 하나인 뮤온 뉴트리노를 최초로 발견하여 노벨상을 수상하였다.

### III. 스파크 상자의 제작 방법

스파크 상자는 대형으로 만들 수도 있지만 수업 시간에 활용하는 시범실험용으로는 탁상용 정도의 크기가 적당하다. 스파크 상자가 정상적으로 작동하기 위해서는 우주선에 의해서 전리된 1차 전자들이 사라지기 전에 고전압이 인가되어야 한다. 따라서 고전압 펄스 시동장치가 매우 중요하다. 이 실험에서는

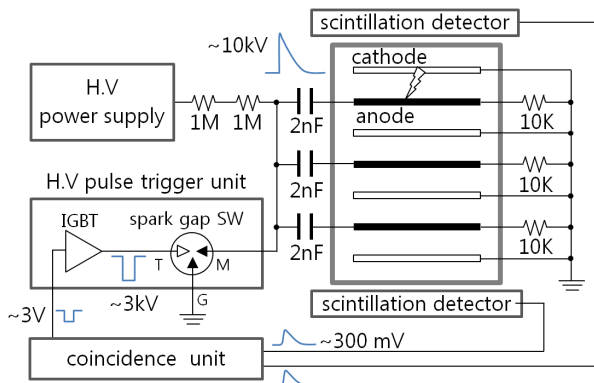


그림 3. 이 연구에서 제작한 스파크 상자의 전체 구조에 대한 개략도.

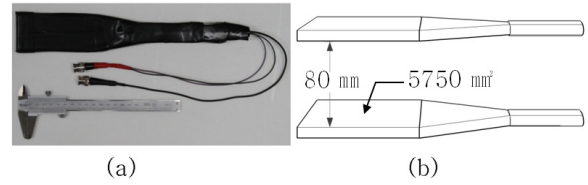


그림 4. (a) 제작한 섬광 검출기 실물 크기를 버니어캘리퍼스 크기와 비교한 그림, (b) 입사 우주선 뮤온을 신호를 확인하기 위하여 상하로 배치한 섬광 검출기 배열 모습 개략도.

저렴한 고속 스위칭 트랜지스터인 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 한 개와 자동차 점화플러그 한 개를 이용하여 고전압 펄스 시동장치를 제작하였다. 그리고 고가의 상용 전원장치를 대신해 코크로프트윌튼 회로를 이용하여 교육용 소형 스파크 상자에 적당한 고전압 전원 장치를 직접 제작하였다. 그림 3은 제작한 스파크 상자의 구조도이다.

뮤온에 의해 동시계수 신호가 생성되면 IGBT 트랜지스터에서 3kV 정도의 상승시간이 짧은 고전압 펄스가 발생한다. 이 과정을 고전압의 고속 스위칭이라고 한다. 이 펄스는 그림 3의 스파크 갭 스위치에 입력되어 시동 전극(trigger electrode) T와 접지 전극 G 사이에서 시동 방전(trigger spark discharge)을 일으킨다. 이때 발생된 자외선으로 인해 주 전극 M과 접지 전극 G 사이에도 불꽃 방전이 발생하고 고전압 전원 장치로부터 상승 시간이 짧은 고전압 펄스가 생성된다. 이 고전압 펄스는 축전기를 지나 가스 상자 내의 전극 판에 입력된다. 따라서 축전기와 연결된 전극 판은 양극 역할을 한다. 양극에 입력된 펄스로 인해 가스 상자의 두 전극 사이에서도 전자사태가 발생하여 스파크 방전이 일어난다.

섬광검출기는 플라스틱 섬광체(plastic scintillator)와 광전증배관(photomultiplier)을 결합하여 제작하였다. 플라스틱 섬광판을 이용한 검출기는 고등학교 수준에서도 충분히 제작할 수 있을 만큼 검출기 제작 방식이나 구조가 비교적 간단하며, 소요되는 부품들도 비교적 구하기 쉽고 취급이 쉬운 재료들이다(이정진 등, 2010). 그림 4. (a)는 제작한 플라스틱 섬광검출기의 모습이다. 제작한 플라스틱 섬광검출기 2개를 그림 4. (b)와 같이 판 사이의 거리는 80 mm로 하여 배열하였다.

수직 입사 뮤온 플럭스 밀도( $F_{\mu}$ )를  $80 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$  로 계산하면(Groom et al., 2000), 예상되는 계수율은  $0.41 \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$  이다. 제작한 검출기의 입체각(1.99 sr)을 고려하면 초당 0.82 개가 검출될 것으로 예상할 수 있다.

그림 5는 제작한 동시신호 판별기의 회로도이다. 동시신호

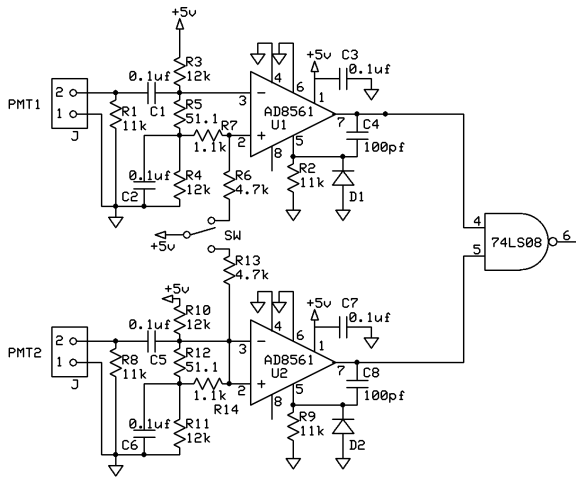


그림 5. 제작한 동시신호 판별기 회로도.

판별기는 가격이 저렴하고 구입하기 쉬운 고속 비교기(AD-8561)와 AND 게이트 소자(SN74LS08N)를 이용하여 제작하였다. 각 광전증배관에서 나온 신호는 고속 비교기(AD8561)에서 논리신호로 변환된다. 비교기는 입력신호가 문턱전압보다 높으면 양의 신호를 출력하는 OP-AMP 회로로 구성된다. 입력신호와 문턱전압이 모두 음의 값일 때에도 출력신호는 양이다. 출력신호와 입력 신호 사이에는 약 7ns의 지연시간이 있다. 비교기에서 출력된 고속 논리신호는 SN74LS08N 소자의 AND 게이트로 입력된다. 입력 신호가 모두 참(true)이 아니면 AND 게이트의 출력은 거짓(false)이다. 다시 말해, AND 게이트는 두 광전증배관의 신호가 동시에 들어왔을 때 참의 신호를 출력한다. SN74LS08N의 참의 출력 신호의 크기는 약 5V 정도 된다.

고전압 펄스 시동장치는 그림 6과 같이 IGBT 트랜지스터와 변압기 및 스파크 갭 스위치로 이루어진다. 소형 스파크 상자의 경우 고전압이 인가될 때까지의 총 지연시간이 500 ns 이하이면 전극 틈 효율(gap efficiency)이 100 %이며 600 ns 일 경우에 85 % 정도 된다(Meyer et al., 1961). 동시신호 판별기에

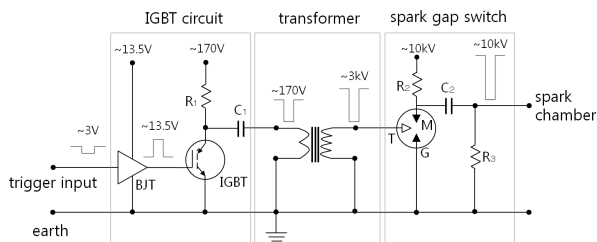


그림 6. 스파크 상자에 스파크를 유도하기 위한 고전압 펄스 시동장치 전체 개략도.

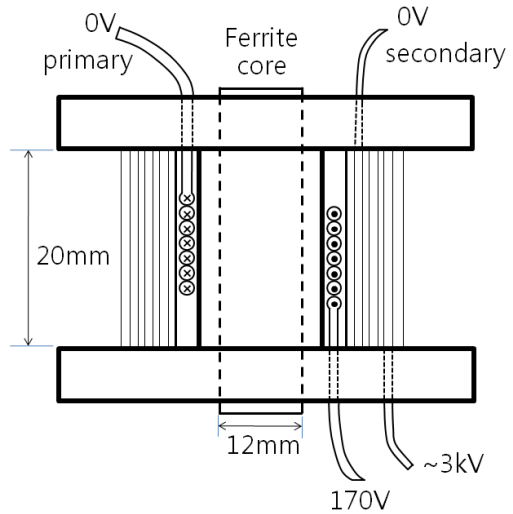


그림 7. 제작한 변압기의 구조도.

서 출력된 3 V의 신호를 BJT(Bipolar Junction Transistor) 전류 증폭기와 IGBT 트랜지스터에서 170 V로 증폭시키고, 변압기에서 다시 3 kV로 증폭시켜서 10 kV의 전원이 연결되어 있는 스파크 갭 스위치로 입력된다. 스파크 갭에서의 시동 방전으로 인해 스파크 상자에 고전압 펄스가 인가된다. 이러한 고전압 펄스 시동장치는 저렴하고 손쉽게 제작할 수 있으므로 소형 스파크 상자에 적절하다. 이 연구의 고전압 펄스 시동장치의 구조는 네덜란드 고에너지 연구소(NIKHEF: Dutch Institute for High Energy Physics)의 설계를 참고하였다.

변압기는 그림 7과 같이 실패 모양의 틀에 1차 코일과 2차 코일을 겹쳐 감아서 중심축을 공유하는 솔레노이드 방식으로 제작하였다. 고전압을 견뎌야 하며 지연시간이 최소화 되어야 하므로 구조적인 면과 재료를 고려하여 손으로 감아 직접 제작하였다. 고전압을 견디게 하기 위해 2차 코일을 감을 때 3층이 쌓일 때 마다 캡톤 테이프로 절연하였다. 40배 전압 수득율을 내기 위해 2차 코일은 한 층마다 40번씩 7층을 감아서 총 280회를 감았다.

스파크 갭 스위치는 쉽게 구할 수 있고 안정적이며 저렴한 자동차 점화플러그를 사용하여 제작하였다. 그림 8과 같이 점화플러그 보관용 플라스틱 케이스와 둥근 머리 볼트를 이용하여 3극 스파크 갭 스위치로 제작하였다. 주 전극 M과 접지 전극 G의 간격은 둥근 머리 볼트와 너트 및 와샤를 이용해서 조정이 가능하다. 그림 9는 만능기판에 IGBT 트랜지스터와 변압기 및 스파크 갭 스위치를 설치하여 완성한 고전압 펄스 시동장치이다.

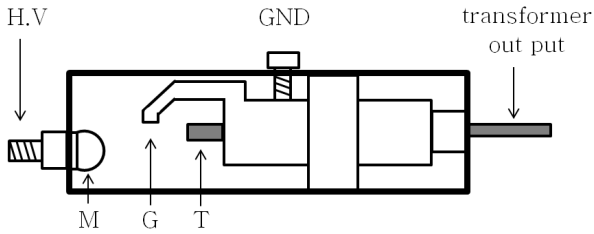


그림 8. 자동차 점화 장치를 개조한 스파크 갭 스위치의 구조도(M: 주전극, G: 접지 전극, T: 시동 전극).

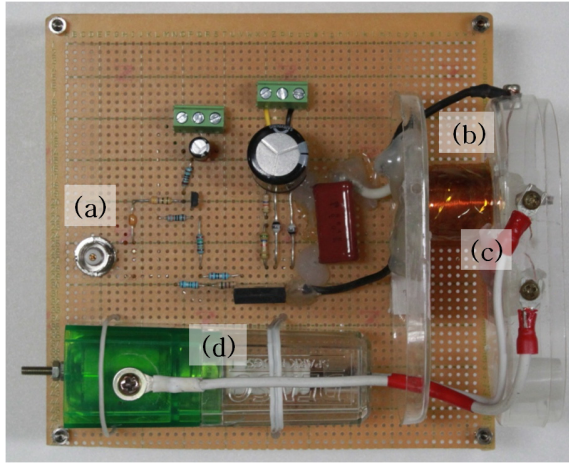


그림 9. 제작한 고전압 펄스 시동 장치의 실제 모습 (a) 무운의 동시계수 신호 입력 단자, (b) 변압기, (c) 보호용 스파크 갭, (d) 스파크 갭 스위치.

고전압 전원 장치는 코크로프트윌튼 회로를 기초로 제작하였다. 이 회로의 특징은 다이오드와 축전기를 직렬로 쌓아올려 쌓아올린 단수(stages)만큼 입력되는 교류전압의 배압 직류 전압을 얻을 수 있다는 점이다. 고전압 전원 장치는 알루미늄 전해축전기(47 mF, 450 V) 30개와 다이오드 (IN4007, 1000 V, 1 A) 30개를 만능기판에 납땀하여 총 15 단으로 완성하였다. 입력전원은 슬라이더스(AC 0 ~ 300V, 60 Hz)를 사용하였고, 무부하 상태에서 입력전압이 20 VAC 일 때 출력전압은 920 VDC 였으며 리플 전압은 10 V였다.

전극 판은 0.8 mm 두께의 알루미늄 판을 사용하여 총 7개를 제작하였다. 전극 판의 크기는 가로와 세로가 각각 128 mm × 100 mm 이다. 전극 틈 하나 당 전기용량은 약 14 pF 이다. 전극 판은 판의 모든 지점이 균일하게 제작되도록 유의하였다. 가장자리 효과(edge effect)에 의한 원하지 않는 방전을 방지하기 위해 모서리는 지름 7.0 mm로 둥글게 절단하였다. 간격자(spacer)는 전극 판과 전극 판 사이를 일정한 간격으로 떨어뜨

려 완전히 절연시키는 부품이다. 완전한 절연을 위해서 두께가 5 mm 인 균일하고 딱딱한 합성 고무판으로 제작하였다.

스파크 상자는 고전압을 이용하는 실험 장치이므로 안전과 안정적인 작동을 위해서 사용하는 전자부품의 내압과 전력을 고려하여야 한다. 저항은 순수탄소저항(pure carbon resistor) 등 고온에 잘 견디는 것을 사용하며, 축전기는 고압용 문손잡이형 축전기(doorknob capacitor)나 고압 세라믹 축전기를 사용한다.

가스 상자 본체는 전극 판과 가스가 들어가는 상자로써 투명한 폴리카보네이트(polycarbonate) 아크릴로 제작하였다. 가스 상자 내부의 크기는 170 mm × 110 mm × 50 mm (H) 이다. 가스 상자의 한 쪽 옆판에 저항 및 축전기를 조립하여 납땀하였다. 이때 저항은 전력 2 W인 것을 사용하였고, 축전기는 내압이 10 kV인 세라믹 축전기를 사용하였다.

스파크 상자 내부 충전 기체는 헬륨(He), 네온(Ne), 아르곤(Ar) 등 불활성 기체를 사용할 수 있다. 일반적으로는 헬륨과 네온을 혼합해서 사용하지만, 본 실험에서는 비용을 절감하기 위하여 아르곤만 사용하였다. 상자 내부가 다른 기체로 오염되어 있는 경우 1기압보다 약간 높은 압력으로 1시간 이상 흘려주어 가스 상자 내부가 충분히 안정화될 때 까지 기다려야한다. 스파크 상자의 가스 주입구와 가스 배출구는 자동멈춤밸브(stop-fitting valve)로 제작하여 튜브를 분리하면 자동으로 밀폐 되도록 하였다.

#### IV. 결과 및 논의

우주선에 의해 발생한 동시신호 판별기의 동시계수 신호와

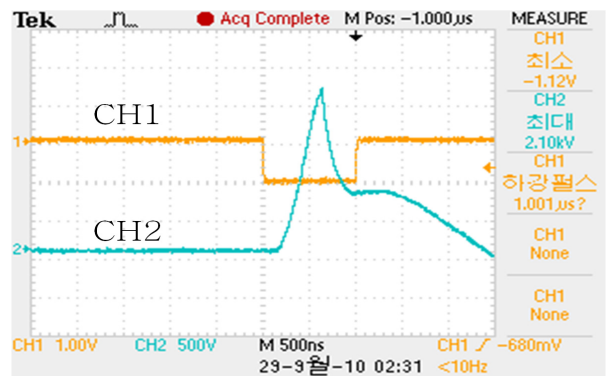


그림 10. 오실로스코프에서 관측되는 신호. CH1 신호는 우주선 무운의 입사 신호인 동시계수 신호, CH2 신호는 고전압 펄스 시동장치의 출력 신호를 표시.



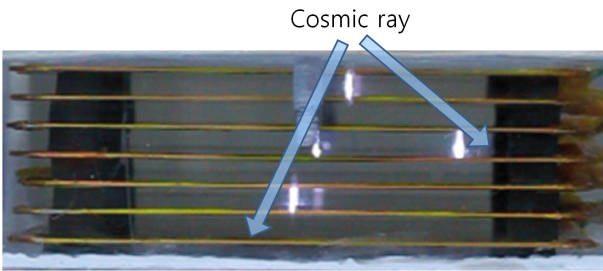


그림 11. 스파크 상자에서 우주선 뮤온 입자로 발생한 스파크 현상의 예시.

고전압 펄스 시동장치의 출력신호 사이의 지연시간을 확인하였다.

그림 10에 나타난 것과 같이 오실로스코프 CH1에 ~1 V 정도의 동시계수 신호가 입력되었을 때 고전압 펄스 신호 사이의 지연시간은 500-600 ns 정도였다. 입사 우주선 뮤온의 스파크의 사진은 스파크 상자를 작동시켜 HD급 동영상으로 촬영한 후 동영상으로부터 사진을 갈무리 하였다. 그림 11은 스파크 사진의 예이다.

## V. 결론 및 제언

고등학교에서 시범실험이나 물리 탐구활동으로 활용할 수 있고, 특히 과학고등학교 또는 과학중점고등학교에서 제작할 수 있는 소형 스파크 상자 제작 방법을 제안하였다. 구조가 간단하고 저렴한 코크로프트윌튼 고전압 전원 장치를 제작하여 스파크 상자 전원으로 사용하였고, 자동차용 점화플러그를 개조하여 스파크 상자를 작동하기 위한 부속장치인 고전압 펄스 시동장치를 제작하였다. 본 연구에서 제작한 스파크 상자에서 우주선 뮤온에 의한 궤적을 확인할 수 있었다. 스파크 상자는 2009년 개정교육과정의 1학년 과학의 '빅뱅과 기본입자', 물리의 '4가지 상호작용과 기본입자', '뮤온의 상대론적 속도에 의한 시간수축현상' 등의 교과 내용과 관련하여 시범실험용으로 활용할 수 있으며, 스파크 상자의 분해능을 높이면 뮤온 입자의 붕괴 및 산란에 대한 탐구, 뮤온의 속도, 질량, 운동량 등을 측정하는 탐구실험용으로 활용할 수 있다. 본 연구를 바탕으로 앞으로 더 정교하고 개선된 성능의 스파크 상자가 제작되어 스파크 상자를 이용한 다양한 연구와 과학교육이 진행되기를 기대한다.

## 감사의 글

이 연구는 한국교원대학교 2010학년도 KNUE 학술연구비 지원을 받아 수행하였습니다.

## Abstract

We constructed a small size spark chamber for use in educational demonstration at Korean high school. For produce required high voltage electrical pulses in the spark chamber, we used an commercial automobile spark plug. A 10 kV DC high voltage power supply which was needed also to operate spark chamber was made by use of Cockroft-Walton circuit. As a spark chamber inner gas, we used low cost argon gas. Finally, we observed electrical sparks which were happened by the incident cosmic muon particles in the spark chamber.

**Key words:** spark chamber, cosmic ray muon, 2009 high-school science curriculum, inquiry activity

## 참고 문헌

- 오원근 (2010) 2009 과학 및 물리교육과정 개정의 의미. 물리학과 첨단기술 19: 44.
- 이정진, 김기연, 김민성, 정금실, 김상년(2010) 우주선 뮤온 관측에 포함되어 있는 고등학교 수준의 과학 탐구활동의 분석. 현장과학교육 4(1): 10-18.
- Amsler C (1974) The determination of the muon magnetic moment from cosmic rays. Am. J. Phys. 42 ,1067-1069.
- Brau B (2010) Determining the muon mass in an instructional laboratory. Am. J. of Phys. 78(1): 64.
- Coan T (2006) A compact apparatus for muon lifetime measurement and time dilation demonstration in the undergraduate laboratory. Am. J. Phys. 74: 161-164.
- Grieder PKF (2001) Cosmic Rays at Earth, Elsevier Science.
- Gruppen C and Shwartz BA (2008) Particle Detectors, 2nd Ed. Cambridge University Press, p 160.
- Groom DE et al. (2000) Particle Data Group. The European Physical Journal C15.
- Meyer et al. (1961) A 14×14×7-in. thin plate spark chamber. Review of Scientific Instruments 32(5): 512-515.