

가속기를 이용한 폭약탐지시스템의 양성자 가속기 설계

Design of Proton Accelerator for Explosive Detection System using Accelerator

조용섭, 송우섭

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

가속기를 이용한 폭약 탐지 시스템은 양성자 가속기를 이용하여 가속시킨 1.75MeV 양성자빔을 ^{13}C 표적에 조사하여 발생된 9.17 MeV 감마선이 폭약 내에 질소(^{14}N)핵과의 광핵공명반응으로 방출되는 감마선을 감마선 검출기를 이용하여 폭약 유무 및 그 위치를 탐색하는 장치이다. 이 장치는 크게 양성자 가속기, 감마선 발생 표적, 감마선 검출기로 구성되며, 요구되는 양성자빔 전류는 10mA로 계산되었다. 이러한 대전류 양성자빔을 가속할 수 있는 양성자 가속기는 음이온원, 빔 광학계, 가속관, 고전압 전원, Stripper 등으로 구성된다. 본 연구에서는 빔 광학계 설계, Stripper 및 진공 설계, 가속관 설계를 수행하고 이를 종합하여 양성자 가속기 전체를 설계하였다. 더불어 시험 제작한 가속관의 진공 배기 시험에 대해 기술한다.

Abstract

The system for detecting existence and position the explosive using accelerator is being developed. The gamma is produced by 1.75 MeV proton through the Proton-Gamma reaction in ^{13}C target, and the scattered gamma with ^{14}N in explosive is detected by gamma detector. The system consists of accelerator, target, and detector. The required proton beam current is 10mA, which is determined by calculation. The large current proton beam can be accelerated in tandem proton accelerator, which is designed with negative ion source, accelerating column, high voltage power supply, and stripper. The accelerator system design with optics design, vacuum design, and accelerating column design are reported in this paper and the vacuum test of the accelerating column are described.

1. 서 론

가속기를 이용한 폭약 탐지 시스템은 양성자 가속기를 이용하여 가속시킨 1.75MeV 양성자빔을 ^{13}C 표적에 조사하여 양성자 포획반응 $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ 으로 발생된 9.17 MeV 감마선이 폭약 내에 필수적으로 포함된 질소(^{14}N)핵과의 광핵공명반응 (Photo-nuclear Resonance Reaction)으로 4π 방향으로 퍼져 나온 감마선의 양을 BGO 검출기 등 감마선 검출기를 이용하여 폭약 유무 및 그 위치를 탐색하는 장치이다. 최근에 개발된 비파괴 폭발물 탐지 장치로 X선, IR파, 중성자를 이용한 장치들이 고안되고 실용화되었다. X선, IR파를 이용한 장치의 경우 신뢰성에 문제가 있고, 중성

자의 경우 질소(^{14}N) 등 폭약 구성원소의 중성자흡수 단면적이 매우 낮으므로 원리적으로는 가능하지만 실용성이 매우 낮다. 또한 중성자는 침투성이 강하기 때문에 차폐에 문제가 있다. 이들이 갖고 있는 문제점인 신뢰성과 안전성을 향상시키기 위해 가속기를 이용한 폭약 탐지 시스템을 개발하고 있다. 이 장치는 그림 1과 같이 크게 양성자 가속기, 감마선 발생 표적, 감마선 검출기로 구성된다.

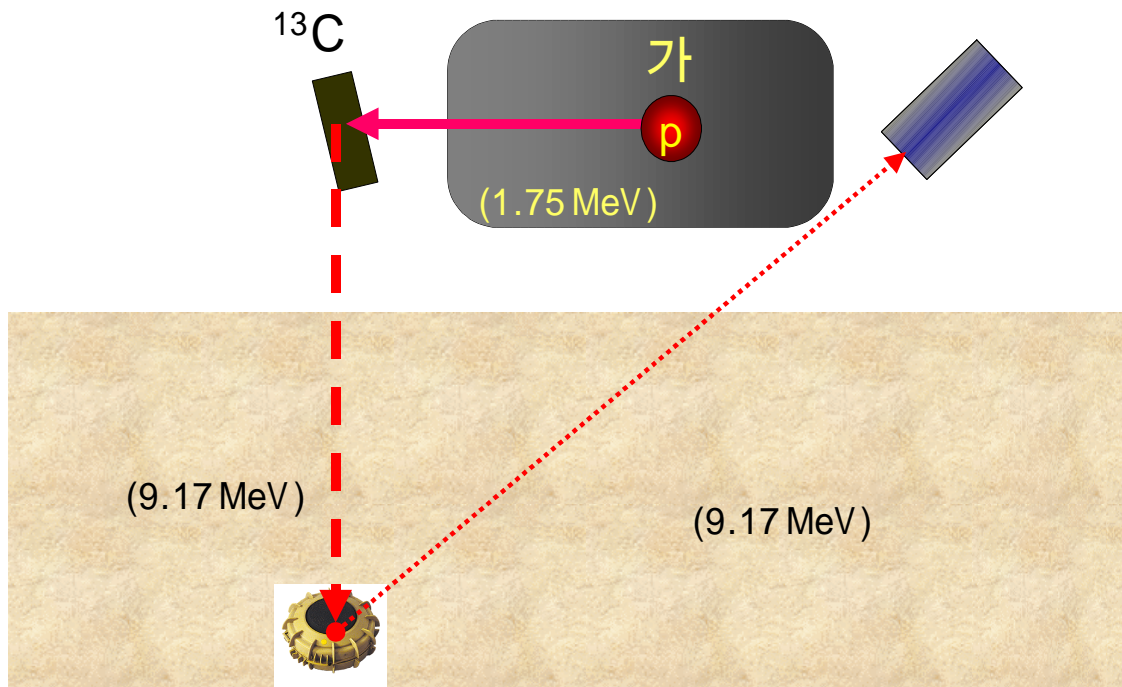


그림 1. 가속기를 이용한 폭약 탐지 원리도

이 장치에서 요구되는 양성자 빔 전류량은 최소 크기의 폭약이 있는 경우 초당 검출기에서 폭약 유무를 통계 처리가 가능한 10 counts가 일어질 수 있는 조건으로 하였다. 자세한 계산은 표 1과 같으며, 이에 필요한 1.75MeV 양성자빔은 10mA로 계산되었다.

표 1. 필요한 1.75MeV 양성자빔 전류량 계산

- 양성자 전류량 : 10mA = 6.25×10^{16} P/s
- 탄소 표적생성 총감마선 : $1.0 \times 10^{-8} \gamma/\text{P} \times 6.25 \times 10^{16} \text{ P/s} = 6.25 \times 10^8 \gamma/\text{s}$
- 폭약-표적거리 : 30 cm
- 최소 폭약 크기 : 1cm x 3cm(폭) x 1cm(두께) = $9.5 \times 10^{-5} \text{ Sr}$
- 폭약 입사 감마선량 : $6 \times 10^4 \gamma/\text{s}$ (흡 감쇠는 무시)
- 폭약 방출 감마선 총량 : $8.5 \times 10^3 \gamma/\text{폭약}$ (γ 방출률 : 85%)
- 검출기 입체각 : 10cm x 10 cm
- 검출 효율 : 10%
- 폭약 - 검출기 거리: 50 cm
- 검출기 입체각 = $8.8 \times 10^{-3} \text{ Sr}$
: 최종 검출량 : $8 \times 10^3 \gamma/\text{sec} \times 8.8 \times 10^{-3} \text{ Sr} \times 0.1 = 10 \text{ count/sec}/10\text{mA}$

2. 양성자 가속기의 설계 조건

감마선 검출에 필요한 빔 에너지 안정도, 빔 전류 안정도, 표적에서의 빔 발산각 및 표적에서의 열 제거 및 표적 수명에 필요한 표적에서의 빔 크기 및 불순물 등의 문제를 고려하면, 필요로 하는 양성자 빔의 조건은 표 2와 같이 주어진다. 이러한 조건을 만족하기 위해 가속기에서 중요한 부분은 조건을 만족하는 가속 전원이 필수적이며, 가속기 내에서의 빔이 빔 광학적 측면에서 이러한 조건을 만족할 수 있도록 설계되어야 한다.

표 2. 양성자 빔의 조건

- 가속 입자 : 양성자
- 가속 에너지 : $1.8\text{MeV} \pm 0.04\text{MeV}$ (2%)
- 가속 전류 : $10\text{mA} \pm 0.5\text{mA}$ (5%)
- 표적 빔 크기 : 20mm 직경 (1σ)
- 빔 발산각 : 10mrad 이하
- Off Energy 및 불순물 : 1% 이하

이러한 조건을 만족할 수 있는 양성자빔을 얻기에 가장 적당한 가속기 형태는 그림 2에서 보이는 바와 같이 고전압 전원으로 Cockroft-Walton 회로를 채용한 탄뎀 정전가속기이다. 이 가속기는 음의 전하를 갖는 수소빔을 만드는 음이온원, 이온이 통과하여 에너지를 얻는 가속관 및 가속 전원으로 구성된다.

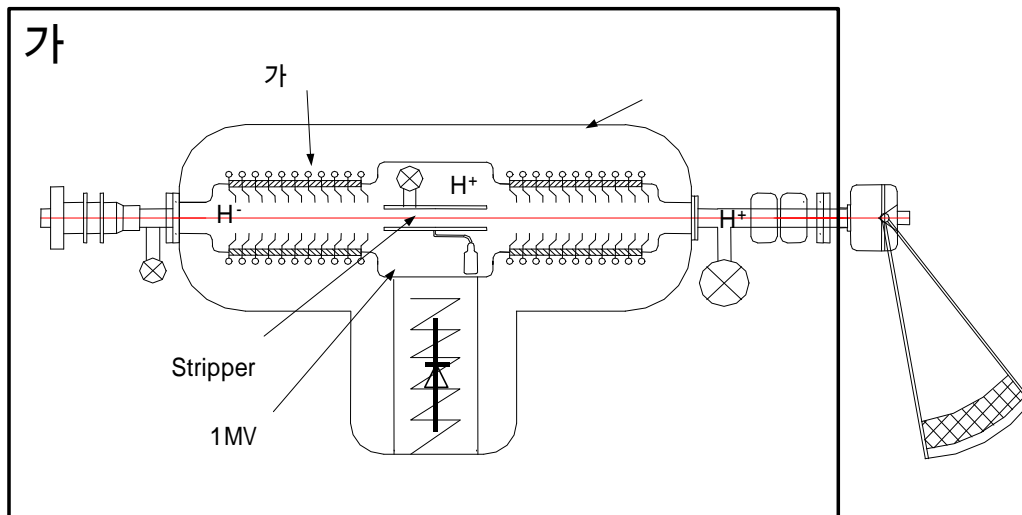


그림 2. 가속기를 이용한 폭약 탐지 시스템 개략도

3. 양성자 가속기 빔광학 설계

본 탐지 시스템에서 요구되는 10mA의 양성자 빔 전류는 현재까지 일반적으로 사용되고 있는 가속기 전류 ($\sim \mu\text{A}$)에 비해 상대적으로 매우 큰 값이다. 이러한 전류를 가속하는 경우 양성자 입자 사이의 전기적 반발에 의해 빔이 발산하게 된다. 따라서 기존의 가속기 설계에 사용되던 Matrix 법을 사용할 수 없어, 입자간 전기적 반발을 고려한 빔 궤적 추적법을 이용하여 빔 궤적

을 구하여 빔 가속계를 구성하여야 한다. 그림 3는 빔 궤적법을 이용한 전산 코드 (IGUN)를 사용하여 최적화한 양성자 가속기 내에서의 빔 궤적이다.

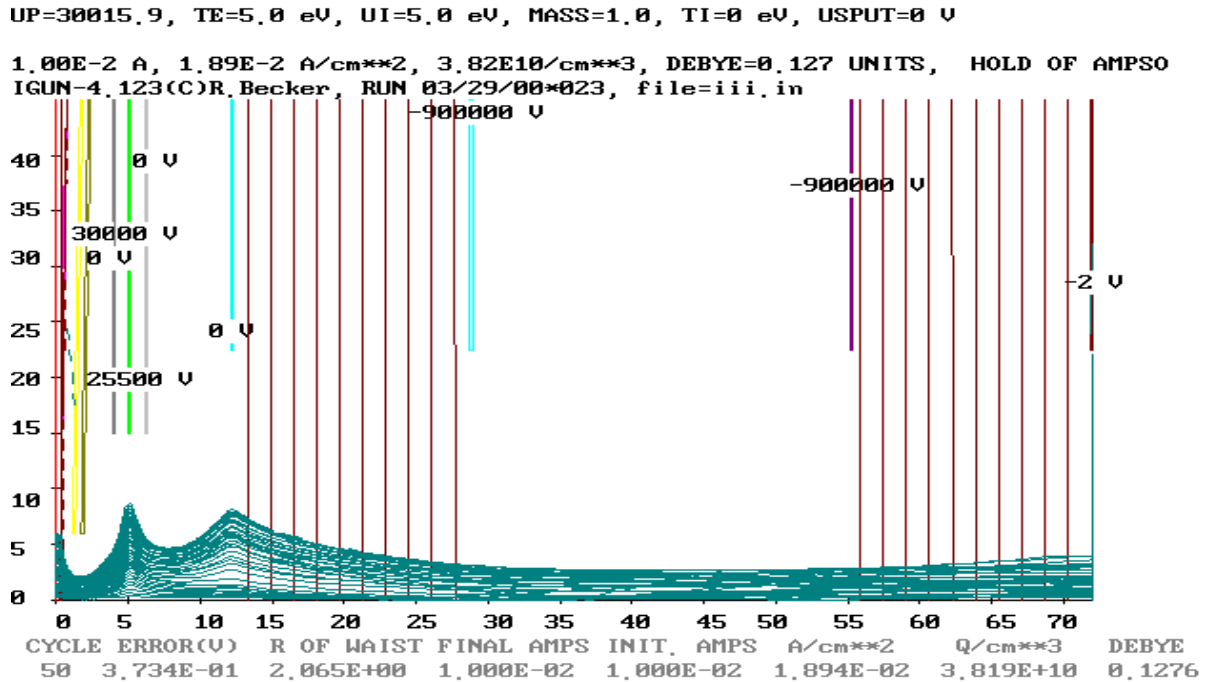


그림 3. 양성자빔 최적화 궤적

본 가속기에서는 시스템 크기의 최소화를 목적으로 빔의 집속을 위해 정전 렌즈를 사용한 직선형 빔 집속계를 구성하였다. 이러한 빔 집속계는 고전압 터미널 내에 위치하여 음이온을 양이온으로 변화하는 Stripper 영역에서 빔 크기가 최소화 되도록 최적화 설계되었다. 빔 에미턴스는 0.4 cm mrad으로 이온원에서 출발한 빔 에미턴스 1.1 cm mrad에 비해 1/3로 감소하였다. 빔 에미턴스의 감소는 빔 에너지 증가에 따른다.

4. Stripper 및 진공 설계

Tandem 가속기에서는 고전압 터미널 내에 Stripper를 두어 이온원에서 출발하여 고전압 터미널까지 가속된 음이온을 양이온으로 변화하여야 한다. 이러한 목적으로 사용되는 Stripper는 일반적으로 다음과 같은 형태의 것이 있다.

- 고체 표적 Stripper
- 액체 표적 Stripper
- 기체 표적 Stripper

고체 Stripper의 경우 탄소 박막이 가장 일반적으로 사용되고 있으며, 장치가 가장 간단한 장점이 있다. 그러나, 박막의 수명이 짧고, mA 이상의 대전류인 경우 박막에서의 발열로 인해 박막 손상이 문제가 되어 본 가속기 설계에는 사용하기 어렵다. 액체의 경우 기름막 등을 이용하는 방식으로 연구가 이루어졌으나, 아직 좋은 결과는 얻지 못하고 있다.

기체 Stripper는 일반적으로 안정된 기체인 질소 기체를 이용하는 경우가 대부분이며, 높은 표적 밀도를 유지하기 터보 분자 펌프를 사용하여 차등 진공계를 구성하는 것이 일반적이다. 현재 소형 극저온 냉각기를 이용한 저온 펌프를 구성하는 경우도 있으나, 장치가 너무 커지는 단점이 있으므로, 본 연구에서는 질소 기체를 이용한 터보 분자 펌프 차등 진공계로 Stripper를 구성, 설

계하였다.

Stripper 내의 질소 표적 밀도에 따라 수소 음이온의 전하 변환 분율을 계산하면 그림 4와 같은 그래프를 얻을 수 있다. 고전압 터미널에 도달하는 빔 출력은 10kW 이므로, 최소한 90% 이상의 빔 변환 효율을 얻어야 한다. 따라서 이때 필요한 표적 밀도는 2×10^{16} 질소/cm² 이상이며, 이를 진공 단위로 환산하면 1 torr • cm에 해당한다.

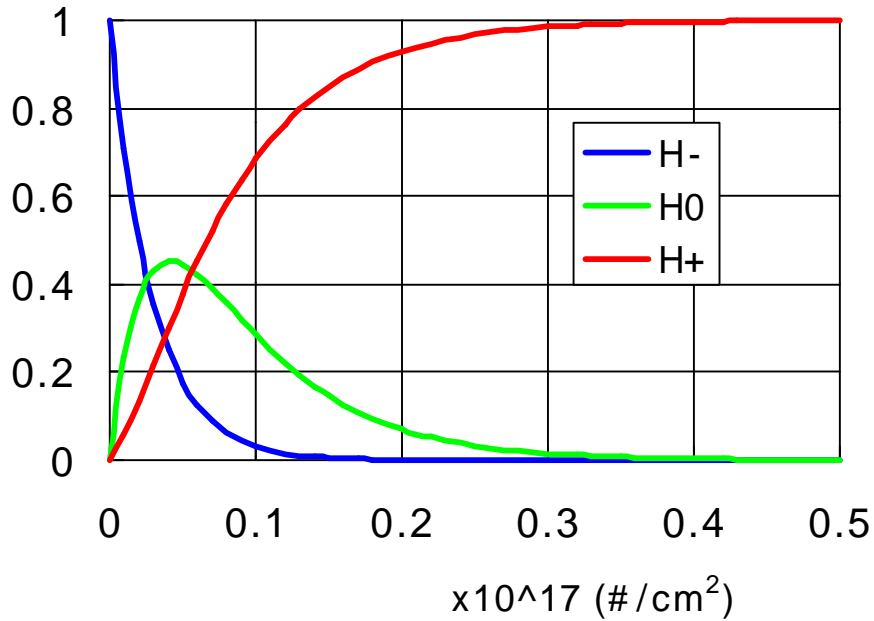


그림 4. Stripper 내의 질소 표적 밀도에 따른 수소 음이온의 전하 변환 분율

Stripper는 Stripping Gas로 사용될 질소의 진공 콘덕턴스가 충분히 작도록 제작되어야 한다. 진공 콘덕턴스가 큰 경우, 즉 Stripper의 직경이 큰 경우 Stripping Gas 주입량이 증가하여 가속관 내의 진공도가 올라가 방전이 발생된다. Stripper의 직경을 너무 작게 하면 빔이 Stripper에 충돌하여 빔의 손실이 일어날 수 있으며, 이로 인해 고전압 전원이 충분한 전압을 공급하기 어렵게 된다. 그림 5는 Stripper의 개념 설계이다.

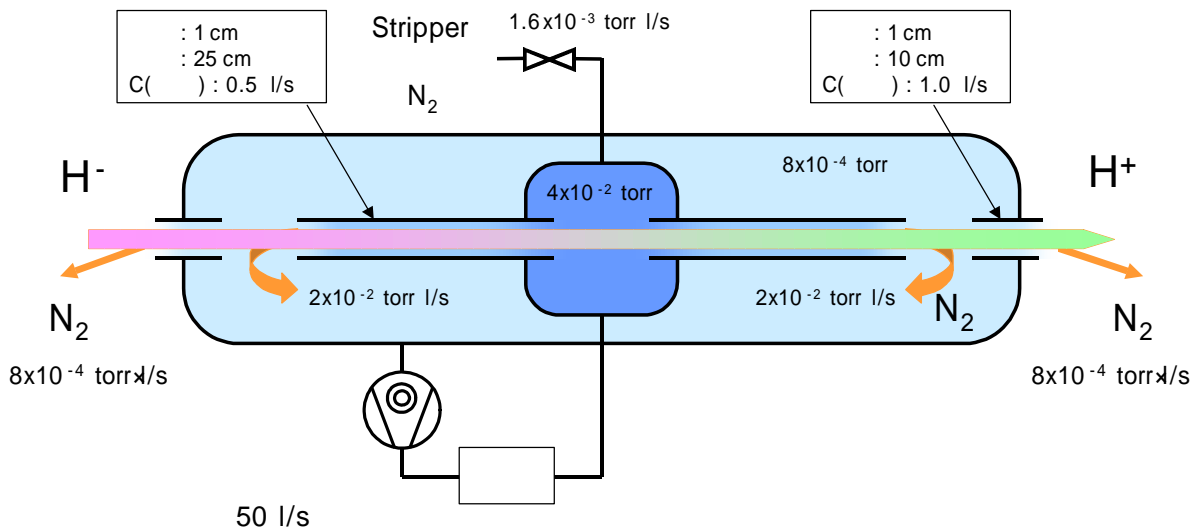


그림 5. Stripper 개념 설계

가속기 내에서 양성자 빔이 가속되기 위해서는 양성자 빔의 통과 영역의 진공도가 최소한 1×10^{-5} torr 이하가 되어야 한다. 이러한 진공도를 유지하기 위해 본 탐지 시스템에서는 500 l/s 저온 펌프 4대를 이용한 진공 배기 시스템을 설계하였다. 기체 부하는 음이온원에서 수소 기체, Stripper에서의 질소 기체, 가속관 알루미늄 및 챔버에서 방출되는 일산화탄소 등이다. 이러한 기체 부하에서 진공도가 요구조건을 만족하도록 챔버의 격판에 있는 개구 직경을 조절하였다. 진공 배기 시스템의 개념도는 그림 6과 같다.

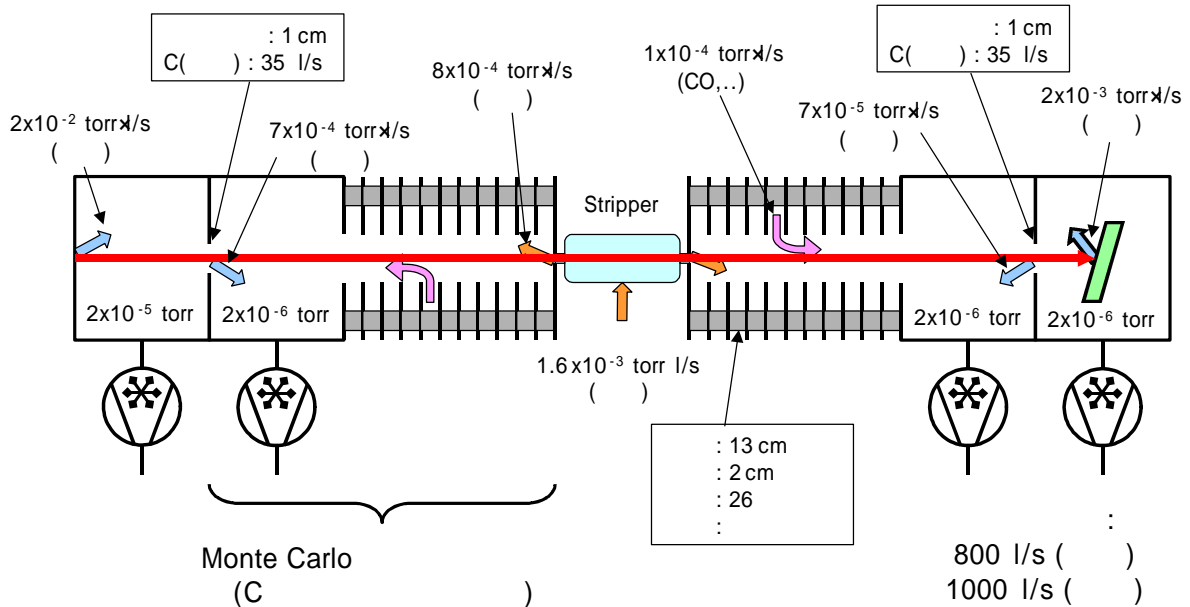


그림 6. 진공 배기 시스템 개념 설계

5. 가속관 설계 및 시험 제작

본 탐지 시스템에서 사용될 가속기의 부품 중 가장 중요한 것은 가속관이다. 이 가속관은 2MV/m의 고전압에 견딜 수 있도록 제작되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 고전압에 견딜 수 있는 가속관을 설계하여 제작하였다.

절연체로는 고전압 절연 강도 및 기계적 강도가 우수한 알루미늄을 사용하기로 하였다. 이때 알루미늄 절연체의 높이는 그림 7과 같이 전압 이론에 근거하여 2cm로 하였다.

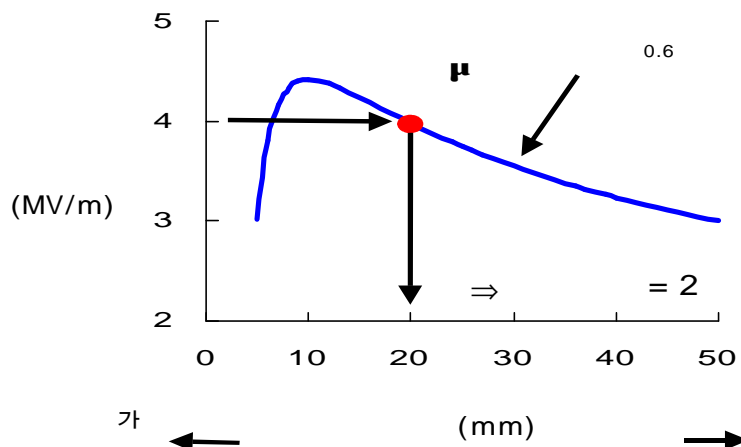


그림 7. 알루미늄 절연체의 높이 결정

가속관의 절연 파괴는 일반적으로 절연물, 전극, 진공이 서로 만나는 Triple Junction에서 방전이 개시되어 진행된다. 따라서, 이러한 방전을 억제하기 위해서는 이 점에서의 전장 강도가 낮아지도록 절연체를 설계하여야 한다. 그림 8과 같이 POSSION Code를 이용하여 알루미늄의 진공면을 조정하여 Triple Junction에서의 전장 강도가 평균 전장 강도의 1/2이 되도록 하였다.

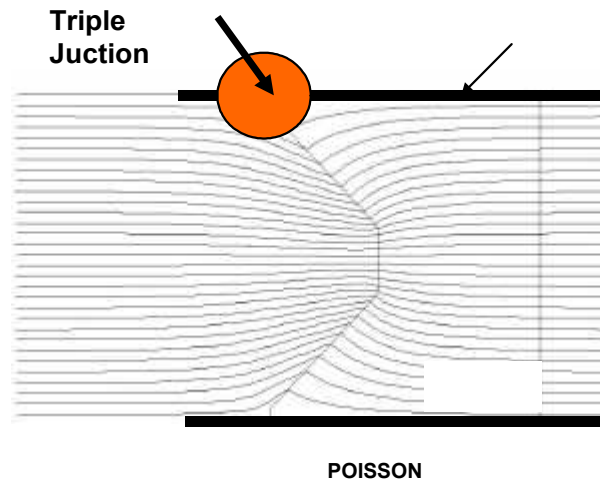


그림 8. 알루미늄 절연체에서의 전장 분포

2cm 높이의 알루미늄 세라믹 링과 0.5 mm Kovar 판을 이용하여 Brazing 방법으로 제작하도록 하였다. 설계된 가속관은 그림 9와 같다.

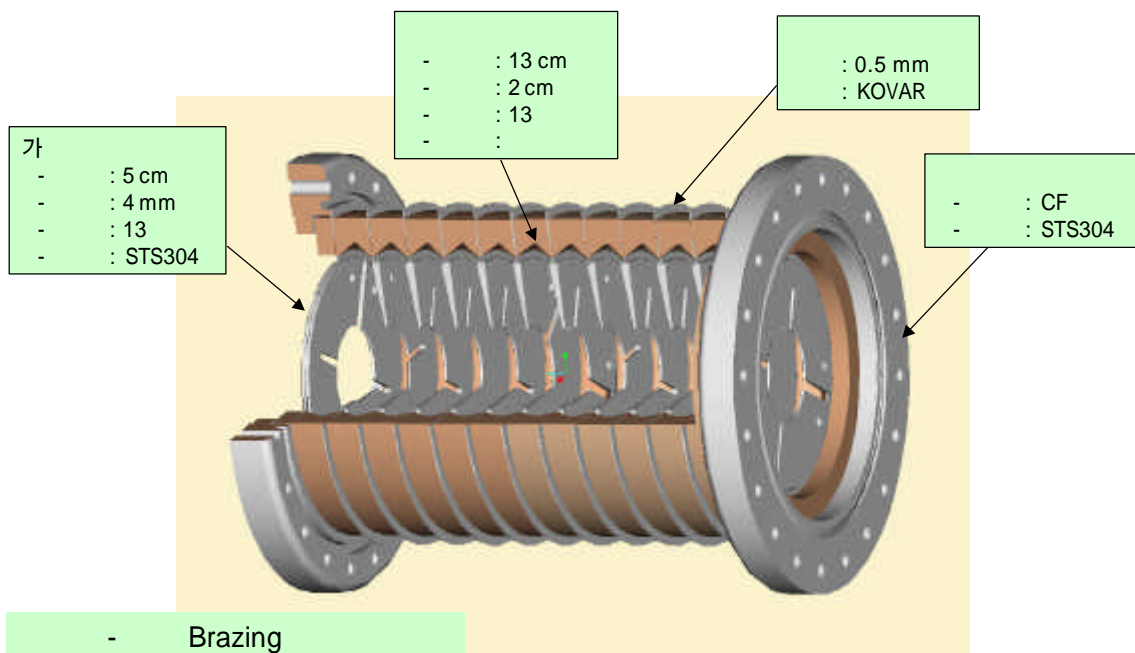


그림 9. 가속관 설계

이러한 설계를 바탕으로 가속관을 제작하였다. 제작된 가속관은 그림 10과 같으며, 이 가속관을 이용하여 현재 진공 배기 시험을 수행하였다. 50l/s 터보 분자 펌프를 이용하여 진공 배기 시험을 수행한 결과, 이 가속관의 진공도는 총 배기시간 100시간에 1×10^{-8} torr 이하가 되었다. 따라서 이 가속관은 진공 요구 조건을 충분히 만족하고 있으므로, 가속관 전체에 필요한 4개의 가속관을 제작 완료하였다.

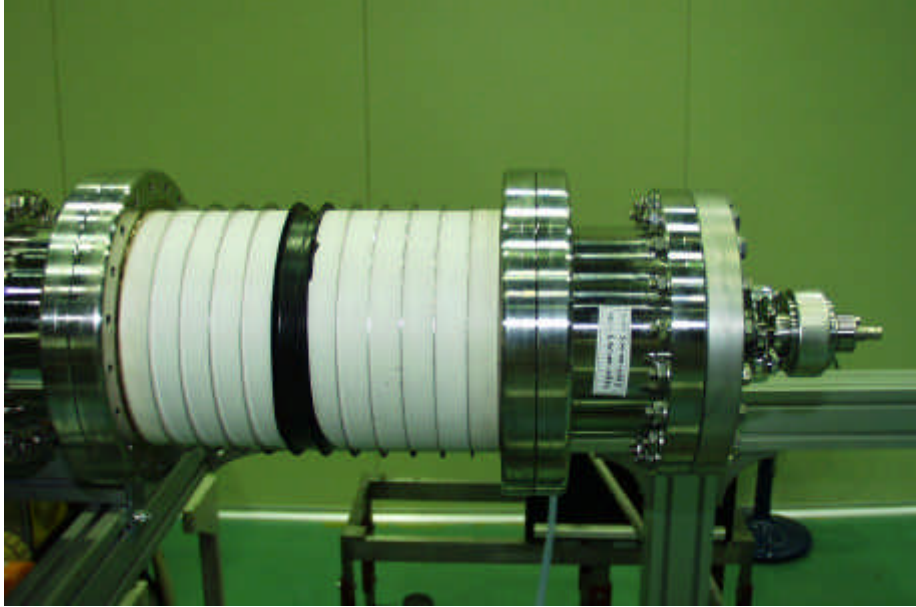


그림 10. 제작된 가속관

제작된 완료된 가속관은 현재 진공 시험 및 고전압 절연 시험을 거치고 있다. 고전압 시험은 1단계로 대기 중에서 수행될 예정이며, 이때의 인가 전압은 대기 내전압을 고려하여 고압 용기에서 인가될 전압의 1/3로 수행된다. 고압 용기는 5기압 SF 기체를 사용할 예정이므로 대기 중에서 1/3 내전압을 갖는다면 충분한 절연 전압을 가진다고 할 수 있다. 그림 11은 진공 및 고전압 시험 장치이

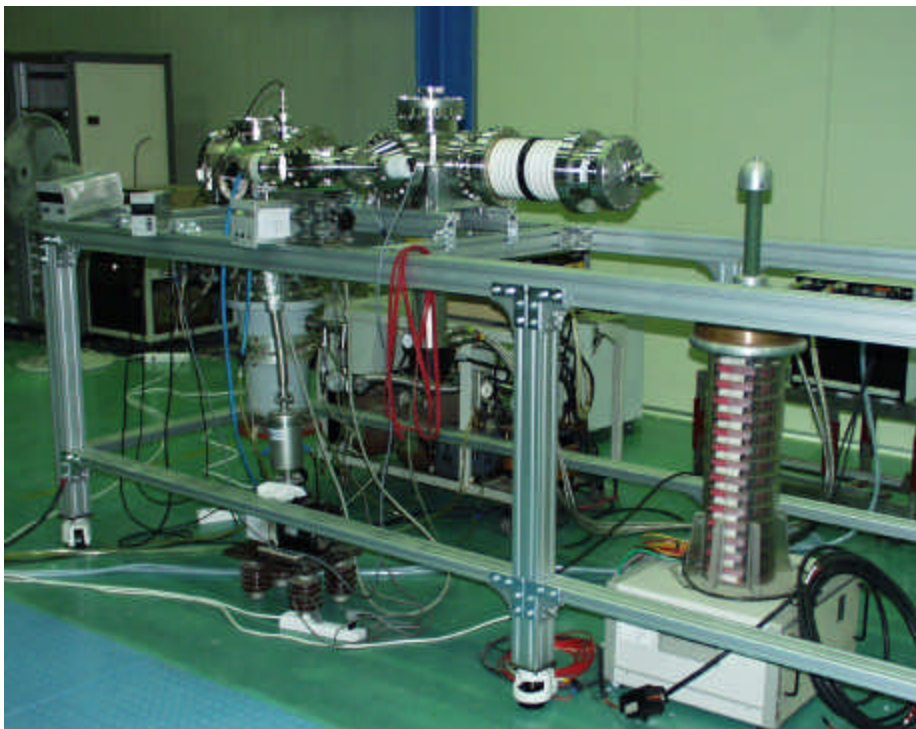


그림 11. 가속관 시험

6. 양성자 가속기 종합 설계

앞에서의 설계 결과를 바탕으로 가속기 전체에 대한 PRO/E Code를 사용하여 3차원 도면을 작성하였다 (그림 12). 가속관의 절연 기체 측 절연 강도를 높이기 위해 등전위 링을 가속관 주변에 설치하고, 고전압 절연을 위해 가속관, Stripper, 및 고전압 전원은 5기압 SF₆ 고압 용기에 넣을 예정이다. 진공 배기 장치의 운영을 위해 가속관 양단에 게이트 진공 밸브를 두었다. 진공 용기는 SUS304로 설계되었으며, 모든 플랜지는 진공 리크를 최소화하기 위해 CF 형태로 하였다. 가속기 전체 길이는 3m 정도로 가능한 소형이 되도록 하였다.

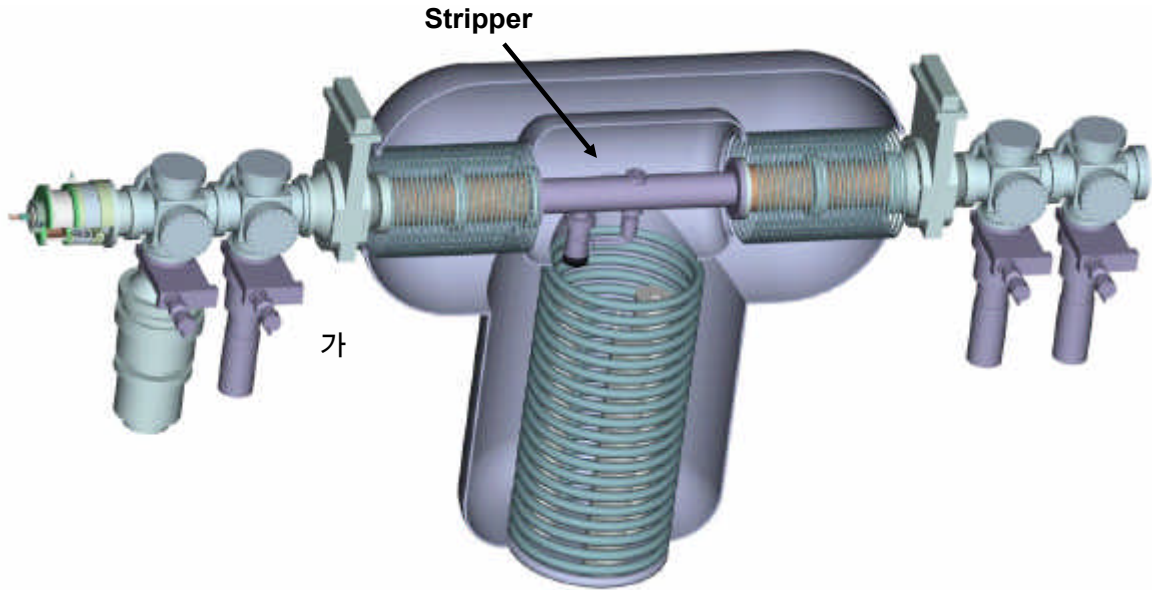


그림 12 양성자 가속기 3차원 도면

5. 결론

가속기를 이용한 폭약 탐지 시스템의 양성자 가속기의 빔 광학 설계를 수행하였다. 공간 진하 효과가 큰 10mA의 양성자 빔을 가속관에 입사하는 시스템에 대해 IGUN 코드를 이용하여 계산하였다. 이온원, 단일 Einzel 렌즈, 가속관으로 이루어진 직선 광학계에서 Stripper를 통과할 수 있는 광학계를 구성할 수 있었다. 단순한 광학계로 이러한 대전류 빔을 가속할 수 있으므로, 빔 손실률이 매우 낮은 장치를 제작할 수 있을 것으로 예상된다.

가속기를 이용한 폭약 탐지 시스템에서 사용되는 원리를 원리 실증 실험을 통해 이미 확인하였다. 이 실험을 통해 폭약 탐지가 가능하다는 결론을 얻을 수 있었다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 이 시스템에 필요한 양성자 가속기를 설계하였다. 이러한 대전류 양성자빔을 가속할 수 있는 양성자 가속기는 음이온원, 빔 광학계, 가속관, 고전압 전원, Stripper 등으로 구성되며, 본 연구에서는 빔 광학계 설계, Stripper 및 진공 설계, 가속관 설계를 수행하고 이를 종합하여 양성자 가속기 전체 설계를 완료하였다. 더불어 시험 제작한 가속관의 진공 배기 시험을 수행하였다. 각 부분품에 대한 제작이 완료되면 시스템 구성을 하여 본격적인 탐지 시험을 수행할 예정이다.

후기

본 연구는 과학기술부의 민군겸용기술개발사업으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- 1] I.G. Brown, "The Physics and Technology of Ion Sources", John Wiley & Sons, New York, 1989.
- 2] R.B. Miller, "An Introduction to the Physics of Intense Charged Particle Beams", Plenum Press, New York, 1982.
- 3] M. Reiser, "Theory and Design of Charged Particle Beams", John Wiley & Sons, New York, 1994.
- 4] S. Humphries, Jr., "Charged Particle Beam", John Wiley & Sons, New York, 1990.
- 5] W.B. Herrmannsfeldt, "Simulation of Extraction of Positive Ion from Plasma (IGUN CODE)", Scientific Simulation Service, Germany, 1992.