'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

가속기를 이용한 폭약탐지스템의 양성자빔 광학 설계

Design of Proton Beam Optics for Explosive Detection System using Accelerator

조용섭, 하장호, 한장민, 송태영, 김용균, 이재형, 주포국, 최병호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

황용석

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산51-1

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 빔 광학계는 공간 전하 효과를 고려하여 구성하여야 한다. 본 논문에서는 가능한 간단한 빔 광학계를 사용하여, 대전류 이온빔을 가속할 수 있는 광학계를 구성하였다.

Abstract

The system for detecting existence and position the explosive using accelerator is being developed. The gamma is produced by 1.75MeV 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 optical system, which is designed with simulation including space charge effect. The simple optical geometry is adapted for the optics design for the accelerator, and the details are reported in this paper.

1. 서 론

가속기를 이용한 폭약 탐지 시스템은 양성자 가속기를 이용하여 가속시킨 1.75MeV 양성자빔을 ^{13}C 표적에 조사하여 양성자 포획반응 $^{13}C(p,\gamma)^{14}N$으로 발생된 9.17 MeV 감마선이 폭약 내에 필수적으로 포함된 질소(^{14}N)핵과의 광핵공명반응 (Photo-nuclear Resonance Reaction)으로 4π방향으로 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, 중성자의 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.

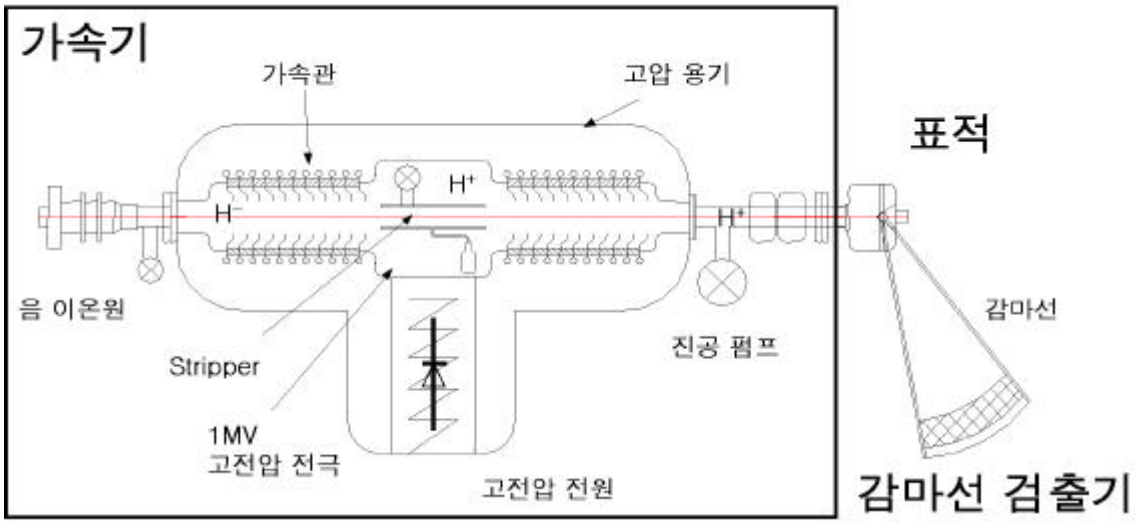

그림 1. 가속기를 이용한 폭약 탐지 시스템 개략도

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

표 1. 필요한 양성자빔 전류량 계산

- **양성자 전류량** : 10mA =6.25x10^{16} P/s
- **탄소 표적생성 총감마선** : 1.0x10^{-8} γ/P x 6.25x10^{16} P/s = 6.25 x 10^{8} γ/s
- **폭약-표적거리** : 30 cm
- **최소 폭약 크기** : 1cm x 3cm(**폭**) x 1cm(**두께**) = 9.5x 10^{-5} Sr
- **폭약 입사 감마선량** : 6x10^{4} γ/s (**흙 감쇠는 무시**)
- **폭약 방출 감마선 총량** : 8.5x 10^{3} γ/ **폭약** (γ **방출률** : 85%)
- **검출기 입체각** : 10cm x 10 cm
- **검출 효율** : 10%
- **폭약 - 검출기 거리**: 50 cm
- **검출기 입체각** = 8.8x10^{-3} Sr
  : **최종 검출량** : 8x10^{3} γ/sec x 8.8x10^{-3} Sr x 0.1 = 10 count/sec/10mA

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 중요

한 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 : 1.8MeV ± 0.04MeV (2%)
- 가속 전류 : 10mA ± 0.5mA (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 1에서 보이는 바와 같이 고전압 전원으로 Cockroft-Walton 회로를 채용한 탄뎀 정전가속기이다. 이 가속기는 음의 전하를 갖는 수소빔을 만드는 음이온원, 이온이 통과하여 에너지를 얻는 가속부 및 가속 전원으로 구성된다. 본 논문에서는 이 가속부의 빔 광학 설계에 대해 기술하고자 한다.

2. 이온원

가속부를 빔광학 설계하기 위해서는 이온원에서 발생된 이온의 특성을 알아야 한다. 현재 이 음이온원에 대한 연구가 진행되고 있으므로, 이온원에서 인출된 빔에 대한 상세한 정보는 이온원을 제작한 후 빔 특성을 측정하여 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이온원에서 얻을 수 있는 최적의 빔 상태를 IGUN Code를 이용하여 추정하였다. 얻어야 하는 빔은 음이온이므로, 전극의 구조가 달라질 수 있으나, 가속부에서 필요로 하는 빔의 형태는 동일하여야 하므로 여기서 얻어지는 빔을 가속부에 넣어 빔 광학을 계산할 수 있다. 계산된 최적의 빔 궤적은 그림 2와 같다.

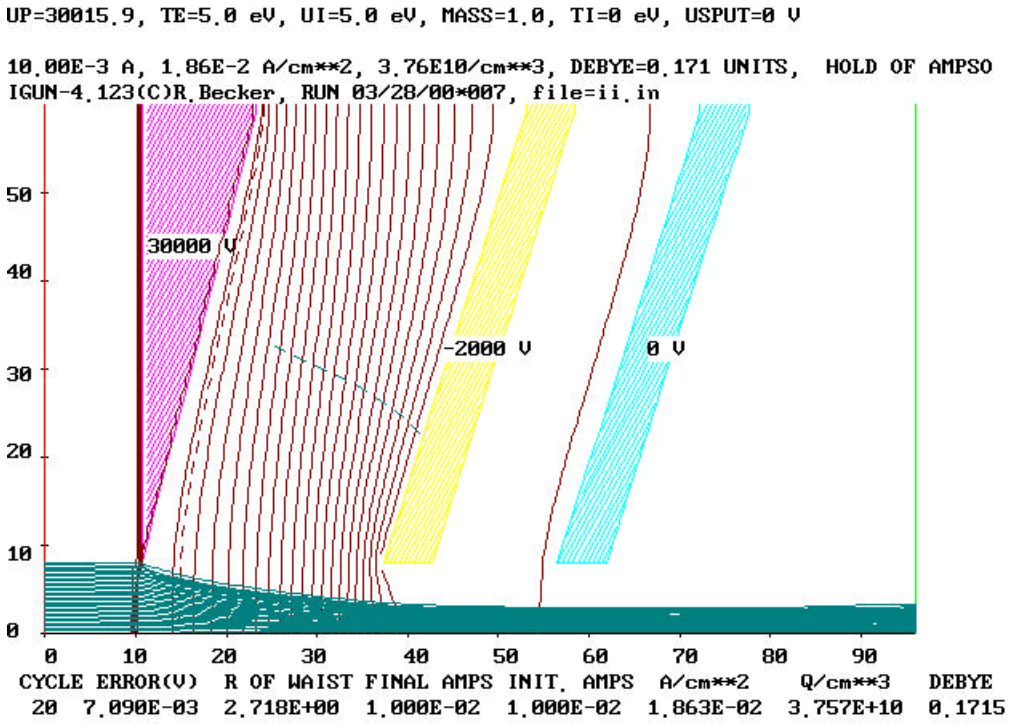

그림 2. 최적화된 이온원에서의 인출빔 궤적

인출 구경은 직경 8mm이며, 인출 전압은 일반적으로 이온원 전극의 고전압 절연이 용이한 30kV로 하였다. 전자의 역방향 가속을 억제하기 위한 Bias 전극 전압은 2kV로 하였다. 최적화된 이온원 전극 구조에서 얻어진 빔의 에미턴스는 1.1 cm mrad, 최소 빔 반경은 1.5mm로 계산되었다.

3. 빔 광학 설계

Generalized Poissance가 K이고 에미턴스가 ε인 빔이 외부 전자기력이 없는 공간을 지나갈 때 이 빔의 반경 r_o는 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{dr_o^2}{dz^2} = \frac{K}{r_o} + \frac{\varepsilon^2}{r_o^3}$$

즉 좌변의 1항이 큰 경우에는 공간 전하 효과에 의해 빔이 발산하고, 2항이 큰 경우에는 에미턴스에 의해 빔이 발산하게 된다. 앞에서 얻어진 30kV 10mA의 음이온 수소빔은 1항이 2항에 비해 크므로, 공간 전하 효과에 의해 발산한다. 이러한 공간 전하 효과가 큰 빔을 가속부의 Acceptance에 맞추어 입사하기 위해서는 많은 빔 광학 부품을 사용하거나, 매우 짧은 거리에서 적은 빔 광학 부품을 사용하여 입사하는 두가지 방법이 있다. 전자의 경우는 빔 에너지 변동, 빔 전류 변동 등에 대한 요구 조건이 매우 까다로운 경우 사용하며, 요구 조건이 쉬운 경우에는 후자를 택할 수 있다. 본 연구에서 설계되고 있는 가속기도 빔의 요구 조건은 다른 분석용 가속기에 비해 매우 단순하므로, 후자를 택하였다.

공간 전하 효과가 빔에 미치는 영향을 알아보기 위해 위의 식을 이용하여 빔 직경을 계산하였다. 가속관 입구에서의 빔 입사각을 조절하여 빔이 Stripper를 최소 반경으로 통과할 수 있는지 판단하였다. 계산된 결과는 그림 3과 같다. 왼쪽의 그림은 빔 직경이 1cm인 경우로 빔의 공간 전하 효과가 적은 경우로, 이때는 Stripper를 최소 반경으로 통과하고 있으나, 빔 직경인 0.5cm인 오른쪽의 경우에는 Stripper 내에서 빔 최소 반경을 얻기 어려움을 보여주고 있다.

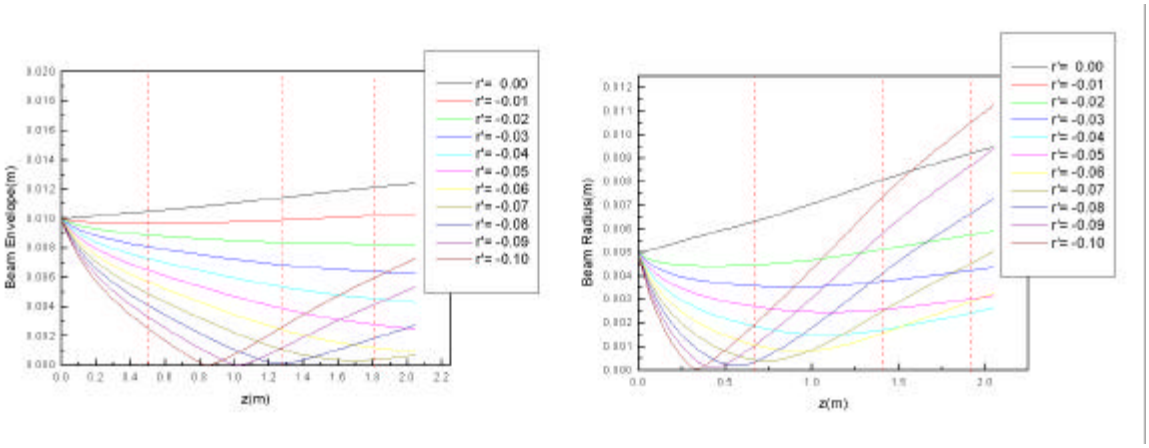

그림 3. 가속관 입구에서의 입사각에 따른 빔 반경 변화

이온의 집속에 사용 가능한 렌즈의 종류는 크게 전장형과 자장형이 있다. 자장형의 경우 사극형과 솔레노이드가 있으나, 모두 렌즈의 크기가 크고 코일의 전력 소모가 크므로 장치의 크기를 최소화하고자 하는 본 장치의 목적에는 적합하지 않다. 전장형의 경우 사극형과 원통형이 있는데 본 장치이온 집속 렌즈로는 원통형 구조로 축대칭인 Einzel 렌즈를 채용하였다. 사극 렌즈를 사용하는 경우 빔의 단면이 타원형이 되므로 휨 전자석을 포함한 빔 광학계를 구성하는 경우 유

리한 점이 있으나, 본 연구에서 얻고자 하는 단순한 광학계에서는 빔 수송이 용이하지 않으므로 사용하지 않았다. 이온원에서 얻어진 발산하는 빔을 그림 3과 같이 Einzel 렌즈로 한번 집속하여 가속관에 넣는 구조를 택하여 설계를 수행하였다. 이때 가장 중요한 것은 고전압 터미널 내에 위치한 Stripper 영역에서 빔 크기가 최소화되는 빔 광학계가 얻어져야 한다는 것이다. 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. 현재 Stripper의 직경은 2cm로 설계되고 있으므로, 빔 정렬을 고려할 때 Stripper 영역에서 빔 직경이 5mm 이하가 되도록 설계되어야 한다.

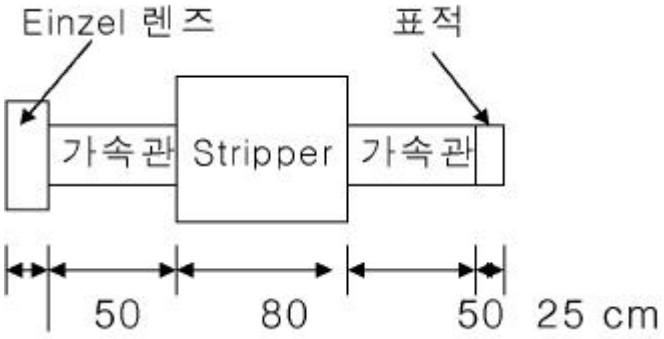

그림 4. 빔 광학계 형태

그림 4과 같이 빔 광학계가 단순하므로, Stripper 영역에서의 빔 크기를 조절할 수 있는 장치는 Einzel 렌즈 하나다. 따라서 Einzel 렌즈의 전압을 조절하여 10mA의 양성자 빔을 Stripper 영역을 통과할 수 있는 빔 크기로 조절할 수 있다면 이러한 광학계를 이용하여 가속기를 설계할 수 있다.

일반적으로 정전 가속기에서는 빔 광학 계산에 Matrix 법을 주로 사용되고 있다. 이러한 Matrix 범은 빔의 궤적이 이온빔 전류에 무관한 경우, 즉 공간 전하 효과가 무시되는 경우에 사용이 가능하나, 공간 전하 효과를 포함하는 경우, 빔 전류의 크기에 따라 빔 궤적이 달라지는 경우에는 사용할 수 없다. 기초 연구를 위한 분석용 가속기에서는 빔 전류가 μA 정도로 Matrix 법을 사용한 빔 광학계 설계가 가능하나, 최근의 산업적 이용을 위한 가속기에서는 mA 이상의 대전류 가속이 많아져 Matrix 법에 의한 빔 광학계 설계가 불가능해지고 있다. 공간 전하 효과를 포함하여야 하는 경우에는 외부 인가 전장과 빔에 의한 자기 발생 전장을 모두 계산하여 빔 궤적을 계산할 수 있는 빔 궤적 추적법으로만 계산이 가능하다. 본 연구에서 빔 궤적의 계산은 공간 전하 효과를 포함할 수 있는 빔 궤적 추적 프로그램 IGUN Code를 사용하였다. 이 코드는 공간 전하 효과를 포함하여 빔 궤적을 계산하게 되므로, 10mA 양성자 빔의 수송 과정을 잘 파악할 수 있다. 계산의 효율을 높이기 위해 Stripper 입구까지 최적화된 양성자 빔 궤적을 Einzel 렌즈 전압을 조절하여 먼저 얻었다.

탄뎀 실제 가속기 내에서의 전압 분포는 그림 5와 같은 분포를 하고 있다. 그러나, 본 연구에서 사용된 IGUN Code는 Stripper 내에서 전하 변동을 고려할 수 없는 것이므로, 계산에서 사용한 전압 분포는 30kV로 인가된 이온원에서 양이온이 인출되어 -900kV 터미널로 가속되고 다시 -1800kV로 인가된 표적에 도달하는 분포로 하였다. 이러한 전압 분포는 이온의 궤적에 전혀 차이를 보이지 않는 동일한 것으로 볼 수 있다.

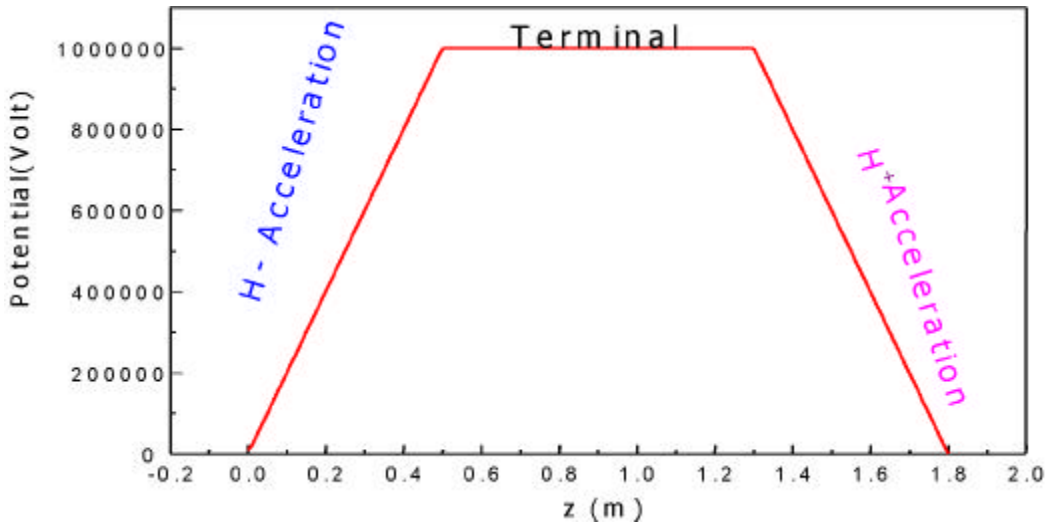

그림 5. 가속기 내에서의 전압 분포

그림 6와 같이 Einzel 렌즈 전압을 25kV로 하는 경우 양성자 빔은 Stripper까지 오는 동안 과도하게 집속되어 Stripper 영역 이전에서 초점이 형성된다. 이 경우 900kV로 가속된 빔이 Stripper에 충돌하여 빔 가속이 불가능하게 될 수 있다. 반대로 그림 7와 같이 Einzel 렌즈 전압을 26kV로 하는 경우 빔 집속이 부족하여 Stripper 영역을 통과한 후에 초점이 형성된다. 이 경우도 25kV의 경우와 마찬가지로 빔 가속이 불가능하게 될 수 있다.

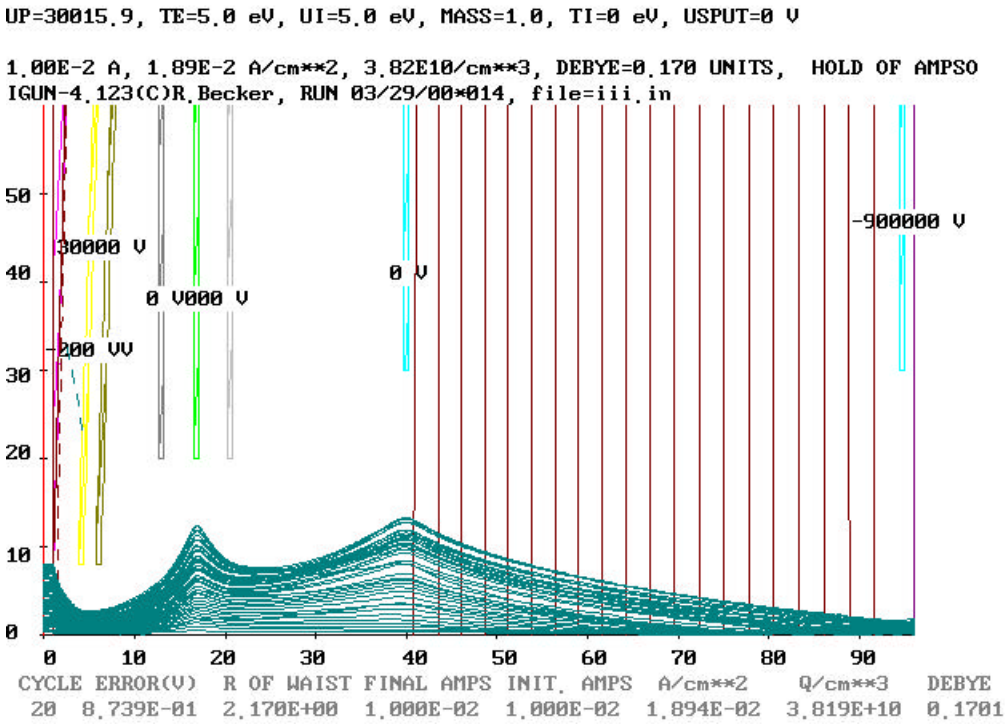

그림 6. Einzel 렌즈 전압이 25kV인 경우 Stripper까지의 양성자빔 궤적

최적으로 계산된 값은 25.5kV로 이 경우 빔의 최대 궤적 직경이 5mm 이하로 계산되었으며, 빔 수송에 필요한 값을 얻었다. 이때의 양성자빔 궤적은 그림 8과 같다. 얻어지는 빔 에미턴스는 0.4 cm mrad으로 이온원에서 출발한 빔 에미턴스 1.1 cm mrad에 비해 1/3로 감소하였다. 빔 에

미턴스의 감소는 빔 에너지 증가에 따른다. 이 결과로부터 Einzel 렌즈 전압은 ±100V 이내의 안정도를 가져야 빔을 안정적으로 수송할 수 있음을 알 수 있다. 이보다 큰 전압 안정도에서는 Stripper 내에서의 빔 반경이 변동하여 빔 손실이 발생할 수 있다.

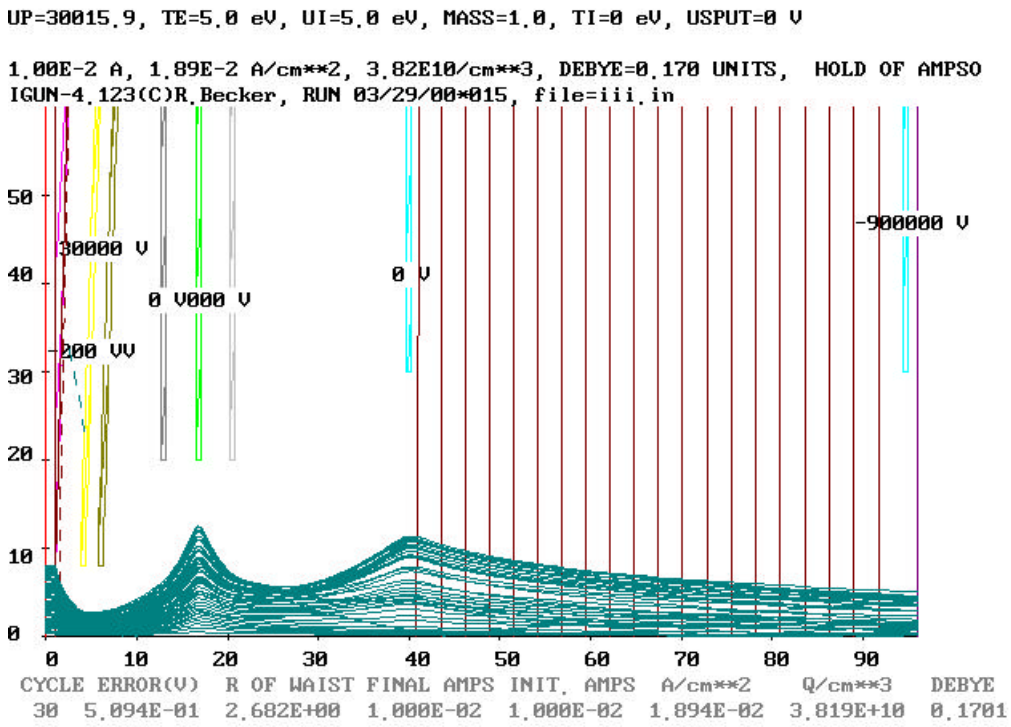

그림 7. Einzel 렌즈 전압이 26kV인 경우 Stripper까지의 양성자빔 궤적

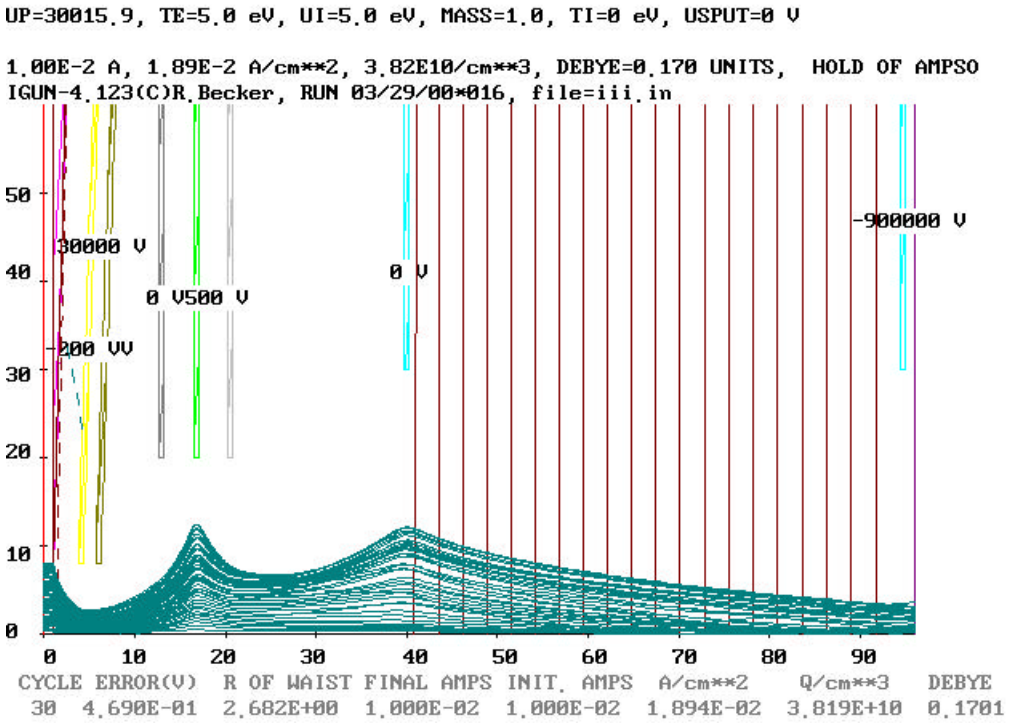

그림 8. Einzel 렌즈 전압이 25.5kV인 경우 Stripper까지의 양성자빔 궤적 (최적화 궤적)

4. 결과

앞에서 얻어진 최적화된 Einzel 렌즈 전압을 주고 가속기 전 영역에서 계산된 빔 궤적은 그림 8과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 Stripper 영역에서 5mm 이하의 빔 직경을 가지고 있다. 따라서 본 가속기에서는 공간 전하 효과에 큰 30keV 10mA의 양성자빔을 1.8MeV로 가속하기 위해 단일 Einzel 렌즈를 사용하여 빔 광학계를 구성할 수 있음을 보여 준다. 빔 전류가 감소하는 경우 공간 전하 효과는 감소하므로 Einzel 렌즈를 조절하면 빔은 충분히 원하는 형태로 조절이 가능하다.

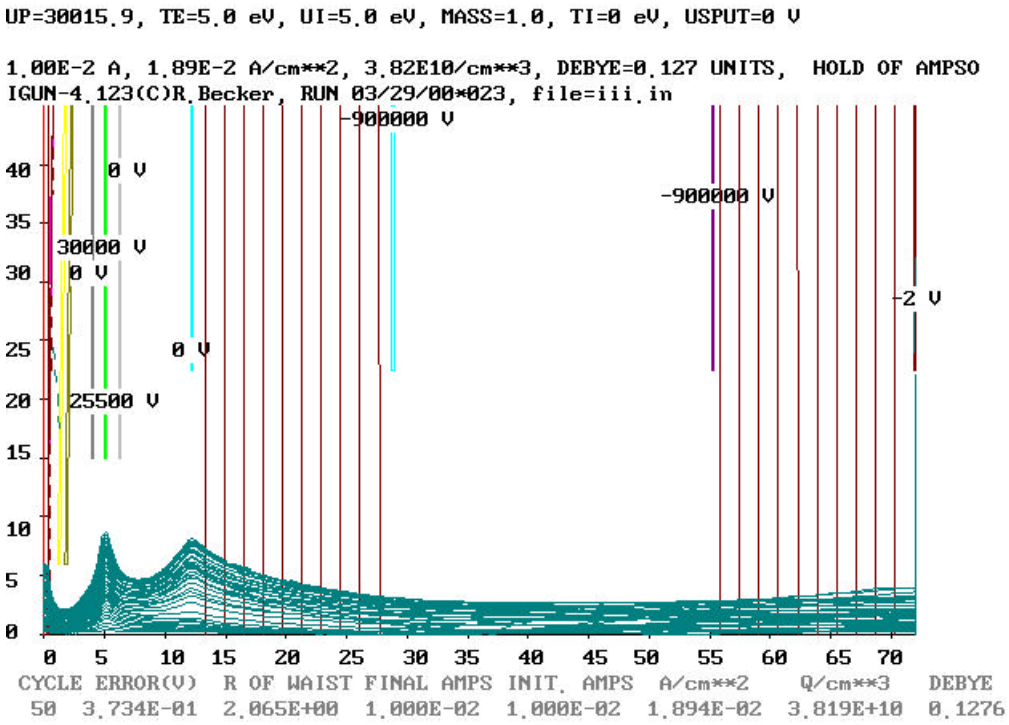

그림 8. Einzel 렌즈 전압이 25.5kV인 경우 Stripper까지의 양성자빔 궤적 (최적화 궤적)

5. 결론

가속기를 이용한 폭약 탐지 시스템의 양성자 가속기의 빔 광학 설계를 수행하였다. 공간 전하 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.

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 Intronduction to the Physics of Intense Charged Particle Beams", Plenum Press, New York, 1982.

3] M. Reiser, "Theory and Design of Charged Particle Beams", John Wiely & Sons, New York, 1994.

4] S. Humphries, Jr., "Charged Particle Beam", John Wiely & Sons, New York, 1990.

5] W.B. Herrmannsfeldt, "Simulation of Extraction of Positive Ion from Plasma (IGUN CODE)", Scientific Simulation Service, Germany, 1992.