'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

양성자가속기를 이용한 지뢰 탐지장치의 감마선 생성 표적 설계

Target Design for Gamma-Ray Production of Proton Accelerator Based Mine Detector

송태영, 윤병주, 조용섭

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

군사적으로 사용된 지뢰는 평화시에도 여전히 땅속에 잔존하여 민간인들을 위협하고 있고 실제 지뢰사고와 관련된 민간인 사망자 및 부상자는 계속 나타나고 있다. 따라서 이러한 지뢰를 제거하기 위해 금속탐지기 등의 방법이 이용되고 있으나 탐지효율 및 안전성 등에서 아직까지 만족할 만한 탐지기의 개발이 이루어지고 있지 않다. 한국원자력연구소에서는 효율적인 지뢰탐지를 위해서 지뢰 등의 폭발물에 공통적으로 포함된 N^{14}의 9.17MeV 감마선과의 공명핵반응을 이용하는 연구를 수행하고 있다. 탐지에 필요한 9.17MeV 감마선은 1.75MeV 양성자가 C^{13}과 핵반응시에 양성자 입사방향과 80.7°의 각도에서 생성되므로 1.75MeV 양성자가속기와 C^{13} 표적이 필요하다. 가능한 많은 9.17MeV 감마선 생성을 위해서 가속 빔 전류는 10mA의 대전류로 설정했고 따라서 표적에서 다량의 열이 축적되므로 이의 냉각이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 대전류 표적의 냉각 및 열응력 계산 결과를 보여주고 또한 지뢰탐지에 적합한 9.17MeV 감마선 생성 및 다른 에너지의 감마선 발생 억제를 위한 표적물질의 종류 및 제원 설정에 대해서 논의한다.

Abstract

Mines used for military purposes during war-time can do harms to civilians after wars. Actually it is often reported that civilians become dead or injured due to accidents related to mines. Therefore mine detectors such as a metal detector is used to detect and remove mines, but its detecting efficiency and safety do not reach the level of satisfaction. KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute) has been developing a more effective mine detector which adopts the nuclear resonance reaction between 9.17MeV gamma-ray and N^{14} included commonly in various kinds of explosives such as mines. 9.17MeV gammas can be produced by bombarding 1.75MeV protons to C^{13} nucleus. Those gamma-rays are produced with the angle of 80.7° to the proton beam direction. Therfore a 1.75MeV proton accelerator and a C^{13} target are needed. A 10mA accelerator is being designed to produce intense 9.17MeV gamma-rays, so intense heat is deposited in the target. In this paper, we discuss the results of cooling and thermal stress calculations for the target, and materials and design parameters of tharget systems which produce effective 9.17MeV gamma-rays and surpress background gamma-rays.

1. 서 론

1998년 기준으로 전 세계에 매설되어 있는 대인지뢰는 약 1억 1천만개로 추정되고 있다. 대인지뢰의 제조나 이용은 쉬운 편이지만 제거에는 지뢰 2개당 보통 $1,000 정도의 비용이 드는 것으로 알려져 있다. 전시에 사용되었으나 제거되지 않은 대인지뢰로 인해서 민간 사상자가 매일 평균 70명 정도가 발생하는 것으로 알려져 있다. 특히 캄보디아 같은 곳에서는 국민 230명당 1명꼴로 지뢰로 이한 사상자가 발생하고 있다[1].

이러한 문제를 해결하기 위해서 지뢰를 발견하고 제거하는 방법들이 연구되어 왔으나 그 효율성에서 많은 문제를 가지고 있다. 예를 들어 쉬운 방법으로 금속탐지기를 이용하는 경우에는 탐지속도가 불과 1인당 $1m^2$/일 정도에 불과하다. 따라서 현재의 탐지 및 제거 기술로 전세계에 매설되어 있는 지뢰를 제거하는데 330억 달러의 비용과 1100년의 기간이 소요되는 것으로 추정되고 있다[1].

한국원자력연구소에서는 이동 가능한 양성자가속기를 이용한 대인지뢰탐지를 주목적으로 하는 폭발물 탐지장치를 개발하고 있다. 예상되는 탐지 속도는 시간당 폭 5m x 길이 5-8 km (평지기준)이고 탐지 정확도는 90 % 이상이다. 현재 운용되고 있는 탐지장치의 경우 대부분 여러 가지 탐지장치를 복합한 형태이며, 단일장치의 경우 정확도는 10% 이내이고, 복합장치의 경우 50% 이내이다[1]. 그림 1에 탐지장치의 개략도가 나타나 있다.

1.75MeV Tandem 양성자가속기를 통해 가속된 양성자가 C^{13} 표적과 반응해서 9.17MeV 감마선을 방출한다. 방출된 9.17MeV 감마선은 지표면을 통과해서 매설되어 있는 지뢰는 물론 모든 폭발물에 공통적으로 포함되어 있는 N^{14}과 광핵공명반응을 일으켜서 다시 9.17MeV 감마선을 방출하고 이를 검출계에서 포착하여 지뢰를 탐지하게 된다. 지뢰가 없는 경우에는 9.17MeV 감마선이 대부분 지층으로 사라지므로 검출계에서 발견이 되지 않는다.

1.75MeV 양성자가 C^{13} 표적과 반응해서 9.17MeV 감마선을 가능한한 많이 생성하는 것이 탐지 효율을 높이는데 도움이 되므로 빔 전류는 10mA의 대전류로 설정했다. 또한 생성되는 9.17MeV 감마선은 양성자 빔 방향과 80.7°의 각도를 이루며 방출되므로 이의 사용을 위한 collimation도 필요하다. 이러한 지뢰탐지장치 관련 개발기술은 크게 3 부분으로 나눌 수 있는데 빔 공급을 위한 가속기 부분, 빔으로부터 효율적이고 안정적인 감마선을 발생시키는 표적 부분, 발생된 감마선을 이용해서 효율적으로 지뢰를 탐지할 수 있는 시스템을 개발하는 검출 부분이 그것이다.

본 논문에서는 위에서 언급한 3 가지 부분중에서 표적의 설계와 관련된 부분을 논의한다.

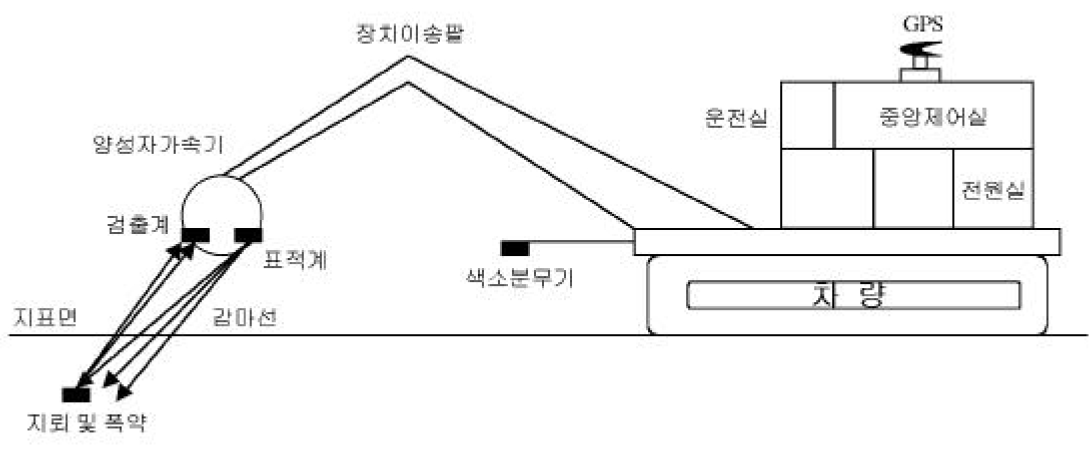

그림 1. 양성자가속기를 이용한 이동형 지뢰탐지기 개략도

2. 표적 설계시의 고려 사항

그림 2는 빔이 표적에 조사되어 감마선을 발생시키는 개략도이다. 1.75MeV 양성자 빔으로부터 9.17MeV 감마선을 생성하는 표적과 관련되어 연구해야 하는 부분은 표적계 설계와, 사용 도중에 파손되지 않도록 설계대로 C^{13}을 표적기판에 잘 증착시키고 실제 검증을 하는 것을 들 수 있다. 본 논문에서는 표적계 설계와 관련된 부분을 언급한다.

표적계 설계시에 고려해야 할 사항은 첫째로 가능한한 9.17MeV 감마선외에 다른 background 감마선 발생을 억제토록 하면서 발생시킨 9.17MeV 감마선도 지뢰탐지에 효율적인 형태가 되도록 하는 것이다. 일반적으로 표적에 조사되는 양성자 빔은 어느 정도의 크기를 가지므로 발생되는 9.17MeV 감마선도 빔이 point source인 경우에 생기는 cone 모양의 선을 이루지 않고 일정한 폭을 갖는 띠를 이루게 된다. 이러한 띠의 폭이 너무 커지면 지뢰 매설 지점을 정확도를 가지고 찾는데 어려움이 있음므로 이를 고려해야 한다.

두번째로 표적은 1.75MeV x 10mA = 17.5kW의 높은 열을 받는데 예를 들어 빔의 크기가 반경 2cm인 경우라면 평균 1.4kW/cm^{2}의 열이 축적된다. 따라서 온도와 스트레스가 허용 기준치 이상 올라가지 않도록 효율적인 냉각을 해주어야 한다. 빔의 크기를 증가시키면 단위면적당 열축적량이 작아지므로 냉각이 용이하나 첫번째 고려사항에서 언급한 발생 감마선 띠의 폭이 넓어지므로 냉각이 가능한 한도내에서 빔의 크기를 작게 해야 하는 어려움이 있다.

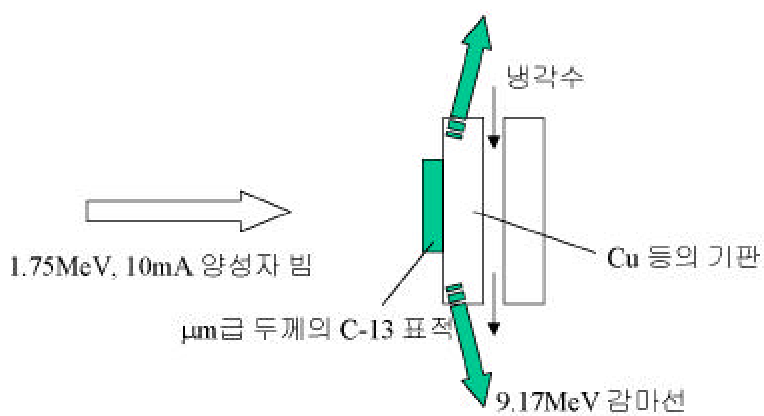

그림 2. 표적에서의 감마선 발생 개략도

3. C^{13} 두께 및 Inter-layer 설정

가속된 양성자 빔은 정확히 에너지 1.75 MeV를 갖지 않고 ±5%의 오차가 발생할 수 있다. 따라서 1.75MeV를 C^{13} 표적에 통과시키려면 +5%인 1.84MeV을 목표로 운전을 해야하고 이때 1.84MeV의 +5%인 1.93 MeV 까지의 빔 에너지가 C^{13}에 조사되는 것이 가능하다. 1.93MeV 에너지의 양성자가 C^{13}을 통과하면서 1.75MeV가 되기 위해서는 이러한 에너지대에서의 단위길이당 에너지 손실을 알아야 한다. 양성자와 같은 이온에 의한 에너지손실은 다음과 같이 계산된다[2].

$$\frac{dE}{dx}(MeV/m) = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{m c^2}{\beta^2} NZ \left[\ln\left(\frac{2m c^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right]$$

$$r_0 = 2.818 \times 10^{-15} m = classical\ electron\ radius$$

$m c^2 = 0.511 MeV$ = rest mass of electron

$\beta = v/c$, v = speed of incident particle, c = speed of light

$\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$

N = number of atoms of target material, $/m^3$

Z = atomic number of target material

z = charge of incident particle

I = mean excitation potential of the target material

위의 식으로 계산하면 양성자 1.93MeV의 C^{13} 통과시 dE/dx = 34 keV/μm가 되고 1μm 통과시마다 양성자에너지가 변하는 것을 고려해서 계산하면 6μm 통과후 1.72 MeV에 도달함을 알 수 있다. 따라서 C^{13} 표적의 두께는 6μm 정도가 적합함을 알 수 있다.

C^{13}을 증착시키기 위한 기판으로서 열전도율이 좋은 구리를 선정했는데 C^{13}을 통과한 양성자는 구리와 반응해서 background 감마선을 발생시키게 된다. 이를 억제하기 위해서 C^{13}과 구리기판 사이에 C^{13}을 통과한 양성자가 핵반응을 일으키기 어려운 Ta를 inter-layer로 증착시킨다. 1.72MeV 양성자가 Ta를 통과할 때 dE/dx = 91 keV/μm 정도이므로 12μm 통과후 양성자는 0.53MeV에 도달하게 되어 구리와의 핵반응을 통한 감마선 발생이 거의 일어나지 않는다.

4. 표적 냉각

유사한 양성자에너지와 전류를 이용하는 가속기 빔 조사 표적의 경우에 일반적으로 물을 냉각수로 사용하는 fin channel 냉각방식을 채택하는데[3] 대략 1kW/cm^2 이하의 냉각에 적합하므로 C^{13} 표적의 냉각에도 같은 냉각 방법을 적용키로 하였다.

빔 전류 밀도는 Gaussian 분포를 가지고 형태는 원형이므로 열축적이 최대인 빔 중앙에서 열축적이 1kW/cm^2 이하가 되도록 Gaussian 분포의 σ를 반경 2cm로 설정하였다. 이때 가능한 빔 에너지를 최대 2MeV로 설정하면 빔 power 분포는 다음과 같다.

$$\text{Power Density} = 2\ \text{MeV} \times \text{Current Density} = \frac{2}{\sqrt{2\pi}}\,\text{Exp}\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{2}\right)^2\right\}\text{kW/cm}^2$$

이때 r은 빔 중앙에서부터의 거리이고 빔 중앙(r=0)에서 최대 0.8 kW/cm^{2}의 열축적을 보임을 알 수 있다. 이러한 열을 냉각하기 위해 그림 3에 나타내어진 것과 같은 fin channel 냉각 방식을 선정하였다.

구리기판의 두께는 1cm로 했고 20 x 20 cm의 규격을 갖는데 이는 가속관의 크기가 지름 20cm이기 때문에 이와 같이 결정했다. 구리기판의 두께 방향으로 channel을 형성시켰는데 총 7개의 unit channel로 구성되고 1개의 unit channel은 13개의 fin으로 구성되어 있다. 1개의 fin은 1 x 2 mm이고 fin과 fin 사이의 간격은 0.5mm로 하였다. 13개의 fin은 0.3mm 두께의 공통 밑면으로 연결되어 있다.

그림 3에서 보여지는 것처럼 빔이 조사되는 부분에 먼저 반경 8cm의 Ta를 6μm 두께로 증착하고 그 위에 반경 4cm의 C^{13}을 6μm 두께로 증착한다. C^{13}의 경우에는 반경이 4cm로 빔의 2σ에 해당되어 그 밖을 벗어나는 약 5%의 빔은 감마선 생성에 이용되지 못한다. Ta의 경우에는 빔과 구리기판과의 background 감마 발생억제를 위해서 C^{13}이 없는 부분에도 넓게 증착을 하도록 했다.

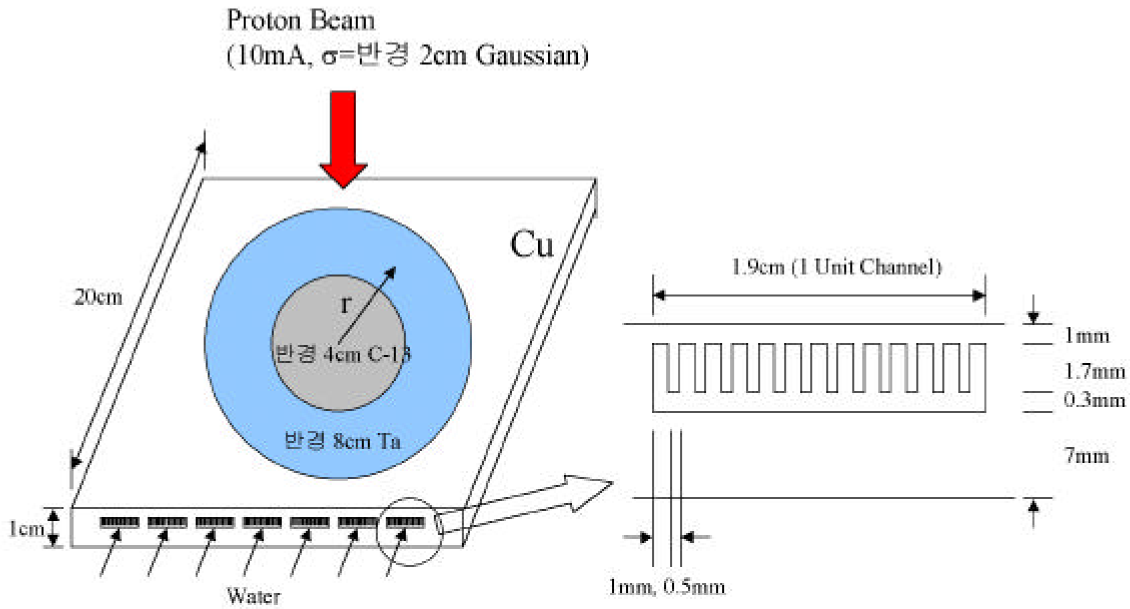

그림 3. 냉각을 고려한 C^{13} 표적계 설계

위에서 언급한 냉각 방식이 효율적으로 적용되는지를 알기 위해서 ANSYS[4] 코드를 이용해서 온도와 열응력 분포를 계산하였다. 온도의 경우에는 표적의 건전성 유지를 위해 최대허용치를 150°C 내외로 하였고 열응력의 경우에는 Cu의 상온에서의 열응력 270MPa의 1/3인 90MPa 내외를 최대허용치로 하였다.

온도 계산을 위해서 평판사이의 열전달계수 h를 구하는 공식을 1개 unit channel에 이용하였고 [5] 물의 입구 온도는 5°C, 속도는 6.5m/s로 설정하였다.

$$Nu = 5.8 + 0.02(Re \cdot Pr)^{0.8}$$

$$Nu = hD/k, \quad Re = \rho VD/\mu, \quad Pr = Cp\,\mu/k, \quad D = 4A/p$$

h : convection heat coefficient

k : thermal conductivity of water = 0.598 W/m・K

ρ : density of water = 1000 kg/m^3

μ : viscosity of water = 1.08×10^{-3} N・s/m^2

Cp : specific heat of water = 4184 J/kg・K

V : velocity of water = 6.5 m/s

A : area of channel = 2.78×10^{-5} m^2

p : perimeter of channel = 0.083 m

따라서 h = 62656 W/m^2.K로 계산되고 물의 출구온도 계산을 위해서 energy balance 법칙을 사용하여 Q = dm/dt • Cp • ΔT 를 이용하면 역시 1개 unit channel에 대해서 Q는 최대로 빔 중앙에서의 열발생량 0.8kW/cm^2에 면적 9.5cm^2 = (unit channel의 폭 1.9cm) x (빔 유효조사 길이 5cm) 를 곱한값으로 사용했다. 따라서 최대로 ΔT = 10°C 정도로 계산되고 이를 바탕으로 기판의 온도는 물의 입구와 출구온도의 평균인 10°C로 설정하였다. 1개 unit channel당 0.2 l/sec의 물이 통과하는 이 경우의 온도 계산을 계산된 h와 기판온도를 입력값으로 ANSYS를 이용하여

수행하였다. 그림 4에 기판의 1/4쪽의 온도분포 전체와 중앙이 확대된 부분으로 나타나 있다.

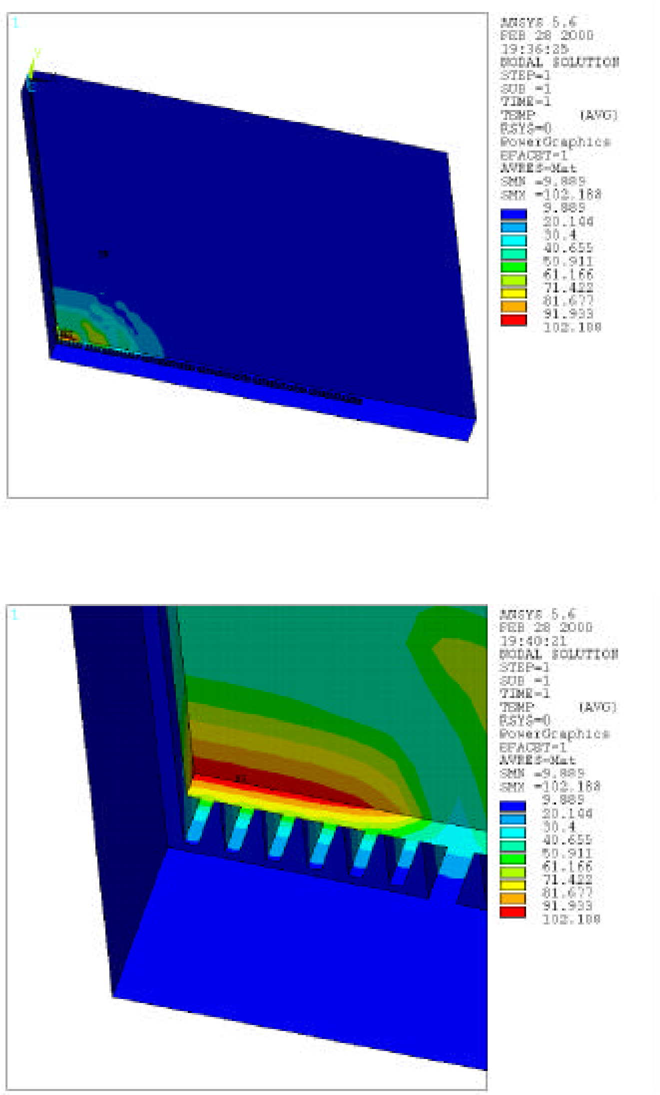

그림 4. 구리기판의 온도분포(단위: °C)

예상대로 빔 중앙에서 102°C로 최대온도가 나타났고 이는 설정된 최대온도 150°C 내외보다 낮은값이다. 위의 계산에서 실제 기판은 30 x 30cm를 사용했고 unit channel도 11개를 사용했는데 실제 디자인인 20 x 20cm, 7개 unit channel의 경우와 비교할 때 중요한 부분인 중앙에서의 온도분포는 거의 차이가 없을 것이다.

계산된 온도분포를 바탕으로 열응력을 계산하였는데 그림 5에 그 결과가 나타나 있다. 역시 중앙에서 최대로 115MPa의 값을 가졌다. 이는 최대허용치로 설정한 90MPa 내외보다 다소 높은 값이므로 약간의 설계수정이 필요함을 알 수 있다.

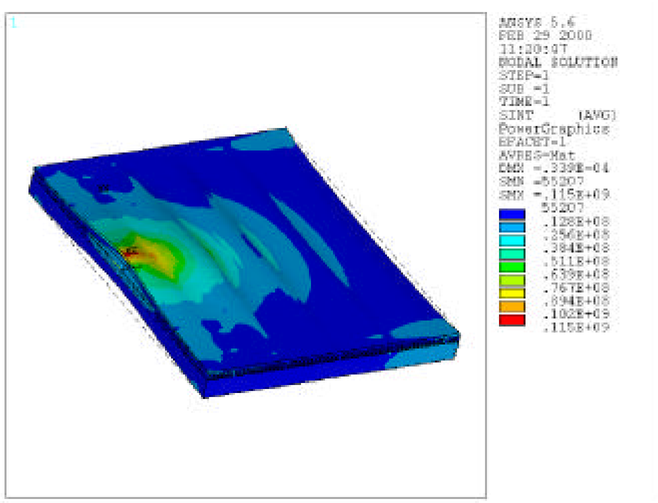

그림 5. 구리기판의 열응력 분포(단위: Pa)

5. 결론

효율적인 지뢰탐지의 한 방법으로 한국원자력연구소에서는 1.75MeV, 10mA 이동형 Tandem 양성자가속기를 이용하는 연구를 수행하고 있는데 이는 1.75MeV 양성자가 C^{13} 표적과 핵반응하여 9.17MeV 감마선을 방출하고 이 감마선이 지층에 매설된 지뢰에 포함되어 있는 N^{14}과 광핵공명반응을 하는 원리를 이용한 것이다. 본 논문은 C^{13} 표적계의 설계와 관련된 현재까지의 연구를 정리한 것으로 효율적인 감마선을 이용하기 위하여 구리기판에 6μm의 Ta을 증착하고 그 위에 다시 6μm의 C^{13}을 증착하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

표적의 냉각을 위하여 fin channel에 물을 냉각수로 통과시키는 방식을 채택했으며 빔이 σ=반경 2cm인 Gaussian 분포를 할 때, 6.5m/s, 5°C의 물을 투입하면 물의 온도는 최대 10°C 정도 증가하고 이때 기판의 최대온도는 102°C, 최대 열응력은 115MPa로 계산되었다.

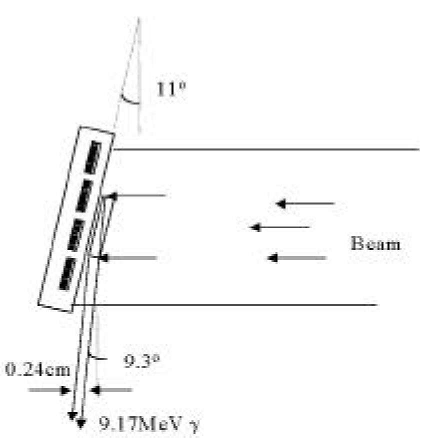

그림 6. 표적 설치 예

빔이 지면과 평행하므로 설계된 구리기판은 그림 6에 나타난 것과 같이 빔의 수직방향과 이루는 각이 9.17MeV 감마선 발생각인 9.3° 보다 크게 설치를 하여야 한다. 그림 5에서처럼 11° 의 각으로 배치를 할 경우에는 9.17MeV 감마선이 0.24cm의 폭을 가진 띠의 형태로 지면으로 방출된다. 배치각을 증가시킬수록 띠의 폭이 넓어져 지뢰탐지 효율에 영향을 주지만 상대적으로 지면의 앞 뒤 방향으로 방출되는 9.17MeV 감마선의 이용이 효율적이 된다. 따라서 설계된 표적에서 생성되는 감마선이 충분히 효율적인지에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

[1] **한 장민 외**, "**지뢰 탐지장치 현황분석**", **한국원자력연구소 기술현항분석보고서** KAERI/AR-514, 1998

[2] N. Tsoulfanidis, "Measurement and Detection of Radiation", 2nd edition, Taylor&Francis, 1995

[3] W. T. Williams et al, "Accelerator-Based BNCT Clinical Trial", BNL's DOE proposal

[4] ANSYS User's Manual for Revision 5.0

[5] M. M. El-Wakil, "Nuclear Heat Transport", International Textbook Co., 1971