

고속중성자 공명기술 적용을 위한
가속기 표적물의 중성자 에너지 스펙트럼 계산

Neutron Energy Spectrum Calculation of Accelerator Target
for Fast Neutron Resonant Technology

배진형, 황주호

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천 1

요 약

최근에 고속중성자 공명 기술(FNRT)은 분자나 원자 정도의 물질구성을 확인하기 위해 적용할 수 있는 기술이다. 이 기술은 일반적인 물질과 비교해 폭발물과 마약의 수소, 탄소, 질소 그리고 산소의 원소성분비를 통해 물질을 구별한다. 이 방법은 중성자 조사 후 대상물질의 유효 감쇄계수와 총 원소성분을 계산하여 폭발물과 마약을 구별한다. 따라서 금수품의 특징적인 원소성분 조성을 알기 위하여 대상물질별 원자밀도를 구하였고 이에 따른 원소성분비를 산출하였다. FNRT의 원리는 검출기 집합체가 D-D중성자 선원 주위를 회전하고 중성자 선원으로부터 각도에 따라 다른 에너지 분포(2~6 MeV)를 가지는 중성자를 이용한다. 고속중성자 공명기술을 적용하기 위해 DROSG-2000 코드를 사용하여 각도와 중양자의 에너지 변화에 따른 중성자의 에너지 분포를 산출하였다. 또한 중양자의 에너지 변화에 따른 중성자의 에너지 손실을 계산하였고 중성자 수율을 산출하기 위해 중양자에너지 변화에 따른 총 반응단면적을 계산하였다. 산출한 계산 결과를 바탕으로 MCNP-4B 코드의 시뮬레이션 입력 자료로 이용하여 대상물질의 원소성분을 결정할 것이다.

Abstract

Fast Neutron Resonant Technology(FNRT) has been studied the ability to characterize a material at the molecular and atomic levels. FNRT has been able to determine concentrations of elements H, C, N, and O in explosives and drugs comparable to many other common materials. The way to detect them is to measure an object's effective attenuation coefficients and total atomic content. Contraband can be identified by their characteristic elemental composition. The object-detector assembly rotates around the neutron source and different energy(2~6 MeV) neutrons can be obtained at different angles from a D-D neutron source. Target data was obtained using the DROSG-2000: neutron source reaction.

1. 서 론

X-ray 검색시스템은 보통 항공기 내 소화물과 대형 수화물 검색에 주로 많이 사용하고 있다. 이 기술은 X-ray를 대상물질에 투과하였을 때 전자와 상호작용하고, X-ray 감쇄계수 (Attenuation C

oefficient)는 물질의 전자밀도(Electron Density)와 X-ray의 에너지에 밀접한 관계를 가지고 있다. 검색시스템이 보통 사용하는 에너지 영역에서 X-ray 감쇄에 주로 기여하는 주 요인으로 콤프턴산란(Compton Scattering)과 광전효과(Photoelectric Effect)가 있다. 여기서 광전효과는 금속, 무기물과 같이 높은 원자번호를 가진 물질에서 하지만 X-ray의 에너지가 증가함에 따라 그 중요성은 떨어진다. 유기물과 같이 낮은 원자번호를 가진 물질에서 콤프턴산란이 X-ray 감쇄에 지배적이고 에너지를 훨씬 적게 변화시킨다[1].

다중에너지 X-ray 검색장비(Multienergy X-ray Detection Equipment)는 유기물과 무기물을 구별하기 위한 준정량적인 측정 장비지만, 폭발물과 마약 같은 금수품에 대한 정확한 정보를 제공하지 못한다. 그래서 이중에너지 CT(Dual-energy Computed Tomography) 기술을 사용하여 물질의 물리적 밀도와 유효 원자번호(Z_{eff})뿐만 아니라 3차원 영상 정보를 제공하지만, 유효 원자번호는 물질 원소성분을 식별할 만큼 충분하지 못하다. 또한, 10~30 MeV의 고에너지 X-ray 검색시스템은 광자가 질소, 탄소 그리고, 산소 원소와 상호작용하여 어떤 물질의 공간적 정보는 제공할 수 있지만, 적은 반응단면적으로 인해 3가지 원소 성분을 정확하게 구별하기 어렵다 [1,2].

X-ray를 대체할 수 있는 기술로서 최근 중성자를 이용한 기내소화물이나 항공수화물에 숨겨져 있는 금수품 즉, 마약, 폭발물 등을 비침입적(non-intrusive) 검출방법[3-16]에 의한 이용 가능성에 많은 관심을 보이고 있다. 중성자를 기반으로 한 기술을 크게 4가지로 분류하자면 다음과 같다. 펄스 고속중성자 분석법(Pulsed Fast Neutron Analysis-PFNA)[5-8], 펄스 고속/열중성자 분석법(Pulsed Fast/Thermal Neutron Analysis-PFTNA)[9-11], 열중성자 분석법(Thermal Neutron Analysis-TNA)[12-13] 그리고 중성자 공명 방사선영상학(Neutron Resonance Radiography-NRR)[16]으로 구분할 수 있다. PFTNA는 펄스고속중성자가 대상물질을 통과할 때의 감쇄계수를 측정한다. PFTNA, PFNA 그리고 TNA 모두 대상물질에 중성자를 조사했을 때 여기된 특성 γ -ray에 대한 서로 다른 원소를 식별할 수 있는데, TNA, PFTNA는 열중성자 포획 반응에 의한 특성 γ -ray이고 PFTNA, PFNA는 펄스화된 단일에너지 중성자 빔을 사용하여 대상물질을 투과하고 나온 중성자를 측정 후 중성자 비탄성산란에 의한 특성 γ -ray를 측정하는 방법이다. TNA는 단지 폭발물 검색시스템에 적용하는데 ^{252}Cf 으로부터 나온 중성자가 폭발물이 포함한 ^{14}N 과 반응한 후 γ -ray(10.8 MeV)를 검출기에 기록하지만, 반응단면적이 11.24 mb으로 상당히 낮은 민감도를 보인다. PFTNA는 D-T 중성자 가속기(14 MeV)를 이용하여 C, N, O을 식별할 수 있지만 낮은 민감도와 제한적인 영상만을 제공하며 큰 컨테이너에 적용하기 힘들다. 반면 PFNA는 D-D 반응을 통해 발생하는 중성자 중 8 MeV보다 작은 에너지 영역에서의 중성자를 나노초의 펄스화된 단일에너지로 집속(collimation)시켜 사용하여 직접 3차원 영상을 얻는다. 그러나, 이 기술은 나노초를 생성시키기 위해 사이클로트론(Cyclotron)과 같은 대형 가속기를 필요로 하며 검출기는 고속 전자장치가 요구됨으로 다른 장치(TNA)에 비해 3.5배 이상의 비용[17]이 소요되는 단점을 가지고 있다.

중성자 반응단면적의 공명 특성을 사용한 NRR는 대조도(contrast)를 향상시키기 위해 가속기로부터 1~8 MeV 중성자를 발생시켜 대상물질의 총 감쇄계수에 의해 원소성분별 특정 공명영역을 분석해서 2차원으로 영상화하는 새로운 방법이며 다른 방법들에 비해 에너지분해능이 10배 이상 좋지만 단지 2차원 영상만이 가능하여 제한적이고 최근 4~5년 동안의 짧은 연구로 인해 신뢰성 검증이 이루어져 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 고속중성자 공명반응 기술(Fast Neutron Resonant Technology-이하 FNRT)의 산업적 적용을 위해 다음과 같은 고려 사항들에 대하여 연구하였다. FNRT에서 고려해야 할 사항으로 첫째, 금수품에 대한 원자밀도(Atomic

Density)에 따른 원소성분비를 알아야하며 많은 양의 자료가 구축되지 않을 경우 검색시스템의 오작동률은 커지게 된다. 그러므로, 마약, 폭발물과 비교해 비슷한 밀도와 원소성분비를 가진 일반물질-만약 국내 항공, 항만에 적용할 경우(가령 된장, 고추장 등)-데이터를 구축해야 한다. 둘째, FNRT에 적합한 중성자를 생성(D-D 반응, $p-^7\text{Li}$ 반응 등)시키기 위하여 소형가속기의 표적물(target)설계를 최적화해야 한다. 셋째, 중성자에너지 스펙트럼을 생성한 후 대상물질의 총 감쇄계수(Total Attenuation Coefficient)를 구하여 각각 물질의 원소성분별 자료를 구축해야 한다. 본 연구는 FNRT에 적용하기 위해 대상물질별 원자밀도를 구하였고 이에 따른 원소성분비를 산출하였으며 DROSG-2000 코드를 이용하여 소형가속기 표적물을 개념적으로 설계하였다. 또한 코드 모사 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 Gongyin Chen[18]과 비교·분석하였다.

2. NRR System

2.1 원리 및 구성

보통 FNRT를 위한 장치는 그림 1과 같다. 가속기를 이용하여 중성자 source를 생성하고 표적물에 중양자(deuteron)빔을 가속시켜 D-D 핵반응을 통하여 원하는 에너지 범위의 고속중성자를 생성시킨다. 대상물질(object)은 금수품(마약, 폭발물 등), 일반 휴대용 물품이 될 수 있다. 보통 고속중성자 Radiography용 검출장치로 섬광물질(scintillation screen)을 사용한다. 거울은 중성자 조사에 의한 CCD카메라의 방사선 손상 피하기 위한 것이고 렌즈는 빛을 집속시켜 CCD 칩에 더욱더 많은 빛을 모아 주는 역할을 한다. 중성자로부터 생성된 빛의 양은 매우 적기 때문에 dark chamber를 사용하여 빛을 차단시킨다.

Neutron Radiography의 지배 방정식은 지수감쇠 법칙을 따른다[19].

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (1)$$

여기서 N은 감쇄된 중성자의 수이고 N_0 는 감쇄가 없는 초기 중성자의 수이다. 또한 μ 는 유효감쇄계수(Effective Attenuation Coefficient- cm^{-1})고 x는 총 원자성분(Total Atomic Content- $\#/\text{cm}^3$)이다. 중성자 선원은 에너지 분포를 가지고 있으며 이에 따라 감쇄계수는 중성자 반응단면적 또는 평균 중성자 반응단면적과 관계가 있지만 같지는 않다.

2.2 선형감소 모델(Linear Attenuation Model)

고속중성자의 공명 반응 중 단일피크(single peak)를 가진 중성자의 에너지 영역은 1.5~2.5 MeV 구간을 선택하여 사용할 수 있으나 이 방법은 하나의 원소에 대해서만 특정 공명 영역의 피크를 형성하고 다른 원소에 대한 피크는 평탄하게 나타나는 특징을 가짐으로써 실제 두 가지 이상의 원소가 포함되어 있을 경우 식별 능력이 떨어지며 중성자 투과율이 낮다. 그래서 단일피크의 고속중성자 공명 반응을 개선하기 위하여 중성자의 에너지 범위 2~6 MeV의 넓은 피크를 형성하는 영역을 선택한다.

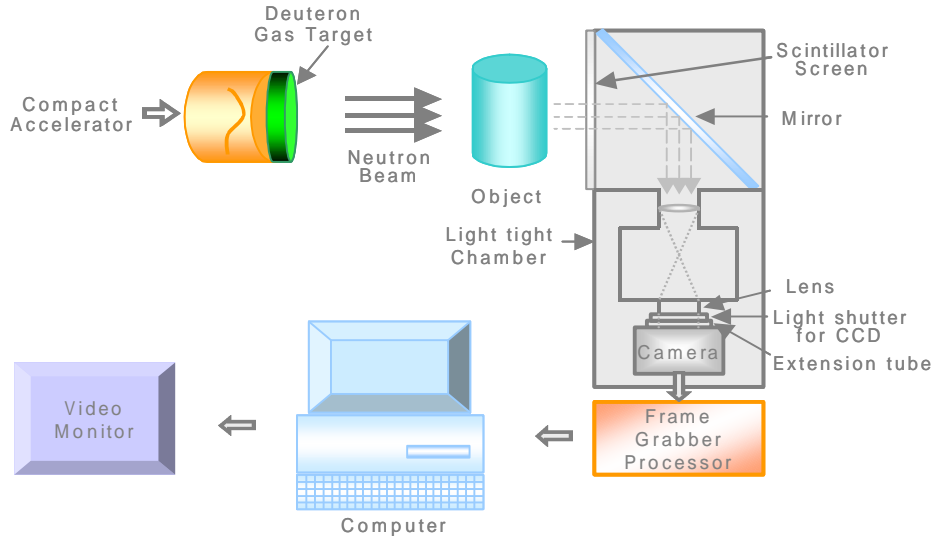


그림 1 고속중성자 방사선영상학 장치 구성도

그림 5는 H, C, N, 그리고 O의 총 반응단면적을 나타내고 있다. 그러나 이 에너지 구간에서 서로 다른 원소의 피크가 겹쳐 나타난다. 따라서 하나 이상의 원소성분에 대한 방정식을 풀기 위한 방법으로 선형감소 모델을 도입하였다.

우선 하나 이상의 원소들의 공명 특성을 포함하는 에너지 구간 $[E_1, E_2]$ 을 선택하고 에너지 구간 내의 중성자가 대상물질과 상호작용하고 나온 중성자를 기록한다. 이때 대상물질의 분자상호작용 효과(Inter-Molecular Effect)와 산란축적인자(Scattered Buildup Factor)는 고려하지 않는다. 그래서 마치 하나의 원소를 통과하고 나온 것처럼 각각의 원소는 중성자에너지를 감쇄시키고 총 감쇄계수 b 는 대상물질의 모든 원소들의 합으로 나타난다. 즉,

$$a_H x_H + a_C x_C + a_N x_N + a_O x_O + a_{Other} x_{Other} = b \quad (2)$$

이고, 여기서 $a_H, a_C, a_N, a_O, a_{Other}$ 는 전체 감쇄계수이고 $x_H, x_C, x_N, x_O, x_{Other}$ 는 이 원소들의 성분이다. 식 1에서 언급했듯이 전체 감쇄계수는 반응단면적과 관계가 있지만 보통 반응단면적과 같지는 않다. 그 이유를 에너지 구간의 개념을 도입해 간단한 식 3으로 표현할 수 있다.

$$N = \frac{N_0}{E_2 - E_1} \int_{E_1}^{E_2} e^{x \cdot \sigma(E)} dE \neq N_0 \cdot e^{x \cdot AVE(\sigma)} \quad (3)$$

하나의 에너지 구간을 가지고 모든 원소의 감쇄계수 합이 총 감쇄계수라고 표현하기에는 한계가 있으며 정확히 대상물질을 알아내기 힘들다. 따라서 n 개의 원소를 가진 대상물질과 m 개의 에너지 구간을 설정하고 식 4를 풀면 더욱 정밀도를 높일 수 있다.

$$\begin{aligned}
& a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + a_{13} x_3 + \dots + a_{1j} x_j + \dots + a_{1n} x_n = b_1 \\
& a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + a_{23} x_3 + \dots + a_{2j} x_j + \dots + a_{2n} x_n = b_2 \\
& \dots\dots\dots \\
& a_{i1} x_1 + a_{i2} x_2 + a_{i3} x_3 + \dots + a_{ij} x_j + \dots + a_{in} x_n = b_i \\
& \dots\dots\dots \\
& a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + a_{m3} x_3 + \dots + a_{mj} x_j + \dots + a_{mn} x_n = b_m \quad (4)
\end{aligned}$$

따라서 위 식 4는 $m \geq n$ 이면 방정식을 풀 수 있다.

몬테카를로 방법을 이용한 MCNP-4B 코드를 사용하여 총 감쇄계수를 구할 수 있다. 본 연구에서는 우선 공항, 항만 등의 금수품과 일반물질의 원자밀도를 각 대상물질별로 원소성분비를 분석하여 자료화하였다. 일반물질, 폭발물, 그리고 마약에 대한 원소성분비는 표 1과 같다[20].

Substance	D (g/cc)	%H	%C	%N	%O	%Cl	%Other Element	Examples of Elemental Signature			
								C/O	N/O	Cl/C	Cl/H
Salt	0.77	0	0	0	0	60	40	0	0	0	0
Sugar	1.2	7	42	0	51	0	0	0.8	0	0	0
Sand	2.3	0	0	0	53	0	47	0	0	0	0
Water	1	11	0	0	89	0	0	0	0	0	0
Wood	0.62	6	47	0	44	0	3	1.1	0	0	0
Petroleum	0.87	14	86	0	0	0	0	0	0	0	0
Cement	2.3	0	0	0	35	0	65	0	0	0	0
PVC	1.32	5	38	0	0	57	0	0	0	1.5	11.5
Polyethylene	0.94	14	86	0	0	0	0	0	0	0	0
Fiberglass	1.7	3	46	0	35	0	16	3	1.3	0	0
Sea Water	1.02	10	0	0	88	1.2	8	0	0	0	0.03
Explosives											
PETN	1.76	2.4	19	17.7	60.8	0	0	0.3	0.3	0	0
TNT	1.63	2.2	37	18.5	42.3	0	0	0.9	0.4	0	0
Dynamite	1.18	4.2	14.8	18.5	62.4	0	0	0.2	0.3	0	0
C4	1.65	3.6	21.9	34.4	40.1	0	0	0.6	0.9	0	0
Korean food [21]											
Kochujang	1.23	8.2	24.9	0.2	57.2	0	9.5	0.4	0	0	0
Doenjang	1.24	7.9	17.4	0.4	56	0	18.3	0.3	0	0	0
Narcotics											
Heroin Hydrochloride	~0.87	6	62.1	3.5	19.7	8.7	0	3.2	0.2	0.1	1.5
Cocaine Hydrochloride	~0.87	6.5	60.1	4.1	18.8	10.4	0	3.2	0.2	0.2	1.6
Heroin	~0.87	6.3	68.2	3.8	21.7	0	0	3.2	0.2	0	0
Cocaine	~0.87	6.9	67.3	4.6	21.1	0	0	3.2	0.2	0	0

표 1. 일반물질, 마약, 폭발물의 원소성분비

여기서 국내 검색시스템의 오작동률을 높이는 된장이나 고추장 같은 물질은 미국 FAA(The Federal Aviation Administration) 조차 검색시험에 적용하지 않고 있다. 또한 FAA는 식품(초콜렛, 사탕 등)에 대한 검색 시험을 실시하지 않기 때문에 실제 현장에 적용하고 있는 X-ray검색

장비에 오작동률을 높일 가능성을 제기하고 있다[22]. 그리고 국내 식품 중 된장이나 고추장의 경우 X-ray 장비의 원리가 밀도와 유효원자번호에 의해 검출하는 방법을 사용함으로써 폭발물 중 다이아마이트의 밀도와 비슷하며 고속중성자 분석법(Fast Neutron Analysis)과 저속중성자 분석법(Thermal Neutron Analysis)은 원소성분비를 통해 분석하지만 C%, O%의 원소성분비가 비슷하여 구분이 힘들다. 따라서 넓은 공명 영역(2~6 MeV)을 가진 FNRT를 사용할 경우 각각의 에너지, 각도별 특성 공명반응을 통한 원소들의 감쇄계수를 구할 수 있는 장점을 가지고 있다.

3. D-D Neutron Source Simulation 및 분석

3.1 가변 에너지 중성자 선원(Variable Energy Neutron Source)

RFQ(Radio Frequency Quadrupole) 가속기는 진동 전기장(oscillating electric field)이 입자를 가속하는 형태로서 교류 전압을 사용하여 빔 축 주위에 4개의 평행 전극(parallel vane)을 통해 field를 만든다. 또한 소형으로 bunch 모드와 하전입자 가속 모드를 결합하여 사용할 수 있는 장점을 가지고 있으며 길이가 보통 3~10 피트, 직경이 1~3 피트로 소형이므로 공항, 항만 검색시스템에 적용할 수 있다[23].

본 연구는 대상물질의 원소성분(H, C, N, O, 그 밖의 원소 하나)을 분석하기 위하여 중성자 에너지는 산소의 좁은 공명피크 영역 2.25~2.5 MeV을 포함하고 질소의 넓은 공명피크 영역 4.75~5 MeV을 포함할 수 있을 만큼 변해야 한다. 이런 요구조건을 만족할 만한 중성자 선원으로 DD 핵반응을 선택하였으며 DROSG-2000 코드[24]를 사용하여 각도에 따른 중성자의 에너지 분포를 계산하였고 중양자 에너지 변화에 따른 각분포별 총 반응단면적을 산출하였다.

DROSG-2000 코드는 57가지의 단일에너지 중성자 선원 반응을 모사하기 위한 코드이다. 이 코드는 크게 3가지로 분류할 수 있다. 중성자에너지에 따른 서로 다른 반응단면적과 수율을 계산할 수 있으며 핵반응을 통해 생성된 단일에너지 중성자로부터 두꺼운 표적물의 수율과 백색 중성자 스펙트럼(white neutron spectra)을 구할 수 있고 (n,p), (n,d), (n,t) 그리고 (n, α)의 반응을 통해 서로 다른 에너지와 반응단면적을 계산할 수 있다.

3.1.1 D-D 각분포

DD 핵반응은



반응의 Q값이 3.269 MeV이고 결과적으로 중성자는 큰 에너지 범위를 가진다. DT 핵반응의 경우 Q값이 14.6 MeV이고 충돌하는 중양자의 에너지는 약 0.1 MeV이지만 모든 각도에서 동일한 에너지 분포를 보인다. 반면에 DD 핵반응은 그림 5와 같이 중성자의 에너지에 따른 각분포 의존성 특징을 보이고 있다.

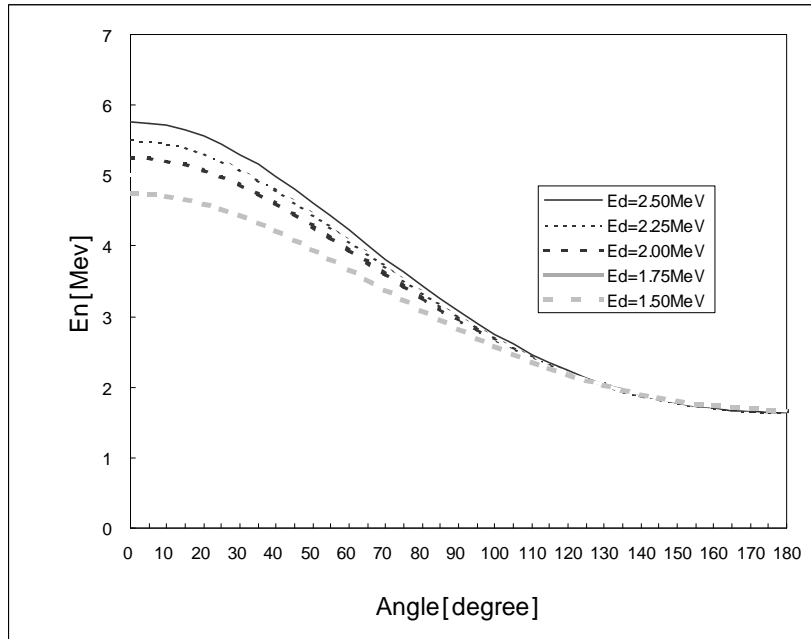


그림 2 각도에 따른 DD 중성자에너지 분포

각도에 따른 DD 중성자의 에너지 분포는 그림 2와 같다. 중양자에너지 구간이 1.5~2.5 MeV 일 때 중성자에너지는 0° 에서 5.76~4.76 MeV이고 120° 에서 2.23~2.18 MeV로 떨어진다. 중성자 에너지는 100° 보다 작은 각도에서 중양자에너지에 의존함을 알 수 있었다. 두꺼운 중양자 표적 물질을 사용하기 때문에 중양자 빔은 중성자 발생 전에 에너지를 조금 잃게 될 것이고, 결국 중성자 에너지는 모든 각도에서 스펙트럼을 가지게 된다. 만약 입사 중양자에너지가 2.5 MeV이고 표적물질의 두께가 1.0 MeV이면 발생 중성자는 0° 에서 5.76~4.76 MeV의 에너지 분포를 가진다.

중성자 조사시 대상물질은 일정한 크기를 가지고 있기 때문에 물질의 다른 일부는 보통 서로 다른 중성자에너지와 각도에 의하여 좌우된다. 즉, 중성자는 각 영상 pixel에서 에너지 스펙트럼을 가지고 이 스펙트럼은 영상을 다양하게 변화시킨다.

중성자에너지는 각분포 의존성을 가지며 중양자에너지에 의해 결정된다. 그러나 중성자에너지 스펙트럼은 어림잡아 모든 각도에서 편평하다. DD 중성자 선원의 각도에 따른 총 반응단면적 분포는 그림 3과 같이 나타내었다.

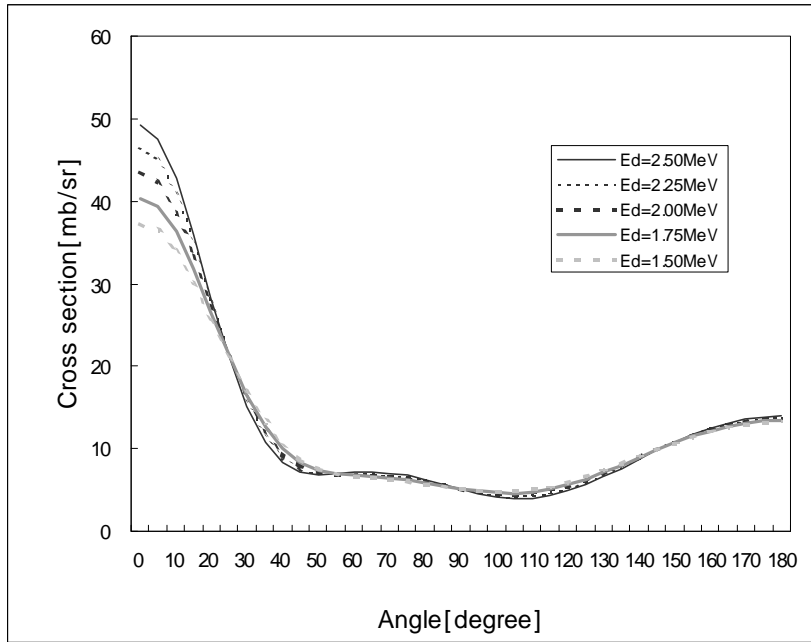


그림 3 각도에 따른 총반응단면적 분포

40°보다 큰 각도에서 중양자에너지에 대하여 총 반응단면적은 거의 변하지 않음을 확인할 수 있었다. 왜냐하면 중양자 빔이 표적물과의 상호작용에 의해 잃는 에너지손실(저지능)은 작기 때문에 중성자에너지 스펙트럼은 어떤 각도에서나 편평하였다.

3.1.2 회전 Geometry

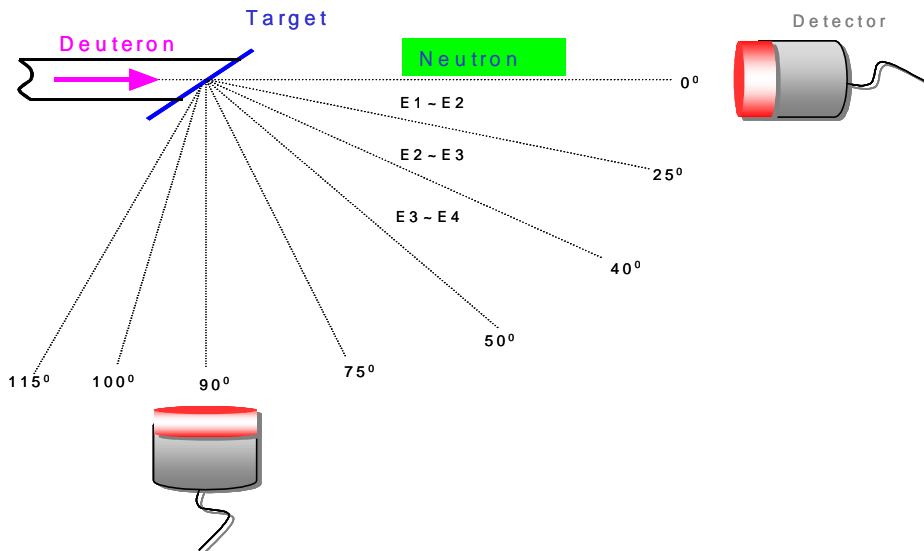


그림 4 각도에 따른 회전 검색시스템 배치도

각도에 따른 회전 geometry는 그림 4와 같으며 고정된 중양자 빔을 표적물에 입사시켜 각도에 따른 중성자의 에너지 분포가 달라지기 때문에 FNRT의 적용하기 위해서 대상물질과 검출기를 하나의 집합체로 구성하여 정해진 각도에 따라 정확히 회전시켜야 한다. 그러므로 각도별로 총

분한 에너지 구간(8~10개)을 설정하면 각 pixel에 대한 H, C, N, O, 다른 원소 하나에 대한 선형방정식을 구할 수 있다. 여기서 원소를 총 5가지로 선택한 이유는 계산상의 편의성도 배제할 수 없지만 표 1에서 기술했던 것처럼 대부분의 산업용 수·화물 검색시스템에서 금수품 목록을 포함한 일반물질의 원소성분들은 수소, 탄소, 질소 그리고 산소로 분류할 수 있으며 상용화에 대한 가능성을 고려하였을 때 비용적 측면도 있다.

회전 geomtry는 단층촬영법(Tomography)과는 다르다. Tomography에서 물질과 검출기를 회전시키는 목적은 다른 투영(projections)을 얻기 위한 방법이지만 FNRT는 투영이 정확하게 정해진 위치에 일치되어야 한다는 차이점을 가지고 있다.

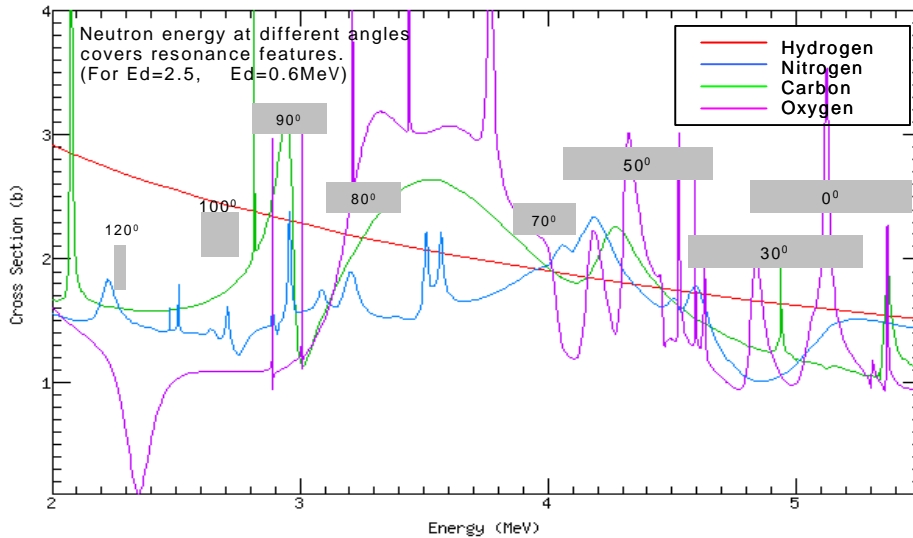


그림 5 다른 각도에서 중성자 에너지

다른 각도에서 얻어진 중성자 에너지 분포를 구하여 그림 5에 나타내었다. 중양자에너지 $E_d=2.5$ MeV, $\Delta E_d=0.6$ MeV로 가정하였다.

3.2 중양자 표적물(Deuteron Target)

RFQ 선형가속기로부터 가속된 중양자에너지는 중양자 표적물에 충돌하여 중성자를 발생시킨다. 표적물의 형태는 크게 가스형이거나 중양자가 침적된 고체형이다. 그러나 고체 표적물의 경우 중성자 수율(yield)이 낮고 고체 표적물을 통한 2차 반응 생성, 그리고 표적물 산화로 인한 수명(lifetime)이 짧아지는 문제점과 함께 많은 불순물을 생성하는 등[24], FNRT에 적용하기 부적합하다. 따라서 본 연구는 DROSG-2000 코드를 사용하여 중양자의 에너지 변화에 따른 저지능(Stopping Power-에너지 손실)을 계산하였고 중성자 수율을 산출하기 위하여 중양자에너지 변화에 따른 총 반응단면적을 계산하였다.

가스 cell은 보통 얇은 입사창(entrance window)을 가진 실린더형이다. 입사창 뒤 단(beam stoper)은 진공의 역할을 하는 동시에 빔 stop의 구실을 한다.

중양자 빔은 중양자 가스 표적구간에서 에너지를 잃어버리고 다른 에너지를 가진다. 결국 생성된 중성자는 모든 각도에서 에너지 퍼짐(spread) 현상이 나타난다. 중양자의 저지능 dE/dx 는 Bethe's formula[25] 즉,

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} NB \quad (6)$$

$$B = Z \left[\ln 2 m_0 \frac{v^2}{I} - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right]$$

이고, 여기서 v 와 ze 는 입사입자의 속도와 전하이므로, N 은 단위 체적내의 흡수체 원자의 개수, Z 는 흡수체 원자의 원자번호, m_0 및 e 는 전자의 정지질량과 전하이므로. 매개변수 I 는 흡수체 원자의 평균 여기 및 potential을 나타낸다.

3기압 중양자 가스에서 저지능은 그림 6과 같다.

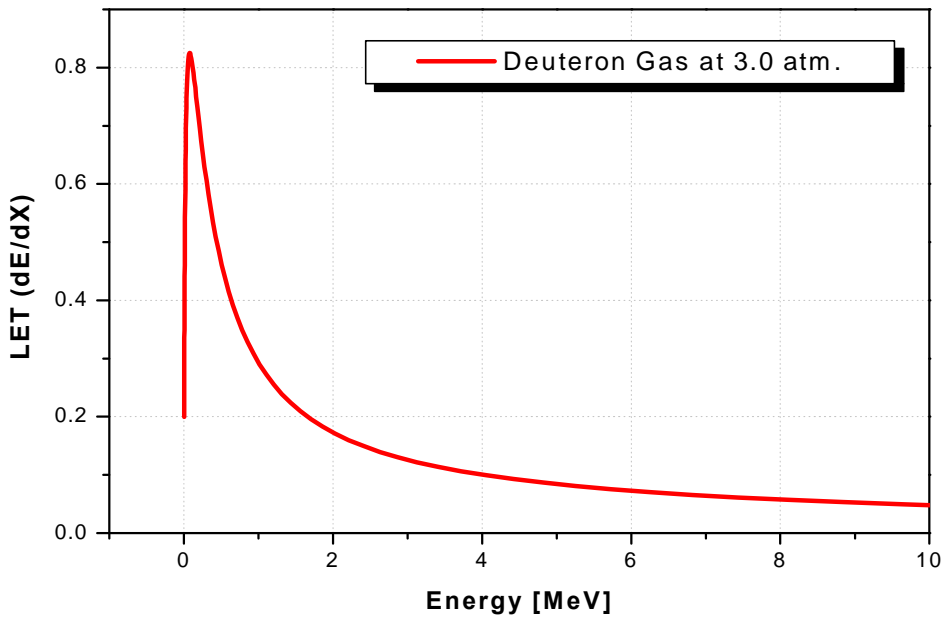


그림 6 3기압에서 중양자에너지 손실

중양자에너지 2 MeV 근처에서 에너지 손실은 약 0.17 MeV/cm 이고, 0^0 에서 중성자는 표적물에서 중양자에너지 퍼짐과 같은 에너지 spread가 일어난다. 왜냐하면 NRR의 목적에 맞게 중성자에너지 스펙트럼은 넓은 공명 피크를 만들어야 하기 때문에 표적물은 0.68 MeV 만큼 두꺼워질 수 있다. 같은 조건에서 측면 산란(lateral straggling)은 약 1.8 mm 정도였다.

중성자 수율 Y 는 DD 반응단면적, 중양자 빔 전류 그리고 중양자 표적물 두께에 의해 구할 수 있다. 0^0 의 반응단면적과 총 반응단면적은 그림 7과 같이 나타냈다.

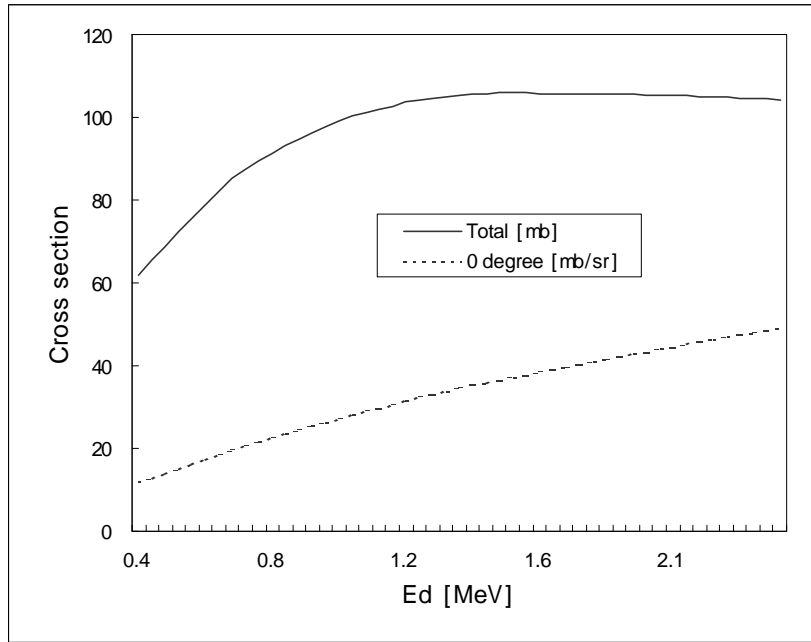


그림 7 DD 반응에서 0^0 와 총 반응단면적

DROSG-2000 코드를 사용하여 계산한 결과 값으로부터 중성자 수율을 산출하였다. 총 중성자 수율($E_d=2.5$ MeV, $x=2$ cm 그리고 $\Delta E_d=0.75$ MeV)은 약 4.4×10^8 neutrons/ $\mu\text{A} \cdot \text{sec}$ 였고 0^0 에서 1.9×10^8 neutrons/ $\text{sr} \cdot \mu\text{A} \cdot \text{sec}$ 값을 얻었다.

4. 결과 분석 및 향후 계획

중양자 가스 3기압 조건에서 저지능에 대한 G. Chen의 계산 결과 값이 2 MeV 근처에서 약 0.2 MeV/cm의 에너지손실이 있고 측면 산란이 1 mm 정도의 값을 가지고 있지만 DROSG-2000 코드를 사용하여 모사한 결과 값과 약간의 차이를 보인다. 이 차이는 물질에서 이온의 저지능과 range를 계산하는 방법에서 전자의 경우 Bethe's formula를 이용해 계산한 값이고 본 연구에 사용한 코드는 Bethe's formula를 기초로 한 Ziegler의 자료표[24]를 토대로 산출된 값에서 오는 차이(약 15%)이다.

중성자 수율은 코드 모사 결과에 비해 G. Chen 계산 결과 값이 2.0×10^8 neutrons/ $\mu\text{A} \cdot \text{sec}$ 로 적게 나타났다. 이 결과로부터 DROSG-2000 코드를 사용하여 표적물 설계시 비용과 시간을 절약하고 정밀도를 한층 높일 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 FNRT를 산업적으로 적용하기 위해 대상물질별 원자밀도를 구하였고 이에 따른 원소성분비를 산출하였으며 DROSG-2000 코드를 이용하여 소형가속기 표적물을 개념적으로 설계하였다.

FNRT의 전반에 걸쳐 지금까지 연구된 결과를 바탕으로 MCNP-4B 코드의 시뮬레이션 입력 자료로 이용하여 대상물질의 원소성분을 결정할 것이다. 향후 대상물질들에 대해 자료화하여 고속중성자 공명 검색시스템 설계 시 활용할 것이다.

참고 문헌

- [1] Configuration Management and Performance Verification of Explosives-Detection Systems, <http://www.nap.edu/openbook/0309061962/html/R1.html>, The National Academy Press,

- Washington, D.C., NMAB-482-3(1998).
- [2] T. Gozani, "A Review of Neutron based Non-Intrusive Inspection Technique", <http://www-hoover.stanford.edu/research/conferences/nsf02/gozani.pdf>.
 - [3] F.D. Brooks, et al, "Determination of HCNO Concentrations by Fast Neutron Scattering Analysis", Nucl. Instr. and Meth. A410, 319-328(1998).
 - [4] A. Buffler, et al, "Material classification by fast neutron scattering", Nucl. Instr. and Meth. B173, 483-502(2001).
 - [5] T. Gozani, "Understanding the physics limitations of PFNA-the nanosecond pulsed fast neutron analysis", Nucl. Instr. and Meth. B99, 743-747(1995).
 - [6] D.R. Brown, et al, "Improvements In Pulsed Fast Neutron Analysis System For Cargo Inspection", ONDCP International Technology Symposium Proceedings Washington, D.C., March 8-10(1999).
 - [7] J. Rynes, et al, "Gamma-ray and neutron radiography as part of a pulsed fast neutron analysis inspection system", Nucl. Instr. and Meth. A422, 895-899(1999).
 - [8] R.L. Feinstein, et al, "Performance evaluation tools for nuclear based interrogation techniques-an application of the PFNA technology", Nucl. Instr. and Meth. A356, 579-584(1995).
 - [9] P.C. Womble, et al, "Non-destructive characterization using pulsed fast-thermal neutrons", Nucl. Instr. and Meth. B99, 757-760(1995).
 - [10] G. Vourvopoulos, et al, "Pulsed fast/thermal neutron analysis: a technique for explosives detection", Talanta 54, 459-468(2001).
 - [11] P.A. Dokhale, et al, "Investigations on neutron-induced prompt gamma ray analysis of bulk samples", Appl. Radiat. Isot., 54, 967-971(2001).
 - [12] W.C. Lee, et al, "Thermal neutron analysis(TNA) explosive detection based on electronic neutron generators", Nucl. Instr. and Meth. B99, 739-742(1995).
 - [13] A.X. da Silva, et al, "Use of thermal neutron tomography for the detection of drugs and explosives", Radiat. Phys. Chem., 61, 767-769(2001).
 - [14] J.C. Overley, "Explosives detection through fast-neutron time-of-flight attenuation measurements", Nucl. Instr. and Meth. B99, 728-732(1995).
 - [15] R.J. Evans, et al, "Design of a large-area CsI(Tl) photo-diode array for explosives detection by neutron-activation gamma-ray spectroscopy", Nucl. Instr. and Meth. A422, 900-905(1999)
 - [16] G. Chen, et al, "Fast Neutron Resonance Radiography for Security Applications", Application of Accelerators in Research and Industry(AIP CP576), J.L. Duggan and I.L. Morgan(eds.) , New York, NY: AIP Press, 1109-1112(2000).
 - [17] P. Shea, et al, "Economic Analysis of Differing High Tech Inspection Techniques and Systems", ONDCP International Technology Symposium Proceedings Washington, D.C., March 8-10(1999).
 - [18] Gongyin Chen, *Fast Neutron Resonance Radiography for Elemental Imaging: Theory and Applications*. Ph.D. Thesis, MIT(2001).
 - [19] J.C. Domanus, *Practical Neutron Radiography*. Kluwer Academic Publishers(1992).
 - [20] T. Gozani, et al, "SeaVEDS-Nonintrusive Inspection of maritime Vessels for Concealed Drugs", ONDCP International Technology Symposium Proceedings Washington, D.C., March 8-10(1999).

- [21] 장규섭, 정재근, “식품의 열특성에 관한 연구”, Korean J. Food Sci. Technol., 2(1982).
- [22] L. Qiang, The Utility of X-ray Dual-Energy Transmission and Scatter Technologies for Illicit Material Detection, Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University(1999).
- [23] R.W. Hamm, “The Missing Link Accelerator”, [http://www.accsys.com/missing link accelerator.pdf](http://www.accsys.com/missing_link_accelerator.pdf), AccSys Technology. Inc.
- [24] M. Drosog, “DROSG-2000: Neutron Source Reactions(Version 2.1)”, IAEA-NDS-87(2002), <http://www-nds.iaea.org>.
- [25] G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons(1989).