2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

가속기를 이용한 BNCT용 열외중성자빔의 선질 향상 연구

A Study on Epithermal Neutron Beam Quality Improvement for Accelerator-Based BNCT

이 덕 재, 한 치 영, 김 종 경
한양대학교
서울 성동구 행당동 17

요　약

현재까지의 모든 BNCT용 열외중성자빔 설계 연구는 단지 열외중성자 에너지의 전 영역에 걸쳐 분포하는 매우 폭이 넓은(broad) 스펙트럼을 가진 중성자빔을 생산하는데 그치고 있다. 그러나 실제 특정 위치(깊이)에 있는 종양을 치료할 경우, 열외중성자 에너지의 전 영역에 걸친 중성자빔을 조사하는 것 보다는 그 위치의 종양을 치료하는 데 적합한 에너지를 갖는 열외중성자빔만을 조사하는 것이 바람직하다. 이와 관련하여 본 연구에서는, 가속기를 이용하여 생성된 중성자 선원을 이용하여, 특정 위치의 암 치료에 적합한 스펙트럼의 폭이 좁은(narrow) 열외중성자빔을 얻을 수 있는 방안을 고찰하였다. 가속기 이용 중성자 선원은 PLINS 코드를 이용하여 획득하였고, 감속재의 재질을 AlF_3에 Al-27, Ni-60을 추가하여 기존의 열외중성자빔보다 폭이 좁은 중성자 스펙트럼을 갖는 열외중성자를 생산할 수 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

Up to now, all epithermal neutron beam designs for BNCT have been focused on generating neutron beams that have broad spectra covering all epithermal energy regions. It is reasonable to generate epithermal neutron beam for BNCT. However, when we consider a tumor which is locally seated in brain, it is desirable to use a locate-specific epithermal neutron beam which has a narrow peak at an epithermal energy region. From this idea, it was investigated the possibility of generating a narrowly peaked epithermal neutron beam using accelerator. Neutron source is calculated with PLINS code. It is found that epithermal neutron beams, those have narrower band spectra than previously designed beam, can be generated with properly combined

moderators; AlF_3 Al-27, and Ni-60.

1. 서 론

붕소중성자포획요법(BNCT, Boron Neutron Capture Therapy)의 원리는, 중성자를 잘 흡수하면서 암 세포에 선택적으로 집적되는 붕소화합물을 환자에게 투여한 후, 암 부위에 중성자를 조사하면 암 세포에 모인 붕소화합물이 중성자를 집중적으로 흡수하게 되고, 이 때 나오는 2차 방사선으로 암 세포를 죽이는 것이다. 따라서, BNCT를 이용한 효과적인 암 치료 방법은 근본적으로 다음과 같이 크게 두 가지 측면에서 접근할 수 있다. 첫 번째는 인체에 해가 없고 암 세포에서의 집적도가 높은 붕소화합물을 사용하는 것이며, 두 번째는 암 치료에 적합한 특성을 갖는 중성자빔을 사용하는 것이다. 이 두 가지 접근 방법 중, 후자인 중성자빔의 특성을 향상시키고자 함이 본 연구의 출발점이다.

붕소의 중성자 포획은 열중성자와 반응하여 발생하지만, 특히 다형성 신경교아종(GBM, Glioblastoma Multiforme)과 같이 뇌의 심부에 위치한 뇌종양의 치료에는 깊은 곳까지 도달할 수 있는 보다 높은 에너지의 중성자빔이 요구된다. 그러나 속중성자와 같이 높은 LET(Linear Energy Transfer)를 갖는 중성자빔은 오히려 정상세포에 불필요한 선량을 전달하게 된다. 따라서 일반적으로 BNCT용 중성자빔으로는 열외중성자빔($4eV \leq E_n \leq 40keV$)이 적합하다[1].

중성자빔 특성은 다시 중성자빔의 세기(intensity)와 선질(quality)로 나누어서 생각할 수 있다. 중성자빔의 세기는 치료시간을 결정하는 주요 인자로서, 일반적으로 BNCT에 적합한 열외중성자빔의 선속(flux)은 환자 조사시 약 1×10^9 neutrons/cm^2-sec 이상이 되어야 하며 이는 약 1시간 이내의 치료를 가능하게 한다. 중성자빔의 선질은 빔의 형태 및 에너지 그리고 동반되는 다른 방사선의 세기 등에 의존한다. 즉, 전향성(forward directional property)과 열외중성자 비율은 크고 감마선이나 속중성자 등과 같은 불필요한 방사선은 가능한 적은 중성자빔이 적합하다고 할 수 있다. 특히, 열중성자가 대부분인 기존의 원자로를 대신하여 최근 몇 년 동안 전 세계적으로 급속하게 진행되고 있는 가속기를 이용한 BNCT 연구에서는 중성자빔의 특성이 더욱 중요한 관심사가 되었다. 즉, 낮은 중성자속을 극복하기 위하여 가속기 빔과 표적 연구에 관심이 모아지고 있으며, 표적에서 발생하는 중성자 선원을 적절한 열외중성자빔으로 감속시키는 집합체(beam shaping assembly) 설계 연구 등이 보고되고 있다.

한편, 중성자빔 선질과 관련하여 지금까지의 모든 BNCT용 열외중성자빔 설계 연구는 단지 위에서 언급한 열외중성자 에너지의 전 영역에 걸쳐 분포하는 중성자빔을 생산하는 수준에 머무르고 있다. 다시 말하면, 지금까지 설계된 열외중성자빔은 매우 폭이 넓은(broad) 스펙트럼을 보여주고 있다는 것이다. 그러나 실제 특정 위치(깊이)에 있는 종양을 치료할 경우, 열외중성자 에너지의 전 영역에 걸친 중성자빔을 조사하는 것 보다는 그 위치의 종양을 치료하는 데 적합한 에너지를 갖는 열외중성자빔만을 조사하는 것이 매우 바람직하다. 특히 심부에 위치한 종양의 경우에는 열외중성자 에너지 영역 중에서도 보다 높은 에너지의 열외중성자빔이 필요하다.

이와 관련하여 본 연구에서는, 가속기를 이용하여 생성된 중성자 선원을 이용하여, 특정 위치의 암 치료에 적합한 열외중성자를 생산하고자 하는 관점에서 스펙트럼의 폭이 좁은(narrow) 열외중성자빔을 얻을 수 있는 방안을 고찰 하였다.

2. 방법

2.1 중성자 선원

가속기를 이용한 BNCT에 적합한 표적으로는 크게 Li-7과 Be-9이 있으며 일반적으로 열외중성자 빔의 생성에 Li-7이 가장 적합하다. 따라서 본 연구에서는 Li-7 표적에서 발생되는 중성자를 선원으로 이용하고자 하였으며, $^{7}Li(p,n)^{7}Be$ 반응으로부터 생성되는 중성자 선원의 스펙트럼을 분석하기 위하여 이전의 연구에서 개발한 PLINS(Proton Lithium Induced Neutron Source) 코드[2]를 사용하였다. 이 때 사용된 양성자의 에너지는 2.5 MeV이다. 그림 1은 PLINS 코드를 이용하여 2.5 MeV 양성자로부터 생성되는 중성자 선원의 스펙트럼(각도, 에너지)를 도시한 것이다. 그림에서 보듯이 중성자 선원은 약 0.8 MeV의 최대 에너지를 가지고 있으며 또한 전향성을 가지고 있다.

2.2 감속재 특성 분석

2.2.1 핵단면적 자료를 이용한 핵종별 중성자 산란 특성 분석

열외중성자빔 설계를 위하여 감속재가 갖추어야 할 특성을 요약하면 다음과 같다.

- 중성자 산란단면적(Σ_s)이 커야 함
- 중성자 충돌 평균 에너지 손실(ξ in lethargy)이 중성자 선원의 스펙트럼에 적당해야 함
- 중성자 포획단면적(Σ_a)이 작아야 함

즉, 감속재는 큰 산란단면적을 갖는 물질이 적합하며, 특히 열중성자 보다는 속중성자의 반응확률이 큰 물질이 바람직하다. 또한 상대적으로 낮은 원자번호(Z)의 물질이 중성자 감속에 효과적이다. 그러나, ξ 값이 너무 클 경우 중성자는 쉽게 열중성자로 감속되므로 중성자 선원의 스펙트럼에 따라, 때로는 목표로 하는 열외중성자빔 설계에 적합하지 않을 수 있다. 중성자 포획(radiative capture)은 불필요한 감마선을 생성하여 이에 대한 추가적인 차폐시설을 요구하므로 가능한 감마선 생성을 줄여야 한다. 이러한 기본적인 요건들을 기준으로, 먼저 핵단면적 자료 분석에 근거한 감속재 재질 특성 분석을 수행하였으며, 이후 MCNP 전산코드를 이용한 중성자빔 특성 분석을 통해 감속재 재질을 선정하였다.

따라서, 우선 모든 핵종의 미시핵단면적을 분석하여 열외중성자 에너지 범위 이상의 에너지 영역에서 공명산란단면적(resonance scattering cross section)이 비교적 크거나 특정 에너지 범위에서의 큰 공명산란단면적을 가지는 핵종을 일차적으로 감속재 재질로서 선정하고 이들의 미시핵단면적 자료를 확보하였다. 선정된 핵종들 중 He과 F는 상온에서 기체상태이므로 밀도가 낮아 독자적인 사용은 어려울 것이므로 보조 감속재 또는 화합물 형태로 사용해야 할 것이다. 특히 F는 상대적으로

낮은 원자번호(Z)의 핵종이므로 다른 금속성 핵종 보다는 중성자 감속에 효과적이다. 또한 F는 많은 핵종들과 다양한 형태의 화합물로 존재하기 때문에 화합물 형태로 사용할 경우 그 효과는 클 것으로 기대된다. 한편 중성자의 실질적 감속은 대상 핵종들과의 반응률($\Sigma\phi$)에 의존하므로 확보된 각 핵종의 미시핵단면적 자료를 이용하여 거시핵단면적 자료를 생산하였다.

2.2.2 MCNP 코드를 이용한 감속재 특성 분석

MCNP 코드를 이용하여 감속재는 반경 15 cm의 원통형으로, 반사체는 두께 30 cm의 Pb를 사용하여 감속재의 외부를 감싸는 원통형으로 모델링하고 감속재의 두께를 변화시키면서 중성자 선원의 스펙트럼 변화를 분석하였다. 감속재의 두께는 핵종별 이용 가능 에너지 범위 이하로 감속될 때까지 변화시켰다. 이 과정에서 이전에 확보한 핵종별 거시핵단면적을 도시하고 여기에 중성자속을 함께 도시하는 방법으로 각 재질의 특성을 분석하였다. 이 때 열외중성자 에너지 범위 이상에서 중성자 감속 효과에 중점을 두고 감속재 특성을 분석하기 위하여 중성자 선원은 최대 에너지인 0.8 MeV의 단일 에너지 빔으로 가정하였다. 반복적인 MCNP 코드 계산을 통한 감속재 특성 분석을 수행하여 폭이 좁은 중성자빔 스펙트럼을 생산하는데 효과적이라고 판단되는 감속재 후보 물질들을 선정하였다.

선정된 감속재 후보 물질들은 다시 주 감속재와 보조 감속재로 나누어 감속재의 두께를 변화시키면서 감속재 1 cm 간격마다 중성자 선원의 스펙트럼 변화를 분석하였다. 주 감속재의 두께는 20 cm와 25 cm로 변화를 주었고, 보조 감속재는 빔 출구위치 주 감속재에 각각 5 cm, 10 cm 및 15 cm를 덧대었다. 이 과정에서 핵종별 거시핵단면적과 빔 출구에서 중성자의 스펙트럼 변화를 함께 도시하는 방법으로 분석하였다.

모든 계산은 MCNP4C 코드를 이용하여 수행하였으며 핵단면적 자료는 ENDF-VI를 기반으로 하였다.

2.3 열외중성자빔의 선질 평가

열외중성자빔의 선질 평가는 최근 IAEA 보고서[3]에서 제안하고 있는 BNCT용 중성자빔의 선질 요건에 근거하여 수행되었으며 아울러 중성자빔의 스펙트럼 형태 분석을 위하여 FWHM(Full Width at Half Maximum) 개념을 도입하여 평가하였다. 또한 본 연구에서 제시한 열외중성자빔의 타당성을 평가하기 위하여 이전에 수행된 열외중성자빔 집합체의 결과를 대상으로 다음과 같은 기준을 이용하여 비교하였다.

2.3.1 속중성자 선량

중성자빔 속에 포함된 속중성자(> 40 keV)는 세포속의 수소원자와 반응하여 높은 LET의 양성자를 생성하므로 속중성자의 양은 가능한 줄여야한다. 속중성자 선량의 요건은 $D_n < 2.0 \times 10^{-13}$ Gy-cm^2/n_{epi} 이다.

2.3.2 열중성자 비율

열중성자는 피부 근처에서 대부분의 선량을 전달하므로 머리피부의 손상을 줄이기 위해서는 열중성자의 비율은 최소화되어야 한다. 열중성자 비율의 요건은 $f_{thermal} / f_{epihermal} < 0.05$ 이다.

2.3.3 감마선 선량

일반적으로 중성자빔과 동반하는 감마선은 암세포와 정상세포 모두에게 비슷한 양의 선량을 전달하므로 BNCT의 가장 중요한 특징인 암세포에 대한 선택적 선량 부여에 기여하지 못한다. 따라서 감마선의 양은 가능한 줄이는 것이 바람직하다. 이러한 중성자빔 속의 감마선에 대한 중요성은 세포 조직에서 수소원자의 (n,γ) 반응에 의해 생성되는 감마선의 중요성보다 다소 작다. 감마선 선량의 요건은 $D_\gamma < 2.0 \times 10^{-13} Gy\text{-}cm^2/n_{epi}$ 이다.

2.3.4 중성자빔 전향성

중성자빔의 전향성이 크면 빔의 발산이 적어 치료시 정상세포에 불필요한 선량을 줄일 수 있으며 중성자빔 중심축을 따라서 환자의 이동에 유연성을 주게 된다. 중성자빔의 전향성이 큰 경우 빔포트로부터 나온 중성자속은 거리에 따라 그 변화가 작으므로 환자와 빔포트사이의 거리를 둘 수 있으며 특히 심부 종양에 보다 많은 선량을 전달할 수 있다. 빔의 전향성은 중성자속에 대한 중성자류의 비로 나타낼 수 있다. 중성자빔 전향성 요건은 $J_{total}/f_{total} > 0.7$ 이다.

2.3.5 중성자빔 스펙트럼

특정 에너지에 집중되는 중성자빔 스펙트럼을 평가하기 위하여 FWHM을 계산하여 각각에 대해 비교하였다. 이 과정에서 중성자빔의 스펙트럼은 중성자 선원에 대하여 정규화시킨 선속으로 나타내고 이들에 대한 평균 에너지를 함께 계산하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 감속재 특성 분석을 통한 열외중성자빔 집합체 설계

PLINS를 이용하여 획득된 중성자 스펙트럼을 BNCT용 열외중성자빔의 생산에 적합하도록, MCNP 코드를 이용하여 감속재 물질들의 다양한 조합과 형태에 따른 중성자빔 특성평가를 수행하였다. 반복적인 MCNP 코드 계산을 통하여 다음과 같은 물질을 감속재 후보 물질로 선정하였다.

LiF, AlF_3, CrF_2, S_2F_{10}, TiF_3, FeF_2

선정된 감속재 후보 물질을 거시핵단면적자료와 함께 도시하여 재 분석한 결과 주 감속재로서 AlF_3를 선정하였다. 본 연구의 목적이 특정 위치의 뇌종양의 치료에 적합한 폭이 좁은 특정에너지의 열외중성자빔을 얻는 데 있으므로 열외중성자빔이 특정 에너지 범위에 집중될 수 있도록 보조 감속재를 선정하였다. 보조 감속재의 사용으로 주 감속재만 있을 때의 중성자 스펙트럼을 특정 에너지대로 이동시킬 수 있다. 보조 감속재의 선정 방법은 전술한 바와 같이 획득된 각 핵종의 거시핵단면적 자료를 근거로 하여 Al-27과 Ni-60을 보조 감속재로 선정하였다. 그림 2와 그림 3에서 이전의 결과[1]들과 본 연구에서 각각의 감속재에 따른 중성자 스펙트럼을 거시핵단면적 자료와 함께

도시하였다. 중성자 에너지 구간 별로 나타낸 열·열외·속중성자의 감속재 안에서의 중성자속 분포는 그림 4 ~ 그림 6에서 보이는 바와 같다. 그림에서 보듯이 본 연구에서 새로이 제안한 열외중성자빔은 이전의 열외중성자빔보다 매우 폭이 좁은 스펙트럼을 가지고 있음을 확인하였다.

3.2 중성자빔 선질평가

열외중성자빔의 선질 평가의 목적으로 제시된 몇몇 요건들에 근거한 결과는 표 1과 표 2에 나타내었다. 표 1에서 보는 바와 같이 모든 감속재에 대한 열외중성자빔의 선질은 IAEA에서 제안하는 요건들을 대체적으로 충족하고 있다. 그러나 모든 경우에 대하여 중성자빔 전향성의 경우 그 결과가 약 0.60이므로 그 요건을 만족하지 못하고 있으며, 주 감속재 20 cm에 보조 감속재 Al-27을 10 cm 추가한 경우에 속중성자 선량이 기준보다 약간 상회하는 결과를 보였다. 이를 제외하고는 전체적으로 우수한 결과를 보였다. 표 2에서 보는 바와 같이 각 감속재에 대하여 열외중성자 및 속중성자의 값은 비슷하게 나타나고 있으나, 열중성자에 대하여 이전의 연구결과는 본 연구에서 결과보다 훨씬 큰 값을 갖는다

또한 본 연구에서의 중성자 스펙트럼은 이전의 연구에서 제안된 중성자 스펙트럼은 보다 훨씬 좁은 피크(peak)를 가짐을 확인할 수 있다. 이를 정량적으로 표시하기 위해 본 연구에서는 FWHM을 lethargy 단위로 계산하였다. 계산된 FWHM은 표 2에서 보는 바와 같이 이전의 연구결과는 2.1로서 가장 크고 본 연구에서는 보조 감속재를 Ni-60를 사용하였을 때 0.4 ~ 0.6, Al-27을 사용하였을 때 0.7 ~ 1.2의 값을 갖는다. 따라서 본 연구에서 제시한 열외중성자빔이 특정한 위치에 있는 뇌종양을 치료할 수 있는 좁은 폭의 특정 에너지를 지닌 스펙트럼을 생산할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

4. 결론 및 향후계획

본 연구에서는, 가속기를 이용하여 생성된 중성자 선원을 이용하여, 특정 위치의 암 치료에 적합한 열외중성자를 생산하고자 하는 관점에서 스펙트럼의 폭이 좁은 열외중성자빔을 얻을 수 있는 방안을 고찰 하였다. 적절한 감속재의 조합을 통하여 특정 에너지로 열외중성자빔을 집중시킬 수 있는 가능성을 확인하였으며 BNCT에 적합한 선질요건을 적용하여 선질을 평가하였다. 본 연구에서 생성된 열외중성자빔은 기존의 열외중성자빔보다 더 높은 평균 에너지를 가지므로 보다 심부에 위치한 종양 치료에 효과적일 것으로 판단된다.

다양한 에너지에 대하여 폭이 좁은 열외중성자빔을 생산할 수 있게 된다면, 즉 비교적 낮은 열외중성자 에너지 영역에 중성자빔을 집중시킬 수 있다면 특정 위치의 암 치료에 유연성을 확보할 수 있을 것이다. 차후 연구를 통하여 열외중성자빔의 유연성 확보 가능성을 검토하고 VOXEL 뇌팬텀을 사용하여 선량 평가를 실시할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기연구개발사업과 방사선안전신기술연구센터의 지원에 의해 수행되었음.

참고 문헌

1. Mi Young PAEK, Chi Young HAN, and Jong Kyung KIM, "A Characteristic Analysis of a Accelerator-Based Epithermal Neutron Beam for Boron Neutron Capture Therapy," ISORD-1, 2001.
2. 김종경 외, "가속기를 이용한 BNCT 용 열외중성자빔의 개발," 과학기술부, 한양대학교, 1998.
3. IAEA, "Current Status of Neutron Capture Therapy," IAEA-TECHDOC-1223, May, 2001.

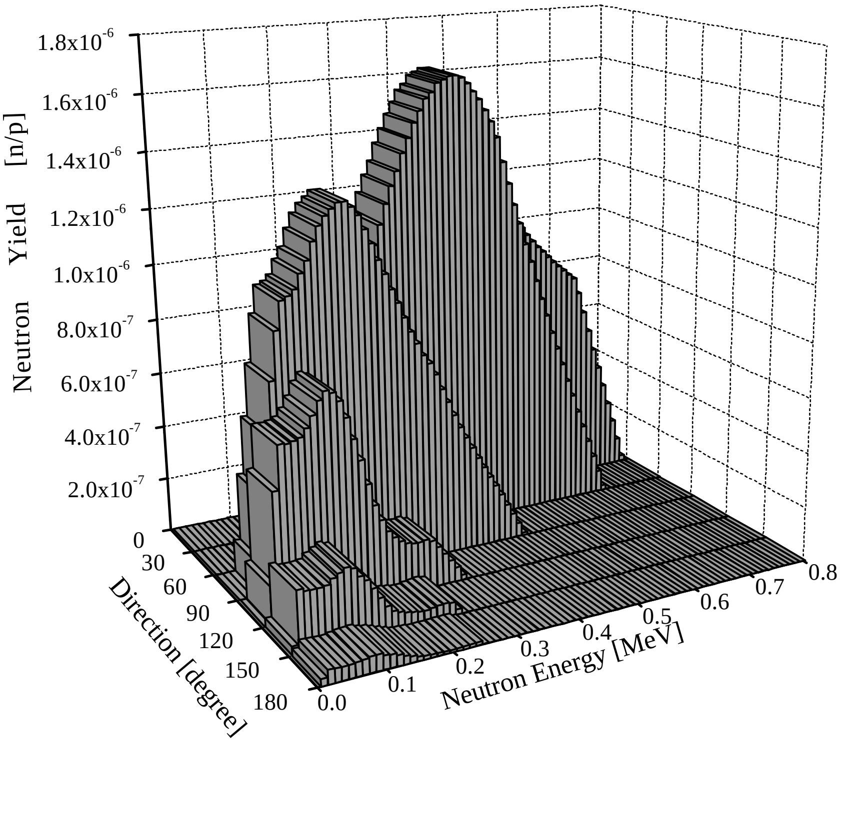


그림 1. PLINS 코드를 이용하여 계산한 $^{7}Li(,n)^{7}Be$ 반응 중성자 선원의 스펙트럼(E_p=2.5 MeV)

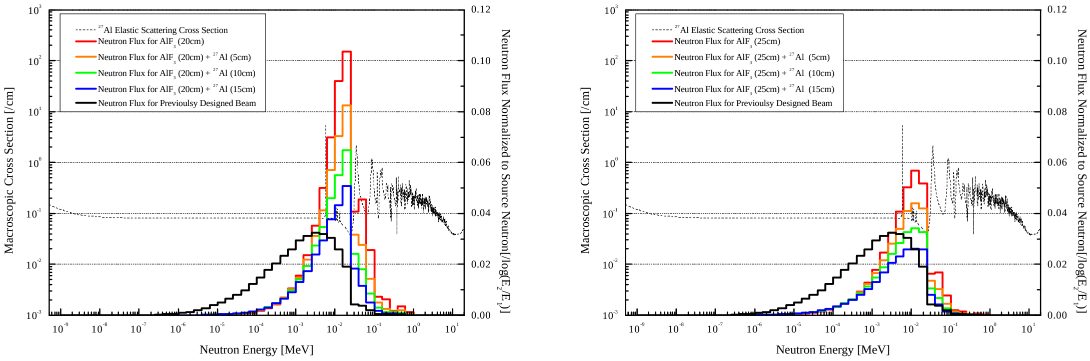


그림 2. 감속재(AlF_3+^{27}Al)의 빔포트에서의 중성자 스펙트럼

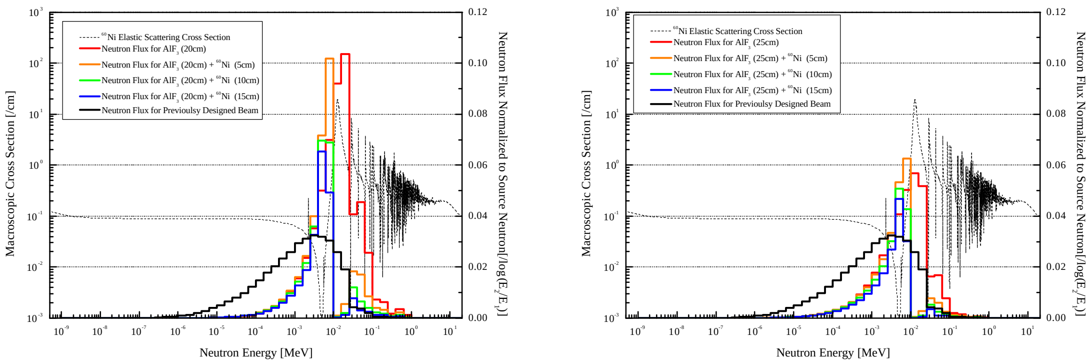


그림 3. 감속재(AlF_3+^{60}Ni)의빔포트에서의 중성자 스펙트럼

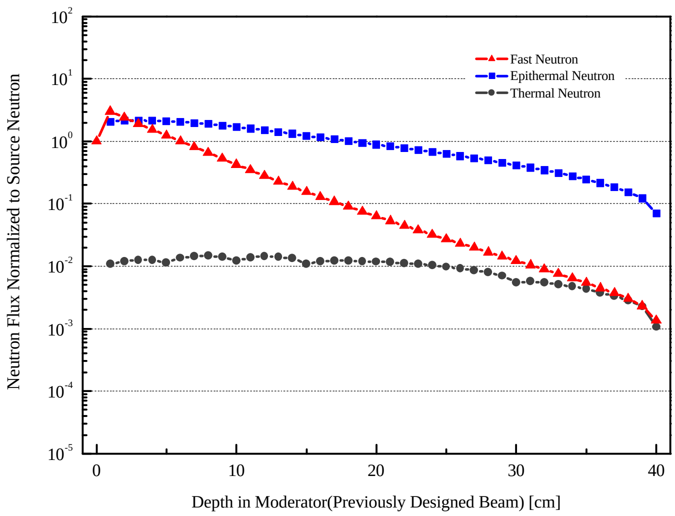
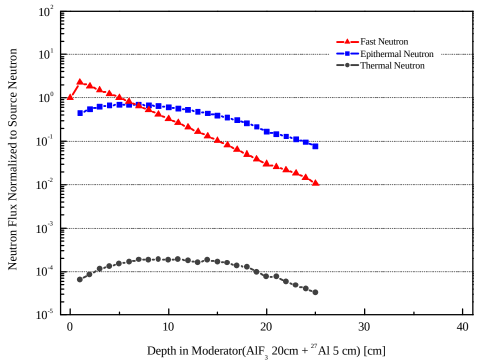
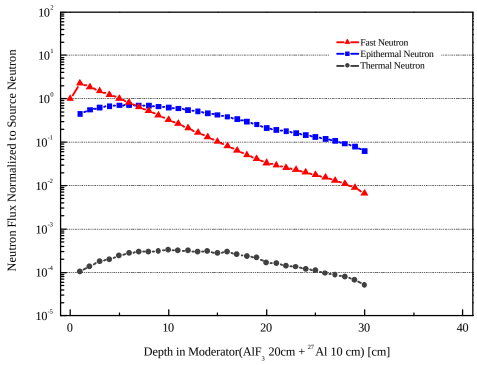


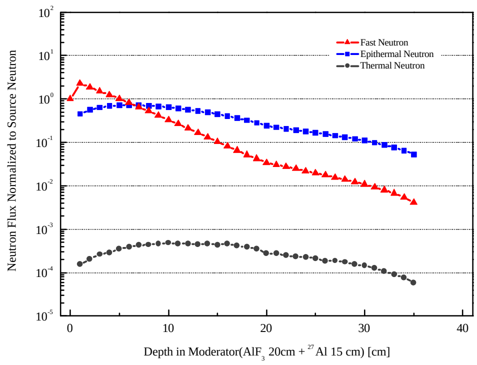
그림 4. 기 수행된 열외중성자빔 집합체 의 감속재 깊에 따른 중성자 스펙트럼 변화



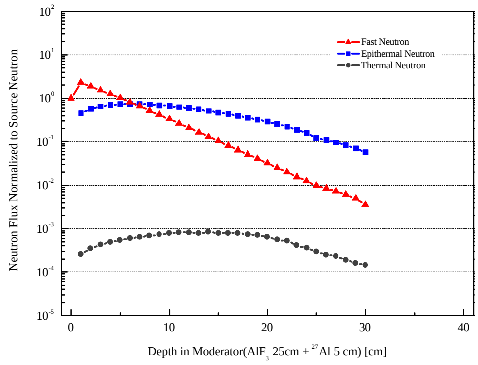
(1) AlF_3 20cm+^{27}Al 5cm



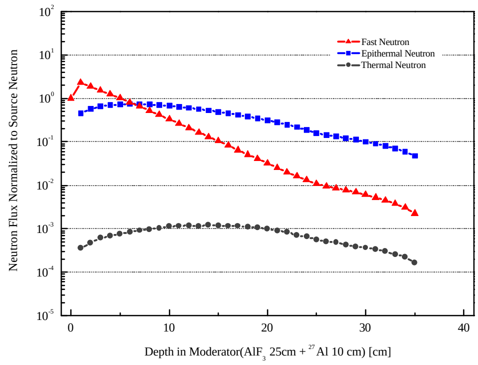
(2) AlF_3 20cm+^{27}Al 10cm



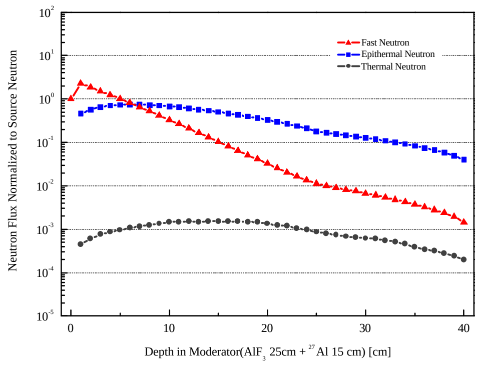
(3) AlF_3 20cm+^{27}Al 15cm



(4) AlF_3 25cm+^{27}Al 5cm

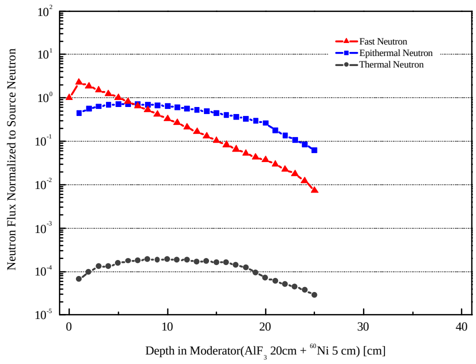


(5) AlF_3 25cm+^{27}Al 10cm

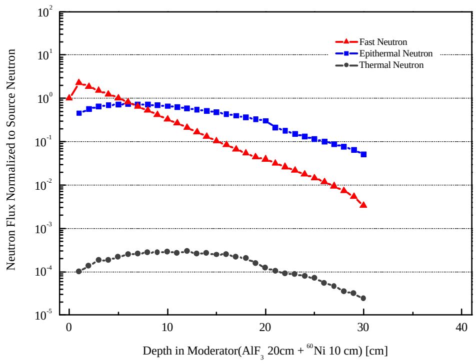


(6) AlF_3 25cm+^{27}Al 15cm

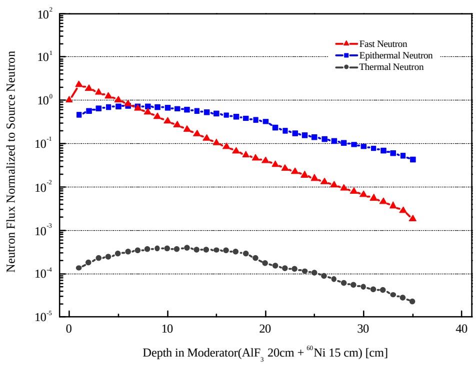
그림 5. 감속재의 깊이에 따른 중성자 스펙트럼 변화(1)



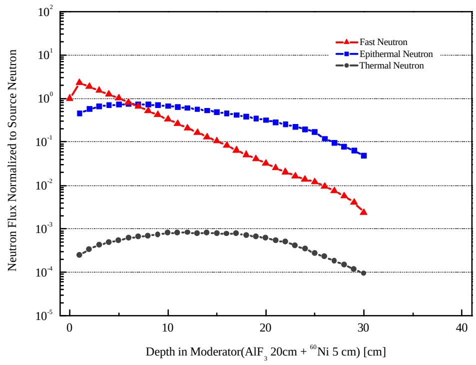
(1) AlF_3 20cm+^{60}Ni 5cm



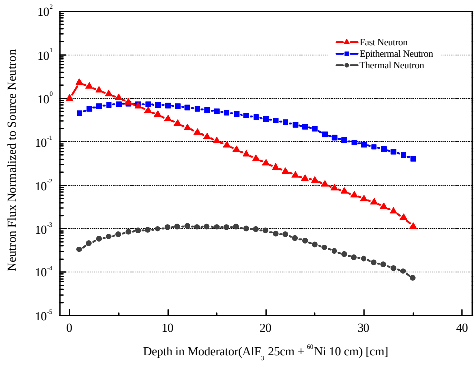
(2) AlF_3 20cm+^{60}Ni 10cm



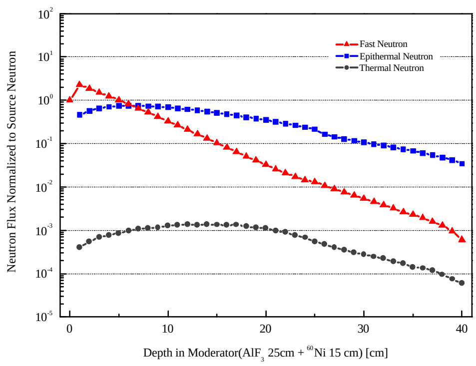
(3) AlF_3 20cm+^{60}Ni 15cm



(4) AlF_3 25cm+^{60}Ni 5cm



(5) AlF_3 25cm+^{60}Ni 10cm



(6) AlF_3 25cm+^{60}Ni 15cm

그림 6. 감속재의 깊이에 따른 중성자 스펙트럼 변화(2)

표 1. 감속재 재질에 따른 중성자 스펙트럼 특성(1)

Moderator	Forward Directional Property,(J/f)	Fast Neutron Dose, D_n	Thermal Flux/n_{epi}, (f_{th} / f_{epi})	Gamma Dose, D_γ
Previously Designed Beam	0.59	3.76261E-14	0.0035	7.50583E-15
AlF_3 20 cm + ^{27}Al 5 cm	0.61	3.29665E-13	0.0002	1.93781E-14
AlF_3 20 cm + ^{27}Al 10 cm	0.62	2.58783E-13	0.0004	1.46778E-14
AlF_3 20 cm + ^{27}Al 15 cm	0.62	2.08231E-13	0.0006	1.28650E-14
AlF_3 25 cm + ^{27}Al 5 cm	0.61	1.46543E-13	0.0012	1.31019E-14
AlF_3 25 cm + ^{27}Al 10 cm	0.62	1.19979E-13	0.0017	1.16371E-14
AlF_3 25 cm + ^{27}Al 15 cm	0.62	1.00759E-13	0.0025	1.11472E-14
AlF_3 20 cm + ^{60}Ni 5 cm	0.60	1.05355E-13	0.0001	1.55972E-14
AlF_3 20 cm + ^{60}Ni 10 cm	0.62	6.43569E-14	0.0001	1.23313E-14
AlF_3 20 cm + ^{60}Ni 15 cm	0.63	4.47608E-14	0.0001	1.09982E-14
AlF_3 25 cm + ^{60}Ni 5 cm	0.60	4.21816E-14	0.0004	1.41886E-14
AlF_3 25 cm + ^{60}Ni 10 cm	0.62	2.71136E-14	0.0004	1.26138E-14
AlF_3 25 cm + ^{60}Ni 15 cm	0.63	1.89086E-14	0.0003	1.09663E-14

표 2. 감속재 재질에 따른 중성자 스펙트럼 특성(2)

Moderator	Neutron Flux Normalized to Source Neutron			Neutron Mean Energy [keV]	FWHM
	Thermal Neutron	Epithermal Neutron	Fast Neutron		
Previously Designed Beam	1.06177E-03	7.09851E-02	1.35661E-03	5.636	2.1
AlF_3 20 cm + ^{27}Al 5 cm	3.32470E-05	7.62110E-02	1.06791E-02	22.881	0.7
AlF_3 20 cm + ^{27}Al 10 cm	5.11210E-05	6.32601E-02	6.58002E-03	19.154	0.7
AlF_3 20 cm + ^{27}Al 15 cm	5.91428E-05	5.26252E-02	4.08735E-03	16.377	0.8
AlF_3 25 cm + ^{27}Al 5 cm	1.43174E-04	5.67272E-02	3.58261E-03	13.938	1.1
AlF_3 25 cm + ^{27}Al 10 cm	1.65056E-04	4.75856E-02	2.25104E-03	12.028	1.2
AlF_3 25 cm + ^{27}Al 15 cm	2.00985E-04	3.98790E-02	1.42889E-03	10.617	1.2
AlF_3 20 cm + ^{60}Ni 5 cm	2.88178E-05	6.20402E-02	7.26700E-03	18.890	0.4
AlF_3 20 cm + ^{60}Ni 10 cm	2.41136E-05	5.07508E-02	3.32476E-03	14.258	0.5
AlF_3 20 cm + ^{60}Ni 15 cm	2.26378E-05	4.28522E-02	1.84471E-03	11.414	0.5
AlF_3 25 cm + ^{60}Ni 5 cm	9.48093E-05	4.85234E-02	2.33081E-03	10.298	0.5
AlF_3 25 cm + ^{60}Ni 10 cm	7.40473E-05	4.08117E-02	1.13258E-03	8.084	0.6
AlF_3 25 cm + ^{60}Ni 15 cm	6.00655E-05	3.44552E-02	6.06204E-04	6.810	0.5