'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

80 MeV 전자 선형가속기에서 감속재-박막 시스템을 이용한 광중성자 생성률 측정과 특성 연구

Measurements of Photoneutron Yields Using Moderator-foil System and Characteristics Study at 80 MeV Electron Linac.

이희석, 박주식, 정진화
포항가속기연구소
경북 포항시 남구 포항공대, 790-784
최희동
서울대학교
서울시 관악구 신림동 산 56-1, 151-742

요 약

폴리에틸렌 감속재와 indium 박막을 이용한 방사화 분석법을 펄스형 전자가속기에서 생성되는 광중성자의 특성조사를 위한 선속 측정에 적용하였다. 에너지 범위 40 – 65 MeV 의 전자빔이 입사할 때 두께가 10 Xo 인 Fe 표적에서 생성되는 광중성자 생성률을 4 개의 각도에서 조사하였다. Indium 박막을 광중성자에 조사시킨뒤, HPGe 감마분광시스템으로 In-116m 에서 방출되는 감마선을 측정하였다. 중성자의 감속효과를 고려한 감속재-박막 시스템의 효율 교정에는 표준 중성자 선원인 Cf-252 를 이용하였다. 검출효율은 6.86 x 10^{-4} 이었다. 몬테카를로 코드인, EGS4 와 거대공명 반응단면적 (γ, xn)을 이용하여 표적 두께와 입사 전자빔 에너지에 따른 광중성자 생성특성을 구하였다. 계산된 결과와 측정결과는 기존의 발표된 자료와 잘 일치하였다. 따라서 본 연구결과에서 감속재-박막 시스템이 광중성자의 생성특성을 연구하는데 적합한 검출기임을 확인하였다.

Abstract

Activation analysis technique using indium foil with a polyethylene moderator was applied to measure the neutron flux for the characteristics study of photoneutron production by the pulse-type electron accelerator. The photoneutron yields produced by incident electrons with the energy range of 40-65 MeV on 10 Xo-thick Fe target were investigated at four different angles. After the indium foil had been irradiated by the photoneutron, the gamma spectrum of In-116m in the activated foil was analyzed by HPGe gamma spectroscopy system. The Cf-252 standard neutron source was used for the efficiency calibration of this moderator-foil system with the consideration of the neutron moderation. The efficiency was resulted as 6.86 x 10^{-4}. The photoneutron yields produced in different thickness targets with electron energy changes were evaluated. The yields were calculated by the EGS4 Monte Carlo code with the (γ, xn) cross-section of giant dipole resonance reaction. The calculated and measured photoneutron yields showed close agreement with the published data. This moderator-foil system was proved to an optimum detection system for thecharacteristics study of photoneutron production.

서 론

전자 가속기에서 발생하는 광중성자에 대한 평가는 고에너지 뿐만 아니라 100 MeV 이하의 저에너지 영역에서도 70 년대말까지의 제한된 실험결과에 기초한 근사식과 광핵반응 단면적을 이용한 계산이 전부였다. 이 자료들을 근거로 반무한 두께 표적에 대해 계산된 Swanson 의 결과는 거대이극공명(Giant Dipole Resonance,

GDR) 반응의 단순한 특성으로 인하여, 100 MeV 이하 에너지 범위에서 정확한 것으로 평가되었다[1]. 개선된 몬테카를로 코드인 EGS4 를 이용한 계산결과와도 일치하는 것으로 알려져 있다[2]. 최근에는 전자빔 에너지가 6-35 MeV 범위인 의료용 전자가속기의 경우에 치료시 환자에게 영향을 주는 중성자 선속을 정확히 평가하기 위한 연구가 계속되고 있다[3].

본 논문의 범위는 전자빔이 표적에 입사할 때 생성되는 광중성자의 특성조사를 위한 연구중에서도 저에너지 전자가속기에 해당하는 경우로써, 첫 단계로 EGS4 몬테카를로 코드를 이용하여 표적두께와 입사 빔에너지에 따른 광중성자의 생성특성을 조사하였다. 또한 카드뮴에 등가한 실리콘으로 둘러 쌓인 폴리에틸렌 감속재와 중심의 indium 박막으로 구성된 감속재-박막 시스템이 표적실내와 같은 고선량, 혼합장 지역에서 고속중성자의 선속을 정확하게 검출하는지 확인하였다. 감속재와 박막을 이용한 중성자 측정은 Stephens 와 Smith 의 연구에 기초하여 SLAC 의 McCall 에 의해 고안되었다[4, 5, 6]. 감속재는 열외중성자영역에서 방사화단면적이 가장 큰 Indium 과의 반응을 증가시키기 위해 고속중성자의 에너지를 감쇄시키는 역할을 한다. 유사한 중성자에너지분포를 갖는 표준선원의 중성자를 동일한 검출시스템에 조사하는 방법으로 감속재의 역할을 평가하여 검출효율을 구하였다. 이 에너지 범위에서 대부분을 차지하는 GDR 중성자의 에너지 분포는 Cf-252 와 AmBe 선원의 중성자 에너지 분포와 유사한 것으로 알려져 있다.[7]

EGS4 를 이용하여 계산한 광중성자의 생성특성은 대체로 Swanson 이 제시한 결과와 일치하여 입사전자에너지가 100 MeV 에 근접할 때와 표적의 두께가 10Xo 를 초과할 때 생성률이 수렴하는 것을 알 수 있었다[1]. 또한 Mao 등의 개량된 계산 결과와도 일치한다[2]. 감속재-박막 시스템으로 측정된 중성자 생성률은 방출각도가 증가함에 따라 약간씩 증가했으며, 입사 전자에너지가 증가함에 따라 생성률이 증가하다가 수렴하는 특성을 보였다.

Monte Carlo 코드를 이용한 광중성자 생성률 계산

전자빔이 표적에 입사할 때 전자와 광자에 의한 핵반응으로 중성자가 생성되지만 전자에 의한 반응단면적은 광자의 경우에 비해 1/137 만큼 작으므로 광핵반응이 지배적이다. 중성자를 발생시키는 광핵반응은 광자의 에너지에 따라 GDR, pseudodeutron, photopion 반응으로 구분된다. 여기서는 입사전자의 에너지가 100 MeV 이하이므로 광자의 문턱에너지가 10 MeV 전후이고, 6 – 35 MeV 범위에서 나타나는 GDR 반응만을 고려하였다. 생성특성을 비교분석하기 위해 반무한 Fe 표적에 전자빔이 입사할 때 표적두께변화에 따른 생성률의 변화와 입사전자에너지에 따른 생성률 변화를 계산하였다. 계산은 표적두께가 0.1 – 20 Xo, 입사전자의 에너지가 18 MeV – 1 GeV 인 경우에 대해서 수행되었다. 여기서 Fe 의 1 Xo (radiation length, r.l)는 17.6 mm 에 해당한다. 실험결과를 모사하여 두께가 10 Xo 인 실린더형 Fe 표적에 대해서도 생성률을 구하였다. 전자-광자 반응 계산용 몬테카를로 코드인 EGS4 를 사용하여 표적내에서의 미분광자진행길이(differential photon track length)를 계산하였으며 Costa 의 (γ, xn) 반응단면적을 이용하여 아래의 식 (1)과 같이 생성률, Y_{GDR} 을 구하였다[8]. 미분광자진행길이는 표적내에서 광자의 평균자유행로와 같은 개념이다.

$$Y_{GDR}[n/MeV/e^{-}] = \frac{1}{E_0}\cdot N_n \int_{E_{th}}^{E_{\max}} s_{GDR}(k)\left(\frac{dl}{dk}\right)dk \cdot \frac{6.023\times10^{-4}\,r\cdot f}{A} = \frac{6.023\times10^{-4}\,r\cdot f\cdot N_n}{A\cdot E_0}\int_{E_{th}}^{E_{\max}} s_{GDR}(k)\left(\frac{dl}{dk}\right)dk \qquad (1)$$

여기서 ρ, A, f 는 각각 표적의 밀도와 질량수, 동위원소성분비이며 N_n, σ_{GDR}[mb], dl/dk[cm MeV^{-1}]는 반응당 생성되는 중성자수, 반응단면적, 그리고 미분광자진행길이이다. E_0, k, E_{th}, E_{max} 는 입사전자에너지, 광자에너지, GDR 반응의 문턱에너지와 최대 반응에너지를 표시한다.

실 험

광중성자 측정실험에 포항가속기연구소의 80 MeV 시험용 전자 선형가속기를 이용하였다. 이 선형가속기는 지하 6 m에 위치한 포항 방사광 가속기의 2 GeV 전자 선형가속기 터널의 부속실에 설치되어 있다. 그림 1과 표 1에 80 MeV 전자 선형가속기와 감속재-박막 시스템의 설치 구조 및 사양을 표시하였다. 표적실의 크기는 4 m(W) x 10 m(L) x 4.3 m(H) 이었다. 표적 앞면으로부터 거리가 1.5 m, 바닥으로부터 높이가 1.4 m인 위치에 박막중심이 오도록 하여 전자빔의 입사방향에 대해 각각 0^0, 27^0, 54^0, 90^0 에 해당하는 지점에 감속재-박막 시스템을 설치하였다. 표적내에서 중성자의 생성반응이 충분히 발생하도록 128 mmϕ x 176 mm(T)(=10 Xo)의 두꺼운 실린더형 Fe 표적을 사용하였다. 전자빔은 Ti 방출창을 통과한 뒤 30 cm 후방에 있는 Fe 표적에 입사하도록 하였다. Fe 표적의 앞면에는 전자빔 스크린 표적을 설치하여 전자빔을 조사하는 동안 카메라로 표적에 입사하는 전자빔의 위치를 확인하였다.

실험에 사용된 입사 전자빔의 에너지는 41, 52, 62, 65 MeV 이었으며 각각의 경우마다 동시에 네 지점의 박막에 광중성자가 조사되도록 하였다. 실험기간중 빔전류는 30 – 46 mA 이었으며 빔출력은 14 – 29 W 는 이었다. 빔 조사시간은 약 30 분으로 하였으며 조사후 1 시간 이후부터 감마선을 측정하여 indium의 방사성동위원소 중 반감기가 빠른 핵종을 제외시켰다. 반감기가 54.1 분인 In-116m 에서 방출되는 감마선스펙트럼은 10 cm 두께의 납함속(40cm x 40 cm x 50 cm)에 설치된 ϕ3" x 3" HPGe 검출기를 이용하여 측정되었다. 박막과 HPGe 검출기간의 간격은 5 cm로 고정하였다. HPGe 검출기 효율 교정은 박막의 직경과 크기가 유사한 직경이 5 cm인 다핵종 표준선원을 사용하였다. In-116m 에서 방출되는 감마선들중에서 에너지가 1294 keV인 감마선의 피이크를 중성자 선속 계산에 사용하였다.

표 1. 전자 선형가속기와 감속재-박막 시스템의 사양.

전자 선형가속기		감속재-박막 시스템	
최대 빔에너지	80 MeV	감속재	폴리에틸렌 165 mmϕ x 165 mm(H)
빔펄스 폭	1μsec	외장재	25% borated silicon rubber (= 0.5 mm Cd)
빔펄스 반복율	12 Hz	박막	In, 44 mmϕ x 0.127 mm(T) (0.127 mm(T) Al backing)
빔 방출창	Ti, 100 μm	제작사	Reactor Experiment, Inc., USA [9]

고속중성자의 측정에서 검출효율 교정

측정에 사용되는 indium의 방사화 단면적은 열외중성자에서 가장 크기 때문에 직접적으로 고속 중성자를 측정할 수 없다. 따라서 감속재-박막 시스템에서는 폴리에틸렌 감속재에 의해서 에너지가 감소된 뒤 반응하는 중성자 선속이 측정되는 것이므로, 박막의 방사능으로부터 고속중성자의 선속을 계산하기 위해서는 외부의 고속중성자가 감속재에서 에너지 감쇠과정을 거친 후 박막과 반응하는 효율을 구해야 한다. Tesch 의 자료에 의하면 1 GeV의 전자빔에 의해 생성되는 광중성자의 에너지 분포가 표적의 원자번호가 높은 경우와 낮은 경우에 각각 Cf-252와 AmBe 선원의 중성자 에너지 분포와 같음을 알 수 있다[7]. 또한 수십 MeV의 저에너지 전자빔에서는 Cf-252의 중성자 에너지 분포와 유사하며 15, 20, 25, 30 MV X선의 경우 생성되는 중성자의 평균에너지는 1.8, 2.1, 2.2, 2.4 MeV라고 알려져 있다[6]. 따라서 원자력연구소의 Cf-252 중성자 조사실에서 기준 선량을 조사한 뒤 박막의 방사능을 측정하는 방법으로 검출효율을 구하였다.

원자력연구소의 중성자선장에서 실린더형 Cf-252 선원의 비등성 인자는 1.057 이며 조사실내의 산란효과는 16%/m^2 이었다[10]. Cf-252 선원의 중성자를 조사할 때는 산란효과를 줄이기 위해 선원으로부터 32 cm 거리에 감속재-박막 시스템을 설치하였다. 조사시 선속은 3.41 x 10^8 n/sec 이었으며 3 회 실시하여 평균값을 구하였다. 감속재에 의해 결정되는 반응효율 및 중성자 선속간의 관계는 다음의 식 (2)와 같이 정의되며 측정된 효율은

6.86×10^{-4} 이었다.

$$e_{moderateor} = \frac{f^{2}_{IN-116m}}{f_{Cf-252}} = \frac{f^{1}_{In-116m}}{f_{GDR}} \quad (2)$$

여기서 $f^{1}_{In-116m}$, $f^{2}_{In-116m}$ 는 각각 광중성자와 Cf-252 선원의 중성자에 의해 조사된 박막의 방사능으로부터 계산된 선속이며 f_{GDR} , f_{Cf-252} 는 실제 조사된 중성자 선속이다.

결과 및 논의

광중성자의 생성특성을 연구하기 위해 몬테카를로 코드와 거대공명반응단면적을 이용하여 계산한 결과를 그림 2, 3, 4에 나타내었다. 그림 2에서 입사 전자에너지에 따른 미분광자진행길이의 분포는 각 광자에너지에 대한 광핵반응의 반응확률을 나타낸다. 그림 3과 4는 각각 GDR 중성자의 생성률을 입사 전자에너지와 표적 두께의 변화에 따른 결과로서 표시한 것이다. 사용된 표적 두께의 단위는 1Xo[radiation length, r.l]이다. 두 계산 결과에서 입사 전자에너지가 증가하거나 표적의 두께가 증가함에 따라 중성자 생성률이 수렴해가는 현상이 보여 진다. 표적 두께가 20 Xo 인 경우, 입사 전자에너지가 40 – 60 MeV 일때 생성률의 증가폭이 감소하기 시작하여 100 MeV 에서 100 %에 가깝게 수렴함이 확인되었다. 이는 Swanson 의 결과와 일치하는 것이다. 이때의 생성률 1.2×10^{12} [n/sec/kw]는 Swanson 이 제한한 값 1.04×10^{12} [n/sec/kw]와 15%내에서 일치한다. 표적두께에 따른 변화에서는 10 Xo 이하의 표적에서 1 GeV 전자빔보다 에너지가 작은 100 MeV 전자빔에서 중성자의 생성률이 높음을 알 수 있다. 이는 높은 에너지 전자빔은 표적내 투과 길이가 길어서 중성자 생성을 유발하는 광자를 충분히 생성하지 못하기 때문이다. 대부분의 경우 저에너지 가속기에서 표적이 되는 여러 부속품들의 두께가 10Xo 를 넘지 않으므로 고에너지 가속기에 비해 상대적으로 수 MeV 영역의 중성자에 대한 위험이 크다는 것을 의미한다.

감속형 박막검출시스템으로 측정된 광중성자 생성률을 몬테카를로 계산 결과 및 Swanson 의 결과와 비교하여 그림 5, 6 에 나타내었다. 그림 5에서 측정값은 EGS4 와 거대공명반응단면적으로 계산한 결과와 Swanson 의 계산 결과사이에 위치한다. 여기서 Swanson 의 계산값은 무한 두께의 표적에 대한 결과이며 EGS4 를 이용한 계산은 한정된 크기의 실험용 표적을 모사한 것이다. 입사전자에너지가 증가할수록 수렴하는 특성이 역시 확인되었다. 다만 경향을 벗어난, 전자빔 에너지가 65 MeV 경우는 실험중의 불안정한 전자빔 상태에 의한 것으로 판단된다. 그림 6 의 생성률 각도분포에서는 입사방향에 대해서 90^{0} 에 가까울수록 생성률이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 방출각도에 따라 일정한 생성률 분포를 갖는 GDR 중성자의 특성을 고려할 때 표적의 앞부분에서 생성된 중성자의 실린더형 표적을 통과하는 길이가 각도에 따라 다르기 때문으로 해석될 수 있으며, 또한 GDR 중성자와 함께 직접반응에 의해 생성된 중성자가 측정된 것을 의심할 수도 있다. 이는 표적 구조를 개선하면서 재검토될 것이다.

본 실험의 조사 조건과 같이 전자빔이 표적에 입사하는 경우 표적 주변의 광자 선속은 중성자에 비해 상대적으로 크므로 박막 방사화 분석에서는 반드시 (γ, n)반응을 확인되어야 한다. 다만 저에너지 전자빔과 충분히 두꺼운 표적(~10Xo)의 경우에는 표적밖으로 방출되는 광자의 에너지분포가 GDR 반응의 문턱에너지보다 낮은 쪽으로 치우치게 된다. Indium 의 경우 In-115 (γ, n) In-114m 반응이 가능하고 반감기는 50 일이지만, GDR 반응의 문턱에너지와 최대 반응단면적을 갖는 광자에너지가 각각 9.03, 15.63 MeV 이고 전단면적은 266 mb 이므로 본 측정결과의 분석에서는 무시되었다.

결과를 분석하는 과정에서 표적실 주변의 콘크리트벽에서의 중성자 산란효과를 고려하지 못하였다. McCall 에 의하면 산란중성자는 전체 중성자의 20-30%에 이를 수 있으며, 산란된 중성자 평균에너지는 초기 중성자 에너지의 20%이하에 해당한다[11]. 이는 원자력연구소에서의 산란정도와도 유사하다. 다만 산란된 중성자둥의 열중성자는 감속재를 감싸고 있는 Cd 등가물질에 의해서 흡수된다. 산란효과는 추후에 보완될 예정이다.

이상의 실험 결과로부터 감속재-박막 시스템이 펄스형 전자 가속기에서 광중성자의 선속을 측정하는데 적합함을 확인할 수 있었고 측정된 결과와 몬테카를로 코드를 이용한 계산 결과는 광중성자 생성의 대표적인 특성을 보여 주었다. 따라서 이 감속재-박막 시스템을 이용하여 구조를 개선한 표적과 Fe 외의 다른 원소에 대해서 광중성자 생성특성을 조사할 계획이다.

참고문헌

1. W.P. Swanson, "Improved Calculation of Photoneutron Yields Released by Incident Electrons," Health Physics, **37**, 347 (1979).
2. X. Mao, et al., "Giant Dipole Resonance Neutron Yields Produced by Electrons as a Function of Target Material and Thickness," Health Physics, **70(2)**, 207(1996).
3. K.R. Kase, et al., "Neutron Fluence and Energy Spectra around the Varian Clinac 2100C/2300C Medical Accelerator," Health Physics, **74(1)**, 38 (1998)
4. L.D. Stephens and A.R.Smith, "Fast Neutron Survey Using Indium-Foil Activation," UCRL-8418, (1958).
5. R.C. McCall, et al., "Transport of Accelerator Produced Neutrons in a Concrete Room," SLAC-PUB-2214, (1978).
6. R. Nath, et al., "Neutron Measurements around High Energy X-ray Radiotherapy Machines," AAPM Report No.19, (1986).
7. K. Tesch, "Data for Simple Estimates of Shielding against Neutrons at Electron Accelerators," Particle Accelerators, **9**, 201 (1979).
8. S. Costa, et al., "Behavior of the (γ ,Tn) cross-section in selenium and iron," IL Nuovo Cimento LI, **B1**, 199(1967).
9. Catalog 24, Reactor Experiments, Inc., (1990).
10. **김봉환, 개인서신**.
11. R.C. McCall and W.P. Swanson, Neutron Sources and Their Characteristics," SLAC-PUB-2292, (1979)

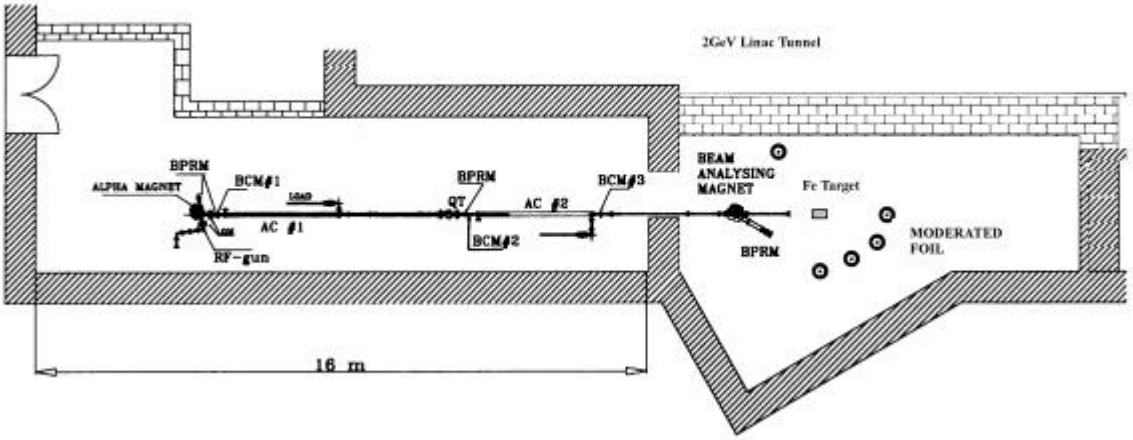

그림 1. 80 MeV 전자선형가속기와 광중성자 측정용 감속재-박막 검출기의 배치구조.

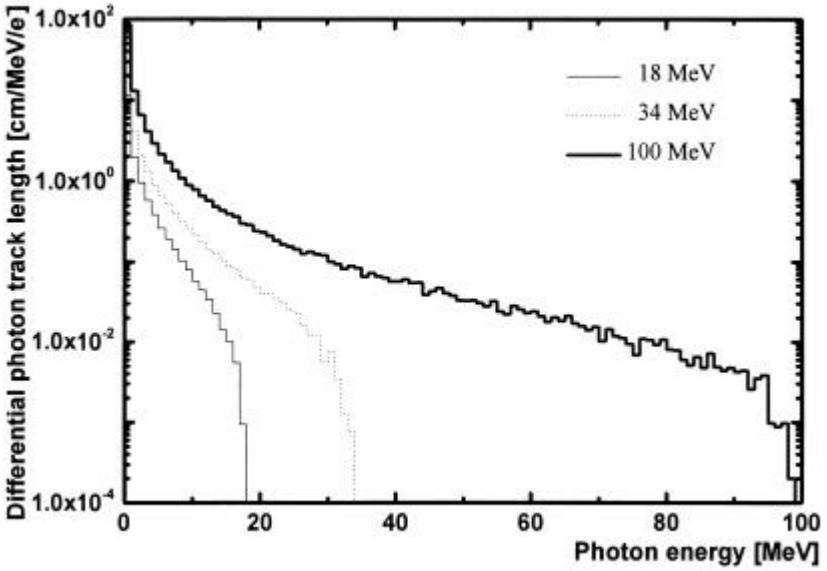

그림 2. 두께가 352 mm(=20 Xo) 인 반무한 Fe 표적에서의 입사 전자에너지에 따른 미분광자추적길이 분포.

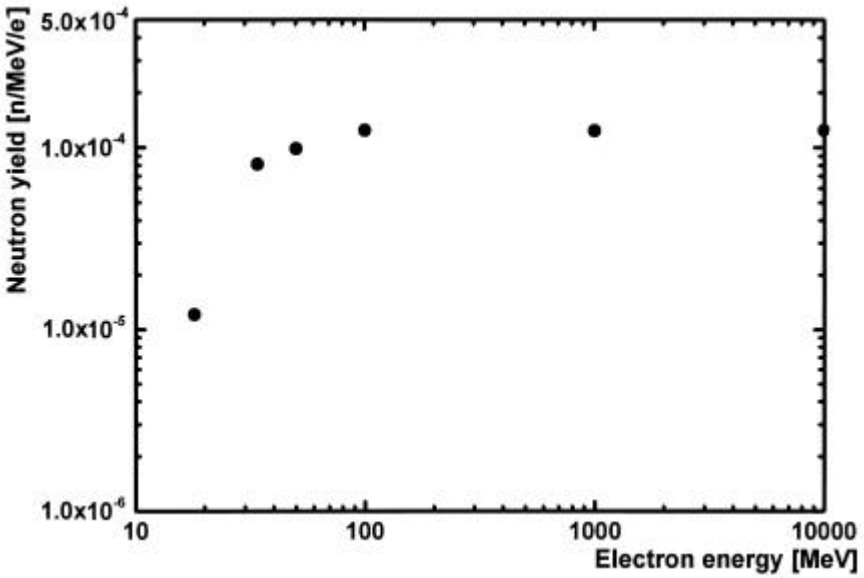

그림 3. 두께가 352 mm(=20Xo) 인 반무한 Fe 표적에서 입사전자 에너지에 따른 거대공명 광중성자의 생성률 분포.

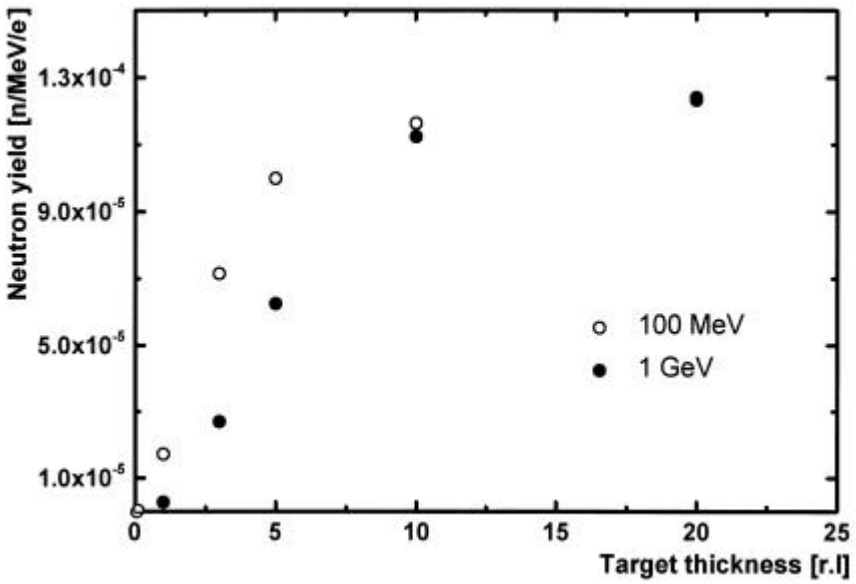

그림 4. 에너지가 각각 100 MeV, 1 GeV 인 전자가 Fe 표적에 입사할 때 표적 두께에 따른 거대공명 광중성자의 생성률 분포.

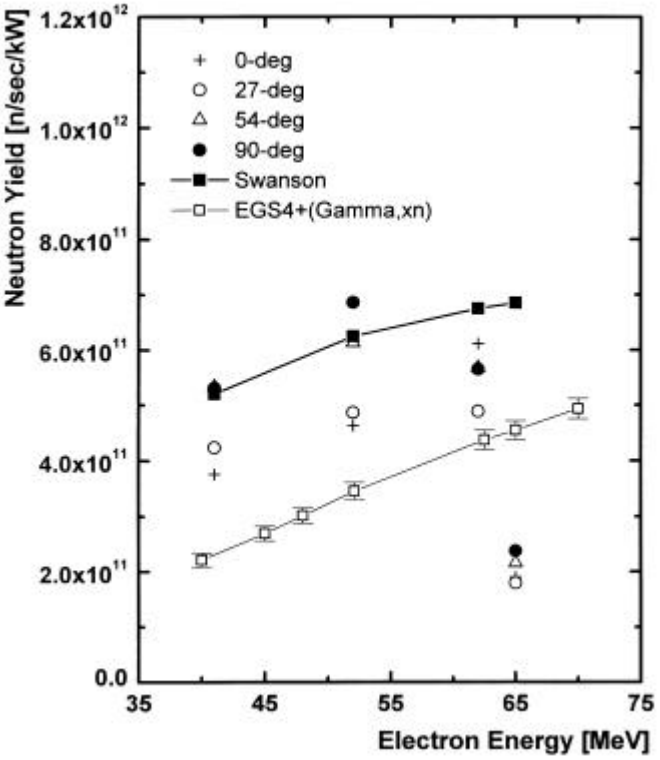

그림 5. 두께가 176 mm(10Xo)인 실린더형 Fe 표적에서 입사전자에너지에 따른 광중성자 생성률 비교.

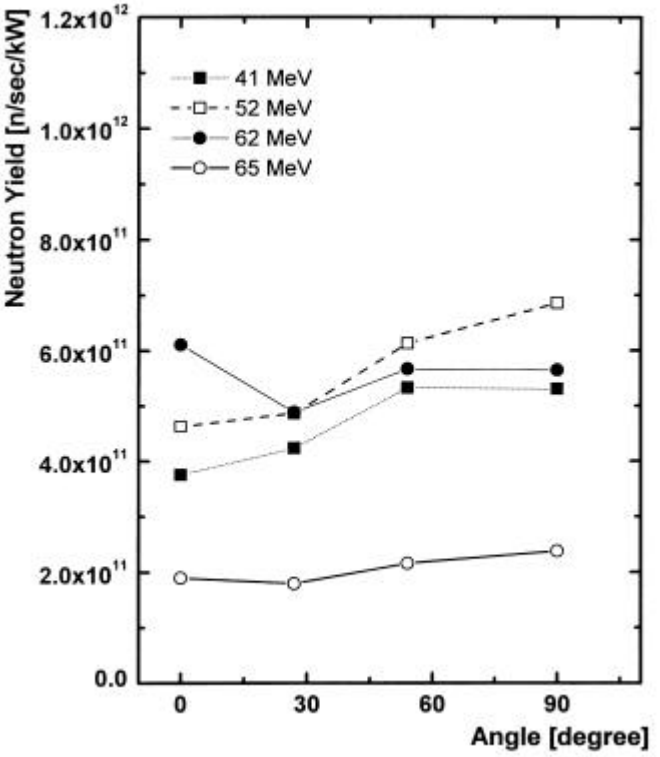

그림 6. 두께가 176 mm(10Xo)인 실린더형 Fe 표적에 전자빔이 입사할 때 방출각도에 따른 광중성자 생성률 분포.