

## 주요 양전자 방출 핵종의 생성반응 단면적 평가

오수열, Zhuang Youxiang\*, 장종화

한국원자력연구소  
대전광역시 유성우체국 사서함 105 호

### 요 약

양전자 단층 촬영장치(PET)에 사용되는 주요 양전자 방출 핵종들의 생성 단면적을 평가하였다. 평가한 생성 반응들은  $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$ ,  $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ ,  $^{20}\text{Ne}(d,\alpha)^{18}\text{F}$  이며, 입사 입자의 에너지 범위는 반응 문턱 에너지부터 약 150 MeV 까지이다. 또한 하전입자 빔 모니터용 표준 단면적으로서  $^{27}\text{Al}$ 에  $d$  및  $^3\text{He}$ ,  $\alpha$ 가 반응하여  $^{22}\text{Na}$ 가 생성되는 반응의 단면적들을 입사 에너지 약 120 MeV 까지 평가하였다. 실험치를 fitting 하거나 ALICE95 코드를 이용하여 이론적 계산을 수행하였는데, 평가 단면적의 표준 편차는 10 ~ 30 %이다. 이들 평가 단면적들은 가속기를 이용한 PET 용 핵종의 생산율 계산 및 빔 모니터의 표준 단면적으로 사용하기에 적절한 것으로 판단된다.

### 1. 서론

현재 방사성 동위원소를 이용한 진단 또는 치료용 첨단 장비들이 많이 개발되어 있다. 그러한 장비의 하나로서 이미 국내에서도 이용되고 있는 PET(positron emission tomography; 양전자 단층 촬영장치)는 양전자가 전자와 결합하면서 생성되는 두 개의 0.511 MeV 짜리  $\gamma$  선을 측정함으로써 양전자 방출 핵종의 체내 분포를 3차원적으로 구성해 내는 비파괴 진단용 장비이다[1]. 양전자 방출 핵종은 핵 안에 양성자가 상대적으로 너무 많아서 한 양성자가 중성자 및 양전자로 붕괴하면서 양전자를 방출하게 된다. 평가 핵구조 자료 파일(ENSDF)에 수록된 118 종의 양전자 방출 핵종 중에서 PET에 사용되는 핵종들은 반감기가 수 분에서 수 시간 정도로 짧아서 인체의 진단용으로 적합한 것들이다. 이들을 생산 방법에 따라 분류하면  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$  등과  $^{68}\text{Ga}$ ,  $^{82}\text{Rb}$ ,  $^{62}\text{Cu}$  등으로 나눌 수 있는데, 전자의 분류에 속하는 핵종은 cyclotron으로 가속한 양성자(p), 중양성자(d),  $^3\text{He}$ ,  $\alpha$  같은 하전입자와 특정 핵종의 반응으로 생성되며, 후자의 핵종들은 generator라 불리는 반감기가 좀더 긴 친(parent) 핵종의 붕괴로 생성된다. 이들 핵종의 붕괴 특성을 생성 방법과 함께 표 1에 정리하였다.

\* China Institute of Atomic Energy, China Nuclear Data Center, P.O.Box 275(41), Beijing 102413, P.R.China

표 1. PET 용 주요 양전자 방출 핵종의 붕괴 특성과 생산 방법

핵종	반감기(분)	$\beta^+$ 붕괴강도 (%)	생산 방법/반응
$^{11}\text{C}$	20.4	99.8	Cyclotron: $^{14}\text{N}(p,\alpha)$
$^{13}\text{N}$	9.96	99.8	Cyclotron: $^{16}\text{O}(p,\alpha)$
$^{15}\text{O}$	2.04	99.9	Cyclotron: $^{14}\text{N}(d,n)$ , $^{15}\text{N}(p,n)$
$^{18}\text{F}$	109.8	96.7	Cyclotron: $^{18}\text{O}(p,n)$ , $^{20}\text{Ne}(d,\alpha)$ , $^{16}\text{O}(^3\text{He},p)$
$^{62}\text{Cu}$	9.74	97.4	Generator: $^{62}\text{Zn}$ 붕괴(반감기 9.3 시간)
$^{68}\text{Ga}$	67.6	89.1	Generator: $^{68}\text{Ge}$ 붕괴(270.8 일)
$^{82}\text{Rb}$	1.27	95.5	Generator: $^{82}\text{Sr}$ 붕괴(25.6 일)

한편, 의료용 방사성 동위원소에 대한 핵자료는 크게 붕괴 자료와 핵반응 자료 두 가지로 나뉘는데, 붕괴 자료는 실제 의료용으로서 어떤 원소가 적절한지를 판단하는 데 중요하며 핵반응 자료는 그러한 원소를 생산할 때 필요한 자료이다. 붕괴 자료는 이미 충분히 정밀도를 갖추었다고 평가되고 있으나, 하전입자 핵반응 단면적은 그렇지 못하여 PET 같은 장비를 실제로 사용하고 있음에도 불구하고 아직까지 그에 쓰이는 핵종의 생성반응 단면적을 포함하고 있는 표준 평가 핵자료집이 없다. 의료용 동위원소 생산에 필요한 하전입자 핵자료집을 구축하는 작업은 최근에야 비로서 IAEA Nuclear Data Section 이 주도하는 한 Coordinated Research Program 으로서 1998 년말 완료를 목표로 추진되고 있다. 이 논문에서 기술하는 양전자 방출 핵종 생성 단면적과  $d, \alpha$  등이 천연 알루미늄( $^{27}\text{Al}$  존재비 100%)과 반응하여 생성되는  $^{22}\text{Na}$  의 생성 단면적 평가는 위 작업의 한 부분으로 포함되어 있다[2]. 여기서  $^{22}\text{Na}$  생성 단면적은 하전입자 beam monitor 로서 쓰인다.

이 논문에서는 cyclotron 으로 가속한 하전입자를 상정하여 입사 에너지 약 150 MeV 까지의 에너지별 단면적을 평가한 결과를 그 평가 방법과 함께 기술하였다. 평가 대상 반응은 양전자 방출 핵종 생산 반응으로서  $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$ ,  $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ ,  $^{20}\text{Ne}(d,\alpha)^{18}\text{F}$  반응과  $^{27}\text{Al}$  과 하전입자 사이의  $^{22}\text{Na}$  생성 반응들이다.

## 2. 평가 방법 및 결과

다른 종류의 핵자료 평가와 마찬가지로 실험값을 구할 수 있는 경우에는 실험값을 fitting 하는 방법을 우선적으로 사용하였으며 전산 코드를 이용한 이론적 계산으로 이를 보완하였다.

실험값은 OECD/NEA Data Bank 의 EXFOR database[3]에서 수집하였는데 반응별 사용 자료의 목록은 표 2 에 평가 방법과 함께 정리하였다. 실험값의 fitting 에는 주로 SPF 코드[4]를 사용하였다. SPF 는 중국 핵자료 센터에서 개발한 spline fitting 코드로서 최적 knot 를 선정하는 기능을 가지고 있으며 함수의 차수도 임의로 지정할 수 있다. 이 평가에서는 모든 경우에 3차 spline 으로 fitting 하였다.  $^{27}\text{Al}(d,x)^{22}\text{Na}$  반응에 대해서는 임의의 차수 직교다항식을 사용하는 COVAFIT[5]를, 그리고  $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$  반응에 대해서는 상용 plotting software 인 ORIGIN 의 fitting 기능을 직접 사용하였다.

한편, 실험값이 있다 하더라도 평가 대상 에너지 전구간에 대해 실험값이 있는 경우는 매우 드물기 때문에 이론적 계산을 통해 실험값을 fitting 한 자료를 보완하여 완전한 한 세트의 평가 자료를 마련하는 것이 일반적 방법이다. 이 평가에서는 ALICE 코드[6]를 사용하여 이론적인 값을 구하였다. ALICE는 전평형(pre-equilibrium) 계열의 코드로서 광학 및 통계 모형과 Exciton 모형을 사용하여 전단면적과 탄성산란 단면적, 입자 생성 단면적, 생성 입자의 각-에너지 이중 미분 단면적 등을 계산하는 코드이다. 사용 기관에 따라 여러 가지 변형이 있는데 여기서는 높은 에너지의 입사 입자를 다룰 수 있는 ALICE95를 사용하였다.

표 2. 반응별 평가 방법 및 사용 실험 자료

반응	평가 에너지 범위 (MeV)	평가 방법	실험 자료	
			EXFOR No.	주저자 및 연도
$^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$	3.13 ~ 22.0	Curve fitting (ORIGIN)	r0025	Jacobs '74
	22.0 ~150.0	Theory with normalization		
$^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$	5.54 ~ 27.8	Curve fitting (SPF)	o0065	Kitwanga '89
	27.8 ~155.0	Theory with Smoothing	c0202	Sajjad '86
$^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$	0. ~ 14.35	Curve fitting (SPF)	a0316	Sajjad '85
	14.35 ~ 20.0	Smoothing	b0125	Ruiz '77
	20.0 ~140.0	Theory		
$^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$	2.57 ~ 14.71	Curve fitting (SPF)	a0235	Ruth '79
	14.71 ~ 25.0	Smoothing		
	25.0 ~140.0	Theory		
$^{20}\text{Ne}(d,\alpha)^{18}\text{F}$	0. ~150.0	Theory with normalization	r0023	Backhausen '81
$^{27}\text{Al}(d,x)^{22}\text{Na}$	14.81 ~ 80.0	Curve fitting (SPF)	a0158	Michel '82
			b0142	Martens '70
$^{27}\text{Al}(^3\text{He},x)^{22}\text{Na}$	2.25 ~118.4	Curve fitting (COVAFIT)	a0158	Michel '82
$^{27}\text{Al}(\alpha,x)^{22}\text{Na}$	32.77 ~120.0	Curve fitting (SPF)	N/A	Ismail '93
			a0157	Dittrich '91
			a0353	Rattan '86
			a0153	Michel '80
			b0174	Probst '76
b0142	Martens '70			

이론적 계산 결과와 실험값을 fitting 한 결과를 접목함으로써 한 단면적 세트를 얻는 것이 평가의 최종 단계이다. 그 접목에는 몇 가지 방법이 사용되었는데 아래에서 각 반응별로 평가 방법을 설명하는 가운데 이들을 설명한다. 반응별 평가 단면적을 그림 1부터 8까지 보였다.

$^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$  반응: 22.5 MeV 까지 모두 네 가지의 EXFOR 세트가 있으나 약 15 MeV 까지 많은 공명을 가지고 있기 때문에 이들을 한꺼번에 fitting 하는 데는 어려움이 있다. 따라서 공명 구조를 가장 잘 보이고 있는 Jacobs의 실험치를 선정하여 fitting 하였다. 22 MeV 부터 140 MeV까지는 이

론값이 보이는 에너지별 단면적 변화 형태를 수용하였는데 이 때 21 ~ 22 MeV 에서 이론값이 fitting 결과와 같도록 규격화하였다.

$^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$  반응: 모두 7 가지의 EXFOR 세트가 있으나 역시 공명 구조를 보이므로 가장 최근의 자료이면서 넓은 에너지 범위를 포함하는 두 세트를 선정하여 27.8 MeV 까지 fitting 하였다. 그 이상의 에너지에 대해서는 155 MeV 까지 구한 이론값이 23.5 및 27.8 MeV 의 실험값을 통과하도록 smoothing 한 후 이론값을 평가 단면적으로 채택하였다.

$^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$  반응: 두 세트의 실험 결과가 있으며 이들을 14.35 MeV 까지 fitting 하였다. 이론값이 실험값과 비교적 잘 맞고 있으므로 높은 에너지 구간에서는 계산값들을 그대로 사용하되 14.35 ~ 20 MeV 구간에서는 fitting 결과와 이론값이 연결되도록 smoothing 하였다.

$^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$  반응: 앞의 반응과 마찬가지로 낮은 에너지에서는 실험값의 fitting 결과를, 높은 에너지에서는 계산값을 채택하였으며 14.71 ~ 25 MeV 구간에서는 두 결과를 연결하였다.

$^{20}\text{Ne}(d,\alpha)^{18}\text{F}$  반응: 높은 단면적을 보이는 20 MeV 이하에서 실험 자료가 빈약하여 150 MeV 까지 전 구간에 걸쳐 이론값을 규격화하여 채택하였다. 그림 5 에서 보듯이 이론값의 형태가 실험값의 형태와 일치하며 Backhausen 의 실험값이 27.1 ~ 37.9 MeV 구간에서 역시 평탄한 단면적을 보이므로 이 구간을 규격화의 기준으로 하였다.

$^{27}\text{Al}(d,x)^{22}\text{Na}$  반응: 상당히 높은 에너지인 80 MeV 까지 두 세트의 실험 자료가 있으며 두 세트가 서로 일치하고 있으나 계산값은 이들 실험값에서 많이 벗어나 있다. 따라서 실험값들을 fitting 한 결과를 그대로 채택하여 80 MeV 까지만 평가 단면적을 준비하였다.

$^{27}\text{Al}(^3\text{He},x)^{22}\text{Na}$  반응: 비록 실험 자료는 한 세트뿐이나 118 MeV 까지 자료가 있으므로 이를 fitting 한 결과를 그대로 채택하였다.

$^{27}\text{Al}(\alpha,x)^{22}\text{Na}$  반응: 120 MeV 까지 광범위한 에너지 영역에 걸쳐 모두 8 개의 실험 세트가 있는데 다른 세트들과 큰 차이가 나는 두 세트를 제외하고 이들을 fitting 하여 평가 단면적으로 채택하였다. 계산값은 실험값들과 큰 차이를 보이고 있다.

한편, 평가 단면적의 표준편차는 실험값을 fitting 한 경우에는 fitting 의 결과로서 얻을 수 있으나 이론적 계산의 경우에는 그렇지 못하다. 따라서 이론값에 대한 표준편차로 단면적 값의 20 ~ 30 %를 주었다. 채택한 이론값은 그 크기가 수 십 mb 이하이므로 표준편차를 상대적으로 크게 주었는데 이러한 크기는 비록 직접적 비교는 힘들지만 ORNL 에서 채택하고 있는 크기와 같다[7].

### 3. 결론

여기서 평가한 주요 양전자 방출 핵종의 생산 반응 단면적과 Al 과 하전입자간의 반응으로 생성되는  $^{22}\text{Na}$  생성 단면적은 실험값을 최대한 반영함으로써 충분한 신뢰도를 갖춘 자료라고 판단

된다. 이들 단면적들은 앞으로 cyclotron 을 이용한 핵종 생산시 수율을 예측 계산하거나 cyclotron 의 운전 조건을 결정하는 데 쓰일 것이다. 나아가 이들 자료는 범용 하전입자 핵자료집의 일부로 채택되어 대형 양성자 가속기 설계나 우주 과학과 같은 분야에서도 쓰이게 될 것이다.

#### 참고 문헌

1. 조규성, "PET 의 개발 현황," 제 1 회 의료용 가속기 학술회의 보문집, pp. 45-53, 원자력병원, 서울 (1994. 7.)
2. P. Oblozinsky, ed., Summary Report of the Second Research Co-ordination Meeting on "Development of Reference Charged-Particle Cross Section Database for Medical Radioisotope Production," INDC(NDS)-371, IAEA (Oct. 1997)
3. <http://www.nea.fr/html/dbdata> 또는 <http://lui.kaeri.re.kr/cgi-bin/exfor>
4. Liu Tingjin, et al., *Communication of Nuclear Data Progress*, 2, 58 (1989)
5. 오수열, 장종화, *한국원자력학회지*, 28(1), 72 (1996)
6. M. Blann and J. Bisplinghoff, "Code ALICE/LIVERMORE 82," UCID-19614, Lawrence Livermore National Lab. (Dec. 1983)
7. D.M. Hetrick, D.C. Larson and C.Y. Fu, "Generation of Covariance Files for the Isotopes of Cr, Fe, Ni and Pb in ENDF/B-VI," ORNL/TM-11763 (Feb. 1991)

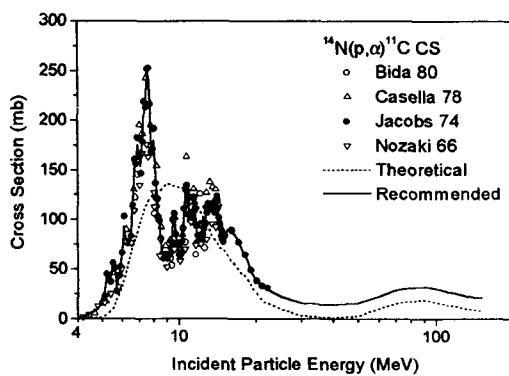


그림 1.  $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$  단면적

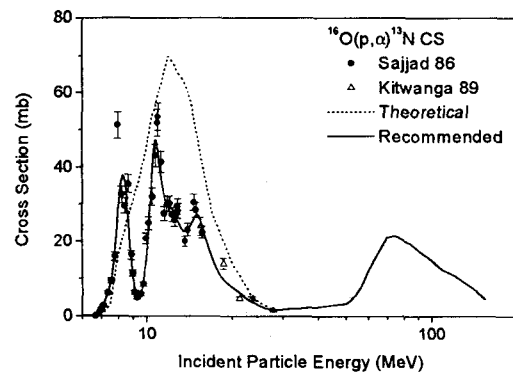


그림 2.  $^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$  단면적

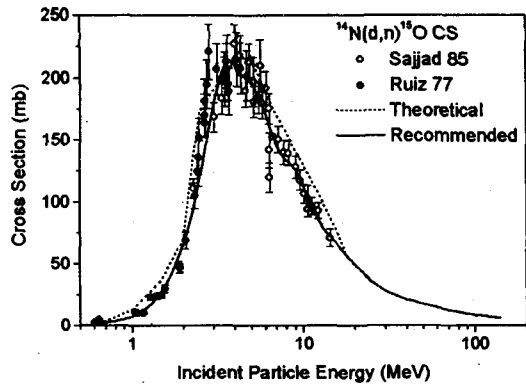


그림 3.  $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$  단면적

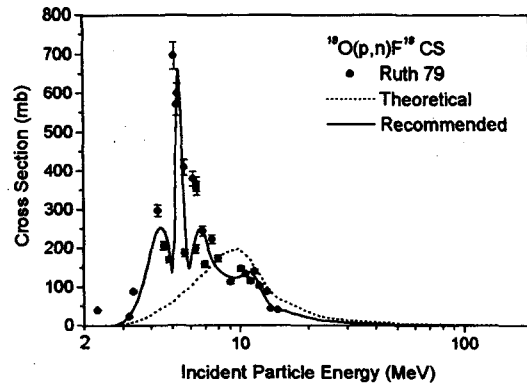


그림 4.  $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$  단면적

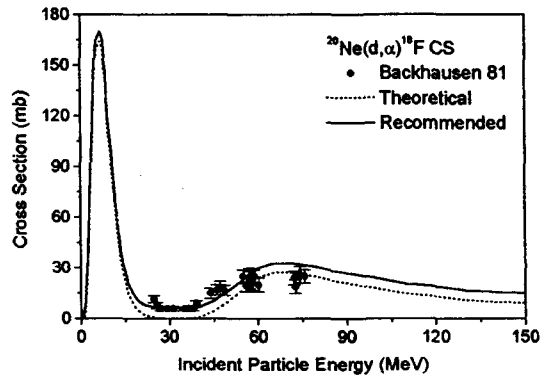


그림 5.  $^{20}\text{Ne}(d,\alpha)^{18}\text{F}$  단면적

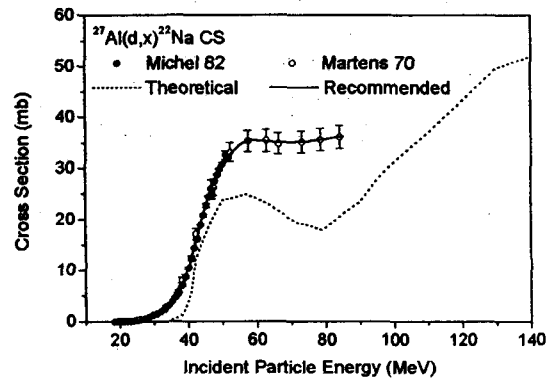


그림 6.  $^{27}\text{Al}(d,x)^{22}\text{Na}$  단면적

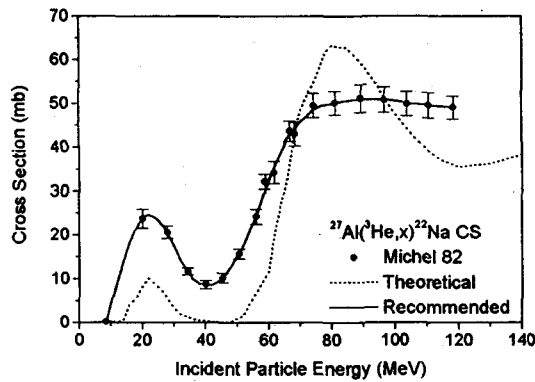


그림 7.  $^{27}\text{Al}(^3\text{He},x)^{22}\text{Na}$  단면적

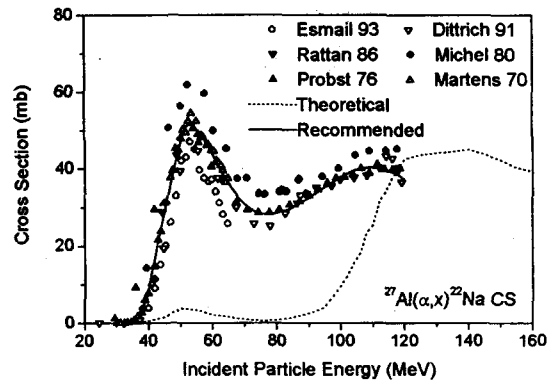


그림 8.  $^{27}\text{Al}(\alpha,x)^{22}\text{Na}$  단면적