

## 주요 금속재료 구성 원소의 박층 방사화법용 양성자 반응 단면적 평가

### Evaluation of Proton Reaction Cross Sections of Major Elements in Metal Substances for Thin Layer Activation Method

장종화, 오수열, 진준하

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

□□ 방사화법(TLA)에 필요한 주요 금속재료의 양성자 반응 단면적을 평가하였다. 평가한 반응은 모두 23 가지로서, TLA 대상 주요 금속재료인 Ti, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Nb, Mo, W 에 입사 에너지 범위 10 ~ 30 MeV 인 양성자를 조사하였을 때의 주요 반응들인데, 이 때 생성되는  $\gamma$  방출 동위원소는  $^{48}\text{V}$ ,  $^{52}\text{Mn}$ ,  $^{56,57}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Ni}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{89}\text{Zr}$ ,  $^{92\text{m}}\text{Nb}$ ,  $^{95\text{m},96}\text{Tc}$ ,  $^{183,184\text{g}}\text{Re}$  등이다. 주로 실측자료의 fitting 을 통하여 평가하였으며, 평가 단면적의 적절성을 평가하기 위해 금속재료별로 양성자 수송을 TRIM 코드로 모사한 결과와 새 단면적을 사용하여 계산한 scaling curve 들을 실측 curve 들과 비교하였다.

#### Abstract

It was evaluated total number of 23 proton reaction cross sections of major elements in metal substances, which are required for the Thin Layer Activation Method. Considered  $\gamma$  emitters are  $^{48}\text{V}$ ,  $^{52}\text{Mn}$ ,  $^{56,57}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Ni}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{89}\text{Zr}$ ,  $^{92\text{m}}\text{Nb}$ ,  $^{95\text{m},96}\text{Tc}$  and  $^{183,184\text{g}}\text{Re}$ , which are produced by bombarding 10 to 30 MeV protons to the metal target such as Ti, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Nb, Mo and W. Most cross sections were evaluated by fitting to experimental data. The accuracy of each evaluated cross section set was reviewed by comparing the calculated scaling curves, which were obtained by processing the results of TRIM code with newly evaluated cross sections, with the curves from experiments.

#### 1. 서 론

박층(□□) 방사화법(TLA; Thin Layer Activation 또는 Analysis)은 기계 부품 표면의 부식이나 마모의 양을 비파괴적으로 측정하는 한 방법으로서, 1970 년대 초부터 산업적으로 이용하기 시작하여 최근에는 거의 모든 산업분야에서 재료의 성능 분석이나 개발을 위해 사용하고 있는 방법이다[1]. 재료를 방사화 한 후 부품을 실제로 사용하거나 또는 실제 상황을 모사한 환경에 두고 시간이 지난 뒤에 방사능을 다시 측정하여 그 동안 마모나 부식으로 유실된 재료의 양을 알아낸다. 유실된 부분이 전혀 없다면 시간이 지난 후 재료의 방사능 양은 초기의 방사능 양에서 붕괴에 따른 감소량을 뺀 값이 될 것이며, 그 값에서 실제 측정된 양을 뺀 값이 재료의 표면이 유실되면서 함께 유실된 방사능 양이 되므로 결국 재료가 유실된 양을 계산할 수 있는 것이다. 실제로 마모나 부식의 두께는 매우 얇으므로 표면에서 수백  $\mu\text{m}$  정도의 얇은 깊이만 방사화 하면 된다. 이 방법은 중성자를 이용하여 깊게 방사화 한 후 유실된 방사능 양을 측정하는 방법과 비교하여 마모 표면을 직접

감시할 수 있다는 장점이 있다. 방사화 박층을 만드는 방법이나 대상 재료의 구성 핵종, 방사능 측정 대상 등에 따라 여러 가지 변형이 있는데, 대체로 수  $\mu\text{m}$  단위로 마모/부식의 두께 측정이 가능하다. 여기서는 10 ~ 30 MeV의 양성자를 금속재료에 조사하여 방사화, 즉,  $\gamma$  방출 핵종을 만들고, 재료의 방사능이 줄어들어 따라 표면의 마모 정도를 측정하는 경우를 상정하였다.

이 연구에서는 먼저 금속재료의 주요 구성 핵종인 Ti, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Nb, Mo, W 원소의 양성자에 의한 주요 방사화 반응 단면적을 평가하였고, 새로 평가한 단면적을 사용하여 각 재료별로 재료 표면으로부터의 깊이별로 방사화 양을 계산하여 scaling (또는 calibration) curve를 만들고 이를 측정치와 비교함으로써 평가 단면적의 적절성을 검토하였다. TLA 용 양성자 반응 단면적으로 한 두 개 원소에 대해서만 평가 자료가 있을 뿐 체계적인 평가는 아직 없다. 원자력병원의 MC50 cyclotron을 이용한 TLA 조사시험을 염두에 둔 이번 평가 자료는 양성자 가속기의 차폐 계산 등에도 사용할 수 있다. TLA에 사용되는 주요 양성자 방사화 반응과 생성 원소의 붕괴 특성을 표 1에 정리하였다. Cr의 양성자 반응으로  $^{52\text{m}}\text{Mn}$  및  $^{52\text{g}}\text{Mn}$ 가 생성되나 대부분의  $^{52\text{m}}\text{Mn}$ 은 반감기 21분으로 곧  $^{52}\text{Cr}$ 로 붕괴하며 불과 1.8% 정도만  $^{52\text{g}}\text{Mn}$ 로 전환된다. Ni의 양성자 반응으로 생성되는  $^{57}\text{Ni}$ 은 1주일의 냉각 기간을 거치면 약 4%만 남고 모두  $^{57}\text{Co}$ 로 전환된다.

표 1. 금속재료별 주요 양성자 방사화 반응과 생성 방사성 동위원소의 붕괴 특성

재료	주요 천연핵종 질량수 및 존재비(%)	주요 양성자 방사화 반응	문턱 에너지 (MeV)	생성 동위원소 붕괴 특성[2]						
				붕괴 모드	반감기 (day)	주요 특성 $\gamma$ 에너지 (keV)				
$^{22}\text{Ti}$	46 (8.0)	$^{48}\text{Ti}(p,n)^{48}\text{V}$	4.9	$\beta^+$	15.97	511 (100%)				
	47 (7.3)					983 (100%)				
	48 (73.8)					1312 (98%)				
$^{24}\text{Cr}$	52 (83.8)	$^{52}\text{Cr}(p,n)^{52}\text{Mn}$	5.6	$\beta^+, \text{EC}$	5.59	511 (59%)				
	53 (9.5)	$^{53}\text{Cr}(p,2n)^{52}\text{Mn}$	13.7			744 (90%)				
						936 (95%)				
				1434 (100%)						
$^{26}\text{Fe}$	54 (5.9)	$^{56}\text{Fe}(p,n)^{56}\text{Co}$	5.44	$\beta^+, \text{EC}$	77.27	511 (48%)				
	56 (91.7)					847 (100%)				
						1238 (67%)				
$^{28}\text{Ni}$	58 (68.1)	$^{58}\text{Ni}(p,2p)^{57}\text{Co}$	8.32	EC	271.8	122 (86%)				
	60 (26.2)					$^{58}\text{Ni}(p,d)^{57}\text{Ni}$	10.16	EC	1.48	127 (15%)
						$^{58}\text{Ni}(p,np)^{57}\text{Ni}$	12.43			1378 (85%)
$^{29}\text{Cu}$	63 (69.2)	$^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$	2.17	EC	244.3	1116 (51%)				
	65 (30.8)									
$^{30}\text{Zn}$	64 (48.6)	$^{66}\text{Zn}(p,np)^{65}\text{Zn}$	11.2	EC	244.3	1116 (51%)				
	66 (27.9)	$^{67}\text{Zn}(p,n)^{67}\text{Ga}$	1.81	EC	3.26	185 (21%)				
	68 (18.8)	$^{68}\text{Zn}(p,2n)^{67}\text{Ga}$	12.15			300 (17%)				
$^{41}\text{Nb}$	93 (100)	$^{93}\text{Nb}(p,na)^{89}\text{Zr}$	16.4	$\beta^+, \text{EC}$	3.27	511 (56%)				
						909 (100%)				
		$^{93}\text{Nb}(p,np)^{92\text{m}}\text{Nb}$	12.1	EC	10.15	934 (100%)				
$^{42}\text{Mo}$	92 (14.8)	$^{95}\text{Mo}(p,n)^{95\text{m}}\text{Tc}$	2.54	EC	61.0	204 (56%)				
	95 (15.9)	$^{96}\text{Mo}(p,2n)^{95\text{m}}\text{Tc}$	11.78			582 (31%)				
	96 (16.7)	$^{97}\text{Mo}(p,3n)^{95\text{m}}\text{Tc}$	18.67			835 (24%)				
	97 (9.6)	$^{96}\text{Mo}(p,n)^{96}\text{Tc}$	3.79	EC	4.28	778 (100%)				
	98 (24.1)	$^{97}\text{Mo}(p,2n)^{96}\text{Tc}$	10.68			813 (82%)				
100 (9.6)	$^{98}\text{Mo}(p,3n)^{96}\text{Tc}$	19.41			850 (98%)					
$^{74}\text{W}$	182 (26.3)	$^{183}\text{W}(p,n)^{183}\text{Re}$		EC	70.0	162 (23%)				
	183 (14.3)	$^{184}\text{W}(p,2n)^{183}\text{Re}$				292 (3%)				
	184 (30.7)	$^{184}\text{W}(p,n)^{184\text{g}}\text{Re}$		EC	38	217 (38%)				
	186 (28.6)					921 (33%)				

## 2. 단면적 평가

양성자에 대한 방사화 단면적은 보통 수 MeV 정도의 문턱 에너지부터 증가하여 십 수 MeV 에서 최대값을 보인 후 감소하는 역포물선 형태이다. 따라서 관심 있는 입사 양성자의 에너지 범위는 5 ~ 30 MeV 정도이다. 한편, 재료 내에서 양성자의 에너지는 표면으로부터의 거리에 거의 선형적으로 감소하므로 최대 방사화 깊이를 예측하는 데 문턱 에너지 근방의 단면적이 중요하다. 또한 단면적이 큰 에너지 영역에서는 그 크기가 크다는 점 때문에 결국 관심 에너지 영역 전체에 걸쳐 평가에 주의를 기울여야 한다.

이 평가에서는 주로 실측 자료 database 인 EXFOR[3]에서 검색, 입수한 측정 자료를 cubic spline 을 사용하여 fitting 하는 방법으로 단면적을 평가하였다. 같은 반응에 대하여 여러 개의 실험 자료 세트가 있는 경우 다른 실험 결과와 현저히 다른 실험 자료는 fitting 에서 제외하며, 관심 영역 전체에 걸쳐 측정된 자료 및 최근 실험 자료를 우선적으로 사용하였다. 표 2 는 이 연구에서 평가한 각 반응별로 fitting 에 사용한 실험 자료를 정리한 것이다. 이들 외에도  $^{nat}\text{Cr}(p,x)^{52g}\text{Mn}$  의 단면적을  $^{52}\text{Cr}$  및  $^{53}\text{Cr}$  단면적을 천연존재비로 가중하여 계산하였으며,  $^{nat}\text{Mo}(p,x)^{95m}\text{Tc}$  및  $^{nat}\text{Mo}(p,x)^{96}\text{Tc}$  단면적도 같은 방법으로 계산하였다. 한편 W 재료에 대해 양성자 조사로 생성된  $^{183}\text{Re}$  및  $^{184g}\text{Re}$  TLA 측정실험은 있으나 각 동위원소나 천연원소에 대한 단면적 실험치는 구할 수 없었다. 미리 평가된 단면적을 사용하여 방사화 양을 계산하고 이를 방사화 실험 결과와 비교하는 것이 정상적인 절차인데, W 재료에 대해서는 거꾸로 TRIM 으로 계산한 방사화 결과가 실험 결과와 같도록 단면적을 조정하는 방법으로  $^{nat}\text{W}(p,x)^{183}\text{Re}$  및  $^{nat}\text{W}(p,x)^{184g}\text{Re}$  단면적을 평가하였다. 그림 1, 3, 5 에 평가 단면적을 예로 보였다.

표 2. 단면적 평가에 사용된 실험 자료

단면적 평가 반응	EXFOR Entry No.	에너지 범위 (MeV)	Data 개수	주 실험자	참고 문헌
$^{nat}\text{Ti}(p,x)^{48}\text{V}$	d4001.002	4.5 ~ 29.98	69	Kopecky	[4]
$^{52}\text{Cr}(p,n)^{52g}\text{Mn}$	a0510.037	7.7 ~ 29.5	25	Levkovski	[5]
$^{53}\text{Cr}(p,2n)^{52g}\text{Mn}$	a0510.040	13.8 ~ 29.5	18	Levkovski	[5]
$^{56}\text{Fe}(p,n)^{56}\text{Co}$	b0041.002	4.8 ~ 39.0	27	Jenkins	[6]
$^{nat}\text{Ni}(p,x)^{57}\text{Co}$	d4002.003	9.9 ~ 29.6	40	Tarkanyi	[7]
$^{nat}\text{Ni}(p,x)^{57}\text{Ni}$	d4002.002	13.6 ~ 29.6	67	Tarkanyi	[7]
$^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$	b0068.006	2.23 ~ 5.78	64	Johnson	[8]
	a0510.081	7.7 ~ 29.5	25	Levkovski	[5]
$^{66}\text{Zn}(p,np)^{65}\text{Zn}$	a0510.089	13.8 ~ 29.5	18	Levkovski	[5]
$^{67}\text{Zn}(p,n)^{67}\text{Ga}$	b0068.011	1.85 ~ 5.34	30	Johnson	[8]
	a0510.090	7.7 ~ 29.5	25	Levkovski	[5]
$^{68}\text{Zn}(p,2n)^{67}\text{Ga}$	a0510.094	12.8 ~ 29.5	19	Levkovski	[5]
$^{93}\text{Nb}(p,na)^{89}\text{Zr}$	o0276.298	16.4 ~ 2600	53*	Michel	[9]
$^{93}\text{Nb}(p,np)^{92m}\text{Nb}$	o0276.301	5.62 ~ 2600	64**	Michel	[9]
$^{95}\text{Mo}(p,n)^{95m}\text{Tc}$	a0338.003	4.0 ~ 9.0	11	Skakun	[10]
	a0510.224	7.7 ~ 18.3	13	Levkovski	[5]
$^{96}\text{Mo}(p,2n)^{95m}\text{Tc}$	a0510.232	12.1 ~ 29.5	20	Levkovski	[5]
$^{97}\text{Mo}(p,3n)^{95m}\text{Tc}$	a0510.240	21.4 ~ 29.5	10	Levkovski	[5]
$^{96}\text{Mo}(p,n)^{96}\text{Tc}$	a0338.004	4.5 ~ 9.0	10	Skakun	[10]
	a0510.231	7.7 ~ 18.3	13	Levkovski	[5]
$^{97}\text{Mo}(p,2n)^{96}\text{Tc}$	a0510.239	12.1 ~ 29.5	20	Levkovski	[5]
$^{98}\text{Mo}(p,3n)^{96}\text{Tc}$	a0510.244	20.3 ~ 29.5	11	Levkovski	[5]

\* 40 MeV 까지 17 개

\*\* 40 MeV 까지 27 개

### 3. 평가 단면적 검증

Scaling (또는 calibration) curve 를 통해 TLA 용 평가 단면적의 적절성을 검증하였다. Scaling curve 란, 표면으로부터 유실이 전혀 없을 때 재료의 총 방사능 양을 1로 정규화 하여, 유실된 두께별로 재료에 남은 방사능의 양을 그린 것이다. Background 방사능을 무시한다면 시간  $t$ 가 지난 후 유실 두께  $x$ 일 때의 방사능 계수  $N(x, t)$ 는 scaling curve  $S(x)$ 를 사용하여

$$N(x, t) = N(0, t) \cdot S(x) = N(0, 0) \exp(-\lambda t) \cdot S(x)$$

로 표현되며, 미지의  $x$ 에 대해 측정값  $N(x, t)$ 와 미리 알고 있는  $N(0, t)$ 의 비를  $S(x)$  curve 위에서 찾으면 그 때의 두께  $x$ 를 결정할 수 있다. 단면적이 양성자 에너지에 따라 다르기 때문에 scaling curve 도 입사 에너지별로 준비하여야 한다.

새로 평가한 단면적 및 TRIM 코드[11]를 사용하여 scaling curve 를 구하고 이를 IAEA 보고서[1] 값과 비교하였다. TRIM 은 하전 입자의 수송을 Monte Carlo 방법으로 모사하는 코드인데 그 자체는 방사화 양을 계산하지 않는다. Scaling curve 를 구하기 위해 TRIM 의 결과인 양성자의 충돌이력 file 과 ENDF format 의 단면적 자료, 생성 핵종의 반감기 등을 입력으로 깊이별 에너지 및 방사화 분포를 계산하는 프로그램 ENERGY 를 작성하였다.

표 3 은 TRIM - ENERGY 계산 결과인 단위량의 양성자 조사에 의한 방사화율과 scaling curve 에서 상대 방사능이 1/2 되는 깊이를 정리한 것이며 그림 2, 4, 6 은 scaling curve 의 예를 보인 것이다.

표 3. TLA 대상 재료의 방사화율 및 상대 방사능 1/2 깊이 계산 결과

재료	밀도* (g/cm <sup>3</sup> )	생성 핵종	입사 양성자 에너지 (MeV)	방사화율 (μCi/μAh)		상대 방사능 1/2 깊이(μm)		
				실측값	계산값	실측값	계산값 및 상대오차(%)	
Ti	4.52	<sup>48</sup> V	7	6.5	21.8	30	31 ( 3)	
			10	98	135	113	110 ( -3)	
Cr	7.20	<sup>52</sup> Mn	11	76	60.5	81	91 ( 12)	
			22	550	493	506	497 ( -2)	
Fe	7.87	<sup>56</sup> Co	7	1.4	1.07	13	14 ( 9)	
			10	7.0	12.8	47	49 ( 4)	
Ni	8.90	<sup>57</sup> Co	10	0.65	0.036	44	20 (-55)	
			22	35.0	30.1**	90	179 ( 98)	
Cu	8.92	<sup>65</sup> Zn	7	1.2	1.42	28	32 ( 14)	
			10	5.44	5.71	63	64 ( 1)	
Zn	7.14	<sup>65</sup> Zn	22	12.0	11.5	227	211 ( -7)	
			<sup>67</sup> Ga	11	50	77.9	73	103 ( 40)
				22	680	1049	308	327 ( 6)
Nb	8.57	<sup>89</sup> Zr	22	6	47	103	130 ( 27)	
			<sup>92m</sup> Nb	22	100	97	186	208 ( 12)
Mo	10.21	<sup>95m</sup> Tc	7	0.173	0.18	28	15 (-46)	
			11	1.27	2.4	72	60 (-17)	
			22	14.4	21	370	356 ( -4)	
		<sup>96</sup> Tc	7	8.0	9.2	20	16 (-20)	
			11	75	128	73	62 (-15)	
			22	560	780	366	415 ( 13)	
W	19.35	<sup>183</sup> Re	11	1.3	1.3	22	21 ( -1)	
			22	34	34	218	204 ( -6)	
		<sup>184g</sup> Re	11	2.43	2.43	40	42 ( 4)	
			22	80	80	91	89 ( -2)	

\* TRIM 의 내장값

\*\* <sup>nat</sup>Ni(p,x)<sup>57</sup>Ni 반응으로 생긴 <sup>57</sup>Ni 이 <sup>57</sup>Co 로 붕괴함으로써 더해지는 양을 포함.

표에서 보다시피 방사화율은 많은 경우 그 계산값이 실측값과 큰 차이를 보이고 있다. 그러나 TLA 실험의 특성상 방사화율 측정값의 신뢰도가 떨어진다는 점과, 실제 TLA 에서 방사화율보다는 scaling curve 가 중요하다는 점을 고려할 때 큰 문제는 아니다. 계산된 scaling curve 중에서 Ni 재료의  $^{57}\text{Co}$ , Zn 의 11 MeV 양성자에 대한  $^{67}\text{Ga}$ , Mo 의 낮은 에너지 양성자에 대한  $^{95\text{m}}\text{Tc}$  및  $^{96}\text{Tc}$  생성 scaling curve 이외에는 모두 계산값이 실험값을 잘 재현하고 있는 것으로 평가된다. Ni 의 경우 10 MeV 입사 양성자에 대한 scaling curve 의 오차는  $^{57}\text{Co}$  생성반응 문턱 에너지부터 10 MeV 까지의 단면적이 너무 낮게 평가되었기 때문에 생긴 것으로 판단되는데,  $^{57}\text{Co}$  의 생성 단면적은 10 MeV 이하에서 수 mb 에 불과하므로 단면적 측정실험의 오차가 매우 크고 따라서 그 에너지 영역에서 평가 단면적의 신뢰도도 떨어진다. 22 MeV 의 양성자에 대해서는  $^{57}\text{Co}$  뿐만 아니라  $^{57}\text{Ni}$  도 생성되고 이는 반감기 1.48 일로 곧  $^{57}\text{Co}$  로 붕괴한다. 따라서  $^{57}\text{Ni}$  의 기여를 고려해야 하는데 이 계산에서는 생성된  $^{57}\text{Ni}$  이 모두  $^{57}\text{Co}$  로 붕괴했다고 가정하였기 때문에 방사화 값이 과도하게 평가된 것으로 보이며, 다른 한편으로는 400 ~ 450 mb 에 이르는 20 ~ 22 MeV 구간에서의  $^{57}\text{Co}$  생성 단면적을 과대 평가했을 가능성도 배제할 수 없다. 낮은 양성자 에너지에 대한 Zn 재료의  $^{67}\text{Ga}$  scaling curve 오차는 문턱 에너지부터 10 MeV 정도까지의  $^{67}\text{Zn}(p,n)^{67}\text{Ga}$  단면적을 높게 평가하였고, Mo 재료의 오차는 역시 낮은 에너지에서  $^{95}\text{Mo}(p,n)^{95\text{m}}\text{Tc}$  및  $^{96}\text{Mo}(p,n)^{96}\text{Tc}$  단면적을 낮게 평가한 때문으로 판단된다. 특히 Mo 경우 그림 7 의 약 0.5 mm 이후 및 그림 8 에서 보듯이 양성자 에너지가 낮을 때 오차가 크다는 점이 이러한 추정을 뒷받침한다.

한편 그림 9 와 10 의 scaling curve 는 원자력 병원의 MC50 cyclotron 을 이용하여 Fe 재료에 대한 TLA 실험과 계산 결과를 비교한 그림이다. Fe 시료는 두께가 약 30 또는 40  $\mu\text{m}$  인 순철 foil 을 여러 장 겹친 것으로 양성자 조사 후 foil 을 한 장씩 떼어내면서  $^{56}\text{Co}$  방사능을 측정함으로써 scaling curve 를 만든다. 두 가지의 서로 다른 양성자 에너지에 대해 실험하였는데, cyclotron 에서 나오는 양성자의 에너지는 35 MeV 로 같지만 양성자 빔이 통과하는 거리가 각각 4 mm 및 5.3 mm 가 되도록 빔 인출구와 Fe 시료 사이에 Al 판을 두어 에너지를 감소시켰다. Al 은 1 mm 당 약 4 MeV 의 에너지 감소를 가져오므로 실제로 Fe 재료에 입사하는 양성자 에너지는 평균적으로 각각 19 및 14 MeV 정도이다. 4 mm-Al buffer 를 사용한 경우 최초 양성자 에너지가 34.5 MeV 라고 가정하여 계산한 curve 가 실험값과 일치하며, 5.3 mm-Al buffer 를 사용한 경우는 최초 양성자 에너지로 35 MeV 가 더 적당하다. MC50 의 50 MeV 빔 에너지 측정 결과[12]를 보면 4.6%의 오차가 있으며 이를 35 MeV 빔에 그대로 적용한다면 오차는  $\pm 1.6$  MeV 이다. 이 크기는 위 그림에서 보인 바와 같이 상당히 다른 scaling curve 를 보일 수 있는 크기이므로 TLA 를 통해 실제로 유실 두께를 측정하려 할 때에는 scaling curve 를 만들 때의 빔 에너지와 유실 두께 측정시의 에너지가 같은지 확인하여야 한다.

#### 4. 결론

입사 에너지 약 5 ~ 30 MeV 구간에서 주요 금속재료의 TLA 용 양성자 반응 단면적을 평가하고 각 재료별로 scaling curve 를 계산한 결과 대체로 측정된 scaling curve 를 잘 재현하였다. 양성자 계동계수와 반응 단면적의 오차, 선행 핵종에 대한 고려 방법 등을 scaling curve 오차의 원인으로 들 수 있다. Ni 의  $^{57}\text{Co}$  scaling curve 에서는  $^{57}\text{Ni}$  의 붕괴에 대한 적절한 고려가 필요하고, Zn 및 Mo 의 scaling curve 에 대해서는 낮은 에너지에서  $^{67}\text{Zn}(p,n)^{67}\text{Ga}$  및  $^{95}\text{Mo}(p,n)^{95\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{96}\text{Mo}(p,n)^{96}\text{Tc}$  단면적을 재평가할 필요가 있다. 문턱 에너지 근방의 단면적은 그 크기가 매우 작아서 실험적으로 정밀하게

측정하기가 곤란하므로 실험값에 근거한 평가 단면적도 역시 오차가 클 수 밖에 없다는 제약이 있기는 하지만 TLA 용 단면적의 평가 때는 낮은 에너지 영역에서도 주의를 기울여야 한다.

한편 W 경우에 대해 시도한, 측정된 scaling curve로부터 역으로 단면적을 구하는 방법은 적절한 단면적 측정 자료가 없는 경우 단면적 평가에 적용할 수 있는 방법임을 확인하였다.

마지막으로, scaling curve 는 입사 양성자 에너지에 민감하므로 실제 TLA 에서 재료에 쪼이는 양성자 빔의 에너지를 정확히 알아야 하며, 해당 실험의 에너지에 대한 scaling curve 를 새로 만들어야 하는 경우라면 이 연구에서 확립한 TRIM - ENERGY 계산 절차를 사용할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력 연구 개발 과제 중 “핵자료 체제 구축” 과제의 일환으로 수행한 것이다.

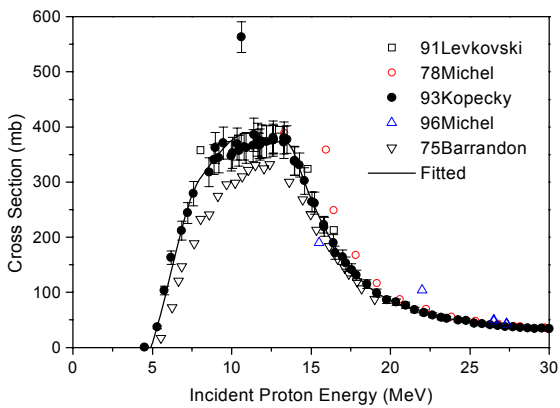


그림 1.  ${}^{\text{nat}}\text{Ti}(p,x){}^{48}\text{V}$  평가 단면적

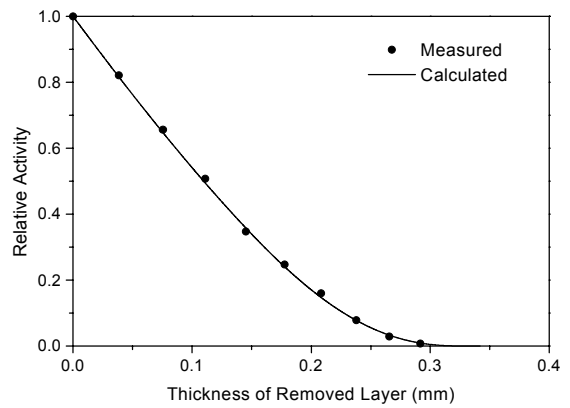


그림 2. Ti 의  ${}^{48}\text{V}$  Scaling Curve ( $E_p=10$  MeV)

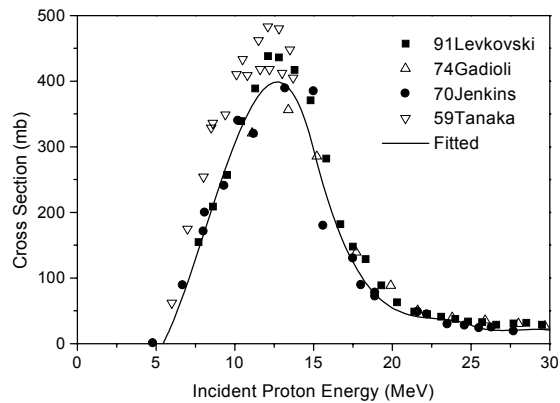


그림 3.  ${}^{\text{nat}}\text{Fe}(p,x){}^{56}\text{Co}$  평가 단면적

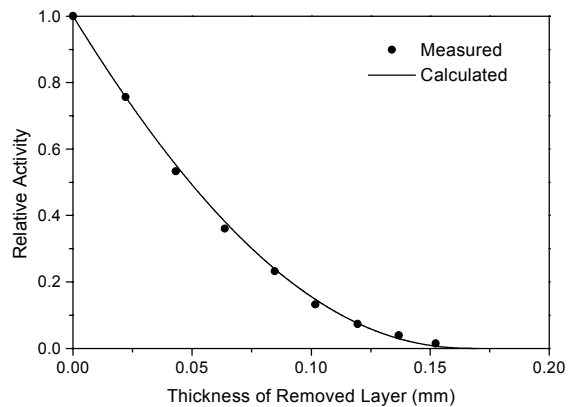


그림 4. Fe 의  ${}^{56}\text{Co}$  Scaling Curve ( $E_p=10$  MeV)

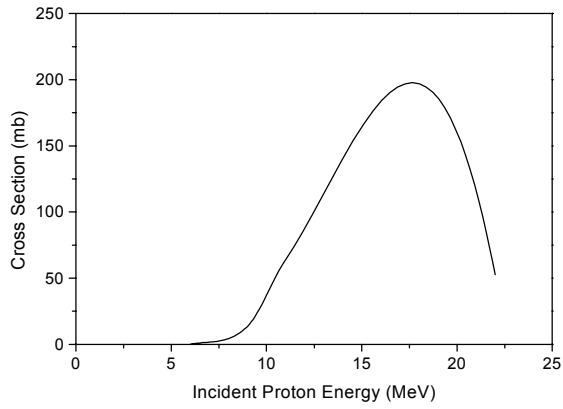


그림 5.  ${}^{\text{nat}}\text{W}(p,x){}^{183}\text{Re}$  평가 단면적

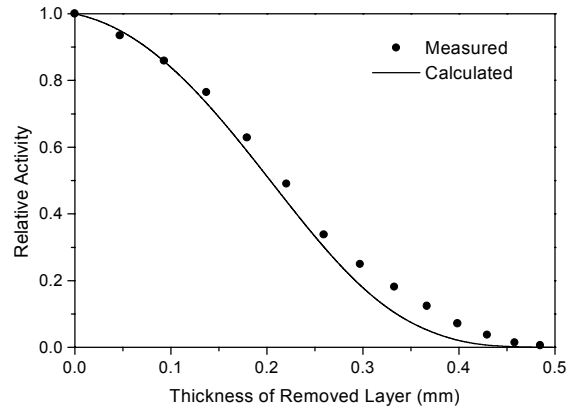


그림 6. W 의  ${}^{183}\text{Re}$  Scaling Curve (Ep=22 MeV)

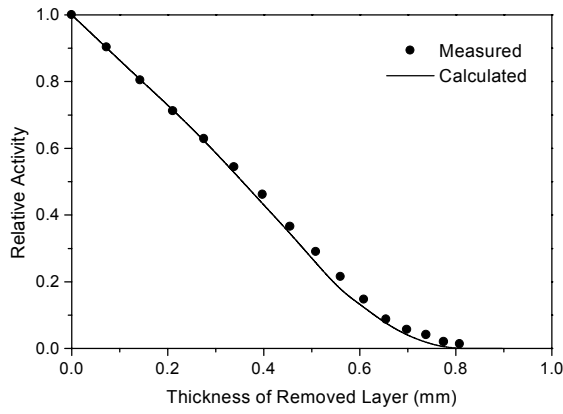


그림 7. Mo 의  ${}^{95\text{m}}\text{Tc}$  Scaling Curve (Ep=22 MeV)

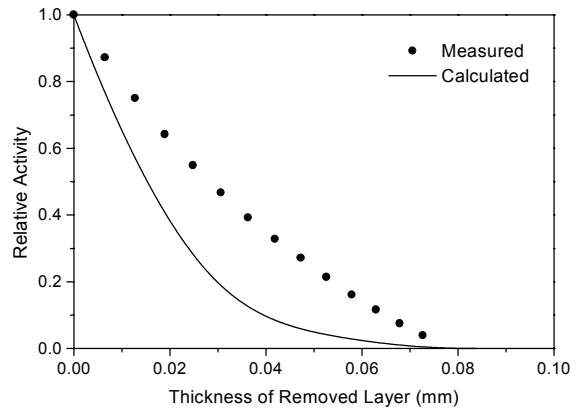


그림 8. Mo 의  ${}^{95\text{m}}\text{Tc}$  Scaling Curve (Ep=7 MeV)

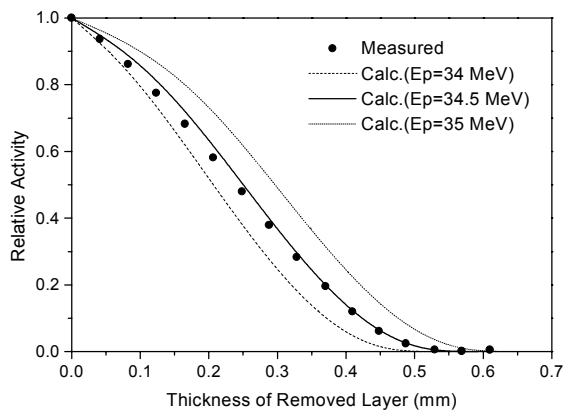


그림 9. Fe 의  ${}^{56}\text{Co}$  Scaling Curve  
(4 mm-Al Buffer)

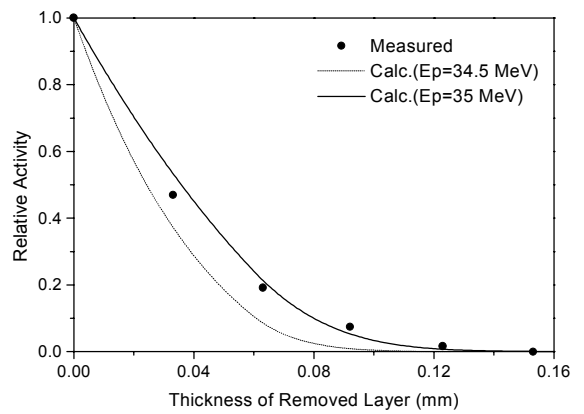


그림 10. Fe 의  ${}^{56}\text{Co}$  Scaling Curve  
(5.3 mm-Al Buffer)

## 참고 문헌

1. "The Thin Layer Activation Method and Its Applications in Industry," IAEA-TECDOC-924, IAEA (Jan. 1997)
2. 장중화, "핵자료 표," KAERI/GP-106/95, 한국원자력연구소 (1995)
3. <http://www.nea.fr/html/dbdata/x4> 또는 <http://lui.kaeri.re.kr/cgi-bin/exfor>
4. P. Kopecky, et al., "Excitation Functions of (p,nx) Reactions on Natural Ti: Monitoring of bombarding Proton Beams," *Appl. Radiation and Isotopes*, **44**, 687 (1993)
5. V.N. Levkovski, "Activation Cross Section Nuclides of Average Masses (A=40~100) by Protons and Alpha Particles with Average Energies E=10~50 MeV," EXFOR Entry a0510 (1991)
6. I.L. Jenkins, "Excitation Functions for the Bombardment of Fe-56 with Protons," *J. of Inorganic and Nuclear Chemistry*, **32**, 1419 (1970)
7. F. Tarkanyi, et al., "Excitation Functions of Proton Induced Nuclear Reactions on Natural Nickel for Monitoring Beam Energy and Intensity," *Appl. Radiation and Isotopes*, **42**, 513 (1991)
8. C.H. Johnson, A. Galonsky, and C.N. Inskeep, "Cross Sections for (p,n) Reactions in Intermediate-Weight Nuclei," ORNL-2910, ORNL (1960)
9. R. Michel, et al., "Cross Sections for the Production of Residual Nuclides by Low- and Medium-Energy Protons from the Target Elements C, N, O, Mg, Al, Si, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Sr, Y, Zr, Nb, Ba and Au," *Nucl. Inst. Methods B* (1996)
10. E.A. Skakun, et al., "Investigation of Cross Sections of Cr-54(p,n)Mn-54 Reactions in the Energy Range from 5 to 9 MeV," *Izvest. Akad. Nauk SSSR, Seriya Fisich.*, **50**, 2043 (1986)
11. J.F. Ziegler, "TRIM version 95.4 – The Transport of Ions in Matter," IBM Research (1998)
12. J.H. Ha, et al., "Energy Measurement of 50 MeV Proton Beam with a NaI(Tl) Scintillator," *Nucl. Inst. Methods A*, **350**, 411 (1994)