

Fluence Monitor를 이용한 HANARO 노심 내 중성자 플루언스 측정

이승규*, 조광호*, 주기남†, 박진석†, 김용균*

*한양대학교 원자력공학과, †한국원자력연구원

2011년 3월 8일 접수 / 2011년 12월 23일 1차 수정 / 2011년 12월 30일 2차 수정 / 2011년 12월 30일 채택

Fluence monitor(F/M)는 조사 시편을 원자로의 노심에 넣은 후 방사화 된 조사 시편의 방사능을 측정후 역산하여 중성자의 선량을 계산하는 기법으로 원자로내의 중성자 분포를 조사하기 위하여 반드시 필요한 기술이다. 이 기술은 중성자에 대한 에너지 스펙트럼 측정이 간접적으로 가능하며, 현존하는 중성자 분포 측정 기법 중에서 우수한 정밀도를 지니고 있다. 하나로(HANARO)에서 수행하는 재료조사 시험에서의 중성자량 측정을 위하여 본 연구에서는 지름 0.1 mm, 길이 3 mm 미만의 질량 150~200 μg 범위, 순도 99.9% 이상의 Fe, Ni, Ti 와이어를 F/M 시편으로 사용하였다. 이 시편은 알루미늄 캡슐에 봉입하여 30 MW 의 하나로 OR5공에 약 25일간 조사하였다. 조사를 마친 시편은 high purity germanium (HPGe) detector를 이용하여 감마선을 측정하였고, SAND-II code로 reaction rate와 중성자 cross-section등을 고려하여 fluence monitor 위치에서의 중성자 플루언스를 계산하였다. F/M이 장착되었던 하나로 OR5공의 중성자 플루언스 값은 MCNP 코드를 이용하여 계산된 결과를 사용하였으며, SAND-II code로 장착된 F/M 위치에서의 중성자 플루언스를 계산하여 적용된 시편의 reaction에 따른 결과값의 차이를 비교 분석하였다.

중심어: Fluence monitor, 중성자 조사량, SAND-II, HANARO

1. 서론

Fluence monitor (F/M) 기법은 조사 시편을 원자로의 노심에 넣은 후 방사화 된 조사 시편의 방사능을 측정하여, 역산으로 중성자 선량을 계산하는 기법으로 원자로내의 중성자 분포를 조사하기 위해 반드시 필요한 기술이다 [1]. 원자로 재료는 가동 중 노심에서 발생하는 고속 중성자에 조사됨으로써 재료의 기계적인 성질이 변하게 되어 파괴 저항성이 떨어지게 되며, 고속 중성자에 의한 재료의 물성 변화는 강도(strength)와 경도(hardness)의 증가와 연성(ductility)과 인성(toughness)이 감소하는 취화 현상으로 나타나며 그 결과로 원자로 재료의 수명이 단축된다 [2]. 원자로 노심의 중성자를 측정하는 방법은 중성자 조사에 따른 취화 현상으로 인한 원전 재료의 수명 예측과 원자로 안전성 연구 등 다양한 목적으로 선진국에서는 이미 기술이 고착되어 풍부한 자료를 축적하고 있으며 이를 다른 국가의 자료와 비교하는 실험이 활발하게 진행되고 있다.

재료 조사 시험에 있어 에너지가 1 MeV 이상인 고속 중성자의 조사량은 매우 중요한 인자이다. 최근에는 SMART 사업이 국가 중요 사업으로 진행됨에 따라 인허

가 기초 자료로서 압력 용기 재료의 조사 시험에서의 고속 중성자 측정 결과를 제시해야 한다. 중성자 조사량 평가와 관련하여 국내기준으로 원자로 압력용기 속중성자 조사량의 계산 및 측정에 관한 규제 지침이 명시되어 있다. 규제 지침에 따르면 원자로 압력용기의 속중성자에 의한 조사취화를 방지하기 위하여, 계산 값과 검증 실험의 결과를 비교하여 20% 오차를 만족하여야 한다 [2]. 이를 위해서 본 연구에서는 그동안 개발해온 고속 중성자 플루언스 측정 기술을 활용하여 그에 대한 시험을 수행하였다.

F/M의 조사 시료로 미국의 경우 Nb, Ti, Cu, Fe, Co-Al 등의 시편을 사용하여, 바나듐 또는 카드뮴 캡슐에 넣어서 사용하고 있다. 프랑스의 경우에는 Al-0.5%Co, Ni, Fe, Cu, U_3O_8 , NpO_2 등을 사용하며, 독일은 Fe, Nb, ThO_2 등을 시편으로 사용한다. [3,4] 스페인의 경우 Cu, Fe, Ni, Co, Al 등을 스틸 플러그 속에 넣어 사용하는 것과 U_3O_8 , NpO_2 등을 산화카드뮴에 넣어 사용하는 것으로 되어 있다 벨기에의 경우는 Ni, Fe, Cu, Co 등을 주로 사용하고 있으며, 현재까지 우리나라의 경우에는 Ti, Fe, Ni 등을 알루미늄 캡슐에 넣어서 사용하고 있다 [5,6].

본 연구에서는 이러한 외국의 사례를 바탕으로 하여, F/M의 고속 중성자 측정용 시편으로 사용할 물질에 대하여 Fe, Ni, Ti의 핵종을 선택하였으며, 각각의 핵종에 대해서 동위원소의 종류, 생성핵의 반감기, 방출 감마선의

교신저자 : 김용균, ykkim4@hanyang.ac.kr
서울시 성동구 행당동 한양대학교 토건관 602-1

에너지 및 branch ratio 등에 대한 물성 및 특성 조사를 수행하였다. 또한 원자로를 이용한 중성자 조사 실험은 연구용 원자로인 HANARO (하나로) OR5 hole에서 수행되었으며, 조사된 시편에서의 감마선을 측정하고 reaction rate와 중성자 cross-section등을 고려한 SAND-II code로 장착된 F/M 위치에서의 중성자 플루언스를 계산하여 적용된 시편의 reaction에 따른 결과값의 차이를 비교 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. Fluence Monitor 시편

Fluence monitor에 사용되는 방사화 검출기는 각종 핵반응, 핵반응 단면적, 생성핵의 반감기, 방출되는 감마선의 에너지, branch ratio 등 핵자료가 정확히 알려져 있어야 하며, 반감기가 조사 종료 시점부터 감마선 계측 시간까지의 조사 시간보다 생성핵의 반감기가 충분히 길어야 한다. 또한 방사화 검출기로 사용되는 물질에 포함된 불순물이 주된 핵반응과 서로 간섭되는 핵반응을 일으키지 않아야 한다. 또한 높은 cross-section을 갖는 물질이 방사화 검출기 주변에 있으면 중성자의 self-shielding이 일어나므로 이를 피해야 한다. 따라서 F/M 설계시에 고려되어야 할 사항은 생성핵에서 방출되는 방사선이 방사화 검출기 자체에서 흡수되는 self-absorption을 줄여야 하고, 생성핵의 계수율이 높으면 감마선 계측기의 dead time이 증가하여 정확한 감마선 계측이 불가능하므로 방사화 검출기는 적당한 크기를 가져야 한다는 것이다. 원자로 내에서의 조사 시간이 길어질 경우 생성핵이 중성자에 의해 다른 핵종으로 변환되는 burn-up도 고려해야 하며, 조사시 온도가 높으면 생성핵의 이동과 용융 및 확산이 일어나므로 시편들의 용융점이 높아야 한다.

고속 중성자 측정용으로 선택한 시편은 Fe, Ni, Ti 의 세 종류이며, 이 시편들의 absorption cross-section, scattering cross-section 및 동위원소의 종류 및 생성핵의 반감기에 대한 값은 Table 1과 같다. 이 시편들은 ASTM E844에서 언급하고 있는 규격에 맞는 시편들이며, E844에서 언급하고 있는 dosimeter elements의 reaction 중 $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$, $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$, $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 의 반응을 이용하여 결과를 도출하였다. 고속 중성자 측정을 위하여 사용한 시편의 일반적인 사양은 Table 2와 같으며, 각각의 와이어는 조사 후의 activation 되는 정도 및 cooling time을 고려하여 100~200 μg 에 가깝게 제작한다. 와이어 자체가 매우 미세하고 이 질량을 맞추주기 위하여 매번 측량을 하기가 어렵기 때문에 각각의 와이어를 정해져 있는 크기에 맞게 cutting을 하여 사용한다. Fe 와이어의 경우 길이를 2.5 mm 미만, Ni 와이어는 길이 2 mm 미만, Ti 와이어는 길이 3 mm 미만으로 하여 제작한 후 메탄올과 아세톤을 이용하여 공기 중에 노출되어 오염된 것을 세척하여 준다. 세척 시에는 시편이 물과 닿지 않도록 주의하여야 한다. F/M 시편의 불순물의 농도는 Table 3과 같다.

Table 1. Nuclear Data of Fluence Monitor Sample for Fast Neutron Measurements.

시료	σ_a (absorption)	σ_s (scattering)	Total	Isotope ($T_{1/2}$)	
Iron	2.56	11.62	14.18	^{52}Fe	8.3 hour
	2.25	2.2	4.45	^{54}Fe	Stable
				^{55}Fe	2.7 year
	2.59	12.42	15.01	^{56}Fe	Stable
	2.48	1	3.48	^{57}Fe	Stable
				^{58}Fe	Stable
	1.28	28	29.28	^{59}Fe	44.5 day
			^{60}Fe	1.5E6 year	
Nickel	4.49	18.5	22.99	^{56}Ni	6.1 day
				^{57}Ni	35.6 hour
	4.6	26.1	30.7	^{58}Ni	Stable
				^{59}Ni	7.6E4 year
	2.9	0.99	3.89	^{60}Ni	Stable
	2.5	9.2	11.7	^{61}Ni	Stable
	14.5	9.5	24	^{62}Ni	Stable
				^{63}Ni	100 year
1.52	0.017	1.537	^{64}Ni	Stable	
			^{65}Ni	2.51 hour	
Titanium	6.09	4.35	10.44	^{44}Ti	63 year
				^{45}Ti	3.07 hour
	0.59	3.05	3.64	^{46}Ti	Stable
	1.7	3.2	4.9	^{47}Ti	Stable
	7.84	4.65	12.49	^{48}Ti	Stable
	2.2	3.4	5.6	^{49}Ti	Stable
	0.179	4.8	4.979	^{50}Ti	Stable
			^{51}Ti	5.76 min	

Table 2. Properties of Fluence Monitor Sample for Fast Neutron Measurements.

시편의 종류	Diameter	Purity
Fe (Iron wire)	0.1 mm	Puratronic, 99.998 % (metals basis)
Ni (Nickel wire)	0.1 mm	Puratronic, 99.994 % (metals basis)
Ti (Titanium wire)	0.127 mm	99.99 % (metals basis)

Table 3. Impurity Concentration of Fluence Monitor Sample for Fast Neutron Measurements.

시편의 종류	Typical analysis (ppm)
Fe (Iron wire)	Ag=1, Al=2, Ca=3, Cr=1, Cu=2, Mg=2, Mn=1, Ni=1, Si=3
Ni (Nickel wire)	Ag=1, Al=1, Ca=1, Cr <1, Cu=3, Fe=15, Mg <1, Mn <1, Si=2, Sn <1
Ti (Titanium wire)	Al <3, Ca <2, Cr <6, Cu <10, Fe <10, Mg <1, Mn <1, Nb <5, Ni <3, S <1, Si <5, V <3, Zn <1, Zr <3.

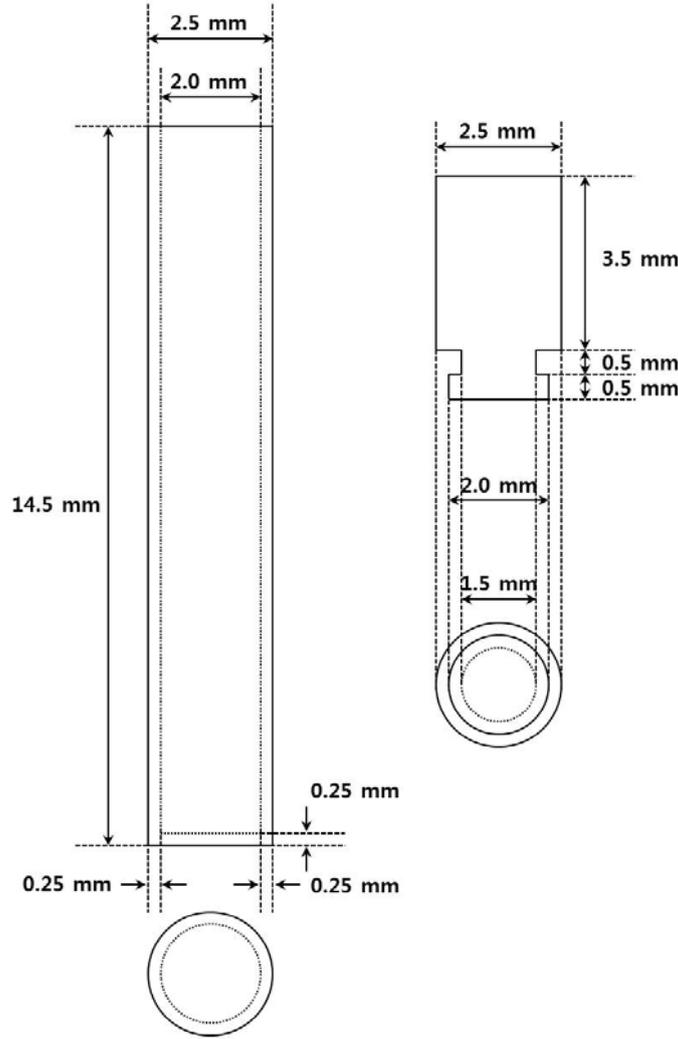


Fig. 1. Schematic drawing of Al capsule.

나. 외장 알루미늄 튜브 및 캡슐

현재 사용하고 있는 외장 튜브는 알루미늄 튜브로 Goodfellow사에서 제작한 AL017150/2 모델을 사용하고 있다. Aluminium/Magnesium (Al97/Mg3), 외경 0.75 mm, 내경 0.55 mm의 0.1 mm 두께를 갖는 튜브로 길이 10 mm~12 mm 사이로 cutting을 하여 사용한다. 튜브의 양쪽 끝을 마감하기 위하여 사용되는 알루미늄 와이어는 같은 회사 제품의 AL0055160/3 모델을 사용하고 있다. 와이어의 성분은 Aluminium/Silicon (Al99/Si1)으로 직경 0.5 mm의 것을 10 mm 길이로 cutting하여 사용하고 있다. 이들 역시 메탄올과 아세톤으로 반복하여 세척해서 사용한다.

현재 제작되어 있는 알루미늄 캡슐의 도식도는 Fig. 1과 같으며 고순도의 알루미늄을 사용한다. Fig. 1과 같이 준비된 알루미늄 캡슐은 메탄올과 아세톤을 이용하여 세척을 수행한다. 알루미늄 캡슐의 경우는 제작 시에 생긴 알루미늄 가루들이 남아 있지 않도록 세척 작업을 반복하

여 수행해 주며 알루미늄 가루가 완전히 제거되었을 때 아세톤을 이용하여 최종 세척을 완료하고 진공 오븐에 완전히 건조 시켜 준다.

다. 시편 제작

준비된 알루미늄 튜브, 알루미늄 와이어를 이용하여, 각각의 시편을 넣어 조립하여 제작한다. 시편을 고정하기 위하여 알루미늄 튜브 안에 시편을 넣고, 알루미늄 와이어로 양 끝단을 봉입하여 시편이 빠지는 것을 방지한다. 제작할 시에 각각의 시편의 질량을 1 μ g까지 측정 가능한 저울을 이용하여 측정, 기록한다. 시편을 넣은 알루미늄 튜브를 다시 알루미늄 조사 캡슐에 넣고 밀봉하고 시편의 오염을 최소화하기 위하여 최종적으로 폴리에틸렌으로 제작된 외장 튜브에 넣은 후 라벨링(구별 가능한 표식)을 하여 시편 제작을 마무리한다. Fig. 2는 외장 튜브, 알루미늄 캡슐, 알루미늄 튜브, fluence monitor 시편을 보여 준다.

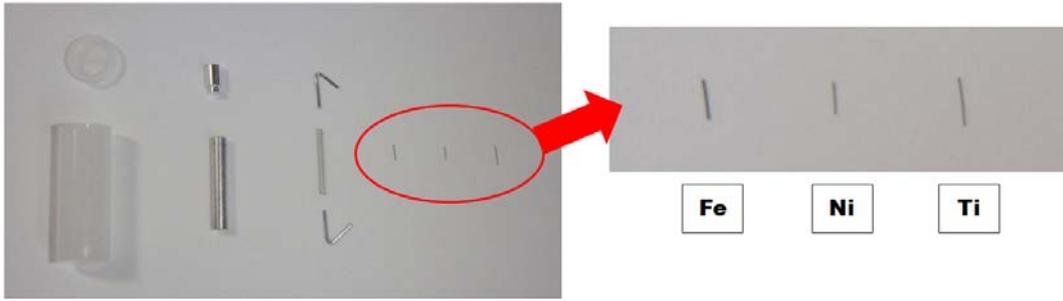


Fig. 2. External tube, Al capsule, Al tube & wire, F/M samples.



Fig. 3. The mounted F/M sample to perform the experiments in HANARO research. (red circle in figure)

라. 하나로 조사 조건

본 연구에서 수행한 하나로에서의 중성자 조사 실험에 사용된 시편은 총 5개 set의 15개 시편이다. 조사 시편은 5개의 stage로 구성되며, 각 stage에 하나씩의 F/M 시편을 장착하였다. F/M의 경우 원자로 내부에서 중성자 flux에 영향을 주지 않는 범위에서 측정을 수행해야 하므로 제작해야 하는 크기에 제한을 받게 되며, 또한 다른 조사 시편이 중성자를 조사 받을 경우 정확한 중성자 flux를 산출해야 하기 때문에 이 시편들은 Fig. 3과 같이 장착된다.

원자로를 이용한 중성자 조사 실험은 연구용 원자로인 하나로 OR5공에서 수행되었으며, 중성자의 조사 시간은 2010년 2월 19일부터 2010년 3월 21일까지 25.46일간 조사되었고, 조사된 시편은 140일 간의 냉각 기간을 거친 후에 해체하였다. 중성자 조사시의 하나로 원자로의 출력은 30 MW 이며, SAND-II 구동을 위한 input data를 위해 사용한 각 위치별 중성자 flux 및 조사량은 Fig. 4와 같으며, 조사 기간 중의 특이사항으로는 조사 중 4회의 불시

정지가 있었다.

3. 결과

가. Fluence monitor 시편의 질량 측정

Fluence monitor 시편을 조사 전과 조사 후 질량을 각각 측정한다. 최소 측정 단위가 μg 까지 측정 가능한 저울을 이용하여 각각의 시편의 질량을 측정하여, 조사 전의 시편과 조사 후의 시편을 각각 매칭 한다. 매회 측정 시 zero-calibration을 수행하고 질량을 측정하였으며, 그 결과값은 Table 4와 같다. 결과를 보면 알 수 있듯이 측정상의 미세한 오차를 제외한 조사 전후 질량에는 큰 차이가 없다는 것을 확인할 수 있다. 측정상의 미세한 오차를 가져온 이유는 시편 조사시 산화가 이루어 졌을 경우가 있으며, 또한 질량 측정시에 기술상의 오차가 발생한 이유가 가장 크다.

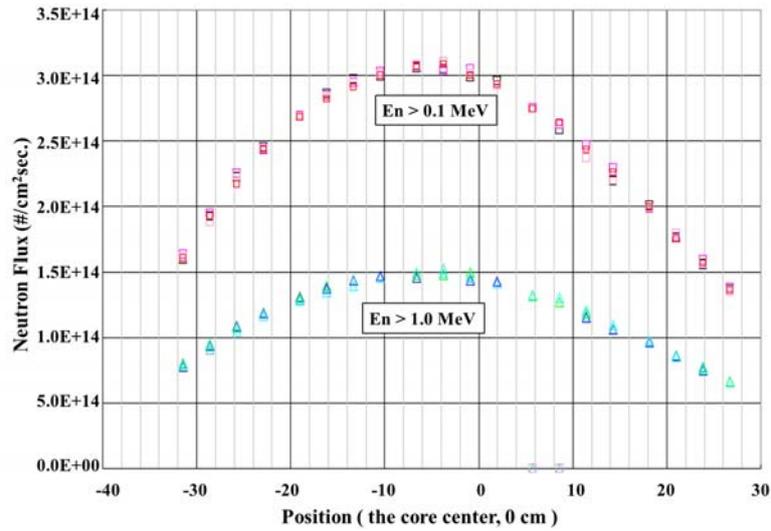


Fig. 4. Fast Neutron flux at sample.(Location : 450 mm)

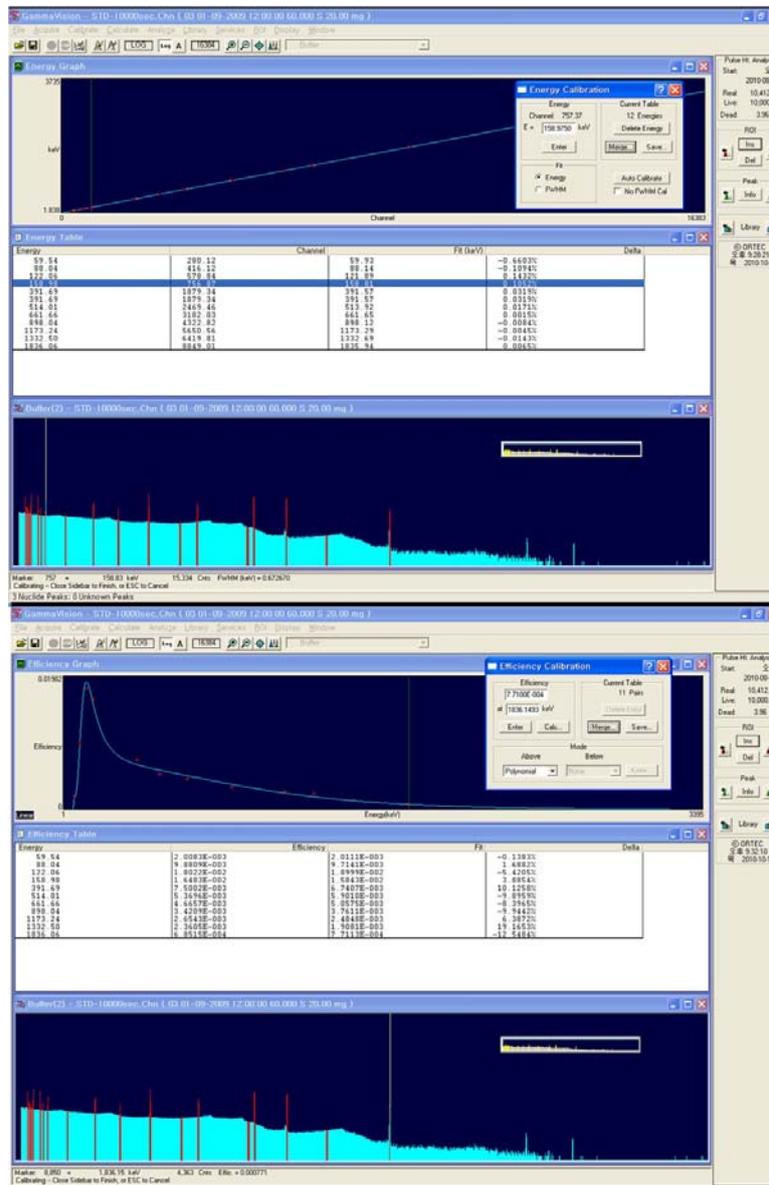


Fig. 5. Energy calibration and efficiency curve for multi-nuclide standard source.

Table 4. Mass Measurement of Fluence Monitor Samples.

시료 No.	조사전 (단위:mg)	조사후 (단위:mg)	질량차 (단위:mg)	시료명
1-1	0.131	0.146	0.015	Ni
1-2	0.167	0.176	0.009	Ti
1-3	0.152	0.159	0.007	Fe
2-1	0.169	0.171	0.002	Ti
2-2	0.224	0.225	0.001	Fe
2-3	0.189	0.192	0.003	Ni
3-1	0.173	0.175	0.002	Ti
3-2	0.193	0.197	0.004	Fe
3-3	0.172	0.171	0.001	Ni
4-1	0.179	0.180	0.001	Ti
4-2	0.186	0.189	0.003	Fe
4-3	0.141	0.140	0.001	Ni
5-1	0.168	0.170	0.002	Ti
5-2	0.209	0.210	0.001	Fe
5-3	0.145	0.145	0	Ni

나. 감마선 스펙트럼 분석

본 연구에서는 GammaVision program을 사용하여 조사 후 시편에서 방출하는 감마선에 대한 분석을 수행하였다. Gamma ray 측정값은 각 동위원소의 평균값을 사용하여 계산하였다. Gamma spectra는 High purity Germanium (HPGe) 검출기를 사용하여 각각의 시편을 2000~3000 초씩 일정한 시간동안 측정하였다.

각 시편들에서 방출되는 감마선의 identify를 위하여 Eckert & Ziegler Isotope Products의 복합 표준 선원을 이용하여 에너지와 efficiency에 대한 calibration을 수행한다. 이를 이용하여 각 시편의 에너지에 해당하는 방사화 된 성분과 각각의 counts를 계산한다. 분석시에 사용된 calibration용 선원으로는 59.5412 keV의 감마선을 방출하는 ²⁴¹Am, 감마선 661.657 keV의 ¹³⁷Cs, 1173.237 keV, 1332.501 keV ⁶⁰Co 등 총 12개의 감마선 에너지 영역의 9개를 사용하였다.

측정된 calibration 선원의 데이터를 바탕으로 하여 Fig. 5와 같이 각 F/M 시편의 에너지 calibration과 efficiency curve를 구하였다. 해체된 고속 중성자 측정용 시편에서 방출되는 핵종은 ⁵⁸Co(810.78, 863.96 & 1674.73 keV), ⁶⁰Co(1173.24 & 1332.5 keV), ⁴⁶Sc(889.28 & 1120.55 keV), ⁵⁹Fe(142.65, 192.35, 334.8, 1099.25 & 1291.6 keV), ⁵⁴Mn(834.85 keV)의 감마선 방출핵종이다. 이 방법으로 측정된 감마선 데이터는 Table 5와 같다.

Table 5. Fluence Monitor Gamma ray Measurements Data.

Sample	Nuclide	Activity(Bq)	Mean Activity (Bq)
1-1 (Ni)	⁵⁸ Co	47003.99	47003.99
1-2 (Ti)	⁴⁶ Sc	870.90	937.45
		1004.00	
1-3 (Fe)	⁵⁹ Fe	12142.33	13030.24
		13918.14	
	⁵⁴ Mn	2915.16	2915.16
2-1 (Ti)	⁴⁶ Sc	2270.25	2424.63
		2579.00	
2-2 (Fe)	⁵⁹ Fe	29964.57	32363.62
		34762.66	
	⁵⁴ Mn	8149.07	8149.07
2-3 (Ni)	⁵⁸ Co	116528.36	116528.36
3-1 (Ti)	⁴⁶ Sc	2824.00	3044.56
		3265.11	
3-2 (Fe)	⁵⁹ Fe	29826.07	32188.73
		34551.39	
	⁵⁴ Mn	8226.87	8226.87
3-3 (Ni)	⁵⁸ Co	101211.61	101211.61
4-1 (Ti)	⁴⁶ Sc	3778.58	4049.81
		4321.04	
4-2 (Fe)	⁵⁹ Fe	39492.48	42805.53
		46118.58	
	⁵⁴ Mn	10985.03	10985.03
4-3 (Ni)	⁵⁸ Co	118346.24	118346.24
5-1 (Ti)	⁴⁶ Sc	3083.49	3290.32
		3497.14	
5-2 (Fe)	⁵⁹ Fe	39237.80	42484.79
		45731.77	
	⁵⁴ Mn	10707.97	10707.97
5-3 (Ni)	⁵⁸ Co	79705.19	79705.19

Table 6. Fluence Monitor Sample and Stage Matching.

Sample labeling	Stage	Height
1-1, 1-2, 1-3	E stage	27.25
2-1, 2-2, 2-3	D stage	14.85
3-1, 3-2, 3-3	C stage	2.45
4-1, 4-2, 4-3	B stage	-9.95
5-1, 5-2, 5-3	A stage	-22.35

다. SAND-II code 분석

위에서 측정된 감마선 자료와 F/M 시편의 질량, 중성자 조사 시간 및 냉각 시간 등을 고려하여 각 시편의 반응을 계산한다. 앞서 측정된 시편들에 대한 방사능 정보가 조사량 평가에 기초가 된다. 측정된 방사능을 바탕으로 포화방사능 (saturation activity)이 계산된다. 포화방사

사능은 해당 핵종의 중성자 방사화에 의한 생성율과 방사성 붕괴 및 중성자 반응에 의한 손실률이 같은 정상 상태 (steady-state)를 가정한 단위시간당 붕괴수를 나타낸다. 계산하는 식은 아래와 같다.

$$A_s = \frac{A \exp(\lambda t_w)}{(1 - \exp[-\lambda t_i])} \quad (1)$$

- 여기서,
- A_s : 포화방사능
- A : 계측된 방사능
- λ : 감쇠계수(decay constant)
- t_w : 조사시험 후 계측될 때 까지 경과한 시간
- t_i : 조사시험이 수행된 시간

포화방사능으로부터 다음과 같이 반응율(reaction rate)을 구할 수 있다.

$$R_s = A_s / N_0 \quad (2)$$

- 여기서,
- R_s : 반응율
- N_0 : 반응핵종의 원자수

여기서 각 시편 물질에 대한 동위원소 비는 시편을 취급한 업체에서 제공하는 시편의 순도 정보를 이용하였으며, 각 물질의 질량을 측정 후 natural material의 abundance를 이용하여 구하였다. 시편으로 사용한 natural Fe 중 ^{54}Fe abundance 5.8% (0.058), ^{58}Fe abundance 0.3% (0.003)를 이용, natural Ni 중 ^{58}Ni 의 abundance 68.3%(0.683)를 이용, natural Ti 중 ^{46}Ti 의 abundance 8.3%(0.083)를 이용하여 각각의 Nuclei number를 구하였다.

$$No. of Nuclei = \frac{Avogadro's No. (6.023 \times 10^{23}) \times Abundance \times Mass (g)}{amu} \quad (3)$$

중성자 스펙트럼 수정 프로그램으로 사용되는 SAND-II 전산코드를 이용하여 위의 식으로 계산된 반응율과 MCNP에 의해 계산된 스펙트럼을 입력하면, 입력된 정보에 따라 MCNP로 계산된 스펙트럼이 수정되고, 이에 따른 중성자속이 출력된다. 수행되어 나온 결과값을 이용하여 total 플루언스 값과 1 MeV 이상의 에너지 영역에서의 플루언스 값을 사용된 F/M의 반응의 종류에 따른 차이점에 대하여 비교 분석을 수행하였다. 각 F/M 캡슐과 조사공의 장착 위치에 대한 매칭은 Table 6과 같다. Fig. 6은 SAND-II 분석을 수행한 결과로 MCNP 전산모사 결과와 SAND-II 코드를 이용하여 unfolding한 결과를 보여준다.

본 연구에서는 $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$, $^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$ 반응을 이용하여 SAND-II 코드를 수행한 2 foil 방식, $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$, $^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$, $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$ 반응을 이용한 3 foil 방식과 $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$, $^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$, $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$, $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ 반응을 이용한 4 foil 방식의 3가지로 분석을 수행하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각 2 foil, 3 foil, 4 foil 방식으로 SAND-II 코드 분석을 수행한 결과값의 to-

tal 플루언스 값과 1 MeV이상에서의 플루언스 값을 비교한 평가 결과표이다.

4. 결론

본 연구에서는 하나로 조사공에서의 중성자 플루언스에 대하여 데이터 분석을 통하여 노심에서의 위치별 플루언스 분포를 얻었다. F/M 시편을 SAND-II 코드를 이용하여 데이터 분석을 하였을 때의 결과는 Fig. 6과 Fig. 7과 같다. Fig. 6을 보면 알 수 있듯이 F/M이 장착된 위치 별 계산값의 결과로는 B stage (Height: -9.95)에서 중성자 조사량이 가장 많은 것으로 분석되었다. 또한 Fig. 7에서와 같이 분석 방식에서는 2 foil 방식과 3 foil 방식으로 분석을 수행하였을 때, 4 foil 방식을 사용하였을 경우에 비해 오차의 범위가 줄어들었으며, 4 foil 방식을 이용하여 분석을 수행하였을 경우 1 MeV 이상에서 2, 3 foil 방식과 다르게 위치에 따른 중성자 플루언스의 경향성이 깨지는 결과가 나오는 것을 확인하였다.

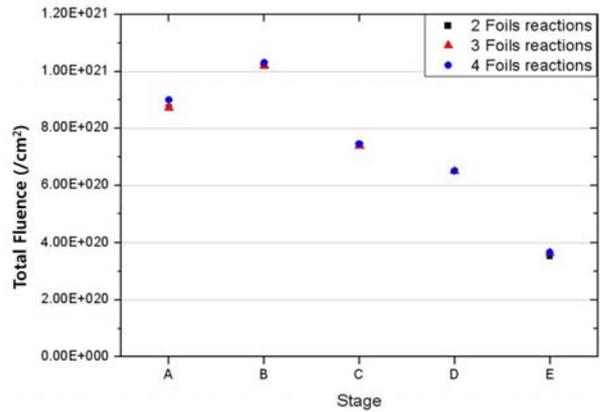


Fig. 6. Comparison of SAND-II evaluation results for total fluence.

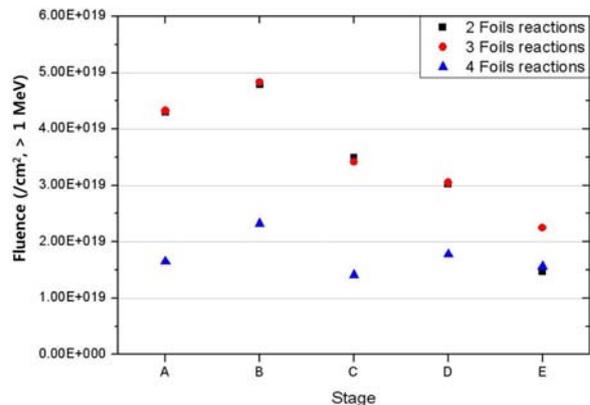


Fig. 7. Comparison of SAND-II evaluation results more than 1 MeV.

SAND-II를 이용한 전체적인 분석 결과값은 MCNP 결과값보다는 반응률을 계산한 결과값에 대하여 더 큰 영향을 받는다. 따라서 위의 분석 결과는 4 foil 방식에서 추

가적으로 입력된 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ 의 반응 또한 고속중성자에 대한 검출을 위한 것으로 이 반응에 대한 반응률 계산에서 오차가 발생하여 1 MeV 이상의 결과값에서 오차가 발생한 것으로 보인다. 반응률 계산에서 발생할 수 있는 오차는 반응률 계산 시 입력해 주는 감마선측정 데이터나 질량 측정 등에서 발생한 오차에서 기인한 것으로 판단된다. 정확한 분석을 위해서는 이러한 측정시의 오차를 줄이는 것이 중요하다.

또한, Ni의 경우 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ 반응생성물인 ^{58}Co 이 열중성자와 반응하여 thermal neutron burn-out되기 때문에 분석 과정에서 적절한 보정계수를 고려해주어야 한다. 하나로의 경우 열중성자 flux가 약 1×10^{14} n/cm²-sec이므로 이에 해당하는 보정계수를 계산하여야 한다. 금번의 연구에서는 보정계수를 계산하지 않고 분석을 수행하여 오차가 발생하였다고 판단된다. 현재 중성자 플루언스를 분석하기 위하여 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ 의 반응을 이용한 4 foil 방식에 대해서는 배제를 하고 있으며, 현재는 $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$, $^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$ 2가지 반응만을 이용하여 조사량평가를 수행하고 결과를 제공하고 있다. 차후에는 열중성자에 대한 보정계수를 계산하여 결과값을 보정해 줌으로써 분석 방법을 개선할 것이다. 계산된 보정 계수는 Fig. 8과 같다. 분석한 시편 중에서는 중간에너지 이하의 중성자 영역의 검출로는 $^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$ 반응만이 사용되고 있으므로 열중성자 및 중간에너지 중성자 영역의 스펙트럼 및 조사량에 대한 정확도는 매우 떨어질 것으로 판단되며, 정확한 스펙트럼 및 조사량을 얻기 위하여서는 향후 4 foil 방식뿐만 아니라 더 많은 핵종을 이용하여 분석이 수행되어야 할 것으로 예상된다.

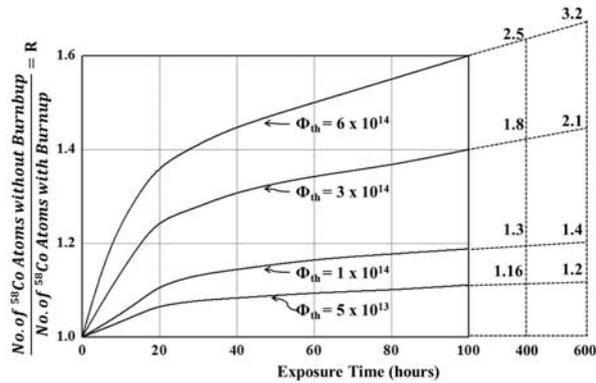


Fig. 8. Thermal neutron burn-out correction factor of ^{58}Co .

SAND-II 코드 구동을 위한 데이터를 만들 경우 MCNP 데이터에 의존하기 때문에 이에 대한 오차를 줄이는 것이 중요하다. 향후의 연구에서는 F/M 시편이 장착된 5개의 stage에 대한 정확한 위치를 반영한 MCNP 데이터를 이용한 SAND-II 분석이 필요할 것이다. 시편에 대한 질량의 측정이나 감마선 측정 등에서도 발생할 수 있는 오차를 줄이는 것 또한 향후 연구 수행 과정 중 분석의 오차를 줄여 분석 결과값에 대한 신뢰성을 향상 시킬 수 있는 방안이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 원자력기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다. (20110018425)

참고문헌

1. Knoll GF. Radiation Detection and measurement, 3rd ed. NewYork; John Willey and Sons, 1999.
2. 유춘성, 박종호. 노외 감시자를 이용한 압력용기 중성자 조사량 결정. 대한방사선방어학회지 2007;32(4): 158-167.
3. 규제지침 6.3 원자로압력용기 속중성자 조사량의 계산 및 측정.
4. Weinberg AM and Wigner EP. The Physical Theory of Neutron Chain Reactors. Chicago; The University of Chicago Press, 1958:707.
5. Beckurts KH and Wirtz K. Neutron Physics. Berlin; Spriger-Verlag Berlin, 1964.
6. Kucera J, Frana J, Horak Z. Calibration of the Reactor Neutron Spectrum for The ko-NAA Standardization Using Several Approaches. Czechoslovak Journal of Physics 1999;49(S1):295-301.
7. Meftah B, Zidi T, Bousbia-Salah A. Neutron flux optimization in irradiation channels at NUR research reactor. Annals of Nuclear Energy 2006; 33(14-15):1164-1175.
8. ASTM E 844. Standard Guide for Sensor Set Design and Irradiation for Reactor Surveillance. E706 (IIC).

Neutron fluence measurement at HANARO using fluence monitor method

Seung Kyu Lee^{*}, Kwang Ho Jo^{*}, Kee Nam Choo[†], Jin Suk Park[†], and Yong Kyun Kim^{*}

^{*}Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, [†]Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract - The neutron fluence measurement and evaluation technology is very important for material irradiation test. The most essential technology in this study is the neutron irradiation evaluation method using a fluence monitor. The fluence monitors were fabricated with metal wires of the purity $\geq 99.9\%$, whose dimensions were 0.1mm diameter, about 3 mm length, and around 150-200 μg mass range. Three wire samples (Fe, Ni, Ti) were prepared for one irradiation aluminum capsule. Five capsules were irradiated in the OR5 hole of the HANARO reactor at 30 MW power for about 25 days. After irradiation tests, radiation activities were measured with the high purity germanium (HPGe) detector. The reaction rates were calculated by using the measured radiation activity data, and then neutron fluence were obtained from the reaction rates and the weighted neutron cross section with calculated neutron spectrum at the fluence monitor position.

Keywords : Fluence monitor, Neutron fluence, SAND-II, HANARO