

냉중성자 삼축분광장치의 차폐능 최적화 설계 및 선량 측정

류지명, 홍광표, 박승일, 최영현, 이기홍
한국원자력연구원

2013년 12월 10일 접수 / 2014년 1월 8일 1차 수정 / 2014년 1월 10일 채택

삼축분광장치는 물질을 이루고 있는 자성 원소들의 거동, 즉 스핀 동역학을 측정하는데 적합한 장치로, 연구용 원자로 ‘하나로’에는 국내 유일의 냉중성자 삼축분광장치가 최근 설치되었다. 삼축분광장치는 중성자 빔을 제어하는 중성자 광학 부품과 중성자 빔으로 인해 발생하는 방사선에 대한 차폐체로 이루어지며 이러한 부품은 수십 톤 중량의 기계 구조물을 이룬다. 방사선 차폐는 중성자 빔 경로 이외의 방향으로 진행되는 중성자와 감마선을 효과적으로 막아 실험대 잡음을 향상시키는 역할을 하며 구조물 내부의 방사화된 부품으로부터 발생하는 감마선을 차폐하여 장치 이용자의 피폭선량을 최소화한다. 그런데 설치된 냉중성자 삼축분광장치의 차폐체 중 전면부의 고하중으로 인해 장치 운영상 여러 가지 문제점이 발생, 전면 세그먼트 차폐체의 하중을 줄이는 구조개선이 불가피하였다. 이에 MCNPX 모의계산을 통해 냉중성자 삼축분광장치의 차폐체 최적화에 필요한 개선방향을 검토하였다. 상부 차폐체의 폴리에틸렌과 납의 추가 설치를 통해 전면 블록 차폐체 하중을 줄일 수 있는 최적 길이를 확인하였다. 그 결과, 전면 블록 차폐체의 높이 20%가 제거된 경우, 구조변경 전 대비 차폐체 상부에서 70% 수준의 감마선속이 나타남을 확인하였다. 하지만 높이를 줄일수록 전면 블록 차폐체의 하중을 줄일 수 있기 때문에, 차폐블록을 추가 제거하고 이에 대한 차폐능을 보상해 줄 방안으로 상부 납 차폐체의 위치 변화에 따른 중성자속과 감마선속을 예측해 보았다. 전면 블록 차폐체 높이의 35% 제거하고 상부 납 차폐체를 최하단부에서 10 cm에 설치한 경우, 전면 블록 차폐체 상부에서 감마선속이 각각 25%, 18% 증가하였다. 증가한 감마선속의 영향을 파악하기 위해 MCNPX 모의계산을 통해 공간의 감마선속 분포를 가시화하였다. 증가한 감마선속은 상부로 향하는 방향성을 띄며 이동하면서 소멸하여 검출기에 이르기 전에 낮아져 검출기와 실험자의 위치에 영향을 끼칠 수 없다고 판단하였다. 그래서 중성자속 및 감마선속과 고하중 문제를 동시에 해결할 수 있는 최적화 조건으로 차폐체 높이가 35% 제거되고 상부 납 차폐체가 10 cm 위치에 있는 경우를 선정하였다. 이 결과를 바탕으로 구조개선 작업을 실시하였으며 열형광선량계를 이용하여 콘크리트 차폐블록 외부에서 중성자와 감마선량을 측정하였다. 측정된 중성자 선량은 $0.21 \mu\text{Svhr}^{-1}$, 감마선량은 $3.69 \mu\text{Svhr}^{-1}$ 로 설계기준을 만족하였으며 피폭으로부터 실험자의 안전성을 확인하였다.

중심어: 냉중성자 삼축분광장치, MCNPX, 차폐체, 중성자속, 감마선속, 선량

1. 서론

중성자는 전기적으로 중성인 특성으로 인해 강력한 투과력을 가지므로 물질 연구에 다양하게 사용되고 있다. 특히 중성자는 자기적인 성질을 가지고 있고, 그 에너지와 파장이 물질이 가지고 있는 에너지 준위나 원자 사이의 거리와 유사하기 때문에, 중성자 산란 방법을 통해 물질의 자기 구조와 스핀 동역학을 측정하는데 이용된다. 이러한 중성자 산란 방법을 최초로 구현한 것은 캐나다의 버트람 브록하우스(Bertram N. Brockhouse)로, 그는 삼축분광장치(Triple-Axis Spectrometer)를 고안해 초크리버(Chalk River)의 NRU (National Research Universal) 연구용 원자로에 설치하였다.

연구용 원자로에 설치, 다양한 물성 연구의 가능성을 열었으며, 이 공로로 1994년 노벨 물리학상을 미국의 클리프드 셸(Clifford Shull)과 공동 수상하였다[1]. 삼축분광장치는 강력한 연구용 원자로를 보유한 대부분의 국가에서 설치, 운용하고 있으며 국내에서는 최초로 2012년 열출력 30 MW의 연구용 원자로 ‘하나로’에 냉중성자 삼축분광장치를 설치하였다[2].

‘하나로’의 중수 반사체 내부에는 액체수소로 채워진 냉중성자원(Cold Neutron Source)이 설치되어 있다. 중성자는 20 K의 온도로 유지되는 액체수소에 의해 에너지를 잃고 수 meV 수준의 에너지를 가진 냉중성자로 변환된다. 이후 냉중성자는 니켈(Ni) 또는 니켈과 티타늄(Ni/Ti) 코팅이 되어 있는 진공의 중성자 유도관(Neutron Guide)을 타고 수십 미터를 이동, 중성자 산란장치에 공

교신저자: 홍광표, kphong1@kaeri.re.kr
대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111 한국원자력연구원

급된다. 냉중성자 삼축분광장치는 여러 가닥의 중성자 유도관 중에서도 5 cm 폭과 15 cm 높이를 가진 5번 냉중성자 유도관(CG5)의 끝에 설치되었다[3]. 하나로의 유도관은 통상 곡선 구간을 가지고 있으며, 이 구간에서 짧은 파장을 가진 열중성자나 고에너지 중성자와 감마선이 먼저 걸러진다.

냉중성자 삼축분광장치의 경우 유도관이 끝나는 지점에 단색기(monochromator)가 설치되어 브래그 회절법칙(Bragg Diffraction Law)에 의해 특정한 파장의 중성자만을 반사해서 연구 대상 물질의 시료로 보내준다. 이 때 중성자 유도관을 빠져나온 중성자 빔이 흑연(graphite)과 실리콘으로 만들어진 단색기 결정 구조물 중심에 입사되고, 반사된 중성자 빔이 시료까지 공기 중에 노출되는 직진빔을 이루므로 이로 인해 주변 방사선량은 높아지게 된다. 따라서 중성자 검출기의 신호대 잡음비를 높이고, 방사선으로부터 실험자의 안전을 확보하기 위해 단색기부터 빔 인출부에 해당하는 장치 전면부에는 반원형으로 설치된 차폐블록이 설치되어 있다. 이 전면 블록 차폐체는 봉소가 포함된 폴리에틸렌(Borated polyethylene) 블록과 납 블록으로 만들어졌으며, 최단의 빔 진행 경로를 만들어주기 위해 썰기 형태로 분할되어 세그먼트(segment) 차폐체라고도 불린다.

그런데 최초의 설계 시에 고하중의 차폐체에 대한 지지 구조물의 허용응력이 충분히 고려되지 않아, 본체 하단부의 콘크리트 원형 차폐체가 아래로 처지는 현상이 발생하였고, 장치의 구동 문제로까지 발전하여 전면부의 차폐블록 하중을 줄이는 구조개선 작업이 필요하였다.

이에 이 논문에서는 몬테카를로(Monte Carlo) 방법이 적용된 MCNPX 모의계산을 통해 전면 블록 차폐체의 무게를 줄이면서 구조변경 전의 수준으로 중성자속과 감마선속을 유지할 수 있는 최적조건을 찾아보았다[4]. 또한 검토내용을 토대로 하여 장치의 차폐체 구조를 변경하였으며 최적화 개선 이후에 발생하는 방사선량이 설계기준치에 만족하는지 열형광선량계(Thermo-Luminescence Dosimeter; TLD)를 이용해 측정하였다.

2. 재료와 방법

2.1. 냉중성자 삼축분광장치 구조

하나로(HANARO, High-flux Advanced Neutron Application Reactor)에서 발생한 냉중성자는 ST2 수평공과 연결된 5개의 유도관 가이드(CG1~CG5)를 통해 냉중성자 실험동에 설치되어 있는 중성자 산란장치로 전달된다. 그 중 곡률반경 1500 m로 굽은 구간이 26 m 가량으로 이루어진 CG5 중성자 유도관 끝단에 냉중성자 삼축분광장치가 그림 1과 같이 설치되어 있다[5].

파장이 짧은 고에너지 중성자를 제거하고 원하는 파장 영역만 통과시키는 파장 선별기 역할을 하는 NVS(Neutron Velocity Selector; HOF(High Order Filter))가 유도관 중간에 설치되어 있고, 중성자를 잘 흡수하는 물질이 부착되어 있는 회전날개를 구동시켜 회전속도(rpm)

에 따라 0.3 MeV에서 17.3 MeV까지 중성자 에너지를 선택할 수 있어 다양한 파장의 중성자를 이용한 실험이 가능하다.

냉중성자 삼축분광장치의 첫 번째 축인 본체 중앙의 단색기는 NVS에서 선택된 파장 대역을 한 번 더 선별하고 집속시켜주는 역할을 한다. 또한 중성자를 입사각도에 따라 반사시킬 수 있어, 실험자가 원하는 중성자 파장을 두 번째 축인 시료 테이블(Sample Table)에 있는 시료에 조사시킬 수 있다. 시료에서 산란된 중성자는 세 번째 축인 분석기(analyzer)로 이동하게 되며, 분석기에서 한 번 더 선별된 중성자는 검출기(detector)를 통해 시료의 물성에 대한 정보를 얻을 수 있다.

냉중성자 삼축분광장치 전면에는 썰기 모양의 전면 블록 차폐체, 17개의 블록이 공압 실린더에 연결되어 있다. 단색기의 반사 각도에 따라 차폐블록 아래로 중성자 빔 가이드가 이동할 수 있도록 차폐블록이 공압 실린더에 의해 위로 이동하고, 빔 가이드가 지나가면 자동으로 내려오도록 되어있어 샘플로 향하는 중성자의 출구를 확보해 준다. 위로 이동된 차폐블록으로 인해 약해진 차폐를 보상해 줄 수 있도록 중성자 빔 가이드를 따라 움직이는 이동식 곡면 차폐체를 설치하였다.

2.2. 중성자 선원과 차폐체 구성요소

MCNPX 모의계산의 입력값 중 결과에 가장 큰 영향을 미치는 것은 중성자 선원이다. 단색기에서 중성자 빔이 정면으로 이동할 수 있도록 입사각을 45도로 설정하였고, 입사각에 따라 0.474 nm의 중성자 파장이 선별되며, 파장에 맞춰 NVS가 구동된다. 연구로에서 냉중성자 유도관을 통해 이동하고 NVS를 통과하여 단색기까지 다다르는 과정을 McStas를 이용하여 모의 계산하였다[6]. McStas는 MCNP와 같이 몬테카를로 방법을 기반으로 하며 중성자의 수송과 intensity 예측에 용이한 프로그램이다.

하나로의 최대 출력인 열출력 30 MW로 가동될 때 파장 0.474 nm의 냉중성자 Intensity는 단색기 위치에서 약 $3.7 \times 10^9 \text{ nsec}^{-1}$ 가 된다[7]. Intensity에 대한 54군의 중성자 에너지 스펙트럼을 얻었으며, 그 중 0.1%보다 적은 부분을 차지하는 에너지는 제외하여 총 36군의 에너지만 선정하였고 그 값은 표 1과 같다. 에너지는 0.15 MeV 간격으로 결과를 얻었으며 표에 표시된 에너지 값은 대푯값으로 전후 0.075 MeV 내의 중성자 분포를 표시하였다.

가이드를 따라 수송된 중성자 중 원하는 파장의 중성자 일부는 단색기에서 반사되어 시료로 이동되지만 반사되지 못한 중성자나 NVS에서 걸러지지 못한 원하지 않는 파장의 중성자는 단색기를 투과하거나 전방향으로 산란하여 차폐체 내부에서 소멸된다. 이러한 현상을 고려하고 보수적인 차폐체 설계를 위해 중성자 선원을 그림 2의 본체 중앙 단색기 위치에서 가이드의 면적(5 cm×15 cm)과 동일하게 설정하고 그림 1의 좌표 방향과 같이 삼축분광장치의 후방을 제외한 -X, X 방향과 -Y방향, -Z, Z 방향으로 분포를 동일하게 설정하였다. 원하는 지점에서 F4 tally를 사용하고 2×10^9 개의 입자를 수송시켜 결과를 얻었으며 통계오차는 모든 경우에 있어서 5% 이하였다.

Table 1. Energy Distribution of Cold Neutron at Monochromator by McStas.

Energy [meV]	Distribution [%]	Energy [meV]	Distribution [%]	Energy [meV]	Distribution [%]
2,025	0.1	3,825	6.2	5,625	1.6
2,175	0.4	3,975	5.7	5,775	1.3
2,325	1.1	4,125	5.2	5,925	1.1
2,475	2.1	4,275	4.8	6,075	0.9
2,625	3.1	4,425	4.2	6,225	0.7
2,775	4.0	4,575	3.9	6,375	0.6
2,925	4.8	4,725	3.4	6,525	0.5
3,075	5.5	4,875	3.1	6,675	0.3
3,225	6.0	2,025	2.7	6,825	0.2
3,375	6.4	5,175	2.4	6,975	0.2
3,525	6.6	5,325	2.1	7,125	0.1
3,675	6.5	5,475	1.9	7,275	0.1

Table 2. Material Weight Ratio of Heavy Concrete included ¹⁰B 5%.

Material	Weight (%)
¹ H	0.682
¹⁰ B	5.0
C	5.019
¹⁴ N	0.018
¹⁶ O	44.086
²³ Na	0.573
Mg	1.136
²⁷ Al	1.973
Si	14.092
S	0.1173
K	1.246
Ca	20.911
Ti	0.091
Fe	5.0557

Table 3. Material Weight Ratio of Polyethylene included ¹⁰B 5%.

Material	Weight (%)
¹ H	13.57
¹⁰ B	5.0
C	81.43

Table 4. Material Weight Ratio of Air.

Material	Weight (%)
C	0.022
¹⁴ N	76.508
¹⁶ O	23.47

차폐능에 영향을 끼치는 또 다른 인자는 차폐체의 구성요소이다. 연구로에서 냉중성자를 수송하는 유도관은 방사선량이 높아 콘크리트 차폐블록으로 차폐되어 있으며, 삼축분광장치의 대부분의 차폐체도 콘크리트로 이루어져 있다. 그 성분비는 미세하게 각기 다르나 Flux에 큰 영향을 끼치지 않는다고 판단하고 표 2와 같이 붕소를 함유한 중량 콘크리트(Heavy Concrete)로 일괄적으로 설정하였으며 이때 밀도는 3.4 gcm⁻³이다. 차폐체로 사용된 폴리에틸렌은 표 2와 같이 무게비 5%의 붕소를 포함하여 중성자의 차폐 효과를 높일 수 있도록 설정하였으며 그 무게비는 표 3과 같으며 밀도는 0.97 gcm⁻³이다. 실제 사용된 납 차폐체는 견고함을 더하기 위해 안티모니(Sb)를 원자비로 3% 첨가되었으나 소량 첨가로 인한 영향을 무시하고 순수 납으로 설정하였고 공기는 밀도 0.00120479 gcm⁻³이며 표 4와 같은 무게비로 설정하였다[8].

2.3. Flux 계산 위치 및 계산 영역 선정

MCNPX 모의계산 시에 flux 변화를 확인할 위치는 그림 1과 같이 중성자 빔이 지나가는 가이드 상부를 1번 포인트(P1)로 설정하였다. P1는 위로 이동한 전면 블록 차폐체의 부재를 보완해주는 이동식 곡면 차폐체에 대한 효과 확인이 가능한 위치이다. 또한 중성자 빔과 매우 근접해 있으므로 빔에 의한 영향을 받을 가능성이 있는 위치이다. P1에서 우측 방향으로 45도 떨어진 납 차폐체 표면을 2번 포인트(P2)로 설정하였다. 단색기에서 전면 블록 차폐체를 통과하여 나오는 중성자속과 감마선속을 확인할 수 있는 위치이다. P1 아래, 콘크리트 원형 차폐체 하단을 3번 포인트(P3)로 지정하여 중성자가 콘크리트 차폐블록을 통과하면서 나타나는 flux를 확인할 수 있는 위치이다. 빔 가이드의 공간 확보를 위해 위로 이동한 전면 블록 차폐체 상부를 4번 포인트(P4)로 설정하고, P4에서 우측방향으로 45도 떨어진 전면 블록 차폐체 상부에 5번

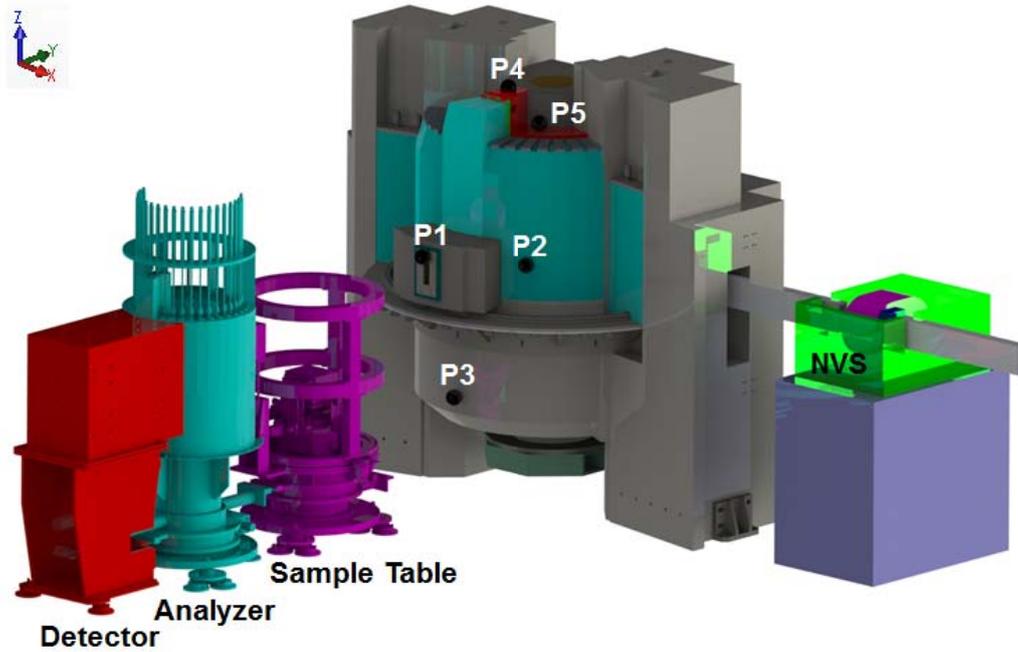


Fig. 1. Geometry of Cold-TAS and positions of NVS and point 1 to 5. (point 1: over guide, point 2: surface of lead rotated by 45 degree from point 1, point 3: surface of bottom concrete, point 4: upper surface of polyethylene at center, point 5: upper surface of polyethylene rotated by 45 degrees from point 4).

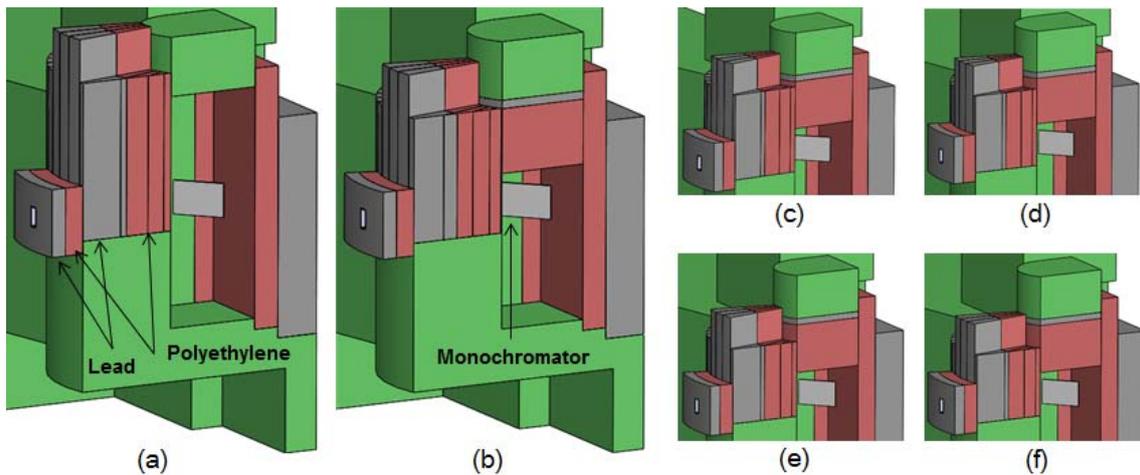


Fig. 2. The monochromator rotated 45 degree (a) polyethylene and lead before change, and shielding block height reduced by (b) 20%, (c) 25%, (d) 30%, (e) 35%, (f) 40%.

포인트(P5)를 설정하였다. 중성자 선원에서 전면과 상부 차폐체를 통과한 중성자속과 감마선속을 확인할 수 있는 위치이다. YZ평면을 기준으로 좌우가 대칭인 구조이므로 P2와 P5의 반대방향도 동일한 값이 나타날 것으로 예상하고 모의계산에서 제외시켰다.

3. 결과와 논의

3.1. 전면 블록 차폐체의 높이 변경에 따른 Flux 변화
삼축분광장치의 본체에는 전면에 위치한 전면 블록 차폐체와 차폐체를 들어 올리는 공압 실린더, 하단의 콘

크리트 원형 차폐체, 이동식 곡면 차폐체, 그리고 주변 기기 구조물 등은 전체 하중이 약 8.6톤으로 예상되며, 그 중 납과 폴리에틸렌으로 구성된 전면 블록 차폐체는 약 4.6톤으로 계산된다. 이러한 차폐체의 하중을 감소시키기 위해 전면 블록 차폐체의 높이를 줄이고 상부 차폐체를 추가하는 방식으로 구조를 변경하였다. 그리고 이러한 구조변경 전후에 따른 중성자속과 감마선속의 변화를 MCNPX를 이용하여 모의계산하고 결과를 비교하였다. 그림 2는 냉중성자 삼축분광장치의 본체를 YZ평면으로 잘라 내부를 도시한 것이다. 빔 유도관을 기준으로 단색기가 45도 회전한 상태로 위치하고 있으며 그림 2(a)는 전면 블록 차폐체의 구조변경 전을 나타낸 것이다. 그림

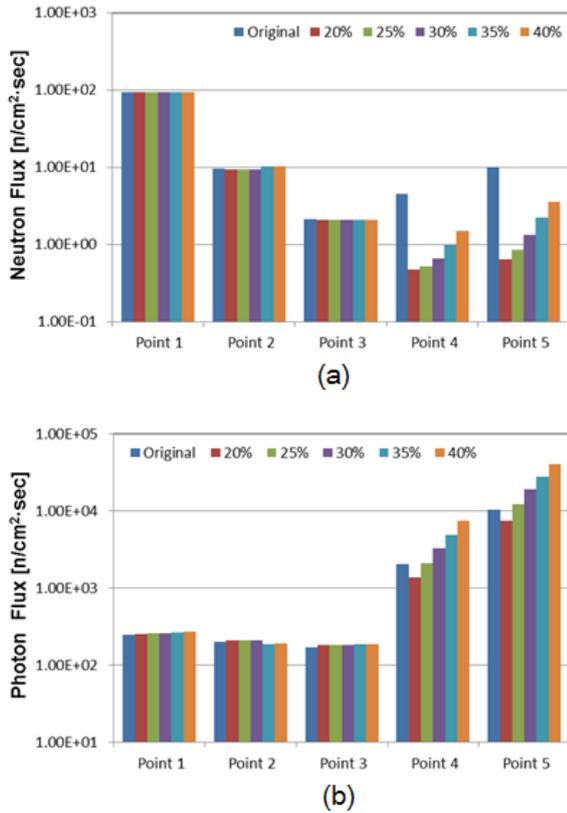


Fig. 3. Flux depended on reduced height of polyethylene and lead (a) neutron, (b) photon.

2(b)부터 (f)까지는 단색기 상부에 5 cm의 납판과 약 40 cm의 폴리에틸렌을 추가하고, 단계적으로 전면부의 납과 폴리에틸렌 차폐블록 높이의 20%, 25%, 30%, 35%, 40%를 줄인 구조를 나타낸 것이다.

각 구조에 따라 선정 위치에서 중성자속과 감마선속의 모의계산 결과는 그림 3과 같다. 중성자속의 경우, P1에서 가장 높게 나타났으며 다음으로 P2가 P1의 1/10수준으로 나타났다. 이는 이동식 곡면 차폐체의 두께 28.5 cm로 52.2 cm인 전면 블록 차폐체보다 얇을 뿐만 아니라 빔과의 거리가 가까워 나타난 현상으로 예상된다. 또한 가이드를 통해 이동한 중성자 중 일부가 전면 블록 납 차폐체를 통해 장치 외부로 이동하여 P1에 영향을 끼친 것으로 예상된다. P3의 중성자속은 구조변경이 없는 P1, P2, P3 중에서 가장 낮은 중성자속을 나타냈으며 P2의 1/5수준이었다. 높이 변경에 따라 P1는 최고 약 1.5% 감소, P3에서는 최고 약 2.2% 감소하였으나 변화량이 적어 중성자속 변화가 없다고 판단하였다. P2에서는 전면 블록 차폐체의 높이를 35% 저감 시 중성자속이 최고 6.9% 상승하였으나 P1의 중성자속에 비해 1/10수준으로 절대적인 증가량은 미미한 것으로 판단하였다. P4, P5에서는 차폐체가 제거될수록 중성자속이 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 가장 짧은 높이인 40%를 줄인 경우, 구조변경 전 대비 P4에서는 66.4% 감소, P5에서는 64.4% 감소하여 어떠한 조건에서도 구조변경 전보다 중성자속이 감소되었다. 이는 전면 블록 차폐체의 높이를 줄이면서

상부에 붕소가 함유된 폴리에틸렌 차폐체를 추가한 것이 중성자 차폐를 강화시킨 효과로 판단된다.

감마선속의 경우, 가이드를 따라 장치의 정면으로 이동하던 감마선이 이동식 곡면 차폐체에서 폴리에틸렌을 통해 차폐되지 못하고 장치 외부로 이동하여 P1, P2, P3에 영향을 끼쳤다. 이동식 곡면 차폐체부터 P2와 P3의 경로에는 차폐체가 존재하지 않아 비슷한 수준의 감마선속을 나타냈으며 P1은 이동식 곡면 차폐체 중 납 차폐체 표면에 위치하고 있어 선원과 먼 거리에 있는 P2, P3와 비슷한 수준으로 나타났다. P1, P2, P3의 감마선속은 구조변경 전에 비해 각각 최고 6.9% 증가, 5.1% 증가, 8.9% 증가하였으나 구조변경 전 P4의 감마선속에 1/10수준이며 증가량은 1/100수준으로 적은 양이 증가하였다. 또한 모든 포인트의 중성자속과 P1, P2, P3의 감마선속은 P4, P5의 감마선속에 비해 1/10에서 1/10000수준으로 flux 변화가 미미하였다. 따라서 구조변경에 따라 가장 큰 flux 변화를 가지며 가장 많은 flux를 나타내는 P4, P5의 감마선속으로 변화를 판단하였다. 감마선속 P4, P5에서는 전면 블록 차폐체의 높이가 줄어들수록 flux가 증가하였다. P4에서 구조변경 전 감마선속을 기준으로 상부 차폐체 보강으로 인해 차폐체 높이가 20% 제거된 경우 32.4% 감소된 반면, 25% 제거된 경우는 4.6% 증가하였다. P5에서는 구조변경 전 감마선속을 기준으로 20% 제거된 경우가 28.1% 감소, 25% 제거된 경우가 18% 증가한 것으로 나타났다.

결과적으로 상부 블록 차폐체를 추가하고 전면 블록 차폐체의 높이를 20% 제거하면 구조변경 전 대비 낮은 flux가 나타난다. 전면 블록 차폐체의 높이를 20% 이상 제거하기 위해서는 추가적인 개선작업이 필요할 것으로 판단된다.

3.2. 상부 납 차폐체 위치에 따른 Flux 변화

하중 제거의 최대화를 위해 상부 차폐체 중에서 납 차폐체를 아래로 이동시키며 감마선속의 변화량을 확인해 보았다. 앞선 검토에 따라 P4, P5의 감마선속이 가장 중요한 부분이라 판단하고 구조변경 전 대비 141%, 171% 상승한 전면 블록 차폐체의 높이가 35% 제거된 조건을 선정하였다. 상부 차폐체의 하단부에는 선원인 중성자를 차폐하기 위해 붕소가 포함된 폴리에틸렌을 두었으며 그림 4와 같이 납 차폐체를 하단에서 30 cm, 20 cm, 10 cm 위치로 배치하며 flux 변화를 확인하였다.

그림 5는 각 경우에 대한 중성자속과 감마선속의 결과이다. 중성자속의 경우 앞서 검토한 전면 블록 차폐체 높이에 따른 flux 결과와 비슷하게 구조변경 전 대비 P1에서는 0.9% 감소, P3에서 2.1% 감소로 큰 변화가 없었으며, P2에서는 구조변경 전 대비 6.9% 상승하였다. P4, P5에서도 각 경우별로 큰 차이 없이 구조변경 전과 비교하여 중성자속이 각각 21.6%, 22.6% 수준으로 나타났다. 납 차폐체 위치변경에 따른 중성자속의 변화는 중성자속에 영향을 끼치는 요인이 변경되지 않아 앞서 검토한 차폐체 높이 35%가 제거된 경우와 매우 유사했다.

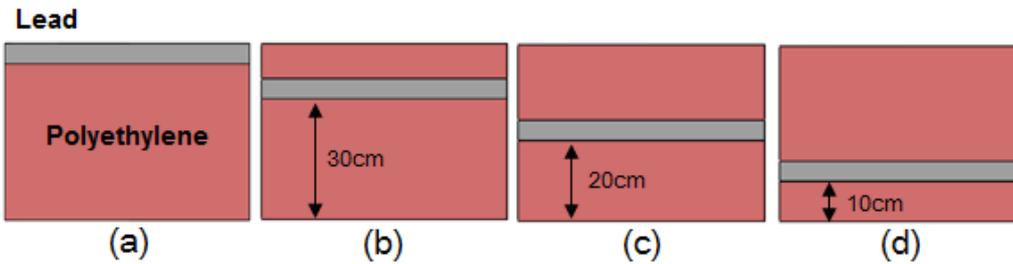


Fig. 4. Position of lead over the monochromator (a) before change, (b) at 30 cm from bottom, (c) at 20 cm from bottom, (d) at 10 cm from bottom.

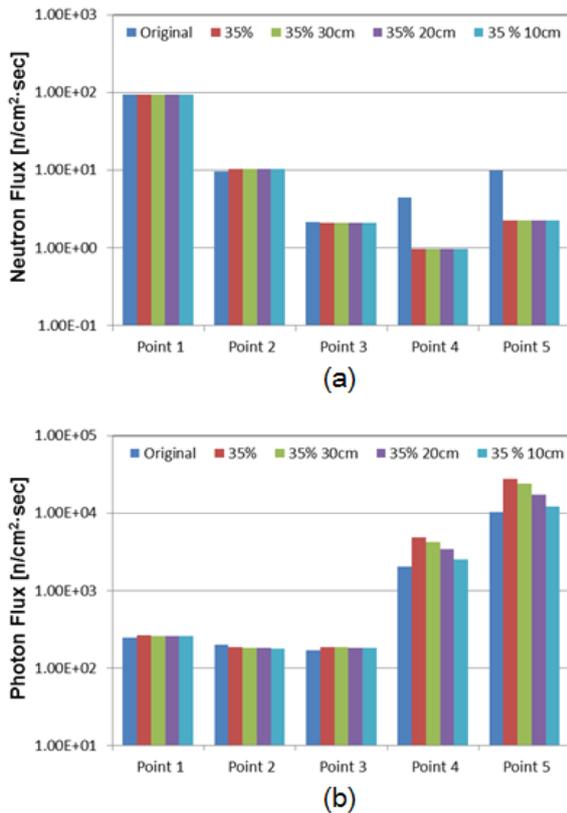


Fig. 5. Flux depended on position of lead over the monochromator (a) neutron, (b) photon.

감마선속의 경우, 납 차폐체가 상부 차폐체 하단에서 10 cm 위치에 있는 경우가 구조변경 전 대비 P1에서 5.1% 증가, P2에서는 10.4%가 감소, P3에서는 7.9% 증가로 다른 조건에 비해 가장 증가율이 낮았다. 그러나 앞서 전면 블록 차폐체 높이 제거에 따른 검토에서와 같이 P4, P5의 감마선속과 비교하여 중성자속과 P1, P2, P3의 감마선속이 1/10에서 1/10000수준으로 낮아 변화가 없다고 판단하였다.

P4, P5에서는 납 차폐체가 아래로 이동할수록 감마선속이 감소하였다. 납 차폐체가 상부 차폐체 하단에서 10 cm 위치에 설치된 경우, 구조변경 전과 비교해 P4에서 25%, P5에서 18% 상승하였다. 구조변경 전 대비 감마선속이 상승하였으나 상부 납 차폐체 위치변경 전과 비교하면 감마선속이 P4, P5에서 각각 116%, 153% 감소하여 증

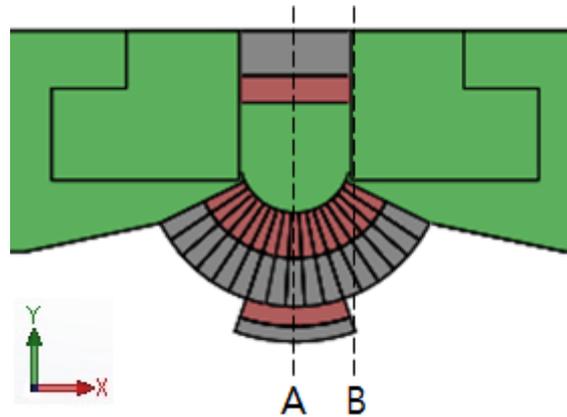


Fig. 6. Y-Z plane position for distribution of photon flux at point 4 and 5.

가량이 약 1/6, 1/10수준으로 낮아졌다. 감마선속의 분포 확인을 통해 증가한 감마선속이 검출기와 차폐블록 외곽에 있는 실험자에게 영향을 끼치지 않는다면 허용할 수 있는 구조변경 조건이 될 것으로 판단된다.

3.3. 감마선속의 분포

P4, P5에서 증가한 감마선속이 검출기에 영향을 끼치는지 확인하기 위해 실험장치가 있는 공간을 구현하고 MCNPX 모의계산을 통해 flux의 분포를 가시화하였다. 중성자 선원은 표 1과 같고 intensity도 앞서 사용한 $3.7 \times 10^9 \text{ sec}^{-1}$ 와 동일하며, 차폐체의 구성요소들도 표 2, 표 3, 표 4와 같다. 그림 6은 삼축분광장치 본체를 위에서 바라본 모습을 묘사하였으며 A위치는 P4가 있는 본체 중앙 지점이고, B위치는 P5가 있는 P4부터 45도 이동된 지점이다. 분해능에 대한 한계성을 감안하여 YZ평면을 4 cm 간격으로 나눠 감마선속을 얻었다. 5×10^7 개의 입자를 수송시켜 가시화 결과를 얻었으며 5개의 포인트에서 감마선속의 통계오차는 5%이하였다. 그림 7은 구조변경 전과 전면 블록 차폐체의 높이 35%를 제거하고 상부 납 차폐체가 하단에서 10 cm 위치에 있는 경우에 대해 감마선속을 가시화 한 결과이다. 최솟값 및 최댓값은 그림 5의 P4, P5 감마선속 결과를 기준으로 하여 $1000 \sim 40000 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ 로 선택하였다. 방사선량이 거리 제곱에 반비례하므로 감마선속이 지수적으로 증가하도록 범례를 설정하였다.

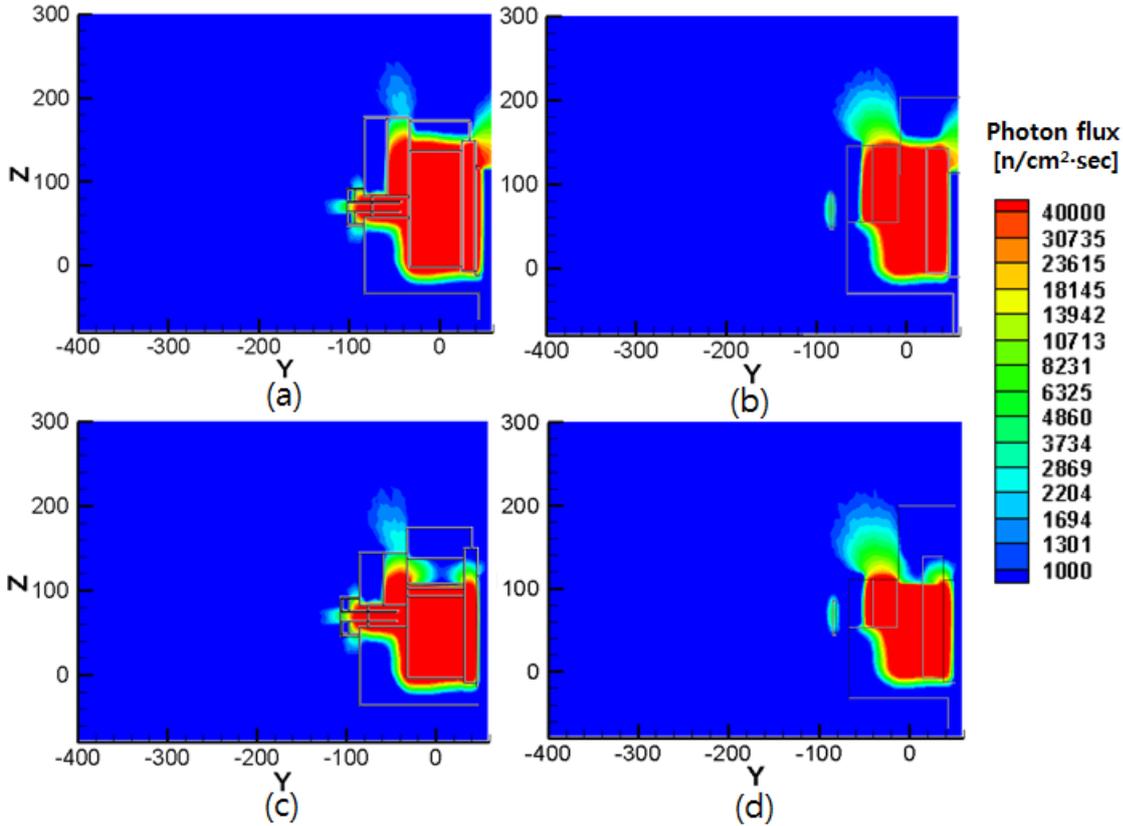


Fig. 7. Distribution of photon flux on Y-Z plane original geometry (a) Fig. 6 A, (b) Fig. 6 B, reduced height 35% and position of lead at 10 cm from bottom (c) Fig. 6 A, (d) Fig. 6 B.

그림 7에 나타난 것과 같이 감마선속은 구조변경 전, 후와 관계없이 전면의 폴리에틸렌 차폐체를 통과하여 공기 중으로 방사되었다. 구조변경 후에 감마선속이 25%가 증가한 P4보다 18% 증가한 P5에서 감마선속의 증가가 더욱 드러나는 것은 감마선속의 증가율은 낮지만 flux가 높아 증가량이 크기 때문이다. 구조변경 후 감마선속이 증가함에 따라 차폐되지 못하고 차폐체 외부로 이동하는 1000 cm²sec⁻¹이상의 감마선속은 P4에서 구조변경 전 약 60 cm, 구조변경 후 약 75 cm 이동하는 것으로 나타났다. 또한 P5에서는 구조변경 전 약 90 cm, 구조변경 후 약 100 cm 이동하여 구조변경 후 증가한 감마선속이 더 먼 거리까지 1000 cm²sec⁻¹이상의 감마선속이 유지하는 것으로 나타났다. 그러나 구조변경 후 낮아진 차폐체 높이로 인해 감마선속 1000 cm²sec⁻¹이하가 되는 높이는 단색기가 있는 공간 바닥지점에서 P4, P5 모두 구조변경 전은 240 cm, 구조변경 후는 220 cm로 오히려 구조변경 후의 경우가 낮아지는 것으로 나타났다.

또한 전면으로 방사되는 감마선속의 경우, 구조변경 전, 후 모두 P4에서는 전면 블록 차폐체를 넘어가지 못하며 P5에서는 이동식 곡면 차폐체를 넘어가지 못하는 것으로 확인되었다. 이로 인해 구조변경 후 감마선속의 증가에도 불구하고 구조변경 전 대비 검출기와 실험자에게 끼치는 영향이 동일할 것으로 예상되어 구조변경 조건으로 전면 블록 차폐체의 높이가 35% 제거되고 상부 납 차폐체의 위치가 하단에서 10 cm에 있는 조건을 선정하

였다.

3.4. 실험자 위치에서의 선량 측정

앞선 검토를 통해 선정된 조건으로 전면 블록 차폐체 고하중 문제를 개선하였다. 추가적으로 전면 콘크리트 차폐체 하단에 지지대를 설치하고, 이동식 곡면 차폐체는 본체에서 샘플 테이블로 옮겨 본체에 집중된 하중을 이동시켰다. 개선된 구조는 중성자와 감마선의 선량 측정 실험을 통해 실험자의 안전성에 대한 확인이 필요하였다. 이를 위해 실험자의 피폭이 가장 우려되는 조건을 선정하고 산란장치 설계기준에 맞춰 선량을 측정하였다.

그림 8은 냉중성자 삼중분광장치와 결합형 콘크리트 차폐체의 위치를 도시한 것이며, -Y방향의 콘크리트 차폐체는 삼중분광장치에 필요한 전원과 냉각수를 우회하여 설치되었다. 냉중성자 선원이 실험자의 방향으로 이동하면 선원과 실험자의 거리가 짧아 방사선량이 높아지게 되므로 단색기의 입사각을 45도로 설정하였다. 또한 중성자 빔을 이용하여 시료의 특성을 측정할 때, 중성자 빔이 실험자 방향으로 이동하는 것을 방지하기 위해 시료 테이블에 폴리에틸렌과 납으로 구성된 빔 스톱퍼(Beam Stopper)가 설치되어 있으나, 최악의 상황을 가정하여 작동하지 않는 것으로 설정하였다. 이러한 조건에서 설계기준치인 6.25 μSvhr⁻¹를 만족하는지 확인하기 위해 열형광선량계를 이용하여 선량을 측정하였다[9].

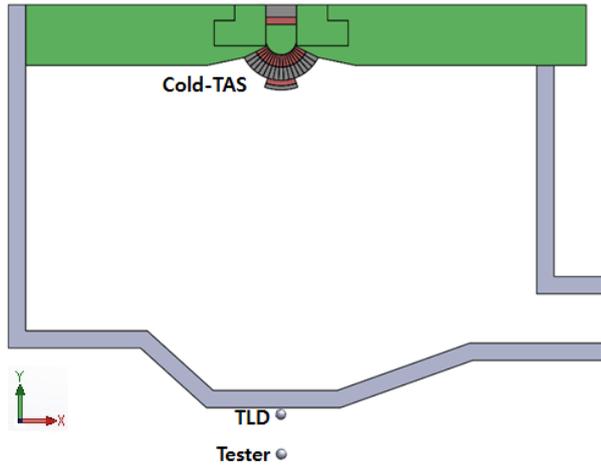


Fig. 8. Geometry of Cold-TAS and position of a TLD and a tester.

감마선의 경우 과거에 많은 연구 결과로 인해 열형광선량계를 이용한 선량 측정이 용이하였다. 중성자 중에서도 에너지가 낮은 냉중성자에 의한 선량측정은 변환계수를 실험을 통해 직접 얻었다. 중성자 빔이 지나가는 위치에서 Potable 중성자 선량계(Thermo Scientific, RADEYE NL)를 이용하여 선량을 확인하고 같은 위치에서 열형광선량계로 측정하여 환산계수를 찾고 선량을 계산하는 방법을 택하였다. 삼축분광장치 본체로부터 선량을 얻을 수 있는 최단거리에서 Potable 중성자 선량계를 이용해 측정하였고 ‘하나로’가 열출력 27 MW로 운전되고 있을 때 단색기부터 437 cm 떨어진 지점의 냉중성자 선량이 76.2 mSvhr⁻¹인 것을 확인하였다.

열형광선량계를 이용한 선량 측정은 냉중성자 선량 변환계수 확인을 위해 Potable 중성자 선량계가 설치되었던 곳과 산란장치 설계기준에 따라 실험자 방향의 결합형 차폐블록 표면에 설치하였다. ‘하나로’가 열출력 30 MW로 운전된 2013년 11월 8일 오후 3시부터 11일 오전 8시까지 총 65시간을 측정하였고 선량계 판독장비로는 HARSHAW 6600 Plus Reading system을 사용하였다. 자연방사선(background) 측정을 위해 2개의 열형광선량계는 실험동 외부 사무실에 두었다.

실험을 통해 얻은 중성자 변환계수를 이용하여 실험자의 위치에서 측정된 중성자 선량은 0.21 μSvhr⁻¹, 감마선량은 3.69 μSvhr⁻¹를 확인하였다. 선량 측정 결과는 산란장치 설계 기준인 6.25 μSvhr⁻¹에 만족하는 수준으로 전면 블록 차폐체의 구조개선 이후에도 실험자가 피폭위험으로부터 안전하다는 것을 확인하였다.

4. 결론

냉중성자 삼축분광장치의 전면 블록 차폐체의 하중으로 인해 본체의 처짐 현상이 발생하였다. 실험장치 정상 구동을 위해 본 연구에서는 전면 블록 차폐체의 높이 제거에 따른 Flux 변화를 확인하여 개선 방안을 도출하였

다. 전면 블록 차폐체 높이의 35%를 제거하고 상부 납 차폐체를 하단에서 10 cm 위치에 설치한 경우, P1, P2, P3의 중성자속과 감마선속은 소량 감소, 소량 증가로 동등 수준으로 판단하였다. 전면 블록 차폐체 상부에 위치한 P4, P5에서는 중성자속이 감소하여 전면 블록 차폐체가 제거되었음에도 불구하고 상부 차폐체 추가 설치의 영향으로 flux가 감소된 것을 확인하였다. P4, P5에서의 감마선속은 각각 25%, 18% 증가하여 감마선속의 분포를 확인하였다. 증가한 감마선속으로 인해 전면 블록 차폐체 외부에서 높은 감마선속을 나타내는 거리가 늘어났지만 전체 차폐체의 높이가 낮아져 오히려 절대적인 높이는 기존보다 낮아진 것으로 확인되었다. 또한 위로 향하는 방향성을 띄고 있어서 검출기가 위치한 전면으로는 기존과 동일한 수준으로 판단하고 전면 블록 차폐체 높이 35% 제거 및 상부 납 차폐체가 하단에서 10 cm 위치에 있는 경우를 최적의 조건으로 선정하였다. 선정된 조건으로 삼축분광장치의 차폐체를 변경작업을 실시하였으며 추가적으로 이동식 곡면 차폐체를 이동시키고 지지대를 보강하였다. 차폐체 최적화 설계의 검증과 산란장치 설계기준에 대한 만족 여부를 확인하기 위해 산란장치 설계기준에 맞춰 열형광선량계를 이용하여 중성자와 감마선량을 측정하였으며 설계기준치를 만족하는 수준의 선량이 측정되어 실험자의 안전을 확인하였다.

참고문헌

1. Brockhouse BN. Slow Neutron Spectroscopy and the Grand Atlas of the Physical World. Lovel Lecture. 1994.
2. So JY, Park SI. New cold neutron inelastic spectrometers at HANARO. Neutron News. 2013;24(2): 28-32.
3. Lee CH. Growth of Neutron Science and Current Situation of the Cold Neutron Research Facility project at HANARO. The 12th International Conference on Accelerator & Beam Utilization. 2008.
4. Denise B. Pelowitz(Editor). MCNPX User's Manual Version 2.7.0. LA-CP-11-00438. 2011.
5. 이창희, 이정수, 성백석. 냉중성자 연구기반시설구축 및 이용기술 개발. KAERI/RR-3155. 한국원자력연구원. 2009.
6. Willendrup P, Farhi E, Knudsen E, Filges U, Lefmann. User and programmers guide to the neutron ray-tracing package McStas version 2.0. Technical University of Denmark; 2012.
7. So JY. Private Communication.
8. Petrie LM, Fox PB, Lucius K. Standard Composition Library. Version 6, Vol. III. ORNL. 2005:M8.2.29-M8.2.31.
9. 이지복, 이종태, 이무웅. 하나로 안전성 분석 보고서, KAERI/TR-710/96. 한국원자력연구원. 1996.

Shielding Design Optimization of the HANARO Cold Neutron Triple-Axis Spectrometer and Radiation Dose Measurement

Ji Myung Ryu, Kwang Pyo Hong, J. M. Sungil Park, Young Hyeon Choi, and Kye Hong Lee
Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract - A new cold neutron triple-axis spectrometer (Cold-TAS) was recently constructed at the 30 MW_{th} research reactor, HANARO. The spectrometer, which is composed of neutron optical components and radiation shield, required a redesign of the segmented monochromator shield due to the lack of adequate support of its weight. To shed some weight, lowering the height of the segmented shield was suggested while adding more radiation shield to the top cover of the monochromator chamber. To investigate the radiological effect of such change, we performed MCNPX simulations of a few different configurations of the Cold-TAS monochromator shield and obtained neutron and photon intensities at 5 reference points just outside the shield. Reducing the 35% of the height of the segmented shield and locating lead 10 cm from the bottom of the top cover made of polyethylene was shown to perform just as well as the original configuration as radiation shield excepting gamma flux at two points. Using gamma map by MCNPX, it was checked that is distribution of gamma. Increased flux had direction to the top and it had longer distance from top of segmented shield. However, because of reducing the 35% of the height, height of dissipated gamma was lower than original geometry. Reducing the 35% of the height of the segmented shield and locating lead 10cm from the bottom of the top cover was selected. After changing geometry, radiation dose was measured by TLD for confirming tester's safety at any condition. Neutron($0.21 \mu\text{Svhr}^{-1}$) and gamma($3.69 \mu\text{Svhr}^{-1}$) radiation dose were satisfied standard($6.25 \mu\text{Svhr}^{-1}$).

Keywords : Cold-TAS(Cold Neutron Triple-Axis Spectrometer), MCNPX, Radiation shield, Neutron flux, Gamma flux, Radiation dose