

2002 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

대용량(1GeV) 양성자 가속기의 차폐 특성 Shielding Characteristics for High-Energy, High-Intensity Proton Accelerator

박병일, 김명현
경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

요 약

고에너지 양성자 가속기의 방사선 방호 차폐 설계를 최적화하기 위해 1GeV 양성자에 대하여 Monte Carlo 방법론을 사용하는 MCNP-X 코드를 이용하여 다음 세 가지 차폐 모델에 대하여 차폐 특성 연구를 수행하였다. 고려된 모델은 기본적인 차폐 특성을 파악하기 위한 Intercomparison problem, Beam Line에서의 차폐를 가정한 Beam spill problem, 가속기 차폐를 가정한 Full beam stop problem 등이며, 차폐 물질로는 Iron 및 Concrete가 고려되었다. 차폐 특성 분석 결과, 양성자 및 감마선은 직접적인 영향보다는 이차 입자인 중성자를 생성함으로써 차폐계산에 중요한 대상인 것으로 나타났다. 대체적으로 Iron이 Concrete에 비해 이차 중성자에 대한 차폐 능력이 보다 우수한 것으로 나타났다. 포항 방사광 가속기에 적용되었던 설계 제한치 0.5mRem/hr를 적용하여 1GeV Proton에 대한 KOMAC 시설에서의 필요 차폐두께를 계산하였다. 빔라인에서 Iron 및 Concrete의 필요 차폐두께는 각각 100cm 및 500cm인 것으로 계산되었다. 또한, Neutron scattering facility에서는 Multi-layer로 설계할 경우 Iron 300cm, Concrete 200cm 정도로 총 5m의 차폐벽 설치되어야 하는 것으로 계산되었다.

Abstract

In order to optimize the shield design of the high energy proton accelerator, three shielding benchmark problem calculations were performed with Monte Carlo code, MCNP-X. Three shielding benchmark problems such as the intercomparison problem, the beam spill problem and the full beam stop problem were suggested for shielding characteristics. Iron and concrete were considered as a shielding material. The neutron generated from proton was the most important particle, because proton has short specific range and photon has low flux level and radiation weighting factor. The shielding capability of Iron was shown to be superior to that of concrete. The shielding thickness of Iron and Concrete in beam line satisfying the limit of 0.5mRem/hr, were 100cm and 500cm, respectively. In the case of neutron scattering facility, shielding thick was required 300cm for Iron and 200cm for concrete under the concept of multi-layer shield design.

1. 서론

1930년대 초 기초학문 연구를 위한 수단으로 가속기가 개발되기 시작한 이래 가속기는 물리학뿐만 아니라 산업적 이용 등 그 범위가 다양해졌으며, 양성자 가속기의 경우 입자 연구를 위한 대형 장치들이 속속 건조되어 현재 그 에너지가 수 TeV 급에 이르고 있다. 기초연구, 의료용, 산업용 및 방위산업용으로 사용되고 있는 가속기는 첨단기술 종합체로서 대형 전자석 설계건설, 초정밀 가공기술, 초고전압 기술, 고진공 기술, 고주파 기술, 초전도 기술, 극저온 기술, 컴퓨터 제어 등 가속기 기술 보유시 학술 연구뿐만 아니라, 의료적, 산업적 응용 등 그 파급효과가 대단히 크다.

또한, 90년대 미래 원천기술 개발에 필요한 양성자원 및 중성자원의 중요성이 부가되어, 이에 적합한 고에너지(수백 MeV~수 GeV) 대전류(~수십 mA)의 대용량 양성자가속기의 필요성이 증대되고있으며, 한국원자력연구소 및 각 학계를 중심으로 대용량의 다목적 양성자가속기, KOMAC(KOrea Multipurpose Accelerator Complex, 최종 목표: 20 mA, 1 GeV) 건설을 추진하게 되었다. KOMAC은 중간에 빔을 인출하여 쓸 수 있도록 고안된 장치로 기초 연구뿐만 아니라, 산업 및 의료용 등 이용 분야가 다양하다.

현재 KOMAC은 최종 1GeV, 20mA를 목적으로 현재 1단계 계획에 따라 2005년까지 DTL(Drift Tube Linac) 가속장치 핵심기술 개발과 20MeV 양성자 가속장치를 완성, 저에너지 빔이용 및 장치응용기술을 개발하고 있다. 그러나, 국내에서 대용량 양성자가속기의 건설은 최초의 시도이고 이에 대한 적절한 차폐설계 특성연구는 미비한 상태이다. 특히 PLS와는 다르게 KOMAC은 가속 입자가 전자보다 질량이 높은 양성자이고, 대전류이므로 양성자의 이에 따른 적절한 차폐 설계 특성이 연구되어야 한다. 이 논문에서는 3단계 개발목표인 100MeV, 20mA 가속장치에서 더 나아가 최종적으로 1GeV, 20mA까지 개발된다는 가정 하에 앞으로 필요한 차폐 설계를 위한 차폐 특성에 대하여 논하고자 한다.

양성자의 핵파쇄(spallation) 반응 및 (p, n) 반응에 의해 생성되는 고에너지 중성자 및 양성자 입자는 차폐 설계시 반드시 고려되어야 한다. 특히 이차 생성 입자로서 고에너지 중성자는 현재까지 중요한 방사선원으로 취급되어 일부 연구가 이루어지고 있다. 그러나, 지금까지의 연구에서는 이차 입자로 생성된 중성자만의 차폐만을 고려하였으며, 일차입자인 양성자 및 중성자에 의해 생성되는 이차입자인 감마선(photon)에 대해서는 연구가 미비한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 고에너지의 하전입자 수송 문제의 해석이 가능한 MCNP-X를 이용하여 1Gev의 고에너지를 갖는 양성자에 대하여 차폐 특성을 분석하고자 한다. 방사선원으로는 일차입자인 양성자, 이차 입자인 중성자 및 감마선(photon) 등을 함께 고려하였으며, 차폐 특성 문제로는 1) The intercomparison problem, 2) The beam spill problem, 3) The full beam stop problem 모델을 선정하였다.

2. 국내의 가속기 현황

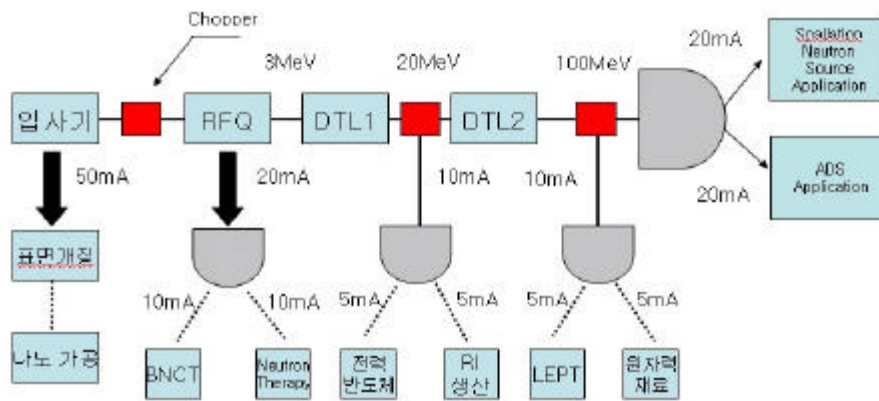
국내의 대형 가속기는 1989년부터 시작되어 1994년에 완성된 포항 방사광 가속기(PLS: Pohang Light Source)가 있다. 이는 2GeV 전자 원형가속기 및 저장링으로 구성되어 있으며, 광속도에 근접한 속도를 갖는 전자 빔(beam)이 자장 속에서 휘어질 때 접선방향으로 나오는 방사광(synchrotron light)을 이용하는 장치로 방사광을 이용한 물질 분석, 반도체 조사

특성, 광화학반응등 기초 연구 및 학술 목적에 사용되고 있다. 중성자 활용 측면에서는 KOMAC이 있는데, 이는 그림 1에서 보듯이 향후 수요를 예측하여 저에너지 영역(100MeV 이하), 중간에너지 영역(100~1GeV), 고에너지 영역(1GeV 이상) 모두를 고려하여 설계될 예정이다.

국외의 대용량 가속기로는 표 1에서 보듯이 미국에서는 ORNL의 SNS project (1GeV, 1mA) 선형가속기와 LANL의 ATW project (1GeV, 45mA), 유럽에서는 유럽공동연구과제로서 ESS(European Spallation Source) project (1.3GeV, 3.8mA), 일본에서는 JAERI의 NSP(neutron Science Project) project (1.5GeV, 5.3mA) 등과 같은 project등이 건설 완료 또는 건설 중에 있다.

이 이외에도 KEK에서 12GeV PS(Proton Sychrotron), RAL의 ISIS에서의 70MeV 선형가속기와 800MeV Synchrotron 등이 있다.

그림 1 KOMAC 빔라인구성 및 수요예측



앞서 언급한 개략적인 가속기 현황을 보면 국내 및 국외의 주 관심사는 고에너지 중성자의 활용이 관점이며 이를 위해 고에너지의 양성자가 사용됨을 볼 수 있다. 따라서 고에너지 양성자의 차폐는 전세계적으로 매우 중요한 논점으로 대두되고 있다.

표 1 국내의 양성자 선형가속기 현황

Project	국가	연구소	가속기 종류	Beam Energy [GeV]	Beam Current [mA]
SNS	미국	ORNL	Linac.	1	1
ATW	미국	LANL	Linac.	1	45
ESS	유럽	Multi-Lab.	Linac.	1.3	3.8
NSP	일본	JAERI	Linac.	1.5	5.3
KOMAC	한국	KAERI	Linac.	1	20

3. 차폐 특성 계산 모델

가속기 시설에 대한 차폐 특성을 연구하기 위하여 차폐 모델로서 다음 세가지를 설정하였다.

1) The intercomparison problem

이 계산 모델은 1GeV의 양성자에 의해 생성된 이차 입자인 중성자 및 감마선이 두꺼운 차폐 물질을 거칠 때의 기초적인 차폐 특성을 연구하기 위하여 제안된 모델로서 무한 평면의 기하학적 구조를 갖는 차폐체에 수직으로 pencil proton beam을 입사되는 모델이다. 차폐물질로는 철과 콘크리트를 고려하였으며, 각 물질의 두께는 철은 3m, 콘크리트는 6m를 고려하였다.

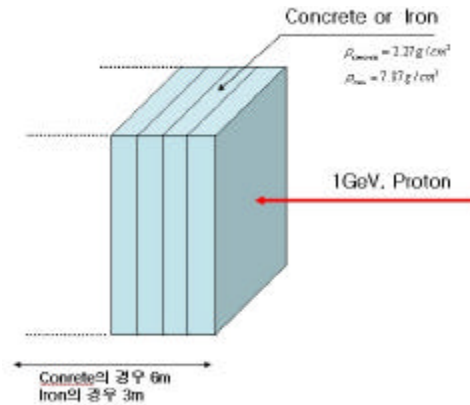


그림 2 Intercomparison problem model

2) The beam spill problem

본 계산 모델은 전형적인 beam transport line에 대한 검증 모델로서 가속(acceleration)과 집속(focusing)을 통하여 이동하는 proton beam이 어느 한 점에서 빔손실(beam loss)이 일어난다는 가정 하에 차폐 특성을 연구하기 위하여 제안되었다. 차폐체의 두께는 Concrete와 Iron을 각각 6m 와 3m로 모델링하였으며, 중성자, 양성자, 감마선의 스펙트럼을 생성하기 위한 표적으로서 원통형 철 표적(cylindrical iron target, diameter : 5cm , length : 50cm)에 각 1GeV의 Proton beam을 입사시켜 계산하였다. KOMAC의 경우 평균 빔누출율이 약 1W/m임을 감안하여 이를 적용하였다.

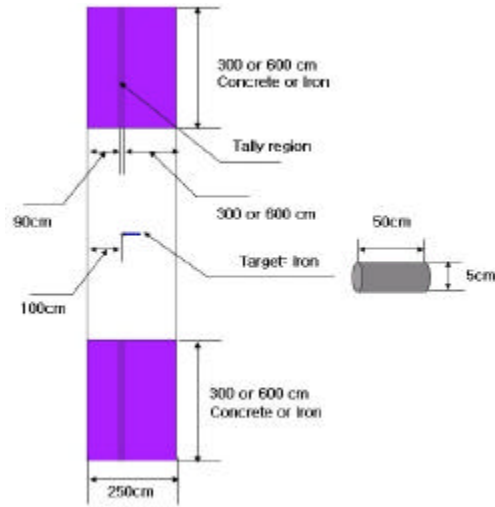


그림 3 Beam spill problem model

3) The full beam stop problem

본 모델은 neutron scattering 시설에 대한 차폐 특성 검증 모델로서 수은 target ($\rho_{Hg} = 13.58g/cm^3$)에 각각 1GeV의 proton을 입사시켜 발생된 각 neutron, proton, gamma 에 대한 차폐특성을 연구하도록 하였다. 여기에서는 beam current로서 1GeV에서 각각 20mA로 설정하였고, Spallation target으로서 cylindrical Hydrargyrum target(diameter : 16cm, length : 60cm)을 두었고, 그 주위로 lead reflector를 모델링하였고, shield는 직진방향으로 4m thick iron + 1m thick concrete와 반경방향 3m thick iron + 1m thick concrete을 두어 MCNP-X로 계산하였다.

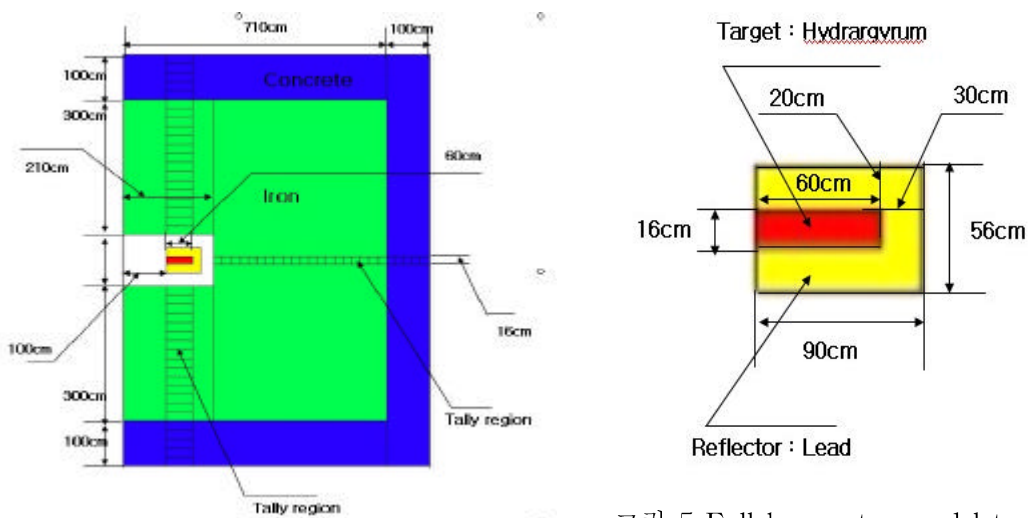


그림 4 Full beam stop model

그림 5 Full beam stop model target and reflector model

4. Equivalent Dose Conversion Coefficient

앞서 언급된 세 가지의 모델에 대하여 MCNP-X 계산을 통해 얻어진 각 두께별 Flux는 neutron, photon에 대하여 [ref.2]의 fluence-to-effective dose conversion coefficient를 적용하여 Equivalent Dose Rate로 환산되었다. 본 논문에서 사용된 DCF(Dose Conversion Factor)는 표 2 및 표 3과 같다. 표 2는 중성자에 대한 DCF이며, 표 3은 감마선에 대한 DCF 값이다.

표 2 Neutron Dose Conversion Factor

Energy (MeV)	10.0	20.0	30.0	50.0	80.0	100.0	180.0
선질계수	8.81	6.76	6.04	5.50	5.23	5.16	5.05
Effective Dose (pSv · cm ²)	475.1±0.2%	482.5±0.2%	432.8±0.5%	433.8±0.7%	462.8±0.8%	495.0±0.9%	418.7±1.1%
DCF (rem/hr)/(#/cm ² · sec)	1.710e-4	1.737e-4	1.558e-4	1.562e-4	1.666e-4	1.782e-4	1.507e-4
Energy(MeV)	200.0	400.0	500.0	700.0	1000.0	1500.0	2000.0
선질계수	5.04	5.01	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Effective Dose (pSv · cm ²)	424.9±1.1%	512.6±1.3%	649.6±1.0%	951.8±0.9%	1158.4±0.9%	1414.9±0.8%	1642.0±0.8%
DCF (rem/hr)/(#/cm ² · sec)	1.530e-4	1.845e-4	2.339e-4	3.426e-4	4.170e-4	5.094e-4	5.911e-4

표 3 Photon Dose Conversion Factor

Energy [MeV]	0.05	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
선질계수	1	1	1	1	1	1	1
Effective Dose (pSv · cm ²)	0.38±1.4%	0.52±1.4%	2.39±1.6%	4.33±1.9%	5.84±1.91%	7.33±2.1%	9.75±2.3%
DCF (rem/hr)/(#/cm ² · sec)	1.368e-7	1.872e-7	8.604e-7	1.559e-6	2.102e-6	2.639e-6	3.510e-6
Energy [MeV]	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	20.0	30.0
선질계수	1	1	1	1	1	1	1
Effective Dose (pSv · cm ²)	11.67±2.3%	13.12±2.1%	14.63±1.9%	17.38±1.9%	20.65±2.0%	31.67±1.8%	38.63±1.7%
DCF (rem/hr)/(#/cm ² · sec)	4.201e-6	4.723e-6	5.267e-6	6.257e-6	7.434e-6	1.140e-5	1.391e-5
Energy [MeV]	40.0	50.0	100.0	200.0	500.0	1000.0	2000.0
선질계수	1	1	1	1	1	1	1
Effective Dose (pSv · cm ²)	43.81±1.7%	46.87±1.5%	57.45±1.7%	67.99±1.5%	78.81±2.1%	83.15±2.6%	88.28±1.8%
DCF (rem/hr)/(#/cm ² · sec)	1.577e-5	1.687e-5	2.068e-5	2.448e-5	2.837e-5	2.993e-5	3.178e-5

5. 계산 결과

1) The Intercomparison problem

그림 6은 1GeV의 proton을 입사시켰을 때 각 두께에 따른 Equivalent Dose Rate를 나타낸다. 그림 6을 보면 proton 200cm 이하에서는 Iron이 concrete에 비해 더 높은 Equivalent Dose Rate을 나타내는데 이는 proton이 차폐체에 입사할 때 이차 입자 생성률이 Iron이 concrete에 비해 더 많기 때문인 것으로 나타났다. 그림 그러나, 전반적인 차폐의 능력은 Iron이 concrete에 비해 훨씬 큰 것으로 나타났다. Proton은 Iron에서는 100cm, concrete에서는 약 200cm 정도 진행하는 것으로 나타나 중성자를 차폐하면 Proton을 자연적으로 차폐되는 것으로 나타나 Proton은 차폐 관점에서 중요하지 않은 것으로 나타났다. Photon과 neutron은 Iron 및 concrete에 대하여 각각 300cm, 600cm 정도까지 진행하여 Equivalent Dose에 기여하는 것으로 나타났다. 그림 6에서 Dose Rate에 기여하는 주 입자는 중성자인 것으로 나타났으며 감마선의 기여도는 무시할 만 한 것으로 나타났다.

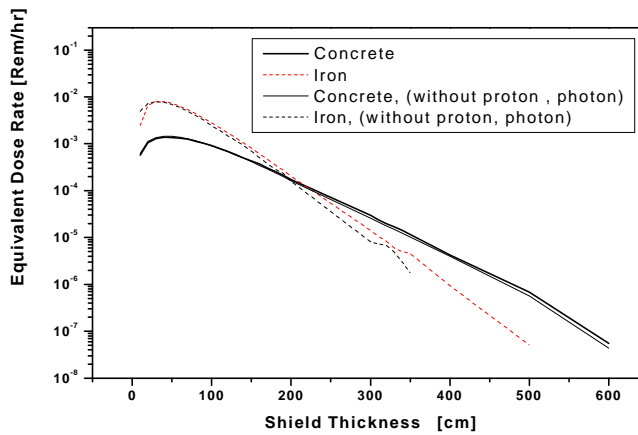


그림 6 Equivalent Dose Rate

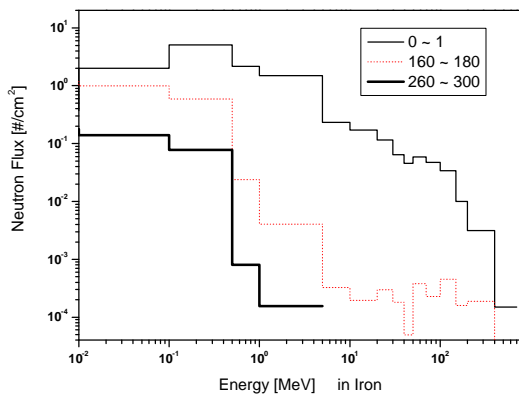


그림 7 Iron 두께별 neutron spectrum

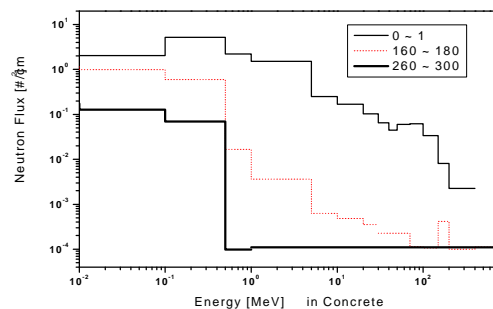


그림 8 Concrete 두께별 neutron spectrum

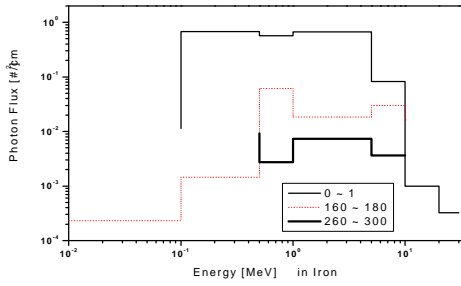


그림 9 Iron 두께별 photon spectrum

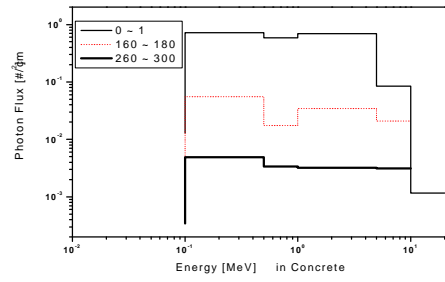


그림 10 Concrete 두께별 photon spectrum

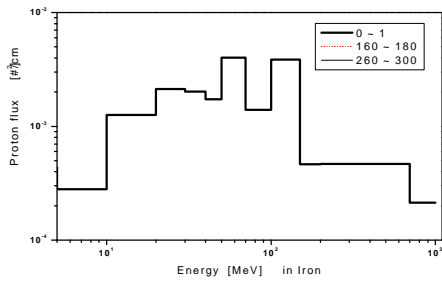


그림 11 Iron 두께별 proton spectrum

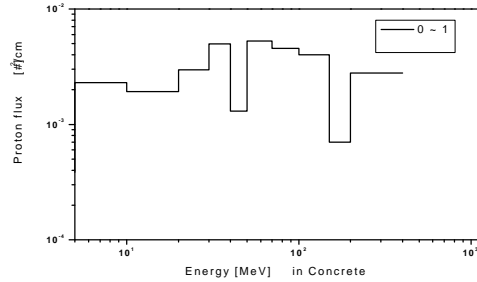


그림 12 Concrete 두께별 proton spectrum

2) The beam spill problem

Beam Loss를 가정한 본 모델에서의 계산결과도 Intercomparison problem에서와 마찬가지로 차폐 특성은 iron이 concrete보다 우수하지만 초기 proton에 의한 이차입자 발생으로 neutron의 flux가 증가하여 concrete에 비하여 높은 Equivalent Dose를 갖게 된다. 그리고, 그림 14와 같이 neutron의 영향으로 gamma에 의한 차폐 특성 역시 iron이 concrete보다 우수함을 알 수 있고, gamma에 의한 equivalent dose rate는 neutron에 의한 equivalent dose에 비하여 무시할 만큼 작음을 알 수 있다.

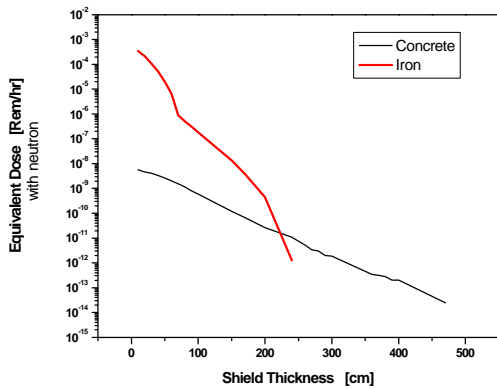


그림 13 Neutron Equivalent Dose Rate

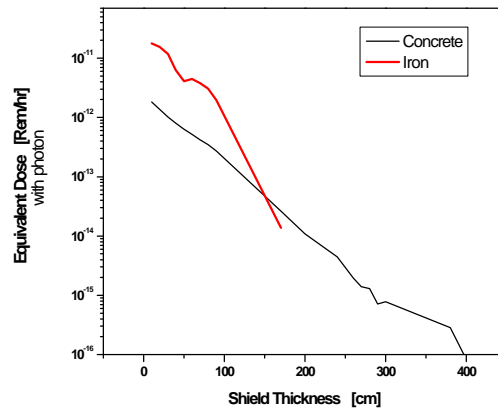


그림 14 Photon Equivalent Dose Rate

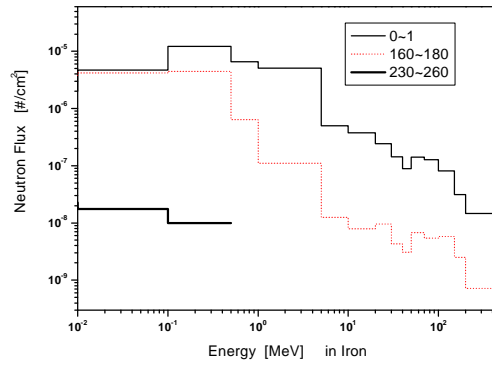


그림 15 Neutron Dose equivalent 변화

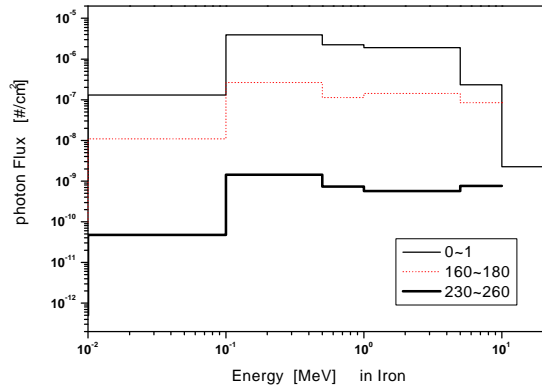


그림 16 Photon Equivalent Dose Rate in Iron

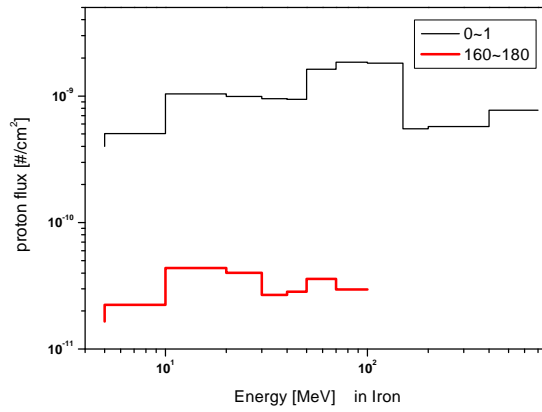


그림 17 Proton Equivalent Dose in Iron

표 4 Iron 차폐체에 대한 beam spill problem에서의 Equivalent Dose

차폐체 두께 [cm]	Effective Dose [rem/hr]	차폐체 두께 [cm]	Effective Dose [rem/hr]	차폐체 두께 [cm]	Effective Dose [rem/hr]
10	1.7997E-4	60	1.9840E-4	110	3.6155E-5
20	3.4529E-4	70	1.7612E-4	120	2.6656E-5
30	3.1550E-4	80	1.5354E-4	130	1.9624E-5
40	2.8633E-4	90	6.3427E-5	140	6.1832E-6
50	2.5410E-4	100	4.7537E-5	150	3.3331E-6

표 5 Concrete 차폐체에 대한 beam spill problem에서의 Equivalent Dose

차폐체 두께 [cm]	Effective Dose [rem/hr]	차폐체 두께 [cm]	Effective Dose [rem/hr]	차폐체 두께 [cm]	Effective Dose [rem/hr]
410	7.6183E-1	460	2.2450E-2	510	1.4341E-3
420	2.5289E-1	470	8.7437E-3	520	1.1176E-3
430	1.7799E-1	480	7.8932E-3	530	1.2338E-3
440	1.2742E-1	490	5.7087E-3	540	6.1311E-4
450	6.5763E-2	500	2.4625E-3	550	4.5414E-4

여기서 beam loss는 각 시설의 경계점에서 모두 일어난다고 가정하여 보면 1W/m 는 약 $6.2422E+09$ #/sec의 current를 갖게 되고, beam spill problem에 대하여 포항 방사광 가속기의 설계 기준치 0.5 mrem/hr를 적용하였을 때 이 기준치를 만족하는 적절한 차폐체의 두께는 표 4와 5를 참조하여 보면 Iron의 경우 약 100cm, Concrete 550cm인 것으로 나타났다.

3) The full beam stop problem

그림 18은 가속된 Beem이 중성자를 생성하기 위해 설계된 표적에 입사하였을 경우의 특성을 보여준다. 그림에서 보듯이, 300cm까지는 선행된 intercomparison 및 beam spill problem에서와 같이 Iron 의 차폐 능력이 concrete에 비해 큰 것으로 나타났지만 300cm를 지난 후 부터는 오히려 concrete가 차폐 능력이 더 좋은 것이 확인되었다. 이는 중성자가 차폐체를 깊이 투과하면 에너지를 많이 잃게 되는데 저에너지 영역에서는 Concrete가 가벼운 원소를 Iron에 비해 많이 함유하고 있어 감속을 잘 시키기 때문인 것으로 분석되었다. 따라서, 중성자를 생성하는 표적이 위치한 영역에 대한 차폐는 Iron 및 Concrete를 Multi-layer로 설계하는 것이 타당한 것으로 나타났으며, 향후 이를 최적화하는 것이 필요함을 알 수 있었다. 포항 방사광 가속기의 설계제한치인 0.5mRem/hr를 적용하여 1GeV, 20mA의 양성자가 완전히 입사하였을 경우, $1.2484E+17$ #/sec를 적용하여 KOMAC 시설에서의 차폐두께를 계산한 결과, Neutron scattering facility에서의 차폐두께는 표 6에서 보는 바와 같이 Multi-layer로 설계할 경우 Iron 300cm, Concrete 200cm정도로 약 5m의 차폐가 확보되어야 하는 것으로 나타났다.

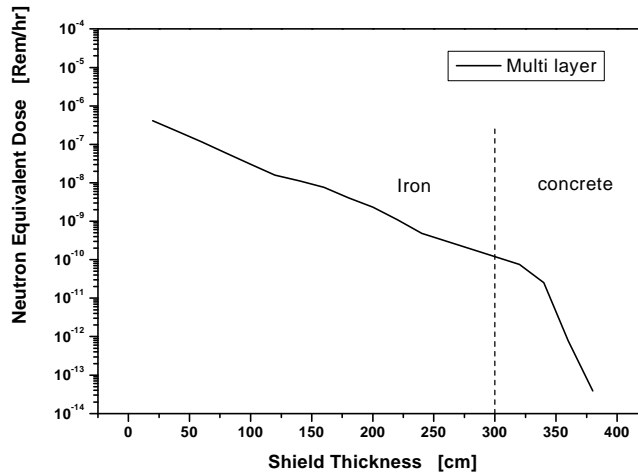


그림 18 반경방향에 대한 각 차폐체 물질별 두께별 equivalent dose의 변화

표 6 Multi-layer에 대한 full beam stop problem에서의 Equivalent Dose

차폐체 두께 [cm]	Effective Dose [rem/hr]	차폐체 두께 [cm]	Effective Dose [rem/hr]	차폐체 두께 [cm]	Effective Dose [rem/hr]
220	1.37E+8	340	3.16E+6	420	1.23E+1
240	5.96E+7	360	9.84E+4	490	4.45E-4
320	9.41E+6	380	4.80E+3	500	8.62E-5

6. 결론 및 향후과제

1GeV에너지를 사용하는 양성자 가속기에 대하여 1) intercomparison problem, 2) beam spill problem, 3) full beam stop problem의 세가지 모델을 이용하여 차폐 특성 분석을 수행하였다. 특성 분석결과, 중성자만을 대상으로 차폐하면 양성자 및 감마선은 자연적으로 차폐되는 것으로 나타났으며, 대체적으로 Iron이 concrete에 비해 차폐능력이 매우 우수한 것으로 나타났다. 그러나, Full beam stop problem에서는 차폐체의 두께가 약 300cm 이상이 되면 중성자의 에너지가 매우 낮아져 감속능력이 좋은 concrete가 더 차폐능력이 좋은 것으로 나타났다. 포항 방사광 가속기의 설계제한치인 0.5mRem/hr를 적용하여 1GeV의 Proton을 사용하는 KOMAC 시설에서의 차폐두께를 계산한 결과, 빔라인에서 Iron 및 Concrete의 차폐두께는 각각 100cm 및 500cm인 것으로 나타났다. Neutron scattering facility에서는 Multi-layer로 설계할 경우 Iron 300cm, Concrete 200cm정도로 약 5m의 차폐가 확보되어야 하는 것으로 나타났다.

본 연구를 기초로 하여, 저에너지 영역 및 중간에너지 영역에 대한 차폐 특성이 수행될 예

정이며, 1GeV에너지에 대하여 Multi-layer차폐 설계를 최적화를 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] H.Handa, R. Tayama et al., "Deep Penetration Calculations of Neutrons up to 1.5GeV" , SATIF-5, 2001
- [2] Michele R. Sutton et al., "Fluence-To-Effective Conversion Coefficients for high-energy Radiations calculated with MCNPX", SATIF-5, 2001
- [3] H.Hirayama et al., "Intercoparison of medium energy neutron attenuation in Iron and Concrete(3)", SATIF-5, 2001
- [4] Laurie S. Waters, "MCNPX User's maunual", LANL, 1999
- [5] Alexander Wu Chao,"Handbook of Accelerator Physics and Engineering"
- [6] N. Nakao et al., "Deep Penetration Experiment at ISIS", SATIF-5, 2001