MCNP 시뮬레이션을 통한 450 kVp 엑스레이 튜브의 콘크리트 차폐벽 두께 계산 및 반가층 방법을 이용한 계산과의 결과 비교

이상헌[1] · 허삼석[2] · 이은중[1] · 김찬규[1] · 조규성[1,*]

[1]한국과학기술원 원자력및양자공학과, [2](주)삼영검사엔지니어링

Calculation of Concrete Shielding Wall Thickness for 450 kVp X-ray Tube with MCNP Simulation and Result Comparison with Half Value Layer Method Calculation

Sangheon Lee[1], SamSurk Hur[2], Eunjoong Lee[1], Chankyu Kim[1] and Gyu-seong Cho[1,*]

[1]*Department of Nuclear & Quantum Engineering, KAIST, Daejeon, Korea*
[2]*Sam Yong Inspection Engineering Co., Ltd.*

Abstract - Radiation generating devices must be properly shielded for their safe application. Although institutes such as US National Bureau of Standards and National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) have provided guidelines for shielding X-ray tube of various purposes, industry people tend to rely on 'Half Value Layer (HVL) method' which requires relatively simple calculation compared to the case of those guidelines. The method is based on the fact that the intensity, dose, and air kerma of narrow beam incident on shielding wall decreases by about half as the beam penetrates the HVL thickness of the wall. One can adjust shielding wall thickness to satisfy outside wall dose or air kerma requirements with this calculation. However, this may not always be the case because 1) The strict definition of HVL deals with only Intensity, 2) The situation is different when the beam is not 'narrow'; the beam quality inside the wall is distorted and related changes on outside wall dose or air kerma such as buildup effect occurs. Therefore, sometimes more careful research should be done in order to verify the effect of shielding specific radiation generating device. High energy X-ray tubes which is operated at the voltage above 400 kV that are used for 'heavy' nondestructive inspection is an example. People have less experience in running and shielding such device than in the case of widely-used low energy X-ray tubes operated at the voltage below 300 kV. In this study, Air Kerma value per week, outside concrete shielding wall of various thickness surrounding 450 kVp X-ray tube were calculated using MCNP simulation with the aid of Geometry Splitting method which is a famous Variance Reduction technique. The comparison between simulated result, HVL method result, and NCRP Report 147 safety goal 0.02 mGy wk^{-1} on Air Kerma for the place where the public are free to pass showed that concrete wall of thickness 80 cm is needed to achieve the safety goal.

* Corresponding author: Gyu-seong Cho, Tel. +82-42-350-3821, Fax. +82-42-350-3810, E-mail. gscho@kaist.ac.kr

Essentially same result was obtained from the application of HVL method except that it suggest the need of additional 5 cm concrete wall thickness. Therefore, employing the result from HVL method calculation as an conservative upper limit of concrete shielding wall thickness was found to be useful; It would be easy, economic, and reasonable way to set shielding wall thickness.

Key words : X-ray tube shielding, MCNP, Half Value Layer method, Air Kerma, Geometry Splitting

서 론

방사선 취급시설의 차폐 설계가 적절한지의 여부는 시설의 안전성과 직결되는 문제이다. US National Bureau of Standards는 1955년에 발간한 Handbook 60에서 다양한 엑스레이 튜브에 대한 감마선 차폐의 가이드라인을 제시하였는데, 주로 400 kV 이하 및 1 MV 이상의 전압에서 구동되는 의료용 엑스레이 튜브의 차폐에 초점이 맞춰져 있다는 한계가 있다. 이에 National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP)는 보다 일반적인 구동조건의 엑스레이 튜브 차폐 방법론을 담은 NCRP Report 34 (1972), 49 (1976) 및 147 (2004)를 발행하였으나 산업계에서는 반가층 두께를 이용한 간편한 손계산을 통해 차폐벽 두께를 산출하는 업계 통칭 '반가층 방법'에 의존하는 경우가 많다. 즉, narrow-beam이 차폐벽에 입사하는 경우 차폐벽 내부에서 반가층 두께만큼 진행할 때마다 빔의 강도(Intensity) 및 선량, 그리고 Air Kerma가 약 절반씩 줄어든다는 사실에 근거하여 차폐벽 외부에서 특정 빔 선량 및 Air Kerma 수치를 달성하기 위한 벽 두께를 역산하는 것이다. 하지만 반가층의 정의는 엄밀히는 빔 강도만을 기준으로 하고 있으며, broad-beam 차폐의 경우 빔이 벽을 통과하는 과정에서 선질에 변화가 생겨 발생하는 Buildup Effect 등의 현상을 고려해야 하므로 반가층 방법을 이용한 차폐벽 외부 선량 및 Air Kerma 계산은 때로 주의를 요한다. 특히 건축기자재 등 대형물의 비파괴 검사를 위한 산업용 엑스레이 튜브의 경우 400 kV 이상의 고전압으로 구동되며, 운용 및 차폐 사례가 300 kV 이하 구동전압의 엑스레이 튜브 경우에 비해 상대적으로 적어 차폐의 안전성을 명확히 검증할 필요가 있다.

국내 비파괴검사기업 S사에서 450 kVp 엑스레이 튜브가 운용되는 자사 비파괴검사시설의 콘크리트 차폐벽 두께를 80 cm로 설계한 사례가 있는데, 450 kVp 엑스레이 튜브 차폐에 이용해야 하는 콘크리트 반가층 두께가 앞서 언급한 NCRP Report에 명시되어 있지 않고 시설의 위치가 민간지역과 인접해 있어 차폐 안전성을 검증해볼 만한 사례로 적합하다고 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 S사 소유의 모델과 동일한 450 kVp 엑스레이 튜브에 대하여 다양한 콘크리트 차폐벽 두께에 따른 외부 선량을 MCNP 시뮬레이션을 통해 계산하였고, 그 결과를 NCRP Report 147에서 제시하는 일반인 구역 선량기준과 비교하였다. 또 연구 도중 발견된 시뮬레이션 방법 상의 문제점을 상대오차 및 계산시간 측면에서 논하고 해결 방안을 제시하였다. 마지막으로 시뮬레이션 계산 결과를 반가층 방법을 이용한 계산 결과와 비교하였다. 콘크리트 반가층 두께는 NCRP Report 49에서 제시하고 있는 400 kVp 엑스레이 튜브에 해당하는 수치인 3.3 cm를 이용하였다.

방 법

Los Alamos Laboratory에서 개발한 Monte Carlo N-particle transport Code (MCNP)는 몬테 카를로 방법을 이용하여 특정 에너지를 가진 입자를 방사시킨 후 반응단면적에 따른 반응확률에 따라 진행경로를 수정해 가며 입자가 에너지를 잃을 때까지 입자 수송을 시뮬레이션하는 전산모사 코드이다. 본 연구에서는 4개 CPU코어의 PC에서 MCNPX version 2.7.0 코드를 이용하여 엑스레이 튜브를 둘러싼 콘크리트 차폐벽 바깥의 Air Kerma를 계산하였다. 1개 선원 입자에 대한 시뮬레이션 시행 횟수에 해당하는 NPS 값은 10^7로 두었다.

시뮬레이션을 위해 엑스레이 튜브의 사양을 확보하고 튜브의 핵심적인 구조물(housing, 타겟 등)과 콘크리트 차폐벽 및 Tally를 MCNP로 구현하였다. 주요 사항을 Table 1과 Figs. 1, 2에 정리하였다. 보수적인 계산을 위해 450 kVp 엑스레이 튜브의 최대 구동전압 450 kV 하에서의 전자에너지 450 keV, 그리고 관전류 10 mA를 상정하였다. 또한 튜브 위치를 빔 초점을 기준으로 차폐벽과 1.5 m 떨어뜨려 놓았는데, 이는 사람 한 명이 통행할 만한 거리로 일반적인 비파괴검사를 위한 거리보다 작게 둔 것이다. 엑스레이 튜브의 빔 초점과 모든 Tally 셀의 중심은 지상에서 1 m 높이에 두었으며, 차폐벽의 재질이 되는 콘크리트는 NCRP Report 49에서 콘크리트 반가층 두께의 기준밀도로 채택되어 있는 2.35 g cm^{-3}를 밀도로 갖는 Ordinary Concrete (NBS 04)를 적용하였다(MacConn *et al*. 2011).

계산시간을 단축시키기 위해서, 먼저 엑스레이 튜브 housing 내부에 450 keV 관전류 전자 선원을 정의하여 전자와

Table 1. X-ray tube specification

Vendor	Product	Operation condition	Target material	Window material	Housing material
YXLON INC.	Y.TU 450-D08	V: 450 kV, I: 10 mA	Tungsten	Beryllium	Stainless steel, lined with lead

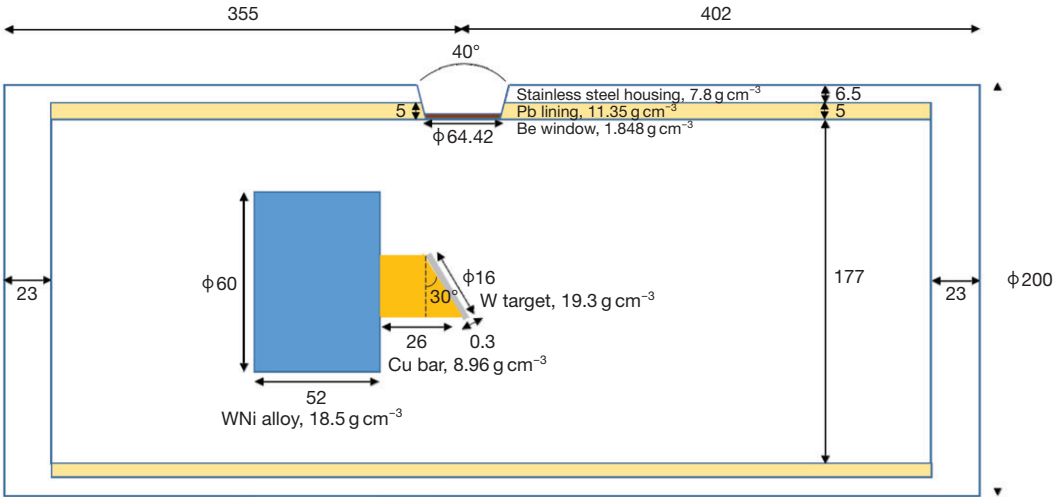

Fig. 1. Schematic drawing of X-ray tube inner structure model used for simulation.

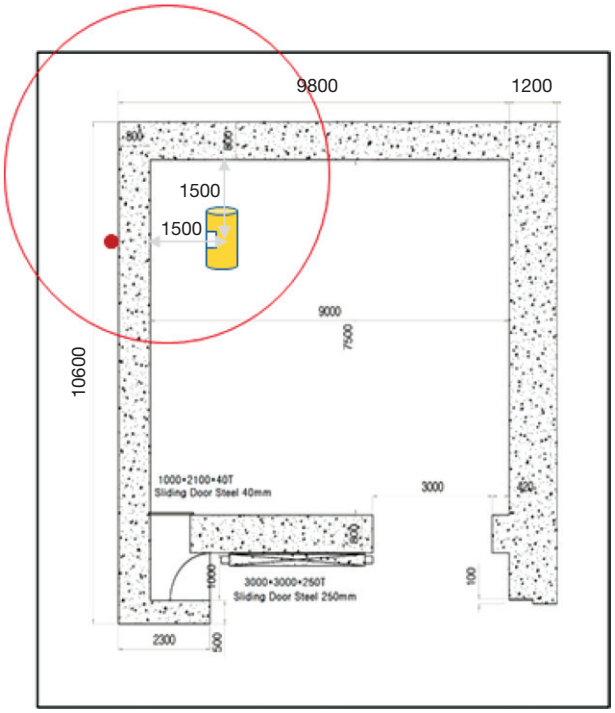

Fig. 2. Top view of MCNP simulation geometry and main tally location (indicated as red sphere).

타겟 간의 충돌을 1회 시뮬레이션 하였고 일차빔 구역을 꽉 차게 점유하는 반지름 30 cm의 구 모양 cell을 잡은 뒤 10 keV 간격의 energy bin으로 분할된 F4 Tally를 적용하여 일차빔 에너지 스펙트럼을 얻었다(Fig. 3). 또한 원뿔 모양 일차빔 구역 단면에서 1개 선원전자당 광자 Fluence와 단면적을 곱해 선원 전자 한 개당 발생하는 일차빔 광자의 개수를 구했고 그 값은 빔 초점에서 1미터 떨어진 단면에 대해서 0.0020였다. 이제 관전류 전자 대신 위에서 구한 에너지 스펙트럼이 적용된 광자를 40° 원뿔 모양의 일차빔 구역으로 방사되는 모양으로 공기와 엑스레이 튜브 구조물이 제거된 콘크리트 차폐벽 안쪽의 진공 상태 공간에 선원으로 정의하였다(여기서 미량의 누설방사선 및 산란방사선이 일차빔 선질에 가하는 영향은 무시되었다). 일차빔 구역 내부에서 광자 선원의 각도별 광자 방출 확률은 균일하게 설정하였다.

또한 감쇠에도 불구하고 차폐벽을 통과하는 입자 수를 효과적으로 늘이기 위하여 MCNP의 분산감소 기법 중 Geometry Splitting 방법을 적용하였다. 차폐벽 내부에서 반가층 두께마다 입자수가 대략 절반으로 감소한다고 보고, 벽을 반가층 두께 단위로 분할한 뒤 두께 벽 내부 각 구역에서 입자 수(population)를 10^7개에 가깝게 유지시키는 것을 목표로(Hendricks and Booth 2006) 각 구역의 Importance를 이전 구역의 2배 값 근처에서 반복적으로 보정하여 최종 적용하였다. 450 kVp 엑스레이 튜브에 대한 콘크리트 반가층 두께는 일반적으로 정해져 있지 않기에 NCRP Report 49에서 제시하고 있는 400 kVp 엑스레이 튜브에 해당하는 수치가 3.3 cm임을 감안하여 근사적으로 3.3 cm의 배수가 되는 10 cm의 자연수배 두께 차폐벽의 경우에서만 단위 두

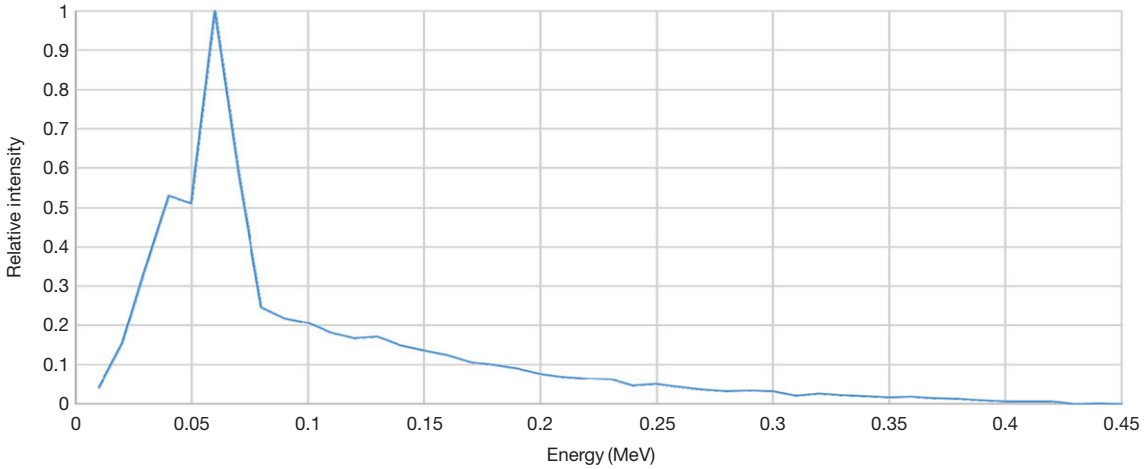

Fig. 3. Simulated primary beam energy spectrum of tungsten target X-ray tube operated at 450 kV.

께인 10 cm를 3.3 cm, 3.3 cm, 3.4 cm로 분할하여 Geometry Splitting을 적용하였다.

International Commission on Radiological Protection (ICRP)에서 1959년에 인체를 반경 30 cm의 구로 모델링하여 인체 흡수선량을 계산한 사례가 있어(Xu and Eckerman 2009) 본 연구에서도 차폐벽 외벽 중 Air Kerma가 가장 높은 일차빔 방향 외벽에 접하는 반지름 30 cm의 구 모양 셀(Fig. 2에 빨간색 구로 표시함)에 대해 F4 Tally를 적용하여 선원 광자 1개당 Fluence를 계산한 후 ICRP Report 74에서 제공하는 에너지별 Fluence-Air Kerma 간 환산계수를 MCNP의 DE Card 및 DF Card에 입력해 적용하여 차폐벽 외부에서의 선원 광자 1개당 Air Kerma (Gy photon^{-1})의 최대치이자 대표 격인 값을 확보하였다. 여기에 앞서 구했던 관전류 전자 1개당 변환되는 광자의 수 0.0020을 곱해 1개 관전류 전자에 대한 Air Kerma 값(Gy electron^{-1})을 얻은 후, 관전류 10 ma에 해당하는 1초당 타겟에 충돌하는 전자 개수를 나타내는 $6.25 * 10^{16}$ electron sec^{-1}를 추가로 곱해 초당 외부 Air Kerma 값을 구하였다(Gy sec^{-1}). 이 수치를 NCRP Report 147에서 제시하는 일반인 구역의 주당 Air Kerma 안전기준 0.02 mGy wk^{-1}와 비교하기 위해 엑스레이 튜브가 1주간 대한민국 근로기준법에서 규정하는 법정근로시간인 40시간(40 * 3600초) 가동되는 경우를 가정하여 주당 차폐벽 외부 Air Kerma (mGy wk^{-1}) 양으로 환산하였다.

차폐벽 두께와 외부 Air Kerma 간의 관계를 보기 위해 1, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 cm 두께 콘크리트 차폐벽에 대해서 계산을 수행하였으며, 한편으로는 차폐벽을 제거한 상태에서 내벽 지점에서의 일차빔 구역 원형 단면의 근사적 반경에 해당하는 50 cm 반지름의 높이 2 cm인 원기둥 모양 셀을 내벽에 밀착하는 위치에 잡은 후 F4 Tally를 적용, 위와 같은 방법으로 MCNP 계산을 수행하여 내벽에서의 주당 Air Kerma를 구한 뒤 이 값을 기준으로 반가층 방법을 적용하여 각 벽 두께별로 낸 외벽에서의 주당 Air Kerma 손계산 결과를 MCNP 계산 결과와 비교하였다. 반가층 계산은 엑스레이 튜브를 450 kV로 구동시킬 때의 근사적인 콘크리트 반가층 두께 3.3 cm마다 Air Kerma를 절반씩 감소시키는 방법으로 수행하였다.

결 과

Fig. 4에 Geometry Splitting이 미적용된 광자선원 기반 시뮬레이션 계산 결과를 정리하였다. 계산시간이 80 cm 두께 벽의 경우 74.19분으로 광자의 에너지 스펙트럼을 계산하기 위해 수행했던 전자선원 기반 시뮬레이션 소요시간의 약 12%로 감소하였으며 상대오차는 1 cm 두께 벽의 경우에서 0.0008로 시작하여 40 cm 두께 벽의 경우 0.06977에 이르기까지 모두 0.1 미만으로 유지되었다. 하지만 50 cm 두께와 60 cm 두께 벽의 경우에 상대오차가 각각 0.2, 0.7를 초과하였고 70 cm 이상 두께 벽의 경우 여전히 외부에서 입자가 검출되지 않았다.

Figs. 5, 6에 Geometry Splitting이 적용된 NPS 10^7의 광자기반 시뮬레이션 결과를 Geometry Splitting이 적용되지 않은 기존 광자선원 기반 시뮬레이션 결과와 함께 나타내었다. 30 cm 이하 두께 벽 외부에서는 Geometry Splitting이 적용되어 계산된 Fluence 값의 적용 없이 계산된 값과 첫 번째 유효숫자에서 서로 일치하며 매우 근소한 차이를 보였으나, 40 cm 이상의 두께 벽 외부에서는 두 값이 첫 번째 유효숫자부터 불일치하며 유의미한 차이를 보였다. 50 cm 두께 벽 외부에서 상대오차가 0.1를 초과하고 70 cm 이상의 두께 벽 외부에서는 입자가 검출되지 않았던 기존 광자 기반 시뮬레이션 결과와는 달리, Geometry Splitting을 적용한 경우 모든 두께 차폐벽의 외부에서 입자가 검출되었으며 상대오

차가 0.01 이하로 극적으로 감소하여 신뢰성이 확보되었다. 계산시간은 차폐벽 두께에 따라 증가하였으며 40 cm 벽의 경우에 약 7시간, 80 cm 두께 벽의 경우에 약 12시간이 소요되었다.

Fig. 7에는 시뮬레이션으로 계산한 차폐벽 외부 주당 Air Kerma, 반가층 방법으로 계산한 차폐벽 외부 주당 Air Kerma, 그리고 NCRP Report 147에서 제시하는 일반인 구역 주당 Air Kerma 기준(0.02 mGy wk^{-1})이 함께 나타나 있다. 가로축은 콘크리트 차폐벽 두께, 세로축은 로그 스케일의 Air Kerma이다. 그래프에서 콘크리트 차폐벽 두께가 10 cm 증가하면 외부 Air Kerma는 두께 증가 전 차폐벽 외부 Air Kerma 값의 약 10%로 감소함을 확인할 수 있었는데 이는 반가층 방법을 적용 시 약 3개의 반가층에 해당하는 두께인 10 cm마다 Air Kerma가 약 1/8, 즉 12.5%로 줄어드는 것과 유사한 결과로, 실제로 반가층 방법으로 도출된 그래프와 시뮬레이션으로 도출된 그래프의 기울기가 각각 거의 일정하며 서로 유사하다. 그러나 내벽의 레퍼런스 Air Kerma 값과 1 cm 두께 차폐벽 외부 Air Kerma 간의 차이는 반가층 공식으로 예측되는 양보다 2배 정도 크게 나타났으며, 여기서 벌어진 간극으로 인해 모든 벽 두께에서 반가층 방법 계산 값이 시뮬레이션 계산 값을 상회하고 있다.

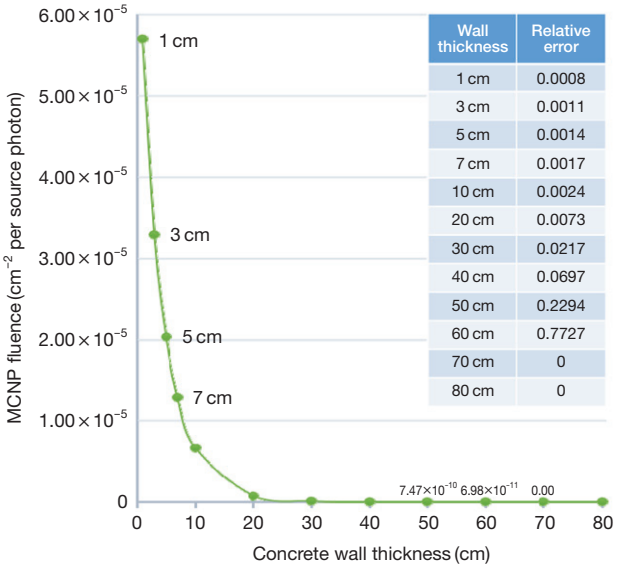

Fig. 4. MCNP simulation result without geometry splitting: outside concrete wall photon fluence.

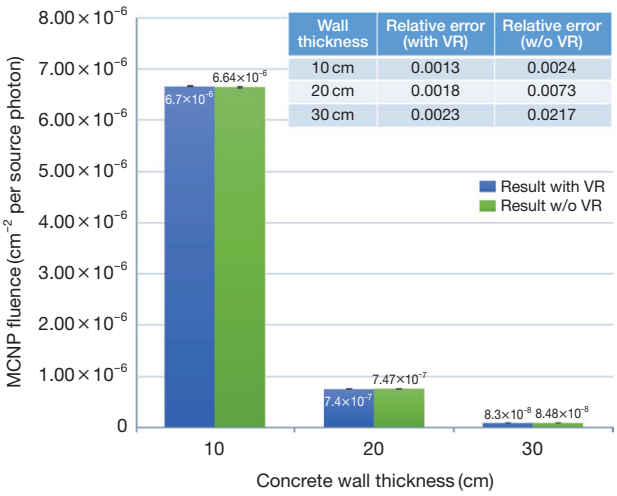

Fig. 5. Effect of Variance Reduction (Geometry Splitting) on primary beam photon source based MCNP simulation result: photon fluence, outside concrete wall of thickness 10 cm, 20 cm, 30 cm.

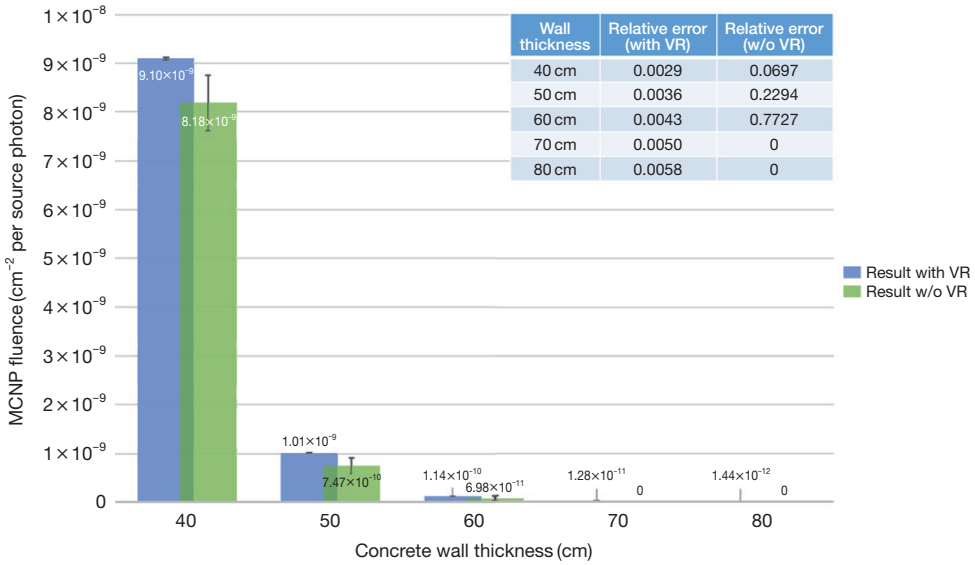

Fig. 6. Effect of Variance Reduction (Geometry Splitting) on primary beam photon source based MCNP simulation result: photon fluence, outside concrete wall of thickness 40 cm, 50 cm, 60 cm, 70 cm, 80 cm.

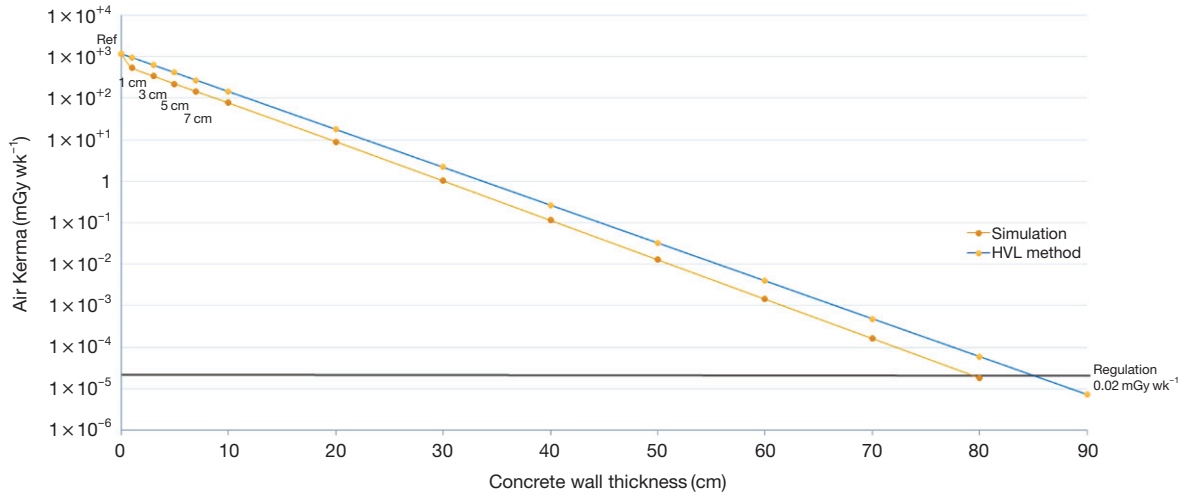

Fig. 7. Comparison between MCNP simulation result and Half Value Layer method result which are converted into mGy wk^{-1} unit for comparison with safety goal 0.02 mGy wk^{-1} stated by NCRP Report 147.

고 찰

Geometry Splitting을 적용한 결과와 적용하지 않은 결과가 30 cm 이하의 두께 차폐벽 경우에 대해 사실상 일치하였으므로 시뮬레이션 방법론에는 문제가 없다고 가정하면, 차폐벽 두께에 따른 Air Kerma의 기울기가 거의 동일한데도 내벽의 레퍼런스 Air Kerma 값과 1 cm 두께 차폐벽 외부 Air Kerma 간의 차이가 반가층 공식으로 예측되는 양보다 2배 정도 크게 나타난 것은 빔의 벽에 대한 방향성이 크게 작용하는 것으로 보인다. 내벽의 Air Kerma를 측정하기 위해 내벽 위치에 위치시켰던 얇은 원기둥 모양 Tally에서의 측정값과 내벽에 접하는 반지름 30 cm의 구 Tally에서의 측정값이 방사선의 역제곱법칙에 의해 차이가 많이 났던 것과 같은 이치로 반가층 방법이 제시하는 값과 외벽에 접하는 반지름 30 cm의 구 Tally에서 측정한 값 또한 차이가 나는 것이라고 생각할 수도 있으나 1 cm 및 80 cm 외벽 위치에 내벽 위치에서 사용했던 것과 동일한 Tally를 놓아 측정한 Fluence와 외벽에 접하는 30 cm 구에서 측정한 Fluence에 양쪽 모두 DE Card 및 DF Card를 통해 Fluence-Air Kerma 간 환산계수를 적용한 값이 4.26916×10^{-5}와 3.07320×10^{-5} (1 cm) 1.26823×10^{-12}와 1.01397×10^{-12} (80 cm)로 각각 약 40%, 25%의 오차를 보여 구형 Tally의 위치가 그래프에서 보여지는 반가층 계산 결과와 시뮬레이션 계산 결과 간의 약 100% 및 그 이상의 오차를 설명할 만큼 중요한 요소는 아님을 알 수 있다.

따라서 이는 빔의 벽에 대한 방향성으로 인해 빔이 반가층 방법에서 전제하는 만큼 외부의 한 지점에 '집광'되지 못하는 것으로 해석된다. 반가층의 감쇠 특성은 시뮬레이션 결과 벽의 두께가 증가함에 따라 비교적 명확히 나타났으므로 차폐가 필요한 상황에서 빔의 방향성과 규격 및 차폐벽의 재료 등에 따른 집광도 차이를 시뮬레이션 등의 방법으로 조사하는 것이 반가층 방법을 이용한 차폐의 효율성 분석을 위해 중요할 것이다. 또한 빔의 방향성이 강할 경우 시뮬레이션 결과가 반가층 방법 계산 결과를 상회하지 않는지 확인할 필요가 있다.

본 연구의 대상인 엑스레이 튜브 및 콘크리트 차폐벽의 경우 그래프 상 안전기준을 달성하기 위해 반가층 방법이 제시하는 콘크리트 차폐벽 두께와 시뮬레이션이 제시하는 두께의 차이가 5 cm 이내이므로 업계에서 통상적으로 행하는 반가층 방법을 이용한 차폐벽 설계의 경제성 및 타당성이 확인되었다. 또한 시뮬레이션 계산 결과 안전선량기준을 달성하기 위해 80 cm 이상 두께의 차폐벽이 필요한 것으로 나타났고, 실제 비파괴검사 시 차폐벽과 엑스레이 튜브 사이의 검사물이 차폐체 역할을 하며 본 연구에서 벽과 튜브의 거리와 튜브의 가동시간 및 반가층 두께 등을 보수적으로 설정한 것을 감안하면 S사의 차폐 설계가 적절했음을 알 수 있었다.

결 론

본 연구에서는 저에너지 엑스레이 튜브에 비해 운용 및 차폐 사례가 상대적으로 적은 비파괴검사용 450 kVp 엑스레이 튜브에 대해 분산감소 기법 중 Geometry Splitting 방법을 적용한 MCNP 시뮬레이션을 통해 콘크리트 차폐벽 두께를 보수적으로 계산하였다. 그 결과 NCRP Report 147에서 제시하는 주당 Air Kerma 안전기준 0.02 mGy wk^{-1}를 달

성하기 위해 필요한 콘크리트 차폐벽의 두께가 80 cm인 것으로 나타났으며 이는 반가층 두께마다 선량 및 Air Kerma 등이 절반으로 줄어든다는 가정 하에 외부 Air Kerma를 간편히 손계산하는 업계 통칭 반가층 방법이 제시하는 결과 두께보다 5 cm 이내의 근소한 차이로 작았다. 따라서 콘크리트 차폐벽 설계 시 반가층 방법으로 계산한 차폐벽 두께를 보수적 상계로서 사용하는 것이 간편하면서도 경제적이고 합리적임을 확인할 수 있었다.

하지만 반가층 방법과 시뮬레이션 결과의 격차는 주로 빔의 방향성 및 규격의 영향으로 빔이 반가층 방법에서 전제하는 만큼 외부의 한 지점에 집광되지 못하는 것을 의미하여, 450 kVp 엑스레이 튜브 외 일반적인 방사선 선원을 차폐할 때 빔의 방향성과 규격 및 차폐벽의 재료 등에 따른 집광도 차이를 시뮬레이션 등의 방법으로 조사하는 것이 반가층 방법을 이용한 차폐의 경제성과 타당성 분석을 위해 중요할 것이다. 또한 빔의 방향성이 강한 선원을 차폐할 때는 시뮬레이션 결과가 반가층 방법 계산 결과를 상회하지 않는지 확인할 필요가 있을 것이다.

참 고 문 헌

Hendricks JS and Booth TE. 2006. Monte-Carlo Methods and Applications in Neutronics, Photonics and Statistical Physics. Volume 240 of the series Lecture Notes in Physics. 83-92.

MacConn RJ, Gesh CJ, Pagh RT, Rucker RA and Williams RG. 2011. Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling. U.S. Customs and Border Protection and Domestic Nuclear Detection Office. 108.

Xu XG and Eckerman KF. 2009. Handbook of Anatomical Models for Radiation Dosimetry. CRC Press. 44.

Received: 24 February 2016
Revised: 3 March 2016
Revision accepted: 15 March 2016