

웹 기반 표준한국인 장기 흡수선량 및 유효선량 평가 시스템 개발

박수연*, 염연수*, 김재현*, 이현수*, 한민철*, 정종휘**, 김찬형*

*한양대학교 원자력공학과, **국립암센터

2013년 12월 11일 접수 / 2013년 12월 26일 1차 수정 / 2013년 12월 30일 2차 수정 / 2014년 1월 3일 채택

최근 표준한국인 성인남녀 복셀 팬텀 한 쌍인 High-Definition Reference Korean-Man (HDRK-Man)과 High-Definition Reference Korean-Woman (HDRK-Woman)을 개발한 바 있다. HDRK-Man과 HDRK-Woman은 각각 한국인 성인 남성과 여성을 대표하므로 이들을 이용하면 한국인 고유의 유효선량을 계산할 수 있다. 이러한 한국인 고유의 유효선량을 계산하기 위해서는 표준한국인 팬텀을 이용한 몬테칼로 선량계산을 수행하여야 한다. 하지만 이러한 몬테칼로 선량계산은 전산인체모델에 대한 이해와 고도의 몬테칼로 전산모사 기술이 요구되기 때문에 몬테칼로 전산모사 경험이 적은 연구자들에게는 접근성이 용이하지 않다. 최근 UFPE (Federal University of Pernambuco) 연구팀에서는 몬테칼로 선량계산 온라인 시스템인 CALDOSE_X를 운영하고 있다. CALDOSE_X는 사용자가 온라인상에서 직접 입력한 선원조건에 따라 곧바로 몬테칼로 선량계산을 수행하고 계산된 결과를 제공해주는 온라인 서비스이다. 따라서 CALDOSE_X를 이용하면 몬테칼로 전산모사 경험 없이도 누구나 쉽게 원하는 선원조건에 대한 선량계산을 수행할 수 있다. 하지만 CALDOSE_X에서 제공하는 선량값은 서양인 전산팬텀을 이용하기 때문에, 이를 한국인 종사자에 대한 방사선 방호목적으로 사용하기에는 여전히 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 온라인상에서 사용자가 입력한 선원조건에 따라 실시간으로 표준 한국인에 대한 유효선량을 계산할 수 있는 웹 기반 표준한국인 선량평가 시스템을 구축하였다.

중심어: HDRK phantoms, 몬테칼로 전산모사, Geant4, 유효선량, 웹 기반 선량평가 시스템

1. 서론

유효선량[1]은 방사선에 의한 인체의 확률론적 위험도를 평가하기 위해 사용되는 가장 중요한 방사선 방호량이다. 유효선량은 인체를 이용하여 직접적으로 측정하는 것이 불가능하기 때문에 인체전산팬텀과 몬테칼로 전산모사 기법을 사용하여 주로 평가해 왔다. 최근 방사선방호 위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)는 체적소 모델(voxel model)인 “ICRP 표준 팬텀”을 이용하여 외부피폭에 대한 유효선량을 계산하였으며, 이들을 방사선 방호 목적으로 사용할 것을 권고하고 있다[1-3]. 하지만 ICRP 표준 팬텀 제작에 사용된 ICRP 표준인 자료[4]는 서유럽과 북미인 즉, 코케이션의 표준 체격, 체형 및 생리등의 자료를 토대로 수립되었기 때문에 해부학적으로 서양인과 차이가 있는 한국인을 대표하는 데는 다소 한계가 있다.

최근 표준한국인 성인남녀 복셀 팬텀 한 쌍인 High-Definition Reference Korean-Man (HDRK-Man)[5]과 High-Definition Reference Korean-Woman (HDRK-

Woman)[6]이 개발된 바 있다. HDRK-Man과 HDRK-Woman은 한국인 사체의 컬러해부영상을 기반으로 한국인의 해부학적 구조를 반영하였으며, 이들의 키, 몸무게, 장기 무게들은 모두 표준한국인 자료[7]에 맞추어져 제작되었다. 따라서 HDRK-Man과 HDRK-Woman은 각각 한국인 성인 남성과 여성을 대표할 수 있으며, 이들을 이용하면 한국인 고유의 유효선량을 계산할 수 있다.

한국인 고유의 유효선량을 계산하기 위해서는 HDRK-Man과 HDRK-Woman을 몬테칼로 코드에 입력하여 몬테칼로 선량계산을 수행하여야 한다. 이와 같은 몬테칼로 기법에 의한 선량 평가는 고도의 전산코드 활용 기술이 요구되기 때문에, 몬테칼로 전산모사 경험이 적은 일반 연구자들에게는 접근성이 용이하지 않다. 비록 몬테칼로 선량계산을 직접 수행하지 않고 전산팬텀을 이용하여 미리 계산된 선량환산계수를 이용하여 선량평가가 가능하지만, 미리 계산된 선량환산계수는 AP (anterior-posterior), PA (posterior-anterior), RLAT (right lateral), LLAT (left lateral), ISO (isotropic) 등과 같은 일부 선원조건에 대해서만 제공되기 때문에 다양한 선원조건에 대한 선량평가를 수행하기에는 한계가 있다.

최근 UFPE (Federal University of Pernambuco) 연구

교신저자 : 김찬형, chkim@hanyang.ac.kr
서울시 성동구 행당동 17 한양대학교 원자력공학과



Fig. 1. Reference Korean male and female phantoms: HDRK-Man (left) and HDRK-Woman (right).

팀에서는 몬테카를로 선량계산 온라인 시스템인 CALDOSE_X(www.caldose.org)를 운영하고 있다. CALDOSE_X를 이용하면 누구나 쉽게 원하는 선원조건에 대한 선량계산을 수행할 수 있다. 하지만 CALDOSE_X에서 제공하는 선량값은 서양인을 기준으로 UFPE에서 자체 개발한 전산팬텀을 이용하기 때문에, 이를 한국인 종사자에 대한 방사선 방호목적으로 사용하기에는 여전히 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 표준 한국인에 대한 장기 흡수선량

및 유효선량을 실시간으로 평가할 수 있는 웹 기반 시스템을 구축하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 표준한국인 성인남녀 복셀 팬텀

본 연구에서는 선량계산을 위해 한양대학교에서 제작한 한국인 남녀 복셀 팬텀 HDRK-Man[5]과 HDRK-Woman[6]을 이용하였다(그림 1). 이들은 한국과학기술정보연구원(KISTI)에서 제공하는 해상도 0.2 mm급의 고해상도 컬러해부영상을 기반으로 제작되었으며, 방사선에 민감한 모든 장기와 조직들이 정밀하게 표현되어 있다. 뿐만 아니라 키, 몸무게, 장기 무게가 모두 표준한국인 자료[7]에 맞추어져 있기 때문에 서양인을 기준으로 제작된 여러 모델들과는 차별된 표준한국인 모델이다.

2.2. 웹 기반 선량평가 시스템 구축

본 연구에서는 선량계산을 수행하기 위해 사용자가 온라인상에 접속하기 위한 웹 기반 선량평가 시스템을 구축하였다. 먼저 여러 사용자가 동시에 선량계산을 수행할 수 있도록 클러스터를 구축하였다. 클러스터는 Intel Core™ 2 Quad Processor Q6600 (4 CPUs)와 4GB RAM 이 탑재된 컴퓨터 6대로 총 24개의 CPU로 구성되어 있다(그림 2). 컴퓨터들 사이의 빠른 정보교환을 위하여 기가비트 전송이 가능한 NETGEAR®의 JGS524 스위칭 허브와 Marvell®의 88E8056 LAN 카드를 CAT.6 UTP 케이블로 연결하였다. 연결을 완료한 후 클러스터 전용 리눅스 운영체제인 ROCKS®5.4 (Cent OS 5.8 (Final))을 설치하였다. 그림 3은 ROCKS®5.4이 제공하는 Ganglia Cluster Toolkit이 실행된 모습이며 6대 컴퓨터 즉, 총 24개의 CPU의 사용현황을 보여주고 있다.

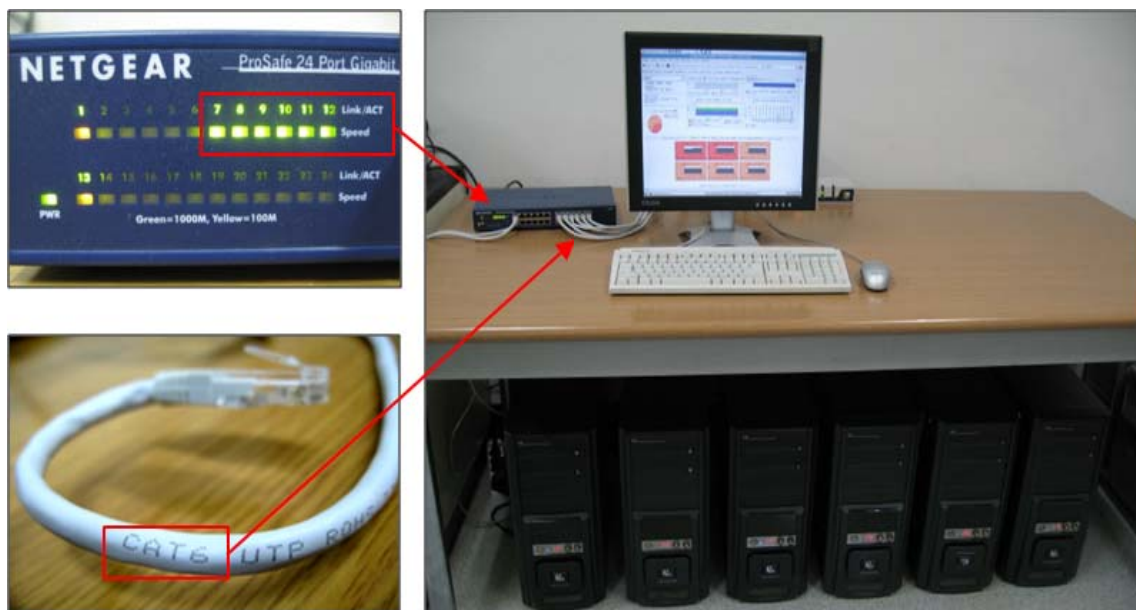


Fig. 2. Linux-based cluster server computer constructed in the present study for Monte Carlo simulation.



Fig. 3. View of running Ganglia Cluster Toolkit provided in ROCKS®5.4.



Fig. 4. Scheme for linking web sever to cluster sever by using PHP and LIBSSH2.

다음으로, 사용자가 온라인상에서 선원 조건을 입력하고 이를 클러스터에 전송할 수 있는 클러스터 통신용 웹 사이트를 개발하였다. 웹 사이트 서버는 리눅스 시스템인 Ubuntu 기반으로 구축하였으며, 웹 서버 구축에 필요한 Apache2는 2.2.22 버전을, 웹 서버 운영 시에 필요한 DB 관리 프로그램인 MySQL은 14.14 버전을 설치하였다. 사용자가 웹 사이트에서 선원 조건을 입력할 수 있도록 GUI 기반의 웹 사이트를 HTML (Hyper Text Markup Language)을 이용하여 제작하였다. 그리고 PHP5 (Personal Hypertext Preprocessor 5) 프로그래밍을 이용하여 웹 서버에서 클러스터로 접속하여 사용자가 입력한

파라미터를 클러스터로 넘겨주는 프로그램을 제작하였다. 이를 위해, 본 연구에서는 PHP 플러그인 중 하나인 LIBSSH2를 이용하였다(그림 4).

마지막으로 사용자가 계산된 선량결과를 확인할 수 있는 결과전송 프로그램을 개발하였다. 선량결과를 확인하기 위해 사용자가 직접 클러스터에 접근하는 것은 보안상으로도 위험할 뿐만 아니라 사용자 입장에서도 매우 불편하다. 따라서 계산이 완료된 후 자동으로 사용자가 입력한 이메일 주소로 선량결과를 전송하는 프로그램을 개발하였다. 이를 위해 본 연구에서는 메일전송 프로토콜 중 하나인 SMTP (Simple Mail Transfer Protocol)를 통해 사

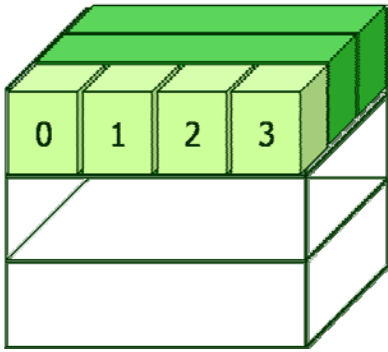


Fig. 5. Conceptual view of voxel description by *G4VNestedParameterisation* class.

용자의 이메일로 전송되도록 프로그래밍 하였다. 이는 C++ 기반으로 작성되었으며, 메일전송에 필요한 프로토콜을 지원하는 cURL 라이브러리를 이용하였다. cURL 라이브러리는 메일 전송에 사용되는 여러 프로토콜(SMTP, POP3, IMAP 등)을 사용할 수 있으며, HTML기반의 메일도 전송이 가능하다. 본 연구에서 개발한 결과 전송 프로그램은 사용자가 편하게 볼 수 있도록 일반 Text 문서가 아닌 HTML 형태로 변환 후 메일로 전송하게끔 제작되었다. 일반 Text 문서로 결과를 보게 될 경우에는 사용자의 운영체제(Windows, Linux, Mac 등), 사용하는 메일 서비스(Naver, Daum, G-mail 등), 웹 브라우저(Explore, Chrome, Firefox 등)에 따라 결과가 제 각기 다르게 정렬되기 때문에, 사용자의 PC 환경에 따라 정렬이 안 되어있는 결과를 볼 수 있다. 하지만 HTML 표를 이용하는 경우, 사용자는 PC 환경과 상관없이 정렬된 결과를 볼 수 있다.

2.3. Geant4 몬테칼로 전산코드를 이용한 선량평가 모듈 개발

본 연구에서는 앞서 구축한 웹기반 시스템을 통해 표준 한국인 선량계산을 수행하기 위한 선량평가모듈을 개발하였다. 먼저, 표준한국인 남녀 복셀 팬텀(HDRK-Man, HDRK-Woman)을 클러스터 서버에 설치된 Geant4 몬테칼로 코드에 입력하였다. 본 연구에서는 복셀 데이터를 입력하기 위한 여러 Geant4 클래스들[8] 중 *G4VNestedParameterisation* 클래스를 이용하여 HDRK-Man과 HDRK-Woman 복셀 팬텀을 Geant4 코드에 입력하였다. *G4VNestedParameterisation* 클래스를 사용하면 Geant4에서 그림 5와 같이 직육면체 형태의 3차원 공간을 x축, y축, z축에 대해 일정한 간격으로 나누어 복셀을 표현할 수 있다. 또한, *G4VNestedParameterisation* 클래스를 이용하여 팬텀과 같은 다수의 복셀을 표현할 경우, 다른ジオ메트리 관련 클래스들에 비해 메모리 사용량이 적고, 빠른 계산이 가능하다는 장점이 있다.

입력된 복셀 팬텀의 장기선량 및 유효선량을 계산하는 방법은 다음과 같다. 먼저 입자를 수송하면서 발생하는 축적에너지를 *G4PSEnergyDeposit* 스코어 클래스를 사용하여 각각의 복셀에 저장한다. 이와 같은 방식으로 전체 입자수송을 모사하고, 입자수송이 끝난 후 *G4UserRunAction* 클래스를 이용하여 각 복셀별로 축적된 에너지를 장기별로 합산시킨다. 최종적으로 합산된 결과를 바탕으로 장기선량 및 유효선량을 계산하게 된다.

마지막으로 클러스터로 전송된 선원조건에 따라 선량계산을 수행하도록 하였다. Geant4에서 선원조건을 정의하기 위해서는 기본적으로 *G4UserPrimaryGeneratorAction* 클래스에서 사용자가 직접 프로그래밍을 해야 한다.

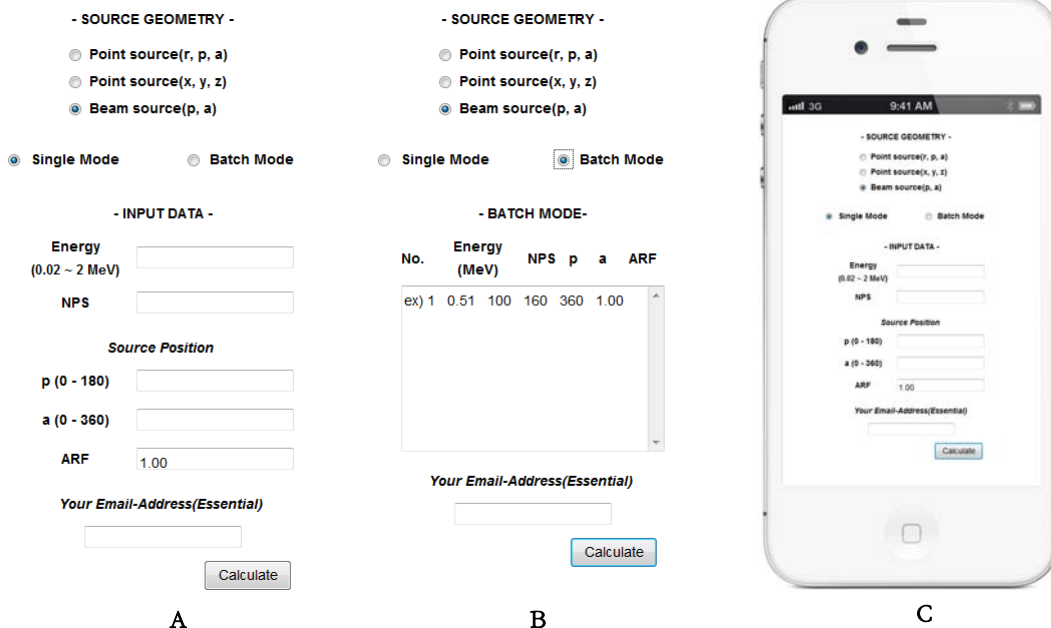


Fig. 6. Main webpage of the developed online dose calculation system: (Fig. 6A) single mode, (Fig. 6B) batch mode, and (Fig. 6C) view in a smart phone.

Geant4 Simulation Result
 HUREL Administrator <churelab@gmail.com>
 보낸 날짜: 2010-11-29 (월) 오후 7:34
 받는 사람:

Input summary		Organ Doses				
Source	Point(x, y, z)	Organ Name	Man		Woman	
Energy	0.1 MeV		Dose (Sv/#)	Relative error	Dose (Sv/#)	Relative error
NPS	100000	RBM	1.41798e-16	0.0254774	2.63901e-17	0.052859
x	0	Colon	3.89276e-16	0.0177117	8.04093e-17	0.0507477
y	0	Lung	2.54633e-18	0.158437	4.69699e-19	0.454179
z	0	Stomach	2.22464e-17	0.151579	3.45828e-19	0.686636
ARF	1	Breast	0	0	1.95077e-19	0.645511
		Gonads	3.43645e-16	0.0545063	1.80377e-16	0.148673
		Bladder	1.7985e-14	0.00475583	5.5937e-16	0.0500541
		Oesophagus	1.23398e-18	0.908618	0	0
		Liver	1.25385e-17	0.0741835	1.31292e-18	0.241161
		Thyroid	0	0	0	0
		Bone surface	1.67222e-16	0.00685867	8.35198e-17	0.0120053
		Brain	0	0	1.61553e-20	1.09099
		Salivary glands	0	0	0	0
		Skin	2.82317e-17	0.0169208	1.03586e-16	0.00908171
		Adrenals	1.7153e-17	0.434175	1.34243e-19	1.09099
		ET region	0	0	0	0
		Gall bladder	5.02622e-17	0.302102	2.5435e-18	0.62155
		Heart	1.50504e-18	0.209285	9.71963e-20	0.752434
		Kidneys	4.30906e-17	0.082266	3.36093e-18	0.267824
		Lymphatic nodes	2.12137e-17	0.0777494	1.27824e-16	0.027902
		Muscle	7.41549e-17	0.00675348	8.93307e-17	0.00553615
		Oral mucosa	0	0	0	0
		Pancreas	3.78646e-17	0.100752	1.69424e-18	0.738821
		Prostate(M)/Uterus(W)	1.39446e-15	0.076232	2.52887e-16	0.0418708
		Small intestine	1.06422e-15	0.0117916	2.38731e-17	0.0882416
		Spleen	2.45056e-17	0.107709	1.29853e-18	0.515505
		Thymus	3.61229e-18	0.794249	0	0
		Lens	0	0	0	0
Effective Dose						
ED (Sv/#)	Relative error					
4.48815e-16	0.0442549					

Fig. 7. Example of dose calculation results for point source sent by email.

다. 하지만 이러한 방식은 선원조건이 바뀔 때 마다 컴파일 일을 해야 되며, 이는 시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라 두 명 이상 동시에 사용할 경우 충돌이 일어날 수도 있다. Geant4에서는 새로 컴파일 하지 않고 선원을 변경할 수 있는 매크로(Macro) 형태의 입력을 제공한다. 따라서 선원조건에 맞는 매크로 파일만 제작하면 다시 컴파일을 하지 않아도 선원조건을 새롭게 정의할 수 있다. 이에 본 연구에서는 클러스터 서버로 전송된 선원조건을 Geant4에 맞는 매크로 파일로 변경해주는 프로그램을 제작하였고, 이를 이용하여 선량계산이 수행되도록 하였다.

3. 결과 및 논의

3.1. 웹 기반 표준한국인 선량평가 시스템 개발

본 연구에서는 웹 기반 표준한국인 선량평가 시스템을 개발하였다. 그림 6은 개발된 온라인 시스템의 웹 사이트(<http://hurel.hanyang.ac.kr/>)를 보여주고 있다. 참고로 웹 사이트는 사용자의 편의를 위해 스마트폰에서도 보기 편한 형태로 제작되었으며(그림 6C), 하나의 선원조건만

입력 할 수 있는 싱글모드(그림 6A)와 여러 선원조건을 한 번에 입력할 수 있는 배치모드(batch mode)(그림 6B)를 제공한다. 개발된 온라인 시스템은 점 선원과 빔 선원에 대한 선량계산을 수행할 수 있도록 제작되었으며, 이용가능한 입자의 에너지는 0.02-10 MeV 사이의 에너지이다. 참고로 현재 개발된 선량평가 온라인 시스템은 광자에 대한 선량계산만 가능하다. 그림 7과 8은 이메일로 전송된 선량계산 결과를 보여준다. 결과에는 사용자가 입력한 선원조건, 유효선량, 장기선량을 차례로 보여주고 있으며 동시에 계산된 값들의 정확성을 나타내는 상대오차를 보여준다.

3.2. 웹 기반 표준한국인 선량평가 시스템 검증

본 연구에서 개발한 웹 기반 선량평가 시스템을 검증하기 위하여 MCNPX 몬테칼로 코드를 이용한 유효선량 평가 결과와 비교하였다. 선량 비교를 위해 AP (anterior-posterior), PA (posterior-anterior), LLAT (left lateral) 방향에 대한 0.03-10 MeV의 에너지를 갖는 광자 빔에 대한 유효선량을 계산하였다. 사용한 초기 입자의 수는 10^7 - 10^9 개로 계산 결과가 모두 10%이내가 되도록 하였다. 본

Geant4 Simulation Result
 HUREL Administrator <hurelab@gmail.com>
 보낸 날짜: 2010-11-29 (월) 오후 7:54
 받는 사람:

Input summary		Organ Doses				
Source	Beam(p, a)	Organ Name	Man		Woman	
Energy	0.1 MeV		Dose (Sv cm2)	Relative error	Dose (Sv cm2)	Relative error
NPS	1e+06	RBM	9.47122e-14	0.0465381	8.88947e-14	0.0520454
p	0	Colon	5.83007e-15	0.269333	1.97308e-14	0.220133
a	0	Lung	1.03409e-13	0.038623	1.30682e-13	0.0338579
ARF	1	Stomach	1.96425e-14	0.30482	9.57876e-14	0.171752
		Breast	3.09514e-13	0.145843	3.5373e-13	0.0634253
		Gonads	4.86498e-15	0.785236	1.32574e-14	0.538638
		Bladder	1.65861e-15	0.895066	3.74188e-15	0.575242
		Oesophagus	6.66207e-14	0.295578	7.22741e-14	0.264459
		Liver	3.48366e-14	0.0336645	8.45972e-14	0.0338754
		Thyroid	9.30091e-14	0.558826	6.08113e-14	0.418482
		Bone surface	1.54757e-13	0.0237468	1.51071e-13	0.0237657
		Brain	3.68025e-13	0.0246584	3.67713e-13	0.0255898
		Salivary glands	8.72153e-14	0.179206	1.5101e-13	0.0994
		Skin	1.05045e-13	0.016325	1.04855e-13	0.0176594
		Adrenals	6.76492e-15	0.898272	5.00484e-14	0.783091
		ET region	1.03033e-13	0.17283	9.76532e-14	0.150663
		Gall bladder	6.69694e-15	0.877012	7.82006e-14	0.234526
		Heart	7.49776e-14	0.0852856	1.01681e-13	0.058944
		Kidneys	1.81424e-14	0.132294	4.15087e-14	0.123135
		Lymphatic nodes	7.2848e-14	0.167643	7.18039e-14	0.035448
		Muscle	7.83245e-14	0.00898388	6.95233e-14	0.0129553
		Oral mucosa	7.97563e-14	0.349356	1.46814e-13	0.222771
		Pancreas	1.3547e-14	0.334161	5.27255e-14	0.264736
		Prostate(M)/Uterus(W)	0	0	1.95142e-15	0.745116
		Small intestine	5.7844e-15	0.133346	2.21872e-14	0.123831
		Spleen	4.25704e-14	0.154568	7.19194e-14	0.14204
		Thymus	7.40428e-14	0.31277	9.88078e-14	0.446707
		Lens	1.98976e-13	0.21267	4.8645e-13	0.7729

Fig. 8. Example of dose calculation results for beam source sent by email.

계산에 사용된 물리모델(physics model)은 Geant4의 경우 *GAEMLiverMorePhysics*이고 MCNPX의 경우 MCPLIB (광자) 및 EL(전자) 라이브러리이다.

Geant4 및 MCNPX 코드를 이용한 각각의 유효선량 평가결과를 비교하여 그림 9에 제시하였다. 그 결과 모든 방향 및 에너지에 대해서 대부분 10% 이내로 유의한 차이를 보이지 않았다. 이러한 약간의 차이는 사용된 물리 모델의 차이 및 통계오차 등에 의한 것으로 판단된다. 이와 같이 본 연구에서 개발한 온라인(또는 웹기반) 시스템이 제공하는 선량평가 결과의 유효성을 확인할 수 있었다.

추가적으로 본 연구에서 계산한 표준한국인 유효선량을 ICRP 116 보고서[3]에 제시된 유효선량과 비교하였다 [그림 10]. 광자의 에너지가 0.08 MeV 이상인 경우 모든 방향 및 에너지에서 10% 이내로 유의한 차이를 보이지 않았다. 반면에 0.08 MeV 미만인 경우 대부분 10% 이상의 차이를 보였으며, 특히 PA 방향과 LLAT 방향 각각 0.03 MeV에 대해서 17%, 18%의 차이를 보였다. 결과적으로 인종간의 해부학적 차이는 고에너지 광자에 대한 선

량에는 영향을 미치지 않는 반면에 저에너지 광자에 대한 선량에 유의한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 따라서 투과력이 낮은 저에너지 광자 또는 하전입자에 대한 선량 평가를 수행할 경우 인종간의 해부학적 차이를 고려해야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 웹 기반 표준한국인 선량평가 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 사용자가 온라인에 접속하여 입력한 선원조건에 따라 실시간으로 몬테칼로 선량계산을 수행할 수 있는 높은 접근성을 제공함과 동시에 표준한국인 팬텀을 이용하므로 한국인 고유의 방사선 방호량을 계산할 수 있다. 따라서 개발된 웹 기반 시스템을 이용하면 몬테칼로 전산모사 기술이 없이도 누구나 원하는 한국인 선량을 쉽게 계산할 수 있기 때문에 특히 국내 방사선작업자들에 대한 방호 연구 발전에 큰 기여를 할 것으로 기대된다. 참고로 현재 개발된 시스템은 광자에

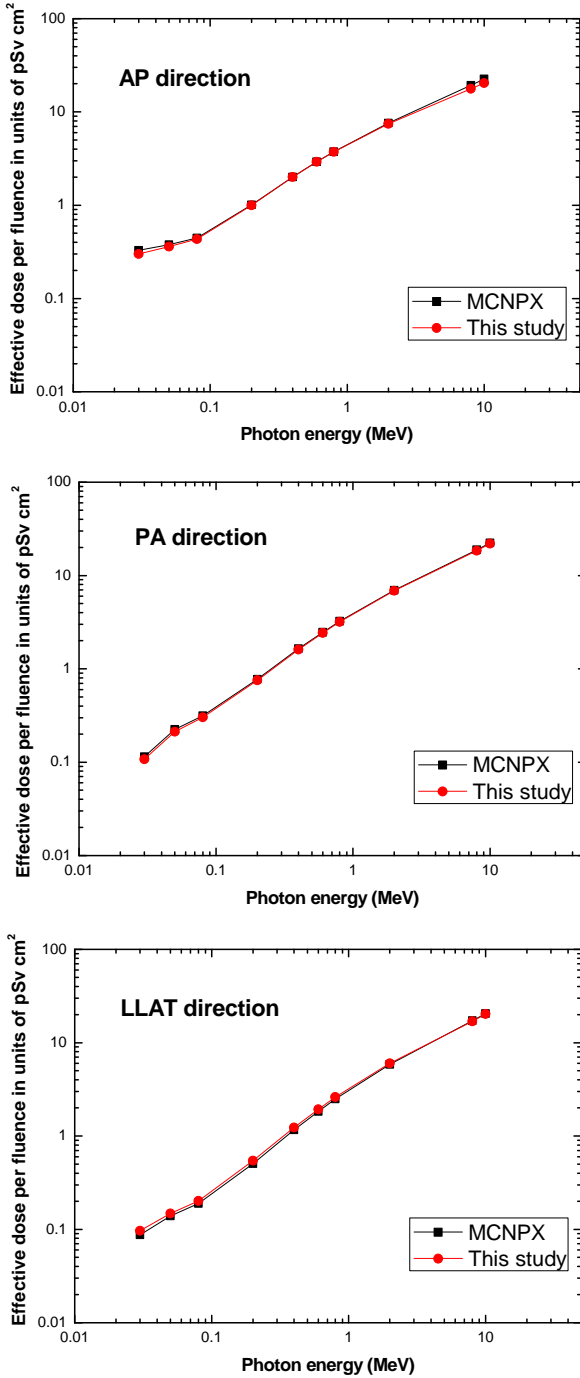


Fig. 9. Comparison of effective dose values calculated by the developed system and MCNPX for AP, PA, and LLAT directions.

의한 외부피폭 선량계산만 가능하다. 차후에는 다른 입자들(예, 전자, 중성자, 양성자 등) 뿐만 아니라 내부피폭 선량계산도 가능하도록 지속적인 업데이트를 진행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 일반연구자지원사업(No. 2011-0025496), 및 글로벌박사펠로우십사업(No. 2011-0007318, 2011-0030970).

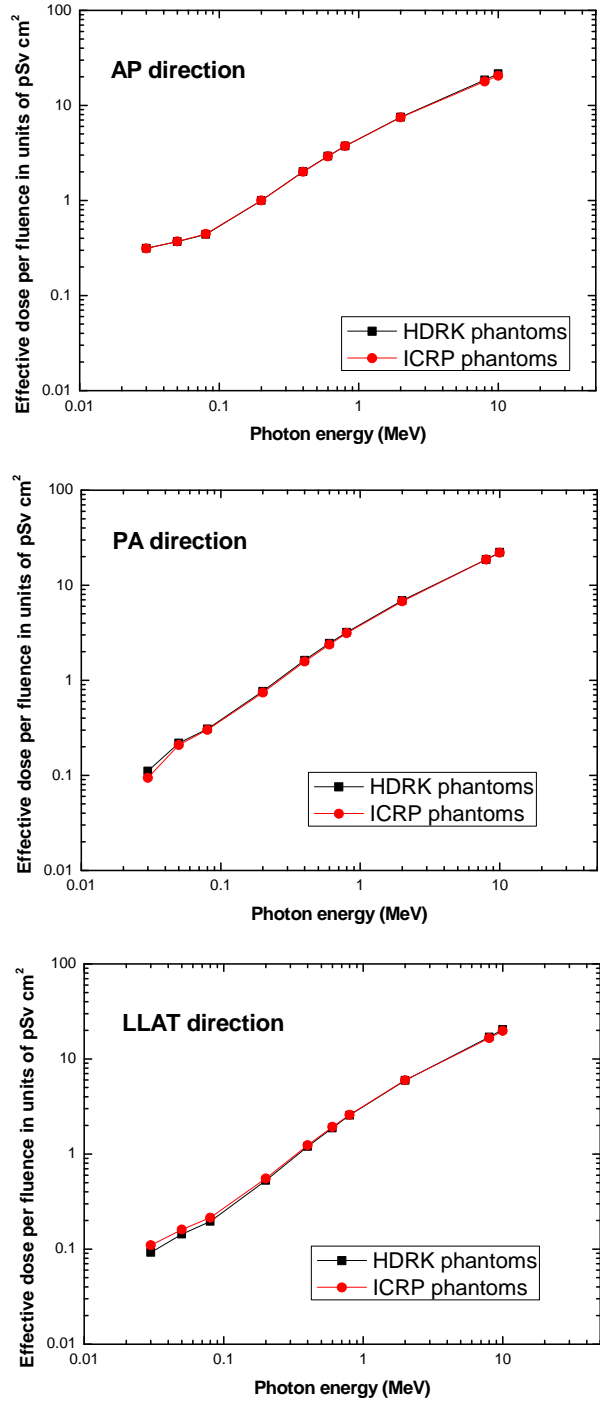


Fig. 10. Comparison of effective dose values between HDRK phantoms and ICRP phantoms for AP, PA, and LLAT directions.

참고문헌

1. International Commission on Radiological Protection, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Oxford; ELSEVIER Press, 2008.
2. International Commission on Radiological Protection, Adult Reference Computational Phantoms, ICRP Publication 110, Oxford; ELSEVIER Press, 2009.

3. International Commission on Radiological Protection, Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures, ICRP Publication 116. Oxford; ELSEVIER Press, 2010.
4. International Commission on Radiological Protection, Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values, ICRP Publication 89. Oxford; Pergamon Press, 2002.
5. Kim CH, Choi SH, Jeong JH, Lee C, Chung MS. HDRK-Man: a whole-body voxel model based on high-resolution color slice images of a Korean adult male cadaver. *Phys. Med. Biol.* 2008;53:4093-4106.
6. 함보경, 조건우, 염연수, 정종휘, 김찬형, 한민철. 한국인 기준여성 체적소형 모의체 개발. *방사선방어학회.* 2012;37:41-49.
7. Park S, Lee J, Kim JI, Lee YJ, Lim YK, Kim CS, Lee C. In vivo organ mass of Korean adults obtained from whole-body magnetic resonance data. *Radiat. Prot. Dosim.* 2005;118:275-279.
8. Schümann J, Paganetti H, Shin J, Faddegon B, Perl J. Efficient voxel navigation for proton therapy dose calculation in TOPAS and Geant4. *Phys. Med. Biol.* 2012;57:3281-3293.

Development of Reference Korean Organ and Effective Dose Calculation Online System

Sooyeon Park*, Yeon Soo Yeom*, Jae Hyeon Kim*, Hyun Su Lee*, Min Cheol Han*, Jong Hwi Jeong[†], and Chan Hyeong Kim*

*Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, [†]National Cancer Center at Korea

Abstract - Recently High-Definition Reference Korean-Man (HDRK-Man) and High-Definition Reference Korean-Woman (HDRK-Woman) were constructed in Korea. The HDRK phantoms were designed to represent respectively reference Korean male and female to calculate effective doses for Korean by performing Monte Carlo dose calculation. However, the Monte Carlo dose calculation requires detailed knowledge on computational human phantoms and Monte Carlo simulation technique which regular researchers in radiation protection dosimetry and practicing health physicists do not have. Recently the UFPE (Federal University of Pernambuco) research group has developed, and opened to public, an online Monte Carlo dose calculation system called CALDOSE_X(www.caldose.org). By using the CALDOSE_X, one can easily perform Monte Carlo dose calculations. However, the CALDOSE_X used caucasian phantoms to calculate organ doses or effective doses which are limited for Korean. The present study developed an online reference Korean dose calculation system which can be used to calculate effective doses for Korean.

Keywords : HDRK phantoms, Monte Carlo simulation, Geant4, Effective dose, Dose evaluation online system