

한국인 기준여성 체적소형 모의체 개발

함보경*, 조건우*,†, 염연수‡, 정중휘‡, 김찬형‡, 한민철‡

*과학기술연합대학원대학교, †한국원자력안전기술원, ‡한양대학교

2012년 1월 31일 접수 / 2012년 2월 17일 1차 수정 / 2012년 2월 27일 2차 수정 / 2012년 2월 29일 채택

한국인 기준남성 체적소형 모의체 HDRK-Man은 서양인과는 구별되는 한국인에 대한 내·외부피폭 관련 방사선방호량을 계산하기 위하여 개발되었다. 하지만 유효선량을 그 정의에 맞게 계산하기 위해서는 반드시 남녀 한 쌍의 인체 전산모의체가 필요하다. 이에 본 연구는 HDRK-Man과 한 쌍을 이루는 한국인 기준여성 체적소형 모의체 HDRK-Woman을 개발하였다. HDRK-Woman의 개발을 위하여 한국인 여성사체로부터 획득된 고해상도 연속절단면 컬러해부영상을 사용하여 제작된 체적소형 모의체의 키, 몸무게 및 장기무게를 한국인 기준자료에 맞게 조정하였다. 전반적인 조정 절차는 ICRP의 체적소형 기준모의체 개발 시 사용된 방법에 따라 키 조정, 뼈 무게 조정, 장기무게 조정, 몸무게 조정의 순으로 진행하였다. 특별히 기존에 사용되던 장기무게 조정 방법의 반복된 절차를 간소화하고 단점을 보완하기 위하여 장기무게 조정 프로그램을 자체적으로 개발하여 사용하였다. 최종 완성된 HDRK-Woman의 체적소 해상도는 x, y, z축 방향 순으로 2.0351×2.0351×2.0747 mm³이며, 체적소 행렬의 크기는 261×109×825이다. 또한 유효선량 계산 시 필요한 장기들을 포함한 총 39개의 장기 및 조직이 표현되어 있다. 본 연구는 HDRK-Woman을 MCNPX 몬테칼로 코드에 입력하여 외부에서 입사하는 광자빔에 대한 장기선량을 계산하였으며, HDRK-Man의 장기선량과 합산하여 한국인에 대한 유효선량 환산계수를 계산하고 ICRP 기준남녀 체적소형 모의체의 유효선량과 비교하였다. 고해상도 컬러해부영상을 기반으로 제작된 기준한국인 성인여성 체적소형 모의체 HDRK-Woman은 장기 및 조직이 정밀하게 표현되어 있으며, 일부 조정이 불가능한 장기를 제외한 대부분의 장기 및 조직들이 한국인 기준자료에 정확하게 일치하도록 조정되었다. 따라서 기준한국인 성인남성 체적소형 모의체 HDRK-Man과 함께 한국인에 대한 장기선량 및 유효선량을 정확하게 평가하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

중심어: 여성 체적소형 모의체, 컬러해부영상, 한국인 기준모의체, 몬테칼로, 유효선량

1. 서론

장기선량 및 유효선량은 직접적으로 측정하기 어려우므로 인체에 대한 전산모의체(computational human phantom)와 몬테칼로 전산모사 기법을 사용하여 간접적으로 계산하는 방법이 널리 사용되어 왔다. 대표적인 인체 전산모의체인 MIRD (Medical Internal Radiation Dose) 모의체는 구, 원통, 원뿔, 타원체 등으로 표현된 단순 기하학적 모델의 수학적 모의체로써 인체의 복잡한 해부학적 구조를 사실적으로 묘사하는데 근본적인 한계를 가지고 있다. 반면, CT (Computed Tomography)와 MR (Magnetic Resonance) 등의 의료영상을 기반으로 개발된 체적소형 모의체(voxel phantom)은 복잡한 모양의 인체 장기를 매우 사실적으로 표현한다. 이에 따라 ICRP (International Commission on Radiological Protection) 103 권고[1]에서는 기존의 수학적 모의체 대신 남녀 한 쌍의 체적소형 모의체를 기준모의체(Reference phantoms)로 결정하였으며, 이를 이용하여 내·외부피폭 관련 선량

환산계수를 다시 계산하고 ICRP 110 보고서[2]를 통해 발표한 바 있다.

유효선량은 남성과 여성의 장기별 등가선량을 평균한 값에 각 장기의 조직가중치(tissue weighting factor, W_T)를 곱한 값의 합으로 정의된다. ICRP 103 권고[1]를 통해 조직가중치가 0.05에서 0.12로 크게 증가한 유방은 그 크기가 남녀 간에 확연한 차이를 보인다. 유방의 남녀 간 크기 차이는 유방자체의 선량뿐만 아니라 유방의 차폐효과로 인하여 인체내부 다른 주요장기들의 선량에도 영향을 미칠 수 있다. 또한 조직가중치 0.08에 해당하는 생식기, 즉 남성의 정소와 여성의 난소는 서로 전혀 다른 위치와 형태를 지닌다. 이러한 차이와 더불어 전체 장기 전반적으로 남녀 간 약간씩의 밀도차이가 존재함을 고려할 때, 유효선량을 그 정의에 따라 정확하게 계산하기 위해서는 반드시 남녀 한 쌍의 인체모의체가 필요하다.

최근 한국인 성인남성을 대표할 수 있는 체적소형 모의체 HDRK-Man (High Definition Reference Korean-Man)이 개발되었다[3]. HDRK-Man은 한국인 성인 남성 사체의 고해상도 컬러해부영상을 이용하여 제작되었으며, 한국인 기준자료(Reference Korean data)[4]에 맞게

교신저자 : 조건우, kwcho@kims.re.kr
대전광역시 유성구 과학로 62 한국원자력안전기술원 방사선규제담당실

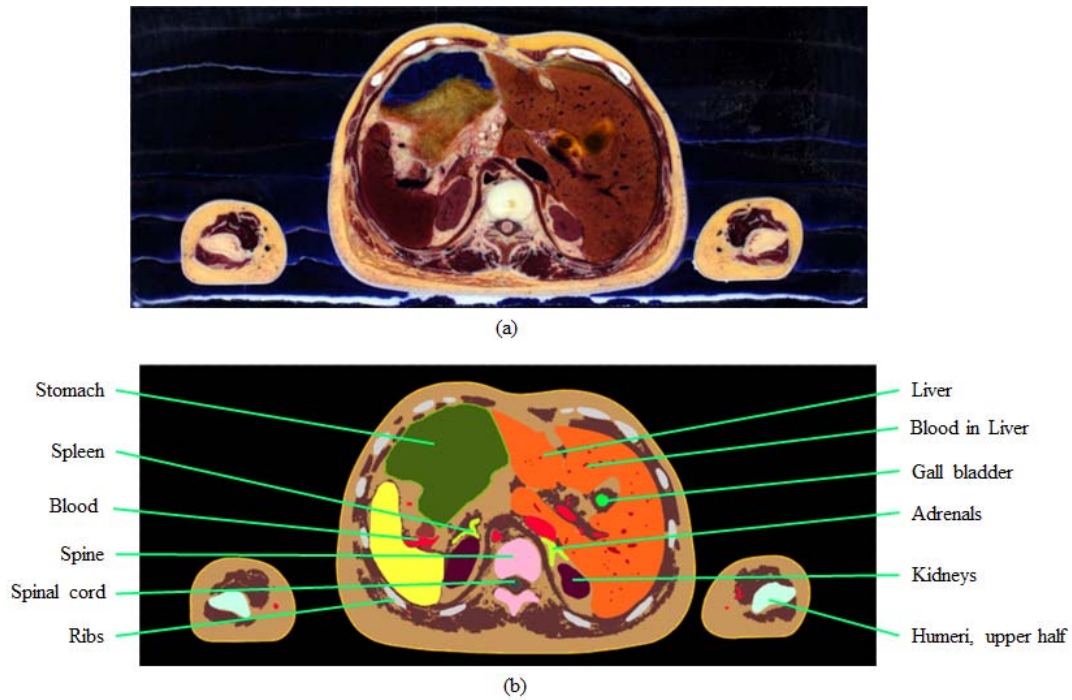


Fig. 1. (a) Example of color photographic slice image at abdomen.
 (b) Segmented image of a Korean female voxel phantom before adjustment.

조정되었다. 한국인에 대한 유효선량을 그 정의에 맞게 계산하기 위해서는 HDRK-Man뿐만 아니라 한국인 성인 여성을 대표할 수 있는 체적소형 모의체가 개발되어야 한다. 따라서 본 연구는 한국인 여성사체에 대한 고해상도 연속절단면 컬러해부영상을 이용하여 제작된 체적소형 모의체를 한국인 기준자료에 맞게 조정하여 기준한국인 성인여성 체적소형 모의체 HDRK-Woman (High Definition Reference Korean-Woman)을 개발하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 고해상도 컬러해부영상 기반 한국인 성인여성 체적소형 모의체

최근 아주대학교 해부학교실에서는 한국인 여성사체에 대한 고해상도 연속절단면 컬러해부영상을 획득하였다. 사체는 사망 당시 연령이 26세였으며 키 160 cm, 몸무게 52.35 kg으로 한국인 성인여성의 기준(161 cm, 54 kg)에 가까운 신체크기를 갖는다. 컬러해부영상의 절단 간격은 기본적으로 0.2 mm이나 주요장기를 포함하지 않는 하반신은 부분적으로 1 mm 간격으로 절단되었으며 총 5,901 장으로 제작되었다. 컬러해부영상의 해상도는 5,616×2,300 픽셀(pixels)이며 한 픽셀의 크기는 0.1×0.1 mm²이다. 컬러해부영상은 CT나 MR 영상에 비하여 장기 및 조직이 주변조직과 뚜렷하게 구분된다. 본 연구는 고해상

도 컬러해부영상을 정밀하게 분할(segmentation)하여 제작된 한국인 여성 체적소형 모의체의 장기무게 및 체형을 한국인 기준자료[4]에 맞게 조정하였다. 조정 전 체적소형 모의체의 체적소 해상도는 x, y, z축 방향 순으로 1.976×1.976×2.0619 mm³이며, 체적소 행렬의 크기는 261×109×825이다. 또한 ICRP 103 권고[1]에서 유효선량 계산을 위해 조직가중치가 제시된 주요장기 27개와 기타 관심장기 13개가 정밀하게 분할되어 있다. 그림 1은 복부에 해당하는 고해상도 컬러해부영상의 원본과 장기가 분할된 조정 전 체적소형 모의체의 단면영상을 보여준다.

전반적인 조정 절차는 Zankl 등이 ICRP의 체적소형 기준모의체 제작 시 사용했던 방법[5]에 따라 키 조정, 뼈 무게 조정, 장기무게 조정, 몸무게 조정의 순으로 진행하였다. 이는 HDRK-Man 개발 시 사용된 절차와 동일하다. 특별히 기존에 사용되던 장기무게 조정 방법의 반복된 절차를 간소화하고 단점을 보완하기 위하여 장기무게 조정 프로그램을 자체적으로 개발하여 사용하였다.

2.2 키 조정 및 뼈 무게 조정

키 조정 및 뼈 무게 조정은 체적소 해상도를 변경하여 조정하였다. 먼저 조정 전 체적소형 모의체의 키(160 cm)를 한국인 기준여성의 키 161 cm로 조정하기 위해서 z축 체적소 해상도를 2.0619 mm에서 2.0747 mm로 변경하였다(그림 2).

뼈 무게는 x, y축 해상도를 변경하여 조정하게 되는데, 현재까지 전체 뼈 무게에 대한 한국인 기준자료는 발표된 바 없으므로, 먼저 한국인 기준여성의 뼈 무게를 결정해야 한다. ICRP 70 보고서[6]에서는 ICRP 기준남녀(Reference male and female)의 전체 뼈 무게를 키와 몸

*한국인 여성사체 컬러해부영상은 한국과학기술정보연구원(KISTI)의 지원을 통해 아주대학교에서 획득한 영상임. 본 연구에서는 장기분할(organ segmentation)과 관련된 공동 연구를 진행하면서 자료를 제공받았으며, 감사의 글을 통해 제공받은 사실을 명시하였음. 해당 자료는 KISTI를 통해 공식적으로 발표될 예정이다.

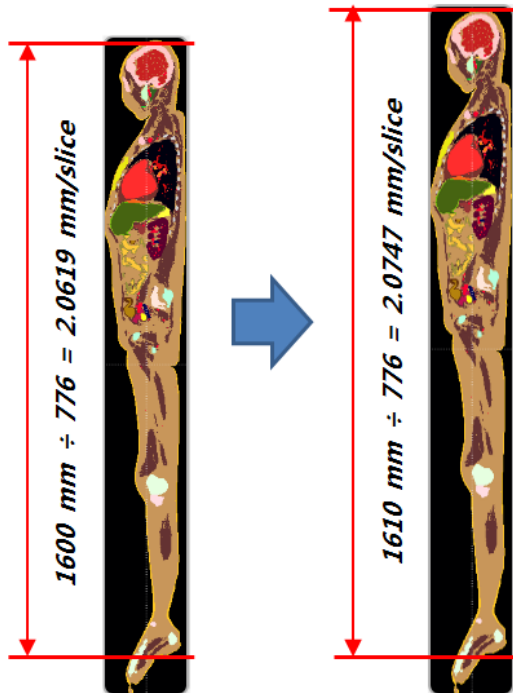


Fig. 2. The adjustment of height(160 cm) to reference Korean height(161 cm).

무게에 근거한 근사식을 사용하여 결정하였다. ICRP 기준여성의 뼈 무게는 키에 근거한 근사식을 사용했을 때

8.6 kg이며, 몸무게에 근거한 근사식을 사용했을 때 7.8 kg이다. ICRP는 남성과 여성의 지방제외체중(lean body mass)을 고려하여, 둘 중 작은 값인 7.8 kg을 택하여 ICRP 기준여성의 뼈 무게로 결정한 바 있다. 따라서 HDRK-Man 개발 당시에는 키에 근거한 근사식을 사용했던 점[3]과는 반대로 한국인 기준여성의 뼈 무게는 몸무게에 근거한 식 [6]을 사용하여 결정하였다.

$$SW=17.1-0.069 \times TBW \quad (R=-0.27) \quad (\text{식 } 1)$$

한국인 기준여성의 몸무게 54 kg을 식 [6]의 TBW(Total Body Weight)에 대입하여 계산된 뼈 무게(SW, Skeletal Weight, percentage of TBW)는 7.2 kg이며 이는 골수 및 치아를 모두 포함한 전체 뼈 무게이다.

본 연구에서 사용된 조정 전 여성모의체는 적색골수 및 치아가 따로 분할되어 있으므로, ICRP 89 보고서[7]에 제시된 전체 뼈의 밀도 $1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 을 그대로 사용할 수 없다. 따라서 따로 분할되어 있는 적색골수의 무게(780 g, 밀도 $1.01 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ [8])와 치아(34 g, 밀도 $2.06 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ [8])를 제외한 뼈의 밀도를 $1.347 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 으로 결정하였다. 적색골수 및 치아를 포함한 전체 뼈 무게의 합이 7.2 kg이 되도록 x, y 해상도를 $1.976 \times 1.976 \text{ mm}^2$ 에서 $2.0351 \times 2.0351 \text{ mm}^2$ 으로 변경하였다(그림 3). 따라서 키와 뼈 무게 조절을 통해 최종적으로 결정된 HDRK-Woman의 체적소 해상도는 $2.0351 \times 2.0351 \times 2.0747 \text{ mm}^3$ 이다.

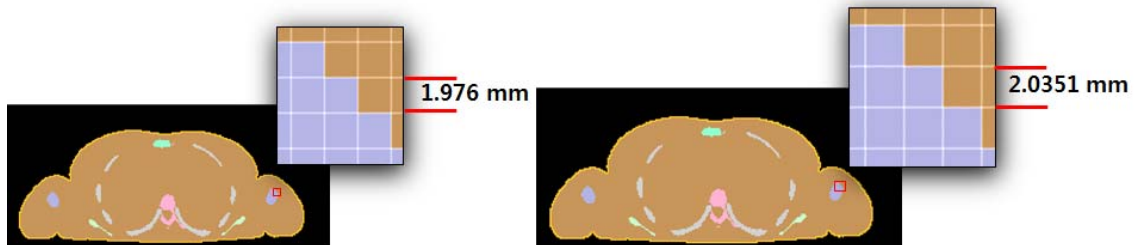


Fig. 3. The conceptual view of adjustment of skeleton.

2.3 3차원 기반 장기무게 조정 프로그램 개발

체적소 해상도는 키 조정 및 뼈 무게 조정으로 결정된 $2.0351 \times 2.0351 \times 2.0747 \text{ mm}^3$ 으로 고정되었기 때문에 각 장기들의 무게조정은 체적소 개수의 조정, 즉 부피를 조정하는 방법을 사용해야 한다. 남성모의체 HDRK-Man 개발 당시에는 단면영상에서 장기 외곽의 경계픽셀(boundary pixels)을 일정하게 더하거나 빼는 방법을 사용하여 각 장기의 무게를 조정하였다. 하지만 이 방법은 z축 방향이 고려되지 않은 단면상에서의 무게조정으로 인한 장기모양의 왜곡이 발생할 수 있으며, 이미 조정이 완료된 인접장기를 침범하는 경우가 발생한다. 또한 조정 후 해당 장기의 체적소 개수를 확인하고 목표하는 기준무게와 일치하지 않을 시 반복적인 작업을 거쳐야 하기 때문에 정밀한 무게조정이 어려운 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 방법이 갖는 여러 문제점들을 해결하기

위해 독자적인 장기무게 조정 프로그램을 개발하였다. C++ 프로그래밍을 통해 개발된 프로그램은 x, y, z 방향을 모두 고려하여 3차원 상에서 장기무게를 조정하고, 부피 증가 시 인접한 다른 장기를 침범하지 않고 오직 지방과 근육이 차지하는 공간으로만 늘어나며, 목표하는 장기무게에 완벽하게 일치시킬 수 있다는 장점이 있다.

3차원 기반의 장기무게 조정 프로그램의 자세한 알고리즘은 아래와 같다. 기본적으로 체적소 모의체에서 각각의 체적소는 장기별로 고유의 ID (identification number)를 갖는데, ID는 몬테칼로 코드 내에서 매질의 결정 및 선량계산결과와 저장에 사용된다. 본 연구에서 개발된 프로그램을 이용한 부피의 증감은 장기의 외곽에 존재하는 경계 체적소(boundary voxel)의 ID를 3차원 상에서 추가하거나 삭제(지방의 ID로 대체)하는 방법으로 진행된다. 따라서 먼저, 경계 체적소를 찾기 위해 조정하고자 하는

장기의 체적소 주변 상, 하, 전, 후, 좌, 우, 대각선 방향의 총 26개 체적소의 ID를 확인한 후 해당 체적소와 다른 ID의 존재여부를 확인한다. 만약 주변에 다른 ID가 존재하면 해당 체적소는 경계 체적소로 판단되며 부피의 증가에 맞게 ID가 바뀌게 된다. 그림 4는 자궁의 경계 체적소 레이어를 3개 층 증가시켜 부피를 늘린 예시를 보여주고 있다. 이때, 경계 체적소 레이어를 무조건 1개 층씩 증가시키면, 목표하는 체적소 개수를 정확하게 일치시킬 수 없다. 따라서 증가시켜야 하는 체적소의 개수를 경계 체적소의 총 개수로 나누어 계산된 확률이 무작위로 선택된 0부터 1사이의 값 보다 작은 경우에만 하나씩 증가시키는 방법을 사용하였다. 또한 부피 증가 시 인접한 다른 장기를 침범하지 않고 오직 지방과 근육이 차지하는 공간으로만 늘어나도록 프로그래밍 되었다.

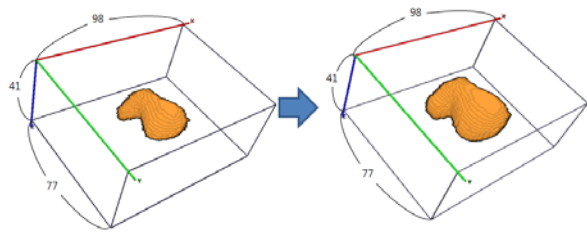


Fig. 4. Example of the increasing 3 boundary voxel layers of uterus by using in-house software program for 3D volume adjustment of organs and tissue.

하지만 임의로 선택된 경계 체적소가 증감되면 장기의 부드러운 곡면이 거칠어지는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 최대한 부드러운 곡면을 유지시키기 위해 곡면의 상태에 따라 증감될 경계 체적소의 우선순위를 결정하는 알고리즘을 추가하였으며, 원리는 다음과 같다. 장기 부피가 감소될 경우는 경계 체적소로부터 2칸 이내의 모든 주변 체적소 124개 중 해당 장기 ID의 개수가 기준 값 50개 이하이면 부드러운 표면에서 튀어나온 체적소이므로 우선적으로 감소시킨다(그림 5). 반대로 장기 부피가 증가될 경우는 경계 체적소로부터 2칸 이내의 모든 체적소 124개 중 해당 장기 ID의 개수가 기준 값 74개 이상이면 부드러운 표면에서 움푹 들어간 체적소이므로 우선적으로 증가시킨다(그림 6). 이때 설정된 기준 값(부피 감소시 50개, 부피 증가시 74개)에 의한 조건에 부합되는 경계 체적소가 존재하지 않는 경우가 있을 수 있다. 이 경우는 프로그램이 무한루프(infinite loop)에 빠져나오지 못하는 문제가 있으므로 기준 값을 변경해야 한다. 즉, 기준 값은 장기의 복잡한 정도에 따라 달라진다. 본 연구에서는 부피 조정 후 해당 장기의 체적소 개수를 확인하고 목표하는 기준무게와 일치하지 않을 시 반복하는 과정(for loop)이 10회 이내가 되는 기준 값을 장기별로 선택하여 사용하였다.

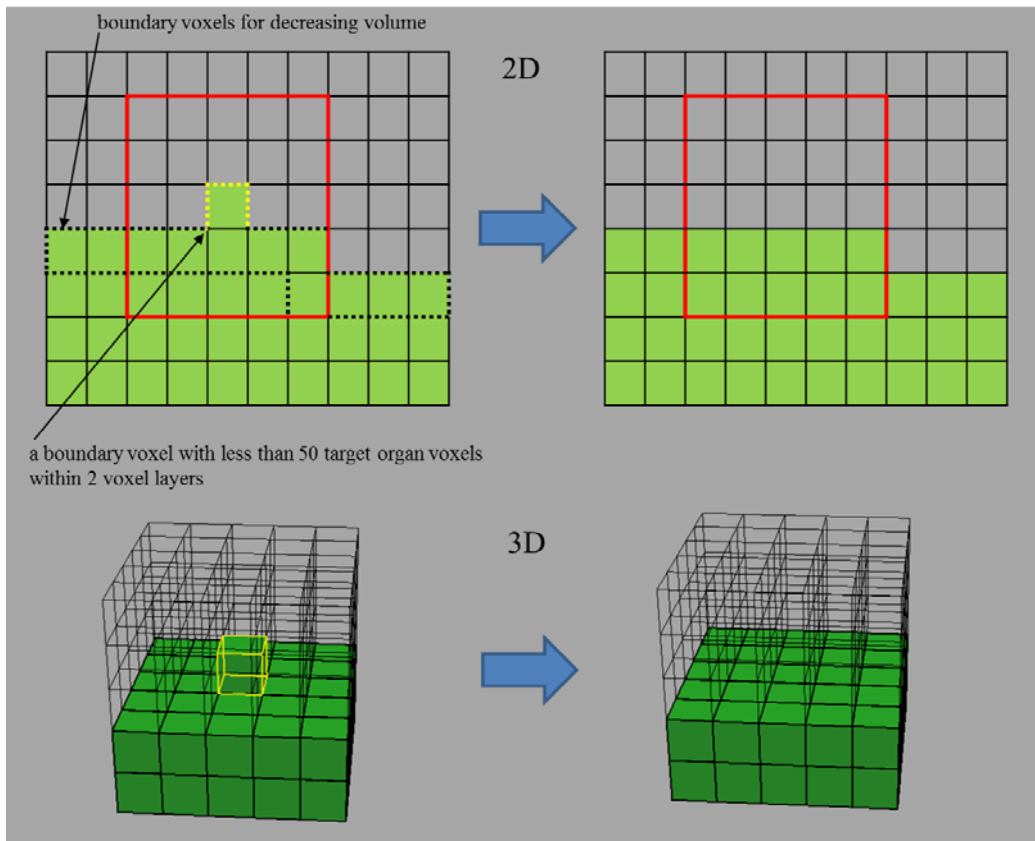


Fig. 5. Ideal case to remove boundary voxel for decreasing organ volume.

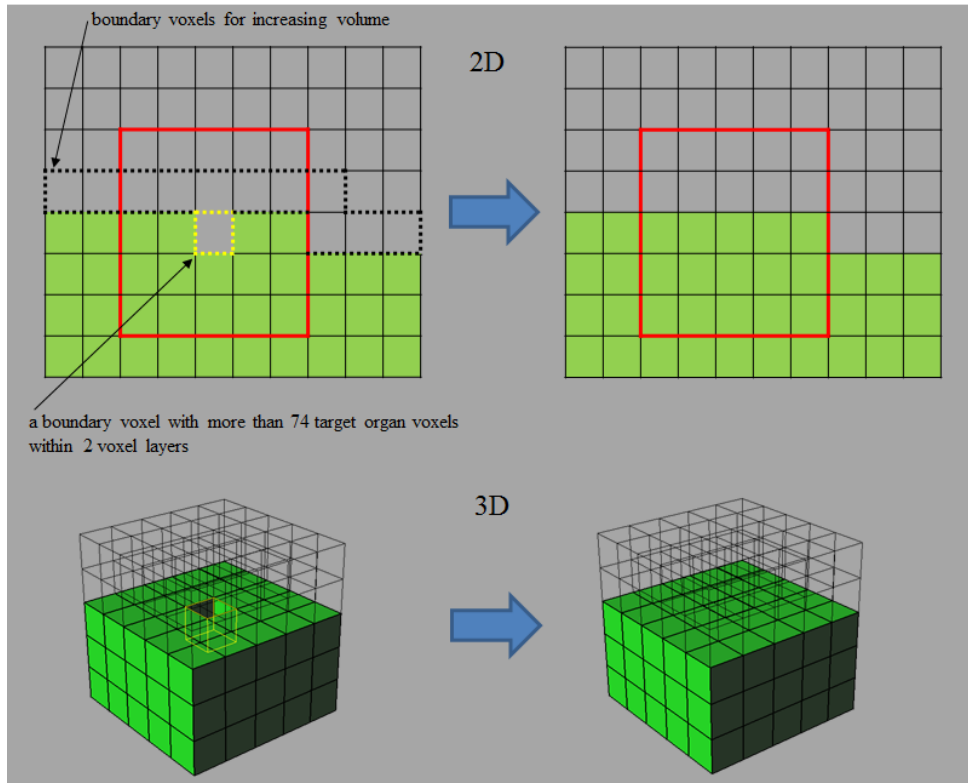


Fig. 6. Ideal case to add boundary voxel for increasing organ volume.

2.4 장기 무게 및 몸무게 조정

앞서 개발된 프로그램을 이용하여 장기 및 조직의 무게를 한국인 기준자료[4]에 맞게 조정하는 작업을 수행하였다. 한국인 기준자료에 제시되지 않은 몇몇 장기들(식도, 방광, 혈관, 유방, 대장, 소장 등)은 아시안 기준자료[8]에 맞추어 무게를 조정하였다. 일반적으로 한국인 기준자료에 제시된 무게보다 무거운 장기들은 해당 장기의 경계 체적소를 지방으로 변경함으로써 무게를 감소시켰고, 한국인 기준자료에 제시된 무게보다 가벼운 장기들은 해당 장기의 경계 체적소에 인접한 지방 또는 근육을 해당 장기로 변경함으로써 무게를 증가시켰다. 식도, 위, 소장 등과 같이 벽으로 정의된 장기의 경우, 부피를 증가시키기 위해서는 복잡한 형태 유지를 고려하여 안쪽 내용물 방향으로 증가시켰으며 부피를 감소시키기 위해서는 내용물을 포함한 전체부피를 줄여가면서 바깥쪽 체적소 레이어 1개 층으로 재정의하였다. 일부 조정이 불가능한 장기를 제외하고 모든 장기의 무게를 한국인 기준자료에 맞게 조정한 결과, 몸무게는 57.7 kg으로 한국인 성인여성 기준 몸무게 54 kg와는 다소 차이가 있었다. 따라서 주요 장기를 포함하지 않는 하반신 일부 지방을 조정하여 54 kg에 정확히 일치시켰다.

2.5 몬테칼로 코드를 이용한 유효선량 환산계수 계산

최종 완성된 한국인 기준여성 체적소형 모의체 HDRK-Woman을 범용 몬테칼로 코드인 MCNPX 2.5.0[9]에 입력하여 외부에서 입사하는 광자에 대한 장기선량을 계산하였다. MCNPX 코드 사용 시 광자 선원 발생과 합

계 전자를 함께 수송시켰으며, 장기선량은 *F6 tally를 사용하여 계산하였다. 0.015-10 MeV 사이의 광자가 전 (AP), 후(PA), 좌(LLAT) 방향으로 전신에 입사하는 방사선장을 전산모사 하였으며, 초기 입자 수는 통계적 오차를 충분히 낮추기 위해서 에너지에 따라 1.0×10^7 - 1.0×10^8 개를 사용하였다. 본 연구에서는 몬테칼로 전산모사를 위하여 쿼드코어 프로세서(2.4 GHz Intel Core™ 2 Quad processor Q6600)와 4 기가바이트(giga byte) 메모리가 탑재된 개인용 컴퓨터를 사용하였다. MCNPX 코드로 계산된 장기선량을 HDRK-Man의 장기선량과 합산하여 유효선량 환산계수를 산출하였으며, 그 결과를 MIRD 모의체 및 ICRP 기준남녀 체적소형 모의체로 각각 계산된 ICRP 74 보고서[10], ICRP 110 보고서[2]의 유효선량 환산계수와 비교하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 기준한국인 성인여성 체적소형 모의체 HDRK-Woman

최종 완성된 기준한국인 성인여성 체적소형 모의체 HDRK-Woman의 체적소 해상도는 x, y, z축 방향 순으로 $2.0351 \times 2.0351 \times 2.0747 \text{ mm}^3$ 이며 체적소 행렬의 크기는 $261 \times 109 \times 825$ 이다. 그림 7은 HDRK-Woman의 방향별 단면 영상 및 3차원 영상을 보여주고 있다. HDRK-Woman은 ICRP 103 권고[1]에 제시된 27개 주요장기를 포함하여 총 39개의 장기 및 조직으로 구성되어 있으며, 일부 조정

Table 1. Organ Masses of HDRK-Woman and Reference Korean/Asian Data.

ID	Organ	ICRP 103 Tissue Weighting Factor (w_T)	Density ($g\cdot cm^{-3}$)	Organ Mass (g)	Reference Korean /Asian Organ Mass (g)	Difference (%)
10	Red bone marrow	0.12	1.01	780	780	0.0
12	Large intestine	0.12	1.02	260	260	0.0
14	Lungs	0.12	0.358	688	688	0.0
16	Stomach	0.12	1.03	122	122	0.0
18	Breast adipose tissue	0.12	0.9	200	200	0.0
19	Breast glandular tissue	0.12	1.02	300	300	0.0
20	Ovaries	0.08	1.05	11	11	0.0
22	Bladder	0.04	1.04	30	30	0.0
24	Esophagus	0.04	1.02	30	30	0.0
26	Liver	0.04	1.06	1,212	1,212	0.0
28	Thyroid	0.04	1.05	12	12	0.0
30	Bone	0.01	1.3	6,408	6,408	0.0
32	Brain	0.01	1.03	1,403	1,403	0.0
34	Salivary glands	0.01	1.03	62	62	0.0
36	Skin	0.01	1.08	4,731	1,800	123.8
38	Adrenals		1	13	13	0.0
40	Extrathoracic(ET) region		1.03	44	0	-
42	Gall bladder		1.03	17	17	0.0
44	Heart		1.01	287	287	0.0
46	Kidneys		1.05	290	290	0.0
48	Blood		1.04	520	3,800	-87.6
50	Muscle	0.12	1.02	20,000	20,000	0.0
52	Oral mucosa		1.02	31	-	-
54	Pancreas		1.05	58	58	0.0
56	Uterus/Cervix		1.04	70	70	0.0
58	Small intestine		1.02	450	450	0.0
60	Spleen		1.06	153	153	0.0
62	Thymus		1.01	29	29	0.0
64	Eye bulb		1.03	19.0	19	0.0
66	Eye lenses		1.08	0.3	0.3	-1.0
68	Spinal cord		1.01	30.0	30	0.0
70	Teeth		2.06	34.0	34	0.0
72	Tongue		1.02	41.3	51	-25.4
74	Tonsils		1.03	3.0	3	0.0
76	Trachea		1.06	13.0	68	-82.5
78	Bronchi		1.03	42.1	20	93.5
80	Ureter		1.03	15.0	15	0.0
82	Fallopian tubes		1.04	10.0	10	0.0
84	Vagina	-	1.04	25.0	25	0.0
90	Adipose tissue		0.9	24404.7	-	-
Total body mass				54,000	54,000	0.0

이 불가능한 몇몇 장기를 제외한 나머지 장기 및 조직들은 한국인 기준자료[4]와 완벽하게 일치하였다[표 1]. 조직가중치가 부여된 주요장기 중 전신의 최외곽 체적소 레이어 1개 층만으로 정의되는 피부(skin)의 경우, 체적소 크기($2.0351 \times 2.0351 \times 2.0747 \text{ mm}^3$)에 의해 두께가 정해지므로 한국인 기준자료에 맞게 조정하는 것이 불가능하였다. 따라서 HDRK-Woman의 피부 무게는 한국인 기준자

료에 제시된 피부 무게보다 123.7% 큰 결과를 보였다. 이러한 한계는 체적소 크기가 한정됨에 따르는 체적소형 모의체가 갖는 고유의 문제로써 ICRP 110에서도 ICRP 기준 남녀 모의체의 이러한 한계점을 지적하고 있다. 피부, 기관(trachea)과 같이 얇은 장기의 무게조정 문제를 개선하기 위해, 폴리곤 면 모의체로 변환하는 방법이 제시된 바 있다[11].

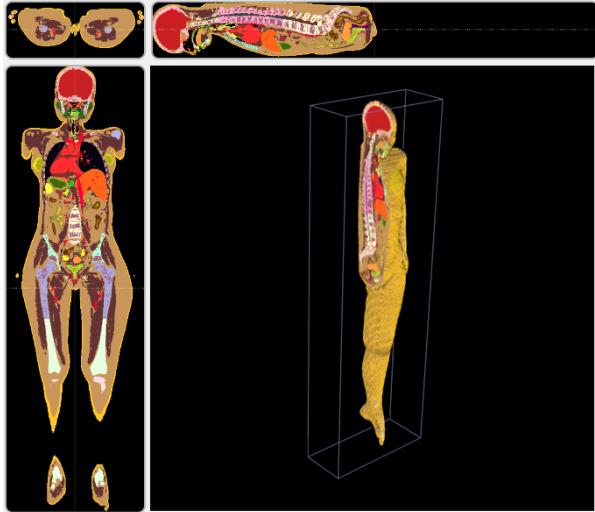


Fig. 7. Transverse, sagittal, coronal and 3D view of HDRK-Woman.

3.2 유효선량 환산계수

본 연구를 통해 기준한국인 성인여성 체적소형 모의체 HDRK-Woman이 최종 완성됨에 따라 남성모의체 HDRK-Man과 함께 기준한국인에 대한 유효선량을 그 정의에 맞게 정확하게 계산할 수 있게 되었다. HDRK-Woman을 이용하여 전(AP), 후(PA), 좌(LLAT) 방향으로 전신에 평행하게 입사하는 0.015-10 MeV 광자에 대한 장기선량을 계산하였다. 계산시간은 케이스별로 33-167분 걸렸으며, 0.015 MeV를 제외한 나머지 에너지 영역에 대한 대부분의 장기선량은 5% 이내의 통계적 오차를 보였다. 계산된 HDRK-Woman의 장기선량을 남성모의체 HDRK-Man의 장기선량과 평균하여 유효선량 환산계수를 산출하였고, 그 결과를 ICRP 110 보고서[2]의 기준남녀 체적소형 모의체의 계산결과와 ICRP 74 보고서[10]에 수록된 MIRD 모의체들로 계산된 결과와 함께 비교하였다. 비교 결과, ICRP 110 기준남녀 모의체와의 차이는 0.015 MeV 에너지의 광자를 제외한 나머지 에너지 영역에서 AP 방향과 LLAT 방향 각각 최대 5%, 9% 이내로 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 PA 방향에서는 기준한국인의 유효선량이 최대 49% (0.03 MeV)로 비교적 높은 결과를 보였다(그림 8, 표 2-4).

Table 2. Effective Dose per Unit Air Kerma Free-in-Air, E/Ka (Sv/Gy), AP Direction.

Photon Energy (MeV)	AP		
	HDRK-Man and Woman	ICRP Reference Male and Female	ICRP 74
0.015	0.049	0.051	0.040
0.030	0.426	0.426	0.416
0.040	0.797	0.780	0.788
0.050	1.110	1.086	1.106
0.080	1.408	1.401	1.433
0.200	1.162	1.159	1.173
0.400	1.056	1.055	1.056
0.600	1.024	1.024	1.024
0.800	1.009	1.009	1.010
2.000	0.981	0.995	0.992
8.000	0.884	0.918	0.991
10.000	0.846	0.884	0.990

Table 3. Effective Dose per Unit Air Kerma Free-in-Air, E/Ka (Sv/Gy), PA Direction.

Photon Energy (MeV)	PA		
	HDRK-Man and Woman	ICRP Reference Male and Female	ICRP 74
0.015	0.016	0.051	0.006
0.030	0.171	0.114	0.128
0.040	0.433	0.338	0.370
0.050	0.696	0.584	0.640
0.080	1.031	0.935	1.019
0.200	0.935	0.861	0.915
0.400	0.901	0.836	0.871
0.600	0.904	0.842	0.870
0.800	0.913	0.850	0.875
2.000	0.950	0.901	0.901
8.000	0.966	0.955	0.927
10.000	0.957	0.952	0.929

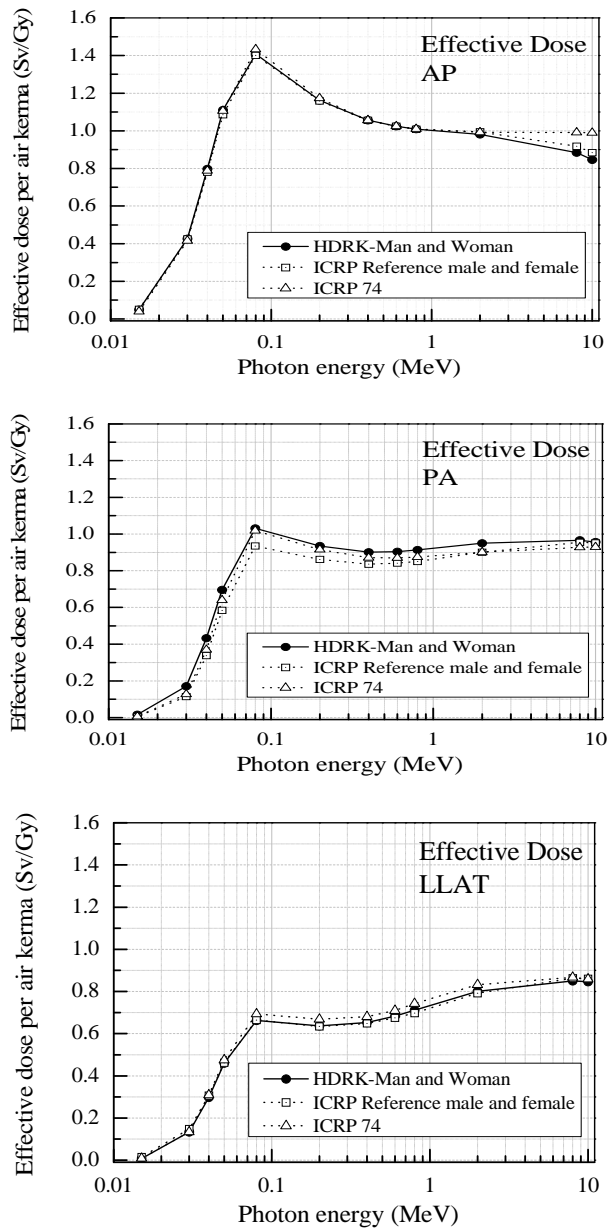


Fig. 8. Comparison of effective dose per air kerma of HDRK phantoms with ICRP Reference phantoms.

Table 4. Effective Dose per Unit Air Kerma Free-in-Air, E/Ka (Sv/Gy), LLAT Direction.

Photon Energy (MeV)	LLAT		
	HDRK-Man and Woman	ICRP Reference Male and Female	ICRP 74
0.015	0.008	0.015	0.009
0.030	0.134	0.148	0.134
0.040	0.298	0.306	0.309
0.050	0.460	0.462	0.475
0.080	0.663	0.664	0.694
0.200	0.637	0.634	0.668
0.400	0.653	0.648	0.681
0.600	0.683	0.674	0.710
0.800	0.712	0.697	0.743
2.000	0.801	0.791	0.832
8.000	0.850	0.863	0.867
10.000	0.846	0.860	0.859

HDRK-Man과 HDRK-Woman은 누워있는 사체의 컬러 해부영상을 기반으로 제작되었다. 따라서 등과 엉덩이 부위가 그림 2와 같이 납작한 형태를 띤다. 이에 따라 PA 방향에 대한 유효선량은 서 있다고 가정했을 때의 유효선량보다 높은 결과를 보인다[12]. 그러나 ICRP 기준 모의체 역시 누워있는 인체에 대한 CT 영상을 기반으로 제작되었기 때문에 등과 엉덩이 부위가 납작한 형태를 띠고 있다. 따라서 납작한 등과 엉덩이 형태만으로는 ICRP 기준남녀 체적소형 모의체보다 PA 방향의 유효선량이 높음을 설명할 수는 없다. 한편, 사체의 컬러해부영상을 기반으로 제작된 체적소형 모의체인 VIP-Man의 경우, 모든 방향의 유효선량(여성 장기를 고려하지 않은 단순 weighted dose)이 ICRP 74[10]의 결과에 비하여 오히려 낮은 결과를 보인다[13]. 이 결과는 VIP-Man (186 cm, 90 kg)의 체구가 ICRP 기준남성(176 cm, 73 kg)에 비하여 크기 때문인 것으로 분석할 수 있다. 결론적으로 본 연구에서 계산된 PA 방향에 대한 유효선량의 차이는 사체와 살아있는 사람의 차이라고 분석하기에도 무리가 있다. 따라서 향후 더욱 다양한 체적소 모의체의 선량 계산결과와 비교 분석해 볼 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고해상도 연속절단면 컬러해부영상 기반의 체적소형 모의체를 기준한국인 데이터에 맞게 조정하여 한국인 성인 여성을 대표할 수 있는 HDRK-Woman 체적소형 모의체를 개발하였다. HDRK-Woman은 고해상도 컬러해부영상을 기반으로 제작되어 CT나 MR 영상 기반의 체적소형 모의체에 비하여 장기 및 조직이 정밀하게 표현되어 있으며, 일부 조정이 불가능한 장기들을 제외하며 나머지 장기 및 조직들이 한국인 기준자료에 정확하게 일치한다. HDRK-Man과 HDRK-Woman을 이용하여 계산된 유효선량은 서양인 기준의 ICRP 기준남녀 모의체로부터 계산된 결과와는 분명히 구별된다. 따라서 본 연구에서 개발된 HDRK-Woman은 HDRK-Man과 함께 장기 및

조직 등가선량, 유효선량, SAF, AF 등 한국인 고유의 방사선 방호량을 계산하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 연구를 통해 개발된 장기무게 조정 프로그램은 x, y, z 방향을 모두 고려하여 3차원 상에서 장기무게를 조정하고, 부피 증가 시 인접한 다른 장기를 침범하지 않고 오직 지방과 근육이 차지하는 공간으로만 늘어나며, 목표하는 장기무게에 완벽하게 일치시킬 수 있다는 장점이 있어 향후 다른 체적소형 모의체의 개발에도 유용하게 활용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 원자력연구사업(No. 2011-0002090) 및 기초연구사업(No. 2011-0025496), KISTI와 아주대학교 의과대학 해부학교실에서 공동으로 제작하여 제공한 Visible Korean 인체 데이터를 사용하였음.

참고문헌

1. International Commission on Radiological Protection. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Oxford; Elsevier Press, 2007.
2. International Commission on Radiological Protection. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. Oxford; Elsevier Press, 2009.
3. 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.* 53(15): 4093-4106; 2008.
4. 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.* 118(3):275-279; 2005.
5. Zankl M, Becker J, Fill U and Petoussi-Hens N. GSF male and female adult voxel models representing ICRP reference man - the present status. *Proceedings of The Monte Carlo Method: Versatility Unbounded in a Dynamic Computing World.* Chattanooga, TN, American Nuclear Society, A Grange Park, USA. 2005.
6. International Commission on Radiological Protection. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: the skeleton. ICRP Publication 70. Oxford; Pergamon Press, 1994.
7. International Commission on Radiological Protection. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: Reference values. ICRP Publication 89. Oxford; Pergamon Press, 2001.

8. International Atomic Energy Agency. Compilation of anatomical, physiological and metabolic characteristics for a reference asian man. IAEA-TECDOC-1005. 1998.
9. Pelowitz DB, ed. MCNPX user's manual version 2.5.0. LA-CP-05-0369. 2005.
10. International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Oxford; Pergamon Press. 1996.
11. Kim CH, Jeong JH, Bolch WE, Cho K, Hwang SB. A polygon-surface reference Korean male phantom (PSRK-Man) and its direct implementation in Geant4 Monte Carlo simulation. *Phys. Med. Biol.* 56:3137-3161; 2011.
12. Jeong JH, Cho S, Cho K, Kim CH. Deformation of the Reference Korean voxel model and its effect on dose calculation. *J. Radiat. Prot.* 33(4):167-172; 2008.
13. Choi SH, Jeong JH, Cho S, Chung MS, Huh HD, Kim WC, Cho K, Kim CH. Construction of a high-quality voxel model VKH-Man using serially sectioned images from Visible Korean Human project in Korea. *J. Nucl. Sci. Technol.* S5:179-182; 2008.

Development of the Reference Korean Female Voxel Phantom

Bo Kyoung Ham^{*}, Kun Woo Cho^{*†}, Yoen Soo Yeom[‡], Jong Hwi Jeong[‡], Chan Hyeong Kim[‡], and Min Cheol Han[‡]

^{*}University of Science and Technology, [†]Korea Institute of Nuclear Safety, [‡]Hanyang University

Abstract - The objective of this study is for development of the reference Korean female phantom, HDRK-Woman. The phantom was constructed by adjusting a Korean woman voxel phantom to the Reference Korean data. The Korean woman phantom had been developed based on the high-resolution color slice images obtained from an adult Korean female cadaver. There were a total of 39 organs including the 27 organs specified in ICRP 103 for effective dose calculation. The voxel resolution of the phantom was $1.976 \times 1.976 \times 2.0619 \text{ mm}^3$ and the voxel array size is $261 \times 109 \times 825$ in the x, y and z directions. Then, the voxel resolution was changed to $2.0351 \times 2.0351 \times 2.0747 \text{ mm}^3$ for adjustment of the height and total bone mass of the phantom to the Reference Korean data. Finally, the internal organs and tissue were adjusted using in-house software program developed for 3D volume adjustment of the organs and tissue. The effective dose values of HDRK phantoms were calculated for broad parallel photon beams using MCNPX Monte Carlo code and compared with those of ICRP phantoms.

Keywords : Voxel phantom, Color slice image, Reference Korean, Monte Carlo, Effective dose