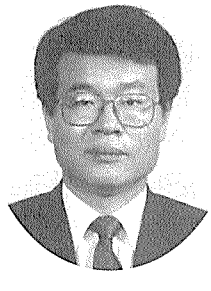
# 인형 체적소 모의피폭체 개발과 방사선량계측에의 활용



이재기
한양대학교 원자력공학과 교수

## 1. 서론

인체가 외부로부터 입사하는 방사선에 노출되는 외부피폭 또는 방사성 핵종을 체내에 섭취하여 조직 내에 오염된 방사능으로 인한 방사선에 의해 그 사람이 피폭하는 내부피폭의 평가에서 구체적인 방사선량은 선원과 피폭조직의 기하학적 위치 차이로 인해 피폭하는 사람의 신체적 특성에 따라 차이를 내게 마련이다. 특히 ICRP 26에서부터 방사선방호를 위한 중심량이 피폭 조직의 확률적 영향의 위험도를 반영한 유효선량으로 설정됨으로써 주어진 피폭상황에서 체내 조직이나 장기들의 선량분포에 대한 정보가 필요하게 되었다.

방사선에 피폭하는 사람의 장기나 조직이 피폭하는 선량을 직접 측정하기는 어렵기 때문에 인체를 근사적으로 모사한 수학적 모의피폭체와 몬테칼로 기법을 이용한 계산에 의해 외부피폭 또는 내부피폭으로 인한 선량분포를 얻었다. 이 목적으로 1969년 핵의학 분야에서 방사능을 섭취한 환자의 조직선량 평가 목적으로 개발한 MIRD형 수학적 모의피폭체로가 사용되어 왔다. 1990년을 전후하여 독일 GSF, 일본 JAERI팀이 이런 방식으로 산출한 데이터들이 종합되어 1997년 ICRP 74로 발간되었다.

그런데 MIRD 접근 방식은 인체의 외형과 내부장기들을 근사적인 기하학적 형태로 모사하기 때문에 조직들의 위치가 정확하지 않고 조직들이 복잡하게 얽힌 상태를 모사할 수 없으며 개인간 체격차이를 반영하기 위한 스케일링이 자유롭지 못하다. 따라서 평균적 개인에 대한 선량계측 목적으로 사용하는 데에는 문제가 없으나 의료상 피폭 등 특정 개인에 대한 구체적 선량평가가 필요한 경우 변형의 융통성이 부족하다. 이러한 약점을 개선하기

위한 방안으로 인체를 매우 작은 체적소(voxel; 전형적으로 1mm3)로 나누고 각 체적소가 어떤 조직에 해당하는가를 나타내는 색인을 부여한 3차원 행렬을 구성하는 방식으로 모의피폭체를 구성하는 방법이 시도되고 있다. 이러한 시도는 그 동안 발전한 컴퓨터의 대용량화와 낮은 비용, 그리고 컴퓨터 단층촬영 등 인체에 대한 이미지 기술의 발전으로 인해 가능하게 되었다.

체적소 모의피폭체는 실제 인체의 CT 또는 MRI 단층촬영 이미지 정보를 이용하여 구성할 수 있다. 체적소 모의피폭체의 장점은 체적소를 충분히 작게 분할하여 분해능을 높이면 인체의 구성을 실제에 가깝게 모사할 수 있으며, x, y, z의 필요한 방향으로 적절한 비율인자를 적용함으로써 다른 형태의 인체조건을 용이하게 모의할 수 있어 다양한 체격의 방사선 진료환자의 체내 선량분포를 보다 가깝게 평가할 수 있다는 점이다. 이 보고에서는 과학기술부 원자력중장기 연구개발사업의 지원으로 한양대학교 방사선안전연구실이 수행 중에 있는 "방사선방호를 위한 표준한국인 설정" 과제의 일부로서 한국인을 위한 체적소 모의피폭체 개발현황을 소개한다.

## 2. 체적소 모의피폭체 구성

### 2.1. 머리 체적소 모의피폭체 제작

먼저 체적소 모의피폭체의 구성기법을 시험하고 구성된 체적소 모의피폭체를 몬테칼로 방사선 수송해석 기법과 결합하여 방사선량 계측에 활용하는 체계를 구축하기 위해 작은 체적의 인체 머리만을 대상으로 체적소 모의피폭체를 구성하였다. 머리에 대한 해부학적 자료는 미국 NLM(National Library of Medicine)의 VHP(Visible Human Project)의 결과물로 제공되는 인체단층사진을 이용하였다. VHP에서는 미국 텍사스주에서 기증된 신장 186cm, 체중 90kg인 38세 남성 사체의 전신에 대해 CT, MRI 단층촬영 이미지를 얻은 후 다시 냉동시켜 1mm 간격으로 절단하여 촬영한 실물 컬러단층사진과 함께 편집하여 고해상도 그래픽파일 형태로 인터넷으로 제공하고 있다.

머리 모의피폭체 시범제작에서는 머리끝부터 4mm 간격으로 55번째 절단면까지 220mm에 대해 단층사진을 선택하여 체적소 머리 모의피폭체를 제작하였다. 하나의 단층면에서 화소(pixel)의 크기는 4 mm×4mm로 된다. 방사선 방호를 위한 선량계측목적으로는 인체 내부구조를 완벽하게 재현할 필요는 없으므로 후속 계산에서 편의를 위해 실물 단층이미지를 단순화하는 작업이 필요하다. 즉, 방사선량 평가는 대체로 하나의 장기나 조직 단위로 이루어지므로 복잡한 단층이미지 중 서로 다른 장기와 조직을 구획하고 동일 영역은 균질한 것으로 단순화한다. 그림1 (a)의 실질 단층이미지를 조직별로 구획한 것이 그림1(b)이다. 이러한 구획 작업에는 그래픽 디지타이저(Wacom, PL-400)가 이용되었다. 하나의 단층이미지를 디지타이저에 전시한 다음 이미지 자체와 해부학적 자료를 참고로 하여 그 단층에서의 조직의 경계를 디지털 펜으로 그려 구획하고 하나의 구획 내부는 균질한 것으로 처리한다. 하나의 조직은 디지타이저의 층(layer) 개념을 이용하여 각각 다른 층에 작성한 다음 최종적으로 층을 합쳤다. 마지막으로 구획된 이미지를 화소와 일치시키는 과정을 거치면 그림1 (c)와 같은 단순화된 단층이미지가 완성된다. 편의를 위해 각각의 조직은 서로 다른 색깔코드를 부여하여 그래픽에서 시각적 효과를 높였다. 각 단층마다 동일한 작업을 반복하여 55장의 단층 영상파일

을 수직으로 쌓아올려 52×66×55의 행렬로 이루어진 체적소 머리 모의피폭체를 완성하였다.

제작된 체적소 머리 모의피폭체를 이용하여 외부피폭 조건에서 선량분포를 평가한 결과 기존의 MIRD형 모의피폭체에 비해 안구의 영향 등 구조상 차이로 인한 영향이 확인되었으며 특히 MIRD에서는 모사되지 않는 눈의 수정체 선량을 직접 평가할 수 있는 이점이 있는 등 체적소 모의피폭체의 이점이 나타났다. 몬테칼로 계산을 위해 범용 몬테칼로 코드인 MCNP4B버전과 ENDF 감마선 단면적자료 및 RMCCS 중성자 단면적자료를 이용하였다. 체적소 모의피폭체를 입력하는 데에는 MCNP4B의 반복구조 알고리즘(repeated structure algorithm)을 응용하였다.

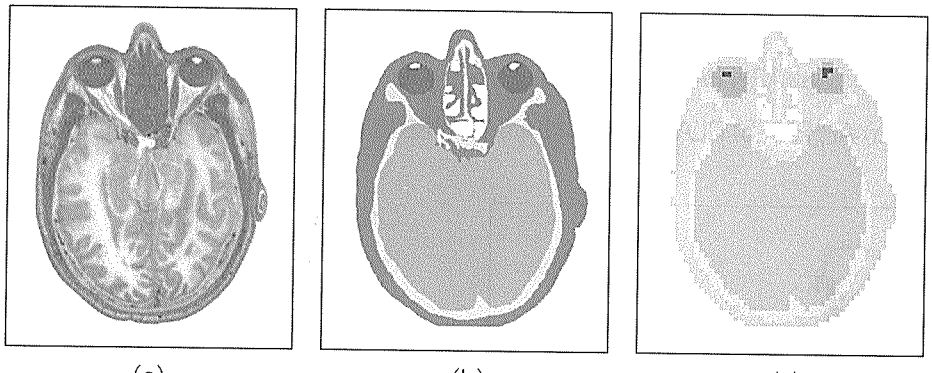
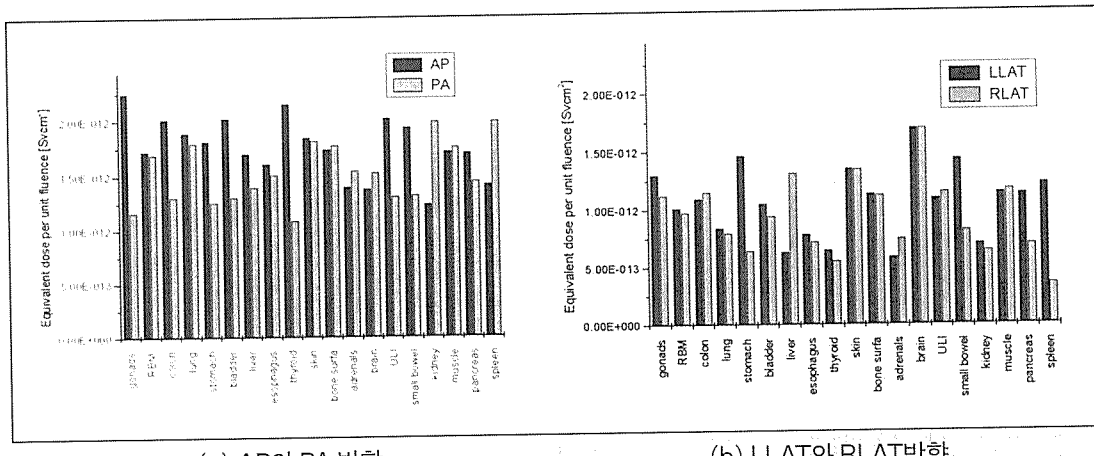



그림1. (a) VHP의 머리부분 실물 단층사진 구획 및 표지작업을 마친 회색조 단층이미지
(c) 52×66 화소 행렬로 표현된 이미지(단위 화소의 크기는 4mm×4mm)

### 2.2. Zubal 체적소 전신 모의피폭체

머리에 대한 체적소 모의피폭체 구성 경험을 바탕으로 전신에 대한 체적소 모의피폭체 구성을 시도하였다. 전신 자료원으로는 미국 Yale대학교 Zubal 등이 사용한 ICRP23 표준인(몸질량 70kg, 신장 174cm)에 가장 가까운 몸질량 70.3kg, 신장 178cm인 사람의 전신 CT영상을 획득하여 사용하였다. 본래 Zubal 등은 장기별 구획 및 표지작업을 거쳐 전신 체적소 행렬을 구성하여 제공하고 있었지만 팔과 다리가 제외되어 있으므로 Stuchly 등은 VHP 자료의 팔과 다리를 Zubal자료에 추가하였고 Sjogreen은 전신촬영을 모사하기 위해서 손부분을 펼쳐서 최종적으로 수정된 Zubal 체적소 전신 모의피폭체를 구성하였다. 수정된 Zubal 모의피폭체는 192×96×498개의 voxel로 구성되었으며 방사선방호의 22개 관심장기를 포함하여 약 120여개의 장기들이 표지되어있다. 그림3은 이 체적소 전신 모의피폭체의 전형적인 세로방향 단면을 보여준다. 본 연구에서는 이 전신에 대한 체적소 모의피폭체를 이용하여 시범적으로 외부피폭 상황에서 체내 주요장기에 대한 등가선량을 계산하였다(그림2).




(a) AP와 PA 방향 (b) LLAT와 RLAT방향

그림2. (a) AP, PA, (b) RLAT, LLAT방향에서 입사하는 넓고 평행한 광자빔에 대한 장기별 등가선량

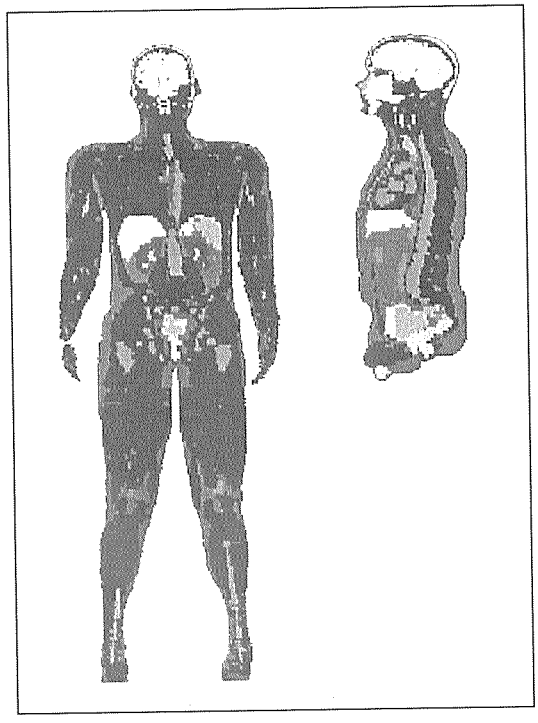
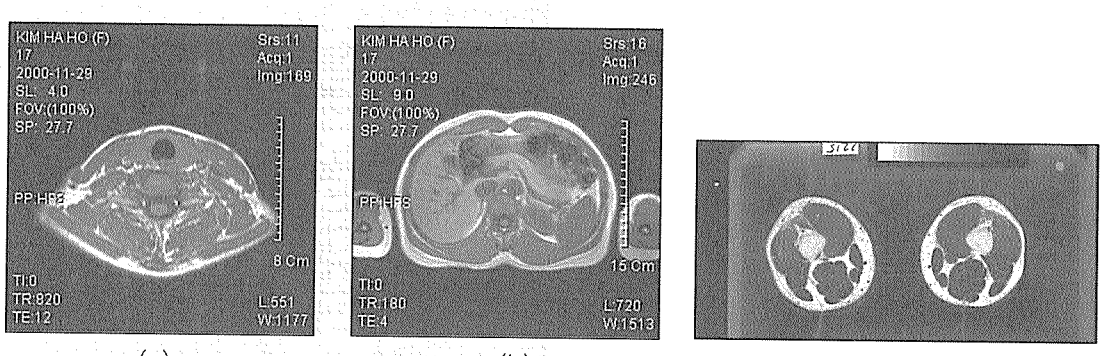


그림3. Zubal 체적소 전신 모의피폭체의 y=0평면에서 절단한 이미지(좌)와 x=0평면에서 절단한 이미지(우)

### 2.3. HYWOMAN제작

전술한"방사선방호를 위한 표준한국인 설정 연구"에서는 한국인의 체내 장기 특성에 대한 자료를 수집하기 위해 표준체격의 범위에 있는 건강한 남녀의 전신 MRI 이미지를 획득하고 있다. 이 작업은 한국수력원자력(주)의 방사선보건연구원 팀이 수행하고 있다. 한국인에 대한 체적소 전신 모의피폭체를 시범적으로 구성하기 위해 여기서 획득한 여성의 MR 이미지 한 세트를 선정하였다. 단층 촬영당시의 연령은 37세, 체중 55kg의 여성이었다. MR 이미지는 DICOM 포맷과 256×256 화소의 JPEG 포맷으로 제공되었다. 부위별로 촬영된 이미지의 간격, 크기 및 방향이 달랐으므로, 층 방향 이미지에 대해서 외삽과 내삽을 통해 8mm 간격으로 재조정하였고, DICOM 포맷의 정보로부터 이미지의 크기를 보정하였다. 층 방향 이미지가 제공되지 않은 팔과 다리 부위는 VHP에서 제공하는 이미지를 사이즈 및 위치 보정을 거쳐 추가시킴으로써 MR 영상으로부터 107장, 그리고 VHP 영상으로부터 93장, 총 200장의 8mm 간격의 이미지 세트가 구성되었다(그림4).




(a) (b) (c)

그림4. 한국여성 MR사진 및 VHP man의 다리단층사진 (a) 한국인여성 MRI(갑상선) (b) 한국인여성 MRI(몸통) (c) VHP man의 다리 단층사진

방사선량 계측에 활용이 주목적이므로 ICRP 60에서 정의하고 있는 방사선에 민감한 대표 관심 장기에 기초하여 장기를 구분하였다. MR 이미지로부터 뼈 내부의 골수분포를 시각적으로 구분하기가 용이하지 않아 MIRD형 모의피폭체에서 골수 선량 계산에 사용된 방법론을 따라 전신의 뼈를 골수 함유 비율이 서로 다른 8가지의 분류로 구분하였다. 그래픽 프로그램과 디지타이저를 이용하여 200개의 단층 영상에 대해 수작업으로 장기구분, 즉 분할 작업을 수행하여 각 장기별로 다른 인식번호를 부여하는 표지 작업을 완료하였다.

각 장기의 표지 역할을 하는 그레이 스케일은 0~255사이의 값을 가지는 16진수 형태의 1바이트 정보이므로, 118×59 화소로 크기가 재조정된 이미지를 각 화소가 1바이트 정보를 갖는 6,962(=118×59) 바이트의 이진파일로 변환시켜 저장하였다. 이진 파일로 변환된 200개의 파일들을 순서대로 연결하여, 전체 체적소 행렬을 나타내는 하나의 파일로 구성하였다. 이렇게 만들어진 체적소 행렬에서 하나의 체적소는 가로×세로×높이가 4mm×4mm ×8mm의 크기를 갖게 되었다. 이렇게 구성된 체적소 전신 모의피폭체를 HYWOMAN으로 명명하였다. 그림5는 HYWOMAN의 전형적인 단면도의 예시이다.

완성된 HYWOMAN의 실용성을 확인하기 위해 범용 몬테칼로 코드 MCNP4B코드를 이용하여 감마선에 의한 외부피폭 상황에서 각 조직에 대해서 단위 방사선당의 흡수선량을 계산하였다. 감마선의 방사선 가중치는 1이므로 흡수선량은 곧바로 등가선량과 같은 값이 된다. 0.2MeV, 0.4MeV, 2MeV 및 8MeV의 네 가지 종류의 에너지에 대하여 계산을 수행하였으며, 계산된 결과를 동일 피폭환경에 놓인 MIRD형 ORNL 여성 모의피폭체에서의 결과와 비교하였다. 몬테칼로 계산 결과의 통계적 유의성을 확보하기 위해서 결과 값의 상대오차 범위가 6% 이하가 되도록 MCNP 코드 내의 광자 수송 이력을 정의해 주었다. 계산의 결과는 그림5와 같다. 그림5에서 보듯 에너지에 따라 차이는 있으나 두 평가결과가 상당한 차이가 나는 조직들이 많다. 다행한 것은 가장 중요한 AP방향(인체의 전면에서 방사선이 입사되는 경우)에서는 폐, 갑상선, 그리고 신장에서만 유의한 차이를 보이고 있다. 그러나 이 결과는 체적소 모의피폭체로서 인체 내부 조직의 구체적 형상을 보다 정밀하게 모사함으로써 선량평가의 신뢰도를 향상시킬 수 있음을 분명히 하고 있다.

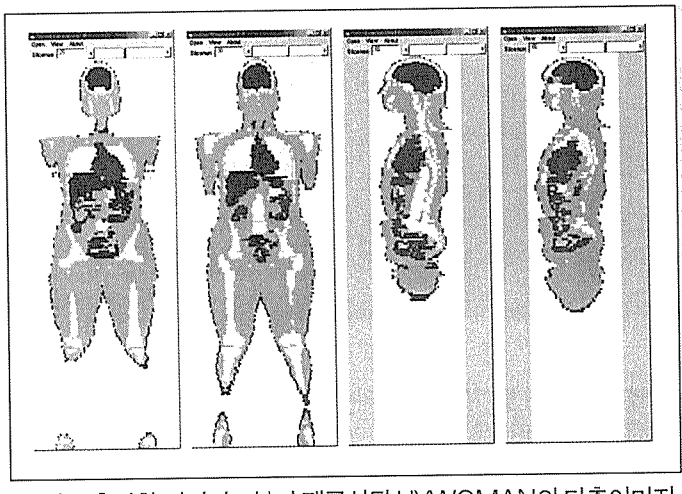


그림5. 층방향 이미지로부터 재구성된 HYWOMAN의 단층이미지

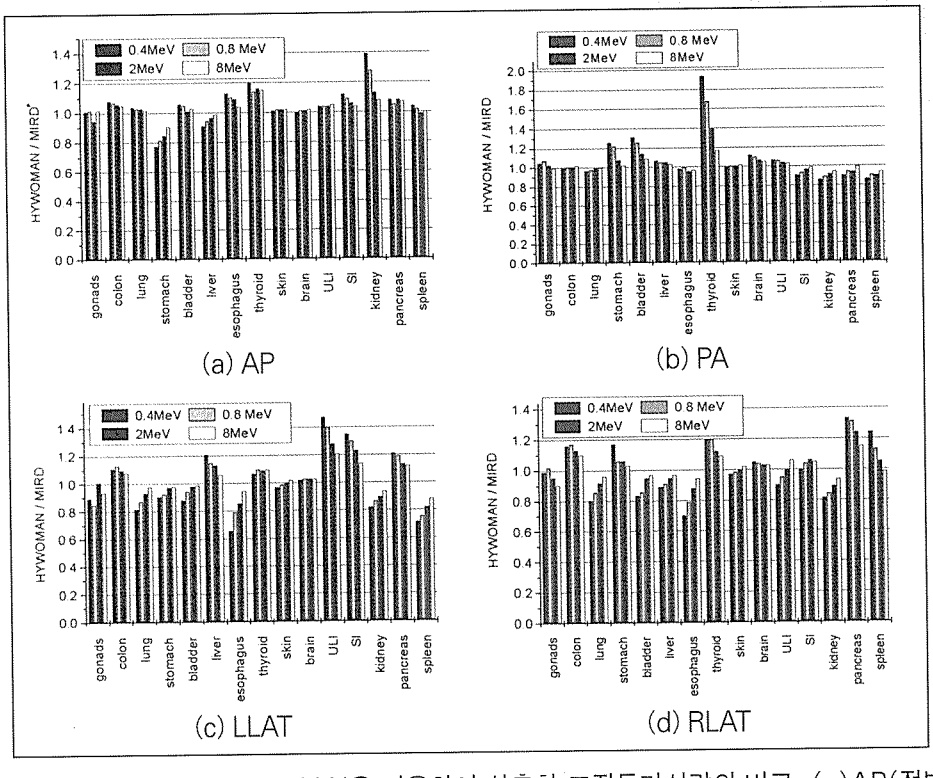



그림6. MIRD형 팬텀과 HYWOMAN을 이용하여 산출한 조직등가선량의 비교. (a)AP(전방입사), (b)PA(후방입사), (c)LLAT(좌측입사), (d)RLAT(우측입사). 평행하고 넓은 광자빔(0.4MeV, 0.8MeV, 2MeV, 4MeV)에 대해 장기별 등가선량을 MIRD형 결과에 대한 비율로 보임.

## 3. 향후 연구방향

복잡한 구조를 갖는 인체를 미소한 체적소로 모사하고 이를 몬테칼로 계산기법과 결합하여 선량분포를 평가하는 작업은 필연적으로 컴퓨터 데이터 저장문제와 계산시간의 문제를 수반하게 된다. 위에서 예시한 체적소 모의피폭체의 단위 체적소 크기를 $4\times4\times8mm^3$의 크기로 상당히 크게 설정한 것도 이러한 이유 때문이다. 당연히 체적소의 크기를 작게 설정할수록 물체를 형상화하는 해상도는 향상된다. 그러므로 궁극적으로는 해상도(또는 모사의 정밀도)와 계산시간의 상충성에 대한 타협점을 찾아야 한다. 이러한 문제를 검토하기 위해 그림6과 같이 연조직과 뼈의 바이너리 성분으로 구성된 물체에 대해 평가계산을 실시하였다.

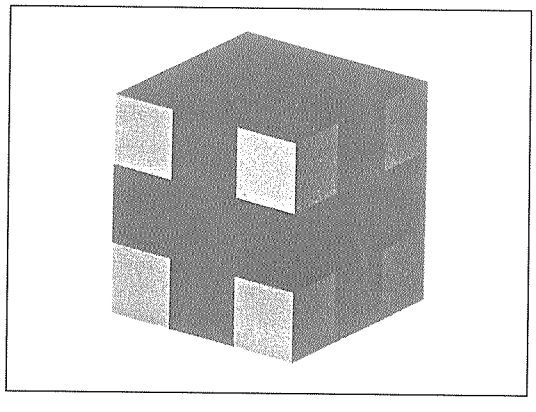


그림6. 체적소 몬테칼로 계산체계 검증을 위한 가상 피폭체. 연조직과 뼈로 구성된 3×3×3 규격을 예시하고 있음.

그림7은 단위 체적소 크기의 감소 즉, 총 체적소 수의 증가에 따른 계산시간의 증가를 보여준다. 체적소의 각 변의 길이를 1/2로 축소하면 총 체적소 수는 8배로 증가하고 단위시간당 계산해낼 수 있는 입자의 수도 현저하게 감소한다. 따라서 방사선방호의 관점에서 중요한 체내 장기나 조직을 충분히 근사적으로 표현할 수 있는 체적소의 크기를 선정하고 계산시간의 단축을 위한 계산 알고리듬 및 전산체계의 개선이 필요하다. 범용 MCNP 코드의 기하학 루틴의 알고리듬을 직교좌표계의 입방체 취급에 필요한 부분만 남기고 삭제하는 방안도 고려될 수 있다. 또 수십Mbyte에 이르는 체적소 모의피폭체 자료를 최소한의 기억장치에 수록할 수 있도록 데이터를 압축하고 필요에 따라 전개하여 사용하는 알고리듬의 보완도 필요하다.

| Voxel size (cm) | Voxel array (# of voxel) | Run rate ( particle per min) |
|---|---|---|
| 8 | 27 | 231930 |
| 4 | 216 | 54264 |
| 2 | 1728 | 4887.6 |
| 1 | 13824 | 296.21 |
| 0.5 | 110592 | 16.499 |

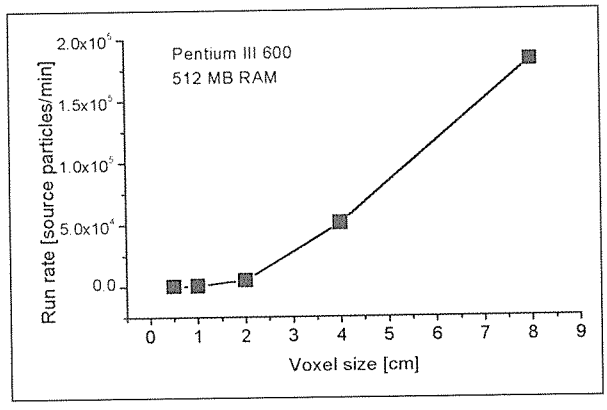



그림7. 단위 체적소의 크기 감소에 따른 단위 시간당 계산되는 입자 수

연구의 목표는 표준한국인의 남녀 연령별 체적소 모의피폭체를 완성하는 것이므로 향후 더 많은 수의 체적소 전신 모의피폭체의 제작이 필요하다. 표준한국인 범주에 속하는 자원자들의 전신MR사진 세트의 입수가 필요하며 또한 표준한국인의 장기무게 및 위치에 관한 자료의 축적이 필요하다. 전신 MR사진을 얻어내기 위해서는 장시간 부동자세로 촬영에 응해주어야 하나 유소년의 경우 이를 기대하기 어렵다. 이를 위한 대안으로 체적소 축소기법을 이용하여 연령별 평균 크기로 성인자료를 축소하여 연령군별 체적소 모의피폭체의 기본형을 구성한 다음 기존의 해부학적 자료 또는 임상목적으로 촬영된 CT 이미지 등 가용자료를 이용하여 수정, 보완하는 방법을 검토중이다. KRIA