

몽테－까를로방법에 의한 인체의 방사선차폐최량설계

김국철, 윤철수

위대한 수령 김일성 동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《...원자력부문의 과학자들이 원자력에 대한 연구사업을 더 적극적으로 하도록 하여야 합니다.》(《김일성전집》 제60권 352페이지)

원자력에 대한 연구에서 방사선차폐복의 개발은 매우 중요한 의의를 가진다.

현재 방사선차폐복은 전신보호복형태로 개발생산 및 리용되고있는데 전신보호복들의 질량과 두께, β 감소계수 f_β 를 결정하여야 한다. 전신보호복은 온몸을 차폐물질로 위장하므로 차폐률을 높이자면 질량이 늘어나게 된다. 연으로 온몸을 2mm정도 피복한다고 할 때 성인남자의 경우 차폐복의 질량이 30kg이상 된다.

인체의 조직 및 기관들은 방사선에 대한 감수성(무계결수)이 서로 다르므로 무계결수가 큰 부위에는 차폐층을 두껍게 하고 무계결수가 작은 부위에는 얇게 하는 방법으로 차폐률을 높이고 질량도 줄일수 있다. 이를 위하여 인체에서 방사선의 선량을 모의하여야 한다.

우리는 방사선립자수송전용모의프로그램 MCNP 5.0을 리용하여 인체모형을 창조하고 선량을 평가하여 인체의 방사선차폐를 위한 최량설계를 하였다.

1. 인체모형설계

대표적인 인체모형인 ICRU구의 구성요소는 O 76.2%, H 10.1%, N 2.6%, C 11.1%이며 전체적인 밀도는 1g/cm^3 , 직경은 30cm이다.[2]

인체등가물질로는 폴리에틸렌테트라크릴산이 물보다 인체조직에 더 가까운것으로 하여 많이 리용되고있는데 크기는 $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 15\text{cm}$ 인 판모양의 직6면체이다. 실천에서는 중성자에 대한 역산란효과를 고려하여 크기를 $40\text{cm} \times 40\text{cm} \times 15\text{cm}$ 되게 만든다.

글리세린($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$)도 인체등가물질로 리용되고있는데 밀도는 $1.256\text{ g/cm}^3(25^\circ\text{C})$ 이다.

방사선에 의하여 인체에 조성되는 유효선량은 다음식으로 계산한다.

$$E = \sum W_T H_T \quad (1)$$

여기서 H_T 는 조직에서의 생물학적등가선량, W_T 는 인체조직의 무계결수이다.

한편 조직에서의 생물학적등가선량은 다음식으로 표시된다.

$$H_T = \sum W_R D_{T, R} \quad (2)$$

여기서 W_R 는 방사선의 무계결수, $D_{T, R}$ 는 방사선에 의하여 조직에 흡수된 흡수선량(Gy)이다.

인체조직의 무계결수[1]와 방사선의 무계결수[3]는 표 1, 2와 같다.

표 1. 인체조직의 무게결수[1]

조직 및 기관	무게결수	조직 및 기관	무게결수	조직 및 기관	무게결수
성선	0.20	방광	0.05	피부	0.01
적골수	0.12	가슴(유방)	0.05	뼈결면	0.01
블록벨	0.12	간장	0.05	나머지 기관	0.05
폐	0.12	식도	0.05	전신	1.00
위	0.12	갑상선	0.05		

표 2. 방사선의 무게결수[3]

방사선 유형	에너지/MeV	무게결수	방사선 유형	에너지/MeV	무게결수
빛량자	전체 대역	1	중성자	2~20	10
전자 및 μ 중간자	전체 대역	1	중성자	>20	5
중성자	<0.01	5	양성자(반중양성자제외)	>2	5
중성자	0.01~0.1	10	α 입자, 분열파편,		20
중성자	0.1~2	20	무거운 핵		

현재 리용되고있는 인체모형들은 모양에 따라 평판, 타원, 원기둥, 구, 립방체모양으로 구분할수 있는데 내부기관과 조직이 없는 단순한 모양의 균질모형들로서 역산란의 영향이 심할 때 모의정확도를 높일수 없는 결함이 있다.

이로부터 우리는 인체의 주요기관들을 포함하면서 인체의 형태에 더 접근한 비균질모형을 개발하였다.

인체등가물질은 뼈조직과 유기조직으로 구분하였다. 뼈조직의 구성요소는 H 7.3%, O 47.9%, C 25.5%, Ca 10.2%로, 간이나 심장과 같이 뼈없는 유기조직의 구성요소는 H 10.4%, C 22.6%, N 2.5%, O 63.5%로 설정하여 물질카드를 작성하였다. 역산란효과를 고려하기 위하여 모의계를 철함으로 둘러쌔으며 계밖의 공기매질에서는 중성자의 영향이 없다고 보았다.

2. MC모의계산 및 결과분석

우리가 구성한 인체모형에서 기관들의 배치구조는 그림과 같다.

모의에서 리용한 원천은 $^{241}\text{Am-Be}$ 중성자원천이며 원천으로부터 인체모형의 중심점까지거리는 y축방향으로 110cm로 하였다. 원천은 점원천, 원천의 세기는 $1.3 \cdot 10^8$ 개/s이다.

모의에서는 F6카드를 리용하여 인체안의 여러 조직과 기관에서 흡수선량을 모의계산하여 무게결수값들로부터 유효선량을 평가하였다.

MCNP프로그램으로 얻은 모의결과는 단위가 MeV/g이므로 이것을 Gy로 환산하고 여기에 에너지에 따르는 중성자의 무게결수와 방사선에 대한 조직의 무게결수들을 고려하여 목적하는 조직과 기관에서의 생물학적등가선량과 전신유효선량을 계산하였다.

단위중성자로 규격화한 인체안의 조직과 기관들에서의 생물학적등가선량은 표 3과 같다.



그림. 인체모형에서 기관들의 배치구조

표 3. 인체내 조직과 기관들에서의 생물학적등가선량

조직, 기관	모의결과/(MeV · g ⁻¹)	조직의 무게결수	등가선량/Sv
두개골, 얼굴뼈	8.258 88 · 10 ⁻⁸	0.01	1.321 · 10 ⁻¹⁸
머리	1.504 64 · 10 ⁻⁷	0.01	2.407 · 10 ⁻¹⁸
뇌수	7.898 98 · 10 ⁻⁸	0.12	1.517 · 10 ⁻¹⁷
목	1.992 26 · 10 ⁻⁷	0.01	3.188 · 10 ⁻¹⁸
몸통	1.873 27 · 10 ⁻⁷	0.05	1.498 · 10 ⁻¹⁷
팔뼈	1.501 48 · 10 ⁻⁷	0.01	2.402 · 10 ⁻¹⁸
심장	2.826 82 · 10 ⁻⁷	0.12	5.427 · 10 ⁻¹⁷
폐	9.112 72 · 10 ⁻⁸	0.12	1.749 · 10 ⁻¹⁵
간	1.272 95 · 10 ⁻⁷	0.05	1.028 · 10 ⁻¹⁷
위	1.223 55 · 10 ⁻⁷	0.12	2.349 · 10 ⁻¹⁷
다리	1.243 44 · 10 ⁻⁷	0.01	1.989 · 10 ⁻¹⁸
다리뼈	6.372 64 · 10 ⁻⁸	0.12	1.224 · 10 ⁻¹⁷
생식기	3.008 48 · 10 ⁻⁷	0.20	9.600 · 10 ⁻¹⁷
갈비뼈	1.293 34 · 10 ⁻⁷	0.12	2.070 · 10 ⁻¹⁸
결장	5.951 48 · 10 ⁻⁸	0.12	1.143 · 10 ⁻¹⁷
하행결장	1.543 55 · 10 ⁻⁷	0.12	2.964 · 10 ⁻¹⁷
상행결장	1.804 55 · 10 ⁻⁷	0.12	3.465 · 10 ⁻¹⁷
콩팥	1.074 72 · 10 ⁻⁷	0.05	8.598 · 10 ⁻¹⁸
골반	1.369 80 · 10 ⁻⁷	0.01	2.192 · 10 ⁻¹⁸
뱃	1.839 53 · 10 ⁻⁷	0.05	1.472 · 10 ⁻¹⁷
담낭	1.726 47 · 10 ⁻⁷	0.01	2.762 · 10 ⁻¹⁸
척수	6.823 30 · 10 ⁻⁸	0.20	2.183 · 10 ⁻¹⁷
흉선	2.367 59 · 10 ⁻⁷	0.05	1.894 · 10 ⁻¹⁷
신상선	4.143 28 · 10 ⁻⁹	0.01	6.630 · 10 ⁻²⁰
취장	2.566 87 · 10 ⁻⁷	0.05	2.053 · 10 ⁻¹⁷

표 3에서 보는바와 같이 무게결수가 큰 즉 방사선에 대하여 감수성이 예민한 뇌수나 심장, 간, 위, 생식기 등과 같은 기관들은 다른 기관들에 비하여 결과값이 상대적으로 크다.

전신유효선량을 계산한 결과 $2.15 \cdot 10^{-15}$ Sv이다.

전신유효선량가운데서 심장, 폐, 간, 위, 다리뼈, 생식기, 결장, 뱃, 척수, 흉선, 취장에서의 생물학적등가선량합은 95%이다.

모의결과로부터 이 조직들의 대다수가 몸통부분에 놓이므로 몸통부위의 차폐층을 두껍게 하고 나머지부분의 차폐층은 얇게 하여 차폐률을 높이면서도 질량을 줄일수 있다는 것을 알수 있다.

맺 는 말

인체모형을 모의하고 인체모형에서의 전신유효선량과 개별적인 조직, 기관에서의 생물학적등가선량을 평가한 결과 방사선에 대한 조직들의 무게결수가 큰 부위의 유효선량값들이 전신유효선량의 95%를 차지한다. 모의결과 무게결수가 작은 부위에는 차폐층을 상대적으로 얇게, 큰 부위에는 두껍게 입히는 방법으로 전신방사선차폐복을 설계하여 차폐복의 질량을 줄이고 차폐률을 높일수 있다.

참 고 문 헌

- [1] R. A. Aly et al.; Journal of Nuclear and Radiation Physics, 5, 1—2, 1, 2010.
- [2] International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU, 15~19, 1980.
- [3] R. B. Siebert et al.; Radiation Protection Dosimetry, 58, 1, 69, 1984.

주제 105(2016)년 4월 5일 원고접수

Radiation Shield Optimization Design in Human Body using MC Method

Kim Kuk Chol, Yun Chol Su

We created the phantom and simulated the total body effective dose and biological equivalent dose by using simulation code MCNP 5.0. From the simulation result, we found that the sum of doses in the tissues and organs which have large radiation weight factor was the main portion among the total body effective dose.

Key words: MC method, phantom