

간외 담도암 고선량을 관내근접방사선치료 시 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 주변장기의 선량평가 연구

Study of Radiation dose Evaluation using Monte Carlo Simulation while Treating Extrahepatic Bile Duct Cancer with High Dose Rate Intraluminal Brachytherapy

박주경*, 이승훈*, 차석용*, 이선영**

전북대학교병원 방사선종양학과*, 전북대학교 의학전문대학원 방사선종양학교실**

Ju-Kyeong Park(21086@cuh.co.kr)*, Seung-Hoon Lee(20514@cuh.co.kr)*, Seok-Yong Cha(chasy@cuh.co.kr)*, Sun-young Lee(sylee78@jbnu.ac.kr)**

요약

MCNPX를 통하여 계산한 상대선량과 고체팬텀과 전리함용 이용하여 측정된 상대선량을 비교하여 몬테카를로 시뮬레이션의 정확성을 평가하였다. 그리고 간외 담도암 관내근접방사선치료를 몬테카를로 시뮬레이션에 적용하기 위해 ¹⁹²Ir 밀봉방사성선원을 모사하였고, 한국 성인남성 표준인을 기초로 하는 KMIRD형 팬텀을 이용하여 담도 및 주변 장기를 제작하였다. 간외 담도암 관내근접방사선치료를 MCNPX를 이용하여 담도 주변 정상장기의 비유효에너지와 초기방사능을 1 Ci로 설정하여 흡수선량을 산정하였다. 몬테카를로 시뮬레이션의 정확성 평가에서 상대선량 차이가 가장 많은 지점이 1.96%로 MCNPX에서 제시한 상대오차 2%를 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 담도 주변 정상장기의 비유효에너지 및 흡수선량은 담도와 비교적 인접한 위치에 있는 우측신장, 간, 췌장, 횡행결장, 척수, 위장, 소장이 높았고, 담도와의 거리가 떨어져 있는 장기들인 좌측신장, 비장, 상행결장, 하행결장, S상결장이 낮게 나타났다.

■ 중심어 : | MCNPX | 관내근접방사선치료 | KMIRD형 팬텀 | 비유효에너지 | 흡수선량 |

Abstract

The relative dose calculated by MCNPX and the relative dose measured by ionization chamber and solid phantoms evaluated the accuracy comparing with Monte Carlo simulation. In order to apply Monte Carlo simulation the intraluminal brachytherapy of extrahepatic bile duct cancer, ¹⁹²Ir sealed radioactive source replicate, Bile duct and surrounding organs were made using KMIRD phantom based on a South Korea standard man. To check the absorbed dose of normal organs around bile duct, we set the specific effective energy and initial radioactivity to 1 Ci using MCNPX. Evaluation of the accuracy of the Monte Carlo simulation, the difference of the relative dose is the most 1.96% that satisfy the criteria that is the relative error less than 2% suggested by MCNPX code. In addition, The specific effective energy and absorbed dose of normal organs that were relatively adjacent to bile duct such as right side of kidney, liver, pancreas, transverse colon, spinal cord, stomach and small intestine were relatively high. on the contrary, the organs that were relatively distant to bile duct such as left side of kidney, spleen, ascending colon, descending colon and sigmoid colon were relatively low.

■ keyword : | MCNPX | Intraluminal Brachytherapy | KMIRD Phantom | Specific Effective Energy | Absorbed Dose |

I. 서론

간의 담도암은 비교적 느리게 진행하며 원격 전이도 늦게 나타나는 특성이 있으나, 발견이 늦기 때문에 소화기계 암에서 예후가 불량한 암 중의 하나이다[1]. 수술적 완전 절제가 가장 효과적인 근치적 치료로 알려졌지만, 진단 당시 수술적 절제가 가능한 경우는 약 40~73% 정도에 지나지 않는다[1][2]. 또한, 근치적 절제술 시행한 이후에도 국소 재발률이 33~65% 정도로 보고되고 있어서 항암화학요법과 방사선치료가 생존율을 향상하기 위해서 시도되고 있고, 여러 연구에서 그 결과가 보고되고 있다[3][4].

방사선치료에는 선형가속기에서 발생한 고에너지의 방사선을 이용하여 암세포를 사멸시키는 외부방사선치료와 종양에 관을 통하여 방사성동위원소를 직접 삽입하여 치료하는 방법인 관내근접방사선치료를 각각 시행하거나, 병행하여 치료한다[5]. 간의 담도암의 외부방사선치료는 조사영역에 있는 간, 십이지장, 췌장, 신장 등 정상장기의 방사선 선량한도 때문에 종양에 충분한 선량이 도달되지 못하는 단점이 있다. 그렇지만 관내근접방사선치료는 원격후장전시스템을 이용하여 종양 부위에 고선량의 방사선을 국소적으로 집중 조사하고, 종양 주변에는 적은 양의 방사선만이 도달하게 되어 정상조직을 최대한 보호할 수 있는 치료법 중의 하나이다. 따라서 방사선치료로 인하여 수반되는 합병증을 최소한으로 줄이고, 시술자가 피폭을 적게 받을 수 있는 장점이 있다[6]. 하지만 관내근접방사선치료 역시 치료부위 주변에 있는 정상조직에도 방사선이 도달하게 되어 합병증을 유발할 수 있다. 따라서 방사선치료 시 정상조직의 정확한 피폭선량의 평가가 이루어져야 한다. 하지만 인체의 해부학적인 복잡성과 인체 조직의 불균일성 때문에 등가선량(equivalent dose) 및 유효선량(effective dose)의 실제 측정은 거의 불가능하다. 국제방사선방호위원회에서는 실제 측정이 가능한 플루언스(fluence), 커마(kerma) 등의 값으로부터 등가선량 및 유효선량을 산출하기 위하여 선량환산인자(dose conversion coefficient)를 제시하였다[7]. 선량환산인자는 MIRD(Medical Internal Radiation Dose)형 인체모형 팬텀과 결합한 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션

방법을 이용하여 산출한다.

이에 본 연구에서는 ^{192}Ir 밀봉방사성선원을 MCNPX(Monte Carlo N particle extended) 코드로 계산한 상대선량과 전리함과 고체 팬텀을 이용하여 직접 측정된 상대선량을 비교하여 몬테카를로 시뮬레이션 방법의 정확성을 평가하고자 한다. 또한, 간의 담도암 관내근접방사선치료를 몬테카를로 시뮬레이션 방법에 적용하여 담도 주변에 있는 정상장기의 피폭선량을 예측함으로써, 간의 담도암의 관내근접방사선치료 요법의 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 실험재료 및 방법

1. ^{192}Ir 밀봉방사성선원 및 팬텀의 구성

관내근접방사선치료용 방사성 선원은 MicroSelectron-HDR(Nucletron, Netherlands)에 장착된 ^{192}Ir 밀봉방사성선원을 모사하였다. 밀봉방사성선원의 중심은 실린더 형태의 iridium core(Ir 30%, Pt 70%)가 있고, 주변은 스테인리스로 밀봉되어 있다. 밀봉방사성선원은 외경이 0.9 mm, 길이는 4.5 mm이고, iridium core의 지름은 0.65 mm, 길이가 3.6 mm이다. 치료지점의 카테터와 선원을 저장하는 원격후장전시스템 내의 이동을 위하여 0.7 mm 스테인리스 강선에 연결되어 있다[Fig. 1].

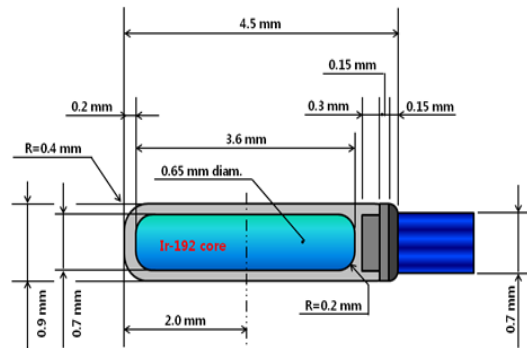


Fig. 1. ^{192}Ir sealed radioactive source

수학적 팬텀은 한국 성인남성 표준인(키 171 cm, 체중 68 kg)을 기초자료로 하는 KMIRD형 팬텀을 이용하

여 각 장기를 모사하였고, 담도는 지름 0.5 cm, 길이 6 cm로 하여 식 (1)과 같이 구성하였다.

$$((x+3.5)+0.25)^2 + (y+1.9)^2 \leq \text{and } 27.354 \leq 33.473 \quad (1)$$

KMIRD형 팬텀은 인체를 머리, 몸통, 다리로 구분하여 원기둥, 원뿔, 구 및 평면 등으로 구성하였으며, 2차원 수학방정식을 이용하여 3차원적인 각 장기를 표현하였다. Z축은 다리에서 머리방향, X축은 오른쪽에서 왼쪽, Y축은 앞면에서 뒷면으로 가는 방향으로 지정하였고, 축의 치수는 센티미터(cm)를 사용하였다.

2. 몬테카를로 시뮬레이션 및 선량측정방법

근접방사선치료는 담도에 경피적 담도 배액관 및 스텐트를 삽입 후 6 french Lumincath(Nucletron, Netherlands) 카테터를 병변에 접근시켜 ¹⁹²Ir 밀봉방사선원이 카테터 내부를 이동하면서 치료를 진행하게 된다. 치료계획은 선원중심으로부터 10 mm 떨어진 지점에 선량표준화(normalization) 하였다. 이러한 모델을 바탕으로 한 몬테카를로 시뮬레이션은 미국 핵무기 연구소인 LANL(Los Alamos National Laboratory)에서 개발된 MCNPX 코드를 이용하여 담도 중앙을 중심으로 선원을 상하로 각각 30 mm씩 하고, 총 60 mm를 치료하는 모델을 설정하여 선속(flux)을 계산하였다. MCNPX 코드로 계산한 값의 정확성을 평가하기 위하여 가상의 공간에 검출기를 설치하여 계산하는 F5 tally 모드를 이용하여 10 mm부터 100 mm까지 10 mm 간격으로 선속을 계산하였고, 이때 상대오차는 2% 이내였다. 그리고 선원중심으로부터 10 mm 떨어진 지점에서 계산된 선속으로 선량표준화(normalization)하여 상대선량을 얻었다. 선원의 측정은 UNIDOS(PTW, Germany) 전기계에 farmer type chamber W-30006 0.6 cm³ 전리함을 연결하고, 고체팬텀을 이용하여 10 mm부터 100 mm까지 거리를 변화시키면서 MCNPX 코드로 계산한 지점과 같은 지점에서의 전하량(electric charge)을 5회 반복하여 측정 후 평균값을 나타내었다. 또한, MCNPX 코드로 계산한 상대선량과 비교하기 위하여 선원중심으로부터 10 mm 떨어진 지점에서 측정된 전하량으로 선량표준화하여 상대선량으로 변환하

였다[Fig. 2]. 담도 주변에 있는 췌장, 간, 우측신장, 척수, 좌측신장, 위장, 소장, 상행결장, 횡행결장, 하행결장, S상결장의 피폭선량을 평가하기 위하여 비유효에너지(Specific Effective Energy: SEE)를 산정하였고, 초기방사능을 1 Ci로 설정하여 흡수선량을 평가하였다. 선량평가자로는 광자와 전자에 의해 축적되는 에너지를 모두 계산하는 F6 tally 모드와 10⁴히스토리를 이용하였다.

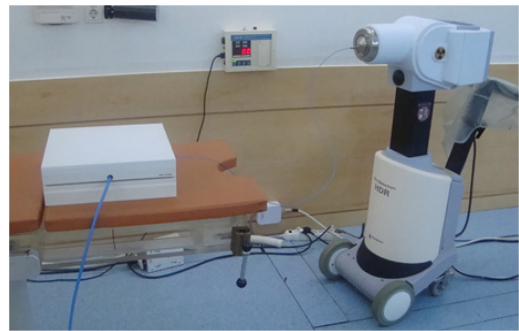


Fig. 2. The electric charge of microSelectron-HDR ¹⁹²Ir sealed radioactive source using ionization chamber and the solid phantoms was measured.

3. 각 장기별 선량 평가방법

누적(축적)방사능(cumulated activity)이란 방사성동위원소의 방사성붕괴에 대한 시간적분량(time integral)을 말하여 아래와 같은 식 (2)로 표현할 수 있다[8][9].

$$U_s = \int_0^{\infty} A(t) dt \quad (2)$$

여기에서 U_s는 누적(축적)방사능(μCi · h 또는 MBq · s)이며, A(t)는 시간 t에서의 순간방사능이다. 선원 영역 내의 초기방사능이 A₀일 때 방사능의 시간함수 A(t)는 방사성동위원소 및 화합물의 유효붕괴상수 λ_{eff}에 의해 아래식 (3)과 같이 결정된다.

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda_{eff} \cdot t} \quad (3)$$

위 (3)식을 식 (2)에 대입하면 누적방사능 U_s는 아래식 (4)와 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$U_s = \frac{A_0}{\lambda_{eff}} \quad (4)$$

또한, 흡수선량은 위의 누적(축적)방사능과 비유효에너지의 값을 이용하여 아래 식 (5)와 같이 표현된다.

$$D = k \sum_i U_{s,i} SEE(T \leftarrow S)_i \quad (5)$$

이때 상수 k는 $k = 1.602 \times 10^{-10} \frac{Gy}{MeV/g}$ 로 표현된다.

피폭조직의 비유효에너지는 다음 식 (6)과 같이 정의된다.

$$SEE = \sum_i \frac{E_i Y_i AF(T \leftarrow S)_i W_i}{Mt} \quad (6)$$

E_i : 입자 i의 평균에너지

Y_i : 붕괴당 입자 i의 방출률

$AF(T \leftarrow S)_i$: 흡수분획(absorbed fraction), 선원조직 Si에서 방출된 입자 i의 에너지 중 피폭조직 Ti의 단위질량당 흡수되는 비율

W_i : 방사선 입자 i의 선질인자(방사선 가중인자)

Mt : 표적 장기의 질량

III. 결 과

1. MCNPX 코드로 계산한 상대선량과 직접 측정치 비교

MCNPX 코드로 계산한 상대선량과 전리함과 고체팬텀을 이용하여 측정된 상대선량은 선원중심으로부터 10 mm 지점은 선량표준화를 하였고 때문에 100%로 같았다. 그리고 20 mm 지점에서부터 50 mm 지점까지는 MCNPX 코드로 계산한 상대선량이 측정된 상대선량보다 약간 높게 나타났고, 60 mm 지점에서부터 100 mm 지점까지는 측정된 상대선량이 MCNPX 코드로 계산한 상대선량보다 좀 더 높게 나타났다[Table 1]. 선원중심으로부터 같은 지점에서의 상대선량 비교에서 가장 차이가 크게 나타난 지점은 20 mm로 MCNPX 코드로 계산한 상대선량이 41.07%, 측정된 상대선량이 39.13%로 1.96%의 차이가 있었고, 상대선량 차이가 가장 적은 지점은 50 mm로서 MCNPX 코드로 계산한 상대선량이 8.84%, 측정된 상대선량이 8.83%로 0.01%의 상대선량 차이가 나타났다. 두 가지 방법에서 상대선량 차이가

2% 이내로 나타났지만, 여기에는 측정할 때 고체팬텀의 셋업 오차도 배제할 수는 없었다.

Table 1. The relative dose calculated by MCNPX and the measured relative dose

Distance (mm)	¹⁹² Ir sealed radioactive source	
	MCNPX (%)	Measurement (%)
10	100	100
20	47.07	39.13
30	22.30	22.23
40	13.61	12.40
50	8.84	8.83
60	6.02	6.13
70	4.24	4.54
80	3.03	3.44
90	2.22	2.70
100	1.78	2.01

2. 담도 주변 장기의 비유효에너지 및 흡수선량 평가 분석

간의 담도에 ¹⁹²Ir 밀봉방사성선원을 6 cm로 하고, 주변장기를 표적 장기로 설정한 후 MCNPX 코드의 F6 tally 모드를 이용하여 각 장기별 비유효에너지를 도출한 결과 선원으로부터 인접한 우측신장에서 8.35E⁻⁰⁵ MeV/g으로 가장 높았다. 그리고 간에서 2.15E⁻⁰⁵ MeV/g, 췌장에서 1.34E⁻⁰⁵ MeV/g, 횡행결장에서 9.01E⁻⁰⁶ MeV/g, 척수에서 6.94E⁻⁰⁶ MeV/g, 위장에서 5.17E⁻⁰⁶ MeV/g, 소장에서 4.75E⁻⁰⁶ MeV/g, 좌측신장에서 4.30E⁻⁰⁶ MeV/g, 비장에서 3.88E⁻⁰⁶ MeV/g, 상행결장에서 3.74E⁻⁰⁶ MeV/g, 하행결장에서 1.26E⁻⁰⁶ MeV/g 이었고, S상결장에서 3.00E⁻⁰⁷ MeV/g으로 비유효에너지가 가장 낮게 계산되었다[Table 2]. 또한, 초기방사능을 1 Ci로 설정하고 식 (5)를 이용하여 흡수선량을 계산한 결과 우측신장에서 4.94E⁻⁰⁴ Gy/Ci로서 가장 높았다. 그리고 간에서 1.27E⁻⁰⁴ Gy/Ci, 췌장에서 7.93E⁻⁰⁵ Gy/Ci, 횡행결장에서 5.33E⁻⁰⁵ Gy/Ci, 척수에서 4.11E⁻⁰⁵ Gy/Ci, 위장에서 3.06E⁻⁰⁵ Gy/Ci, 소장에서 2.81E⁻⁰⁵ Gy/Ci, 좌측신장에서 2.55E⁻⁰⁵ Gy/Ci, 비장에서 2.30E⁻⁰⁵ Gy/Ci, 상행결장에서 2.21E⁻⁰⁵ Gy/Ci, 하행결장에서

$7.46E^{-06}$ Gy/Ci이었고, S상결장에서 $1.78E^{-06}$ Gy/Ci으로 흡수선량이 가장 적게 계산되었다. 담도와 인접한 위치에 있는 우측신장, 간, 췌장, 횡행결장, 척수, 위장, 소장이 비유효에너지와 흡수선량이 비교적 높았고, 담도와 의 거리가 떨어져 있는 장기들인 좌측신장, 비장, 상행결장, 하행결장, S상결장이 비교적 낮게 평가되었다.

Table 2. Bile duct surrounding normal organs of the specific effective energy and absorbed dose evaluation

Organ	^{192}Ir sealed radioactive source	
	Specific effective energy (MeV/g)	Absorbed dose (Gy/Ci)
Liver	$2.15E^{-05}$	$1.27E^{-04}$
Pancreas	$1.34E^{-05}$	$7.93E^{-05}$
Right Kidney	$8.35E^{-05}$	$4.94E^{-04}$
Left Kidney	$4.30E^{-06}$	$2.55E^{-05}$
Spinal cord	$6.94E^{-06}$	$4.11E^{-05}$
Spleen	$3.88E^{-06}$	$2.30E^{-05}$
Stomach	$5.17E^{-06}$	$3.06E^{-05}$
Small Intestine	$4.75E^{-06}$	$2.81E^{-05}$
Ascending Colon	$3.74E^{-06}$	$2.21E^{-05}$
Transverse Colon	$9.01E^{-06}$	$5.33E^{-05}$
Descending Colon	$1.26E^{-06}$	$7.46E^{-06}$
Sigmoid Colon	$3.00E^{-07}$	$1.78E^{-06}$

IV. 고 찰

몬테카를로 시뮬레이션 방법은 입자와 물질과의 상호작용을 직접 계산하여 결과를 나타내는 것으로 상대적으로 많은 계산시간이 필요하지만, 가장 정확한 선량 계산 도구로 평가받고 있으며, 특히 기하학적으로 불규칙한 비균질 물질을 포함하는 경우의 선량계산에서 탁월하다[10]. 본 연구에서 직접 측정치와 비교하여 검증한 결과 MCNPX 코드로 계산한 허용오차가 2%인데 [11], 측정된 상대오차가 최대 1.96%이었던 것을 고려하면 담도와 인접한 정상장기의 비유효에너지와 흡수선량 또한 신뢰할 수 있는 수준의 계산결과를 얻을 수 있었다. 하지만 몬테카를로 시뮬레이션 방법의 계산 결과가 비교적 정확하지만, 절대적인 신뢰도를 가지는 선량은 아니다. 몬테카를로 시뮬레이션 방법의 계산 결과

를 기준으로 어느 허용오차 이상의 측정치가 있다면, 그 측정치에 어떤 문제가 없었는지 원인을 살펴보는 것이 바람직하다. MCNPX 코드로 계산한 결과와 직접 측정된 상대선량 사이에 나타난 오차는 고체팬텀 사이의 압착상태가 일치하지 않아 그 사이에 존재하는 일부 공기층 때문에 나타난 것으로 생각된다.

MCNPX 코드는 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용하는 내부피폭 연구의 대표적인 방사선 수송 코드로서 광자, 중성자 및 전자를 연계하여 수송할 수 있으며 여러 형태의 계산에 널리 이용되고 있다. 광자는 1 KeV에서 1 GeV까지의 수송해석이 가능하고 인체의 내부피폭과 외부피폭에서 선량분포, 조직등가선량 및 유효선량의 계산에 표준이 되고 있다[11].

몬테카를로 시뮬레이션 방법과 결합하여 사용되고 있는 수학적 팬텀은 MIRD형이 대표적으로, 방사선 방호와 의학적 목적의 선량분포를 계산하기 위해 널리 이용되고 있다. 하지만 MIRD형 팬텀은 그 기본 데이터가 서유럽과 북미인 즉, 코케이션 자료에 의존하고 있다. ICRP-89에 따르면 성인남성 표준인의 키와 몸무게는 176 cm, 73 kg이었고, 2004년 전과학기술포에서 제시한 한국 성인남성 표준인은 171 cm, 68 kg으로 한국 표준인이 약간 작은 것으로 평가되었다. 이계기 등[12]은 표준한국인을 기초자료로 하는 KMIRD형 수학적 팬텀을 개발하였고, 이후 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용한 여러 연구에서 많이 이용되고 있다. 수학적 팬텀을 이용한 몬테카를로 시뮬레이션 방법의 신뢰성은 일반적으로 받아들여지고 있고[13], 직접 측정된 상대선량과 비교하여 몬테카를로 시뮬레이션 결과의 정확성을 평가하고, MCNPX 코드를 이용하여 담도 주변 정상장기의 비유효에너지 및 흡수선량을 계산하고자 했던 목적은 충분히 달성되었다고 판단된다.

간의 담도암은 수술적 절제술을 시행하더라도 국소 재발이 많이 발생하는 암종으로, 재발하였을 때 남아 있는 담도의 여유 길이가 부족하여 재수술은 어려운 실정이다[14][15]. Kurosaki 등[16]은 수술 후에 완전 절제가 불가능하거나 림프절의 전이가 있을 때, 방사선 치료가 생존율의 향상에 효과적이라고 하였다.

간의 담도암에서 수술적 절제 외에 항암화학요법과

국소치료법인 방사선치료가 많이 시행되고 있다. 최근의 외부방사선치료는 삼차원입체조형방사선치료, 세기 조절방사선치료, 영상유도방사선치료 등의 고정밀 방사선치료법들이 개발되어 정상조직을 가능한 최대로 보호하여 치료성과를 한층 더 높이는 데 이바지하고 있다. 또한, 외부방사선치료와 병행하거나 단독으로 시행할 수 있는 관내근접방사선치료가 많이 시도되고 있다. 관내근접방사선치료는 방사선조사량을 줄이면서 종양 주변의 일정한 부위에만 높은 방사선을 조사할 수 있는 치료법으로 방사선선원을 장착한 도관을 경피적, 혹은 내시경적 방법으로 담도암 부위에 위치해서 국소부위에만 집중적으로 방사선을 조사하여 종양을 치료한다 [17][18].

하지만 방사선치료는 필연적으로 조사범위 내에 있는 정상조직의 피폭을 수반하게 되고, 관내근접방사선치료 또한 방사선원과 인접한 영역에서 정상조직의 피폭이 발생한다. 따라서 정상조직의 피폭선량을 평가함으로써 방사선치료를 정확한 선량한도를 설정할 수 있다. 그러나 인체의 내부조직에 대한 방사선량의 측정은 거의 불가능하며, 현재로서는 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용하여 피폭선량을 계산하는 것이 가장 정확하다[19].

간의 담도암의 관내근접방사선치료를 몬테카를로 시뮬레이션 방법에 적용하면서 복셀의 크기를 줄여 계산하면, 계산되는 시간은 더 걸리겠지만 좀 더 정확한 계산결과를 얻을 수 있을 것이다[20]. 또한, 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용하여 정상장기의 피폭선량을 정확하게 평가함으로써 방사선을 이용한 분야에서 폭넓게 이용할 수 있을 것으로 생각한다.

V. 결론

간의 담도암에서 수술이 불가능한 환자와 근치 목적의 절제술 후에 생존율을 향상하기 위해 시도되는 관내근접방사선치료는 주변 정상장기의 피폭선량 제한을 받는다. 피폭선량을 평가하는 데 있어서 직접 측정은 거의 불가능하여, 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용

하는 계산이 주로 사용된다.

몬테카를로 시뮬레이션 방법은 입자와 물질간의 상호작용을 직접 계산하여 결과를 주는 것으로, 상대적으로 많은 계산 시간이 필요하지만 가장 정확한 선량평가 도구로 평가받고 있고, 방사선 종양학 분야에서 지난 10여 년에 걸쳐 폭넓게 이용되어 왔다. 앞으로 선량계를 통한 실제 측정이 불가능한 여러 연구에서 방사선량을 계산하는데 많은 이바지 할 것으로 생각된다.

아직 간의 담도암에서 방사선치료 요법이 명확하게 확립되어있지 않았지만, 관내근접방사선치료를 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 이용하여 담도와 인접한 정상장기의 피폭선량을 예측함으로써, 안전하고 정확한 치료를 위한 기초가 될 것이다.

참고 문헌

- [1] K. B. Bae, T. H. Kim, Y. K. Choi, and N. W. Paik, "Surgical treatment and prognosis for 268 patients with biliary tract cancers," *J. of Korean Surgical Society*, Vol.58, No.3, pp.412-419, 2000.
- [2] B. D. Cho, H. K. Oh, M. K. Jang, T. Y. Kyong, J. M. Lee, Y. B. Kim, H. Y. Kim, C. K. Park, and J. Y. Yoo, "Clinical characteristics and prognosis of the extrahepatic bile duct cancer," *Korean J. of Gastroenterology*, Vol.28, No.2, pp.251-259, 1996.
- [3] Y. Sakamoto, T. Kosuge, K. Shimada, T. Sano, H. Ojima, J. Yamamoto, S. Yamasaki, T. Takayama, and M. Makuuchi, "Prognostic factors of surgical resection in middle and distal bile duct cancer: an analysis of 55 patients concerning the significance of ductal and radial margins," *Surgery*, Vol.137, No.4, pp.396-402, 2005.
- [4] R. Sasaki, M. Takahashi, O. Funato, H. Nitta, M. Murakami, H. Kawamura, T. Suto, S. Kanno, and K. Saito, "Prognostic significance of lymph

- node involvement in middle and distal bile duct cancer," *Surgery*, Vol.129, No.6, pp.677-683, 2001.
- [5] K. A. Vallis, I. S. Benjamin, A. J. Munro, A. Adam, C. S. Foster, R. C. N. Williamson, G. R. Kerr, and P. Price, "External beam and intraluminal radiotherapy for locally advanced bile duct cancer: Role and tolerability," *Radiotherapy and Oncology*, Vol.41, No.1, pp.61-66, 1996.
- [6] H. S. Shin, J. S. Seong, W. C. Kim, H. S. Lee, S. R. Moon, I. J. Lee, K. K. Lee, K. R. Park, C. O. Suh, and G. E. Kim, "Combination of external beam irradiation and high-dose-rate intraluminal brachytherapy for inoperable carcinoma of the extrahepatic bile ducts," *International J. of Radiation Oncology, Biology, Physics*, Vol.57, No.1, pp.105-112, 2003.
- [7] International Commission on Radiological Protection, 1996 *Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation*, ICRP Publication 74, Pergamon Press, 1996.
- [8] P. B. Zanzonico, "Internal Radionuclide Radiation Dosimetry: A Review of Basic Concepts and Recent Developments," *J. of Nuclear Medicine*, Vol.41, No.2, pp.297-308, 2000.
- [9] R. Loevinger, T. F. Budinger, and E. E. Waston, *MIRD Primer for Absorbed Dose Calculations (revised)*, The Society of Nuclear Medicine, New York, 1991.
- [10] P. E. Metcalfe, T. Kron, and P. Hoban, *The Physics of Radiotherapy X-Rays from Linear Accelerators*, Medical Physics Publishing, Madison, Wisconsin, 1997.
- [11] B. Denise and Pelowitz(editor), *MCNPXTM user's manual, version 2.6.0*, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-07-1473, 2008.
- Vol.3, No.2, pp.27-38, 2003.
- [12] 이재기, 이춘식, 김현기, 박상현, 홍종호, 고광옥, 장한기, 장기원, 정계호, 안길훈, 신은혁, 인영기, 김종순, 김은실, 장윤균, 정규환, 진영우, 이진, 이연주, 성숙희, 김혁민, 오지민, 윤충현, 방사선 안전규제 기술 개발, 방사선방호를 위한 표준한국인 설정연구, iTRS/TR-20047-01, 한양대학교, 과학기술부, 2004.
- [13] 강세권, 정광호, 주라형, 조병철, 오도훈, 김수산, 김경주, 배훈식, 한영이, 신은혁, 박성호, 임천일, "제작된 선량 검증용 IMRT 팬텀의 몬테카를로 시뮬레이션: 예비적 연구", *의학물리학회논문지*, 제 18권, 제3호, 2007.
- [14] T Takada, M Miyazaki, S Miyakawa, K Tsukada, M Nagino, S Kondo, J Furuse, H Saito, T Tsuyuguchi, F Kimura, H Yoshitomi, S Nozawa, M Yoshida, K Wada, H Amano, and F Miura, "Purpose, use, and preparation of clinical practice guidelines for the management of biliary tract and ampullary carcinomas," *J. of Hepatobiliary Pancreatic Surgery*, Vol.15, No.1, pp.2-6, 2008.
- [15] J. Klempnauer, G. J. Ridder, M. Werner, A. Weimann, and R. Pichlmayr, "What constitutes long term survival after surgery for hilar cholangiocarcinoma?," *Cancer*, Vol.79, No.1, pp.26-34, 1997.
- [16] H. Kurosaki, K. Karasawa, T. Kaizu, T. Matsuda, A. Okamoto, T. Sato, T. Ebara, and T. Tanaka, "Intraoperative radiotherapy for resectable extrahepatic bile duct cancer," *International J. of Radiation Oncology, Biology, Physics*, Vol.45, No.3, pp.635-638, 1999.
- [17] H. Ishii, J. Furuse, M. Nagase, M. Kawashima, H. Ikeda, and M. Yoshino, "Relief of jaundice by external beam radiotherapy and intraluminal brachytherapy in patients with extrahepatic cholangiocarcinoma: results without stenting,"

Hepatogastroenterology, Vol.51, No.58, pp.954-957, 2004.

[18] R Golfieri, E Giampalma, M Renzulli, A Galuppi, L Vicenzi, M. C. Galaverni, and A Cappelli, "Unresectable hilar cholangiocarcinoma: multimodality approach with percutaneous treatment associated with radiotherapy and chemotherapy," *In Vivo*, Vol.20, No.6A, pp.757-760, 2006.

[19] P. Andero, "Monte Carlo technique in medical radiation physics," *Physics in Medicine and Biology*, Vol.36, No.7, pp.861-920, 1991.

[20] 김상태, "영·유아의 입사피부선량 측정을 위한 몬테카를로 시뮬레이션", *한국콘텐츠학회논문지*, 제12권, 제6호, 2012.

차 석 용(Seok-Yong Cha)

정회원



- 1999년 8월 : 전북대학교 산업보건학(보건학석사)
- 1987년 4월 ~ 현재 : 전북대학교병원 방사선종양학과

<관심분야> : 몬테카를로 시뮬레이션, 방사선량 평가

이 선 영(Sun-Young Lee)

정회원



- 2008년 2월 : 전북대학교 의학석사
- 2013년 2월 : 전북대학교 의학박사
- 2004년 3월 ~ 현재 : 전북대학교병원 방사선종양학과 임상조교수

<관심분야> : 몬테카를로 시뮬레이션, 방사선량 평가

저 자 소 개

박 주 경(Ju-Kyeong Park)

정회원



- 2013년 8월 : 전북대학교 산업보건학(보건학석사)
- 2007년 5월 ~ 현재 : 전북대학교병원 방사선종양학과

<관심분야> : 몬테카를로 시뮬레이션, 방사선량 평가

이 승 훈(Seung-Hoon Lee)

정회원



- 2013년 8월 : 전북대학교 산업보건학(보건학석사)
- 2004년 5월 ~ 현재 : 전북대학교병원 방사선종양학과

<관심분야> : 몬테카를로 시뮬레이션, 방사선량 평가