

전립선암 근접시료시 주변 장기 선량 평가

*경희대학교 원자력공학과, †건양대학교 방사선학과

김정훈* · 임창선† · 황주호*

정량적인 방사선치료 선량을 예측하기 위한 일환으로 한국표준남성에 기초하여 수학적 모의피폭체를 제작하였다. 이후 전립선을 선원장기로 하여 전립선암 근접치료 시 발생할 것으로 예상되는 전립선 및 주변장기의 흡수선량을 산정하였다. 모의모사를 위하여 방사성핵종은 전립선 근접치료에 유용하게 사용되는 ^{251}Pu 및 ^{103}Pd 선정하였고, 초기 방사능을 1 Ci를 투여하는 것으로 가정하였다. 그 결과 선원장기인 전립선이 ^{125}I 및 ^{103}Pd 경우 각각 101 Gy/Ci와 7.24 Gy/Ci를 나타냈으며, 전립선을 제외하고 흡수선량이 높은 장기는 비교적 전립선과 인접되어 있는 장기 즉 음경과 음낭, S자결장, 정소, 방광순으로 나타났다.

중심단어: 방사선치료, 근접치료, 전립선암, SEE, 흡수선량

서 론

전립선암은 서구사회 남성에서 가장 높은 발생빈도를 보이는 암이다. 진단기술의 발달과 사회적인 관심도의 증가로 조기진단이 가능하게 되었고, 전립선암의 완치를 위한 많은 노력이 진행되고 있다.¹⁾ 우리나라의 경우 2007년 국가암등록사업 연례 보고서에 따르면 전립선암은 인구의 노령화, 식생활의 서구화 등에 의해 전립선암의 발생률이 급격히 증가하여, 남성암 중 5번째, 비뇨기계통 중 첫 번째의 발생 빈도를 보이고 있다.²⁾ 전립선암의 치료방법으로는 추적관찰, 근치적 전립선절제술, 외부방사선치료, 조직내 방사선치료, 냉동치료, 항남성호르몬치료 등이 보편적으로 행해지고 있으며, 특별히 우월한 치료방법보다는 경우에 따라 적당한 치료방법을 선택하고 있다.¹⁾

전립선 내에 국한된 전립선암인 경우 근치적 치료방법으로 방사선치료가 시행되며, 임상적으로 피막 외 침범이나 정낭 침범이 의심되는 경우에는 방사선치료 단독 혹은 호르몬치료와 병합하는 치료를 시행한다. 방사선 조사에 의한 암 치료방법은 치료의 간편성 및 유효성이 뛰어나 널리 이용되고 있으나,³⁾ 국소부위에 대한 선택성이 떨어져 주변

조직인 방광, 요도, 직장 등의 부작용을 피하기는 어렵다. 따라서 방사선의 외부 조사 대신 방사성 물질을 체내로 투입하여 국소에 집중시킴으로써 부작용을 줄이고자하는 노력이 꾸준히 시도되어 왔다. 1980년대 중반부터 전산화단층촬영술과 직장초음파검사술의 발전에 힘입어 보다 정밀한 전립선의 계측이 가능해지고 경회음부 침습을 위한 장비들이 개발되었으며, 인체 내 삽입이 가능한 ^{125}I 나 ^{103}Pd 과 같은 방사성동위원소 씨앗이 제조되면서 이러한 어려운 문제들을 해결할 수 있게 되었다.^{4,5)} 전립선암 치료를 위한 근접치료의 국외사례를 살펴보면, 일본의 Saito 등⁶⁾은 2001년에 26명, Shin 등⁷⁾은 2007년에 300명, 영국의 Bashar 등⁸⁾은 2001년부터 2003년까지 238명, 스페인의 Pedro 등⁹⁾은 1999년에 63명, 미국의 Mark 등¹⁰⁾은 9명, 호주의 David 등은 102명의 전립선암 환자를 대상으로 근접치료를 시행했으며,¹¹⁾ 현재 미국 및 유럽 등에서는 침습성이 매우 낮은 근접방사선치료법이 이미 널리 사용되고 있다.

그러나 국내의 경우 2001년 오문목 등이 70세 환자를 대상으로 ^{125}I 를 이용한 근접방사선요법으로 치료한 경험을 보고하였으나¹²⁾ 이후 이와 관련된 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구는 ^{125}I 나 ^{103}Pd 를 사용하여 전립선암의 방사선치료 시 주변장기가 받게 될 것으로 예상되는 방사선 피폭을 수학적 모의피폭체를 통하여 미리 예측함으로써 전립선암의 근접방사선요법의 기초자료를 제공하고자 한다.

이 논문은 2008년 8월 13일 접수하여 2008년 9월 18일 채택되었음.
 책임저자 : 황주호, (449-701) 경기도 용인시 기흥구 서천동
 경희대학교 원자력공학과
 Tel: 031)201-3654, Fax: 031)202-5973
 E-mail: rdt111@daum.net

재료 및 방법

1. 전립선의 해부학적 위치 및 역할

전립선은 방광경 바로 아래에 있는 밤알크기의 한 개의 도넛 모양의 선이며, 20~30개의 전립선관이 요도부를 에워싸고 있다. 내부에는 한 층 또는 두 층의 상피로 싸여 있는 다수의 선방이 있다. 전립선은 정자의 운동성을 증가시키는 역할을 하며, 사정 시에는 정자의 운동을 촉진하는 유백색의 밤꽃 냄새 즉 유백색의 알칼리성 물질을 분비한다. 또한 사정하는 동안 전립선의 평활근이 수축하여 요도로 분비액이 나가게 하며, 전립선에서 분비되는 알칼리성 분비물은 정자에 활기를 불어 넣는 작용을 한다. 전립선은 삽호선이라고도 하는데, 이는 그 분비물이 사정에 앞서 요도를 윤회하게 하고 산성인 오줌(urine) 및 질의 산성 환경을 중화시켜 오줌(urine) 및 질의 산성 환경 즉 유해작용에서 정자를 보호한다는 뜻이다.^{13,14)}

2. 전립선 근접치료용 방사선택종의 물리적 특성

근접치료(Brachytherapy)는 조직내, 강내, 관내 또는 피부 표면에 위치한 종양을 밀봉 방사성동위원소로 치료하는 방법이다. 이 방법은 원격치료에 비하여 고선량의 방사선을 종양에 집중할 수 있는 반면, 주위 정상조직에는 선량이 급격히 감소시킬 수 있다.¹⁵⁾ 전립선에 대한 근접치료용 방사

선택종은 크게 영구 삽입형과 일시적 삽입형으로 Table 1 과 같이 분류 할 수 있다. 이중 가장 많이 사용하는 ¹²⁵I와 ¹⁰³Pd에 대해 살펴보면, ¹²⁵I는 방사선 치료에서 영구삽입형 치료에 사용되어 왔다. Ytterbium -129과 Gold-198에 비하여 ¹²⁵I의 장점은 반감기가 길어 오래 보관할 수 있으며 에너지가 낮아 차폐가 용이 하다. ¹²⁵I는 전자 포획에 의해서만 여기상태의 ¹²⁵Te로 붕괴되는데, 이는 자연발생적으로 35.5 keV의 감마광자를 방출하며, 바닥상태로 떨어진다. 또한 전자포획과 내부변환 과정에 기인하여 에너지가 27~35 keV 범위의 특성 X선이 생성된다. ¹⁰³Pd의 경우 최근 들어 근접치료에 활용되었으며, 임상응용은 ¹²⁵I와 비슷하다. ¹²⁵I보다 더 짧은 반감기를 갖는 ¹⁰³Pd는 훨씬 더 빠른 속도로 선량이 전달되기 때문에 영구삽입형 치료에 있어서 생물학적 장점이 있다.^{5,15)} ¹⁰³Pd는 20~30 keV범위의 특성 X선의 방출과 오제전자로 인한 전자포획에 의해서 붕괴된다. Table 2에 ¹²⁵I와 ¹⁰³Pd의 붕괴 특성을 표시하였다.¹⁶⁾

3. 몬테칼로 계산

본 연구에 사용한 수학적 인체모형의 내부 장기는 한국 성인 남성의 표준 데이터를 바탕으로 질량 및 체적을 결정 하였다. 본 연구에 사용된 장기의 물질은 ORNL (Oak Ridge National Laboratory) 보고서 TM-8381에서 제시하는 구성 물질 즉 폐(Lung), 뼈(Bone 또는 Skeleton), 기타 조직은 연부조직(Soft Tissue)으로 구성되어 있다고 가정한다. 밀도는 각각 0.296 g/cm³, 1.40 g/cm³, 1.04 g/cm³ 이다.¹⁷⁾

광자의 수송과 에너지 부여량 계산에는 몬테칼로 입자

Table 1. Radioisotopes used for prostate brachytherapy.

	Energy (keV)	Half-life (days)	Half value layer (HVL) in mm of lead	Initial dose rate (cGy/hr)	Dose to infinity (Gy)
Permanent					
Iodine 125	27	60	1/40	8	160
Palladium 103	21	17	1/100	20	120
Gold 198	412	2.7	4	64	60
Ytterbium 129	93	32	1/2	13	140
Temporary					
Iridium 129	340	70	3	High, variable	Variable (30~40)

Radionuclides for brachytherapy against prostate cancer are mainly divided into a permanent insertion type and a temporary insertion type. As the permanent insertion type, ¹²⁵I and ¹⁰³Pd are used most widely having a physical half-life of 60 days and 17 days respectively, to indicate that ¹⁰³Pd has shorter half-life than ¹²⁵I.

Table 2. Decay characteristics of ¹²⁵I and ¹⁰³Pd.

Iodine-125			Palladium-103		
Freq. (%)	E (keV)	Yield	Freq. (%)	E (keV)	Yield
39.71	27.2	0.3971	37.5	20.22	0.375
73.95	27.5	0.7395	19.8	20.07	0.198
7.19	30.9	0.0719	6.6	22.72	0.066
13.98	31	0.1398	1.74	23.17	0.0174
4.29	31.7	0.0429	3.48	22.7	0.0348
6.65	35.5	0.0665	2.23	2.7	0.0223

¹²⁵I is collapsed into excited ¹²⁵Te only by electron capture and dropped to the ground state by spontaneously emitting gamma photon of 35.5 keV. Also, the electron capture and internal conversion cause characteristic X-ray to be generated to the energy range of 27 to 35 keV. Also, ¹⁰³Pd is collapsed due to emission of characteristic X-ray at the range of 20 to 30 keV and electron capture caused by Auger electron.

수송 코드인 MCNPX를 사용하였다. 전립선을 선원영역으로 하고 광자의 에너지는 Table 1에 제시되어 있는 ^{125}I 와 ^{103}Pd 의 에너지를 이용하여 전립선에 씨앗형태를 취하는 점선원이 균일하게 분포하고 있는 것으로 가정하였다. 또한 피폭조직의 비유효에너지(SEE, Specific Effective Energy) 산정을 위해 *F8 tally와 10^7 개의 히스토리를 사용하였고, 상대오차는 1%이내였다.

4. 수학적 모의피폭체의 구성

ORNL에서 개발한 MIRD형 인체 팬텀은 최초의 수학적 팬텀으로 몬테칼로 방법과 결합하여 방사선 방호와 의학목적의 선량 분포를 계산하기 위해 널리 이용되어 왔다.

MIRD형 모의피폭체(MIRD-Type Phantom) 또한 인체의 장기를 타원, 원뿔, 평면 및 원통 등으로 구성하였으며, 2차원 수학방정식을 이용하여 3차원 공간내에 각 장기를 표현하였다. MIRD형 모의피폭체의 기초 자료는 ICRP-23에서 제시하는 표준인을 반영하였다. 이를 이용하여 ORNL에서는 수학적 인체모형과 몬테칼로 방법을 이용하여 비흡수분획을 도출해 냈다. MIRD Pamphlet No. 5의 수학적 팬텀의 구성은 인체를 서(erect)있는 것으로 모사했으며, 3차원 공간에 입체도형을 직교 좌표계를 이용하여 모사하였다. Z-축은 팬텀의 발에서 머리 방향, X-축은 오른쪽에서 왼쪽방향, Y-축은 앞면에서 뒷면으로 가는 방향으로 지정하였고, 축의 치수는 센티미터(cm)를 사용하였다. 수학적 팬텀의 일반적 방정식은 식 (1)과 같다.^{17,18)}

$$\left(\frac{x}{A_T}\right)^2 + \left(\frac{y}{B_T}\right)^2 \leq 1, 0 \leq Z \leq C_T \quad (1)$$

이때 A_T 와 B_T , C_T 는 각각 X, Y, Z축 방향의 최대값을 나타낸다. 부등호(\leq)는 각각의 수식에 정의되는 표면의 안쪽에 위치한 점들과 그 면 위에 존재하는 점들을 포함한다. 본 연구에서는 2004년 과학기술부에서 제시하는 한국표준인을 기초 자료로 하고,¹⁹⁾ 수학적 팬텀인 MIRD형 인체팬텀을 수정하여 Fig. 1과 같이 각 장기를 모사하였다. 이때 전립선의 경우 식 (2)와 같이 구성하였다.

$$4.84 = x^2 + (y + 6.808)^2 + (z - 2.477)^2 \quad (2)$$

이후 전립선을 선원장기로 한 주변 장기의 비유효에너지를 도출하였다. 모의모사를 위한 각 장기별 무게는 Table 3과 같다.

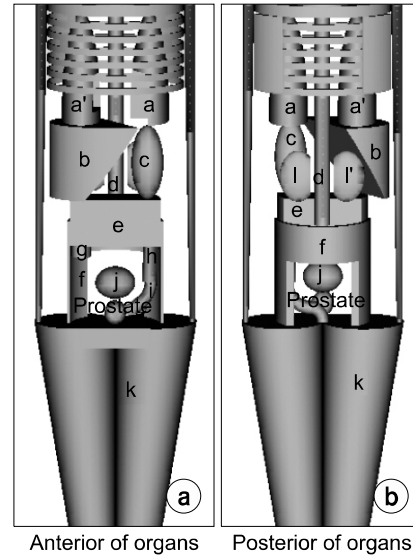


Fig. 1. Anatomical position and constitution of the phantom. In this study, an MIRD type anthropomorphic phantom was corrected and complemented, and each organ was manufactured on the basis of Korean standard man. Also, the prostate was reproduced considering mass of the prostate of the existing ICRP-89 standard man and body size of Korean standard man without overlapping with other organs, and the radius of the prostate were set to 2.2 cm and X, Y, Z center coordinates thereof to 2.2cm, 0, -6.808, and 2.477 respectively. a: Lt. Lung, a': Rt. Lung, b: Liver, c: Stomach, d: Spine, e: Small Intestine, f: Pelvis, g: Ascending Colon, h: Descending Colon, i: Sigmoid Colon, j: Urinary Bladder, k: Legs Skin, l: Lt. Kidney, l': Rt. Kidney.

한국 표준인의 장기를 기준 ICRP-89 표준인 및 ORNL 인체모형의 장기와 비교한 결과, 한국 표준인의 장기와 몸무게 및 키는 ICRP-89 표준인 및 ORNL 인체모형 보다 작은 것으로 나타났다. 전립선의 경우, 수학적 모의피폭체로 제작된 사례는 거의 보고되지 않았으며, 한국표준인 또한 조사되지 않았다. 본 연구에서는 기존 ICRP-89 표준인의 전립선 질량과 한국표준인의 신체 크기를 고려하여 각 장기가 겹치지 않는 범위에서 Fig. 1과 같이 전립선을 모사하였다 또한 전립선의 반지름은 2.2 cm와 X, Y, Z의 중심좌표는 각각 0, -6.808, 2.477로 표현하였다.

5. 흡수선량 계산방법²¹⁾

누적(축적)방사능이란 방사성동위원소의 방사성붕괴에 대한 시간적분량(Time integral)을 말하며 아래 같이 식 (3)으로 표현할 수 있다.

Table 3. Comparison of selected tissue masses for the phantoms (Unit: g).

Organ	Reference Korean (Male) ¹⁹⁾	ICRP-89 reference man ²⁰⁾	ORNL phantom ¹⁷⁾	This study phantom
Adrenal glands (2)	10	14	16.33	11.4
Gall bladder	17.1±3.5	58	66.25	59.4
Heart	663.9±155.3	840	769.6	614.9
Kidneys	326.3±62.0	310	299.5	255.3
Liver	1,631.3±200.8	1,800	1,903	1,478.9
Lung	1,148.7±201.4	1,200	1,000	703.6
Pancreas	40.5±18.1	140	94.33	69.3
Spleen	180.7±46.8	150	183	132.7
Stomach	373.5±191	250	418.1	327.9
Testes	34.4±8.5	35	39.1	19.1
Thyroid	18.8±4.3	20	20.7	13.6
Urinary bladder	209.7±115.5	50	296.1	205.4
Prostate	-	17	-	14.4
Height (cm)	170.97±3.7	176	179	170
Weight (kg)	67.94±4.8	73	73.14	68

By comparing each organ of Korean standard man with organs of the existing ICRP-89 standard man and ORNL human body model based on ICRP-23, the organ, body weight, and height of Korean standard man were smaller than those of ICRP-89 standard man and ORNL human body model. In the case of the prostate, there were few cases reporting that it was manufactured with mathematical anthropomorphic phantom, and no investigation about Korean standard man either. In this study, it was set to 14.4 g considering mass of the prostate of the existing ICRP-89 standard man and size of Korean standard man.

$$U_s = \int_0^{\infty} A(t) dt \quad (3)$$

여기에서 U_s 는 누적(축적)방사능($\mu\text{Ci h}$ 또는 MBq s)이며, $A(t)$ 는 시간 t 에서의 순간방사능이다. 선원 영역 내의 초기 방사능이 A_0 일때 방사능의 시간 함수 $A(t)$ 는 방사성 동위원소 및 화합물의 유효 붕괴 상수 λ_{eff} 에 의해 아래 식 (4)와 같이 결정된다.

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda_{\text{eff}} \cdot t} \quad (4)$$

위 식을 식 (3)에 대입하면 누적방사능 U_s 는 아래 식 (5)와 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$U_s = \frac{A_0}{\lambda_{\text{eff}}} \quad (5)$$

또한 흡수선량은 위의 누적방사능과 비유효에너지(Specific Effective Energy, SEE)의 값을 이용하여 아래 식 (6)과

Table 4. Estimation of specific effective energy of the surrounding organs with prostate as the source organ.

Organ	SEE (Unit: MeV/g)	
	I-125	Pd-103
Penis & scrotum	4.27E-07	8.43E-08
Penis & scrotum skin	1.18E-07	1.68E-08
Pelvis	8.20E-09	1.01E-10
Spine	7.37E-12	5.99E-15
Gall bladder	1.01E-11	-
Stomach	4.87E-12	1.77E-26
Small intestine	3.62E-10	8.36E-13
Ascending colon	3.82E-10	8.81E-13
Transverse colon	6.02E-11	6.31E-14
Descending colon	3.73E-09	4.94E-11
Sigmoid colon	3.17E-07	2.72E-08
Kidneys	2.57E-12	-
Liver	1.39E-12	-
Lungs	4.62E-14	1.18E-15
Pancreas	8.79E-13	-
Spleen	7.78E-13	-
Testicles	3.12E-07	5.05E-08
Urinary bladder	1.19E-07	9.34E-09
Prostate	2.28E-06	5.77E-07

By setting the prostate as a source organ and adjacent organs thereof as a target organ, specific effective energy of ^{125}I and ^{103}Pd from each organ was detected. As a result, organs having high specific effective energy regardless of radionuclides were organs relatively close to the prostate, that is, penis, scrotum, sigmoid colon, testis, and bladder in order.

같이 표현되며,

$$\text{흡수선량(AbsorbedDose)} = k \sum_i U_s \text{SEE}(T \leftarrow S)_i \quad (6)$$

이때 상수 k 는 $k = 1.602 \times 10^{-10} \frac{\text{Gy}}{\text{MeV/g}}$ 로 표현되며,

피폭조직의 비유효에너지(Specific Effective Energy, SEE)는 다음 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\text{SEE} = \sum_i \frac{E_i Y_i AF(T \leftarrow S)_i W_i}{M_i} \quad (7)$$

여기서 Y_i : 붕괴당 입자 i 의 방출율

E_i : 입자 i 의 평균에너지

$AF(T \leftarrow S)_i$: 흡수분획(Absorbed Fraction), 선원조직 S 에서 방출된 입자 i 의 에너지 중 피폭조직 T 의 단위질량당 흡수되는 비율

W_i : 방사선입자 i 의 선질인자(방사선가중인자)

M_i : 표적장기의 질량

Table 5. Estimation of the absorbed dose of the surrounding organs with prostate as the source organ.

Organ	Absorbed dose (Unit: Gy/Ci)	
	I-125	Pd-103
Penis & scrotum	1.89E+01	1.06E+00
Penis & scrotum skin	5.24E+00	2.12E-01
Pelvis	3.63E-01	1.27E-03
Spine	3.27E-04	7.53E-08
Gall bladder	4.47E-04	-
Stomach	2.16E-04	2.22E-19
Small intestine	1.61E-02	1.05E-05
Ascending colon	1.70E-02	1.11E-05
Transverse colon	2.67E-03	7.93E-07
Descending colon	1.65E-01	6.21E-04
Sigmoid colon	1.40E+01	3.41E-01
Kidneys	1.14E-04	-
Liver	6.17E-05	-
Lungs	2.05E-06	1.48E-08
Pancreas	3.90E-05	-
Spleen	3.45E-05	-
Testicles	1.38E+01	6.35E-01
Urinary bladder	5.26E+00	1.17E-01
Prostate	1.01E+02	7.24E+00

By setting 1 Ci of ¹²⁵I and ¹⁰³Pd generally used in the brachytherapy against prostate cancer as initial radiation and measuring radiation absorbed dose of the prostate, the values of ¹²⁵I and ¹⁰³Pd were 101 Gy/Ci and 7.24 Gy/Ci respectively.

결 과

1. 전립선을 선원영역으로 한 주변 장기의 비유효에너지 산정

선원장기를 전립선으로 주변장기를 표적장기로 설정하여, 각 장기별 ¹²⁵I와 ¹⁰³Pd의 비유효에너지를 Table 4와 같이 도출했다. 그 결과, 모든 장기에서 ¹²⁵I의 비유효에너지가 ¹⁰³Pd 보다 높게 나타났다. 이는 방사성핵종의 에너지와 세기 및 비정이 상대적으로 높은 핵종일수록 주변장기에 영향이 더 있는 것으로 판단된다.

또한 각 장기별 비유효에너지가 높은 장기는 비교적 전립선과 인접되어 있는 장기 즉, 음경과 음낭, S자결장, 정소, 방광순으로 나타났다.

2. 전립선 및 주변장기의 흡수선량 산정

전립선암의 근접치료시 주변장기의 흡수선량을 예측하기 위하여 모의모사를 시행하였다. 모의모사를 위한 방사성핵종은 전립선암 근접치료에 일반적으로 사용되는 ¹²⁵I와 ¹⁰³Pd를 선정하고 1 Ci를 초기방사능으로 설정하였고 물리

적 반감기를 고려한 ²⁵I와 ¹⁰³Pd의 누적방사능 U_s 는 각각 $2.77E+17 \text{ Ci}^{-1}$, $7.84E+16 \text{ Ci}^{-1}$ 였다. 그 결과 Table 5와 같이 선원장기인 전립선이 ¹²⁵I 및 ¹⁰³Pd 경우 각각 101 Gy/Ci와 7.24 Gy/Ci를 나타냈다. 가장 많은 흡수선량 장기는 비유효에너지와 마찬가지로 전립선을 제외하고 음경과 음낭, S자결장, 정소, 방광순으로 나타났다.

결 론

본 연구는 우리나라 남성들의 비뇨기계통 중 첫 번째로 높은 발생빈도를 보이는 전립선암의 근접치료방법에 관심을 가지고, 주변장기의 피폭선량을 최소화할 수 있는 치료선량에 기여하기 위한 것이다. 따라서 한국표준남성에 기초하여 수학적 모의피폭체를 제작하여 전립선을 선원장기로 한 주변장기의 비유효에너지 및 흡수선량을 산정하였다.

산정 결과 첫째, 각 장기별 비유효에너지가 높은 장기는 비교적 전립선과 인접되어 있는 장기 즉 음경과 음낭, S자결장, 정소, 방광순으로 나타났다.

둘째, 선원장기인 전립선이 ¹²⁵I 및 ¹⁰³Pd 경우 각각 101 Gy/Ci와 7.24 Gy/Ci를 나타냈다. 전립선암 치료에 적합한 선량은 145 Gy이다. 이를 기준으로 한다면, 동일한 방사능을 대상으로 전립선암의 근접치료시 ¹²⁵I이 ¹⁰³Pd 에 비하여 더 높은 치료선량이 발생할 수 있다. 그러므로 주변장기에 미치는 피폭 또한 높아질 수 있기 때문에, 치료방법의 선택시 방사성핵종의 선택에 주의를 기울려야 할 것이다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

1. 김홍섭: 전립선암의 치료 표준 요법. 유로트렌드 4:19-25 (1999)
2. 국가암등록사업 연례 보고서 보건복지부 (2007)
3. 박 원, 허승재, 최한용, 이현무, 채수응, 안용찬, 임도훈: 전립선암의 근치적 방사선치료 결과. 대한비뇨기과학회지 46:201-228 (2005)
4. 홍성후, 이승주, 김세웅, 이충범, 강성학, 조용현, 윤문수: 전립선암 치료를 위한 홀뮴-키토산 복합체 국소주입. 대한비뇨기과학회지 45:229-235 (2004)
5. Arthur TP, John CB, Peter DG, Sarada MR, Haakon R: Brachytherapy for prostate cancer. CA-A Cancer Journal for

- Clinicians 45:165-178 (1995)
6. Saito S, Momma T, Dokiya T, Murai M: Brachytherapy for prostate cancer in Japan. *International Journal of Urology* 8:S22-S27 (2001)
 7. Shin E, Yoshihisa K, Ryuta T, Kohei E, Hiroyuki N: Iodine-125 seed implantation for clinically localized prostate state cancer. *Acta Med Okayama* 62:9-13 (2008)
 8. Bashar AQ, Brendan C, Dan A, David B: The use of linked seeds eliminates lung embolization following permanent seed implantation for prostate cancer. *Int J Radiation Oncology Biol Phys* 59:397-399 (2004)
 9. Pedro JP, German J, Jose F, Gonzalez SH: Conformal prostate brachytherapy guided by realtime dynamic dose calculations using permanent ¹²⁵I implants: technical description and preliminary experience. *Arch Esp Urol* 59:933-940 (2006)
 10. Mark J, Athanasios C, David P, Mark T: Dosimetric and technical aspects of intraoperative i-125 brachytherapy for stage i non-small cell lung cancer. *Phys Med Biol* 52:1237-1245 (2007)
 11. David JJ, Tony CW, Annette H: Iodine-125 brachytherapy for prostate cancer: first published Australian experience, Australasian Radiology 48:181-187 (2004)
 12. 오문목, 박용휘, Tropper SE: Iodine-125를 이용한 초기 전립선암의 근접방사선치료 첫 치험례(예보). *대한비뇨기과학회지* 42:1235-1240 (2001)
 13. 임난영, 권영은, 권혜정, 등: 알기쉬운 해부생리: 정담미디어, 서울(2006), pp. 560
 14. 이한기, 고재문 권봉숙 등: *해부생리학 3판*, 고문사, 서울(2005), pp. 486
 15. 강제식, 고인호, 김성환 등: *방사선치료학*, 청구문화사, 서울(2007), pp. 321-326
 16. ICRP Publication 38: International Commission on Radiological Protection: Radionuclide Transformations Energy and Intensity of Emissions, Pergamon Press, Oxford, England (1984), pp. 298, 446
 17. Cristy M, Eckerman KF: Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon sources, ORNL/TM-8381, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA (1987)
 18. Snyder WS, Ford MR, Warner GG: Estimates of Specific Absorbed Fractions for Photon Sources Uniformly Distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom, MIRDO Pamphlet No 5, revised, The Society of Nuclear Medicine, New York (1978)
 19. 이재기, 이춘식, 김현기 등: 방사선방호를 위한 표준한국인 설정 연구, 과학기술부 (2004)
 20. ICRP Publication 89: International Commission on Radiological Protection: Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values, Elsevier Science Ltd, Oxford, UK (2003)
 21. Richard EF, Shultis JK: *Radiological Assessment sources and Doses*. 2nd ed. Americal Nuclear Society, Inc. USA (1999), pp. 373-428

Radiation Dose Calculation in the Surrounding Organs during Brachytherapy of Prostate Cancer

Junghoon Kim*, Changseon Lim[†], Joocho Whang*

*Department of Nuclear Engineering, College of Advanced Technology, Kyung Hee University, Yongin, [†]Department of Radiological Science, Konyang University, Daejeon, Korea

As a part of estimating quantitative radiation treatment doses, we produced a mathematical phantom based on the standard Korean male. Then, with the prostate as the source organ, we calculated the absorbed dose in the prostate and surrounding organs forecasted to occur during brachytherapy for prostate cancer. To simulate the procedure, we selected ²⁵¹I and ¹⁰³Pd useful in brachytherapy of the prostate as the radionuclides and made an assumption that 1 Ci of initial radioactivity is administered. As a result, we found that the prostate, as the source organ, indicated 101 Gy/Ci and 7.24 Gy/Ci, respectively, in case of ¹²⁵I and ¹⁰³Pd. With the exception of the prostate, organs with high absorbed doses were found to be in the order of the penis and scrotum, sigmoid colon, testicles and the urinary bladder, which are relatively close to the prostate.

Key Words: Radiotherapy, Brachytherapy, Prostate cancer, SEE, Absorbed dose