

Ir-192 선 선원의 선량분포에 관한 품질보증

— Quality Assurance on Dose Distribution of Ir-192 Line Source —

인제대학교 의용공학과

김 종 언

— 국문초록 —

이 연구는 플라토 치료계획시스템의 치료계획에서 Ir-192 선원에 대한 처방점의 처방선량과 선원 주위의 선량분포상의 선량점들의 선량이 정확하게 계산되는지를 확인하는데 그 목적이 있다. 선원의 중심축의 전후방향에서의 평면의 직교좌표계와 측면방향에서의 평면의 직교좌표계 및 선원을 A4 용지 위에 그려서 치료계획시스템에 입력하였다. 처방선량은 선원중심으로부터 극각 90°, 270°의 방향으로 반경 1 cm인 두 지점에 400 cGy를 처방하였다. 처방점과 선량점들의 선량은 치료계획시스템에서 출력된 선량과 파울 킹 등이 유도한 기하학 함수식으로 계산된 선량을 분석하였다. 본 실험의 분석에서 처방 점의 선량은 오차 없이 정확하게 일치하였고, 선량 점들의 선량은 1.85% 이내의 오차를 얻었다. 그리고 플라토 치료계획시스템의 선량계산은 허용오차 ±2% 범위 이내의 정확성으로 분석되었다. 파울 킹 등이 유도한 기하학 함수식을 사용하여 손으로 계산한 선량은 높은 정확성의 품질보증과 편리성에 기인하여, 임상에서 사용하는데 유용할 것으로 생각된다.

중심 단어: 기하학 함수, Ir-192 선원, 선량계산

I. 서 론

고 선량을 근접 치료계획시스템의 치료계획에 의해 Ir-192 선 선원에 대한 처방점의 처방선량과 선원 주위의 선량분포상의 선량점들의 선량이 허용오차(±2%)¹⁾ 범위 이내에서 정확하게 계산되는지를 확인하는 것은 기본적인 품질보증 항목에 속한다. AAPM TG-43 기반을 사용하는 시스템들 중 일부는 극각의 함수인 비등방성 함수(anisotropy function) 대신 평균 비등방성 인자(average anisotropy factor)를 사용하는 데, 이것은 선량 오차에 기인되는 주된 원인이 된다. 비등방성은 선원의 모

델에 따라 35%에서 60% 정도를 나타낸다고 보고된 바 있다^{2,3)}.

본 연구는 치료계획시스템(TPS)이 선량을 계산할 때 비등방성 함수를 사용하는지 또는 연산(algorithm)의 정확성이 어느 정도인지, 확인과 분석하는데 목적이 있다.

손으로 선량을 계산할 때 활성 선원 길이(active source length)가 3.5 mm인 선 선원(line source)에 대한 기하학 함수(geometry function)의 사용이 문제가 된다. TG-43에서 주어지는 기하학 함수(geometry function) 식을 사용하여 기하학 함수를 구하는 것은 까다롭고, 시간의 소비가 많으며, 도표는 3 mm 선 선원에 대해서만 주어졌다. 따라서 이 문제점을 해결하기 위해, 파울 킹 등⁴⁾이 유도한 기하학 함수식을 이 연구에 사용하였다.

실험은 AAPM TG43의 모듈 선량 계산 모형(modular dose calculation model)을 사용하는 nucletron사의 플라토 치료계획시스템(plato treatment planning system)

* 이 논문은 2007년 2월 1일 접수되어 2007년 2월 22일 채택 됨.

책임저자: 김종언, (660-702) 경남 진주시 칠암동 90번지
경상대학교병원 방사선종양학과
TEL: 055-750-8219, 017-858-8218
FAX: 055-750-8217, E-mail: kjepk@yahoo.co.kr

과 두 개의 A4 용지를 사용한다. 이 두 개의 용지는 선원의 중심에서 공간의 직교좌표계를 형성하며, 하나는 전후방향의 선원 중심으로부터 평면의 직교좌표계를 형성하고, 또 다른 하나는 측면방향의 선원 중심으로부터 평면의 직교좌표계를 형성한다. 선원의 중심으로부터 처방점에 처방선량을 처방하여, 처방점과 선원 주위의 선량 분포상의 선량점들의 선량이 정확히 계산되는지를 확인하기 위하여, 치료계획에 의한 TPS가 출력하는 선량과 손으로 계산한 선량을 정량적으로 분석한다.

II. 재료 및 방법

본 실험은 각도기, 자, A4 용지, 공학용 계산기, 플라토 치료계획시스템 및 내장된 customizing file의 내용물인 치료 장치 파라미터 등을 사용하였다. Ir-192 선원의 특성들은 다음과 같다. model이 DRN07735이고, 선원 봉치의 치수는 직경이 0.6 mm이고 길이가 3.5 mm이다. 또한 반감기는 73.83일이고, 물 흡수선량률 상수는 1.115 cGy/h/U이다.

1. AAPM TG43의 모듈 선량 계산 모형

에어커마강도 S_k 의 Ir-192 선 선원의 중심으로부터 물 물질안의 극좌표(r, θ)를 갖는 점에서 2차원 흡수선량률은 다음과 같다^{1,4-7}.

$$\dot{D}(r, \theta) = \Lambda S_k \frac{G(r, \theta)}{G(1, \pi/2)} F(r, \theta) g(r) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 Λ 는 Ir-192 선 선원에 대한 물 흡수선량률 상수(1.115 cGy/h/U)로서, 선 선원 장축의 중심으로부터 수직 이등분선(bisector)인 횡축을 따라 1cm인 점에서 단위 에어커마강도(U)당 흡수선량률($\Lambda = \dot{D}(1, \pi/2)/S_k$)이다. 이것은 선원의 타입(type)과 구성 및 밀봉에 의존한다. S_k 는 선원의 중심으로부터 수직 이등분선을 따라 교정 점의 거리의 제곱과 지정된 거리(대개 1m)에서 자유공간(free space)의 에어커마율의 곱으로서, 단위는 1 U = cGy cm²/h이다. 그리고 $g(r)$ 는 반경선량 함수로서, 선원의 횡축을 따라 물 안에서 광자의 흡수와 산란의 반경 의존성을 고려한 양이며, $F(r, \theta)$ 는 기하학적 인자로서 극각(θ) 90°에서 규격화된 비등방성 함수이고, 밀봉과 물 물질에서 광자의 흡수와 산란의 각 의존성을 고려한

다. $G(r, \theta)$ 는 선원으로부터 거리를 따라 광자 플루언스의 기하학적 감소를 고려한 기하학 함수로서, 방사성물질의 분포에만 의존하며 산란과 감쇠를 무시한다. 점 선원으로 근사하면 $G(r, \theta) = r^{-2}$ 이고, 선 선원으로 근사할 때 $\theta \neq 0$ 면 $G(r, \theta) = (\theta_2 - \theta_1)/L r \sin\theta$ 이고, $\theta = 0$ 이면 $(r^2 - L^2/4)^{-1}$ 이다. 이때 기하학 함수는 측정 반경을 보정하면 $G(r, \theta) \times r^2$ 이 되고, 점 선원의 근사는 항상 1이 되어 식에서 제거할 수 있는 반면, 선 선원 근사는 반경 1cm와 극각 90°에서 규격화됨으로, 이 조건에서는 1이 될 것이고, 그 외의 범위에서는 1보다 작거나 크게 될 것이다. 이 기하학 함수는 도표화된 선량률의 내삽의 정확성을 향상시키기 위해 사용된다.

식 (1)은 기준 반경이 1cm일 때 흡수선량률로서, 임의로 주어지는 반경에 대한 2차원 흡수선량률은 식 (2)로 주어진다.

$$\dot{D}(r, \theta) = \Lambda S_k \frac{G(r, \theta)}{G(1, \pi/2)} F(r, \theta) g(r) \frac{1}{r^2} \dots\dots\dots (2)$$

2. 흡수선량과 머무르는 시간의 계산식

치료계획시스템에서 계산되는 흡수선량의 정확성을 확인하기 위해 식 (2)로부터 시간 단위를 변환하면, 흡수선량 계산식은 식 (3)으로 유도된다.

$$D(r, \theta) = \Lambda S_k \frac{G(r, \theta)}{G(1, \pi/2)} g(r) \frac{1}{r^2} F(r, \theta) \frac{1}{3600s} t_{dt} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 t_{dt} 는 선원이 머무르는 위치(dwel position)에서 머무르는 시간(dwel time)으로서 단위는 s이며, 흡수선량의 단위는 cGy이다.

식 (3)로부터 머무르는 시간의 계산식은 식 (4)로 유도된다.

$$t_{dt} = \frac{D(r, \theta) r^2 3600s}{\Lambda S_k \frac{G(r, \theta)}{G(1, \pi/2)} g(r) F(r, \theta)} \dots\dots\dots (4)$$

3. 선 선원의 기하학 함수식

파울 킹 등은 r, θ, L 의 함수로서 식 (5)의 기하학 함수를 유도하였다⁴.

$$G(r, \theta) = \frac{\sin^{-1} \left(\frac{L \times \sin(\tan^{-1} [r \times \sin(\theta)] / [r \times \cos(\theta) - L/2])}{\sqrt{[r \times \sin(\theta)]^2 + [r \times \cos(\theta) + L/2]^2}} \right)}{L \times r \times \sin(\theta)} \quad (5)$$

여기서 L 는 활성 선원의 길이(cm)이고, r 는 반경(cm)이며, θ 는 극각(degree)이다. 식 (5)에서 $G(r, \theta)$ 는 절대치로 구한다. 이 식의 타당성(validation)은 TG43의 도표 V와 비교에서, $r=0.5$, $\theta=60^\circ$ 의 점에서 8.3%로 불일치하는 것을 제외하고, 모든 점들에서 0.1%로 잘 일치된다.

4. 실험 방법

선원의 중심에서 공간의 직교좌표계를 형성하는 평면의 직교좌표계들은 전후 방향에서 X, Z축, 측면 방향에서 Y, Z축을 형성한다. Fig. 1에서 보여주는 바와 같이, 선원이 평면의 직교좌표계에 배치되는 기하학은 전후 방향에서 Z축과 선원의 장축이 일치되며, 극각 θ 는 플러스 Z축(0°)으로부터 시계방향으로 증가한다. 또한 측면방향에서 Z축과 선원의 장축이 일치된다.

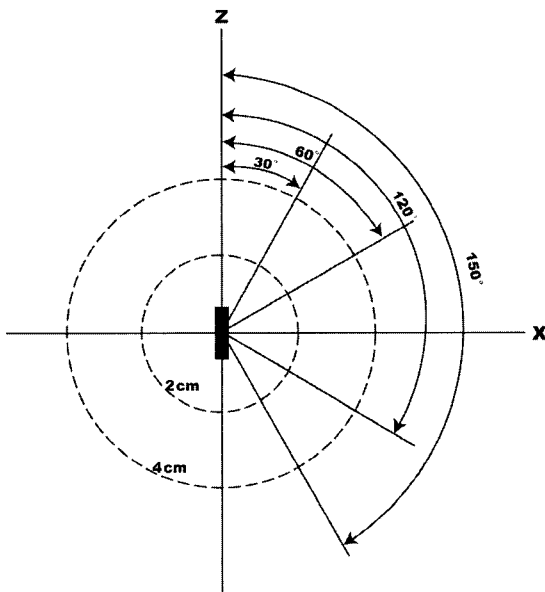


Fig. 1. The coordinate system of the line source geometry

치방점은 선원의 중심으로부터 θ 가 90° , 270° 의 두 방향으로 반경이 1cm인 두 점의 극좌표에 대응된다. 선량점(dose point)들은 반경 2cm와 4cm에서 각각 $\theta=0^\circ$, $\theta=30^\circ$, $\theta=60^\circ$, $\theta=90^\circ$, $\theta=120^\circ$, $\theta=150^\circ$, $\theta=180^\circ$ 등의 극좌표에 대응되는 점이다.

1) TPS로부터 각 점들에 대한 선량

치료계획으로 치방점과 선량점들을 입력하였다. 그 후 치방점에 치방선량 400 cGy를 치방하여 출력되는 선량을 얻었다.

2) 손으로 계산되는 각 점들에 대한 선량

TPS의 치방점에 치방선량을 치방하는 순간에 에어커마 강도를 읽어서 기록하였고, 이 에어커마 강도와 치방선량 및 함수들을 식 (4)에 대입하여 머무르는 시간을 계산하였다. 이 수치를 식 (3)에 대입하여 치방점과 선량점들의 선량을 구하였다.

III. 결과 및 논의

실험에서 에어커마강도는 $33665.51 \text{ cGycm}^2/\text{h}$ 을 얻었다. 이때 머무르는 시간은 손으로 계산된 시간(38.36 s)과 치료계획시스템에서 출력된 시간(38.36 s)들이 정확하게 일치하였다. 따라서 선량은 머무르는 시간에 비례하므로 치방점의 선량은 정확히 일치한다는 결과를 얻었다. 선량점들에서 손으로 계산된 선량과 치료계획시스템에서 출력된 선량의 오차는 반경 2cm에서 최대 1.5% 이내, 반경 4cm에서 최대 1.85% 이내의 결과를 얻었고, 각각 Fig. 2와 Fig. 3에서 보여준다.

실험에 사용된 자료로서, Table 1은 반경에 대한 반경 선량 함수이다. 이 함수에서 반경이 2cm 이하와 이상에서 지수 함수적으로 감소함을 알 수 있으며, 반경이 14cm에서 약 30% 감소함을 보여주고 있다.

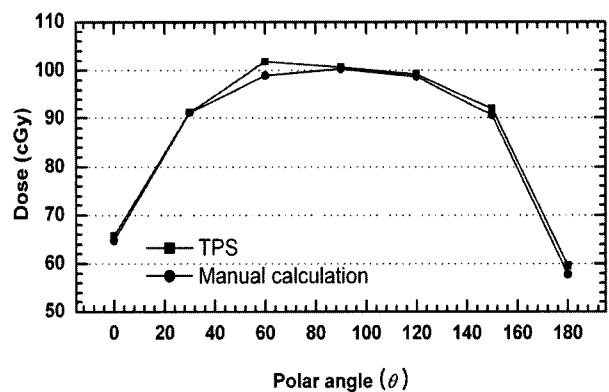


Fig. 2. The doses acquired from TPS and those from calculations as a function of polar angle at radius 2 cm.

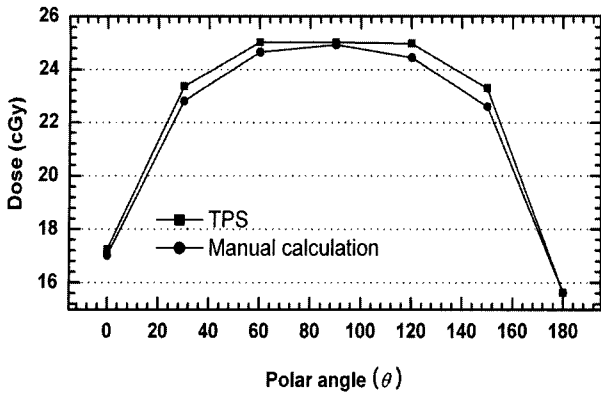


Fig. 3. The doses acquired from TPS and those from calculations as a function of polar angle at radius 4 cm.

Table 1. Radial dose function, $g(r)$, for Ir-192 model DRN07735

Radius r (mm)	Radial dose function $g(r)$	Radius r (mm)	Radial dose function $g(r)$
0	0.987	80	0.933
10	1.000	90	0.904
20	1.003	100	0.871
30	1.002	110	0.836
40	0.997	120	0.795
50	0.987	130	0.749
60	0.973	140	0.682
70	0.956		

Table 2는 비등방성 함수로서 극각 90°의 규격화로부터 최대 45% 정도의 비등방성을 보여주며, 비등방성은 극각 180° 방향에서 극각 0° 방향보다 더 크다. 또한 180°에서 360° 방향의 비등방성은 180°에서 0° 방향과 대칭성을 갖는다.

Table 3은 식 (5)로부터 구한 규격화된 기하학 함수를 보여준다. 여기서 반경 1cm에서 극각 0°가 극각 90°보다 약 6% 더 큰 것을 볼 수 있으며, 반경이 클수록 수치가 작아지는 것을 볼 수 있다. 이 기하학 함수는 극각 0°에서 90°로 구한 수치를 대칭적으로 90°에서 180°로 사용할 수 있으며, 또한 180°에서 360° 방향의 기하학 함수는 180°에서 0° 방향과 대칭성을 갖는다. 극각 0°는 식 (5)에서 0/0이 되어 부정의 발산이 되기 때문에 2차

Table 2. Anisotropy function, $F(r, \theta)$, for Ir-192 model DRN07735

Anisotropy function				
r (mm)	0°	30°	60°	90°
0	0.881	0.968	0.994	1
10	0.637	0.905	0.987	1
20	0.646	0.909	0.987	1
30	0.663	0.912	0.988	1
40	0.683	0.915	0.989	1
50	0.704	0.917	0.989	1
r (mm)	120°	150°	180°	
0	0.993	0.972	0.659	
10	0.985	0.9	0.551	
20	0.985	0.903	0.576	
30	0.981	0.902	0.596	
40	0.981	0.907	0.617	
50	0.985	0.918	0.646	

Table 3. Normalized geometry function for a 3.5 mm line source [$r^2 \times G(r, \theta)/G(1, \pi/2)$]

	$r = 1$ cm	2 cm	4 cm
$\theta = 0^\circ$	1.0630	1.0231	1.0133
30°	1.0309	1.0152	1.0114
60°	1.0099	1.0101	1.0101
90°	1	1.0076	1.0095

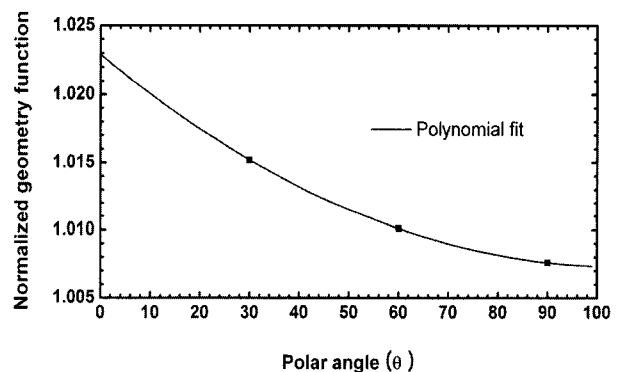


Fig. 4. Polynomial fit of the normalized geometry function as a function of polar angle at radius 2 cm.

다항식의 정합으로부터 기하학 함수를 구하였고, Fig. 4는 예로서 반경 2 cm의 다항식 정합의 결과인 $Y = 1.02311 - 3.045 \times 10^{-4}X + 1.46333 \times 10^{-6}X^2$ 를 보여준다.

본 실험에서 파악할 수 있었던 중요한 문제점들은 비등방성 함수와 기하학 함수의 사용에 있다. TPS에 내장된 비등방성 함수의 자료는 반경 5 cm까지만 주어졌다. 반경 5 cm 이상 또는 경계에 아주 가까운 반경의 선택은 선량점들에 대한 선량에 오차를 부가할 확률이 존재한다. 기하학 함수를 사용하지 않고, 점 선원으로 근사시킨 식에 의해서 손으로 계산된 선량점들의 선량과 TPS에서 출력된 선량점들의 선량의 비교는 선원의 중심으로부터 거리가 먼 반경보다 가까운 반경에서 오차가 더 크게 기여하므로 반경의 선택은 대략 4 cm가 좋을 것으로 생각된다. 이 때 최대 오차는 1.5% 이내에 있다. 또한 손으로 계산된 선량은 반경 1 cm 이상에서 TPS에서 출력된 선량보다 항상 작고, 반경 1 cm 이하에서 TPS에서 출력된 선량보다 크거나 작게 된다.

기존의 선량 계산 기법은 선 선원의 기하학 함수를 점 선원으로 근사시켜 식 (3)에 1을 대입하여 선량을 구하였다. 본 연구의 선량분포 계산과 기존의 선량분포 계산 결과의 차이는 기하학 함수만큼 존재하고 있다.

IV. 결 론

본 실험에서 손으로 계산된 선량과 치료계획시스템에서 출력된 선량과의 비교 분석에서, 처방점의 선량은 오차 없이 정확하게 잘 일치하였다. 그리고 선량점들의 선량은 1.85% 이내의 오차를 얻었으며, 이 오차는 허용오차 2% 이내에 들어간다. 또한 치료계획시스템의 선량계산에서 비등방성 함수가 사용되는 것을 확인하였다.

결론적으로, 플라토 치료계획시스템의 선량계산은 허용 오차 $\pm 2\%$ 범위 이내의 정확성으로 분석되었다. 파울 킹 등이 유도한 기하학 함수식을 사용하여 손으로 계산한 선량은 높은 정확성의 품질보증과 편리성에 기인하여, 임상에서 사용하는데 유용할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. AAPM TG56 Report : Code of Practice for Brachytherapy Physics, Med Phys, 24(10), 1997
2. Williamson JF, Li Z. : Monte Carlo Aided Dosimetry of the Microselectron Pulsed and High Dose-Rate Ir-192 Sources, Med Phys, 22, 809-819, 1995
3. Wang R, Sloboda RS. : Monte Carlo Dosimetry of the Varisource High Dose Rate Ir-192 Source, Med Phys, 25, 415-423, 1998
4. Paul King R, Scott Anderson R, Mills MD. : Geometry function of a linear brachytherapy source, Am. Coll. Med. Phys, 2(2), 69-72, 2001
5. AAPM Report 51: Dosimetry of Interstitial Brachytherapy Sources, American Association of Physicists in Medicine, Med Phys, 22(2), 1995
6. Update of AAPM TG43 Report : A revised AAPM Protocol for Brachytherapy Dose Calculations, Med Phys, 31(3), 2004
7. Khan FM: The Physics of Radiation Therapy, 3rd ed., Williams & Wilkins, Baltimore, 373-377, 2003

• Abstract

Quality Assurance on Dose Distribution of Ir-192 Line Source

Jong-Eon Kim

Department of Biomedical Engineering, College of Biomedical Sciences and Engineering, Inje University

The propose of this study is a verification of the correct calculation of the dose around source and the prescription dose of Ir-192 source in the plato treatment planning system. The source and orthogonal coordinates for lateral direction and those for the anterior posterior direction were drawn on a A4 paper and then input into the system. The prescription dose was prescribed to two points with radius 1 cm in the direction of polar angle 90° and 270° from the center of the source. The doses of prescription point and dose points acquired from the treatment planning system were compared with those from manual calculation using the geometry function formalism derived by Paul King et al.

In this analysis, the doses of prescription point were exactly consistent with each other and those of dose points were obtained within the error point of 1,85%. And the system of accuracy was evaluated within 2% of tolerance error. Therefore, this manual dose calculation used for the geometry function formalism is considered to be useful in clinics due to its convenience and high quality assurance.

Key Words : Geometry function, Ir-192 source, Dose calculation