

Ralstron 선원대체형 Ir-192 원추선원의 선량 전산화 모델링

계명대학교 의과대학 의공학교실

최 태 진

방사선의 에너지가 비교적 낮은 선원은 알짜선원의 방사능크기와 껍술을 통과한 선량으로 나타내는 겉보기방사능크기로 구분할 필요가 있다. 저자는 국내 도입된 Ralstron 강내조사장치에 사용할 고선량률 Ir-192 선원을 고안제작하여 선원-껍술간 필터효과를 조사하였다.

선원은 직경 1.5mm 와 높이 1.5mm 이고, 선원껍술의 외경과 길이는 각각 3.0 mm 와 12.0mm로 원형과 동일한 외형을 하고 있다. 선원의 필터에 의한 선량감쇠는 66.3%로 나타났으며, 단위 방사능 강도에 의한 기준 출력선량은 선원 측방 1cm 거리에 도달되는 조직선량을 기준선량으로 규격화하였으며, 기준선량은 $0.0013511\text{cGy/mCi} \cdot \text{sec}$ ($\text{cGy}/37\text{MBq} \cdot \text{sec}$) 로 나타났다. 선원하부는 스텐필터 두께의 영향으로 동일 거리의 측방 위치의 조직선량에 비해 약 52%의 선량감쇠를 보이고 있다. 그러나 선원하부 에서 측방 영역으로 갈수록 스텐 필터에 의한 선량감쇠효과가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 선원중심에서 상하 45도 대각선 방향의 선량을 비교한 바 상부 대각선 방향의 선량이 하부의 것에 비해 약 4% 크게 나타났으며, 이는 선원 상부의 껍술용기의 모양을 경사지게 한 결과 필터효과가 상대적으로 적음을 알 수 있다. 선원과 케이블이 있는 선원축의 연결케이블과 근접한 20도 이내의 영역에서는 필터효과와 변화가 커서 40%의 선량감쇠를 보였으나, 축에서 떨어질수록 균등한 동심원의 선량분포를 얻었다.

중심 단어: Ir-192 선원, 선량모델링, 출력선량률계수

서 론

국내에서는 1998년부터 하나로 원자로의 중성자를 ^{191}Ir 에 조사하여 강도가 높은 ^{192}Ir 고선량률 소선원을 개발하기 시작하였다. 처음 개발된 것은 Buchler 사(독일)의 원격강내조사에 이용되는 Co-60 선원을 대체할 선원을 개발하여 임상에 활용하게 되었다.^{1,2)}

초기에 개발된 선원은 Buchler 사의 원격강내조사 장치의 Co-60 선원을 대체하기 위해 동일크기로 고안된 ^{192}Ir 선원으로 외경이 4mm 이고 길이는 6mm 가 되도록 고안된 것이다. 개발된 고선량률 선원은 강내조사 전용으로 사용하기 위해 개발 제작되었으나, 타회사의 강내조사장치에는 원격제어 및 구동방

식이 다르고 선원과 이동케이블간의 연결방식이 다르므로 서로 호환성이 없도록 되어 있다.³⁾

국내 도입된 원격강내조사장치의 선원 중 고선량률 Co-60 선원의 공급이 원활치 못하여, 하나로 원자로사업 활성화에 힘입어 개발된 대체형 선원은 기존 장치에서 안전하게 사용할 수 있어야 하므로 무엇보다 원형과 동일 모양의 외형과 구조적 기능을 할 수 있어야 하며, 대체형 선원의 에너지스펙트럼과 단위방사능에 대한 선량률과 선량등방성과 조직선량환산계수 결정 등 선량모델링이 뒷받침 되어야 임상에 사용할 수 있다고 생각된다.^{4,5)}

저자는 국내에 도입된 고선량률 선원 가운데, 코발트-60선원의 공급이 부진하거나 선원생산이 중단되어 대체형 선원의 공급 없이는 임상진료에 어려움을 줄 수 있는 Ralstron 장비를 선택하여, Ir-192 선원으로 교체하고자 선원을 고안하고, 고안된 선원을 이

본 연구는 과학기술부의 하나로 원자로사업 지원에 의해 이루어졌음(2000).

Table 1. Nomination of geometric plane, coordinates of given points and size of plane.

Plane	Coordinates of plane (Unit: mm)			
	p1	p2	p3	Radius
Capsule Top Plane(CTP)	(0.75, 1.50, 0)	(0, 1.50, 0)	(0, 1.50, 0.75)	0.75
Capsule Upper Plane(CUP)	(1.50, 0.75, 0)	(0, 0.75, 0)	(0, 0.75, 1.50)	1.50
Capsule Bottom Plane(CBP)	(1.50, -11.50, 0)	(0, -11.50, 0)	(0, -11.50, 1.50)	1.50
Source Top Plane (STP)	(0.75, 0.75, 0)	(0, 0.75, 0)	(0, 0.75, 0.75)	0.75
Source Bottom Plane(CBP)	(0.75, -0.75, 0)	(0, -0.75, 0)	(0, -0.75, 0.75)	0.75

용하여 조직선량률을 모델링함으로써 선량계획 전산화에 이바지하고자 한다.

선원의 에너지가 상대적으로 낮은 선원에서 선원주위에 도달되는 조직선량률과 선량분포는 선원과 켈술용기의 크기와 모양에 따라 단위 방사능에 따른 선량률과 선량등방성이 크게 달라질 수 있다.

선원은 전단부의 반구형 모델에 비해 원추대형을 한 원형에 가깝도록 고안되었으며, 선원켈술용기의 모양이 균등치 않아 필터효과에 의한 선량률의 변화가 예상된다⁶⁾.

과거 선형선원의 선량은 Sievert⁷⁾가 제시한 바 있는 선원-평가점의 위치에 관련되어 선원 축에서 떨어진 거리와 각도에 따라 용기두께를 결정하고 선량적분을 통해 계산해 왔다. Sievert 적분은 선형선원의 경사면필터는 효과적으로 나타낼 수 있으나, 양단의 켈술모양에 대한 선량필터효과는 잘 계산되지 않으며, 양단의 선량분포는 실험에 의존하는 경우가 많다. 그러나 최근에는 선원을 미세 분할하여 점선원화 하고 필터의 효과를 나타내고자하는 연구가 발표되고 있다.^{1,6)}

본 연구에서는 Ir-192선원을 Ralstron에 사용할 수 있도록 원형과 동일한 외형을 갖도록 하였으며, 선원의 모양에 따라 조직내 임의의 선량평가점에 도달하는 선량을 구하기 위하여, 선원을 미세 분할하여 점선원화하였다.

임의의 조직선량은 분할선원에서 평가점까지 기하학적 수치해석을 통해 경로상의 선원차폐효과와 켈술에 의한 차폐효과를 각각 구하였으며, 선량률표를 제공하여 조직선량을 쉽게 평가할 수 있도록 하여 선량모델링의 지침이 되고자 하였다.

대상 및 방법

선원의 외형적 규격은 기존의 코발트-60선원과 동일하게 하였고, 이리디움-192 선원의 높은 비방사능을 이용하여 한 개 원추형 선원으로 10Ci의 선원을 만드는 설계를 하였다.

원추형 선원의 크기는 직경과 길이가 각각 1.5mm ϕ x 1.5mm 이고, 선원 켈술은 스텐레스-스틸(SUS316L)로 크기는 직경과 길이가 각각 3.0mm ϕ x 12.0mm 이며, 한쪽 끝은 1.6mm 스텐와이어가 연결되어 있고, 연결고리가 달려있다(Fig.1).

선원 주위의 선량분포를 구하기 위하여 선원을 미세하게 분할하여 선원자체모양과 켈술용기의 모양에 따른 선속 필터효과를 적용하였다.

조직선량을 비교적 정확하게 평가하기 위해서는 선원을 점선원화하고 켈술을 지나는 경로의 필터두께와 거리와 거리 및 산란보정계수 결정이 중요하다. 선원을 점선원화하기 위해 선원의 가로와 세로를 각각 0.1mm 씩 분할하고, 높이는 15등분으로 분할하여 분할선원의 크기를 0.1mm x 0.1mm x 0.1 mm로 하여 조직에 도달되는 선량을 구하였다.

분할선원의 중심에서 조직내 한 점까지 경로 중 면과 교점을 구하기 위해 사용된 면과 기하학적 위치를 Table 1과 같이 정리하였다.

선원분할에서 가로 및 세로로 분할할 때 분할선원이 선원 반경($r_s=0.75\text{mm}$) 내에 위치하는 경우만 분할선원으로 다루었다.

분할선원에서 조직내 선량평가점까지의 선속 경로는 선원벽과 선원켈술용기벽과 선원-조직거리를 고려하였으며, 분할선원에서 경로상 각 면까지 거리를 구하고 필터의 두께를 결정하였다.

선속 경로상의 선원과 용기벽과의 교점을 삼차원적으로 구하기 위해 삼차원 공간상의 기하학적 벡터

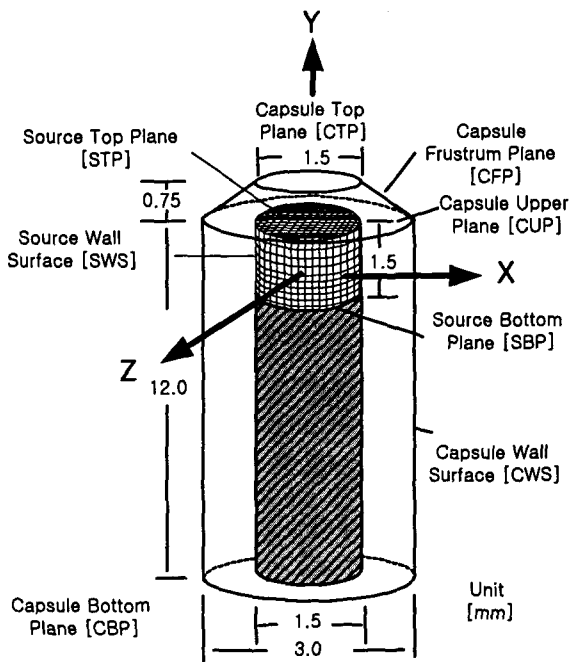


Fig.1. Nomination of geometric source plane and axis.

해석을 이용하였다.

선량평가면은 Fig.1에서 알 수 있지만, 선원을 중심으로 1/4분면과 4/4분면만을 계산하고 나머지 평가면은 대칭인 점을 이용하였다.

선속경로는 표1과 같이 원주형 선원내 한 분할선원의 중심에서 선속이 지나가는 면은 선원상부면(Stu), 측면(Sws), 하부면(Sbp) 중 한 면을 지나게 되고, 용기면은 상부(Ctp), 원추면(Cfs), 원주면(Cws)과 하단면(Cbp) 중 한 면을 지나게 된다.

분할선원점과 조직내 한 점이 결정되면 선속의 방향이 결정되므로, 선속에 따른 경계를 정하기 위해 선원의 3면 중 한 면을 통과한 후, 선원용기의 4면 가운데 통과하는 한 면을 정하였다.

선원의 직경과 용기윗면의 직경이 동일한 1.5mm이므로, 분할선원에서 용기윗면을 통과하는 경우는 선원의 윗면을 반드시 지나게 된다.

선속의 방향은 분할 선원의 중심의 y축 좌표(Sy)와 조직내의 한 점의 y축 좌표(Py)의 크기를 비교하여 Sy가 Py보다 크면 상부의 경로를 취하고, 같으면 측면, 작으면 하부의 경로를 취하게 하였다(Fig.2). 여기서 Sy와 Py가 동일 한 경우를 제외하고, 상하부에서 선원과 용기의 측면과 교점이 있는지 검색이 필요하다(Fig.2).

선속이 선원 상부면(Stu)을 통과하고 용기 상부면

(Cup)을 지날 때와 원추면(Cfs)을 지나는 두 경우가 있게 되고, 선원측면을 지나는 경우 용기의 원추면과 용기 측면과 용기 하부면을 지나는 지를 검색하게 되며, 선원하단면을 통과하는 경우 용기의 측면과 용기의 하단면을 통과하는 지 검색하였다.

선원의 상부면과 선원측벽의 경계는 선원의 윗면을 지나는 것으로 결정하였고, 용기벽의 원추면 상부의 경계면은 용기의 상부면으로, 원추면의 하부 경계는 원추면을 지나는 것으로 각각 결정하였다.

선원의 측면과 선원하단면의 경계와 캡슐의 측면과 하단면의 경계는 각각 선원측벽과 캡슐의 측면을 지나는 것으로 확정하였다.

조직내 어느 한 위치에 도달되는 선량을 결정하기 위해서는 선량결정에 영향을 주는 선원두께와 캡슐의 두께, 조직층의 두께와 선원-조직거리(r) 함수로 결정되므로, 경로를 선분으로 한 직선과 경계면의 교점과 거리에 따른 산란보정계수를 적용하여 결정하였다.

선속매개변수와 원주면 교점결정

분할선원의 중심점 P1(x1,y1,z1)과 선원 바깥 임의의 점 P2(x2,y2,z2)을 잇는 선속의 경로를 정하는 직선으로부터 공간상의 직선으로 식(1) 같이 나타낸다.

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1} \quad (1)$$

선속 경로상 선원의 원주면과 교점을 구하기 위하여, 선원과 점까지 거리를 선분 r로 두고, 선분상의 모든 점을 표현하기 위한 매개변수t를 이용하면 다음과 같이 둘 수 있다.

$$r = r_0 + tL \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} x &= x_1 + (x_2 - x_1) t \\ y &= y_1 + (y_2 - y_1) t \\ z &= z_1 + (z_2 - z_1) t \end{aligned} \quad (2b)$$

분할선원을 한 점(x1,y1,z1)으로 하고 조직내 평가할 위치의 한 지점을 (x2,y2,z2)인 직선과 임의의 y축상의 한점을 원점 (x0,z0)으로 하는 원과 교차점을

Dose Computation Model

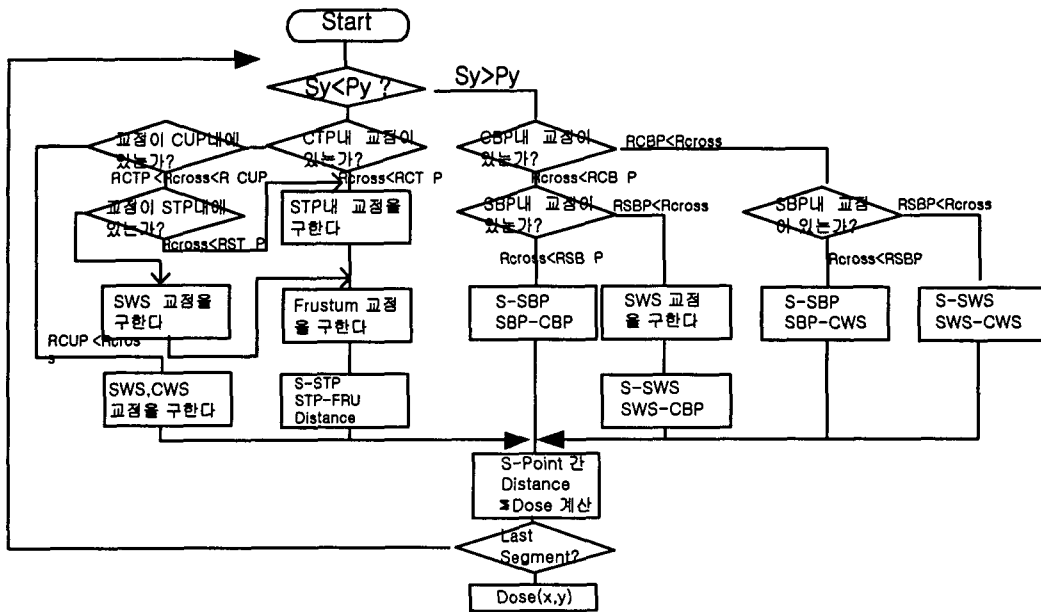


Fig.2. Flow chart of dose computation for designed source and capsule-shape

찾는다. Fig.1B에서 x,z 평면상의 원의 방정식을 이 용한다.

$$(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2 \quad (3)$$

교점이 원주면에 생기는 경우 교점은 식2b를 식3에 대입하여 매개변수 t에 대한 2차식을 얻어 실근을 구한다.

원주면과의 교점은 원의 방정식에서 x 또는 z를 구한 다음, 직선의 매개변수를 얻어 나머지 교점의 좌표 성분을 구하였다.

선원-평면과의 교점

원주형의 선원을 분할한 경우, 분할선원에서 조직내 임의의 한 점에 이어지는 선분은 Fig.1 과 같이 선원 윗면이 포함되는 원통의 윗면을 통과하는 선원과 선원 전단의 깎술 윗면을 통과하는 선속인 경우 평면과 교점을 이루게 된다. 평면의 교점의 일반식으로부터 유도한다.

$$a(x-x_0) + b(y-y_0) + c(z-z_0) = 0 \quad (4)$$

여기서 (x_0, y_0, z_0) 는 평면상의 한 점이다.

식(4)의 좌변을 전개하여 $d = ax_0 + by_0 + cz_0$ 라 두면 평면방정식

$$ax + by + cz = d \quad (5)$$

을 얻게 된다.

평면상에서 일직선에 있지 않은 세 점 $P_0(x_0, y_0, z_0)$, $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 로부터 얻어지는 두 직선의 법선벡터는

$$N = P_0P_1 \times P_0P_2 =$$

$$\begin{vmatrix} i & j & k \\ x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \end{vmatrix} \quad (6)$$

와 같이 주어지며, N 벡터의 각 성분의 계수를 구하여 식 (4)에 대입하고, 주어진 평면상의 한 점의 좌표를 대입하여 d 를 구한다. 평면과 직선의 교점은 직선의 식(1)에서 x,y,z의 1차식 두개를 각각 얻어 x,z를 대입하고 y 에 대해 정리하면

$$\begin{aligned}
 & \left[a \left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \right) + b + c \left(\frac{z_2 - z_1}{y_2 - y_1} \right) \right] y - \\
 & \left(a \left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \right) + c \left(\frac{z_2 - z_1}{y_2 - y_1} \right) \right) y_1 + ax_1 + cz_1 \\
 & = d \tag{7}
 \end{aligned}$$

과 같이 y 를 구 할 수 있다. 동일한 방법으로 y, z 나 x, y 를 대입하여 각각 x 와 z 를 구할 수 있다.

원추면의 교점

선원 앞 부분은 Fig.3과 같이 원추대를 이루는 45도 경사진 부분이 있으므로, 선원 주위에 도달되는 방사선량을 정량적으로 평가하기 위해서는 방사선 경로상에 있는 원추대의 각 면을 지나는 교점을 구할 필요가 있다.

y 축에 대한 원추면의 입체각 θ 는 Fig.3을 통해서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tan \theta = \frac{r_1}{(y_e - y_b)} \tag{8a}$$

따라서 입의 y 점에 대한 반경의 함수는

$$\tan \theta = \frac{r}{(y_e - y)} \tag{8b}$$

와 같이 볼 수 있으므로, 원추면의 반경은 y 축의 위치에 따른 함수로 주어짐을 알 수 있다.

식(8)의 r 을 원의 방정식(3)에 대입하고, 직선의 방정식의 x 와 z 에 대한 일차식으로 부록과 같이 해를 구하여, 원추면의 반경을 나타내는 y 의 위치를 결정함으로써 선분과 원추면의 교차점 $C(x,y,z)$ 을 얻을 수 있다.

조직흡수 선량률

개발선원은 방사선에너지에 비해 선원자체의 흡수와 선원 캡슐벽 물질에 대한 흡수가 조직선량결정에 큰 영향을 받게 된다.

따라서 조직흡수선량률을 구하기 위해 선원을 점선원화 하고자 미세하게 분할하였다.

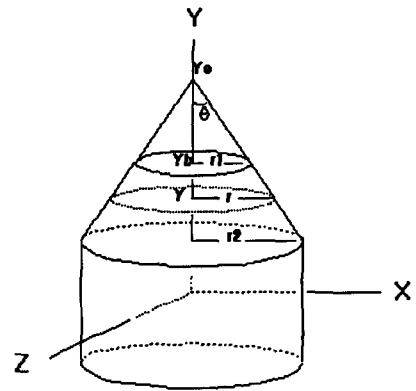


Fig.3. Schematic diagram of frustum and cylindrical typed source

직경이 1.5mm인 선원을 0.1 mm x 0.1 mm 의 단면적으로 선원을 분할하여 직경내부에 있는 선원 177개와 두께를 15등분하여 총 2655개의 점선원이 되도록 하였다. 점선원에서 방출되는 선량으로부터 선원의 자체흡수와 캡슐벽의 투과감쇠를 보정하여 조직에 흡수되는 선량을 계산하였다. 선원캡슐벽이 없는 점선원에 의한 조직내 임의의 한 점에 도달되는 선량은 9식과 같이 얻을 수 있다

$$D(r) = A_{app} \cdot (\Gamma_\delta)_x \cdot F_{med} \cdot (1/r^2) \cdot T(r) \tag{9}$$

여기서 A_{app} 는 겉보기 방사능(mCi)으로 선원의 자체흡수와 선원 캡슐벽에 의한 감쇠가 없는 점선원에 의한 동일한 선량의 방사능을 의미한다⁵⁾. $(\Gamma_\delta)_x$ 는 공기중 조사선량상수를 의미하며, 조직감쇠계수 $T(r)$ 은 선원주위의 조직내 산란과 감쇠에 의한 조직선량 보정계수로 공기중 조사선량에 대한 물에서 조사한 조사선량의 비로 얻는다^{7,8)}.

F_{med} 는 조사선량을 흡수선량으로 변환하는 변환계수항이며, 조사선량의 정의와 전리상수 및 질량에너지흡수계수로 0.973을 얻었다^{3,9)}.

Ir-192 선원에 의한 조직투과 및 산란선에 대한 조직선량보정계수 $T(r)$ 는 35 x 35 x 35 cm³ 의 아크릴 (두께 6 mm) 수조 속에서, 선원과 전리함의 위치를 일정하게 유지할 수 있게 한 후, 측정범위를 선

Table 2. Coordinates of center of segmented source and thickness of filters of source, capsule and tissue in mm.

Segmented source			Point		Thickness[mm]		
x1	y1	z1	x2	y2	ST	CT	Ts
0.0	-0.75	0.0	10.00	-0.75	0.75	0.75	10.00
0.0	-0.75	0.0	0.00	9.25	0.75	0.75	10.00
0.5	-0.75	0.0	0.00	10.00	0.75	0.75	10.76
0.0	-0.50	-0.6	10.00	-0.75	0.49	0.93	10.04
-0.7	-0.75	0.0	10.00	-0.75	1.45	0.75	10.70
0.4	-0.75	0.6	10.00	10.00	0.08	1.18	14.42
-0.4	-0.75	0.6	10.00	10.00	1.04	0.58	14.97
0.0	-0.05	0.0	10.00	10.00	0.07	1.02	14.18

ST and CT represent a source thickness and a thickness of capsule, respectively.

원에서 20 cm 까지로 정하고, 검출기를 1cm 씩 이동하면서 공기중 전리량과 물에서 전리량을 번갈아 측정하여 실험적인 다항식계수를 통해 구한 값을 이용하였다³⁾.

본 연구에서 개발한 선원은 원주형이므로 식(1)을 근거로 선원 자체의 흡수 두께와 선원 캡슐벽의 두께에 대한 보정을 하였다.

조직선량은 선원의 방사능 크기를 균등히 하기 위해 디스크형 선원의 단면을 직교축(X,Z)으로 0.1 mm 씩 균등히 분할하고, 두께를 0.1 mm 로 분할하여, 선원의 중심에서 측방 방향(x)과 선원의 축 방향(±y)의 각 위치에서 알짜선원의 단위방사능에 의한 조직선량을 얻었다.

$$D(x, y) = \frac{1}{LMN} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N D(r) \cdot e^{-(\mu_{Ir} r + \mu_{Fe} \cdot r_n)} \quad (10)$$

여기서 L,M,N은 x,y,z축상의 분할 수를 말하며, 지수항은 선원필터두께(T_{Ir}), 스텐 캡슐두께(T_{Fe})와 선원 자체의(μ_{Ir})와 스텐캡슐(μ_{Fe})의 선흡수계수를 의미하고, 각각의 선흡수계수는 5.7406 cm^{-1} 과 0.7523 cm^{-1} 을 이용하였다¹⁰⁾.

결 과

방사선의 에너지가 비교적 낮은 선원은 선원을 감싸고 있는 필터의 재질과 두께에 따라 선원의 방사능크기를 나타낼 때 주의해야 할 부분이 알짜선원의

방사능크기와 캡슐을 통과한 선량으로 나타내는 결보기방사능크기로 구분할 필요가 있다. 특히 구형선원이 아닌 경우 선원 모양에 따라 선원 중심에서 동일 위치에 있는 주위 조직에 도달되는 선량은 달라지기 때문이다.

Fig.1과 같이 선원 캡슐이 상하 비대칭이고, 선원이 구형이 아닌 경우 필터의 효과가 평가위치에 따라 다르게 나타난다. Table 2는 분할선원에서 임의의 지점까지 거리를 계산하여 얻은 값으로 임의의 선원위치(x_1, y_1, z_1)와 선원 측면($z_2=0$)상의 평가지점(x_2, y_2)에 대해 선원자체두께(ST)와 캡슐두께(CT)와 평가점까지의 거리(T_s)가 선원위치에 따라 필터의 차이를 볼 수 있다.

알짜선원은 원자로에서 중성자조사에 의해 반응된 ^{191}Ir (n, r) ^{192}Ir 선원을 큐리미터로 방사능의 강도를 측정하거나 캡슐로 밀봉된 선원을 일정위치에 두고 공기 이온함으로 전리전하를 측정하여 이온함의 선량교정값과 기온기압보정계수를 이용하여 평가된 단위 거리의 시간당 선량으로 환산된 공중선량률 ($R/\text{mCi-cm-hr}$)으로부터 밀봉선원의 필터효과에 의한 감쇠효과를 이용하여 선원의 강도(mCi 또는 MBq)를 구한다.

분할선원의 강도를 결정하기 위해서는 선원의 자체 필터효과와 선원을 둘러싸고 있는 스텐(SUS316) 필터의 선량감쇠를 구한 결과 알짜 점선원의 66.3%로 감쇠효과를 얻었다. 필터에 의한 선량감쇠를 알면 외부에서 측정된 공기중선량으로부터 식 3을 통해 결보기방사능을 구할 수 있다.

조직선량은 방사선에너지의 저지능에 근거를 둔 질량에너지계수의 비와 조직내 산란보정계수를 이용

Table 3A. Dose Output Factor of Ir-192 Source for Ralstron Unit.

The normalized reference dose is 0.0013511cGy/370MBq-sec as a given tablet. (Upper region)

x y	Lateral distance [mm] from source central axis.																			
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	100	120	150	180	200	
0	----	4.0350	1.0000	.4430	.2486	.1586	.1097	.0803	.0611	.0386	.0264	.0190	.0142	.0109	.0086	.0056	.0032	.0019	.0015	
5	3.9472	1.9937	.8066	.4027	.2362	.1538	.1076	.0792	.0605	.0383	.0262	.0189	.0142	.0109	.0086	.0056	.0032	.0019	.0015	
10	.9612	.7844	.4973	.3086	.2012	.1383	.0999	.0750	.0581	.0375	.0258	.0187	.0140	.0109	.0085	.0056	.0032	.0019	.0014	
15	.4237	.3885	.3028	.2206	.1596	.1176	.0887	.0686	.0542	.0357	.0250	.0183	.0138	.0107	.0085	.0055	.0031	.0019	.0014	
20	.2371	.2269	.1953	.1574	.1236	.0967	.0763	.0609	.0493	.0336	.0239	.0177	.0134	.0105	.0083	.0055	.0031	.0019	.0014	
25	.1511	.1473	.1337	.1149	.0957	.0786	.0645	.0531	.0441	.0311	.0226	.0169	.0130	.0102	.0081	.0054	.0031	.0019	.0014	
30	.1044	.1029	.0963	.0861	.0748	.0639	.0542	.0459	.0389	.0284	.0211	.0160	.0124	.0099	.0079	.0053	.0031	.0019	.0014	
35	.0763	.0756	.0721	.0663	.0594	.0523	.0455	.0395	.0342	.0257	.0196	.0151	.0119	.0095	.0077	.0051	.0030	.0019	.0014	
40	.0581	.0577	.0558	.0523	.0479	.0431	.0383	.0339	.0299	.0232	.0180	.0142	.0113	.0091	.0073	.0050	.0029	.0018	.0014	
45	.0456	.0454	.0443	.0421	.0391	.0359	.0325	.0292	.0261	.0208	.0165	.0132	.0106	.0086	.0071	.0048	.0029	.0018	.0013	
50	.0367	.0365	.0358	.0344	.0324	.0302	.0277	.0252	.0229	.0186	.0150	.0122	.0099	.0081	.0067	.0047	.0028	.0018	.0013	
60	.0250	.025	.0247	.0240	.0230	.0218	.0205	.0191	.0176	.0149	.0125	.0104	.0087	.0073	.0061	.0043	.0027	.0017	.0013	
70	.0180	.018	.0178	.0175	.0170	.0163	.0155	.0147	.0138	.0120	.0103	.0088	.0075	.0064	.0054	.0039	.0025	.0016	.0013	
80	.0134	.0134	.0134	.0132	.0129	.0125	.0120	.0115	.0109	.0097	.0085	.0075	.0065	.0056	.0048	.0035	.0023	.0015	.0012	
90	.0104	.0104	.0103	.0103	.0101	.0098	.0095	.0091	.0088	.0079	.0071	.0063	.0055	.0049	.0042	.0032	.0021	.0015	.0011	
100	.0082	.0081	.0081	.0081	.0079	.0078	.0076	.0073	.0071	.0065	.0059	.0053	.0047	.0042	.0037	.0029	.0019	.0013	.0011	
110	.0065	.0065	.0065	.0065	.0064	.0063	.0061	.0060	.0058	.0054	.0050	.0045	.0041	.0037	.0033	.0025	.0018	.0013	.0010	
120	.0053	.0053	.0053	.0053	.0052	.0051	.0051	.0049	.0048	.0045	.0042	.0039	.0035	.0031	.0029	.0023	.0016	.0011	.0009	
130	.0043	.0043	.0043	.0043	.0043	.0043	.0042	.0041	.0040	.0038	.0035	.0033	.0030	.0027	.0025	.0020	.0015	.0011	.0009	
140	.0036	.0036	.0036	.0036	.0036	.0035	.0035	.0034	.0033	.0032	.0030	.0028	.0026	.0024	.0022	.0018	.0013	.0010	.0009	
150	.0030	.0030	.0030	.0030	.0030	.0029	.0029	.0029	.0028	.0027	.0025	.0024	.0023	.0021	.0019	.0016	.0012	.0009	.0008	
160	.0025	.0025	.0025	.0025	.0025	.0025	.0025	.0025	.0024	.0023	.0022	.0021	.0019	.0018	.0017	.0014	.0011	.0009	.0007	
170	.0021	.0021	.0021	.0021	.0021	.0021	.0021	.0021	.0021	.0020	.0019	.0018	.0017	.0016	.0015	.0013	.0010	.0008	.0007	
180	.0019	.0018	.0018	.0018	.0018	.0018	.0018	.0018	.0017	.0017	.0016	.0015	.0015	.0014	.0013	.0011	.0009	.0007	.0007	
190	.0016	.0016	.0016	.0016	.0016	.0015	.0015	.0015	.0015	.0015	.0014	.0013	.0013	.0012	.0011	.0010	.0009	.0007	.0007	
200	.0013	.0013	.0013	.0013	.0013	.0013	.0013	.0013	.0013	.0013	.0013	.0012	.0011	.0011	.0011	.0009	.0008	.0007	.0006	

* Tissue Dose[cGy/min at given dose] can be delivered from Dose Output Factor x 0.00150212[cGy/sec-mCi] x mCi x 60 [sec/min]

하여 조직내 임의의 위치에 도달되는 선량을 얻었다. 여기서 조직내 산란보정계수는 Ir-192 선원중심에서 20cm위치까지 실험값을 인용하였다.

계산결과 겔보기방사능의 강도 37MBq(mCi) 당 단위 거리(cm)에서 기준선량(선원에서 1cm 측방위치의 선량)은 0.0013511cGy/sec- 37MBq-cm 를 얻었다. 이 기준선량값은 선원 축을 중심으로 축에서 측방거리(x)와 측방향의 거리(y)값을 알면 출력선량계수 $D_{output-Factor}$ 와 기준선량률 $D_{ref}(cGy/mCi-sec-cm)$ 과 겔보기 방사능강도 $A(mCi)$ 와 시간(sec)을 곱하여 조직내 도달되는 선량을 구할 수 있다. 즉 단위시간 (sce)당 조직선량 (Dose/sec) = $D_{output-Factor} \times D_{ref}(0.0013511cGy/mCi-sec) \times A_{apparent}[mCi] \times Time[sec]$ 로 선원에서 임의의 위치에 도달하는 조직내 선량을 구할 수 있다.

선원주위의 선량분포특성을 구하기 위해서 겔보기 방사능강도로 선원의 알짜 강도를 구한 다음, 2655개의 분할선원에서 조직에 도달되는 선량을 구하고, 선

원의 측방 1cm 지점의 선량을 기준하여 출력선량계수를 도표화하였다(Table 3A,B).

선량분포특성은 선원의 측방 10mm 위치를 기준으로 했을 때, 선원의 상부는 측방에 비해 약 4%가 적게 도달하였다. 선원의 하부는 Iridium 선원을 연결하는 케이블이 부착되는 스텐레스 스틸와이어 부위가 있어 선량분포를 불균등하게 하는 필터 역할을 하며, 그 두께는 10.5 mm 이었다. 선원 중심의 하부 영역은 분할선원으로부터 조직에 도달되는 통로상의 기하학적 두께차이로 선량감쇠가 크게 나타났다.

선원하부는 스텐 필터 두께의 영향으로 동일 거리의 측방 위치의 조직선량에 비해 약 52%의 선량감쇠를 보이고 있다. 그러나 선원하부에서 측방영역으로 갈수록 스텐 필터에 의한 선량감쇠효과가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

선원중심에서 상하 45도 대각선 방향의 선량을 비교한 바 상부 대각선 방향의 선량이 하부의 것에 비해 약 4% 크게 나타났으며, 이는 선원 상부의 꺾슬용기

Table 3B. Dose Output Factor of Ir-192 Source for Ralstron Unit. The normalized reference dose is 0.0013511cGy/370MBq-sec as a given tablet. (Lower region)

x y	Lateral Distance [mm] from Source Axis																		
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	100	120	150	180	200
0	----	4.0350	1.0000	.4430	.2486	.1586	.1097	.0803	.0611	.0386	.0264	.0190	.0142	.0109	.0086	.0056	.0032	.0019	.0015
-5	2.8945	1.9142	.7969	.4006	.2355	.1535	.1074	.0790	.0604	.0383	.0262	.0189	.0142	.0109	.0086	.0056	.0032	.0019	.0015
-10	.4816	.6891	.4775	.3026	.1986	.1373	.0993	.0747	.0579	.0373	.0258	.0187	.014	.0109	.0085	.0055	.0031	.0019	.0014
-15	.2140	.3082	.2791	.2117	.1558	.1156	.0876	.0679	.0538	.0356	.0250	.0182	.0138	.0107	.0085	.0055	.0031	.0019	.0014
-20	.1198	.1619	.1717	.1472	.1186	.0941	.0748	.0600	.0487	.0333	.0238	.0176	.0134	.0105	.0083	.0055	.0031	.0019	.0014
-25	.0764	.0945	.1118	.1043	.0901	.0755	.0626	.0519	.0433	.0306	.0224	.0168	.0129	.0101	.0081	.0053	.0031	.0019	.0014
-30	.0528	.0597	.0765	.0758	.0690	.0604	.0520	.0445	.0379	.0279	.0208	.0159	.0124	.0098	.0079	.0053	.0031	.0019	.0014
-35	.0385	.0411	.0544	.0565	.0535	.0486	.0431	.0379	.0331	.0251	.0192	.0149	.0118	.0094	.0076	.0051	.0030	.0019	.0014
-40	.0294	.0302	.0399	.0430	.0421	.0393	.0359	.0322	.0287	.0225	.0176	.0139	.0111	.0089	.0073	.0049	.0029	.0018	.0014
-45	.0230	.0232	.0300	.0334	.0336	.0322	.0300	.0274	.0248	.0200	.0161	.0129	.0105	.0085	.0070	.0048	.0029	.0018	.0013
-50	.0185	.0185	.0231	.0264	.0272	.0265	.0252	.0234	.0215	.0178	.0146	.0119	.0098	.0081	.0067	.0046	.0028	.0017	.0013
-60	.0126	.0126	.0145	.0172	.0183	.0184	.0180	.0172	.0162	.0141	.0120	.0101	.0085	.0071	.0060	.0043	.0026	.0017	.0013
-70	.0091	.0091	.0099	.0117	.0128	.0132	.0132	.0129	.0124	.0112	.0098	.0085	.0073	.0062	.0053	.0039	.0025	.0016	.0012
-80	.0068	.0068	.0071	.0083	.0093	.0097	.0099	.0099	.0096	.0089	.0080	.0071	.0062	.0054	.0047	.0035	.0023	.0015	.0012
-90	.0053	.0053	.0053	.0061	.0069	.0073	.0075	.0076	.0075	.0071	.0065	.0059	.0053	.0047	.0041	.0031	.0021	.0014	.0011
-100	.0041	.0041	.0041	.0045	.0051	.0056	.0059	.0059	.0059	.0057	.0054	.0049	.0045	.0040	.0035	.0028	.0019	.0013	.0011
-110	.0033	.0033	.0033	.0035	.0039	.0043	.0046	.0047	.0047	.0047	.0045	.0041	.0038	.0035	.0031	.0025	.0017	.0012	.0010
-120	.0027	.0027	.0027	.0028	.0031	.0034	.0036	.0037	.0038	.0038	.0037	.0035	.0032	.0029	.0027	.0022	.0016	.0011	.0009
-130	.0022	.0022	.0022	.0023	.0025	.0027	.0029	.0030	.0031	.0031	.0031	.0029	.0027	.0025	.0023	.0019	.0014	.0011	.0009
-140	.0018	.0018	.0018	.0019	.0020	.0021	.0023	.0025	.0025	.0026	.0025	.0025	.0023	.0022	.0020	.0017	.0013	.001	.0008
-150	.0015	.0015	.0015	.0015	.0016	.0017	.0019	.0020	.0021	.0021	.0021	.0021	.0020	.0019	.0017	.0015	.0012	.0009	.0008
-160	.0013	.0013	.0013	.0013	.0013	.0015	.0015	.0017	.0017	.0018	.0018	.0018	.0017	.0016	.0015	.0013	.0011	.0009	.0007
-170	.0011	.0011	.0011	.0011	.0011	.0012	.0013	.0013	.0014	.0015	.0015	.0015	.0015	.0014	.0013	.0012	.0009	.0008	.0007
-180	.0009	.0009	.0009	.0009	.0009	.001	.0011	.0011	.0012	.0013	.0013	.0013	.0013	.0012	.0012	.0011	.0009	.0007	.0007
-190	.0008	.0008	.0008	.0008	.0008	.0009	.0009	.0009	.0010	.0011	.0011	.0011	.0011	.0011	.0010	.0009	.0008	.0007	.0006
-200	.0007	.0007	.0007	.0007	.0007	.0007	.0007	.0007	.0008	.0009	.0009	.0009	.0009	.0009	.0009	.0009	.0007	.0007	.0006

의 모양을 경사지게 한 결과 필터효과가 상대적으로 적음을 알 수 있다.

결과적으로 선원과 케이블이 있는 선원축의 연결 케이블이 가까이 있는 ± 20 도 영역에서 필터효과의 변화가 40%의 차이를 보였으며, 각도가 클수록 즉 선원의 측방향에 가까울수록 약 5% 범위내에서 균등한 선량분포를 보임을 알 수 있다.

고 찰

선원주위의 선량률은 선원자체와 선원을 감싸고 있는 캡슐 용기의 재질의 밀도와 모양에 따른 필터 효과에 의해 크게 영향을 받는다^{4,11)}. 본 연구는 Ralstron 원격강내조사장치에 사용되는 Co-60 선원을 대체할 수 있는 고선량률 Ir-192 선원을 고안 제작하고, 캡슐모양의 해석기하학적 분석을 통해 전산화하였다.

대부분의 선원은 전단부가 반구형으로 이루어져 있

으나, Ralstron 강내조사장치의 선원의 원형을 준수한 경우 선원의 전단부가 45도 경사가 진 원추대형을 이루어 반구형에 비해 두께차이가 많아 기하학적 계산이 복잡하다. 선원전단부를 원추대를 하는 경우 반구형에서 보다 대각선 방향의 필터에 의한 선량감쇠효과가 약간 작게 나타나 선량률이 더 클 수 있다고 본다.

Iridium-192 선원의 공중 선량은 의 에너지스펙트럼을 이용하여 4.69 R/mCi-cm-hr을 얻어 걸보기 방사능 환산에 이용되었다. 강내조사장치의 사용 핵종에 대한 공중 선량평가는 절대선량 평가의 지침이 되고 조직 선량평가의 기본이 된다¹¹⁾.

공중선량에 대한 조직선량변환계수를 구한 결과 0.973을 얻었다. 이 때 스펙트럼의 절단에너지 10keV로 하여 이보다 낮은 에너지는 필터효과에 의해 감쇠가 클 것으로 예상하여 계수하지 않았다.

공중 선량은 이리디움의 에너지 스펙트럼이 잘 알려져 있지 않아 3.8R 에서 5.1R까지 적용한 발표가

있었으나, Glosgow는 에너지 분해능이 높은 Ge 반도체 검출기를 이용하여 측정한 스펙트럼으로 계산한 결과 4.69 ± 0.005 R/mCi-cm-hr 이 적정함을 발표하였다. 본 연구에서 Cut off 에너지를 10 keV로 두고 구한 선량값과 매우 유사하게 나타남을 알 수 있었다.⁹⁾

조직내 선량은 산란선의 영향으로 계산이 어렵고 대개 실험에 의해 거리함수로 보정계수를 구해 사용하는 경우가 많으므로, 저자는 공중선량률과 수조펜텀내의 선량률을 비교하여 보정계수를 구한 다음, 거리함수로 다항식계수를 구하였으며, 실험값과 0.5% 오차범위에서 일치함을 나타내었다.

산란보정계수는 선원의 이동거리와 조직선량 평가위치를 선원에서 20cm 까지 확대하였다.^{3,7)}

방사선 에너지는 낮고, 선원의 재질은 원자번호가 높은 고밀도의 선원인 경우 선원자체의 필터효과가 크고, 밀봉 캡슐의 필터효과도 무시할 수 없으므로, 선원강도를 겠보기 방사능 강도를 적용해야할 때와 알짜 방사능 강도를 적용할 때를 구분할 필요가 있다. 선원을 미세 분할하는 경우 후자를 적용하고, 겠보기 방사능강도를 이용한 기준 선량률표는 전자를 적용해야할 줄 안다.

한편, 사용자가 제작사의 선원모형에 따른 선량분포의 특성을 파악해두는 것은 임상 적용시 선원의 위치와 시술부위에 따라 선량평가를 정확하게 할 수 있는 자료가 되므로 중요하다. 고선량률 선원의 선량률분포는 선원의 모양과 선원을 연결하는 고강도 캡슐의 모양과 두께에 따라 선량분포에 차이를 보였으나 선원하부의 연결케이블이 있는 주위를 제외하고는 약 5%의 이내의 차이를 보여 선량균등성을 보이고 있음이 확인되었다.

선원측상의 하부는 약 52%의 선량감쇠를 보이지만 원격강내조사에서는 애플리케이션 내부의 값이 되므로 무시할 수 있다. 단, 예외적으로 고려할 사항은 조사부위가 경사진 경우 선원하부의 선량값이 영향을 줄 수 있으므로, 입체적 선량평가가 필요하다.⁹⁾

필터의 두께에 대한 종래의 Sivert가¹²⁾ 발표한 선원차폐두께는 선원이 원추형이며 대칭인 필터의 두께를 나타내는 수학적 표현으로, 선원양단부위에 대한 계산은 적용되지 않는 점이 있는 근사적 표현인데 비해 본 연구의 접근 방식은 선원의 모양과 필터의 모양이 비대칭이고 복잡한 모형에서도, 최대한 분

할하여 해석학적 알고리즘을 사용하여 보다 정확한 구조해석이 가능하다고 생각한다.

본 연구에서 제시하는 규격화된 선량률 표는 시험 제작선원의 모형을 근거로 전산화된 선량분포로써 매 제작 선원에 대해 기준선량을 비교함으로써 겠보기 방사능강도를 구하고, 임상에 정확한 조직선량을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

결론

Ralstron 원격강내조사에 사용되는 고선량률 Co-60 선원을 대체하기 위해 고안된 Ir-192 선원의 규격은 선원직경 1.5mm 높이 1.5mm 인 원추형 선원시료로 하나로 원자로에서 중성자를 조사하여 제작하였다. 선원-캡슐의 모양은 전단이 원추대형으로 경사지게 고안되어 선원주위의 조직선량을 구하고, 선량분포를 규격화하여 임상에 활용이 용이하도록 하였다.

본 연구에서 고안제작된 선원에 대한 단위 기준선량률은 $0.0013511\text{cGy}/37\text{MBq-cm-sec}$ 를 얻었으며, 선원주위 조직의 선량은 선원축에서 떨어져 있는 거리를 알면 쉽게 구할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 선원과 조직내 평가점간의 선속방향에 따른 필터두께를 얻는 과정을 보이고 전산화한 결과를 발표하였으므로, 이와 유사한 기하학적 분석에 유효하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

부록: 직선과 원추대의 교점

기호는 본문의 그림 2에 선원과 원추대형의 선원 캡슐에 명시된 것을 말하며, 원추대의 교점은 y의 위치에 따라 반경이 달라지므로, 역으로 반경이 정해지면 y의 위치도 결정된다고 본다.

그림2에서 원뿔의 꼭지점에서 Y축과 이루는 입체각을 θ 로 두고, 원추대의 윗면과 아랫면의 반경이 결정되면 입체각을 매개로 하여 원추면상의 교점의 반경과 교점의 y 값은 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned} \tan \theta &= r_1/(y_e - y_b) \\ &= r/(y_e - y) \end{aligned} \quad (A1)$$

$$r = \frac{r_1}{(y_e - y_b)} \cdot \frac{r}{(y_e - y)} \quad (A2)$$

$$(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2 \quad (A3)$$

참고문헌

식을 간단히 하기 위해

$$k = \frac{r_1}{(y_e - y_b)} \text{ 라 두고,}$$

원주대의 중심이 (0,y,0) 에 있다면 식 A3은 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$x^2 + z^2 = k^2 (y_e - y)^2 \quad (A4)$$

본문의 직선의 방정식에서 $dx = x_2 - x_1$, $dy = y_2 - y_1$, $dz = z_2 - z_1$ 으로 두고 x와 z에 대해 풀면 다음과 같은 일차식을 얻게 되어 식6과 같이

$$\begin{aligned} x &= u/v(y - y_1) + x_1 \\ z &= w/v(y - y_1) + z_1 \end{aligned} \quad (A5)$$

되며, 식(A5)를 식(A4)에 대입하면 y의 2차함수로 나타낼 수 있다. 즉

$$Ay^2 + By + C = 0 \quad (A6)$$

이고 각 계수는

$$\begin{aligned} A &= P^2 + Q^2 - k^2 \\ B &= 2(K^2 Y_e - P^2 Y_1 - Q^2 Y_1 + P X_1 + Q Z_1) \\ C &= X_1^2 + Z_1^2 + P^2 y_1^2 + Q^2 y_1^2 - 2P X_1 - 2Q Y_1 Z_1 - K^2 Y_e^2 \end{aligned}$$

와 같다. 여기서 P 와 Q 는 식 A5에서 각각 기울기를 말한다.

원주면과의 교점은 근의 공식을 이용하여 구하고 두 근 중 큰 값이 실근이 된다.

1. 최태진, 원철호 등: 원격강내조사용 Co-60 선원의 대체용 Ir-192 선원의 조사선량결정 및 선량등방성조사. 의학물리. 9:55(1998)
2. 조운갑, 한현수 등: 강내조사용 ¹⁹²Ir 치료선원 제조.98춘계학술발표논문집.한국원자력학회, 1998
3. 최태진, 이호준 외: 코발트-60 선원 대체용 고선량률 Ir-192 선원의 조직선량특성. 의학물리. 9:55(1998)
4. Glasgow GP et al: Remote Afterloading Techology. AAPM Report No.41:6-30(1993)
5. Nath R., Anderson L.L., Luxton G., et.al: Task Group No.43: Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: Recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee. Task Group No. 43. Med.Phys.22:209(1995)
6. Buermann L, Kramer HM, Selbach HJ: Reference Air Kerma Rate Determination of an Iridium-192 Brachytherapy Source. Nucletron-Oldelft Report No.7, 1995.
7. Venselaa J.L.M., Giessen P.H.: Measurement and calculation of the dose at large distances from brachytherapy sources: Cs-137, Ir-192, and Co-60. Med. Phys. 22:537(1996)
8. Meisberger L.L., Keller R.J., Shalek R.J.: Effective Attenuation in Water of the Gamma Rays of Gold 198, Iridium 192, Cesium 137, Radium 226 and Cobalt 60. Radiology 93:953(1968)
9. Glasgow GP: Specific γ ray constant and exposure rate constant of ¹⁹²Ir. Med. Phys. 6(1),49-52, 1979
10. Berger MJ, Hubbell JH: National Bureau of Standards Report NBSIR-87
11. ICRU Report 38 : Dose and Volume Specification for Reporting Intracavitary Therapy in Gynecology. 1985
12. Johns H.E., Cunningham J.R.: *The Physics of Radiology*. 4th ed. Thomas, Springfield. IL, pp.462(1983)

Dose Computation Modeling for Frustum Typed Ir-192 of Ralstron Source

Tae Jin Choi, Ph.D.

*Medical Physics and Engineering, School of Medicine,
Keimyung University*

In dose modeling, the shape of actual source and sealed capsule are important parameter to determine the physical dose computation. The author investigated the effect of filter of source self-absorption and sealed capsule to designed the high dose rate Ir-192 source for Ralstron(Japan) unit.

The size of source designed to 1.5 mm Φ x 1.5mm length of actual source sealed with stainless steel which is 3.0mm Φ x 12.0mm length connected to driving cable.

The dose attenuation was derived 66.3 % from 2655 segmented source at reference point of 10mm lateral distance of source. The output dose rate factor in tissue for designed source showed 0.0013511 cGy/mCi-sec in reference point at 1cm lateral distance of source center.

The dose distribution at inferior of source showed the 52% of that of source tip region, however, the filtering effect was small as 4% at 45degrees of source axis.

The dose attenuation within 20 degrees of source axis at near source-cable connector showed large filtering effect as 40% over, but the small effect was revealed isotropic dose distribution at large angle.

Key words: Ir-192 source, dose model, output dose rate factor