

근접조사용 Ir-192 마이크로선원의 디자인과 선량 특성

계명대학교 의과대학 의공학교실*, 방사선중앙학교실†

최 태 진* · 김 진 희†

근접조사용 선원으로 직경이 0.5 mm에 길이 3.5 mm 인 Ir-192선원을 고안하고, 선량알고리즘을 개발하였다. 선원을 0.1 mm 두께로 균등분할하고 총 875개의 미소선원으로부터 조직에 도달되는 선량을 계산하고 선량분포를 조사하였다, 선원을 감싸는 캡슐용기의 두께는 0.3 mm이며, 선량기준점인 Ir선원의 Air-kerma strength(S_k)는 mCi당 4.108U를 얻었으며 선원 축방의 1 cm에서 1.154 U h^{-1} ($1.3167 \times 10^{-3} \text{ cGy/mCi-sec}$)의 조직선량을 얻었다. Air-kerma strength로부터 조직내 선량률상수(Λ)는 Ir-192에너지 스펙트럼과 실험치인 조직내 산란보정계수를 적용하여 $1.154 \text{ cGy h}^{-1} \text{ U}^{-1}$ 를 얻었다. 선량분포의 특성은 선원 축방향으로 56%의 상대선량률을 보였고, 케이블축의 선량감쇠는 50 %를 보였다. 마이크로선원의 중심에서 반경 1 cm 주위의 선량분포와 5 cm의 선량분포를 비교한 결과 반경이 큰 경우의 축방선량에 비해 축 방향의 선량이 약 2% 감쇠함을 보였다. 선원자체의 필터효과는 점선원에 비해 88.3 %의 선량률을 얻어 약 12%의 감쇠를 보였으며, 캡슐벽의 필터효과는 약 3% 정도로 미미하게 나타났으며 기준점에서 선량필터효과는 약 15.6% 감쇠되는 것으로 나타났다. Ir-192 선원과 같이 에너지가 낮은 선원을 사용하는 경우 선량분포특성에 따라 아프리카이터의 직경을 크게 하여 선원 축 방향의 선량저하를 피할 수 있음을 알 수 있었다.

중심단어 : Ir-192 마이크로선원, 조직선량률, 선량알고리즘

서 론

방사선에 의한 종양 치료는 종양의 조직특성에 따라 적용되는 선량에 의해 치료효과와 예후를 기대할 수 있으므로, 체외조사나 근접조사에는 $\pm 5\%$ 오차이내의 정확한 선량을 얻기 위한 노력이 요구되고 있다.^{1,2)}

특히 근접조사는 방사성선원을 종양조직에 삽입하여 조사하게 되므로 선원의 크기를 가능한한 작은 규모로 만드는 노력을 하고 있으며, 직경 0.9-1.1 mm에 길이 5.5 mm 이내의 크기로 상업화되고 있으나 모두 외국에서 제작되어 도입되고 있다.³⁾

근접조사장치의 국산화에서는 선원-케이블의 길이 결정과 입상에 사용할 선원도입 및 폐기를 용이하게 하기 위해서는 선원의 국내 개발이 필수적이며, 국내 “하나로 원자로”를 운영하는 관련 연구소에서 선원 개발이 활발히 전개되고 있어 소형 마이크로 선원의 국내개발이 완성단계에 이르렀다고 볼

수 있다.^{4,5)}

근접조사선원의 디자인은 필수적으로 선량분포와 선량평가 결정이 있어야 한다. 특히 근접조사치료의 적용범위는 선원의 유한크기가 작을수록 넓어진다. 선원의 크기를 극소화하면서 방사선피폭 방호를 효과적으로 할 수 있는 선원은 비방사능(Specific activity)이 높으며, 방사선에너지가 근접병소 부위에 충분한 선량이 도달될 수 있는 수백 keV에서 수 MeV 광자선이 많이 사용되고 있다.

최근 근접조사선원으로는 Ir-192 선원의 반감기가 73.8 일로 비방사능이 다른 근접조사선원에 비해 월등히 높고, 선원이 소형화 될 수 있으며, 평균 380 keV의 광자선을 방출하므로 방사선 방호가 용이하여 많이 사용되고 있으나, 복잡한 붕괴양상을 보이므로 광자선의 스펙트럼 분석에 따라 선량평가에 어려움이 따른다.⁶⁻⁸⁾

선원주위의 선량분포는 선원의 크기와 모양과 함께 선원을 둘러싼 밀봉용기의 두께에 의해서 차폐효과가 적용되어야 한다.

또한 근접조사선원의 선량은 선원의 에너지의 크기와 조직산란 및 선량강도의 평가 결정이 중요하다.

본 연구에서는 직경 1.1 mm 길이 5.5 mm 크기의 선원을 제작하기 위해 모형선원 모델을 제시하고, 선원의 유한두께와 용기를 통과한 필터효과를 적용하여 선원 입체모형에 따른 주위 선량을 평가하였다.

이 논문은 2003년 5월 14일 접수하여, 2003년 6월 2일 채택됨.
본 연구는 과학기술부의 원자력연구사업과제 지원으로 이루어졌음(2002년).

책임저자 : 최태진, (700-712) 대구시 중구 동산동 194
계명대학교 의과대학 의공학교실
Tel : 053)250-7666, Fax : 053)250-7667
E-mail : tjchoi@dsmc.or.kr

대상 및 방법

1. 선원 고안과 알고리즘

고선량을 방사성선원 Ir-192 선원을 크기와 모양이 동일한 모형선원(0.5 mm×3.5 mm)을 외경 1.1 mm 길이 5.5 mm 크기의 스테레스-철(SUS316L)에 봉입하고 1.0 mm의 스텐케이בל(길이 2.830 mm)을 레이저용접으로 연결되는 모형선원을 고안하였다(Fig. 1).

케이블와이어의 전단에 선원용기와 접합할 수 있도록 직경 1.1 mm ϕ ×1.45 mm 길이의 연결자에 케이블을 접합하고, 모형선원을 넣고 접합하였다.

모형선원주위의 선량은 Fig 2와 같이 원주의 단면 중심에서 반경을 0.05, 0.15, 0.25 mm로 정하고, 동일 용적의 미소 선원을 얻기 위해 가장 작은 원(내경 0.1 mm)의 용적과 둘째 분할 원(내경 0.3 mm)에서 45도씩 8개, 셋째 분할 원(내경 0.5 mm)을 22.5도씩 16개로 분할하였으며, 두께는 0.1 mm 씩 분할하여 두께당 25개의 분할선원을 정하였다.

선량률표는 선원축의 중심에서 측방으로 200 mm, 선원축과 평행한 격자를 상하 200 mm 까지 각각 1 mm 격자로 계산하였다.

비교적 낮은 에너지의 방사선을 방출하는 선원의 선량평가는 선원자체와 봉입 물질에 의한 차폐효과의 영향을 고려

하여야 하므로, 선원에서 조직내 계산 지점간 각 차폐체의 두께 결정이 중요한 역할을 한다.⁹⁾

차폐두께 결정은 Fig. 3의 순서도와 같이 분할선원의 중심에서 조직내 계산지점을 잇는 벡터와 차폐체의 경계에 만나는 교점을 계산하여 이루어 졌다.

차폐체의 경계는 벡터가 1) 선원 상부 원주면과 구면을 지나는 경우와 2) 선원 벽을 지나고 구면을 지나는 경우, 3) 선원벽과 캡슐벽을 지나는 경우, 4) 선원 하단 원주면과 캡슐 벽을 지나는 경우와 5) 선원 하부 단면과 캡슐 하부 단면을 지나는 경우의 경로를 정하여 결정하였다.

선량차폐효과는 선원재질(Iridium)과 캡슐재질(철)에 대한 스펙트럼의 에너지별 감쇄는 EGS4 코드에서 사용하는 질량 감쇠계수를 이용하여 구하였다.

2. 원추면의 교점

선원 앞 부분은 선원벽을 비교적 동일 두께가 되도록 하고, 선원용기의 흠을 구하는 드릴의 모형대로 남는 공기 층이 원추형을 이루며 반경 r_1 은 0.25 mm 이고, 공기층의 침 단위치 Y_e 는(0, 0.25, 0)이다. 선원 주위에 도달되는 방사선량을 정량적으로 평가하기 위해서는 분할선원과 임의의 평가점에 이르는 방사선 경로상에 있는 원추면의 교점을 구할 필요가 있다.

y축에 대한 원추면의 입체각 θ 을 이용해서 원추면의 중

Microsource Ir-192

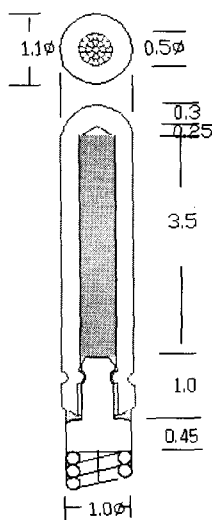


Fig. 1. Designed micro-source of Ir-192 for dummy source. The scale of Ir-192 source is 0.5 mm of diameter and 3.5 mm in length.

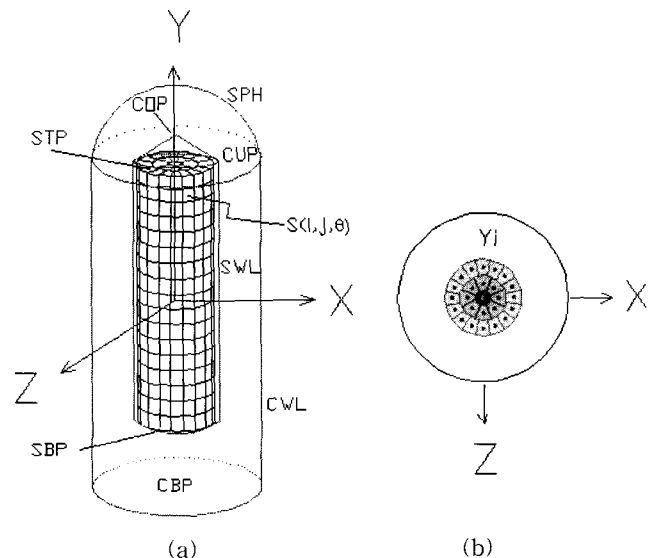


Fig. 2. Schematic drawings of the high activity Ir-192 source. The source was segmented to 875 in equivalent volume possible as a point source (a), the cross-section of source showed a segmented for equivalent volume and black mark represented the source center for a point source (b).

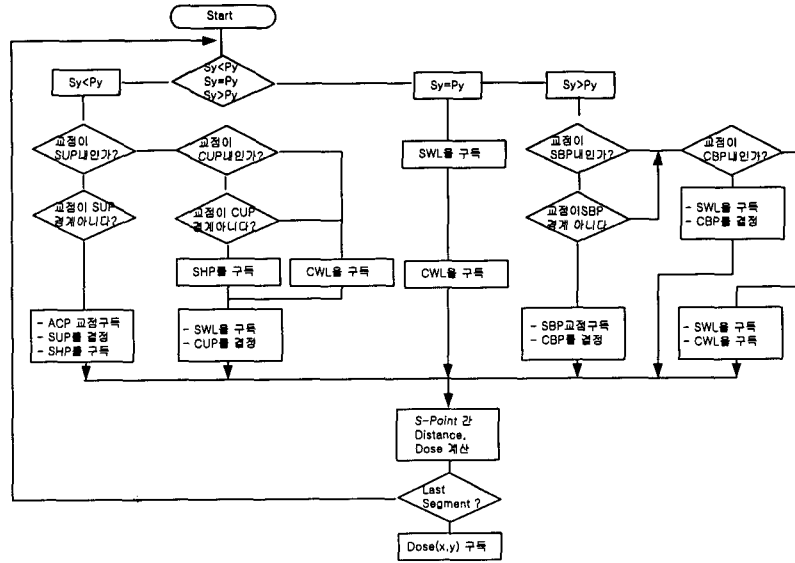


Fig. 3. Flow chart for determination of source and capsule thickness through the beam path in a given source model.

심(0, y_b, 0)에서 반경(γ₁)과 원추면상의 교점이 있는 y축에서 교점까지의 반경을 r 이라 한 경우 다음과 같이 표현하였다.¹⁰⁾

$$\frac{r_1}{(y_e - y_b)} = \tan \theta \dots\dots\dots (1a)$$

따라서 임의의 y 점에 대한 반경의 함수는

$$\frac{r}{(y_e - y)} = \tan \theta \dots\dots\dots (1b)$$

와 같이 둘 수 있다. 따라서

$$r = \frac{(y_e - y)r_1}{(y_e - y_b)} \dots\dots\dots (1c)$$

와 같이 원추면의 반경은 y축의 위치에 따른 함수로 주어짐을 알 수 있다.

기하학적 구도에 따라 r을 원의 방정식 $x^2 + z^2 = r^2$ 에 대입하고, x와 z에 대해 풀어 원추면의 반경을 나타내는 y의 위치를 결정함으로써 선분과 원추면의 교점 C(x,y,z)을 얻을 수 있다.

3. 구면의 교점

구의 중심을 좌표계의 원점에 두고 구면의 방정식을 간단히 했다. 선원 캡슐의 상단부에 있는 구의 반지름은 그림과 같이 0.55 mm 이고, 선원의 중심은 원점에서 1.75 mm 아래쪽에 두었다.

구의 중심(a,b,c)이 원점에 있고, 반지름이 r인 구면의 방정식은

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \dots\dots\dots (2)$$

와 같이 표시되며, 분할선원의 중심에서 조직내 평가점까지 직선을 유향직선으로 해 구면을 지나는 경우 직선의 매개변수를 사용하여 구면의 교점을 구하였다.

선원의 축을 y축과 평행하게 두고 구의 중심이 선원의 상단면에 있게 하고, 본문의 분할선원의 중심 S (S_x, S_y, S_z)과 임의의 평가점 P(P_x, P_y, 0)을 잇는 유향직선의 y성분과 비교해서 Sy < Py인 경우 구의 중심면에 있는 임의의 3점을 정해 평면방정식을 얻고, 유향직선과 구의 중심면과 교점을 구한다. 교점이 반경내에 있으면, 유향직선은 반드시 구면을 지나게 된다.

일반적으로 두 점 (x₁, y₁, z₁), (x₂, y₂, z₂)을 지나는 직선의 방정식은

$$x = t \cdot d_x + x_1, y = t \cdot d_y + y_1, z = t \cdot d_z + z_1 \dots\dots\dots (3)$$

와 같이 직선의 매개변수t를 써서 표현할 수 있다. 여기서 d_x = x₂ - x₁, d_y = y₂ - y₁, d_z = z₂ - z₁ 이다.

직선의 방정식을 구면의 방정식에 대입하고, 매개변수 t에 관한 2차 방정식을 둘 수 있다.

$$At^2 + Bt + C = 0 \dots\dots\dots (4)$$

여기서, 각 항의 계수는

$$A = d_x^2 + d_y^2 + d_z^2$$

$$B = 2(d_x(x_1 - x_o) + d_y(y_1 - y_o) + d_z(z_1 - z_o))$$

$$C = (x_1 - x_o)^2 + (y_1 - y_o)^2 + (z_1 - z_o)^2 - r^2$$

와 같이 된다. 따라서 매개변수 t에 대한 2차 방정식의 근을 구하고, 두 근 중에 큰 값이 구하는 해이다. 구면과 교점이 있을 조건은 2차식의 판별식 값이 0보다 커야 한다. 한편, 선원의 벽면과 캡슐용기의 벽을 원주면으로 한 교점은 원의 방정식과 매개변수를 같은 방법으로 구하여 얻는다.

4. 선원강도와 조직선량

선원 주위의 조직내 선량평가시 적용되는 조직산란계수는 “하나로 원자로”의 중성자조사를 해서 핵반응을 유도해 만든 강내조사용 Ir-192 선원을 이용한 실험치를 적용하였다.

코발트-60이나 세슘-137 및 Ir-192와 같이 밀봉된 근접조사선원의 강도를 나타내는 물리적 양과 단위는 라듐선원의 실제 등가질량(mgRa-eq)을 사용하기도 하며, I-125와 Au-198의 물리적양의 표현을 위해 겔보기방사능 또는 유효방사능이란 용어를 사용했으나, TG-32에서 근접조사 밀봉선원의 출력선량개념에 근거해 단일 선원강도를 나타내는 Air-kerma strength 를 채택해 권장하고 있다.

Air-kerma strength는 비밀봉 구형 점선원이 아닌 경우 엄밀한 의미에서 내부 선원의 강도인지, 필터를 투과한 표현인지 혼동을 줄 수 있고, 낮은 에너지의 방사선 선원에서는 자체흡수와 밀봉캡슐의 필터효과에 기인된 방사선입자의 방출분포가 등방성이 아닌 점을 들어 정확한 선량평가를 하기 위한 것이다.

방사선에너지가 낮고 원자번호가 높은 Ir-192 선원은 높은 원자번호(Z=77)로 선원자체의 필터효과가 크므로 선형 선원인 경우 선원강도 결정에 Air kerma strength S_k (cGy $cm^2 h^{-1}$)를 사용한다.

본 연구에서는 점선원의 Air kerma strength (S_k)와 선형 선원으로 필터에 둘러싸인 선원체에 의한 선량비등방성을 알 수 있도록 선형 선원의 중심에서 측방 1 cm의 조직선량을 기준으로 규격화된 선량률표를 작성하였다.

Air kerma 강도 S_k 는 공기중의 Air kerma rate (Kr)와 선원의 중심에서 떨어진 교정점의 거리를 제공하여 곱한 것으로 다음과 같이 정의한다.⁶⁾

$$S_k = K_r r^2 (\mu Gy m^2/h) \dots\dots\dots (5)$$

S_k 는 NCRP에서 발표한 밀봉선원의 조사선량률(exposure rate, Rx)과는 다음의 관계에 있다. 즉, 공기중 임의 지정거리-선원 축의 중심에서 측방 1 m 거리(do) - 의 조사선량률(exposure rate, Rx)을 기준 조사률로 하여 다음과 같이 구하며,

$$Rx = X_o d_o^2 \dots\dots\dots (6)$$

여기서 조사선량률 X_o 는 R/h 이므로 R_x 는 Rm^2/h 가 된다. 따라서 공기중 기준조사률과 S_k 는 다음의 관계에 있게 된다.⁸⁾ 즉,

$$S_k = Rx (W/e)=X_o d_o^2 (W/e) \dots\dots\dots (7)$$

건조 공기의 이온쌍 에너지(W/e)는 33.97 J/C을 적용하면 공기중 흡수선량은 0.876 cGy/R 이다.

선원에 대한 S_k 강도는 필터의 두께에 따라 선량감쇠가 변하므로, 선원을 미소균등분할하여 점선원으로 간주하고 각 점선원에서 평가점까지 필터두께를 얻어, 조사선량률로부터 공기중 에너지강도 S_k 를 구하였다.

원주형 대칭선원은 2차원적 선량분포를 이루므로, 극좌표계를 써서 선원 중심에서 각도 θ 로 r거리에 떨어진 점의 선량률 $D(r, \theta)/h$ 은

$$D(r, \theta)/h = S_k \cdot \Lambda \cdot G(r, \theta)/G(r_o, \theta_o) \cdot g(r) \cdot F(r, \theta) \dots\dots (8)$$

로 주어진다.

Λ 는 선량률 상수(Dose rate constant)를 의미하며 수조(Water phantom)내 1 U의 Air kerma strength 는 선원의 축에서 측방 1 cm 떨어진 거리에 도달되는 선량으로 정의하고 다음과 같이 구한다.

$$\Lambda = D(r_o, \theta_o)/S_k \dots\dots\dots (9)$$

Λ 는 선원의 기하학적 영향과 선원의 공간적 분포, 자체흡수와 밀봉캡슐의 필터효과와 수조내 산란효과가 포함된 상수이며, 식 9와 같이 수조 또는 조직내 흡수선량으로 환산하는 질량에너지흡수계수의 비가 포함되어 단위는 cGy h^{-1} 가 된다.

$G(r, \theta)$ 는 선원내 방사능의 공간분포함수으로써 선원내 방사능의 분포가 다른 경우, 방사능 공간분포에 의한 변화를 나타내는 계수로 다음과 같이 정의된다.

$$G(r, \theta) = \frac{\int_V [\rho(r') dV' / |r' - r|^2]}{\int_V \rho(r') dV'} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 $\rho(r')$ 은 선원 내부 한 점(x'y'z')에서 방사능밀도 크기를 나타내고, dV' 는 미소용적 성분으로 분할선원의 용적을 의미한다. 선원이 점선원인 경우 Geometry Factor 는 거리함수로 얻을 수 있음을 보여준다.

$g(r)$ 은 선원축의 중심 단면에서 조직내 거리(r)에 대한 방사형 선량함수를 의미하고, $F(r, \theta)$ 는 흡수 및 산란 영향에 의한 선량분포의 비등방성 함수를 의미한다.

필터에 쌓인 선형 근접조사선원이 구형 필터내에 있고 선원에서 거리 r, 방향 θ 위치에 있는 조직에 도달되는 선량 $D(r)$ 는

$$\dot{D}(r) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_k K_a K_t (\mu_{en}/\rho)_{air}^{med} T(r)/r^2 \dots\dots\dots (11)$$

과 같이 구한다.

여기서 K_a 는 선원자체흡수와 캡슐용기의 필터 두께에 의한 지수함수적 감쇠를 의미하며, K_t 는 반감기에 의한 강도감쇠를 의미하며, 공기에 대한 조직의 선량변환계수인 $(\mu_{en}/\rho)_{air}^{med}$ 는 방사선에너지에 의한 공기에 대한 매질(물)의 질량흡수계수의 비이다. Ir-192 선원은 다양한 핵붕괴를 보이므로, Glasgow가 제시한 에너지스펙트럼을 이용하여 다음과 같이 구하였다.¹¹⁻¹³⁾

$$(\mu_{en}/\rho)_{air}^{med} = \frac{\int_{\Delta E}^{E_{max}} (\mu_{en}/\rho)_{E, med} \Phi_E dE}{\int_{\Delta E}^{E_{max}} (\mu_{en}/\rho)_{E, air} \Phi_E dE} \dots\dots\dots (12)$$

연구자들은 Task Group-43의 선원강도 표현을 검토한 결과 선형 선원의 필터두께를 구하는 Sievertz 적분항이 선원의 축방향의 구형에는 적용되기 어렵고, Fig. 2와 같이 선원을 주입하기 위해 많은 원추형 흡은 선원 끝의 두께를 축방과 근사하게 만들 수 있는 공기층의 기하학적 계산에 적합하지도 않으므로, Fig. 2(b)와 같이 미소분할선원을 만들어 필터가 있는 점선원으로 간주하고 차폐체의 경계점을 정하고 식 11을 이용해서 선원주위의 조직선량률 $\dot{D}(X,Y)$ 을 구하였다.

결 과

본 실험에서 고안된 모형선원은 직경이 0.5 mm 이고 길이가 3.5 mm 인 Ir-192를 외경 1.1 mm 이며 길이 5.55 mm 의 스텐레스 강철(SUS316L)봉의 내부에 밀봉시켜 제작하였다(Fig. 4).

Fig. 1과 같은 규격의 모형선원(Dummy)은 1.0 mm의 스텐레스-스틸와이어를 연결하여 개발중인 원격제어근접조사 실험장치에 활용할 수 있게 고안하였다.

근접조사선원의 모형선원을 근거로 고안한 선원에 대한 선량특성을 제시하여 Ir-192 선원의 임상 응용에 유용한 정보를 얻을 수 있게 하였다.

모형선원의 선량특성은 기존 상업화된 선원의 선량 정보를 평가하는 데에도 기여할 수 있도록 임상에 통용되고 있는 마이크로선원과 호환할 수 있는 규격을 취했다.

마이크로선원 주위의 선량 비등방성과 선량분포특성을 얻기 위해 Fig. 2와 같이 길이 3.5 mm의 원주형 선원을 0.1 mm 두께의 디스크로 35 등분하고, 각 디스크를 25 등분하

여 중앙에 반경 0.05 mm, 둘째 분할궤도의 반경을 0.15 mm 로 45도씩 분할하고, 3번째 분할궤도는 0.25 mm에 22.5도씩 분할하여 부채꼴 면적을 만들고 선원중심은 부채꼴의 중앙 궤도상에 두어 등용적 등강도로 분할하였으며 총 875개의 미소점선원으로 고려해서 선량을 평가하였다.

TG-32에서 제시하는 식 8의 선량률은 실험에 의해서 구하거나 선원주위의 선량률이 제시되어야 구할 수 있으며, 본 연구에서 Ir-192 선원의 1 mCi 당 S_k 는 4.108U를 얻었으며, 조직내 선원 축방 1 cm에서 1.154 U h^{-1} (0.0013167 cGycm²/mCi-s)의 조직선량률을 얻었다.

조직산란보정계수 T(r)은 수조내 실험측정으로 부터 T(r)= $A_0 + A_1r + A_2 r^2 + A_3 r^3 + A_4r^4$ 의 다항식으로 구하였으며, Table 1과 같이 각 상수항은 $A_0=1.04424$, $A_1=0.00522$, $A_2=-0.00231$, $A_3=3.60534E-5$, $A_4= 5.77645E-7$ 과 같다.¹³⁾

조직내 선량률에 영향을 주는 필터두께는 선원모형과 밀봉캡슐을 통과하는 경로에 따라 Fig. 3의 순서도와 같이 경로상의 두께를 구하여 필터효과를 얻고 선량률은 Table 2와 같이 구하였다.

선량률표는 선원강도가 단위 U일때 선원축의 중심에서 축방으로 200 mm, 축방향으로 ± 200 mm 상대적 선량률을 얻었다. 이는 선원의 전단부가 구형인 부분과 케이블이 연결된 미부의 모양이 다르기 때문에 선원 중심에서 선원의 전단부 선량분포와 선원미부로 나누어 선량계획에 이용하도록 하였다.

Ir-192 알짜선원의 축에서 축방으로 1 cm 떨어진 거리에서 88.4%의 투과선량을 보여 선원자체의 차폐효과가 점선원에 비해 약 12% 감쇠되는 것을 알 수 있었으며, 캡슐 용기에 의한 차폐는 불과 2.5%의 감쇠를 보였으며(Table 3), 밀봉캡슐을 통과한 축방 1 cm 지점의 조직선량은 필터효과에 의해 0.862을 보여 약 16%의 선량감쇠를 보여주었으며, 선

Table 1. Polynomial regression for mathematical models accounting for tissue attenuation and multiple scattering in a medium surrounding an Ir-192 radioactive source

$T(r) = X_w/X_a = A_0 + A_1r + A_2r^2 + A_3r^3 + A_4r^4$
$A_0 = 1.04424$
$A_1 = 0.00522$
$A_2 = -0.00231$
$A_3 = 3.60534E-5$
$A_4 = 5.77645E-7$

where,
 X_w : Exposure in water, X_a : Exposure in air
 r : Distance in cm from source to point of calculation. A_0, A_1, A_2, A_3 and A_4 are zero, first, second, third and fourth order polynomial fitting coefficients.

Table 2. Normalized to 10 mm lateral distance from central source axis as 1.154 U h^{-1} ($0.0013167 \text{ cGy/mCi}\cdot\text{cm}\cdot\text{sec}$)

Y/X	0	5	10	20	30	40	50	70	100	150	200
200	0.00068	0.00076	0.00091	0.00106	0.00122	0.00122	0.00114	0.00106	0.00099	0.00076	0.00061
150	0.00160	0.00182	0.00213	0.00266	0.00273	0.00258	0.00243	0.00228	0.00182	0.00122	0.00076
100	0.00425	0.00532	0.00661	0.00745	0.00691	0.00653	0.00615	0.00509	0.00365	0.0019	0.00106
70	0.00950	0.01299	0.01626	0.01550	0.01443	0.01314	0.01155	0.00866	0.00539	0.00243	0.00122
50	0.01937	0.02955	0.03358	0.02993	0.02636	0.02218	0.01823	0.01208	0.00669	0.00281	0.00137
40	0.03092	0.05052	0.05113	0.04497	0.03715	0.02932	0.02287	0.01405	0.00729	0.00296	0.00137
30	0.05599	0.09641	0.08843	0.07202	0.05318	0.03844	0.02811	0.01603	0.00790	0.00304	0.00144
20	0.12953	0.21112	0.18423	0.12132	0.07551	0.04900	0.03343	0.01770	0.00836	0.00319	0.00144
10	0.56036	0.75264	0.48925	0.19973	0.09983	0.05827	0.03761	0.01892	0.00866	0.00319	0.00144
5	2.75234	1.98671	0.79898	0.23627	0.10849	0.06116	0.03882	0.01922	0.00874	0.00319	0.00144
0	-	3.8814	1.00000	0.25154	0.11137	0.06207	0.03920	0.01930	0.00874	0.00327	0.00144
-5	2.43957	1.95738	0.79473	0.23589	0.10811	0.06100	0.03882	0.01922	0.00870	0.00310	0.00144
-10	0.49692	0.70653	0.48158	0.19851	0.09945	0.05812	0.03761	0.01884	0.00860	0.00310	0.00144
-20	0.11487	0.16691	0.17344	0.11920	0.07483	0.04870	0.03335	0.01763	0.00830	0.00310	0.00144
-30	0.04968	0.06533	0.07741	0.06944	0.05227	0.03806	0.02788	0.01595	0.00790	0.00300	0.00144
-40	0.02743	0.0335	0.04087	0.04239	0.03609	0.02879	0.02256	0.01390	0.00730	0.00290	0.00137
-50	0.01725	0.02021	0.02423	0.02735	0.02530	0.02165	0.01793	0.01193	0.00660	0.00280	0.00137
-70	0.00843	0.0095	0.01079	0.01299	0.01329	0.01246	0.01124	0.00851	0.00530	0.00240	0.00122
-100	0.00380	0.0041	0.00448	0.00539	0.00593	0.00600	0.00577	0.00494	0.00350	0.00190	0.00107
-150	0.00137	0.00144	0.0016	0.00175	0.00198	0.00213	0.00213	0.00213	0.00170	0.00110	0.00076
-200	0.00061	0.00061	0.00068	0.00076	0.00084	0.00091	0.00091	0.00099	0.00090	0.00070	0.00062

원측 방향에서는 56%를 보여 급격한 선량감쇠의 주된 요인이 선원자체흡수율을 알 수 있으며, 선원주변의 주된 선량비

Table 3. The filter attenuation effect of source self-absorption and capsule thickness at a given reference point by small segmented source

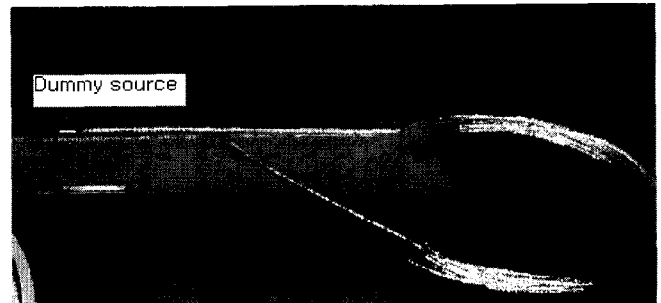
Reference Point		Filter attenuation effect		Self-absorption effect	
Y2'	X2 (mm)	Dose	Attenuation (cGy)	Dose (cGy)	Attenuation
0	10	0.001317	0.862	0.001349	0.884
10	0	0.000737	0.560	0.000762	0.564

등방성이 선원측 방향에 있음을 알 수 있었다(Fig. 5).

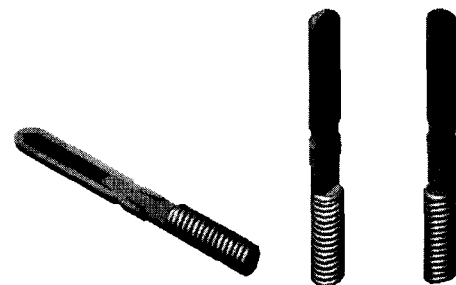
선원의 중심에서 각선량분포는 축을 중심으로 전단부의 $\pm 10^\circ$ 범위에서 큰 감쇠를 보였고, 선원미부의 $\pm 10^\circ$ 범위에서 측방선량의 50%, $\pm 20^\circ$ 에서 80%의 선량을 보였다.

또한, 마이크로선원의 중심에서 반경 1 cm 주위의 선량분포와 5 cm의 선량분포를 비교한 결과 반경이 큰 경우의 측방선량에 비해 축 방향의 선량이 약 2% 감쇠함을 보였다.

조직내 선량률상수 Λ 에 포함되는 식 9의 조직선량변환계수 $(\mu_{en/\rho})_{air}^{med}$ 는 Glasgow가 제시한 Ir-192의 에너지 스펙트럼을 이용해서 구한 결과 공기에 대한 조직의 선량변화계수 $(\mu_{en/\rho})_{air}^{med}$ 는 1.112가 되었다.



(a)



(b)

Fig. 4. Showed the fabricated dummy micro-source (a) and the 3-dimensional source cross-sections of Ir-192 source (b).

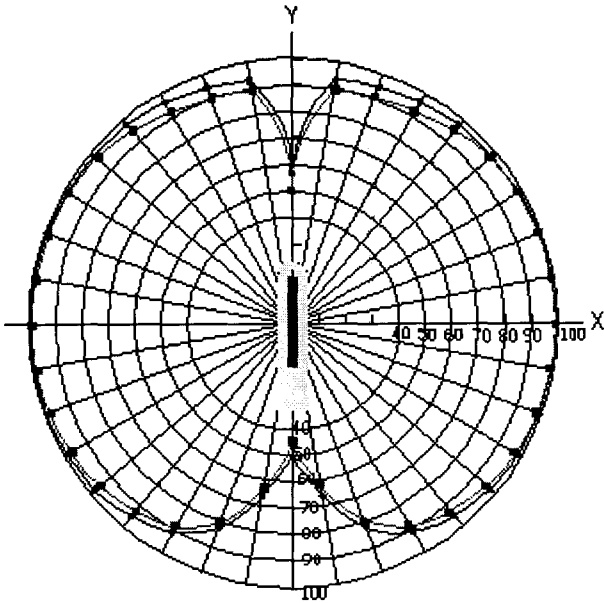


Fig. 5. Percent angular dose distributions show the function of $F(r, \theta)$ for single source of Ir-192. The black (marked x) line represents the $F(r, \theta)$ of 10 mm distance from source center and inner (marked square) line for that of 50 mm distance.

고 찰

고선량률 근점조사선원을 개발하기 위하여 직경 0.5 mm 이하의 Ir-192 마이크로선원을 디자인하고, 선원주위의 선량 분포를 조사하였다.

선원고안시 안정성과 선량균등성에 착안하여 선원후부의 연결부위에 0.1 mm의 홈을 만든 다음 케이블연결자에 레이저 용접으로 연결하였으며, 선원용기벽의 두께를 일정하게 유지하도록 용기내부에 직경 0.5 mm 높이 0.25 mm의 원추형 공간을 두었고, 선량평가는 원주형 선원을 875개의 동일 용적의 미소선원으로 분할한 점선원으로 이루어졌다.

선량강도는 TG-32에서 채택한 Air-kerma strength (S_k)의 정의에 근거하여 선원강도를 평가하였다. Ir-192는 비방사능이 높은 반면에 평균에너지가 380 keV로 비교적 낮은 광자선을 방출하므로, 선원주위의 선량률은 자체흡수와 캡슐용기의 재질과 두께 및 크기에 많은 영향을 받는다.

Nath⁶⁾에 의하면 Ir-192에 대한 조사선량률이 3.9에서 5.0 $Rcm^2/mCi-h$ 를 보인 것은 선원제작사별 다른 선원 강도를 적용한 까닭이라고 밝힌바 있다.

TG-32에서는 이러한 선량률의 오차를 줄이기 위하여 새로운 선량계산법을 내어놓았으며, 새로운 개념의 정량적 평가로 알려져 있다. 즉, 감마선 상수, 출력선량률상수, 조직감

쇠계수, 결보기방사능, 조직선량변환계수 등이 새 개념의 알고리즘에서는 사용되지 않고, 수조내에서 측정예 근거를 둔 선량비등방성 계수와 측방 방사선량계수를 적용하고 있어 혼돈을 유발하지만, 조직내에 도달되는 선량강도에 조직선량변환계수가 포함되어 있음을 알 수 있었다.⁸⁾

Williams에 의하면, 공기 커어마 강도의 단위인 1U는 공기중에서 1 $cGycm^2/h$ 로 $S_k = Rx (W/e)$ 로부터 얻을 수 있음을 밝힌바 있다.⁸⁾

저자들은 Ir-192 선원의 선원자체에 대한 흡수가 높아 선원강도를 평가할 때 알짜선원을 측정하여도-엄밀한 의미에서 근점조사선원이 점선원이 아니므로-정확한 강도를 얻기가 쉽지 않음을 알 수 있었다.

저자들은 선원 측방 1 cm의 위치를 기준점으로 도달되는 조직선량률의 감쇠를 역으로 점선원의 강도를 구하여 기준점의 조직선량률과 상대적 선량비등방성을 구하였다.⁴⁾

근점조사선원의 선량률표는 선량계획전산화에 이용할 수 있게 하였으며, 선원주위의 각선량분포를 얻으므로 Ir-192 선원을 이용한 임상치료시 선원측방향의 선량이 적음을 생각한다면, 선원 길이를 현저히 줄이거나 또는 구형선원을 이루어야 함을 암시하나, 임상적으로는 아프리케이터의 직경을 3-4 mm 굵기를 사용해서 측 방향의 저하된 선량분포를 상쇄하는 방법도 좋은 방법으로 생각된다.

근점조사치료용 아프리케이터의 크기에 따라 선원을 중심으로 200×200 mm의 범위의 선량률표를 제시하여 큰 치료 영역에서도 적용될 수 있게 하였다.

선량평가에 영향을 주는 자체흡수와 캡슐용기의 두께에 대한 감쇠를 분해해서 비록 직경이 0.5 mm의 선원이라 해도 자체흡수가 많고, 선량강도는 선원축에서 지정거리에서 측정된 공기 커-마로 표현하는 것이 강도에 대한 불확실성을 최소화 할 수 있다고 주장하는 TG-32의 근거를 알 수 있었다.

결 론

근점조사용 마이크로선원을 디자인하고 모형선원에 대한 기하학적 캡슐용기와 분할 선원에 대한 필터효과를 조사한 결과 선원축의 측방 선량기준점에서 선원자체의 흡수로 88.4%의 투과선량을 보였으며, 캡슐 두께를 포함한 투과는 86.2%를 보였다.

선량비등방성을 나타내는 $F(r, \theta)$ 는 선원축과 $\pm 10^\circ$ 범위에서 심한 선량감쇠를 보였으며, 전단부에서는 56%를 보이고 미부에서 50%를 나타내므로, 본 연구와 유사한 마이크로선원의 사용에서는 선원 축 방향의 좁은 입체각 내에서 선량

측정을 통한 평가와 치료선량결정에 유의할 필요가 있음을 보여주고 있다.

본 연구의 Ir-192 선원에 대한 Air-kerma strength 는 1 mCi 당 4.108 U를 얻었다. 선원 주위의 선량분포를 구하기 위해 사용되는 조직내 선량률표는 선원 측방 1 cm를 선량기준점으로 하였으며, 단위 mCi 선원에서 1.154 U h^{-1} ($0.0013167 \text{ cGycm}^2/\text{mCi-s}$)의 조직선량률을 얻었다.

참 고 문 헌

1. Utley JF, Essen CF: High-Dose Rate Afterloading Brachytherapy in Carcinoma of the Uterine Cervix. *Int J Radiation Onco Biol Phys* 10:2259-2263 (1984)
2. ICRU Report 38: Dose and Volume Specification for Reporting Intracavitary Therapy in Gynecology. International Commission in Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD (1985)
3. Nucletron Oldelft Activity Report No. 7: Reference Air Kerma Rate Determination of an Iridium-192 Brachytherapy Source. 43 (1995)
4. 최태진, 원철호, 김옥배, 김시운, 등: 원격강내조사용 Co-60 선원의 대체용 Ir-192 선원의 조사선량결정 및 선량등방성조사. *의학물리* 9(1):55-64 (1998)
5. 한현수, 조영갑, 조운갑, 박울재, 최태진: 의료용 ^{192}Ir -192 강내 조사선원 개발. *동위원소회보* 15(2):27-42 (2000)
6. Nath R, Anderson LL, Luxton G: Task Group No.43: Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: Recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee. Task Group No. 43. *Med Phys* 22:209-233 (1995)
7. Buermann L, Kramer HM, Selbach HJ: Reference Air Kerma Rate Determination of an Iridium-192 Brachytherapy Source. *Nucletron-Oldelft Report No.7* (1995)
8. Williamson JF, Nath R: Clinical implementation of AAPM Task Group 32 recommendations on brachytherapy source strength specification. *Med Phys* 18: 439-448 (1991)
9. 김옥배, 최태진, 김진희, 등: Ralstron 선원대체형 Iridium-192 선원의 선량모델링과 응용. *의학물리* 11(2): 131-139 (2000)
10. 최태진: Ralstron 선원대체형 Ir-192 원추선원의 선량 전산화 모델링. *의학물리* 12(1):19-29 (2001)
11. Johns HE, Cunningham JR: *The Physics of Radiology*. 4th ed. Thomas Springfield. IL (1983), pp.462-465
12. Glasgow GP: Specific γ -ray constant and exposure rate constant of ^{192}Ir . *Med Phys* 6:49-52 (1979)
13. 최태진, 이호준, 김옥배: 코발트-60 선원 대체용 고선량률 Ir-192 선원의 조직선량특성. *의학물리* 9(4):259-265 (1998)

The Dose Characteristics of Designed Ir-192 Micro-source for Brachytherapy

Tae-Jin Choi, Ph.D.^{*}, Jin-Hee Kim, M.D.[†]

^{}Department of Medical Physics Engineering, [†]Department of Radiation Oncology
School of Medicine, Keimyung University, Daegu, Korea*

The dose distributions of designed Ir-192 micro-source were investigated by dose computations which were accomplished by employing shape of capsule material and thickness of the source for self-absorption. The computation dose derived from air-kerma rate (S_k) and dose rate constant (Λ) includes the anisotropy of dose distribution around the source. We got the dose rate constants in a water medium is $1.154 \text{ cGy h}^{-1}\text{U}^{-1}$. The size of the source was 0.5 mm in diameter and 3.5 mm in length and it was encapsulated in 1.1 mm ϕ \times 5.5 mm of stainless steel sealed with 0.3 mm of filter thickness. The tissue dose of reference point at 1.0 cm radial distance of the source axis was delivered 1.154 U h^{-1} ($1.3167 \times 10^{-3} \text{ cGy/mCi-sec}$) from the S_k 4.108U/mCi of Ir-192 source.

The filtration effect contributed to air-kerma strength as exponential filtering effect of 86.2% in total attenuation, but self-absorption was 88.4% from radial dose distributions. In particular, the dose attenuations showed a rapid anisotropic distributions as 56% of reference dose along to ± 10 degrees from the tip of source axis and 50% for of that to source-cable direction. We persist in use the large diameter of applicator will avoid the dose anisotropy by the filtered attenuation effects along the axis of Ir-192 micro-source.

Key Words : Ir-192 micro-source, Tissue dose rate, Dose algorithm