

고선량을 원격강내조사의 코발트-60 이동선원에 의한 선량특성

최 태진, 김 옥배

계명대학교 의과대학 치료방사선과학교실

노홍균

영남대학교 이과대학 물리학과

서 론

체의조사에 이용되어온 코발트-60 선원에 대해서는 출력안정성과 선량분포등에 대한 특성들이 잘 알려져 있으나 원격강내조사에 이용되고 있는 고선량을 코발트-60 소선원에 대해서는 그 선량특성이 비교적 잘 알려져 있지 않으며, 특히 병소의 모양이나 크기에 따라 코발트-60 소선원을 주기적으로 이동 시켜 선원의 크기를 결정하는 원격강내조사장치에 선량특성은 발표된 바 적다.

선선원(line source)인 경우 선원축방향에 도달되는 선량은 선원 자체의 흡수에 의한 감약을 배제할 수 없게 되는데 비해서 소선원을 아프리케이터내에서 주기적으로 이동시켜 선원크기를 결정하는 장치에서는 선원의 이동축방향의 감약이 없으며 아프리케이터내부의 공기층에 의해 선량증가가 예상되어진다.

본 저자는 본원 치료방사선과에서 사용중인 Buchler 3K(Buchler, Germany)원격강내조사 장치의 이동선원으로 이용되고 있는 코발트-60 소선원의 일정주기에 따라 발생하는 선량 분포특성을 고에너지 감마선에서 비교적 신뢰성이 높고 연속적인 선량분포를 알 수 있는 필름계측을 하였으며¹⁾, 선원이동에 따라 스텐레스 스틸 재질의 아프리케이터 벽두께 및 공기층의 두께 변화에 따른 선원 주위의 선량을 평가하고 실측과 비교분석하여 강내조사에 이용되는 이동선원에 대한 선량특성을 발표하고자 한다.

방 법

Biculer 3K장치에서 이동선원의 크기는 Basic unit 내 회전 디스크(일명 Program-Disk라 함)의 반경에 따라 결정되어지며, 반경이 일정한 디스크에서는 고정선원을 나타내며, Fig.1과 같이 회전위치에 따라 반경이 변하는 디스크에서는 최소반경과 최대반경의 차이에 비례하여 선원이 주기적으로 이동하게 되어 임의의 선원크기를 나타내게 된다.²⁾ 본 실험에서는 회전 주기가 분당 6회전이었으며, 강내조사에 많이 이용되는 0, 3.5, 5.0 및 6.0cm의 이동선원을 택하여 선량특성을 조사하였다.

실험에 사용된 코발트-60소선원의 크기는 직경 1mm이며 길이는 1mm 점선원으로 계산될 수 있으며 Fig.2와 같이 선원은 직경 4mm의 스텐레스 스틸로 싸여 있고 선원 용기의 길이는 7 mm이며 끝은 스텐레스 스틸 줄로써 선원이동용 모터에서 나온 케이블과 연결되는 부분을 나타낸다. 이 선원은 두께 0.5mm 스텐레스 아프리케이터내에 삽입하여 지정된 길이만큼 주기적으로 이동하게 되어있다.

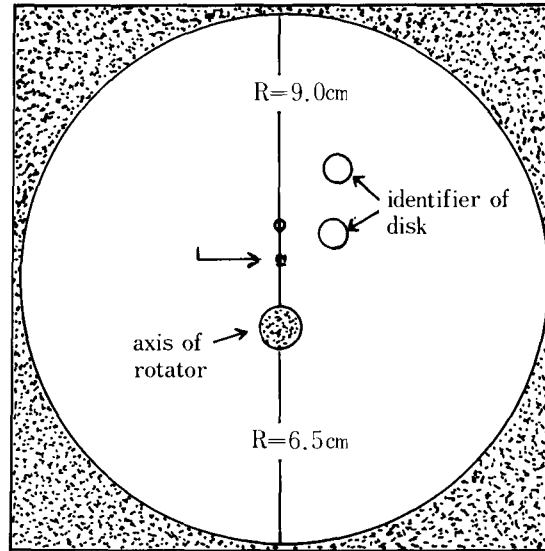


Fig.1. Representation of a program-disc for source oscillations; 5cm.

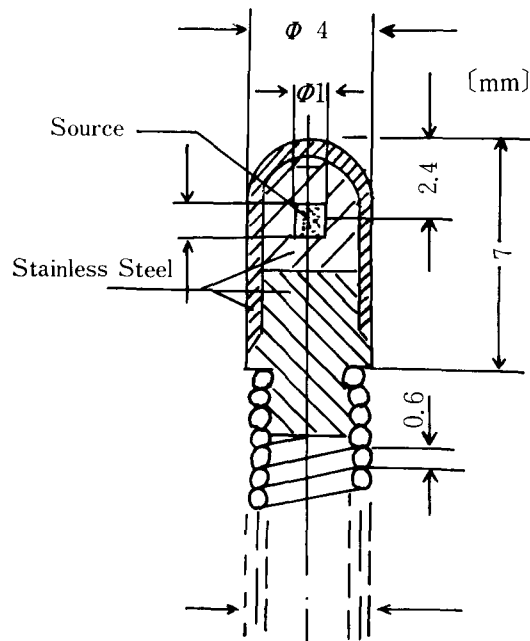


Fig.2. Diagram of encapsulated Amersham-Buchler Afterloading Co-60 Source.

선량계측은 Kodak X-omat V 필름이 이용되었으며, 코발트-60 감마선에 대한 선량특성을 조사하기 위하여 출력선량이 80cm에서 1분간 100 cGy인 원격체의조사장치의 코발트-60 선원으로 3.5, 10, 30, 50, 100, 200, 300, 400 cGy를 각 필름에 조사하여 농도에 따른 선량변화를 조사하였다.³⁾

이동선원에 의한 선량분포를 측정하기위한 필름과 선원간의 기하학적 관계는 Fig.3과 같이 아프리케이터를 폴리스탈린 펜툼의 홈에 삽입하고 선원이 아프리케이터의 중앙에 놓이게 하여, 선원이동 중심과 필름이 평행을 이루게 함으로 선량평가시 기하학적 보정을 줄이고 아프리케이터 끝부분의 선량을 알 수 있게 하였다.

필름의 농도는 암실하에서 방사능강도 0.983 Ci(36.4 GBq)인 코발트-60감마선을 1분간 조사하여 얻어졌다.

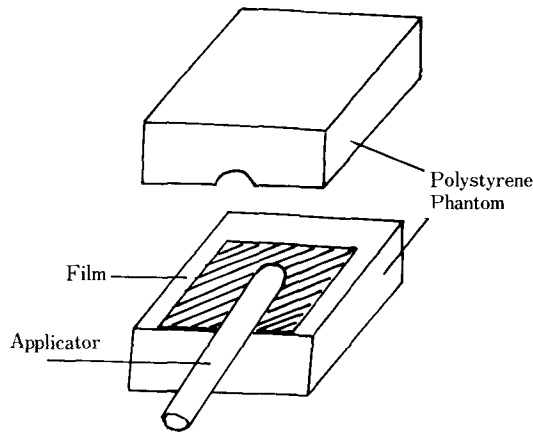


Fig.3. Experimental Serup for Irradiating Film Arround Co-60 Source Including Cylindrical Applicator in the Polystyrene Phantom.

필름선량측정은 현상, 정착온도를 각각 22°C를 일정하게 유지하고 현상시간 2.0분, 정착시간 5.0분, 세척시간 20분으로 수작업을 통해서 이루어졌다. 필름의 농도는 광구경 1mmφ인 WP-102자동농도계(Wellhofer, Germany)로 측정되었으며, 주사간격은 선원이동의 중심에서 중형 각각 5mm간격으로 주사하여 등농도곡선을 취한 다음 선량값으로 환산하였다.

즉 각 지점의 농도는 표준감도곡선에 따라 다음과 같이 선량을(D(gy))로 환산하였다.

$$D(x, y, x) = \rho(x, y, z) F(\rho(x, y, z)) \tag{1}$$

$$\rho(x, y, z) = (M(x, y, z) / M_0(x, y, z)) * \rho_0(X_0, Y_0, Z_0)$$

$$K(x, y) = \int_{\infty}^{\infty} \exp(-\mu(t_1 + t_2)) \sec(\phi) d\phi \tag{2}$$

여기서 M_0 는 임의의 기준점 농도(ρ_0)를 규정한 값이며, M 은 각 측정점의 농도(ρ)를 기준점농도에 대한 백분율로 주어진 계기치이다. 그리고 $F(\rho)$ 는 감도곡선으로부터 선량값으로 환산하는 변환함수이다.

한편 필름에 도달하는 방사선의 입사방향에 따라 농도가 다르게 나타날 수 있으므로 전자평형이 충분히 이를 수 있는 직경의 3cm 폴리스탈린 펜툼의 중앙에 3×3cm 크기의 필름을 삽입하여 SAD법으로 필름의 수직방향(0도)에서 수평방향(90도)까지 15도 간격으로 조사하여

중심부의 농도를 측정하였다.⁴⁾

이론적 배경

직경 1mm와 길이 1mm인 코발트-60선원은 점선원으로 볼 수 있으나 선원을 감싸고 있는 용기의 크기나 모양은 입사방향에 따라 여과벽의 두께가 변하므로 선량분포에 영향을 줄 수 있다.

선원과 용기의 모양이 Fig.4와 같은 경우 선원축의 측방향을 지나 점 $p(x,y,z)$ 에 도달되는 방사선은 선원용기와 스테인레스 스틸로된 아프리케이터의 벽을 통과하게 되므로 각 여과벽에 의한 흡수감약이 예상된다.

선원이 이동하게 되면 선원중심과 계산점간의 방위각이 변하게 되므로 비록 점선원일지라도 주위용기의 두께는 입사각에 따라 달라지게 된다.

선원이 y 축을 따라 dy 만큼 이동할 때 용기벽의 두께(t_1)와 측방 아프리케이터 벽의 두께(t_2)에 대한 선량감쇄(K)는 Sivert적분에 따라

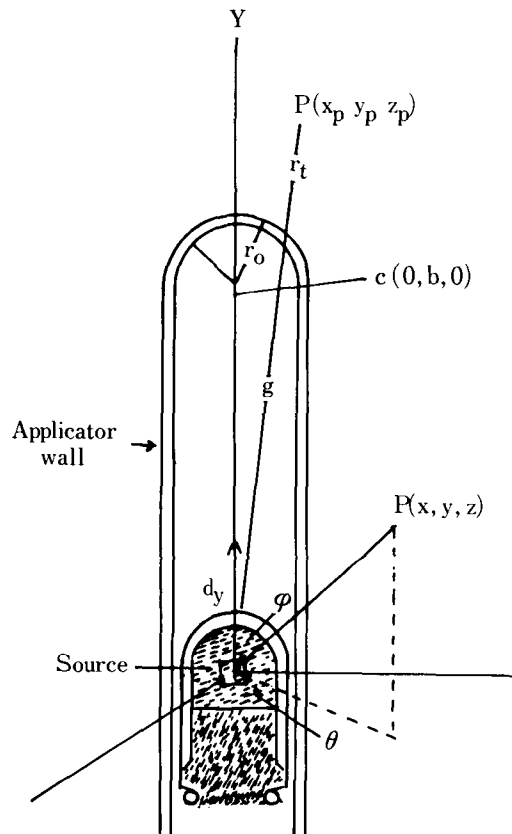


Fig.4. Geometry of encapsulated Amersham-Buchler Afterloading Source, Co-60 Source(0.983 Ci, 36.4 GBq), and 0.5 mm Thickness of Stainless Steel Cylindrical Applicator.

$$K(x,y) = \int \phi_2 \phi_1 \exp(-\mu(t_1 + t_2) \sec(\phi)) d\phi \quad (2)$$

로 주어진다.

여기서 μ 는 코발트-60 감마선에 대한 철의 선흡수계수를 의미하며, ϕ_1 , ϕ_2 는 각각 선원 출발점과 이동끝점에서 는 선원이동방향인 y축과 선원-측정지점간 거리 벡터의각이다. 상기의 이동선원에 의한 점p(x,y)의 선량은 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$D(x,y) = \sum (A \Gamma t_j // r_j^2) S_j(r_j) K_j \quad (3)$$

여기서 A는 선원의 방사능강도(Ci), Γ 는 방사성선원의 감마상수(R/cm²-hr), r_j 는 선원의 중심에서 조직내 한 점 까지의 거리(cm), S_j 는 조직두께(r_j)에 의한 산란교정계수로 공기중 선량에 대한 조직선량의 비로 Meisberger상수를 나타내며, t_j 는 선원이 d_j 만큼 이동하는 시간(t)동안 방출하는 선량으로 선원의 이동속도가 V일때 $t_j = d_j/V$ (Sec)가 된다.

한편 선원의 중심으로부터 아프리케이터 단을 지나는 방사선은 선원의 이동에 따라 아프리케이터 내 공기층의 두께 변화를 가져오고 선원과 계산지점간의 조직두께(r_j)는 r_j 보다 줄어들게 되며, 아프리케이터의 두께는 아프리케이터단의 내구면과 외구면을 지나는 방사선의 입사점과 출사점을 결정함으로써 결정될 수 있다.

아프리케이터 단의 내구면반경을 r_i 이며 구면중심이 C(O, b,O)이고 선원의 위치가 S(x,y,x)이며 계산지점이 P(xp, yp, zp)일 때, SP선분과 구면과 만나는 점의 거리(g)는 원주좌표계와 직각좌표계를 써서 구면방정식에 따라 다음과 같이 구하였다.

먼저 S와 P위치에서 y축과 이루는 각 ϕ 와 z축과의 각 θ 를 결정하고 SP선분과 구면과의 교점g(x,y,z)를 정함으로써 이동선원의 중심으로부터 아프리케이터 단의 내벽까지의 거리를 결정할 수 있었다.

즉 SP선분이 아프리케이터 단의 벽을 지날 조건은 방위각과 구면의 반경으로 부터 결정되어진다고 볼 수 있다. 각 ϕ 와 θ 를 알고 있으므로 교점 g의 직각좌표는 원주좌표계로 부터 변환하면

$$\begin{aligned} x &= g \sin(\phi) \sin(\theta) \\ y &= g \cos(\phi) \\ z &= g \sin(\phi) \cos(\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

으로 주어진다.

구면방정식과 5식의 결합으로 부터 미지의 g값은 다음과 같이 정해진다. 즉

$$g = 2b \cos(\phi) \pm \text{SQR}((2b \cos(\phi))^2 - 4(b^2 - r_i^2))/2 \quad (5)$$

이 되며 ϕ 의 범위는 $0 < \phi < 90$ 이다.

또한 아프리케이터 단의 외벽도 같은 방법으로 결정될 수 있으므로, 선원과 아프리케이터내의 내벽간의 거리와 외부의 조직두께가 결정될 수 있다.

결 과

필름선량계에서 현상액과 정착액의 농도유지와 온도유지가 매우 중요할 것으로 생각되어

가능한 한 새 현상액을 사용하였으며 현상액등은 항온항습기가 설치된 치료실에 장시간 보관되어 섭씨 22도를 항상 유지되도록 하였다. 이 때 필름의 배경농도(background density)는 0.01을 보였다.

사용된 Xomat V 필름의 코발트-60 감마선에 대한 표준감도곡선은 40cGy범위에서 초적선성(suprlinearity)을 보여 최소자승법을 이용하여 다음과 같은 3차 다항식을 얻었다. 즉

$$F(\rho) = a + b\rho + c\rho^2 + d\rho^3 \quad (7)$$

이며, 여기서 ρ 는 농도를 나타내며, WP 102 자동농도계의 최대 측정 농도는 4.0이며 400 CGy에서 과농도를 보였다. a, b, c 및 d는 상수항으로 각각 $a=0.060$, $b=0.429567$, $c=-0.08219$ 와 $d=0.04827$ 이며, 이 다항식에 의한 선량 불확실도는 ± 0.003 Gy였다.

농도측정 검출기의 위치오차는 평균 0.01mm의 미소한 계기오차를 보였으므로 무시하였다. 필름의 입사각에 따라 필름의 수직입사나 수평입사에서 동일한 선량에 대해 나타난 농도는 거의 변화가 없었으므로, 코발트-60소선원에 의해 필름에 수평입사된 농도보정은 필요치 않았다.

Fig.5a는 선원이 고정되었을 때, 그리고 5b는 선원이 주기적으로 5cm 이동할 때의 주위 선량을 나타낸 것이며, 선량은 등농도곡선으로 부터 식1을 이용하여 환산된 선량값을 보인다.

등선량분포곡선에서 고정선원일 때는 비교적 등선량곡선이 동심원을 나타내는 반면에 선원의 이동이 클수록 타원형을 이루며 특히 선선원에서 볼 수 없는 축방향의 선량이 증가하고 있음을 알 수 있었다.

Fig.6은 선원이동의 크기에 따라 이동의 중심에서 축방향으로 떨어진위치의 실측된 선량과 계산된 선량을 나타낸 것으로 매우 잘 일치되고 있음을 알 수 있었으며, Fig.7은 이동선원의 크기가 6.0cm인 경우 축방선량분포와 이동축 방향의 선량을 나타내었다. 선원이동폭이 커질

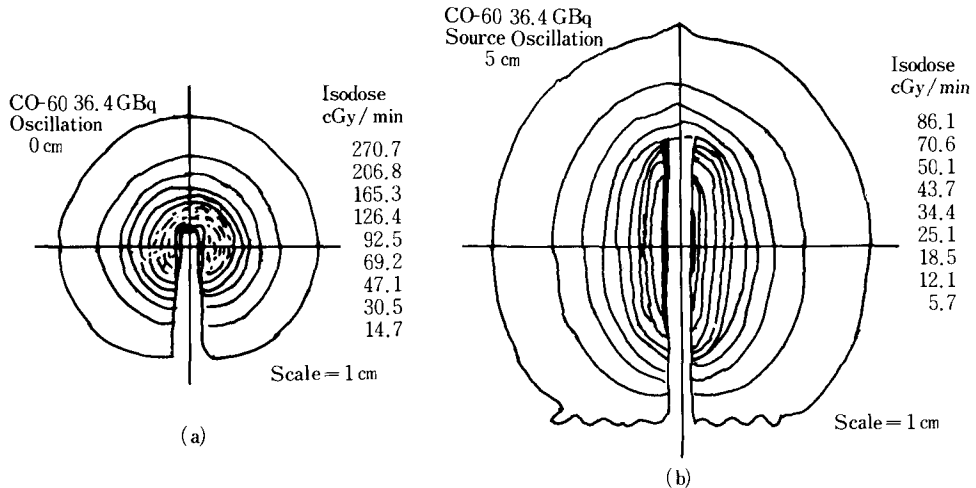


Fig.5. Isodose around Co-60 Source 0.983 Ci(36.4 GBq). Dose distributions around a Cobalt-60 Source and 0.5mm Stainless Steel Applicator. The length of Source Oscillation is (a) 0cm and (b) 5.0 cm.

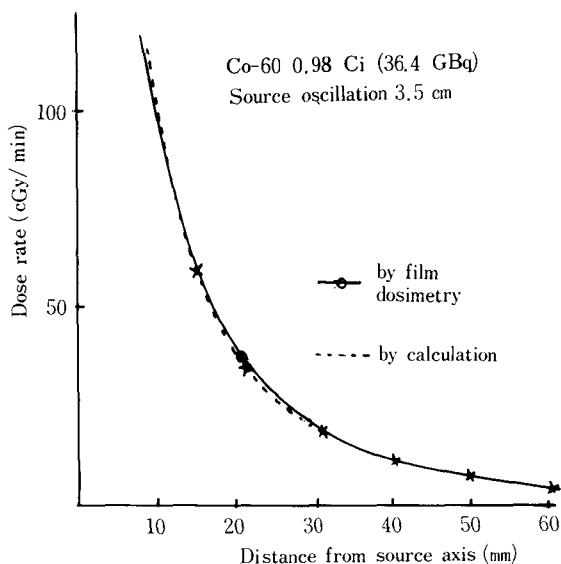


Fig.6. Comparison of dose rate around a Co-60 0.983 Ci with film dosimetry (—○—) and fully corrected calculations (---x---)

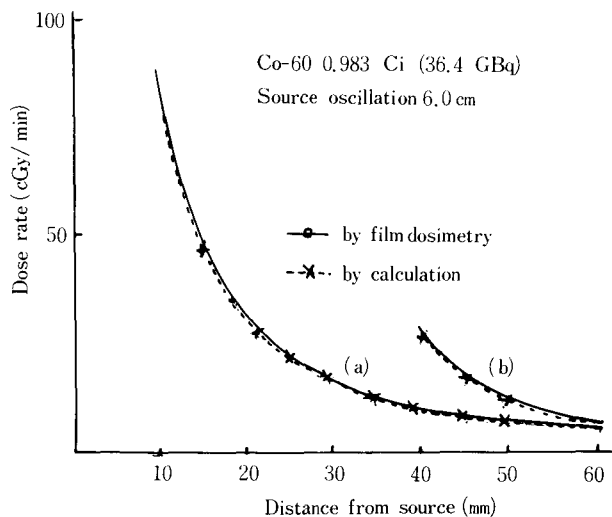


Fig.7. Dose rate as a function of distance from source. (a) transverse and (b) axial distance from source oscillation 6.0 cm.

수록 분포는 타원형이 됨을 알 수 있으며 이동축방향의 선량이 더욱 커짐을 보였다. 특히 선원이동축 방향의 실측값과 계산값이 5% 범위내에서 잘 일치함을 알 수 있었고 동일한 거리의 측방 선량보다 크게 나타났다. 선원이동 3.5cm의 경우 선원이동중심에서 각 5cm 지점의 선량 비교결과 측방방향의 선량은 이동축의 수직방향에 비해 약 20.5% 증가, 선원이동 5cm에서는 51.4%, 선원이동 6cm의 경우에는 약 83.3%가 더 증가함을 보여 주었다.

고 찰

본 실험에서는 아프리케이터내 선원을 넣어 선량특성을 직접 측정하므로써 고선량을 원격강내조사장치의 코발트-60소선원에 대한 선량분포를 얻고자 하였다.

필름선량계측에서 오차의 요인이 될 수 있는 현상조건은 필름흑화에 비교적 큰 영향을 미치므로 자동현상기의 사용을 피하고 조건을 제어 하기 쉬운 자동현상을 실시한 결과 배경흑화도는 0.02까지 투명한 필름을 얻게 되었으며, 흑화도에 따른 선량변환은 코발트-60 감마선에 의한 표준선량농도곡선을 작성이용하였다. 표준선량농도곡선상 감마선 40cGy까지는 비교적 선형을 이루었으나 선량이 클 수록 직선비례상은 나타나지 않고 지수적으로 증가하는 경향을 보였다. 이것은 조사되는 양이 대개 수 cGy에서 수 백 cGy조사되는 실험에서는 흑화에 따른 선량평가에 보정이 반드시 필요함을 의미한다.

한편 코발트-60감마선의 동일한 조사선량에 대해 X-omat V필름면의 수직방향과 수평방향의 입사에 대해 나타나는 흑화도를 측정된 결과 선량보정을 요하는 변화를 나타내지 않았다. 이것은 고에너지 감마선에서는 필름에 도포된 은입자에 의한 흡수감쇄의 변화가 조직에 비해 큰 차이가 없는 것으로 생각된다.⁵⁾

필름농도계는 필름의 최대농도에 대해 규격화된 각지점의 농도백분율을 나타내고 있어 식 1에 따라 실제농도값을 구하여 선량으로 환산하였다.

Buchler 3K 고선량을 원격강내조사장치에서는 1mm ϕ ×1mm 코발트-60선원을 주기적으로 이동하여 고정선원의 크기와 동일한 효과를 얻게된다. 이 때 선원이동거리는 회전원반의 최소반경과 최대반경 크기의 차이에 비례하여 결정되며 프로그램-원반의 회전주기는 분당 6회전이였다. 특히 일정한 회전주기에 따라 선원은 지정된 거리(선원이동크기)를 6회 왕복하게 되므로 이동속도는 이동크기가 클 수록 커지고, 미소이동(dy)간 움직이는 시간은 상대적으로 작아진다.

선원용기의 필터와 0.5mm 스텐레스 아프리케이터벽의 두께가 식 2로 주어졌으며, 선원이동에 따라 축의 상하방을 지날 선로(ray path)에 대한 선원필터의 두께도 동일한 방법으로 정해졌다.

특히 선원이동에 따라 유도되는 아프리케이터내 공기층의 두께는 구면방정식과 식 (5)으로부터 정해질 수 있었다.

선원필터와 아프리케이터벽의 재질은 동일하였으며 코발트-60 감마선에 대한 선흡수계수는 0.4239 cm⁻¹이 적용되었다.^{6, 7)}

조직내 소선원주위의 선량계산에는 공기중선량율에 대한 조직내 선량율의 비로부터 구한 Meisbrger상수를 이용하였으며, Meisberger 실험상수 적용에 의하면 선원으로 부터 거리가 멀어짐에 따라 오차가 커지며 실측선량에 비해 작게 평가되고 있으며,^{8, 9)}

Meisberg에 대한 유효감쇄계수 적용은 근접거리에서 비교적 실험과 잘 일치되나 거리가 크게됨에 따라 오차가 큰 것으로 알려지고 있다.

본 실험에서는 선원측방 5cm거리에서 약 6%의 실측치와 차이를 보이고 있으나 유효감쇄계수에 의한 것인지 실험오차인지 규명하기는 이 자료만으로는 불충분하다고 생각된다. 그러나 소선원치료에서 거리가 멀어지면 출력선량이 매우 저하되므로 임상적용에 무리가 없을 것으로 본다.

이에 저자는 고정선원, 3.5cm, 5.0cm과 6.0cm선원 이동에 대한 주위의 선량분포를 필름선량계의

실측치와 계산된 선량값을 비교한 결과 고정선원에서 평균 $-2.1 \pm 1.9\%$, 3.5cm에서 $-2.9 \pm 1.8\%$, 5.0cm에서 $-7.4 \pm 6.1\%$ 그리고 6.0cm에서는 $-6.7 \pm 4.6\%$ 의 차이를 보였으나 이는 실험오차 및 농도계의 계기오차에 기인하는 것으로 생각되며 특히 이동중심에서 4cm까지는 매우 근사한 값을 보인 바, 거리가 멀어질 수록 절대선량은 상대적으로 매우 적으므로 적은 선량차이에도 상대오차는 크게 나타나는 것으로 생각된다.

이동선원에 대한 선량분포는 선원의 위치에 따라 아프리케이터내 공간이 발생하게 되어, 선원 이동축방향에 선량증가를 예상할 수 있었으며, 실측치와 계산값에서 모두 증가함을 알 수 있었다.

조직내 소선원아프리카이터의 선원축방향의 선량평가는 임상에서 중요한 의미를 갖게 되므로 실측에 의한 평가를 통해서 오차를 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

결 론

최근 고선량을 원격강내조사 장치의 선원크기 결정은 대개 수 mm 정도의 소형 선원을 이동하여 결정되는 경우가 많이 있다. 이와 같이 소선원을 이동하는 경우 종래부터 강내조사에 쓰이고 있는 선원원의 선량분포와는 달리 이동축방향의 선량은 아프리케이터내 공기층의 두께에 의해 축방향의 선량보다 증가하는 경향이 있다.

Buchler 3K원격강내조사장치 코발트-60 선원을 각각 0, 3.5, 5.0 및 6.0cm 이동하여 선원이동에 따른 선량분포특성이 필름계측으로 실측되었다. Xomat-V 필름의 코발트-60 감마선에 대한 농도-선량특성은 40cGy 범위에서 조직선성을 나타내었으며 이 특성은 필름농도를 선량율로 환산하는데 적용되었다.

실측된 선량은 선원용기벽, 아프리케이터 벽 및 공기층의 각 두께와 Meisberger 상수를 이용한 계산값과 비교한 결과 계산값이 고정선원과 3.5cm 이동선원에서는 각각 평균 $-2.1 \pm 1.9\%$, $-2.9 \pm 1.8\%$ 낮았으며, 5.0, 6.0cm 이동선원에서는 각각 $-7.4 \pm 6.1\%$ 및 $-6.7 \pm 4.6\%$ 낮은 값을 보였으나 선원중심에서 4cm 이내에서는 매우 근사한 값을 나타내었다. 그러나 5cm 이상 떨어진 지점의 선량은 절대선량값이 작음으로 적은 선량차이도 큰 오차로 나타나게 되므로 임상적용에 무리가 없을 것으로 생각된다.

선원이동축방향의 선량평가는 임상에서 중요한 의미를 갖게 되는 바, 본 실험에서 선원원의 선량특성과는 달리 선량증가를 알 수 있었다.

특히 선원의 이동폭이 클 수록 뚜렷한 증가를 보였으며, 선원이동이 3.5cm, 5.0cm 및 6.0cm 일 때 축방향의 선량에 비해 각각 약 20.5%, 51.4% 및 83.3% 증가를 보였으며, 이 것은 선원이동에 따라 동선량곡선이 전체적으로 타원형을 이루게 되는 것과 아프리케이터내 공기층두께가 증가에 따른 효과가 중복되어 나타나는 것으로 임상적용에는 필히 고려되어야 될 것으로 본다.

References

- FM Khan, The Physics of Radiation Therapy, Williams & Wilkins, Baltimore, 1984, 372.
 Buchler Manual, Basis for the programming of isodose-distributions for afterloading Buchler (unpublished), 1983.
 HE Johns, the Physics of Radiology, Charles Thoms, Springfield, 1983, 597-585.

- FH Attix, Radiation Dosimetry 2nd, Academic, New York, 1966, 330-357.
- FM Khan, The Physics of Radiation Therapy, Williams & Wilkins, Baltimore, 1984, 154-155.
- Radiological Health Handbook, Rockville, Maryland, 1970, 138
- JH Hubbel, Photon Cross sections, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients from 10 KeV to 100 GeV, NBS 29, 1969, 1-13.
- LL Meisberger, RJ Keller, RJ Shalek, The Effective Attenuation in Water of the Gamma Rays of Gold 198, Iridium 192, Cesium 137, Radium 226 and Cobalt 60, Radiology, 90, 953-957, 1968.
- S Jayarama and LH Lanzl, An overview of errors in line source dosimetry for gamma-ray brachytherapy, AAPM, 10(6), 871-875, 1983.

Dose Characteristics by the Co-60 Source Oscillations in High Dose Rate After Loading Irradiations

T.J. Choi, M. S., O. B. Kim, M. D.

Department of Therapeutic Radiology, College Keimyung University, College of Medicine

H. K. Roh, M. S.

Department of physics, College of Science, Yeungnam University

Abstract.

Dose distributions around Co-60 moving source in high dose rate remote afterloading unit, Buchler 3K unit, were experimented with X-omat V films and calculations. In our experiments, film dosimetries have achieved to evaluate the axial dose distributions for source oscillations were 0, 3.5, 5.0 and 6.0 cm in periodically. In results, the dose distributions in axial of source movement showed apparently higher than in transverse direction caused by source locations, dwelling time and air gap in the applicator. In the calculations, the dose rate was derived by using the inverse square law, filtration corrections and Meisberger constant for scatter corrections as source movings. In our experiments and calculations, the average dose uncertainties were showed $-2.1 \pm 1.9\%$ in fixed source, $-2.9 \pm 1.8\%$, $-7.4 \pm 6.1\%$ and $-6.7 \pm 4.6\%$ at 3.5 cm, 5.0 cm and 6.0 cm source oscillations, but the calculations have showed very close to experimental dose rate within 4 cm distance from source.

Key Words : Film dosimetry, Source oscillation