

고선량을 강내조사선원을 이용한 근접조사선량계획전산화 개발

계명대학교 의과대학 의공학교실*, 치료방사선과학교실†, 경북대학교병원 치료방사선과‡, 한국원자력연구소 동위원소실§

최태진* · 예지원† · 김진희† · 김옥배† · 이호준‡ · 한현수§

목적: 고선량의 Ir-192 선원을 이용한 근접조사의 모의촬영 영상을 개인컴퓨터(PC)에 입력하여 해부학적 영상에 선량분포를 구현하고 히스토그램, 선량-용적히스토그램 및 3차원 선량분포를 전산화하였다.

대상 및 방법: 선량전산화에 이용된 선원은 원격근접조사장치(Buchler 3K, 독일)의 Co-60 대체선원으로 한국원자력연구소와 공동으로 개발한 Ir-192이다. 선원 모양에 의존하는 선량분포의 비등방성은 선원을 미소 분할하여 구한 선량과 선원 중심에서 측방 기준점의 공중선량을 기준으로 규격화한 값을 이용하였다. 선원 주위의 조직선량은 선원 중심에서 측방으로 실측된 조직감쇠와 산란에 의한 보정계수와 에너지에 따른 공기 저지능에 대한 조직의 저지능 비로 공중-조직선량 변환계수를 적용하고 기준점에 대해 규격화한 선량률표를 검색하여 얻도록 하였다. 선량계획 전산화 과정에 모의촬영 영상입력, 선원입력과 선원의 측면 결정과 해부학적 영상을 이용한 선량분포와 점선량, 히스토그램 및 선량-용적 히스토그램을 구현하였다.

결과: 저자들이 개발한 근접조사 선량계획시스템에는 선원모의촬영 영상을 스캔하여 비트맵 파일로 저장하고, 좌표원점과 확대율을 정해, 선원위치를 결정하고 선량분포와 선량분석 프로그램을 포함한 선량전산화를 구현하였다. 실험에 이용된 Ir-192 선원의 조직내 선량은 공중선량율과 조직에 의한 감쇠 및 산란에 의한 실험식을 이용하였다. 선원 중심에서 축상의 거리와 축에서 떨어진 거리에 따른 선량률표에서 행렬 검색하여 얻도록 하였다. 근접조사선량계획은 선원좌표 입력과 선원의 측면(principal plane)을 결정하여 선원이 포함된 평면상의 선량을 구현하였으며, 시뮬레이션 영상인 관상면과 시상면에 선량분포를 구현하였다. 선량-히스토그램에 의한 선량분포 분석은 임의의 해부학적 영상면 위에 커서가 놓인 위치의 선량 스킷치로 얻었다. 임상에 필요한 선량분석은 선원의 축에서 면의 깊이를 이동하여 선량분포를 구할 수 있게 하였으며, 선량-용적 히스토그램과 3차원 선량분포를 구현하였다.

결론: 고선량 Ir-192를 이용하여 근접조사선량계획을 전산화하였으며, 선량분포의 분석에는 해부학적 영상의 선량분포와 선량-히스토그램, 선량-용적히스토그램을 구현하였으며, 선량분포의 면을 임의 선택할 수 있고 3차원 선량분포를 포함한 선량계획시스템을 준비하였다.

핵심용어: 근접조사 선량계획, Ir-192 선원, 3D선량분포, 선량-용적 히스토그램

서 론

튜브형 방사성 선원을 강내에 삽입하거나 침형 선원을 종양에 자입하여 계획된 선량을 주는 근접조사 선량은 선원으로부터 떨어진 거리의 제곱에 반비례하여 급격히 감소되므로, 종양에 다량의 선량을 주는 한편, 주위 정상장기에는 적은 량의 방사선이 도달되므로 치료계획 목적에 잘 부합되는 치료를 시행할 수 있다.

최근 고선량률 근접조사 선원으로 많이 이용되는 Ir-192 선원은 반감기가 74일로 코발트-60이나 세슘-137의 반감기에 비해 월등히 짧은 반면, 비방사능이 높아서 선원크기가 직경 0.9~2.5 mm와 길이 5~10 mm 이내의 크기로 370 GBq (10 Ci)의 높은 강도를 얻을 수 있는 장점이 있다.¹⁾

Ir-192 선원은 저선량률 강내조사선원으로 사용되는 세슘-137이나 고선량률 Co-60 감마선원에 비해 에너지 스펙트럼이 복잡하여 지금까지 알려진 바로는 119개의 스펙트럼 피크를 갖는 것으로 알려져 있다.²⁾

Ir-192 선원의 평균에너지는 0.38 MeV로, 에너지가 낮은 선원은 선원캡슐의 재질과 크기 및 모양에 따라 선원 주위의 선량 필터 효과가 크게 나타나므로 선량분포 결정에 주의를 요한다.³⁾

저자는 국내에 도입된 고선량률 선원 가운데, 코발트-60 선원의 공급이 부진하여 대체형 선원의 공급 없이는 임상진료

This work supported by the Ministry of Science and Technology in 2000.

이 논문은 2001년 9월 28일 접수하여 2002년 8월 12일 채택되었음.

책임저자: 최태진, 계명대학교 의과대학 의공학교실
Tel: 053)250-7666, Fax: 053)250-7667
E-mail: tjchoi@dsmc.or.kr

에 어려움을 줄 수 있어, 강내조사용 선원을 한국원자력연구소와 공동으로 선원을 개발하여 선량특성을 발표한 바 있다.³⁾

고선량을 강내조사선원을 이용한 선량계획전산화에는 선원 에너지스펙트럼을 이용한 단위방사능에 대한 선량률과 선량등방성과 조직선량환산계수 결정 등 선량 모델이 뒷받침되어야 입장에서 안전하게 사용할 수 있게 된다.

고선량을 선원을 원격 제어하여 근접조사를 시행하는 선량치료계획에는 선원의 종류와 크기 및 이송 방식에 적합한 선량전산화가 필요하다.

본 연구에서는 국내에서 개발된 강내조사선원인 Ir-192의 선량모델을 이용하여 선원의 모양에 따라 임의의 선량평가점에 도달되는 경로를 추산하고 선량률을 결정하여 조직에 도달되는 선량을 전산화하여 입상에 이용할 수 있게 하였으며 선량분석이 용이하도록 스캔한 골반 영상 위에 선원좌도와 선량계획이 이루어지고 선량분석이 가능한 선량-용적 히스토그램을 개발하여 발표한다.

대상 및 방법

1. 선량계획의 하드웨어

최근 개인용 컴퓨터PC는 속도와 안정성이 높고 저장능력이 높아서 단일 목적의 전산화프로그램인 경우 임상 업무에 활용도가 충분하다고 생각되어 환부의 영상을 이용한 선량계획에 이용되었다.

저자는 PC (Pentium-III, 866 MHz)와 스캐너 Epson-9600 (일본)에 비주얼C++6.0 언어(마이크로소프트사, 미국)를 사용하여 선원종류와 모양특성에 따른 규격화된 선량비를 생성하고, 선원입력을 위한 영상스캔과 조직선량계산, 2D선량분포와 와이어프레임의 3D 선량분포, 선량-용적 히스토그램과 선량을 스케치한 곡선과 입상에 필요한 점선량을 얻을 수 있게 전산화하였다.

실험에 이용된 선원은 Buchler 3K (독일) 장비에 사용하는 Co-60 선원을 대체하기 위해 원자력연구소(Korea Atomic Energy Research Institute)의 “하나로” 원자로를 이용해 조사된 Ir-192선원으로 직경 2.5 mm에 높이 0.25 mm인 디스크형 선원시료를 원자로의 중성자에 조사하여 10개를 쌓아 2.5 mm 높이로 원주형이 되도록 하였으며, 외경이 4 mm이고 길이가 5 mm인 스텐레스-스틸(SUS316) 캡슐에 봉입되어 있으며, 선원 전단은 반구형이다.³⁾

Ir-192 선원의 강도는 약 370 GBq (10 Ci)이며, 실험에 이용된 방사능은 경과일시에 따른 붕괴를 적용 보정하였다.

2. 선량률 결정

Ir-192 선원의 조사선량상수는 Glasgow가 제시한 에너지스펙트럼을 이용하였으며, 미소분할한 선원은 에너지별 선원필터효과를 적용하였으며, Cutoff 에너지 10 keV이다.

조직내 선원에서 평가점에 도달하는 선량은 단위방사능량에서 방출되는 선량상수(Γ_{δ})_z와 겹보기방사능A_{app}, 선원의 자체흡수와 캡슐의 입체모양에 따른 필터효과 및 조직산란계수를 고려한 보정항 T(γ)과 거리(r)의 함수로 다음과 같이 얻는다.⁴⁾ 즉 선원의 중심에서 거리(r)에 도달되는 선량률 D(r)은

$$D(\gamma) = A_{app} \times (\Gamma_{\delta})_z \times F_{med} \times (1/\gamma^2) \times T(\gamma) \times \Phi_{an} \quad (1)$$

이 된다. 여기서 겹보기방사능A_{app}은 실측선량을 근거로 결정되며, 에너지가 낮아 선원자체 및 캡슐 필터에 의해 감쇠효과가 많이 나타나는 선원에서는 알짜선원의 방사능강도와 겹보기 방사능의 강도에 차이가 커진다.⁴⁾

조사 선량률상수(Γ_{δ})_z는 Ge 검출기로 측정된 Ir-192의 스펙트럼과 흡수체의 질량에너지계수로 구한다.²⁾

F_{med}는 조사선량을 흡수선량으로 변환하는 변환계수이며, 조직산란보정계수T(γ)은 거리에 따른 실험선량을 다항식으로 최적화한 계수이다. Φ_{an} 은 실험선원의 모양에 의한 선량비등방성함수를 의미한다.

식 1의 F_{med}는 조사선량의 정의와 전리상수 및 질량에너지 흡수계수로 구하며, 연속선에 대해서는 이론적으로 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$F_{med} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg-R(W/e)} \int_{E_0}^{E_m} \Phi(E) \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{E}^{water} \frac{1}{E_{air}} dE \quad (2)$$

여기서 $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{E}^{water}$ 는 공기에 대한 에너지E에 대한 물의 질량에너지흡수계수의 비이며, $\Phi(E)$ 는 미소에너지 구간의 입자수로 스펙트럼에서 구한다. 한편 공기 중 전리에너지 상수(W/e)는 33.97 J/C를 적용하였다.⁵⁾

Ir-192 선원에 의한 조직투과 및 산란선에 대한 조직선량 보정계수T(r)는 35×35×35 cm³의 아크릴(두께 6 mm) 물팬텀을 이용하여 실험식을 구하였다. 실험은 선원과 전리함(IC-10, WELLHOFER, 독일)의 위치를 일정하게 유지할 수 있게 한 후, 측정범위를 선원에서 20 cm 까지 정하고, 검출기를 1 cm 씩 이동하면서 공기 중 전리량과 물에서 전리량을 번갈아 측정된 값을 최적화하여 다항식계수를 구하였다.

공기 중 선량(D_{air})은 전리용적 0.14 mL이고 선량등방방성이 우수한 IC-10 전리함과 Farmer 전위계를 이용하여 구하였

다.

공기 중 선량률은 산란선을 줄이기 위해 선원을 Couch에서 20 cm 떨어진 공중에 지지체위의 플라스틱 튜브에 넣고 선원에서 20 cm 떨어진 좌우측에서 동시에 측정하여 선량률을 정하였으며(Fig. 1), 공기 중 선량과 겔보기방사능간에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$D_{air}(r) = A_{app}(\Gamma_{\delta})_z \quad (3)$$

캡슐 속의 알짜선원은 겔보기방사능에서 미소분할 선원의 필터효과에 의한 감쇠율과 조사선량상수를 알면 공기 중 조사선량으로부터 구할 수 있다.

특히 알짜선원은 캡슐과 선원형태가 점선원이나 구형선원이 아닌 경우 선원주위의 선량률 계산에서 필터효과를 구하는 데 중요한 변수가 된다.⁶⁾

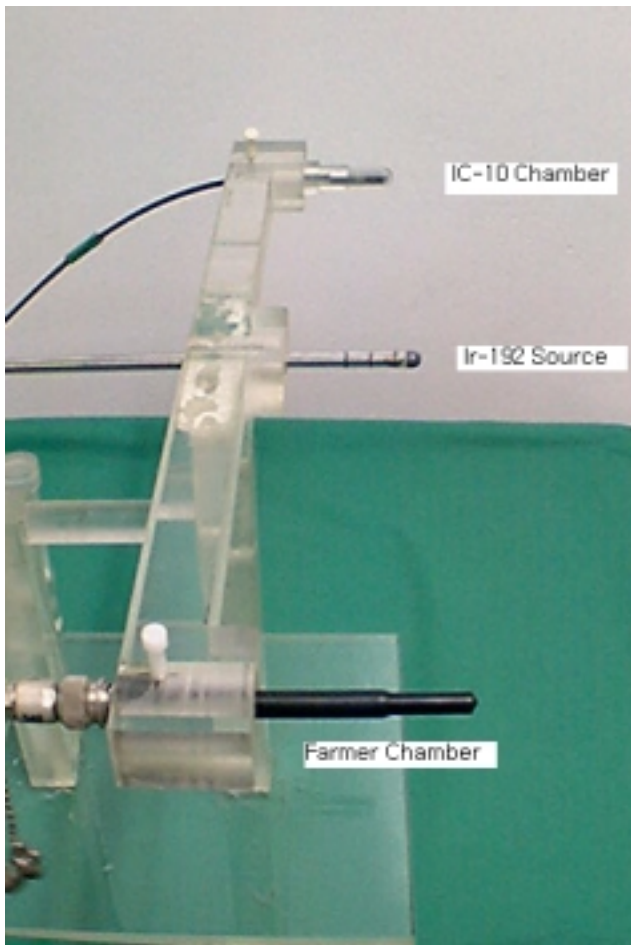


Fig. 1. Shows the lucite acrylic jig for mounting the IC-10 ion chamber, Farmer PR-06 ion chamber and Ir-192 source.

3. 선량과 행렬

근접조사선량계획의 구성은 선량률 규격표 생성, 인적자료 등록 및 저장, 선원입력, 입체선량계산, 선량분석 및 선량분포 출력으로 Fig. 2의 흐름도와 같다.

선원 주위의 선량은 단위 방사능(mCi)과 단위시간(sec) 당 방출되는 선량률을 선원의 중심에서 선원 축방향의 세로거리S(L)와 선원축에서 떨어진 방사상 거리(radial distance, S(r))의 함수로 나타낸 선량률표를 이용하였으며, 선량률표는 선원자체흡수와 캡슐필터에 의한 선량감쇠효과를 적용하여 보정되었다.

임의의 조직에 도달되는 선량은 입력된 i번째 선원의 중심에서 선원 축으로부터 수직 방사상 거리S(r)와 선원중심에서 축상의 세로길이S(L)로 표에서 검색하도록 하였다.

선원에서 평가점까지 방사상 거리와 축상의 거리가 필요하므로 벡터화 하였다. 즉 선원중심에서 선원 첨단까지를 벡터A로 표시하고, 선원중심에서 평가점P(x,y,z)까지를 벡터P로 표시하면, 두 벡터의 스칼라곱과 벡터와 벡터의 사잇각을 구하고, 선원축상의 투영점을 구함으로써 선원축에서 방사상 거리S(r)와 선원중심-투영점간 거리인 세로길이S(L)를 구할 수 있다. 즉 선원축의 첨단(Tx,Ty,Tz)으로 하고, 선원의 중심(Sx, Sy, Sz)이라 두면, 두 벡터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{A} &= (T_x - S_x)_i + (T_y - S_y)_j + (T_z - S_z)_k \\ \vec{P} &= (P_x - S_x)_i + (P_y - S_y)_j + (P_z - S_z)_k \end{aligned} \quad (4)$$

벡터 표기에서 Tx, Ty, Tz는 선원의 앞첨단 위치이고, Sx, Sy, Sz는 선원의 중심 좌표이다. 사잇각 $\cos \theta = (\vec{A} \cdot \vec{P}) / (|\vec{A}| |\vec{P}|)$ 를 구하고 투영한 점을 G라 하면, $G = |\vec{P}| \cos \theta$ 와 같다.

여기서 |A|와 |P|는 각 벡터의 크기이다. |A| 상의 투영 G점의 좌표는 벡터크기의 비를 구하고 좌표성분벡터를 곱하여 정한다.

선원입력은 환부의 아프리케이션을 전후투사(Anterior-Posterior Projection)와, 좌우투사(Lateral projection)로 직각 투사한 두 영상의 선원좌표를 차례로 입력하므로, AP영상의 선원 전단의 X, Y 위치와 측방영상에서 동일 선원의 전단을 나타내는 Y, Z의 위치를 얻고, 선원 하단의 X, Y 위치와 Y, Z의 위치를 동일한 방법으로 얻는다.

입력된 선원 배열이 평면상에 놓이도록 Z축을 중심으로 선원을 회전하여 선원의 주된 배열이 평면상의 Y축에 일치하도록 Z축과 X축을 차례로 회전한다. 회전된 선원은 평면에 절편되는 선원만큼 화면에 나타나도록 Fig. 5에 삽입그림으로 표시하였다.

본 실험에서 조직 내 선량은 선원필터감쇠, 캡슐용기벽의

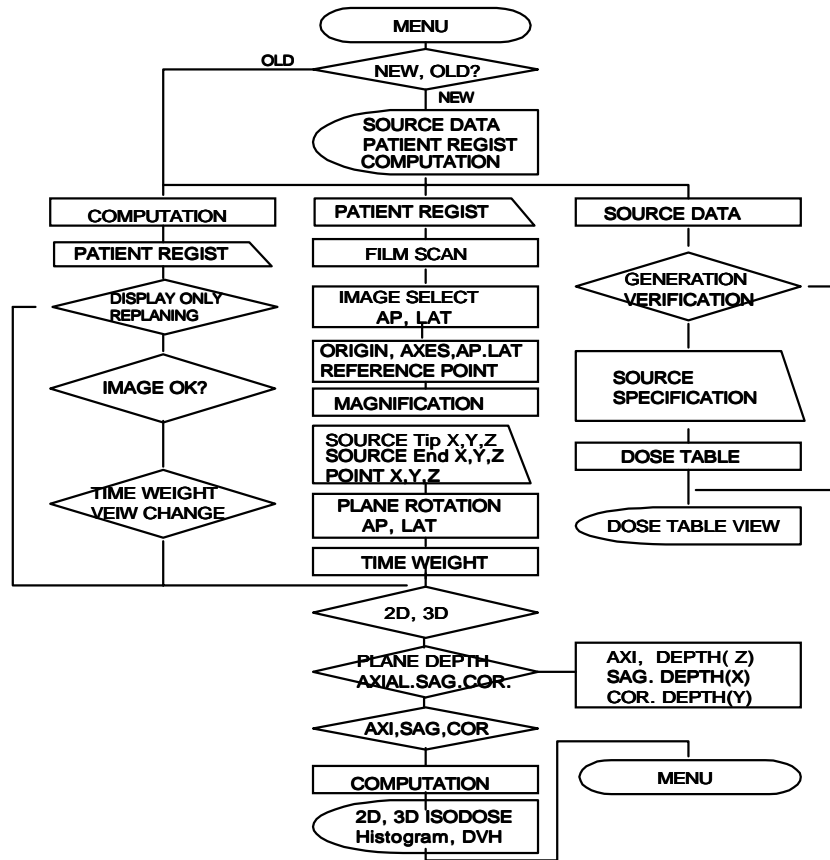


Fig. 2. Schematic flow-diagram of developed high dose rate remote afterloading system.

감쇠와 거리함수 및 산란보정을 시행한 각 점의 조직선량을 구하고, 단일 선원에 의한 단위방사능과 단위시간에 의한 선량률(cGy/mCi-sec)을 표로 배열함으로써 등선량분포작성에 필요한 연산은 선량률의 배열을 검색하여 얻게 하였다.

선원에서 떨어진 한 점의 선량은 선원의 축에서 떨어진 방사상 거리S(R)와 축방향의 세로길이(S(L)로 결정되는 선량률비S(r,L)와 조사시간 및 현재의 방사능강도에 따라 식 5와 같이 구한다.

$$Dose(x,y,z)=D_{ref} \cdot S(r,L) \cdot T(sec) \cdot A(mCi)e^{-\log 2 \cdot d/H_d} \quad (5)$$

여기서 D_{ref} 는 실험평가 된 규격화된 선량률비로 선원 축의 중심에서 축방 1 cm 위치에 도달하는 단위방사능의 초당 도달되는 조직흡수선량률로 $0.001358cGy/mCi-sec$ 이며, S(r, L)는 D_{ref} 에 대해 규격화된 선량률비로 선원 축에서 방사상 거리S(r)와 축상의 세로거리S(L)에 의해 결정된다. T(sec)는 선원이 정주하는 시간(sec)이다.

또, A(mCi)는 선원의 초기 겔보기방사능강도(Apparent activity)를 나타내며 지수함수의 d는 선원제조에서부터 경과일

이며, H_d 는 선원의 반감기이다.

특히 Ir-192 선원의 반감기(H_d)는 74일로 매일 약 1%의 방사능 감쇠가 일어나므로 이에 대한 강도 보정이 필요하다.

식 5는 단일 선원을 임의의 정주시간T(sec) 조사했을 때의 선량을 의미하나, 근접조사선원의 개수가 N개이고 각 선원마다 정주시간이 다른 경우도 있으므로, 여러 선원에 의한 총 조사시간(T)에 도달되는 선량은 이산적분을 통해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Dose(x,y,z)=A(mCi) \cdot e^{-\log 2 \cdot \frac{d}{H_d}} \cdot D_{ref} \cdot \sum_{i=1}^N S(r,L)_i \cdot T(sec)_i \quad (6)$$

여기서 첨자는 i번째 선원의 선량과 정주시간을 나타낸다. 등선량분포를 얻기 위한 선량평가점의 격자간격은 각 평면에서 3 mm와 5 mm 간격을 선택할 수 있도록 구성하였고, 점선량 값을 검색 및 적산하여 등선량분포를 구현하였다.

식 5는 고정되어 있는 선원에서 유도되는 선량이며, 임상에서는 여러 개의 선원을 직렬로 배열해서 조사하는 일이 많으며, 자궁강내 직렬선원의 크기와 질원개의 Ovoid 선원의

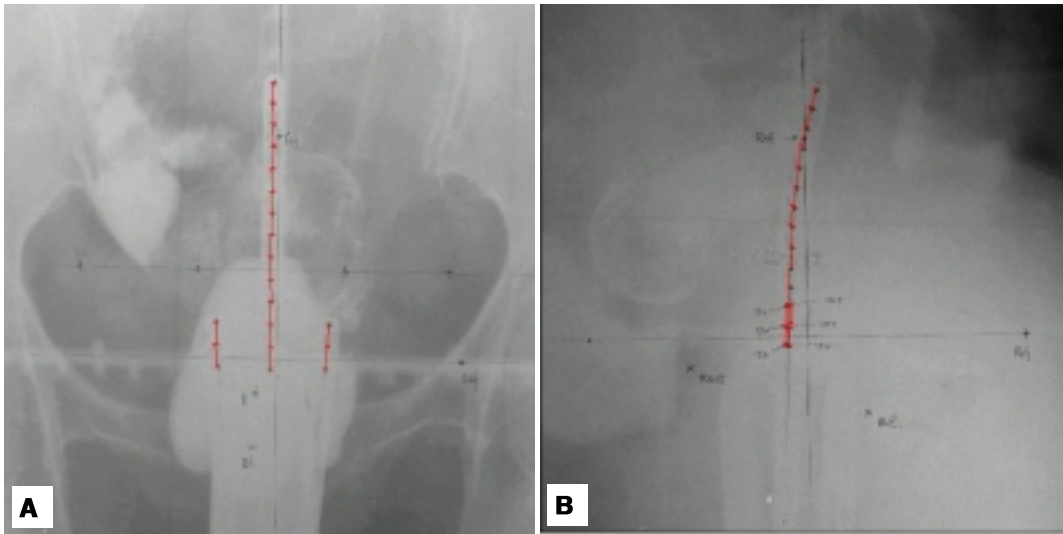


Fig. 3. Simulation image (AP projection A and right lateral projection B) of intracavitary brachytherapy shows input sources, reference and interesting points.

크기와 시간에 따라 각 선원위치의 정주시간 결정이 중요해진다.

환부의 처방된 종양선량(TD)을 조사할 시간은 선량계획에서 얻은 등선량률곡선을 K라 하면, 각 선원의 정주시간(T_{wi})은

$$T_{wi(sec)} = T_i \frac{TD}{K} \quad (7)$$

과 같이 얻을 수 있으며, 치료부위 내 배열된 선원의 전 조사시간 T_{total} 은 각각(T_i)의 합이 된다. 즉 $T_{total} = \sum_{i=1}^n T_{wi}$ 이 된다.

한편, 자궁체 조사시간과 질원개(Fornix) 좌우의 선원들이 정주하는 총 시간을 단위시간(1분) 조사하는 계획에서 얻어진 선량분포일지라도 각 선원의 정주시간 또는 시간-비중(Time-weight)을 알면 같은 방법으로 얻을 수 있게 된다.

근접조사선량계획의 검증은 Fig. 7과 같이 자궁경부암의 강내에 258 GBq (6.98 Ci)의 Ir-192 선원으로 직렬선원배열 10개, 질원개(Fornix)의 양측에 각각 2개 총 14개를 배열하고 선원위치를 Table 1과 같이 두고, 임의의 점에 도달되는 선량을 수작업으로 계산한 값과 전산화 프로그램에서 출력된 선량을 비교하였다.

근접조사의 계획된 치료선량이 차지하는 선량-용적 히스토그램(Dose-volume histogram, DVH)은 선정한 최소선량(Fig. 8과 같이 최소선량 10 cGy가 차지하는 용적 1,915 cc)의 용적에 대한 임의의 선택한 선량곡선이 차지하는 용적의 백분율로 나타내었다.

DVH는 직각좌표계의 세 축의 원점에서 ± 200 mm 까지

Table 1. The Coordinates of Tip (T_x, T_y, T_z) and End-position (x_E, y_E, z_E) of Dwelling Source (Unit of mm) in Benchmarking Plan, The Time Weight (T_i) was Dwelling Time of Source in a Given Position

Source identification	System of coordinate						
	T_x	T_y	T_z	x_E	y_E	z_E	$T_i(sec)$
T1	0	50	0	0	45	0	6.0
T2	0	45	0	0	40	0	6.0
T3	0	40	0	0	35	0	6.0
T4	0	35	0	0	30	0	6.0
T5	0	30	0	0	25	0	6.0
T6	0	25	0	0	20	0	6.0
T7	0	20	0	0	15	0	6.0
T8	0	15	0	0	10	0	6.0
T9	0	10	0	0	5	0	6.0
T10	0	5	0	0	0	0	6.0
R1	20.4	2.2	0	-20.0	-2.6	0	6.0
R2	20.0	-2.6	0	-19.3	-7.6	0	6.0
L1	20.7	1.5	0	20.0	-3.2	0	6.0
L2	20.0	-3.2	0	19.9	-8.0	0	6.0

격자간격을 각각 5 mm로 계산하여 선택선량곡선의 면적에 해당되는 화소수와 두께로 누적하여 구하였다.

결 과

반감기가 짧은 방사선선원의 사용은 잦은 선원교체가 불가피하고, 선원의 크기가 소형이며, 높은 선량률을 가지므로, 선량평가의 중요성이 항상 따른다.

근접조사 선량계획의 기준이 되는 방사능강도는 교정된

전리함 두 개를 선원에서 동일 거리인 20.0 cm에 두고 조사 선량률을 구하였다(Fig. 1). 두 전리함의 동시 측정은 선원의 위치오차를 극복하고 선량률의 신뢰성을 높인다. 두 전리함의 선량오차는 0.5% 이내로 거의 동일하게 나타났다. 선원의 방사능강도는 조사선량을 식 3에 따라 환산하여 구한 것과 큐리미터로 측정된 강도를 비교한 결과 $\pm 3\%$ 의 오차범위에서 일치하였으며, 최종적으로 적용한 선원 강도는 전리함의 공기선량을 환산한 강도를 채택하였다.

Iridium-192 선원의 선량상수(I_{δ})는 Glasgow가 Ge-검출기로 얻은 119개의 피크를 검출한 에너지스펙트럼 중 전체 입자수의 1% 미만이며 선원필터의 감쇠가 높은 10 KeV 이하의 에너지 피크를 절삭에너지로 한 결과 4.69 Rcm²/mCi-hr을 얻을 수 있었으며, 식 2를 통해 조직선량변환계수는 0.973을 얻었다.^{6~8)}

조직선량을 결정하는 변수 중 식1의 조직 내 선량보정항 T(r)은 실험에서 거리(r)에 따라 다음 함수로 $\pm 1\%$ 오차 내에서 최적화하였으며, 조직선량보정 $T(r)=A_0+A_1r+A_2r^2+A_3r^3+A_4r^4$ 의 각 다항식계수는 $A_0=1.04424$, $A_1=0.00522$, $A_2=-0.00231$, $A_3=3.60534E-5$ 및 $A_4=5.77645E-7$ 와 같이 얻었다.

선량전산화에서 선량계산의 기준이 되는 선량률표의 구조는 다음과 같다. 선원종류와 모양에 따라 선원축에서 측방 1 cm 거리의 선량을 기준으로 규격화된 선량비를 생성하고, 위치에 따른 선량률표는 선원중심에서 측방향과 측방향의 각 20 mm 내에는 1 mm의 간격으로 선량비를 얻고, 20~50 mm

사이의 격자간격을 5 mm씩 두었으며, 200 mm까지는 10 mm를 두었다. 선량변화가 급경사를 이루는 근접거리에서는 1 mm의 좁은 간격으로 평가하고 완만한 거리에서는 간격의 폭을 늘림으로써 선량오차를 줄이고 선량표의 저장용량과 비피점유량을 줄여 계산시간을 줄이기 위해 이용되었다.

특히 선량률 규격표는 선원을 중심으로 전방향의 첨단부와 후방 케이블 연결부로 나누어 선량행렬에 해당되는 위치에서 선원 자체흡수와 캡슐 벽의 필터의 경사 두께를 해석적으로 구해 선량비등방성을 전산화하였다.⁶⁾

선량비등방성은 선원모양과 캡슐 용기 벽에 의한 필터두께 차이와, 평가점의 위치에 따라 기하학적 두께가 나타나게 되는데 기인하게 되므로, 선원 중심에서 ± 45 도 지점과 단위 거리의 측방선량과 선원전방 선량을 비교한 결과 선원전방 45도 방향이 후방 45도 방향에 비해 약 4.5% 높으며, 측방에 비해 전방이 약 5.6%에서 9.0%까지 낮은 선량을 보였다.

본 연구에서 전산화 선량계획의 구성 및 흐름은 Fig. 2와 같이 선원규격과 관련된 선원자료생성과 영상입력에 의한 선원입력과 선원면을 구하는 각 단면에서 회전과 선원중주 시간(Time-weight)의 결정, 점선량계산과 선량분석 전산화에 이어 3차원선량 및 선량-용적 히스토그램을 구현하였다.⁶⁾

근접조사 모의영상은 PC (Pentium-III, 866 MHz)와 스캐너로 아프리케이터가 삽입된 환부영상을 비트맵 파일로 입력하고, 선원위치는 영상에 나타난 전후방영상(Anterior-Posterior, AP)과 우측방 영상(Lateral, LAT)의 각각의 원점과 좌표축

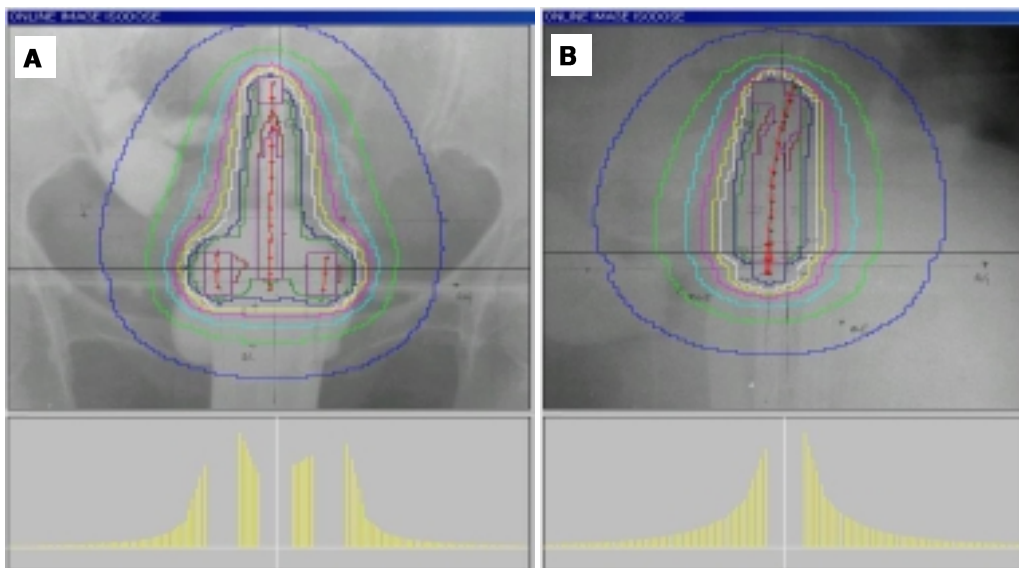


Fig. 4. Isodose distributions (AP view A and Lateral view B) delivered by 1.8 Ci of Ir-192 sources for 1 min irradiation. The histogram under the simulation image shows the dose profiles at os which is located to 5 mm up of Y-axis from origin.

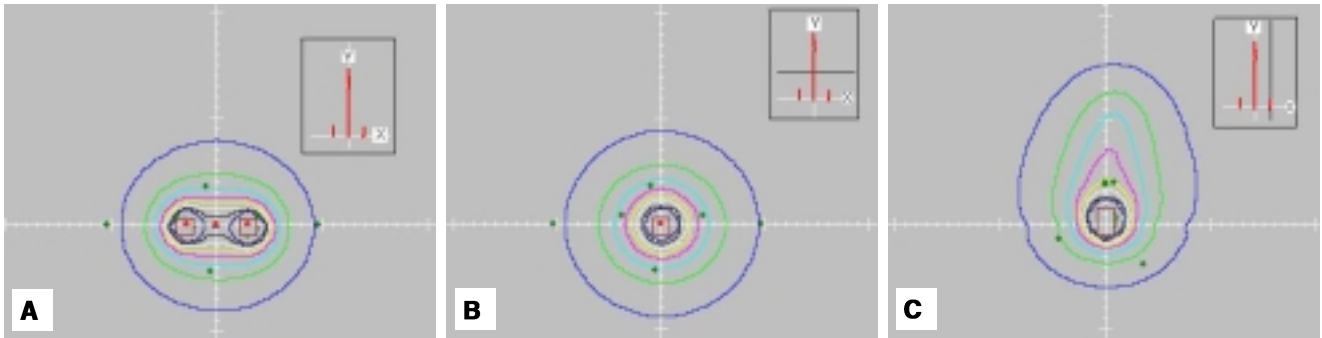


Fig. 5. Isodose distributions were displayed on different axial planes at os level (A), upper 2 cm level (B) and on a sagittal plane which is 15 mm apart from the tandem applicator (C).

및 기준을 정하여 각 영상의 확대비를 얻어 Fig. 3A와 3B 같이 확정하였다.

선량계획상 화면의 구성은 환부를 나타낸 영상에 등선량 곡선을 구현하기 위해 AP면과 LAT면을 각각 다른 화면에서 표현하였다.

선원이 놓인 면을 중심으로 한 관상면과 시상면의 2차원 선량분포를 Fig. 4A와 4B 같이 얻었으며, 각 선량 분포상에서 커서를 상하로 이동하면 Fig. 4A와 4B의 하단과 같이 선량 히스토그램이 나타나게 되어 선량과소 또는 과다부위를 쉽게 파악할 수 있게 하였다.⁹⁾

본 선량계획전산화에서는 각 단면의 ±깊이를 지정하여 선량분포를 얻을 수 있다. 즉, 경부 레벨의 단면 선량(Fig. 5A)과 경부에서 2 cm 상방의 단면 선량(Fig. 5B)을 얻었으며, 시상면에서는 직렬선원(Tandem source)으로부터 15 mm 떨어진 질원개 선원을 중심으로 한 시상면의 선량분포를 Fig. 5C와 같이 구현하였다.

선량은 격자간격 5 mm의 폭으로 200×200 mm 면적내의 선량을 계산하며, 등선량곡선은 임의로 반복하여 조사할 수 있도록 하였다.

3차원 선량분포는 입체선량계산 후, 선택선량곡선에 대해 Fig. 6과 같이 Wire-Frame으로 구현하였으며, 입체로 나타내기 위한 선량 곡선은 임의의 값을 지정하여 얻도록 하였다.

선량검증은 임상에서 흔히 볼 수 있는 선원배열크기로 Table 1과 같이 직렬선원 10개(치료선원길이 5 cm, 정주시간 6초)와 질원개 반구형 아프리케이션어에 좌우 각각 2개(치료선원길이 1 cm, 각각 12초)를 조사한 결과 Fig. 7과 같은 결과를 얻어 Benchmarking 시험으로 수작업과 비교하였다.

선량계획전산화에서 출력된 선량은 본 실험수식들을 이용하여 수작업으로 계산된 선량을 Table 2와 같이 얻었으며, 선원의 위치와 정주시간에 따라 평가점에 도달되는 각각의 선량 검토 비교한 결과 선원과 가까운 위치의 점(10,10,0)의

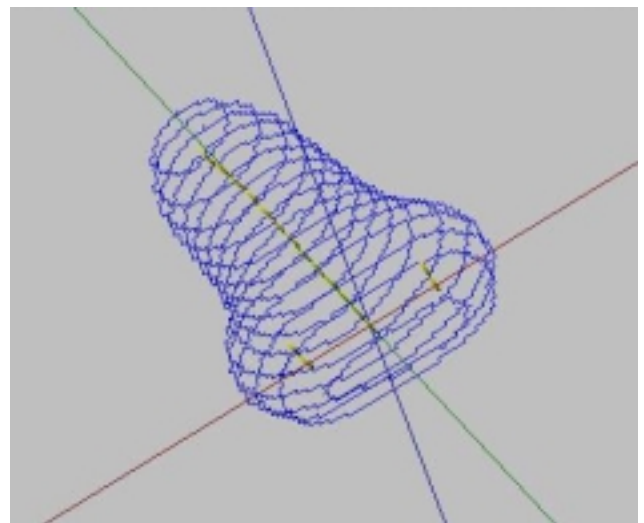


Fig. 6. Three dimensional isodose distributions showed the 40 cGy for A-point dose by 1.8 Ci of Ir-192 source activity.

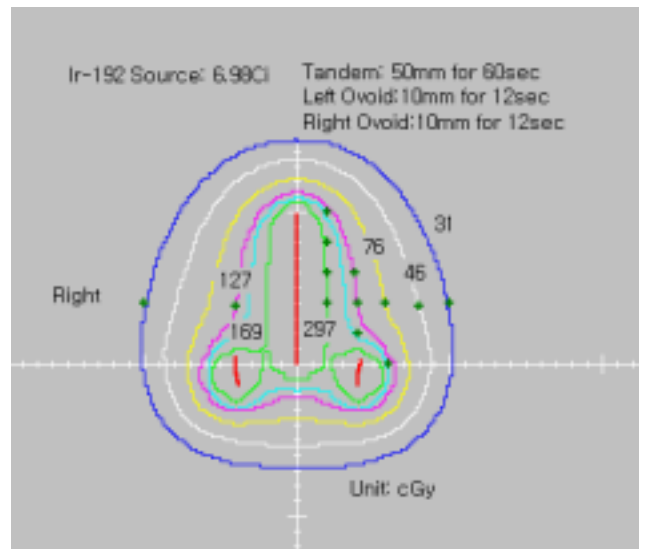


Fig. 7. Isodose curves of intracavitary brachytherapy in gynecology with Ir-192 (6.98 Ci) for a given dwelling time (sec).

Table 2. The Delivered Dose (D) to Given Points Showed as a Function of Radial Distance S(r) and Longitudinal Distance S(L) of Each Source Address for Benchmarking Plan with a Given Exposed Time as Described in the Text, The Apparent Activity of Ir-192 was 258GBq

Coordinates of interesting points	Axis & dosei	Source identification																Dose sum	RTP system			
		T1*	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	R1*	R2	L1*	L2							
1 (30, 0, 0)	S(r)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	50.0	49.9	9.4	9.9	158.2	157.4
	S(L)	-47.5	-42.5	-37.5	-32.5	-27.5	-22.5	-17.5	-12.5	-7.5	-2.5	-4.0	-1.8	2.3	5.8	2.1	2.2	74.2	42.4			
	D _i	1.6	1.9	2.2	2.7	3.2	3.9	4.6	5.3	5.8	6.1											
2 (10, 10, 0)	S(r)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	30.9	31.5	11.8	10.3	282.4	297.1
	S(L)	-37.5	-32.5	-27.5	-22.5	-17.5	-12.5	-7.5	-2.5	2.5	7.5	7.7	10.8	9.2	15.4	5.6	5.2	26.9	18.4			
	D _i	3.1	4.2	5.9	8.5	14.0	22.4	34.2	49.3	49.6	35.1											
3 (20, 10, 0)	S(r)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	40.9	41.4	1.9	0.3	168.5	169.9
	S(L)	-37.5	-32.5	-27.5	-22.5	-17.5	-12.5	-7.5	-2.5	2.5	7.5	6.8	9.5	10.7	15.6	3.2	3.1	46.3	30.5			
	D _i	2.8	3.5	4.6	6.0	7.8	10.1	11.9	13.3	13.4	12.0											
4 (20, 20, 0)	S(r)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	41.7	42.7	3.4	0.5	123.5	126.9
	S(L)	-27.5	-22.5	-17.5	-12.5	-7.5	-2.5	2.5	7.5	12.5	17.5	16.8	19.4	20.6	25.6	2.8	2.6	11.8	8.8			
	D _i	4.6	6.0	7.8	10.1	11.9	13.3	13.4	12.0	10.3	8.1											
5 (50, 20, 0)	S(r)	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	71.6	72.5	26.3	29.5	30.2	30.8
	S(L)	-27.5	-22.5	-17.5	-12.5	-7.5	-2.5	2.5	7.5	12.5	17.5	14.31	15.2	25.0	26.2	1.0	1.0	4.4	3.6			
	D _i	1.7	1.8	1.9	2.1	2.1	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0											

*T represents the identification of tandem source, The source Rs and Ls are for ovoid applicator of intracavitary therapy in gynecology

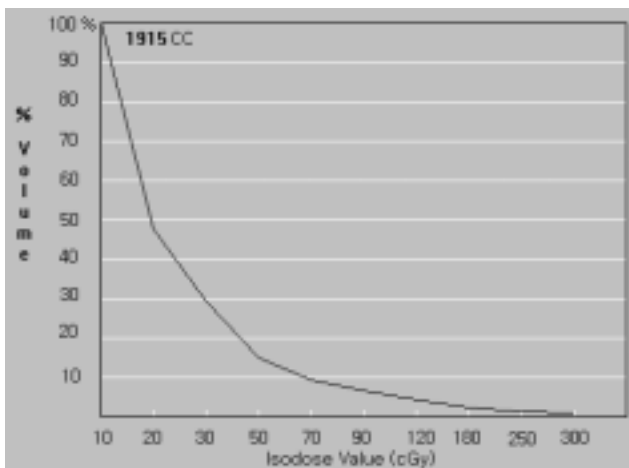


Fig. 8. The represented A-point dose (127 cGy) showed 79 cc (4.1% of maximum volume corresponding of 10 cGy) in a dose-volume histogram by Ir-192 (6.98 Ci) source. The exposed time were 60seconds for 50 mm length of tandem size and 12 seconds for 10 mm of both left and right ovoid, respectively.

선량이 5.3%의 차이를 보였고, 선원에서 비교적 떨어져 있는 점(20,20,0)에서는 1% 미만의 차이를 보였다.

선량-용적 히스토그램은 선원을 중심으로 깊이방향으로 5 mm 격자간격으로 3차원 선량을 얻어 임의로 선택한 선량곡선의 용적을 기준으로 높은 선량곡선의 용적을 백분율로 Fig. 8과 같이 나타내었다.

선량-용적히스토그램(DVH)은 치료선량의 용적을 쉽게 분

석할 수 있는 정보를 제공하게 된다.⁹⁾

근접조사에서는 최대선량점의 결정이 이론적으로 어려우므로 DVH는 3차원적 격자구조의 선량을 구한 후, 선택 등선량곡선에 해당되는 화소와 두께로 용적을 누적하여 구현하였으며, 실험 결과에서 얻은 A점(자궁체입구의 상방 2 cm에서 측방 2 cm 지점)의 치료선량(127 cGy)이 차지하는 용적은 Fig. 8과 같이 79 cc를 보였다.

고안 및 결론

최근 개인용 컴퓨터PC는 속도와 저장 능력이 향상되고 안정성이 높아서 비트맵의 영상을 이용한 선원입력과 선량전산화 및 분석프로그램을 지원하여 임상에 응용될 수 있음을 확인하였다.

경부암 치료시 강내조사는 체외조사와 병용치료가 많은 치료방법으로 국내에서는 1980년대부터 원격제어에 의한 고선량률 근접조사 이용기관이 증가되어 왔으며, 선원으로는 주로 Co-60, Cs-137과 Ir-192 선원들이 사용되었다.¹⁰⁾

전세계적으로 1990년대 들어 Co-60감마선원(반감기 5.3년)의 생산이 부진하여, 선원의 외부 직경이 1 mm 내외의 소형이며, 고선량률을 방출하는 Ir-192 선원의 생산으로 이양되고 있음을 알 수 있다.

국내에서는 Co-60 감마선원의 수급이 원활치 못해 선원교체에 고심하게 되었으며, 치료시간이 수 십분 소요되어 대체

선원개발에 관심을 모으게 되었다.⁶⁾

저자들은 한국원자력연구소와 공동으로 “하나로” 원자로를 이용하여 고선량률 원격제어장치인 Buchler (독)에 사용 중인 Co-60 선원을 대체하기 위해 물리적으로 동일 규격이고, 강도는 10 Ci 내외의 Ir-192 선원을 수년 전부터 제작 생산하여 방사선학적 특성과 선량비등방성에 관해 발표한 바 있으며, 입상에 사용중이다.^{3,6)}

고선량률 강내조사선원은 대개 선원의 진행방향으로 반구형이 대부분이며, Ir-192와 같이 평균에너지가 0.38 MeV의 낮은 에너지인 경우 선원자체 및 선원벽의 선량필터효과가 커서 임상용 선량전산화계획에는 선량비등방성이 필히 고려되어야 정확성 있는 선량계획이 이루어 질 수 있다.

본 연구의 선원에 대한 선량비등방성에서 선원전방 45도 방향이 후방 45도 측의 선량률에 비해 약 4.5% 높은 것은 선원전단이 반구형이므로 측방 대각선 방향의 필터두께에 비해 증가가 적기 때문인 것에 원인이 있고, 동일 거리의 측방선량에 비해 전방향의 선량이 5~9% 낮은 것은 원주형 선원의 측면경로에 비해 전단부의 경로가 기하학적으로 크기 때문인 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 조직흡수선량률을 규격화하여 버퍼링에 두고, 직교 검색을 통해 선량을 계산함으로써 선원의 모양과 크기에 따른 선량비등방성 계산의 시간을 줄일 수 있게 하였다.

근접조사 선원의 출력선량의 안정화는 모든 선량계획에 기초가 되며, 생산치의 겉보기 방사능강도(Apparent activity)를 비교 평가할 수 있으며, 선량오차는 환부의 선량에 직접적인 영향을 줄 수 있으므로 방사능 강도를 보증하는 일에서도 중요하다.⁴⁾

Ir-192 선원에 대해 지금까지 발표된 조사선량상수는 Ir-192의 에너지 스펙트럼이 잘 알려져 있지 않아 3.8~5.1 R/mCi-cm-hr까지 적용한 발표가 있으나, Glasgow는 에너지 분해능이 높은 Ge 반도체 검출기를 이용하여 측정된 스펙트럼으로 계산한 결과 조사선량상수가 4.69 ± 0.05 R/mCi-cm-hr 됨을 발표한 바 있다.²⁾

본 연구에서는 Glasgow가 검측한 119개의 에너지스펙트럼을 사용하여 공기 중 조사선량상수와 조직흡수선량변환 계수를 정하였으며 이 때 절삭에너지는 10 keV이다. 특히 본 연구에 이용되는 선원의 규격에서 절삭에너지(Cutoff)에 포함되는 입자는 1% 미만으로 미미하였으며, 선원필터에 의해 저에너지스펙트럼의 흡수로 조사선량상수는 $0.1268 \text{ Rcm}^2/\text{MBq-Hr}$ ($4.69 \text{ Rcm}^2/\text{mCi-Hr}$)을 얻었으며, Glasgow가 발표한 값과 거의 일치하는 값을 확인하였다.

본 연구결과 근접조사선량은 애플리케이션의 재질과 기하학적 대각선방향의 필터두께에 영향을 받을 수 있다고 보아 향후 추가적인 연구가 필요함을 느꼈으며, 본 연구가 추가적으로 진행되어야 할 부분은 환자에 관련된 자료저장과 선원종류에 따른 데이터 베이스화한 선량계획전산화가 이루어진다면, 사용자 누구나 쉽게 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

본 선량계획전산화는 ICR 시뮬레이션 영상을 스캔하여 선량분포와 해부학적 위치관계가 명료하게 함으로써 치료계획에 도움이 되고 향후 체외조사에 의한 합성 선량계획에도 길잡이가 될 것으로 생각된다.

고선량률 ICR 선량계획에서 해부학적 영상과 선원 측면이 일치되지 않는 경우는 주로 배열 선원이 흰 경우이므로, 면상에 선원이 놓이지 않는 경우 선량과소평가로 환부에는 더 많은 선량이 갈 수 있게 된다. 이와 같이 선원과 면이 일치하지 않는 경우에는 Fig. 5와 같이 평가단면을 이동하여 계산할 필요가 있으며, 컴퓨터단층촬영을 이용하는 것도 한 방법이 될 수 있다고 본다.

ICR은 체외조사와 병용하여 치료하는 경우가 흔하므로, 체외치료와 선량합성이 필수적이며, 지난 15년간 ICRU 보고서¹¹⁾는 3차원 선량계획의 발전에 따라 표적용적(Target volume), 치료용적(Treatment volume), 조사용적(irradiated volume)을 쓸 것을 권하고 저선량률에 의한 기준선량(Reference volume)에 일정 선량을 조사하도록 정한 바 있다.

그러나 Grigsby 등¹²⁾과 Potter 등¹³⁾은 Time-Fraction을 사용하는 고선량률 근접조사에서는 ICRU 38에서 권장하는 선량용적에 치료선량이 적절하게 조사되지 않음으로 수정이 불가하다는 주장을 펼 바 있다. 이러한 주장은 치료용적결정의 적정성과 중요성을 지적하고 있는 것이며, 용적 선량분석용 프로그램이 필수적으로 준비되어야 함을 암시하고 있다.

결론적으로 ICR의 선원 주위는 고선량-급경사를 이루고 있으므로 체외조사선량에 사용한 접근방식과는 개념이 달라 표적용적내 한 점이나 몇몇 지점의 선량은 전체 선량분포에 대한 평가하에 유효하게 된다.

본 연구에서는 해부학적 모의영상을 이용한 선량전산화와 선원에 대한 측면의 이동과 회전을 중시하였으며, 선량분석을 위한 선량-용적 히스토그램과 선량 히스토그램을 구현하였으므로 임상활용에 유효하게 응용할 수 있을 것으로 확신한다.

선량검증은 실측선량으로 확인할 수도 있으나, 본 실험에 이용된 선원이 상업화된 선량계획시스템에 적용되지 못하는 점에서 실측선량으로 선량계획프로그램의 정확성을 보증하

기는 현실적으로 무리가 따른다고 생각된다. 특히 근접조사의 선량검증에서는 고선량률 선원의 선량계측에서 오는 기계오차와 개인오차 및 실험에 따른 오차 등이 있으므로 전산화프로그램 자체의 검증에는 동일한 조건을 두고 수작업 계산과 일치하는 가를 비교함으로써 Benchmarking 시험의 한 방법으로 사용할 수 있다고 본다.

선원 배열과 임의의 점에 도달되는 선량을 수작업으로 계산한 값에 비교한 결과 선원과 거리가 가까운 곳에서 평균 4.0% 이내 오차를 보였으며, 측방 3 cm 이후에서는 거의 일치함을 보여 선량계획전산화는 비교적 정확한 것으로 생각된다.

향후 치료계획에는 시간-선량 효과의 연산모델의 적용과, 물리적 선량에 방사선생물학적 치료효과가 적용된 선량계획 전산화로 발전할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. Glasgow GP, Bourland JD, et al. Remote afterloading technology. AAPM Report No. 41, 1993
2. Glasgow GP. Specific γ -ray constant and exposure rate constant of ^{192}Ir . Med Phys 1979;6:49
3. Choi TJ, Won CH, Kim OB, et al. Determination of Exposure Dose Rate and Isotropic Distributions of Substitute High Dose Rate Ir-192 Source for Co-60 Brachytherapy Source. Kor J Med Phys 1998;9:55-64
4. Nath R, Anderson LL, Luxton G, et al. Task Group No. 43. Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: Recommendation of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 43. Med Phys 1995;22:209
5. Technical Reports Series No. 277. Absorbed dose determination in photon and electron beams. An International Code of Practice. IAEA 1987:3-9
6. Choi TJ, Lee HJ, Kim OB. Characteristics of Tissue Dose of High Dose Rate Ir-192 Source Substitution for Co-60 Brachytherapy Source. Kor J Med Phys 1998;9:259-266
7. Williamson JF, Nath. Clinical implementation of AAPM Task Group 32 recommendations on brachytherapy source strength specification. Med Phys 1991;18:439-448
8. Nucletron Oldelft Activity Report No. 7. Reference air kerma rate determination of an Ir-192 brachytherapy source. 43(1995)
9. Tepe JE. Three-dimensional treatment planning. Seminars in Radiation Oncology 1992;246-256
10. 대한치료방사선과학회. 대한치료방사선과 전국 통계(1996). J Korean Soc Ther Radiol Oncol 1996;15:277-281
11. ICRU REPORT 38. Dose and volume specification for reporting intracavitary therapy in gynecology. ICRU 1985
12. Grigsby PW, Williamson JF, Chao KSC, et al. Cervical tumor control evaluated with ICRU38 reference volumes and integrated reference air kerma. Radiotherapy & Oncology 2001;58:19-23
13. Potter R, Limbergen EV, Gerster N, et al. Survey of the use of the ICRU 38 in recording and reporting cervical cancer brachytherapy. Radiotherapy & Oncology 2001;58:11-18

Abstract

Development of Dose Planning System for Brachytherapy with High Dose Rate Using Ir-192 Source

Tae Jin Choi, Ph.D.^{*}, Ji Won Yei, M.D.[†], Jin Hee Kim, M.D.[†], OK Kim, M.D.[†]
Ho Joon Lee, M.D.[†] and Hyun Soo Han, M.S.[§]

^{*}Department of Bio-Medical Physics Engineering, [†]Therapeutic Radiology
School of Medicine, Keimyung University,

[†]Department of Therapeutic Radiology, School of Medicine, Kyung Pook University, Daegu,

[§]Korea Atomic Energy Research and Institute, Korea

Purpose: A PC based brachytherapy planning system was developed to display dose distributions on simulation images by 2D isodose curve including the dose profiles, dose-volume histogram and 3D dose distributions.

Materials and Methods: Brachytherapy dose planning software was developed especially for the Ir-192 source, which had been developed by KAERI as a substitute for the Co-60 source. The dose computation was achieved by searching for a pre-computed dose matrix which was tabulated as a function of radial and axial distance from a source. In the computation process, the effects of the tissue scattering correction factor and anisotropic dose distributions were included. The computed dose distributions were displayed in 2D film image including the profile dose, 3D isodose curves with wire frame forms and dose-volume histogram.

Results: The brachytherapy dose plan was initiated by obtaining source positions on the principal plane of the source axis. The dose distributions in tissue were computed on a 200×200 (mm²) plane on which the source axis was located at the center of the plane. The point doses along the longitudinal axis of the source were 4.5~9.0% smaller than those on the radial axis of the plane, due to the anisotropy created by the cylindrical shape of the source. When compared to manual calculation, the point doses showed 1~5% discrepancies from the benchmarking plan. The 2D dose distributions of different planes were matched to the same administered isodose level in order to analyze the shape of the optimized dose level. The accumulated dose-volume histogram, displayed as a function of the percentage volume of administered minimum dose level, was used to guide the volume analysis.

Conclusion: This study evaluated the developed computerized dose planning system of brachytherapy. The dose distribution was displayed on the coronal, sagittal and axial planes with the dose histogram. The accumulated DVH and 3D dose distributions provided by the developed system may be useful tools for dose analysis in comparison with orthogonal dose planning.

Key Words: Dose planning system, Ir-192 source, 3-D dose plan, Dose-volume histogram