

## Ralstron 선원대체형 Iridium-192 선원의 선량모델링과 응용

계명대학교 의과대학, \*메리놀병원 치료방사선과,  
\*\*영남대학교 방사선종양학과, \*\*\*한국원자력연구소

김옥배, 최태진, 김진희, 이호준, 박정호\*, 김성규\*\*, 조운갑\*\*\*, 한현수

국내도입 원격제어 근접조사장치인 Ralstron(Shimatsu, Japan)의 코발트-60선원을 이리듐-192 선원으로 대체하고자 선원을 설계하고, 선원주위의 선량분포를 유도하였다. 이리듐 선원의 물리적크기는 직경1.5mm, 높이 1.5mm 로 370MBq(10Ci)를 목표로 설계하였으며, 외경은 3mm 이고, 크기는 13mm이며, 켈술의 재질은 SUS316L 이다. 선원 선원자체흡수와 스테인리스 스틸 켈술에 의한 선량감쇠는 61.2%로 나타났으며, 단위방사능당 감마상수는 4.69Rcm<sup>2</sup>/mCi-hr였다. 조직선량은 공기중흡수선량 변환과 조직산란보정을 통해 구하였으며, 조직흡수선량변환계수는 이리듐의 에너지스펙트럼을 이용하여 공기에 대한 조직의 질량에너지흡수계수비 ( $\mu_{en}$ )<sup>tissue</sup>/<sub>air</sub> = 1.112를 얻었다. 고안 선원에 대한 선량분포는 선원을 2,338개의 선원으로 분할하고, 각 분할선원에서 주위에 도달되는 선량을 이산적으로 누적 평가하여 임상에서 사용할 수 있도록 선량도표를 제공하였다.

### 서 론

소선원에 의한 강내조사는 저선량률에 의한 After-loading 법과 고선량률에 의한 원격조사(Remote Afterloading)로 나누어지며, 고선량률 원격조사장치에 사용되는 선원은 Co-60이나 Cs-137 과 Ir-192 선원을 주로 이용하고 있으며, 이 가운데 Ir-192 선원은 반감기가 비교적 상당히 짧은 편이지만 비방사능이 높아 소형화가 가능하여 점차 적으로 사용빈도가 높아지고 있다.<sup>1,2)</sup>

선원크기는 대개 직경 1.1 mm 에서 4.0 mm 까지 사용되며, 직경 4.0 mm 선원은 주로 강내조사에 많이 이용되고 있으며<sup>3,4)</sup>, 직경 1.1 mm 의 선원은 식도암, 담관종양, 및 기관지암 등 혈관 또는 체강관을 통해 종양에 접근 시켜 다량의 방사선을 조사하게 되며 선원직경이나 길이가 소형화되어 임상응용범위가 확대되고 있다.

한편, 국내에서는 기존 치료장비로 활용되고 있는 원격근접조사장치 중에서 약 1/3을 차지하는 Ralstron(Simatsu사, 일본)은 고선량률 Cobalt-60 선원을 장착해서 강내치료를 주로 사용하고 있으나, 도입된 시

기가 오래되고 Ir-192 선원의 생산활동이 활발하고, 상대적으로 Co-60 생산은 전 세계적으로 공급부진 현상을 보이고 있다.

국내에서는 원격조사장치와 선원을 전량 외국에서 도입하게 되어 의료용 선원의 국산화가 시급한 실정이다.

본 연구에서는 선원 국산화를 위해 Ralstron 원격강내조사장치에 사용되는 직경1.5 mm, 높이 1.5mm 의 Ir-192 선원 고선량률 선원을 개발하고, Co-60 선원을 대체하고자 고안한 선원에 대한 선량모델링을 통해 강내조사 선량분포를 발표하고자 한다.

### 대상 및 방법

#### 선원 고안

Ralstron 강내조사장치는 고선량률 Cobalt-60 선원을 사용하며, 기기에는 부인암치료를 위해서 자궁체내 삽입치료와 질와(Fornix)치료를 조사할 선원으로 구분하며, 각기 다른 Co-60 선원을 사용하고 있다.

코발트-60 선원을 감싸는 켈술은 스테인레스-스틸이며, 외경 3.0mm 이고, 외장은 13mm 이며, 스텐레스-스틸 켈술내 직경 1.5mm이고 길이 1.0 mm 인 원주형 Co-60 선원(1-2Ci)이 밀봉되어 있고, 선원이송

본 연구는 과학기술부 하나로 공동이용 활성화사업의 지원과 계명대학교 지원으로 이루어졌음.

케이블 길이는 1,088mm 와 1,138mm이다.

본 연구에서는 기존 Co-60 선원을 대체하기 위해 동일한 외형의 선원궤술에 직경과 길이가 각각 1.5mm 이며, 방사능이 10Ci 인 Ir-192 선원을 Fig.1 과 같이 고안하고 단위 방사능에 대한 선량 모델링을 통해 Co-60 선원에 의한 선량분포를 재현하였으며, Fig.2는 Ralstron 강내조사 장치에 사용할 대체형 Ir-192 선원의 모형선원을 제작한 것이다.

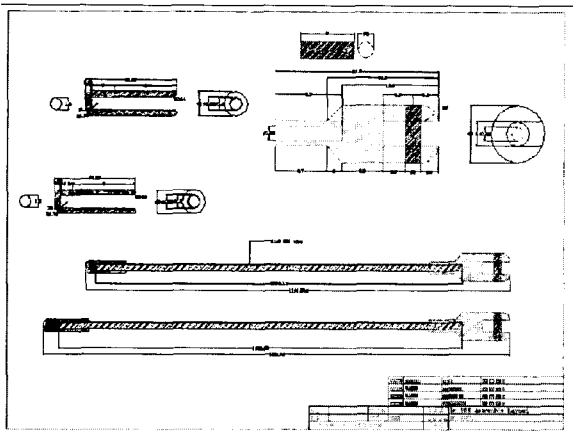


Fig.1. Design of Ir-192 source for Ralstron remote control therapy unit.



Fig. 2. Fabricated of Ir-192 dummy source for substitution source of Ralstron remote control therapy unit.

선량모델

선량모델은 Ir-192 선원의 에너지 스펙트럼을 이용한 조사선량률과 선원재질 및 궤술벽에 의한 선량차

폐를 통해 겉보기방사능 (Apparent Activity)을 구하고, 산란선량을 포함한 조직감쇠계 수를 구하여 조직 선량을 구하였다.

에너지 스펙트럼을 이용한 조사선량률( $\Gamma$ )은 다음과 같이 구하였다.

$$\Gamma = \frac{A}{4\pi} \int_0^{E_{max}} \Phi(E) \frac{\mu_{en}}{\rho}(E) dE \quad (1)$$

여기서 A는 방사능,  $\Phi(E)$ 는 에너지 E 인 방사성 입자속과  $\frac{\mu_{en}}{\rho}(E)$  에너지에 대한 질량 에너지 흡수계수를 나타낸다.<sup>5)</sup> Ir-192 선원은 천연 Iridium 은 62.7% 의  $^{193}\text{Ir}$ 을 함유하고 있어  $^{191}\text{Ir}(n,r)^{192}\text{Ir}$  생성 과정에 반 감기가 19.2 시간인  $^{192}\text{Ir}(n,r)^{192}\text{Ir}$ 가 생성되므로 충분한 냉각 시간을 가지고 불순핵종을 제거하게 된다.<sup>6)</sup>

$^{191}\text{Ir}(n,r)^{192}\text{Ir}$ 는 에너지 스펙트럼이 잘 알려져 있지 않아 조사선량률이 3.8에서 5.0 R/mCi-hr 까지 평가 오차를 일으키는 요인이 되어왔다.<sup>7)</sup>

Glasgow<sup>8)</sup>는 Ge반도체 검출기를 이용한 다중채널 파고분석기를 통해  $\beta$  붕괴에 의한 Pt. 변환에서 발생하는 15개의 감마선파고와 전자포획(Electron capture, EC)에 의한 Os핵변환과정에서 발생하는 13개의 감마선파고를 분석한 결과를 발표한바 있다.

방출에너지범위는 60keV에서 1.8MeV까지 분포되어 있으며, 핵붕괴시 70keV 영역의 K-특성 X선과 10keV 이하의 L-특성 X선이 다수 방출하고 있다.

본 연구에서는 10keV 이하의 감마선을 제거하고 Cut off 에너지 이상의 전 에너지를 이용하여 감마상수를 구하였다.

겉보기방사능을 구하기 위한 선량차폐는 각 입자에 대해 에너지별 질량감약계수를 구하여 얻었다.

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum \frac{\mu}{\rho}(E_i) F_i \quad (2)$$

여기서  $\frac{\mu}{\rho}$ 는 Iridium-192 에 대한 질량감약계수이고,  $F_i$ 는 에너지별 입자비를 나타낸다.

이리듐과 스텐레스-스틸의 밀도를 사용하여 공기 중 산란체에 의한 영향이 없는 상태의 선흡수계수를 구할 수 있으며, 선원주위의 선량분포를 얻기 위해서 선원을 분할하여 선원에서 선량 평가지점까지 기하학적 경로상에 놓인 선원차폐효과와 궤술벽의 두께에 따른 차폐를 계산하는 데 이용한다.

선원의 자체흡수를 계산하는데 필요한 Iridium ( $Z=77, \rho=22.6 \text{ g/cm}^3$ )과 철( $Z=26, \rho=7.86 \text{ g/cm}^3$ )의 질량에너지흡수계수는 Beger<sup>9)</sup> 등의 자료와 EGS4 시뮬레이션<sup>12)</sup>을 통해 구한 자료를 이용하였다. 흡수벽을 통과한 출력선량은

$$D(\text{cGy/min}) = \frac{\Gamma \cdot A \cdot \tau}{R^2} \cdot e^{-(\mu_{Ir}T_{Ir} + \mu_{Fe}T_{Fe})} \quad (3)$$

과 같이 단위면적을 지나는 입자에 의한 조사선량률 상수<sup>13)</sup>  $\Gamma$  ( $4.69\text{Rcm}^2/\text{mCi-hr}$ )와 방사능  $A(\text{mCi})$  및 선원의 자기흡수와 켈슬벽의 흡수를 통해 얻을 수 있다.

또한  $\tau$ 는 조사시간 (min)을,  $R$ 은 선원과 측정 평가점간의 거리(cm)를 의미한다.  $\mu_{Ir}$ 과  $\mu_{Fe}$ 는 각각 Iridium과 철에 대한 선흡수계수이며,  $T_{Ir}$ ,  $T_{Fe}$ 는 선원의 자기 두께와 벽재질의 두께이다.

이리듐 선원과 같이 에너지가 비교적 낮은 선원에서 강도에 대한 정의는 선량계산모델에 선원자체를 정의하는 방법과 겐보기방사능을 정의하는 방법이 있을 수 있다. 선원자체는 주로 중성자에 조사된 선원을 큐리메-터로 측정하여 정의하는 방법이며, 이 경우 식 3과 같이 선원켈슬용기의 모양에 따라 출력 선량이 다르게 나타나게 되며, 겐보기방사능 정의법은 켈슬에 밀봉된 선원의 출력을 외부에서 절대 선량을 측정하여 식 4와 같이 방사능을 환산하는 방법이라 할 수 있다.

본 연구에서는 겐보기방사능은 선원의 중심에서 일정거리( $r$ )의 공기중 선량률( $D_{\text{air}}$ )을 기준으로 다음과 같이 구한다<sup>10)</sup>.

$$A_{\text{app}}(\text{Bq}) = D_{\text{air}} / \Gamma_{\delta} \quad (4)$$

여기서  $\Gamma_{\delta}$ 는 낮은 에너지를 제외(Cut-off)한 한정된 에너지에 대한 단위시간당 선량률을 의미하며,  $D_{\text{air}}(r)$ 는 교정된 공기이온함(0.14cc, IC-15)을 이용하여 선원으로부터 20cm 거리에 산란선의 영향을 적게 받도록 Fig. 3과 같이 고안한 Lucite 대에 설치하여 교정선량을 구하였다.

**조직감쇠계수와 선량**

Ir-192 선원에서 일정거리( $r$ )에서 평가된 공기중 선량률에 대한 조직선량률의 비를 산란선을 포함한 조직감쇠계수비( $K$ )로 실험적으로 구한다.

조직선량률은 자체적으로 제작한 가로x 세로 x 높이가 모두 35cm 인 루사이트 수조에서 먼저 공기중 선량을 측정된 다음 물을 채워 선원으로부터 1cm에서 20 cm까지 교대로 측정하여 실험식을 구하였다. 조직선량은 겐보기방사능으로부터

$$D(\text{cGy/min})_{\text{tissue}} = D_{\text{air}} \cdot A_{\text{app}} \cdot F \cdot K \quad (5)$$

여기서  $F$ 는 공기중 흡수선량을 조직흡수선량으로 변환하는 조직흡수선량변화인자 이다.

조직선량률은 단위시간(sec)에 단위 방사능(mCi)에 의한 출력선량지표를 준비하여 선원 주위조직에 대한 선량률을 쉽게 환산할 수 있도록 고안하였다.

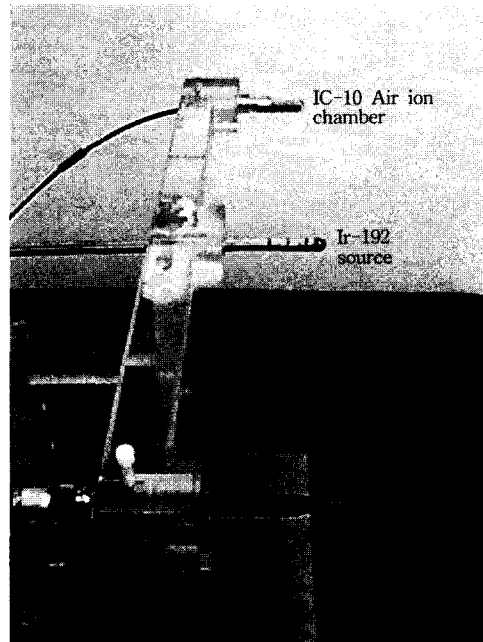


Fig. 3. Output dose measured in air of Ir-192 source for Ralstron unit was mounted on acrylic mounter to avoid the scatter contribution. Dual ion chamber were measured of the output dose of Ir-192 in air free-space.

**결 과**

선원규격은 Ralstron 고선량률 원격강내조사 기기에 사용하는 Co-60 선원을 Ir-192 선원으로 대체하기 위하여 Fig. 1과 같이 설계하였다. Ralstron 기기에 사용하는 Co-60 선원은 직경 1mm 와 높이 1mm 이고, 외경 3mm 이고 길이 13mm 인스텐레스-스틸 (SUS316L) 봉내에 밀봉되어 있다.

본 연구에서 고안한 선원은 Fig.2와 같이 외경과 길이가 Ralstron 기기의 선원과 동일한 외형을 갖추었으며, 제작한 Ir-192선원은 직경 1.5mm 에 길이 1.5mm 원주형으로 SUS316L 봉에 밀봉되었다.

일차 실험에서는 가상선원을 제작하여 기존장치에 교체하여 시험운전을 하였으며, 선량모델링 을 통해 기존 Co-60 선원에 의한 선량분포를 얻을 수 있음을 확인하였다.

이에 선원재료 조달 및 제작이 용이한 1.5 mm (직경) x 1.5 mm(두께) 원주형 Ir-192 선원을 외경 3.0mm 의 용기(Capsule)에 밀봉함으로써 Cobalt-60 선원을 대체할 수 있는 고선량을 강내조사 선원으로 이용될 수 있도록 Fig. 1과 같이 설계고안하고 Fig.2와 같이 시험선원을 제작하였다.

고선량을 근접조사치료 선원은 원격제어로 선원을 환부의 아프리케이터에 주입하므로 선원캡슐과 연결 와이어의 용접 또는 고정이 매우 중요하다. 선원-연결자까지 길이는 1138mm 이고, 스텐-와이어의 직경은 1.6 mm 이 되어 기존 선원과 호환될 수 있도록 하였다.

### 선량률 결정

원자로에서 중성자를 조사하여 구하는 Iridium-192 감마 선원은 평균에너지가 0.38MeV로 비교적 낮은 점이 있어 선원의 밀봉형태와 재질에 따라 선량률이 다르게 나타나므로, 선원주위의 선량분포는 선원과 캡슐의 입체적 형태에 따라 선량 비등방성이 유발될 수 있다<sup>4)</sup>. 즉 선원자체의 감쇠와 선원 캡슐벽에 의한 감쇠로 선원중심에서 동일 거리에도 도달되는 선량률이 다르게 나타난다.

본 연구에서 제작한 강내조사용 Ir-192 선원은 1.5 mm 직경과 원주형 선원두께가 1.5 mm 이고, 선원 연결고리 반대측인 선원 앞부분은 반구형에 가깝고 두께가 측면과 거의 같도록 원뿔대형이 되도록 하였다.

특히 선원이 원주형인 경우 대각선 방향으로 두께가 두꺼워지므로, 선량분포에 영향을 주어 선량비등방성이 유발될 수 있다.

선량비등방성은 선원의 중심에서 측방 10 mm 위치의 기준선량을 함수로 정규화하여 선원주위의 선량을 구하여 비등방성을 구하였으며, 보정계수를 구하거나 선원주위의 선량분포를 도표(Table 1)로 정

하여 사용하기 쉽게 준비하였다.

Glasgow 등은 Ir-192 에 대한 Oak Ridge National Laboratory 의 Evaluated Nuclear structure Data File (ENSDF) 를 근거로 제시한 감마상수( $\Gamma$ )는 4.62 였고, 수 keV의 저지X선과 11keV 이하의 특성x선을 제외한 조사선량률상수( $\Gamma_s$ )는  $4.65 \pm 0.05 \text{ Rm}^2/\text{Ci-hr}$ 를 제시하였다<sup>7,11)</sup>.

본 연구에서는 Ir-192 선원의 스펙트럼을 통해 입자수를 구하고, 본 과제에서 제작한 선원에 대한 조사선량상수를 구한 결과 필터두께 및 선원자체흡수에 의해 감소된 보정입자수를 이용해 구한 조사선량률 상수( $\Gamma_s$ )는  $4.69 \pm 0.05 \text{ Rcm}^2/\text{mCi-hr}$ 로 나타나 Glasgow 등이 제시한 조사선량률과 잘 일치함을 알 수 있었다<sup>12,13)</sup>.

Fig. 3은 산란선을 줄이며, 이온함에 의한 절대선량측정으로부터 출력선량을 정하고 결보기방사능을 결정하기 위해 고안제작된 루사이트 측정대(Jig) 이다.

### 선량감쇠 필터효과

Ir-192 선원의 에너지 스펙트럼에 나타난 입자는 수 keV에서 1.8 MeV 까지 혼합되어 있으며, 평균에너지가 0.38 MeV 로 낮은 편이다. 에너지가 낮고, 원자번호가 (Z=77) 인 Iridium 과 스텐레스-스틸 재질에 의한 입자감쇠는 선량특성에 큰 영향을 끼치게 된다. 감쇠효과를 통해 결보기방사능(Apparent activity)의 결정할 수 있다.

Fig. 4는 선원의 원주면을 간격 0.1 mm 씩 155 개로 분할하고 높이를 0.1mm 씩 15개로 분할하여 총 2,338 개의 분할선원에 대한 입자감쇠를 계산하였으며, 밀봉선원의 강도는 알짜선원에 비해 62.0%가 되었다.

### 조직선량

조직선량은 Ir-192 선원을 이용한 조직선량은 핵종의 감마상수와 조직산란감쇠에 의한 보정을 이용하여 구하였다.

선원에서 방출된 방사선의 조직내 흡수선량은 공기중 조사선량과 수중의 조사선량을 실험적으로 구한 4차 다항식을 이용해 조직 내 20 cm 이내의 선량계산에 이용될 수 있도록 실험식(6)을 구하였으며,

Table 1A. Normalized output factor to reference dose ( 0.001445cGy/mCi-sec) of apparent activity at 10 mm of transverse distance from source center. ( Upper region of source center)

X(mm) Y(mm)	Lateral distance (mm) from source axis																					
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	110	120	130	150	170	200
200	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
190	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
180	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
170	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
160	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
150	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
140	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
130	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001
120	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001
110	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001
100	0.006	0.006	0.007	0.007	0.007	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001
90	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005	0.005	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001
80	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.009	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001
70	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.013	0.013	0.012	0.012	0.011	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001
60	0.020	0.020	0.020	0.020	0.019	0.019	0.018	0.017	0.016	0.015	0.014	0.012	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002	0.001
50	0.029	0.029	0.029	0.028	0.027	0.026	0.024	0.023	0.021	0.019	0.017	0.014	0.012	0.010	0.008	0.007	0.005	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
45	0.036	0.036	0.036	0.035	0.033	0.031	0.029	0.027	0.024	0.022	0.020	0.016	0.013	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
40	0.045	0.046	0.045	0.044	0.041	0.038	0.035	0.031	0.028	0.025	0.022	0.017	0.014	0.011	0.009	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
35	0.059	0.060	0.059	0.056	0.052	0.047	0.042	0.037	0.032	0.028	0.025	0.019	0.015	0.012	0.009	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
30	0.081	0.082	0.079	0.074	0.066	0.058	0.050	0.043	0.037	0.032	0.027	0.021	0.016	0.012	0.010	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
25	0.117	0.117	0.111	0.100	0.086	0.073	0.061	0.051	0.042	0.036	0.030	0.022	0.017	0.013	0.010	0.008	0.007	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
20	0.182	0.181	0.165	0.140	0.114	0.091	0.073	0.059	0.048	0.040	0.033	0.024	0.018	0.013	0.010	0.008	0.007	0.005	0.005	0.003	0.002	0.001
15	0.322	0.311	0.261	0.201	0.150	0.113	0.086	0.067	0.053	0.043	0.035	0.025	0.018	0.014	0.011	0.008	0.007	0.006	0.005	0.003	0.002	0.001
10	0.719	0.637	0.445	0.290	0.193	0.135	0.098	0.074	0.058	0.046	0.037	0.026	0.019	0.014	0.011	0.009	0.007	0.006	0.005	0.003	0.002	0.001
5	2.833	1.694	0.756	0.391	0.232	0.153	0.107	0.079	0.061	0.048	0.039	0.026	0.019	0.014	0.011	0.009	0.007	0.006	0.005	0.003	0.002	0.001
0	-	3.953	1.000	0.445	0.250	0.160	0.111	0.081	0.062	0.048	0.039	0.027	0.019	0.014	0.011	0.009	0.007	0.006	0.005	0.003	0.002	0.001

\*D<sub>water</sub>(r)[cGy/Time]=0.001445(cGy/mCi-sec) x Output Factor x A<sub>apparent</sub> activity (mCi) x Time(sec)

조직선량변환인자 F는 0.973을 얻었으며, 공기에 대한 조직의 질량에너지계수의 비는 1.112 가 됨을 확인하였다.

표1A, B는 Ralstron 에 사용할 Ir-192 선원에 대한 조직선량환산표는 겔보기방사능을 기준으로 단위 시간(sec)당 단위방사능(mCi 또는 37MBq)당 조직출력선량계수는 0.001445(cGy/sec-mCi -cm) 를 나타낸다.

특히 표1A와 B는 선원의 중심으로부터 선원단 방향의 선량분포와 선원연결케이블 방향의 선량분포를 나타내고 있으며, 대각선 방향의 조직선량이 측방에 비해서 약 10% 낮게 낮으며, 선원 상단과 하단의 동일 대각선방향에서도 동일한 차이가 있음을 알 수 있었다. 이 것은 선원필터의 대각화에 의한 필터증가효과에 기인하는 것으로 알 수 있다.

Ir-192 에 대한 조직선량은 실험적으로 구한 공기 중선량률에 대한 수증의 선량률 비(X<sub>water</sub>/X<sub>air</sub>)를 적용하여 이루어졌으며, 거리(r)에 대한 다항식의 계

수는 아래와 같다.

$$X_{water}/X_{air} = A_0 + A_1r + A_2r^2 + A_3r^3 + A_4r^4 \quad (6)$$

여기서 각 계수는,

$$A_0 = 1.04424, A_1 = 0.00522,$$

$$A_2 = -0.00231, A_3 = 3.60534E-5$$

A<sub>4</sub> = 5.77645E-7를 실험식으로 구하였으며, 실험치와 오차는 0.5% 이내였다.

Fig.4는 조직선량계수를 이용하여 강내조사선원으로 사용할 때 환부의 중앙배열선원(Tandem source)를 중심으로 관상면과 시상면상에서 구한 등선량분포를 나타낸다.

전산화선량계획은 VC++ 6.0 으로 구현하였으며, 선량분포 산출은 임의의 겔보기방사능으로 표1을 이용하여 선원의 중심에서 조직내 평가점까지 선원측 방향(y축)의 거리와 측방거리(x 또는 z축)에 따라 구한 값으로 선량분포를 재현하였다.

Table 1B. Normalized output factor to reference dose ( 0.001445 cGy/mCi-sec) of apparent activity at 10 mm of transverse distance from source center. ( Lower region of source center)

X(mm) Y(mm)	Lateral distance (mm) from source axis																					
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	110	120	130	150	170	200
0	---	3.953	1.000	0.445	0.250	0.160	0.111	0.081	0.062	0.048	0.039	0.027	0.019	0.014	0.011	0.009	0.007	0.006	0.005	0.003	0.002	0.001
-5	3.884	2.083	0.822	0.407	0.238	0.155	0.108	0.080	0.061	0.048	0.039	0.026	0.019	0.014	0.011	0.009	0.007	0.006	0.005	0.003	0.002	0.001
-10	0.781	0.700	0.488	0.307	0.201	0.138	0.100	0.075	0.058	0.046	0.038	0.026	0.019	0.014	0.011	0.009	0.007	0.006	0.005	0.003	0.002	0.001
-15	0.326	0.313	0.276	0.212	0.157	0.116	0.088	0.068	0.054	0.044	0.036	0.025	0.018	0.014	0.011	0.009	0.007	0.006	0.005	0.003	0.002	0.001
-20	0.178	0.169	0.166	0.145	0.118	0.094	0.075	0.060	0.049	0.040	0.033	0.024	0.018	0.013	0.011	0.008	0.007	0.005	0.005	0.003	0.002	0.001
-25	0.112	0.106	0.108	0.101	0.088	0.075	0.062	0.052	0.043	0.036	0.031	0.022	0.017	0.013	0.010	0.008	0.007	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
-30	0.077	0.074	0.075	0.072	0.067	0.059	0.051	0.044	0.038	0.032	0.028	0.021	0.016	0.012	0.010	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
-35	0.056	0.054	0.055	0.054	0.051	0.047	0.042	0.037	0.033	0.029	0.025	0.019	0.015	0.012	0.009	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
-40	0.042	0.041	0.041	0.041	0.040	0.038	0.035	0.031	0.028	0.025	0.022	0.018	0.014	0.011	0.009	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
-45	0.033	0.032	0.032	0.033	0.032	0.031	0.029	0.027	0.024	0.022	0.020	0.016	0.013	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
-50	0.026	0.026	0.025	0.026	0.026	0.025	0.024	0.022	0.021	0.019	0.017	0.014	0.012	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
-60	0.018	0.018	0.017	0.018	0.018	0.018	0.017	0.016	0.016	0.015	0.014	0.012	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002	0.001
-70	0.013	0.013	0.013	0.012	0.013	0.013	0.013	0.012	0.012	0.011	0.011	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002	0.001
-80	0.010	0.010	0.009	0.009	0.009	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.008	0.008	0.007	0.006	0.005	0.005	0.004	0.003	0.003	0.002	0.001
-90	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.006	0.006	0.006	0.005	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001
-100	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001
-110	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001
-120	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
-130	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
-140	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
-150	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
-160	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
-170	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
-180	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
-190	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
-200	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

$$*D_{water}(r)[cGy/Time]=0.001445(cGy/mCi-sec) \times \text{Output Factor} \times A_{\text{apparent activity}} (mCi) \times \text{Time}(sec)$$

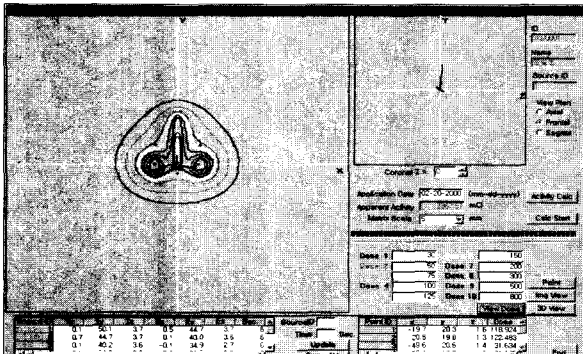


Fig.4A. Generated isodose distributions for coronal plane with Ir-192 brachysource.

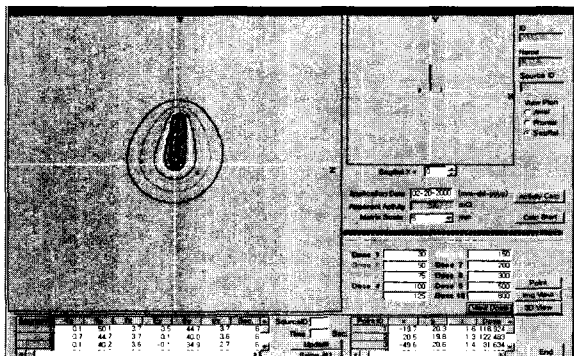


Fig.4B. Generated isodose distributions for sagittal plane with Ir-192 brachysource.

### 고안 및 고찰

원격조정에 의한 근접조사장치(Brachytherapy unit)의 선원은 치료부위에 따라 결정 고안될 수 있다.

강내조사인 경우 비교적 큰 내관강 (Inner lumens) 치료에는 3- 4 mm 의 직경의 선원이 마이크로선원 (1 mm 직경 이하)보다 유효한 경우가 많다. 즉 선원의 직경이 큰 쪽이 근접조사 치료시 선원과 밀접한 국소에 과도한 선량이 도달될 수 있는 점을 피할 수 있는 이점이 있다.

반면, 혈관, 담관 등 좁은 관내에는 0.9-1.6 mm 직경의 비방사능이 높은 Ir-192선원이 많이 이용되고 있으며, 강내조사용 선원으로도 이용되고 있다.

국내 원격강내조사 장치 중 약 절반 정도가 자궁경부암의 강내조사장치를 사용하고 있었으며, 대부분이 선원생산공급이 중단되어 반감기를 한 두 차례 경과된 Cobalt-60 선원을 사용하고 있는 실정이므로, 자궁경부암 조사를 위한 강내조사선원을 제작욕구가 일어나게 되었다.

본 과제에서는 비방사능이 높고 반감기가 짧은 고선량을 Iridium-192 선원을 개발하여 감마상수적용과 조직선량률과 겔보기방사능의 측정 등을 통해 선

원주위의 선량분포 값을 쉽게 비교할 수 있게 선량 지침표를 제시하였으며, 선량계획전산화에서 Ir-192 선원을 사용하여 구한 선량분포와 기존 사용중인 Cobalt-60 선원의 강내조사선원에 의한 선량분포가 매우 근사한 분포를 보여 기존 선원을 충분히 대체할 수 있을 것으로 확신하게 되었다.

방사선의 조직내 산란선의 영향을 고려한 조직흡수선량은 공기중 조사선량과 수중의 조사선량을 실험적으로 구한 4차 다항식을 이용해 얻은 선량값이 실험 오차범위  $\pm 2\%$ 내에서 실험과 잘 일치할 수 있었으며, 선원을 중심으로 조직내 20 cm 이내의 선량을 구할 수 있도록 하였다.

본 실험의 조직산란보정은 Meisberger<sup>14)</sup> 가 실험식에서 3차 다항식을 이용하였으며, 선원에서 10 cm 거리 이내의 선량을 변환하므로 직접적인 비료를 하기는 어려우나, 선원에서 수 cm 이내에서는 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

Ir-192 선원에 의한 조직선량변환인자(F)는 0.973을 얻었으며, 공기에 대한 조직의 질량에너지계수의 비는 1.112 가 됨을 확인하였으며, 이 수치는 Glasgow<sup>8)</sup> 가 발표한 값과 유사하고, AAPM Task Group 43에서 제시한 값과 거의 일치함을 확인하였다<sup>10)</sup>.

Ir-192 선원은 비방사능이 높아 10Ci 정도의 선원을 국내 하나로원자료를 이용해 제작할 수 있으므로, 본 연구에서 재현하는 선량계획 프로그램을 이용하여 임상 응용이 높을 것으로 생각 한다.

## 결 론

국내 선원공급이 부진한 Ralstron Co-60 선원을 Ir-192 선원으로 대체하기 위해 하나로원자료를 이용해 제작하는 선원의 조직선량모델을 구하고, 결보기방사능 결정과 단위방사능에 대한 선량률 표를 제공하여 향후 임상에 활용할 선원에 대한 선량률 확인이 용이하고, 타 선원의 선량률과 비교가 용이하게 하였다.

본 연구의 선량모델은 실험을 통해 구한 자료를 근거로 선량계획전산화를 이루었으므로, 향후 임상응용에 많은 이용이 될 수 있을 것으로 확신한다.

## 참고문헌

1. Utley JF, Essen CF et al: High-Dose Rate Afterloading Brachytherapy in Carcinoma of the Uterine Cervix. *int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* vol 10: pp 2259-2263, 1984.
2. Joslin CAF: Brachytherapy: A Clinical Dilema. *int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* vol 19: pp 801-802.
3. ICRU Report 38: Dose and Volume Specification for Reporting Intracavitary Therapy in Gynecology. 1985.
4. 최태진, 원철호 등: 원격강내조사용 Co-60 선원의 대체용 Ir-192 선원의 조사선량결정 및 선량등방성조사. *의학물리.* 9: 55, 1998.
5. Johns H.E., Cunningham J.R.: *The Physics of Radiology*. 4th ed. Thomas, Springfield, IL, pp.462, 1983.
6. 조운갑, 한현수 등: 강내조사용 <sup>192</sup>Ir 치료선원 제조. 98 춘계학술발표논문집. 한국원자력학회, 1998.
7. Glasgow G.P.: Specific  $\gamma$ -ray constant and exposure rate constant of <sup>192</sup>Ir. *Med. Phys.* 6: 49, 1979.
8. Glasgow GP: Specific  $\gamma$  ray constant and exposure rate constant of <sup>192</sup>Ir. *Med. Phys.* 6(1), 49-52, 1979.
9. Berger MJ, Hubbell JH: National Bureau of Standards Report NBSIR-87.
10. Nath R., Anderson L.L., Luxton G., et.al.: Task Group No.43: Dosimetry of interstitial brachy-therapy sources: Recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee TaskGroupNo.43.No.43.Med.Phys.22: 209, 1995.
11. Buermann L, Kramer HM, Selbach HJ: Reference Air Kerma Rate Determination of an Iridium-192 Brachytherapy Source. *Nucletron-Oldelft Report No.7*, 1995.
12. 최태진, 이호준 외: 코발트-60 선원 대체용 고선량률 Ir-192 선원의 조직선량특성 *의학물리.* 9: 55, 1998.
13. Venselaar 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.

14. 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.



## Dose modeling and its Application of Ir-192 for substitution of Ralstron Brachytherapy source

Ok Bae Kim, Tae Jin Choi, Ho Joon Lee, Jin Hee Kim,  
\*Jeung Ho Park, \*\*Seung Kyu Kim, \*\*\*Woon Gap Cho, Hyun Soo Han

*Keimyung University, \*Marrynol Hospital, \*\*Yeungnam University,  
\*\*\*Korea Atomic Energy Atomic Research and Institute*

We designed high dose rate Ir-192 source which was prepared for substitute the Co-60 source in Ralstron unit (Simatsu, Japan) which is supplied for cervical cancer treatment.

The source dimension is 1.5 mm in a diameter and 1.5mm thickness of cylinder and encapsulated with 3 mm diameter of stainless steel(SUS316L) to substituted for the Co-60 source size.

The Ir-192 source was prepared the dose model for tissue dose computation through the experimental determination of apparent activity and applied the empirical tissue correction factors extended to 20cm distance.

The tissue dose model was applied the 4.69 R/cm-mCi-hr gamma constant and the ratio of energy absorption coefficient of water to that of air showed 1.112 include filtration of the self-absorptions.

In this experiments, we prepared the dose computation software to clinical usefulness.

**Keywords: Brachytherapy, Dose Model, Ralstron**