

원격강내조사용 Co-60 선원의 대체용 Ir-192 선원의 조사선량결정 및 선량 등방성조사

최태진, 원철호, 김옥배*, 김시운**, 김금배***, 조운갑****, 한현수****, 박경배****

계명대학교 의과대학 의공학교실, 치료방사선학교실*, 파티마병원 치료방사선과**,
부산백병원 치료방사선과***, 한국원자력연구소****

고선량률 원격 강내조사 선원은 전량 외국에서 수입되어 왔으며, 최근 Co-60 소선원의 공급부진으로 초기 도입시의 치료시간에 비해 4내지 5배의 시간을 조사하게 되어 대체용 선원의 개발이 크게 요구되고 있다. 이 연구는 국내 하나로 원자로의 중성자를 이용하여 $^{191}\text{Ir}(n,T)^{192}\text{Ir}$ 핵반응을 일으켜 Ir-192 선원 2.87 Ci (밀봉 1.012 Ci)를 생산하고, 고선량률 원격 강내조사선원의 선량특성을 조사하였다. 제작선원에 대한 조사선량률은 아크릴 지지체의 중앙에 아크릴 애플리케이터를 고정하고 선원의 중심으로부터 각각 5, 10, 20 cm 거리에 전리함을 설치하여 일정시간 선원을 노출시켜 측정된 결과 $6.36 \pm 0.147 \text{ Rm}^2/\text{GBq}\cdot\text{hr}$ ($2.350 \pm 0.054 \text{ Rcm}^2/\text{mCi}\cdot\text{hr}$) 을 결정하였으며, 측정오차는 1σ 는 2.2% 였다. 계산선량은 조사선량률 상수 $4.69 \text{ Rcm}^2/\text{h}\cdot\text{mCi}$ 와 Ir-192 에너지 스펙트럼을 이용한 선원자체 및 철에 대한 질량흡수계수를 통해 구했으며, 실제 측정선량과 평균 3.8 % 오차범위에서 일치하였다. 선량 등방성은 선원의 측방향과 축 및 대각선방향으로 전리함을 이용하여 측정된 결과 3 % 이내 균등한 선량을 나타내었으며, 필름선량에서도 균등선량분포를 확인할 수 있었으며, Co-60 선원과 유사한 선량분포를 얻었을 수 있었다. 특히 본 연구의 선량특성조사는 강내조사선량선원 대체용의 선원개발과 선량계획 전산화의 근거가 될 것으로 믿는다.

brachytherapy source, exposure dose rate constant, isotropic isodose

서 론

방사성선원을 병발 부위에 근접조사하는 방법은 방사선체의조사법과 함께 오랜 역사를 지니며, 종양 치료의 성적을 향상 시키는 중요한 치료법이다^{1,2,3)}. 근접강내조사선원은 환부부착, 강내삽입조사 및 조직내 자입조사에 이용되며, 애플리케이터의 개발과 선량계획의 전산화 및 선원크기의 소형화로 시술범위가 넓어져 뇌종양삽입치료와 혈관벽조사에 이르기까지 치료방법의 개발이 활발하다⁴⁾. 방사성물질을 병발부위에 삽입하여 치료하는 근접강내조사에는 수십 mg 의 밀봉방사성 라듐-226 이나 세슘-137 선원을 이용한 저선량률 조사와 비방사능이 높은 수 Ci 의 코발트-60 또는 이리듐-192 밀봉선원을 이용한 고선량률 원격조사가 이용되고 있다⁵⁾. 원격강내조사장치는 치료부위에 시간당 50 cGy 를 조사하는 저선량률 선원에 비해 분당약 50-200 cGy 를 조사

하는 높은 선량률의 방사능 선원이 이용되며, 방사선치료효과를 증대시키는 분할치료와 저선량률의 선원배열 특성을 구현할 수 있으며, 시술자의 방사선 피폭이 거의 없는 특징이 있다⁶⁾.

한편, 고선량률에 의한 원격강내조사선원은 환부가 큰 강내조사에 사용되는 직경이 수 mm 인 선원과 식도 및 폐기관지조사에 이용되는 직경이 약 1 mm 인 선원이 이용되고 있으므로, 시술적용 범위가 넓어져 국내에서는 수작업에 의한 저선량률강내조사 시술에서 점차적으로 고선량률 원격강내조사에 의한 시술로 확대되고 있다⁷⁾.

고선량률 선원은 이론적으로 단위시간당 붕괴입자수가 크므로 비방사능이 높고, 반감기가 대체로 짧게 마련이다. 따라서 고선량률 강내조사선원은 교체가 빈번해지며 선원교체 경비의 부담을 간과할 수 없는 단점이 있다.

방사성 치료선원의 교체는 이용효율에 따라 다르

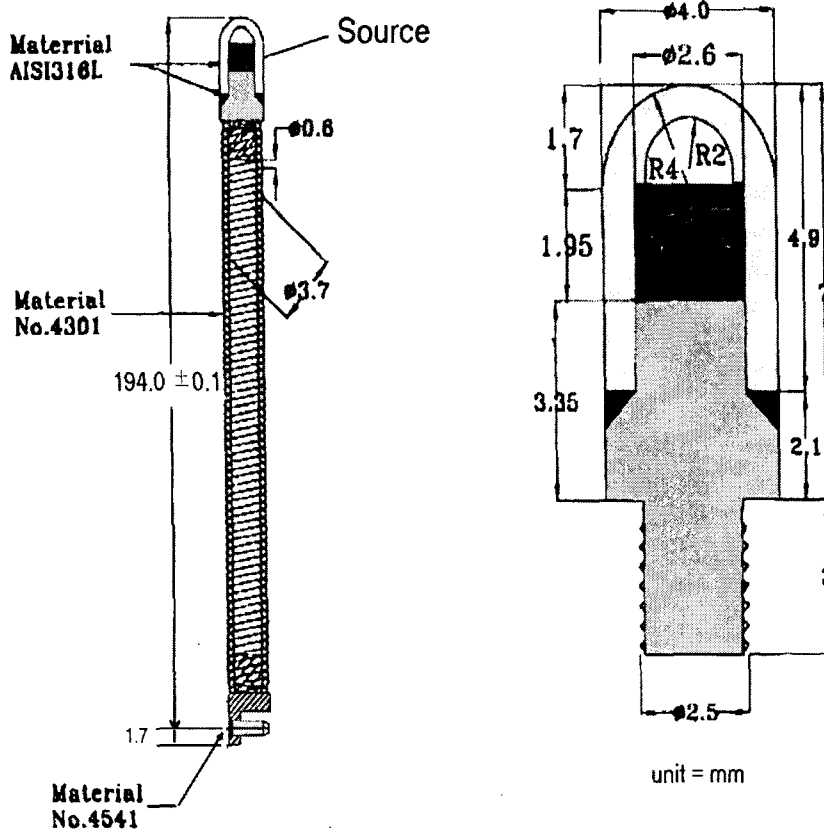


Fig. 1. Schematic diagrams of source connector and detailed stainless steel capsule for the arrangement of disk-types Ir-192 radioactive source.

지만, 대개 1-2 반감기 사이에 대부분 선원을교체 하게 된다.

본 연구에서는 저자의 기관에서 이용하고 있는 원격조사장치(Buchler 3K unit, Germany) 는 강내 조사용 Co-60 소선원을 사용하고 있으며, 국내 병원의 약 1/3 에 해당하는 기관에서 동일한 선원을 이용하고 있으며, 최근 수년 전부터 상업용 Co-60 선원의 생산공급 부진으로 치료시간이 초기도입시 보다 약 4-5 배나 길어져 이용효율을 떨어뜨리는 원인이 되고 있다.

본 연구는 방사능이 극도로 감약된 Co-60 선원을 대체 하기 위해 국내 생산이 가능하고 비방사능이 높은 Ir-192 소선원을 원자력연구소와 공동으로 고안 제작하여 원격조사장치에 이용하기 위하여 제작 선원에 대해 공기 조사선량률, 선량등방성과 선원 및 선원 캡슐의 흡수계수를 이용하여 계산한 선량률을 비교 평가하였으며, Co-60 선원의 선량분포와 비교하여 공급이 원활치 못한 Co-60 선원의 대체용

으로 사용할 수 있는 지를 알아 본다.

대상 및 방법

선원 제작

본 연구에서 고안 및 제작한 Iridium-192 선원은 원격강내조사장치 (Buchler 3K unit) 의 고선량률 선원인 Co-60 선원 대체선원으로 Fig. 1 의 구조로 고안되었다.

선원은 직경 2.5 mm 와 두께 0.25 mm 인 디스크형 천연 Iridium-191 에 국내 원자력연구소의 하나로 원자로에서 중성자로 $^{191}\text{Ir}(n,\gamma)^{192}\text{Ir}$ 핵반응을 시켜 반감기가 74.2일 인 방사성동위원소 Iridium -192 를 생산 하였다. 고선량률 선원은 원자로에서 생성된 디스크형 선원을 10 겹 쌓아 선원두께가 2.5 mm 가 되도록 하였으며, 시험적으로 제작한 디스크형

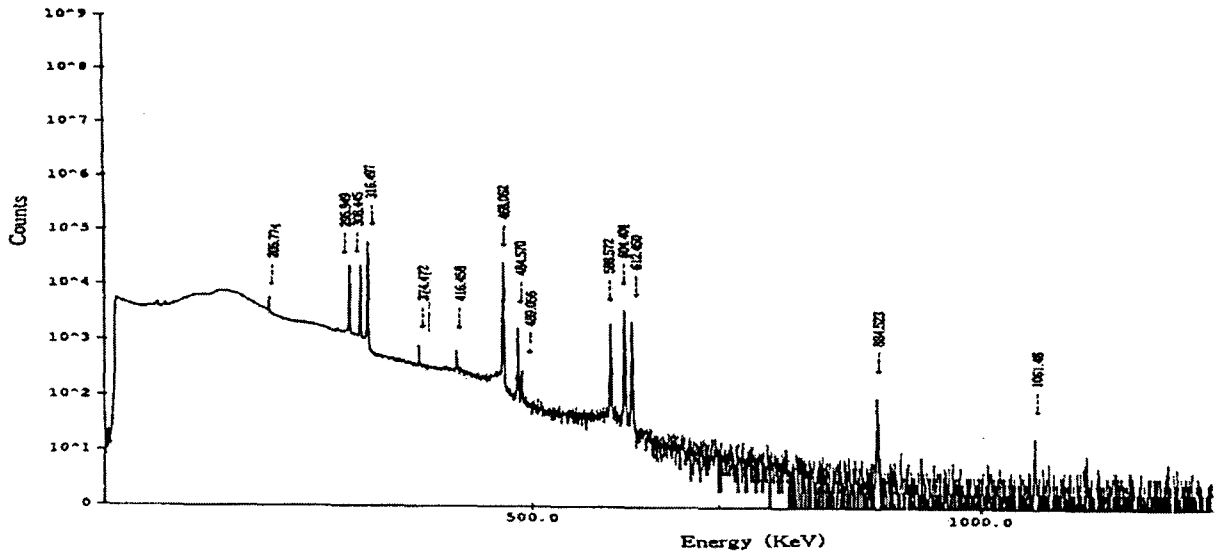


Fig.2. Energy spectrum of Ir-192 source determined by Ge spectrometer.

선원의 평균 방사능강도는 290.4 mCi 이며 $\pm 5\%$ 이내의 오차범위에 생성되었다.

디스크형 선원은 켈셀내에 10겹으로 쌓아 밀봉한 후, 감마선 자기흡수효과 측정을 통해 밀봉선원의 강도는 1.012 Ci 되었으며 향후 10-20 Ci 의 선원을 제작하기 앞서, 시험제작 선원의 선량분포특성을 조사하였다.

선원켈셀의 재질과 규격은 Fig.1 과 같이 직경 4.0 mm 와 길이 5.0 mm 의 스텐레스 스틸에 직경 2.60 mm 의 홈이 있으며, 켈셀의 전단은 반구형이며 내 반경 1.0 mm 의 홈을 주어 선원을 감싸는 용기의 외벽의 두께가 균등하게 0.7 mm 되도록 제작하였다.

선원과 선원이송 연결고리 사이는 0.6 mm 스텐와 이어로 제작한 직경 3.7 mm 스프링으로 구성되어 Buchler 원격강내조사장치의 선원이송장치와 케이블에 연결하여 사용할 수 있게 하였으며, 선원과 연결고리의 외형적 규모는 Co-60 선원과 동일하게 고안 제작 하였다.

방사능 생성

$^{191}\text{Ir}(n, \gamma)^{192}\text{Ir}$ 반응에 대한 열중성자 흡수단면적은 $^{192\text{m}}\text{Ir}$ 생성반응의 400 barn과 ^{192}Ir 이 직접생기는 반응의 540 barn을 합하여 940 barn이다. 원자로에서

생성된 ^{192}Ir 은 다시 1000 barn의 높은 단면적을 가지고 열중성자를 흡수하여 ^{193}Ir (반감기 74.2일)으로 되며 이 때 ^{192}Ir 의 생성수율은 다음 식으로 주어진다.⁸⁾

$$A = \frac{N_0 \phi}{3.7 \times 10^{10} (1 + (\sigma - \sigma') \phi / \lambda)} \times (\exp(-\sigma \phi t) - \exp(-(\lambda + \sigma' \phi)t)) \quad (1)$$

여기에서

A : ^{192}Ir 의 비방사능(Ci/g)

N : g당 표적핵의 수 (아보가드로 수)

σ : ^{191}Ir 의 열중성자 포획단면적(940 barns)

σ' : ^{192}Ir 의 열중성자 포획단면적(1000 barns)

ϕ : 열중성자속 밀도 ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)

t : 조사시간(sec)

λ : ^{192}Ir 의 붕괴상수 이다.

천연 Iridium은 62.7%의 ^{193}Ir 을 포함하고 있으므로 약 110 barn의 중성자흡수단면적을 가지고 $^{193}\text{Ir}(n, \gamma)^{194}\text{Ir}$ 반응에 의해 ^{194}Ir (반감기 19.2시간)을 생성한다. ^{192}Ir 선원은 충분한 기간동안 냉각시켜 불순핵종인 ^{194}Ir 의 방사능을 제거하였다.

일반적으로 사용되는 강내조사용 ^{192}Ir 방사능은 10-20 Ci 이나 시험용 선원은 생성방사능식(2-1식)

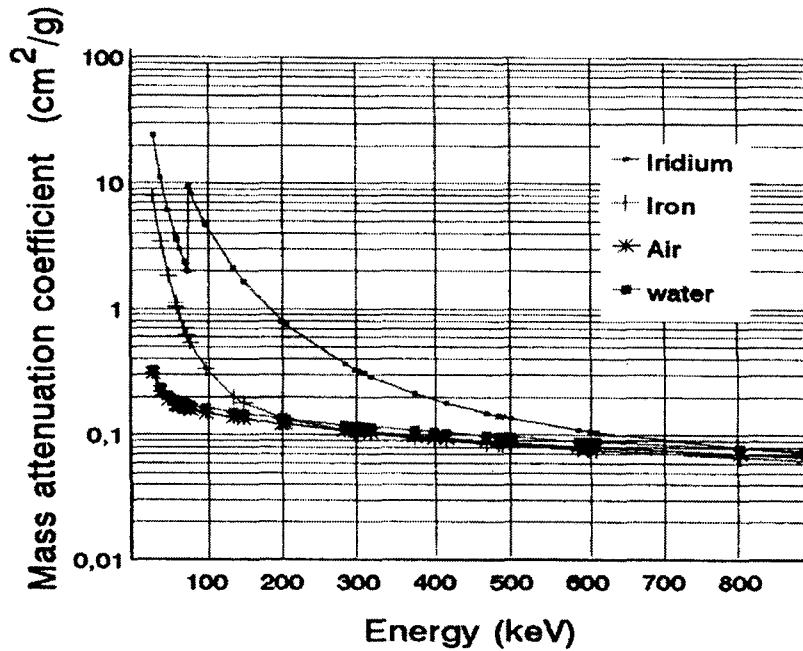


Fig 3. Plot of Mass attenuation coefficient of iridium, iron, water and air as a function of an energy.

을 이용하여 1-2 Ci 의 선원을 제조하여 선량분포와 조사선량률상수를 결정하였다.

중성자조사는 27.6mg인 원판형 Ir 표적을 하나로의 HTS 조사공(열중성자 속은 $3.39 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{sec}$, 출력20MW)에서 48시간 조사시켜 조사종료시점(EOB : End of Bombardment)에서 표적당 293 mCi 정도의 방사능을 얻을 수 있으며, 실제 원자로에서 조사생성된 방사능은 원판형 선원당 평균 290 mCi 를 얻어 선량특성조사에 이용되었다.

Iridium-192 선원은 원판형 선원을 개별 측정후 29일 경과하여 내경 2.6mm (외경4 mm, SUS315 스테리스 스틸) 의 켈술에 봉입하여 시험선원으로 제작되었으며, 우물형 Curie 매터(정밀도 $\pm 3\%$)를 이용하여 측정한 결과 1.012 Ci를 얻었으며, 개별선원의 방사능과 봉입후 측정을 통해 선원의 자체흡수를 이용한 계산선량과 비교하여 측정선량의 정확도를 유지하고자 하였다.

감마선 흡수

켈술에 밀봉된 선원은 선원의 자체흡수와 켈술벽 흡수에 의한 차폐효과에 따라 선량률에 영향을 끼치게 되므로, 선원의 에너지스펙트럼을 이용하여 질량

흡수계수를 구하였다.

제조한 방사 ^{192}Ir 선원의 에너지스펙트럼은 Ge 검출기와 다체널분석기를 이용하여 측정한 결과 Fig.2 와 같다. 에너지스펙트럼에서 나타나는 검출 입자수는 Ge 검출기의 에너지에 따른 감도변화의 보정을 행하였다.

선원의 필터효과를 구하는 데 필요한 질량흡수계수 ($\frac{\mu}{\rho}$) 는 단위시간당 단면적을 지나는 에너지와 입자수에 따라 달라지므로 다중에너지의 스펙트럼을 이용하여 iridium 과 철에 대한 각각의 질량흡수계수를 다음과 같이

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \cdot F_i \quad (2)$$

구하였다. 여기서 $\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i$ 와 F_i 는 각각 i번째 에너지에 대한 질량흡수계수와 입자수의 비를 나타내며 단위는 cm^2/g 이다.

선원의 자체흡수를 계산하는 데 필요한 Iridium ($Z=77, \rho=22.6 \text{ g/cm}^3$)과 철($Z=26, \rho=7.86 \text{ g/cm}^3$) 의 질량에너지흡수계수는 Fig. 3 과 같이 Beger⁹⁾ 등의 자료와 EGS4 시뮬레이션¹⁰⁾을 통해 구한 자료를 이용하였다. 흡수벽을 통과한 출력선량은

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

과 같이 단위면적을 지나는 입자에 의한 조사선량률 상수¹¹⁾ Γ ($4.69\text{Rcm}^2/\text{mCi}\cdot\text{hr}$) 와 방사능 $A(\text{mCi})$ 및 선원의 자기흡수와 켈슬벽의 흡수를 통해 얻을 수 있다.

또한 τ 는 조사시간 (min)을, R 은 선원과 측정평가점간의 거리(cm)를 의미한다. μ_{Ir} 과 μ_{Fe} 는 각각 Iridium 과 철에 대한 선흡수계수이며, T_{Ir} , T_{Fe} 는 선원의 자기 두께와 벽재질의 두께이다. K 는 산란선보정항이다.

조사 선량률

제작 선원에 대한 공기중 조사 선량률($\text{R}/\text{min}\cdot\text{Ci}$) 은 2.5mm 디스크형 선원을 매선원 마다 가로와 세로로 0.125 mm 씩 314 개로 나누어 10 개의 디스크형 선원으로부터 자체흡수와 켈슬벽의 흡수계수를 이용하여 각 지점에 도달하는 선량률을 계산하였으며, 측정으로 구한 조사선량률과 비교 하였다.

공기중 조사선량은 산란선의 영향을 줄이기 위해 아크릴 지지체에 선원과 검출기를 설치하였다.

선원-검출기 지지체는 선원-아프리카이터를 중심으로 한쪽에 10 cm 위치에 표준공기전리함(PR-06, 0.6 cc)을 고정하고, 다른 한쪽에 측정전리함 IC-10 (내경 6mm, 검출용적 0.14 cc)을 5 cm, 10 cm 와 20 cm 위치에 고정시킬 수 있도록 하였으며, 선원과 검출기간의 거리오차는 1/20 mm 범위내에 설치하여 선량을 정밀 측정하였다.

표준 공기중 조사선량률 측정은 250 kV X선에 대해 교정된 Farmer 형 PR-06(Capintec 사) 전리함을 설치하였으며, 측정용 전리함은 IC-10 (Wellofer, Germany)을 선원-아프리카이터와 평행되게 설치하고, 각각 Capintec-192 와 Farmer 2570A (Nuclear Entertainment, England) 전위계로 측정하였으며, 매 위치마다 5분 내지 10분간 5회 측정하여 조사선량을 평가하였다.

선량등방성

강내조사선원의 선량등방성은 임상 적용시 조직선량평가에서 중요한 변수가 되므로, 본 연구에서 제작

된 선원에 대해 필름선량과 공기전리함을 통해 선원 주위의 선량분포를 통해 조사하였다.

필름 선량계측은 선원위치, 검출위치 등 검출조건의 동시성이 우수한 반면, 흑화도-선량특성 곡선(H-D 곡선), 현상조건, 방향성, AgBr 입자의 에너지에 따른 감도변화 등에 대한 보정이 필요하지만, 선량등방성은 H-D 곡선을 이용해 상대적 선량분포를 조사하였다.

계측용 필름은 폴리스탈린 펜텀브록 사이의 홈에 삽입된 아프리카이터 (내경 5 mm ϕ x 두께 0.5 mm 의 스텐레스 스틸 아프리카이터) 의 중앙에 놓인 선원의 중앙레벨에 KODAK X-OMAT V2 필름을 삽입하여 1 분간 조사하여 수동으로 일정시간 현상을 통해 선량분포를 확인하였다.

공기전리함을 이용한 선량등방성 측정은 내경 6mm ϕ 와 길이 10 mm 이며, 용적이 0.14 ml 인 IC-10 (Wellofer, Germany) 공기전리함을 WP-600 수조펜텀의 벽에 아크릴 지지체를 부착시키고, 내경 5 mm 이고 두께 1.1 mm 인 아크릴 아프리카이터를 고정하고 WP600에서 지원되는 수동-검출기 위치결정 방법을 택하였으며, 선원중심은 검출기를 in-plane, cross-plane 및 선원측방향으로 이동하여 최대선량점을 얻어 결정되었다.

선량평가점은 선원의 3차원적 중심으로부터 측방향, 측방향 및 45도 대각선방향으로 각각 10 mm 에서 100 mm 까지 공간선량을 측정하고 기준점(선원 측방 1cm) 의 선량으로 규격화하여 선량 등방성을 조사하였다.

본 연구는 선량등방성, 계산선량과 실측 조사선량을 비교평가 하여 개발선원이 Co-60 선원을 대체해 임상에 적용할 수 있는 지 비교하였다.

결 과

본 연구는 고선량률 원격강내조사선원인 Co-60 선원을 대체하기 위해 Ir-192 선원을 고안제작하고 공기중 조사선량과 선량등방성을 조사하였으며, 제작선원의 에너지스펙트럼을 이용하여 선원의 자기흡수와 선원벽의 흡수감약을 통해 조사된 조사선량률을 구하였다.

Iridium, 철, 물 과 공기에 대한 질량흡수계수는 Berger 와 EGS4에서 제공하는 값을 사용하였다.

Ir-192 선원은 하나로원자로(한국원자력연구소) 의 중성자를 두께 0.25 mm 와 직경 2.5 mm 인 원판형시편에 조사하여 시험용선원(290 mCi/시편)으로

Table 1. Comparison the computed air dose (R/min) at given distance to that of measurement. The measurement doses were within $\pm 3.7\%$ of standard deviation.

Evaluation Mode	Distance (mm) from center of source						
	10	20	30	40	50	70	100
measurement	112.4	27.4	11.2	7.0	4.4	2.1	1.1
computation	110.0	27.1	12.0	6.7	4.3	2.2	1.1
discrepancy (%)	-2.1	-0.7	7.1	-4.0	-2.3	4.8	0.0

Measurement error: 112.4 ± 2.6 R/cm-min-2870 mCi

Table 2. Exposure dose (R/min) was normalized to the 1cm of lateral distance of source center of Ir-192 high dose rate brachysource for an encapsulation with stainless steel.

distance (mm)	Scan Direction				
	Lateral	Longitudinal %	Diagonal	%	
10	100.0	104.2	4.2	100.0	0.0
20	26.1	26.2	0.4	26.4	1.1
30	11.8	11.8	0.0	11.9	0.8
40	6.8	6.6	-2.9	6.7	-1.5
50	4.3	4.2	-2.3	4.3	0.0
70	2.2	2.1	-4.8	2.2	0.0
100	1.1	1.0	-10.0	1.1	0.0

제작되었으며, 시편 10 개를 겹으로 쌓아 4 mm 직경 (2.6 mm 내구경) 의 쥘술용기에 밀봉하여 고선량을 선원을 제작하였으며, 선원의 자기흡수와 쥘술용기를 통과한 방사능은 우물형 Curie 메터로 측정된 결과 1012 mCi 였다.

제작선원에 대해 Ge 반도체검출기(High Purity, Oxford) 로 측정된 스펙트럼은 Fig.2 와 같으며, 생성된 Iridium-192 선원은 불순물의 방사능화를 제거하기 위하여 2 주간 경과후 측정되었다.

Ir-192 선원은 에너지스펙트럼에서 수 KeV에서 MeV 단위에 걸쳐 에너지파고를 보였으며, 방사성입자량은 200 keV에서 885 keV 범위에서 높은 파고를 검출할 수 있었고 전 입자의 99% 가 이 영역에 있다.

수 keV에서 수십 keV 의 영역에 있는 감마선은 수율이 1% 미만으로 극히 낮고, 저에너지 영역의

스펙트럼은 선량에 대한 산란선의 잡음비가 높아 파고가 불분명하여 EGS4 로 계산된 수율을 이용하였다.

에너지스펙트럼을 이용한 입자량은 Cobb PD ⁷⁾ 등의 발표에 따라 Ge 검출기의 에너지에 따른 고유효율을 적용하여 스펙트럼의 에너지별 수율비를 보정한 후 iridium(밀도 22.6 g/cm³) 과 쥘술벽 재질(철, 밀도 7.9 g/cm³) 및 물에 대한 질량감약계수를 구한 결과는 각각 0.25401, 0.09646 와 0.11887 cm²/g 이었다. 한편 측정된 에너지스펙트럼으로부터 계산한 Ir-192 의 평균에너지는 0.38 MeV를 얻었다.

선량계산의 기본이 되는 공기중 조사선량률은 아크릴 지지체의 중앙에 아크릴 아프리케이션터를 고정하고 제작선원(2870mCi) 의 중심으로부터 각각 5, 10, 20 cm 거리에 전리함을 설치하여 일정시간 선원을

Ir-192, 921 mCi

Co-60 1.1 Ci

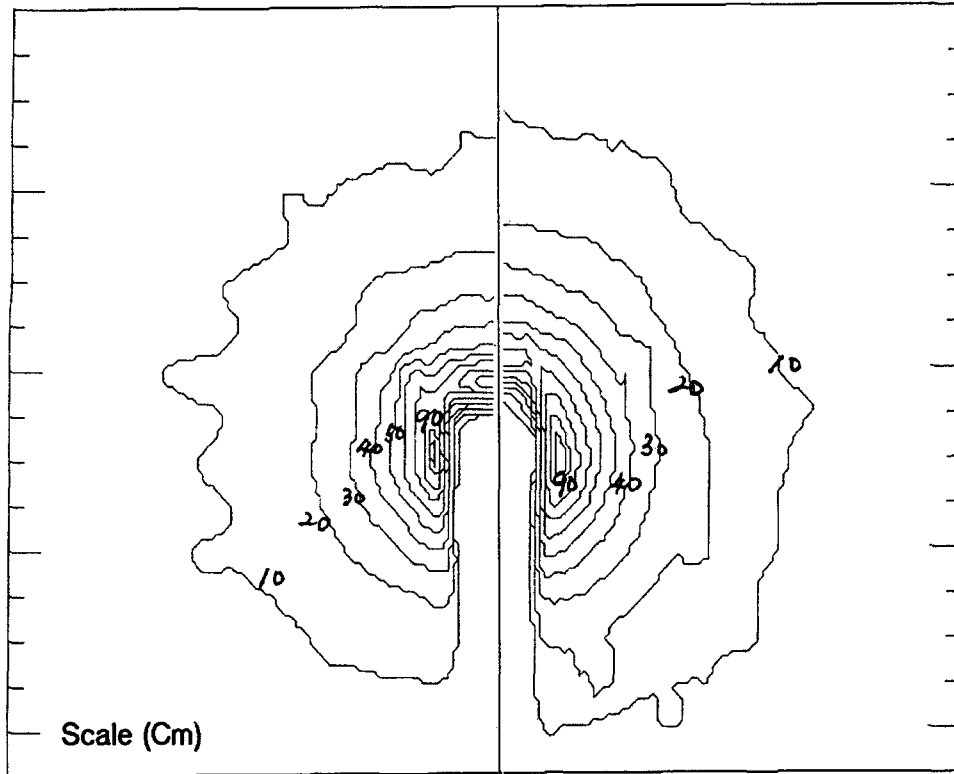


Fig 4. Isodose curves in terms of % around the Ir-192 and Co-60 brachytherapy source. The percent dose represents the normalized dose to 1 cm lateral distance from source center.

노출시켜 측정된 결과 $6.36 \pm 0.147 \text{ Rm}^2/\text{GBq-hr}$ ($2.350 \pm 0.054 \text{ Rcm}^2/\text{mCi-hr}$) 을 얻었으며, 측정 표준편차 1σ 는 2.2% 였다. 방사능(mCi)은 공기중 조사선량률과 식3을 이용하여 Glasgow 가 제시한 조사선량률상수 $4.69 \text{ Rcm}^2/\text{mCi-hr}$ 을 사용하여 계산된 방사능은 1072mCi 임을 알 수 있으며, 이 값은 실측값에 비해 약 6 % 높은 값이었다. 제작한 Ir-192 선원의 켈술벽을 투과한 공기중 조사선량률은 제작선원의 켈술형과 구조에 의해 결정되는 값으로 향후 제작선원의 조사선량률의 지침이 된다. 선원을 중심으로 측방향으로 측정된 선량오차는 $\pm 3.7\%$ 의 표준편차 범위내에 있었으며, 선원의 자체

흡수와 선원켈술벽의 흡수계수를 이용하여 선원을 중심으로 한 측방거리의 계산선량은 Table 1과 같이 나타났다.

계산선량은 동일 위치의 실측선량과 비교한 결과 최대 7.1 R 의 선량오차를 보였으나 평균 $0.4 \pm 3.8\%$ 를 나타내어 실측선량과 잘 일치함을 알 수 있었다.

WP-600 수조펜텀을 이용한 선원 주위의 공간선량으로 선원의 등방성을 조사한 결과, 선원을 중심으로 한 선량분포는 선원의 측방향과 측방향 및 대각선방향으로 공기중 조사선량률을 각각 구한 결과 측방선량을 기준으로 환산한 결과 Table 2 와 같이 나타났

으며, 선량률은 측방향의 동일 지점의 선량을 기준으로 선량차를 비교하였다.

WP-600 펜텀을 이용한 등방성 조사시 검출위치오차는 ± 0.1 mm 이내 였고, 선량분포비교는 선원의 측방 1 cm 의 선량을 중심으로 규격화하였으며, 각각 측방선량을 중심으로 선원축의 선량과 45도 대각 선방향의 선량을 비교한 결과, 절대선량 값이 현저히 낮은 100 mm 위치에서는 최대 10% 차이를 보였다. 특히 유효치료거리의 50 mm 이내에서 선량차는 선원측방향의 선량차가 최대 4.2 %를 보였으며, 대부분 3 % 이내 선량차이를 보여 등방성이 잘 유지됨을 확인하였다.

Fig. 4 는 폴리스탈린 고체펜텀에 삽입된 아프리카이티(재질 철, 내경 5 mm, 두께 0.5 mm) 의 중심축에 필름(Kodak X-omat V2) 을 아프리카이티의 외경과 같이 잘라 필름이 아프리카이티를 둘러싸도록 한 후 암실상태에서 선원을 고정하여 일정시간 노출시킨 다음, WP-102 흑화도 측정기로 구한 선원주위의 선량분포이다.

선량분포의 좌측은 Ir-192 (921 mCi)이며, 우측은 Co-60 (350 mCi) 의 선원으로 각각 측방 1cm 위치의 흑화도로 규격화하여 백분율로 나타낸 선량분포이다.

Ir-192 선원은 에너지가 낮음에도 불구하고 Co-60 의 선량분포와 아주 유사한 값을 보이고 있으며, 동일 선량곡선을 비교한 결과 선원으로 부터 2-3 mm 적은 차이를 보이고 있으며, 선원주위의 선량기울기가 다소 높음을 알 수 있다.

고 찰

선원개발에 가장 중요한 것은 안전성, 오염선원, 켈솔과 선량흡수효과에 의한 선량등방성의 유지라는 점에서 시험제작한 선원의 안정성과 오염선원에 대한 평가는 조¹²⁾ 등에 의해 선원켈솔의 접합, 케이블 연결고리의 안정성이 검토되었으며, Whatman Paper No.10 으로 방사능 누출시험, 음압상태에서 선원표면의 기포발생 여부로 밀봉시험 결과 품질 안전성을 확보하였다.

본 연구에서는 국내에서 시험생산한 원격강내조사 선원에 대한 계산 및 실측 조사선량률을 조사하여 선원자체흡수와 켈솔벽의 흡수를 결정하며, 선량등방성의 조사를 통해 향후 고선량률 선원제작의 기틀을 만들하고자 하였다.

제작선원의 규격은 자궁경부암 치료부위와 같이

치료 반경이 비교적 큰 경우, 직경이 큰 선원에 의한 선량기울기가 작아 아프리카이티 주변의 조직과 사선량이 상대적으로 낮아지는 점을 이용하였으며, 또한 국내에 자궁경부암 치료기의 Co-60 선원공급이 잘 이루어지지 않아 대체용 선원이 시급한 시점에 자궁경부암치료기에 장착할 수 있도록 Co-60 선원과 동일한 모양과 크기로 이루어졌다.

단 ¹⁹²Ir 선원의 평균에너지가 0.38 MeV 로 나타나 켈솔벽의 선량흡수가 높아 선원과 켈솔의 구형 전단에 반경 1 mm 의 공동을 두어 벽두께를 비교적 일정하게 하므로써 선량등방성을 유지하고자 하였다.

근접선원의 선량평가는 선량률이 거리에 따라 급격히 감소하는 특성이 있으므로, 근접거리의 선량측정은 선원-검출기간 거리의 작은 오차에도 높은 선량차를 볼 수 있으므로, 낮은 오차범위에서 공기중 조사선량률을 측정하기 위해서는 선원과 검출기간 거리설정이 매우 중요하다.

또한 선량평가에서 조사선량률의 오차는 재질의 흡수비교와 조직내 흡수선량 결정에 직접 기여하게 된다.

본 연구에서는 국내 하나로원자로에서 생산한 Ir-192 디스크형 선원에 대해 조사선량률을 결정하기 위해 산란이 적은 아크릴 지지대에 아프리카이티를 지지하여 선원을 중심으로 좌측 20 cm 위치에 표준전리함을 설치하여 선량재현성을 확인하였으며, 우측 5cm, 10 cm 와 20 cm 위치에 오차 0.05 mm 이내 측정전리함을 설치하고 선원을 노출시켜 공기 선량률을 결정하였으며, 표준편차가 ± 2.2 % 인 오차 범위에서 측정이 이루어 졌다.

Buermann 등¹³⁾ 에 따르면, 조사선량률의 측정시 산란선을 줄이기 위해 선원으로부터 높이 1.85 m 와 1 - 2 m 위치에 검출기를 설치하여 ± 1.7 % 오차범위내에 측정할 수 있었다고 보고한 바 있으며, NCRP¹²⁾ 에서는 선원에서 1 m 위치에 있는 검출기로 측정하기를 권하고 있다. 본 연구에서는 시험제작된 선원으로 방사능 강도가 낮아 5- 20 cm 위치에서 측정하였으므로 조사선량률에 산란선에 의한 오차가 포함될 것으로 생각된다.

본 연구에서 측정된 선량오차는 Buermann 이 선원-검출기간 거리를 2 m 위치에 두고 측정한 오차범위와 유사한 범위내에서 측정이 이루어진 것으로 생각되므로 향후 고강도 선원에 적용하는 데 무난할 것으로 본다.

특히 공기중 조사선량률은 선원의 규격과 켈솔의 크기와 모양에 따라 달라지게 되므로 정량적인 평가

가 필요하다.

근접선원에 대한 선량특성에는 공기 조사 선량률, 등방성, 재질에 대한 흡수계수와 실측선량 및 이론적 선량의 비교가 필요하여 본 연구에서는 실측한 에너지스펙트럼과 EGS4 및 Berger 가 제공한 이리듐, 철에 대한 흡수계수를 이용하여 계산한 선량과 실측선량을 비교한 결과 상호 잘 일치하였다.

제작선원이 코발트-60 선원의 대체선원으로 개발되어, 선원규격이 서로 다른 외국의 자료와 비교하기 어려우나, 선량률 상수 $4.69\text{Rcm}^2/\text{hr-mCi}$ ($0.111\text{cGy m}^2/\text{hr-GBq}$) 의 적용과 선량측정평가에 신뢰성이 있다고 생각된다.

Ir-192 에 대해 발표되거나 권장하는 감마상수 또는 조사 선량률의 값은 일정하지 않고 여러 값이 있는데, 이것은 계산에 이용된 에너지 스펙트럼의 차이로 알려져 있다.

NCRP 41 에서는 Ir-192 의 에너지스펙트럼을 이용하여 감마상수를 최하 $3.948\text{Rcm}^2/\text{h-mCi}$ 에서 최대 $4.89\text{Rcm}^2/\text{h-mCi}$ 를 권장하였으나, 에너지스펙트럼을 이용하여 Cobb 등에 의해 발표된 가장 최근의 감마상수는 $4.62\pm 0.05\text{Rcm}^2/\text{h-mCi}$ 이고 X선 방출에 의한 조사선량률을 포함한 조사선량률상수는 $4.69\pm 0.05\text{Rcm}^2/\text{h-mCi}$ 이다.

선원에 대한 조사선량률 평가거리는 혈관조사와 같이 수 mm를 조사하는 경우 2-3 cm 범위를 평가하기도 하나, 자궁강내조사의 경우 선원으로부터 10 cm 범위의 선량을 비교 평가하므로써 향후 고선량률 선원에 대한 선량계획 전산화에 충분히 도움이 될 것으로 생각된다.

결 론

본 연구는 자궁경부암치료에 사용중인 고선량률원격강내조사장치의 Co-60 선원 대체용으로 시험제작된 Ir-192 선원에 대해 선량특성을 조사하여 대체용 선원으로 사용할 수 있는 지 조사하였다.

조사된 선량특성중 공기중 조사선량률은 $6.36\pm 0.147\text{Rm}^2/\text{GBq-hr}$ 로 2.2 %의 오차범위에 측정되었으며, 고선량률선원의 선량률 지침으로 이용될 수 있다. Ir-192 제작선원에 대해 전리함을 이용하여 조사한 선량등방성은 $\pm 3\%$ 범위에서 균등한 선량이 조사될 수 있음을 알 수 있었으며, 필름선량계에서 Co-60 선원의 선량분포와 비교하여 동일 선량곡선의 위치를 비교한 결과 불과 2-3 mm 차이를 가지고 있었으며, 선량 등방성의 확인을 통해 제작선원이

Co-60 선원의 대체용 강내조사선원으로써 조금도 손색이 없음을 알 수 있다. 이론적 계산선량이 실측 선량과 3% 이내 잘 일치하므로, 조사선량률상수와 선원자체 및 켈술벽에 대한 흡수계수는 향후 고선량률 선량계획 전산화에 이용에 크게 기여할 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. Utley JF, Essen CF et al(1984) High-Dose Rate Afterloading Brachytherapy in Carcinoma of the Uterine Cervix. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 10:2259-2263
2. Joslin CAF Brachytherapy A Clinical Dilema. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 19:801-802
3. ICRU Report 38(1985) Dose and Volume Specification for Reporting Intracavitary Therapy in Gynecology
4. Macha HN, Koch K et al(1987) New technique for treating occlusive and stenosing tumors of the trachea and main bronchi endbronchial irradiation by high dose iridium-192 combined with laser canalisation. *Thorax* 42:511-515
5. Koch K, Schumacher W et al(1986) Iridium Afterloading Technique, Basic Principles and Effects. *Tumor Diagnostik & Therapie* 7:36-38
6. Glasgow GP et al(1993) Remote Afterloading Technology. *AAPM Report* 41:6-30.
7. 대한치료방사선과학회(1996) 대한치료방사선과 전국통계, 대한치료방사선과학회지 15(3):277-281.
8. Katoh H(1980) Production of Radioisotopic Gamma Radiation Source in JAERI JAERI/M-8810
9. Berger MJ, Hubbell JH National Bureau of Standards Report NBSIR-87
10. Nelson WR, Hirayama H, Rogers DWO(1985) The EGS4 System. SLAC-265
11. Glasgow GP(1979) Specific γ ray constant and exposure rate constant of ^{192}Ir . *Med Phys* 6(1):49-52.
12. 조운갑, 한현수 등(1998) 강내조사용 ^{192}Ir 치료선원 제조. 98 춘계학술발표논문집 한국원자력학회
13. Buermann L, Kramer HM, Selbach HJ(1995) Reference Air Kerma Rate Determination of an

Iridium-192 Brachytherapy Source. Nucletron-
Oldelft Report 7

Determination of Exposure Dose Rate and Isotropic Distributions of Substitute High Dose Rate Ir-192 Source for Co-60 Brachytherapy Source

Tae Jin Choi, Ph.D., Chul Ho Won, Ph.D., Ok Bae Kim, MD*
Shi Woon Kim, M.D.** , Kum Bae Kim, M.Sc***, Un Gap Cho, Ph.D.****,
Hyun Soo Han, Ph.D****, and Kyung Bae Park, Ph.D****.

Medical Bio-Physics Engineering, Radiation Oncology, Keimyung University,
Radiation Oncology, Fatima Hospital**, Radiation Oncology, Pusan In Jae
university*** Hospital, Korean Atomic Energy Research Institute*****

In recent, the demand of development of the high dose rate brachytherapy source increased for substitute for Co-60 source by iridium source, since the supplying Co-60 source is very depressed and the high dose rate brachytherapy sources are entirely imported from the abroad. This study investigated the exposure rates and isotropic dose distributions for the Ir-192 source produced from $^{191}\text{Ir}(n,r)^{192}\text{Ir}$ by nuclear reactor in Korea Atomic Energy Research Institute. The activity of source was obtained an 1.012 Ci (the initial activity without encapsulation was 2.87Ci) by measurement with encapsuled stainless steel. The exposure rate of provided Ir-192 source was determined on $6.36 \pm 0.147 \text{ Rm}^2/\text{h-GBq}$ ($2.350 \pm 0.054 \text{ Rcm}^2/\text{mCi-hr}$) within $\pm 2.2\%$ discrepancy with IC-10 ion chamber (0.14 cc) which was mounted on the acrylic jig to 5, 10 and 20 cm from the center of source. The calculated doses with 22 most significant spectrum lines were corrected with intrinsic efficiency of the germanium detector were compared to measured exposure dose rates within $\pm 3.8\%$ discrepancy. The authors confirmed the high dose rate Ir-192 source could be replaced the long decayed Co-60 source via investigation of the isotropic dose distributions in lateral, source axis and diagonal direction of source center are very closed to within 3% uncertainties. Especially, this exposure rate constant and isotropic dose distribution will be fundamental to build the high dose rate source and develop the computed therapy planning system.

brachytherapy source, exposure dose rate constant, isotropic isodose