

## 근접 방사선치료용 이리듐 선원의 선량분포에 대한 몬테칼로 시뮬레이션

전북대학교 물리학과, 전주예수병원 치료방사선과\*  
원광보건대학 방사선과<sup>†</sup>, 원광대학교 의과대학 치료방사선과학교실<sup>‡</sup>

김승곤 · 강정구\* · 이정옥<sup>†</sup> · 정동혁<sup>‡</sup> · 문성록<sup>‡</sup>

본 연구에서는 근접 방사선치료용 Ir-192 선원의 흡수선량에 관한 물리적 특성들을 몬테칼로 계산을 이용하여 조사하였다. 몬테칼로 계산은 EGS4 코드로 수행하였으며 이를 위하여 원통형 선원과 팬텀 그리고 에너지 분포의 입력과 처리가 가능한 사용자 코드를 작성하였다. 베타선에 대한 계산 결과, 베타선들은 선원과 0.5-5.0 cm 거리에서 전체 흡수선량에 평균 0.02% 기여하는 것으로 나타났다. 이것은 초기 베타선들이 선원과 밀봉물질에서 대부분 흡수를 당하지만 이 과정에서 발생한 저에너지 제동복사 광자들이 원거리까지 기여하기 때문이다. 밀봉물질에 의한 흡수선량의 변화는 백금으로 취한 경우에 평균 2.8% 그리고 철로 취한 경우에 평균 1.1% 감소하는 것으로 나타났다. 몬테칼로 계산으로 구한 반경선량함수는 선원과 0.5-10.0 cm 반경거리 구간에 대하여 TG-43 보고서의 값들과  $\pm 3\%$  이내로 일치하였다. 본 연구에서 작성한 사용자 코드는 다른 종류 및 다른 크기의 선원에 대해서도 계산을 수행할 수 있어서 근접 방사선치료용 선원의 생산 및 가공에 관한 연구에 다양하게 이용될 수 있다.

**중심단어** : 근접 방사선치료, Ir-192, 몬테칼로 계산, EGS4

### 서 론

근접 방사선치료용 이리듐(Iridium, Ir-192) 선원은 반감기가 74.2일인 비방사능이 높은 동위원소로서 고선량을 치료에 이용되고 있다.<sup>1, 2)</sup> 그리고 Ir-192 선원의 감마선 평균에너지는 약 0.4 MeV로서<sup>3)</sup> 1 MeV 이상의 감마선을 방출하는 라듐이나 코발트와 같은 선원들에 비하여 낮아서 사용시설의 차폐가 용이하기 때문에 이 선원의 이용은 점차 선호되고 있다. 또한 국내에서도 고순도 Ir-192의 생산이 가능해짐에 따라 현재 일부 기관에서 사용되고 있는 코발트(Co-60)나 세슘(Cs-137) 같은 선원들도 점차 Ir-192 선원으로 대체될 전망이다.<sup>4, 5)</sup> Ir-192 선원의 이용에 대한 이러한 추세는 앞으로 치료의 목적 및 방법에 따라 이에 적합한 형태의 다양한 선원들이 생산되고 이용될 것임을 암시한다. 최근의 이러한 경향과 함께 의료기관에

서 양질의 방사선치료를 수행하기 위해서는 먼저 주어진 선원에 대한 정확한 물리적 특성과 방사선량의 분포에 대한 연구가 선행되어야 한다.

물리적인 측면에서 Ir-192는 베타붕괴와 전자포획에 의하여 붕괴하는 동위원소이며, 붕괴과정에서 방출되는 광자들은 에너지가 약 1.3 MeV 이하인 감마선들과 수-수십 keV 범위인 특성 x-선들이다.<sup>6, 7)</sup> Ir-192 선원에 대한 연구들은 에너지의 복잡한 방출 특성과 함께 선원과 인접한 영역에 대한 측정의 어려움으로 인하여 이론적 계산과 실험에 있어서 많은 제한을 받는다.<sup>8, 9)</sup> 이로 인하여 일선 기관에서는 방사선치료시 사용선원에 대하여 장비 제작사에서 제공하는 자료나 보고된 일반적인 선원에 관한 자료에 의존하여 선량계산을 수행하는 경우가 많다. 이러한 배경과 함께 본 연구에서는 Ir-192 선원의 기하구조와 에너지 분포를 입력하고 계산할 수 있는 몬테칼로 계산코드를 작성하고 이를 이용하여 베타선의 기여와 밀봉물질의 효과와 같이 측정이 어려운 인자들을 구하였다. 또한 물 팬텀 속에 위치한 선원에 대하여 선량계산에 직접 적용되는 반경선량함수를 구하여 알려진 자료들과 비교하였다. 다음의 재료 및 방법에서는 Ir-192 선원의 붕괴특성과 기하학적 형태 그리고 몬테칼로 계산코드에 대하여 설명하였으며, 이어지는 결과에서는 계산의 결과들을 도식으로 제시

이 논문은 2002년 9월 18일 접수하여, 2002년 10월 3일 채택됨.  
이 논문은 2001년도 전북대학교의 지원 연구비에 의하여 연구되었음

책임저자: 김승곤, (561-756) 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가  
전북대학교 물리기술학과  
Tel : 063)270-3335,  
E-mail : skkimb@moak.chonbuk.ac.kr

하고 분석하였다. 마지막으로 결론에서는 본 논문의 결과들을 정리하고 결론을 제시하였다.

## 재료 및 방법

### 1. Ir-192 붕괴특성

Ir-192의 핵은 매 붕괴시 약 95.2%의 분지율로  $\beta$ -붕괴 그리고 약 4.8%의 분지율로 전자포획을 일으키며 붕괴후 불안정한 핵들은 감마선을 방출하고 안정한 상태로 변화한다. 베타붕괴에서 방출되는 전자들은 0에서 끝점에너지(end point energy)까지 연속적으로 분포하며 평균에너지는 일반적으로 끝점에너지의 1/3 이다.<sup>10) LBNL<sup>11)</sup></sup> (Lawrence Berkeley National Laboratory)에 의하면 Ir-192 선원에 대한 끝점에너지는 0.25, 0.53, 그리고 0.67 MeV이며, 각각에 대한 분지비(branching ratios)는 5.4%, 42.6%, 그리고 47.2% 이다. 이 베타선들은 선원내부에서 충돌과 이온화에 의하여 자체 흡수될 수 있지만 제동복사에 의하여 광자의 형태로 방출될 수 있다. Ir-192 핵의 붕괴과정에서 방출되는 감마선들은 약 0.1 MeV에서부터 1.3 MeV의 에너지까지 분포되는데 평균에너지는 약 0.4 MeV 이다. Table 1에 Ir-192 선원에 대한 LBNL의 스펙트럼 자료에서 1 붕괴당의 방출확률이 0.01% 이상인 감마선들만을 선정하여 수록하였다. 이 표로부터 Ir-192 핵의 붕괴당 평균적 방출 광자수는 2.171 photons/decay (217.1%) 임을 알 수 있다. 이 값은 베타선에 대하여 분지비로부터 0.952 electrons/decay (95.2%) 임을 알 수 있는데, 이 값들은 본 논문의 결과에서 두 선원의 기여를 서로 분리하여 비교할 때 가중인자로서 사용된다. 따라서 Ir-192 선원으로부터 방출되는 전체 에너지 플루언스는 베타선과 감마선의 에너지 플루언스에 대한 합으로 주어지며, 이로부터 팬텀 속에 위치한 선원에서 임의의 거리  $r$ 의 흡수선량  $D_{total}(r)$ 은 다음과 같이 베타선과 감마선에 의한 기여의 합으로 표현할 수 있다.

$$D_{total}(r) = D_{\beta}(r) + D_{\gamma}(r) \dots\dots\dots (1)$$

그렇지만 공간적으로 베타선과 감마선 그리고 베타선에 의하여 발생된 광자들의 에너지 플루언스가 서로 중첩되어 있으므로 이들을 분리하여 측정하는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서는 주어진 베타선과 감마선의 에너지 분포를

이용하여 물팬텀 속에 놓인 선원에 대한 몬테칼로 계산을 독립적으로 수행하여 전체 흡수선량에 대한 베타선의 기여를 조사하였다. 이 계산에서 베타선의 초기 에너지 결정은 앞서 언급한 베타붕괴의 세가지 모드에 대하여 주어진 분지비를 이용하여 하나의 붕괴모드를 선택하고, 선택된 모드에 대한 평균에너지로서 끝점에너지의 1/3을 취하는 방법으로 수행하였다. 또한 실제로 이용되는 선원의 형태를 반영하기 위하여 선원을 둘러싸고 있는 밀봉물질을 포함하여 계산을 수행하였다.

Table 1. The  $\gamma$ -ray spectrum from the Ir-192 source used in our monte carlo calculations

Photon energy (MeV)	Emission probability (%) per decay
0.1101	0.0126
0.1363	0.183
0.1770	0.0043
0.2013	0.472
0.2058	3.3
0.2800	0.023
0.2833	0.262
0.2960	28.67
0.3085	30.0
0.3165	82.81
0.3293	0.0185
0.3745	0.721
0.4165	0.664
0.4205	0.0737
0.4681	47.83
0.4846	3.184
0.4853	0.0022
0.4890	0.443
0.5886	4.515
0.5934	0.0426
0.5994	0.0039
0.6044	8.23
0.6125	5.309
0.7040	0.0053
0.7658	0.0015
0.8845	0.2923
1.0615	0.0528
1.0897	0.0011
1.3783	0.0012
Total	217.12

2. 밀봉물질

근접 방사선치료용 이리듐 선원의 형태는 중심에 원통형 이리듐 코어(core)가 있고 주변은 강철 또는 백금으로 밀봉되어있다. 선원의 크기는 선원이나 장비 제작회사에 따라 다른데 일반적으로 외경이 1 mm, 길이가 5 mm 이며, 코어의 직경은 0.6 mm, 길이는 3.5 mm 이다. 선원을 둘러싸고 있는 밀봉물질은 반경방향으로 두께가 0.25 mm 인 강철 또는 0.05 mm인 백금이 사용되며 세로방향으로의 두께는 0.8-1.0 mm 이다. Fig. 1에 근접 방사선치료용 장비(GAMMAMED 12I)에서 사용하는 이리듐 선원의 기하구조를 나타냈다. 이 그림에 보인 대로 순수한 Ir-192 선원은 반경방향으로 0.25 mm 그리고 길이방향으로 0.8 mm의 두께를 가지는 강철로 밀봉되어 있음을 알 수 있다. 따라서 순수한 선원으로부터 방출된 감마선들은 밀봉물질과의 상호작용에 의하여 1차 선속의 감쇠를 당하는 한편 부가적인 산란선들의 발생에 기여할 것이다. 여기서 감마선의 상호작용은 광자의 에너지 및 밀봉물질의 종류 및 형태에 의존하는데, 본 연구에서는 밀봉물질에 의한 흡수선량의 변화를 고찰하기 위하여 철과 백금으로 밀봉된 선원에 대하여 흡수선량의 분포를 각각 계산하고 순수한 선원에 대한 계산결과와 비교하였다. 이 계산에 적용된 밀봉물질의 두께는 현행 사용되는 선원의 형태와 일치하도록 철의 경우에 0.25 mm 그리고 백금의 경우에 0.05 mm를 취하였다.

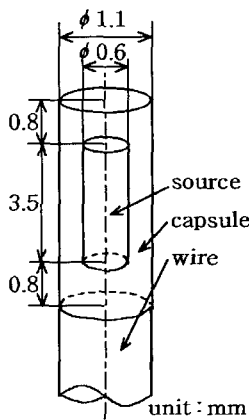


Fig. 1. The geometry of the Ir-192 source in the capsule.

3. 반경선량함수

반경선량함수(radial dose function)는 물 팬텀속에 위치한 선원에서 방출된 광자들에 의한 흡수선량의 변화를 거리의 함수로서 나타내는 함수이다. 수학적으로 반경선량함수  $g(r)$ 은 선원의 중심에서 반경방향으로의 거리  $r$  (cm)에서의 흡수선량이  $D(r)$ 로 주어질 때, 다음 (2)식과 같이 기준거리  $r_0=1$  cm에 대하여 규격화한 흡수선량의 비로 정의된다.<sup>12)</sup>

$$g(r) = \frac{D(r)G(r_0)}{D(r_0)G(r)} \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $G(r)$ 는 선원의 형태가 점선원이 아닌 경우에 자유공간에서 광자의 플루언스가 선원의 길이 및 선원과 의 거리와 각도에 의존하여 감쇠하는 성질을 나타내는 기하구조인자(geometry factor)이다. 이 식에서  $G(r)$ 은  $D(r)$ 에 포함된 거리에 따른 광자의 공간적 플루언스의 변화를 상쇄시키기 위한 인자로서 작용한다.  $G(r)$ 은 점선원에 대하여 단순히  $G(r) = 1/r^2$  이지만, 길이가 유한한 선원에 대해서는 계산점에서의 각도 의존성이 고려된다. ICWG<sup>13)</sup>(Interstitial Collaborative Working Group) 및 TG-43<sup>14)</sup>(AAPM Task group)에 의하면 길이가  $L$ 인 선원에 대하여 기하구조인자의 근사식은 다음과 같다.

$$G(r, \theta) \approx \frac{\beta}{Lr \sin \theta} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 각도  $\theta$  및  $\beta$ 의 정의는 Fig. 2에 나타낸 바와 같다.

$g(r)$ 은 방사선치료에서 조직내 흡수선량의 결정에 이용되는 중요한 인자이며, 선원과의 거리  $r$ 만의 함수로서 측

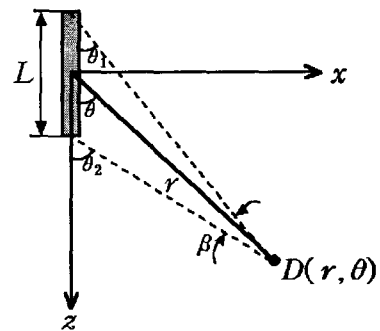


Fig. 2. The variables defined for the mathematical descriptions of the source.

정 가능한 양이다. 그러나 근접 방사선치료에서 통상 거리는  $r=1-5$  cm 이기 때문에 일반적인 측정기를 이용한 직접측정은 측정기들의 체적에 따른 위치의 높은 불확정성으로 인하여 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 물팬텀 속에 위치한 Fig. 1의 형태를 가지는 선원에 대하여 몬테칼로 계산을 수행하고 이로부터 선원의 반경방향에 대하여 결정된  $D(r)$ 과  $L=0.35$  cm인 선원에 대하여 (3)식으로 계산한  $G(r)$ 를 이용하여  $g(r)$ 을 구하였다. 구해진  $g(r)$ 은 TG-43에 수록된 값들과 비교하였으며, 또한 Meisberger 등<sup>15)</sup>에 의하여 제안된 다음과 같은 다항식  $g_M(r)$  으로 계산한 값들과도 비교하였다.

$$g_M(r) = 1.0128 + 0.00502r^2 - 0.00118r^3 - 0.00002r^4 \quad \dots\dots\dots (4)$$

이 식은 선원과 인접한 거리에서 측정값과 잘 일치하는 것으로 알려져 있으며,<sup>14)</sup> 현재 근접 방사선치료 치료계획장치(GAMMAMED Co.)에도 내장되어 선량계산에 이용되고 있다.

4. 몬테칼로 계산

본 연구에서 몬테칼로 계산에 이용한 코드는 EGS4<sup>16)</sup> (electron gamma shower ver. 4) 이다. EGS4는 SLAC (Stanford linear accelerator center)에서 전자와 광자의 전자기적 상호작용을 연구하기 위하여 개발한 몬테칼로 계산 프로그램이다. EGS4는 표준 부함수, PEGS4 코드,

그리고 사용자 코드(user code)로 구성되어 있으며, 본 연구에서 계산을 위하여 작성한 사용자 코드의 주요구성은 Fig. 3과 같다. 이 그림에서 점선으로 둘러 쌓인 부분이 사용자 코드이며 나머지 부분은 EGS4 고유의 코드들이다.

몬테칼로 계산의 기하구조는 반경과 깊이로써 기술되는 원통형 좌표계를 기본으로 하는데, 이것은 팬텀의 구조를 선원의 형태와 동일한 원통형으로 취함으로써 입자의 수송시 기하구조의 처리를 쉽게 하기 위해서이다. 이 사용자 코드에서 입자의 수송을 처리하는 순서는 먼저 팬텀 영역을 물질과 좌표로서 정의하고, 이어서 입자의 발생위치, 초기방출방향, 그리고 초기 에너지와 같은 수송의 매개변수들을 표본추출로서 결정하는데, 여기서 표본추출에 대한 수학적 방법은 Weaver 등<sup>17)</sup>의 논문을 참고하였다. 결정된 수송의 매개변수들은 EGS4의 표준 부함수 (standard subroutines)로 전달되며, 이 때 사용자 코드는 이 함수로부터 계산되는 결과들을 수집하여 최종적인 결과들을 출력시킨다.

흡수선량은 주어진 물질구조에서 입자의 수송을 처리하는 과정에서 물질에 흡수되는 에너지로부터 계산할 수 있다. 계산에서 기하구조를 다룰 때 임의의 물질영역 번호  $i$ 의 밀도와 체적이 각각  $\rho_i$ 와  $\Delta v_i$ 이고 이 영역에서 흡수된 총에너지가  $\Delta \epsilon_i$ 이면  $i$  영역의 흡수선량은 다음과 같다.<sup>18, 19)</sup>

$$D_i = \frac{1}{\rho_i} \frac{\Delta \epsilon_i}{\Delta v_i} \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서  $\Delta \epsilon_i$ 는 광자와 전자가 물질과 상호작용하는 과정에서 에너지 흡수에 기여하는 모든 물리량들의 합이다. 입자의 수송은 에너지가 초기에 정한 하한 에너지에 도달할 때까지 계속되며 본 계산에서 하한 에너지는 광자와 전자에 대하여 각각 10 keV이다. 본 연구에서는 선원영역에서 발생하는 천만개의 방출입자에 대하여 계산을 수행하였으며, 이 때 계산용 컴퓨터는 Pentium III(Intel Co.) 기종이었고 포트란 컴파일러는 LF95(Lahey/Fujitsu Co. fortran 95, version 5.6a) 이었다.

결 과

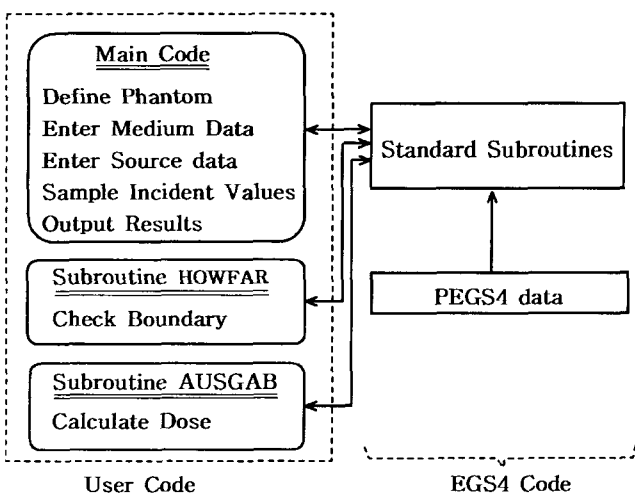


Fig. 3. The user code and the main elements of the code EGS4.

Ir-192 선원에 대하여 물질속의 전체 흡수선량에 대한 베타선의 효과는 감마선과 베타선의 동일한 입사입자 수

에 대하여 독립적으로 수행된 몬테칼로 계산결과에 각각 붕괴시의 가중인자를 곱함으로써 평가할 수 있다. Fig. 4는 감마선과 베타선의 흡수선량에 대한 몬테칼로 계산결과인데, 선원영역에서 방출되는 동일한 입자수에 대하여 반경거리에 따라 저장되는 흡수선량을 독립적으로 계산하고, 여기에 가중인자로서 감마선에 대하여 2.171 photons/decay 그리고 베타선에 대하여 0.952 electrons/decay를 각각 곱한 후 선원의 중심으로부터 1 cm 거리에서 감마선에 대한 흡수선량을 1로 일반화하여 나타낸 그림이다. 이 그림에서 베타선의 효과는 매우 낮지만 선원으로부터 수 cm 영역까지 기여하는 것을 알 수 있다. 이것은 운동 에너지가 0.5 MeV인 전자의 비정미 물에서 약 1.8 mm

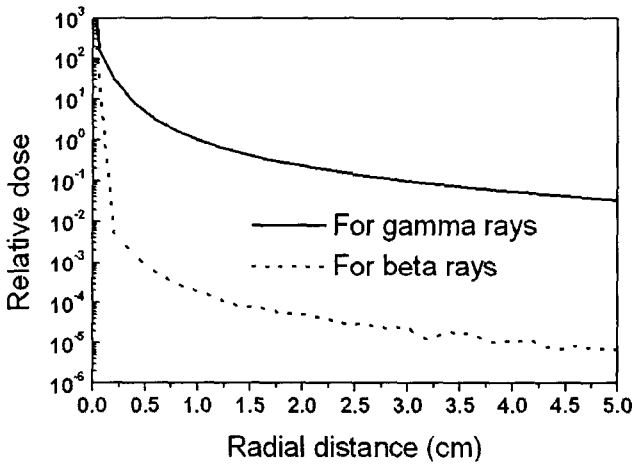


Fig. 4. Comparison of the absorbed doses for the  $\gamma$ -rays and  $\beta$ -rays from the Ir-192.

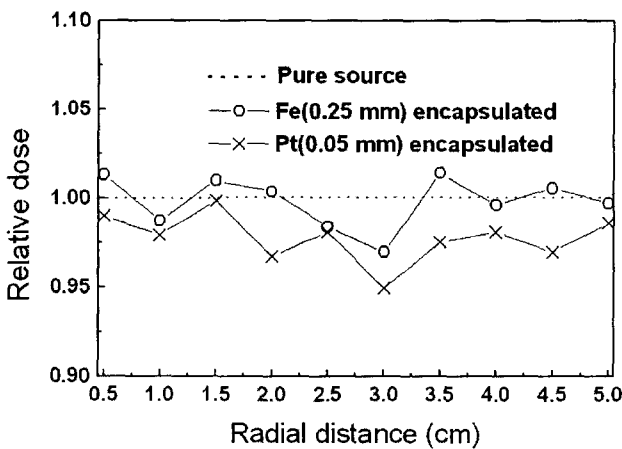


Fig. 5. Variation of the absorbed doses in the encapsulation materials.

인 점으로 미루어 베타선의 직접적인 기여라고 보기 어려우며, 베타선들이 선원과 밀봉물질에서 흡수되는 과정에서 발생된 수-수십 keV의 에너지를 가지는 제동복사선들이 원거리까지 기여하기 때문이라고 해석할 수 있다.<sup>6,7)</sup> 이 그림의 자료들을 분석한 결과 베타선의 전체 흡수선량에 대한 기여는 선원과 0.5-5.0 cm 거리 구간에서 0.017-0.025% 범위를 가지며 평균값은 0.02%인 것으로 나타났다.

밀봉물질에 의한 효과는 Fig. 5와 같이 나타났다. 이 그림은 순수한 선원의 중심으로부터 반경방향으로 임의의 거리(radial distance)에서의 흡수선량 값을 1로 취했을 때 철과 백금의 밀봉물질에 대한 상대적 흡수선량을 나타낸 것이다. 이 그림에서 두께가 0.05 mm인 백금으로 밀봉한 경우에 선원과 0.5-5.0 cm 거리이내에서 상대적 선량비가 평균 0.972로 나타났는데, 이것은 백금으로 밀봉한 경우에 이 거리구간에서 흡수선량이 평균 2.8% 감소하는 것을 의미한다. 두께 0.25 mm인 철의 경우에는 상대적 선량비가 0.989로서 평균 1.1% 감소하는 것으로 나타났다. 이 결과들은 물질에서 광자의 지수함수적 감쇠 성질로부터 근사적인 설명이 가능하다.

선원영역에서 광자의 초기 플루언스가  $I_0$  일 때 물질속 선원과의 거리  $x$ 에서 광자의 플루언스는  $I = I_0 e^{-\mu x}$ 로 주어진다. 이 때 밀봉물질의 두께가  $t$  이면, 밀봉물질을 통과한 광자의 플루언스  $I_w = I_0 e^{-\mu t}$ 와 동일 두께의 물을 통과한 플루언스  $I_w = I_0 e^{-\mu' t}$ 의 비는 다음과 같다.

$$I/I_w = e^{(\mu_w - \mu)t} \dots\dots\dots (6)$$

여기서  $\mu$ 와  $\mu_w$ 는 각각 밀봉물질과 물에 대한 선형감쇠계수이다. 이때 감마선의 평균에너지인 0.38 MeV에 대한 선형감쇠계수들을 이용하여  $I/I_w$ 를 계산하면, 백금에 대하여  $I/I_w = 0.977$  그리고 철에 대하여  $I/I_w = 0.984$ 를 얻을 수 있다.

이 근사값들은 평균에너지에 대하여 그리고 광자의 산란을 무시한 1차선에 대하여 계산되었지만 몬테칼로 계산결과와  $\pm 1\%$  이내로 일치한다. 이 계산에서 적용된 선형감쇠계수들은 백금, 철, 그리고 물에 대하여 각각  $\mu_{Pt} \approx 4.75 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\mu_{Fe} \approx 0.74 \text{ cm}^{-1}$ , 그리고  $\mu_w \approx 0.11 \text{ cm}^{-1}$ 이며 이 값들은 EGS4<sup>16)</sup>의 단면적 자료들과 Attix<sup>18)</sup>의 문헌으로부터 취해졌다.

Fig. 6은 Fig. 2에 주어진 기하구조에서 가로방향(x축)

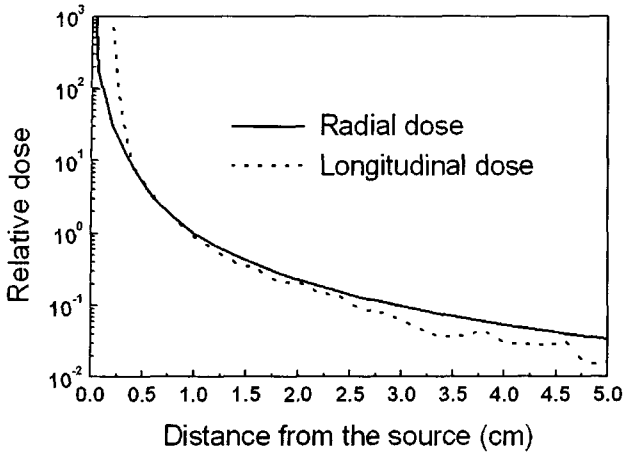


Fig. 6. Comparisons of the radial absorbed doses with the longitudinal absorbed doses.

과 세로방향(z축)에 대하여 몬테칼로 방법으로 계산한 물 패턴 속에서의 선량분포이다. 이 그림에서 흡수선량 변화는 선원중심으로부터 1 cm 미만의 거리에서는 세로방향의 흡수선량이 높은 반면 거리가 멀어질수록 반경방향의 흡수선량이 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 관측점에서 광자의 플루언스가 선원의 형태 및 밀봉물질의 두께에 의존하기 때문인데, Fig. 1에 나타난 선원과 밀봉물질의 형태로부터 해석할 수 있다.

길이가 유한한 선원의 경우에 선원의 중심으로부터 가까운 거리에서는 선원은 점선원으로 간주할 수 없으며 이 거리에서의 흡수선량은 선원표면과의 거리에 강하게 의존할 것이다. 따라서 Fig. 1과 같은 선원에 대하여 선원의 표면과 가까운 세로방향에 대한 흡수선량이 가로방향보다 높게 나타났을 것이다. 그러나 거리가 멀어질수록 선원은 점선원으로 근사화되며 광자 플루언스는 밀봉물질의 두께에만 의존하게 되어 거리의 증가에 따라 세로방향의 흡수선량이 가로방향보다 낮아지는 것으로 해석할 수 있다.

Fig 7은 식(2)로 주어지는 반경선량함수의 값들인데, 이 그림에는 본 연구의 몬테칼로 계산 결과와 TG-43 보고서<sup>14)</sup> 그리고 Meisberger 등<sup>15)</sup>에 의하여 연구된 값들이 함께 제시되어있다. 이 그림에서 보여지는 바와 같이 본 연구의 결과가 TG-43 보고서의 값들과 잘 일치함을 알 수 있는데, 상호간의 차이는 0.5-10.0 cm 거리구간에 대하여  $\pm 3\%$  이내인 것으로 나타났다. 이러한 결과들의 상호간 차이는 앞서 언급하였듯이 반경선량함수가 선원의 형태 및 밀봉물질의 두께에 의존하기 때문으로 생각한다.

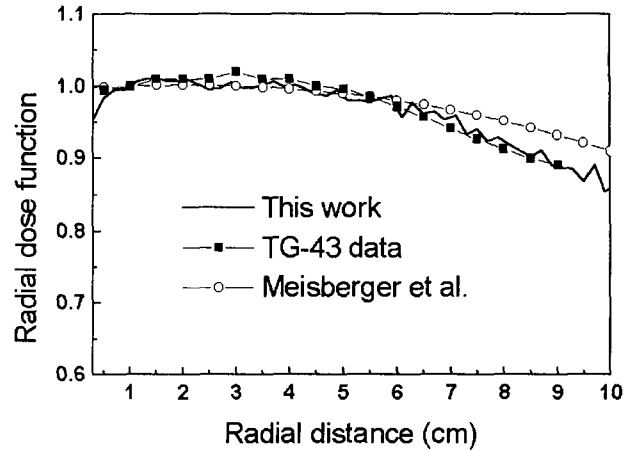


Fig. 7. Comparison of our calculated radial dose functions for the Ir-192 with the published values.

그러나 TG-43 보고서에 수록된 반경선량함수의 값들은 선원의 크기나 밀봉물질에 대한 언급이 없기 때문에 여기서 자세히 분석할 수는 없다. (4)식으로 주어지는 Meisberger 등의 다항식은 0.2 mm 두께의 강철로 밀봉된 선원(길이: 3 mm, 직경: 0.5 mm)에 대한 실험적 연구로부터 구해진 피팅(fitting)식이다. 이 다항식으로 계산한 값들은 근거리에서 다른 값들과 잘 일치하지만 거리가 멀어질수록 높게 나타났으며 이것은 문헌들에서의 분석과 일치한다.<sup>1, 2, 14)</sup>

### 고안 및 결론

본 연구에서는 근접 방사선치료용 Ir-192 선원의 물리적 특성에 대한 몬테칼로 계산을 수행하였다. 특히 본 연구에서는 측정이 어려운 베타선에 대한 효과를 계산하였으며, 계산결과 베타선들이 전체 흡수선량에 약 0.02% 기여함을 알 수 있었다. 본 베타선의 계산에서는 각 붕괴모드에 대한 베타선의 평균에너지만을 취했는데 만약 베타선의 정확한 에너지 분포를 취하는 경우에 그 결과는 보다 정확할 것이다. 그렇지만 전체 흡수선량에 대한 베타선의 기여는 감마선에 비하여 극히 적을 것이며, 방사선치료의 측면에서 베타선의 효과는 무시할 수 있다고 생각한다. 그리고 밀봉물질의 효과는 현행 사용되고 있는 형태의 백금과 철의 밀봉선원에 대하여, 각각 2.8%와 1.1%의 흡수선량의 감소가 나타남을 알 수 있었다. 본 연구에서 몬테칼로 계산으로 구한 반경선량함수는 선원과 0.5-

10.0 cm 거리구간에서 TG-43 보고서의 값들과  $\pm 3\%$  이내에서 잘 일치하는 것으로 나타났다. 본 연구의 몬테칼로 계산결과들은 측정이 어렵거나 거의 불가능하기 때문에 Ir-192 선원의 생산과 가공에 관한 연구 및 방사선치료의 선량계산에 유용하게 이용될 수 있다. 또한 본 연구에서 작성한 EGS4 사용자 코드는 다른 종류의 선원 및 다른 크기의 선원에 대해서도 계산을 수행할 수 있기 때문에 근접 방사선치료용 선원의 연구에 다양하게 응용될 것이다.

### 참 고 문 헌

1. AAPM TG-56: Code of practice for brachytherapy physics. Med Phys 24:1557-1598 (1997)
2. AAPM TG-59: High dose-rate brachytherapy treatment delivery. Med Phys 25:375-403 (1998)
3. Goetsch S.J., Attix F.H., Pearson D.W., Thomadsen B.R.: Calibration of  $^{192}\text{Ir}$  high-dose-rate afterloading systems. Med Phys 18:462-467 (1991)
4. 김옥배, 최태진, 김진희, 이호준, 박정호, 김성규, 조운갑, 한현수: Ralstron 선원대체형 Iridium-192 선원의 선량모델링과 응용. 의학물리학회지 11:131-139 (2000)
5. 최태진: Ralstron 선원대체형 Ir-192 원추선원의 선량전산화 모델링. 의학물리학회지 12:19-28 (2001)
6. Borg J., Rogers D.W.O.: Monte Carlo Calculations of Photon Spectra in Air from  $^{192}\text{Ir}$  Sources. NRC-report PIRS 629r, Ottawa, Canada (1999)
7. Borg J., Rogers D.W.O.: Spectra and air-kerma strength for encapsulated  $^{192}\text{Ir}$  sources. Med Phys 26:2441-2444 (1999)
8. Williamson J.F.: Comparison of measured and calculated dose rates in water near I-125 and Ir-192 seeds, Med Phys 18:776-786 (1991)
9. Serago C.F., Pisciotto V., Schwade J.G., Abitbol A.A., Lewin A.A., Poole D.O., Marcial-Vega V.: Scattering effects on the dosimetry of Iridium-192. Med Phys 18:1266-1270 (1991)
10. Tsoufanidis N.: *Measurement and Detection of Radiation*. Hemisphere, U. S. (1983), pp. 93-98
11. Chu I S.Y.F., Ekstrom L.P., Firestone R.B.: WWW Table of Radioactive Isotopes Ver. 2.0, Lawrence Berkeley National Laboratory, home page: <http://ie.lbl.gov/toi/index.asp> (1999)
12. Khan F.M.: *The Physics of Radiation Therapy*. 2nd ed. Williams & Wilkins, Baltimore (1984), pp. 440-442
13. ICWG: Interstitial Brachytherapy: Physical, Biological, and Clinical Considerations. Interstitial Collaborative Working Group, Raven, New York, (1990)
14. AAPM TG-43: Dosimetry of Interstitial Brachytherapy Sources. Med Phys 22:209-234 (1995)
15. Meisberger L.L., Keller R.J., Shalek R.J.: 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)
16. SLAC Report-265: *The EGS4 Code system*. Stanford Linear Accelerator Center (1985)
17. Weaver K., Siantar C.H., Xhandler W., White R.M.: A source model for efficient brachy computations with Monte Carlo. Med Phys 23:2079-2084 (1996)
18. Attix F.H.: *Introduction to Radiological Physics and radiation Dosimetry*. John Wiley & Sons, New York (1986), pp. 160-199
19. Jenkins T.M., Nelson W.R., Rindi A.: *Monte Carlo Transport of Electrons and Photons*. Plenum press, New York (1988), pp. 323-341

## Monte Carlo Simulation for Dose Distributions from Ir-192 in Brachytherapy

Seung Kon Kim, Jeong Ku Kang<sup>\*</sup>, Jeong Ok Lee<sup>†</sup>,  
Dong Hyeok Jeong<sup>‡</sup> and Sun Rock Moon<sup>‡</sup>

*Department of Physics, Chonbuk National University, Korea*

*<sup>\*</sup>Department of Radiation Oncology, Presbyterian Medical Center, Jeonju, Korea*

*<sup>†</sup>Department of Radiotechnology, Wonkwang Health Science College, Korea*

*<sup>‡</sup>Department of Radiation Oncology, Wonkwang University, School of Medicine, Iksan, Korea*

In this work we investigated through Monte Carlo calculations the physical characteristics of the absorbed dose from the Ir-192 source used in brachytherapy. The Monte Carlo calculations were performed using the code EGS4, which was extensively modified in order to handle cylindrical sources, phantoms, and energy distributions to suit our own purpose. From the results of the calculations for the  $\beta$ -rays, it was found that they contribute on the average 0.02% to the total absorbed dose in the distance range of 0.5-5.0 cm from the source. This is due to the fact that, although most of the primary  $\beta$ -rays are absorbed in the source and encapsulation material, the resulting low energy braking radiation from them contribute to such a distance. The absorbed dose in the encapsulation material varied on the average from 2.8% for platinum down to 1.1% for iron. The radial dose functions obtained by our Monte Carlo calculations were consistent within  $\pm 3\%$  with those of the TG-43 report for the radial distance interval 0.5-10.0 cm from the source. The user code we wrote in this work can be used for other sources of different sizes and so it can be very useful in designing and producing the sources for brachytherapy.

**Key words :** Brachytherapy, Ir-192, Monte Carlo calculation, EGS4