

기준점에서의 물 흡수선량을 이용한 Ir-192 선원의 공기커마 세기 계산을 위한 알고리즘 개발

*인하대학교 의과대학 방사선종양학교실, †경기대학교대학원 의학물리학과, ‡고려대학교 의과대학 방사선종양학교실, §경희대학교 의과대학 방사선종양학교실, ¶가천의과학대학교 방사선종양학교실, ¶한양대학교 의과대학 방사선종양학교실

허현도*† · 김우철* · 노준규* · 이 석† · 이상훈† · 조삼주† · 신동오§ · 최진호¶ · 권수일† · 김성훈¶

본 연구의 목적은 Ir-192 선원의 검교정을 겔보기 방사능(apparent activity)을 이용하지 않고 물속 기준점에서 흡수선량을 측정함으로써 공기커마 세기(air-kerma strength, S_k)를 계산하고자 알고리즘을 개발하였다. 연구를 위하여 근접치료용 다목적 팬텀(multi purpose brachytherapy phantom, MPBP)을 제작하였다. 물 흡수선량 측정은 고선량을 근접치료기(micro-Selectron, Nucletron, Netherlands)에 장착된 Ir-192 선원(Mallinckrodt Medical B.V., Netherlands)을 대상으로 측정하였다. 물 흡수선량은 몬테칼로 계산방법으로 계산된 이온전리함(TM30013, PTW, Germany)의 물 흡수선량 교정인자($N_{D,w}$)를 이용하여 결정하였다. 물 흡수선량은 한 개의 선원에 대하여 4 cm에서 7 cm까지 측정하였다. 측정된 값은 전산화 치료계획 장치에서(plato BPS, ver 13.2, Nucletron, Netherlands) 계산된 값과 비교하였다. 공기커마 세기(S_k)는 기준점 5 cm되는 곳에서 3개의 Ir 선원에 대하여 구하였다. 계산된 공기커마 세기는 선원제조사에서 제공된 값과 비교하였다. 몬테칼로 계산방법으로 계산된 이온전리함의 물 흡수선량 교정인자는 5.28 cGy/hC이었다. 한 개 선원에서 측정된 물 흡수선량 값은 -2.16%에서 -0.84%까지 상대오차를 나타내었다. 공기커마 세기는 제조사에서 제공된 값과 비교하여 -0.6%에서 +1.8% 제조사 권고치 $\pm 5\%$ 이내로 잘 일치하였다. 본 연구에서 개발한 알고리즘은 기준점에서의 물 흡수선량을 정확히 결정함으로써 선원의 공기커마 세기를 구할 수 있었다. 이러한 물 흡수선량을 통한 Ir-192 선원의 검교정 방법들은 미국의학물리학회(AAPM) 보고서 TG-43에서 권고한 흡수선량 계산 알고리즘에 바로 적용할 수 있는 것으로 사료된다.

중심단어: 공기커마 세기, 겔보기 방사능, 알고리즘, 물흡수선량교정인자

서 론

고선량을 근접 방사선 치료에 사용되는 Ir-192는 상대적으로 물리적 반감기가 73.8일로 최적의 치료성적 향상을 위하여 매년 3회 이상의 교체가 요구된다. 그러므로 새로운 선원의 정확한 검교정은 환자치료계획에서 중요한 부분을 차지한다. 대부분 국내에서 사용되고 있는 Ir-192 선원은 Mallinckrodt Medical B.V. (Netherlands)에서 제조되어 공급된다. 제조사에서 선원의 검교정은 대부분 공기커마(S_k)를 이용하여 공기 중에서 실시한다.¹⁻³⁾ 그러나 새로 제조된

선원들은 신뢰할 수 있는 국내 표준기관에서 검증을 통하지 않고 공급된다. 따라서 임상분야에서 새로운 선원의 교체 시 이온 전리함을 이용한 지그(Jig) 시스템 및 우물형 전리함 등을 이용하여 선원에 대한 검교정이 이루어진다.^{4,9)} 이러한 검교정 방법들은 선원의 공기커마 세기(air-kerma strength, $uGym^2/h$)를 측정하는 것이 아니라 선원의 겔보기 방사능(apparent activity, Ci)을 측정하는 것이다. 미국의학물리학회(AAPM) 보고서 TG-32³⁾에서는 겔보기 방사능을 권고하고 있지 않으며, TG-43 (1995)¹⁰⁾ 및 TG-43¹¹⁾의 2004년 개정판에서는 일체 겔보기 방사능이란 용어를 사용하고 있지 않다. 또한 공기 중에서 시행된 교정 값은 물속에서 흡수선량을 계산하는 데 여러 가지 인자들이 필요하다. 이러한 인자들로 인하여 상대 오차가 증가하게 된다. 최근에는 외부 방사선 치료에서도 선형 가속기의 교정을 물속에서 직접 시행하는 방법으로 바뀌어가는 추세이다.¹²⁾

본 연구에서는 고선량률 Ir 선원에 대한 겔보기 방사능 대신에 물속 기준점에서의 물 흡수선량을 이용하여 공기커

본 연구는 2006년도 과학기술부 원자력 중장기 과제에 의하여 수행되었음.

이 논문은 2006년 9월 13일 접수하여 2006년 10월 3일 채택되었음.

책임저자 : 김성훈, (133-792) 서울시 성동구 행당동 17

한양대학교 의과대학 방사선종양학교실

Tel: 02)2290-8625

E-mail: dochokim@yahoo.co.kr

마 세기를 계산할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 이론적 배경

1) 물 흡수선량 보정인자($N_{D,w,Q}$)에 기반한 수식체계

Fig. 1에서 선질이 Q인 방사선 빔이 물에서의 기준 깊이 z_{ref} ($r=5.0$ cm)에서의 물 흡수선량 $D_{w,Q}$ 다음처럼 주어진다.^{12,13)}

$$D_{w,Q} = M_Q N_{D,w,Q} \quad (1)$$

여기서 M_Q 는 온도와 기압, 이온재결합, 극성효과 등에 대해 보정한 이온함의 전하 측정값이며, $N_{D,w,Q}$ 는 물 흡수선량 보정인수이다. 따라서 물 흡수선량 보정인수($N_{D,w,Q}$)는 다음처럼 정의된다.

$$N_{D,w,Q} = \frac{D_{w,Q}}{M_Q} \quad (2)$$

기준깊이 z_{ref} 에서의 물 흡수선량 $D_{w,Q}$ 를 열량계와 같은 절대 선량계를 통해 측정할 수 있다면, M_Q 는 기준깊이에서의 이온함의 측정 전하 값이므로, 위 (2)식에 의하여 해당 이온함과 해당 에너지 선질에 대한 물 흡수선량 보정인자 $N_{D,w,Q}$ 를 구할 수 있다.

2) 물 흡수선량 보정인자($N_{D,w,Q}$) 계산

공동을 차지하는 매질이 '표준상태의 공기'라고 가정하고, 방사선에 의해 전하 M_Q 가 공동 V_{cavity} 에 생성되었다면, 공기공동의 흡수선량 D_{air} 는 전하 M_Q 의 관점에서 다음처럼 표현할 수 있다.

$$D_{air} = \frac{dE}{dm} = \frac{M_Q}{m_{air}} \left(\frac{W}{e} \right) \quad (3)$$

여기서 m_{air} 는 전하 M_Q 가 생성되는 공기공동의 공기의 질량으로서 공기의 밀도 ρ_{air} 와 V_{cavity} 를 알고 있으면 다음처럼 구할 수 있다.

$$m = \rho_{air} V_{cavity} \quad (4)$$

(3)과 (4)식을 M_Q 에 대한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$M_Q = \frac{(\rho_{air} V_{cavity}) D_{air}}{W/e} \quad (5)$$

(1)~(5)식을 사용하여 정리하면, 물 흡수선량 보정인자 $N_{D,w,Q}$ 는 다음처럼 된다.

$$N_{D,w,Q} = \frac{D_{w,Q}}{D_{air}} \frac{W/e}{m_{air}} \quad (6)$$

(6)식에서 본 연구에서는 $D_{w,Q}$ 와 D_{air} 는 몬테칼로 기법을 사용하여 계산한다.

3) 기준점에서의 물 흡수선량 $D(r_{ref}, \theta_0)$ 와 공기커마 세기 S_K

공기커마 세기 S_K 는 다음처럼 정의된다.

$$S_K = K'_{ref} l^2 \quad (7)$$

여기서 K'_{ref} 는 선원의 수직이등분선상 1 m 지점에서의 공기커마율이고, l 은 통상 1 m로 취한다.

실제 선원이 진공 중에 놓여 있을 때 선원의 수직 이등분선상 ($\theta=90^\circ=\theta_0$) r_1 과 r_2 에서의 공기커마세기 관계는 다

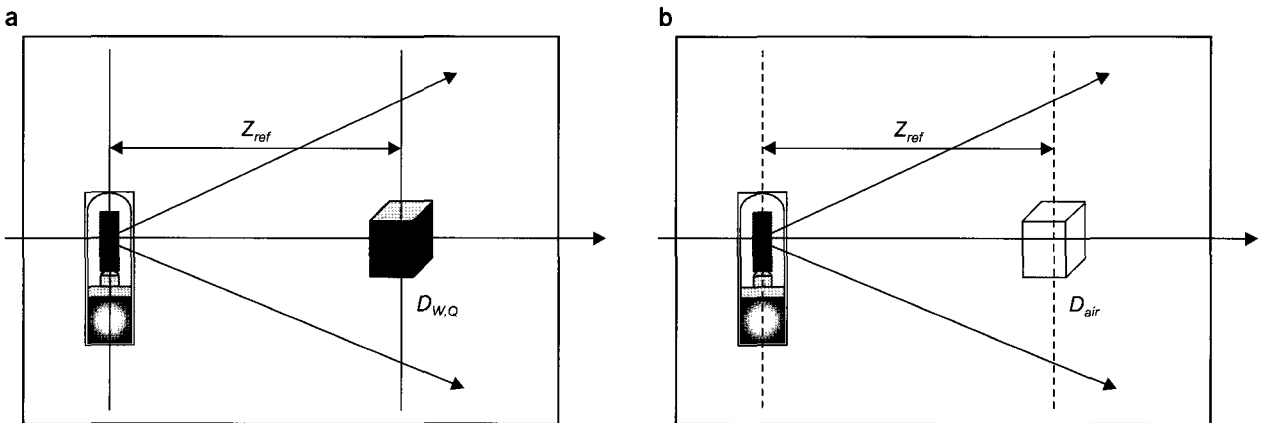


Fig. 1. Schematic geometry of the phantom for absorbed dose calculation with Monte Carlo Calculation Method (EGSnrcCPP). The entire medium of (a) is only water, whereas the medium of (b) is water including an air cavity.

음과 같다.

$$S_K(r_2) = \frac{G(r_2, \theta_0)}{G(r_1, \theta_0)} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 S_K(r_1) \quad (8)$$

여기서 $G(r, \theta)$ 는 선원의 기하학적 함수이다(Fig. 2).^{10,11)} 자유 공간 내 선원으로부터 동일 지점에 각각 공기부피와 물 부피가 있을 때 공기커마 K_{air} 와 물 부피에서의 흡수선량 $D_{fs, w}$ 와의 관계는 다음과 같다.

$$K_{air} = \frac{1}{1-g} (\mu_{en} \rho)_{water}^{air} D_{fs, w} \quad (9)$$

지름방향 선량함수(the radial dose function) $T(r)$ ^{10,11)}를 도

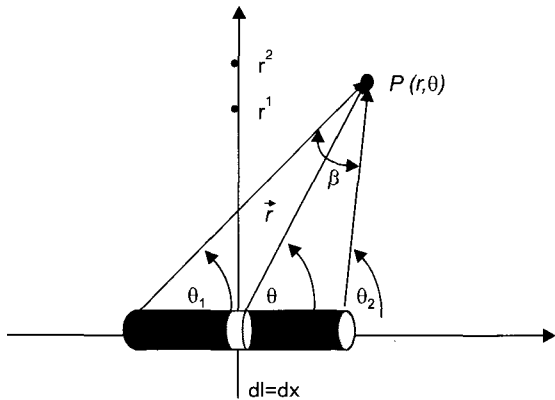


Fig. 2. Geometry function of radioactive source. $G(r, \theta)=r^2$ is for a point source and $G(r, \theta) = \beta/L.r \sin \theta$ is for a line source.

입하면 (9)식은 다음처럼 쓸 수 있다.

$$K_{air} = \frac{1}{1-g} (\mu_{en} \rho)_{water} \frac{D_{w, w}(r)}{T(r)} \quad (10)$$

여기서 $D_{w, w}$ 는 주변매질이 물에서 r 지점에 있는 물 부피에서의 물 흡수선량이다.

(7)~(10)식을 이용하면 다음과 같은 공기커마 세기 공식을 유도할 수 있다.

$$S_k(r_{ref}) = \frac{G(r_{ref}, \theta_0)}{G(r, \theta_0)} \left(\frac{r_{ref}}{r} \right)^2 \frac{1}{1-g} (\mu_{en} \rho)_{water}^{air} \frac{D_{w, Q}(r)^2 k_i}{T(r)} \quad (11)$$

여기서 k_i 는 흡수선량의 측정시간을 보정해 주는 시간보정인자이며, $D_{w, Q}$ 는 r 지점에서 측정된 물 흡수선량 값이다. 따라서 (11)식을 통해 물 흡수선량을 측정함으로써 공기커마 세기를 구할 수 있다. 선원의 수직 이등분선상에서의 기하학적 함수이다.

$$G(r, \theta_0) = \frac{2}{L.r} \arctan \left(\frac{l}{2r} \right)$$

4) 이온전리함의 물 흡수선량 보정인자($N_{D, w, Q}$) 몬테칼로 계산

국내 표준기관에서 Ir-192 표준선원을 보유하지 않은 실정이기 때문에 이온전리함의 물 흡수선량 보정인자($N_{D, w, Q}$)는 몬테칼로 계산법으로 구하였다. 또한 표준 선원과 사용자 빔 선질의 차이를 보정해주는 k_Q 값을 구하기 위한 예비단계로 시행하였다. 사용된 이온전리함의(TM30013, PTW,

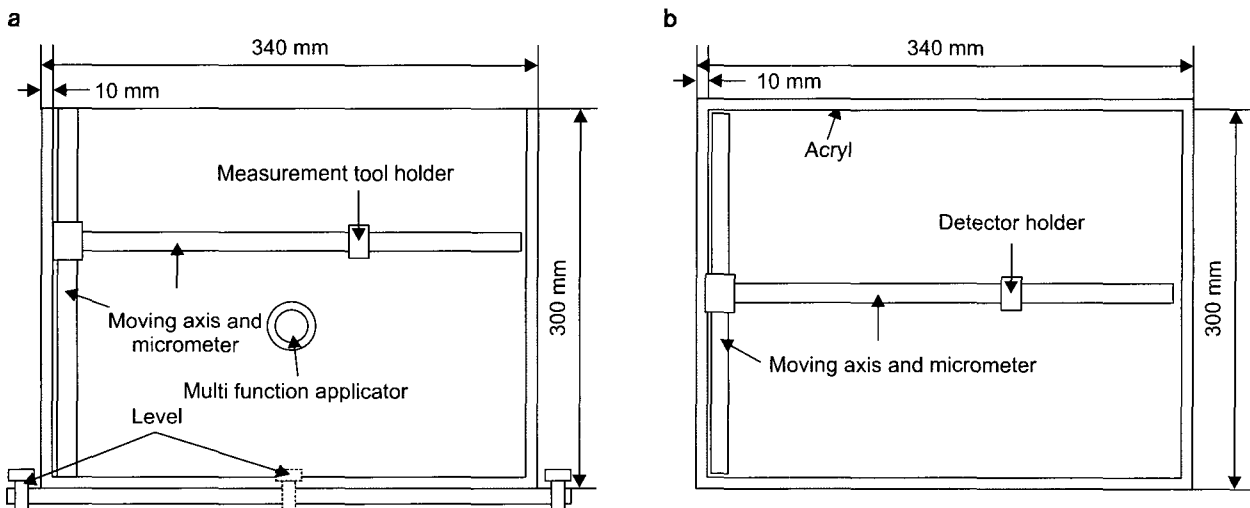


Fig. 3. Diagram of a multi purpose brachytherapy phantom (MPBP). (a) for the top view and (b) for the side view. The internal phantom size is $34 \times 30 \times 30$ cm, which wall is made of acrylic with 1-cm thickness.

Germany) 체적은 제조사에서 제공되는 정보를 이용하였다. 계산에 사용된 몬테칼로 코드는 EGSnrc CPP (2005년)로 사용된 언어는 C++이다. 이 코드는 직각좌표, 극좌표, 구좌표와 같은 복잡한 물체를 설계할 수 있도록 기하학적 모델 시스템을 구성하고 있다. 따라서 본 실험에서는 물속에서 캡슐화된 Ir-192 선원 주변에서의 절대선량을 계산하였다. 해당 코드를 사용하여 물팬텀에서의 3차원 선원구조 및 실제 이온 전리함의 구조 등을 구현하였다. Ir-192 선원의 일차선 광자의 스펙트럼은 Ballester 등¹⁴⁾이 발표한 자료를 이

용하였다. 사용자 코드에서 선원을 둘러싸고 있는 캡슐 및 연결 케이블 등의 상세한 내용을 구현하였다. 스테인리스 스틸 구성물질의(2% Mn, 1% Si, 17% Cr, 12% Ni, 68% Fe) 모델은 AISI316L이었다. 밀도는 8.02 g/cm³이다. 이리듐은 한 번 붕괴 시 평균 2.24개의 감마선을 방출한다.¹⁴⁾ 계산에 사용된 이리듐의 양은 20 mCi (1.6576 × 10⁹) 히스토리였다.

2. 측정

1) 다목적 근접치료용 물팬텀 제작

이온전리함의 물 흡수선량인자를 이용한 Ir 선원의 공기 커마 세기 측정을 위해 제작한 다목적 근접치료용 물팬텀을(Multi Purpose Brachytherapy Phantom, MPBP) Fig. 3과 같이 구성하였다. 이는 이온전리함을 정확히 위치시킬 수 있도록 고안하였으며 내부 크기는 34 × 30 × 30 cm, 재질은 아크릴로 제작하였다.

2) 선원

측정에 사용된 고선량률 근접치료기(microSelectron, Nucletron, Netherlands)에 장착된 Ir-192 선원을 이용하였다. Ir-192 선원의 기하학적 구조는 Fig. 4에서 나타내었다. 선원의 활성도 길이는 3.5 mm, 반경은 0.6 mm이다. 선원의 캡슐을 포함한 총길이는 5 mm와 반경은 1.1 mm이다.

3) 공기커마 세기(S_K)

몬테칼로 계산방법으로 구한 물 흡수선량인자($N_{D,w,Q}$)를 이용하여 물팬텀에서 선원으로부터 4 cm에서 7 cm까지 물 흡수선량을 측정하였다. 측정된 값은 전산화 치료계획장치에서(plato BPS, ver 13.2, Nucletron, Netherlands) 계산된 값과

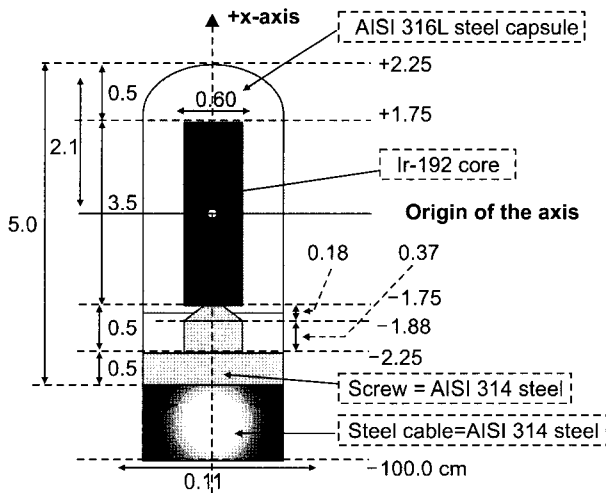


Fig. 4. Geometry of Ir-192 source, it shows the geometry and the materials of an Ir-192 source. The active source is a pure iridium metal of a 0.6-mm in diameter by 3.5-mm long cylinder.

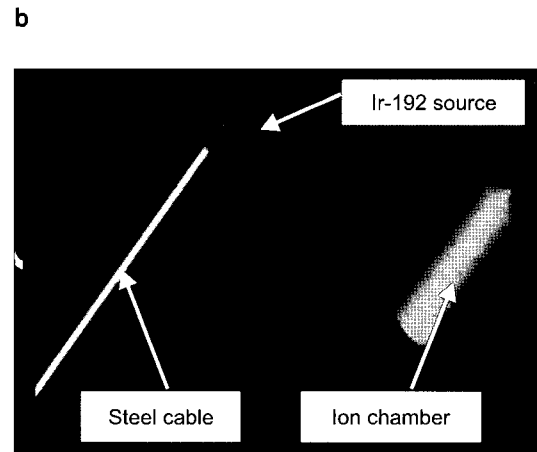
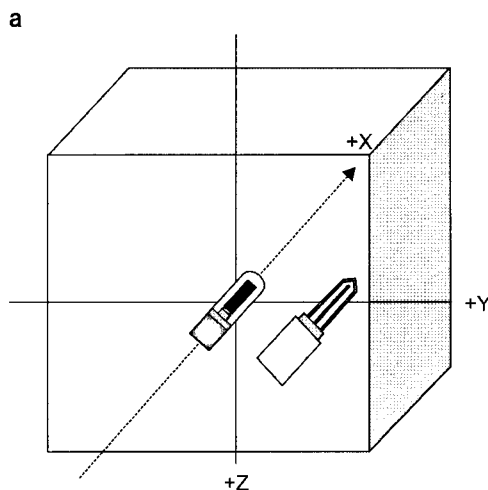


Fig. 5. Scheme of the source and the detector shown in the EGSnrcCPP MC code. (a) is a diagram and (b) is a design by the MC user code.

Table 1. Comparison between the calculated and measured dose using an ion chamber from 4-cm 7-cm distance with 1-cm step in a water phantom.

Distance (cm)	Calculated by RTP (cGy)	Ion chamber (cGy)
4	100	97.84±0.02
5	100	99.16±0.02
6	100	98.57±0.04
7	100	98.55±0.04

비교하였다. 물 흡수선량의 측정은 한 개의 선원에 대하여 실시하였다. 그리고 본 연구에서 개발한 공기커마 세기 계산알고리즘(계산식 11)을 이용하여 기준점 5 cm되는 거리에서 물 흡수선량을 측정하여 Ir 선원의 공기커마 세기를 계산하였다. 공기커마 세기는 총 3개의 Ir-192 선원에 대하여 구하였다. 계산알고리즘으로부터 구한 공기커마 세기는 선원 제조사에서 제공된 공기커마 세기의 값과 비교하였다.

결 과

몬테칼로 계산방법으로 Ir 선원에 대한 이온전리함(TM-30013, PTW, Germany)의 물 흡수선량 교정인자($N_{D,w,Q}$)는 5.28 cGy/nC이었다. 불확정도는 ±0.5%였다. Fig. 5b은 사용자 코드를 이용하여 물 팬텀에서 Ir-192 선원 및 이온전리함을 구현한 것이다. 몬테칼로 계산방법으로 물 흡수선량 인자값의 정확도를 검증하기 위해 이온전리함을 이용하여 한 개의 선원에 대하여 거리 4 cm에서 1 cm 간격으로 7 cm 까지 측정된 결과 계산 값에 비교하여 -2.16%에서 -0.84% 까지 상대오차를 나타내었다(Table 1).

그리고 본 연구에서 개발한 공기커마 세기 계산 알고리즘(계산식 11)을 이용하여 3개의 Ir-192 선원에 대하여 기준점(5 cm)에서 물 흡수선량으로부터 공기커마 세기를 계산하였다. 공기커마 세기는 제조사에서 제공된 값과 비교하여 -0.6% ~ +1.8% 이내로 제조사 권고치 ±5% 이내로 잘 일치하였다(Fig. 6).

고찰 및 결론

본 연구의 목적은 Ir-192 선원의 교체시 제조사에서 공급되는 걸보기 방사능을 측정하여 검교정을 시도하는 대신 물속 기준점에서 물 흡수선량의 측정값을 가지고 공기커마 세기를 구하는 것이다. 국가 표준기관에서 표준 Ir-192 선

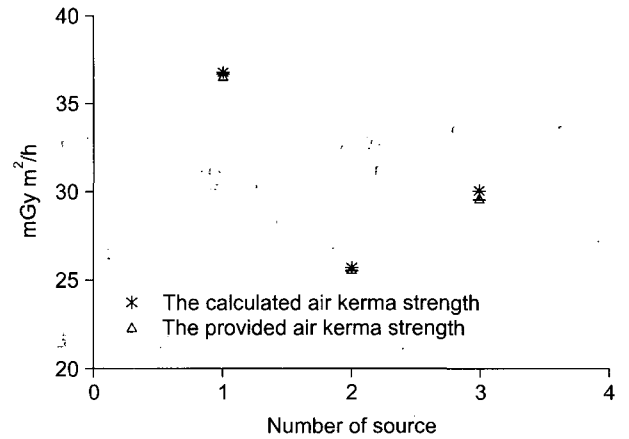


Fig. 6. The air-kerma strength, it was calculated from absorbed dose to water for three sources. (*) is the air-kerma strength calculated from the absorbed dose, (Δ) is the air-kerma strength provided by the vendor.

원을 보유하고 있지 않다. 따라서 일부 사용자들은 Cs-137 및 Co-60 선원과 250 kVp 선원을 이용한 보간법¹⁵⁻¹⁷⁾을 이용하여 Ir-192 선원에 대한 이온전리함의 공기흡수교정인자(N_k)를 구하여 선원의 공기커마 세기를 측정하였다. 그러나 이러한 방법들은 공기 중에서 측정이 이루어지기 때문에 미국의학물리학회(AAPM) 보고서 TG-43^{10,11)}에 권고한 흡수선량 계산 알고리즘에 적용 시 여러 가지 전환인자들이 요구된다. 스위스 그룹에서는¹⁸⁾ PMMA 팬텀에서 Ir-192 선원의 공기커마 세기를 측정하는 방법을 보고하였다. 이 그룹 또한 Co-60 선원에서 이온전리함의 물 흡수 교정인자(N_w)를 구하여 시행하였다.

Ir-192 선원에 대한 정확한 흡수선량을 측정하기 위해서는 이온함 교정 시 교정 빔 선질과 해당 선원의 빔 선질 사이의 차이를 보정해 주는 선질 보정 인자인 k_Q 값을 알아야 한다. 이에 대한 연구가 현재 진행 중이며 차후 논문에서 발표될 수 있으리라 생각한다. 본 연구에서 개발한 알고리즘은 물속 기준점에서 흡수선량을 결정함으로써 선원의 공기커마 세기를 계산할 수 있다는 것을 보여 주었다. 그리고 이러한 물흡수선량 결정을 통한 Ir-192 선원의 검교정 방법은 미국의학물리학회 보고서 TG-43^{10,11)}에서 권고한 흡수선량 계산 알고리즘에 바로 적용할 수 있는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. IAEA-TECDOC-1079: Calibration of Brachytherapy Sources.

- International Atomic Energy Agency, Vienna (1999)
2. IAEA-TECDOC-1274: *Calibration of Photon and Beta Ray Sources Used in Brachytherapy*. International Atomic Energy Agency, Vienna (2002)
 3. AAPM Report 21: *Specification of Brachytherapy Source Strength*. American Association of Physicist in Medicine (1987)
 4. Kohn ML, Gooch AW Jr, Zajac AJ: Nucletron MicroSelectron calibration and radiation survey. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 21:1057-1061 (1991)
 5. Goetsch SJ, Attix FH, Dewerd LA, Thomadsen BR: A new re-entrant ionization chamber for the calibration of iridium-192 high dose rate sources. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 24:167-170 (1991)
 6. AAPM Report 41: *Remote of Afterloading Technology*. American Association of Physicist in Medicine (1993)
 7. Nair MT, Cheng MC: HDR source calibration methods and discrepancies. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 38:207-211 (1997)
 8. Baltas D, Geramani K, Ioannidis GT, et al: Comparison of calibration procedures for Ir-192 high dose rate brachytherapy source. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 43:653-661 (1999)
 9. Huh HD, Park SY, Lee RJ: Comparison of calibration methods of Ir-192 sources for high dose rate brachytherapy. *Korean J Medical Physics* 4:192-196 (2004)
 10. AAPM Report 43: *Dosimetry of Interstitial Brachytherapy Source*. American Association of Physicist in Medicine (1995)
 11. AAPM Report 43: *A Revised AAPM Protocol for Brachytherapy Dose Calculation*. American Association of Physicist in Medicine (2004)
 12. AAPM Report 51: *Protocol for Clinical Reference Dosimetry of High-energy Photon and Electron Beams*. American Association of Physicist in Medicine (1999)
 13. IAEA Report 398: *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy*. International Atomic Energy Agency, Vienna (2000)
 14. Ballester F, Hernandez C, Perez-Calatayud J, Liso F: Monte Carlo calculation of dose rate distributions around Ir-192 wires. *Med Phys* 24:1221-1228 (1997)
 15. Ezzell GA: Acceptance testing and quality assurance for high dose rate remote afterloading systems. *Activity Selectron Brachytherapy Journal* 5:2-6 (1991)
 16. Goetsch SJ, Attix FH, Pearson DW, Thomadsen BR: Calculation of Ir-192 high-dose-rate after loading systems. *Med Phys* 18:462-467 (1991)
 17. Stump KE, DeWerd LA, Micka JA, Anderson DR: Calculation of new high dose rate Ir-192 source. *Med Phys* 29:1483-1488 (2002)
 18. SSRPM Report 13: *Dosimetry and Quality Assurance in High Dose Rate Brachytherapy with Iridium-192*. Swiss Society for Radiobiology and Medical Physics (2005)

The Development of Air-kerma Strength Calculation Algorithm in Terms of the Absorbed Dose to Water for HDR Ir-192 Source

HyunDo Huh^{*†}, WooChul Kim^{*}, John J K Loh^{*}, Suk Lee[†], SangHoon Lee[†], SamJu Cho[†], DongOh Shin[§], Jinho Choi^{||}, Sooil Kwon[†], SeongHoon Kim[¶]

*Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Inha University, Incheon; †Department of Medical Physics, Kyonggi University, Suwon; ‡Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Korea University, Seoul; §Department of Radiation Oncology, Medicine, College of Medicine, KyungHee University, ¶Department of Radiation Oncology, Gacheon Medical School, Gil Medical Center, Incheon; ||Department of Radiation Oncology, College of Medicine, Hanyang University, Seoul, Korea

The aim of this study was to develop the calculation algorithm of source strength of Ir-192 source in terms of the absorbed dose to water instead of an apparent activity (Ci). For this work the Multi Purpose Brachytherapy Phantom(MPBP) was developed, which was designed to locate the source and the chamber precisely at a specific position inside the water phantom. The reference point of measurement was set at the 5 cm distance along the transverse axis of the source. For a brachytherapy source calibration, the absorbed dose to water calibration factor ($N_{D,w,Q}$) of an ionization chamber were determined and then apply standard protocols of absorbed dose to water. The calibration factor ($N_{D,w,Q}$) of the ion chamber (TM30013, PTW, Germany) was determined using the EGSnrcCPP Monte Carlo Code. The calculated calibration factor ($N_{D,w,Q}$) was 5.28 cGy/nC. The calculated factor was then used to determine the absorbed dose to water from which the air kerma strength for an Ir-192 source can be easily derived at the reference point (5 cm). The calculated air kerma strength showed discrepancies of -0.6% to +1.8% relative to the air kerma strength provided by the vendor. In this work we demonstrated that the air kerma strength (S_k) could be determined from the absorbed dose to water calibration factor for Ir-192 source. In addition, this source calibration method could be applied directly to the dose calculation formalism of AAPM report TG-43.

Key Words: Air-kerma strength, Apparent activity, Algorithm, Calibration factor