Journal of Radiation Industry 3(2) : 115~120 (2009)

감마선 조사시설에서의 흡수선량 계산을 위한 모델

임 익 성*·김 기 엽·노 규 홍

한국원자력연구원

A New Model to Calculate an Absorbed Dose for the Gamma Irradiation Facility

Ik-Sung Lim*, Ki-Yup Kim and Gyu-Hong Roh

Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea

Abstract − The main propose of this study was to develop a new model to calculate the absorbed dose rates for a gamma ray irradiation facility by analyzing the geometry theoretically and using the Monte Carlo simulation. These equations derived from the model is adapted to the IR-221. The validity of this model seems to be verified, as most calculation dose rates were within about ±5% of the measurement data. This model could be used to calculate the absorbed dose rates unless the facility has grossly changed its structure and even though the intensity of radiation and the position of the source rod has been modified to meet the needs someday. This model will be worked on properly and the uniformity adjusted when there is a need to reload or change the source rod. Even though these equations derived from this model is for the IR-221, it seems that this methodology is good for other gamma ray irradiation facilities.

Key words : Monte Carlo simulation. Gamma ray irradiation facility, Absorbed dose rate calculation, Alanine dosimeter

서 론

방사선 조사에 대한 품질을 보증하기 위해서는 조사시설에 대한 선량율 분포를 정량적으로 해석하는 작업이 우선된다(ASTM E 2303-03 2004). 이를 위해서 거의 대부분의 조사시설에서는 각종 선량계에 의존하여 각각의 지점을 측정하고, 이를 분석하여 3차원의 선량지도(dose mapping)를 만든다. 그러나 이러한 일련의 작업들은 많은 인력과 시간, 그리고 경제적 비용이 소모된다는 것은 이미 알려진 사실이다.

그래서 많은 연구자들이 이러한 수고로움과 비용을 줄이고자 몬테칼로 시뮬레이션을 포함하는 수학적 선량평가를 연구하고 있다(ASTM E 2232-02 2004).

대표적인 연구로서는 ITS 코드를 이용한 연구(Halbleib 1988; Weiss *et al.* 1997)와 EGS4 코드를 이용한 연구(Nelson *et al.* 1988; McIntyre *et al.* 1990; Raisali *et al.* 1993), GEANT4 코드를 이용한 연구(Gharbi *et al.* 2005; Kadri *et al.* 2006), 그리고 MCNP4B 코드를 이용한 연구(Briesmeister 1997; Oliveira *et al.* 2000, 2002; Sohrabpour *et al.* 2002) 등이 있다. 이처럼 외국에서는 방사선 이용에 관한 연구를 촉진시키기 위한 업무의 일환으로서 방사선

* Corresponding authors: Ik-Sung Lim, Tel. +82-42-868-8684, Fax. +82-42-863-0565, E-mail. islim@kaeri.re.kr

조사의 품질을 보증해줄 수 있는 기본 연구가 진행되어 왔다.

그러나 국내에서는 이러한 연구가 아직 시작 단계에 있어 감마선 조사시설의 선량 평가를 오로지 선량계에 의존하여 수행하고 있는 실정이다. 따라서 도시메트리에 대한 과도한 비용과 노동력의 손실은 물론, 조사 대상물에 대한 선량 평가 역시 매번 선량계에 의존함으로써, 조사 전에 선량율을 예측하는 작업은 운전자의 경험에 의존할 수밖에 없는 어려움에 처해 있다. 이러한 평가를 좀 더 정량적으로 수행하기 위해서는 조사시설에 대한 선량 분포 평가와 조사 대상물에 대한 선량 예측에 있어서 좀 더 과학적인 계산 방법을 도입할 필요성이 있다.

본 연구에서 기존 연구와 달리 코드를 직접 사용하지 않고 간접적인 방법으로 선량을 계산할 수 있는 모델을 개발했다.

임의의 감마선 선원을 가정한 뒤 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하여 구조물에 의해 감쇄되는 함수와 구조물에 의해 반사되는 함수를 구한 뒤 선원의 분포 방정식을 이용하여 임의의 지점에서 선량 값을 계산하는 방법이다. 물론 물리적으로 반사되는 양과 감쇄되는 양을 정확하게 분석하는 것은 불가능하다. 본 연구에서 개발한 모델에서는 벽과 천정 바닥의 구조물에 의한 것은 반사되는 양으로, 그리고 선원을 보호하기 위한 구조물은 감쇄되는 양으로 가정했다.

이 모델로 일단 산출된 계산식은, 이에 대한 검증은 아직 수행되지 않았지만, 구조물이 크게 바뀌지 않는 한 선원의 재배치나 그 크기가 바뀌어도 적용 가능한 모델이라 평가하고 있다. 본 연구에서 묘사된 계산식은 IR-221에만 한정된다. 그러나 개발된 모델은 이와 비슷한 감마선 조사시설의 경우에도 적용 가능한 방법론이라 판단하고 있다.

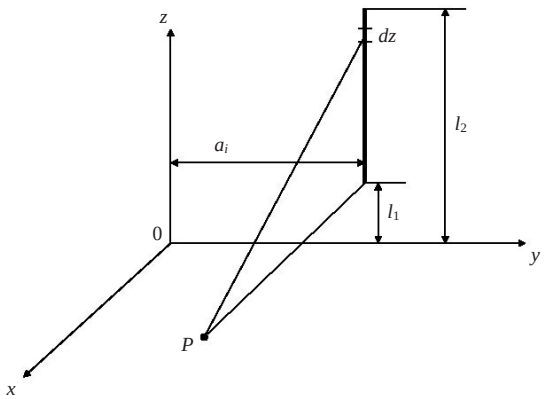

Fig. 1. Diagram for calculating gamma ray flux from the finite line source.

이렇게 개발된 모델을 IR-221 조사시설에 적용하여 계산식을 산출한 뒤, 그 계산식에 의한 선량값과 알라닌 선량계로 측정된 선량값을 비교해 본 결과, 대부분의 영역에서 ±5% 오차 범위를 벗어나지 않음을 알 수 있었다. 그러나 선원에서 아주 가까운 거리에서는 비교적 오차가 컸는데, 이에 대한 원인 분석도 아울러 수행했다.

재료 및 방법

1. 흡수선량 계산

흡수선량 $\dot{D}$는 다음과 같은 기본 식으로 계산될 수 있다.

$$\dot{D}=E\frac{\mu_{en}}{\rho}\phi_r(P) \tag{1}$$

여기서 E는 감마선의 에너지, $\frac{\mu_{en}}{\rho}$는 매질의 질량에너지 감쇄계수, 그리고 $\phi_r(P)$는 임의의 지점 P에서의 감마선 플럭스이다.

2. 감마선 플럭스 계산식 도출

Fig. 1과 같이 z축으로부터 a_i 떨어진 곳에서 단위 길이 당 S ray $\sec^{-1}$의 감마선이 나오는 선형의 선원이 있고, 감마선은 모든 방향으로 균등하게 방출된다고 가정하면, 임의의 지점 P에서의 감마선 플럭스는 다음과 같이 기본 식으로 나타낼 수 있다.

$$d\phi_r(P)\frac{Sdz}{4\pi r^2} \tag{2}$$

여기서 r은 dz에서 임의의 지점 P까지의 거리이다. 위의 (2)식을 l_1에서 l_2까지의 dz에 대하여 적분하면, 임의의 지점 P에서의 감마선 플럭스는 다음과 같이 계산된다.

$$\phi_{r_i}(P)=\frac{S_i}{4\pi\sqrt{(a_i-y)^2+x^2}}\left[\tan^{-1}\left(\frac{l_2}{\sqrt{(a_i-y)^2+x^2}}\right)+\tan^{-1}\left(\frac{l_1}{\sqrt{(a_i-y)^2+x^2}}\right)\right] \tag{3}$$

위 (3)식은 선원 한 개에 대한 플럭스이고, 다수 개의 선원이 존재할 경우, 임의의 지점 P에서의 전체 감마선 플럭스는 다음과 같다.

$$\phi_r(P)=\sum\phi_{r_i}(P) \tag{4}$$

위 (2)에서 (4)까지의 과정으로 계산된 감마선 플럭스

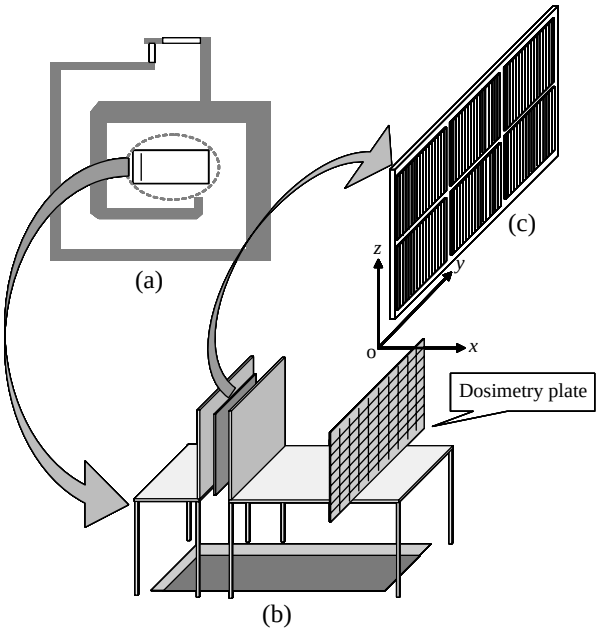

Fig. 2. Schematic view of the IR-221 gamma irradiator: (a) floor plan of the IR-221, (b) source plaque and irradiation product table with dosimetry plate (c) enlarged figure of source plaque.

는 선원만 존재하고 선원 이외의 구조물이 없다고 가정한 경우이다. 따라서 실제 Fig. 2와 같은 감마선 조사 시설의 경우 그 구조물에 의한 차폐와 반사되는 양을 따로 결정해야 하는데, 이는 수학적 방법론만으로는 어렵고, 이에 대한 상관 식을 도출하기 위해 몬테칼로 시뮬레이션을 이용했다.

3. 몬테칼로 시뮬레이션

계산식에 의한 감마선 플럭스와 몬테칼로 시뮬레이션 의한 플럭스의 값을 비교하기 위해, 5가지의 시뮬레이션을 수행하였고, MCNP4B 코드를 이용하였다.

우선 위 계산식의 검증을 하기 위하여 계산식과 동일한 조건에서의, 즉 선원만 존재하고 구조물이 없다고 가정하여 몬테칼로 시뮬레이션 값과 위 계산식에 의해 계산된 값과 비교 검토하였다.

다음은 이러한 시뮬레이션을 통해서 선원 및 철골 구조물 등, 차폐에 의한 요소를 계산하였다. 계산식 검증에 활용한 IR-221의 경우 차폐되는 구조물은 선원 자체와 선원을 밀봉하고 있는 스테인레스 스틸 봉과 선원 랙 자체를 보호하기 위한 스테인레스 스틸 평판이 있는데, 이 구조물들에 의해 감쇄되는 정도를 분석하였다. 그리고 콘크리트 벽에 의해 반사되는 정도를 마지막으로 분석하였다.

본 계산 방법론의 타당성을 검증하기 위해 알라닌 선량계로 총 239개 지점에 대한 선량을 측정하였고, 'e-scan™ Alanine Dosimeter Reader'를 이용하여 그 값을 읽었다.

4. 알라닌 선량계 및 측정 장치

알라닌 도시메터는 NH_2-CaH(CH_3)-COOH의 분자구조로 이루어져 있고, 지름 5 mm, 두께 3 mm, 무게 50 mg의 디스크 모양을 띠고 있다. 알라닌이 감마선에 조사되면 C-N 결합이 깨지면서 자유 라디칼(free radical)이 생성되는데, EPR (Electron Paramagnetic Resonance) 장치로 자유 라디칼의 양을 읽고 그에 상응하는 흡수선량을 표시하게 된다(ISO/ASTM E 51607 2004).

알라닌을 측정하는 EPR장치는 'e-scan™ Alanine Dosimeter Reader(Bruker Analytik GmbH, Germany)'를 이용했고, 측정에 앞서 국제 표준에 의거하여 보정(calibration)을 수행했다. 보정은 국제 표준 기관인 NPL (National Physical Laboratory)에서 조사시킨 레퍼런스 스탠다드 도시메터(reference-standard dosimeter)를 이용했다(ISO/ASTM E 51261 2004).

결과 및 논의

우선 (1)에서 (4)까지의 과정으로 얻은 계산식이 유효한지 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 확인해보았다. IR-221과 같이 30개의 선원이 있다고 가정하였다. 구조물이 없는 경우, 즉 선원을 지지하는 구조물과 시설을 유지하는 벽이 없고 순수 선원만 존재한다고 가정하여 130개 포인트 지점에서 계산을 수행하였고, 이를 MCNP 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 결과는 Fig. 3과 같이 나타났다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 위 식으로 계산한 결과와 MCNP 시뮬레이션 결과는 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 시설물에 대한 차폐나 반사 등을 고려하지 않으면, 복잡한 MCNP 시뮬레이션을 거치지 않더라도 앞서 도출한 방정식만으로도 충분히 선량을 계산할 수 있다는 결론을 보여준다.

이는 또한 시설물의 구조가 변경되지 않는다면, 선원의 개수와 위치 혹은 선원의 세기가 바뀌더라도 적용 가능함을 설명할 수 있다. 따라서 이러한 계산 방법론은 선원을 재배치 할 때도 유용하게 쓸 수 있을 것으로 사료된다. 즉 선원의 분포를 균일하게 재조정할 때도 위의 식을 활용할 수 있다.

조사시설 Fig. 2와 같은 경우 감쇄되는 양과 벽에 의해 반사되는 양을 나누어 분석을 수행하였다. 선원 및

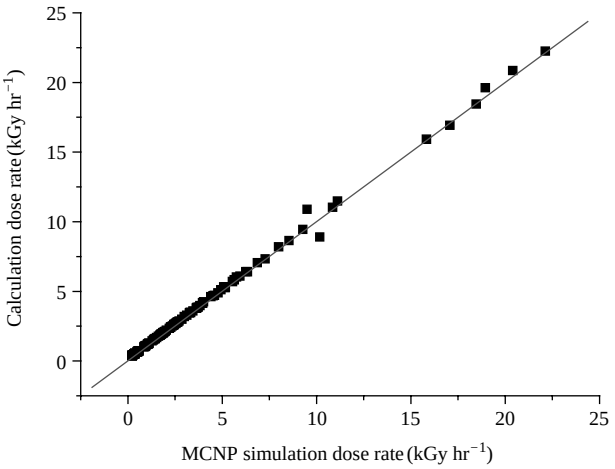

Fig. 3. Calculated dose rates compared with MCNP simulation results.

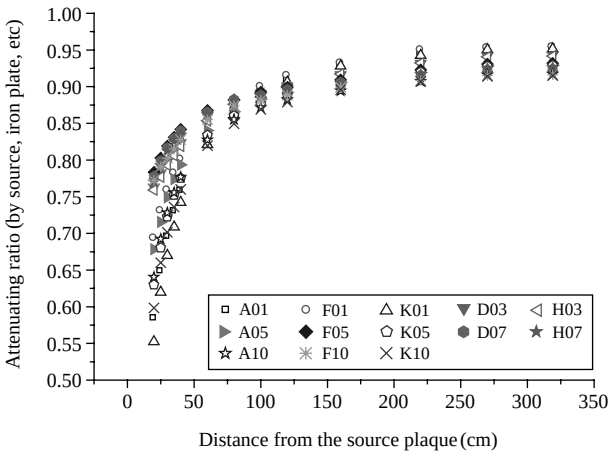

Fig. 4. Attenuating ratio of some structures (source itself, iron plate) by MCNP simulation.

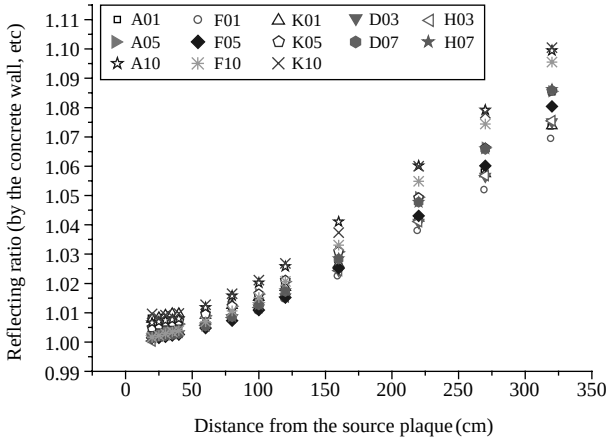

Fig. 5. Reflecting ratio of some structures (concrete wall, water, etc) by MCNP simulation.

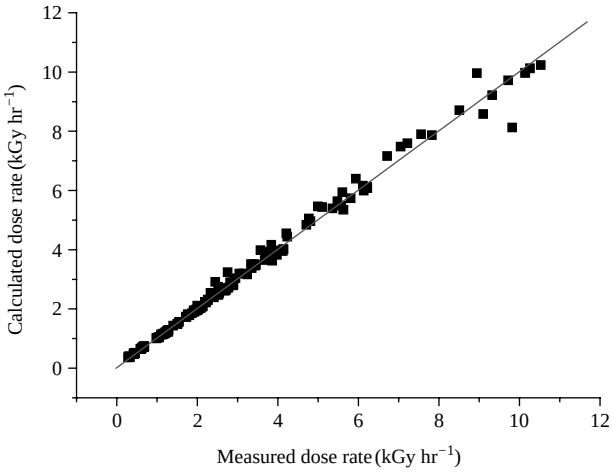

Fig. 6. Calculated dose rates compared with measured dose rates except for the data within 40 cm from the center of source rod.

선원을 둘러싼 구조물에 의해 감쇄되는 양은 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하여 얻어낼 수 있었고 결과는 Fig. 4와 같았다. Fig. 4는 선원을 둘러싸고 있는 스테인레스 스틸 봉과 선원 랙 자체를 보호하기 위한 스테인레스 스틸 평판 등이 있는 경우의 값과 없는 경우의 값을 비교한 것이다.

Fig. 3의 결과를 이용하여 구조물에 의해 감쇄되는 상관 식 $X(x,t_1,A)$을 다음과 같이 얻을 수 있었다.

$$X(x,t_1,A)=0.2+0.55(1-e^{-x/t_1})+A(1-e^{-x/80}) \quad (5)$$

여기서 $t_1(y,z)=0.229\sqrt{y^2+z^2}-1.5512$, $A(z)=-0.0004z+0.2056$이다.

한편 벽, 바닥, 천정 등으로부터 반사되는 양을 계산하기 위해 역시 몬테칼로 시뮬레이션으로 결과를 얻을 수 있었는데 반사되는 양은 Fig. 5와 같이 선원으로부터 멀어질수록 증가하였고, 그 결과에 따라 다음과 같은 상관 식 $R(x,t_2)$을 얻을 수 있었다.

$$R(x,t_2)=0.96104+0.03897e^{-x/t_2} \quad (6)$$

여기서 $t_2(z)=0.8059z-321.09$이다.

참고로 Fig. 4와 5에서 알파벳 (A…K)은 y축의 좌표를 15 cm의 간격으로 나눈 것을, 그리고 숫자 (01…10)은 z축의 좌표를 10 cm의 간격으로 나눠 계산 기준점으로 삼았음을 표시한다.

따라서 임의의 지점 P에서 물에 대한 흡수선량은, (1)에서 (6)까지의 식을 종합하여 IR-221에서와 같이 선원

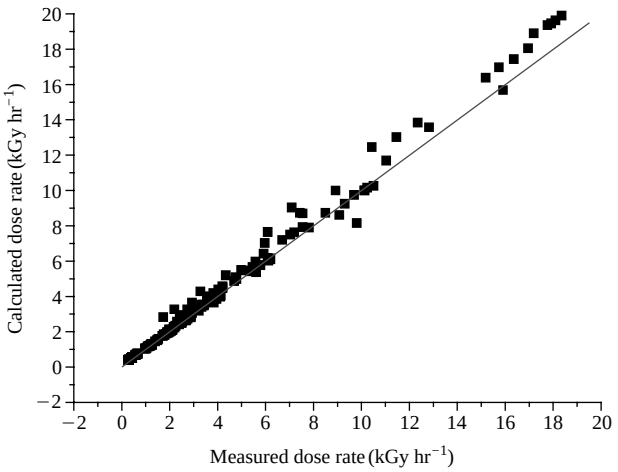

Fig. 7. Calculated dose rate compared with measured dose rate for all position.

이 30개일 경우, 다음과 같은 최종 결과 식을 도출해 낼 수 있었다.

$$\dot{D}=E\frac{\mu_{en}}{\rho}\sum_{i=1}^{30}\phi_{r_i}(P)\cdot X(x,t_1,A)\cdot R(x,t_2) \quad (7)$$

여기서 E는 ^{60}Co이 붕괴되면서 나오는 감마선 에너지의 평균값(1.25 Mev)이고, $\frac{\mu_{en}}{\rho}$는 에너지 1.25 Mev에서의 물의 질량에너지 흡수계수(cm^2 g^{-1})이다.

(7)식과 같이 도출된 계산식이 실제 IR-221에 적용 가능한지를 검증하기 위해 총 239 지점에 알라닌 선량계로 흡수선량을 측정하여 계산된 값과 비교해 보았다.

Fig. 6은 선원 중심으로부터 x축의 방향으로 40 cm 떨어진 곳에서부터 320 cm까지, 그리고 y축으로 120 cm의 영역과 z축으로 100 cm의 영역에 걸쳐 계산된 흡수선량과 측정된 흡수선량을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 대부분의 모든 데이터들이 ±5% 범위에 들어감을 알 수 있다.

그러나 Fig. 7에서는 추가의 연구가 필요하다는 것을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 Fig. 6과는 다르게 ±5% 범위를 벗어난 데이터가 곳곳에 눈에 띈다. 범위를 벗어난 데이터들은 주로 선원 중심으로부터 x축 방향으로 20 cm 떨어진 곳에서의 계산 값들이다. 선원으로부터 가까운 거리일수록, 구조물의 영향을 많이 받는다. 또한 짧은 시간에도 상대적으로 흡수선량 값이 높고, 짧은 거리 안에서도 그 흡수선량 값의 편차가 상대적으로 심하다. 따라서 흡수선량을 측정할 때 불확도가 높을 수 있다. 한편으로 몬테칼로 시뮬레이션을 하기 위해서는 구조물에 대한 입력 자료가 충분해야 하는데, 불행하게도 선원을 둘러싸고 있는 구조물에 대한 정확한 자료를 확보하는 데 어려움이 있었다. 이러한 이유들로 인해 선원 근처에 있는 값들은 Fig. 7과 같이 범위를 벗어난 것으로 분석된다.

그럼에도 불구하고 선원 중심으로부터 40 cm 떨어진 곳부터는 본 연구에서 개발된 모델의 적용이 타당함을 증명할 수 있었으며, 그 이하의 거리에서는 별도의 보정함수를 추가하면 모든 범위에서의 선량 평가가 가능할 것으로 판단하고 있다.

이러한 결과는 간단한 몬테칼로 시뮬레이션을 이용한다면 기하학적인 구조 분석을 통한 계산식만으로도 흡수선량 평가가 가능함을 보여주고 있다.

결 론

본 연구에서 개발된 방법론은 몬테칼로 시뮬레이션 코드처럼 정확한 물리적 분석에 의한 모델 개발은 아니다. 그러나 IR-221과 유사한 구조물에서의 흡수선량 평가는 복잡한 코드 계산이 아니어도 물리적 현상들을 단순화시켜 모델을 세우고, 그 모델에 근거해서 산출된 식만으로도 흡수선량을 계산할 수 있음을 밝혀냈다.

이 모델에 의해 산출된 계산식은 IR-221에 적용 가능하지만, 현재의 계산식은 선원 중심으로부터 40 cm 미만의 곳에서는 적용이 어렵다. 그러나 실제로 조사 시에 이처럼 가까운 거리에서는 불확도가 커서 요구하는 선량을 조사시키기는 어려움이 있고, 부피가 상대적으로 큰 물질의 조사는 균일한 조사가 어려우므로, 굳이 보충 연구가 필요하지 않을 수 있다.

그러나 이 모델에 대한 보충 연구가 수행된다면, 이 구조물에 대한 정보 부족에 따른 함수를 고려하여 좀 더 정확한 산출식을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

ASTM E 2232-02. 2004. Selection and use of mathematical methods for calculating absorbed dose in radiation processing applications. pp. 269-284. *In*: ASTM, Standards on Dosimetry for Radiation Processing, 2nd ed. 100Barr Harbor Drive, West Conshohoken, PA 19428.

ASTM E 2303-03. 2004. Absorbed-dose mapping in radiation processing facilities. pp. 285-293. *In*: ASTM, Standards on Dosimetry for Radiation Processing, 2nd ed. 100 Barr Harbor Drive, West Conshohoken, PA 19428.

Briesmeister J. 1997. MCNP-A general Monte Carlo N-Particle Transport Code, LA 1265-M, Version 4B, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, USA.

Gharbi F, Kadri O, Farah K and Manni K. 2005. Validation of GEANT code of CERN as predictive tool of dose rate measurement in the Tunisian gamma irradiation facility. *Radiat. Phys. Chem.* **74**(2):102-110.

Halbleib J. 1988. Structure and operation of the ITS code system. pp. 249-262. *In*: Monte Carlo transport of electrons and photons (Jenkins TM, Nelson WR and Rindi A *eds*.), Plenum Press, New York.

ISO/ASTM E 51261:2004. 2004. Selection and calibration of dosimetry systems for radiation processing. pp. 23-41. *In*: ASTM, Standards on Dosimetry for Radiation Processing, 2nd ed. 100 Barr Harbor Drive, West Conshohoken, PA 19428.

ISO/ASTM E 51607:2004. 2004. Practice for use of the alanine-EPR dosimetry system. pp. 107-112. *In*: ASTM, Standards on Dosimetry for Radiation Processing, 2nd ed. 100 Barr Harbor Drive, West Conshohoken, PA 19428.

Kadri O, Gharbi F, Farah K, Manni K and Trabelsi A. 2006. Monte Carlo studies of the Tunisian gamma irradiation facility using GEANT4 code. *Appl. Radiat. Isot.* **64**(2):170-177.

McIntyre R, Huntzinger CJ and Nelson WR. 1990. Applications of EGS4 to industrial irradiator design and use. *Radiat. Phys. Chem*. **35**(4-6):762-766.

Nelson WR and Rogers DW. 1988. Structure and operation of the EGS4 code system. pp. 287-305. *In*: Monte Carlo Transport of Electrons and Photons (Jenkins TM, Nelson WR and Rindi A *eds*.), Plenum Press, New York.

Oliveira C, Ferreira LM, Goncalves IF and Salgado J. 2002. Monte Carlo studies of the irradiator geometry of the Portuguese Gamma Irradiation facility. *Radiat. Phys. Chem.* **65**(3):293-295.

Oliveira C, Salgado J and Carvalho AF. 2000. Dose rate determinations in the portuguese Gamma Irradiation Facility: Monte Carlo simulations and measurements. *Radiat. Phys. Chem.* **58**(3):279-285.

Raisali GR and Sohrabpour M. 1993. Application of EGS4 computer code for determination of gamma ray spectrum and dose rate distribution in Gammacell 220. *Radiat. Phys. Chem.* **42**(4-6):799-805.

Sohrabpour M, Hassanzadeh M, Shahriari M and Sharifzadeh M. 2002. Dose distribution of the IR-136 irradiator usinga Monte Carlo code and comparison with dosimetry. *Radiat. Phys. Chem.* **63**(3-6):769-772.

Weiss DE, Johnson WC and Kensek RP. 1997. Dose distribution in tubing irradiated by electron beam: Monte Carlo simulation and measurement. *Radiat. Phys. Chem.* **50**(5):475-485.

Manuscript Received: June 5, 2009
Revision Accepted: June 22, 2009