

말단선량계의 광자에 대한 선량환산인자의 이론적 계산

김광표 · 이원근

경희대학교

이상윤 · 윤석철

한국원자력연구소

요 약

본 연구에서 말단선량계에 대한 선량평가지 선량환산인자를 산출하기 위해 1995년의 ANSI N13.32 기준인 "말단선량계의 성능평가를 위한 기준"에서 제안된 기준 팬텀을 가지고 MCNP 전산코드를 이용하여 커마근 사법에 의해 수행하였다. ANSI N13.32의 기준팬텀은 손·발 그리고 손가락을 대표하는 원통형으로서 특히 손·발 팬텀에 대해서는 뼈등가물질로 알루미늄을 삽입한 것을 제안함에 따라 본 계산 목적을 위하여 팬텀 설계를 똑같이 모사하였으며 사용된 광자빔 에너지는 20 keV에서 부터 1.5 MeV에 걸쳐 14개의 단일에너지를 선택하여 수행 하였다. 본 연구에서 전산수행한 결과를 ANSI N13.32의 실험적 결과와 비교해 볼때 50 keV에서 부터 1.5 MeV까지의 에너지 영역에서는 최대오차 6 % 이내에서 거의 일치함을 보였다.

1. 서론

지난 수년에 걸쳐서는 방사선 방어 목적을 위한 선량평가에 있어서 전신평폭선량 평가를 위한 연구에 몰두해 왔으나 기본적인 방사선 방어 지침에서 예상되는 변화인 전신선량당량의 제한치가 연간 5 rem인데 반해 손에 대한 선량당량 제한치는 연간 50 rem으로 전자의 경우보다 10 배나 높다는 사실을 주목함에 따라 말단선량평가의 필요성을 인식하게 되었다⁽¹⁾. 또한 전신에 대한 선량당량보다 더욱 큰 선량당량이 손이나 피부의 국부적인 곳에서 발생할 수 있으나 말단선량평가에 관한 주의가 없을 경우 일상적인 개인 모니터링의 방법으로는 선량평가 뿐만 아니라 감지할 수도 없으므로 말단선량평가에 더욱 많은 관심이 강조되고 있다. 특히 미국의 환경보호 위원회의 개정된 시행령에 의해 미연방에서는 작업중 말단부위에 대한 조사 한계치

를 이전의 75 rem에서 50 rem으로 낮추었다⁽¹⁾. 이에 미국의 핵안전성 위원회의 보건물리 그룹에서는 말단 선량평가개발을 위한 노력에 박차를 가한 결과 ANSI N13.32 (1995)기준⁽²⁾인 “말단선량계의 성능평가를 위한 기준”을 제정하였고 여기에는 말단선량평가의 정확성과 신뢰성을 확립하기 위하여 사용선원, 조사 조건, 그리고 최소검출선량, 기준 팬텀, 선량환산인자, 방향의존성 등을 포함하고 있다.

최근 ICRU Report 51⁽³⁾에서는 개인 모니터링을 위한 실용량으로서 개인선량당량(the personal dose equivalent, $H_p(d)$)를 사용하도록 제안하였다. 하지만 이러한 양은 인체조직에 대한 선량당량으로서 정의되어 있으므로 인체는 물론 인체조직등가물질로 만든 팬텀을 사용한다고 해도 직접 측정하기에는 매우 곤란하다. 따라서 환산인자가 결정되면 계산에 의해서 선량당량을 알 수 있다. X선, 또는 감마선과 같은 광자의 경우에는 자유공간에서의 공기커마(air kerma)와 선량당량의 비가 환산인자이다.

한편 ANSI N13.32에 포함된 환산인자는 실험적인 방법에 의해 산출한 값⁽⁴⁾들이므로 본 연구에서는 말단 선량평가를 위하여 MCNP 4A 전산코드를 도입해 ANSI N13.32의 기준팬텀을 사용하여 인체조직등가물질내에서 광자의 단일에너지에 따른 흡수선량 분포 및 선량당량의 분포를 결정함으로써 선량환산인자를 이론적으로 도출해 보자는 데 그 목적이 있다. 아울러 이러한 분포를 구하는 방법으로는 확률적 접근방법인 몬테 카를로 방법을 이용하여 입자 수송과 자유공간에서의 공기커마(air kerma, K_a)로 부터 선량당량을 산출하는 커마(kerma)근사법을 채택했다.

2. 이론적 근거

2.1 커마 근사법에 의한 선량 계산

흡수선량은 단위질량당 흡수된 에너지의 양으로 나타내어지는데, 어떤 작은 부피의 tally cell에 2차 하전 입자와 전자의 수송이 없다는 커마(kerma) 근사를 이용해 계산된다. 따라서 광자의 에너지는 전자의 운동에너지로 모두 부여된다. 그리고 이러한 전자의 최대비정거리내에서 광자의 감쇄효과를 무시할 정도이면 에너지를 가진 광자가 조직과 충돌할 때 그때 조직에 흡수되는 에너지량을 커마(kerma) 근사법으로 나타낼 수 있다.

따라서 광자의 경우 선질계수(quality factor)가 1이므로 선량당량 $H_p(d)$ 의 결과식은 다음과 같이 주어진다.

$$H_p(d) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \phi(E, d) K(E) dE$$

여기서 $\phi(E, d)$ = fluence with the energy E in the depth, d of the phantom

$K(E)$ = kerma per unit fluence

2.2 선량당량 환산인자의 전산수행 조건

MCNP(Monte Carlo N-Particle) 4A 전산코드⁽⁵⁾는 ENDF/B-V에 근거를 둔 광범위한 핵단면적 자료를 보유하고 있으며 중성자, 광자는 물론 전자의 수송(transport)까지 몬테카를로 방법을 이용하여 계산할 수 있도록 되어있다. 광자에 대한 선량당량 환산인자는 공기커마에 대한 선량당량의 비로 나타내므로 먼저 공기커마를 구하는 데 있어서 질량에너지전이계수(mass energy transfer coefficient)는 Hubbel의 자료⁽⁶⁾를 근거로 하여 광자의 에너지에 따라 별도로 계산한 것으로서 그림1에 나타내었다

MCNP 4A 전산코드의 검증 계산을 하기위해 ICRU 구내의 선량당량을 그림2과 같은 상태로 하여 계산에 적용하였다. 즉, 진공상태에서 평행하고 광범위한 단일에너지의 광자장이 형성되었다고 가정하고 거기에 직경이 30 cm인 ICRU 구를 놓았다. 또한 광자에너지는 팬텀 표면에 수직으로 입사한다고 본다.

아울러 또 하나의 가정은 하전입자평형(charged particle equilibrium) 상태가 존재한다는 것에 커마 근사법이 근거를 두고 있다는 것과 제동복사(bremsstrahlung)나 전자의 결합 효과(binding effect), 탄성산란(coherent scattering)은 무시한다는 것이다. 그리고 단일 광자에너지는 10 keV부터 10 MeV까지의 24개를 선택하였으며 각각의 단일에너지에 대하여 1×10^6 개의 이력(history)을 가지고 모사하였다. 이러한 광자의 이력(history)은 관심있는 체적내로 입사하여 그 체적내에서 총에너지가 흡수되었을 경우, 에너지가 1 keV 이하로 감쇄되었을 경우 그리고 산란에 의하여 그 체적을 벗어났을 경우에 마치는 것으로 했다. 계산된 흡수 선량이나 선량당량은 어떤 한 부피의 셀(cell)에서의 평균치이므로 그 부피의 평균반지름에서 계산되었다고 볼 수 있다. 따라서 어떤 부피의 셀(cell)에서 계산된 값이 각 셀의 중심지점에서의 값이므로 구의 주축의 따른 깊이에서 선량당량의 분포를 알 수 있다.

이제 본 전산 수행의 목적인 말단선량평가를 위한 팬텀내에서의 선량당량을 계산하기 위해 그림3과 같은 상태를 적용하였다. 그리고 계산 조건은 위와 동일하다. 다만 여기서는 광자의 이력(history)이 1×10^7 개이며, 광자의 단일에너지는 20 keV부터 1.5 MeV까지의 영역에 걸쳐 14개를 선택해 ANSI N13.32가 제안한 기준팬텀인 손·발 팬텀, 즉, 길이 300 mm, 직경 73 mm인 원통형이며 특히 뼈등가물질로서 길이 300 mm 이고 직경 60 mm인 알루미늄으로 된 원통을 삽입한 것을 설계팬텀으로 모사해 전산수행 하였다. 한편 ANSI N13.32의 기준팬텀으로서 손가락 팬텀은 길이 300 mm, 직경 19 mm인 PMMA의 재질로 된 원통형이다. 말단선량의 경우는 $H_p(0.07)$ 에 대해서만 계산을 수행하였다. 말단선량평가를 위한 선량환산인자의 결과식은 다음과 같다.

$$\frac{H_p(0.07)}{K_a} = \frac{C \int \phi_{PMMA}(E) \left[\frac{\mu_{tr}(E)}{\rho} \right]_{ICRU \text{ tissue}}}{K_a}$$

여기서, C = unit conversion factor

ϕ = fluence in the PMMA material of extremity cylindrical phantom

$$\left[\frac{\mu_{tr}(E)}{\rho} \right] = \text{mass attenuation coefficient of ICRU tissue}$$

3. 수행 결과 및 토의

본 연구에서 ICRU 구 팬텀의 경우 검증계산 결과인 $H_p(0.07)/K_a$ 와 $H_p(10)/K_a$ 를 williams et al (1983)⁽⁸⁾과 Dimblow and Francis(1984)⁽⁸⁾의 평균값을 취한 ICRP Publication 51⁽⁹⁾에 권고된 데이터와 비교하였을 때 4 % 이내에서 일치함을 보여준다. 이를 그림4에 나타내었다. 실제로 이차전자(secondary electron)의 수송(transport)을 고려하여 흡수선량을 산출한 값도 10 MeV에서 최대오차 4 %를 나타낸다는 사실이 이미 몇몇 실험자^{(8),(9)}에 의해 확인된 바에 의하여 전자평형이 성립된다는 가정하에서는 커마근사법이 타당함을 보여준다. 여기서 0.07, 3, 10 mm의 깊이에서의 선량당량은 각각 인체에 대해 피부, 수정체, 장기(organ)에 해당되는 값들이다.

말단팬텀인 손·발 팬텀에 대해서는 전산수행 결과인 $H_p(0.07)/K_a$ 를 ANSI N13.32의 실험적 방법에 의해 제안된 결과와 비교하였다. 이것은 그림5에 나타내었다. 50 keV에서부터 1.5 MeV까지의 에너지 영역에서는 최대 6 % 이내에서 거의 일치함을 보였다. 또한 50 keV 이하의 낮은 에너지영역에서는 최대 15 % 오차가 나타났다. 이것은 이 영역의 광자에 있어서는 주로 광전효과가 매우 우세한 영역이므로 짧은 거리에 대해서도 감쇄가 급속히 일어나기 때문에 전산수행함에 있어서의 조사조건(irradiation geometry)에 기인한 것으로 판단된다. 아울러 ANSI N13.32의 데이터가 실험적으로 구한 결과이므로 특히 낮은 에너지에서의 실험에 의한 불확실성(uncertainty)도 이러한 오차 발생에 기여한다고 사려된다.

4. 결론

지금까지 말단선량평가를 위한 선량환산인자의 산출에 있어서 이론적 계산에 의한 연구가 없었던 상황에서 광자에 대하여 ANSI N13.32가 제안한 기준팬텀인 손·발 팬텀을 가지고 전산수행함으로써 이론적으로 도출한 본 연구의 말단선량 환산인자를 ANSI N13.32의 실험적 방법에 의한 결과와 비교해 볼 때 20 keV와 30 keV의 낮은 에너지 영역을 제외한 50 keV 이상의 에너지 영역에서는 최대오차 6 % 이내에서 잘 일치함을 보여주었다. 따라서 본 연구의 이론적 계산 방법에 있어서 상당한 타당성이 있음을 확인하였다. 그리고 향후에 손가락 팬텀에 대해서도 선량환산인자를 구하기 위한 이론적 계산을 계속 수행할 것이다. 또한 실질적인 피부선량평가를 위해서는 특히 중성자와 베타에 대한 선량환산인자를 계산하는 작업이 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. International Commission on Radiological Protection, "General Principle of Monitoring for Radiological Protection," ICRP Publication 35, Pergamon Press, Oxford, 1982.
2. ANSI, "America National Standard for the Performance Testing of Extremity Dosimeters," ANSI N13.32, America National Standards Institute., New York, N.Y., 1995.

2. ANSI, "America National Standard for the Performance Testing of Extremity Dosimeters," ANSI N13.32, America National Standards Institute., New York, N.Y., 1995.
3. International Commission on Radiation Units and Measurements, "Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry" ICRU Report 51, Washington, D.C., 1993.
4. P.,L. Roberson, F.,N. Eicher, W.,D. Reece, "Determination of Photon Conversion Factors relating Exposure and Dose for Several Extremity Phantom Designs," Pacific Northwest Laboratory, Washington D.C., 1986.
5. J. Briesmeister, "MCNP4A, Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4A," LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1993.
6. J.H. Hubbel, "Photon Mass Attenuation and Energy-Absorption Coefficient from 1 keV to 20 MeV," Int. Appl. Rad. Isot.,33, 1269, 1982.
7. G., Williams, W.,P., Swanson P., Kragh and G., Drexler, Calculation and Analysis of Photon Dose Equivalent Distributions in the ICRU Sphere. GSF Bericht 5-598, Munchen, 1983.
8. P.J. Dimbylow and T.M. Francis, "A Calculation of Dose Equivalent Quantities in the ICRU Sphere for a Photon Energies from 0.01 to 10 MeV", Radiat. Prot. Dosim., 9(1), p,49-53, 1984.
9. International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 51, Pergamon Press, Oxford, 1987.
10. E., Storm and H.I. Israel, "Photon Cross Section from 1 keV to 100 MeV for Elements Z=1 to Z=100," Nuclear Data Tables, A7, 565, 1970.

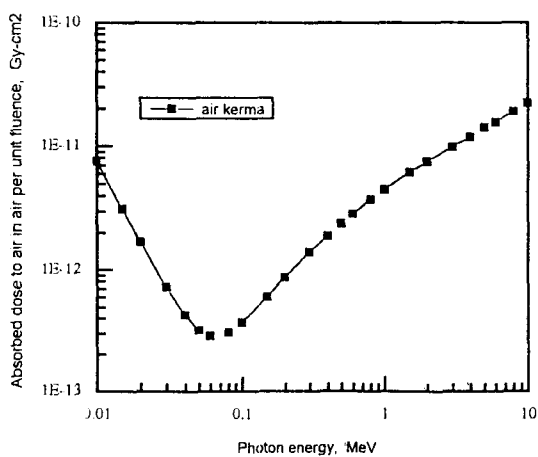


Fig 1 Absorbed dose th air in free air per unit fluence

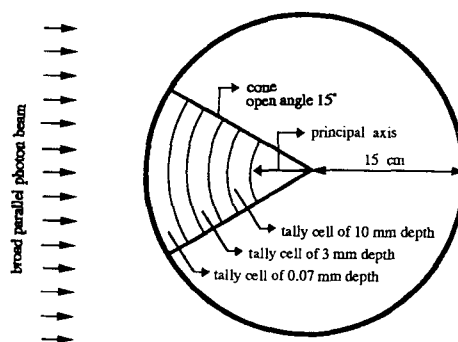


Fig.2 The omputational geometry and cell arrangemaent for ICRU sphere phantom.

■ Arm/leg phantom

■ Finger phantom

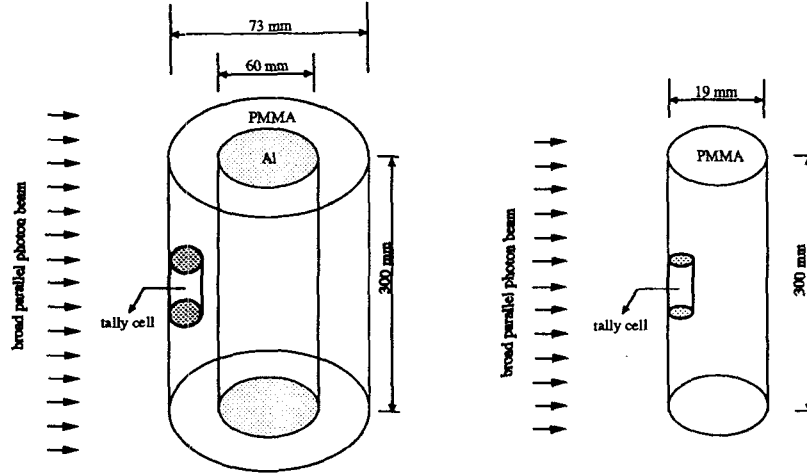


Fig.3 The computational geometry and cell arrangement for extremity phantom.

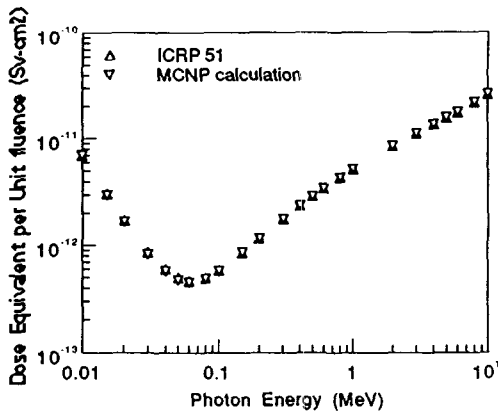


Fig. 4 Dose equivalent per unit fluence on the principal axis at a depth 0.07 mm for photon of the ICRU sphere.

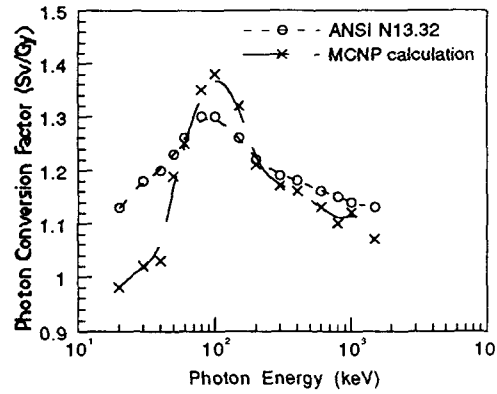


Fig. 5 The air kerma to dose conversion factor for photon of the extremity and derived smooth curves.