

Photon Beam 에 대한 Kerma 와 흡수선량의 측정

김 성 희 · 신 승 애

이화여자대학교 자연과학대학 물리학과

추 성 실

연세대학교 의과대학 치료방사선학교실

=요 약=

Kerma와 흡수선량 사이의 관계를 결정하는 것은 선량측정의 기본적인 문제이다. 본 연구에서는 고에너지 치료용 선형가속기의 6 MV X선과 감마치료기의 ^{60}Co 에 대한 kerma와 흡수선량을 측정하였다. 본 실험결과는 ^{60}Co 감마선에 의한 물과 알루미늄의 과도 평형 영역에서의 흡수선량이 실제적으로 kerma와 일치하였으며, 최대선량 깊이는 6 MV와 ^{60}Co 에서 각각 1.45 g/cm^2 과 0.48 g/cm^2 이었다. 최대 build-up에서의 흡수선량과 표면에서의 충돌 kerma의 비(K^{att})는 표준 조사면에서 물과 알루미늄에 대해, 6 MV인 경우는 0.949, ^{60}Co 인 경우는 0.992이었다. 이 결과는 K^{att} 의 물질에 대한 의존성이 매우 작음을 보여준다.

I. 서 론

Kerma¹⁾의 개념은 Roesch²⁾에 의해서 처음 도입되었다. 그는 2차 하전입자에 의해서 전자파의 형태로 소모되는 에너지를 제외한 양이 kerma에 대응되는 것으로 "KERMA"으로 이름짓고 그 양을 정의하였다. 1979년 Attix³⁾는 1954년 Cormack와 Johns⁴⁾에 의해서 얻어진 실험적인 심부선량분포곡선으로부터 흡수선량을 결정할 때, 흡수선량에 대한 깊이적분과 kerma에 대한 깊이 적분이 같다는 Roesch의 도입²⁾에 잘못이 있었음을 지적하고 이에 대해 kerma의 개념적인 명확성을 갖도록 이를 두 부분으로 나누었다.

$$K = K^{col} + K^{rad} = \frac{\mu_{en}}{\mu_{tr}} K + \frac{\mu_{tr} - \mu_{en}}{\mu_{tr}} K \quad (1)$$

여기서 K^{col} 은 충돌 상호작용에서 부분적으로 소모되는 하전입자의 운동에너지에 대한 kerma이며, K^{rad} 은 일반적으로 제동복사에 의해서 소모되는 운동에너지이다. μ_{tr} 은 에너지 전달계수이며, μ_{en} 은 에너지 흡수계수⁵⁾이다.

식 (1)은 간접 전리 방사선이 X선 또는 감마선인 경우, 2차 하전입자가 전자이기 때문에 중요한 의미가 있다. 만일 간접 전리방사선이 중성자인 경우, 2차 하

입자는 양성자이거나 무거운 입자이다. 이 하전 입자에 대한 복사 상호작용의 확률은 $1/(\text{질량})^2$ 로 변하기 때문에⁶⁾, 양성자에 의한 확률은 거의 같은 속도의 전자에 의한 것보다 10^{-6} 배만큼 작다. 그러므로, 무거운 하전입자에 대해서는 근사적으로, $K^{rad} \approx 0$ 이고, $K \approx K^{col}$ 이라고 할 수 있다.

본 논문에서는 X선 또는 감마선을 사용하므로 2차 하전입자의 상호작용을 고려하여야 한다.

본 실험은 Build-up 영역에서 광자선에 대한 흡수선량과 kerma가 깊이에 따라서 어떻게 달라지며, 또 물질에 따른 변화가 어떠한가를 알아보고, 이들 관계에 대한 실험결과를 Greening의 준실험식⁷⁾과 비교하고자 한다.

II. 이 론

에너지속과 물질과의 상호 작용에 관련하여 kerma와 흡수선량을 다음과 같이 정의한다¹⁾.

$$K(z) = \bar{\mu}_{tr} / \rho \psi(z) \quad (2)$$

$$D(z) = \beta(z) \bar{\mu}_{en} / \rho \psi(z) \quad (3)$$

전자의 초기운동 에너지의 일부는 원자핵과의 비탄성 상호 작용으로 인하여 부수적으로 소모된다. 그리고 그 나머지는 다른 전자와의 비탄성 충돌로 소모되

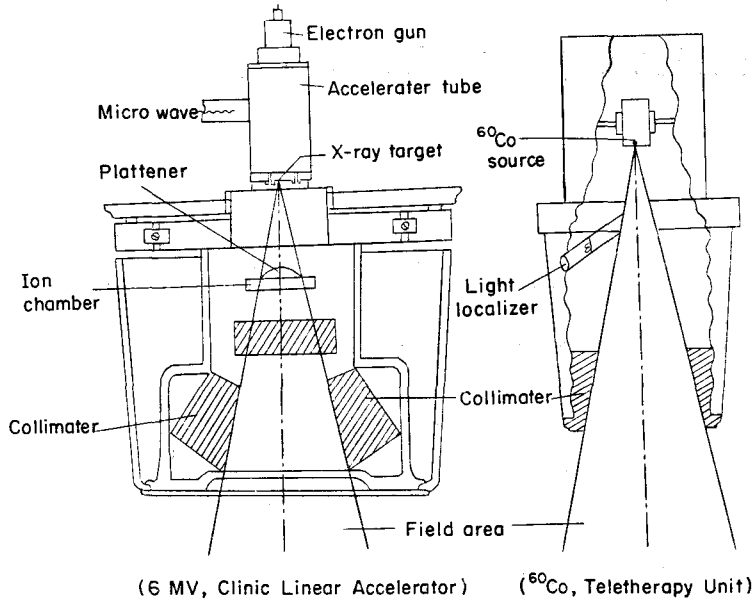


Fig. 1. Arrangement of ⁶⁰Co Teletherapy Unit and 6 MV Clinic Linear Accelerator.

며, 이 결과 원자는 전리 또는 여기된다. 이것을 kerma 로서 표현하면 다음과 같다.

$$K(z) = [(1-g) + g] \bar{\mu}_{tr}/\rho \psi(z) \quad (4)$$

여기서는 전자의 초기 운동에너지에 대한 복사 상호 작용에 기여하는 에너지의 비이다. 그러므로 $\bar{\mu}_{en} = (1-g) \bar{\mu}_{tr}$ 의 관계를 도입하면 다음과 같다.

$$K^{col}(z) = \bar{\mu}_{en}/\rho \psi(z) \quad (5)$$

$$K^{rad}(z) = \bar{\mu}_{tr}/\rho \psi(z) \quad (6)$$

식 (3)에서 $\beta(z)$ 는 에너지 확산과 하전입자 수송을 고려한 하전입자의 이동을 나타내는 보정 인자로서, Loevinger⁸⁾에 의해서 정의되었다.

$$\beta(z) = D(z)/K^{col}(z) \quad (7)$$

이 식에서 흡수선량은 kerma 그 자체가 아니라, kerma 의 층돌 부분과 관계된다. 이 형식적인 가정을 한 이유는 관심있는 영역에서부터 빠져 나온 에너지가 높은 입자들을 제외한 전자에 의해서 소모된 에너지만이 흡수선량과 관계있기 때문이다.

높은 에너지의 광자선에서 선량분포에 관한 두개의 지수함수를 도입함으로써, 다음과 같이 kerma 와 흡수선량사이의 관계식을 얻을 수 있다.

$$D(z)/K(z) = (\mu_e/\bar{\mu} - \mu_e) (\exp(-\mu_e \cdot z) - \exp(-\bar{\mu} \cdot z)) \quad (8)$$

여기서 μ_e 는 전자에 대한 실효선형 감쇠 계수이며, $\bar{\mu}$ 는 실효평균 감쇠계수이다. 이 식은 1981년 Greening⁷⁾

이 제안한 준실험식이며, 실험적으로 얻어진 분포곡선에 의해서, μ_e 와 $\bar{\mu}$ 가 결정된다.

III. 실험

1. 선원과 검출기

⁶⁰Co 원격 치료 장치에서 나오는 1.17 MeV 및 1.33 MeV 감마선과 치료용 선형 가속기에서 나오는 6 MV X-선을 사용하였다(Fig. 1). 이 두 장치에 대해서 SSD (source-skin distance) 80 cm 에서 실제적인 조사면 을 갖도록 콜리메타가 조립되어 있다.

⁶⁰Co 에서 사용한 검출기는 박벽 단창형 전리함(Thin-wall end-window ionization chamber)으로 앞표면은 0.5 mg/cm²의 알루미늄창으로 되어 있고, 감각부피는 직경 2 cm 와 두께 1.2 mm 의 원통형이다. 6 MV 에서 사용한 검출기는 가압전리함(Condensed ionization chamber)으로서 두께 0.31 g/cm²의 루사이트 벽으로 둘러싸인 원통형이며, 감각부피는 0.3 ml 이다. 팬텀 내의 표면 근처 0.31 g/cm²이전 영역에서의 흡수선량 측정엔 TLD-LiF teflon 을 사용하였다.

2. 측정 방법

흡수선량의 측정엔, 물과 알루미늄 팬텀 위에 수직 으로 광자선을 조사시키고 Build-up 영역내에서 물질

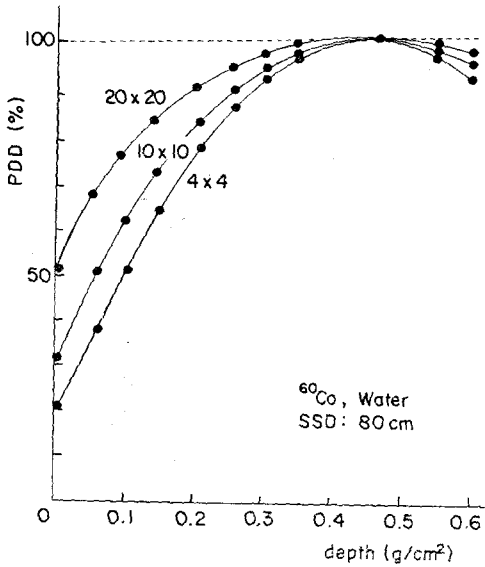


Fig. 2. Percent depth dose distribution in water at the build-up region for ^{60}Co by field sizes.

의 두께를 변화시키면서 측정하였다. 이때 SSD 를 80 cm 로 일정하게 유지하는 표준측정법¹⁰⁾을 사용하였으며, 조사시간은 60초로 두고, 조사면을 변화시키면서 실험하였다.

TLD 를 사용한 경우, 물에서의 측정은 불과 거의 등가물질인 폴리스틸렌판을 물팬텀 사이에 고정시키고 그 위에 LiF teflon 을 두고 점차로 물의 높이를 올리면서 측정하였다.

kerma 의 측정은 콜리메터 아래에 흡수체를 두고, 그 두께를 증가시키면서 멀리 떨어진 검출기를 사용하여 측정하여 산란된 광자를 제외한 kerma 를 얻었다. 여기서 K^{Co} 은 식(1)에서의 관계를 이용하여 계산하였다.

IV. 결과 및 분석

1. 실험 결과

본 실험에서 얻어진 결과중 몇개를 도표로 나타내어 보았다. Fig. 2는 ^{60}Co 감마선에서 물에 대한 심부 백분 선량분포를 조사면의 크기별로 나타낸 것이다.

여기서 조사면의 크기가 커지면 표면에서의 심부 백분 선량분포가 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 공기중에서 산란된 전자나 광자의 기여가 조사면이 넓어짐에 따라서 증가함을 나타낸다.

Fig. 3은 6 MV 에서 불과 알루미늄에 대한 흡수선

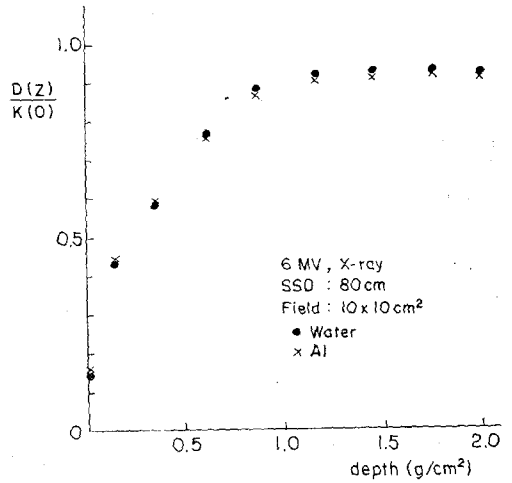


Fig. 3. Absorbed dose in water(●) and Al(X) in the build-up region for 6 MV by field size $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Data are normalized to $K(0)$.

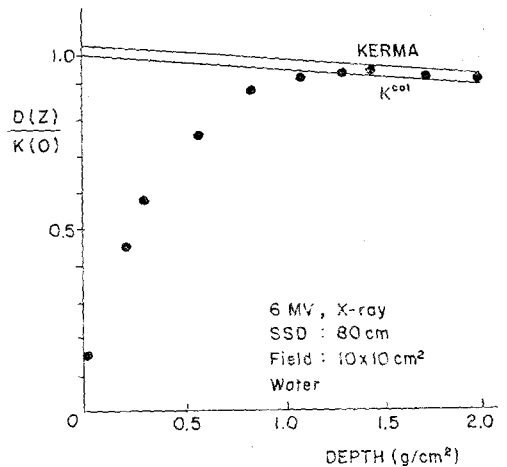


Fig. 4. Absorbed dose in water for 6 MV by field size $10 \times 10 \text{ cm}^2$. The KERMA and K^{Co} also included.

량을 비교한 것이다. 여기서 팬텀 표면에서의 알루미늄의 선량이 물에서보다 더 높은 것은, 알루미늄이 물보다 더 높은 질량 산란 능력을 갖는다는 사실을 나타낸다. 만일 동일한 질량 산란 능력을 갖는다고 가정한다면, 알루미늄의 선량 분포 곡선이 물에서 보다 완만한 것은 질량 저지능이 작기 때문이라고 해석된다. 최대 선량 깊이에서 물인 경우가 알루미늄에서 보다 높은 선량을 나타내는 것은 알루미늄에서의 μ_{en}/μ_{tr} 의 비가 물에서 보다 더 낮다는 것을 보여준다.

Fig. 4는 6 MV 에서 알루미늄에 대한 흡수선량과

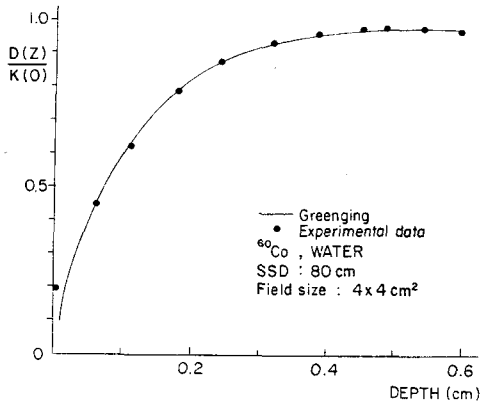


Fig. 5. Comparing between calculated absorbed dose in water, eq.(13), with experimental data for ⁶⁰Co, by field size 4×4 cm².

kerma 그리고 K^{col} 의 관계를 나타낸다. 여기서, 최대 선량 깊이에서의 흡수선량은 kerma와 K^{col} 사이에 존재하는 것을 볼 수 있다.

만약, 물질내에서 하전입자 평형¹⁾(C.P.E)이 존재한다면, $D=K^{col}$ 임을 볼 수 있을 것이다. Fig. 5는 Greening의 계산 결과와 실험결과를 비교한 것이다.

처음 몇 mm에서의 불일치는 물질내에서 광자와 하전입자의 후방산란에 의한 영향과 Greening의 식에서 공기중에서 산란된 전자의 기여가 큰 넓은 조사면에서 커진다.

2. 보정인자, $\beta(z)$ 분석

⁶⁰Co과 6 MV의 광자선에서 얻은 흡수선량과 kerma, K^{col} 의 관계는 Fig. 6에 간단히 도식화하였다.

이 그림은 균일한 물질내로 광자선에 수직으로 들어오는 경우이며, 여기서 R 은 전자의 평균 비정이다. 흡수선량과 K^{col} 의 비 $\beta(z)$ 는 다음 세가지 경우로 구분된다.

1) 균일한 물질내에서, 표면 가까운 영역과 2차 전자의 최대비정보다 가까운 영역에서는 $\beta=D/K^{col}<1$ 이다. 가속 전자의 잃는 에너지가 흡수선량이므로, 이 영역에서 흡수선량은 표면에서 멀어질수록 많아진다.

2) 2차 전자의 최대 전자 비정보다 깊은 영역에서, 넓은 조사선이 물질내에서의 감쇠를 무시한다고 가정할 때, 하전입자 평형이 성립된다. 즉 $\beta=1$ 이다. 광자선에서 완전한 전자 평형은 존재하지 않는다.

3) 최대전자 비정보다 깊은 영역에서 $\beta>1$ 인 경우이다. 이 영역에서 일시 전자 평형이 존재한다.

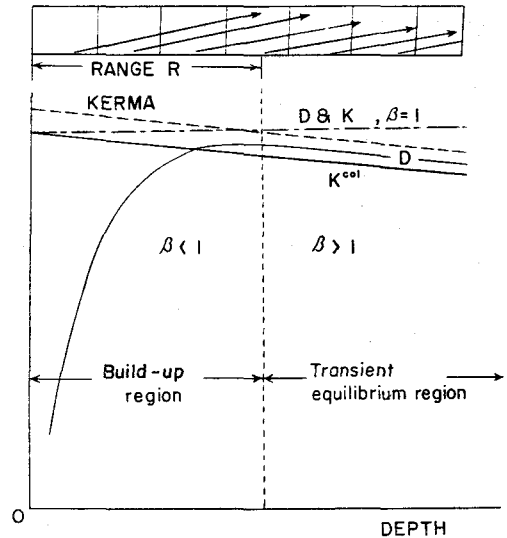


Fig. 6. Relation between absorbed dose D, KERMA K and K^{col}

VI. 결 론

본 논문은 현재 방사선 물리학에서 관심을 가지고 연구하고 있는 build-up 영역에서의 kerma와 흡수선량사이의 관계를 결정하였다. 이들 관계는 Table 1로 주어진다.

본 실험에서, 광자선에 대한 build-up 영역에서의 선량분포는 다음 특징을 갖는다. 팬텀 표면에서의 흡수선량은 조사면이 작을수록 kerma에 비해 작아지며, 최대 선량 깊이는 6 MV X-선에서 1.45 g/cm²이며, ⁶⁰Co 감마선에서는 0.48 g/cm²으로 실험에 사용된 두 가지 물질에 대해 동등한 결과를 얻었다. 그리고, 최대 선량깊이에서 하전입자 평형이 실제 존재하지 않음은 Table 1의 D/K^{col} 의 결과로 알 수 있다. K^{att} 는 물질에 무관한 결과로 나타난다.

본 논문에서 build-up 영역에서 이들 관계를 규정하려는 이유는 첫째, kerma와 흡수선량 사이에 전자에 의해서 수송된 에너지의 영향을 특징짓는 보정인자 $\beta(z)$ 가 어떻게 결정되어지는가를 알고, 둘째, 최대선량 깊이를 측정하여 이 위치에서 고에너지가 주는 영향을 고려함으로써, 의·공학적인 면에서 널리 사용되는 방사선의 효과적인 이용에 중요한 자료를 제공하며, 셋째는 감쇠인자, K^{att} 를 결정함으로써, 광자선에서 전리함벽의 감쇠를 수정하는데 실제 적용할 수 있도록 하는 것으로, 이는 선량 측정에 중요한 의미를 갖는다.

Table 1. KERMA and Absorbed Dose Ratio

| Photon energy | Material | Field size(cm ²) | D/K ^{Co1} | D/K | K ^{att} |
|---------------------------------|----------|------------------------------|--------------------|-------|------------------|
| 1.25 Mev (⁶⁰ Co) | Water | 20×20 | 1.004 | 1.001 | 0.998 |
| | Al | 20×20 | 1.004 | 1.000 | 0.998 |
| | Water | 10×10 | 1.005 | 1.001 | 0.997 |
| | Al | 10×10 | 1.004 | 1.001 | 0.997 |
| | Water | 4×4 | 1.006 | 1.002 | 0.992 |
| | Al | 4×4 | 1.005 | 1.002 | 0.991 |
| 6 MV (X-ray) | Water | 10×10 | 1.018 | 0.997 | 0.949 |
| | Al | 10×10 | 1.017 | 0.979 | 0.949 |

본 실험 결과는 Greening 의 준 실험식과 비교할 때, 최대 선량 깊이에서의 차이는 0.1%이하의 오차로 근사식으로 도입하기에 충분하나, 처음 몇 mm 에서의 불일치에 대한 보정이 필요함을 알 수 있다. 이 보정항은 산란인자로서 깊이, 조사면 그리고 광에너지에 의한 함수임을 예측한다.

$$D(z)/K(z) = \frac{D_{Greening}^{(z)} + S(z, hv, field)}{K(0)} \quad (9)$$

방사선 치료의 가장 큰 목적은 물론 인체내에서 악성 조직을 파괴하는 것이지만, 여기서는 방사선이 통과해야 하는 악성조직 주변 조직의 피해를 최소화 하여야 하는 목적도 함께 가진다. 그러므로 주어진 위치에서 정확한 방사선 선량측정은 방사선의 인체조사에 앞선 기본문제로 되고 있다.

REFERENCES

- 1) ICRU.: Report No. 33, 1980.
- 2) W.M.C. Roesch.: Radiat. Res. 9:399, 1958.
- 3) F.H. Attix: Health. Phys. 36:347, 1979.
- 4) D.V. Cormack and H.E. Johns: Radiat. Res. 1:133, 1954.
- 5) I.C.R.U.: Report No. 19, 1971.
- 6) H.A. Enge: Introduction to Nuclear Physics, Addison-Wesley Publishing Company, 1966.
- 7) J.R. Greening: Fundamentals of Radiation Dosimetry, Adam Hilger, Ltd, Bristol, 1981.
- 8) R. Loevinger: Med. Phys. 8:1, 1981.
- 9) B. Nilsson and A. Brahme: Acta Radiol. Oncology. 22:1, 1983.
- 10) ICRU.: Report No. 23, 1973.
- 11) F.H. Attix: Health. Phys. 15:49, 1968.

A Measurement of Kerma and Absorbed Dose in Photon Fields

Sung Hee Kim, M.Sc., Seung Aea Shin, Ph.D.

Dept. of Physics, College of Science, Ewha Womans University

Sung Sil Chu, Ph.D.

Dept. of Radiology, College of Medicine, Yonsei University, Seoul, Korea

= Abstract =

Determination of the relation between the kerma (Kinetic Energy Released in Material) and the absorbed dose is one of the basic problems of dosimetry. Kerma and absorbed dose were measured for 6 MV X-ray from the high energy medical linear accelerator and ^{60}Co gamma-ray. The experimental results show that the absorbed dose in the transient equilibrium region practically coincide with the kerma in water and Al for ^{60}Co .

The maximum dose depths were 1.45 g/cm^2 for 6 MV X-ray and 0.48 g/cm^2 for ^{60}Co gamma-ray. The ratios of the absorbed dose at maximum build-up to the collision kerma at the surface, (K^{att}), were 0.949 for 6 MV X-ray and 0.992 for ^{60}Co gamma-ray. No difference was found between water and Al when the standard field size was used. This results show that the dependence of K^{att} on the material is very small.