

일반 Batho방법의 부정형 이질조직에의 적용

서울대학교 의과대학 치료방사선과학교실

채 규 영

== Abstract ==

Application of Generalized Batho Method to Arbitrary Shape of Heterogeneous Tissues

Kyu Young Chai, M.D.

Department of Therapeutic Radiology, College of Medicine, Seoul National University, Seoul, Korea

The generalized Batho method, proposed by Webb and Fox, which is a method of calculation of dose correction factor for the multilayer of heterogeneous tissue, is complex even for a few kind of tissues. The method was modified for the purpose of getting a simple method that divide the multilayer of heterogeneous tissues into some groups of adjacent-tissue pairs. This new method could reduce the number of exponential terms and the time for calculating the dose correction factors by manual and computer calculation.

서 론

방사선 조사야내에서 이질 조직(heterogeneous tissue)이 포함되어 있는 경우 흡수선량을 계산하는 방법에는 여러가지가 있다¹⁾. 그중 특히 잘 알려져 있는 방법은 이른바 Batho의 지수법칙(Batho's power law)이다²⁾. Webb와 Fox³⁾는 다중층의 이질 조직에 대해 적용할 수 있는 Batho 보정방법을 일반화시켰고, Lulu와 Bjärngard⁴⁾는 부피가 유한한 단순한 형태의 이질 조직에 대해 적용할 수 있게 Batho방법을 보완하였다.

한편 인체의 여러 조직은 일정한 층상으로만 배열되지 않고 형태나 체적이 서로 다른 조직들로 복잡하게 배열되어 있으며 한 조직이 다른 여러 조직을 둘러 싸고 있는 경우도 흔히 관찰된다. 이와같이 인체조직의 구성은 같은 밀도의 조직층으로 구성되기 보다는 다양한 이질조직(heterogeneous tissue)으로 구성되어 있어, 임의의 이질조직체에 Webb-Fox의 일반 Batho 방법을 적용하기 위해서는 조직부위별로 각각의 조직층에 대응시킬 필요가 있다.

Fig. 1이나 Fig. 2와 같이 임의 형태의 이질조직에 대한 보정계수는 CF는

$$CF = \frac{D}{D_0} \tag{1}$$

로 정의된다. 여기서 D는 이질조직내의 점 P(또는 Q)의 선량이고, D₀은 균질인 수중내의 점 P(또는 Q)의 선량이다. 실제로 각각의 이질조직의 형태가 다양하므로 두께가 균일하지 않고 측방의 범위가 유한하여 일반 Batho방법의 기본 조건에서 벗어나기는 하지만, 일반 Batho방법을 적용하여 보정계수의 근사치를 구하는데 무리가 없을 것으로 추정된다.

따라서 저자는 불규칙한 형태의 이질조직체에 일반 Batho 방법을 적용하여 흡수선량 계산시 계산시간을 단축시킬 수 있는 방법을 모색하고자 한다.

대상 및 방법

이질조직의 다중 층에 대한 일반 Batho 보정계수 CF는

$$CF = \frac{\mu_{en}^0(n)}{(\mu_{en}^0)_0} \prod_{i=1}^n T(d(i))^{\rho(i)-\rho(i-n)} \tag{2}$$

와 같이 정의되어 있다^{3,5)}. 여기서 n은 선량계산점 범위내의 방사선의 경로상에서 방사선과 이질조직들의 경계면과 교점(혹은 조직층)의 수이다. ρ(i)는 i번째 조직층의 상대전자밀도(relative electron density)이며 단 ρ(0)은 1이다. d(i)는 i번째 조직층의 상부 경계면

에서 선량계산점까지의 깊이이며 $T(d(i))$ 는 깊이 $d(i)$ 에 대응하는, 균질물에서의 조직 최대 선량비 (tissue-maximum ratio, TMR)이다. 또한 $(\mu_{en}^0)_0$ 은 주어진 광자 방사선에 대한 물의 질량흡수계수(mass energy absorption coefficient)이고, $\mu_{en}^0(n)$ 은 선량계산점을 포함하는 이질조직의 질량흡수계수이다.

Fig. 1이나 2에서 도시된 바와 같이 방사선이 그 경로상 동일 조직을 2회 이상 관통할 것이라고 가정해도 무리는 아닐 것이다. 그와 같은 경우 접해 있는 두 이질조직의 쌍이 2개 이상일 수도 있다. 쌍을 이루고 있는 이질조직의 배열 순서 즉 방사선이 통과하는 순서가 같은 경우와 뒤바뀐 경우가 있을 있을 수 있다.

이질조직의 쌍의 배열 순서가 같은 경우를 우선 고려해 보면 방사선과 이질조직의 경계면과의 i 번째 및 j 번째 교점에서 이질조직의 쌍 및 배열 순서가 같다고 가정할 경우 이질조직의 상대전자밀도는 각각

$$\rho(j-1) = \rho(i-1) \tag{3}$$

$$\rho(j) = \rho(i) \tag{4}$$

임을 의미한다. 이 경우 일반 Batho 보정계수 [식(2)]는

$$\begin{aligned} CF &= \frac{\mu_{en}^0(n)}{(\mu_{en}^0)_0} T(d(1))^{\rho(1)-1} \dots T(d(i))^{\rho(i)-\rho(i-1)} \dots \\ &\quad \cdot T(d(j))^{\rho(j)-\rho(j-1)} T(d(n))^{\rho(n)-\rho(n-1)} \\ &= \frac{\mu_{en}^0(n)}{(\mu_{en}^0)_0} T(d(1))^{\rho(1)-1} \dots T(d(i)) \\ &\quad \cdot T(d(j))^{\rho(j)-\rho(j-1)} T(d(n))^{\rho(n)-\rho(n-1)} \end{aligned} \tag{5}$$

와 같이 표시될 수 있다.

반대로 이질조직의 쌍의 배열순서가 뒤바뀐 경우를 가정하면 이질조직의 경계면과 방사선의 i 번째 교점과 k 번째 교점에서 이질조직 쌍의 배열 순서가 역으로 되므로 이때 상대전자 밀도는

$$\rho(k-1) = \rho(i) \tag{6}$$

$$\rho(k) = \rho(i-1) \tag{7}$$

의 관계가 있음을 알 수 있다. 이 경우 일반 Batho 보정계수(식(2))는

$$\begin{aligned} CF &= \frac{\mu_{en}^0(n)}{(\mu_{en}^0)_0} T(d(1))^{\rho(1)-1} \dots T(d(i))^{\rho(i)-\rho(i-1)} \dots \\ &\quad \cdot T(d(k))^{\rho(k)-\rho(k-1)} \dots T(d(n))^{\rho(n)-\rho(n-1)} \\ &= \frac{\mu_{en}^0(n)}{(\mu_{en}^0)_0} T(d(1))^{\rho(1)-1} \dots \\ &\quad \cdot \{T(d(i))T(d(k))\}^{\rho(i)-\rho(i-1)} \dots \\ &\quad \cdot T(d(n))^{\rho(n)-\rho(n-1)} \end{aligned} \tag{8}$$

과 같이 표시된다.

한편 이질조직의 배열 순서가 같은 두 교점과 배열 순서가 다른 또 하나의 교점이 공존하는 경우를 생각해 보자. 이 경우 이질조직의 상대 전자밀도는 식(3), (4)와 식(6), (7)에 의해

$$\rho(i-1) = \rho(j-1) = \rho(k) \tag{9}$$

$$\rho(i) = \rho(j) = \rho(k-1) \tag{10}$$

과 같은 관계가 있을 것이다. 이때 일반 Batho 보정계수는 식(5)와 식(8)을 구하는 방법에 의하여

$$\begin{aligned} CF &= \frac{\mu_{en}^0(n)}{(\mu_{en}^0)_0} T(d(1))^{\rho(1)-1} \dots \\ &\quad \cdot \left\{ \frac{T(d(i))T(d(j))}{T(d(k))} \right\}^{\rho(i)-\rho(i-1)} \dots \\ &\quad \cdot T(d(n))^{\rho(n)-\rho(n-1)} \end{aligned} \tag{11}$$

와 같이 표시될 수 있음을 알 수 있다.

식(5)와 (8), (11)로부터 접해 있는 이질조직의 쌍이 같으면 그 배열 순서에 관계없이 하나의 지수(exponent)로 묶을 수 있음을 알 수 있다.

이질조직의 다중층에 대해 몇개의 이질조직 쌍으로 묶을 수 있는 경우에 식(11)을 일반화시키는 것이 본 논문의 주목적이다. 그러나 (11)에서 알 수 있는 바와 같이 지수를 $\rho(i) = \rho(i-1)$ 대신에 $\rho(i-1) = \rho(i)$ 와 같이 표시하면 그 밀인 $\frac{T(d(i))T(d(j))}{T(d(k))}$ 는 역수로 표시되어야 하기 때문에 혼란이 있을 수 있다. 이 혼란을 피하기 위하여 하나의 약속이 필요하다. 지수가 음수(negative)가 되도록 이질조직의 상대전자밀도가 작은 값에서 큰 값을 뺀다는 것을 전제로 하자는 것이다. 선량계산점까지 방사선의 경로상에 이질조직쌍의 종류가 m 개이고 i 번째 새롭게 나타나는 이질조직쌍이 N_i 개 존재한다면 일반 Batho 보정계수는

$$CF = \frac{\mu_{en}^0(n)}{(\mu_{en}^0)_0} \prod_{i=1}^m \left\{ \prod_{j=1}^{N_i} T(d_i(j))^{\rho'_i(j)} \right\}^{\rho_i} \tag{12}$$

와 같이 표시할 수 있다. 여기서 지수 ρ'_i 는 i 번째 이질조직쌍에 대한 상대전자밀도차의 음수 값이며 단 $i=1$ 일 때는 $N_1=1$ 이고 $\rho'_1 = \rho(1) - 1$ 이다. $d_i(j)$ 는 i 번째 쌍이 j 번째 나타나는 교점에서 선량계산점까지의 깊이이다. $r_i(j)$ 는 지수 ρ'_i 에 의하여 결정되는 수로서 본 논문에서는 방사선의 진행방향에 의해 아래와 같은 값을 갖는다. 상대전자밀도가 높은 조직에서 낮은 조직으로 방사선이 진행하면 $r_i(j) = 1$ 이고, 반대로 진행할 때 $r_i(j) = -1$ 이라면 혼란이 없을 것이다.

Fig. 1에 보여진 이질조직체는 세 가지의 이질조직적

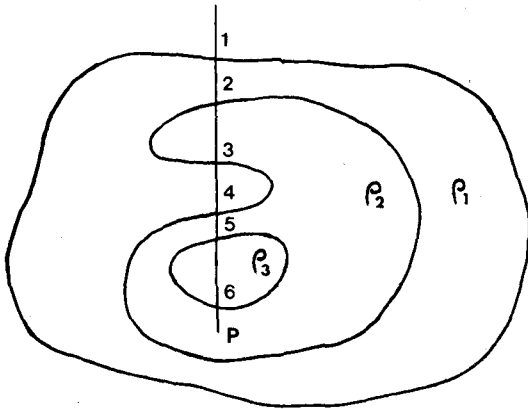


Fig. 1. The heterogeneous medium. Any heterogeneous tissue is enclosed by another tissue. The intersection points 1 – 6 are ordered along the ray path from the source point to the dose calculation point P.

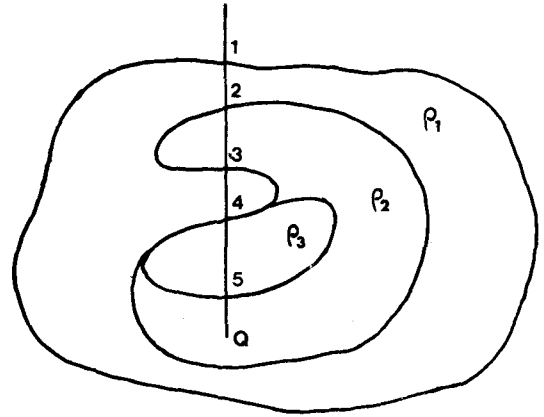


Fig. 2. The heterogeneous medium. An heterogeneous tissue is inserted between two heterogeneous tissues. The intersection points 1 – 5 are ordered along the ray path from the source point to the dose calculation point Q.

로 이루어져 있다. 이질조직의 밀도는 각각 ρ_1, ρ_2, ρ_3 이다. 선량계산점 P까지 방사선 경로상 이질조직의 쌍은 처음은 (공기, ρ_1 물질)이고, 두번째는 (ρ_1, ρ_2), 세번째는 (ρ_2, ρ_3)이다. 이질조직들의 상대조직밀도가

$$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 \quad (13)$$

의 관계가 있다고 가정할 때, (ρ_1, ρ_2)쌍에 대한 각 이질 조직에서 선량계산점 깊이 $d_2(j)$ 는 아래와 같다.

$$d_2(1) = d(2)$$

$$d_2(2) = d(3)$$

$$d_2(3) = d(4)$$

$d_2(1)$ 과 $d_2(3)$ 에서는 방사선이 상대전자밀도가 큰 조직(ρ_1)에서 작은 조직(ρ_2)으로 가기 때문에 $r_2(1) = r_2(3) = 1$ 이고 $d_2(2)$ 에서는 상황이 바뀌어 ρ_2 조직에서 ρ_1 조직으로 입사되기 때문에 $r_2(2) = -1$ 이다. 한편 (ρ_2, ρ_3)쌍에 대한 각 이질조직에서 선량점 깊이 $d_3(j)$ 는 아래와 같다.

$$d_3(1) = d(5)$$

$$d_3(2) = d(6)$$

$d_3(1)$ 에서는 상대전자가 큰 조직에서 작은 조직으로, $d_3(2)$ 에서는 작은 조직에서 큰 조직으로 방사선이 진행하므로 $r_3(1) = 1, r_3(2) = -1$ 이다. 상대전자밀도 차이에 관한 값은 각각 아래와 같다.

$$\rho'_1 = \rho_1 - 1$$

$$\rho'_2 = \rho_2 - \rho_1$$

$$\rho'_3 = \rho_3 - \rho_2$$

이러하여 그림 1의 점 P에서 일반 Batho 보정계수 CF는

$$CF = \frac{(\mu_{en}^0)_2}{(\mu_{en}^0)_0} T(d(1))^{\rho_1 - 1} \cdot \left\{ \frac{T(d(2))}{T(d(3))} \right\}^{\rho_2 - \rho_1} \cdot \left\{ \frac{T(d(5))}{T(d(6))} \right\}^{\rho_3 - \rho_2}$$

와 같이 쉽게 구할 수 있다. 여기서 $(\mu_{en}^0)_2$ 의 무릎 수 2는 선량계산점 P가 이질조직 부위 2에 속해 있다는 것을 의미하고 있다.

Fig. 2는 상대전자밀도가 ρ_3 인 이질조직이 ρ_2 의 이질조직에 의해 에워싸여 있는 Fig. 1과는 달리 ρ_1 과 ρ_2 두 이질조직 사이에 끼여 있다. 이 경우에 선량계산점 Q에 이르는 방사선의 경로상 인접한 이질조직쌍의 종류를 순서대로 나열하면 첫째 (공기, ρ_1), 둘째 (ρ_1, ρ_2), 셋째 (ρ_1, ρ_3), 넷째 (ρ_3, ρ_2)이다. 상대전자밀도의 관계가 식(13)과 같을 때, (ρ_1, ρ_2)쌍에 대한 깊이는 두 개로서

$$d_2(1) = d(2)$$

$$d_2(2) = d(3)$$

이고, $d_2(1)$ 에서는 상대전자밀도가 큰 조직에서 작은 조직으로 $d_2(2)$ 에서는 작은 조직에서 큰 조직으로 방사선이 진행하므로 $r_2(1) = 1, r_2(2) = -1$ 임을 알 수 있다.

(ρ_1, ρ_2)쌍에 대하여는

$$d_3(1) = d(4)$$

$$r_3(1) = 1$$

이고, (ρ_3, ρ_2) 쌍에 대하여는

$$d_4(1) = d(5)$$

이지만 상대전자밀도가 작은 조직에서 큰 조직으로 방사선이 진행하므로

$$r_4(1) = -1$$

이다. 이렇게 하여 그림 2의 점 Q에서 일반 Batho 보정계수 CF는

$$CF = \frac{(\frac{\mu_{en}^0}{\mu_{en}^0})_2 T(d(1))^{\rho_1-1} \left\{ \frac{T(d(2))}{T(d(3))} \right\}^{\rho_2-\rho_1}}{\cdot \frac{T(d(4))^{\rho_3-\rho_1}}{T(d(5))^{\rho_3-\rho_2}}}$$

이라는 것을 식 (12)와 지수 결정방법에 의하여 쉽게 구할 수 있다.

고 안

Siddon⁶⁾은 Fig. 1과 같이 한 이질조직이 다른 조직에 의하여 에워싼 경우에 한하여 일반 Batho 보정계수를 간단히 구하는 방법을 보고한 바 있다. 그러나 그의 방법에서는 두 이질조직 사이에 제 3의 조직이 존재하는 경우에 대해서는 언급이 없으며 또한 그 방법에 의하여 구할 수 없다. 그러나 본 논문에서 거론된 방법으로는 Fig. 1이나 그 어느 경우에도 적용시킬 수 있다.

Siddon의 방법에서는 동일 조직이라도 서로 분리되어 있으면 주변 조직에 관계 없이 분리취급해야 하지만 본 방법에서는 접하는 이질조직의 쌍이 같기만 하면 하나로 묶어서 취급할 수 있다.

또한 Siddon의 방법에서는 방사선의 경로상에 있는 모든 종류의 이질조직의 질량에너지 흡수계수에 관한 자료가 요구되지만 본 방법에서는 선량계산점을 포함하는 조직의 질량에너지 흡수계수만이 요구된다. 이와 같은

점으로 미루어 볼 때 본 방법이 Siddon의 방법에 비해 좀더 포괄적이며 계산이 간편할 것이라 생각된다. Webb-Fox의 일반 Batho 방법에서는 이질조직층의 수와 각 조직층의 상대전자밀도가 요구된다. 그 방법은 층보다는 오히려 조직부위로서 표현되는 이질조직체를 취급하는데 비능률적이라는 점이 지적되었다. 또한 Siddon의 방법에서는 조직부위별로 고려되지만 분리된 동질조직까지 분리시켜 취급하게 되어있다. 그러나 본 논문에서 제시한 방법은 인접하는 이질조직의 쌍이 같기만 하면 하나로 묶어 취급할 수 있어서 Siddon의 방법보다 더 효과적임이 밝혀졌다. 따라서 본 방법을 적용하면 수작업에 의한 일상적인 계산이나 컴퓨터에 의한 계산에서 시간을 단축할 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. **Cunningham JR:** Tissue Inhomogeneity Corrections in Photon Beam Treatment Planning. In Progress in Medical Radiation Physics. Orton CG, Plenum Publishing, New York 1982, pp103-131
2. **Batho HF:** Lung corrections in cobalt 60 therapy. J Can Assoc Radiol 15:79-83, 1964
3. **Webb S, Fox RA:** Verification by Monte Carlo methods of a power law tissue-air ratio algorithm for inhomogeneity corrections in photon beam dose calculations. Phys Med Biol 25:225-240, 1980
4. **Lulu B, Bjärngard B:** Batho's correction factor combined with scatter summation. Med Phys 9: 372-377, 1982
5. **Sontag MR, Cunningham JR:** Corrections to absorbed dose calculations for tissue inhomogeneities. Med Phys 4:431-436, 1977
6. **Siddon RL:** Generalized Batho correction factor. Phys Med Biol 29:1575-1579, 1984