

조영제 사용 전·후 불균질 조직 보정 알고리즘에 따른 선량변화에 대한 연구

연세의료원 암센터 방사선 종양학과

김주호, 조정희, 이 석, 전병철, 박재일

Purpose : The aim of this study is to investigate the effect of tissue inhomogeneities when applying to contrast medium among Homogeneous, Batho and ETAR dose calculation method in RTP system.

Method and Material : We made customized heterogeneous phantom it filled with water or contrast medium slab. Phantom scan data have taken PQ 5000 (CT scanner, Marconi, USA) and then dose was calculated in 3D RTP (AcQ-Plan, Marconi, USA) depends on dose calculation algorithm (Homogeneous, Batho, ETAR). The dose comparisons were described in terms of 2D isodose distribution, percent depth dose data, effective path length and monitor unit. Also dose distributions were calculated with homogeneous and inhomogeneous correction algorithm, Batho and ETAR, in each patients with different clinical sites.

Results : Result indicated that Batho and ETAR method gave rise to percent depth dose deviation 1.5~2.7%, 2.3~3.5% (6MV, field size $10 \times 10 \text{cm}^2$) in each status with and without contrast medium. Also show that effective path lengths were more increase in contrast status (23.14 cm) than Non-contrast (22.07 cm) about 4.9% or 10.7 mm (In case Hounsfield Unit 270) and these results were similary showned in each patient with different clinical site that was lung, prostate, liver and brain region.

Conclusion : In conclusion we shown that the use of inhomogeneity correction algorithm for dose

calculation in status of injected contrast medium can not represent exact dose at GTV region. These results mean that patients will be more irradiated photon beam during radiation therapy.

Key-words : contrast medium, inhomogeneity correction algorithm, isodose distribution

서 론

방사선 치료의 궁극적인 목적은 종양조직에 최대 한의 선량을 투여하고, 주위 정상조직은 보호함으로써 치료성적을 극대화시키는데 있으며 치료성과와 예후에 수반되는 합병증은 조사 선량에 매우 밀접한 관계가 있으므로 국제방사선단위위원회 (ICRU)에서는 조사되는 선량이 계획된 선량의 $\pm 5\%$ 이내로 정확하게 할 것을 권고하고 있다.

방사선 치료 계획시 불확정도는 선량계산, 환자 자세 및 빔 출력 인자 등에 영향을 받는다. 이중 공간상의 정확한 선량분포 계산 및 선량평가는 방사선 치료 계획시 필수요소이고 이를 위해서 정확한 선량 계산 알고리즘이 요구된다. 방사선치료계획시 인체 내의 조직 불균질에 따른 선량분포 및 선량 계산을 위하여 사용하는 선량계산 알고리즘에는 매트릭스 형태로 저장해서 사용하는 matrix method, 조직 결손 보정 방법을 사용하는 effective SSD method, analytical beam model, different scatter-air ratio

(dSAR)을 사용하는 semi-empirical method, equivalent tissue-air-ratio method (ETAR), delta volume (DV) method, convolution method, convolution-superposition model, fast fourier transform (FFT) method, differential pencil beam(DPB) method, age diffusion model, hogstrom model, batho model, ray-tracing model 등이 있다. 이러한 알고리즘은 전산화 단층 모의 치료조건과, 3차원 치료 계획장비의 도입으로 인해 전산화 단층 촬영 영상 (computed tomography, CT)을 이용함으로써 그 정확성을 한층 높여가고 있다.

현재 CT 영상은 직접적이고 광범위하게 이용되고 있으며 중앙조직의 묘사, 가상 치료 조건, 불균질 조직 보정 등의 선량분포 확인에 있어서 필수적이며 직접적인 중앙의 묘사와 위치 결정, 주변조직과의 경계 확인 등의 작업을 수행하기 위해 우수한 CT 영상이 요구되어진다. 그중 조영제의 사용은 가장 보편화되어 있는 방법 중에 하나로 이용되고 있으나 이러한 혈관 조영제의 사용은 심장이나 방광 등의 높은 집적을 보이고 대동맥과 혈관계에 충만 되어 CT 영상에서 뼈와 비슷한 정도의 밀도로서 묘사되어진다. 따라서 CT 영상을 이용한 전자 밀도의 계산으로부터 불균질 조직 보정 인자를 사용하는 것은 CT 영상에서의 인공물 (artifact) 이나 왜곡된 영상으로 인한 계산상의 오류를 일으킬 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 조영제의 사용이 조직 불균질에 미치는 영향을 평가하고 불균질 조직 보정 알고리즘 계산 시 조영제 사용 유·무에 따른 선량 변화를 등선량곡선, 심부선량, 유효 길이 등의 인자들을 통해 분석함으로써, 조영제 사용에 따른 불균질 조직 보정 알고리즘의 유용성을 평가하는데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 조영제 팬텀

(contrast resolution phantom, CRP) 제작

불균질 조직 보정 알고리즘을 이용한 선량 계산

시 조영제 사용 유·무에 따른 선량 변화를 알아보기 위해 조영제 팬텀을 제작하였고, 조영제 팬텀은 260×240×250 mm³의 아크릴속에 물을 채우고 내부에 직경 70 mm 공동을 형성한 후 공동속에 물과 조영제를 번갈아 채워서 팬텀의 CT 영상을 얻었다. (그림 1) 이때 조영제는 물과 20대 1로 희석하여 260~270의 Hounsfield unit을 유지하도록 하였고 이 값은 흉부 검사 시 심장에 집적되는 조영제의 상태와 유사하다

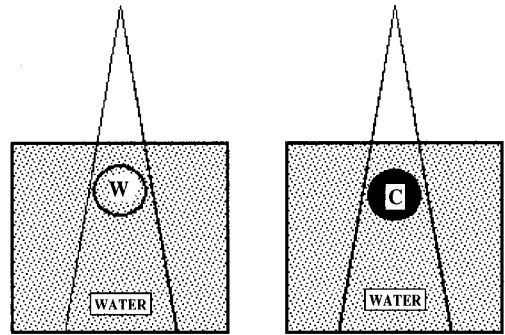


그림 1. 조영제 사용 전, 후의 선량 비교를 위한 조영제 팬텀: W : Water, C : Contrast medium

2. 실험과정

영상 수집은 전산화 단층 촬영 영상장치 (PQ 5000, Marconi, USA)을 사용하였으며 영상 수집 조건은 5 mm scan thickness, 1.5 pitch, 5 mm slice image를 사용하였다. 이렇게 물과 조영제가 채워진 각각의 상태에서 수집한 영상은 방사선 치료계획 장치 (AcQ Plan, Marconi, USA)에서 균질 알고리즘인 homogeneous 알고리즘과 불균질 조직 보정 알고리즘인 Batho, ETAR등을 이용하여 각각 계산함으로써 선량 변화를 비교하였다. 또한 치료 부위가 각기 다른 네 명의 환자를 대상으로 흉부, 골반부, 간장, 두경부에서 조영제 사용 전·후의 영상을 이용하여 팬텀에서의 실험과 동일한 방법으로 homogeneous와 Batho, ETAR 알고리즘 등을 이용하여 선량을 비교하였다. 분석은 등선량 곡선을 이용하여 시각적으로

비교하였고, 심부 선량값과 유효길이를 비교함으로써 조영제의 영향을 평가 하였다. 단, 심부 선량값은 에너지에 따른 최대 선량 깊이에서 선량 100%에 대한 빔 중심축의 선량 변화이며 유효길이는 전자 밀도 매트릭스에 의해 계산 되어진 밀도값에 대하여 가중치를 두어 계산하였고, 불균질 조직 보정 알고리즘이 아닌 homogeneous 알고리즘에서 투과 물질의 밀도는 1로 하였다.

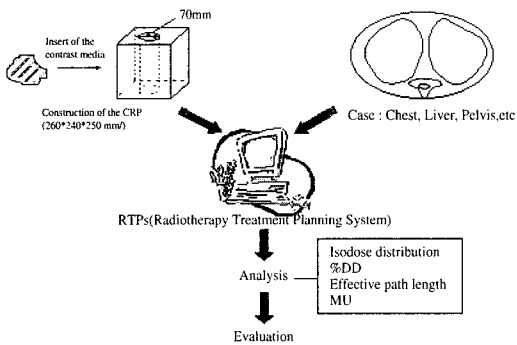


그림 2. 실험과정의 모식도

3. 전자 밀도 매트릭스

광자선과 전자선에 대한 불균질 조직 보정 알고리즘은 전자 밀도 값을 이용한다. CT 영상을 이용한 불균질 조직 보정은 CT number 값을 사용하여 다음과 같은 식으로서 전자 밀도 매트릭스를 재구성하였다."

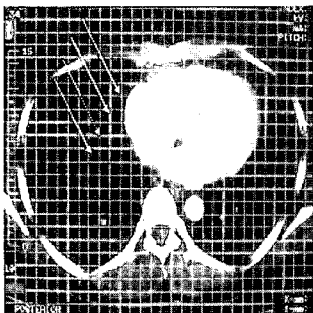


그림 3. 전자 밀도 매트릭스의 구성
Grid Point 10×10mm

$$\rho_e^w = A + B * N_{CT} \quad N_{CT} \leq 1100 \text{ ----- (1)}$$

$$\rho_e^w = C + D * N_{CT} \quad N_{CT} > 1100 \text{ ----- (2)}$$

여기에서 ρ_e^w = 물의 전자밀도에 비례한 픽셀의 전자밀도 N_{CT} = 픽셀의 Hounsfield unit, 대개 Hounsfield unit에 1000 을 더하여 공기의 $N_{CT} = 0$, 물의 $N_{CT} = 1000$ 이 된다.

그리고 $A = 0.0, B = 0.001, C = 0.572, D = 0.00048$ 로 설정 하였다.

결 과

1. 팬텀 측정

조영제 사용 유·무시에 불균질 조직 보정 알고리즘에 따른 선량 변화를 비교하기 위해 자체 제작한 팬텀을 사용하여 등선량 곡선과 심부선량값을 구하였다.

homogeneous 알고리즘을 이용하여 조영제 사용 전, 후의 선량분포와 선량 중심에서의 심부 선량값을 비교한 결과 상호간에 유의한 차이는 보이지 않았으며 등선량 곡선의 분포 또한 같은 결과를 나타내었다. (그림 4-5) 그러나 불균질 조직 보정 알고리즘인 ETAR, Batho 알고리즘을 사용하여 계산한 경우 조영제 사용 전과 사용 후 조영제층을 통과한 깊이 8 cm지점에서 ETAR 알고리즘은 조영 전 77.68 cGy, 조영 후 74.27 cGy를 나타냄으로써 약 3.41%의 선량의 감소를 보였고 Batho 알고리즘 또한 77.15 cGy에서 74.33 cGy로 변화되어 2.82%의 선량 감소를 보였다. (그림 7, 9)

등선량 곡선의 변화도 이와 동일하게 나타나 50% 선량곡선은 Batho와 ETAR 알고리즘 사용 시 조영 전과 조영 후에 16 cm에서 15 cm으로 감소하였으며 (그림 6, 8) homogeneous 알고리즘과 Batho, ETAR 알고리즘에 따른 심부선량값의 변화 또한 조영제 사용 전 유의한 차이는 볼 수 없었으나, 조영제 사용 후 Homogeneous 알고리즘에 비해 Batho 알고리즘은 2.8%, ETAR 알고리즘은 약 3.3% 정도 선량이 감소되었다. (그림 11)

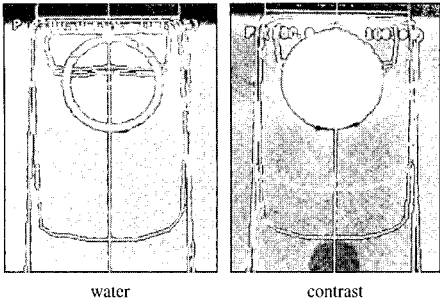


그림 4. 조영제 사용전, 후 homogeneous 알고리즘을 이용한 등선량곡선의 비교

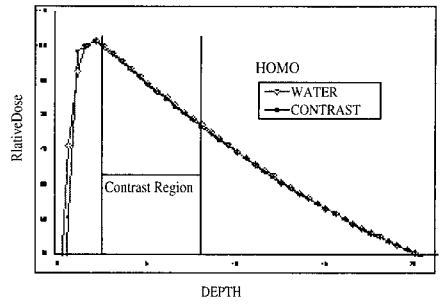


그림 5. 조영제 사용전, 후 Homogeneous 알고리즘 사용시 심부선량값의 변화

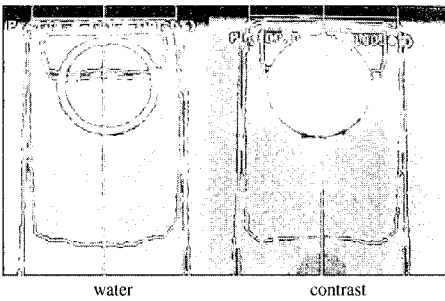


그림 6. 조영제 사용전, 후 ETAR 알고리즘을 이용한 등선량곡선의 비교

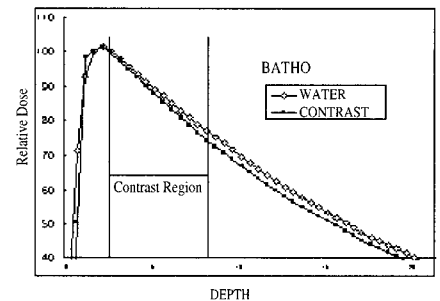


그림 7. 조영제 사용전, 후 Batho 알고리즘 사용시 심부선량값의 변화

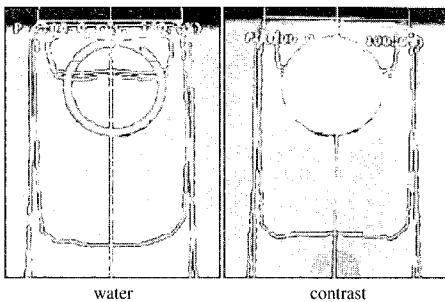


그림 8. 조영제 사용전, 후 Batho 알고리즘을 이용한 등선량곡선의 비교

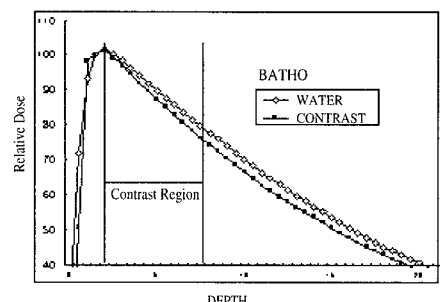


그림 9. 조영제 사용전, 후 ETAR 알고리즘 사용시 심부선량값의 변화

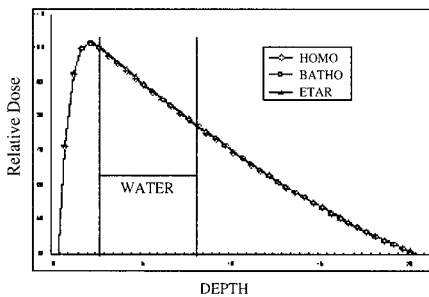


그림 10. 조영제 사용전 알고리즘에 따른 심부선량값의 변화

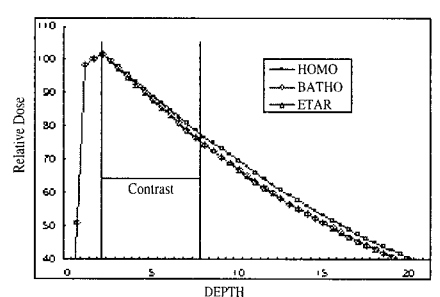


그림 11. 조영제 사용후 알고리즘에 따른 심부선량값의 변화

2. 흉부 및 골반부 측정

팬텀에 대한 실험과 동일하게 흉부와 골반부에 병변이 있는 환자를 대상으로 불균질 조직보정 알고리즘을 사용하여 조영제 사용전과 조영제 사용 후에 선량을 계산하였다. 조영 후에 조영제가 가장 많이 집적되는 심장에서의 Hounsfield Unit은 조영 전 50 이고 조영 후 273, 방광은 조영전 10 에서 조영 후 269 로 변화된 상태이고, 그 조영된 층의 길이는 심

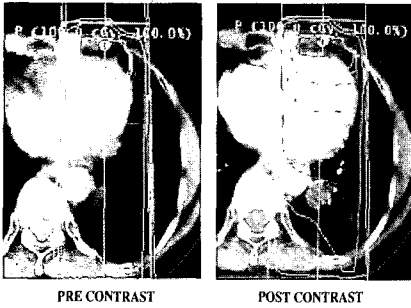


그림 12. 흉부 치료시 조영전, 후 등선량 곡선의 변화

방광을 지나는 골반부에 있어서도 조영 전에 비해 조영 후에 방광의 용적이 증가하였고 방광에 집적된 고밀도의 조영제로 인한 선량 감소는 심부 선량값을

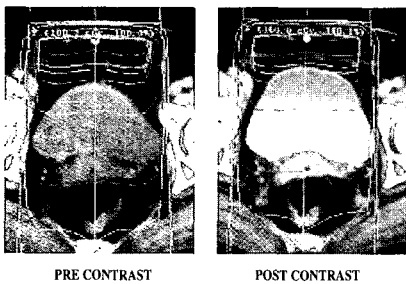


그림 14. 골반부 치료시 조영제 사용전, 후 등선량 곡선의 변화

3. 유효측정길이 (Radiological path length)의 변화

불균질 조직 보정 시 조영제로인한 유효길이의 차이를 비교하기 위하여 (식 1-2.)와 같이전자 밀도 매

장과 방광에서 각각 7.8 cm 과 3.7 cm 이다.

흉부 치료시 불균질 조직 보정 알고리즘인 ETAR method를 이용한 선량계산 시 조영 전과 조영 후의 등선량 곡선으로 50%의 선량곡선이 서로 다르게 나타남을 볼 수가 있고 심부선량값을 비교한 결과 심장을 지나면서 조영 전 63.99 cGy 조영 후 61.8 cGy 로 약 2% 정도의 선량 감소를 나타내었다. (그림 12-13)

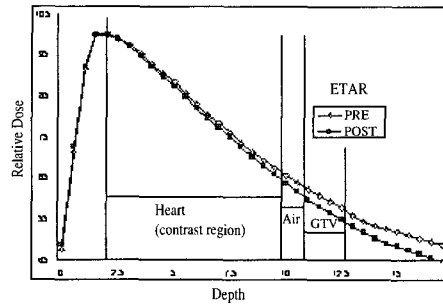


그림 13. 흉부 치료시 조영전, 후 ETAR 알고리즘에 의한 심부선량값의 변화

비교한 결과 2.3 % 정도의 선량이 조영제 층을 지나면서 더욱 감소하였다. (그림 14-15)

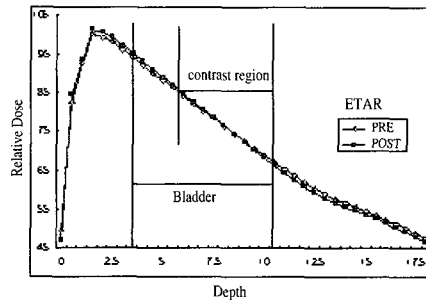


그림 15. 골반부 치료시 조영전후 ETAR 알고리즘에 의한 심부선량값의 변화

트릭스에 의해 계산된 밀도의 가중치를 두어 조영 전과 조영 후에 유효길이를 측정 하였다. 팬텀에서는 조영 후, 조영 전에 비해 Hounsfield Unit은 260의 차이를 나타내었으며 5.5 cm 의 집적된 공간을 투과

시에 약 4.9%의 유효길이를 증가하였고, 또한 흉부와 골반부에선 심장과 방광에 각각 220, 259의 차이를 나타냄으로써 비록 방광에서 조영제의 집적이 크게 나타났으나 투과된 공간의 차이로 인해 흉부에서는 7.3%, 골반부에서 3.7%의 유효 길이가 증가하였다. (그림 16, 표 1) 그러나 복부의 간 실질과, 두경부의 뇌 실질에 있어서 조영제의 집적은 심장과 방광에

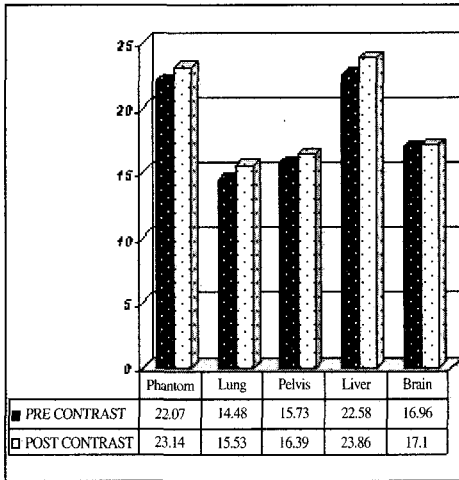


그림 16. 조영전후 불균질조직 보정 알고리즘에 의한 유효길이의 변화

비해 조영제의 집적이 적게 됨으로써 유효길이가 증가에 미치는 영향이 매우 적은 결과를 보였으며 조영제의 집적도와 충전된 공간의 따른 유효길이의 증가는 조영제 집적도의 차가 클수록, 그리고 집적된 공간의 길이가 길 수록 그 차이는 크게 증가하였다. (그림 17)

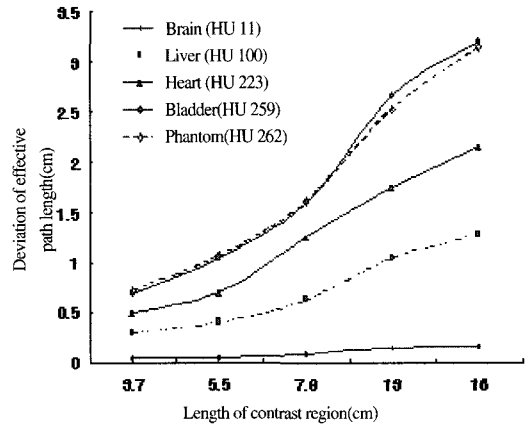


그림 17. 조영제 집적에 따른 유효 길이의 변화

표1. 조영제 집적에 따른 유효길이의 변화

		Phantom	Lung (heart)	Pevis (bladder)	Liver (parenchyma)	Brain (parenchyma)
Length of Contrast Legion (cm)		5.5	7.8	3.7	16	13
PRE - CONTRAST	H.U(Hounsfield Unit)	12	50	10	41	32
	Eff. Path length (cm)	22.07	14.48	15.73	22.58	16.96
POST - CONTRAST	H.U (Hounsfield Unit)	272	273	269	140	43
	Eff. Path length (cm)	23.14	15.53	16.39	23.86	17.1
Deviation of Eff. path length (%)		4.9%	7.3%	4.2%	5.7%	0.8%

고찰

방사선 치료 시 불균질한 조직 보정을 위한 알고리즘은 서론에서 밝힌바와 같이 여러 가지 알고리즘이 개발되어 사용되고 있으나, 현재 3차원 방사선 치료, 세기 변조 방사선 치료의 도입과 전산화 단층 모의 치료조준의 도입으로 인해 불균질 조직 보정 알고리즘의 사용 시 CT 영상을 이용하는 것은 보편화되고 있고, 또한 CT 영상의 이용이 늘어나면서 해부학적 변별력을 높이기 위한 조영제의 사용도 증가하고 있다. 따라서 CT 영상을 이용한 불균질 조직 보정 알고리즘 사용 시 조영제의 영향을 고찰하는 것은 매우 중요한 것이라 하겠다. 그러나 불균질 조직 보정 알고리즘에 대하여 miften²⁾ 등은 불균질 패턴을 이용한 실험에서 그 유용성과 오차에 관하여 기술한 바 있으나 혈관 조영제 혹은 소화관 조영제와 같은 영상의 왜곡에 의한 영향은 고려하지 않았으며, plessis³⁾ 등도 치료시 상악동과 같은 조직 내 공동에 의한 불균질 조직 보정 알고리즘의 영향을 고찰하였을 뿐 조영제의 영향으로 인한 방사선 치료 계획 장치에서의 계산적 오차를 고려한바 없었다.

따라서 CT 영상에서 고밀도로 묘사되어지는 혈관 조영제의 영향을 고찰하고자 한 본 연구에서 조영제의 사용은 그림 15와 같이 조영 전과 조영 후 심장이나 방광, 장기의 실질 등에 집적됨으로써 CT 영상에서 Hounsfield Unit 200 ~ 250의 고밀도 물질로 묘사되고 불균질 조직 보정 알고리즘 사용 시 유효 밀도를 증가시킴으로써 0.5 ~ 1.3 cm의 유효 길이의 증가를 보이고, 조영 전에 비해 조영 후 2 ~ 3.4%의 선량감소를 나타남을 알 수 있었으며, 이러한 결과는 조영제가 충전된 심장이나 방광을 지나는 치료 범의 사용 시 종양부위에 목적인 선량을 주기 위하여 더욱 많은 양의 선량이 조사되도록 계산되어지는 오류를 유발하게 됨으로써, 조영제의 영향 혹은 영상의 왜곡을 고려하지 않은 불균질 조직 보정 알고리즘의 사용은 환자에게 추가적으로 많은 선량을 조사하게 되는 결과를 초래할 수 있다. 그러나 본

연구에서는 치료계획장비에 따라 전자밀도 매트릭스 재구성 시 격자범위 (Grid point), 보정 계수 등이 달라짐으로써 본 실험과 다른 선량차이를 나타낼 수 있으며 선량의 실측이 아닌 방사선 치료계획 장비에서 선량 중심축의 선량분포를 비교하였으므로 본 실험과 다른 불균질 조직 보정 알고리즘을 사용하거나 산란선의 영향을 고려할 경우 실험 결과에 다소간의 차이가 있을 수 있으므로 본 실험의 결과를 모든 경우에 응용하여 사용하는 것은 적절치 않다. 또한 조영제 주입시간, 조영제 주입량, 영상절편의 두께 등과 같은 영상 수집 조건 (Scan parameter)의 변화와 조영제로 인한 용적의 증가 등도 실험 결과에 차이를 줄 수 있으므로 향후 임상적 응용을 위해선 전산화 단층 모의 치료조준 시 영상수집조건을 표준화하고, 산란선 등과 같은 선량 변수 등에 따른 연구가 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

결론

불균질 조직 보정 알고리즘에 의한 치료 계획시 조영제 사용으로 인한 선량변화를 평가 한 결과 첫째. 패턴에서 유효길이는 1.07 cm 증가하였고, 흉부와 골반부에서도 심장과 방광에 집적되어지는 조영제로 인해 조영 전과 조영 후에 각각 1.1 cm과 0.6 cm의 유효길이가 증가하였다. 둘째. 중심축의 심부선량값과 등선량 분포는 패턴에서 약 2.8 ~ 3.4 %정도 감소하였고, 흉부와 골반부에서도 약 2 ~ 2.3%의 선량이 감소하였으나 간 실질과 뇌 실질에 있어서 조영제는 심장과 방광에 비해 매우 적은 집적을 나타냄으로써 유효한 선량의 변화를 볼 수 없었으며 단지 종양의 위치에 따라 조영된 실질을 길게 투과할 때에만 조영전과 다른 선량변화를 나타내었다.

결론적으로 조영제의 사용은 조영 후 유효 밀도 변화와 용적의 변화로 인해 유효길이를 증가시킴으로써 치료 계획 시 환자에게 조사되는 선량에 차이를 나타낼 것으로 사료되며 따라서 CT 영상을 이용한 불균질 조직 보정 알고리즘의 사용은 혈관 조영

제 사용에 따른 조영제의 집적도와 집적된 공간에 따라 신중히 고려되어야 할 것이다.

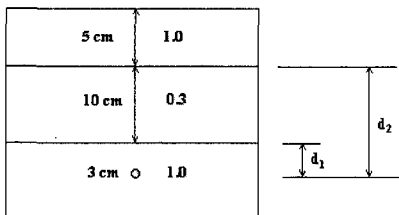
참 고 문 헌

- 1) J. W. Wong and R. M Henkelman, "A new approach to CT pixel calculations in heterogeneous media" Med Phys. volume 10 199-208 (1983)
- 2) M. Miften, M. Wiesmeyer, A. Kapur, "Comparison of RTP dose distribution in heterogeneous phantom with the Beam Monte carlo simulation system" Med Phys. 2(1), winter 2001
- 3) F. C. P. du Plessis, C. A. Willems, M. G. Lotter, "Comparison of the Batho, ETAR and Monte carlo dose calculation method in CT based patient models" Med Phys. volume 28 582- 589 (2001)
- 4) M. R. Sontag and J. R. Cunningham, "Correction to absorbed dose calculation for tissue inhomogeneities" Med Phys. volume 4 431-436 1977)
- 5) M. R. Sontag and J. R. Cunningham, "The equivalent tissue-air ratio method for making absorbed dose calculations in a heterogeneous medium" Radiology. volume 129 787-794 (1978)

APPENDIX

1. 불균질 조직 보정 알고리즘

단위밀도의 매질내 관심의 지점에 대한 불균질 편층에 대한 그림



$$d_{air} = (5 \times 1) + (10 \times 0.3) + (3 \times 1)$$

2-1. Power Law TAR 모델

: Batho가 제안하고 Young과 Gaylor에 의해 일반화된 TAR의 확장형

$$CF = \left(\frac{T[d_2, W_d]}{T[d_1, W_d]} \right)^{\rho_e}$$

$$\ast CF = \left(\frac{T[13, 12.25]}{T[3, 12.25]} \right)^{0.3-1} = \left(\frac{0.637}{0.985} \right)^{-0.7} = 1.36$$

이 방법은 불균질 아래 놓여 있는 지점들에 대해 서 유효하나 불균질내에 존재할 경우에는 적용되지 않음

2-2. 일반화된 Batho 보정 방법

: 불균질 내에 존재하는 점들을 포함하는 Batho 방법을 Sontag와 Cunningham이 일반화

$$CF = \frac{\{T[d_1, S_d]\}^{\rho_1} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)^{\rho_1}}{\{T[d_2, W_d]\}^{1-\rho_2} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)^{\rho_2}}$$

$$\rho_1 \neq \rho_2 = 1$$

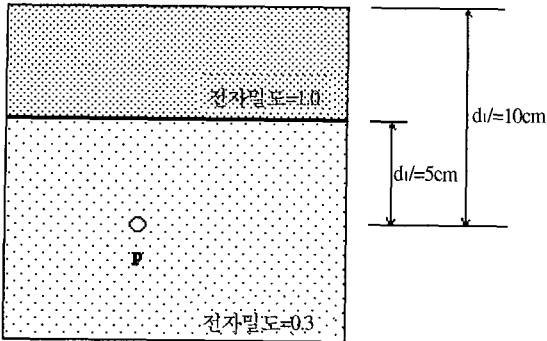
$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{\rho_1}$: 전자 밀도가 인 불균질에 대한 질량에너지 흡수계수

$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{\rho_2}$: 전자 밀도가 인 불균질에 대한 질량에너지 흡수계수

아래 fig에서 인 경우 $W_d = 12.25$, $\rho_1 = 1$, $d_1 = 3$, $\rho_2 = 0.3$, $d_2 = 13$ 인 경우 Power Law TAR 모델에 대입하면,

$$CF = \frac{[T(3, 12.25)]^{0.7}}{[T(13, 12.25)]^{0.7}} = \left(\frac{0.985}{0.637} \right)^{-0.7} = 1.36이다.$$

불균질내에 관심점이 존재하는 불균질 팬텀



그러나 이 알고리즘은 불균질 내에 존재하는 점에 대한 선량계산 가능

$\rho_1 = 0.3, d_1 = 5; \rho_2 = 1; \rho_2 = 10$ 이고

$$CF = \frac{[T(3, 12.25)]^{0.7}}{[T(13, 12.25)]^{0.7}} = 1.06 \frac{(\frac{\mu_{en}}{\rho})_{\rho_1}}{(\frac{\mu_{en}}{\rho})_{\rho_2}}$$

완전한 선량계산을 하기 위해서는 질량에너지흡수계수를 숙지하고 있어야 한다. 이 방법은 Webb와 Fox에 의해 여러층의 불균질 조직에 대해서 까지 확장. 조사면의 크기보다 불균질의 측방으로의 범위가 커야한다고 가정

2-3. Equivalent TAR 방법

: Sontag와 Cunningham이 제안한 것으로 조사면의 크기와 깊이가 불균질의 크기와 조사면의 크기에 대하여 척도 계산

$$CF = \frac{T[d', \bar{r}]}{T[d, r]}$$

d : 계산점의 깊이

r : 등가 원형 조사면의 반경

d' : 불균질에 대하여 척도 계산된

\bar{r} : 불균질에 대하여 척도 계산된 반경

$T(d', \bar{r})$ 는 광자선의 1차 성분과 산란성분으로 구분하여 계산

$$T(d', \bar{r}) = T(d', 0) + S(d', \bar{r})$$

d' 은 등가 방사선 경로 깊이이고 산란성분에서 조사면의 크기를 척도 계산함으로써 불균질에 대한 기하학적인 배열 효과를 고려해야 한다고 가정