

측정된 원통형 전리함 반응함수의 몬테카를로 시뮬레이션 보정

이병용, 김미화*, 조병철**, 나상균*, 김종훈, 최은경, 장혜숙
울산대학교 의과대학, 서울중앙병원 방사선종양학과
울산대학교 물리학과*
한림대학교 의과대학, 강동성심병원 치료방사선과학교실**

초 록

방사선 측정기로 사용되는 원통형 전리함의 위치별 반응 함수를 좁은 방사선장에서 측정하였다. 광자선 에너지 4MV, 6MV, 15MV, 전리함 내경 0.5cm~3.05cm인 전리함들에 대하여 방사선면의 크기를 $0.2 \times 20\text{cm}^2$ 로 하여 물속 10cm 깊이에서 전리함 반응함수를 측정하였다. 좁은 방사선면의 선량분포 profile을 EGS4(Electron Gamma Shower 4) 몬테카를로 시뮬레이션 코드를 이용하여 계산하였고, 이 결과를 측정된 전리함의 반응 함수 값에서 되곱말림(deconvolution) 기법으로 제거하여 순수하게 δ 함수 모양의 방사선장으로부터 측정된 반응함수로 보정하였다. 전리함 반응함수는 보정전에는 에너지에 따라 다르게 나타났으나 EGS4계산으로 얻어진 선량분포 프로파일(profile)을 보정한 결과 전리함 반응함수는 에너지와 무관한 것으로 나타났다.

서 론

방사선 치료에 있어서 치료부위에 대한 정확한 선량의 전달과 정상 조직에 대한 선량의 평가는 매우 중요한 과제이다. 좁은 치료 조사면 영역과, 치료 조사면 모양에 따른 급격한 선량 변화가 있는 경우 정확한 선량평가를 위하여 에너지 및 선량의존성이 없으며 공간 분해능이 우수한 측정기가 필요하게 된다. 일반적으로 전리함이 방사선의 측정에 가장 우수한 특성을 보이는 것이 알려져 있으나, 체적이 크므로 주로 반경이 0.5-1cm인 작은 치료 조사면 측정에 어려움이 있다. 전리함은 선량의존성, 재현성, 에너지 의존성등에서 뛰어난 성능을 보이고 있으며 연속적인 선량 분포 평가에도 매우 유용하지만 공간 분해능의 문제가 남아있다. 공간 분해능이 우수한 직경 0.1cm 이내 전리함이 있다면 가장 바람직하지만 전리함 원리상 제작이 불가능하므로, 작은 공간 영역의 선량 측정은 film, TLD (Thermoluminescent Dosimetry), diode등 다른 여러 측정기로부터 만들어진 결과를 모두 비교함으로써 절대 선량 및 상대 선량 분포를 평가하게 된다.¹⁾ 1960년 Kondo와 Randolph²⁾가 전리함 크기의 효과를 제거하여 공간 분해능 문제를 해결하고자 하는 시도에 접근은 했지만 이 연구는 단지 절대 선량 평가를 위하여 약간의 보정치를 더해 주는 역할밖에 하지 못하였다. 그 후 Sibata³⁾는 전리함의 반응함수가 전리함의 기하학적인 모양, 즉 원형으로 분포한다고 가정하여 처음으로 원통형 전리함의 반응함수를 도입, 측정에 이용하게 하였다.

EGS4(Electron Gamma Shower 4)는 1985년 Nelson, Hirayama, Rogers³⁾등이 발표한 몬테카를로 시뮬레이션 코드로 방사선 치료 영역의 전자선 및 X선(또는 감마선) 시뮬레이션에 적합한 것으로 잘 알려져 있는 공개 코드이다. 이 코드를 이용하여 에너지 분포를

갖는 감마선(또는 광자선)과 전자선의 매질속에서의 다양한 운동을 묘사할 수 있어서 방사선 치료 영역에서 최근 활발히 이용되고 있다.⁶⁻⁸⁾

이 연구는 전리함의 반응 함수를 직접 측정할 수 있다면 전리함을 이용한 측정에서 공간 분해능을 올릴 수 있다는 앞서의 연구를 바탕으로⁹⁾ 고에너지 방사선장에서 실제로 만들어내기 어려운 δ 함수 모양의 선량분포 프로파일을 갖는 방사선장을 EGS4 code로 만들어내고, 여기서 얻어진 광자선 커널(kernel)을 실제 측정된 전리함 반응함수에 적용, 보정하고 이 방법의 유효성을 알아보려고 하는데 있다.

실험 방법

보정 방법

방사선이 물질에 들어가면 산란에 의해 빔 커널(beam kernel)이 일정한 선량 분포폭을 갖는데 이 폭의 크기가 '0' 이라면, 순수한 δ 함수 모양의 방사선에 대한 전리함 반응함수를 측정하게 되므로 측정된 전리함 반응함수 $M(x)$ 는 실제 전리함 반응함수 $R(x)$ 와 동일하게 될 것이다. 빔 커널로 인한 $0.2 \times 20 \text{cm}^2$ 조사면에 대한 깊이 10cm에서 방사선량 분포함수를 $D(x)$ 로 표시하면, 측정된 전리함 반응함수는 방사선량 분포함수 $D(x)$ 를 포함하고 있다. 즉 측정된 전리함 반응함수를 실제 전리함 반응함수와 $0.2 \times 20 \text{cm}^2$ 조사면에 대한 방사선량 분포함수가 곱말림(convolution)되어 있는 결과로 표시할 수 있다.¹⁰⁾

즉,

$$M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(u)D(u-x)du. \quad (1)$$

측정값 $M(x)$ 는 직접 측정으로 구하였고, $0.2 \times 20 \text{cm}^2$ 조사면에 대한 깊이 10cm에서 방사선량 분포함수는 EGS4 몬테카를로 시뮬레이션 코드를 이용하여 계산하였다. 따라서, 곱말림 이론(convolution theorem)에 의하여 되곱말림(deconvolution)으로 $R(x)$ 를 구할 수 있다.¹⁰⁾

즉,

$$R(x) = F^{-1} [M(f) / D(f)] \quad (2)$$

따라서 $M(x)$ 와 $D(x)$ 를 구한 뒤 (1), (2)식을 이용하여 푸리에 변환식을 이용하면 측정된 전리함 반응함수를 순수하게 δ 함수 모양의 방사선장으로부터의 측정된 전리함 반응함수로 보정할 수 있다.

측정

방사선 측정기로 사용되는 원통형 전리함의 위치별 반응함수를 좁은 방사선장, 즉 $0.2 \times 20 \text{cm}^2$ 인 슬릿모양의 콜리메이터를 통과시킨 방사선장에 대해 실시하였고 물팬텀 10cm깊이에서 측정하였다. 이때 사용한 광자선 에너지는 선형가속기의 4MV, 6MV, 15MV X선이고 전리함은 0.125cc(내경 : 0.5cm), 0.6cc(내경 : 0.64cm), 30cc(내경 : 3.05cm)를 사용하였으며 비교를 위하여 측정용 diode와 film도 함께 사용하였다.

몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)

측정된 반응함수를 순수한 δ 함수 모양의 방사선장으로부터 측정된 반응함수로 보정하기

위하여 몬테카를로 시뮬레이션 수치 계산을 수행하였다. 이때 사용한 코드는 EGS4 코드⁵⁾ 이고 시뮬레이션에 사용된 컴퓨터는 Indigo2 R4400 200MHz이다. 이 시스템을 이용하여 해당 에너지의 빔 커널을 구했다. 빔 커널은 팬텀내 물리량(선량)의 분포를 나타낸다. 방사선이 물질에 들어가면 산란에 의해 빔 커널은 일정한 분포폭을 갖게 된다. 이를 point spread function으로 표현한다. 시뮬레이션의 정확성을 확인¹¹⁾하기 위하여 Co-60감마선 단일에너지 1.25MeV, SSD 80cm, 조사면 크기 10×10cm²으로 물속 10cm, 20cm깊이에서의 PDD를 계산하였다. 이 결과를 Co-60감마선의 표준 자료로 인정받고 있는 BJR Supplement 17(1983)¹²⁾결과와 비교하였다.

시뮬레이션은 2,000,000번의 모의실험 진행횟수로 반복되었으며 계산결과의 오차가 2% 이하가 되는지 확인한 후 본 실험의 빔 커널계산을 시행하였다. 0.2×20cm²선원에서 발생한 방사선을 물팬텀에 찍어주어 선량분포 즉, 빔 커널을 10cm 깊이에서 구했다. 빔 커널은 측정과 계산을 동일하게 하기위해 EGS4 몬테카를로 시뮬레이션에 사용한 에너지가 실험과 동일한 명목에너지 4MV, 6MV, 15MV로 하였으며, 이때의 X선 스펙트럼은 Mohan¹³⁾의 자료를 이용하였다. 계산에서는 레일리 산란(rayleigh scattering)까지 고려하여 2,000,000 번의 모의실험 진행횟수를 반복하였다.

실험결과 및 논의

측정된 반응함수

그림 1은 6개의 방사선 측정기의 15MV에 대한 반응함수 측정 결과이다. 10cm 물 깊이에서 film과 diode가 다른 장치에 비하여 더 좋은 분해능을 갖고 있음을 알 수 있다. 그러나 잘 알려져 있듯이 film은 에너지 의존성이 크다는 단점이 있다.¹⁾

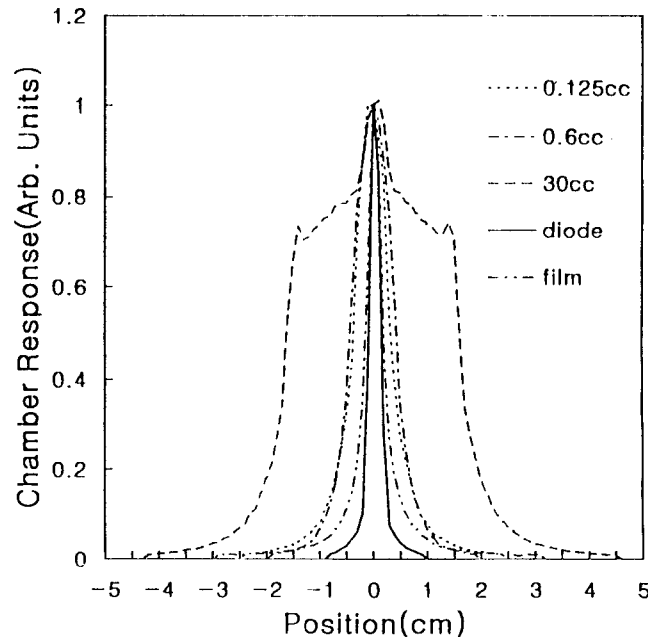


Fig 1. Various chamber response functions for 15MV X-ray 0.2×20cm² field.

측정된 원통형 전리함 반응함수의 몬테카를로 시뮬레이션 보정

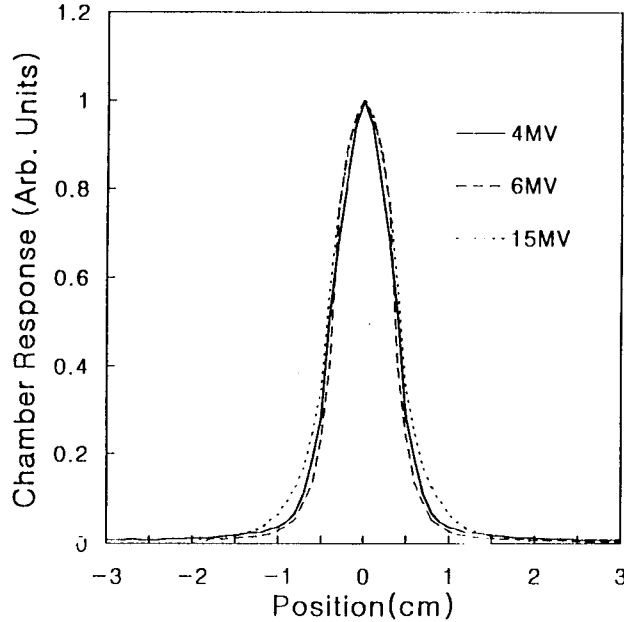


Fig 2. Chamber response function of 0.6cc chamber for energies 4, 6 and 15MV

동일한 측정기에 대하여 사용하는 에너지가 다를 때 전리함의 반응 함수가 다르게 나왔다. 그림 2는 전리함 0.6cc(내경 : 0.6cm)에 대하여 에너지에 따르는 측정된 반응함수의 차이를 보이고 있다. 이러한 차이를 보이는 이유로 두가지를 생각할 수 있는데 하나는 전리함의 반응함수가 에너지 의존성을 갖는다는 것이고, 또 다른 하나는 각 에너지의 팬텀내 산란 정도, 즉 빔 커널의 차이에 따르는 것으로 볼 수 있다.

EGS4 몬테카를로 시뮬레이션

각 에너지별로 팬텀 측정에서와 동일한 조건의 0.2×20cm² 방사선에 대한 물속 10cm 깊이에서의 선량 분포를 구하였다. 빔의 크기를 0.2cm로 정한 이유는 실제 측정 실험에서 얻을 수 있는 가장 작은 크기가 0.2cm이기 때문이다.

그림 3에 4MV, 6MV, 15MV에 대하여 EGS4 몬테카를로 시뮬레이션 코드를 이용하여 얻은 0.2×20cm² 조사면에 대한 선량분포 시뮬레이션 결과가 표현되어 있다.

그림에서 쉽게 알 수 있듯이 에너지가 높아지면서 빔 커널의 분포폭이 커가는 것을 알 수 있다. 이 실험 이전에 이 시뮬레이션의 정확성을 검증하기 위하여 SSD 80cm, 10×10cm²의 조건에서 Co-60 단일에너지 빔의 10cm와 20cm에서의 PDD를 계산하였다. 이 결과를 BJR 17보고¹²⁾와 비교하였다(표1).

표 1. Co-60 beam의 PDD비교

	SSD 80cm, 10×10cm ²	
	10cm PDD	20cm PDD
Current Study	55.8%	27.9%
Standard*	55.6%	27.2%
Difference	0.2%	0.7%

* British Journal of Radiology Supplement 17 (1983)

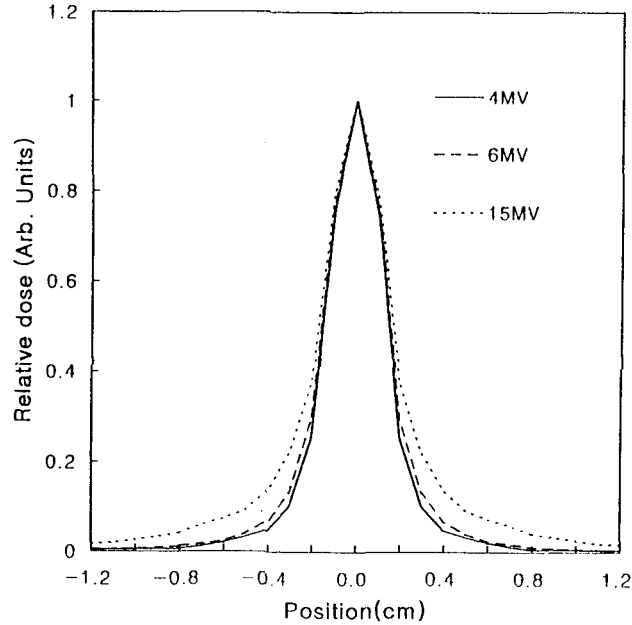


Fig 3. Calculated dose distributions (beam kernel) for $0.2 \times 20 \text{cm}^2$ field in depth 10cm water for various energies

본 연구의 몬테카를로 시뮬레이션 결과는 2%이내에서 신뢰할 수 있음을 알 수 있다.

측정값의 보정

전리함 반응함수의 에너지 의존성을 알아보기 위하여 그림 3의 빔 커널 결과를 측정된 전리함 반응함수에서 되검정하여 순수한 δ 함수 모양 방사선장에 대한 반응함수만 (2)식을 이용하여 뽑아내었다. 그림 4에 0.6cc 전리함에 대한 선량분포 효과를 되검정된 실제 반응함수 결과가 보이고 있다.

그림 1에서 보듯 여러 종류의 전리함은 각각 다른 반응 함수를 갖고 있으며, 그림 2와 같이 서로 다른 에너지에 따라 동일한 전리함도 반응 함수가 달리 나타나고 있었다. 그러나 그림 3의 빔 커널 효과를 제거한 결과 선량 평가에 흔히 쓰이는 0.6cc 전리함의 반응함수는 그림 4에서 같이 에너지에 무관한 분포를 보여주고 있으며, 측정값에서 보여준 에너지에 따르는 반응함수 변화는 각 에너지로 인한 팬텀내의 산란 효과가 반영되어 있어서 전리함 반응함수가 다른 듯이 보이게 된 것임을 알 수 있다.

그림 5에서는 30cc 전리함 반응함수의 EGS4 결과로 보정하기 전과 후를 보여주고 있다. 0.6cc에서와 마찬가지로 보정 후 결과는 에너지 의존성이 현저히 줄어들고 있음을 알 수 있다. 0.6cc만큼 완벽히 일치하지 않는 이유는 이 전리함 자체가 방사선 치료 영역이 아닌 낮은 에너지용으로 제작된 것으로, 선량 및 에너지 의존성이 상대적으로 크기 때문인 것으로 생각된다. 다른 전리함들도 보정 후 결과는 에너지 의존성이 없는 것으로 나타났다. 이는 전리함 반응함수를 이용한 분해능 증진 방법에 있어서 전리함 반응함수가 에너지에 무관하게 쓰일 수 있음을 보여주는 결과라 하겠다.

추정된 원통형 전리함 반응함수의 몬테카를로 시뮬레이션 보정

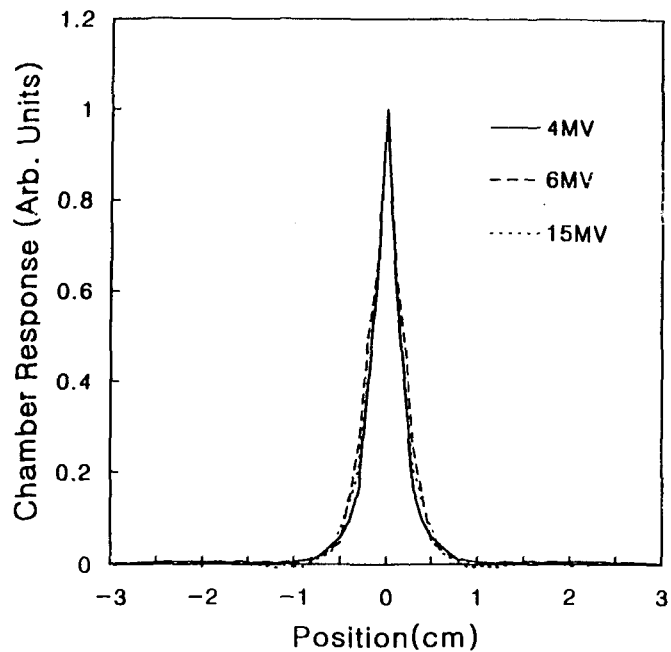
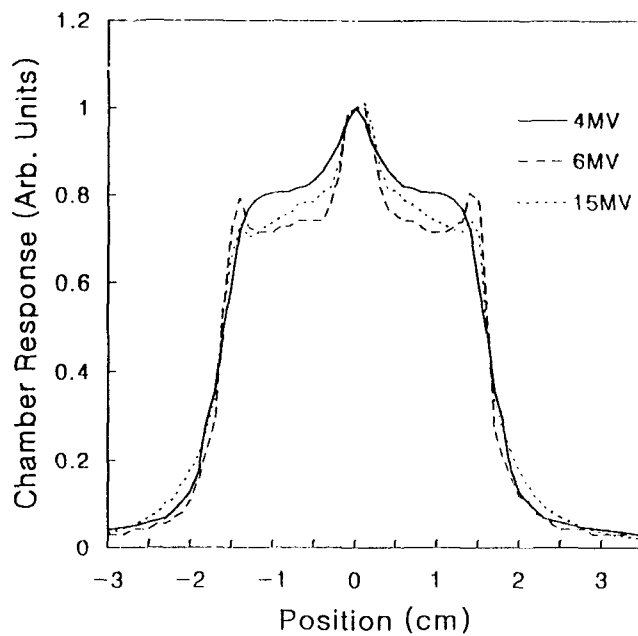
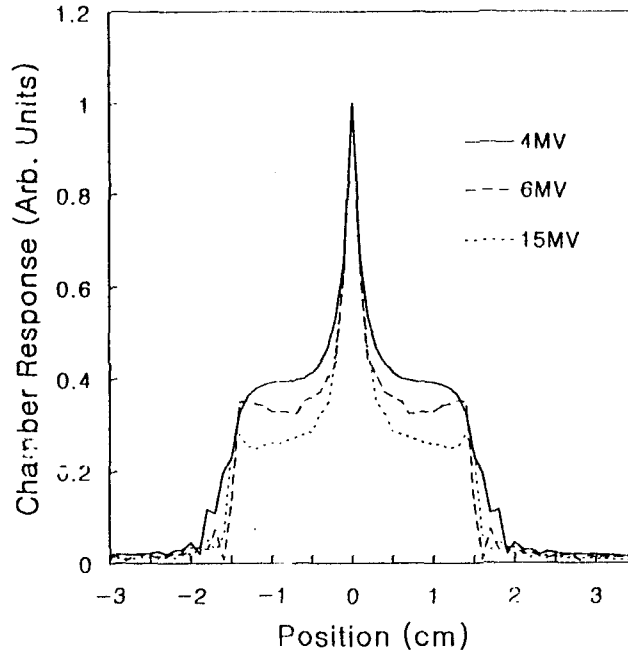


Fig 4. Deconvolved chamber response function from fig 3 for 0.6cc chamber



(a) before deconvolution



(b) after deconvolution

Fig 5. Chamber response function for 30cc chamber

결 론

크기가 다른 3종류의 전리함에 대해서 몬테카를로 시뮬레이션 코드인 EGS4를 사용하여 δ 함수모양의 방사선장 효과를 얻기 위해 수치 계산을 통해 선량 분포를 계산해 내었다. 그 결과를 사용하여 측정된 전리함 반응함수에서 측정조건외 선량 프로파일 효과를 제거했다.

이 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 측정된 전리함 반응함수는 빔 커널에 의해 영향을 받아 동일한 측정기라 할지라도 사용한 방사선장 에너지에 따라 전리함 반응함수가 다르게 나타난다.
2. 그러나 빔 커널효과를 보정한 전리함 반응함수는 에너지에 대해 일정하다.
3. 이 방법을 사용하여 전리함의 반응함수를 정확히 구하면, 작은 조사면과 선량이 급격히 변하는 지점에서의 선량평가에 더욱 유용해 질 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 1995년 일반목적기초(핵심전문)연구비(과제번호 KOSEF 951-0702-0661-1)의 지원을 받았습니다.

이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. H.C.Mota, C.H.Sibata, W.Roberts and P.D.Higgins : Film dosimetry-linearisation of dose response for relative measurements of dose distribution : *Phys. Med. Biol.* 35(4), 565-569(1990).
2. S.Kondo and M.L.Randooph : Effect of finite size of ionization chambers on measurements of small photon sources : *Rad. Res.* 13, 37-60(1960).
3. C.H.Sibata, H.C.Mota, A.S.Beddar, P.D.Higgins and K.H.Shin : Influence of detector size in photon beam profilm measurements : *Phys. Med. Biol.* 36(5), 621-631(1991).
4. P.D.Higgins, C.H.Sibata, L.Siskind and J.W.Sohn : Deconvolution of detector size effect for small field measurement : *Med. Phys.* 22(10), 1663-1666(1995).
5. W.R.Nelson, Hideo Hirayama and D.W.O.Rogers : The EGS4 code system-SLAC Report 265 : SLAC publications office, Stanford, 1-7(1985).
6. D.W.O.Rogers, B.A.Faddegon, G.X.Ding, C.M.Ma, J.We and T.R.Mackie : Beam-A Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units : *Med. Phys.* 22(5), 503-525(1995).
7. S.S.Kubsad, T.R.Mackie, M.A.Gehring, D.J.Misco, B.R.Paliwal, M.P.Mehta and T.J.Kinsella : Monte Carlo and convolution dosimetry for stereotactic radiosurgery : *Int. J.Rad. Oncol. Biol. Phys.* 19, 1027-1035(1990).
8. C.Malamut, D.W.O.Rogers and A.F.Bielajew : Calculation of water/air stopping-power ratio using EGS4 with explicit treatment of electron-positron differences : *Med. Phys.* 18(6), 1222-1228(1991).
9. 이병용, 최은경, 장해숙 : 방사선 측정용 전리함의 반응 함수 측정 및 이론적 고찰 : *울산의대 학술지* 1(1), 184-187(1992).
10. C.S.Chui and R.Mohan : Extraction of pencil beam kernels by the deconvolution method : *Med. Phys.* 15(2), 138-144(1988).
11. D.W.O. Rogers : How accurately can EGS4/PRESTA calculate ion-chamber response ? : *Med. Phys.* 20(2), 319-323(1993).
12. *British Journal of Radiology supplement* 17, IPS, London, (1983).
13. R.Mohan, C.Chui and L. Lidofsky : Energy and angular distributions of photons from medical linear accelerators : *Med. Phys.* 12(5), 592-597(1985).

The ionization chamber response function from the measured and the corrected by Monte Carlo simulation.

Byong Yong Yi, Mi Hwa Kim*, Byung Chul Cho**, Sang Kyun Nha*

Jong Hoon Kim, Eun kyung Choi, Hyesook Chang

Department of Radiation Oncology, Asan Medical center, College of Medicine, University of Ulsan

Department of Physics, University of Ulsan*

Department of Radiation Oncology, Kang Dong Sacred Heart Hospital, College of Medicine, Hallym University**

Abstract

The response function of ionization chambers are measured in the narrow radiation field. Nominal photon energies are 4MV, 6MV and 15MV. the Radii of the chambers are 0.5cm~3.05cm and the field size is $0.2 \times 20 \text{cm}^2$. The measurements are taken in the water phantom at 10cm depth. The beam kernel (radiation distribution profile) for narrow radiation field in the phantom are obtained from Monte Carlo simulation (EGS4, Electron Gamma Shower 4). The beam kernel components in the measured chamber response function are deconvolved in order to get the ideal chamber response function of the δ -shaped function radiation field.

The chamber response functions have energy dependent tendency before deconvolution, while they show energy invariant properties, after the components of beam kernels are removed by deconvolution method.