

고에너지 광자선에 대한 금속구의 차폐효과

서울대학교 의과대학 치료방사선과학교실, 서울 110-744

* 상호연공업(주), 서울 135-080

강위생, 강석종*

납공(lead ball)과 쇠공(steel ball)을 고에너지 광자선에 대한 차폐재로 이용하는 것이 가능한가를 평가하고, 4~10MV 엑스선 차폐를 위한 납공과 쇠공의 물리자료를 구하는 것이 목적이다.

직경이 각각 2.0~2.5mm, 1.5~2.0mm인 납공 및 쇠공을 폭이 균일한 아크릴 용기에 채워, 두께의 균일성 확인을 위해 MV 엑스선사진을 촬영하였으며, 금속공의 평균 밀도와 4~10MV 엑스선에 대한 선감쇠계수를 측정하였다. 선감쇠계수를 측정할 때 Farmer 이온함을 이용하였으며 산란선의 효과를 최소화하기 위해 70cm 거리에서 조사면크기는 5.5cm×5.5cm로 하였다. 비교하기 위해 납판과 철판에 대해서도 같은 종류의 변수를 구하였다.

금속구를 용기에 채웠을 때 분포는 균일하였으며, 납-공기 혼합물의 밀도는 6.93g/cm³이었으며, 철-공기 혼합물의 밀도는 4.75g/cm³이었다. 납의 밀도에 대한 납-공기 혼합물의 밀도의 비는 0.611, 철에 대한 철-공기 혼합물의 밀도의 비는 0.604이었다. 납-공기 혼합물의 반가층은 4MV, 6MV, 10MV 엑스선 각각에 대하여 1.89cm, 2.07cm, 2.16cm이었으며 납판 반가층의 약 1.64배였다. 철-공기 혼합물의 반가층은 4MV, 6MV, 10MV 엑스선 각각에 대하여 3.24cm, 3.70cm, 4.15cm이었으며 철판 반가층의 약 1.65배였다.

금속구는 용기속에 고르게 채워질 수 있기 때문에 차폐재료로 쓸 수 있다. 납공과 쇠공이 고르게 채워질 때 밀도는 각각 6.93g/cm³, 4.75g/cm³이었으며 각각의 반가층은 납 또는 철의 반가층의 1.65배였다. 밀도와 반가층을 곱한 값은 공이나 판에 대해 같은 값이었다.

중심단어: 납공, 쇠공, 차폐재료, MV 광자선, 반가층

서 론

방사선치료실의 차폐벽(벽과 천장, 바닥)을 모두 철근콘크리트만으로 건축하면 차폐벽의 두께가 2m 정도로 두꺼워서 차폐벽이 차지하게 공간이 너무 넓어지게 된다. 방사선치료를 위한 공간이 넓지 않은 경우, 벽이 두꺼우면 공간의 부족으로 많은 애로점이 생기게 된다. 천장까지 높이는 천장두께가 느는 만큼 낮아지게 되기 때문에 방사선치료실이 있는 층의 층고가 충분히 높지 않은 경우에 천장을 두껍게 하면 치료실의 천장이 지나치게 낮아지게 된다. 그런

경우에 치료실 바닥을 같은 층의 다른 시설보다 낮게 해야 할 필요가 있다. 방사선치료실 아래층의 공간을 활용할 계획이 있다면 그 층의 층고를 충분히 높여야 할 것이다.

납이나 철과 같이 금속만으로 방사선 차폐벽을 만들면 벽의 두께는 납은 약 30cm, 철은 약 60cm로도 충분하다. 구조역학적 면이나 미관적인 면 등 여러 가지 이유 때문에 방사선치료실의 차폐벽을 금속으로만 만드는 경우는 없다.

방사선치료실의 차폐벽을 설계할 때 공간 활용성을 높이기 위해¹⁾ 콘크리트의 일부를 철이나 납으로

대체하는 경우가 있다. 납을 이용하는 경우에는 납벽돌이나 납판¹⁾, 납공²⁾을 쓰든지 녹인 납을 채울 수 있다. 어떤 형태의 납을 쓰거나 납의 밀도가 균일해야 한다. 납벽돌을 쓰는 경우에는 인접하는 납벽돌 사이로 방사선의 누출을 막을 수 있는 형태로 제작하여야 한다. 녹인 납을 채우는 경우에는 기포가 생기지 않는다는 보장이 없다. 납판을 사용할 경우 바닥이나 천장의 시공은 간편할 수도 있지만 벽에 사용할 경우엔 시공이 단순하지는 않을 것이다.

차폐벽은 균일한 차폐효과를 내도록 설치되어야 한다. 그러기 위해서는 차폐물질이 구조물 속에 균일하게 분포되어야 한다. 모래알의 굵기는 균일하지 않지만 구조물 속에 모래를 균일하게 다져 넣는 것이 어렵지 않을 것이라고 생각된다. 이런 점에 착안하여 납공(lead ball)과 쇠공(steel ball)을 개발하게 되었다.

납공과 쇠공을 용기 속에 고르게 다져 넣을 수 있는가가 첫 번째 의문이었다. 공모양 물체를 용기 속에 넣어 두면 공 사이에는 공기로 채워지는 공간이 있게 마련이다. 용기에 금속구를 채웠을 경우 금속구-공기 혼합물의 평균밀도와 고에너지 엑스선에 대한 반가층, 밀도와 반가층의 곱과 금속판의 대응하는 값과의 관계, 반가층과 금속판의 반가층의 관계를 구하는 것이 이 연구의 목적이다.

재료 및 방법

납공 및 쇠공을 각각 직경 2.0~2.5mm, 1.5~2.0mm 크기로 제작하였다. 차폐재로 금속구를 이용한다면 굳이 금속구의 크기가 균일해야 할 필요성이 없을 것이다. 금속구의 크기를 일정하게 만들 수 있겠지만 생산 원가가 비쌀 가능성이 있으며 금속구는 가격 때문에 차폐재로서의 가치가 없을 수도 있다.

공기 이외에 아무 것도 없는 용기에 공 모양의 고체를 채우면, 공이 아무리 뽕뽕히 채워졌을지라도 고체 사이의 공극이 완전히 배제될 수가 없다. 공기가 섞여 있는 금속구의 방사선에 대한 반가층을 구하기 위해서는 먼저 금속구의 두께를 일정하게 해야 한다. 금속구의 두께를 일정하게 유지하기 위해서는 간격이 일정한 통에 채우는 것이 필요하며 또 간단하다. 납공과 쇠공을 채울 목적으로 두께가 4.5mm인 아크릴 판으로 통을 제작하였다. 통의 내부 크기는

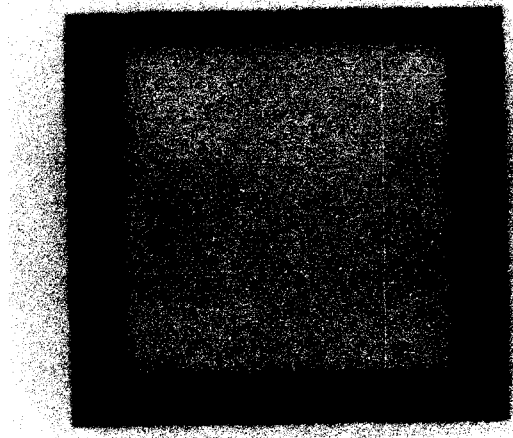


Fig. 1. Megavoltage x-ray radiograph of 1 cm layer filled with lead balls of diameter ranging 2.0~2.5mm. Distance from the lead balls to film was 70cm.

단면적이 $10.0 \times 10.0 \text{cm}^2$ 이고 내부 간격은 0.5cm~5cm이었다. 아크릴통에 납공 또는 쇠공을 다져 넣고 공에서 70cm 위치에 선량측정용 필름을 두고 6MV 엑스선으로 방사선촬영을 하였다. 거리를 70cm로 멀리 둔 것은 금속구에 발생된 전자와 산란선에 의해 방사선사진의 대조도가 나빠지는 것을 막기 위해서이다.

아크릴 통에 납공이나 쇠공을 채운 것(m_{ml+acr})과 빈 아크릴 통(m_{acr})의 무게를 측정하고, 아크릴 통 내부 용적(V)을 계산하여 공기와 혼합된 금속구의 밀도를 아래 식에 의해 도출하였다.

$$\rho = \frac{m_{ml+acr} - m_{acr}}{V}$$

공기와 혼합된 금속구의 반가층은 4MV, 6MV, 10MV 엑스선에 대해 측정하였다. 4MV 엑스선의 발생장치로 Clinac-4/100(Varian, 미국)을, 6MV와 10MV 엑스선의 발생장치로 Clinac-2100C(Varian, 미국)를 이용하였다. 방사선 검출기는 Farmer 이온함을 이용하였다. 측정치에 기여하는 산란선의 영향을 최소화하기 위해 금속구에서는 충분히 먼 곳에 이온함을 두었고, 조사면의 크기는 최소화하였다. 금속구에서 선원까지 거리와 이온함까지 거리는 모두 70cm이었다. 검출부의 길이가 2.2cm인 검출기에 걸쳐 방사선이 균일해야하므로 검출기 위치에서 조사면의 크기는 $5.5 \text{cm} \times 5.5 \text{cm}$ 로 하였다. 이온함은 폴리스티렌 팬텀내 최대선량점 깊이에 두었다. 납공을

Table 1. HVL of lead and steel for high energy x-ray.

Material		Lead			Steel		
Shape of body		Ball	Plate	NCRP ¹⁾	Ball	Plate	NCRP ¹⁾
Density (g/cm ³)		6.93	11.34	---	4.75	7.86	---
4 MV X-ray	HVL (cm)	1.89	1.16	1.60	3.24	1.96	2.7
	Ratio of HVL ^a	1.63	---	1.38	1.65	---	1.38
	HVL _p (g/cm ²)	13.10	13.15	---	15.39	15.41	---
6 MV X-ray	HVL (cm)	2.07	1.26	1.69	3.70	2.24	3.0
	Ratio of HVL ^a	1.64	---	1.34	1.65	---	1.34
	HVL _p (g/cm ²)	14.32	14.28	---	17.58	17.60	---
10 MV X-ray	HVL (cm)	2.16	1.32	1.66	4.15	2.51	3.2
	Ratio of HVL ^a	1.64	---	1.26	1.65	---	1.27
	HVL _p (g/cm ²)	14.97	14.97	---	19.71	19.73	---

^a The ratio of HVL is the ratio of HVL of metal balls including air to that of metal plate or the ratio of the HVL from NCRP-49 to the measured data.

채운 층의 두께는 1.0cm에서 3.2cm까지였고, 쇠공은 0.5cm에서 5.0cm까지였다.

방사선에 대한 물질의 반가층은 물질의 밀도에 영향을 받는다. 그러나 물질의 밀도와 반가층의 곱인

$$HVL_p = \rho \times HVL$$

은 물질의 밀도에 무관한 것으로 알려져 있다.³⁾

공기와 혼합된 납공의 HVL_p과 납판의 HVL_p을 비교하기 위해 납판의 반가층을 측정하였다. 철에 대해서도 동일한 변수를 비교하였다. 납판의 두께는 0.5cm~2.0cm였고, 철판은 1.0cm~5.0cm였다. "NCRP 49"에 제시된 반가층과 비교하였다.

결 과

Fig. 1은 아크릴 통에 채운 납공에서 70cm 떨어진 곳에 둔 필름으로 얻은 1cm 두께의 납공의 방사선 사진이다. 사진의 농도는 Fig. 1에서 보는 것과 같이 1cm의 두께에 대해 균일한 분포를 보였다.

공기와 혼합된 납공과 쇠공의 밀도는 6.93 g/cm³와 4.75g/cm³로서 밀도가 각각 11.34g/cm³, 7.86g/cm³인 납과 철의 밀도의 0.611, 0.604배였다.

4MV와 6MV, 10MV 엑스선에 대한 납공의 반가

층은 Table 1에 제시된 바와 같이 1.89cm, 2.07cm, 2.16cm이며, 같은 표에서 쇠공의 반가층은 3.24cm, 3.70cm, 4.15cm이다. 비교할 기준이 되는 납과 철의 반가층도 Table 1에 제시되어 있다. 납판에 대한 납공의 반가층의 비는 에너지에 상관없이 1.64이고, 철판에 대한 쇠공의 반가층의 비는 1.65이며 납에 대한 것과 같다고 할 수 있다. 반가층을 단위면적당 질량으로 표기한다면 그 값은 반가층과 밀도의 곱인 셈이다. 4, 6, 10MV 엑스선 각각에 대해 납의 밀도와 반가층의 곱은 공기와 혼합된 납공과 납판에 대하여 HVL_p가 거의 일치한다는 것을 Table 1에서 볼 수 있다. 동일한 투과력에 대해 철에 대해서도 공기와 혼합된 쇠공과 철판에 대한 값이 거의 일치한다는 것도 Table 1에서 볼 수 있다.

Table 1에 NCRP-49에 제시된 납과 철의 반가층이 이 연구에서 측정된 반가층보다 두꺼운 것으로 나타났다. 이 연구에서 측정된 반가층 두께에 대한 NCRP의 값의 비가 납과 철이 다른 금속임에도 불구하고 차이가 없이 4MV, 6MV, 10MV 엑스선 각각에 대해 1.38, 1.34, 1.26이었다.

광자선의 투과력에 따른 변화에 대해 주목한다면 판에 대한 금속구의 반가층의 비는 일정하지만 이 연구에서 측정치에 대한 NCRP에 제시된 금속의 반

가층의 비는 투과력이 증가함에 따라 크지는 않지만 감소하는 경향을 보였다.

토 론

단위면적당 질량 HVL_p 로 표시된 반가층은 반가층과 밀도의 곱이다. 기체와 혼합된 공의 평균 밀도와 반가층의 곱은 금속판에 대한 것과 같았으며 방법에서 언급했던 바와 같이 물질의 밀도와 반가층의 곱은 물질의 밀도와 무관하다는 것과 일치하는 결과를 얻은 셈이다. 밀도와 반가층의 곱의 값은 물질과 광자선의 에너지에 따라 변하였다. 그러나 4~10MV 범위에서 주어진 광자선의 투과력에 대해 HVL_p 가 물질의 밀도에 무관하다는 것³⁾이 광자선의 에너지와 물질에 관계없이 성립한다는 것이 입증되었다.

이 연구에서 얻어진 납과 철의 반가층(HVL)은 NCRP에 제시된 반가층과 비교하면 동일하지 않았다. 4, 6, 10MV 각각에 대해 NCRP에 제시된 반가층이 납과 철 두 가지 금속 모두 다 이 연구에서 얻어진 값의 1.38, 1.34, 1.26배였다. 이와 같이 반가층의 두께가 차이나 나는 이유를 살펴 보면 여러 가지 원인을 찾을 수 있겠지만 가장 주목할 만한 이유는 반가층 측정대상인 물체에서 발생하는 산란선의 효과를 배제시키느냐 고려하느냐이다.

이 연구에서는 산란선의 효과를 배제하기 위해 측정기를 금속구에서 충분히 먼 70cm 만큼 떨어진 거리에 두었으며, 측정기의 위치에서 조사면의 크기는 측정기를 겨우 에워쌀 수 있게 $5.5 \times 5.5 \text{cm}^2$ 로 작게 하였다. 반면에 NCRP는 반가층을 측정할 때 충분히 큰 조사면에 대해 측정하여 반가층에 산란선의 효과가 충분히 고려되게 하였다.

4~10MV 엑스선을 사용하게 될 방사선치료실의 차폐벽의 두께를 계산할 때 NCRP 보고서의 자료를

이용하면 벽 두께가 충분하거나 과잉일 수 있다. 반면에 이 연구에서 얻어진 반가층 자료를 이용하면 산란선이 고려되지 않은 점 때문에 선량한도로 제한하기에 필요한 두께에 한 반가층 내지 두 반가층 정도 추가할 필요가 있다. 그렇지만 차폐벽 두께가 과잉이 될 우려는 없다.

결 론

납공이나 쇠공을 차폐벽의 재료로 이용할 수 있는가를 확인하고 납이나 철로 된 공을 차폐벽 재료로 이용하고자 할 때 두께를 환산하기 위한 자료를 얻었다.

납공이나 쇠공은 고에너지 엑스선의 차폐재료로 이용될 수 있다.

납공이나 쇠공을 4~10MV 엑스선의 차폐재료로 사용하고자 할 때 두께는 납판 또는 철판 두께의 1.65배가 된다.

참고 문헌

1. NCRP: *Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X-Rays and Gamma Rays of Energies up to 10MeV*. Report No. 49: National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD (1994)
2. Morrison, R.A.: *Spherical lead shields for megavoltage teletherapy*. Radiology 127:546-547 (1978)
3. Johns H.E, Cunningham J.R.: *The Physics of Radiology*. 4th ed. Charles C Thomas, Springfield Il, pp140 (1983)

Protection effect of metal balls against high energy photon beams

Wee-Saing Kang, Ph.D., Suk Jong Kang*

Dept. of Therapeutic Radiology College of Medicine Seoul National University, Seoul 110-744 Korea

** Sang-ho Lead Industry, Co., Seoul 135-080 Korea*

The purposes of this report are to evaluate whether lead ball and steel ball could be used as protective material of radiation and to acquire physical data of them for protecting 4-10 MV X-ray beams. Lead balls of diameter 2.0~2.5mm or steel balls of diameter 1.5~2.0 mm were filled in an acrylic box of uniform width. An MV radiograph of metal balls in a box were taken to ascertain uniformity of ball distribution in the box. Average density of metal ball and linear attenuation coefficient of metal balls for 4~10 MV X-rays were measured. At the time of measurement of linear attenuation coefficient, Farmer ionization chamber was used and to minimize the scatter effect, distance between the ball and the ionization chamber was 70 cm and field size was 5.5cm×5.5cm. For comparison, same parameters of lead and steel plates were measured. The distribution of metal balls was uniform in the box. The density of a mixture of lead-air was 6.93g/cm³, 0.611 times density of lead, and the density of a mixture of steel-air was 4.75g/cm³, 0.604 times density of steel. Half-value layers of a mixture of lead-air were 1.89 cm for 4 MV X-ray, 2.07 cm for 6 MV X-ray and 2.16 cm for 10 MV X-ray, and approximately 1.64 times of HVL of lead plate. Half-value layers of a mixture of steel-air were 3.24 cm for 4 MV X-ray, 3.70 cm for 6 MV X-ray and 4.15 cm for 10 MV X-ray, and approximately 1.65 times of HVL of lead plate. Metal balls can be used because they could be distributed evenly. Average densities of mixtures of lead-air and steel-air were 6.93g/cm³, 4.75g/cm³ respectively and approximately 1.65 times of densities of lead and steel. Product of density and HVL for a mixture of metal-air are same as the metal.

Key word: Lead ball, steel ball, protective material, MV photon beam, half value layer