

핵의학에서 콜리메타의 기하학적 특성

東南保健專門大學 放射線科

朴 成 玉

Geometric Characteristics of Collimator in Nuclear Medicine

Soung Ock Park

Dept. of Radiotechnology, Dong Nam Junior Health College

I. 서 론

螢光 camera에 의한 核醫學映像에 있어 collimator는 映像形成에 매우 重要的 役割을 한다. 光學 camera의 lens와 類似하게 collimator는 핵의학영상 system에서 視野의 크기, 空間分解能, 感도와 歪曲에 많은 영향을 미친다. 그리고 collimator는 一定한 方向으로 進行되는 X線 또는 r線만 映像形成을 위해 檢出器로 檢出되도록 한다. 이와같은 目的을 達成하기 위하여 얇은 隔壁(septa)에 의해 hole을 一定方向으로 羅列되도록 考案되어있다.

이 隔壁은 방사성 核種으로부터 放出되는 放射線을 吸收 할 수 있도록 密度가 높고 原子番號가 높은 물질(보통 납)로 되어 있다. 적당한 方向이 아닌 다른 方向으로 進行하는 대부분의 방사선은 隔壁에 의해 吸收되고 隔壁 사이(hole)를 지나는 放射線은 檢出器에 檢出된다. 결국 collimator는 核醫學映像에 필요한 計數(counts)를 減少시키는 要因도 된다.

Scintillation camera에 利用되는 collimator는 대부분 동일한 모양과 동일한 方向의 hole과 서로 平行한 隔壁(septal wall)을 가지고 있으나 그 幾何學的 特性에 의하여 converging

hole, diverging hole, pinhole 그리고 multi parallel hole collimator로 나뉘어 진다. 각각의 collimator는 線原으로부터 放出되는 放射線을 螢光體에 效率的으로 檢出될 수 있도록 特성을 가지고 있으나 隔壁을 透過하는 放射線이나, 臟器內에서부터 放出되는 散亂線은 映像의 分辨率과 對照度를 低下시키는 原因이 되므로 可能限 檢出되지 않도록 考案되어야 한다. 그러나, 이와같은 目的에만 置重하게 되면 오히려 放射線 檢出能力이 低下되는 結果를 招來하게 되므로 실질적으로 collimator는 空間分解能을 最大로 向上시킬 수 있고 散亂線이나 collimator 隔壁을 투과하는 放射線을 最大한 減少 시킬 수 있도록 考案되어 있다.^{1, 2)}

一般的으로 작고 긴(long) hole은 空間分解能을 向上시키지만 幾何學的 檢出效率은 저하된다. Collimator hole의 크기와 길이는 視野(field)에서의 感도와 分解能에 影響을 준다. 그리고 hole의 모양과 配列도 幾何學的 檢出效率과 空間分解能에 多樣的 影響을 미치게 된다. 隔壁의 두께(septal thickness)를 감소하면 幾何學的 效率과 함께 隔壁을 透過하는 감마線量이 증가하게 된다³⁾. 그러므로 가장 適合한 collimator의 選定은 映像의 質을 向上시킬 수

있으며 검출효율을 증가시킬 수 있는 것이라야 한다.

이와같은 觀點에서 현재 camera에 이용되고 있는 각 collimator의 特性을 考察하여 比較 검토함으로써 實質的 利用에 있어 그 效率를 增進 시키고자 한다.

II. Collimator의 分類

現在 scinticamera에 利用되고 있는 collimator는 形態에서 알 수 있듯이 幾何學的인 面으로 設計되어 있음을 알 수 있다. 보통 그 外形에서 平行多孔形, 集束形, 擴散形, 핀홀形으로 區分된다. Collimator의 空間分解能은 collimator로부터 一定距離에 있는 部分에 대한 영상의 分解能을 向上시킬수 있도록 되어 있으며 臟器로부터 放出되는 放射能을 最大로 많이 효율적으로 檢出되도록 考案되어 있다. 이외 slant hole, bilateral 등의 特秀 collimator도 있다⁵⁾. 代表的인 collimator에 대한 特徵을 보면 아래와 같다.

1. 平行多孔形 collimator (parallel-hole collimator)

평행다공형 collimator는 臨床的으로 가장 많이 이용되고 있으며 그림 1에서와 같이 동일한 모양과 직경의 hole이 나란히 羅列되어 있다. Hole과의 사이(격벽:septa)는 납(lead)과 같은 原子番號가 큰 物質로 되어 있으며 이 격벽은 螢光體(crystal)에 대하여 垂直으로 羅列되어 있다. Collimator의 前面과 臟器間의 距離의 變化에 따라 有效視野(FOV)의 크기는 一定하고 映像의 크기도 변함이 없다(그림 1).

140kev의 비교적 낮은 energy의 감마선용 collimator는 격벽(septa)의 두께가 고에너지용에 비하여 얇고 ¹³¹I에서 放出되는 364kev의 中에너지 감마선 檢出用 collimator는 두껍다.

511kev의 고에너지 r線 檢出用 collimator는 tungsten과 같은 원자번호가 높은 물질로 비교

적 두꺼운 격벽을 가지고 있다.

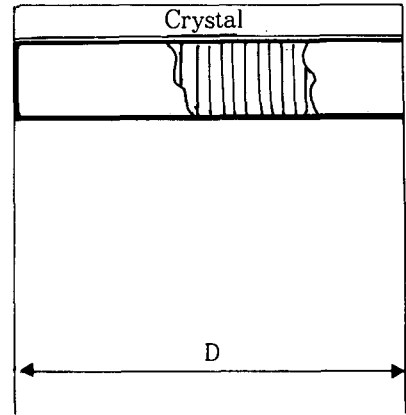


그림 1. 평행다공형 collimator

2. 집속형, 확산형 (converging, diverging hole collimator) 콜리메터

實在 臨床에서 螢光체의 直徑보다 크거나 작은 臟器를 映像化 할 때가 있다. 예를 들면 집속형 collimator나 擴散形 collimator는 장기의 영상을 擴大하거나 縮小하여 나타나게 된다(그림 2와 3). 集束形 collimator의 경우 collima-

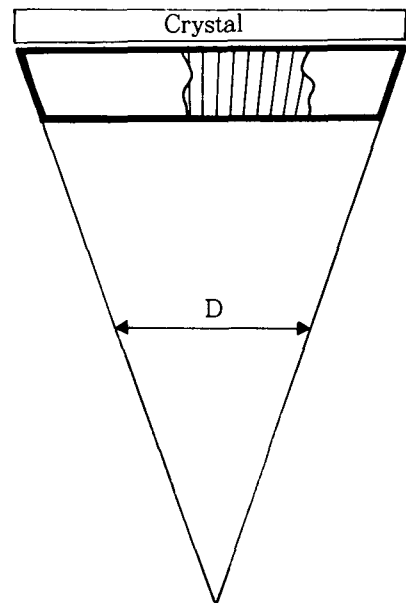


그림 2. 집속형 collimator

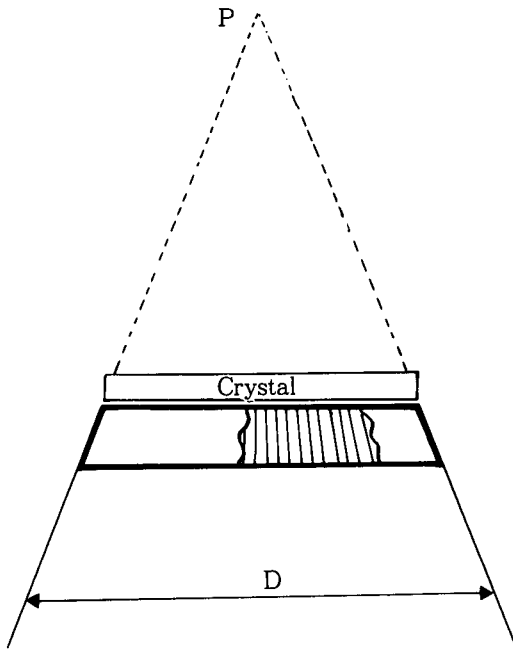


그림 3. 확산형 collimator

tor로부터 먼거리일수록 有效視野(FOV:field of view)가 減小되며 확산다공형의 경우는 collimator로부터 거리가 증가할수록 有效視野가 증가되고 있다(그림 5). 확산다공형 collimator는 특히 螢光體의 直徑보다 큰 장기를 映像化할 때 有利하다.

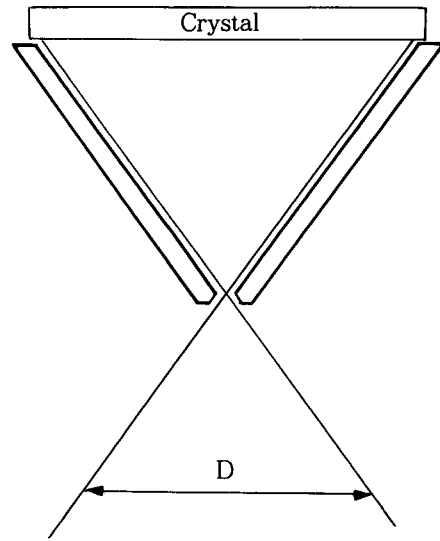
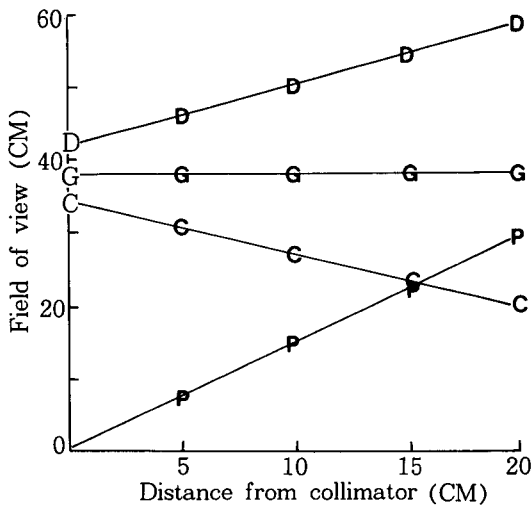


그림 4. Pinhole collimator

3. 핀홀(pinhole) collimator

그림 4와 그림 5에서와 같이 pinhole collimator의 有效시야(FOV)는 collimator와 source간 거리가 증가할수록 넓어진다. 이 collimator는 작은 장기에 대하여 가장 좋은 空間分解能을 記錄할 수 있으며 특히 甲狀腺에 많이 이용하고 있다.



D : Diverging hole collimator
 G : Parallel hole collimator
 C : Converging hole collimator
 P : Pinhole collimator

그림 5. 각 collimator에서 거리별 FOV의 비교

4. 其他 特殊 collimator

그외의 collimator로는 核醫學 컴퓨터 斷層 SPECT 映像記錄을 위한 slant-hole collimator, seven-pinhole collimator 등이 있으며 특히 SPECT용 fan-beam collimator는 평행다공형 collimator같은 정도의 空間분해능으로 斷面像을 記錄할 수 있으며 요즘에 cone-beam collimator가 SPECT에 이용되고 있다.

III. 各 collimator의 特徵

1. 평행다공형 collimator

1) 幾何學的 檢出效率

面線原 또는 點線原을 利用한 경우 collimator의 檢出效率는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = G_0 \left(\frac{A_{open}}{A_{unit}} \right)$$

여기서 A_{open} 은 collimator 後面에서의 hole 部分의 面積이며 A_{unit} 는 hole部分과 隔壁部分을 包含한 面積으로 A_{unit} 는 $4\pi l e^2$ 으로 表示될 수 있으며 $l e$ 는 hole의 길이로 $1-2\mu^{-1}$ 과 같다. μ 는 격벽물질의 감마선에 대한 線吸收係數이다. 그리고 G_0 는 幾何學的 要因으로,

$$\frac{A_{open}}{A_{unit}} \text{으로 表示된다.}$$

즉 $\frac{A_{open}}{A_{unit}}$ 은 격벽에 의해서 가려지지않은 작은 부위를 나타내며 collimator hole의 모양 그리고 격벽의 두께에 의해서 영향을 받는다. A_{open} 과 A_{unit} 그리고 G_0 의 값은 hole의 모양에 따라 다르다(표 1 참조).

표 1로부터 육각형의 hole을 가진 collimator가 다른 모양의 hole을 collimator의 空間分解能을 比較할 때 가장 높은 幾何學的 檢出效率를 提供하고 있다는 것을 알 수 있다.

대부분의 평행다공형 collimator에서 hole의 크기와 비교할 때 hole의 길이가 크다. 만약 점선원을 collimator의 表面으로부터 먼곳으로 移動 시킨다면 檢출효율은 距離逆自乘法則에 의해 감소 된다.

2) 공간분해능

평행다공형 collimator의 경우 point source를 이용한 영상은 線原의 위치에 따라 다르게 된다. 즉 source를 collimator hole 바로 아래 부분에 놓았을 때의 영상과, 격벽의 아래에 놓았을 때 point source 映像의 差異가 있게 된다. 엄격히 설명하자면 평행다공형 collimator의 response 함수는 일정하지 않다. 평행다공형 collimator의 기하학적 공간분해능은 그림 6에서와 같이 a 는 hole의 폭 $l e$ 는 hole의 길이 s 는 격벽의 두께로 정의한 경우 collimator 표면에서 Z 만큼거리에 點線原을 놓았을 때 기하학적 공간분해능 R 은

$$R = \frac{a(l e + Z + b)}{l e} \text{로 표시된다.}$$

여기서 a 는 hole의 직경, Z 는 point source와 collimator 前面間 距離이며, b 는 collimator 後面부터 crystal내 映像이 형성되는 곳까지의 거리이고, $l e$ 는 collimator hole의 有效길이이며 $l e = 1-2\mu^{-1}$ 로 표시되고 μ 는 격벽물질의 감마선에 에너지에 대한 線吸收係數이다. Camera collimator hole의 모양은 보통 그림 7에서와 같이 원형, 사각형, 삼각형, 또는 육각형으로 되어 있다. 각 hole에 대한 기능상 차이점은 표 1과 같다. Hole의 모양이 원형이 아닌 경우는 collimator의 기하학적 檢출 효율에 있어 비등방향성(nonisotropic)의 경향이 있다. 그러나 육각형 모양의 hole은 거의 등방향성을 나타낸다. 檢출 효율은 hole의 모양에서 hole의 크기와 길이 그리고 source와 collimator간 거리에 의해서 다르게 되며 hole의 길이가 짧을 때보다 길 경우 공간분해능이 향상될 수 있다.

표 1. Collimator hole 모양에 따른 geometric factor와 aperture function

Hole Shape	Open Hole Area (A_{open})	Unit Hole Area (A_{unit})	Geometric Factor (G_0)	Aperture Function
Round	a^2	$(a + s)^2$	$\frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{a^2}{l_c(a + s)} \right)^2$	$\frac{J_1(\beta)}{\beta}$
Square	$\frac{\pi a^2}{4}$	$2\sqrt{3} \left(\frac{a + s}{2} \right)^2$	$\frac{1}{4\pi} \left(\frac{a^2}{l_c(a + s)} \right)^2$	$\frac{2 \sin \beta_c \sin \beta_s}{\beta^2 \sin 2\theta}$ when $0 \neq n\pi/2$ $\frac{\sin \beta}{\beta}$ when $0 = n\pi/2$
Equilateral triangle	$\frac{\sqrt{3}}{4} a^2$	$\frac{\sqrt{3}}{4} (a + 3s)^2$	$\frac{\sqrt{3}}{16\pi} \left(\frac{a^2}{l_c(a + \sqrt{3}s)} \right)^2$	$\frac{2}{\beta^2} \left(\frac{\cos \theta}{\cos 30} \right) [(\cos \beta_c - \cos \sqrt{3}\beta_s)^2 + (\sqrt{3} \tan \theta \sin \beta_c - \sin \sqrt{3}\beta)^2]^{1/2}$ when $0 \neq (2n + 1)\pi/6$ $\frac{2}{\beta_3} \left(1 + \text{sinc}^2 \frac{\beta_3}{2} \right) - 2 \text{sinc} \beta^{1/2}$ when $0 = (2n + 1)\pi/6$
Hexagonal	$\frac{3\sqrt{3}}{2} a^2$	$\frac{3\sqrt{3}}{2} \left(a + \frac{s}{\sqrt{3}} \right)^2$	$\frac{\sqrt{3}}{8\pi} \left(\frac{a^2}{l_c(a + s/\sqrt{3})} \right)^2$	$\frac{2 \cos \theta}{\beta_3^2 \cos 30} (\cos \beta_c \cos \sqrt{3}\beta_s - \cos 2\beta_c - \sqrt{3} \tan \theta \sin \beta_c \sin \sqrt{3}\beta_s)$ when $0 \neq (2n + 1)\pi/6$ $\frac{1}{3} \left(2 \text{sinc} \beta_3 + \text{sinc} \frac{\beta_3}{2} \right)$ when $0 = (2n + 1)\pi/6$

Note : $\beta = \pi a \nu$, $\beta \cos \theta$, $\beta_s = \beta \sin \theta$
 $\beta_3 = \sqrt{3}\beta$, $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$
 a is the dimension of the hole aperture [see Fig. 6]
 l_c is the effective hole length [see Eq. (8)]
 s is the septal thickness

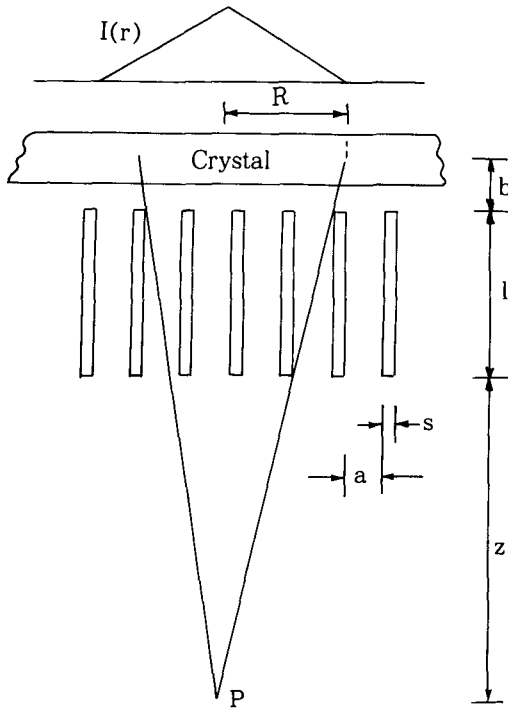


그림 6. 평행다공형 collimator

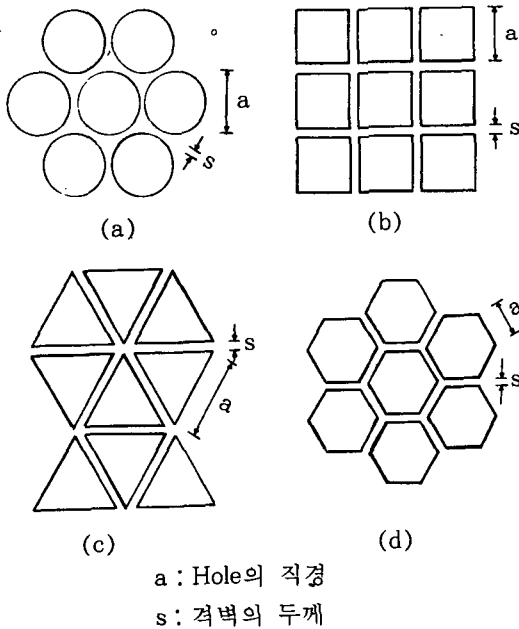


그림 7. Collimator hole의 모양

2. 집속형 collimator (converging-hole collimator)

1) 기하학적 검출효율

Converging hole collimator의 幾何學的 檢出效率(G)은 有效視野 範圍內에 點線原이나 線線原에 대한 平均 反應으로 생각할 수 있다.

$$\text{즉, } G = \left(\frac{A_{\text{open}}}{4\pi l e^2} \right) \times \left(\frac{A_{\text{open}}}{A_{\text{unit}}} \right) \times \left(\frac{F}{F-Z} \right)^2$$

단, $0 < Z < F$ 로 표시되며 le 는 傾斜진 hole의 有效길이로 $\frac{le}{\cos \theta}$ 로 나타낸다. le 는 $1-2\mu^{-1}$ 로 구한다.

만약 collimator hole이 collimator의 全體直徑에서 一定하다면 幾何學的 效率는 collimator 중심으로부터 $\cos 2\theta$ 만큼 감소된다. 보통 converging hole collimator는 초점길이(F)가 45cm 정도이며 θ 의 값은 0° 부터 20° 이다. 그러므로 collimator의 有效시야에서 기하학적 검출효율은 12% 정도의 多樣性을 나타낸다.

2) 공간분해능 (spatial resolution)

Converging hole collimator의 공간분해능은 parallel hole collimator와 유사하게 나타낸다.

$$\text{즉 } R = \frac{a(le+Z+b)}{le} \times \frac{1}{\cos \theta} \times \left(1 - \frac{2+Z}{F-Z} \right)$$

Z는 점선원과 collimator 전면간의 거리 a는 collimator의 전면(환자측) hole의 직경 b는 collimator로부터 image까지의 거리, 그리고 F는 converging hole의 초점거리이다(그림 8참조). Converging hole collimator의 擴大에 基因된 幾何學的 空間분해능(R_0)는

$$R_0 = R \times \left(\frac{F-Z}{F+le+b} \right)$$

가 되며 R은 공간분해능이다. 그러므로 converging hole을 사용한 camera에서 전체적인 기하학적 분해능(R_t)은

$$R_t = \sqrt{R_0^2 + \left(\frac{F-Z}{F+le+b}\right)^2 \times Ri^2} \text{ 이 된다.}$$

Ri는 camera의 고유 분해능이다 전형적인 converging hole collimator의 거리에 따른 기하학적 공간분해능의 변화는 그림 11과 같다.

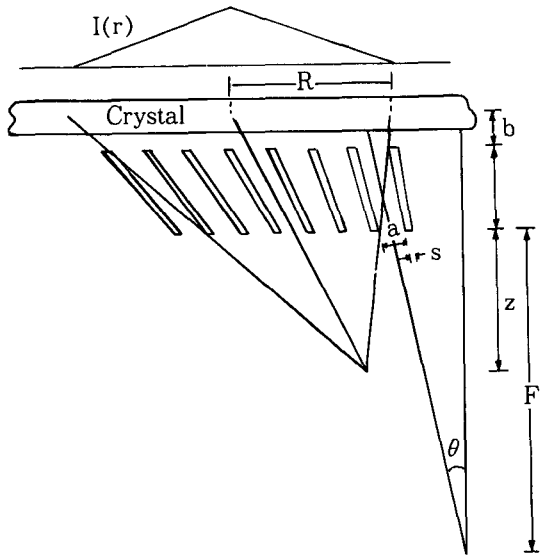


그림 8.

3. 확산다공형(diverging) collimator

1) 기하학적 검출효율

Diverging hole collimator의 기하학적 효율(G)은

$$G = \frac{A_{\text{open}}}{4\pi l e^2} \times \frac{A_{\text{open}}}{A_{\text{unit}}} \times \left(\frac{F+le+b}{F+le+Z+b}\right)^2 \text{ 과}$$

같다. Diverging hole collimator는 10" 정도 형광체 직경을 가진 camera에서 주로 이용되고 있으며 45cm 정도의 초점길이가 되어 있다(그림 9).

2) 공간분해능

Diverging hole collimator의 공간분해능은 converging hole collimator와 같은 방법으로誘導할 수 있다.

$$\text{즉 } R = \frac{a(le+Z+b)}{le} \times \frac{1}{\cos \theta} \times \left(1 - \frac{le}{F+le+b+Z}\right)$$

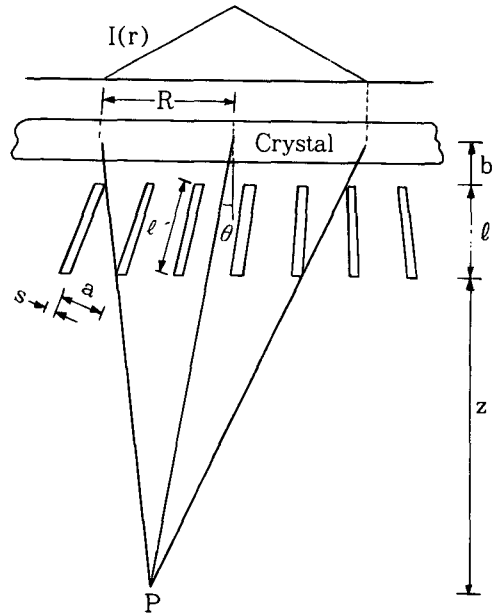


그림 9. Diverging collimator

被寫體面(object plane)에서 기하학적 공간분해능(R_0)은

$$R_0 = R \times \left(\frac{F+le+Z+b}{F}\right) \text{ 이다.}$$

Camera의 전체적인 기하학적 공간분해능(R_t)은

$$R_t = \sqrt{R_0^2 + \left(\frac{F+le+Z+b}{F}\right)^2 Ri^2} \text{ 으로}$$

표시된다(그림 11 참조).

4. Pinhole collimator

1) 기하학적 검출효율

Pinhole collimator의 幾何學的 效率는 그림 10과 같이 점선원으로부터放出되는 방사선을 pinhole의 구멍을 통하여放出되는 것으로判斷한다.

$$\text{즉 } G = \frac{ae^2 \cdot \cos^2 \theta}{16Z^2}$$

여기서 Z는 collimator와 source간 거리이고 θ 는 collimator의 長軸과 point source로부터 pinhole을 통해檢出되는放射線이 이루는角度이

다. Pinhole의 有效直徑 ae 는

$ae = [a(a + 2\mu^{-1}\tan\alpha/2)]^{1/2}$ 되며 a 는 pinhole의 실제직경 α 는 cone의 각도이며 μ 는 hole물질의 線吸收係數이다. Pinhole collimator는 작은 장기를 짧은 거리(Z)에서 높은 分解能으로 檢査할 때 이용되고 있다. α 가 60° 인 pinhole collimator인 경우 θ 는 0° 부터 60° 가 되며 有效視野에서 中心에서 주변으로 갈수록 기하학적 效率는 0.65 배정도 저하된다.

2) 공간분해능

그림 10에서와 같이 pinhole collimator의 기하학적 공간분해능은 collimator 표면으로부터 동일한 거리에 있는 2개의 점선원 사이의 거리를 분해할 수 있는 능력을 말하며

$$R_0 = \frac{ae(\ell + Z)}{\ell} \text{ 로 표시된다. 또 camera 장}$$

치의 고유 분해능을 고려한 전체 공간분해능 (R_t)은

$$R_t = \sqrt{R_0^2 + \left(\frac{Z}{\ell}\right)^2 R_i^2} \text{ 과 같다.}$$

Collimator와 source간 거리변화에 따른 분해능의 저하는 그림 11과 같다.

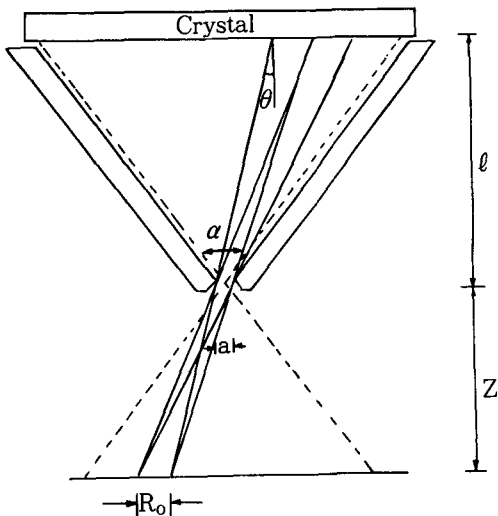


그림 10. Pinhole collimator

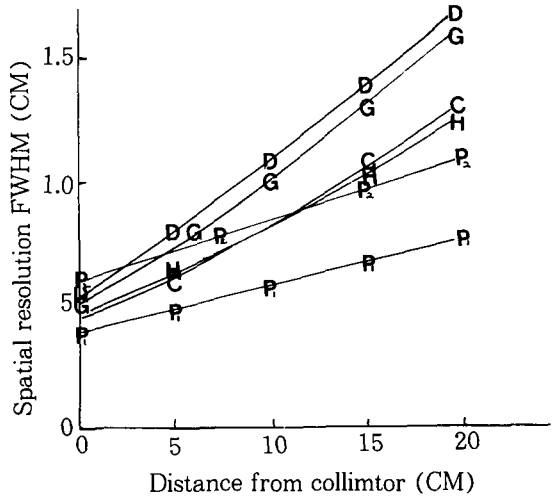


그림 11. Collimator와 거리변화에 따른 FWHM의 변화

IV. 空間分解能과 檢出效率과의 關係

일반적으로 collimator의 構造上의 問題點은 映像의 質과 空間分解能에 관한 向上對策과 함께 最大의 檢出效率에 관한 事項이다. 이와같은 問題에 關係되는 事項을 보면 적당한 hole의 크기와 最大의 檢出效率을 얻을 수 있는 hole의 길이 그리고 hole의 모양을 들 수 있다. 이와 같은 parameter들은 camera 映像의 質과 직접적인 關係에 있으며 最上의 映像은 無限한 檢出效率과 완전한 空間分解能을 가진 영상이라고 할 수 있다. 그러나 공간분해능을 향상시키기 위해서는 檢출효율의 저하를 감수해야 하며 檢출효율을 증가시키기 위해서는 분해능의 감소를 피할 수 없다. 그러므로 가장 적당한 것은 분해능과 檢출효율의 상호關係를 가장 효율적으로 향상시킬 수 있는 방법을 모색해야 한다.

V. 結 論

Camera를 이용한 映像 診斷에서 映像의 質을 비롯하여 充分한 情報量을 나타내기 위한 모든 手段이 이용되고있으며 發展된 方法들이 繼續 研究進行되고 있다. 이 중 collimator역할

은 放射線을 檢出하는데에 分해능은 물론 感度에 큰 영향을 미치고 있다.

각 collimator의 幾何學的 特性과 그 機能을 充分히 理解하고 利用한다면 患者診療에 있어 그 特異性과 感受性을 向上시키는데 크게 이바지 할 것으로 思料된다.

참 고 문 헌

1. Guy G. Simmons : The scintillation camera, 17-43, The society of nuclear medicine 1988.
2. E. Edmund Kim, Thomas P. Haynie : Nuclear diagnostic imaging, 62-65 Macmillan publishing Co. Inc., 1987.
3. Harrison H. Barrett, William Swindell : Radiological imaging, 456-458, vol.2 Academic press., 1981.
4. Fred a. Mettler, Milton J. Guiberteau : Nuclear medicine imaging. 16-19, Grune & Stratton, Inc., 1986.
5. 박성옥, 이만구 등 : 임상 핵의학 기술학, 36-57, 보문서원, 1992.
6. 이준일 : 핵의학 기술학, 104-110, 대학서림, 1993.