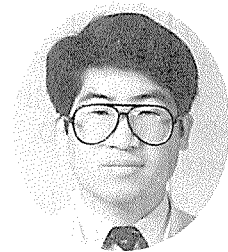


# 감마나이프를 이용한 뇌 질환의 3차원 정위 방사선 수술



장            건            호  
경   회   의   료   원  
치   료   방   사   선   연   구   원

## 서   론

3차원 정위방사선 수술은 1951년 스톡홀름 카로린스카 병원의 신경외과 교수인 Lars Leksell에 의해 처음 제안된 것으로 그 이후  $^{60}\text{Co}$ 을 사용한 방사선 수술 장비인 감마나이프 장비가 1968년에 처음으로 카로린스카 병원에 설치되었다. 이때의 감마나이프는 총 179개의  $^{60}\text{Co}$  선원에서 방출되는 고에너지 감마선을 이용하였으며, 그후 계속되는 연구 개발을 토대로 1980년대 피치버그대학병원을 비롯한 여러 병원에서 201개의 CO-60 선원을 이용한 감마나이프가 설치되게 되었다. 전세계적으로 50여대가 사용중이며, 일본에는 7대가 사용되고 있으며 우리나라에는 서울에만 3대가 사용되고 있다.

감마나이프는 선원 배열 형태에 따라 두가지 형태로(Type A, B) 사용되고 있으며, A-형태는 1990년대 이전의 미국 여러 병원에서 도입하여 사용하였고, B-형태는 1990년대 이후 미국과 그외 여러 나라에서 사용중이며 본원에 설치된 형태도 바로 이 종류이다.

정위 방사선 수술이라함은 두개골을 직접 절개하지 않고, 비침습적인 방법으로 두개골 내의 여러 종양이나 선천성 동정맥 기형등의 질병을 방사선을 이용하여 수술하는 것으로써, 사용하는 방사선의 종류에 따라 여러가

지로 분류되어 사용되고 있다. 즉, Co-60 감마선을 이용한 감마나이프(Gamma Knife), 고에너지 X-선을 이용한 선형가속기(Linac) 및 중하전 입자를 이용한 여러가지 기기등이 이용되고 있다. 보통 외부 방사선 조사를 이용한 치료와 달리 정위 방사선 수술은 한번에 많은 양의 선량을 병변에만 집중적으로 조사하는 방사선 치료 방법이다.

본 연재의 목적은 Co-60 감마선을 이용하여 3차원 정위 방사선 수술을 하는 감마나이프의 방사선 수술 원리와 여러가지 물리적, 의학적 적용 및 지난 1992년 3월 이후 10개월간 수술 받은 환자의 치료에 대하여 살펴보기로 한다.

## 본   론

### 1. 물리적 원리

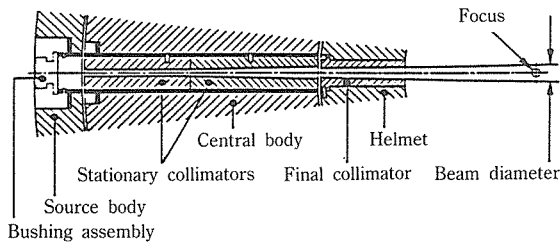
감마나이프의 주요 구성을 크게 분류하면 방사선 장치, 네개의 조준기 헬멧이 있는 테이블, 제어 판넬과 배전기 시스템, 정위 수술용 장비 및 선량 계산용 컴퓨터 시스템 등으로 되어 있다. 방사선 장치로는 201개의  $^{60}\text{Co}$  선원이 내장되어 있는 구형의 차폐 장비들로 되어 있으며, 차폐와 몸체 부위에는 주철로 되어 있고 환자가 출입하는 문에는 철로 되어 있다. 또한 총 20,000kg의 무게로 되어 있으며, 총 6200Ci의 Co-60 방사능량이 포함되

어 있다.

각각의 선원으로부터 조사되는 빔이 구형의 두개골 중심에서 초점이 정확히 잡히도록 조준되어 있다. 따라서 병소 주위의 정상 조직내 흡수선량은 임계 선량 이하의 최소의 방사선량이 들어갈 수 있도록 구성되어 있다. 시스템 내의 처음 인가된 중심점에서의 선량율은 분당 약 385.2Gy정도이다.

### 1. 1 선원의 특징

201개 Co-60 선원은 직경이 1mm이고 길이가 1mm인 약 20개의 Co-60 펠렛으로 완전히 봉입된 이중 스테인레스 스틸 내에 장진되어 있다. 선원은 반경이 약 400mm인 반구의 몸체내에 다섯개의 동심원 형태로 배열되어 있다. 또한 선원들은 서로 7.5도의 각을 이루며 각각의 동심원을 따라 배열되어 있으며 60mm정도 떨어져 있다. 이러한 배열은 수평축에 대해 약 36도의 각을 갖게 된다. 각 201개의 선원에서 나오는 방사선의 통로 역할을 하는 빔 채널은 중심체 내에 위치한 고정된 조준기 부분과 네개의 헬멧 내에 위치한 교환 가능한 조준기로 되어 있으며 이에 대해 그림 1에 나타나 있다.



<그림 1> 조준기 채널  
201개의 조준기 채널중에서 하나를 보여주고 있다.

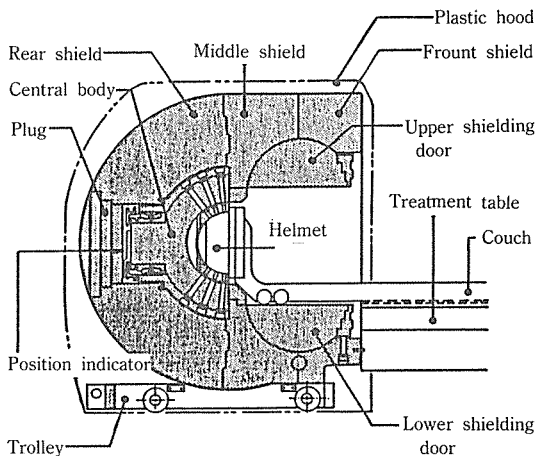
각 집합체 내의 채널은 65mm두께의 96% 텅스텐 합금으로 된 전조준기(Precollimator)와 92.5mm 두께의 납 조준기로 구성되어 있다. 또한 교환 가능한 조준기는 60mm두께의 96% 텅스텐 합금으로 되어 있으며, 헬멧에 있는 최외부의 조준기는 96% 텅스텐 합금으로

된 60mm두께의 플러그(Plug)로 교환하여 선택적인 차폐가 가능하도록 되어 있다.

### 1. 2 방사선 차폐 및 안전장치

Co-60 선원이 장진된 중심체는 완전한 구형태로 방사선 차폐가 되어 있다. 이들 차폐의 주요 부분은 앞, 중간, 뒤부분의 차폐 시설과 헬멧에 부착될 수 있는 플러그와 문의 위, 아래에 차폐 시설등으로 되어 있다. 주요 차폐 구조가 그림 2에 나타나 있다. 환자가 들어가고 나오는 차폐문은 원격 조정하며 긴급상황에 대비하여 수동적으로 조작할 수 있도록 Handwheel이 설치되어 있다. 환자에 대한 차폐의 마지막 부분이 되는 헬멧에 부착된 마지막 조준기를 교체하여 차폐할 수 있도록 플러그가 준비되어 있으며, 이는 특히 환자의 눈을 보호해 주기 위하여 치료시 매번 사용하고 또한 특히 방사선에 민감한 정상 조직에 들어가는 방사선을 막는데 중요한 역할을 한다.

중심체의 집합체를 수용은 방사선 구역내 시설은 벽의 두께가 방사선의 노출되는 곳에 따라 두가지 형태 콘크리트 두께로 되어 있다. 빔이 확산되는 각도는 중심체의 중심선을 기준으로하여 80도의 각을 갖고 주로 산



<그림 2> 감마나이프의 주요 방사선 차폐 장치  
감마나이프의 도식적 형태를 보여주고 있다.

란되게 된다. 또한 방사선 안전관리 시설로는 치료실 출입구의 적색 램프와 제어 판넬을 통하여 환자를 감시할 수 있도록 감시 카메라가 설치되어 있으며 환자의 안정을 유도하기 위해 대화를 할 수 있는 마이크가 설치되어 있다. 또한 치료실 출입문에는 제동 장치가 되어 있어 방사선 조사시에 치료실 문이 열리게 되면 깜박이는 적색 램프가 작동하게 된다.

### 1. 3 방사선의 선량 계산 알고리즘

등선량 곡선의 크기는 사용되는 조준기에 따라 다르며 실제 병소에 조사되는 빔의 수에 따라 그 모양이 다르게 나타난다. 또한 플러그가 등선량 곡선의 모양과 병소의 모양 사이의 최적화된 형태를 찾는데 이용되게 된다.

선량 계산에 필요한 것은 병소 표적의 X, Y, Z좌표와 감마각(Gamma Angle)-사람의 머리를 앞, 뒤로 당기고 짓치는 것에 따른 각도-등이 필요하며 두개골의 표면내에 24곳의 특정 선택된 점으로부터 정위 좌표 축간의 거리를 측정하게 된다. 계산에 사용되는 특정 프로그램은 스웨덴의 Elekta에서 개발된 것을 Micro-Vax II 컴퓨터를 이용하는 KULA 프로그램이 사용된다. 계산되는 형태는 다음과 같다.

행렬의 중심과 160mm 직경의 물로된 구에 빔의 초점이 위치한다는 가정 아래 정입방 행렬로된 50×50×50에 위치하여 흡수되는 선량을 먼저 계산하게 된다. 하나의 Shot에 대한 선량 계산시는 31×31×31행렬과 11×11×11 행렬이 각 영역에서 같은 좌표를 갖도록 생성되며, 31×31×31 행렬 내 매 세번째 점에서 11×11×11 행렬의 점이 일치하게 된다. 11×11×11 행렬의 한점에서 흡수선량을 (1)식에 의하여 정확히 계산하고 미리 계산된 50×50×50의 행렬 내에 위치한 31×31×31 행렬의 각 점에서의 선량이 가장 가까운 8곳의 선량들로부터 반복적 계산으로 얻게 된다.

점선량 계산이 하나의 특정점에 모든 실제

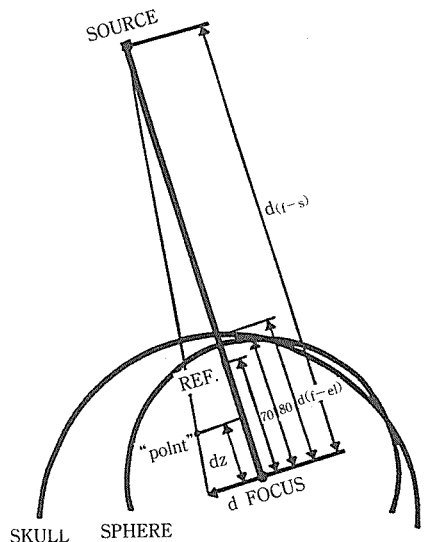
사용되는 선원으로 부터의 선량 기여를 계산하기 위해 선원으로부터의 선량 계산을 살펴보면 선원 I로부터의 임의의 공간 좌표점에 대한 상대적인 선량 계산 RDI는 아래와 같이 계산된다.

$$RDI = \frac{RDI_{skf}}{\sum RDI_{skf}} \left[ \frac{d_{(f-s)}}{d_{(f-s)} - dz} \right]^2 e^{-\mu dz} P_{(d)} \dots \dots \dots (1)$$

여기서 RDI는 두개골 내 임의의 점에서 선원I의 상대 선량이며, dz는 수직축과 교차하는 초점으로부터 임의의 점까지의 빔 축을 따른 거리, RDI<sub>skf</sub>는 구내 상대적인 기준점에서 두개골내 초점에 기여하는 선량, d<sub>(f-s)</sub>는 초점에서 선원까지의 거리(395mm)이고, p(d)는 초점으로부터 거리 d에 영향을 주는 횡단선량(Transversal Dose)이다.

선원 I로부터 80mm깊이에서 초점내 물팬텀(Water Phantom) 10mm깊이에서의 상대적 선량 RDI<sub>sphf</sub>는 다음식과 같이 나타난다.

$$RDI_{skf} = RD_{sphf} \left[ \frac{d_{(f-s)} - 70}{d_{(f-s)}} \right]^2 e^{-\mu [f - e] + 10} \dots \dots \dots (2)$$



<그림3> 선원에서 임의의 점에 대한 선량 계산 방법  
두개골을 구형태로 가정하여 구한다.

여기에서  $d_{(r)}$ 는 빔 I의 초점에서 두개골까지의 거리이다. 이 값은 환자 개개인의 두개골 모양을 측정하여 얻게 된다. 이들 원리에 대한 기하학적 구조가 그림3에 나타나 있다.

### 1. 4 임상 적용 과정

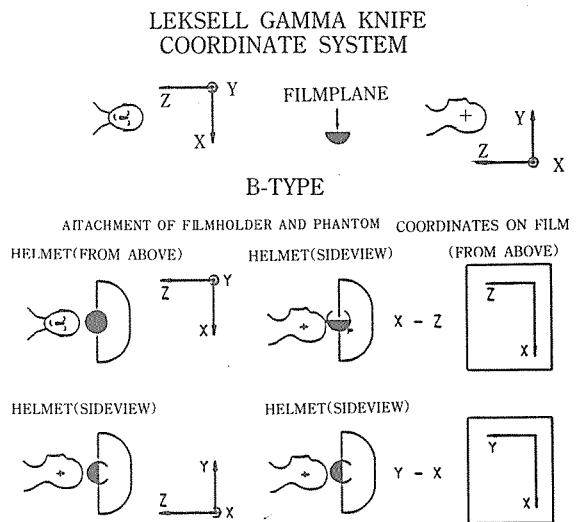
Leksell 감마나이프 고유의 “G-좌표계”를 환자에게 국부 마취 시킨후 두개골 부위에 금속핀이나 탄소 막대편등을 이용하여 고정시킨다. 다음 막대형 자와 반구 모형의 플라스틱 헬멧-Bubble라고 부름-을 이용하여 두개골의 외부까지의 거리를 측정한다. 병변의 3차원 좌표를 구하기 위해 동정맥 기형의 경우 앞뒤와 전후좌우로 뇌혈관 조형술(Angiography)을 이용하여 촬영하고 기타 종양은 컴퓨터 단층촬영(CT)이나 자기공명 영상촬영(MRI)을 N자형의 좌표계를 정착한 후에 3차원으로 촬영하고 필름을 실제머리 크기 만큼 확대하여 뽑아낸다.

그 다음 주위의 정상 조직에는 최소한의 방사선 선량이 들어가도록 병변의 주변부에서 선량 분포가 매우 조밀하게 되도록 치료 계획을 전용 컴퓨터 프로그램(KULA)을 통하여 계산한다. 사용되는 조준기 헬멧의 크기는 4mm, 8mm, 14mm, 18mm가 있으며 적당한 것을 선택하여 50% 이상의 등선량 곡선이 병변의 주위에 오도록 치료 계획을 세우는 것이 매우 중요하다. 정상 장기나 시신경, 시신경 교차점 및 뇌간등의 중요 민감 장기에 가능하면 허용선량 이하의 적은 선량이 들어가도록 하여야 하며, 이때 빔 플러깅등을 사용할 수 있으며 4개의 조준기 헬멧 중 에서 적당한 것을 선택하여 병의 크기에 따라 Shot수-방사선을 환자에게 조사하는 횟수-를 여러개 사용하여 표적의 모양과 똑같이 계산하도록 하여야 하며 소프트웨어상 12개 이상의 Shot를 사용하지 못하게 되어 있다. 특정 부위에 대한 가중을 하여 원하는 모양의 등선량 분포 곡선을 얻을 수도 있으며, 계산 결과는 플로토와 레이저 프린트를 통하여 얻게 된다.

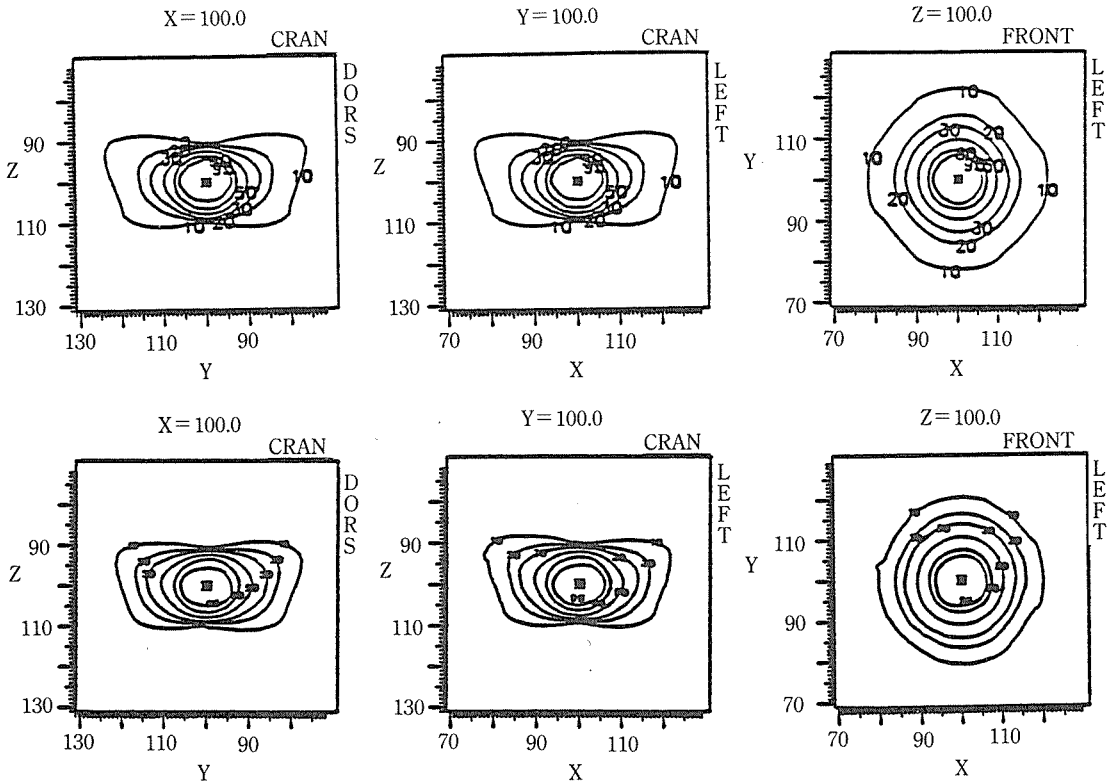
수술 과정은 사용하게 될 조준기의 헬멧을 테이블에 정착시키고 환자를 계산된 3차원 좌표에 따라 고정시켜 주고 헬멧에 고정시킨 후 환자의 눈에 방사선이 들어가는가를 확인하고 들어가는 눈에 대해서는 플러깅을 한후에 선량의 인가에 따라 나타나는 시간을 제어 펜넬에 입력시킨후 수술을 시작하게 된다. 실제 사용된 Shot에 대해 모두 반복 수행한 후에 치료가 끝나게 되며, 환자에게 고정시킨 좌표 계산용 플래임을 제거한 후 편 고정부위를 소독하고 병실로 보내어 지게되며 치료후 2~3일 동안 경과를 살핀 후 퇴원하게 된다.

### 2. 임상 적용 방법

3차원 정위 방사선 수술은 선천성 동정맥 기형과 뇌하수체 선종, 청신경 교종등의 두개골에 발생하는 여러 종류의 종양들에 적용될 수 있다. 전세계적으로 동정맥기형의 치료가 56%정도의 가장 많은 치료를 보여주고 있으며 치료 결과도 87%이상에 매우 좋은 결과를 보여주고 있다. 또한 여러 뇌 종양의



〈그림4〉 선량측정을 위해 사용된 폴리스텐 펜텀의 좌표 검정색 부분이 필름이 놓인 모양을 나타낸다.



〈그림5〉 등선량 곡선 분포의 컴퓨터 계산 및 필름 조사 결과의 비교  
 각각 빔의 중심인 좌표에서 얻은 분포 곡선이다.

경우도 약 3.5cm 이하의 종양에 대한 수술이 진행되고 있으며 수술, 결과 역시 50%이상 좋은 결과를 보여주고 있다.

### 2. 1 선량 측정

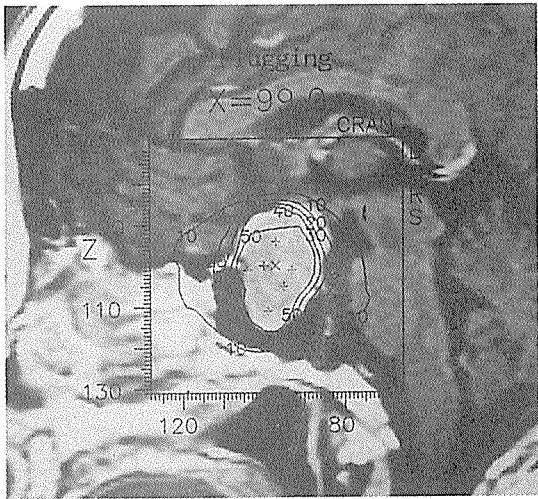
선량측정을 위하여 사용된 좌표계가 그림4에 나타나 있으며, 실제 임상에 적용되는 등선량 분포 곡선의 컴퓨터 상에 제공된 곡선과 비교 평가하기 위하여 X-omat V 필름을 이용한 측정을 하였다. 그 결과 그림5와 같이 나타났으며, 위줄은 컴퓨터에서 계산된 것이며 아래줄은 필름 측정을 이용하여 얻은 결과이다. 필름노출에 따른 결과는 RFA-3 자동 밀도측정기(Densitometer)의 구경의 직경이 2mm의 큰 것을 사용하였기 때문에 저선량에 대해서는 조금 차이가 있지만 50%이

상의 선량에 대해서는 두가지가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

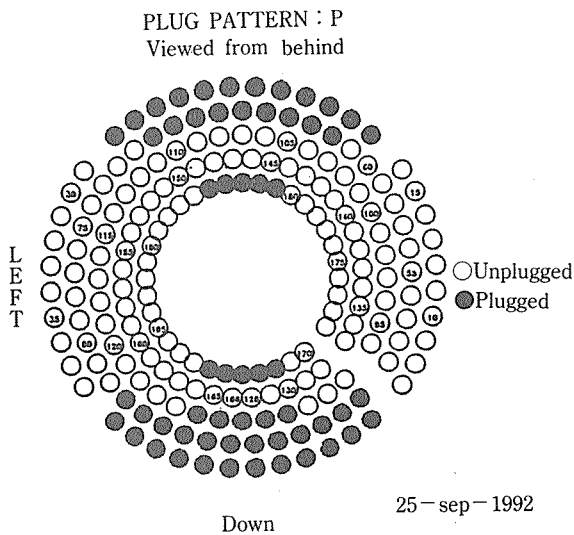
실제 환자에 적용된 치료 계획에 의한 두개골의 시상(Sagittal)방향의 병변에 따른 등선량 곡선의 분포가 그림6에 나타나 있으며, 뇌하수체 선종의 치료시에 사용된 선택적인 플래킹 모양이 그림7에 나타나 있다. 외부 위와 아래의 두줄은 뇌간(Brainstem)부분에 들어가는 방사선의 양을 막기 위함이고, 내부의 세줄은 시신경 교차(Optic Chiasm)부분의 방사선량을 줄이기 위함이다.

### 2. 2 임상 적용 결과

1992년 3월부터 시작된 본 병원의 감마나이프 수술은 그동안 10개월간 83명의 환자를 치료하였으며 치료환자에 대한 병명에 따른



〈그림6〉 뇌하수체 선종 환자의 치료 계획에 따른 선량분포 곡선 Sagittal영상을 보여주고 있다.



〈그림7〉 뇌하수체 선종의 치료시에 사용된 선택적 플러깅 모형 검정색 부분이 플러깅한 곳이다.

분류가 표1에 나타나 있다. 표에서 볼수 있는 것과 같이 악성 성상 세포종과 뇌하수체 선종 환자를 본원에서 가장 많이 치료하였

다. 또한 각 병명에 따른 100% 등선량 곡선에 대해 적용된 선량을 우측에 나타내었다.

뇌하수체 선종의 치료 결과를 간단히 살펴 보면 감마나이프 수술후 6개월후의 환자에 대한 자기공명 영상 촬영을 하여 수술 직후의 병의 상태를 비교해 보았다. 14명의 환자 중에서 수술후 최소 3개월 이상 지난 환자 9명에 대해 영상의 비교를 해본 결과 병변의 크기가 최대 1/2의 감소된 소견을 보여주고 있으며, 이들 환자들의 대부분이 영상에서의 흰 농도(병변의 농도)가 매우 줄어들었음을 볼 수 있었고, 기타 병리학적 소견 역시 좋은 결과를 가져왔다.

## 결 론

본원에서는  $^{60}\text{Co}$  감마선을 이용한 뇌 종양 혹은 선천성 동정맥 기형등을 3차원 정위 수술을 할 수 있는 감마나이프를 도입하여 83명의 환자에 대해 시행하였다. 감마나이프의 특징은 201개의 선원이 반구 모형으로 배열되어 있기 때문에 하나의 채널당 방출되는 방사선량이 매우 적어 정상 조직을 해칠 우려가 없으며, 기계적 및 임상적인 정밀도에 있어서 총 2.8% 이내에 오차를 갖도록 되어 있다. 또한 기계적인 정확도는 오차한계가 1mm 이내로 되어 있다. 한번에 고선량을 주어 질환을 치료하므로써 일반적인 치료에서 나타나는 방사선 후유증을 줄일 수 있으며 환자의 입원기간이 보통 5일 정도로 모든 과정이 끝나게 되어 바로 정상적인 사회 생활을 할 수 있다.

선량의 측정 결과 50% 이상의 등선량 곡선에 대해서는 컴퓨터에서 제공된 것이 잘 일치함을 볼 수 있었으며, 플러깅을 사용하여 정상 민감 장치들에 들어가는 방사선을 막는것이 치료후의 방사선에 의한 후유증을 막는데 매우 중요한 요인임을 알 수 있었으며, 실제 치료 결과 병변의 크기가 감소된 소견을 볼 수 있었으며, 병리학적 소견 역시 좋아짐을 알 수 있었고 앞으로 3개월 단위로 환자에게 대한 정밀 평가가 수행될 예정이

표 1 감마나이프 수술 환자의 병명에 따른 분류와  
병변에 적용한 최대선량

병명	치료 환자수 (명수)	100% 등선량에 대한 선량 범위(Gy)
악성성상세포종(Malignant Astrocytoma)	22	32-60
뇌하수체 선종(Pituitary Adenoma)	14	30-62
동정맥 기형(Arteriovenous Malformation)	12	42-60
청신경 교종(Acoustic Neurinoma)	7	30-50
양성 신경 교종(Low Grade Glioma)	5	30-50
뇌 수막종(Meningioma)	7	30-60
전위성 종양(Metastases)	5	40-70
기타	11	20-50
총 치료 환자수	83	

다. 현재까지는 치료 후 더 악화된 소견을 보인 환자는 없었다.

요즈음 세계적으로나 국내적으로 뇌의 심부 깊숙히 자리잡고 있는 여러 질환에 대한 실제 칼로 수술을 할 수 없는 부위나 큰 위험성이 따른 부위의 정위 방사선 수술에 대한 관심사가 매우 높기 때문에 앞으로는 방사선을 이용한 일반적 치료외에 3차원 정위 방사선 수술이 더 많은 각광을 받으리라고 여겨진다.

#### 참고문헌

1. A.H. Maitz, L. Dade Lunsford : Shielding Requirements On-site Loading and acceptance Testing of the Lekse11 Gamma Knife. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. 18 : 469-476, 1990
2. Hans Dahlin, Bert Sarby : Destruction

of Small Intracranial Tumours with  $^{60}\text{Co}$  Gamma Radiation-Physical and technical consideration-. Acta Radiologica Therapy Physics Biology 14 : 209-227, 1975

3. Elekta : User's Manual 1 and 5 of Lekse 11 Gamma Unit-Type B. 1991
4. Dan G. Lekse11 : Stereotactic Radiosurgery-present status and future trends-. Neurological Research, 9 : 60-68, 1987
5. John C. Flickinger, Ann Maitz : Treatment Volume Shaping with Selective Beam Blocking using the Lekse11 Gamma Unit. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys., 19 : 783-789, 1990
6. Andrew Wu, G. Lindner : Physics of Gamma Knife Approach on Convergent Beams in Stereotactic Radiosurgery. Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. 18 : 941-949, 1990