

선형가속기 방사선 수술을 이용한 뇌동정맥기형의 치료

계명대학교 의과대학 신경외과학교실, 치료방사선과학교실*

이성열 · 손은익 · 김옥배* · 최태진* · 김동원 · 임만빈 · 김인홍

= Abstract =

Linac Based Radiosurgery for Cerebral Arteriovenous Malformations

Sung Yeal Lee, M.D., Eun Ik Son, M.D., Ok Bae Kim, M.D.,*

Tae Jin Choi, Ph.D.,* Dong Won Kim, M.D.,

Man Bin Yim, M.D., In Hong Kim, M.D.

Department of Neurosurgery and Therapeutic Radiology,*
Keimyung University School of Medicine, Taegu, Korea

Objective : The aim of this study was to retrospectively analyze the safety and effect of Linac based Photon Knife Radiosurgery System(PKRS) for treatment of cerebral arteriovenous malformation.

Patients and Methods : The authors analyzed the clinical method and results of ten patients who were followed up more than two years, among the 18 patients who had radiosurgery on arteriovenous malformation from June, 1992, to Dec. 1997, with Linac based Photon knife radiosurgery system(PKRS) which was developed in our hospital.

Results : The average age of the patients was 30.4(with the range of 13 - 49), and the sex was seven males and three females. For the initial clinical symptoms, there were five patients with headache, three with seizure, one with hemiparesis, and one with vomiting. Before the radiosurgery, computed tomography, MRI, and cerebral angiogram were done. For the location of arteriovenous malformation, it was found on six patients of cerebral hemisphere, two of thalamus, one of brainstem, and one of corpus callosum. Regarding the size of nidus, there were seven patients of smaller than 3cm, and three patients of larger than 3cm. Computed tomography, MRI, and cerebral angiogram were done periodically for sixth months, first year, and second year after the radiosurgery of PKRS for the completeness of obliteration. Six cases showed complete obliteration, and four partial obliterations were observed among ten cases, and interestingly, six cases of complete obliteration were observed among seven cases of small AVM of smaller than 3cm(the rate of complete obliteration : 85.7%). All patients tolerated the treatment and no significant complication were seen.

Conclusion : In this study, linac based radiosurgery using PKRS onto arteriovenous malformation showed excellent effects, therefore authors believe that it is an ideal method for small sized or deep seated AVM.

KEY WORDS : Arteriovenous malformation · Stereotactic radiosurgery · Photon knife.

서 론

1951년 Leksell에 의하여 두개강내 병변에 대한 정위적 방사선 치료법이 처음으로 소개되었으며¹⁰⁾, 이 치료법은 정위 수술 방법을 이용하여 두개강내 병변에 대하여 방사선을 국소 병변부위에 적절하게 조사함으로써 실제 수술로서 병소를 절제하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다⁶⁾⁷⁾. 이 수술

방법의 가장 큰 장점은 주변 정상 뇌조직에 들어가는 방사선량을 극소화하고 병소에만 다량의 방사선을 조사하여 기존의 방사선 치료에서 볼 수 있는 부작용을 극소화시키고 하루만에 모든 치료를 끝낼 수 있다는 것이다¹⁾.

뇌동정맥기형에 대한 정위적 방사선 수술의 도입은 1963년 Kjellberg가 Bragg peak photon beam을 이용하여 처음 시도하였으며 1970년 Steiner가 감마나이프를 이용하여 뇌동정맥기형의 치료를 시작한 이래로 방사선 진단기기

와 정위 수술 방법의 발달과 더불어 관심이 증가되면서 치료효과가 증명되어지고 치료 불가능했던 특정부위에 발생한 병변에 대한 치료 선택의 폭이 넓어지게 되었다¹¹⁾.

그러나 기존의 cobalt - 60을 이용한 감마나이프나 Kjell - berg에 의해 시작된 Bragg peak photon beam을 이용한 방사선 수술은 엄청난 장비와 비용이 요구되어 실제로는 널리 이용되지 못하고 있는 실정이다. 이런 이유로 최근에는 기존의 선형가속기를 이용하여서도 충분히 이에 상응하는 효과를 얻을 수 있다는 것이 여러 저자들에 의해 보고되어 왔다²⁾⁶⁾²²⁾.

이에 저자들은 본원에서 연구개발된 software인 Photon knife radiosurgery system(PKRS)을 이용하여 선형가속기 방사선 수술을 시행하고 그 치료방법의 안정성과 효과를 후향적으로 분석하고 평가하고자 한다.

대상 및 방법

1. 대 상

포톤나이프 방사선 수술 시스템을 이용하여 1992년 6월부터 1997년 12월까지 뇌동정맥기형에 대한 방사선 수술을 시행한 18명의 환자중에서 2년 이상 경과한 10명을 대상으로 후향적 분석을 시행하였다.

치료의 적응은 대부분 외과적 수술을 원하지 않거나, 수술하기 어려운 부위, 뇌 중요부위나 심부병변인 경우, 그리고 수술 후 병변이 남아있는 환자를 대상으로 하였다.

환자의 연령은 13 ~ 49세(평균 30.4세), 성별은 남자 7명, 여자 3명이었고 초기 임상증상은 두통 5명, 경련 3명, 반신마비 1명, 오심 및 구토 1명이였다. 방사선 수술전 검사로 뇌전산화 단층촬영, 뇌자기공명영상, 뇌혈관 조영술을 실시하였다. 뇌동정맥 기형의 위치는 대뇌반구 6명, 시상 2명, 뇌간 1명, 뇌량 1명이였으며 병소(nidus)크기는 3cm 이하 7명, 3cm이상 3명이였다. 방사선 수술전 처치로 수술을 시행한 경우가 1명이였다(Table 1, 2). 방사선 수술을 시행한 후 6개월, 1년, 2년째에 뇌전산화 단층촬영, 뇌자기공명영상, 뇌혈관 조영술로 추적 관찰하였다.

2. 방 법

본원에서 연구 개발된 방사선 수술기구 포톤나이프는 6MV 광자선을 방출하는 선형가속기(ML - 15 MDX, Mitsubishi)의 지지체와 치료대 및 환자 체위를 일정 각도만큼 회전시켜 표적에 닿는 방사선량의 집중화를 높이고 정상 뇌조직의 손상을 줄일 수 있는 다양한 선량분포를 얻게 하였다.

포톤나이프의 구성은 환부고정용 환형틀(재질 : 고강도 합

Table 1. Location and size of 10 cases with arteriovenous malformation treated by radiosurgery

Location of AVM	Nidus size		
	No.	≤30mm	>30mm
Lobar	6	3	3
Thalamus	2	2	
Corpus callosum	1	1	
Brain stem	1	1	
Total	10	7	3

Table 2. Summary of 10 cases with arteriovenous malformation treated by radiosurgery

Case	Sex/Age	Symptom	Site	Cone (mm)	Size (mm)	Dose (cGy)
1	M/23	Headache	Brain stem	20	17	2500
2	F/41	Headache	Lt-Frontal	35	40	1500
3	M/40	Seizure	Lt-Temporal	28	30	2000
4	F/33	Headache	Lt-Occipital	15	12	3119
5*	M/13	Seizure	Lt-Frontal	35	38	1500
6	F/32	Weakness	Lt-Thalamus	20	20	2500
7	M/21	Seizure	Rt-Frontal	28,15	45	2000
8	M/49	Headache	Rt-Parietal	15	12	2500
9	M/32	Nausea/ Vomiting	Corpus callosum	25	20	1700
10	M/20	Headache	Lt-Thalamus	25	25	1700

* : Partial resection was performed before radiosurgery

성수지)과 뇌정위 수술 프레임(frame)과 프레임을 고정하는 원형고정대, 표적위치결정기구(CT localizer), 표적과 방사선 선속을 일치시키는 위치결정기구(positioner), 콜리메이터와 전산화단층영상자료를 재구성하여 치료계획을 세울 수 있는 입체선량 software로 구성되어 있다.

환부고정은 합성수지용 치아부목(occlusal splinter)으로 환부를 환형틀에 고정하고 BRW 틀을 장착한 다음, 환형틀과 두부사이에 비닐 우레탄폼을 삽입 경화시켜 두부를 둘러싸서 흔들리지 않게 하였으며, 고정된 환형에 BRW 표적위치기구와 선속을 결정하는 기구를 부착한다(Fig. 1).

표적선량의 집중화는 표적에 도달하는 선량율을 높이기 위하여 표적 중심은 변치않고 환자 체위를 우와위로 눕혀 회전조사를 시행함으로써, 양와위 체위에서 선원궤적이 환부를 중심에 두고 횡으로(선속이 환자 두부의 좌에서 우측으로 이동함) 이동하는 방법을 통하여 얻었다.

두개부 고정프레임의 고정대는 환부를 치료대에 고정했을 때 치료대의 힘에 대한 보정이 가능하고 체위 회전후 좌표축과 일치토록 되어 있으며, 좌우 이동이 가능하여 회전조사시 선원지지체와의 충돌을 방지하도록 하였다.

방사선을 집속하는 콜리메이터는 납두께 8.5 mm에 해당하는 110mm로 일차선속을 0.3%까지 차폐하는 효과를

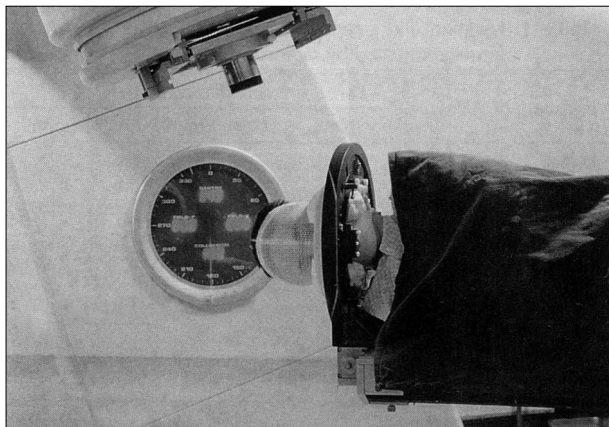


Fig. 1. The photograph show the patient's position lies on the right side for obtaining the same effect of the trans-multiarc beams in supine position. This Photon knife beam modes of multiarc and/or trans-multiarc are useful to set the beam orientations with right angles against the multiarc beam to avoid the adjacent critical organ.



Fig. 2. Collimators of variable sized cone for radiosurgery.

갓도록 하였으며, 물리적 반음영을 줄이기 위해 구경은 기하학적으로 방사선속의 확산과 일치하게 하였다(Fig. 2).

방사선 수술계획용 소프트웨어는 모델 VAX 4000-90 워크스테이션에서 실행되며, 환자의 영상자료는 두개부의 전산화단층영상(SOMARIS, SIEMENS) 자료를 광디스크(MOD)에 저장 이송하고, 화상 재구성을 독자적으로 시행하여 구한다. 표적 중심은 전 두부 영상의 윤곽과 표적 윤곽을 그린 후, 3차원적 위치해석을 통해 자동으로 얻도록 되어 있으며 전산화단층영상의 촬영시 비직교성에 대해서 교정된 좌표를 얻도록 하였다.

표적에 대한 콜리메이터 직경의 선정은 표적 윤곽을 재구성하여 얻은 입체해부학적 구조를 시각방향에서 본 표적의

Table 3. Outcome of radiosurgery in 10 cases with arterio-venous malformation

	Follow-up over 2 years		
	CO	PO	NO
≤30mm(7)	6	1	-
>30mm(3)	-	3	-

CO ; Complete obliteration, PO ; Partial obliteration, NO ; No obliteration

모양(Beam's Eye View)에 따라 결정되며, 동시에 회전중심을 확인하게 된다.

성 적

정위적 방사선 수술을 시행한 후 환자의 호전여부는 신경학적 및 6개월, 1년, 2년째에 뇌전산화 단층촬영, 뇌자기공명영상, 뇌혈관 조영술을 통한 방사선학적 소견을 토대로 하였다.

방사선학적으로 10명의 환자중 6례에서 완전 폐색, 4례에서 부분적 폐색을 보였으며, 특히 3cm이하의 작은 뇌동정맥기형 7례중 6례에서 완전 폐색을 보였다(Table 3, Fig. 3). 모든 환자에서 방사선 수술로 인한 방사선학적 합병증의 발병은 없었다.

신경학적으로 모든 환자에서 방사선 수술전에 보이던 증상들이 호전을 보였다. 방사선 수술 후 일시적인 두통이나 오심이 관찰되는 환자들은 있었으나 약물치료후 호전을 보였고 다른 특별한 합병증은 없었다.

고 찰

전통적으로 뇌동정맥기형의 치료 목적은 출혈을 방지하고 동정맥으로 가는 혈류를 차단하여 정상 조직으로 혈류를 보내는 것으로, 현재 뇌동정맥기형의 치료에는 여러 방법이 사용되고 있으나 가장 이상적인 치료 방법은 신경학적 결손 없이 완전하게 제거하는 것이다¹⁵⁾. 그러나 거대 뇌동정맥기형은 수술상 완전제거의 어려움이 있으며 갑작스런 뇌혈류의 차단으로 인한 합병증이 발생할 수 있고, 색전화의 성공률도 높지 않아 치료의 어려움이 있다⁵⁾. 또 심부에 위치하거나 기능성 뇌 중요부위의 동정맥기형은 수술적 치료가 불가능하거나 수술후 합병증 및 사망률이 높기 때문에 치료가 어려운 경우가 많았다. 그러나 정위적 방사선 수술의 치료 효과가 증명되면서 지금까지 치료 불가능했던 부위에 생긴 병소에도 안전하게 치료할 수 있게 되었다.

방사선 수술후 혈관변화의 기전을 규명하기 위한 임상적 또는 실험적 연구가 많이 시행되어 왔다¹²⁾¹³⁾¹⁸⁾. 작은 혈관

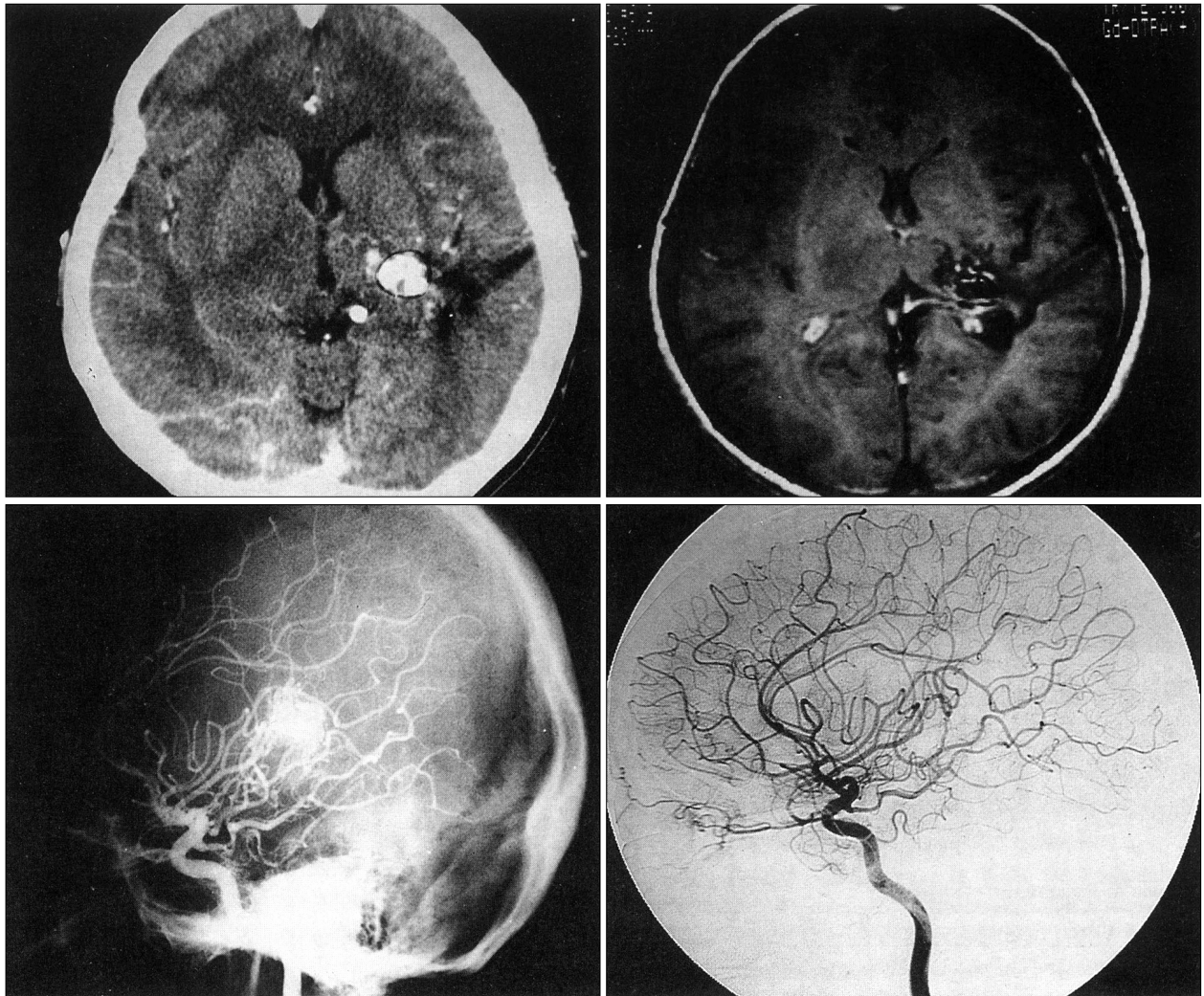


Fig. 3. A 32 year-old female with left thalamus AVM. Small-sized AVM(20mm) is fed by middle cerebral artery. At the time of treatment, 2500cGy were delivered at the center of the target(80% isodose) with a 20mm field. Upper, contrast-enhanced CT scan(left) and MR imaging(right) before radiosurgery. Lower, angiogram before(left) and after(right) radiosurgery. Angiographic follow-up 2 years showed complete obliteration of arteriovenous malformation.

의 내피조직은 큰 혈관들에서 보다 방사선에 더욱 민감하며, 조기에 나타나는 변화로는 부종, 퇴화, 그리고 내피세포들의 괴사가 발생하고 혈전형성, 혈관벽의 균열(fissuring), 점상출혈(punctate hemorrhage) 등이 있다. 작은 혈관들은 점진적으로 퇴화와 섬유화되어 림프구와 혈장세포가 혈관 주위로 침윤하게 된다. 큰 혈관들은 초기에는 퇴행성 변화를 보이지만 작은 혈관에서 보이는 것처럼 그리 심하게 영향을 받지 않는다. 손상된 내피세포들은 증식을 하게되고 결국에는 혈관 내강을 폐색시키게 된다. 또한 내측 혈관 구조물들의 증식과 혈관외막 주위의 섬유화도 볼 수 있다. 큰 혈관의 정확한 손상 기전은 확실하지 않지만 방사선 치료후 맥관벽혈관(vasa vasorum)의 점진적 경화와 폐색이 혈관벽의 구성물들에 대한 영향을 차단시키게 되어 나타나게 된다.

혈관벽의 광범위한 융합성(confluent), 섬유화, 무세포성(acellular) 괴사, 유리질 비후(hyaline thickening)가 발생되어 혈관의 완전한 폐색을 일으키게 된다. 혈관 내피세포의 증식과 더불어 혈전 또한 혈관의 폐색에 중요한 역할을 하게 된다. 방사선 수술후 혈전이 발생할 수 있지만 치료받지 않은 뇌동정맥기형에서도 볼 수 있다. 이런 경우에는 방사선 수술후 혈관내막의 손상, 와류성의 혈류, 그리고 증가된 혈소판 반응 등의 인자들에 의해 혈전의 형성이 촉진된다. 즉, 뇌동정맥기형은 혈소판의 응집이 진행중인 역동적 병변이며 방사선 수술은 이러한 인자들을 촉진시켜 혈관의 폐색을 이르게 한다.

방사선을 어떤 부위를 통해 조사할 것인가 하는 것이 방사선 수술의 가장 중요한 핵심을 차지한다. 이때의 조사 방

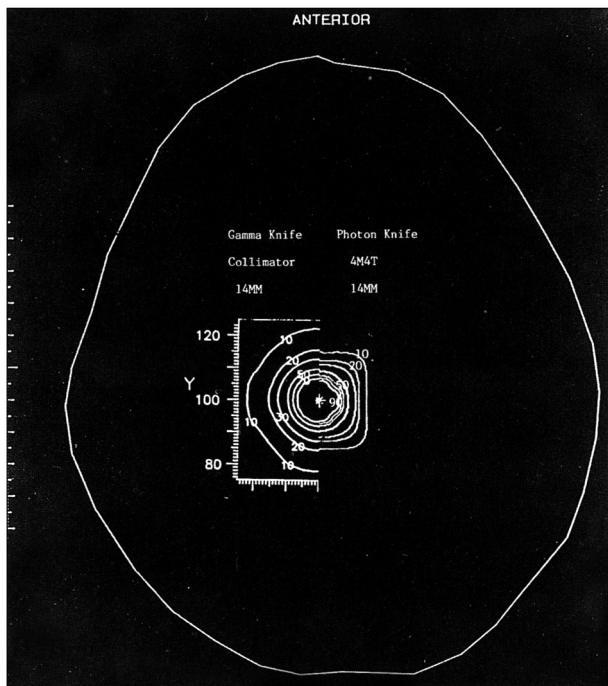


Fig. 4. The isodose curves of Linac based Photon knife radiosurgery system(right) for 14mm target field were compared to that of the Gamma knife(Left) with same target size. The projected beam angle of Linac couch were 30 and 150 degrees for the multiarc and transmultiarc beam, respectively. The irradiation angles of moving gantry were 120 degrees from 30 to 150 degrees in all multiarc and transmultiarc beams.

Table 4. Parameters for radiosurgery

Nidus size	Isocenter	Isodose	Dose(cGy)	No.
<20mm	1	80%	2500 - 3000	4
20 - 35mm	1	80%	1700 - 3000	3
>35mm	1	80%	1500 - 2000	2
45mm	2	80%	2000	

법으로는 병소를 중심으로 360°회전시키는 방법과 정해진 각도만큼만 각 대(strip)를 정해 놓고 조사하는 방법이 있다. Podgorsak 등¹⁶⁾은 병소를 중심으로 360°단회전(sin-gle rotation) 시키면서 방사선을 조사할 시에는 반대편에서 서로 중복되는 방사선(parallel opposed beams)으로 인해 주변의 정상 조직에도 많이 조사되기 때문에 이 방법은 적합치 않으며 최소한 서로의 중복을 피하면서 여러 대로 나누어 조사되어야 한다고 하였다(moving field technique). 실제로 본 대학의 포톤나이프 방사선 수술 시스템은 전환조사(transmultiarc)를 포함하는 비등면 다면궁상 조사(non-coplanar multiarc irradiation) 방식으로 표적병소를 중심으로 전후좌우 방향의 선량폭이 좁아지는 특성을 갖게 되며, 표적병소주위 선량기울기가 증가하여 병소내에만 많은 양의 방사선을 주면서 주변의 정상 조직의 방사선량을 극소화 시

킬 수 있는 장점이 있다²¹⁾.

정해진 병소내에 얼마만큼의 방사선량을 조사할 것 인가 하는 것은 뇌동정맥기형의 위치, 크기, 모양, 그리고 인접한 주변 중요 조직의 유무 등에 의해 좌우된다. 저자들에 따라 보고가 다르나 보통 2000 2500cGy 이상에서 병소의 경계에는 70 90%의 방사선량이 조사되면 혈관들의 폐색이 일어난다고 알려져 있다²⁾³⁾. 본 환자들에서는 등선량 곡선(isodose) 80%를 기준으로 하여 1500 3000cGy로 방사선을 조사하여 치료하였다(Table 4).

Siddon 등¹⁹⁾은 방사선 수술시 표적점(target point)을 정하는데 있어 뇌전산화단층촬영상에서만 잡은 표적점과는 미세한 차이가 있어 뇌동맥촬영하에서 표적점을 정하여야 한다고 하였다. 포톤나이프 방사선 수술 시스템은 표적위치결정기구로 전산화단층촬영을 사용하는 방식으로 표적점과의 미세한 차이가 생길 수 있는 한계가 있으며 앞으로 개선하여야 할 과제로 남아있다. 한편 뇌동맥 조영술이 이상적인 자료를 제공해 주지 못하고, 선택적인 경우 정위적 조영증강 뇌전산화 단층촬영이나 뇌자기공명영상이 더 나은 정보를 제공해 준다는 보고도 있다³⁾.

방사선 수술후 완전폐색율은 추적검사기간과 동정맥기형의 크기에 따라 차이가 있으나, 평균 직경이 3cm 이하의 작은 뇌동정맥기형의 경우 방사선 수술후 대략 70 80% 이상에서 치료가 가능하다.

정위적 방사선 수술후 치료의 성공여부는 잠재기간이 지난후 판단이 가능하고, 그 기간도 병소의 크기와 조사된 방사선량 등에 따라 다양하며, 의미있는 합병증의 발생도 지연성으로 나타나기 때문에 어느 일정기간동안의 정기적인 추적검사가 필요하다. 대부분의 문헌에서 방사선 수술후 적어도 2년이상의 경과관찰이 필요하다고 보고하고 있다. 만약 치료 2년후 추적 동맥촬영에서 혈관이상이 계속 보이면 재치료를 권해야 할만큼 완전 폐쇄가 필요하다고 하는 주장²⁰⁾이 있으며 불완전폐쇄도 혈관벽 비후로 인하여 의미있게 출혈을 저하시킴으로 완전폐쇄가 꼭 필요하지 않다는 주장⁸⁾도 있다.

방사선 수술의 장점은 다른 비수술적 치료방법이나 수술적 제거에 비해 합병증 발병율이 낮고 뇌동정맥기형의 자연 경과와 비교할 때에도 의미있게 낮은 유병율과 사망율을 갖는다. 수술적 치료와 비교하여 혈액의 손실, 감염, 혹은 새로운 신경학적 장애와 같은 위험이 없으며 치료에 필요한 입원기간을 단축시키고 적절히 선택된 환자에서 수술적 치료에 의한 완치율과 비슷한 결과를 얻을 수 있다.

방사선 수술의 가장 큰 단점은 일시에 뇌동정맥기형의 혈관을 제거하는 것이 아니므로 완전폐색이 이루어지기 전의

잠재기간동안 출혈이 발생할 수 있다는 것이다¹⁷⁾. 여러 문헌들마다 조금씩의 차이는 있으나 방사선 수술후 잠재기간 동안 출혈의 위험성은 5% 내외로 보고되고 있다²⁾³⁾⁴⁾.

포톤나이프 방사선 수술 시스템은 기존의 선형가속기를 이용하여 자체적으로 연구, 개발되어 향상된 치료 체계로서 병소의 모양에 따라 방사선 조사의 방향이 자유롭고 1회 치료범위가 4 40mm로 선택의 폭이 넓으며 전환조사를 포함하는 비등면 다면궁상 조사 방식으로 병소내에만 많은 양의 방사선을 주면서 주변의 정상 조직의 방사선량을 극소화시킬 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서 비록 경험한 환자군의 수는 적지만 감마나이프나 선형가속기를 이용하여 방사선 수술을 시행한 여러 저자들의 치료결과와 비교하여 결코 뒤떨어지지 않는 성적을 얻었으며 선량분포 곡선상에서도 감마나이프와 비교해서 차이가 없음을 보여주고 있다(Fig. 4). 그러나 정위적 방사선 수술의 한계를 극복하기 위해서는 병소에 대한 정확한 방사선 조사를 위한 지원 체계의 보완, 방사선 수술후 남은 혈관기형에 대한 재치료 여부, 큰 뇌동정맥기형에 대한 색전술이나 미세수술 등을 병용하는 방법¹⁴⁾이나 분할 방사선 치료⁹⁾ 같은 방법들에 대한 지속적인 연구와 분석이 필요할 것으로 사료된다. 또한 방사선 조사에 의한 위험성을 줄이면서 치료효과를 향상시키고 완전폐색이 발생할 때까지 잠재기간을 감소시킬 수 있는 새로운 방사선 물질의 개발이 필요하다.

요 약

본 논문에서 뇌동정맥기형에 대해 포톤나이프로 정위적 방사선 수술을 시행한 후 방사선학적으로 10명의 환자중 6례에서 완전 폐색, 4례에서 부분적 폐색을 보였으며, 특히 3cm이하의 작은 뇌동정맥기형 7례중 6례에서 완전 폐색을 보였다(완전 폐색율 : 85.7%).

모든 환자에서 방사선 수술로 인한 방사선학적 합병증의 발병은 없었다. 신경학적으로도 모든 환자에서 방사선 수술 전에 보이던 증상들이 호전을 보였다.

포톤나이프 방사선 수술 시스템은 이미 실험적으로 안정성이 검증된 것으로 이 논문에서 임상적으로 방사선 수술의 안정성 및 정확성을 다시 확인할 수 있었다.

정위적 방사선 수술은 지금까지 치료 불가능했던 부위에 생긴 병소, 수술이나 다른 치료방법으로 완전 제거에 실패한 경우, 노인환자나 다른 내과적 질환으로 수술이 어렵거나 수술적 치료를 거부하는 환자에서도 좋은 치료 방법으로 사용되어지며, 특히 뇌 중요부위나 심부병변에 위치한 경우

또는 최대직경이 3cm 이하의 소 동정맥기형으로 발견 당시 출혈량이 많지 않고 신경학적 결손이 경미한 환자에서 좋은 적응증이 되리라 사료된다.

- 논문접수일 : 1999년 8월 19일
- 심사완료일 : 2000년 5월 16일
- 책임저자 : 손 은 익
700 - 712 대구광역시 중구 동산동 194
계명대학교 의과대학 신경외과학교실
전화 : 053) 250 - 7306, 전송 : 053) 250 - 7356
E - mail : drson@dsmc.or.kr

References

- 1) Colombo F, Benedetti A, Pozza F, Zanardo A, Avanzo RC, Chierigo G, et al : Stereotactic radiosurgery utilizing a linear accelerator. *Appl Neurophysiol* 48 : 133-145, 1985
- 2) Colombo F, Pozza F, Chierigo G, Casentini L, Luca GD, Francescon P : Linear accelerator radiosurgery of cerebral arteriovenous malformations : An update. *Neurosurgery* 34 : 14-21, 1994
- 3) Friedman WA, Bova FJ, Mendenhall WM : Linear accelerator radiosurgery for arteriovenous malformations : the relationship of size to outcome. *J Neurosurg* : 82 : 180-189, 1995
- 4) Friedman WA, Blatt DL, Bova FJ, Buatti JM, Mendenhall WM, Kubilis PS : The risk of hemorrhage after radiosurgery for arteriovenous malformations. *J Neurosurg* 84 : 912-919, 1996
- 5) Fournier D, TerBrugge KG, Willinsky R, Lasjaunias P, Montanera W : Endovascular treatment of intracerebral arteriovenous malformations : Experience in 99 cases. *J Neurosurg* 75 : 228-233, 1991
- 6) Hartmann GH, Schlegel W, Sterm V, Kober B, Pastyr O, Lorenz WJ : Cerebral radiation surgery using moving field irradiation at a linear accelerator facility. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 11 : 1185-1192, 1985
- 7) Heifetz MD, Wexler M, Thompson R : Single beam radiotherapy knife. *J Neurosurg* 60 : 814-818, 1984
- 8) Kemeny AA, Dias PA, Poster DMC : Results of stereotactic radiosurgery of arteriovenous malformations : an analysis of 52 cases. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 52 : 554-558, 1989
- 9) Kirkeby OJ, Bakke S, Tveraa K, Hirschberg H : Fractionated stereotactic radiation therapy for intracranial arteriovenous malformations. *S Karger AG Basel*, 1996, pp10-14
- 10) Leksell L : Stereotactic radiosurgery. *J Neurology Neurosurgery Psychiatry* 46 : 797-803, 1983
- 11) Lindquist C, Steiner L : Stereotactic radiosurgical treatment of arteriovenous malformations : in Lunsford L (ed) : *Modern Stereotactic Neurosurgery*. Boston, Martinus Nijhoff, 1988, pp 491-505
- 12) Lo EH : A theoretical analysis of hemodynamic and biochemical alterations in intracranial AVMs after radiosurgery. *Int J*

- Radiat Oncol Biol Phys* 27 : 353-361, 1993
- 13) Major O, Kemeny AA, Forster DMC, Jakubowski J, Morice AH : *In vitro contractility studies of the rat middle cerebral artery after stereotactic gamma knife radiosurgery. Stereotactic and Functional Neurosurgery* 66 (suppl 1) : 17-28, 1996
 - 14) Mathis JA, Barr JD, Horton JA, Jungreis CA, Lunsford LD, Kondziolka DS, et al : *The efficacy of particulate embolization combined with stereotactic radiosurgery for treatment of large arteriovenous malformations of the brain. AJNR* 12 : 299-306, 1995
 - 15) Pikus HJ, Beach ML, Harbaugh RE : *Microsurgical treatment of arteriovenous malformations : Analysis and comparison with stereotactic radiosurgery. J Neurosurg* 88 : 641-646, 1998
 - 16) Podgorsak EB, Olive A, Pla M, Lefebvre PY, Hazel J : *Dynamic stereotactic radiosurgery. Int J Radiat Oncol Biol Phys* 14 : 115-126, 1988
 - 17) Pollock BE, Flickinger JC, Lunsford LD, Bisconette DJ, Kondziolka D : *Hemorrhagic risk after stereotactic radiosurgery of cerebral arteriovenous malformations. Neurosurgery* 38 : 652-661, 1996
 - 18) Schneider BF, Eberhard DA, Steiner LE : *Histopathology of arteriovenous malformations after gamma knife radiosurgery. J Neurosurgery* 87 : 352-357, 1997
 - 19) Siddon RI, Barth NH : *Stereotactic localization of intracranial targets. Int J Radiation Oncology Biol Phys* 13 : 1241-1246, 1987
 - 20) Spetzler RF, Martin NA : *A proposed grading system for arteriovenous malformations. J Neurosurg* 65 : 476-483, 1986
 - 21) Tae Jin Choi, Jin Hee Kim, Ok Bae Kim : *A new approach with combined stereotactic transmultiarc beams for radiosurgery based on the linear accelerator : Photon knife. J Korean Soc Ther Radiol Oncol* 14 (2) : 149-158, 1996
 - 22) Winston KR, Lutz W : *Linear accelerator as a neurosurgical tool for stereotactic radiosurgery. Neurosurgery* 22 : 454-462, 1988