

분할 정위방사선 치료 시스템 개발 연구

원자력병원 방사선종양학과

이동한 · 지영훈 · 이동훈 · 조철구 · 김미숙 · 유형준 · 류성렬

두부 프레임을 지지하는 방식으로 pedestal mounting system과 couch mounting system의 장점을 수용한, 새로운 형태의 분할 정위방사선 치료 시스템을 개발하였다. 두부 고정을 위한 프레임은 두랄루민으로 제작하였고, 카우치에 부착되게 하였다. 프레임 내에서 환자의 두부를 고정하기 위해 치아 고정장치와 3.2 mm 열프라스티크로 전두부와 후두부에 마스크를 제작할 수 있다. 정위 좌표 구현을 위한 전산화 단층촬영 localizer는 각 병원에서 많이 사용하고 있는 Brown-Roberts-Walls(B.R.W) 시스템을 사용할 수 있게 하여, 개발된 시스템의 신뢰성을 높이고 제작 단가도 낮추고자 하였다. 프레임 mounting system은 pedestal mounting system을 수정, 보완한 형태로 개발하였다. 시스템은 카우치를 지지하는 바닥 면에 고정되어 카우치에 부착된 프레임과 결합할 수 있고, 시스템과 카우치의 잠금 장치를 풀 채 자유롭게 x, y축으로 이동할 수 있다. 프레임 mounting system의 중심축은 상, 하 방향으로 이동 가능한 포인터 형태로 제작하여, 치료기의 구동 정확성을 검증하는 정도 관리에 응용 가능하다. 개발된 시스템의 재현성과 정확도 검증을 위해 아크릴 팬텀과 포인터를 제작하였고, 전산화 단층촬영 영상에서 획득한 팬텀 내 목표점의 정위 좌표를 dial-gauge와 E.C.L 필름으로 검증하였다. 실험의 결과 x축 방향의 재현성 오차는 0.71 ± 0.19 mm, y축 방향은 0.45 ± 0.15 mm, z축 방향 재현성 오차는 0.63 ± 0.18 mm로 나타났고, 최대 1.3 mm 이내의 우수한 재현성을 보였다. 연구 결과로 개발된 분할 정위방사선 치료 시스템은 재현성이 우수하고, 전체 중량이 가벼워 사용하기 쉽게 제작되었다. 특히 수정된 pedestal frame mounting system으로 설계되어 후두부 방사선 조사가 가능한 장점이 있다.

중심단어 : 분할 정위방사선 치료, 두부 프레임, 프레임 mounting system

서 론

수술이 힘든 뇌암의 방사선 치료를 위해, 상용의 선형가속기를 이용한 여러 형태의 정위적 치료 방법과 이를 구현하는 보조 장비들이 개발되었다. 이러한 정위적 방사선 치료를 시행함에 있어 정위방사선 수술의 정밀도를 그대로 유지한 채 치료 선량을 한번에 시술하지 않고, 여러 번 나누어 시술하는 분할 정위방사선 치료법^{1,2)}이 크게 각광받고 있으며 이에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다.

분할 정위방사선 치료는 방사선 치료의 생물학적 관점에서 정위방사선 수술에 비해 치료 효과가 우수하고, 주위 정상 조직에서 발생할 수 있는 여러 부작용을 줄일 수 있으며, 치료 과정 전반에 대한 부정확도의 부담도 여러 번

나누어 치료함에 따라 다소 줄일 수 있다는 장점³⁻⁵⁾이 있다. 본 연구에서는 지난 수년간의 정위방사선 수술 경험과 연구 결과를 토대로 뇌암 치료를 위한 분할 정위방사선 치료용 프레임과 프레임 mounting system, 그리고 콜리메이터 등의 각종 시스템과 시스템의 정확도를 검증하기 위한 보조 장비들을 개발하였다. 개발된 분할 정위방사선 치료 시스템은 정위방사선 수술 및 분할 치료에 이용할 뿐만 아니라, 고 에너지 방사선 발생장치의 정도관리에도 사용할 수 있게 하여 치료의 질적 수준 향상에 도움이 되고자 하였다.

재료 및 방법

1. 시스템 개발

분할 정위방사선 치료에 이용되는 효과적인 시스템의 설계를 위해 본 개발에서는 크게 두 가지 사항을 고려하였다⁶⁻⁸⁾. 첫째로 기존의 장비 사용 시, 장비 하중으로 인해 설치에 애로가 많았던 점을 인식하여 가볍고 강도가 우수

이 논문은 2002년 2월 2일 접수하여 2002년 3월 2일 채택되었음.
본 연구는 과학기술부 2001년도 원자력 연구개발 중장기 계획사업 연구비 지원으로 수행되었음.

통신저자 : 이동한, 서울시 노원구 공릉동 215-4

원자력병원 방사선종양과

Tel : 02)976-1900 E-mail : hanny@kcchsun.kcch.re.kr

이동한 외 6인: 분할 정위방사선 치료 시스템 개발 연구

한 소재를 선택하였다. 하지만 장기간 사용할 경우 장비의 마모 발생을 최소화하기 위해서는 금속재의 사용이 불가피하여, 주된 기능에 크게 영향이 미치지 않는 범위 내에서 체적을 최소화하여 무게를 줄이고자 하였다. 둘째, 시스템의 재현성이 우수하고 상용의 뇌정위 방사선 수술 장비와도 호환성이 뛰어나게 제작하여 치료 응용성을 높이고자 하였다. 이러한 개발 내용의 일환으로 전산화단층촬영 영이나 자기공명 등의 영상을 통해 정위 좌표를 구현하는 localizer는, 이미 많은 병원에서 보유하고 있고 정확성이 널리 검증된 Brown-Roberts-Wells(B.R.W) 시스템을 사용하였다. 그래서 많은 부속 장비들을 개발해야 하는 부담도 줄이고 대외적 신뢰도 또한 높이고자 하였다.

2. 시스템 정확도 검증을 위한 실험

개발된 시스템의 성능 평가를 위해서는 두 가지 측면에서 검증 작업⁹⁻¹²⁾을 시행하였다. 첫째, 개발된 프레임과 프레임 mounting system을 치료기에 부착하였을 경우, 영상을 통해 확인된 정위 좌표를 구현하는 시스템 정확도를 검증하였다. 이를 위해 먼저 치료기 회전 중심축에 대해 갠트리, 카우치, 콜리메이터 각 축의 구동 중심이 얼마간의 편차를 가지고 있는가를 측정하였고, 전체 시스템 결합 시 구동 정확도 또한 확인하였다. 둘째, 분할 정위방사선 치료는 여러 번에 나누어 방사선을 조사하는 만큼, 환자 두부를 고정하는 프레임의 구조상 정위방사선 수술용 프레임에 비해 재현성이 떨어지게 된다. 그래서 매번 치료 시 목표점 설정의 정확도를 나타내는 재현성이 중요하다. 개발된 시스템의 재현성 검증을 위해서는 임상 실험을 수행함이 타당하지만, 이번 실험에서는 팬텀을 이용한 일차적 실험을 수행하였다. 제작된 프레임의 재현성 검증을 위해 lucite로 제작된 정육면체의 팬텀을 제작하였고, 팬텀

내 가상의 목표점 설정을 위해 3 mm의 납 구슬을 다섯 군데 설치하였다. 제작된 팬텀을 사용하여 전산화단층촬영 영상을 통해 치료실에서 구현된 납 구슬 중심점의 정위 좌표와 실제 측정된 좌표간의 차이를 측정하였다. 또한 치료기 구동 정확성 검증을 위해 치료기 갠트리와 카우치에 부착할 수 있는 포인터를 제작하였다(Fig. 1). 측정에서는 0.01 mm 정확도의 dial-gauge(magnetic base)와 E.C.L 필름을 사용하였다.

결과 및 토의

1. 분할 정위방사선 치료용 두부 고정 프레임

프레임의 형태는 환자 두부의 고정과 시술에 편리하고 다른 정위 시스템과의 원활한 호환을 위해서 U자형으로 제작하였다(Fig. 2). 그리고 상부에는 치료 시 하중에 의한 프레임의 휨 방지와 두부 고정용 보조 장치들을 지탱하기 위한 수평의 지지대를 설치하였다. 프레임은 가볍고 튼튼한 소재로 강화 알루미늄인 두랄루민을 사용하였고, 전체 하중을 줄이기 위해 불필요한 부분은 제거하여 체적을 최소화하였다. 환자 두부의 하중을 지탱하여 프레임의 처짐 현상을 방지하기 위해 후두부 지지대는 섬유질 프라스틱을 사용하였다.

2. 두부 고정 장치

재현성이 우수한 환자 두부 고정방식을 채택하기 위하여 상용화된 기존의 제품 특징을 파악하고 장단점을 분석하였다. 일부 정위 방사선 시스템에서 채택하고 있는 치아 고정 방식이 재현성 확보와 미세한 움직임 방지에 효과적

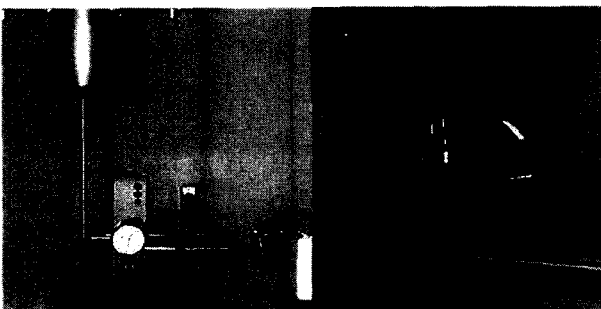


Fig. 1. Points for verification of isocentric accuracy



Fig. 2. Head fixation frame

이라 판단하여, 제작된 프레임에서는 기본적으로 치아와 턱을 고정하는 방식을 채택하였다. 제작된 치아 고정장치 (Oral appliance)는 프레임 상부의 두랄루민 지지대에 부착되고, 치아의 위치에 따라 x,y,z축 3방향으로 조절이 가능하게 제작하였다. 보다 우수한 재현성 확보를 위해 치아 고정장치와 더불어, 환자의 전두부와 후두부에 3.2 mm 열 프라스틱을 이용한 추가적인 고정 장치를 설치하였다. 열 프라스틱은 프레임에 수직하게 부착된 lucite bar를 통해 환자의 두부를 고정할 수 있게 하였다.

3. 콜리메이터

콜리메이터 Cone은 다양한 크기의 뇌종양에 대해 분할 정위방사선 치료가 가능하도록, 선원표면간거리(SSD) 100 cm에서 조사야 지름이 15 mm부터 60 mm까지 8 단계로 제작하였다(Fig. 3). 제작된 Cone의 재질은 Cerrobend를 사용하였고 길이는 144 mm로 방사선 투과율이 최대 0.5%를 넘지 않도록 하였다. 사용 시 미세한 충격에도 쉽게 파손될 수 있는 재질의 특성을 고려하여 Cone의 외장은 스테인레스 첼로 하우징(housing)하였다. 제작 공정의 정확도를 평가하기 위해 버어니어 캘리퍼로 Cone의 내, 외경을 측정하였고 이때 정확도는 ± 0.05 mm 이내로 확인되었다. 아울러 E.C.L 필름을 통한 반원(half circle) 테스트의 결과 최대 오차가 0.5 mm를 넘지 않았다. 콜리메이터 Cone을 지지하는 어댑터는 선형가속기의 차폐용 블록이 위치하는 Block Slot에 삽입할 수 있도록 제작하였다. 이러한 경우 방사선 인출 지점과 대상 목표의 거리가 가까워 반응영 특성이 우수하지만, 갠트리 회전 시 환자 두부와 위치적 여유가 없는 단점이 있다. 하지만 본 시스템이 설치될 Mevatron MD-2(Siemens, U.S.A) 선형가속기

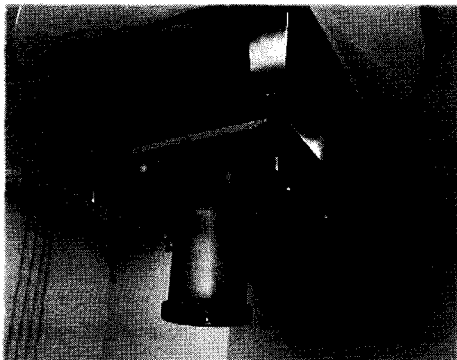


Fig. 3. Collimator system

의 경우 어댑터를 장착하고 치료 중심점까지 426 mm의 여유가 있어 치료 시 문제가 없을 것으로 판단되며, 대부분의 타 회사 제품에서도 사용이 용이할 것으로 사료된다. 어댑터의 재질은 두랄루민으로 제작하였고, Cone 장착 부위의 4개 미동나사를 사용하여 정확하게 Cone이 설치될 수 있도록 하였다.

4. 프레임 mounting system

프레임 mounting system은 치료기에서의 장착 위치에 따라 pedestal mounting system과 couch mounting system으로 구분된다. 이중 pedestal mounting system은 치료를 위한 준비 과정이 쉽고, 정확하게 위치 구현을 할 수 있는 반면 장비가 크고 무거우며, 자체 제작할 경우 제작 단가가 높게 형성된다. 세계적으로 많이 사용되고 있는 B.R.W 정위방사선 수술 시스템이 이에 해당되며, 치료 시 후방조사가 불가능한 단점이 지적되고 있다. 이에 반해 couch mounting system의 경우 두부 프레임을 치료기 카우치에 직접 결합하여 구동하므로 pedestal mounting system에 비해 가볍고 사용이 편리하며, 저렴하게 제작할 수 있다. 아울러 360° 전 방향에서 방사선 조사가 가능하여 치료의 효과를 높일 수 있다. 본 연구를 통한 일련의 분할 정위방사선 치료 시스템의 개발에서는 정위 좌표 구현의 정확성과 치료 시 위치검증을 통한 재현성 확보에 큰 의미를 둔 만큼 새로 개발할 프레임 mounting system은 couch mounting system을 기초로 하여 pedestal mounting system의 장점을 보완하는 새로운 형태로 제작하였다(Fig. 4). 즉 프레임은 카우치에 부착되며 프레임 mounting system은 카우치를 지지하는 바닥 면에 고정되어 카우치에 부착된 프레임과 결합할 수 있고, 시스템과 카우치의 잠금 장치를 풀 채 자유롭게 x, y축으로 유동할 수 있다. 이러한 형태로 시스템을 개발할 경우 couch mounting system의 가장 큰 장점인 후방 조사가 가능하고 시스템의 정확성도 높일 수 있어 두 방식의 장점을 모두 수용할 수 있다. 시스템의 재질은 두랄루민을 사용하였고, 중심축을 상, 하 방향으로 이동 가능한 포인터 형태로 제작하여 치료기의 구동 정확성을 검증하는 정도 관리에 응용 가능하도록 하였다. 시스템의 하단부에는 상용의 버어니어 캘리퍼를 부착하여 눈금자로 사용하였다. 별도의 눈금자를 제작하지 않고 상용화된 제품을 사용할 경우 제작 단가를 낮출 수 있으며, 제작상의 난이도를 줄일 수 있



Fig. 4. Frame mounting system

다. 이러한 눈금자로 정위 좌표를 실현할 경우 ± 0.05 mm의 오차 범위 내에서 프레임이 치료 위치에 고정시킬 수 있다. 상용화된 제품으로 ± 0.01 mm 정밀도의 마이크로미터도 있으나, 수평 방향으로 이동해야 하는 본 시스템에는 부적합하였다.

5. 시스템 정확도

개발된 시스템의 성능 평가를 위해 시스템 재현성 오차와 아올러 치료기 자체의 구동 오차를 분리하여 평가하였다. 제작된 팬텀을 이용한 프레임 재현성 검증 실험의 결과 x축 방향의 재현성 오차는 0.71 ± 0.19 mm, y축 방향은 0.45 ± 0.15 mm, z축 방향 재현성 오차는 0.63 ± 0.18 mm로 나타났고, 최대 1.3 mm 이내의 우수한 재현성을 보였다 (table 1). 선형가속기의 기하학적 isocenter는 갠트리와 카우치 간 0.6 mm, 카우치와 콜리메이터 간 0.84 mm 그리고 갠트리와 콜리메이터 간에는 0.25 mm의 편차를 보였다 (table 2).

전체 시스템 결합 시 기하학적 회전축의 구동 정확도를 확인한 결과 0.24~0.69 mm의 편차 분포를 나타내어 최대 1 mm를 벗어나지 않는 정확성을 보였다 (Fig. 5).

결 론

분할 정위방사선 치료와 정위방사선 수술에 사용 가능한 시스템을 개발하였다. 프레임은 카우치에 부착하되 프레임 mounting system은 치료기 바닥에

Table 1. Accuracy of Frame and Phantom Repositioning

Movement Direction	Mean (mm) \pm S. D
Lateral(X)	x = 0.71 ± 0.19
Superior(Y)	y = 0.45 ± 0.15
Occipital(Z)	z = 0.63 ± 0.18

Table 2. Isocentric Accuracy of the Three Mechanical Axes

Axis	Discrepancy (mm)
Gantry - Couch	0.60
Couch - Collimator	0.84
Gantry - Collimator	0.25

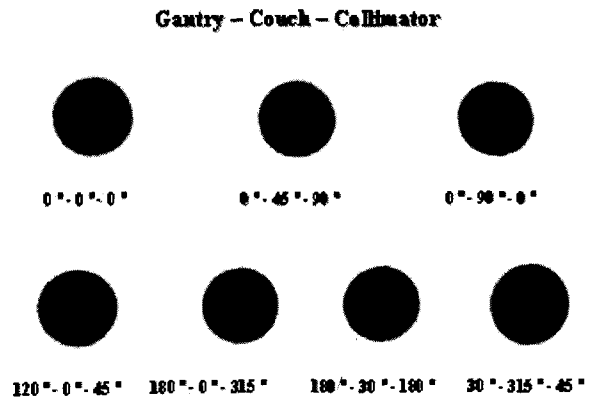


Fig. 5. Accuracy of the three axes movement

설치하여 pedestal mounting system과 couch mounting system의 장점을 최대한 수용하고 선형가속기의 정도 관리에도 응용 가능하도록 하였다. 시스템 개발에서 가장 중요하게 반영된 주안점은 첫째 정위방사선 수술을 통한 경험을 시스템 설계 과정에 반영하여 사용자의 시술 효율성과 편의성을 도모하도록 하였으며, 둘째 상용화된 제품들의 장, 단점을 파악하여 정확하고 병원 실정에 맞도록 제작하였다. 이러한 취지의 일환으로 두부 고정 프레임은 B.R.W localizer와 호환이 되게 제작하였고, 호환성을 전제한 프레임의 설계 과정에서 단면의 크기는 제한될 수밖에 없었다. 이로 인해 치료를 위한 준비 작업 시, 프레임 내부의 한정된 공간에서 두부 고정을 위한 치아 고정장치와 전, 후두부 열프라스틱을 제작해야 하는 어려움이 발생할 수 있으나, 치료 효과를 향상하기 위해서는 보다 정확하고 재현성이 보장되어야 하기 때문에 프레임

에 많은 고정 장치를 설치하였으며, 수 차례 임상 경험을 통해 고정장치 제작에 경험이 축적될 경우 큰 애로사항은 없을 것으로 판단하였다. 개발된 시스템의 성능 검증 결과, 전체 시스템의 부정확도가 ± 1.0 mm 이내로 연구 개발에 타당성을 부여할 수 있었다. 이러한 부정확도는 시스템 자체가 갖는 부정확도와 선형가속기가 갖고 있는 구동 오차가 포함된 결과이다. 그러므로 개발된 시스템이 고유적으로 가지고 있는 부정확도는 결과에서 제시된 것 보다는 다소 낮을 것이다. 보다 정확한 재현성 검증을 위해서는 본 실험의 결과를 토대로 임상 실험을 수행하여야 하며, 임상 실험의 재현성 결과를 통해 평가되어야 할 것으로 본다. 하지만 외국의 여러 사례를 통해 볼 때 팬텀 실험과 임상 실험의 재현성 결과가 크게 상이하지 않았음을 감안하면 본 연구를 통해 개발된 시스템의 재현성 오차는 최대 ± 1.0 mm를 초과하지 않을 것으로 추측된다. 이러한 분할 정위방사선 치료용 시스템 개발로 두부 종양에 대한, 보다 우수한 방사선 치료 기술이 가능하리라 생각된다. 아울러서 종래의 일반적인 방사선 치료법에서 흔히 발생하는 주위 정상 조직의 방사선 조사에 의한 부작용을 최소화 할 수 있고, 보다 저렴한 비용으로 고가의 장비를 대체하는 효과가 기대된다.

참 고 문 헌

1. Wolfgang S., Otto P., Thomas B., Günther G., Markus M., Wolfgang M.B.: Stereotactically guided fractionated radiotherapy: technical aspects. *Rad. and Oncol.* 29: 97-204 (1993)
2. Hanne M.K., Susan F.D., Nancy J.T., Edward M., Nalton F., Stephen S., Marc B., Linda F., Coleman V.M., Jay S.L.: Adaptation and verification of the relocatable Gill-Thomas-Cosman frame in stereotactic radiotherapy. *Int. J. Rad. Oncol. Biol. Phys.* 30:685-691 (1994)
3. James G.S., Pavel V.H., Howard J.L., Joanne L.B., Alan A.L., Andre A.A.: Small-field stereotactic external beam radiation therapy of intracranial lesions: fractionated treatment with a fixed-halo immobilization device. *Radiology* 176:563-565 (1990)
4. Delannes M., Daly N.J., Bonnet J., Sabatier J., Tremoulet M.: Fractionated radiotherapy of small inoperable lesions of the brain using a non-invasive stereotactic frame. *Int. J. Rad. Oncol. Biol. Phys.* 21:749-755 (1991)
5. Marwan I.H., Roger H., Per-Olov L., Lauri V.L., Nils-Erik S.: A non-invasive method for fractionated stereotactic irradiation of brain tumors with linear accelerator. *Radia. Oncol.* 17:57-72 (1990)
6. Kyriaki T., Constantin K., Constantin T.: A new non-invasive and relocatable immobilization frame for F.S.R.T. *Radia Oncol.* 47:313-317 (1998)
7. Gill S.S., Thomas D.G.T., Warrington A.P., Brada M.: Relocatable frame for stereotactic external beam radiotherapy. *Int. J. Rad. Oncol. Biol. Phys.* 20:599-603 (1991)
8. Russell J.H., Franca T.K., Charles A.P., Patrick J.S., Steven J.R.: Repositioning accuracy of a noninvasive head fixation system of stereotactic radiotherapy. *Med. Phys.* 23:1909-1917 (1996)
9. Bruce J.G., Donald M.R., Steven D.H., Walter A.H.: Maintaining accuracy in stereotactic radiosurgery. *Int. J. Rad. Oncol. Biol. Phys.* 32:1199-1203 (1995)
10. Edward S., Robert K., Michael G., Luis S., Alan H., Linda M.: Radiation therapy oncology group: radiosurgery quality assurance guidelines. *Int. J. Rad. Oncol. Biol. Phys.* 27:1231-1239 (1993)
11. Warrington A.P., Laing R.W., Brada M.: Quality assurance in fractionated stereotactic radiotherapy. *Rad. and Oncol.* 30:239-246 (1994)
12. Jen-San T., Beverly A.B., Göran K.S., Eben A.III, Chee-Wai C., Edward G.M., Jay S.L.: Quality assurance in stereotactic radiosurgery using a standard linear accelerator. *Int. J. Rad. Oncol. Biol. Phys.* 21:737-748 (1991)

Development of A Fractionated Stereotactic Radiotherapy System

Dong Han Lee, Young Hoon Ji, Dong Hoon Lee, Chul Koo Cho,
Mi Sook Kim, Hyung Jun Yoo, Seong Yul Yoo

Dept. of Radiation Oncology, Korea Cancer Center Hospital, Seoul, Korea

We invented the newly developed Fractionated Stereotactic Radiotherapy(F.S.R.T) system using combined techniques of couch mounting and pedestal mounting system. Head fixation frame consists of a milled alluminium alloy(duralumin) and is placed to the couch. This frame immobilized patient head using the dental bite, 3.2 mm frontal and occipital thermoplastic mask. To evaluate the coordinate of target isocenter, Brown-Rovert-Walls C.T localizer can be attached to this frame. And also, we developed the frame mounting system by developing the modification of pedestal mounting system. This system is fixed to couch floor and can be used to evaluate the isocenteric accuracy of gantry, couch and collimator in Q.A procedure. In order to measure the relocation accuracy, the acrylic phantom and the accurate pointers have been made. The repositioning of the targets in the phantom were estimated by comparing C.T coordinates and E.C.L portal films taken with anterior-posterior and right-left direction. From the results of experiments, the average distance errors between the target isocenter and its mean position were 0.71 ± 0.19 for lateral, 0.45 ± 0.15 for inferior-superior, 0.63 ± 0.18 for anterior-posterior. And the maximum distance error was less than 1.3 mm. The new head fixation frame and frame mounting system were non-invasive, accurately relocatable, easy to use, very light and well tolerable by the results of phantom tests. The major advantage of using this frame mounting system is complete access to any point in the patients cranium, especially posterior direction

Keyword : Fractionated Stereotactic Radiotherapy(F.S.R.T), Head fixation frame, Frame mounting system