

## 정위적 방사선 수술에서 물팬텀을 이용한 목표점 및 전달 선량확인

강영남\*, 이동준†, 권수일\*, 권양†  
경기대학교 이과대학 물리학과\*  
울산대학교 의과대학, 서울중앙병원 신경외과†

### 초 록

정위적 방사선수술 (Stereotactic radiosurgery)은 병소(region)의 위치를 정확히 결정하고 치료에 요구되는 방사선량이 정확히 전달되는 것이 중요하다. 본 연구는 이를 실험적으로 확인할 목적으로 특별히 고안된 물팬텀(water phantom)을 개발하여 Leksell정위기구 (Leksell Stereotactic Frame ; LSF)에 부착하여 방사선수술을 시행하였다. 방사선 수술에는 Leksell 감마나이프(Gamma Knife Unit ; GKU)와 LSF를 사용하였으며 실험을 위해 개발된 팬텀은 1mm두께 플라스틱의 직경 160mm의 구형으로 물을 채울수 있는 구조로 되어있다. 측정장치로서는 목표점 설정(target localization)을 위한 필름과 전달 선량(dose delivery) 측정을 위해 이온 전리함(ionchamber)을 사용하였으며 이를 팬텀의 목표점에 각각 위치시킬 수 있도록 설계하였다. 본 연구에서 목표점 확인은 허용 오차범위인  $\pm 0.5$  mm 이내에서의 값을 보였으며 선량전달값은  $\pm 3$  % 정도의 오차로 허용값내에 있음을 보여주었다. 본 연구에서 개발된 팬텀으로 측정된 값이 모두 허용 오차범위 내에 있음을 보여주었고 이로 인해 GKU 및 LSF의 주기적 QA (Quality Assurance)에 계속적으로 사용할수 있게 되었다.

### 서 론

정위적 방사선 수술은 두개내의 작은 병소에 한번에 집중적으로 고선량의 방사선을 조사하면서 주위정상조직에는 최소한의 선량만이 도달하게 하는 수술법이다.<sup>2-4)</sup> 정위적 방사선 수술에서 방사선 분포의 특징은 위치가 설정된 점으로부터 수 mm만 떨어져도 선량이 급격히 감소하는 물리적특성을 나타낸다.<sup>5, 6, 8)</sup> 이러한 방사선 수술에서 요구되는 조건은 우선 정위적 기구가 환자의 두개골에 단단히 부착되어야하며 대상 목표점의 위치가 3차원 공간상에서 정확히 결정되어야 하고 계획된 선량이 목표점에 정확히 전달되어야한다. 정위적 방사선 수술에서 품질 보증(Quality Assurance, 이하 QA)은 방사선 수술의 정확성과 안전성을 위해 매우 중요한 작업이다.<sup>7)</sup> QA방법은 일반적으로 방사선 측정장치인 필름, 이온전리함(ion chamber), 열형광선량계(thermoluminescence dosimetry, TLD)등과 조직 등가물질(tissue-equivalent material)로 구성된 팬텀을 이용하여 목표점의 위치 설정 및 전달선량 확인을 하는것이다.<sup>(21)</sup> 본 연구에서는 대상 목표점 설정(Target Localization)과 흡수선량(Dose Delivery)확인을 위해 조직 등가 물질인 물팬텀(water phantom)을 제작하여 정위적 방사선 수술을 시행하였다. 미국의 USNRC( The United States Nuclear Regulatory Commission)에 의하면 목표점 설정의 경우  $\pm 0.3$  mm이내의 값을 그리고 흡수선량 확인의 경우  $\pm 3\%$ 내의 값을 허용오차로 나타내고 있다.<sup>6, 7)</sup> 새로 개발된 팬텀은

Leksell 정위기구(Leksell Stereotactic Frame, LSF)에 부착이 가능하며 실험의 목적인 목표점 설정과 흡수선량 확인을 위해 측정장치인 필름과 이온 전리함을 각각 팬텀내에 장착할 수 있다. 목표점 확인은 X-ray를 이용해 설정된 3차원적 좌표와 방사선 조사에 의해 팬텀내에서 직접 측정된 좌표를 비교하였으며 흡수선량 확인은 컴퓨터 모의실험에 의해 계산된 선량과 팬텀내에서 직접 측정된 흡수선량을 비교하여 허용오차 범위내에 있는가를 확인하였다. 본 연구에서 사용된 프로토콜(Protocol)은 ‘한국방사선 표준측정법’<sup>15)</sup>의 ‘공기 흡수선량 보정계수  $N_D$ 의 계산’과 ‘고에너지 광자선의 기준 조건에서 물의 흡수선량 계산’ 프로토콜에 따른 것이며 계산상의 각변수는 표준측정법과 AAPM TG-21 (American Association of Physicists in Medicine, Task Group 21)<sup>13)</sup>에서 인용되거나 직접 측정된 값을 사용하였다.

## 재료 및 방법

본 실험에서 방사선 조사장치는 Co-60를 선원으로하는 감마나이프(Gamma Knife Unit)를 사용하였으며 Leksell정위기구(Leksell Stereotactic Frame)와 방사선 측정장치로서는 필름과 이온전리함을 사용하였다. 본 연구의 목적에 맞도록 개발한 새로운 물팬텀은 두께 2 mm의 플라스틱으로 구성된 직경 160 mm $\phi$ 의 구형으로 이루어져 있다. 팬텀은 측정장치를 설치할 수 있도록 2개의 반구로 분리, 결합이 가능하며 2개의 반구는 16개의 나사로 고정되어 있다. 물팬텀의 구조는 Fig. 1과 같다. 물팬텀의 양쪽에는 정위적 기구에 결합할 수 있도록 제작된 연결관(adapter)에 물팬텀을 장착하기 위해 귀(trunion)를 만들었다. 본 실험에서는 팬텀을 고정시키는 방법으로 핀을 사용하지 않고 연결관을 이용하였다. 팬텀을 고정시키기 위해 연결관을 사용함으로써 정위기구의 3차원 공간내에서 팬텀내 측정해보고자 하는 임의의 목표점의 좌표를 미리 설정할 수가 있다. 팬텀내부의 중심에는 목표점 확인을 위해 필름을 장착할 수 있도록 필름 카트릿지(cartridge)가 장착되며 흡수선량 측정을 위해 이온전리함을 장착할 수 있는 내경 6 mm $\phi$ 의 아크릴 파이프가 장착된다. 필름 카트릿지와 아크릴 파이프는 동시에 장착할 수 없으며 실험의 목적인 목표점 설정 및 흡수선량 측정에 따라 각각 장착하도록 하였다. Fig. 2는 필름 카트릿지의 구조이다. 목표점 확인을 위한 필름 카트릿지는 두께 3 mm, 60 $\times$ 40 mm<sup>2</sup>크기의 아크릴 평판이다. 필름 카트릿지에 현상된 필름에서의 목표점 확인과 위치 확인을 위해 목표점과 세곳의 모서리에 2 mm 핀을 설치하였다. 흡수선량 확인은 Fig. 3에서와 같이 목표점에 아크릴 파이프에 포함된 이온전리함을 설치하여 측정한다. 본 실험에서 사용된 아크릴파이프는 이온전리함의 방수와 정확한 위치설정을 위해 설치하였다. 이와 같은 구조에 의해 정위적 방사선수술에서 물팬텀을 이용한 3차원 공간상의 목표점확인 및 흡수선량 확인 실험을 수행하였다.

목표점 확인을 위해 사용된 필름은 개인 피폭선량측정용 필름(personal monitoring film badge; 이하 필름 배지)이다. 본 실험에서는 AGFA사의 크기 29.5 $\times$ 39.5 mm<sup>2</sup> 인 필름배지를 사용하였다. 흡수선량 측정을 위해 사용된 이온전리함은 미국 Capintec사의 Model PR-05P로서 부피 0.07 cm<sup>3</sup>(외경 0.6 mm 내경 0.4 mm)의 크기로 AE 플라스틱(Air-Equivalent conducting plastic)으로 구성되어있다. 이온전리함의 측정은 Capintec사의 Model 192 electrometer를 사용하였다.<sup>11, 12)</sup>

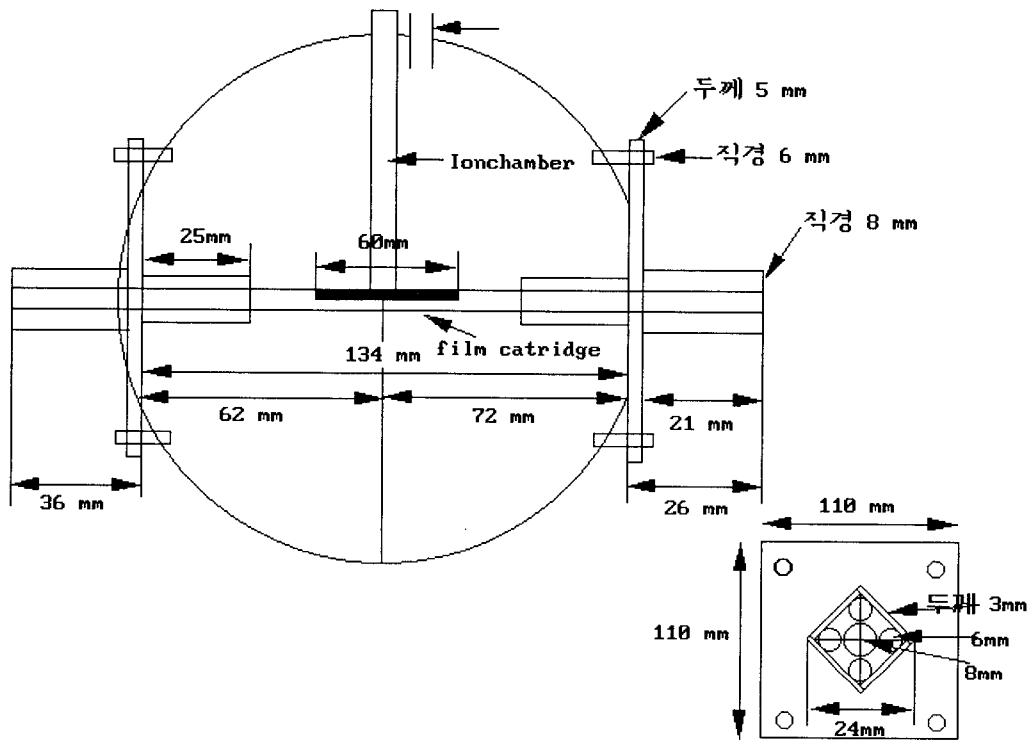


Fig. 1. Structure of the water phantom

24

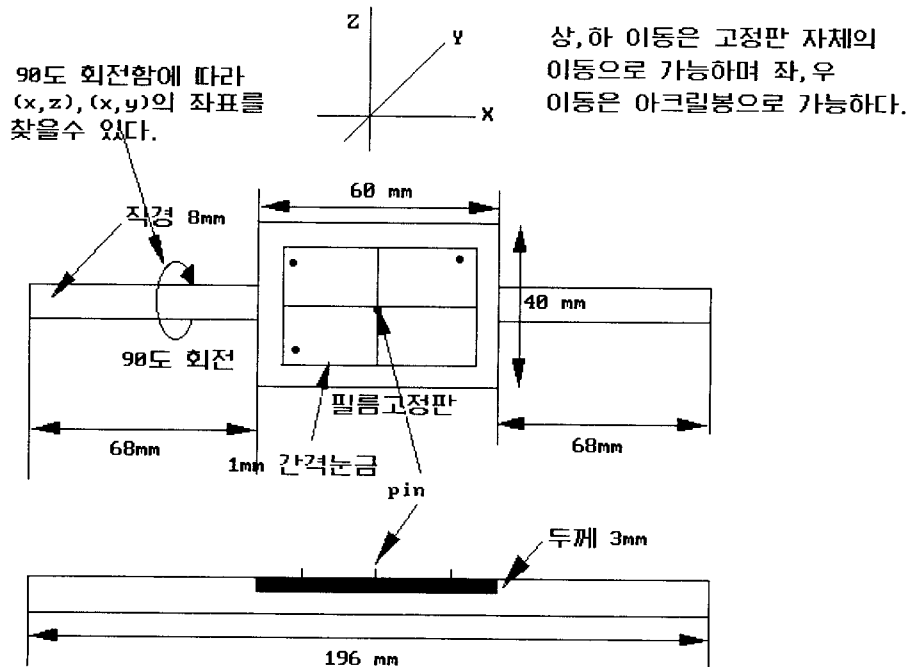


Fig. 2. Structure of the film cartridge

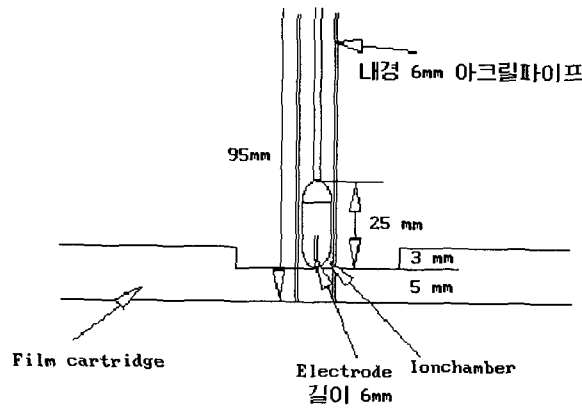


Fig. 3. Setup ionchamber for water resistance

대상 목표점 확인

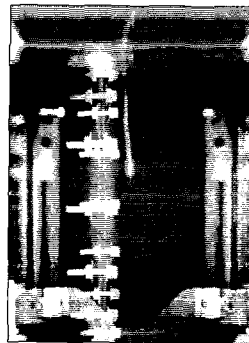
목표점 확인과정은 연결관을 사용하여 물팬텀을 정위적 기구에 부착시킨후 Fig 4.에서와 같이 X-ray 연결관을 사용하여 앞뒤면(Anterior-Posterior View ; AP), 측면(Lateral View)의 위치로 촬영하였다. 각 위치의 필름에서 팬텀내 공간상의 목표점에 대한 3차원적 좌표를 결정하였다.<sup>14)</sup> 카트릿지에 필름뱃지를 설치하고 목표점이 결정된 좌표에 물팬텀을 고정시킨후 4 mm 조준기 헬멧을 결합한 감마나이프로 약 400 rad의 방사선을 조사하였다. 위의 실험을 통하여 X-ray에 의해 결정된 좌표 ( $r_k$ )와 필름뱃지 필름으로부터 측정된 좌표( $r_m$ )를 비교하여 허용오차범위내에 있는가를 조사하였다. 필름뱃지에서 오차측정은 film digitizer( Vidar System Corporation, VXR-12)를 이용하였다. 오차의 계산은 다음과 같다.<sup>1)</sup> 3차원 공간상의 목표점에서 거리  $|\vec{r}|$  은

$$|\vec{r}| = \sqrt{dX^2 + dY^2 + dZ^2}$$

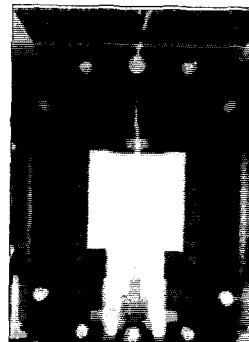
으로 정의하며 각 좌표에 대한 벡터값은

$$d\vec{X} = \vec{X}_k - \vec{X}_m, d\vec{Y} = \vec{Y}_k - \vec{Y}_m, d\vec{Z} = \vec{Z}_k - \vec{Z}_m$$

이다.<sup>1)</sup><sup>4)</sup>  $\vec{r}$  에 대한 허용오차 범위는  $|\vec{r}| \leq 0.5mm$ 이다.



A-P View



Lateral View

Fig. 4. Image for target localization used simple X-ray

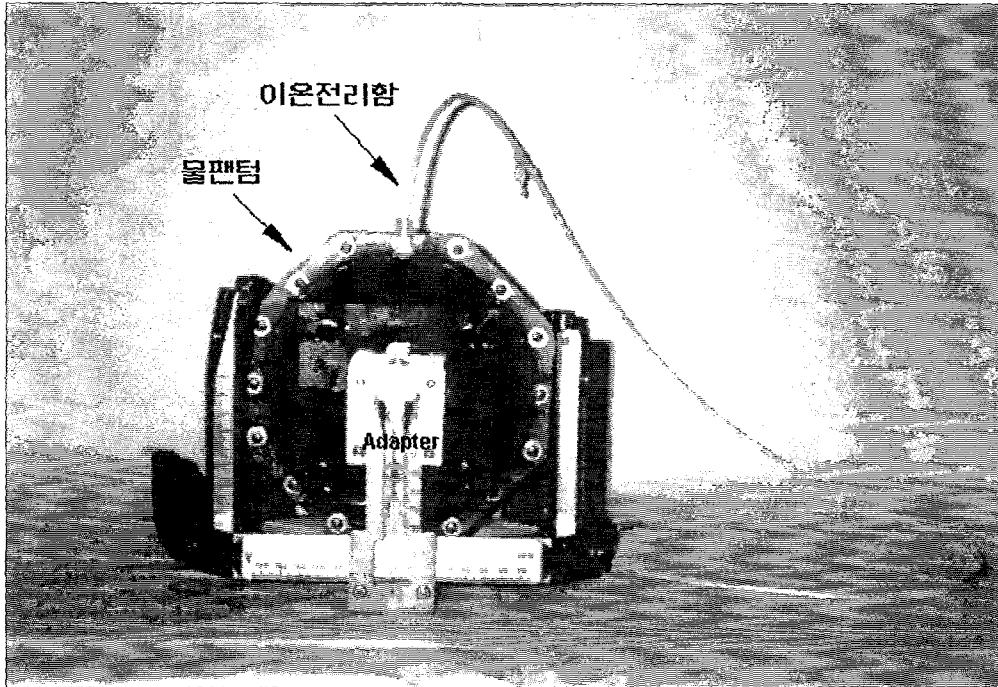


Fig. 5. Setup water phantom with Leksell stereotactic frame

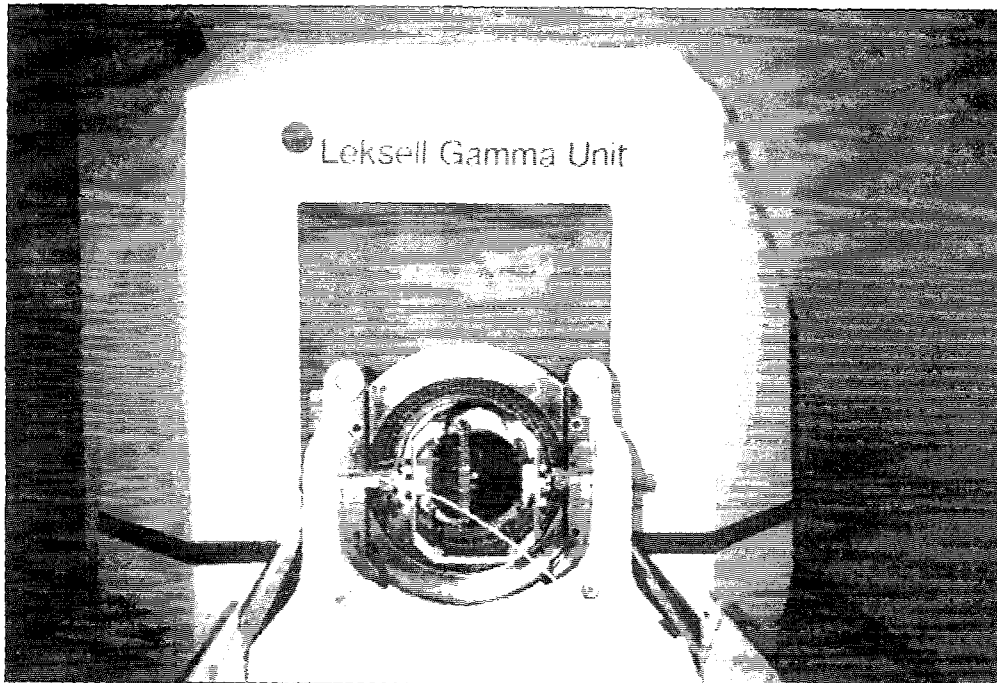


Fig. 6. 18 mm collimator helmet and water phantom adapted Gamma Knife Unit

흡수선량 확인

컴퓨터 모의실험(simulation)은 micro Vax-II 컴퓨터를 이용한 감마나이프의 지원 프로그램인 'KULA 4.5'를 사용하였다. 이 프로그램의 선량값은 18 mm 조준기 헬멧에 의한 두께 80 mm 물팬텀의 중심에서 측정된 선량을 기준으로 계산되어 있으며<sup>7, 8)</sup> 201개의 선원에 의해 조사된 선량은 31×31×31 matrix로 계산된다. 본 연구에서 사용된 계산식은 다음과 같다. 전리함의 공기흡수선량 교정계수

$$N_D = N_K(1-g)K_{air}K_m$$

에서 교정계수  $N_K^{24)}$  는

$$N_K = N_X \times (W/e) \times (1/1-g)$$

이다. 목표점에서 물의 흡수선량은 브래그-그레이(Bragg-Gray) 식을 이용하여 흡수선량 ( $\bar{D}_w$ )을 구한다.<sup>15)</sup>

$$D_w(P_{eff}) = M_u N_D (S_{w,air})_u P_u \tag{5}$$

실험 결과 및 고찰

대상 목표점 확인

X-ray를 이용한 필름으로부터 계산된 좌표 ( $r_k$ )와 직접 측정된 좌표( $r_m$ )의 결과는 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Data of calculated(가) and measured coordinate( $r_m$ )

	$r_k$ (mm)	$r_m$ (mm)
X	110	110±0.2
Y	100	100±0.1
Z	107	107±0.2

실험 방법에서 논의한 수식에 의해

$$d\vec{X} = \pm 0.2, d\vec{Y} = \pm 0.1, d\vec{Z} = \pm 0.2$$

이며 그러므로,

$$|\vec{r}| = \sqrt{dX^2 + dY^2 + dZ^2} = 0.3 \text{ mm}$$

이다.

위의 결과는 전체 허용오차 범위인 0.3 mm 내의 값을 나타내고 있다. Fig. 6은 4 mm 조준기 헬멧을 사용한 방사선 조사에 의해 목표점이 설정된 필름이다. 필름에서 중심의 흰점이 목표점이며 오른쪽과 아래쪽 모서리의 검은점은 위치확인을 위해 설치한 핀의 자취이다. 흰점을 중심으로 이루어진 원형의 흑점은 조사된 선량의 분포이다. 이 필름에서 목표점과 조사된 선량의 중심이 일치되었음을 알 수 있다. 위의 결과와 같은 오차는 실험장치 조작상의 오차에 의한 것으로 분석된다.

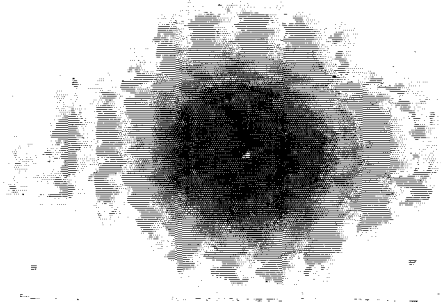


Fig. 6. 목표점이 확인된 필름

흡수 선량 확인

본 계산에서 사용된 전리함의 조사선량교정계수  $N_X$ 의 값은 본 실험에서 사용된 이온 전리함에 대하여 ‘국립보건원 식품의약품 안전본부’에서 교정된 값을 사용하였다. 교정된  $N_X$ 의 값은  $N_X=0.013$  c/kg/div이다. 물에서의 흡수선량은 다음과 같다. 전리함의 공기 커마 교정 계수  $N_K$ 는  $N_K=N_X \times 33.97 \times 1.003$ (Gy/div)이다. ( $W/e=33.97 \pm 0.06$  J/C, Co-60에 대해  $g=0.003$ ) 본 실험에서 전리함벽과 선량 증가 두겹의 물질을 동일 물질로 고려하였으므로 전리함벽에서 발생된 전자의 전리비  $\alpha=1$ 의 값으로 계산하였다. 본 실험에서 사용된 Capintec PR-05P 이온전리함에 대한 각각의 변수는 다음과 같다.

저지능비 (공기/벽)  $S_{air, wall} = 1.005$

에너지 흡수 계수비 (벽/공기)  $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{ca, air} = 1.001$

$\alpha=1$  이므로 측정점 물질 m의 커마  $K_m$ 은

$$K_m = \alpha S_{air, wall} (\bar{\mu}_{en}/\rho)_{wall, air} + (1-\alpha) S_{air, ca} (\bar{\mu}_{en}/\rho)_{ca, air} = 1.005 \times 1.001 = 1.006 \text{ 이다}$$

전리함에 대한 교정용 방사선의 투과율  $K_{att}$ 는  $K_{att} = 0.988$ 이므로 전리함의 흡수 선량 교정 계수  $N_D$ 는  $N_D = N_X \times 34.071 \times 0.997 \times 0.993$ (Gy/div)이며, 교란보정계수  $P_u$ 는

$$S_{wall, air} = 0.995, (\bar{\mu}/\rho)_{w, wall} = 1.110, S_{w, air} = 1.133$$

$$P_u = \frac{\alpha S_{wall, air} (\bar{\mu}_{en}/\rho)_{w, wall} + (1-\alpha) S_{w, air}}{S_{w, air}} = 1.10445$$

이다. 그러므로, 물팬텀에서의 흡수 선량은

$$D_w(P_{eff}) = M_u N_D (S_{w, air})_u P_u = M_u \times N_X \times 37.239 \text{ Gy}$$

Table 2. Data of absorbed dose in target

$M_u^0$ (nC)	$D_w$ (Gy)
15.01	7.24
30.19	14.56
45.37	21.89
60.54	29.20
75.72	36.48

정위적 방사선 수술에서 물팬텀을 이용한 목표점 및 전달 선량확인

로 계산된다.  $M_u$ 는 측정값( $M_u^0$ )에 기온·기압보정계수( $P_{TP}$ ), 습도보정계수( $K_h$ ), 재결합보정계수( $P_s$ )를 적용한 값으로서  $M_u = M_u^0 \cdot P_{TP} \cdot P_h \cdot P_s = M_u^0 \cdot 0.9969 \text{ div/min}$  이다. 위의 결과식에 의한 흡수선량 결과는 Table 2와 같다.

물에서의 흡수선량( $D_w$ )과 계산값( $D_c$ )의 오차율은 다음 Table 3 및 Fig. 7과 같다.

Table 3. Data of absorbed( $D_w$ ) and calculated dose( $D_c$ )

$D_w$	$D_c$ (Gy)	오차 (%)
7.24	7.2	+0.5
14.56	14.4	+1.1
21.89	21.6	+1.3
29.20	28.8	+1.3
36.48	36.0	+1.3

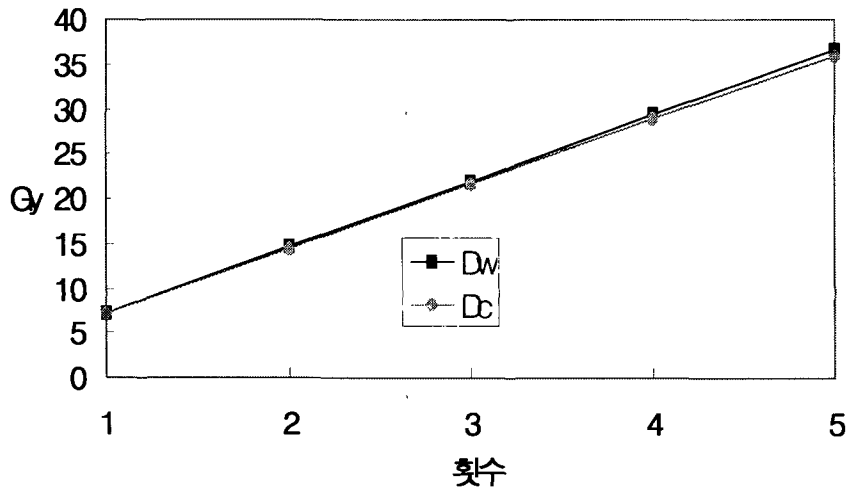


Fig. 7. Graph of comparison absorbed dose( $D_w$ ) and calculated dose( $D_c$ )

결 론

정위적 방사선 수술에서 흡수선량의 정확성은 대상 목표점에 대한 정확한 위치 측정이 선행되어야 한다. 본 실험의 결과 3차원 공간상에서 결정한 목표점의 좌표와 방사선 조사에 의해 측정된 좌표는 허용오차범위  $\pm 0.3 \text{ mm}$  이내인  $\pm 0.3 \text{ mm}$ 의 결과를 나타내었으며 흡수선량 측정에서 컴퓨터 모의 실험에 의해 계산된 선량값과 직접 측정된 선량값이 허용오차  $\pm 3\%$  내인 평균  $\pm 1.1\%$ 이다. 결론적으로 본 실험에서 개발된 물팬텀은 이온전리함을 이용한 방사선 수술에서 재연성이 뛰어나고 전리함을 이용한 측정이 용이하여 감마나이프 (Gamma Knife Unit)와 Leksell 정위기구 (Leksell Stereotactic Frame)의 주기적인 QA (Quality Assurance)에 사용할 수 있게 되었다.



## 참 고 문 헌

1. Michael e. Schell, et al. : Stereotactic radiosurgery, Report of Task Group 42 : June(1995)
2. Dan G Leksell. : Stereotactic radiosurgery : Neurological research, 9, 60-68(1987)
3. Leksell, L. : The stereotactic method and radiosurgery of the brain. : Acta Chir Scand. 102, 316-319(1951)
4. Daniel Yeung, et al. : Systematic analysis of errors in target localization and treatment delivery in stereotactic radiosurgery. : Int.J.Radiat.Oncol.Phys., 28(2), 493-498(1994)
5. Errin B.Podgorsak. : Radiosurgery with phantom beams : Physical aspect and adequacy of linear accelerators. : Radiotherapy oncol, 17, 349-358(1990)
6. Ann H. Maitz. : Quality assurance for gamma knife stereotactic radiosurgery. : Int.J. Radiat. Oncol. Biol, 32(5), 1465-1471(1995)
7. Harold W.Berk. : Quality assurance of Leksell gamma knife units. : Stereotact Funct Neurosurg, 57, 106-112(1991)
8. Andrew Wu. : Physics of gamma knife approach on convergent beams in stereotactic radiosurgery. : Int.J.Radi.Oncol.Biol.Phys., 18(4), 941-949(1990)
9. Wu, A. : Physics and dosimetry of the gamma knife. : Neurosurg.Clin.N.Am., 3(1), 35-50(1992)
10. Elekta instrument. : Leksell stereotactic systems user's manual : (1990)
11. Robert Gastorf, et al. : Cylindrical chamber dimensions and the corresponding values of  $A_{wall}$  and  $N_{gas} / (N_x A_{ion})$ . : Med. Phys., 13(5), sep/oct (1986)
12. Capintec Inc. : Instruction manual for capintec exposure rate meter model 192 : (1983)
13. AAPM Task Group 21 . : A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams. : Med.Phys., 10(6)nov/Dec, 741-771(1983)
14. Christopher F. Serago, et al. : Stereotactic target point verification of an X-ray and CT localizer. : Int.J.Radi. Oncol. Biol. Phys., 20(3), 517-523(1991)
15. 한국의학물리학회. : 방사선 표준 측정법 : (1990)
16. David G.T.Thomas : Stereotactic and Image Directed surgery of Brain Tumours. : Churchill Livingstone. 1-25

## Target Localization and Dose Delivery Verification used a Water Phantom in Stereotactic Radiosurgery

Young Nam Kang\*, Dong Joon Lee<sup>†</sup>, Soo Il Kwon\*, Yang Kwon<sup>†</sup>

Dept. of Physics, Kyonggi University\*

Dept. of Neurological Surgery, Asan Medical Center, Ulsan University<sup>†</sup>

### Abstract

It is important that the precise decision of the region and the accurate delivery of radiation dose required for treatment in the stereotactic radiosurgery. In this research, radiosurgery was carried with Leksell stereotactic frame(LSF) which is especially developed water phantom to verify in experiment. Leksell Gamma Knife and LSF are used in radiosurgery is the spherical water phantom has the thickness of 2 mm, the radius of 160mm. The film for target localization and ionchamber for dose delivery was used in measurement instruments. We compare the coordinate of target which is initialized by biplanar film with simple X-ray to the coordinate of film measured directly. The calculated dose by computer simulation and the measured dose by ionization chamber are compared. In this research, the target localization has the range  $\pm 0.3\text{mm}$  for the acceptable error range and the absolute dose is  $\pm 3\%$  for the acceptable error range. This research shows that the values measured by using the especially manufactured phantom are included the acceptable error range. Thus, this water phantom will be used continuously in the periodic quality assurance of Gamma Knife Unit and Leksell Stereotactic Frame.