

## Carbon Fiber as Material for Radiation Fixation Device : A comparative study with acrylic

Eui Kyu Chie\* · Jang Pil Park\* · Soon Nyung Huh\* · Semie Hong† ·  
Suk Won Park‡ · In-Ah Kim\*§ · Hong-Gyun Wu\*§|| ·  
Jae-Sung Kim\*§|| · Wee-Saing Kang\*|| · Il Han Kim\*§|| ·  
Sung Whan Ha\*|| · Charn Il Park\*||

\*Department of Radiation Oncology, Seoul National University College of Medicine

†Department of Radiation Oncology, Konkuk University College of Medicine

‡Department of Radiology, Chung-Ang University College of Medicine

§Cancer Research Institute, Seoul National University

||Institute of Radiation Medicine, Medical Research Center, Seoul National University

### 고정기구 재질로써 탄소 섬유와 아크릴의 방사선량 감쇄 영향 비교

지의규\* · 박장필\* · 허순녕\* · 홍세미† · 박석원† · 김인아\*§ · 우홍균\*§|| · 김재성\*§|| ·  
강위생\*|| · 김일한\*§|| · 하성환\*|| · 박찬일\*||

\*서울대학교 의과대학 방사선종양학교실, †건국대학교 의과대학 방사선종양학교실,  
‡중앙대학교 의과대학 방사선과학교실, §서울대학교 암연구소, ||서울대학교 의학연구원 방사선의학연구소

(2004년 5월 6일 접수, 2005년 2월 10일 채택)

**Abstract** - Radiation absorption parameters of carbon fiber panel were measured in comparison to acrylic panel. 30x30cm sized 2mm thick carbon fiber panel and identical sized 6mm thick acrylic panel were placed in tray holder position and 0cm, 5cm, 10cm from surface of phantom. Radiation field size was 10x10cm. 50MU of 4MV photon was irradiated to the phantom with dose rate of 300MU/min. Source-to-phantom distance was 120cm. Radiation dose was measured with 0.6cc Farmer-type ionization chamber with 1cm build-up. Measurement was repeated thrice and normalization was done to the dose of the open field. Radiation transmission rate of carbon fiber panel is approximately 1% lower than acrylic panel of equivalent thickness. However, considering the strength of the material, transmission rate is higher for carbon fiber panel. Although carbon fiber panel increases the radiation dose when attached to the surface for about 2%, it normalizes the radiation dose to 97-99% of irradiated dose which could have been lowered to as much as 5-7.5% with acrylic panel. As carbon fiber panel is stronger than acrylic panel, radiation fixation device could be made thinner and thus lighter and furthermore, with increased radiation transmission. This in turn makes carbon fiber more ideal material for radiation fixation device over conventionally used acrylic.

**Key words** : carbon fiber, fixation device, radiation transmission rate

**요약** - 방사선치료용 고정기구 재질로 사용되는 아크릴을 탄소 섬유로 대체할 목적으로 양 재질의 특성을 방사선량 감쇄와 모의촬영 및 고에너지 확인 영상 측면에서 비교 분석하였다. 30x30cm 크기의 2mm 두께의 탄소 섬유판과 6mm 두께의 아크릴판을 선형가속기의 차폐 선반 위치 및 폴리스티렌 팬텀 표면에서 0cm, 5cm, 10cm에 위치시키고, 0.6cc Farmer형 이온전리함으로 측정을 시행하였다. 10x10cm 조사야에 4MV 광자선을 이용하여 선량률 300MU/min로 50MU를 조사하였다. 선원-팬텀 거리는 120cm였으며, 선량보강은 1cm이었다. 각각의 위치에서 각 재질을 두께를

달리하는 중첩 조건에서 3회 반복측정 하였으며, 각각의 경우 대조군인 개방 조사야에 대한 투과율을 얻었다. 영상소견은 통상적 모의촬영조건에서 비교하였다. 동일 두께의 탄소 섬유는 아크릴보다 방사선 감쇄율이 약 1% 정도 높으나, 동일 강도에서는 방사선 감쇄율이 낮았다. 탄소 섬유는 아크릴과 비교하여 팬텀 표면에 밀착된 경우 선량을 약 2%정도 증가시키나, 표면에서 떨어져 있는 경우에는 아크릴에 의하여 작게는 2~3% 많게는 5~7.5% 정도 감소된 체내 방사선량 분포를 97~99% 정상화시켰다. 임상적으로 아크릴판 20 mm 판 2장이 중첩된 고정기구 부분을 방사선이 통과하는 상황이 존재하며, 이 경우 탄소 섬유 8 mm의 방사선 투과율은 폴리스티렌 팬텀 표면 0, 5, 10 cm에서 각각 1.008, 0.991, 0.976이며 아크릴 40mm는 각각 0.916, 0.855, 0.815으로, 아크릴에 의해 8~18.5% 정도 감소된 체내 방사선량 분포를 2.4% 이내 감소로 호전시켜 87~100% 정상화시킴을 확인하였다. 탄소 섬유의 모의촬영 영상이 통상 영상소견에 주는 악영향은 없었다. 탄소 섬유는 아크릴에 비하여 고정기구 재질로서의 두께 및 무게 감소, 강도유지, 체내 방사선량 감쇄 측면에서 월등하므로 향후 적극 이용되어야 하겠다.

중심어 : 탄소 섬유, 고정기구 재질, 방사선 투과율

## 서론

방사선 치료에는 다양한 고정기구가 사용되며, 비교적 값이 저렴하며, 가공이 용이하고, 물리학적 특성이 잘 알려져 있는 아크릴(polymethylmethacrylate, PMMA)이 가장 빈번하게 사용되어 왔다. 아크릴은 많은 장점이 있으나, 경도가 떨어져서 임상에서 활용되기 위해서는 10mm 이상의 두께가 필요하며, 이럴 경우 아크릴의 투과에 따른 심부 선량 감소와 최대 선량 깊이 변화 및 피부 선량 증가 등의 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 일부에서 이러한 아크릴의 제한점을 극복할 수 있는 소재로 경도가 매우 높고, 경량이면서 방사선 투과성이 우수한 탄소 섬유가 대두되었다[1]. 본 연구에서는 기존에 널리 사용되고 있는 아크릴과 탄소 섬유의 특성을 방사선량 감쇄 및 모의촬영 영상적 측면에서 비교 분석하였다.

## 재료와 방법

Clinac 4/100 (Varian, USA)에서 출력되는 4MV 광자선 50MU를 300MU/min으로 조사하여 측정하였다. 선원-팬텀간 거리는 120cm로 조사야 크기는 팬텀 표면에 10x10cm로 콜리메이터 크기는 8.3x8.3cm 였다. 측정에 사용된 팬텀은 폴리스티렌 팬텀 (PD-339, Capintec, USA)으로, 선량 보강은 1cm였다. 선량 측정에는 0.6 cc Farmer형 이온함 (Capintec, USA)과 Dose-Dose rate meter (NE, 2620) 선량계를 이용하였다.

각각 30x30cm 크기의 2mm 두께의 탄소 섬유

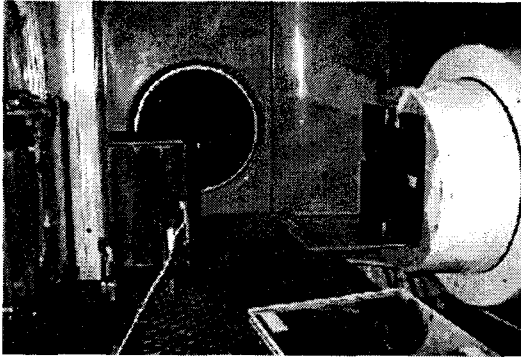
판 (한국화이버)과 6mm 두께의 아크릴판의 투과선량을 측정하였다. 고정 재질을 선형가속기 차폐선반, 폴리스티렌 팬텀 표면, 폴리스티렌 팬텀 표면에서 5cm, 폴리스티렌 팬텀 표면에서 10cm 등 상이한 5개의 위치에서 측정하였다.

각각의 위치에서 각 재질을 두께를 달리하는 중첩 조건으로 측정을 시행하였다. 탄소 섬유 박판의 두께를 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20mm로 변화시켰고, 아크릴 판의 두께는 6, 12, 18mm의 경우에서 측정을 시행하였다. 각각의 경우 개방 조사야를 대조군으로 하여, 투과율을 얻었다. 독립적으로 각 조건에서 측정을 3회 반복하였으며, 측정 시의 온도 및 기압에 따라 측정값 보정을 시행하였다. 각각의 두께별 측정을 완료한 이후 개방 조사야에 대하여 다시 3회의 추가 측정을 시행하여, 측정값의 재현성을 확인하였다. 위치별 측정시의 배치는 Fig. 1에 도식하였다.

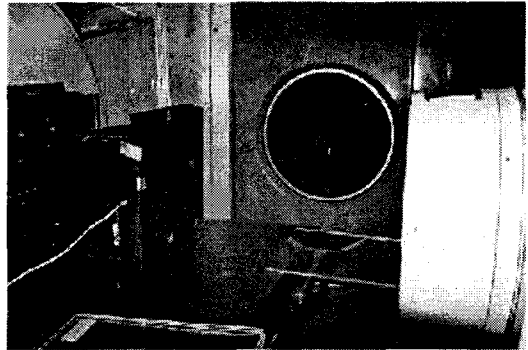
영상 실험의 경우, 탄소 섬유 2mm 판의 중첩 상태 투시 영상 및 인형 팬텀에서의 투시 영상 및 고에너지 확인 영상을 획득하였다. 납선에서 위로 2mm 박판을 1cm 간격을 두고 10장이 중첩된 상태에서 투시 영상 및 고에너지 확인 영상을 획득하여, 탄소 섬유의 방사선 투시영상 및 고에너지 확인 영상에 미치는 변화를 확인하였다. (Fig. 2)

## 결과 및 논의

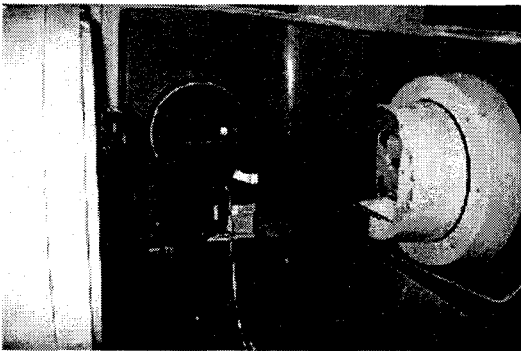
1. 아크릴과 탄소 섬유의 방사선 투과특성 측정 결과  
재료와 방법에 언급한 각각의 조건에서 시행한



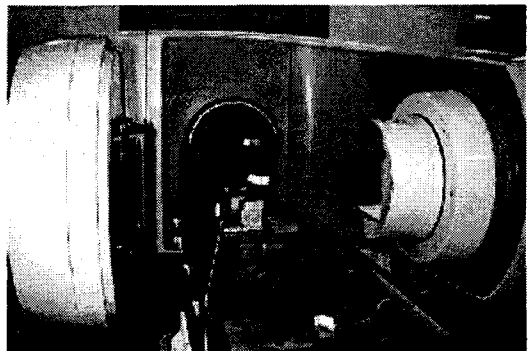
A. Device at tray holder.



B. Device at phantom surface.



C. Device at 5cm from phantom surface.



D. Device at 10cm from phantom surface.

Fig. 1. Set-ups for transmission rate measurements of carbon fiber and acrylic plate of variable thickness at variable location.

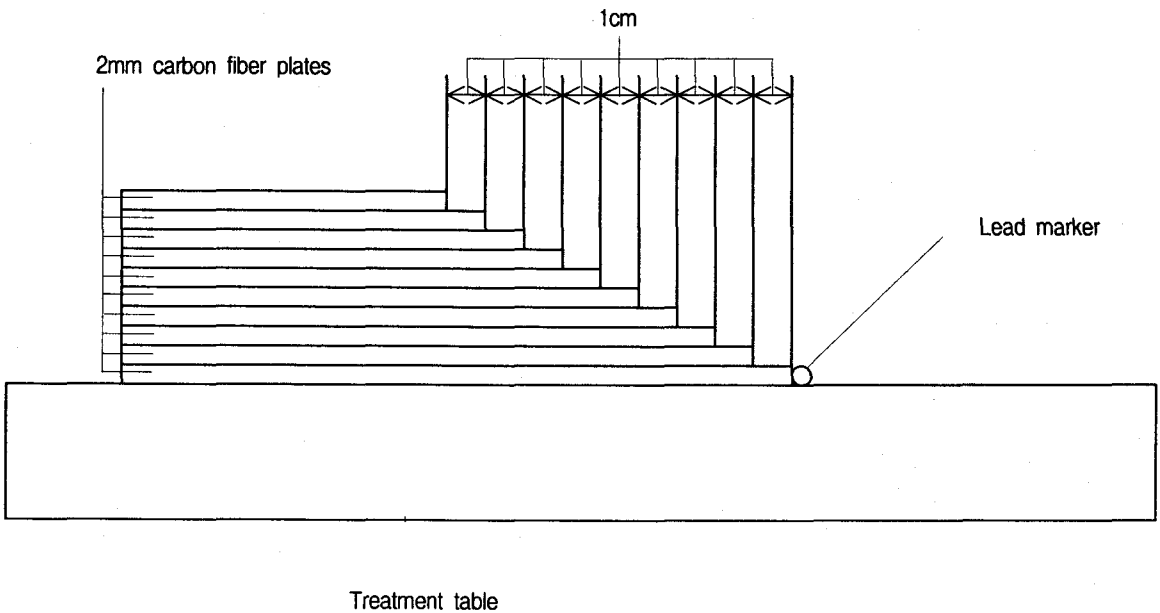


Fig. 2. Set-ups for transmission rate measurements of carbon fiber and acrylic plate of variable thickness at variable location.

Table 1. Measured dose with or without the device material of respective thickness at each location.

## A. Device at tray holder.

Carbon fiber	1	2	3	Average	TR*
Open	6.713	6.704	6.715	6.711	1.000
2 mm	6.600	6.597	6.599	6.599	0.983
4 mm	6.499	6.516	6.513	6.509	0.970
6 mm	6.417	6.429	6.426	6.424	0.957
8 mm	6.325	6.330	6.332	6.329	0.943
10 mm	6.238	6.241	6.246	6.242	0.930
12 mm	6.148	6.146	6.141	6.145	0.916
14 mm	6.051	6.050	6.058	6.053	0.902
16 mm	5.957	5.954	5.954	5.955	0.887
18 mm	5.854	5.856	5.863	5.858	0.873
20 mm	5.766	5.770	5.766	5.767	0.859
Open	6.713	6.715	6.708	6.712	1.000

Acrylic	1	2	3	Average	TR*
Open	6.712	6.707	6.703	6.707	1.000
6 mm	6.467	6.481	6.485	6.478	0.966
12 mm	6.243	6.250	6.247	6.247	0.931
18 mm	6.027	6.020	6.026	6.024	0.898
Open	6.735	6.737	6.739	6.737	1.004

TR\* transmission rate

## B. Device at phantom surface.

Carbon fiber	1	2	3	Average	TR*
Open	7.124	7.123	7.123	7.123	1.000
2 mm	7.252	7.251	7.254	7.252	1.018
4 mm	7.261	7.261	7.261	7.261	1.019
6 mm	7.223	7.223	7.226	7.224	1.014
8 mm	7.179	7.176	7.179	7.178	1.008
10 mm	7.129	7.128	7.131	7.129	1.001
12 mm	7.075	7.075	7.079	7.076	0.993
14 mm	7.023	7.025	7.023	7.024	0.986
16 mm	6.968	6.969	6.968	6.968	0.978
18 mm	6.914	6.916	6.916	6.915	0.971
20 mm	6.863	6.860	6.860	6.861	0.963
Open	7.107	7.106	7.111	7.108	0.998

Acrylic	1	2	3	Average	TR*
Open	7.106	7.108	7.111	7.108	1.000
6 mm	7.232	7.232	7.236	7.233	1.018
12 mm	7.120	7.122	7.125	7.122	1.002
18 mm	6.994	6.997	6.998	6.996	0.984
Open	7.109	7.112	7.113	7.111	1.000

TR\* transmission rate

## C. Device at 5cm from phantom surface.

Carbon fiber	1	2	3	Average	TR*
Open	7.200	7.202	7.200	7.201	1.000
2 mm	7.292	7.291	7.291	7.291	1.019
4 mm	7.271	7.269	7.269	7.270	1.010
6 mm	7.204	7.208	7.205	7.206	1.001
8 mm	7.130	7.133	7.134	7.132	0.991
10 mm	7.059	7.061	7.062	7.061	0.981
12 mm	6.975	6.977	6.977	6.976	0.969
14 mm	6.903	6.900	6.903	6.902	0.959
16 mm	6.824	6.827	6.825	6.825	0.948
18 mm	6.757	6.757	6.754	6.756	0.938
20 mm	6.677	6.679	6.680	6.679	0.928
Open	7.198	7.196	7.199	7.198	1.000

Acrylic	1	2	3	Average	TR*
Open	7.200	7.199	7.199	7.198	1.000
6 mm	7.238	7.241	7.240	7.240	1.006
12 mm	7.063	7.061	7.060	7.061	0.981
18 mm	6.876	6.876	6.877	6.876	0.955
Open	7.194	7.196	7.197	7.196	1.000

TR\* transmission rate

## D. Device at 10cm from phantom surface.

Carbon fiber	1	2	3	Average	TR*
Open	7.195	7.197	7.198	7.197	1.000
2 mm	7.249	7.248	7.249	7.249	1.007
4 mm	7.191	7.192	7.194	7.192	0.999
6 mm	7.107	7.110	7.107	7.108	0.988
8 mm	7.021	7.020	7.021	7.021	0.976
10 mm	6.926	6.931	6.929	6.929	0.963
12 mm	6.838	6.840	6.838	6.839	0.950
14 mm	6.748	6.747	6.751	6.749	0.938
16 mm	6.661	6.661	6.662	6.661	0.926
18 mm	6.576	6.579	6.581	6.579	0.914
20 mm	6.493	6.496	6.498	6.496	0.903
Open	7.188	7.190	7.189	7.189	0.999

Acrylic	1	2	3	Average	TR*
Open	7.187	7.191	7.187	7.188	1.000
6 mm	7.153	7.158	7.157	7.156	0.996
12 mm	6.938	6.940	6.938	6.939	0.965
18 mm	6.722	6.726	6.725	6.724	0.935
Open	7.185	7.187	7.186	7.186	1.000

TR\* transmission rate

측정 결과는 Table 1과 같으며, 조건별 결과 그림은 Fig. 3와 같다.

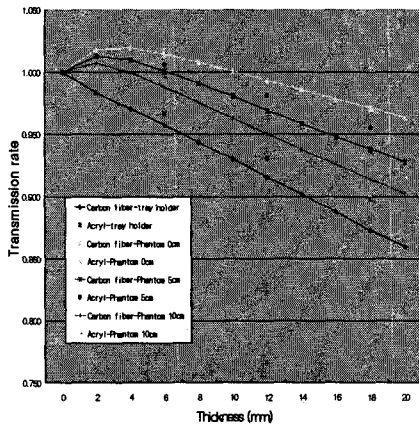


Fig. 3. Transmission rate of carbon fiber and acrylic plate of variable thickness at variable location.

탄소 섬유 2mm 박판의 중첩 시 측정깊이에 따른 감쇄율 또는 방사선 투과율의 변동이 없으므로, 탄소 섬유 재질의 일관성을 확인할 수 있었다. 후방 산란의 영향을 배제한 조건에서 동일 두께의 탄소 섬유는 아크릴 보다 방사선 감쇄율이 약 1% 정도 높았다. 두께 6mm에서의 투과율이 탄소 섬유는 0.957 (4.3% 감쇄), 아크릴은 0.966 (3.4% 감쇄)으로 탄소 섬유의 전자밀도가 탄소(C)와 수소(H)의 공유결합물인 아크릴에 비하여 높음에 기인하는 것으로 생각된다. 아크릴의 인장 강도가 4g/d이며, 비중이 1.15로 알려져 있는 것에 반하여, 탄소 섬유의 인장 강도는 조성에 따라서 10-20g/d인 것으로 알려져 있으며, 비중은 1.5-2.1인 것으로 알려져 있다[2,3]. 본 실험에서 이용된 탄소 섬유판의 인장 강도는 380Kgf/mm<sup>3</sup>이고, 밀도는 1.77g/cm<sup>3</sup>로, 일반적인 고강력 탄소 섬유판의 범주에 속하는 재질이었다. 밀도와 인장 강도를 기준으로 할 때, 탄소 섬유 2 mm 박판 2장의 구조물이 아크릴 12~20 mm 두께의 강도를 대체할 수 있다고 판단되므로, 두께는 1/3~1/5로 감소가능하며 이에 따라 탄소 섬유를 재질로 하는 고정기구의 무게도 아크릴 재질의 고정기구에 비하여 감소됨을 알 수 있었다.

동일한 두께가 아닌 동일한 강도의 탄소 섬유는 아크릴 보다 방사선 감쇄율이 낮았다, 즉 팬텀 또는 체내에서의 방사선 흡수량을 감소시키는 영향력이 낮았다. 탄소 섬유 4mm 판의 방사선 투과율은 폴리스티렌 팬텀 표면 0, 5, 10cm 에서 각각 1.019, 1.010, 0.999 이며, 8mm 판의 투과율은

각각 1.008, 0.991, 0.976인 것에 반하여, 아크릴 12mm 판은 각각 1.002, 0.981, 0.965 이고, 아크릴 20mm 판은 각각 0.978, 0.947, 0.925 이다. 따라서, 팬텀 표면에 밀착된 경우에는 선량을 2% 정도 증가시키지만, 표면에서 떨어진 경우에는 아크릴에 의하여 작게는 2~3% 많게는 5~7.5% 정도로 심부 방사선량을 감소시키는 것과는 달리, 심부 방사선량을 개방 조사야와 비교하였을 때, 의 97% 이상으로 유지시킴을 확인할 수 있었다. 또한, 임상에서 아크릴 판 20mm 2장이 중첩된 고정기구 부분을 방사선이 통과하는 상황이 존재하므로 이 경우와 탄소 섬유 8mm 판 2장을 통과하는 경우를 비교하면, 탄소 섬유 16mm 판의 방사선 투과율은 폴리스티렌 팬텀 표면 0, 5, 10cm 에서 각각 0.978, 0.948, 0.926이며 아크릴 40mm 판은 각각 0.916, 0.855, 0.815 으로 아크릴에 의하여 작게는 8~18.5% 정도 감소된 체내 방사선량 분포를 7.4% 이내 감소로 호전시켜 심부 방사선량에 미치는 영향이 훨씬 적음을 확인할 수 있었다.

탄소 섬유판은 방사선 투과성이 기존 재질에 비하여 높아 이미 선반 재질로의 활용 경우의 장점이 보고된 바 있다. Meara등은 동일 밀도의 탄소 섬유 재질과 아크릴 재질의 투과성의 비교 논문에서, 5, 6, 8 MV의 광자선을 이용한 측정 결과, 아크릴 재질이 약 95%의 투과율을 보인 반면, 탄소섬유는 99.5% 이상의 투과율을 보여서 방사선 치료용 선반 재질로 기존의 아크릴보다 탄소 섬유가 더 우수함을 보고한 바 있다. 아울러, 선량보강의 경우에도 아크릴보다 낮음을 보고하였다[4]. 선반 재질로서의 탄소 섬유의 효용성을 나무 및 아크릴과 비교한 결과에서도, 상용화되어 임상에서 활용되고 있는 유사한 인장 강도를 재질들을 비교한 경우, 탄소 섬유가 60Co, 6 MV, 23 MV에서 공히 투과율이 높음을 보고한 바 있다. 그러나, 저자들은 탄소 섬유의 투과율이 높음에도 불구하고, 6 MV 광자선의 경우, 개방 조사야와 비교하였을 때, 최대 선량 깊이가 감소하며, 표면 선량이 증가함을 보고한 바 있다[5]. 이번 측정의 결과 역시 기존에 발표된 결과와 일치하는 것으로, 아크릴을 탄소 섬유로 대체하여, 선량 감소의 정도를 개선할 수 있음을 확인할 수 있었다. 기존의 연구에서 탄소 섬유의 선반 재질로서의 유용성에 초점을 맞추어 선량 측정시의 조건은 팬텀 표면에 위치한 경우로 제한되었었다. 이번 연구에서는, 고정 기구의 경우 선반의 경우와는 달리 피부와 접촉하는 경우보다 일정한 거리를 두게되는 상황이 임상에서 많이 발생하며,

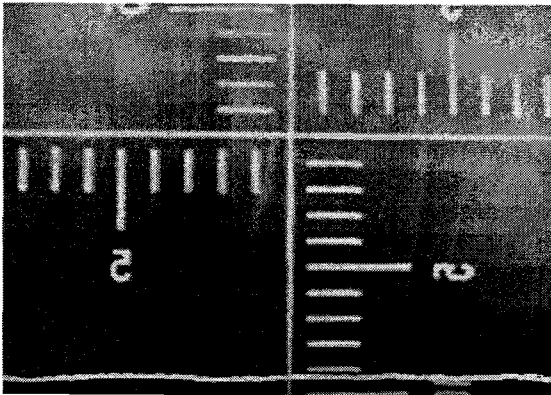
이러한 경우를 표면에서 5cm, 10cm 거리의 대표적인 위치에서도 측정을 시행하였다. 선반 재질의 경우처럼 표면에 밀착한 경우에는 선량 증가를 보이는 것과 달리, 표면에서 떨어진 경우에는 유사한 정도의 경도를 보이는 탄소 섬유 재질이 아크릴에 비하여 더 투과율이 더 높음에 따라 방사선 감소 정도가 적음을 확인할 수 있었다. 그러나, 탄소 섬유를 사용하는 경우에도, 미미하지만, 선량 감소는 발생하므로, 임상 상황에서는 가급적이면, 방사선 조사 방향에 포함되는 고정 기구가 최소화하도록 기기 제작에 반영을 하여야 하겠다.

## 2. 방사선투시 및 고에너지 확인 영상 특성

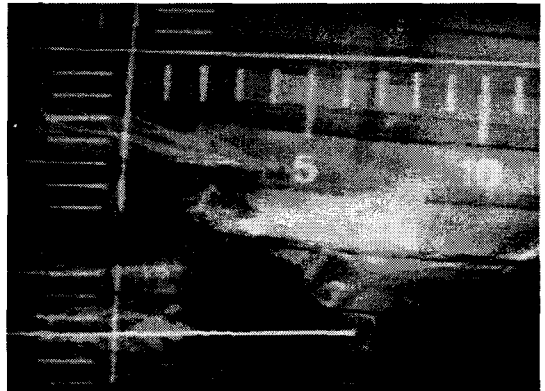
Fig. 4 A. 그림에서, 박판의 두께가 두꺼워짐에 따라, 투과율이 변화됨을 측정 결과에서와 마찬가지로 확인할 수 있었으나, B. 그림에서처럼,

영상의 판독에 영향은 크지 않음을 알 수 있었다. C. 그림은 탄소 섬유 가공물의 고에너지 확인 영상으로, 내부의 그물은 2mm 판 1장, 외부는 2장 중첩판이며, 외부의 강한 음영선은 필름에 수직방향에 위치한 2mm 탄소 섬유 박판의 영상이다. 투시 영상에서와 마찬가지로, 박판의 두께가 두꺼워짐에 따라, 투과율이 변화됨을 측정 결과에서와 마찬가지로 확인할 수 있었으나, D. 그림에서 볼 수 있는 것처럼, 영상 판독에 영향은 크지 않음을 알 수 있었다.

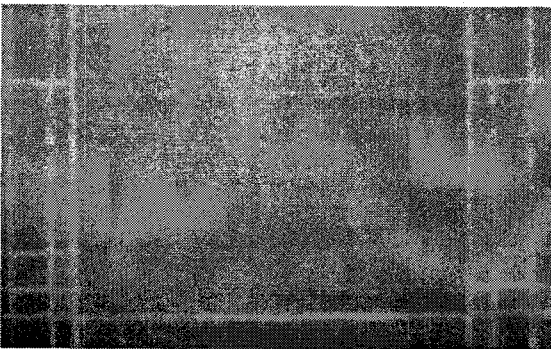
기존의 보고나 이번 연구에서 탄소 섬유의 투과율은 99%를 상회하여, 투시 영상이나, 고에너지 확인 영상에 미치는 영향이 크지 않을 것임을 예상할 수 있었다. 실제 영상의 육안 판독에서도 탄소 섬유판으로 인한 가독성의 저하는 미미함을 확인할 수 있었다. 진단 영상의 경우 카세트 재질



A. Simulation film with overlapping 2mm thick carbon fiber plates at 1cm interval.



B. Simulation film of humanoid phantom with overlapping 2mm thick carbon fiber plates at 1cm interval.



C. L-gram of carbon fiber plates. Inner mesh is of single 2mm plate and outer mesh is of two plates. High signal lines outside the mesh is due to 2mm thick carbon fiber plate perpendicular to the plane.



D. L-gram of humanoid phantom with overlapping 2mm thick carbon fiber plates at 1cm interval.

로 탄소 섬유를 사용하였을 경우 알루미늄이나 플라스틱 재질을 사용하였을 경우와 비교하여, 환자 피폭량은 감소시키면서, 영상의 대조성은 더 증가시킨다고 보고하고 있다[7]. 이는 탄소 섬유 재질이 타 재질에 비하여, 투과율은 높으면서 산란을 최소화하기 때문으로 분석하였다. 따라서, 일반 투시 영상의 경우 외에 단층 촬영의 경우에서도, 타 재질에 비하여 주변 산란이 감소하여, 더 우수한 영상을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## 결 론

표준형 방사선치료 고정기구 신 재질인 탄소 섬유는 기존에 사용되는 아크릴에 비하여 고정기구 두께 및 무게 감소, 강도유지, 체내 방사선량 악영향 회복 등 장점을 확인할 수 있었다. 아울러, 모의촬영 및 고에너지 확인 영상에서도 방사선 감쇄율 결과와 동일하게 영상의 왜곡 및 판독성 저하 등의 정밀도 유지에 악영향을 주지 않음을 확인할 수 있었다. 아울러, 삼차원 방사선 치료에 사용되는 고정 기구 제작에 탄소 섬유를 활용한 경우에서 매우 높은 재현성을 확인할 수 있어서, 고정성이 매우 뛰어나야 보고된 바 있다[6]. 따라서, 향후의 개발할 고정기구 시제품의 재질로 적합함을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

1. L.G. de Mooy, "The use of carbon fibres in radiotherapy", *Radiother. Oncol.*, 22(2), 140-142(1991)
2. W.A. Whitaker, "Acrylic polymers: A clear focus", *Medical Plastics and Biomat.*, 3(1), 12-19(1996)
3. B. Chadwiak and C. Toto, "Radiolucent structural materials for medical applications", *Medical Device & Diag Ind.*, 23(6), 40-49(2001)
4. S.J.P. Meara and K.A. Langmack, "An investigation into the use of carbon fibre for megavoltage radiotherapy applications", *Phys. Med. Biol.*, 43(5), 1359-1366(1998)
5. B. de Ost, J. Vanregemorter, B. Schaecken, and D. van den Weyngaert, "The effect of carbon fibre inserts on the build-up and attenuation of high energy photon beams", *Radiother. Oncol.*, 45(3), 275-277(1997)
6. A.J. Olch and R.S. Lavey, "Reproducibility and treatment planning advantages of a carbon fiber relocatable head fixation system", *Radiother. Oncol.*, 65(3), 165-168(2002)
7. R.A. Schmidt, H.P. Chan, Y. Koser, K. Doi, and C.T. Chen, "Evaluation of cassette performance : physical factors affecting patient exposure and image contrast", *Radiol.*, 146(3), 801-806(1983)