

친환경 소재의 의료 방사선 차폐 시트 개발 ; I : 섬유, 고무, 실리콘 소재 차폐 시트의 성능 비교평가

— Development of Radiation Shield with Environmentally-Friendly Materials ;
I : Comparison and Evaluation of Fiber, Rubber, Silicon
in the Radiation Shielding Sheet —

대구보건대학 방사선과
김선철 · 박명환

— 국문초록 —

영상의학과 검사실을 비롯하여 병원에서 의료방사선 차폐제로 사용되는 대표적인 물질이 납이다. 납은 재질이 연하고 오래 동안 변질되지 않으며, 특히 X(γ)선에 대한 선흡수계수가 커서 방사선 차폐제로 매우 유용하다. 그러나 납은 생물학적 구조와 기능에 필요하지 않는 부분이 많아 인체에 과다하게 노출되면 위험하므로 카드뮴, 수은, 비소 등과 같이 중금속으로 분류되어 있다. 이러한 위험성에서 벗어나기 위해서 납과 같은 방사선 차폐능력을 가지고 어떠한 형태로도 가공이 가능한 방사선 차폐물질을 개발하려고 노력하고 있다. 본 연구에서는 인체에 무해한 황산바륨을 이용하여 섬유, 고무, 실리콘에 함유하여 의료방사선 차폐시트를 개발하였고 이를 대상으로 의료방사선 차폐능력을 비교 평가하였다. 평가 결과에 있어서 실리콘에 바륨을 함유하여 제조한 시트가 가장 우수한 차폐능을 보였다.

중심 단어: 방사선 차폐시트, 에어프론, 바륨, 납

I. 서 론

의료방사선의 차폐에 대한 연구는 환자와 종사자의 방사선 피폭과 직접적인 상관관계가 있어 많은 연구가 있었다^{1,2)}. 방사선 차폐제로 사용되고 있는 대부분의 재료는 납이다. 납에 대한 유해성은 이미 많이 알려져 있으며, 중금속으로 분류되어 관리되고 있으며 작업성 노출, 체내 흡수 등 다양한 면에서 위험성을 내포하고 있다^{3,4)}. 영상

의학과에서는 의료방사선의 차폐로 환자, 보호자, 방사선사, 의료인은 납 방호복의 일종인 에어프론(Apron)을 착용한다. 이 방호복의 재료는 대부분이 납을 가공하여 제작하였다. 영상의학과 검사실인 촬영실의 차폐에 사용되는 벽, 바닥, 출입문 등의 재료 또한 납을 포함하고 있다. 납이 방사선차폐물로 많이 이용되는 가장 큰 이유는 경제적인 측면의 의료방사선 차폐능과 물질의 가공성이 우수하기 때문이다. 방사선사의 근무환경과 병원의 진단과 검사 환경을 고려한다면 가벼우면서도 인체의 무해한 의료방사선 차폐 재료를 고려해야 할 것이다. 본 연구에서는 납과 같은 차폐능을 가짐과 동시에 어떠한 형태로도 가공이 용이한 의료방사선 차폐시트를 개발하고자 인체에 무해한 황산바륨($BaSO_4$)에 중점을 두고 연구 제작하였다.

*접수일(2010년 3월 8일), 1차심사(2010년 5월 7일), 2차심사(2010년 6월 4일), 확정일(2010년 6월 15일)

교신저자 : 김선철, (702-722), 대구광역시 북구 태전동 산 7번지
대구보건대학 방사선과
TEL : 053-320-1458, FAX : 053-320-1449
E-mail : sckim@dhc.ac.kr

시트 형태를 제시한 이유는 어떤 형태로 가공하기에 가장 기본적인 재료형태가 될 것으로 사료되어 시트형태를 개발하고자 하였다. 의료용 방사선 차폐시트의 친환경 재료로 선택된 황산바륨은 밀도가 4.5 g/cm^3 로 매우 클 뿐만 아니라, 수지, 고무와 같은 재질의 혼화성(Miscibility)이 불량하여 타 재질에 고르게 분산시켜야지만 차폐능을 갖는데, 이는 전사코팅과 직접코팅과 같은 기술적인 가공법을 필요로 한다. 따라서 관련 특허내용과 제작공정에 참여하는 기술자의 조언을 통해 제작하였다. 기존의 연구사례에서는 방사선 불투과성 섬유에 대한 개발과 연구, 특허가 많이 제시되었으나, 구체적인 성능평가에 대한 등록된 제품생산은 전무하며, 다만 제조방법과 공정에 대해서는 특허가 많이 출현되어 있었다⁵⁻¹⁰⁾.

따라서 본 연구는 납 이외의 물질로 의료방사선의 차폐가 가능하며 위생과 공해 면에서 문제가 없는 친환경 소재의 바륨(Barium)화합물로 차폐시트를 제작하여 실제 임상 의 의료방사선 차폐효율이 제조 방식과 재료 배합 방법의 결과에 따라 어느 정도의 차폐성능을 가지는지 실험하여 평가 결과를 제시하고자 하였다.

II. 실험 기기 및 방법

1. 실험기기 및 재료

- (1) 진단용 X-선발생장치; DK-525, 125 kV-500 mA, Toshiba E7239X
- (2) Exposure and Exposure rate meter(192X, Capintec)
- (3) Ion Chamber(Model PM-30, PR-18)
- (4) 반가층 측정용 Al 흡수체 $300 \times 300 \times 10 \text{ mm}$ 10개
- (5) 부가필터 0.1 mmCu 2개
- (6) 의료방사선 차폐 시트 샘플

1) 섬유(Fiber) 소재의 시트 : 부직포에 바륨과 첨가제를 코팅한 형태

황산바륨을 물과 1:1 중량비로 혼합하여 3,000 rpm 이상의 고속교반을 실시하여 현탁액 형태의 혼합물로 제조한 후, 이 혼합물에 일반적인 부직포(Double Raschel)를 실험실용 소형 코팅기(Coater)와 패더(Padder)를 이용하여 함침(Deeping)-패딩(Padding)-건조(Dry)를 6회 반복하여 섬유형태의 시트로 제조하였다. 이때 패딩 압력은 2 bar, 속도는 2 m/min로 하였으며, 건조 시간은 2 min, 온

도는 130°C 로 하였다. 크기는 방사선 차폐능을 시험하기에 적당한 크기($500 \times 500 \text{ mm}$)로 제작되었으며(Fig. 1.), 시트 하나의 두께는 평균 2.53 mm이다.



Fig. 1. Fiber of radiation shielding sheet

2) 고무(Rubber) 소재의 시트 : 고무에 바륨과 첨가제를 삽입한 형태

황산바륨을 물과 1:1 중량비로 혼합하여 3,000 rpm 이상의 고속교반을 실시하여 현탁액 형태의 혼합물로 제조한 후, 마스터 배치(Master Batch) 형태의 고무(Rubber)에 1:1의 중량비로 다시 혼합하였다. 이 혼합물을 120°C 에서의 건조 과정을 거쳐 물을 건조시킨 후 황산바륨과 고무만 남은 혼합 마스터배치를 제조하였다. 이를 150°C 에서 10분간 압력을 가한 뒤 사출방식의 틀을 이용하여 시트 형태로 제조하였다(Fig. 2). 실제로는 롤러(Roller)를 통한 압출이 가능하므로 두께는 큰 문제가 없으나, 바륨을 최대한 함량 시킨 형태의 제조 시트 1장의 두께는 4.89 mm로 실험을 준비하였다.



Fig. 2. Rubber of radiation shielding sheet

3) 실리콘(Silicon) 소재의 시트

실리콘수지(Silicone LSR(Liquid silicone rubber), 100% 고휘분 사용)에 황산바륨 고휘분 60% 농도로 고속 교반하여 코팅물을 준비하였다. 고휘분 황산바륨의 균일한 분산을 위하여 교반 시 3,000 rpm 이상의 고속교반을 실시하였으며, 균일한 수지층 형성을 위하여 진공상태에서 공기 탈포를 하였다. PET 직물 상에 Shoe knife를 사용하여 Knife Over-roll방식(Gap : 100 μm)으로 준비된 코팅수지를 Direct 코팅하였으며, 도포량을 최대로 하기 위해 3회(Base, Main, Top 코팅) 반복 코팅하였다. 코팅 후 180℃에서 각각 3분간 경화시켰으며, 이때 필요한 실리콘 경화제와 촉매를 사용하여 제작하였다(Fig. 3).

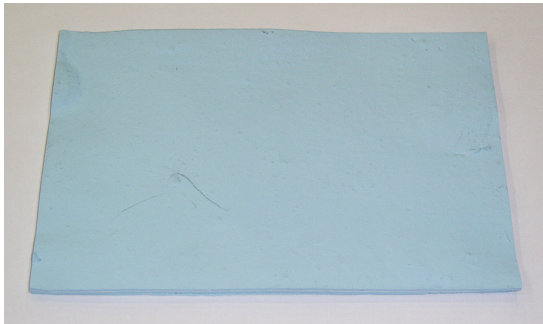


Fig. 3. Silicon of radiation shielding sheet

2. 실험 방법

본 연구에서의 실험방법은 한국산업표준에 X선 방호용품류의 납당량 시험방법(KS A 4025 : 1990, 2005년 확인)과 동일한 실험방법을 준수하여 적용하였다¹¹⁾. 그리고 친환경 소재로 제작된 차폐 시트의 차폐성능을 알아보기 위하여 진단용 X선 발생장치의 실효에너지(Effective Energy) 측정하여 이용하였다.

X선의 실효에너지를 측정하기 위한 기하학적 조건을 Fig. 4와 같이 배치하고 관전류 200 mA, 조사시간 0.1 sec, 고유여과는 X선관 0.7 mmAl, 콜리메이터 1.5 mmAl로 총여과 2.2 mmAl으로 고정하고, 관전압은 임상에서 주로 많이 사용하는 범위 내에서 관전압 60 kVp(부가여과관 없음), 100 kVp(부가여과관 0.2 mmCu 추가)에서 각각 반가층 측정용 Al 흡수체의 두께를 변화시키면서 검·교정한 전리조를 이용하여 조사선량을 측정 후 반가층을 구하였다. 이때 전리조 선량계의 정확한 조사선량 측정을 위한 온도, 기압에 대한 보정계수(Compensation Factor)는 실습실 온도 22℃, 1기압 상태에서 1.0을 확인하였다. 또한

보다 더 정확한 차폐능 측정을 위해 X선발생장치의 관전압과 조사시간의 정확도 및 X선의 출력의 재현성과 직선성이 양호한 것을 확인한 후 실험하였다.

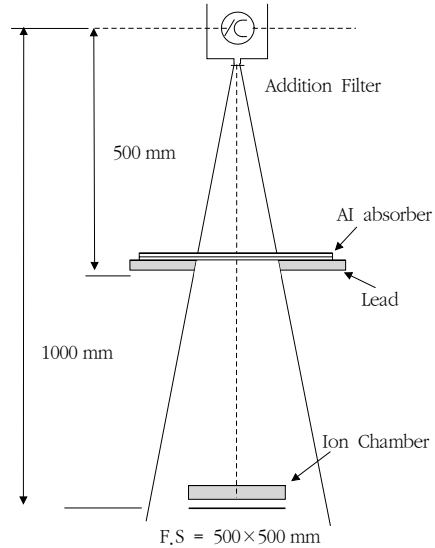


Fig. 4. Measuring arrangement for half value layer

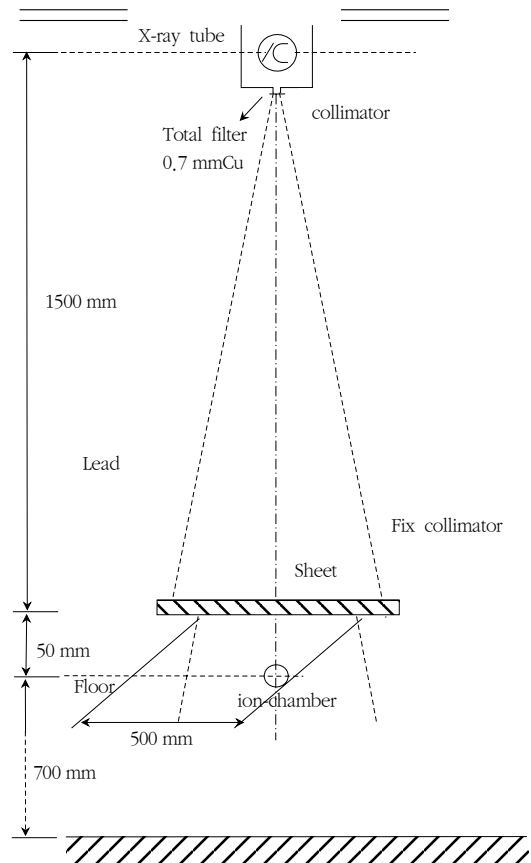


Fig. 5. Measuring arrangement for Radiation Shielding Sheet

반가층 측정은 감약지수법칙($I = I_0 e^{-\mu x}$)에서 양변의 \log_e 를 취하여 $y = -ax$ 의 그래프로부터 기울기를 산출하여 이 기울기로부터 선흡수계수 μ 값을 얻은 후 반가층 $= 0.693/\mu$ 으로부터 계산할 수 있었다. 실효에너지 계산¹²⁾은 앞에서 구한 반가층으로부터 단일에너지에 해당되는 반가층과 같은 반가층을 갖는 실효에너지를 산출하기 위하여 Hubbell의 질량흡수계수표¹³⁾를 이용하였다. 직접 개발한 의료방사선 차폐시트의 성능검사를 위한 실험방법은 Fig. 5와 같이 기하학적 조건을 설정하였으며, 차폐시트의 차폐율 계산은 $(1 - W/W_0) \times 100$ 으로 하였다. 이때 W 는 X선빔과 검출기 사이에 차폐시트가 있을 경우에 측정하는 조사선량이며, W_0 는 X선빔과 검출기 사이에 차폐시트가 없을 경우에 측정하는 조사선량 값으로 산정하였다. 그리고 황산바륨을 섬유, 고무, 실리콘에 함유하여 개발한 의료방사선 차폐 시트와 기존의 에이프런과의 차폐능을 비교하기 위하여 현재 병원의 촬영실에서 사용하고 있는 에이프런을 대상으로 무작위 추출하여 실험에 이용하였다.

III. 실험 결과

1. 실효에너지 측정

직접 개발한 방사선 차폐 시트의 차폐율 측정에 이용한 X선의 선질에 있어서 실효에너지는 Table 1과 같다. 관전압 60 kVp에 부가여과판 없는 경우에는 선흡수계수가 0.2886/mm, 반가층 2.40 mmAl으로 측정되어 이를 Hubbell의 질량흡수계수표로부터 실효에너지 30.58 keV를 얻을 수 있었다. 그리고 관전압 100 kVp에 부가여과판 0.2 mmCu를 추가한 경우는 선흡수계수가 0.1205/mm, 반가층이 5.75 mmAl으로 측정되어 이때 실효에너지는 45.01 keV임을 알 수 있었다. 따라서 관전압이 증가하고 부가여과판이 두꺼울수록 선질에 영향을 주어 실효에너지가 증가함을 알 수 있었으며, 또한 정확한 선질을 이용한 차폐 시트의 차폐능을 구할 수 있었다.

Table 1. Comparison of effective energy to tube voltage

Tube Voltage (kVp)	Inh. filter (mmAl)	Add. filter (mmCu)	Abs. coe. (μ) (mm ⁻¹)	Half value (mmAl)	Eff. energy (keV)
60	0.7	-	0.2886	2.40	30.58
100	0.7	0.2	0.1205	5.75	45.01

2. 방사선 차폐 시트의 차폐율

의료 방사선의 선질 및 선량 범위 내를 기준으로 실험하였고, 두께를 동일하게 비교 제작하기가 매우 어려운 과정이라 사용한 재질에 가장 가공하기 적합한 두께를 선택하여 제작하였다. 다만, 섬유형태는 두 배로 만들어 실험을 시행하여도 투과율에는 그와 상응하는 수학적 결과를 도출할 수 없다. 또한 두께의 변화에 따라 섬유라는 특성을 잃기 때문에 향후 연구결과에서 의도한 제품과는 거리가 멀어진다. 따라서 본 연구는 원래의 재질 성질을 잃지 않는 범위 내에서 제작하였다. 첫 번째는 관전류 200 mA, 조사시간 0.1 sec, 고유필터 0.7 mmAl에서 관전압 60 kVp, 부가여과판이 없는 경우에 실효에너지 30.58 keV의 조건에서 각종 방사선 차폐시트(500×500 mm)에 대한 차폐율이 Table 2와 같은 결과를 얻었다. 차폐시트가 없을 경우의 W_0 는 평균 4.03 mR로 측정되었으며, 먼저 섬유형태의 차폐시트를 이용한 경우는 평균 2.73 mR의 투과선량을 나타내어 차폐시트 중에서 가장 적은 32%의 차폐율을 나타내었으며, 그리고 고무 재질의 차폐시트는 평균 1.13 mR의 투과선량을 나타내어 72%의 차폐율 결과를 얻었으며, 마지막으로 실리콘 재질은 평균 0.07 mR의 투과선량으로 측정되어 차폐율이 가장 높은 98%를 나타내어 차폐율이 매우 좋았다. 이때 재질의 두께는 6.02 mm 이었다. 그리고 직접 개발한 방사선 차폐시트의 임상 성능의 비교를 위하여 현재 병원의 촬영실에서 사용하고 있는 에이프런을 대상으로 무작위 추출하여 실험한 결과는 평균 0.11 mR의 투과선량으로 측정되어 97%의 차폐율을 나타낼 수 있었다. 따라서 낮은 실효에너지 영역에서는 전반적으로 차폐율이 높았지만, 재질 중에서 실리콘 소재의 차폐효과가 가장 높은 결과를 도출하였다.

Table 2. Result of the radiation shielding sheet tests [60 kVp]

Material	Thickness (mm)	Exposure(mR)				Shield ratio(%)
		1	2	3	mean	
Nothing	-	3.90	4.10	4.10	4.03	-
Fiber	2.53	2.80	2.70	2.70	2.73	32
Rubber	4.89	1.00	1.20	1.20	1.13	72
Silicon	6.02	0.00	0.10	0.10	0.07	98
Lead	2.40	0.11	0.11	0.10	0.11	97

또한 두 번째는 관전압 100 kVp, 부가여과판 0.2 mmCu가 없는 경우에 실험에너지 45.01 keV의 조건에서 차폐 시트에 대한 차폐율은 Table 3과 같이 나타났다. 차폐 시트가 없을 경우의 W_0 는 평균 3.07 mR로 측정되었으며, 먼저 섬유형태의 차폐 시트를 이용한 경우는 평균 2.50 mR의 투과선량을 나타내어 차폐 시트 중에서 가장 적은 20% 미만의 차폐율을 나타냄을 알 수 있었다. 그리고 고무 재질의 차폐 시트는 평균 1.63 mR의 투과선량을 나타내어 50% 미만의 차폐율 결과를 얻었으며, 마지막으로 실리콘 재질은 평균 0.17 mR의 투과선량으로 측정되어 차폐율이 가장 높은 95%를 나타내어 차폐율이 매우 좋았다. 실리콘 재질 시트의 유연성과 가공성, 내구성을 고려하여 제작하였으므로 두께에 대한 큰 불편한 점은 없다. 고무의 경우 실리콘과 동일한 두께로 실험한 결과 54%의 차폐율을 나타내었고 섬유의 경우는 3% 정도 상승하는 효과뿐이었다. 그러나 두 경우 모두가 6.02 mm의 차폐율을 가질 수 있게 제작하기에는 압연과 코팅의 상당한 기술적 요소가 필요하였다. 그리고 현재 병원의 촬영실에서 사용하고 있는 에이프런을 대상으로 무작위 추출하여 실험한 결과는 89%의 차폐율을 나타냄을 알 수 있었다.

Table 3. Result of the radiation shielding sheet tests [100kVp]

Material	Thickness (mm)	Exposure(mR)				Shield ratio(%)
		1	2	3	mean	
Nothing	-	3.00	3.10	3.10	3.07	-
Fiber	2.53	2.40	2.50	2.60	2.50	19
Rubber	4.89	1.60	1.70	1.60	1.63	47
Silicon	6.02	0.10	0.20	0.20	0.17	95
Lead	2.40	0.30	0.40	0.30	0.33	89

섬유는 바륨의 균등한 분포, 즉 제작과정에 있어 코팅의 어려운 점이 있었으며, 고무의 경우는 고무시트의 기본적인 성질을 유지하기 위해서 바륨의 양을 조절하여 제작하는데 한계가 있어 차폐율을 높이는데 문제가 있었다. 마지막으로 실리콘은 재료배합에 있어서 메탈로센(Metallocene)계와 같은 촉매제를 사용하여 유연성과 가공성, 실리콘의 특성을 살릴 수 있어 많은 배합이 가능하여 결과적으로 차폐율을 높일 수 있었다. 그러나 본 연구에서 제작된 의료방

사선 차폐시트의 차폐율도 매우 중요하지만, 방사선 에너지에 따른 차폐가 자유롭게 이루어지기 위해서는 제품의 가공성이 매우 중요하다. 차폐 블록 및 핵의학과에서 사용되는 각종 차폐기구 등은 모양의 운영방법이 매우 독립적이고 자유롭다. 따라서 실리콘 재질의 방사선 차폐시트는 이러한 점에서 매우 효과적이고 두께 조절이 자유롭고 두께별 차폐율의 계산이 정확하게 제작하는 기술적인 과제를 해결할 수 있는 방법이 시트형 모델이다.

IV. 결론 및 고찰

병원에서 사용되는 대부분의 방사선 차폐제는 납분말을 사용한 재료로 만들어져 위생, 안전상의 문제를 지니고 있어 친환경 소재의 의료방사선 차폐제가 필요하다. 이러한 문제점을 해결하고자 본 연구에서는 황산바륨을 선택하였다. 황산바륨은 임상에서 X-선 검사 시 조영제로 많이 사용되는 인체의 무해한 재료이며, X선의 에너지 60 keV 근처에서는 납에 비교하여 바륨쪽이 차폐효율이 크므로 유효한 방사선 차폐 재료로 알려져 있다¹⁴⁾. 이러한 친환경 소재를 이용하여 개발 1단계로 바륨의 재료를 잘 규합할 수 있는 시트재료를 찾아 성능평가를 하였다. 가장 먼저 실험대상으로 선정한 섬유인 경우 코팅기술이 가장 중요하였으며, 섬유형태의 차폐제를 개발할 경우 사용 상 많은 부분들이 효과적이다¹⁵⁾. 그러나 섬유형태에 바륨 코팅에 있어서는 납과 같은 차폐능을 가지기 위해서는 상당한 기술력과 바륨 중량의 한계점이 현실로 나타났다. 두 번째 대상인 고무인 경우 고무의 유연성을 유지하기 위한 밀도와 중량의 한계가 있었다. 마지막 실리콘 조성물인 경우 두 재료와는 달리 시트 형태로 만들었을 경우 차폐능은 우수한 성적을 나타낼 수 있으나, 첨가물의 선택과 압축, 유연성 등 일부 문제가 발생되었다. 그러나 이러한 문제는 바륨의 배합량과 실리콘 첨가물의 중량적 조절의 기술로 가능할 것으로 실험을 통해 추측할 수 있었다. 특히, 실리콘 차폐시트인 경우는 내부의 공극을 최대한으로 줄여 두께를 줄이는 방법과 공극을 두어 가공성을 용이하게 하는 방법이 있는데 전자는 두께는 줄어드나, 가공성이 부족하고 후자는 가공성은 좋으나, 두께가 증가하는 단점을 안고 있어 타 물질을 첨가하는 연구가 필요하였다^{16,17)}. 또한 공극내의 방사선 산란선을 유도하여 직접 방사선 에너지를 감쇠하는 방법도 고려하여 공극률을 동일하게 맞추는 제조공법에 대한 연구도 앞으로 필요할 것으로 사료된다. 본 연구의 결과를 통해 친환경소

재의 방사선 차폐제를 안정적으로 제작하는 기술을 더 개발하여 좀 더 좋은 검사환경을 만드는데 도움이 되고자 한다.

참 고 문 헌

1. 김영근, 장영일, 김정민: 방사선 방호용 에이프런의 경량화와 차폐능 개선, 대한방사선기술학회지, 26(1), 45-50, 2003
2. 오현주, 김성수, 김영일 외: X선 촬영 시 산란선 방향 의존성에 관한 연구, 대한방사선기술학회지, 18(1), 63-70, 1995
3. 송태희: 환경오염성 중금속 중 납(Lead)의 인체영향에 관한 고찰, 소비자생활연구, 12, 1993.
4. 대한산업안전협회: 납 중독에 대한 안전 대책, KISA, 보건-05, 1995
5. 일본국특허청 공개특허공보: 방사선차폐재, 특개평 11-133184, 1999
6. 일본국특허청 공개특허공보: 방사선차폐재의 제조공정, 특개2007-85865, 2007
7. 대한민국특허청 공개특허공보(A): 방사선 차폐섬유, 공개번호 10-2009-0011082, 2009
8. 대한민국특허청 공개특허공보(A): 방사선 차폐섬유, 공개번호 10-08600332, 2008
9. 대한민국특허청 공개특허공보(A): 엑스선 차폐성이 우수한 섬유제품 및 그의 제조방법, 공개번호 특 2001-0056190, 2001
10. 대한민국특허청 공개특허공보(A): 황산바륨을 이용한 방사선차폐섬유 및 그 제조방법, 공개번호 특 2000-0007084, 2000
11. KS규격: X선 방호용품류의 납당량 시험방법, KS A 4025, 2005
12. 강희동 외: TLD 방사선 센서 및 판독장치의 개발, 센서기술연구센터, 47-48, 1992
13. Hubbell, J. H.: Photon Mass Attenuation and Energy absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV, Int. Appl. Radiat. Isot., 33, 1269-1290, 1982
14. H. W. Friedman, M. S. Singh: Radiation Transmission Measurements for Demron Fabric, Lawrence livermore national laboratory, 2003
15. Radiological Protection: New findings from Health Protection Agency describe advances in radiological protection, Medical Letter on the CDC & FDA, Atlanta, Mar 9, 2008
16. Radiation Exposure from Medical Imaging Procedures: The Journal of Nuclear Medicine, New York, 51(2), 2010
17. An introduction to radiation protection in medicine: Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine, Adelaide, 31(3), 2008

• Abstract

Development of Radiation Shield with Environmentally-Friendly Materials ; I : Comparison and Evaluation of Fiber, Rubber, Silicon in the Radiation Shielding Sheet

Seon-Chil Kim · Myeong-Hwan Park

Department of Radiologic Technology, Daegu Health College

Traditionally, lead has been primarily used to shield the radiation in the hospital, because of its soft texture, durability and cost effectiveness. However, lead can be dangerous because of its toxicity when exposed to the human body, and it is classified as a heavy metal like cadmium, mercury, and arsenic etc. In order to compensate its noxious properties on the human body, researchers are trying to develop a radiation shield which has similar shielding efficiency and can also be manufactured in any form. In this study, sulfuric acid barium was mixed with fiber, rubber, and silicon all of which are harmless to the human body, tested, and evaluated for its ability of medical radiation shield. The result of this study showed that the sheet containing silicon and barium has the strongest shielding abilities.

Key Words : radiation shielding sheet, Apron, Barium, Lead