

차폐 재료의 융합과 개질제 특성에 따른 의료방사선 차폐 시트 물리적 특성 고찰

김선철
계명대학교 의용공학과 교수

Physical Properties of Medical Radiation Shielding Sheet According to Shielding Materials Fusion and Resin Modifier Properties

Seon-Chil Kim

Professor, Department of Biomedical Engineering, Keimyung University

요 약 의료방사선 방어를 위해 사용되는 차폐 시트의 제조과정에서 인장강도를 유지하면서 차폐 재료의 충진율을 높여 차폐 성능을 향상시키는 방안을 제시하고자 한다. 본 연구에서 제안된 개질제는 고분자 수지재료와의 융합에 있어서 분자량을 높여 재료의 친화성을 높이는 역할을 수행한다. 차폐시트의 산화텅스텐의 충진율과 인장강도, 차폐 성능 등을 평가하였다. 공정과정에서 개질제는 분자량과 밀도를 증가시켰고, 성형 과정에서 피집 형상이 적용되었고, 성능 향상과 재료와의 친화성, 인장강도를 유지하기 위해 사용된 개질제 PMMA는 20%를 혼합할 경우 가장 우수한 효과를 얻을 수 있다. 본 연구에서 제시된 재료의 융합과 개질제를 통해 차폐시트의 대량생산이 가능하며, 향후 경량의 차폐복 제작에 기여할 것입니다.

주제어 : 융합, 방사선 차폐, 개질제, 재료 융합, 폴리에틸렌, 산화텅스텐

Abstract The modifier proposed in this research is for enhancing the affinity of the glass component with the high polymer resin and the molecular weight. The particle packing, tensile strength and shielding performance of the shielding sheet made of the tungsten oxide were evaluated. The best effect can be obtained when 20% of the modifier PMMA used to improve the shielding performance and maintain the affinity and strength with the sealant is mixed. The fusion of the materials presented in this study and the mass production of the shielding sheet through the modifier are possible and will contribute to the production of lightweight shielding sheets in the future.

Key Words : Convergence, Radiation Shielding, Modifier, Shielding material fusion, Polyethylene, Tungsten oxide

1. 서론

의료 기관에서 방사선을 가장 효과적으로 차폐할 수 있는 물질은 납이다. 납은 경제성과 가공성에 대해서는 상당한 우위를 지니고 있다. 현재 의료기관의 방사선 차폐시트(Radiation Shielding Sheet)는 대부분이 납판을 그대로 사용하거나, 분말형태 납을 고무에 배합하여 사용하였다. 그 결과 무게로 인한 활동 제약과 인체 납 중

독의 위험성을 가지고 있어 의료 환경에서 퇴출시키는 노력을 진행하고 있다[1-3].

병원에서 사용되는 에이프런은 납 시트가 지닌 중량감과 중금속의 부정적인 인식으로 인해 최근 친환경 차폐물질로 대체되고 있다. 납을 대체할 수 있는 차폐 재료는 바륨, 붕소, 주석, 비스무트, 텅스텐 등이 있으며, 최근 가장 많이 의료분야에서 사용되는 것은 산화텅스텐(Tungsten Oxide, WO_3)이다[4-5]. 의료기관에서는 차폐

*Corresponding Author : Seon-Chil Kim (chil@kmu.ac.kr)

시트가 주로 인체 착용을 목적으로 제작하기 때문에 차폐 시트의 경량화는 매우 중요한 요소이다. 최근 차폐 시트의 경량화를 달성하기 위해, 차폐 재료의 구성, 제조 공정의 기술 등의 새로운 제조방법에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다[6].

차폐 재료로 사용되는 산화텅스텐은 밀도가 7.16g/cm³이며, 텅스텐의 원료보다는 경제적이나, 금속 재료로 시트의 기본 재료인 고무와 폴리머 등의 고분자 수지인 베이스 재료와 친화성이 우수하지 못한 단점을 지니고 있다. 그러나 이러한 문제는 각종 첨가제와 제조 기술로 극복할 수 있으며, 차폐 성능을 높이기 위해서 혼합 과정에서 충전율(Particle Packing) 즉, 동일한 면적에 산화 텅스텐의 함유량을 높이는 공법에 많은 연구가 진행되고 있다[7-8].

최근 차폐 시트 베이스 재료로 폴리에틸렌과 같은 고분자 수지를 많이 사용하고 있으며, 주로 성형과정의 유연성과 경량화에 기여한다. 그러나 대량 생산을 목적으로 시행할 경우 차폐 성능의 재현성을 유지하기 위해 차폐 재료의 동일한 충전율을 단위면적 당 지속적으로 유지해야 하는 문제점을 지니고 있다[9-10]. 이를 위해 공정 조건을 동일하게 유지하면서, 일정량의 첨가제를 사용한다. 차폐 시트 제작과정에서 사용되는 첨가제로는 개질제, 가소제, 열안정제, 산화 방지제, 난연제, 안료, 윤활제 등이 있어 각 역할을 수행한다.

본 연구에서는 제조과정에서 고분자 수지의 용융퍼짐을 우수하게 하여 충전율을 높일 수 있는 개질제(Resin Modifier)에 대한 연구를 하고자 한다. 차폐 시트의 적정 인장강도가 유지되는 범위 내에서 개질제와 차폐 재료의 충전율, 차폐 성능의 상관관계를 알아보고자 한다. 따라서 고분자 차폐 시트 제작과정에서 사용되는 개질제가 차폐 재료의 충전율에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다. 이를 통해 재현성이 우수한 차폐 시트 제조과정을 정량적으로 제시하여 대량 생산의 기반을 마련하는데 도움을 되고자 한다.

2. 연구 방법

차폐 시트는 열 성형과정인 카렌다 공정을 통해 압착 성형된다. 따라서 일정 차폐 성능을 유지하기 위해서는 성형 공정에서 단위 면적당 차폐 재료의 함량이 매우 중

요하다. 일정한 크기로 구성되어 있는 차폐 재료를 고분자 수지와 배합하는 혼합 공정에서 개질제를 투입한다. 이는 베이스 재료인 수지와 차폐 재료의 혼합율을 높이고 열 성형을 효과적으로 수행하기 위해서 첨가하며, 성형과정에서도 고분자 수지와 친화성이 커져 시트의 두께 등을 유지하기가 쉽다. 개질제로는 폴리 메틸 메타크릴레이트(PMMA ; Poly Methyl Methacrylate)와 폴리 테트라 플로로 에틸렌(PTFE ; Poly tetra phloro ethylene)을 주로 사용된다. 특히 PMMA는 메타크릴산 메틸을 중합하여 얻어지는 고분자로 대표적인 메타크릴 수지이다. 일반적으로 PTFE보다는 PMMA를 첨가할 경우 열가공성에서 평판작업이 좀 더 우수한 점을 고려하여 본 연구에서는 개질제로 PMMA를 선택하였다.

이론적으로 평판작업은 차폐 재료의 안정적인 분산을 의미하기 때문에 결과적으로 충전율에도 영향을 미친다. 따라서 개질제인 PMMA와 수지의 고분자 평균 분자량을 적용하여 이론적으로 차폐 재료의 충전율 향상시키는 방법이 가능하다. 차폐 재료와 고분자 수지의 효과적인 배합 공정을 통해 재료의 충전율을 높이고자 한다면 고분자 수지의 중합도를 높여야 한다. 일반적으로 고분자는 분자량이 매우 큰 분자로 구성되어 있으며 대부분의 경우 같은 구조가 반복되는 형식이다. 고분자 물질의 성질은 구성 분자량에 크게 영향을 받는다. 하지만 고분자의 분자량은 매우 커 일반적으로 정의 내리기 힘들기 때문에 평균적인 분자량을 구하는 것이 일반적이다. 평균 분자량을 구하는 방법은 수 평균 분자량, 질량 평균 분자량, 다 분산지수 등 다양한 방법이 있다[11-12].

분자량이 균일하지 않아 고분자량 기준으로 평균을 취할 때에 사용하는 중량을 중량분율 w_i 라 한다. 수지의 분자량 M_i 인 것의 분자수가 N_i 이면 중량평균분자량 \overline{M}_w 는 Eq. 1.과 같이 연속적으로 정의할 수 있다.

$$w_i = M_i N_i / \sum_{i=1}^{\infty} M_i N_i$$

$$\overline{M}_w = \sum_{i=1}^{\infty} M_i w_i = \sum_{i=1}^{\infty} M_i^2 w_i / \sum_{i=1}^{\infty} M_i N_i$$

Eq. 1. The mass average molecular weight of the polymer

Eq. 1 을 이용하여 질량 평균 분자량을 통해 고분자의 중합도는 수지의 밀도(D_i)와 질량(W_i)을 근거로 Eq. 2

와 같이 유출할 수 있다. 따라서 차폐 시트의 밀도를 늘이기 위해서는 평균분자량의 기여를 높이고, 단위체의 분자량을 줄여야 중량평균 중합도를 높일 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{X}w &= D_1 \frac{M_1 N_1}{W_t} + D_2 \frac{M_2 N_2}{W_t} + \dots + D_n \frac{M_n N_n}{W_t} \\ &= W \frac{\sum_{i=1}^{\infty} D_i^2 N_i}{W_t} = W \frac{\sum_{i=1}^{\infty} D_i^2 N_i}{\sum_{i=1}^{\infty} M_i N_i} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} D_i^2 N_i}{\sum_{i=1}^{\infty} D_i N_i} \end{aligned}$$

Eq. 2. Polymerization degree of polymer using mass average molecular weight

고분자로 이루어진 물질의 경우, 고분자량이 차폐 시트의 물리적, 기계적 특성에 직접적인 영향을 주고 있다. 따라서 PMMA의 첨가는 분자량이 증가할수록 기계적 성질이 비례적으로 증가하는 임계적 포인트를 고분자 중합도를 통해 찾아 시트의 인장 강도를 일정하게 유지시킬 수 있다. 분자량에 따른 고분자 물질의 특성은 분자의 표면적 변화로 분자 간 인력 변화가 증가하면서 어느 한 시점에서부터 물리적 특성 증가가 둔화되는 것으로 알려져 있다[13]. 따라서 일방적인 차폐 재료의 함유량을 늘여서 물리적 특성인 차폐 성능을 높이는 방안보다는 폴리머의 유기적인 결합을 지속시키는 범위 내에서 차폐 재료의 함유량을 높이면 강도의 변화 없이 차폐 성능을 유지할 수 있을 것이다.

일정 범위 내에서 차폐 재료와의 교합을 진행한다면 기계적 특성인 인장강도를 유지한 채로 충전율을 높여 차폐 시트를 제작할 수 있게 된다. 차폐 시트를 제작할 때 메타크릴 수지인 PMMA와 차폐 재료와의 혼합 시 충전율(PP : Particle Packing)은 Eq. 3 과 같다.

$$Pp = \frac{Tw + \overline{M}w}{V}$$

- Tw : Molecular weight of tungsten
- $\overline{M}w$: Average molecular mass of polymer
- V : Volume of shielding sheet

Eq. 3. Resin filling rate of tungsten particles

본 연구에서는 차폐 시트의 베이스 재료인 폴리에틸

렌 수지에 PMMA 함유량을 조절하면서 차폐 재료인 산화텅스텐의 함유량의 변화를 주어 충전율을 높일 수는 방법을 실험하고자 차폐 시트를 PMMA 함유량과 산화텅스텐 함유량 기준으로 제작하였다. 또한 이로 인해 발생하는 기계적 특성인 인장강도와 물리적 변화인 차폐 성능을 납 당량 기준으로 실험하였다.

먼저 차폐 재료인 산화텅스텐은 중량 평균 분자량 ($\overline{M}w$)이 3 이하인 폴리에틸렌 수지 베이스 재료로 중량 기준으로 55 Weight% 에서 65 Weight% 까지 충전율을 높였으며, 개질제인 PMMA는 첨가하지 않은 상태에서 5% 씩 변화를 주어 최대 20% 까지 투입하면서 카렌더 공정으로 가공한 차폐 시트를 5종을 제작하였다. 시트 크기는 300mm×300mm 이며, 두께는 동일하게 0.35mm 로 하였다. 사용된 산화텅스텐의 입자의 크기는 4 μ m 미만으로 균일성을 유지하였다.

제작된 차폐 시트의 차폐 성능을 비교 평가하기 위해 진단용 X-선 발생장치는 Shimadzu사의 Radiography System (UD 150L-40E)를 이용하였으며, 공간선량 검출기는 Radical Corporation Mo.9517 Radiation Monitor, Mo10×5-6, 6cc ion chamber (Radical Corp.)로 검 교정 후 사용하였다. 방사선 발생 조건은 관전압 30kVp, 60kVp(부가여과 없음), 100kVp, 120kVp(부가여과관 0.31mmCu 추가)을 사용하였으며, 관전류 200 mA, 조사 시간 0.1 sec, 고유여과 0.7mmAl으로 고정하여 Fig.1 과 같이 실험하였다. 의료방사선 차폐 성능을 분석하기 위해 단일에너지 형태의 실효에너지를 측정하였다. 실효에너지 계산은 반가층으로 단일에너지에 해당되는 반가층과 같은 반가층을 갖는 실효에너지를 산출하기 위하여 Hubbell의 질량흡수계수표를 이용하였다[14]. 이에 따른 차폐 성능의 변화도 제작된 시트의 특성별로 실험하였다. 실험방법은 동일한 조건으로 제작된 차폐 시트에 각 10 회 조사한 다음 평균값으로 적용된 차폐율을 측정하였다. 차폐율은 Eq. 4 와 같이 계산하였다.

$$SP = K_0 / K_1 \times 100$$

- SP : Shielding rate (%)
- K_0 : Radiation-free state
- K_1 : State of radiation

Eq. 4. Radiation shielding rate calculation

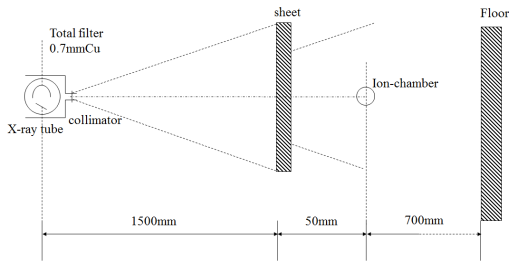
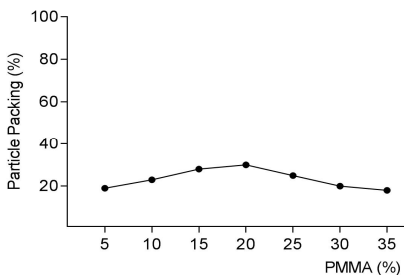


Fig. 1. Measuring arrangement for Radiation Shielding Sheet

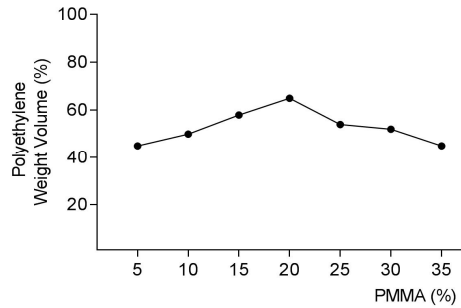
제작된 차폐 시트 별로 기계적 특성인 인장 강도를 측정하기 위해 2mm/min 조건에서 인장강도기(Rheometer, MJU-50)를 사용하여 10회 실시한 후 통계 처리하였다. 또한 차폐 시트의 PMMA함유에 따른 차폐 재료의 분산 상태 관찰을 위해 나노분석주사전자현미경(SUPRA-55VP, ZEISS& Kleindiek)으로 15kV에서 관찰하였다.

3. 결과

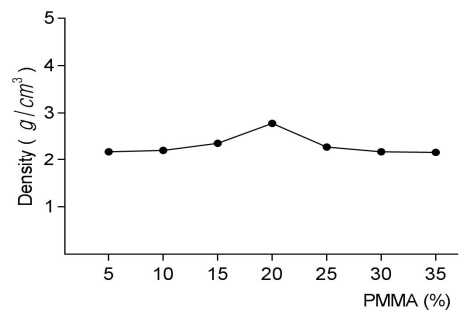
차폐 시트의 베이스 재료인 폴리에틸렌 수지 중량 기준으로 PMMA의 첨가량에 따른 차폐 재료 산화텨스텐의 충전율(PP : Particle Packing) 비교는 Fig. 2 과 같이 나타났다. 그래프에서 보는 것과 같이 PMMA 첨가량이 20% 인 경우에 가장 효과적인 차폐 재료의 충전율이 나타났으며, 이후에는 떨어지는 것으로 나타났다. 최대 충전율은 고분자 재료인 수지 기준으로 최대 약 중량 30%에 해당된다. 이때 밀도는 2.78 g/cm³ 이다.



(A) Relationship between tungsten oxide and PMMA input



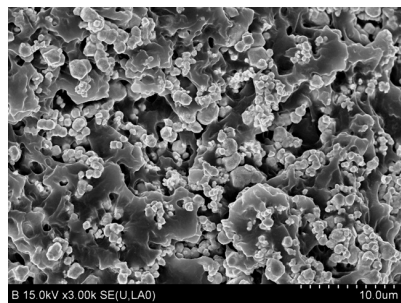
(B) Relationship between Polyethylene(WV%) and PMMA Input



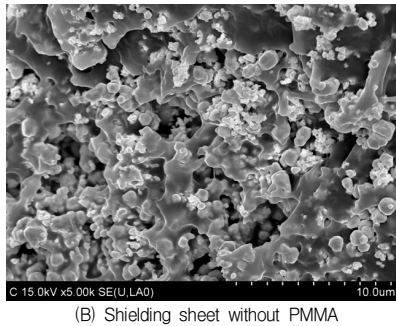
(C) Relationship between Shielding Sheet Density and PMMA Input

Fig. 2. Relationship with PMMA doses and shield sheet components

차폐 시트의 외형은 차이가 없으며, Fig. 3 과 같이 전자현미경 사진에서는 폴리에틸렌 고분자 수지와 산화텨스텐의 결합모양이 좀 더 많아 보이는 경향이 있으나, 큰 차이를 보이지 않았다.



(A) Shielding sheet blended with PMMA



(B) Shielding sheet without PMMA

Fig. 3. Comparison of internal images with and without PMMA

개질제인 PMMA의 첨가량에 따라 제작된 5종의 차폐 시트의 차폐 성능을 평가하고자 사용되었던 방사선의 에너지의 특성은 Table. 1과 같다. 사용된 에너지는 실효 에너지를 기준으로 측정하였으며, 차폐 성능은 Fig. 4와 같이 나타났다. PMMA의 함유량이 20%인 경우에 납당량 0.21mmPb에 해당되는 우수한 차폐성능을 나타내었다. 차폐 시트 0.35mm의 두께에서 평균 80%의 차폐율을 보였다. 특히 낮은 에너지 영역에서는 효과적인 차폐가 이루어졌으나, PMMA를 사용하지 않은 경우 고에너지로 갈수록 차폐율이 급격히 떨어지는 변화를 보였다

Table 1. Specific characteristics of radiation qualities

Quality of Radiation	Tube Voltage (kV)	Added Filter (mm)	Half Value Layer(mm)	Effective Energy (keV)
M30	30	0.374A1	0.36A1	21.1
M60	60	-	1.67A1	34.6
M100	100	3.67A1	4.91A1	56.2
M120	120	0.31Cu + 4.07A1	10.26A1	74.9

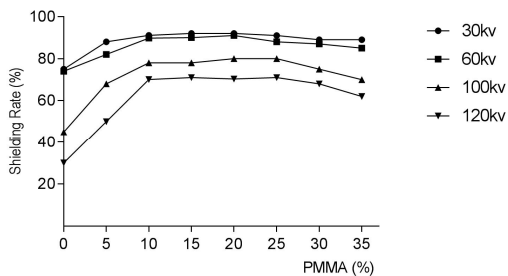
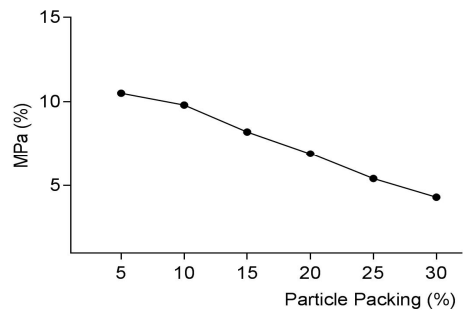
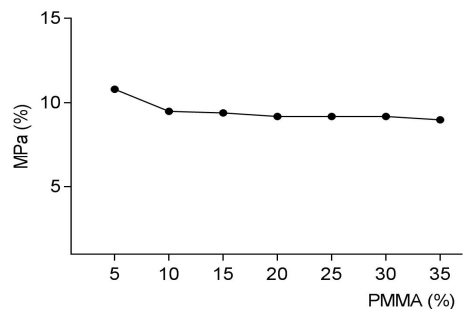


Fig. 4. Comparison of shielding performance by energy according to PMMA input

실험 전에 차폐 시트 제작과정에서 PMMA 함유량이 산화텨스텐의 충전율을 높임에 따라 인장강도가 떨어지는 문제점을 예측하였다. 실험 결과 PMMA의 유무에 따른 강도의 차이는 미미했고, 함유량 10%에 따른 차이 역시 차이가 없어 거의 동일한 수치를 나타내었다. 따라서 베이스재료가 동일한 조건에서 차폐물질이 다소 적게 포함된 시트에는 Fig. 5과 같이 인장강도 변화가 크게 나타나지 않았다.



(A) Relationship between filling rate and tensile strength of tungsten oxide



(B) Comparison of Tensile Strength of Shielding Sheet According to PMMA Input (Particle packing rate of Tungsten oxide Maximum 30%)

Fig. 5. Comparison of tensile strength of shielding sheet

4. 고찰

방사선 차폐 시트는 차폐 재료가 구성하는 시트 내부 구조와 밀도에 직접적인 영향을 받는다. 따라서 차폐 성능을 높이기 위해 일차적으로 시트 내의 차폐 재료 함량을 높여야 한다. 차폐 재료의 함량을 높이기 위해서는 중량 평균 분자량을 높여 베이스 재료인 고분자 수지에 안정감을 주어야 한다. 개질제를 사용함으로써 고분자 수지의 분자량을 높이는 동시에 차폐 재료의 충전율을 높여

본 실험과 차폐 성능을 개선 할 수 있다. 또한 베이스 재료인 수지의 안정감으로 인해 떨어지는 인장강도를 유지 할 수 있다.

차폐 시트의 제품화 조건은 경제적인 측면과 친환경, 유연성, 경량화, 얇은 두께, 인장강도 등의 조건들이 필요하다. 특히 신체에 착용되는 에이프런은 모든 조건을 수용하여 한다. 따라서 의료방사선영역에서 사용되는 차폐 재료는 친환경이며, 자체 밀도가 높은 산화텅스텐을 많이 사용하는데, 고분자 수지와의 친화성을 조절할 수 있다면 경량화의 조건도 만족할 수 있다. 무엇보다도 제작 공정에서 혼합비율의 정량적인 수치값으로 고정할 수 있어 표준화된 공정으로 대량생산이 가능하다.

기존의 차폐 시트 제작공정은 대부분이 동일한 면적에 차폐 재료의 충전율을 높이는데 중점을 두었기 때문에 향후 제품 제작이후의 차폐 시트의 인장강도 문제점이 발생되었다[15]. 충전율을 높이고 공극률을 낮추는 공정과 가소제와 같은 첨가물을 이용하여 차폐 시트의 용융퍼짐과 유연성, 인장강도 등을 우수하게 하는 연구를 진행하고 있다[16].

본 연구에서 사용되었던, 메탈크릴 수지인 PMMA는 고분자 그 자체로 분자량 및 밀도가 높기 때문에 방사선의 알파선, 베타선, 감마선까지 차단 할 수 있는 것으로 알려진다[17-22]. 폴리머의 분자량은 클수록 차폐 효과를 긍정적으로 평가할 수 있다. 베이스 재료의 분자량을 높이면 차폐 재료와의 친화성이 떨어져 재료의 분산력이 떨어지고 열 성형과정에서 경도가 증가하여 유연성이 떨어지고 시간이 지나면 균열의 원인이 된다. 따라서 적절한 비율이 필요하고 재현성을 유지하기 위해 첨가제가 필요하다.

최근에는 차폐 성능을 높이기 위해 혼합된 차폐 재료를 사용할 경우가 있으며, 적층의 방법으로 멀티케이트 공법을 사용한다[23]. 혼합된 차폐 재료는 크기가 일정하지 않아 차폐 성능의 재현성에 문제가 된다. 본 연구에서와 같이 차폐 재료와 베이스재료의 배합과정에서 첨가제를 사용할 수 있다. 제작 공정에서 사용되는 개질제는 첨가되는 재료의 분산력과 제품의 유연성을 높이는데 주로 사용된다. 그 결과 차폐 성능을 일정하게 유지 할 수 있다.

차폐 성능이 우수하고 가볍고, 친환경소재의 차폐 시트의 제작을 위해 차폐 재료와 베이스 재료인 수지와의 교합성을 높이는 개질제와 공극율을 낮추는 가소제 등 공정의 연구만큼 첨가물에 대한 연구가 많이 진행되어야

한다. 고분자 수지 등과 같은 베이스 재료가 일정량의 저에너지를 차단하고 멀티케이트 역할을 차폐 재료가 수행한다면 효과적인 방사선 차폐가 이루어져 전혀 중량감을 느끼지 못하는 의복 수준의 차폐 제품이 생산될 것이다.

5. 결론

의료방사선의 일상적인 방어를 위한 차폐 시트 제조 공정과정에서 고분자 재료 폴리에틸렌수지와 산화텅스텐의 교합과정에서 개질제 PMMA의 역할을 제시하였다. 이는 고분자로 일정면적에서 차폐 재료인 산화텅스텐의 충전율을 향상시키는 역할과 인장강도를 일정하게 유지시키는 역할을 수행하는 것으로 나타났다. 차폐 성능에서는 혼합 재료 내부의 분자량과 밀도 증가로 향상을 가져왔다. 이를 통해 의료기관에서 꼭 필요한 의복형 저선량 차폐 시트의 대량생산이 가능하다.

REFERENCES

- [1] K. Yue, et al. (2009). A New Lead-free Radiation Shielding Material for Radiotherapy. *Radiation Protection Dosimetry*, 133(4), 256-260.
DOI : 10.1093/rpd/hcp053
- [2] S. Xu, M. Bourham & A. Rabiël. (2010). A novel ultra-light structure for radiation shielding. *Materials and Diskan* 31(4), 2140-2146.
DOI : 10.1016/j.matdes.2009.11.011
- [3] W. Stam & M. Pillay. (2008). Inspection of Lead Aprons: A Practical Rejection Model. *Operational Radiation Safety*, 95(2), 133-136.
DOI: 10.1097/01.HP.0000314763.19226.86
- [4] N. Y. Kwon, Y. K. Jeong, & S. T. Oh. (2017). Effect of powder mixing process on the characteristics of hybrid structure tungsten powders with nano-micro size. *Journal of the Korean Powder Metallurgy Institute*, 24(5), 384-388.
DOI : 10.4150/KPML.2017.24.5.384
- [5] S. Y. Seo1, M. S. Han, C. G. Kim, M. C. Jeon, Y. K. Kim & G. J. Kim. (2017). A study on the usefulness of a fusion model designed cloak shield to reduce the radiation exposure of the assistant during CT of severely injured patient. *Journal of the Korea Convergence Society*, 8(9) 211-216.

- DOI : 10.15207/JKCS.2017.8.9.211
- [6] I. Akkurt, H. Akyildirim, B. Mavi, S. Kilincarslan, & C. Basyigit. (2010). Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies. *Progress in Nuclear Energy* 52(7), 620-623.
DOI : 10.1016/j.pnucene.2010.04.006
- [7] N. Z. Noor Asman, S. A. Siddiqui & L. M. Low. (2013). Character of micro-sized tungsten oxide-epoxy composites for radiation shielding of diagnostic X-rays. *Materials Science and Engineering : C* 33(8), 4952-4957.
DOI : 10.1016/j.msec.2013.08.023
- [8] N. Z. NoorAzman, S. A. Siddiqui, R. Hart & L. M. Low. (2013). Effect of particlesize, filler loadings and x-ray tube voltage on the transmitted x-ray transmission in tungsten oxide-epoxy composites. *Applied Radiation and Isotopes* 71(1), 62-67.
DOI : 10.1016/j.apradiso.2012.09.012
- [9] D. H. Kim, S. H. Kim. (2015). Convergence performance evaluation of radiation protection for apron using the PSNR. *Journal of Digital Convergence*, 13(10), 377-383.
DOI : 10.14400/JDC.2015.13.10.377
- [10] S. C. Kim, J. R. Choi, & B. K. Jeon. (2016). Physical analysis of the shielding capacity for a light weight apron designed for shielding low intensity scattering X-rays. *Scientific Reports*, 6(1), 1-7.
DOI : 10.1038/srep27721
- [11] A. Koski, K. Yim & S. Shivkumar. (2004). Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning. *Materials Letters* 58(3), 493-497.
DOI : 10.1016/S0167-577X(03)00532-9
- [12] F. Ganachaud, M. J. Monteiro, R. G. Gilbert, M. A. Dourges, S. H. Thang & E. Rizzardo. (2000). Molecular Weight Characterization of Poly(N-iso propylacrylamide) Prepared by Living Free-Radical Polymerization. *Macromolecules*, 33(18), 6738-6745.
DOI: 10.1021/ma0003102
- [13] S. M. Choi, E. K. Lee & S. Y. Choi. (2008). Effects of Silane-treated Silica on the Cure Temperature and Mechanical Properties of Elastomeric Epoxy. *Polymer Korea*, 32(6), 598-602.
- [14] J. H. Hubbell. (1982). Photon Mass Attenuation and Energy absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV. *Int. Appl. Radiat. Isot.*, 33(11), 1269-1290.
DOI : 10.1016/0020-708X(82)90248-4
- [15] S. S. Ray & M. Okamoto, (2003). *Progress in Polymer Science*, 28, 1539.
- [16] J. P. Yang, Z. K. Chen, G. Yang, S. Y. Fu & L. Ye. (2008). Simultaneous improvements in the cryogenic tensile strength, ductility and impact strength of epoxy resins by a hyperbranched polymer. *Polymer* 49(13), 3168-3175.
DOI : 10.1016/j.polymer.2008.05.008
- [17] C. Stephan, T. P. Nguyen, M. Lamy de la Chapelle, S. Lefrant, C. Journet & P. Bernie. (2000). Characterization of singlewalled carbon nanotubes-PMMA composites. *Synthetic Metals* 108(2), 139-149.
DOI : 10.1016/S0379-6779(99)00259-3
- [18] Z. Jia, Z. Wang, C. Xu, J. Liang, B. Wei, D. Wu & S. Zhu. (1999). Study on poly(methyl methacrylate):carbon nanotube composites, *Materials Science and Engineering A*, 271(1), 395-400.
DOI : 10.1016/S0921-5093(99)00263-4
- [19] A. M. Sukegawa, Y. Anayama, S. Ohnishi, S. Sakurai, A. Kaminaga & K. Okuno. (2011). Development of Flexible Neutron-Shielding Resin as an Additional Shielding Material. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 48(3), 585-590.
DOI: 10.1080/18811248.2011.9711737
- [20] L. Chang, Y. Zhang, Y. Liu, J. Fang, W. Luan, X. Yang & W. Zhang. (2015). Preparation and characterization of tungsten/epoxy composites for X-rays radiation shielding. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 356(1), 88-93.
DOI : 10.1016/j.nimb.2015.04.062
- [21] S. A. M. Issa, A. M. A. Mostafa. (2017). Effect of Bi2O3 in borate-tellurite-silicate glass system for development of gamma-rays shielding materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 695(25), 302-310.
DOI : 10.1016/j.jallcom.2016.10.207
- [22] R. Li, Y. Gu, Y. Wang, Z. Yang, M. Li, & Z. Zhang. (2017). Effect of particle size on gamma radiation shielding property of gadolinium oxide dispersed epoxy resin matrix composite. *Materials Research Express*, 4(3), 1-10.
DOI: 10.1088/2053-1591/aa6651
- [23] S. C. Kim, H. K. Lee & J. H. Cho. (2014). Analysis of low-dose radiation shield effectiveness of multi-gate polymeric sheets. *Radiation Effects and Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology*, 169(7), 584-591.
DOI : 10.1080/10420150.2014.920019

김 선 칠(Kim, Seon Chil)

[정회원]



- 2003년 2월 : 고려대학교 의료정보 기기학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 경북대학교 의료정보학과 (의료정보학박사)
- 2003년 3월 ~ 2015년 8월 : 대구 보건대학교 방사선과 교수
- 2015년 9월 ~ 현재 : 계명대학교 의용공학과 교수
- 관심분야 : 방사선 차폐, 의료기기, 의료정보
- E-Mail : chil@kmu.ac.kr