Journal of the Korea Convergence Society
Vol. 12. No. 1, pp. 105-110, 2021

ISSN 2233-4890 / eISSN 2713-6353
https://doi.org/10.15207/JKCS.2021.12.1.105

# 무연 방사선 융합 차폐시트 단일 구조와 적층 구조의 비교를 통한 두께별 차폐성능 예측

**김선칠**
**계명대학교 의용공학과 교수**

# Prediction of Shielding Performance by Thickness by Comparing the Single and Laminated Structures of Lead-free Radiation Fusion Shielding Sheets

Seon-Chil Kim
Professor, Department of Biomedical Engineering, Keimyung University

**요 약** 의료기관에서 최근 많이 사용되고 있는 친환경 소재 방사선 차폐체는 시트 형태로 제작되어 Apron의 재료로 활용되고 있다. 친환경 Apron의 차폐성능은 납당량을 기준으로 제시되고 있으며, 납당량은 0.25~0.50mmPb로 제시되고 있다. 납이 주재료 사용되는 차폐체인 경우 납의 우수한 가공성으로 인해 두께로 차폐성능을 조절할 수 있다. 그러나 친환경 차폐시트는 차폐재료의 함량, 베이스 재료인 고분자 물질의 물성, 공정과정의 기술적 차이에 따라 차폐성능이 변화되어 두께 기준의 차폐성능을 제어하기가 어렵다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 두께를 기준으로 차폐시트를 제작하여 차폐성능을 평가, 비교하였다. 동일한 시트 제작공정을 제시하여 두께를 제어할 수 있는 캘린더 공정의 압연 기술을 적용하였고 여러층의 적층 구조와 단일 구조로 제작된 두 시트의 두께별 차폐성능을 비교하여 5%대의 차이를 관찰하였다. 그 결과 여러 층으로 차폐한 적층 구조 차폐시트가 더 효과적임을 증명하는 동시에 두께 중심의 차폐성능의 가능성을 제시하였다.

**주제어 :** 텅스텐, 융합 차폐시트, 단일 구조, 적층 구조, 납당량

**Abstract** Radiation shielding of affinity material, which is widely used in medical institutions, is made in sheet form and is mainly applied to apron. Shielding performance is presented based on lead equivalent, and is presented as 0.25-0.50mmPb. In the case of shielding materials where lead is used as the main material, the shielding performance can be adjusted by thickness due to the excellent machinability of lead. However, eco-friendly shielding sheets are difficult to control shielding performance based on thickness criteria as shielding performance varies depending on the content of shielding materials, the properties of polymeric materials that are base materials, and the technical differences in the process. In this study, shielding sheets were manufactured based on thickness to solve these problems and the shielding performance was compared in this study. As a result, it was shown that the laminated structure shielding sheet was more effective.

**Key Words :** Tungsten, Fusion shielding sheet, Single structure, Laminated structure, Lead equivalent

*This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MEST) (NRF. 2020R1I1A3070451).
*Corresponding Author : Seon-Chil Kim(chil@kmu.ac.kr)
Received November 3, 2020 Revised December 1, 2020
Accepted January 20, 2021 Published January 28, 2021

## 1. 서론

의료기관에서 사용되는 방사선 차폐체는 최근 무연을 소재로 제작되고 있다. 과거의 방사선 차폐체 제작에는 주로 가공성이 우수한 납을 사용하여 두께를 기준으로 한 납당량을 차폐성능으로 제시하는 방법을 사용하였다[1]. 그러나 납 사용에 있어서 발생되는 환경문제와 인체에 대한 유해성으로 인해 방사선 차폐체로 납 사용이 줄어드는 추세이다[2]. 따라서 최근에는 친환경 소재의 차폐물질들을 이용하여 무연 방사선 차폐체를 개발하는 연구가 활발히 진행되고 있다[3]. 친환경 소재의 무연 방사선 차폐체는 텅스텐, 주석, 안티몬, 비스무트, 황산바륨 등과 같은 방사선 차폐물질과 고분자 물질을 혼합한 복합재료로 구성되어 있다[4]. 복합재료는 필름, 시트, 섬유 형태로 제작되고 있으나, 의료기관에서 가장 많이 사용되는 것이 시트 형태이며, 방사선 차폐시트는 주로 의료기관에서 차폐복(Apron)으로 제작되고 있다[5].

의료용 방사선 발생장치를 사용하는 시설의 방사선 차폐를 위해 콘크리트, 납판 등을 사용하여 촬영실 벽을 제작하거나 이동형 방사선 차폐벽 등을 사용하고 있다[6]. 이 경우 두께를 중심으로 차폐성능을 예측이 가능하여 표준 납당량을 기준으로 차폐성능을 제시하고 있다. 따라서 기존의 납 차폐체 제작은 납의 두께를 조정하여 차폐성능을 예측하여 제품화할 수 있는 가공성이 우수한 장점을 지니고 있어 차폐성능별 제작 공정에 어려움이 없다고 할 수 있다.

그러나, 친환경 방사선 차폐시트의 경우는 두께별 차폐성능을 제시하기에 어렵다. 가장 큰 이유로는 차폐 재료의 성분별, 함유량 별, 생산 공정별 등 조건의 변화에 따라 표준 차폐성능을 제시하기가 어렵기 때문이다. 따라서 제품의 생산단계에서 차폐성능을 결정하여 제작해야 하는 단점이 있으며, 추가적으로 차폐성능을 조절하기는 거의 불가능하다. 또한, 납당량 기준으로 의료기관 방사선 차폐복 생산에만 맞추어져 있어 대량생산에 있어서 동일한 차폐성능의 재현성을 추구하기 사실상 어렵다고 할 수 있다[7].

일반적으로 차폐시트의 방사선 차폐성능은 KS A 4025에 의해 납당량(mmPb)으로 제시되고 있으며, 의료기관에 사용되는 납당량은 0.25~0.50mmPb 범위 내에서 사용되고 있다[8]. 따라서 친환경 차폐시트는 재료 종류를 기준으로 두께보다는 무게 중심의 함량으로 납당량을 맞추고 있으나, 대부분이 차폐복 중심의 동일한 0.25~0.50mmPb 범위 내의 납당량을 의무적으로 제공하고 있다[9].

따라서 본 연구는 납 대신에 텅스텐을 이용하여 고분자 수지와 혼합하여 친환경 방사선 차폐시트를 제작하였다. 동일한 차폐성능의 두께별 차폐율 변화를 실험하여 적층 구조 차폐시트의 차폐성능 재현성에 대하여 연구하고자 한다. 한 장의 차폐시트와 여러 장 겹겹이 적층한 시트 구조의 차폐성능 차이를 비교 분석하였다. 이를 통해 단일 구조와 적층 구조의 차폐 성능의 차이를 제시하고 동일한 조건으로 10회의 동일한 차폐시트 제조공정을 통해 최종 제품인 차폐시트의 차폐성능 재현성을 제시하고자 한다. 최대한 외부 영향인자를 줄인 동일한 제조공정을 제시하여 여러 장 시트가 동일한 두께 범위에 차폐능을 나타낼 수 있는지를 실험하였다. 이를 통해 적층 구조 시트의 차폐성능 예측 가능성을 평가하고자 하였다.

## 2. 연구 방법

무연 방사선 차폐시트를 제작하기 위해 방사선 차폐물질을 고분자 수지에 혼합하는데, 이 방법은 차폐시트의 물리적 특성인 강도와 유연성에 직접적인 영향을 끼친다[10]. 또한, 차폐성능에 영향을 미치는 요인으로는 시트의 공극과 입자의 함량이며 차폐성능의 기준은 밀도와 물질의 중량으로 계산할 수 있다. 따라서 차폐물질과 고분자 수지의 혼합성이 가장 중요하다. 분자량이 일정하지 않은 고분자 물질 분자량에 대해 평균 분자량을 적용하여 전체 차폐물질의 중량을 결정할 수 있다. 이는 차폐시트의 단위 면적당 방사선 흡수선량에 직접적인 영향을 끼치기 때문에 단위 흡수선량으로 단량체 단위당 분자량의 변화는 E.q 1, E.q 2와 같이 설명할 수 있다[11].

$$\frac{m}{Mn} = \frac{m}{(Mn)_0} + (p_0 - \frac{1}{2}q_0)D \qquad (1)$$

$$\frac{m}{Mw} = \frac{m}{(Mw)_0} + (\frac{1}{2}p_0 - q_0)D \qquad (2)$$

여기서 $Mn$은 수 평균 분자량, $M\omega$는 중량 평균 분자량, $p_0$는 단위 선량당 투과될 확률, $q_0$는 단위 선량당 흡수될 확률, $D$는 흡수선량이다. 따라서 혼합물의 구성에 따라 차폐성능에 영향을 줄 수 있기 때문에 차폐물질의 함량을 기준으로 혼합물의 중량을 포함해야 한다. 본 실험을 위해 제작한 시트의 차폐성능을 동일한 조건으로 비교 평가하기 위해서는 동일 면적의 차폐물질과 고분자 수지

의 중량을 기준으로 제시하였다.

차폐시트 재료는 텅스텐 분말(순도 99.9%)을 사용하였고, 텅스텐 분말을 초음파 분쇄 장비를 활용하여 입자를 5$\mu m$이하로 분쇄하여 70℃에 12시간 건조하여 사용하였다. 고체상태의 폴리머(PU, Mw 100000~150000)를 사용하기에 용매는 N-dimethylformamide(DMF, 99.5%)을 사용하여 캐스팅 용액을 만들었다. DMF를 10wt% 내외의 비율로 교반기에 폴리우레탄(PU:Polyurethane)를 녹이고 완성된 캐스팅 용액에 텅스텐 마이크로 분말을 첨부하여 5000rpm으로 교반하여 텅스텐 입자를 분산시켰다. 차폐시트 내부의 공극을 제거하기 위하여 사용된 가소제는 Diisononyl phthalate (DINP)를 0.85~0.95wt%를 사용하였다. 최종 케스팅 용액의 균일한 차폐성능을 유지하기 위해서 이물질을 필터링을 통해 제거하고, 탈포 과정을 거친 후 압착 성형의 카렌더 공정으로 마무리 하였으며, 시트의 크기는 500㎜×500㎜로 작업을 수행하였다.

친환경 방사선 차폐시트의 동일한 차폐성능을 평가하는 실험이라 본 연구에서는 혼합물의 함량을 일정한 용량으로 고정하고 두께 재현성에 초점을 두고 동일한 공정기술로 10개의 동일한 시트를 제작하였다. 따라서 두께의 재현성을 유지하기 위해서는 Fig. 1과 같이 성형 압착과정은 등속 회전 방식의 캘린더 공정을 이용하여 여러 형태의 공정 과정을 실험하여 단일 방법을 선택하였다. 따라서 동일한 두께의 시트를 재현하기 위해 공정 과정의 기술을 동일하게 적용하였다. Fig. 2와 같이 동일한 두께를 만드는 과정이 필요하다. Fig 2.(a)는 일반 캘린더 압연 성형과정으로 70℃의 온도로 반복 압연을 통해 시트를 제작하였으며 (b), (c)는 두 개의 시트를 하나로 합포하는 과정으로 동일한 혼합물의 양을 투입하여 2배로 시트의 두께를 만들었다. 이렇게 제작된 시트의 두께 변화와 차폐성능을 평가하였다.

Fig. 1. Sheet Process with Thickness Adjustment

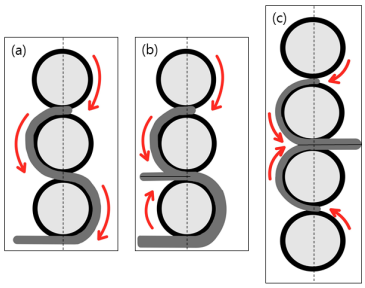



Fig. 2. Calender process technology through constant speed rotation

차폐시트 내의 텅스텐 입자 분포상태를 확인하기 위해 Field Emission Scanning Electron Microscope을 15.0kV×10.0k 조건으로 SEM으로 분석하였다. 차폐성능을 테스트하기 위한 실험장비로 X-선 발생장치(MOBIX-1000, Listem, 2010), 방사선 검출선량계는 이온챔버 전리조(Radcal 2186(Accu-Dose), Radcal Co, 2017, Correction. 2020) 장치를 이용하여 Fig 3과 같이 설치하였다.

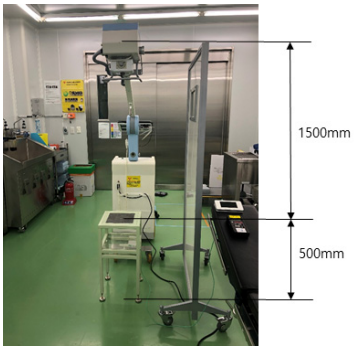



Fig. 3. Evaluation of Radiation Shielding Performance of Shielding Sheets

X-선 발생장치와 방사선 검출 분석기를 이용하여 방사선 차폐시트를 의료기관 방사선 촬영에서 사용되는 저선량 범위와 고선량 범위인 60kVp와 100kVp 두 영역의 관전압을 사용하였다. 이는 인체에 사용되는 에너지 중 저에너지 영역대와 고에너지 영역대의 차폐성능을 평가하기 위해 사용하였다.

관전류량은 20mAs로 각 10회로 실험하여 평균값을 적용하였다. 측정방식은 납당량 시험방법(KS A 4025 : 2017)과 동일한 실험방법을 준수하여 적용하였다[8]. X선 차폐율 측정은 시트 1장씩의 반복 복층형태의 차폐효과와 제작과정에서 동일 두께로 제작된 3장과 5장의 단

일 구조 차폐시트의 차폐효과를 비교하였다. 실험에서 방사선 차폐시트의 차폐율 측정은 E.q 3과 같이 계산하였다. $e$는 X선 빔과 검출기 사이에 차폐시트가 있을 경우에 측정한 조사선량이며, $e_0$는 X선 빔과 검출기 사이에 차폐시트가 없을 경우에 측정한 조사선량 값으로 산정하였다[12].

$$S=(1-\frac{e}{e_0})\times 100 \qquad (3)$$

S = 차폐율, $e_0$ = 입사선량(mR), $e$ = 투과선량(mR)

## 3. 결과

본 연구는 차폐시트의 단일 구조와 적층 구조의 시트 제작은 Fig 4와 같이 비교되었다. 두께의 변화 없이 공정 기술제어로 시트를 제작하였다. 시트 제작의 공통된 공정 기술 플랫폼을 연구하기 위해 제작된 단일구조 차폐시트의 구조는 Table 1과 같다. 단일  구조 시트를 복층으로 하여 차폐성능을 비교하여 적층 구조의 데이터와 동일하도록 구성하였다.

**Table 1. Fabrication composition of radiation shielding sheet**

| Characteristic | Value |
|---|---|
| Sheet structure | Single structure |
| Shielding material | Tungsten |
| Mixing ratio (Polymer:Tungsten) | 1:3 |
| Final sheet weight (kg/m²) | 1 |
| Final sheet thickness (㎜) | 0.3 |
| Solvents (g) | 11.2 |
| Polyurethane (g) | 23.4 |
| Tungsten(g) | 70.2 |

Fig 4와 같이 완성된 차폐시트를 1장에서 5장까지 겹겹이 적층하여 차폐율 계산하였고, 3장과 5장에 해당하는 두께로 단일 구조의 차폐시트를 제작하여 차폐성능을 비교한 결과는 Table 2, 3, 4, 5와 같이 나타났다. 고밀도로 텅스텐을 첨가하지 않고 동일한 공정 조건 하에서 차폐시트의 차폐성능을 비교하기 위해 차폐시트의 최종 무게를 동일하게 맞추고자 하였다. 그 결과 Fig 5의 입자 분산 SEM 사진에서도 시트 내부 밀도의 큰 차이가 없다는 것을 관찰할 수 있다. 고밀도로 텅스텐 입자를 충전한 것이 아니어서 우수한 차폐성능을 나타나지 않았지만 두께에 대해 비례적인 관계의 차폐성능은 얻을 수 있었다.

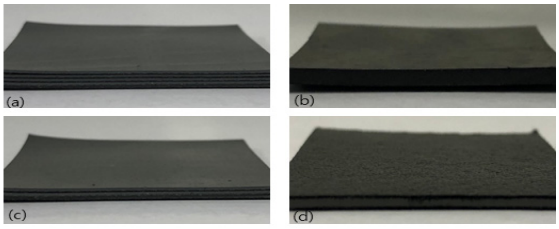
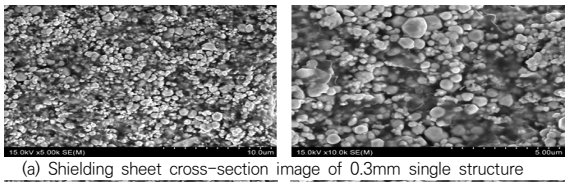
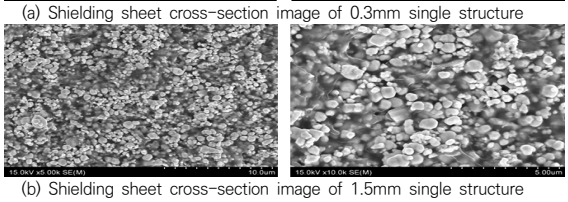



**Fig. 4. The appearance of the final shielding sheet**
((a) and (c) are a stacked structure of 5 sheets and 3 sheets, respectively, and (b) and (d) are sheets made of 1 sheet with the same thickness)



(a) Shielding sheet cross-section image of 0.3mm single structure



(b) Shielding sheet cross-section image of 1.5mm single structure

**Fig. 5. Structure of the shielding sheet's internal SEM photo**

저선량과 고선량의 차폐률은 유사한 형태를 얻을 수 있었으며, 동일한 차폐물질과 공정 과정을 적용하였지만 개별 적층구조보다 단일구조가 차폐성능이 다소 떨어지는 경향이 있다. 이는 적층구조 사이의 아주 작은 공기층이 방사선 산란과 흡수에 영향을 끼치는 것을 예측할 수 있다. 단일 구조보다 적층 구조가 저 에너지에서는 5.4 ~ 7.4% 정도의 차폐율 상승효과가 있으며, 고에너지에서는 2.6 ~ 5.5% 정도 증가함을 보였다.

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

| Material | Thickness (mm) | Exposure | | Shield ratio(%) |
|---|---|---|---|---|
| | | M(mR) | SD | |
| Nothing | - | 91.42 | 0.14682 | |
| Sheet 1 | 0.30 | 65.35 | 0.05044 | 28.52 |
| Sheet 2 | 0.60 | 50.21 | 0.03323 | 45.08 |
| Sheet 3 | 0.90 | 38.41 | 0.02835 | 57.99 |
| Sheet 4 | 1.20 | 22.94 | 0.03976 | 74.91 |
| Sheet 5 | 1.50 | 16.64 | 0.02538 | 81.80 |

*M:Average, SD:Standard Deviation

Table 3. Result of the radiation shielding sheet tests [60kVp]

| Material | Thickness (mm) | Exposure | | Shield ratio(%) |
|---|---|---|---|---|
| | | M(mR) | SD | |
| Nothing | - | 91.42 | 0.02934 | |
| Double 3 Sheet | 1.00 | 41.12 | 0.01732 | 55.02 |
| Double 5 Sheet | 1.50 | 21.81 | 0.02786 | 76.14 |

Table 4. Result of the radiation shielding sheet tests [100kVp]

| Material | Thickness (mm) | Exposure | | Shield ratio(%) |
|---|---|---|---|---|
| | | M(mR) | SD | |
| Nothing | - | 308.4 | 0.02193 | |
| Sheet 1 | 0.30 | 248.54 | 0.02610 | 19.41 |
| Sheet 2 | 0.60 | 209.54 | 0.02188 | 32.06 |
| Sheet 3 | 0.90 | 160.21 | 0.01855 | 48.05 |
| Sheet 4 | 1.20 | 110.15 | 0.03523 | 64.28 |
| Sheet 5 | 1.50 | 84.85 | 0.03371 | 72.49 |

Table 5. Result of the radiation shielding sheet tests [100kVp]

| Material | Thickness (mm) | Exposure | | Shield ratio(%) |
|---|---|---|---|---|
| | | M(mR) | SD | |
| Nothing | - | 308.4 | 0.03195 | |
| Double 3 Sheet | 1.00 | 168.02 | 0.02449 | 45.52 |
| Double 5 Sheet | 1.50 | 90.54 | 0.02691 | 70.64 |

## 4. 고찰

의료방사선 차폐복은 방사선 차폐체의 주요 재료로 사용되었던 납을 사용하지 않고 친환경 재료인 텅스텐, 산화비스무트, 황산바륨 등을 고분자 수지 화합물과 혼합하여 압출 성형, 캘린더 공정, 코팅 공정을 통해 고분자 차폐시트로 제작하고 있다[13]. 이 과정에서 가장 중요한 것이 활동성에 기준을 두고 있는 경량과 두께, 차폐성능이다. 이러한 조건은 차폐물질과 혼합 공정기술에 해당된다.

본 연구에서와 같이 차폐시트의 제작공정에 따라 차폐성능의 차이가 발생하고 있으며 이에 대한 제작공정의 표준화와 원인 분석이 중요하다고 생각된다. 동일한 제작공정에서도 두께와 차폐성능은 직접적인 영향을 있으며, 두께는 내부구조의 밀도와 상관관계가 있다[14]. 밀도는 주로 차폐물질의 분산과 입자의 크기에 영향을 받는다. 일반적으로 방사선 차폐성능은 밀도와 두께의 곱에 비례하며, 두께가 동일하면 밀도가 커질수록 차폐율이 증가한다[15]. 따라서 밀도를 높이기 위해 공극을 낮추거나, 입자의 크기를 줄여 혼합하는 기술을 연구하고 있다[16]. 본 연구에서와 같이 단일조직과 적층구조로 차폐체를 제작할 경우에도 차폐성능의 차이를 차폐물질의 구성 조건만으로 차폐성능을 예측하는 것이 어렵다. 또한, 방사선 장비를 사용하는 시설의 차폐를 위한 차폐체로 납 대신에 친환경 소재의 차폐체를 사용할 경우, 현재로는 가공성과 경제성에 다소 어려운 점이 있다. 따라서 원하는 차폐성능을 쉽게 고려할 수 있는 친환경 차폐체의 차폐공정 개발이 중요하다.

동일한 차폐 구성물질로 제작된 시트의 두께에 대한 구성이 단일구조에서 여러 층을 겹겹이 구성한 복합 적층구조로 차폐성능을 비교하여 차폐율이 예측가능한 두께를 산정하고자 연구하였고, 차폐시트 제조 결과 차폐성능의 차이의 범위를 알아내었다. 따라서 향후 차폐물질의 차이에 따라 두께를 예측할 수 있는 시스템이 필요하다고 사료된다.

본 연구에서 제시된 단일구조와 적층 구조의 차이는 본 연구에서는 적층 사이의 공기 함량에 따른 변화로 예측되며, 향후 두께와 밀도, 입자의 분산 정도를 고려하는 공정기술도 필요할 것으로 생각된다. 이러한 점은 앞으로 연구되어야 하며, 본 실험에서 입자 사진을 보고 예측한 결과이다. 따라서 본 연구에서 여러가지의 조건 등을 고려하지 못한 한계점도 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 동일한 조건을 맞추어 시트를 제작하였으며, 10kg의 대량생산을 통해 일정 크기의 시트를 실험한 결과로 방사선 차폐시트의 대량생산에 초점을 맞추어 실험하였다.

## 5. 결론

방사선 차폐를 목적으로 한 친환경 차폐시트 적층 구조의 차폐성능을 단일구조와 비교하여 차이점을 분석하였다. 동일한 공정을 통해 두께에 대한 차폐성능을 표준화 하여 방사선 차폐성능의 재현성을 유지하고자 하였다. 그 결과 동일한 제조 공정을 기반으로 한 경우 여러 겹의 적층구조 차폐시트의 차폐성능이 5% 정도 상향되게 나타나, 두께별 차폐성능 예측에 있어서 이 점을 고려하여 차폐구조와 차폐성능을 계산할 수 있다.

## REFERENCES


[1] S. C. Kim. (2018). Physical Properties of Medical Radiation Shielding Sheet According to Shielding Materials Fusion and Resin Modifier Properties, *Journal of the Korea Convergence Society*, *9(2)*, 99-106.
DOI : 10.15207/JKCS.2018.9.12.099

[2] Y. J. Heo, S. U. Yang & J. K. Park. (2020). A Study on the Non-Toxic Compound-based Multi-layered Radiation Shielding Sheet and Improvement of Properties, *Journal of the Korean Society of Radiolgy, 14(2)*, 149-155.
DOI : 10.7742/jksr.2020.14.2.149

[3] J. K. Park, I. H. Choi, H. H. Park, S. W. Yang, K. T. Kim & S. S. Kang. (2016). Design of Double Layer Shielding Structure using Eco-friendly Shielding Materials, *Journal of the Korean Society of Radiology, 10(8),* 559-563.
DOI : 10.7742/jksr.2016.10.8.559

[4] H. Cetin, A. Yurt & S. H. Yuksel. (2016). The absorption properties of lead-free garments for use in radiation protection, *Radiation Protection Dosimetry, 173(4),* 1-6.
DOI : 10.1093/rpd/ncw004

[5] S. H. Kim, Y. J. Kim & J. S. Kwak. (2013). Development and Radiation Shield effects of Dose Reduction Fiberfor Scatter ray in CT Exams, *Journal of the Korea Academia-Industrial, 14(4),* 1871-1876.
DOI : 10.5762/KAIS.2013.14.4.1871

[6] C. I. Chang & C. Y. Boo. (1998). A Study on the Radiation Shielding of Heavyweight Concrete using Metal Aggregate. *Jouranl of Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 14(4),* 361-367

[7] S. C. Kim & S. H. Cho. (2019). Analysis of the Correlation between Shielding Material Blending Characteristics and Porosity for Radiation Shielding Films, *Applied sciences, 9(9)*, 1765.
DOI : 10.3390/app9091765

[8] K. W. Kim, S. H. Choi, K. Y. Kim, I. P. Lee, S. G. Hwang & K. R. Dong. (2017). Performance Evaluation of Aprons according to Lead Equivalent and Form Types, *Journal of Radiation Industry, 10(4)*, 219-225.

[9] C. B. Kim, Y. K. Kim, H. B. Ku & K. S. Lee. (2004). Improvement of the shieldability and lightweight of a radiation protective apron, *The Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers,* 105-110.

[10] M. Mirzaei, M. Zarrebini, A. Shirani, M. Shanbeh & S. Borhani. (2019). X-ray shielding behavior of garment woven with melt-spun polypropylene mono-filament, *Powder Technology, 345(1)*, 15-25.
DOI : 10.1016/j.powtec.2018.12.069

[11] Z. Lihua, Z. Maotang & C. Donglin. (1994). Effects of structure multiplicity on mechanism of radiation crosslinking of polymers, *Radiar. fhys. Chem, 44(3)*, 303-308.
DOI : 10.1016/0969-806X(94)90008-6

[12] J. W. Hong, D. H. Kim, S. W. Kim, S. H. Choi, G. E. Lee, H. K. Seo, S. H. Kim & Y. J. Lee. (2018). Effectiveness evaluation of self-produced micro- and nanosized tungsten materials for radiation shielding with diagnostic X-ray imaging system, *Optik, 172*, 760-765.
DOI : 10.1016/j.ijleo.2018.07.107

[13] J. H. Yun, J. Hou, W. G. Jang, J. H. Kim & H. S. Byun. (2019). Preparation and Optimization of Composition of Medical X-ray Shielding Sheet Using Tungsten, *Polymer(Korea), 43(3),* 346-350.
DOI : 10.7317/pk.2019.43.3.346

[14] N. Z. N. Azman, S. A. Siddiqui & I. M. Low. (2013). Characterisation of micro-sized and nano-sized tungsten oxide-epoxy composites for radiation shielding of diagnostic X-rays, *Materials Science and Engineering C 33,* 4952-4957.
DOI : 10.1016/j.msec.2013.08.023

[15] J. C. Lee & W. J. Kim. (2017). Mechanical Properties and Neutron Shielding Performance of Concrete with Amorphous Boron Steel Fiber, *Journal of the Korea Institute of Building Construction, 17(1)*, 009-014.
DOI : 10.5345/JKIBC.2017.17.1.009

[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*, 3168-3175.
DOI : 10.1016/j.polymer.2008.05.008



**김 선 칠(Seon-Chil Kim)** [정회원]

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