

The Study on Reduction of Hazardous Materials using Eco-friendly Charcoal Composite Sheet

Il-Hong Choi,¹ Sang-Sik Kang,¹ Su-Min Lee,² Seung-Woo Yang,² Kyo-Tae Kim,³ Ji-Koon Park^{1,*}

¹Institute of Radiation Fusion Technology, International University of Korea

²Department of Radiological Science, International University of Korea

³Software Education Institute, Inje University

Received: September 28, 2018. Revised: October 25, 2018. Accepted: October 31, 2018

ABSTRACT

Recently, various environmentally friendly products have been developed for improving the indoor air quality while pursuing a well-being nature-friendly healthy life as a core value. In this research, we not only solve the problems of existing environmentally friendly paints, but also developed a charcoal composite seats that can reduce radon, which is a natural radioactive substance, and evaluated the reduction effect of radon, formaldehyde and volatile organic compounds. In the charcoal composite seats, a sodium silicate emulsion and charcoal were mixed to prepare an charcoal liquid coating material, and the composite seats was fabricated by air-spray coating method. In order to analyze the hazardous substance reduction performance of the fabricated charcoal composite seats, radon was designed to comply with the Ministry of the Environment standard, formaldehyde and volatile organic compounds were designed to comply with KCL-FIR-1085 standard. As a result of the experiment, the fabricated charcoal composite seats was evaluated as having a radon reduction capability of about 90.8% from 20 hours, formaldehyde and volatile organic compounds were 3 hours, and the reduction capability of 96.7% and 96.6% was found respectively. It is considered that these results can be utilized as basic data at the time of product development for improvement of indoor air quality.

Keywords: Indoor air quality, Charcoal composite seats, Radon, Formaldehyde, Volatile organic compounds

I. INTRODUCTION

최근 현대인들은 생활공간의 적정한 환경을 효율적으로 유지하기 위해 건축물의 밀폐화가 점차 이루어지고 있다. 이러한 건축 양식은 다양한 오염원을 생활공간에 장기간 체류하게 하며 궁극적으로 인체에 유해한 영향을 미치게 한다. 이에 환경부에서는 실내 공기 질에 대한 오염물질과 위험도를 근거로 '실내 공기 질 관리법'을 명문화함으로써 다중이용시설에 대한 실내 공기 질을 관리하고 있으며, 오염물질을 방출하는 오염원을 엄격히 규제하고 있다. 이러한 '실내 공기 질 관리법'에서 규정하는 오염물질은 다양하지만, 최근 라돈에 대한

관심이 세계적으로 대두되고 있으며 관리를 위한 법제화가 이루어지고 있다. 라돈은 핵변환을 통하여 α 선을 방출하는 천연방사성 가스로서 호흡을 통해 폐로 유입되어 폐암을 유발하는 것으로 알려져 있다. 국제 암 연구기관에서는 폐암 발생의 약 14%가 라돈에 의해 발생하는 것으로 보고하고 있으며 이를 근거로 1급 발암물질로서 규정하고 있다.^[1] 또한, 국제방사선방호위원회에서는 공기 중 라돈에 대한 피폭가능성이 있는 상황을 고려하여 방사선 방호체계에 대한 ICRP 103 권고안을 발간하였다.^[2] 이에 국내에서는 '원자력법'의 명문화를 통하여 라돈 농도가 높은 공간에서의 작업 수행을 제한하고 있으며, 적절한 방안을 통해 라돈 농도를 저감할

* Corresponding Author: Ji-Koon Park

E-mail: radiopjk@iuk.co.kr

Tel: +82-10-9316-7931

것을 규정하고 있다.

현재 밀폐된 공간에서 공기 질 개선을 위하여 보편적으로 활용되는 방안으로는 환기 시스템에 기능성 필터를 설치하여 오염물질을 제거하는 방법이 적용되고 있다. 하지만, 토양/건축자재로부터 유입되는 라돈은 환기 시스템만으로는 근본적인 해결이 어려운 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 천연물 소재인 활성탄을 이용한 친환경 제품에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다.^[3-5] 하지만 기존의 친환경 도료 기술은 악취 발생과 더불어 포름알데히드 (HCHO; formaldehyde) 및 휘발성 유기화합물 (VOCs; Volatile Organic compounds)와 같은 오염물질을 방출하는 등의 한계점이 여전히 존재하며 사용 시 도료가 묻어나는 현상이 나타나고 있다. 그러므로 라돈을 저감할 수 있으면서도 오염물질을 방출하지 않는 친환경 기술에 대한 개발이 필요하다. 이에 본 연구에서는 기존 친환경 도료의 문제점을 해결할 뿐만 아니라 천연방사성 물질인 라돈 저감이 가능한 활성탄 복합 시트를 개발하고 오염물질 저감 효과에 대한 성능을 평가하였다.

II. METHODS

본 연구에서는 기존 문제점을 해결하기 위하여 규산나트륨 에멀전과 활성탄을 혼합함으로써 활성탄 액상 도료를 제조하였으며 에어스프레이 공법을 통하여 복합 시트로서 제작하였다. 이는 압축된 공기를 제어함으로써 방출되는 도료의 양을 쉽게 조절할 수 있으며 균일한 도막을 형성할 수 있다.^[6]

1. Fabrication of charcoal composite sheet

본 연구에서는 분말 상태의 활성탄을 에어스프레이 공법으로 제작하기 위하여 탄산칼슘과 규산나트륨으로 구성된 에멀전 소재와 혼합하여 활성탄 액상 도료를 제조하였다. 이 때, 활성탄 분말과 에멀전 소재는 2:1로 혼합하였으며 25 °C 에서 20 분 동안 교반기 (Homogenizer HG-15A, DAIHAN Scientific Co., Ltd, Korea)에서 500 rpm의 속도로 교반하였다. 활성탄의 주성분은 탄소질로서 기체나 습기에 대한 우수한 흡착성을 바탕으로 공기 정화, 살균 등과 같은 유의한 효과를 발현하는 것으로 알

려져 있다.^[7-9] 이러한 유의한 효과는 기존 친환경 도료에서 미생물에 의한 변질을 방지하기 위해 첨가하는 방부제를 대체함으로써 오염물질이 방출되는 문제점을 해결할 수 있다. 이 후, 제조된 활성탄 액상 도료를 흡착성이 우수한 섬유 소재인 부직포 시트에 에어스프레이 공법으로 도포하였다.

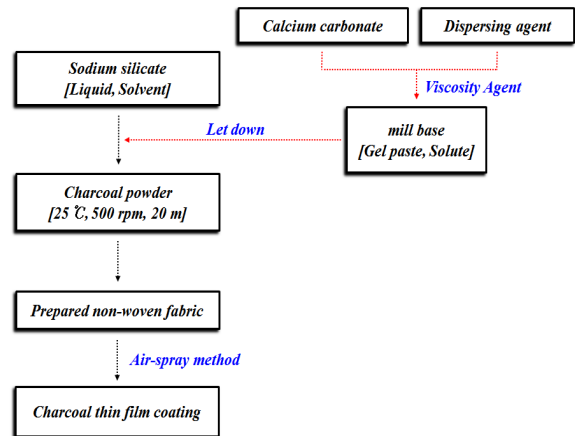


Fig. 1. Fabrication process of charcoal composite seats using air-spray method.

Fig. 1은 에어스프레이 공법을 이용한 활성탄 복합 시트의 제조 공정을 나타내었다.

2. Assessment of radon reduction capability

본 연구에서는 라돈 저감 성능을 평가하기 위해 라돈 검출기 (FRD-400, FTlab Co., Korea)을 이용하였으며, 실험 환경은 환경부 고시 제2017-11호 실내 공기 질 공정시험기준에 부합하도록 설계하였다. FRD-400는 10 pCi/L에서 정밀도는 ± 8% 이내, 정확도는 ± 10% 이내로 제공되며 최소오차는 ± 0.35 pCi/L이다. 또한 측정된 라돈 정보는 1시간 단위로 제시된다.

2.1 Geometrical setup

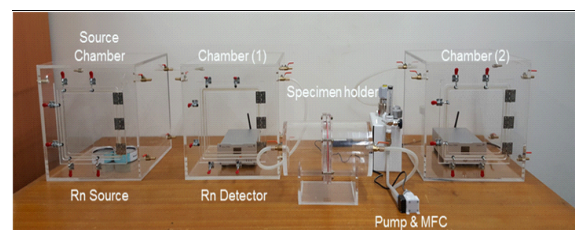


Fig. 2. Geometrical setup of measurement module for radon reduction capability assessment

라돈 저감 성능을 평가하기 위해 자체 제작된 아크릴 챔버 ($40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$)를 이용하여 밀폐된 모의 환경을 구현하였다. Fig. 2는 라돈 저감 성능을 평가하기 위한 실험 모식도를 나타내었다.^[10]

일정한 초기 라돈 농도를 형성시키기 위하여 1st 아크릴 챔버에 라돈 소스 (1.67 pCi·L⁻¹·h⁻¹, Betterlife 社, Korea)를 위치시켰다. 또한, 2nd 아크릴 챔버와 3rd 아크릴 챔버에 라돈 검출기를 위치시키고 아크릴 챔버 사이에 시료 거치대 (Specimen holder)를 설치하였다. 이 후, 제작된 활성탄 복합 시트의 통과 전/후에 대한 라돈 농도를 측정함으로써 저감 성능을 평가하였다. 이 때, 밀폐된 아크릴 챔버 간에 공기 순환을 발생시키기 위하여 에어 펌프 및 유량계 (RMA-14-SSV, Dwyer Instruments Inc., USA)를 설치하였다.

2.2 Experimental methods

본 연구에서는 1st 아크릴 챔버에 24시간 라돈을 집적시킨 후, 에어 펌프를 통해 밀폐된 2nd 아크릴 챔버에 20 pCi/L로 초기 라돈 농도를 형성하였다. 이 후, 성형된 활성탄 복합 시트를 시료 거치대에 위치시키고 2nd 아크릴 챔버에서 3rd 아크릴 챔버로 라돈을 유입시키면서 20시간 동안 1시간 단위로 농도를 측정하였다. 이 때, 유량은 에어 펌프와 유량계를 이용하여 200 cc/min를 유지하였다. 이렇게 측정된 라돈 농도를 바탕으로 저감 성능의 산출은 다음의 수식으로 도출하였다.

$$\eta = (1 - (A_{in} - A_{bkg}) / (A_0 - A_{out})) \times 100 \quad (1)$$

η 는 라돈 저감 효율을 의미하고, A_{in} 는 3rd 아크릴 챔버에서 측정된 라돈 농도를 의미하며, A_{bkg} 는 라돈이 유입되기 전 3rd 아크릴 챔버에서 측정된 라돈 농도로서 백그라운드를 의미한다. 또한, A_0 는 2nd 아크릴 챔버에 설정된 초기 라돈 농도를 의미하고, A_{out} 은 2nd 아크릴 챔버에서 측정된 라돈 농도를 의미한다.

3. Assessment of HCHO/VOCs reduction capability

본 연구에서는 오염물질에 대한 저감 성능을 평가하기 위해 오염물질 검출기 (LB-S06, 嵐宝德源社, China)를 이용하였으며, 실험 환경은

KCL-FIR-1085 기준에 부합하도록 설계하였다.

3.1 Geometrical setup

오염물질에 대한 저감 성능을 평가하기 위하여 자체 제작된 아크릴 챔버 ($40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$)를 이용하여 밀폐된 모의 환경을 구현하였다. 또한, 아크릴 챔버 내에 오염물질 검출기 및 시료 거치대를 설치하고 제작된 활성탄 복합 시트의 유무에 따라 오염물질 농도를 측정함으로써 저감 성능을 평가하였다.

3.2 Experimental methods

본 연구에서는 제조된 활성탄 복합 시트를 시료 거치대에 위치시키고 오염물질을 주입하였다. 이 후, 180분 동안 20분 단위로 오염물질 농도를 측정하였다. 이렇게 측정된 오염물질 농도를 바탕으로 저감 성능의 산출은 다음의 수식으로 도출하였다.

$$\varepsilon = (1 - (C_{with} / C_{without})) \times 100 \quad (2)$$

ε 는 오염물질 저감 효율을 의미하고, C_{with} 는 활성탄 복합 시트를 위치시켰을 때 측정된 오염물질 농도를 의미하며, $C_{without}$ 은 활성탄 복합 시트를 위치시키지 않았을 때 측정된 오염물질 농도를 의미한다.

III. RESULTS

1. Fabrication of charcoal composite sheet

본 연구에서는 라돈 저감 효율을 평가하기 위하여 직경 85 mm, 두께 2 mm의 원형 시편을 제작하였고, 오염물질 저감 효율을 평가하기 위해 면적 $100 \times 200 \text{ mm}^2$, 두께 2 mm의 사각형 시편을 제작하였다. Fig. 3은 제작된 활성탄 복합 시트를 나타내었다.



Fig. 3. Fabricated specimen for (left) radon and (right) HCHO/VOCs for reduction capability assessment.

2. Radon reduction capability

본 연구에서는 제작된 원형 시편을 설치하고 20 시간 동안 1시간 단위로 라돈에 대한 농도를 측정함으로써 라돈 저감 성능에 대한 평가를 수행하였다. Fig. 4는 시간에 따라 측정된 라돈 농도를 나타내었다.

라돈 농도 측정 결과, 2nd 아크릴 챔버의 초기 농도 (A_0)는 19.08 pCi/L로 측정되었고, 3rd 아크릴 챔버의 초기 농도 (A_{bkg})는 1.64 pCi/L로 측정되었다. 2nd 아크릴 챔버에서 측정된 라돈 농도 (A_{out})는 시간이 지남에 따라 결정계수 (Coefficient of determination, denoted, R-sq)

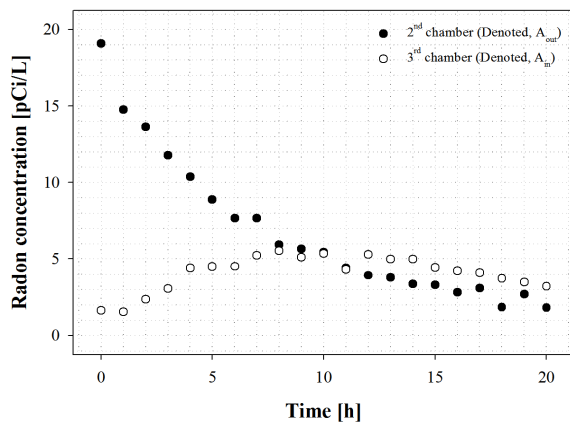


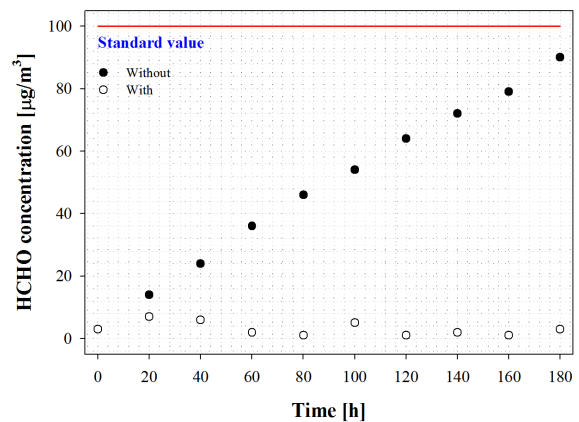
Fig. 4. Measured radon concentration as a function of measurement time.

‘R-sq = 0.9727’를 따르는 ‘ $Y = 15.999 e^{-0.108 X}$ ’의 지수함수 추세를 따르는 것으로 나타났다. 이 때, X는 시간을 의미하고 Y는 측정된 라돈 농도를 의미한다. 반면, 3rd 아크릴 챔버에서 측정된 라돈 농도 (A_{in})은 ‘R-sq = 0.9203’를 따르는 ‘ $Y = 0.0012 X^3 - 0.0666 X^2 + 0.9572 X + 1.0946$ ’의 다항함수 추세를 따르는 것으로 나타났다. 이러한 측정 결과를 바탕으로 20 시간을 기준으로 라돈 저감 능력은 약 90.8%로 분석되었다.

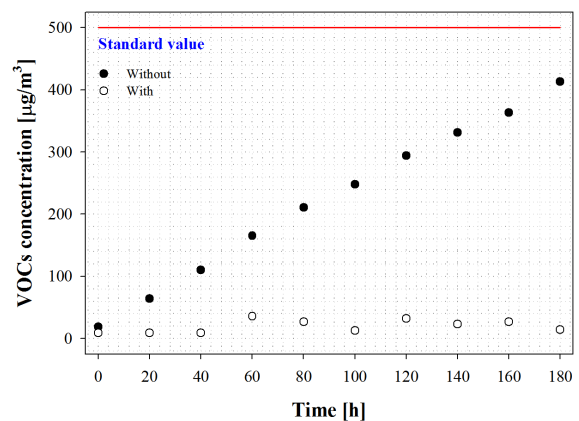
3. HCHO / VOCs reduction capability

본 연구에서는 제작된 사각형 시편을 시료 거치대에 위치시키고 180분 동안 20분 단위로 오염물질에 대한 농도를 측정함으로써 오염물질 저감 성능에 대한 평가를 수행하였다. Fig. 5는 시간에 따라 측정된 오염물질 농도를 나타내었다.

HCHO 농도 측정 결과, 시편을 위치시키지 않았을 경우 ‘R-sq = 0.9966’을 따르는 ‘ $Y = 0.473 X + 5.7273$ ’의 선형함수 추세를 따르는 것으로 나타났다. 이 때, X는 시간을 의미하고 Y는 측정된 HCHO 농도를 의미한다. 반면, 시편을 위치시켰을 경우 1 ~ 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이내로 측정되었다. 이는 HCHO 관리 기준 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 근거로 7% 이내로 저감할 수 있는 것으로 분석하였다. 또한, 180분에서 측정된 농도를 기준으로 HCHO 저감 능력을 산출한 결과 약 96.7% 분석되었다. VOCs 농도 측정 결과, 시편을 위치시키지 않았을 경우 ‘R-sq = 0.9966’을 따르는 ‘ $Y = 2.1721 X + 26.309$ ’의 선형함수 추세를 따르는 것으로 나타났다. 이 때, X는 시간을 의미하고 Y는 측정된 VOCs 농도를 의미한다.



(a) HCHO concentration graph; (Standard : 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)



(b) VOCs concentration graph; (Standard : 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fig. 5. Measured concentration as a function of measurement time.

반면, 시편을 위치시켰을 경우 모든 시간 영역에

서 $9 \sim 36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이내로 측정되었다. 이는 환경부에서 제시된 VOCs 관리 기준 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 근거로 약 7% 이내로 저감할 수 있는 것으로 분석하였다. 또한, 180분에서 측정된 농도를 기준으로 VOCs 저감 능력을 산출한 결과 약 96.6% 분석되었다.

IV. DISCUSSION

본 연구에서는 기존의 문제점을 해결할 뿐만 아니라 라돈 저감이 가능한 활성탄 복합 시트를 개발하고 라돈, HCHO, VOCs에 대한 저감 성능을 평가하였다. 그 결과 라돈 저감 능력은 약 90.8%로 분석되었다. 하지만, 회귀분석에 대한 신뢰도를 표현하는 R-sq이 공학적 관점에서 낮은 값으로 분석되었다. 2nd 아크릴 챔버에서 측정된 라돈 농도에 대한 R-sq가 낮은 원인으로 라돈 검출기의 측정 방식에 기인하는 것으로 사료된다. 본 연구에서 활용된 라돈 검출기는 1 시간 동안 측정된 농도 값에 대한 평균값을 제공하기 때문에 측정 딜레이 시간에 기인한 것으로 사료된다. 반면, 3rd 아크릴 챔버에서 측정된 라돈 농도에 대한 R-sq가 낮은 원인으로서는 라돈의 유입량에 기인하는 것으로 사료된다. Fig. 4의 A_{out} 에서 볼 수 있듯이 지수함수의 추세를 가지므로 라돈의 유입량은 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 그러므로 3rd 아크릴 챔버 내의 라돈 농도가 감소하는 원인은 라돈의 유입량에 대비하여 제작된 활성탄 복합 시트의 저감 능력이 우수하기 때문으로 사료된다. HCHO 저감 능력은 약 96.7%, VOCs 저감 능력은 96.6%로 분석되었다. Fig. 5의 without에 대한 그래프가 R-sq 0.99 이상의 선형함수에 대한 추세를 따르므로 본 실험을 위해 오염물질 주입의 제어가 안정적으로 이루어졌음을 확인할 수 있다. 또한, 기존 친환경 도료의 한계점 중 하나로 제시된 오염물질 방출을 해결했을 뿐만 아니라 저감 능력을 가진다는 것을 정량적으로 검증하였다.

V. CONCLUSION

최근 웰빙이라는 자연친화적인 건강한 삶을 핵심 가치로 추구하면서 실내 공기질의 개선을 위한 다양한 친환경 제품이 개발되고 있다. 하지만, 라돈에 대한 위험성이 대두되고 있지만 아직까지 HCHO, VOCs에 대한 연구가 주를 이루고 있으며

라돈 저감에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구 결과는 활성탄이 가지는 미세기공에 의해 오염물질을 흡착함으로써 실내 공기 질을 개선하기 위한 제품 개발 시 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료되며 궁극적으로 국민 건강에 이바지할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만, 본 연구에서는 실내 공기 질에 중요한 요소이지만 정량적인 측정이 어려운 물질인 악취에 대한 평가는 배제되었다. 그러므로 차후 연구에서는 기기분석법 중 반도체 센서 (바이오 센서)를 통하여 악취에 대한 정량적인 평가가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국국제대학교 연구기금(2018)의 지원을 받아 수행되었습니다.

Reference

- [1] H. C. Park, H. S. Choi, S. Y. Cho and S. H. Kim, "Numerical Study on Indoor Dispersion of Radon Emitted from Building Materials," *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 36, No. 5, pp. 325-332, 2014.
- [2] ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- [3] J. H. Kim, S. H. Hyun, C. W. Lee and Y. M. Hahm, "A study on the Explosion Riskiness with Flying of Activated Carbon," *Fire Science and Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 3-9, 1998.
- [4] S. Z. LU, "Discussion of the Indoor Chemical Pollution and the Purification Method", *Liaoning Chemical Industry*, Vol. 32, No. 5, pp. 204-206, 2003.
- [5] L. P. Hu, K. L. Mo, L. Yang and B. Zhang, "Research on Activated Carbon to Adsorption of formaldehyde", *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, Vol. 28, No. 4, pp. 53-55, 2017.
- [6] Q. Ye and J. Domnick, "Analysis of droplet impingement of different atomizers used in spray coating processes", *Journal of Coatings Technology and Research*, Vol. 14, No. 2, pp. 467-476, 2017.
- [7] Y. H. Sun, "The pollutants removal and disinfection of

secondary effluent from sewage treatment plant in loop reactor using silver nanoparticles coated on activated carbon," *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 30, No. 4, pp. 361-367, 2016.

- [8] Y. Lee, S. H. Lee, I. S. Kyeng and S. S. Lee, "Reduction Properties of Environment-friendly Mortar for Indoor Air Contaminant Using Phytoncide and Palm Active Carbon," *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 32, No. 6, pp. 27-34, 2016.
- [9] D. W. Cha, S. Y. Cho and S. H. Kim, "Radon reduction efficiency of the air cleaner equipped with a Korea carbon filter," *Journal of Odor and Indoor Environment*, Vol. 16, No. 4, pp. 364-368, 2017.
- [10] I. H. Choi, S. S. Kang, J. H. Jun, S. W. Yang and J. K. Park, "A Study of Radon Reduction using Panel-type Activated Carbon," *Journal of Korean Society of Radiology*, Vol. 11, No. 5, pp. 297-302. 2017.

친환경 활성탄 복합시트의 유해물질 저감 연구

최일홍,¹ 강상식,¹ 이수민,² 양승우,² 김교태,³ 박지균^{1,*}

¹한국국제대학교 방사선융합기술연구소

²한국국제대학교 방사선학과

³인제대학교 소프트웨어교육원

요약

최근 웰빙이라는 자연친화적인 건강한 삶을 핵심 가치로 추구하면서 실내 공기질의 개선을 위한 다양한 친환경 제품이 개발되고 있다. 본 연구에서는 기존 친환경 도료의 문제점을 해결할 뿐만 아니라 천연방사성 물질인 라돈 저감이 가능한 활성탄 복합 시트를 개발하고 라돈, HCHO, VOCs에 대한 저감 효과를 평가하였다. 활성탄 복합 시트는 규산나트륨 에멀전과 활성탄을 혼합하여 활성탄 액상 도료를 제조하고 에어스프레이 공법을 통하여 복합 시트로 제작하였다. 제작된 활성탄 복합 시트에 대한 유해물질 저감 성능을 분석하기 위해 라돈은 환경부 고시, HCHO 및 VOCs는 KCL-FIR-1085 기준에 부합하도록 설계하였다. 실험 결과, 제작된 활성탄 복합 시트는 20시간에서 약 90.8%의 라돈 저감 효율을 가지는 것으로 평가되었고, HCHO 및 VOCs는 3시간에서 각 96.7%, 96.6%의 저감 효율이 나타났다. 이러한 결과는 실내 공기 질 개선을 위한 제품 개발 시 기초 자료로서 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

중심단어: 실내 공기 질, 활성탄 복합 시트, 라돈, 포름알데히드, 휘발성 유기화합물

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	최일홍	한국국제대학교 방사선융합기술연구소	교수
(공동)	강상식	한국국제대학교 방사선융합기술연구소	교수
	이수민	한국국제대학교 방사선학과	학생
	양승우	한국국제대학교 방사선학과	학생
	김교태	인제대학교 소프트웨어교육원	연구원
	박지균	한국국제대학교 방사선융합기술연구소	교수