다공성 무기물 함유 부직포의 제조 및 세슘 흡착 성능 평가

차주희 · 안승재 · 전한용*,†🕩

인하대학교 대학원 유기응용재료공학과, *인하대학교 유기응용재료공학과 (2018년 1월 4일 접수, 2018년 1월 12일 수정, 2018년 1월 14일 채택)

Manufacturing of Nonwoven Fabrics Containing Porous Inorganic Materials and the Evaluation of Their Cesium Adsorption Performance

Ju-Hee Cha, Seung-Jae Ahn, and Han-Yong Jeon*,*

Department of Applied Organic Materials Engineering, *Department of Applied Organic Materials Engineering, Inha University, 100 Inharo, Namgu, Incheon 22212, Korea (Received January 4, 2018; Revised January 12, 2018; Accepted January 14, 2018)

초록: 제올라이트와 prussian blue(PB)를 포함한 다공성 무기물의 세슘 이온의 흡착 특성을 평가하였으며 이 결과를 바탕으로 세슘 이온 흡착부직포를 제조하였다. 세슘이온에 대한 흡착성능은 제올라이트의 경우 고농도 오염수에서, PB는 저농도, 초저농도, 산/염기 오염수에서 높게 나타났다. 오염수의 농도가 낮아질수록 PB의 세슘이온 흡착효율 이 높아진다는 것을 확인하였다. 입자 미세화를 통해 제올라이트 대비 절반 이하의 크기를 가지는 PB 입자를 얻을 수 있었으며 이를 이용하여 제작된 제올라이트와 PB 흡착부직포의 흡착효율을 비교한 결과 PB가 흡착제로 사용된 흡착부직포의 흡착효율이 더욱 높게 나타났다.

Abstract: Adsorption characteristics of cesium ions on zeolite and prussian blue (PB) porous inorganic materials were evaluated and cesium ion adsorption nonwoven fabric was prepared using zeolite and PB. Zeolite showed better adsorption performance for cesium ions in high concentrations, whereas PB showed higher adsorption performance at low concentration, ultra low concentration, acid/base contaminated waters. The lower the concentration of polluted water, the higher the cesium ion adsorption efficiency of PB. It was found that PB particles had a size less than half of that of zeolite after particle grinding. Cesium ion adsorption nonwoven fabrics fabricated using zeolite and PB particles were prepared and their adsorption efficiencies of cesium ions were compared. As a result, the adsorption efficiency of the nonwoven fabric fabricated using PB was better.

Keywords: prussian blue, zeolite, radioactive cesium, radioactive ion absorbent.

서 론

일본대지진으로 발생한 후쿠시마 제1원자력발전소 사고로 인해 많은 양의 방사성물질이 방출되어 외부 환경이 방사능 의 영향을 받게 되었다. 방출된 방사성물질 중에서도, ¹³⁴Cs 와 ¹³⁷Cs (방사성세슘)는 그 반감기가 약 2년, 약 30년으로 비 교적 길다는 점에서 앞으로 수 십 년에 걸쳐 환경에 영향이 있을 것으로 우려되고 있다. 이 방사성물질들은 인위적으로 무해하게 하는 것은 불가능하기 때문에 생활환경으로부터 제 거, 회수하여 관리구역에 장기 또는 안전하게 보존하는 것이 중요하다. 방사성 오염 폐액 처리 방법으로는 침전, 흡착 및 이온교 환, 증발농축 등이 있으며, 폐액 내 함유되어 있는 오염 핵종 의 특성에 따라 적절한 방법을 선택하여 처리할 필요가 있 다. 후쿠시마 제1원자력발전소로부터 발생한 방사성 세슘은, 토양 중에 점토광물에 흡착한 상태로의 존재가 압도적으로 많고,^{1,2} 수중에서 용존체로 존재하는 양은 매우 적다는 것이 일반적인 견해이나, 방사성 오염폐기물을 소각할 때에 발생 하는 소각비재에 포함된 방사성 세슘의 물에 의한 용출률이 79.8%라는 보고도 있으며, 이것들의 용존체를 분리, 회수하 는 역할을 하는 것이 세슘 흡착섬유재이다.

무정형탄소를 기본으로 하는 탄소재료는 오랜 기간 다양한 방면에 이용되어 왔으며, 많은 세공을 가지고 있어 비표면적 이 큰 활성탄이 상업적 이용도가 증가하면서 다른 탄소재료 들도 수요가 크게 증가하게 되었다. 활성탄은 폐수 내에 존

[†]To whom correspondence should be addressed. hyjeon@inha.ac.kr, ORCiD[®]0000-0003-2432-6884 ©2018 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

재하는 유기물에 대한 흡착능은 높지만 중금속에 대한 흡착 능은 상대적으로 낮은 특성을 가진다.³ 최근에 활성탄 외에도 zeolite, silica-alumina계 흡착제, 천연섬유계 흡착제 등 균일 한 세공경을 갖는 다양한 흡착제가 개발 및 합성되어 각종 흡착공정에 많이 사용되고 있다.^{4,5}

제올라이트 세공 속에는 양이온들이 존재하며, 이 양이온 들이 수용액 중에서 여러 가지 금속 양이온, 유기 양이온으 로 교환된다.⁶⁷ 이러한 성질을 이용하여 핵폐기물 내에 존재 하는 방사성 양이온을 제거하는데 사용되는 등 양이온 교환 제로 널리 사용되고 있다.⁸ 특히 장석류의 돌과 같은 성분으 로 이루어진 제올라이트는 방사능으로 인한 기능 및 구조의 손상이 없어 방사능으로 인해 쉽게 분해되는 유기이온교환수 지에 비해 안정성 측면에서 이점을 가지고 있다.

Prussian blue(PB)는 상용화된 파란색을 띠는 염료로서 방 사성 세슘을 제거하는데 효과적인 것으로 알려져 있어 일본 에서의 원전사고 이후 큰 관심을 받기 시작하였으며, 방사성 세슘 흡착소재에 대한 연구에 많이 사용되고 있다.⁹

균일한 면심 입방 격자구조를 가지는 PB는 시아노 그룹으 로 연결된 메탈이온을 가지고 있어 분자 내에 존재하는 격자 공간에 양이온을 흡착시킬 수 있다. 물리적인 측면에서, PB 에 대한 알칼리 금속 이온과의 흡착 성능은 알칼리 금속 이 온의 수화상태의 크기와 관련이 있다. 세슘이온은 알칼리 금 속 중 크기가 가장 작으며 PB의 격자구조에도 그 크기가 잘 맞으므로 PB는 세슘이온에 대한 선택적 흡착에 유리하다고 알려져 있다.¹⁰⁻¹²

본 연구에서는 다양한 조건에서 제올라이트와 PB를 선정 하여 다공성무기물의 세슘 흡착성능을 확인하였다. 또한 이 다공성무기물을 이용해 방사성물질 오염수에서 방사성 세슘 을 회수하는 수단으로 사용되는 세슘흡착용 부직포를 제조하 여 그 흡착성능을 평가하였다.

실 험

시료. 흡착성능 실험에서는 총 5종의 다공성무기물을 사용 하였으며 그 종류는 Table 1과 같다.

이미지 분석. 전자현미경(s-42000 scanning electron microscope, Hitachi, Japan)을 이용해 다공성무기물의 입자

Table 1. Specification of Adsorption Materials

Materials	Manufacturer	Specimen
Zeolite 42-200-70	Dong-sin	Z_70
Zeolite 42-200-100	Dong-sin	Z_100
Prussian blue	Tae Heung	PB
Synthetic zeolite	E-Young Chemical	S_Z
Bentonite 325#	Dong-sin	B_325

형태를 확인하였다.

입도크기 분석. 흡착물질의 입도는 particle size analyser를 통하여 측정하였으며, Beckman coulter Inc.의 LS 13320제품 을 사용하였다. 측정 원리는, laser light를 입자에 조사하면, 입자의 크기와 형태에 따라 빛이 산란되는데, 시료의 후면과 측면에 장착된 광검출기로 회절 및 산란된 광의 광도를 감지 하고, 광세기의 분포가 컴퓨터에 입력되어 입자의 크기 분포 를 측정하는 방식이다. 이 때 PB의 경우 분산 시간에 따라 입도 크기가 크게 달라져 초음파를 가해주며 시간에 따른 입 도를 측정하였다.

흡착성능 평가-고농도 오염수(1차 시험). 세슘이온 오염수 를 약 700 ppm으로 희석하여 다공성무기물들의 흡착성능을 측정하였다. 농도의 측정은 모두 ICP-MS를 통하여 이루어졌 다. 흡착조건은 2시간 동안 교반한 후 48시간을 거쳐 안정화 시키고(응집), 셀룰로오스 필터(0.4 μm)로 상위수를 걸러내어 추출하였다. 이 때 흡착물질의 농도는 0.1 g/20 mL로 하였다.

흡착성능 평가·저농도 오염수(2차 시험). 2차 시험은 1차 시험에 비해 정치시간과 다공성무기물의 양을 늘리고 오염수 의 농도를 낮추었다. 48시간 교반 후 중력을 이용하여 응집 (침지)시켰으며(72시간) 총 120시간 동안 실험이 진행되었다. 흡착물질은 0.2 g/mL의 농도로 첨가하였으며 오염수는 약 100 ppm으로 준비되었다. 이후 1차 실험과 마찬가지로 필터 로 부유수를 채취하여 ICP-MS로 세슘이온의 농도(ppb)를 측 정하였다.

흡착성능 평가-초저농도 오염수(3차 시험). 3차 시험에서 는 오염수의 농도를 약 10 ppm으로 희석하였으며 나머지 조 건은 2차 시험과 동일하게 진행하였다.

흡착성능 평가·흡착물질의 양(4차 시험). 4차 시험은 다공 성무기물의 양에 따른 효율을 비교하는 것을 목적으로 하였 다. 오염수는 약 10 ppm으로 준비하였으며 다공성무기물의 농도는 0.05~0.5 g/20 mL까지 총 8개의 조건으로 실험을 진 행하였다. 이 때, 반응시간은 24시간으로 하였다.

흡착성능 평가-산/염기 환경(5차 시험). 5차 시험은 오염수 의 산/염기 조건 하에서의 흡착성능을 확인하는 것이 목적으 로 산은 황산, 염기는 수산화칼륨으로 조절하였다. 오염수는 4차 시험과 마찬가지로 10 ppm으로 조절하였으며 흡착물질 은 0.2 g/20 mL의 농도로 실험을 진행하였다.

다공성무기물의 입자미세화. 다공성무기물의 흡착성능 향 상, 표면적 증가, 안정적인 섬유고정화를 위해 수분산 실험을 이용한 입자미세화를 진행하였다. 볼밀장치와 수분산을 통해 나노스케일의 입도를 가지는 다공성무기물을 얻고자 하였으

Milling process → (dispersion)	Water dispersion (water + dispersing agent + dispersion)	⇒	Stabilizing (dispersion + stabilizer)
-----------------------------------	---	---	---

Figure 1. Particle refinement of porous inorganic materials.



Figure 2. Composition of adsorption nonwoven samples: (a) #1; (b) #2; (c) #3; (d) #4.

며 이 과정을 Figure 1에 나타내었다.

먼저 3 mm의 강구 볼을 사용하여 60분의 밀링공정을 거친 후 80%의 농도를 가지는 다공성무기물 수용액 형태로 준비 하였다. 분산액은 증류수에 삼양화인(San Nopco 제품)의 SN-Dispersant 44S(분산제)를 0.5 mL 넣고 homomixer을 이용해 250~300 rpm으로 30분간 교반한 뒤 다공성무기물 수용액 160 mL를 첨가하여 약 30분간 교반하였다. 이후 Colorsperse 188A(San Nopco 제품, 침강안정제) 1 mL를 첨가하여 500 rpm 으로 교반, 24시간 안정화를 거쳐 제작하였다. 이 때 교반 시 간을 변수로 두고 PB는 30분 간격으로 30~240분까지 총 8 가지, 제올라이트는 30분 간격으로 30~120분까지 총 4가지 로, 분산시간에 따른 다공성무기물의 입도차이를 분석하였다.

세슘 흡착부직포의 흡착성능평가. 앞선 실험에서 얻어진 흡착성능 결과를 참고해 다공성무기물이 첨가된 4가지의 복 합부직포를 제작하였으며, 그 흡착성능을 분석하였다. 세슘 이온 흡착부직포의 흡착성능평가에서도 농도의 측정은 모두 ICP-MS를 통하여 이루어졌다. 제작한 부직포의 구조는 Figure 2와 같다.

결과 및 토론

이미지 분석. 다공성무기물의 입자형태를 알아보기 위한 SEM 분석 결과를 Figure 3에 나타내었다. 이미지 상으로 B_325와 천연제올라이트(Z_70, Z_100)는 거친 표면과 불규 칙적인 모양을 가지며 S_Z는 규칙적인 모양과 매끈한 표면 을 가지고 있음을 확인하였다. B_325와 천연 제올라이트에 서 판상형태의 구조를 일부 확인할 수 있었으며 S Z가 가장 작은 입자크기를 가지고 있는 것을 알 수 있었다. PB의 경우 입자의 크기가 매우 불규칙적이며 다른 물질들에 비해 가장 큰 입자를 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다.

입도크기 분석. 다공성무기물의 흡착실험에서 각 물질의 입자크기는 흡착표면적과 관련된 아주 중요한 인자이다. 또 한 입도크기는 이후의 세슘 흡착부직포의 제작과정에서도 부 직포 내 다공성무기물의 보유도, 안정적인 섬유고정화 등과 연결되므로 중요하다 할 수 있다. 따라서 5종의 다공성무기 물에 대한 입도분석을 진행하였으며 입도분석 결과는 Table 2에 나타내었다.

입자의 크기는 PB가 가장 큰 값을 보였으며, Z_100, Z_70, B_325, S_Z 순으로 나타났다. Span(시료의 분포 폭) 값을 통 해 S_Z의 입자들이 가장 작은 크기편차를 가지며 PB와 B_325 입자들이 비교적 큰 편차를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

초음파를 가해주며 측정한 PB의 입도분석 결과는 Figure 4와 같으며 초음파 없이 측정한 입도크기와 비교했을 때 최 대 10배가량 차이를 가지는 결과를 보였다. 초음파를 가해준 경우 PB의 입자크기는 최소 8.2 µm까지 확인하였으며 초음 파의 세기, 가해준 시간에 따라 원하는 크기의 입자를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 또한 초음파를 가해준 시간이 5분 이상인 경우 Span 값이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었 다. 이는 PB 입자가 분산됨에 있어 고르게 분산되지 않고 있 음을 알 수 있는 결과이며 이를 통해 초음파만으로 나노스케 일의 작은 PB 입자를 얻기에는 그 크기나 분산정도에 한계 가 있을 것으로 예상할 수 있다.

흡착성능 평가-고농도 오염수(1차 시험). 다공성무기물의 흡착성능 비교를 위해서 고농도 오염수 환경에서 흡착성능







Figure 3. SEM images of adsorption materials: (a) bentonite x800; (b) prussian blue x800; (c) Z_70 x800; (d) Z_100 x800; (e) synthetic Z x800; (f) synthetic zeolite x5000.

Table 2. Particle Size of Adsorption Materials

	Z_70	Z_100	PB	S_Z	B_325
Mean [µm]	29.38	33.38	84.27	4.36	15.54
Span	3.91	3.75	4.13	1.39	4.55
d ₁₀ [μm]	2.46	2.57	15.49	1.85	1.71
d ₅₀ [µm]	17.08	19.45	50.90	3.99	8.18
d ₉₀ [μm]	69.16	75.56	225.46	7.39	38.96

평가를 진행하였다. 그 결과 전체적으로 70% 이하의 흡착성 능을 보였다(Figure 5). 이 실험에서는 오염수는 고농도인데 반해 다공성무기물은 소량을 사용하였으며 짧은 정치시간으 로 인해 전체적으로 낮은 흡착효율이 나타난 것으로 생각된다.

5가지 흡착물질 중 S_Z가 가장 높은 흡착성능을 보였으며 이후 Z_70, B_325, Z_100순으로 나타났다. S_Z는 5가지 다



Figure 4. Particle size of PB with ultrasonic wave according to time.

공성무기물 중 가장 작은 입도와 가장 작은 크기편차를 가지 고 있으므로 오염물질과 맞닿는 표면적이 넓어 짧은 정치시



Figure 5. Adsorption efficiency of adsorption materials in primary test conditions.

간에도 흡착효율이 높게 나타난 것으로 판단할 수 있었다. 반 면, 세슘이온 흡착물질로 잘 알려진 PB는 이 시험조건에서 20%도 되지 않는 상당히 낮은 흡착성능을 보였다. 이 결과를 통해 PB는 다른 물질들에 비해 세슘을 흡착하는데 보다 많 은 시간이 필요한 것으로 생각할 수 있다.

흡착성능 평가-저농도 오염수(2차 시험). 2차 흡착시험에 서는 저농도 조건에서 흡착성능을 측정하였다. 2차 시험부터 는 1차 시험에서 가장 높은 흡착성능을 보인 S_Z와 예상과 다른 결과를 보였던 PB만을 선별하여 시험을 진행하였다. 또 한 1차 시험에서의 결과를 통해 짧은 정치시간은 다공성무기 물의 흡착성능을 평가하는데 적당하지 않다고 판단해 2차 흡 착시험에서는 충분한 반응시간 동안 시험을 진행하였다.

저농도-장시간의 2차 시험 결과를 Table 3에 제시하였다. 2 차 시험조건에서 S_Z는 94~95%의 효율을 보였으며, PB는 그보다 더 높은 99.8%의 효율을 보였다. 이는 이전 1차 시험 과 다른 결과로 흡착조건 및 반응시간에 따라 흡착을 할 수 있는 용량과 그 속도의 차이가 발생하기 때문인 것으로 보인 다. Figure 4에서 확인한 것과 같이 짧은 시간으로는 PB 입 자를 제대로 분산시키기에 충분하지 않으며 이로 인해 1차 흡착성능 실험에서 PB의 흡착성능이 낮게 측정된 것으로 생 각된다. 즉, 1차 시험에서는 각 물질이 분산되고 오염물질과 접촉 및 흡착하는데 필요한 교반 및 반응시간이 부족했으며 그에 따라 흡착제가 가지고 있는 흡착성능을 완전히 발휘할

 Table 3. Adsorption Efficiency of Adsorption Materials in

 Third Test Conditions

	Cs/ppb	Adsorption efficiency (%)
Contaminated water	98487.9	-
S_Z	5833.9	94.1
PB	182.3	99.8

수 없었던 것으로 보인다. 따라서 세슘 흡착부직포를 실제 환 경에 적용시킬 때 사용되는 다공성무기물에 따라 제품의 정 치시간 및 오염수의 농도, 그리고 다공성무기물의 입도 및 분 산성이 매우 중요한 요인이 될 것으로 판단된다.

흡착성능 평가-초저농도 오염수(3차 시험). 3차 시험에서 는 초저농도 오염수에 대한 흡착성능을 2차 시험과 같은 조 건에서 측정하였다. Table 4에 3차 흡착시험의 결과를 나타 내었으며 시험의 결과 두 물질 모두 2차 시험에 비해 높은 흡착성능을 보였다. PB가 99.99%의 뛰어난 효율을 보였으 며, S_Z는 2차 시험과 비슷한 제거효율을 보였다. 따라서 S_Z 는 오염수의 농도가 2차 시험에서 사용된 오염수 이하일 경 우 그 농도에 크게 영향을 받지 않으며 최고 제거효율은 95% 내외인 것으로 판단할 수 있으며, PB는 그 변화가 미세하지 만 오염수의 농도가 줄어들수록 높은 흡착성능을 가지는 것 을 알 수 있었다.

흡착성능 평가-흡착물질의 양(4차 시험). 4차 흡착시험에 서는 다공성무기물의 세슘 흡착용량 비교를 위해 다공성무기 물의 양에 변화를 주어 그에 따른 흡착성능을 비교하였다.

24시간 반응시킨 4차 시험 결과 48시간 동안 반응시킨 2차 시험과 흡착효율에서 큰 차이가 없었다. 즉, 모든 다공성무기 물에서 24시간 이상의 반응시간은 무의미함을 알 수 있다. 또 한 다공성무기물의 양이 증가할수록 제거효율이 증가하는 것 을 확인하였다(Table 5, Figure 6). 특히 PB의 경우 그 양에 상관없이 모두 99% 이상 고효율의 흡착성능을 보였으며 PB

 Table 4. Adsorption Efficiency of Adsorption Materials in

 Third Test Conditions

	Cs/ppb	Adsorption efficiency (%)
Contaminated water	8742.1	-
S_Z	413.7	95.3
PB	<0.1	>99.99

Table	5.	Adsorption	Efficiency	of	Adsorption	Materials	in
Fourth	ιT	est Condition	ns				

		Cs/ppb	Adsorption efficiency (%)
Contamin	ated water	10890.54	-
	0.05 g	789.07	92.75
67	0.1 g	787.81	92.77
5_L	0.15 g	683.12	93.73
	0.2 g	619.25	94.31
	0.05 g	48.43	99.56
מס	0.1 g	4.61	99.96
PB	0.15 g	0.76	99.99
	0.2 g	0.49	>99.99



Figure 6. Adsorption efficiency of adsorption materials in fourth test conditions.

가 S Z에 비해 큰 흡착용량을 가지는 것으로 생각된다.

흡착성능 평가-산/염기 환경(5차 시험). 5차 흡착시험에서 는 PB와 S_Z에 대해 산, 염기 환경에서의 흡착성능을 알아 보았으며 충분한 흡착성능 발휘를 위해 저농도 오염수에서 충분한 양의 다공성무기물을 사용해 시험하였다. 그 결과는 Table 6에 나타내었다.

5차 시험을 통해 발견된 특이점으로 Figure 7과 같이 산조 건 하에서 S_Z가 용해되어 투명해지는 것을 확인하였고, 이 때 S_Z의 세슘이온 제거 효율은 0에 가까워 오염수의 세슘

 Table 6. Adsorption Efficiency of Adsorption Materials in

 Fifth Test Conditions

		Cs/ppb	Adsorption efficiency (%)
	Contaminated water	11392.38	-
Acid (pH 2)	S_Z	11347.73	0.39
(pri 2)	PB	76.59	99.33
_	Contaminated water	11165.24	-
Base (pH 10)	S_Z	526.50	95.28
	PB	5.90	99.95



Figure 7. Adsorption products after fifth test. From left to right, Acid-Z, Base-Z, Acid-PB, Base-PB.

이온 농도와 크게 차이나지 않았다. 이는 산성 환경에 의해 제올라이트의 용해반응이 촉진되고 그로 인해 세슘 흡착제로 서 작용할 제올라이트가 모두 용해됨으로써 나타난 결과로 보인다.¹³이 외, 염기 환경에서의 S_Z는 95%의 제거효율을 보였으며, PB는 두 조건 모두 99%를 넘는 효율을 나타냈으 나 염기 환경에서 약간 높은 제거효율을 보였다. 이는 낮은 pH에서 존재하는 많은 양의 수소이온이 세슘이온에 대해 경 쟁이온으로 작용하기 때문인 것으로 보인다.¹⁴두 물질 모두 산 환경에서보다 염기 환경에서의 흡착성능이 높게 나타난 것으로 보아 실제 환경에 적용하게 된다면 사용되는 오염수 의 pH에 따라 다공성무기물의 종류 및 농도를 고려해야 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

흡착물질의 입자미세화. 흡착성능 시험 결과 흡착물질의 입자분산성 및 그 크기가 중요한 인자임을 알 수 있었으며 입자의 분산성, 흡착표면적을 향상시키고 세슘 흡착부직포 제 작을 위해 다공성무기물에 대한 밀링 및 수분산을 진행하였 다. 입자미세화 실험에서는 5차까지 진행된 흡착시험에서 높 은 흡착효율을 보인 PB와 1차 흡착시험에서 S_Z 다음으로 높은 흡착효율을 보인 천연제올라이트를 선별하여 진행하였 다. S_Z의 경우 본 밀링 및 수분산 조건에서 얻을 수 있는 최소 입자크기 이하의 시료이므로 시험에서 제외시켰다.

분산시간에 따른 PB의 입도분석 결과는 Figure 8에 제시 하였다. PB의 결과 값을 보면 분산시간이 120분일 때 평균 입경 0.287 µm로 가장 작은 입경을 가지고 있으며 분산시간 이 90~150분 사이일 경우 가장 작은 크기분포를 나타낸다. 세슘흡착부직포 제작 시 흡착물질의 표면적이나 흡착성능, 안 정적인 섬유 고정화 면에서 흡착물질의 크기가 작을수록, 크 기편차가 크지 않을수록 유리하다. 따라서 120분간 분산시킨 PB가 세슘 흡착부직포에 적용하기에 가장 적합하다고 할 수 있다.



Figure 8. Particle size of PB according to dispersion time.



Figure 9. Particle size of Z_70 according to dispersion time.



Figure 10. Particle size of Z 100 according to dispersion time.

분산시간이 120분 이상일 경우 시간에 따라 입자크기가 서 서히 증가하는 현상을 보이는데 이는 분산시간이 길어짐에 따라 분산되었던 미세입자들이 다시 응집하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 다시 응집된 입자들로 인해 분산 시간이 길 어지면서 span 값이 커지는 현상이 나타났다.

천연 제올라이트의 분산시험은 Z_70, Z_100 두 종류로 진 행하였으며 그 결과를 Figure 9와 10에 각각 나타내었다. PB 의 분산시험 결과 분산시간이 150분 이상인 경우는 크게 의 미가 없으며 PB 입자보다 작은 입자를 얻을 수 없다고 판단 해 제올라이트는 120분까지만 진행하였다.

Z_70, Z_100 시료 모두 분산시간이 길어질수록 입자크기 가 작아지며 입자의 크기편차도 작아지는 경향을 보였다. 그 러나 분산시간이 30분 이상일 경우 입자의 크기나 크기편차 에 큰 변화가 없으므로 30분 이상의 분산은 의미가 없는 것 으로 생각된다.

입자의 크기편차는 PB보다 제올라이트가 더 작으나 PB의 입자 크기편차도 크지 않으며 두 시료 모두 PB의 두 배 이 상되는 입자크기를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 제올라 이트보다 PB가 실제 세슘흡착부직포에 적용시키기 적합한 것으로 판단된다.

세슘흡착부직포의 흡착성능평가. 앞서 진행한 다공성무기

Table	7.	Adsorption	Efficiency	of	Adsorption	Nonwoven
Sampl	es					

	Cs/ppb	Adsorption efficiency (%)
Contaminated water	12152.4	-
#1	39.5	99.6
#2	48.3	99.6
#3	514.3	95.7
#4	15.0	99.8

물의 흡착성능평가 및 입자미세화 결과를 이용하여 다공성무 기물이 포함된 세슘 흡착부직포를 제작하였으며 제작한 세슘 흡착부직포에 대해 세슘흡착성능을 평가하였다.

세슘흡착부직포의 흡착성능평가에서는 벤토나이트가 첨가 된 시료(#3) 외에 모든 시료에서 99%이상의 효율을 보였으 며(Table 7) 그 값은 각각의 다공성무기물의 흡착성능시험과 비슷한 결과를 나타냈다. 따라서 세슘 흡착부직포에 포함된 다공성무기물들이 부직포 내에서도 충분한 흡착성능을 발휘 하고 있는 것으로 판단할 수 있었다. 각 시료별로 세슘이온 에 대한 제거효율의 차이는 미미했으나 PB가 첨가된 시료가 가장 높은 효율을 보이는 것으로 나타났다.

PB가 첨가된 #4 샘플의 제조 시 PB로 염색된 실을 이용해 부직포를 제조하였으나 다공성무기물의 흡착성능 시험과 부 직포의 흡착성능에 크게 차이가 없었다. 이런 결과를 통해 염 색사를 사용하는 방법이 다공성무기물의 흡착성능에 크게 영 향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있었으며, 다른 다공성 무기물을 사용하는 것보다 PB를 흡착제로 사용하여 염색사 를 이용하는 것이 부직포 제조방법에 이점이 있는 것으로 생 각된다.

결 론

본 연구에서는 세슘에 대한 흡착효율이 좋다고 알려진 제 올라이트와 PB를 포함한 다공성무기물의 세슘 흡착성능을 다양한 조건에서 평가하였으며 이 결과를 바탕으로 세슘 흡 착부직포를 제작하여 그 흡착성능을 평가하였다.

각 흡착물질의 흡착성능을 확인한 결과 고농도의 오염수에 서 세슘이온에 대한 흡착성능은 제올라이트가 가장 높게 나 타났으며 PB는 기대와 달리 매우 낮은 흡착성능을 보였다. 오염수의 농도를 달리한 세 번의 흡착실험을 통해 오염수의 농도가 낮아질수록 PB의 세슘이온 흡착효율이 높아진다는 것을 확인하였다. 5번에 거친 다공성무기물의 흡착성능시험 결과 PB의 경우 다른 물질에 비해 세슘흡착에 필요한 시간 이 긴 것을 확인하였으며 이는 다공성무기물 입자의 분산성 에 의한 결과로 생각된다. 따라서 실제로 다공성무기물이 첨 가된 세슘흡착부직포를 실제 적용하기 위해서는 제품의 정치 시간 및 오염수의 농도, 그리고 오염수의 pH정도에 따른 다 공성무기물의 종류 및 입도크기가 고려해야할 매우 중요한 인자가 될 것으로 생각된다.

한편, 입자미세화 실험에서 PB는 제올라이트에 비해 절반 이하의 크기까지 가지는 입자를 얻을 수 있었다.

PB, 제올라이트, 벤토나이트를 첨가해 제작한 세슘흡착부 직포의 흡착성능 평가에서는 벤토나이트가 첨가된 부직포만 비교적 낮은 흡착성능을 보였으며 모든 부직포에서 다공성무 기물의 단독 흡착성능과 비슷한 성능을 보였다. 또한 PB는 원사에 염색하여 사용이 가능하므로 부직포 제작 시 첨가 및 분포에 유리할 것으로 생각된다.

감사의 글: 이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되 었음.

참 고 문 헌

- D. Parajuli, A. Kitajima, A. Takashi, H. Tanaka, H. Ogawa, Y. Hakuta, K. Yoshino, T. Funahashi, M. Yamaguchi, M. Osada, and T. Kawamoto, *J. Envinon. Radioact.*, **151**, 233 (2016).
- N. Kozai, T. Ohnuki, M. Arisaka, M. Watanabe, F. Sakamoto, S. Yamasaki, and M. Jiang, J. Nucl. Sci. Technol., 47, 473 (2012).

- 3. C. H. Lee, J. M. Park, and M. G. Lee, *J. Environ. Sci. Int.*, **24**, 151 (2015).
- 4. M. S. Yang, J. Adv. Eng. Technol., 2, 189 (2009).
- 5. A. Malek and S. Farooq, AIChE J., 42, 3191 (1996).
- K. H. Park and J. K. Suh, J. Korean Soc. Ind. Appl., 8, 113 (2005).
- J. M. Park, S. K. Kam, and M. G. Lee, J. Environ. Sci. Int., 22, 1651 (2013).
- H. S. Kim, W. K. Park, H. Y. Lee, J. S. Park, and W. T. Lim, J. Miner. Soc. Korea, 27, 41 (2014).
- N. L. Torad, M. Hu, M. Imura, M. Naito, and Y. Yamauchi, J. Mater. Chem., 22, 18261 (2012).
- M. Ishizaki, S. Akiba, A. Ohtani, Y. Hoshi, K. Ono, M. Matsuba, T. Togashi, K. Kananizuka, M. Sakamoto, A. Takahashi, T. Kawamoto, H. Tanaka, M. Watanabe, M. Arisaka, T. Nankawa, and M. Kurihara, *Dalton Trans.*, **42**, 16049 (2013).
- S. C. Jang, J. Y. Kim, Y. S. Huh, and C. H. Roh, *J. Radiat. Ind.*, 9, 127 (2015).
- A. Mohammad, Y. S. Yang, M. A. Khan, and P. J. Faustino, J. Pharm. Biomed. Anal., 103, 85 (2015).
- E. D. Park, S. K. Wang, and M. H. Lee, *Econ. Environ. Geol.*, 47, 421 (2014).
- 14. C. H. Lee, S. K. Kam, and M. G. Lee, *J. Environ. Sci. Int.*, **24**, 1331 (2015).