

톱밥에 의한 염색폐수의 흡착처리

김탁현[†] · 박철환* · 김상용**

한국원자력연구원 방사선공업환경연구부 · *광운대학교 화학공학과 · **한국생산기술연구원 청정공정팀

(2007년 7월 31일 접수, 2008년 3월 25일 채택)

Adsorption of Textile Wastewater on Sawdust

Tak-Hyun Kim[†] · Chulhwan Park* · Sangyong Kim**

Radiation Research Division for Industry and Environment, Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI)

*Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University

**Green Engineering Team, Korea Institute of Industrial Technology(KITECH)

ABSTRACT : Sawdust is considered one of the cheapest and abundantly available adsorbents, and it is not necessary to regenerate. The spent sawdust can be incinerated or reused as a fuel. The sawdust adsorption can be applied to the removal of color and metal cations from the wastewater. The aim of this study was to evaluate the adsorptive capacities of sawdust with respect to color, COD, SS, turbidity, metal cation from textile wastewater. Langmuir, Freundlich, BET and Sips adsorption isotherm were obtained for the sawdust adsorption of Fe(III). The effects of particle size and amount of sawdust on the adsorption of Fe(III) were also studied. COD, SS, color, turbidity and Fe(III) removal efficiencies were examined at the continuous fixed-bed adsorption test. It was showed the removal efficiencies of SS 50.0%, Fe(III) 25.0%, turbidity 79.4%, color 48.6% and COD 50.9%. In addition, the changes of surface structure between before and after adsorption were investigated through SEM analysis. It is confirmed that the waste sawdust can be successfully used as an adsorbent for wastewater treatment.

Key Words : Sawdust, Textile Wastewater, Adsorption Isotherm, COD, Fe(III)

요약 : 톱밥은 가장 저렴하면서도 주변에서 가장 흔하게 얻을 수 있는 흡착제중의 하나이며, 이는 사용 후 재생할 필요없이 소각시켜 버리거나 연료물질로 활용할 수 있는 장점이 있다. 이러한 톱밥은 산업폐수중의 색도 혹은 금속 이온성분의 제거를 위한 흡착제로 사용할 수 있다. 본 연구에서는 톱밥의 흡착특성을 알아보기 위하여 염색폐수내의 색도, 유기물질, 부유물질, 탁도 및 금속 이온 성분을 대상으로 그 흡착처리 특성을 확인하여 보았다. 특히, Langmuir, Freundlich, BET 및 Sips 흡착등온식을 활용하여 Fe(III) 이온 물질의 흡착특성을 조사하였으며, 톱밥 입자크기 및 주입량에 따른 영향도 조사하였다. 연속식의 고정상 흡착 실험을 통하여 SS 50.0%, Fe(III) 25.0%, 탁도 79.4%, 색도 48.6% 그리고 COD 50.9%의 제거효율을 획득하였다. 또한, SEM 분석을 통하여 흡착전후의 톱밥표면을 관찰하였다. 결론적으로, 폐톱밥이 산업폐수의 처리를 위한 양호한 흡착제로 활용이 가능함을 확인하였다.

주제어 : 톱밥, 염색폐수, 흡착등온식, COD, Fe(III)

1. 서론

톱밥은 주변에서 쉽게 얻을 수 있는 흔하면서도 값이 아주 저렴한 재료중의 하나이면서도, 훌륭한 흡착성능을 갖고 있는 흡착제이다. 톱밥은 인공적인 합성 이온교환수지에 비견할 만큼의 흡착성능을 갖고 있어 폐수내 중금속 성분의 제거에도 훌륭한 성능을 나타낸다. 또한, 화학적으로 개량하면 금속이온의 흡착제거 등에 더욱 더 효과적인 것으로 알려져 있다.¹⁻³⁾ 활성탄과 톱밥의 흡착성능과 경제성을 평가해본 결과, 흡착성능은 활성탄이 톱밥의 8배 가량 되지만, 그 경제성 측면에서는 톱밥이 활성탄에 비

하여 매우 저렴하다. 또한, 톱밥의 경제적 이점 때문에 이의 재생이 불필요하며 사용 후 소각 등의 방법으로 처분하거나 연료로도 활용할 수 있다.⁴⁾ 활성탄은 염료 등의 제거를 목적으로 광범위하게 활용되고 있지만, 경제적 비용이 높은 단점이 있다. 따라서, 보다 경제적으로 폐수를 처리할 수 있는 흡착제를 발굴, 개발하려는 시도가 행해지고 있다.

염색폐수는 일반적으로 강한 색도, 다량의 부유물질(suspended solids; SS), 변동이 심한 pH, 높은 온도, 높은 유기물농도(chemical oxygen demand; COD)를 함유하고 있어 처리가 쉽지 않은 특징을 가지고 있다.⁵⁾ 따라서, 활성슬러지법과 같은 생물학적 처리방법, 화학응집, 펜톤산화, 전기응집/전기분해 등의 물리화학적인 방법에 의한 처리기술 혹은 이들의 결합공정들이 다양하게 개발되고 적용되고 있

[†] Corresponding author
E-mail: tkhk@kaeri.re.kr
Tel: 063-570-3343

Fax: 063-570-3348

다.⁵⁻⁷⁾ 염색폐수의 색도를 제거하기 위한 처리기술로서 최근에 흡착기술이 처리효율이 높은 기술의 하나로 각광받고 있다.⁸⁻¹⁰⁾ 이 흡착기술은 용수의 재이용, 설계의 간편성, 운전의 용이성, 그리고 독성물질에 대한 대처능력 탁월 등의 장점 때문에 여타 처리기술에 비해 뛰어난 것으로 평가하고 있다.

Meyer 등⁹⁾은 염색폐수에서 색도를 제거하기 위한 보다 값싸고 쉽게 적용할 수 있는 자연산물들의 흡착성을 평가하고자 vermiculite, 톱밥, barbecue charcoal, maize stalks, 모래, 벼껍질, 그리고 peatmoss 등을 대상으로 흡착특성을 비교하였으며, 이들 흡착제들이 입상활성탄에 비견할 만큼의 흡착성을 나타내었다고 하였다. Asfour 등¹⁰⁾도 염료의 제거특성을 알아보기 위하여 Astrazone Blue가 hardwood 톱밥에 의해 흡착될 때 톱밥 입경, 온도가 흡착성에 미치는 영향과 등온흡착식을 산출하였다.

본 연구에서는 이런 경제적 이점을 갖고 있는 톱밥을 흡착제로 활용하기 위하여 Langmuir, Freundlich, BET 및 Sips 등온흡착식을 이용하여 흡착특성을 확인하고자 하였다. 그리고, 염색폐수를 대상으로 톱밥의 유기물질, 금속이온 성분, 색도, SS 및 탁도물질 등과의 동시흡착 특성을 알아보았고, 이를 입상활성탄에 의한 흡착특성과도 비교하여 보았다.

2. 실험

2.1. 실험재료

실험재료로 사용한 톱밥은 목재 제재소에서 얻은 것으로서, 재질은 향나무이며, 톱밥입경에 따라 KS 규격의 체를 이용하여 0~0.3 mm, 0.3~1.0 mm, 1.0~2.0 mm의 세 부류로 분류하여 놓았고, 실험 전에 증류수로 충분히 이물질을 세척시킨 후 건조기에서 105°C 조건에서 하루정도 완전 건조시켜 실험에 사용하였다.

톱밥의 흡착성을 확인하기 위하여 입상활성탄에 의한 흡착실험을 동일조건에서 수행하여 그 결과를 비교하였는데, 이때 사용된 입상활성탄은 국내 J사에서 제작된 코코넛 껍질 및 lignite coal을 원료물질로 하여 제조된 활성탄을 사용하였다. 이를 증류수로 충분히 세척하고 105°C 조건에서 완전 건조시킨 후 사용하였다.

등온흡착식을 산출하기 위하여 중금속 성분을 사용하는 경우가 많은데, 본 연구에서는 자연환경 중에 가장 흔하게 존재하는 금속 성분중의 하나인 철(Fe) 성분을 사용하였다. 철은 광산폐수, 제철소 폐수, 화학산업폐수, 염료생산공장, 금속제련, 섬유산업 및 석유정제업 등 광범위한 산업에서 발생하는 폐수에 가장 흔하게 존재하는 금속 오염물질 중의 하나이며, 용액의 pH 및 용존산소 농도 등에 따라 2가 혹은 3가의 형태로 존재하게 된다. 실험에 사용한 염색폐수는 B공단에서 채취한 것이며, 원수의 주요 화학적 성상은 다음의 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of raw textile wastewater

Item	Unit	Value
COD	mg/L	438
SS	mg/L	240
Turbidity	NTU	32.8
Color	PtCo unit	730
pH	-	10.9

2.2. 실험장치 및 방법

톱밥에 의한 등온흡착식을 산출하기 위하여 회분식 실험을 먼저 수행하였다. 등온흡착 실험에 앞서 동력학 및 평형농도 도달시간을 산출하기 위하여 200 mL 삼각플라스크에 입경 0~0.3 mm의 톱밥을 25 g/L 만큼 넣고 대상물질로 FeCl₃을 사용하여 증류수에 초기농도가 0.01 M Fe가 되도록 인공적으로 제조하여 회분식의 흡착실험을 수행하였다. 항온 shaking incubator를 이용하여 25°C로 일정하게 온도를 유지하며 200 rpm으로 2시간 동안 교반시켜 주었고, 일정시간 간격으로 시료채취 후 농도변화를 측정하여 평형농도 도달시간을 산출하였다.

또한, 등온흡착식을 산출하고 톱밥입경의 영향을 확인하기 위하여, 200 mL 삼각플라스크를 이용하여 톱밥입경 0~0.2 mm, 0.2~1.0 mm, 1.0~3.0 mm별로, 각각 톱밥주입량을 5, 15, 25, 35, 45 g/L의 농도로 첨가시켜주어 흡착실험을 수행하였다.

회분식 흡착실험을 수행한 후, 고정상 연속식 흡착실험을 수행하기 위하여 내경 4 cm, 높이 60 cm(유효부피 754 mL)인 아크릴 흡착탑을 제작하여 사용하였고, 체를 쳐 입경을 일정하게 한 톱밥(0.2~1.0 mm) 일정량을 흡착탑의 높이만큼 채워넣고 상향류로 원수를 정량펌프를 이용하여 일정한 유량(12.5 mL/min)으로 흘러 보내주며, 12시간 간격으로 시료를 채취하여 흡착에 의한 폐수의 성상변화를 조사하였다.

비교실험을 위하여 입상활성탄을 톱밥과 동일 입경으로 체를 쳐서 흡착탑에 채워넣은 후 동일 유량으로 상향류로 염색폐수를 주입시키면서 유출수의 성상을 분석하여 톱밥의 흡착성과 비교하여 보았다.

2.3. 분석항목 및 방법

흡착에 의한 폐수처리시 분석항목으로는 SS, COD_{Cr}, 색도, 탁도, Fe(III)를 선정하였다. COD, SS, 색도 및 탁도는 염색폐수를 사용하여 흡착제거성능을 조사하였으며, 금속 성분은 실험대상인 염색폐수의 금속농도가 매우 낮으므로 이의 제거효율을 알아보기 위하여 FeCl₃를 원하는 농도만큼 첨가한 인공폐수를 제조하여 금속 성분의 제거효율도 함께 살펴보았다.

SS는 Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater에 의거하여 측정하였으며,¹¹⁾ COD_{Cr}는 Standard Methods의 Closed Reflux, Colorimetric Method에 의거

한 HACH사의 DR2010 spectrophotometer 및 COD reactor 를 이용하여 측정하였으며, 색도(color)는 UV/VIS Spectrophotometer를 이용하여 Standard Methods의 PtCo법에 의거하여 측정하였다. 탁도는 HACH사의 Turbidimeter(Model No. 2100P)를 사용하였으며, Fe(III)의 분석은 Standards Methods의 Ferover method에 의거하여 측정하였다.^{11,12)}

3. 결과 및 고찰

3.1. 회분식 등온흡착 실험

톱밥과 같은 리그노셀룰로스계열의 물질에는 단백질, 셀룰로스, 헤미셀룰로스 등을 포함하는데 이들은 이온교환능력과 흡착능력을 가지고 있다. 또한, 이러한 리그노셀룰로스 물질들은 일반적으로 탄닌, 리그닌과 같은 폴리페놀 화합물을 포함하고 있어 이들이 금속이온들이 부착할 수 있는 활성점(active site)을 제공하는 것으로 알려져 있다.¹³⁾ 특히, 금속이온들은 톱밥표면의 COOH 혹은 OH기와 같은 작용기와 반응하면서 H⁺이온은 내놓게 되며, 이러한 금속이온과 셀룰로스계열의 흡착제와의 결합은 킬레이트화, 이온교환, 작용기와의 결합에 의한 수소결합 등에 의한 것으로 알려져 있다.¹⁴⁾

등온흡착 실험에 앞서 kinetics 및 평형농도 도달시간을 산출하기 위하여 200 mL 삼각플라스크에 입경 0~0.2 mm의 톱밥을 25 g/L 만큼 넣고 대상물질로 FeCl₃을 사용하여 초기농도가 0.01 M Fe³⁺가 되도록 인공적으로 제조하여 회분식의 흡착실험을 수행하였다.

회분식 실험을 수행한 결과, 아래의 Fig. 1과 같이 15분에 Fe 제거율이 62%까지 도달하였다가 꾸준히 증가하여 270분 후에는 71%의 제거율을 나타내고 있다. 따라서, 이후의 회분식 등온흡착 실험에서는 270분까지 반응시켜 주어야 하나, 완전한 반응을 보장하기 위하여 24시간 교반시켜 흡착성능을 확인하도록 하였다.

200 mL 삼각플라스크에 0~0.2 mm, 0.2~1.0 mm, 1.0~3.0 mm의 톱밥입경별로 각각 주입량을 달리 첨가시켜주

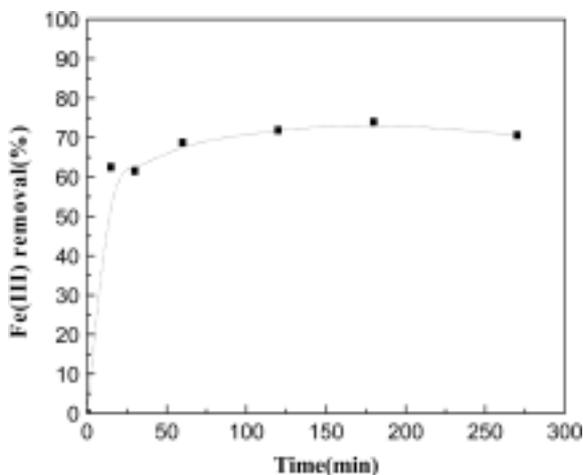


Fig. 1. Batch adsorption of Fe(III) using sawdust.

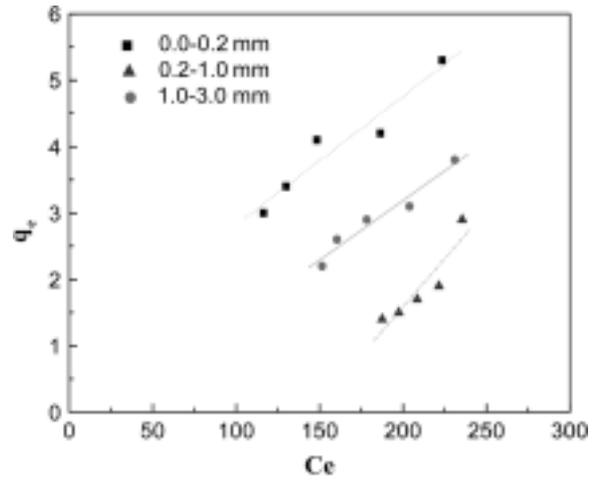


Fig. 2. Equilibrium isotherm for Fe(III) on sawdust particle.

어 흡착실험을 수행하여 먼저, 등온흡착 그래프를 작성하였다. 식 (1)과 같이 흡착제 단위질량당 흡착된 Fe³⁺의 양간의 관계를 나타내는 q_e(mg/g sawdust)와 평형농도(C_e mg/L) 간의 관계가 톱밥 입자의 크기별로 Fig. 2에 나타나 있다.

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{W} \tag{1}$$

- 여기서, q_e = 흡착제 단위질량당 흡착된 Fe³⁺의 양(mg/g sawdust)
- C₀ = 초기 용액농도(mg/L)
- C_e = 흡착반응후 평형농도(mg/L)
- V = 용액부피(L)
- W = 흡착제 질량(g)

Fig. 2에서 알 수 있듯이, 톱밥의 입경이 가장 작을 때 흡착되는 Fe³⁺의 양이 가장 높은 것으로 나타났다.

등온흡착식의 경향을 파악하기 위하여 Langmuir, Freundlich, BET(Brunauer-Emmett-Teller) 및 Sips 등온흡착식으로부터 각 계수 값들을 산출하였고 이때의 r²값들을 비교하여 보았다. 등온흡착식은 일반적으로 Langmuir, Freundlich, BET 및 Sips 식과 같은 비선형식으로 표현된다. Sips 등온흡착식은 Langmuir 및 Freundlich 등온흡착식을 결합시켜놓은 형태이다.¹⁵⁾ 폐수의 흡착처리시 이들은 아래의 식 (2)~(4) 및 (5)와 같이 표현이 가능하다.

Langmuir 등온흡착식

$$\frac{X}{M} = \frac{abC_e}{1+aC_e} \tag{2}$$

- 여기서, X = 제거되는 피흡착물의 량
- M = 첨가된 흡착제의 량
- C_e = 흡착후 평형농도
- a, b = 상수

Freundlich 등온흡착식

$$\frac{X}{M} = K_f C_e^{1/n} \quad (3)$$

여기서, $n, K_f =$ 상수

BET 등온흡착식¹⁶⁾

$$\frac{C_e}{(C_s - C_e)(X/M)} = \left(\frac{1}{BQ}\right) + \left(\frac{B-1}{BQ}\right)\left(\frac{C_e}{C_s}\right) \quad (4)$$

여기서, $C_s =$ 용매의 포화농도
 $B, Q =$ 상수

Sips 등온흡착식¹⁵⁾

$$\frac{X}{M} = \frac{q_0 (bC_e)^{1/n}}{1 + (bC_e)^{1/n}} \quad (5)$$

여기서, $q_0, b, n =$ 상수

최소자승법을 이용하여 Langmuir 흡착식에서는 기울기 $1/ab$ 와 교점 $1/b$ 값을 얻어 계수 a, b 값을, Freundlich 등온흡착식에서는 $\log X/M$ 과 $\log C_e$ 의 그래프로부터 기울기 $1/n$ 과 교점 $\log K_f$ 값을 획득하였고, BET 등온흡착식에서는 $C_e/(C_s - C_e)(X/M)$ 과 C_e/C_s 의 그래프로부터 B, Q 값을 세 가지의 입경별로 구하여 Table 2에 제시하였다. 또한, Sips 등온흡착식은 흡착데이터를 POLYMATH(v. 4.02)를 이용하여 비선형 회귀분석하여 상수 값 및 r^2 을 획득하였다. 실험결과, Langmuir, Freundlich 및 Sips 등온흡착식은 r^2 값이 0.8860~0.9504의 범위에서 유사한 상관관계를 나타내는 반면, BET 등온흡착식의 r^2 값은 0.2594~0.8442로서 상대적으로 그 상관관계가 다소 떨어졌다. 즉, 톱밥에 의한 Fe(III) 흡착 거동은 유사한 수준의 상관관계 범위내에서 Langmuir, Freundlich 등온흡착식, 그리고 이 두 가지 등온흡착식을 결합시켜놓은 Sips 등온흡착식을 따른다고 할 수 있었다. Al-Mansi,⁸⁾ Asfour 등¹⁰⁾의 연구에서는 톱밥의 폐수흡착처리에서는 Langmuir의 등온흡착식을 따른다고 하였다.

Table 2의 Freundlich 등온흡착식 결과로부터 입경이 감소할수록 K_f 값이 증가하고 있는데, 이는 입경이 감소함에 따라 비표면적이 증가하여 흡착능(K_f 값)이 증가한다는 사실을 뒷받침해주고 있으며, 지수값 n 은 흡착의 용이도(favorability) 및 흡착제/피흡착물간의 흡착능력을 나타내는 인자로서, 일반적으로 n 값이 2~10의 값을 가지면 양호한 흡착능을 나타낸다.¹⁰⁾ 본 연구에서는 n 값이 0.33~1.247 범위의 값들을 가져 입경 0.0~0.2 mm인 경우 다소 양호한 흡착능을 보이지만 그 이상의 톱밥입경에서는 그다지 양호한 흡착결과를 보이지는 않는다고 할 수 있었다.

그리고, 톱밥입경 및 톱밥주입량에 따른 흡착성능 실험을 수행하여 보았다. 그 결과, Fig. 3에서 보는 바와 같이 입경이 작을수록 흡착성능도 증가하여 1.0~3.0 mm일 때

Table 2. Coefficients of isotherms by Fe(III) sawdust adsorption

	Coefficient	sawdust particle size(mm)		
		0.0~0.2	0.2~1.0	1.0~3.0
Langmuir isotherm	a	0.00137	-0.00079	-0.00309
	b	22.3214	-16.7224	-1.0046
	r^2	0.9398	0.9422	0.9284
Freundlich isotherm	K_f	0.06811	0.00674	1.68E-7
	n	1.2470	0.8515	0.3302
	r^2	0.9368	0.9504	0.8860
BET isotherm	B	1654.3333	-680.25	-2623.75
	Q	20.1491	-18.3756	-0.9528
	r^2	0.4974	0.2594	0.8442
Sips isotherm	q_0	13.0757	12.6632	73.7937
	b	0.0031	0.0024	0.0017
	n	0.8750	0.6732	0.2807
	r^2	0.9255	0.9520	0.8890

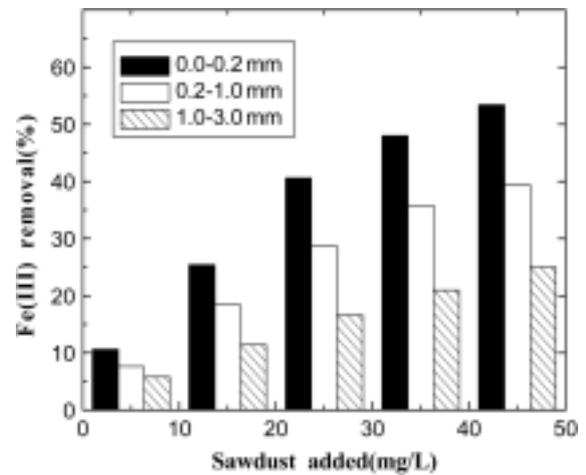


Fig. 3. Effects of sawdust particle size and amount on the adsorption capacity.

와 0.0~0.2 mm일 때를 비교하면 1.8~2.4배의 흡착능을 나타냄을 확인할 수 있었고, 주입량이 증가할수록 흡착량도 증가함을 알 수 있었다.

3.2. 고정상 흡착 실험

고정상에서의 톱밥흡착 성능을 조사하기 위하여 Table 1과 같은 성상을 갖는 염색폐수에 Fe(III) 이온을 인위적으로 첨가하여 12 mg/L가 되도록 제조하고 7시간의 연속 고정상 흡착실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 4에서 보면, 초기 탁도, SS, Fe(III) 제거율은 각각 98.3%, 100%, 100%이었으나, 시간이 경과할수록 그 흡착성능이 감소하여 6시간 경과후에는 각각 79.4%, 50.0%, 25.0%로 감소하였다.

또한, Fig. 5에서와 같이 색도는 초기 원수의 색도 값이 730 PtCo unit이었으나, 시간이 경과함에 따라 375~510 PtCo unit의 값을 나타내어 30.1~48.6%의 범위에서 다소간의 변동을 일으키면서 유지되는 경향을 나타내고 있다. COD는 초기 COD 값이 438 mg/L이었으나, 최초 흡착탑 통과

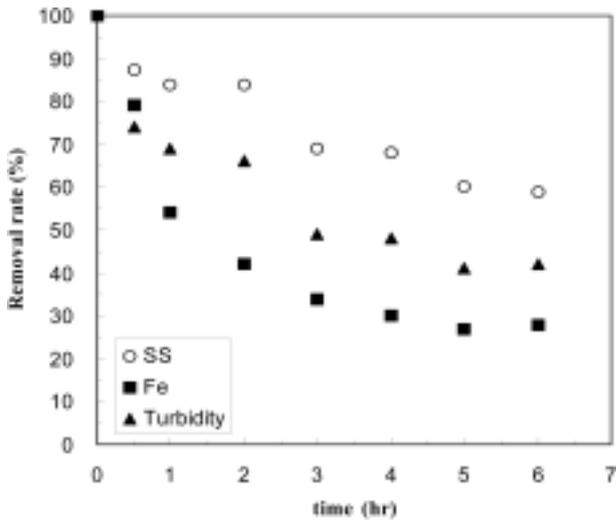


Fig. 4. SS, Fe(III) and turbidity removal from textile wastewater by continuous sawdust adsorption.

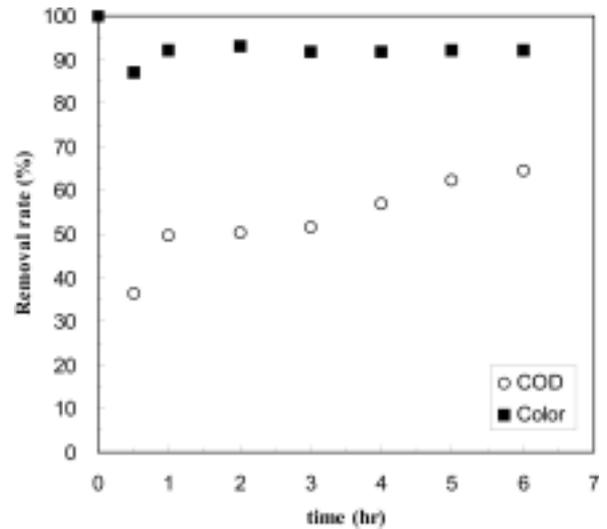


Fig. 6. COD and color removal from textile wastewater by continuous granular activated carbon adsorption.

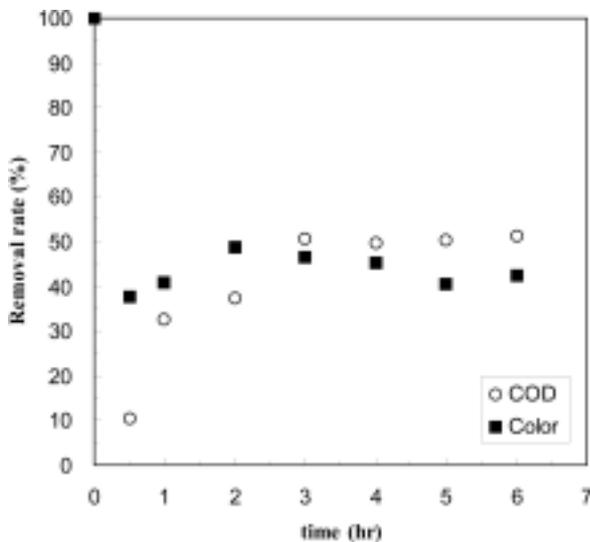


Fig. 5. COD and color removal from textile wastewater by continuous sawdust adsorption.

후 COD 값이 1,300 mg/L로 값이 상승하였다가, 그 이후에는 점차 안정되어 3시간 경과이후부터는 215 mg/L의 값을 나타내어 50.9%의 제거율을 나타내었다. 이와 같이 색도가 낮은 제거율을 보이고, 초기 COD값이 원 COD보다도 상승하는 것은 흡착제로 사용한 톱밥에 의해 발생하는 색도 및 유기물질에 의한 COD 값이 각각 270 PtCo unit, 865 mg/L로서, 이에 기인한 것이라 여겨진다. 그리고, 대상폐수내에 SS물질이 다량으로 존재하는 경우 톱밥흡착층의 폐색을 야기시켜 원활한 연속운전을 방해하는 원인이 되었다.

톱밥의 흡착성능을 상대적으로 비교하기 위하여, 입상활성탄을 대상으로 하여 톱밥의 흡착탑 실험에서와 동일 조건하에서 연속식 흡착 실험을 수행한 후, 그 때의 유출수 성상을 분석한 결과를 아래의 Fig. 6에 나타내었다. 그 결

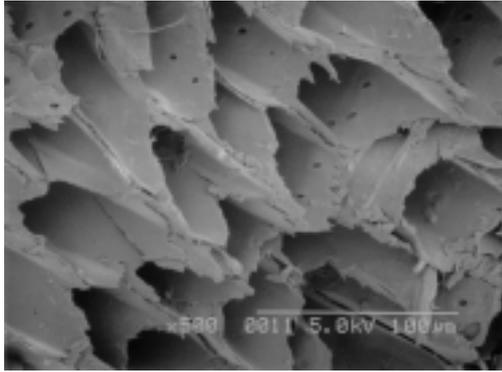
과, COD는 초기농도가 446 mg/L이었던 것이, 시간이 경과함에 따라 서서히 감소하여 6시간 후에는 65.0%가 감소한 156 mg/L을 나타내었고, 색도성분은 실험개시 최초 30분 경과 후 초기 색도값이 752 PtCo unit이었던 것이 89.4%가 흡착제거되어 80 PtCo unit으로 감소한 후 일정한 수준을 유지하는 경향을 나타내었다.

Fig. 5의 톱밥흡착에 의한 COD 및 색도 제거 결과와 Fig. 6의 입상활성탄에 의한 흡착 결과를 비교하며 보면, COD 제거율의 경우 입상활성탄에 의해서 65.0%가 제거된 반면, 톱밥흡착에 의해서는 50.9%의 제거율을 보였고, 특히 색도제거율 측면에서는 그 차이가 커서, 입상활성탄이 89.4%의 색도를 안정적으로 제거하였지만, 톱밥에 의해서는 30.1~48.6%대의 불안정한 색도제거율을 보여주었다.

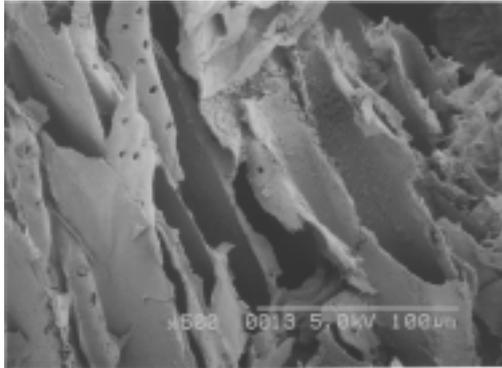
그리고, 입상활성탄에 의한 흡착시에는 유기물 혹은 색도성분의 초기 유출에 의한 일시적인 증가현상도 없이 안정적인 흡착성능을 확인시켜주었다. 그러나, 톱밥에 의한 흡착을 경제성 측면과 함께 고려한다면, 효율적인 흡착제가 될 것으로 사료되었다.

3.3. 톱밥의 SEM 분석

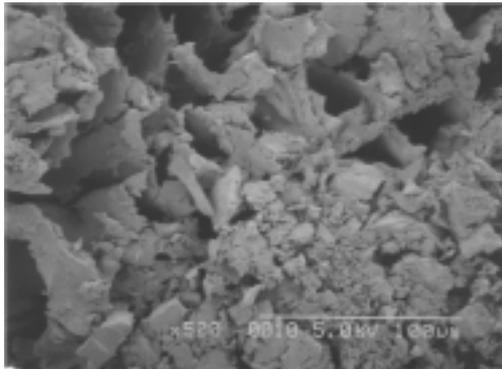
염색폐수의 흡착처리 전후의 톱밥의 표면구조의 변화 등을 관찰하기 위하여 SEM(Scanning Electron Microscope) (JEOL LTD, Model: JSM-6400) 촬영을 하여, Fig. 7과 같이 원 톱밥(a), 금속이온 Fe(III) 7시간 흡착처리 후(b), 염색폐수 7시간 흡착처리 후(c)의 톱밥 표면구조의 변화를 500배 확대하여 촬영하였다. Fig. 7에서와 같이, 톱밥 표면에 폐수내 오염물질로 사료되는 물질들이 흡착되어 있음을 관찰할 수 있었다. 톱밥 공극은 SEM 이미지상의 크기로 미루어보아 0~20 μm 의 Micro pore라기 보다는 주로 50~1,000 μm 에 해당하는 Transitional pore 혹은 Macro pore에 해당한다고 할 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. SEM photographs of sawdust, virgin (a), after Fe(III) adsorption (b), and after textile wastewater adsorption (c) ($\times 500$, 5.0 kV).

4. 결론

본 연구에서는 톱밥의 흡착제로서의 적용가능성을 알아보기 위하여, 회분식 및 연속식의 흡착실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 등온흡착 실험을 통하여 염색폐수의 톱밥에 의한 흡착현상이 유사한 상관관계 범위내에서 Langmuir, Freundlich 및 Sips 등온흡착식의 거동을 따름을 알 수 있었다.

2) 흡착탑을 통과시키는 연속흡착 실험을 통하여 6시간 연속 운전 후 SS 50.0% Fe(III) 25.0%, 탁도 79.4%, 색도 48.6% 그리고 COD 50.9%의 흡착처리 효율을 획득하였다.

3) 입상활성탄에 의한 흡착 결과와 비교하며 보면, COD 제거율 측면에서는 약 15%의 차이를 보인 반면, 색도제거율 측면에서는 40% 이상의 차이를 나타냈으며, 특히 COD 및 색도제거율 모두 입상활성탄에 의한 흡착결과에 비하여 안정적인 흡착성능을 나타내지 못하였다.

4) 톱밥에 의한 흡착시 SS물질이 고농도로 존재하면 흡착층의 폐색을 일으켜 안정적인 운전을 방해하였고, 톱밥 고유의 색도 및 유기성분이 색도 및 COD 값의 처리율 저하에 영향을 미치므로, 이의 사전적인 처리가 필요할 것으로 사료되었다.

종합적으로, 톱밥 원래의 색도 및 유기물질의 사전적인 제거 등 보다 심층적인 연구가 진행된다면, 경제적 측면 및 최종처분 측면뿐만 아니라, 양호한 흡착제로 활용이 가능함을 확인하였다.

사 사

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 산업기술개발사업의 재정적 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Ajmal, M., Khan, A., Hussain, A. S., and Ahmad, A., "Role of Sawdust in the Removal of Copper(II) from Industrial Wastes," *Water Res.*, **32**, 3085~3091(1998).
2. Shukla, S. R. and Sakhardande, V. D., "Column Studies on Metal Ion Removal by Dyed Cellulosic Materials," *J. Appl. Polym. Sci.*, **44**, 903~910(1992).
3. Shukla, S. R. and Sakhardande, V. D., "Removal of Metal Ions Using Dyed Cellulosic Materials," *Dyes Pigments*, **17**, 101~112(1991).
4. Fouad, M. M. K., "Numerical Simulation for Fixed Bed Adsorption of Dyes from Waste Water Using a Natural Adsorbent," *J. Eng. Appl. Sci.*, **43**, 421~432(1996).
5. Kim, T.-H., Park, C., Lee, J., Shin, E.-B., and Kim, S., "Pilot Scale Treatment of Textile Wastewater by Combined Process(Fluidized Biofilm Process-Chemical Coagulation-Electrochemical Oxidation)," *Water Res.*, **36**, 3979~3988(2002).
6. Kim, T.-H., Park, C., Shin, E.-B., and Kim, S., "Effects of Cl-based Chemical Coagulants on Electrochemical Oxidation of Textile Wastewater," *Desalination*, **155**, 59~65(2003).
7. Kim, T.-H., Park, C., Yang, J., and Kim, S., "Comparison of Disperse and Reactive Dye Removals by Chemical Coagulation and Fenton Oxidation," *J. Hazard. Mater.*, **B112**, 95~103(2004).
8. Al-Mansi, N. M., "Decolorizing Wastewater in a Fixed Bed Using Natural Adsorbents," *Sep. Sci. Technol.*, **31**,

- 1989~1995(1996).
9. Meyer, V., Carlsson, F. H. H., and Oellermann, R. A., "Decolourization of Textile Effluent Using a Low Cost Natural Adsorbent Material," *Water Sci. Technol.*, **26**, 1205~1211(1992).
 10. Asfour, H. M., Fadali, M. M. N., and El-Geundi, M. S., "Equilibrium Studies on Adsorption of Basic Dyes on Hardwood," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **35A**, 21~27(1985).
 11. APHA, "Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater," APHA, 19th Ed., Washington, DC(1995).
 12. Hach, "Water Analysis Handbook," Hach Company, pp. 522~526(1997).
 13. Lalvani, S. B., Wiltowski, T. S., and Murphy, L. S., "Metal Removal from Process Water by Lignin," *Environ. Technol.*, **18**, 1163~1168(1997).
 14. Shukla, S. R. and Pai, S., "Removal of Pb(II) from Solution using Cellulose-containing Materials," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **80**, 176~183(2005).
 15. Al-Asheh, S., Banat, F., Al-Omari, R., and Duvnjak, Z., "Predictions of Binary Sorption Isotherms for the Sorption of Heavy Metals by Pine Bark Using Single Isotherm Data," *Chemosphere*, **41**, 659~665(2000).
 16. Ramakrishna, K. R. and Viraraghavan, T., "Use of Slag for Dye Removal," *Waste Manage.*, **17**, 483~488(1997).