

## 활성탄 물성에 따른 암모니아성 질소 흡착의 동력학적 연구

서정범<sup>†</sup> · 강준원 · 이익수<sup>\*</sup>

안양대학교 환경공학과

<sup>\*</sup>서울산업대학교 에너지환경공학과

### A Kinetic Study on the Ammonia Nitrogen Adsorption by Physical Characteristics of Activated Carbon

Jeong-beom Seo<sup>†</sup> · Joon-won Kang · Ik-soo Lee<sup>\*</sup>

Department of Environmental Engineering, Anyang University

<sup>\*</sup>Department of Environmental Energy Engineering, Seoul National University of Technology

(Received 7 January 2008, Accepted 25 March 2008)

#### Abstract

This study aimed to obtain equilibrium concentration on adsorption removal of ammonia nitrogen by activated carbon, to express the adsorption characteristics following Freundlich isotherm and also, based on the value obtained, to investigate the relationship between physical characteristics of activated carbon and dynamics of ammonia nitrogen removal by obtaining rate constant and effective pore diffusivity. The results summarized from this study are as follows. It was noted that powdered activated carbon showed better adsorption ability than granular activated carbon. The value of constant (f) of Freundlich isotherm of powdered activated carbon was  $4.6 \times 10^{-8}$  which is bigger than that of granular activated carbon. The adsorption rate constant on ammonia nitrogen of powdered activated carbon with high porosity and low effective diameter was highest as 0.416 hr<sup>-1</sup> and the effective pore diffusivity ( $D_e$ ) was lowest as  $1.17 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/hr, and the value of ammonia nitrogen adsorption rate constant of granular activated carbon was 0.149~0.195 hr<sup>-1</sup>. It was revealed that, with the same amount of dosage, the adsorptive power of activated carbon with lower effective diameter and bigger porosity was better and its rate constant was also high. With a little adsorbent dosage of 2 g, there was no difference removal ability of ammonia nitrogen as change of adsorption properties.

**keywords** : Activated carbon, Ammonia nitrogen adsorption, Kinetics, Physical characteristics

## 1. 서론

우리나라의 하수 및 산업폐수 발생량은 경제성장과 더불어 지속적으로 증가하는 추세이고 국내의 하·폐수 처리는 주로 BOD, COD 및 SS 제거를 위한 2차처리 정도에 치중해 왔다. 그러나 최근 부영양화 현상으로 인하여 하천과 호수가 크게 오염되어 사회적 문제를 일으킴에 따라, 부영양화의 원인이 되는 질소와 인의 제거 기술에 관하여 관심이 증가되고 있다(환경부, 2004).

국내의 하천 수질이 계속해서 오염되어가고 있는 가장 커다란 이유 중 하나는 하·폐수 처리 과정에서 처리되지 않은 질소와 인과 같은 영양분이 하천 및 호수에 유입됨으로써 미생물 성장에 필요한 영양을 공급하고 유기물의 합성에 기여하는 과정에서 발생하는 조류의 이상증식으로 인해 수계가 더욱 오염되기 때문이라는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 단순 유기물만의 제거는 방류수역에서의 영양염

류에 의한 조류 및 수서식물의 성장을 촉진시켜 용존산소의 고갈로 인한 하천의 자정능력 저하를 초래하게 되므로 궁극적으로 방류수역의 수질 개선을 위해서는 유기물뿐만 아니라 질소, 인 등의 영양염류도 제거해야만 한다(환경부, 2001b).

영양염류 제거 방법에는 생물학적 및 물리화학적 제거방법이 있는데, 생물학적인 영양염류 제거방법에는 SBR (Sequencing Batch Reactor) 공법, ICEAS (Intermittent Cycle Extended Aeration System) 공법, A<sup>2</sup>/O (Anaerobic/Anoxic/Aerobic) 공법, 5단계 Bardenpho (5 Stage-Bardenpho 또는 수정 Bardenpho) 공법, MBR (Membrane Bio-reactor) 공법 및 CSBR (Constant Sequencing Batch Reactor) 공법 등(윤정미, 2001; Arora et al., 1985; Burdick et al., 1982; Daigger and David, 1988; Silverstein and Schroeder, 1983; Tetreault et al., 1986; US EPA, 1993)이 있으며 물리화학적인 질소 제거방법에는 파과점 염소주입(Breakpoint Chlorination), 암모니아 탈기(Ammonia Stripping) 및 이온교환(Ion Exchange) 등(US EPA, 1975)이 있으나 이들은 2차 오염물질을 유발할 가능성이 존재한다는 등의 단점이 있다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

jbseo@anyang.ac.kr

따라서 본 연구에서는 물리화학적인 영양염류제거 방법 중 2차 오염물질의 유발 가능성이 없고 오염물질의 흡착능이 우수한 것으로 알려진 활성탄에 의한 암모니아성 질소의 흡착제거에 관하여 연구를 수행하였다. 지금까지 활성탄에 의한 영양염류 제거에 대한 많은 연구가 행하여졌으나 주로 인 흡착에 편중되어 있고 암모니아성 질소 흡착에 대한 연구는 적은 실정이며 특히 활성탄의 물성에 따른 암모니아성 질소 흡착에 대한 속도상수, 유효흡착계수 등의 동력학적 연구는 극히 적은 실정이다. 본 연구에서는 평형 농도를 구하고 이를 이용하여 Freundlich 식으로 흡착 특성을 표현하였으며, 또한 이들 값을 이용하여 속도상수 및 유효흡착계수를 구하여 활성탄의 물리적 특성에 따른 암모니아성 질소 제거의 동력학적인 고찰을 행하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 활성탄 시료

실험에 사용된 활성탄 시료는 N사의 분말활성탄 1종(AC-A)과 입상활성탄 3종(AC-B, AC-C, AC-D)이며 물리적 특성 비교를 위해 비표면적(Total surface area, BET), 요오드가(Iodine number), 겉보기 밀도(Apparent density), 유효경(Effective diameter) 등을 분석하였다. 요오드가의 측정엔 활성탄 시료에 요오드 용액을 가하여 흡착시킨 다음 상층액을 분리하여 남아 있는 요오드의 농도로부터 구하였으며, 비표면적은 N<sub>2</sub> gas sorption method로 구하였다.

활성탄의 물리적인 특성을 Table 1에 나타내었다. AC-A, AC-B, AC-C 및 AC-D의 BET는 각각 600 m<sup>2</sup>/g, 875 m<sup>2</sup>/g, 875 m<sup>2</sup>/g 및 1,100 m<sup>2</sup>/g로 AC-A가 가장 낮은 값을 나타내었고, AC-D가 가장 높은 값을 나타내었다. Effective diameter는 AC-A, AC-B, AC-C 및 AC-D가 각각 106 μm, 1 mm, 2 mm 및 1 mm로 분말활성탄인 AC-A는 매우 작았고, AC-C가 가장 높은 값을 나타내었다. 활성탄은 사용 전에 증류수에 침전시켜 미세 분진 등을 제거한 후 건조기에 충분히 건조하여 사용하였다.

### 2.2. 회분식 실험

실험에 이용된 암모늄 용액은 NH<sub>4</sub>Cl을 증류수에 녹여 농도를 2,000 mg/L로 조제한 것을 냉장고에 보관하고 필요에 따라 희석하여 사용하였다. 흡착 평형에 도달하는 시간을 측정하는 실험에서는 NH<sub>3</sub>-N 농도가 약 100 mg/L인 용

액 200 mL를 300 mL 삼각플라스크에 넣고 분말활성탄 또는 입상활성탄을 넣어 실험하였다.

흡착량 측정 실험에서는 분말활성탄을 1 g, 2 g, 3 g, 4 g 및 5 g으로 입상 활성탄은 2 g, 5 g, 10 g, 15 g, 20 g 및 25 g으로 투여량을 변화시켜 활성탄과 피흡착제의 무게비 변화에 따른 흡착량의 변화를 측정하였다. 실험은 incubator shaker 내의 온도를 약 30°C로 일정하게 유지하고 shaker의 회전수를 150 rpm으로 하여 실시하였으며, 실험 후의 분석용 시료는 용액을 공극이 1 μm인 여과지로 여과한 후 그 여액을 분석하였다. NH<sub>3</sub>-N의 분석은 수질오염 공정시험법(환경부, 2001a)에 따라 실시하였다.

### 2.3. 동력학 상수의 산정

암모니아성 질소 흡착 실험의 결과를 이용하여 식 (1)로 표현되는 Freundlich 등온흡착식의 상수 f와 1/n을 구하였다. 또한, average capacity ratio( $\bar{a}$ )는 식 (2)를 이용하여 계산하였으며, 시간 경과에 따른 평형접근율 E를 식 (3)으로 구하였다.

$$q_e = fC_e^{1/n} \tag{1}$$

여기서

q<sub>e</sub>: 활성탄 단위 무게당 피흡착질의 흡착 평형 농도(mg/g)

C<sub>e</sub>: 평형 농도(mg/L)

f, 1/n: 실험상수

$$\bar{a} = \frac{Mf}{V} \cdot \frac{C_o^{1/n} - C_e^{1/n}}{C_o - C_e} \tag{2}$$

여기서

$\bar{a}$ : 평균용량비율

M: 활성탄 무게(g)

V: 용액의 부피(mL)

C<sub>o</sub>: 초기 농도(mg/L)

C<sub>e</sub>: 평형 농도(mg/L)

$$E = \frac{C_o - C_t}{C_o - C_e} \tag{3}$$

여기서

**Table 1.** Physical properties of the activated carbon

Classification	AC-A	AC-B	AC-C	AC-D
Total surface area (BET)	600 m <sup>2</sup> /g	875 m <sup>2</sup> /g	875 m <sup>2</sup> /g	1100 m <sup>2</sup> /g
Iodine number	550 mg/g	800 mg/g	800 mg/g	1000 mg/g
Methylene blue adsorption	10 g/100 g	11 g/100 g	11 g/100 g	19 g/100 g
Phenol adsorption	2.5 g/100 g	-	-	-
Apparent density	510 kg/m <sup>3</sup>	290 kg/m <sup>3</sup>	260 kg/m <sup>3</sup>	500 kg/m <sup>3</sup>
Effective diameter	106 μm	1 mm	2 mm	1 mm
Particle size	>150 μm 1 mass-% D <sub>50</sub> 25 μm	>3.15 mm 10 mass-% < 0.70 mm 5 mass-%	>5.0 mm 10 mass-% < 2.80 mm 5 mass-%	>2.36 mm 15 mass-% <0.60 mm 4 mass-%

E : 평형접근율

C<sub>t</sub> : 시간 경과에 따른 농도(mg/L)

흡착 평형 관계가 직선 관계인 경우에 입자 내부의 확산 계수를 추정하기 위해서는 비정상상태 열전달에 대해 Patterson이 유도한 식이 물질전달에도 적용되는데, 이 식의 해는 식 (4)와 같다.

$$E = q/q_e = (C_0 - C)/(C_0 - C_e) = \frac{\bar{a} + 1}{\bar{a}} \left[ 1 - \frac{1}{\alpha - \beta} \left\{ \alpha e^{\alpha^2 kt} (1 + \text{erf} \cdot \alpha \sqrt{kt}) - \beta e^{\beta^2 kt} (1 + \text{erf} \cdot \beta \sqrt{kt}) \right\} \right] \quad (4)$$

여기서

q : 활성탄 단위 무게당 피흡착질의 흡착 농도(mg/g)

α, β : X<sup>2</sup> + 3αX + 3α = 0의 해

k : 속도상수(hr<sup>-1</sup>)

t : 시간(hr)

Patterson에 의해 창안된 Fig. 1 (Dryden and Kay, 1954)의 여러  $\bar{a}$  값에 대한 E와 log kt 간의 관계 그래프로부터 각각의 경과 시간에 대한 kt 값을 구하고 속도상수와 유효 확산계수와와의 상관관계를 나타내는 식 (5)를 이용하여 유효 확산계수를 구하였다.

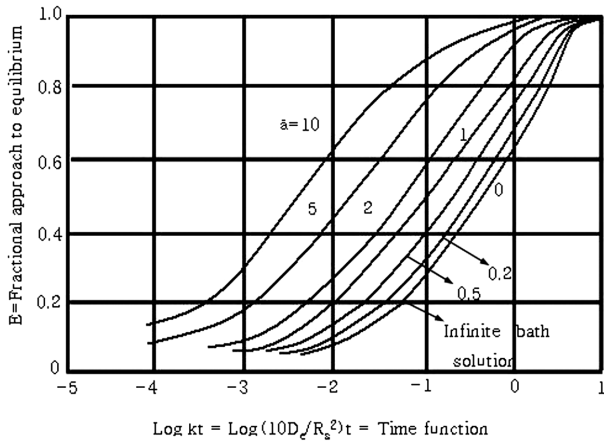


Fig. 1. Graphical solution of equation 4 for various values of  $\bar{a}$ .

$$k = 10 \frac{D_e}{R_s^2} \quad (5)$$

여기서

D<sub>e</sub> : 유효 확산계수(cm<sup>2</sup>/hr)

k : 속도상수(hr<sup>-1</sup>)

R<sub>s</sub> : 활성탄 입자의 반지름(mm)

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 흡착 평형

활성탄을 이용하여 온도를 30°C, shaker의 회전수를 150 rpm, 초기 NH<sub>3</sub>-N 농도를 약 100 mg/L로 하여 시간 경과에 따른 용액 중의 NH<sub>3</sub>-N 농도 변화를 조사한 결과가 Fig. 2~5 및 Table 2에 주어져 있다.

흡착 속도는 느리고 흡착 능은 전반적으로 낮았다. 분말 활성탄인 AC-A를 2 g 투입시 다른 입상활성탄을 2 g 투여한 경우와 유사한 흡착 평형 농도를 보였으며 투여량을 증가시켜 5 g을 투여하였을 경우에는 분말활성탄의 흡착 평형 농도가 다소 낮았다. 활성탄 투여량이 증가하여도 흡착 평형 도달 시간에는 영향이 없었으며, 약 10 hr 이후에 흡착 평형에 도달하였다. 입상활성탄인 AC-B의 경우 활성탄 투여량이 증가할수록 흡착 제거량의 지속적인 증가를

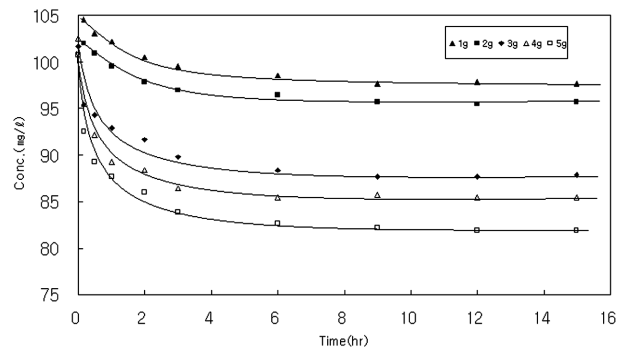


Fig. 2. Determination of NH<sub>3</sub>-N adsorption equilibrium time and concentration (AC-A).

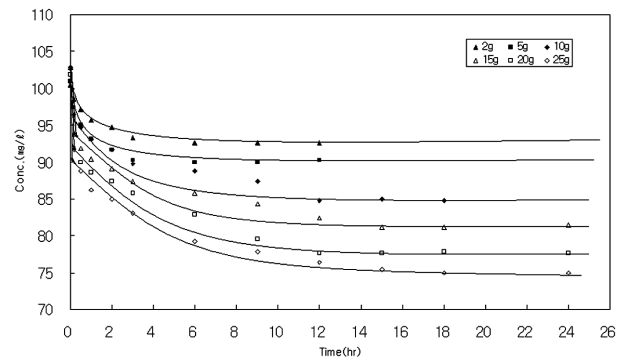


Fig. 3. Determination of NH<sub>3</sub>-N adsorption equilibrium time and concentration (AC-B).

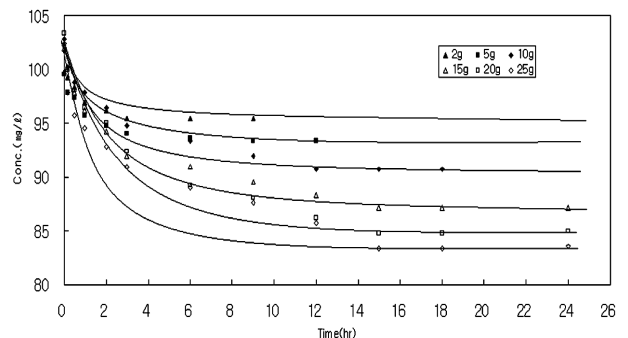


Fig. 4. Determination of NH<sub>3</sub>-N adsorption equilibrium time and concentration (AC-C).

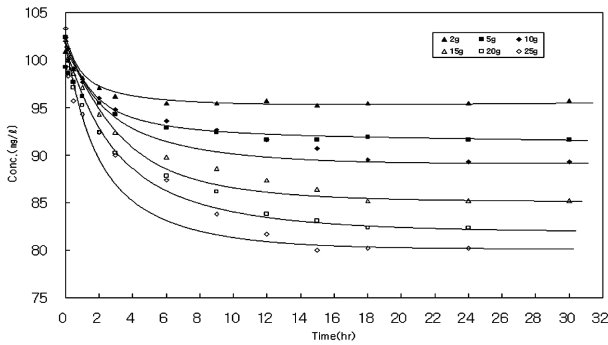


Fig. 5. Determination of NH<sub>3</sub>-N adsorption equilibrium time and concentration (AC-D).

Table 2. Summary of experimental results on NH<sub>3</sub>-N adsorption equilibrium

Classification	Effective diameter	Dosed adsorbent quantity (g)	Equilibrium concentration (mg/L)
AC-A	106 μm	1	97.6
		2	95.5
		3	87.6
		4	85.5
		5	82.0
AC-B	1 mm	2	92.6
		5	90.0
		10	84.8
		15	81.2
		20	77.6
		25	75.0
AC-C	2 mm	2	95.5
		5	93.3
		10	90.7
		15	87.1
		20	84.7
		25	83.3
AC-D	1 mm	2	95.2
		5	91.7
		10	89.3
		15	85.2
		20	82.4
		25	80.0

나타내었으며, 활성탄 투여량이 증가할수록 흡착 평형에 도달하는 시간이 길어져서 25 g 투여시 약 20 hr으로 길었다. 입상활성탄인 AC-C의 경우 AC-B보다 낮은 흡착능을 보였으며 전체적으로 약 12 hr 경과 후 흡착 평형에 도달하였다. 활성탄의 NH<sub>3</sub>-N 흡착 제거는 여러 문헌에서 연구된 바와 같이(Moon and Lee, 1983) 인에 비하여 매우 낮았으며, 흡착 평형 도달 시간은 10 hr 이상으로 길었다. 따라서 활성탄을 이용한 암모니아성 질소의 흡착 제거는 고농도의 암모니아성 질소를 함유하는 폐수에는 적용이 어려울 것으로 사료되며 암모니아성 질소 농도가 약 20~30 mg/L인 하수 혹은 그 이하의 농도를 나타내는 폐수에 대하여는 흡착시간을 10 hr 이상으로 유지하면 제거가 가능

할 것으로 사료된다.

3.2. 동력학 상수

Fig. 6은 활성탄의 암모니아성 질소 흡착 현상을 Freundlich 등온흡착식으로 표현한 것으로 분말활성탄인 AC-A의 경우 흡착능이 입상활성탄에 비해 상대적으로 높으나 흡착량은 매우 작다. 유효경이 1 mm인 입상활성탄 AC-B는 유효경이 각각 2 mm 및 1 mm인 입상활성탄 AC-C와 AC-D보다 다소 높은 흡착 능을 보였으며 AC-C와 AC-D는 비슷한 흡착 능을 보였다.

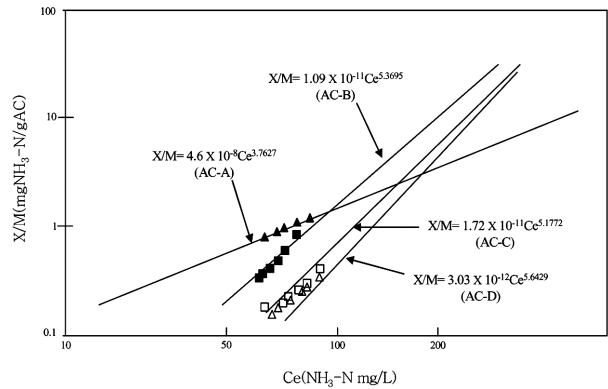


Fig. 6. Adsorption of NH<sub>3</sub>-N on activated carbon.

Table 3은 Freundlich 등온흡착식의 상수(f, 1/n) 값들을 나타낸 것으로 분말활성탄인 AC-A의 경우 f값이 4.6×10<sup>-8</sup>으로 입상활성탄인 AC-B, AC-C 및 AC-D보다 높은 값을 나타내었으며 입상활성탄 중에는 AC-B가 가장 높은 값을 나타내었다. 기울기인 1/n 값은 입상활성탄인 AC-D가 가장 높았으며 분말활성탄인 AC-A가 가장 낮은 값을 보였다.

Table 3. Constant of Freundlich isotherm on NH<sub>3</sub>-N adsorption

Classification	f	1/n	Sample number	Correlation coefficient
AC-A	4.6×10 <sup>-8</sup>	3.76	5	0.88
AC-B	1.09×10 <sup>-11</sup>	5.37	6	0.90
AC-C	1.72×10 <sup>-11</sup>	5.18	6	0.86
AC-D	3.03×10 <sup>-12</sup>	5.64	6	0.84

Table 4는 활성탄의 암모니아성 질소 흡착 실험 자료를 이용하여 average capacity ratio( $\bar{a}$ )를 구하고 시간 경과에 따른 평형접근율(E)를 구한 후 Fig. 1을 이용하여 kt를 산정한 결과이다. 경과시간(t)과 kt의 상관관계를 Fig. 7에 나타내었으며, 그래프의 기울기로부터 속도상수(k)를 구하였다. 분말활성탄인 AC-A의 속도상수는 입상활성탄인 AC-B, AC-C 및 AC-D에 비하여 다소 높았으며, 입상활성탄인 AC-B, AC-C 및 AC-D는 유사하였다.

Table 5는 속도상수(k)와 유효확산계수(D<sub>e</sub>)를 나타낸 것으로 활성탄 AC-A, AC-B, AC-C 및 AC-D의 속도상수(k)는 각각 0.416 hr<sup>-1</sup>, 0.195 hr<sup>-1</sup>, 0.164 hr<sup>-1</sup> 및 0.149 hr<sup>-1</sup>로

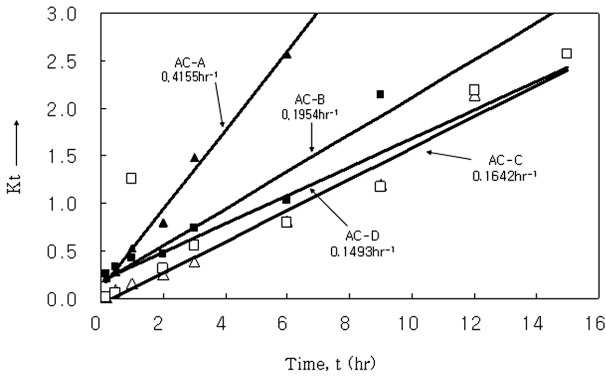


Fig. 7. Correlation of NH<sub>3</sub>-N batch adsorption rate data.

Table 4. Typical batch NH<sub>3</sub>-N adsorption data using integrated method (AC-A)

Weight of activated carbon: 3 g, Volume of solution added: 200 mL  
Initial solution concentration: 101.7 mg/L, Final output concentration: 87.9 mg/L

Elapsed time, t (hr)	Concentration (mg/L)	$E = \frac{C_o - C_t}{C_o - C_e}$	kt
0.167	95.5	0.449	0.209
0.5	94.3	0.535	0.282
1	92.9	0.688	0.525
2	91.7	0.724	0.794
3	89.8	0.862	1.479
6	88.3	0.966	2.570
9	87.6	1.017	

분말활성탄인 AC-A는 다른 활성탄에 비해 다소 높은 암모니아성 질소 흡착 능력을 보여 속도상수(k) 값이 다소 높게 나타났다. 활성탄 AC-A, AC-B, AC-C 및 AC-D의 유효 확산계수는 각각  $1.17 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{hr}$ ,  $4.89 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{hr}$ ,  $1.64 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{hr}$  및  $3.73 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{hr}$ 로 계산되어 분말활성탄인 AC-A가 가장 낮은 값을 나타내었으며, 입상활성탄 중에서는 AC-B가 가장 높은 값을 나타내었다.

3.3. 물성과 흡착 평형 농도의 관계

Fig. 8은 유효경과 암모니아성 질소의 흡착 평형 농도의 관계를 나타낸 것으로 활성탄을 2 g 투여시에는 활성탄의 유효경에 관계없이 흡착 평형 농도가 비슷하였으나 투여량을 증가시켜 5 g 투여시에는 입경이 큰 입상활성탄보다 입경이 작은 분말활성탄의 흡착 평형 농도가 낮았다.

3.4. 물성과 동력학 상수의 관계

Fig. 9는 유효경과 속도상수의 관계를 나타낸 것으로 유

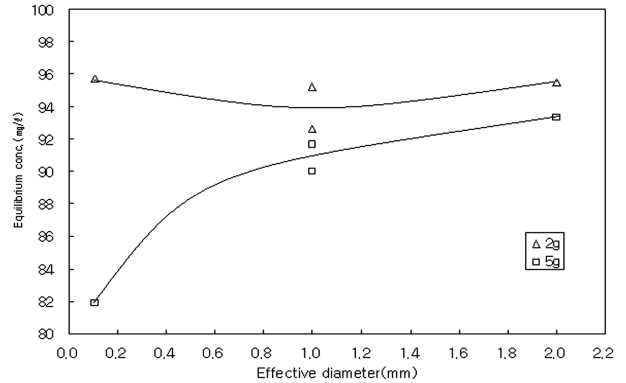


Fig. 8. The relationship between effective diameter and NH<sub>3</sub>-N equilibrium concentration.

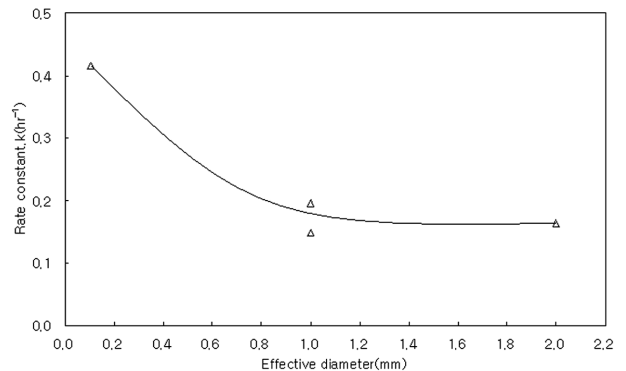


Fig. 9. The relationship between effective diameter and NH<sub>3</sub>-N rate constant.

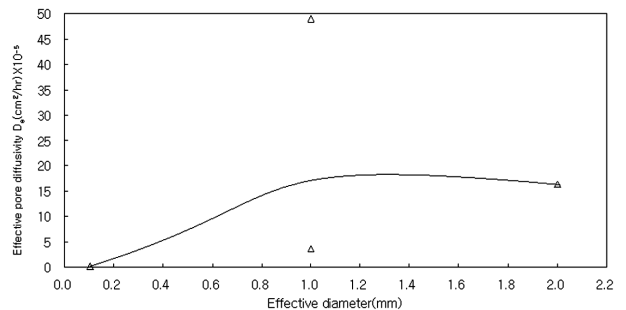


Fig. 10. The relationship between effective diameter and NH<sub>3</sub>-N effective pore diffusivity.

효경이 0.106 mm로 가장 작은 분말활성탄의 속도상수가 가장 높았으며, 유효경이 1 mm 및 2 mm인 입상활성탄의 경우 큰 차이를 보이지 않았다. Fig. 10은 유효경과 유효 확산계수의 관계를 나타낸 것으로 활성탄 시료의 수가 4가지로 많지 않아 명확히 규정하기는 어려우나 유효경이 0.106

Table 5. Rate constant and effective pore diffusivity of activated carbon NH<sub>3</sub>-N adsorption

Classification	Rate constant, k (hr <sup>-1</sup> )	Effective pore diffusivity, D <sub>e</sub> (cm <sup>2</sup> /hr)	Sample number	Correlation coefficient
AC-A	0.416	$1.17 \times 10^{-6}$	5	0.99
AC-B	0.195	$4.89 \times 10^{-4}$	6	0.94
AC-C	0.164	$1.64 \times 10^{-4}$	6	0.97
AC-D	0.149	$3.73 \times 10^{-5}$	6	0.97

mm인 분말활성탄의 유효흡산계수가 가장 낮았으며, 전체적인 경향은 유효경이 커질수록 유효흡산계수는 큰 값을 나타내는 경향을 보였다.

#### 4. 결론

공극율, 유효경 등의 물리적인 특성이 다른 활성탄 4종류를 이용하여 암모니아성 질소의 흡착 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 흡착속도는 초기에 빠르고 점차 감소하며, 입상활성탄은 활성탄 투여량이 증가하여도 암모니아성 질소 흡착 평형 도달 시간에는 영향을 미치지 않았으며 10 hr 이상으로 길었다.
- 2) 분말활성탄은 입상활성탄보다 더 적은 양으로 더 좋은 흡착 효과를 나타내었으며, 활성탄에 의한 흡착은 Freundlich형 등온흡착식으로 잘 표현되었고, 상수  $f$  값은 분말활성탄이 입상활성탄에 비해 상대적으로 매우 크게 계산되었으며 분말활성탄의 질소 흡착에 대한  $f$  값은  $4.6 \times 10^{-8}$ 이었다.
- 3) 활성탄의 암모니아성 질소 흡착 속도상수는 분말활성탄이  $0.4155 \text{ hr}^{-1}$ , 입상활성탄이  $0.1493 \sim 0.1954 \text{ hr}^{-1}$  범위로 분말활성탄이 매우 큰 값을 보였다.
- 4) 활성탄의 암모니아성 질소 흡착에 대한 유효흡산계수는 분말활성탄이  $1.17 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{hr}$ , 입상활성탄이  $1.64 \times 10^{-4} \sim 3.73 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{hr}$ 로 측정되었다.
- 5) 같은 양의 활성탄을 투여했을 때에는 유효경이 작은 활성탄의 흡착능이 우수하였으며 2 g의 소량을 투여하였을 경우 물성변화에 따른 암모니아성 질소 제거 능력에는 큰 변화가 없었다.
- 6) 시료의 수가 많지 않아 명확히 규정하기는 어려우나 유효경이 작은 활성탄의 속도상수가 가장 높고, 유효흡산계수는 유효경이 클수록 높은 경향을 보였다.

#### 참고문헌

- 윤정미(2001). 생물학적 방법을 이용한 영양염류 고도처리 기술 동향조사 연구. 석사학위논문, 동국대학교 산업기술환경대학원.
- 환경부(2001a). 수질오염공정시험방법.
- 환경부(2001b). 하수처리장의 탈질·탈인 공정 상용화 기술 개발.
- 환경부(2004). 하수도 통계.
- Arora, M. L., Barth, E. F. and Margaret, B. U. (1985). Technology Evaluation of Sequencing Batch Reactor. *Journal WPCF*, **57**, pp. 867-875.
- Burdick, C. R., Reffling, D. R. and Stensel, D. H. (1982). Advanced Biological Treatment to Achieve Nutrient Removal. *Journal WPCF*, **54**, pp. 1078-1086.
- Daigger, G. T. and David, G. (1988). Enhanced Secondary Treatment Incorporating Biological Nutrient Removal. *Journal WPCF*, **60**, pp. 1833-1842.
- Dryden, C. E. and Kay, W. B. (1954). Kinetic of Batch Adsorption and Desorption. *Ind. and Eng. Chemistry*, **46**(11), pp. 2294-2300.
- Moon, H. and Lee, W. K. (1983). Intraparticle Diffusion in Liquid-phase Adsorption of Phenols with Activated Carbon in Finite Batch Adsorber. *Journal of Colloid and Interface Science*, **96**, pp. 162-171.
- Silverstein, J. and Schroeder, E. D. (1983). Performance of SBR Activated Sludge Processes with Nitrification/Denitrification. *Journal WPCF*, **55**, pp. 377-384.
- Tetreault, M. J., Benedict, A. H., Christopher, K. and Barth, E. F. (1986). Biological Phosphorus Removal : A Technology Evaluation. *Journal WPCF*, **58**, pp. 823-837.
- U. S. EPA (1975). Process Design Manual for Nitrogen Control.
- U. S. EPA (1993). *Manual Nitrogen Control*. U. S. EPA/625/R-93/010.