

## *Nocardia* 균주에 의한 염료의 색도제거

김동욱<sup>†</sup>

공주대학교 환경공학과

## Removal of Dyes from Aqueous Solution Using *Nocardia* as a Biosorbent

Dong Wook Kim<sup>†</sup>

Kongju National University, Budae-dong, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, Korea

This research was to investigate the removal of dyes from aqueous solution by *Nocardia* biomass. Biosorption of basic red 46 by *Nocardia* cells occurs rapidly, reaching steady-state levels in one day after dye dosing. Biosorption for reactive dyes was enhanced with decrease in pH, which was likely because the biomass functional groups at acidic pH and the positively charged site could bind the negatively charged group of dye molecules. The *Nocardia* cells with different growth rate condition in continuous culture affect their cell surface properties governing the adsorption capacity of dyes. Batch dye-sorption isotherms for basic red 46 showed that *Nocardia* cells harvested from the chemostat cultures at a dilution rate of  $3.33\text{d}^{-1}$  have significantly higher metal sorption capacity than that of cells growing at 1 and  $0.67\text{d}^{-1}$ . This indicates that *Nocardia* cells with a higher growth rate have higher sorption capacity.

**Key words:** Biosorption, Dyes, Growth rate, *Nocardia*

### 1. 서 론

최근 할로젠 방향족 화합물과 질소 방향족 화합물 및 azo-방향족 화합물 등 유기화합물은 다양한 제조공정 과정과 산업활동을 통해 매년 수 천톤이 산업 유기폐수가 발생하고 있으며 폐수 처리의 여러공정 중 기존의 활성 슬러지 공정에서는 효과적으로 제거되지 않은 채 방출되고 있다.<sup>1,2)</sup> 벤젠과 벤젠 분자가 치환된 톨루엔, 크실렌 같은 대부분의 유기합성 오염물은 호기성 조건 하에서 생분해가 가능하기 때문에 일반적인 활성 슬러지 공법에 의해 널리 사용되고 있지만 방향족 고리에 수소 대신에 염소, 질소기를 갖는 방향족 유기화합물은 호기성 분해가 어렵거나 분해 속도가 느려 생물학적 처리를 적용하는 것은 비효율적이며 방향족 화합물의 생분해도 정도에 대한 일관된 기준도 설정되어 있지 않다. 방향족 화합물의 생분해 능력은 화합물 분자 구조와 상당히 밀접한 관계를 갖고 있으며 이는 산

소첨가(oxygenases) 효소에 의해 친전자적 침해를 억제하는 전자공여체에 의해 염소와 질소 및 아조(azo)기의 방향족 고리를 가진 방향족 화합물이 호기성 조건 하에서 미생물에 의한 분해가 잘 되지 않거나 전혀 되지 않는다<sup>3)</sup>.

방향족 유기화합물을 포함하는 대표적 산업폐수인 염색폐수는 염료의 복잡성과 화합물의 다양한 화학적 구조로 인하여 분해방법이 아직 확립되어 있지 않으며, 발생 폐수량도 지속적으로 증가추세에 있다. 또한 염색 공정 중에서 약 10~15% 정도가 유출되고 있으며 폐수 중에 포함된 오염물질의 종류도 새로운 합성화학물질이 다량 포함되어 수생태계와 수질오염에 미치는 영향이 점차 커지고 있다. 이런 난분해성 염료물질들을 처리하기 위한 고도의 기술과 시설을 필요로 하게 되었으며, 유해화학 오염물질의 수환경으로의 유입을 차단하기 위한 배출허용기준 규제의 정도도 점차 강화될 것으로 예상되는데 반해 이들을 제거하기 위한 연구 및

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

E-mail: dwkim@kongju.ac.kr

기술 수준은 환경 선진국에 비해 미약한 수준이다. 따라서 난분해성이고 종류에 따라서는 독성을 나타내는 화학물질을 다량으로 함유한 염색폐수의 경우에는 적정 수준으로 처리하기 위해 경제적이면서도 안정적인 고도의 정화처리기술 개발이 절실히 요구된다.

염색폐수의 오염원인물질인 합성염료는 생물학적 난분해성 물질로 알려져 있으며 흡착, 응집·침전, 여과 및 산화와 같은 물리·화학적 처리방법에 의존하고 있다. 그러나 이와 같은 처리방법들은 2차 오염물 생성에 따른 처리문제가 발생하고 있으며 고가의 처리비용으로 인한 경제적인 부담이 커지고 있다. 물리·화학적 염료폐수의 처리의 단점을 보완하기 위해 최근에는 생물학적인 처리에 대한 연구가 주목을 받고 있다<sup>4,8)</sup>. 생체흡착제를 이용한 염색폐수의 탈색에 관한 연구가 많은 연구자들에 의해 보고된바 있으나, 균체와 복잡한 염료 구조와의 상호작용에 대한 연구로써 매우 제한적이었<sup>9,10)</sup>. 하지만 다양한 미생물균주들에 의한 고유의 염료 대사 분해에 관한 연구와 균체 생물흡착에 의한 탈색 기작에 관한 기초연구는 난분해성 염료물질의 성상에 따른 생분해/생흡착에 관한 거동을 밝히고 향후 응용 기술을 개발하는데 기초적 자료로 요구된다.

최근 염료 흡착능이 뛰어난 균류뿐만 아니라 사상성 세균들에 의한 염료제거의 가능성이 대두되고 있다. 특히, *Nocardia* 균체는 다른 미생물에 비해 월등히 높은 비표면적 특성을 갖는 사상성 세균이며, 세포성장 따른 균체의 비표면적 변화에 따라 중금속의 생물흡착 제거에 영향을 미친다는 연구결과가 보고되었다<sup>11,12)</sup>. 이러한 연구 결과는 타 미생물에 비해 비표면적이 큰 특징을 활용한 오염물질 제거에 초점을 맞출 필요가 있으며, 앞서 선행된 연구와 연계하여 *Nocardia* 균체의 생물학적 대사 분해 및 균체 생물흡착능 탈색 능력에 대하여 평가해 볼 필요가 있다. 또한 과거 생물학적 유기물 처리 연구에서는 활성슬러지 공정의 운전에서 foaming문제를 야기하는 *Nocardia*에 대해 제어에만 초점을 두었지만, 이들이 발생하는 스컴의 재활용은 이미 중금속 제거와의 연구에서 가능성을 제시하였다. 이 결과는 *Nocardia* 균체를 다량 함유된 폐수처리장의 스컴이 경제적인 염료의 흡착제로서의 역할이 가능한가를 연구해 볼 필요가 있다.

본 연구에서는 *Nocardia*를 이용하여 각종 염료에 대한 색도제거 능력과 성장별 염료제거 능력을 비교함으로써 향후 염료폐수 등 난분해성 물질의 생물학적 처리에 대한 응용 가능성을 검토하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. *Nocardia* 균주

#### 2.1.1. *Nocardia* 배양

본 실험에서 사용된 *Nocardia amarae*는 생명공학 연구소 유전자원센터 유전자은행에서 동결 건조 상태로 분양(ATCC#27808) 받아 한천고체평판 배지에 접종하여 사용하였다. 회분식 배양은 5 L 용량의 Jar Fermentor(베스트 코리아(주))에 3 L의 멸균한 배지용액을 주입하고 고체평판배지에서 배양한 *N. amarae*를 일정한 접종하고 30°C, 200 rpm에서 호기성 조건으로 운전되었다. *N. amarae*가 성장하는데 필요한 배지용액 성분의 조성은 Table 1, 2, 3에 나타내었다. Fig. 1은 실험에 사용된 Jar Fermentor의 모식도이다.

연속식 배양은 3 L의 배지용액을 멸균한 후 순응한 *Nocardia* 배양액을 5%(V/V)로 접종하고 유입과 유출을

Table 1. Constituents of mineral salts medium

Constituent	Conc. (g/L)
NaCH <sub>3</sub> COO·3H <sub>2</sub> O	2.305
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.000
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	2.840
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2.720

Table 2. Constituents of hunter's solution

Constituent	Conc. (g/L)
Nitriiotriacetic acid	10.000
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	2.971
(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0.010
MgSO <sub>4</sub>	14.150
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.100
Metals 44	50 mL/L

[Caution] Hunter's solution preparation: dissolved all constituents of except MgSO<sub>4</sub> into distilled water and then adjust to pH 6.6~6.8 with KOH. Add MgSO<sub>4</sub> gradually while continually pH 6.6~6.8.

Table 3. Constituents of metal 44

Constituent	Conc. (g/L)
EDTA(disodium salt)	2.500
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	10.95
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	5.000
MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	1.540
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	392.0
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	2.160
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O	177.0

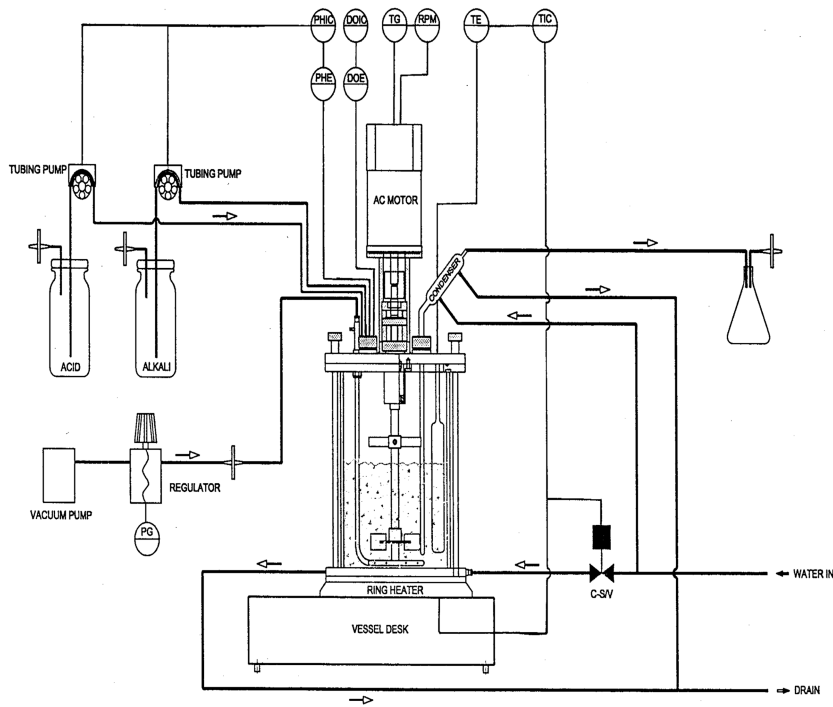


Fig. 1. Schematic diagram of fermentor.

막고 정상상태에 도달할 때까지 약 5일간 200 rpm으로 배양한 후, 비 성장속도를 HRT(0.3 day, 1 day, 1.5 day)를 환산하여 연속으로 운전하였다. 유입배지는 멸균기(Autoclave)를 이용하여 120°C, 1.25 Kg/cm<sup>2</sup>에서 30분간 멸균한 후 침전물을 완전히 녹여 사용하였다.

유입속도, DO, pH, TSS와 COD는 정상상태에 근접 여부 확인하기 위해 수행되었으며 시료의 감염여부도 함께 매일 측정되었다. 목표로 정한 HRT의 3배수 이상에서 운전된 후 유출수는 실험에 사용하기 위해 냉암소에서 4°C로 유지하며 보관하였다. 연속 배양하는 순수세균의 오염 여부는 매일 시료를 검출한 후 Gram staining 하여 현미경으로 확인하였다.

2.1.2. 비 성장속도(net growth rate) 측정

X에 대한 물질수지식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{F_i X_i}{V_R} - \frac{F_o X}{V_R} + \frac{V \mu X}{V_R} - \frac{V k_d X}{V_R} = \frac{1}{V_R} \frac{dX}{dt}$$

여기서, V<sub>R</sub> : 반응조 부피 [L<sup>3</sup>]

F : 배지의 양 [L<sup>3</sup>/t]

P : 생성물의 양 [L<sup>3</sup>/t]

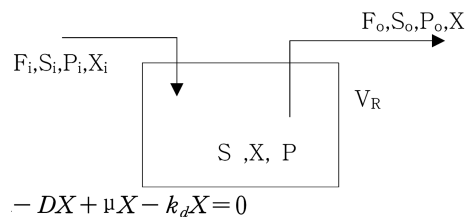
X : 미생물의 양 [L<sup>3</sup>/t]

S : 기질의 양 [L<sup>3</sup>/t]

K<sub>d</sub> : 내생감소 계수 [1/t]

μ : 비성장 속도 [1/t]

F/V<sub>R</sub>=D라 하고 식을 정리하면(정상상태라 가정하여 dx/dt=0, X<sub>i</sub>=0)



D는 dilution rate이고 μ는 비 성장속도이다. 다시 말해 D가 μ보다 커지면 washout이 일어나므로 washout이 일어나지 않을 dilution rate를 결정하기 위해 정확한 비 성장속도를 측정해 보고자 하였다.

$$\frac{dX}{dt} = \mu X t$$

$$\mu t dt = \frac{dX}{X}$$

$$\mu(t-t_0) = \ln(X/X_0)$$

$$\mu = \frac{\ln(X/X_0)}{(t-t_0)}$$

여기서 X는 미생물의 양으로 미생물농도에 부피를 곱하여 무게로 대입한다. 위 식으로 비 성장속도를 구할 수 있다.

비 성장속도를 측정하기 위한 실험은 1 L 플라스크에 700 mL 정도의 배지와 마그네틱바를 넣어 멸균하고 마그네틱바만 넣은 250 mL 플라스크와 100 mL 유리메스실린더도 함께 멸균하였다. 1 L 플라스크에 균을 접종하고 난 후, 교반하여 균일해진 배지를 250 mL 플라스크에 100 mL씩 나누어 담았다. 1 L 플라스크에 남아 있는 배지 100 mL로 초기 TSS를 측정하였다. 다섯 개의 플라스크는 일정한 시간 간격으로 TSS를 측정하여 그 값을 위의 식에 대입하여 비 성장속도를 구하였다.

## 2.2. 염료

본 실험에서는 basic red 46, acid red 6, reactive red 17 아조계열의 염료를 사용하였다.

Basic red 46, acid red 6, reactive red 17 염료들은 각각 1g을 취하여 1L의 증류수에 녹여 초기농도를 1000 mg/L로 하여 Stock solution을 만들었다. 이 때 NaOH와 HNO<sub>3</sub>를 이용하여 pH를 조절하였다.

## 2.3. 염료 흡착실험

### 2.3.1. *N. amarae*의 연속 배양 및 염료 흡착실험

*Nocardia* cell의 성장속도와 연속흐름 반응기안의 *Nocardia* cell 표면의 생화학적 특성에 따른 염료흡착을 평가하기 위해 생물학적인 수리학적 체류시간이 사용되었다. Chemostat 시스템내의 순수배양하는 *Nocardia* 균은 정상상태 운전 하에서 *N. amarae*의 다양한 성장 특성을 보기 위해 하나의 반응기에서 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time; HRT)를 달리 하여 운전하였다. 생물학적 반응기로 순수 배양하는 *Nocardia*의 신진대사의 활성은 HRT의 영향을 받는다.

연속 배양한 *Nocardia* biomass에 의한 염료제거에 영향을 주는 수리학적 체류시간을 *Nocardia* 비성장속도 측정결과  $\mu_{max}$ 값이 약 3.5 day<sup>-1</sup>이기 때문에 wash out이 일어날 가능성이 있는 3.33 day<sup>-1</sup>부터 0.67 day<sup>-1</sup> (0.3~1.5 day HRT)까지 네 가지 비 성장속도로 운전하였다. 연속 배양한 *Nocardia* cell의 회수는 원하는 HRT의 약 3배 이상 운전한 후 정상상태(Steady state)

에 도달한 3.33, 1, 0.67 day<sup>-1</sup>의 비 성장속도로 자란 *Nocardia* cell을 대상으로 하였다.

Fermentor에 접종 후 성장 단계별로 *N. amarae* 바이오매스를 각각 회수하여 실험에 사용하였다. 50 mL의 high-density polyethylene(HDPE)튜브에 0.1 g/L~0.5 g/L의 바이오매스와 계산된 농도의 염료용액을 혼합하여 전체 액의 양이 40 mL로 되게 하였다. 이때 pH는 7로 조정하고 30°C에서 24시간 동안 진탕 교반하였다. 교반 후 흡착한 염료용액과 바이오매스를 분리하기 위해 0.45  $\mu$ m 막을 사용해 여과하였고 여액은 UV-spectrophotometer (Hach DR4000)를 이용해서 흡광도를 측정하였다. 바탕실험은 용기 벽면에 염료가 침착되는 것을 보정하기 위해 *Nocardia* 바이오매스가 제외된 같은 조건에서 동일하게 수행하였다.

### 2.3.2. pH, 온도, 교반속도 변화에 따른 흡착능 비교

pH 변화에 따른 염료의 흡착능의 변화를 알아보기 위해 3.33 day<sup>-1</sup>에서 회수한 *N. amarae*를 사용하였다. NaOH와 HNO<sub>3</sub>를 이용하여 pH를 2, 4, 6, 8, 10으로 변화시킨 후 1000 mg/L의 바이오매스 농도로 하여 50 mg/L의 basic red 46와 reactive red 17의 염료에 대해 염료흡착실험을 하였다.

온도에 따른 *Nocardia*의 흡착능 비교를 위해 10°C, 20°C, 30°C, 40°C와 50°C의 온도조건에서 초기 pH를 7로 고정 한 basic red 46와 pH 3으로 고정 한 acid red 6을 대상으로 흡착실험하였다. 이때 초기 염료농도는 100 mg/L이고 바이오매스 농도는 100 mg/L이었다.

100 rpm에서 500 rpm의 교반속도에서 *Nocardia* 바이오매스 reactive red 17염료흡착 제거율을 알아보았다. 이때 초기 pH는 4이며 바이오매스의 농도는 1000 mg/L이고 염료의 농도는 100 mg/L이었다.

## 2.4. 분석방법

염료의 농도는 UV-spectrophotometer(Hach DR4000)를 이용하여 각 염료별 특정파장을 조사한 후 특정파장에서 염료의 농도와 흡광도와의 비례관계를 이용하여 산출하였다. Basic red 46, acid red 6, reactive red 17의 각 염료를 pH 7의 조건에서 1, 3, 5, 7, 9 mg/L의 다섯 농도의 Standard solution을 만들어 특정파장을 조사한 결과 각각 530, 512, 544 nm였다. UV 측정시 기기의 적용 가능한 농도 범위에 맞추기 위해서 모든 용액의 농도는 10 mg/L 이내로 하여 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. pH 변화에 따른 염료흡착능 영향

수용액의 초기 pH는 가장 중요한 흡착변수로서 바이오매스의 염료의 흡착자리와의 염료분자의 기능기와의 관계에 영향을 준다. pH변화에 따른 *Nocardia* 바이오매스 흡착능 변화를 basic red 46의 염료를 대상으로 하여 알아보았다. 흡착실험에 들어가기 전에 basic red 46 초기염료의 pH에 대한 안정성을 알아보기 위해 염료의 pH에 따른 농도의 변화를 살펴보았다. 초기pH를 산성에서 알칼리성으로 변화를 주었을 때, pH 2에서 pH 8까지는 염료농도가 지속되다가 pH 8 이상에는 염료의 농도가 급격히 감소한 결과를 보였다. 이는 basic 염료가 산성에서 안정한 물질이라 염기성 상태가 되면 불안정해져서 염료분자의 연결고리들이 끊어져 염료가 분해되는 것으로 사료된다.

Fig. 2는 pH변화에 따른 *Nocardia* 바이오매스의 흡착능을 basic red 46과 reactive red 17로 구분하여 나타내었다. 이때 바이오매스의 농도는 1000 mg/L이고 염료의 농도는 50 mg/L이었다. Basic red 46의 *Nocardia* 바이오매스의 흡착능은 pH 2에서 pH 8까지는 pH가 증가함에 따라 흡착능은 증가하다가 pH 8 이후 감소한 결과를 보였으며 reactive red 17의 *Nocardia* 바이오매스의 흡착능은 basic red 46과 반대의 경향인 pH가 증가할수록 흡착량이 감소하였다. 수소이온농도가 증가할수록 바이오매스의 (+)극성을 띤 흡착자리는 증가하는데 반응성 염료인 reactive red 17의 술폰기는 (-)극성과 바이오매스의 (+)극성을 띤 흡착자리와 정전기적인 인력에 의해 결합할 수 있게 된다. 반면에 양이온성 염료인 basic red 46은 pH가 높

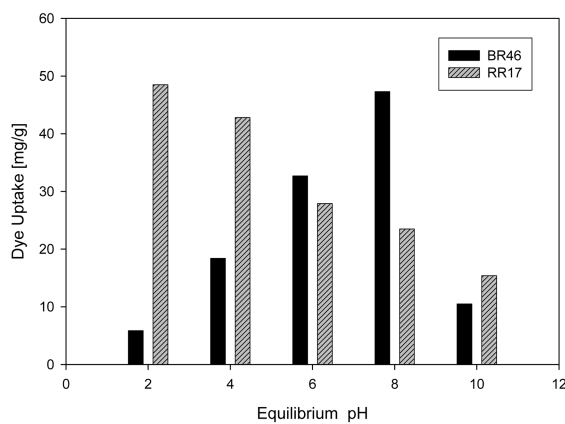


Fig. 2. Effect of pH on dye sorption by *N. amarae*.

아질수록 바이오매스가 음이온성 극성을 띠게 됨으로써 쌍방간의 정전기적인 인력에 의해 결합능이 증가하게 된다. 이러한 결과는 수용액의 pH 변화에 따른 바이오매스와 염료의 기능기 간의 극성에 의한 정전기적 인력의 기작으로 판단된다.

#### 3.2. 온도 변화에 따른 염료흡착 제거 영향

온도 변화에 따른 *Nocardia* 바이오매스 흡착제거율 변화에 대해 비교하였다. 이때 사용한 *Nocardia* 바이오매스는  $0.67 \text{ day}^{-1}$  비 성장속도에서 회수한 것으로서 초기 pH는 7로 고정된 basic red 46과 pH 3으로 고정된 acid red 6을 대상으로 실험하였다. 이때 초기 염료 농도는 100 mg/L이고 바이오매스 농도는 100 mg/L이었다. Fig. 3은 10°C에서 50°C 범위에서 온도 변화에 따른 *Nocardia* 바이오매스 흡착제거율 결과이다. Basic red 46과 acid red 6의 염료흡착능은 20°C와 30°C서 가장 큰 염료흡착제거율 보였다. 특히 basic red 46인 경우, 염료 흡착 제거효율이 20°C에서 50°C보다 약 50% 이상 크게 나타났는데 다른 이는 바이오매스 흡착이 발열성 과정의 특성임을 보여주고 있다. 또한 바이오매스의 발열성은 염료의 화학적 변화에 의한 것보다는 바이오매스의 흡착자리가 온도에 영향을 받기 때문으로 사료된다.

#### 3.3. 교반속도 변화에 따른 염료흡착능 영향

수용액 상에서 바이오매스와 염료 간의 교반속도 변화가 염료의 생체흡착 제거율에 영향을 주는지 알아보았다. 이때 초기 pH는 4이며 바이오매스의 농도는 1000 mg/L이고 염료의 농도는 100 mg/L이었다. Fig. 4

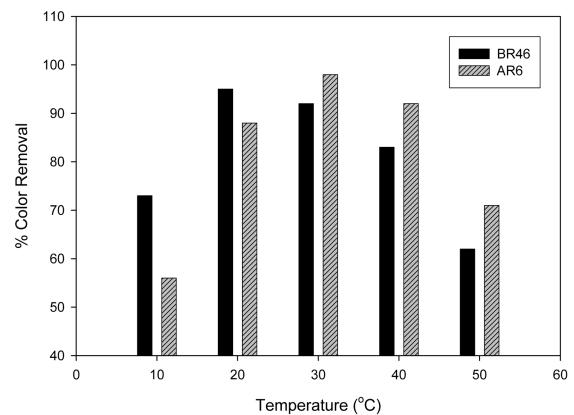


Fig. 3. Effect of temperature on dye removal capacity of *N. amarae* cells.

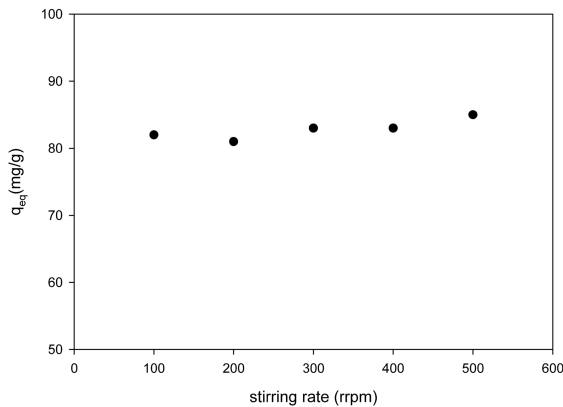


Fig. 4. Effect of stirring rate on dye removal capacity of *N. amarae* cells.

는 reactive red 17을 대상으로 3.33 day<sup>-1</sup> 비 성장속도에서 배양된 *Nocardia* 바이오매스의 염료제거율을 교반속도별로 비교하여 나타내었다. 교반속도를 100 rpm에서 500 rpm으로 증가한 결과, *Nocardia* 바이오매스의 염료제거율은 변화가 없었으며 이는 교반속도에 의한 염료의 바이오매스 세포벽 내부 확산이 진행되지 않고 있음을 보여주고 있다.

3.4. 접촉시간에 따른 염료흡착능 영향

*Nocardia* 바이오매스와 염료 간의 흡착제거 속도를 알아보기 위해 접촉시간을 변화하면서 흡착제거율을 관찰하였다. 이때 초기염료농도는 50 mg/L이며 pH는 7로 고정하였고 1 day<sup>-1</sup>의 *Nocardia* 바이오매스를 대상으로 실험하였다. *Nocardia* 바이오매스에 염료가 흡착되는 형태는 Fig. 5와 같으며, 염기성염료인 basic red

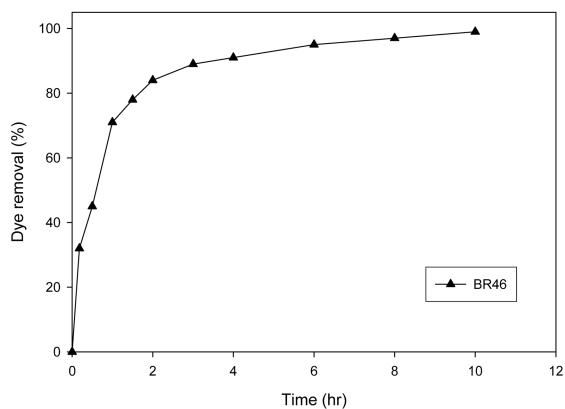


Fig. 5. Biosorption kinetics for basic red 46 on *N. amarae* cells.

46은 흡착평형이 12시간 이내에 도달하였다. 따라서 본 실험에서는 *Nocardia* 바이오매스의 염료흡착 평형에 걸리는 시간을 고려하여 24시간 이상의 접촉시간을 두고 수행하였다. 특히 바이오매스에 의한 70% 이상의 염료 제거가 1시간 이내에 빠른 속도로 이루어졌으며 이는 바이오매스의 표면에 염료가 흡착됨을 확인할 수 있었다. 또한 1시간 이후의 느린 흡착속도를 볼 때 접촉시간 동안 염료가 바이오매스 내부로 느리게 확산되고 있음을 알 수 있다.

3.6. N. amarae의 성장별 염료흡착

*Nocardia* 바이오매스와 염료용액을 혼합하면 일정한 온도에서 *Nocardia* 바이오매스에 흡착된 염료의 양은 용액의 염료농도와 평형을 이룬다. 이러한 흡착평형은 염료농도와 흡착제 량의 관계로부터 염료의 흡착량 (capacity) 및 친화도(affinity)를 알 수 있다.본 실험에서는 생체흡착공정의 기초설계인자를 도출하기 위하여 일반적으로 알려진 Langmuir 모델식을 사용하였다. Langmuir 등온흡착식은 일정한 흡착점(site)에 단층흡착(monolayer adsorption)이 되어진다고 가정하며 다음 식과 같다.

$$q = \frac{q_{max} \cdot b \cdot C_f}{(1 + bC_f)}$$

이 식을 선형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{max}} + \frac{1}{q_{max} b C_f}$$

여기서,

q: 단위미생물 무게 당 흡착된 염료 량 [mg removed amount/g dried biomass]

q<sub>max</sub>: 단위미생물 무게 당 흡착된 염료 최대량 [mg removed amount/g dried biomass]

C<sub>f</sub>: 평형 농도 [mg/L]

b: 상수 [L/mg]이다.

다양한 성장속도에서 회수된 *Nocardia* 바이오매스와 염료간의 흡착능력을 비교하기 위해서 *N. amarae* 성장속도별로 흡착실험을 수행하였다. 이때 초기 pH는 7로 고정하였고 대상염료는 basic red 46을 선택하였다. 비 성장속도의 범위는 3.33 day<sup>-1</sup>-0.67 day<sup>-1</sup> (0.3-1.5 day HRT)이다.

Fig. 6은 Langmuir 등온흡착식에 의해 *N. amarae*의 비 성장속도별 basic red 46의 흡착량 결과를 모사

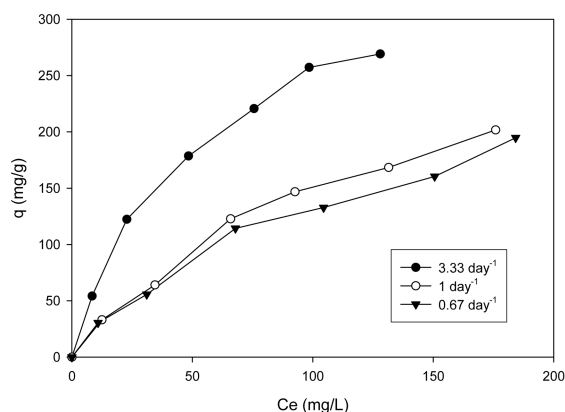


Fig. 6. Isotherms of basic red 46 on *N. amarae* biomass at different specific growth rates.

한 것이다.  $3.33 \text{ day}^{-1}$  비 성장속도에서 회수한 *Nocardia* 바이오매스의 염료흡착능이 가장 크게 나타났으며 비 성장속도가 작아질수록 염료흡착량이 낮은 흡착결과를 보이고 있다. 비 성장속도별 최대 염료 흡착능을 비교하였을 때  $3.33 \text{ day}^{-1}$  에서  $q_{\max}$  값이  $374 \text{ mg/g}$ 으로 가장 컸으며, 그 다음으로  $1 \text{ day}^{-1}$ 에서  $285 \text{ mg/g}$ ,  $0.67 \text{ day}^{-1}$ 에서  $217 \text{ mg/g}$ 의 순 이었다. 본 결과는 *N. amarae*의 성장 정도에 따라 염료 흡착능에 차이가 있음을 보여주며, 이는 *N. amarae*의 성장에 따른 세포벽내의 기능기와 효소의 변화 때문에 염료 흡착능에 차이가 발생함을 보여 준다. 특히  $3.33 \text{ day}^{-1}$ 에 회수한 *N. amarae* 바이오매스의 흡착능이 가장 크게 나타났는데, 이는 미생물의 성장 초기단계와 이후 성장단계에서 나타나는 기능기들의 분포와 체외세포 효소(exocellular enzymes)의 차이가 염료를 흡착하는데 있어서 중요한 역할을 한 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

1. pH변화에 따른 *Nocardia* 바이오매스의 염료 흡착능 변화는 basic red 46의 염료인 경우 pH가 증가함에 따라 흡착능이 증가하였다. 반면 reactive red 17의 *Nocardia* 바이오매스의 흡착능은 pH가 증가할수록 흡착량이 감소하였다. 이러한 결과는 수용액의 pH 변화에 따른 바이오매스와 염료의 기능기 간의 극성에 의한 정전기적 인력의 기작으로 판단된다.

2. 온도 변화에 따른 *Nocardia* 바이오매스의 basic red 46와 acid red 6의 염료흡착제거율은  $20^{\circ}\text{C}$ 와  $30^{\circ}\text{C}$ 서 가장 값을 보였으며 이는 바이오매스의 발열성

이 염료의 화학적 변화에 의한 것보다는 바이오매스의 흡착자리가 온도에 영향을 받기 때문으로 사료된다.

3. 교반속도를  $100 \text{ ppm}$ 에서  $500 \text{ ppm}$ 으로 증가한 결과, *Nocardia* 바이오매스의 염료제거율은 변화가 없었으며 이는 교반속도에 의한 염료의 바이오매스 세포벽 내부확산이 진행되지 않고 있음을 보여주고 있다.

4. Langmuir 등온흡착식에 의해 *N. amarae*의 비 성장속도별 basic red 46의 흡착량 결과를 모사한 결과,  $3.33 \text{ day}^{-1}$  비 성장속도에서 회수한 *Nocardia* 바이오매스의 염료흡착능이 가장 크게 나타났으며 비 성장속도가 작아질수록 염료흡착량이 낮은 흡착결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 *N. amarae*의 성장에 따른 세포벽내의 기능기와 효소의 변화 때문에 염료 흡착능에 차이가 발생함을 보여 준다.

#### 감사의 글

본 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의해 연구되었으며(KRF 2004-003-D00166) 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Hallas, L.E. and Alexander, M. : Microbial transformation of nitroaromatic compounds in sewage effluent. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1983, 45, pp 1234.
- Spain, J.C., Hughes, J.B. and Knackmuss H.J. : Biodegradation of nitroaromatic compounds and explosives. Boca Raton, FL. Lewis Publishers. 2000.
- Bruhn, C., Lenke, L. and Knackmuss, H.J. : Nitro-substituted aromatic compounds as nitrogen source for bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1987, 53, pp.208-210.
- Fu, Y. and Viraraghavan, T. : Fungal decolorization of dye wastewater. review. *Bioresour. Technol.*, 2001, 79, pp. 251-262.
- Correia, V.M., Stephenson, T. and Judd, S.J. : Characterization of textile wastewaters-a review. *Environ. Technol.*, 1994, 15, pp. 917-919.
- Banat, I.M., Nigam, P., Singh, D. and Marchant, R. : Microbial decolorization of textile-dye-containing effluents: a review. *Biores. Technol.*, 1996, 58, pp. 217-227.
- 김정목, 한명호, 임학상 : 반응성 염료의 색도제거를 위한 균주의 분리 및 성장 특성. 대한상하수도학회지. 1998. 12(4), pp. 78-85.

8. 서승교 : 염색폐수성분을 분해하는 세균의 혼합배양에 의한 염색폐수의 처리. 한국위생과학회지. 2001. 7(1): pp. 55-61.
9. Low, K.S., Lee, C.K. and Tan, K.K. : Biosorption of basic dye by water hyacinth roots. *Biores. Technol.*, 1995, 52, pp. 79-83.
10. 이제혁, 황규대, 조동욱, 전역한 : *Pseudomonas*속의 균주를 이용한 Azo계와 Reactive계의 Dye의 생분해. 한국생물공학회지. 1993, 8(2), pp. 150-155.
11. Kim, D.W., Cha, D.K., Wang, J. and Huang, C.P. : Heavy metal removal by activated sludge. influence of *Nocardia amarae*. *Chemosphere.*, 2002, 46, pp. 137-142.
12. Shuttleworth, K.L. and Unz, R.F. : Sorption of heavy metals to the filamentous bacterium *Thiothrix* strain A1. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1993, 59, pp. 1274-1282.