ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 2, pp. 241-249, April, 2013
http://dx.doi.org/10.11001/jksww.2013.27.2.241

Treatment of ETA wastewater using GAC as particle electrodes in three-dimensional electrode reactor

활성탄 충진 3D 복극전기분해조를 이용한 ETA 처리

Kim, Ran · Kim, Yu-jin · Shin, Ja-won · Kim, Jeong-Joo · Park, Joo-Yang*

김란 · 김유진 · 신자원 · 김정주 · 박주양*

한양대학교 건설환경공학과

Abstract : Ethanolamine (ETA) is widely used for alkalinization of water in steam cycles of nuclear power plants with pressurized water reactor. When ETA contained wastewater was released, it could increase COD and T-N. The treatment of the COD and T-N from ETA wastewater was investigated using the GAC as particle electrodes in three-dimensional electrode reactor (TDE). This study evaluated the effectiveness of GAC as particle electrode using different packing ratio at 300 V. The results showed that GAC-TDE could reduce ETA much more efficiently than ZVI-TDE at the mass ratio of GAC to insulator, 1:2. Additionally, The effect of applied electric potential to COD and T-N reduction was investigated. The results showed the high COD, T-N reduction and current efficiency at the low electric potential. Using the GAC-TDE will provide a better ETA reduction with reducing electrical potential dissipation.

Key words : Ethanolamine, COD, T-N, Ammonia, Three-dimensional electrode reactor, Granular activated carbon.
주제어 : 에탄올아민, COD, T-N, 암모니아, 3D 복극전해조, 활성탄.

1. 서 론

에탄올아민(monoethanolamin, ETA, C_2H_7NO)은 아민기와 알콜기로 구성된 유기화합물질이다(Puttaswamy와 Made, 2001). 물질안전정보(material safety data sheet, MSDS)에 따르면 ETA는 인체에 노출될 경우 피부에 심한 화상 및 알레르기성 피부반응과 눈에 심한 손상을 일으킬 수 있는 유독한 물질이며, 열분해 시 자극적이고 유독한 가스가 발생될 수 있다. 또한 수계에 유입될 경우 COD 및 T-N의 증가에 영향을 준다. 이러한 ETA는 천연가스나 원유 속에 포함되어있는 사워가스(sour gas, 예, H_2S와 CO_2)를 제거하기 위해 주로 사용되고 있으며(Ndegwa 등, 2004), 가압경수형원자로(PWR)를 포함한 원자력발전소 내 증기 사이클 내의 pH 조절 및 부식방지를 위해 많이 이용되고 있다(Bénézeth 등, 2009). 원자력발전소 내 증기 순환 시스템에서 발생한 폐수는 이온교환수지 컬럼을 통해 회수, 농축되어 재사용되지만 일부 고농도의 ETA 폐수가 방류되어 수질환경에 유독한 영향을 유발하기 때문에(Kim 등, 2010) 이에 따른 처리기술이 필요하다. ETA 처리를 위해서 양이온 교환수지를 이용한 처리 방법이 주로 연구되고 있으며(Raught 등, 2005), Chi와 Rochelle (2002)

• Received 17 January 2013, revised 10 April 2013, accepted 12 April 2013.
* Corresponding author: Tel : +82-2220-0411 E-mail : jooypark@hanyang.ac.kr(Park, J.Y.)

이 수행한 Fe^{3+}를 촉매로 사용한 ETA 산화분해 연구 등 다양한 산화분해 방법(Puttaswamy와 Made, 2001; Niedbała 등, 1994)과 생물학적 분해방법(Maklas 등, 2003; Hawthorne 등, 2005)에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 방법에 의한 처리 시 약품 소모가 과도하게 요구되어 비용이 많이 소모되며 장기간 운전 시 분해속도가 상당히 느려지기 때문에(Harimurti 등, 2010) 대체 처리 기술이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 폐수 처리 시 약품 소모가 적고, 슬러지 발생이 적어 후처리가 간단하며, 운영이 간편한 장점을 가지고 있는(Wang 등, 2007) 3D 복극전기분해조(three-dimensional electrode, TDE)를 이용하여 수중 ETA를 처리하고자 하였다.

TDE는 한 쌍의 양극과 음극으로 이루어진 주전극 사이에 수많은 복극전극(particle electrodes)이 전기적 연결 없이 독립적으로 위치한 형태로 2D 복극전기분해조(two-dimensional electrode)보다 부피 대비 비표면적이 넓기 때문에(Zhu 등, 2011; Nageswara 등, 2009; Kong 등, 2006) 다양한 오염원에 대하여 효과적인 저감 효과를 기대할 수 있다(Liu 등, 2011; Xu 등, 2008). Jung 등(2012)은 영가철(zero valent iron, ZVI)을 모래와 섞어 3D 형태로 배열한 복극전기분해조를 이용하여 600 V에서 99 %까지 질산성 질소를 저감하였으며, Xiong 등(2003)은 페놀함유 폐수에 의해 유발된 COD 저감을 위해 입상활성탄을 복극전극으로 적용한 3D 복극전기분해조를 이용하여 운영횟수(batch runs)에 따른 COD 저감 능력을 설명하였다.

본 연구에서는 입상활성탄을 복극전극으로 적용한 TDE를 이용하여 ETA를 효과적으로 처리하고자 하였다. 활성탄은 표면이 전도성을 띄고 전기용량이 크며(Qu와 Shi, 1998), 높은 전기전도도를 가지고 있으며, 전기적 흡착과 전하를 이동시킬 수 있기 때문에 전기화학 분야에서 다양하게 이용이 가능하다(Bandosz, 2006; Foo와 Hameed, 2009; Obreja, 2008; Frackowiak와 Béguin, 2001). 이러한 활성탄을 복극전극으로 적용할 경우 복극전극으로서의 역할뿐만 아니라 전기적 흡착을 할 수 있을 것이라 기대되기 때문에(Wang 등, 2007) 실험에 사용하였다. 활성탄의 ETA 흡착 여부를 판단하기 위해 인가전압 없이 흡착 실험을 진행하였고, 활성탄 충진 TDE의 ETA 처리 효율을 평가하고자 전기화학적 처리 실험을 수행하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 모의 ETA 오염 폐수 제조

ETA 폐수 처리 효율을 알아보기 위해 10 mM의 ETA (Sigma Aldrich, 99 %) 용액을 제조하였고, 1N HCl (Matsunoen chemical, 35 %)를 이용하여 pH 7로 조절하였다.

2.2. 3D복극전기분해조(TDE)

TDE 규모는 직경 80 mm에 높이 200 mm이며, 내부 부피는 약 1,000 cm^3이 되도록 설계하였다(Fig. 1). TDE 내부에는 미세복극과 격리재(insulator)를 균일하게 혼합하여 충진하였다. 미세복극으로 사용한 입상활성탄(granular activated carbon, GAC)은 요오드가 〉1100 mg/g의 Kuraray chemical의 GW-H20x40을 역세 세정 후 사용하였으며 격리재는 주문진

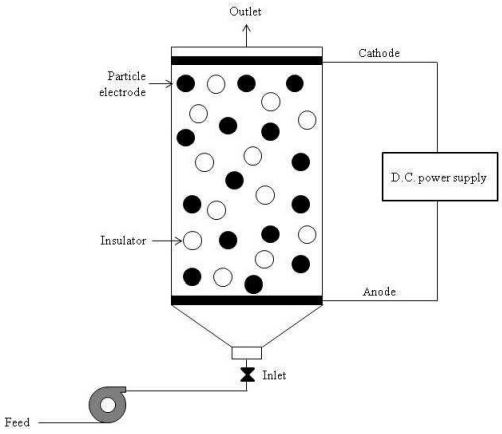

Fig. 1. Schematic diagram of the three-dimensional electrode reactor (TDE).

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 2, pp. 241-249, April, 2013

규사(직경 0.3 mm, 주문진주식회사)를 사용하였다. 주전극은 양극에는 백금 코팅 니오브(Sun Wing Technology Co., Hong Kong), 음극에는 상용 SUS304를 각각 사용하였으며, 직류전원 공급장치(Sorensen, XG600-2.8)를 TDE에 연결하여 전력을 공급하였다. ETA 인공폐수는 10 mL/min의 유량으로 펌프를 이용하여 상향류로 흘려보냈다.

2.3. 실험방법

2.3.1. 활성탄의 ETA 흡착

활성탄이 복극전극으로서의 역할 뿐만 아니라 전기적 흡착을 할 수 있을 것이라 추측하기 때문에 ETA 흡착 능력을 평가하기 위해 회분식 실험을 진행하였다. 복극전극으로 사용될 활성탄을 0.5 g씩 넣은 polypropylene conical tube (Falcon. Co.)에 초기농도 10 mM의 모의 ETA 폐수 50 mL를 주입한 후 12 시간 동안 반응시켰다. 교반은 Hag rotator (Vision Co.)를 사용하여 58 rpm 으로 회전 혼합하였고, 반응이 끝난 용액은 0.45 μm syringe filter를 이용하여 여과한 후 분석하였다.

2.3.2. 활성탄 충진 TDE의 전기화학적 ETA 처리

본 연구에서는 모의 ETA 폐수를 처리하고자 활성탄을 복극전극으로 적용한 TDE를 이용하여 실험을 진행하였다. 먼저 활성탄 충진 TDE 효율 비교를 위해 미세복극과 격리재간의 혼합비에 따른 TDE 실험을 실시하였다. 전압은 300 V로 고정하였으며 모의 ETA 폐수의 초기농도는 10 mM에서 실험을 진행하였다. 미세복극인 활성탄과 격리재를 1:1, 1:2, 1:4 비율로 혼합하여 TDE를 제작하였으며, 활성탄의 복극전극으로서의 적용 가능성을 판단하고자 Jung 등(2012)의 실험에 사용된 영가철을 격리재와 1:2 비율로 혼합한 TDE를 준비하였다. 마지막으로 인가전압에 따른 활성탄 충진 TDE의 ETA 처리 능력을 평가하고자 전압을 100, 300, 600 V로 각각 달리하여 실험을 수행하였다. 이때 활성탄과 격리재간의 혼합비는 1:2로 고정하였다. 반응이 종료된 모의 ETA 폐수는 0.45 μm syringe filter를 이용하여 여과한 후 분석하였다.

2.4 분석 방법

ETA 처리여부를 평가하기 위해 COD, T-N 등의 농도를 측정하였다. COD 농도는 Reactor digestion method (#8000)을 이용하여 Cr^{3+}에 의해 녹색으로 발색된 시료를 파장 620 nm에서 분광흡광계(HACH DR2800 portable spectrophotometer)를 이용하여 분석하였다. T-N 농도는 Persulfate digestion method (#10208)를 이용하여 무기, 유기 결합된 질소를 질산염으로 산화시킨 후. 질산염 이온을 2,6-dimethylphenol과 반응시켜 형성된 나이트로페놀을 파장 345 nm에서 분석하였다. 질산성질소(NO_3^--N) 농도는 Cromotropic acid method(#10020)를 이용하여 크로모트로프산과 반응하여 노랗게 발색된 시료를 파장 410 nm에서 분석하였으며, 암모니아성질소(NH_3-N) 농도는 Salicylate method(#10031)을 이용하여 염소와 반응하여 녹색으로 발색된 시료를 파장 655 nm에서 분석하였다(Francis, 2012; Racz 등, 2010). pH는 pH meter (Thermo orion 720A+)를 이용하여 측정하였으며, 전류는 직류전원 공급장치를 통해 직접 모니터링하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 활성탄의 ETA 흡착 결과

활성탄의 복극전극 적용 가능성을 판단하기에 앞서 ETA 흡착 능력을 평가하기 위해 초기농도 10 mM의 모의 ETA 폐수의 흡착 실험을 진행하였다. **Fig. 2**에 시간별 COD와 T-N의 농도를 나타내었다. 12 시간 교반 결과 활성탄의 g당 흡착량은 COD= 0.7 mg/g, T-N= 3.4 mg/g으

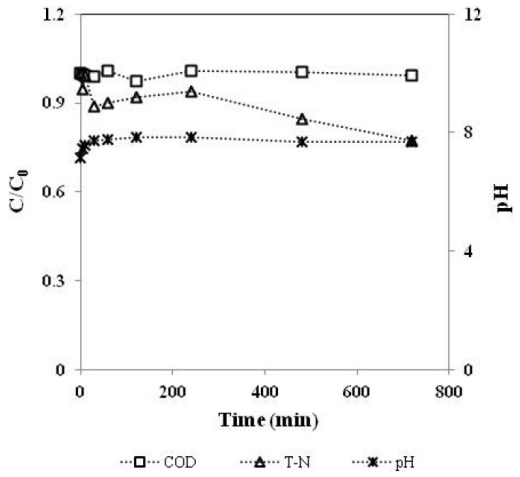

Fig. 2. Adsorption of ethanolamine onto the GAC.

로 흡착에 의한 처리가 거의 이루어지지 않았다. 이는 활성탄 표면과 식 (1)에 설명된(Yeon 등, 2007) ETA 폐수 중에 존재하는 OH^-에 의한 이온 반발(ionic repulsion)에 의한 것으로 보인다(Ahmad와 Hameed, 2009). 실험 결과 활성탄 단독으로는 ETA 처리가 불가능할 것이라 판단되므로, 일반적 흡착제가 아닌 TDE 시스템의 복극전극으로 이용하여 ETA의 전기화학적 처리 실험을 진행하였다.

$$HOCH_2CH_2NH_2+H_2O \leftrightarrow HOCH_2CH_2NH_3^+ + OH^- \quad (1)$$

3.2. 활성탄 충진 TDE의 전기화학적 ETA 처리

3.2.1. 혼합비에 따른 TDE의 전기화학적 ETA 처리

활성탄 충진 TDE의 ETA 처리 효율 비교를 위해 활성탄과 영가철을 미세복극으로 적용하여 격리재와 혼합비에 따른 TDE 실험을 진행하였다. Fig. 3에 혼합비에 따른 TDE의 COD와 T-N의 처리 결과를 나타내었다. 혼합비에 따른 COD 처리 효율은 GAC 1:2에서 가장 높게 나타났으며, GAC 1:1, GAC 1:4, ZVI 1:2 순으로 나타났다. 혼합비 1:2의 TDE에서 처리한 COD의 농도를 비교해보면 활성탄의 경우 2 mg/L(초기 농도=838 mg/L)까지 감소시킬 수 있었지만 영가철의 경우 784 mg/L까지 감소시킬 수 있었다. 활성탄 혼합비 1:1에서는 최대 4 mg/L, 1:4에서는 49 mg/L까지 COD를 저감시킬 수 있어서 영가철보다 높은 COD 처리 효율을 나타내었다. 활성탄을 복극전극으로 적용할 경우, 전기화학적 산화, 환원 작용과 동시에 전기적 흡착을 할 수 있으므로(Wang 등, 2007) 높은 저감 효율을 보이는 것으로 판단된다. Ban 등(1998)은 활성탄에 전압을 인가할 경우, 표면이 전하를 띠게 되어 타겟물질이 쉽게 흡착할 수 있게 되므로 흡착량이 증가한다고 설명하였다. 이를 통해 활성탄을 이용한 흡착 실험을 진행하였을 때는 처리 효율이 낮게 나타났지만, 복극전극으로 적용하였을 때 전기적 흡착이 일어나 COD와 T-N의 처리 효율이 높게 나타난 것을 설명할 수 있다. Fig. 3와 Fig. 4a에 TDE 처리수의 T-N과 질산성질소, 암모니아성질소의 농도 변화를 살펴보면 반응초기에 T-N의 주요성분인 암모니아(Yeon 등, 2007) 농도가 감소되고 질산성질소의 농도가 증가되는 경향이 나타났다.

$$NH_3+2O_2 \rightarrow NO_3^- + 2H^+ + OH^- \quad (2)$$

$$NH_3+3OH^- \rightarrow 0.5N_2+3H_2O+3e^- \quad (3)$$

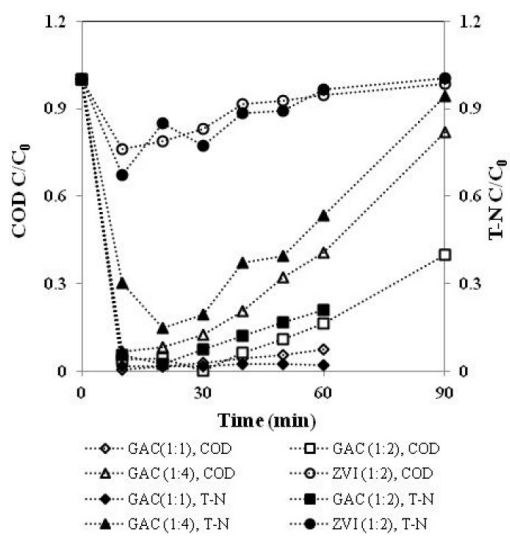

Fig. 3. Dependence of COD and T-N treatment efficiency at various packing ratio.

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 2, pp. 241-249, April, 2013

양극 산화 과정에서 일어나는 전자 이동에 의해 암모니아가 식 (2), (3)과 같이(Van 등, 2004; Yeon 등, 2007; Kim 등, 2010) 질산성 질소나 N_2로 산화되어 처리되었을 것으로 추측하였다(Yeon 등, 2007; Zhou 등, 2007). 활성탄 충진 TDE의 경우 반응 초기 30분 내에 ETA가 90 % 이상 제거되었으며 반응이 지속될수록 처리가 이루어지지 않은 것을 확인할 수 있었다. ETA 제거 효율이 초기에 증가하였다가 반응시간에 따라 감소하는 것은 복극전극으로 적용된 활성탄이 saturation되어 흡착능이 감소하였기 때문인 것으로 보인다(Xiong 등, 2003).

Fig. 4b의 온도를 살펴보면 복극전극으로 사용된 활성탄의 양이 증가할수록 온도가 더 빠르게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 4c에 나타난 전류의 증가에 따른 것으로 TDE 내의 활성탄의 양이 증가할수록 전류가 높게 흐르게 되며 이에 따라 온도가 상승하였으며(Xiong 등, 2001), 온도 상승이 ETA의 전기화학적 처리에 영향을 끼친 것으로 보인다.

Fig. 4c에 TDE에서의 전류 효율(current efficiency, CE)을 나타내었다. 전류 효율 계산은 식 (4)에 나타내었다(Wang 등, 2007; Xiong 등, 2001; Comninellis과 Nerini, 1995).

$$CE = \frac{(COD_0 - COD_t) \cdot F \cdot V}{8 \cdot I \cdot \triangle t} \qquad (4)$$

(COD, COD_t: COD 농도(gO_2/L), F : 페러데이 상수(96,487 C/mol), V : 전해질의 부피(L), I : 전류(A), △t: 반응시간(s), 8: 상수(32 g O_2 mol O_2/4 mol e^- mol O_2).

위의 식을 바탕으로 계산한 전류 효율을 보면 활성탄의 경우 혼합비 1:4에서 가장 높게 나타났으며, 1:2, 1:1 순으로 나타났다. 이는 1:4에

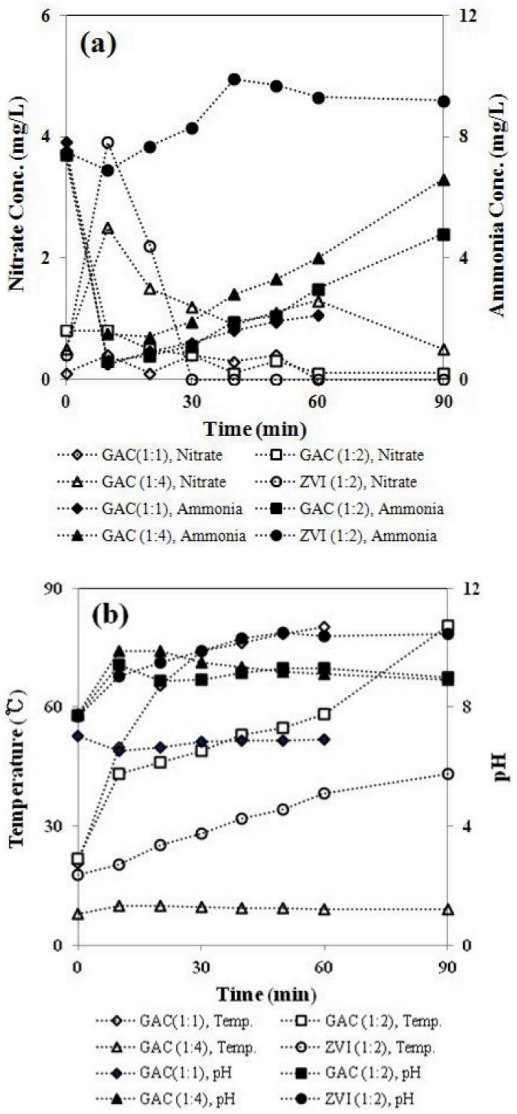

Fig. 4. Dependence of the nitrate and ammonia concentration (a), temperature and pH (b) and current and current efficiency (c) at various packing ratio.

서 발생 전류당 COD 제거율이 가장 우수한 것을 의미하며, 이처럼 전류 효율이 높게 나타난 것은 복극전극으로 사용된 활성탄에서 전기화학 작용과 전기적 흡착이 일어났음을 시사한다.

3.2.2. 인가전압에 따른 활성탄 충진 TDE의 전기화학적 처리

활성탄 충진 TDE의 전기화학적 처리 시 효율 평가를 위해 COD 처리 효율 가장 우수하게 나타난 혼합비 1:2에서 인가전압을 100, 300, 600 V로 달리하여 ETA 처리 실험을 진행하였다. Fig. 5에 인가전압에 따른 COD와 T-N 농도를 나타냈다. 일반적으로 높은 전압에서 전기화학적 반응이 증가하므로 오염물질의 처리 능력이 뛰어난 것으로 알려져 있지만, 본 실험에서는 600 V에서보다 300 V에서 COD 처리 효율이 높게 나타났다. 특히 300 V 전압을 인가하였을 때, TDE 처리수의 COD 농도가 2 mg/L(초기농도= 838 mg/L), T-N은 3.92 mg/L(초기농도= 159 mg/L)까지 감소하였으며, 100 V에서는 활성탄 충진 TDE 처리수의 COD 농도가 139 mg/L, T-N 농도가 26.1 mg/L까지 감소하였다. Fig. 6a에 질산성질소 농도와 암모니아 농도를 나타내었다. 반응 초기에 암모니아 농도가 감소하고 질산성질소의 농도가 증가하였으며, 반응시간에 따라 T-N 농도

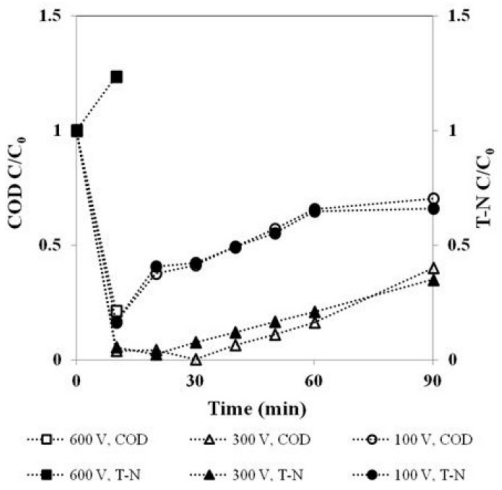

Fig. 5. Dependence of COD and T-N treatment efficiency at various applied electrode potential.

와 암모니아 농도가 증가하는 경향을 통해 반응이 진행될수록 ETA 처리가 이루어지지 않은 것을 확인하였다. 600 V를 인가한 활성탄 충진 TDE의 경우, 고전압으로 인한 급격한 온도 상승 때문에 더 이상 TDE 실험을 수행할 수 없어서 반응시간 10분 만에 반응을 종료시켰다.

Fig. 6b-c를 보면 반응이 지속될수록 전류가 증가함에 따라 온도 또한 증가하는 것을 확인할 수 있는데 이는 반응과정에서 발생한 바이패스 전류(bypass current)에 의한 것이라 판단된다(Kim 등, 1987). Fig. 6c에 활성탄 충진 TDE의 전류와 전류 효율에 대하여 나타냈다. 전류는 반응초기에 감소하였다가 다시 서서히 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 TDE 내의 전기분해과정에서 물의 산화에 따른 O_2의 증가에 의한 것이라 설명할 수 있다(Wang 등, 2007). 전류 효율은 반응 초기에 가장 높게 나타났으며 반응시간에 따라 감소하는 경향을 보였다. 100 V에서 전류 효율이 가장 높았으며, 300, 600 V 순으로 나타났다. 인가전압이 증가할수록 H^+와 O_2가 발생하고 온도가 증가하는 등 부반응(side reaction)이 증가하게 되므로 이에 따라 낭비되는 전류가 증가하게 되어 전류 효율이 감소되는 것으로 보인다(Xiong 등, 2002). 또한 높은 열전도도를 가진 활성탄의 특성으로 인하여 높은 전압에서 전류뿐만 아니라 열의 이동까지 증가하게 되므로 활성탄 표면이 온도 영향에 의해 흡착제 및 복극전극으로서의 역할을 수행하지 못하기 때문에 온도가 증가할수록 전류 효율이 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 활성탄 충진 TDE는 다른 복극전극과는 다르게 시스템에 적합한 범위의 전압을 가하였을 때 모든 활성탄 입자가 극성을 가지며 양극, 음극으로서의 역할을 할 수 있으므로(Xiong 등, 2003) 비교적 안정적으로 전기화학 작용을 할 수 것으로 보인다. 따라서 활성탄을 복극전극으로 적용할 경우 기존 영가철이나 기타 복극전극에 비해 전력소모를 줄임과 동시에 더 많은 양의 ETA를 처리할 수 있을 것으로 보인다.

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 2, pp. 241-249, April, 2013

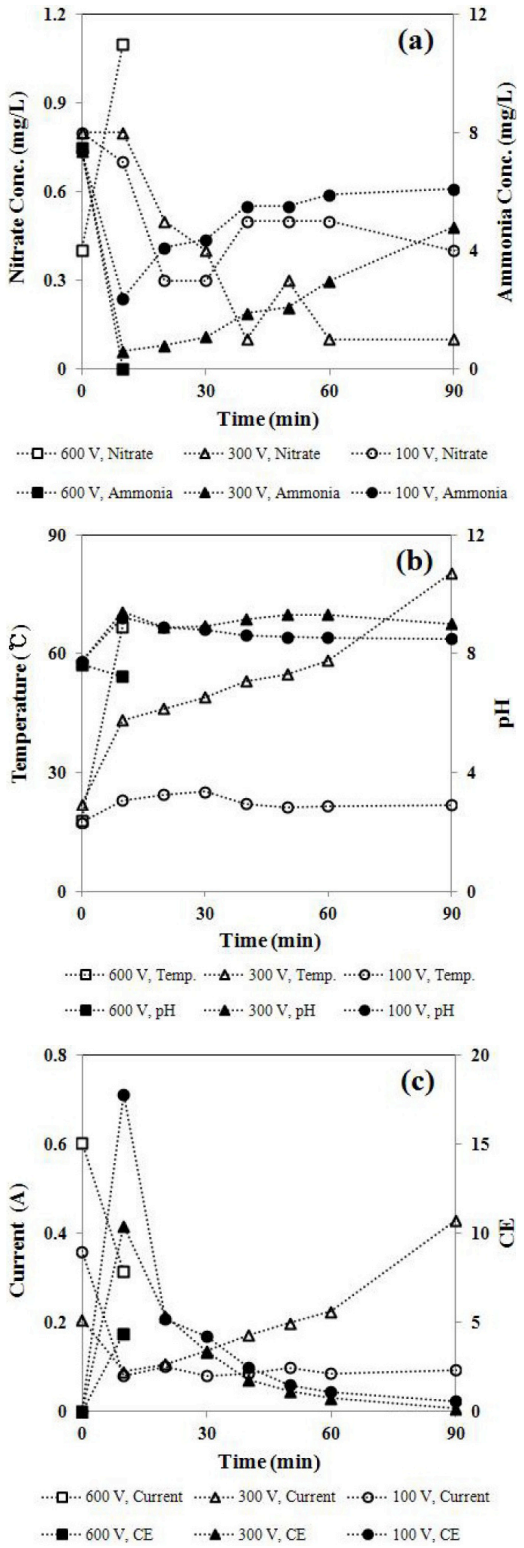

Fig. 6. Dependence of the nitrate and ammonia concentration (a), temperature and pH (b) and current and current efficiency (c) at various applied electrode potential.

4. 결론

본 연구는 활성탄을 복극전극으로 적용한 활성탄 충진 TDE를 통하여 ETA 처리에 대하여 평가하였다. 먼저 활성탄의 ETA 흡착 여부를 판단하기 위해 시간별 흡착실험을 진행하였다. 실험 결과, 활성탄의 흡착량이 COD는 0.7 mg/g, T-N은 3.4 mg/g으로 흡착이 거의 이루어지지 않았다. 두 번째로, 활성탄을 복극전극으로 적용한 TDE를 통해 ETA 처리 능력을 평가하였다. 미세복극과 격리재간의 혼합비에 따른 TDE 실험 결과, 영가철을 복극전극으로 사용하였을 때(COD=24.03 %, T-N=11.38 %)보다 활성탄을 복극전극으로 사용했을 때(COD=99.76 %, T-N=97.53 %) ETA 처리 효율이 더 높게 나타났으며(혼합비 1:2) 전류 효율 역시 활성탄이 영가철보다 높게 나타났다. 이는 활성탄 TDE의 전기적 산화 · 환원작용과 전기적 흡착에 의한 것이라 판단된다.

마지막으로 인가전압에 따른 활성탄 충진 TDE의 ETA 처리 능력을 평가한 결과 COD 제거율은 300 V (99.76 %), 100 V (83.41 %), 600 V (78.67 %), 전류 효율은 100, 300, 600 V순으로 높게 나타나 낮은 전압에서 ETA 처리가 용이한 것으로 나타났다. 일정 범위의 인가전압은 활성탄 복극전극의 전기화학적 처리능력을 향상시켜 높은 전류 효율을 나타내며, 활성탄을 복극전극으로 적용할 경우 높은 COD 및 T-N 저감 능력을 확보함과 동시에 전력소모를 줄일 수 있으므로 기존의 영가철 복극전극보다 효율적으로 ETA 처리가 가능할 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 한국에너지기술평가원 '원전기술혁신사업(과제번호 201262010050)'의 지원을 받아 이루어진 것으로, 이에 감사드립니다.

참고문헌

Ahmad, A.A. and Hameed, B.H. (2009) Reduction of COD and color of dyeing effluent from a cotton textile mill by adsorption onto bamboo-based activated carbon, *Journal of Hazardous Materials*, **172**(2-3), pp.1538-1543.

Ban, A., Schafer, A. and Wendt, H. (1998) Fundamentals of electrosorption on activated carbon for wastewater treatment of industrial effluents, *Journal of Applied Electrochemistry*, **28**(3), pp.227-236.

Bandosz T. J. (2006) *Activated carbon surfaces in environmental remediation*, pp. 169-178, Elsevier, New York.

Bénézeth, P., Wesolowski, D.J., Palmer, D.A. and MacHesky, M.L. (2009) Effect of amines on the surface charge properties of iron oxides, *Journal of Solution Chemistry*, **38**(7), pp.925-945.

Chi, S. and Rochelle, G.T. (2002) Oxidative Degradation of Monoethanolamine, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **41**(17), pp.4178-4186.

Comninellis, C. and Nerini, A. (1995) Anodic oxidation of phenol in the presence of NaCl for wastewater treatment, *Journal of Applied Electrochemistry*, **25**(1), pp.23-28.

Foo, K.Y. and Hameed, B.H. (2009) A short review of activated carbon assisted electrosorption process: An overview, current stage and future prospects, *Journal of Hazardous Materials*, **170**(2-3), pp.552-559.

Francis, R (2012) Utilization of Nitrogen from Surface and Subsurface Applied Wastewater, Master's Thesis, Texas Tech University.

Frackowiak, E. and Béguin, F. (2001) Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors, *Carbon*, **39**(6), pp.937-950.

Harimurti, S., Dutta, B.K., Ariff, I.F.B.M., Chakrabarti, S. and Vione, D. (2010) Degradation of monoethanolamine in aqueous Solution by Fenton's reagent with Biological post-treatment, *Water, Air, and Soil Pollution*, **211**(1-4), pp.273-286.

Hawthorne, S.B., Kubátová, A., Gallagher, J.R., Sorensen, J.A. and Miller, D.J. (2005) Persistence and Biodegradation of Monoethanolamine and 2-Propanolamine at an Abandoned Industrial Site, *Environmental Science & Technology*, **39**(10), pp.3639-3645.

Jeong, J.-Y., Kim, H.-K., Kim, J.-H. and Park, J.-Y. (2012) Electrochemical removal of nitrate using ZVI packed bed bipolar electrolytic cell, *Chemosphere*, **89**(2), pp.172-178.

Kim, D.-J., Lim, Y., Cho, D. and Rhee, I. (2010) Biodegradation of monoethanolamine in aerobic and anoxic conditions, *Korean Journal of Chemical Engineering*, **27**(5), pp.1521-1526.

Kim, H., Kusakabe, K., Hokazono, S., Morooka, S. and Kato, Y. (1987) Electro-oxidation rate ofp-tert-butyltoluene in a bipolar packed-bed electrode cell, *Journal of Applied Electrochemistry*, **17**(6), pp.1213-1222.

Kong, W., Wang, B., Ma, H. and Gu, L. (2006) Electrochemical treatment of anionic surfactants in synthetic wastewater with three-dimensional electrodes, *Journal of Hazardous Materials*, **137**(3), pp.1532-1537.

Mrklas, O., Lunn, S. R. D. and Chu, A. (2001) Laboratory investigations of aerobic and anaerobic monoethanolamine biodegradation studies, *Journal of Environmental Monitor*, **5**, pp.336-340.

Mondal, P., Balomajumder, C. and Mohanty, B. (2007) A laboratory study for the treatment of arsenic, iron, and manganese bearing ground water using Fe^{3+} impregnated activated carbon: Effects of shaking time, pH and temperature, *Journal of Hazardous Materials*, **144**(1-2), pp.420-426.

Nageswara Rao, N., Rohit, M., Nitin, G., Parameswaran, P.N. and Astik, J.K. (2009) Kinetics of electrooxidation of landfill leachate in a three-dimensional carbon bed electrochemical reactor, *Chemosphere*, **76**(9), pp.1206-1212.

ISSN (Print) 1225-7672
ISSN (Online) 2287-822X
Journal of Korean Society of Water and Wastewater Vol. 27, No. 2, pp. 241-249, April, 2013

Ndegwa, A.W., Wong, R.C.K., Chu, A., Bentley, L.R. and Lunn, S.R.D. (2004) Degradation of monoethanolamine in soil, *Journal of Environmental Engineering and Science*, 3(2), pp.137–145.

Niedbał, J., Budniok, A. and Matyja, P. (1994) Electro–oxidation of ethanolamine on modified layers of Cu–Ni alloys in alkaline environment, *Thin Solid Films*, 237(1–2), pp.148–154.

Obreja, V.V.N. (2008) On the performance of supercapacitors with electrodes based on carbon nanotubes and carbon activated material—A review, *Physica E: Low–dimensional Systems and Nanostructures*, 40(7), pp.2596–2605.

Puttaswamy, Vaz, N. and Made Gowda, N.M. (2001) Oxidation of ethanolamines by sodium N–bromobenzenesulfonamide in alkaline buffer medium: A kinetic and mechanistic study, *International Journal of Chemical Kinetics*, 33(8), pp.480–490.

Qu, D. and Shi, H. (1998) Studies of activated carbons used in double–layer capacitors, *Journal of Power Sources*, 74(1), pp.99–107.

Racz, L., Datta, T. and Goel, R. (2010) Effect of organic carbon on ammonia oxidizing bacteria in a mixed culture. *Bioresource Technology*, 101(16), pp.6454–6460.

Raught D. P., Foutch. G. L. and Apblett. A. (2005) Ion exchange resin fouling by organic amines in secondary systems at U.S. nuclear power plants, *Power Plant Chemistry*, 7(12), pp.741–747.

Van Hege, K., Verhaege, M. and Verstraete, W. (2004) Electro–oxidative abatement of low–salinity reverse osmosis membrane concentrates, *Water Research*, 38(6), pp.1550–1558.

Wang, L., Fu, J., Qiao, Q. and Zhao, Y. (2007) Kinetic modeling of electrochemical degradation of phenol in a three–dimension electrode process, *Journal of Hazardous Materials*, 144(1–2), pp.118–125.

Xiong, Y., Strunk, P.J., Xia, H., Zhu, X. and Karlsson, H.T. (2001) Treatment of dye wastewater containing acid orange II using a cell with three–phase three–dimensional electrode, *Water Research*, 35(17), pp.4226–4230.

Xiong, Y. and Karlsson, H.T. (2002) An experimental investigation of chemical oxygen demand removal from the wastewater containing oxalic acid using three–phase three–dimensional electrode reactor, *Advances in Environmental Research*, 7(1), pp.139–145.

Xiong, Y., He, C., Karlsson, H.T. and Zhu, X. (2003) Performance of three–phase three–dimensional electrode reactor for the reduction of COD in simulated wastewater–containing phenol, *Chemosphere*, 50(1), pp.131–136.

Xu, L., Zhao, H., Shi, S., Zhang, G. and Ni, J. (2008) Electrolytic treatment of C.I. Acid Orange 7 in aqueous solution using a three–dimensional electrode reactor, *Dyes and Pigments*, 77(1), pp.158–164.

Yeon, K.–H., Song, J.–H., Shim, J., Moon, S.–H., Jeong, Y.–U. and Joo, H.–Y. (2007) Integrating electrochemical processes with electrodialysis reversal and electro–oxidation to minimize COD and T–N at wastewater treatment facilities of power plants, *Desalination*, 202(1–3), pp.400–410.

Zhu, X., Ni, J., Xing, X., Li, H. and Jiang, Y. (2011) Synergies between electrochemical oxidation and activated carbon adsorption in three–dimensional boron–doped diamond anode system, *Electrochimica Acta*, 56(3), pp.1270–1274.