

超音波에 의한 水중의 難分解性 汚染物質 處理

孫鍾烈·牟世榮*·孫晉錫**

高麗大學校 保健專門大學, *忠北大學校, **京畿道 保健環境 研究院

Treatment of non-degradable Organic Pollutants in Aqueous by ultrasonic irradiation

Jong-Ryeul Sohn, Se-Young Mo, Jin-Seok Sohn*

Junior College of Allied Health Science, Korea University

** Chungbuk National University*

*** Kyunggi Province Government Institute of Health and Environment*

Abstract

This study was performed to examine the factors influenced on the decomposition of nondegradable organic pollutants(Trichloroethylene, Benzene) in aqueous by ultrasonic irradiation.

The TCE(Trichloroethylene) and Benzene are major hazard compounds causing environmental pollution and not decomposable substances by conventional treatment.

The results shows that the oxidation and reduction reaction of ultrasonic irradiation was formed the H_2O_2 , H^+ and OH^- radical, and then these was decomposed pollutants of TCE and Benzene in aqueous.

We were conformed that the ultrasonic irradiation was excellent in removal efficiency of the nondegradable organic substances any other than processes and utilized the treatment of organic compounds in the industrial wastewater.

Conclusively, these results suggest that ultrasonic irradiation may be extremely useful for the treatment of wastewaters contaminated organic pollutants, which is difficult to treat economically by conventional treatment.

I. 서 론

산업화가 가속화됨으로서 각종 생산시설이 확대되고 따라서 각종 공업용품과 생활용품의 생산량과 사용량이 증대 될 뿐만 아니라 그 종류 또한 다양해 짐으로서 그것들을 제조하고 사용하는 과정에서 배출되는 부산물 및 폐기물의 양이 또한 증대되고 아울러 그것들 속에 함유된 유해화학물질의 종류도 매우 다양하여 그것들을 제거하고 통제하여 사람의 건강과 환경에 해를 끼치지 않는 안전한 수준으로 유지하도록 하는 것이 주요한 과제가 되고 있다. 그러나 지금까지 알려진 대부분의 처리기술들은 일반적으로 알려진 성분의 폐기물에 대해서는 처리효율이 입증되어 비교적 양호한 처리효율을 갖지만 새로운 구조를 갖는 특정 성분을 함유한 폐기물은 효과적으로 처리하지 못하는 경우가 점점 증대되고 있다.

따라서 이러한 과제를 해결하기 위해 식수 및 공업용수를 정제하고 각종 생산시설과 가정에서 배출되는 폐수 및 폐기물과 폐가스를 효과적으로 처리할 수 있도록 하는 새로운 기술로서 자외선(Ultra Violet Radiation), 전자빔(Electron Beam), 그리고 펄스 코로나방전 플라즈마등을 이용하고자 하는 연구가 행하여지고 있고 그 결과 그것들의 처리효과는 비교적 양호한 것으로 나타나고 있으나 장치의 제작비용이 매우 높아 경제성이 문제인 것으로 지적되고 있다.

자외선을 이용하는 방법은 화학반응에 참여하는 각 분자가 빛을 흡수하므로써 1 Quantum의 반응을 일으키기 위해 어떤분자 1몰이 흡수한 에너지(E)와 파장과의 관계식인

$$E = (2.859/\lambda) \times 10^6 \text{ kcal/mol}$$

에서 파장이 짧아지면 1Einstein의 값이 커지기 때문에 어떤 물질이 반응을 일으킬 수 있도록 몰당 흡수되어야 할 에너지의 양은 파장이 짧은 빛 스펙트럼의 Ultraviolet end¹⁾에서 증대되는 원리가 적용된것이다. 이에대한 연구로써 최근에 국내에서 발표된 논문으로서는 강준원²⁾ 등에 의한 오존, H₂O₂, UV를 이용한 고급산화 처리공정에 관한 연구와 신항식³⁾ 등의 Fe/H₂O₂에 의한 고급산화 산화처리에 관한연구, 그리고 한국에너지 기술연구소의 이규태⁴⁾ 등의 TiO₂촉매를 이용한 충전탑 반응기에서의 TCE 광분해에 관한 연구등이 있으며 이들의 연구 결과는 자외선의 처리효과가 매우 긍정적인임을 보이고 있다.

전자빔을 이용하는 방법은 Potential Field를 통해 전자를 가속시켜 전자빔을 생성시킴으로 그 전자빔을 반응물질의 분자와 상호충돌시켜 분자를 이온화시킴으로써 이온화된 분자가 반응물과 상호작용하여 다른 구성분자와 빠르게 반응할 수 있는 자유라디칼을 생성토록하는 원리를 이용한것이며, 이 기술은 특히 연소배출가스에서 SO₂와 NO_x를 제거시키기 위한 E-beam process의 기술적 및 경제적 타당성검토가 1970년대 초반이후에 행해지고 있으며⁵⁾ 미국의 Department of energy, TVA, 그리고 Control Environmental Science가 Spray Drier, E-beam, 그리고 Fabric Filter 등을 병합한 처리공정에서의 처리효과를 검토하기 위해 켄터키주 파두카의 스와니 발전소에 파이롯트규모의 시험을 행하였음이 발표된 바 있고 최근 국내에서는 한도흥등이 러시아의 Budker에 있는 핵물리연구소에서 제작한 60kW, 1.0~1.MeV의 에너지를 가지는 고전압 전자빔 가속기를 이용하여 에틸렌글리콜과 페

놀, 폐수, 폴리비닐알콜, 그리고 염료의 처리를 오존화, 응집 및 미생물산화등의 처리방법과 결부시켜 그 처리효율을 측정하고 이 전자빔 가속기가 폐수의 처리에도 응용될 수 있음을 확인하였다.⁶⁾

펄스 코로나방전 플라즈마를 이용하는 방법은 반응기 내부에 브러쉬같은 형태로 전류채널의 코로나방전을 형성시키고 고전압펄스를 가하여 펄스방전플라즈마를 생성시켜 생성된 펄스방전플라즈마가 방전플라즈마의 전기물리 화학적 작용에 의해 다량의 활성 분자, 이온, 라디칼등을 만들어 반응물의 구성분자와 효과적으로 반응할수 있게하는 방법으로써 A. Mizuno⁷⁾, 占部武生⁸⁾, G. Dinelli⁹⁾, 玉置喜平次¹⁰⁾ 등의 연구결과가 소개되고 있으며 최근에는 국내에서도 이 분야에 대한 연구가 행하여져 문재덕과 이근택¹¹⁾이 “펄스 코로나 방전 플라즈마와 수막에 의한 NO_x 저감”에 관한 연구에서 저온 저농도 플라즈마가 NO의 제거능이 있음을 밝히고 있으며, 채재우¹²⁾ 등이 “Pulse Streamer Corona방전을 이용한 NO_x 저감효과”에 관한 연구에서 Pulse Streamer Corona 방전법이 연소 배출가스중에 함유된 NO_x의 저감에 효율적이었음을 확인하고 있다.

한편 초음파란 인간의 가청주파수 영역인 16Hz에서 16KHz 범위보다 더 높은 (>16KHz) 주파수를 갖는 音波를 칭하는 말로써, 초음파에 대한 연구는 지난 수십년전 부터 활발하게 연구되어져 그 결과 여러분야에 응용되어 인간의 생활에 도움을 주고있는바, 생물학 및 미생물분야에서는 均質化와 세포벽의 파열에, 엔지니어링 분야에서는 Drilling, Grinding, 그리고 Cutting등에, 지질학분야에서는 초음파의 펄스와 울림특성을 이용하여 지하 광물자원의

탐사 및 수증탐사에 이용되고 있으며, 의학계에서는 몸의 질병상태를 진단하는 도구로써 매우 폭넓게 활용되고 있고, 산업계에서는 안료와 고체물질을 쉽게 분산시키는 도구로써, 그리고 각종 장비를 세척하는 세척수단으로써 유용하게 사용되고 있다.

특히 초음파가 각종장비를 세척할수 있다는 사실은 그것이 수용성 세제(Aqueous Detergent)속에서 불용성인 용매를 파괴시킬수 있는 기능을 갖음을 의미하기 때문에 그것을 화학반응성을 높이는 매체로 사용할 경우 효과가 있을 것임을 예측하게 하였다. 즉 결정구조를 갖는 물질에 충분히 높은 가변전위장 결정구조로 되어 있는 물질이 갖는 압전성(Piezoelectric Properties)의 역효과(Inverse Effect)를 이용하여 그 물질의 한면에 높은 전하를 걸어주고 크기가 같고 반대하전을 갖는 전하를 반대면에 걸어줄때 형성되는 전위장에 걸어주어 초음파를 발생시키고 그 초음파가 매질을 통할때 발생하는 Cavitation이 화학반응에 영향을 미치게 하므로써 화학반응을 촉진시키도록 하는 것이다.¹³⁾

이러한 사실과 관련하여 초음파를 각종 화학반응에 활용코져 하는 연구가 행하여 졌으며 1945년이후 Cavitation현상의 원인이 보다 확실하게 규명되어 초음파(Power Ultrasound)가 화학공정에 급속히 적용되게 되었고 그 결과 Sonochemistry라는 별도의 분야가 확립되었으며 그분야의 연구 결과가 지난 수년동안에 저서와 논문으로 발표되어 화학반응 공정에서의 Sonochemistry의 유용성이 입증되었고 그의 장점으로서 아래와 같은 점들이 확인되었다.¹⁴⁾

· 화학반응에 초음파를 적용할 경우 과중한

반응조건을 부여하지 않고 반응속도를 향상시킬수 있다.

- 과중한 반응조건을 충족시켜줘야 할 반응이 발열반응이면 유도기간(Induction Period)이 매우 짧아진다.
- 재래식 기술보다 저급시약을 사용하여도 된다.
- 합성반응의 경우 별도의 반응 개시제를 필요로 하지 않는다.

따라서 이러한 초음파의 장점은 자외선이나 전자빔, 또는 펄스코로나방전플라즈마등을 이용하는 기술과 함께 폐수와 폐기물 및 폐가스를 처리하는 기술로서 유용하게 활용될수 있을것이라는 기대가 가능하며 특히 재래식 기술로 쉽게 제거되지 않는 난분해성 유기물질의 제거를 위해 이 초음파 응용기술을 적용시켜볼 필요가 있다.

이와같은 사실을 종합해 볼때 폐수중에 함유되어있어 수질오염을 야기시키는 주요 성분으로서 재래식 처리공정으로 쉽게 처리되지않고 있는 난분해성 유기물질의 처리에 초음파 응용기술을 적용할 경우, 그 처리 효과가 매우 긍정적일 것으로 판단되며 따라서 대표적인 난분해성 유기물의 분해반응 메카니즘과 함께 반응메카니즘에 영향을 미치는 요소들의 영향을 측정하여 체계화할 경우 초음파응용기술이 난분해성 유기물을 함유한 폐수의 새로운 처리기술로써 기여할수 있을것으로 사료된다.

그러므로 본 연구에서는 실험 대상물질로서 TCE와 벤젠을 택하여 그것들을 반응에 영향을 미치는 인자들에 의한 여러가지 상태로 조절된 수용액중에서 강력 초음파로 분해시킨후 그 결과를 측정하여 규명함으로써 효율적이고

경제적인 새로운 폐수처리기술을 제시하는데 있다.

II. 이론적 고찰

초음파가 상업적인 용도로 사용된 것은 1917년에 Langevin이 Echo-Sounding을 이용하여 수심을 측정한것이 최초이며 그후 50여년동안 많은 연구가 행하여져 여러분야에 적용되어 왔고 화학적인 효과가 많이 알려지게 되었다. 특히 Cavitation현상의 원인이 보다 확실하게 규명된 1945년이후 부터는 초음파 응용기술이 화학공정에 본격적으로 적용되기 시작하였는데 그후 음화학반응에 대한 많은 연구가 수행되어 최근에는 Sonochemistry라는 별도의 분야로 정착되어 초음파를 화학공정에 적용하는 기술과 관련된 많은 저서와 논문들이 발표되었으며 국내에서 접할수 있는 저서로써는 Kenneth S. Suslick의 "Ultrasound"¹³⁾와 Timothy J. Mason등의 "Sonochemistry"¹⁴⁾등이 있고 발표된 논문의 예로써는 아래와 같은 것들이 있다. 즉 1981년에 Sehgal¹⁵⁾이 Thymin을 시료로 하여 낮은 음향강도에서 音化學反應을 진행시켜 용매의 온도가 변하면 Reaction Kinetics가 변할수 있고 그때 그반응의 반응속도는 생태계의 물질변화를 야기시킬수 있을만큼 크다는 사실을 확인하여 발표한 것이 있고, 1985년에 발표된 논문으로써 Hart¹⁶⁾의 연구결과가 있는데 그것은 iodide와 Formate의 수용액을 300KHz의 초음파로 반응시켜 그것들의 분해생성물을 확인한 것이었다. 또한 연속적으로 펄스를 가한 초음파에 의한 Polymer와 Iodide의 산화반응에 관한 연구결과 Polymer의 산화반응 분해생성

물은 초음파의 음향강도에 따라 달라지고 반응에 작용하는 요소는 음향강도와 Cavitation의 성장정도라는 사실을 밝힌 1990년의 Heglein¹⁷⁾의 논문과, 같은해에 염소계 화합물을 초음파로 균일반응(Homogeneous reaction)시키면 매체속에서 Cavitation이 형성되어 높은 온도와 압력이 발생하며 그로인해 H₂, O₂, HO₂, H, OH등이 생성되고 이것들이 수용액중의 염화탄화수소를 파괴시킨다는 사실을 발표한 Cheung. H. H의 논문¹⁸⁾이 있다. 플화화반응의 Reaction Kinetics와 반응메카니즘을 규명한 연구 논문으로써는 p-nitrophenol을 시료로하여 포화산소용액속에서 플화화반을 실시하고 그것의 분해생성물을 측정하여 1991년에 발표한 Kotronarou¹⁹⁾의 것이 있는데 이 실험결과에 의하면 20KHz의 초음파반응에서 p-nitrophenol은 NO₂⁻, NO₃⁻, Bezoquinon, Hydroquinon, 4-nitroatechol, Formate, 그리고 Oxalate등으로 분해되었으며 반응에 영향을 미치는 요소들은 pH, 반응시간, p-nitrophenol의 초기농도 등이었고 pH 4이하에서 시료의 제거효율이 가장 높고 반응시작 120분후에 거의 모두 분해되었다. 1992년도의 발표된 논문으로는 Kortronarou. A와 Mills. G²⁰⁾의 지하수중에 함유되어 있는 CCl₄의제거에 관한 연구논문이 있다. 이 연구는 OH 라디칼이 관여하는 H₂S의 산화반응에서 Iodide가 효과적인 촉매제로 작용하는데 지하수중에 함유되어 있는 CCl₄의분해반응에서도 같은 원리가 적용되어 음화화반응이 효과적이고 경제적으로 이용될수 있음을 보여주었다.

강력초음파를 화학반응에 적용하는 Sono-

chemistry는 가스를 다량 함유하고 있는 액체 매질속에서 매질의 일부를, 발생시키고저 하는 초음파와 같은 주파수로 진동시켜 초음파를 발생시켰을때 발생된 초음파가 압력의 변동으로 전해져서 초음파의 음장내에서 정압을 중심으로 압력의 증감을 일으키고 초음파의 강도를 차츰 강하게 하여 압력진폭의 최대값을 1기압이 되도록 하면 감압측의 최대값일때 정압과 진동압력의 순시값의 합이 0이되었다가 계속해서 초음파의 강도를 증대시키면 마이너스압력이 발생하는 효과를 내는 힘이 작용하게 되어 그로인해 공동이 발생하여 생성된 Cavitation으로 인해 이루어진다. 즉 액체에 초음파가 닿으면 그곳에 있는 미세한 기포가 감압측의 반주기에서는 팽창하여 주위 액체로부터 기체나 액체의 증기를 받아들이며 증압측의 반주기에서는 수축하면서 기포속의 기체를 용해시키거나 액체증기를 용축시키며 기포가 진동하고 그와함께 평균직경이 증대되면서 진폭이 커지고 직경이 최대로 되었을때 순간적으로 기포가 깨지면서 아래의 식으로 산출되는 수백기압의 압력과 수천도의 열이 발생되어 반응의 에너지원이 된다.

$$T_{Max} = T_0 P_m \frac{(K-1)}{P}$$

$$P_{Max} = P \left[P_m \frac{(K-1)}{P} \right]^{\frac{K}{K-1}}$$

여기서

T₀: 주변온도.

K: 가스혼합물 또는 가스증기의 Polytropic Index.

P: 크기가 가장 커졌을때의 기포내의 압력, 통상 액체의 증기압과 같은 것으로 함.

P_m : 기포가 깨지는 순간의 액체속의 압력.

따라서 Cavitation은 Sonochemistry의 기본이고 특히 Transient Cavitation이 Sonochemical Effects에 주로 기여하며 Stable Cavitation도 중요하고 Cavitation이 일어날 때 음화학반응에 영향을 미치는 과정은 아래와 같다. 즉 Acoustic Cavitation이 균일액체속에서 일어날때의 과정은 핵의 생성단계와 기포의 성장단계, 그리고 내파적 파열단계등으로 진행되는데 핵은 액체상태를 유지하는 서로 끄는 분자간 인력으로 인해 생성되며 그것이 커다란 부(-)의 음압환경에 놓이게 되면 체적이 커지고 궁극적으로 내부적 파열에 의해 작은 자유기포로 쪼개진다. 따라서 1.5KHz 이상의 주파수를 갖는 음파를 물속에 통과시키면 이러한 과정에 의해 팽창과 압축파로 인해 증기로 채워진 공동기포가 깨지는 동안이나 깨진 바로 직후에 순간적으로 상승한 압력과 온도의 작용으로 화학반응이 일어나고 이와같은 음화학반응(Sonichemical Reaction)에서는 열분해와 라디칼반응이 동시에 일어나며 휘발성반응물의 경우에는 깨지는 기포의 기체속에서, 또는 그 기포를 둘러싸고 있는 뜨거운 경계면내에서 직접 열분해를 하게되는데 반응물의 농도가 높을때에는 경계면에서의 열분해가 우세하며 농도가 낮을때에는 자유라디칼반응이 우세하다.

최근의 논문들중 본 연구목적과 관련이 될 수 있는 몇가지 것들을 살펴보았는데 그것들 모두가 초음파 응용기술이 훌륭한 화학반응제임을 보여주고 있다. 그럼에도 불구하고 국내에서는 아직까지 화학공정에 초음파를 적용한

연구가 진행되고 있다는 기록이 나타나고 있지 않고 단지 서론에서 언급한 바 있는 UV, 전자빔, 그리고 펄스코로나방전 플라즈마등에 대한 연구결과가 발표되고 있는데 이것들에 의한 반응메카니즘이 지금까지 고찰한 음화학반응에 관한 연구논문들에서 확인된 반응메카니즘과 매우 유사한 것으로 나타나고 있다.

이러한 사실과 관련하여 본 실험실에서는 수년간 초음파 응용기술에 관심을 갖고 기초 자료를 수집한 바 있고 그것들을 검토한 결과 그 기술을 환경분야에 적용할 경우 매우 유용하게 활용될 수 있다는 확신을 갖고 실험을 진행하였다.

III. 실험장치 및 방법

3.1 시료

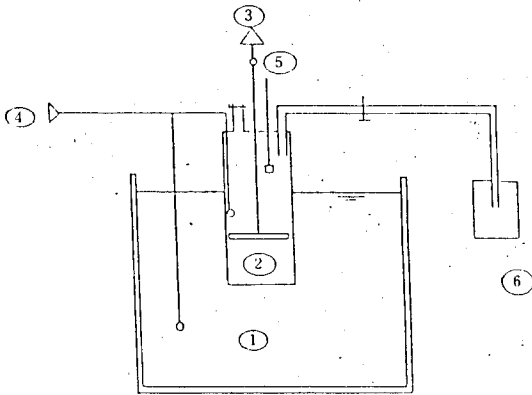
시료로는 분석용시약급인 Trichloroethylene(TCE)와 Benzene 등으로 하고 그것들은 실험조건에 따라 수용액중에서 10~50ppm 사이의 농도가 되게 희석하여 사용한다.

3.2 실험장치 및 실험방법

실험장치는 Fig.1과 같으며 반응기는 직경이 10cm이고 높이가 25cm인 SUS316관으로 하며 Fig. 1에 보인바와 같이 반응기 중앙에 초음파를 발생시키는 진동자(㉓)를 설치한다. 이 진동자는 본 실험장치에서 핵심이 되는 부분이며 본 연구실험에서 사용한 진동자는 28KHz(200W)의 주파수를 발생하는 것이었다.

반응중에 발생하는 열은 반응기를 냉각수조속에 잠기게 한후 순환냉각수에 의해 제거하

도록 하며 순환냉각수의 양은 반응기내에 꼽은 Thermocouple과 자동온도조절기, 그리고 컨트롤밸브를 연결하여 자동조절되게 한다. 또한 위의 이론적 고찰에서 언급하지 않은 pH의 영향을 추가로 검토하기 위해 반응기내에 자동 pH측정기를 설치한다.



- ① cooling water bath
- ② reactor
- ③ ultrasonic transducer
- ④ thermocontroller
- ⑤ pH indicating recorder
- ⑥ sampling bottle

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

시료의 분석은 반응이 진행되는 동안 일정 시간 간격으로 시료채취병에서 시료를 채취하여 시료중의 pH는 환경처의 환경오염공정시험법²¹⁾과 미국의 Standard method²²⁾를 근거로 pH meter(HANA HI8510E, Japan) 이용하여 측정하였고, 난분해성 물질인 Phenol은 UV Spectrophotometer(SHIMAZU: UV 160A, Japan), TCE와 Benzene은 GC(Hwellet Packard: HP 5898, USA)로 분석하여 실험을 진행했으며, 시료는 실험 즉시 조제하여 적

당한 농도로 조절하여 사용하였고 Reactor의 반응인자인 반응시간별 농도 변화, pH 변화등을 실험하여 그 결과를 검토 분석하였다.

IV. 실험결과 및 고찰

4. 1 TCE (Trichloroethylene)의 적용실험

표준 TCE용액으로 초기농도를 15ppm, 20ppm으로 조정후 Ultrasonic reactor에 넣고 반응시간별로 제거되는 농도를 나타낸 것이 Fig.2이며, Fig.23에서 초기농도 15ppm 일때 반응시간 30min에서 80%, 60min이상에서는 90%의 높은 제거효율을 보였고, 초기농도 20ppm에서 30min 80%, 60min이상 90%이상의 제거효율을 나타냈다.

Ultrasonic reactor 실험 결과에서 짧은 반응시간에 높은 제거효율을 나타냈는데 이는 Ultrasound가 유기물질 제거능력이 있음을 보여준것으로 상수처리와 폐수처리공정에도 응용될 수 있음을 입증한 결과라 할 수 있다.

특히 반응시간 60min이상에서는 제거효율의 변화가 크지 않는 결과를 보여주었는데 이는 실험결과로써 이 공정의 최적 반응시간임을 알수 있었다.

4. 2 Benzene의 적용실험

표준 Benzene용액으로 Benzene의 농도를 10mg/l로 조정후 Ultrasonic reactor에서 반응시간별로 제거되는 농도를 실험분석후 결과가 Fig. 3이다.

Fig. 3에서 초기농도 10mg/l에서 반응시간 30min에서 50%, 60min이상에서 65%이상의 높은 제거 효율을 나타냈으며, 이는 ultra-

sound 공정이 수중의 적은 농도의 Benzene을 처리하는데 효과적이며 유기물 처리능력이 있음을 보여준 결과이다.

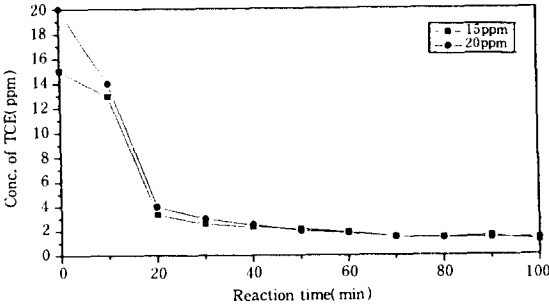


Fig. 2 The concentration of TCE during sonication

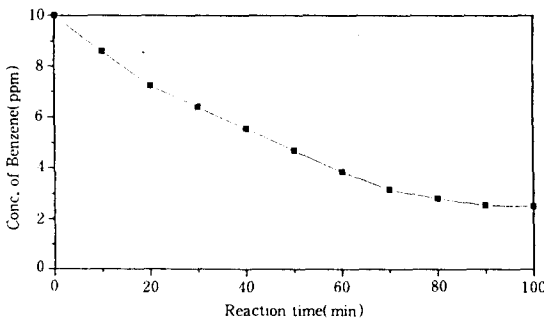


Fig. 3 The concentration of Benzene during sonication

4. 3 pH변화 실험

Ultrasonic reactor에서 TCE와 Benzene 용액의 반응 실험중의 pH변화를 나타낸 것이 Fig. 4이다. Fig. 4에서 reactor에 Ultrasound를 적용시킨 결과 반응시간이 길어짐에 따라 모든 용매의 pH는 초기에는 약간 감소하는 경향을 보였으나 일정시간이 경과한 후에는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 초기에는 H, OH radical과 H₂O₂생성에 따른 산화반응으로 사료되나 반응시간이 경과함에 따라 물질제거반응에 H₂O₂가 소모됨에 따라 거의 일정한 값을 나타낸 결과라고 사료된다.

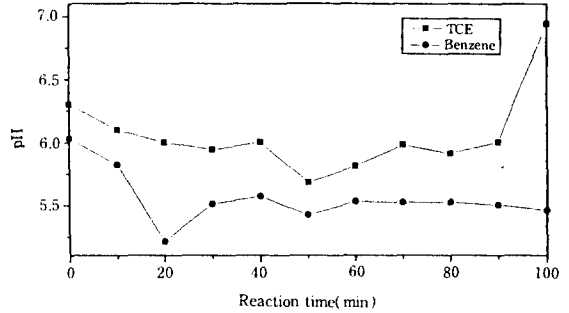


Fig. 4 The variation of pH during sonication

V. 결론

Ultrasound irradiation을 폐수중의 난분해성 유기물인 TCE와 Benzene의 제거실험에 적용실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) TCE 적용실험에서는 초기농도 15,20 ppm에서 반응시간 30 min 일때 80%, 60 min 일때 90% 이상의 제거효율을 나타냈는데 이는 Ultrasound가 난분해성 물질처리 능력이 있고, 상수 및 폐수처리 공정에도 응용될 수 있음을 확인한 결과이다.
- (2) Benzene 적용 실험에서 초기농도 10 ppm 에서 반응시간 30 min에서 50%, 60 min 에서 65% 이상의 제거효율을 보여주었는데 이는 본 공정이 저농도의 난분해성인 유기물 제거에도 효과가 있음을 보여준 결과이다.
- (3) pH 변화에서 반응시간 초기에는 전체적으로 pH가 떨어지는 경향을 보여 주다가 시간이 경과함에 따라 일정함을 보여 주었는데 이는 반응과정중 초기에는 H⁺, OH⁻ radical과 H₂O₂생성으로 인한 영향이며 점차 이러한 물질이 반응물 생성에

기인한 결과로 사료된다.

- (4) 이상의 실험에서 Ultrasound reactor의 최적 오염물질 제거 반응시간이 60min임을 보여주었는데, 이는 짧은 반응시간에 모든 반응이 일어남을 보여준 결과로 본 공정이 다른 어느 폐수처리공정 보다는 짧은 반응시간에 높은 유기물 제거효율이 있음을 나타낸 것이다.

참 고 문 헌

1. Glsstonem lewis "Element of Physical of Physical Chemistry", Van Nostrand Maruzen 2nd Ed. p. 660-662.
2. 강준원등, "오존/pH 및 오존/과산화수소 고급산화처리 공정의 평가(II)", 대한 토목 공학회지 Vol. 15(3).p.537-547(1993)
3. 신항식등, "TiO₂ Packed Bed Reactor에서 Trichloroethylene의 광분해반응", 공동추계학술발표(수질, 대기, 환경) (1993)
4. Robert J. Gleason and Dennis J. Helfritch, "High Efficiency NO_x and SO_x Removal by Electron Beam", Env. Prog. Vol.5(4)(1986).
5. 한도홍등, "전자빔 가속기를 이용한 폐수처리", 대한환경공학회지, Vol.16(7).p.885 (1994).
6. A. mizuno, J,S,Clelment, and R,H,Davis, "A mehhod for the Removal of Sulfur Dioxide from Exhaust Gas Utilizing Pulsed Streamer Corona Electron Energization", IEEE Trans on IA, IA-22, 3, 516-522 (1986).
7. 占部武生등, "펄스 코로나방전을 이용한 NO_x, SO_x의 제거에 관한 기초연구", 12,5, 354-359 (1988).
8. G. Dinelli and M.Rea, "Pulse power Electrostatic Technologies for the Control of Flue Gas Emissi- ons ", J. of Electrostatics, 25,23-24(1990).
9. 下置喜平次등, "코로나 방전에서의 일산화 질소의 산화기구", 일본화학회지, 11, 1580-1596 (1979)
10. 문재덕, 이근택, "펄스 코로나방전 플리즈마와 수막에 의한 NO저감", 대한환경공학 회지, Vol. 16(2). p. 149-156(1994).
11. 채재우등, "Pulse Streamer Corona방전을 이용한 NO_x 저감효과", 대한환경공학 회지, Vol. 16(3). p. 343-353(1994).
12. Suslick, K.S.(ed). "Ultrasound: its Chemical, Physical and Biological Effects," VCH, New York (1988).
13. Mason, T.J., Lorima, J.P. "Sonochemistry. Theory, Applications and uses of Ultrasound in Chemi- stry", Ellis Horwood, Ltd.(1988).
14. Shutilov, V.A. "Fundamental Physics of Ultrasound", Gordon & Breach Science Publishers: New York(1988).
15. Suslick, K.S., "Modern Synthetic Methods", 4, 1-60(1986).
16. Lorimer, J.P., and Mason, T.J., Chem. Soc. Rev., 16,239-274(1987).
17. Henglein, A., "Ultrasonics", 25,6-16 (1987).
18. Margulis, M.A., Russ. J..Phys. Chem., 50,1-11(1976).

-
19. Suslick, K.S., Scientific American, 80-86, Feb(1989).
 20. 환경부, 환경오염공정시험법, 수질편, (1994).
 21. APHA, AWWA, WPCF, "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater", 18th Ed. (1992).