

## 超音波 照射에 의한 水中의 TCE, Benzene & 2,4 Dichlorophenol의 分解 特性

孫鍾烈 · \*牟世榮

高麗大學校 保健專門大學, \*忠北大學校

### Characteristics of TCE, Benzene & 2,4 Dichlorophenol Degradation in Aqueous solution by Ultrasonic Irraditation

Jong-Ryeul Sohn · \*Se-Young Mo

*Junior College of Allied Health Science, Korea University*

*\*Chungbuk National University*

#### Abstract

This study was performed to examine the factors influencing on the degradation of TCE, Benzene and 2,4 DCP in aqueous solution using ultrasonic irradiation.

The TCE, Benzene and 2,4 DCP, which are hazard compounds causing environmental pollution, were not decomposable pollutants by conventional treatment.

The results shows that the generation of  $H_2O_2$ ,  $H^+$  and  $OH^-$  radical was formed by the oxidation and reduction reaction of ultrasound, and then theses decomposed the refractory pollutants of TCE, Benzene & 2,4 DCP in aqueous solution. we conformed that the ultrasonic irradiation was excellent in removal efficiency of the refractory pollutants any other than Advanced Oxidation Processes(AOP),utilized the treatment of organic compounds in the industrial wastewater.

Consequently, 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 process.

-----  
Key Words: Refractory pollutants, ultrasonic irradiation,treatment of wastewater

## I. 서 론

우리가 살고 있는 환경은 약 800만종의 화학물질이 존재하고 있으며 그중 8만종 정도가 상업적으로 생산 판매되고 있고 1000여종 이상이 새로이 합성되고 있다. 또한 각종 산업의 발달과 국민 소득 수준의 향상으로 화학물질의 종류가 다양화되고 그 사용량이 점점 증가하는 추세이며 이러한 화학물질로 인한 위해발생의 잠재성도 높아지고 있는 실정이다<sup>1)</sup>.

현재 유통되는 화학물질의 종류는 선진국일수록 다양화하고 양적으로 증가하고 있으며, 법적으로 정해진 수많은 오염물질중 일반적으로 처리하기 곤란한 수백종의 유해화학물질로 인해 환경은 점점 오염되어 가고 있다<sup>2)</sup>. 대표적인 난분해성물질인 aromatic compounds와 같은 유해화학물질들은 산업이 발달함에 따라 점점 사용이 증가하여 심각한 환경오염문제를 야기시키고 있으며, 이러한 물질들은 반응시간이 길어 현재 사용되고 있는 처리공정으로 완벽하게 처리하지 못하고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제들을 해결하기 위하여 초음파에 의한 산화반응을 이용하여 환경중에 난분해성 오염물질을 처리하고자 한다.

초음파는 주파수가 높아서 귀에 들리지 않는 음이란 의미이며, 이것이 기계적인 장치로 등장한것은 1921년 프랑스의 P.langeuir에 의해 만들어진 초음파 촉심기라고 전해지고 있으며<sup>3)</sup> 1930년대부터 미국의 Wood와 Loomis에 의해 강력한 초음파의 여러가지 작용에 대해 알려지기 시작했으나 공업적으로 응용되지 못했다. 1933년 Flosdorf와 Chamber에 의해 1-15KHz sound가 metal sulfide를 산화시킬수 있다고 보고한 예가 있으며, 1964년 Wawrzyczek는 27KHz ultrasonic intensity에서 Ar를 포함한 물에 녹아있는 H<sub>2</sub>S의 산화 분해반응에 대한 실험보고를 한바있다. 1976년 Cauwet는 600KHz에서 H<sub>2</sub>S가 H<sub>2</sub>와 S로 분해되는 실험에 대해 보고한 기록이 있다.<sup>4)</sup> 위에서와 같이 발표된 논문들은 주로 물질의 합성과정에서 화학물질의 반응성을 높이기 위한 방법으로 적용된 예에 불과하다.

그리고 우리가 알고있는 ultrasound의 산업화 적용은 기계적인 가공처리, 용접, plastic 소재 변형에 응용되어 왔고, 그밖에 세척기로서 소규모 기계장치, 반도체, 초자류의 세척에 이용되어 왔다. 최근들어 가정용인 가습기에 도입됨으로써 일반인들에게 초음파라는 것이 알려지기 시작했

고, 의료장비에 설치 응용됨으로써 병의 진단과 치료에 이용되어 본격적으로 연구를 시작하는 계기가 되었다.<sup>5)</sup>

본 연구에서는 이러한 ultrasound의 반응을 이용하여 폐수중의 난분해성 오염물질인 TCE(Trichloroethylene), Benzene, 2,4 DCP(Dichlorophenol)처리에 적용 실험함으로써 새로운 처리공정을 제시함은 물론 이러한 연구를 지속하여 작은 설비로서 고농도의 난분해성 유해물질들을 짧은 시간에 높은 효율로 처리할수 있는 기술을 개발하는데 있다.

## II. 이론적 고찰

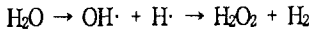
액체내의 압력이 그 액체의 증기압보다 현저히 낮아질 때 bubble이 형성되며 이러한 현상을 cavitation이라고 한다. cavitation은 turbulent flow, laser heating, electric discharge, boiling, acoustic irradiation 등 여러가지 원인에 의해서 일어나며 본 연구에서 화학반응의 에너지원으로 이용코져 하는 acoustic cavitation은 액체속에 강력한 초음파를 조사시키면 음이 liquid속을 통과할때 마이너스 압력이 발생하게 되지만 실제로 마이너스 압력이 존재하지 않으므로 액체를 가르는 힘이 작용하게 되며 그것은 expansion (negative pressure) waves와 compression (positive pressure) waves를 갖게 되고 감압축의 반주기도 음의 압력이 발생하므로써 액체속에 공동(cavitation)이 발생하는 것이다. 이것은 다음 증압축의 반주기에 밀려 일그러지고 그때 액체가 심하게 부딪치므로 대단히 큰 충격적인 압력이 발생한다.

acoustic cavitation이 균일액체속에서 일어날때는 핵의 생성단계, 버블성장단계, 그리고 內破의파열단계등으로 나뉘어 지는데 핵은 액체상태를 유지하는 서로 끄는 분자간인력으로 인해 생성되며 그것이 커다란 부의 음압환경에 놓이게 되면 체적이 커지게 되고 궁극적으로 內破的파열에 의해 작은 free bubbles로 쪼개진다. 그런데 1.5KHz 이상의 주파수를 갖는 음파를 물속에 통과시키면 expansion wave와 compression waves로 인해 이와 같은 과정이 연속해서 일어나고 증기로 채워진 공동버블(vapor-filled cavitation bubbles)이 깨지는 공동버블내에서는 순간온도가 5000K 올라가며 압력은 수백기압까지 되는것으로 산출된다.<sup>5)</sup>

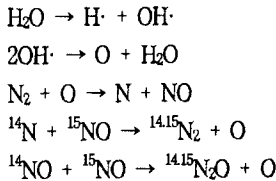
음화학반응(sonochemical reactions)에서는 열분해와 라

디칼반응이 동시에 일어나며, 반응물의 농도가 높을 때는 이러한 현상이 현저하다. 휘발성반응물(volatile solute)은 깨지는 버블의 기체속에서 또는 그 버블을 둘러싸고 있는 뜨거운 경계면내에서 직접 열분해반응을 하게 되는데 반응물의 농도가 높을 때는 경계면에서의 열분해가 우세하고 농도가 낮을 때에는 자유라디칼반응이 우세하다.

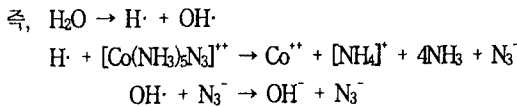
물에 초음파를 조사하면 버블이 깨지는 동안에 방출되는 열에 의해 H<sub>2</sub>O가 열분해되어 H원자와 OH라디칼로 되며 최종적으로 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>로 된다.<sup>56)</sup>



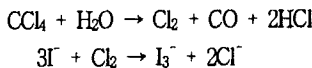
물속에서 기체들의 음화학반응물로서 물에 초음파를 조사했을 때 용해되어 있는 N<sub>2</sub>의 반응은 H<sub>2</sub>O가 초음파에 의해 OH·와 H·로 열분해 된 후 O원자가 N<sub>2</sub>를 공격하여 NO와 N원자를 생성하는 아래의 반응메카니즘이 제안된 바있고,



물속에서의 무기화합물의 반응의 예로서는 간단한 무기물이온과 transition-metal complexes에게서 일어나는 sonochemical redox reaction을 들수 있으며 예로서 Rehorek과 Janzen이 발표한 [Co(NH<sub>3</sub>)<sub>5</sub>N<sub>3</sub>]<sup>2+</sup>의 sonochemical degradation이 있다.<sup>78)</sup>

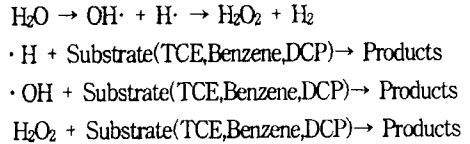


물속에서의 유기화합물의 경우에는 여러가지 화합물들이 수용액으로서 또는 현탁액으로서 초음파반응이 이루어졌으며 많은 분해생성물이 생성되었다. 예로서 사염화탄소의 수용액에 초음파를 조사하면 O<sub>2</sub>가 없이도 Cl<sub>2</sub>가 배출되며 요드수용액에서 반응시킬 경우 I<sub>3</sub><sup>-</sup>의 생성이 크게 가속된다.



이러한 반응은 뜨거운 증기상태로 생성된 OH·라디칼이 생성되면서 반응에 참여하거나 그것이 주변 액상속으로 확산되어 들어가서 거기서 반응하는 것으로 알려지고 있다<sup>9)10)</sup>.

초음파 조사에 의한 수중의 난분해성 유기물질인 TCE, Benzene, 2,4 DCP의 분해반응 기전은 다음과 같다.



상기와 같은 반응기전을 응용하여 폐수중의 난분해성 물질인 TCE, Benzene, 2,4 DCP(Dichlorophenol)처리 실험을 하게 된 것이다.

### III. 실험장치 및 방법

실험장치에서 반응기는 Fig.1과 같으며 직경이 2.2cm 이고 높이가 25cm인 SUS316판으로 제작했고, 반응기 중앙에 초음파를 발생시키는 진동자를 설치했다. 이 진동자는 본 실험장치에서 핵심이 되는 부분이며 본 연구실험에서 사용한 진동자는 20KHz(1400W)의 주파수를 발생시키는 것이었다.

반응중에 발생하는 열은 반응기에 Water Jacket를 설치하여 그 내부로 냉각수를 순환시켜 순환냉각수에 의해 제거하도록 하였고, 순환 냉각수의 공급은 반응기내에 설치한 Thermocouple과 자동온도조절기 그리고 Control Valve를 연결하여 반응기내의 온도를 일정하게 유지하도록 자동조절되게 했으며, pH의 영향을 검토하기 위해 반응기내에 pH를 자동 지시 기록되도록 pH측정기를 설치하였다.

시료의 분석은 반응이 진행되는 동안 일정시간 간격으로 시료채취병에서 시료를 채취하여 시료중의 pH는 환경부의 수질오염공정시험법<sup>11)</sup>과 미국의 Standard method<sup>12)</sup>를 근거로 pH meter(HANA HI8510E, Japan) 이용하여 측정하였고, 난분해성 물질인 TCE, Benzene 그리고 2-4 DCP는 GC(Varian-3400, USA)로 Table 1 과 같은 조건으로 분석하였다.

Table.1 GC Condition for Benzene, 2,4-DCP, and TCE Analysis

	Benzene	2,4-DCP	TCE
Column	capillary DB-1(35m,50mx0.2mm)	capillary DB-1(25mx0.32mm)	DB-1(50mx0.2mm) capillary(25mx0.32mm)
Injection Mode	splitless	splitless	split ratio 65:1
Injection Temp.	180 °C	180 °C	180 °C
Detector Temp.	200 °C	200 °C	200 °C
Oven Temp.	40-180 °C rate 10 °C/min	80-180 °C rate 10 °C/min	40-180 °C rate 10 °C/min
Carrier gas flow	2 ml	2 ml	1 ml
Make-up gas flow	50 ml	50 ml	30 ml
Injection Volume	10 ul	13 ul	13 ul
Detector	FID	FID or ECD	FID or ECD
GC Model	Varian-3400	Varian-3400	Varian-3400

Table 2. Physical Properties of Organic Compounds

Name	Formula	Molecular weight(g)	Specific gravity	Melting point(°C)	Boiling point(°C)	Solubility (%)	Remarks
Trichloroethylene	$Cl_2C=CHCl$	131.40	1.466	-73	87.2	0.1	
Benzene	$C_6H_6$	78.11	0.879	5.5	80.1	0.07	
2-4 Dichlorophenol	$Cl_2C_6H_3OH$	163.01	1.383	45	209	0.45	

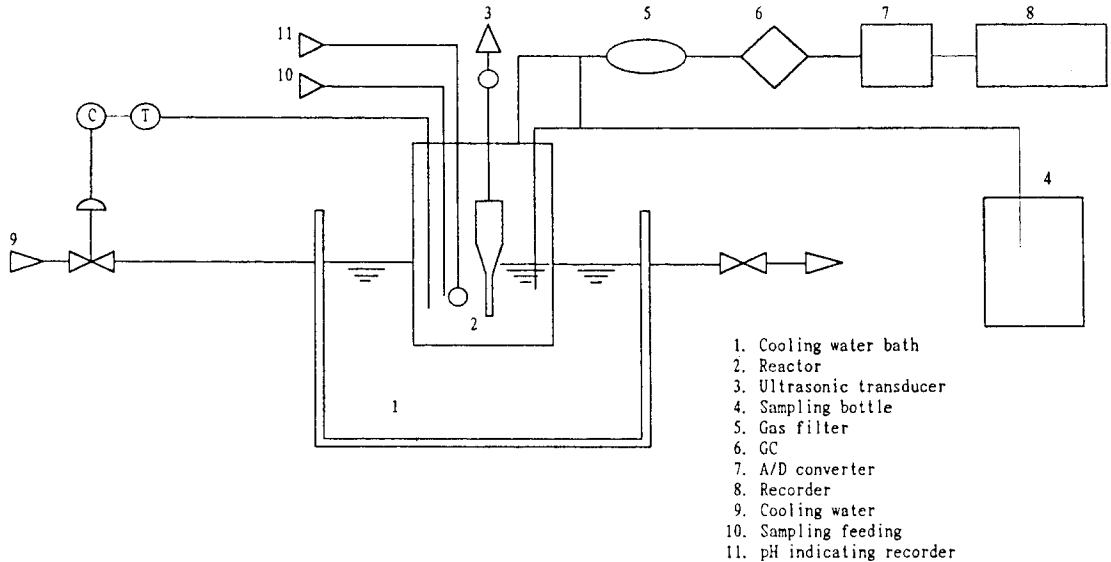


Fig.1. Schematic diagram of experimental apparatus

Table 3 The Sources and Healthy Effects of Selected Pollutants

Pollutant	Sources	Healthy Effects	Regular limit
TCE	도금, 전자, 전기기기 제품공장에서 발생되며 용제, 세정액, 탈지제, 회석제로 주로 사용	다량의 증기, 액체로 눈, 코, 목 자극, 피부병유발, 중추신경계 자극(두통, 현기증) 발암성, 변이원성이 있음	환경보전법상배출허용기준 : 0.06-0.3ppm 산업안전보건법 TWA 50ppm STEL 200ppm
Benzene	스티렌, 페놀, 시클로hex산등의 화학물질제조 의 중간산물 세제, 살충제, 용제, 도료제거제조과정에서 발생하며 합성고무, 수지, 도료, 의약품, 폭약, 유지, 추출제등으로 사용	급성폭로되면 중추신경을 억제하고 만성폭로되면 조혈기능억제, 백혈병, 다발성골수종을 일으킴 발암성, 변이원성이 있음	산업안전보건법 TWA 10ppm
2-4 DCP	살충제, 제초제 제조과정에서 발생,제지공장 2-4D의 합성의 중간생산물, 동물의 경련제	수중에서 냄새 유발 장기간 폭로되면 초조감, 호흡촉진, 설사, 식욕감퇴증상, 피부변색유발등	법적 기준이 없다.

- \* TWA(Time Weighted Average) : 하루 8시간 작업하는 동안의 시간가중평균농도
- STEL(Short Time Exposure Limit) : 근로자들을 15분 이상 계속하여 폭로해서는 안되는 최대농도
- \* 실제적으로 본 연구에서 조사한 B 염색공장, S 화학공장, D 제지공장, K 제약공장, H 농약공장등에서 배출되는 폐수의 성분중 상기와 같은 오염물질을 확인하고 그것들을 대상물질로 선정하여 실험을 진행하였음.

시료는 Table 2, 3 과 같은 성상을 가진 대상물질을 선정하였으며, 실험 당일 조제하여 2차로 증류한 증류수로 실험에 적당한 농도로 조절하여 사용하였고 Ultrasonic Reactor의 영향인자인 반응시간, pH, 초기주입농도 등의 영향을 비교 실험하여 그 결과를 검토 분석하였다.

Fig.3에서 Benzene 용액에서도 초기용액의 농도가 높을수록 제거효율이 높았으며, 초기농도 100,500ppm 일때 반응시간 20min에서 75% 이상의 제거효율을 보였으며, 80min에서 거의 모든 반응이 완료됨을 확인할 수 있었다. 특히 농도 100,500ppm 에서 초기 반응시간 20min 까지는 반응이 빨리 진행되고 그 이후에는 서서히 진행됨을 나타냈는데 이는 초기에는 열분해 반응이 진행된 결과이며

#### IV. 실험결과 및 고찰

##### 1. 반응시간별 오염물질 제거효율

연구 대상물질인 TCE, Benzene, 2,4 DCP를 표준용액으로 적당한 농도 20,100,500ppm으로 조정후 초음파 반응이 진행되는 시간별 제거효율을 나타낸 것이 Fig. 2, 3, 4 이다.

Fig.2에서 TCE는 초기 용액의 농도가 높을수록 제거효율이 높았으며, TCE 100,500ppm인 고농도에서는 반응시간 30min 동안에 90% 이상의 제거효율을 보였고, 저농도인 20ppm에서는 반응시간 60min에서 90% 이상의 제거율을 나타냈다.

이는 초음파에 의한 Pyrolysis(열분해)와 Free Radical 반응이 동시에 일어난 결과로 사료된다.

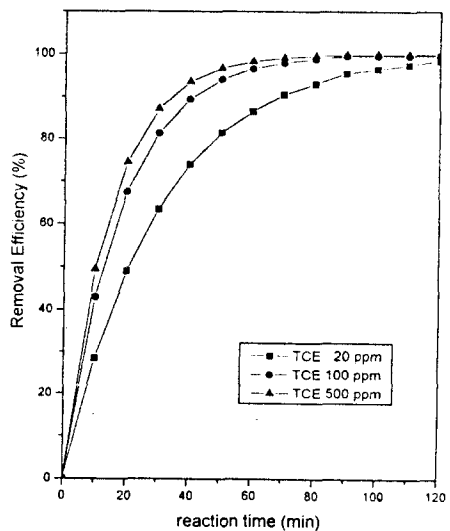


Fig.2 Removal Efficiency of TCE solution during sonication

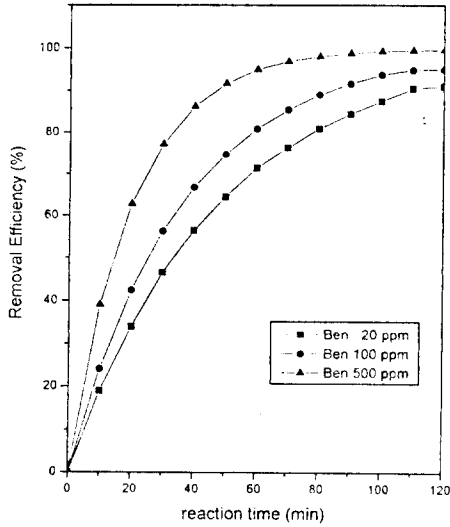


Fig.3 Removal Efficiency of Benzene solution during sonication

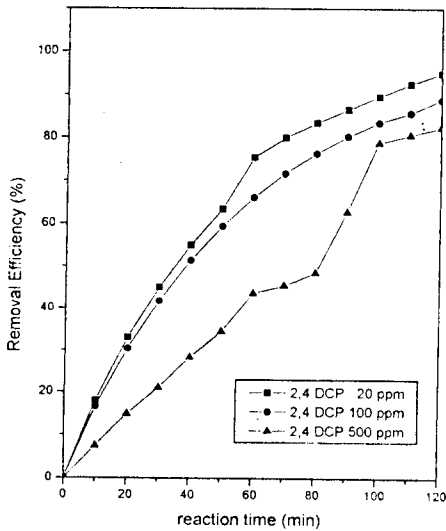


Fig.4 Removal Efficiency of 2,4 DCP solution during sonication

그후에는 반응에서 생긴 라디칼 반응에 의한 결과라 생각된다.

Fig.4에서 2,4 DCP 용액에서는 TCE와 Benzene 보다는 서서히 분해가 진행됨을 알 수 있었고 용액의 농도가 낮을수록 제거효율이 높았다. 반응시간 60min 에서 60%, 120min 에서 80%이상의 제거효율을 나타냈다. 그리고 100min에서 거의 모든 반응이 완료됨을 확인할 수 있었

다.

## 2. 반응시간별 pH 변화

연구대상 물질의 농도를 100ppm으로 조정후 Ultrasonic reactor에 넣고 반응시간별로 변화하는 pH 나타낸 것이 Fig. 5, 6, 7 이다. Fig.5, 6에서 TCE, 2,4 DCP 용액은 반응시간이 길어짐에 따라 용액의 pH는 감소하는 경향을 보였고,제거가 거의 완료된 시간에는 거의 변화가 없는 것으로 나타났는데 이는 초음파반응에 의한 H, OH radical, 그리고 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>생성에 따른 산화반응(HCl, Cl 이온 형성)으로 생긴 결과이며, 반응이 경과함에 따라 물질 제거반응이 완료됨에 따라 일정한 값을 유지하고 있는 것이라고 사료된다. 그리고 실험결과에서 TCE 제거를 위한 최적 반응시간은 60min, pH는 2.5이며, 2-4 DCP에서는 최적 반응시간 100min, pH는 4.25 임을 알았다. Fig.7에서 Benzene용액은 반대로 약간 증가하는 경향을 보이고 있으나 pH 변화는 크지 않는 것으로 나타났는데 이는 Benzene의 분해반응에 의한 gas화 현상에 기인한 것으로 생각되나 앞으로 이에 대한 연구가 필요하다.

결론적으로 반응용액의 pH가 변화한다는 것은 활발히 분해반응이 진행되고 있으며 반응에 따른 새로운 Product가 형성되고 있음을 간접적으로 보여주는 결과이다.

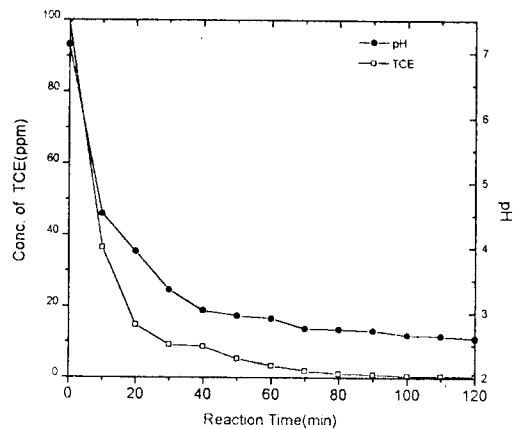


Fig.5. The variation of pH and conc.of TCE solution during sonication

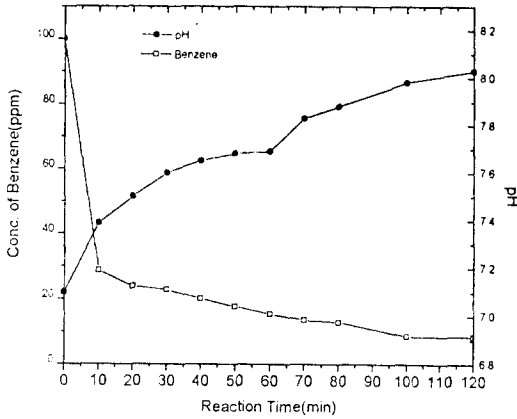


Fig.6. The variation of pH and conc. of benzene solution during sonication

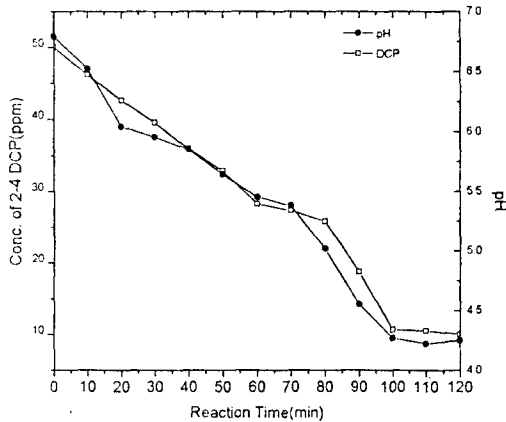


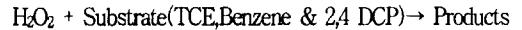
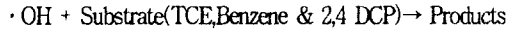
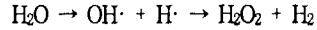
Fig.7. The variation of pH and conc. of 2,4 DCP solution during sonication

이상과 같은 실험 결과에서 적용 실험한 모든 난분해성 유기물이 짧은 반응시간에 높은 제거효율을 나타냈는데 이는 Ultrasound가 일반적인 처리공정(Conventional Treatment)보다는 유기물질 제거능력이 있음을 보여준 것으로 다른 처리공정들과 함께 환경 오염물질 처리공정에 응용될 수 있음을 입증한 결과라 할 수 있다.

### 3. Reaction Kinetics

초음파에 의해 반응기에서 난분해성 오염물질의 제거 반응은 1차 반응에 따른다.

여기서 회분식 반응조의 비가역 1차 반응속도는 다음 식으로 표현된다<sup>13)</sup>.



$$r_A = ds/dt = -ks$$

$$\ln s/s_0 = -kt \quad \text{or} \quad \log s/s_0 = -kt$$

이 식으로부터 반응속도 상수 k를 구하면 Fig. 8,9,10와 같다.

Fig.8 에서 TCE sol.의 농도 20ppm 일 때 제거속도 상수  $k=0.0342/\text{min}$ , 100ppm  $k=0.0546/\text{min}$ , 500ppm일 때  $k=0.0638/\text{min}$  로 농도가 높을수록 반응속도 상수가 증가함을 알수 있었는데 이값은 Cheung<sup>14)</sup> 등이 실험한 Methylene Chloride 농도 100ppm 일 때  $k=0.0393/\text{min}$  보다 큰 값이며, Glaze<sup>15)</sup> 등이 연구한 다른 산화공정인 UV와 TiO 촉매를 이용한 TCE 분해 결과 농도 20ppm 에서  $k=0.0016/\text{min}$ 인 결과 보다도 훨씬 큼을 알 수 있었는데 이는 Ultrasound 를 이용한 공정이 TCE 처리 능력이 우수하다는 것을 확인한 결과이다.

Fig. 9의 Benzene sol. 실험에서 초기농도 20ppm일때 반응속도상수  $k=0.0207/\text{min}$ , 100ppm 일때  $k=0.0263/\text{min}$ , 500ppm 일 때  $k=0.0475/\text{min}$ 로 나타났다. 이는 Kochany<sup>16)</sup> 등이 EPR Spin-Trapping Method를 사용하여 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 광화학 반응에 따른 Benzene의 1차 반응상수를 측정된 값보다 높은수치로서 Ultrasound의 산화반응이 Benzene 분해에도 응용될수 있음을 보여준 결과이다.

Fig. 10에서 2,4 DCP sol. 초기농도 20ppm 일 때 반응속도 상수  $k=0.0243/\text{min}$ , 100ppm 일 때  $k=0.0180/\text{min}$ , 500ppm 일 때  $k=0.0148/\text{min}$ 로 TCE, Benzene에 비해 초기농도가 낮을수록 k값이 증가함을 보였는데 이는 열분해에 따른 Boiling point의 차로 사료되며 앞으로 이에 대한 규명이 연구할 과제라 사료된다. 특히 이 값은 Shen<sup>17)</sup> 등이 UV를 이용하여 초기농도 50ppm인 DCP sol.을 분해할 때 반응속도상수와 거의 일치함을 보여주었는데 이는 Ultrasound가 UV와 같이 비휘발성 유기물질의 산화 처리

공정으로 응용될수 있음을 확인한 것이다.

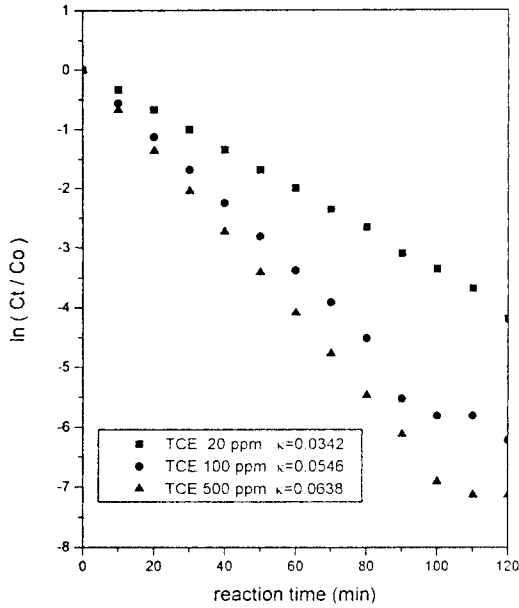


Fig. 8 Estimation of substrate(TCE) removal rate(k) for batch reactor

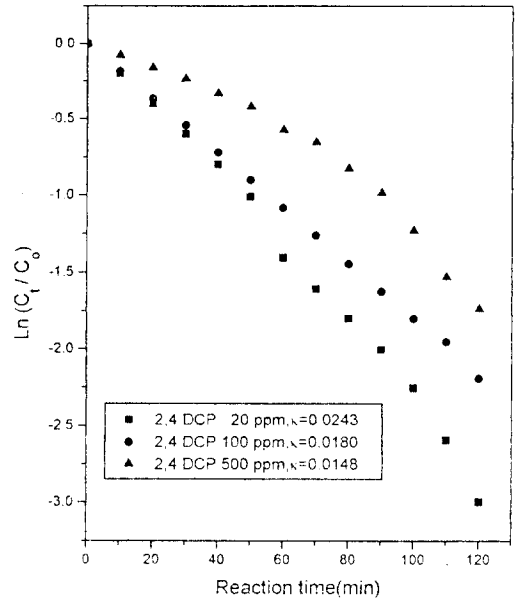


Fig. 10 Estimation of substrate(2,4 DCP) removal rate(k) for batch reactor

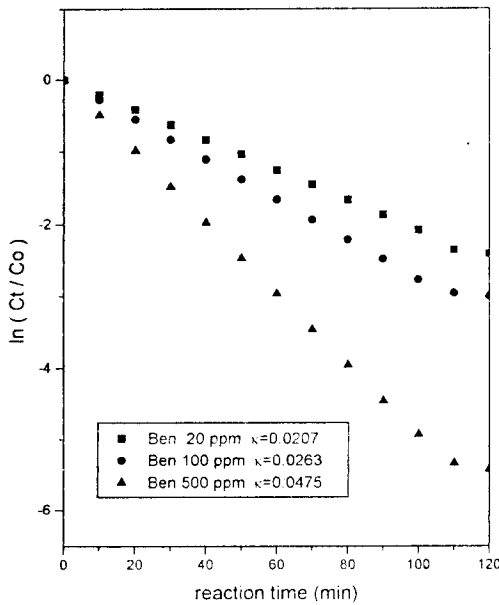


Fig. 9 Estimation of substrate(Benzene) removal rate(k) for batch reactor

## V. 결론

Ultrasound irradiation에 의한 수중의 난분해성 유기물인 TCE, Benzene, 2,4 DCP solution의 제거실험에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 반응시간에 따른 농도 변화에서 TCE는 초기 용액의 농도가 높을수록 제거효율이 높았으며, TCE 100, 500 ppm인 고농도에서는 반응시간 30min 동안에 90% 이상의 제거효율을 보였고, 저농도인 20ppm에서는 반응시간 60min에서 90% 이상의 제거율을 나타냈다.
- 2) Benzene 용액에서도 초기용액의 농도가 높을수록 제거효율이 높았으며, 초기농도 100, 500ppm 일때 반응시간 20min에서 75% 이상의 제거효율을 보였고, 20 ppm에서는 반응시간 80min 일때 75% 이상의 제거효율을 나타냈다.
- 3) 2,4 DCP 용액에서는 TCE와 Benzene 보다는 서서히 분해가 진행됨을 알 수 있었고 용액의 농도가 낮을수



특 제거효율이 높았다. 반응시간 60min에서 60%, 반응시간 120min에서 80% 이상의 높은 제거효율을 보였다.

- 4) 반응시간별 pH 변화 실험에서 TCE, 2,4 DCP 용액은 반응시간이 길어짐에 따라 용액의 pH가 급격히 감소하는 경향을 보였고, 제거가 거의 완료된 시간에는 거의 일정함을 유지했다. 이는 초음파반응에 의한 H, OH radical, 그리고 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 생성에 따른 산화반응으로 생긴 결과이며, 반응이 경과함에 따라 물질제거반응이 완료됨에 따라 일정한 값을 유지하고 있는 것이라고 사료된다.
- 5) Benzene 용액은 반대로 약간 증가하는 경향을 보이고 있으나 pH 변화는 크지 않은 것으로 나타났는데 이는 Benzene의 분해반응에 의한 gas화 현상에 기인한 것으로 생각되며 앞으로 이에 대한 확실한 규명이 필요하다.
- 6) Reaction Kinetics 결과에서 모든 분해반응이 비가역적 1차반응으로 해석할 수 있으며, 제거속도를 비교하면 TCE > Benzene > 2,4 DCP 순이었으며, 다른 산화공정보다도 제거 속도 상수가 큰 것으로 나타났는데 향후 이에 대한 연구를 지속하는 것이 필요하다고 사료된다.

이상과 같은 실험 결과에서 적용 실험한 모든 난분해성 유기물이 짧은 반응시간에 높은 제거효율을 나타냈는데 이는 초음파(Ultrasound)가 일반적인 다른 처리 공정보다는 유기물질 제거능력이 우수함을 알 수 있었으며, 다른 산화 처리공정들과 함께 유해물질 처리공정에 응용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 국제환경문제연구소: 환경관계법규-유해화학물질관리법 해설, 동화기술, 10-1, 1996.
2. 환경부: 유해화학물질관리법 시행규칙 별표1, 1995.
3. 島川正憲: 超音波工學-理論 과 實際, 工業調査會, 1971.
4. Giggenbach, W.: Optical spectra of highly alkaline sulfide solutions and the second dissociation constant of hydrogen sulfide, *Inorg. chem.*, 7, 1333, 1971.
5. Suslick, K.S.(ed): *Ultrasound: its Chemical, Physical and Biological Effects*, VCH, New York 1988.
6. Mason, T.J., Lorimer, J.P.: *Sonochemistry. Theory, Applications and uses of Ultrasound in Chemistry*, Ellis Horwood, Ltd. 1988.
7. Suslick, K.S.: *Modern Synthetic Methods*, 4, 1-60, 1986.
8. Lorimer, J.P., and Mason, T.J.: *Chem. Soc. Rev.*, 16, 239-274, 1987.
9. Henglein, A.: *Ultrasonics*, 25, 6-16, 1987.
10. Margulis, M.A.: *Russ. J. Phys. Chem.*, 50, 1-11, 1976.
11. 환경부: 수질오염공정시험법, 동화기술, 1996.
12. APHA : *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 16th ed., 1985.
13. Lenvenspiel O.: *Chemical reaction engineering*, John Wiley and Sons Inc. 2th., 42-49, 1972.
14. H. Michael Cheung, Ashish Bhatnagar, and Greg Jansen : *Sonochemical Destruction of Chlorinated Hydrocarbons in Dilute Aqueous Solution*, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 25, No. 8, 1510-1512, 1991.
15. William H. Glaze, John F. Kenneke, and John I. Ferry : *Chlorinated Byproducts from the TiO<sub>2</sub>-Mediated Photodegradation of Trichloroethylene and Tetrachloroethylene in water*, *Environ. Sci. Technol.* Vol. 27, No. 1, 177-184, 1993.
16. Jan Kochany and James R. Bolton : *Mechanism of Photodegradation of Aqueous Organic Pollutants. 2. Measurement of the Primary Rate Constants for Reaction of ·OH Radicals with Benzene and Halobenzenes Using an EPR Spin-Trapping Method following the Photolysis of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>*, *Environ. Sci. Technol.* Vol. 26, No. 2, 262-265, 1992.
17. Yung-Shuen Shen, Young Ku and Kuen-Chyr Lee : *The Effect of Light Absorbance on the Decomposition of Chlorophenols by Ultraviolet Radiation and U.V/HO Processes*, *Wat. Res.* 24. 8. 907-914, 1995.