

## 화학작용제의 2단계 폐기기술(II) (작용제 가수분해 후 초임계수 산화처리)

Chemical Agent Disposal Technology by a 2-step Process(II)  
(Agent Hydrolysis followed by Supercritical Water Oxidation)

**이종철\***      **베리안시아 밤방\*\***      **송은석\*\*\***      **김재덕\*\***  
Lee, Jong-Chol      Veriansyah Bambang      Song, Eun-Suk      Kim, Jae-Duck

### ABSTRACT

A 2-step process for the safe destruction of chemical warfare agents(agent hydrolysis followed by supercritical water oxidation) was studied to obtain kinetic data for the pilot plant design. This process is simple to operate by using commercial equipments and could be applied as an alternative technology to incineration. Sarin(GB) and sulfur mustard(HD) were hydrolysed in sodium hydroxide and water respectively and their hydrolysates and OPA, which is binary agent for GB were oxidized in a continuous flow supercritical water oxidation system. Destruction efficiencies of the materials were above 99.99% in supercritical water.

주요기술용어(주제어) : Chemical Agent, Chemical Agent Disposal, Supercritical Water Oxidation

### 1. 머리말

이 논문은 화학작용제(이하 “작용제”)를 가수분해한 후 분해물질을 초임계수 산화(supercritical water oxidation, SCWO)방법으로 최종 처리할 수 있는 2단 처리공정 개발에 목적이 있다.

작용제는 극소량을 흡입하거나 피부에 노출되어도 인체를 치사에 이르게 하는 대량 살상물질로서 자연 환경에 노출 될 경우 피해가 매우 크므로 화학무기금

지협약(Cheical Weapons Convention, CWC)에서 규제물질로 지정하고 일정기간 내에 폐기 하도록 규정되어있다<sup>[1]</sup>. 작용제는 P, F, Cl, S 등이 함유된 난분해성 물질로서 완전분해가 용이하지 않으나 중화 및 소각방법으로 소각 처리한 바 있다. 최근, 미국은 비축 작용제를 대량 폐기하기 위하여 소각 폐기시설을 운영하고 있으나 직접소각에 대한 지역주민의 반대에 따라 향후 건설예정인 2 곳의 처리시설은 중화 후 초임계수산화 및 미생물 처리기술이 선정되었다<sup>[2]</sup>.

SCWO 기술은 민수분야에서 폐슬러지, PCB, 다이옥신 처리에 이용하려고 노력하고 있으나 미 국방부, 에너지부, DARPA 및 각 군은 이 기술을 작용제, 폭약, 함정 발생 폐기물 및 염화물이 포함된 특수폐기물 처리용 핵심기술로 개발하고 있다. 특히, 육군은 이 기술을 화학무기(작용제 및 화약류 폐기) 폐기 전

† 2006년 12월 15일 접수~2007년 2월 9일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD), 화생부

\*\* 한국과학기술연구원(KIST), 청정기술연구센터

\*\*\* 서울대학교, 화학생물공학부

주저자 이메일 : jcleaadd@hanafos.com

용기술로 이용하기 위하여 적극 노력하여왔다<sup>[3]</sup>.

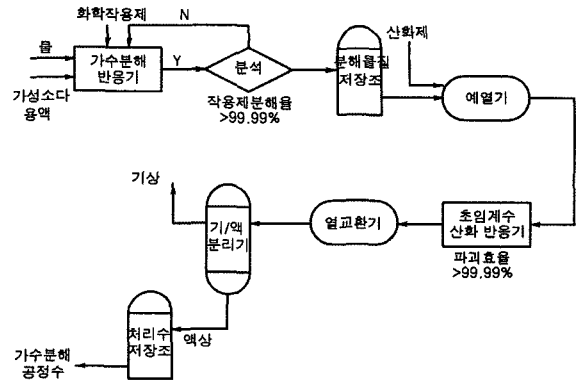
초임계수는 상온, 상압의 물과는 달리 임계점(374 °C, 220bar) 이상에서는 대부분의 유기물과 기체의 용해도가 급격히 증가한다. 물을 반응매체로 사용하여 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), 공기 또는 산소를 공급하면 물에 용해된 유기물은 산화되어 CO<sub>2</sub>와 물로 전환되며 500°C 이상에서는 수초~1분의 짧은 체류시간에 높은 전환율을 얻을 수 있다. 초임계수의 장점은 유기물과 산소에 대한 용해도와 확산속도가 크며 반응물이 단일 상으로 존재하므로 반응물 간의 이동이나 혼합의 어려움을 극복할 수 있다. 특히, 소각과 비교하면 배출가스에 NO<sub>x</sub>, 다이옥신 또는 입자상 물질을 포함하지 않으며 20% 내외의 희석된 유기물 처리에 적합하므로 가수분해 공정을 전처리 과정으로 사용하는 작용제 처리에 매우 효과적이다.

위와 같은 장점에도 불구하고 불소, 염소 등 할로젠이 함유된 물질을 처리할 경우 부식과 염이 생성되어 막힘현상(Plugging)이 발생한다. 이는 공정의 안정성을 저해하고 대규모 처리공정에 스케일을 발생시켜 열전달을 저해한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 지속적인 노력에 따라 double-shell 또는 transpired-wall을 이용한 신 개념의 반응기가 개발되어 일부 해결 되었으나 부식문제는 아직 완전히 해결되지 않았다. 그러나 반응기나 부품의 주기적인 교환과 이에 따른 고압장치의 운영 중단 등 SCWO 기술의 단점에도 불구하고 이 기술보다 월등히 우수한 공정의 개발 가능성은 그다지 크지 않다.

이 논문은 SCWO 기술을 후처리기술로 이용하기 위한 다양한 실험과 이를 통하여 얻은 기초자료로부터 반응 kinetics 식을 도출하고 궁극적으로 pilot plant 공정설계에 필요한 자료를 획득하는데 목적이 있다.

## 2. 처리공정 및 SCWO 실험 데이터 처리

작용제 2단 처리공정은 그림 1과 같이 작용제를 먼저 물이나 가성소다 용액으로 가수분해 한 후 분해된 물질을 초임계수로 산화시켜 완전히 무해한 물질로 변환시키고 처리수는 다시 가수분해 공정수로 이용하



[그림 1] 화학작용제 처리 개념도

도록 작용제 처리시스템을 구축하는 것이다.

작용제를 가수분해하면 독성은 거의 제거되나 분해물질은 CWC 규제물질이므로 이를 재사용할 수 없도록 완전히 폐기해야 하므로 후처리가 필요하다. 또한, 분해물질에는 무기염과 산이 포함되어 있어 역반응에 의한 작용제 재생을 방지하고 완전분해를 촉진하기 위하여 중화하면 염이 발생할 수 있다.

가수분해는 90°C 이하에서 반응기에 물이나 가성소다 용액을 채우고 작용제를 서서히 주입하면서 교반하여 일정시간 반응시키고 분해물질을 안정화시킨 다음 작용제 농도를 분석하여 분해율이 일정수준 이상 도달하면 분해물질을 저장조로 이송하여 SCWO 처리한다. 가수분해 효율은 작용제를 기준으로 99.99% 이상, SCWO 분해율은 총유기탄소(TOC) 기준 99.99%를 목표로 하였다. 가수분해 대상물질은 사린(GB, isopropyl phosphonofluoridate) 및 sulfur mustard ((HD, bis(2-chloroethyl)sulfide))를 선정하였다.

가수분해 실험결과는 본고의 제 I 편에 발표하였으므로 이 논문은 GB와 HD 가수분해 물질의 초임계수 산화결과에 대하여 중점 기술하였다. SCWO 반응물질은 가수분해 실험결과에 따라 모사용액을 제조, 사용하였고 처리물질에 따라 실험 장치를 다소 변화시키면서 압력, 농도, 온도, 체류시간 및 산화제 투입에 따른 kinetics 데이터를 도출하였다.

SCWO 실험장치는 반응물과 산화제 공급용 펌프, 예열기, 초임계수 산화반응기, 냉각기, 감압장치, 필터, 기/액 분리기 등으로 구성된 연속흐름 반응기를 이용하였으며 예열기 및 반응기를 비롯한 고온부분은 세

라믹으로 단열하고 k-형 열전대를 사용하여 시스템 내부온도를 측정하였다. 산화제로는 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>와 기체산소를 물에 직접 용해시켜 사용하였다. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>는 35% 수용액을 탈 이온수로 희석하여 산화제 용액을 제조하였으며 낮은 온도와 높은 유속에서도 예열기를 통과하면서 완전히 분해된다. 산소는 물에 용해하는 경우, 양론적으로 요구되는 산소농도에 따라 실린더 배출 산소압력을 7~10MPa로 조절하였다.

반응기에 공급된 처리물질의 농도는 TOC 농도를 적용하였으며 전화율을 식 (1)과 같이 정의하고 유기물 분해의 평가지표로 사용하였다. 전화율 X는,

$$X = \left( 1 - \frac{[TOC]_f}{[TOC]_i} \right) \quad (1)$$

[TOC]<sub>i</sub>는 반응기 입구농도, [TOC]<sub>f</sub>는 출구농도이다.

반응 속도식은 다양한 실험조건에서 얻은 많은 실험 데이터를 적용하기 위하여 global power-law 속도식을 이용하였으며 다음과 같이 표현된다.

$$\text{rate} = -\frac{d[TOC]}{dt} = -k[TOC]^a [H_2O_2]^b [H_2O]^c \quad (2)$$

a, b, c는 각각 TOC, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 및 물의 농도에 대한 반응차수이며 k는 속도상수이다. k는 식 (3)과 같이 Arrhenius 식으로 표현되며 A는 지수앞 인자, E<sub>a</sub>는 활성화 에너지이다.

$$k = A \exp(-E_a/RT) \quad (3)$$

TOC 농도와 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>에 대한 분해효과를 조사하기 위하여 다른 조건은 상수로 유지하고 한 변수만 변화하여 실험하였다. SCWO 반응에서 물에 대한 의존성은 명확히 규명되지 않았다. 물은 복잡한 반응 메커니즘을 통해 반응에 직접 참여하는 것으로 알려지고 있으나 반응매체는 항상 물이 99% 이상이므로 유기물 분해속도에 대한 물의 영향은 무시될 수 있다. 따라서 반응 속도식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{rate} = -\frac{d[TOC]}{dt} = -k[TOC]^a [H_2O_2]^b \quad (4)$$

산화제 농도는 초기 상태에서부터 변화한다고 가정하고 속도식은 각각 TOC 및 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 농도에 지배된다. 따라서 초기속도법 및 최소자승법을 사용할 수 있다. 모든 실험은 10초 내외의 매우 짧은 체류시간을 가지므로 초기 속도법을 적용할 수 있으며 초기 조건  $\tau = 0, X=0$ 을 식 (4)에 적용하면 TOC 제거율과 실험상수간의 관계를 식 (5)에 의해 계산 할 수 있다.

$$X = 1 - [1 - (1-a)k(T)\tau [TOC]_i^{a-1} [H_2O_2]_i^b]^{1/(1-a)} \quad (5)$$

$$a \neq 1$$

비선형 최소자승법을 사용하면 위에서 정의되는 반응속도를 최적화 할 수 있으며 각 매개변수를 추정하여 반응속도를 예측 할 수 있다. 실험결과로부터 반응차수 a, b를 얻고 Arrhenius 식의 값(k, A 및 E<sub>a</sub>)을 구하여 분해 속도식을 표시하면 식 (6)과 같다.

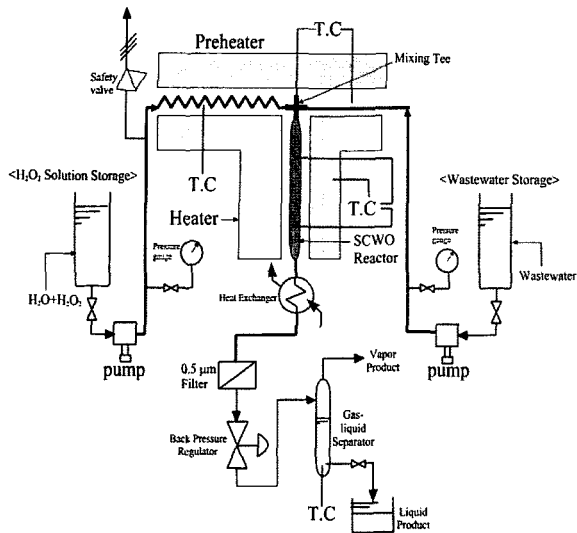
$$\text{rate} = A \exp(-E/RT) [TOC]^a [H_2O_2]^b \quad (6)$$

여기서 k ; mmol/s, [TOC] 및 [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] ; mmol /L, E<sub>a</sub> ; kJ/mol이다.

### 3. 실험장치, 방법 및 결과

#### 가. OPA<sup>(4)</sup>

OPA는 이소프로필 알콜과 아민의 혼합물로서 그림 2의 실험장치를 이용하였다. OPA와 산화제는 외경 1/8" 316SS 관을 사용하고 각각 0.5 및 6m 길이의 예열기를 통과하였다. 유입용액은 반응기 입구에 설치된 cross에서 혼합되며, 반응기는 외경 18mm, 내경 9.5mm, 길이 280mm의 304SS를 사용하였다. 반응기 출구로 나오는 생성물은 이중관 열교환기로 급속 냉각 후 감압하였다. 처리수는 기/액 분리기에서 분리한 후 액체시료를 포집하였다. 기체는 온라인으로 GC-TCD(HP-5890)에서 3.048m×1/8" Supelco Carbosieve S-II, 칼럼을 사용하여 온도기울기 32°C/분으로 분석하였다. 또한 H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>를 함유하고 있는 표준 기체의 보정곡선을 만들어 발생가스를 분석하였다.



[그림 2] OPA의 SCWO 실험장치

1) 과산화수소를 이용한 OPA의 초임계수 산화

OPA의 초임계수 산화는 표 1의 조건에서 총 43회 실험하였으며 반응기에 유입되는 OPA 농도는  $2.1 \times 10^{-3} \sim 1.7 \times 10^{-1} M$  이었다. OPA는 온도 557°C, 체류시간 11s 이하에서 99.97 %가 분해되었으며 실험을 통해 얻은 OPA 분해속도는 식 (7)과 같다.

$$rate = -2.46 \times 10^3 \exp(-64.12/RT) [OPA]^{1.13} [H_2O_2]^{0.24} \quad (7)$$

[표 1] OPA 실험 범위

실험 변수	실험 범위
압력(MPa)	25
온도(°C)	410-618
체류시간(s)	7-18
초기 TOC 농도(M)	$2.1 \times 10^{-3} - 1.7 \times 10^{-1}$
과산화수소/산소 농도(M)	$5.17 \times 10^{-2} - 1.04$

2) 산소를 이용한 OPA의 초임계수 산화

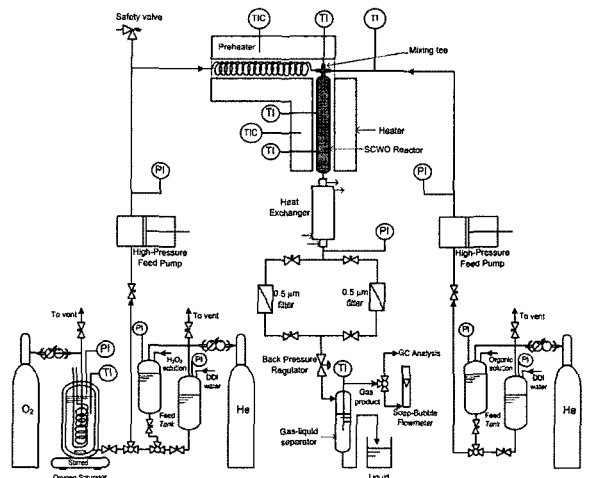
OPA는 200% 과잉 산소조건에서 완전 분해되었으며 산소를 사용한 경우 속도식은 (8)로 표현된다.

$$rate = -1.67 \times 10^2 \exp(-44.01/RT) [OPA]^{0.98} [O_2]^{0.16} \quad (8)$$

OPA 분해율은 84.26~99.39% 이었으며 적절한 과잉산소(50~150%) 조건에서 온도를 높이고 체류시간을 길게하면 CO 생성이 최소화되는 동시에 분해율이 증가 하였다. 산화제로는 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>를 사용할 때 O<sub>2</sub>를 사용한 경우보다 분해율이 더 상승하였다. 이는 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 경우 OH 라디칼이 더 많이 형성되기 때문으로 판단 된다.

나. Thiodiglycol(TDG)

TDG 실험은 SCW 조건에서 산소 공급의 유무에 따른 분해거동을 알아보기 위하여 가수분해와 SCWO 실험을 별도로 실시하였다. 실험 장치는 그림 3과 같으며 산화제는 550°C로 예열하였으나 TDG 용액은 예열로 인한 열분해 가능성을 배제하기 위하여 예열하지 않고 예열된 산화제와 혼합하였다. TDG와 산화제는 Hastelloy C-276으로 제조된 cross형 이음관에 반대 방향으로 유입시켜 혼합하고 이음관 위에 열전대를 설치하여 혼합유체의 반응기 유입직전 온도를 측정하였다. 반응기는 외경 31.7mm, 내경 10mm, 길이 0.3m로 C-276 재질을 사용하였으며 반응기 내부 온도를 측정하기 위해 반응기 유입 직전의 혼합지점과 반응기 중간 및 끝 부분에 열전대를 설치하여 온



[그림 3] TDG의 SCWO 실험장치

도분포를 측정된 결과 400~650℃로 반응온도 설정 시 반응기 입, 출구의 온도차는 2~5℃ 이었다.

1) 가수분해<sup>[5]</sup>

이 실험은 산소를 공급하지 않을 경우 TDG의 분해거동을 파악하기 위하여 산화제를 전혀 사용하지 않고 탈 이온수를 공급하였다. 전화율은 TOC 농도로 측정하고 등은, 등압에서 총 17회 실험 하였으며 실험범위는 표 2와 같다. TDG는 가수분해 중 생성되는 황화수소로 인하여 강한 악취가 발생하였으며 CO, 메탄, CO<sub>2</sub>, 에틸렌, 에탄 등도 검출되었다. 액체 시료를 이온크로마토그래피(IC)로 분석한 결과 황산이 검출되었으나 1% 이하로 황 성분이 황산으로 잘 전화되지 않았다. TDG의 가수분해반응 속도식은 식 (9)와 같다.

$$rate = -5.57 \times 10^3 \exp(-71.32/RT)[TOC] \quad (9)$$

[표 2] TDG 실험범위

실험 변수	실험 범위	
	가수분해	SCWO
압력(MPa)	25	25
온도(℃)	385-530	397-617
체류시간(s)	13-87	9-40
초기농도(mM)	0.32-1.10	0.38-4.75
TOC 농도(mM)	1.38-4.99	1.75-21.04
산소(stoic%)	-	110-440

2) 초임계수 산화<sup>[6]</sup>

TDG의 SCWO 실험은 반응온도, 체류시간, 초기농도 및 산소농도를 변화시켜 총 58회 실험 하였다. TDG 산화에 필요한 산소의 당량은 다음과 같다.



전화율에 미치는 온도와 체류시간의 영향을 파악하기 위하여 반응온도(400, 450, 500℃)에서 초기농도

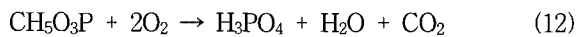
2.39mmol, 188%의 과잉산소 조건에서 실험한 결과, 온도와 체류시간 증가에 따라 전화율이 증가하였으며 모두 90% 이상이었다. 실험결과 TDG의 SCWO 반응 속도식은 식 (11)과 같이 표시된다.

$$rate = -1.64 \times 10^2 \exp(-41.53/RT)[TOC]^{1.02}[O_2]^{0.66} \quad (11)$$

이와 유사한 연구는 Turner, Lachance 등<sup>[7,8]</sup>이 수행한 바 있다. Turner<sup>[7]</sup>는 압력, 27.6MPa, 체류시간 5~17s, 및 425~525℃에서 실험한 결과 TDG의 주요 분해물질은 황산, CO<sub>2</sub>, CO 및 메탄이었다. 부식이 발생하여 동적 모델은 제안하지 못했으나 CO와 메탄이 반응속도를 제한하는 중간 생성물로 확인되었다. Lachance 등<sup>[8]</sup>은 아임계 및 초임계수에서 TDG를 가수분해 및 산화(25MPa, 100~525℃)한 결과 TDG는 400℃에서 수초 내에 CO<sub>2</sub>, 물 및 황화물로 완전 산화되었다.

다. Methylphosphonic acid(MPA)<sup>[9]</sup>

MPA는 표 3의 조건에 따라 압력을 고정시키고 온도, 체류시간, MPA 및 산소 농도를 변화시켜 실험하였다. MPA는 식 (12)와 같이 1몰 당 산소 2몰 즉, 4몰의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>가 필요하다.



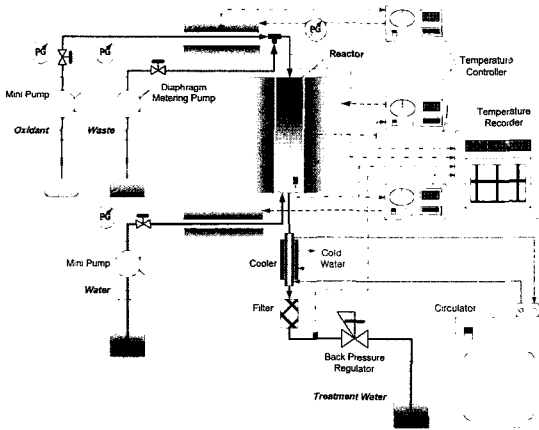
MPA는 신경 작용제의 가수분해 시 생성되는 주요 분해물질로서 독성은 없으나 C-P 결합이 존재하여

[표 3] MPA의 실험범위

실험변수	실험범위
압력(MPa)	25
온도(℃)	448-602
체류시간(s)	3.82-11.68
초기 MPA 농도(mM)	4.43-18.89
초기 TOC 농도(mM)	61.56-244.95
산소농도(stoic%)	0, 113-279

상은, 상압에서 쉽게 분해되지 않으며 대부분 코일형 반응기(1/4" 관)를 이용, 실험하였다. 작용제에는 장기지장을 위해 안정제가 첨가되어 있으며, 가수분해 물질에는 MPA 이외에 알칼리 금속이 포함되어 있어 염의 생성가능성이 크고 가수분해 과정에서 산이 생성된다. 코일이나 관형 반응기의 경우 직경이 작고 유로가 좁아 있어 염이나 고상물질이 발생할 경우 plugging을 피하기 어려운 단점이 있다. 따라서 본 연구는 직경이 2배 이상 크고 길이가 짧은 수직관 반응기를 사용하고 상대적으로 전하효율이 높은 범위의 반응조건을 설정하였다.

그림 4는 실험에 사용한 연속흐름 SCWO 장치로서 액상물질의 유로 및 예열기는 모두 316 SS 재질을 사용하였다. 산화제(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)와 물은 각각의 예열기를 통해 반응기로 유입되며 물은 2 중벽 반응기 외부의 하단에서 유입되어 내부 반응기 상단으로, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>는 반응기 상단으로 유입되어 내부 반응기에서 물과 혼합된다. MPA는 열분해를 방지하기 위해 예열하지 않고 반응기에 유입하였다. 반응기 출구에서 나오는 생성물은 이중관 열교환기로 급속 냉각 하였으며 반응 중 생성된 입자를 제거하기 위해 직경 0.5 $\mu$ m 필터를 사용하고, 감압 후 기/액 분리기를 통과시켜 기체는 GC로 실시간 분석하고 액체는 vial에 포집하여 적절히 희석한 후 분석 하였다. 온도는 각 가열로 내부, 예열기를 통과한 물과 산화제가 반응기에 유입되는 지점, 내부 반응기 입구, 냉각기 이후, 대기온도



[그림 4] MPA의 SCWO 실험장치

측정을 위한 시스템 외부 등 총 8개의 열전대를 설치하여 측정하였다.

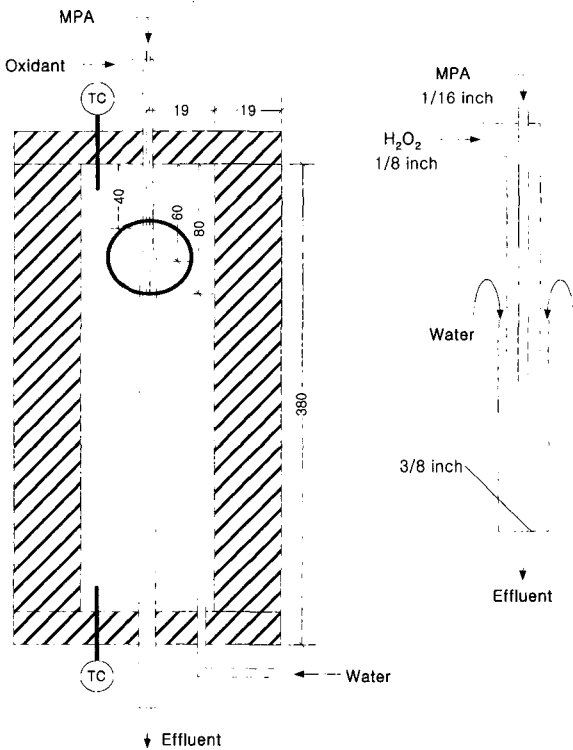
이 실험은 반응성이 크기 때문에 부식이 심각함에 따라 2 중벽의 연속흐름식 반응기를 제작하여 외벽은 대기와 경계에 위치시켜 반응기 내압의 강한 응력을 받는 역할을 하는 한편, 내부 반응기는 응력의 영향을 줄이는 대신 산화제나 처리물질 등 부식이 강한 물질간 반응영역의 역할을 수행한다. 이는 부식에 의한 피해를 내부 반응기로 제한하는 동시에 압력차로 인한 응력을 견디기 위하여 두껍게 제작되는 외부 반응기의 부식을 최소화 할 수 있다. 따라서 부식이 집중되는 내부 반응기는 SS나 인코넬, Ti 재질의 상용관을 사용함으로써 시간과 비용을 절약할 수 있다. 이 방법은 본 실험과 같이 부식이 심하고 염의 침적으로 기존 형태의 반응기를 사용하기 곤란한 경우 매우 효과적이다.

그림 5는 실험에 사용한 반응기로서 외부 반응기는 C-276 재질을 사용하여 벽두께 19mm, 내경 38mm, 외경 76mm, 높이 380mm의 원통형으로 제작하였다. 내부 반응기는 3/8" 316SS관을 사용하고 MPA는 가장 내부에 위치하는 1/16" 관을, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>는 MPA 관을 감싸고 있는 1/8"관을 통해 내부 반응기로 유입하였다.

산화실험은 표 3의 실험범위에서 50회 실시하여 MPA 및 산소의 초기농도와 전하율간의 관계식을 구하였다. 각 반응물의 초기농도에 대한 매개변수를 표 4에 표시하였으며 실험으로 구한 최대 전하율은 TOC 기준 99.3715%, MPA 기준 99.9988% 이었다. 전하율 99.99% 이상인 10회의 실험조건을 분석하면 반응 온도 600℃에서 체류시간 5초 이상 및 과잉 산화제를 사용한 경우이다. 반응속도는 MPA 초기농도의 의존성이 크므로 농도에 따라 전하율이 증가할 것으로 예측되며 처리조건을 설정하면,

- 총 유량, 10.55g/분
- Feed 비, MPA : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : Water=1.08 : 2.85 : 6.62
- 체류시간, 4.77s(@ 627℃) 및 5.28s(@ 573℃)
- H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 공급량/소요량, 125%(25% O<sub>2</sub> 과잉) 이다.

한편, 분해기준을 더욱 높여 MPA 전하율 99.999% 이상 달성할 수 있는 반응온도를 구한 결과 MPA



[그림 5] Double shelled SCWO 반응기

[표 4] Kinetic data의 비교

	a	b	A	E(KJ/mol)
TOC 기준	1.39	$2.04 \times 10^{-10}$	$1.22 \times 10^6$	74.94
MPA 기준	1.20	0.03	$1.99 \times 10^6$	77.96

feed 농도 1wt.%에서 627°C, 10wt.%에서 573°C 이었다.

#### 4. 결론

화학작용제의 2단 폐기공정(작용제의 가수분해 후 초임계수 산화) 개발의 일환으로 작용제 가수분해 연구를 통하여 얻은 실험결과에 따라 분해물질을 제조하고 다양한 초임계수산화 실험을 실시하여 kinetics 데이터를 도출하고 분해조건을 제시하였다. SCWO

기술은 작용제 가수분해 물질과 같은 난분해성 물질을 안전하게 폐기처리 할 수 있는 소각 대체용 기술로 판단되므로 실용화를 위한 지속적인 연구, 개발이 필요하다. 본 논문의 실험결과는 향후 Pilot Plant 개발을 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] Chemical Weapons Convention, Organization for the Prohibition of Chemical Weapons, OPCW Home page, <http://www.opcw.org>
- [2] Fact Sheets, The U.S. Army Chemical Materials Agency(CMA), <http://www.cma.army.mil>
- [3] U.S. National Research Council, "Review and Evaluation of Alternative Technologies for Demilitarization of Assembled Chemical Weapons, Washington D.C., U.S.A., 1999.
- [4] B. Veriansyah, J.-D. Kim, J.-C. Lee, Y.-W. Lee, "OPA oxidation rate in SCWO", *J. of Hazard. Mater.*, Vol. B124, pp.119~124, 2005.
- [5] B. Veriansyah, J.-D. Kim, J.-C. Lee and D. Hong, "Hydrothermal Decomposition Rate of TDG in Supercritical Water", *J. Ind. Eng. Chem.*, Vol. 22, No. 3, pp.395~400, 2006.
- [6] B. Veriansyah, J.-D. Kim and J.-C. Lee, "SCWO of Thiodiglycol", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 44, pp.9014~9019, 2005.
- [7] M. D. Turner, "SCWO of DMMP and TDG", Ph D. Dissertation, The Univ. of Texas, 1993.
- [8] R. Lachance, J. Paschkewitz, J. DiNaro, J. W. Tester, "TDG hydrolysis and Oxidation in sub and SCW", *J. Supercrit. Fluids*, Vol. 16, 1999.
- [9] E.-S. Song, J.-D. Kim, D. Hong and J.-C. Lee, "Destruction of MPA by SCWO", *Supergreen 2005*, National Taiwan Univ., Taipei, 2005.