

화학작용제의 2단계 폐기기술(I) (작용제 가수분해 후 액중배기식 소각처리)

Chemical Agent Disposal Technology by a 2-step Process(I)
(Agent Hydrolysis followed by Incineration)

이종철*
Lee, Jong-Chol

이용한*
Lee, Yong-Han

오석중*
Oh, Sok-Chong

홍대식*
Hong, Dea-Sik

ABSTRACT

A 2-step process for the safe disposal of chemical warfare agents(agent hydrolysis followed by incineration in the submerged-quench incinerator) was studied to obtain basic data for the design of pilot plant in the future. Sample materials used for the hydrolysis reaction were sarin(GB), sulfur mustard (HD), and methylphosphonic difluoride(DF). The hydrolysates of these materials were thermally destroyed in a submerged-quench incineration system. Experimental conditions for achieving destruction efficiency of 99.99% in both steps were established and phosphoric acid was recovered from the waste water when destroying DF hydrolysate in the incinerator. Treated water could be reused as process water for the agent hydrolysis.

주요기술용어(주제어) : Chemical Agent, Chemical Agent Disposal, Hydrolysis, Submerged-quench Incinerator

1. 머리말

화학무기는 1997. 4. 29일 발효된 “화학무기 금지협약”(CWC : Chemical Weapons Convention)에 따라 지정기간 내에 모두 폐기해야한다. 이를 실현하기 위하여 네덜란드 헤이그에 화학무기 금지기구(OPCW)를 두고 화학무기의 검증 및 폐기에 대한 강력한 사찰활동을 전개하고 있다.

2006. 9월 현재, OPCW에 신고된 화학작용제(이하 “작용제”)는 약 7만톤이며 작용제 종류는 VX(19,589

톤), GB 또는 사린(15,048톤), HD(13,838톤)가 대부분(약 70%)이다. 이외에 오래되고 버려진 화학무기가 미국, 유럽 및 중국 등지에서 발견되고 있으며 이들 무기도 폐기해야 한다^[1]. 과거 폐기된 화학무기는 2만톤을 초과하며 대부분(16,000톤) 소각하였고 일부 중화 처리하였다. 작용제는 탄이나 로켓, 지뢰 등에서 분리한 후 소각하거나 염기 수용액, methylethanolamine 등으로 중화 한 후 매립하였으나 최근, 비축 화학무기의 대량처리 방법은 미국의 경우 탄에서 작용제를 분리 한 후 직접 소각하는 방식을 기본으로 사용하여 왔다. 따라서 작용제 누출 방지를 위한 안전장치가 거대해 지고 소각 시 배출되는 유해가스를 다수의 활성탄 여과기를 사용하여 여과함으로써 여과 및 집진장치가 거대해져 많은 공정

† 2006년 12월 6일 접수~2007년 2월 9일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD), 화생부

주저자 이메일 : jcleaeadd@hanafos.com

비용을 소비하는 한편, 누출된 작용제나 소각 배가스가 흡착된 다량의 폐 활성탄 처리문제가 대두 되었다. 또한, 일부지역은 소각을 반대함에 따라 소각 대체기술을 적용할 예정이며 제안된 기술은 대부분 2단 처리방법으로 먼저 작용제를 가수분해 한 후 분해물질을 다양한 기술을 이용하여 최종 처리하는 것이다. 유망기술로는 중화 후 초임계수 산화, 암모니아에 의한 중화, 중화 후 전기화학 산화, 흡산으로 처리, 중화 후 광 산화 및 미생물처리, 중화 후 환원, 용융금속 환원, 플라즈마 이용 등 다양하다. 최근에는 벌크 HD 및 VX의 신속처리를 위하여 가수분해 후 상용 폐수처리장에 보내 처리한 바 있으며 향후 2곳의 신규시설에는 중화 후 초임계수 산화 및 미생물 처리기술이 각각 선정되었다^[2].

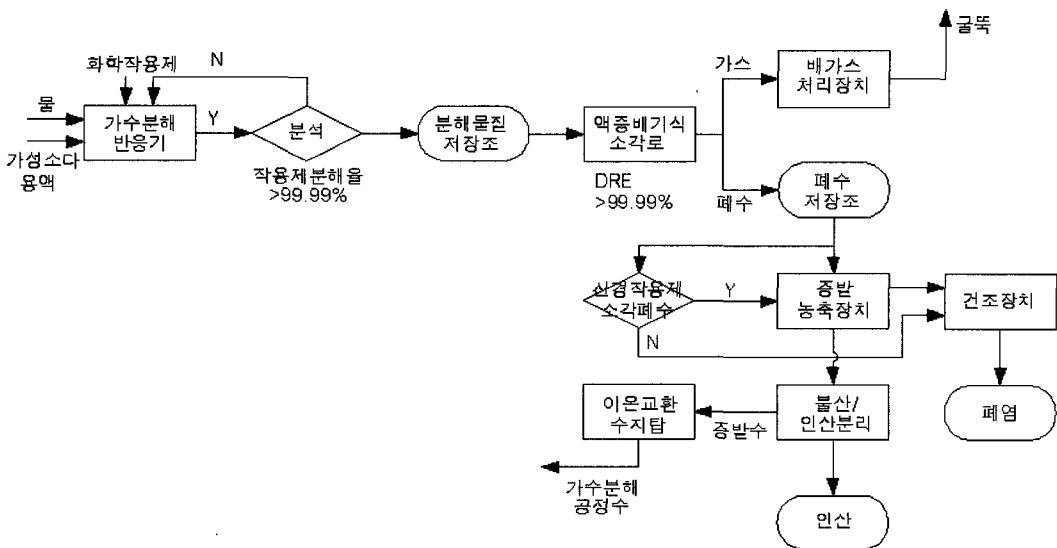
한편, 세계 최대의 화학무기 보유국인 러시아는 작용제를 중화 한 후 고형화하여 매립 예정이다. 어떤 경우이던 각국은 그 나라의 특성에 적합한 폐기기술을 선정하여 적용하고 있으나 처리기술을 분류하면 작용제의 직접소각, 중화 후 고형화/매립 및 중화 후 고도 산화처리 방법으로 분류된다^[3~5].

작용제는 물이나 염기성 물질로 가수분해하면 독성이 크게 감소되어 취급이 용이해지나 분해물질에는 여전히 CWC 규제물질과 할로겐 또는 산성물질과 다

량의 염이 함유되어 있으므로 이를 무해한 물질로 전환시켜야 한다. 따라서 작용제 분해물질의 최종처리를 위한 경제적이고 환경 친화적인 기술선정이 필요하다. 그러나 위 제시된 기술은 소각을 제외하면 작용제 대량 처리기술로 상용화 된 기술은 아직 없다.

유기물은 소각온도 1,000℃ 이상, 체류시간 2초 내외에서 거의 완전 분해한다고 알려져 있으나 대부분의 금속염은 용점이 800~900℃로 낮기 때문에 소각로내의 온도가 비교적 낮은 지역이나 후단 처리공정 표면에 염이 고착되어 슬래그나 스케일이 형성되며 금속염은 내화물 손상의 원인을 제공한다. 이와 같이 할로겐 물질을 포함하며 염을 발생하는 난 분해성 액상 유해물질 처리를 위하여 액중배기식 소각로(Submerged-quench Incinerator)가 개발, 운영되고 있다.

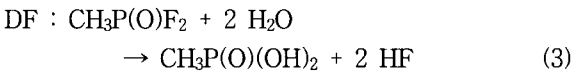
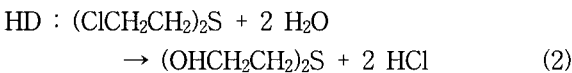
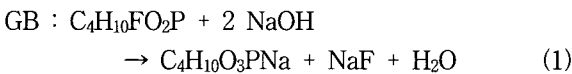
이 논문은 그림 1과 같이 각종 작용제의 안전폐기를 위한 2단계 처리기술(1단계 : 가수분해, 2단계 : 분해물질의 액중배기식 소각) 개발에 목적이 있다. 이를 구현하기 위하여 먼저 작용제 가수분해 조건을 수립하고 가수분해물질을 CWC 및 국내 환경관련 규정을 준수하여 소각하는 한편 배가스 세정폐수가 계외로 전혀 배출되지 않도록 폐수의 무방류 시스템을 구성하는 것이다. 부가적으로 유기인계 작용제 분해물



[그림 1] 화학작용제 처리공정 개념도

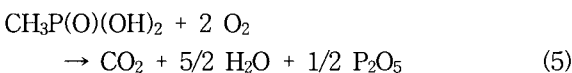
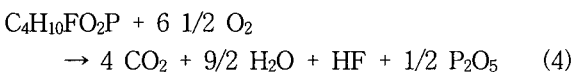
질 소각 시에는 배가스 세정폐수로부터 인산을 회수하는 방법을 고찰하였다.

가수분해 및 소각 단계에서 작용제 분해효율과 분해 물질의 파괴효율은 각각 99.99% 이상 달성하는 것을 목표수준으로 정하고 처리대상 물질은 GB(isopropyl phosphonofluoridate), HD(bis-2-chloroethyl sulfide) 및 GB의 전구물질인 DF(methylphosphonicdifluoride)로 하였다. 이들 물질은 선행기술 조사결과 식 (1)~(3)과 같이 가성소다 용액 및 물에서 효과적으로 분해된다.



작용제를 가수분해하면 고유의 독성은 대부분 제거되거나 주요 분해물질인 MPA(사린, DF의 경우) 및 TDG(HD의 경우)는 규제물질이므로 다시 사용할 수 없도록 재처리해야 한다. 또한, 분해물질에는 NaF와 같은 무기염과 HCl 및 HF와 같은 산성물질이 포함되어 있어 산에 의한 역반응을 방지하고 완전 분해를 촉진하기 위하여 중화 할 경우 염이 생성된다. 염이 함유된 액상폐기물은 액중배기식 소각로에서 효과적으로 소각 할 수 있다. 한편, 소각 후 폐수에 함유된 산은 중화, 농축, 건조하면 폐수를 발생하지 않는 무방류 시스템을 구축할 수 있다. 이는 폐기시설이 청정지역에 건설될 경우 환경보존을 위한 주요 설계요소가 된다.

GB나 MPA를 소각하면 각각 식 (4) 및 (5)와 같이 고온에서 열분해 되어 P₂O₅가 생성된다.



따라서 소각 시 발생하는 P₂O₅를 가성소다로 중화하여 인산염으로 완전히 제거하지 않는 한 P₂O₅가 생성되며 이는 물과 결합하여 흰 연기를 발생하거나 용해되어 식 (6)과 같이 인산이 된다. 소각 용액에 존재하는 F도 소각 후 물과 접촉하면 불산을 생성하나 물질수지 상 대부분 인산이 생성된다.



폐수 중, 인은 계 외로 방류 될 경우 호수나 하천 수 부영양화의 주요인이며 불산의 방류기준 또한 매우 엄격하다. 따라서 유기인계 작용제의 가수분해 물질을 완전 소각하고 배가스 세정장치에서 발생하는 폐수에서 불산과 인산을 분리하면 후 처리장치의 부하를 낮추고 부식저감에 따른 장비수명을 연장시킬 수 있을 뿐 만 아니라 인산을 회수 할 수 있다.

위와 같이 작용제를 가수분해 한 후 분해물질을 소각하여 완전하게 처리할 수 있는 화학작용제의 2단계 처리기술을 그림 1과 같이 설정하고 이를 구현하기 위한 실험을 실시하였다.

2. 실험

가. 작용제 가수분해

작용제 가수분해 실험은 자켓이 부착된 소형 반응기에서 신경작용제 및 수포작용제의 대표물질인 GB와 HD를 가성소다와 물로 분해하였다.

GB의 가수분해는 반응기에 2.05 당량의 가성소다 수용액을 넣고 10wt%의 GB를 주입한 후 온도변화(50, 70 및 90℃)에 따른 반응속도 상수를 구하였다. 가수분해 시 가성소다 량이 증가하면 분해 후 NaF가 생성되어 염이 증가하므로 이를 최소화하는 것이 후 처리 시 유리하므로 최소량을 사용하였다. HD 가수분해도 GB와 동일한 방법으로 90℃ 물에 10~20wt%의 HD를 주입하여 1.5시간 반응 한 후 상온에서 가성소다 수용액을 2.01 당량으로 30분간 추가 반응하여 시간 및 농도 변화와 역반응에 의한 HD의 재생 및 완전 분해여부를 확인하였다. 작용제 및 분해생성물의 분석은 GB의 경우 GC-MSD 및 LCQ(IT)로,

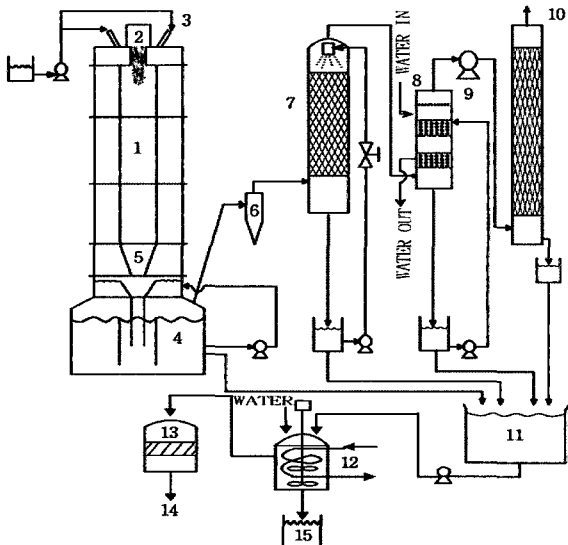
HD 분해물질은 GC/MS(SIM)로 정량 하였다.

나. 액중배기식 소각

소각 실험은 그림 2와 같이 폐액기준 10kg/hr 급의 실험실용 액중배기식 소각로를 사용하여 GB의 가수분해공정에서 생성되는 분해물질(MPA)과 HD의 주요 가수분해 물질인 TDG를 제조하여 소각하였다.

소각로는 상부에 버너가 부착되어 있으며 두개의 폐액 주입장치가 부착된 소각 체임버와 소각로 하단에 냉각시스템이 수직 일체형으로 구성되며 배가스 처리장치와 굴뚝이 부착되어 있다. 후처리 장치는 싸이클론, 충전탑, 유동층 열교환기가 연결되어 있으며 폐수 증발, 농축 및 건조 장치와 인산회수를 위한 회수장치 및 응축수에 포함된 불소처리를 위하여 이온교환수지탑을 별도 설치할 수 있다. 배 가스 처리 시 발생하는 폐수는 대부분 quencher에서 발생하나 충전탑 및 유동층 열교환기에서 일부 발생한다. 소각시스템의 작동원리는 별도 논문에 상세히 기술하였다^[6].

소각물질인 MPA 용액을 이온크로마토그래피(IC.)로 분석한 결과 MPA 26.4~32.1wt%, HF 0.8~1.02 wt%와 물로 구성되었으며 pH는 2.0~2.9 범위이고



1. Incinerator 2. Burner 3. Injector 4. Quencher 5. Downcomer 6. Cyclone 7. Absorber 8. Water fluidizer 9. 1.0 D Fan 10. Stack 11. Waste water Collector 12. Evaporator 13. Ion Exchanger 14. Discharge 15. H3PO4 tank

[그림 2] 액중배기식 소각로 및 후처리 시스템

발열량이 매우 낮아 연소성을 높이기 위해 보조연료로 아세톤을 1:1 중량비로 혼합한 후 900~1100℃에서 소각하였다. TDG 소각은 10wt%의 TDG를 물에 용해시켜 3kg/hr로 900~1,000℃에서 소각하였으며 가수분해 시 발생하는 염산을 가성소다로 중화할 경우를 모사하여 위 시료와 별도로 TDG에 염산과 가성소다를 1wt% 첨가 한 후 소각 하였다.

3. 실험결과

가. 가수분해

1) GB의 가수분해

GB는 표 1과 같이 온도증가에 따라 가수분해가 촉진되었으며 90℃에서 1시간 이상 반응하면 99.99% 이상 분해되었다. 실험결과를 1차 속도식을 적용하여 속도상수를 구하고 온도 의존성을 Arrhenius 식에

[표 1] 가성소다 용액에서 온도 및 가수분해시간에 따른 GB의 가수분해 효율(%)

반응 온도 (°C)	가수분해 시간(분)							
	5	15	30	60	120	140	200	240
50	-	82.27	89.91	92.68	-	98.27	-	-
70	86.55	92.81	95.68	98.69	99.75	-	-	99.92
90	93.57	98.35	99.72	99.99	-	99.99	-	-

[표 2] 분해효율 달성에 소요되는 반응시간

반응 온도 (°C)	1/T(K) × 10 ³	ln k	k(min ⁻¹) × 10 ³	폐기물 달성 소요시간(h)	
				99%	99.99%
50	3.096	-4.51530	10.940	7.0	14.0
60	3.003	-3.84940	21.293	3.6	7.2
70	2.915	-3.22233	39.862	1.9	3.9
80	2.833	-2.63079	72.022	1.1	2.1
90	2.755	-2.07184	125.954	0.6	1.2

대입하여 도시한 결과 좋은 직선성을 보여주었다. 따라서 온도에 따른 가수분해 소요시간을 예측한 결과 99.99% 이상 분해되는 반응조건은 표 2와 같이 80℃에서 2시간, 90℃에서 1.2시간 이상이었으며 분해생성물은 isopropylmethyl phosphonate(iMPA) 이었다^[7].

2) HD의 가수분해

HD를 90℃ 물에서 10~20wt%를 주입하여 1.5시간 반응 한 후 상온에서 가성소다 수용액을 2.01 당량 주입하고 30분간 추가 반응한 결과 99.99% 이상 분해되었으며 분해물질은 각각 thiodiglycol 68wt%, 1,2-Bis(2-hydroxyethylthio)ethane 8wt% 및 Bis-(2-hydroxyethylthioethyl)ether 24wt% 이었다. HD는 용해도가 매우 작아 물에 넣으면 물 아래층으로 분리됨에 따라 분해를 촉진하기 위해 용해도를 증가시키는 것이 중요하였다.

농도 변화(10, 15 및 20wt%)에 따른 가수분해 결과는 표 3과 같이 모든 농도에서 1시간 후 99.9% 까지 분해되었고 반응시간을 2시간 이상 증가시켜도 분해효율은 크게 증가하지 않았다. 한편, 가수분해 시 생성되는 HCl에 의한 역 반응으로 HD가 재생될 가능성을 배제하기 위하여 반응 후 상온에서 가성소다를 주입한 결과 분해율이 미세하게 증가하였으나 21시간 경과해도 분해율의 큰 변화는 없었다. HD의 가수분해는 용해도에 크게 의존하며 온도뿐만 아니라 교반기 형태와 교반속도에도 큰 영향이 있으므로 교반방법을 개선하면 분해시간을 감소시킬 수 있다^[8]. 본 연구는 Corning사 제품의 자석식 교반기에서 3mm의 교반막대를 이용하여 최대속도에서 실험하였으나

[표 3] 농도에 따른 HD의 가수분해율(%), 90℃

HD (wt %)	가수분해 시간(hr)						
	90℃에서 가수분해			가수분해 후 상온에서 가성소다 첨가			
	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	-	21
10	99.990	99.992	99.993	99.991	99.993	-	99.997
15	99.981	99.987	95.990	99.988	99.994	-	99.997
20	99.970	99.975	99.985	99.992	99.993	-	99.999

향후에는 교반속도 및 교반기 형태에 따른 HD의 분해효율을 고려해야 한다.

3) DF의 가수분해

DF를 물과 1 : 1.5로 70~90℃에서 2시간 이상 가수분해한 후 I.C.로 분석한 결과 물 45%, MPA 39% 및 HF 16%가 생성되었으며 DF는 검출되지 않았다. 분해물질에는 HF가 다량 함유되어 있어 이를 소각하면 소각로 내화벽 및 후 처리장치에 부식을 일으킬 수 있으므로 물과 HF의 공비점을 이용한 반복 증류를 통하여 HF를 제거하는 한편, MPA는 최대 용해도(32.3wt%)까지 물에 용해시켜 소각하는 것이 경제적으로 판단되었다. 따라서 소각물질의 조성을 MPA 약 32%, HF 약 1% 및 물로 구성되도록 DF 가수분해 물질에 물을 주기적으로 주입한 후 증류하여 HF는 회수하고 이때 잔류하는 MPA 및 HF 혼합용액을 소각 하였다.

나. 액중배기식 소각

1) MPA 용액의 소각

MPA 용액은 강산성이며 발열량이 낮아 연소성을 높이기 위하여 보조연료로 아세톤을 1:1 중량비로 혼합하고 900~1100℃에서 소각한 결과 TOC 기준으로 99.99% 이상 파괴되었다. 배 가스(CO, SO_x, NO_x, HF)는 배출기준을 만족하였으나 백색 연기가 다량 발생함에 따라 이를 제거하기 위하여 후처리 장치에 가성소다 용액을 분무하였으나 소각용액 자체를 중화한 후 소각하는 것이 가장 효과적이었다. 이때 가성소다의 투입량은 40wt%를 초과하면 침전이 발생하여 폐액을 주입하는 인젝터 노즐을 폐쇄시킬 수 있으므로 침전이 발생하지 않는 최대수준으로 중화 후 소각한 결과 폐기효율(DRE) 99.99%를 달성하면서 백색연기가 획기적으로 감소되었다^[6].

백색연기는 인 화합물인 MPA가 고온에서 분해되어 발생한 P₂O₅이므로 중화 전, 후의 소각 발생가스로 부터 PO₄⁻³를 I.C.로 측정, 비교하였다. 표 4는 두 시료(S-1 ; MPA 용액, S-2 ; MPA 중화용액)의 폐기효율을 THC(total hydrocarbon) 및 TOC(total organic carbon) 기준으로 측정한 것이며 표 5에 소각온도에 따른 굴뚝 배출가스를 비교하였다. HF 및

[표 4] 소각 실험결과(THC 및 TOC 기준)

소각 시료	S-1		S-2	
	THC (ppm)	TOC (ppm)	THC (ppm)	TOC (ppm)
W _{in}	9,210	350,700	7,371	-
W _{out}	0.205	9.5	0.144	-
DRE(%)	99.998	99.997	99.998	-

절할 수 있었다. pH 조절은 뷰렛에 10몰 가성소다 용액을 넣고 유량계를 부착하여 일정량의 가성소다 용액을 물 유동층 장치에 주입한 다음 순환수의 pH를 자동 측정하였으며 시간에 따른 순환수의 pH와 배가스 중 SOx 농도를 측정, 비교하였다. 실험결과 순환수의 pH를 4이상 유지하면 SOx 농도를 100ppm 이하로 감소시킬 수 있었다. 한편, TDG에 염산과 가성소다를 1wt% 첨가 후 소각 한 결과 DRE에 미치는 영향은 없었다.

[표 5] 굴뚝 배출가스의 비교

연소량 (kg/hr)	소각 온도 (°C)	대상 시료	굴뚝가스 농도				m
			CO (ppm)	NOx (ppm)	HF (ppm)	PO ₄ ⁻³ (mg/l)	
6.6	912	S-1	0	71	S-1	S-1	1.53
		S-2	1	70			
	1056	S-1	5	91	:0.49	:86.7	1.32
		S-2	6	96	S-2	S-2	
	1124	S-1	7	120	:0.17	:2.18	1.22
		S-2	6	124			

S-1 : MPA 용액

S-2 : MPA 중화용액, m : 과잉공기비

PO₄⁻³의 농도는 MPA 용액을 3.36kg/hr로 3.5시간 소각하면서 굴뚝가스를 가스 포집병에 포집하여 실험 종료 후 분석하였으며 소각온도 범위에서의 평균농도를 나타낸다.

2) TDG 용액의 소각

10wt%의 TDG를 물에 용해시켜 3kg/hr로 900~1,000°C에서 소각한 결과 DRE는 99.99% 이상 달성되었으나 황 화합물(SOx)이 최대 300ppm 발생하였다^[10]. 따라서 SOx 농도를 대기 배출기준(100ppm) 이하로 감소시키기 위한 실험결과 후처리 시스템 중 유동층 열교환기에 가성소다 용액을 순환시키는 것이 가장 효과적이었으며 여기서 순환용액의 pH를 조절함으로써 SOx 농도를 허용기준 이하로 용이하게 조

3) 폐수처리

소각실험결과 TDG는 소각이 용이하였으나 MPA는 많은 문제점을 발생시켰다. MPA 용액을 6kg/hr로 3.5hr 소각 한 후 폐수가 가장 많이 발생하는 quencher 용액을 분석한 결과 표 6과 같이 pH, 총인 및 불소가 모두 폐수 배출기준을 초과하였다. MPA 용액은 가성소다로 40wt% 까지 중화(S-2 시료)하여 소각하는 경우에도 폐수 배출기준을 초과하였다. 이를 충족시키기 위하여 현행 법규상 가장 엄격한 공업지역인 “가” 사업장의 배출기준으로 폐수를 처리하기 위한 방법을 모색하였다. 이 경우 불소 및 총인의 배출기준은 각각 15mg/l 및 8mg/l 이하이다.

Quencher 순환수는 폐수처리장에 보내는 대신 중발, 농축하여 산을 분리하면 장치부식 및 폐수처리 부하를 경감시키는 동시에 인산을 회수 할 수 있다. 이 실험은 Buchi사의 R-205 회전식 증발기를 사용하여 오일 bath 온도 150°C, 플라스크 회전속도 30rpm,

[표 6] Quencher 폐수성상(6kg/hr로 3.5hr 소각)

구 분	COD (mg/l)	pH	총인 (mg/l)	불소 (mg/l)	
허용 기준*	청정 지역	40~50 이하	5.8~6.8	4 이하	3 이하
	가 지역	70~90 이하	5.8~6.8	8 이하	15 이하
MPA	S-1	11	2.0	5850	260
	S-2	11	2.8	3400	160

*기준 : 수질환경보존법 8조, 동법 시행규칙 제 8조

냉각수 순환온도 5℃에서 일정량의 폐수를 취하여 플라스크에 넣고 장치 가동 후 응축액을 일정량씩 채취한 다음 잔류액에 순수로 초기량을 채워 동일한 방법으로 3회 이상 증발하였다. 인은 불소보다 증발율이 낮기 때문에 효과적으로 농축되었으며, HF는 물과 112℃에서 공비점을 형성하므로 농축 잔류액에 순수를 주입하여 반복적으로 증발 농축함으로써 불소를 효과적으로 분리할 수 있었다.

실험결과, 불산과 인산의 증발특성 차이를 이용하면 불산은 응축수로, 인산은 잔류액으로 농축, 회수할 수 있었다. 인산은 회수하여 이용하는 한편, 응축수에 함유된 불산은 이온교환수지(Purolite A-300)로 제거하였다. 이온교환수지의 장점은 재생하여 지속적으로 사용할 수 있다는 점이며 사용하기 전, 1N 가성소다 용액으로 전 처리 하였다. 응축수에 대한 수지의 평형흡착 실험은 수지 2.5ml와 응축수 100cc를 비이커에 넣고 자석식 교반기로 10 분간 교반한 후 수지 처리 전/후의 인 및 불소농도를 측정된 결과 응축수에 포함된 불소이온이 99% 이상 제거되었다. 인은 모두 회수되어 농도가 폐수 배출기준 이하로 매우 낮아 제거의 의미가 없었다. 이를 확인하기 위하여 증발수를 이온교환 수지로 처리 한 후 I.C.로 분석한 결과 PO_4^{3-} 는 검출되지 않았다.

4. 결 론

신경 및 수포작용제를 안전하게 폐기하기 위하여 작용제를 가수분해 한 후 분해물질을 소각 처리할 수 있는 2단 폐기공정을 제안하였다. 각 공정 단계에서의 분해율은 99.99% 이상을 목표로 실험조건을 정립하고 목표를 달성하였다. 이 공정은 작용제 가수분해 물질과 같이 염이 함유된 난분해성 물질을 안전하게 처리 할 수 있는 경제적인 기술로 판단된다. 주요장치는 가수분해 장치와 액중배기식 소각장치로 구성되며 상용장비로 시스템을 구성할 수 있다. 여기에 폐수 증발 및 건조 장치를 부착하면 일체형 시스템에서 작용제를 안전한 수준까지 처리하고 발생폐수를 건

조, 고형화 함으로써 폐수의 무방류 시스템을 구축할 수 있다.

TDG는 소각 시 SO_x 가 다량 발생하였으나 물유동층 장치의 순환수에 가성소다를 투입하여 pH를 조절 함으로서 감소시킬 수 있었다. MPA는 고온에서 분해하고 배가스 세정폐수를 증발, 농축하면 인산을 회수할 수 있었다. 응축수에 함유된 불소는 이온교환수지로 제거하고 최종 처리된 배출수는 작용제 가수분해 용액으로 재사용할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Chemical Weapons Convention, Organization for the Prohibition of Chemical Weapons, OPCW Home page, <http://www.opcw.nl>
- [2] Fact Sheets, The U.S. Army Chemical Materials Agency(CMA), <http://www.cma.army.mil>
- [3] Workshop on Advances in the Alternative Demilitarization Technologies, Reston, Virginia, USA, 1995.
- [4] U.S. National Research Council, "Review and Evaluation of Alternative Technologies for Demilitarization of Assembled Chemical Weapons, Washington D.C., pp.203~228, 1999.
- [5] 이종철, "화학무기 폐기기술(I)", 한국폐기물학회지, Vol. 16, No. 3, pp.205~216, 1999.
- [6] 이종철, 김상국, "액중배기식 소각로를 이용한 MPA 폐용액의 소각특성", 한국 폐기물학회지, Vol. 22, No. 8, pp.706~713, 2005.
- [7] 이용한, 이종철, 홍대식, "가성소다 수용액에서 사린의 가수분해", Korean Chem. Eng. Res., Vol. 45, No. 2, 2007. 4. 인쇄 중.
- [8] Harvey, S. P., Kolakowski, J. E., Sumpter, K. B., Szafraniec, L. L., Harley, M. V., Rohrbaugh, D. K., "Hydrolysis of 15wt% HD in Water", ECBC-TR-121, APG, U.S.A., 2000.