

폐화약류의 친환경적 폐기처리 공정의 최근 현황 및 전망

김태호¹, 김덕열², 김종민^{2*}

¹동아대학교 융합과학기술학과
49315 부산광역시 사하구 낙동대로 550번길 37
²동아대학교 화학공학과
49315 부산광역시 사하구 낙동대로 550번길 37

(2023년 1월 11일 접수; 2023년 3월 8일 수정본 접수; 2023년 3월 8일 채택)

Current Status and Prospects of Eco-friendly Disposal Processes for Waste Explosives

Tae Ho Kim¹, Deok Yeol Kim², and Jong Min Kim^{2*}

¹Department of Converging Science and Technology, Dong-A University
37, Nakdong-daero 550bean-gil, Saha-gu, Busan 49315, Korea
²Department of Chemical Engineering, Dong-A University
37, Nakdong-daero 550bean-gil, Saha-gu, Busan 49315, Korea

(Received for review January 11, 2023; Revision received March 8, 2023; Accepted March 8, 2023)

요 약

군에서의 폐탄약 및 제조업체에서 생산 중에 발생하는 불용화약 등 폐화약류는 지속적으로 발생되고 있다. 이들은 화재, 폭발 등을 유발하는 화약류의 위험성으로 일반 폐기물 처리 시설에서는 처리가 어려우며, 지정된 폐기처리시설에서 야외 소각 및 기폭처리를 하는 것이 고전적인 폐기처리 방법이다. 야외에서의 소각 및 기폭을 통한 폐기처리시에는 SO_x, NO_x와 같은 유해물질의 배출에 의한 대기오염, 중금속 및 난분해성 물질로 인한 토양 및 수질 오염 등 다양한 환경문제를 유발시킨다. 이러한 환경문제를 극복하기 위한 친환경적인 다양한 폐기처리 방안이 개발되고 있으며, 일부 국가에서 운영중에 있다. 본고에서는 폐화약류의 다양한 친환경적인 폐기처리 공정 및 각 공정에 있어서의 장, 단점을 소개하여 폭발성 위험물 및 유해물질 처리의 향후 연구방향을 제안하고자 한다.

주제어 : 폐화약, 환경오염, 친환경적 폐기처리, 대기오염, 수질오염

Abstract : Waste explosives such as useless ammunition discharged from the military and coproduced useless explosives during the manufacturers production process have been continuously produced. These are difficult to dispose with normal waste treatment facilities due to the dangers of fire and explosion. An open burning or an open detonation at military designated disposal facilities is a classical treatment method for the dangerous explosives. The classical method raises various environmental problems by the emission of hazardous materials. An air pollution by the emission of hazardous gases such as SO_x and NO_x, soil and water contaminations by the accumulation of non-biodegradable heavy metals, are representative pollution examples. To overcome these problems, various processes for eco-friendly waste treatment methods have been developed, and some processes have already been operated in some countries. In the current report, various eco-friendly disposal processes for waste explosives or harmful materials, and their advantages and disadvantages are documented to suggest future development directions for reducing the hazardous substances by the treatment processes.

Keywords : Waste explosives, Environmental pollution, Eco-friendly disposal, Air pollution, Water pollution

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jmkim3@dau.ac.kr; Tel: +82-51-200-7729; Fax: +82-51-200-2228

doi: 10.7464/ksct.2023.29.1.1 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 화약류의 친환경적 폐기처리 개요

지속적인 평화 정책 및 급격히 변화하는 군사기술로 탄약용 화약 및 탄약자체의 사용량은 감소하고 있지만 이에 따른 탄약의 장기저장은 폐탄약의 축적을 유발하고, 또한 탄약을 포함하는 무기류를 생산하는 산업체에서도 제조과정 중에 발생하는 불용화약은 지속적으로 존재하여 군 및 산업체에서 발생하는 폐화약류는 증가하고 있는 추세이다[1].

폐화약류의 장기 보관은 안전상 문제가 있어 가능한 즉시 폐기처리 하여야 하며, 폐탄약을 안전하게 해체, 분해 및 폐기하여 탄약의 고유성능을 무력화시키는 일련의 폐기처리 작업 과정을 탄약 비군사화(munitions demilitarization)라고 부른다[2,3].

탄약 및 무기류의 폐기처리 작업은 화재와 폭발할 수 있는 위험성이 있기 때문에 일반 생활 폐기물 시설에서의 폐기처리는 어려우며 일반적으로 지정된 군부대 폐탄처리장에서 야외 소각(open burning) 및 기폭(open detonation) 처리하도록 법규에서도 규정되어 있다[4].

야외 소각 및 기폭 폐기처리 작업시에는 불완전 연소에 의한 유해가스 대기배출, 중금속 등에 의한 토양 및 수질 오염 등 환경오염이 발생한다[5]. 또한 환경오염에 대한 인식 확산으로 화약 물질에 의한 토양, 지하수 및 하천의 오염은 사회적 문제로 대두되고 있는데, 특히 군용 화약으로 가장 많이 사용되는 TNT와 RDX는 미국 환경청이 C급 발암물질로 지정 할 정도로 인간의 건강에도 유해한 물질이다[6].

야외에서 다양한 화약류를 소각 및 기폭 폐기처리시 일반적인 유해물질 배출농도를 Table 1에서 요약하였다[7].

Table 1에서와 같이 폐화약류 폐기처리과정에서는 CO, NO_x와 같은 유해가스가 발생하고 무기류 및 탄약의 cartridge에 함유된 Pb, Zn 등과 같은 중금속에 의해 토양 및 수질오염이 발생한다. 이러한 환경문제 해결을 위한 비군사화 기술은 세계적으로 관심을 받고 있으며 친환경적인 폐기처리 공정이 기본적으로 필요하다. 현재 우리나라에도 군 및 산업체에서의 소각시설, 용융시설, 탄약 분해시설 등 일부 친환경적인 비군사화 시설을 운영하고 있으나, 발생하는 모든 폐화약류를 처리하지 못해 일부분의 탄약 및 화약에 대해서만 사용되고 있다[8].

본고에서는 현재 국내외에서 운영되거나 개발되고 있는 폐화약류 및 폐탄약의 비군사화 처리공정을 친환경적 관점에서 소개하고자 하며, 이러한 처리법을 기반으로 하여 여타의 위험물질 처리에 대한 공정적인 측면의 정보도 제공하고자 한다.

2. 화약류의 친환경적 폐기처리 공정 현황

2.1 기폭챔버

야외 기폭처리(open detonation)시 소음, 진동, 유해가스 대기배출 등의 환경오염 문제를 해결하기 위해 폐탄약을 전처리 없이 챔버내에서 기폭(detonation) 처리하는 기폭챔버(contained detonation chamber) 공정이 있는데 그 간단한 구조를 Figure 1에서 나타내었다[9].

Table 1. Hazardous substance discharge concentration of various waste explosives (3 g of standard sample).

Hazardous substance	Criteria	TNT	Comp B	Flare	20 mm Cartridge	155 mm Projectile
CO	200 (ppm)	53,333	28,774	31,252	45,298	40,067
NO _x	100 (ppm)	2,361	1,281	8,454	-	8
Pb	5 (mg/Nm ³)	-	-	97.1	2,663	0.26
Cu	10 (mg/Nm ³)	-	-	-	97,855	12.9
Zn	10 (mg/Nm ³)	-	-	-	6,040	5.5
Dioxin	5 (ng-TEQ/Nm ³)	-	-	6.51	-	-

ng-TEQ : Nano gram-Toxicity Equivalency Quantity.

Nm³ : Normal volume (Volume at standard Condition of 0 °C, 101.325 kPa).

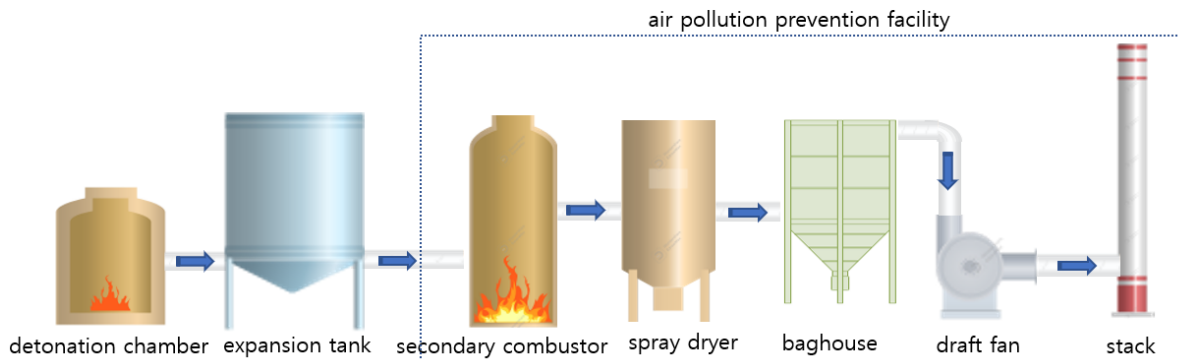


Figure 1. A schematic of contained detonation chamber systems. The figure was redesigned to give better understandings based on the reference [9].

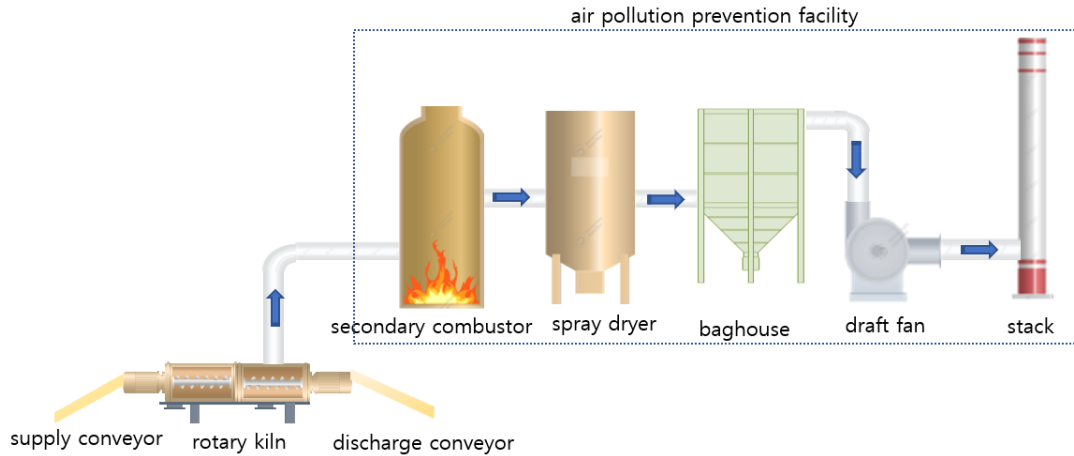


Figure 2. A schematic of rotary kiln systems. The figure was redesigned to give better understandings based on the reference [16].

기폭챔버는 일반적으로 내구성과 충격에 강한 steel로 만들어지며, 충격완화를 위하여 내부 및 외부의 2개의 분리된 층으로 구성한다. 2개의 층 사이에는 규사로 채워 폐탄약 기폭시 소음 및 진동을 저감할 수 있도록 설계하고 또한 규사의 완충은 기폭파편의 비산을 예방할 수 있다. 기폭시 발생하는 과압은 steel로 만들어진 확장탱크(expansion tank)에서 해소시킨다 [10].

대기오염방지시설(air pollution prevention facility)에서는 폐탄약의 기폭시 발생하는 일산화탄소 및 수소가스와 같은 고농도의 가연성 물질을 연소하여 제거한다. 연소장치는 일반적으로 900 °C 내외의 온도에서 2초 이상 유해 가스가 유지되는 조건으로 설계하여 수소가스와 일산화탄소를 각각 물과 이산화탄소로 전환시킨다. 흑색화약의 경우에는 황(S) 성분이 10% 포함되어 있어, 기폭시에는 황산화물(SO_x)과 같은 산성가스가 발생하여 수산화나트륨 수용액을 분무하여 산성가스를 중화하여 흡수시킨다[11].

탄약의 신관 및 뇌관에 사용되는 기폭약(initiating explosive)에는 납(Pb) 등의 중금속이 포함되어 있기 때문에 폐기처리 과정에서 발생하는 중금속을 포집하기 위해서 대기오염방지시설에 원심력 집진기를 설치하며, TNT 등이 포함된 탄약 폐기처리시에는 니트로기(-N₂)에 의해 질소산화물(NO_x)이 발생하기 때문에 이를 제거하기 위해 선택적 촉매환원장치를 설치한다 [11,12].

기폭챔버의 장점은 소구경 탄약부터 대구경 탄약, 화학탄까지 처리 품목에 특별한 제한이 없으며 챔버의 용량에 따라 이동식으로도 운영 가능하다. 특히 조명탄과 같은 화학탄 처리시에는 조명탄의 분해와 같이 노동집약적이고도 위험한 전처리 작업이 필요없이 안전하고 간편하게 폐기처리 할 수 있는 장점이 있다. 단점으로는 폐탄약을 챔버내에 수작업으로 투입하고 폐탄약을 기폭시키는 뇌관을 연결하는 등의 기폭준비 작업이 필요하며, 폐기처리 이후에도 다음 작업을 위해 고철 등을 수거해야하므로 연속적인 폐기처리는 어렵고, 기폭챔버 내부 철판의 손상에 따라 철판의 주기적 교체가 필요하여 이로 인한 유지비용이 많이 소요된다[13].

2.2 소각

폐화약류의 폐기처리를 위해 연구 개발되고 있는 기술 중 효율적, 안정적, 친환경적인 방법으로 소각(incineration) 폐기처리 공정이 있다. 열분해의 방법에 따라 내폭형 및 내열형으로 구분되며, 소각로 구조에 따라 고정식 소각로(static kiln)와 회전식 소각로(rotary kiln)으로 분류된다. 국내에서는 내폭형 회전식 소각로가 군에서 운용되고 있는데, 20 mm 이하의 소구경 탄약 및 다양한 화공품을 처리할 수 있다[14,15].

고정식 소각로는 소구경탄 등 소형 품목의 폐기처리에 제한적으로 사용하며, 회전식 소각로에 비해 설치 비용 및 면적이 적게 소요되는 장점이 있다. 일반적으로 소각 폐기처리의 경우에는 회전식 소각로를 사용하며, 현재 미국에서 사용하고 있는 회전식 소각로의 개략도를 Figure 2에 나타내었다[16].

폐기처리 품목은 컨베이어를 통해 회전식 소각로에 자동공급하고 공급된 폐기처리 품목은 회전식 소각로 내부에서 열분해하여 폐기처리 한다. 폐기처리 이후 고철과 재(ash)는 자동으로 배출되도록 설계한다. 회전식 소각로는 steel 재질로 회전원통이며 소각로 내부온도는 850~1600 °C로 액체 및 고체 폐기물을 소각 처리할 수 있으며, 연소효율이 높고 설계가 간단한 장점이 있다[17].

소각시 발생하는 유해가스 및 중금속 등은 대기오염 방지시설에서 처리하며, 2차 연소로(secondary combustor), 반건식 여과집진기(spray dryer), 집진기(baghouse), 송풍팬(draft fan), 배기구(stack)로 구성된다[18].

2차 연소로에서는 내부온도 800 °C 이상으로 하여 유기물과 일산화탄소(CO)를 물과 이산화탄소(CO₂)로 배출시킨다. 폐탄약에 포함된 중금속 및 미립자는 반건식 여과집진기 및 집진기에서 포집하며 분진이 제거된 공기는 송풍팬을 통해 외부로 배출한다[19].

이와 같이 회전식 소각로의 경우 소각로 자체 및 대기오염방지시설 설치 등 설치면적이 많이 소요되어 설치 비용이 많이 드는 단점이 있다[18].

2.3 고온 플라즈마 처리

플라즈마(plasma) 자체는 기술이라 할 수 없으며, 물질의 제 4상태를 지칭하는 용어이다. 기체상태에서 지속적으로 열 및 에너지를 가하게 되면 기체분자는 전자와 이온으로 분리되는데 이러한 상태를 플라즈마라고 한다[20].

고온 플라즈마는 기존의 소각 방법에 비해 고온으로 질소산화물 및 황산화물과 같은 산성기체의 발생량 조절이 가능하고, 다이옥신을 포함한 불완전 연소생성물의 발생을 최소화가 가능하여 기존 소각처리에 비하면 더욱 친환경적인 폐기처리 방법이다[21]. 고온 플라즈마를 이용하는 공정은 에너지 밀도와 온도가 높아 소형 반응기에서도 많은 폐기물을 처리할 수 있고, 열원으로 연료를 연소시키지 않으므로 배기가스 발생량도 적다. 이러한 장점으로 인해 현재 군 및 산업체에서는 조명탄, 연막탄 등 화학탄에 대해 고온 플라즈마 방법을 이용하여 친환경적 폐기처리를 시도하고 있으며, 미국을 포함한 여타 국가에서는 상용화도 되고 있다. 현재 운영중인 플라즈마를 이용한 비군사화 공정의 개략도를 Figure 3에 나타내었다[22].

Steel 재질로 된 용융로 내부에서 음극과 양극으로 구성된 2 개 이상의 전극에서 개시 전압(ignition voltage: 보통 50 kV)을 인가함으로 아크(arc)를 발생시키고 이를 플라즈마 발생가스(N₂)를 이용하여 고온의 플라즈마 제트를 형성한다. 고온 플라즈마 제트 중심부 온도는 10,000 K 이상이고 제트 외면 온도는 1,000~3,000 K 영역이기 때문에 고온의 열분해 영역을 효과적으로 형성할 수 있다[23].

용융로에서 처리된 슬래그(slag)는 열처리로에 연동된 컨베이어를 통하여 자동으로 배출하며, 발생된 유해가스 처리공정은 기폭챔버 및 소각 폐기처리 방법의 대기오염방지시설 시스템과 유사하다.

2.4 유동층 소각처리

유동층 소각로(fluidized bed incinerator)는 하부에 유동매체인 모래를 충전하고 하부로부터 고온가스를 불어넣어 물이 끓는 것처럼 유동층을 형성한다. 원론적 측면에서 유동층이 미리 가열된 상태에서 폐화약을 공급하므로, 폐화약을 순간적으로

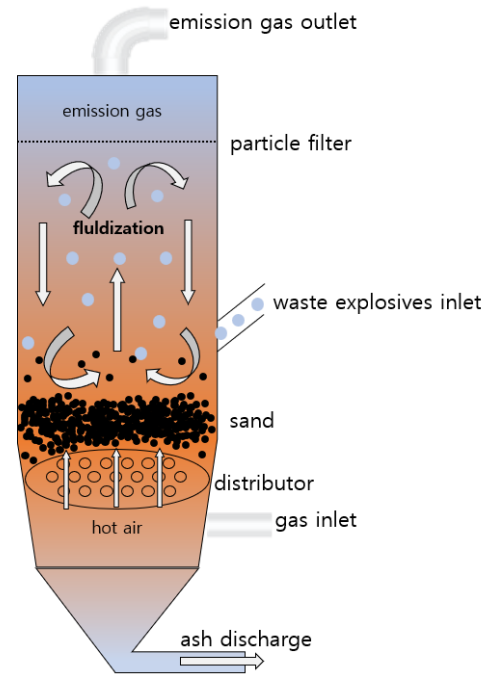


Figure 4. A schematic of fluidized bed incinerator systems. The figure was redesigned to give better understandings based on the reference [26].

연소하여 처리할 수 있는 공정이다[24].

회전식 소각로를 이용한 소각공정에 대해 이미 많은 연구가 진행되었지만 유동층 소각로가 가진 완전연소 처리효율(유동층: 400~600 kg/m²h, 회전식: 연소율은 300~400 kg/m²h)에 대한 장점으로 인하여 최근 많은 연구가 유동층 소각로에 집중되고 있다. 이러한 장점이 발생하는 이유는 유동층의 폐기물이 접촉할 수 있는 외부공기의 비율이 논리적으로 크기 때문으로 사료된다. 또한 반응기 내부 충전 입자와의 혼합 효과를 이용하여 연소시 발생하는 열에너지를 효율적으로 분산시켜 고열이나 과압발생이 적어 운영측면에서도 안전하다[25].

전형적인 유동층 소각로의 구조를 Figure 4에서 나타내었다[26]. 일반적으로 유동층 소각로의 연소온도는 700~800 °C인

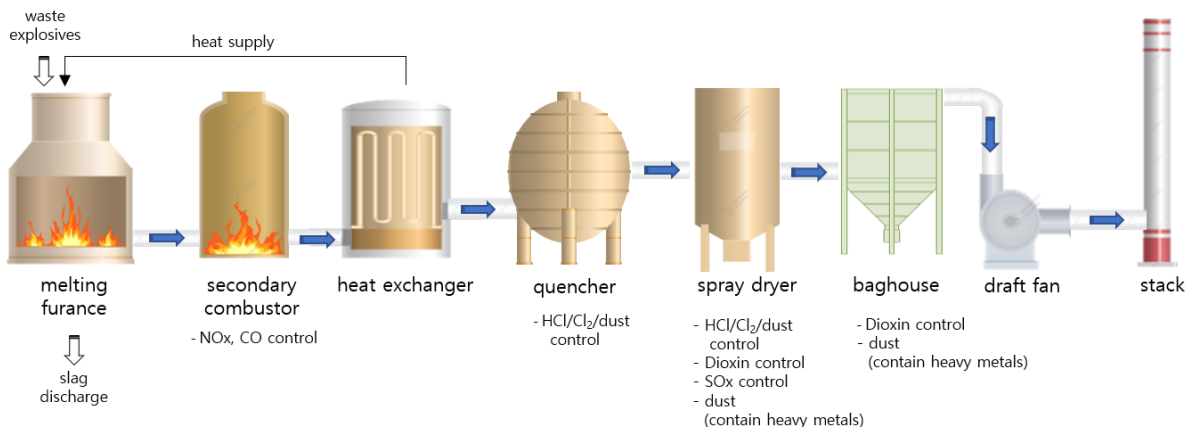


Figure 3. A schematic of plasma ordnance demilitarization systems. The figure was redesigned to give better understandings based on the reference [22].

데, 고온에서의 안정적인 연소는 NO_x와 같은 유해가스 배출을 회전식 소각로에 비해 최소화할 수 있으며, 암모니아(NH₃)를 첨가하면 NO, NO₂와 같은 질소산화물(NO_x)을 질소(N₂)로 환원시켜 배출하므로 유해가스 배출을 더욱 더 최소화할 수 있다.

Steel 재질의 실린더 내부에는 유동매체로 내부 부피 기준 40% 정도로 모래가 충전되며(입자크기: 0.18~0.30 mm), 이러한 유동매체의 부피는 다공의 분사판을 통해 공급된 뜨거운 공기에 의하여 유동이 쉬운 조건이다. 충전된 모래는 유동층을 형성하며 내부의 고온이나 고압에 대한 실린더 완충역할도 한다. 하부에는 1.5 bar의 압력 및 600 K의 고온의 공기를 0.5~4.5 m/s의 속도로 공급하여 실린더 내부에 유동층을 형성한다. 실린더 중간부분으로(inlet) 처리대상인 폐화약류를 공급하고 실린더 내부에서 연소하여 상부로 연소가스가 배출하고 하부로는 재(ash)를 배출한다[26].

슬러지가 모래에 정착된 상태로 배출부로 이동하는 경우에는 진동에 의해서도 정착성 슬러지와 모래가 분리되지 않아 배출부가 막히는 현상이 발생한다. 즉, 금속분말이 포함된 화약의 경우 소각 중 경금속염의 슬러지가 형성되어 배출부가 막히게 때문에 금속분말이 포함된 폐화약류는 처리가 어렵다. 또한 슬러지와 분리가 되지 않은 모래는 재사용이 어려워 주기적으로 보충해야 하는 단점도 있어 주로 순수한 폐화약만을 처리하는 공정으로 유익하다[27].

2.5 화학적 산화처리

연소는 유기화합물이 산화되는 급속 산화반응의 한 형태이며 산화를 이용한 폐기처리 기술은 독성이 감소된 생성물을 만들기 위한 기술이다. 즉 산화반응의 목표는 무기물화이며 유기화합물을 이산화탄소, 질소, 물과 같은 무기 화합물로 전환하기 위함이다. 화학적 산화공정은 TNT와 같은 니트로계열의 난분해성 물질의 정화에 많이 이용되고 있다[28].

직접산화법은 화학적 산화의 대표적인 방법이며 주로 과산화이황산(S₂O₈²⁻)의 산화력을 이용하여 폐기처리 한다. 보통 상

Table 2. Reaction formula of direct chemical oxidation

Reaction name	Reaction formula
Direct chemical oxidation	S ₂ O ₈ ²⁻ ↔ 2SO ₄ ⁻ (sulfate radical anion) S ₂ O ₈ ²⁻ + organic → 2HSO ₄ + CO ₂ + H ₂ O + inorganic residues

온, 저압의 조건에서 진행하며 과산화이황산이 분해되어 생성되는 황산라디칼 음이온의 경우 분해 반응에는 직접적인 영향을 주지 않지만 반응을 시작하게 하는 개시제 역할을 한다. 산화반응시 유기물은 물과 이산화탄소로 변화하며 소모된 산화제는 재생하여 사용하므로 2차 폐기물을 최소화할 수 있다. 기초 반응식은 Table 2에 나타내었다[29,30].

가수분해 용기, 공급탱크, 3단 연속 교반 반응기, 오프가스 처리탱크, 산화제 보충탱크 및 서지탱크로 구성된 직접 화학적 처리공정의 간략도를 Figure 5에 나타내었다[30].

스테인레스강 재질의 전처리 반응기에서는 폐기처리 대상물질을 가수분해한다. 반응기 내부는 5 kW의 수증히터를 사용하여 내부온도를 150 °C를 유지할 수 있게 하며, 벽면은 가수분해중의 압력발생을 충분히 수용할 수 있도록(200 psig 압력수용) 충분한 두께로 설계한다. 반응기 내부압력이 120 psig 이상일 경우 이상과압을 자동으로 배출시키기 위한 안전밸브 또한 설치한다. 폐기처리 대상 물질은 연동펌프를 통하여 각 탱크로 이송하며, 역류를 방지하기 위하여 각 반응기는 밸브를 설치한다[31].

Figure 5에서 가수분해된 용액은 연동펌프를 통해 스테인리스강으로 만들어진 공급탱크로 이송되며 여기서 과량의 산화제가 공급된다. 그리고 3개의 연속식 반응기로 이송되어 산화반응을 진행한다. 이들 반응기는 폭발의 위험이 없어 내산성 재질의 유리를 사용하고 있으며 내부 부피는 17 L 정도이다. 폐기처리 효율을 최대화하기 위해 유속과 체류 시간을 제어할 수 있도록 구성하고 있으며, 혼합속도 100 rpm 이상으로 50 min 이상으로 혼합하여 다음반응기로 이송한다. 각 연속식 반응기에서 배출된 가스는 펌프를 통해 off gas 탱크로 이송하여 처리

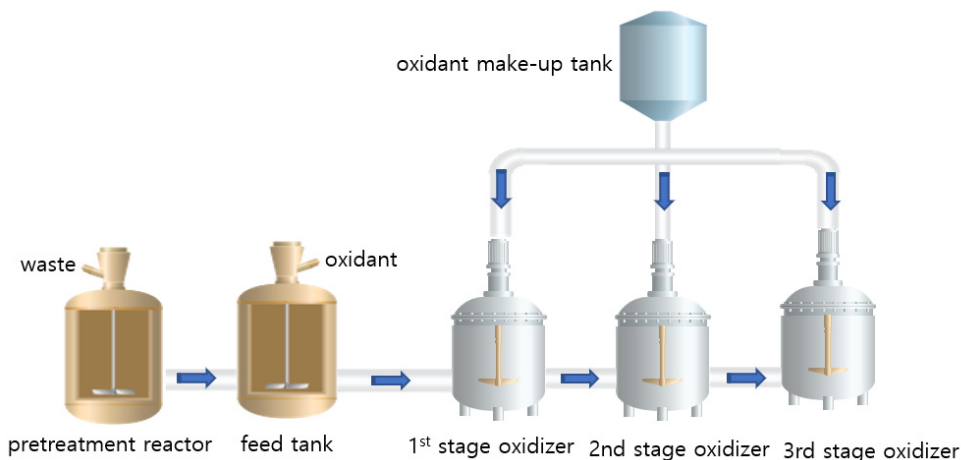


Figure 5. A schematic of direct chemical oxidation integrated systems. The figure was redesigned to give better understandings based on the reference [31].

한다[31].

화학산화법에서 사용하는 산화제인 과산화이황산은 군용화약에서 가장 많이 사용하는 TNT를 포함한 거의 대부분의 유기물을 분해할 수 있어 화약류뿐만 아니라 많은 유기물들의 친환경 처리에도 응용이 가능하다. 폐기처리 과정에서 유해가스 발생이 없어 오염물의 폐기처리 장치도 많이 필요하지 않아 공정 운전비용이 절감될 수 있는 장점이 있다[30].

2.6 생물학적 처리

회전식 소각로, 유동층 소각로 등의 폐기처리 방법은 설치비용이 많이 소요되며 NO_x와 같은 유해가스 배출 등 환경문제가 여전히 존재한다. 생물학적 처리공정은 별도의 폐기처리 시설이 필요없으며 소각시 유해가스 배출도 없어 현시점에서는 중 가장 환경친화적인 공정이다[32].

생물학적 처리공정은 생명체가 가지는 대사 반응을 이용하여 유해물질을 분해하는 방법으로 식물을 이용하는 식물학적 처리방법(phytoremediation)과 미생물이나 균류를 이용하는 생물정화 처리방법(bioremediation)으로 분류된다[33].

식물학적 처리방법은 중금속을 함유하지 않는 유기성 유해물질의 분해에 많이 사용되는데, 이는 식물의 자정작용만으로는 중금속의 분해가 불가능하기 때문이다. 친환경적이며 처리비용이 낮다는 점에서 가장 큰 장점을 가지고 있으나, 단점으로는 자연적인 자정작용을 이용하는 방법이기 때문에 시간당 처리 능력이 높지 않은 편이며 특히 TNT와 같은 방향족 난분해성 물질 폐기처리가 어려운 문제가 있다[34]. 생물정화 처리방법도 식물학적 처리방법과 장단점이 거의 비슷하나 군용 화약에서 가장 많이 사용되고 있는 TNT의 처리율은 식물학적 처리방법보다 높으며 용액 혼합물보다는 토양혼합물 처리에 용이하여 폐화약으로 오염된 토양의 Revival에 방법론을 제시한다[35].

TNT로 오염된 토양을 생물정화 처리하는 방법에는 soil slurry 반응과 soil column 반응의 두가지 방법이 있으며 soil slurry 반응기와 soil column 반응기의 구조를 각각 Figure 6과 Figure 7에 표현하였다[36,37].

Soil slurry 반응기의 경우 내부부피는 보통 1 L이고 실제 운영하는 최대 부피는 500 mL로 전체반응기 부피의 50% 정도를 처리반응에 사용하여 생물호흡과 기포발생에 의한 부작용을 줄인다. 반응기의 내부부피를 확대해도 이러한 부피비를 이용하여 생물정화 가능한것으로 사료된다. 반응기 내부온도는 미생물의 성장에 유리한 30 °C를 유지하며 air supply 장치를 통해 외부 공기를 반응기에 공급한다. TNT로 오염된 토양, 미생물 배지로 con steep liquor (CSL, 1.0%), NH₄Cl (0.025%), 및 polyoxyethylene sorbitan mono-oleate (제품명: Tween 80, 0.1%)을 반응기에 공급한 후 교반모터를 이용하여 TNT로 오염된 토양 슬러리를 교반하며 반응중 TNT의 농도, 미생물 성장, 용존 산소, pH를 주기적으로 측정하여 처리효율을 모니터링 한다 [37].

Soil column 반응기의 경우 부피는 보통 370 mL이고 미생물과 혼합된 약 290 mL의 토양을 투입하여 전체 반응기 부피의



Figure 6. A schematic of TNT soil slurry reactor systems. The figure was redesigned to give better understandings based on the reference [36].

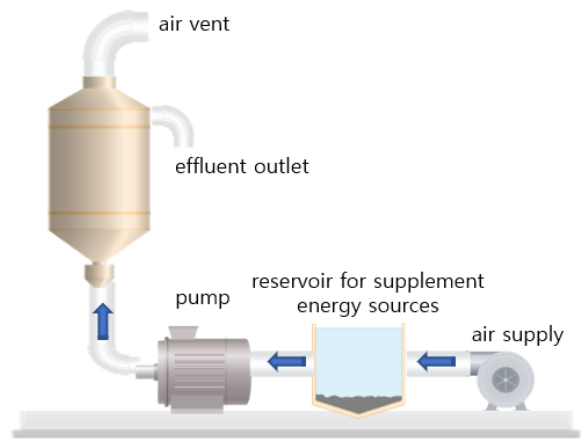


Figure 7. A schematic of TNT soil column reactor systems. The figure was redesigned to give better understandings based on the reference [37].

80% 이상을 사용하며, 구조를 살펴보면 supplemental sources와 공기를 공급하는 부분과 배출하는 부분이 있다. 미생물 배지를 위해 CSL (1.0%), NH₄Cl (0.025%), 및 Tween 80 (0.1%)을 공급하고 TNT의 농도, 미생물 성장, 용존 산소, pH를 주기적으로 측정한다[37].

2.7 가수분해처리

기폭약(primary explosive)은 탄약 내 폭약을 기폭 시켜주는 역할을 하는 뇌관(primer) 및 신관(fuse)에 들어가는 아주 예민한 화약이다. 관련 법규에서는 기폭약을 폐기처리 할 경우에는 톱밥에 묻혀 야외에서 연소 처리하도록 규정되어 있다[38].

예민한 화약인 기폭약을 톱밥에 묻혀 연소처리하는 것은 위험한 방법이며 안전하게 기폭약을 폐기처리하기 위해 국내 방산업체 등에서는 수산화나트륨을 이용하여 가수분해하여 폐기 처리하고 있다[38]. 가수분해하여 폐화약을 폐기 처리하는 방법은 HMX(1,3,5,7-Tetranitro-1,3,5,7-tetraoctane) 및 RDX(1,3,5-Trinitro-1,3,5-triazinane), TNT(2,4,6-Trinitrotoluene)와 같은 고폭화약(high explosive)에도 적용 가능하다[40].

일반적으로 가수분해를 이용한 방법은 처리하고자 하는 폐

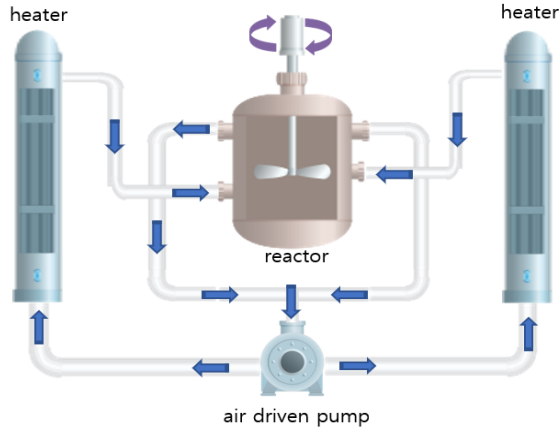


Figure 8. A schematic of HMX hydrolysis reactor systems. The figure was redesigned to give better understandings based on the reference [41].

화약의 양보다 최소 5배이상의 가성소다(weight of a 10%) 용액을 투입하여 혼합 후 16시간 이상 유지한다[38]. 100~150 °C 에서 반응속도가 빠르며 아질산나트륨, 질산염, 암모니아 등과 같은 반응생성물이 만들어진다. 그러나 많은 양의 가성소다 용액 사용으로 인한 폐수처리 시설을 확보해야 하는 단점이 있다[41].

HMX(1,3,5,7-Tetranitro-1,3,5,7-tetrazoctane)의 가수분해 반응기의 간략도를 Figure 8에 표현하였는데, 분해반응기의 온도설정과 대상물질의 환류를 유도하는 간단한 회분식 반응기를 채용하고 있는데[42], 연속식 공정에서의 처리방법은 아직 보고되고 있지 않고 있다.

2.8 전해질 파괴처리

기폭약으로 많이 사용되고 있는 아지드 납(lead azide, Pb(N₃)₂)의 경우 가수분해 방법 이외 전해질 파괴 방법(electrolytic

Table 3. Reaction formula of anode and cathode in lead azide

Reaction name	Reaction formula
Cathode	$Pb^{++} + 2e^{-} \rightarrow Pb^{0}$ $4H_2O + 4e^{-} \rightarrow 2H_2 + 4OH^{-}$
Anode	$2N_3^{-} \rightarrow 3N_2 + 2e^{-}$ $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^{+} + 4e^{-}$

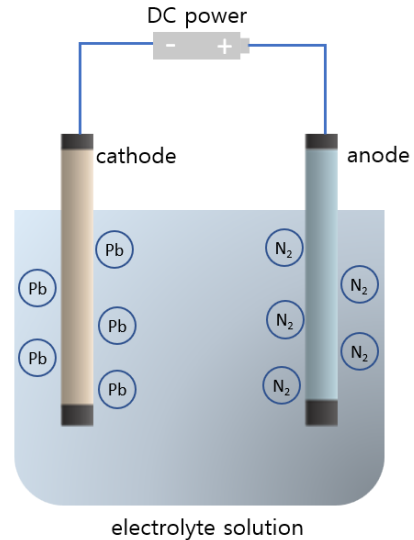


Figure 9. A schematic of Lead Azide electrolytic destruction systems. The figure was redesigned to give better understandings based on the reference [43].

destruction)을 사용하여 친환경적으로 폐기처리 가능하다. 아지드 납 수용액을 전기분해하여 음극에서는 납을 회수하고 양극에서는 질소를 방출시켜 폐기처리하는 방법이다. 이 과정의 반응식을 Table 3 및 Figure 9에서 공정의 간략도를 나타내었다[43].

Table 4. Eco-friendly disposal processes and their advantages and disadvantages in the waste explosives treatment

Method	Advantages	Disadvantages
Detonation chamber	- Reduction of detonation noise and vibration - Blocking of fragments	- Impossibility of continuous disposal - Periodic replacement of steel inside the chamber → increase of maintenance cost
Static kiln	- Less cost and installation area compared to rotary kiln	- Impossibility of continuous disposal - Restriction on disposal items (Small items can be disposal) - Pre-work needed
Rotary kiln	- Continuous disposal is possible	- Installation cost and area excessive required - Pre-work needed
High temperature plasma	- Complete decomposition - Mass disposal	- Restriction on disposal items (Chemical ammunition can be disposal)
Fluidized bed incinerator	- Less harmful gas emission	- Ammunition containing metal powder cannot be disposal
Direct chemical oxidation	- Waste treatment facility not required - Mixture can be disposal	- Air pollution emission facility not required
Biological disposal	- Waste treatment facility not required - Low disposal cost	- Heavy metal cannot be disposal - Low disposal capacity
Hydrolysis	- Waste treatment facility not required	- Waste water treatment facility required
Electrolytic destruction	- Waste treatment facility not required	- Low disposal capacity

전해액은 농도 10~20%의 수산화나트륨을 사용하며 0.2~0.6%의 로진 분말 및 약 5% 정도의 주석산칼륨나트륨(potassium sodium tartrate)을 전해액에 첨가하면 전극 및 용액에서의 산화납의 생성 억제가 가능한데, 온도 180 F (82.2°C), 전압 2.3~3.0 V (표준환원전위 -0.12V), 전류 1,000~3,000 A의 반응조건에서 납의 음극에서 회수율이 높다. 참고문헌의 경우 이러한 조건에서 시간당 10~30 파운드의 작은 양을 처리할 수 있어 많은 양의 폐화약을 처리할 수 없는 단점이 있지만[43], 일반적인 전기화학 환원과 유사하게 전극의 종류, 숫자, 면적 등을 조절한다면 이러한 단점은 극복이 가능하다 사료된다.

이상으로 폐화약류의 전반적인 처리법을 진단하였는데, 소개한 폐화약류 처리공정에 대한 공정운영 및 친환경측면의 장단점을 Table 4에 요약하여 나타내었다.

3. 결론 및 전망

탄약의 장기저장에 따른 불용탄약 발생 및 산업체 제조공정 중에 발생하는 불용 화약류를 다양한 친환경적 방법으로 처리할 수 있다.

소각의 경우 소각로에서 연소시키며 발생하는 유해가스 및 분진은 대기오염방지시설을 통과하여 환경관련규정에 적합한 수치로 배출가능하다. 소각시 화재 및 폭발이 발생할 수 있기 때문에 일반 폐기물 소각로와는 다르게 내열 및 내폭 기능이 필요하다.

기폭처리 방법도 소각의 경우와 마찬가지로 특수 제작된 챔버내에서 기폭처리하며 이때 발생하는 유해가스 및 분진은 대기오염방지시설을 통과하여 환경관련규정에 적합한 수치로 배출 가능하다.

기본적인 소각로 내부에서 연소 및 챔버내에서 기폭의 기본적인 방법외에도 산화, 생물학적 처리, 가수분해, 전해질 파괴 등의 화학적/생물 공정으로 폐화약류를 친환경적으로 처리하는 방법도 있는데, 공정의 개선과 최적화를 통한 처리효율과 경제성의 제고가 여전히 필요하다.

본고에서 소개한 친환경적 폐기처리 방법도 모든 폐화약류를 친환경적으로 폐기처리 할 수는 없으며 일부 품목에 대해 제한적으로 사용되고 있다. 전쟁과 분쟁이 없어지지 않는 한 폐화약류는 끊임없이 발생할 것이며, 이러한 폐화약류를 인한 부수적인 환경오염의 해결을 위해서는 앞으로도 지속적인 연구개발이 필요할 것으로 사료된다.

References

- Lee, S. H., Baek, S. W., Moon, I., Park, J. S., and Oh, M., "Incineration Process of Double Base Propellant for Demilitarization," *Clean Technol.*, **22**(3), 191(2016).
- Lee, J. C., Park, B. S., and Go, B. N., "Analysis of the technical status of ammunition demilitization-disposal of waste and insoluble coal, how to do it," *Defense & Technology*, **2**, 35-36 (2001).
- Kim, S. H. and Han, S. H., "Review of demilitarization & disposal technics for ammunitions," *Kstee*, 126 (2009).
- Korea police., "Guns, Swords, and Explosives Safety Management law" (2021).
- Lee, J. C., Park, B. S., and Go, B. N., "Analysis of the technical status of ammunition demilitization-disposal of waste and insoluble coal, how to do it," *Defense & Technology*, **2**, 34 (2001).
- Park, J. E., Bac, B. H., "Distribution and Migration Characteristics of Explosive Compounds in Soil at Military Shooting Ranges in Gyeonggi Province," *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, **15**(6), 17-18 (2014).
- Jang, G. H., Baek, B. H., and Seo, N. S., "Eco-friendly waste ammunition demilitization development plan by applying high-temperature plasma technology," *Defense & Technology*, **400**, 114(2012).
- Lee, S. H., Baek, S. W., Moon, I., Park, J. S., Kim, H. S., and Oh, M., "Incineration for Demilitarization of Waste Cyclotol," *Journal of the KIMST*, **19**(4), 546 (2016).
- <https://frtr.gov/matrix/MEC-Contained-Detonation-Chamber> (accessed May 2022).
- Wilkinson, J., "Review of demilitarization and disposal techniques for munitions and related materials," *MASIC*, L-118, 48 (2006).
- Kim, H. J. and Park, T. J., "Eco-friendly waste ammunition sealed detonation treatment device equipped with pollution prevention device and method therefor," Korea Patent No. 10-1420167, (2014).
- Kim, S. C., Kwon, M. H., Song, G. J., and Jeong, S. G., "A Study on the Characteristics Variation of Bottom Ashes from MSWIs Using the Different Process for the Removal of NOx by Natural Aging Treatment," *Journal of KSWM*, **23**(3), 181-189 (2006).
- Kiyoshi Asahina, Ryusuke Kitamura, and Masato Katayama, Tsuyoshi Imakita, Masaya Ueda, "Study on controlled detonation chamber system of chemical weapons : A study on destruction efficiency of chemical warfare materials by controlled detonations," *Sci. Tech. Energetic Materials*, **68**(2), 41-47 (2007).
- Lee, S. H., Baek, S. W., Moon, I., Park, J. S., and Oh, M., "Incineration Process of Double Base Propellant for Demilitarization," *Clean Technol.*, **22**(3), 191 (2016).
- Kim, H. S., "Basic Technologies for the Development of High Explosives," *Korea Chem. Eng. Res.*, **44**(5), 441-442 (2006).
- Wilkinson, J., "Review of demilitarization and disposal techniques for munitions and related materials," *MASIC*, L-118, 55-56 (2006).
- Park, J. S., "A Study on the Detonation Behavior of Insensitive Explosive by Experiments and Computational Simulations," Ph.D. Dissertation, KAIST (2011).

18. EL DORADO ENGINEERING, INC., "EXPLOSIVE WASTE INCINERATOR"
19. Kim, T. H., An, I. H., and Kim, J. M., "Development of Eco-friendly Combustion Process for Waste 2,4,6-trinitrotoluene," *Clean Technol.*, **27**(3), 249-250(2021).
20. <https://ko.wikipedia.org/wiki> (accessed May 2022).
21. Han, S. H., "Large scale treatment of PFCs gases using a thermal plasma scrubber," Ph.D. Dissertation, University of Inha, Incheon (2010).
22. Jang, G. H., Baek, B. H., and Seo, N. S., "Development plan of Demilitarization for Waste Ammunition by High-temperature Plasma Technology," *Defense & Technology*, **400**, 116-118 (2012).
23. Park, H. W., Cha, W. B., and Uhm, S. H., "Highly Efficient Thermal Plasma Scrubber Technology for the Treatment of Perfluorocompounds (PFCs)," *Appl. Chem. Eng.*, **29**(1), 10-17 (2018).
24. Wilkinson, J., "Review of demilitarization and disposal techniques for munitions and related materials," *MASIC*, L-118, 58 (2006).
25. Park, S. H., "About Fluidized Bed Incinerators," *Korean Society Mechanical Engineers*, **35**(7), 622 (1995).
26. Cho, S. H., Park, C. H., Lee, J. H., Lyu, B. G., and Moon, I., "Finding the best operating condition in a novel process for explosive waste incineration using fluidized bed reactors," *Computer and Chemical Engineering*, **142**, 1-5 (2020).
27. <https://dlstudy.tistory.com/10>(accessed July 2022).
28. Camila L, Madeira., Warren M, Kadoya., Guangbin, Li., and Stanley, W., "Reductive biotransformation as a pretreatment to enhance in situ chemical oxidation of nitroaromatic and nitroheterocyclic explosives," *Chemosphere*, **222**, 1025-1032 (2019).
29. John F. Cooper., and G. Bryan Balazs., "Final Report: Fiscal Year 1997 Demonstration of Omnivorous Non-Thermal Mixed Waste Treatment: Direct Chemical Oxidation of Organic Solids and Liquids using Peroxydisulfate," *Lawrence Livermore National Laboratory*, DCO Final Report FY97, 1 (1997).
30. Park, J. H., Shin, W. M., and Lee, J. W., "Review on the TNT Disposal," *Journal of the KIMST*, **19**(1), 130 (2016).
31. John F. Cooper., and G. Bryan Balazs., "Final Report: Fiscal Year 1997 Demonstration of Omnivorous Non-Thermal Mixed Waste Treatment: Direct Chemical Oxidation of Organic Solids and Liquids using Peroxydisulfate," *Lawrence Livermore National Laboratory*, DCO Final Report FY97, 39-41 (1997).
32. Korneliusz, Miksch., and Katarzyna, Panz., "Phytoremediation of explosives (TNT, RDX, HMX) by wild-type and transgenic plants," *J. Environ. Manage.*, **113**, 85-92 (2012).
33. Kim, S. Y., Back, K. H., Lee, I. S., Bae, B. H., and Jang, Y. Y., "A Column Study on Phytoremediation of 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) Contaminated Soil," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **24**(11), 2039-2046 (2002).
34. Ensley, B. D., and Raskin, I., "Phytoremediation of Toxic Metals: using Plants to Clean up the Environment," *Wiley & Sons, New York*, 304 (2000).
35. Park, J. H., Shin, W. M., and Lee, J. W., "Review on the TNT Disposal," *Journal of the KIMST*, **19**(1), 132 (2016).
36. Ahmed Ibrahim Jessim., "Biodegradation of explosive material 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT)," *J. Bacteriol. Mycol.*, **6**(2), 116-120 (2018).
37. Park, C. W., Kim, T. H., and Kim, S. Y., "Bioremediation of 2,4,6-Trinitrotoluene Contaminated Soil in Slurry and Column Reactors," *J. Biosci. Bioeng.*, **96**(5), 429-433 (2003).
38. U.S. Environmental Protection Agency., "Recommended methods of reduction, neutralization, recovery or disposal of hazardous waste," EPA-670/2-73-053-g, 129 (1973).
39. U.S ARMY MATERIEL COMMAND., "Explosives series properties of explosives of military interest," AMCP 706-177, 196 (1971).
40. Gabriel W. and Desmare Dillard M., "DMSO/BASE HYDROLYSIS METHOD FOR THE DISPOSAL OF HIGH EXPLOSIVES AND RELATED ENERGETIC MATERIALS," United States Patent No. US 6,388,164 B1, (2002)
41. Robert L BISHOP., CARY SKIDMORE., "BASE HYDROLYSIS KINETICS OF HMX BASED EXPLOSIVES USING SODIUM CARBONATE," *Los Alamos NATIONAL LABORATORY*, (1996).
42. R. Flesner., P. DellOrco., and J.Kramer., "Pilot-Scale Base Hydrolysis Processing of HMX-Based Plastic-Bonded Explosives," *Int. J. Energetic Mater. Chem. Propul.*, **4**, 213-220 (1996).
43. U.S. Environmental Protection Agency., "Recommended methods of reduction, neutralization, recovery or disposal of hazardous waste," EPA-670/2-73-053-g, 131 (1973)
44. Polson J., "Electrolysis of Lead Azide," *Department of Army(USA)* (1979).