

총 설

고폭화약 연구의 기술 분야

김 현 수

국방과학연구소 고폭화약연구팀
305-600 대전시 유성구 조치원길 462
(2006년 8월 18일 접수, 2006년 9월 14일 채택)

Basic Technologies for the Development of High Explosives

Hyoun-Soo Kim

High Explosives Team, Agency for Defense Development, 462, Jochiwon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea
(Received 18 August 2006; accepted 14 September 2006)

요 약

이 논문은 화약연구 종사자는 물론 화학공학자들에게 고폭화약에 대한 기본적인 정보를 제공하는데 그 목적이 있다. 고폭화약 연구를 기술 분야별로 (1) 신규 에너지물질의 합성, (2) 기능성 화약 제조, (3) 복합화약 조성개발, (4) 무기체계 적용성 연구, (5) 군용 물질 해체 공정 등으로 대별하여, 고폭화약 연구의 이해를 위해 필요한 기본적인 기술분야에 대해 소개한다.

Abstract – The objective of this paper is to provide fundamental information on the subject of high explosives not only to the explosive scientist but also to the chemical engineer. Technologies for the development of high explosives are divided into 5 areas: (1) synthesis of new energetics, (2) preparation of functional explosives, (3) formulation study of plastic bonded explosives, (4) application of high explosives to munitions, (5) demilitarization process. This paper outlines the basic technologies need to understand the high explosives.

Key words: High Explosives, Energetic Materials, Munitions

1. 서 론

고폭화약(high explosives)이란, 극히 짧은 시간($\sim 10^{-6}$ s)의 화학반응에서 생성된 고온($\sim 10^3$ °K)과 고압($\sim 10^5$ bar)의 기체가 팽창할 때 발생하는 에너지(팽창에너지와 운동에너지)를 이용하는 물질이다. 고폭화약의 가장 중요한 요구 특성은 성능(performance)과 감도(sensitivity)라고 할 수 있다. 성능과 감도는 상반되는 개념으로서, 일반적으로 성능이 높은 화약은 민감한 특성(외부의 자극에 쉽게 반응하는 특성)을 지니며, 반대로 둔감한 특성을 지닌 화약은 성능이 다소 떨어진다. 따라서 성능이 우수하면서도 둔감한 특성을 나타내는 화약을 개발하는 것이 이 분야에 종사하는 과학자들이 추구하는 최종 목표이다.

고폭화약 연구의 기술 분야는 매우 다양하다. 에너지 물질(분자화약과 에너지화 결합제)의 설계 및 합성으로부터 시작하여 기능성 화약 제조 연구, 복합화약(PBX, plastic bonded explosive)의 조성공정 개발, 반응 전후 화약의 물리적·화학적 현상에 대한 실험 및 정량적 평가, 무기체계의 적용성 연구, 성능/안전도

평가방법 개발, 수명이 지났거나 용도 폐기된 탄약의 환경친화적 처리방법 등 최종제품 또는 무기체계의 성능 및 안정성에 영향을 줄 수 있는 모든 분야가 연구대상이 되기 때문에 관련되는 학문/기술 분야가 화학공학의 전체분야를 망라할 만큼 다양하다고 할 수 있다.

이 논문에서는 고폭화약 연구를 기술 분야별로 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 (1) 신규 에너지물질의 합성, (2) 기능성 화약의 제조, (3) 복합화약 조성개발, (4) 무기체계 적용성 연구, (5) 군용 물질 해체(demilitarization) 등으로 대별하여, 각 분야에 대해 개략적으로 고찰함으로써 고폭화약 개발의 전체과정을 설명하고자 한다.

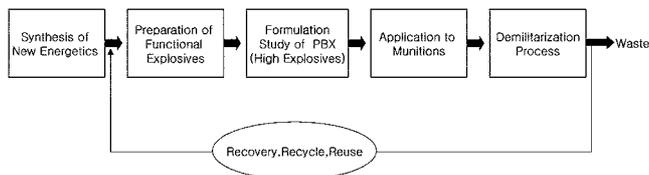


Fig. 1. Steps in the development of high explosives.

† To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hyounsoo@add.re.kr

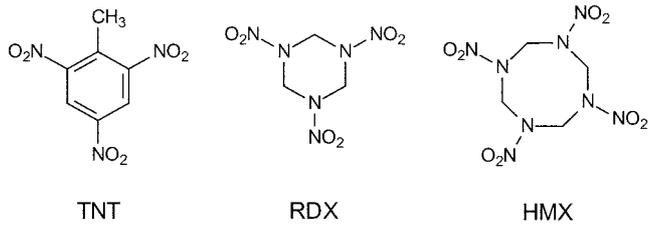


Fig. 2. Structure of common molecular explosives.

2. 고폭화약 연구의 기술 분야

2-1. 신규 에너지 물질의 합성

대부분의 군용 고폭화약은 한 개 이상의 원료화약을 혼합하여 제조한다. 이 논문에서는 원료화약과 고폭화약을 구별하기 위해 원료화약을 ‘분자화약’ 또는 ‘에너지 물질’ 칭하고, 혼합화약(composite)을 ‘고폭화약’이라 명기한다. 현재 군용 고폭화약의 주성분으로 널리 사용되는 분자화약은 TNT(tri-nitro-toluene), RDX(research development explosive, cyclotrimethylenetrinitramine), HMX(high melting explosive, cyclotetramethylenetrinitramine) 등이며, 이들 물질의 구조식은 Fig 2와 같다. 실제로 현재 실전 배치된 모든 탄(munition)에는 이 세 종류의 물질이 원료로 사용된 고폭화약이 들어있다고 보아도 무방하다. TNT는 작은 조각이나 덩어리 형태이고, RDX와 HMX는 분말형태로 제조된다. 이 세 가지 화약 중 TNT가 성능(폭발속도 및 폭발압력) 면에서 위력이 가장 약한 화약이다(Table 1 참조). 그 대신 가격이 저렴하므로 생산단가가 무기개발에 주요 인자로 작용하는 대량생산 무기체계에 주로 사용된다. 녹는점이 낮아서(80.8 °C) 용융충전이 가능하다는 장점을 갖고 있지만, 반면에 그러한 특성 때문에 열적, 기계적 안정성과 저장성이 떨어지는 단점을 함께 갖고 있다. 한편, 고성능의 탄에서는 RDX나 HMX를 사용한다. RDX나 HMX는 폭발성능은 뛰어나지만 민감한 화약이기 때문에 둔감화를 시키지 않은 순수한 상태로는 주장약(main charge explosive)이나 보조장약(booster charge explosive)으로 사용할 수 없다. 이러한 이유로 RDX나 HMX에 고무성질의 플라스틱 결합제 등을 사용하여 복합화약을 제조함으로써 둔감화 시켜서 사용한다(2-3절 참조).

이외에도 최근 HNIW(hexanitrohexaazaisowurtzitane)와 같은 고밀도 고성능 분자화약이 합성되어 연구목적으로 소량씩 사용되고 있으며, NTO(3-nitro-1,2,4-triazole-5-one), ADNBF(7-amino-4,6-dinitrobenzofuroxan), FOX-7(1,1-diamino-2,2-dinitroethylene) 등 분자화약에 대한 합성 연구가 활발하게 진행되고 있다.

새로운 분자화약에 대한 요구사항은 크게 네 가지로 요약할 수 있다. (1) 에너지 밀도(energy density)가 HMX보다 5% 이상 높을 것, (2) 감도(충격, 마찰, 정전기 감도)가 HMX보다 둔감할 것, (3) 열적, 화학적

으로 안정할 것, (4) 합성공정이 다섯 단계를 넘지 않을 것 등이다[2]. 에너지 밀도를 예측하는데 필요한 비중, 반응생성물, 반응열 등은 분자구조와 열역학 자료로부터 계산할 수 있다. 최근에는 성능 및 감도 등에 영향을 미치는 분자 특성들과 화약 분자 구조 간의 정량적인 상관관계를 찾아내고, 이를 모델화하여 실험 전에 미리 결과들을 예측함으로써 적절한 화약 분자를 찾아내는 연구가 활발히 수행 중이다. 이러한 연구를 효과적으로 수행하기 위해서는 기존의 화약 분자 자료들을 수집, 저장, 검색하는 작업이 중요하므로 화약 분자들의 특성 정보를 웹 기반에서 검색할 수 있는 데이터베이스 시스템이 개발되어 사용 중이다. 또한, 분자화약 설계 단계에서 필수적으로 실험해야 하는 충격 감도(impact sensitivity)를 예측하기 위하여, 유전자 알고리즘 및 인공신경망 방법을 이용한 정량적 구조-물성 상관관계(QSPR, quantitative structure property relationship) 모델을 구현하는 연구가 국방과학연구소와 학계의 공동연구를 통해 성공적으로 진행 중이다. Fig 3은 설계 중인 에너지 물질의 폭발성능을 예측한 결과의 예이고[3], Fig 4는 충격감도를 예측한 예이다[4]. 이러한 예측모델의 개발은 합성 실험 전에 미리 예상 물질의 성질을 어느 정도 예측할 수 있어서, 화약분자의 효과적인 설계는 물론, 위험한 합성실험의 횟수를 크게 줄일 수 있다.

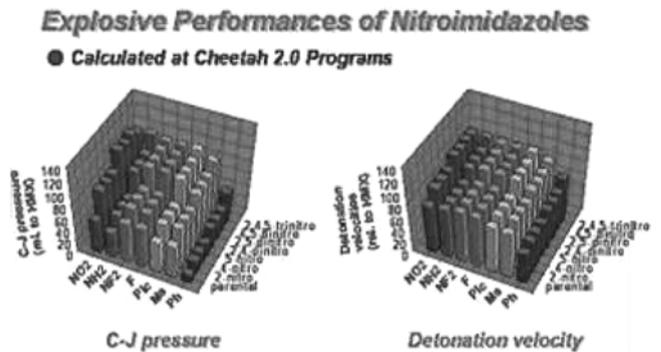


Fig. 3. Prediction of explosive performance[3].

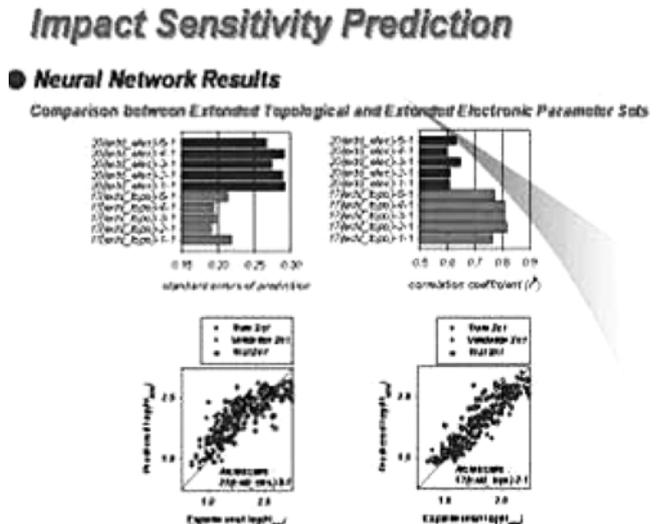


Fig. 4. Prediction of impact sensitivity by QSPR method[4].

Table 1. Characteristics of common molecular explosives[1]

	TNT	RDX	HMX
Crystal density (g/cm ³)	1.6	1.8	1.9
Detonation velocity (m/s)	6,640	8,950	9,150
Detonation pressure (kbar)	210	350	390
Temperature of detonation (°K)	2740	2,600~4,000	2,400~3,800

2-2. 기능성 화약의 제조

합성공정으로부터 제조된 에너지물질(원료화약)은 대부분 불순물을 함유하고 있고, 그 형상 및 입도가 불규칙적이며, 표면이 거칠고, 균질성이 보장되지 않으며, 더구나 이러한 특성들은 합성공정 과정에서는 제어하기가 어렵다.

기능성 화약이란 합성에 성공한 에너지물질을 이용하여 특별한 중간공정을 한 단계 거침으로써 화약입자의 크기, 입도 분포, 형상, 표면 특성, 결정 내부결함, 균질도, 강도 및 순도 등을 제어하여 원료화약의 특성을 임의로 조절한 물질로 정의한다. 화약입자의 미세구조 특성은 연소 또는 폭발 거동에 큰 영향을 미치는데 이는 열이나 물질 전달 속도들이 에너지 생성 속도를 지배하며 이들 전달 속도는 주로 입자의 크기, 형상, 결합정도나 최종 제품의 균질성 등에 의하여 결정되기 때문이다. 최근 나노 크기의 화약 초미립자 제조 연구가 진행되고 있는데, 나노 입자를 적용할 경우 전체 반응 속도를 지배하는 율속 단계를 열 또는 물질 전달 과정으로부터 화학반응 단계로 전환시킬 수 있게 되기 때문에, 기존의 큰 화약 입자들과 비교하여 훨씬 높은 연소 속도, 낮은 충격 감도 그리고 최대 에너지를 발생시키는 온도 또한 낮은 것으로 보고되고 있다[5].

기능성 화약 제조를 위한 기존의 방법으로는 분쇄(milling), 용액 재결정(recrystallization from solution), 유화 재결정(emulsion crystallization), 분무 재결정(spray crystallization), 증발 재결정(evaporation crystallization), 초음파 공정(ultra-sonification process), 유체 에너지 밀(fluid energy mill) 등이 유용한 공정이다. 이와 더불어 최근에 각광을 받는 연구로는 정밀 결정화공정을 이용한 구형(spherical shape)의 화약제조, 초임계 유체를 이용한 나노 크기의 미세입자 제조공정, 복층막 화약 개발, 결정내부결함을 완전히 제거한 둔감 분자화약의 개발 등을 들 수 있다.

대부분 화약의 결정 특성은 cubic, tetragonal, orthorhombic 이어서 합성 공정에서 제조한 결정은 대부분 침상이다. 표면의 상태는 거칠고, 응집체이며, 불순물이 내포되어 있어 성능이 매우 낮고 불안정하여 비의도적인 폭발이 일어나기 쉽다. 이들 문제점은 결정의 크기 및 형상을 변화시키는 결정화 공정으로 해결할 수 있다. Fig. 5에 정밀 결정화 공정을 이용한 구형(spherical shape)의 화약(NTO) 제조 결과를 제시하였고, 입자의 형상 조절에 따른 충격감도는 Table 2에 제시한 바와 같이 거의 3배 정도 둔감화 되었음을 알 수 있다[6](주: 충격감도 값이 클수록 외부로부터의 기계적 충격에 둔감함을 의미함).

최근 초임계 유체를 이용한 화약제조 연구가 화약 선진국 중심으로 꾸준히 수행되고 있다. 국내에서는 국방과학연구소의 기초연구과제를 통해 GAS(gas anti-solvent)공정을 응용한 초임계유체의 화약제조공정 적용 가능성을 확인한바 있다[7, 8]. Fig. 6은 Stepanov 등[9]이 RESS(rapid expansion of supercritical solution) 공정을 이용하여 RDX 나노 결정을 제조한 결과인데, 110~220 nm의 평균입경을 가지며, 입도분포 또한 좁은 범위를 얻어내었음을 알 수 있다.

화약 입자의 내부 공극(internal cavity) 또는 결함은 화약의 성능 및 감도에 지대한 영향을 미친다. 일반적으로 합성반응에 의해 생성된 RDX 입자는 아세톤에 용해시킨 후, 차가운 물로서 석출시켜 정제한다. 석출된 RDX 입자는 결정 내에 미세한 내부 공극을 갖는다. Fig. 7(a)는 합성에 의해 제조된 RDX를 아세톤으로 세척한 뒤 건조하여 얻어낸 결정의 SEM 사진인데, 매끄러운 표면을 가진 결정임을 알 수 있다. 그러나 결정의 내부는 겉보기와는 엄청난 차이

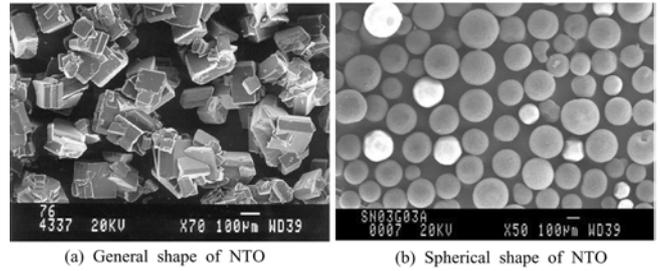


Fig. 5. SEM image of explosive crystals[6].

Table 2. Impact sensitivity of explosives[6]

	General shape of NTO	Spherical shape of NTO
Impact sensitivity (J)	16.9	46.5

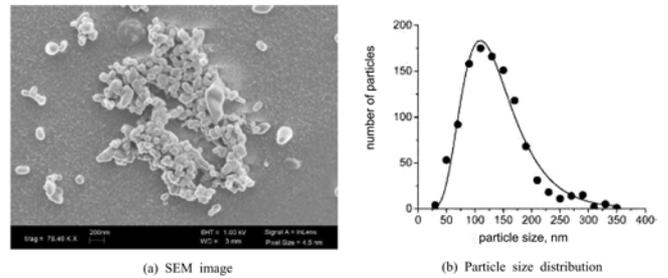


Fig. 6. RDX particles produced by RESS process (mean size : 115±35 nm)[9].

가 있다. Fig. 7(b)는 image analyzer를 사용하여 관찰한 동일한 물질의 결정 내부 사진이다. 결정 내에 포함될 수 많은 내부 공극 구조를 관찰할 수 있는데, 내부 공극은 재결정에 사용한 용매, 물, 공기, 염 등으로 채워져 있다. 이러한 결정내의 내부 공극 및 내부 결함(internal defect)은 이들을 원료로 사용하여 제조한 고폭화약 조성(explosive formulation)이 비의도성 충격에 의해 폭발할 가능성을 크게 하는 역할을 한다(내부 기공이 hot spot으로 작용하여 adiabatic compression을 유도함). 따라서 화약조성의 안정성을 높이기 위해서는 이들 결정성 물질의 고유 특성의 조절이 필수적이다. 프랑스의 화약제조회사인 SNPE(SME)사는 새로운 재결정화 공정으로 둔감 RDX(reduced sensitivity RDX, RS-RDX)의 제조에 성공하였다고 발표하였다. SNPE사의 RS-RDX의 상품명은 IRDX®이다[10]. Image analyzer를 이용하여 RS-RDX의 결정내부를 관찰한 결과, Fig. 7(c)에 나타난 바와 같이 내부결함이 현저히 감소되었음을 알 수 있다. 이처럼 내부결함이 현저히 감소된 분자화약의 효과는 복합화약에 적용하여 시험하였을 때 분명하게 나타나게 된다. 외부에서 가해지는 충격 에너지(shock energy)에 대한 둔감도를 측정하는 시험기법인 large scale gap test(LSGT) 결과 Fig. 8에 나타난 것과 같이 둔감 RDX를 원료로 사용한 복합화약은 일반 RDX를 사용한 복합화약 보다 훨씬 둔감한 특성을 나타내는 것으로 보고되었다[10](주: LSGT 결과는 압력이 클수록 둔감한 특성을 나타내는 것임). 이러한 결과가 보고된 이후 전 세

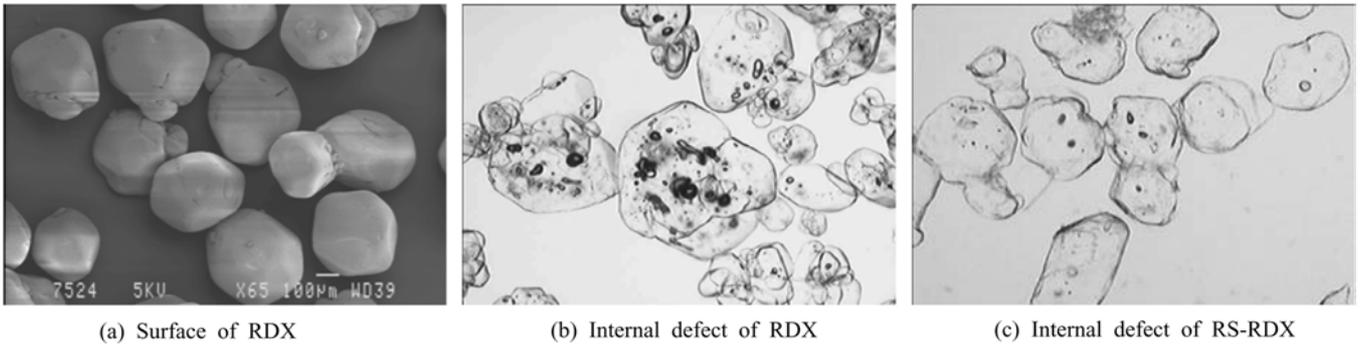


Fig. 7. Microscopic observations of different qualities of RDX crystals with refractive index matching[10].

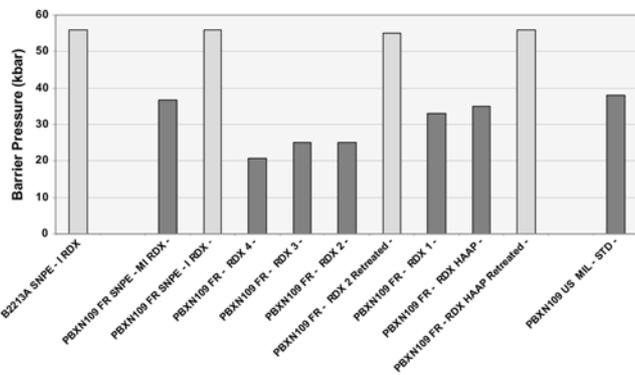


Fig. 8. LSGT results for different RDX qualities used in PBXN-109 [10].

계적으로 내부결함을 최소화시킨 둔감 분자화약 제조 연구가 경쟁적으로 활발히 수행되고 있다.

2-3. 복합화약 조성 개발

대부분의 원료화약이나 기능성 화약은 분말상태로는 물론, 높은 밀도로 압축한 경우에도 군용화약으로 사용하기에는 너무나 민감하여 주장약이나 보조장약으로 직접 사용할 수가 없다. 설사 화약 분말을 압축한 상태에서 민감도가 허용치 범위 내에 있다고 할지라도, 이들 압축된 화약은 오랜 기간(무기체계의 수명 기간)에 걸쳐서 물리적으로 견고하게 결합된 상태를 유지할 수 있을 만큼 안정적으로 고품질을 유지하지를 못한다. 따라서 분말 형태의 원료화약이나 기능성화약은 다른 물질과 혼합하여 둔감하게 만들고, 고체상태의 간단한 물리적 특성을 갖도록 하여야 한다.

복합화약(PBX)이란 이처럼 분말형태의 원료화약에 고분자 물질을 결합재로 사용하여 혼합(주조형 복합화약)하거나 피복-응집시킨(압축형 복합화약) 복합체(composite) 형태의 물질로써, 재래식 화약(TNT를 주성분으로 하는 Comp-B나 Octol 등과 같은 용융충전계열의 화약)의 열적, 기계적 취약성을 개선하고 성능 및 안전도의 조절이 가능하도록 만든 화약을 의미한다. Table 3에 용융충전화약인 Comp-B와 고성능 화약인 압축형 복합화약의 주요 특성을 비교하였다.

Table 3. Characteristics of conventional explosive and plastic bonded explosive

	Comp-B (Composition B)	High performance PBX
기본물질	TNT를 기반으로 함	플라스틱 결합화약(PBX)
제조방법	용융충전 화약	압축형 복합화약
제조원리	TNT는 분말 또는 작은 조각 형태인데, 비교적 낮은 온도(80°C)로 가열하면 녹일 수 있고, 녹은 TNT는 점도가 낮아 흐름성이 좋으며, 이를 다시 냉각시키면 결정성 고체가 되는 성질이 있음. 이러한 특성을 이용해 RDX와 같은 고성능 화약분말과 혼합하고, 가열시켜 녹인 후(용융) 탄체에 충전시킴.	분말 형태의 원료화약(HMX, RDX) 표면에 고분자 플라스틱 결합재를 피복-응집시켜 성형분말(molding powder) 형태로 만들고, 이를 탄체에 직접 압축충전하거나 또는 cylinder 형태로 압축한 다음 원하는 탄의 모양으로 기계 가공하여 사용함.
조성	RDX + TNT + Wax	HMX + 고무성질의 고분자결합제
성능	폭발속도 : 7,900 m/s	폭발속도 : 8,700 m/s
장점	-가격이 저렴 -대규모 생산이 용이함	-성능이 우수하면서도 안전함 -동조폭발 가능성 낮음 -열적 안정성 유지 -물성이 좋아, 균열이 발생하지 않음 -화재 노출시 반응이 격렬하게 진행될 가능성이 낮음(연소반응)
단점	-저장시 동조폭발 가능성 -물리적인 견고성 취약함 -장기간 보관시 균열이나, 액체상태의 화약용출 가능성 (낮은 용융점) -화재 노출시 격렬한 반응 발생 (폭발반응)	-고가임 -생산성이 낮음

복합화약을 제조 방법에 따라 분류하면 (1) 주조형(cast) 복합화약, (2) 압축형(pressed) 복합화약, (3) 압출형(extrudable) 복합화약, (4) 사출성형(injection molding) 복합화약 등으로 나눌 수 있다. 생산량 측면에서 보면 대부분의 화약은 주조형 복합화약이고, 그다음으로 압축형 복합화약이 많다. 사실 이 두 방법으로 제조된 화약이 거의 전부를 차지한다고 보아도 무방할 것이다. 압출이나 사출성형 복합화약은 아주 특별한 용도로 쓰이고, 그 양도 극히 적다[1, 2].

주조형 복합화약은 고분자 망상구조 속에 RDX나 HMX 등과 같은 결정성 화약을 분산 혼화시킨 것으로 고무와 같은 탄성을 지니기 때문에 외부 자극에 매우 둔감한 특성을 나타내며, 그 대표적인 조성은 Table 4와 같다. 주조형 복합화약은 사용하는 원료화약, 금속성분, 산화제와 고분자물질에 따라서 기계적 성질은 물론, 화약의 성능 및 안전도 특성을 임의로 조절할 수 있어서 무기체계의 요구 조건에 맞추어 광범위하게 이용할 수 있다.

압축형 복합화약은 원료 화약 또는 기능성 화약의 표면에 열가소성 수지를 피복시킨 후, 압축하여 특수 형태로 가공하여 사용하는 것으로서, 화약 함량을 최대 98%(중량비)까지 높일 수 있는 고성능 화약이다. 따라서 소형화, 경량화, 고성능을 요구하는 정밀유도 무기체계의 주장약이나 보조장약으로 사용한다[11]. Fig. 9는 고분자 결합제(Estane)로 원료화약(HMX)을 피복-응집시켜 제조한 압축형 복합화약 분말, 고온 고압(25,000 psi 수준)으로 압축성형시킨 제품, NC machine을 사용하여 원하는 형상으로 기계 가공하는 사진이다.

Table 4. Typical example of cast-PBX formulation

Ingredient	Function
RDX (HMX)	Molecular Explosives
HTPB	Prepolymer
PAPI	Curative
DOA	Plasticizer
FeAA	Catalyst
Aluminum	Metal fuel
AP	Oxidizer

근래 들어 무기체계의 저장, 수송, 운용 등과 관련하여 둔감무기체계(IM, Insensitive Munitions)를 규정하는 필요성이 대두되고 있다. 이는 화약 및 탄두/탄약의 저장, 수송 및 운용 과정에서 불의의 사고로부터 인적, 물적 손실을 최소화하고 실제 전장에서 적의 모든 위협요소(열, 화재, 충격, 탄자 및 파편 피격)로부터 안전성을 확보하고자 하는데 그 목적이 있다. 실제로 미해군에서 운용하는 Oriskany, Forrestal, Enterprise 항공모함 화재 폭발사고, 1991년 걸프전 당시 미 육군의 Camp Doha에서의 탄약보급차량의 폭발사고 등을 통하여 둔감탄약에 대한 필요성이 증대되었다(Fig. 10).

둔감화약 규정은 유엔 폭발물 위원회에서 규정한 'UN Test Series 7 (substance)'이 국제적으로 공인된 규정이다. 화약 및 탄약의 저장, 운송 및 전장 운용과정에서 조우할 수 있는 모든 위협요소의 종류와 위험수준을 모사한 6종의 시험항목(기폭관 시험, 충격감도 시험, 비

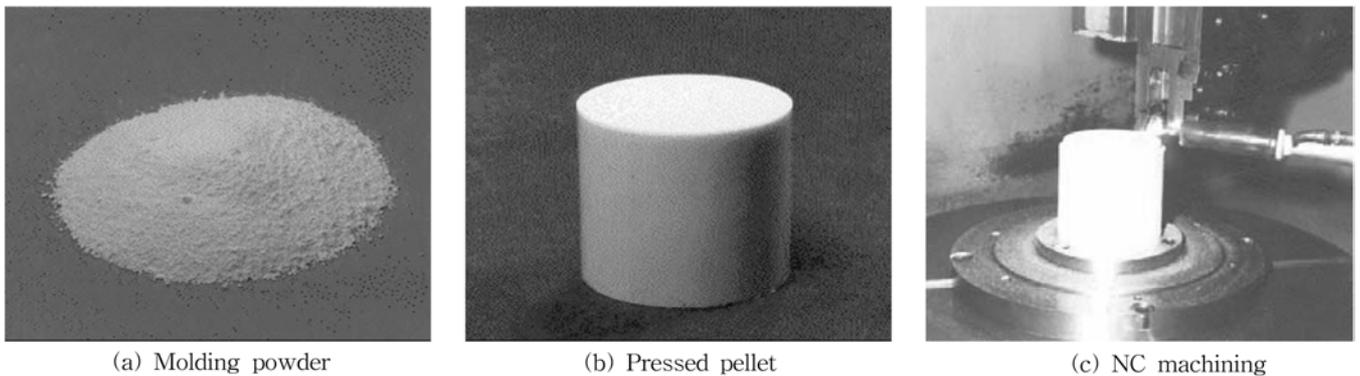


Fig. 9. Pressed PBX.



Fig. 10. Pictures of unexpected detonating accident with warheads and ammunitions.

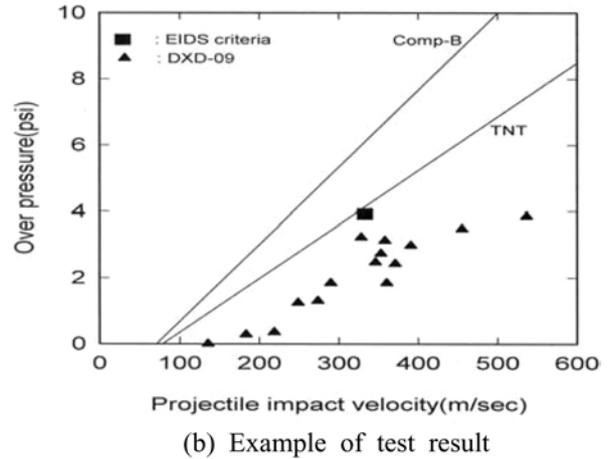
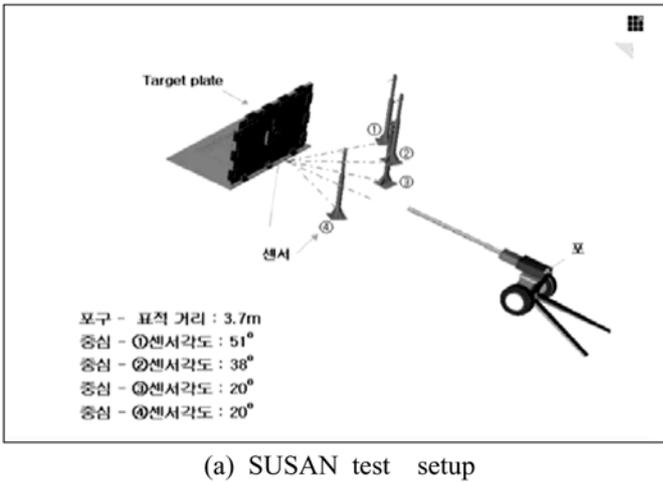


Fig. 11. SUSAN test[13].

행충격 시험, 급속가열 시험, 완속가열 시험, 탄자/파편 충격 시험)으로 구성되어 있으며, 이 모든 시험항목을 통과한 화약을 EIDS(extremely insensitive detonating substance) 둔감화약이라 칭한다[12]. 실제 둔감화약은 인위적인 기폭이 아닌 외부의 웬만한 자극요소에는 폭발하지 않는 매우 둔감한 특성을 지닌다. Fig. 11에는 둔감화약 평가 시험 중의 하나인 비행충격시험(SUSAN Test)의 시험장 구조와 결과를 보였다. 개발한 복합화약을 시험용 탄자에 충전하여 76 mm 무장선 해군포로 견고표적에 발사시켜 충돌시 화약의 반응정도를 측정하는 시험이다. 시험탄의 발사속도에 따른 충격속도별 반응압력의 측정결과로부터 둔감정도를 판단한다. 신규 개발한 복합화약의 시험 결과는 재래식 화약(Comp-B 또는 TNT)보다 훨씬 둔감함은 물론, EIDS로 표기된 기호(■)보다 압력이 낮아 둔감기준을 만족하고 있다[13].

2-4. 무기체계 적용성 연구

개발한 화약의 무기체계 적용은 화약에 의해 발휘되는 탄두(warhead) 효과에 바탕을 두고 결정된다. 대부분의 탄두는 무기체계에서 요구하는 특성 및 효과가 최적화되도록 설계한다. 탄두 효과 또는 폭발 효과는 최대의 성능이 발휘될 수 있도록 설계한다. 무기체계의 특성에 따라 요구되는 탄두 효과(또는 폭발 효과)는 다음과 같이 분류할 수 있다[2]. (1) 금속 가속(metal acceleration), (2) 공기 중 폭풍파(air blast), (3) 일반목적(general purpose, GP), (4) 수중무기용(under water - bubble energy, shock energy), (5) 내 폭풍(internal blast), (6) 화구 생성(cratering) 등이다.

적용 목적(탄두 효과)에 따른 화약의 유형을 도시하면 Fig. 12와 같다. 금속 가속용 화약은 극히 짧은 시간에 높은 폭발압력을 생성하도록 설계된 화약이다. 금속과 접촉된 화약이 기폭되면 이 금속이 무수한 파편으로 변하여(fragmentation) 고속으로 가속되어 목표물을 파괴시키거나, 성형작약 라이너(shaped charge liner)를 빠르게 압축붕괴시켜 금속의 제트(jet)가 표적에 최대한의 깊이로 관통될 수 있도록 설계된다. 반면 내폭풍파나 화구생성용 화약은 병커나 함정내부와 같은 막힌 공간, 또는 지하암반 내부에서 고폭화약이 폭발하여 폭발에너지는 다소 작더라도 비교적 오랜 시간 동안 과압(overpressure)이 유지되도록 설계된 화약이다.

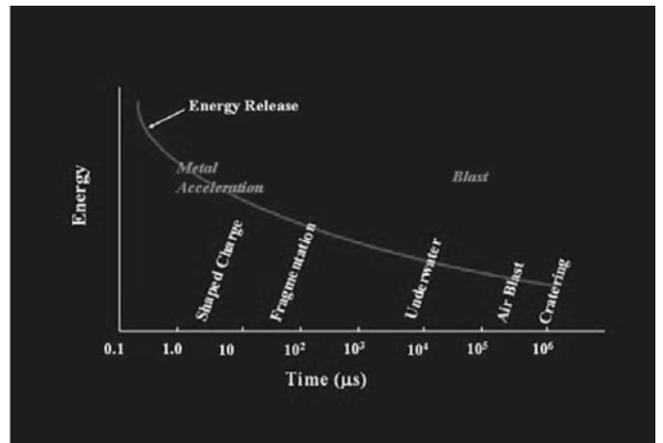


Fig. 12. Selection of useful explosives according to the detonating effect.

탄두 효과는 M&S(modeling and simulation)를 통해 물리적인 현상 설명과 거동특성 분석이 가능하다. Fig. 13은 상용 수치해석 프로그램인 AUTODYN-2D/3D를 이용하여 파편의 형성을 분석한 결과이다[14]. Fig. 14는 성형작약탄두의 제트 형성 및 관통 현상을 해석하기 위하여 탄두의 구성요소별 재질과 상태방정식 및 구성방정식을 이용, 제트가 형성되는 현상 및 목표물에 대한 관통 해석 진행 형태를 해석한 결과이다[14].

무기체계에서 요구하는 최적의 탄두 효과를 낼 수 있는 고폭화약이 선정되면, 이 화약을 충전시킨 탄두/탄약의 각종 성능평가, 안전도 평가, 노화도 평가, 환경 평가 시험 등을 수행하게 되는데, 이 부분에 대한 내용은 보안 등의 이유로 본 논문에서 제외하기로 한다.

Fig. 15는 이러한 모든 시험규정에 합격하여 최종 무기체계로 확정된 정밀유도무기의 발사장면이다. 국방과학연구소의 독자기술로 개발한 복합화약 조성이 충전된 탄두가 장착되어 있다. Fig. 15(a)는 단거리 지대공 유도무기로서 고성능 압축형 복합화약이 충전되어 있으며, Fig. 15(b)는 함대함 유도무기인데 둔감 주조형 복합화약이 충전되어 있다.

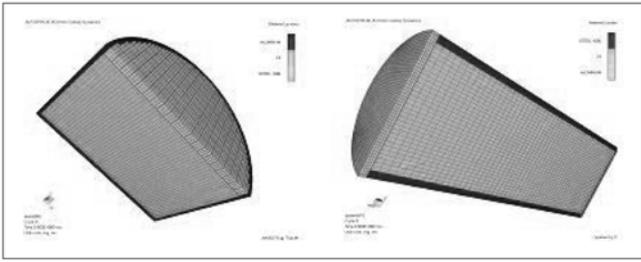


Fig. 13. Modeling and simulation of fragmentation[14].

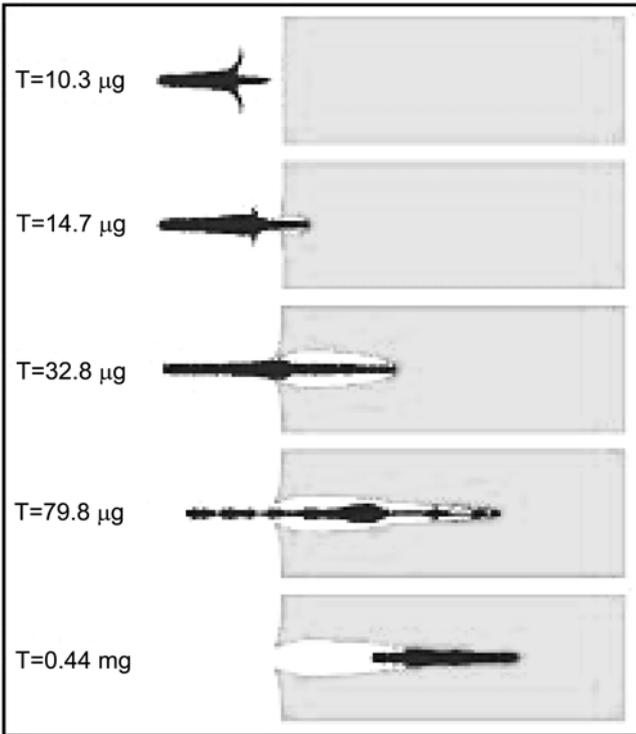


Fig. 14. Penetrating phenomena by shaped charge jets[14].

2-5. 군용 물질 해체 기술

군용 물질 해체(demilitarization)란 수명이 지났거나 용도 폐기된 탄약을 효과적이고 안전한 방법으로 처리하는 기술을 의미한다. 지금까지의 폐탄약은 야외 소각이나 기폭처리 방식으로 폐기하였으나, 환경오염 등의 문제로 새로운 처리방법의 개발이 필요하다는 인식이 전 세계적으로 확산되고 있다. 또 폐 탄약의 증가와 처리능력 부족으로 저장공간이 부족한 문제를 합리적으로 해결하는 방안도 강구하여야 한다. 나아가 폐탄약의 자원화 개념을 도입하여 환경기준을 만족시킴은 물론 폐탄약으로부터 자원의 회수, 재활용 및 재사용(3R: resource recovery, recycle, and reuse)을 제고하려는 연구가 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 군과 국방과학연구소의 공동 노력으로 재래식 탄약의 효율적 처리시설을 확보하는 사업을 진행하고 있다. 탄약의 군용 물질 해체 연구가 일반 폐기물 처리공정과 다른 점은 탄에 충전된 폭발 물질(고폭화약, 기폭장치, 추진제 등)의 취급 안전성 확보와 환경오염 방지 두 가지 조건을 효율적으로 만족시켜야 하는 처리공정상의 어려움에 있다고 하겠다.

군용 물질 해체 공정은 크게 (1) 탄 분해공정, (2) 회수공정, (3) 재활용 및 재사용 공정, (4) 폐기공정으로 분류할 수 있다. Fig. 16에 나타난 다연장로켓(multiple launching rocket system, 이하 MLRS)의 예를 들어 군용 물질 해체 주요공정을 설명한다[15,16]. 먼저 MLRS의 발사관은 알루미늄과 유리섬유 튜브로 되어 있어 재활용이 가능하다. 하나의 pod에 들어있는 여섯 발의 로켓은 탄두와 추진기관으로 분리되며, 탄두 부분은 성형된 발포체 내에 총 644개의 M77 자탄이 충전되어 있다. 이 자탄의 경우에는 분리하는 것은 용이하나, 자탄을 분해하면 장전 상태로 되는 위험한 탄종도 있다. 분리된 M77 자탄은 비록 충전된 화약량은 소량이지만 성형작약 탄두이어서 공정 중에 반응기구가 작동하게 된다면 10 cm 정도의 철판도 관통시킬 수 있는 제트 기류를 형성한다. 따라서 자탄은 냉동파쇄 방법으로 화약과 구리 라이너(copper liner cone)를 분리시켜 작동기구를 차단시킨 후 소각처리하고 금속재는 재활용한다. 추진기관에는 복합추진제(composite propellant)가 충전되어 있어 고압수를 사용하여 추진제를 절단하고, 충전물을 회수한다. 회수된 추진제는 상용(산업용 화약 원료)으로 쓰이거나, 군용으로 재사용하기 위하여 추



(a) Surface to air missile



(b) Ship to ship missile

Fig. 15. Precision guided missile warhead filled with PBX.



Fig. 16. MLRS demilitarization technology[16].

진제 조성의 주요 화합물(산화제 및 화약)을 재생한다. 화약과 접촉해있던 탄체는 조각하여 화약성분을 모두 제거한 후 금속물질은 수거하여 재활용할 수 있다. 이외에 자탄을 분산시키기 위한 장약, 신관, 발포체 및 날개 부분 등은 회수하여 재활용하거나 조각처리한다.

탄 분해공정에는 냉동파쇄, 고압 유체 에너지에 의한 절단 등의 기술이 적용되며, 회수공정에는 스팀 또는 마이크로파를 이용한 용융방법, 고압 유체 에너지에 의한 채굴 등의 기술이 필요하다. 회수 물질의 재활용 또는 재사용 공정에는 고부가 화합물로 전환 기술, 재결정에 의한 고순도 물질 제조, 초임계 유체를 이용한 추출 등의 기술이 적용될 수 있다. 마지막으로 폐기공정에는 내열형 또는 내압형 조각방법, 초임계 산화, 플라즈마 열분해 및 용융, 용융염 산화, 가수분해 및 산화, 생물학적 처리 방법 등이 연구대상이다.

국내의 군용 물질 해체 기술 일부는 선진국의 핵심 기술 수준에 근접하지만, 전체적으로는 이제 시작단계이다. 더구나 처리대상 탄약의 종류가 다양하고 그 특성이 모두 서로 다르기 때문에 모든 처리대상 탄약을 처리할 수 있는 범용의 기술은 존재하지 않지만 추후 확보되어야 할 기술은 안정성이 확보되고 재활용 자원의 회수율을 극대화시킬 수 있으며, 운영상의 효율성을 갖춘 환경친화적인 방법이어야 함에는 논의의 여지가 없을 것이다.

3. 결 론

고려말 최무선의 화통도감으로 시작한 우리나라의 화약 역사는 결코 짧다고 할 수 없으나, 그 이후 화약 분야에 대한 연구 및 발전은 오랫동안 단절되었던 것이 역사적 사실이다. 일례로 군사용으로 사용 가능한 TNT, RDX 등의 원료화약이 국내에서 처음 생산된 것이 겨우 30여 년 전의 일이다. 그러한 열악한 기반에서 출발하였지만 국방과학연구소 탄두탄약부에서는 용융충전화약의 탄두 정밀충전공정 개발, 주조형 복합화약 및 압축형 복합화약의 개발, 둔감화약의 개발, 개발화약의 성능 및 안전도 평가기법 개발, 무기체계 적용성 연구, 신에너지 물질의 합성 그리고 분자화약 설계 및 성능/감도 예측 프로그램의 개발 등 세계적인 화약개발 추세에 맞추어 고폭화약 연구를 성공적으로 추진하고 있다. 개발된 핵심 기술은 방위산업체에 기술 이전하여 국산화 및 양산화에 크게 기여하고 있다.

또한, 미래 무기체계 및 핵심기술을 연구하는데 필요한 기반기술을 확보하기 위하여 대학 및 관련 연구기관에 기초연구와 특화연구

센터 과제를 수행하도록 적극 지원하고 있으며, 이를 통해 화약 관련 연구의 활성화와 연구인력 저변의 확대 및 산-학-연 공동연구체계의 구축 등의 발전적인 효과를 기대하고 있다.

앞에서 살펴보았듯이 고폭화약 연구의 기술 분야는 실로 화학공학의 전체 분야를 망라할 만큼 다양하다고 할 수 있으며, 앞으로 도전하고 확보해야 할 기술 분야 또한 무궁하다고 할 수 있다. 이 총설을 통해, 현재 진행 중인 고폭화약 관련 연구는 물론 추후 확보해야 할 기반기술에 대하여 학계, 산업체 그리고 관련기관의 깊은 관심을 촉구한다.

감 사

고폭화약 연구는 국방부와 방위사업청의 방위력 개선사업(핵심기술, 시험개발, 특화연구센터)으로 수행되고 있습니다.

참고문헌

1. Dobratz, B. M. and Crawford, P. C. *LLNL Explosive Handbook*, LLNL, University of California(1985).
2. Anderson, E., *AIAA Tactical Missile Series Vol.155 Tactical Missile Warhead - Explosives*, NSWC, USA(1993).
3. Kim, H. S., Cho, S. G., Kim, J. K. and Song, S. Y., "Molecular Design of Explosive Molecules : Nitroimidazole Derivatives," Proc. ACS Meeting (57th SE/61st SW), Nov., Memphis, USA (2005).
4. Cho, S. G., Kim, J. K., Song, S. Y., Lee, S. K. and No, K. T., "Optimization of Neural Networks Architecture for Impact sensitivity of Energetic Molecules," Proc. ACS Meeting (57th SE/61st SW), Nov., Memphis, USA(2005).
5. Yongxu, Z., Dabin, L. and Chunxu, L., "Preparation and Characterization of Reticular Nano-HMX," *Propellants, Explos., Pyrotech.*, **30**(6), 438-441(2005).
6. Kim, K. J., Kim, M. J., Lee, J. M., Kim, H. S. and Park, B. S., "Control of Size and Shape of NTO Crystals by Cooling Crystallization," Proc. Intern. Symp. CGOM, Aug., Bremen, Germany, 169(1997).
7. Lim, G. B., Lee, S. Y., Koo, K. K., Park, B. S. and Kim, H. S., "Gas Anti-solvent Recrystallization of Molecular Explosives under Subcritical to Supercritical Conditions," Proc. 5th Meeting Supercritical Fluids, March, Tome 1 Nice, 23-25(1998).
8. Lim, G. B., Lee, S. Y., Koo, K. K., Park, B. S. and Kim, H. S., "Size and Shape Control of Molecular Explosives Using SCF CO₂," Proc. 11th Symp. Missile Tech., Daejeon, Korea, 363-366 (2001).
9. Stepanov, V., Krasnoperov, L. N., Elkina, I. B. and Zhang, X., "Production of Nanocrystalline RDX by Rapid Expansion of Supercritical Solutions," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **30**(3), 178-183(2005).
10. Spyckerelle, "Insensitive RDX," Proc. 32nd Intern. Annual Conf. ICT, June, Karlsruhe, Germany(2001).
11. Kim, H. S. and Park, B. S., "Characteristics of the Insensitive Pressed Plastic Bonded Explosive," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics.*, **24**, 217-220(1999).
12. MIL-STD-2105B, Hazard Assessment Tests for Non-Nuclear

- Munitions(1991).
13. Kim, J. K. and Kim, S. H., "Development of Insensitive High Explosive, DXD-09," ADD report GWSD-419-90042(1999).
 14. Lee, J. M., Moon, D. C., Kim, G. L. and Cho, S. H., "Application of Explosives to Ammunition," Proc. KICHe 2006 Spring Meeting(Special Issue for Military Explosives Technology), 97-108(2006).
 15. Park, B. S. and Ham, D. S., "Demilitarization Technologies for Aging or Obsolete Munitions," Proc. KICHe 2006 Spring Meeting(Special Issue for Military Explosives Technology), 109-120 (2006).
 16. Olszewski, B., "MLRS Demilitarization Status Update," Global Demil Symposium and Exhibition, Sparks, NV(2003).