

## 에너지 물질 RDX의 둔감화

이우진\* · 김영한\*<sup>†</sup> · 이기봉\*\* · 구기갑\*\*\* · 임호영\*\*\*\*

## Energetic Material Reduced Sensitivity RDX

Woojin Lee\* · Younghan Kim\*<sup>†</sup> · Kibong Lee\*\* · Kee Kahb Koo\*\*\* · Ho Young Lim\*\*\*\*

### ABSTRACT

Recently, weapon system has been highly regarding IM ability. Explosive is positively necessary in weapon system and it is principle component that must be improved for IM as the most hazardous material. RDX is one of energetic materials used the most at present since 1930s. It is being applied a lot to most of explosive in warhead and artillery and rocket propellants in these latter days due to its low cost and high energetic characteristics. However, it has a disadvantage which is more sensitive than some insensitive explosive like NTO, DADNE recently developed. To overcome this, researches have been continued about insensitive RDX and we are performing the study as well. In this study, we developed to apply reduced sensitivity RDX to pilot scale and mass production and we could confirm a result by shock sensitivity test.

### 초 록

근래 무기 체계는 IM에 대한 능력을 중요시하고 있다. 화약은 무기체계에 반드시 필요한 에너지 물질이면서 가장 위험한 물질로 IM을 위해 반드시 개선해야 할 주요 부품이라 할 수 있다. RDX는 1930년대부터 사용되어 현재는 가장 널리 사용되는 에너지 물질 중 하나이며 저렴한 가격과 높은 에너지 특성으로 인하여 탄두 화약의 대부분을 그리고 근래에는 화포용 추진제 및 로켓용 추진제에도 많이 사용되고 있는 물질 중 하나이다. 그러나, RDX는 근래에 개발된 NTO나 DADNE등의 둔감 화약에 비해 감도가 민감하다는 단점을 가지고 있어 이를 극복하기 위한 둔감 RDX의 연구 개발이 국내외에서 지속 수행되어 왔다. 본 연구에서는 RDX를 둔감화한 RS-RDX의 연구를 Pilot Scale과 양산 Plant에 적용하여 개발하였으며 그 결과를 Shock 감도를 통해 확인 할 수 있었다.

Key Words: RS(Reduced Sensitivity)-RDX(둔감 RDX), Crystal(결정), Shock Sensitivity(속감도), Large Scale Gap Tes(LSGT), Crystallization(결정화), Crystal Morphology(결정형태),

\* (주)한화 여수사업장

\*\* 국방과학연구소 기-4-2

\*\*\* 서강대학교 화공생명공학과

\*\*\*\* 국방기술품질원 품질경영본부

† 교신저자, E-mail: mansizz@hanwha.com

### 1. 서 론

근래 탄약 체계의 주요 연구 분야 중 하나인 IM(Insensitive Munitions)은 다양한 분야의 개선

을 통해 진행되고 있다. 그 중에서도 에너지 물질인 화약을 둔감화하는 기법은 가장 근본적인 해결 방법이라 할 수 있을 것이다. 화약의 대표적인 발전 방향은 둔감화와 고성능화로 볼 수 있다.

이 중 IM과 관련된 둔감화 연구의 주력 분야는 신물질 개발로 볼 수 있으며 NTO(3-Nitro-1,2,4-triazole-5-one), DADNE(2,2-Dinitroethene-1,1-diamine) 등과 같이 실제로 RDX와 유사한 에너지 수준의 많은 둔감 화약이 개발되고 있다. 그럼에도 불구하고 RDX(1,3,5-Trinitroperhydro-1,3,5-triazine)는 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 화약으로 자리 잡고 있다 이는 새로운 물질에 비해 최대 수십 배 이상의 가격 경쟁력을 가지고 있기 때문이라 할 수 있다. 이러한 이유로 RDX를 둔감화 하려는 노력이 2000년대부터 시작 되었으며 근래 유럽의 몇 개 국가에서 RS-RDX를 시판하고 있는 것으로 알려져 있다[1].

RDX의 주요 용도는 탄두 분야로 TNT(2,4,6-Trinitrotoluene)와 함께 탄두 분야의 90% 이상을 차지하고 있다. 또한 RDX의 새로운 용도로 자리 잡고 있는 분야는 추진제 분야이다. 실제로 화포용 추진제의 경우 RDX를 적용한 추진제가 사용되고 있으며 현재 많은 부분에서 개발이 진행되고 있는 것으로 알려져 있다[2]. 또한 로켓용 추진제에서도 RDX 및 HMX(Octahydro-1,3,5,7-tetra nitro-1,3,5,7-tetrazocine)등의 고에너지 물질 사용 및 이에 대한 응용 검토가 많이 이루어지고 있는 것으로 알려져 있다.

위와 같이 아직도 RDX의 용도 및 개선은 지속적으로 이루어지고 있으며 국내에서도 이를 위한 연구를 수행하여 왔다. 본 연구에서는 기존의 연구를 포함하여 양산 Plant 까지 적용하여 RS-RDX를 개발하기 위해 노력 하였으며 결론적으로 둔감한 감도 평가 결과를 확인 할 수 있었다[3].

## 2. 본 론

본 연구는 RS-RDX를 개발하기 위해 결정화 기술을 기반으로 Pilot Scale Plant를 이용하여 연구를 수행하였으

며 양산 Plant에 적용하여 그 결과를 확인하였다. LSGT로 증명된 둔감성과 RDX 결정 특성간의 상관관계를 확인하기 위해 이화학적 분석을 수행하였다.

## 2.1 RDX

RDX는 에너지 물질 중 가장 널리 사용되고 있는 물질 중 하나로 Cyclonite, Hexogen 등으로도 불리고 있다. 역사적으로는 2차 세계대전부터 대량으로 사용되어진 화약이며 2000년대 초반부터 RS-RDX에 대한 연구가 이루어져 근래에는 해외 많은 국가에서 RS-RDX에 대한 연구 결과와 양산이 이루어지고 있다. 국내에서는 약 30년 전부터 RDX가 생산되고 있으며, 근래에 들어서야 RS-RDX에 대한 개발 필요성과 활용성에 대한 연구가 이루어지고 있다.

RDX의 제조 방법을 Fig. 1과 대표적인 물성을 Table 1에 나타내었다.

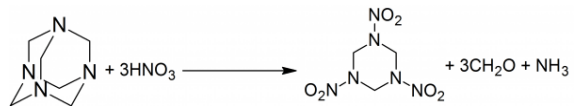


Fig. 1 RDX Synthesis Method by Nitric acid

Table 1. Properties of RDX

구분	특성
Chemical Formular	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>6</sub> O <sub>6</sub>
Molar Mass	222.12g/mol
Appearance	White/Yellowish Crystal
Density	1.82g/cm <sup>3</sup>
Melting Point	205.5℃
Flame Temp.	4,225K
Impact Sensitivity	7.5J
Detonation Velocity	8,750m/s
Heat of Combustion	2,285cal/g
Heat of Explosion	1,280cal/g
Gas Volume	908cm <sup>3</sup> /g
Oxygen Balance	-21.6%

RDX의 제조 방법은 그 공법에 의해 질산법과 초산법으로 나누어지며 국내는 질산법을 이용하여 합성을 진행한다. 미국과 호주의 경우는 초산법을 많이 사용하며 유

럽은 제조국에 따라 각각 다른 방법을 채용하고 있는 것으로 알려져 있다[4].

추가적으로 RDX는 군사 규격에 의해 입도 조건이 규정되어 있는데 이는 탄두 또는 추진기관에서 충전율 및 연소 속도를 조절하기 위함이다. 국내에서는 RDX CL-1, CL-3, CL-5를 결정화 공법에 의해 제조 하고 있으며 이 보다 입도가 작은 RDX는 Grinding 공정이 개발되어 제조되고 있다. 근래에는 정밀 결정화 공정을 도입하여 sub-micron size의 RDX 제조에 대한 개발이 진행 되고 있다. 국내에서 제조되고 있는 RDX의 대략적인 입도별 평균 사이즈를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Crystal Size of RDX

구분	평균 입도
RDX CL-1	100~250 $\mu$ m
RDX CL-3	250~500 $\mu$ m
RDX CL-5	10~50 $\mu$ m
RDX CL-G	3~8 $\mu$ m
RDX CL-N	0.5~3 $\mu$ m

본 연구에서는 국내에서 합성된 RDX를 기반으로 결정화 실험을 진행하였으며 유럽에서 수입된 RS-RDX를 그 비교 대상으로 선정 하여 감도 평가를 수행하였다.

## 2.2 LSGT

본 연구에서는 RS-RDX의 Shock 감도를 LSGT를 적용하여 평가하였다[5]. LSGT의 시험 규정은 AOP(Allied Ordnance Publication)-7 “Manual of Data Requirements and Tests for the Qualification of Explosive Material of Military Use”를 사용하였다[6].

화약을 기폭 시키는 외부 자극으로는 충격, 마찰, 정전기 및 Shock 그리고 열과 화기로 생각 할 수 있으며 탄약 체계에 적용된 화약의 민감도는 주로 Shock과 열의 영향을 받는다고 볼 수 있다. 그러므로 화약의 Shock 감도는 무기 체계의 안전성에 매우 중요한 변수로 볼 수 있다.

LSGT는 화약의 Shock 감도를 측정하는 대표적인 평가 방법이며 RS-RDX의 둔감성은 현재까지 LSGT와 같은 Shock 감도 시험에서만 확인이 가능 한 것으로 알려져

있다. 일부 유럽 국가에서는 LSGT 보다 시험 규모가 작은 Water Gap Test 등을 사용하기도 한다.

LSGT는 규정된 Donor 화약이 기폭되어 발생한 일정한 Shock의 크기를 PMMA Gap의 높이로 조절하여 Acceptor에 전달하여 Sample 화약이 기폭 되는지를 확인하는 시험이다. 결과 값은 기폭 후의 증거판을 확인하여 50% 기폭 에너지 값으로 표현된다.

LSGT 시험의 모식도와 증거판 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

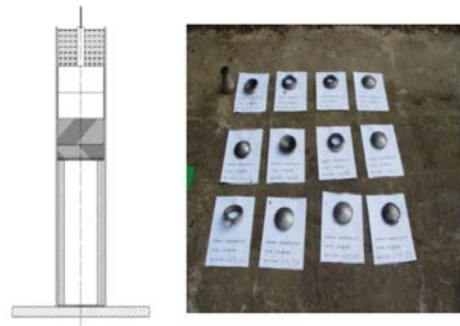


Fig. 2 LSGT Scheme

LSGT에 충전되는 화약은 본 연구에서 진행한 RS-RDX CL-1 및 CL-3와 함께 RS-RDX 기준 시료를 사용하였으며 시험 원리에 맞춰 PBXN-109 조성으로 사용하였다[7]. 시료인 RDX CL-1 및 CL-3 외에는 모두 동일 LOT.를 사용하여 평가의 신뢰도를 높이기 위해 노력 하였다. Table 3에 PBXN-109 조성을 나타내었다.

Table 3. PBXN-109

RDX CL-1 / CL-3	48%
RDX CL-5	16%
Aluminum	20%
HTPB 外	16%

## 2.3 RS-RDX의 Pilot Scale 적용 실험

RS-RDX의 둔감성 원리에 대해서는 세계적으로 십수년에 걸쳐 지속적으로 연구되어 왔으나, 아직 명확한 원인이 밝혀지지 않았으며 여러 연구 기관에서 일반적으로 예상하는 원인은 RDX 결정의 완벽성과 결정 형태에

있다. 전자인 RDX 결정 완벽성은 RDX 내부의 결정 결합이나 기포가 적어야하며 추가적으로 RDX의 순도가 높아야 한다[8]. 이는 RDX 결정 내에 불순물이나 결함 등이 있으면 화약이 에너지를 받았을 경우 Hot-spot으로 작용하여 쉽게 기폭 될 수 있기 때문이다. 후자인 결정의 형상은 각이 없이 둥근 형태를 보여야 둔감하다는 이론으로 화약이 에너지를 받았을 때 특정 지점에 에너지가 집중되어 기폭 된다는 이론이다.

본 연구에서는 상기의 두 가지 이론에 집중하여 결정의 질을 높이기 위한 연구와 결정의 형태를 등글게 만들기 위한 노력을 수행하였다. RS-RDX의 Pilot Scale 연구는 100L와 150L Scale의 결정화 설비에서 수행하였으며, 이화학 분석을 통해 RDX의 일반 특성을 확인하였으며, LSGT를 통해 감도 차이를 확인하였다. Pilot Scale에서는 RDX CLL-1에 한정하여 실험을 진행하였으며 Fig. 3에 Pilot Scale 설비를 나타내었다.



Fig. 3 Pilot Scale Equipment

결정화 공정으로는 냉각 결정화 공정과 증류 결정화 공정을 사용하였으며 Lab.과 Pilot Plant에서의 Screening Test를 통해 DMSO(Dimethylsulfoxide)를 이용한 냉각 결정화와 Cyclohexanone을 이용한 증류 결정화로 선정하였다. DMSO를 이용한 냉각 결정화 공정의 경우 RDX 결정 형태에 각이 많아 EA(Ethyl acetate)를 이용한 식각 공정을 추가하여 결정 형태와 둔감성의 상관관계를 확인하였다. 증류 결정화는 결정의 질 보다는 형태 개선을 한 것이며 결정화기 내부의 유동을 강화시켜 장시간의 증류 결정화 공정에서 식각이 일어 날 수 있게 유도 하였다.

Pilot Scale 연구의 이화학 분석 결과를 Table 4에 나타내었다. 이화학 분석 결과 모든 RDX가 상용 RDX와

전반적으로 차이가 없는 것을 알 수 있다. 특히, RDX 결정성과 관련이 있을 수 있는 순도, 밀도, 용점의 경우 거의 차이가 없으며 입도의 경우 냉각 결정화 공정에 의한 RDX가 비교적 입도가 크게 나오는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 4. Pilot Scale Analysis Result

구분	냉각 RDX	식각 RDX	증류 RDX	상용 RDX
순도	100%	100%	100%	100%
밀도	1.802	1.790	1.792	1.794
용점	203℃	203℃	203℃	203℃
입도	285 $\mu$ m	215 $\mu$ m	185 $\mu$ m	205 $\mu$ m
산도	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
불용분	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Table 5. Pilot Scale Morphology Result

냉각 RDX		
식각 RDX		
증류 RDX		
상용 RDX		

결정 형상과 내포물의 함량을 확인하기 위해 SEM과 굴절액을 이용한 현미경을 사용하여 확인하였다. Table 5에 그 결과를 나타내었다. 전반적으로 내부 불순물은 상용 RDX가 가장 많았으며 본 연구의 결과물은 유사한 것으로 판단되고 있다. 결정 형상의 경우 DMSO를 이용한 냉각 결정화 공정에서 가장 완벽한 RDX 결정의 형태를 유지하고 있으며 이는 결정에 각이 많은 것을 의미 한다.

식각 공정의 경우 좀 더 각이 적은 것을 확인 할 수 있으며 증류 공정이나 상용 RDX의 경우는 유사하게 비교적 둥근 형태를 나타내는 것을 알 수 있었다.

Pilot Scale 연구의 결과물을 LSGT를 통해 Shock 감도 측정을 진행하였다. 그 결과 본 논문에서 연구된 3개의 RDX가 상용 RDX에 비해 Card Gap 기준 10장 이상 둔감한 결과를 확인 할 수 있었으며 이는 Shock Wave Pressure 기준 약 2kbar의 높은 감도 차이인 것을 확인 할 수 있다. 시험 샘플 3중에서는 3장 내외로 비교적 차이가 적은 것을 확인 할 수 있었다. Figure 4에 LSGT 평가 결과를 나타내었다.

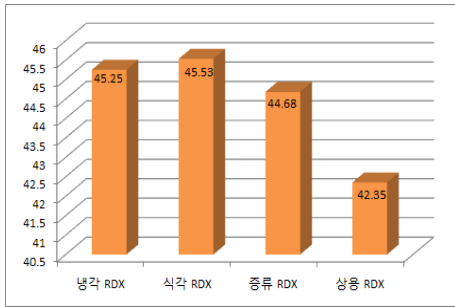


Fig. 4 Pilot Scale LSGT Result(kbar)

RDX의 둔감화를 통해 RS-RDX 개발을 위한 Pilot Scale 연구 결과 RDX 결정의 내포물을 비교적 적게 조절 할 수 있었으며 이러한 결과가 RDX의 둔감성을 조절 할 수 있는 것을 확인 할 수 있었다.

#### 24 RS-RDX의 양산 Plant 적용 실험

Pilot Scale의 연구 결과를 양산 PLANT에 적용하여 결정 특성과 Shock 감도를 확인 해 보았다. 결정화 설비는 35,000L의 증류 결정화기를 사용하였으며 결정화 공정은 상기의 증류 결정화 공정을 적용하였다. RDX 양산 시설을 Fig 5에 나타내었다.

상기 연구에서 둔감성 결과가 가장 좋았던 냉각 결정화에 의한 식각 공정은 제조 공정이 2단계로 비교적 생산성이 낮고 일부 설비 투자가 필요하여 이번 연구에서는 적용하지 않았으나 향후 연구를 지속할 계획에 있다.

양산 Plant에서는 RDX CL1과 CL3에 대한 공정을 선정하였으며, 동일 Class에서 둔감성 차이에 원인을 주

는 공정 변수를 확인하기 위해 증류 시간과 용제 품질 차이에 대한 실험을 수행하였으며 수입된 상용 RS-RDX를 비교 시료로 사용하였다[11].



Fig. 5 RDX Plant

전반적인 실험은 Pilot Scale에서 정립된 공정을 적용 하였으며 유틸리티의 온도를 조절하여 증류시간을 약 1.2 배로 조절한 실험과 용제 순도를 92%에서 98%로 높인 실험을 함께 수행하였으며, 그 LSGT 결과를 Fig. 6과 Fig 7.에 나타내었다.

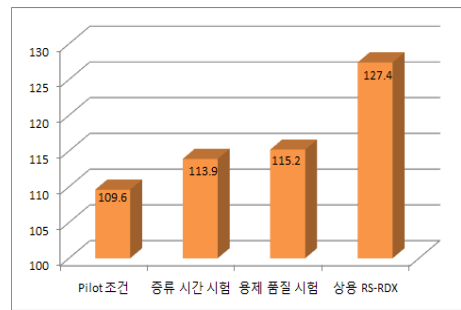


Fig. 6 LSGT Result of RS-RDX CL-1(Card Gap)

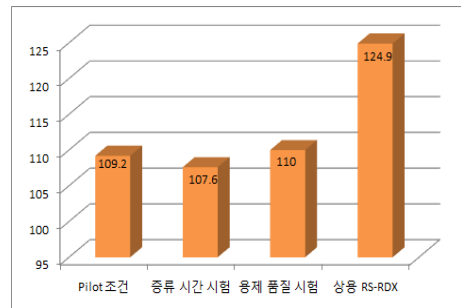


Fig. 7 LSGT Result of RS-RDX CL-3(Card Gap)

LSGT 시험 결과 RDX CL-1 및 CL-3 모두 본 연구에서 수행한 RDX의 감도가 기존의 상용 RDX에 최소 12장에서 최대 17장까지 둔감한 결과를 확인하였다. 각

Class별 변수 시험에서는 최대 5장 정도의 차이를 보였으나 전반적으로 크게 차이나지는 않았으며 변수에 따른 경향성 또한 확인 할 수 없었다. 또한 일반적인 이화학 분석에서도 특별한 차이점을 나타내지는 않았다.

상기와 같은 결과를 확인해 보면 본 논문에서 연구하여 양산 Plant에서 개발한 RS-RDX가 해외에서 시판되고 있는 RS-RDX 보다 둔감한 것을 확인 할 수 있었으며 향후 RS-RDX에 대한 국내 시판도 가능 할 것으로 예상할 수 있다.

### 2.5 RS-RDX의 둔감 특성 분석

추가적으로 본 연구에서는 RS-RDX의 둔감 특성을 분석하려는 노력을 시도 하였다. 현재 RS-RDX의 감도를 평가 할 수 있는 방법은 LSGT만 확인된 상태이나 LSGT는 기폭 시험으로 일반적인 분석에 비해 일정, 비용 및 위험성이 높은 방법이다. 향후 RS-RDX를 생산 한다고 해도 지속적인 LSGT 평가는 어려울 수 있어서 이에 대한 해결 방법이 필요하다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 아직 RS-RDX의 둔감성 원리에 대해서는 세계적으로 밝혀지지 않은 상태여서 적당한 분석 방법을 선정 할 수 없었으나 세계적으로 주목 받고 있는 방법을 포함하여 여러 가지 분석을 시도 하여 보았다.

우선 RDX 결정의 불순물과 관련이 있는 순도, 밀도 및 용점을 분석하여 Table 6에 나타내었다.

Table 6. Analysis Result of RS-RDX

구분	#1	#2	#3	#4	
CL-1	LSGT	109.6장	113.9장	115.2장	127.4장
	순도	100%	100%	100%	100%
	밀도	1.781	1.788	1.783	1.782
	용점	202.9℃	203.1℃	202.9℃	202.7℃
CL-3	LSGT	109.2장	107.6장	110.0장	124.9장
	순도	100%	100%	100%	100%
	밀도	1.783	1.783	1.784	1.784
	용점	203.3℃	202.8℃	202.9℃	203.1℃

#1 : Pilot Scale 조건 시험      #2 : 증류 시간 변경 시험  
#3 : 용제 품질 변경 시험      #4 : 상용 RS-RDX

추가적으로 RDX 결정의 완벽성을 정량적으로 확인하기 위한 굴절을 정합법(Matching Refractive Index Method)을 이용하여 분석을 실시하였다[1]. 이는 Pilot

Scale 공정에서 진행한 굴절을 분석과 동일한테 추가적으로 image analyzer를 이용하여 RDX 결정 내의 내포물을 정량화하는 방법으로 그 원리를 Fig. 8에 나타내었다.

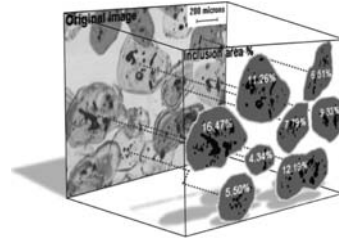


Fig. 8 RDX inclusion image analysis diagram

상기 분석의 결과 값은 감마 분포 확률 밀도 함수를 이용하여 회귀되어 분포 곡선을 구해 최종적으로 정량화 할 수 있다.

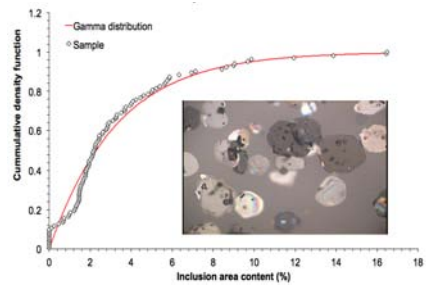


Fig. 9 RDX inclusion area gamma distribution

이러한 방법을 이용하여 정량화된 결과값을 Table 7에 나타내었다.

Table 7. Analysis Result of RS-RDX

구분	#1	#2	#3	#4	
CL-1	LSGT	109.6장	113.9장	115.2장	127.4장
	내포물	3.29%	4.86%	3.85%	2.10%
	이미지				
CL-3	LSGT	109.2장	107.6장	110.0장	124.9장
	내포물	3.14%	1.53%	1.58%	4.69%
	이미지				

#1 : Pilot Scale 조건 시험      #2 : 증류 시간 변경 시험  
#3 : 용제 품질 변경 시험      #4 : 상용 RS-RDX

상기의 분석 결과를 종합하여 보면 RDX 결정의 완벽성 및 결정의 형상과 RS-RDX의 둔감성 사이에서 정량성 또는 연계성을 확인 할 수 없다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 해외 선진 연구소의 연구 결과와 유사한 결과였다.

추가적으로 일부 전문가 집단에서 추천되고 있는 Advanced- DSC Method 및 XRD Rocking Curve Method등의 분석을 수행해 보았으나 상기 결과와 유사하게 어떠한 연관성도 확인 할 수는 없었다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 대표적인 에너지물질로 각종 무기 체계의 탄두 및 추진제에 널리 사용되고 있는 RDX의 둔감화에 공정 개발을 수행하였다. 다양한 방법에 대해서 Pilot Scale과 양산 Plant에 적용하여 실험한 결과 해외 상용 RS-RDX 보다 둔감한 RS-RDX를 개발 할 수 있었다.

이러한 RS-RDX는 향후 다양한 분야에 적용하여 무기 체계의 IM 성능 향상에 도움이 될 것이라 기대 할 수 있다.

RS-RDX의 둔감 특성 분야에 대한 연구는 결과적으로 마땅한 분석 방법을 확인하지 못 하였다. 이 분야는 앞으로 지속적으로 연구가 필요한 분야이며 LSGT가 아닌 다른 방법에 의한 RS-RDX의 감도 확인 방법이 반드시 필요한 연구 분야로 예상된다.

추가적으로 본 연구에서 적용된 화약 결정의 둔감화 방법은 유사한 제조 공정을 사용하는 PEIN, NTO, AP 및 HMX 등의 에너지 물질의 둔감화 연구에 참고적으로 활용이 가능 할 것이라 판단 할 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. Kim J. W., Kim H. S., Koo. K. K., "Characterization of Liquid Inclusion of RDX Crystals With Cooling Crystallization", *Crystal Growth & Design*, Vol. 9, No. 6, 2009, pp. 2700-2706
2. 권순길, 이정환, 황준식, "RDX계 화포추진제의 가공성과 물리적 특성", 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2003, pp. 691-694
3. Yun G. A., Lee K. B., Lee G. D., "Reduced Sensitive RDX Crystal", 22<sup>nd</sup> International Workshop on Industrial Crystallization, 2015, pp. 335-341
4. 김선환, 김민준, 설민정, "분자화약류의 제조 및 특성", 한국화학공학회 제12권, 제3호, 2006, pp.1195-1199
5. Wolfson, M. G., A Large Scale Gap Test at MRL for Measuring Shock Sensitivity of Explosive Fillings for Insensitive Munitions, 1994, MRL-TR-93-43, DSTO
6. North Atlantic Treaty Organization, Manual of Data Requirements and Tests for the Qualification of Explosive Materials for Military Use", 2004, AOP-7, NATO
7. Freche, A. Spycckerelle, C. and Lucume, "SNPE insensitive nitramines", *Insensitive Munition and Energetic Materials Technology Symposium*, 2003
8. Lecume, S. Chabin, P. and Brunet, P., "Two RDX Qualities for PBXN-109 Formulation Sensitivity Comparison, *Insensitive Munition and Energetic Materials Technology Symposium*, 2001