

둔감탄약 시험의 측정불확도 산출 방안 연구

김민*† · 김종명* · 양승호** · 선태부**

* 한국산업기술시험원 신뢰성융합기술센터
** 한화중합연구소

A Study on Measurement Uncertainty of Insensitive Munitions Tests

Min Kim*† · Jong-Myoung Kim* · Seung-Ho Yang** · Tae-Boo Sun**

*Korea Testing Laboratory
**Hanwha Group R&E Center

ABSTRACT

Purpose: This study proposes the main sources of uncertainty and uncertainty analysis of a measurement system of insensitive munitions tests.

Methods: We established the mathematical model for calculating measurement uncertainty of insensitive munitions tests, conducted experiments for calculating uncertainties of dynamic sensitivity and overshoot value, and estimated the distributions of uncertainty factors.

Results: The measurement uncertainty calculation methods are presented, which include experimental data processing methods for calculating uncertainties of dynamic sensitivity and overshoot value.

Conclusion: The measurement of explosion pressure in insensitive munitions tests is an important issue to the reporting test results and classifying reaction types. The more efforts to ensure the reliability of the insensitive munitions tests results are required.

Key Words: Insensitive Munitions Test, Measurement Uncertainty, Explosion Pressure

● Received 31 August 2017, 1st revised 3 September, accepted 4 September 2017

† Corresponding Author(minkim@ktl.re.kr)

© 2017, The Korean Society for Quality Management

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. 서 론

둔감탄약이란 필요시에는 성능 및 작전 요구조건을 충분히 만족하면서도 우발적인 외부 자극이 가해졌을 경우에는 의도하지 않은 기폭가능성 및 주변 피해를 최소화하는 탄약을 뜻한다.

미 해군 최악의 3대 항모 사고인 1966년 Oriskany 사고, 1967년 Forrestal 사고, Enterprise 사고를 비롯하여, 1991년 쿠웨이트 미군 Camp Doha 폭발사고, 2013년 러시아 사마르 폭발사고에 이르기까지 탄약의 제조, 수송, 저장 및 전장 운용 중 탄약의 둔감성 미확보로 인한 사고가 세계 도처에서 발생하였다. 이러한 여러 피해 사례로부터 외부의 돌발적인 각종 위기상황에서 무기체계 및 인원의 생존성을 극대화할 수 있는 둔감탄약의 필요성이 강력히 대두되어 왔다. 이에 따라 군사 선진국에서는 둔감탄약의 개발과 도입을 법령으로 강제하는 등 탄약의 둔감화는 세계적 추세가 되어가고 있으며, 우리 군 또한 막대한 인명 및 재산상의 피해와 작전준비태세의 공백을 막기 위해서는 둔감탄약의 설계 기술 연구가 필요하다는 공감대가 형성되고 있다.

둔감탄약 설계기술 연구의 성공 여부는 둔감탄약 시험평가를 통해 확인되어야 한다. 그러나 현재 둔감탄약에 대한 국내 평가 기준이 없어 MIL-STD-2105D, NATO STANAG 4439 등 해외 둔감탄약 평가 기준에 의존하고 있는 실정인바 우리의 상황에 적합한 시험 진행과 우리 군의 요구조건 충족 여부 판단을 위해서는 둔감탄약 시험평가방법의 한국화와 시험 가이드라인의 확립이 시급하다. 또한 올바른 평가를 위해서는 둔감탄약의 평가 방법 및 시험 능력의 적정성에 대한 객관적인 입증도 동반되어야 한다. 아울러, 개발된 둔감탄약의 수출을 고려할 때, 해외에서의 중복적인 시험평가를 받음으로 인한 시간·비용의 낭비를 막기 위해서는, 우리의 둔감탄약 시험 결과가 국제 공인을 받을 수 있는 수준이 되도록 시험결과의 신뢰성 확보와 평가 체계의 구축 방안이 필요하다.

정확하지 못한 측정값은 잘못된 의사결정을 초래할 수 있으므로, 측정시스템 분석은 시험평가 체계의 신뢰성을 확보하는데 있어 필요한 가장 중요한 선행 활동 중 하나이다. 기존의 전형적인 측정능력분석 절차는 Gage R&R study였다. Gage R&R study에서는 측정실험을 수행하여 반복성(repeatability)과 재현성(reproducibility)에 관한 표준편차 $\hat{\sigma}_{GRR}$ 를 추정하여 총변동량 대비 혹은 공차대비로 측정능력지수를 산출하여 해당 측정시스템의 합부를 판정한다(Chang and Kim 2007; Lee and Lee 2000). 한편 2012년 측정능력분석에 관한 국제 표준인 ISO 22514-7이 제정되었는데, 불확도 표현에 관한 지침인 ISO/IEC Guide 98-3에 근거해 측정 불확도를 파악하여 측정 능력을 평가한다(Lee and Lim 2016). 폭압 측정 데이터는 둔감탄약시험에서 반응 등급을 결정하는 가장 중요한 데이터 중 하나이기 때문에, 폭압 측정 데이터의 불확도 평가는 실험 결과를 보고하는 과정에서 중요한 역할을 한다. ISO/IEC 17025에 따른 국제 공인 시험평가 체계 구축을 위해서는 ISO 22514-7에 따른 측정시스템의 능력 평가 및 교정이 필요하다. 그러나 폭압과 같은 과도 또는 동적 측정시스템의 감도는 정적 측정시스템의 감도와 차이가 있으며, 동적 특성치의 불완전한 반응 특성은 정적 특성치에 비해 큰 불확도를 갖게 된다. 동적인 교정 없이는 측정시스템의 동적 불확도의 정량적인 평가가 불가능하다. 정적 교정과 달리, 동적 교정은 여기 신호의 대역폭과 관련되기 때문에, 일반적으로 주파수반응함수를 구하려는 시도가 많았다. Huang(2005)은 측정 신호의 주파수 스펙트럼에 따라 적절한 동적 측정시스템을 선택하기 위한 방법을 제안했다. Zhang and Zu(2007)는 측정시스템의 주파수 반응의 불확도 개념을 제안했다. 과도 또는 동적 측정에서 또 다른 문제는 동일한 조건 하에서도 대부분의 과도 또는 동적 측정의 반복성이 떨어진다는 점이다. 따라서 동적 측정 데이터의 불확도 분석 방법은 정적 측정 데이터를 분석하는 통계적 방법과 다르게 된다. Hessling(2006)은 transfer function이 알려졌다는 가정 하에서 최대 동적 오차를 추정하는 방법을 제안하였으나, 정확한 transfer function을 안다고 가정하는 것은 다소 현실성이 떨어진다.

본 논문에서는 둔감탄약의 도입 배경 및 현황을 살펴보고, 둔감탄약 시험 시 폭발을 측정하는 현장 상황을 반영하여 주요 불확도 요인과 정적 측정 데이터 대비 동적 감도를 처리하는 방안을 예시를 통해 제안하였다.

2. 둔감탄약의 도입 배경 및 현황

탄약 둔감화 관련 연구/정책과 둔감탄약 시험평가 규격의 발전은 반복적인 탄약 관련 사고를 통해 이루어졌다고 해도 과언이 아니다. 국내외의 주요 탄약 관련 사고들을 살펴보면 다음과 같다.

2.1 탄약 관련 대표적 사고

탄약 둔감화 관련 연구는 특히 베트남전 중 발생한 여러 탄약 관련 사고로부터 촉진되었다. 그 중에서도 1965년 베트남 비엔호아 공군기지 사고는 탄약 둔감성의 중요성에 대한 폭넓은 관심을 모으게 된 최초의 사고라고 할 수 있다. 적군에 의한 탄약고 화재와 그에 따른 연쇄 폭발로 33명이 사망하고 많은 양의 탄약이 소실되었다.

1966년 미 항모 Oriskany에서는 2.75인치 로켓 탄두가 화염에 노출되어 폭발 사고가 발생하였고, 사망 44명, 부상 156명, \$10M(당시 기준)의 재산상 피해를 입었다. 1967년 미 항모 Forrestal에서는 발함 준비 중인 F-4 팬텀에 장착된 대지 공격용 Zuni 로켓의 오발로 함재기에 화재가 발생하고, 뒤이은 9발의 폭탄이 연쇄 폭발하여 사망 134명, 부상 161명, \$182M(당시 기준)의 재산상 피해가 발생하였다(Graves 1967). 같은 해 미 항모 Enterprise에서도 Zuni 로켓에 항공기 배기가스가 노출되어 폭발되었고, 그 후 화재가 발생하여 사망 28명, 부상 343명, \$122M(당시 기준)의 재산상 피해가 발생하였다(Carlin 1993). 이 사고들은 미 해군 최악의 3대 항모 사고로 손꼽히며, 해상에서의 사고는 자칫 최악의 상황으로 치달을 수도 있다는 점에서 향후 미 해군이 둔감탄약의 개발과 도입을 주도하는 계기가 되었다. Table 1은 3대 미 항모 사고의 피해 규모 및 둔감탄약을 도입했다고 가정했을 경우의 피해 경감량을 나타낸 것으로 둔감탄약을 도입했을 경우, 인명/재산상 피해를 크게 줄일 수 있음을 보여주고 있다(Tindle 1991).

Table 1. Damage reduction when introducing Insensitive Munitions

Ship		Fatalities	Injured	Ship Damage (\$M)	Aircraft Damaged/Destroyed	Aircraft Damage (\$M)	IM Savings		
							Lives Saved	Injuries Averted	FY02 (\$M)
Oriskany	Actual	44	156	7.6	3/3	3.4	44	106	40.4
	IM Est.	0	50	3	0/0	0			
Forrestal	Actual	134	161	72.1	43/21	110	74	141	825.3
	IM Est.	60	20	5	6/2	6.6			
Enterprise	Actual	28	343	56.2	17/15	70	28	323	529.2
	IM Est.	0	20	3.5	1/1	4.7			

전장에서뿐만 아니라 탄약의 수송 중에도 탄약 관련 사고는 이어졌다. 1969년 탄약 수송선 SS Badge State는 MK-82, M117, MK-84 등을 가득 싣고 북태평양을 향해 중 폭풍을 만났다. 폭풍에 의해 일부 폭탄이 팔렛으로부터 분리되어 바닥을 구르던 중 폭발하여 배가 침몰되고 5336톤의 탄약이 소실되었으며 40명의 승무원 중 14명만이 탈

출에 성공할 수 있었다. 1973년 미국 캘리포니아주 Roseville에서는 폭탄을 적재한 기차의 한 화물칸에서 발생한 화재가 18칸의 연쇄 폭발로 이어지면서 부상 48명, \$24M의 재산상 피해가 났으며, 같은 해 미국 아리조나주 Benson에서도 폭탄을 적재한 기차칸에서 발생한 화재가 연이은 12칸의 폭발사고로 확대되었다(Nelson 1985).

1981년에는 또 다시 미 항모 Nimitz에서 사고가 발생하였다. EA-6B 비행기가 야간 착륙 중 충돌하여 화재가 발생했고, 연이은 Sparrow 미사일 탄두가 폭발하여 사망 14명, 부상 48명, \$79M의 재산상 피해가 발생하였다.

영국의 경우 포클랜드 전쟁에서 탄약 관련 사고로 두 척의 전함을 잃었다. 1982년에 AM-39 Exocet 미사일이 Sheffield호에 꽂혔는데, 미사일 자체는 불발하였으나 후속 화재로 인해 전함이 침몰하고 20명이 사망하는 사고가 발생하였다. 같은 해 프리깃함 Antelope호에서는 투하된 불발탄의 신관 제거 작업 중 1차 폭발이 발생하고, 이것이 대규모의 2차 폭발반응으로 이어지면서 침몰로 이어지는 사고가 발생하였다. 이러한 사고 경험은 추후 미국의 동맹국에 대한 둔감탄약 공동 개발과 도입 요청 시 영국이 전향적인 태도를 취하는 계기가 되었다.

고속도로에서 발생한 인상적인 사고는 1985년 미국 오클라호마주 Checotah에서 일어났다. 10개의 MK-84 폭탄을 운송하던 트레일러가 충돌사고를 낸 후 약 35분간 화재에 노출되었고, 그 열에 의해 3차량의 연쇄적 폭발 발생으로 고속도로 상에 너비 28 피트, 깊이 27 피트의 구덩이가 생기고 파편이 반경 990 피트 내에 뿌려지는 사고로 51명의 부상자가 발생하였다.

한편 상대적으로 탄약 관련 대규모 사고가 많이 발생하지 않아 둔감탄약의 개발과 도입에 소극적이던 미 육군에서는 1980년대 말에서 1990년대 초 사이에 다음과 같은 연이은 사고들을 계기로 둔감탄약의 개발/도입에 적극 참여하게 된다. 1989년에는 아리조나주 Flagstaff 근처 나바호 육군창으로 군용기 탄약을 끌고 가던 트럭에 불이 나 운전자가 사망하고 동승자가 중상을 입는 사고가 발생했는데, 화재가 발생한 후에도 20 mm 포탄이 계속해서 폭발하는 바람에 수 시간 동안 고속도로가 통제되었다. 1990년에는 캘리포니아에서 대서양 연안으로 21 톤의 군용 화약을 수송하던 트럭이 네바다주 Beaty 부근에서 화재에 휩싸였고, 연쇄적인 대규모 폭발이 일어나 Las Vegas와 Reno 사이의 간선도로가 9시간 반이나 통제되었다. 결정적으로 1991년에는 쿠웨이트시 서쪽 20 km 지점의 미군 보급창인 Camp Doha에서 대규모 폭발사고가 발생하였다. 155 mm 탄약을 적재한 M992 탄약 운반차에 화재 발생 후 연이은 대규모 연쇄 폭발로 사망 3명, 부상 52명, 차량 102대(\$23M), 탄약(\$15M) 등 \$40M 이상의 재산상 피해를 입었으며, 이라크전을 통틀어 잃은 전차 수보다 많은 수의 전차가 손실되었다.

2000년대 들어서도 세계 각국에서 기존의 재래식 탄약의 저장 중 크고 작은 사고가 빈번히 발생하고 있다. 2002년에는 아프가니스탄 Spin Boldak에서 미확인 물체가 탄약고의 BM-21 로켓에 충돌 후 연쇄폭발이 일어나 26명이 사망하고 90명이 부상당한 사고가 일어났으며, 같은 해 아프가니스탄 Jalalabad에서도 저장된 화약이 폭발하여 사망 32명, 부상 70명의 피해를 입는 사고가 발생하였는데, 40 °C 이상의 기온으로 인한 탄약고 내부의 온도 상승이 그 원인으로 추정되었다. 최근 사고 중 대규모 인명 피해로 관심을 끈 사고로는 2012년 콩고공화국 Brazzaville 사고가 있다. 탄약고에서 전기합선으로 인한 대규모 폭발사고가 발생하여 무려 236명이 사망하고 1500여명이 부상당했다. 러시아에서도 재래식 탄약 관련 사고가 자주 발생하는 것으로 알려지고 있다. 가장 최근에 알려진 사고를 두 가지만 꼽으면 다음과 같다. 2012년 오렌부르크에서는 4천여 톤의 폭약이 연쇄 폭발하여 상당히 먼 지역에서도 폭발이 감지될 수 있을 정도로 대규모 사고가 발생하였는데, 폭발물 보관 장소 근처에 버린 담뱃불이 원인인 것으로 추정되고 있다. 2013년 사마르 훈렌장 탄약고에서도 폐기 포탄을 해체하는 과정에서 초기 폭발이 발생하고 이것이 탄약고 전체로 폭발이 확산되어 1명이 사망하고 48명이 부상당했으며 인근 지역 주민 6500여명이 대피하는 사고가 발생하였다.

국내에서 발생한 가장 유명한 사고는 1977년 이리역 사고이다. 인천의 한국화약 공장에서 광주로 출발한 폭약 수송 열차가 이리역에 도착하여 대기 중, 호송원의 촛불 관리 실수로 발생한 불이 신고 있던 30여 톤의 폭약에 옮겨

불은 후 폭발하는 사고가 발생하였다. 이 사고로 깊이 15 m, 너비 30 m의 구덩이가 생기고, 시내의 1/3 가량이 정전 등 직·간접적인 피해를 입었으며, 59명의 사망자와 1343명의 부상자가 발생하였다. 이리를 복구하는 데 들어간 비용만도 당시 기준으로 130여억 원이 소요되었을 정도로 사상초유의 사고였다. 이 사고는 일반 대중에게도 탄약의 둔감성이 보증되지 않을 경우 얼마나 무서운 피해를 입을 수 있는지를 인식시킨 사고였으며, 이후 한국화약은 안전경영에 주력하게 된다. 2004년에는 북한 용천에서 화약운송 기차가 폭발하는 사고가 있었는데, 리히터 규모 3.6의 지진이 관측될 정도로 강력한 폭발이 발생했다. 2005년 대구에서는 공군의 나이키 미사일 추진체를 수송하던 화물차량에서 차량 브레이크 과열로 인해 화재가 발생하는 사고가 있었다. 다행히 안전을 고려해 탄두와 추진체를 각각 분리하여 수송하였고, 나이키 미사일의 추진체 연료가 불이 나면 자연적으로 연소되는 고체 연료였기 때문에 추가적인 폭발로 이어지지는 않았으며 인명피해 또한 발생하지 않았다. 그러나 큰 사고로 발전할 수도 있었던 아찔한 사고였고, 그 대상이 여러 사건사고로 잡음이 끊이지 않았던 나이키 미사일이었다는 탓에 국내의 큰 관심을 받았다.

2.2 탄약 둔감화 관련 연구/정책 이력 및 발전 동향

합상에서 탄약 관련 사고 발생 시 아무리 작은 사고라도 대응을 제대로 하지 못할 경우 피할 수 없는 엄청난 피해를 입을 수가 있다. 특히, 한정된 공간에 다량의 탄약과 연료, 인원이 집중되어 있으며 함재기 이착륙 시 충돌 및 화재 사고의 가능성이 상존하는 항모의 경우는 그 위험성이 더욱 크다. 이러한 점에서 1960년대에서 1970년대에 이르기까지 탄약 관련 최악의 3대 항모 사고 및 여러 사고를 겪은 미 해군에서 둔감탄약의 필요성을 절감하고 탄약 둔감화 관련 연구와 정책을 주도한 것은 당연한 일이라 할 수 있다. 탄약의 안정성 개념에서 한발 더 나아간 ‘둔감탄약’ 개념의 도입은 1979년 미 해군 조사단장인 John D. Bulkeley 중장이 새 진함에 사용할 ‘Insensitive Ordnance’의 개발을 요청하면서부터 시작된다. 이 명칭은 나중에 James D. Watkins 대장이 폭약류, 추진체류, 신호조명탄류를 포함하는 모든 폭발물을 포함시키면서 ‘Insensitive Munitions (IM)’라 개명한 것이 현재에 이르고 있다. Bulkeley 중장의 요청에 따라 1979년 미 해군무기체계사령부 내 소규모의 EAD(Explosive Advanced Development) 프로그램이 시작되었다(Beauregard 2011).

예산 부족 등의 이유로 한동안 지지부진하던 둔감탄약 관련 연구/개발은 1981년 Nimitz 항모 사고로 다시금 그 중요성이 부각되게 되었고, 1984년에는 EAD 프로그램이 IMAD (Insensitive Munitions Advanced Development) 프로그램으로 확대 개편되었을 뿐만 아니라, 미 해군참모총장실에서 둔감탄약 정책 관련 최초의 공식문서인 OPNAVINST 8010.13을 제정하여 해군 함정에서 사용되거나 저장되는 모든 재래식 탄약에 대해 둔감탄약 시험을 수행하고, 1995년까지 모든 해군 탄약을 둔감화하겠다는 목표를 세웠다.

미 해군은 전시에 우방국으로부터 탄약을 공급받는 경우가 발생할 수 있는데 자체의 탄약이 둔감화되었다라도 공급받은 우방국의 탄약이 둔감화되어 있지 않다면 아무런 소용이 없게 된다. 또한 둔감탄약의 공동개발을 통한 비용 절감도 이를 수 있으므로, 미 해군에서는 우방국에 둔감탄약의 개발과 도입 필요성을 적극적으로 설득하게 된다. 이러한 노력의 첫 결실로 프랑스에서는 1985년 MURAT(MUnition à Risque ATténuée: 둔감탄약) 프로그램이 시작되었고, NATO에서도 관심을 보이게 된다.

마찬가지의 논리로 미 해군은 미 육군/공군에도 둔감탄약의 개발과 도입이 확산되도록 심혈을 기울인 결과, 1985년 미 합동참모부의 합동작전요구심의회에서 Insensitiv Munitions Special Study Group을 설립하여 논의를 시작하게끔 하였고, 1987년에는 미흡하나마 미 육군/공군에 IM 부서가 설립되게 된다.

1991년에 발생한 쿠웨이트 Camp Doha 사고는 둔감탄약에 대한 국제적 관심을 고조시키게 되고, 같은 해 NATO에서는 NIMIC(NATO Insensitive Munitions Information Center)이 창설되어 IM 관련 STANAG (STAN dardiza-

tion AGreements) 규격의 제정을 시작하게 된다. 또한 이때까지 둔감탄약의 개발/도입에 소극적이던 미 육군에서도 1992년 Insensitive Munitions Handbook을 발간하고, 미군 둔감탄약 합동 시험규격인 MIL-STD-2105B의 개정 전까지 해군 둔감탄약 시험규격이었던 MIL-STD-2105A에 육군용 보충판을 추가하여 사용하게 된다. 또한 1995년 DODD 5000.1 및 DODI 5000.2에 전군의 모든 탄약이 둔감화 되어야 한다는 것이 규정되고, 1996년 미 국방성 IM Integrated Product Team과 1999년 JSIMTP(Joint Services IM Technical Panel)이 설립되면서 둔감탄약의 개발과 도입이 전군으로 확대되게 되었다.

이후 2004년에 NIMIC이 MSIAC(Munitions Safety Information Analysis Center)로 확대/개편되면서 둔감탄약에 대한 국제 협력이 강화되어 현재에 이르고 있다.

2.3 둔감탄약 시험평가 규격 제정 이력 및 발전 동향

1964년 미 해군은 WR-50을 제정하여 외부의 열/충격 등의 자극으로 인해 목표물에 도달하기 전에 폭발하거나 안전상 문제를 보이던 재래식 고성능 폭약을 사용하는 비핵탄두에 대한 최소 안전 시험 요구사항 및 절차를 규정하였다. 이 규격은 FCO(Fast Cook-Off: 급속가열), SCO(Slow Cook-Off: 완속가열), BI(Bullet Impact: 탄자충격)에 대한 시험 절차와 합부 판정 기준을 다룬 최초의 규격이다.

1982년에는 WR-50이 DOD-STD-2105로 발전되었다. 이 규격에서는 WR-50의 FCO, SCO, BI 시험을 보다 자세히 규정하고, 기본 안전 시험(28일 온습도시험, 진동시험, 4일 온습도시험, 12 m 낙하시험)이 추가되었으나, 시범적인 단계에 있던 관제로 합부 판정 기준은 포함되지 않았다.

1985년에는 현재 둔감탄약 시험규격의 근간이 된다고 할 수 있는 NAVSEAINST 8010.5가 제정되었고, 이어서 1986년 NAVSEAINST 8010.5A로 개정되었다. 이 규격에서는 탄약을 운용 구성 형태대로 시험할 것과 전투 중 유발 환경 등을 포함하는 위험 분석에 기초한 위험요소 평가에 따라 시험할 것을 요구하였고, FI(Fragment Impact: 파편 충격), SD(Sympathetic Detonation: 동조폭발), SER(Sensitivity to Electromagnetic Radiation: 전자기 방사 민감도) 시험을 추가하였다. 또한, 현재 둔감탄약 시험의 판정기준으로 사용되고 있는 반응등급 개념을 다음과 같이 도입하였다(I에서 VI로 갈수록 의도치 않은 자극에 대한 반응 수준이 더 안정해짐).

① Type I: Detonation(폭굉)

불길의 전달 속도가 음속보다 빠르면서 주변 매질에 극심한 충격을 주는 반응. 폭발물이 케이스에 담겨 있을 경우, 케이스의 급속한 소성변형이 일어나고 이어 대규모 파쇄가 일어난다. 폭굉하는 탄약은 최대의 폭발과 파쇄 피해를 발생시킨다.

② Type II: Partial Detonation(부분폭굉)

탄약의 폭약 중 일부만 폭굉하는 반응. 충격파가 형성되고 케이스의 일부만 파쇄된다. 피해량은 폭굉하는 비율에 따라 다르다.

③ Type III: Explosion(폭발)

외함의 격렬한 파열에 의해 야기되는 갑작스런 가스의 방출. 금속 케이스는 취성파괴에 의해 여러 조각으로 부서진다. 크고 작은 파편들이 종종 먼 거리까지 날아간다. 반응하지 않은 연소성 고에너지 물질도 흩뿌려질 수 있다. 주변 구조물에 피해를 줄 수 있는 공기 충격이 발생된다. 폭발과 고속파편은 근처 지면이나 물품에 작은 구멍을 만들거나 금속판의 흠집이나 부서짐과 같은 피해를 줄 수 있다. 폭굉에서와 같은 금속의 소성 유동은 일어나지 않는다. 폭발 압력은 폭굉과 비교하여 상당히 낮지만 고에너지 파편은 근처에 저장된 병기의 폭굉을 유발할 수도 있다.

④ Type IV: Deflagration(폭연)

탄약 케이스가 과열되고 화재를 유발할 수 있는 연소 물질이 방출될 수 있다. 제한되지 않을 경우 탄약이나 그 일부가 일정 거리 날아갈 수 있다. 케이스의 갑작스러운 분기로 인해 일정 과압이 발생할 수 있고, 화재와 연기의 위험성이 존재한다. 날아간 파편은 위험성 파편이 아니고 근처에 저장된 탄약의 폭굉을 유발하지 않는다.

⑤ Type V: Burning(연소)

고에너지 물질이 점화되고 연소된다. 연소 가스가 극심하지 않게 방출될 정도로 케이스가 녹거나 약해질 수 있다. 파편은 화재 발생 부위에 머무른다. 외함은 내부 압력에 의해 50피트까지는 날아갈 수 있지만, 이 거리를 벗어나서는 위험성 파편이 아니어야 한다.

⑥ Type VI: No Reaction(미반응)

1991년 DOD-STD-2105가 MIL-STD-2105A로 개정되는데, 기본 안전 시험과 IM 시험을 분리하였으며, NAVSEAINST 8010.5A의 FI, SD 시험항목과 합부 판정 기준, 반응등급 등 NAVSEAINST 8010.5A의 상당 부분을 도입하였다. 그리고 새로이 부각된 외부 위협 요소를 반영하여 SCJ(Shaped Charge Jet: 성형작약제트), SI(Spall Impact: 스포 충격) 시험을 추가하였다.

1994년에는 MIL-STD-2105A가 MIL-STD-2105B로 개정되면서 미 해군 규격에서 전군 규격으로 채택되었으며, 각 군의 특성에 맞춰 시험항목 선택 및 요구사항 부분이 보완되었다.

1998년에는 NATO에서, 그 동안 개별적으로 제정되어 관리되던 각 둔감탄약 시험관련 규격들을 통합 운영할 수 있는 IM 방침과 기술적 요구사항 규격인 STANAG 4439와 AOP 39를 제정하였다.

2003년에는 MIL-STD-2105B가 MIL-STD-2105C로 개정되었는데, NATO STANAG 4439와 AOP 39를 합부 판정기준과 평가 가이드라인으로서 받아들이고, 기본 안전 시험과 IM 시험 중 SI 시험을 제외한 나머지 시험은 관련 NATO STANAG 규격을 준용하도록 하였다.

NATO STANAG 4439와 AOP 39는 2009년에 STNAG 4439 Ed. 2, AOP 39 Ed. 2, 2010년에 STANAG 4439 Ed. 3, AOP 39 Ed. 3으로 연이어 개정 작업을 거쳐 IM과 HC(Hazard Classification) 시험 부합화를 통한 시험시간, 비용, 시료 수 절감을 꾀하는 등 최신 동향을 반영하면서 전세계 IM 규격의 지배적인 규격이 된다.

2011년 MIL-STD-2105C는 MIL-STD-2105D로 개정되는데, HC 시험과의 부합화 내용 등 STANAG 4439 Ed. 3과 AOP 39 Ed. 3의 개정 내용을 반영하면서, STANAG 4439와 AOP 39에서 정의되지 않은 SI 시험을 IM 시험 항목에서 추가 시험 항목으로 변경하였다.

2.4 세계 각국의 둔감탄약 정책, 시험평가 규격 및 판정기준

세계 각국의 둔감탄약 정책 현황과 주요 국가의 둔감탄약 시험평가 규격 및 판정기준을 비교한 결과는 각각 Table 2, Table 3과 같다.

Table 2. Status of IM policy implementation in each country

Country	National Standards	IM policy implementation
USA	MIL-STD-2105D	IM requirements are mandatory for all munitions, including legacy munitions
UK	JSP 520	
Australia	DI(G) LOG 07-10	
Sweden ¹	Considering the use of STANAG 4439	
Canada ¹	DOAD 3000-2 in progress	
France ²	Mod and DGA Instruction No 211893/DEF/DGA/INSP/IPE	IM requirements are mandatory for all new munitions
Netherlands ¹	Directive of the Netherlands Armaments Director – Insensitive Munitions	
Denmark ¹	In preparation	
Finland		
Italy	DG-AD IM Guidelines 2000	IM requirements are desirable
Norway	STANAG 4439	
Germany	Fü S IV 3	

¹: Draft policy or in preparation, ²: IM requirements are mandatory for all munitions on-board aircraft carrier

Table 3. Comparison on the criteria of the IM test standards in each country

		NATO	UK	Germany	Italy	France	USA							
Threat	Test Procedure	STANAG 4439												
		STANAG	Stimuli	IM requirements	AASTP-1 S&D 1 ° 2 ° 3	JSP 520	Fu S IV 3	DG-AT IM Guidelines 2000			Instruction No 211893			MIL-STD-2105D
								Φ	ΦΦ	ΦΦΦ	★	★★	★★★	
Magazine/Store fire of aircraft/vehicle fuel fire	4240	FH	V	V	V	V	V	V	V	IV ²	V ³	V ^{3,4}	V	
Fire in adjacent magazine, store or vehicle	4382	SH	V	V	V	V	V	V	V	III	V	V ⁴	V	
Small arms attack	4241	BI	V	V	V	V	V	V	V	III	V	V ⁴	V	
Most severe reaction of same munition in magazine, store, aircraft or vehicle	4396	SR	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III ⁴	III	
Fragmenting munitions attack	4496	FI	V		V	V		I ¹	V		V	V ⁴	V	
		Heavy FI						I ¹	V		III ⁵	III ^{4,5}		
Shaped charge weapon attack	4526	SCJI	III		III	III		I ¹	III		III	III ⁴	III	

¹: Type I or better as per THA(Threat Hazard Analysis), ²: Without propulsion, ³: Only after 5 minutes, ⁴: Energetic materials required to meet substance criteria specified in UN Orange Book Test Series 7, ⁵: French National Standard NF T70-512

이와 같이 세계 각국에서는 둔감탄약 시험평가 규격으로서 기본적으로 NATO STANAG 4439와 AOP 39를 받아 들이고 있으나, 여러 군사 선진국에서는 별도의 국가규격 및 가이드라인을 제정하여 운영하고 있으며, 합부 판정기준 및 세부 시험 방법에서 다소 차이를 보이고 있다. 이는 규격의 체계 상 지역규격에 속하는 NATO STANAG 규격에서는 다수의 국가별 특수성을 모두 반영하기 어려우므로, 규격에서 상세한 내용을 다루기보다는 다소 광범위하게 일반론적인 서술이 되어 있는 부분이 많아, 각 국가별 상황에 맞게 tailoring을 해서 적용할 필요성이 있기 때문이다.

따라서 한국형 둔감탄약의 평가방법 및 시험 가이드라인을 개발함에 있어 기본적으로는 NATO STANAG 4439와 AOP 39를 준용하되, 이를 단순히 번역해서 사용할 것이 아니라, 우리 군의 도입 정책, 목적, 위협요소, 운용 및 구성형상 등을 분석하고, 안전이나 환경 등 관련 국내 법규 및 시험 상황/관례를 반영하며, 환경조건의 차이로 인한 외부 자극의 수준, 종류 등을 고려하여 세부적인 시험 장비 및 set-up, 시험 조건, 시험 절차, 반응등급의 분류 기준 및 평가 기준 등을 적절히 tailoring 해야 할 것이다.

3. 폭발 측정불확도

둔감탄약시험에서 폭발 반응 현상은 고속카메라를 이용하여 촬영이 되고, 시험절차 및 결과(파편크기 및 반응형태 등)은 DSLR로 기록한다. 그리고 폭발은 다채널 데이터 수집장치를 이용하여 측정된다. 본 논문에서는 정량적인 판단에 가장 주요하게 사용되는 폭발에 대한 측정불확도를 다루며, 시료 손실로 인한 A형 불확도는 고려하지 않았다.

3.1 수학적 모델 및 인자 분석

불확도 계산을 위한 수학적 모델은 다음과 같다.

$$\Delta p = p_i + \delta p_d + \delta p_o + \delta p_a + \delta p_f \quad (1)$$

여기서, Δp 는 폭발지시값의 불확도이며, p_i 는 폭발 지시값(Mpa)이다. δp_d 는 동적 감도로 충격파관에 의해 결정된다. δp_o 는 폭발 신호에 대한 스텝 응답에서 정상상태응답을 초과하여 나타나는 출력의 최대오차를 뜻하는 시스템의 오버슈트 값인데, 폭발의 측정 결과는 시계열 데이터로서 나타나고 측정에 의한 센서 노이즈가 크므로, 폭발과 같은 과도 신호에 대해서는 실제 압력 곡선을 보다 잘 추정하기 위해 반드시 측정값을 보정하는 것이 필요하다. δp_a 는 시스템의 충격 가속도 영향으로서, 폭발을 측정하는 환경에서 측정 시스템은 진동, 충격에 노출되게 되므로, 가속도에 대한 반응도 측정불확도에 영향을 끼치게 된다. δp_f 는 시스템의 섬광반응으로서 강렬한 빛의 과도 섬광에 대한 센서의 반응도 불확도를 야기시키는 요인이 된다.

3.2 불확도 평가

동적 감도의 상대불확도를 계산하기 위해, 본 연구에서 사용된 충격파관은 다음 관계식이 성립하는 이상적인 상태로 가정한다.

$$P_s = \frac{7}{6}(M_s^2 - 1)P_0 \quad (2)$$

$$P_r = \frac{7}{3}(M_s^2 - 1)\left(\frac{4M_s^2 + 2}{M_s^2 + 5}\right)P_0 \quad (3)$$

여기서, P_s 는 관 측벽에 설치된 변환기에 의해 발생된 반사 충격파 뒤의 압력 진폭, M_s 는 충격파 마하수, P_0 는 저압 챔버에서의 가스 압력 진폭, P_r 은 관 끝단벽에 설치된 변환기에 의해 발생된 반사 충격파 뒤의 압력 진폭이다. 동적 감도의 결정을 위한 실험 결과는 Table 4와 같다.

Table 4로부터 측정시스템의 동적 감도 k_{dyna} 와 동적 감도의 표준편차 Δk_{dyna} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k_{dyna} = 2.043 \times 10^{-1} \text{ (MPa/V)} \quad (4)$$

$$\Delta k_{dyna} = 4.834 \times 10^{-3} \text{ (Mpa/V)} \quad (5)$$

Table 4. The experimental results for determination of dynamic sensitivity

P_r (MPa)	Output (mV)	P_r (MPa)	Output (mV)
0.1905	961.5	0.1428	682.5
0.2657	1310.3	0.2528	1195.7
0.2592	1270.4	0.2457	1180.7
0.2465	1195.7	0.2583	1260.4
0.1644	834.5	0.2457	1195.7
0.2465	1200.7	0.2396	1195.7
0.2528	1195.7	0.2393	1245.5
0.2724	1305.4	0.2712	1320.2
0.2592	1280.4	0.2457	1220.6
0.1575	772.2	0.2865	1384.0

이 때, 95 % 신뢰수준을 사용한다고 하면, 동적 감도의 표준불확도 δ_{dyna} 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\delta_{dyna} = 2 \times \frac{\Delta k_{dyna}}{k_{dyna}} = 4.732 \% \quad (6)$$

동적 감도는 주어진 구간에서 동일한 확률분포를 갖는 직사각형 분포를 따른다고 가정한다. 감도계수는 식 (1)을 동적 감도 δp_d 로 편미분하여 구하면 다음과 같이 1을 얻는다.

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial \delta p_d} = \frac{\partial}{\partial \delta p_d} (p_i + \delta p_d + \delta p_o + \delta p_a + \delta p_f) = 1 \quad (7)$$

δp_d 의 불확도 기여는 합성불확도에 동적 감도의 불확도가 미치는 영향의 크기를 나타내는데, 동적 감도의 표준불확도와 감도계수를 곱하여 구하면 4.732 %이다. 자유도는 다음과 같이 B형 표준불확도의 자유도를 구하는 식에 의해 무한대이다.

$$\nu = \frac{1}{2} \times \left(\frac{100}{R} \right)^2 = \infty \quad (\text{신뢰도 } R = 0) \quad (8)$$

시스템의 오버슈트 값과 교정 후 불확도의 확률분포는 정확히 알 수 없으므로, 현실적인 대안으로서 20회 측정 중에서 가장 큰 값을 선택하고, 그 확률분포는 직사각형 분포를 따른다고 가정한다. Table 5는 시스템의 오버슈트 값의 상대불확도를 계산하기 위한 실험 결과를 나타낸다.

Table 5. The experimental results for determination of dynamic sensitivity

P_r^* (Mpa)	P_{rmax} (Mpa)	Δ (%)
0.1930	0.2076	7.6
0.2630	0.2767	5.2
0.2550	0.2687	5.4
0.2400	0.2573	7.2
0.1675	0.1768	5.6
0.2410	0.2572	6.7
0.2400	0.2550	6.3
0.2620	0.2800	6.9
0.2570	0.2755	7.2
0.1550	0.1670	7.7
0.1370	0.1499	9.4
0.2400	0.2545	6.0
0.2370	0.2501	5.5
0.2530	0.2680	5.9
0.2400	0.2610	8.8
0.2400	0.2523	5.1
0.2500	0.2600	4.0
0.2650	0.2800	5.7
0.2450	0.2594	5.9
0.2778	0.2975	7.1

여기서, P_r^* 는 안정화 시간 후의 P_r , P_{rmax} 는 시간에 따른 P_r 곡선 상 최대값, $\Delta = \frac{P_{rmax} - P_r^*}{P_r^*} \times 100\%$ 는 오버슈트 값.

이로부터 오버슈트 값의 상대불확도 δ_{over} 는 다음과 같이 얻을 수 있다(신뢰수준 95 %).

$$\delta_{over} = \max(\Delta) = 9.4\% \quad (9)$$

식 (1)을 δp_o 로 편미분하면 1이므로 감도계수는 1이고, δp_o 의 불확도기여는 9.4 %가 된다. 자유도는 동적 감도와 마찬가지로 무한대이다.

센서의 사양에는 측정에 영향을 주는 요인에 대한 감도나 불확도가 제시되는 경우가 있다. 충격 가속도 불확도의 확률분포는 정확히 알 수 없으므로, 현실적인 대안으로 센서 사양의 값을 선택하고, 그 확률분포는 정규분포를 따른다고 가정한다. 본 논문에서 사용된 센서의 충격 가속도에 의한 불확도는 0.75 %FSO(95 % 신뢰수준)로 주어졌다고 가정한다. 따라서 충격 가속도로 야기되는 상대 불확도 δ_{acce} 는 0.75 %이다. 식 (1)을 δp_a 로 편미분하면 1이 되므로, δp_a 의 불확도기여는 0.75 %, 자유도는 정규 분포로 무한대이다.

빛의 섬광에 의해 야기되는 불확도의 확률분포는 정확히 알 수 없으므로, 현실적인 대안으로 ISA S37.10 등 관련 규격에서 센서 종류 별로 제시한 값을 선택하고, 그 확률분포는 정규 분포를 따른다고 가정한다. 본 논문에서 사용된 센서의 특정 광원에 대한 상대 표준편차가 0.6 %FSO로 주어졌다고 가정하고, 95 % 신뢰수준을 사용하면, 강렬한 빛의 섬광에 의해 야기되는 상대불확도 δ_{flash} 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\delta_{flash} = 2 \times 0.6 = 1.2 \% \tag{10}$$

식 (1)을 δp_f 로 편미분하면 1이 되므로, δp_f 의 불확도기여는 1.2 %, 자유도는 정규 분포로 무한대이다. 이상을 정리하여 나타낸 폭압의 측정불확도 총괄표는 Table 6과 같다.

Table 6. The uncertainties budget of the detonation pressure

Quantity X_i	Estimate x_i	Standard uncertainty $u(x_i)$	Probability distribution	Sensitive Coefficient c_i	Contribution to the standard uncertainty $u_i(y)$	Degree of freedom ν
p_i	100	-	-	-	-	-
δp_d	-	4.732	Rectangular	1	4.732	∞
δp_o	-	9.4	Rectangular	1	9.4	∞
δp_a	-	0.75	Normal	1	0.75	∞
δp_f	-	1.2	Normal	1	1.2	∞
Δp	100				10.6	∞

합성표준불확도 $u_c(y)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_c(y) &= \sqrt{\sum_i u_i^2(y)} = \sqrt{\sum_i c_i^2 u(x_i)^2} \\ &= \sqrt{4.732^2 + 9.4^2 + 0.75^2 + 1.2^2} = 10.6 \% \end{aligned} \tag{11}$$

유효자유도 ν_{eff} 는 다음과 같이 얻어진다.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_i \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} = \infty \tag{12}$$

4. 결 론

외부 자극에 의한 의도치 않은 탄약의 폭발 사고를 직·간접적으로 겪으면서 탄약의 안정성 확보가 필요하다는 인식이 싹트긴 했으나, 기존 우리 군의 탄약 개발 방향은 주로 위력증대에 초점이 맞춰져 왔으며, 그동안 위력 증대에 기여하지 못하면서 많은 비용이 필요한 둔감탄약의 개발과 도입은 그 우선순위가 밀려왔던 것이 사실이다.

본 논문에서는 국제 둔감탄약 정책 동향을 살펴봄으로써 둔감탄약의 개발 및 도입 시도가 좌초될 상황마다 탄약의 둔감성 미확보로 인한 사고가 반복적으로 발생하여 막대한 인명·재산 피해를 입게 되면서 마침내는 미국, 프랑스,

영국, 이탈리아 등 군사 선진국들이 둔감탄약의 개발과 도입을 법령으로 강제하게 되었고, 그 외 세계 각국에서도 둔감탄약의 개발 및 도입을 서두르고 있음을 확인하였다. 이러한 교훈으로부터 우리나라 또한 둔감탄약의 개발과 도입을 지속적으로 추진해야 하며, 이에 선행적으로 둔감탄약 설계기술과 시험평가기법의 확보가 시급하다고 할 수 있다.

또한 본 논문에서는 각국의 둔감탄약 시험평가 규격의 제정 이력과 현황을 비교/분석함으로써, 국제적으로 지배적인 시험평가 규격이 된 NATO STANAG 4439 및 AOP 39를 준용하되, 이를 단순히 번역해서 사용할 것이 아니라, 우리나라의 특성을 반영한 한국형 둔감탄약 평가 방법 및 시험 가이드라인의 개발이 필요함을 밝혔다.

마지막으로 둔감탄약시험에서 폭압 측정시스템의 주요 불확도 요인을 제시하고, 동적 감도와 오버슈트 값의 불확도 계산을 위한 실험데이터 처리 방안을 포함하여, 예시를 통한 불확도 산출 방안을 다루었다. 반응등급을 결정하는데 있어 중요한 정량적 특성인 폭압의 불확도를 산출함으로써, 둔감탄약시험 결과의 신뢰성과 객관성을 확보하는데 기여하리라 판단된다.

최근 폭발성형 관통자(Explosive Formed Projectile), 열압력 탄두(Thermobaric Warheads) 등의 위협 요소가 점차 증가하고 있어 이를 둔감탄약 시험평가 규격에 반영하려는 동향이 있다. 따라서 새로운 시험 항목의 반응등급을 결정하기 위한 불확도 산출방안 연구도 계속되어야 할 것이다.

References

- Beauregard, Raymond L. 2011. "What is an "Insensitive Munition and where did the term originate?." Accessed September 1. <http://www.insensitivemunitions.org/history/what-is-an-insensitive-munition-and-where-did-the-term-originate/>.
- Carlin, Michael Joe. 1993. *Trial: Ordeal of The USS Enterprise 14 January, 1969*. West Grove: Tuscarora Press.
- Chang, Mu Sung, and Kim, Sang Bu. 2007. "Estimation of Measurement System Variability and PTR under Nonnormal Measurement Error." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 35:10-19.
- Graves, Ralph. 1967. "Forrestal Disaster - Inferno at Sea." *Life Magazine*, August 11.
- Hessling, Jan P. 2006. "A Novel Method of Estimating Dynamic Measurement Errors." *Measurement Science and Technology* 17:2740-2750.
- Huang, Jun-qin. 2005. "Estimation Method and Application of Dynamic Uncertainty." *Acta Metrologica Sinica* 26: 372-375.
- Instrument Society of America (ISA). 1995. ISA-37.10-1982 (R1995), Specifications and Tests for Piezoelectric Pressure and Sound Pressure Transducers.
- International Organization for Standardization (ISO). 2005. ISO/IEC 17025, General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories. Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization (ISO). 2008. ISO/IEC Guide 98-3, Guide to the Expression of the Uncertainty in Measurement (GUM). Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization (ISO). 2012. ISO 22514-7, Statistical Methods in Process Management - Capability and Performance - Part 7: Capability of Measurement Processes. Geneva, Switzerland.
- Lee, Seung-Hoon, and Lee, Jong-Hwan. 2000. "A Statistical Software for Measurement Systems Analysis." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 28:175-195.
- Lee, Seung-Hoon, and Lim, Keun. 2016. "Some Relationships between Measurement Capability Indices of Type 1 Study, Gage R&R Study, and ISO 22514-7." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 44:77-94.
- Naval Sea Systems Command. 1985. NAVSEAINST 8010.5. Technical Requirements for Insensitive Munitions.

- Naval Sea Systems Command. 1986. NAVSEAINST 8010.5A. Technical Requirements for Insensitive Munitions.
- Nelson, Howard R. 1985. Explosive Accidents Involving Navy Munitions. NWSY TR 85-5. Yorktown: Naval Weapons Station.
- North Atlantic Treaty Organization (NATO). 1998. AOP-39. Guidance on the Development, Assessment and Testing of Insensitive Munitions (MURAT).
- North Atlantic Treaty Organization (NATO). 2009. AOP-39, Ed. 2. Guidance on the Development, Assessment and Testing of Insensitive Munitions (MURAT).
- North Atlantic Treaty Organization (NATO). 2010. AOP-39, Ed. 3. Guidance on the Development, Assessment and Testing of Insensitive Munitions (MURAT).
- North Atlantic Treaty Organization (NATO). 1998. STANAG 4439, Policy for Introduction. Assessment and Testing for Insensitive Munitions (MURAT).
- North Atlantic Treaty Organization (NATO). 2009. STANAG 4439, Ed. 2, Policy for Introduction. Assessment and Testing for Insensitive Munitions (MURAT).
- North Atlantic Treaty Organization (NATO). 2010. STANAG 4439, Ed. 3, Policy for Introduction. Assessment and Testing for Insensitive Munitions (MURAT).
- Tindle, John R. 1991. A Historical Perspective of Insensitive Munitions and Their Estimated Contribution to CV Safety. CRM 90-260. Center for Naval Analysis.
- U.S. Department of Defense. 1982. DOD-STD-2105. Hazard Assessment Tests for Navy Non-Nuclear Ordnance.
- U.S. Department of Defense. 1991. MIL-STD-2105A. Hazard Assessment Tests for Non-Nuclear Munitions.
- U.S. Department of Defense. 1994. MIL-STD-2105B. Hazard Assessment Tests for Non-Nuclear Munitions.
- U.S. Department of Defense. 2003. MIL-STD-2105C. Hazard Assessment Tests for Non-Nuclear Munitions.
- U.S. Department of Defense. 2011. MIL-STD-2105D. Hazard Assessment Tests for Non-Nuclear Munitions.
- U.S. Department of Defense. 1996. DODD 5000.1. Defense Acquisition System.
- U.S. Department of Defense. 2002. DODI 5000.2. Operation of the Defense Acquisition System.
- U.S. Department of the Navy, Chief of Naval Operations. 1984. OPNAVINST 8010.13, OP-354, U.S. Navy Policy on Insensitive Munitions.
- U.S. Department of the Navy. 1964. WR-50, Warhead Safety Tests, Minimum for Air, Surface and Underwater Launched Weapons.
- Zhang, Zhijie, and Zu, Jing. 2007. "Uncertainty on Frequency Response of Pressure Transducer." Paper presented at the Measurement Science Conference, Long Beach, California, January 22-26.