

Friability 시험에 의한 둔감화약의 기계적 충격 감도 평가 연구

A study on friability test to assess the mechanical impact
sensitivity of insensitive explosives

박 정 수* 박 희 덕* 김 성 호* 이 정 관*
Park, Jung-Su Park, Hee-Duck Kim, Sung-Ho Lee, Jeong-Kwan

ABSTRACT

We recently developed a friability test procedure, which will be used as one of substance tests for Extremely Insensitive Detonating Substances(EIDSs) in Test Series 7 of the United Nations. This test was intended to assess the susceptibility of insensitive explosives to the break-up as high strain rate and subsequent ignition characteristics of the deformed material. We designed an air gun system using the hydro code simulation. The projectile velocities of the gun were in good agreement with those predicted by the hydro code with an inert material. Three different types of explosives, melt castable Comp B, castable plastic bonded explosives(PBXs), and pressable PBXs were tested during the development of the test procedure. Two castable PBXs, i.e. DXD-09 and DXD-10, which are currently under development as candidate formulations of EIDS were classified as EIDS, since test results with these formulations were far better than the criterion of the UN Test Series 7.

주요기술용어 : Friability(부서짐 정도), Air gun(압축공기 발사장치), Closed bomb(연소장치), $(dP/dt)_{max}$ (최대압력변화율), DXD-09, -10(주조형 복합화약), Comp B(용융충전화약) DXD-57,-59(압축형 복합화약)

1. 서 론

특정무기체계의 제한된 조건하에서 탄두 효과를 극대화하기 위해서는 고퍽화약의 고성능화를 목표로 화약 조성 개발 연구가 수행되어야 하지만 그 외의 환

경, 즉 저장이나 수송 그리고 일반적인 취급은 물론 급격한 외부 환경변화에도 반응하지 않고 안전성이 확보되어야 하는 둔감화의 또 다른 목표를 충족하면서 개발되어야 한다. 그러나 화약에 대한 고성능화와 둔감화는 서로 상반되는 개념으로 이를 모두 만족하기는 대단히 어려운 과제이며 적용 무기체계에 따라 고성능화와 둔감화에 대한 초점 수위가 조절되며 연

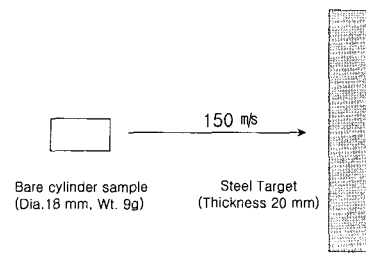
* 국방과학연구소

구되고 있으며 화약의 고성능화와 둔감화를 평가할 수 있는 시험기법도 함께 연구되고 있다. 현재 국제적으로 사용되고 있는 둔감화약의 기준은 1988년에 규정된 것과 같이 대량 폭발의 위험이 없는 둔감한 물품에 부여되는 class/division 1.6급수를 만족하는 대단히 둔감한 물질 즉 EIDS(Extremely Insensitive Detonating Substance)를 둔감화약의 기준으로 사용하고 있으며 개발 화약이 EIDS를 획득하기 위해서는 UN Test Series 3,4(Impact, Friction, Thermal Stability, Response to flame 등)을 통과한 물질에 대하여 UN Test Series 7을 통과해야만 EIDS를 부여 받을 수 있다⁽¹⁾⁽²⁾. UN Test Series 7의 시험내용은 다양한 외부의 열적, 기계적 충격 및 hydrodynamic shock 환경을 EIDS 후보에 적용하여 이에 대한 민감도를 평가하는 시험으로 구성되어 있으며, 특히 기계적 충격에 대한 화약의 반응특성을 평가하는 시험은 7(c)와 7(d)에 속해 있으며 각각 선택적으로 SUSAN impact 시험과 friability 시험 그리고 EIDS bullet impact 시험과 friability 시험을 수행하게 되어있다. 이에 본 연구는 둔감화약을 평가하는 시험기법 중의 하나로서 시험 목적은 유사하지만 야외시험으로 많은 인원과 비용이 소요되는 SUSAN impact 시험과 EIDS bullet impact 시험을 대체할 수 있는 friability 시험을 개발하게 되었다. 연구내용으로는 시험장치를 설계 제작하고 이를 개발화약에 적용하여 friability 정도인 $(dP/dt)_{max}$ 를 측정하고 기계적 충격에 대한 민감성을 평가하였다. 특히 friability 시험을 통하여 화약의 기계적 물성이 충격에 대한 민감성에 미치는 영향을 살펴보았으며 또한 EIDS 시험항목에 선택적 시험으로 되어있는 friability 시험과 SUSAN impact 시험의 상호 연관성을 알아보기 위하여 friability 시험 결과와 SUSAN impact

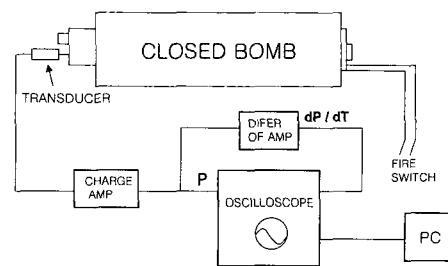
시험 결과를 비교하여 시험 결과의 유사성과 friability 시험이 SUSAN impact 시험의 대체 가능성을 실험적으로 확인해 보았다.

2. Friability 시험과 기존의 연구내용

UN Test Series 7에서 규정하고 있는 friability 시험은 Test 7(c) ii 과 Test 7(d) ii 항목에 있으며 시험목적은 EIDS 후보가 충돌시 기계적 충격에 대하여 고변형을 변형 특성 및 변형 후의 민감도 변화를 평가하는 시험이라 할 수 있다.⁽²⁾ 시험방법은 그림 1과 같이 직경이 18mm, 무게 9g인 원통형 시편을 두께 20mm의 강철판에 150m/s의 속도로 충돌시킨 후 깨어진 화약 조각들을 8.8g 이상 포집하고 이를 평균 직경이 0.75mm인 흑색화약(black powder) 0.5g과



(a) Air gun 충돌시험



(b) Closed bomb 연소시험

[그림 1] Friability 시험

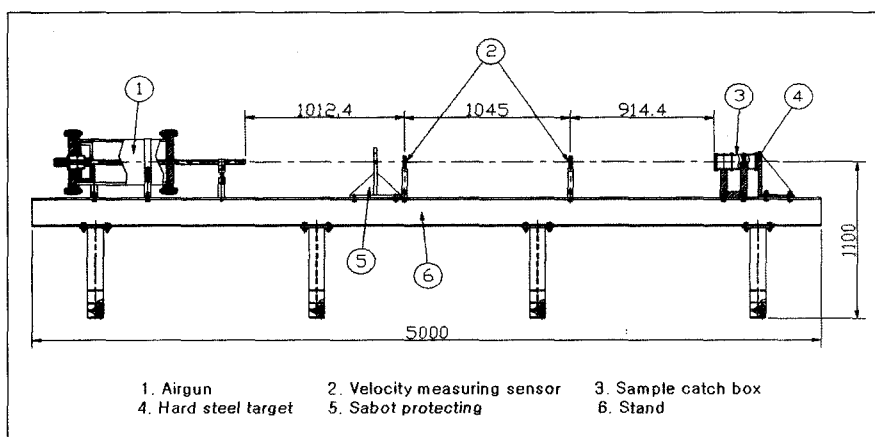
hot wire로 구성된 점화 캡슐(firing capsule)을 사용하여 체적이 108cc이고 시간당 압력변화를 측정할 수 있는 Closed bomb에서 연소시킨다. 이 때 측정된 압력 변화 data로부터 최대압력변화율인 $(dP/dt)_{max}$ 값을 구하여 이 값을 EIDS 후보의 friability 정도(level)로 하고 friability 정도가 15MPa/ms 이상이면 EIDS 후보는 EIDS가 아니라고 규정하고 있다.

기존의 friability 시험에 대한 연구내용을 살펴보면 friability 시험은 초기에는 추진제의 충격에 대한 취약성 평가에 많이 이용되었고⁽³⁾ 최근에는 화약에 대한 시험이 많이 수행되고 있다. 화약에 대한 friability 시험 결과는 Isler가 발표한 논문⁽⁴⁾에 잘 나타나 있는데 그는 여러 화약에 대하여 friability 시험을 수행하여 friability 정도를 측정하였다. 특히 Comp B 와 같은 용융충전화약의 friability 시험을 수행하여 friability 정도를 51MPa/ms로 보고하였고 동일한 화약에 대하여 bullet impact 시험과 SUSAN impact 시험을 수행하여 friability 시험과 bullet impact 혹은 SUSAN impact 시험과의 상관관계를 실험적으로 증명하였다. 그의 연구내용에서 화약에 대한 friability 정도가 5 ~ 20MPa/ms 이내이면 bullet impact 시험에서는 pneumatic burst 반응만 관찰되고 friability

정도가 5MPa/ms 이하이면 bullet impact 시험에서는 burning 현상만 관찰되며 SUSAN impact 시험에서는 탄자속도 333m/s에서 측정된 폭압이 10 KPa 이내라고 보고하고 있다. 이는 UN Test Series 7에서 friability 시험이 bullet impact 시험이나 SUSAN impact 시험의 대체 시험으로 정의된 것을 실험적으로 증명하고 있으며 friability 시험의 충격에 대한 반응과정과 bullet impact 혹은 SUSAN impact 시험의 반응과정에 많은 상관관계가 있음을 보이고 있다.

3. 시험장치 설계

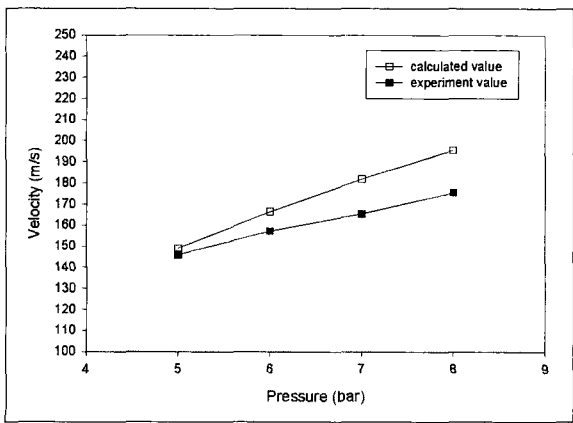
UN Test Series 7에서 정의된 시험 규정을 만족할 수 있는 friability 시험기법 개발을 위하여 그림 2와 같은 시험장치를 설계 제작하였다. 그림 2에서 ①의 air gun에서 sabot와 함께 발사된 시편은 ②의 속도측정장치를 통과하기 전에 sabot와 분리되고 시편은 속도측정장치와 ③의 포집장치를 지나 시험장치 끝부분에 있는 ④의 충돌판과 충돌하게 된다. 시험장치 구성품을 좀더 살펴보면 화약시편 발사에 사용되는 air gun은 chamber와 barrel로 구성되어 있으며



[그림 2] 제작된 friability 시험장치

압축공기가 저장되는 chamber는 내부용적이 30 l 로 설계되었다. 압축공기에 의하여 시편이 가속되는 barrel은 1000mm로 제작되었으며 이는 설계 단계에서 Euler 운동방정식^{(5),(6)}을 이용한 1차원 hydrocode simulation 결과와 제작 후 비활성 물질을 이용한 발사시험에서 그림 3과 같이 압축공기 5bar일 때 가속 길이 1000mm에서 시편속도가 friability 시험속도인 150m/s가 나오는 것을 확인할 수 있어 barrel 설계의 타당성을 확인할 수 있었다.

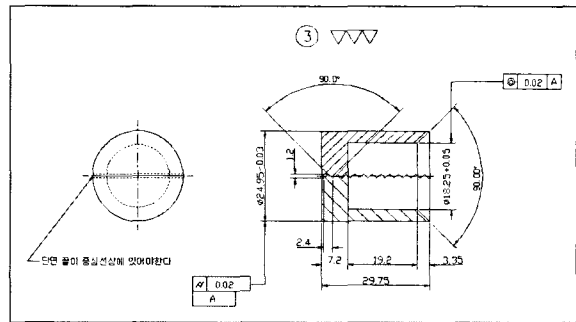
속도측정장치는 시편의 속도를 계측하는 장치로 photo 센서를 이용하였고 측정원리는 시편이 센서를 통과할 때 TTL level의 high to low 신호가 출력되어 이 신호로 time counter가 구동되어 시편의 속도를 계측하게 된다. 충돌판은 시편에 충분한 충격에너지가 전달되도록 두께 25mm의 $H_{RC} 50 \sim 60$ 인 steel plate를 사용하였고 충돌판에 일정량 이상의 질량을 주기 위하여 뒤에 보강판을 두고 steel ring과 볼트를 이용하여 보강판과 steel plate를 완전히 밀착하여 사용하였다. 충돌판과 함께 조립되는 포집장치는 3단 형태로 제작되었으며 각 단계는 내부 분리막을 설치하여 충돌 후 변형된 화약이 충돌판 외부로 배출



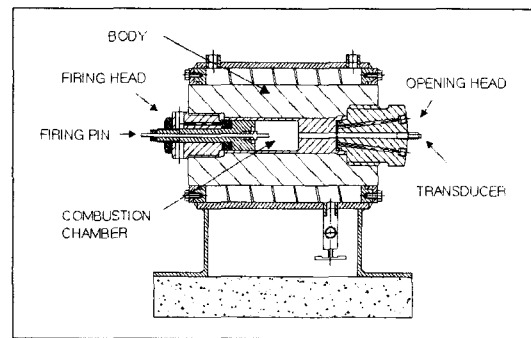
[그림 3] 시편속도 계산값과 측정값 비교

되지 않도록 하였고 포집장치의 분해 조립을 용이하게 하기 위해서 clamp형태로 제작하여 변형된 화약의 회수율을 높였다. 시편 발사에 사용되는 sabot는 시편의 비행안정성과 제작성을 고려하여 그림 4와 같은 형태의 sabot를 시험에 사용하였다.

또한 시편을 일정속도로 충돌시켜 변형된 화약을 8.8g 이상 회수한 다음 변형 후의 화약의 연소특성을 분석하기 위하여 그림 5와 같은 closed bomb 시험장치를 사용하였다. 그림 5에서 변형된 화약의 연소가 이루어지는 combustion chamber는 friability 시험조건을 만족하기 위해서 108cc 용적을 갖도록 제작하였다. 또한 화약의 연소를 위하여 M-100 electric match와 0.5g 흑색화약(black powder)으로 구성된 점화장치를 변형된 화약과 함께 조립하여 연소시키게



[그림 4] Sabot



[그림 5] Closed bomb 시험장치

된다. 연소압력을 계측하는 압력센서는 KISTLER 사 제품으로 측정범위가 0 ~ 7500bar 압력 transducer 를 사용하였다. 압력 transducer에서 나오는 신호는 oscilloscope에 연결되어 시간에 대한 압력변화를 계측하고 자체 내장되어 있는 미분기를 이용하여 dP/dt 값을 계산한 후 최종적으로 PC로 보내지게 된다.

4. 화약의 Friability 시험

시험장치의 제작을 완료하고 용융충전화약인 Comp B와 주조형 복합화약인 DXD-09, DXD-10 그리고 압축형 복합화약 DXD-57, DXD-59에 대하여 friability 시험을 수행하였다. Friability 시험은 충돌시험과 연소시험으로 나누어 진행되었으며 충돌시험에서는 충돌속도를 변화시키면서 화약의 변형특성을 관찰하였고 연소시험에서는 충돌 후 변형된 화약의 압력변화를 계측하고 이로부터 최대압력변화율인 $(dP/dt)_{max}$ 을 계산하여 시험화약에 대한 friability 정도를 측정하였다. 개발된 시험장치를 사용한 friability 시험에서 표 1과 같이 다른 기계적 물성을 갖는 화약

을 선택한 것은 기계적 물성 차이가 화약의 충격감도에 미치는 영향을 살펴보기 위해서이다.

5. 시험 결과 및 분석

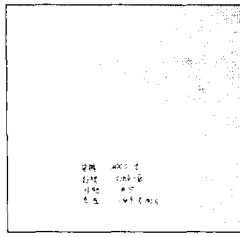
5.1 충돌시험

Comp B와 DXD-09, -10, -57, -59 화약에 대한 충돌시험 결과는 다음과 같다. 모든 화약의 충돌속도는 압축공기 3bar, 5bar, 7bar, 9bar에서 수행되었으며 특히 압축공기 5bar에서 friability 시험의 요구속도인 150 m/s가 $\pm 3m/s$ 의 오차를 가지고 나오는 것을 알 수 있다. 그림 6은 충돌속도 150m/s에서 시험 화약들이 충돌한 후 변형된 모습을 나타낸 그림이다.

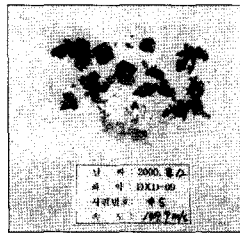
그림 6에서 Comp B는 충돌 후 거의 미세한 powder 형태로 변형되었으며, 주조형 복합화약인 DXD-09, -10은 비교적 큰 조각 형태로 변형이 이루어지는 것을 알 수 있다. 또한 압축형 복합화약인 DXD-57, -59는 주조형 복합화약보다는 좀 더 작은 형태로 잘게 부서지지만 용융충전 화약인 Comp B와 비교하면 변형량이 비교적 적은 것을 알 수 있다. 시험화약의 변형형태를 기계적 물성과 비교했을 때 표 1에서 화약에 갑작스런 충격이 가해질 경우 충격량을 완화시키는 역할을 수행하는 연신율을 살펴보면 변형량이 가장 작은 DXD-09와 -10 화약이 높은 것을 알 수 있고 그 다음으로 DXD-59, -57, Comp B 순으로 되어 있다. 또한 화약의 강성을 결정하는 탄성계수에서도 변형이 많은 Comp B와 압축형 복합화약은 값이 크지만 주조형 복합화약은 작은 것을 알 수 있다. 이러한 기계적 물성의 특징을 실제로 화약이 충전되어 있는 탄체로 확대해서 생각하여 고속의 탄자나 파편에 의하여 기계적 충격이 가해졌을 경우 연신율이 크고 탄성계수가 작은 화약은 충격에 의하여 발생한

[표 1] 시험화약 제원

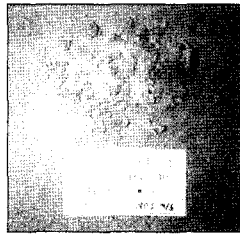
화 약	평균밀도 (g/cc)	탄성계수 (MPa)	연신율 (%)	항복강도 (MPa)
Comp B	1.672	12.7	1.5	0.833
DXD-09	1.72	5	20	0.52
DXD-10	1.76	3.2	27	0.47
DXD-57	1.81	709.9	2.77	15.85
DXD-59	1.76	50.3	4.12	1.26



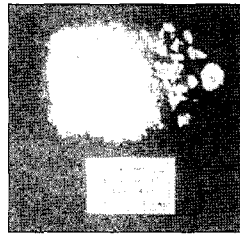
(a) Comp B 149.5 m/s



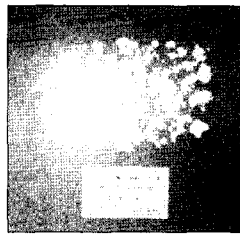
(b) DXD-09 149.9 m/s



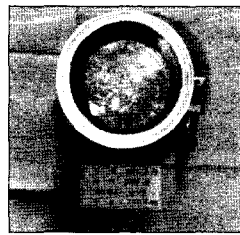
(c) DXD-10 150.5 m/s



(d) DXD-57 150.6 m/s



(e) DXD-59 150.4 m/s



(f) 포집장치 내의 DXD-59

[그림 6] 시험화약의 충돌 후 변형현상

stress에 의한 변형이 크지 않아 내부에서 stress와 마찰에 의하여 발생된 열에너지에 의하여 연소가 이루어져도 급격한 압력상승이 이루어지지 않는다. 때문에 화약의 에너지 특성이 같다고 했을 경우 충격에 변형이 심하게 발생하는 기계적 물성보다는 내부에서 충격량을 완화시킬 수 있도록 강성이 작고 탄성에너지가 많은 물성이 외부의 충격에 둔감하다고 할 수 있으며 이와 같은 현상은 충격시험을 수행한 후 변형된 화약을 포집하여 연소시험을 수행한 결과에서도 잘 나타나고 있다.

5.2 연소시험

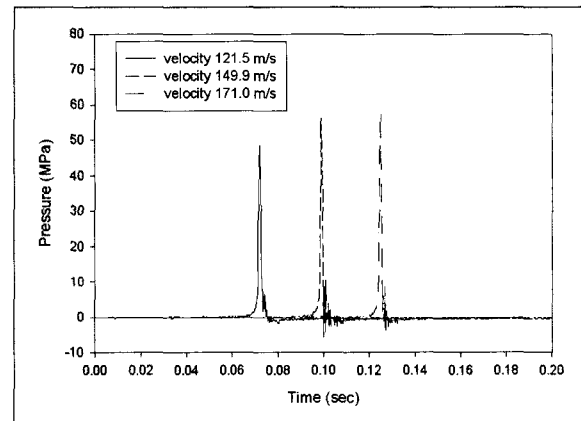
시험화약들에 대한 충돌시험 후 108cc 용적을 갖는 closed bomb 시험장치에서 연소시험을 수행하였다. 표 2는 충돌속도별 최대 $(dP/dt)_{max}$ 를 정리한 것이다. 표 2에서 최대 $(dP/dt)_{max}$ 가 가장 큰 것은 Comp B로서 충돌속도 150.8m/s에서 56.73MPa/ms로 나타나고 있다. 본 연구에서 계측된 Comp B의 최대 압력상승율은 외국문헌에 발표된 51MPa/ms와 비교했을 때 시편의 물성 및 조성의 변화 등에 대한 영향을 고려하면 같은 수준의 값으로 본 연구에서 개발된 시험기법이 신뢰성이 있음을 보여주고 있다. 주조형 복합화약인 DXD-09와 -10 경우는 충돌속도 151.4m/s과 151.1m/s 에서 최대 압력상승율이 0.085MPa/ms과 0.770MPa/ms로 아주 낮은 압력상승율을 보이고 있다. 압축형 복합화약인 DXD-57과 -59의 경우에는 같은 충돌속도 150.8m/s에서 최대 압력상승율이 21.56MPa/ms와 53.45MPa/ms로 주조형 복합화약과 비교하면 압력상승율이 크지만 Comp B보다는 작은 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 그림 7에서 그림 11과 같이 시험화약의 (dP/dt) 곡선에서도 알 수 있는데 Comp B나 DXD-57, -59의 (dP/dt) 곡선의 기울기가 매우 급하여 압력증가가 큰 반면에 DXD-09와 -10은 (dP/dt) 곡선의 기울기가 완만하여 압력증가가 급격히 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 또한 같은 화약에서도 충돌속도가 증가하여 변형량이 증가하면 최대 압력상승율이 증가하는 것을 볼 때 화약들이 가지고 있는 에너지 특성이 조금씩 다르지만 Comp B나 DXD-57, -59와 같이 화약의 기계적 물성이 충격에 취약하여 소성변형이 많이 발생되면 상대적으로 연소면적이 증가하고 이로 인하여 급격한 압력상승이 수반되는 반면 DXD-09와 -10과 같이 소성변형이 적어 연소면적이 감소하면 연소가 이루어져

도 급격한 압력상승율이 발생하지 않는 것으로 판단된다. 이런 이유로 UN Test Series 7의 friability 시험에서는 최대 압력상승율이 15MPa/ms 이내이면 외

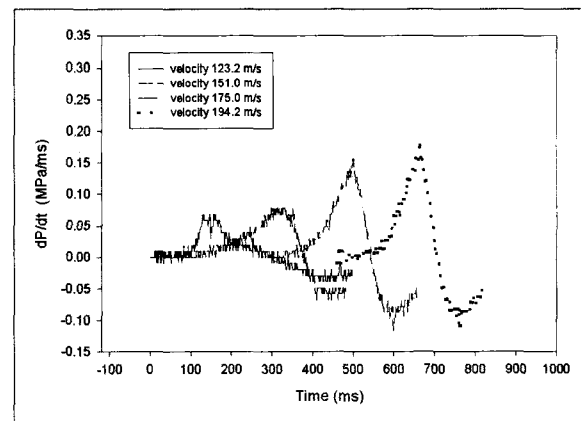
부의 충격에 의하여 화약이 연소되어도 급격한 압력 상승이 일어나지 않아 폭발로 전이 될 수 있는 확률이 거의 없는 아주 둔감한 물질인 EIDS(Extremely Insensitive Detonating Substance)로 규정하고 있으며, 15MPa/ms 이상이면 급격한 압력상승에 의하여 연소반응이 폭발로 전이될 수 있어 EIDS가 아니라고 정의하고 있다. 본 연구를 통하여 얻어진 시험화약들의 연소압력상승을 살펴보면 그림 12와 같이 Comp B와 DXD-57, -59는 EIDS가 아니며 DXD-09, -10은 EIDS인 것을 알 수 있다.

[표 2] 시험화약의 연소시험 결과

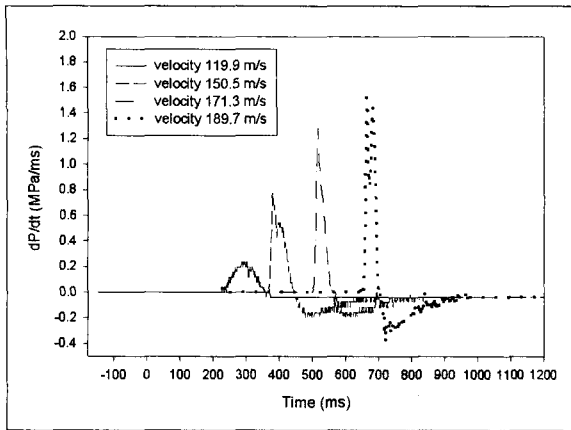
시험화약	충돌 속도 (m/s)	Sampling rate (ms ⁻¹)	최대 압력 (MPa)	최대 dP/dt (MPa/ms)
Comp B	122.4	0.2	77.71	45.16
	150.8	0.2	79.41	56.73
	173.6	0.2	80.45	58.83
DXD-09	123.0	1	6.38	0.055
	151.4	1	9.96	0.085
	175.8	1	12.42	0.156
	194.4	1	12.54	0.187
DXD-10	120.2	1	16.54	0.242
	151.1	1	29.75	0.770
	172.4	1	32.73	1.259
	190.0	1	36.88	1.420
DXD-57	119.1	0.2	88.88	17.46
	150.8	0.2	79.61	21.56
	171.5	0.2	87.57	33.09
	188.5	0.2	86.87	35.82
DXD-59	119.5	0.2	85.75	44.87
	150.8	0.2	85.85	53.45
	172.5	0.2	86.77	56.18
	190.0	0.2	87.22	58.71



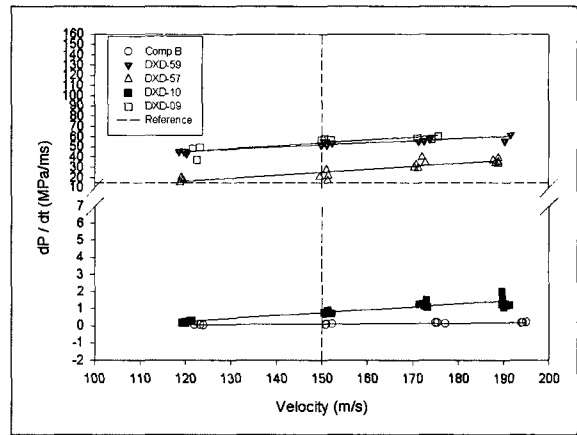
[그림 7] Comp B 충돌속도별 dP/dt



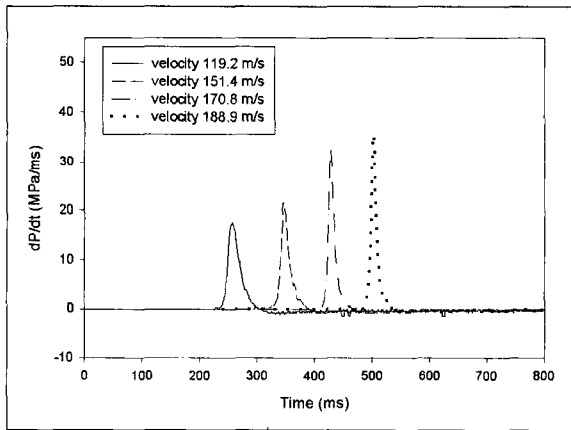
[그림 8] DXD-09 충돌속도별 dP/dt



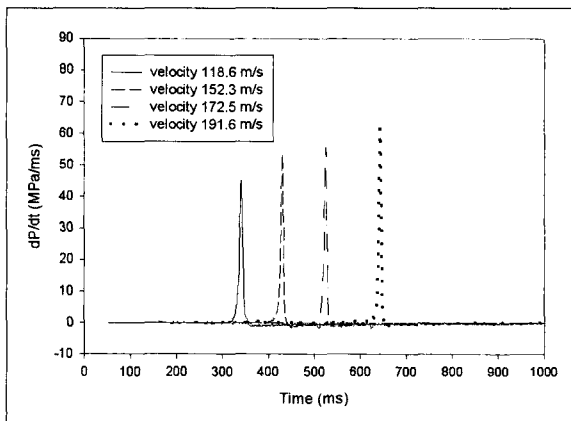
[그림 9] DXD-10 충돌속도별 dP/dt



[그림 12] 시험화약의 충돌속도별(dP/dt)_{max}



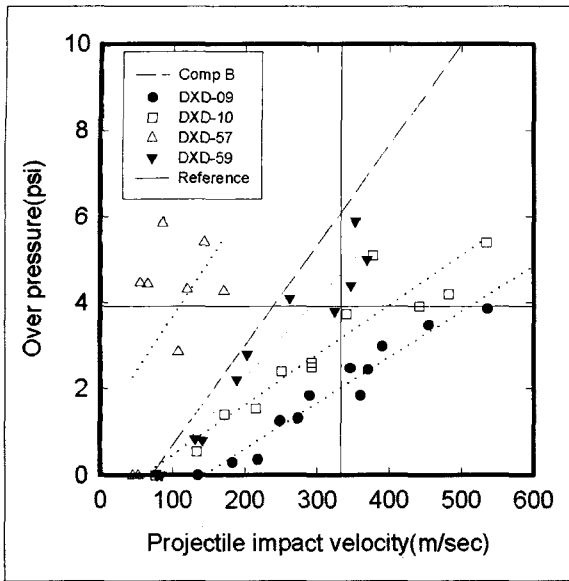
[그림 10] DXD-57 충돌속도별 dP/dt



[그림 11] DXD-59 충돌속도별 dP/dt

5.3 Friability 시험과 SUSAN impact 시험 비교

그림 13은 UN Test Series 7에 규정되어 있는 시험화약들의 SUSAN impact 시험 결과를 나타내고 있다. SUSAN impact 시험의 EIDS 통과 기준은 화약이 충전된 탄자가 hard target에 333m/s 속도로 충돌하여 폭발되었을 때 충돌지점에서 탄도와 각각 20°, 38°, 51°의 각을 이루며 3.05m 거리인 3 지점에서 측정된 압력상승(overpressure)이 27 KPa 이내이어야 EIDS를 만족한다 할 수 있으며 이를 시험화약에 적용하면 그림 13과 같다. 그림 13에서 DXD-09와 -10은 EIDS를 만족하는 반면에 Comp B와 DXD-57과 -59는 EIDS를 만족하지 않는 것을 알 수 있다. 또한 예측된 압력상승(over pressure)도 DXD-57을 제외하고는 모두 friability 시험에서 예측된 최대 압력상승율과 같은 순위를 보이고 있다. 이와 같은 결과는 SUSAN impact 시험도 시험목적에 명시되어 있듯이 고속의 기계적 충격에 의한 EIDS 후보의 반응 격렬도를 살펴본다고 했을 때 그 반응과정이 friability 시험과 매우 유사하며 그 결과 또한 화약의 에너지 특성과 기계적 물성과 밀접한 관련이 있어 friability 시험 결과를 뒷받침 해주고 있다. 따라



[그림 13] SUSAN impact 시험 결과

서 SUSAN impact 시험과 friability 시험은 시험목적과 반응과정에서 유사성이 매우 많은 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었으며 UN Test Series 7에서 규정한 것과 같이 SUSAN impact 시험의 대체 시험으로 friability이 타당성이 있음을 확인할 수 있었다. 그림 13의 DXD-57의 SUSAN impact 시험 결과와 friability 시험 결과의 차이는 실제로 시험방법 차이 때문에 발생한 결과일 가능성과 시험에 사용되었던 DXD-57 화약이 표준조성과의 차이로 인하여 발생된 것으로 나누어 생각해 볼 수 있으며 자세한 원인 분석은 추후 더 많은 시험과 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

6. 결 론

둔감화약의 개발에 맞추어 실험실적 규모에서 충격에 대한 화약의 반응이 EIDS 기준을 만족할 수 있는

지를 평가할 수 있는 새로운 시험기법인 friability 시험기법의 개발을 위하여 장치계를 설계하여 성능을 검증하고 실제 개발화약에 적용하여 시험기법의 타당성을 검토하고 화약의 기계적 충격에 대한 민감성을 측정하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. Friability 시험에 사용되는 장치계로 air gun 발사장치, sabot, 속도측정장치, 충돌판, 포집장치, closed bomb 연소실 등을 설계 제작하였고 성능 시험을 통하여 friability 시험 조건과 안전성을 모두 만족함을 확인하였다. 또한 용융충전 화약인 Comp B에 대하여 friability 시험을 수행한 결과 Comp B 화약의 friability 정도는 충돌속도 150 m/s에서 56.73 MPa/ms로 나타났다. 이는 외국 연구기관의 시험 결과인 51 MPa/ms와 비교하면 같은 수준으로 개발된 friability 시험기법이 신뢰성이 있음을 보여주고 있다.
2. 고성능 둔감화약으로 개발중인 여러 화약들에 대한 friability 시험을 수행하여 기계적 충격에 대한 화약의 민감성을 측정하였다. 구조형 복합화약인 DXD-09와 -10의 friability 정도는 충돌속도 151.4m/s와 151.1m/s에서 0.085MPa/ms와 0.770 MPa/ms로 EIDS 통과 기준을 만족하는 아주 둔감한 화약인 것을 알 수 있었고 압축형 복합화약 DXD-57과 -59의 friability 정도는 충돌속도 150.8m/s에서 21.56MPa/ms와 53.45MPa/ms로 EIDS 기준을 만족하지 않은 것을 알 수 있었다.
3. Friability 시험을 통하여 기계적 충격에 대한 화약의 민감성은 화약의 에너지 특성과 기계적 특성에 많은 관계가 있는 것으로 나타났다. 특히 화약의 에너지 특성이 같다고 했을 경우 탄성계수와 연신율과 같은 기계적 물성은 충돌에 의한 소성변형량을 결정하고 이로 인하여 발생된 연소압력 상승을

- 을 결정하여 연소반응에서 폭발(detonation)로의 전이에 많은 영향을 주는 것으로 알 수 있었다.
4. EIDS 통과기준을 고려하여 friability 시험 결과와 SUSAN impact 시험 결과를 비교했을 때 두 시험의 결과는 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 UN Test Series 7에 규정된 것과 같이 friability 시험이 SUSAN impact 시험을 대체 할 수 있음을 실험을 통하여 확인할 수 있었고 이를 통하여 friability 시험과 SUSAN impact 시험의 반응과정에 많은 상관관계가 있음을 알 수 있었다.
 5. 추후 연구과제로 다양한 기계적 물성을 갖는 여러 화약에 대한 friability 시험과 SUSAN impact 시험을 수행하여 두 시험의 상관관계에 대한 연구가 깊이 있게 진행되어야 하며 friability 시험의 충돌과정에 대한 전산해석을 수행하여 기계적 물성이 충돌과정에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.
- 참 고 문 헌**
1. 함덕순, 박보영, 이정관, “화약/탄약의 위험등급 분류 및 1.6급수”, 국방과학연구소 보고서, GWSD-519-950527, 1995
 2. Michael, M., Swisdak, Jr., “Hazard Class/Division 1.6: Extremely Insensitive Detonating Substance(EIDS)”, NSWC TR 89-356, 1989
 3. Gibson, P.W., “Friability and Critical Diameter Tests on the Maneuver Propulsion Assembly Propellants”, AFRPL, TR-85-089, January, 1986
 4. Isler, J., “Classification Tests for Assignment to Hazard Class/Division 1.6: SNPE two years experience”
 5. 이재민, “충격현상”, 국방과학연구소 소내강좌 강의 노트, 2000
 6. 금오연, 최인호, 한기복, “취약성 분석을 위한 충격파의 현상과 이론”, 국방과학연구소 보고서, GWSD-519-970712, 1997
 7. 박정수, “화약의 충격감도 평가를 위한 friability 시험기법 개발”, 국방과학연구소 선임논문, 2000
 8. 박정수, 김성호, 박희덕, 이정관, “Friability 시험기법 개발(II)”, 국방과학연구소 보고서, TEDC-419-001244, 2000
 9. 박정수, 김성호, 이정관, “Friability 시험을 이용한 화약의 충격감도 평가 연구”, 국방과학연구소 보고서, TEDC-419-010308, 2001