

## 개발 화약의 내폭풍압 측정

### Internal Blast Tests of Developed Explosives

김성호\*  
Sung-ho Kim

김정국\*  
Jeong-kook Kim

이준웅\*\*  
Jun-wung Lee

#### ABSTRACT

Internal blast performance test on developed explosives was carried out. Internal blast means a blast wave in closed chambers like tunnels, bunkers, operation centers and chamber of ships. We used Anpa tunnel for our test facility. We performed two series of tests to measure internal blast of developed explosives. Three different kinds of cast PBXs, DXD-09, DXD-10, DXD-18, and conventional explosive, Tritonal, were used in our test. The explosives were cast as a charge of 108mm diameter in a plastic tube of a 3mm thickness. The length of charges were adjusted as a weight 3kg. A melt-cast explosive, tritonal, was used as a reference. Pentolite booster was used. The cylindrical boosters have a 95mm diameter and 47.5mm height. The results showed that there may be some differences between the performances in the air blast tests and those in the internal blast tests. The results showed that DXD-10, the best performance in air blast tests, showed the poorest performance in internal blast among the explosives tested. On the other hand, DXD-18 showed exactly the opposite trend. This is probably due to the highest contents of aluminum and inert binder in DXD-18. DXD-18 has 38 wt % of aluminum and 17 wt % of inert binders.

주요기술용어(주제어) : Internal blast test, Air blast test, Cast PBX, Melt-cast explosive

#### 1. 서론

화약이 폭발할 때, 화약을 이루고 있는 원자들 간의 화학반응으로 발생하는 에너지는 매우 짧은 시간에 방출된다. 이와 같이 에너지의 급격한 방출은 주변 매질에 높은 압력의 충격파를 발생시킨다. 이 충

격파는 주변 매질 내를 진행하면서 압력이 급격히 소멸되어 결국 없어진다. 충격파의 중요한 특성은 충격파의 압력과 충격량(압력×압력 지속시간)으로 나타내어진다. 폭심으로부터 같은 거리에서의 압력과 충격량이 높을수록 화약의 폭풍 위력이 높다.

화약에 따른 폭풍 특성은 폭발 에너지의 양과 방출 속도 및 주변매질에 영향을 크게 받는다. 지중이나 수중에서 화약이 폭발할 경우는 화약 폭발 생성물의 팽창이 느리기 때문에 내부의 압력과 온도가 장시간 높게 유지되며, 따라서 반응속도가 느린 물질의 경우에도 충분한 반응시간을 가지게 되므로 공기 중에서

† 2004년 4월 28일 접수~2004년 6월 28일 심사완료  
\* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)  
\*\* 한국과학기술정보연구원  
주저자 이메일 : ksho@add.re.kr

는 폭풍 위력이 낮은 화약이라도 이러한 환경에서는 위력이 높게 나타날 수도 있다. 또 방출속도가 느린 화약의 경우 초기 압력은 낮으나 화약의 폭발에너지가 서서히 방출됨에 따라 진행되는 폭풍파에 계속 에너지가 공급되어 장시간에 걸쳐 높은 압력의 지속시간을 유지한다.<sup>[1]</sup>

주변매질이 공기일 때 공기 중을 진행하는 충격파를 폭풍파라 말하며 이때는 압력이 중요한 특성이 되나 충격파가 지중, 수중 또는 한정된 밀폐공간과 같은 주변 매질을 진행할 경우 이를 내폭풍파라 하고 이때는 압력보다 충격량이 더욱 중요한 특성이 된다.

그림 1은 공기 중 폭풍파와 내폭풍파의 파형을 보여주고 있다.

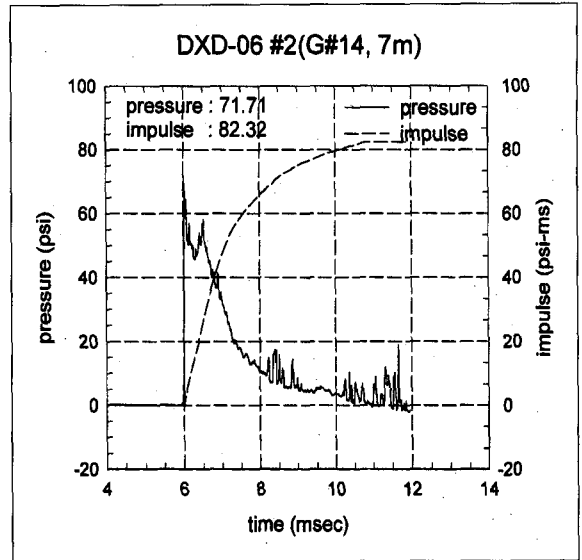
공기 중 폭풍파인 경우 압력의 상승시간(rise time)이 수십  $\mu s$  이하로 급격히 상승하며 초기 압력은 매우 높으나, 압력의 감소도 급격히 일어나 수십 ms 이내에 압력은 완전히 소멸함을 알 수 있다. 반면 내폭풍파의 경우 초기 압력이 비교적 낮다. 그러나 시간에 따른 압력 감소율이 낮아 압력파가 일정 압력 이상에서 수백 ms에서 1초 이상 지속되고 있음을 알 수 있다.

내폭풍파의 파형에서 파형이 심하게 동요(fluctuation)하는 현상을 나타내는데 이는 폭풍파가 벽면에서 반사되어 압력 센서에 나타나기 때문이다. 따라서 화약의 내 폭풍 위력은 압력의 최대 값에 의해 결정되는 것이 아니라 준 정압(quasi-static pressure)에 의해 결정된다. 준 정압이란 압력 신호를 외삽(extrapolating)하여 얻어진 평균값을 화약이 기폭 되는 시간의 기점에서 나타낸 값을 의미한다.<sup>[2]</sup>

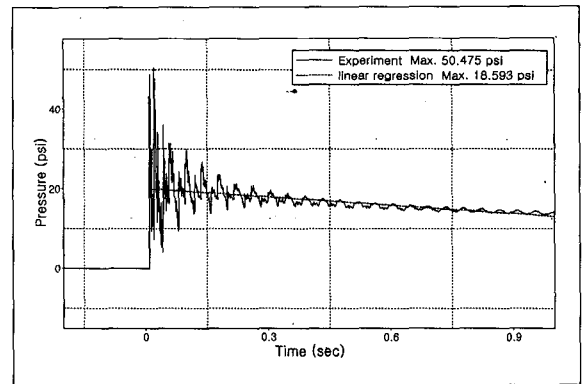
내 폭풍 효과는 한정된 공간 내에서 화약의 폭발로 발생된 비교적 긴 압력펄스에 의해 내부의 인력에게 치명적인 손상을 주거나 장비의 파괴를 목적으로 하는 화약의 효과를 말한다.

따라서 적의 병커나 터널 및 밀폐된 작전 공간 내의 인명과 장비에 치명적인 손상을 주기 위한 무기체계 적용 화약은 내 폭풍 효과가 높은 특성을 가져야 한다.

화약의 폭발 시 발생하는 압력은 근사적으로 식 (1)과 같이 주어진다.



(a) 공기중 폭풍 파 파형



(b) 내폭풍파 파형

[그림 1] 공기 중 폭풍파와 내폭풍파 파형의 비교

$$P = A W (\Delta H_c)^n \quad (1)$$

P : Overpressure

W : Explosive weight

$\Delta H_c$  : Heat of Combustion

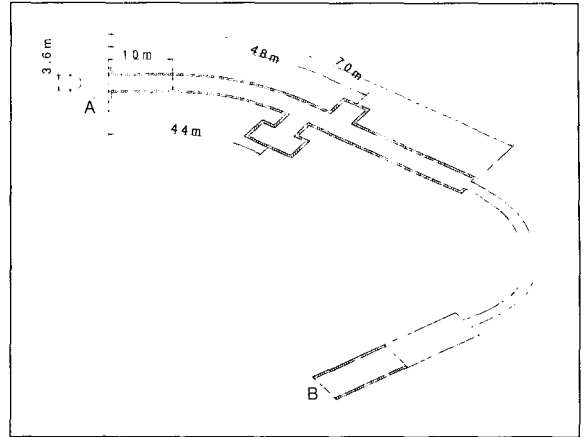
A, n : Constants

위 식에 의하면 화약의 폭발 시 발생하는 폭발 압력은 구성 성분의 연소열과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 그러므로 내 폭풍 효과용 화약 조성의 주 성분은 폭발 시 비교적 많은 연소열을 발생시킬 수

있는 원료 물질들을 사용하는 것이 바람직하다.<sup>[3]</sup>

수중무기용 화약이나 폭풍파형 무기용 화약의 첨가물로 알루미늄이 많이 사용되는데 이는 알루미늄이 반응은 비교적 느리나 반응열이 매우 높기 때문이다. 또 알루미늄 함유 화약들은 폭풍파의 지속 시간이 긴 경향이 있는데 이는 알루미늄의 반응에너지가 음속점 이후에도 계속적으로 발생되기 때문이다. 또 긴 지속 시간은 폭풍파 압력의 감쇠를 늦추어 비교적 낮은 압력 범위에서 좋은 폭풍파 특성을 보인다.

본 논문에서는 개발 화약의 내폭풍압 측정을 위해 준비한 시험시설과 시험화약 조성 및 시험방법에 대하여 고찰하고 시험 결과를 분석하여 수록하였다.



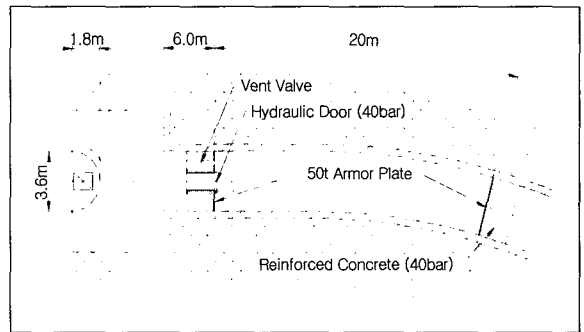
[그림 2] 터널의 평면도.

## 2. 시험시설

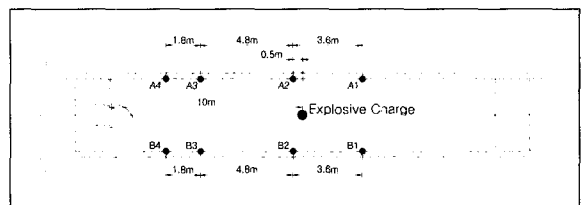
개발 화약의 내 폭풍 위력 측정을 위한 시험은 특별히 설계된 방탄 구조물 내에서 수행하는 것이 바람직하나 본 연구에서는 시험을 위해 특별히 설계하여 건축한 시험 시설이 아니라 종합 시험장에 있는 기존 터널을 시험 목적에 맞게 개조하여 사용하였다. 기존 터널은 두개의 입구를 갖는 말발굽 모양으로 평면도는 그림 2와 같다. 입구의 직경과 높이는 각각 3.6m × 1.8m, 5.5m × 5.4m인 반원형이다. 그림 3은 개조된 터널 부분의 평면도이다

터널의 앞, 뒷부분은 두께 1.8m의 방폭 벽으로 막아 시험을 위한 밀폐 공간으로 만들었다. 또 전면 방폭 벽에는 가로 1.0m, 세로 1.2m의 방폭문을 설치하였고, 방폭문 양쪽으로는 압력 측정용 cable hole과 시험 후 터널 내부의 압력을 방출하기 위한 직경 50mm의 hole을 설치하였다. 방폭 벽과 방폭 문은 순간 압력이 40bar에서 견딜 수 있도록 설계, 제작하였다. 시험장의 내부 공간은 부피가 약 100m<sup>2</sup>가 되도록 하였으며, 시험장 내부에는 폭풍압을 측정하기 위해 기폭점을 중심으로 여덟 개의 압력 센서를 설치할 수 있도록 하였다. 그림 4는 센서의 설치 위치를 나타내고 있다.

폭풍압 측정을 위해 사용된 센서는 압전저항형 (piezo resistive type)으로 미국 Kulite 사의 Model "HEM-375", "XT-190"이며 측정 범위는 50psia 이

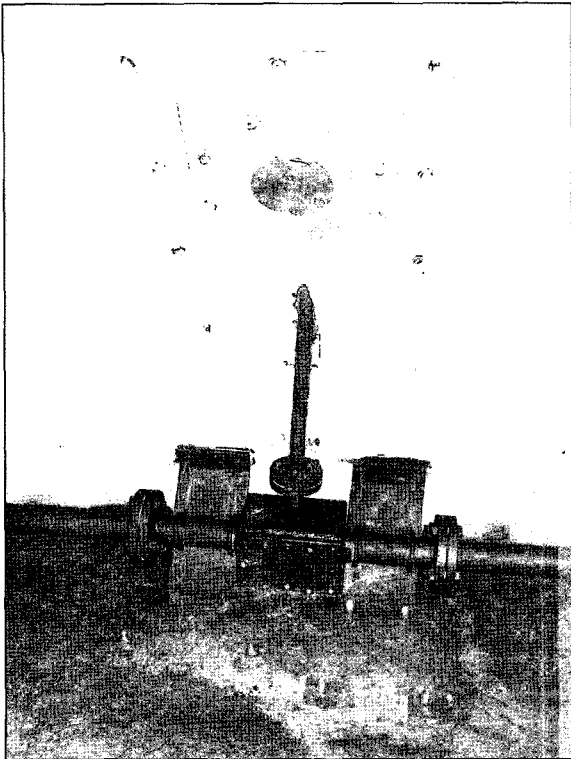


[그림 3] 개조된 터널 평면도



[그림 4] 압력 센서의 설치 위치

다. 센서는 가로 50cm, 세로 50cm, 두께 4cm의 철판에다 부착한 후 지상에서 90cm의 높이에 설치하였다. 또 화약의 폭발 시 발생하는 압력에 의한 벽의 진동이 센서에 영향을 미치는 것을 최소화하기 위하여 센서 설치대에 테프론 재질의 가스켓을 부착하여 센서 설치대가 벽으로부터 격리되게 하였다. 그림 5는 터널 벽에 부착된 압력 센서의 형상을 보여주고 있다.



[그림 5] 압력 센서의 설치 형상

방폭문과 압력 배기용 배브는 유압으로 구동되도록 하였으며 유압 밸브는 시험 인원의 안전을 고려하여 원격 조정으로 동작되도록 하였다.

### 3. 시험 화약

시험은 3종의 주조형 복합화약 DXD-09, DXD-10 및 DXD-18과 용융충전 화약인 Tritonal에 대해 수행하였다. 시험 화약은 모두 20 wt% 이상의 알루미늄을 함유하고 있으며, 용융 충전 화약인 Tritonal을 기준 화약으로 사용하였다.

시험 화약은 직경 108mm, 두께 3mm의 플라스틱 튜브에 충전하였으며 무게가 2kg, 3kg, 3.5kg이 되도록 높이를 조절하여 가공하였다. 보조 장약은 직경 95mm, 길이 47.5mm의 원통형 pentolite(50/50)를 사용하였고, Detonator는 RP-87 EBW를 사용하였다. 시험 화약의 특성은 표 1과 같다.

[표 1] 시험화약의 특성

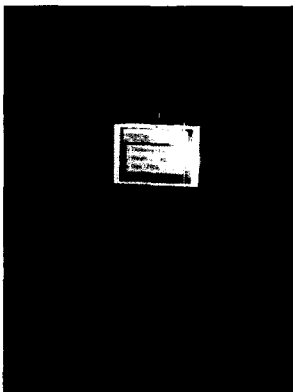
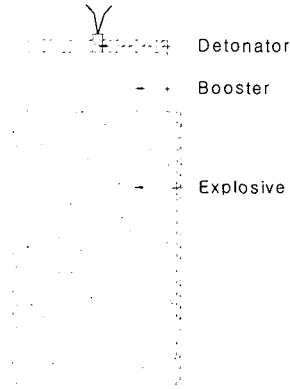
	DXD-09	DXD-10	DXD-18	Tritonal
Filler	62	63	45	80
AL	23	23	38	20
Binder	15	14	17	-
폭속 (km/s)	7.45	6.52	7.01	6.77
폭압 (kbar)	280	248	216.6	167.0
탄성계수 (bar)	50	32	31	-
연신율 (%)	20	27	29.9	-
항복강도 (bar)	5.2	4.7	6.9	-
Density (g/cc)	1.73	1.76	1.764	1.72

### 4. 시험

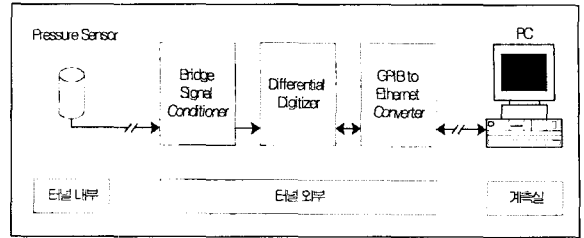
시험은 화약의 무게를 세 종류로 하여 시험을 수행하였다. 화약은 직경 108mm인 플라스틱 튜브에 충전한 후 무게 별로 길이를 결정하여 가공한 후 그림 6(a)와 같이 축 방향으로 세워 기폭 하였으며 화약의 충전 중심은 압력 센서의 설치 높이와 같은 지상 90cm가 되도록 높이를 조절하여 설치하였다. 그림 6(b)는 시험화약이 설치된 시험장의 단면을 보여주고 있다. 폭풍 압력은 여섯 곳에서 측정하였으며 여기서 얻어진 준 정압(Quasi-static pressure)의 평균값을 시험 화약의 준 정압으로 하였다.

측정 시스템의 구성은 그림 7과 같다. 측정시스템은 터널 내/외부 및 계측실의 세 부분으로 구성된다. 터널 내부에는 압력 센서와 케이블 장치로 구성되어 있으며 터널 외부에는 센서의 전원 공급, signal conditioner 및 A/D 변환기로 구성되어 있다. Signal conditioner 부분은 quarter bridge로 구성하고 gain

은 50배로 고정하였으며 센서에는 DC 10V 전압을 공급하였다.



(a) 시험 화약의 조립도



[그림 7] 계측 시스템의 구성

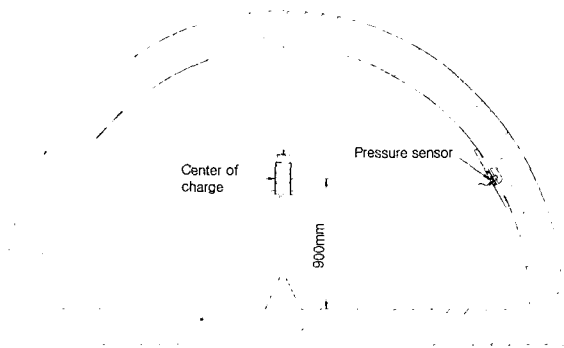
Digitizer 부분은 common mode noise를 해결하기 위하여 differential input으로 구성하였으며 최대 초당 1M samples의 속도로 신호를 변환할 수 있도록 하였으나 본 시험에서는 초당 200k sample의 속도로 압력 신호를 변환하였다.

계측실에는 계측장비의 제어, 획득된 자료의 저장 및 처리를 위한 PC 시스템을 설치하였으며, Digitizer와 PC 시스템 사이에는 GPIB/Ethernet 변환기로 연결되며, Ethernet 통신으로 압력의 계측에 관한 모든 사항을 제어를 수행할 수 있도록 하였다.

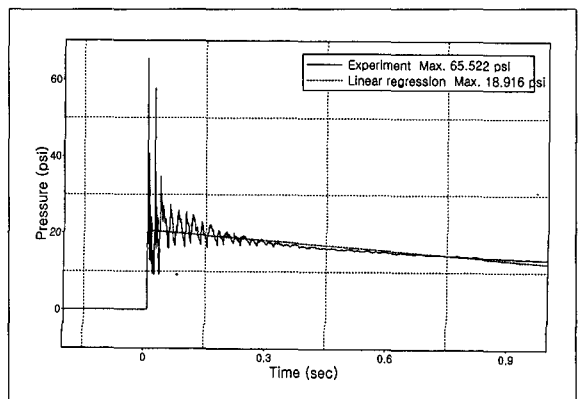
## 5. 시험 결과 및 고찰

그림 8은 시험 시 센서에서 얻어진 내 폭발 파형과 이를 외삽(extrapolation)하여 얻어진 준 정압의 예를 보여주고 있다.

표 2는 화약의 무게에 따른 준 정압을 나타내고 있다.



(b) 시험화약 설치 개략도



[그림 8] 측정된 내폭풍 파형 및 준 정압의 예

[그림 6] Charge Assembly and Front View of Test Site

[표 2] 화약의 무게별 준 정압

화약	Quasi-static pressure(psi)		
	2kg	3kg	3.5kg
Tritonal	20.87	18.75	27.86
DXD-09	21.76	19.77	-
DXD-10	17.46	19.16	-
DXD-18	22.41	21.69	30.97

[표 3] 센서의 위치별 최대압력(3kg)

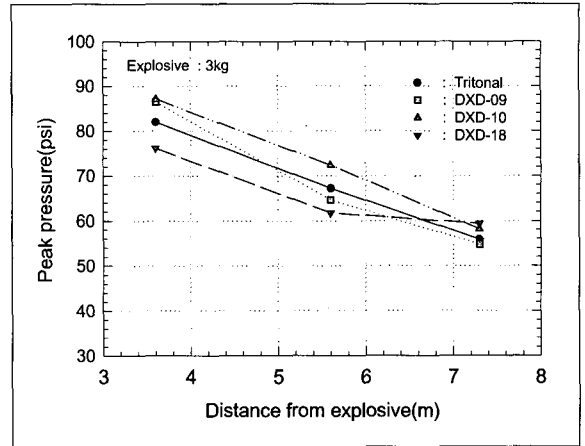
화약	Peak pressure(psi)		
	3.6m(A1)	5.6m(A3)	7.3m(A4)
Tritonal	82.0	67.2	55.9
DXD-09	86.4	64.6	54.7
DXD-10	87.1	72.3	58.1
DXD-18	76.1	61.7	59.4

표 3은 화약의 무게가 3kg일 때 센서의 위치에 따른 최대압력을 나타내고 있다.

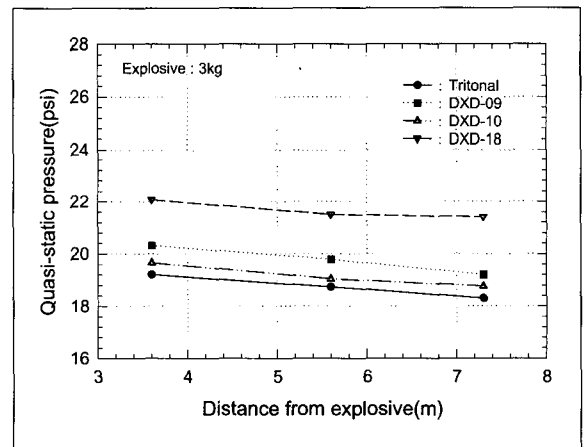
그림 9는 화약의 무게가 3kg인 경우 센서의 위치별 압력의 최대 값을 보여주고 있으며 그림 10은 준 정압을 나타내고 있다

기폭 점에서부터 거리에 따른 최대 압력 값과 준 정압은 화약의 종류에 관계없이 비교적 양호한 상호 관계를 보여주고 있음을 그림 9와 10에서 알 수 있다. 센서에서 얻어진 최대 압력과 준 정압 사이에서도 상관관계가 있음을 알 수 있다. Tritonal이나 DXD-09, -10은 폭심으로부터 가까운 거리(3.6m)에서는 압력이 높으나 7.3m 위치에서는 큰 압력의 감쇄가 나타나고 있으며 DXD-18은 거리에 따른 압력 감쇄가 크지 않음을 보여주고 있다. 이는 공간 내에서 압력의 지속 시간이 다른 화약보다 길다.

표 4와 5는 공기 중 폭풍 위력과 내 폭풍 위력을 화약에 따라 상대적으로 비교한 것을 보여주고 있다. 공기 중 폭풍 위력의 경우는 TNT 등가 무게를 기준으로 표시하였으며 내 폭풍 위력은 Tritonal을 기준



[그림 9] 센서 거리에 따른 최대 압



[그림 10] 센서 거리에 따른 준 정압

[표 4] 공기 중 폭풍 위력 비교

화약	Pressure (TEW)*	Impulse (TEW)
TNT	1	1
DXD-09	1.05	1.69
DXD-10	1.27	1.68
DXD-18	0.93	1.36

\* TNT Equivalent Weight

으로 준 정압으로 나타내었다. 공기 중 폭풍 위력은 2000년도에 수행된 시험에서 획득된 자료이다.

[표 5] 내 폭풍 위력 비교

화약	무게	Average Quasi-static pressure(psi)		
		2kg	3kg	3.5kg
Tritonal		1	1	1
DXD-09		1.04	1.05	-
DXD-10		0.84	1.02	-
DXD-18		1.07	1.16	1.11

표 5에서 화약간의 상대적인 내 폭풍 위력을 살펴 보면 공기 중 폭풍 위력이 가장 낮은 복합화약 DXD-18이 가장 높은 내 폭풍 위력을 나타내었으며, 반면 공기 중 폭풍 위력이 가장 높은 DXD-10이 가장 낮은 내 폭풍 위력을 보여주고 있다.

이는 공기 중 폭풍 위력은 매우 짧은 시간(~10 ms)의 화약 반응에 기인한데 비하여 내 폭풍 위력은 비교적 긴 시간(~1s)의 화약 반응으로 화약의 원료 물질에 포함된 알루미늄이나 binder가 주위의 산소와 충분히 반응할 수 있기 때문으로 판단된다.

따라서 조성 중 알루미늄과 binder의 함량이 가장 높은 DXD-18 조성이 가장 높은 내 폭풍 위력을 나타난 것으로 판단된다. 시험 결과에서 보조 장약의 영향은 무시하였다.

## 6. 결론

화약의 내폭풍압 측정 시험의 결론은 다음과 같다.

- (1) 공기 중 폭풍과 위력이 가장 낮았던 DXD-18 화약이 내폭풍압 위력이 가장 높았다. 이는 DXD-18의 조성 중에 포함된 알루미늄과 binder의 함량 비율이 가장 높기 때문이다.
- (2) 화약의 내 폭풍 위력을 높이기 위해서는 조성 중에 높은 연소열을 갖거나 또는 binder나 알루미늄과 같이 산소의 함량이 낮은 물질의 함량을 가능한 높여야 한다.
- (3) 개발된 화약 조성은 공기 중 폭풍 위력과 내 폭풍 위력은 상관관계가 전혀없기 때문에 사용하고자 하는 무기 체계의 목적에 따라 적절한 화약의 선택이 요구된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 이재민, 김호수, 김성식, 임완권, 함덕순, “화약의 폭풍위력 분석 III” ADD Reports No. KTRC-419-991000, 11, 1999.
- [2] P. E. David Tassa, “Internal Blast Tests to Support the Thomahawk and APET Programs” IM Technical Symposium, Proceeding, 1996.
- [3] N. Saidenber, P. Blanc, H. Miermont, and B. Nouguez, “A high Performance and Less Sensitive Penetrator” Insensitive Munitions and Energetic Materials Tech. Symposium, 1997.
- [4] 김성호, 이근득, 박정수, “화약의 폭풍위력 분석 IV” ADD Reports No. TEDC-419-021321, 10, 2002.