

축척법에 의한 화약 폭풍파 분석

Analysis of Blast Wave of Explosives by the Scaling Law

박정수* **김성호*** **이근득*** **이재민***
 Park, Jung-Su Kim, Sung-Ho Lee, Keun-Deuk Lee, Jai-Min

ABSTRACT

To analyze a blast effect of developed explosives, three different kinds of aluminized castable explosives and melted cast explosive TNT were used. Conventional explosive TNT was used as a reference. Each tested explosive charge of 340mm diameter spherical type was initiated at the charge center with DXD-65(~750g) booster and RP-87 EBW detonator. Thirteen piezo type pressure sensors were located at a range from 4 to 50m away from the charge. From the blast wave profiles, we calculated a peak blast pressure and impulse of the explosion. The calculated pressures and impulses were converted to TNT Equivalent Weight (TEW) factor by the scaling law method. The average TEW factors based on the blast pressure of TX-01, TX-02, TX-03, TX-04 were 1.298, 1.05, 1.266, 1.274 and the average TEW factors based on impulse were 1.504, 1.686, 1.640, 1.679. From the results, we concluded that TEW factors based on blast pressure and based on impulse of aluminized explosives were superior to TNT. This results are owing to the high contents of aluminum in formulations.

주요기술용어(주제어) : Blast wave(폭풍파), Castable PBX(주조형 복합화약), Al(알루미늄), TNT(Trinitrotoluene), Scaling law(축척법), Equivalent weight(등가무게)

1. 서론

화약의 폭발로 인해 발생하는 에너지는 매우 짧은 시간에 방출되며 그림 1과 같이 주변매질에 매우 높은 압력의 충격파(shock wave)를 발생시킨다. 이 충격파는 주변물질의 비가역적인 압축(irreversible compression)에 의하여 에너지를 잃게 되어 주변매질 내를 진행함에 따라 압력이 급격히 감소되고 결국

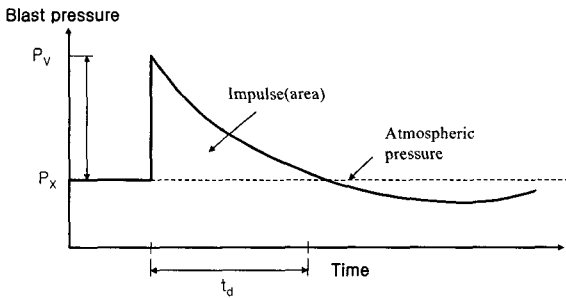
에는 소멸된다^{1,2)}.

주변매질이 공기일 때 공기 중을 진행하는 충격파를 폭풍파(blast wave)라 부르며 이를 이용한 무기체계인 폭풍파형 무기는 강력한 폭풍파를 발생하여 주변의 목표물을 파괴시킨다. 폭풍파의 중요한 특성으로는 폭풍파의 압력(blast pressure)과 충격량(blast impulse)을 들 수 있는데, 화약으로부터 같은 거리에서 압력과 충격량이 높을수록 폭풍위력이 높다고 할 수 있다. 또한 화약의 폭풍특성은 주로 화약의 폭발 에너지의 양과 방출속도에 의하여 결정된다. 에너지의 양이 크면 대체적으로 같은 거리에서 폭풍파 압력이 높다. 에너지 방출속도가 빠른 화약은 가까운 곳

† 2005년 7월 27일 접수~2005년 12월 15일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD) 기술-3부

주저자 이메일 : pjs@add.re.kr



[그림 1] 화약의 폭풍파

에서는 높은 압력을 보이거나 거리가 멀어질수록 급격히 감소한다. 반면에 에너지 방출속도가 느린 화약의 경우, 화약에서 가까운 곳에서는 압력이 낮으나 거리에 따른 압력의 감소율이 비교적 낮아 거리가 먼 곳에서도 비교적 높은 압력과 충격량을 나타내게 된다. 이는 화약의 폭발에너지가 서서히 방출됨에 따라 진행되는 폭풍파와 에너지 공급이 계속적으로 이루어지기 때문이다. 그러나 폭발에너지의 공급이 너무 느린 경우에는 이 에너지가 폭풍파에 전달되지 못하기 때문에 오히려 압력과 충격량이 낮아지게 된다.

폭풍파의 특성은 주변매질에도 매우 큰 영향을 받는다. 암석이나 흙, 또는 물 등의 내부, 즉 지중이나 수중에서 화약이 폭발하는 경우에는 화약 폭발 생성물의 팽창이 비교적 느리기 때문에 내부의 압력과 온도가 비교적 장시간 높게 유지되어 반응속도가 느린 물질이라도 충분한 반응시간을 갖게 되어 공기 중에서는 폭풍위력이 낮은 화약이라도 이러한 환경 하에서는 위력이 매우 높게 나타날 수도 있다. 그러므로 화약의 폭풍위력은 그 화약이 사용되는 조건하에서 측정되어야 가장 정확하게 평가될 수 있다.

이러한 특성을 갖는 화약의 폭풍파 위력을 측정하기 위하여 폭풍파 위력의 기준이 되는 TNT와 주조형 복합화약 TX-01, -02, -03, -04에 대하여 수행하였다.

2. 이론적 고찰

폭풍파의 압력과 충격량은 화약의 폭풍위력 결정에 가장 중요한 특성들이다. 이러한 특성을 이론적으로

계산하는 것은 매우 복잡하고 어려운 작업이다. 따라서 화약의 폭풍파 특성을 계산하기 위해서는 대부분 많은 실험결과를 토대로 얻어진 경험적인 축척법 (scaling law)을 사용한다. 화약의 폭풍파 측정시험을 통하여 폭풍파 특성을 결정하고 축척법을 사용하여 기준화약인 TNT에 대한 등가무게(TNT equivalent weight, TEW)를 결정한다. 등가무게가 결정되면 화약의 다른 무게나 거리에서의 폭풍파 특성은 축척법으로부터 계산할 수 있다.

축척법 중에서 가장 널리 사용되고 있는 것은 Hopkinson 축척법이다^[2]. Hopkinson 축척법에서는 폭풍파 특성을 축척거리(scaled distance)만의 함수로 가정한다. 이를 식으로 표현하면 식 (1), (2)와 같다.

$$P = P(Z) \tag{1}$$

$$I = I(Z) \tag{2}$$

여기에서 축척거리 Z는 다음과 같이 정의한다.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \tag{3}$$

위의 식에서 R은 화약의 중심에서부터 거리이며, W는 화약의 질량이다. 대부분의 경우 R의 단위는 m, W의 단위는 kg으로 주어지며, 이 때 Z의 단위는 $m/kg^{1/3}$ 이 된다. 이 축척법에 의하면 화약의 질량 또는 무게나 측정위치가 달라도 축척거리만 같으면 같은 압력과 충격량이 얻어지게 된다. 따라서 한 화약에 대한 실험을 통하여 축척법의 계수들을 얻으면 다른 무게나 위치에서의 폭풍파 압력과 충격량을 예측할 수 있다. Hopkinson 축척법에서는 거리를 질량의 3승근으로 나누어진 축척거리로 사용하기 때문에 3승근 축척법(cube-root scaling law)이라 불린다.

TNT 등가무게비는 동일한 거리에서 같은 폭풍파 특성을 나타내는 TNT무게에 대한 시험화약의 무게 비율로 정의되며 기준화약인 TNT와 시험화약의 에너지 방출량 차이를 축척법과 관련시킴으로서 구해진다. 그리고 TNT 등가무게는 폭풍파 압력, 충격량, 도달시간, 지속시간(positive duration) 등의 폭풍파

특성에 대하여 결정할 수 있으나 도달시간이나 지속 시간에 대한 등가무게는 산출이 약간 복잡하고 크게 유용하지 않기 때문에 잘 쓰이지 않고 압력이나 충격량을 기준으로 산출하는 것이 보통이다.

Hopkinson 측정법을 이용하여 등가무게를 결정하는 방법은 다음과 같다. 화약의 기하학적인 구조와 기폭방법이 같고 시험 환경이 동일한 곳에서 TNT 화약과 시험화약의 폭풍과 압력을 측정하였을 때 각각의 화약에 대하여 폭풍과 압력을 측정거리의 함수로 표현하면 식 (4)와 (5)로 나타낼 수 있다.

$$P_{TNT} = P_{TNT}(Z_{TNT}) \quad (4)$$

$$P_{test} = P_{test}(Z_{test}) \quad (5)$$

여기서 하첨자 TNT는 TNT 화약을, test는 시험화약을 의미한다. 이 때, 측정거리 Z_{TNT} 와 Z_{test} 에서의 압력이 같으면

$$P_{TNT}(Z_{TNT}) = P_{test}(Z_{test}) \quad (6)$$

측정법에서는 같은 측정거리에서의 압력이 같다고 가정하므로, 식 (6)의 Z_{TNT} 과 Z_{test} 가 같은 값을 가짐을 의미한다. 즉

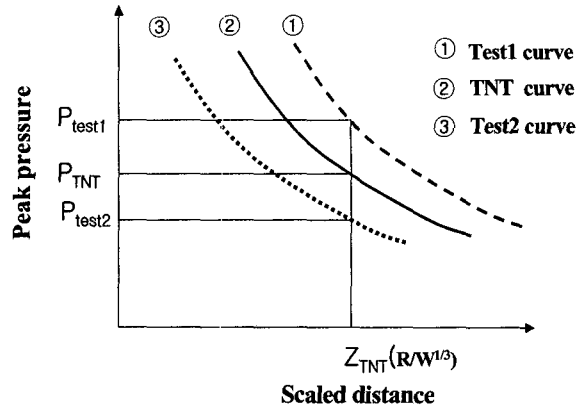
$$Z_{TNT} = Z_{test} \quad (7)$$

이며, 이를 식 (3)에 대입하면

$$\frac{R_{TNT}}{(W_{TNT})^{1/3}} = \frac{R_{test}}{(F_{TNT}W_{test})^{1/3}} \quad (8)$$

식 (8)을 정리하면 TNT 등가무게 계수(TNT equivalent weight factor)인 식 (9)의 F_{TNT} 가 얻어진다.

$$F_{TNT} = \frac{(R_{test})^3 W_{TNT}}{(R_{TNT})^3 W_{test}} \quad (9)$$



[그림 2] 측정거리의 TNT 등가무게

충격량(impulse) 기준 등가무게 계수도 폭풍과 압력의 등가무게 계수를 구하는 방법과 같은 방법으로 구한다. 등가무게는 다른 임의의 화약을 기준으로 결정할 수 있으며, 이 때에는 위의 식들에 TNT 화약 값 대신에 다른 기준화약의 값을 대입하면 된다. 측정법을 이용하여 시험화약의 TNT 등가무게 관계를 도식하면 그림 2와 같고 측정거리가 같은 상태에서의 P_{TNT} 와 P_{test} 의 비가 압력에 대한 TNT 등가무게 계수가 된다. 그림 2에서 P_{test1} 은 TNT 등가무게 계수가 1보다 크며 P_{test2} 는 1보다 작다. 등가무게 계수가 1보다 크면 같은 거리에서 TNT 보다 높은 압력을 보이는 것으로 해석할 수 있다.

3. 폭풍과 측정 시험

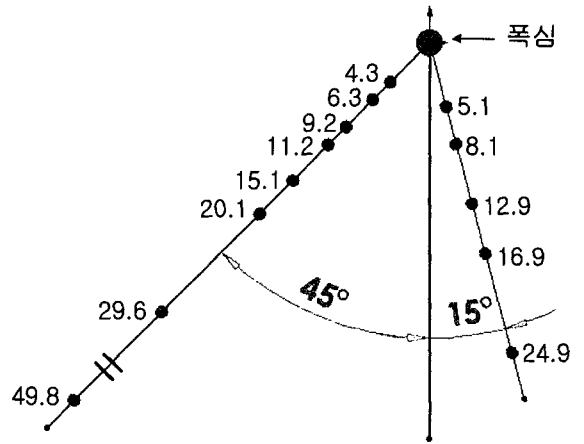
화약의 공기 중 폭풍파를 측정하기 위하여 구형화약(spherical charge)을 사용하였다. 구형화약의 장점은 1) 폭발의 방향성이 없어 특성 측정이 용이하고, 2) 중심기폭 시 1차원 폭발현상으로 간주 할 수 있어 해석이 용이하며 3) 문헌자료가 풍부하여 시험 결과의 비교가 용이하다.

본 연구에서 폭풍과 압력과 충격량 측정을 위하여 시험화약을 그림 3과 같이 외경이 340mm의 구형형태로 충전 가공하였고 화약의 내부 중앙에 직경이 94mm 구형 전폭약을 기계가공하여 충전하였으며 전폭약의 중앙에는 기폭관(RP-87 EBW detonator)을

삽입하여 화약의 중심에서 기폭이 되도록 하였다.

폭풍과 압력과 충격량 측정을 위한 시험화약은 표 1과 같이 기준 화약인 TNT와 주조형 복합화약이다. 시험에 사용된 주조형 복합화약은 모두 알루미늄(Al)이 첨가된 화약으로서 알루미늄을 함유하고 있는 화약은 비교적 반응속도가 느리기 때문에 폭발파에 전달되는 에너지가 비교적 작고 이로 인하여 폭발속도와 폭발압력이 비교적 낮으나 알루미늄의 반응에너지가 음속점 이후에도 계속적으로 방출되기 때문에 폭풍파의 지속시간이 긴 경향이 있다.

시험방법은 그림 4와 같이 구형의 시험화약을 지상에서 1.8m 높이에 고정시키고 시험화약 기폭 시

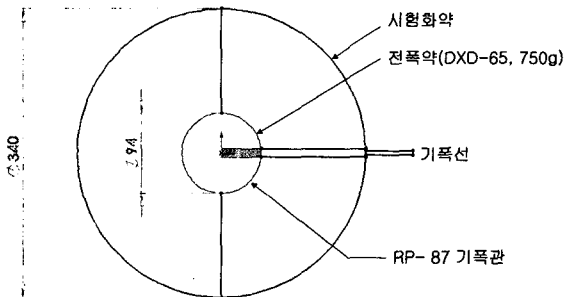


[그림 5] 측정 gage의 위치

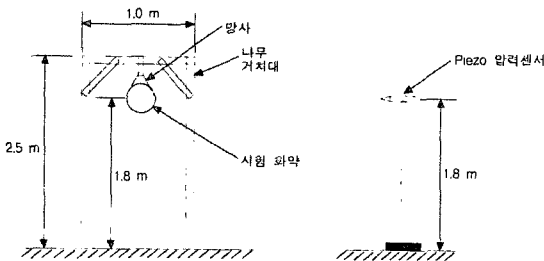
[표 1] 시험화약 조성과 밀도

특성	TNT	TX-01	TX-02	TX-03	TX-04
밀도 (g/cm ³)	1.6	1.79	1.72	1.76	1.76
화약량 (kg)	31.224	36.356	35.066	35.532	35.640

발생되는 폭풍과 압력을 측정하기 위하여 게이지를 측정면과 시험화약의 중심이 지면에서 수직방향으로 1.8m의 수평면에 오도록 설치하였다. 게이지는 그림 5와 같이 폭심을 중심으로 2개의 선상을 따라 설치되었으며 편의상 화약 중심에서 15°선상에 있는 것을 A라인, 45°선상에 있는 것을 B라인으로 구분하면 A라인에는 5개의 게이지를 B라인에는 8개의 게이지를 설치하였다. 사용된 게이지는 미국 PCB piezotronic사의 압전형 압력게이지(piezoelectric type pressure transducer)를 사용하였는데, 압력이 높을 것으로 예상되는 화약으로부터 8m까지는 측정범위가 500psi인 PCB 137A11 게이지를 사용하였고, 8m 이후에는 측정범위가 50psi인 PCB 137A12 게이지를 사용하였다. 게이지로부터 나온 압력신호는 증폭기를 거쳐 1μs의 sampling rate로 A/D 변환되어 컴퓨터에 저장되게 된다.



[그림 3] 시험화약의 형상



[그림 4] 시험화약의 거치 및 sensor 높이

4. 시험결과

가. 폭풍파 압력

시험 대상 화약인 주조형 복합화약(TX-01, TX-02, TX-03, TX-04)에 대한 폭풍압 측정시험을 수행하고 지상 1.8m 높이의 화약 중심으로부터 4~50m 거리에 총 13개의 압전형 게이지를 설치하여 폭풍파 압력파형을 계측하였다. 결과 분석방법은 계측된 폭

폭파 압력파형에서 최고 압력과 충격량을 계산하여 TNT에 대한 등가무게를 계산하였는데, 계측된 폭풍파 압력파형들은 시험 특성상 일정한 형태로 계측되지 못하고 주변의 잡음들이 함께 계측되므로 이를 없애기 위하여 폭풍파가 도달하기 전 수 ms의 신호들은 선형 끼워 맞추기(least square regression)을 통하여 보정해 주었다.

시험 결과 분석에 앞서 화약의 폭발에너지에 의한 폭풍파 압력파형들의 형성과정을 살펴보면 다음과 같다. 화약이 지표면에서 가까운 공기 중에서 폭발하게 되면 화약의 폭발에너지의 급격한 방출에 의하여 충격파가 공기 중으로 전파하게 되며 화약에서 가깝고 화약의 높이와 비슷한 한 점에서는 화약으로부터 직선으로 전달되는 입사파(incident wave)와 지면에서 반사되어 발생하는 반사파(reflected wave)를 차례로 경험하게 된다. 반사파는 먼저 도달된 입사파에 의하여 압축된 공기 내를 통과하므로 입사파보다 약간 빠르게 진행한다. 따라서 폭풍파가 계속 진행함에 따라 반사파와 입사파간의 거리는 좁혀지고, 결국에는 반사파가 입사파를 추월하여 하나의 폭풍파를 형성하게 된다. 이와 같이 하나의 중첩된 압력파를 mach stem이라 한다. Mach stem이 최초로 형성되는 점은, 입사파가 도달되지 않은 영역과 입사파에 의해 압축된 영역 그리고 mach stem 영역의 3개 영역이 존재하게 되는 3중점(triple point)이며, 이 3중점은 화약으로부터 비교적 가까운 지표면에서 형성되기 시작하여 거리에 따라 서서히 상승하게 된다. 따라서 3중점이 형성되기 이전에는 입사파와 반사파가 각각 분리되어 나타나지만 3중점 이후에는 하나의 압력파만 나타나게 된다. 이러한 mach stem의 형성지점은 화약의 폭발높이에 관계하며, 화약의 종류나 양에는 거의 영향을 받지 않는다고 보고되고 있다^[2]. 이에 본 연구에서도 화약 폭발높이가 1.8m일 때는 mach stem은 7~8m 되는 지점에서 게이지 높이인 1.8m 까지 상승하며 본 시험에서도 약간의 편차는 있지만 대략 8m 근처에서 3중점이 게이지 높이에 도달하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 화약 중심에서 8m 이전에 설치된 게이지로부터 얻은 파형에 대해서는 입사파의 압력을, 8m 이후 파형에 대해서는 잡음이 아닌 것으로 판단되는 최고압력을 게이지 압력으로 계산하였다.

부록의 그림 16과 17은 TNT 화약의 폭풍파 측정 시 형성된 mach stem과 8m 이후에 입사파와 반사파가 중첩되는 것을 보여주고 있다.

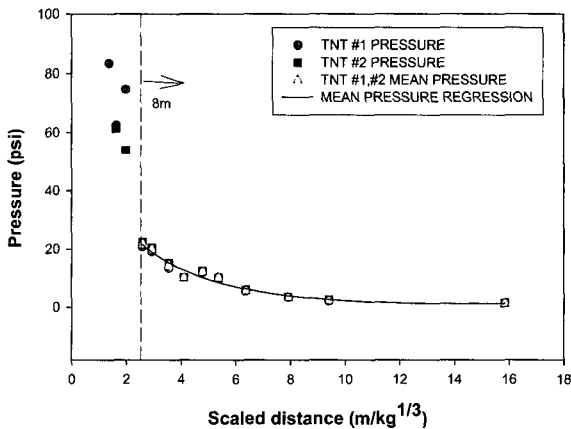
3중점의 개념을 도입하여 본 연구의 기준화약인 TNT의 2회 시험에 대한 축척거리와 폭풍압을 그림 6에 도시하였다. 그림 6에서 알 수 있듯이 1회 시험과 2회 시험값의 차이는 크게 없으며, 각각의 시험에서 mach stem이 형성되는 8m 지점을 기준으로 볼 때 8m 이전에서는 폭풍압의 편차가 심하나 8m 이후에서는 비교적 일관성이 있음을 보여주고 있다. 또한 8m 이전의 폭풍압과 8m 이후의 폭풍압의 크기도 차이가 많은 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 다른 화약에서도 나타나고 있다. 따라서 8m 이전의 폭풍압들의 편차는 계측기법상의 오류라기보다는 mach stem의 형성과정에서 나타난 불안정성으로 판단되어 시험결과 분석에 사용된 값들은 8m 이후의 게이지로부터 얻은 결과만을 사용하였다.

기준화약인 TNT 화약에 대한 주조형 복합화약의 폭풍압과 충격량을 구하기 위해서는 우선 TNT 화약에 대한 기준값들을 계산하여야 한다. 이를 위해서 그림 6과 같이 화약의 폭발지점으로부터 8m 이후에 설치된 게이지 값들을 이용하여 기준 값을 계산하였다. 계산 방법은 시험방법에서 언급한 것과 같이 시험화약의 기폭중심에서 압력게이지들은 15°와 45°각도를 이루면서 일정한 거리를 두고 설치되어 있는데 편의상 15°각도의 게이지 열을 line A, 45°각도의 게이지 열을 line B라 하면 시험화약이 구형이기 때문에 게이지가 설치된 각도에 상관없이 측정된 압력과 충격량이 일정해야 하나 시험장 주변의 환경(흙, 잡초, 돌 등) 변화에 의하여 폭풍파 특성이 약간씩 변하기 때문에 게이지 열에 따라 각각 보정(calibration)을 하여 다른 시험화약과 비교하여야 하지만 본 시험에서는 각 게이지 열별로 설치된 게이지 수가 작고 이 중에서도 8m 이내에 설치된 게이지 값들은 계산에 사용하지 않기 때문에 게이지 열별로 각각 보정하는 것은 다른 시험화약과 비교 시 오차가 발생할 수 있는 확률이 높은 것으로 판단하여 게이지 열별로 보정하지 않 통합하여 보정을 수행하였다. 또한 기준화약인 TNT의 시험회수가 2발이기 때문에 이때 계측된 압력과 충격량 그리고 화약무게는 2발의 평균값을

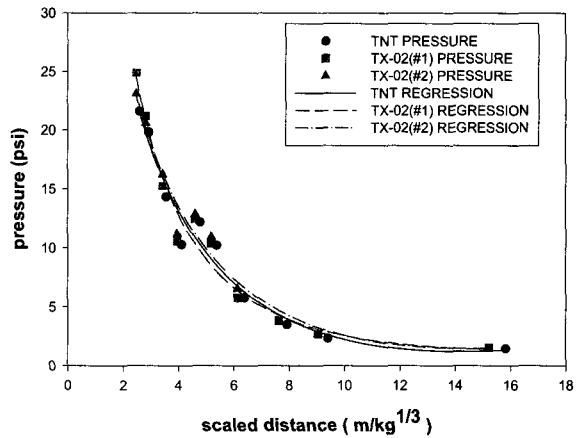
사용하여 계산하였다. 이와 같은 방법으로 기준화약인 TNT 화약의 축척거리에 따른 압력값의 보정 결과는 식 (10)과 같은 3차항의 logarithm 식으로 나타나고 이 식에 의하여 구해진 압력값을 기준으로 다른 시험화약의 TNT에 대한 등가무게압력을 계산하게 된다.

$$P = 43.7041 - 24.8351(\ln Z) + 0.6072(\ln Z)^2 + 1.0241(\ln Z)^3 \quad (10)$$

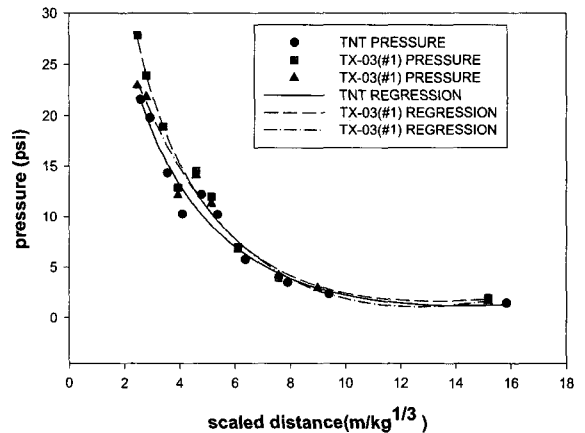
그림 7에서 그림 10까지는 TX-01, TX-02, TX-03, TX-04 화약의 폭풍압을 TNT 평균압력과 비교하여 도시하였다.



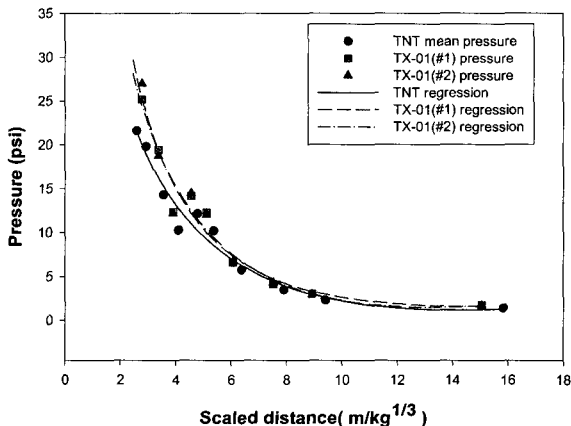
[그림 6] TNT 폭풍압력 및 보간 결과



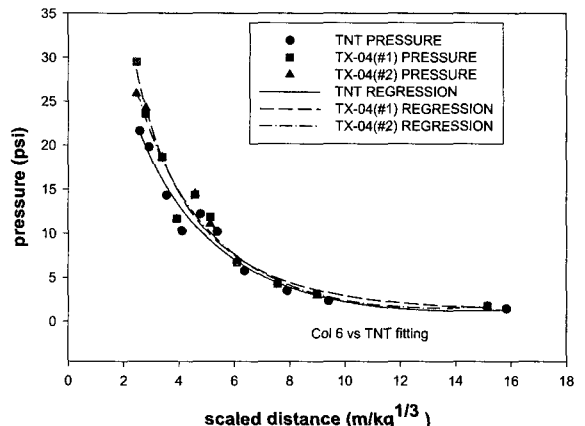
[그림 8] TX-02 폭풍압력



[그림 9] TX-03 폭풍압력



[그림 7] TX-01 폭풍압력



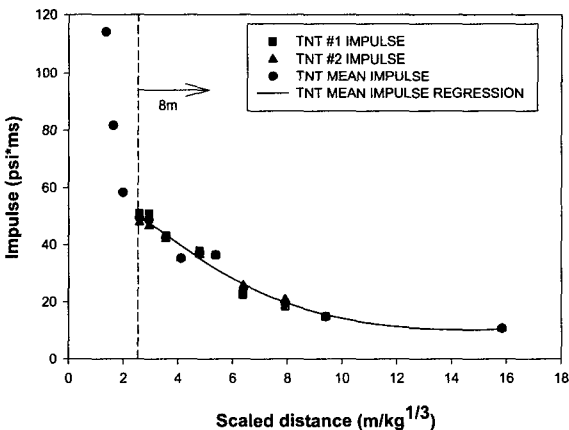
[그림 10] TX-04 폭풍압력

나. 폭풍파 충격량(Impulse)

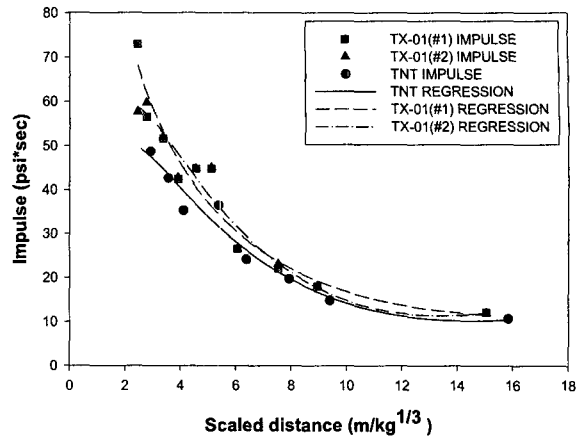
화약의 폭풍파 특성에서 충격량(impulse)은 폭풍파 압력과 함께 가장 중요한 특성이라 할 수 있다. 충격량 계산은 폭풍파 도달시간으로부터 압력이 음(negative)의 값을 가질 때까지의 시간을 폭풍파 지속시간(positive duration)으로 간주하고 이 시간동안의 압력파형을 시간에 대하여 적분하여 충격량을 구하였다.

그림 11은 TNT 화약의 축척거리에 따른 폭풍파 충격량을 나타낸 그림이다. 그림에서 2발의 TNT 화약에 대한 충격량의 경향도 폭풍압력과 같이 화약으로부터 8m 이후에 설치된 게이지의 데이터만 사용하였으며 8m 이후에 측정된 충격량 값들은 시험 1과 시험 2가 정확히 일치하지는 않지만 비교적 일관성 있는 값들을 보이고 있다. TNT 화약의 충격량 끼워맞춤도 폭풍파 압력에서 구한 방법과 같이 게이지 열별로 구하지 않고 이를 통합하여 끼워맞춤을 수행하였고 2발의 TNT 화약의 평균 무게와 평균 충격량을 계산에 사용하였다. 축척거리에 대한 충격량의 끼워맞춤 결과 식 (11)과 같은 3차항의 logarithm 식을 얻을 수 있었으며 이를 도시하면 그림 11과 같다. 그림 11과 같이 계산된 TNT 충격량을 기준으로 다른 시험화약에 대한 충격량 등가무게비를 계산하게 된다.

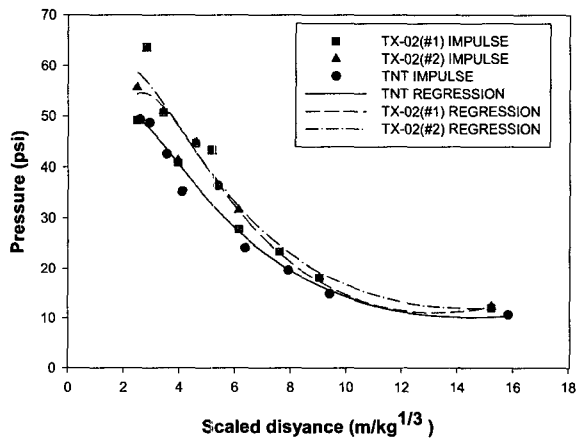
$$P = 24.9224 + 72.2364(\ln Z) - 60.1464(\ln Z)^2 + 12.6170(\ln Z)^3 \quad (11)$$



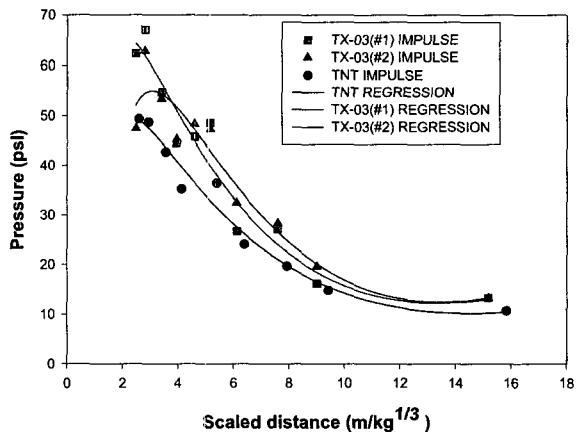
[그림 11] TNT 폭풍파 충격량 및 보간 결과



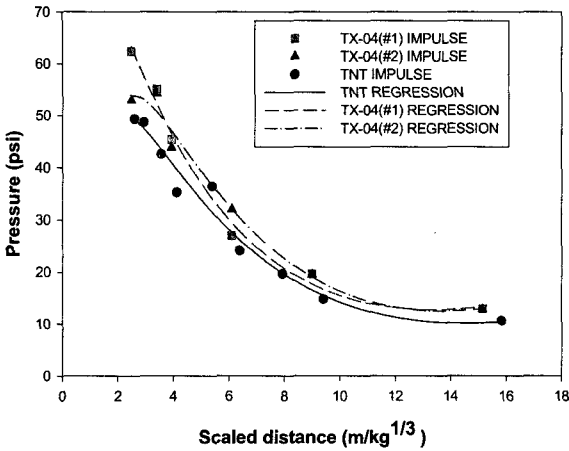
[그림 12] TX-01 폭풍파 충격량



[그림 13] TX-02 폭풍파 충격량



[그림 14] TX-03 폭풍파 충격량



[그림 15] TX-04 폭풍파 충격량

그림 12에서 그림 15는 TNT의 평균 충격량과 각각의 시험화약의 충격량 값을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 시험 화약들의 충격량은 TNT 충격량과 비교했을 때 기워 맞춤 곡선의 형태가 조금은 일정하지 않지만 전체적인 형태는 유사한 결과를 보이고 있다.

5. 등가무게 분석

표 2는 시험화약에 대한 공기중 폭풍파 압력 및 충격량에 대한 TNT 등가무게비를 나타내고 있다. 표에서 알 수 있듯이 폭풍파 압력과 충격량은 시험화약 모두 TNT 등가무게비가 1을 넘는 것으로 계산되었다. TNT 등가무게를 화약별로 자세히 살펴보면 다음과 같다. 먼저 TX-03은 폭풍파 압력과 충격량의 평균 TNT 등가무게비가 1.266/1.640으로 계산되었다. 이는 TNT에 비하여 폭풍파 성능이 상당히 우수한 것으로 판단할 수 있다. TX-04의 경우도 폭풍파 압력과 충격량이 1.274/1.679로 TNT 보다 우수한 것은 물론 TX-03과 비교했을 때 폭풍파 압력이 약 0.6%, 충격량이 2.4% 증가된 것으로 계산되었다. 이는 TX-04가 TX-03에 비하여 HMX 함량이 5% 많이 함유된 것이 주요인으로 작용한 것으로 판단된다. TX-02의 경우는 폭풍파 압력과 충격량이 각각 1.050/1.686으로 폭풍파 압력은 TX-03, -04보다는 낮지만

충격량은 시험화약 중에서 가장 높은 것으로 계산되었다. 특히 TX-02 화약의 폭풍파 압력이 낮은 것은 TX-02 조성이 안전도를 향상시키기 위하여 사용한 둔감 활성충전제인 NTO의 함량이 시험화약 중에서 가장 많으며 NTO의 낮은 폭발온도에 의하여 다량의 알루미늄이 순간적으로 반응되지 못했기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 폭풍파 충격량에서는 NTO와 AL의 함유량이 많기 때문에 반응속도는 늦지만 지속적인 에너지 방출로 인하여 충격량이 시험 화약 중 가장 높은 것으로 판단된다.

TX-01의 폭풍파 압력과 충격량의 TNT 등가무게비는 1.298과 1.504로 계산되었다. 이는 폭풍파 압력은 시험 화약 중에서 가장 높은 것으로 계산되었으며 충격량은 TX-02, -03, -04보다는 다소 낮은 것으로 분석되었다. TX-01의 폭풍파 압력이 가장 높은 것은 TX-01 조성이 RDX와 결합제로 이루어져 있어 HMX와 둔감 활성충전제인 NTO가 함유된 TX-02나 TX-04보다 폭풍파 압력이 높은 것으로 생각할 수 있다. 그러나 TX-01과 TX-04의 폭풍파 압력을 비교하면 약 2%의 작은 차이를 보이고 있고 이는 계산상의 오차일 수 있으며 폭풍파 시험의 특성이 주변 매질에 많은 영향을 받기 때문에 반드시 TX-01이 TX-04보다 폭풍파 압력이 우수하다고는 단정할 수 없다. TX-01의 폭풍파 특성을 살펴보면 TX-01의 활성충전제로 사용하고 있는 RDX는 높은 폭발을 갖고 있으나 반응속도가 빠르기 때문에 폭풍파가 오랜 시간 지속성이 없기 때문에 높은 폭풍파 압력에도 불구하고 충격량은 TX-02, -03, -04보다 낮은 것을 알 수 있다.

개발화약의 폭풍파 특성을 알아보기 위하여 기준화약인 TNT와 주조형 복합화약 TX-01의 3종을 시험한 결과 폭풍파 압력은 모두 TNT보다 높은 값을 나타냈으며 폭풍파 압력이 가장 큰 조성은 TX-01로 계산되었다. 그러나 앞서서도 설명한 것과 같이 시험방법과 계산상의 오차를 감안하면 TX-01과 TX-04의 폭풍파 압력은 같은 수준으로 판단된다. 폭풍파 충격량에서는 TX-02가 TNT 등가무게비가 1.686으로 가장 높게 나타나고 있다. 다른 시험화약들도 TNT 등가무게비가 1.364~1.679로 모두 TNT 보다 높게 나타난 것을 알 수 있다. 시험화약들의 폭풍파 충격량이 TNT 보다 우수한 것은 폭풍파 압력이 모

[표 2] 시험화약의 TNT 등가무게비

Explosive	Test Num (#)	Pressure (TEW)	pressure (TEW) 평균	Impulse (TEW)	Impulse (TEW) 평균
TNT	#1	1	1	1	1
	#2				
TX-01	#1	1.306	1.298	1.483	1.504
	#2	1.290		1.524	
TX-02	#1	1.012	1.050	1.647	1.686
	#2	1.087		1.725	
TX-03	#1	1.343	1.266	1.454	1.640
	#2	1.189		1.826	
TX-04	#1	1.304	1.274	1.585	1.679
	#2	1.244		1.773	

▶TEW(TNT Equivalent Weight factor) : TNT 등가무게 계수

두 TNT보다 높으며 이와 함께 시험화약들의 조성 대부분에 활성 충전재에 비하여 반응시간은 상대적으로 늦지만 연소열이 높은 알루미늄의 함유량이 많으며 여기에 AP 산화제가 알루미늄이 반응할 수 있도록 충분한 산소를 공급함으로써 TNT 화약에 비하여 에너지 방출이 증대했기 때문으로 판단된다.

6. 결론

TX-01의 3종의 주조형 복합화약과 기준화약인 TNT 화약의 폭풍압 시험을 수행하고 이들 화약의 폭풍과 특성인 압력과 충격량을 계산하여 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째 TX-01, TX-02, TX-03, TX-04 폭풍과 압력과 충격량의 등가무게비는 시험화약 모두 1보다 크

게 나타나 폭풍과 압력과 충격량이 TNT보다 우수한 것으로 분석되었다.

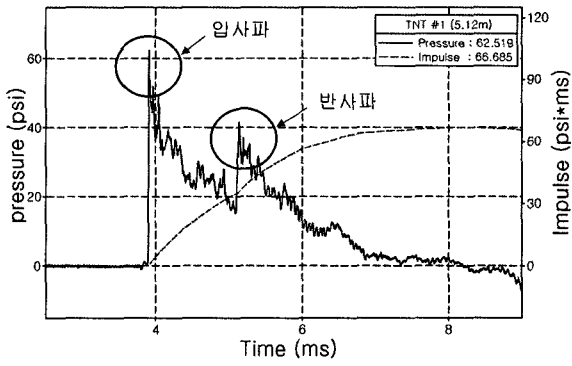
둘째 시험화약의 폭풍과 압력과 충격량이 모두 TNT 등가무게비 1보다 크게 나타나고 있고 특히 충격량의 경우 TNT보다 상당히 큰 폭의 증가를 보이고 있다. 이는 시험 화약들의 조성에 다량의 알루미늄이 함유되어 있고 알루미늄의 연소반응에 산화제인 AP가 충분한 산소를 공급하여 에너지 방출이 증가했기 때문이다.

추후 공기 중 화약의 폭풍과 특성 시험에서 계측된 폭풍과 시험값들의 재현성과 신뢰성을 높이는 연구가 필요할 것으로 판단되며 보완책으로 좀 더 많은 센서를 설치하면 데이터 분석에서 오는 오차를 최소화 할 수 있을 것으로 사료된다.

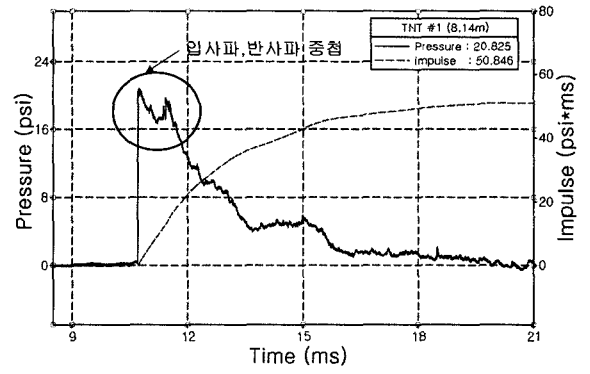
참 고 문 헌

- [1] 이재민의 4인, 화약의 폭풍위력 분석, KTRC-419-991000, 국방과학연구소 기술보고서, 11, 1999.
- [2] G. F. Kinney and K. J. Graham, Explosive shocks in air, 2nd ed., Springer-Verlag, New York, NY, 1985, pp.07~118(scaling law), pp. 124~128(mach stem).
- [3] AMC Paphlet, "Engineering design handbook", Explosive in air, Part one, US Army Material Command Headquater, AMCP 706-181, 1975, pp.3-2~3-4.
- [4] 박정수, 김성호, 이근득, 화약의 폭풍위력 분석 (IV), TEDC-419-021321, 국방과학연구소 기술보고서, 12, 2002.
- [5] 박정수, 김성호, 이근득, 이재민, "화약의 폭풍위력 측정 및 분석", 한국군사과학기술학회 종합학술대회 논문집, pp.639~642, 8, 2004.

부 록



[그림 16] TNT 폭풍파(거리 5.12m)



[그림 17] TNT 폭풍파(거리 8.14m)