

## HMX의 양에 따른 최대압력 및 폭풍파속도 분석

권희웅 · 탁경재 · 김정환 · 오 민\* · 채주승\*\* · 김현수\*\* · 문 일†

연세대학교 화공생명공학과  
120-749 서울특별시 서대문구 연세로 50  
\*한밭대학교 화학공학과  
305-719 대전광역시 유성구 동서대로 125  
\*\*국방과학연구소  
305-600 대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 35호  
(2014년 3월 31일 접수, 2014년 5월 24일 수정본 접수, 2014년 5월 29일 채택)

## Maximum Pressure and the Blast Wave Analysis of a Amount of HMX

Hweeung Kwon, Kyongjae Tak, Junghwan Kim, Min Oh\*, Jooseung Chae\*\*, Hyeonsoo Kim\*\* and Il Moon†

Department of Chemical & Biomolecular Engineering, Yonsei Univ., 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea

\*Department of Chemical Engineering, Hanbat Univ., 125 Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon 305-719, Korea

\*\*The 4th R&D Institute-2, Agency for Defence Development, P.O.Box 35, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea

(Received 31 March 2014; Received in revised form 24 May 2014; accepted 29 May 2014)

### 요 약

폭약은 높은 에너지를 포함하는 반응성 물질이며 폭발이 발생할 경우 강한 빛, 높은 열, 소음 및 고압을 발생시킨다. 폭발 지점 주변의 손상은 대부분 높은 과압과 폭풍파에 영향을 받는다. 따라서 폭발에 의한 압력 및 폭풍파의 분석이 매우 중요하다. 본 연구에서는 HMX와 같은 고폭화약의 최대 과압 및 폭풍파 속도를 분석하였다. 먼저 HMX 폭발에 관하여 4가지 경우를 선정하고 폭발현상을 모델링하였으며 HMX의 양에 따른 폭발시뮬레이션을 통하여 최대 과압 및 폭풍파 속도를 도출하였다. 또한, 폭발이 Geometry 중심에서 일어난다고 가정하고 계산된 과압과 폭풍파 속도로부터 폭심에서 인접해 있는 위치의 영향을 분석하였다. 대조군으로 이용된 TNT도 함께 시뮬레이션 및 분석하였으며 HMX 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 HMX의 상대적인 과압 및 폭풍파속도를 확인하였다. 본 연구는 HMX가 포함된 복합화약이 폭발하였을 경우 최대 과압 및 폭풍파속도 산정 시 기초데이터로 활용할 수 있다.

**Abstract** – Explosives are reactive material that contain a great amount of high potential energy. They produce detonation if released suddenly, accompanied by the production of strong light, high heat, great noise and high pressure. Damage at surrounding detonation point is affected by high pressure and blast wave for explosives detonation. Consequently, analysis of pressure and blast wave is very important. This study focuses on the analysis of maximum overpressure and blast wave of explosives for safety assurance. First of all, four cases of the amount of HMX were selected. Secondly, maximum pressure and blast wave were calculated through detonation simulation along with a set of TNT and HMX quantities. The peripheral effect of detonation point was analyzed by calculating overpressure and absolute velocity and considering detonation occurred in the center of geometry by HMX. Also, maximum overpressure and blast wave of HMX were compared to equivalent amount of TNT, which was taken as a base case and verified through theoretical HMX graph. This study contributes to the base case for overpressure and blast wave of complex gunpowder containing HMX.

Key words: TNT, HMX, Detonation, Explosive, Blast Wave

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ilmoon@yonsei.ac.kr

\*이 논문은 서울대학교 윤인섭 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

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

고에너지물질은 일반 산업뿐만 아니라 군사 분야에서 많이 사용되며 대표적인 고에너지물질은 TNT와 같은 고폭화약이라고 할 수 있다. HMX와 같은 고폭화약은 높은 에너지를 포함하고 있으며 매우 빠른 반응을 통하여 높은 압력 및 열을 발생시킨다. 따라서 고폭화약 폭발 시 압력 및 폭풍파를 통한 파손이 대부분이므로 폭발영향 분석이 필요하다[1].

TNT 및 HMX와 같은 고폭화약 폭발 사고의 경우는 고온, 고압 및 폭풍파가 주위로 전파되어 나간다[2]. 고폭화약에 의한 피해의 대부분은 폭풍압이기 때문에 Baker는 폭풍압을 측정하기 위하여 폭발압력 산정 시 기준이 되는 TNT를 공중에서 폭발시켰다[3]. 폭발속도가 다른 복합화약들이 폭발하였을 때 시간에 따른 압력을 측정하였다. 과거에는 주로 폭발에서의 주요변수가 과압이었으나 현재는 과압을 포함한 폭발량 및 폭풍파까지도 변수로 선정하여 연구되고 있다[4]. 그리고 폭발변수를 기본으로 TNT 당량을 계산하였으나 열화학적 계산에 의해서도 계산이 가능하게 되었다[5]. 박종천 연구팀은 메탄 연소를 이용한 CFD(Computational Fluid Dynamics) 시뮬레이션을 통하여 메탄가스가 폭발 시 폭발 피해 예측을 수행하였고 격자의 수렴성, 반응모델 및 난류모델과 관련된 계수 평가를 통하여 최적 조건을 도출하여 시뮬레이션 하였다[6]. Lee 연구팀은 가스폭발 예측을 기존 모델과 비교하였고[7] 수소 누출 및 폭발 시뮬레이션을 통하여 안전 설계에 기여하였다[8]. 이민형 및 정완진 연구팀은 고속충돌 및 폭발을 해석하기 위하여 Eulerian solver를 사용하고 결과를 검증하였으며 추가적으로 Lagrangian solver에서 Eulerian solver로 계산중에 변환하는 병렬화연구를 진행하였다[9]. 현재까지 다양한 전산해석 방법을 통하여 폭발현상을 규명하고 있다. TNT 및 HMX의 폭발 현상은 폭발 시 고체화약에서 순간적으로 가스 상태로 변화하고 이와 동시에 압력이 팽창하여 높고 빠른 압력 상태의 충격파를 전달하고 주위 물체에 손상을 준다. 화약이 폭발할 경우 급격한 압력 팽창과 폭풍파 등 비선형적인 현상을 모사할 수 있어야 한다. 화약 폭발과 같은 전산모사는 1950년대부터 시작되었으며 1960년대와 1970년대에 들어서 여러 가지 수치 해석 기법들이 활발하게 진행되었다. 전산해석은 크게 오일러리안(Eulerian), 라그랑지안(Lagrangian)과 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 방법으로 나누어 연구되었다.

고폭화약 폭발 시 과압이나 폭풍파가 주위에 전파되어 건물이나 인체에 큰 피해를 줄 수 있기 때문에 고폭화약의 폭발 영향에 대하여 정확한 평가가 필요하다. 본 연구에서는 야외소각 및 야외기폭을 기준으로 하여 D Geometry를 모델링하고 Lagrangian과 Eulerian 방법을 동시에 이용하여 폭발 시뮬레이션을 진행하였다. HMX의 양을 주요변수로 사용하여 최대 과압 및 폭풍파속도를 도출하였고 대표적인 고폭화약인 TNT와 비교하여 HMX의 상대적인 최대 과압 및 폭풍파속도의 크기를 분석하였다.

## 2. 본 론

폭발은 짧은 시간 동안에 급속하게 대규모의 에너지가 방출하는 것으로 화학변화에 의하여 압력 및 온도가 급격하게 상승하여 주위로 퍼져나가면서 파괴 작용을 수반하는 현상이라고 할 수 있다. 폭발현상은 순간적으로 온도, 소리 및 압력을 동반하는 화학반응을 말하며 기체 상태에서의 엔탈피 변화가 압력을 상승시킨다. 폭발화학

반응은 발열반응이며 강력한 에너지에 의하여 발생하는 급격한 가열이므로 액체에서 기체 상태로 또는 고체에서 기체 상태로 변화하는 상변화가 일어난다. 폭발은 크게 물리적 폭발과 화학적 폭발로 나누어진다. 진공용기 파손에 의한 폭발 및 급격한 끓는점에 의한 증기 폭발 등이 물리적인 폭발이며 산화, 분해, 중합 및 촉매폭발 등이 화학적 폭발에 속한다.

폭발 현상이 발견된 이후 1899년 Chapman과 1906년 Jouguet에 의하여 폭발상태에서의 충격파는 음속과 같다는 CJ(Chapman-Jouguet)이론을 제시하였으며 최초의 이론이다. CJ이론에서 화학반응은 주로 반응대역으로 불리는 유한한 영역에서 유한한 속도로 진행된다. 또한, 화약과 같은 고에너지물질이 폭발할 경우 폭발파는 음속을 갖는다고 볼 수 있다. CJ이론은 화약이 순간적으로 폭발하고 반응하기 때문에 폭발파가 음속에 도달한다는 가정이 들어있다. 화약이 폭발 시 반응대역 끝에서의 상태는 화약의 초기조건 및 반응생성물의 상태방정식에만 의존한다. 또한, 발열반응을 동반한 충격파의 전파로 모델링한다.

Fig. 1은 CJ 폭발이론을 설명하는 것으로 화약이 순간적으로 폭발된 상태를  $\lambda=1$ 으로 표현한다[10]. CJ 폭발이론은 순간적으로 반응이 일어난다고 가정한 이론이기 때문에 TNT와 같은 화약 폭발에 잘 맞는 이론이며 폭발 압력과 관련이 있다.

TNT의 폭발 압력은 폭발 진원지에서의 이격거리와 방출되는 전체 에너지량으로 결정된다. TNT가 폭발하면 고체 TNT는 고온 및 고압의 가스로 상전이가 일어나며 폭풍파와 높은 열에너지를 방출하게 되므로 주위 기상상태와 평형을 이루고자 순간적으로 압력을 상승시킨다. 폭풍파는 폭발 시 발생하는 충격파와 감쇄하여 음속으로 진행되는 파를 말한다. 폭풍파의 영향은 매우 짧은 시간 내에서 발생하며 시간이 지나면 대기 압력으로 떨어진다. Fig. 2는 이론적으로 폭발지점으로부터 어떤 한 지점에서 측정된 시간에 따른 폭발 압력을 나타낸다[11]. 폭발이 발생하면 압력은 일시적으로 증가한 후 감소하여 대기 압력으로 떨어질 때까지 누적된 값을 양의 임펄스, 음압부의 누적 적분값을 음의 임펄스라고 한다. 고폭 화약이나 가스 폭발 후 시간이  $t_d$ 에 도달하는 하면 폭발 압력은 초과 압력에 도달한 후 대기 압력과 평형을 이루기 위하여 떨어진다. 그리고 시간 음압

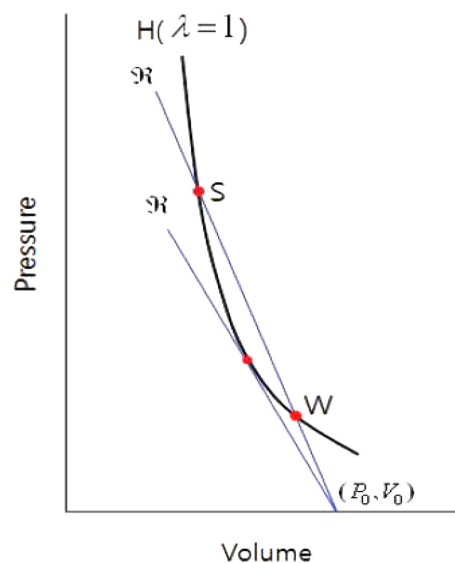


Fig. 1. Chapman-Jouguet detonation [10].

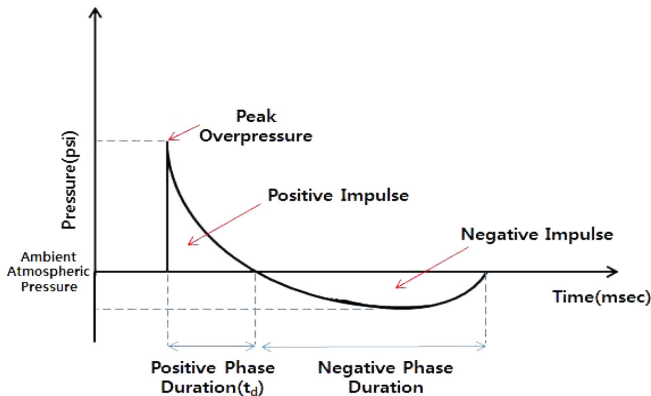


Fig. 2. Blast wave pressure at a fixed location [11].

력이 발생하게 되며 일정 지속시간이 흐른 후 대기 압력과 평형을 이룬다. 폭발 압력이 대기 압력보다 크면 양의 임펄스이며 대기 압력보다 작으면 음의 임펄스를 가진다. 과중압력(Overpressure)의 증폭은 폭풍파의 진행 경로에서 상대적으로 밀도가 큰 물질과 부딪히면서 나타나며 과중압력의 크기에 따라서 증폭 크기가 달라진다. 충격파의 경우 진행방향과 대상물질이 직각이면 반사압력이 최대가 되고 평행할 경우 최소가 된다[12].

TNT 및 HMX가 폭발하면 폭풍파는 폭발지점으로부터 퍼져나가게 된다. TNT 및 HMX가 폭발한 후 일정시간이 지나면 폭발 반응은 완료되지만 폭풍파는 지속적으로 이동하며 모든 건물 및 인명피해의 원인이 된다. 폭풍파에 의한 구조물 피해는 충격의 가하는 최대 과압을 결정하게 되며 피해의 크기는 폭풍파의 지속시간과 압력상승속도 관련이 있다. Fig. 3은 과압을 기준으로 하여 추정한다. 과압에 따른 피해영향은 다음과 같다

특정 질량을 가진 TNT 및 HMX가 폭발할 때 어느 정도 거리에서

얼마만큼 피해를 줄 수 있는지는 Scaling 법칙을 이용하여 추정한다. 피해를 줄 수 있는 최대 과압을 알고 있으면 환산거리와 과압과의 관계로부터 환산거리를 구할 수 있고 이를 이용하여 영향거리를 알 수 있다. 환산거리를 구하는 식은 다음과 같다.

$$Z_e = \frac{r}{m_{TNT}^{1/3}} \quad (1)$$

$m_{TNT}^{1/3}$ 는 TNT의 당량,  $r$ 은 폭심으로부터의 거리이며  $Z_e$ 는 유도된 환산거리이다. 밀폐된 구조물에서 폭발이 일어날 경우 구조물은 부분 또는 전파되고 그 주위로 크고 작은 파편들이 비산된다. 이러한 파편들은 주위 구조물 및 사람에게 2차피해를 발생시킨다. Clancy는 폭발물의 질량에 따라 파편이 날라 가는 최대 수직거리를 계산하였다[13].

$$L = 294W^{0.236} \quad (2)$$

$L$ 은 폭발에 의해 파편이 비산되는 최대 수직거리(m)이고  $W$ 는 TNT의 질량이다.

본 연구에서는 폭발 사고시나리오로 TNT와 HMX의 양에 따라 4가지 경우로 나누어 모사하였다. 4가지의 경우로 나누어 모사한 것은 크게 폭발량이 작은 경우의 시뮬레이션 결과는 이론적 TNT 및 HMX와 검증을 하였으며 폭발량이 큰 경우에는 외삽을 이용하여 이론적 TNT와 HMX와의 관계를 비교하여 보았다. 두 고폭화약의 양은 비슷한 수준인 약 361 g, 1.34 kg, 2.17 kg과 3.27 kg으로 나누어 모사를 진행하였고 각각 2, 4, 6, 8 m에서 최대압력 및 폭풍파속도를 측정하였다. TNT는 폭발에 의하여 초기 폭풍파 및 충격파의 발생 및 전파되는 과정을 Lagrangian과 Eulerian으로 대표되는 수치모델을 이용하여 계산하였다. Lagrangian 방법은 각각의 해석하고자하는 요소 또는 질점 등이 궤적을 그리며 이동해가면서 관찰하는 방법이며

### Damage criteria for blast overpressure :

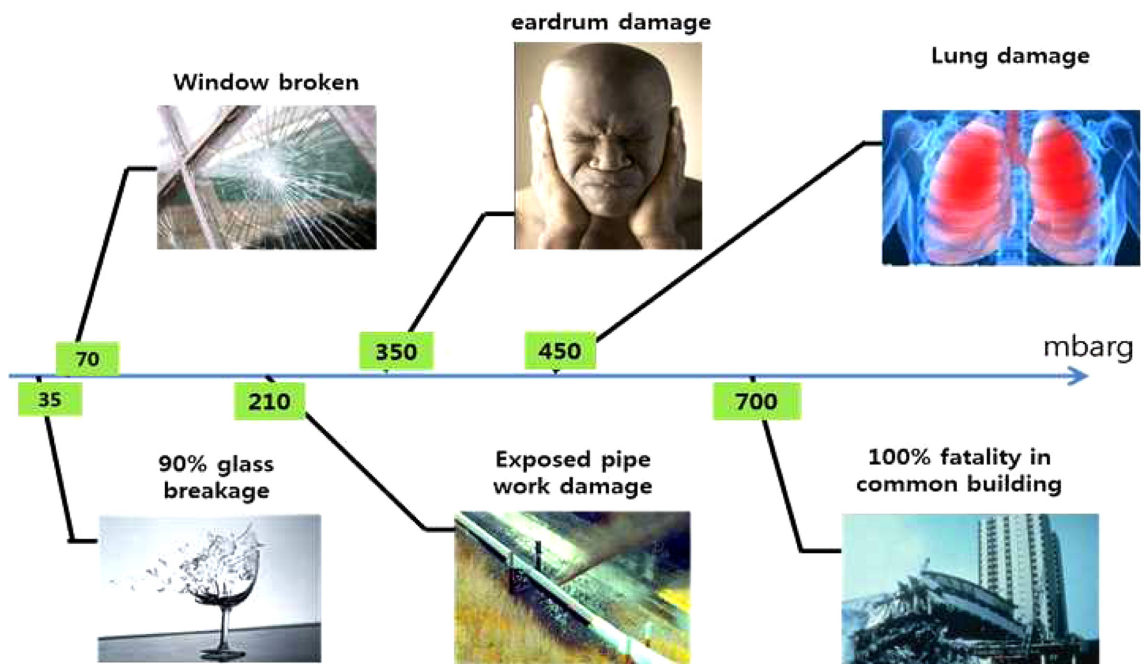


Fig. 3. The extent of damage from Overpressure [13].

Eulerian 방법은 좌표를 고정하고 그 좌표를 지나가는 해석하고자하는 요소 또는 질점을 관찰하는 방법이다. 폭발 EOS (Equation Of State)로는 JWL(Jones Wilkins Lee), 공기는 이상기체 상태방정식을 이용하였다. JWL EOS는 가장 널리 사용되는 상태방정식이며 Fig. 1에서 CJ점을 통과하는 등엔트로피 곡선을 기준선으로 사용하였다. JWL EOS의 수식은 다음과 같다.

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \left( 1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega \rho e \quad (3)$$

A, B,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\omega$ 는 상수,  $\rho$ 는 밀도,  $\rho_0$ 는 기준 밀도,  $\eta = \rho/\rho_0$ 이며  $e$ 는 비내부에너지를 나타낸다.

### 3. 결과 및 고찰

TNT 및 HMX와 같은 고폭화약이 폭발할 경우 주위 물체에 미치는 영향 요소들은 폭발 시 발생하는 압력, 속도, 폭발량 및 퍼져나가는 방향등이 있다.

폭발은 고온으로 주위 물체에 영향을 준다고 생각하기 쉽지만 고온의 열보다는 순간적인 압력과 폭풍파등이 더 큰 영향을 미친다. 비

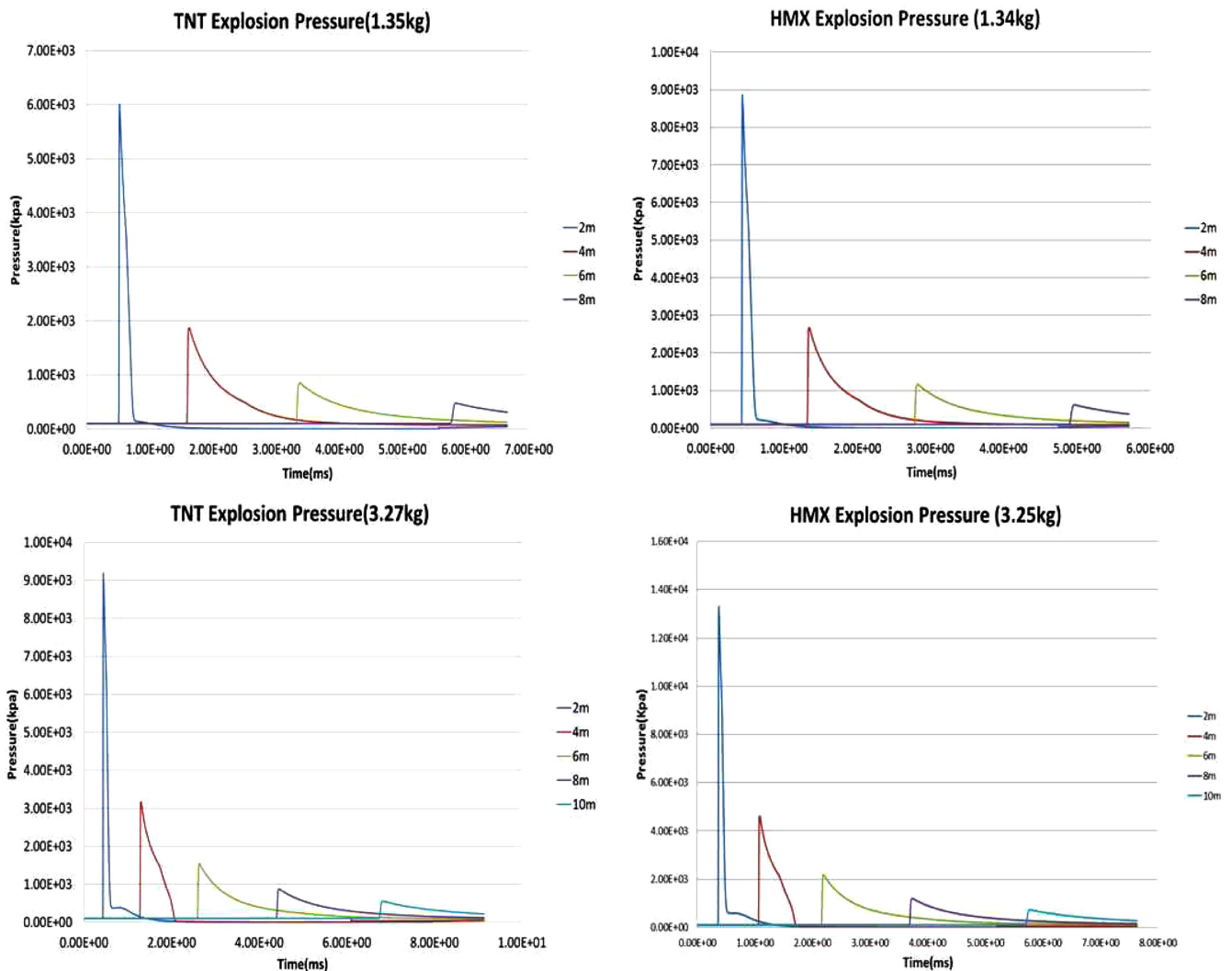
**Table 1. Maximum pressure in accordance with explosives quantity and distance (Below 3.27 kg of TNT and HMX, Unit: kPa)**

	0.363 kg	1.35 kg	2.17 kg	3.27 kg
2 m	2,960	6,000	7,620	9,180
4 m	781	1,870	2,480	3,170
6 m	-	852	1,180	1,540
8 m	-	479	658	880

	0.351 kg	1.34 kg	2.17 kg	3.25 kg
2 m	4,190	8,870	11,100	13,300
4 m	1,040	2,670	3,590	4,620
6 m	-	1,170	1,650	2,180
8 m	-	625	881	1,200

교 대상인 TNT의 경우 2 m 지점에서의 압력분포는 0.363 kg이 중심에서 폭발할 경우 약 2,960 kPa, 1.35 kg의 경우 약 6,000 kPa, 2.17 kg의 경우 약 7,620 kPa 그리고 3.27 kg의 경우는 9,180 kPa의 최대압력을 보였다. HMX의 경우에는 2 m 지점에서의 압력 분포는 0.351 kg의 HMX가 중심에서 폭발할 경우 약 4,190 kPa, 1.34 kg의 경우 약 8,870 kPa, 2.17 kg의 경우 약 11,100 kPa 마지막으로 3.25 kg의 경우는 13,300 kPa



**Fig. 4. Pressure variation in accordance with explosives quantity and distance (TNT and HMX).**

의 최대 과압을 보였다. 최대 과압은 인체 및 폭발 주변에 손상을 주는 정도를 결정하는 하나의 중요한 변수가 된다. 특히 주변 어느 한 구조물의 경우는 최대 과압 중 어느 하나가 지배적인 효과를 나타내기도 한다. 예를 들면, 육상에 있는 자동차 및 기차 등에 손상을 주는 것은 주로 충격면에 따른 폭풍파이며 건축구조물이 손상을 받는 것은 충격에 의한 것이다. TNT 및 HMX 폭발의 경우 매우 짧은 시간에 발생하며 인체가 받는 치명적인 손상 과압은 약 690~1,380 kPa이다. 또한, 건물의 붕괴 및 파편으로 인한 인체 손상은 더 낮은 압력에서도 치명적일 수 있다.

각 거리에 따른 최대 과압은 Table 1와 같다. Table 1에서 가로축은 TNT와 HMX의 양이며 세로축은 폭심으로부터의 거리이다. TNT와 HMX의 폭발량을 증가시켜 가면서 또는 거리를 변경하여가면서 최대압력을 비교분석하였다. TNT 및 HMX의 폭발 압력을 비교하면, 비슷한 양의 고폭화약이 폭발하였을 때 HMX가 TNT보다 각 거리에서의 최대 과압이 더 높은 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 TNT와 HMX의 각 폭발량과 거리에 따른 압력을 보여준다. 폭발량이 증가함에 따라 각 거리에 따른 압력도 대체로 증가하며 폭발량에 관계없이 폭심으로부터 약 10 m까지 매우 심각한 피해를 주는 것으로 분석되었다. 사람과 건물 등은 압력에 의한 피해가 대부분이므로 4가지 경우를 분석한 결과 적어도 6 m 지점까지도 약 852~2,180 kPa의 매우 높은 압력이 미치는 것을 알 수 있다.

Sochet 연구팀은 Autodyn 폭발 시뮬레이션을 이용하여 공기 중에서

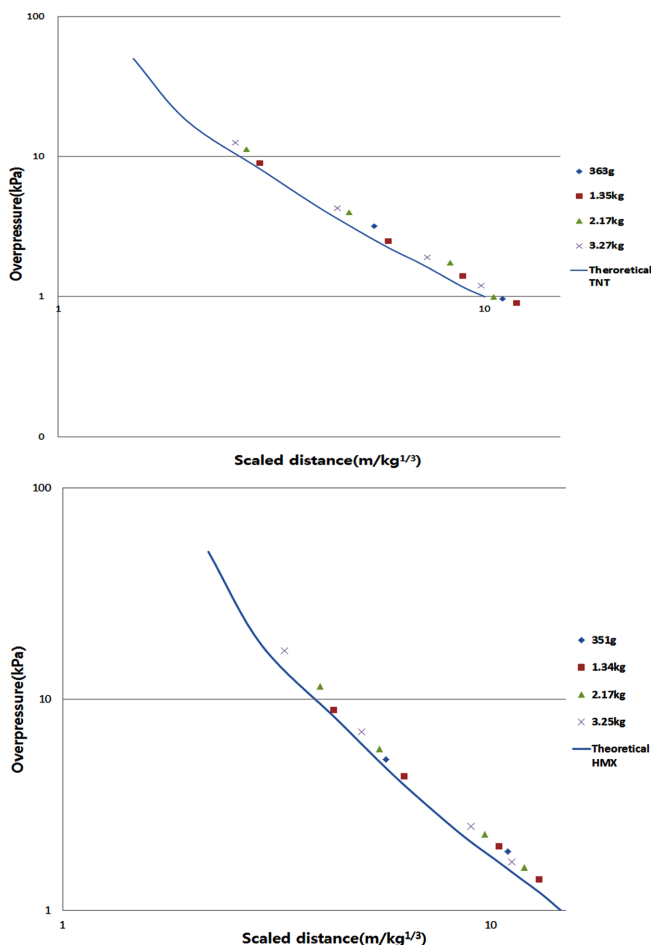


Fig. 5. Comparison of detonation simulation of theoretical TNT and HMX (Small explosives quantity).

TNT 폭발 시 환산거리에 따른 과압을 확인하였다[14]. 폭발의 경우 매우 짧은 시간 안에 반응이 이루어지기 때문에 압력 및 절대속도 등을 실험으로 측정하기가 어려움이 있으므로 이론적 TNT 및 HMX와 비교하였다. Fig. 5는 TNT와 HMX의 폭발 모사를 통하여 이론적으로 검증하여 보았다. TNT 및 HMX가 폭발할 경우 최대 과압과 환산거리의 관계를 통하여 이론적으로 검증을 한 결과 폭발량이 작을 경우 폭발량에 관계없이 이론적 TNT 및 HMX 그래프와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 6은 이론적 TNT 및 HMX와 폭발량이 큰 경우

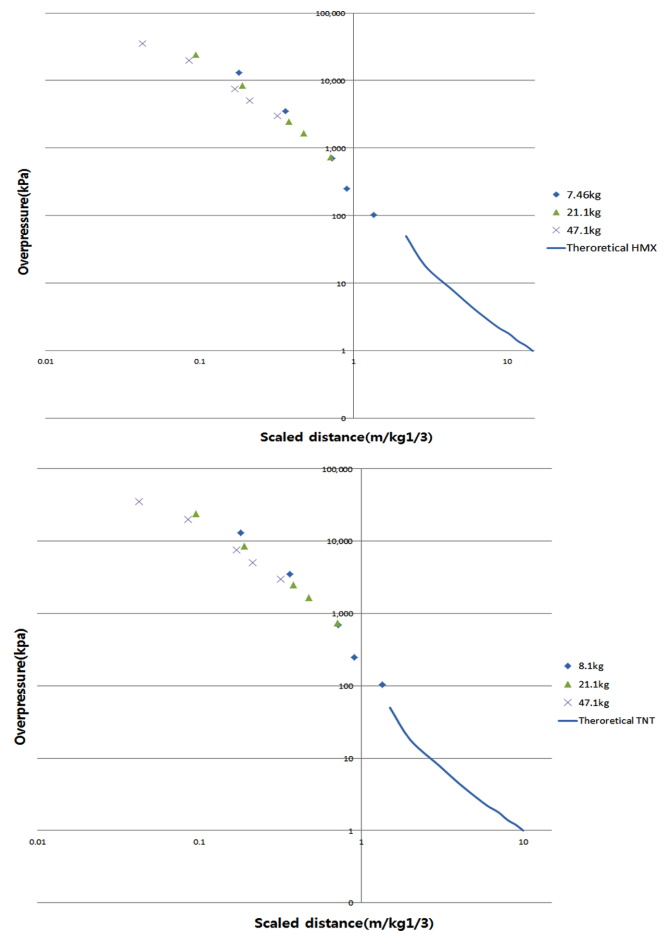


Fig. 6. Comparison of detonation simulation of theoretical TNT and HMX (Large explosives quantity).

Table 2. Maximum pressure in accordance with explosives quantity and distance (Over 7.46 kg of TNT and HMX, Unit: kPa)

	8.1 kg	21.1 kg	47.1 kg
2 m	13,000	18,800	24,000
4 m	4,710	7,690	11,300
8 m	1,360	2,490	3,960
10 m	708	1,650	2,650
15 m	342	737	1,230

	7.46 kg	21.1 kg	47.1 kg
2 m	19,100	28,300	34,000
4 m	6,610	11,800	16,600
8 m	1,820	3,670	5,880
10 m	1,120	2,390	3,900
15 m	462	1,010	1,770

**Table 3. Maximum blast wave of explosives quantity and distance (TNT and HMX, Unit: m/s)**

	0.363 kg	1.35 kg	2.17 kg	3.27 kg
2 m	1,610	2,510	2,750	2,960
4 m	635	1,070	1,430	1,870
6 m	-	671	816	953
8 m	-	445	562	679

	0.351 kg	1.34 kg	2.17 kg	3.25 kg
2 m	1,960	3,040	3,320	3,570
4 m	764	1,310	1,770	2,290
6 m	-	816	990	1,160
8 m	-	542	683	824

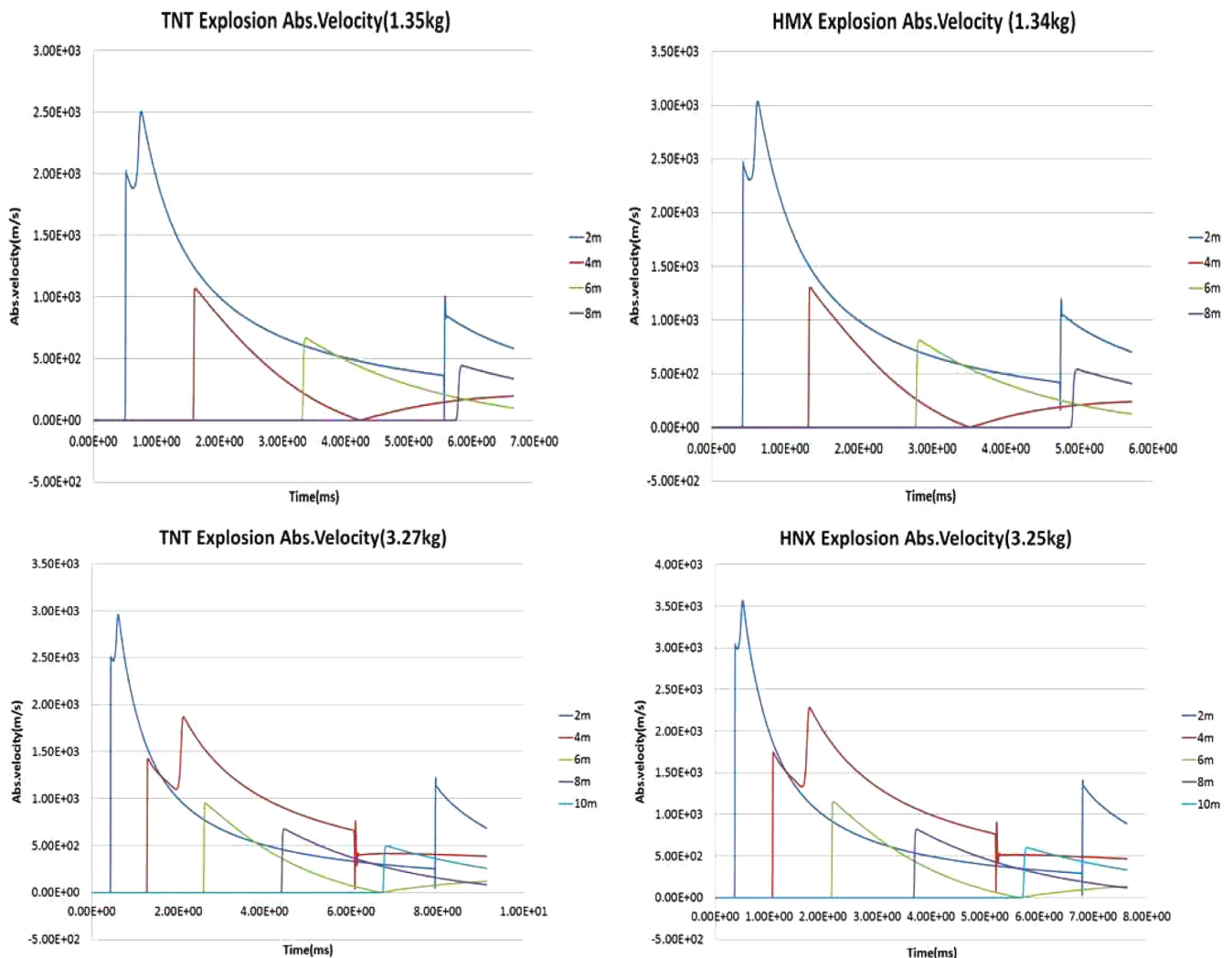
를 외삽을 통하여 비교하여 볼 수 있으며 Table 2는 최대 과압을 나타낸다.

Table 3은 폭심에서 TNT 및 HMX와 같은 고폭화약 폭발 시 각 거리에 따른 최대 절대속도를 나타낸다. Table 3에서 가로축은 TNT와 HMX의 양이며 세로축은 폭심으로부터의 거리이다. TNT와 HMX의 양을 증가시켜 가면서 또는 거리를 변경하여가면서 최대 폭풍파

속도를 도출하였다. 폭발량이 증가할수록 최대 절대속도도 함께 증가하는 경향성을 보이며 폭발량에 관계없이 2 m 지점에서 TNT는 약 1,610 m/s, HMX는 1,960 m/s 이상의 매우 빠른 속도를 보였다. Fig. 7은 TNT와 HMX의 유사한 양이 폭발하였을 경우 HMX가 TNT보다 1.20~1.22배 폭풍파속도가 높은 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 고에너지물질 중 분자화약으로서 가장 폭발력이 큰 HMX를 양에 따라 폭발 시뮬레이션을 진행하였으며 최대 과압 및 폭풍파속도를 계산하였다. 고에너지물질 중 대표적인 물질인 TNT가 폭발할 경우를 대조군으로 하고 계산된 HMX의 최대 과압 및 폭풍파속도와 비교하였다. HMX의 최대 과압은 폭심으로부터 거리가 가깝고 양이 많을수록 크다. 순간적으로 매우 빠른 반응이 발생하고 큰 에너지가 방출됨으로서 약 4,190~13,300 kPa 범위의 높은 과압을 형성하며 양에 관계없이 2 m 거리에서는 빌딩을 전파할 정도의 위력을 가졌으며 HMX의 양이 큰 경우에는 분화구를 생성할 정도의 매우 큰 최대 과압을 보였다. 최대 폭풍파속도는 HMX의 양에 따라 약 1,960~3,570 m/s의 범위를 보였다. HMX와 대조군인 TNT를 비



**Fig. 7. Maximum blast wave of each distance in accordance with explosives quantity.**

교한 결과 HMX의 양을 기준으로 TNT보다 최대 과압은 1.41~1.47배가 높았으며 폭풍파속도는 1.20~1.22배가 더 크게 분석되었다. 본 연구에서는 고폭화약 중 가장 폭발력이 큰 HMX를 대상으로 양과 거리에 따라 폭발 모사를 수행하였으며 HMX의 최대 과압 및 폭풍파속도를 구하여 TNT와 비교하였다. 이를 통하여 HMX가 포함된 복합화약의 압력 분포 및 폭풍파속도 분석이 가능할 것이다.

## 감 사

본 연구는 차세대에너지물질특화센터와 국방과학연구소의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

## References

1. Kim, H. S., "Basic Technologies for the Development of High Explosives," *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**(5), 435-443(2006).
2. Jung, W. J., "Mitigation of Blast Pressure according to the Variation of Density and Thickness of the Water Gel," *J. Kosham*, **13**(3), 123-130(2013).
3. Baker, W. E., "Explosion in Air," *University of Texas, Austin*, 150-163(1973).
4. Sochet, I., Fardebas, D., Calderara, S., Marchal, Y. and Longuet, B., "Blast Wave Parameters for Spherical Explosives Detonation in Free Air," *J. Safety Sci and Tech*, **1**, 31-42(2011).
5. Jeremic, R. and Bajic, Z., "An Approach to Determining the TNT Equivalent of High Explosives," *Scientific-Technical Review*, LVI(1) (2006).
6. Seok, J., Jeong, S. M., Park, J. C. and Paik, J. K., "CFD Simulation of Methane Combustion for Estimation of Fire and Explosion on Offshore Plant," *J. Ocean Engineering and Technology*, **27**(2), 59-68(2013).
7. Park, D. J. and Lee, Y. S., "A Comparison on Predictive Models of Gas Explosions," *Korean J. Chem. Eng.*, **26**(2), 313-323(2009).
8. Kim, E. J., Park, J. D., Cho, J. H. and Moon, I., "Simulation of Hydrogen Leak and Explosion for the Safety Design of Hydrogen Fueling Station in Korea," *J. Hydrogen Energy*, **38**(3), 1747-1743(2013).
9. Lee, M. H. and Chung, W. J., "Development of Hydrocode for Large Deformations," *Computational Structural Engineering Institute of Korea*(2009).
10. Park, J. S., "A Study on the Detonation Behavior of Insensitive Explosive by Experiments and Computational Simulation," *Ph.D. Dissertation, Rensselaer KAIST Institute*, Daejeon(2011).
11. Formby, S. A. and Wharton, R. K., "Blast Characteristics and TNT Equivalence Values for Some Commercial Explosives Detonated at Ground Level," *J. Hazard. Mater.*, **50**, 183-198(1996).
12. Hwang, I. H., "Elasto-Plastic Response of Structural Elements Subjected to Blast Pressure," *Posco Engineering Technical Report*, **28**(1), 18-28(2012).
13. Crowl, D. A. and Louver, J. F., *Chemical Process Safety : Fundamentals with applications*, 3rd ed., *Prentice Hall*(2011).
14. Sochet, I., Gardebas, D., Calderara, S., Marchal, Y. and Longuet, B., "Blast Wave Parameters for Spherical Explosives Detonation in Free Air," *OJSST*, **1**, 31-42(2011).