

폭발파에 의한 폭발압력곡선 경험식에 관한 연구

권상기^{1)*}

Study on the Empirical Equations for Pressure Curve by Air Blast

Sangki Kwon

Abstract The understanding of the pressure associated with air blast, which travels through air, and its effect on surface and underground structures is highly important. It is necessary to determine the pressure change with time and distance for a computer simulation of the explosion impact on a structure. From the previous studies, many empirical equations for estimating the parameters related to the pressure change. In this study, the empirical equations for predicting peak overpressure, duration of positive phase, impulse, minimum negative pressure, duration of negative pressure, arrival time, and decay constant were reviewed and analyzed. Also, the pressure changes predicted from the Kingery equation, which is the most commonly used, and from the other empirical equations were compared.

Key words Overpressure, Air blast, Impulse, Pressure-time curve

초 록 공기를 통해 이동하는 폭발파에 의한 압력 및 압력에 의해 지표 및 지하구조물에 미치는 영향을 이해하는 것은 매우 중요하다. 폭발의 충격이 구조물에 미치는 영향을 컴퓨터 시뮬레이션하기 위해서는 시간과 거리에 따른 압력의 변화를 결정하여야 한다. 기존의 연구를 통해 압력의 변화와 관련되는 인자들을 추정하기 위한 여러 경험식들이 개발되었다. 본 연구에서는 최대압력, 양압지속시간, 임펄스, 최소음압, 음압지속시간, 폭발파 도착시간과 감쇠상수를 예측하는 경험식들을 조사 분석하였으며 가장 널리 사용되고 있는 Kingery 경험식과 다른 경험식에 의한 압력 변화를 비교하였다.

핵심어 폭발압력, 폭발파, 임펄스, 압력-시간 곡선

1. 서 론

폭약의 폭발 현상이 일으키는 급속한 에너지의 방출은 높은 열과 압력, 가스의 발생, 지반의 진동 그리고 공기나 매질을 통해 전달되는 충격파의 발생으로 이어진다. 고성능폭약(high explosive)의 폭굉(detonation)에서는, 300kbar에 달하는 높은 압력과 3000-4000°C까지의 높은 온도 상승이 발생하기도 한다. 폭발에 의한 피해는 인적, 물적 손해를 야기할 수 있다. 폭발물의 폭발로 인해 공기중에서 발생하는 충격파를 폭발

파(airblast)라고 한다(Guzas and Earls, 2010). 폭발파에 의한 여러가지 현상을 이해하는 것은 군사적, 상업적 목적을 포함한 여러 분야에서 요구된다. 해외의 경우, 폭발파에 대한 많은 연구가 지속적으로 수행되었다. 특히, 폭발물 테러에 의한 영향 평가, 화학적 폭발 현상의 이해, 군사 시설물의 방폭설계, 광산 폭발에 의한 영향 평가 등을 위해 이론과 실험, 수치해석을 이용한 연구가 활발히 수행되었다(Guzas and Earls, 2010; Chowdhury and Wilt, 2015; Karlos and Solomos, 2013).

국내에서는 폭발파에 대한 연구는 동적거동 해석을 중심으로 수행되고 있다. 폭발 하중을 고려한 방폭창 호시스템 설계 연구(허영철 등, 2010), 가스폭발 하중에 의한 터널구조물의 동적거동 해석 연구(김영민,

¹⁾ 인하대학교 에너지자원공학과

* 교신저자 : kwonsk@inha.ac.kr

접수일 : 2017년 1월 10일

심사 완료일 : 2017년 1월 17일

게재 승인일 : 2017년 2월 14일

2011) 등이 수행된 바 있지만 폭발하중에 대한 국내 연구는 초기단계(허영철 등, 2010)로 관련 연구의 필요성이 높아지고 있다. 국내 여건상 폭약 실험은 여건상 제약이 많기 때문에 이를 대체할 수 있는 신뢰도 높은 수치해석이 필요한 상황이다(장범석 등, 2016). 신뢰도 높은 수치해석을 위해서는 최대 폭발압(peak overpressure)의 산정과 폭발압력의 시간에 따른 감쇄 패턴에 대한 이해가 필수적이다.

미 육군에서는 1959-1964년 사이 TNT를 이용하여 폭발파에 의한 폭발압력과 환산거리(scaled distance) 관계를 연구한 Kingery의 연구결과를 바탕으로, 다양한 폭발조건에서의 폭발하중 계산을 위한 CONWEP 프로그램을 개발하였다. CONWEP 프로그램은 실험 결과를 바탕으로 화약폭발에너지를 등가의 TNT에너지로 환산하는 TNT당량모델(TNT equivalency model)을 이용하여 대상구조체의 폭발최대압력, 충격량, 지속시간을 산출한다(Departments of the US Army, 1986). 현재 CONWEP은 폭발구조해석에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 폭발하중 구현 코드이다. 하지만 이 코드는 상용프로그램을 통해 제한적으로 공개되어 있고 자세한 알고리즘이나 수식은 알려져 있지 않다. 또한 상용프로그램에서 제공되는 CONWEP 코드는 폭발하중을 과예측하는 경향이 있다(장범석 등, 2016). 본 연구에서는 폭발파의 특성을 예측하기 위해 Kingery 경험식을 포함하여 여러가지 경험식을 조사 분석함으로써 향후 관련 연구의 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 폭발압력 패턴

2.1 압력-거리 관계

구조물에 작용하는 폭발하중 계산에서 가장 중요한 인자중 하나가 폭발지점으로 부터의 거리이다. 폭발파의 최대 압력과 속도는 거리에 따라 급속히 감소하는 경향을 보인다. 이러한 거리의 영향은 환산법칙(scaling law)을 사용하여 고려할 수 있다. 가장 일반적으로 사용되는 환산법칙으로는 Hopkinson-Cranz의 법칙과 Sachs 법칙을 들 수 있다. Sachs 환산법칙은 Sachs 스케일을 사용하여 압력, 시간, 임펄스(impulse)의 변화를 표현하는 방법을 제시하며, Sachs 스케일

은 다음과 같다.

$$\bar{R} = \frac{R P_0^{1/3}}{E^{1/3}} \quad (1)$$

여기서 R은 거리, P_0 는 대기압(ambient pressure), E는 폭발에너지를 의미한다. 이때 공기는 이상기체로 가정되며, 중력과 점성의 효과는 고려하지 않는다(Chock, 1999). Sachs 스케일은 핵폭발과 같은 경우에 폭발파의 특성을 예측하는데 적합하다고 알려져 있다(Baker et al., 1983). 일반적인 고성능폭탄의 폭발현상을 파악하는데 적합한 Hopkins-Cranz 법칙은 삼승근 환산법칙(cube-root scaling law)이라고도 불리며, 다음과 같다.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (2)$$

또는

$$Z = \frac{R}{E^{1/3}} \quad (3)$$

여기서 R은 폭원에서 거리(m), W는 폭약량(kg), E는 폭발에너지를 의미한다. 폭발현상의 규명을 위한 기존의 폭발시험은 주로 TNT를 사용하였다. TNT 폭발 시험결과를 바탕으로 도출된 관계식을 다른 폭약의 폭발현상을 예측하는데 활용하기 위해서는 TNT 등가량을 산정하여야 한다. 일반적으로 폭발시에 발생하는 열을 기준으로 다음과 같이 TNT 등가량을 산정할 수 있다.

$$W = \frac{H_{exp}}{H_{TNT}} W_{exp} \quad (4)$$

여기서 W_{exp} 는 폭약량, H_{exp} 와 H_{TNT} 는 폭약과 TNT의 폭발열을 의미한다. 가스폭발에서 TNT 등가량을 계산하는 방법은 권상기와 박정찬(2015)에 의해 보고된 바 있다.

2.2 압력-시간 관계

폭원에서 일정 거리에 위치한 한 지점에서는 도달

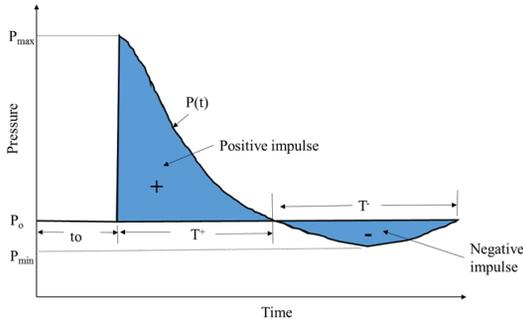


Fig. 1. Pressure-time history of air blast

한 폭발충격이 시간에 따라 감소하는 경향을 보인다. Fig. 1은 전형적인 폭발파의 압력-시간이력을 나타내고 있다. 양의 압력이 작용하는 구간을 양압구간(positive phase), 음의 압력이 작용하는 구간을 음압구간(negative phase)이라고 한다.

2.2.1 양압구간에서의 압력변화

양압구간에서의 시간에 따른 폭발압의 변화를 표현하기 위해 여러가지 방법이 제안되었다. Flynn은 아래의 선형적인 감쇠식을 제안하였다(Baker, 1973).

$$P(t) = P_0 + P_{max} \left(1 - \frac{t}{T^+}\right) \tag{5}$$

여기서 P₀는 대기압(ambient pressure), P_{max}는 최대초과압력(peak overpressure), T⁺는 양압기간(duration of positive pressure), t는 시간을 의미한다. Ethridge (1965)는 아래 지수함수를 사용하여 폭발압 감쇠식을 제안하였다.

$$P(t) = P_0 + P_{max} e^{-ct} \tag{6}$$

가장 일반적으로 사용되는 Friedlander(1946) 식은 아래와 같다.

$$P(t) = P_0 + P_{max} \left(1 - \frac{t}{T^+}\right) e^{-b\frac{t}{T^+}} \tag{7}$$

여기서 b는 감쇠계수를 의미한다. 실험데이터에서 P_{max}, T⁺가 결정되면 시간에 따른 압력변화 곡선을 비

선형 적합함으로써 감쇠계수를 구할 수 있다(Kalos and Solomos, 2013). 대기압(P₀)은 측정지점의 고도(h)에 따라 다르며 다음 식으로 계산할 수 있다(Shames, 1982).

$$P_0 = 101332 \exp\left(\frac{-11.99}{101332} h\right) \tag{8}$$

여기서 P₀의 단위는 pa이고 h는 m이다.

구조설계에서는 최대 압력과 함께 압력-시간 곡선이 만드는 면적을 의미하는 임펄스(충격량)도 중요한 인자로 고려된다. 이는 임펄스가 발파에 의해 구조물에 작용하는 힘의 총량(total force)과 관계되기 때문이다. 양압구간의 임펄스는 다음 식으로 계산된다.

$$I_s = \int_{t_0}^{t_0+T^+} P(t) dt \tag{9}$$

Friedlander 식을 사용하여 다음과 같이 임펄스를 구할 수 있다.

$$I_s = \frac{P_{max} T^+}{b^2} [b - 1 + e^{-b}] \tag{10}$$

양압구간에서의 압력-시간이력 및 임펄스를 결정하는 인자로는 최대 폭발압(P_{max}), 지속시간(T⁺), 그리고 감쇠계수(b)를 들 수 있다.

2.2.2 음압구간에서의 압력변화

일반적으로 구조물의 손상은 양압에 의해 발생하며 음압구간에서 발생하는 압력의 크기가 상대적으로 작기 때문에 구조물 설계에는 음압구간은 고려되지 않는 것이 일반적이다. 하지만 구조물의 건전성뿐 아니라 구조물의 전체적인 구조성능(structural performance)를 평가하려면 음압구간도 고려할 필요가 있다(Kalos and Solomos, 2013). 음압구간에서의 폭발압의 변화를 표현하기 위해선형 또는 비선형식들이 제안되어 있다. 선형식은 다음과 같다.

$$P(t) = P_0 - \frac{2P_{min}}{T^-} (t - T^+) \tag{11}$$

for $t_0 + T^+ < t < t_0 + T^+ + T^-/2$

$$P(t) = P_0 - \frac{2P_{min}}{T^-} (T^+ + T^- - t) \quad (12)$$

for $t_0 + T^+ + T^-/2 < t < t_0 + T^+ + T^-$

$$P(t) = P_0 \quad \text{for } t > t_0 + T^+ + T^- \quad (13)$$

여기서 t_0 는 폭발파 도달시간, T 는 음압지속시간을 의미한다.

Brode(1955)는 음압구간에서의 압력변화를 표현하기 위해 다음식을 사용하였다.

$$P(t) = P_0 - P_{min} \left[\frac{(t - t_0 - T^+)}{T^-} \right] \left[1 - \frac{(t - t_0 - T^+)}{T^-} \right] e^{-4 \frac{t - t_0 - T^+}{T^-}} \quad (14)$$

for $t_0 + T^+ < t < t_0 + T^+ + T^-$

위 식의 경우, 음압구간에서의 비선형적 압력 변화를 표현할 수 있지만 P_{min} 값을 구현하는데 어려움이 있는 것으로 판단된다. Naval facilities engineering common design manual과 미국 army blast effects design spreadsheet에서는 아래와 같은 비선형 관계식

을 이용할 것을 권장하고 있다(Rigby et al. 2014).

$$P(t) = P_0 - P_{min} \left[\frac{6.75(t - t_0 - T^+)}{T^-} \right] \left[1 - \frac{(t - t_0 - T^+)}{T^-} \right]^2 \quad (15)$$

for $t_0 + T^+ < t < t_0 + T^+ + T^-$

Fig. 2는 $W=5\text{kg}$, $R=5\text{m}$ 지점에서의 폭발압 변화를 보여준다. Eq. 11을 이용하여 음압구간에서의 압력변화를 선형적으로 추정된 것과 Eq. 15을 이용한 비선형으로 추정된 것을 비교하고 있다. 최소압력의 발생 지점에 차이가 있으며 임펄스의 경우 선형식이 142kpa-ms, 비선형식이 160kpa-ms으로 10% 정도 차이를 보였다. 본 연구에서는 실측결과와 유사한 비선형식을 이용하여 음압구간에서의 압력 변화를 표현하고자 하였다.

3. 폭발압력 인자의 추정

3.1 도착시간의 추정

도착시간(t_0)을 추정하기 위해 Kingery와 Pannill (1964)은 다음 식을 제시하였다. Table 1은 계산을 위

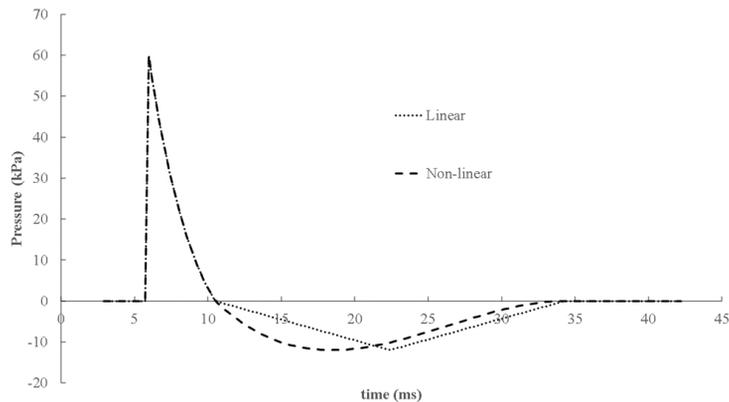


Fig. 2. Comparison of the pressure changes in negative phase using linear and nonlinear equations, when $W=5\text{kg}$ and $R=5\text{m}$.

Table 1. Parameters for estimating the time of arrival (Swisdak, 1994)

$Z(\text{m}/\text{kg}^{1/3})$	Time of arrival ($\text{ms}/\text{kg}^{1/3}$)					
	A	B	C	D	E	F
0.06-1.5	-0.7604	1.8058	0.1257	-0.0437	-0.031	-0.00669
1.5-40	-0.7137	1.5732	0.5561	-0.4213	0.1054	-0.00929

Table 2. Polynomial coefficients to define the arrival time (Guzas and Earls, 2010)

Time of arrival (ms/kg ^{1/3})				
Z(m/kg ^{1/3})	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
0.3-2.4	0.0179362	0.02032568	0.5395856	-0.03010011
2.4-12	-2.251241	1.76582	0.1140477	-4.066734e-3
12-500	-6.852501	2.907447	9.466282e-5	-9.344539e-8

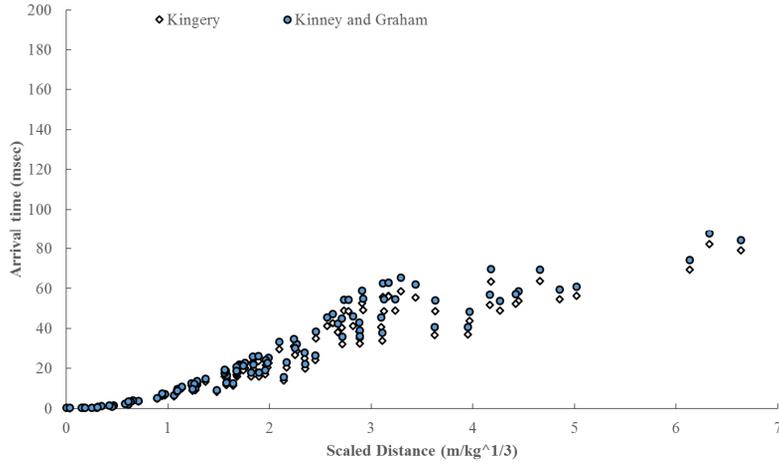


Fig. 3. Arrival time dependent on scaled distance.

한 인자를 보여준다.

차이가 날 수 있기 때문이다.

$$T_o = W^{1/3} \exp(A + B \ln Z + C (\ln Z)^2 + D (\ln Z)^3 + E (\ln Z)^4 + F (\ln Z)^5) (ms) \quad (16)$$

Kinney and Graham(1985)실험자료에 기반한 도착시간 추정식은 다음과 같다(Guzas and Earls, 2010).

$$T_o = W^{1/3} \sum_{i=1}^4 a_i Z^{i-1} (ms) \text{ for } 0.3 \leq Z \left(\frac{m}{kg^3}\right) \leq 500 \quad (17)$$

위 식에서 매개변수 a_i 는 Table 2와 같다.

무작위로 생성된 폭약량(W)과 거리(R)에서 환산거리를 구한 후, 위 경험식을 사용하여 폭발과 도착시간을 추정하였다(Fig. 3). Kingery식과 Kinney 및 Graham 식이 환산거리의 증가에 따라 도착시간이 증가하는 경향을 유사하게 보임을 알 수 있다. 동일한 환산거리에서 도착시간이 분포를 보이며 나타나는 것은 환산거리는 같지만 장약량(W)이 다른 경우, 도착시간에

3.2 양압구간 인자의 추정

3.2.1 최대압력(Peak overpressure)

최대압력(P_{max})를 결정하기 위해 여러가지 경험식이 제시되었다. Henrych(1979)는 다음 식으로 최대압력을 추정하였다.

$$P_{max} = \frac{14.0717}{Z} + \frac{5.5397}{Z^2} - \frac{0.3572}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4} \quad (18)$$

(bar) for $0.05 \leq Z \leq 0.3$

$$P_{max} = \frac{6.1938}{Z} - \frac{0.3262}{Z^2} + \frac{2.1324}{Z^3} \quad (19)$$

(bar) for $0.3 \leq Z \leq 1$

$$P_{max} = \frac{0.662}{Z} + \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3} \quad (20)$$

(bar) for $1 \leq Z \leq 10$

여기서 Z 는 Hopkins 환산거리($m/kg^{1/3}$)이다. Kinney 와 Graham(1985)은 다음 식을 제시하였다.

$$P_{max} = P_0 \frac{808[1+(\frac{Z}{4.5})^2]}{\{[1+(\frac{Z}{0.048})^2][1+(\frac{Z}{0.032})^2][1+(\frac{Z}{1.35})^2]\}^{0.5}} \quad (bar) \quad (21)$$

Sadovskiy(2004)는 다음 식을 제시하였다.

$$P_{max} = \frac{0.085}{Z} + \frac{0.3}{Z^2} + \frac{0.8}{Z^3} \quad (MPa) \quad (22)$$

Brode(1955)는 다음 식을 제시하였다.

$$P_{max} = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \quad for \quad P_{max} > 10 \quad bar \quad (23)$$

$$P_{max} = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \quad (24)$$

for $10 \quad bar > P_{max} > 0.1 \quad bar$

Newmark and Hansen(1961)은 다음식을 제시하였다.

$$P_{max} = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \sqrt{\frac{W}{R^3}} \quad (bar) \quad (25)$$

여기서 W 는 TNT 질량(ton), R 은 폭원에서 거리

(m)이다. Mills(1987) 식은 다음과 같다.

$$P_{max} = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \quad (kpa) \quad (26)$$

Wei와 Dharani(2005)는 다음 식을 제시하였다.

$$P_{max} = P_0 \left(\frac{0.696}{Z} + \frac{2.1}{Z^2} + \frac{4.13}{Z^3} \right) \quad (bar) \quad (27)$$

Idadifard와 Foroutan(2010)는 다음 식을 제시하였다.

$$\log_{10}[\log_{10}P_{max}] = -0.1319X^2 - 0.3231X + 0.644 \quad (28)$$

(kPa)

여기서 $X = \log_{10}Z$ 이다. 가장 널리 사용되고 있는 Kingery 와 Bulmash(1984) 식은 다음과 같다.

$$P_{max} = \exp(A + B \ln Z + C(\ln Z)^2 + D(\ln Z)^3 + E(\ln Z)^4) \quad (kPa) \quad (29)$$

여기서 A, B, C, D 는 상수로 Table 3과 같다. Table 3은 최대압력 계산을 위한 인자이다(Swisdak, 1994).

Fig. 4는 무작위로 입력된 폭약량과 거리에서 환산 거리를 계산한 후 위의 각 식을 이용하여 예측한 최대 압력을 보여준다. 환산거리가 짧을수록 각 식에서 예

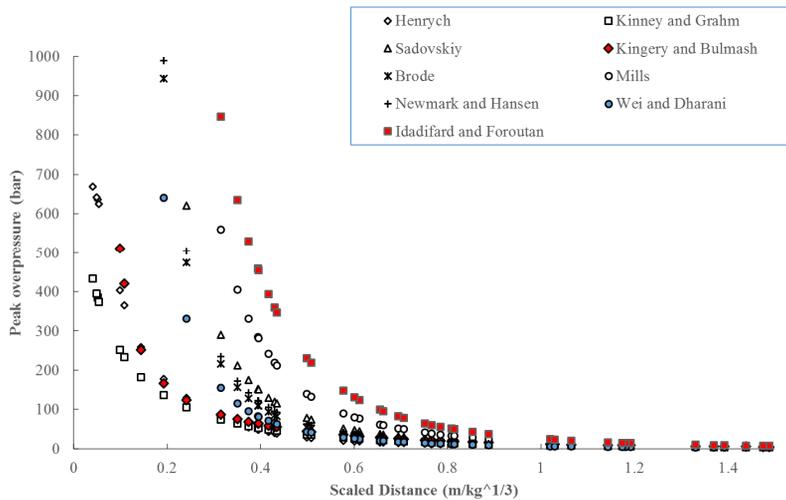


Fig. 4. Calculated peak overpressure change with scaled distance from different equations.

Table 3. Constants for the polynomial equation of Kingery and Blumash to determine peak overpressure(kPa) (Swisdak, 1994)

Z(m/kg ^{1/3})	A	B	C	D	E
0.2-2.9	7.1206	-2.1069	-0.3229	0.1117	0.0685
2.9-23.8	7.5938	-3.0523	0.40977	0.0261	-0.01267
23.8-198.5	6.0536	-1.4066	0	0	0

Table 4. Calculated peak overpressure for Z=0.5 using different empirical equations

Equations	Peak overpressure (bar)	Rank	Difference from average (%)
Henrych	28.1	9	-65
Kinney and Graham	36.2	8	-54.5
Sadovskiy	77.7	3	-2
Kingery and Bulmash	44.7	6	-43.8
Brode	54.6	5	-31.4
Mills	139.4	2	75
Newmark and Hansen	62.6	4	-21.4
Wei and Dharani	42.8	7	-46.2
Idadifard and Foroutan	230	1	189
Average	79.6		

측하는 최대압력의 차이가 커짐을 알 수 있다. 이는 폭원에서 거리 가깝고 폭약량이 많은 경우 사용하는 경험식에 따라 최대압력의 예측치가 크게 달라질 수 있음을 의미한다. 환산거리 0~1.5m/kg^{1/3} 구간에서는 Henrych 식과 Kinney와 Graham 식이 가장 낮은 값을, Idadifard와 Foroutan이 제안한 식이 가장 높은 값을 예측하고 있다. Kingery 식의 경우, 다른 경험식들에 비해 전반적으로 낮은 폭발압을 예측하고 있음을 알 수 있다. Table 4는 환산거리가 0.5일 때 각 경험식에서 예측하는 최대압력을 보여준다. 평균값(79.6bar)에 비하여 -65%~189%까지 다른 값을 예측하며, 최대값(Idadifard와 Foroutan)과 최소값(Henrych)은 8배 정도 차이가 남을 알 수 있다.

3.2.2 양압 지속시간(Duration of positive pressure)

양압이 지속되는 시간을 예측하기 위해 여러가지 경험식이 제시되었다. Henrych는 Z에 따라 다음 식을 통해 T⁺를 추정하였다.

$$T^+ = W^{\frac{1}{3}}(0.107 + 0.444Z + 0.264Z^2 - 0.129Z^3 + 0.0335Z^4) \text{ (ms) for } 0.05 \leq Z \leq 39 \tag{30}$$

Sadovskiy 식은 다음과 같다(Bajic et al, 2009).

$$T^+ = B^{\frac{1}{6}} W \sqrt{R} \text{ (ms)} \tag{31}$$

여기서 B는 1~1.5 사이에 있다. 일반적으로 1.2가 사용된다. Kinney and Graham 식은 다음과 같다.

$$T^+ = W^{1/3} \frac{980 \left[1 + \left(\frac{Z}{0.54} \right)^{10} \right]}{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.02} \right)^3 \right] \left[1 + \left(\frac{Z}{0.74} \right)^6 \right] \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{6.9} \right)^2}} \text{ (ms)} \tag{32}$$

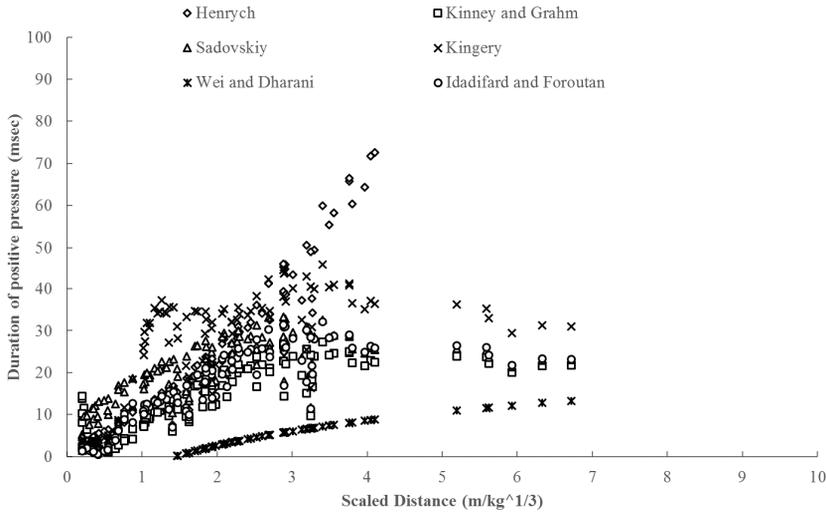
Kingery 식은 다음과 같이 T⁺를 계산한다. Table 5는 인자들의 값을 보여준다.

$$T^+ = W^{\frac{1}{3}} \times \exp(A + B \ln Z + C (\ln Z)^2 + D (\ln Z)^3 + E (\ln Z)^4 + F (\ln Z)^5) \text{ (ms)} \tag{33}$$

T⁺(ms) 계산을 위해 다음 식을 이용할 수 있다(Idadifard and Foroutan, 2010).

Table 5. Coefficients for positive pressure period of time(Swisdak, 1994)

Z(m/kg ^{1/3})	Positive phase duration (ms/kg ^{1/3})					
	A	B	C	D	E	F
0.2-1.02	0.5426	3.2299	-1.5931	-5.9667	-4.0815	-0.9149
1.02-2.8	0.5440	2.7082	-9.7354	14.3425	-9.7791	2.8535
2.8-40	-2.4608	7.1639	-5.6215	2.2711	-0.44994	0.03486

**Fig. 5.** Duration of positive pressure(T^+) changed with scaled distance.

$$T^+ = W^{\frac{1}{3}}(-64.86Z^4 + 52.32Z^3 - 15.68Z^2 + 1.794Z + 0.1034) \text{ for } Z \leq 0.37 \quad (34)$$

$$T^+ = W^{\frac{1}{3}}(4.64Z^2 - 3.86Z + 0.854) \text{ for } 0.37 < Z < 0.82 \quad (35)$$

$$T^+ = W^{\frac{1}{3}}(-2.97X^3 + 6.27X^2 + 0.358X + 0.763) \text{ for } 0.82 < Z < 2.5 \quad (36)$$

$$T^+ = W^{\frac{1}{3}}(0.608X^3 - 2.38X^2 + 5.62X - 0.22) \text{ for } Z > 2.5 \quad (37)$$

여기서 $X = \log_{10} Z$ 이다. Wei와 Dharani(2005)는 다음 식을 제시하였다.

$$T^+ = [24.44x(908^{\frac{1}{3}}Z)^{\frac{1}{5}} - 0.0316x908^{\frac{1}{3}}Z - 40.99] \quad (38)$$

환산거리에 따른 T^+ 변화는 Fig. 5와 같다. Wei와 Dharani가 제안한 식의 경우, 환산거리가 짧은 경우 음의 값을 예측하므로 사용에 유의해야할 것이다. 대부분의 경험식에서 환산거리가 길어짐에 따라 일정한 값(20~40ms)으로 수렴하는데 반해 Henrych 식의 경우, 양압지속시간이 기하급수적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. Kingery 식의 경우, 비선형적이며 불규칙한 변화 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 실제 측정 결과를 반영하기 위해 구간별 인자값을 조정 한 까닭으로 사료된다. 양압지속시간은 환산거리와 함께 장약량($W^{1/3}$)에 영향을 받으며 따라서 장약량과 거리가 무작위로 가정되는 경우, 그림에서와 같이 복잡한 변화를 보이게 된다. 환산거리와 T^+ 의 관계에서 장약량의 영향을 배제하기 위해 추정식에서 $W^{1/3}$ 을 나누어준 결과는 Fig. 6과 같다. 각 Fig. 5에 비해 환

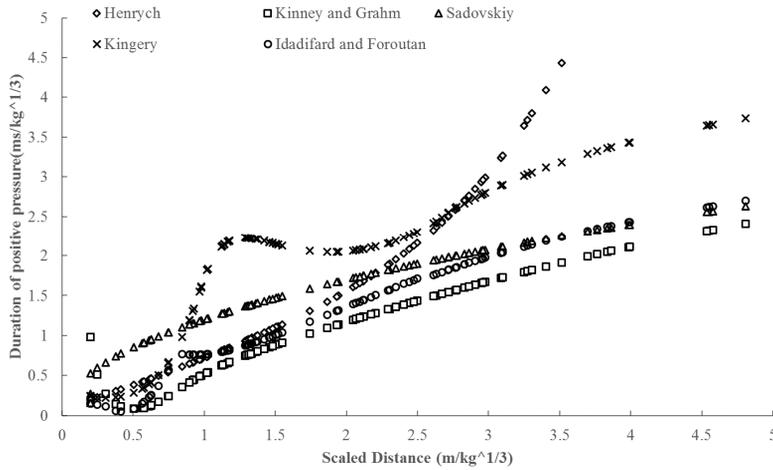


Fig. 6. Relationship between duration of positive pressure and scaled distance.

Table 6. Coefficients for incident impulse (Swisdak, 1994)

Z(m/kg ^{1/3})	Incident impulse (kpa·ms/kg ^{1/3})				
	A	B	C	D	E
0.2-0.96	5.522	1.117	0.6	-0.292	-0.087
0.96-2.38	5.465	-0.308	-1.464	1.362	-0.432
2.38-33.7	5.2749	-0.4677	-0.2499	0.0588	-0.00554
33.7-158.7	5.9825	-1.062	0	0	0

산거리와 지속시간 사이의 상관관계를 잘 보여주고 있다. Kingery 식의 경우, 환산거리 1~1.5 m/kg^{1/3} 구간에서 독특한 형태의 변화를 보여주고 있다. Kinney와 Graham 식이 가장 낮은 값을 예측하고 있다.

3.2.3 임펄스

임펄스(Is)를 추정하기 위해 여러가지 경험식들이 제시되었다. Kinney와 Graham(1985)은 다음 식을 제시하였다.

$$I_s = W^{1/3} \times 100 \times \frac{0.067 \sqrt{1 + (\frac{Z}{0.23})^4}}{Z^2 \sqrt{1 + (\frac{Z}{1.55})^3}} \quad (pa \cdot s) \quad (39)$$

Sadovkiy 식은 다음과 같다(Sadovkiy, 2004; Bajic et al., 2009).

$$I_s = 200 \frac{W^{2/3}}{R} \quad (pa \cdot s) \quad (40)$$

Held(1983)이 제시한 식은 다음과 같다.

$$I_s = 300 \frac{W^{2/3}}{R} \quad (pa \cdot s) \quad (41)$$

Kingery 식은 다음과 같이 임펄스를 계산한다(Swisdak, 1994). Table 6은 인자값을 보여준다.

$$I_s = W^{1/3} \exp(A + B \ln Z + C (\ln Z)^2 + D (\ln Z)^3 + E (\ln Z)^4) \quad (42)$$

Idadifard와 Foroutan(2010)은 다음 식을 제시하였다.

$$\log_{10} \left(\frac{I_s}{W^{1/3}} \right) = -3.423X^4 - 10.143X^3 - 7.558X^2 - 1.614X + 2.14 \quad \text{for } Z < 0.8 \quad (43)$$

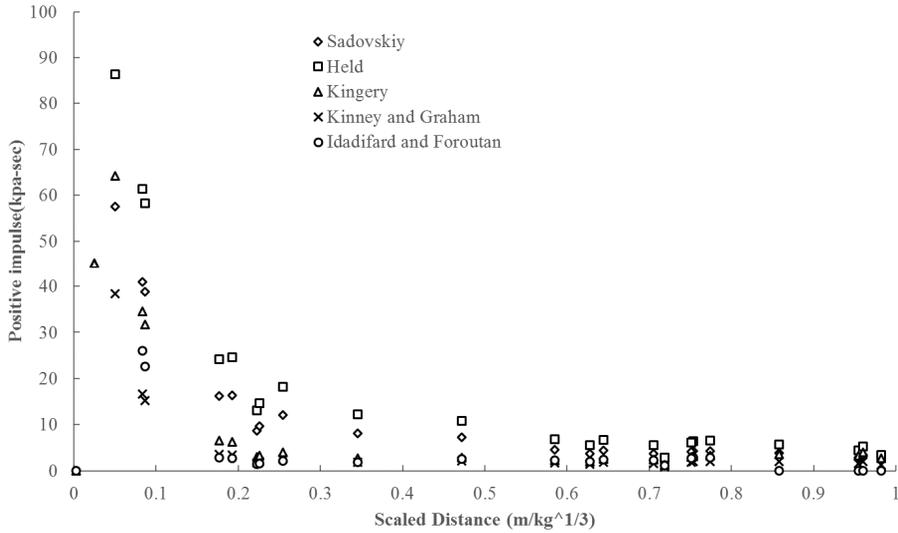


Fig. 7. Relationship between positive impulse and scaled distance.

$$\log_{10} \left(\frac{I_s}{W^{1/3}} \right) = -0.07X^2 - 0.853X + 2.153 \quad (44)$$

for $Z \geq 0.8$

여기서 임펄스의 단위는 pa-s이다. Fig. 7은 각 경험식에서 추정하는 환산거리에 따른 임펄스 변화를 보여준다.

Kinney와 Graham 식과 Idadifard와 Foroutan 식이 낮은 임펄스 값을 예측하며, Held 가 제안한 식이 상대적으로 가장 높은 임펄스를 예측하고 있다. 최대압력의 변화양상과 유사하게 환산거리가 짧은 경우, 경험식간의 차이가 크게 나타나며 $0.5\text{m/kg}^{1/3}$ 이상의 구간에서는 10kPa-s 아래로 수렴함을 알 수 있다.

3.2.4 감쇠상수(decay constant)

감쇠상수 b 를 추정하기 위해 Lam(2004) 등은 다음 식을 제시하였다.

$$b = Z^2 - 3.7Z + 4.2 \quad (45)$$

Wei와 Dharani(2005)는 다음 식을 제시하였다.

$$b = -0.0697Z - \frac{9.63}{Z} + \frac{15.9}{Z^2} - \frac{5.65}{Z^3} + 2.735 \quad (46)$$

Larcher(2007)는 다음 식을 제시하였다.

$$b = 5.2777Z^{-1.1975} \quad (47)$$

Teich와 Gebekken(2010)은 다음 식을 제시하였다.

$$b = 1.5Z^{-0.38} \quad (48)$$

감쇠상수는 다음 식으로도 추정할 수 있다(Guzas and Earls, 2010).

$$b = \sum_{i=1}^6 c_i Z^{i-1} \text{ (sec) for } 0.3 \leq Z \left(\frac{m}{\text{kg}^{1/3}} \right) \leq 500 \quad (49)$$

C_i 는 Table 7과 같다.

Fig. 8은 여러가지 경험식에서 예측하는 감쇠상수의 환산거리에 따른 변화를 보여준다. 대체적으로 환산거리가 증가함에 따라 감쇠상수가 낮아지는 경향을 보이고 있다. Lam 등이 제안한 식을 사용하는 경우, 환산거리 증가에 따라 처음에는 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보인다. 이는 Lam 식이 이차함수의 형태로 제안되었기 때문이며 환산거리 $3\text{m/kg}^{1/3}$ 이상에서는 사용에 유의해야할 것으로 판단된다.

Table 7. Polynomial coefficients to define the decay coefficient(Guzas and Earls, 2010)

Z(m/kg ^{1/3})	c ₀	c ₁	c ₂	c ₃	C ₄	C ₅
0.3-0.95	308.473	-2146.9	5953.3	-8226.03	5687.43	-1573.4
0.95-2.4	17.6	-26.7855	17.86	-5.65557	0.694	
2.4-6.5	4.432	-2.719	0.742	-9.3413e-2	4.47e-3	
6.5-40	0.7116	-0.0627	3.325e-3	-8.24e-5	7.619e-7	
40-500	0.2516	-1.7676e-3	9.5164e-6	-2.197e-8	1.79e-11	

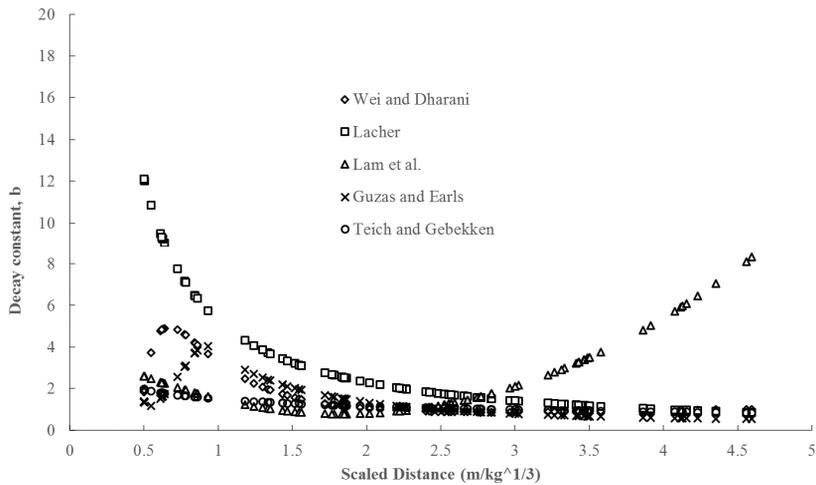


Fig. 8. Variation of decay constant b with scaled distance in positive pressure phase.

3.3 음압구간 인자의 추정

최대압력에 비해 상당히 낮은 음압(negative pressure)은 구조물에 미치는 영향이 양압구간에 비해 상대적으로 낮기 때문에 고려하지 않는 경우가 많다(Baker et al. 1983). 하지만 충격에 취약한 재질로 이루어지는 구조물이나 느슨하게 설치된 대형 창문과 같이 낮은 음압에 의해 손상을 입을 가능성이 있기 때문에 음압을 고려한 해석을 실시하는 것이 필요하다. 음압구간에서의 최소압력, 지속시간, 그리고 음의 임펄스를 추정하기 위해 여러가지 경험식들이 제시되었다.

최소압력(P_{min})을 추정하기 위해 Brode(1955)는 다음 식을 제시하였다.

$$P_{min} = 0.35/Z \text{ (bar) for } Z > 1.6 \tag{50}$$

Krauthammer(2000)식은 다음과 같다.

$$P_{min} = \frac{0.35}{Z} \times 10^5 \text{ (pa) for } Z > 3.5 \tag{51}$$

$$P_{min} = 10^4 \text{ (pa) for } Z < 3.5 \tag{52}$$

Fig. 9는 위 식을 이용하여 추정된 최소압력과 환산거리의 관계를 보여준다. Brode 식과 Krauthammer식은 낮은 환산거리에서는 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 음압이 작용하는 시간은 (Smith, 1994)

$$T^- = 0.00125W^{1/3} \text{ (sec)} \tag{53}$$

Slotnick (2004)에 따르면

$$T^- = 3T^+ \tag{54}$$

Krauthammer 다이어그램을 이용하면 (Larcher, 2007)

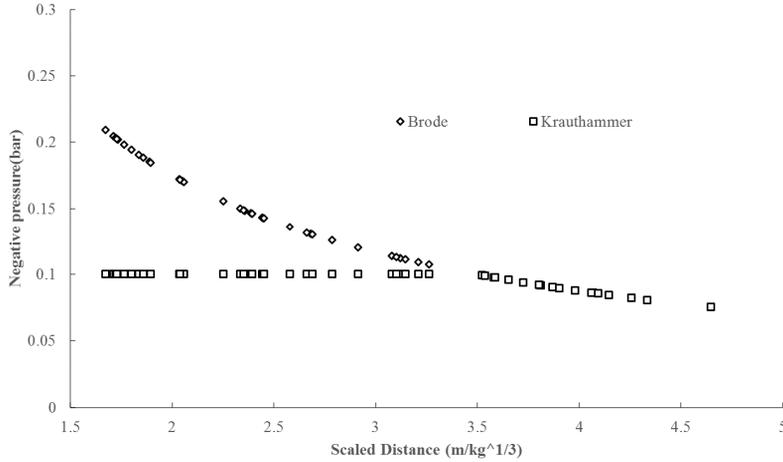


Fig. 9. Variation of negative pressure with scaled distance.

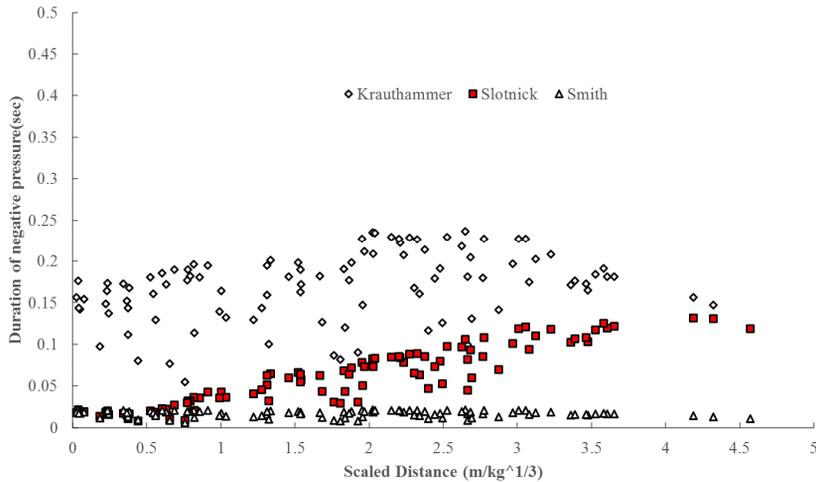


Fig. 10. Variation of the duration of negative pressure phase.

$$T^- = 0.0104W^{\frac{1}{3}} \text{ (sec) for } Z < 0.3 \quad (55)$$

$$T^- = (0.003125\log Z + 0.01201)W^{\frac{1}{3}} \text{ (sec) for } 1.9 < Z < 0.3 \quad (56)$$

$$T^- = 0.0139W^{\frac{1}{3}} \text{ (sec) for } Z > 1.9 \quad (57)$$

하의 짧은 지속시간을 예측하고 있다(Fig. 10). Slotnick 식은 양압구간의 지속시간(T^+)에 따라 결정되며, T^+ 를 여러가지 경험식의 평균값을 사용하는 경우, 환산거리의 증가에 따라 선형에 가까운 증가 양상을 보여준다.

음압이 작용하는 구간에서의 임펄스는 다음 식으로 추정할 수 있다(Draganic and Sigmund, 2012).

$$I_s^- \sim I_s^+ \times (1 - 0.5Z) \quad (58)$$

Krauthammer 식이 최대 0.2s 까지의 상대적으로 긴 지속시간을 예측하며, Smith가 제안한 식이 0.05 s 이

4. 폭발압력의 변화

폭원에서 일정 거리에 위치한 지점에서 시간에 따른 폭발압력의 변화를 예측하기 위해 경험식을 이용하였다. 다양한 경험식 중에서 아래와 같은 경험식을 이용하는 경우, 폭발압력의 변화는 Fig. 11과 같다.

- 도달시간(t_0) : Kingery
- 최대과압 (P_{max}) : Kingery와 Bulmash
- 양압구간 지속시간 : Kingery

- 감쇠상수 : Wei와 Dharani
- 음압 (P_{min}) : Brode
- 음압구간 지속시간 : Krauthammer

폭약량은 12kg 이며, 폭원으로부터의 거리는 5~25m 사이로 가정하였다. 음압 구간에서의 압력 변화는 비선형관계식(Eq. 15)을 사용하였다.

Fig. 12는 최대압력을 추정하는 경험식의 선택에 따른 시간에 따른 압력변화를 보여준다. 다른 인자의 추정에는 위에서 언급한 경험식을 동일하게 사용하였다.

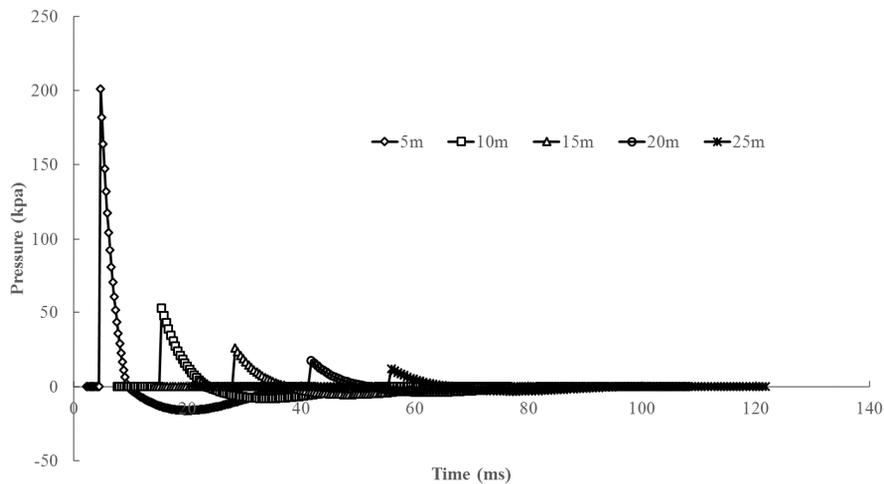


Fig. 11. Variation of pressure with time at certain distances from a blasting point.

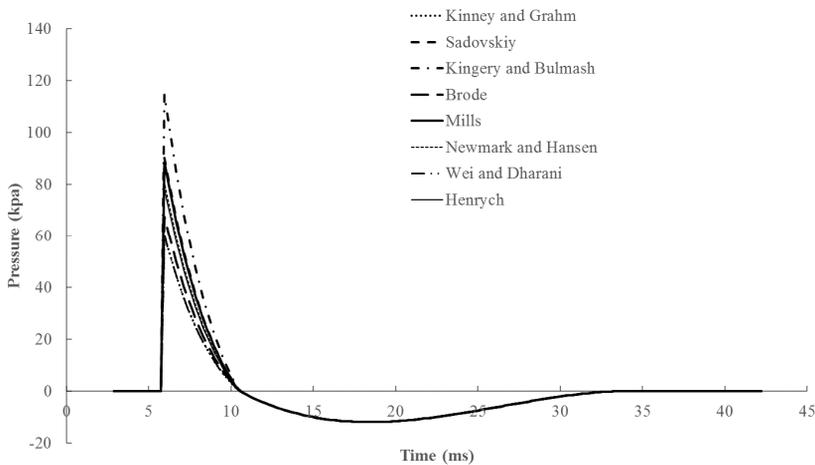


Fig. 12. Influence of the selection of empirical equation for the peak overpressure.

Table 8. Calculated impulse from the pressure curves when W=5kg and R=5m

Equations	Peak overpressure (kPa)	Impulse from pressure curve (kPa-ms)
Henrych	83.1	149.4
Wei	63.96	112
Newmark	85.95	154.4
Mills	94.48	169.7
Brode	71.86	129.1
Kingery	122.2	219.6
Sadovkiy	96.15	172.7
Kinney	84.6	152
Idadifard	82.49	148.2
Average	87.2	156.3

Table 9. Calculated impulse from the pressure curves when W=5kg and R=5m

Equations	Impulse from equations(kPa-ms)
Kingery	161.9
Sadovkiy	116.9
Kinny	109.6
Held	175.4
Average	140.9

폭약량은 5kg 이며, 측정지점은 폭원에서 5m 떨어져 있는 것으로 가정하였다. 사용되는 경험식에 따라 폭발압 변화에 차이가 있음을 알 수 있다. Eq. 10을 이용하여 각 압력곡선의 임펄스를 계산할 수 있다. Table 8은 각 경험식에서 얻어진 최대압력과 임펄스를 보여준다.

최대압력의 경우 64~122kPa, 임펄스는 112~219.6 kPa-ms 범위에 놓이는 것으로 계산되며 최대, 최소값은 두배 정도 차이를 가지는 것으로 나타났다. 가장 널리 사용되고 있는 Kingery 식의 경우, 가장 높은 폭발압력(122.2kPa)과 임펄스(219.6kPa-ms)를 추정하였다. 이는 다른 경험식을 이용하는 경우의 평균값(87.2 kPa, 156.3 kPa-ms)에 비해 약 40% 높은 것이었다. 임펄스를 추정하는 식을 적용하면 Table 9와 같은 결과를 얻을 수 있다. Idadiford 식을 사용하는 경우, 최대 175 kPa-ms, Kinney 식이 최소 109.6 kPa-ms으로 나타나며 평균은 140.9 kPa-ms로 압력곡선에서 계산된 평균값(156.3 kPa-ms)보다 약 10% 낮은 결과를 보인다.

Fig. 4에서는 Kingery 식이 다른 경험식에 비해 상대적으로 낮은 최대압력을 예측한데 비해 W=5kg, R=5m의 경우에서는 상대적으로 높은 압력과 임펄스를 예측하고 있다. 이는 환산거리에 따라 Kingery 식의 상대적인 압력 및 임펄스 예측이 달라질 수 있음을

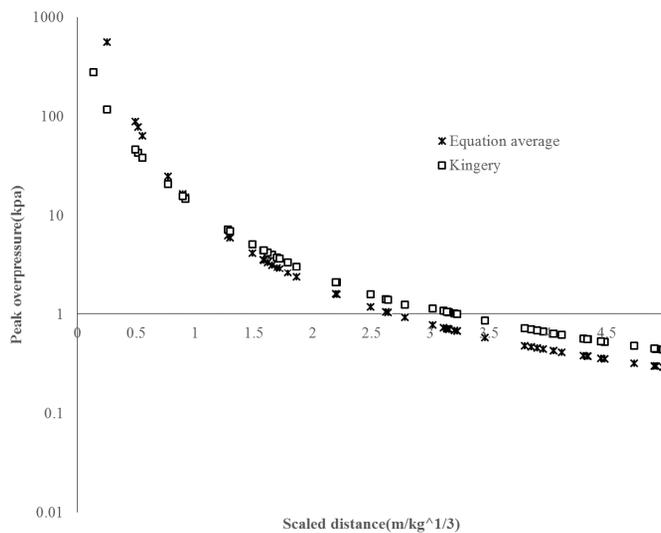


Fig. 13. Comparison of the peak overpressure predicted from Kingery equation and the average of the other empirical equations.

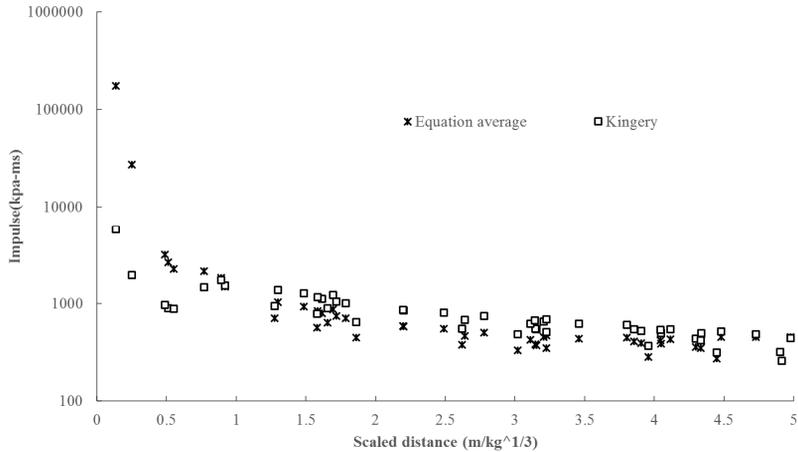


Fig. 14. Comparison of the impulse predicted from Kingery equation and the average of the other empirical equations.

의미한다. 이를 확인하기 위해 보다 넓은 환산거리 구간에서 최대압력과 임펄스 변화를 계산하여 Fig. 13 과 14에 나타내었다. 폭약량과 거리는 무작위로 주어 졌다. 그림에서 알 수 있듯이 환산거리가 $1\text{m/kg}^{1/3}$ 보다 짧은 경우 Kingery 식이 다른 식의 평균보다 낮은 최대압력 및 임펄스를 예측하며, $1\text{m/kg}^{1/3}$ 이상에서는 반대의 경향이 나타나고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 폭발 충격에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 추정하기 위해 제안된 여러가지 경험식들의 특성을 정리하고 분석함으로써 다양한 구조물의 동적 해석을 위한 폭발압력 곡선의 선정에 기여하고자 하였다. 경험식을 기술한 일부 문헌에서는 오류가 있는 식이나 단위를 기술하는 경우가 있었으며 단위를 명확히 표현하지 않음으로써 식을 사용하는데 어려움이 있었다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 환산거리에 따른 폭발파의 특성을 예측하기 위해 제안된 다양한 경험식들은 경우에 따라 상당한 차이를 보였다. 따라서 폭발파의 영향 평가 해석을 위한 경험식을 선택할 때 이에 유의하여야 한다.
- 폭발파의 도착시간과 양압지속시간은 환산거리에 따라 증가하는 경향이 있으나 동일 환산거리에서

장약량이 다른 경우 예측값에 차이가 날 수 있다.

- 음압구간에서의 압력변화를 비선형적으로 추정하는 경우, 선형으로 추정하는 경우에 비해 10% 높은 임펄스를 나타내었다.
- 환산거리가 짧은 경우($0\sim 1.5\text{m/kg}^{1/3}$), Henrich 식과 Kinney와 Graham 식이 가장 낮은 값을, Idadifard와 Foroutan가 제안한 식이 가장 높은 값을 예측하였다. 가장 널리 사용되고 있는 Kingery 식의 경우다른 경험식들에 비해 전반적으로 낮은 폭발압을 예측하고 있음을 알 수 있었다.
- 임펄스를 추정하는 방법에 대한 검토를 위해 $W=5\text{kg}$, $R=5\text{m}$ 경우에 대하여 압력곡선과 경험식을 사용한 임펄스를 구하여 비교하였다. 압력곡선을 이용한 경우 평균값이 $156.3\text{kPa}\cdot\text{ms}$, 경험식을 이용하는 경우 평균값이 $140.9\text{kPa}\cdot\text{ms}$ 로 나타났다. 가장 널리 사용되고 있는 Kingery 식의 경우, 가장 높은 폭발압력과 임펄스 값을 추정하였으며 다른 경험식의 평균에 비해 40% 정도 높게 나타났다.
- Kingery 경험식과 다른 경험식과의 비교를 통해 환산거리가 $1\text{m/kg}^{1/3}$ 보다 짧은 경우 Kingery 식은 상대적으로 낮은 최대압력과 임펄스를 예측하며, 환산거리가 긴 경우 상대적으로 높은 최대압력과 임펄스를 예측함을 알 수 있었다.

이와 같은 폭발 충격 특성에 관한 연구는 향후 지상

및 지하에서의 폭파작업, 가스 폭발 사고 또는 인위적 테러에 의한 폭발현상이 발생하는 경우 지상 및 구조물의 안정성 해석을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- 권상기, 박정찬, 2015, 가스폭발에 따른 폭발에너지를 평가하기 위한 TNT 등가량 환산방법에 대한 고찰, 화약발파 Vol. 33, No. 3, pp. 1-13.
- 김영민, 2011, 가스폭발하중에 의한 터널구조물의 동적거동 해석, 한국터널지하공간학회논문집, Vol. 13, No. 5, pp. 413-430.
- 심창수, 윤누리, 2010, 희생부재를 이용한 근거리 폭발 압력 저감효과, 한국지진공학학회논문집, Vol. 14, No. 1, pp. 11-23.
- 허영철, 정태영, 오성근, 2010, 공기중 폭발하중에 대한 창호시스템의 방폭설계 절차에 관한 고찰, 한국소음진동공학학회논문집, Vol. 20, No. 12, pp. 229-235.
- Bajic, Z., J. Bogdanov and R. Jeremic, 2009, Blast effects evaluation using TNT equivalent, Scientific technical review, Vol. LIX, No. 3-4, pp. 50-53.
- Baker, W. E., 1973, Explosions in air, University of Texas Press, Austin.
- Baker, W. E., P. Cox, P. S. Westine, J. J. Kulesz and R. A. Strehlow, 1983, Explosion hazards and evaluation, Elsevier, New York.
- Brode, H. L., 1955, Numerical solution of spherical blast waves, Journal of applied physics, American Institute of Physics, New York.
- Brode, H. L., 1977, Quick estimates of peak overpressure from two simultaneous blast waves, Tech. Rep. DNA4503T, Defense Nuclear Agency, Aberdeen Proving Ground, MD.
- Chock, M. K. 1999, Review of methods for calculating pressure profiles of explosive air blast and its simple application, Master Thesis, Virginia polytechnic institute.
- Chowdhury, A. H. and T. E. Wilt, 2015, Characterizing explosive effects on underground structures, NRC report, NUREG/CR-7201.
- Department of the US Army, 1986, Fundamentals of protective design for conventional weapons, Technical Manual TM 5-855-1.
- Draganic, H. and V. Sigmund, 2012, Blast loading on structures, Tehnički vjesnik Vol. 19, No. 3, pp. 643-652.
- Ethridge, N. M., 1965, A procedure for reading and smoothing pressure-time data for H. E. and nuclear explosives, Ballistic research laboratory memorandum report No. 1691, Aberdeen proving grounds, Md.
- Friedlander, F. G., 1946, The diffraction of sound pulses. I. Diffraction by a semi-infinite plane. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 186, No. 1006, pp. 322-344.
- Guzas, E. L. and C. J. Earls, 2010, Air blast load generation for simulating structural response, Steel and composite structures, vol. 10, no. 5, pp. 429-455.
- Held, M., 1983, Blast waves in free air. Prop. Exp. Pyro., Vol. 8, No. 1, pp.1-8.
- Henrych, J., 1979, The dynamics of explosion and its use. Elsevier, Amsterdam.
- Izadifard, R. A. and M. Roroutan, 2010, Blastwave parameters assessment at different altitude using numerical simulation, Turkish J. Eng. Env. Sci., Vol. 34, pp. 25-41.
- Karlos, V. and G. Solomos, 2013, Calculation of blast loads for application to structural components, JRC technical reports, JRC87200.
- Kauthammer, T. and A. E. Altenberg, 2000, A negative phase effects on glass panels. Int. J. Imp. Eng., Vol. 24, No., pp. 1-17.
- Kingery, C. N. and G. Bulmash, 1984, Airblast Parameters from TNT Spherical Air Bursts and Hemispherical Surface Bursts, ARBRL-TR-02555.
- Kingery, C. N. and B. F. Pannill, 1964, Peak Overpressure vs Scaled Distance For TNT Surface Bursts (Hemispherical Charges), BRL Memorandum Report 1518.
- Kinney, G. F. and K. J. Graham, 1985, Explosive Shocks in Air, Springer-Verlag, New York, 2nd. ed.
- Lam, N., P. Mendis and T. Ngo, 2004, Response spectrum solutions for blast loading. Elec. J. Str. Eng., Vol. 4, pp. 28-44.
- Larcher, M., 2007, Simulation of the effects of an air blast wave, JRC technical notes.
- Mills, C.A., 1987, The design of concrete structure to resist explosions and weapon effects, Proceedings of the 1st Int. Conference on concrete for hazard protections, Edinburgh, UK, pp. 61-73.
- Newmark, N. M. and R. J. Hansen, 1961, Design of blast resistant structures, Shock and Vibration Handbook, Vol. 3, Eds. Harris and Crede. McGraw-Hill, New York, USA.
- Rigby, S. E., A. Tyas, T. Bennett, S. D. Clarke and S. D. Fay, 2014, The negative phase of the blast load, International journal of protective structures, Vol. 5, No. 1. pp. 1-20.
- Sadovskiy, M. A., 2004, Mechanical effects of air shockwaves from explosions according to experiments. In Sadovskiy M. A. Selected works: Geophysics and

- physics of explosion. Nauka Press, Moscow, 2004.
31. Shames, I. H. 1982. Mechanics of Fluids. McGraw-Hill, Singapore.
 32. Shin, W., W. Wilkinson, D. Cormie and A. Whittaker, 2015, Updated scaled-distance charts for design: improving incident and reflected air-blast parameters in the near field, CONFAB 2015, First International Conference on Structural Safety under Fire and Blast, At Glasgow, United Kingdom.
 33. Slotnick, J. 2004, Explosive Forces of Improvised Explosive Devices.
 34. Smith, P. D. and J. G. Hetherington, 1994, Blast and Ballistic Loading of Structures. Laxton's, 1994.
 35. Swisdak, M. M., 1994, Simplified Kingery airblast calculation, OMB No. 0704-0188.
 36. Teich, M. and N. Gebbeken, 2010, The Influence of the under pressure phase on the dynamic response of structures subjected to blast loads, Int. J. Prot. Str., Vol. 1, No. 2, pp. 219-34.
 37. Wei, J. and L. R. Dharani, 2005, Fracture mechanics of laminated glass subjected to blast loading, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 44, pp. 157-167.



권 상 기

인하대학교 에너지자원공학과 교수

Tel: 032-860-7554

E-mail: kwonsk@inha.ac.kr