

표면 폭발하중 파라메타의 수정 산정식

A Modified Equation of Parameter of Surface Blast Load

전 두 진*
Jeon, Doo-Jin

김 기 태**
Kim, Ki-Tae

한 상 을***
Han, Sang-Eul

Abstract

The Kingery-Bulmash equation is the most common equation to calculate blast load. However, the Kingery-Bulmash equation is complicated. In this paper, a modified equation for surface blast load is proposed. The equation is based on Kingery-Bulmash equation. The proposed equation requires a brief calculation process, and the number of coefficients is reduced under 5. As a result, each parameter obtained by using the modified equation has less than 1% of error range comparing with the result by using Kingery-Bulmash equation. The modified equation may replace the original equation with brief process to calculate.

Keywords : Surface blast, Blast load, Kingery-Bulmash equation, Blast wave parameter

1. 서론

최근 국내외에서 충격, 폭발 등과 같은 비정상하중에 대한 연구¹⁻³⁾가 활발히 진행되고 있다. 또한, 이러한 사고에 대비하고자 규모가 크고 많은 인원이 사용하는 시설 또는 사회적, 경제적으로 중요한 시설 등에서 이를 설계에 반영하는 추세이다. 더욱이 최근 전 세계적으로 발생한 테러와 그 위협으로 인해 방폭 설계의 필요성이 증대되었다.

폭발 하중을 산정하기 위한 방법으로는 폭발 하중식을 이용한 방법과 수치 해석을 이용한 방법이 있다. 전자는 다양한 폭발 실험의 데이터를 기반으로 세워진 식을 계산함으로써 폭발 하중을 산정하는 방법이다⁴⁾. 이 방법은 하중을 쉽고 빠르게 계산할 수 있다는 장점이 있으나, 폭발파가 대상을 직접 가격하는 경우에만 적용이 가능하다. 그리고 후자는

전산유체역학을 이용하여 폭발에 의한 유체의 거동을 해석하고, 그로부터 발생하는 압력을 산정하는 방법이다⁵⁾. 이 방법은 수치 해석 모델에 따라 다양한 경우에 적용이 가능하지만, 하중 산정에 많은 시간이 소요된다. 이 중 가장 일반적으로 사용되는 것은 폭발 하중식을 이용한 방법이다.

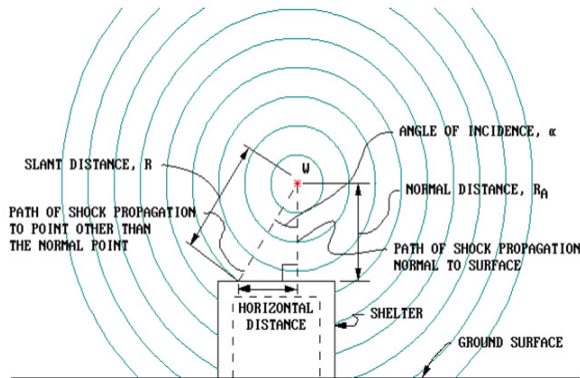
과거에 폭발 하중을 산정하기 위한 많은 연구가 수행되었고 다양한 형태의 방정식이 제시되었다⁶⁻⁹⁾. 이러한 방정식들은 실험 데이터를 기반으로 세워진 경험식이며, 그 중에서 가장 보편적으로 사용되는 것은 Kingery-Bulmash 방정식이다. 본 연구에서는 이 방정식을 바탕으로 기존의 식을 개선하여 수정된 산정식을 제시하고자 한다.

폭발의 유형은 폭발이 발생하는 위치에 따라 자유 공중 폭발, 공중 폭발 그리고 표면 폭발로 분류할 수 있다. 자유 공중 폭발은 <Fig. 1>과 같이 지표면에서 멀리 떨어진 공중에서 폭발이 발생하는 것을 말한다. 자유 공중 폭발이 일어나면, 폭발지점의 중심으로부터 발생한 충격파가 구형으로 전파되고, 이 충격파는 도중에 증폭 없이 직접 구조물을 가격한다.

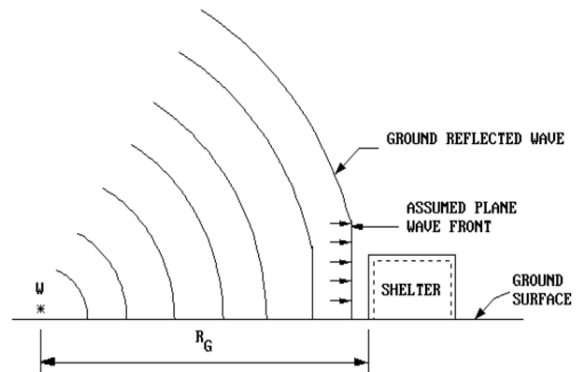
* 학생회원, 인하대학교 대학원 박사과정
Inha University

** 학생회원, 인하대학교 대학원 석사과정
Inha University

*** 교신저자, 정회원, 인하대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Dept. of Architectural Engineering, Inha University
Tel: 070-8269-3656 Fax: 032-866-4624
E-mail: hsang@inha.ac.kr

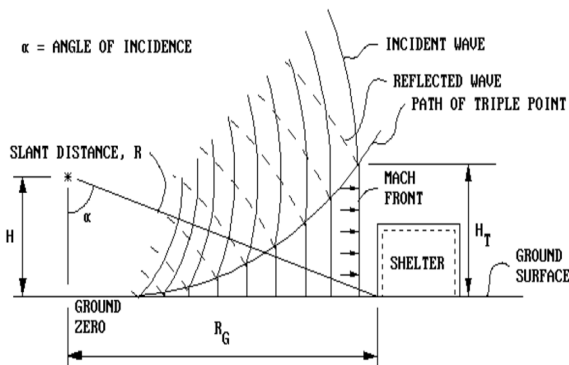


〈Fig. 1〉 Free-air burst¹⁰⁾



〈Fig. 3〉 Surface burst¹⁰⁾

공중 폭발 또한 공중에서 발생하는 폭발이지만, 자유 공중 폭발과는 다르게 지표면과 가까운 공중에서 폭발하는 것을 말한다<Fig. 2>. 공중 폭발은 폭발지점으로부터 발생한 초기의 충격파가 대상에 도달하기 전에 지표면에서 반사되어 충격파의 증폭이 일어난다.



〈Fig. 2〉 Air burst¹⁰⁾

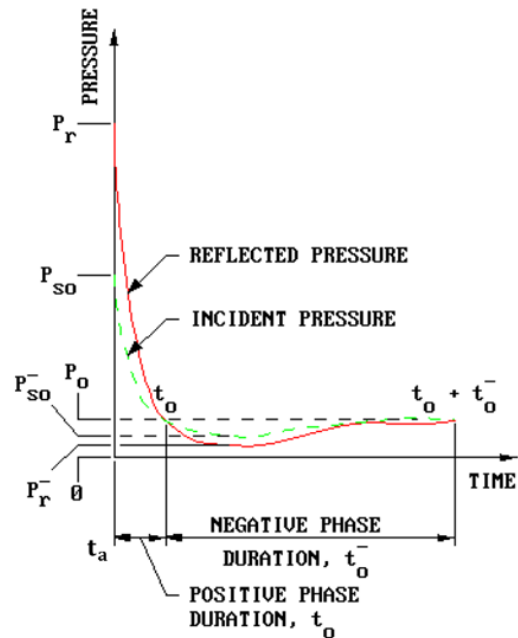
표면 폭발은 <Fig. 3>과 같이 지표면에서 발생하는 폭발을 말한다. 표면에서 폭발이 일어나면, 충격파는 폭발지점부터 지표면 반사로 인해 증폭이 발생하여 진행된다. 이 때문에 표면 폭발은 일반적으로 같은 조건의 자유 공중 폭발에 비해 하중이 크게 발생한다.

이러한 폭발의 유형 중에서, 본 연구의 선행 논문에서는 자유 공중 폭발을 다루었으며, 본 논문에서는 표면 폭발을 다루고자 한다.

2. 기존의 폭발하중 산정식

2.1 폭발하중의 특성

폭발이 발생하였을 때, 생성된 충격파는 구조물에 공기의 압력으로 작용하며, 이러한 하중을 <Fig. 4>와 같이 압력-시간 이력 곡선으로 나타낼 수 있다.



〈Fig. 4〉 Pressure-time curve of blast load¹⁰⁾

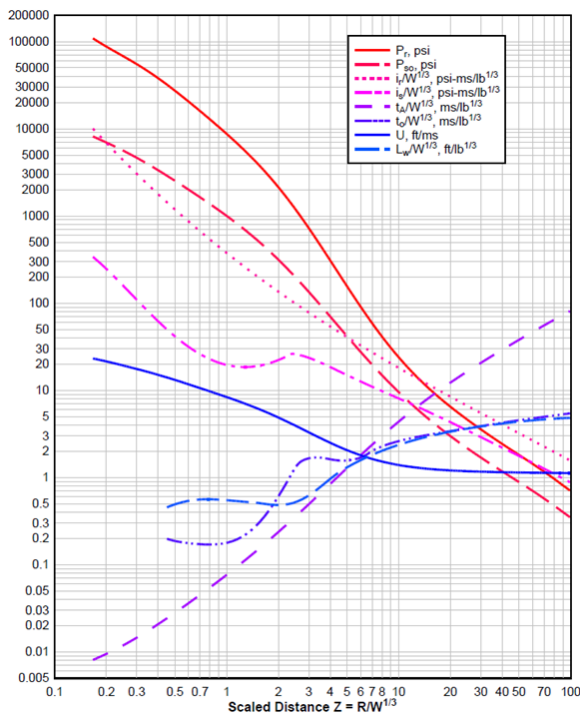
충격파가 대상에 도달하면, 순간적으로 최대 압력이 발생하였다가 빠르게 감소한다. 이러한 구간을 정압기라고 한다. 정압기 이후에는 대기압보다 낮은 부압력이 발생하며 서서히 대기압에 수렴하게 된다.

이러한 구간을 부압기라고 한다. 그러나 부압기의 경우 구조물에 미치는 영향이 매우 미미하므로 일반적으로 폭발 해석에서는 정압기만을 고려한다.

<Fig. 4>에서 알 수 있듯이, 몇 가지의 파라메타들로부터 폭발하중의 압력-시간 이력 곡선을 나타낼 수 있는데, 이 때 사용되는 파라메타들은 다음과 같다.

- P_{so} : 입사압의 최대값
- P_r : 반사압의 최대값
- I_{so} : 입사압에 의한 충격량
- I_r : 반사압에 의한 충격량
- T_a : 충격파의 도달 시간
- T_o : 정압기의 지속 시간
- U : 충격파 도달 시 충격파의 속도

미 국방성에서 발간하는 UFC 3-340-02¹⁰⁾에서는 이러한 파라메타들을 환산거리에 따라 <Fig. 5>와 같은 도표로 나타내고 있다.



<Fig. 5> Positive phase shock wave parameter for surface burst¹⁰⁾

2.2 기존의 폭발하중 산정식

과거에 폭발 하중식을 정립하기 위한 많은 연구가 수행되었으며, 이론적으로 접근하기 어려운 폭발하중의 특성상 실험 데이터를 기반으로 한 경험식으로 제시되었다. 그 중에서 Kingery-Bulmash 방정식은 미 국방성에서 발간된 UFC 3-340-02와 미 공병단에서 개발된 폭발 하중 산정 프로그램인 Conwep에 적용되어, 가장 보편적으로 사용되는 방정식이다. 그러나 Kingery-Bulmash 방정식은 계산 과정이 다소 복잡하여 하중을 직접 계산하기에는 어려움이 있다. 이에 Swisdak¹¹⁾은 단순화된 Kingery-Bulmash 방정식을 제시하였다.

대부분의 방정식에서 공통적으로 환산거리를 변수로 사용하며, 환산거리는 식 (1)과 같이 계산된다.

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

Z : 환산거리(Scaled distance)

R : 폭발지점까지의 거리

W : 폭약의 TNT 환산량

또한, 위의 환산거리를 통해 폭발 하중의 파라메타를 계산하는 Kingery-Bulmash의 방정식은 다음 식 (2a), (2b)와 같다.

$$U = K_1 + K_2 \times \log Z \tag{2a}$$

$$Y = 10^{(C_1 + C_2 \times U + C_3 \times U^2 + \dots + C_N \times U^{N-1})} \tag{2b}$$

Y : 폭발하중의 파라메타 (P_{so} , P_r , $\frac{I_{so}}{W^{1/3}}$,

$$\frac{I_r}{W^{1/3}}, \frac{T_a}{W^{1/3}}, \frac{T_o}{W^{1/3}}, U)$$

Kingery-Bulmash 방정식은 표면 폭발의 파라메타를 환산거리 범위 $0.06 \sim 40 m/kg^{1/3}$ ($0.167 \sim 100 ft/lb^{1/3}$)에서 계산할 수 있다. K 와 C 는 각각의 파라메타를 구하기 위한 계수이며, 환산거리의 범위, 계산하기 위한 파라메타에 따라 계수의 수와 값이 달라진다. 상수 K 는 2개, 상수 C 는 4~15개로 이루어

어져 있다. 한 가지 예로써, 표면 폭발에서 입사압의 최대값은 다음 <Fig. 6>과 같이 계산된다.

$U = -0.214362789151 + 1.35034249993T$ <p style="text-align: center;"><i>Then substitute U into</i></p> $Y = 2.780776916577 - 1.6958988741U + 0.154159376846U_2 + 0.514060730593U_3 - 0.0988534365274U_4 - 0.293912623038U_5 - 0.0268112345019U_6 + 0.109097496421U_7 + 0.00162846756311U_8$
$U = K_0 + K_1T$ <p>T = Common Logarithm of the Distance(m) Y = Common Logarithm of the Surface Blast Parameter (metric)(Pressure or Impulse)</p>

<Fig. 6> Example of coefficients for Kingery-Bulmash Equation¹²⁾

또한, Swisdak은 이를 비교적 간단히 계산하기 위해 단순화된 Kingery-Bulmash 방정식을 제시하였으며, 식 (3)과 같이 계산된다.

$$Y = e^{(A + B \times \ln Z + C \times (\ln Z)^2 + \dots + G \times (\ln Z)^6)} \quad (3)$$

이 방정식은 Kingery-Bulmash 방정식을 바탕으로 세워졌으며, 상수의 수는 2~7개로 이루어져 있다. 또한, 기존 방정식과의 오차율은 1% 이내로 상당히 정확하다. 그러나 표면 폭발에만 적용이 가능하며, 계산 가능한 환산거리 범위가 기존 방정식의 범위(작은 환산거리)를 포괄하지 못하는 한계점을 가지고 있다. 한 가지 예로써, 표면 폭발에서 입사압의 최대값을 계산하기 위한 상수는 <Table 1>과 같다.

3. 수정된 폭발하중 산정식

3.1 수정 산정식의 조건

앞서 언급한 바와 같이, Kingery-Bulmash 방정식은 자유 공중 폭발과 표면 폭발에 모두 적용할 수 있으며, 폭발하중의 압력-시간 이력 곡선을 나타내기 위한 모든 파라메타들을 계산할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

<Table 1> Coefficients of P_s (Swisdak Eq.)¹¹⁾

0.2 < Z < 2.9 (m/kg ^{1/3})					
A	7.2106	B	-2.1069	C	-0.3229
D	0.1117	E	0.0685	F	0
G	0				
2.9 < Z < 23.8 (m/kg ^{1/3})					
A	7.5938	B	-3.0523	C	-0.40977
D	0.0261	E	-0.01267	F	0
G	0				
23.8 < Z < 198.5 (m/kg ^{1/3})					
A	6.0536	B	-1.4066	C	0
D	0	E	0	F	0
G	0				

또한, 미 국방성에서 발간된 매뉴얼인 UFC 3-340-02와 미 공병단에서 개발된 폭발 하중 산정 프로그램인 Conwep에 적용되어, 가장 보편적으로 사용되는 방정식이다. 그러나 계산 과정이 3단계로 다소 길며, 계산에 사용되는 상수의 수가 상당히 많고 복잡하다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 Kingery-Bulmash 방정식을 기반으로 보다 간편하게 수정된 폭발하중 산정식을 제안하고자 한다. 자유 공중 폭발의 하중식은 본 연구의 선행 논문에서 다루었으며, 본 논문에서는 표면 폭발의 하중식을 다루고자 한다.

본 연구에서 설정된 수정 산정식의 조건은 다음과 같다.

- (1) 수정 산정식은 Kingery-Bulmash 방정식을 기반으로 한다.
- (2) 기존 방정식에서 제시하는 모든 환산거리 범위(0.06~40m/kg^{1/3})를 만족하도록 한다.
- (3) 기존 방정식의 계산 과정에서 변수 U의 계산을 생략한다.
- (4) 기본 함수의 형태는 지수함수로 하며, 지수는 환산거리의 상용로그(log Z)를 변수로 하는 다항식으로 한다.
- (5) 방정식의 상수의 수는 5개 이하로 하며, 5개

의 유효숫자를 갖도록 한다.

(6) 전 환산거리 범위에 대하여 기존 방정식과의 오차는 1% 이하가 되도록 한다.

위와 같은 조건에 따라 결정된 수정 산정식의 기본 함수 형태는 식 (4)와 같다. 식 (4)에서는 기존 식의 변수 U 를 계산하는 과정을 생략하도록 하였으며, 지수는 4차 다항함수로 계산된다.

$$Y = 10^{(C_1 + C_2 \times (\log Z) + C_3 \times (\log Z)^2 + C_4 \times (\log Z)^3 + C_5 \times (\log Z)^4)} \quad (4)$$

3.2 수정 산정식의 계수

수정 산정식의 상수 C 를 결정하기 위해 기존 방정식의 값으로부터 Curve fitting을 사용하였다. Curve fitting의 알고리즘은 비교적 안정적이고 빠르게 해에 수렴할 수 있는 Levenberg-Marquardt 방법을 사용하였다. Levenberg-Marquardt 방법은 비선형 최소 자승 문제를 푸는 대표적인 방법으로, Gauss-Newton 방법과 Gradient descent 방법이 결합된 형태이다.

이를 통해 표면 폭발하중의 입사압의 최대값 (P_{so})에 대한 계수는 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Coefficients of P_{so} (MPa)

0.06 < Z < 1.13 (m/kg ^{1/3})					
C_1	0.13295	C_2	-2.1712	C_3	-1.3878
C_4	-1.0401	C_5	-0.37148		
1.13 < Z < 10.00 (m/kg ^{1/3})					
C_1	0.13067	C_2	-2.0672	C_3	-1.1750
C_4	2.1159	C_5	-0.83460		
10.00 < Z < 40.00 (m/kg ^{1/3})					
C_1	0.78363	C_2	-4.5738	C_3	2.6834
C_4	-0.72311	C_5	-		

이와 마찬가지로 반사압의 최대값(P_r)에 대한 계수는 <Table 3>과 같다.

<Table 3> Coefficients of P_r (MPa)

0.06 < Z < 0.42 (m/kg ^{1/3})					
C_1	1.3953	C_2	0.30058	C_3	4.8121
C_4	4.7833	C_5	1.5439		
0.42 < Z < 3.45 (m/kg ^{1/3})					
C_1	0.90962	C_2	-2.6898	C_3	-1.2237
C_4	0.85625	C_5	1.4957		
3.45 < Z < 40.00 (m/kg ^{1/3})					
C_1	1.2511	C_2	-4.7950	C_3	2.7741
C_4	-0.73282	C_5	-		

입사압과 반사압에 의한 충격량은 각각을 폭약의 TNT 등가량의 세제곱근으로 나눈 값($I_{so}/W^{1/3}$, $I_r/W^{1/3}$)으로 계산되며, 이에 대한 계수는 각각 <Table 4>, <Table 5>와 같다.

<Table 4> Coefficients of $I_{so}/W^{1/3}$ (MPa · ms/kg^{1/3})

0.06 < Z < 0.95 (m/kg ^{1/3})					
C_1	-0.60247	C_2	1.1143	C_3	1.3760
C_4	-1.5534	C_5	-1.0651		
0.95 < Z < 5.97 (m/kg ^{1/3})					
C_1	-0.63226	C_2	-0.41419	C_3	-2.2475
C_4	3.8761	C_5	-2.2190		
5.97 < Z < 40.00 (m/kg ^{1/3})					
C_1	-0.60392	C_2	-0.84947	C_3	-0.055334
C_4	-	C_5	-		

<Table 5> Coefficients of $I_r/W^{1/3}$ (MPa · ms/kg^{1/3})

0.06 < Z < 40.00 (m/kg ^{1/3})					
C_1	-0.053169	C_2	-1.3466	C_3	0.23258
C_4	-0.059534	C_5	-		

이와 마찬가지로, 압력의 도달 시간과 지속 시간도 각각을 폭약의 TNT 등가량의 세계평균으로 나눈 값($T_a/W^{1/3}$, $T_o/W^{1/3}$)으로 계산되며, 이에 대한 계수는 각각 <Table 6>, <Table 7>과 같다.

<Table 6> Coefficients of $T_a/W^{1/3}$ ($ms/kg^{1/3}$)

0.06 < Z < 1.46 ($m/kg^{1/3}$)				
C_1	-0.33217	C_2	1.8061	C_3 0.43653
C_4	0.26277	C_5	0.15906	
1.46 < Z < 10.00 ($m/kg^{1/3}$)				
C_1	-0.35217	C_2	1.9914	C_3 -0.13049
C_4	-0.17628	C_5	-	
10.00 < Z < 40.00 ($m/kg^{1/3}$)				
C_1	-0.074315	C_2	1.5680	C_3 -0.15812
C_4	-	C_5	-	

<Table 7> Coefficients of $T_o/W^{1/3}$ ($ms/kg^{1/3}$)

0.17 < Z < 0.69 ($m/kg^{1/3}$)				
C_1	0.43227	C_2	6.1103	C_3 12.418
C_4	11.021	C_5	3.8670	
0.69 < Z < 1.00 ($m/kg^{1/3}$)				
C_1	0.24242	C_2	3.6673	C_3 2.6397
C_4	-	C_5	-	
1.00 < Z < 2.88 ($m/kg^{1/3}$)				
C_1	0.24255	C_2	2.1849	C_3 -14.917
C_4	35.106	C_5	-23.852	
2.88 < Z < 10.00 ($m/kg^{1/3}$)				
C_1	-0.32552	C_2	2.7174	C_3 -2.7949
C_4	1.0846	C_5	-	
10.00 < Z < 40.00 ($m/kg^{1/3}$)				
C_1	0.27214	C_2	0.48449	C_3 -0.076501
C_4	-	C_5	-	

마지막으로, 압력이 도달할 때의 압력과의 속도 (U)에 대한 계수는 <Table 8>과 같다.

<Table 8> Coefficients of U (m/ms)

0.06 < Z < 1.28 ($m/kg^{1/3}$)				
C_1	0.079911	C_2	-0.97917	C_3 -0.53612
C_4	-0.39288	C_5	-0.14662	
1.28 < Z < 10.00 ($m/kg^{1/3}$)				
C_1	0.089984	C_2	-1.1228	C_3 0.31104
C_4	0.73402	C_5	-0.45634	
10.00 < Z < 40.00 ($m/kg^{1/3}$)				
C_1	-0.41168	C_2	-0.034073	C_3 -
C_4	-	C_5	-	

3.3 기존 방정식과 수정 산정식의 비교

본 논문에서 제안한 수정된 산정식을 기존의 방정식인 Kingery-Bulmash 방정식과 비교하여 오차를 파악하고 정확성을 검증하였다. 전 구간에서 균등하고 충분한 비교 데이터를 확보하기 위해 환산거리 0.06~40m/kg^{1/3} 구간의 총 500개의 지점에서 비교하였으며, 그 결과를 <Table 9>에 나타내었다. 그 결과, 모든 파라메타의 최대 오차는 1% 이하이며, 평균 오차는 0.3% 이하로 기존의 방정식과 매우 일치함을 확인하였다.

4. 결론

다양한 폭발하중 산정식 중, Kingery-Bulmash 방정식은 자유 공중 폭발과 표면 폭발에 모두 적용이 가능하며, 폭발의 압력-시간 이력 곡선을 표현하기 위한 모든 파라메타를 계산할 수 있다. 또한 UFC 3-340-02와 Conwep 모델에 적용되어 전 세계적으로 가장 널리 사용되는 방정식이다. 그러나 이 방정식은 계산이 다소 복잡한 문제점을 가지고 있다. 이에 따라 Swisdak은 Kingery-Bulmash 방정식을 보다 간단하게 계산하기 위한 방정식을 제시하였다. 그러나 Swisdak의 방정식은 표면 폭발에만 적용이 가능하고, 계산 가능한 환산거리 범위도 기존의 방정식을 모두 포괄하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 수정된 산정식을 제안하였다.

〈Table 9〉 Comparison modified equation with Kingery-Bulmash equation (Error: %)

Z	P_{so}	P_r	$I_{so}/W^{1/3}$	$I_r/W^{1/3}$	$T_a/W^{1/3}$	$T_o/W^{1/3}$	U
0.06	-0.93	0.08	-0.01	0.00	0.33	-	-0.05
0.0608	-0.77	-0.03	-0.01	0.00	0.22	-	-0.06
0.0616	-0.63	-0.11	-0.01	0.00	0.12	-	-0.07
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
38.9710	-0.40	-0.23	0.37	0.01	0.05	-0.34	-0.47
39.4822	-0.58	-0.38	0.39	0.01	0.05	-0.42	-0.51
40	-0.79	-0.56	0.41	0.01	0.06	-0.50	-0.55
Maximum	0.49	0.97	1.00	0.01	0.87	0.96	0.48
Minimum	-1.00	-0.58	-0.81	0.00	-0.61	-0.95	-0.81
Average	0.17	0.23	0.12	0.00	0.19	0.19	0.20

선행된 논문에서는 자유 공중 폭발 하중의 수정 산정식을 다루었으며, 본 논문에서는 표면 폭발하중의 수정 산정식을 다루었다.

본 논문에서 제안한 산정식은 Kingery-Bulmash 방정식과 마찬가지로 2가지 유형의 폭발에 모두 적용할 수 있다. 또한, 계산 가능한 환산거리 범위도 동일하다. 수정된 산정식에서는 기존 방정식에서의 불필요한 계산을 생략함으로써 계산 과정을 줄였으며, 계산에 필요한 계수의 수를 5개 이하로 줄여 방정식을 더욱 간단하게 하였다. 계산의 결과는 기존의 방정식과 비교하여 1% 이하의 오차를 갖는다.

그러나, 수정된 산정식은 다음과 같은 2가지 한계점을 가지고 있다. 첫째, 방정식을 정립함에 있어 충분한 이론적인 배경이 바탕이 되지 않는다는 것이다. 이 문제는 제안된 수정 산정식 뿐만 아니라 실험 데이터에 의해 경험식으로 세워진 다른 방정식들도 함께 갖는 문제이다. 둘째, 방정식이 세워지는데 사용된 데이터가 실험 데이터가 아닌 Kingery-Bulmash 방정식의 계산값이라는 점이다. 실제 사용된 실험 데이터를 기반으로 하는 것이 가장 좋은 방법이지만, 충분한 실험 데이터를 얻는 것이 불가능하다.

그러나 본 논문의 목적은 새로운 방정식을 만드는 것이 아닌, Kingery-Bulmash 방정식과 같은 결과를 얻으면서, 보다 간단하게 계산하기 위한 방정식을 찾는 것이기 때문에 Kingery-Bulmash 방정식의 계산값을 이용한 것은 합당하다고 판단된다.

따라서 본 논문에서 제안한 수정 산정식은 이러한 한계점을 이해하고 상황에 맞게 사용한다면, 더욱 간단한 계산으로 동일한 결과를 얻을 수 있다는 점에서 Kingery-Bulmash 방정식을 보완하고 대체할 수 있을 것이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원(17AUDP-B100343-03)에 의해 수행되었습니다.

References

1. H.S. Kim, H.S. Ahn, J.G. Ahn, "Erosion Criteria for the Blast Analysis of Reinforcement Concrete Members", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 30(3), pp.21-28, 2014

2. K.S. Lee, Z. Huque, D.J. Jeon, S.E. Han, "The Development of Impact Force Model of Large Commercial Aircraft Considering the Fuel Mass Effect", *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 30(8), pp.19-28, 2014
 3. S. Astarlioglu, T. Krauthammer, D. Morency, T.P. Tran, "Behavior of Reinforced Concrete Columns Under Combined Effects of Axial and Blast-induced Transverse Loads", *Engineering Structures*, 55, pp.26-34, 2013
 4. U. Nystrom, K. Gylltoft, "Numerical Studies of the Combined Effects of Blast and Fragment Loading", *International Journal of Impact Engineering*, 36, pp.995-1005, 2009
 5. M. Carriere, P.J. Hefferman, R.C. Wight, A. Braimah, "Behaviour of Steel Reinforced Polymer (SRP) Strengthened RC Members under Blast Load", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36, pp.1356-1365, 2009
 6. H.L. Brode, "Numerical Solution of Spherical Blast Waves", *Journal of Applied Physics*, American Institute of Physics, New York, 1955
 7. G.F. Kinney, K.J. Graham, "Explosive Shocks in Air", Springer, Berlin, 1985
 8. C.A. Mills, "The Design of Concrete Structures to Resist Explosions and Weapon Effects", *Proceedings of the 1st Int. Conference on Concrete for Hazard Protections*, Edinburgh, UK, 1987
 9. C.N. Kingery, G. Bulmash, "Technical Report ARBRL-TR-02555: Air Blast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Burst", AD-B082 713, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, 1984
 10. Unified Facilities Criteria, "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions", UFC 3-340-02, U.S. Department of Defense, Washington D.C., 2014
 11. M.M. Swisdak. "Simplified Kingery airblast calculations", *Proceedings of the 26th DoD Explosives Safety Seminar*, Indian Head, MD: Naval Surface Warfare Center, 1994.
 12. United Nations Office of Disarmament Affairs (UNODA), "International Ammunition Technical Guideline: Formulae for Ammunition management", UN IATG 01.80:2015 [E], UN Safer Guard, 2015
- Received : July 31, 2017
 - Revised : August 28, 2017
 - Accepted : August 31, 2017