

자유 공중 폭발하중 파라메타의 수정 산정식

A Modified Equation of Parameter of Free-air Blast Load

전 두 진*
Jeon, Doo-Jin

이 민 재**
Lee, Min-Jae

한 상 을***
Han, Sang-Eul

Abstract

The blast load is classified into free-air blast and surface blast following the location of explosion and surface. In this paper, several equations for blast load calculation are explained briefly and a modified equation for free-air blast load is suggested. The modified equation is based on Kingery-Bulmash equation which is used in UFC 3-340-02 and Conwep model. In this modified equation, the process of calculation is simplified against the original equation, and the number of coefficients is reduced under 5. As a result, each parameter of estimated data by modified equation has less than 1% of error range comparing with Kingery-Bulmash equation.

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

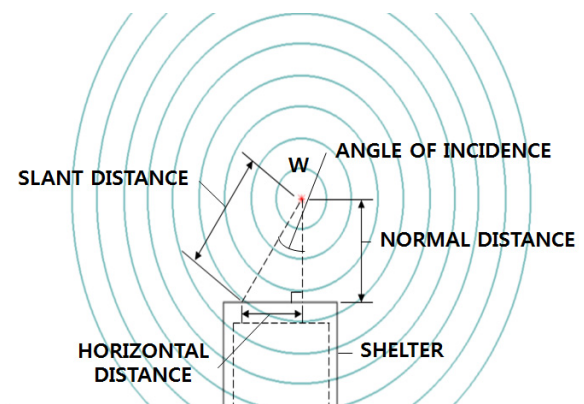
1. 서론

911 테러 및 폭탄테러, 가스폭발 사고 등에 의한 구조물과 인명 피해가 발생함에 따라 충격, 폭발 등의 비정상하중에 대한 사회적 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 국내외에서 이러한 비정상하중에 대한 연구¹⁻⁴⁾가 활발히 진행되고 있으며, 더욱이 최근 전 세계적으로 발생한 테러와 그 위협으로 인해 방폭설계의 필요성이 증대되었다.

구조물의 방폭설계 시 성능 검증은 실험을 통하는 것이 가장 확실한 방법이나, 비용 등의 현실적인 여건상 충분한 실험을 시행하는 것은 어렵기 때문에 일반적으로 수치해석 시뮬레이션을 통한 검토를 수행하게 된다. 이 때 방폭설계 및 폭발해석에서 가장 기본이 되는 것은 폭발하중을 산정하는 것이다. 따라서 과거에 폭발하중 산정식을 정립하기 위한 많은 연구

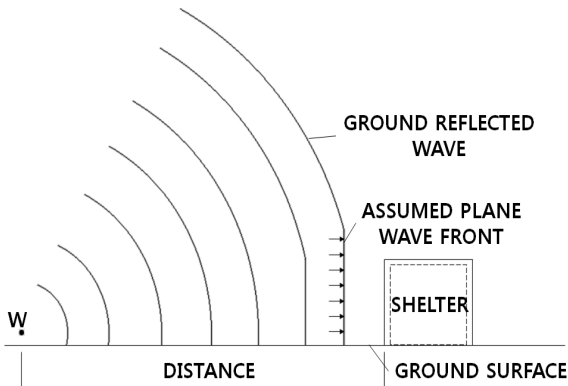
가 수행되었으며, 이론적으로 접근하기 어려운 하중의 특성상 다양한 형태로 제시되었다.

폭발하중은 폭발 발생 위치와 지표면의 관계에 따라 자유 공중 폭발과 표면 폭발로 분류할 수 있다. 자유 공중 폭발은 <Fig. 1>과 같이 지표면에서 멀리 떨어진 공중에서 폭발이 일어나는 것으로 폭발에 의한 압력파가 지표면의 간섭을 받지 않고 직접 구조물에 작용하는 것이며, 표면 폭발은 <Fig. 2>와 같이 지표면에서 폭발이 발생하여 압력파가 지표면의 영향을 받는 것으로 일반적으로 자유 공중 폭발보다 큰 압력이 발생한다.



<Fig. 1> Free-air blast⁵⁾

* 정회원, 인하대학교 대학원, 박사과정
Inha University
** 정회원, 인하대학교 대학원, 석사과정
Inha University
*** 교신저자, 인하대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Department of Architecture, Inha University
Tel: 032-860-7592 Fax: 032-750-5837
E-mail: hsang@inha.ac.kr

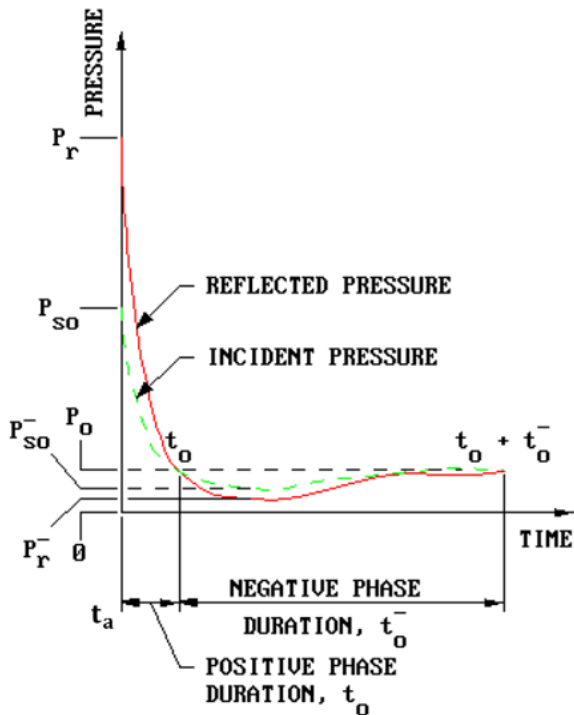


<Fig. 2> Surface blast⁵⁾

본 논문에서는 2가지 폭발 중, 자유 공중 폭발하중을 대상으로 하였으며, 기존에 제시된 다양한 폭발하중 산정식을 간략하게 소개하고, 그 중 가장 보편적으로 사용되는 식인 Kingery-Bulmash 방정식을 바탕으로 기존의 식을 개선하여 자유 공중 폭발에 대한 수정된 산정식을 제시하고자 한다.

2. 기존의 폭발하중 산정식

2.1 폭발하중 시간이력곡선과 주요 파라메타



<Fig. 3> Pressure-time curve of blast load⁵⁾

폭발 압력은 입사파에 의한 입사압력과 압력파가 구조물에서 반사되어 발생하는 반사압력의 합으로 결정된다. <Fig. 3>에서 보듯이 폭발 압력은 순간적으로 큰 압력이 발생하였다가 빠르게 감소하는데, 이 때 폭발 압력이 대기압보다 큰 구간을 정압기, 대기압보다 작은 구간을 부압기라 한다. 그러나 부압기의 경우 구조물에 미치는 영향이 매우 미미하므로 일반적으로 폭발 해석에서는 정압기만을 고려한다. 폭발 압력을 나타내는 주요 파라메타들로는, 압력의 도달 시간(T_a), 정압기의 지속 시간(T_o), 입사압과 반사압의 최대값(P_s, P_r), 입사압과 반사압에 의한 충격량(I_s, I_r), 그리고 압력 도달 시 압력파의 속도(U) 등이 있다.

2.2 기존의 폭발하중 산정식

과거 폭발하중을 산정하기 위한 다양한 방정식이 제시되었다. Brode⁶⁾는 입사압의 최대값(P_s)을 식 (1)a, 식 (1)b와 같이 제시하였다.

$$P_s = \frac{6.7}{Z^3} + 1.0 \text{ (bar)}, (P_s > 10\text{bar}) \quad (1a)$$

$$P_s = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \text{ (bar)}, \quad (0.1 < P_s < 10\text{bar}) \quad (1b)$$

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

Z: 환산거리(Scaled distance)

R: 폭발지점까지의 거리

W: 폭약의 TNT 환산량

Kinney⁷⁾는 이와 다르게 입사압의 최대값을 식 (3)과 같이 나타내었다.

$$P_s = P_o \frac{808[1 + (\frac{Z}{4.5})^2]}{\{[1 + (\frac{Z}{0.048})^2][1 + (\frac{Z}{0.32})^2][1 + (\frac{Z}{1.35})^2]\}^{0.5}} \text{ (bar)} \quad (3)$$

P_o : 대기압

또한, Mills⁸⁾는 입사압의 최대값을 식 (4)와 같이 제시하였다.

$$P_s = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \text{ (kPa)} \quad (4)$$

그러나 이들과 다르게 Kingery와 Bulmash⁹⁾는 입사압의 최대값 외에도 다른 파라메타들을 함께 제시하였으며, 그 식은 식 (5)a, 식 (5)b와 같다.

$$U = K_1 + K_2 \times \log Z \quad (5)a$$

$$Y = 10^{(C_1 + C_2 \times U + C_3 \times U^2 + \dots + C_N \times U^{N-1})} \quad (5)b$$

Y: 폭발하중의 파라메타 ($P_s, P_r, \frac{I_s}{W^{1/3}}$,

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

여기서, K 와 C 는 Kingery-Bulmash 방정식에서 각각의 파라메타를 구하기 위한 계수이다<Fig. 4>.

6.2.1 Incident Pressure

These equations have a range of applicability from 0.05-40m.

$U = -0.214362789151 + 1.35034249993T$

Then substitute U into

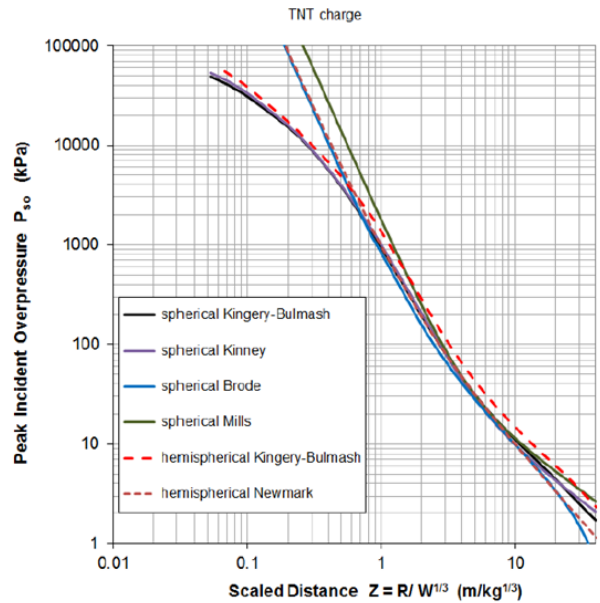
$Y = 2.611368669 - 1.69012801396U +$
 $0.00804973591951U_2 + 0.336743114941U_3 -$
 $0.00516226351334U_4 - 0.0809228619858U_5 -$
 $0.00478507266747U_6 + 0.00793030472242U_7 +$
 $0.0007684469735U_8$

$U = K_0 + K_1 T$

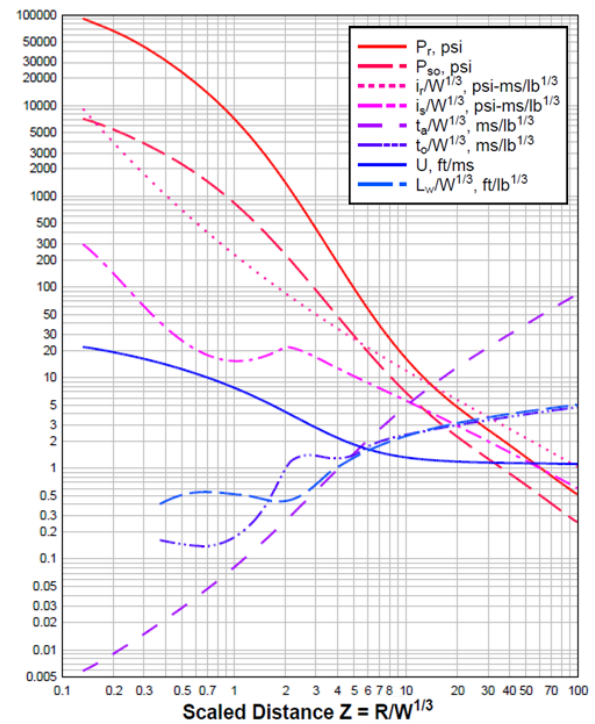
T = Common Logarithm of the Distance(m)
Y = Common Logarithm of the Air Blast Parameter (metric)(Pressure or Impulse)

<Fig. 4> Example of coefficients for Kingery-Bulmash equation¹⁰⁾

<Fig. 5>는 각 방정식에 따른 입사압의 최대값을 비교한 결과이며, 방정식에 따라 다소 차이가 있을 수 있다.



<Fig. 5> Comparison of peak incident overpressure¹¹⁾



<Fig. 6> Positive phase shock wave parameter for free-air burst⁵⁾

여러 폭발하중 산정식 중, Kingery-Bulmash의 방정식은 많은 실험 데이터를 기반으로 Curve fitting을 사용하여 세워졌으며, <Fig. 6>과 같이 폭발 압력의 시간이력곡선을 나타내기 위한 파라메타들을

모두 계산할 수 있다. 또한, 미 국방성에서 발간된 매뉴얼인 UFC 3-340-02⁹⁾와 미 공병단에서 개발된 폭발하중 산정 프로그램인 Conwep에 적용되어, 가장 보편적으로 사용되는 방정식이다.

그러나 Kingery-Bulmash 방정식은 각각의 파라메타를 두 단계에 걸쳐 계산하며, 경우에 따라 계수 C 는 최대 15개까지 필요하여 계산 과정이 다소 복잡한 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 Kingery-Bulmash 방정식을 바탕으로 하여, 계산과정을 줄이고 보다 간단하게 수정된 산정식을 제안하고자 한다.

3. 수정된 폭발하중 산정식

3.1 수정 산정식의 조건

본 연구에서는 Kingery-Bulmash 방정식을 기본으로 단순화된 수정 산정식을 찾기 위하여 우선 기본 함수형태를 설정하고 Curve fitting을 이용하여 각 파라메타에 맞는 계수를 찾으려 하였다. Curve fitting의 알고리즘은 비교적 안정적이고 빠르게 해에 수렴할 수 있는 Levenberg-Marquardt 방법을 사용하였으며, 수정 산정식의 조건으로는 다음과 같이 설정하였다.

- (1) 로그 스케일을 사용한 Kingery-Bulmash 방정식을 기본으로 한다.
- (2) 거리, 질량, 시간, 압력의 단위계는 각각 m , kg , ms , MPa 단위를 사용한다.
- (3) 기존 방정식에서 제시하는 모든 범위(환산거리 $0.05 \sim 40m/kg^{1/3}$)를 만족하도록 한다.
- (4) 기본 함수의 형태는 지수함수로 하며, 지수는 환산거리의 로그값($\log Z$)을 변수로 하는 다항식으로 한다.
- (5) 각 계산식의 계수의 수는 5개 이하로 하며, 5개의 유효숫자를 갖도록 한다.
- (6) 전 구간에 대하여 기존 방정식과의 오차는 1% 이내가 되도록 한다.

위와 같은 조건에 따라 수정 산정식의 기본 함수

형태는 식 (6)과 같이 결정하였다.

$$Y = 10^{(C_1 + C_2 \times (\log Z) + C_3 \times (\log Z)^2 + C_4 \times (\log Z)^3 + C_5 \times (\log Z)^4)} \quad (6)$$

3.2 수정 산정식의 계수

수정 산정식 조건에 따라 결정된 기본 함수로 Curve fitting을 사용하여 계수 C 를 결정하였으며, 자유 공중 폭발하중의 입사압의 최대값(P_s)에 대한 계수값은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Coefficients of P_s (MPa)

0.05 < Z < 0.67					
C_1	-0.066628	C_2	-2.5691	C_3	-1.4213
C_4	-0.50355	C_5	-0.094865		
0.67 < Z < 10.00					
C_1	-0.028310	C_2	-2.2324	C_3	-0.43379
C_4	1.1615	C_5	-0.42023		
10.00 < Z < 40.00					
C_1	-1.0569	C_2	-0.41582	C_3	-0.61361
C_4	0.12882	C_5	-		

이와 마찬가지로 반사압의 최대값(P_r)에 대한 계수값은 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Coefficients of P_r (MPa)

0.05 < Z < 1.05					
C_1	0.69758	C_2	-2.9928	C_3	-1.3840
C_4	-0.25645	C_5	-		
1.05 < Z < 10.00					
C_1	0.69699	C_2	-2.8246	C_3	-1.1613
C_4	2.8654	C_5	-1.2088		
10.00 < Z < 40.00					
C_1	-0.24954	C_2	-1.3806	C_3	-
C_4	-	C_5	-		

입사압과 반사압에 의한 충격량은 각각을 폭약의

TNT 등가량의 세제곱근으로 나눈 값($I_s/W^{1/3}$, $I_r/W^{1/3}$)으로 계산되며, 이에 대한 계수값은 각각 <Table 3>, <Table 4>와 같다.

<Table 3> Coefficients of $I_s/W^{1/3}$ (MPa/kg^{1/3})

0.05 < Z < 0.79					
C_1	0.69758	C_2	-2.9928	C_3	-1.3840
C_4	-0.25645	C_5	-		
0.79 < Z < 3.99					
C_1	0.69699	C_2	-2.8246	C_3	-1.1613
C_4	2.8654	C_5	-1.2088		
3.99 < Z < 40.00					
C_1	-0.24954	C_2	-1.3806	C_3	-
C_4	-	C_5	-		

<Table 4> Coefficients of $I_r/W^{1/3}$ (MPa/kg^{1/3})

0.05 < Z < 40.00					
C_1	-0.25256	C_2	-1.3067	C_3	0.22166
C_4	-0.063474	C_5	-		

이와 마찬가지로, 압력의 도달 시간과 지속시간도 각각을 폭약의 TNT 등가량의 세제곱근으로 나눈 값($T_a/W^{1/3}$, $T_o/W^{1/3}$)으로 계산되며, 이에 대한 계수값은 각각 <Table 5>, <Table 6>과 같다.

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

0.05 < Z < 0.71					
C_1	-0.24704	C_2	2.1318	C_3	0.99500
C_4	0.61033	C_5	0.18836		
0.71 < Z < 10.00					
C_1	-0.27471	C_2	1.8687	C_3	0.19437
C_4	-0.67341	C_5	0.24074		
10.00 < Z < 40.00					
C_1	0.069208	C_2	1.3812	C_3	-0.093519
C_4	-	C_5	-		

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

0.14 < Z < 0.75					
C_1	0.66547	C_2	6.0191	C_3	8.2785
C_4	3.5900	C_5	-		
0.75 < Z < 1.15					
C_1	0.25418	C_2	0.24840	C_3	-5.3442
C_4	55.310	C_5	-		
1.15 < Z < 2.93					
C_1	0.23966	C_2	0.84271	C_3	-11.795
C_4	45.212	C_5	-47.224		
2.93 < Z < 40.00					
C_1	0.084367	C_2	1.0610	C_3	-0.92091
C_4	0.50765	C_5	-0.10921		

또한, 압력이 도달할 때의 압력과의 속도(U)에 대한 계수값은 <Table 7>과 같다.

<Table 7> Coefficients of U (m/ms)

0.05 < Z < 1.16					
C_1	0.0052658	C_2	-1.0266	C_3	-0.23754
C_4	0.14415	C_5	0.073166		
1.16 < Z < 10.00					
C_1	0.011060	C_2	-1.0765	C_3	0.50854
C_4	0.48259	C_5	-0.37621		
10.00 < Z < 40.00					
C_1	-0.42546	C_2	-0.025850	C_3	-
C_4	-	C_5	-		

3.3 기존 방정식과 수정 산정식의 비교

본 논문에서 제안한 수정된 산정식의 정확성을 검증하기 위하여 기존 방정식인 Kingery-Bulmash 방정식과 비교하여 오차를 파악하였다. 전 구간에서 충분한 비교 데이터를 확보하기 위해 환산거리 0.05~40m/kg^{1/3} 구간의 총 500개의 지점에서 비교 하였으며, 그 결과는 <Table 8>과 같다.

〈Table 8〉 Comparison modified equation with Kingery-Bulmash equation (Error: %)

Z	P_s	P_r	$I_s/W^{1/3}$	$I_r/W^{1/3}$	$T_a/W^{1/3}$	$T_o/W^{1/3}$	U
0.05	1.00	-0.62	-0.02	0.01	-0.97	-	0.74
0.0507	0.85	-0.38	-0.02	0.01	-0.82	-	0.62
0.0514	0.7	-0.18	-0.02	0.01	-0.67	-	0.51
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
38.9426	-0.54	-0.46	0.35	-0.01	0.39	-0.18	-0.48
39.4678	-0.70	-0.56	0.42	-0.01	0.46	-0.25	-0.50
40	-0.89	-0.65	0.51	-0.01	0.06	-0.32	-0.53
Max	1.00	0.76	0.78	0.01	0.72	0.88	0.74
Min	-0.89	-0.95	-0.56	-0.01	-0.97	-0.99	-0.85
Average	0.29	0.20	0.08	0.01	0.15	0.23	0.18

<Fig. 6>에서 볼 수 있듯이 파라메타의 값은 환산거리의 범위에 따라 차이가 매우 크기 때문에, <Table 8>에서는 환산거리와 결과값을 골고루 비교하기 위하여 환산거리의 로그값을 500개로 등분하였다. 전 범위의 환산거리에서 기존식과 비교한 결과, 모든 파라메타의 오차는 $\pm 1\%$ 이하임을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 자유 공중 폭발의 다양한 산정식에 대해 알아보았으며, 각 방정식에 따라 결과의 차이가 있음을 확인하였다. 또한, 여러 폭발하중 산정식 중 가장 보편적으로 사용되는 Kingery-Bulmash 방정식의 문제점을 인식하고, 이를 개선하고자 기존의 식을 바탕으로 하는 수정 산정식을 제안하였다.

본 논문에서 제안하는 수정 산정식은 Curve fitting을 활용하여 기존 Kingery-Bulmash 방정식의 계산과정을 단축시켰으며, 각 파라메타의 계산에 사용되는 계수의 수를 5개 이하로 감소시켰다. 이어, 수정 산정식의 정확성을 검증하기 위하여 모든 환산거리 범위에 대해 기존식과 결과를 비교하였다. 총 500개의 지점에서 결과값을 비교하였으며, 기존식과 수정 산정식은 1% 이하의 오차율을 가짐을 확인하였다.

본 논문에서 제안하는 수정 산정식은 기존의 방정식으로부터 기본 함수 형태를 변경하여 세워진 방정식으로, 기존의 산정식과 마찬가지로 이론적인 내용이 포함되지 않은 한계점이 있다. 그러나 가장 보편적으로 사용되는 Kingery-Bulmash 방정식과 비교하여, 더욱 간단한 계산절차와 계산식으로부터 동일한 결과를 얻을 수 있다는 점에서 기존식을 보완하고 대체할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(16AUDP-B100343-02)에 의해 수행되었습니다.

References

1. H. Kim, H. Ahn, J. Ahn, "Erosion Criteria for the Blast Analysis of Reinforcement Concrete Members", Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure and Construction Section, 30(3), pp21-28, 2014
2. K. Lee, Z. Huque, D. Jeon, S. Han, "The Development of Impact Force Model of

- Large Commercial Aircraft Considering the Fuel Mass Effect", Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure and Construction Section, 30(8), pp19-28, 2014
3. 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
 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. Unified Facilities Criteria, "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions", UFC 3-340-02, U.S. Department of Defense, Washington D.C., 2014
 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. 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
 11. V. Karlos, G. Solomos, "Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components", EUR 26456 EN, European Commission, Italy, 2013
 - Received : November 14, 2016
 - Revised : December 12, 2016
 - Accepted : December 12, 2016