폭발해석을 위한 간략 폭발하중 제안식

전 두 진¹ · 한 상 을^{1*}

¹인하대학교 건축공학과

A Suggestion of Simplified Load Formula for Blast Analysis

Doo-Jin Jeon¹ and Sang-Eul Han^{1*}

¹Department of Architectural Engineering, Inha Univ., Incheon, 22212, Korea

Abstract

In this paper, a pressure-time history curve of blast load and Conwep model are presented, and a simplified blast load formula is suggested. Generally, a blast load are applied as a pressure-time history curve, and it is calculated by blast load formula such as Conwep model. The Conwep model which is used in most of the blast analysis is quiet difficult to calculate because of its complex process. Therefore, a simplified formula is proposed to calculate blast load by simple rational expressions and to make a simplified pressure-time history curve. In this process, a curve fitting method was used to find the simple rational expressions. The calculation results of the simplified formula have an error of less than 1% in comparison with the Conwep model. And, blast analyses using finite elements method are accomplished with the Conwep model and simplified formula for verification.

Keywords : blast load, pressure-time history curve, Conwep model, curve fitting, simplified blast load formula

1. 서 론

최근 각종 테러, 가스 폭발사고 등으로 구조물의 손상 및 인명피해가 증가함에 따라 폭발하중과 같은 특이하중에 대한 관심이 증대하고 있다. 이에 따라 국내외에서 이러한 특이하중에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며(Nystrom *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011), 주요 구조물에 방폭설계 방안을 적용하고 있는 추세이다.

폭발해석은 극히 짧은 시간에 매우 큰 하중이 작용하는 폭발하중의 특징 때문에 일반적인 정적해석으로는 해석이 어려우며 동적해석으로만 정확한 해석이 가능하다. 따라서 대부분의 폭발해석은 유한요소를 이용한 동적 비선형 해석으로 수행되고 있다. 폭발해석에서 폭발하중을 적용하는 방법은 주로 두 가지로 나뉜다. 한 가지는 폭발물을 직접 모델링하고 유체-구조체의 상호작용으로 하중을 전달하여 해석하는 방법이며 (Carriere *et al.*, 2009), 다른 한 가지는 폭발하중의

압력-시간 이력곡선을 대상 구조체에 하중으로 직접 적용하는 방법이다(Lee, 2010). 이 중에서 폭발물을 직접 모델링하는 방법은 유체 공간까지 모델링을 해야 하며, 그에 따라 요소 수가 크게 증가하고 매우 긴 해석시간이 요구된다. 따라서 많은 연구에서 폭발하중의 압력-시간 이력곡선을 이용하여 해석을 수행하고 있다.

폭발하중의 압력-시간 이력곡선은 폭발실험을 통해 얻은 실험식에 근거하여 산정되며, 이러한 산정식은 TM5-855-1과 TM5-1300등에서 제안하고 있다. 주로 폭발해석이 가능한 동적해석 프로그램에서 폭발하중의 산정을 위해 사용되는 Conwep 모델은 TM5-855-1의 식을 적용하였으며, 대부분의 폭발해석에서 사용되고 있다(Randers-Pehrson, 1997). 그러나 Conwep 모델은 매우 복잡하여 이 모델을 내장한 프로그램의 도움 없이는 다양한 연구와 실무에서 활용하는데 많은 어려움이 있으며, 이런 문제에도 불구하고 간략식에 관한 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 복잡한

* Corresponding author:

Tel: +82-32-860-7592; E-mail: hsang@inha.ac.kr
Received October 9 2015; Revised November 16 2015;
Accepted December 8 2015

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

Conwep 모델을 단순화하여 간략식을 제안하는 것을 목표로 한다.

2. 폭발하중식의 정식화

이 장에서는 폭발하중의 압력-시간 이력곡선과 Conwep 모델을 소개한 후, 간략 폭발하중 산정식을 제안하고 해석 결과를 비교하고자 한다.

2.1 폭발하중의 압력-시간 이력곡선과 Conwep 모델

Fig. 1에서 나타난 것과 같이 폭발하중은 압력이 대기압보다 높아지는 정압력 단계와 대기압보다 낮아지는 부압력 단계로 나타나며, 충격파가 도달하면 정압이 순간적으로 크게 증가하고 이후 정압의 크기가 빠르게 감소한다. 이어서 주변 대기압과 압력이 같아질 때까지 부압이 따라오게 된다. 그러나 일반적으로 폭발해석에서 부압력 단계의 영향은 무시할 수 있을 만큼 미세하기 때문에 정압력 단계만 고려한다.

폭발하중 산정을 위한 Conwep 모델은 거리, 질량, 시간, 압력의 단위로 각각 *ft*, *lb*, *ms*, *psi*를 사용하며, 환산거리 (scaled distance)를 핵심변수로 계산하게 된다.

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

여기서, Z 는 환산거리($ft/lb^{(1/3)}$)이며, R 은 폭발물로부터 대상까지 거리(ft), W 는 폭발물의 양(lb)을 의미한다. 환산 거리를 이용하여 폭발하중의 압력-시간 이력곡선에 나타나는 정압의 도달시간과 지속시간, 최대값, 총 충격량을 계산할 수 있으며, 정압의 도달시간은 다음과 같다(Randers-Pehrson, 1997).

$$T_a = 10^{(C1 + C2 \times U + C3 \times U^2 + \dots + C8 \times U^7)} \times W^{(1/3)} \quad (2a)$$

Fig. 1 Pressure-time history curve of blast load

Table 1 Coefficients for arrival time of blast load

C1	-0.0423733936826	C2	1.36456871214
C3	-0.0570035692784	C4	-0.182832224796
C5	0.0118851436014	C6	0.0432648687627
C7	-0.0007997367834	C8	-0.00436073555033

$$U = -0.80501734056 + 1.37407043777 \times \log Z \quad (2b)$$

여기서, T_a 는 정압의 도달시간(*ms*)이며, 계산에 필요한 계수들은 Table 1과 같다.

이와 마찬가지로 정압의 지속시간 T_o 는 다음과 같다.

$$T_o = 10^{(C1 + C2 \times U + C3 \times U^2 + \dots + C9 \times U^8)} \times W^{(1/3)} \quad (3a)$$

여기서, $\log Z < -0.34$ 일 때,

$$U = 0 \quad (3b)$$

Table 2 Coefficients for positive phase duration ($\log Z < -0.34$)

C1	-0.824	C2	0
C3	0	C4	0
C5	0	C6	0
C7	0	C8	0
C9	0		

$-0.34 \leq \log Z < 0.350248$ 일 때,

$$U = 0.209440059933 + 5.11588554305 \times \log Z \quad (3c)$$

Table 3 Coefficients for positive phase duration ($-0.34 \leq \log Z < 0.350248$)

C1	-0.801052722864	C2	0.164953518069
C3	0.1277888499497	C4	0.00291430135946
C5	0.00187957449227	C6	0.0173413962543
C7	0.00269739758043	C8	-0.00361976502798
C9	-0.00100926577934		

$0.350248 \leq \log Z < 0.7596678$ 일 때,

$$U = -5.06778493835 + 9.2996288611 \times \log Z \quad (3d)$$

Table 4 Coefficients for positive phase duration ($0.350248 \leq \log Z < 0.7596678$)

C1	0.115874238335	C2	-0.0297944268969
C3	0.0306329542941	C4	0.018340557407
C5	-0.0173964666286	C6	-0.00106321963576
C7	0.0056206003128	C8	0.0001618217499
C9	-0.0006860188944		

$\log Z \geq 0.7596678$ 일 때,

$$U = -4.39590184126 + 3.1524725264 \times \log Z \quad (3e)$$

Table 5 Coefficients for positive phase duration ($\log Z \geq 0.7596678$)

C1	0.50659210403	C2	0.0967031995552
C3	-0.00801302059667	C4	0.00482705779732
C5	0.00187587272287	C6	-0.00246738509321
C7	-0.000841116668	C8	0.0006193291052
C9	0		

폭발하중의 압력은 입사압과 반사압의 합으로 계산되며, 입사 각도를 고려한 정압의 최대값은 다음과 같다.

$$P_{\max} = P_{\text{inc}} \times (1 + \cos \theta - 2 \cos^2 \theta) + P_{\text{ref}} \times \cos^2 \theta \quad (4)$$

여기서, $P_{\max}$ 는 최대 정압(psi)이며, P_{inc} 와 P_{ref} 는 각각 최대 입사압과 최대 반사압이다. 이때, 최대 입사압은 다음과 같이 계산된다.

$$P_{\text{inc}} = 10^{(C1 + C2 \times U + C3 \times U^2 + \dots + C9 \times U^8)} \quad (5a)$$

$$U = -0.756579301809 + 1.35034249993 \times \log Z \quad (5b)$$

Table 6 Coefficients for peak incident overpressure

C1	1.77284970457	C2	-1.69012801396
C3	0.00804973591951	C4	0.336743114941
C5	-0.00516226351334	C6	-0.0809228619888
C7	-0.00478507266747	C8	0.00793030472242
C9	0.0007684469735		

이와 마찬가지로 최대 반사압은 다음과 같다.

$$P_{\text{ref}} = 10^{(C1 + C2 \times U + C3 \times U^2 + \dots + C10 \times U^9)} \quad (6a)$$

$$U = -0.756579301809 + 1.35034249993 \times \log Z \quad (6b)$$

Table 7 Coefficients for peak reflected overpressure

C1	2.39106134946	C2	-2.21400538997
C3	0.035119031446	C4	0.657599992109
C5	0.0141818951887	C6	-0.243076636231
C7	-0.0158699803158	C8	0.0492741184234
C9	0.00227639644004	C10	-0.00397126276058

폭발하중의 총 충격량 또한 같은 방법으로 계산되며 다음과 같다.

$$I_{\max} = I_{\text{inc}} \times (1 + \cos \theta - 2 \cos^2 \theta) + I_{\text{ref}} \times \cos^2 \theta \quad (7)$$

여기서, $I_{\max}$ 는 총 충격량($psi \cdot ms$)이며, I_{inc} 와 I_{ref} 는 각각 입사압과 반사압에 의한 충격량이다. 이때, 입사압에 의한 충격량은 다음과 같이 계산된다.

$$I_{\text{inc}} = 10^{(C1 + C2 \times U + C3 \times U^2 + \dots + C9 \times U^8)} \times W^{(1/3)} \quad (8a)$$

여기서, $\log Z < 0.30103$ 일 때,

$$U = 1.04504877747 + 3.24299066475 \times \log Z \quad (8b)$$

Table 8 Coefficients for incident impulse ($\log Z < 0.30103$)

C1	1.43534136453	C2	-0.443749377691
C3	0.168825414684	C4	0.0348138030308
C5	-0.010435192824	C6	0
C7	0	C8	0
C9	0		

$\log Z \geq 0.30103$ 일 때,

$$U = -2.67912519532 + 2.30629231803 \times \log Z \quad (8c)$$

Table 9 Coefficients for incident impulse ($\log Z \geq 0.30103$)

C1	0.599008468099	C2	-0.40463292088
C3	-0.0142721946082	C4	0.00912366316617
C5	-0.0006750681404	C6	-0.00800863718901
C7	0.00314819515931	C8	0.00152044783382
C9	-0.0007470265899		

이와 마찬가지로 반사압에 의한 충격량은 다음과 같다.

$$I_{\text{ref}} = 10^{(C1 + C2 \times U + C3 \times U^2 + C4 \times U^3)} \times W^{(1/3)} \quad (9a)$$

$$U = -0.757659920369 + 1.37882996018 \times \log Z \quad (9b)$$

Table 10 Coefficients for reflected impulse

C1	1.60579280091	C2	-0.903118886091
C3	0.101771877942	C4	-0.0242139751146

또한, 압력-시간 이력곡선에서 정압의 감쇠계수 A 는 다음의 식과 같은 충격량과 압력, 정압의 지속시간의 관계로부터 계산된다.

$$I = P \times T_o \times [A + \exp(A) - 1] / A^2 \quad (10)$$

Conwep 모델은 위와 같은 방법으로 주요 파라메타가 계산되며, 이를 통해 압력-시간 이력곡선으로 나타내 폭발해석에 활용한다.

2.2 간략 폭발하중 산정식

Conwep 모델은 실험값과 비교하여 매우 정확하여 대부분의 연구에서 사용되지만, 주요 값의 계산 시에 식들이 복잡하고 계수들이 너무 많기 때문에 다양한 연구나 실무에서 간단히 활용하거나 Conwep 모델을 내장하지 않은 프로그램으로 폭발해석을 수행하는데 어려움이 있다. 또한, Fig. 2와 같이 압력-시간 이력곡선에서 정압의 증폭이나 감쇠는 일반적으로 충격량 유지의 가정을 전제로 하여 직선으로 가정하여도 충분하다(RIST, 2012). 이때 충격량은 압력-시간 이력곡선의 면적이 된다. 따라서 간략 폭발하중 산정식의 단순화 조건은 다음과 같이 설정하였다.

Fig. 2 Simplified pressure-time history curve

- (1) 거리, 질량, 시간, 압력의 단위계는 m, kg, ms, MPa 단위를 사용한다.
- (2) 폭발하중의 주요 값들의 계산식은 환산거리를 변수로 하는 유리식으로 한다.
- (3) 변수가 되는 환산거리의 범위는 $0.2 \sim 2.0 \text{m/kg}^{(1/3)}$ 로 한다.
- (4) 각 계산식의 계수의 수는 4개 이하로 하며 각 계수는 4개의 유효숫자를 갖도록 한다.
- (5) 충격량 유지의 가정을 전제로 압력-시간 이력곡선을 직선으로 가정한다.
- (6) Conwep 모델과 간략식에 의해 계산된 결과의 오차는 10% 이내가 되도록 한다.

우선, Conwep 모델에서 주요 값들의 계산식을 살펴보면, 식 (2a), (5a), (6a), (8a), (9a)로부터 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\frac{T_a}{W^{(1/3)}} = f_{T_a}(Z) \quad (11a)$$

$$P_{inc} = f_{P_{inc}}(Z) \quad (11b)$$

$$P_{ref} = f_{P_{ref}}(Z) \quad (11c)$$

$$\frac{I_{inc}}{W^{(1/3)}} = f_{I_{inc}}(Z) \quad (11d)$$

$$\frac{I_{ref}}{W^{(1/3)}} = f_{I_{ref}}(Z) \quad (11e)$$

이는 좌변의 값들은 환산거리를 유일한 변수로 갖는 것을 의미하며, 각 값들은 환산거리에 의한 식으로 표현될 수 있다. 따라서 조건 (2)와 같이 간략식은 환산거리를 변수로 갖는 유리식으로 표현하도록 하였다. 여기서 조건 (1)과 같이 단위계는 m, kg, ms, MPa 단위를 사용하였으며, 조건 (3)과 같이 환산거리의 범위는 $0.2 \sim 2.0 \text{m/kg}^{(1/3)}$ 로 하였다. 또한, 조건 (4)와 같이 각 유리식에서 계수의 수는 4개 이하로 하며, 4개의 유효숫자를 갖도록 하였다. 따라서 유리식의 경우의 수식은 다음과 같다.

$$f_1(Z) = C_1 \times Z^2 + C_2 \times Z + C_3 \quad (12a)$$

$$f_2(Z) = C_1 \times Z^3 + C_2 \times Z^2 + C_3 \times Z + C_4 \quad (12b)$$

$$f_3(Z) = \frac{C_1}{Z + C_2} \quad (12c)$$

$$f_4(Z) = \frac{C_1 \times Z + C_2}{Z + C_3} \quad (12d)$$

$$f_5(Z) = \frac{C_1 \times Z^2 + C_2 \times Z + C_3}{Z + C_4} \quad (12e)$$

$$f_6(Z) = \frac{C_1}{Z^2 + C_2 \times Z + C_3} \quad (12f)$$

$$f_7(Z) = \frac{C_1 \times Z + C_2}{Z^2 + C_3 \times Z + C_4} \quad (12g)$$

$$f_8(Z) = \frac{C_1}{Z^3 + C_2 \times Z^2 + C_3 \times Z + C_4} \quad (12h)$$

각 값을 환산거리를 변수로 하여 나타낸 그래프에 가장 적합한 유리식을 찾기 위하여 곡선 적합(curve fitting) 방식을 적용하였으며, Levenberg-Marquardt 알고리즘을 사용하였다. Levenberg-Marquardt 알고리즘 방법은 Gradient descent 방법과 Gauss-Newton 방법이 결합된 형태로, 안정적으로 해를 찾을 수 있으며 비교적 빠르게 해에 수렴하기 때문에 대부분의 비선형 최소자승문제에 사용된다. 각 그래프에 곡선 적합 방식을 적용한 결과는 다음과 같다.

Fig. 3 $T_a/W^{(1/3)}$ - Z interaction curve Fig. 6 $I_{inc}/W^{(1/3)}$ - Z interaction curve Fig. 4 P_{inc} - Z interaction curve Fig. 7 $I_{ref}/W^{(1/3)}$ - Z interaction curve Fig. 5 P_{ref} - Z interaction curve

각 그래프를 살펴보면, 환산거리가 증가할수록 정압의 도달시간($T_a/W^{(1/3)}$)은 증가하고, 최대 입사압(P_{inc})과 최대 반사압(P_{ref}), 반사압에 의한 충격량($I_{ref}/W^{(1/3)}$)은 감소하는

것을 알 수 있다. 그러나 입사압에 의한 충격량($I_{inc}/W^{(1/3)}$)은 환산거리 약 $0.8\text{m/kg}^{(1/3)}$ 전후에 따라 두 가지 형태의 그래프로 나뉘는 현상을 보인다. 따라서 환산거리 $0.8\text{m/kg}^{(1/3)}$ 을 기준으로 나누어 두 개의 식으로 표현하였다. 각 계산식은 모두 최대 오차가 1% 미만으로 조건 (6)을 만족하며, 전 구간에서 매우 일치하는 결과를 보인다. 이때의 정압의 도달시간($T_a/W^{(1/3)}$)의 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{T_a}{W^{(1/3)}} = C_1 \times Z^3 + C_2 \times Z^2 + C_3 \times Z + C_4 \quad (13)$$

Table 11 Coefficients for $T_a/W^{(1/3)}$

0.2 ≤ Z < 0.8			
C1	0.05395	C2	0.3778
C3	0.09957	C4	0.003146
0.8 ≤ Z ≤ 2.0			
C1	-0.05014	C2	0.6201
C3	-0.09687	C4	0.05867

또한, 최대 입사압(P_{inc})은 다음과 같이 계산된다.

$$P_{inc} = \frac{C_1}{Z^3 + C_2 \times Z^2 + C_3 \times Z + C_4} \quad (14)$$

Table 12 Coefficients for P_{inc}

$0.2 \leq Z < 0.8$			
C1	1.942	C2	0.7656
C3	0.3162	C4	0.02512
$0.8 \leq Z \leq 2.0$			
C1	16.39	C2	23.80
C3	-11.50	C4	4.237

최대 입사압과 마찬가지로, 최대 반사압(P_{ref})은 다음과 같이 계산된다.

$$P_{ref} = \frac{C_1}{Z^3 + C_2 \times Z^2 + C_3 \times Z + C_4} \quad (15)$$

Table 13 Coefficients for P_{ref}

$0.2 \leq Z < 0.8$			
C1	5.300	C2	-0.1431
C3	0.1810	C4	-0.004876
$0.8 \leq Z \leq 2.0$			
C1	5.575	C2	0.3634
C3	-0.4965	C4	0.2472

입사압에 의한 충격량($I_{inc}/W^{(1/3)}$)은 $0.2 \leq Z < 0.8$ 일 때, 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{I_{inc}}{W^{(1/3)}} = \frac{C_1 \times Z^2 + C_2 \times Z + C_3}{Z + C_4} \quad (16a)$$

또한, $0.8 \leq Z \leq 2.0$ 일 때, 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{I_{inc}}{W^{(1/3)}} = \frac{C_1 \times Z + C_2}{Z^2 + C_3 \times Z + C_4} \quad (16b)$$

Table 14 Coefficients for $I_{inc}/W^{(1/3)}$

$0.2 \leq Z < 0.8$			
C1	0.3045	C2	-0.1146
C3	0.04532	C4	-0.04603
$0.8 \leq Z \leq 2.0$			
C1	0.1845	C2	-0.1254
C3	-0.6729	C4	0.01244

그리고 반사압에 의한 충격량($I_{ref}/W^{(1/3)}$)은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{I_{ref}}{W^{(1/3)}} = \frac{C_1 \times Z + C_2}{Z^2 + C_3 \times Z + C_4} \quad (17)$$

Table 15 Coefficients for $I_{ref}/W^{(1/3)}$

$0.2 \leq Z < 0.8$			
C1	0.3901	C2	0.1806
C3	0.02167	C4	-0.002467
$0.8 \leq Z \leq 2.0$			
C1	0.3784	C2	0.2418
C3	0.1266	C4	-0.01713

이때, 폭발 압력의 입사 각도를 고려한 최대 정압(P_{max})과 총 충격량(I_{max})은 식 (4), (7)과 같이 계산할 수 있다. 마지막으로 정압의 지속시간(T_o)은 충격량 유지의 가정을 통해 다음과 같이 계산된다.

$$T_o = \frac{2 \times I_{max}}{P_{max}} \quad (18)$$

최종적으로, 간략 폭발하중 산정식은 다음과 같다.

$$T_a \leq t \leq (T_a + T_o) \text{ 일 때,}$$

$$P = P_{max} - \frac{P_{max}}{T_o} \times (t - T_a) \quad (19)$$

여기서, t 는 폭발이 일어난 후의 시간이다.

2.3 Conwep 모델과 간략식의 비교

이 장에서는 간략 폭발하중 산정식의 검증을 위해 같은 대상에 Conwep 모델과 간략식을 각각 적용하여 비교하였다. 해석 프로그램은 폭발해석이 가능한 동적 비선형 유한요소 프로그램인 LS-Dyna를 사용하였다. 해석 대상은 크기 $10\text{m} \times 10\text{m} \times 0.2\text{m}$ 의 판형이며, 네 모서리 모두 고정단으로 가정하였고, 유한요소해석을 위해 $100 \times 100 \times 4$ 개의 요소로 나누었다.

Fig. 8 Plate model for analysis

간략식의 오차가 가장 큰 구간의 폭발하중을 비교하기 위하여 폭발하중의 환산거리를 0.2, 0.8, 2.0m/kg^(1/3)의 3가지 경우로 가정하였다. 폭발물의 위치는 대상의 중심으로부터 5m 떨어진 위치로 가정하였으며, 환산거리에 따라 폭발물의 양을 결정하였다. 환산거리가 0.2m/kg^(1/3)일 때 해석 대상의 중심에 작용하는 폭발하중은 다음과 같다.

Fig. 9 Blast load at the center($Z=0.2\text{m/kg}^{(1/3)}$)

폭발하중의 경우 환산거리에 따라 하중 크기의 차이가 매우 크기 때문에 일정 수준의 변위를 얻기 위해 해석 모델의 물성은 환산거리에 따라 임의로 조절하여 가정하였으며, 가정한 물성은 다음과 같다.

Table 16 Material of plate model

Z [m/kg ^(1/3)]	Density [g/cm ³]	Young's Modulus [MPa]	Poisson's Ratio	Yield Strength [MPa]
0.2	7.85	200000	0.3	400
0.8	0.26	6667	0.3	13
2.0	0.04	1000	0.3	2

각각의 하중에 따른 영향을 비교하기 위해 판의 중심과 중심에서 2m, 4m 떨어진 지점의 변위를 측정하고, 진동하는

Fig. 10 Displacement of plate($Z=0.2\text{m/kg}^{(1/3)}$)

Fig. 11 Displacement of plate($Z=0.8\text{m/kg}^{(1/3)}$)

Fig. 12 Displacement of plate($Z=2.0\text{m/kg}^{(1/3)}$)

변위 위상차의 평균으로 수렴 변위를 예측하였다.

폭발하중으로 Conwep 모델과 간략식을 각각 적용하여 변위를 비교하였을 때, 환산거리가 0.2m/kg^(1/3)일 경우 1% 미만의 오차를 보였다. 또한, 환산거리가 0.8, 2.0m/kg^(1/3)인 경우 각각 약 3~4%, 5~6%정도의 오차를 보였다. 이를 통해

Table 17 Displacement of plate

$Z=0.2\text{m/kg}^{(1/3)}$			
	Center	2m from center	4m from center
Conwep	-982mm	-737mm	-236mm
Simplified	-978mm	-736mm	-236mm
Error	0.41%	0.14%	0.00%
$Z=0.8\text{m/kg}^{(1/3)}$			
	Center	2m from center	4m from center
Conwep	-1058mm	-827mm	-278mm
Simplified	-1031mm	-802mm	-267mm
Error	2.55%	3.02%	3.96%
$Z=2.0\text{m/kg}^{(1/3)}$			
	Center	2m from center	4m from center
Conwep	-918mm	-744mm	-261mm
Simplified	-863mm	-708mm	-247mm
Error	5.99%	4.84%	5.36%

제안된 간략 폭발하중 산정식은 Conwep 모델과 비교하여 상당히 신뢰할 만한 수준의 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 일반적으로 폭발해석에 사용되는 폭발하중의 압력-시간 이력곡선과 폭발하중 산정식인 Conwep 모델에 대하여 살펴보았으며, 이를 단순화하여 계산할 수 있는 간략 폭발하중 산정식을 제안하였다.

Conwep 모델은 거리, 질량, 시간, 압력의 단위로 각각 *ft*, *lb*, *ms*, *psi*를 사용하며, 환산거리를 핵심변수로 폭발하중의 압력-시간 이력곡선의 주요 값들을 계산하는데, 그 계산 과정이 매우 복잡하여 Conwep 모델이 내장되어 있지 않은 다양한 해석 프로그램에서 사용하기 어려워 다양한 연구와 실무에서 활용하기 까다로운 단점이 있다. 그러나 본 연구에서 제안하는 간략식은 더욱 일반적으로 사용되는 *m*, *kg*, *ms*, *MPa*의 단위를 사용하였으며, 폭발하중의 압력-시간 이력곡선을 단순화하고 필요한 주요 값들의 계산식을 간략하게 하여 보다 간편하게 폭발하중을 산정할 수 있도록 하였다. 제안된 간략식에서 주요 값의 계산은 모두 환산거리를 변수로 갖는 유리식으로 표현하였으며, 계산 값은 Conwep 모델과 1% 미만의 오차를 보였다. 이어서, 실제 유한요소를 이용한 폭발해석에 적용하여 해석 대상의 변위를 비교한 결과, 환산거리가 $0.2\text{m/kg}^{(1/3)}$ 일 때 1%미만의 오차를 보이며 매우 정확한 결과를 보였다. 또한, 환산거리가 $0.8\text{m/kg}^{(1/3)}$ 인 경우에는 약 3~4%정도의 오차를 보이며 상당히 신뢰할 만한 결과를 보였고, $2.0\text{m/kg}^{(1/3)}$ 의 환산거리에서는 약 5~6%정도의 오차를 보였다. 실제 환산거리 $2.0\text{m/kg}^{(1/3)}$ 에 해당하는 폭발하중은 매우 작으며, 주로 폭발해석에서는 낮은 범위의 환산거리가 사용된다는 점을 감안하였을 때, 본 연구에서 제안하는 간략 폭발하중 산정식은 다양한 연구와 실무에서 긍정적인 결과를 얻을 것이라 판단된다.

본 연구에서는 Conwep 모델과의 비교만 이루어졌으며, 이어지는 후속 연구에서는 다른 다양한 폭발하중 산정식들과 비교를 통해 정확성을 검증하자 한다.

감사의 글

본 연구는 인하대학교의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Bounds, W.L.** (2010) *Design of Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities*, ASCE, American Society of Civil Engineers, Virginia.
- Carriere, M., Heffernan, P.J., Wight, R.G., Braimah, A.** (2009) Behaviour of Steel Reinforced Polymer (SRP) Strengthened RC Members under Blast Load, *Can. J. Civil Eng.*, 36, pp.1356~1365.
- Department of the Army** (1986) *Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons*, TM 5-855-1, Headquarters, Department of the Army.
- Kim, H.S., Choi, H.B.** (2015) Damage Assessment of Reinforced Concrete Column under Combined Effect of Axial Load and Blast Load by Using P-M Interaction Diagram, *J. Arch. Inst. Korea, Struct. & Constr. Sect.*, 27(10), pp.47~54.
- Kim, H.S., Lee, J.Y.** (2011) An Evaluation of Blast Resistance Performance of RC Columns by Using P-M Interaction Diagram, *J. Arch. Inst. Korea, Struct. & Constr. Sect.*, 31(4), pp.13~20.
- Kim, H.S., Park, J.P.** (2010) An Evaluation of Blast Resistance Performance of RC Columns According to the Shape of Cross Section, *J. Comput. & Struct. Eng. Inst. Korea*, 23(4), pp.387~394.
- Lee, K.K.** (2010) Evaluation of Residual Capacity of Steel Compressive Members Under Blast Load, *J. Arch. Inst. Korea, Struct. & Constr. Sect.*, 26(10), pp.37~44.
- Lee, K.K., Kim, T.J., Kim, E.S., Kim, J.K.** (2007) Behavior of Steel Columns Subjected to Blast Loads, *J. Arch. Inst. Korea, Struct. & Constr. Sect.*, 23(7), pp.37~44.
- Livermore Software Technology Corporation (LSTC)** (2007) *LS-DYNA Keyword User's Manual, version 971*, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA.
- Nystrom, U., Gylltoft, K.** (2009) Numerical Studies of the Combined Effects of Blast and Fragment Loading, *Int. J. Impact Eng.*, 36, pp.995~1005.
- Randers-Pehrson, G., Bannister, K.** (1997) *Airblast Loading Model for DYNA2D and DYNA3D*, ARL-TR-1310, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD.
- RIST** (2012) *Protection of Buildings Against Explosions*, Goomibook, Seoul, pp.44~64.

요 지

본 논문에서는 폭발해석에서 주로 사용되는 폭발하중의 압력-시간 이력곡선과 폭발하중 산정식인 Conwep 모델을 소개하고, 이를 더욱 간편하게 계산할 수 있는 간략 폭발하중 산정식을 제안한다. 폭발해석에서 폭발하중은 일반적으로 압력-시간 이력곡선의 형태로 적용되며, 그에 대한 주요 값들은 폭발하중 산정식에 의해 계산된다. 대부분의 폭발해석에서 사용되는 폭발하중 산정식인 Conwep 모델은 환산거리(scaled distance)를 핵심변수로 하여 계산되는데, 그 계산 과정이 매우 복잡한 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 환산거리를 변수로 갖는 간략한 유리식을 사용하여 주요 값들을 계산하고, 단순화된 압력-시간 이력곡선으로 폭발하중을 산정할 수 있도록 제안하였다. 간략식을 찾는 과정에서 Conwep 모델의 계산 결과를 바탕으로 곡선 적합(curve fitting) 방식이 사용되었으며, 제안된 간략식에 의한 주요 값의 계산 결과는 Conwep 모델과 비교하여 1% 미만의 오차를 갖는다. 또한, 유한요소를 이용한 폭발해석에 적용하였으며 Conwep 모델을 적용한 결과와 비교를 통해 검증하였다.

핵심용어 : 폭발하중, 압력-시간 이력곡선, Conwep 모델, 곡선 적합, 간략 폭발하중 산정식