

D/B기반 외부폭발에 의해 기둥에 작용하는 폭압이력 예측 모델

성 승 훈^{1†} · 차 정 민¹

¹국방과학연구소 미사일연구실 선임연구원

Prediction Model of Blast Load Acting on a Column Component Under an External Explosion Based on Database

Seung-Hun Sung^{1†} and Jeong-min Cha¹

¹Senior Researcher, The 1st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, 34060, Korea

Abstract

A prediction model is proposed for a blast load acting on a column component because of an external explosion. The model can predict the pressure-time histories acting on a column using the fitting curves established from a database composed of finite-element (FE) analysis results. To this end, 70 numerical simulations using the commercial software AUTODYN were performed by changing the column width. To confirm the performance of the proposed model, pressure-time histories estimated from an existing empirical formula and the proposed model were compared based on the FE analysis results. It was verified that the proposed model can more precisely predict the pressure-time histories compared with the existing model.

Keywords : blast wave, clearing effect, column, kingery-bulmash

1. 서론

테러 또는 예기치 못한 폭발사고 등에 의해 발생한 폭발하중은 건축구조물의 부분적 혹은 전체적인 파손을 야기한다. 이를 최소화하기 위해 주요 방호시설 혹은 폭발사고에 노출된 건축구조물에 대한 방호설계는 필수적이다. 미 방호설계 기준(Dalton *et al.*, 2008)은 건축구조물을 구성하는 구조부재 단위의 방호설계 방법을 활용하며, 방호설계센터에서 제시한 구조부재의 지점 회전각에 따라 피해기준을 산정한다(Center, 2008).

건축구조물은 기둥, 보, 슬래브, 벽체 등으로 구성된다. 이중 기둥은 프레임 형태 건축구조물의 평형상태를 유지하는 주요 부재이다. 즉, 기둥의 파손은 건축구조물의 연쇄붕괴 발생의 주요인으로서 작용한다. 따라서 폭발하중 하에서 기둥의 거동 예측은 매우 중요하며, 이를 위해 기둥에 작용하는 폭압이력의 정확한 예측이 필요하다. 기둥에 작용하는 폭압이력의

정확한 예측을 위해서는 clearing time에 대한 이해가 필요하다. 외벽이 존재하는 건축구조물에 평면파 형태의 입사파가 도달할 때, 건축구조물 표면에 작용시 반사파로 발생한다. 이때, 반사파에 비해 상대적으로 작은 과압의 저밀도파(Rarefaction wave)가 코너에서 안쪽으로 전파되며 건축구조물 표면에 작용하는 반사파를 이선형(bilinear) 형태로 감소시킨다(Department of the Army, 1959; Norris *et al.*, 1959). 이때, 불연속점이 발생한 시각을 clearing time 이라고 하며, 이러한 현상은 기둥에 작용하는 반사파에도 동일한 원인으로 작용하여 발생한다.

기존의 문헌에는 clearing time 예측을 위한 경험식에 대한 연구가 진행됐다. Norris 등(1959) 및 TM 5-856-1(Department of the Army, 1959)은 shock tube 테스트 기반으로 clearing time 을 예측하는 경험식을 제공한다. Kinney와 Graham(1985) 및 Smith와 Hetherington(1994)은 Norris 등이 제시한 식과 유사한 형태의 식을 제시했다. Norris 등(1959) 및 TM 5-856-1 (Department of the Army, 1959)은 반사파 발생 구역의 음속,

[†]Corresponding author:

Tel: +82-42-821-0913; E-mail: sshgns@add.re.kr

Received April 27 2022; Revised July 19 2022;

Accepted July 22 2022

© 2022 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.

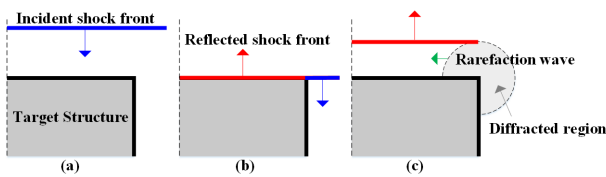


Fig. 1 Clearing effect

Kinney와 Graham(1985)는 반사파 발생 구역의 저밀도파의 속도, Smith와 Hetherington(1994)는 충격파 속도를 활용해 clearing time을 예측한다. 미 방호설계 기준(Dalton *et al.*, 2008)에는 대체된 수식을 활용해 반사파 발생 구역의 음속을 기반으로 계산한다.

그러나 Rickman과 Murrell(2007), Tyas 등(2011), Rigby 등(2014; 2017)은 상기와 같은 경험식 기반의 clearing time 예측식의 정확도에 대한 문제점을 제시했다. 이를 확인하고자 Rickman과 Murrell(2007)은 총 23번의 실험을 수행했다. Tyas 등(2011)은 Rickman과 Murrell(2007)과 유사한 방식으로 실험을 통해 clearing time의 정확도를 확인했다. Rigby 등(2014)은 유한요소해석을 통해 미 방호설계 기준(Dalton *et al.*, 2008)에 제시된 식의 특정 범위에서 부정확함을 확인했다. Rigby 등(2017)은 상기와 같은 연구결과를 기반으로 경험식 기반의 clearing time 예측식이 부정확하다는 결론을 내렸다. 또한, Shin과 Whittaker(2019)은 유한요소해석 결과를 기반으로 근접 폭발 시 경험식 기반의 clearing time 예측식이 부정확함을 확인했다.

Clearing time의 부정확한 예측은 기둥에 작용하는 반사파 충격량의 오차를 발생시키고, 이는 폭발하중에 의한 기둥의 거동 예측에 큰 오차를 야기한다. 과도한 폭발하중의 예측은 설계 시 경제성을 떨어뜨리고, 과소한 폭발하중의 예측은 건축물의 부실한 방호설계의 원인이 된다. 앞서 언급했듯 경험식 기반의 clearing time 예측식의 부정확성을 보완하기 위해 본 연구에서는 기존의 경험식기반 간략화된 폭발하중 예측식의 clearing time을 개선하는 연구를 진행한다. 이를 위해 기둥의 두께 및 환산이격거리(scaled distance)를 달리하여 유한요소해석을 다수 수행한다. 환산이격거리란, 폭발지점으로부터 폭풍파가 도달하는 이격거리를 화약량의 1/3제곱으로 나눈 값이다. 유한요소해석 결과를 D/B(database)로 구축하고, 이 결과와 유한요소해석 결과를 통해 계산된 반사파 충격량을 일치시키는 clearing time을 예측하는 보간식을 개발한다. 개발된 모델의 적용가능성 확인을 위해 D/B에서 활용된 해석결과 외의 유한요소해석 결과와 개발된 모델로부터 예측한 폭압이력에 대한 비교/검증을 수행한다. 즉, 기존의 예측식은 간략한 수식으로 clearing time을 예측하였으나, 본 연구에서 제안하는

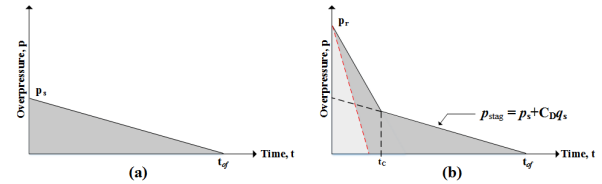


Fig. 2 Simplified pressure-time history considering clearing effect

방법론은 다수의 유한요소해석 결과를 기반으로 획득된 보간식을 통해 유한요소해석 결과와 유사한 결과를 산출할 수 있다.

2. Clearing 현상

Fig. 1은 clearing 현상이 발생하는 과정을 도식한 것이다. 평면과 형태의 입사파가 발생하여 건축구조물에 작용하면, 입사파는 반사파로 발생된다(Fig. 1b). 반면, 그 옆을 지나가는 입사파는 현재 상태로 건축구조물의 측면을 지나게 된다. 이때, 코너에는 Fig. 1(b)와 같이 회절영역이 발생하며 저밀도파가 생성되고, 이는 건물 안쪽으로 전파된다. 이러한 저밀도파에 의해 건축구조물 표면에 작용하는 반사파는 이선형(bi-linear) 형태로 감소되게 되고, 이를 clearing 현상이라고 한다.

이러한 clearing 현상은 반사파의 충격량을 감소시키기 때문에 일반적인 반사파 모델을 적용하여 폭압이력을 예측할 때, 둘 간의 오차를 야기한다. 이는 건축구조물의 코너뿐만 아니라, 프레임 형태 건축구조물의 기둥에도 동일한 원인으로 발생한다. 따라서 clearing time의 정확한 예측을 통해 경제적인 방호설계를 수행할 필요가 있다.

3. Clearing 현상을 고려한 간략화된 폭발하중

Clearing 현상에 의해 감소된 반사파는 Fig. 2와 같이 간략화할 수 있다. Fig. 2(a)는 삼각파로 간략화된 평면과 형태의 입사파를 나타내며, Fig. 2(b)는 clearing 현상이 발생한 반사파와 그렇지 않은 반사파를 나타낸다. 즉, 저밀도파가 이동함에 따라 반사파는 clearing time(t_c)에서 정체압(P_{stag} , stagnation pressure)으로 감소하며, 정체압은 저밀도파가 모두 이동한 후 사라진다. 이때, 정체압은 입사압(p_s), 항력계수(C_D), 동압(q_s)의 관계식으로 계산된다. 만약, clearing time이 반사압이 사라지는 시점보다 늦다면, Fig. 2(b)의 붉은선과 같은 형태의 반사파 특성을 지닌다.

4. 경험식 기반 clearing time 예측식

2장에서 기술된 clearing을 고려한 간략화된 폭발하중은 Fig. 2에서 확인할 수 있듯, clearing time(t_c), 반사파의 최대압

(pr), 입사압(p_s), 항력계수(C_D), 동압(q_s), 입사파 소멸시간(t_{of})을 활용해 생성할 수 있다. 반사파의 최대압, 항력계수 및 입사파 소멸시간이 정해지면, 나머지 변수들은 clearing time에 종속된다. 다시 말해, clearing time은 폭발하중의 충격량과 직접적인 관련이 있다. 따라서 이를 정확히 예측해야 건축구조물의 부재단위 거동 예측에 신뢰성이 확보된다. 기존의 문헌에는 clearing time 예측을 위한 경험식에 대한 연구가 진행됐다. Norris 등(1959) 및 TM 5-856-1(Department of the Army, 1959)은 반사파 발생 구역의 음속, Kinney와 Graham(1985)는 반사파 발생 구역의 저밀도파의 속도, Smith와 Hetherington(1994)는 충격파 속도를 활용해 clearing time을 예측하는 식을 제시했다. 미방호설계 기준(Dalton *et al.*, 2008)에는 대체된 수식을 활용해 반사파 발생 구역의 음속을 기반으로 계산한다. 각각에 대한 clearing time 계산식은 Table 1과 같다.

미방호설계 기준(Dalton *et al.*, 2008)에 활용되는 등가 단자유도 모델 기반의 구조부재 거동 예측 방법(Center, 2008; Liu *et al.*, 2018; Morison, 2006; Nartu and Kumar, 2020; Oswald and Bazn, 2014)은 구조부재 중심에 작용하는 폭압이력이 부재 전체에 등분포로 작용한다는 가정하에 유도된다. 즉, 기둥의 경우에는 Table 1에서 H가 기둥의 높이, W가 기둥의 너비가 된다.

5. 제안하는 방법론

기존 문헌(Rigby *et al.*, 2017)에서는 다수의 실험결과 및 유한요소해석 결과를 근거로, Table 1에 제시된 경험식 기반의 clearing time 예측식이 부정확하다는 결론을 내렸다. 특히, Shin과 Whittaker(2019)은 근접 폭발 시 경험식 기반의 clearing time 예측식이 부정확함을 확인했다. 앞서 언급했듯, clearing time의 부정확한 예측은 폭발하중 충격량의 부정확한 예측에 직접적 관계가 있다. 다시 말해, 이를 적용해 개활지 폭발현상에 의해 기둥에 작용하는 폭압이력 예측 시, 실제현상과 큰 오차가 발생할 것이라 사료된다.

따라서 본 연구에서는 경험식 기반 예측식에 비해 유한요소해석 결과가 참값과 유사하다(Rigby *et al.*, 2017; Shin and Whittaker, 2019)는 전제하에 clearing time의 정확도를 개선하는 새로운 방법론을 제안한다. 이를 위해 유한요소해석 D/B를 구축하고 이를 기반으로 clearing time의 정확도를 개선하는 보간식을 제시한다. 즉, 환산이격거리에 따라 clearing time을 예측하는 제안하는 방법론을 활용하여 폭압이력을 구축할 수 있으며, 이를 활용할 시 기존의 간략식들에 비해 상대적으로 유한요소해석 결과와 유사한 폭압이력을 예측할 수 있다.

Table 1 Conventional equations to predict the clearing time

	Norris <i>et al.</i> and TM 5-85-1	Kinney and Graham	Smith and Hetherington	UFC 3-340-02
Equation	$3S/c_r$	$3S/u_r$	$3S/U_s$	$4S/\{(1+S/G)c_r\}$
Parameters	c_r : sound velocity	u_r : rarefaction wave velocity	U_s : shock wave velocity	c_r : sound velocity
<p>S : minimum value between W/2 and H G : maximum value between W/2 and H</p>				

5.1 유한요소해석 D/B 기반 clearing time 예측 방법론 개요

기둥에 작용하는 폭발하중에 의한 부재의 파손은 하중의 압력과 충격량 크기에 기인한다(Dragos and Wu, 2013; Hou *et al.*, 2018). Kingery-Bulmash(K-B) 차트로 획득한 반사파 최대압력이 유한요소해석 결과와 유사하다는 전제하에(Sung and Chong, 2020), 본 연구에서는 유한요소해석으로부터 획득한 기둥 중심에 작용하는 폭압이력 충격량과의 오차를 최소화하는 clearing time을 산출하고, 다수의 해석결과를 통해 D/B를 구축하고자 한다. 이렇게 구축된 D/B로부터 보간식을 추출한 후, 이를 활용해 clearing time을 예측하는 방법론을 제안한다.

Table 1에서 경험식 기반 예측식은 크게 폭풍파 속도와 관련된 변수(저밀도파 속도, 충격파 속도 등)와 건축구조물의 형상정보(높이, 너비)와 관련된 변수에 종속적이다. 이에 근거하여, 본 연구에서는 D/B 구축을 위해 폭풍파 속도와 관련된 변수인 환산이격거리(Z: scaled distance)와 기둥의 형상정보인 단면너비를 설계변수로 하여 D/B 구축하고자 한다. 단, 기둥의 높이는 단면너비에 비해 상대적으로 큰 값으로서, clearing 현상은 기둥의 높이보다는 단면너비에 지배적일 것으로 예상되어 이를 설계변수에서 제외한다.

또한, clearing time은 동일한 단면을 지닌 기둥에 대해 환산이격거리가 커질수록 증가하고, 동일한 환산이격거리에 대해 단면너비가 커질수록 증가할 것으로 예측된다. 다시 말해, Fig 3의 형태로 D/B가 구축될 것으로 예상된다.

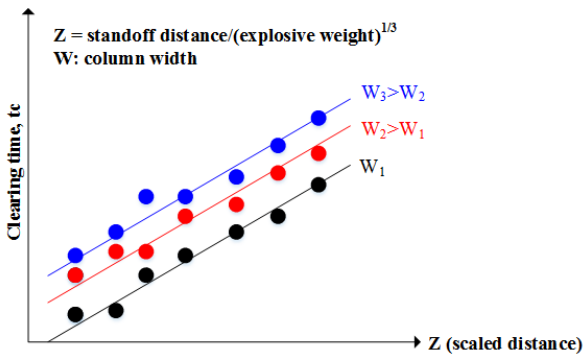


Fig. 3 Prediction of the clearing time due to the scaled distance and the column width

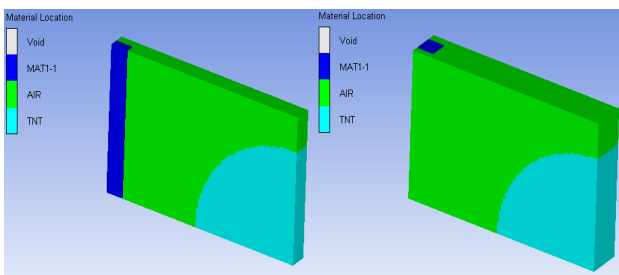


Fig. 4 Computational model for the columns (left: axisymmetric model, right: full model)

5.2 유한요소해석 모델 구성

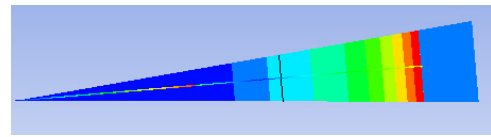
5.2.1 모델링

유한요소해석은 상용소프트웨어인 AUTODYN을 활용하여 수행했으며, 1차원 영역에서 TNT와 공기층을 모델링하였다. 이를 위해 JWL(Johes-Wilkins-Lee) 상태방정식(EOS; equation of state)을 적용했으며, JWL EOS의 변수들은 LLNL Explosive Handbook(Dobratz and Crwaford, 1985)의 값을 활용했다.

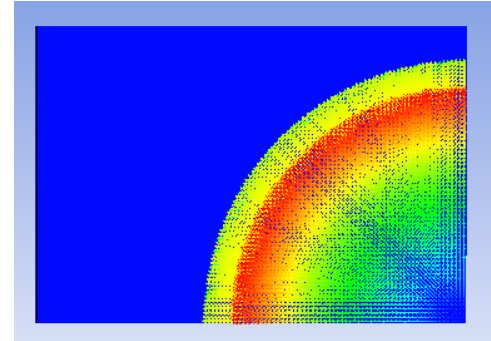
$$P = C_1 e^{-r_1 v} + C_2 e^{-r_2 v} + B v^{-(1+\omega)} \quad (1)$$

$$P = C_1 \left(1 - \frac{\omega}{r_1 v}\right) + C_2 \left(1 - \frac{\omega}{r_2 v}\right) e^{-r_2 v} + \frac{\omega e}{v} \quad (2)$$

기둥의 모델링은 해석시간의 단축을 위해 Fig. 4와 같이 축대칭으로 구성했다. 폭풍파는 Fig. 5와 같이 1D-Wedge 방법을 이용해 TNT와 공기층을 모델링하여 초기단계 해석을 수행한 후, Fig. 6과 같이 3차원 매핑(mapping)을 통해 3D 환경에 적용했다. 이러한 방법은 3D 환경에서 직접 TNT를 모델링할 때에 비해 해석시간을 단축시킬 수 있으나 크기가 정해진 공기를 모델링해야 하며 모델링된 공기층의 경계면에서 폭압이 반사될 수 있기 때문에 이를 유의하여 모델링해야 한다. 이때의 폭압은 3D 환경에서 완전연동(fully-coupled)조건을 부여하여 구조



(a) 1D-Wedge analysis



(b) 3D mapping

Fig. 5 Example of the TNT modeling

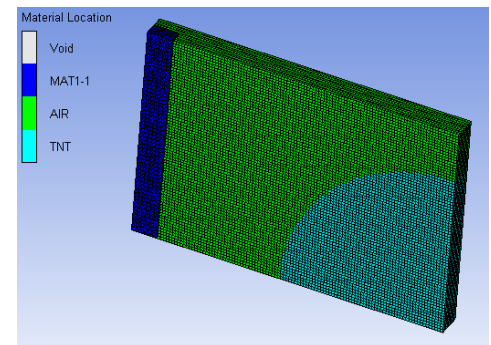


Fig. 6 Example of the 3D model

물과 상호작용하게 된다(Autodyn, 2005).

5.2.2 해석격자(mesh) 크기 결정

본 연구에서 해석격자의 크기는 수렴성 테스트에 근거하여 1D 및 3D 모두 40mm의 해석격자를 구성했다. 해석격자 크기가 40mm 이하인 경우 해석 시간만 증가되고 결과 값에는 크게 차이가 없으며, clearing time은 반사파의 최대압력과는 무관하고, 충격량에 관련된 변수이기 때문에 그 이상 해석격자의 수를 늘리는 것은 비효율적이라 판단했다.

5.3 D/B 구축

기존 문헌(Shin and Whittaker, 2019)의 유한요소해석 결과, 환산이격거리가 0.8이하일 경우에는 저밀도파의 전파속도가 일정치 않고 건축구조물의 코너에서 안쪽으로 진행됨에 따라 증가함을 확인했다. 특히, 환산이격거리가 0.4일 경우, 그 경향이 과도하게 발생했다. 또한, 환산이격거리가 0.4이하일 경우, 반사파 형태가 전형적인 지수함수 형태가 아닌 피크(peak)가

Table 2 FE analysis scenarios for D/B construction

Column width	Explosive weight(kg)	Distance (m)	Scaled distance (m/kg ^{1/3})
350mm 400mm 450mm 500mm 550mm 600mm 650mm	750	4	0.44
	750	5	0.55
	750	6	0.66
	750	7	0.77
	750	8	0.88
	750	9	0.99
	750	10	1.10
	1,000	14.5	1.45
	1,000	16.5	1.65

다수 발생하는 형상을 나타냈다.

이러한 연구결과에 근거하여 유한요소해석 수행을 위한 최소 환산이격거리를 0.44로 결정하였으며, 기둥의 파손을 고려하여 최대 환산이격거리를 1.65로 결정했다. 또한, 기둥의 너비는 일반적인 건축구조물에 활용되는 규격에 근거하여 350mm에서 650mm까지 50mm 간격으로 구성했다. 기둥높이는 설계변수에서 제외했으며 3,000mm로 고정했다. 즉, Table 2와 같이, 규격별로 총 10가지 시나리오 해석을 수행하여 총 70회의 유한요소해석을 수행했다.

5.4 D/B기반 clearing time 예측 보간식

Table 2의 시나리오 하에서 유한요소해석을 수행한 후, 이에 대한 D/B를 구축하여 보간식을 만들고자 한다. 이를 위한 D/B 구축 절차는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7의 절차에 따라 Table 2의 시나리오로서 총 70회의 유한요소해석을 수행했다. 구축된 D/B로부터 획득한 기둥 너비별 보간식은 Fig. 8과 같다. 이때, 두 개의 설계변수(환산이격거리, 기둥 너비)에 따라 두 번의 보간을 통해 clearing time을 획득할 수 있다. 환산이격거리에 대한 clearing time 예측 보간식은 2차식으로 표현했다. 본 연구에서 활용된 70회 유한요소해석 결과의 추세를 예측하기 위해서는 2차식이 적합하다고 판단했다. 하지만, 유한요소해석 결과를 점진적으로 추가 확보하여 D/B의 양이 증가할 경우, 이를 좀 더 상세히 모사할 수 있는 보간법의 활용이 필요하다.

기둥 너비 간 데이터의 보간은 선형보간을 활용한다. Fig. 9는 유한요소해석으로부터 획득된 폭풍파 이력, 가장 널리 활용되는 간편식인 Smith와 Hetherington(1994) 예측식을 활용해 구성된 폭풍파 이력, 제안하는 방법을 활용해 새롭게 구축된 폭풍파 이력을 비교한 예시이다.

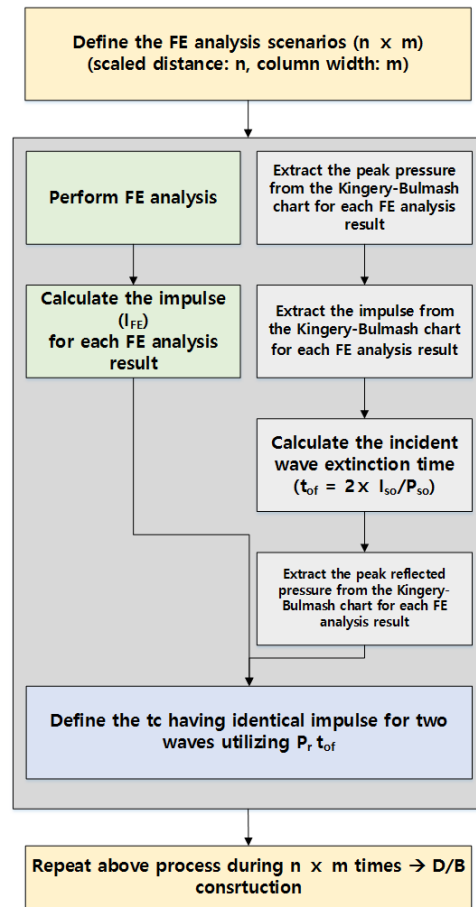


Fig. 7 D/B construction process

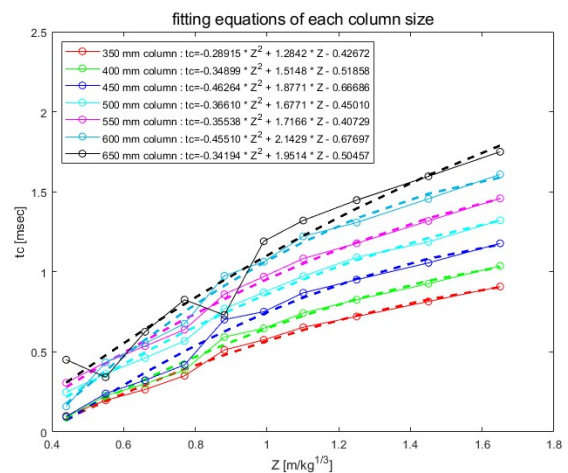


Fig. 8 Interpolation formula estimated from the constructed D/B according to the different column width

유한요소해석 결과 기준으로 Smith와 Hetherington(1994)의 clearing time 예측식을 적용해 산출한 충격량의 절대 평균 오차는 약 27.6%, 제안하는 보간식을 활용해 산출한 충격량의 절대 평균오차는 약 11.6%였다.

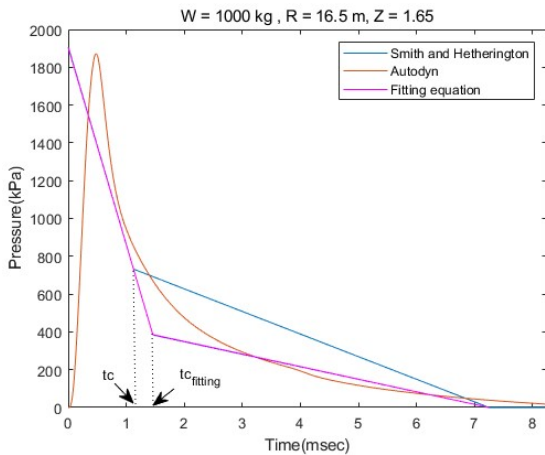


Fig. 9 Typical example of the pressure-time histories(t_c =Smith and Hetherington Method, $t_{cfitting}$ =Fitting Equation Method)

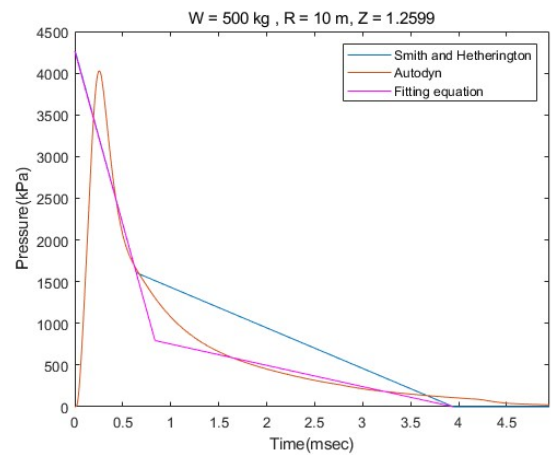


Fig. 10 Typical example of the pressure-time history(for 400mm width)

Table 3 Validation scenarios

Column width	Explosive weight(kg)	Distance (m)	Scaled distance ($m/kg^{1/3}$)
400mm	100	5	1.08
	100	10	2.15
	100	15	3.23
	300	5	0.75
	300	10	1.49
	300	15	2.24
	500	5	0.63
	500	10	1.26
450mm	750	5.5	0.61
	1000	12	1.20

6. 제안하는 방법론 검증

5장에서 보간식을 활용한 충격량 예측값이 Smith와 Hetherington(1994)의 clearing time 예측식을 적용하는 방법에 비해 유한요소해석 결과와 잘 일치함을 확인했다. 6장에서는 D/B를 구성하는 point 외의 영역에서 제안하는 방법의 오차 범위를 확인코자 총 11회의 유한요소해석을 수행했다. 유한요소해석으로부터 산출한 충격량, Smith와 Hetherington(1994) 방법론으로부터 산출한 충격량, 그리고 제안하는 방법론으로부터 산출한 충격량을 각각 비교/검증하였다.

6.1 비교/검증 연구를 위한 유한요소해석 시나리오

유한요소해석 시나리오는 다음의 Table 3과 같다. 모델링 방법 및 격자 크기 등의 해석 조건은 5.2절과 동일하게 구성했으며, D/B를 구성하지 않는 영역의 point를 획득하여 비교/검증 연구를 수행했다.

6.2 비교/검증 연구 결과

Fig. 10은 각각의 방법론(유한요소해석, Smith와 Hetherington (1994) 예측식을 활용, 제안하는 방법 활용)을 통해 획득된 시간에 대한 폭풍파 이력을 비교한 예시이다. 주황색이 유한요소해석 결과로부터 획득한 폭압이력이고, 하늘색이 Smith와 Hetherington이 제시한 예측식을 활용한 결과이며 분홍색이 제안하는 방법론을 활용해 획득한 폭압이력이다. Fig. 10의 결과처럼 Smith와 Hetherington 예측식을 활용할 경우 상대적으로 큰 충격량을 갖는 폭압이력을 산출함을 확인할 수 있다.

Table 4는 이로부터 산출한 충격량과 제안하는 보간식을 활용해 산출한 충격량을 비교한 표이다. 유한요소해석 결과 기준으로 Smith와 Hetherington(1994) 방법론은 충격량의 절대 평균오차가 약 27.5%, 제안하는 방법론은 충격량의 절대 평균 오차는 약 14.2%를 나타냈다. 이 값은 보간식에 point로 활용했던 값들의 오차가 각각 약 27.6%, 약 11.6%임을 감안할 때, 유사한 결과를 나타냄을 확인했다. 즉, 환산이격거리가 3.23, 0.63인 경우를 제외하고 모든 결과에서 제안하는 방법론이 유한요소해석 결과와 근접한 결과를 산출하고 있음이 확인됐다. 그러나 환산이격거리가 3.23, 0.63인 경우에는 제안하는 방법론의 오차가 기존의 예측식에 비해 큰 오차를 야기했는데, 이는 보간식을 산출하기 위한 D/B의 양이 부족했기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 향후 지속적인 D/B 확보를 통해 보간식의 정확도를 높일 필요성이 있다.

7. 결론

외벽으로 막혀있는 건축구조물에 평면파 형태의 입사파가 도달한 후 반사파로 발생할 때, 건축구조물의 코너로부터 안

Table 4 Validation results

Column width	Scaled distance (m/kg ^{1/3})	Estimated impulse from FE analysis (I _{FE}) (kPa-ms)	Estimated impulse utilizing Smith and Hetherington clearing time (I _r)(kPa-ms)	Estimated impulse utilizing proposed method (I _{fit})(kPa-ms)
400mm	1.08	2,396	3,646	2,973
	2.15	971	1,169	1,084
	3.23	508	616	825
	0.75	4,987	5,522	5,294
	1.49	2,070	2,986	2,269
	2.24	1,188	1,486	1,407
	0.63	6,351	6,671	7,153
450mm	1.26	3,206	4,519	3,347
	1.89	8,843	7,744	8,532
	0.61	4,087	5,988	4,124

쪽으로 반사파에 비해 상대적으로 작은 저밀도파가 전파되며 반사파를 이선형(bi-linear) 형태로 감소시키는 현상을 clearing 현상이라고 한다.

이러한 clearing 현상은 기둥 부재에도 동일한 원인으로 발생하며, 이는 기존의 K-B 차트를 활용하여 구성된 지수함수 형태의 폭압이력에 비해 상대적으로 작은 크기의 충격량을 발생시킨다. 따라서 이를 보다 정확히 예측하여 폭압이력을 구성해야 보다 경제적이고 정확도 높은 방호설계를 수행할 수 있다.

본 연구에서는 기존의 경험식 기반 clearing time 예측식의 부정확성을 개선하고자 유한요소해석 결과를 활용해 clearing time에 대한 D/B를 구성하고 이로부터 보간식을 추출하는 모델을 개발했다.

D/B 구성을 위해 총 7종류 기둥 너비에 대해 70회의 유한요소해석을 수행했다. 환산이격거리는 기존 문헌의 연구결과 및 기둥의 파손을 고려하여 0.44m/kg^{1/3}~1.65m/kg^{1/3}로 설정했다. 제안하는 모델의 성능확인을 위해 기존에 제시된 경험식 기반의 예측식과의 비교연구를 수행했으며, D/B를 구성하는 point 외의 영역에서의 예측 정확도 확인을 위해 유한요소해석 결과와의 비교/검증 연구를 추가로 수행했다.

비교/검증 연구결과, 제안하는 방법은 기존의 경험식 기반 예측식에 비해 유한요소해석 결과와 유사한 결과를 산출함을 확인했다. 제안하는 방법론의 보간식을 확보하기 위해 본 연구에서는 총 70회의 유한요소해석 결과를 활용했다. 향후, 지속적인 유한요소해석을 수행하여 D/B를 확장함으로써 평균 오차를 줄이는 방향으로 연구를 진행하고자 한다.

References

Autodyn, ANSYS (2005) Theory Manual Revision 4.3., Century Dynamics, Concord, CA.

Center, P.D. (2008) *Single Degree of Freedom Structural Response Limits for Anti-Terrorism Design*, PDC TR-06-08, Omaha, NE: US Army Corps of Engineers.

Dalton, J., Gott, J., Parker, P., McAndrew, M., Bowling, C. (2008) Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions(UFC 3-340-02), US Department of Defense, Washington, DC.

Department of the Army (1959) Design of structures to Resist of the Effects of Atomic Weapons: Weapons Effects Data, Army Technical Manual(TM 5-856-1). Washington, DC: Dept. of the Army.

Dobratz, B.M., Crawford, P.C. (1985) LLNL Explosive Handbook, Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants, Rep. No.UCRL-52997. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory.

Dragos, J., Wu, C. (2013) A New Approach to Derive Normalized Pressure Impulse Curves, *Int. J. Impact Eng.*, 62, pp.1~12.

Hou, X., Cao, S., Rong, Q., Zheng, W. (2018) A P-I Diagram Approach for Predicting Failure Modes of RPC One-Way Slabs Subjected to Blast Loading, *Int. J. Impact Eng.*, 120, pp.171~184.

Kinney, G.F., Graham, K.J. (1985) *Explosive Shocks in Air*, 2nd ed., Springer, New York.

Liu, Y., Yan, J., Huang, F. (2018) Behavior of Reinforced Concrete Beam and Columns Subjected to Blast Loading, *Def. Technol.*, 14(5), pp.550~559.

Morison, C.M. (2006) Dynamic Response of Walls and Slabs by Single-Degree-of-Freedom Analysis-a Critical Review and Revision, *Int. J. Impact Eng.*, 32(8), pp.1214~1247.

Nartu, M.K., Kumar, M.K. (2020) Blast Response of Single-Degree-of-Freedom System Including Fluid-Structure Interaction, *J. Struct. Eng.*, 147(1), pp.1~14.

Norris, C.H., Hansen, R.J., Holley, M.J., Biggs, J. M., Namyet, S., Minami, J.K. (1959) *Structural Design for Dynamic Loads*, McGraw-Hill, New York.

Oswald, C., Bazn, M. (2014) Comparison of SDOF Analysis Results to Test Data for Different Types of Blast Loaded Components, *Structures Congress*, Boston, Massachusetts, pp.117~130.

Rickman, D.D., Murrell, D.W. (2007) Development of an Improved Methodology for Predicting Airblast Pressure

- Relief on a Directly Loaded Wall, *J. Press. Vessel Technol.*, 129(1), pp.195~204.
- Rigby, S.E., Tyas, A., Bennett, T., Fay, S.D., Clarke, S.D., Warren, J.A.** (2014) A Numerical Investigation of Blast Loading and Clearing on Small Targets, *Int. J. Prot. Struct.*, 5(3), pp.253~274.
- Rigby, S.E., Tyas, A., Clarke, S.D., Razaqpur, G.** (2017) Approach to Developing Design Charts for Quantifying the Influence of Blast Wave Clearing on Target Deformation, *J. Struct. Eng.*, 143(1), 04016150.
- Shin, J., Whittaker, A.S.** (2019) Blast-Wave Clearing for Detonations of High Explosives, *J. Struct. Eng.*, 145(7), 04019049.
- Smith, P.D., Hetherington, J.G.** (1994) *Blast and Ballistic Loading of Structures*, Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Sung, S., Chong, J.** (2020) A Fast-Running Method for Blast Load Prediction Shielding by a Protective Barrier, *Def. Technol.*, 16(2), pp.308~315.
- Tyas, A., Warren, J.A., Bennett, T., Fay, S.** (2011) Prediction of Clearing Effects in Far-Field Blast Loading of Finite Targets, *Shock Waves*, 21(2), pp.111~119.

요 지

본 연구에서는 유한요소해석 D/B를 기반으로 보간식을 산출하여 개활지 폭발현상에 의해 기둥에 작용하는 폭압이력을 예측하는 모델을 개발했다. D/B 구성을 위해 7종류 기둥 너비에 대해 총 70회의 유한요소해석을 수행했다. 제안하는 방법의 성능확인을 위해, 기존에 제시된 경험식 기반의 예측식과의 비교연구를 수행했다. 또한, D/B를 구성하는 point 외의 영역에서의 예측 정확도 확인을 위해 유한요소해석 결과와의 비교/검증 연구를 추가로 수행했다. 제안하는 방법은 기존의 경험식 기반 예측식에 비해 유한요소해석 결과와 유사한 결과를 산출함을 확인했다.

핵심용어 : 폭풍파, 클리어링 효과, 기둥, kingery-bulmash