

실내폭발 효과를 포함한 폭발하중 산정

김성환¹ · 김한수^{1*}

¹건국대학교 건축학과

Calculation of Blast Load Including Interior Explosion Effects

Seong-Hwan Kim¹ and Han-Soo Kim^{1*}

¹Department of Architecture, Konkuk Univ., Seoul, 05029, Korea

Abstract

To study the behavior of structures subject to blast loads it is important to calculate the loads due to the explosives accurately, especially in the case of interior explosions. It is known that numerical method based on computational fluid dynamics can estimate relatively accurate blast load due to the interior explosion including reflection effect. However, the numerical method has disadvantages that it is difficult to model the analysis and it takes much time to analyze it. Therefore, in this study, the analytical method which can include the reflection effect of the interior explosion was studied. The target structures were set as the slabs of residential buildings subject to interior explosion that could lead to massive casualties and progressive collapses. First, the numerical method is used to investigate the interior explosion effect and the maximum deflection of the slab which was assumed to be elastic, and compared with the analytical method proposed in this study. In the proposed analytical method, we determine the weighting factor of the reflection effect using the beam theory so that the explosion load calculation method becomes more accurate.

Keywords : interior explosion, blast load, impulse, slab, autodyn

1. 서 론

폭발하중을 받는 방호 시설이나 대규모 화학 플랜트에 관한 연구는 많이 수행되었지만 상대적으로 주거 건물에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 특히 폭발파의 반사와 회절 현상 같은 다양한 변수들이 포함되어야 하는 도시환경 또는 실내폭발의 경우 그에 대한 기준과 연구들이 많이 부족하다.

관련 연구를 살펴보면, Yi 등(2009b)은 폭발하중을 받는 콘크리트 슬래브의 실험적 거동을 분석하기 위해 콘크리트 강도에 따른 거동 분석을 실험을 통해 연구하였다. Tai 등(2011)은 폭발하중을 받는 슬래브의 동적 거동을 유한요소 프로그램 중 하나인 LS-DYNA를 통해 연구하였다. 해당 연구들은 실외폭발(free-air burst)에 대한 연구들로 실내폭발에 대한 효과가 포함되어 있지 않다.

Choi 등(2012)은 폭발하중을 받는 철근콘크리트 기둥의 해석적 연구와 잔류저항 성능을 평가하기 위한 연구를 진행

하였다. 해당 연구는 수직부재의 거동에 관한 연구로 실내 폭발의 경우 수평부재의 위험성이 더 크다고 판단된다. Kang 등(2015)은 폭발하중의 작용 형태에 따른 판 구조물의 동적 응답 평가를 진행하였다. 해당 연구는 폭발하중 이력 특성 변화에 중점을 맞춘 연구로서, 폭발하중 지속시간과 구조부재 고유주기 관계에 따른 분석이 요구된다.

Costin(2014a)은 LPG 가스폭발에 대해 모서리에서 압력 값의 변화를 유한요소 프로그램인 AUTODYN(Ansys, 2011)을 통해 연구하였다. Costin(2014b)은 건물의 실내에서 일어날 수 있는 가스폭발에 대해 방의 위치와 크기에 따라 압력 전파 양상과 그 크기를 AUTODYN 3D 해석을 통해 연구하였다. 해당 연구는 실내 구조물을 강체로 설정하여 개구부 위치와 크기에 대해 폭발압력이 어떻게 전파되는지 중점을 둔 연구로 폭발하중 산정과 구조물의 거동은 파악하기 힘들다.

폭발물 관련 연구에서는 폭발하중이 올바르게 산정되어야 정확한 구조물의 거동을 예측할 수 있다. 폭발하중 산정방법에는

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2049-6110; E-mail: hskim@konkuk.ac.kr
Received November 30 2016; Revised February 14 2017;
Accepted March 20 2017

©2017 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.

크게 실험 결과를 바탕으로 정식화된 공식을 이용한 해석적(analytical) 방법과 전산유체역학 이론을 바탕으로 한 수치적(numerical) 방법으로 나눌 수 있다. 해석적 방법으로는 Kinery와 Bulmash(1994)가 제안한 방법이 가장 많이 사용되며 이를 프로그램으로 개발한 것이 ConWep이다. 해석적 방법은 실험적(empirical) 방법이라고 불리기도 한다(Cormie *et al.*, 2009). 해석적 방법은 도시환경과 실내폭발과 같은 반사와 회절의 영향 등을 포함하지 못하고 단순한 문제에서만 적용 가능하다(IATG, 2013). 전산유체역학 이론을 바탕으로 폭발과의 전달 과정을 재현하는 수치적 방법은 비용이 많이 소모되고 제한사항이 많은 폭발실험을 대신하면서 기존의 단순 해석기법보다 높은 정확도를 확보할 수 있다(Kim *et al.*, 2007). 하지만 수치적 방법을 이용한 폭발해석은 올바른 해석 결과를 얻기 위해서 다양한 변수들을 고려하여야 하며 이러한 변수들의 효과를 모두 포함하여 정확한 결과를 얻기 위해선 많은 해석 시간이 필요할 뿐 아니라 컴퓨터와 소프트웨어의 전산 처리 능력의 제한 사항들 또한 존재한다(Shi *et al.*, 2008). 따라서 본 연구에서는 실내폭발 효과 중 충격량에 영향을 미치는 반사 효과를 반영할 수 있는 해석적 폭발하중 산정방법을 개발하고자 한다.

본 연구에서의 대상 구조물은 철근콘크리트 슬래브로 폭발하중이 발생하였을 때 슬래브의 파괴는 기둥의 파괴와 더불어 연쇄적 파괴가 발생할 수 있으며(Yi *et al.*, 2009a), 슬래브 구조물 자체의 파괴 및 손상은 인명 피해와도 직접적으로 연관됨으로 이를 실험대상 구조물로 선정하였다. 또한 반사효과가 발생하는 실내폭발을 고려하여 전형적인 주거시설인 아파트의 슬래브를 해석 모델로 설정하였다. 본 연구에서는 우선 수치적 방법을 이용하여 해석 모델에 적절한 요소망 크기를 알아보고, 그 충격량과 동적 거동을 분석하였다. 그리고 이를 실내폭발 상황의 정해라는 가정 하에 수치적 방법으로 얻은 해석 결과와 유사한 해석 결과를 주는 해석적 폭발하중 산정방법을 개발하였다. 설계 시 구조물 응답에서 중요하게 평가하는 최대변위를 기준으로 유사한 결과를 주는 해석적 방법을 제시하고자 한다.

2. 외부폭발과 실내폭발

폭발 발생 시 폭발물의 위치와 구조물의 개방정도에 따라 Fig. 1과 같이 3가지로 구분할 수 있다. 본 연구에서 비교하고자 하는 대상은 완전 개방(fully vented)과 완전 구속(fully confined) 형태의 폭발이다. 완전 개방 형태를 실외폭발로 볼 수 있으며, 초기 충격파가 구조물에 가한 후 그 반사파는 밖으로 퍼져 나가므로 그에 대한 영향은 없다.

완전 구속 형태를 실내폭발로 볼 수 있으며, 개구부가 없는

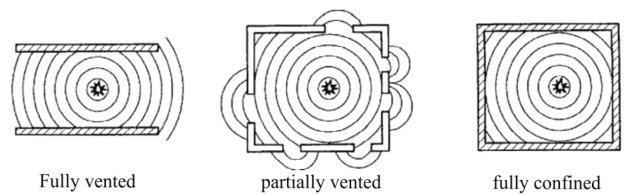


Fig. 1 Condition of explosion(Koccz *et al.*, 2008)

상황을 가정하였다. 초기 충격파는 최초 구조물에서 반사되는 압력으로 실외폭발과 같고, 구조물의 크기와 폭발물의 크기에 따라 반사에 의해 증폭이 되므로 최대 압력은 동일한 값을 나타내지만 충격량은 더 큰 값을 나타낸다. 구조물에 도달하기 전 반사되는 면들은 충격 하중에 대해 강제 거동을 한다고 가정한다. 반사 압력뿐 아니라 온도 상승에 연관된 압력 또한 발생하게 된다(Army *et al.*, 1990). 하지만 이는 반사압력에 비해 그 크기가 작고 매우 짧은 시간에 처리되기 때문에 본 연구에서는 반사에 의한 효과만을 고려한다.

3. 폭발하중에 대한 슬래브 해석

대상 구조물인 슬래브는 실내폭발 상황을 감안하여 전형적인 주거시설인 아파트의 주방으로 선정했다. 그 크기는 아파트 평면도를 참고하여 3150×5000(mm)로 설정하였고, 두께는 200mm로 설정하였다. 경계조건은 4변 단순 받침 슬래브가 되도록 지정하였다. 본 연구에서는 폭발하중 산정에 그 중점을 맞추고 있다. 따라서 콘크리트 재료 모델은 Ansys(2011)에서 제공하는 35Mpa강도의 모델을 탄성거동 하도록 수정하여 사용하였고, 철근 배근은 하지 않았다. 이 슬래브 모델을 Biggs(1964)의 이론과 대표적인 유한요소 프로그램 중 하나인 ABAQUS의 고유주기 해석을 통해 고유주기를 알아보고 폭발과의 지속시간(t_d)과 고유주기(T_n)의 비를 통해 구조체 응답 수준을 파악한 결과는 Table 1과 같다.

Table 1 Natural period of slab

| | Biggs | ABAQUS |
|------------|-------|--------|
| T_n (ms) | 36.1 | 32.4 |
| t_d/T_n | 0.033 | 0.037 |

지속시간과 고유주기의 비를 통해 구조체 응답은 0.1 수준 이하의 충격하중 범주로 볼 수 있으며, 이 범주에서는 최대 압력보다는 충격량이 폭발하중의 크기를 결정한다.

실제 폭발하중은 Fig. 2에서 폭발파의 실제 지속시간(T_s) 동안 작용하는 파선 형태의 그래프와 같은 형태로 작용하며, 이는 식 (1)로 시간에 따른 압력을 계산할 수 있다. 이를 단순화하면 Fig. 2에서 빗금 친 영역과 같이 최대압력과 충격량을

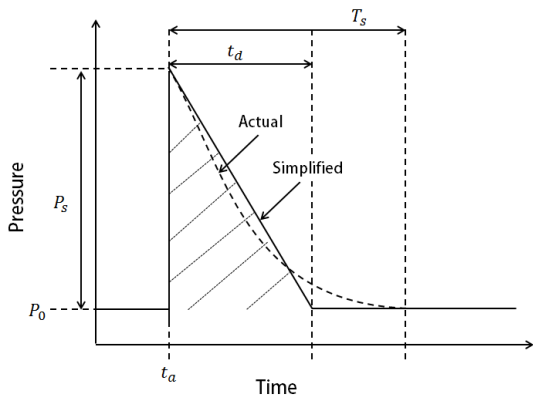


Fig. 2 Actual and simplified Blast Load

동일한 크기로 고정 후 삼각형의 하중으로 작용되도록 지속시간 (t_d)을 이상화 하고, 식 (2)와 같이 시간에 따른 압력값을 계산 할 수 있다(Karlos and Solomos, 2013).

$$P(t) = P_s (1 - t/T_s)^{e^{-bt/T_s}} \quad (1)$$

$$P(t) = P_s (1 - t/t_d) \quad (2)$$

여기서, $P(t)$ 는 시간에 따른 압력값, P_s 는 최대 입사압력, t 는 시간, T_s 는 폭발파의 실제 지속시간, t_d 는 이상화된 폭발파 지속시간을 나타낸다.

실내폭발 하중은 구조체의 크기와 폭발물의 크기에 따라 다르다. Fig. 3처럼 폭발물이 크면 최대 압력과 반사에 의한 압력이 크게 작용하는 것을 알 수 있고, 폭발물이 작으면 최대

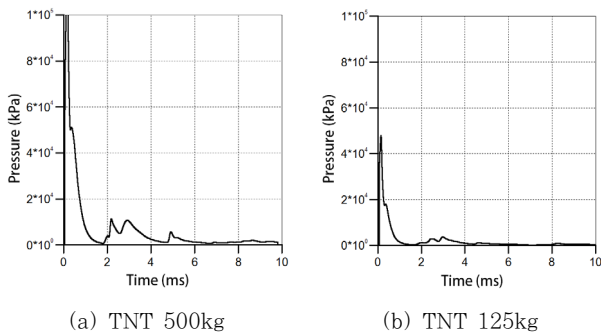


Fig. 3 Interior explosion

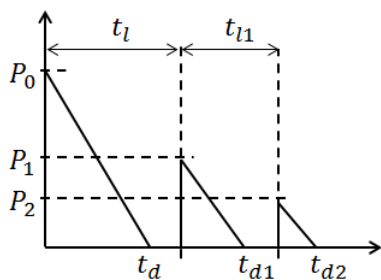


Fig. 4 Simplified interior explosion

압력과 반사에 의한 압력이 상대적으로 미비한 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 하이드로코드 중 하나인 Autodyn의 수치해석 으로부터의 결과이다. Autodyn에서는 연성 해석(coupled analysis)를 제공하고 있기 때문에 폭발 상황에 대한 구조물의 거동을 예측할 수 있다(Ngo et al., 2007).

환경에 따라 반사파의 크기와 도달 시간이 다르게 나타나므로 이를 변경시키며 폭발하중 평가를 진행하였다. 앞에서 소개한 방식처럼 단순화 과정을 거치면 Fig. 4와 같이 여러 개의 삼각 형을 가지는 형태로 나타낼 수 있다. 반사파에 의한 압력(P_1 , P_2), 반사파가 도달하는 시간(t_l , t_{l1}) 그리고 반사파의 지속시 간(t_{d1} , t_{d2})를 변화시키며 진행하였다.

해석적 방법 모델에서는 외부폭발에 맞춰진 방식으로 하나의 피크를 가지는 하중으로 적용된다. 따라서 Fig. 4와 같이 여러 개의 피크를 가지는 실내폭발은 동일한 충격량을 가지는 하나의 피크의 하중으로 단순화 할 필요가 있다. 충격량 크기를 동일 하게하기 위해 Fig. 5와 같이 최대 압력은 같고, 지속시간을 늘여(t_d') 세 개의 펄스와 같은 면적을 가지는 하나의 펄스로

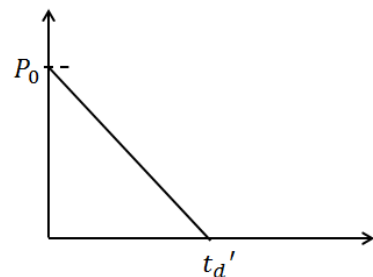
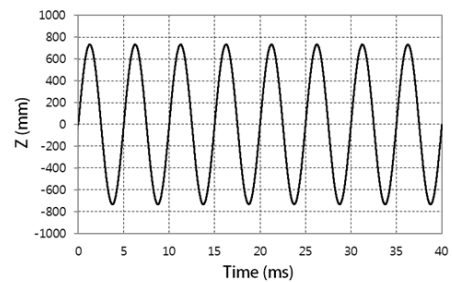
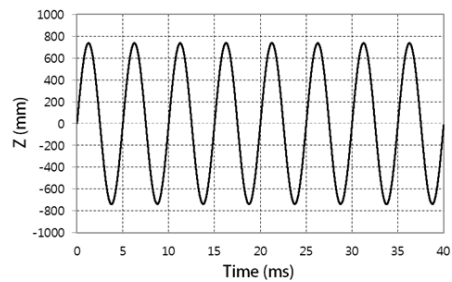


Fig. 5 Simplified interior explosion as 1-pulse



(a) 3 pulse



(b) 1 pulse

Fig. 6 Time history graph of displacement

단순화하였다.

충격량은 동일하지만 하중이 작용하는 형태가 바뀔 때 따라 구조체에 동일한 폭발하중이 작용하는지 알아보기 위해 각각 하중에 대해 동일한 조건의 슬래브의 응답을 알아보았다. 폭발하중이 동일하게 작용하는지를 알아보기 위한 것이므로, 가해지는 압력을 제외한 조건들은 같은 조건으로 무감쇠 탄성해석으로 진행하였다. 지속시간과 고유주기의 비를 통해 알아봤듯이, 폭발하중은 매우 짧은 시간동안 가해지기 때문에 여러 개의 피크를 가지는 하중을 동일한 크기의 하나의 하중으로 가해도 최대변위에서 2% 내외의 차이를 가진다. 이 결과를 Fig. 6을 통해 확인할 수 있다.

반사파에 의한 압력(P_1 , P_2)과 반사파가 도달하는 시간(t_1 , t_2)을 변화시켰을 때, 하중 지속시간이 여전히 고유주기에 비해 짧은 경우 5% 이내의 결과를 얻었다. 반사파가 도달하는 시간이 길어질수록 그에 대한 압력값이 작아지므로 구조물에 가해지는 폭발하중은 5% 이내의 차이를 가진다.

4. Numerical Analysis 검증

이 장에서는 실내폭발 환경의 수치적 방법 모델 검증을 통해 5장의 해석적 방법 모델 비교의 타당성을 제시하고자 한다. 외연적(explicit) 유한요소해석에서 폭발하중 산정 같은 경우 공기와 폭발에 의한 가스 생성물 같은 유체 해석에 적합한 오일러(eulerian) 방식을 사용한다(Birnbaum *et al.*, 1999). 이 방식은 요소망을 지날 때의 시간 단계에 의해 압력값으로 측정되므로, 적절한 요소망 크기로 모델이 구성되어야 폭발하중이 제대로 전달되어 산정될 수 있다(Shi *et al.*, 2008). Deng와 Jin(2009)과 그 외 연구에서 요소망 크기에 따라 폭발하중이 제대로 전달되는지 검증하였다. 본 연구에서도 그와 유사하게 환산거리(Z)에 따라 요소망 별 폭발하중을

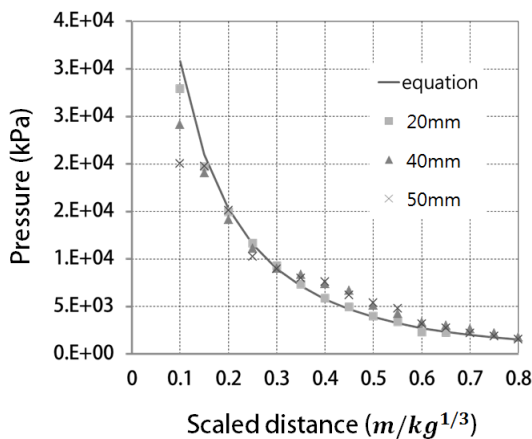
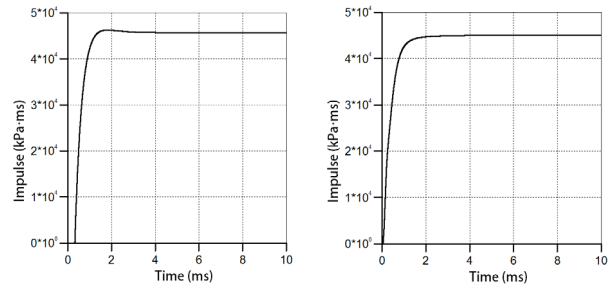


Fig. 7 Variation of pressure with scaled distance

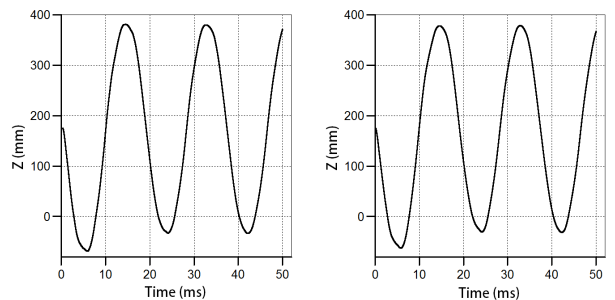
Kingery-Bulmash의 식(IATG, 2013)과 비교하였고, 그 결과를 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

요소망 크기가 작을수록 모든 환산거리에서 유사한 결과값을 가지고, 요소망 크기가 클 수록 오차가 커지는 상황을 확인할 수 있다. 하지만, 환산거리가 커짐에 따라 요소망 크기가 커도 작은 오차 범위의 폭발하중을 산정할 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 전형적인 주거시설인 아파트의 평면 모델(3150×5000×3000mm)을 기준으로 하였다. 환산거리가 작으면서도 5cm의 요소망 크기를 사용할 수 있도록 폭발물 크기는 500kg을 사용하였다. 이는 환산거리 $Z=0.19m/kg^{1/3}$ 에 해당하므로, 요소망 크기 50mm에서도 폭발하중이 제대로 가해짐을 알 수 있다.

실의 폭발의 경우 해석적 방법의 결과가 정해라고 볼 수 있으므로, 수치적 방법의 폭발하중과 탄성 구조물의 동적 거동을 비교해 보았다. 폭발조건은 앞서 정의한 TNT 500kg을 1.5m 거리(환산거리 $Z=0.19m/kg^{1/3}$)에서 터트렸고, 요소망 크기는 5cm로 진행하였다. 폭발하중의 결과를 Fig. 8에서 확인할 수 있고, 구조물의 동적 거동을 Fig. 9에서 확인할 수 있다. 폭발하중은 2ms 지점에서 이미 다 작용한 상태이므로, 10ms까지만 비교를 하였다. 변위 그래프는 최대 변위와 주기 등 구조물의 동적 거동을 비교하기 위해 50ms 지점까지 비교를 하였다. 구조물에 가해지는 폭발하중은 4% 이내의 오차를 보이고, 최대 변위를 포함한 동적 거동에서도 4% 이내의 결과를 얻을 수 있다.



(a) Analytical analysis model (b) Numerical analysis model
Fig. 8 Time history graph of reflected impulse



(a) Analytical analysis model (b) Numerical analysis model
Fig. 9 Time history graph of displacement

5. Analytical Analysis

이 장에서는 수치적 방법 모델과 유사한 결과를 낼 수 있는 해석적 모델 적용 방법에 대해 미 삼군 통합 매뉴얼인 UFC (unified facilities criteria) 3-340-02(Army *et al.*, 1990) 매뉴얼을 적용한 방법과 보 이론을 활용한 가중치 적용 방법에 대해 소개한다.

5.1 UFC 매뉴얼

미 삼군 통합 매뉴얼인 UFC 매뉴얼은 많은 실험을 바탕으로 폭발하중 산정과 구조체 설계에 가이드라인을 그래프로 제시한다. 본 연구에서는 실외폭발(unconfined explosion)와 실내폭발(confined explosion) 하중의 차이를 UFC 매뉴얼을 통해 파악하고 이를 해석적 모델에 적용하고자 하였다.

UFC 매뉴얼에서 밀폐 정도에 따른 비교 그래프들은 평균 값들로 제공이 되고 있으며, Fig. 10과 같이 현재 모델 조건에 대해 실외폭발과 실내폭발 하중의 차이를 알아보면 평균 충격량에서 약 2배 정도의 차이를 보이는 것을 그래프에서 확인할 수 있다.

하이드로코드 Autodyn에서 앞서 설정한 아파트의 평면의 철근콘크리트 슬래브 모델 크기(3150×5000×200mm)에 대해 실내폭발 효과를 포함하지 못하는 해석적 모델과 실내

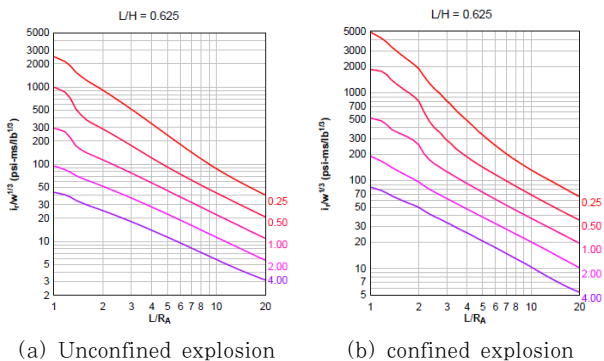


Fig. 10 Scaled average unit reflected impulse (Army *et al.*, 1990)

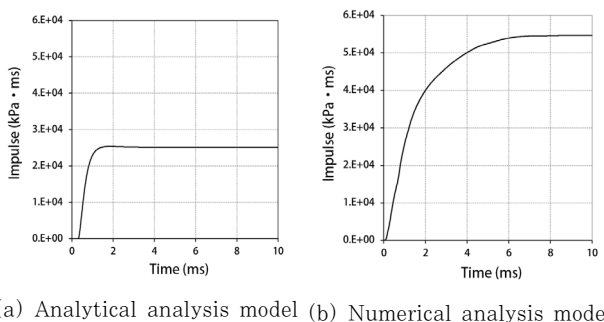


Fig. 11 Time history graph of average reflected impulse

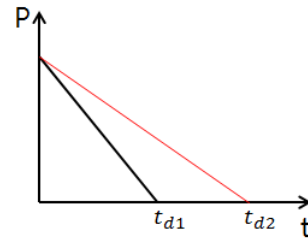


Fig. 12 Simplified time-pressure history

폭발의 효과중 반사 효과를 포함하도록 공기의 4면을 반사가 일어날 수 있는 강체로 설정한 수치 모델을 비교하였다. 슬래브 구조체에 일정한 간격의 게이지를 심어 비교한 결과 Fig. 11과 같이 평균 충격량이 약 2배 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 UFC 매뉴얼과 같은 결과를 보인다. 따라서 Fig. 12과 같이 최대 압력은 동일하고 충격량은 2배가 되게 지속시간을 늘려 하중을 가하는 방식으로 적용을 하였다. 모델에서는 최대 압력 계산을 지배하는 환산거리는 유지하면서, 식 (3)의 관계로부터 폭발물 크기와 폭발물과의 거리를 일정 비율로 늘리면서 충격량을 늘이는 것으로 적용할 수 있다.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \tag{3}$$

여기서, Z 는 환산거리, R 은 폭발물 중심으로부터의 거리, W 는 폭발물의 무게이다.

하지만 UFC에서 제시하고 있는 그래프는 평균값에 대한 차이로, 평균 충격량이 2배가 되었을 때 구조체가 유사한 거동을 하는지 알아 보았다. 앞서 확인하였듯이 평균충격량은 2배 차이로 UFC에서 제시하고 있는 결과와 유사하게 나타났다. 하지만 슬래브 거동 예측에서 가장 많은 변위가 발생할 것으로 예상되는 가운데 지점에서의 충격량과 변위는 Fig. 13과 Fig. 14 같이 상이한 결과를 나타낸다는 것을 확인할 수 있고, 충격량 2배 모델이 과대평가 되었다는 것을 확인할 수 있다. 폭발하중은 10ms 이전에 모두 가해지므로 충격량을 10ms 까지만 비교를 하였다. 슬래브의 거동을 비교하기 위해 변위는

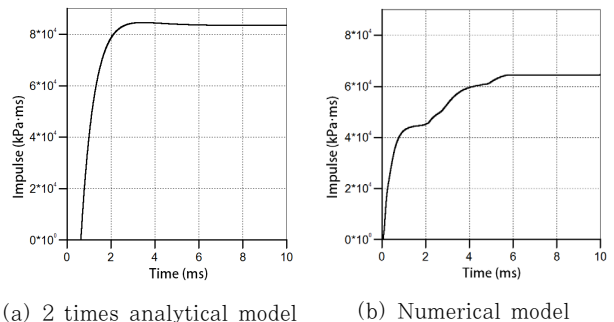
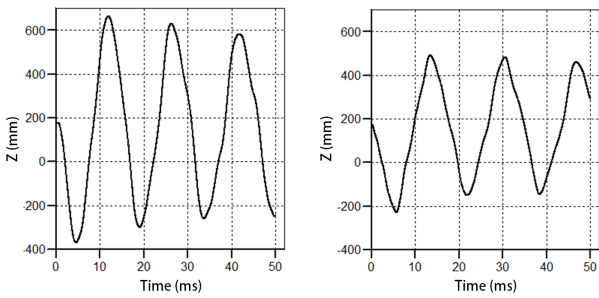


Fig. 13 Time history graph of reflected impulse



(a) 2 times analytical model (b) Numerical model

Fig. 14 Time history graph of displacement

50ms까지 비교를 하였다.

따라서 UFC 매뉴얼에서 확인한 충격량 2.0배를 적용한 모델에서는 반사가 일어나는 모서리 부분에서의 가중치가 높아 슬래브 가운데 지점에서의 결과를 유사하게 하기 위해선 그 가중치를 고려한 폭발하중 산정이 필요하다.

5.2 보 이론 활용한 가중치 적용

슬래브 가운데 지점의 가중치를 고려하기 위해 보 이론을 통해 가중치를 계산하고자 하였다. Fig. 15와 같이 해석적 모델과 수치적 모델의 충격량 차이를 가중치들로 비교를 하였고 이 가중치들을 보에 분포하중들로 계산을 하여 가운데 지점에 대한 가중치를 계산하였다.

동일한 모델 크기에서 폭발물 크기에 따라 반사 압력 크기가 달라질 거라 예상하여 이러한 방법을 다른 폭발물 크기에 대해 진행하였다. 그때 반사 압력의 차이만큼 각도에 의한 압력 차이 때문에 가운데 지점에서의 가중치는 약 1.5배 내외로 계산이 되었다. 반면에 모델 크기가 달라지면 가중치 값도 달라진다. 따라서 앞서 설정한 모델에 크게 벗어나는 크기를 가진 모델에서는 가중치를 새로 계산해야 한다는 한계점을 가진다. 본 연구에서는 보편적인 아파트 평면을 설정하여 그 가중치를 적용한 만큼 충격량이 가해지도록 해석적 모델을 설정하고 다시 4장에서 검증한 모델에 반사효과를 포함하도록 한 수치적

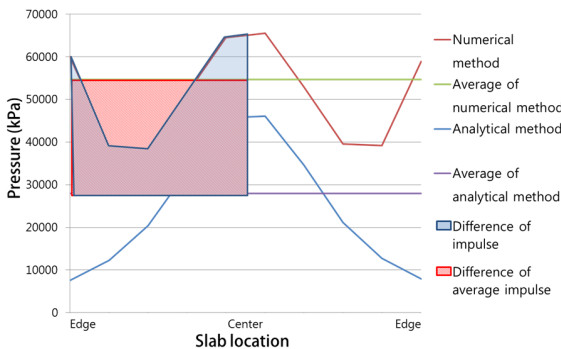
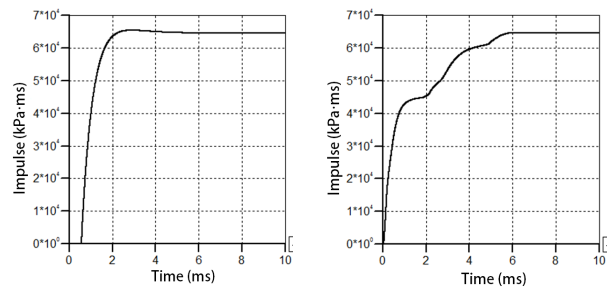
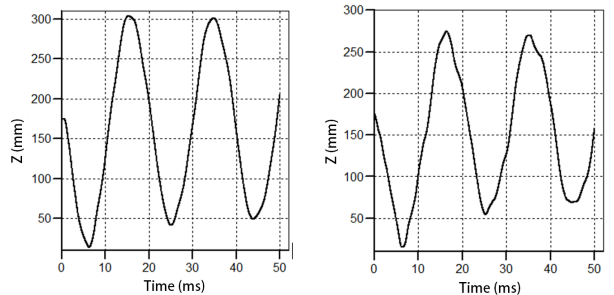


Fig. 15 Process calculating factor using beam theory



(a) 1.5 times analytical model (b) Numerical model

Fig. 16 Time history graph of impulse



(a) 1.5 times analytical model (b) Numerical model

Fig. 17 Time history graph of displacement

모델과 비교하여 그 타당성을 보이고자 한다. Fig. 16에서 가중치를 적용한 해석적 모델과 실내폭발 상태를 모델링한 수치적 모델이 서로 유사한 크기의 충격량을 가해지는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 17과 같이 진폭의 크기는 실제 반사효과 차이에 의해 반사파가 도달하는 시점부터 약간 상이 하지만, 본 연구에서 평가하고자 하는 순간 최대 처짐의 크기는 유사한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 16과 17에서 6ms 이전에 2% 내외의 오차의 충격량이 가해지면, 최대 처짐에 대해서 2% 내외의 유사한 결과를 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 반사 압력에 대한 가중치를 보 이론을 이용해 적용하였을 때 실내폭발 효과를 간단히 포함할 수 있다고 할 수 있다. 하지만 가중치를 이용한 방법은 지속 시간과 고유주기 비에서 충격하중 범주를 벗어나면 적용하기 힘들고, 반사 압력에 대한 가중치는 모델의 크기에 따라 약간 상이할 수 있다는 한계를 가진다. 반면에 폭발물 크기가 충격하중 범주를 벗어나지 않고, 본 연구에서 설정한 보편적인 아파트 평면에 준하는 크기에 대해서는 약 1.45배에서 1.55배의 작은 변수 범위의 하중 가중치를 가진다.

6. 결 론

본 연구에서는 건물의 점진적 붕괴를 유발할 수 있고 직접적 인명피해로 이어질 수 있는 슬래브 구조를 대상으로 실내폭발

효과를 포함할 수 있는 해석적 폭발하중 산정 방법을 제안하고자 하였다. 하중 지속시간과 고유주기 비를 통해 충격량이 폭발 하중을 결정하는 범주임을 알아 보았고, 그 하중을 하나의 삼각형 펄스로 단순화하여 적용하였을 때의 결과가 2% 내외의 차이를 가진다는 것을 확인하였다. 이를 토대로 슬래브의 최대 변위가 유사하게 일어나도록 해석적 폭발하중 산정 방법을 개발하였다. 등가의 해석적 폭발하중을 결정하기 위해서는 등가의 충격량을 갖도록 해야 한다. 이 등가의 충격량을 UFC 매뉴얼에서 제시하는 그래프를 통해 2.0배 한 값을 적용해 볼 수 있다. 하지만 UFC 매뉴얼은 개폐 여부에 대해서 압력과 충격량의 평균값들을 제시하고 있어 슬래브의 최대 변위를 일으키는 가운데 지점에 관한 결과는 상이한 것을 확인할 수 있다. 따라서 보 이론에 근거해 반사파에 대한 하중의 가중치를 계산하여 적용하였다. 모델의 크기가 달라지면 가중치를 새로이 계산해야 한다는 한계점을 가지지만, 본 연구에서는 보편적인 아파트 평면을 예시로 들었다. 해당 모델을 통한 계산 결과는 1.5배 내외였고, 그 가중치를 적용하여 해석적 모델과 수치적 모델을 비교한 결과 유사한 충격량과 최대변위를 보이는 것을 확인할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부의 U-City 석.박사과정 지원사업으로 지원되었습니다.

References

- Army, U.S., Navy, U.S., Force, U.A.** (1990) *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, TM5-1300*, 1400.
- Ansys** (2011) AUTODYN Theory Manual, *Century Dynamics*.
- Biggs, J.M.** (1964) Introduction to Structural Dynamics, *McGrawHill*, New York.
- Birnbaum, N.K., Francis, N.J., Gerber, B.I.** (1999) Coupled Techniques for the Simulation of Fluid-structure and Impact Problems, *Comput. Assist. Mech. & Eng. Sci.*, 6(3-4), pp.295~311.
- Choi, H.S., Kim, M.S., Lee, Y.H.** (2012) Parametric Study on Reinforced Concrete Columns under Blast Load, *J Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 25(3), pp.219~226.
- Costin, N.S.** (2014) Numerical Simulation of Detonation of an Explosive Atmosphere of Liquefied Petroleum Gas in a Confined Space, *Def. Tech.*, 10(3), pp.294~297.
- Costin, N.S.** (2014) The Explosive Atmosphere Conditions Required to Carry Out An Improvised Explosive Device and Numerical Simulation of Detonation, *Land Forces Acad. Rev.*, 19(1), p.132.
- Cormie, D., Mays, G., Smith, P.** (2009) Blast Effects on Buildings - 2nd Ed., *Thomas Telford*, London, p.338.
- Deng, R.B., Jin, X.L.** (2009) Numerical Simulation of Bridge Damage under Blast Loads, *WSEAS Trans. Comput.*, 8(9), pp.1564~1574.
- Kang, K.Y., Choi, K.H., Ryu, Y.H., Choi, J.W., Lee, J.M.** (2015) Dynamic Response of Plate Structure Subject to the Characteristics of Explosion Load Profiles, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28(2), pp.187~195.
- Karlos, V., Solomos, G.** (2013) Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components, *European Comm.*, JRC 87200, 20
- Kingery, C.N., Bulmash, G.** (1994) Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst, Technical Report ARBRL-TR-02555, *US Army Research and Development Centre*.
- Kim, H.J., Nam, J.W., Kim, S.B., Kim, J.H., Byun, K.J.** (2007) Analytical Evaluations of the Retrofit Performances of Concrete Wall Structures Subjected to Blast Load, *J. Korea Concr. Inst.*, 19(2), pp.241~250.
- Kocczaz, Z., Sutcu, F., Torunbalci, N.** (2008) Architectural and Structural Design for Blast Resistant Buildings, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., Ramsay, J.** (2007) Blast Loading and Blast Effects on Structure - An Overview, *Electron. J. Struct. Eng.*, 7, pp.76~91.
- Shi, Y., Li, Z., Hao, H.** (2008) Mesh Size Effect in Numerical Simulation of Blast Wave Propagation and Interaction with Structures, *Trans. Tianjin Univ.*, 14, pp.396~402.
- IATG (International Ammunition Technical Guideline)** (2013) Formulae for Ammunition Management, *UN SaferGuard*, 1st edition, pp.2~6.
- Yi, N.H., Kim, S.B., Kim, J.H., Cho, Y.G.** (2009) Behavior Analysis of Concrete Structure under Blast Loading:(I) Experiment Procedures, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 29(5A), pp.557~564.

요 지

폭발하중을 받는 구조물의 거동을 연구하기 위해서는 폭발물에 의한 하중을 정확히 산정하는 것이 중요하며 실내폭발의 폭발하중의 경우에는 특히 그러하다. 반사효과를 포함하는 실내폭발의 폭발하중 산정방법으로는 전산유체역학을 기반으로 한 수치해석적 방법이 비교적 정확한 폭발하중을 산정할 수 있다고 알려져 있다. 하지만 수치해석적 방법은 해석모델링이 어렵고 해석에 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 실내폭발에서 고려되어야 하는 여러 효과 중 대표적인 반사효과를 간단히 반영할 수 있는 해석적 폭발하중 산정방법을 연구하였다. 대상 구조물은 큰 인명피해와 연쇄붕괴를 일으킬 수 있는 실내폭발하중을 받는 주거시설의 슬래브로 설정하였다. 우선 수치해석적 방법을 이용해 실내폭발 효과와 탄성체로 가정한 슬래브의 최대 처짐을 알아보고, 이를 본 연구에서 제안하는 해석적 방법과 비교를 하였다. 제안된 해석적 방법에서는 보 이론을 적용한 반사효과의 가중치를 결정함으로써 보다 정확한 폭발하중 산정방법이 되도록 하였다.

핵심용어 : 실내폭발, 폭발하중, 충격량, 오토던, 슬래브