

# 3차원 Burgers equation을 이용한 폭풍파의 전파 해석

## Study of blast wave propagation using 3-D Burgers equation

이재완\*. 엄원석†. 이도형\*\*

Jae-Wan Lee, Won-Suk Ohm and Do Hyung Lee

### 1. 서 론

폭풍파는 폭발 등에 의해 발생한 대기의 과압력이 3차원 공간상으로 전파하는 음향 현상으로 첨두 파면에서의 과압력이 파면을 전후로 하여 불연속적인 특징에 의해 충격파로 간주할 수 있으며, 대표적인 발생 원인으로는 화학적 폭발, 핵폭발 등이 있다<sup>(1)</sup>. 폭풍파는 불연속적인 첨두 파면, 유한 진폭 등의 특성에 의해 비선형 음향 전파 양상을 보이게 된다. Burger equation은 이러한 비선형 음향 전파를 해석하기 위한 대표적인 이론으로, 비선형 효과, 흡수 및 분산, 지형적 폴질 효과, 굴절 등을 반영할 수 있다. 본 연구에서는 실험에서 측정된 폭풍파의 전파 양상을 3차원 Burgers equation을 이용하여 해석하고 실제 측정 데이터와 비교하였다.

### 2. 3차원 Burgers equation

일반적인 충격파의 전파는 다음 수식 (1)의 확장된 Burgers equation을 통해 나타낼 수 있다<sup>(2)</sup>.

$$\frac{\partial p}{\partial s} = \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial p^2}{\partial t'} + l(t')p \quad (1)$$

$$- \frac{1}{2S} \frac{\partial S}{\partial s} p + \frac{1}{2\rho_0 c_0} \frac{\partial (\rho_0 c_0)}{\partial s} p$$

여기서  $p = p(s, t')$ 는 음압,  $s$ 는 음선 거리,  $S$ 는 음선관(ray tube)의 단면적,  $t' = t - \int_0^s 1/c_0 ds$ 는 retarded time,  $c_0$ 는 음속,  $\rho_0$ 는 대기 밀도,  $\beta$ 는 비선형 계수이다. 우변의 항들은 각각 비선형, 흡수

및 분산, 기하학적 폴질, 굴절에 의한 효과를 의미한다. 본 연구에서는 비교적 짧은 거리에서의 전파 해석을 상정하고, 비선형, 흡수, 구면파 전파에 의한 효과만을 고려한 수식 (2)의 주파수 영역 상에서의 무차원화 Burgers equation로 변환하여 사용하였다<sup>(3)</sup>.

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = P \frac{\partial P}{\partial \theta} + A \frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} + \frac{m}{\sigma} P \quad (2)$$

여기서  $P = p/p_0, \sigma = x/\bar{x}, \theta = \omega_0 t', A = \alpha_0 \bar{x}$ 는 각각 무차원화된 과압력, 전파거리, 전파시간, 흡수계수이며,  $\bar{x}, \omega_0, \alpha_0$ 는 각각 shock formation distance, fundamental angular frequency, fundamental frequency에 대한 흡수 계수이다.  $m$ 은 기하학적 전파 양상을 나타내는 값으로서  $m = 0, \frac{1}{2}, 1$ 인 경우, 각각 평면파, 원통파, 구면파 전파를 의미하며 본 연구에서는 구면파 전파 해석을 위해  $m = 1$ 을 사용하였다.

### 3. 계산 및 측정 신호와의 비교

#### 3.1 측정 데이터

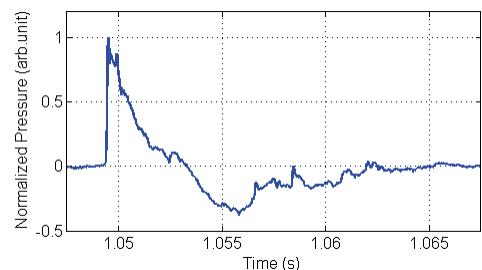


Fig 1. Normalized pressure plot of a blast wave as a source condition of 3-D Burgers equation

\* 엄원석; 연세대학교 기계공학과

E-mail : ohm@yonsei.ac.kr

Tel : 02-2123-5819

\*\* 연세대학교 기계공학과

\*\*\* 국방과학연구소 추진기관부

전파 해석의 초기 조건으로 사용한 측정 신호 (Fig 1)는 폭풍파의 발생 위치로부터 직선거리로 23.80 m 떨어진 위치에서 측정되었다.

### 3.2 계산 결과와 측정 신호와의 비교

계산 결과와의 비교 대상은 발생 위치로부터 직선거리로 32.39 m 떨어진 위치에서 측정된 폭풍파 신호이며, 이 신호와의 비교를 위해 Fig 1의 초기 조건에 해당하는 폭풍파가 발생 위치로부터 32.39 m 떨어진 지점까지의 약 9 m를 전파하는 양상을 계산하였다. 또한, 폭풍파가 가지는 비선형 전파의 특성이 해석에 반영되었는지 확인하기 위하여 해석 프로그램 내에서 비선형 효과 모듈을 on/off하여 계산된 결과를 각각 비교하였다. 계산 결과는 Fig 1의 초기 조건의 최댓값에 대해 정규화하여 나타내었다.

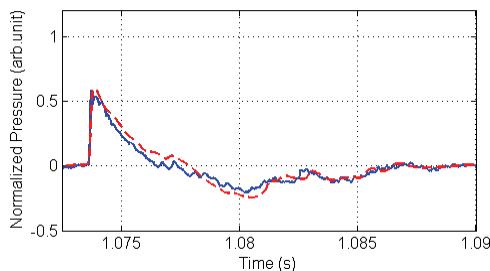


Fig 2. Comparison of measured pressure(—) and calculated pressure by 3-D Burgers equation with nonlinear effect module(---).

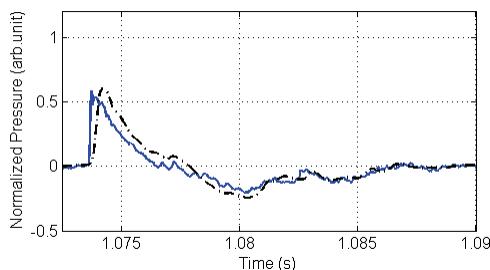


Fig 3. Comparison of measured pressure(—) and calculated pressure by 3-D Burgers equation without nonlinear effect module(-·-)

해석 결과, Fig 2와 같이 계산을 통해 구한 폭풍파의 전파 양상이 실제 측정된 폭풍파 신호의 크기와 과정 등에 있어서 상당히 유사함을 확인하였다. 비선형 효과 모듈을 off한 경우는, Fig 3과 같이 실

제 측정 결과나 비선형 효과 모듈을 on한 경우에 비해 충격파면의 가파른 경사가 나타나지 않으며 손실은 적게 나타났다. 이러한 오차의 원인은 비선형 효과의 특징인 고주파 대역으로의 에너지 전달이 고려되지 않았기 때문이다. 해석 결과를 통해 실험에서 측정된 음향 신호는 높은 과압력에 의해 비선형 효과가 주요 메커니즘으로 작용하는 폭풍파임을 재차 확인하였다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 3차원 Burgers equation을 이용하여 폭풍파의 전파에 대해서 해석하였다. 작성한 3차원 Burgers equation 프로그램에는 폭풍파 전파에 있어서 비선형, 흡수, 구면파 전파 효과가 고려되었다. 전파 해석 결과, 실제로 측정한 폭풍파 신호와 유사한 결과를 얻었으며, 비선형 효과 모듈을 on/off 한 결과를 비교하여 측정된 음향 신호에서 폭풍파의 주요 특징인 비선형 효과가 주요 메커니즘으로 작용함을 확인하였다. 이번 연구는 향후 다양한 3차원 폭풍파, 충격파의 전파 해석에 활용 가능할 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- (1) Needham, C. E., 2010, *Blast Waves*, Springer.
- (2) Cleveland, R. O., Chambers, J. P., Bass, H. E., Raspet, R., Blackstock, D. T., and Hamilton, M. F., 1996, Comparison of computer codes for the propagation of sonic boom waveforms through isothermal atmospheres, *Journal of Acoustical Society of America.*, Vol. 100, No. 5, pp. 3017~3027.
- (3) Hamilton, M. F. and Blackstock, D. T., 1997, *Nonlinear Acoustics*, Acoustical Society of America.