

Burgers equation 을 이용한 로켓 연소소음 전파 해석

Study of rocket combustion noise propagation using Burgers equation

이훈기* · 엄원석† · 이도형**

Hunki Lee, Won-Suk Ohm and Do Hyung Lee

1. 서 론

로켓 연소소음은 그 특성상 유한 진폭 (finite amplitude)의 랜덤 파형으로 구성되어 있기 때문에 넓은 주파수대역을 갖는다. 이와 같은 특성을 갖는 로켓 연소소음의 전파는 일반화된 Burgers 방정식의 해를 시간-주파수 도메인이 결합된 알고리즘으로 계산하여 효과적으로 해석할 수 있다.⁽¹⁾ 따라서 본 연구에서는 효율적인 로켓 연소소음 전파 해석을 위해 시간-주파수 도메인이 결합된 알고리즘을 이용하여 Burgers 방정식의 해를 구하였으며 이를 측정결과와 비교하였다.

2. 수치모델 및 실험

2.1 Burgers 방정식

유한 진폭을 갖는 파의 음향 전파는 일반화된 Burgers 방정식을 이용하여 해석한다. 본 연구에서 사용한 Burgers 방정식은 비선형효과, thermo-viscous에 의한 흡음효과, 구형 전파를 포함하며 이는 아래 식 (1)과 같다.⁽²⁾⁽³⁾

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\beta p}{\rho_0 c_0^3} \frac{\partial p}{\partial \tau} + \alpha_{tv}(\tau)p - \frac{1}{r}p. \quad (1)$$

식 (1)에서 p 는 음압, r , 거리, β , 비선형 계수, ρ_0 , 밀도, c_0 , 음속, $\tau = t - r/c_0$, 지연시간 (retarded time), $\alpha_{tv}(\tau)$ 는 thermo-viscous에 의한 흡음률을 의미한다.

위 식 (1)의 해를 시간-주파수 도메인이 결합된 알고리즘을 이용하여 수치적으로 구하였다. 이를 위

해 먼저 분리 연산자 방법 (split-operator method)으로 식 (1)을 다음 식 (2), (3)과 같이 두 개의 방정식으로 나눈다.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\beta p}{\rho_0 c_0^3} \frac{\partial p}{\partial \tau} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p(f)}{\partial r} = \alpha_{tv}(f)p(f) - \frac{1}{r}p(f). \quad (3)$$

위의 식 (2)에서 비선형 효과에 의한 시간 변화 (time shift)가 반영되며, 이를 Earnshaw solution으로 해를 구하면 아래 식 (4)와 같다.

$$\tau_{r+\Delta r} = \tau_r - \frac{\beta \Delta r p(\tau_r)}{\rho_0 c_0^3}. \quad (4)$$

식 (3)은 구형 전파와 흡음효과에 따른 감쇠가 주파수 도메인에서 반영되며, 이때 해는 식(5)과 같다.

$$p(r + \Delta r, f) = \frac{r}{r + \Delta r} e^{-\alpha_{tv}(f)\Delta r} p(r, f). \quad (5)$$

위의 식 (4), (5)를 이용하여 거리에 따른 로켓 연소소음 전파 양상을 해석한다.

2.2 로켓 연소소음 측정

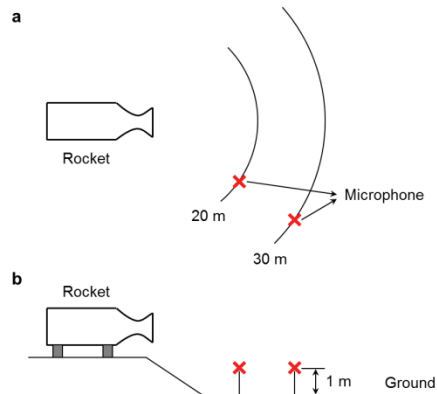


Fig 1. Experimental setup: (a) bird's-eyes view, (b) side view.

† 교신저자; 연세대학교 기계공학부

E-mail : ohm@yonsei.ac.kr

Tel : 02-2123-5819

* 연세대학교 기계공학과

** 국방과학연구소 추진기관부

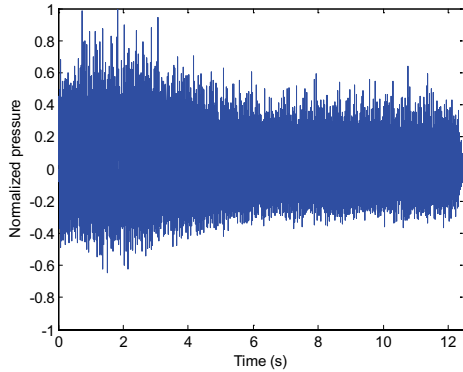


Fig 2. Measured rocket combustion noise waveform at 20 m.

로켓 연소소음은 Fig 1과 같이 로켓으로 노즐로부터 20 m, 30 m 떨어진 지점에 마이크를 지면으로부터 1 m 띄워서 측정하였다. 20 m 지점에서 측정된 로켓 연소소음 신호는 Fig 2와 같으며, 본 논문의 모든 신호는 20 m에서 측정된 신호의 최댓값으로 정규화 (normalized) 하였다.

2.3 수치모델과 측정결과의 비교

수치모델과 측정결과를 비교하기 위해 수치모델에 Fig 2의 파형을 초기 입력조건으로 주어 거리에 따른 음향전파 해석을 수행하였다. Fig 3은 30 m 지점에서 수치모델로 예측한 파형(파선)과 실험으로부터 측정된 파형(실선)을 비교한 그림이다. 그림에서 두 결과 모두 전체적으로 유사한 파형을 가지며, 예측한 결과에서 측정결과와 같이 급격한 경사를 갖는 파면이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 급격한 경사파면은 비선형 전파의 주된 현상이다.

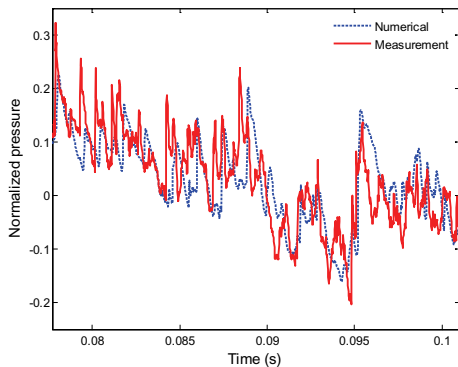


Fig 3. Comparison of numerically predicted (dashed line) and measured (solid line) waveform segments at 30 m.

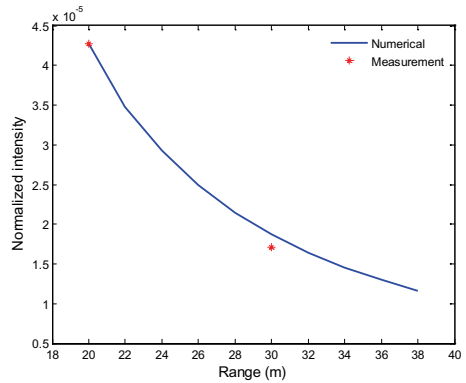


Fig 4. Numerically predicted (solid line) and measured (asterisk) intensity along the propagation range.

Fig 4는 거리에 따른 intensity를 수치모델로 예측한 결과와 실험으로 측정한 결과를 비교한 그림이다. 그림에서 보이는 것처럼 30 m 지점에서 해석결과가 측정결과보다 더 높은 값을 갖는다. 이 같은 결과의 원인으로 지면효과를 들 수 있다. 실제 측정 환경의 지면은 잔포이 우거진 흙으로 구성되어 높은 흡음효과가 예상되는 반면에 수치모델에서는 지면 효과에 의한 감쇠가 반영되지 않았기 때문이다.

3. 결 론

본 연구에서는 효율적으로 로켓 연소소음의 전파를 예측하기 위해 시간-주파수 도메인이 결합된 알고리즘을 이용하여 Burgers 방정식 해를 구하였다. 그 결과 비선형 전파의 주된 현상은 측정결과와 유사하게 예측하였으나 전파거리에 따른 intensity에서는 차이를 보였다. 이는 향후 지면효과가 고려된 수치모델에서 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- (1) Hamilton, M. F. and Blackstock, D. T., 1997, Nonlinear Acoustics, Acoust. Soc. Am.
- (2) Kent L. G., Prediction of nonlinear jet noise propagation, Ph.D. thesis, The Pennsylvania State University, University Park, PA, 2005.
- (3) Gee K. L., Sparrow V. W., James M. M., Downing J. M., Hobbs C.M., Gabrielson T.B., and Atchley A. A., 2008, The role of nonlinear effects in the propagation of noise from high-power jet aircraft, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 123, No. 6, pp. 4082~4093.