

# 고체추진제 연소속도 측정의 정밀도 향상을 위한 초음파 신호 잡음제거 기술 연구

전수균\* · 송성진\* · 김학준\* · 고선필\* · 오현택\* · 김인철\*\* · 유지창\*\* · 정정용\*\*

## A study on ultrasonic signal denoising techniques for improving ultrasonic burning rate measurements of solid propellants

Su-Kyun Jeon\* · Sung-Jin Song\* · Hak-Joon Kim\* · Sun-Feel Ko\* · Hyun-Taek Oh\* · In-Chul Kim\*\* · Ji-Chang Yoo\*\* · Jung Yong Jung\*\*

### ABSTRACT

Ultrasonic techniques have the advantage of determining the burning rates with wide range of pressure in only a single test. However, ultrasonic techniques have a drawback, which is that they are using high frequency transducers and it is easily affected by noise. Therefore, ultrasonic measurement method needs noise reduction algorithm to improve or grantee accuracy of burning rate measurements of solid propellants using ultrasound. Thus, in the present study, we propose a noise reduction method of measured ultrasonic signals by applying wavelet shrinkage.

### 초 록

기존 연구를 통해 초음파법을 이용한 고체추진제 연소속도 측정 시스템 및 연소속도 산정 기법을 개발하였으며, 스트랜드버너법과 비교하여 두 측정 기법의 특성을 비교해보았다. 그 결과 초음파법은 측정된 추진제의 잔존길이를 연소시간으로 미분함으로써 고체 추진제의 연소속도를 계산하기 때문에 한번의 시험으로 넓은 압력구간에 걸쳐 고체추진제 연소속도를 구하는 장점이 있으나, 초음파 측정신호의 잡음이 연소속도의 정밀도 및 신뢰성에 영향을 미침을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 압력시험과 연소시험에서 획득한 측정신호의 잡음 제거 기법을 제안하고, 제안된 기술을 적용하여 연소속도를 측정한 결과와 제안된 기술을 적용하지 않은 경우를 비교하여 제안된 기술의 성능을 평가하였다.

Key Words: Ultrasonic measurement system(초음파 측정 시스템), Solid propellants(고체추진제), Burning Rate(연소속도), Wavelet(웨이브릿)

\* 성균관대학교 기계공학부

\*\* 국방과학연구소 기4-6

연락처, E-mail: sjsong@skku.edu

## 1. 서 론

고체추진제 연소속도 측정을 위한 다양한 측정법이 있지만, 그 중에서 스트랜드버너법이 표준측정기법으로 광범위하게 사용되고 있다[1]. 하지만 스트랜드버너법은 정압조건에서 연소속도를 측정하기 때문에 넓은 압력범위의 연소속도를 측정하기 위해서는 많은 실험이 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 초음파법이 적용되어 왔다. 초음파법은 한 번의 실험으로 전체 압력범위의 연소속도를 완벽하게 구현할 수 있고, 매순간 변하는 추진제 연소속도를 알 수 있기 때문에 매우 경제적인 뿐 아니라 효율적인 기법으로 간주되고 있다[2].

이전 연구를 통해[3], 초음파법을 이용한 고체추진제 연소속도 측정 시스템 및 연소속도 산정 기법을 개발하였으며, 스트랜드버너법과 비교하여 두 측정 기법의 특성을 비교해보았다. 그 결과 초음파법은 측정된 추진제의 잔존길이를 연소시간으로 미분함으로써 고체 추진제의 연소속도를 계산하기 때문에 한 번의 시험으로 넓은 압력구간에 걸쳐 고체추진제 연소속도를 구하는 장점이 있으나, 초음파 측정신호의 잡음이 연소속도의 정밀도 및 신뢰성에 영향을 미침을 알 수 있었다.

본 연구에서는 압력시험과 연소시험에서 획득한 측정신호의 잡음 제거 기법을 제안하고, 제안된 기술을 적용하여 연소속도를 측정한 결과와 제안된 기술을 적용하지 않은 경우를 비교하여 제안된 기술의 성능을 평가하였다.

## 2. 초음파 연소속도 측정

이전 연구를 통해 초음파 연소속도 측정 시스템을 개발하였으며, 정확한 연소속도를 측정하기 위해서는 연소중인 추진제의 잔존길이를 정확히 측정하는 것이 중요하다. 그러기 위하여 정확한 TOF (Time Of Flight) 를 구할 수 있어야 한다. 이를 위해 시험편을 제작하고, 시험편에 초음파를 방사하여 Fig. 1과 같은 초음파 파형을 획득

하였다.

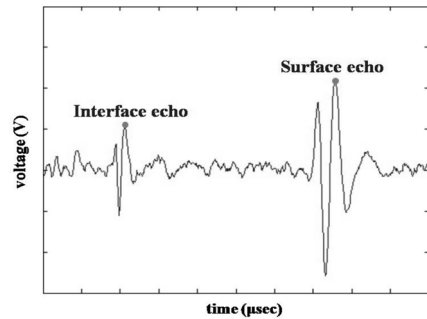


Fig. 1 A typical waveform

Figure 1의 초음파 파형은 전형적인 초음파 파형으로, 이 파형에서 우리는 매우 중요한 두 개의 Echo를 확인할 수 있다. 첫 번째, Interface echo는 경계면 신호라고 부르며, 이것은 고체커플러트와 추진제 사이의 경계면에서 초음파가 반사하여 발생한 것이다. 그리고 두 번째, Surface echo는 연소면 신호라고 부르며, 이것은 추진제의 연소면에서 반사되어 발생한 것이다. 여기서 경계면 신호와 연소면 신호의 시간차이가 초음파가 추진제 내부를 왕복한 시간, 즉 TOF이다. 앞에서 구한 TOF와 추진제 내부에서의 초음파 속도를 이용하여 추진제의 잔존길이를 알 수 있다.

연소속도 측정에 가장 중요한 요소인 TOF를 측정하기 위하여 경계면 신호와 연소면 신호 두 급수의 상관관계를 이용하여 시간차를 구하는 방법인 Cross-Correlation 방식을 이용하였다.

## 3. Wavelet Shrinkage

지금까지 많은 필터가 신호에 포함되어 있는 잡음을 제거하기 위해 제안 되고 있으며, 최근 Donoho[4]에 의해 잡음이 포함된 신호에서 잡음을 제거하는 Wavelet Shrinkage 방식이 제안되었다. 측정신호를  $x(i)$ , 원 신호를  $u(i)$ , 백색잡음 신호를  $e(i)$ , 신호의 길이가  $L$ 일 때, 측정신호  $x(i)$ 는 Eq. 1과 같다.

$$x(i) = u(i) + e(i) \quad (i = 0, 1, \dots, L-1) \quad (1)$$

윗 식을 직교 웨이브렛 변환을 하면, 측정신호의 웨이브렛 계수  $w_x^{(j)}(k)$ 는 Eq. 2와 같이 구할 수 있다.

$$w_x^{(j)}(k) = w_u^{(j)}(k) + w_e^{(j)}(k) \quad (2)$$

여기서,  $w_u^{(j)}(k)$ 는 원 신호의 웨이브렛 계수,  $w_e^{(j)}(k)$ 는 백색잡음의 웨이브렛 계수,  $j$ 는 웨이브렛 분해 레벨을 의미한다.

직교 웨이브렛 변환의 특성에 의해 원 신호의 웨이브렛 계수  $w_u^{(j)}(k)$ 가 고주파 성분을 포함하지 않을 경우에는 0가 된다. 따라서,  $w_e^{(j)}(k)$ 를 threshold level  $\lambda$ 에 의해 제거함으로써 측정신호에서 백색잡음을 제거할 수 있다. Donoho는 Eq. 3과 같이 제안하였으며 이를 soft-thresholding이라 부른다.

$$w_x N^{(i)}(k) = \begin{cases} w_x^{(i)}(k) - \lambda & (w_x^{(i)}(k) > \lambda) \\ 0 & (|w_x^{(i)}(k)| \leq \lambda) \\ w_x^{(i)}(k) + \lambda & (w_x^{(i)}(k) < -\lambda) \end{cases} \quad (3)$$

$w_x N^{(i)}(k)$ 을 사용하여 신호를 재구성 하면 잡음이 제거된 신호를 얻을 수 있다.

#### 4. 초음파 신호의 잡음제거



Fig. 2 Solid propellant specimen of Type

기존 연구를 통해 개발된 고체추진제 연소속

도 측정 시스템을 이용하면 고체추진제 Type I (Fig. 2)의 연소 실험 시 초음파 신호의 한 구간을 Fig. 3와 같이 측정할 수 있다.

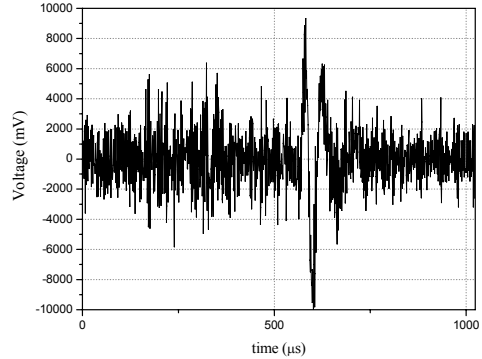


Fig. 3 An example of a column of ultrasonic full waveform

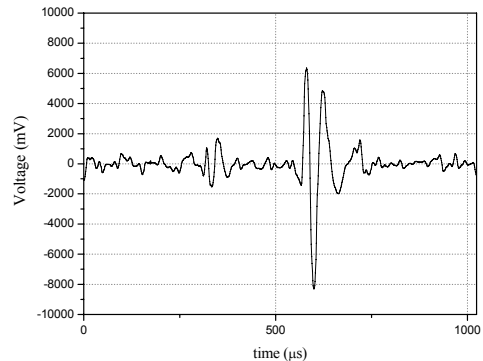


Fig. 4 Ultrasonic full waveform after noise reduction by using wavelet shrinkage

Figure 3과 같이 잡음이 심한 경우 정확한 TOF 측정이 곤란하기 때문에 잡음제거가 선행되어야 한다. 따라서, 앞 장에서 제안한 Wavelet Shrinkage를 Fig. 3에 적용하면 Fig. 4와 같은 결과를 얻을 수 있고, Fig. 3과 4를 비교해 보면 고주파 성분의 백색 잡음이 Wavelet Shrinkage에 의하여 제거되었다는 것을 알 수 있다.

제안된 잡음제거 방식을 전 구간의 초음파 신

호에 적용하여 Type I의 연소속도를 Fig. 5와 같이 얻을 수 있다.

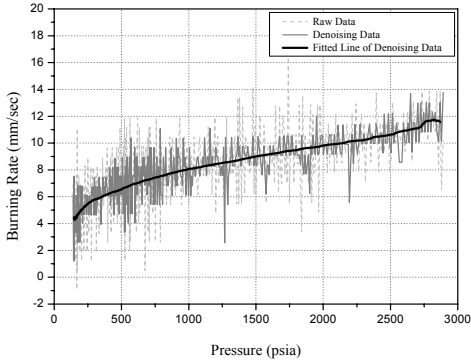


Fig. 5 Burning rate of Type I

점선이 잡음제거 전의 연소속도 신호, 회색선이 잡음제거 후의 연소속도 신호이고 검은색 선은 Polynomial curving fitting을 사용한 연소속도 신호이다. Polynomial curving fitting 신호를 사용하여 잡음제거 전 연소속도 값과 잡음제거 후 연소속도 값의 MSE(Mean Square Error)를 구하면 Table 1과 같다. MSE 결과에서 보여주듯이 제안된 잡음제거 방식에 의해 정밀도가 향상되었음을 알 수 있다.

Table 1. MSE of the experiments

MSE \ 실험	Test 1	Test 2	Test 3
잡음제거 전	3.42	1.97	3.13
잡음제거 후	3.04	1.43	2.62

#### 4. 결 론

기존 연구를 통해 개발된 고체추진제 측정시

스템을 이용한 초음파법으로 고체추진제의 연소속도를 측정하였으며, 초음파법으로 측정된 연소속도 결과가 잡음으로 인하여 연소속도의 정밀도 및 신뢰성에 영향을 미침을 알 수 있었다. 본 연구에서는 측정된 연소속도 신호에 Wavelet shrinkage 방식을 적용하여 보다 정확한 고체추진제 연소속도를 얻을 수 있었다. 향후 연구에서는 다양한 추진제의 연소속도에 적용하여 초음파법의 정확성과 신뢰성을 향상하는 연구를 수행하려 한다.

#### 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소 지원에 의한 연구결과입니다.

#### 참 고 문 헌

1. Sutton, G. P. and Biblarz, O., A wiley-Interscience Publication - Rocket Propulsion Elements, 7th ed., John Wiley & Sons Inc., 2001, pp.417-430
2. Frederick, Jr. R. A., Traineau, J. C. and Popo, M., "Review of ultrasonic technique for steady state burning rate measurements," 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA paper 2000-3801, 2000
3. 송성진, 전진홍, 김학준, 오현택, 김인철, 유지창, 정정용, "초음파를 이용한 고체추진제 연소속도 측정원리 및 시범시스템 개발," 한국추진공학회지, 제10권, 제4호, 2006, pp.61-68
4. Donoho, D. L., "De-noising by soft-thresholding," IEEE Trans. Information Theory, Vol. 41, No. 3, 1995, pp. 613-627.