

초음파를 이용한 고체추진제 연소속도 측정 불확실도 평가

강토* · 송성진* · 김학준* · 고선필* · 오현택* · 김인철** · 유지창** · 정정용**

Evaluation of Uncertainty in Burning Rate Measurement of Solid Propellant using Ultrasound

To-Kang* · Sung-Jin Song* · Hak-Joon Kim* · Sun-Feel Ko* · Hyun-Taek Oh* · In-Chul Kim** · Ji-Chang Yoo** · Jung Yong Jung**

ABSTRACT

The advantage of ultrasonic burning rate measurement of solid propellant is measuring burning rates with wide range of pressure in a single test. In the ultrasonic method, instantaneous thickness of solid propellants as function of pressure or time were measured using time of flight(TOF) of ultrasonic signals. So, uncertainties of the measured burning rates by ultrasonic method have to evaluate with variation of pressure, TOF and initial propellant thickness. In this study, we evaluated uncertainties of ultrasonic method for measuring burning rates on the types 317 and the 318 propellants.

초 록

초음파를 이용한 고체추진제의 연소속도 측정방법은 한 번의 실험으로 넓은 범위의 압력에서 연소속도를 구할 수 있는 장점이 있다. 하지만, TOF를 이용한 연소속도 측정방법은 압력에 따라 변화하는 초음파의 음속을 이용하여 잔존길이를 구하기 때문에 압력, 비행시간(TOF:Time of Flight), 고체추진제 초기길이에 따른 불확실도에 대한 평가를 하여 신뢰성을 얻어야 한다. 본 연구에서는 초음파를 이용하여 고체추진제의 연소속도를 측정할 때 발생하는 불확실도를 평가하여 고체추진제의 연소속도의 신뢰성을 확보하였다.

Key Words: Ultrasonic(초음파), Uncertainty(불확실도), Burning Rate(연소 속도), Solid Propellant(고체 추진제)

1. 서 론

초음파를 이용한 연소속도 측정방법은 정적조건 실험으로서, 한 번의 실험으로 전체 압력범위의 연소속도를 완벽하게 얻을 수 있기 때문에 매우 경제적인 것 뿐만 아니라 효율적인 기법으로 간주되고 있다. 초음파를 이용한 고체추진제의 연

* 성균관대학교 기계공학부

** 국방과학연구소 기4-6

연락처, E-mail: sjsong@skku.edu

소속도 측정방법은 초기길이, 압력, 초음파비행 시간(TOF)가 연소속도의 불확실도에 영향을 준다. 따라서 불확실도에 관한 연구는 초음파를 이용한 고체추진제 연소속도 측정과 함께 이루어져야 한다.

본 논문에서는 초음파를 이용한 고체추진제 연소속도 측정 시 초기길이, 압력, TOF에 따른 불확실도를 연구함으로써 고체추진제 연소속도의 신뢰성을 평가하였다.

2. 초음파를 이용한 고체추진제 연소속도 측정

이전 연구에서는 고체추진제 시험편을 제작하고 초음파를 방사하여 초음파 파형을 획득하였다. 획득된 초음파 파형에서 우리는 매우 중요한 두 개의 Echo를 확인할 수 있다. 첫 번째, 경계면 신호(Interface Echo)는 고체케플런트와 추진제 사이의 경계면에서 초음파가 반사하여 발생한 것이다. 그리고 두 번째, 연소면 신호(Burning Surface Echo)는 추진제의 연소면에서 반사되어 발생한 것이다[1].

여기서 경계면 신호와 연소면 신호의 시간차이가 초음파가 추진제 내부를 왕복한 시간, 즉 TOF와 압력변화에 따른 추진제의 음속변화 함수를 적용했을 때, 고체추진제의 잔존길이를 구할 수 있다(Figs. 1과 2 참조).

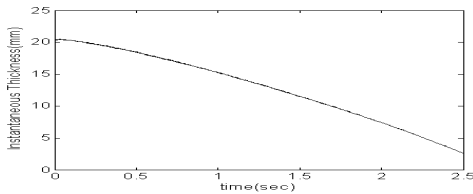


Fig. 1 Instantaneous thickness of the type 317 propellant as a function of time

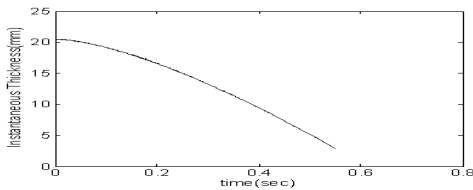


Fig. 2 Instantaneous thickness of the type 318 propellant as a function of time

잔존길이를 이용하여 연소속도를 구하면 Figs. 3과 4와 같다.

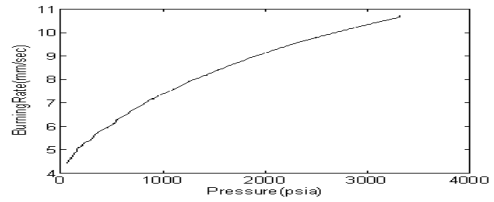


Fig. 3 Burning rate of the type 317 propellant

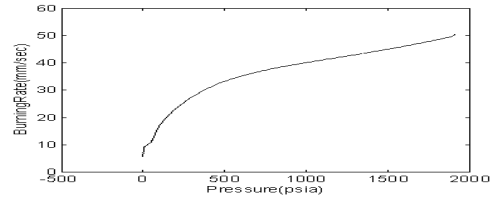


Fig. 4 Burning rate of the type 318 propellant

3. 고체추진제 연소속도 불확실도 평가

일반적인 실험결과를 r 이라고 하면, r 은 변수 X_i 의 함수인 Eq. 1과 같이 나타낼 수 있다. Eq. 1을 "data reduction equation"이라고 하고, r 은 변수 X_i 에 의해 정의 된다.

$$r = r(X_1, X_2, \dots, X_f) \quad (1)$$

실험결과 r 은 X_i 에 의해 불확실도가 전개된다. 이때의 결과 U_r 은 Eq. 2로 정의 된다.[2].

$$U_r = \left(\frac{\partial r}{\partial X_1}\right)^2 U_{X_1}^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial X_2}\right)^2 U_{X_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial r}{\partial X_f}\right)^2 U_{X_f}^2 \quad (2)$$

이때, 편미분항은 Eq. 3으로 정의할 수 있으며, 이를 "absolute sensitivity coefficients"라고 한다.

$$\theta_i = \frac{\partial r}{\partial X_i} \quad (3)$$

$$E = \frac{E_{p0}}{(a_{p0} - a_c)P + (b_{p0} - b_c)} [r - (a_c P + b_c)] \quad (4)$$

Eq. 2를 이용하여 초음파를 이용한 고체추진제의 잔존길이의 불확실도를 계산할 수 있다. 고

체추진제의 잔존길이는 Eq. 4와 같이 나타낼 수 있는데, 연소속도를 구하는 실험은 음속을 구하기 위한 가압실험과 고체추진제의 잔존길이를 구하는 연소실험으로 나뉜다. E 는 고체추진제의 잔존길이이며, E_{p0} 는 고체추진제의 초기길이, τ 는 연소실험시 연소면 시간, P 는 연소실험시 압력, a_{p0} 는 가압실험시 압력-TOF곡선의 연소면 신호의 기울기, b_{p0} 는 가압실험시 압력-TOF곡선의 연소면 신호의 y절편, a_c 는 가압실험시 압력-TOF곡선 경계면 신호의 기울기, b_c 는 가압실험시 압력-TOF곡선 경계면 신호의 y절편, N_p 는 가압실험시 연소면신호의 데이터 수, τ_{pk} 는 가압실험시 경계면 신호의 시간, P_{pk} 는 가압실험시 경계면 신호의 압력, N_c 는 가압실험시 경계면신호의 데이터 수, τ_{ck} 는 가압실험시 경계면 신호의 시간, P_{ck} 는 가압실험시 경계면 신호의 압력, U_{E_0} 는 초기길이에 대한 불확실도, U_τ 는 시간에 대한 불확실도, U_p 는 압력에 대한 불확실도이다. Eq.2를 이용한 잔존길이에 대한 불확실도는 Eq. 5와 같다[3].

$$(U_E)^2 = \left(-\frac{\partial E}{\partial E_{p0}}\right)^2 U_{E_{p0}}^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \tau}\right)^2 U_\tau^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial P}\right)^2 U_P^2 + \sum_{k=1}^{N_p} \left[\left(\frac{\partial E}{\partial \tau_{pk}}\right)^2 U_\tau^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial P_{pk}}\right)^2 U_{P_{pk}}^2 \right] + \sum_{k=1}^{N_c} \left[\left(\frac{\partial E}{\partial \tau_{ck}}\right)^2 U_\tau^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial P_{ck}}\right)^2 U_{P_{ck}}^2 \right] \quad (5)$$

각 변수에 대한 불확실도는 Eq. 6과 같이 시스템 불확실도(B_{X_i})와 랜덤 불확실도(P_{X_i})로 정의된다[4].

$$U_{X_i} = \sqrt{B_{X_i}^2 + P_{X_i}^2} \quad (6)$$

Table 1은 Eq. 6에 의해 압력, TOF, 고체추진제 초기길이의 불확실도를 구한 것이다. 압력에 따른 불확실도는 탐측자사양, 디지털화, 측정등의 시스템 불확실도와 랜덤불확실도가 있으며, TOF에 따른 불확실도는 디지털화에 의한 시스템 불확실도와 랜덤 불확실도, 추진제 초기길이에 따른 불확실도는 연소면이 1°변화한다고 가정

했을 때의 시스템 불확실도와 랜덤 불확실도로 나타낼 수 있다. “Bias”는 시스템 불확실도(B_{X_i})이고, “Precision”은 랜덤 불확실도(P_{X_i})이다.

Table 1. Bias and Precision Uncertainties

	Pressure[psi]	TOF[μ s]	Propellant length[mm]
Bias	Transducer Spec 5.5	Digitization 0.04	1° Angle change 0.244
	Digitization 2.44		
	Calibration 2.5	Total 0.04	Total 0.244
	Total 6.52		
Precision	8.53	0.014	0.076
Total	10.74	0.0423	0.256

압력, TOF, 고체추진제 초기길이에 관하여 불확실도가 정해지면, Eq. 5를 이용하여 추진제 잔존길이에 따른 불확실도는 Figs. 5~8의 결과로 나타난다.

Figures 5와 6은 고체추진제 잔존길이에 대한 불확실도를 구한 결과로서, 길이에 따른 불확실도는 잔존길이가 줄어들수록 따라 줄어든다.

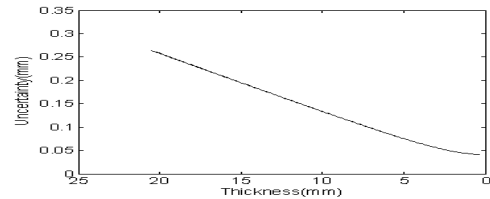


Fig. 5 Uncertainty of instantaneous thickness of the type 317 propellant

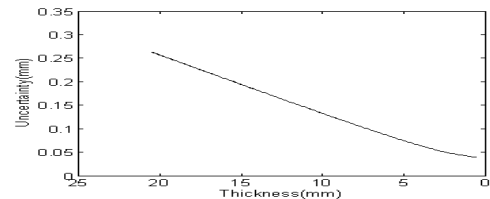


Fig. 6 Uncertainty of instantaneous thickness of the type 318 propellant

Figures. 7과 8은 잔존길이에 대한 불확실도를 해당시간의 잔존길이를 나눈 값이다. 길이의 불확실도는 잔존길이가 줄어들수록 감소하지만, 상대적인 불확실도는 증가한다.

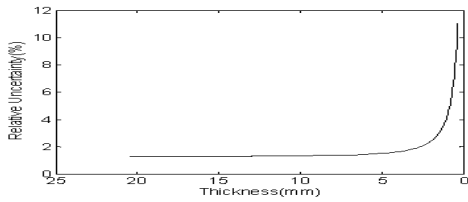


Fig. 7 Relative uncertainty of thickness of the type 317 propellant

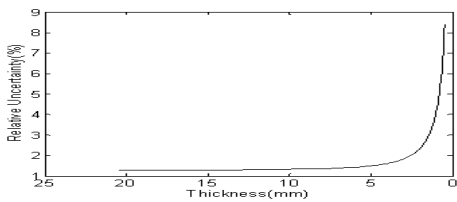


Fig. 8 Relative uncertainty of thickness of the type 318 propellant

Figures. 5과6은 불확실도의 절대값을 나타낸 것이다. 따라서 불확실도의 크기는 잔존길이에 따라 줄어들게 된다. 하지만 Figs. 7과8은 상대적 불확실도의 값을 나타내는데, 고체추진제 317, 318의 잔존길이가 약 3mm이하일 때, 불확실도가 급격히 증가한다. 따라서 상대적인 불확실도를 측정하여 연소속도의 신뢰성을 보장해야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 고체추진제의 불확실도를 평가하기 위하여 가압실험과 연소실험을 수행하였다. 한 번의 실험으로 전체의 압력범위에 따른 연소속도를 측정할 수 있기 때문에 발생하는 압력, TOF, 고체추진제 초기길이에 따른 불확실도를 평가하였다.

압력, TOF, 고체추진제의 초기길이에 따른 불확실도를 줄이면 연소속도의 신뢰성을 확보할 수 있다. 가공하지 않은 데이터를 처리할 때 향상된 기법들을 적용한다면, 고체추진제의 불확실

도를 줄일 수 있을 것이다. 잔존길이가 3mm이하일 때, 상대적 불확실도가 급격히 증가하게 되는데 이를 줄이기 위한 연구가 필요하다.

향후의 연구는 이번연구에서 수행했던 317, 318 뿐 아니라 double base형, Composite 추진제에도 적용하면서 다양한 고체추진제 연소속도 측정의 신뢰성을 판단하는 연구를 수행하려 한다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소 지원에 의한 연구결과입니다.

참 고 문 헌

1. 송성진, 전진홍, 김학준, 오현택, 김인철, 유지창, 정정용, "초음파를 이용한 고체추진제 연소속도 측정원리 및 시범시스템 개발," 한국추진공학회지, 제10권, 제4호, 2006, pp.61-68
2. H. W. Coleman and W. Glenn Steele, JR., Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc., 1999
3. Dauch, F., Mose, M.D., Frederic, Jr., R.A., and H. W. Coleman, "Uncertainty Assessment of Ultrasonic Measurement of Propellant Burning Rate." CPIA Pub 680, Vol. 1, pp.293-304, December 1998
4. Dauch and Frederic, "Uncertainty Analysis of the Ultrasonic Technique Applied to Solid Propellant Burning Rate Measurement", Master of Science in Engineering, The University of Alabama in Huntsville, March 22, 1999