

## 그레인 형상에 따른 침식연소 효과 연구

조민경\* · 김진용\* · 권태훈\*

### Study the effects of grain shape on the erosive burning

Mingyung Cho\* · Jinyong Kim\* · Taehoon Kwon\*

#### ABSTRACT

A typical unsteady internal ballistic analysis model was developed to take account the erosive burning of a solid rocket motor. The variance of local velocity and pressure along grain surface were analyzed by using the continuity and momentum equation. The coefficients of erosive burning were drew from comparing experiment data with analysis. It was investigated that the grain shapes of propellant affect the erosive burning.

#### 초 록

본 연구에서는 고체 추진기관의 침식연소 해석을 위해 비정상 일차원 내탄도 해석 모델을 이용하였다. 연소실 축방향 유동과 압력변화를 해석하기 위해 연속방정식과 운동량 보존식을 연립하여 수치해석 하였다. 침식연소가 발생한 모터의 시험 결과와 해석 결과를 비교하여 연구 모터의 침식연소 상수를 도출하였다. 그레인 형상 변화가 침식연소에 미치는 영향을 평가하였다.

Key Words: Unsteady Internal Ballistics (비정상 내탄도 해석), Solid Rocket motor (고체 로켓 모터), Erosive burning (침식 연소), L&R model, Regression rate (연소속도)

#### 1. 서 론

일반적인 고체로켓 모터 연소 속도는 압력과 온도에 대한 함수로 나타낼 수 있다. 그러나 연소가스의 유동속도가 특정 속도 이상이 되면 추진제 연소 속도에 영향을 미치게 되며 이러한 현상을 침식연소(erosive burning)라고 한다.[1]

침식연소는 연소관내 축방향 연소 가스의 빠른 유동 속도로 인해 발생하며 고려하지 않은

압력 상승을 유발한다. 그렇기 때문에 연소실내 연소가스의 유속이 빠른 모터의 경우 침식연소를 고려하여 해석하여야 한다. 일반적으로 port 단면적과 노즐 목 면적비가 4이하 일 때 침식연소를 고려해야 하는 것으로 알려져 있다.[2].

본 연구에서는 L/D비가 크고 port 단면적과 노즐 목 면적비가 4이하인 별형 그레인을 적용한 모터의 시험 결과와 침식연소를 고려한 해석 결과를 비교하여 위 시험 모터의 침식연소 인자를 도출 하였다. 또한 그레인 형상 변경을 통해 침식연소로 인한 압력 상승효과 변화를 고찰하였다.

\* 일반회원, (주)한화 대전 사업장 개발부  
교신저자, E-mail: soho24@hanwha.co.kr

## 2. 내탄도 해석 모델

### 2.1 지배 방정식

Figure 1과 같이 연소실 그레인에 미소체적을 설정하여 연속 보존 방정식을 설정하고 모터 전반에 걸쳐 연속, 운동량, 에너지 방정식을 적용한다[3].

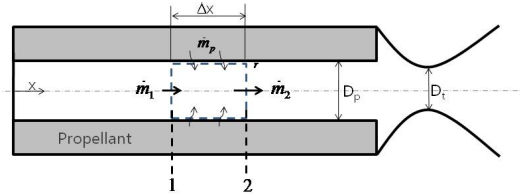


Fig. 1 Schematic of a solid rocket motor

추진제 그레인 내 유동을 일차원 유동으로 가정하면 비정상상태에서 질량 보존식과 운동량 보존식은 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho UA) = \rho_p L_p \dot{r} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho UA) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U^2 A) = -A g_0 \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2)$$

질량 보존식과 운동량 보존식을 미소구간에 대해 적분하여 간략하게 정리하면 다음과 같이 표현 할 수 있다.(Eq. 3, Eq. 4)

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 - \frac{\partial(V\rho_m)}{\partial t} + \left( \frac{L_p \dot{r}_2 + L_{pl} \dot{r}_1}{2} \right) \rho_p \Delta x \quad (3)$$

$$P_2 = P_1 - \frac{2}{(A_1 + A_2)g_0} \left[ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m U_m V) + \dot{m}_2 U_2 + \dot{m}_1 U_1 \right] \quad (4)$$

연소실 축방향 질량유량은 비정상상태에서 그레인 확공과 밀도 변화에 의해 감소되고 그레인 연소 표면에서 공급되는 추진제 질량유량에 의해 증가한다. 연소실 압력은 연소가스의 유속과 질량 유량에 대한 함수로 나타나며 그레인 단면적이 클 수록 압력변화는 작게 나타난다.

해석에 적용한 질량 보존식과 운동량 보존식은 비정상상태 일차원 미분방정식이다. 연소실로

공급되는 연소 가스량 ( $\dot{m}_p$ ) 과 노즐 목으로 빠져나가는 유량( $\dot{m}^*$ )이 동일하지 않으므로 시간변화에 따른 유량차를 고려하여 해석하여야 한다.

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_p - \dot{m}^* \quad (5)$$

연소관 내부에서 생성되는 연소가스가 이상기체라고 한다면 시간에 따른 질량 변화는 시간에 따른 압력과 부피의 변화로 나타낼 수 있다(Eq 6). 이 때 온도 변화에 의한 연소가스 질량 변화는 무시된다[4].

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{PV}{RT} \right) = \frac{V}{RT} \frac{dP}{dt} + \frac{P}{RT} \frac{dV}{dt} \quad (6)$$

연소가스의 체적 변화는 추진제 연소속도에 의한 그레인의 확공(Grain Burnback)으로 표현될 수 있다(Eq 7).

$$\frac{dV}{dt} = \sum \rho_p \dot{r} L_p \Delta x \quad (7)$$

위 식을 연소실 시간변화에 따른 연소실 압력 변화에 대한 식으로 나타내면 Eq. 8과 같다.

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = \frac{1}{m} (\dot{m}_p - \dot{m}^* - \sum \rho_p \dot{r} L_p \Delta x) \quad (8)$$

Equation 8을 풀이를 위해 수치적분법인 Runge-Kutta 4th method를 이용하였다. 연소실 축방향 질량 유량과 연소실 압력은 서로 결합되어 있으므로 연소실 압력, 온도, 연소가스 질량 유량에 대한 연립 방정식으로 계산을 수행 하였다.[5]

### 2.2 연소속도 모델

본 연구에서는 L&R 모델 변형식을 사용하였으며 Eq. 9와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{r} &= \dot{r}_0 + \dot{r}_e \\ &= a P_x^n + \alpha G^{0.8} D^{-0.2} \exp(-\beta \dot{r} \rho_p / G) \end{aligned} \quad (9)$$

위 모델은 스트랜드 버너의 연소속도 모델 식에 침식연소 효과가 고려된 연소속도 항을 추가한 형태이다. 연소가스의 유동속도와 추진제의 특성치가 모두 고려된 식이기 때문에 고체로켓 연소 해석에 광범위하게 적용할 수 있다.

Eq. 9에서  $\beta$ 는 추진제 성분부에 따라 독립적인 값을 가지며 일반적으로 SI단위에서 53인 값을 갖는다.[2]  $\alpha$ 는 추진제 표면에서의 열전달에 관한 상수이다. 추진제 표면에서 이뤄지는 열전달은 추진제의 열적 특성과 연료 주변온도 및 연료 표면온도에 의해 결정되며 Eq. 10과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{0.0028C_{p,g}t^{0.2}Pr^{-2/3}}{\rho_p C_{p,p}} \frac{T_f - T_s}{T_s - T_p} \quad (10)$$

### 3. 해석결과

작은 port 단면적, 긴 L/D비와 같이 그레인 내 연소 가스의 유동 속도를 증가 시키는 요소들이며 이러한 요소들의 영향으로 인해 빨라진 연소 가스의 유속으로 인해 침식연소가 발생한다. Figure 2는 그레인의 초기 단면적과 노즐 목면적 비가 4이하인 모터로 침식연소가 발생이 예상되는 모터에 대한 시험 결과와 침식연소를 고려하여 수행한 예측 결과를 비교한 그래프이다.

Analysis 1과 2 수행과정에서 추진제와 연소가스의 물성값을 적용하였다. Analysis 1에서는 추진제 연소 과정을 추진제 표면에서 생성되는 확산화염에 의해 이뤄진다고 가정하였으며 추진제 표면온도는 330℃라고 가정하였다.[6] 그러나 실제 시험 결과와 비교결과 침식연소로 인한 압력 상승효과는 크게 발생하지 않았다. 이를 바탕으로 볼 때 적용한 상수값보다 큰 값을 적용해야 한다는 것을 알 수 있으며 추진제의 표면온도가 가정했던 값보다 낮을 것이라고 예상 된다. 즉, 화염으로부터 발생하여 그레인으로 전달되는 열 대부분이 그레인 표면에서 추진제를 기화시키는 열로 소비되어 실제 연료 표면온도를 올리는 데

크게 기여하지 못하는 것으로 추측 할 수 있다.

Analysis 2는 추진제의 표면온도가 52℃로 가정하였을 때 결과이며 실제 시험 결과와 유사한 것을 확인하였다.

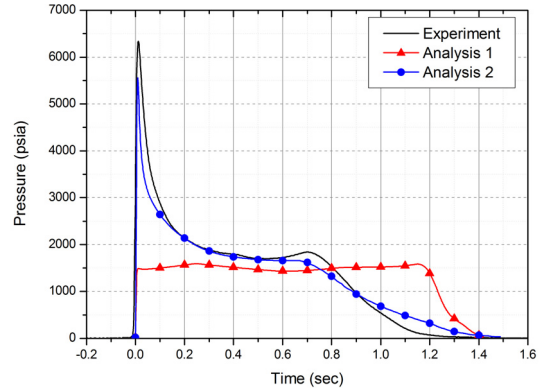


Fig. 2 Comparison of exp. and pred. pressure

동일 추진제를 적용하는 모터에서 침식연소 효과를 감소시키기 위해서는 침식연소와 연관된 인자 중 추진제 특성과 관련 없는 인자를 이용하여야 한다. 그레인 형상 변경을 통해 연소가스의 유속을 감속시킬 수 있으므로 이를 통해 침식연소 효과를 둔화시킬 수 있다.

Figure 3은 Fig. 2의 해석결과와 동일 추진제로 동일한 충전량을 갖는 실린더형 그레인을 모터를 적용하여 해석한 결과를 비교한 것이다. 실린더형 그레인인 동등 충전량에서 초기 연소면적이 다른 그레인 형상에 비해 작기 때문에 초기 연소가스 유속으로 인한 침식연소 효과를 효과적으로 감소시킬 수 있다. Figure 3에서 별형 그레인과 실린더 그레인 형상 모터에서 침식연소현상으로 인한 초기 압력 상승 효과 차이를 확인 할 수 있다. 동일 추진제를 적용하였으나 실린더 그레인에서 압력 상승효과가 크게 감소한 것을 확인 할 수 있다.

Figure 4는 Fig. 3의 두 그레인 형상에 대한 해석 결과에서 얻은 연소 시간 경과에 따른 연소실 축방향 압력비 변화를 나타낸 것이다. 연소가스의 유속이 압력비에 비례하므로 연소 초기 실린더형 모터가 별형 모터에 비해 연소가스의 유속이 느린 것을 확인 할 수 있다. 침식연소속

도는 연소가스의 유속에 비례하므로 연소 초기 유속 감소가 침식연소현상으로 인한 연소실 압력 상승 경향을 감소시킨 것으로 판단된다.

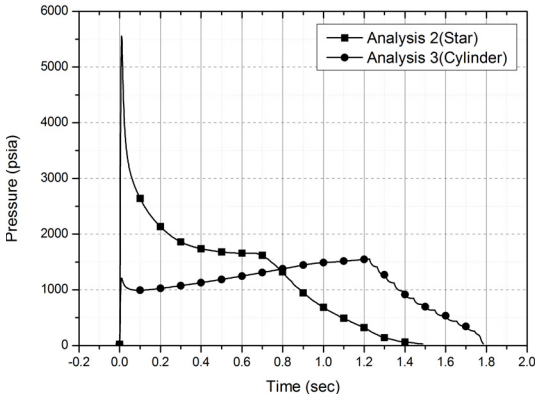


Fig. 3 Comparison of predicted pressure

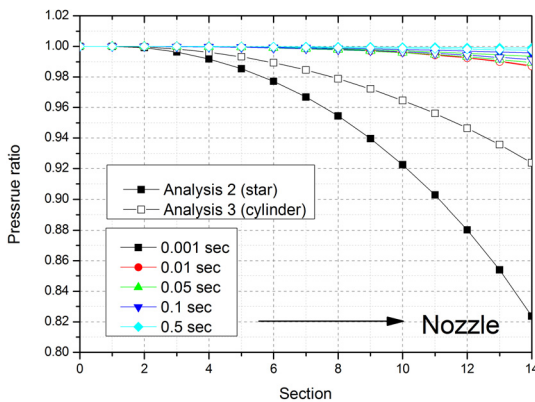


Fig. 4 Pressure along the grain

#### 4. 결 론

침식연소를 고려한 일차원 내탄도 해석 프로그램을 이용하여 실제 모터 시험 결과와 해석 결과를 비교하였다. 시험 결과와 비교를 통해 일반적인 이원추진제의 연소 시 표면 온도보다 표

면 온도보다 낮게 가정하여 해석한 결과가 보다 시험 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 본 연구에서 분석한 모터의 경우 추진제 표면으로 전달되는 대부분의 연소열이 추진제의 기화열에 사용되어 추진제 표면 온도는 연소실 온도에 비해 상온에 가까울 것으로 판단할 수 있었다. 또한 동일 추진제를 이용 시 그레인 형상을 별형에서 실린더형로 변경하여 침식연소로 인한 초기 압력 상승효과를 감소시킬 수 있다는 것을 확인하였다. 이는 실린더 그레인의 초기 연소 면적이 별형 그레인에 비해 작아 초기 연소가스 유동 속도가 작기 때문이며 이는 축방향 압력비 변화를 통해 확인 하였다.

#### 참 고 문 헌

1. K. Srinivasan, S. Narayanan, O. P. Sharma, "Numerical studies on erosive burning in cylindrical solid propellant grain", Springer-Verlag , Heat Mass Transfer 44:579 -585,2008
2. Sutton, G. P., "Rocket Propulsion Elements, 7th ed.", John Wiley & Sons Inc., 2001
3. 조민경, 허준영, 성홍계 "침식연소를 고려한 고체 로켓의 비정상 내탄도 해석 기법" 한국 추진공학회지, v. 13, no. 2, pp.17-25, 2009
4. Heister, S. D. and Landsbaum, E. M., "Analysis of Ballistic Anomalies in Solid Rocket Motors." Journal of propulsion and power, Vol. 7, No. 6, 1991, pp. 887-893.
5. 조민경, 권태훈 "침식연소를 고려한 고체로켓 추진기광 내탄도 해석기법 연구", 한국추진공학회 추계학술대회, 2010
6. N. Kubota, "Survey of Rocket Propellants and Their Combustion Characteristics, Ch 1" , AIAA, 1984