

가스발생기를 이용한 분리 메카니즘 성능예측 기법

오석진* · 이도형* · 김상화** · 김기언***

Performance Prediction Method of Separation Mechanism by using a Gas Generator

Seok-Jin Oh* · Do-Hyung Lee* · Sang-Hwa Kim** · Ki-Un Kim***

ABSTRACT

This paper presents a mathematical-physical model to predict the performance of a gas pusher used as a separation system powered by a gas generator. The empirical coefficients of heat loss and friction were determined from experiments. Based on the grain configuration of the gas generator, the analytical approach of combustion, flow and movement of a piston inside the chamber of a gas generator and a gas pusher was simulated by numerical method. The prediction method developed can be usefully applied to the design of separation mechanism systems.

초 록

본 논문에는 가스발생기와 분리장치 종류 중 하나인 가스푸셔의 내부 유동장 설계를 통한 수학적-물리적 모델이 기술되었다. 실험적 상수인 열손실계수와 마찰계수는 시험에 의해 결정되었다. 그레인 형상설계에 기초한 가스발생기와 가스푸셔 내부의 연소과정, 유동과 피스톤 거동이 수치해석적 방법으로 시뮬레이션 되었다. 개발된 예측기법은 향후 분리 메카니즘 시스템 설계 시에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

Key Words: Gas generator(가스발생기), Gas pusher(가스푸셔), Heat loss(열손실)

1. 서 론

분리 메카니즘 중 한 가지 방법으로 사용된 가스푸셔는 PAD(propellant actuated device)의 한 종류이다. PAD는 노즐이 없는 상태에서 그레인

형상설계를 통해 제어된 추진제의 에너지를 사용하여 특정임무를 수행하는 장치를 통칭한다. 파이로장치를 원동력으로 사용하는 파이로푸셔 시스템과 함께 많은 역할을 수행하는 가스푸셔 시스템은 미사일이 대형화되고 복잡하게 되면서 더욱 많은 분야로 그 적용이 확대되고 있다. 일반적으로 사용되는 가스푸셔는 노즐이 없는 가스발생기에서 발생한 고온 고압의 연소가스를 사용하여 피스톤을 밀어주는 정해진 역할을 수행한다.[1]

* 국방과학연구소 1본부-6부
연락처, E-mail: seokjin5@empal.com

** 국방과학연구소 1본부-3부

*** 국방과학연구소 대합체계

2. 본 론

2.1 분리메카니즘

일반적으로 두 물체의 결합 상태를 유지하면서 필요한 시점에 분리하기 위한 방법은 파이프로 분리 너트(Pyrotechnic Separation Nuts)를 이용하거나 전단 핀(Shear Pins)을 스퀴브(Squib)를 이용하여 결합 상태를 해제한 후 두 물체 사이의 밀폐 공간에 형성된 높은 압력을 이용하는 방법이 있다. 본 논문에 사용한 가스푸셔는 추진제 연소를 통한 고온 고압의 연소가스를 이용하여 두 물체의 결합 상태 해제와 분리가 동시에 가능한 구조로 개발되었다.[1]

가스푸셔의 내부 구조는 가이드, 볼지지대, 텅스텐볼, 피스톤 등으로 구성되어 있다.(Fig. 1) 제1연결부는 가스푸셔 내부의 볼지지대와 연결되어 있으며, 제2연결부는 피스톤과 연결되어 있다. 제1연결부의 볼지지대와 제2연결부의 피스톤은 텅스텐볼과 가이드를 이용한 잠금장치로 연결되어 두 물체간의 결합상태를 유지한다.

가스푸셔의 동작 원리는 다음과 같다.

- (1) 추진제에 의해 생성된 압력이 가스푸셔의 내부에 공급되기 전까지 가이드는 텅스텐 볼의 운동을 구속함으로써 결합 상태를 유지한다. (Fig. 2(a))
- (2) 추진제가 연소하여 고온/고압의 연소가스가 발생하여 가스푸셔로 유입되면 내부 압력 상승으로 인하여 가이드가 움직임으로써 텅스텐 볼의 구속이 해제된다. (Fig. 2(b))
- (3) 구속이 해제됨과 동시에 연소가스의 압력을 이용하여 피스톤을 밀어냄으로써 두 물체를 분리시킨다. (Fig. 2(c))

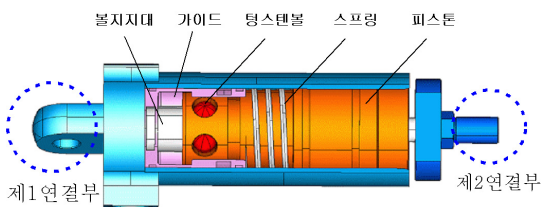


Fig. 1 Schematic of gas pusher

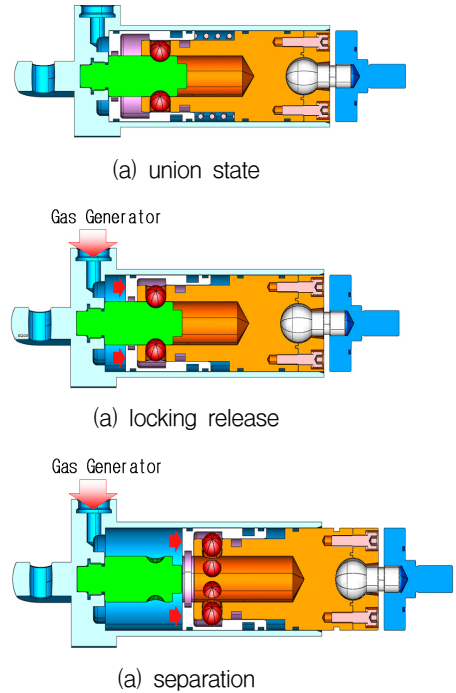


Fig. 2 Gas pusher separation mechanism

2.2 시험장치

가스푸셔의 성능분석을 위한 시험장치를 제작하였다.(Fig. 3) 시험장치는 점검장비에서 스퀴브 신호를 인가하며, 리니어 가이드(Linear guide)를 이용하여 가스푸셔가 부하를 한 방향으로만 분리하도록 설계되었다. 부하의 이동상태를 측정하기 위해 포텐쇼미터를 부착하였으며, 가스푸셔 내부의 압력 변화와 힘을 측정하기 위해 압력센서와 로드셀을 가스푸셔에 조립하였다.

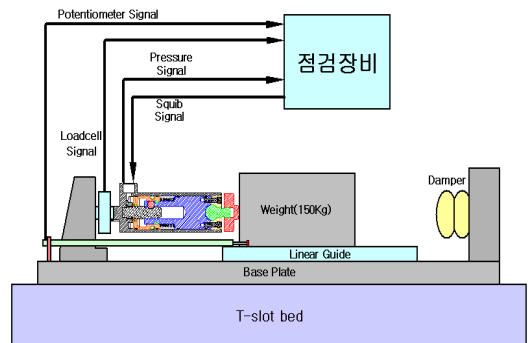


Fig. 3 Schematic of experiment system

2.3 지배방정식

가스푸셔에 의해 발생하는 기계적 에너지 출력을 평가할 때, 일반적으로 장치의 열적 물성치들이 특정 시간에 공간적으로 균일하다는 준평형과정임을 가정한다. 초기 비정상 유동의 작동 시간이 매우 짧기 때문에, 이러한 준평형 모델은 만족할만한 결과를 나타내게 된다.[1,2] 이러한 가정은 모델에 대해 상대적으로 쉽게 풀 수 있는 시간에 대한 상미분 방정식 시스템을 이룬다.

가스푸셔 모델링에 고려된 검사체적은 노즐이 없기 때문에 하나의 시스템으로 가정하였다. 부하중량의 동적거동에 대한 1차원 방정식은 다음과 같다.

$$a_{pis} = \frac{PA_{pis} - F_f - g \sin \theta}{m} \quad (1)$$

시스템 작동중 피스톤에 작용하는 마찰력(부하 질량에 작용되는 마찰력 포함)은 다음과 같이 정의한다. 여기서 a_f 는 마찰계수를 의미한다.

$$F_f = a_f F = a_f P A_{pis} \quad (2)$$

지배방정식은 각 검사체적에 대한 질량, 에너지 보존방정식으로부터 유도된 압력과 가스푸셔 피스톤 속도 및 이동거리에 대한 1차원 운동방정식이다.[3,4] 4th-order Runge-Kutta 방법을 사용하여 식 (3)~(8)을 동시에 계산하여 각 검사체적내 시간에 따른 밀도, 압력, 체적, 그레인 연소거리 및 피스톤 속도와 이동거리 변화를 해석하였다.

$$\frac{d\rho}{dt} = \left[\dot{m}_p - \rho \frac{dv}{dt} \right] \cdot \frac{1}{v} = \left[\rho_p A_b r_b - \rho (A_b r_b + A_{pis} U_{pis}) \right] \cdot \frac{1}{v} \quad (3)$$

$$\frac{dP}{dt} = \left\{ \gamma R_c T_p (\dot{m}_p) - (A_b r_b + A_{pis} U_{pis}) P \right\} / v = \left\{ \gamma R_c T_p (\rho_p A_b r_b) - (A_b r_b + A_{pis} U_{pis}) P \right\} / v \quad (4)$$

$$\frac{dv}{dt} = A_b r_b + A_{pis} U_{pis} \quad (5)$$

$$\frac{d(web)}{dt} = r_b \quad (6)$$

$$\frac{dU_{pis}}{dt} = \frac{PA_{pis} - F_f}{m} - g \sin \theta \quad (7)$$

$$\frac{dH}{dt} = U_{pis} \quad (8)$$

3. 결과 및 고찰

개발된 프로그램을 사용하면 추진제의 연소물성 및 연소속도 데이터, 가스푸셔의 열손실 및 마찰계수, 피스톤 이동에 따른 내부체적 변화, 그레인의 연소거리에 따른 연소면적 데이터, 부하중량의 입력값을 통해 가스푸셔 내부의 압력, 가스푸셔 내부에서 이동하는 피스톤의 가속도, 속도, 이동거리와 추력을 얻을 수 있다. 추가적으로 각 작동시간에서 추진제 그레인의 연소거리와 연소면적 변화를 볼 수 있다.

Fig. 4는 검증시험 시 가스발생기에 사용된 그레인 형상을 보여준다. 그레인은 7-perforated 형상으로 그레인의 외경은 22mm, 그레인의 길이는 30mm이고, 연소는 전면에 동시에 이루어진다.

Fig. 5에는 Fig. 2의 시험장치를 이용하여 수행된 2번의 시험으로 얻어진 시간에 따른 압력과 피스톤 이동거리가 나타나 있다. 해석프로그램으로 동일 상황조건을 입력하여 시험결과와 비교를 수행하였다. 이 때 열손실 및 마찰계수는 시험결과와 레벨이 맞도록 보정을 하였다. 보정으로 얻어진 열손실계수는 전반부에는 0.52, 후반부에는 0.75가 사용되었다. 이 의미는 전반부에는 화염온도의 약 50%, 후반부에는 약 25%의 손실이 일어난다는 것을 의미한다. 마찰계수는 모든 영역에서 2%인 것으로 나타났다. 가스푸셔의 내부압력의 경향과 약간의 차이는 있으나 피스톤 이동거리 선도와 함께 전반적으로 유사한 값을 얻을 수 있었다.

Fig. 6과 7에는 추진제 그레인의 길이 변화에 따른 가스푸셔의 거동데이터들이 나타나있다. Fig. 6에서 볼 때 추진제의 길이가 5mm 길어졌을 때는 연소실 압력은 약 300psia 증가하고, 피스톤 종말속도는

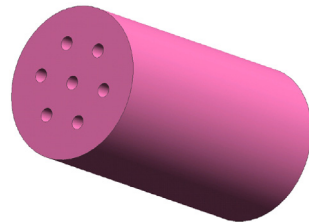


Fig. 4 Grain shape of gas generator

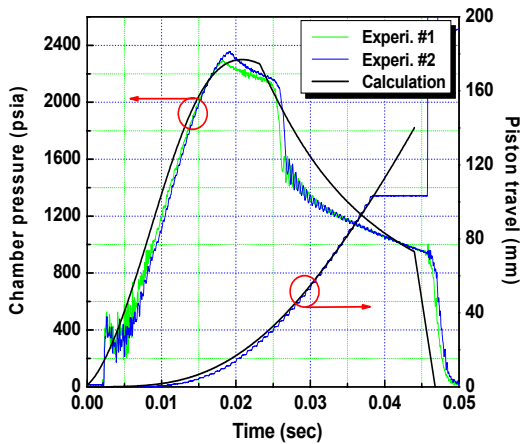


Fig. 5 Verification of program

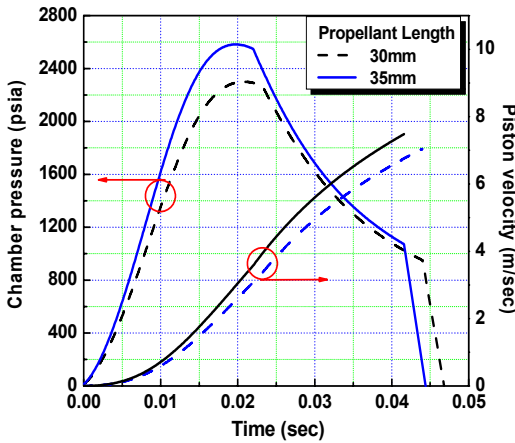


Fig. 6 Analytical chamber pressure and piston velocity

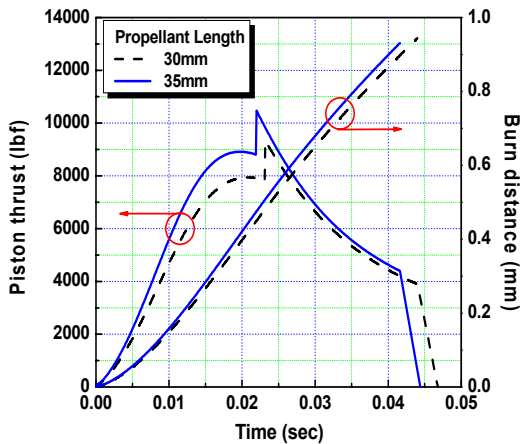


Fig. 7 Analytical piston thrust and grain burn distance

0.5m/sec 정도 빨라지는 것으로 나타났다. Fig. 7에서 볼 때 최대추력은 약 1000lbf 증가하고, 추진제의 연소거리는 추진제 그레인 길이에 따라 큰 차이 없이 약 0.9mm 정도 연소가 이루어지는 것으로 나타났다. 개발된 프로그램을 사용하면 실제 가스푸셔 작동시험을 하지 않고도, 연소거리에 따른 연소면적만 변경하여 시험에 대한 예측이 가능하다. 검증시험 후 연소하고 남은 추진제 그레인을 분해하여, 연소거리를 측정한 결과 해석과 유사한 약 1.0mm의 연소가 이루어진 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 가스발생기와 분리장치 종류 중 하나인 가스푸셔의 가스동역학 해석을 통한 수학적-물리적 모델이 기술되었다. 실험적 상수인 열손실계수와 마찰계수는 시험에 의해 결정되었다. 그레인 형상설계에 기초한 가스발생기와 가스푸셔 내부의 연소과정, 유동과 피스톤 거동이 수치해석적 방법으로 시뮬레이션 되었고, 검증시험을 통해 해석모델 및 프로그램의 타당성을 입증하였다. 개발된 해석기법은 향후 분리 메카니즘 시스템 성능설계시에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Lee, H. S., "Unsteady Gasdynamics Effects in Pyrotechnic Actuators," *Journa of Spacecraft and Rockets*, Vol. 41, No. 5, 2004, pp.877-886
2. Lee, H. S., "Modeling of High Speed Duct-Flows in CAD/PAD," *AIAA* 2000-3409
3. Tao, Y., Wu, X. and Chen, X., "Design of a Micro Solid Rocket Motor," *AIAA* 97-2684
4. Barud, A. M., Gonthier, K. A., and Decroix, M. E., "Performance Modeling for Explosively Actuated Valves" *AIAA* 2005-3843