

고체추진제를 이용한 PAD 시스템 설계기법

오석진* · 이도형* · 김윤곤*

The Design Approach of PAD System by using a Solid Propellant

Seok-Jin Oh* · Do-Hyung Lee* · Yoon-Gon Kim*

ABSTRACT

A quasi-equilibrium model is used in order to aid movement and ballistic analysis for a propellant actuated device(PAD) system. The validity of the model is examined by experiments of a PAD system. The appropriateness of its usage for application was explored by comparing the tendency of experiments and analysis results, and the coefficients of friction and heat loss were obtained. The design method developed will be applied to the design of PAD systems.

초 록

본 논문에는 준평형 모델을 사용하는 PAD(propellant actuated device) 시스템의 거동 및 추진제 형상설계에 관하여 기술하였다. 준평형 모델의 검증을 위해 PAD 시스템 시험이 수행되었다. 시험과 해석 결과를 비교하여 상호 경향이 유사함을 확인함으로써 준평형 모델적용의 타당성을 입증하였고, 사용된 시스템의 열손실 및 마찰계수를 얻을 수 있었다. 개발된 설계기법은 향후 PAD 시스템 설계 시에 유용하게 사용될 것이다.

Key Words: Quasi-equilibrium model(준평형 모델), Heat loss(열손실), Friction factor(마찰계수)

1. 서 론

PAD는 노즐이 없는 상태에서 제어된 추진제의 에너지를 사용하여 특정역할을 수행하는 장치를 말한다. 파이로-분리 시스템과 함께 많은 역할을 수행하는 PAD 시스템은 미사일이 대형화되고 복잡하게 되면서 새로운 분야로 그 적용이 확대되고 있다. 일반적으로 사용되는 PAD는

압력챔버에서 발생하는 고온 고압의 연소가스를 사용하여 피스톤을 밀어주는 역할을 수행한다. 또한 동일한 작동원리를 이용하여 유로를 막거나 피스톤 끝 부분에 커터를 달아서 케이블을 절단하는 등의 작동도 가능하다. 최근에는 우주선의 유압장치가 고장날 경우 이루어지는 비상착륙시 착륙기어를 작동하는 역할까지 수행하고 있다.[1]

본 연구에서는 이러한 PAD 시스템의 거동 및 추진제 형상설계를 위하여 준평형 모델을 사용하여 해석을 수행하였다.

* 국방과학연구소 기술-42
연락처자, E-mail: seokjin5@empal.com

2. 이론해석

21 해석모델

Fig. 1에는 해석에 사용된 개념적인 모델을 도시하였다. 압력챔버 내부에서 추진제가 연소하여 압력이 상승하고, 이 압력을 사용하여 부하로 작용하는 질량을 밀어주게 된다.

22 해석순서

본 연구에서 준평형 모델을 사용하는 해석순서가 Fig. 2에 나타나있다. 시간에 따른 챔버 압력을 입력데이터로 사용하고, 최종출력 결과는 각 시간의 피스톤 이동거리와 추진제 연소거리에 따라 요구되는 추진제 연소면적이다.

얻어진 연소거리-연소면적 결과에 따라 추진제 그레인의 형상을 설계하게 된다.

23 지배방정식

PAD에 의해 발생하는 기계적 에너지 출력을 평가할 때, 일반적으로 장치의 열적 물성치들이 특정 시간에 공간적으로 균일하다는 준평형과정을 가정한다. 초기 비정상 유동의 작동시간이 매우 짧기 때문에, 이러한 준평형 모델은 만족할 만한 결과를 나타내게 된다.[1,2] 실제 본 문제에 사용된 PAD의 거동도 이와 같은 가정이 잘 적용된다. 이러한 가정은 모델에 대해 상대적으로 쉽게 풀 수 있는 시간에 대한 상미분 방정식 시스템을 이룬다.

해석모델에 대한 수치적 모델링은 결과적으로 다음과 같은 식들로 나타낼 수 있다. 주어진 압력을 이용하여 얻어진 추력에서 가속도를 계산하고, 피스톤 이동속도 및 이동거리, 챔버내부체

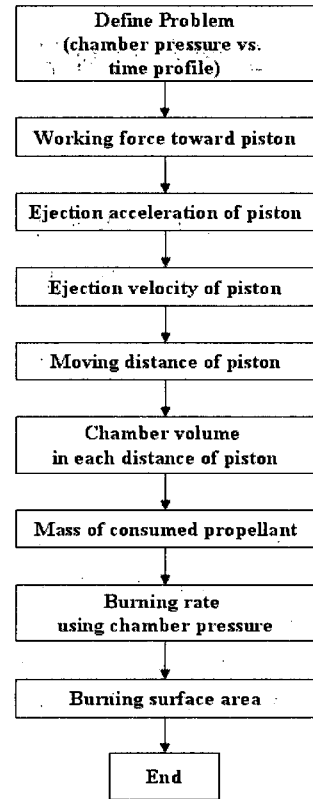


Fig. 2 Flow chart of the calculation sequence

적 변화, 사용된 추진제 질량, 추진제 연소면적을 계산하기 위한 식들이며, 각 시간구간에 대해 모든 방정식들이 동시에 계산되어지게 된다.[3,4] 압력을 받게 되는 피스톤 단면이 변화하는 경우는 식 (4)와 같이 함수형태가 되고, 초기에 마찰 계수 및 열손실계수는 가정된 값이 사용되어진다. 제어체적이 Fig. 1에서와 같이 챔버내부 공간으로 설정되었기 때문에 식 (1)~(6)의 반복계산은 피스톤이 구조체를 빠져나갈 때까지 반복 수행된다.

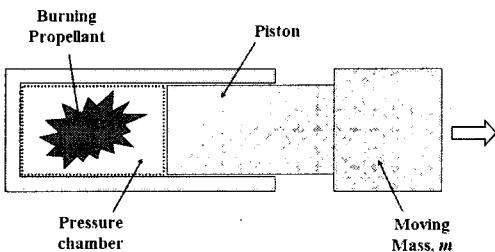


Fig. 1 Schematic of a PAD

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_P - F_f = P \cdot A(x) - F_f \quad (1)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F}{m} \quad (2)$$

$$\frac{dx}{dt} = v_0 + t \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3)$$

$$V = \int_0^x A(x) dx \quad (4)$$

$$m_p = \frac{P \cdot V \cdot M}{18541 \cdot T} \quad (5)$$

$$A_b = \frac{1}{\rho_p \cdot r_b} \frac{dm_p}{dt} \quad (6)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 검증용 시험

해석시 사용되는 마찰계수 및 열손실계수를 이론적으로 구하는 것은 매우 많은 노력과 시간이 소요될 뿐만 아니라 얻어진 결과에 대해서도 신뢰성이 부족하다. 그러므로 PAD 시스템에 적용할 수 있는 계수들을 얻고, 각 시간에 따른 피스톤 이동거리 및 추진제 연소거리에 따른 연소면적의 경향이 실제 시험결과와 유사한지 검증하기 위해 시험이 수행되었다. Fig. 3에는 시험에 사용된 시험장치의 사진을 도시하였다. 사진의 좌측부분에는 PAD가 장착되어 있고, 우측부분에는 부하로 작용하는 질량체가 나타나있다. 또한 점화 및 계측을 위한 케이블들이 보여지고 있다.

3.2 해석결과

준평형 모델을 사용한 입력데이터 및 해석결과들을 Fig. 4~7에 나타내었다. Fig. 4에는 입력데이터인 챔버압력이 나타나있다. 시험결과와 유사한 압력이 입력조건으로 사용되었다. 각 시간

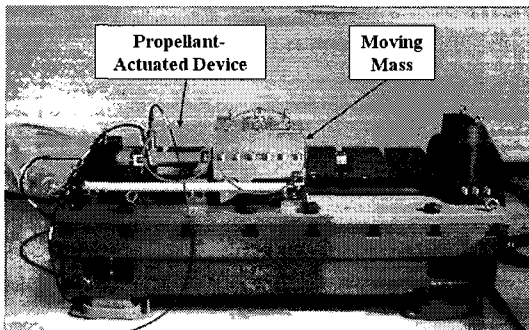


Fig. 3 Photograph of a PAD system to experiment

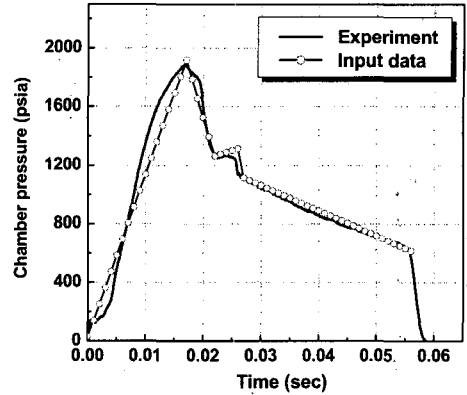


Fig. 4 Input data of chamber pressure

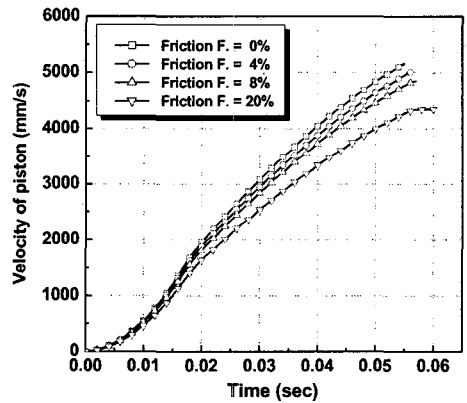


Fig. 5 Analytical Piston velocity

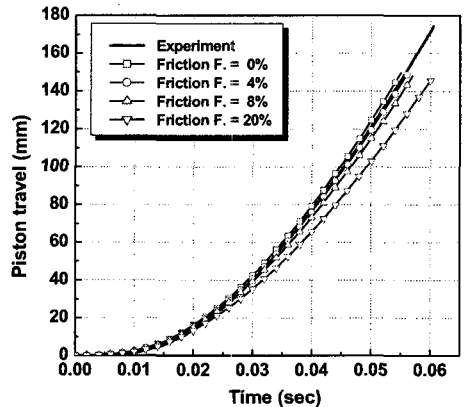


Fig. 6 Piston travel distance vs. time

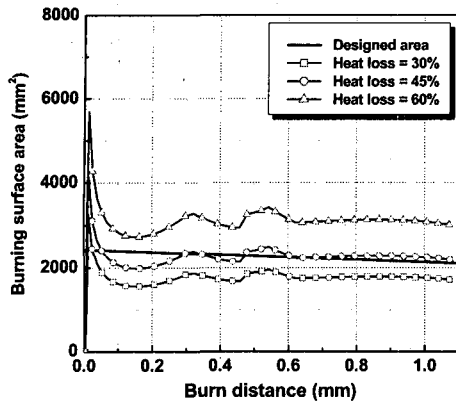


Fig. 7 Burning surface area vs. burn distance

에서 계산된 피스톤 이동속도가 Fig. 5에 도시되어 있다. 마찰계수는 0~20%까지의 값들이 사용되었다. 마찰계수의 차이에 따라 최종속도는 약 1400mm/s, 피스톤의 분리시간은 약 10msec가량 차이가 발생함을 확인할 수 있었다. Fig. 6에는 마찰계수에 따른 피스톤 이동거리가 나타나있다. 그림에서 보듯이 마찰계수를 일정한 값으로 사용했음에도 불구하고 시험결과와 그 경향이 매우 유사함을 확인할 수 있다. 결과적으로 마찰계수가 4%인 경우에서 시험결과를 정확하게 모사할 수 있었다. 이는 본 시스템의 마찰계수라고 볼 수 있고, 유사한 재질과 구조를 가지는 시스템의 예측 및 설계시 초기치로 적용이 가능한 값이다. 추진제 그레인 설계를 위한 데이터인 추진제 연소거리에 따른 연소면적이 Fig. 7에 보여진다. 열손실계수는 30~60% 사이의 값이 사용되었고, 45%의 열손실을 가정한 경우 시험에 사용된 그레인의 연소면적과 유사한 값을 보이고 있다. 실제 연소면적과 약간의 경향 차이를 보이고 있는데 이는 피스톤이 이동할 때 각 거리에

다른 챔버 내부체적의 차이 및 열손실계수를 일정한 값으로 사용했기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 준평형 모델을 사용하여 PAD 시스템 해석을 수행하였다. 해석을 통하여 각 시간에서의 추력, 피스톤의 가속도, 속도, 이동거리 그리고 사용되는 추진제 질량, 추진제 연소거리에 따른 연소면적을 얻을 수 있었다. 본 시험에 사용된 PAD 시스템에서의 마찰계수 및 열손실계수는 각각 4%, 45%인 것으로 분석되었다. 해석결과와 검증시험과의 경향을 비교하여 개발된 프로그램이 유사 시스템의 분석 및 설계에 도움을 줄 수 있음을 보였다. 향후 다양한 PAD 시스템에서 진보한 해석기법을 위해서는 마찰계수나 열손실을 미리 예측해 볼 수 있는 해석 모델링 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Lee, H. S., "Unsteady Gasdynamics Effects in Pyrotechnic Actuators," *Journal 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