

研究論文

PAD 모델링을 통한 분리메카니즘 시뮬레이션 기법

오석진*† · 이도형*

Simulation of Separation Mechanism
by Modeling a Propellant Actuated Device

Seok-Jin Oh*† · Do-Hyung Lee*

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. A quasi-steady model is used in order to aid ballistic analysis for a propellant actuated device(PAD). The empirical coefficients of heat loss and friction were determined from experiments. The analytical approach of combustion, flow and movement of a piston inside the chamber of the PAD, consisted of a gas generator and a gas pusher, was simulated by numerical method based on the grain configuration design of the gas generator. The prediction method developed can be usefully applied to the design of separation mechanism systems.

초 록

본 논문에는 분리장치 종류 중 하나인 가스푸셔와 가스발생기의 수학적-물리적 모델이 기술되어있다. 준정상상태 모델이 가스푸셔와 가스발생기로 구성된 PAD의 성능해석을 위해 도입되었다. 실험적 상수인 열손실계수와 마찰계수는 시험에 의해 결정되었다. 그레인 형상설계에 기초한 가스발생기와 가스푸셔 내부의 연소과정, 유동과 피스톤 거동이 수치해석적 방법으로 시뮬레이션 되었다. 개발된 예측기법은 향후 유사한 분리메카니즘 시스템 설계시에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

Key Words: Quasi-Steady Model(준정상상태 모델), Gas Generator(가스발생기), Heat Loss(열손실)

1. 서 론

PAD(propellant actuated device)는 그레인 형상설계를 통해 제어된 추진제의 에너지를 사용

하여 특정 임무를 수행하는 장치를 통칭한다. 화약으로 작동하는 파이로-분리 시스템과 함께 많은 역할을 수행하는 PAD는 유도탄이 대형화되고 다기능화되면서 새로운 분야로 그 적용이 점차 확대되고 있다. 일반적으로 사용되는 PAD는 추진제를 연소시켜 압력챔버에서 발생하는 고온 고압의 연소가스를 사용하여 피스톤을 밀어서

접수일 2010. 10. 5, 수정완료일 2010. 11. 29, 게재확정일 2010. 12. 8

* 정회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 6부

† 교신저자, E-mail: seokjin5@empal.com

주어진 역할을 수행한다. 이 밀려지는 피스톤을 사용하여 분리 또는 유로를 막거나 피스톤 끝 부분에 커터를 달아서 케이블을 절단하는 등의 작동도 가능하다. 최근에는 우주선의 유압장치가 고장날 경우 이루어지는 비상착륙시 착륙기어를 작동시키는 역할까지 수행하고 있다[1]. 이렇게 다양한 역할을 수행하는 PAD는 그 역할에 따라 에너지의 양 뿐만 아니라 여러 형태의 시간-추력 선도가 요구되고, 이를 위해서는 적절한 추진제 그레이의 형상설계를 포함한 PAD의 성능해석이 필수적이다. 해외에서는 PAD를 사용하여 특정 물체를 들어주는 장치에 대한 모델링 및 해석[6]과 작은 관 사이로 고속으로 흐르는 PAD 장치의 모델링 및 해석연구[3] 등이 이루어지고 있다. 그러나 국내에서 이와 같은 PAD 장치의 해석 및 설계에 관련된 연구는 거의 전무한 실정이다.

본 연구에 사용된 PAD는 가스푸셔(GP)와 가스발생기(GG)로 구성되는 분리장치로 성능해석을 위하여 PAD를 수학적-물리적 모델링 및 이 모델을 사용한 수치적 계산을 수행하고, 그 결과를 시험결과와 비교검증 하였다.

2. 본 론

2.1 분리메카니즘

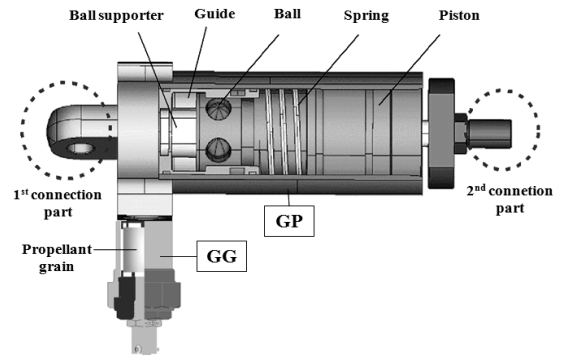
일반적으로 두 물체의 결합상태를 유지하다가 필요한 시점에 분리를 하는 방법은 첫 번째 과이로 분리 너트를 이용하거나 두 번째로 전단 핀을 스퀴브(squib)를 이용하여 결합상태를 해제한 후 두 물체 사이의 밀폐공간에 형성된 높은 압력을 이용하는 방법 등이 있다. 본 연구에 사용된 가스푸셔 및 가스발생기로 구성된 PAD의 내부 구조는 Fig. 1(a)에서 보듯이 가스푸셔의 경우 가이드, 볼지지대, 텅스텐볼, 피스톤 그리고 가스발생기의 경우 에너지원이 되는 추진제 그레이, 점화기, 리테이너 등으로 구성된다. 가스푸셔의 제1연결부는 가스푸셔 내부의 볼지지대와 연결되어 있으며, 제2연결부는 피스톤과 연결되

어있다. 제1연결부의 볼지지대와 제2연결부의 피스톤은 텅스텐볼과 가이드를 이용한 잠금장치로 연결되어 분리전까지 두 물체간의 결합상태를 유지한다.

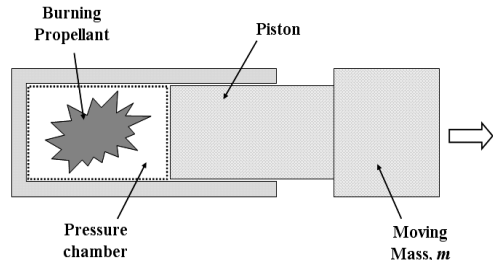
분리작동시에는 Fig. 1(b)에서와 같이 가스발생기내의 추진제가 연소하여 발생된 고온고압의 연소가스를 이용하여 연소실 내부 압력을 상승시킴으로써 구속이 해제됨과 동시에 가스발생기에서 발생된 이 압력을 이용하여 피스톤을 밀어냄으로써 두 물체를 분리시킨다. 본 연구에 사용된 가스푸셔는 초기위치에서 피스톤이 140 mm 이동시 가스푸셔 구조체로부터 완전히 분리가 이루어진다.

2.2 검증용 시험장치

PAD의 성능해석 결과를 검증하기 위한 시험장치를 Fig. 2(a)와 같이 제작하였다. 시험장치는 점검장비에서 스퀴브 신호를 인가하여 가스발생



(a) Structure of a PAD

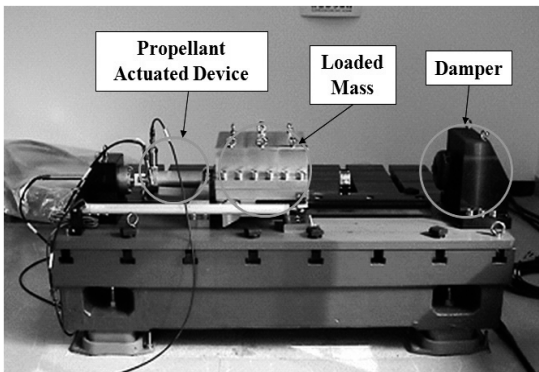


(b) Schematic of a PAD

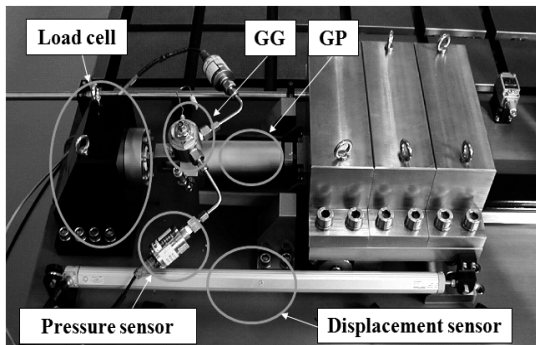
Fig. 1 PAD used in this study

기에 장착된 착화기를 통해 점화되며[2], 리니어 가이드(linear guide)를 이용하여 PAD가 부하질량을 한 방향으로만 분리할 수 있도록 설계되었다. Fig. 2(a)에서 베드의 오른쪽 끝부분에는 분리된 질량체의 충격을 흡수할 수 있는 댐퍼가 설치되어 있다. 부하질량은 150 kg으로 설정하여 사용하였다. 시험시 정확한 결과계측을 위해 Fig. 2(b)에서 보듯이 부하의 이동정도를 계측하기 위한 변위센서를 부착하였으며, PAD 내부의 압력과 추력 변화를 측정하기 위해 압력센서와 로드셀을 PAD에 조립하여 구성하였다.

시험장비로 측정할 수 있는 데이터는 시간-압력, 시간-추력, 시간-이동거리 선도이다. 시간-이동거리 데이터로부터 시간미분을 통해 속도와 가속도 데이터를 추가로 획득할 수 있다.



(a) T-slot bed with a PAD



(b) PAD and a loaded mass

Fig. 2 Experimental setup

2.3 지배방정식

PAD에 의해 발생하는 기계적 에너지 곧 성능을 평가할 때, 일반적으로 장치의 열적 물성치들이 특정시간에 공간적으로 균일하다는 준정상상태임을 가정한다. 초기 비정상 유동의 작동시간이 매우 짧기 때문에, 이러한 준정상상태 모델은 만족할만한 결과를 나타내게 된다[3-4]. 이러한 가정은 해석모델에 대해 성능해석을 위한 상미분 방정식 시스템으로 모델링이 가능하게 해준다.

PAD 모델링에 고려된 검사체적은 Fig. 1(b)의 점선박스 부분에서와 같이 가스발생기와 가스푸셔 내부를 하나의 검사체적으로 가정하였다. 이러한 가정은 실제 가스발생기 노즐부가 없고 가스푸셔와 연소실을 공유하기 때문에 타당한 가정이다. 부하질량의 동적거동에 대한 1차원 방정식은 Eq. (1)과 같다. Equation (1)에서 a_{pis} 는 피스톤 가속도, P 는 챔버압력, A_{pis} 는 피스톤 단면적, F_f 는 마찰력, m 은 부하질량, g 는 중력가속도, θ 는 지표면과 가스푸셔의 축방향이 이루는 각도를 각각 의미한다.

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

시스템 작동 중 부하질량에 작용되는 마찰력과 피스톤에 작용하는 마찰력 F_f 는 Eq. (2)와 같이 정의된다. 여기서 F 는 피스톤 추력을, a_f 는 마찰 계수를 나타낸다.

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

고체 추진제 연소속도 r_b 는 Eq. (3)과 같이 정의된다. a 는 연소속도 상수이고, n 은 연소속도 압력지수를 나타낸다[5].

$$r_b = aP^n \quad (3)$$

지배방정식은 각 검사체적에 대한 질량 및 에너지 보존방정식으로부터 유도된 PAD 내부압력

과 피스톤 속도 및 이동거리에 대한 1차원 운동 방정식이다[6-8]. Equation (4)~(9)를 4th-order Runge-Kutta방법을 사용하여 동시에 계산하여 각 검사체적내 시간에 따른 밀도(ρ), 압력(P), 체적(v), 그레인 연소거리($Dist_b$) 및 피스톤의 속도(U_{pis})와 이동거리(H)의 변화를 해석하였다. 여기서 A_b 는 추진제 그레인 연소면적, T_p 는 추진제의 화염온도를 의미하고 하첨자에서 P 는 추진제, pis 는 피스톤을 각각 나타낸다.

$$\frac{d\rho}{dt} = \left[\dot{m}_p - \rho \frac{dv}{dt} \right] \cdot \frac{1}{v}$$

$$= \left[\rho_p A_b r_b - \rho (A_b r_b + A_{pis} U_{pis}) \right] \cdot \frac{1}{v} \quad (4)$$

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

$$= \left\{ \gamma R_c T_p \cdot (\rho_p A_b r_b) - (A_b r_b + A_{pis} U_{pis}) P \right\} / v \quad (5)$$

$$\frac{dv}{dt} = A_b r_b + A_{pis} U_{pis} \quad (6)$$

$$\frac{d(Dist_b)}{dt} = r_b \quad (7)$$

$$\frac{dU_{pis}}{dt} = \frac{PA_{pis} - F_f}{m} - g \sin \theta \quad (8)$$

$$\frac{dH}{dt} = U_{pis} \quad (9)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 검증시험과의 비교

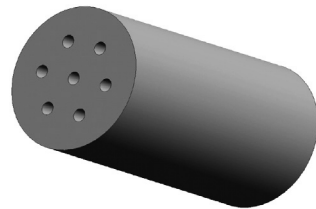
개발된 프로그램을 사용할 때 추진제의 연소물성치 및 연소속도 데이터, PAD의 열손실 및 마찰계수, 피스톤 이동에 따른 PAD 내부체적 변화, 그레인의 연소거리에 따른 연소면적 데이

터, 부하질량의 입력을 통해 PAD 내부의 압력, 부하질량과 함께 움직이는 피스톤의 가속도, 속도, 이동거리와 추력을 얻을 수 있다. 추가적으로 각 작동시간에서 추진제 그레인의 연소거리를 확인할 수 있다.

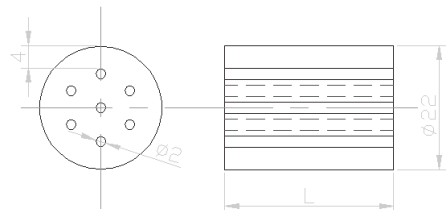
Table 1에는 피스톤 이동에 따라 PAD 내부체적 변화량이 정리되어있다. 내부 체적변화는 PAD 솔리드 모델링 파일에서 피스톤 이동에 따라 계산을 통해 얻었다. 피스톤이 초기위치에서 26 mm 이동하면 피스톤이 볼지대에서 빠지게 되어 체적이 급격히 증가한다. 그리고 이동거리가 140 mm가 되면 피스톤이 구조체로부터 완전히 분리되기 때문에 이 거리에 도달하면 계산이 종료되도록 설정하였다.

Table 1. PAD inner volume data

Piston travel [mm]	PAD inner volume [mm ³]
0	54,441
8	72,626
26-	113,520
26+	171,103
140	479,246



(a) Schematic of a propellant grain



(b) Configuration of a propellant grain

Fig. 3 Grain shape of the gas generator

Figure 3은 검증시험시 가스발생기에 사용된 추진제 그레인 형상을 보여준다. 추진제는 복기형 추진제로 자체 개발된 조성을 가지고 있으며 NC(Nitrocellulose), NG(Nitroglycerin)가 주성분으로 구성된다. 추진제의 연소속도는 20 °C, 1000 psia에서 약 20 mm/sec이다. 그레인은 7-perforated 형상으로 그레인의 외경은 22 mm, 그레인의 길이(L)는 30 mm이고, Fig. 4에서 보듯이 연소가 추진제 그레인의 전면에서 이루어지므로 분리메카니즘 작동시 그레인의 외경은 줄어들고 내경은 증가하며 그레인의 길이는 점차 짧아지게 된다.

Figure 5에는 Fig. 2의 시험장치를 이용하여 수행된 시험결과로 시간에 따른 압력 및 피스톤 이동거리가 나타나있다. 시험시 온도조건은 20 °C이다.

해석프로그램으로 동일 상황조건을 입력하여 시험결과와 비교를 수행하였다. Fig. 5에서 해석 결과는 PAD의 내부압력 경향과 약간의 차이는 있으나 피스톤 이동거리 선도와 함께 전반적으로 유사한 값을 확인할 수 있었다. 이러한 약간의 차이발생 원인 중 하나는 실제 작동상황에서와 해석시 사용된 PAD 내부체적변화 입력값에서의 오차 때문일 것으로 생각된다. 이 때 열손실(heat loss) 및 마찰계수는 시험결과와 레벨이 맞도록 보정하였다. 일반적으로 마찰계수는 접촉하는 두 재질에 의한 영향과 기밀에 의한 영향의 합으로 나타내어지고, 열손실계수는 유효노출면적에 비례하는 것으로 알려져있다[9]. 보정의

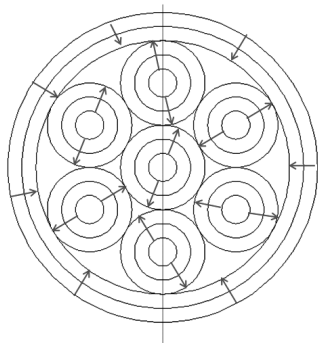
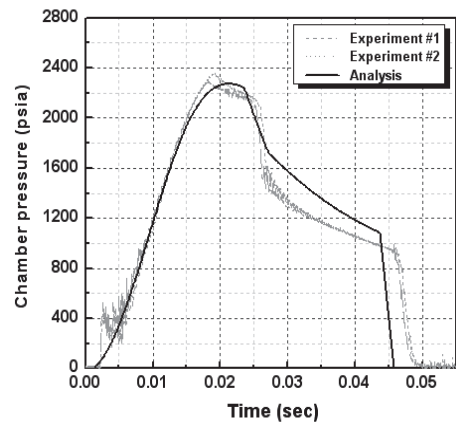


Fig. 4 Burning pattern (all exposed burning)

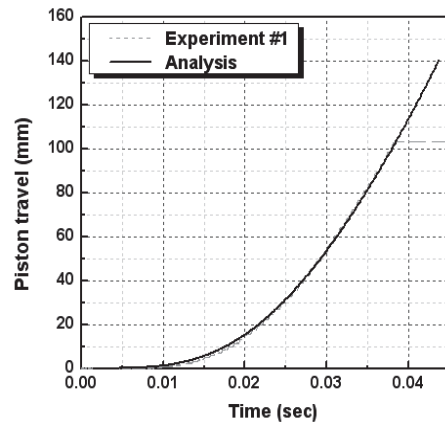
로 얻어진 열손실계수는 피스톤 이동거리 0 mm에서 26 mm까지인 전반부에는 0.50, 피스톤 이동거리 26 mm에서 140 mm까지인 후반부에는 0.55이었다. 이 의미는 전반부에는 추진제 화염 온도의 약 50%, 후반부에는 약 45%의 열손실이 일어난다는 것을 의미한다. 마찰계수는 모든 영역에서 1% 수준인 것으로 조사되었다.

3.2 시스템 요구조건에 따른 적용 예

특정 분리메카니즘을 적용한 분리시스템 개발은 제한된 일정과 비용문제를 항상 수반한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 사전에 M&S(Modeling and Simulation)를 통해 충분한 해석을 수행하고 시험조건을 미리 한정하



(a) P-t graph



(b) H-t graph

Fig. 5 Validation of the program developed

여 시험횟수를 최소화해야만 주어진 자원을 가지고 개발에 성공할 수 있다.

일반적으로 PAD 계산으로 얻어지는 데이터 중 챔버압력을 살펴보면 PAD 구조체 설계에 사용되는 최대작동압력을 미리 정확하게 예측함으로써 안전하면서도 최적화된 구조체 설계를 할 수 있게 한다. 또한 전체 유도탄의 허용치 이상의 가속도가 부가될 경우 탄의 전자장비 등에 심각한 영향을 줘서 정상작동을 보장할 수 없게 된다. 추력을 해당 부하질량으로 나누면 가속도가 나오기 때문에 예상 가속도 예측을 통해 문제점을 미리 파악할 수 있다. 해석시 얻어지는 피스톤의 속도는 동역학 해석을 통해 얻어진 분리하기 위한 최소한의 속도가 주어진 환경조건에서 확보되는지를 미리 확인하여 안전하고 확실한 분리거동 예측을 가능하게 해준다.

검증시험에서와 동일한 PAD를 사용하여 다음과 같은 조건의 시스템 요구조건을 만족하는 그레인 형상을 설계한다고 해보자. 그레인 단면형상은 검증시험과 동일하다고 가정한다. (20 °C 기준시)

- ① 피스톤의 종말속도는 7 m/sec 이상.
- ② 최대추력 8500 lbf 이하.

이 때 두 조건을 동시에 만족하는 그레인 길이를 결정하기 위하여, 분리거동 및 분리성능 예측을 수행하였다.

시스템 요구조건인 20 °C 기준으로 최저속도 이상과 최대추력 이하라는 조건을 모두 만족시키는 추진제 그레인 형상선정이 필요하다. 그레인 길이를 조정하여 요구조건을 만족시키는 조건을 찾기 위하여 그레인 길이에 따른 PAD 성능해석을 수행하고, 결과를 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6(a)에는 시간에 따른 챔버압력이, (b)에는 시간에 따른 피스톤 추력이, (c)에는 시간에 따른 피스톤 속도, (d)에는 시간에 따른 피스톤 이동거리가 나타나있다. 물리적으로 당연한 결과이지만 그레인의 길이가 20 mm에서 40 mm로 길이가 늘어날수록 챔버압력과 추력은 상대적으로 증가하고, 분리시 피스톤 종말속도 역시 6.4 m/sec에서 8.3 m/sec까지 증가하는 것을 볼 수

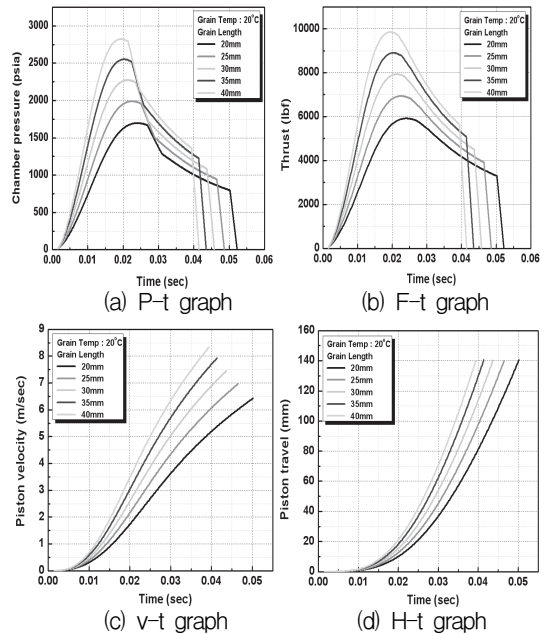


Fig. 6 PAD performance for grain length

있다. 또한 피스톤 이동거리로부터 그레인이 길수록 에너지가 증가하여 분리시간이 50 msec에서 39 msec까지 단축됨을 확인할 수 있다. 첫 번째 시스템 요구조건인 피스톤 종말속도 7 m/sec를 만족할 수 있는 그레인 길이는 Fig. 6(c)에서 볼 수 있듯이 최소 30mm는 되어야만 만족시킬 수 있는 것으로 예측된다. 두 번째 요구조건인 최대추력 8500 lbf 이하라는 조건을 만족시키는 그레인 길이는 Fig. 6(b)에서 보듯이 최대 30 mm이하에서만 만족시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 두 조건을 동시에 만족시킬 수 있는 추진제 길이는 30 mm가 된다.

요구조건이 비교적 간단할 경우에는 쉽게 요구조건을 만족시키는 최적의 값을 찾을 수 있으나 시스템 요구조건이 더 까다로워진다면 그레인 길이를 변경하는 것만으로 요구조건을 만족시키지 못하고 새로운 형태의 그레인 설계가 필요하게 된다.

시스템 요구조건을 만족시킬 수 있는 그레인 길이가 30 mm로 결정되면 이 시스템이 사용되는 온도범위에서 분리속도, 분리시 최대추력, 분리시간에 대한 값을 예측하여야 한다. 이 때 개

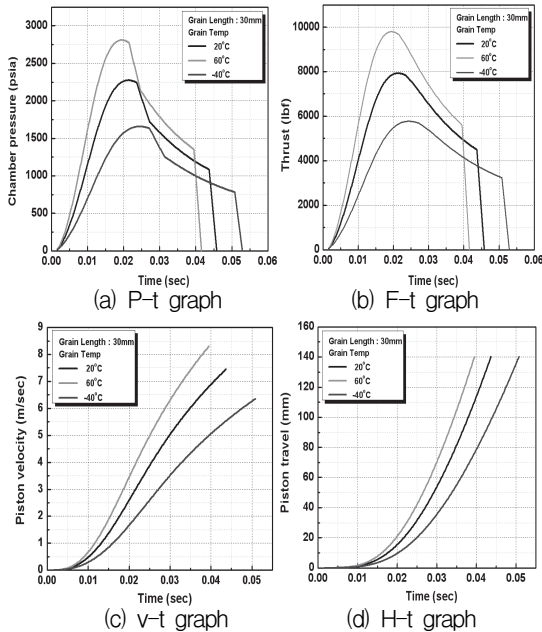


Fig. 7 PAD performance at 3-different temperature

발된 PAD 해석프로그램을 사용하면 온도에 따른 분리성능 예측이 가능하다. Fig. 7은 작동하는 온도조건에 따른 분리장치의 성능값을 계산한 결과를 도시하고 있다. 분리속도는 -40°C 에서 최저 6.3 m/sec, 60°C 에서 최대 8.3 m/sec이고 최대추력은 60°C 에서 9800 lbf, 분리시간은 60°C 에서 39 msec, -40°C 에서 51 msec로 조사되었다.

마지막으로 개발된 프로그램을 사용하면 실제 PAD 작동시험을 하지 않고도, 추진제 그레인의 연소거리 추정이 가능하다. Fig. 8에는 PAD 시험 중 피스톤 분리시에 급격한 압력감소로 소화된 추진제 그레인 사진이 시험전과 비교하여 도시되어있다. 분리작동 완료 후 가스발생기 안에 소화되고 남아있던 추진제 그레인을 이용하여 그레인 각 위치에서의 연소거리를 측정하였다. 실제 연소된 연소거리를 측정한 결과 그레인의 외경은 22 mm에서 20.1 mm로, 내부 홀직경은 2 mm에서 큰 편차없이 평균 3.9 mm로 증가하여 각 방향으로 약 0.95 mm의 연소가 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 이에 대해 비교를 위한 계산결과가 Fig. 9에 나타나있다. 시험조건이

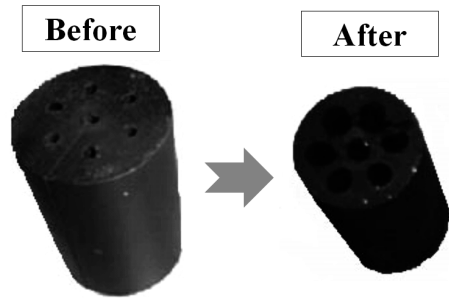


Fig. 8 Grain shape before and after experiment

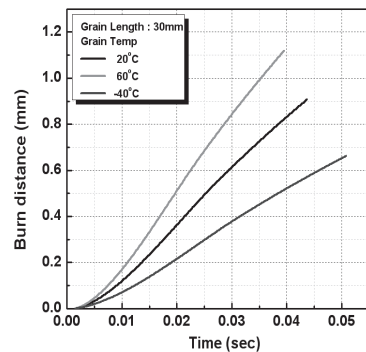


Fig. 9 Calculated burn distance of the grain

20°C 이기 때문에 20°C 데이터를 보면 분리종료 시점인 43 msec에서 약 0.91 mm가 연소된 것으로 나타난다. 시험시 얻어진 그레인 치수와 비교시 그 차이는 0.04 mm 수준으로 해석결과가 실제현상을 잘 묘사하는 것을 확인할 수 있었다. 물론 다른 온도에서의 그레인 연소거리 또한 동일한 방법으로 예측이 가능하다.

4. 결 론

본 연구에서는 분리장치 종류 중 하나인 PAD의 가스동역학 해석을 위한 수학적-물리적 모델이 기술되었다. 실험적 상수인 열손실계수와 마찰계수는 시험에 의해 결정되었다. 그레인 형상 설계에 기초한 가스발생기와 가스푸셔 내부의 연소과정과 피스톤 거동이 수치해석적 방법으로 시뮬레이션 되었고, 검증시험을 통해 해석모델 및 개발된 프로그램의 타당성을 입증하였다. 적

용 예에서 보았듯이 개발된 프로그램은 유사한 분리메카니즘 시스템 설계시에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후에는 마찰계수를 속도나 가속도의 함수로 모델링하는 방법과 더불어 지상시험에서 뿐만 아니라 비행시험 분석 시에도 사용할 수 있도록 가스푸셔의 제1연결부와 제2연결부의 상대운동이 고려된 모델 및 해석프로그램으로 업그레이드 할 계획이다.

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. 윤기은, 류병태, 최창선, "STS 304 발열선 착화기의 열전이 특성," *한국추진공학회지*, 제10권, 제4호, 2006, pp.19-25
3. Lee, H. S., "Modeling of High Speed Duct-Flows in CAD/PAD," AIAA 2000-3409
4. Pollard, F. B. and Arnold, J. H. Jr., *Aerospace ordnance hand book*, Prentice-Hall Inc., 1966
5. Sutton, G. P., *Rocket Propulsion Elements*, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., 1992
6. Tao, Y., Wu, X. and Chen, X., "Design of a Micro Solid Rocket Motor," AIAA 97-2684
7. Barud, A. M., Gonthier, K. A., and Decroix, M. E., "Performance Modeling for Explosively Actuated Valves" AIAA 2005-3843
8. Lee, H. S., "Modeling of a large ballistic reactor," AIAA 2001-3770
9. Edquist, C. T., "Prediction of the Launch Pulse for Gas-Generator-Lunched Missile," *Journal of propulsion and power*, Vol. 6, No. 6, 1990, pp.705-712