

파이로추력기의 점화시간차 영향

Effect of Ignition Delay Time Gap on the Linked Pyrotechnic Thrusters

김기연*

Ki-Un Kim

전인수*

In-Soo Jeon

안성우*

Sung-Woo Ahn

Abstract

The effect of the ignition delay time gap is newly studied. The operational characteristics of the linked two pyrotechnic thrusters are affected by the time gap. Although two thrusters are simultaneously ignited, the time at which the pressure starts to rise in each thruster may not be synchronized. The characteristic of the system with the time gap is compared with that of the fully synchronized system without any time gap. Depending upon the magnitude of the time gap, the pressure-time profile and the ballistic performance are different. When two pyrotechnic thrusters have a time gap, the peak pressure of one thruster(in which the pressure is built up earlier) is increased and the other is decreased. As the time gap is increased, the peak pressure is converged into the maximum pressure. This maximum pressure can be obtained when only one thruster is activated. Because the maximum pressure is bounded, it is predicted that there isn't any catastrophic failures in the considered system. When the time gap is relatively small, the impulse of the combined force acting on the moving body is almost maintained. But the ballistic performance of the system with a large time gap should be carefully estimated because the reduction of the ballistic performance should not be easily neglected.

Keywords : Pyrotechnic Thruster, Delay Time Gap

1. 서론

카트리지나 추진제를 사용하여 물체를 당기거나, 분리하거나 사출하는 파이로장치는 항공기 및 로켓 등에서 많이 사용된다. 카트리지 또는 추진제를 동력원으로 사용하는 경우를 각각 CAD(Cartridge Actuated Device) 및 PAD(Propellant Actuated Device)라고 부른

다. 이들은 용도에 따라 파이로 추력기, 파이로 구동기 또는 가스푸셔 등으로도 부른다^{1~4)}.

이러한 파이로 장치는 점화가 되며 바로 작동하는 것이 보통이나 CCU-40A/A와 같이 점화 후에 일정한 시간지연을 인위적으로 주는 경우도 있다. 이 장치는 AV-08 항공기에 사용되고 있으며, 0.575초의 시간 지연을 준 이후에 사출좌석의 낙하산 전개에 필요한 압력을 형성시킨다. 이러한 시간지연은 궁극적 목적 수행을 위하여 인위적으로 지연이 필요한 시간이며, 현재 사용되는 장치의 공차범위는 8% 또는 25% 수준이다¹⁾.

† 2010년 11월 26일 접수~2011년 1월 20일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD) 대함유도무기체계개발단

책임저자 : 김기연(kimkiun1@chol.com)

그러나 이처럼 인위적으로 설정된 시간지연과는 달리 원하지 않는 시간지연이 발생하는 사례도 있다^[4]. 참고문헌의 사례에 의하면, 수년간 실전 배치되어 있던 추력기의 기능시험을 수행하는 과정에서 원하지 않았던 200msec 이상의 긴 점화지연(ignition delay)이 관찰된 바 있다. 이 시스템에는 여러 개의 추력기가 사용되며 이들은 상호 동기(synchronized)되어져 있기 때문에 이러한 시간지연은 그 시스템의 커다란 실패를 유발할 수 있다라고 보고되었다. 이러한 실패에 대한 우려와는 달리, 추력기 내부의 압력변화와 추력기에 의해 구현된 속도특성이 시간지연과는 무관하게 동일하다는 주목할 만한 사실도 보고되었다.

본 논문에서 고려된 2개의 추력기 시스템에서, 2개의 추력기의 압력이 형성되는 시간사이에는 약 1msec 수준의 아주 작은 시간차가 존재하였다. 두 개의 추력기는 이론적으로 동시에 압력이 형성되도록 설계된다. 그러나 이들 추력기들 간의 압력 형성시점에는 시간차가 존재할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 시간차가 추력기 내부의 압력 형성 특성과 속도로 대변되는 운동특성에 미치는 영향을 고찰하였으며, 시간차로 인한 시스템의 실패 가능성도 함께 고찰되었다.

2. 연동된 추력기의 시간차 영향

가. 연동된 추력기 시스템에서의 시간차

본 연구에서 고려된 추력기 시스템이 Fig. 1에 제시되어 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 추력기는 카트리지/추진제가 연소하여 고온, 고압을 형성하는 가스발생기(gas generator)부분과 이러한 가스 압력을 대상체(moving mass)에 힘으로 전달하는 피스톤부분으로 구성되어져 있다. 2개의 추력기는 대상체(moving mass, m)에 병렬로 연결되어져 있다. 각각의 추력기는 별도의 가스발생기(gas generator)를 가지고 있으며, 착화기(initiator)가 점화되면 가스발생기 내부의 추진제가 연소되면서 추력기 내부의 공간에 고압이 형성된다. 이렇게 형성된 압력은 잠금장치(locking device)가 해제된 이후에 추력기 피스톤을 통하여 대상체, m에 전달되어 대상체의 운동을 유발하게 된다. 대상체는 하단의 안내레일(guide rail)에 설치되어 있으므로 2개의 추력기에 의하여 형성되는 회전운동은 없고, 레일을 따라서만 움직일 수 있도록 하였다.

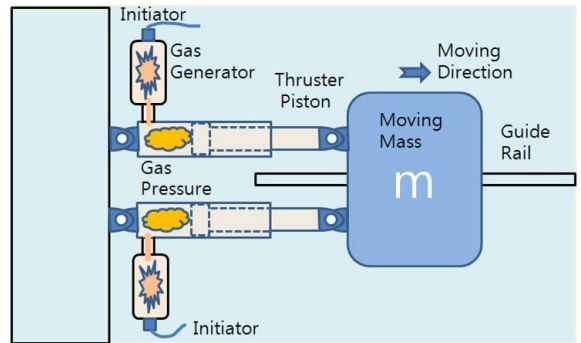


Fig. 1. 추력기 시스템 개념도

착화기가 τ_0 에 작동된 이후, 가스발생기의 추진제가 점화되기 시작하는 시간을 지연시간(delay time)이라 정의하였으며, 이러한 지연시간이 각각 τ_1 과 τ_2 로 구분하여 표시되어 있다. 이는 2개 추력기의 지연시간은 서로 다를 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 이들 두 추력기의 시간지연시점 사이의 차이를 시간차(time gap)로 정의하였으며, 기호로는 $\Delta\tau$ 로 표현하였다.

Fig. 1에 제시된 추력기 시스템에서 계측된 추력기 압력곡선이 Fig. 2에 제시되어 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 첫 번째 추력기에서 압력이 형성되기 시작하는 시점을 τ_1 이라하고 두 번째 추력기에서 압력이 형성되기 시작하는 시점을 τ_2 라 하면, 이들 두 시점사이에는 시간차, $\Delta\tau$ 가 존재하게 된다. 본 연구에서는 이 시간차가 추력기의 압력 형성과 대상체의 거동에 미치는 영향을 살펴보았다.

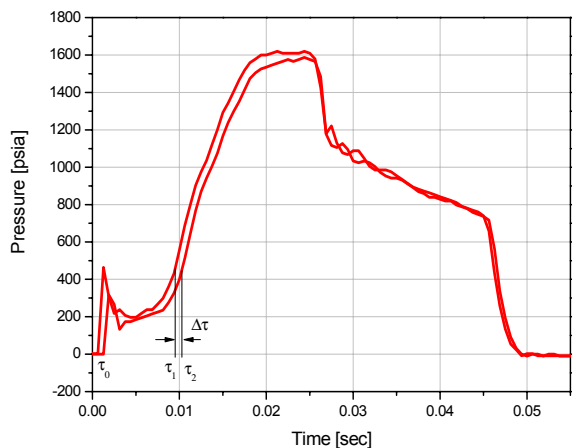


Fig. 2. 압력 계측치(시험결과)

나. 시간차에 대한 개념적 고찰

추력기의 피스톤에 작용하는 힘과 대상체(moving mass)의 거동관계는 다음과 같은 충격량과 모멘텀 방정식(The equation of impulse and momentum)을 통하여 개념적으로 살펴볼 수 있다.

$$\int_{\tau_1}^{t_2} F_{T1} \cdot dt + \int_{\tau_2}^{t_2} F_{T2} \cdot dt = m \Delta v \quad (1)$$

식 (1)에서 하첨자 T1과 T2는 각각 추력기 1과 2를 의미한다. 두 추력기, T1과 T2에 의하여 공급되는 힘을 시작적분하면, 대상체, m의 운동특성이 속도변화로 나타남을 의미한다. 이 식에 표현된 바와 같이 대상체의 거동을 유발하는 힘의 작동시점은 추력기들의 압력 형성시점인 τ_1 과 τ_2 부터 차별적으로 시작된다. 그러나 이들 두 추력기는 대상체에 의하여 연계되었기 때문에, 이들의 종료시점은 t_2 로 동일하다. 대상체의 질량은 일정하며, 거동특성은 상대 속도로 평가할 수 있기 때문에 초기와 최종 순간사이의 속도증분, Δv 로 표현되어 있다.

2개의 추력기 사이에 시간지연 차이가 존재할 경우, 각각의 추력기가 형성하는 역적(impulse)는 달라질 여지가 있다. 추력기에 의한 힘이 동일하다면 작용한 시간이 감소하면 총 역적은 감소하고, 결과적으로 대상체의 거동 속력도 감소하게 된다. 역으로 일정 속력이 유지되려면 추력기 힘은 증가될 필요가 있게 된다. 어느 경우든지 상대적인 시간차가 없는 경우와는 압력 또는 속력 변화특성에서 다른 결과가 기대된다.

다. 시험과 시뮬레이션 비교

시험의 제한성과 추력기의 작동실패에 따른 위험성 등을 고려하여 시간차의 영향은 시뮬레이션을 통하여 사전에 분석될 필요가 있다. 본격 분석에 앞서서 시뮬레이션의 적절성을 주어진 시험결과와 비교하여 평가하였다. 추력기 운동에 따른 추력기 내부의 압력곡선은 참고문헌 [2]와 [3]에서 제시된 바와 같이 준평형 탄도모델을 사용하여 계산되었다. 추력기 내부압력도 지배방정식에 포함되어 있어서, 대상체의 이동거리와 같은 운동 조건과 바로 연계되어 계산된다. 이러한 시뮬레이션 개념은 추력기가 2개 이상인 시스템에도 적용은 가능하나, 이들 추력기 사이에 시간차가 존재하는 경우에는 시간차 부분을 어떻게 모사하는게 좋은지 명확하게 제시된 바가 없다.

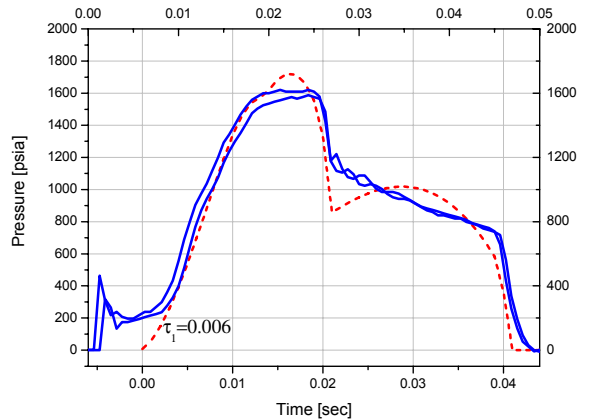


Fig. 3. 시험결과와 시뮬레이션 결과의 비교

본 연구에서는 추력기 내부 압력을 2단계로 계산하는 새로운 접근법을 사용하였다. 대상체의 거동을 살펴보기 위한 시뮬레이션을 수행하기에 앞서서, 주요 위치 다섯 곳에서의 기준 압력곡선은 준평형 탄도모델^[2,3]을 이용하여 사전에 계산하였다. 이러한 계산에는 열손실은 없다고 가정되었다. 이렇게 획득된 정적 체적에서의 시간-압력 데이터는 대상체에 대한 운동방정식의 해를 구하는 과정에서 입력값으로 주어진다. 대상체의 운동에 따른 임의의 시점 및 위치에서의 압력은 이들 시간-압력 데이터를 이용하여 산출하도록 하였다. 이러한 접근법은 2개의 추력기가 시간차를 두고 압력이 형성되는 경우 등을 모사하기 위한 방안으로 채택되었다.

시험결과와 시뮬레이션 결과가 Fig. 3에 함께 제시되어 있다. 시험에서 계측된 압력곡선은 실선으로 표현되어 있다. 시뮬레이션 결과는 점선으로 표현되어 있으며, 시험자료에서 추력기에 압력이 형성되는 시점을 시뮬레이션의 시작점으로 설정하였다. 압력곡선 형상은 0.02sec를 기준으로 전-후반부로 나누어 비교하였다. 후반부의 압력 곡선은 시험결과와 비교시 상대적인 상승 및 하강하는 부분이 있어서 다소 차이가 눈에 띄지만, 전반부의 압력 변화는 시험결과를 대체로 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 전 과정에서 열손실을 50%로 가정한 시뮬레이션을 통하여 획득된 것이다.

이러한 시뮬레이션 결과는 압력을 시간적분하여 얻어지는 압력에 대한 시간 역적값으로 자세히 비교해 보았다. 두 개의 추력기에 의하여 제공된 압력의 시간 역적의 합은 81.76psia-sec이며, 시뮬레이션으로 획득된

역적은 81.64이다. 이는 시험치의 98.6%에 이르는 것으로서 시뮬레이션 결과는 실제 시험결과를 충분히 잘 묘사하고 있다고 볼 수 있다. 이러한 시뮬레이션 결과에 대한 평가를 토대로 본격적인 시간차 영향을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

라. 시간차 영향 해석

두 추력기사이의 시간차 영향을 고찰하기 위하여 비교 기준조건에 대한 압력과 속도 특성을 Fig. 4와 5에 나타내었다. Fig. 4에 제시된 압력곡선은 2개의 추력기가 동조되어 동시에 작동하는 상태이므로 마치 하나의 압력곡선만 존재하는 것처럼 보인다. 최대압력은 약 16msec 부근에서 형성되며, 추력기의 작동시간은 약 40msec임을 알 수 있다. 또한 이러한 추력기의 작

동으로 인하여 물체, m은 최대속력 5.7m/sec까지 상승함을 Fig. 5에서 확인할 수 있다.

이렇게 동조된 추력기에 시간차 9msec를 부가할 경우에 대한 해석결과가 Fig. 6에 제시되었다. 시간차가 없는 경우(적색, 실선)와 비교하여 2개의 추력기의 압력특성(청색, 점선)은 서로 다른 양상을 보임을 알 수 있다. 시간 지연이 없는 추력기의 압력은 기준조건보다 더 큰 최대압력(약 2200psia)까지 상승하며, 시간차가 있는 추력기 압력은 약 900psia 수준으로 크게 저하되었음을 알 수 있다. 또한 압력이 작동된 시간도 약 45msec로 다소 증대되었음을 알 수 있다. 이 같은 압력의 변화가 속력에 미치는 영향은 Fig. 7에서 살펴볼 수 있는데, 시간차가 있는 경우의 최대 속력은 약 5.5m/sec 수준으로 다소 감소되었음을 알 수 있다.

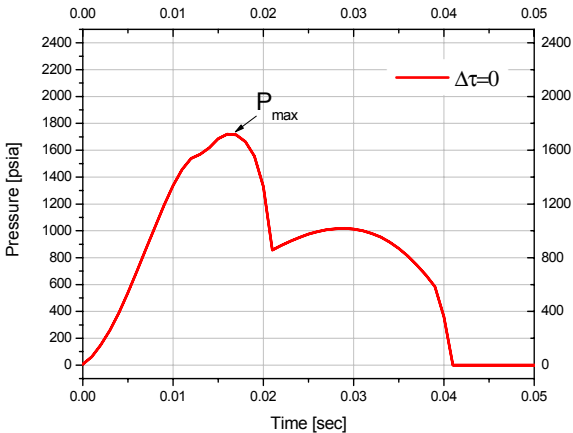


Fig. 4. 연동된 추력기의 압력특성

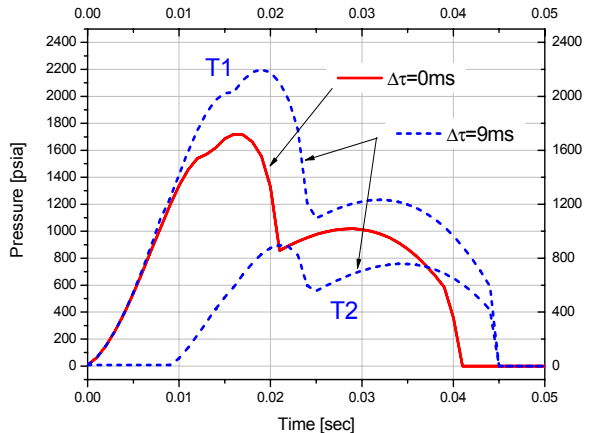


Fig. 6. 시간차(9msec)에 따른 압력변화

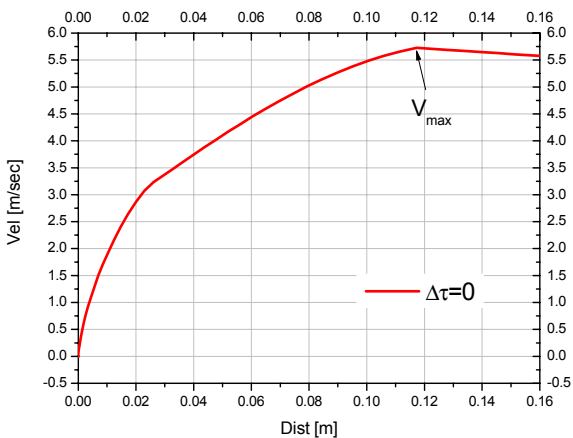


Fig. 5. 연동된 추력기에 의한 속력-거리 특성

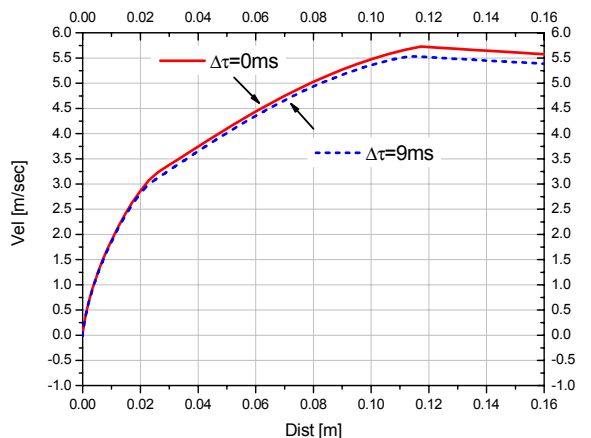


Fig. 7. 시간차(9msec)에 따른 속력변화

비록 시간차 기간 동안 1개의 추력기만 물체를 움직이는 힘을 공급하게 되었지만, 뒤늦게 합류한 추력기2가 일정수준의 힘을 부가하였으며, 또한 작동시간이 증대되면서 전체적인 물체의 속력은 비슷한 수준을 유지할 수 있었던 것으로 판단된다.

좀 더 긴 시간간격이 존재하는 경우도 고려되었다. 즉, 추력기1의 작동시간보다 더 긴 시간차가 존재하는 경우에 대한 압력 변화곡선이 아래의 그림에 제시되어져 있다. 두 추력기 사이의 시간차가 50msec 이상이므로 한 개의 추력기 압력은 이 시간동안 0 상태를 유지하고 있다. 결과적으로는 2개중에 1개의 추력기의 작동만 유효한 경우에 해당된다. 정상 작동된 추력기는 최대압력이 약 2300psia 수준임을 알 수 있다. 이 추력기의 작동시간은 50msec에 근접하고 있다.

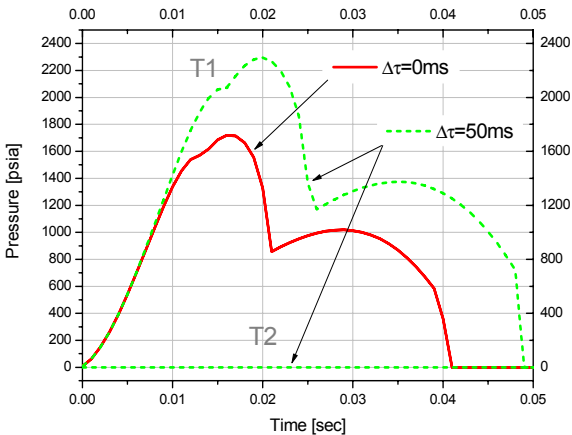


Fig. 8. 긴 시간차(50ms)에 따른 압력변화

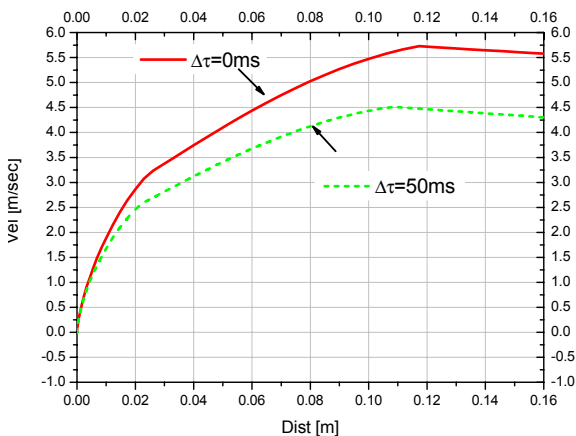


Fig. 9. 긴 시간차(50ms)에 따른 속도변화

이 같은 최대압력과 작동시간이 추가로 증가하기는 하였으나, 궁극적인 물체의 속력변화는 앞서의 시간차 9msec의 경우와는 차이가 있음을 Fig. 9에서 확인할 수 있다. 구현된 최대 속력은 약 4.5m/sec 수준으로서 동조된 경우와 비교하여 약 20%이상이 저하된 것이다.

이상의 사례를 종합하여 살펴보았다. 기본적으로 추력기 사이에 시간차가 존재하면 추력기 압력은 변화한다. 먼저 작동된 추력기의 압력은 상승하며, 지연 작동된 추력기의 압력은 하강하게 된다. 9msec 수준까지의 작은 시간차가 존재하는 경우, 물체의 운동 속력은 동조된 경우와 비슷한 수준을 유지하지만, 50msec 이상의 지연시간이 존재하는 경우에는 비록 정상 작동된 추력기의 압력이 상승하고 작동시간이 증대되기는 하지만 구현 가능한 속도는 연동되어 작동되는 경우보다 20%이상의 속도 감소가 있음을 알 수 있었다. 시스템에 따라서 요구하는 속도조건의 하한은 다를 수 있으나, 이처럼 큰 속도 감소는 시스템의 정상작동을 저해할 우려가 있는지 여부를 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다.

3. 결론

이상의 연구로부터 2개의 추력기 사이에 존재하는 시간차의 영향을 시뮬레이션을 통하여 새로이 살펴보았다. 시간차가 존재하면 먼저 작동된 추력기의 압력은 증가하고, 지연 작동된 추력기의 압력은 감소되는 현상이 나타난다. 시간차가 긴 경우에 최대압력은 증가하지만, 그 수준은 구조적인 파괴를 유발할 수준에 이르지 않는다. 변화된 추력기 압력은 물체의 속력 구현에 영향을 준다. 시간차가 상대적으로 작은 경우에는 그 영향이 미미하나, 큰 경우에는 눈에 띄는 속도 감소를 유발할 수 있다. 이러한 결과는 1개의 추력기만을 고려해서는 나타날 수 없는 것이다. 따라서 여러개의 추력기가 사용되는 경우에는 이들 추력기를 연계하여 그 특성을 사전에 살펴봄으로서 성공적으로 작동하는 시스템을 구현할 수 있도록 해야 한다.

References

[1] Toewee, G., Tirmizi, A., Blachowski, T. J., and Culhane, D. A., "U.S. Navy and the CAP/PAD Joint

- Program Office Electronic Time Delay Cartridge Development Program”, AIAA 2008-5078, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 21~23 July 2008.
- [2] 오석진, 이도형, 김상화, 김기연, “가스발생기를 이용한 분리 메카니즘 성능예측 기법”, 한국추진공학회 2008년도 추계학술대회 논문집, pp. 1~4.
- [3] Lee, H. S., “Unsteady Gasdynamics Effects in Pyrotechnic Actuators”, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 41, No. 5, pp. 877~886, September~October 2004.
- [4] Lee, H. S., “Ignition Delay Investigation in a Pyrotechnic Cartridge with Loosely-Packed Propellant Grains”, AIAA 2009-5191, 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2~5 August 2009, Denver, Colorado