

초폭굉 모드 램 가속기에서 데토네이션파의 거동특성

성근민** · 정인석** · 문귀원***

Behavior of Detonation Wave in Superdetonative Ram Accelerator

Kunmin Sung, In-Seuck Jeung, Guee-Won Moon

ABSTRACT

The numerical simulation is conducted for analysis flame structure of superdetonative ram accelerator experiment by ISL(French-German Research Institute in Saint Louis). Fully coupled chemically non-equilibrium Navier-Stokes equation is used. Shockwave structure of superdetonative ram accelerator and behavior of detonation wave is studied. Maintaining of detonation wave is very important to accelerate projectile. Because detonation wave make high pressure gases and this high pressure accelerate projectile.

Key Words : 램 가속기, 초폭굉 모드, Ram Accelerator, RAMAC30, 데토네이션

기 호 설 명

C-J Chapman-Jougate

RAMAC Ram Accelerator

1. 서 론

램 가속기는 화약이나 고압가스에 의해 발사된 탄체가 가연성 예혼합기로 채워진 가속관 내부를 초음속으로 비행하는 추진기관으로서 가연성 혼합기가 탄체주변에 생성된 충격파에 의해 압축되고 데토네이션파에 의해 연소되면서 추진력을 얻는다. 예혼합기속을 비행하므로 초음속/극초음속 공기흡입식 추진기관에서 발생하는 연료와 공기의 혼합문제가 없는 장점이 있다. 화약에 의해 발사되는 기존의 대포의 경우 화약이 연소되는 포미(breech)에 최대의 압력이 가해지고 이 압력

에 의해 탄체의 추진력이 결정된다. 더 큰 추진력을 얻기 위해서는 더 큰 압력을 가해야 하지만 구조적인 한계가 있으므로 탄체의 속도에 한계가 있다. 하지만 램 가속기는 가속관속에서 예혼합기를 연소시키며 연속적으로 가속이 가능하다. 따라서 가속관의 길이에 따라 극초음속의 영역까지 가속이 가능하다. 그리고 공기흡입식 추진기관과 달리 가속관 속에서 운용되므로 지상에서 초음속/극초음속 비행을 구현할 수 있어 초음속/극초음속 충격파구조의 연구와 초음속 데토네이션파의 연구에 활용되고 있다. 가속관을 여러개의 격막으로 분리하고 각 부분마다 가속 단계에 따라 최적화된 조성의 예혼합기를 사용하면 극초음속의 속도까지 연속적인 가속을 할 수 있으며 램 가속기의 탄체내부에 초소형 인공위성을 탑재하여 우주궤도 진입의 1단계로 활용이 가능하다. 램 가속기는 가속관과 예혼합기만 있으면 발사가

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 한국항공우주연구원 우주시험그룹

† 연락처, sgm@snu.ac.kr

가능하므로 일단 시설이 갖추어지게 되면 횡수에 관계없이 발사가 가능하며 1회당 발사비용이 저렴하다. 따라서 초소형 인공위성의 발사가 빈번해질 미래에는 매우 저렴한 가격의 우주발사체로의 활용성이 매우 크다.

램 가속기의 추진모드는 탄체속도에 따라 나누어지는데 탄체 속도가 가속관내에 채워지는 예혼합기의 C-J 데토네이션과의 속도보다 작은 경우 열적질식모드 또는 아폭굉 모드(sub-detonative mode)라고 하며 두 속도가 비슷한 경우를 친폭굉모드(trans-detonative mode)라고 하며 탄체의 속도가 더 큰 경우를 경사 폭굉파 모드 또는 초폭굉모드(super-detonative mode)라고 한다.[1]

열적질식 모드인 아폭굉 모드 램 가속기의 경우 탄체 미부의 열적질식에 의해 수직충격파가 생성되고 탄체 후부의 영역이 고압으로 유지되므로 지속적인 추력이 발생한다. 초폭굉 모드 램 가속기의 경우는 탄체에 의해 생성되는 충격파와 반사충격파에 의해 데토네이션과 유도되어 데토네이션과 후면의 높은 압력이 탄체를 가속시키게 된다. 아폭굉 모드 램 가속기는 예혼합기의 C-J 폭굉파 속도 이상으로 비행할 수 없어 속도에 제한이 있는 반면 초폭굉 모드 램 가속기는 이런 제한이 없어 더 많은 활용도를 가지고 있다.

열적질식 모드 램 가속기에 대하여서는 상당히 많은 이론적, 실험적, 수치적 연구가 이루어졌으나 초폭굉 모드 램 가속기의 실험결과는 아직 매우 부족한 상태이다. 1988년 ISL(French-German Research Institute in Saint Louis)에서 탄체직경이 30mm인 램 가속기 RAMAC30과 탄체직경이 90mm인 램 가속기 RAMAC90이 제작되었는데 이 중 RAMAC30은 초폭굉 모드 램 가속기의 점화와 연소현상의 기초연구에 사용되었다.[2] 본 연구는 ISL에서 시행된 RAMAC30의 실험을 수치적으로 모사하고 초폭굉 램 가속기에서의 데토네이션과의 움직임과 추력의 상관관계를 살펴보고 있다.

2. 지배방정식 및 수치해법

초음속으로 비행하는 램 가속기의 수치모사를 위해서 유동과 화학반응이 완전히 결합된 화학종 보존방정식과 Navier-Stokes 방정식을 이용하였다. 각 화학종의 분자량, 표준생성열, 정압비열 등의 열역학적 데이터는 JANAF Table을 이용하였다.[3] 램 가속기는 고압의 가스속을 비행하므로 화학반응모델은 GRI-Mechanism에 기초하여 고압조건에 알맞은 상세 화학반응 모델을 적용하였다. H, H₂, O, O₂, H₂O, OH, H₂O₂, HO₂, CO, CO₂의 10개의 화학종과 29단계 화학반응식이 사용되었다.[4] 램 가속기 내의 고속유동을 더 정확히 모사하기 위해 비교적 간단한 난류모델인

Boldwin-Lomax 난류모델이 사용되었다.

충격파와 데토네이션과 있는 유동장의 해석을 위해서 Roe의 근사 Riemann해법을 이용하였으며 고차 공간차분을 위해 MUSCL기법을 이용하였다. 또한 완전 내재적 형태의 LU-SGS 기법[5]을 이용하여 시간적분을 수행하였다.

3. 계산조건

계산 조건으로 ISL의 RAMAC30 실험중에서 Shot225 실험의 조건을 그대로 이용하였다. 탄체의 길이는 153mm, 직경은 30mm이고 탄체의 질량은 130g, 탄체의 재질은 알루미늄으로 이루어져 있다. 탄체 선두부의 각은 15°, 탄체 미부의 각은 14°이며 가속관 내부 유로의 직경은 42mm이다. 가속관 내부는 40bar의 2H₂+O₂+5CO₂ 혼합기가 40bar로 채워져 있으며 탄체는 초기에 1800m/s의 속도로 가속관을 향해 발사되어 가속관의 격막을 뚫고 들어가 가속관 내부를 비행한다. 계산영역 Fig. 1에 나타내었다.

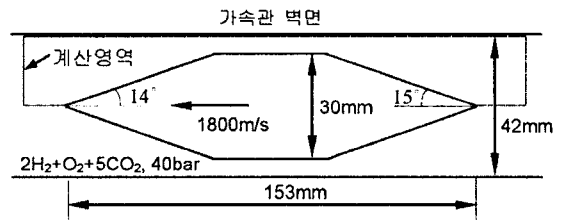


Fig. 1 계산영역

계산에 사용된 혼합기의 C-J 폭굉파의 속도는 약 1300m/s로 초기속도 1800m/s는 예혼합기의 C-J 폭굉파속도의 약 1.38배 이다.

4. 계산결과분석

4.1 탄체주위의 유동장 분포

초기속도 1800m/s로 발사된 탄체는 가속관 내를 이동하게 된다. 탄체의 전진 거리에 따른 마하수 분포를 Fig. 2에, 압력분포를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2와 Fig. 3에서 길이의 단위는 모두 cm이다.

Fig. 2를 살펴보면 선두부에서 생성된 경사 충격파가 가속관 벽면에서 반사되고 이 반사충격파는 탄체의 표면에서 다시 반사되면서 계산 격자에서 11cm 부근에서 강한 데토네이션파를 생성함을 알 수 있다. Fig. 3을 살펴보면 세가지 경우 모두 탄체 선두부보다 후미의 압력이 높아 추진력이 발생함을 알 수 있다. 마하수 분포와 거의 유사한 충격파 구조를 가지지만 데토네이션파가 더 확연히 구분되는 것을 알 수 있다. 충격파의 위치와 압력값은 ISL의 실험결과와 대체적으로

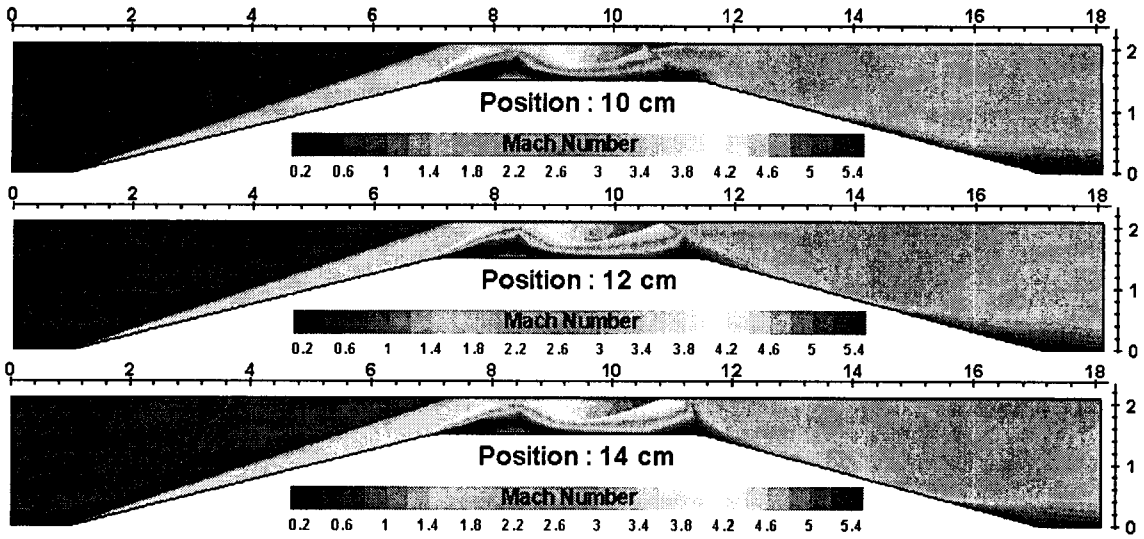


Fig. 2 각 위치에서의 마하수 분포

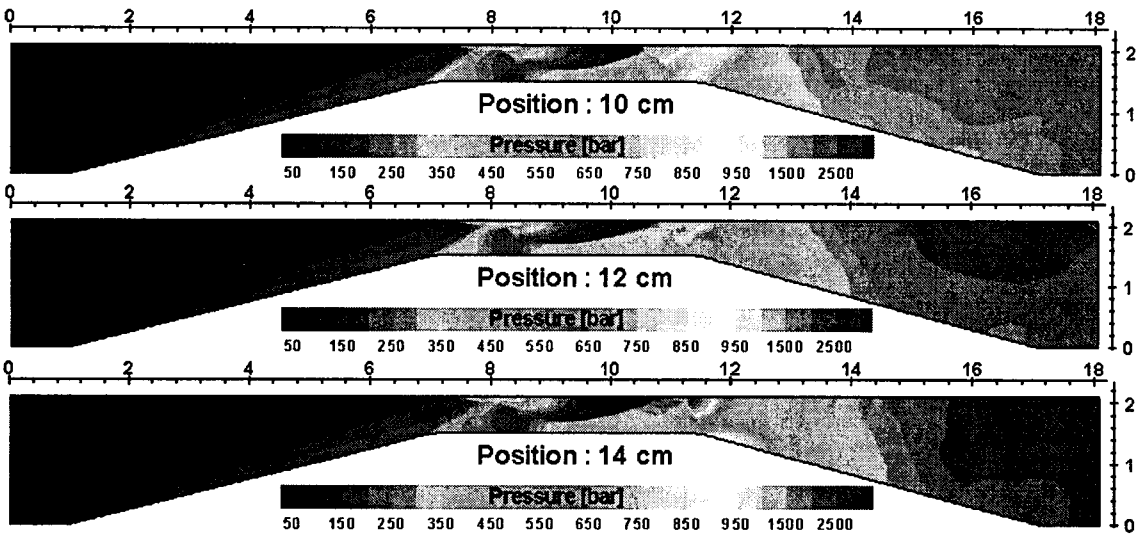


Fig. 3 각 위치에서의 압력 분포

일치한다. 탄체의 가속도 값도 ISL의 실험결과와 유사하다. 탄체의 위치가 10cm일 때는 계산격자에서 11cm부근에 위치한 데토네이션파는 탄체가 전진함에 따라 조금씩 뒤로 밀려나가게 되어 전진거리가 14cm인 경우 탄체표면에서 반사된 반사충격파와 완전히 분리되는 것을 볼 수 있다.

데토네이션파는 반사충격파와 분리된 이후부터는 빠른 속도로 탄체 후미방향으로 이동하게 되며 데토네이션파가 탄체의 후미부분의 팽창부분에 들어서면 급속히 그 세기가 약해져 탄체 후미의 압력이 유지되지 않아 탄체는 가속도가 크게 떨어지는 결과가 나타났다. ISL의 실험결과와 초기 가속특성은 유사하지만 ISL의 실험결과에서

는 탄체의 연속적인 가속이 나타났다. ISL의 실험에서는 실험에 사용된 알루미늄 탄체가 녹는 현상이 관찰되었고 이로 인해 탄체의 형상이 변하는 것은 물론 용융된 알루미늄 입자가 화학반응에 영향을 주었을 것으로 생각된다. 즉 탄체 형상변화에 의하여 충격파의 구조가 변하고 이에 따라 데토네이션파가 안정적으로 유지되거나 H_2 / O_2 화학반응 외에 알루미늄 연소반응이 추가로 일어나 더 강한 데토네이션파가 생성되었을 것으로 추정할 수 있다. 본 연구에서는 탄체의 용융이나 표면 반응은 고려하지 않았으므로 위의 충격파 구조와 데토네이션파의 움직임은 ISL의 실험 중에서 탄체가 아직 많이 녹지 않은 발사 직후

상태를 나타낸다고 볼 수 있다.

램 가속기의 경우 탄체후미의 높은 압력이 추력을 발생시키며 초폭굉 모드 램 가속기의 경우에는 탄체 후미의 높은 압력은 데토네이션파에 의해서 생성된다. 위의 계산결과에서는 데토네이션파가 후방으로 밀려감에 따라 연소반응과 연소압력이 유지되지 않아 추력이 감소하게 되고 탄체의 공기저항에 의해 탄체의 속도가 점점 감소하게 된다.

이상의 결과에서 초폭굉 모드의 램 가속기에서 지속적인 추진력을 얻기 위해서는 탄체의 연소기 부분에서의 데토네이션파의 안정적 유지가 필수적임을 알 수 있다.

5. 결 론

초폭굉 모드 램 가속기의 특성을 알기 위해 ISL의 RAMAC30실험 중에서 Shot225의 경우를 택해 수치해석을 수행하였다. 그 결과 전체적인 압력분포와 초기 가속특성은 실험결과와 상당히 유사하였으나 실험에서 고온유동에 의해 알루미늄 탄체가 녹는 현상까지는 고려하지 못해 탄체의 초기 가속특성을 밝혀내는데 그쳤다.

실험결과에서는 탄체의 지속적인 가속이 관측되었으나 계산결과에서는 데토네이션파의 소실에 따른 추력감소를 볼 수 있었으며 이것은 탄체의 용융에 따른 형상의 변화나 용융된 알루미늄이 데토네이션파의 유지에 도움을 주기 때문으로 예상된다. 초폭굉 모드에서의 지속적인 추진력을 얻기 위해서는 데토네이션파의 안정적인 유지가 필요함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업인 우주진입을 위한 공기흡입식 극초음속 추진기관 의 초음속 연소기술(M10500000072-05J000007210)의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Bruckner, A. P., and Knowlen C., "Overview of Ram Accelerator Technology", National Shock Wave Symposium, Jan. 1991, Sendai, Japan
- [2] Smeets, G., Seiler, F., Patz, G. and Srujijes, J., "First Result Obtained in a 30mm-Caliber Scram Accelerator Using a Rail Tube for Cylindrical Projectiles", Twenty-Fifth

Symposium (International) on Combustion, WIP Poster, July 1994, No. P1-56.

[3] Stull, D. R., and Prophet, H., JANAF Thermodynamics Tables, 2nd ed., National Bureau of Standards, NSRDS-Rept. 37, June 1971.

[4] Frenklach, M., Wang, H., Goldenberg, M., Smith, G.P., Golden, D.M., Bowman, C.T., Hanson, R.K., Gardiner, W.C. and Lissianski, V., http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/

[5] Shuen, S. and Yoon, S., "Numerical Study of Chemically Reaction Flows Using a Lower-Upper Symmetric Successive Overrelaxation Scheme," AIAA Journal, Vol. 27, No. 12, Dec. 1989, pp.1752-1760