

초폭굉 모드 램가속기의 혼합기 강도 특성에 대한 수치적 연구

성근민* · 정인석*

A Numerical Study on Characteristics of Mixture Composition in Superdetonative Mode Ram Accelerator

Kunmin Sung* · In-Seuck Jeung*

ABSTRACT

Based on ISL' S225 superdetonative mode ram accelerator, numerical simulation is conducted for strong mixture cases ($2H_2+O_2+3CO_2$, $2H_2+O_2+2.5CO_2$). For 3.0CO₂ case, projectile is not accelerated, but 2.5CO₂ case has successful acceleration. It shows that superdetonative mode ram accelerator can be operated when using mixture which strong enough to ignition.

초 록

ISL의 초폭굉 모드 램 가속기 실험을 바탕으로 하여 혼합기 강도를 조정하여 수치해석을 수행하였다 (3.0CO₂ 희석과 2.5CO₂ 희석). 계산결과 3.0CO₂ 희석의 경우는 초기 점화가 이루어지지 않아 탄체가 가속되지 않은 반면 2.5CO₂ 희석을 한 경우에는 점화가 이루어지고 높은 가속을 보임을 알 수 있었다. 이것은 탄체의 가속성능이 혼합기의 강도에 단순히 비례하지 않으며 점화가 가능한 최소한의 혼합기 강도 이상에서만 초폭굉 모드 램 가속기가 정상적으로 작동함을 알 수 있었다.

Key Words: RAMAC(램 가속기), Superdetonative Mode(초폭굉 모드), Detonation(폭굉파)

1. 서 론

램 가속기는 질량사출장치의 한 종류로서 고압의 가연성 혼합기체로 충전된 관속을 고속으로 비행하는 탄체가 압축 및 연소를 통하여 추진력을 얻는 장치이다[1]. 기존의 대포는 탄체가 화약의 폭발 압력으로 추진되므로 높은 속도를

얻기 위해서는 포미에 매우 큰 압력이 가해지게 되므로 포미의 구조강도에 따라 최종속도에 한계가 있다. 이에 비해 램 가속기는 혼합기체의 조성에 따라 상대적으로 낮은 마하수에서도 높은 속도의 비행이 가능하고 가속관을 따라 연속적으로 연소 및 가속이 일어나므로 구조강도의 문제가 적어 가속관의 길이에 따라 매우 높은 최종속도를 얻을 수 있다. 이러한 장점 때문에 극초음속 탄체 발사나 저궤도 인공위성의 1단계 발사에 응용이 가능하며 현재로서는 극초음속

* 서울대학교 기계항공공학부 항공우주신기술연구소
연락처, E-mail: enjis@snu.ac.kr

탄체의 연소추진현상과 관련하여 연구가 이루어지고 있다. 램가속기는 작동모드에 따라 아폭굉(sub-detonative) 모드, 천폭굉(trans-detonative) 모드, 초폭굉(super-detonative) 모드로 나눌 수 있다. 높은 최종속도를 얻기 위해서는 C-J 폭굉과 속도 이상으로 탄체를 가속시킬 수 있는 초폭굉 모드의 사용이 필수적이다. 램가속기에 대하여 여러 실험적 연구가 진행되어 왔는데 ISL (French-German Research Institute of Saint-Louis)에서는 1988년부터 램가속기의 설계와 연구가 이루어져 왔으며 1997년에는 RAMAC30 II 실험장치를 통하여 초폭굉모드 램가속기의 실험을 수행했다. 그 결과 알루미늄 재질의 탄체가 녹는 경우에만 가속이 가능하며 실험이후 탄체가 녹아 상당량의 질량이 손실되는 것이 관찰되었다[2]. 이 결과는 고온의 연소 환경에서 용융된 탄체의 알루미늄이 초기 점화와 연소과정에 영향을 미치는 것을 시사한다. 하지만 가속과 추진이 가능하더라도 램가속기의 안정적인 탄체발사와 운영을 위해서는 탄체의 훼손없이 연소 및 가속이 유지되어야 한다. 본 연구에서는 ISL의 RAMAC30 II 실험을 바탕으로 혼합기의 강도를 높여 초기점화와 추진성능의 변화를 수치적으로 살펴본다.

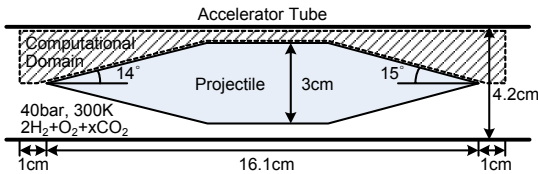


Fig. 1 Computational Domain

2. 계산조건

Figure 1은 계산 영역의 형상과 조건을 그린 그림으로 ISL의 RAMAC30 II 실험중에서 Shot 225의 조건을 그대로 이용하였다. 탄체의 길이는 16.1cm이고 선두부 각은 14°, 후미부의 각은 15°인 축대칭 형상이다[2]. 탄체 연소실의 지름은 3cm이며 가속관의 지름은 4.2cm이다. 탄체와 가

속관 사이에는 고압의 가연성 혼합기체가 충전되어 있으며 실험에서는 수소와 산소의 이론 반응비의 혼합기체에 5CO₂의 분자를 희석한 2H₂+O₂+5CO₂의 조성이 사용되었다. 이는 CO₂를 통하여 C-J 폭굉과 속도를 낮춤으로써 직접적인 초폭굉 모드 발진을 가능하게 하기 위함이었다. 본 연구에서는 3CO₂ 및 2.5CO₂ 희석의 경우에 대하여 수치계산을 수행하였다. 실험 및 계산에 사용된 기체의 조성과 기타 계산조건을 Table 1에 정리하였다. 각각의 경우에 대하여 발사속도와 C-J 폭굉과 속도의 비율인 Over-driven Factor가 일정하도록 초기 발사 속도를 설정하여 계산을 수행하였다.

Table 1 Computational Cases/Conditions

	S225	Case1	Case2
CO ₂ 희석량	5CO ₂	3CO ₂	2.5CO ₂
가연기체 몰분율	37.5%	50%	54.5%
음속 (m/s)	320.9	344.8	354.8
C-J 폭굉과속도 (m/s)	1316.8	1561.0	1649.7
탄체발사속도 (m/s)	1800	2133.9	2255.5
탄체마하수	5.609	6.189	6.357
Over-driven Factor	1.367		
충진 압력	40bar		
혼합기체 온도	300K		
탄체 질량	150g		

3. 수치해법

초음속 유동장에서 연소반응이 일어나는 램가속기의 수치모사를 위해서 유동과 화학반응이 완전히 결합된 형태의 비평형 화학종 보존방정식과 Navier-Stokes 방정식을 이용하였다.

Pertersen과 Hanson은 GRI-Mechanism에[3] 기초하여 고압환경의 램가속기에 적합한 H₂-O₂ 화학반응 모델을 제시하였다[4]. 본 연구에서는 GRI-Mechanism중에서 H, H₂, O, O₂, H₂O, OH, H₂O₂, HO₂, CO, CO₂의 10개의 화학종에 대한 반응식을 선택하여 총 29단계 화학반응식을 사용하였다. 램 가속기 내의 고속유동을 더 정확히 모사하기 위해 비교적 간단한 난류모델인 Baldwin-Lomax 난류모델이 채택하였다. 충격파와 폭굉파가 있는 유동장의 해석을 위해서

Roe의 근사 Riemann해법을 이용하였으며 고차 공간차분을 위해 MUSCL기법을 이용하였다. 또한 화학반응이 포함된 경직성이 높은 유동을 해석하기 위해서는 내재적 형태의 시간 적분이 유리하며 본 연구에서는 Yoon에 의하여 제안된 LU-SGS기법[5]을 이용하여 시간적분을 수행하였다. 본 연구에 사용된 수치해석 코드는 이전의 선행연구를 통하여 이미 검증되었다[6, 7].

4. 해석결과 및 분석

4.1 탄체 속도 및 가속도

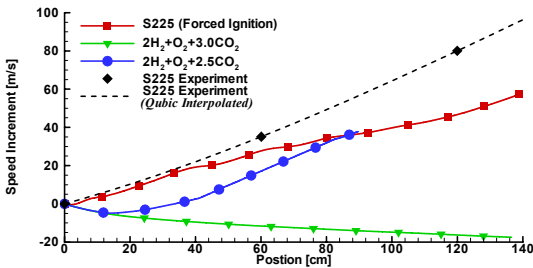


Fig. 2 Speed Increment of Projectile

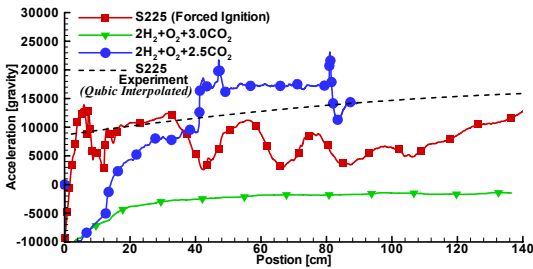


Fig. 3 Acceleration of Projectile

Figure 2는 탄체의 속도증가량을 도시한 그래프이다. 각각의 경우는 탄체의 출발속도가 다르므로 속도의 증분을 비교하였다. 3.0CO_2 회석의 경우는 초기부터 계속 속도가 감소하여 135 cm 전진후에는 약 17 m/s의 속도 감소가 있었다. 이에 비해서 2.5CO_2 회석의 경우, 초기 10 cm 전진의 경우까지는 3.0CO_2 와 비슷한 경향을 보이나 그 이후부터 속도가 증가하기 시작하여 80 cm 전진시에 약 31 m/s의 속도 증가가 있었다.

초기의 속도감소 때문에 전체적인 속도 증가량은 S225 실험에 비해서 작다. Fig. 3의 그림은 탄체의 가속도를 표시한 것이다. 3.0CO_2 회석의 경우 초기에 -10000 G 이하의 가속에서 시작되지만 점차 가속도가 증가한다. 하지만 -1500 G 정도에서 더 가속도가 증가하지 않고 가속도가 음의 값을 가지므로 속도는 계속 감소한다. 2.5CO_2 회석의 경우 역시 초기에 -10000 G 이하의 가속도를 갖지만 점차 가속도가 증가하여 약 14 cm 이후에서는 양의 가속도를 가지게 된다. 가속도는 점차 증가하여 30 cm 부근에서는 약 8000 G의 가속도를 가지며 약 40 cm 이후에서 가속도가 급격히 증가하여 순간적으로 약 21000 G까지 상승하였다가 17000G 부근에 머물게 된다. 50 cm에서 80 cm 사이의 가속도가 거의 일정하게 유지되는 구간의 평균 가속도는 17218 G인데 S225 실험이 약 13000G의 값을 가지는데 비해서 훨씬 높은 수치임을 알 수 있다.

4.2 유동장 분석

Figure 4는 3.0CO_2 회석의 경우에 대하여 탄체 진행거리 43 cm 에서의 등압력선도이다. 탄체 선두부에 의해 형성된 충격파가 가속관 벽면에서 반사되어 탄체 연소실 표면에서 다시 반사되는 것을 볼 수 있다. 몇 차례 충격파 반사에 의해서 연소실의 압력에 조금 상승하지만 탄체 후미의 노즐에서 팽창하면 오히려 선두보다 후미의 압력이 낮아 탄체가 감속하게 된다. 이 때의 가속도는 -2437 G로서 탄체는 이 이후에도 계속 감속하게 된다.

Figure 5는 2.5CO_2 회석의 경우에 대하여 탄체 진행거리 43 cm 에서의 등압력선도이다. 탄체 전반부에서 충격파의 반사가 일어나는 점은 앞의 경우와 유사하지만 탄체 연소실 후반부에 데토네이션파와 강한 충격파가 존재함을 알 수 있다. 이로 인해서 탄체 후반부의 압력이 급격하게 상승하고 탄체 후미의 압력이 선두의 압력보다 훨씬 높아 탄체가 높은 가속도를 얻게 됨을 알 수 있다. 충격파는 가속관 벽면과 탄체 후미에서 반사가 반복되어 추력에 큰 기여를 한다.

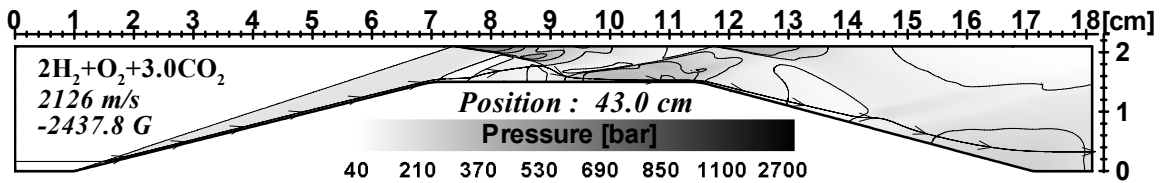


Fig. 4 Pressure Contour at 43cm (3.0 CO₂ dilution)

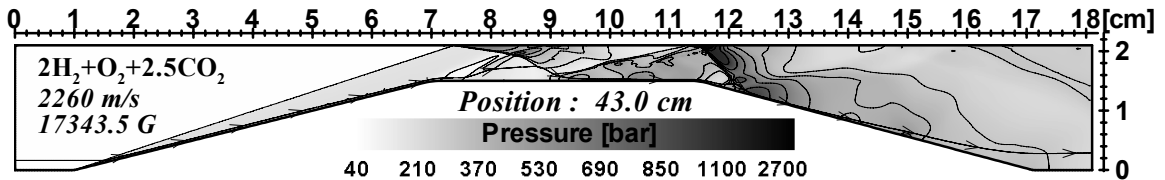


Fig. 5 Pressure Contour at 43cm (2.5 CO₂ dilution)

이 때의 가속도는 17343 G로서 탄체가 감속하는 3.0CO₂ 희석의 경우에 비하여 훨씬 높은 가속을 가짐을 알 수 있다.

5. 결 론

이상의 결과에서 3.0CO₂ 희석의 경우는 탄체가 점화 되지 않는 반면 2.5CO₂ 희석을 한 경우에는 데토네이션파가 생성되며 점화에 성공하고 가속이 지속적으로 이루어짐을 알 수 있다. 두 경우의 CO₂ 희석량의 차이는 크지 않지만 초폭펍 모드 램가속기의 성능은 단순히 혼합기체 에너지량에 비례하지 않고 초기 점화에 충분한 에너지 이상을 가지는 경우에 대하여 시동되어 작동을 시작함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. A. Hertzberg, A. P. Bruckner, and D. W. Bogdanoff, "Ram Accelerator: A New Chemical Method for Accelerating Projectiles to Ultrahigh Velocities", AIAA Journal, Vol. 26, No. 2, Feb 1988, pp.195-203
2. Friedrich Seiler, Gunther Patz, Gtinter Smeets, Julio Srulijes, AIAA paper 98-3445, "Influence of projectile material and gas composition on superdetonative combustion in ISL's RAMAC 30"
3. 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/
4. Eric L. Petersen and Ronald K. Hanson, "Reduced Kinetics Mechanisms for Ram Accelerator Combustion", Journal of Propulsion and Power, Vol. 15, No. 4, July-August 1999
5. Seokkwan Yoon and Dochan Kwak, "Three-Dimensional Incompressible Navier-Stokes Solver Using Lower-Upper Symmetric- Gauss-Seidel Algorithm", AIAA Journal, Vol. 29, No. 6, June 1991
6. Jeong-Yeol Choi, In-Seuck Jeung and Youngbin Yoon, "Numerical Study of Scram Accelerator Starting Characteristics", AIAA Journal, Vol.36, No.6, 1998, pp. 1029-1038
7. Jeong-Yeol Choi, In-Seuck Jeung and Youngbin Yoon, "Unsteady-State Simulation of Model Ram Accelerator in Expansion Tube", AIAA Journal, Vol.37, No.5, 1999, pp. 537-543