초폭굉 모드 램 가속기의 연소실 길이에 따른 화염유지특성에 대한 수치적 연구

성근민* · 정인석*†

A Numerical Study on Flame Stability with Extended Combustor in Superdetonative Mode Ram Accelerator

Kunmin Sung*, In-Seuck Jeung*†

ABSTRACT

An numerical study was conducted on superdetonative mode ram accelerator with extended combustor. The computation case was based on ISL's RAMAC30 II experiment. For 50% length increased combustor, flame is not sustained. For the case of 60% and 70% increase, flame is successfully sustaind. But detonation wave is oscillating and acceleration is fluctuating. Increasing of combustor length is helpful for sustaing detonation wave but it may cause unstart.

Key Words : Ram Accelerator, Superdetonative mode, Detonation, ISL, RAMAC30

기 호 설 명

C-J Chapman Jouget

L_{comb} 탄체 연소실 길이

L_{total} 탄체 전체 길이

1. 서 론

램가속기는 가연성 기체로 채워진 관 내부를 탄체가 고속으로 진행하면서 탄체에 의하여 연소를 유도시켜 추력을 얻고 탄체를 가속시키는 장치이다. 램가속기의 개념은 대포와 유사한데 대포는 화약의 순간적인 폭발에 의하여 추진력을 얻으므로 포미(breech)에 매우 높은 압력이 가해지고 구조강도에 따라 탄체속도의 제한이 있는데 비해서 램가속기는 탄체가 진행하면서 지속적으로 연소를 유도하고 추력을 얻으므로 구조 문제가 적으며 가속관의 길이에 따라 극초음속에 이르는 매우 높은 최종속도를 얻을 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 램가속기는 초음속/극초음속 충격파 현상과 연소현상을 연구하기 위한 목적으로 사용된다. 또한 지상에서 극초음속에 이르는 최종속도를 얻을 수 있으므로 저궤도 위성의 궤도 진입이나 우주 발사체의 1단계로 응용이 가능하며 일단 시설이 갖추어지면 발사에는 탄체와 충진기체만 소모되므로 1회당 발사비용이 매우 저렴하여 소형위성발사 수요가 많은 미래에 그 활용성이 매우 크다.

램가속기는 작동모드에 따라 아폭굉 모드, 천폭굉 모드, 초폭굉 모드로 나눌 수 있다. 가연 혼합기체의 C-J 데토네이션 속도보다 느린 속도로 탄체가 진행하는 아폭굉 모드의 경우는 속도가 C-J 데토네이션 속도 이하로 제한되므로 그 활용도가 떨어질 수 밖에 없으며 높은 최종속도를 얻기 위해서는 C-J 데토네이션 속도 이상으로 탄체를 가속시킬 수 있는 초폭굉 모드의 사용이 필수적이다. 램가속기에 대하여 여러 실험적 연구가 진행되어 왔는데 ISL (French-German

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원
† 연락저자, enjis@snu.ac.kr

Research Institute of Saint-Louis)에서는 1988년부터 램가속기의 설계와 연구가 이루어져 왔으며 1997년에는 RAMAC30 II 실험장치를 통하여 초폭굉모드 램가속기의 실험을 수행했다. RAMAC 30 II을 이용한 실험은 흥미로운 결과를 보였는데, 탄체표면 재질이 강철인 경우에는 탄체가 정상적으로 가속이 되지 않고 알루미늄의 경우에는 가속이 되는 결과였다[1]. 또한 알루미늄 표면 탄체의 경우는 실험이후의 탄체가 녹아서 상당량의 질량 손실이 일어나는 것이 관찰되었는데, 여기서 탄체 표면재료가 녹는 현상이 탄체의 초기발진과정과 연소과정에 영향을 주었기 때문으로 생각할 수 있다. 하지만 아직까지 탄체의 용융과 초기발진/가속사이의 명확한 관계는 밝혀지지 않고 있다. 하지만 안정적인 탄체발사와 램가속기의 운영을 위하여 탄체의 용융 및 연소가 없이 안정적으로 화염이 유지되어야 한다. 본 연구에서는 ISL의 RAMAC30 II 실험을 바탕으로 탄체의 연소실 길이를 늘려 데토네이션파의 안정화를 통하여 탄체 표면재료의 영향이 없이 램가속기가 안정적으로 가속을 할 수 있는 방법을 수치적으로 살펴본다.

2. 수치해법 및 계산조건

2.1 수치해법

초음속으로 비행하는 램 가속기의 수치모사를 위해서 유동과 화학반응이 완전히 결합된 형태의 화학종 보존방정식과 Navier-Stokes 방정식을 이용하였다. 각 화학종의 분자량, 표준생성열, 정압비열등의 열역학적 데이터는 JANAF Table을 이용하였다.[2] 램 가속기는 고압의 가스속을 비행하므로 화학반응모델은 GRI-Mechanism에 기초하여 고압조건에 알맞은 상세 화학반응 모델을 적용하였는데 H, H_2, O, O_2, H_2O, OH, H_2O_2, HO_2, CO, CO_2의 10개의 화학종과 29단계 화학반응식이 사용되었다.[3] 램 가속기 내의 고속유동을 더 정확히 모사하기 위해 비교적 간단한 난류모델인 Boldwin-Lomax 난류모델이 사용하였다. 충격파와 데토네이션파가 있는 유동장의 해석을 위해서 Roe의 근사 Riemann해법을 이용하였으며 고차 공간차분을 위해 MUSLC기법을 이용하였다. 또한 완전 내재적 형태의 LU-SGS 기법[4]을 이용하여 시간적분을 수행하였다.

2.2 계산조건

탄체의 연소실 길이를 제외한 모든 조건은 ISL의 RAMAC30 II 실험중에서 Shot225 실험의 조건을 그대로 이용하였다. 탄체 선두부의 각은 15°, 탄체 미부의 각은 14° 이며 가속관 내부 유로의 직경은 42mm이다. 가속관 내부는 40bar의 $2H_2+O_2+5CO_2$ 혼합기가 40bar로 채워져 있으며 탄체는 초기에 1800m/s의 속도로 가속관을 향해 발사되어 가속관의 격막을 뚫고 들어가 가속관 내부를 비행한다. Shot225에 사용된 탄체의 직경은 30mm, 길이는 약 161mm인데 이 중에서 선두부 길이는 56mm, 후미부 길이는 60mm, 연소실 길이는 45mm이다. 본 연구에서는 연소실 길이를 50%, 60%, 70% 증가(연소실 길이 67.5mm, 72mm, 76.5mm)시킨 형상에 대하여 계산을 수행하였다. 가속관 벽면과 탄체면을 포함한 축대칭 계산영역을 Fig. 1에 나타내었다. 또한 계산에 사용된 탄체의 조건을 Table 1에 정리하였다.

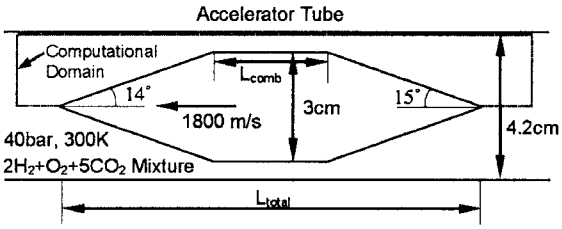

Fig. 1 계산영역

Table 1 탄체 연소실 길이 및 탄체 길이

	연소실 길이(L_{comb})	탄체 길이(L_{total})
Shot225	45mm	161 mm
CASE 1	67.5mm (50%증가)	183.5mm
CASE 2	72 mm (60%증가)	188mm
CASE 3	76.5mm (70%증가)	192.5mm

계산에 사용된 혼합기의 C-J 폭굉파의 속도는 약 1300m/s로 탄체발사속도 1800m/s는 예혼합기의 C-J 데토네이션 속도의 약 1.38배 이다. 탄체 벽면의 압력을 이용하여 추력과 가속도를 계산하고 시간에 따라 적분하여 탄체 속도를 구하였다.

3. 계산결과 및 분석

3.1 탄체 가속도 및 속도

Fig. 2는 연소실 길이를 각각 50%, 60%, 70% 증가시킨 형상의 탄체에 대하여 탄체진행거리에 따른 탄체 가속도를 나타낸 그래프이며 Fig. 3은 각각의 경우에 대하여 탄체 속도를 나타낸 그래프이다. 탄체 후미에서 발생하는 추력에서 탄체 선두부의 압력저항과 탄체 표면의 점성저항을 뺀 순수 추력이 양의 값을 가질 때 가속도가 양의 값을 가지게 되며 탄체의 속도가 계속 증가한다.

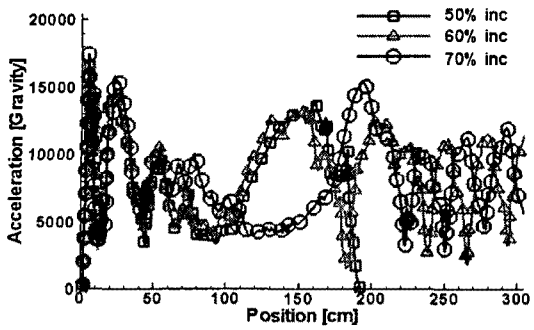

Fig. 2 탄체 진행 거리에 따른 탄체 가속도

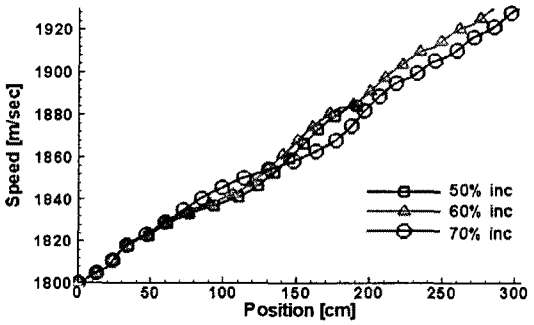

Fig. 3 탄체 진행 거리에 따른 탄체 속도

세 가지 경우 모두 초기 거동은 비슷하지만 탄체 진행거리 60cm 이후에서는 차이를 보이기 시작한다. 50% 증가의 경우는 170cm 부근 까지는 연소실 길이 60%증가의 경우와 비슷한 결과를 보이지만 190cm 이후에서 가속도는 음의 값을 가지며 탄체가 감속하게 된다. 60%증가와 70% 증가의 경우는 300cm 이후에도 계속 가속이 이루어지며 탄체의 속도는 계속 증가한다. Fig. 3의 속도 그래프에서 보면 초기에는 70%증가의 경우가 가장 속도가 높지만 약 130cm지점 이후에는 60% 증가의 경우가 더 빨라지게 된다. 이 원인은 Fig.2의 100~160cm 영역에서 70%증가의 경우가 다른 경우보다 가속도가 훨씬 낮기 때문에 가속도가 높은 60%증가의 경우가 추월하게 되는 것이다.

50%증가의 경우는 190cm이후에는 더 이상 가속이 되지 않는 것으로 미루어 더 이상 추력을 얻을 만큼의 연소가 이루어지지 않고 있음을 짐작할 수 있다. 60%증가와 70%증가의 경우는 탄체의 가속이 300cm이후까지도 지속되는데 두 가지 모두 200cm 이후에서는 가속도가 약30cm 정도의 주기로 크게 변하는 현상을 보인다. 가속도의 진폭은 진행거리에 따라 달라지지만 약 6000G~8000G 수준이다. 탄체 속도가 1800m/s를 넘는 빠른 속도임을 생각하면 상당히 짧은 시간 간격으로(약 150μ sec) 내부 유동장 및 화염 구조가 주기성을 가지고 변화함을 유추할 수 있다.

3.2 내부 유동장 분석

Fig. 4는 연소실 길이 50%증가의 경우에 대해 탄체진행거리 190cm 지점에서의 등압력선도인데, 충격파반사만 있을 뿐이며 데토네이션에 해당하는 화염구조를 찾아 볼 수 없다. Fig. 5는 연소실 길이 60%증가, 진행거리 150cm지점의 등압력선도인데, 11cm지점에서 데토네이션파의 존재를 확인 할 수 있다. 그리고 데토네이션파 이후의 충격파 반사를 볼 수 있으며 탄체 선두부 보다 후미의 압력이 훨씬 높아서 추력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 연소실 길이 50%증가의 경우는 탄체 선두부와 후미의 압력이 거의 비슷해 추력이 거의 없음을 알 수 있다. 이 경우는 연소실에서 압력이 유지되지 않아 데토네이션파가 후방으로 흘러나간 경우로서 더 이상 속도를 유지할 수 없다.

Fig. 6은 연소실 길이 70%증가, 탄체진행거리 150cm지점에서의 등압력 선도이다. 연소실 길이 60%증가인 Fig. 5와 비교하면 70%의 경우가 연소실 내부의 압력이 전체적으로 더 높고 충격파 및 데토네이션 구조가 훨씬 선두부 쪽에 위치하고 있다. 일부 충격파가 탄체 선두부에 위치하고 있는데 이 때문에 상당한 추력의 감소를 가져오게 된다. 여기서 알 수 있듯이 높은 추력을 얻기 위해서는 연소실 내부의 압력이 적절하여야 하며 압력이 지나치게 낮을 경우 화염이 후방으로 떠내려가게 되어 가속이 불가능해지며 연소실 압력이 지나치게 높을 경우 충격파가 선두부로 전진함에 따라 추력이 상당히 감소하며 심한 경우에는 unstart로 진행할 수도 있다.

Fig. 7과 8은 연소실 길이를 70%증가시킨 경우 탄체 진행거리 250cm와 265cm에 대하여 등압력선도를 나타낸 것이다. 가속도 그래프에서 250cm와 265cm지점은 각각 가속도가 최저인 점과 최고점에 해당한다. 두 가지 경우를 비교해 보면 충격파 구조의 위치와 데토네이션파의 위치가 다름을 알 수 있다. 250cm지점의 경우는 선두부까지 충격파가 밀려와 추력이 낮아진 상태이며 265cm지점의 경우는 충격파가 연소실 안쪽에 위치해 추력이 최대가 된다. 연소실 압력이 변동함에 따라 충격파의 위치가 변하며 이에 따라 추력과 가속도가 변동하게 되는 것이다. 연소실 길이를 60% 증가시킨 경우도 이와 유사한 진동현상이 나타나며 이런 진동현상은 전체적인 탄체 가속도를 크게 떨어뜨리며 최종속도 증가를 상당히 감소 시킨다.

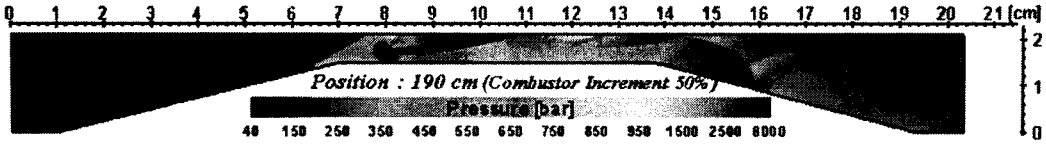

Fig. 4 탄체 진행거리 190cm에서의 등압력선도 (연소실 길이 50% 증가)

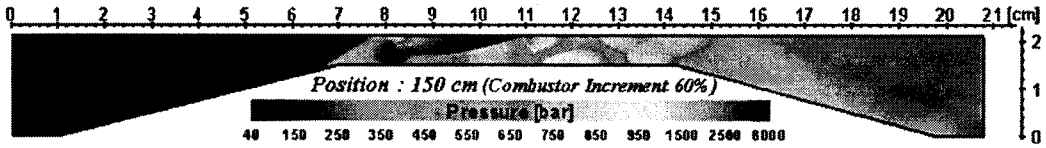

Fig. 5 탄체 진행거리 150cm에서의 등압력선도 (연소실 길이 60% 증가)

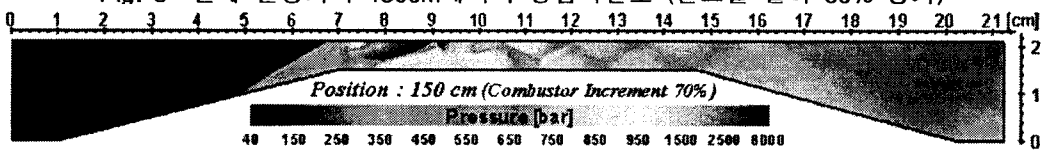

Fig. 6 탄체 진행거리 150cm에서의 등압력선도 (연소실 길이 70% 증가)

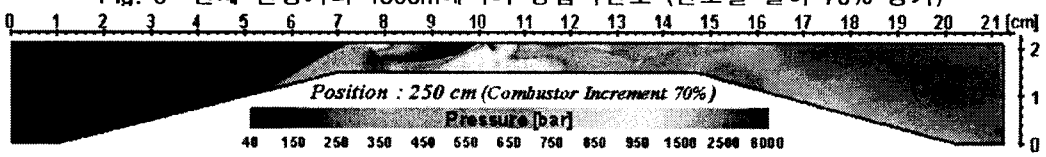

Fig. 7 탄체 진행거리 250cm에서의 등압력선도 (연소실 길이 70% 증가)

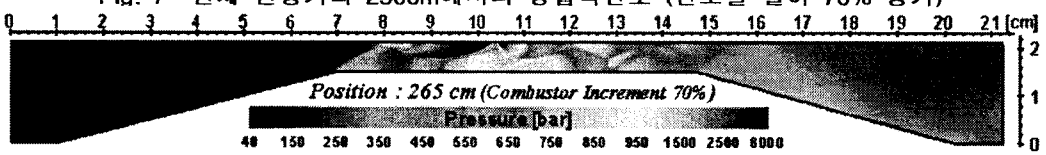

Fig. 8 탄체 진행거리 265cm에서의 등압력선도 (연소실 길이 70% 증가)

4. 결 론

ISL의 RAMAC30 II 실험을 바탕으로 초폭굉 모드 램가속기에서 연소실 길이가 화염 안정성에 미치는 영향을 살펴보았다. 연소실 길이를 50% 증가시킨경우는 화염이 지속적으로 유지되지 못하고 하류로 흘러가는 현상이 있었으며 60%, 70% 증가의 경우는 데토네이션파가 유지되지만 진동현상으로 인해서 가속도의 감소가 있었다. 이상에서 연소실 길이 증가가 화염을 유지시키는데 도움을 주는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 지나친 연소실의 압력증가는 오히려 추력의 감소와 더불어 unstart를 야기할 수 있음을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 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"

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

[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] 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