

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(8), 684-691(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.8.684

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

열 질식에 의한 덕티드 로켓 가스 발생기의 연소 압력 상승

김도영*, 신경훈**, 이창진***

A Sudden Increase in Combustion Pressure of Gas Generator of Ducted Rocket by Thermal Choking

Doyeong Kim*, Kyung-Hoon Shin** and Changjin Lee***

Dept. of Aerospace Engineering, Konkuk University* · ***

Daejeon Plant Development Team, Hanwha Corporation**

ABSTRACT

A sudden increase in combustion pressure is observed in the ducted rocket combustion test equipped with pipe shaped and converging nozzle exhaust tubes. This study aims to understand the physical mechanism of abrupt change in combustion pressure using thermal choking in the exhaust tube. Results confirmed that the thermal choking of the flow inside the exhaust tube was responsible for the sudden increase in combustion pressure. Also, high pressure exponent of solid propellants is critical sensitive to the occurrence of thermal choking exhaust pipe. Additionally, numerical simulation showed that the sudden increase in combustion pressure was less possible in diverging pipe because thermal choking is more reluctant to occur.

초 록

덕티드 로켓 가스발생기용 추진제 성능을 검증하기 위한 실험에서 직경이 10mm인 파이프와 최소 직경이 8.7mm인 수축 노즐을 배출 튜브로 사용하였을 때 급격한 압력 증가가 관찰되었다. 급격한 연소 압력 증가는 배출 튜브를 통과하는 유동의 열 질식(thermal choking) 때문인 것으로 판단하였다. 본 연구에서는 원형 파이프를 사용하는 경우, 배출 튜브 유동의 열 질식을 고려하여 가스발생기 연소 압력 변화를 예측하였다. 그 결과, 배출가스의 비-평형 화학반응으로 인한 배출 튜브 유동의 열 질식 발생이 급격한 연소 압력 증가의 원인임을 확인하였다. 특히 덕티드 로켓의 높은 압력 지수는 배출 튜브 내에서 발생하는 열에 매우 민감하게 반응하여 배출 튜브 내의 열 질식 가능성을 높이는 것으로 분석되었다. 또한 배출 튜브로 단면적이 변화가 있는 발산형 파이프를 사용하면 가스발생기의 급격한 연소 압력 증가를 예방할 수 있을 것으로 판단하였다.

Key Words : Ducted Rocket(덕티드 로켓), Thermal Choking(열 질식), Non-Equilibrium Chemical Reaction(비-평형 화학반응)

† Received : February 2, 2015 Revised : July 20, 2015 Accepted : July 28, 2015

*** Corresponding author, E-mail : cjlee@konkuk.ac.kr

1. 서 론

덕티드 추진기관은 연료과농 고체추진제를 연소시키는 가스발생기와 2차 연소실로 구성된다. 가스발생기는 불완전 연소가스를 생성하여 2차 연소실로 공급하며, 불완전 연소 가스는 2차 연소실에서 대기에서 흡입한 공기와 혼합되어 재연소한다. 이때 가스발생기에서 발생하는 1차 연소는 비-평형 화학반응으로 2차 연소실에서 완전연소가 이루어질 때까지 화학반응이 계속 진행되며 소량의 발열과 함께 생성물의 화학조성이 변한다 [1].

덕티드 로켓은 비행고도 변화에 대응하여 가스발생기의 연소가스 유량 조절이 필요하며 연소실 압력을 변화시켜 추진제의 연소량을 조절한다. 따라서 가스발생기의 고체추진제는 압력변화에 따른 연소율이 빠른 응답성을 갖도록 하기 위해 압력 지수가 0.5이상의 높은 값이어야 한다. 이러한 특징은 연소실 압력 변화에 따른 추진제 연소율 변화를 줄이기 위하여 0.5 이하의 압력지수를 요구하는 일반 고체추진제와 매우 다른 특성이자[2].

1차 연소에서 발생한 불완전 연소가스를 2차 연소실로 전달하기 위하여 다양한 단면적을 갖는 배출 튜브가 사용된다. 배출 튜브의 단면 형상으로 단순한 원형 파이프 또는 수축 노즐, 수축-팽창 노즐이 사용되며 2차 연소실에서 공기와 혼합을 원활하게 하기 위한 운동량을 갖도록 한다.

한편, 신경훈 등은 덕티드 로켓 가스발생기용 추진제를 개발하고 성능을 검증하기 위한 실험을 실시하였다[3]. 실험에 사용한 가스발생기의 배출 튜브는 수축 노즐, 수축-팽창노즐, 원형 파이프를

각각 사용하였다. Fig. 1은 직경 10mm인 파이프 (tube 1), 최소 직경 10mm인 수축 노즐(tube 2), 수축-팽창 노즐(tube 3)과 최소 직경이 8.7mm인 수축 노즐(tube 4)을 사용했을 때 가스발생기의 연소 압력 변화를 보여주고 있다. 직경 10mm인 파이프를 사용하였을 때, 가스발생기의 연소 압력이 급격히 증가하는 현상이 관찰되었다. 이 같은 연소 압력 증가는 최소 직경이 8.7mm인 수축 노즐을 사용하였을 때도 발생하였다. 직경이 작아질수록 압력 증가가 나타난 것으로 미루어 볼 때 배출 튜브를 통한 배출 유량의 변화가 가스발생기의 압력 상승 원인으로 보인다. 또한 최소 직경이 동일하여도 파이프를 사용하였을 때만 압력 증가가 발생하였으므로 길이가 매우 긴 파이프의 형상적 특징이 급격한 연소 압력 증가의 원인으로 판단된다.

유동 질식은(choking) 단면적을 통과하는 유량이 최대에 도달한 현상을 의미하며 이 경우 유동의 마하수 1이다. 이러한 유동 질식 현상이 발생하면 배출 유량을 제한하므로 연소 압력이 상승할 가능성이 높다. 연소 실험 이후에 파이프 단면을 관찰한 결과, 용융된 금속이 침착하여 발생하는 직경 감소는 확인되지 않았으며 물리적 원인에 의한 유동 질식은 아닌 것으로 판단된다.

열 질식(thermal choking)은 유동에 열 출입이 있으면 압축성 효과에 의해 유동이 가속 또는 감속하여 마하수가 1로 변하는 현상을 의미하며 이로 인하여 유동 질식이 발생한다. 스크램젯(scramjet)과 램젯(ramjet) 엔진은 초음속 또는 아음속 유동에서 연소를 발생시켜 추력을 얻기 때문에 연소로 인한 열 발생에 의하여 열 질식이 일어날 가능성이 매우 높다. 열 질식이 발생하면 배출되는 질량 유량이 제한되고 연소 압력이 상승하여 엔진 성능이 급격히 저하되기도 한다. 따라서 실험을 통하여 열 질식 발생 여부를 확인하거나 [4] 연소에 대한 열 질식을 예측하는 연구가 진행되고 있다[5-6]. 한편 덕티드 로켓의 1차 연소는 농후 연소가 이루어지는 비-평형 화학 반응이므로 배출 튜브를 통과하면서 비-평형 화학반응에 의한 소량의 열이 발생하여 열 질식 발생의 가능성이 있다. 특히 길이가 짧은 수축 노즐이나 수축-팽창 노즐보다 길이가 긴 파이프를 배출 튜브로 사용한 경우, 비-평형 화학반응에 의한 열 발생이 상대적으로 오랫동안 진행되기 때문에 열 질식이 발생할 가능성이 높다. 따라서 덕티드 로켓의 배출 튜브로 원형 파이프를 사용한 경우에 대하여 열 질식을 고려한 가스발생기 연소 압력 변화를 해석할 필요가 있다.

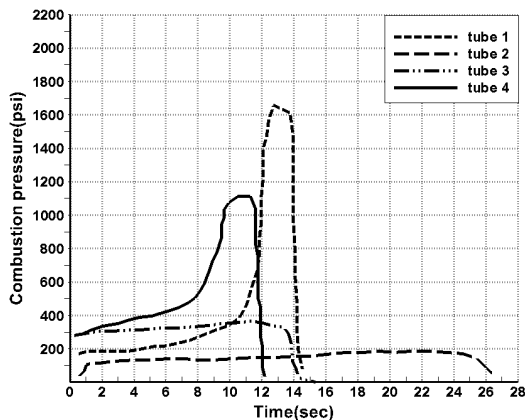


Fig. 1. Combustion pressure of gas generator with different exhaust tubes[3]

본 연구는 덕티드 로켓 가스발생기의 1차 연소에서 발생하는 비-평형 화학반응에 의한 열 방출을 고려하여 단면적이 일정한 배출 파이프에서 발생하는 열 질식을 모사하고 가스발생기의 급격한 연소 압력 증가의 발생을 예측하였다. 또 덕티드 로켓 추진제의 주요 특성인 높은 압력지수가 열 질식 발생에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 배출 튜브의 단면적 변화를 고려하여 가스발생기 연소 압력 변화의 거동 분석과 연소 압력의 급상승을 제어하는 방법을 제시하였다.

II. 본 론

2.1 연소 압력 모델링

2.1.1 지배방정식

Figure 2는 제어체적으로 표시된 연소 공간 그리고 연소 압력과 관계된 작동 변수들을 나타내고 있는 그림이다. 가스발생기의 연소 압력 변화는 질량 보존 방정식에 의하여 결정되며 연소로 발생하는 발생 유량과 배출 튜브를 통해 배출되는 배출가스 유량 사이의 균형에 의하여 결정된다. 식 (1)은 가스발생기의 연소 압력 변화를 나타내고 있으며 하첨자 ()₀, ()_p, ()_b는 각각 정체량(stagnation), 파이프, 연소를 의미한다.

$$\frac{V}{RT_0} \frac{dP_0}{dt} = \rho_b A_b \alpha P_0^n - \rho_p A_p M_p \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{1 + \frac{\gamma-1}{2} (M_p)^2}} \quad (1)$$

식 (1)의 오른쪽 첫째 항은 연소에 의한 가스 발생량이며 둘째 항은 원형 파이프를 통과하여 배출되는 가스 유량이다. 이 때 배출 튜브를 통해 빠져 나가는 배출가스의 마하수(M_p)의 변화는 비-평형 화학반응으로 인한 열 발생을 고려하여 식 (2)로 나타낼 수 있다. 식 (2)는 배출 튜브를 통과하는 배출가스의 마하수 변화를 시간에 따라 예측함으로써 배출 튜브에서의 열 질식 유무를 판단한다. 식 (2)의 오른쪽 항 $\dot{Q} = \frac{1}{c_p T_0} \frac{dq}{dt}$ 는 파이

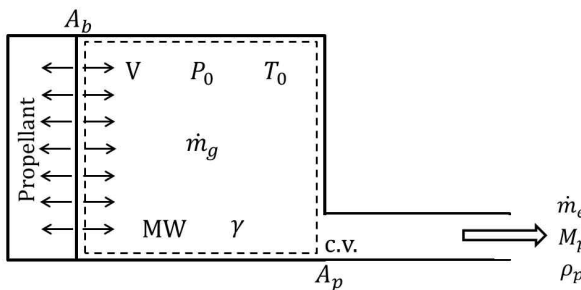


Fig. 2. Schematic of control volume and variables

프에서 발생하는 열량을 의미하며 비-평형 화학 반응으로 발생하는 열량은 매우 적은 양이므로 상수로 가정하였다.

식 (1)에서 가스발생기의 연소 압력을 계산하면 파이프로 유입되는 배출가스의 마하수(M_p)를 알 수 있다. 이는 식 (2)를 계산하는 데 사용되며 그 결과로 배출 튜브를 통과한 배출가스의 마하수를 알 수 있다. 식 (2)로 계산된 배출가스 마하수는 식 (1)의 배출 유량을 결정한다. 따라서 식 (1)과 (2)를 연계하여 계산하였으며 4차, 5차를 통합한 룬게 쿠타 방법(Runge-Kutta method)을 사용하였다.

$$\frac{dM_p^2}{dt} = \frac{(1 + \gamma(M_p)^2)(1 + \frac{\gamma-1}{2}(M_p)^2)}{1 - (M_p)^2} (M_p)^2 \dot{Q} \quad (2)$$

계산에 사용한 추진제 밀도(ρ_b), 연소 면적(A_b), 배출 파이프 단면적(A_p), 추진제의 연소율 계수(a)와 압력지수(n)은 모두 실험값과 동일한 값을 사용하였으며 연소실 초기 부피는 $0.002m^3$, 연소 온도(T_0) 1800K를 각각 사용하였다[3]. 또한 배출 가스는 열량적 완전 기체(calorically perfect gas)로 가정하였으며 비-평형 화학반응에 의한 발생 열량이 그리 크지 않으므로 연소 가스의 물성치는 평형 화학 반응 계산을 사용하여 배출가스의 비열비(γ)는 1.09, 분자량은 $37.48kg/kmol$ 을 사용하였다. 배출 튜브에서 비-평형 화학반응으로 발생하는 열량은 매우 적은 양이므로 단위 시간 당 가스발생기 발생 열량의 1%이하로 가정하였다.

한편 본 연구에서 적용하고 있는 열 질식 모델링은 유동과 벽면의 마찰로 인한 유동 속도 변화를 고려하고 있지 않고 있다. 즉 가스발생기의 연소 압력 변화를 결정하는 주요 요인은 발생 유량과 배출 유량의 차이이며 마찰로 인한 유동 마하수 변화보다 열 출입에 의한 영향이 더 클 것으로 가정하였으며 식 (1), (2)를 사용한 연소 압력 변화에 대한 해석 결과는 실험값[3]과 정성적인 비교가 가능할 것으로 판단하였다.

2.1.2 지배방정식의 초기값 설정

식 (1), (2)의 계산을 위하여 가스발생기의 압력과 배출가스 유동 마하수의 초기값이 필요하다. 연소 압력 모델링의 불확실성이 존재하므로 실험에서 관찰된 경향과 정성적으로 유사한 가스발생기의 압력을 모사하기 위하여 초기 값 선정이 중요하다.

가스발생기의 연소 압력이 평형을 유지하는 경우는 발생 유량(\dot{m}_g)과 배출 유량(\dot{m}_e)이 균형을

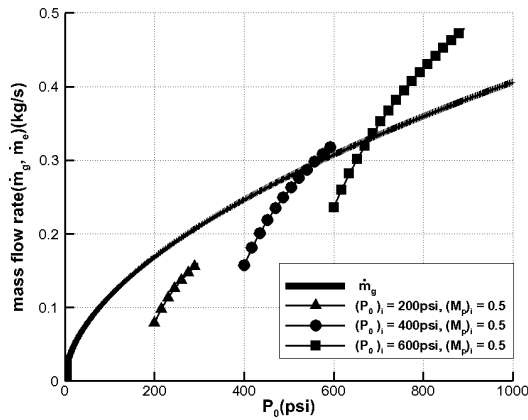


Fig. 3. Comparison of generated mass flow rate and exhaust mass flow rate at different initial conditions

이루고 있을 때이다. Fig. 3은 가스발생기의 연소 압력과 배출가스 유동의 초기값을 변화시키면서 연소 압력에 따른 배출 유량 변화를 나타낸 그림이다. 하첨자 ()는 초기값을 의미한다. 실험 결과에 의하면 가스발생기의 압력 변화 범위는 200-2000 psi이므로 초기 가스발생기 연소 압력은 같은 범위 안에서 설정하였다. Fig. 3에 의하면 배출 유량의 초기 마하수가 동일해도 초기 가스발생기 연소 압력에 따른 배출 유량이 다르게 나타남을 알 수 있다. 그 중에서도 발생 유량과 배출 유량이 균형을 이루는 경우는 두 값이 같아지는 가스발생기 연소 압력이 존재할 때이며 이는 Fig. 3에서 초기 가스발생기 압력이 400psi 또는 600psi일 때이다. 따라서 발생 유량 그래프와 배출 유량 그래프가 교차점이 존재하도록 하는 초기 압력과 마하수를 사용하였다.

2.2 배출 파이프와 가스발생기 연소 압력 변화

2.2.1 열 발생량에 따른 연소 압력 변화

직경이 10mm인 원형 파이프를 사용하였을 경우, 배출 튜브 내의 열 발생에 따른 가스발생기 연소 압력 변화를 예측하였다. 배출 튜브 내에서 비-평형 화학반응에 의하여 발생하는 열량은 가스발생기에서 발생하는 1차 연소로 인해 발생한 열량의 0.1%, 0.5%, 1% 로 각각 가정하였다.

Figure 4는 비-반응 유동이 배출 튜브를 통과할 때 가스발생기의 발생 유량과 배출 유량의 변화를 나타낸 그림이며 가스발생기의 발생 유량과 배출 유량은 평형을 이루게 됨을 알 수 있다. Fig. 5는 배출 튜브 내부에서 열 발생량이 있는 경우 배출 유량의 변화를 나타낸 그림이다. 열

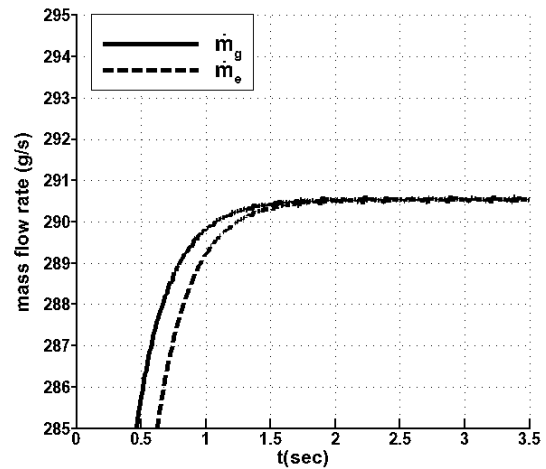


Fig. 4. Comparison of production with depletion mass flow rate for $\dot{Q}=0$

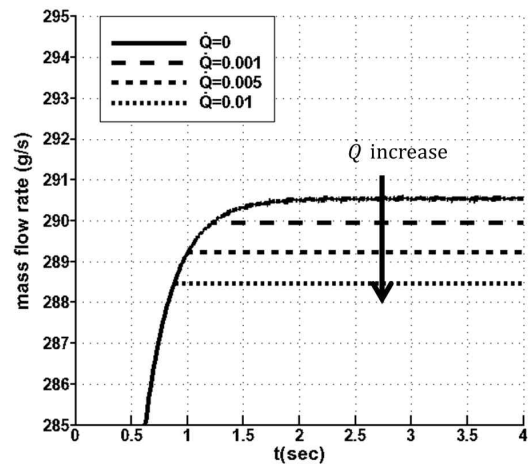


Fig. 5. Exhaust mass flow rates with different amount of \dot{Q} at exhaust tube

질식이 발생하면 배출 유량이 최대량에 도달하기 전에 배출 유량이 제한됨을 알 수 있다. 또한 열 발생량이 커질수록 열 질식이 발생하는 시점이 앞당겨지므로 배출 유량이 제한되는 시점 또한 빨라진다. 이는 열 발생량이 클수록 배출되는 속도가 더 적은 경우에도 열 질식이 발생할 가능성이 높아지기 때문이다. Fig. 6은 열 발생량에 따른 가스발생기 연소 압력 변화를 나타내는 그림이며 Fig. 5의 열 발생량에 따른 열 질식 시점과 가스발생기의 급격한 압력 증가 시점이 일치함을 알 수 있다. 따라서 열 질식에 의한 배출 유량의 제한이 가스발생기에서 관찰된 급격한 연소 압력 상승의 원인으로 예측된다.

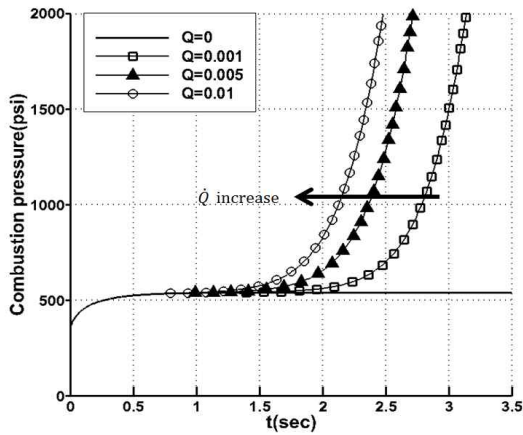


Fig. 6. Pressure in gas generator with different amount of \dot{Q} at exhaust pipe

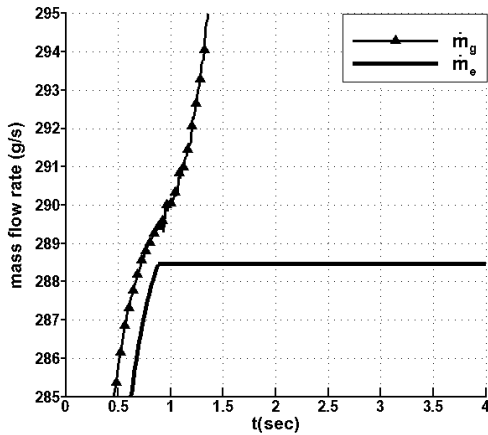


Fig. 7. Comparison of generated mass flow rate and exhaust mass flow rate with $\dot{Q}=0.01$

Figure 7은 \dot{Q} 이 0.01일 때 시간에 따른 발생 유량과 배출 유량의 변화를 보여주고 있다. 열 질식으로 인해 배출 유량이 제한되므로 가스발생기의 발생 유량이 급격히 증가하여 급격한 연소 압력 상승으로 이어진다. 발생 유량과 배출 유량이 같아져 압력 균형에 이르지 못하고 발생 유량과 배출 유량의 차이가 더 커짐을 알 수 있다. 배출 유량이 더 이상 증가하지 않으므로 가스발생기의 연소 압력이 증가하게 되며, 증가한 가스 발생기 연소 압력은 다시 발생 유량의 증가로 나타난다.

종합하면 1차 연소 가스의 비-평형 화학반응으로 인해 배출 튜브 내에서 열이 발생하면 열 질식에 의한 가스발생기의 급격한 압력 증가가 나타나는 것으로 예측된다. 특히 열 발생량이 증가

할수록 열 질식이 좀 더 빨리 발생하므로 압력 증가 시점이 앞당겨짐을 알 수 있다.

2.2.2 연소 면적 증가에 따른 가스발생기 연소 압력 변화

연소 실험 결과를 나타내는 Fig. 1에 의하면 배출 튜브로 직경 10mm의 원형 파이프를 사용한 경우, 연소 초기에 완만한 기울기로 연소 압력이 증가함을 보인다. 가스발생기의 연소 압력은 발생 유량과 배출 유량이 균형을 이루지 못하고 발생 유량이 증가하거나 배출 유량이 감소할 때 증가한다. 배출 유량의 감소가 나타날 수 있는 직접적인 원인으로 배출 튜브의 단면적 감소를 확인한 결과 용융된 금속의 침착으로 인한 단면적 감소는 없었으므로 배출 유량의 감소보다 발생 유량의 증가로 인한 압력 증가가 원인인 것으로 보인다.

발생 유량은 식 (1)처럼 밀도와 연소율, 연소 면적의 곱으로 나타낸다. 추진제의 연소율은 연소 압력과 상호 관련되어 있으나 연소 압력이 증가해야 연소율도 증가하므로 연소 초반에 압력 증가를 일으킬 만한 원인은 아니다. 그러므로 추진제의 연소 면적의 증가로 인한 발생 유량의 증가가 가스발생기 연소 압력을 일으키는 주요 원인으로 판단된다. 실험에서 사용한 추진제는 끝연소형(end-burning) 형상으로 중립 연소가 특징이지만 배출 튜브를 직경 10mm의 파이프를 사용한 경우에는 어떠한 원인에 의해 추진제가 균일하게 연소하지 못하고 연소 면적이 증가한 것으로 보인다. 본 연구에서는 연소 면적 변화로 인한 가스발생기 연소 압력 증가를 모델링하여 실험값과 정성적으로 비교하는 것에 중점을 두었다. 이를 위해 앞서 예측한 열 질식에 의한 가스 발생기 연소 압력 변화 모델링에 연소 면적(A_b) 증가 모델링을 포함하여 가스발생기 연소 압력 변화를 모사하였다. 실험 결과 점진 연소는 시간에 따라 선형적으로 증가하지 않고 비선형적으로 증가하므로 이를 모사하기 위하여 시간에 따른 2차 함수로 가정하였다.

Figure 8은 2차 함수로 나타낸 연소 면적 변화 식($\frac{dA_b}{dt} = bt + c$)의 계수(b)가 다른 세 가지 경우에 대하여 시간에 따른 가스발생기의 연소 압력을 나타낸 그림이다. 계산 결과 연소 면적 증가로 인해 완만한 기울기의 압력 증가가 나타났으며 시간에 따른 연소 면적 변화가 클수록($A > B > C$) 압력 증가 또한 빠르게 나타남을 알 수 있었다. 또한 배출 튜브 내의 열 발생 효과를 고려하면 완만한 기울기의 압력 증가 이후 급격한 기울기

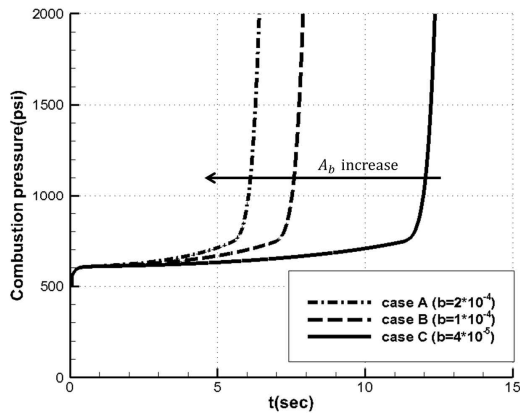


Fig. 8. Comparison of combustion pressure with different area coefficient

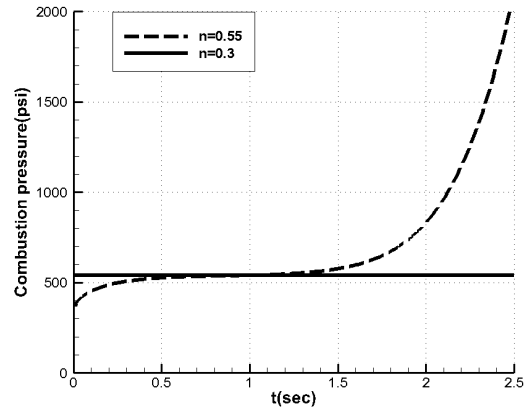


Fig. 10. Comparison of pressure at $n=0.5$ and pressure at $n=0.55$

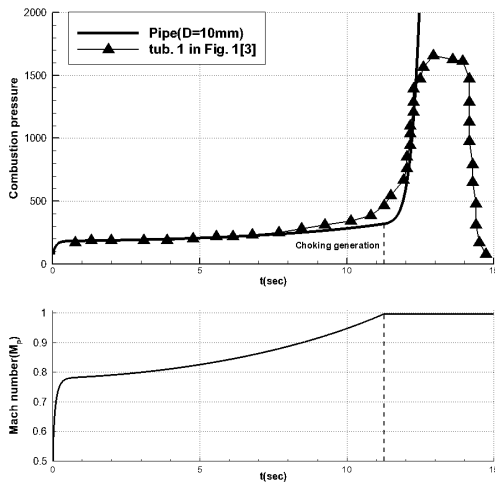


Fig. 9. (Top) Comparison of estimation pressure and test in combustion pressure[3] (Bottom) Change in pipe Mach number

의 압력 증가도 예측되었다. Fig. 9은 가스발생기 연소 압력 거동에 대한 계산 결과를 실험 값[3]과 정성적으로 비교한 그림이다. 그 결과 두 경우의 연소 압력 증가가 정성적으로 매우 유사한 경향을 갖고 있음을 알 수 있다.

그러므로 직경 10mm의 원형 파이프를 배출 튜브로 사용 시, 급격한 가스발생기의 연소 압력 증가 이전에 나타나는 완만한 기울기의 압력 증가 현상은 추진제의 연소 면적 증가로 인한 발생 유량의 증가로 인해 나타나는 것으로 분석된다.

2.2.3 압력지수 n 에 의한 연소 압력 증가의 민감도

덕티드 로켓에 사용되는 고체추진제는 일반 고체추진제와 달리 0.5 이상의 압력 지수를 갖는

다. 이러한 덕티드 로켓 추진제의 높은 압력지수는 열 질식이 발생하는데 매우 민감한 영향을 미치는 것으로 보인다. 압력 지수 n 이 클수록 배출 튜브 유동의 마하수가 증가하므로 적은 열 발생이라도 열 질식이 발생할 가능성이 높아진다.

Figure 10은 실험값과 동일한 $n=0.55$ 인 경우와 $n=0.3$ 인 경우에 대하여 동일한 열 발생량($\dot{Q}=0.01$)을 가정하였을 때, 가스발생기의 연소 압력 변화를 비교한 그림이다. 비-평형 화학반응에 의한 열 발생량이 동일하여도 두 경우의 연소 압력 거동은 매우 다르게 나타나고 있다. n 이 0.3인 경우, 가스발생기의 연소 압력은 평형 상태로 유지되었지만 압력 지수 $n=0.55$ 인 경우는 연소 압력이 급격히 증가하였다. 이러한 급격한 압력 증가는 배출 튜브 내에서 열 질식이 발생한 것으로 예측할 수 있다. 이러한 연소 압력 상승의 민감성은 압력지수 n 이 0.55인 경우에 배출 튜브로 유입되는 배출가스의 마하수가 1에 가까우므로 적은 열 발생에도 민감하게 열 질식이 발생하기 때문이다.

2.3 단면적이 변화하는 배출 튜브의 유동 마하수

배출 튜브의 단면적 변화가 가스발생기 연소 압력 변화에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 11은 단면적이 선형적으로 증가하는 단순한 형태의 배출 튜브의 형상이다. 출구 직경(D_{pf})은 배출 튜브 입구 직경(D_{pi})보다 5%가 큰 값으로 하였으며 배출 튜브의 길이는 입구 직경의 10배가 되도록 하였다. 배출 튜브 길이에 따른 직경의 변화가 적음에도 불구하고 단면적 변화가 배출 유동에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

Figure 11과 같은 발산형 파이프를 사용하였을

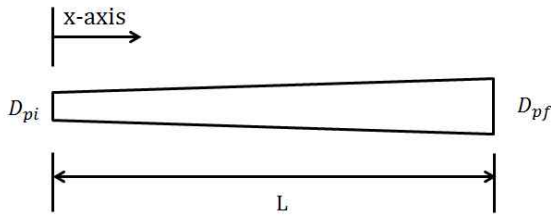


Fig. 11. Schematic of diverging pipe

때 배출 유동의 마하수(M_p) 변화는 식 (3)에 의하여 결정된다[6]. 식 (3)은 단면적 변화를 포함한 배출가스 유동의 마하수 변화와 배출 튜브 내부의 열 발생 효과도 포함하고 있다. 식 (1)을 통하여 각 시간마다 파이프 입구 유동의 마하수 $M_p(x=0)$ 를 계산하여 이를 식 (3)의 경계값으로 사용하였다.

$$\frac{dM_p}{dx} = \frac{1 + \frac{\gamma-1}{2}(M_p)^2}{1 - (M_p)^2} (M_p)^2 \left[(1 + \gamma(M_p)^2) \frac{dQ}{dx} - \frac{4}{D_p} \frac{dD_p}{dx} \right] \quad (3)$$

단면적 변화 효과는 식 (3)의 마지막 항에 포함되어 있으며 배출가스의 비-평형 화학반응으로 발생하는 열에 의한 유동 마하수 변화도 고려하였다. 배출 튜브 내부에서 발생하는 총 열량(Q)은 단위 시간 당 배출 튜브에서 발생하는 열량 (\dot{Q})에 시간 간격(dt)을 곱한 것으로 사용하였다. \dot{Q} 은 단위 시간당 가스발생기 발생 열량의 1%로 가정하였다. 축 방향에 따른 열 발생($\frac{dQ}{dx}$)은 균일하다고 가정하여 파이프 내부의 총 발생 열량(Q)을 파이프 길이(L)로 나눈 값으로 사용하였다. 식 (3)을 사용하면 각 시간마다 배출 튜브에서의 열 질식 유무뿐만 아니라 열 질식이 배출 튜브에 어느 지점에서 발생하는 지를 예측할 수 있다.

Figure 12는 가스발생기 연소 압력이 평형 상태가 되어 입구 유동의 마하수가 고정되었을 때, 단면적 변화가 없는 기본 파이프 형태의 배출가스의 마하수 변화 및 발산 파이프를 사용하여 배출가스의 마하수 변화를 예측한 그림이다. 단면적이 일정한 파이프 유동에 열이 발생하면 파이프 출구에서 마하수가 1에 도달하여 열 질식이 발생하였다. 그러나 발산 파이프에서는 동일한 열량이 발생하여도 단면적 변화로 인하여 길이에 따른 유동 마하수가 감소하였다. 이는 열 발생에 의한 마하 수 증가보다 배출 튜브 형상으로 인한 마하 수 감소의 영향이 매우 크기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로 단면적 변화가 크지 않더라도 발산 파이프 형태의 배출 튜브

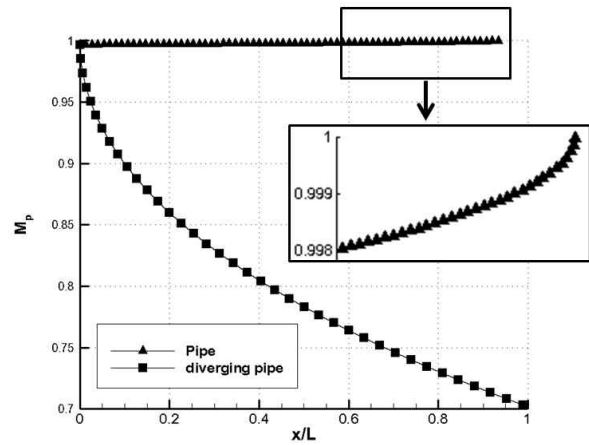


Fig. 12. Comparison of Mach number with different pipes

사용 시 열 질식으로 인한 급격한 압력 증가를 막을 수 있을 것으로 판단된다.

III. 결 론

배출 튜브로 직경 10mm의 파이프를 사용한 경우에 발생하는 열 질식을 모사하여 실험에서 관찰된 덕티드 로켓 가스발생기의 급격한 연소 압력 증가를 예측하였다. 배출가스의 비-평형 화학반응으로 인한 배출 튜브 내의 열 발생이 열 질식을 일으켜 가스발생기에서 급격한 연소 압력 증가가 나타남을 확인하였다. 특히 덕티드 로켓의 추진제가 높은 압력 지수를 갖고 있으므로 배출 튜브 내에서 발생하는 열에 매우 민감하게 반응하여 열 질식이 발생하며 연소 압력 증가가 이어진다.

또한 배출 튜브로 단면적이 변화가 있는 발산형 파이프를 사용하면 동일한 조건에도 유동 열 질식이 발생하지 않아 급격한 연소 압력 증가를 방지할 수 있었다. 이는 단면적 증가로 인한 마하수 감소 효과가 열 발생으로 인한 마하수 증가 효과보다 크게 작용하기 때문이며 발산 파이프 형태의 배출 튜브를 사용함으로써 열 질식으로 인한 급격한 연소 압력 증가를 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 우주기술개발사업(NSL사업, 2013M1A3A3A02041818)의 지원을 받아 수행한 연구결과임을 밝히며 지원해주신 한국연구재단에 감사드립니다.

Reference

- 1) You, J. M., Lee, C. J., "Prediction of Non-Equilibrium Kinetics of Fuel-Rich Kerosene/LOX Combustion in Gas Generator", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, 2007, pp. 1271-1283
- 2) Cochet, A., Fourest, B., Blanchard, H., Masson, C., and Perut, C., "New Boron Fuel Rich Solid Propellants for 'Rustique' Ducted Rocket", 110, *Aéronautique et Astronautique de France(AAAF)*, 2006
- 3) Shin, K. H., Won, J. U., Tak, H. S., Choi, S. H., Lee, W. B., and Lee, C., "A Static Combustion Study on Fuel Rich Propellant for Ducted Rocket Gas Generator", *AIAA 2014-4045*, 50th AIAA/ ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2014.
- 4) O'Byrne, S., Doolan, M., Olsen, S. R., and Houwing, A. F. P., "Analysis of Transient Thermal Choking Process in a Model Scramjet Engine", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 16, No. 5, 2000, pp. 808-814
- 5) Miyazato, Y., Masuda, M., Matsuo, K., Kashitani, M., and Yamaguchi, Y., "One-Dimensional Analysis of Thermal Choking in Case of Heat Addition in Ducts", *Journal of Thermal Science*, Vol. 9, No. 3, pp. 224~229, 2000
- 6) Knuth, W., Gloyer, P., Goodman, J., and Litchford, R., "Thermally-Choked Combustor Technology", N96-16952, Center for Space Transportation and Applied Research Fifth Annual Technical Symposium Proceedings, 1993