

가스 다이내믹 점화기의 온도상승 지배인자에 관한 수치적 연구

이재원* · 최효상* · 임대홍** · 서성현*** · 강상훈****†

Numerical Investigation about the Dominating Factors of Heat Increasing in a Gas-Dynamic igniter

Jaewon Lee* · Hyosang Choi* · Daehong Lim** · Seonghyeon Seo*** · Sang Hun Kang****†

ABSTRACT

In the present study, dominant factors for temperature increase and effects of mass entering the resonance tube of the gas-dynamic igniter are investigated. Using RhoCentralFoam solver in OpenFOAM program, numerical simulation is performed for three different cases. In the results, the heating of the working fluid is found to be a result from aero-thermodynamic phenomena. Appropriate mass entering to the resonance tube is found to be an important dominant factor as well.

초 록

본 연구에서는 가스다이내믹 공진 점화시스템 (Gas-dynamic Ignition System)의 온도상승 지배인자를 파악하고, 공진관으로의 질량유입 패턴의 영향에 대해 연구하였다. OpenFOAM 프로그램을 이용하여 세 가지 Case에 대한 전산해석을 수행하였으며, RhoCentralFoam을 적용하였다. 해석결과로, 작동유체의 가열이 공기열역학적 현상에 의한 것임을 밝히고, 공진관으로의 원활한 질량유입이 온도상승에 중요한 지배인자임을 확인하였다.

Key Words: Gas-dynamic Ignition System(가스 다이내믹 점화), Under Expanded Nozzle(부족 팽창 노즐), Resonance tube(공진 관), OpenFOAM(오픈폼)

* 세종대학교 기계공학과

** 서울대학교 항공우주공학과

*** 국립한밭대학교 기계공학과

**** 세종대학교 항공시스템공학과

† 교신저자, E-mail: aeroksh@sejong.ac.kr

1. 서 론

가스 다이내믹 점화기는 로켓엔진 연소에 사

용된 이전의 점화기술과 달리 간단한 구조를 갖고, 재점화가 용이하다는 장점을 가진 액체로켓의 점화기로 Sprenger에 의해 발견되었다[1]. 기압 차이에 의해 구동되는 이 점화기는 노즐을 통과한 작동유체가 공진관 내부로 진입하여 공진 가열효과 즉 충격파의 생성, 진동, 충돌에 의해 내부 유동의 온도를 상승시킨다. 유동의 온도 상승에 의해 충분한 점화에너지를 확보한 후에는, 가열된 점화기의 표면에 연료 및 산화제를 분사하여 점화시킨다[2]. 이재원 등은 공진관 가열효과에 영향을 미치는 요소인 공진관 입구의 각도, 노즐 출구와 공진관 입구 간 거리가 공진 가열효과에 미치는 영향에 대한 연구를 하였다[3]. 임대홍 등은 OpenFOAM 코드를 이용하여 가스다이내믹 점화기 내부 현상을 자세히 관찰하였다[4]. 본 연구에서는 이들 연구의 연장연구로서, 가스다이내믹 점화기 내 압력 및 질유량 변화가 온도 상승에 기여하는 바에 대해 연구하였다.

2. 수치 해석

본 연구에서는 노즐출구와 공진관 입구 간의 거리(X) 및 Taper 각도(θ)를 변화시켜 3가지 Test case를 구성하였으며, 그 조건은 Table 1에 나타난 바와 같다.

Table 1. The Condition of each cases

	$\theta^*(\text{ }^\circ)$	X**(mm)
Case 1	4	18
Case 2	4	36
Case 3	4 + α	18

*Taper Angle **Distance Between Nozzle and Resonance Tube

Case 1은 기준조건으로서 온도상승효과가 두드러지는 형상으로 설정하였고, Case 2는 노즐출구와 공진관 입구 간의 거리를 확장시켜 그 영향을 살펴보았다. Case 3은 Case 1에서 확장각을 증가시켜 유동의 유입이 원활하게 되도록 개선한 경우이다.

각 Case별 가스 다이내믹 점화기의 격자는 Fig. 1과 같다.

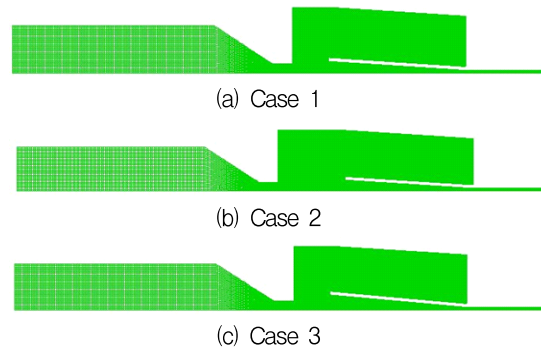


Fig. 1 Grid system of each cases

가스 다이내믹 점화기는 축대칭형상이므로 그림과 같이 2차원 축대칭 격자계를 적용하였다.

온도상승을 위한 적절한 경계조건으로 노즐입구의 압력은 절대압력 11기압, 노즐출구의 압력은 절대압력 2기압으로 설정하였다. 이러한 조건을 바탕으로 가스다이내믹 점화기 내부 현상을 고찰하기 위해 압축성 유동에 대한 Navier-Stokes 방정식을 해석하였으며, 난류의 영향은 고려하지 않았다. 전산해석을 위한 Solver는 OpenFoam의 대표적 압축성 유동해석 solver인 RhoCentralFoam을 사용하였다. OpenFoam의 사용과 관련된 내용은 임대홍 등의 논문에 기술된 바와 같다[4].

3. 해석 결과

가스 다이내믹 점화기의 온도상승은 기압 차에 의해 발생하는 유동의 운동에너지가 공진관 내부의 벽에서 충돌 후 역류하는 과정에서 유입 유동과 역류유동의 속도차이에 의해 충돌하여 유동의 운동에너지가 내부에너지로 변화하는 메커니즘에 의해 발생한다[3]. Fig. 2에는 Case 1에 대해 $t = 0.002629$ sec일 때 공진관 내의 유로일정구간에 대한 온도와 축 방향 속도 Contour를 나타냈다. 그림에 나타난 바와 같이, 유동의 속도가 급격히 감소하는 구간과 온도 상승 구간이 일치하고 있다. 따라서 공진관 내 유로 일정구간

의 내부 온도상승은 해당 구간의 유량의 변화에 직접적인 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

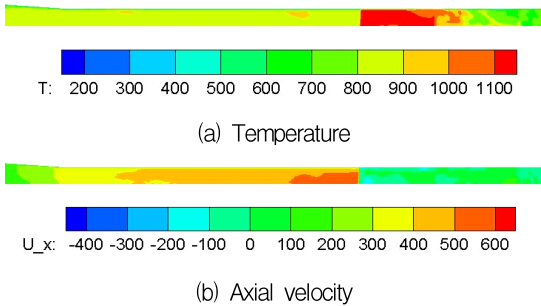
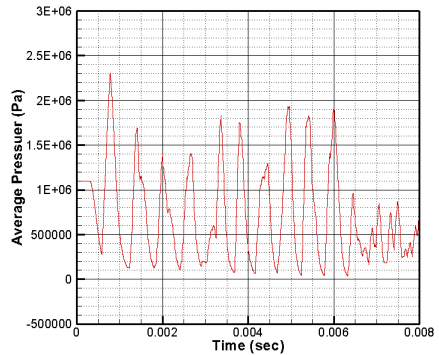
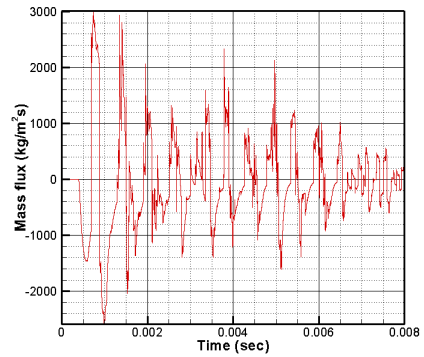


Fig. 2 Temperature and Axial velocity contour within the resonance tube for Case 1

유량, 압력 및 온도 상승 간의 상관관계를 더 자세히 확인하기 위해, 공진관 내 일정 유로 구간으로 유입되는 질량유속, 평균 온도 및 압력의 변화를 Fig. 3에 나타냈다. 그림에 나타난 데이터를 분석해보면 온도, 압력, 유량의 진동수가 일치하고 있으며, 질량유속과 압력의 최고점 달성 시점이 온도의 최고점 달성 시점에 비해 약간 선행하는 것이 확인되었다. 따라서, 공진관으로의 질량 유입이 구동가스의 온도상승에 중요한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 Case 2, 3 에서도 동일하게 관찰되었다.

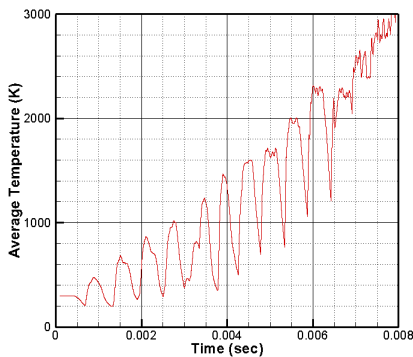


(b) Average pressure



(c) Mass flux

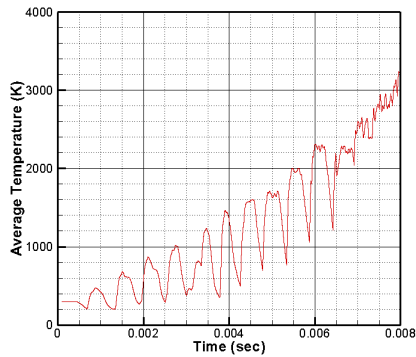
Fig. 3 Properties within the resonance tube for Case 1



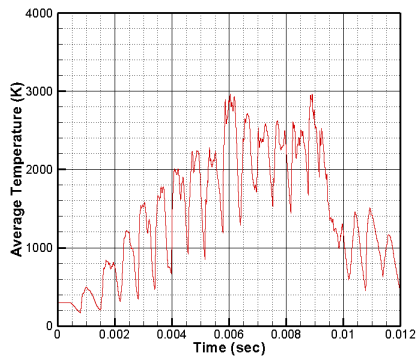
(a) Average temperature

Case 2와 3은 공진관으로의 질량 유입 변화영향을 확인하기 위해 설정되었다. Fig. 4에는 Case 1~3에서 공진관 일정구간에서의 온도변화를 함께 나타냈다. 그림에 나타난 바와 같이, 노즐과 공진관 간의 거리를 확장한 Case 2의 경우에는 온도가 상승하다 하락유지되는 경향이 관측되었고, 확장각을 약간 증가시킨 Case 3의 경우에는 온도상승성능이 개선되고 있음을 확인할 수 있다.

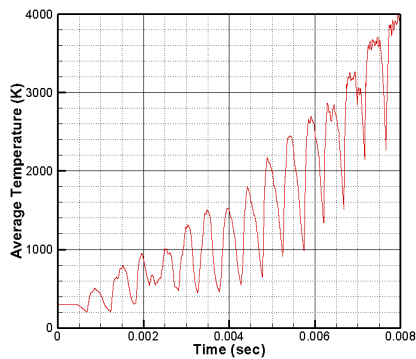
앞서 설명한 바와 같이 이러한 온도상승정도의 차이는 공진관으로 유입되는 유동의 차이에 기인한다. Fig. 5에는 각각의 경우에 대해, 공진관 입구로 최대 유속으로 구동가스가 유입될 시점에서의 축방향속도 contour를 나타냈다.



(a) Case 1



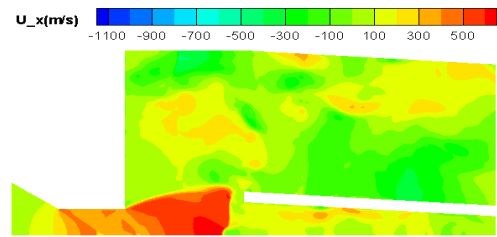
(b) Case 2



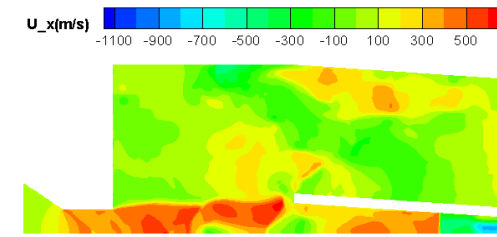
(c) Case 3

Fig. 4 Average temperature within the resonance tube for each Cases

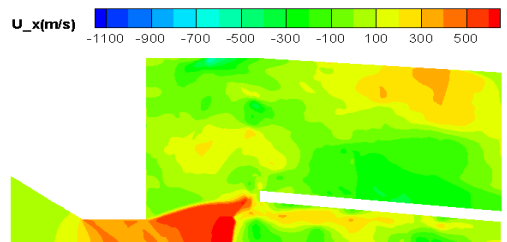
그림을 살펴보면, Case 2의 경우, 다른 경우보다 노즐출구와 공진관 입구 사이의 거리가 길기 때문에 노즐출구를 지난 유동이 공진관 입구 근처에서 전단층이 발생하며 주기적인 불안정성을 보였다. 이러한 전단층의 불안정성은 공진관 안으로의 원활한 유동유입을 방해하여 공진관 내 에너지 축적량을 저감시킨다. 따라서, Fig. 4의 (b)에서 나타난 바와 같이 온도 하락 패턴이 발생하게 된다. Case 3의 경우에는 그림에 나타난 바와 같이 공진관 입구 확장각 증가로, 노즐 유동 전체가 공진관으로 원활하게 유입되고 있음을 알 수 있다. 따라서, Fig. 4의 (c)에서 나타난 바와 같이 가장 높은 온도상승성능을 보이고 있다.



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 5 Axial velocity contour for each Case

4. 결 론

가스 다이내믹 점화기의 온도상승 특성과 지배인자를 파악하기 위한 연구를 수행하였다. OpenFOAM을 이용하여 공진관 입구의 Taper 각도(θ)과 노즐출구로부터 공진관 입구 사이의 거리(X)를 변화시킨 세 가지 Case에 대하여 온도상승 지배인자에 대하여 분석하였다. 그 결과, 가스 다이내믹 점화기의 공진관 내부온도 상승에 영향을 미치는 요인은 공진관 입구의 유동의 출입이 중요한 영향을 미치고 있음이 확인되었다. 따라서, 노즐 출구를 지난 유동이 공진관 내부로 손실 없이 원활히 유입되는 경우와 유동의 간섭이 일어나지 않는 경우에 점화기의 가열 효과가 높게 나타나며 성능지수가 좋다고 판단할 수 있다.

5. 후 기

본 연구는 한국연구재단(미래창조과학부)의 우주핵심기술개발사업(NRF-2015M1A3A3A02013905)에 의해 지원받았습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Sprenger, H. S., "Uber Thermische Effekte Bei Resonanzröhren," Mitteilungen Aus Dem Institut Fur Aerodynamik An Der E.T.H, Zurich, Nr.2, 1954, pp.18
2. Guo-Zhou Zhang, Ya-Na Song, Nan-Jia Yu, Xiao-Yan Tong, and Bin Ma, "Coaxial Hydrogen/Oxygen Gas-dynamic Resonance Ignition Technology for Rocket Repetitive Starting," AIAA SPACE Conference & Exposition, 2007
3. 이재원, 임대홍, 이형원, 서성현, 강상훈, "가스 다이내믹 점화기의 열공진현상 전산해석연구," 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, 2016, pp. 74-78
4. 임대홍, 이재원, 강상훈, 서성현, "OpenFOAM을 이용한 가스다이내믹 점화기 전산해석 연구," 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2016, pp.12~16