

스월 인젝터의 음향학적 감쇄기로서의 백홀에 대한 연구

황성하* · 윤영빈*

Backhole as an Acoustic Damper for the Swirl Injector

Seong-Ha Hwang* · Youngbin Yoon*

ABSTRACT

Backhole, which is one of geometric parameters in swirl coaxial injectors, is found to affect the inner flow motion and the acoustic characteristics of the swirl injector. In order to analyze the effect of the backhole as a damping device such as acoustic cavities of the combustion chamber, it was regarded as a Helmholtz or Quarter-wave resonator. As a result, it is known that the swirl coaxial injector with the backhole may produce the resonant frequency coincided with the frequency of the combustion chamber.

초 록

스월 인젝터의 분무특성을 변화시키는 기하학적인 변수인 백홀은 스월 인젝터의 내부유동이나 음향학적인 특성에도 큰 영향을 주게 된다. 백홀이 연소불안정 제거를 위하여 연소실에 부가적으로 부착하는 음향공(Acoustic cavity)과 유사한 역할을 할 수 있는지 알아보기 위하여 백홀을 Helmholtz resonator나 Quarter-wave resonator로 해석하였다. 그 결과 백홀을 가지는 스월 인젝터는 연소실내의 파동과 상쇄될 수 있는 고유주파수를 가지게 될 수 있었다. 또한 이를 위한 설계식을 제시하였다.

Key Words : Backhole(백홀), Swirl injector(스월 인젝터), Combustion instability(연소불안정), Acoustic filter(음향 필터), Resonant frequency(공진주파수), Acoustic cavity(음향공)

1. 서 론

백홀(Backhole)은 스월 인젝터의 새로운 기하학적인 설계요소로서 스월 인젝터 내부에 있는 와류실의 연직 주입구(Tangential entry) 후방에 위치하는 추가적인 빈 공간을 총칭한다. 백홀의 크기에 따라 세밀하게 변화하는 인젝터의 분무

각은 리세스(Recess)만 존재할 경우보다 최적의 산화제와 연료의 혼합효율을 가질 수 있도록 한다. 또한 백홀의 크기가 증가하면 같은 조건에서 인젝터에서 분무되는 단위시간당 유량이 증가한다. 그럼에도 불구하고 미립화 효율은 통계적으로 크게 감소하지 않고, 감소하더라도 미세한 압력강하 증가만으로도 미립화 효율의 감소

* 서울대학교 기계항공공학부(Seoul National University)

를 막을 수 있게 된다.[1] 이러한 분무특성 외에도 백홀을 스웰 인젝터의 필터(Filter)로서의 역할을 고려하여 연소불안정을 일으키는 음향 파동을 상쇄하는 기능을 알아보고자 한다.[2~5]

2 백홀에서의 내부 유동

2.1 백홀 내부 유동

백홀의 내부 유동을 알아보기 위하여 투명한 소재로 다양한 크기의 백홀을 가지는 스웰 인젝터를 제작하여 실험을 하였다. Fig. 1은 백홀쪽으로 짧은 시간 안에 발달하는 초기 유동을 시간 순서에 따라 나타내고 있다. 압력강하가 적용된 직후에는 Air Core 영역이 크게 형성되어 있지만 시간이 지나서 완전히 발달한 정상상태 유동이 되었을 때에는 Air Core 영역이 크게 줄어들고 계속 그 상태가 유지된다. 이러한 백홀 유동 특성 때문에, 단순히 길이가 긴 와류실을 가지는 경우와는 내부 유동 특성 및 외부 분무 형태가 다르게 나타난다.

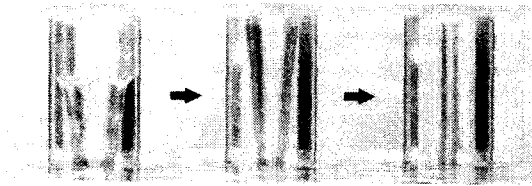


Fig. 1 The transient inner flow of the backhole

2.2 Air Core 영역의 변화

Air Core의 반지름은 백홀의 크기에 상관없이 백홀이 존재하는 영역 전반에 걸쳐 거의 일정함을 가짐을 알 수 있었다. 이 결과는 Dash와 Halder 등의 수치적 계산 결과와 일치하는 경향이다.[6] 그리고 백홀의 크기가 증가할수록 Air Core의 길이가 증가하기 때문에 Air Core의 부피는 증가하는 경향을 보인다.

그러나 백홀의 크기가 커질수록 유동의 두께가 증가하기 때문에 Air Core의 부피의 증가는 줄어들게 되고, 백홀이 계속 커질 경우 오히려

Air Core의 부피가 줄어들 수도 있다. 백홀이 증가함에 따른 유동 두께의 증가는 스웰 인젝터에서 분무된 외부 유동에서도 확인할 수 있다.[1] 이렇게 백홀로 인하여 변화된 Air Core의 영역은 스웰 인젝터의 고유주파수를 변화시키게 된다.

3. 음향 필터로서의 백홀

3.1 이론적인 해석

음향 시스템에서 Side Branch가 음향 Inertance와 Compliance를 가지고 있으면 그것은 Band-stop 필터로 작용하게 된다.[7~8] 만약 열점도에 의한 손실을 무시하면 와류실과 백홀(Side Branch) 사이의 에너지 손실을 무시할 수 있게 된다. 이 때, Fig. 2와 같이 스웰 인젝터를 Helmholtz resonator로 간주하면 와류실과 백홀사이의 파동의 전달계수(Transmission coefficient, T_H)는 다음과 같이 나타난다. (단, a :음속, S : Main Branch 단면적)

$$T_H = \left(1 + \left(\frac{a/2S}{wL/S_b - a^2/wV} \right)^2 \right)^{-1} \quad (1)$$

이 때, 스웰 인젝터의 설계론[9]에서 인젝터 내부의 액막 두께 h_L 은 유동 면적 계수 ϕ 와 노즐 반지름 R_n 의 함수로 표현할 수 있다.

$$h_L = (1 - \sqrt{1 - \phi})R_n \quad (2)$$

또한 백홀이 있는 경우는 Air Core의 반지름이 백홀 전체에 걸쳐 거의 일정하다고 가정하면, 백홀의 Air Core 단면적 S_b , 부피 V 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} S_b &= \pi (\sqrt{1 - \phi}R_n)^2 \\ V &= \pi (1 - \phi)R_n^2 (L_{VC} + L_B) \end{aligned} \quad (3)$$

그러므로 백홀이 있는 스웰 인젝터의 전달계수(식(1))를 0으로 하는 공진주파수 f_B 의 기본모드는 다음의 식 (4)와 같다.

$$f_{B0} = \frac{a}{2\pi\sqrt{(L+1.7\sqrt{1-\phi}R_n)(L_{VC}+L_B)}} \quad (4)$$

(단, $L' = L + 16\sqrt{1-\phi}R_n/3\pi$) 식 (4)에서 백홀이 있는 스월 인젝터의 공진주파수는 유동의 액막 두께와 백홀의 길이에 따라 그 값이 변화한다. 2.2절에서 다뤄진 바에 따라 백홀의 길이의 증가와 Air Core 부피와의 상관관계를 고려하면 원하는 주파수의 조율이 가능해진다.

Air Core가 인젝터 내부에 걸쳐서 일정한 반지름을 가지면서 분포한다는 가정 하에서는 백홀을 Quarter-wave resonator로 간주할 수도 있게 된다. 이 경우, 공진주파수 f_{BQ} 의 기본모드는 식 (5)와 같이 간략하게 표현되어 백홀의 길이에 주로 영향을 받는다. 이 때 백홀의 형상은 공진주파수에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. (단, $L' = L + 8\sqrt{1-\phi}R_n/3\pi$)

$$f_{BQ0} = \frac{a}{4(L+0.85\sqrt{1-\phi}R_n+L_{VC}+L_B)} \quad (5)$$

스월 인젝터의 백홀에 따른 공진주파수의 변화는 Fig. 3에 정리되어 있다. 백홀이 증가함에 따라 스월 인젝터의 주파수 영역이 보다 낮은 주파수대로 옮겨가는 것을 알 수 있다.

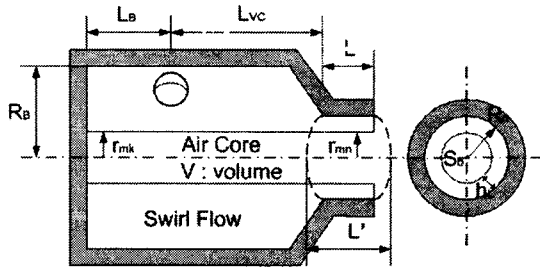


Fig. 2 The swirl injector as a Helmholtz resonator

3.2 백홀의 음향 필터로서의 역할

이상적인 원기둥형태의 연소실을 가정하고 양 끝을 닫힌 경우(Closed/Closed system)로 가정하면, 이상적인 연소실이 가지는 음향학적 공진주파수 f_{mn} 는 다음의 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

(단, R_C 는 연소실 반지름, L_C 는 연소실 길이)

$$f_{mn} = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda_{mn}^2}{R_C^2} + \frac{l^2\pi^2}{L_C^2}} \quad (6)$$

여기서 l 은 파동의 Longitudinal mode를 의미하고 λ_{mn} 은 Transverse mode의 고유값이다. 위의 식의 이론값은 실제값과 매우 유사하다고 알려져 있으며 비연소 실험의 주파수에 대략 3.2배를 하면 실제 로켓엔진의 연소 환경에서의 주파수가 된다고 알려져 있다.[10]

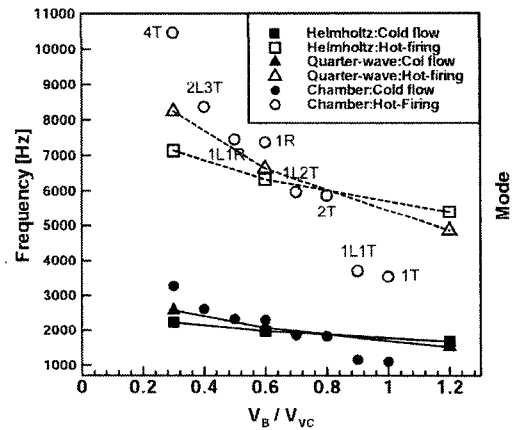


Fig. 3 Injectors and combustion chamber frequencies simulation of RD-0110 engine : Injectors have imaginary backholes

RD-0110엔진을 모사하기 위하여 반지름 R_C 이 9cm이고 길이 L_C 가 50cm인 연소실의 Transverse와 Longitudinal mode 주파수를 식 (6)으로 각각 구하고, 백홀이 장착되었다고 가정한 RD-0110엔진 스월 인젝터[11]의 공진주파수를 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 구한 다음 연소실의 주파수와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3은 스월 인젝터의 공진주파수와 연소실의 고유주파수들이 백홀의 조절에 따라 중첩될 가능성이 높음을 보여주고 있다. 이 경우 연소실의 파동과 일치하도록 세밀하게 조절된 백홀을 가지는 스월 인젝터를 연소실에 배치하면 백홀을 가진 스월 인젝터가 음향공의 역할을 담당할 수 있으리라 예

상된다. 음향공의 작용과 같이, 연소실의 파동과 180° 위상차를 이루는 고유파동 생성과 에너지 소산으로써 연소시 발생한 파동 에너지를 감소 시키게 될 것이다. 그러므로 특정 주파수에 조절된 백홀을 가지는 스월 인젝터를 인젝터면 최외곽에 비대칭으로 배치하면 음향공을 추가로 설치하지 않고서도 연소불안정을 억제할 수 있는 효과를 얻을 수 있으리라 예상된다.

4. 결론

스월 인젝터의 백홀은 인젝터의 Air Core 영역이 Helmholtz resonator 또는 Quarter-wave resonator로 작용할 수 있도록 하는 기하학적 변수라고 할 수 있다. 이를 적용하기 위하여 음향학과 인젝터 설계 변수들을 사용하여, 실질적으로 특정 주파수에 맞출 수 있는 인젝터 설계식을 제시 하였다. 또한 연소실 내부의 고유주파수들과 인젝터의 고유주파수가 백홀의 조절을 통하여 중첩될 수 있음을 보여 주었다. 앞으로의 연구에서는 실제 연소 상태에서 인위적으로 연소불안정을 일으킨 다음 그것을 백홀이 제어할 수 있는지를 보이는 것이 필요하다.

5. 후기

본 연구는 과기부 국가지정연구실사업(NRL) (M1-0104-00-0058)과 국제공동연구사업의 연구지원금을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 황성하, 윤영빈, “로켓엔진 스월 인젝터의 백홀로 인한 분무특성 연구,” 한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집, 2003년 4월, pp.353-356
2. Bazarov, V. G., “Liquid Flow Pulsation Damping in Feed Lines and Injectors of Liquid Propellant Rocket Engines,” 44th Congress of the International Astronautical Federation, Graz, Austria, 1993
3. Huang Yuhui, Zhou Jin, Hu Xiaping, Wang Zhenguo, “Acoustic Model for the Self-oscillation of Coaxial Swirl Injector,” 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Seattle, WA, 1997
4. Bazarov, V. G., “Influence of Propellant Injector Stationary and Dynamic Parameters on High Frequency Combustion Stability,” 32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Lake Buena Vista, FL, 1996
5. Hutt, J. J., Rocker, M., “High Frequency Injection-Coupled Combustion Instability,” *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol.169, 1995
6. Dash S. K., Halder M. R., Peric M., Som S. K., “Formation of Air Core in Nozzles with Tangential Entry,” *Journal of Fluids Engineering*, Vol.123, 2001
7. Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J. V., *Fundamentals of Acoustics*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2000, pp.272-296
8. Morse, P. M., Ingard, K. U., *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill Book Company, 1968, pp.39-43, 554-576, 679-688
9. Bazarov, V. G., *Liquid Propellant Rocket Engine Injectors*, Invited Lecture of V. Bazarov, Rocket Propulsion Lab., Seoul National University, 2002
10. Laudien, E., Pongratz, R., Pierro, R., Preclik, D., “Experimental Procedures Aiding the Design of Acoustic Cavities,” *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol.169, 1995
11. Rubinsky V. R., “Combustion Instability in the RD-0110 Engine,” *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol.169, 1995