액체 추진제용 로켓 엔진 스월 인젝터의 백홀로 인한 분무 특성 연구

황성하* · 윤영빈**

Effect of Backhole on Spray Characteristics of Swirl Injectors in Liquid Propellants Rocket Engine

Seong-Ha Hwang* and Youngbin Yoon**

ABSTRACT

"Backhole" is a new geometric parameter and is defined as an extra empty volume which is located behind the tangential entries at the rear part of the vortex chamber in the swirl injector. Backhole makes a difference to the spray characteristics of swirl injectors such as the spray angle, SMD, the mixing characteristics and so on. To find its characteristics, experiments are conducted by using a stroboscopic photography, a PDPA apparatus and a mechanical patternator. With the backhole, the mass flow rate of the swirl injector is increased and the center region of the injected flow has more large volume than that of without the backhole. Also the cone angle can be controlled by the backhole, so that the mixing efficiencies of swirl injectors are changed. Based on cold-flow tests, the swirl injector with the backhole may improve its performance.

초 록

백홀은 스월 인젝터의 새로운 기하학적인 설계요소로서 스월 인젝터 내부에 있는 와류실의 연직 주입구후방에 위치하는 추가적인 빈 공간을 총칭한다. 이 백홀은 분무각이나 평균액적지름(SMD), 혼합 특성과 같은 스월 인젝터의 분무 특성을 변화시키게 된다. 이러한 백홀의 특성을 알아보기 위하여 직·간접 촬영 기법 및 PDPA와 기계적 유량 포집기 등을 사용하여 수류실험을 수행하였다. 백홀이 스월 인젝터 내에 존재하게 되면 단위시간당 유량이 증가하게 되어 분무되는 유동의 중심부가 강화된다. 또한 백홀은 스월 인젝터의 유동 분무각을 조절할 수 있게 하고 그로 인하여 혼합 효율을 변화시킨다.

Key Words : Backhole(백홀), Swirl injector(스월 인젝터), Spray characteristics(분무 특성), SMD (평균액적지름), Patternation(패터네이션), Spray angle(분무각), Mixing efficiency(혼합효율)

1. 서 론

스월 인젝터는 그동안 주로 러시아의 로켓 엔진에 장착되어 왔으나 최근에는 미국을 비롯한 여러 나라의 로켓 엔진에도 널리 사용되고 있다. 스월 인젝터는 충돌형 인젝터에 비하여 작동상의 신뢰도가 높고 미립화와 혼합 효율이 우수하며 연소안정성에도 비교적 뛰어나다고 알려져 있다

† 2003년 1월 3일 접수 ~ 2003년 2월 19일 심사완료
* 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원 로켓 추진연구실
** 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부
연락저자, E-mail : ybyoon@plaza.snu.ac.kr
서울시 관악구 신림9동 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 301동 1301호

[1].그러나 비교적 복잡한 형상으로 인하여 제작이 어렵고 성능해석이 쉽지 않다는 단점이 있다.

스월 인젝터에서 기하학적인 형상은 인젝터의 성능과 특성을 좌우하는 중요한 요소이다. 이 기하학적인 형상에 대한 연구는 그동안 많은 연구자들에 의하여 수행되어 왔다. 러시아의 Pazhi와 Galustov[2]는 인젝터의 실제 유동면적과 인젝터의 단면적, 유량계수들의 관계식 등으로 이루어진 기하학적 매개변수를 제시하였는데, 이 변수는 스월 인젝터의 설계시 인젝터의 특성을 결정하는 변수이다. Bazarov[1]는 스월 인젝터의 특성을 결정하는 중요 변수로서 노즐의 유입구 반지름, 노즐 출구 반지름 등으로 구성된 기하학적 특성변수 (Geometric characteristics)를 제시하였다. Bazarov는 이 변수를 가지고 자신의 스월 인젝터 설계론을 전개하였다. Hardalupas와 Whitelaw[3]는 그들의 수많은 반복 실험을 통하여 미립화와 혼합 효율을 극대화하는 리세스(Recess)나 노즐의 형상, 반지름의 최적치가 존재한다고 보고하였다. 또한 Taylor[4]는 수렴하는 노즐형상을 지니는 스월 인젝터(Atomizer)의 경계층 방정식을 이론적으로 제시하였고 경계층에서 발생하는 원형의 2차 유동으로 인하여 미립화가 이루어진다고 발표하였다.

Bazarov[1]가 제시한 스월 인젝터 분무각은 마찰의 효과를 무시했을 때 다음 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha_n = 2tan^{-1}\sqrt{\frac{a(1+q^2)}{R_n^2-a}}, \quad a = A^2\mu^2 \qquad (1)$$

A는 스월 인젝터의 기하학적 특성변수이고 q는 노즐의 경사도이며 R_n은 노즐의 반지름이다. 이 식에 따르면 분무각 α_n은 노즐의 반지름과 q를 조절함으로써 바꿀 수 있다. 그러나 실제로는 마찰에 의한 경계층 효과 때문에 그 각은 더 작아지게 된다. 그리고 이번 실험에 쓰인 산화제 인젝터는 와류실(Vortex chamber)에 비해 노즐의 단면적이 훨씬 작아서 전체적으로 수렴하는 형상을 띠고 있다. 이 경우 Taylor[4]에 의하면 수렴하는 형상이 경계층에서 2차 유동을 유발시키는데 이 2차 유동의 효과는 유동의 축방향 성분의 속도를 증가시켜서 각이 더 작아지도록 한다. 그러나 Bazarov나 Taylor의 이론으로는 리세스로 인한 분무각의 변화를 설명할 수 없다. 또한 리세스나 노즐의 직경 등의 변수 외에도 분무각을 조절하는 새로운 기하학적 변수인 백홀이 존재하였다. 그러므로 이에 대한 추가적인 심도있는 연구가 필요하게 되었다.

스월 인젝터의 연구과정에서 스월 인젝터 내의 와류실 유동의 진동을 효과적으로 억제하고 조절하기 위하여 새로운 설계상의 변수를 고려하게 되었는데, 일반적으로 연소실 내부에 위치하는 공동이나 추진제 공급라인 등에서 적용되는 감쇠(Damping)구조[5]를 인젝터 내부의 와류실 안에 적용하는 것을 시도하였다. 이 과정에서 Fig. 1에서와 같이 위의 감쇠 구조의 새로운 응용이며 분무와 혼합 특성에 큰 영향을 미치는 새로운 기하학적인 매개변수를 발견하였는데 이를 '백홀(Backhole)'이라고 명명하였다[6]. 본 연구는 새롭게 제시되는 기하학적인 변수인 백홀에 대한 구체적인 특성과 그 영향을 알아보기 위하여 수류실험을 수행하고 그에 따른 분석을 하였다. 앞으로 스월 인젝터 산화제 와류실의 연직 주입구 후방에 위치하는 여분의 빈 공간을 총칭하여 백홀이라고 일컫기로 한다. 그동안 일반적으로 사용되어 왔던 스월 인젝터에서는 추진제의 주입구 후방이 와류실의 끝이 되어서, 막혀있는 형태가 대부분이었다. 그러나 이번 연구에서는 백홀의 부피를 주요한 기하학적인 변수로 간주하여 여러 가지 종류의 백홀 크기를 가질 수 있도록 인젝터를 설계하였다.

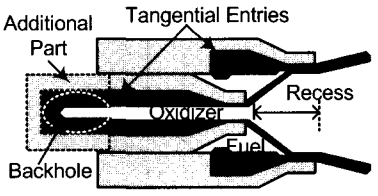


Fig. 1 Schematics of the backhole

2. 실험 장치 및 실험 조건

2. 1 실험 장치

전체 실험 장치는 연료 및 산화제 공급 장치와 고압압축공기 공급 장치 등으로 구성된 추진제 공급 장치, PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 위한 Spectra-Physics Ar-ion 514.5㎚ 레이저와 optics 등 일련의 광학 장치 및 시험장치, 기계적 유량 포집기(Mechanical patternator), 직·간접 조명 촬영을 위한 60㎐ 스트로보스코프(Stroboscope)와 디지털 카메라, 백홀과 리세스의 조절이 가능한 모델 동축형 스월 인젝터(Swirl coaxial injector) 등으로 이루어져있다.

실험에서 사용된 스월 인젝터(Fig. 2)는 연료 노즐에 비해 리세스를 가지는 산화제 노즐이 동심축 상에 위치하는 동축형을 기본형으로 하여 리세스를 전혀 두지 않은 형태인 단일 스월 인젝터에 관한 실험도 가능하도록 설계되었다. 스월러(Swirler)는 사용하지 않고 연직 주입구를 사용하였다. 산화제 노즐의 직경은 1.8㎜이고 연료 노즐의 직경은 4.5㎜이다. 또한 기하학적 특성변수 A의 값은 1.08이다.

기계적 유량 포집기는 지면과 평행한 채집용 단위 셀(cell)이 가로 15개, 세로 12개로 모두 180개로 이루어져 있으며 각각의 셀의 크기는 10㎜×10㎜이고 두께를 무시할 수 있는 얇은 판으로 구분되어 있다. 또한 압축공기에 의해서 전기적으로 컨트롤되는 개폐기가 셀 바로 위에 설치되어 있어서 원하는 순간과 시간의 분무를 채집할 수 있도록 되어 있다.

2. 2 실험 조건

이번 실험에서는 스월 인젝터의 분무 특성을 알아보기 위하여 수류실험을 수행하였다. 액체 산소의 유사제로는 물을 사용하였고 연료는 등유(Kerosene)를 사용하였다. 유동의 스월 방향은 기본적으로 연료와 산화제가 모두 반시계방향으로 같도록 하였다. 분무는 상온, 대기압 하에서 분사하였으며 백홀이 없는 경우에 산화제와 연료가 분사 압력, ΔP가 3bar, 4bar 일 때, 각각 유량이 23.9g/s, 10.8g/s로 공급된다.

리세스, 백홀의 부피를 변화시켜 가면서 간접 조명 사진촬영과 혼합효율 및 미립화(SMD) 측정 등을 하였는데 이에 대한 구체적인 자료는 Table. 2에 정리되어 있다. 인젝터의 압력강하는 최소 1bar에서 6bar까지 변화시켰다. 기계적 유량 포집기 실험은 인젝터 노즐 끝단에서 50㎜와 70㎜ 하방에서 채집하였다. 인젝터를 작동시킨 후 5초 동안의 초기 유동은 채집하지 않고 그 후 30초 동안의 유동을 채집하였다. 이를 통하여 초기에 발생할 수 있는 비정상 상태적인 섭동을 제거함으로써 평균적으로 정상상태인 유동을 채집하였다. PDPA 실험도 역시 인젝터 노즐 끝단에서 하방으로 70㎜ 떨어진 지점의 유동을 이용하였고 분무의 한쪽 외각부분에서부터 매 2㎜ 간격으로 반대편으로 이동시켜 가면서 분무장 전체를 측정하였다.

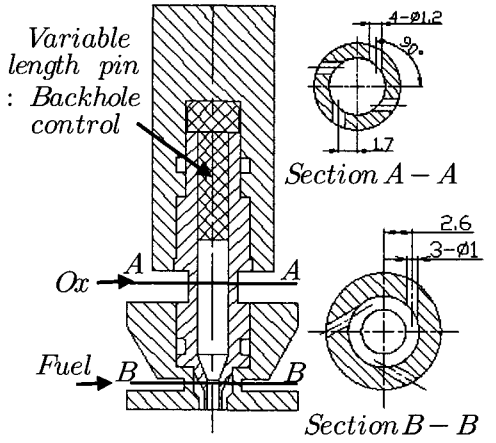


Fig. 2 Model swirl coaxial injector assembly

Table. 1 Nomenclature

	definition
r_{ox}	inner radius of the oxidizer nozzle
d_{ox}	inner diameter of the oxidizer nozzle
r_i	inner radius of the oxidizer flow
L_{Re}	depth of the recess
V_B	volume of the backhole
V_{VC}	volume of the vortex chamber

Table. 2 Experimental Condition

parameter	experimental conditions					
L_{Re}/d_{ox}	0	1.39	1.53	1.67	1.81	1.95
V_B/V_{VC}	0	0.21	0.52	0.62	0.83	1.03

3. 연구 결과 및 고찰

3. 1 단위시간당 유량의 증가

스월 인젝터에 가해지는 각각의 압력 강하에 대하여 백홀의 부피를 다르게 하면서 유량을 측정하여 보면 Fig. 3와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 실험을 수행한 압력구간에서 단위시간당 유량이 압력강하의 제곱근에 선형적으로 비례하는 결과를 얻었기 때문에 모델 스월 인젝터가 일반성에 위배되지 않는 인젝터임을 알 수 있다.

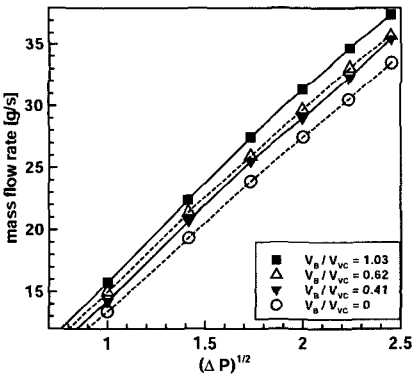


Fig. 3 Mass flow rate with various backholes

Fig. 3은 백홀의 부피가 증가함에 따라서 산화제 유량도 증가하는 것을 나타내고 있다. 단일 스월 인젝터의 경우, 백홀의 부피가 와류실 부피의 약 103.5%일 때에 산화제 노즐 안에 백홀이 존재하지 않을 경우에 비해서 약 15% 정도가 더 많은 단위시간당 유량을 흘려 보내고 있다. 또한 동축형 스월 인젝터의 경우에도 단일 스월 인젝터와 같은 경향을 나타낸다.

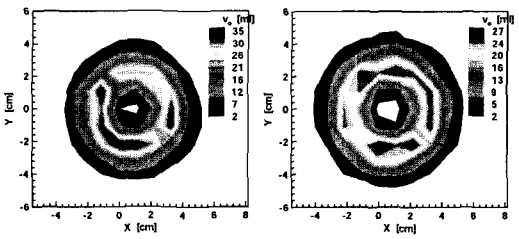
일반적으로 단위시간당 유량(Mass flow rate) $\dot{m}$를 아래의 식(2)와 같이 정의하면,

$$\dot{m} = \mu\pi(r_{ox}^2 - r_i^2)\sqrt{2\rho\Delta P} \qquad (2)$$

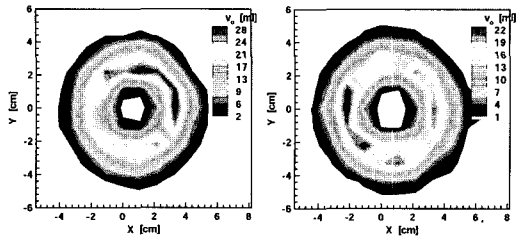
위의 식(2)에서 $\dot{m}$은 압력강하 ΔP의 제곱근에 비례하고 유동면적과 유량계수 μ에 비례한다. 가해진 압력강하(ΔP)는 일정하고 밀도(ρ)도 일정하므로 유동의 속도는 일정하게 된다. 그러므로 유량이 증가하기 위해서는 유량계수와 유동면적이 증가할 수밖에 없다. Fig. 3와 같이 백홀의 부피가 증가할 수록 $\dot{m}$이 증가하고 있으므로 유동면적뿐만 아니라 백홀부위에 재순환영역(Recirculation region)이 유동의 흐름을 돕는 방향으로 발생하여 유량계수도 같이 증가하거나, 재순환영역이 유동의 흐름을 방해하는 쪽으로 발달하여 유량계수가 감소한다 할지라도 유동면적이 크게 증가하여 전체적으로 $\mu\pi(r_{ox}^2 - r_i^2)$가 증가하게 되는 경우가 존재할 수 있다. 이 때, 를 수 $\mu\pi(r_{ox}^2 - r_i^2)$정 유량계수(modified μ, C_{dm})로 정의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{dm} = \mu\pi(r_{ox}^2 - r_i^2) \qquad (3)$$

Fig. 4는 단일 스월 인젝터에서 백홀의 부피에 따른 유동장의 분포를 나타내고 있다. 백홀이 있는 경우들은 백홀이 없는 경우에 비해서 동심축 부근의 중심부에 유량이 많이 축적되어 있고 유동 자체도 두터워져 있음을 볼 수 있다. 스월 인젝터의 경우에 유동은 환형의 단면(Ring section)을 가지는 흐름을 가지기 때문에 가운데 부분은 빈 공간을 형성하는 분무형상(Hollow cone)을 취한다. 그러므로 실제로 유량이 흘러가는 면적은 인젝터 와류실의



(a) $V_B/V_{VC} = 1.03$ (b) $V_B/V_{VC} = 0.62$



(c) $V_B/V_{VC}=0.52$ (d) $V_B/V_{VC}=0$

Fig. 4 Patternation of oxidizer with various backholes at Z=70㎜, $L_{Re}/d_{ox}=0$

내부 단면적 πr_{ox}^2보다 작게 되며 가상의 동심축으로부터 흐름의 안쪽 경계 반지름(r_i)을 가지게 된다. 그런데 스월이 있는 유동이 인젝터 와류실의 내벽을 따라 나오기 때문에 링 모양 유동의 최외각 반지름은 와류실의 내벽 반지름(r_{ox})과 같다. 그러므로 유동면적이 증가하려면 필연적으로 r_i 가 감소해야 한다. 또한 만약 백홀로 인하여 압력손실이 더 커져서 유동의 속도가 감소되었다고 할지라도 그것을 상쇄하고 남을 만큼의 유동면적 증가가 있어야 한다. 이러한 r_i 의 감소는 전체적으로 유동의 동심축 부근 중앙부가 두터워지게 됨을 의미하고 유동의 모양이 Hollow cone에서 Solid cone쪽으로 조금씩 변해가고 있음을 의미한다. 따라서 백홀의 부피가 증가함에 따라 C_{dm} 이 증가하여 단위시간당 유량이 증가한다고 결론지을 수 있다.

백홀이 있는 경우에는 주입구에서 나온 산화제 와류실 내부 유동의 일부분이 백홀쪽으로 진행하여 재순환 영역을 만들게 됨을 예상할 수 있다. 이 재순환 영역은 백홀이 없는 경우에 비해서 그 규모가 광범위하고 많은 유량이 존재할 것이므로 인젝터 외부로 스월을 가지며 빠져나가는 본 유동에 간섭을 주게 된다. 백홀쪽의 재순환 영역을 거친 유동은 본 유동에 비하여 작은 속도값을 가지며 그 결과 작은 스월 반지름을 가지게 된다. 이 경우 전체적인 유동은 동심축으로부터 반경방향에 대하여 연속적인 속도분포를 가져야 하므로 본 유동이 산화제 와류실의 중앙부로 더 성장하여야 한다.

이 유동의 확장은 결과적으로 산화제 유동면적의 증가를 가져오고 이는 유량의 증가를 발생시킨다. 이는 실제 로켓엔진의 스월 인젝터에서 백홀이 있을 경우에 단위시간당 연소실로 나오는 유량을 증가시켜 결국 로켓엔진의 단위시간당 추력을 높일 수 있는 조건을 만들어 줄 수 있음을 의미한다.

3. 2 분무각의 조절

스월 인젝터의 분무각은 액적의 질량의 분포와 공간적인 분포 및 산화제와 연료의 혼합효율 등을 결정하는 중요한 요소이다. 분무각은 노즐의 직경과 연직 주입구의 직경 및 개수, 리세스 등의 기하학적인 요소와 더불어 가해진 압력강하 등이 복합적으로 작용하여 결정된다[1][2][3]. 또한 백홀도 분무각을 변화시키는 중요한 기하학적인 변수임을 발견하였다.

Fig. 5 (a), (b)의 결과는 리세스가 없거나 얕은 경우, (c), (d)의 결과는 리세스가 깊은 경우에 산화제 노즐만을 이용하여 분무를 간접사진으로 촬영하여 얻은 것이다. Fig. 5 (e), (f)의 결과는 리세스가 깊을 때, 산화제와 연료 모두를 분사시켜서 분무각을 촬영한 것이다. 리세스가 얕을 때에는 백홀이 있으면 산화제의 분무각이 감소하여 나타나지만 리세스가 깊을 때에는 백홀이 있는 경우 반대로 분무각이 증가하여 나타나고 있음을 알 수 있다. 그렇지만 산화제와 연료를 모두 분사하였을 때에는 분무각의 큰 차이는 보이지 않는다. 이에 대한 자세한 결과는 Fig. 6에 정리되어 있다.

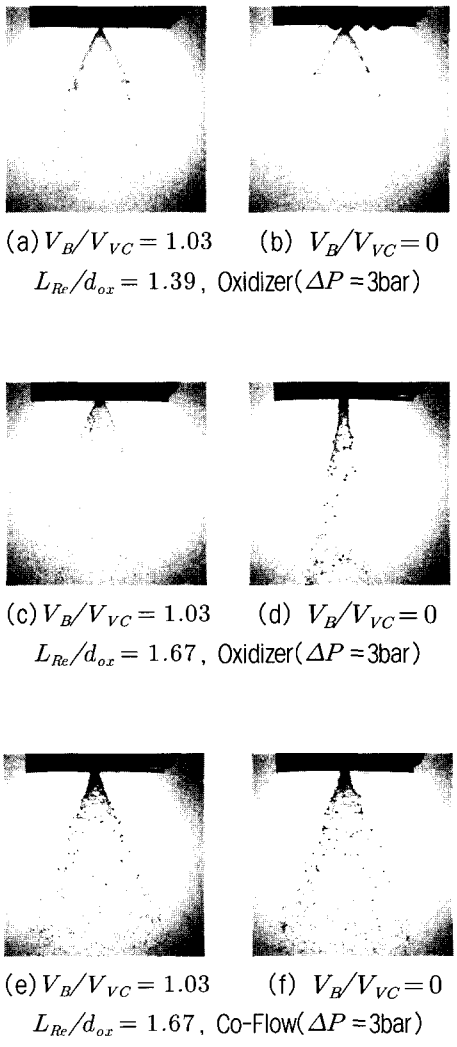
전체적인 분무각의 변화는 Bazarov의 식(1)과 같이 가해진 압력강하의 제곱근에 비례하는 경향을 보인다. 리세스가 얕아서 인젝터 외부에서 혼합이 이루어지는 경우에 분무각은 Fig. 6 (a), (b)와 같이 백홀의 부피가 증가할수록 작아지는데 백홀이 없는 경우에 비해서 백홀의 부피가 와류실의 103.5%일 때 28%까지 감소하였다. 백홀이 있는 경우에는 와류실의 중심부 유동이 강화되고

반경방향 속도가 감소된다. 그러면 인젝터 밖으로 나온 유동은 분무각이 일정부분 줄어들게 된다.

그러나 Fig. 6 (c)와 같이 리세스를 충분히 깊게 되도록 $L_{Re}/d_{ox}=1.67$로 고정시킨 후 백홀의 부피를 바꾸어 가며 분무각을 측정해 보면, 백홀이 있는 경우에 분무각의 크기가 오히려 증가할 수도 있음을 알 수 있다. 이것은 백홀이 없는 경우에는 백홀의 부피가 큰 경우보다 산화제 유동의 분무각이 더 크고 리세스가 3.00㎜ ($L_{Re}/d_{ox}=1.67$)로 비교적 깊기 때문에 산화제 노즐을 빠져 나온 유동이 연료 노즐 밖으로 나와서, 인젝터를 벗어나기 전에 연료 노즐 내벽에 부딪히면서 그 내벽에 간섭되기 때문이다. Fig. 7 (a)에서와 같이 연료 노즐의 내벽에 의하여 간섭된 유동은 충돌로 인하여 운동량을 일정량 잃게 되어 반경방향의 속도성분이 감소하게 되므로 전체적인 분무각이 작아지는 현상이 나타난다. 그러나 Fig. 7의 (b)와 같이 백홀의 부피가 충분히 크면 적절히 줄어든 산화제 유동의 각으로 인하여 유동이 연료 노즐 내벽에 닿지 않아서 간섭을 받지 않으므로 전체 분무각은 더 커지는 효과를 가지게 된다. 이 효과는 연료와 산화제를 동시에 분무하였을 때에도 동일하게 나타나고 리세스를 $L_{Re}/d_{ox}=1.81$로 보다 깊게 하여도 그 경향은 일치한다.(Fig. 6 (d))

그렇지만 산화제의 유동이 외곽의 연료유동과 연료노즐의 끝단부근에서 만나게 되는 Fig. 6 (c) ($L_{Re}/d_{ox}=1.67$)의 조건을 만족하는 경우에는 압력강하와 분무각 사이에 뚜렷한 비례관계가 보이지 않는다. 특히 $V_B/V_{VC}=1.03$일 때가 다른 경우보다 분무각도 크고 경향성도 일정하지 않다. 이것은 $L_{Re}/d_{ox}=1.67$인 부근에서 Outer mixing injection과 Emulsion injection을 가름하고 있기 때문이다. 백홀이 충분히 커져서 산화제 유동이 연료 노즐의 끝단에 걸치게 되거나 그 이상의 유동각을 가질 수 있게 되면 분무각이 크게 측정되고, 산화제 유동이 연료 노즐에 간섭을 받게 되면 분무각이 급격히 작아지기 때문이다.

리세스가 깊어짐으로 인하여 발생하는 분무각의 감소는 Fig. 6 (e)에서 볼 수 있는 것처럼 어느 조건부터 갑자기 급격하게 일어나서 리세스

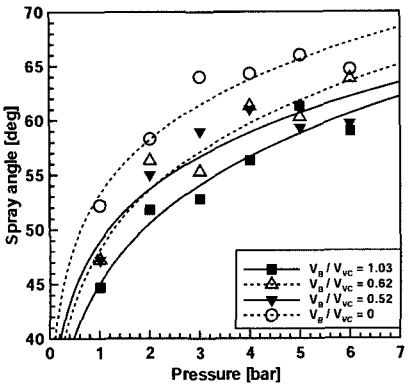


(a) $V_B/V_{VC}=1.03$ (b) $V_B/V_{VC}=0$
$L_{Re}/d_{ox}=1.39$, Oxidizer(ΔP ≈3bar)

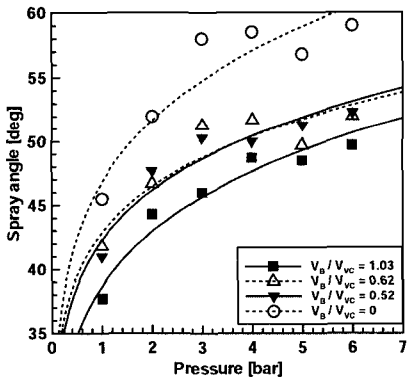
(c) $V_B/V_{VC}=1.03$ (d) $V_B/V_{VC}=0$
$L_{Re}/d_{ox}=1.67$, Oxidizer(ΔP ≈3bar)

(e) $V_B/V_{VC}=1.03$ (f) $V_B/V_{VC}=0$
$L_{Re}/d_{ox}=1.67$, Co-Flow(ΔP ≈3bar)

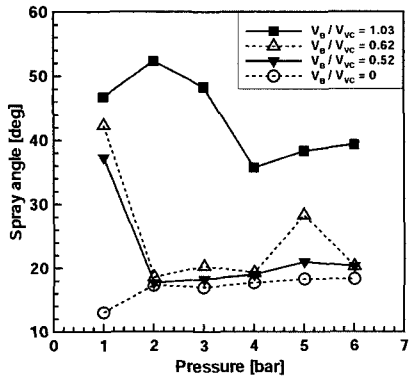
Fig. 5 Back-lit shadow graph : Spray angles of swirl injectors



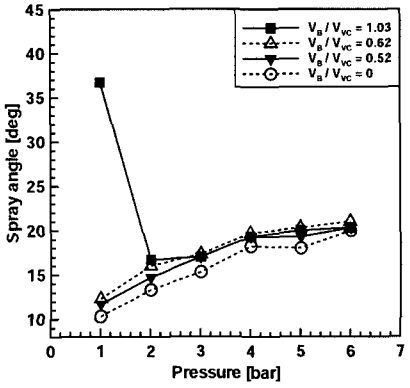
(a)$L_{Re}/d_{ox} = 0$ with various backholes



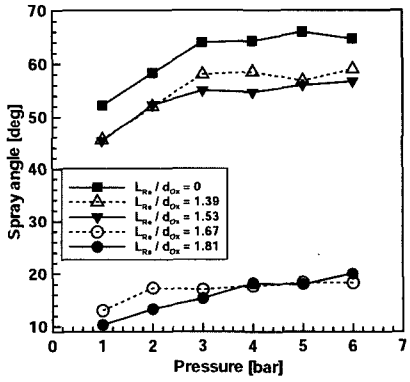
(b)$L_{Re}/d_{ox} = 1.39$ with various backholes



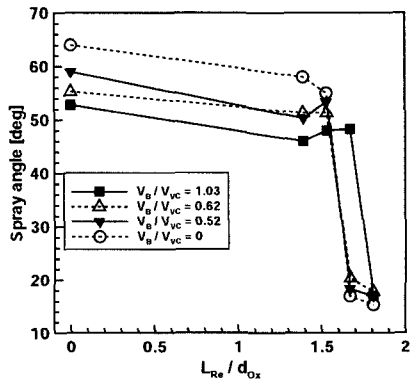
(c)$L_{Re}/d_{ox} = 1.67$ with various backholes



(d)$L_{Re}/d_{ox} = 1.81$ with various backholes



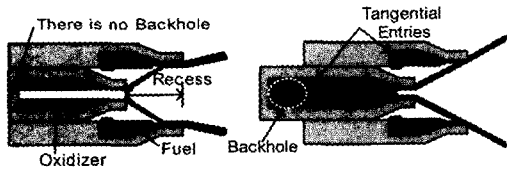
(e) No backholes ($V_B/V_{VC}=0$)



(f)Various recesses & backholes

Fig. 6 Spray angle variations of various pressure drops, recesses and backholes

에 따른 분무각의 건너뜀이 존재하게 된다. $L_{Re}/d_{ox}=1.67$보다 작을 때에는 비교적 조금씩 분무각이 감소하고 있으나 그 후로 급격하게 감소하여 갑자기 작은 분무각을 가지는 현상이 나타난다. 그러나 Fig. 6 (f)에서 확인할 수 있듯이 백홀의 부피가 충분히 크게 되면 이러한 분무각의 급격한 감소현상이 상대적으로 지연되고 줄어들게 된다. 특히 충분히 큰 백홀 조건, 즉 $V_B/V_{VC}=1.00$이 넘을 때에는 그러한 경향이 두드러진다. 백홀의 조건이 $V_B/V_{VC}=1.00$가 넘으면 리세스조건이 $L_{Re}/d_{ox}=1.81$이 되어서야 급격한 분무각 감소가 나타나는 반면, 다른 백홀 조건 하에서는 $L_{Re}/d_{ox}=1.67$부근에서 분무각이 급격하게 감소하고 있다. 리세스의 작은 변화는 분무각을 급격하게 변화시킬 수도 있지만 백홀은 분무각의 보다 세밀한 조절을 가능하게 한다고 할 수 있다.



(a) Without backhole (b) With backhole

Fig. 7 Spray angle control in case of deep recess

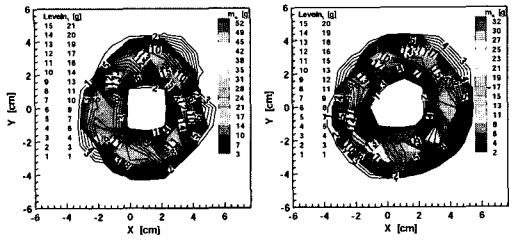
3. 3 혼합 특성

기계적 유량 포집기의 수득률은 최저 약 86%였고 최고 약 94%, 평균 89.7%로 양호하여 실험결과를 얻는 데에 큰 지장이 없었다. 또한 리세스가 3.00㎜ 이상이 되어 $L_{Re}/d_{ox}=1.67$이상이 되면, 실험에 쓰인 모델 인젝터에서 산화제와 연료가 충분히 서로 만날 수 있는 조건이다. 패터네이션과 혼합 효율의 측정은 기계적 분류장치를 이용하여 6가지 종류의 백홀 크기에 따라 이루어졌다(Table. 2). Fig. 8의 패터네이션은 $L_{Re}/d_{ox}=1.67$, 1.81, 1.95일 때, 인젝터 연직하방 70㎜ 위치에서 이루어진 것이다. 등고선 형식으로 표현된 것은 연료의 유량분포이고 단계별 색의 변화로 표현된 것은 산화제의 유량분포이다.

단일 스월 인젝터의 경우와 유사하게 연료와 산화제를 동시에 분무했을 때에도 백홀의 부피가 커짐에 따라 유동의 중심부가 강화됨을 알 수 있다. 단일 스월 인젝터의 경우보다 더 명확한 hollow cone의 분무형상을 취하는 것은 바깥쪽으로 퍼져나가는 연료 유동의 운동량으로 인하여 혼합이 일어나면서 산화제 유동의 확산이 도움을 받았기 때문으로 예상된다. Fig. 5 (e), (f)에서 확인할 수 있듯이 연료와 산화제를 동시에 분무하면, 산화제만 분무했을 시 나타나는 분무각과 연료만을 분무했을 시 나타나는 분무각의 중간에 존재하는 값을 전체적인 분무각으로 가지게 된다. 이러한 혼합에 따른 이유로 산화제와 연료를 동시에 분무하게 되면 산화제만을 분무했을 때보다 인젝터 외부에서 유동의 중심부가 강화되는 현상이 줄어들게 된다고 할 수 있다. 그러나 산화제와 연료를 동시에 분무하는 것이 인젝터 내부에서의 유동 중심부 강화 현상까지 감소시킨다고는 말할 수 없다.

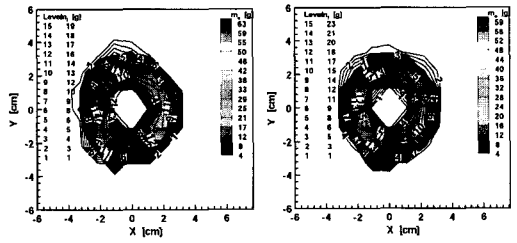
동축형 스월 인젝터의 혼합효율을 구하기 위하여 Rupe[7]가 제시한 식을 따라 혼합 효율을 산출하여 Fig. 9와 Fig. 10에 정리하였다. Rupe의 혼합인자(mixing factor, E_m 식은 이론적인 혼합비율에 대해서 실제 국지적 혼합비율의 변화에 근거한 질량분포에 관한 경험식이다. 이 혼합 인자는 충돌형 인젝터의 혼합효율을 구할 때에 일반적으로 쓰이는 식이며 스월 인젝터의 혼합효율을 구할 때에도 별다른 무리없이 적용할 수 있다고 판단된다.

Fig. 11에서와 같이 산화제 노즐에서 나온 유동의 확산이 연료 노즐의 외각 끝단 부근에 근접하는 정도에 따라 에멀전 인젝터(Emulsion injector)와 외곽 혼합 인젝터(Outer Mixing injector)로 구분[8]하고 있는데 리세스의 정도에 따라 혼합특성과 효율이 달라지기 때문이다. 너무 과도한 리세스나 너무 얕은 리세스는 분무가



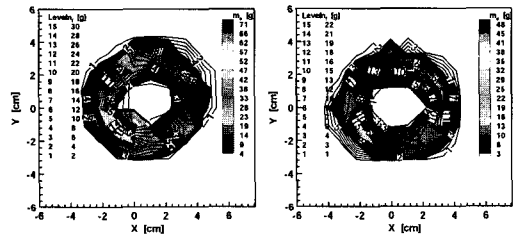
(a) $V_B/V_{VC}=1.03$ (b) $V_B/V_{VC}=0$

$L_{Re}/d_{ox}=1.67$



(c) $V_B/V_{VC}=1.03$ (d) $V_B/V_{VC}=0$

$L_{Re}/d_{ox}=1.81$



(e) $V_B/V_{VC}=1.03$ (f) $V_B/V_{VC}=0$

$L_{Re}/d_{ox}=1.95$

Fig. 8 Patternation of swirl coaxial injectors with various recesses & backholes at Z=70

퍼져나가는 것에 좋지 않은 영향을 주기 때문에 혼합 효율에 악영향을 준다[3]. 그러므로 산화제 노즐에서 나온 유동이 연료노즐의 끝단 안쪽에 걸치도록 리세스를 조절하는 것이 혼합효율을 증가시킬 수 있는 방법이다.

Fig. 9는 백홀을 인젝터에 두지 않고 리세스만을 변화시켜 가면서 혼합효율을 측정한 것이

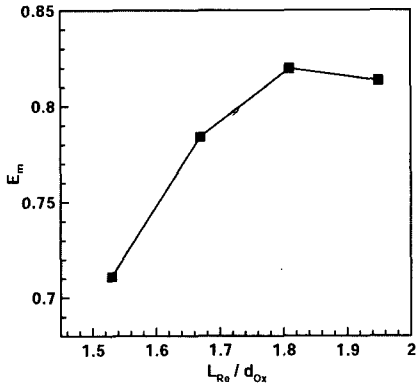


Fig. 9 Mixing efficiency with various recesses

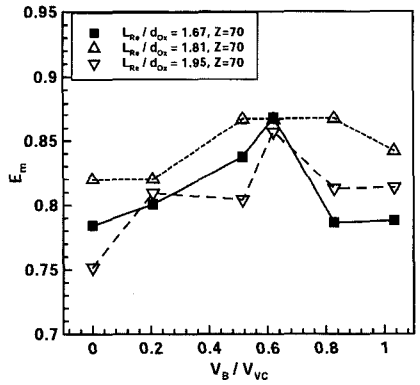


Fig. 10 Mixing efficiency with various recesses & backholes

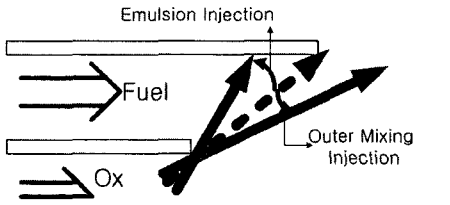


Fig. 11 Injection classification according to recess

다. 리세스가 증가함에 따라 혼합효율이 증가됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 리세스가 얕을 때보다 깊어진 리세스로 인하여 산화제가 상대적으

로 먼저 분무되어 스월 효과로 인하여 퍼지는 효과가 증대되기 때문에 산화제와 연료가 적절히 서로 혼합되기에 용이하기 때문이다. 리세스가 0.25㎜씩 증가함에 따라서 혼합효율이 71.1%에서 84.2%까지 증가하고 있으므로 Fig. 11의 외곽 혼합식의 분무보다는 에멀전식의 분무가 되도록 리세스를 조절해 주는 것이 혼합효율을 높이는 데에 더 유리함을 알 수 있다.

한편, 각각의 리세스에 대하여 리세스를 고정시키고 백홀의 부피를 변화시켜 가면서 혼합효율을 측정하여 정리한 그래프가 Fig. 10이다. 백홀은 근본적으로 분무각을 감소시키므로 반경방향의 유동장 속도를 감소시킨다고 예상된다. 느려진 유동장의 속도는 혼합특성에 좋지 않은 영향을 준다고 알려져 있다[3]. 그러나 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 적절한 백홀의 부피가 존재하면 백홀이 전혀 없는 경우보다 오히려 혼합효율이 증가할 수도 있어서, 같은 리세스를 가지는 경우라 하더라도 백홀의 부피에 따라서 분무각이 조절되어 오히려 더 좋은 혼합특성을 나타내도록 한다는 것을 보여주고 있다. 분무각은 혼합 특성을 결정하는 중요한 요소이며 백홀은 분무각을 보다 세밀하게 조절할 수 있다. 그러므로 백홀은 스월 인젝터가 여러 가지 다른 이유로 인하여 과도한 리세스를 가지도록 설계되었을 때, 산화제의 분무각을 줄여서 최적의 리세스 조건과 동일한 효과를 내도록 하거나 리세스와 백홀의 조합으로 최적화된 인젝터 설계가 가능하도록 할 수 있다는 장점이 있다.

리세스가 $L_{Re}/d_{ox} = 1.67$일 때에는 백홀의 부피에 따른 혼합 효율의 차이가 비교적 크지만, 리세스가 $L_{Re}/d_{ox} = 1.81$로 커지면 백홀의 부피에 따른 혼합 효율의 차이가 상대적으로 작아짐을 알 수 있다. 리세스가 3.25㎜이상으로 깊어져서 $L_{Re}/d_{ox} = 1.81$ 이상이 되면 Fig. 6 (d)에서와 같이 백홀의 부피 차이로 인한 분무각의 변화가 그리 크지 않기 때문에 비교적 일정한 혼합효율을 나타내게 된다. 그러나 백홀의 부피가 $V_B/V_{VC} = 1.00$ 이상일 경우에는 상대적으로 분무각의 감소가 크므로 산화제 유동이 연료 노즐의 안쪽 깊은 곳에서 연료 유동과 충돌, 혼합이 이루어지게 되어 혼합 효율이 감소하는 경향을 보이고 있다. 반면에 리세스가 $L_{Re}/d_{ox} = 1.67$일 때에는 백홀의 부피에 따른 분무각의 변화가 비교적 크기 때문에 혼합 효율이 백홀의 크기에 따라 보다 큰 차이를 보인다. 백홀의 부피가 와류실의 62% 수준일 때 효율이 최대가 되며 백홀이 그보다 작거나 클 때에는 더 작은 효율을 보이고 있다.

3. 4 미립화

예상되는 백홀의 단점으로 미립화 효율을 생각해 볼 수 있다. 왜냐하면 백홀이 스월 인젝터에 존재하면 반경방향 속도성분이 감소되어 분무각이 줄어들고 단위시간당 유량이 증가하기 때문에 미립화에 불리할 것으로 예상되기 때문이다[9]. 만약 분무각을 감소시키는 백홀의 영향 때문에 유동속도가 감소된다고 하면, 감소된 유동속도는 분열기작에 악영향을 주어 SMD를 증가시키서 결과적으로 스월 인젝터의 미립화 효율을 감소시키기 때문이다[10][11]. 또한 백홀의 부피가 증가할 수록 액막의 두께가 두꺼워져서 미립화에 불리할 수 있다.

그렇지만 6가지로 백홀의 부피를 변화시켜 가면서 PDPA로 SMD를 측정하여 본 결과 백홀이 스월 인젝터의 미립화에 좋지 않은 영향을 준다고 단정 지을 수 없었다. Fig. 12에서와 같이 백홀의 부피가 $V_B/V_{VC} = 1.03$일 때에는 백홀이 없을 때에 비해서 전체적으로 10% 정도의 SMD 증가가 존재하여 미립화에 불리하였지만, 백홀의 부피가 $V_B/V_{VC} = 0.21$일 경우에는 오히려 백홀이 전혀 없는 경우보다 평균적으로 SMD 값이 작게 측정되기도 하였다. 또한 백홀의 부피가 $V_B/V_{VC} = 0.52$ 수준이었을 때에도 백홀이 없는 경우와 비슷한 정도의 SMD 값을 나타내었다. 그러므로 백홀이 스월 인젝터의 미립화 효율에 좋지 않은 영향을 준다고 하기 어렵다. 그러나 백홀의 부피가 $V_B/V_{VC} = 1.00$ 이상일 때에는 다른 경우보다 SMD의 증가가 비교적 크게 나타난다.

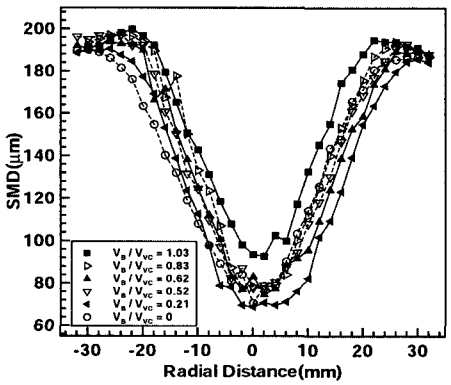


Fig. 12 SMD with various backholes (PDPA)

이러한 현상은 백홀이 유동의 반경방향 속도(Radial or Circumferential velocity)를 줄이는 것이지 축방향 속도(Axial velocity)를 크게 감소시키는 것이 아니기 때문에 레이놀즈수(Renolds number)나 웨버수(Weber number)를 그다지 감소시키지 않기 때문으로 보인다. 만약 백홀이 축방향 속도를 크게 감소시킨다고 하면 단위시간 당 유량이 증가하는 현상을 설명하기 어려워진다. 와류실 안의 실제 유동면적이 증가한다 하더라도 노즐의 크기에 한계가 있기 때문에 분열기작에 영향을 크게 줄 정도로 속도가 감소되면 결과적으로 유량의 변화가 거의 없을 것이기 때문이다. 축방향 속도가 크게 감소되지 않는다면 레이놀즈수가 크게 줄어들지 않을 것이고 따라서 웨버수도 크게 감소되지 않을 것이므로 전체적인 분열기작에는 큰 변화가 없을 것이기 때문이다 [12].

이를 알아보기 위하여 PDPA로 축방향 속도를 측정하여 각각의 백홀 부피에 따른 속도의 평균을 취하여 Fig. 13과 같은 결과를 얻게 되었다. Fig. 13에서와 같이 백홀로 인하여 축방향의 속도가 크게 변화하거나 백홀이 증가함에 따라 축방향 속도가 감소하는 경향은 보이지 않는다. 오히려 백홀의 부피가 증가함에 따라 축방향 평균속도가 약간 증가하는 경향도 있다. 그러나 이 증가는 5% 내외로 그리 크지는 않다. 그러므로 백홀의 부피가 증가한다 하더라도 분열기작에 영향을 주는 유동의 축방향 속도를 크게 감소시키지 않아 SMD에 큰 영향을 주지 않는다고 할 수 있다. 그렇지만 백홀의 부피가 지나치게 증가할 경우에는 늘어난 유량 때문에 액막의 두께가 증가하여 미립화에 좋지 않은 영향을 줄 수도 있다.

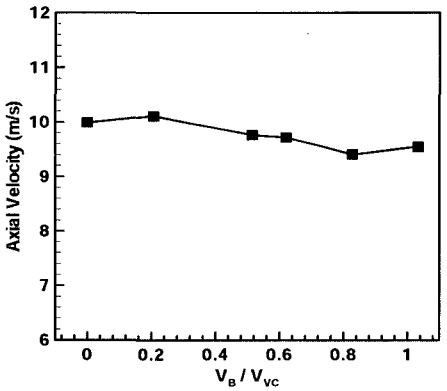


Fig. 13 Axial velocity of swirl injectors with various backholes (PDPA)

3. 5 백홀 내부 유동

백홀이 존재하게 되면 연직 주입구 후방으로 유동이 성장하게 되고 분사되는 주 유동과 상관하여 전체적인 유동형태를 나타내게 된다. 이를 관찰하기 위하여 투명한 소재로 인젝터를 제작하여 백홀부분의 내부 유동을 가시화하였다.

인젝터가 작동되면 유동이 백홀의 끝단쪽으로 성장해 나아가면서 종국에는 백홀이 없는 경우보다 좁은 Air core를 형성하게 된다. 이 유동의 성장은 작동 초기 단계 동안 빠르게 진행된다. 유동의 가시화 사진은 Fig. 14에 나타나 있다.

이러한 유동은 백홀은 존재하지 않지만 와류실의 길이가 길어서 백홀이 있는 경우와 같은 부피가 되는 조건의 유동과는 다르다. 백홀이 없이 단순히 와류실 부피가 큰 경우에는 벽면에 의한 마찰손실로 인한 분무 특성의 변화를 예상할 수 있지만, 백홀이 있는 경우에는 유동의 일부분이 연직 주입구 후방으로 성장을 한 후 분사되기 때문이다. 스월 인젝터의 마찰손실에 대한 판단은 Bazarov[13]의 인젝터 설계론을 따르면 다음의 식

(4)와 같다.

$$\frac{(R_n/r_{in})^2}{n} - A \leqq 6.5 \qquad (4)$$

위의 식(4)를 만족하면 스월 인젝터의 마찰손실은 무시할 수 있다. 이번 실험에 쓰인 인젝터들은 식(4)의 좌변값이 모두 1미만이므로 마찰손실을 크게 고려하지 않아도 되는 수준이다. 그러므로 분무 특성의 변화는 벽면에 의한 마찰손실로 인한 운동량 손실 때문이라기보다는 백홀쪽으로 형성되는 독특한 유동의 작용 때문이라고 해야 할 것이다.

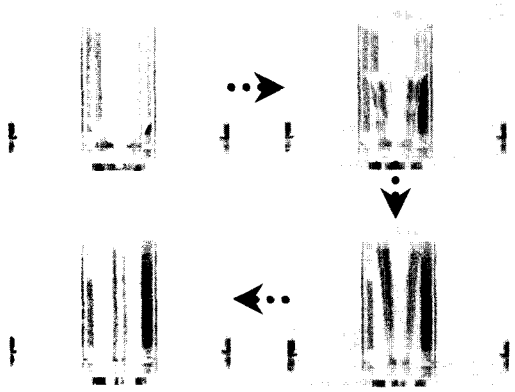


Fig. 14 The inner backhole flow visualization with a transparent swirl injector : transient flow development

4. 결 론

백홀을 가지는 스월 인젝터는 그동안의 일반적인 스월 인젝터들에 비해서 다음과 같은 분무 특성을 가진다.

산화제 노즐 와류실의 백홀은 유동의 중심부를 강화시켜서 단위시간당 유량을 증가시켰다. 또한 백홀은 분무각을 감소시키는데, 동축형 스월 인젝터의 경우에는 리세스가 충분히 깊을 때에는 백홀로 인하여 분무각이 오히려 증가하기도 하여, 분무각의 결정은 리세스와 백홀의 조합이 많은 영향을 주었다. 백홀은 인젝터에 리세스만 있었을 때보다 세밀하고 부드러운 분무각의 조절을 가능하게 하는데, 이러한 백홀의 산화제 유동의 분무각 조절은 동축형 스월 인젝터에서 산화제가 연료와 혼합되는 효율에 큰 영향을 주게 되어 스월 인젝터가 최적의 혼합 효율을 가지도록 할 수 있었다. 그러므로 액체 로켓 엔진의 스월 인젝터와 동축형 스월 인젝터에서 백홀은 수력학적인 성능을 향상시킬 수 있는 조건을 만들어 주며 원하는 작동 조건으로 용이하게 조절 가능하게 한다. 또한 여러 가지 제작상의 오류로 인한 인젝터 성능의 저하나 작동상 불안정성에 대하여 비교적 둔감하게 반응하도록 하게 할 가능성이 있다. 그러나 백홀의 크기는 리세스 등 다른 기하학적인 변수들을 고려하여 결정하여야 하며 각각의 조건에 따라 최적의 백홀 부피가 존재하게 된다.

이 후의 과제로 백홀 부근의 내부 유동에 대한 해석을 하고 리세스로 인한 Self-Pulsation[14]을 줄이는 장치나 감쇠 구조로서의 역할을 살펴보아 연소불안정 감소 효과를 고려하는 것은 의미 있는 연구가 될 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업의 고유번호 M1-0104-00-0058의 연구 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1]Bazarov, V. G., "Hydraulics of Swirl Propellant Injectors," *9th Annual Symposium on Propulsion*, 1997

[2]Pazhi, D. G. and Galustov, V. S., *Atomization of Liquids*, Russia

[3]Hardalupas, Y. and Whitelaw, J. H., "Characteristics of Spray Produced by Coaxial Airblast Atomizers," *Journal of Propulsion and*

Power, Vol.10, No.4, 1994

[4]Taylor, G. I., et al., "The Boundary Layer in the Converging Nozzle of a Swirl Atomizer," *Quart. J. Mech. Appl. Math.*, Vol. 3, pp.129-139, 1950

[5]Bazarov, V. G., "Liquid Flow Pulsation Damping in Feed Lines and Injectiors of Liquid Propellant Rocket Engines," *IAF-93-S.2.468*, 1993

[6]황성하, 설재훈, 정원호, 한풍규, 윤영빈, "Effects of Backhole on Hydraulics of Liquid Rocket Swirl Coaxial Injector," *Proceedings of the 2nd National Congress on Fluids Engineering*, pp.287~290, 2002

[7]Rupe, Jack H., "The Liquid-Phase Mixing of a Pair of Impinging Streams," *Progress Report No.20-195*, Jet Propulsion Laboratory, 1953

[8]Rubinsky, Vitaly, R., "Combustion Instability in the RD-0110 Engine," *AIAA-1994, Liquid Rocket Engine Combustion Instability*, Vol.169, Progress in Astronautics and Aeronautics, edited by Vigor Yang and William E. Anderson, Pennsylvania State University

[9]Couto, H. S., Carvalho, J. A. Jr. and Bastos-Netto, D., "Theoretical Formulation for Sauter Mean Diameter of Pressure-Swirl Atomizers," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.13, No.5, 1997

[10]Ramamurthi, K., Tharakan, T. J. and Balakrishnan, M., "Flow Transition in Swirled Liquid Sheets," *AIAA Journal*, Vol.36, No.3, 1998

[11]Inamura, T., Miyata, K., Tamura, H., and Sakamoto, H., "Spray Characteristics of Swirl Coaxial Injector and Its Modeling," *AIAA 2001-3570*, 2001

[12]Lefebvre, Arthur H., *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corporation, 1989

[13]Bazarov, V. G., "Liquid Propellant Rocket Engine Injectors," Invited Lecture of V. Bazarov, edited by Rocket Propulsion Lab., Seoul National University, 2002

[14]Bazarov, V. G., "Self-Pulsations in Coaxial Injectors with Central Swirl Liquid Stage," *AIAA 95-2358*, 1995