

## 액체로켓 동축형 스월인젝터에서 Backhole에 의한 수력학적 영향

황성하\*, 설재훈\*, 정원호\*, 한풍규\*, 윤영빈\*\*

## Effects of Backhole on Hydraulics of Liquid Rocket Swirl Coaxial Injector

Seong-Ha Hwang\*, Jaehoon Seol\*, Wonho Jeong\*, Poongkyu Han\* and Youngbin Yoon\*\*

**Key Words :** Swirl Injector(스월 인젝터), Atomization(미립화), Patterning(패터네이션), Backhole(백홀), PDDPA(Phase Doppler Particle Analyzer; 위상 도플러 입자 측정기), SMD(Sauter Mean Diameter; 평균액적지름), Spray(분무)

### Abstract

"Backhole" is an extra empty volume where is located behind the tangential entries at the rear part of the vortex chamber in the swirl coaxial injector. With the backhole, there are three major hydraulic characteristics. First, mass flow rate is increased about 15% compared with the case without the backhole. Second, with the backhole, the center region of the injected flow has more large volume than that of without the backhole. The last, some range of the cone angle can be controlled by the backhole. Experiments are conducted by using a PDDPA apparatus, a mechanical patterator, stroboscopic photography and etc. With the backhole, based on cold-flow tests, the model swirl injector has some improvement in its performance.

### 1. 서론

스월 인젝터의 연구과정에서 분무와 혼합 등에 큰 영향을 미치는 새로운 기하학적인 매개변수인 '백홀(Backhole)'을 발견하였고 그에 대한 구체적인 영향을 알아보기 위하여 본 실험을 수행하였다. 스월 인젝터 분무 시 발생하는 유동의 진동을 효과적으로 억제하고 조절하기 위하여 새로운 설계상의 변수를 고려하게 되었는데, 일반적으로 연소실 내부에 위치하는 공동이나 추진제 공급라인 등에서 적용되는 감쇠(damping)구조[1]를 인젝터 내부의 와류실 안에 적용하는 것을 시도하였다. 위의 감쇠 구조를 새롭게 설계하여 모델 스월 인젝터를 제작하였다. 이 새로운 구조인 백홀은 스월 인젝터 산화제 와류실의 연직 주입구 후방에 위치하는 여분의 빈 공간을 총칭하여 일컫는다. 그동안 사용되어 왔던 스월 인젝터에서는 산화제의 주입구 후방이 와류실의 뒷벽으로 막혀있는 형태가 대부분이었다. 그러나 이번 실험에서는 백홀의 부피도 변수로 보아 산화제 노즐이 여러 가지 종류의 백홀 크기를 가지도록 인젝터를 구성하였다.

이 백홀이 스월 인젝터의 분무현상에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여 PDDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 이용한 평균 액적 크기 측정과 기계적 분무 분류장치(Mechanical Patterator)를 통한 혼합특성, 간접·직접 조명 촬영을 통한 분무 형상 등을 실험하였다. 본 실험에서 사용된 스월 인젝터는 연료 노즐에 비해 리세스(Recess)를 가지는 산화제 노즐이 동심축 상에 위치하는 동축형이다. (리세스는 Fig. 1에서와 같이 연료 노즐에 대하여 산화제 노즐이 후퇴한 길이를 의미한다.) 또한 산화

제 노즐 및 연료 노즐에 스월러가 없이 연직방향으로 주입된 추진제를 가해진 압력으로 회전시켜 분무하는 방식을 취하고 있다. 전체 실험 장치는 연료 탱크와 고압압축공기 등으로 구성된 연료 공급 장치, PDDPA를 위한 녹색광 레이저와 optics 등 일련의 광학 장치 및 시험장치, 기계적 분무 분류장치 등으로 이루어져 있다.

분무는 상온, 대기압 하에서 분사하였으며 산화제와 연료가 분사 압력,  $\Delta P$ 가 3bar, 4bar 일 때, 각각 유량이 23.9g/s, 10.8g/s로 공급된다. 이번 실험에서는 스월 인젝터의 분무 특성을 알아보기 위하여 연소실험 대신 수류실험을 하였다. 산화제(액체 산소)의 유사체로는 물을 사용하였고 연료는 등유(Kerosene)를 그대로 사용하였다. 유동의 스월 방향은 기본적으로 연료와 산화제가 모두 반시계방향으로 같고 특별히 다른 경우 명시하였다.

다음의 Fig. 1은 스월 인젝터가 백홀을 가지고 있을 때와 가지고 있지 않았을 때의 개략도이다. 실제 실험에 쓰인 인젝터들은 백홀이 있을 때와 없을 때 백홀을 제외한 모든 기하학적 형상이 일치하며 다른 조건들도 동일하게 일치시켰다.

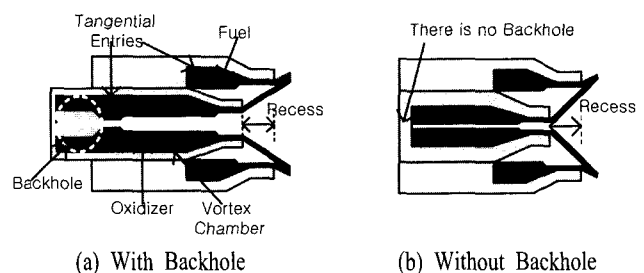


Fig. 1 Schematics of the Swirl Coaxial Injectors

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 서울대학교 기계항공공학부, ybyoon@plaza.snu.ac.kr

## 2. 백홀에 의한 동축형 스월 인젝터 유동특성

### 2.1 산화제 유량의 증가

유량계수  $\mu$ 는 아래의 식(1)과 같이 정의한다.

$$\mu = \frac{\dot{m}}{\pi R^2 \sqrt{2\rho \Delta P}} \quad (1)$$

스월 인젝터의 경우 인젝터 내부에서도 링 모양의 실제 유동 면적을 가지고 가운데 부분은 빈 공간을 형성하며 전체적인 분무형상이 Hollow Cone이기 때문에 실제로 유량이 흘러가는 면적은 인젝터의 노즐 단면적  $\pi R^2$ 보다 훨씬 더 작게 된다. 그러므로 이론적인 식으로부터 구한 유량계수는 실제 인젝터의 유량계수보다 훨씬 작은 값을 가지게 된다. 백홀의 부피를 다르게 하여 유량을 측정하여 보면 Fig. 2과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 2에서 보면 백홀의 부피가 증가할수록 유량이 증가하는 것을 알 수 있다. 백홀의 부피가 와류실 부피의 약 103.5%일 때에는 산화제 노즐 안에 백홀이 존재하지 않을 경우에 비해서 약 15% 정도가 더 많은 유량을 보이고 있다. 이는 백홀이 있을 경우 단위시간당 스월 인젝터에서 연소실로 나오는 유량을 증가시켜서 결국 로켓엔진의 단위시간당 추력을 높일 수 있는 조건을 만들어 줄 수 있음을 의미한다. Fig. 2의 그래프들의 기울기가 거의 일정하므로 유량계수가 일정하다고 가정한다면 가해진 압력은 일정하고 밀도도 일정하므로 유량이 증가하기 위해서는 유동면적이 증가할 수밖에 없다. 백홀로 인하여 압력손실이 더 커져서 유동의 속도가 감소되었다고 할지라도 그것을 상쇄하고 남은 만큼의 유동면적 증가가 있어야 한다. 이것은 3. 2 혼합특성에 대한 영향부분에서 기계적 분류장치를 이용하여 확인하였다.

### 2.2 분무각의 조절

스월 인젝터의 분무각은 마찰의 효과를 무시했을 때 다음 식(2)와 같이 표현할 수 있다.[2]

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

A는 스월 인젝터의 Geometric Characteristics이고  $q$ 는 노즐의 경사도이다. 이 식에 따르면 분무각  $\alpha_n$ 은 노즐의 반지름과  $q$ 를 조절함으로써 바꿀 수 있다. 그러나 실제로는 마찰에 의한 효과 때문에 그 각은 더 작아지게 된다. 그리고 이번 실험에 쓰인 산화제 인젝터는 와류실에 비해 노즐의 단면적이 훨씬 작아서 전체적으로 수렴하는 형상을 띠고 있다.

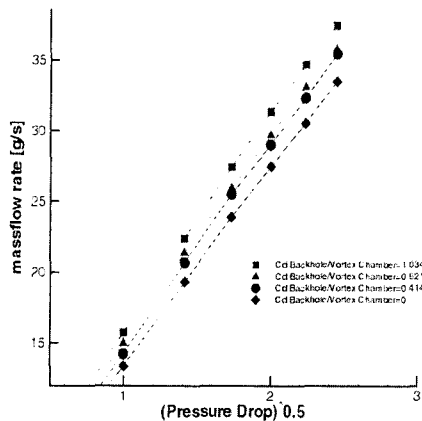


Fig. 2 Mass Flow Rate With Variable Backhole Volumes

이 3차원 유동의 형상은 경계층에서 2차 유동을 유발시키는 데 이 2차 유동은 동심축에 평행하고 회전은 하지 않는다. 이 2차 유동의 효과는 유동의 축방향 성분의 속도를 증가시켜서 각이 더 작아지도록 한다. 이 2차 유동을 유도하는 압력차는 다음 식(3)과 같다.[3] 즉, 노즐의 반지름이 작아질수록 노즐 바깥으로 향하는 압력구배가 형성된다.

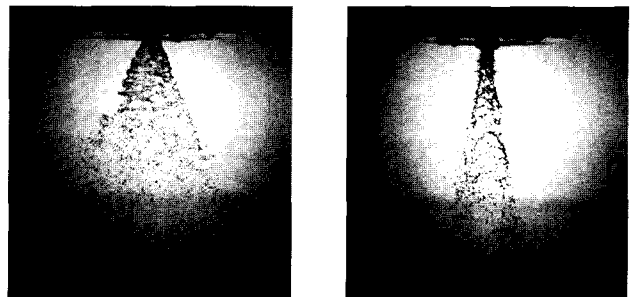
$$P - P_\infty = -\frac{\rho \Gamma^2}{8\pi^2} r^{-2} \quad (3)$$

( $\Gamma$ 는 와류의 세기이고  $r$ 은 수렴하는 노즐의 반지름이다.)

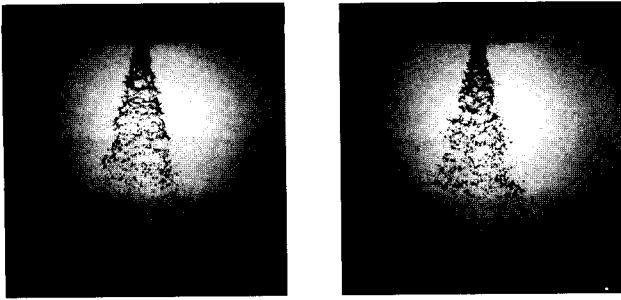
그러나 리세스나 노즐의 직경 등의 변수 외에도 분무각을 조절하는 변수인 백홀이 존재하였다. 리세스가 없을 때, 산화제 노즐만을 이용하여 분무각을 측정하여 보면 Fig. 3의 (a)-(b)와 같다. 그림에서와 같이 백홀의 부피가 증가할수록 분무각은 작아지는데 백홀이 없는 경우에 비해서 백홀의 부피가 와류실의 103.5%일 때 28%까지 감소하였다. 하지만 리세스를 3.0으로 고정시킨 후 백홀의 부피를 바꾸어 가며 분무각을 측정해 보면, 백홀이 있는 경우에 분무각의 크기가 오히려 증가함을 알 수 있다. 이것에 대한 이유는 리세스가 3.0으로 고정되어 있기 때문에 산화제 유동이 연료 노즐에 부딪히며 나오기 때문이다. 즉, 백홀이 없는 경우에는 산화제 유동의 각이 크기 때문에 미처 인젝터 밖으로 나가기 전에 연료 노즐 내벽에 부딪히면서 내벽을 타고 나오기 때문이다. 이 효과는 연료와 산화제를 동시에 분무하였을 때에도 동일하게 나타난다.(에멀전(Emulsion) 인젝터와 유사한 역할을 하게 된다.) 백홀이 있으면 작아진 산화제 유동의 각으로 인하여 유동이 연료 노즐 내벽에 닿지 않아 전체 분무각은 더 커지게 된다. 이러한 현상은 스월 인젝터의 혼합특성에 중대한 영향을 주게 된다.



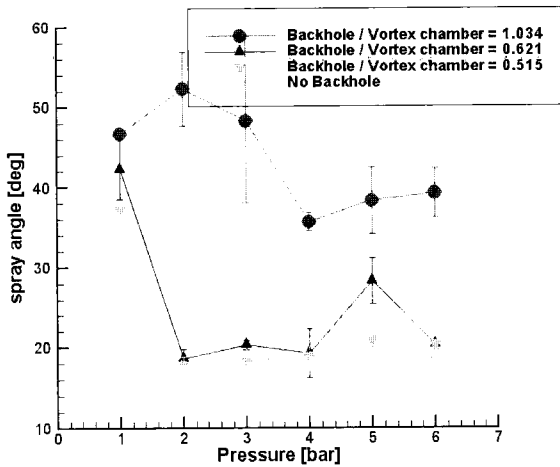
(a) Large Backhole (b) No Backhole  
Oxidizer Sprays of Swirl Coaxial Injector (Recess = 0)



(c) Large Backhole (d) No Backhole  
Oxidizer Sprays of Swirl Coaxial Injector (Recess = 3.0)



(e) Large Backhole  
(f) No Backhole  
Oxidizer & Fuel Sprays of Swirl Coaxial Injector (Recess = 3.00)



(g) Spray Angles

Fig. 3 Spray Angles with variable Backhole Volumes

### 3. 백홀에 의한 스윙 인젝터의 미립화와 혼합특성

#### 3.1 미립화에 대한 영향

백홀이 있는 경우에는 분열길이(Breakup length)가 증가하게 된다. 백홀이 없는 경우 분열길이 비교적 짧게 나타나 거의 완전한 '분열형'에 가까운 모습을 보이지만, 백홀이 존재하면 분열길이가 보다 길게 나타난다. 백홀의 부피가 산화제 외류실 부피의 103.5%일 경우에는 전형적인 '블립형'의 분무형상에 가까운 모습을 나타낸다. 이러한 현상은 백홀이 유동의 속도를 감소시키고 분열기작에 영향을 주어 SMD를 증가시키며 결과적으로 스윙 인젝터의 미립화 효율을 감소시키기 때문이다.[4]

Fig. 4에서와 같이 인젝터 하방 50mm에서 PDPA로 SMD를 측정하여 보았는데 반경거리 15~24mm에서는 SMD의 상대적인 증가가 12.5% 정도로 백홀이 있는 경우 미립화에 불리하였다. (SMD 측정은 연료와 산화제가 서로 다른 방향으로 회전하는 경우로 하였다. 이 경우 연료와 산화제의 스윙 방향이 서로 같은 경우 보다 SMD가 보편적으로 더 작기 때문에 PDPA를 이용하여 측정하는 데에 더 수월하다. 본 논문에서는 백홀이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 비교하고 있기 때문에 스윙 방향의 동일성 여부에 따른 SMD의 절대값 차이는 고려하지 않았다.) 이 부분은 대부분의 유동이 존재하는 구간이라서 백홀이 미립화에 좋지 않은 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그러나 동심축 부근의 유동이 적은 부분에서는 오히려 백홀이 있을 때 SMD가 더 작게 나오고 있으며 반경방향의 거리가 27mm 이상일 때는 그

차이가 3%정도에 불과하여 측정오차를 고려했을 때 차이가 난다고 보기 어렵다.

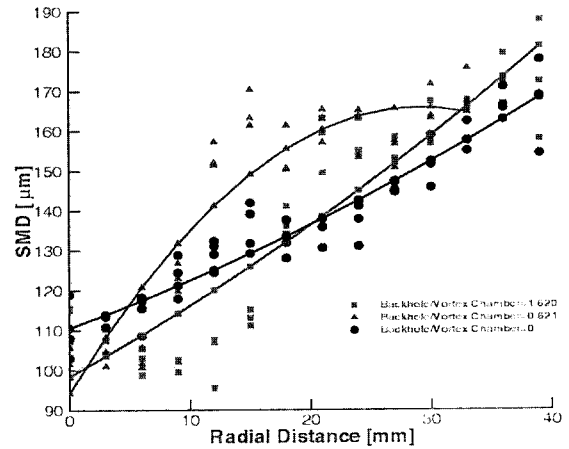


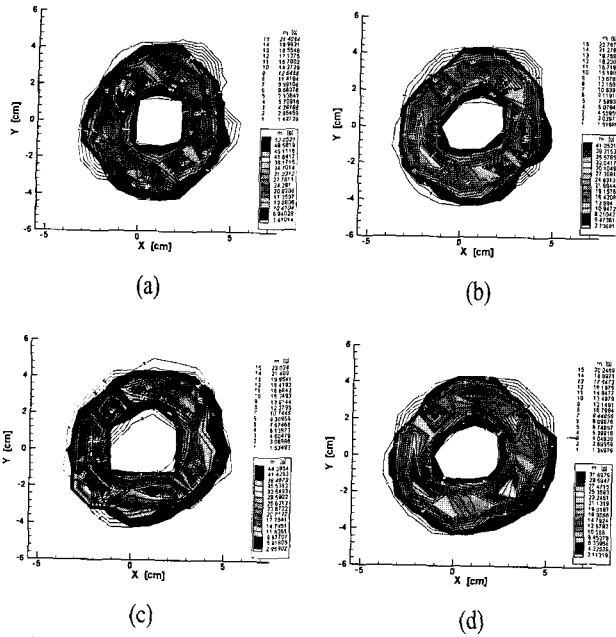
Fig. 4 SMD of Swirl Injectors with Variable Backhole Volumes at Recess 3.0

#### 3.2 혼합특성에 대한 영향

리세스를 3.0으로 고정 시킨 후 산화제 외류실에 백홀이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 기계적 분무 분류장치를 이용하여 혼합특성을 실험하였다. 기계적 분류장치의 수득률은 최저 약 86%였고 최고 약 89%, 평균 88%로 양호하여 실험결과를 얻는 데에 큰 지장이 없었다. 각각의 실험은 채집기(Cell)로부터 연직방향으로 50, 70mm 위에 스윙 인젝터가 위치하여 수행되었고 채집기의 수는 가로 15개 세로 12로 모두 180개이다. 전기적으로 컨트롤되는 순간적으로 열리고 닫히는 개폐기를 통하여 정해진 정확한 시간동안 측정하였는데 분무 초기의 유동은 채집하지 않고 분무가 시작된 후 10초 후의 유동을 채집하여 초기에 발생할 수 있는 변동을 제거하였다. 실험에 대한 결과 그래프는 Fig. 5에 나타났다. 리세스 3.0은 실험에 쓰인 모델 인젝터에서 산화제와 연료가 서로 만날 수 있도록 해주는 충분한 리세스이므로 모든 실험 경우 모두 혼합효율이 80% 이상 되는 성능을 보여 주었고 효율산출에 사용된 식은 다음과 같다.[5]

$$E_m = 100 \left\{ 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n Cu(R-r)}{WR} + \frac{\sum_{i=1}^n Cu(R-\bar{r})}{W(R-1)} \right] \right\} \quad (4)$$

백홀이 있는 경우들은 백홀이 없는 경우에 비해서 동심축 부근의 중심부에 산화제와 연료의 유량이 많이 축적되어 있는 것을 볼 수 있다. 백홀이 있는 경우에는 주입구에서 나온 산화제 외류실 내부 유동의 일부분이 백홀쪽으로 진행하여 재순환 영역을 만들게 된다. 이 재순환 영역은 백홀이 없는 경우에 비해서 그 규모가 광범위하고 많은 유량이 존재하므로 인젝터 외부로 빠져나가는 본 유동에 간섭을 주게 된다. 백홀쪽의 재순환 영역을 거친 유동은 본 유동에 비하여 작은 속도값을 가지며 그 결과 작은 회전 반지름을 가지게 된다. 이 경우 전체적인 유동은 연속적인 속도분포를 가져야 하므로 본 유동이 산화제 외류실의 중앙부로 더 성장하여야 한다. 그러므로 백홀이 없는 경우보다 중심부에 상대적으로 가까운 곳에 유동이 형성되어야 한다. 이 유동의 확장은 결과적으로 산화제 유동면적의 증가를 가져오고 이는 유량의 증가를 수반한다. 또한 유동이 중심부로 물리고 회전 속도가 감소되면서 분무각이 줄어들게 된다.



(a) Backhole/Vortex Chamber=1.034 (Z=70mm Recess=3.00)  
 (b) Backhole/Vortex Chamber=0.515 (Z=70mm Recess=3.00)  
 (c) Backhole/Vortex Chamber=0.621 (Z=70mm Recess=3.00)  
 (d) Backhole/Vortex Chamber=0 (Z=70mm Recess=3.00)

Fig. 5 Patternation of Swirl Coaxial Injectors with Variable Backhole

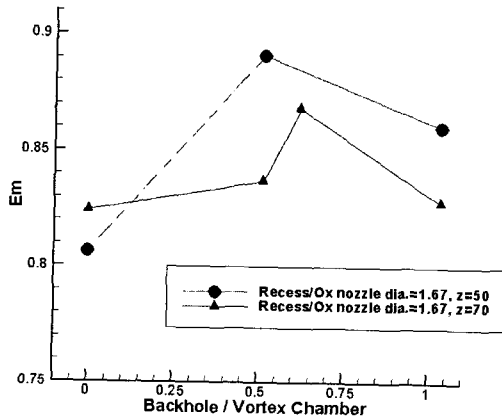


Fig. 6 Mixing Efficiency

Fig. 6의 혼합효율 그래프를 보면 백홀로 인하여 유동장의 속도가 느려져서 혼합특성에 좋지 않은 영향을 주었다기보다는 분무각이 조절되어 오히려 더 좋은 혼합특성을 나타내도록 하였고 볼 수 있다. 산화제 노즐에서 나온 흐름이 연료 노즐의 외가장자리 부근에 근접하도록 리세스를 정하는 것이 혼합효율을 증가시킬 수 있다.

너무 과도한 리세스나 너무 얇은 리세스는 확산율(Rate of Spread)에 좋지 않은 영향을 주기 때문에 혼합특성에 악영향을 준다.[6] 백홀은 스윙 인젝터가 여러 가지 이유로 인하여 과도한 리세스를 가지도록 설계되었을 때, 산화제의 분무각을 줄여서 최적의 리세스 조건이 되도록 조절할 수 있도록 할 수 있다는 장점이 있다.

#### 4. 결론

산화제 노즐에 백홀을 가지는 스윙 인젝터는 백홀이 없는 경우에 비해서 다음과 같은 수력학적 특징을 가진다.

1. 백홀이 없는 스윙 인젝터에 비해 단위시간당 유량이 약 15%까지 증가하였는데 이것은 연소실에서 더 많은 열량을 발생하게 하여 더 높은 추력을 발생시킬 수 있는 조건을 만들 수 있다.
2. 백홀은 분무각을 감소시킨다. 노즐의 직경이나 노즐의 경사도 이외에 분무각을 바꿀 수 있는 새로운 변수이며 28%까지 분무각을 변화시켰다.
3. 백홀이 있는 경우 SMD가 증가하고 분열길이가 증가하여 인젝터의 미립화 효율을 감소한다. 그러나 미립화 효율의 감소는 전체적으로 10%미만으로 그리 크지 않다.
4. 백홀은 전체적인 분무를 동심축이 존재하는 중심부로 집중시키며 결과적으로 Hollow Cone에서 Solid Cone의 형상으로 변화하는 과정에 놓이게 한다.
5. 백홀은 리세스와 더불어 혼합 효율을 결정하며 적절하지 못한 리세스를 선택하더라도 최적의 혼합 효율을 만들 수 있도록 한다.

그러므로 액체 로켓 동축형 스윙 인젝터에서 백홀은 수력학적 성능에 많은 이득을 가져다 주며 원하는 작동 조건으로 용이하게 조절 가능하게 한다. 반면, 백홀로 인한 단점은 리세스 등 다른 변수들로 줄일 수 있기 때문에 액체 로켓 스윙 인젝터에서는 매우 유용한 기하학적인 변수라고 할 수 있다.

더 나아가 앞으로 백홀을 스윙 인젝터의 감쇠 구조로서의 역할을 살펴보아 연소불안정 감소 효과를 연구하는 것은 의미 있는 일이 될 것이다.

#### 후 기

본 연구는 과기부 국가지정연구실사업의 고유번호 M1-0104-00-0058 연구 지원을 받았으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- [1] V. G. Bazarov, "Liquid Flow Pulsation Damping in Feed Lines and Injectors of Liquid Propellant Rocket Engines," IAF-93-S.2.468, (1993).
- [2] V. G. Bazarov, "Hydraulics of Swirl Propellant Injectors," 9th Annual Symposium on Propulsion, Cleveland, (1997).
- [3] G. I. Talor, et al, "The Boundary layer in the Converging Nozzle of a Swirl Atomizer," Quart. J. Mech. Appl. Math., Vol. 3, 129-139. (1950).
- [4] H. Tamura et al, "Spray Characteristics of Swirl Coaxial Injector and its Modeling," AIAA2001-3570, (2001).
- [5] Jack H. Rupe, "The Liquid-Phase Mixing of a Pair of Impinging Streams," Progress Report No. 20-195, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, (1953).
- [6] Y. Hardalupas and J. H. Whitelaw, "Characteristics of Spray Produced by Coaxial Airblast Atomizers," Journal of Propulsion and Power, Vol.10, No. 4, (1994).