

## 論文

## 분사조건에 따른 기체/액체 동축형 인젝터의 분무특성에 관한 연구

정원호\*, 김동준\*, 임지혁\*, 윤영빈\*\*

## A Study on Characteristics of Gas/Liquid Coaxial Sprays Under Varying Flow Conditions

W. H. Jeong\*, D. Kim\*, J. H. Im\* and Y. Yoon\*\*

## ABSTRACT

Characteristics of sprays injected by gas/liquid coaxial atomizers operated at atmospheric pressure are studied using shadowgraph, mechanical patternator and PDPA. The gas-to-liquid momentum flux ratio( $M$ ) and the liquid Reynolds number( $Re$ ) are selected as key parameters in characteristics of gas/liquid coaxial sprays from the dimensional analysis. The properties of shear coaxial sprays are compared with those of swirl coaxial sprays through the macroscopic and microscopic analysis. Macroscopic similarities between shear and swirl coaxial sprays are revealed under flow conditions of high momentum flux ratio. Also, empirical correlations between the mean drop diameters( $D_{32}$ ) and operating conditions of coaxial sprays are proposed in this paper.

## 초 록

기체와 액체 추진제를 사용하는 동축형 분사기의 분무특성을 조사하기 위하여 shadow graph와 mechanical patternator, PDPA를 이용한 실험을 수행하였다. 차원해석 방법을 도입하여 운동량 플럭스 비( $M$ )와 레이놀즈 수( $Re$ )를 기체/액체 동축형 분무의 주요 변수로 설정하였고, 실험을 통하여 전단 및 스윙 동축형 분무의 특성을 거시적 및 미시적 관점에서 비교·분석하였는데, 기체 추진제의 영향력이 커지는 분사조건에서 전단 및 스윙 동축형 분무의 거시적 특성이 유사해짐을 확인할 수 있었다. 또한, 본 연구에서는 미시적 분무 특성에 대한 분석 결과로서 분무액적 크기와 분사조건 사이의 관계식도 제시하였다.

**Key Words :** Gas/Liquid Coaxial Injectors(기체/액체 동축형 인젝터), Momentum Flux Ratio(운동량 플럭스 비), Macro-structure of Spray(거시적 분무특성), Micro-structure of Spray(미시적 분무특성), Mechanical Patternator(기계식 패턴네이터), PDPA

## 1. 서 론

동축형 인젝터는 충돌형 인젝터와 더불어 가장 널리 사용되고 있는 형태의 분사기로서, 내부

† 2004년 3월 12일 접수 ~ 2004년 6월 9일 심사완료

\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

연락처, E-mail : ybyoon@snu.ac.kr

서울특별시 관악구 신림9동 산56-1

추진제의 분무형태에 따라 전단 동축형 인젝터와 스윙 동축형 인젝터로 나뉘어진다. 즉, 전단 동축형 인젝터에서 내부 추진제는 액주(liquid jet)의 형태로 분사되지만, 스윙 동축형 인젝터에서는 접선방향 속도성분의 영향으로 얇은 액막(liquid sheet)의 형태를 취하게 된다[1]. 일반적으로 동축형 인젝터는 충돌형 인젝터에 비하여 작동상 안정성이 높은 것으로 알려져 있는데, 특히 스윙 인젝터는 액막의 두께가 얇고 hollow-cone 형태

기 호

$\rho_l$	: density of liquid propellant	$d$	: orifice diameter of inner injector
$\rho_g$	: density of gas propellant	$h$	: annular gap size
$\mu_l$	: viscosity of liquid propellant	$M$	: momentum flux ratio
$\sigma$	: surface tension	$Re$	: Reynolds number
$U_l$	: injection velocity of liquid propellant	$We$	: Weber number
$U_g$	: injection velocity of gas propellant	SMD	: sauter mean diameter( $D_{32}$ )

의 분무형상을 가지기 때문에 혼합 및 미립화의 측면에서 유리한 것으로 알려져 있다[2].

인젝터의 분무특성은 분무의 전체적인 형상 및 분무각, 분열길이, 추진제의 질량분포 등 분무 자체와 관련된 거시적 특성(macro-structure)과 분무액적의 평균크기, 분포 등 액적과 관련된 미시적 특성(micro-structure)으로 분류할 수 있으며[1], 다양한 계측 기법을 이용하여 이들을 측정하고자 하는 주된 목적은 원하는 작동조건 하에서 적절한 성능을 발휘할 수 있는 분사기를 설계하는데 있다. 따라서, 추진제의 유량, 속도비 등 인젝터의 분사조건을 바꾸지 않고서도 특정한 분무특성만을 조절할 수 있는 방법이 실제적인 측면에서 상당한 의미를 지닌다고 할 수 있으며, 최근 들어 이와 관련된 연구결과들이 발표되고 있다. Strakey 등[2]은 운동량 비가 증가함에 따라 스윙 동축형 분무와 전단 동축형 분무의 거시적 특성이 유사해진다는 사실을 실험적으로 확인하였고, Rahman[3]은 크기에서만 2배의 차이가 나고 다른 기하학적 형상은 모두 같은 두 개의 스윙 동축형 인젝터로 실험을 수행한 결과, 액체 추진제의 웨버 수와 기체/액체 운동량 비가 동일한 조건에서는 액막의 두께로 정규화한 분무특성들이 유사성을 갖는다고 보고하였다.

본 연구에서는 다양한 분사조건 하에서 기하학적 형상이 완전히 동일한 전단 및 스윙 동축형 인젝터의 분무특성을 거시적 및 미시적 관점에서 비교·분석하고자 한다. 전단 및 스윙 동축형 인젝터의 분무특성을 서로 비교한 연구결과는 상당수 존재하지만[2], 같은 기하학적 형상 조건을 가진 두 인젝터로 실험을 수행하였고 기체/액체 운동량 플럭스 비를 중요한 변수로 다루었다는 점에서[9] 본 연구의 의미를 찾을 수 있다.

II. 본 론

2.1 실험조건 및 방법

액체로켓엔진에 적용되는 전단 및 스윙 동축

형 인젝터는 수소나 메탄을 연료로 사용하는 경우에 내부 인젝터에서 산화제(액체), 외부 인젝터에서 연료(기체)가 분사되는 형태로 작동되는데 본 연구에서도 이 방식을 그대로 적용하여 산화제 및 연료 인젝터를 배치하였다(Fig. 1). 실험에 사용된 인젝터는 기존의 연구자들이 사용했던 인젝터의 치수를 고려하여[4] 설계하였고, 스윙 인젝터의 design criteria를 만족하고 있는지 확인하였으며[1], 내부 추진제의 유입방식을 제외하고는(Fig. 1) 두 인젝터가 같은 기하학적 조건을 가지도록 제작하였다. 한편, Table 1로부터 기체가 분사되는 annular gap의 크기가 1.5mm임을 알 수 있는데 이는 SSME 등에서 사용되고 있는 것(0.5 ~ 1.0mm)보다 큰 값이다[4]. 기체의 운동량이 큰 조건에서 작은 annular gap(1.0mm)을 가지는 스윙 동축형 인젝터로 실험할 때 pulsation[5] 현상이 나타났으며, 이 경우에 분무가 반경방향으로 진동하여 실험결과를 왜곡시킬 수 있기 때문에 이를 막기 위한 방법으로써 넓은 annular gap을 사용한 것이다.

Table 2는 실험에 사용된 인젝터의 작동조건

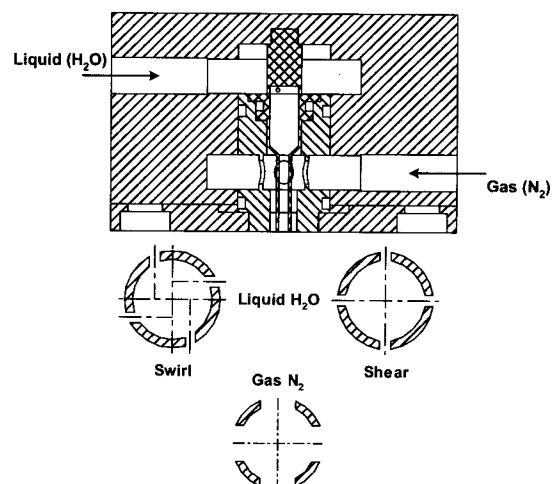


Fig. 1. Schematics of Gas/Liquid Coaxial Atomizers

**Table 1. Design Conditions of Gas/Liquid Coaxial Injectors**

	유사 추진제	위치	오리피스 직경(mm)	유입구 직경(mm) 및 개수
산화제	Water	내부	Φ2.5(i.d.) Φ4(o.d.)	Φ1, 2개
연료	GN <sub>2</sub>	외부	Φ7	6×5 타원, 4개

을 정리한 것으로서, 전단 및 스월 동축형 인젝터의 산화제 압력강하 조건이 서로 다를 수 있다. 이것은 SMD( $D_{32}$ )에 영향을 미치는 액체유량( $m_i$ )을 통제하면서[6] 파생된 결과이며, hollow cone의 형태로 분사되어 유량계수 값이 작은 스월 동축형 인젝터에서 압력강하의 정도가 더 커지게 된다. 한편, 연료는 상압을 고정시킨 상태에서 기체 유량 조절기를 이용하여 정확한 유량이 공급되도록 하였다. 특히, 본 연구에서는 유사추진제 사이의 상대적인 운동량을 중시하였기 때문에 연료와 산화제가 특정한 속도비(10~50)를 유지하도록 하는데 중점을 두었다. 운동량 플럭스비는 연료와 산화제의 (밀도비)×(속도비)<sup>2</sup>에 해당하는 물리량인데, 유사추진제의 종류를 변화시키지 않았으므로 속도비와 밀접한 관계를 가진다고 할 수 있다.

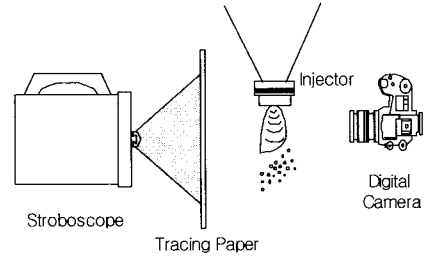
**Table 2. Experimental Conditions**

	압력강하	유량	운동량 플럭스 비
산화제	0.05~0.1MPa (shear) 0.15~0.3MPa (swirl)	14.7~22.0g/s	1.05~2.91
연료	1.8MPa	2.7~8.1g/s	

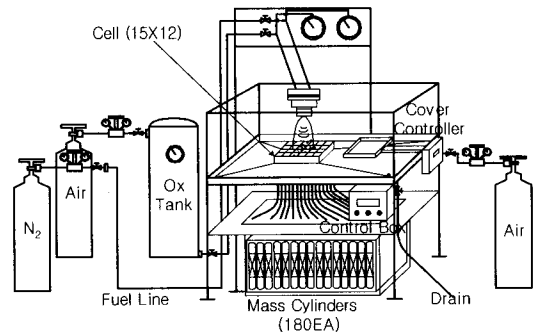
한편, 실험에 사용된 계측기법은 분무사진 및 Mechanical Patternator, PDPA 등이며 앞의 두 기법으로는 거시적 분무특성을, PDPA로는 미시적 분무특성을 각각 측정하였다. Fig. 2에 각 실험장치의 개략도를 정리하여 나타내었다.

Mechanical Patternator의 격자는 180개 셀로 이루어져 있으며, 각 셀의 크기는 10mm×10mm이다. 유사 추진제의 포집은 PDPA 결과와의 관련성을 고려하여 인젝터 면으로부터 100mm 하방에서 이루어졌고, 실험결과와 유의성과 관련 있는 채집효율은 모든 분사조건에서 90% 이상으로 나타났다.

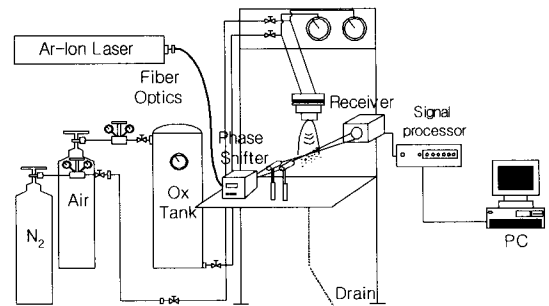
PDPA의 광원으로는 파장 길이가 514.5nm인



(a) Shadowgraph



(b) Mechanical Patternator



(c) PDPA

**Fig. 2. Experimental Setups**

Ar-ion laser가 사용되었다. Beam Splitter를 통과한 레이저빔은 50mm 간격을 가지는 두 개의 광으로 나누어지고, 다시 초점거리가 591mm인 렌즈를 지나면서 측정 체적을 형성하게 된다. 전단 동축형 분무의 분열길이를 고려하여 인젝터 면으로부터 100mm 하방에서 모든 측정이 이루어졌으며, 측정 상의 오차를 줄이기 위하여 각 시행마다 15,000개 이상의 액적을 계측하였다.

**2.2 차원해석 (Dimensional Analysis)**

기체/액체 동축형 인젝터의 분무특성을 결정하는 주요변수를 알아보기 위하여 차원해석 방법

을 이용하였다[7]. SMD에 영향을 미치는 변수로서 기체와 액체의 특성( $\rho_g, \rho_l, \mu, \sigma$ ) 및 분사조건( $U_l, U_g$ ), 인젝터의 기하학적 형상( $d, h$ ) 등 8 가지를 선택하였고, 이 변수들이 3개의 차원으로 표현되므로 Buckingham pi theorem에 의하여 모두 6개의 무차원 변수를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{SMD}{d}, \quad \Pi_2 = \frac{h}{d}, \\ \Pi_3 &= \frac{\rho_g}{\rho_l}, \quad \Pi_4 = \frac{U_g}{U_l}, \\ \Pi_5 &= \frac{\rho_l U_l d}{\mu_l}, \quad \Pi_6 = \frac{\rho_l U_l^2 d}{\sigma} \\ \frac{SMD}{d} &= f_1\left(\frac{h}{d}, \frac{\rho_g}{\rho_l}, \frac{U_g}{U_l}, Re, We\right) \quad (1) \end{aligned}$$

본 연구에서 중요하게 다루어질 운동량 플럭스 비는 식 (1)에 분리된 형태로 존재한다[8]. 즉,  $\Pi_3$  과  $\Pi_4$ 를 결합하면 새로운 무차원 변수를 만들 수 있는데 이것이 바로 운동량 플럭스 비이다.

$$\begin{aligned} \Pi_7 &= \Pi_3 \Pi_4^2 = \frac{\rho_g U_g^2}{\rho_l U_l^2} \\ \frac{SMD}{d} &= f_2\left(\frac{h}{d}, M, Re, We\right) \quad (2) \end{aligned}$$

실제 실험 과정에서는 여러 변수 중 기체와 액체의 속도만을 변화시켰기 때문에 분무특성을 표현하는데 있어서도 2개의 무차원 변수를 사용해야 한다. 본 연구에서는  $GN_2$ 와  $H_2O$  이외의 simulants는 사용하지 않았고 ambient pressure도 바꾸지 않았으며 모든 형상조건을 고정하였으므로, 식 (1)에 제시된 무차원 변수 중  $\Pi_5$ 와  $\Pi_6$ 은 서로 종속 관계가 되고  $\Pi_2$ 는 상수가 되어 최종적으로 운동량 플럭스 비를 포함하는 2개의 무차원 변수만이 남게 된다. SMD가 액체 유량의 변화에 민감하다는 점을 고려할 때[6] 이 변수를 직접 포함하고 있는 레이놀즈 수가 액체의 운동량과 관련 있는 웨버 수보다 SMD를 표현하는데 있어서 더 적합한 변수라고 판단된다. 또한, 운동량 플럭스 비가 1보다 큰 조건에서는 기체의 운동량에 의한 액체의 분열이 지배적일 것으로 예상되며, 결국 이 조건 하에서 액체 자체의 특성 ( $\mu, \sigma$ )이 분열에 미치는 영향은 작아질 것이다. 따라서, 본 연구에서는 유사추진제간의 상호작용 정도를 나타내는 변수로서 운동량 플럭스 비를, 분무 액적 크기에 영향을 주는 액체 추진제의 유량을 고려하여 레이놀즈 수를 주요 무차원 변수로 설정하고 일련의 실험을 진행하였다.

$$\frac{SMD}{d} = f_3(M, Re) \quad (3)$$

$$M = \frac{\rho_g U_g^2}{\rho_l U_l^2}, Re = \frac{\rho_l U_l d}{\mu_l}$$

한편, 스월 동축형 분무의 경우 액체 추진제의 분무각에 따라 동축 기체와의 상호작용이 달라질 것으로 예상되는데, 본 연구에서는 두 유사추진제 모두 분사 직전의 속도를 사용함으로써 실험 과정에서 발생할 수 있는 어려움을 줄이고자 하였다.

### 2.3 거시적 분무특성

전단 동축형 인젝터는 내부 인젝터에서 액체 추진제가 분무될 때 annular gap을 통하여 빠른 속도로 기체 추진제를 분사함으로써 산화제의 분

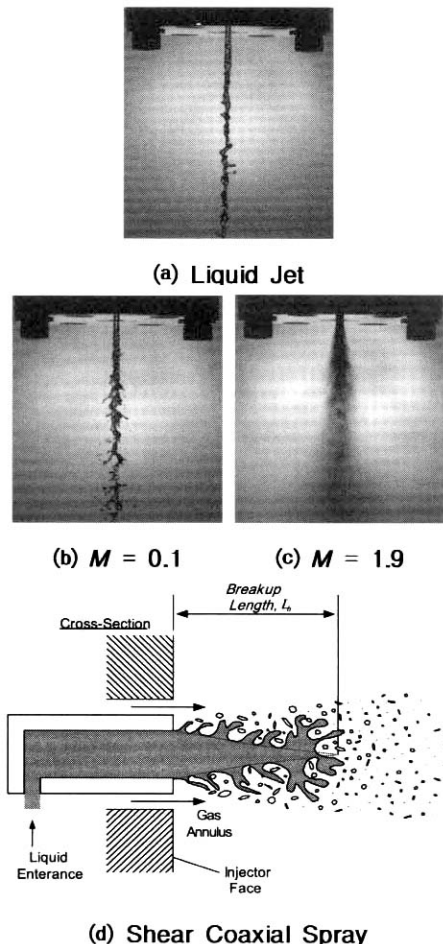


Fig. 3. External Shape of Shear Coaxial Sprays

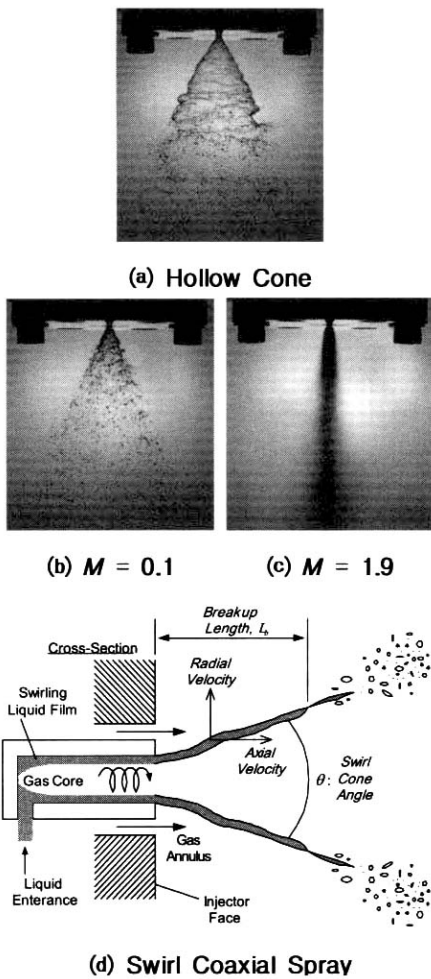


Fig. 4. External Shape of Swirl Coaxial Sprays

열과 미립화를 유도한다. 따라서, 전단 동축형 분무의 분열 및 미립화 과정은 액주 자체의 불안정성에 기인한 것과는 완전히 다른 양상으로 전개된다. 즉, 운동량 플럭스 비가 1보다 작은 조건에서는 액주의 분사조건에 따라 분열 메커니즘이 달라지는 반면[10], 운동량 플럭스 비가 1보다 클 때에는 기체에서 액체로의 운동에너지 전달이 액주의 분열과정을 지배하는 것으로 알려져 있다 [9].

동축 기체가 없는 조건에서 전단 분무와 스윙 분무의 차이점이 액체 추진체의 분사형태에 있음을 고려할 때, 기체 추진체의 영향력이 커지는 분사조건에서 두 인젝터의 분무형상이 유사해질 것으로 예상되며 Fig. 3과 4를 통하여 이러한 사실을 확인할 수 있다. 한편, 액체 추진체의 분열 길이 면에서는 두 분무에서 차이가 나타났는데,

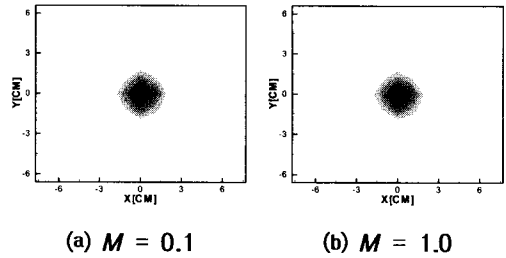


Fig. 5. Spatial Distribution of Liquid Propellant for Shear Coaxial Sprays

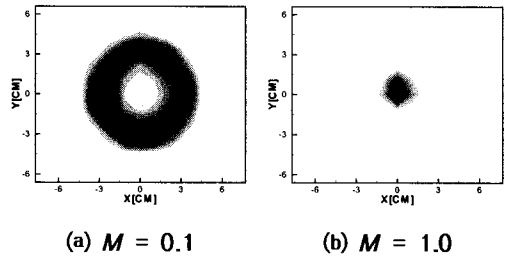


Fig. 6. Spatial Distribution of Liquid Propellant for Swirl Coaxial Sprays

이는 동축 기체가 액체 추진체를 관통하는데 있어서 얇은 액막의 형태를 가지는 스윙 분무 쪽이 쉽기 때문인 것으로 판단된다.

추진체의 공간적인 질량분포는 혼합효율을 결정하는 중요한 거시적 분무특성으로서 이것의 측정에는 Mechanical Patternator나 광학적 측정기법 등이 이용되고 있는데, 본 연구에서는 측정 원리가 단순하면서도 질량유량을 직접 측정할 수 있는 측정기법으로서 별도의 후처리과정이 필요 없는 Mechanical Patternator 방법을 이용하여 액체 추진체의 공간적인 분포를 조사하였다.

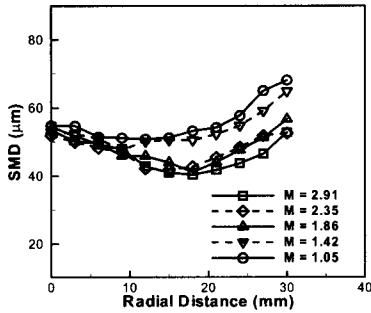
일반적으로 전단 동축형 분무는 액주 형태의 내부 산화제를 외부의 동축 기체가 분열시키는 방식으로 작동되기 때문에 마지막까지 액주가 존재하게 되는 분무의 중심부에서 최대 질량 플럭스가 나타나는 것으로 알려져 있다[4]. 한편, 스윙 동축형 분무에서 추진체의 공간적인 분포는 액막의 위치와 밀접한 관계를 가지는데[3], 기체의 운동량이 커짐에 따라 액막이 인젝터의 중심부로 이동하기 때문에 운동량 플럭스 비가 1보다 큰 분사조건에서는 전단 동축형 분무의 것과 유사한 분포를 가지는 것으로 나타났다(Fig. 5, 6).

## 2.4 미시적 분무특성

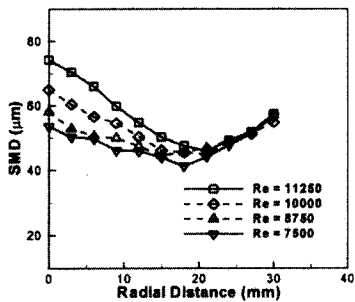
액체 추진체는 분열 및 미립화, 기화, 혼합 등의 과정을 거쳐 연소되는데[1] 이 중 분열 및 미

립화 부분을 인젝터가 담당하고 있으며 액적의 기화 시간도 초기 액적의 크기에 의해 좌우되므로( $t_a = D_0^2/K$ ; droplet lifetime  $t_a$ , droplet of given initial size  $D_0$ , evaporation constant  $K$ )[11] 이로부터 연소 이전 단계에서 인젝터가 가지는 중요성을 짐작할 수 있다. 엔진의 연소성능과 관련된 분무특성은 주로 액적에 포함되어 있는 정보들로서 이것을 측정하기 위하여 PDPA, Malvern 등 레이저를 기반으로 하는 정밀한 계측기법들이 이용되고 있다. 특히, PDPA는 액적과 관련된 여러 정보를 동시에 제공해주는 기법으로서 측정의 정확도 및 공간분해능이 높은 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 장점을 지니고 있는 PDPA를 이용하여, 인젝터의 분사조건이 액적의 크기에 어떠한 영향을 주는지 조사하였다.

전단 동축형 분무에서 SMD의 반경방향 분포는 액체 추진제의 질량분포와 유사한 경향성을 나타내는데[4] 본 연구를 통해서도 비슷한 결과가 도출되었다(Fig. 7). 또한, 인젝터 중심부와 외부에서의 SMD는 각각 레이놀즈 수와 운동량 플럭스 비의 영향을 받고 있음이 확인되었다. 한편,



(a)  $Re = 7500$



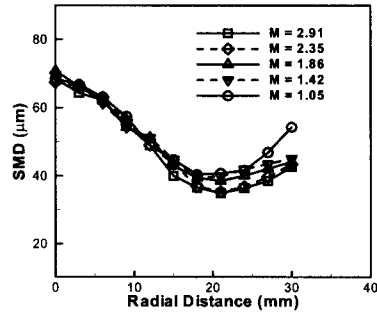
(b)  $M = 1.9$

Fig. 7. Radial Profiles of SMD for Shear Coaxial Sprays as a Function of M and Re

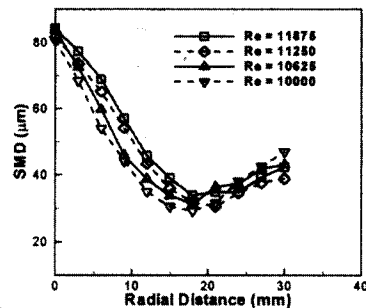
동축형 분사기 특히 recess가 없는 선형 인젝터의 경우는 분열된 액적의 크기가 작기 때문에 2차 분열이 활발하지 않은 것으로 알려져 있기 때문에 본 연구에서 PDPA로 측정된 자료는 액체 추진제의 1차 분열에 의한 것이 대부분이라고 판단된다.

Fig. 8은 스윙 동축형 분무의 SMD 분포에 관한 결과로서 분사조건에 따른 평균액적의 크기 변화가 전단 동축형 분무의 경우만큼 뚜렷하게 나타나지 않았는데, 이는 동축 기체가 스윙 분무의 얇은 액막을  $M=1.05$ 인 조건에서 이미 관통하였기 때문인 것으로 판단된다.

한편, PDPA는 점측정 방식을 기반으로 하기 때문에 측정된 SMD 값은 특정 위치에서의 정보만을 포함하고 있다. 따라서, 분사조건 전반적인 영향을 파악하기 위해서는 평균 SMD의 도입이 필요하다. 식 (4)는 Zaller 등[12]이 제안했던 composite mean drop sizes를 본 연구에 맞도록 변형한 것이며,  $(Data\ rate)_i$ 는 측정 체적(probe volume)에서 1초당 측정되는 액적의 평균 개수,  $A_i$ 는 측정지점을 포함하는 링 모양의 면적,  $(D_{32})_i$ 는 측정지점에서의 SMD를 각각 의미한다.



(a)  $Re = 7500$



(b)  $M = 1.9$

Fig. 8. Radial Profiles of SMD for Swirl Coaxial Sprays as a Function of M and Re

$$\overline{SMD} = \frac{\sum_i (Data\ rate)_i A_i (D_{32})_i}{\sum_i (Data\ rate)_i A_i} \quad (4)$$

Fig. 9는 식 (4)를 이용하여 구한 평균 SMD 값을 운동량 플럭스 비와 레이놀즈 수로 표현한 것이며, 본 연구의 실험조건과 인젝터 사양에서 식 (5), (6)과 같은 실험식을 갖는다. 한편, Fig. 9의  $R^2$ 는 실험식이 전체 자료를 몇 %나 설명해줄 수 있는가를 나타내는 지표로서, 1에 가까울수록 실험식에 의해 설명되는 자료가 많음을 의미한다.

$$\overline{SMD}_{shear} = 5.04(M^{-0.14} Re^{0.26}) + 0.60 \quad (5)$$

$$\overline{SMD}_{swirl} = 0.19(M^{-0.05} Re^{0.57}) + 2.38 \quad (6)$$

분사조건에 따른 SMD의 변화는 두 인젝터에서 같은 경향성을 가지는 것으로 나타났지만, 스윙 동축형 분무의 경우 그 변동폭이 크지 않으며 생성되는 액적의 크기도 작음을 확인할 수 있었다. 액적의 크기가 작으면 기화 시간도 짧아지기 때문에 기체 추진제와의 혼합이 좀더 균일하게 이루어지는 이점을 갖는다[2]. 또한, 운동량 플럭스

비가 큰 분사조건에서는 전단 및 스윙 동축형 분무의 거시적 특성이 유사해지므로 결국 혼합 및 미립화의 측면에서 스윙 동축형 분무가 더 유리할 것으로 예상된다.

### III. 결 론

분무사진과 Mechanical Patternator, PDPA 기법을 이용하여 분사조건에 따른 전단 및 스윙 동축형 인젝터의 분무특성을 살펴보았으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 차원해석 방법을 통하여 동축형 분무에 영향을 주는 분사조건으로 운동량 플럭스 비( $M$ )와 레이놀즈 수( $Re$ )를 선정하였으며, PDPA 결과로부터 두 변수가 분무에 주는 위치가 다름을 확인할 수 있었다.

2) 운동량 플럭스 비가 증가함에 따라 전단 및 스윙 동축형 분무의 거시적 특성이 유사해짐을 알 수 있었다. 즉, 스윙 동축형 인젝터의 분무형상 및 산화제 질량분포는 기체 추진제의 영향력이 커지는 분사조건에서 전단 동축형 분무의 것과 유사한 형태로 나타났다.

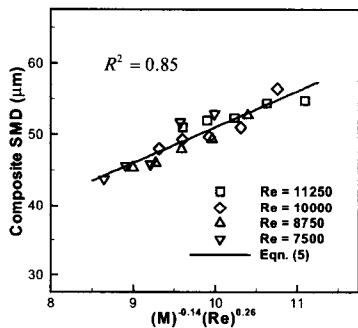
3) 분사조건에 따른 전단 및 스윙 동축형 인젝터의 분무특성은 미시적 측면에서 차이가 나타났는데, 주로 동축 기체의 운동에너지 전달에 의하여 액체 추진제가 분열되는 전단 동축형 분무에서 운동량 플럭스 비의 영향이 더 큰 것으로 측정되었다.

### 후 기

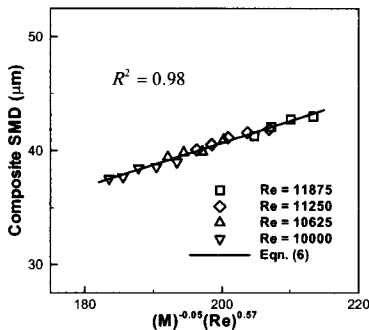
본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실과제, "과제번호 : M1-0104-00-0058"과 소형위성 발사체 개발사업 위탁과제, "과제번호 : M1-02-DF-00-0001-02-D06-00-001-1-14"의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

### 참고문헌

- 1) Bayvel, L., and Orzechowski, Z., *Liquid Atomization*, Taylor & Francis, 1993.
- 2) Strakey, P., et al., "Mixing Characteristics of Coaxial Injectors at High Gas/Liquid Momentum Ratios," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 17, No. 2, March - April 2001, pp. 402 - 410.
- 3) Rahman, S., *Primary Atomization Study of a*



(a) Shear Coaxial Sprays



(b) Swirl Coaxial Sprays

Fig. 9. Correlations of Composite SMD for Gas/Liquid Coaxial Sprays with  $M$  and  $Re$

*Swirl Coaxial Liquid Propellant Rocket Injector*, Ph.D. Thesis in Mechanical Engineering, The Pennsylvania State University, 1997.

4) Hardalupas, Y. and Whitelaw, J., "Characteristics of Sprays Produced by Coaxial Airblast Atomizers", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 10, No. 4, July - Aug. 1994, pp. 453 - 460.

5) Bazarov, V., "Self-Pulsations in Coaxial Injectors with Central Swirl Liquid Stage", *AIAA 95-2358*, July 1995.

6) Sridhara, S. and Raghunandan, B., "Studies on the Performance of Airblast Atomizer under Varying Geometric and Flow Conditions", *AIAA 99-2460*, June 1999.

7) White, F., *Fluid Mechanics*, 4th ed., McGraw-Hill, 1999.

8) Woodward, R., *Primary Atomization of*

*Liquid Jets Issuing from Rocket Engine Coaxial Injectors*, Ph.D. Thesis in Mechanical Engineering, The Pennsylvania State University, 1993.

9) Lasheras, J. and Hopfinger, E., "Liquid Jet Instability and Atomization in a Coaxial Gas Stream", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2000, pp. 275 - 308.

10) Reitz, R. and Bracco, F., "Mechanism of Atomization of a Liquid Jet", *Phys. Fluids*, Vol. 25, 1982, pp. 1730 - 1742.

11) Turns, S., *An Introduction to Combustion : Concepts and Applications*, 2nd ed., McGraw-Hill, 2000.

12) Zaller, M. and Klem, M., "Shear Coaxial Injector Spray Characterization", *Liquid Rocket Engine Combustion Instability*, AIAA, 1995, pp. 191 - 213.