

# 광학계측기법에 의한 비충돌형 인젝터의 거시적 분무거동 고찰

김종현\* · 정 훈\* · 김정수\*\*†

## An Investigation on the Macroscopic Spray Behavior of Nonimpinging-type Injector through Optical Measurement Technique

Jong Hyun Kim\* · Hun Jung\* · Jeong Soo Kim\*\*†

### ABSTRACT

This study is an investigation on macroscopic spray behavior of nonimpinging-type injector equipped on the hydrazine thruster under development. An electron microscope is employed for the acceptance examination of injector orifice. Initial performance characteristics and spray behavior of injector are observed through the instantaneous spray images which are captured by high speed camera and Schlieren method with varying injection pressures. The injector performance is scrutinized by the velocity along with penetration length of spray and categorized by dimensionless parameters. It is confirmed that there exist varying characteristics related to the spray breakup caused by fabrication errors of injector-orifices. Unexpected spray behavior, which needs to be reexamined, is grasped at specific pressure level, as well.

### 초 록

본 연구팀에서 개발 중인 중형급 하이드라진 추력기에 장착되는 비충돌형 인젝터의 거시적 분무거동을 관찰하였다. 전자현미경을 이용하여 인젝터 오리피스의 인수검사를 수행하였으며, 솔리렌 기법과 고속카메라로 획득한 순간 분무이미지를 통하여 압력변이에 따른 인젝터의 초기 동작특성 및 분무성능을 확인하였다. 또, 분무침투거리에 따른 속도와 무차원 매개변수를 이용하여 인젝터의 성능을 검증하였다. 인젝터 오리피스의 가공오차에 의한 분무분열 특성 차이가 확인되었으며, 특정 압력수준에서 이상 분무거동이 관찰되었다.

Key Words: Hydrazine Thruster(하이드라진 추력기), Injector(인젝터), Initial Performance Characteristics(초기동작특성), Spray Penetration Length(분무침투거리)

\* 부경대학교 대학원 에너지시스템공학과

\*\* 부경대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

단일액체추진제(liquid-monopropellant) 하이드라진( $N_2H_4$ ) 추력기는 비추력(specific impulse), 추력조절(throttling) 능력, 추진제 저장성, 배기 오염성, 시스템 중량 등에서 보이는 우수한 성능 특성으로 인하여 우주비행체(발사체, 인공위성, 외대기권 요격체(EKV), 행성간 탐사선 등)의 속도/자세 제어 측면에 있어 많은 장점을 제공한다. 또한, 로켓엔진 관련 기술 선진국에서는 이미 30,000기 이상의 하이드라진 추력기가 우주비행체에 활용되어 그 임무수행능력과 신뢰도가 검증되었다[1,2]. 이에 따라 본 연구팀은 중·대형급 하이드라진 추력기의 체계소요에 대비하여, 공칭추력 4.5 N급 추력기(MRE-STD-1)의 연소실에서 발생하는 인젝터 분무의 공간분포/미립화 특성 규명과 함께 핵심부품 성능평가기술을 구축하여 왔다[3-5]. 우주비행체의 자세제어 및 궤도기동용으로 사용되는 추력기는 정상상태 연소 모드(steady state firing mode)와 펄스 연소 모드(pulse firing mode)로 작동하게 되며, 인젝터의 초기 동작특성은 추력기의 반응시간 및 작동 신뢰도에 직접적인 영향을 미친다[2]. 따라서, 인젝터의 추진제 주입압력에 따른 분무의 패턴, 침투거리(penetration length), 속도 등의 초기 동작특성 검증시험은 엔진 개발과정에서 반드시 필요한 절차이다.

Gunder와 Friant[6]의 연구에서 분사노즐 입구의 형상과 위치가 유동특성(충류/난류, 공동현상 발생여부) 및 미립화특성 등에 지대한 영향을 미친다는 사실이 확인 되었다. 본 연구팀은 인젝터 노즐 오리피스 중심축을 따라 수행한 실험에서 액적이 분무하류로 진행하면서 분사압력에 종속된 속도가 역전되는 현상을 확인하고, 레이저를 이용한 분무가시화를 통하여 유동의 주기적인 홀림현상의 존재를 관찰하였다. 또한, 비간섭적 방법에 의한 분사각 관련 인젝터 성능평가 기법을 수립하였으며, 슈퍼드릴 방전가공(super-drill EDM)에 의하여 그 오리피스가 제작된 70 N급 인젝터의 인수시험을 기수행하기도 하였다[7,8].

본 연구에서는 선행연구에 더하여 현재 개발 중인 70 N급 하이드라진 추력기에 장착되는 비

충돌형 인젝터의 초기 동작특성 및 분무거동을 고찰하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

분무발생장치(Spray Generation System, SGS), 추진제 공급장치, 유량계, 고속카메라, 그리고 슐리렌(Schlieren) 장치 등으로 구성되는 실험장치를 Fig. 1에 도시하며, 슐리렌 장치는 할로겐 램프를 광원으로 사용하고, 핀홀, 오목거울 한쌍, 직경 6 mm의 링에지(ring edge)로 구성된다. 인젝터 오리피스는 드릴가공(drilling)으로 제작되었으며, 실험에 사용된 인젝터의 형상 및 분무패적을 Fig. 2에 도시한다. 인젝터는 총 36개의 오리피스로 구성되며, 3개의 열로 나뉘어져 배열된다. 실제 추력기의 연료로 공급되는 하이드라진은 실험실 단위 연구에서 취급되기에 많은 제약이 따른다. 따라서 하이드라진과 물성치가 매우 유사하고, 고압 분사 시험시 정전기에 의한 액적의 이상거동을 방지할 수 있는 이온 제거수

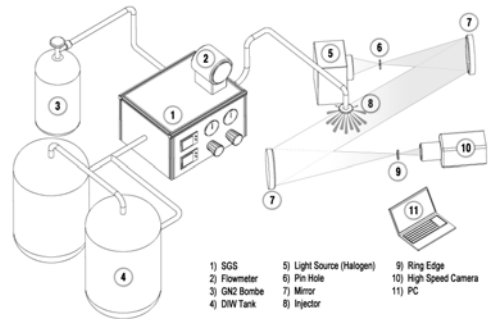


Fig. 1 Schematic diagram of the experiments

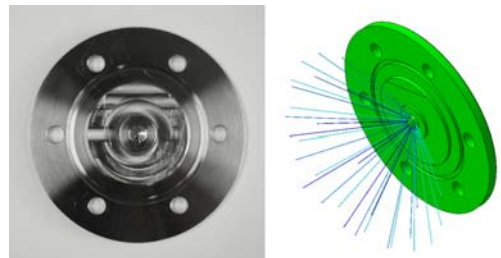
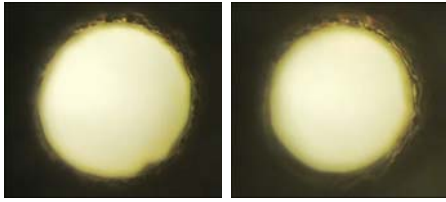
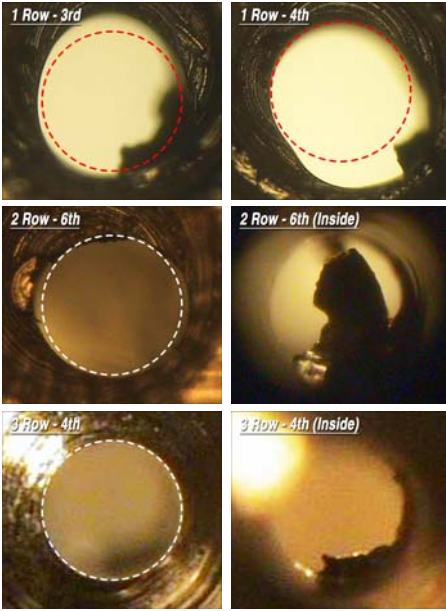


Fig. 2 Configuration of 70 N-class injector



(a) Super-drill EDM (orifice inside)



(b) Drilling

Fig. 3 Inspection Results: Completion for Fabrication of Injector Nozzle Orifice

(Deionized Water, DIW)를 작동유체로 사용하였다. 추진제 공급장치에서 기체질소로 가압된 DIW는 분무발생장치를 통하여 대기(atmosphere) 중으로 분사된다.

인젝터 분무의 초기 동작특성을 솔리덴 장치를 이용하여 가시화하고, 압력변이에 따른 분무액적의 침투거리, 속도 등을 산출하였다. 이때, 분사압력은 실제 추력기의 작동압력인 0.24 - 2.31 MPa로 설정하였으며, 순간 분무이미지 획득율은 5,000 fps, 촬영소자 노출시간은 4  $\mu$ s로 실험을 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

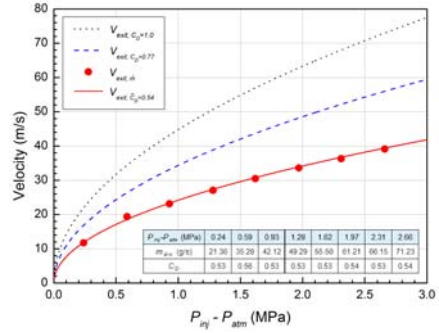
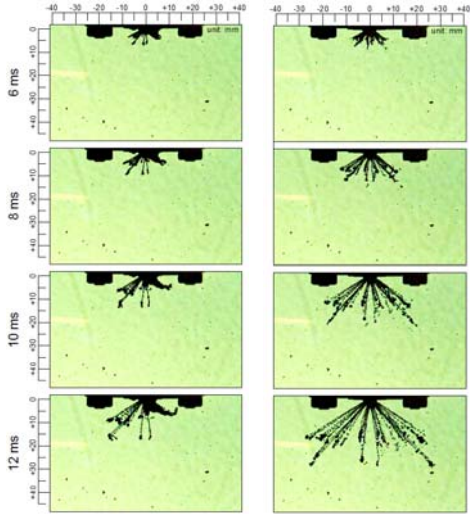


Fig. 4 Predicted velocities of the injector-spray droplets at the orifice exit

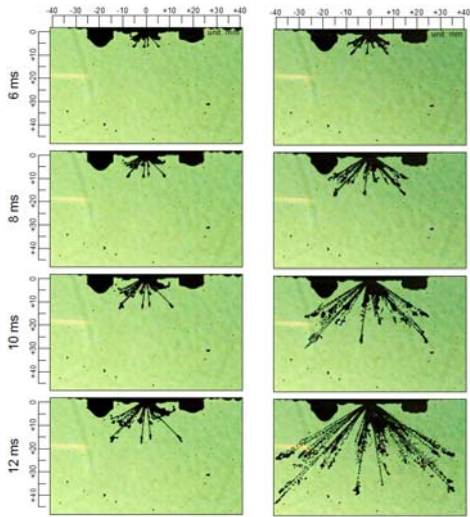
수류시험에 앞서 인젝터 오리피스의 가공완성도 평가를 위하여, 전자현미경을 이용하여 각각을 정밀 촬영하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 요약한다. 1열과 2열은 600 배율로 촬영하였으며, 3열은 인젝터 형상의 제약으로 인하여 200 배율의 렌즈로 이미지를 획득하였다. Fig. 3(b)에서 확인할 수 있듯이 3열의 경우 오리피스 입구에서 보이는 버(burr)를 제외하고는 비교적 양호하게 가공된 형상을 보이고 있다. 반면, 1열과 2열의 경우는 그 단면이 원형이 아닐 뿐더러 오리피스 내부유동을 방해하는 주요인인 버가 다량 존재한다. 드릴가공을 통한 오리피스 가공은 슈퍼드릴 방전가공에 비해 우수한 표면조도를 얻을 수 있다는 장점이 있기는 하지만, 내부에 부득이하게 잔재되는 버에 의해서 분무간 균일성 확보 측면에서 불리한 것으로 판단된다. 불규칙적인 인젝터 오리피스의 배열 및 버의 존재는 분무의 비균일성을 유발하여, 추력기 전체 시스템의 성능저하라는 결과를 초래할 수 있다. 따라서, 오리피스 간 가공완성도 수준을 유사하게 유지할 수 있도록 가공방법에 대한 개선과 함께 내부에 잔존하는 버를 제거할 수 있는 추가적인 방법도출이 요구된다.

추진제 주입압력( $P_{inj}$ )에 따른 인젝터 유량성능을 평가하였으며, 그 결과로부터 도출한 유량계수 및 오리피스 출구속도 등을 Fig. 4에 나타낸다. 인젝터 분무의 출구속도 계산에 사용된 식은 다음과 같다.

$$V_{exit} = C_D \cdot \sqrt{2(P_{inj} - P_{atm})/\rho_l} \quad (1)$$



(a)  $P_{inj} = 0.24$  MPa (b)  $P_{inj} = 0.93$  MPa



(c)  $P_{inj} = 1.62$  MPa (d)  $P_{inj} = 2.31$  MPa

Fig. 5 Instantaneous images of initial spray behavior with varying injection pressures

$$\frac{1}{C_D} = \frac{1}{C_{D_{max}}} + \frac{20}{Re} \left( 1 + 2.25 \frac{l_0}{d_0} \right) \quad (2)$$

$$C_{D_{max}} = 0.827 - 0.0085(l_0/d_0) \quad (3)$$

$$Re = \rho V_{exit} d_0 / \mu_l \quad (4)$$

Equation 2는  $l_0/d_0$ 가 2 - 10, Reynolds 수 ( $Re$ ) 10 - 20,000의 범위에서 적용 가능하며, 공

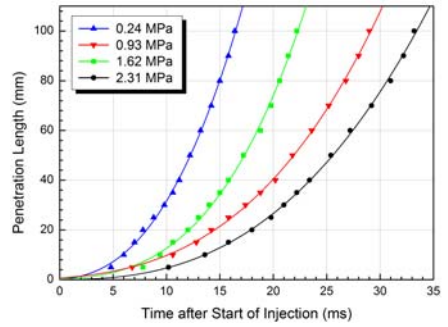


Fig. 6 Distribution of spray penetration length according to injection pressures (orifice 3R-6th)

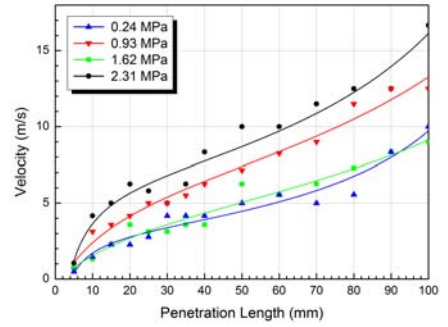


Fig. 7 Effects of pressure variation on the spray velocity along with penetration length (orifice 3R-6th)

동현상이 발생하는 경우에는 그 정확도를 보장할 수 없다. Fig. 4는 실험을 통하여 산출된 유량계수와 더불어 이론식 및 경험식에 근거한 유량계수( $C_D = 0.77$ )에 따른 속도를 나타낸다. 당연히,  $V_{inj, C_D=1}$ 의 경우 다른 유량계수가 적용된 속도보다 상대적으로 빠름이 확인된다. 이는 내부유동의 비가역적 요소가 고려되지 않은 베르누이방정식에 근거한 결과이기 때문이다. 또한, 실험값과 경험식에 의한 값이 다소 차이를 보이고 있는데 이는 인젝터 내부유동에서 발생하는 공동현상에 의한 결과로 판단된다.

압력변이에 따른 분무발달 이미지를 Fig. 5에 도시한다. 공급압력의 증가에 따라 분무의 침투 거리가 증가하는 것을 확인할 수 있으며 이는 증가된 압력에 의해 전달되는 운동량이 증대된 결과이다. 하지만 Fig. 5(c)의 경우 공급압력이

증가하였음에도 불구하고 Fig. 5(b)에 비해 그 발달정도가 저조한 것으로 보이며, 이에 대한 명확한 분석을 위하여 해당 압력구간 근처에서의 추가적인 실험이 요구된다. Fig. 6, 7에 시간에 따른 분무침투거리 및 구간별 속도를 도시한다. 시간이 경과함에 따라 모든 압력에서 가속이 되는 것을 확인할 수 있으며,  $P_{inj} = 1.62$  MPa의 경우 오리피스 출구근처에서부터 그 속도가  $P_{inj} = 0.93$  MPa보다 느린 비정상적 현상이 발생하고 있다. Fig. 5(a), (c)에서 분무가 비대칭적으로 발달되는 것을 볼 수 있듯이 인젝터 스크린이 위치하게 되는 5 mm 구간에서 최초로 분사되는 액적들이 중합(coalescence)되어 분무의 발달을 지연시킨다. 비대칭적 분무발달의 원인은 인젝터 내부에 잔재된 버와 비대칭적으로 가공된 인젝터 오리피스의 영향으로 간주된다. 이러한, 오리피스 간 가공오차는 비대칭적 분무 발생의 원인으로 작용하여 추력기의 작동성능을 저하시킨다.

0 - 100 mm 구간에서의 평균 가속도 및 정상상태 도달시간을 Table 1에 나타낸다. 인젝터 오리피스 출구의 속도가 이론적으로 산출된 출구속도와 동일하게 되는 시점을 분무가 정상상태에 이르는 시간으로 가정하였을 경우,  $P_{inj} = 1.62$  MPa의 분무가 정상상태까지 발달하는데 걸리는 시간이 다른 압력대와 비교하여 분명한 차이를 보인다. 초기 분무발달과정에서의 발달지연은 정상상태 도달시간에 영향을 미치지만 분무의 완전발달 이후 속도는 공급압력에 따라 증가하는 것을 알 수 있다.

분무의 특성을 고찰하기 위하여 Weber 수, Reynolds 수를 바탕으로 분무 침투거리에 따른 미립화 특성을 고찰하였다. 제트유동은  $Re$ 가 2,000 - 10,000 이상일때 난류 영역에 속하고, 미립화 성능을 판단하는 기준인 제트 Weber 수 ( $We$ ) 및 액체분류 Weber 수( $We_g$ )는 각각 1차분열(primary breakup) 그리고 2차분열(secondary breakup) 성능을 대변하는 척도이다 [9].  $We$  그리고  $We_g$ 는 다음과 같이 정의되며 실험적 제약으로 인해 액경 측정 정확도가 불확

Table 1. Predicted time to reach fully developed spray according to the pressure variation

Parameter	$P_{inj}$ (MPa)			
	0.24	0.93	1.62	2.31
$V_{exit}$ (m/s)	11.73	23.12	30.47	36.32
$\bar{a}^*$ (m/s <sup>2</sup> )	343.3	528.29	456.52	1088.3
$t_{steady}$ (ms)	3.4	4.3	6.7	3.3
$V_{steady}^*$ (m/s)	13.67	30.71	42.02	49.89

\*Section: 0 - 100 mm

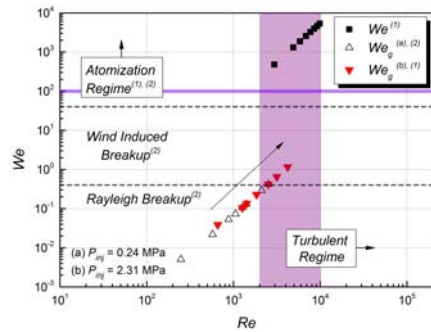


Fig. 8 Categorization of spray-flow regime by the interrelation of  $Re - We$  and  $Re - We_g$

실험에 특성길이는 오리피스 직경을 이용하였다.

$$We = \rho_w V^2 L / \sigma_w \quad (5)$$

$$We_g = \rho_g V^2 L / \sigma_w \quad (6)$$

$We$  분류(가로 실선)에 의하면 개발모델 인젝터는 분사압력에 상관없이 액적의 1차분열이 활발하게 발생하는 미립화 영역 범주로 구분되는 것이 확인된다. 실험에 사용된 인젝터는 그 전체 조립품의 구조상 액적과 주변공기 간의 상호작용에 의해 발생하는 2차분열 보다는 1차분열 성능이 절대적으로 중요하지만, 인젝터의 총체적 성능평가를 목적으로 2차분열 성능 또한 고찰하였다. 2차분열 성능은 Ranz[10]에 의해 정의된 기준을 사용하였으며, 그 경계(Rayleigh-Wind Induced-Atomization)는 수평 파선 형태로 그림에 표시하였다. 정지상태로부터 분사된 액적이 정상상태에 이르기까지 즉, 분무이동거리가 증가



함에 따라 그 속도가 점차 증가하면서 액적의 2차분열 가능성도 높아지는 것이 그림에서 관찰되며, 최저/최고 분사압력 모두 그 범주가 Rayleigh 모드에서 Wind Induced 영역으로 천이되는 수준이며, 그 난류강도 또한 천이구간에 속해있는 정도이다.

#### 4. 결 론

70 N급 하이드라진 추력기에 장착되는 비충돌형 인젝터의 초기 동작특성 규명을 위한 연구를 수행하였다.

인수시험을 통하여 드릴가공에 의한 인젝터의 가공성을 판단하였으며, 오리피스 내부에 존재하는 다량의 버와 불규칙적인 오리피스 배열이 관찰되었다. 오리피스 내부에 잔재된 버는 공동현상을 유발시키고, 비대칭적인 분무성능을 야기시키게 되므로 인젝터 가공방법 개선이 필요하다. 또, 분사압력 증대에 따라 초기 분무속도가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 특정 압력수준에서의 비정상적인 분무거동이 관측되었다. 실험에 사용된 인젝터의 성능평가 기준인 1차분열 특성은 미립화 영역에 속하는 것이 확인되며, 2차분열 성능은 액적분열 관점에서 그리 높지 않았다.

#### 후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부 우주핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행되었음(No. 20110020890).

#### 참 고 문 헌

1. 김정수, 정훈, 감호동, 서항석, 서혁, "우주비행체 웨도기동/자세제어용 추력기의 개발과 발사체에의 활용현황," 한국추진공학회지, 제14권, 제6호, 2010, pp.103-120
2. 김정수, "단일액체추진제 소형 추력기의 진

공환경 연소시험 및 성능특성 평가," 한국추진공학회지, 제8권 제4호, 2004, pp.84-90

3. Kim, J. S., Park, J., Kim, S., Choi, J., and Jang, K. W., "Test and Performance Evaluation of Small Liquid-monopropellant Rocket Engines," AIAA-2006-4388, 2006
4. 정훈, 김정수, "소형 액체로켓엔진 인젝터 분무의 연료분사압력 변이에 따른 액적의 공간분포 특성," 한국추진공학회지, 제12권, 제5호, 2008, pp.1-8
5. Kim, J. S. and Kim, J. S., "A Characterization of the Spray Evolution by Dual-mode Phase Doppler Anemometry in an Injector of Liquid-propellant Thruster," J. of Mechanical Science and Technology, Vol. 23, No. 6, 2009, pp.1637-1649
6. Gunder, D. F. and Friant, D. R., "Stability of Flow in a Rocket Motor," J. of Applied Mechanics (ASME), Vol. 17, No. 3, 1950, pp.327-333
7. Kim, J. S. and Kim, J. S., "A Characterization of the Spray Evolution by Dual-mode Phase Doppler Anemometry in an Injector of Liquid-propellant Thruster," J. of Mechanical Science and Technology, Vol. 23, No. 6, 2009, pp.1637-1649
8. Jung, H., Kim, J. H., and Kim, J. S., "Spray Characteristics under Various Injection Conditions for a Nonimpinging-type Injector Utilized in 70 N-class Hydrazine Thruster," AJCPP2012-141, 2012
9. R. J. Kenny, M. D. Moser, J. Hulka and G. Jones, "Cold Flow Testing for Liquid Propellant Rocket Injector Scaling and Throttling," 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA-2006-4705
10. Ranz, W.E., "On Sprays and Spraying," Department of Engineering Research, Pennsylvania State University, Bulletin 65, 1956