

스월 인젝터의 작동조건 및 인젝터 형상에 따른 분무특성

The Effects of Operating Conditions and Injector Geometry on the Spray Characteristics of Swirl Injectors

김동준 · 임지혁 · 한풍규 · 윤영빈*

D. J. Kim, J. H. Im, P. G. Han, Y. B. Yoon

Abstract

The flow characteristics of a swirl injector were investigated with the variation of the flow condition and geometric dimensions, such as orifice length for considering the viscous effect and tangential entry port area for considering the swirl intensity. The liquid film thickness strongly influencing on the formed drop size of the spray was measured using a new technique. The film thickness measurement technique proposed here, used the attenuation of fluorescence signal near the injector exit. The breakup length that is important for the flame location as well as the spray cone angle which influences on the ignition performance was measured using a backlit stroboscopic photography technique. From the experimental results, it is found that an increase in injection pressure decreased the film thickness and breakup length, and also enlarged the spray cone angle. A decrease in orifice length and tangential entry port area has a similar tendency of thinner film thickness, shorter breakup length and larger spray cone angle. In the present study, we proposed empirical models of the flow characteristics of the swirl injectors.

주요기술용어(Key Words) : swirl injector(스월 인젝터), film thickness(필름두께), breakup length(분열길이), spray cone angle(분무각)

기호설명			
t	액체 필름두께	P	분사압력
q	분무각	m	점성
d	지름	U	속도
l	길이	s	표면장력
A	면적	We	Weber 수 ($=\rho U^2 d / \mu$)
m	질량		
ρ	밀도	<u>하첨자</u>	
		L	액체
		g	기체
		p	탄젠트 유입구
		O	오리피스
		s	스월 챔버

* 서울대학교 기계항공공학부

1. 서론

스웰 인젝터는 미립화 성능이 좋고, 연소불안정성이 작은 장점이 있으므로 로켓엔진, 가스터빈엔진 등에 많이 사용된다[1]. 스웰 인젝터는 스크류나 탄젠트 유입구를 사용하여 스웰 방향의 유동을 생성시킨다. 스웰 방향의 속도가 크기 때문에 오리피스 내부에서는 중앙부에 air core가 형성되며, 축방향 속도와 스웰 방향의 속도 성분의 비에 해당하는 분무각을 가지며 분사된다. 따라서, 일반적으로 스웰 분무의 유량 계수는 매우 낮은 값을 가진다.

스웰 분무의 분무 조건과 형상에 따른 미립화 특성과 분무 특성에 대하여 많은 연구가 이루어져 왔지만, 모든 영향을 고려한 확실한 모델들이 제시되지 못하고 있는 실정이다. Taylor[2]는 포텐셜 유동으로 가정하여 비점성 이론을 통하여 film 두께와 분무각이 선형적인 관계가 있음을 유도하였다. Giffen and Muraszew[3]는 역시 비점성 이론을 바탕으로 유량 계수, 분무각, film 두께 등의 분무 특성이 인젝터 상수, $K=A_p/D_s d_o$ 만의 함수로 표현하였다. 하지만, 그들의 이론적 전개는 비점성으로 가정하였고, 분사압력과 액체 물성치 등에 무관한 한계를 가지고 있다. 최근에 Rizk and Lefebvre에 의해서 스웰 분무의 내부 및 외부 유동 특성에 대해서 많은 연구가 진행되었다[1][4][5].

본 연구에서는 분사압력과 오리피스 길이, 탄젠트 유입구 면적의 변화에 대하여 film 두께, 분무각을 측정하였다. 본 연구의 최종 목적은 이러한 실험 결과를 바탕으로 여러 가지 분무 특성에 대하여 실제 스웰 인젝터 설계에 유용한 데이터를 제공하는 empirical 관계식을 제시하고자 한다.

2. 실험장치

본 연구는 로켓용 스웰 인젝터의 분무특성에 초점을 맞추고 있으며, 로켓용 스웰 인젝터는 고압분사이고, 흔히 사용되는 동축형 인젝터에서 추진제의 혼합과 구조상의 문제로 수렴부가

없는 직선형을 흔히 사용한다. 실험에 사용된 인젝터는 형상에 따른 분무특성을 실험하기 위해 Fig. 1에서 보는 바와 같이 탄젠트 유입구, 오리피스, 덮개의 3부분으로 구성되어 있다. STME 혼합 연구에 따르면 3개의 탄젠트 유입구가 가장 좋은 특성을 보인 것으로 알려져 있으므로[6], 3개의 탄젠트 유입구로 제작하였다. Dimensional analysis로부터 2개의 기하학적 변수를 설정하였는데, 오리피스내에서 점성의 영향을 고려하기 위하여 오리피스 직경에 대한 길이비(l_o/d_o), 그리고 스웰 강도를 고려하기 위하여 탄젠트 유입구 직경의 변화에 따른 오리피스 출구 면적에 대한 탄젠트 유입구 면적비(A_p/A_o)를 변수로 결정하였다. 모든 경우에 대하여 오리피스 직경의 크기는 4mm로 고정되었으며, l_o/d_o 와 A_p/A_o 의 변화는 Table 1과 같다.

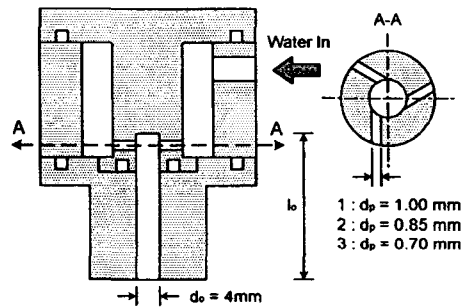


Fig. 1 Schematics of swirl injectors

Table 1 Geometric dimensions of injector

l_o/d_o	A_p/A_o	d_o [mm]	d_p [mm]
5	0.1875	4	1.00
7.5			
10			
15			
20			
7.5	0.1355	4	0.85
	0.0919		0.70

분무 형상, 분열 길이, 분무각을 측정하기 위하여 shadowgraphy 방법을 이용하였다. 시험 유체로 물을 사용하였으며, 0.6 - 6.6 bar의 압력 변화에 따라 유량은 10 - 50g/s 정도로 변화하였다. Film 두께 측정을 위하여, 형광 신호

의 감쇠를 이용한 새로운 방법을 제시하였다. 알려진대로 형광 신호는 분무 체적에 비례한다. 시험 유체로는 물과 에탄올을 4:1로 혼합한 용액에 fluorescein (Aldrich F245-6, C₂₀H₁₂O₅)을 30mg/l의 비율로 용해시켰다. 광원으로 Ar-ion 레이저(514nm, SpectraPhysics)가 사용되었으며, 일련의 cylindrical 렌즈를 이용하여 0.2mm 정도의 평면광을 수직으로 조사하였다. 산란 신호를 걸러내고 형광 신호만을 획득하기 위하여 550nm long-pass cutoff 필터를 사용하였다. 그리고 신호의 검출을 위하여 CCD 카메라와 Nikkor 렌즈용 Tele Converter를 이용하여 3μm/pixel의 해상도를 얻었다.

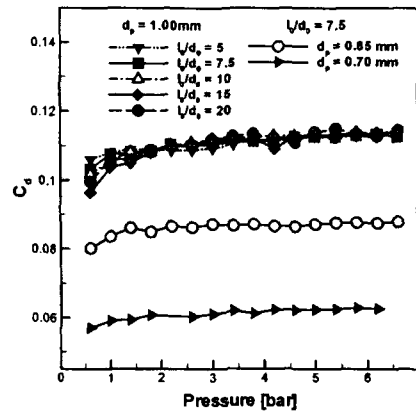
3. 유량계수

일반적으로 스윙 인젝터의 유량 계수는 air core로 인하여 매우 낮은 값을 가진다. 낮은 Re에서는 점성의 영향으로 인하여 film 두께를 두껍게 하여 유량 계수가 커지지만, 일반적으로 실제로 많이 사용하는 3000 이상의 Re에서는 유량 계수는 Re에 무관하다[1]. Giffen and Muraszew[3]는 비점성 이론에 의하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

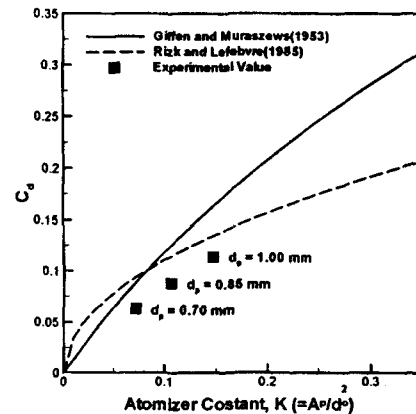
$$C_d = 1.17 \left[\frac{(1-X)^3}{1+X} \right]^{0.5} \quad (1)$$

여기서, X는 오리피스 출구 면적에 대한 air core 면적비(A_{ac}/A_o)이고, 최대 유량조건에 따라 X는 인젝터 형상변수와 관련이 있다. 따라서 유량 계수가 인젝터 형상에 따라 결정된다. Rizk and Lefebvre[4]는 또한 인젝터 형상변수에 따라 유량 계수를 식(2)와 같이 제시하였다.

$$C_d = 0.35 \left(\frac{A_p}{D_s d_o} \right)^{0.5} \left(\frac{D_s}{d_o} \right)^{0.25} \quad (2)$$



(a)



(b)

Fig. 2 Discharge coefficients of swirl injectors used in experiments: (a) According to the injector geometry and injection pressure (b) Comparison with previous studies

Fig. 2의 각 경에 대하여 유량 계수를 나타내고 있는데, 매우 낮은 값을 보여주고 있다.

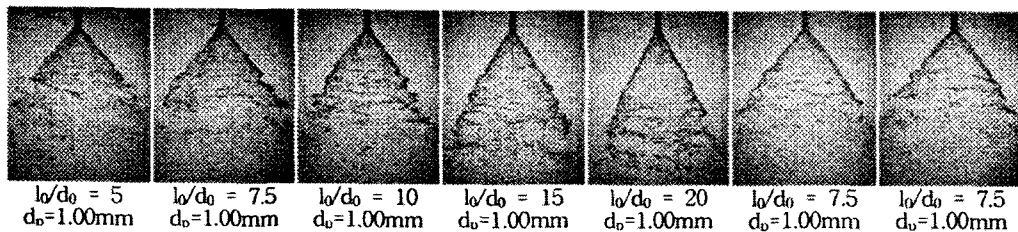


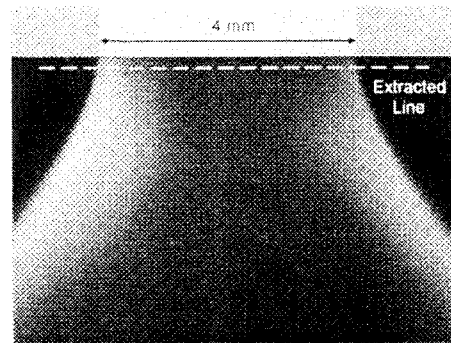
Fig. 3 Spray patterns with the variation of injector dimensions (injection pressure = 5.8 bar)

Fig. 2(a)에 따르면, 유량 계수는 오리피스 길이 변화에 따라서 거의 변하지 않으며, 이것은 본 실험의 Re가 15000-50000 정도의 값을 가지므로, Lefebvre[1]의 결론과 잘 일치하고 있다. 또한 탄젠트 유입구 면적이 감소함에 따라 유량 계수도 감소하고 있다.

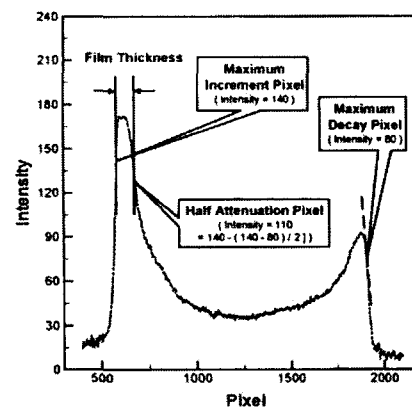
Fig. 3은 분사 압력이 5.8 bar 일때의 분무 형상을 보여주고 있다. 정성적으로 오리피스 길이가 길어짐에 따라 분무각은 작아지고, 분열 길이는 짧아지는 경향을 보여주고 있다. 또한, 오리피스 길이가 작을 때, 보다 작은 액적들이 발견되는 것으로 미루어 보아 film 두께가 작으리라 예상된다. 탄젠트 유입구의 면적이 감소할수록 분무각을 약간 더 증가하며, 분열 길이도 짧아지는 결과를 보여주고 있다.

4. 필름두께 측정

Film 두께는 분무 액적 크기와 직접적으로 연관이 있으므로 정확한 측정이 요구된다. Film 두께에 대하여 많은 측정 방법들이 제시되었지만, 아직까지 정확한 측정이 이루어지지 못하고 있다. Kutty 등.[7]은 분사압력이 air core 면적에 미치는 영향에 대하여 조사하기 위하여 카메라를 오리피스 출구로 향하도록 하여 이미지를 얻는 방법을 이용하였다. Suyari and Lefebvre[8]는 오리피스 내에 위치한 두 전극 사이의 conductance 측정을 통하여 air core 크기를 측정하였다. Jeng 등[9]은 오리피스 내부를 가시화할 수 있도록 큰 사이즈의 인젝터를 제작하여 직접 사진을 찍어 측정하였다. Cousin 등[10]은 인젝터와 probe 사이의 conductivity를 이용하여 probe가 액체와 접촉하고 있는지, air core 내부에 있는지를 결정하여 film 두께를 측정하였다. 하지만 이러한 방법들은 실험을 위하여 특별히 제작된 인젝터에만 적용이 가능하거나, 큰 사이즈의 결과들이 실제 사용하는 크기의 인젝터에 바로 적용하지 못하는 단점들을 가지고 있다.



(a)

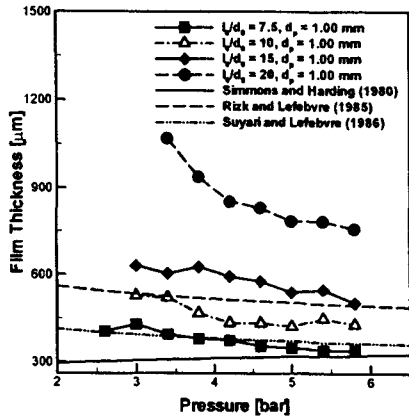


(b)

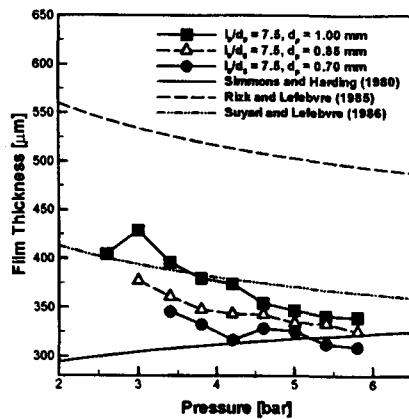
Fig. 4 Measurement principle of film thickness: (a) fluorescence image (b) extracted intensity profile near the orifice exit ($z=0.12\text{mm}$) and measurement principle

본 논문에서는 형광 신호의 감쇠를 이용한 새로운 film 두께 측정방법을 제시하였다. Fig. 4(a)에 위에서 언급한 실험 장치를 이용하여 왼쪽에서 레이저가 조사된 분무의 형광 이미지를 나타내었는데, 왼쪽의 sheet에 의하여 형광 신호의 강도가 감쇠된 것을 볼 수 있다. Fig. 4(a)로부터 노즐 근처에서 추출된 강도 분포와 측정 원리를 Fig. 4(b)에 나타내었다. 양쪽 sheet의 바깥쪽 경계는 최대강도차이가 나타나는 지점, 즉 최대강도증가 지점과 최대강도감소 지점으로 정하였다. 하지만, 양쪽 sheet의 안쪽 경계는 conical 형태의 분무에 의해서 감쇠되므로 그 경계를 결정하기가 어렵다. 감쇠가 없다면 양쪽 sheet의 바깥쪽 경계의 강도도 일치해야 하지만 실제 두 sheet을 지나면서 감쇠가 일어난다. 따라서 왼쪽 sheet의 안쪽 경계

를 하나의 sheet에 의한 감소에 따른 강도가 나타나는 지점으로 정하였다.



(a)



(b)

Fig. 5 Measured film thickness of swirl injectors: (a) according to the orifice length (b) according to the tangential entry area

여러 연구자들에 의하여 film 두께에 관한 식이 제시되었는데, 본 연구에서 새롭게 제안된 측정방법을 통한 실험 결과와의 비교를 위하여 아래에 연구자와 함께 식을 정리하였다. 특히 Suyari and Lefebvre[8]에 의해서 제시된 식은 Rizk and Lefebvre[4]에 의해서 유도된 식을 실험을 통하여 상수를 보정한 결과이다.

Rizk and Lefebvre[4]:

$$t = 3.66 \left[\frac{d_o \dot{m}_L \mu_L}{\rho_L P_L} \right]^{0.25} \quad (3)$$

Simmons and Harding[11]:

$$t = \frac{0.48 m}{d_o \cos \theta \sqrt{P_L \rho_L}} \quad (4)$$

Suyari and Lefebvre[8]:

$$t = 2.7 \left[\frac{d_o \dot{m}_L \mu_L}{\rho_L P_L} \right]^{0.25} \quad (5)$$

본 연구에서 제안된 측정방법을 통한 film 두께 결과가 분사압력에 따라 Fig. 5에 나타나 있다. 분사압력이 증가함에 따라 film 두께는 감소하고 있음을 알 수 있으며, 일반적으로 분사압력이 증가함에 따라 분사속도가 증가하면서 공기역학적 영향으로 미립화 성능이 우수하다고 알려져 있는데, film 두께의 감소에 의한 영향도 있으리라 판단된다. 또한 오리피스 길이가 길어지고 탄젠트 유입구의 면적이 증가함에 따라 film 두께는 증가하고 있다. 식(3)과 (5)는 실험결과와 경향성이 일치하고 있지만, 식(4)는 실험결과와 전혀 다른 경향을 나타내고 있다. 이것은 분사압력의 다른 분무각의 변화를 너무 크게 예측한 결과라고 판단된다. 실제 실험을 통해 보정된 식(5)와 상당히 잘 일치하고 있는 것으로 본 측정방법의 신뢰성을 얻을 수 있었다.

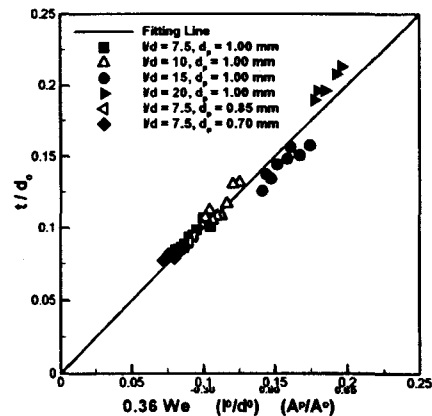


Fig. 6 Empirical relation of film thickness

Fig. 6에 실험결과로부터 얻어진 film 두께에 대하여 empirical 관계식을 구한 결과를 나타내었다. 일반적으로 많은 모델들은 분무 조건을

표현하기 위하여 Re를 주로 사용한다. 하지만, 본 연구에서는 점성의 영향이 l_0/d_0 에 포함되어 있고, 분무의 분열과정에서 표면장력은 중요한 물성치로 작용하고 있으므로 이를 포함하는 Weber number ($We = \rho_L U^2 d_0 / \sigma$)에 대하여 표현하였다. 그리고, 스웰 인젝터에서는 air core의 존재로 인해서 액체 sheet의 속도를 바로 계산하기가 힘들기 때문에 식(6)과 같이 effective 속도를 계산하여 We 수를 정의하였다. l_0/d_0 가 15와 20에서는 약간 일치하지 않는 경향이 보이지만, 이 조건에서는 실험이 행해진 분사압력 범위에서 분무가 full-developed되지 않은 결과라 판단된다. 전체적으로 film 두께는 오리피스 길이 변화에 가장 민감한 것을 알 수 있다.

$$U_{eff} = \frac{\dot{m}}{\rho(\pi/4)d_0^2} \quad (6)$$

$$\frac{t}{d_0} = 0.36 We^{-0.30} \left(\frac{l_0}{d_0}\right)^{0.80} \left(\frac{A_p}{A_o}\right)^{0.65} \quad (7)$$

5. 분열길이

스웰 인젝터로부터 분사된 액체 분무는 매우 복잡한 분열과정을 거치며, 지난 수십년 동안 스웰 분무의 분열현상은 가장 흥미로운 주제중의 하나였다. Han 등[14]은 Clark and Bombrowski[15]에 의한 평면 액체 sheet의 비선형 이론을 기본으로 하여 식(8)과 같이 원추형 스웰 분무의 분열길이를 예측할 수 있는 semi-empirical 관계식을 제안하였다.

$$L_b = C \left[\frac{\rho_L \sigma \ln(\eta/\eta_0) t \cos\theta}{\rho_g^2 U_L^2} \right] \quad (8)$$

여기서 C는 실험보정상수이며, Han 등[14]은 3을 사용하였으나, 본 연구에서는 0.82로 고정하여 실험결과와 비교하였다. 식(8)은 액체의 film 두께와 분무각을 알고 있어야 하며, 인젝터 형상을 고려하지 않고 있는 등 여러 가지

단점을 지닌다고 할 수 있다.

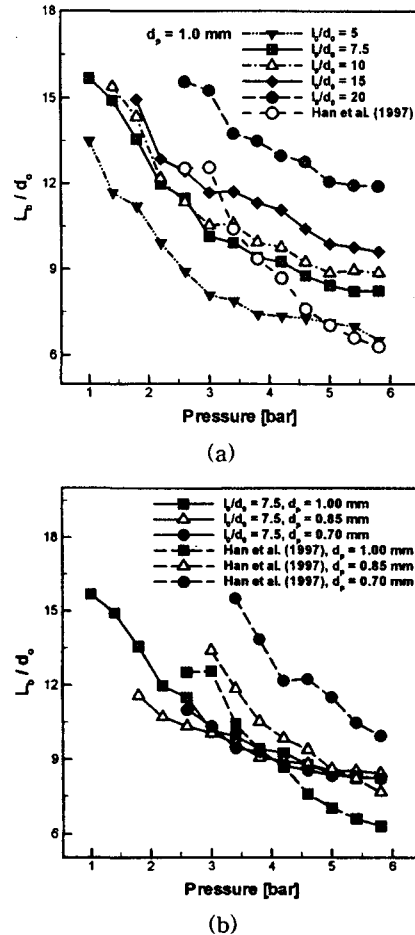


Fig. 7 Measured breakup length of swirl injectors: (a) according to the orifice length (b) according to the tangential entry area

Fig. 7은 분사압력과 인젝터 형상에 따른 스웰 분무의 분열길이를 나타낸 그림으로, 전체적으로 분사압력이 증가할수록 분열길이는 감소하고 있다. 그리고, Fig. 7(a)의 결과로부터 오리피스 길이가 짧을수록 분열이 일어나는 지점은 인젝터 면에서 가까워지고 있음을 알 수 있다. 이것은 두가지 요인으로 설명할 수 있는데, 첫째, 앞선 결과에 따르면 film 두께는 분사압력의 증가와 오리피스 길이의 감소에 따라 얇아지게 되는데, 얇아진 액체 sheet의 분열이 더 쉽게 일어날 수 있기 때문이다. 둘째로, 액체 sheet의 분열은 공기역학적 영향에 의해서 가속되게 된다. Takahashi 등[16]은 액체 sheet

에 수직인 방향의 속도 섭동에 의해서 분열이 일어난다고 보고하였는데, 이 속도 섭동은 wave의 진폭으로 표현된다. 따라서 분사압력이 증가하고, 오리피스 길이가 짧아질수록 이러한 진폭의 성장은 인젝터 면에서 가까운 위치에서 크게 성장하게 되므로 분열이 빨리 일어나게 되는 것이다. 본 실험결과와 Han 등[14]에 의한 예측결과와 비교해 보면, 분사압력에 따른 분열길이의 변화를 보다 크게 예측하고 있음을 알 수 있다.

탄젠트 유입구 면적에 따른 분열길이의 영향은 Fig. 7(b)와 같이 상대적으로 작은 것을 볼 수 있다. 탄젠트 유입구 면적이 작을수록 film 두께가 얇아지기 때문에 분사압력이 낮은 조건에서는 좀더 빨리 분열이 이루어진다. 흥미롭게도 Han 등[14]의 식에 의한 예측은 본 실험결과와 상반된 경향성을 보이고 있다. 이것은 식(7)이 인젝터 형상을 고려하지 않고 있기 때문에 유량의 변화에 따른 특성을 표현하지 못하기 때문이라고 생각된다.

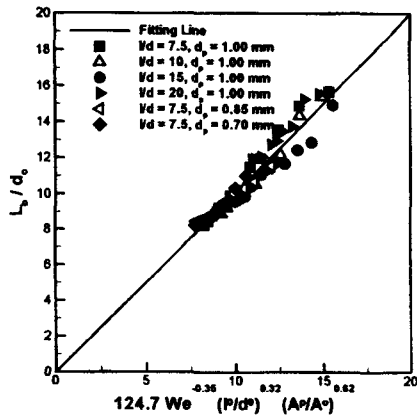


Fig. 8 Empirical relation of breakup length

스웰 분무의 분열길이에 대한 실험결과로부터 Fig. 8과 같이 empirical 관계식을 얻을 수 있었다. Fig. 7(b)에서와 같이 탄젠트 유입구 면적에 따라 분열길이의 변화 기울기 차이가 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 탄젠트 유입구의 면적에 따라 유량과 분사속도가 크게 바뀌게 되므로, 이 변수에 대한 지수가 크게 표현된 것을 알 수 있다.

$$\frac{L_b}{d_o} = 124.7 We^{-0.35} \left(\frac{l_o}{d_o}\right)^{0.32} \left(\frac{A_p}{A_o}\right)^{0.62} \quad (9)$$

6. 분무각

스웰 분무의 분무각은 연소 시스템의 점화 성능과 multi-element 인젝터의 상호작용에 큰 영향을 미치므로 중요한 분무 특성으로 작용한다. 분무각에 대해서도 이론적, 실험적으로 많은 연구가 이루어져 왔으며, Giffen and Muraszew[3]는 비점성 이론에 근거하여 분무 특성에 대한 일련의 이론적 결과로서 분무각에 대한 식을 식(10)와 같이 예측하였다. 그리고, Rizk and Lefebvre[4]는 오리피스 내의 유동이 압력과 점성의 영향을 받는다는 가정 아래 식(11)과 같이 제시하였다. 그들은 또한 추가적인 연구에서 분무 액체의 물성치 등을 고려한 식(12)를 제시하였다.

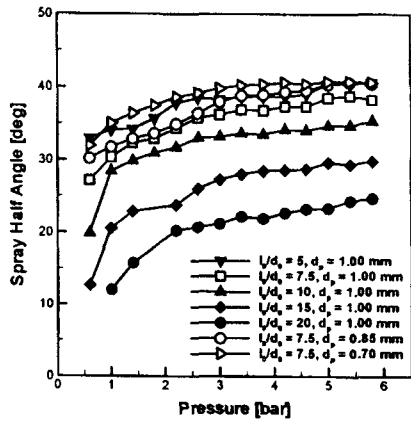
$$\sin \theta = \frac{\pi (1-X)^{1.5}}{2K(1+\sqrt{X})(1+X)^{0.5}} \quad (10)$$

$$\cos^2 \theta = \frac{1-X}{1+X} \quad (11)$$

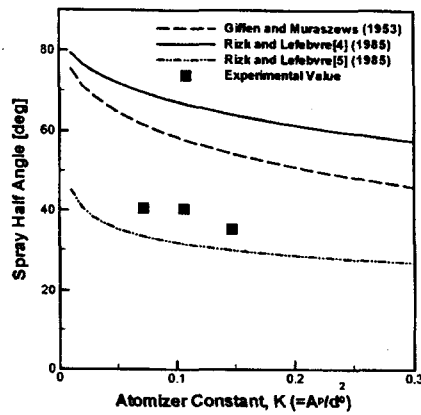
$$\theta = 3K^{-0.15} \left(\frac{P_L d_o^2 \rho_L}{\mu_L^2}\right)^{0.11} \quad (12)$$

Fig. 9은 분사압력과 인젝터 형상에 따른 분무각의 변화를 나타내고 있다. 상대적으로 낮은 압력 범위에서는 분무각이 상당히 크게 변화하고 있지만, 3bar 이상의 압력에서는 약간 증가할 뿐이다. 반면, 오리피스 길이에 따른 변화는 상당히 크게 나타나는데, 오리피스 길이가 짧아질수록 분무각이 커지고 있다. 또한 탄젠트 유입구 면적이 작아짐에 따라서도 분무각이 커지는 결과를 보인다. 앞에서 열거한 식(10)-(12)와의 비교도 Fig. 9(b)에 나타내었는데, 식(12)가 본 실험결과와 가장 유사한 값을 나타내고 있다. 하지만, 불행히도 본 실험 결과가 인젝터 상수, K에 따라 그 경향성을 예측하

기에 부족하기 때문에 보다 많은 연구가 있어야 할 것 같다.



(a)



(b)

Fig. 9 Measured spray cone angle of swirl injectors: (a) according to the injector geometry (b) comparison with previous studies

실험 결과로부터 얻은 분무각의 변화를 Fig. 10과 같이 empirical 관계식을 구해보았다. 전체적으로 경향성을 일치하지만, 오리피스 길이에 따른 분무각의 차이가 너무 커서 절대적인 값은 약간 분산된 결과를 보이고 있고, 오리피스 길이에 따라 가장 크게 변화하고 있는 것을 알 수 있다.

$$\sin \theta = 0.40 We^{0.15} \left(\frac{l_o}{d_o} \right)^{-0.48} \left(\frac{A_p}{A_o} \right)^{-0.28} \quad (13)$$

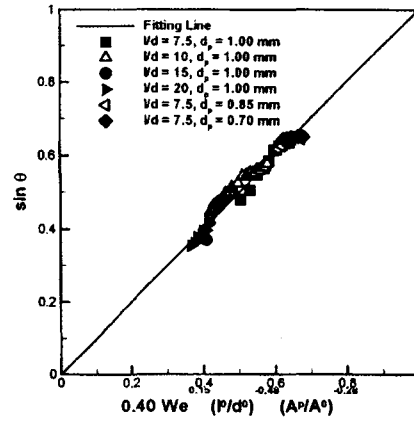


Fig. 10 Empirical relation on spray cone angle

7. 결론

스윙 인젝터의 작동조건과 인젝터 형상에 따른 분무특성 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Film 두께, 분열길이, 분무각 등과 같은 스윙 인젝터의 분무특성은 작동조건과 인젝터 형상에 큰 영향을 받는다.
2. 형광신호의 감쇠현상을 이용하여 film 두께 측정을 위한 새로운 방법이 제안되었다. Film 두께는 액체 sheet의 안쪽과 바깥쪽 경계 사이의 픽셀 차이로부터 결정된다.
3. 액체 film 두께는 분사압력의 증가와 오리피스 길이의 감소에 따라 두꺼워진다. 또한 탄젠트 유입구 면적이 감소할수록 film 두께는 얇아진다.
4. 분사압력이 증가하고, 오리피스 길이가 감소할수록 분열길이는 감소하고 있지만, 탄젠트 유입구 면적의 영향은 크지 않다.
5. 분무각은 작동조건과 인젝터 형상에 따라 큰 영향을 받고 있으며, 특히 오리피스 길이에 따른 변화가 크다.

후기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업

(M1-0104-00-0058)과 소형위성발사체(KSLV-I) 개발사업의 지원을 받아 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Lefebvre, A.W., *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- Taylor, G.I., "The Boundary Layer in the Converging Nozzle of a Swirl Atomizer", *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 3, Pt. 2., 1950.
- Giffen, E., and Muraszew, A., *The Atomization of Liquid Fuels*, Chapman & Halt Ltd., London, 1953.
- Rizk, N.K., and Lefebvre, A.H., "Internal Flow Characteristics of Simplex Swirl Atomizers", *J. Propulsion*, Vol. 1, No. 3., 1985.
- Rizk, N.K., and Lefebvre, A.H., "Prediction of Velocity Coefficient and Spray Cone Angle for Simplex Swirl Atomizer", *International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, 1985.
- Hulka, J., Schneider, J.A., and Davis, J., "Single Element Injector Testing for STME Injector Technology", *AIAA/SAE/ASME/ASEE 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, ms, Nashville, TN., July 6-8, 1992.
- Kutty, S., "Design and Prediction of Discharge Coefficient, Cone Angle and Air Core Diameter of Swirl Atomizers", *First International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Tokyo, Japan, Aug. 1978, pp. 93-100.
- Suyari, M., and Lefebvre, A.H., "Film Thickness Measurement in a Simplex Swirl Atomizer", *J. Propulsion*, Vol. 2, No. 6., 1986.
- Jeng, S.M., Jog, M.A., and Benjamin, M.A., "Computational and Experimental Study of Liquid Sheet Emanating from Simplex Fuel Nozzle", *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 2, 1998.
- Cousin, J., Vich, G., and Nally Jr. J.F., "Formation and Primary Breakup of Conical Liquid Sheets Discharged by Pressure Swirl Injectors. Experimental and Theoretical Investigation", *Eighth International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Pasadena, CA, USA, July 2000.
- Simmons, H., and Harding, C., "Some Effects of Using Water as a Test Fluid in Fuel Nozzle Spray Analysis", *ASME paper80-GT-90*, 1980.
- Yule, A.J. and Chinn, J.J., "Swirl Atomizer Flow: Classical Inviscid Theory Revisited", *6th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Rouen, France, July 1994, pp. 334-341.
- Ma, Z., Wang, D. and Jeng, S.M., "Internal Flow Study on Pressure-Swirl Atomizer", *ILASS Americas*, May 1999.
- Han, Z., Parrish, S., Farrell, P.V. and Reitz, R.D., "Modeling Atomization Processes of Pressure-Swirl Hollow-Cone Fuel Sprays", *Atomization and Sprays*, Vol. 7, No. 6, 1997, pp. 663-684
- Clark, C.J. and Dombrowski, N., "Aerodynamic Instability and Disintegration of Inviscid Liquid Sheets", *Proc. Roy. Soc. Lond. A.*, Vol. 329, 1972.
- Takahashi, F., Schmolli, W.J. and Dressler, J.L., "Characteristics of a Velocity-Modulated Pressure-Swirl Atomizing Spray", *J. Propulsion*, Vol. 11, No. 5, 1995.