

직접분사식 가솔린엔진용 고압 스윙분무의 액막두께 측정 및 해석

문석수* · Essam Abo-Serie** · 오희창* · 배충식**

Measurement and Analysis of Liquid Film Thickness of Pressure-Swirl Spray for Direct-Injection Gasoline-Engines

Seoksu Moon, Essam Abo-Serie, Heechang Oh and Choongsik Bae

Key Words: Pressure-swirl spray(고압스윙분무), Direct-injection spark-ignition engine(직접분사식 가솔린엔진), Liquid film thickness(액막두께)

Abstract

The liquid film thickness inside a pressure-swirl nozzle was measured, and then the measured liquid film thickness was compared with the results from previous empirical equations. The liquid film inside the nozzle was visualized using extended transparent nozzles and a microscopic imaging system, and then the measurement error was evaluated using optical geometry analysis. The high injection pressures up to 7MPa were adopted to simulate the injection conditions of the direct-injection spark-ignition engines. The totally different two injectors with different fuels, nozzle lengths, nozzle diameters and swirlers were utilized to obtain the comprehensive equations. The results showed that the liquid film thickness very slightly decreased at high injection pressures and the empirical equations overestimated the effect of injection pressure. Most of empirical equations did not include the effect of nozzle length and swirler angle, although it caused significant change in liquid film thickness. A new empirical equation was suggested based on the experimental results with the effects of fuel properties, injection pressure, nozzle diameter, nozzle length and swirler angle.

기호설명

A_p : 선회기 출구면적
 d_o : 노즐직경
 h : 액막두께
 l_o : 노즐 길이
 \dot{m}_l : 질량유량
 R : 노즐반경
 u : 분사속도

a : 선회각
 ΔP : 분사압
 μ_l : 연료점성
 θ : 분무각
 ρ_l : 연료밀도

1. 서 론

스윙분무는 직선방향의 운동량만을 가지는 분무형태에 비해 비교적 저압조건에서도 분무의 미립화를 향상 시킴으로써 지금까지 항공기와 자동차 내연기관에 많이 이용되어 왔다⁽¹⁾. 근래에 들어서는 직접분사식 가솔린 엔진이 도입되면서 기존의 항공기에 쓰였던 분사압력 조건보다 상대적으로 높은 분사압력을 적용한 스윙분무

(2007년 12월 15일 접수 ~ 2007년 12월 26일 심사완료)

*한국과학기술원

**Coventry University

†책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : csbae@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3044 FAX : (042)869-5044

가 이용되어왔다⁽¹⁾. 분무와 흡입유동, 피스톤 보울(bowl)의 상호작용을 통해 점화플러그 주변에 혼합기를 형성시키는 분무유도방식(wall-guided system)에서는 최대 7 MPa 정도의 분사압이 이용되었으나⁽¹⁾, 최근 균일혼합 연소만을 적용하는 직접분사식 엔진에서는 최대 10 MPa의 분사압이 적용되고 있다.

스웰분무 노즐 내부의 액막두께는 분사 후 액막의 분열 및 미립화 과정을 결정하는 중요한 인자이다. 또한 스웰분무 해석모델 또는 미립화 모델의 초기 설정값으로 중요한 의미를 가진다. 기존의 스웰분무에 대한 연구에서는 노즐내부에 생성되는 액막두께를 측정하고 경험식을 도출하거나^(2,7) 모델링을 통하여 액막두께를 계산하고자 하는 노력들이 있어왔다⁽⁸⁻¹²⁾.

스웰분무의 액막두께 측정 방법으로는 현재까지 직접 촬영기법과 전기전도도 (electric conductivity)를 이용한 방법이 주로 이용되어 왔다. 노즐의 직경이 매우 작기 때문에 지금까지의 직접촬영기법은 주로 large-scale 노즐에서 이루어져 왔으며 Jeng(1998) 등이 이 방법을 이용하였다⁽¹³⁾. 또한 Suyari & Lefebvre(1986)와 Kim (2006) 등은 전기전도도를 이용하여 액막의 두께를 측정하였다^(3, 5). 그러나 실제 노즐과 같은 미세한 영역에서 액막두께를 측정하기 위한 시도는 현재까지 거의 이루어지지 않았다.

Ritz & Lefebvre(1985)는 연료물성치와 분사압, 노즐 직경을 변수로 하는 경험식을 도출하였으며⁽²⁾, Suyari & Lefebvre(1986)는 실험을 통한 측정결과를 토대로 경험식을 수정, 보완하였다⁽³⁾. 지금까지 Han & Fan(1997), Allocca 등(2002), Aziz & Ali(2006), Khoo & Hargrave (2006)는 Suyari & Lefebvre(1986)에 의해 도출된 경험식을 적용하였다⁽¹⁴⁻¹⁷⁾. 그러나 Ritz & Lefebvre(1985)의 모델이 저압분무 조건(최대 3 MPa)에 국한되어 있으므로 직접분사식 가솔린 엔진용 스웰분무의 상대적인 고압조건에 적용가능한지에 대한 검토는 이루어지지 않았다. 또한 액막 형성의 가장 중요한 요인 중의 하나라고 할 수 있는 선회기(swirler)의 형태와 노즐의 길이가 경험식에 포함되어 있지 않아 다양한 노즐 형태에 대한 적용성이 어려웠다.

Kim *et al.*(2006)은 Ritz & Lefebvre(1985)의 경험식을 토대로 노즐길이를 변수로 추가한 경험식을 도출하였는데⁽⁵⁾ 이 역시 적용 분사압이 최대 0.6 MPa로써 실제 고압스웰분무에의 적용성이 확인되지 않았다. 또한 Schmidt 등(1999)은 연료의 물성, 분사압, 선회기 형태 및 노즐길이에 의해서 영향을 받는 분무각을 변수로 하는 이론식

을 도출하였는데 실제 실험결과와의 비교는 아직 이루어지지 않았으며⁽⁷⁾, Badami 등(2004)은 분무각과 노즐직경만을 변수로 하는 이론식을 제시하였으나⁽⁶⁾ 이 역시 고압분무 조건에서의 검증은 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 스웰분무의 액막유동을 실제 노즐에 장착된 확장노즐을 통해 측정하였으며 보다 정밀한 측정값을 얻기 위해 기하광학을 이용하여 오차해석을 하였다. 또한 직접분사식 가솔린엔진의 실제 고압분사조건에서의 액막두께결과가 저압분사조건에서 제시된 기존경험식의 결과와 일치하는지를 알아보하고자 하였다. 보다 광범위하게 적용될 수 있는 액막두께의 경험식을 도출하기 위해 다른 형태의 두 가지 인젝터를 이용하였으며 이 결과를 통해 보다 개선된 경험식을 제시하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 조건

2.1 실험장치

Figure 1은 인젝터 내부 유동을 가시화하고 정량화 하기 위한 실험장치를 나타내고 있다. 노즐 내부의 유동을 가시화하여 액막두께에 대한 정보를 얻기 위하여 실제 노즐에 투명한 확장노즐을 장착하였다. 확장노즐의 직

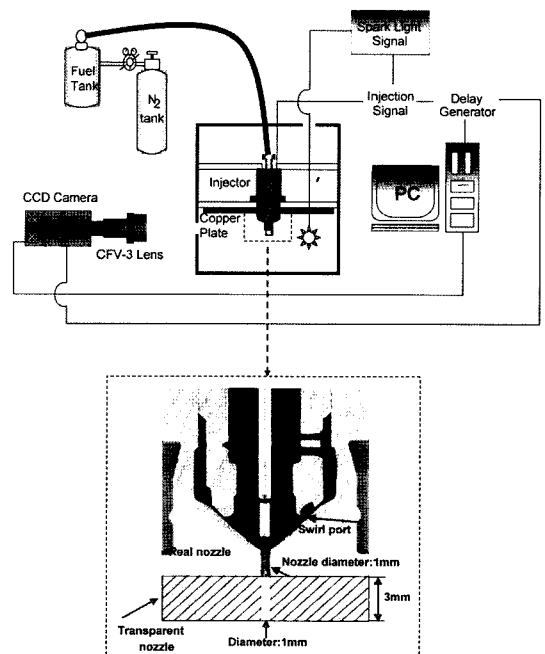


Fig. 1 Experimental setup

Table 1 Injector specifications and experimental conditions

	Injector 1	Injector 2
Nozzle diameter [mm]	0.9	1
Nozzle length [mm]	1.7	4.5
Transparent nozzle diameter [mm]	0.9	1
Transparent nozzle length [mm]	1.3	3
Transparent nozzle material	Perspex	Quartz
L/D ratio	1.89	4.5
Swirler angle [deg]	30	30
Fuel	White spirit	Gasoline
Fuel density [kg/m ³]	785	730
Fuel viscosity [kg/m·s]	0.00094	0.000438
Injection pressure [MPa]	3, 5, 7	3, 5, 7
Mass flow rate at 5MPa injection pressure [kg/s]	0.0097	0.0135
Fuel Temperature [K]	298	298
Ambient Pressure [MPa]	Atmospheric	Atmospheric
Ambient Temperature	Atmospheric	Atmospheric

경은 실제 노즐의 직경과 동일하게 적용하였다. 노즐 내부 유동을 가시화하기 위하여 점화광원을 이용하였으며, 노즐 내부에 공급되는 빛의 분포를 균일하게 하여 선명한 이미지를 얻기 위해서 인젝터 어댑터 밑면에 구리판을 장착하였다. 이미지는 해상도 1280×1024의 CCD (charge coupled device) 카메라(PCO Inc.; Sencicam)를 이용하여 취득하였으며, 확대된 이미지를 취득하기 위해 미시렌즈(microscopic lens)인 CFV-3를 카메라에 부착하였다. 이미지 취득 시점, 점화광원 발광시점은 분사 신호를 트리거 신호로 하여 지연발생기(Delay generator; DG 535)를 통해 제어하였다. 연료 가압을 위하여 고압 질소를 이용하였으며, 일정한 압력을 인젝터에 공급하기 위하여 압력조절기(regulator)를 통해서 분사압력을 변화시켜 주었다.

2.2 적용 인젝터 및 실험조건

Table 1은 본 연구에서 적용된 두 가지 형태의 인젝터에 대한 제원과 각각의 인젝터에 적용된 실험조건들을 정리해서 나타내고 있다. 서론에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 포괄적인 경험식을 도출하기 위해 두 가지 인젝터를 이용하였다. 각각의 인젝터는 노즐길이와 직경이 각각 다르게 설정되었다. 확장노즐의 길이는 Injector 1의 경우가 1.3 mm, Injector 2의 경우가 3 mm로 설정되었으며, 확장노즐의 직경은 실제노즐의 직경과 동

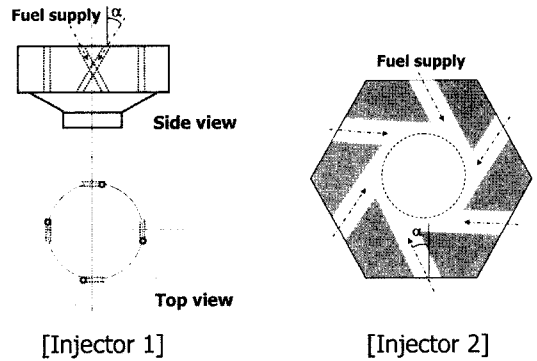


Fig. 2 Swirler geometry of each injector and definition of swirler angle (α)

일하게 적용되었다. 적용된 두 인젝터의 선회각 (α :swirler angle)은 30°로 동일하게 적용되었다. Fig. 2는 적용된 두 가지 인젝터의 선회기 형상 및 선회각의 정의를 나타내고 있다. 두개의 인젝터는 다른 형태의 선회기를 가지고 있으나 선회각은 30°로 동일하다. Injector 1의 경우에는 White spirit을 Injector 2는 Gasoline를 적용하여 물성치가 다른 연료의 영향 역시 경험식에 포함시키고자 하였다. White sprit은 가솔린과 물성은 유사하나 휘발성이 낮은 연료로써 연구용으로 주로 이용되는 연료이다. 5 MPa 분사압 조건에서 질량유량(mass flow rate)은 Injector 2의 경우가 더 크게 나타났다. 적용된 분사압은 일반적인 스웰인젝터의 운전범위인 3, 5, 7MPa로 적용하였다. 주변압력, 주변온도는 대기 조건으로 설정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분사압에 따른 액막 두께

Figure 3은 각 인젝터에서 분사압 조건에 따른 액막의 이미지를 나타내고 있다. 액막과 공기기둥 (air core)의 선명한 경계이미지를 얻기 위해 이미지의 초점을 경계 부분에 맞추어 촬영하였다. 이미지를 통해 분사압의 증가에 따라서 액막의 이미지에는 큰 변화가 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 보다 정량적인 데이터를 취득하기 위해 촬영된 이미지에서 액막과 공기기둥의 경계부분만을 추려낸 후 이의 경계를 이미지처리도구(image processing tool)를 이용하여 얻어냈다. 그 후 픽셀정보를 이용하여 노즐로부터 경계지점까지의 거리를 계산하였다. 노즐출구부분의 액막두께가 분무발달과 미립화에 중요한 인자이기 때문에 노즐출구 0.3 mm 상단에서부터 노

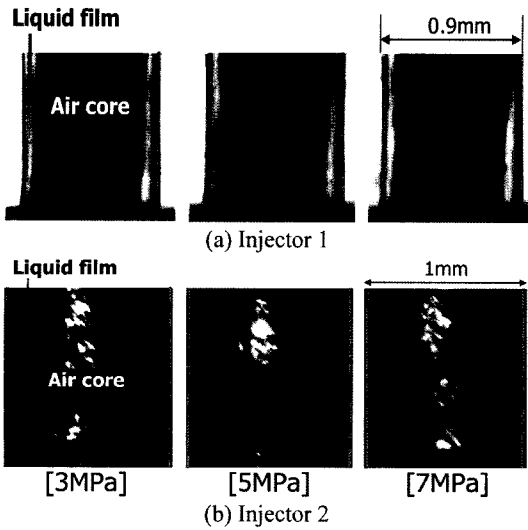


Fig. 3 Liquid film images of each injector at different injection pressures [Time after injection: 1 ms]

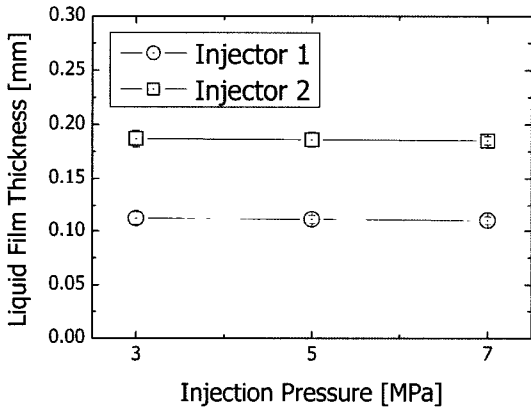


Fig. 4 Quantified liquid film thickness of each injector at different injection pressures [Time after injection: 1 ms]

즐출구까지의 액막두께를 평균하여 결과에 제시하였다. 오차가 적은 대표적인 값을 취득하기 위하여 각 인젝터와 분사압 조건에서 50개의 이미지를 취득하여 평균값을 대표값으로 활용하였다. Fig. 4는 이러한 방법을 통해 취득된 액막두께 결과를 나타내고 있다. 두 가지 인젝터 모두에서 분사압의 증가에 따라서 1 μm 정도의 미미한 감소를 보였다. 또한 각 조건에서 50개의 결과가 가지는 표준편차(standard deviation)가 5% 이내로 액막이 각 분사마다 균일하게 형성됨을 살펴볼 수 있었다. 그러나 인젝터 간의 액막두께는 큰 차이를 나타내었다. 저압 스웰분무에 대한 기존의 경험식에서 액막의 두께

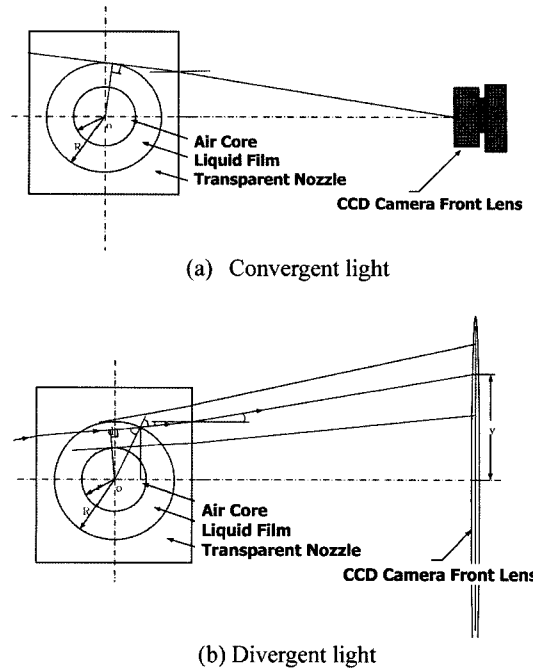


Fig. 5 Schematic of the optical geometry analysis for the determination of measurement error

에 가장 큰 영향을 미치는 것이 분사압력임을 감안할 때 기존의 경험식이 고압분사에는 적용되기 어려움을 판단할 수 있다. 또한 두 가지 인젝터에서 나타나는 가장 큰 차이가 노즐의 형상임을 감안할 때 두 노즐간의 액막두께 차이는 노즐 형상의 차이에서 비롯되었음을 예측할 수 있다. 이에 대한 토론은 다음 장에서 계속 이루어지기로 한다.

3.2 액막두께 측정 오차 해석

지금까지 미시적 촬영기법을 통해서 측정된 액막두께에 대해서 토의하였으나, 실제 경향성이 맞는지 검증하기 위해서는 액막두께의 측정 오차에 대한 해석이 요구된다. 따라서 액막두께 측정의 오차를 해석하기 위해 기하광학이 적용되었다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 기하광학을 이용한 해석은 액막을 통과 후 수렴하는 빛(convergent light)과 액막을 통과 후 발산되는 빛(divergent light)으로 나뉘어서 수행되었다. Snell의 굴절법칙(Snell's law of refraction)에 연료가 가진 굴절률을 대입하므로써 진입하는 빛의 각도에 따라 최종적으로 렌즈에 투영되는 노즐의 반경과 액막두께를 알아낼 수 있으며, 이렇게 측정된 실제값과의 오차는 Eq. 1으로 표현할 수 있다.

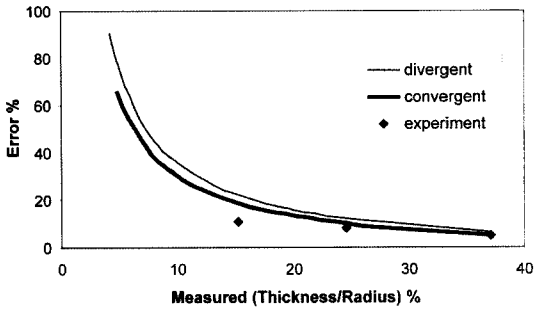


Fig. 6 Measurement error at different ratios of liquid film thickness to nozzle radius (Case: Injector 1)

$$Error = \frac{h_{im}/R_{im} - h/R}{h/R} \quad (1)$$

여기서,

h_{im} = film thickness in camera image

R_{im} = nozzle radius in camera image

h = liquid film thickness

R = nozzle radius

Figure 6은 Injector 1의 노즐형상과 적용연료를 통해서 계산된 오차 해석결과를 나타내고 있다. x축은 실제 측정된 액막의 두께와 노즐반경의 비를 나타내며, y축은 오차를 백분율로 나타내고 있다. 결과를 통해 측정된

Table 2 Empirical equations

		Input parameters				
		Fuel properties	Injection pressure	Nozzle diameter	Nozzle length	Swirler angle
Ritz & Lefebvre (1985)	$h = \left[\frac{1560\mu_l \dot{m}_l}{d_0 \Delta P} \frac{1+X}{(1-X)^2} \right]^{0.5}$ where, $X = \left(1 - \frac{2h}{d_0}\right)^2$	O	O	O	X	X
Suyari & Lefebvre (1986)	$h = 3.66 \left(\frac{d_0 \dot{m}_l \mu_l}{\rho_l \Delta P} \right)^{0.25}$	O	O	O	X	X
Kim et al. (2006)	$h = 1.44 d_0 \left(\frac{\dot{m}_l \mu_l}{\rho \Delta P d_0^3} \right)^{0.25} \left(\frac{l_0}{d_0} \right)^{0.6}$	O	O	O	O	X
Lefebvre (1989)	$\left(\frac{A_p}{2Rd_0} \right)^2 = \frac{\pi^2 (1-X)^3}{32 X^2}$ where, $X = \left(1 - \frac{2h}{d_0}\right)^2$	X	X	O	X	X
Schmidt et al. (1999)	$\dot{m}_l = \pi \rho_l u h (d_0 - h)$ where, $u = \max \left[0.7, \frac{4\dot{m}_l}{\pi d_0^2 \cos \theta} \sqrt{\frac{\rho_l}{2\Delta P}} \right] \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_l}} \cos \theta$	O	X	O	X	X
Badami et al. (2004)	$h = \frac{d_0}{2}(1-k) \text{ where, } \theta = 2\arctan \sqrt{\frac{k^2}{1-k^2}}$	X	X	O	X	O
	h = liquid film thickness, \dot{m}_l = mass flow rate, ΔP = injection pressure, l_0 = nozzle length, θ = spray angle, A_p = swirler exit area				μ_l = liquid viscosity, d_0 = nozzle diameter, ρ_l = liquid density, u = injection velocity, R = nozzle radius,	

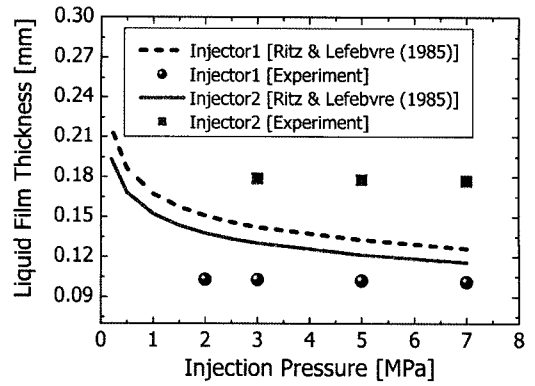
액막두께의 크기가 클수록 오차율이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6에 제시된 실험결과는 Injector 1의 노즐직경과 같은 내경을 가지는 투명한 원통에 이보다 작은 직경을 가진 원통을 삽입한 후 그 중간에 연료를 부은 후 이미지를 촬영하여 계산된 오차값이다. Injector 1의 경우 측정된 액막두께와 노즐반경의 비가 25%로써 이 때 해당하는 오차는 8%였다. 반면 Injector 2의 경우에는 액막두께와 노즐반경의 비가 38%로써 이 때 해당하는 오차는 4.4%였다. 이는 해당 측정된 값이 모두 과대평가(overestimate) 되는 경우로써, 앞으로 논의될 경험식과의 비교에서는 오차가 보정된 값이 이용되었다.

3.3 기존 경험식과의 결과 비교

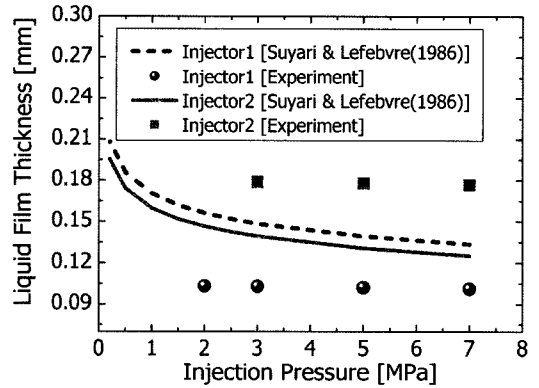
지금까지 실험을 통해 측정된 액막두께의 결과와 이의 오차 해석에 대해서 논의하였다. 본 장에서는 실험을 통해 얻어진 결과를 토대로 기존의 경험식들이 실제 직접분사식 가솔린 엔진의 운전조건에서 측정된 액막의 결과와 일치하는지 살펴보고자 하였다.

Table 2는 서론에서 언급된 기존의 연구에 적용된 대표적인 경험식 또는 이론식들을 정리해서 나타내고 있다. 또한 각각의 식들이 액막 두께 결정에 중요한 요소들을 포함하고 있는지에 대한 여부를 표에 나타내었다. 본 연구에서 제시한 변수는 연료물성치, 분사압, 노즐직경, 노즐길이, 선회각으로써 이는 모두 액막두께 결정에 중요한 변수로 판단되어 설정하였다. 노즐의 길이가 증가함에 따라 공기기동과 액막의 마찰에 의해 선회운동이 약화됨으로써 액막의 두께가 커질 것이라 판단되어 노즐길이를 중요변수로 채택하였으며, 선회각이 증가함에 따라서 노즐 내부의 선회운동이 강화되기 때문에 액막두께에 영향을 미치는 중요한 변수로 채택하였다.

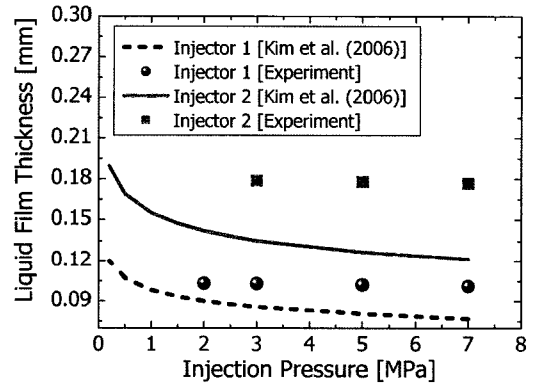
표 중앙의 분리선은 분사압력을 중요변수로 도입하는지 여부를 나타내는 것으로써 위쪽은 중요변수로 도입한 경우이고 아래쪽은 그렇지 않은 경우이다. 분사압의 변화를 중요한 인자로 채택한 연구들에서는 주로 항공용 저압분사 조건에서 경험식을 도출하였는데, 이전의 연구에서 이는 실험값과 잘 일치하는 결과를 나타냈다^(2, 3, 5). 분사압을 주요 인자로 채택하지 않은 연구에서는 노즐의 직경과 선회기 출구의 면적이 중요한 인자로 이용되었는데 이는 주로 직접분사식 가솔린 엔진용 고압스웰 분무에 대한 연구에서 주로 이용되어왔다^(4, 6, 7). 그러나 5가지 중요변수를 모두 포함하고 있는 경험식은 없었으며, 고압분사 조건에서의 실험적인 검증이 이루어지지



(a) Ritz & Lefebvre (1985)



(b) Suyari & Lefebvre (1986)



(c) Kim et al. (2006)

Fig. 7 Comparison between results from experiment and empirical equations with the effect of injection pressure

않은 경우가 많기 때문에 이에 대한 검증이 요구된다. Figure 7은 분사압 조건을 중요한 인자로 적용한 기존

경험식들의 결과를 실험 결과와 비교해서 나타내고 있다. 경험식에 의한 결과는 고압조건까지 연장계산하여 표기하였다. 결과를 통해 이전 경험식 모두에서 고압분사조건으로 갈수록 분사압의 영향이 줄어들기는 하나 실험결과와 비교할 때 그 감소폭에 대한 과대해석을 하는 경향성이 나타났다. 이는 비록 이러한 경험식들이 저압분사조건에서는 잘 부합되는 결과를 나타냈더라도 고압분사조건에서는 적합하지 않음을 나타낸다. 또 한가지 발견할 수 있는 점은 실험 결과에서는 Injector 2가 Injector 1보다 액막두께가 크게 측정되었으나, Ritz & Lefebvre, Suyari & Lefebvre의 경험식에 의해서는 Injector 1의 경우가 더 큰 액막두께를 나타냈다는 것이다. 이는 동일한 분사압 조건에서 두 연료의 물성차이가 경험식 결과에 영향을 미쳤기 때문이다. 두 가지 경험식에 포함된 변수들을 볼 때, 포함되지 않은 것은 노즐 길이와 선회각이다. 그러나 두 인젝터에 적용된 선회각은 동일하다고 볼 때 이러한 반대경향성은 노즐 길이를 인자로 포함시키지 않았기 때문이라 판단된다. 이러한 관점에서 노즐 길이를 변수로 포함시킨 Kim 등의 경험식에 의한 결과는 실험결과와 동일한 경향성을 나타냈다.

위의 결과를 통해서 분사압을 주요 변수로 설정한 기존의 경험식은 고압분사 조건에서 분사압의 효과를 과대해석하고 있으며, 노즐의 길이를 고려하지 않았을 때 각 인젝터 간의 경향성을 반대로 해석하였다. 따라서 이의 개선을 위해서는 경험식에서 분사압력의 영향을 축소시켜야 하며, 노즐의 길이를 변수로 추가해야 함을 판단할 수 있다.

Figure 8은 분사압을 액막두께의 주요 인자로 도입하지 않은 경험식의 결과와 실제 측정된 실험 결과를 비

교하여 나타내고 있다. 모든 경험식의 결과가 실제측정값과 큰 차이를 보였으나 분사압을 변수로 고려하였던 경우에는 달리 모든 경험식에서 Injector 2가 Injector 1보다 큰 액막두께 값을 나타냈다. 또한 분사압에 의한 변화경향성이 나타나지 않기 때문에 고압분사의 경우에는 더 적합했다. 한가지 더 주목할 점은 각 인젝터 간의 액막두께 차이가 모든 경험식에서 과소평가 되었다는 것이며, 이는 주로 노즐길이 변화가 변수로 포함되지 않았기 때문이라 판단된다. 또한 노즐길이의 변화를 변수로 채택한 Kim 등의 경험식의 경우에는 노즐길이와 노즐직경의 비(L/D ratio)를 과소평가하거나 선회각의 영향을 고려하지 않았기 때문에 실험결과와 일치하지 않는 결과를 나타냈다 판단된다.

본 장의 모든 결과를 통해서 최종적으로 얻을 수 있는 결론은 Table 2에 언급된 모든 조건 중 분사압의 영향을 축소시켜야 하며, 이 밖의 모든 조건을 고려하여야만 고압분사 시의 액막두께를 예측할 수 있는 경험식을 제시할 수 있다는 점이다. 이러한 결과를 토대로 하여 다음 장에서는 고압 스월분무에 적용할 수 있는 새로운 경험식에 대해서 논하기로 한다.

3.4 개선된 경험식 도입 및 결과 고찰

지금까지의 결과를 통해서 고압분사조건에서의 경험식을 도출하기 위해서는 분사압력의 영향이 축소되어야 하며, 노즐의 길이와 선회각이 중요변수가 되어야 함을 판단하였다. 선회각을 중요변수로 채택한 또 하나의 이유는 비록 본 연구에 적용된 인젝터의 선회각이 동일하다고 하나, 기존의 연구에서 선회각의 변화에 따라 액막의 두께가 변화하는 결과가 이미 발표되었기 때문이다⁽¹⁷⁾. 본 연구에서는 기존의 연구결과와 본 연구에 적용된 두 가지 형태의 인젝터에 포괄적으로 이용될 수 있는 경험식을 도출하였으며 이는 Eq. 2와 같다. Eq. 2는 액막두께의 결과를 mm 단위로 나타낸다.

$$h = 0.455 \left(\frac{\mu_l d_0}{\rho_l} \right)^{0.25} \left(\frac{m_l}{\Delta P} \right)^{0.02} \left(\frac{l_0}{d_0} \right)^{0.81} (\tan \alpha)^{-0.15} \quad (2)$$

기존의 경험식과 비교하여 Eq. 2의 다른 점은 분사압력의 영향이 축소되고, 노즐길이의 영향이 추가 또는 증가하였으며, 선회각의 영향이 추가되었다는 점이다. Fig. 9는 Eq. 2를 통해서 계산된 분사압에 따른 액막두께와 실험을 통해서 얻어진 액막두께의 결과를 동시에 나타내고 있다. 기존의 결과와 달리 모든 압력조건 모든

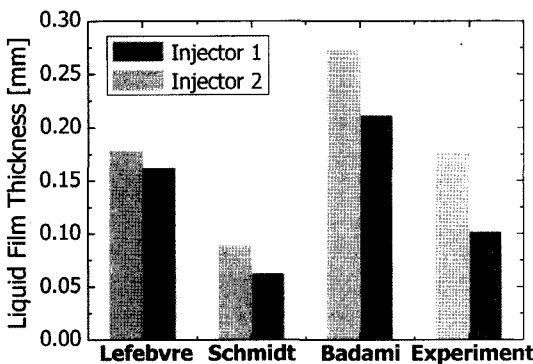


Fig. 8 Comparison between results from experiment and empirical equations without the effect of injection pressure

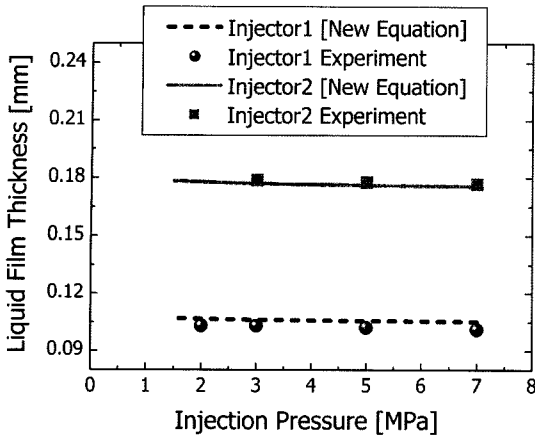


Fig. 9 The result comparison between calculation from new equation and experiment

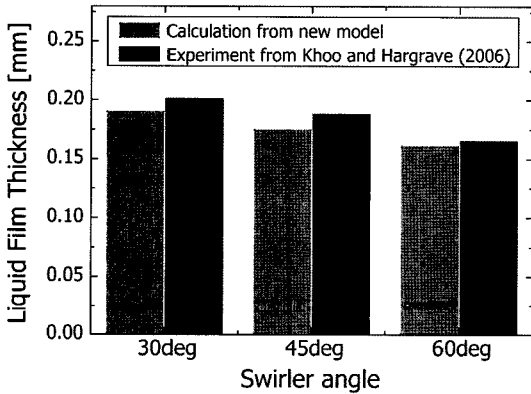


Fig. 10 Comparison of new equation results with experimental results from Khoo and Hargrave (2006) at different swirler angles

인젝터 조건에서 계산결과는 실험결과와 잘 부합하였다. 비록 Eq. 2의 결과가 적용된 인젝터의 다른 노즐형상, 연료에서 부합되는 결과를 나타내기는 하였으나 동일한 선회각 조건에서 수행되었기 때문에 선회각의 영향에 대한 검증이 요구된다. 이를 위해서 Khoo & Hargrave (2006)의 실험결과를 비교대상으로 삼았다. 해당 연구는 Injector1과 동일한 연료인 White spirit을 이용하였으며, 노즐형상의 변화 없이 선회각을 30°, 45°, 60°로 적용하여 실험하였으며 노즐직경은 1 mm, 노즐길이는 4 mm 였다.

Figure 10은 본 연구를 통해서 제시된 새로운 액막 모델에 의한 결과와 기존의 Khoo & Hargrave(2006)의 실험결과를 비교해서 나타내고 있다. 결과를 통해 비록 실제값에 최대 8%의 오차를 보였으나 선회각에 따

른 경향성은 동일하게 나타났다. 또한 Khoo & Hargrave(2006)의 액막두께 측정 결과에 오차보정이 이루어지지 않았기 때문에 이러한 오차보정을 거치면 새로운 액막모델의 결과와 거의 동일한 값을 나타내리라 예상된다.

4. 결 론

직접분사식 가솔린엔진용 고압 스윙분무의 액막두께를 투명확장노즐을 이용해 측정하였으며, 측정결과와 오차해석에 대해서 논의하였다. 보정된 측정결과를 기존의 경험식과 비교하였으며, 이를 토대로 새로운 경험식을 도출하였다.

실험결과를 통해 분사압이 7MPa까지 증가하였을 때 액막의 두께는 1~2 μm 정도의 아주 미미한 감소를 나타냄을 확인하였다. 기하광학을 통해 액막두께 결과의 오차를 확인한 결과 Injector 1에서는 8%, Injector 2의 경우에는 4.4% 정도 액막 두께를 과대평가하였다.

기존의 경험식 중에 연료물성치, 분사압, 노즐두께, 노즐길이, 선회각을 모두 변수로 포함하고 있는 경우는 없었다. 보정된 실험결과를 기존의 경험식과 비교하였을 때, 분사압력을 주요 변수로 이용한 경험식의 경우 고압분사 조건에서 분사압의 영향을 과대해석함으로써, 분사압의 증가에 따른 액막두께의 감소정도가 실험결과보다 크게 나타났다. 노즐길이를 변수로 포함하지 않은 경험식의 경우, 본 연구에 적용된 다양한 노즐길이에서의 액막두께 경향성을 제대로 해석하지 못하였으며, 선회각을 변수로 포함하지 않은 경우 다른 선회각을 가진 인젝터의 액막두께 경향성을 반영하지 못했다.

따라서 본 연구에서는 연료물성치, 분사압, 노즐직경, 노즐길이, 선회각을 모두 변수로 하는 새로운 경험식을 도입하였으며, 이를 실험값 및 기존 참고문헌의 결과와 비교하였다. 새로운 경험식의 결과는 본 연구에 적용된 두 가지 인젝터를 만족시켰으며, 다른 선회각을 적용한 기존연구의 결과 역시 만족시켰다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터 및 미래형자동차사업단의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) F. Zhao, M. C. Lai and D. L. Harrington, "Automotive Spark-ignited Direct-Injection Gasoline Engines", *Progress in Energy Combustion Science*, Vol. 25, 1999, pp. 4~8.
- (2) N. K. Rizk and A. H. Lefebvre, "Internal Flow Characteristics of Simplex Swirl Atomizers", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 1, No. 3, 1985, pp. 193~199.
- (3) M. Suyari and A. H. Lefebvre, "Film Thickness Measurements in a Simplex Swirl Atomizer", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 2, No. 6, 1986, pp. 528~533.
- (4) A. H. Lefebvre, "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- (5) S. Kim, D. Kim and Y. Yoon, "Liquid Film Thickness Measurement for a Swirl Injector", *Journal of Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 10, No. 2, 2006, pp. 70-77.
- (6) M. Badami, V. Bevilacqua, F. Millo, M. Chiodi and M. Bargende, "GDI Swirl Injector Spray Simulation: Combined Phenomenological-CFD Approach", SAE Paper 2004-01-3005, 2004.
- (7) D. P. Schmidt, I. Nouar, P. K. Senecal, C. J. Rutland, J. K. Martin, R. D. Reitz and J. A. Hoffman, "Pressure-Swirl Atomization in the Near Field", SAE Paper 1999-01-0496, 1999.
- (8) M. Kubo, A. Sakakida and A. Iiyama, "Technique for Analyzing Swirl Injectors of Direct-Injection Gasoline Engines", SAE Paper 2001-01-0964, 2001.
- (9) S. K. Dash, M. R. Halder, M. Peric and S. K. Som, "Formation of Air Core in Nozzles With Tangential Entry", *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 123, 2001, pp. 829~835.
- (10) A. Datta and S. K. Som, "Numerical prediction of air core diameter, coefficient of discharge and spray cone angle of a swirl spray pressure nozzle", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, 2000, pp. 412~419.
- (11) M. Gavaises and C. Arcoumanis, "Modelling of sprays from high-pressure swirl atomizers", *International Journal of Engine Research*, Vol. 12, No. 2, 2001, pp. 95~117.
- (12) J. Cousin and H. J. Nuglisch, "Modeling of Internal Flow in High Pressure Swirl Injectors", SAE Paper 2001-01-0963, 2001.
- (13) S. M. Jeng, M. A. Jog and M. A. Benjamin, "Computational and Experimental Study of Liquid Sheet Emanating from Simplex Fuel Nozzle", *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 2, 1998, pp. 201~207.
- (14) Z. Han, L. Fan and R. D. Reitz, "Multidimensional Modeling of Spray Atomization and Air-Fuel Mixing in a Direct-Injection Spark-Ignition Engine", SAE Paper 970884, 1997.
- (15) L. Allocca, G. Bella, A. De Vita and L. Di Angelo, "Experimental Validation of a GDI Spray Model", SAE Paper 2002-01-1137, 2002.
- (16) A. A. Aziz and M. F. All, "Numerical Investigation on the Needle-shape of Hollow-Cone Pressure-Swirl Type Gasoline Direct Injector", SAE Paper 2006-01-1002, 2006.
- (17) Y. C. Khoo and G. K. Hargrave, "Real-Sized Pressure Swirl GDI Injector Investigation with HSFV and FPIV", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 45, 2006, pp.77~84.