

스월 인젝터에서의 액막두께 측정에 관한 연구

김성혁* · 김동준* · 윤영빈**

Liquid Film Thickness Measurement for a Swirl Injector

Sunghyuk Kim* · Dongjun Kim* · Youngbin Yoon**

ABSTRACT

A specially designed injector using electric conductivity was used to measure the liquid film thickness exactly. The measurement conducted through the precise calibration, accuracy is demonstrated in comparison with the previous theory and the results using other measurement method. The variation of internal flow and stability are examined through the variation of liquid film thickness by the time. The tendency of liquid film thickness for geometric parameters was examined by the precise measurement.

초 록

정확한 액막두께 측정을 위해 전기전도도를 이용한 장치를 제작하였다. 정밀한 calibration을 통해 측정을 수행하였으며 기존의 이론식 및 다른 측정 방법을 이용한 결과와 비교해 보았을 때 정확성이 입증되었다. 시간에 따른 액막두께 변화를 통해 내부 유동의 변화 및 안정성도 살펴볼 수 있었다. 정확한 측정을 통해 기하학적 형상에 따른 액막두께의 경향성도 파악할 수 있었다.

Key Words: Liquid Film Thickness(액막두께), Electric Conductivity(전기전도도), Backhole(백홀), Swirl Chamber(스월챔버), Orifice(오리피스)

1. 서 론

스월 인젝터에서 액막두께는 미립화 특성을 나타내는 분무각, 분열길이, 분무 액적 크기 등과 직접적으로 관련되어 있으므로 정밀한 측정이 요구된다. 지금까지 액막두께의 측정을 위

하여 여러 가지 방법이 시도되어 왔지만 정밀한 측정이 어렵고 방법의 한계 등으로 인해 수치적 해석이나 이론식에 의존하고 있는 실정이다. Kutty 등은 분사 압력과 air core 면적의 영향을 알아보기 위하여 오리피스 출구 방향의 이미지를 촬영하는 방법을 사용하였다[1]. Jeng 등은 오리피스 내부를 가시화할 수 있도록 large-scale의 인젝터를 제작하여 이미지를 촬영하는 방식으로 액막두께를 측정하였다[4]. Suyari와 Lefebvre는 오리피스 끝단에 위치한 두 전극 사이의 electric

† 2005년 12월 13일 접수 ~ 2006년 3월 27일 심사완료

* 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부

** 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부
연락처, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

conductivity를 이용하여 액막두께를 측정하였다 [6]. Cousin 등은 액체의 conductivity가 일정하다는 점을 이용하여 인젝터에서 probe가 air core의 내부에 있는지 액체와 접촉하고 있는지를 결정하여 액막두께를 측정하였다[7]. Kim 등은 형광 신호의 감쇠를 이용하여 액막두께를 측정하였고 이전 연구자들과는 달리 Weber number에 대한 실험식을 제시하였다[9].

본 논문에서는 액막두께를 측정하기 위하여 Suyari, Lefebvre와 유사한 방식을 이용하였으나 스윙 챔버 내의 air core의 변화와 액막두께의 관계를 살펴보기 위하여 가시화가 가능하도록 인젝터를 제작하였다. 더불어 인젝터의 기하학적 형상에 따른 액막두께 변화도 살펴보기 위하여 각 파트를 교체가 가능하도록 제작하였다.

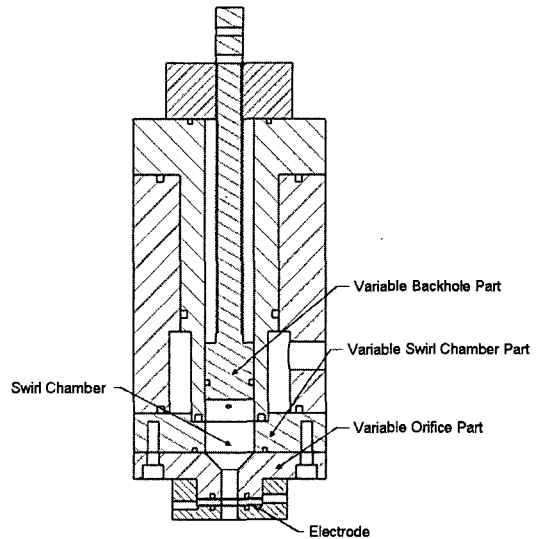


Fig. 1 Cross section view of swirl injector

2. 측정기법

2.1 실험장치 및 측정원리

액막두께 측정을 위해 설계된 스윙 인젝터의 구조는 Fig. 1과 같다. 기본적으로 액막두께를 측정할 수 있으며 스윙 인젝터의 기하학적 형상에 따른 액막두께 변화를 측정할 수 있도록 백홀, 스윙 챔버, 오리피스 길이를 변화시킬 수 있게 제작하였다. 백홀은 음향학적 감쇠자로서 최근에 연소불안정성 등의 연구에 사용되고 있는 스윙 인젝터의 기하학적 설계요소이다[10]. 액막두께는 스윙 유동이 인젝터 내부에 형성되고 오리피스 하단에 위치하고 있는 두 전극 사이의 전기전도도를 측정함으로써 얻어진다.

실험에서 작동유체로 사용되는 물의 전기전도도는 일정하므로 오리피스 내의 액막두께에 따라 측정되는 전압으로 평균 액막두께를 환산할 수 있다. 전극은 원형의 얇은 stainless steel sheet 재질로 되어 있으며, 두 전극은 절연물질인 acrylic로 분리되어 있다.

실험장치 구성은 Fig. 2와 같다. 실험장치는 크게 함수발생기, 측정회로, 디지털 멀티미터로 이루어져 있다. 함수발생기로 일정한 주파수의

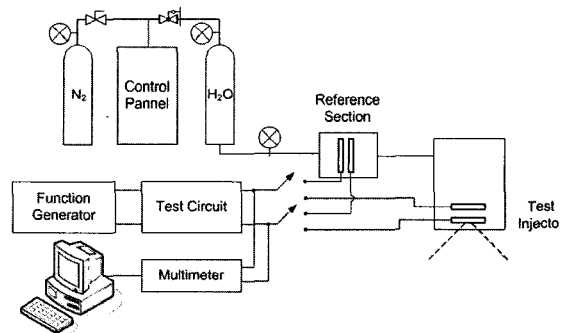


Fig. 2 Layout of apparatus

교류전원(10 kHz, 10 ACV)을 측정회로에 공급해주고 오리피스내의 두 전극을 통해 액막두께에 따른 전압이 측정된다. 교류전원을 사용하는 이유는 직류 전원을 사용하면 전극 주위에 기포가 발생하여 순간적으로 전압이 높아지는 분극 현상이 발생하기 때문이다.

Suyari와 Lefebvre는 물의 순도와 온도에 의한 영향을 조사하기 위해 실험을 수행하였는데, 염도와 이온화도가 다른 몇 가지 물의 종류 중에서 일반 수도물이 최소 분산과 재현성 면에서 가장 적합하다고 하였으며 물의 온도를 1°C로 유지시키는 것이 가장 중요하다고 하였다[6]. 물의 전기전도도는 온도차에 의한 영향(약 2%/°C)

이 크므로 대개는 동일한 조건에서 비교하기 위하여 25℃에서의 값으로 환산하여 기록하기도 한다. 그러나 실험환경에서 물의 온도를 1℃로 지속적으로 유지하기란 어렵기 때문에 물 공급 라인에 오리피스 내에 위치하는 측정 전극과 같은 방식의 장치를 따로 두어 매 측정시 온도에 의한 영향을 보정할 수 있도록 하였다.

2.2 Calibration

액막두께 측정에 앞서 정밀한 calibration이 요구된다. Calibration은 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 인젝터 오리피스 내에 측정방향을 따라 일정한 직경의 아크릴 막대를 삽입하여 오리피스의 직경과 막대 직경의 차이에 해당하는 전압을 측정하여 이루어진다. Calibration에 사용된 막대의 직경은 약 3.6 mm ~ 5.8 mm 이며 총 15개를 사용하였다.

정확한 측정을 위하여 오리피스 출구를 막아 정지된 유동 상태에서 calibration을 수행하였다. 이는 유동이 오리피스와 막대 사이의 틈을 지날 때 작은 기포 등이 발생하거나 오리피스와 막대 사이에 물이 가득차지 않는 경우를 방지하기 위함이다. 비록 유동이 흐르는 상태일지라도 물이 오리피스와 막대 사이에 가득차 있는 상태라면 측정값은 대체로 일정하였다.

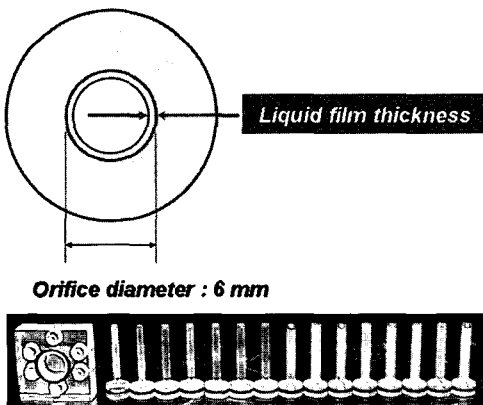


Fig. 3 Calibration method & parts

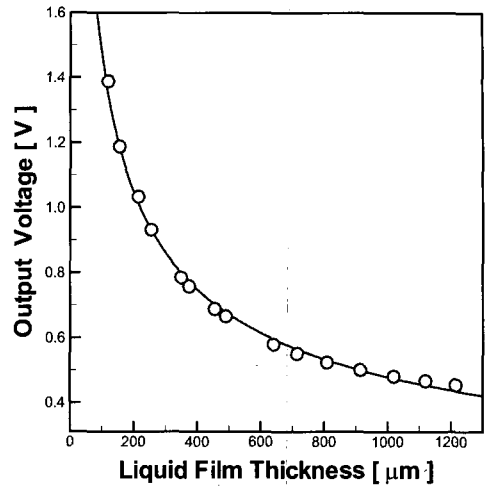


Fig. 4 Calibration curve

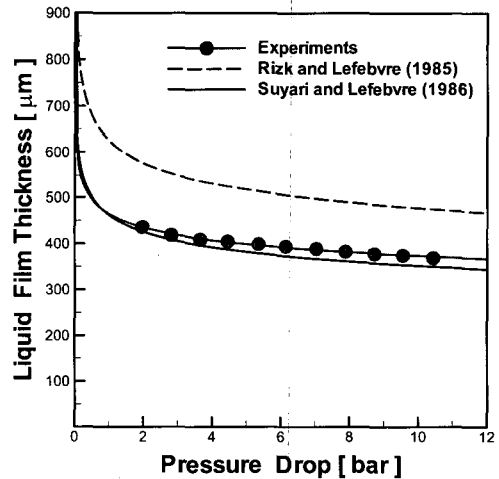


Fig. 5 Influence of water injection pressure

Figure 4에서와 같이 calibration은 120 μm에서 1215 μm까지 약 50 μm간격으로 수행되었다. 아주 미소한 간격까지도 측정될 수 있다는 점이 장점이라고 할 수 있다.

Figure 5는 분사압력에 따른 액막두께를 측정 한 결과를 나타내고 있는데, 최근까지 어느 정도 잘 맞다고 알려져 있는 Suyari와 Lefebvre의 이론식과 비교해 볼 때, 분사압력 변화에 따른 액막두께는 기본 인젝터 형상이나 분사압력의 오차 등의 원인으로 약간의 차이를 보이고 있지

만 대체로 경향성은 유사하게 측정되었다.

23 실험조건

스윙 인젝터에서 길이 방향의 변수인 백홀, 스윙챔버, 오리피스 길이가 분무특성에 미치는 영향을 살펴보고 액막두께 측정결과에 있어서 어떤 차이점이 발생하는지 알아보기 위하여 아래와 같은 조건을 설정하였다.

Table 1. Experimental conditions

Variable parameter	Value(mm)				
Backhole length [L_B]	0	10	20	30	40
Swirl chamber length [L_S]	19	28	37	46	55
Orifice length [l_o]	18	30	42	54	66

Figure 1의 스윙 인젝터에서 백홀, 스윙챔버, 오리피스의 기본 형상 길이는 각각 0, 19, 18 mm이다. 백홀 길이는 스윙챔버 상단에 피스톤을 삽입하여 조절이 가능하도록 하였으며, 스윙챔버와 오리피스 길이는 각각 4개의 part로 교체하여 조절할 수 있도록 하였다.

실험은 일정한 분사압력(2, 4, 6, 8, 10 bar)하에서 수행하였고, 액막두께는 0.01초 간격으로 300개의 data를 3초 동안 측정하였다. 또, 내부 유동과 액막두께의 상관관계를 살펴보기 위해 Photron社의 고속카메라(FASTCAM ultima APX Imager)를 사용하여 스윙챔버 내부를 가시화 하였다.

3. 실험결과

3.1 기하학적 형상에 따른 액막두께 측정

스윙 인젝터의 기하학적 형상에 따른 내부 유동과 액막두께의 관련성을 살펴보고자 하였는데, 측정 결과로 볼 때 내부 유동과 액막두께는 서로 밀접한 연관이 있음을 알 수 있었다. 고속카메라를 이용한 air core의 변화를 관찰하였는데, Fig. 9(b)에서 볼 수 있듯이 특정 백홀 길이를 전

후로 air core의 하단부가 불규칙적으로 분열되는 현상이 관찰되었다. 이와 동시에 Fig. 6에서도 볼 수 있듯이 백홀 길이에 따른 액막두께 변화도 시간에 따라 불규칙한 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 스윙챔버 길이에 변화를 준 경우에는 Fig. 9(c)와 같이 air core 상단부에서 규칙적인 분열 현상이 나타남을 관찰할 수 있었는데, 역시 Fig. 7에서의 액막두께 측정 결과에서도 그대로 반영된다.

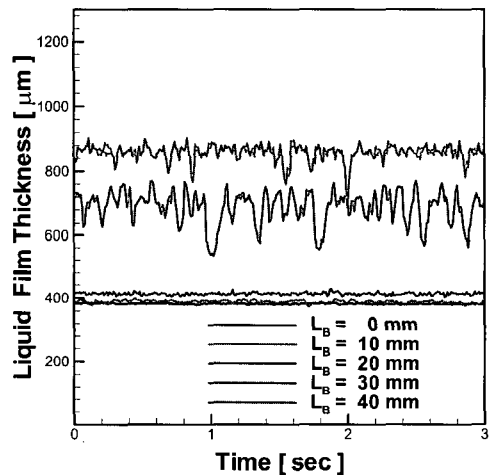


Fig. 6 Liquid film thickness variation by changing backhole length [L_B]

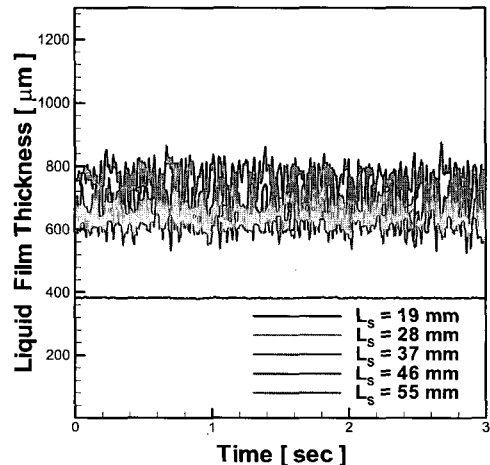


Fig. 7 Liquid film thickness variation by changing swirl chamber length [L_S]

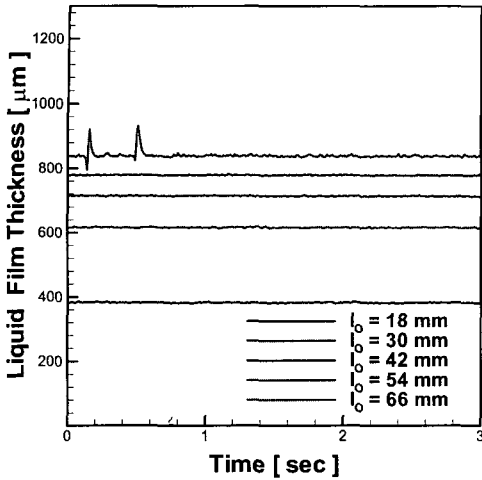


Fig. 8 Liquid film thickness variation by changing orifice length [l_o]

특정 백홀 길이에서 백홀이 없는 경우보다 내부 유동이 더 안정적 이었으며, 기본 스윙챔버 길이를 벗어난 모든 경우에서 내부 유동의 불안정한 경향이 관찰되었다. 이점은 적절한 백홀 길이는 유동의 안정화와 미립화 특성을 좋게 하고, 스윙 인젝터 설계에 있어서 유체의 속도 손실을 줄이기 위해 스윙챔버 길이를 최소화하는 이유를 알 수 있게 해주는 부분이기도 하다.

오리피스스의 길이에 변화를 준 경우에는 내부 유동의 가시화에서도 아주 안정적인 air core 형상이 관찰되었으며 Fig. 8에서의 액막두께 측정 결과에서도 이런 점들이 그대로 반영되고 있다.

Figure 9의 (a), (b), (c)는 각각 백홀 길이 10 mm, 백홀 길이 30 mm, 스윙챔버 길이 55 mm 일 때 스윙챔버 내부의 air core 형상을 가시화 한 결과이다. 각 경우에 대한 액막두께 변화는 Fig. 10에 나타나 있다. 위에서 살펴본 바와 같이 내부 유동의 변화를 액막두께 측정을 통해서도 직접적으로 연관 지어 볼 수 있는데, 이는 다른 액막두께 측정법에서는 거의 불가능 했던 점이다.

전기전도도를 이용한 액막두께 측정방법은 오리피스내에서 시간에 따른 유량섭동을 측정한 Bazarov[8]의 방법과도 유사하며 이를 통해 시간

의 변화에 따른 액막두께 변화 경향을 자세하고 정확하게 살펴 볼 수 있었으며, 내부 유동의 안정성 여부도 판단할 수 있었다.

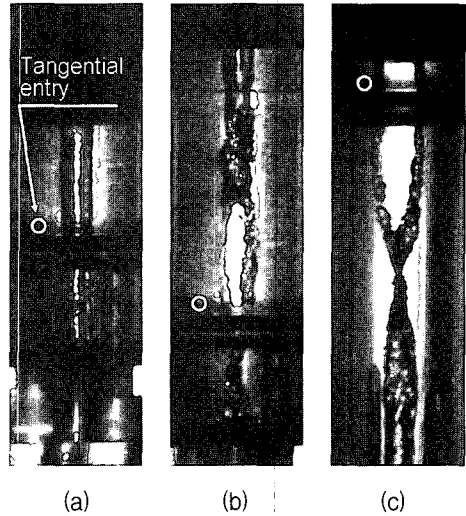


Fig. 9 Internal flow in swirl chamber ;
 (a) backhole length : 10 mm
 (b) backhole length : 30 mm
 (c) swirl chamber length : 55 mm

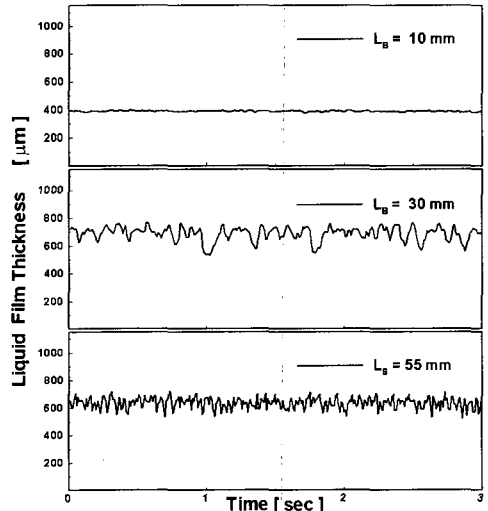


Fig. 10 Liquid film thickness' variation for $L_b = 10$ mm, $L_b = 30$ mm, $L_s = 55$ mm

3.2 측정 결과의 정량화

동일한 조건에서 인젝터의 기하학적 형상에 따른 액막두께의 변화를 살펴보기 위하여 우선 실험조건에 따라 유량을 측정하였다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 오리피스 길이에 대한 유량은 거의 모든 경우에서 일정하였다.

액체 로켓 엔진용 인젝터가 아닌 pressure-swirl atomizer를 사용했던 기존의 연구결과에서는 오리피스의 길이가 액막두께 변화에 미치는 영향이 매우 작다고 되어있다[5]. 이는 실험에 사용되었던 pressure-swirl atomizer에서 상대적으로 짧은 길이의 오리피스를 사용했기 때문이다. Case study의 경우에도 오리피스 길이 변화는 적게 주었으며, 실험결과에서는 오리피스 길이가 증가하였을 때 액막두께는 얇아졌다. 그러나 본 논문의 실험결과에서는 오리피스 길이가 증가함에 따라 액막두께도 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 경향은 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 LIF(Laser Induced Fluorescence)방법을 사용한 Kim 등의 결과에서도 살펴볼 수 있었다[8].

Figure 13은 오리피스 길이에 따른 액막두께 변화를 나타내고 있으며, Fig. 12에서의 결과보다 경향성면에서 더 일관성이 있음을 알 수 있었다. Eq. 2는 Suyari와 Lefebvre[6]에 의해 제시된 식으로 Rizk와 Lefebvre[2, 3]에 의해 유도된

Eq. 1을 실험을 통해 상수를 보정한 결과로 지금까지 어느 정도 잘 맞는다고 알려져 있다.

$$t = 3.66 \left(\frac{d_o \dot{m}_L \mu_L}{\rho_L \Delta P} \right)^{0.25} \quad (1)$$

$$t = 2.7 \left(\frac{d_o \dot{m}_L \mu_L}{\rho_L \Delta P} \right)^{0.25} \quad (2)$$

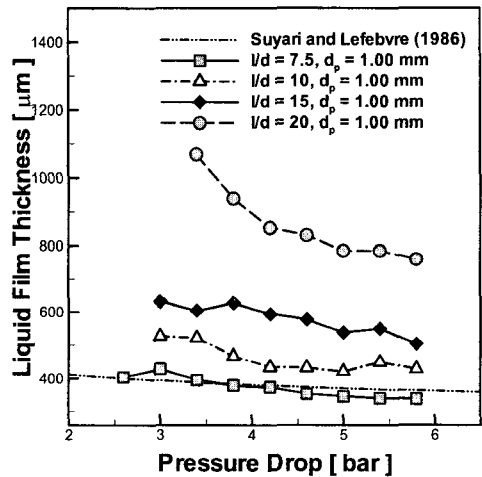


Fig. 12 Liquid film thickness measurement using LIF method

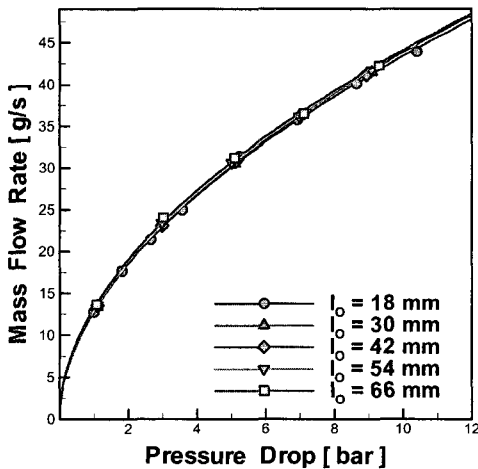


Fig. 11 Flow rate for orifice length

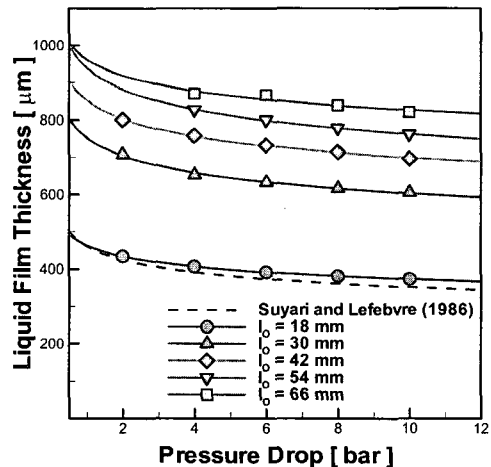


Fig. 13 Liquid film thickness measurement using Electrical conductance method

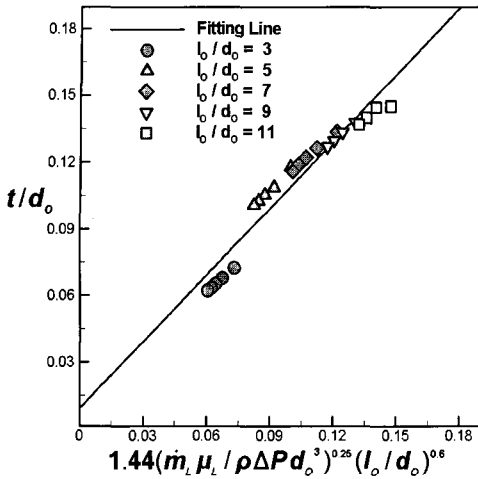


Fig. 14 Empirical relation for liquid film thickness

그러나 위 식들에서는 오리피스 길이에 대한 영향은 고려되지 않고 있으며, 실제 실험결과에서도 특정 길이의 오리피스의 경우 이론식과 유사한 결과를 나타내지만 오리피스 길이를 변화 시킴에 따라 이론식과 잘 맞지 않음을 알 수 있다. 본 논문의 실험결과에서 알 수 있듯이 오리피스의 길이는 분무각, 분열길이, 액적크기 등에 직접적으로 관련이 되는 액막두께에 적지 않은 영향을 주고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구자의 이론식에 오리피스 길이에 대한 변수를 추가하고 상수를 보정하여 실험식을 도출하였다. Fig. 14는 실험을 통한 액막두께 측정결과와 식(3)에 의한 값의 비를 나타내고 있는데, 실험결과와 실험식의 오차가 적음을 알 수 있다.

$$\left(\frac{t}{d_o}\right) = 1.44 \left(\frac{m_L \mu_L}{\rho \Delta P d_o^3}\right)^{0.25} \left(\frac{l_o}{d_o}\right)^{0.6} \quad (3)$$

식(3)에서 오리피스 길이 변화에 대한 영향은 Kim 등의 연구결과인 $t/d_o \propto (l_o/d_o)^{0.527}$ 와 비교해볼 때, $t/d_o \propto (l_o/d_o)^{0.6}$ 으로 신빙성을 확인해 볼 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 스윙 인젝터에 전기전도도를 이용한 장치를 설계·장착하여 오리피스를 통해 흐르는 액막의 정확한 두께를 측정하였다. 시간 변화에 대한 액막두께 비교, 다른 측정방법과의 비교를 통해 측정 장치의 정확성을 검토하였고 인젝터 내부 유동의 불안정성 등 다른 연구에의 활용 가능성도 찾을 수 있었다. 더불어 기존 연구자들의 이론식에는 고려되지 않았던 오리피스의 길이에 대한 영향을 확인하였으며, 이를 통해 기존의 이론식을 보완한 실험식을 제시하였다. 스윙 인젝터에서 액막두께는 분무각, 분열길이, 액적크기 등 분무특성에 직접적으로 영향을 미친다.

최근 들어 스윙 인젝터의 최적설계를 통해 연소 불안정성을 제어하려는 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이에 부합하여 적절한 오리피스 길이 조절을 통해 정확히 액막두께를 제어하고, 액막두께 측정을 통해 인젝터 형상에 따른 내부유동의 변화 등도 살펴볼 수 있는 가능성도 찾아볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(M1-0104-0058)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 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.
2. Rizk, N.K. and Lefebvre, A.H., "Internal

- Flow Characteristics of Simplex Swirl Atomizers," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 1, No. 3, 1985, pp.193-199
3. Rizk, N.K., and Lefebvre, A.H., "Prediction of Velocity Coefficient and Spray Cone Angle for Simplex Swirl Atomizer," *Proceedings of International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, 1985
 4. 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
 5. Lefebvre, A.H., *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corporation, 1989
 6. 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
 7. 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," *8th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Pasadena, CA, USA, July 2000
 8. V. G. Bazarov, "Liquid Injector Dynamics," Moscow, Mashinostroenie, 1979
 9. 김동준, 임지혁, 한풍규, 윤영빈, "스윙 인젝터의 작동조건 및 인젝터 형상에 따른 분무 특성," *한국액체미립화학회지*, 제9권 제1호, 2004, pp.21-29
 10. 황성하, 윤영빈, "액체 추진제용 로켓 엔진 스윙 인젝터의 백홀로 인한 분무 특성 연구," *한국추진공학회지*, 제7권 제2호, 2003, pp.23-35