스월 인젝터에서 액막두께 측정과 Air Core의 구조에 관한 실험적 연구

김성혁* · 김동준* · 윤영빈†

Experimental Studies on Liquid Film Thickness Measurement and the Formation of Air Core in a Swirl Injector

Sunghyuk Kim, Dongjun Kim and Youngbin Yoon

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

Abstract

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

기호설명

t : Liquid Film Thickness [μm]
$\dot{m}_L$: Mass Flow Rate of Liquid [kg/s]
μ_L : Viscosity of Liquid [Ns/m^2]
ρ : Density of Liquid [kg/m^3]
ΔP : Pressure Drop [N/m^2]
L_B : Backhole Length [mm]
L_S : Swirl Chamber Length [mm]
D_S : Swirl Chamber Diameter [mm]
l_o : Orifice Length [mm]
d_o : Orifice Diameter [mm]

(2006년 9월 1일 접수 ~ 2006년 9월 20일 심사완료)
*서울대학교 기계항공공학부
†책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : ybyoon@snu.ac.kr
TEL : (02)880-1904 FAX : (02)872-8032

1. 서 론

스월 인젝터에서 액막두께는 미립화 특성을 나타내는 분무각, 분열길이, 분무 액적 크기 등과 직접적으로 관련되어 있으므로 정밀한 측정이 요구된다. 지금까지 액막두께의 측정을 위하여 여러 가지 방법이 시도되어 왔지만 정밀한 측정이 어렵고 방법상의 한계 등으로 인해 수치적 해석이나 이론식에 의존하고 있는 실정이다. Kutty 등[1]은 분사 압력과 air core 면적의 영향을 알아보기 위하여 오리피스 출구 방향의 이미지를 촬영하는 방법을 사용하였다. Jeng 등[2]은 오리피스 내부를 가시화할 수 있도록 large-scale의 인젝터를 제작하여 이미지를 촬영하는 방식으로 액막두께를 측정하였다. Suyari와 Lefebvre[3]는 오리피스 끝단에 위치한 두 전극 사이의 electric conductivity를 이용하여 액막두께를 측정하였다. Cousin 등[4]은 액체의 conductivity가 일정하다는 점을 이용하여 인젝터에서 probe가 air core의 내부에 있는지 액체와 접촉하고 있는지를 결정하여 액막두께를 측정하였다. Kim 등[5]은 형광 신호의 감쇠를 이용하여 액막두

께를 측정하였고 이전 연구자들과는 달리 Weber number에 대한 실험식을 제시하였다.

스월챔버 내에서 형성되는 air core는 액막두께를 좌우하는 근본적인 원인이 된다. 인젝터 외부의 분무현상은 일반적으로 관찰이 용이하지만, 스월챔버 내의 air core는 보통 가시화하기가 어렵기 때문에 주로 수치적 해석을 통한 연구가 주로 이루어져 왔다. Som 등[6]은 air core가 중요한 분무 특성중의 하나인 유출계수에 지배적인 영향을 미치며, air core 직경 역시 평균 액적 크기를 결정에 중요한 역할을 하는 오리피스에서의 액막두께를 결정한다고 하였다. 따라서 air core가 스월 분무 노즐 영역에서 가장 중요한 요소 중의 하나가 될 수 있다고 하였다. Dash 등[7]은 원뿔형 노즐과 실린더형 노즐에서의 air core 형상을 비교하였으며, 실린더형 노즐에서 air core가 복잡한 나선 형상을 이루어 노즐 출구에서 원형이 아닌 타원형 제트가 나타난다고 하였다.

본 논문에서는 액막두께를 측정하기 위하여 Suyari, Lefebvre와 유사한 방식을 이용하였으나 스월챔버 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.

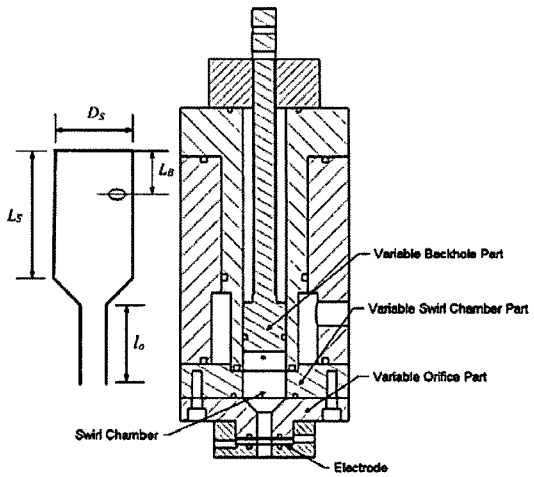


Fig. 1 Cross section view of swirl injector

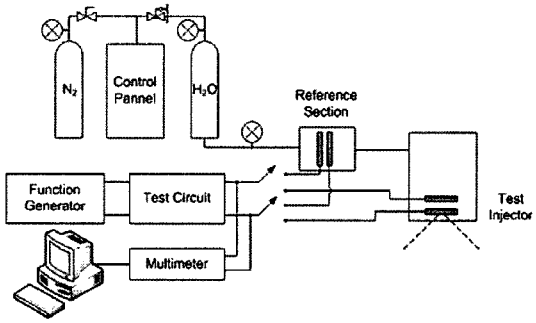


Fig. 2 Layout of apparatus

2. 액막두께 측정방법

2.1 실험장치

액막두께 측정을 위해 설계된 스월 인젝터의 구조는 Fig. 1과 같다. 기본적으로 액막두께를 측정할 수 있으며 스월 인젝터의 기하학적 형상에 따른 액막두께 변화를 측정할 수 있도록 백홀, 스월챔버, 오리피스 길이를 변화시킬 수 있게 제작하였다. 백홀은 음향학적 감쇠자로서 최근에 연소불안정성 등의 연구에 사용되고 있는 스월 인젝터의 기하학적 설계요소이다.[8] 액막두께는 스월 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 acryl로 분리되어 있다.

실험장치 구성은 Fig. 2와 같다. 실험 장치는 크게 함수발생기, 측정회로, 디지털 멀티미터로 이루어져 있다. 함수발생기로 일정한 주파수의 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 분극현상이 발생하기 때문이다.

Suyari와 Lefebvre[3]는 물의 순도와 온도에 의한 영향을 조사하기 위해 실험을 수행하였는데, 염도와 이온화도가 다른 몇 가지 물의 종류 중에서 일반 수돗물이 최소 분산과 재현성 면에서 가장 적합하다고 하였으며 물의 온도를 1°C로 유지시키는 것이 가장 중요하다고 하였다. 물의 전기전도도는 온도차에 의한 영향(약 2%/°C)이 크므로 대개는 동일한 조건에서 비교하기 위하여 25°C에서의 값으로 환산하여 기록하기도

한다. 그러나 실험환경에서 물의 온도를 1°C로 지속적으로 유지하기란 어렵기 때문에 물 공급라인에 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 인젝터 오리피스 내에 축방향을 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.

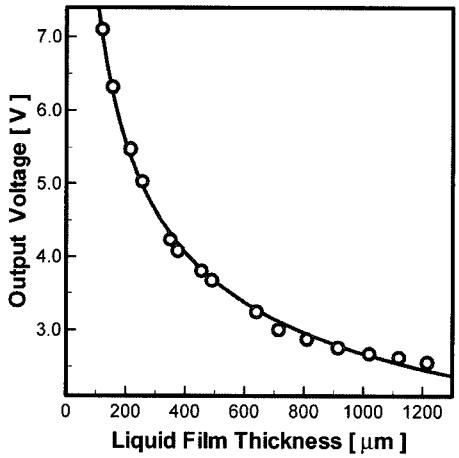


Fig. 3 Calibration curve

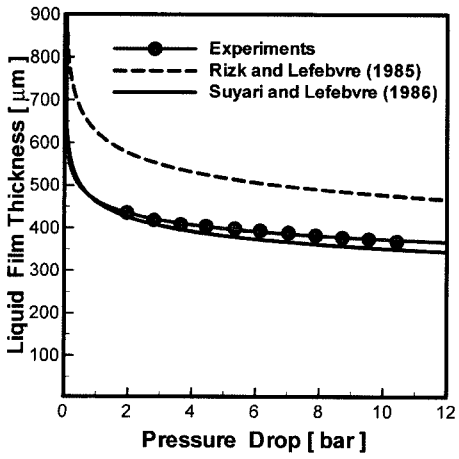


Fig. 4 Influence of water injection pressure

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.

Figure 3에서와 같이 calibration은 120 μm에서 1215 μm까지 약 50 μm간격으로 수행되었다. 아주 미소한 간격까지도 측정이 가능하다는 장점이 있다.

Figure 4는 분사압력에 따른 액막두께를 측정한 결과를 나타내고 있는데, 최근까지 어느 정도 잘 맞는다고 알려져 있는 Suyari와 Lefebvre[3]의 이론식과 비교해 볼 때, 분사압력 변화에 따른 액막두께는 기본 인젝터 형상이나 분사압력의 오차 등의 원인으로 약간의 차이를 보이고 있지만 대체로 경향성은 유사하게 측정되었다.

2.3 실험조건

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

Figure 1의 스월 인젝터에서 백홀, 스월챔버, 오리피스의 기본 형상 길이는 각각 0, 19, 18 mm 이다. 백홀 길이는 스월챔버 상단에 피스톤을 삽입하여 조절이 가능하도록 하였으며, 스월챔버와 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 스월챔버 내부를 가시화하였다.

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

3. 실험결과

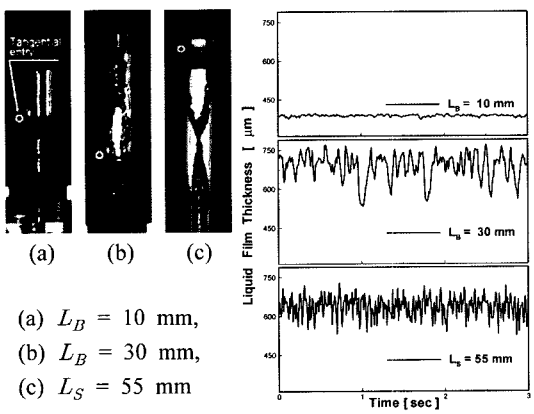
3.1 기하학적 형상에 따른 액막두께 측정

스월 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. 5(b)에서 볼 수 있듯이 특정 백홀 길이를 전후로 air core의 하단부가 불규칙적으로 분열되는 현상이 관찰되었다. 이와 동시에 Fig. 6(a)에서도 볼 수 있듯이 백홀 길이에 따른 액막두께 변화도 시간에 따라 불규칙한 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 스월챔버 길이에 변화를 준 경우에는 Fig. 5(c)와 같이 air core 상단부에서 규칙적인 분열 현상이 나타남을 관찰할 수 있었는데, 역시 Fig. 6(b)에서의 액막두께 측정 결과에서도 그대로 반영된다.

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

오리피스의 길이에 변화를 준 경우에는 내부 유동의 가시화에서도 아주 안정적인 air core 형상이 관찰되었으며 Fig. 6(c)에서 볼 수 있듯이 액막두께 측정 결과에서도 이런 점들이 그대로 반영되고 있다.

Figure 5의 (a), (b), (c)는 각각 백홀 길이 10 mm, 백홀 길이 30 mm, 스월챔버 길이 55 mm 일 때 스월챔버



(a) L_B = 10 mm,
(b) L_B = 30 mm,
(c) L_S = 55 mm

Fig. 5 Internal flow in swirl chamber and liquid film thickness variation for time step

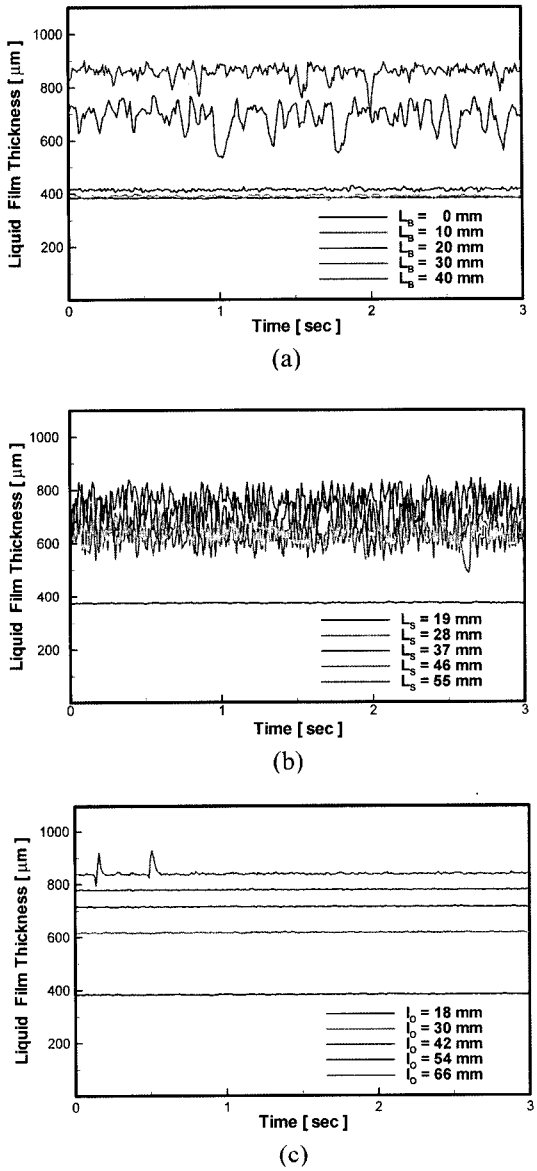


Fig. 6 Liquid film thickness variation for length parameters; (a) backhole length, (b) swirl chamber length, (c) orifice length

내부의 air core 형상을 가시화한 결과이며 각 경우에 대한 액막두께 변화도 나타나 있다. 위에서 살펴본 바와 같이 내부 유동의 변화를 액막두께 측정을 통해 서로 직접적으로 연관 지어 볼 수 있는데, 이는 다른 액막두께 측정법에서는 거의 불가능 했던 점이다.

전기전도도를 이용한 액막두께 측정방법은 오리피스 내에서 시간에 따른 유량섭동을 측정한 Bazarov[10]의 방

법과도 유사하며 이를 통해 시간의 변화에 따른 액막두께 변화 경향을 자세하고 정확하게 살펴 볼 수 있었으며, 내부 유동의 안정성 여부도 판단할 수 있었다.

3.2 측정결과의 정량화

동일한 조건에서 인젝터의 기하학적 형상에 따른 액막두께의 변화를 살펴보기 위하여 우선 실험조건에 따라 유량을 측정하였다. 다른 길이 변수와는 달리 오리피스 길이에 대한 유량은 거의 모든 경우에서 일정하였다.

액체로켓엔진용 인젝터가 아닌 pressure-swirl atomizer를 사용했던 기존의 연구결과에서는 오리피스의 길이가 액막두께 변화에 미치는 영향이 매우 작다고 되어있다[9]. 이는 실험에 사용된 pressure-swirl atomizer의 오리피스 길이가 상대적으로 짧았고 길이변화를 아주 적게 주었기 때문이다. 이에 따른 실험결과에서는 오리피스 길이가 증가하였을 때 액막두께는 오히려 감소하였다. 그러나 본 논문의 실험결과에서는 오리피스 길이가 증가함에 따라 액막두께도 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 경향은 Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 LIF (Laser Induced Fluorescence)방법을 사용한 Kim 등[5]의 결과에서도 살펴볼 수 있었다.

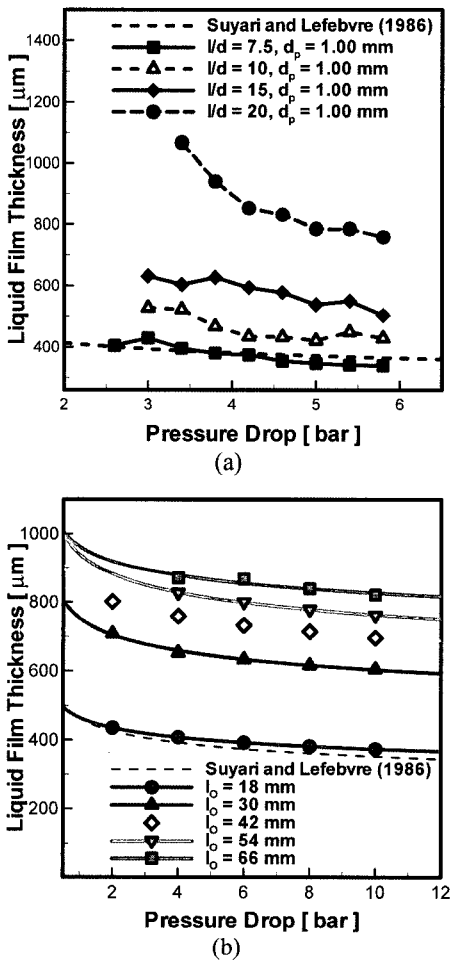


Fig. 7 Liquid film thickness measurement; (a) LIF method (b) Electrical conductance method

Figure 7(b)은 오리피스 길이에 따른 액막두께 변화를 나타내고 있으며, Fig. 7(a)에서의 결과보다 경향성면에서 더 일관성이 있음을 알 수 있었다. 식(2)은 Suyari와 Lefebvre[3]에 의해 제시된 식으로 Rizk와 Lefebvre[11, 12]에 의해 유도된 식(1)을 실험을 통해 상수를 보정한 결과로 지금까지 어느 정도 잘 맞는다고 알려져 있다.

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

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

그러나 위 식들에서는 오리피스의 길이에 대한 영향은 고려되지 않고 있으며, 실제 실험결과에서도 특정 길이의 오리피스의 경우 이론식과 유사한 결과를 나타내지만 오리피스 길이를 변화시킴에 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 실험식(3)을 도출하였다.

Figure 8은 실험을 통한 액막두께 측정결과와 식(3)에 의한 값의 비를 나타내고 있는데, 실험결과와 실험식의

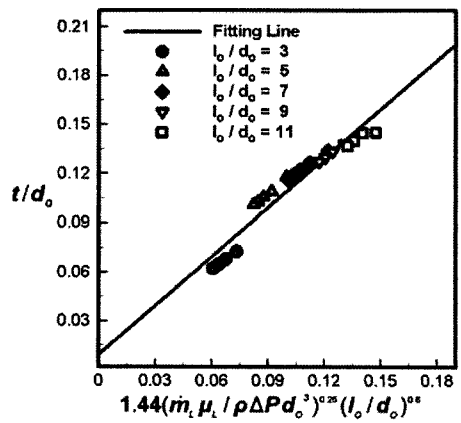


Fig. 8 Empirical relation for liquid film thickness

오차가 적음을 알 수 있다.

$$\left(\frac{t}{d_o}\right) = 1.44\left(\frac{\dot{m}_L \mu_L}{\rho_L \Delta P_o^3}\right)^{0.25}\left(\frac{l_o}{d_o}\right)^{0.6} \quad (3)$$

식(3)에서 스월 인젝터에서 액막두께에 대한 오리피스 길이의 영향은 Kim 등[5]의 연구결과인 $t/d_o \propto (l/d_o)^{0.527}$ 와 비교해보았을 때, $t/d_o \propto (l_o/d_o)^{0.6}$ 으로 결과의 신빙성을 확인할 수 있었다.

3.3 Air Core Instability

Dash 등[7]은 원뿔형 노즐에서 노즐 출구 근처의 직경이 증가함에 따라 air core가 거의 대칭적으로 형상을 유지하고 있는 반면에 실린더형 노즐에서는 air core가 복잡한 나선 형상을 이루어 노즐 출구에서의 제트 단면이 원형이라기보다는 다소 타원형을 나타낸다고 하였다. 본 연구에서도 이러한 결과를 살펴볼 수 있었는데, 스월챔버 길이가 기본 길이인 19 mm 보다 긴 경우에서 Dash 등의 결과에서와 같이 실린더형 노즐에서의 air core 형상 변화가 나타났다. Dash 등[7]은 노즐에서 air core 발달과정이 매우 빠르게 진행되기 때문에 air core 구조를 포착하기 위하여 고속카메라의 필요성을 언급하였지만, 상당한 투자가 필요하므로 대신에 수치적 해석 방법을 이용하였다. 본 연구에서는 고속카메라를 이용하여 초당 8000 frame의 영상을 획득하여 air core 구조 변화를 살펴보았다. 그 결과 Fig. 9에서와 같이 스월챔버 길이가 28 mm 인 경우 0.125초 동안 air core가 2회 정도 나선형으로 분열되는 현상이 발견되었다. 분사압력이 6 bar 인 경우에 유량은 약 34 g/s, 3개의 접선방향 유입구에서의 평균 유속은 약 14.44 m/s 이었다. 스월챔버 내의 점성효과, 스월챔버의 기하학적 형상, 레이놀즈

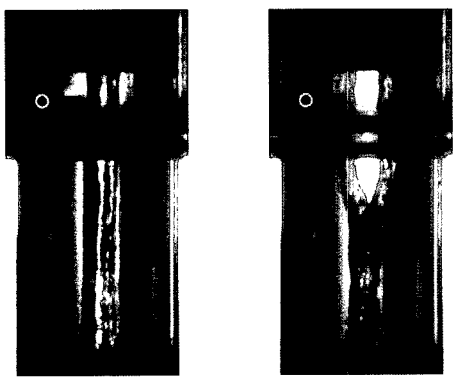


Fig. 9 Formation of air core in swirl chamber at L_S = 28 mm

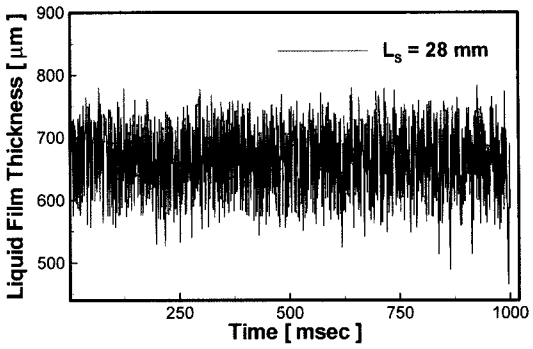


Fig. 10 Variation of liquid film thickness for time step at L_S = 28 mm

수 등이 원인이 될 수도 있지만, 어떤 교란으로 인해 air core가 나선 구조를 나타내는지에 대해서는 연구가 더 필요하다고 생각된다.

Air core는 오리피스에서의 액막두께에 직접적인 영향을 주기 때문에 air core의 변화에 따른 액막두께 변화 경향을 살펴보는 것은 중요하다. 본 연구에서 사용한 액막두께 측정 장치는 시간 변화에 따른 데이터 획득이 가능하므로 air core의 변화에 따른 액막두께 경향성을 쉽게 파악해 볼 수 있다. Fig. 10은 스월챔버 길이가 28 mm 일 때, 시간에 대한 액막두께 변화를 나타내고 있다.

1초 동안 1000개의 데이터를 측정하여 살펴본 결과, air core가 시간에 따라 크게 변화하고 있음을 유추해볼 수 있으며 액막두께도 약 200의 진폭을 가지며 변화하였다.

3.4 Air Core Stabilization

오리피스에서의 액막두께 fluctuation은 불안정한 분무를 만들어 내고 이는 실제 로켓엔진 연소시 불안정성을 일으키는 원인이 될 수도 있다. 따라서 스월챔버 내의 air core가 안정적으로 유지시키는 것은 안정한 분무를 위한 근본적인 해결책이 될 수 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 스월챔버 길이가 길어짐에 따라 air core가 나선형 구조를 나타내다가 분열되는 현상이 발생하였는데, 이 분열현상은 주로 접선 방향 유입구 근처에서만 발견되었다. Dash 등[7]은 노즐에서 유체가 배출되는 과정에서 Core 내 압력이 대기압 이하로 떨어지게 되면 주위 공기가 노즐내로 빨려 들어가 air core가 형성된다고 하였다. 이러한 점에 착안하여 Fig. 11과 같이 인젝터 내의 형상에 변화를 주어 불안정한 air core를 안정화시키

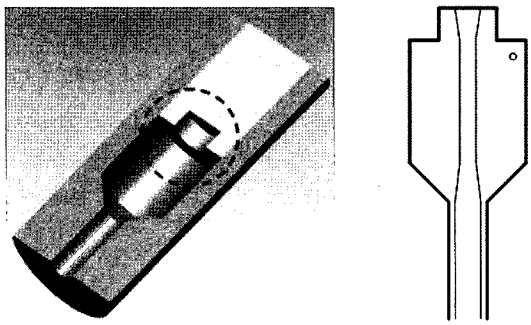


Fig. 11 Addition of core-hole parameter

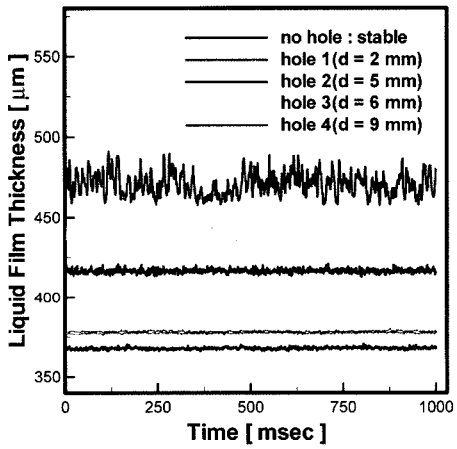


Fig. 12 Effects of core-hole parameter

는 방안을 모색하여 보았다. 인젝터 내의 형상은 나선형 구조의 air core에서 분열 현상이 주로 발생하는 유입구 상단 부분에 평균 air core 직경보다 큰 core-hole을 만들어 변화를 주었다.

Air core 안정화 여부를 판단하기에 앞서 core-hole 직경이 air core 직경 변화에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 실험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 12와 같이 core-hole 직경이 커짐에 따라 air core 직경은 줄어들고 있음을 알 수 있었으며, 이는 유입구에서의 유속이 빠르고 air core가 생성되는 과정에서 챔버 내로 빨려 들어가는 공기가 유입구 바로 위에 위치하는 core-hole의 영향을 받기 때문이라고 생각된다. 그리고 air core 직경보다 core-hole 직경이 더 큰 경우(9 mm hole)에 액막두께 변화에도 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 결과에서 더욱 정확한 형상 변수에 대한 스케일링이 이루어진다면, 오리피스의 길이 변화나 core-hole의 직경 변화를 통하여 스월 인젝터에서의 액막두께 조절이 가능하리라고 여겨진다.

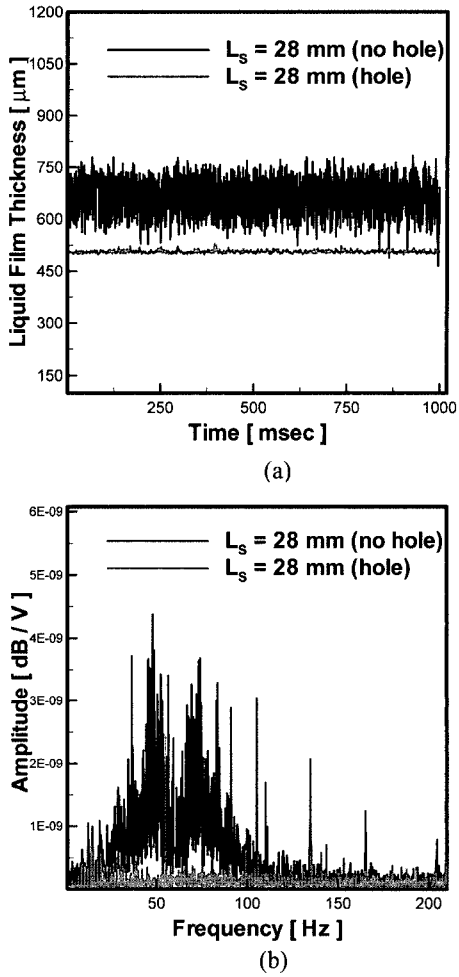


Fig. 13 Variation of liquid film thickness (a) and frequency analysis in orifice (b)

Figure 13은 스월챔버의 길이가 28 mm 일 때의 액막두께 측정결과와 주파수 분석 결과를 나타낸다. Core-hole이 없는 경우에는 액막두께 변화가 최대 200 μm의 진폭을 가지며 심한 fluctuation 현상이 나타났지만, 직경 9 mm의 core-hole이 있는 경우에는 액막두께의 fluctuafion이 거의 나타나지 않았으며, 가시화 결과에서도 안정적인 air core를 형성하고 있음을 알 수 있었다. 스월챔버의 길이가 더 길어짐에 따라서는 안정화에 대한 영향력이 감소하긴 하였지만, 나선형 구조를 가지는 air core 분열 현상은 나타나지 않았다.

Core-hole의 직경이나 깊이 등이 air core의 구조에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서는 추후 더욱 깊이 있는 연구가 필요하겠지만, 몇 가지 실험 결과를 통해 접선방

향 유입구 상단에 위치하는 core-hole의 존재가 스월챔버 내에서 일종의 oscillator로서의 역할을 하고 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 스월 인젝터에 전기전도도를 이용한 장치를 제작하여 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. 이외에도 액막두께에 직접적인 영향을 미치는 air core의 변화를 가시화하였으며, 스월챔버의 형상 변수에 따라 air core의 안정성이 달라질 수 있음을 확인하였다. 좀 더 세밀한 스케일링이 필요하겠지만 본 연구 결과를 통해 오리피스의 길이나 core-hole의 직경 등에 변화를 줌으로써 액막두께의 조절이 가능함을 알 수 있었다.

최근 들어 액체로켓엔진용 스월 인젝터의 최적설계를 통해 연소 불안정성을 제어하려는 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이에 부합하여 적절한 인젝터 형상 변화를 통해 정확히 액막두께를 제어하고, 액막두께 측정을 통해 가시화가 불가능한 실제 액체로켓엔진 인젝터 내부의 유동 특성 등을 살펴볼 수 있다는 가능성도 찾아볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 서울대학교 BK21 기계분야사업단에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(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) 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.

(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) 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.

(5) 김동준, 임지혁, 한풍규, 윤영빈, "스월 인젝터의 작동조건 및 인젝터 형상에 따른 분무특성," 한국액체미립화학회지, 제9권 제1호, 2004, pp. 21~29.

(6) S. K. Som and S. G. Mukherjee, "Theoretical and Experimental Investigations on the Formation of Air Core in a Swirl Atomizing Nozzle," Applied Scientific Research, Vol. 36, No. 3, 1980, pp. 173~196.

(7) S. K. Dash, M. R. Halder, M. Peric and S. K. Som, "Formation of Air Core in Nozzles With Tangential Entry," Journal of Fluids Engineering, Vol. 123, 2001, pp. 829~835.

(8) 황성하, 윤영빈, "액체 추진제용 로켓 엔진 스월 인젝터의 백홀로 인한 분무 특성 연구," 한국추진공학회지, 제7권 제2호, 2003, pp. 23~35.

(9) Lefebvre, A.H., "Atomization and Sprays," Hemisphere Publishing Corporation, 1989.

(10) V. G. Bazarov, "Liquid Injector Dynamics," Moscow, Mashinostroenie, 1979.

(11) 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.

(12) 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.