

Jet의 충돌로 형성된 액막의 분산각 및 후류 분열길이에 관한 연구

A study on the Breakup Length of Back Flow and Dispersion Angle of the Liquid Sheet formed by Two Impinging Liquid Jets

박 종욱*, 김 선진, 김 유(충남대학교)

1. 서론

충돌형 인젝터는 가공이 비교적 용이하고 혼합성능이 좋기 때문에 LOX(액체산소) /RP-1 (kerosine - based hydrocarbon fuel)과 저장성 추진제인 N_2O_4 (nitrogen tetroxide)/Aerozine 50(hydrazine 과 UDMH의 50/50 혼합)등의 추진제조합을 사용하는 액체로켓엔진에서 주로 사용되어왔다. 충돌형 인젝터는 두 개의 연료 사류와 두 개의 산화제 사류가 서로 충돌하는 like형과 연료 사류와 산화제 사류가 서로 충돌하는 unlike형으로 구분되어 진다.

Table 1. Design Features of Injectors used in Major Operational Vehicles

발사체, 엔진	추진제	추력 (lbf)	연소실 압력(psi)	인젝터 형상
Redstone A-7	LOX/ Alcohol	78,000	315	Like Doublet
Jupiter	LOX/ RP-1	150,000	530	Like Doublet
Thor MB-3	LOX/ RP-1	170,000	588	Like Doublet
Saturn IC F-1	LOX/ RP-1	1,522,000	1128	Like Doublet
Lance booster	IRFNA/ UDMH	42,000	950	Unlike Doublet

표 1 은 충돌형 인젝터를 사용한 기존엔진의 주요 설계특성으로서, LOX를 산화제로 사용하는 엔진에는 like 충돌형 인젝터가 주로 사용되고 있음을 알 수 있다. 따라서 like 충돌형 인젝터를 사용하는 엔진의 안정성 및 성능향상을 위해 많은 연구가 진행되어 왔으며, 특히 사류의 충돌로 형성된 액막의 분산각, 액주/액적의 형성 주기는 추진제의 질량분포, 혼합분포, 연소불안정성에 직접적인 영향을 끼치기 때문에 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 경우에 따라 인젝터면을 향하여 움직이는 후류 유동이 발

생하게 되는데, 이러한 후류유동은 인젝터면 근처에서의 연소집중을 초래하여 인젝터면을 손상시키는 주요한 원인이 되기 때문에 충돌형 인젝터를 사용하는 엔진에서는 주의하여야 할 부분이다. 그림 1 은 충돌형 doublet 인젝터의 사류가 충돌후 형성된 액막의 분열과정을 나타 내었다.

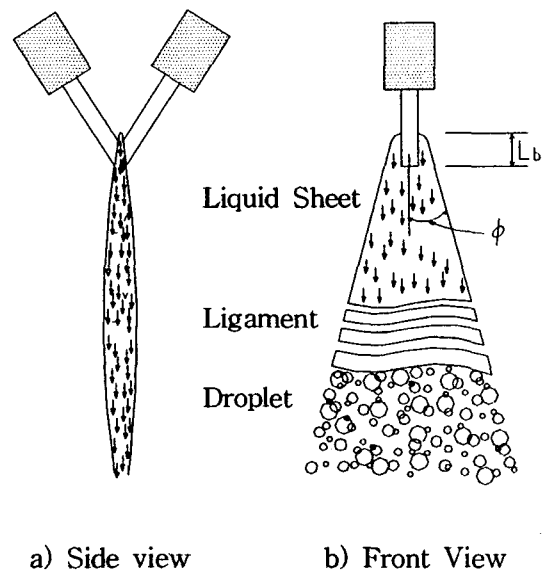


Fig.1 Disintegration of liquid Sheet formed by Two Impinging Jets

N. Dombrowski 와 P.C. Hooper는 지름 0.5mm의 사류를 속도 7 ~ 20m/s, 충돌점거리 2mm, 충돌각 50~140°의 조건하에서 충돌사류에 의해서 형성된 액막의 분열에 대한 연구를 수행하였다. 액막의 분열은 Re수에 따르지 않고 사류의 속도분포선과 충돌각에 영향을 받음을 관찰하였다. 난류 사류는 충돌점에서 형성된 충돌파가 액막의 분열을 야기시켰고, 층류 사류는 충돌파와 공기역학적파가 액막의 분열을 야기시킴을 관찰하였다.

Heidmann과 Foster는 지름 2.26mm의 사류를 충돌각 10~90°, 사류속도 9.144~22.555 m/s의 조건하에서 충돌시켜 충돌각, 사류속도가 분산각과 분열길이에 미치는 영향을 실험적으로 관찰하였다. 실험결과 충돌각이 증가하면 분산각이 증가하고, 분열길이는 짧아졌다. 그러나 사류 속도가 분산각과 분열길이에 미치는 영향은 두드러지지 않음을 관찰하였다.

E.A. Ibrahim과 A.J.Przekwas는 충돌사류에 의해서 형성된 액막의 분열을 해석적으로 연구를 수행하였다. 저자는 We수에 따라 두 개의 분열영역 ($We < 500$, $We > 2000$)이 존재하고, 두 영역에서 분열기구가 다름을 제안하였다. 그리고 낮은 We수 영역에서 액막의 형상과 두께를 예측할 수 있는 모델을 제안하였다.

본 연구에서는 충돌각(30~120°), 사류속도(4~20 m/s), 오리피스지름(0.61, 0.98, 1.55 mm)을 변화시키며, 충돌형 인젝터의 설계 및 운용조건이 후류유동의 발생과 액막의 후류 분열길이에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였고, 이론적 모델 및 기존 실험 결과와 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

인젝터

본 연구를 수행하기 위해 충돌각, 충돌점거리, 오리피스지름을 쉽게 교환할 수 있도록 다음과 같이 설계하였다. 인젝터는 분류의 충돌시 형성된 액막의 폭에 따라 높이를 조절할 수 있는 지지대, 오리피스에서 나오는 사류가 정확하게 충돌하도록 방향을 미세조정할 수 있는 나사, 사류의 충돌점거리를 변화시킬 수 있는 Clamp로 이루어져 있다. 지지대는 광학용으로 사용되는 post를 사용하였고, Clamp는 SUS(1/4인치)관의 전후 이동 및 고정을 위해, 중심부에 1/4인치 구멍을 뚫었고, 육각나사(M2)로 고정할 수 있도록 설계하였다. 오리피스는 Clamp에 설치된 1/4인치 SUS관의 앞부분에 너트로 고정하여 교체가 가능하도록 되어있다. 지지대를 받치고 있는 부분은 5도 간격으로 눈금이 새겨있는 반원형 밀판의 중심부에 회전

이 가능하도록 고정되어, 충돌각을 변화시킬 수 있도록 하였다. 사진 1은 녹 방지를 위해 듀랄루민으로 제작된 가변형 인젝터이다.

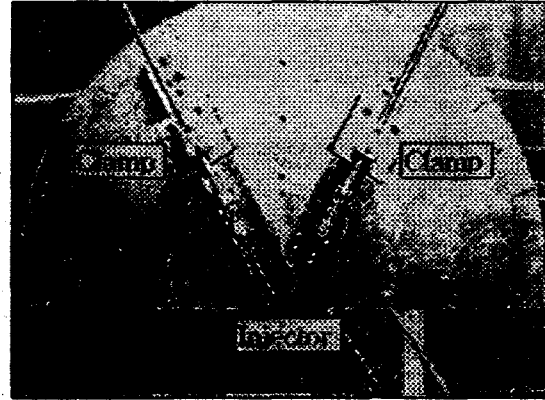
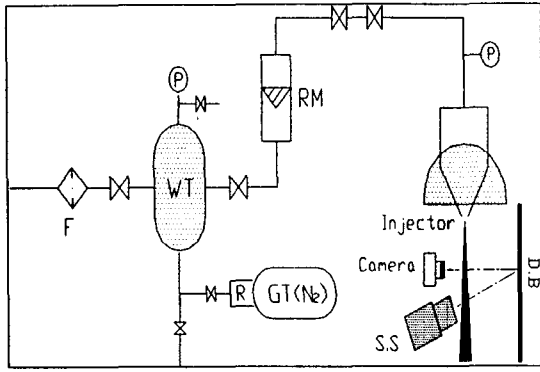


Photo. 1. Impinging Injector

실험장치 구성도

그림3은 추진제를 공급할 수 있는 공급계통도 및 분사되는 추진제의 분무현상을 촬영한 장치도이다. 수도에 연결된 1/2인치 동관을 통하여 공급되는 물은 정수기(10 μ m filter)를 통과하여, SUS로 제작된 고압 탱크로 공급된다. 고압 탱크내의 물은 Regulator(1차압력 250기압, 2차압력 10기압)가 부착된 고압 질소 가스 tank(20liter, 100기압)로 가압되어 인젝터로 공급되어 진다. 물의 유량은 인젝터로 공급되기 전에 설치된 Rotameter를 이용하여 측정된 후, Union Tee를 이용하여 두 방향으로 분류되어 오리피스로 공급된다. 유량변화의 미세 변화를 위하여 관의 중간에 needle valve를 설치하였다. 그리고 Stroboscope(life time; 3 μ s)의 빛은 30도 입사각으로 30cm 거리에 설치된 형광판에 반사되어 액막을 비추도록 하였다. 또한 액막에 근접하여 촬영할 수 있도록 접사 렌즈를 카메라에 부착하였고, 노출시간은 1/4초, 조리개는 4로 하였다. Stroboscope의 주파수를 240rpm으로 고정하여 빛의 발생시간과 카메라의 작동 시간을 맞추어 한장에 한개의 영상을 받을 수 있도록 하였고, 필름은 ASA# 400칼라 필름을 사용하였다.



GT : Gas Tank,
 WT: Water Tank
 RM : Rotameter , P : Pressure gauge
 F : Filter , S.S : Stroboscope
 D.B : Deflection Board

Fig.2. Apparatus for measuring spray pattern formed by impinging injector

실험조건

수행한 인젝터의 형상 및 운용조건은 표2와 같다.

Table 2. Experimental Condition

인젝터 형상	Doublet
사류속도(U_j)	4 ~ 20 m/s
충돌각(2θ)	30 ~ 120 degree
충돌점거리(L_{imp})	12 mm
오리피스 길이(L)	60 d
오리피스지름(d)	0.61 mm 0.98 mm 1.55 mm

3. 결과 및 고찰

모든 조건하에서 충돌점에 높은 정체 압력이 형성되어, 두 개의 사류를 포함하고 있는 평면과 수직하게 얇은 액막을 형성하면서 충돌점으로부터 반경방향으로 흐르는 유동이 형성되었다. 다음은 실험을 통하여 얻어진 사진 2,3,4와 이론적으로 계산된 결과에 대한 고찰이다.

그림 4는 충돌각 60도 이상, We수 500이하에 대한 액막의 형상 및 두께를 예측할 수 있는 E.A. Ibrahim의 해석해로 계산된 오리피스 지름 0.61mm, 사류속도 4m/s 조건하에서 충돌각 변화에 대한 액막형상의 변화이고, 사진 2는 같은 조건하에서 수행된 실험결과이다. 충돌각이 증가함에 따라, 액막의 폭은 증가하며, 60도 이상의 충돌각에서는 충돌점 후방으로 유동이 생성되며 충돌각을 더 증가시키면 후류의 분열길이($\phi=180$)도 증가하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 충돌각을 증가시키기에 따라 충돌 운동량이 증가되어, 충돌점의 정체압력이 상승되기 때문으로 사료된다. 또한 낮은 충돌각에서 액체의 많은 부분이 축에 집중되었고, 더 높은 충돌각에서 액체는 균일하게 분산되었다. 그리고 속도를 증가시키면서 액적의 방향을 관찰하여, 형성된 액막의 $\phi=0$ 과 $\phi=90$ 사이에 있는 유체는 전방으로 움직이고, $\phi=90$ 와 $\phi=180$ 도 사이에 있는 유체는 후방으로 움직임을 확인하였다. 결과적으로 저속 충돌 사류에 의해 형성된 액막 형상을 해석함으로써 고속 충돌 사류에 의해서 형성되는 액적의 방향을 예측할 수 있었다.

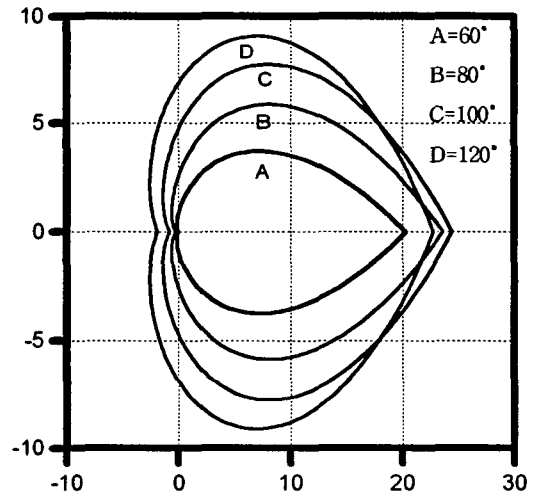


Fig.4 Shape of Liquid Sheet formed by Two Impinging Jets (d=0.61mm,v=4m/s)

그림 5는 오리피스 지름 0.98mm, 충돌각 80, 100, 120도 조건하에서 사류 속도 변화에 대한 후류 분열길이의 변화를 나타내며, 경향이 다른 두 영역이 존재함을 알 수 있었다.

첫번째 영역은 유속이 4m/s~12m/s로 후류 유동의 액막 끝부분에 달혀진 가장자리 영역이 관찰되었고, 이러한 현상은 액막의 끝부분에서 관성력과 표면장력이 평형상태를 유지하고 있기 때문으로 사료된다. 또한 액막의 표면위에 충돌파가 존재함이 관찰되었고, 이 영역에서는 관성력이 표면장력과 평형을 유지하기 때문에 사류속도가 증가하면 분열길어도 증가하였다. 유속 12m/s이상인 두번째 영역에서는 액막 끝부분에서 달혀졌던 가장자리 부분이 깨어지며, 사류의 속도가 증가함에 따라 후류 액막 분열 길이는 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 관성력과 표면장력의 균형이 깨어지며, 관성력의 증가는 충돌파로 인한 액막의 분열을 촉진하기 때문으로 사료된다.

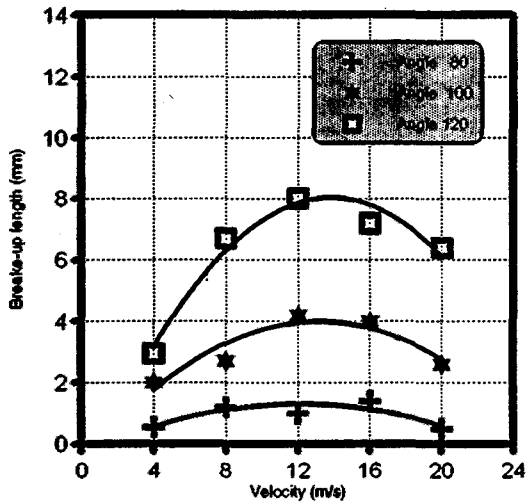


Fig.5 The variation of Breakup length with injector velocity ($d=0.98\text{mm}$)

그림 6은 오리피스 지름 0.98, 1.55mm, 사류속도 4m/s인 조건하에서 충돌각을 변화시킴에 따른 후류 분열길이 변화를 나타낸다. 오리피스 지름과 충돌각을 증가시킴에 따라 액막의 분열 길이는 증가한다. 이것은 유량의 증가와 반경방향의 유속증가로 운동량이 증가하여, 정체압력을 상승시키기 때문에 후류 유량의 증가를 초래하는 것으로 사료된다.

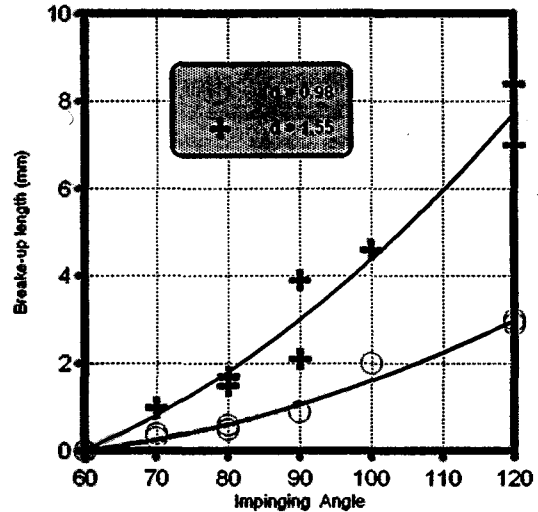


Fig.6 The variation of Breakup length with impinging angle ($v=4\text{m/s}$)

그림 7,8은 충돌각, 사류속도, 오리피스지름의 변화에 따른 액막의 분산각이다. 오리피스 지름과 사류속도는 액막의 분산각에 거의 영향을 미치지 않고, 충돌각이 증가함에 따라 분산각이 증가하다가 충돌각이 약 60도 이상에서는 분산각이 360도로 수렴하였고, 충돌점후방 ($\phi=180$)으로의 유동이 시작되었다. 이러한 결과는 Heidman의 실험결과와 거의 같은 경향을 나타내고 있다.

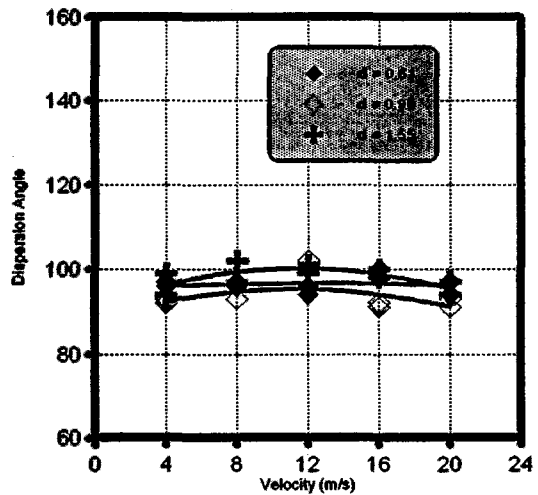


Fig.7 The variation of dispersion angle with injector velocity and orifice diameter ($2\theta=30^\circ$)

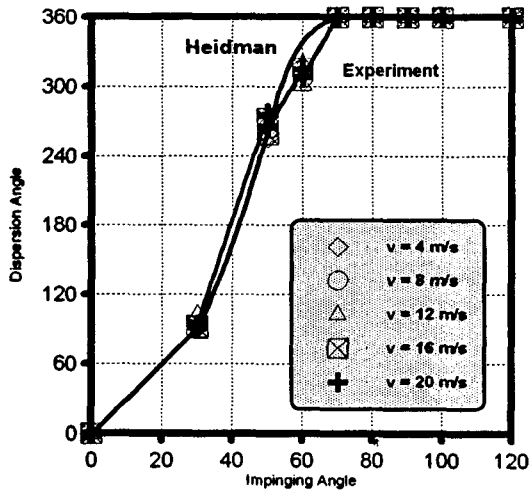


Fig.8 The variation of dispersion angle with impinging angle ($d=0.98\text{mm}$)

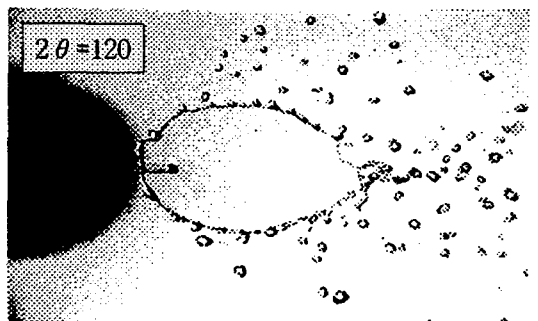
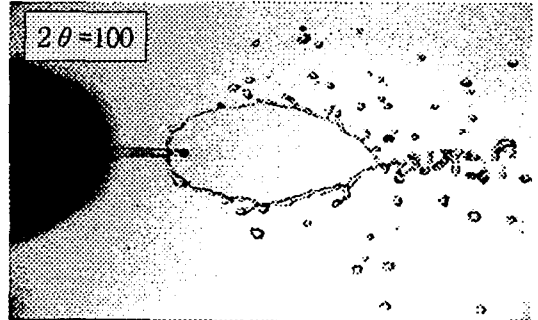
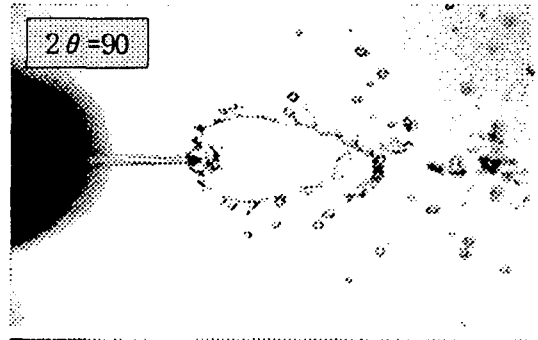
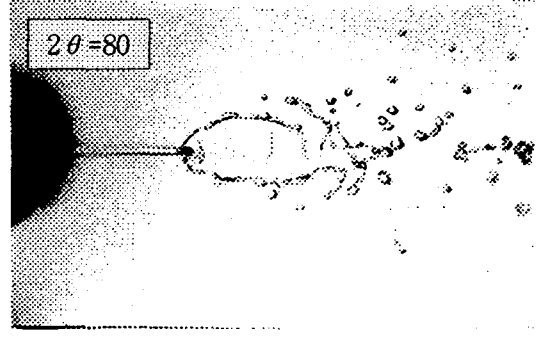
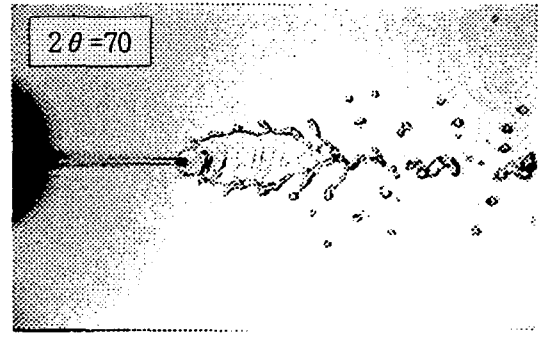
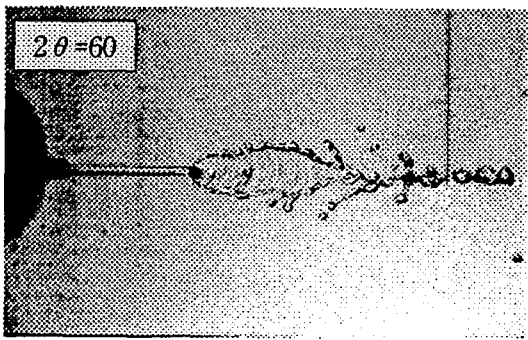
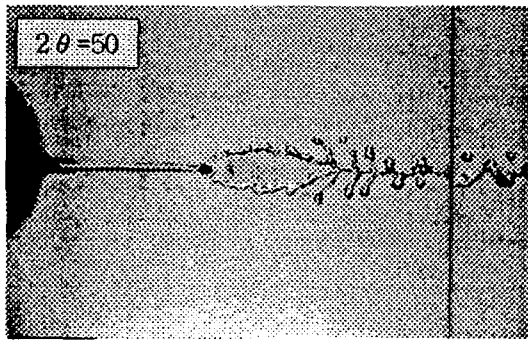
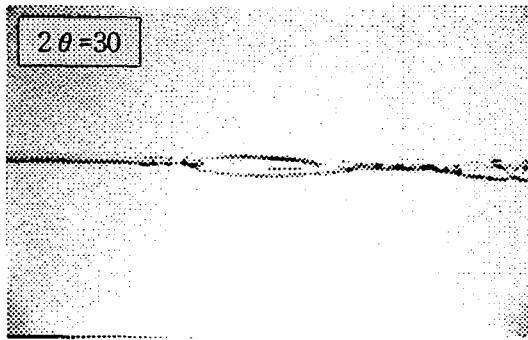


Photo. 2 The variation of spray pattern with impinging angle ($d=0.61\text{mm}$, $v=4\text{m/s}$),

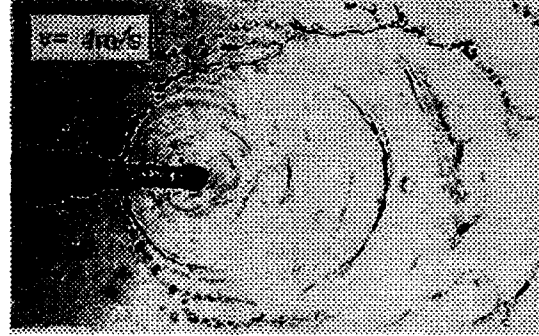
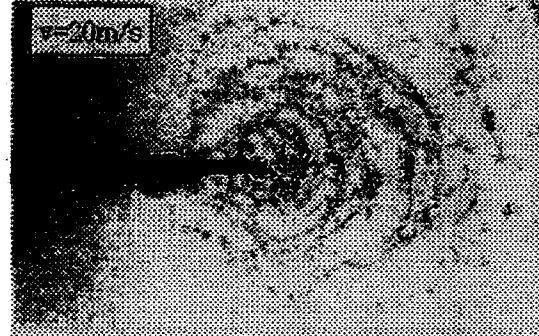
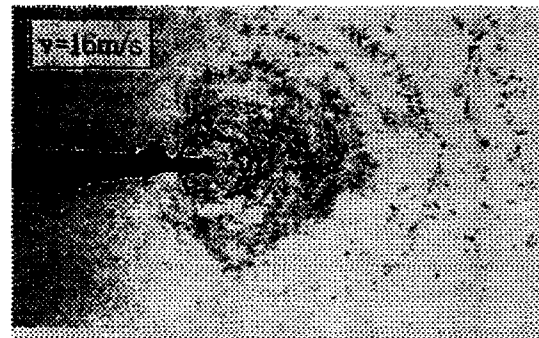
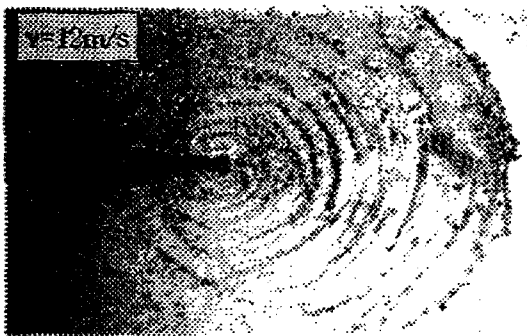
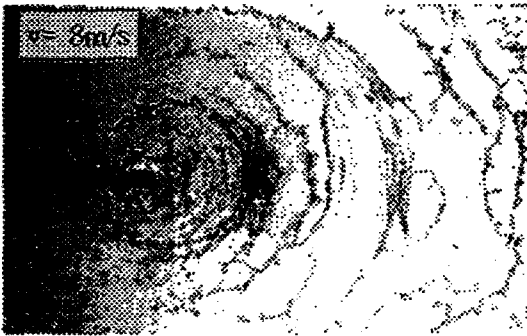
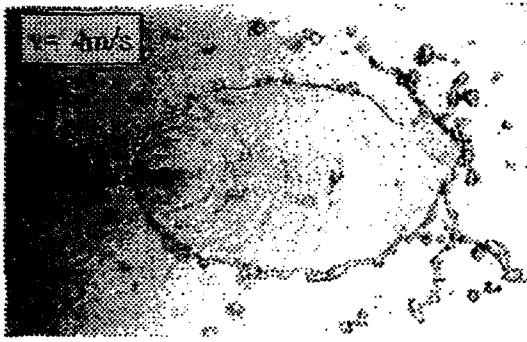


Photo.3 The variation of spray pattern with injector velocity($d=0.98\text{mm}$, $2\theta=100^\circ$) and orifice diameter($d=1.55\text{mm}$, $2\theta=100^\circ$)

4. 결론

두 사류의 충돌로 형성된 액막의 후류유동에 대한 연구결과는 다음과 같으며, 이러한 결과는 충돌형 인젝터를 사용하는 여러분야에서 활용될 수 있을 것이다.

1. 충돌각과 오리피스 지름이 증가함에 따라 후류의 분열길이는 증가한다.
2. 12 m/s이하의 속도에서는 유속이 증가하면 분열길어도 증가하나, 12 m/s이상의 속도에서는 유속이 증가하면 분열길이는 감소한다.
3. 오리피스 지름과 사류속도는 분산각에 거의 영향을 미치지 못한다.
4. 분산각은 충돌각이 증가함에 따라 증가하며, 충돌각 60도 이상에서는 분산각이 360도로 수렴하고, 충돌점 후방으로의 유동이 생성된다.

참고문헌

1. Dombrowski, N. , etc, " A Study of the Sprays Formed by Impinging Jets in Laminar and Turbulent Flow ", J. Fluid Mechanics, Vol. 18, Part 3, 1963, pp. 392-400.
2. Heidman, M. F.,etc, " A Study of Sprays formed by Two Impinging Jets", NACA Technical Note 3835, March 1957.
3. H. M. Ryan, etc, " Atomization Characteristics of Impinging Liquid Jets ", AIAA paper 93-0230, Jan. 11-14, 1993.
4. Ibrahim, E. A.,etc , " Impinging Jets Atomization ", Phys. Fluids A, Vol. 3, No. 12, Dec. 1991