

SWIRLER의 설계변수가 액막특성에 미치는 영향

Effects of Design Values of Swirler on the characteristics of the liquid sheet

박병성*, 김선진, 김유(충남대학교)

1. 서론

Swirl Coaxial 인젝터는 미립화 및 혼합효율이 좋고, 안정된 연소가 이루어지기 때문에 LOX/GH₂를 추진제로 사용하는 액체로켓엔진의 인젝터로 널리 사용되고 있다. Swirl Coaxial 인젝터의 기본 형태는 그림1 과 같고, 주로 액체 산소는 Swirl을 야기할 수 있도록 압력차에 의해서 Post에 접선방향으로 유입되고, 액체수소는 냉각을 위해 사용된 후 가스상태로 산화제관 주변의 Coaxial관을 통하여 연소실로 유입되어, 액체산소와 혼합되어 연소가 이루어진다. 이러한 형태의 인젝터는 RL10A 액체로켓엔진에 오랜동안 성공적으로 사용되어왔고, 또한 Spray Drying, Spray cooling, spring cooler, 가스터빈, 자동차엔진, 보일러등 여러분야에서 사용되어 왔다. 이러한 분무현상에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해서 진행되어 왔으나, Swirler만에 의해서 형성된 액막의 특성이 Swirl Coaxial 인젝터의 미립화에 중요한 영향을 미치나 이에 관한 연구결과는 미흡한 실정이다.

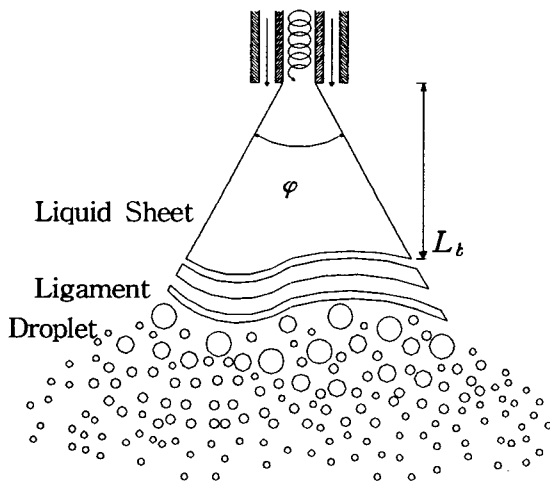


Fig. 1 Disintegration of Sheet formed by Swirl Injector

Donald J. Hautman은 카메라, Patternater와 PDPA를 사용하여 가스/액체 Swirl Coaxial 인젝터에서 분무되는 추진제의 분산각, 질량분포, 액적크기분포에 대한 영향을 고찰하였다. 실험결과, 분산각은 질량유동율이 증가함에 따라, 가스 유동율이 감소함에 따라 증가함을 알았고, 대칭성을 이루며 중심부에는 추진제가 거의 없는 cone 형태의 질량분포를 나타내었다.

M.Doumas 와 R. Laster은 인젝터 출구의 지름보다 큰 반경을 가지는 Swirler로 실험을 수행하여, 인젝터의 기하학적 형상과 압력조건으로부터 액막의 속도와 두께를 계산할 수 있는 실험식을 제시하였고, 액막내에 존재하는 core는 인젝터의 기하학적 형상에만 종속되고, 압력조건에는 무관함을 밝혔다.

G.D. Crapper등은 얇은 액막에서 생성되는 Kelvin-Helmholtz waves(Aerodynamic waves)를 영상처리를 통해서, 파의 성장은 액막의 속도와 출구로부터의 거리에 많은 영향을 받음을 알았다. 이러한 현상은 경계층의 박리와 Vortex의 성장이 주된 원인임을 밝혔고, vortex는 인젝터로부터 일정한 거리에서 형성되었고, 이것의 크기가 급격하게 증가되었다. Vortex가 성장하는 정도는 운용조건에 달려있고, 높은 성장율에서 액막은 빨리 분열됨을 알았다.

본 연구에서는 액체로켓엔진에 사용될 수 있는 Swirl Coaxial 인젝터의 개발을 위해, 가스가 공급되지 않는 상태에서 Swirler에 의해 형성되는 액막의 특성에 대한 기초연구를 수행하였다. 연구를 위해 추진제 대용으로 물을 사용하였고, 인젝터의 기하학적 형상인 입구 형상, Post 길이/직경비와 운용조건이 분무특성인 액막길이, 분산각에 미치는 영향과 유량계수에 미치는 영향을 고찰하였다. 실험은 stroboscope와 카메라를 이용하여 분무형태를 영상화하는 방법을 사용하였다.

2. 실험장치 및 방법

인젝터

본 연구의 목적을 수행하기 위해, 그림2와 같이 Swirler와 Post를 쉽게 교환할 수 있도록 부분품으로 설계하여 볼트로 체결하였다. 인젝터는 LOX를 산화제로하는 50lbf용 액체로켓엔진 및 하이브리드 로켓 엔진에 사용할 수 있도록 설계하였고, Slot 면적/Post 면적비, Swirler 입구의 폭/높이비는 문헌을 참고하여 미립화에 최적치인 0.57과 0.2로하여 설계하였다. 표1은 본 실험에서 사용한 Swirler, Post의 치수이고, 이러한 형상을 조합하여 각변수가 분무특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 Swirler주변에서 유체가 작은 유속을 유지할 수 있도록 Manifold에 두 개의 1/4인치 관으로 물을 공급하였고, 각 부품의 결합시 새는 것을 방지하지 위해 O-ring을 사용하였다.

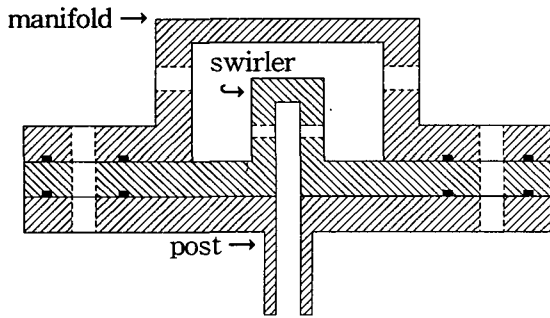


Fig. 2 Swirl Injector

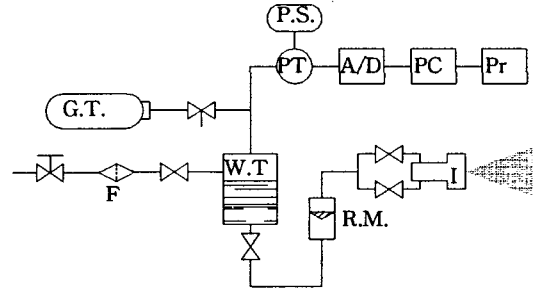
Table 1. Dimension of Swirl Injector

부 품	명 칭	치 수(mm)	
Manifold	Inner diameter	30	
	Inlet diameter	4.3	
Swirler	Circle	Diameter 2.2	
	Slot.1	Width	0.5
		Height	3.7
	Slot.2	Width	1.0
Height		3.7	
Post	Diameter	2.8	
	L/D.15	42	
	L/D.25	70	
	L/D.35	98	

공급장치

그림 3은 Simulant로 사용되는 물을 인젝터로 공급하는 공급계통도이다. 일반 수도에 연결된 1/2인치 동관으로 공급되는 물은 filter(10μ

m)로 여과된 후, 20기압까지 가압할 수 있는 고압용 스테인레스 tank로 공급되고, regulator(1차 압력 250기압, 2차압력10기압)가 부착된 질소용기(20liter,100기압)를 이용하여 가압되었다. 유량은 인젝터로 공급되기 전에 Rotameter를 설치하여 측정하였고, 압력은 탱크에 부착된 압력변환기를 이용하여 측정하였다.



GT : Gas Tank, I : Injector
 PT : Pressure Transducer, F : Filter
 PS : Power Supply, RM : Rotameter
 AD : A/D converter, WT: Water Tank
 PC : Personal Computer, Pr : Printer

Fig. 3 Apparatus of water supply system

영상처리장치 및 방법

그림 4는 추진제의 분무현상을 가시화할 수 있도록 Stroboscope와 카메라를 설치한 장치도이다. Stroboscope(life time; 3 μs)의 빛은 30도 입사각으로 30cm 거리에 설치된 하얀색 형광판에 반사되어 액막을 비추도록 하였다. 또한 액막에 근접하여 촬영할 수 있도록 접사렌즈를 카메라에 부착하였고, 조리개는 4로하였다. 분산각 측정시에는 Stroboscope의 주파수를 1200rpm으로 고정하고, 카메라 노출시간을 1/4초로하여 한장의 사진에 5개의 영상이 중첩되도록 하였다. 또한 분열길이 측정시에는 Stroboscope의 주파수를 240rpm으로 고정하고, 노출시간을 1/4초로하여 Stroboscope에서 나오는 빛의 발생시간과 카메라의 작동시간을 맞추어 한장에 한개의 영상을 받을 수 있도록 하였다. 필름은 ASA# 400 칼라필름을 사용하였다.

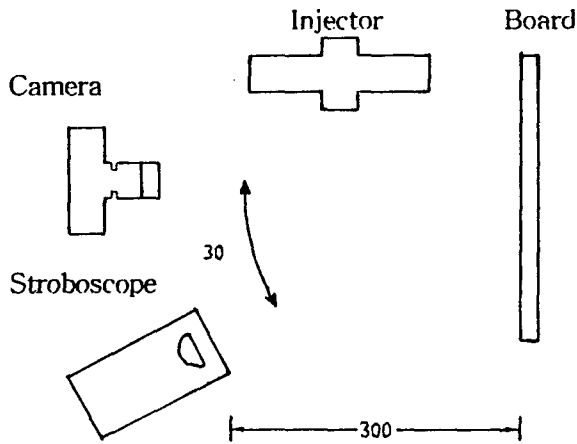


Fig. 4 Stroboscopic photographic apparatus

3. 결과 및 고찰

다음은 사진 1,2,3의 고찰을 통하여 얻어진 결과이다.

그림 5는 압력과 기하학적 형상에 따른 유량계수 변화로 Swirler 입구가 직사각형보다 원형이 유량계수가 크고, shower head인 경우가 가장 크게 나타났다. 또한 입구의 Slot수가 증가함에 따라 유량계수는 약간씩 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이것은 각각의 입구에서 발생하는 수축현상과 점성으로 인한 에너지손실때문에 나타나는 현상으로 사료된다. 그리고, 압력이 증가할 경우 유량계수는 거의 변화하지 않았다. 그림 6는 Post길이/직경비와 유량계수와의 관계로, 본 실험범위에서는 Post길이 증가하는 유량계수에 거의 영향을 미치지 못하였다. 이러한 본 연구의 결과는 액체의 유속이 클 경우 마찰로 인한 손실은 축방향에너지에 실질적인 영향을 주지 못한다는 Novikov의 주장과 일치함을 알 수 있다.

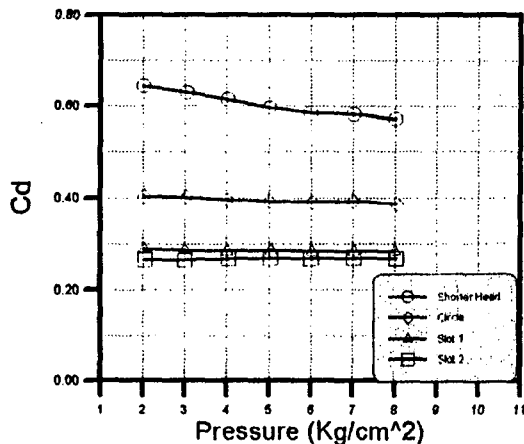


Fig. 5 Discharge Coefficient(Cd) versus Pressure and Geometry

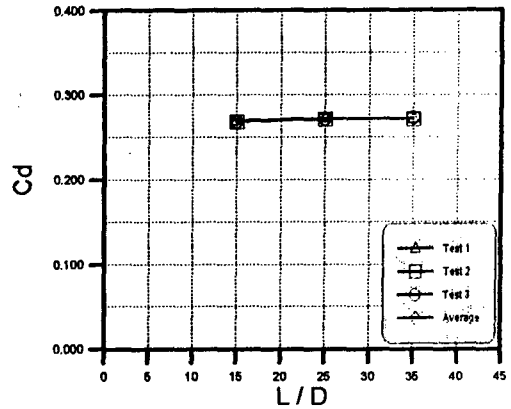


Fig. 6 Discharge Coefficient(Cd) versus Post Length / Diameter (L/D)

그림 7은 입구 형상에 따른 분산각과 분열길이의 변화에 대한 결과이다.

Shower head 인젝터에서는 압력차가 모두 축방향속도로 바뀌기 때문에 post를 나오는 액체는 거의 분산이 이루어지지 않고 원주형 사류를 형성하였다. 또한 swirler의 입구형상이 원형인 경우도 Shower head인 경우와 비슷한 현상을 나타내었다. 이러한 결과는 post 직경/입구직경비가 1.27로 압력에너지가 회전에너지로 거의 변환되지 않았기 때문으로 사료된다. 따라서 위 두 형상에 대한 분열각과 분열길이는 측정할 수 없었다. 한편 swirler의 Slot수가 1, 2로 증가하면서 post 중심으로부터 Swirler의 입구 중심까지의 거리가 증가하기 때문에 전체 각운동량의 증가를 가져오고, 접선방향의 속도를 증가시키기 때문에 분산각의 증가를 초래한다. 그러므로 액막의 두께가 얇아져서 액막의 불안정성을 촉진하기 때문에 분열길이가 짧아진다.

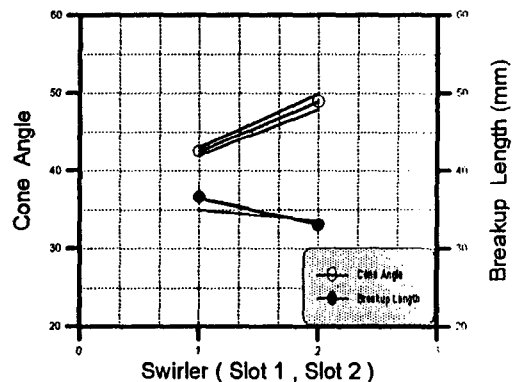


Fig. 7 Cone Angle and Breakup Length versus Number of Slot

그림 8는 압력변화에 따른 분산각과 분열길이에 대한 결과이다. 압력의 변화가 분산각에 미치

는 영향은 작으나, 분열길이에 미치는 영향은 매우 컸다. 이것은 압력이 증가하면 반경방향속도와 축방향속도를 증가시키고, 이들의 비도 약간의 증가를 가져오는 것으로 사료된다. 따라서 분산각의 증가로 인한 더 얇은 액막의 형성과 액막속도가 증가하게 되어 액막의 불안정파가 빠르게 형성되고, 결국 이러한 현상은 분열을 촉진하고 더 작은 액주와 액적을 형성하는 것으로 사료된다. 이것은 액막의 분열에 영향을 미치는 Kelvin helmholtz 파의 성장이 액막의 속도에 많은 영향을 받는다는 G.D. Crapper의 결과와 잘 일치하고 있다.

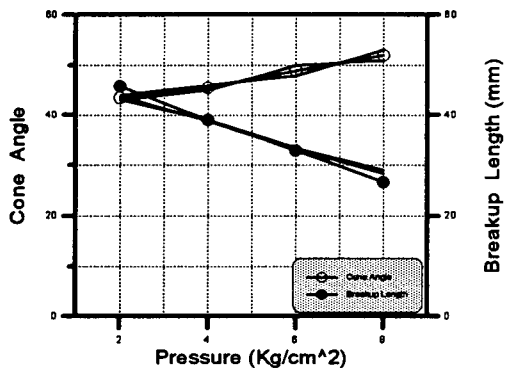


Fig. 8 Cone Angle and Breakup Length versus Pressure

그림 10, 11은 Post 길이/직경비에 따른 분산각과 분열길이에 대한 결과로, Post 길이가 길어지면 분산각은 줄어들고, 분열길이는 길어졌다. 이것은 점성으로 인한 회전에너지의 손실이 축방향에너지의 손실보다 크기 때문에 반경 방향 속도/축방향 속도비의 감소를 야기하고, 결국 이것은 분산각의 감소와 분열길이의 증가를 가져오는 것으로 사료된다. 또한 Post길이 증가로 인한 축방향에너지의 감소가 거의 없음은 유량계수에 대한 결과로부터도 확인 할 수 있었다.

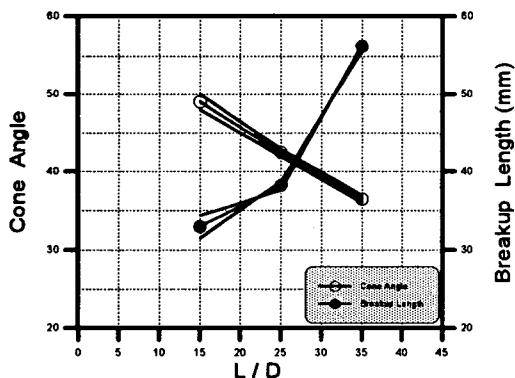


Fig. 9 Cone Angle and Breakup Length versus L/D

4. 결론

본 실험조건에서 수행된 분무실험을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. Swirler 입구의 수가 증가함에 따라 유량계수는 약간 감소하고, 압력변화에 대한 영향은 거의 없었다.
2. Slot 수가 증가할수록 분산각은 증가하고 액막의 분열길이는 짧아진다
3. Post 길이/직경비가 증가하면 분산각은 감소하고 분열길이는 길어진다.
4. 압력이 증가하면 분산각은 약간 증가하고 분열길이는 짧아진다.
5. 분산각이 증가하면 액막의 분열길이는 짧아진다.

참고문헌

1. Donald J. Hautman, " Spray Characterization of Liquid/Gas Coaxial Injectors With The Center Liquid Swirled ", Atomization and Sprays, Vol. 3, 1993, pp. 373-387.
2. Lefebvre, A. H. , " Atomization and Sprays," Hemisphere Publishing Corporation, Philadelphia, PA, 1989.
3. M. A. Beisler, S. Pal, M. D. Moser and R.J. Santoro, " Shear Coaxial Injector Atomization in a LOX/GH₂ propellant Rocket", AIAA Paper 94-2775, AIAA/ASE/ASME/ASEE 30th Joint Propulsion Conference & Exhibit, Indianapolis, IN., June 27-29, 1994.
4. M. Doumas and R. Laster, " Liquid-Film Properties for Centrifugal Spray Nozzles" , Chemical Engineering Progress, Vol. 49, No. 10, October 1953, pp. 518-526.
5. Novikov, I.I., " Atomization of Liquids by Centrifugal Nozzles", The Engineer's Digest, Vol. 49, No. 5, May 1953, pp.226-234
6. S. A. Rahman, S.Pal and R.J. Santoro, " Swirl Coaxial Atomization: Cold-Flow and Hot-fire Experiments ", AIAA paper 95-0381,

33rd Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV,
Jan. 9-12, 1995.
7. " Liquid Rocket Injectors ", NASA SP-8089,
1976.

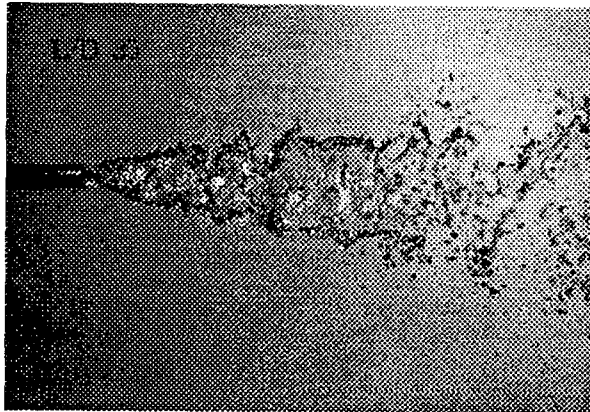
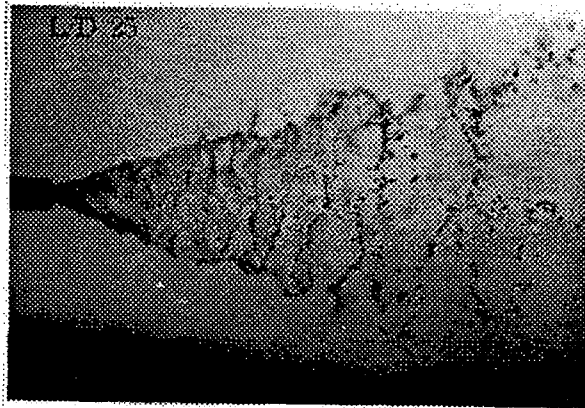
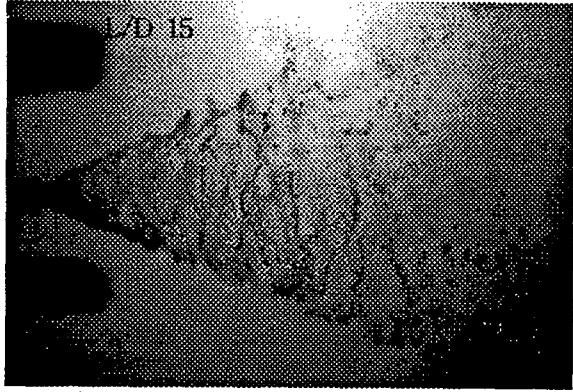


Photo. 1 Instantaneous image showing the effect of L/D on spray pattern.

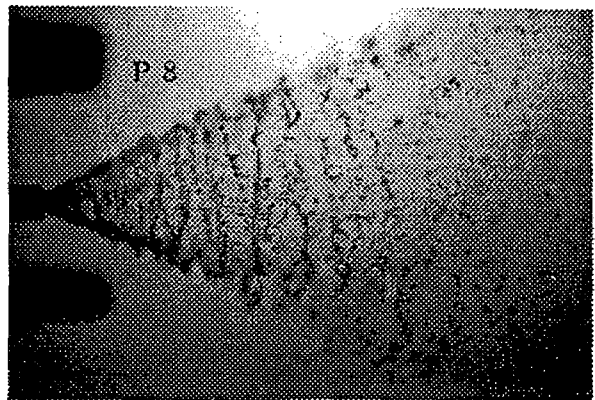
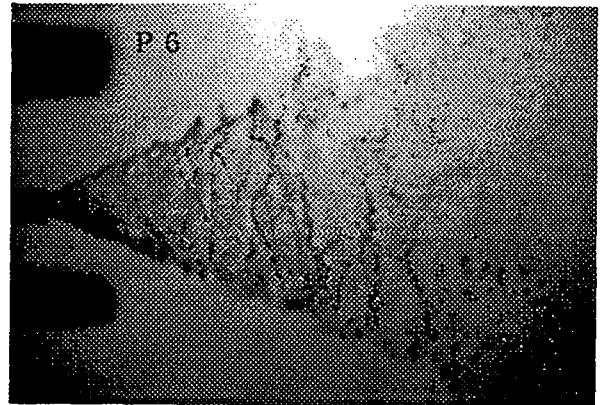
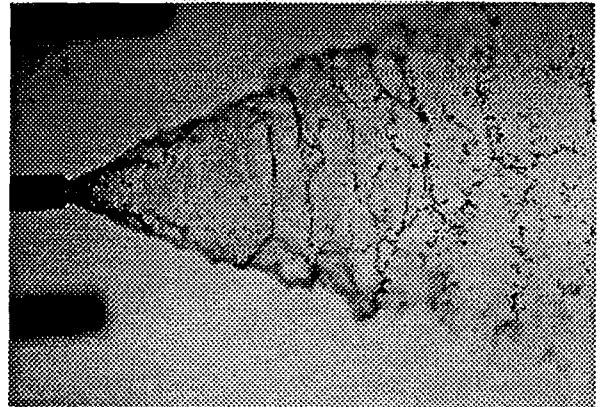
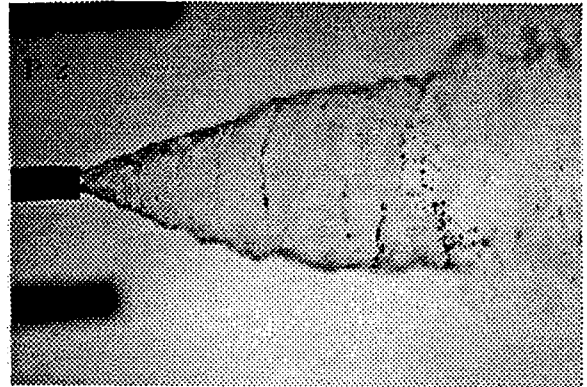


Photo. 2 Instantaneous image showing the effect of pressure on spray pattern.

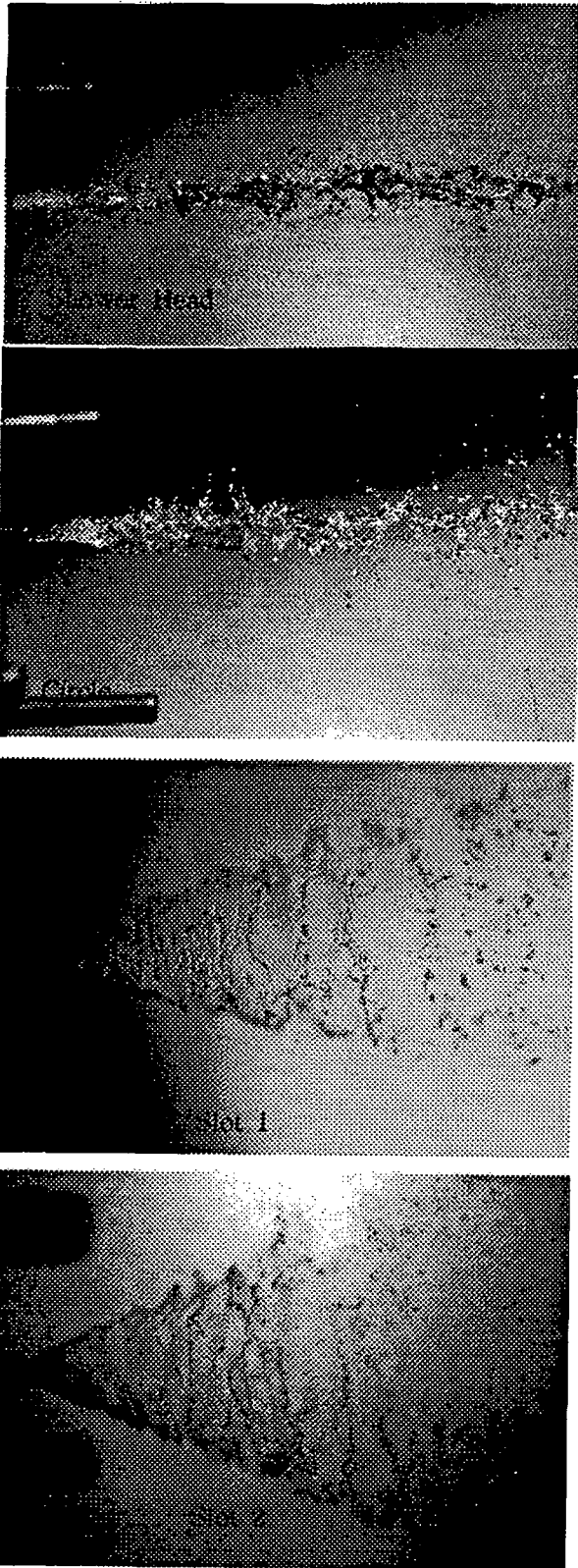


Photo. 3 Instantaneous image showing the effect of the change of injector inlet on spray pattern.