

## 고속유동장내 액체분열현상 Phenomena of Liquid Jet Breakup in High Speed Gas Stream

박 용국\*, 석 지권\*\*, 이 충원\*\*\*  
Y. K. Park, J. K. Seok, C. W. Lee

### ABSTRACT

The present study investigates experimentally the characteristics of liquid jet, which is, the spray flow in the normal direction of the air stream under the flow conditions of air velocity 110~125m/s. The present study adopts with the flow visualization technique using a short duration light bulb and the image processing analyse with CCD camera. Two types of injector were used: one is a flat plate type, and the other is backward facing step type, which height are 5, 8, 10mm. Dispersion of liquid jet can be represented by gray level of CCD camera.

In the upstream of liquid jet, the backward facing step shows better liquid jet penetration. However, in the downstream, mean droplet size for backward facing step injector is smaller than that for flat plate injector

주요기술용어 : Flat plate injector, Backward facing step injector, Flow visualization(유동가시화), Gray level(그레이레벨), Penetration(관통도), Dispersion(분산도), SMD(평균입경)

### 1. 서론

액체연료가 분사될 때 연소실 내 주류의 공기유동에 끼치는 영향을 최소화하고 우수한 분무특성을 얻기 위하여 지금까지 개발된 연료 분사방법<sup>(1)</sup>은 여러가지가 있지만 그 중 구조가 비교적 간단하고 액체연료의 미립화 및 분무특성에 효과적이기 때문에 주류 공기 유동장에 대하여 수직방향의 연료 분사 형식이 많이 연구되어왔다.

이러한 형식은 램제트(ramjet) 및 스크램제트(scramjet)의 추진장치, 터빈 및 터빈익의 분무냉각 등 산업과 공업전반에 걸쳐 실제적

인 응용 예가 많이 있다.<sup>(2)</sup> 공기 유동에 대한 액체의 수직방향 분사에 대한 최근 중요 연구들은 다음과 같다. Adeleeng<sup>(3)</sup>는 액체제트의 최초분열을 Weber의 이론<sup>(4)</sup>을 바탕으로 해석하고 평균입경을 실험을 통하여 제시하였다. 小田, 廣安<sup>(5)</sup>는 공기 유동장에서 액체제트의 분열과정과 tomogram방법으로 평균입경 분포를계측하였고, Schetz<sup>(6)</sup>는 초음속 공기 유동장내에 물과 실리콘 이산화물(silicon dioxide)의 혼합물인 슬러리(slurry)를 분사하여 분사체의 물성치가 분열현상에 미치는 영향을 관찰하여 물과 슬러리의 분열기구는 기본적으로 큰 차이가 없음을 밝혔다.

\* 경북대학교 대학원 기계공학과

\*\* 안동전문대학교 자동차과

\*\*\* 경북대학교 기계공학과

Manela<sup>(7)</sup>와 Hautman<sup>(8)</sup>은 천이음속에서 관통 높이를 공기의 운동량과 액체 운동량의 함수로 표시 하였다. 특히 Arai<sup>(9)</sup>와 Park, Lee<sup>(10)</sup> 등은 초음속 유동장에서 노즐형태가 분무특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

이상의 연구들을 살펴보면 전반적으로 주류 공기 유동속도가 대부분 초음속 또는 천이음속의 고속 유동장에서 연구가 이루어져 액체 제트의 분열현상을 정확하게 해석하기가 어렵고, 小田, 廣安<sup>(5)</sup>에 의해 높이 방향 액적의 평균입경 측정이 이루어졌지만, 측정횟수가 충분하지 않으며, 액적 샘플링 탐침주위에 발생하는 충격파의 영향을 고려 하지 않았으므로 정확한 측정이라고 보기 어렵다<sup>(6)</sup>.

따라서 본 연구의 목적은 비교적 저속인 공기 유동장에 대하여 수직 상방향으로 액체를 분사할 경우, 노즐의 형상이 flat plate와 backward facing step일 때, 유동장이 액체 제트 분열에 미치는 영향과 주류와의 혼합특성을 관찰하고, 화상 처리방법을 이용하여 주류 공기 유동장에 영향을 미치지 않고, 분무특성을 정량적으로 해석함으로써, 액체 분사체의 분열기구를 명확히 파악하여 램제트 및 스크램제트 연소실의 액체연료 연소에 필요한 기본자료를 제시하는 것이다.

## 2. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 크게 풍동장치와 연료 분사계(노즐), 제어회로 및 분무특성을 파악하기 위한 화상처리장치로 구성된다.

### 2.1 풍동 및 연료공급장치

Fig.1은 실험장치와 연료공급장치의 개략도를 나타낸 것이다.

풍동(blower ①)은 모터(220ACV, 25PS)에 직결되어 있고, 실험 계측부 ③ (50×50×400)내 풍속과 풍량은 최대 150m/s, 45m<sup>3</sup>/min로 제작 하였고, 가시화를 위해 관측창을 양

측면에 설치하였다. 또한 공기 정류기(air rectifier②)를 디퓨저 내에 설치하여 계측부 내의 난류발생을 최소화 하였다.

펌프 ④에 의해 저장조 ⑤로부터 공급된 액체는 고압공기에 의해 가압되어, 지연회로 ⑩의 동기신호로 작동되는 전자밸브 ⑪에 의하여 분사된다. 이때 분사압력은 압력탱크에 부착된 바이패스 밸브에 의해서 조절된다.

한편 실험에 사용된 액체는 상온의 수돗물을 필터로 여과한 후 사용 하였으며, Ostwald점도계, 비중계, 표면장력계(Fisher Model 20)를 이용하여 점도, 비중, 표면장력을 측정하였다. Table 1은 측정된 물성치를 나타낸 것이다.

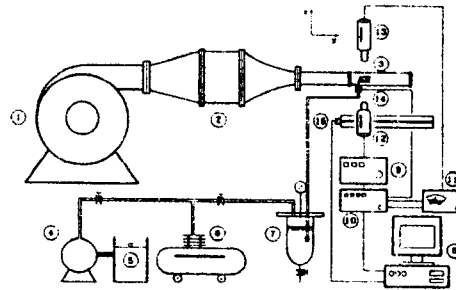


Fig.1 Diagram of experimental apparatus

temperature	22℃
density	997.86 kg / m <sup>3</sup>
viscosity	1.002 × 10 <sup>-3</sup>
surface tension	73.58 × 10 <sup>-3</sup>

Table 1. Properties of experimental liquid

### 2.2 연료분사계

액체연료의 미립화용으로 개발된 노즐은 많이 있지만, 노즐구조에 의한 액체의 미립화의 영향을 최소로 하기 위하여 단공 오리피스 노즐을 사용하였다.

Fig.2는 실험에 사용된 노즐의 개략도를 나타낸 것으로서 flat plate와 backward facing step의 경우에 대하여 직경 d<sub>0</sub>와 오리피스 길이 l<sub>0</sub>.

를 각각 0.9mm, 5.4mm로 제작, 노즐 형상비 (aspect ratio:  $l/d_0$ )는 약 6이 되도록 하였다.

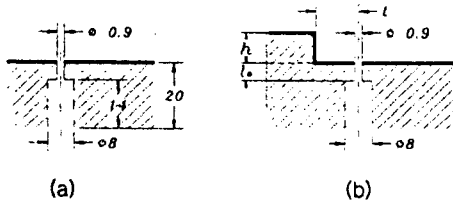


Fig.2 Flat plate and backward facing step injector

특히 (b)의 경우, step하류 재순환 영역이 액주의 분열 및 분무특성에 미치는 영향을 관찰하기 위해 step 높이(h)가 각각 5, 8, 10mm로 제작하였고, step과 분사구와의 거리(l)는 유동장 속도분포를 계속하여 step하류의 재순환 영역을 확인한 후 결정하였다.

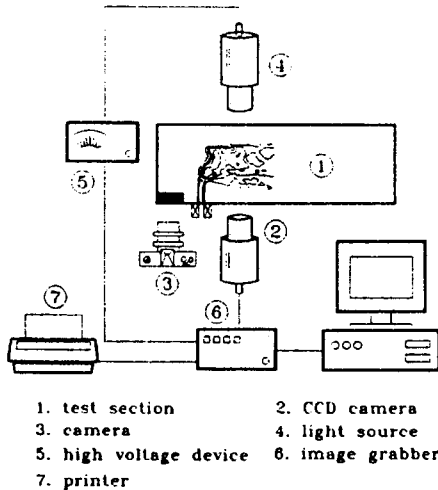


Fig.3 Image processing system

2.3 화상처리장치

액주의 부분확대, 관통도 및 분산도와 액적의 평균입경을 계속하기 위하여 CCD 카메라로 촬영한 영상을 화상처리하였다. Fig. 3은 본 실험에 사용한 화상처리 장치의 개략도를 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험에 사용된 좌표계는 Fig. 1에 표시한 바와 같이 고속 공기 유동방향과 액체 분사 방향을 각각 x, z축으로, 나머지를 y축으로 나타낸다.

3.1 속도분포

고속 공기 유동장에 분사된 액주의 분열현상을 정확히 파악하기 위하여 우선 유동장 내의 속도분포를 정확하게 파악하는 것이 중요하다.

유동장 내 속도측정은 분무가 없을 경우에만하여 피토 튜브( $\phi 3\text{mm}$ )와 디지털 마노미터를 사용하여 평균유속을 측정하였다. 특히 Fig.2 (b)의 경우에는 step후면에서 발생하는 유동의 재순환영역을 찾기 위해 z축 및 x축 방향으로 각각 1mm 간격으로 속도를 측정하였다. Fig.4는 시험부내의 속도 분포를 나타낸 것이다.

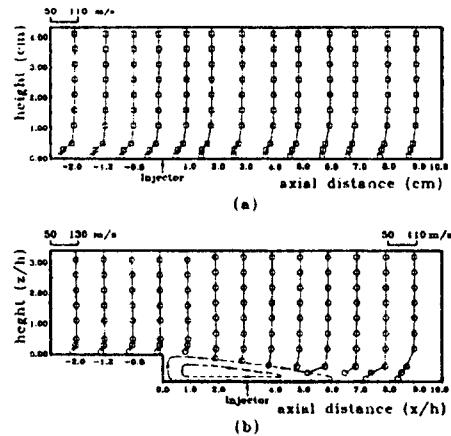


Fig.4 Velocity distribution of (a) flat plate and (b) backward facing step injector

(a)의 경우, 제속부 내로 유입된 공기 속도분포는 시험부의 아래벽면 근처를 제외하고는 100~110m/s의 균일한 속도분포를 나타낸다.

시험부의 상류에는 얇은 경계층이 형성되고, 하류로 진행할수록 유동장내의 속도분포는 균일하게 된다. 한편 (b)의 경우, 급박대되는

step하류에서는 경계층의 박리에 의하여 재순환영역이 나타나고 있다. 이러한 경계층의 박리는 step 높이에 대한 축방향의 비( $x/h$ )가 약 7이 되는 부분에서 다시 유로에 부착하여 서서히 안정된 흐름으로 변한다. 이는 step 높이의 6~8배 되는 곳에서 다시 유로에 재부착된다는 Friedrich와 Schumann의 수치해석 결과와 잘 일치한다.

한편 (b)에서 step과 분사구의 위치가 액주의 초기 분열에 지대한 영향을 미칠것으로 판단되므로 분사구의 위치가 중요하다고 생각된다.

만약 분사구의 위치를 step에 가까이 할 경우에는 재순환 영역 내에서 분사된 액주 표면에서 생성되는 초기액적은 재순환 영역내의 흐름을 따라 순환 되면서 액적들이 다시 합체되는 현상이 일어나기도 하고, step과의 거리를 멀게 할 경우는 step을 사용함으로써 기대되는 효과는 적게 나타나 flat plate 경우의 경향이 지배적으로 된다고 할 수 있다.

이러한 이유로 분사구의 위치는 속도분포제 측을 통하여 step 높이에 대한 축방향의 비( $x/h$ )가 재순환영역의 중간이 되는 값으로 결정하였다.

### 3.2 액체유량

유동장내의 공기유량이 일정한 경우 액주의 분열 및 분무특성은 액체 유량의 함수가 된다. 따라서 노즐 오리피스의 유량계수를 정확하게 파악하는 것이 중요하다고 생각된다.

본 실험에서 노즐 오리피스의 유량계수는 노즐에 공급된 유량과 노즐 오리피스를 통과한 유량의 비로 정의하였다.

Fig.5는 분사압력을 변화시키면서, 전자밸브를 통과한 유량과 노즐 오리피스를 통과한 유량에 대하여, 분사압력 변화에 따른 노즐유량 및 유량계수의 변화를 나타낸 것이다.

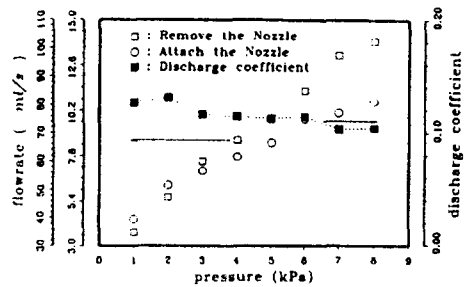


Fig.5 Distribution of discharge coefficient and flowrate.

유량은 분사압력이 증가할수록 선형적으로 증가하는 반면 유량계수는 분사압력이 증가할수록 조금씩 감소하고 있다.

이러한 이유는 액체유속이 증가함으로써 노즐로 유입되는 액체의 포텐셜 에너지가 증가하여 노즐 오리피스에서 축류현상(Vena-contracta)이 발생한다. 이러한 축류현상 때문에 노즐 오리피스의 유효단면적이 감소하기 때문이다.

### 3.3 액주 분열현상

고속공기 유동장으로 분사된 액주의 분열은 액주 표면에서 주위 기체에 의해 불안정한 파동이 발생하여 액체의 일부(또는 전부)가 액적으로 분열하는 것으로 공기역학적 분열 기구가 지배적이다.

Fig.6은 분사압이 3.0kPa이고, 고속 공기 유동속도가 110m/s일 때, 고속 유동장에 수직으로 분사된 액주의 분열현상을 나타내는 순간 촬영한 사진이다.

그림에 나타난 바와 같이 분사된 액주는 노즐형상에 관계없이 분사구 근처에서는 표면이 매끈한 형태이지만, z방향으로 진행할수록 고속공기의 운동에너지의 영향을 받아 공기 유동방향으로 급격하게 굽는다.

분사 초기 액주후면에서 생성되는 작은 액적들은 노즐형상의 영향 보다는 가압 분사된 액체의 팽창과 액주후면에 발생하는 보텍스(vortex)에 의한 운동량 교환에 의해서 액주로

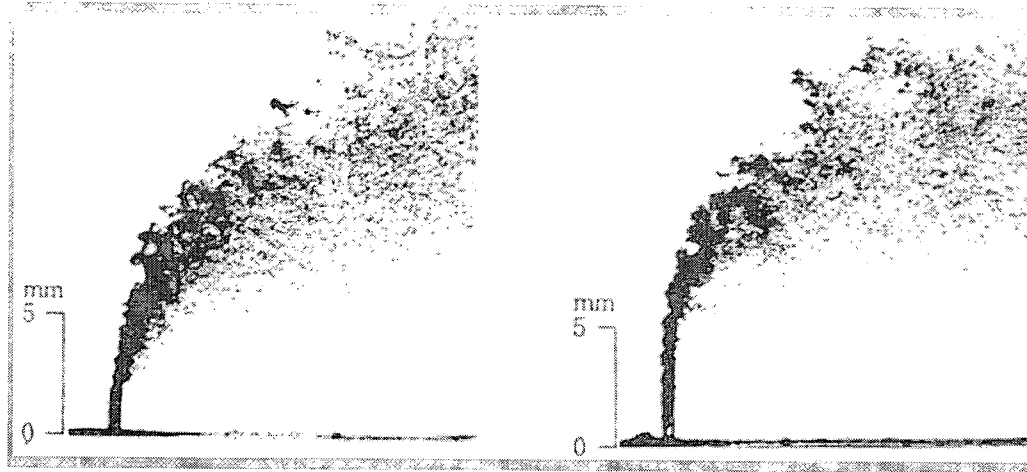


Fig. 6 Breakup phenomenon of liquid injecting from nozzle

부터 초기 작은 액적들이 생성된다.

액주가 z방향으로 진행할수록 정맥류형 교란(dilatational wave)이 액주표면에 발생, 성장하여 분열하기 시작한다.

Fig.7은 액주를 따라 연직상향으로 카메라의 초점을 5mm씩 이동하면서 분열현상을 확대 촬영한 결과로서 액주면의 초기교란의 발생과 성장을 명확히 나타내고 있다.

(a)의 경우 액주의 초기 교란은 액주가 공기 유동장으로 진행할수록 공기 운동에너지의 영향으로 액주전면에서 사인곡선형으로 바뀌

고, 액주후면에서 작은 액적으로 형성된다. 또한 액주가 하류로 진행할수록 더 이상의 연속된 액주로 존재하지 못하고 큰 액체 분무군으로 분열된다.

(b)의 경우, 액주 표면에 나타난 초기 교란은 (a) 경우와 같은 모양이지만 step의 영향으로 초기교란의 크기는 훨씬 크고, 액주 하류에서 사인곡선형 교란은 (a)의 경우보다 조밀하다. 그러나 분사초기에 생성되는 액적의 수는 (a)보다 작다.

액주가 공기 유동방향으로 더욱 진행함에

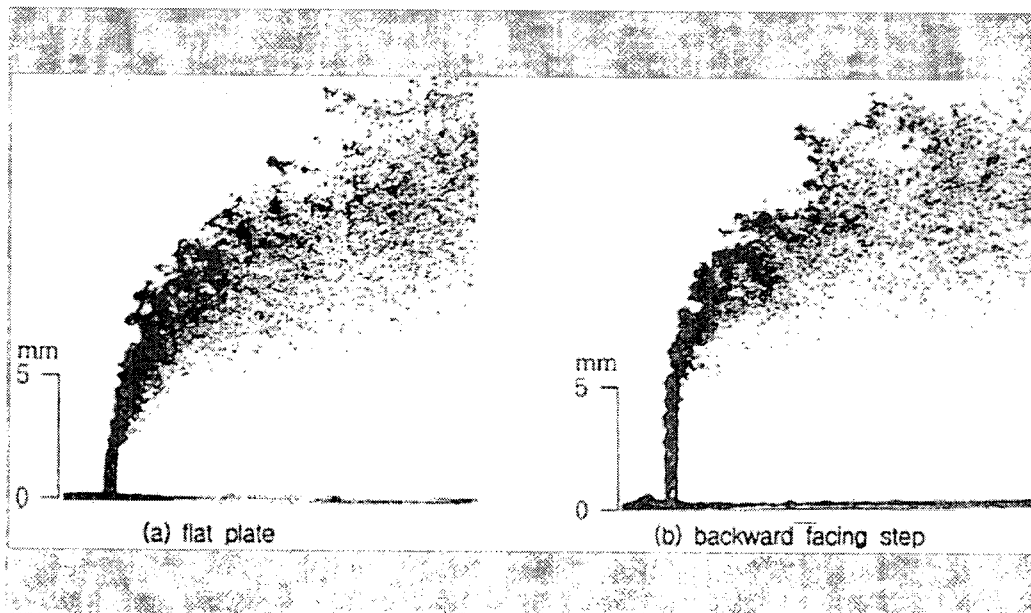


Fig.7 Magnified photographs of disintegration of liquid jet

따라 액주의 표면에 나타나는 교란의 크기는 (a)의 경우 보다 우수하다.

이러한 이유는 고속 공기에 수직으로 분사된 액주가 step의 영향 때문에 (a)의 경우 보다 늦게 공기의 운동에너지를 받지만, 액주가 공기유동장으로 완전히 진행했을 경우, (a)보다 훨씬 큰 공기 운동에너지를 받기 때문이라고 생각된다.

이상을 종합해보면 액주 표면에 발생하는 초기교란은 액주의 초기분열에 직접 영향을 미치지 못한다. 왜냐하면 backward facing step의 경우, 액주표면에 발생한 초기 교란은 크고 뚜렷하지만 실제적으로 분열은 flat plate에서 먼저 발생하기 때문이다.

### 3.4 관통높이

Fig.8은 flat plate와 step 높이가 5mm인 backward facing step의 경우, 분사압이 각각 2.0, 3.0, 5.5kPa일때 분사압과 관통높이 (penetration height)의 관계를 나타낸 것이

다.

그림을 통하여 명확하게 알 수 있듯이 노즐의 형상에 관계없이 분사구에서 x축 방향으로 일정한 거리에서 관통높이는 분사압이 증가할수록 높게 나타난다.

이는 동일한 형상의 분사노즐인 경우에는 분사압이 증가할수록 액체가 갖는 운동량이 크게 되기 때문이다.

Fig.9는 분사압이 3.0kPa일 때 flat plate와 backward facing step의 경우에 대하여 분사구에서부터 x방향으로 5mm간격으로 측정된 분사체의 관통높이의 결과를 나타낸 것이다.

Flat plate의 경우 분사초기에는 backward facing step보다 관통높이가 낮지만, 공기 유동장 하류로 갈수록 그 차이는 점차 줄어들어 비슷하게 된다.

이는 backward facing step의 경우 step의 영향 때문에 분사초기 운동량 손실이 작아 관통높이가 높지만, 액체가 공기 유동장의 하류로 진행함에 따라 액체가 가지는 2방향 운동에너지가 점차 소멸되기 때문이다.

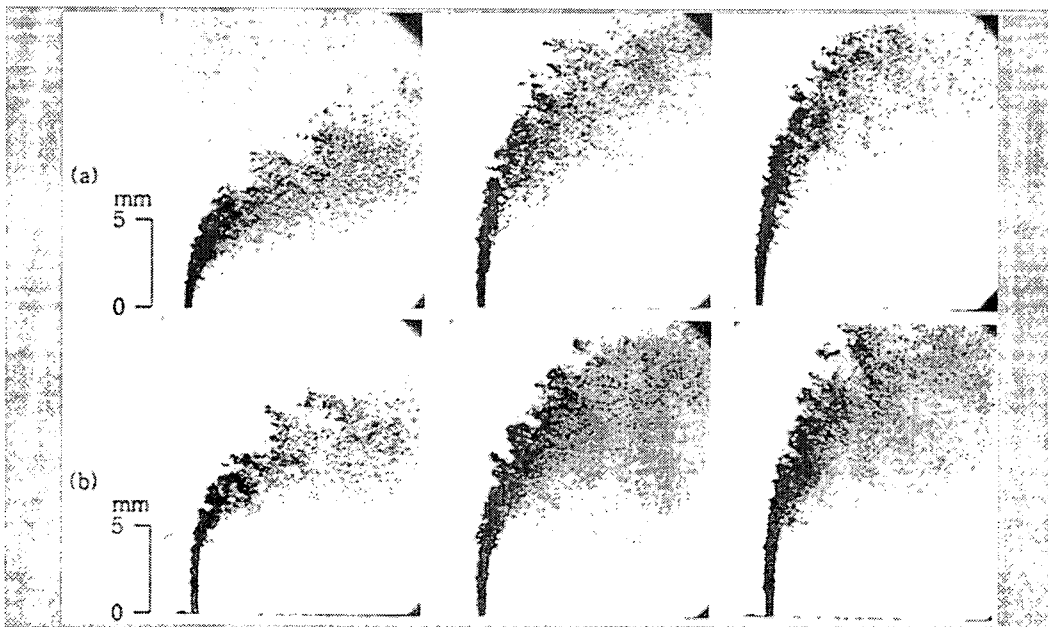


Fig.8 Effects of injection pressure to the liquid jet penetration (a) flat plate and (b) backward facing step ( $V_0 = 110m/s, P_i = 2.0, 3.0, 5.5 kPa$ )

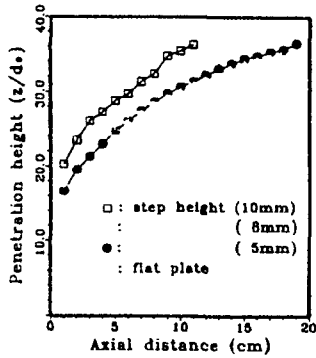


Fig.9 Penetration height for liquid jet

3.5 액적의 분산

Fig.10은 분사압력이 3.0 kPa일 때, (a) flat plate와 (b) backward facing step에 대한 확산 처리 결과를 각각 나타낸 것이다.

액체제트 유동의 중심과 액체제트 전면을 따라 그레이 레벨선의 간격이 조밀하기 때문에 이곳에서는 액체가 조밀하게 분포하고 액주가 공기 유동방향의 하류로 진행할수록 그레이 레벨의 간격이 넓게 나타나기 때문에 액적의 공간 조밀도(稠密度)가 낮다.

(a)의 경우에는 분사초기를 제외하고 전체

공기유동장에 대하여 등그레이 레벨(Iso-gray level)선도의 간격이 넓게 나타나지만, (b)의 경우는 (a)보다 등그레이 레벨선도의 간격이 좁고, 특히 공기 유동방향(x축)으로 먼곳까지 등그레이 레벨선도가 조밀하게 분포한다.

따라서 (a)의 경우가 (b)의 경우 보다 분사된 액체가 주류공기에 의하여 일찍 분열하고 또한 액적의 공간분포도가 우수함으로 혼합기 형성에 유리할 것으로 생각된다.

3.6 평균입경

Fig.11은 유동장 속도가 110m/s, 분사압력이 5.5kPa일 때 flat plate와 backward facing step의 경우, 액체 분열 궤적의 중심을 따라 공기 유동방향(x축)으로 이동하면서 평균입경(SMD)을 측정한 결과를 나타낸 것이다.

그림에서 실선은 각 거리별 측정값을 근사시킨 곡선으로서 노즐의 형태에 관계없이 어느 경우든 입경분포는 최대가 된 후, 다시 감소하는 것으로 나타난다.

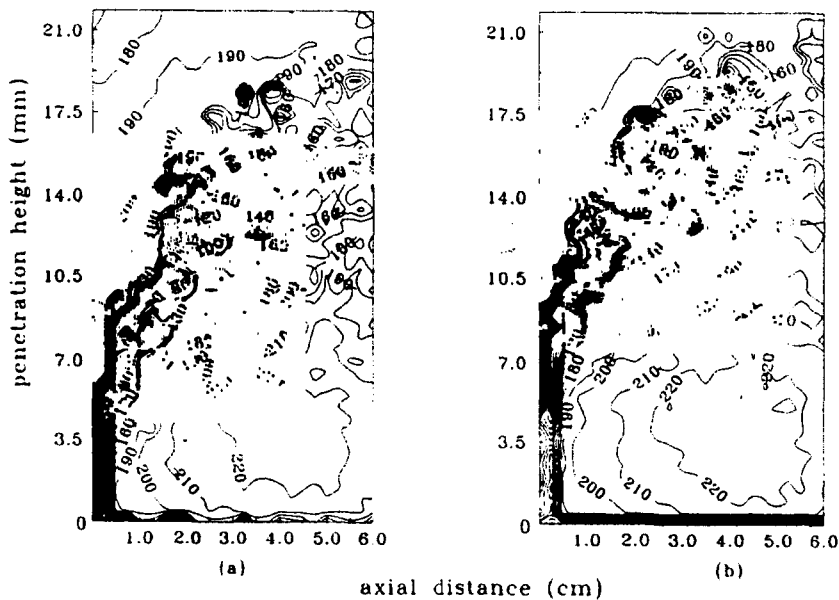


Fig. 10 Iso-gray for liquid jet dispersion

이러한 이유는 화상처리장치는 완전한 구형의 액적만을 인식하기 때문에 이 부분의 작은 액적은 분사초기에 이미 분열을 마친 액적이라 할 수 있다.

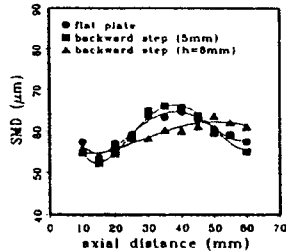


Fig.11 Distribution of drop diameter (SMD)

분사구(x=0)에서부터 25mm까지는 step의 영향 때문에 backward facing step의 경우가 flat plate보다 액적의 입경이 작게 나타난다.

이는 분사초기의 액주의 관통 높이는 backward facing step의 경우가 flat plate보다 우수하여 분사된 액체가 받는 주류 공기의 운동에너지는 상대적으로 크기 때문이다. 이러한 현상은 step의 높이가 서로 다른 경우의 입경분포에서 더욱 명확하게 나타난다.

#### 4. 결론

고속유동장에서 노즐의 형상을 flat plate와 backward facing step으로 각각 변화시켜 액체의 분열현상을 관찰하고, 화상처리법을 이용하여 액체제트의 분무특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 분사초기의 관통높이는 backward facing step의 경우가 우수하지만 하류로 갈수록 Flat plate와 거의 같은 값을 갖는다.
- (2) 화상처리 방법으로 유동장에 영향을 주지 않고 충분히 만족 할만한 액적들의 공간 분포를 예측할 수 있고, 하류에서 flat plate에의해 분사된 액체가 유동장 내에 넓게 분포하고 있다.

- (3) 공기 유동장 하류에서 액적의 평균입경은 backward facing step인 경우가 flat plate의 경우에 비하여 작은 평균입경을 나타낸다.

#### 참 고 문 헌

1. Jack L. Kerrebrock, Aircraft Engineering and Gas Turbines. The MIT Press. pp. 6~32, 480 1992
2. George P. Sutton, "Rocket Propulsion Elements " 6th ed., John Wiley & Sons. inc., pp. 168~281, 1992
3. M. Adeleeng, "Mean Drop Size Resulting from the Injection of a Liquid Jet into a High-Speed Gas Stream" J. AIAA Vol. 6, pp. 1143~1147, 1968
4. Arthur H. Lefebvre "Atomization and Spray", Hemisphere Publishing Corp, pp. 27~73 1989
5. 小田, 廣安 "高速氣流中における氣液の二相噴流の分散特性", 2th. Symp. on Atomization, pp. 193~198, 1993
6. J. A. Schetz, "Characteristics of Liquid Jets in High-Speed Crossflow", Special Lecture in 1st Int. Symp. on Atomization, Yokohama, 1992
7. J. Manela, "Jet Penetration Height in Transonic Flow", J. AIAA Vol. 24, pp. 67~73 1986
8. D. J. Hautman, "Transverse Liquid Injection Studies" J. AIAA, 90-1966, pp. 1~8, 1990
9. T. Arai, H. Sugiyama and T. Takahashi, "Flow Characteristics of Atomizing Liquid Jet by Supersonic Flow and Related Shock Wave/Boundary Layer Interaction", Proceeding of ICLASS-'91, pp. 165~172, 1991
10. C. W. Lee, Y. K. Park, "A Study of Injection Characteristics in Supersonic", Proceeding of ICLASS-'94, pp. 172~179, 1994