

노즐 형상에 따른 Jet in Crossflow의 분무 특성

윤현진* · 임영현* · 홍정구** · 이충원*

The Spray Characteristics of Jet in Crossflow with the Injector Shapes

Hyun Jin Yoon* · Young Heon Lim* · Jung Goo Hong** · Choong Won Lee*

ABSTRACT

The spray characteristics of jet in crossflow (JICF) to improve the atomization and mixing characteristics of liquid Jet, while minimizing the impact on crossflow, were studied experimentally. By varying the temperature, velocity, pressure of crossflow and the speed, pressure of liquid Jet, the spray boundary (outer boundary, inner boundary) with the change of crossflow and liquid jet momentum ratio (q) were measured and led the experimental formula, compared with the results of previous work. Specifically, when the jet penetration with the shape of injector were measured, in the case of dual orifice Injector, under the influence of front orifice, the jet penetration of back orifice was improved approximately 18% ($L_h = 4$ mm), compared with single orifice injector.

초 록

Crossflow에 미치는 영향을 최소화하면서 liquid Jet의 미립화 및 혼합특성을 향상시키기 위한 JICF의 분무 특성에 대해 실험적으로 연구하였다. Crossflow의 온도, 속도, 압력과 liquid Jet의 속도, 압력을 변화시키면서 crossflow와 liquid jet의 momentum ratio(q)의 변화에 따른 spray boundary (outer boundary, inner boundary)를 측정하고 실험식을 유도하여 선행연구자의 결과와 비교하였다. 특히, injector의 형상에 따른 jet penetration를 측정하여 dual orifice injector의 경우 전단 오리피스의 영향으로 후단 오리피스에서의 jet penetration은 single orifice injector 분사노즐과 비교할 때 약 18% ($L_h=4$ mm) 증가하는 것을 확인하였다.

Key Words: Jet in Crossflow(JICF:수직분사), VAH(Vitiated Air Heater), Spray Characteristics(분무 특성), Jet Penetration(침투깊이),

* 경북대학교 기계공학부

** 경북대학교 기계연구소

† 경북대학교 기계공학부, E-mail: arakiy@paran.com

1. 서 론

최근 액체연료의 분사시스템에 있어서 연소실

내의 주류 공기유동에 미치는 영향을 최소화하면서 미립화 및 혼합특성을 향상시키기 위한 방법으로 주류공기 유동에 대해 수직방향의 연료 분사(JICF : jet in crossflow) 방식이 많이 연구되고 있으며, 이러한 JICF 연료분사 시스템은 dilution air jets, fuel/air mixer, turbine blade film cooling systems, ramjet/scramjet fuel injector 등을 포함한 air-breathing engine(공기 흡입식 엔진)과 rocket engine system 에서의 실제적인 응용예가 많이 있다[1, 2, 3, 4].

JICF 에 의한 연료의 분무 및 미립화과정은 다수의 복잡한 현상들이 상호 밀접하게 연관되어 복합적인 현상으로 나타난다[5]. 즉, 난류유동, 분무기구, 기하학적 특성, 분사유체역학, 혼합 및 화학반응 메커니즘 등이 밀접하게 관련되어 있으며[6], 특히, 분무 및 미립화 메커니즘의 관점에서 liquid jet 은 crossflow 에 의해 미립화 과정을 거치게 되고, 이후 crossflow 와 혼합되어 연소실내로 유입된다. 이러한 미립화 과정과 혼합 메커니즘은 연소실에서의 연소성능에 큰 영향을 미치게 되는데, 기체와의 혼합 성능에 의해 결정되지만, 액체연료의 분사에서는 액주의 분열 및 미립화 과정을 거치므로 분무 메커니즘이 훨씬 복잡하다[7].

JICF 에 의한 액체연료의 분무 및 연소 특성에 관한 선행 연구로는 Schetz 등[8] 에 의해 산란광을 이용한 분무사진이나 shadow graph 를 이용하여 transverse jet 의 침투 깊이의 측정이 이루어 졌으며, Inamura 등[9] 은 liquid ramjet engine 연소실에서 transverse jet 의 연료 혼합 특성에 대한 연구가 진행되었다.

하지만 기존의 연구들은 대기압 상태에서, 주류 공기의 속도가 비교적 낮은 특정 분사조건에서 분무특성을 파악하는데 그치고 있기 때문에 고압, 고온의 cross-flow 에서의 liquid jet 의 미립화 특성에 대한 연구는 아직도 미진한 실정이며, 특히 연료 분사 노즐의 형상 및 배열을 가진 연료분사 노즐에 대하여, crossflow 의 속도를 선행연구보다 고속의 영역인 33 [m/s] 에서 80 [m/s] 까지 변화시키면서 VAH 를 이용하여 cross-flow의 온도를 변화시켜 cross-flow 와

liquid jet 의 운동량비(J : jet-to-crossflow momentum flux ratio)에 따른 jet 의 spray boundary 를 측정하여 고온, 고속 기류 중에 분사되는 transverse jet 의 분무 특성을 규명하고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 조건

2.1 실험 장치

실험 장치는 크게 공기공급부, VAH(Vitiate Air Heater), 가시화장치, liquid jet 공급부, 그리고 압력 및 유속 측정부로 구성 된다. Fig. 1 은 실험장치의 개략도를 보여 준다.

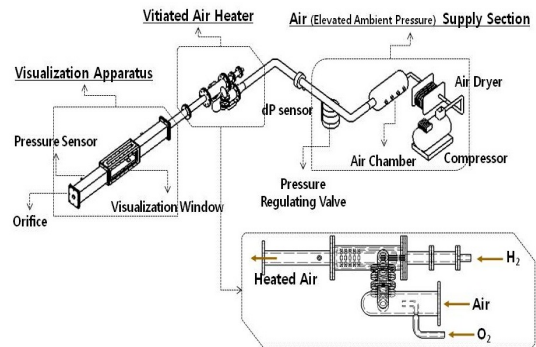


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

공기공급부는 대용량 압축기, 공기 건조기, 공기 저장탱크, 압력제어 밸브로 구성된다. 압축기에서 압축된 고압의 공기는 건조기를 거쳐 공기 저장탱크에 저장되고 고압의 공기는 압력 제어 밸브를 통해 설정된 압력으로 낮아져 가시화 장치에 공급된다.

VAH 는 고속의 공기를 가시화 장치로 유입되기 전에 연소반응을 통해 가열시키기 위한 장치로, 일정온도를 발생하도록 수소와 수소가 완전 연소 되기 위한 일정량의 산소를 혼합된 후 VAH 내부에서 연소반응을 통해 공기를 가열시킨다. 본 실험에서 사용된 VAH 의 성능은 속도 범위 80~125 m/s, 온도범위 400~800 K 에서 고온·고속의 vitiated air 를 생성 할 수 있는

능력을 가지고 있다.

가시화장치는 사각단면으로 측면 2 개, 상부 1 개의 가시화 창으로 구성되었다. 장치의 배관 앞 부분에는 소닉 노즐을 설치하여 일정한 유량의 공기를 공급하도록 하였고 내부의 압력은 후단의 오리피스를 통해 조절하였다.

Liquid jet 공급부는 압축기, 레귤레이터, 연료 저장 탱크, 솔레노이드 밸브, 연료 분사노즐로 구성되며, 고압의 공기에 의해 압축된 연료는 가시화장치 하단에서 연료 분사노즐을 통해 수직으로 분사된다.

압력측정부와 유속측정부는 압력센서와 DAQ-board(Date Acquisition Board), 그리고 pitot-tube 와 micro-manometer 로 구성되어 있다. 가시화 장치의 전, 후단에서 pressure transducer 를 사용하여 압력을 측정하였으며 가시화 장치 내부에서 pitot-tube 와 micro-manometer 를 이용하여 cross-flow 의 유속을 측정하였다.

2.2 분사노즐

분사노즐은 단공 분사노즐(SO : Single orifice injector)과 2 공 분사노즐(DO : Dual orifice injector)이 사용되었다. 분사노즐의 상세한 사양은 Table 1 과 같다.

SO 분사노즐은 오리피스가 중앙에 1 개 있는 형태로 3 가지 종류의 오리피스 내경(D_i : 1.65, 1.83, 2.10 mm)을 가지는 연료 분사노즐이 사용되었으며, DO 분사노즐은 오리피스가 공기유동 방향으로 2 개 있는 경우로 오리피스 사이의 거리(L_h : 4, 8, 12 mm)가 다른 3 개의 연료분사노즐이 사용되었고 두 오리피스의 내경은 1.83 mm 로 동일하다.

Table 1. Specifications of injectors.

injector	Single orifice injector (SO)	$D_i = 1.65, 1.83, 2.10 \text{ mm}$ $L/D = 10$
	Dual orifice injector (DO)	$L_h = 4, 8, 12 \text{ mm}$ $D_o = 1.83 \text{ mm} \times 2 \text{ ea}$ $L/D = 10$

2.3 주류 공기의 온도 및 속도 분포

Crossflow 의 속도분포는 liquid jet 의 분열 과정에 중요한 영향을 미친다. Fig. 2 에 가시화 장치 전단 100 mm 지점(VAH 출구)에서의 crossflow 의 속도분포를 나타내었다. 전체 측정 지점에서 균일한 속도와 온도 분포를 보여주고 있다.[7]

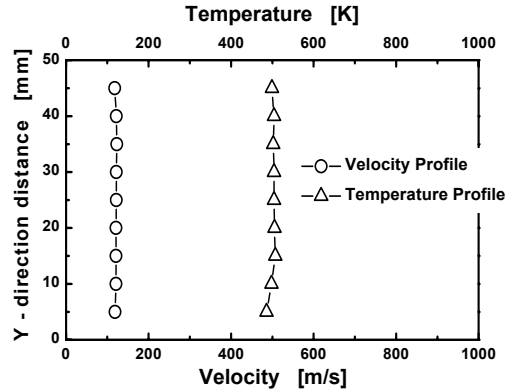


Fig. 2 Distribution of velocity and Temperature of crossflow

VAH 출구의 온도, 속도분포는 VAH 의 벽면을 제외하면 균일한 분포를 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 가시화 장치 내의 공기 속도 분포의 불균일성으로 인한 액주의 이상 분열 현상은 없는 것으로 가정하였다.

2.4 실험 조건

총 6 종의 SO 분사노즐과 DO 분사노즐을 사용하여, cross-flow의 속도와 온도, 정압, 그리고 연료의 분사압력을 달리하여 실험을 수행하였다.

JICF 분사조건에서 liquid jet 과 crossflow 의 밀도(ρ_j, ρ_∞)와 속도(U_j, U_∞)는 유동조건에 따라 다양하게 변하기 때문에 유동장을 특성화하는 주요 변수로 liquid jet 과 crossflow 의 모멘텀 비(J : jet-to-crossflow momentum flux ratio)를 사용 한다. 모멘텀비의 정의는 Eq. 1 과 같다.

$$J \equiv \frac{\rho_j U_j}{\rho_\infty U_\infty} \quad \text{Eq. 1}$$

Crossflow 와 liquid jet의 유동 및 분사조건은 Table 2와 같다. 실험을 위한 momentum ratio는 2에서 29까지 변화시키며 실험을 수행하였다.

Table 2. Test Conditions.

Crossflow	Temperature [K]	293 ~ 497
	Pressure [atm]	1 ~ 5.1
	Velocity [m/s]	40 ~ 100
Liquid Jet	Pressure [atm]	2 ~ 8
Momentum Ratio (J)		2.0 ~ 29.1

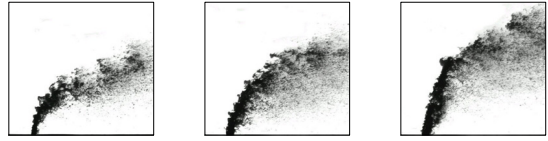
3. 결과 및 고찰

3.1 Spray Boundary (Single Orifice Injector : SO)

Liquid jet 의 포함한 penetration 은 분사 노즐을 통해 유동장 내의 수직으로 액체가 분사될 때 분사기 출구로부터의 임의의 수평거리(X)에서의 jet 의 선단이 도달하는 최대거리(Y)로 정의된다. 분사 침투깊이는 분출되는 액체의 운동 에너지와 주위 기체에 의한 공기역학적 저항의 상대적인 크기에 의해 결정되는데, transverse jet 의 경우 liquid jet 의 낮은 penetration 는 연소실 내에서의 완전 연소를 어렵게 하고 압력과 온도분포 또한 일정치 못하게 하는 등의 연소성능에 나쁜 영향을 끼친다.

JICF 에서의 spray boundary 는 pulsed shadowgraphy 를 이용하여 측정되었다. shadowgraphy 는 할로겐 조명과 동기된 CCD camera를 이용하여 획득되었으며 촬영된 이미지는 영상처리 프로그램에 의해 image processing 과정을 거쳐 outer boundary(jet penetration), inner boundary 를 측정하였다.

Fig. 3 은 momentum ratio 증가에 따른 spray boundary의 변화를 보여준다. 그림에서 momentum ratio의 증가는 jet 의 outer boundary(jet penetration) 를 증가시킨다. outer boundary 부근의 높은 농도분포는 큰 직경의 액적들이 작은 직경의 액적들보다 운동량이 커서 작은 액적보다 높은 위치에 도달하기 때문이다.



(a) J=5.97 (b) J=8.13 (c) J=11.97

Fig. 3 Jet penetration injection at the low wall of inlet (T_a=497 K)

JICF에서 jet boundary, 특히 outer boundary (jet penetration) 에 대한 다양한 실험식이 선행 연구자들에 의해 연구되는데, 공통적으로 momentum ratio(J) 와 jet penetration 과의 관계를 실험적으로 규명하고 있다. 선행연구자에 의해 제안된 다양한 실험식은 결국 Eq. 2 와 같이 표현된다.

$$\frac{y}{d_0} = A \cdot \left(\frac{x}{d_0} + 0.5 \right)^C \cdot q^D \quad \text{Eq. 2}$$

Momentum ratio 의 지수인 D의 값에 대해서는 선행연구자에 따라 차이는 있지만 일반적으로 0.4 에서 0.55 정도의 값을 가지는 것으로 연구되었다. 좀 더 자세히는 Wu 등은 0.5, Lin 등은 0.48, Stenzler 등은 0.429, Chen 등은 0.44를 제안하였다. [10, 11, 12, 13]

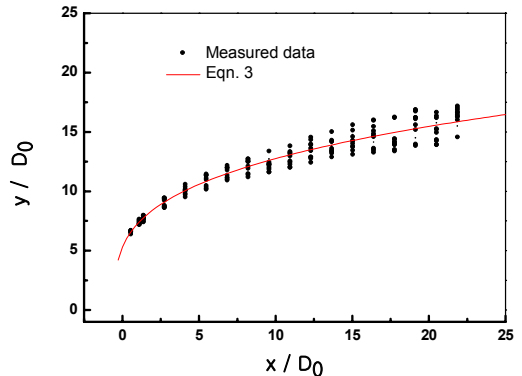


Fig. 4 Predicted Eqn. 2 versus measured data of jet penetration (J=4.06)

$$\frac{y}{d_0} = 3.44 \cdot \left(\frac{x}{d_0} + 0.5 \right)^{0.288} \cdot q^{0.452} \quad \text{Eq. 3}$$

Fig. 4 는 특정조건(J=4.06)에서의 jet 의 outer boundary(jet penetration) 를 측정 한 결과와 Eq. 3 을 이용하여 jet의 penetration 을 예측한 결과를 함께 보여준다. jet penetration 은 momentum ratio 의 0.452 승에 비례하는 것으로 나타났다. 전체 시험영역에 걸쳐 jet 의 penetration 은 Eq. 3 을 비교적 잘 만족하는 것으로 보인다. 특히 momentum ratio(J) 에 대해 0.424 에서 0.452 승에 비례하는 것으로 나타났다.

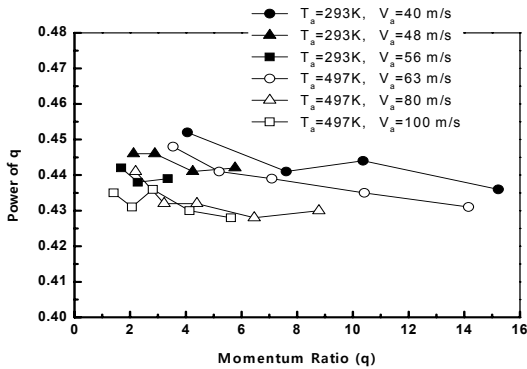


Fig. 5 Power of J with the variation of T_a , P_a .

Fig. 5 은 crossflow 의 온도가 각각 293 K, 497 K 일 때 crossflow 의 속도에 따른 momentum ratio(J) 의 승수를 보여준다. 그림에서 crossflow 의 온도가 낮은 경우 승수가 더 크며, 동일 온도에서 crossflow 의 속도가 더 작을수록 jet의 outer boundary(penetration)는 momentum ratio에 더 크게 의존함을 알 수 있다. 마찬가지로 jet 의 inner boundary 의 경우에도 동일한 방식으로 실험식을 구할 수 있는데 실험범위 전체 영역에 걸쳐 Eq. 4 와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{y}{d_0} = 3.44 \cdot \left(\frac{x}{d_0} - 0.5 \right)^{0.246} \cdot q^{0.306} \quad \text{Eq. 4}$$

하지만, inner boundary의 경우에는 outer boundary(penetration) 와 같은 유동조건에 따른 momentum ratio 의 지수에 대한 경향성을 찾기는 어려운데, 이는 inner boundary 의 경우에는 jet 뒷단에 형성되는 wake와 separation 등의 발달로 인해 유동의 불안정성이 증가하기 때문이다. 실험영역 전체에 걸쳐 inner boundary 의 경우에는 momentum ratio(J) 에 대해 훨씬 둔감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

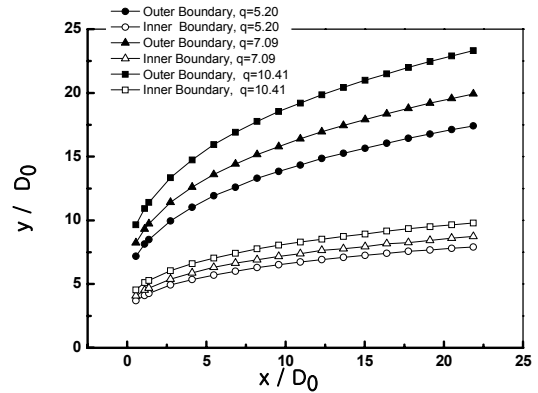


Fig. 6 Boundary of Jet ($V_a=63$ [m/s], $T_a=497$ [K])

Fig. 6 은 동일한 crossflow 조건에서 jet 의 inner boundary 와 outer boundary (penetration) 를 보여준다. 동일한 crossflow 의 속도 및 온도에서 spray boundary 는 momentum ratio 가 증가 할수록 증가하는데 증가량은 outer boundary (penetration) 에서 더 크게 나타난다. 실제 outer boundary (penetration) 의 경우에는 jet 의 운동량(에너지) 증가가 penetration 을 증가시키는데 거의 다 소모되지만, inner boundary 의 경우에는 jet 의 운동량 중 상당부분을 노즐 뒷단에서 wake 와 separation 을 발생시키는데 사용되어지기 때문이다.

3.2 Jet Penetrations. (Single & Dual Orifice Injector)

Fig. 7 과 Fig. 8 은 SO 와 DO 에서의 jet penetration 을 보여준다. SO 분사노즐의 경우 crossflow 의 속도가 증가함에 따라 liquid jet

의 penetration 이 감소함을 알 수 있다. 이것은 crossflow 의 속도가 증가함에 따라 jet에 작용하는 공기역학적 저항의 크기가 증가하게 되고 이로 인해 liquid jet 의 운동에너지의 감소하는 경향이 빨라지기 때문이다. 그리고 빠른 공기 속도는 동압에 의한 힘을 증가시켜 액주의 표면에서 발생하는 surface breakup 현상을 증가시킨다.

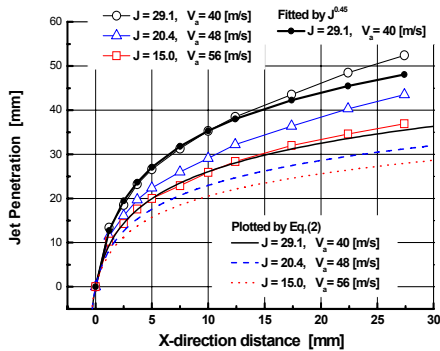


Fig. 7 Jet Penetration (SO : $P_a=2$ atm, $D_f=1.83$ mm)

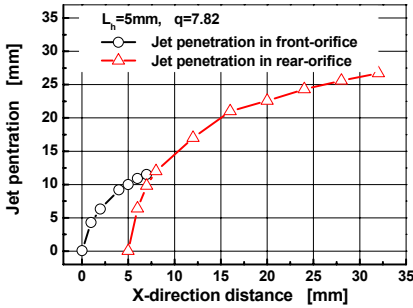


Fig. 8 Jet Penetration (SO : $P_a=2.39$ atm)

Fig. 8 의 DO 분사노즐의 경우 전단에 있는 오리피스에서 분사되는 액주가 공기유동의 저항체로 작용하여 후단에 있는 오리피스에서 분사되는 액주는 분사 침투깊이가 증가하게 된다. 즉, liquid jet 의 penetration 은 분출되는 액적의 운동에너지와 공기역학적 저항의 상대적 크기에 의해 결정되는데, 후단의 액주의 경우 상대적으로 공기역학적 저항을 적게 받는다.

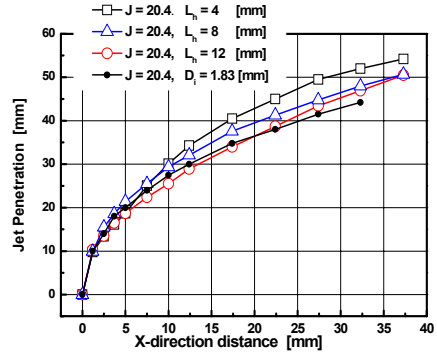


Fig. 9 Jet Penetration (SO : $P_a=2.39$ atm, $J=20.4$, $D_f=1.83$ mm)

Fig. 9 은 DO 분사노즐에서 두 오리피스 간의 거리(L_h)의 변화에 따른 jet penetration 의 변화를 보여준다. 두 오리피스 간의 거리가 멀어질수록 penetration 이 감소하고 있는데, 이는 두 오리피스간의 거리가 멀어짐에 따라 전단에서 분출된 액주로 인한 공기역학적 힘의 감소 효과가 회복되는 정도가 증가하여 후단에서 분출된 액주가 받는 저항이 더 커지기 때문이다.

또한, SO 분사노즐과 DO 분사노즐을 통해 분사되는 jet의 penetration 을 살펴보면, 동일한 실험조건에서는 SO 분사노즐 보다 DO 분사노즐을 통해 분사되는 jet의 penetration 이 더 증가하였다. 상류에서는 liquid jet 의 모델링이 큰 영역이기 때문에 jet 의 penetration 이 비슷한 경향을 보이지만 $X=17$ mm 이후에는 모든 조건에서 DO 분사노즐의 jet penetration 보다 더 낮아짐을 알 수 있다. $X=17$ mm 지점에서 두 오리피스 간의 거리가 4 mm 인 DO 분사노즐의 분사 침투깊이와 비교하여 18% 정도 증가 하였다.

4. 요약

분사노즐의 형상 및 배열에 따른 transverse jet 의 분무 및 미립화 특성 연구를 위한 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

SO 분사노즐에서의 liquid jet 의 Spray

Boundary 는 crossflow 의 속도가 낮고, 온도가 높을 때, momentum ratio 가 증가함에 따라 증가하였으며, outer boundary(jet penetration) 의 경우 momentum ratio 의 0.424 에서 0.425 층에 비례하는 것으로 나타났다. 특히, crossflow 의 온도가 낮은 경우 승수가 더 크며, 동일 온도에서 주류의 공기속도가 더 작을수록 jet 의 outer boundary(penetration) 는 momentum ratio 에 더 크게 의존한다.

DO 분사노즐의 경우, 전단 오리피스에의 영향으로 후단 오리피스에서의 jet penetration 은 DO 분사노즐과 비교할 때 약 18% ($L_h=4$ mm) 증가하였으며, DO 분사노즐에서 두 오리피스 사이의 거리가 클수록 후단 오리피스에서의 jet penetration 이 감소하는 경향을 나타낸다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원 사업으로 수행된 연구임(2010-0020089)

참 고 문 헌

1. Ann R. Karagozian, "Transverse jets and their control." Progress in Energy and Combustion Science, Accepted 3 January 2010, 2011
2. Abbitt JS, Segal C, McDaniel JC, Krauss RH, Whitehurst RB., Experimental supersonic hydrogen combustion employing staged injection behind a rearward-facing step, Journal of Propulsion and Power, Vol. 9, 1993, pp. 472-8
3. Wang KSC., Smith OI., Karagozian AR., In-flight imaging of gas jets injected into subsonic and supersonic crossflows. AIAA Journal, Vol. 33, No. 12, 1995, pp. 2259-63
4. Curran ET., Scramjet engines: the first forty years. Journal of Propulsion and Power, Vol. 17, No. 6, 2001, pp. 1138-48.
5. Jones. R., Firebird ramjet propulsion system development. 8th JANNAF Combustion Meeting, Vol. 3. 1981
6. Arthur H. Lefevre, Gas-Turbine Combustion. Hemisphere Publishing Corporation, 1983
7. CH. Lee, SY. Moon, CH. Shon, HJ. Yoon, Spray and Combustion Characteristics of a Dump-type Ramjet Combustor. KSME International Journal. Vol 17, No. 12, 2003, pp. 2019~26
8. Schetz JA., Padhye A., Penetration and breakup of liquids in subsonic airstreams. AIAA Journal, Vol. 15, No.10, 1977, pp. 1385-90
9. Takao Inamura,, Nobuki Nagai., Spray characteristics of liquid jet traversing subsonic airstreams. Journal of Propulsion and Power, Vol. 13, No. 12, 1997, pp. 250-256
10. Wu, P. K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P., and Nejad, A. S., "Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows," Journal of Propulsion and Power. Vol.13,
11. Lin, K. C., Kennedy, P. J., and Jackson, T. A., "A Review of Penetration Heights of Transverse Liquid Jets in High-Speed Flows," ILASS 15th International Conference
12. Stenzler J., Lee J., and Santavicca D., "Penetration of Liquid Jets in a Crossflow," 2003.
13. Chen, T. H., Smith C.R., and Schommer D.G., "Multi-Zone Behavior of Transverse Liquid Jet in High-Speed Flow," 1993.