

횡단 유동장의 기액비 및 레이놀즈수 변화에 따른 외부혼합형 이상유체 제트의 액적크기 및 체적유속 특성

김 종 현¹⁾ · 이 봉 수²⁾ · 구 자 예³⁾

동양공업전문대학 기계설계과¹⁾ · 한국기유화시험연구원²⁾ · 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부³⁾

Characteristics of SMD and Volume Flux of Two-phase Jet Injected into Cross-flow with Various Gas-Liquid Ratio and Reynolds Number

Jong-hyun Kim^{*1)} · Bong-soo Lee²⁾ · Ja-ye Koo³⁾

¹⁾Department of Mechanical Design, Dongyang Technical College, Seoul 152-714, Korea

²⁾Korea Machinery-Meter and Petrochemical Testing & Research Institute, 587-10 Sinsa-dong, Gangnam-gu, Seoul 135-892, Korea

³⁾School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi 412-791, Korea

(Received 10 June 2008 / Accepted 9 October 2008)

Abstract : A study was performed to investigate the characteristics of two-phase jet injected into subsonic cross-flow using the external mixed gas blast two-phase nozzle. The shadowgraph method was adopted for the cross-flow jet visualization and PDPA system was used to measure droplet size, velocity, and volume flux. The atomization of two-phase jet is initially determined according to gas to liquid mass flow-rate ratio and the Reynolds number of cross-flows. The highest penetration trajectories of two-phase jet injected into cross-flow are governed by the momentum ratio at subsonic cross-flow. As GLR of two-phase jet injected into cross-flow increases, the droplet size decreases and the distribution area of volume flux increases. The distribution of volume flux that influenced by the counter vortex pair at the downstream of cross-flow is symmetric in shape of horseshoe.

Key words : Cross-flow(횡단유동), Two-phase jet(이상유체 제트), GLR(기체와 액체의 질량유량비), Penetration trajectory(분무선단 궤적), SMD(Sauter 평균입경)

Nomenclature

\dot{m} : mass flow rate, kg/s
U : velocity, m/s
d : diameter, mm
 μ : viscosity coefficient, kg/(m · s)
 ρ : density, kg/m³
 σ : surface tension, N/m
q₂ : momentum ratio

GLR : Gas to Liquid mass flow-rate Ratio

Subscripts

l : liquid of cross-flow
a : air of cross-flow
cross : cross-flow
2-phase : liquid and gas of 2-phase jet nozzle
blast : gas of 2-phase jet nozzle

*Corresponding author, E-mail: jhkim0@dongyang.ac.kr

1. 서론

내연기관, 가스터빈, 그리고 비행체의 추진기관 등에 최적화된 연소시스템 설계를 위해서는 연료의 미립화 제어가 필수적으로 선행되어야 하며, 연소실 내부로 분사되는 연료의 분열과정, 액적의 미립화 및 분포는 연료분사시스템 설계에 중요한 요소로 작용한다. 대부분의 연소시스템은 연소실 내의 횡단유동장으로 연료가 분사되며, 분사된 연료와 공기가 혼합될 수 있는 시간이 매우 짧기 때문에, 분사된 연료의 시간적, 공간적 분포특성은 연소의 안정성과 연소효율, 그리고 배출가스에 중대한 영향을 미친다.

효율적인 연료분사시스템을 개발하기 위해서 단순 압력 분무방식이 아닌 다양한 형태의 미립화 방법이 개발되어지고 있으며, 특히 와류 분무 노즐 및 이상유체 노즐이 많이 연구되어지고 있다.¹⁾

이상유체 노즐은 연료로 사용하는 액체에 추가로 공급하는 기체의 운동에너지를 이용하여 액체연료를 미립화시키는 방식으로서, 단순 압력분무형 노즐과 다르게 정해진 액체 분사압으로도 다양한 분무특성을 얻을 수 있으며, 연료와 같이 공급되는 기체의 분사량을 조절하여 연소상태를 제어할 수 있어서 노즐의 형상변화 및 작동조건의 변경 없이 연소효율 및 배출가스를 능동적으로 제어할 수 있는 장점이 있으나 액체연료의 분열과정 및 미립화 특성이 기존의 단순 압력분무 방식과 다르므로 연료와 같이 공급되는 기체를 변수로 하는 다양한 연구가 필요하다.²⁾

본 연구는 횡단류의 속도 및 이상유체 제트의 GLR (Gas to Liquid mass flow-rate Ratio)을 변경하면서 저속 횡단 유동장에 분사되는 이상유체 제트의 분열점 및 분무선단 외곽표면 궤적을 관찰하고, 이상유체 제트 액적의 입경(SMD) 및 속도, 그리고 체적유속(Volume flux)을 측정하여 이상유체 제트의 분열 및 미립화 특성을 연구하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 실험조건 및 장치

이상유체 제트에서 분사되는 액체는 물을 사용하였고, 부가되는 기체는 공기를 사용하였다. 온도는

20°C를 유지하였으며, 정확한 유속을 얻기 위해 열선유속계로 측정하였다. 검사체적의 크기가 120mm(H)×120mm(W)×350mm(L)인 축류 흡입식 풍동에서 실험이 수행되었고, 스트로보스코프와 CCD카메라를 이용하여 분무의 가시화를 수행하였으며, 위상도플러 입자분석기(PDPA)를 사용하여 액적의 입경(SMD) 및 속도, 체적유속을 측정하였다. 실험에 사용된 이상유체 노즐은 Spray system사의 Model 1250 Autojet로서 Fig. 1과 같다. 실험 중에 니들밸브는 최대개방 상태에서 연속분무를 수행하였으며, 분사 중에 노즐의 구성부분이 기구학적으로 변화하지 않고 일정하게 유지되었다. 실험장치의 구성은 Fig. 2에 나타내었다.

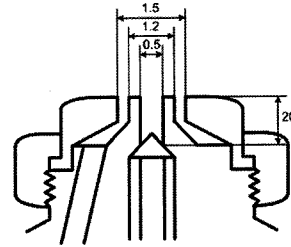


Fig. 1 Two-phase nozzle

2.2 무차원 변수의 정의

이상유체 제트의 경우, 횡단 유동장으로 액체 및 기체가 동시에 분사되기 때문에 분무의 특성을 해석하기 위한 무차원 변수를 다음과 같이 정의한다.³⁾

GLR은 이상유체 제트에서 분사되는 기체와 액체의 질량유량 비를 나타낸다.

$$GLR = \frac{\dot{m}_{blast}}{\dot{m}_l} \quad (1)$$

Fig. 3은 이상유체 제트에 사용된 노즐의 출구를 표시한 그림이다.

A_o 는 액체가 분사되는 면적, A_{blast} 는 기체가 분사되는 면적을 나타낸다. 이 두 면적을 합한 것을 이상유체 제트의 단면적 A_{2phase} 로 정의한다.

이상유체 제트의 모멘텀 비를 다음과 같이 q_2 로 정의한다.

$$q_2 = \frac{(\rho_l U_l^2 A_o + \rho_a U_{blast}^2 A_{blast}) / A_{2phase}}{\rho_a U_{cross}^2} \quad (2)$$

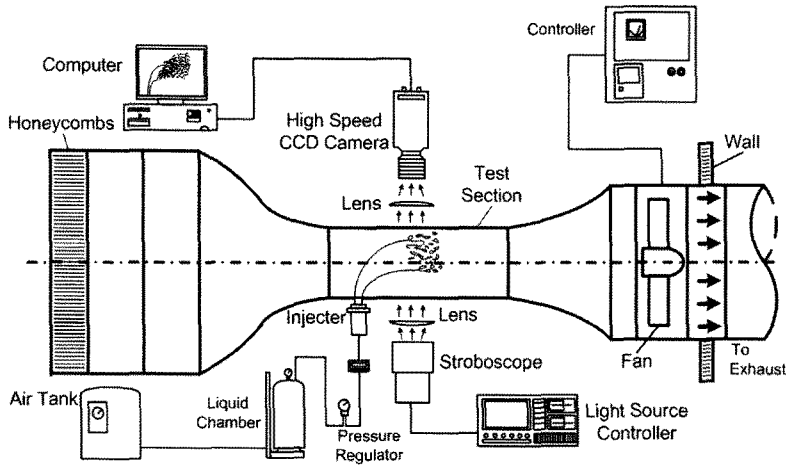


Fig. 2 Arrangement of spray visualization system

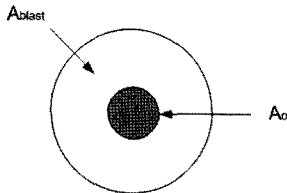


Fig. 3 Schematic of nozzle outlet area for 2-phase nozzle

실험이 수행된 조건들의 범위를 Table 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 GLR 변화에 따른 분무선단 외곽표면 궤적 변화

횡단 유동장의 레이놀즈수를 $Re_{cross} = 2.61 \times 10^5$, A_o 에 공급되는 액체의 압력을 60kPa로 일정하게 유지하면서 A_{blast} 에 공급되는 기체의 압력을 0kPa, 30kPa, 60kPa, 120kPa, 300kPa로 변화시키면서 유동 가시화를 수행하였다.

분무선단 외곽표면 궤적은 Fig. 4와 같이, 액적의 밀도가 70% 이상인 외곽표면의 궤적을 연결하여 측정하였다. 분무영상 내의 가장 농후한 영상에 대한 음영비의 백분율이 70% 이상 되는 부분으로 외곽표면의 궤적을 측정하였으며, Image-Pro Express 소프트웨어를 이용하였다.⁴⁾ Fig. 5는 횡단유동장의 속도가 일정한 경우에 대해 이상유체 제트의 GLR 변화에 대한 분무선단 외곽표면 궤적을 나타낸 것이다.

Table 1 Experiment conditions for two-phase jet

Parameter	Range
Fuel Flow-rate (g/s) [water]	1.7
Blast Flow-rate (g/s) [air]	0.18~1.02
GLR (%)	0~59.4
Cross-flow Velocity [U_{cross} (m/s)]	27~42
$Re_1 = \frac{\rho_1 U_1 d_o}{\mu_1} \times 10^3$	0.12~0.86
$Re_{blast} = \frac{\rho_a U_{blast} d_{2phase}}{\mu_a} \times 10^4$	1.27~2.29
$Re_{cross} = \frac{\rho_a U_a d_h}{\mu_a} \times 10^5$	2.14~3.33
Cross-flow Hydraulic Diameter [d_h (mm)]	120
$We_{blast} = \frac{\rho_a (U_{blast} - U_1)^2 d_o}{\sigma_1}$	261~940
Two-phase Jet Momentum Ratio [q_2]	22.20~79.93
Measuring point and coordinate system	

일반적인 단순 분무압력 액체제트는 횡단유동장의 수평방향 공기력에 의해 수직 방향으로 분사되는

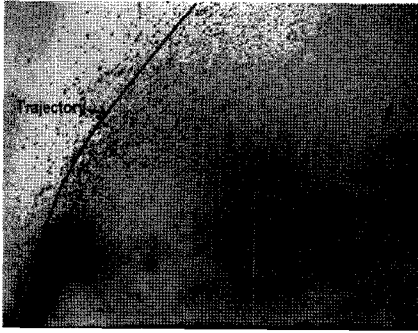


Fig. 4 Definition of spray trajectory

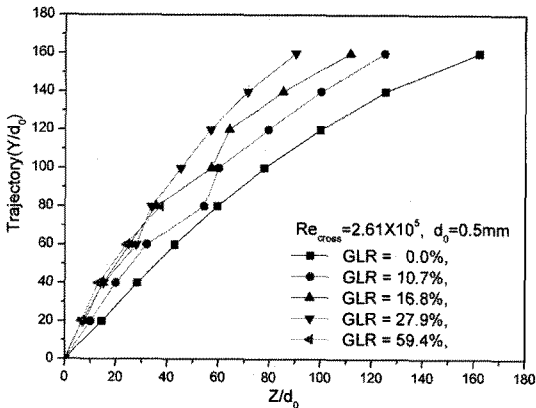
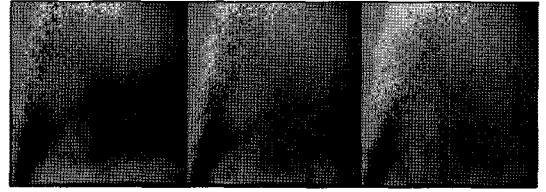


Fig. 5 Trajectories of two-phase jet with various GLR

액체제트에 교란을 주어 액주에 불안정한 파장을 만들며, 교란된 액체 제트는 액주, 액막, 액적의 순으로 분열된다. 그러나 이상유체 제트는 GLR이 증가함에 따라 분무선단 외곽표면 꺾적 및 분무각 등을 제어할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 횡단유동장의 레이놀즈수 변화에 따른 분무선단 외곽표면 꺾적 변화

가시화 결과 GLR이 59.4% 이상이 되면 미립화 과정이 더 이상 진행되지 않으며 분열되지 않은 액적 때문에 침투 거리만 길어지게 된다. Fig. 6은 GLR을 27.9%로 일정하게 유지하고, 횡단유동장의 유속을 증가시킨 경우를 가시화한 예이며, Fig. 7에 횡단유동장의 레이놀즈수 변화에 따른 분무선단 외곽표면 꺾적을 나타내었다. GLR이 27.9% 이상이 되면 분무 하류 영역에는 아주 작게 미립화된 무흐스트립이 형성되는 성층화 현상이 관찰된다. 횡단 유동장의 유속 증가는 이상유체 제트의 미립화를 촉진



(a) $Re_{cross} = 2.14 \times 10^5$ (b) $Re_{cross} = 2.61 \times 10^5$ (c) $Re_{cross} = 3.33 \times 10^5$

Fig. 6 Images for two-phase jet in cross-flow with various Re_{cross} (GLR=27.9%, $d_0=0.5mm$)

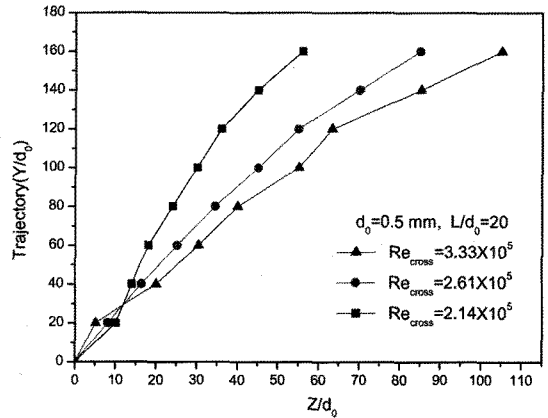


Fig. 7 Trajectories of two-phase jet with various Re_{cross} (GLR=27.9%)

시키는 것을 알 수 있다. GLR이 0%인 이상유체 제트 즉, 액체 제트의 경우는 분무 선단에서 횡단유동장의 횡단류에 의해 액체제트가 교란되고 액주와 충돌하여 액체 제트의 분열을 가속화하며, 액체 제트를 지난 횡단 유동장은 액체제트의 하류에서 서로 반대 방향의 와류를 양쪽 영역으로 발생시켜, 액주에서 떨어져 나간 액적들을 더 작게 하는 2차 미립화 과정을 진행시킨다.⁵⁾

3.3 GLR 변화에 따른 SMD 및 체적유속 변화

Fig. 8은 이상유체 제트의 GLR 변화에 따른 SMD의 단면분포 특성을 나타낸 것이다. Z/d₀가 60인 지점에서 횡단 유동장의 Re_{cross} 를 2.61×10^5 로 유지하고 GLR을 0%, 10.7%, 27.9%, 59.4% ($We_{blast} = 261, 468, 682, 940$)로 변경하면서 실험한 결과이다. GLR이 0%인 경우 SMD는 55~85 μm , GLR이 10.7~27.9%인 경우 SMD는 34~85 μm , GLR이 59.4%인 경우 SMD는 32~54 μm 범위에 분포한다. 가시화 결과로부터 GLR

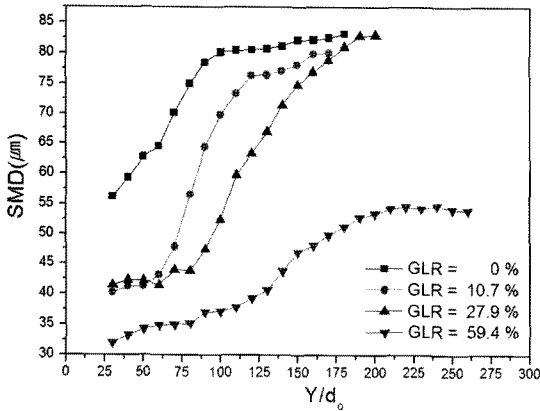


Fig. 8 SMD distribution of two-phase jet in the spray centerline with various GLR($Re_{cross}=2.61 \times 10^5$, $d_o=0.5mm$, $Z/d_o=60$)

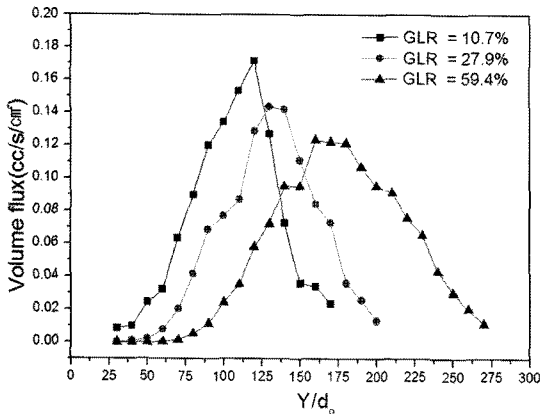


Fig. 9 Volume flux distribution of two-phase jet in the spray centerline with various GLR($Re_{cross}=2.61 \times 10^5$, $d_o=0.5mm$, $z/d_o=60$)

이 16.8%인 경우의 SMD는 GLR이 10.7%와 27.9%인 경우의 중간에 위치하므로, Fig. 8에는 GLR이 16.8%인 경우는 생략하였다. 이상유체 제트에서 분사되는 기체의 유량이 증가할수록 SMD가 작아진다는 것을 알 수 있다. 모든 SMD분포는 성층 구조를 나타내며, 작은 액적이 하부 및 중심에 분포하고 상부 및 외곽에는 큰 액적이 분포한다. 노즐에서 분사되는 기체 유량의 증가는 GLR 및 We_{blast} 의 증가를 가져오고 두 변수가 미립화에 영향을 주는 인자임을 알 수 있다. GLR이 59.4%인 경우에는 분사된 액체와 기체간의 충돌이 극대화 되어 가장 낮은 SMD 분포를 나타내고 있다.

Fig. 9는 GLR 변화에 따른 체적유속의 분포를 나타내고 있다. GLR을 증가시키면 최대 체적유속이 감소하고 체적유속의 분포가 분무의 상부로 이동하면서 넓게 퍼지는 것을 알 수 있다. GLR이 작은 경우에는 미립화가 적게 되고 큰 액적이 분무의 상부까지 올라가 체적유속이 크게 나오는 것이다. 분사되는 기체와 액체의 충돌에 의해 미립화가 진행된다면 체적유속이 넓은 면적에 걸쳐서 균일하게 분포하게 된다.

3.4 횡단유동장의 레이놀즈수 변화에 따른 SMD 및 체적유속 변화

Fig. 10은 횡단 유동장의 레이놀즈수 변화에 따른 SMD의 분포를 나타내고 있으며, Z/d_o 가 60인 위치에서, 이상유체 제트의 GLR을 27.9%로 일정하게 유지하면서 횡단유동장의 레이놀즈수를 $Re_{cross}=2.61 \times 10^5$ 에서 $Re_{cross}=3.33 \times 10^5$ 로 변화시켜 실험한 결과이다. $Re_{cross}=2.61 \times 10^5$ 인 경우에는 SMD가 43~85 μm 범위에 있으며, $Re_{cross}=3.33 \times 10^5$ 인 경우에는 SMD가 30~53 μm 범위에 있다. 횡단 유동장의 속도증가가 이상유체 제트의 미립화를 촉진시키는 것을 알 수 있다. 또한 SMD 단면 분포를 통하여 액적의 분포가 성층 구조를 이루고 있는 것을 알 수 있는데, 큰 액적은 모멘텀이 커서 분무의 상부 및 외곽까지 도달할 수 있어 침투 거리의 증가를 가져오며, 작은 액적은 모멘텀이 작아서 분무의 하부 및 중심에 분포하게 된다. 이상유체 제트에서 횡단유동장의 속도 증가

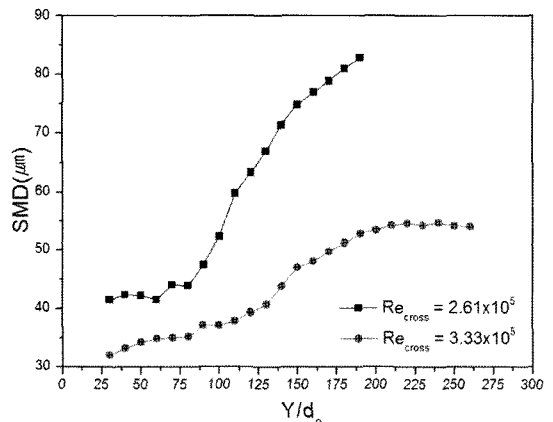


Fig. 10 SMD distribution of two-phase jet in the spray centerline with Re_{cross} (GLR=27.9%, $d_o=0.5mm$, $z/d_o=60$)

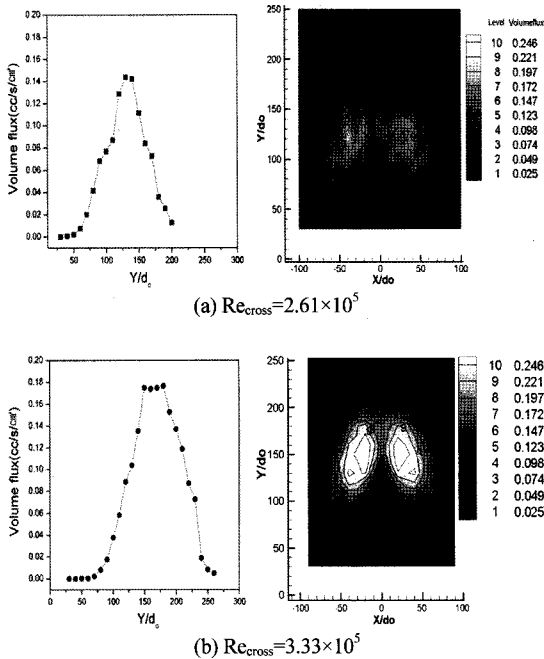


Fig. 11 Volume flux distribution of two-phase jet in the spray centerline and cross-section with Re_{cross} (GLR=27.9%, $d_o=0.5mm$, $z/d_o=60$)

는 이상유체 제트의 미립화에 영향을 미치는 주요 인자임을 알 수 있다.

Fig. 11에 Re_{cross} 변화에 따른 체적유속 분포를 나타내었다. $Re_{cross}=2.61 \times 10^5$ 인 경우에는 체적유속의 분포가 두 영역으로 나누어지는 것이 명확하지 않지만, $Re_{cross} = 3.33 \times 10^5$ 인 경우에는 체적 유속의 분포가 두 영역으로 명확하게 나누어지는 것을 알 수 있다. 횡단 유동장의 속도는 제트 후단에 생기는 와류의 형성 및 강도에 영향을 주며, Fig. 10의 결과처럼 액적의 2차 미립화에도 영향을 준다. 또한 횡단 유동장의 속도를 증가시키면 최대 체적유속이 증가하고 체적 유속의 분포 면적이 증가하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 횡단 유동장의 속도 증가로 인하여 이상유체 제트를 통과한 횡단유동장의 양단에 발생한 와류의 영향 때문이다. 분사 초기의 큰 액적은 횡단 유동장과 모멘텀 상호 작용에도 불구하고 큰 모멘텀을 가지며, 작은 액적에 비하여 긴 침투 길이를 갖는다. 체적유속 측정 결과 체적유속의 분포가 분무의 중심에 집중되어 있어 상부 및 외곽의 큰 SMD는 연소시 연소효율보다 배출가스에 영향을

주는 인자라고 판단된다.

4. 결론

- 1) 횡단 유동장에 분사되는 이상유체 제트는 GLR 및 횡단 유동장의 속도에 따라 분사 초기에 액적의 미립화 정도가 결정된다.
- 2) 이상유체 제트의 액체유량을 일정하게 유지하고, 분사되는 기체유량만을 증가하여도 액체제트의 분사압력을 증가한 것과 같이 침투길이 및 분무선단 외곽표면 궤적의 기울기를 증가시킬 수 있다.
- 3) 횡단 유동장에 분사되는 이상유체 제트는 GLR이 증가할수록 액적의 SMD가 감소되고, 검사체적의 횡단면 중심 및 하부에는 미립화가 잘된 성층화된 분무가 관찰된다. 또한 작은 액적들은 이상유체 제트 영역을 통과한 횡단류에서 발생하는 와류의 영향을 많이 받는다.
- 4) 이상유체 제트는 횡단 유동장의 유속이 증가하면 분열이 가속되어 SMD가 감소하고 체적유속의 분포가 대칭적으로 두 영역으로 나누어지며, 액체 제트와 다르게 액적의 분열은 분사 초기에 주로 진행된다.
- 5) 횡단 유동장의 유속 증가와 GLR의 증가에 따른 액적의 미립화는 유사한 경향을 보이는 지점이 있어 연소시 보조인자로 활용할 수 있으며, 웨버수의 증가 및 모멘텀비의 감소는 미립화를 촉진한다.

후 기

본 논문은 2007년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단 지역대학우수과학자 지원사업의 지원으로 수행된 연구과제임(KRF-2007-D00084).

References

- 1) K. C. Lin, P. J. Kennedy and T. A. Jackson, "Spray Structures of Aerated-Liquid Jets in Subsonic Crossflows," AIAA Meeting & Exhibit, pp.8- 11, 2001.

- 2) C. Ghenai, H. Sapmaz and C. X. Lin, "Effect of Gas/Liquid Mass Ratio on the Penetration of Aerated Liquid Jet in Supersonic Cross Flow," 44th AIAA, Aerospace Science Meeting and Exhibit, 2006.
- 3) M. Y. Leong, V. G. McDonell and G. C. Samuelsen, "Mixing of an Airblast-Atomized Fuel Spray Injected Into a Crossflow of Air," NASA CR-2000-210467, 2000.
- 4) Image-Pro Express Version 4.0 for Windows User Guide, Media Cybernetics, L.P, 1998.
- 5) J. H. Kim, W. J. Cho, I. C. Lee and B. S. Lee, "The Effect of Cross-flow on Liquid Atomization," Transactions of KSAE, Vol.16, No.2, pp.87-92, 2008.