

초임계 환경으로 분사되는 극저온 제트의 분열

이건웅* · 김도현* · 구자예†

Disintegration of Cryogenic Jet in Super-critical Environment

Keonwoong Lee, Dohun Kim and Jaye Koo

Key Words: Supercritical spray(초임계 분무), Breakup length(분열 길이), Momentum flux ratio(운동량 플럭스 비), Density ratio(밀도 비)

Abstract

Sub/supercritical spray experiments were conducted, and cryogenic nitrogen and gaseous argon were selected for simulants. liquid nitrogen and gaseous argon were injected in subcritical case, and supercritical nitrogen and near-critical gaseous argon were injected in near-critical/supercritical cases. shadowgraph method was used to visualize spray, and analyzed about the breakup length. The breakup length was measured from numbers of Instantaneous shadowgraph Images from each case, and they were compared with momentum flux ratios and density ratios. It was observed that the relation between breakup length and momentum flux ratio was fitted into former experiment results. and the reasonable constant was suggested about the relation between breakup length and density ratio.

기호설명

d 분사기 액체분사 포트 내경
 L 제트의 진행방향 길이
 J 운동량 플럭스 비
 \dot{m}_G 아르곤의 질량유량
 \dot{m}_L 질소의 질량유량
 P_{ch} 챔버의 압력
 P_{cr} 임계 압력
 P_G 분사시 아르곤의 압력
 P_L 분사시 질소의 압력
 ρ_f 분사시 질소의 밀도
 ρ_o 분사시 아르곤의 밀도

T_{ch} 챔버 온도
 T_{cr} 임계 온도
 T_G 분사시 아르곤의 온도
 T_L 분사시 질소의 온도

1. 서 론

최근의 주된 액체로켓엔진은 고온 고압 환경의 연소실에 극저온 추진제를 분사, 연소시켜 연소실의 압력을 올려 그 힘으로 추력을 얻는다. 따라서, 연소실 내부는 대부분의 상황에서 추진제의 초임계 온도 및 압력 이상의 온도와 압력을 가진 상태가 되며, 따라서 추진제는 대부분 온도가 임계 조건을 만족하지 못하는 아임계 액체 상태에서 초임계 상태로 상변화를 거치며 분사된다.

초임계 유체의 분무 및 연소에 관한 연구는 주로 해외에서 활발하게 이루어지고 있는데, 미국의 플로리다 대학교(UFL)⁽¹⁻³⁾에서는 PLIF(Planar Laser Induced Fluorescence) 기법을 이용해 제트의 분열을 관찰하였으며,

(2013년 8월 31일 접수 ~ 2013년 9월 11일 심사완료, 2013년 9월 23일 게재확정)

*한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

†책임저자, 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

E-mail : jykoo@kau.ac.kr

TEL : (02)300-0116 FAX : (02)3158-0117

또한 단일제트 및 전단동축 제트의 분열과 연소에 관하여 연구한 독일의 독일항공우주연구소(DLR)⁽⁴⁾, 그리고 DLR과 미국의 공군연구소(AFRL) 간의 초임계 제트의 분열에 대한 공동연구에 대한 사례⁽⁵⁾가 있다. 또한 Davis⁽⁶⁻⁷⁾ 등이 액체 중심 전단동축 분사기에서의 운동량 플럭스비 및 밀도 비와 분열 길이(Break-up length)에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 전단 동축 분사기를 이용해 액체질소 및 기체 아르곤을 기체 질소로 가압한 챔버 내에 분사하여 그림자 기법(Shadowgraphy method)을 이용해 가시화하여, 이미지 후처리를 통해 분열 길이를 측정하였다. 이를 운동량 플럭스비와 밀도 비에 따라서 비교, 분석하였다. 이를 통하여, 산화제 과잉 가스 발생기를 사용하는 로켓 연소실 내부와 같이, 고압 환경에서의 액체 연료의 분열을 모사할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험장치 및 실험조건

2.1 실험장치

초임계 전단 동축 제트의 분사 실험을 수행하기 위하여, Fig. 1과 같은 초임계 분사 실험 장치를 구축하였다. 비반응 유체인 액체 질소와 기체 아르곤을 모사추진제로 선택하였으며, 기체 질소를 이용하여 모사 추진제인 액체 질소와 분사시험 챔버를 가압하여 초임계 상태로 분사될 수 있도록 압력을 조절하였다. 그리고 실험을 위해 설계된 전단 동축 분사기는 액체분사 중심포스트 내경 4.5 mm, 액체분사 중심포스트 외경 6.5

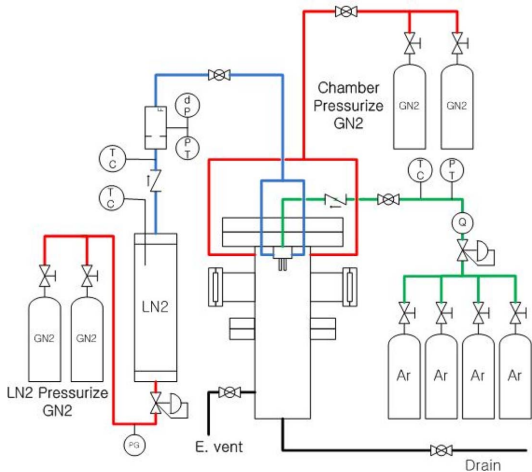


Fig. 1 Schematic of Simulant Feeding System

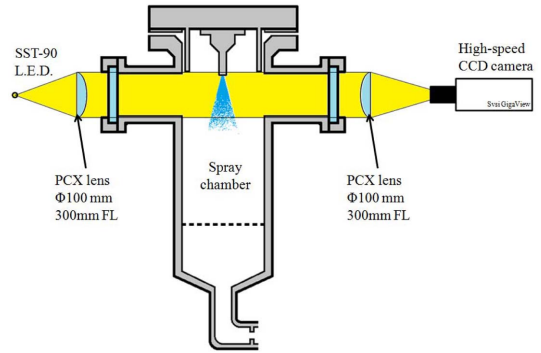


Fig. 2 Schematic of Shadowgraphy

mm, 기체분사 환형간극(annular gap)의 폭 1.5 mm 이며, 리세스(recess) 깊이는 0 mm, 즉 중심 포스트 끝과 분사기의 표면이 일치한다.

초임계 분무의 가시화를 위하여, Fig. 2와 같이 챔버 양쪽에 가시화 창을 설치하고, 고속 CCD 카메라와 LED 광원을 이용하여 1065 fps(frame per second)의 촬영속도와 4 μ s의 노출시간으로 분무 가시화 이미지를 촬영하였다.

2.2 실험 조건 및 실험 방법

Table 1에 질소 및 아르곤의 임계 조건을 나타내었다. 그리고 Table 2와 Table 3에 각각 아임계 및 초임계/근임계 질소 및 아르곤 동축 분무의 세부적인 조건을 나

Table 1 Critical properties of Simulants

	P_{cr} (bar)	T_{cr} (K)
Nitrogen	33.99	126.15
Argon	48.98	150.87

Table 2 Experimental Condition of subcritical coaxial flow

	Value
P_{ch} (bar)	18.63
T_{ch} (K)	279.8
P_G (bar)	19.71
T_G (K)	292.45
P_L (bar)	20.65
T_L (K)	142.3
\dot{m}_G (kg/s)	0.0411
\dot{m}_L (kg/s)	0.1379
J	1.329

Table 3 Experimental conditions of super/near-critical flow

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Pch (bar)	40.25	40.35	40.44	40.52	40.60
Tch (K)	283.55	283.47	283.38	283.27	283.16
PG (bar)	41.88	41.97	42.04	42.11	42.18
TG (K)	289.86	289.89	289.91	289.93	289.93
PL (bar)	42.68	42.73	42.76	42.80	42.83
TL (K)	163.09	162.02	161.00	160.04	159.09
\dot{m}_G (kg/s)	0.1058	0.1071	0.1093	0.1093	0.1115
\dot{m}_L (kg/s)	0.0898	0.0898	0.0902	0.0929	0.0949
J	1.1084	1.0785	1.0434	1.1064	1.1069

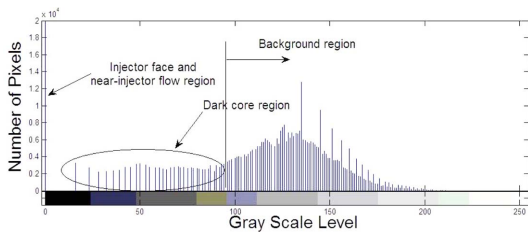


Fig. 3 Histogram of Instsantaneous Image

타내었다. 아임계 실험의 경우, 질소와 아르곤 모두 아임계 상태로 분사되었으며, 초임계/근임계 실험의 경우 질소는 압력과 온도 모두 임계치를 만족하는 초임계 상태로, 아르곤은 온도는 초임계 조건을 만족하나, 압력은 임계상태보다 약간 낮은 근임계 상태로 분사되었다. 초임계/근임계 실험의 경우 가시화 가능 영역이 액체 제트 분사직경의 약 13배에 해당하므로, 그에 맞추어 모사추진제 분사 운동량 플럭스 비를 조절하였으며, 그에 따라 Table 3에 나타난 바와 같이 실험을 다섯 경우에 대하여 진행하였다. 그리고 그와 유사한 운동량 플럭스 비를 가지는 아임계 분사 실험을 진행하여 비교하였다.

분열 길이는 Davis⁽⁶⁻⁷⁾가 제시한 방법과 유사하게 각 사진의 이미지 히스토그램을 이용한다. 실험에서 촬영된 가시화 이미지중 하나의 이미지 히스토그램을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3와 같은 히스토그램에서, 그레이 레벨(Gray level)이 0에 해당하는 부분은 분사기 및 분사기 출구 근처의 유동에 해당하며, 반대로 픽셀 수가 증가하기 시작하는 그레이 레벨 약 90 이상 영역은 유동 주변 배경에 해당한다. 따라서, 그레이 레벨이 0 보다 크고, 약 90 보다 작은 영역이 바로 동축 제트의

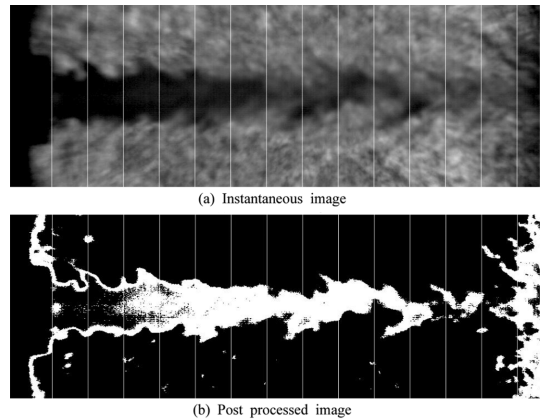


Fig. 4 Images of super/near-critical coaxial flow

분열길이 에 해당하는 그레이 레벨이다. 다만 그레이 레벨이 90이란 것은 절대적인 기준이 아니기 때문에, 실험 조건이 달라지면 또한 기준이 되는 그레이 레벨이 달라질 수 있다. 이는 매 실험마다 바뀔 수 있으므로, 그에 따라 조정이 필요하다. 매 사진마다 Fig. 4(a)와 같은 순간 사진을 Fig. 3와 같은 히스토그램을 이용해 분열길이 부분에 해당하는 그레이 레벨을 구하고, 그에 해당하는 픽셀만을 백색으로, 나머지는 흑색으로 처리하여 Fig. 4(b)와 같은 이미지로 처리하였다. 여기서, 분사기의 끝과 분열 길이가 완전히 사라지거나, 혹은 끊어지는 부분 사이를 분열 길이로 정의하여, 그 길이를 측정하였다.

이와 같이 유동의 순간사진을 이미지 후처리를 통해 길이를 측정하였다. 0.05초의 간격에 해당하는 순간사진 53장의 각각 분열길이를 평균하여 Fig. 5과 같이 한 case 의 분열길이를 구하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험결과

각 실험 케이스에 대해서 운동량 플럭스 비 값과 그에 따른 사진에서 측정된 분열 길이의 평균값을 Table 3에 나타내었다. 각 케이스마다 50장 이상의 사진을 2.2 절에서 다룬 방법을 이용해 분열 길이의 평균값을 구하였다. 그에 따른 대표적인 이미지는 Fig. 4에 나타내었으며, 위 사진에서 스케일 간격은 인젝터 액체 분사 직경과 같다. 이를 분사기 직경으로 나누어 정규화 하였으며, 그에 대한 평균값을 Fig. 5와 같이 구하였다. 질소 및 아르곤의 분사 압력은 분사기의 상류 압력과 챔버 내부 압력의 평균값으로 가정하여 밀도 및 분사속도 등을 구하였다. 각 케이스에 대하여, 정규화 된 분열 길이와 밀도 비를 Table 3에 나타내었다.

3.2 결과 분석

3.2.1 분열 길이와 운동량 플럭스 비의 관계

Davis는 전단 동축 제트의 분열 길이와 운동량 플럭스

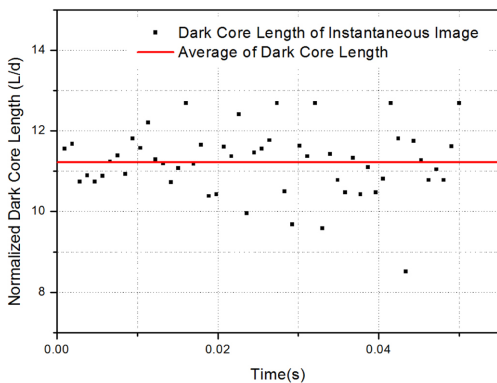


Fig. 5 Distribution of Breakup Length of Instantaneous Image (Case 1)

Table 4 Result of Normalized Core Length and Density Ratio

	Density Ratio	Normalized breakup length
Case 1	0.6499	11.21
Case 2	0.6512	11.25
Case 3	0.6523	11.28
Case 4	0.6261	11.47
Case 5	0.6190	11.41

스 비 사이의 관계를 다음과 같이 제시한 바가 있다⁽⁶⁻⁷⁾.

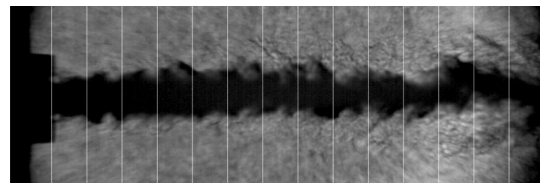
$$\frac{L}{d} = \frac{12}{J^{0.5}} \quad (1)$$

$$\frac{L}{d} = \frac{25}{J^{0.2}} \quad (2)$$

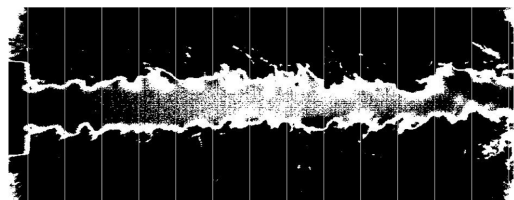
식 (1)은 초입계 및 근입계 전단 동축 분무에서의 운동량 플럭스 비와 정규화 된 분열 길이와의 관계를 나타낸 식이며, 식 (2)는 아입계 전단 동축 분무에서의 관계를 나타낸 식이다.

질소와 아르곤이 모두 아입계 상태인 경우, Fig. 6와 같이 가시화 영역 이내에서는 분열되는 모습이 관측되지 않았다. 이는, 가시화 창을 통하여 관측할 수 있는 분열거리의 최대값은 분사기 직경의 약 13배($L/d < 13$) 정도임에 반해, 아입계 상태에서의 전단 동축 분무의 경우, 정규화된 분열 길이의 이론 값은 약 23.6 정도 이기 때문으로 보인다. 이는 차후 실험을 통해 보완할 부분으로 생각된다.

초입계/근입계 전단 동축 분무의 경우, 이전의 연구결과⁽⁶⁻⁷⁾와 이번의 실험결과를 비교한 그래프를 Fig. 7에 나타내었고, 이번 실험의 범위에 대한 것만을 모아서 따로 Fig. 8에 확대하여 나타내었다. 본 실험의 오차에 대한 Error bar는 53장의 사진의 분열길이를 95% 신뢰수준에서 분석한데서 오는 오차와, 실험에 사용한 측정장비들의 오차를 고려하여 범위가 설정되었다. 운동량 플럭스 비 범위가 좁아 이번 실험 결과에서 값의 증가와 감소 같은 경향성까지는 파악하기 힘들으나, 실험값 자체는 D.W. Davis의 결과⁽⁶⁻⁷⁾에 비교하여도 제시된 값과 매



(a) Instantaneous image



(b) Post processed image

Fig. 6 Images of subcritical coaxial flow

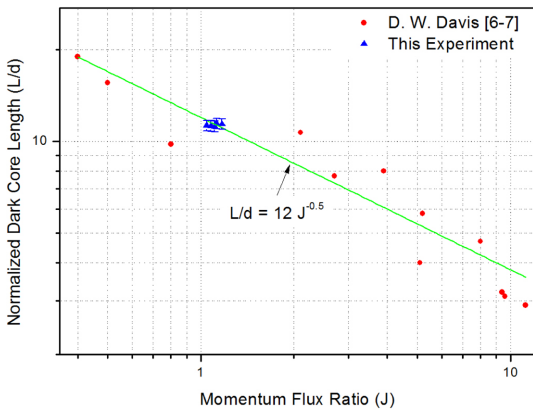


Fig. 7 Breakup length according to momentum flux ratio

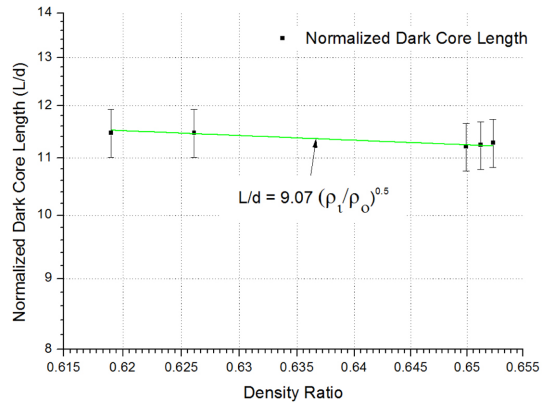


Fig. 9 Breakup length according to density ratio

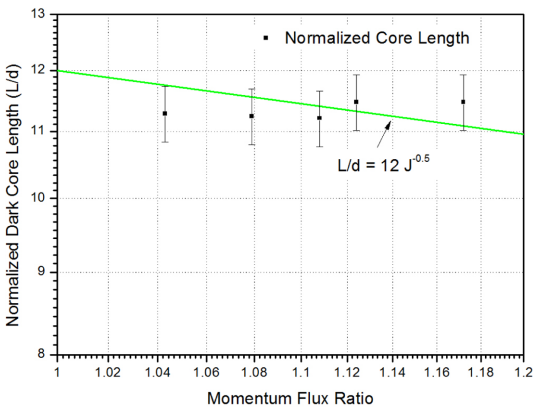


Fig. 8 Zoomed graph of breakup length according to momentum flux ratio

우 근사하게 분포함을 볼 수 있다.

3.2.2 분열 길이와 밀도비의 관계

밀도 비와 분열 길이와의 관계는 단일 원형 제트의 연구결과에서 확장하여, 운동량 플럭스 비가 1 이하, 즉 환경 간극에서 분사되는 기체의 속도가 작을 경우, 보통 다음과 같은 식으로 알려져있다^(6,8).

$$\frac{L}{d} = \frac{C}{\sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_1}}} \quad (3)$$

여기서 Chehrudi⁽⁸⁾ 등은 자신의 연구 결과에서 상수 C의 값을 3.3에서 11 사이의 상수로 제시하였으며, 7.15에 최적화한 사례가 있다.

본 실험 결과의 경우, 운동량 플럭스 비가 1보다 약간

크지만, 그 초과량이 0.2 이하로 그리 크지 않으므로, 식 (3)을 적용해보았다.

이번 실험의 밀도 비와 정규화된 분열 길이의 관계를 Fig. 9에 나타내었으며, 그래프 상의 직선은 상수 C의 값이 약 9.07로 회귀(regression)된 직선이다. Chehrudi 등이 제시했던 7.15 보다는 크지만, 원래 C의 범위인 3.3에서 11 사이의 값이므로 충분히 적용 가능한 결과라고 생각된다.

4. 결 론

초임계 환경으로 분사되는 극저온 액체질소와 기체 아르곤으로 이루어진 동축 제트의 거시적 특성을 그림자 기법으로 고속카메라를 이용해 1065 fps의 촬영속도와 4 μs의 노출시간으로 유동을 가시화하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

이미지 히스토그램을 이용하여 분열 거리를 측정한 결과, 초임계 질소와 근임계 아르곤으로 이루어진 동축 제트의 분열길지와 운동량 플럭스 비의 관계는 식 (1)인 $L/d = 12J^{0.5}$ 을 따름을 알 수 있다. 또한 운동량 플럭스 비가 1보다 약간 큰 경우에도 밀도 비의 제곱근에 반비례 하는 식 (3)에서 상수 C가 9.07인 $L/d = 9.07(\rho_1/\rho_0)^{0.5}$ 의 관계식을 따름을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으

로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-033146).

참고문헌

- (1) C. Segal and S. A. Polikhov, "Subcritical to supercritical mixing", AIP Physics of Fluids 20, 052101, 2008.
- (2) A. Roy and C. Segal, "Experimental Study of Fluid Jet Mixing at Supercritical Conditions", Journal of Propulsion and Power, Vol. 26, No.6, November-December pp. 1205~1211, 2010.
- (3) A. Roy and C. Segal, "Sub-to-Supercritical Mixing and Core Length Analysis of a Single Round Jet", AIAA 2011-792, January, pp. 1~14, 2011.
- (4) W. Mayer, A. Schik, C. Schweitzer and M. Schaeffler, "Injection and mixing processes in high pressure LOX/GH2 rocket combustors", AIAA 96-2620, July, pp. 1~15, 1996.
- (5) M. Oswald, J. J. Smith, R. Branam, J. Hussong, A. Schik, B. Chehroudi, and D. Talley, "Injection of fluids into supercritical environments", Combustion Science and Technology 178, pp. 49~100, 2006.
- (6) D. W. Davis, "On the behavior of a shear-coaxial jet, spanning sub- to supercritical pressures, with and without an externally imposed transverse acoustic field", Ph.D Thesis, The Pennsylvania State University, 2006.
- (7) D. W. Davis and B. Chehroudi, "Shear-coaxial jet from a rocket-like injector in a transverse acoustic field at high pressures", AIAA ASME, 44th, pp. 1~18, 2006.
- (8) B. Chehroudi, S. H. Chen, F. Bracco and Y. Onuma, "On the intact core of full-cone sprays", Society of Automotive Engineers, 1985.