

## 횡단 공기유동장으로 분사되는 저온 에탄올 제트의 침투거리

이종권\* · 구자예†

### Penetration Height of Low-temperature Ethanol Jet Injected Into a Crossflow Airstream

Jongkwon Lee and Jaye Koo

**Key Words:** Jet in crossflow(횡단유동장 내 제트), Penetration height(침투거리), Low temperature liquid jet(저온 액체 제트), cold-start(냉간시동)

#### Abstract

The jet in crossflow is a spray method used in the various air-breathing engine. In order to understand the spray characteristics in various environments, many prior studies have been conducted. However, there is a lack of understanding of the low-temperature liquid spray characteristics below 273 K. With this in mind, we tried to enhance the knowledge of the low-temperature liquid spray characteristics by identifying the penetration height of low-temperature ethanol. The experiment was conducted under phase pressure, and 273 K of air and 293, 263, and 233 K of ethanol was used. Shadowgraphy was employed to measure the liquid penetration, and Otsu's method was used to analyze the penetration height. The heights tend to decrease as the temperature of the liquid jet decreases. A correlation for the penetration height in the experimental conditions was derived and presented.

#### 기호설명

$U$	: 속도 (m/s)
$A$	: 단면적 ( $m^2$ )
$d_0$	: 지름 (mm)
$T$	: 온도 (K)
$\rho$	: 밀도 ( $kg/m^3$ )
$\mu$	: 점성계수 (Pa·s)
$q$	: 액체/공기 운동량 플럭스 비, ( $\rho_j U_j^2 / \rho_a U_a^2$ )
$Re$	: 레이놀즈수 ( $\rho d_0 U / \mu$ )
$Oh$	: 오네서지수 ( $\mu / \sqrt{\rho_j \sigma d_0}$ )

$We$	: 웨버수 ( $\rho d_0 U^2 / \sigma$ )
$V$	: 액체 점도비 ( $\mu_j / \mu_w, 293k$ )
$S$	: 액체 표면장력비 ( $\sigma_j / \sigma_w, 293k$ )
$x$	: 횡단 공기유동장 방향 (mm)
$z$	: 수직분사 액체 제트방향 (mm)

#### 하첨자

$j$	: 액체 제트 성분
$a$	: 횡단 공기유동장 성분
$w, 293K$	: 물, 293 K

(Received: 10 Mar 2020, Received in revised form: 22 May 2020, Accepted: 27 May 2020)

\*한국항공대학교 대학원

†책임저자, 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

E-mail : jykoo@kau.ac.kr

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

## 1. 서 론

JICF(Jet in crossflow)는 연소효율 향상 등의 장점으로

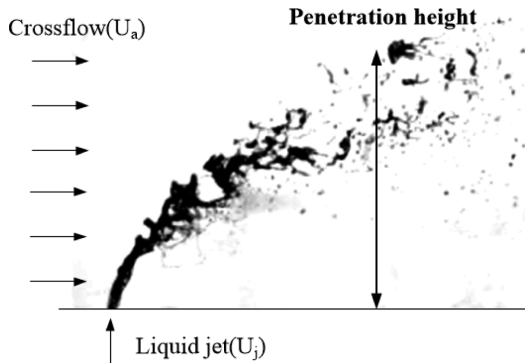


Fig. 1 Penetration height of liquid jet in crossflow

여러 공학 분야에 적용되고 있는 스프레이 기술이다. 횡단 공기유동장 내로 분사되는 수직분사 액체 제트(Liquid jet in crossflow airstream, LJCF)는 가스터빈, 스크램 제트, 램제트와 같은 공기흡입 엔진시스템의 연료 분사 장치로써 사용된다. 따라서 LJCF 연구는 ‘횡단 공기유동장 내로 분사되는 수직 액체 제트’ 방식의 연료 분사 장치의 분무특성을 연구하는 데 목적이 있다<sup>(1)</sup>.

LJCF의 주요특성으로는 침투거리(Penetration height), 분열과정(Breakup process) 규명, 액적 분포 및 크기 규명 등이 있다. Fig. 1은 LJCF 실험의 순간이미지이며 분무특성인 침투거리를 보여준다. 침투거리는 횡단 공기유동장 내로 분사된 액체의 최대 높이를 의미한다. 수직 분사 액체 제트의 침투거리 확인을 통해 분무 연료에 의한 연소기 내 직접적 충돌확인 및 충돌방지를 위한 연소기 디자인 설계에 도움을 줄 수 있다. 연소기 내 충돌방지는 완전한 미립화를 이뤄 발생할 수 있는 국부적 연소를 방지하며 NOx 저감 및 연소효율을 향상시킬 수 있다<sup>(2-4)</sup>.

LJIC는 Wu, Becker, Stenzler 등 선행연구자들에 의해 실험이 진행됐다<sup>(5-8)</sup>. 하지만 많은 선행연구는 공기유동장만의 온도와 압력 변화에 따른 액체의 분무특성을 연구해왔고, 소수의 연구에서 액체의 온도 변화에 따른 분무특성을 연구하였다. 하지만 액체 온도를 변화한 소수의 연구 역시 액체를 상온에서 고온으로 상승시키는 실험으로 액체가 상온 이하일 때의 분무특성 규명은 이루어지지 않았다. 미연방항공청(Federal Aviation Administration; FAA)과 유럽항공안전기구(European Aviation Safety Agency; EASA)는 민간항공기 엔진에 대해 각각 CFR 14 Part 33과 CS-E/Amendment 4에 의거 엔진평가 시 연소실에 공급되는 공기와 연료의 작동 제한 온도를

Table 1 Operating limitation of Trent 1000 and Trent 7000<sup>(10)</sup>

Airplane	Limitation of air temperature[K]	Limitation of fuel temperature[K]
Trent 1000	~973	219~338
Trent 7000	~973	219~338

Table 1<sup>(9)</sup>과 같이 명시하고 있으며 RTO(NATO research and Technology Organization) 및 미 육군은 군용 터보사프트엔진에 대한 cold-start 조건의 영하 40도의 공기와 연료가 연소실 내로 분사되었을 때의 운용가능 여부를 판단한 바 있다<sup>(11,12)</sup>. 이와 같이 저온 액체의 분무특성을 이해하고 안전한 항공기 엔진 운용을 위해 저온 LJCF 연구가 필요하다.

이에 본 논문은 민간 항공기와 군용항공기의 공기흡입식 엔진의 연료 분사장치로써 사용되는 LJCF의 실험을 수행하였으며, 저온 연료가 상온의 횡단 공기유동장 내로 분사될 때의 침투거리 변화 결과와 초기분열과정을 다룬다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Figure 2는 LJCF 실험장치의 개략도이다. LJCF의 실험장치는 공기 공급장치, 액체 제트 분사장치, 가시화장치로 구성되어 있다.

공기는 고압 공기 압축기를 통해 공급되며, 273 K의 공기를 최대 100 g/s의 유량으로 공급된다. 균일한 공기를 공급하기 위해 풍동에 초킹 오리피스(choking orifice)를 사용하였고 1%의 측정 오차범위를 가지는

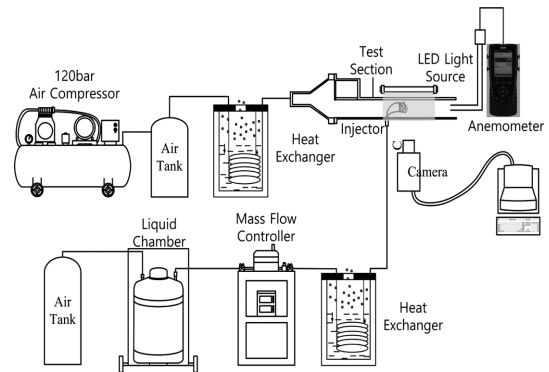


Fig. 2 Schematic of LJCF experimental setup

KIMO 社의 MP210 속도계를 사용하여 공기 속도를 측정하였다. 공기는 횡방향성을 띄며 가시화 장치인 JICF 인젝팅 챔버로 공급된다.

액체 제트 공급장치는 공기 가압장치, 액체 챔버, 질량 유량 조절장치(MFC; Mass flow rate controllers), 급속 냉각 열교환기, 액체 분사장치(injector)로 구성되어 있다. 액체 제트는 가압공기에 의해 챔버 내의 액체가 공급되며 MFC를 통해 유량이 제어된다. MFC는 0.2% 오차율을 가지며 코리올리 방식(Coriolis type)의 유량 제어방식을 사용하며 최대 30 g/s의 유량 제어가 가능하다. MFC를 통해 제어된 액체는 급속 냉각 열교환기를 통해 냉각되고 분사장치를 통해 JICF 인젝팅 챔버로 분사된다. 액체 분사장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었으며, 액체 분사장치의 지름( $d_0$ )는 0.6 mm이며 형상인자 ( $L/d_0$ )는 2.5이다.

LJCF의 가시화 장치는 고속카메라, LED 광원, 렌즈, 공기와 액체가 공급되는 인젝팅 챔버로 구성되어 있다. 1024 × 1024의 최대 분해능을 가지는 Photron 社의 고속

카메라를 사용하였으며, 최대 57 Watt/m<sup>2</sup>의 출력을 가지는 Advanced Illumination 社의 LED 광원을 사용하여 유동을 가시화하였다. 인젝팅 챔버는 가시화를 위해 아크릴로 제작되었으며, 41 mm(H) × 25 mm(W) × 230 mm(L)의 차원을 가진다. 인젝팅 챔버의 단면도는 Fig. 4에 나타내었다.

2.2 실험방법 및 실험조건

2.2.1 실험방법

횡단 공기유동장 내로 분사되는 수직 분사 제트의 침투거리 분무특성 규명을 위해 백라이트 가시화 기법을 사용하였다. LED 광원을 이용해 백라이트 기법에 필요한 평행광을 형성하였다. 인젝팅 챔버 내로 분사된 수직 액체 제트는 횡방향 공기유동장에 의해 분열되며 순간 이미지를 고속카메라를 이용해 촬영하였다. 순간 이미지의 가시화 방법과 고속카메라 촬영조건을 Table 2에 나타내었다.

2.2.2 실험조건

LJCF의 실험간 273 K의 공기와 293, 263, 233 K의

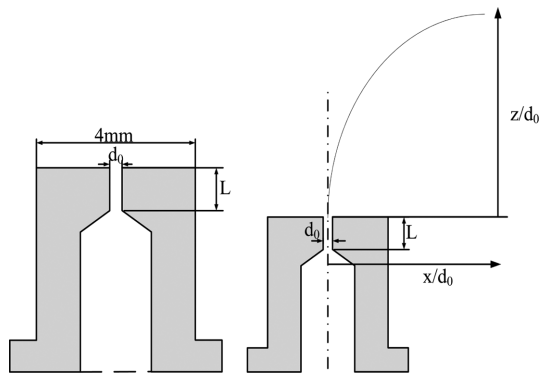


Fig. 3 Schematic of nozzle injector

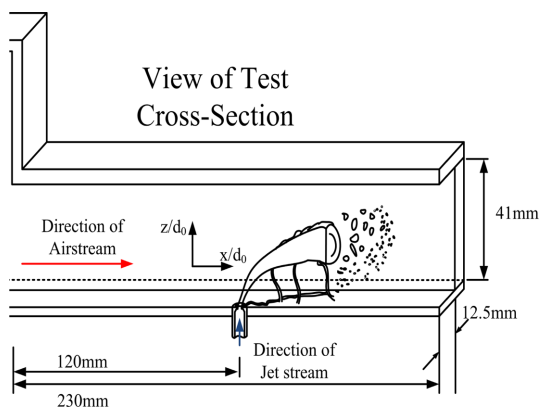


Fig. 4 JICF injecting chamber's cross-sectional view

Table 2 Visualization method and high speed camera setting conditions

Visualization method	
Backlight visualization	
High speed camera setting conditions	
Frames per second [fps]	3,000
Shutter speed [s]	1/100,000

Table 3 Test conditions of LJCF

Air			
Air Temperature(K)	273		
$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.294		
$\mu_0 \cdot 10^{-6}$ (Ns/m <sup>2</sup> )	13.313		
Ethanol			
Test conditions	STP	LTJSTC	
Fuel Temperature(K)	293	263	233
$\sigma_j \cdot 10^{-2}$ (N/m)	2.222	2.477	2.468
$\mu_j \cdot 10^{-6}$ (Ns/m <sup>2</sup> )	1.492	2.811	6.05
$\rho_j$ (kg/m <sup>3</sup> )	789.03	817.86	845.31

에탄올(Ethanol)을 공급하였으며 공기와 온도 변화에 따른 에탄올의 물성치 변화를 Table 3에 나타내었다. 선행 연구들은 JICF 실험의 중요 무차원수로 액체와 공기의 운동량 비인 운동량 플럭스 비( $q$ )를 사용하였으며 식 (1)에 나타냈다.

$$q = \frac{\rho_l U_l^2}{\rho_a U_a^2} \quad (1)$$

본 실험은 액체 온도만의 변화에 따른 침투거리 변화

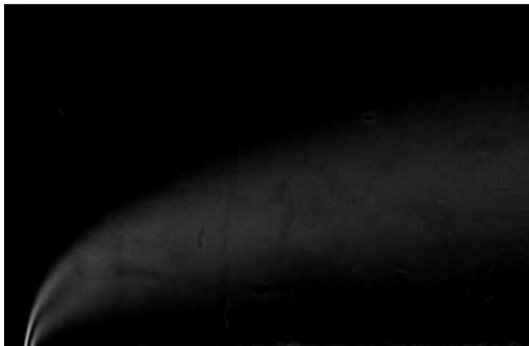
를 보기 위해 공기와 액체 속도를 고정하여 실험하였다. 실험의 공기와 액체 속도 기준은  $T_a$  273 K,  $T_l$  293 K일 때, 액체 유량을 2 g/s로 공급하여  $q$ 값 18, 27, 36에 의해 정해지는 공기 속도값인 52.18, 42.60, 36.90 m/s이다. 이 때의 액체 속도는 8.98 m/s이다. 실험조건은 액체 온도에 따라 STP(Standard temperature, pressure)와 LTJSTC (Low temperature jet and standard temperature crossflow)로 분류된다. STP 조건은 공기유동장과 액체제트가 상온상압, LTJSTC 조건은 저온 액체제트와 상온상압의 공기유동장을 의미한다.

### 2.3 분석 방법

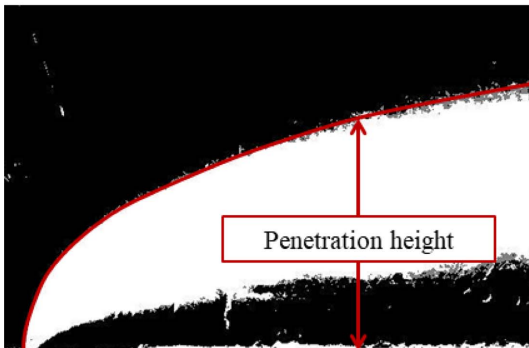
본 논문의 연구 목적은 저온 환경에서의 LJCF의 침투거리 규명에 있다. 침투거리 분석방법에는 Otsu 이원화 경계기법을 사용하였다<sup>(13)</sup>. Otsu 이원화 경계기법은 최근 JICF 액체 제트의 침투거리 및 궤적 분석에 사용되는 대표적 기법이다<sup>(14,16)</sup>. 분석순서는 Fig. 5에 나타냈다. 고속카메라를 통해 촬영한 LJCF의 순간이미지는 Fig. 5(a)에 나타냈다. 1000장의 순간이미지를 MATLAB을 이용하여 (b)와 같이 평균이미지화 하였으며, 평균이미지화된 이미지는 Otsu 이원화 이미지 기법을 통해 침투거리를 확인할 수 있다. 침투거리는 Fig. 4와 같이 연료 분사장치의 지름( $d_0$ )에 대한횡방향 거리( $x$ )와 수직 유동방향 거리 ( $z$ )의 무차 원수( $x/d_0, z/d_0$ )를 사용하여 변화 그래프를 나타내었다. 침투거리 변화 분석을 위해 순간 이미지를 사용하여 분무각(spray angle)을 분석하였다. 침투거리 상관관계식 도출에는 액체 온도 변화에 따른 점도와 표면장력 변화를 고려하기 위해 293 K의 물과 해당 온도에서의 액체 점도, 표면장력에 따른 액체 점도비( $V_j$ ), 표면장력비( $S$ )와 운동량 플럭스 비( $q$ ), 횡방향 무차원거리비( $x/d_0$ )를 사용하였다.



(a) Instantaneous Image



(b) Average Image



(c) Otsu's binary Image

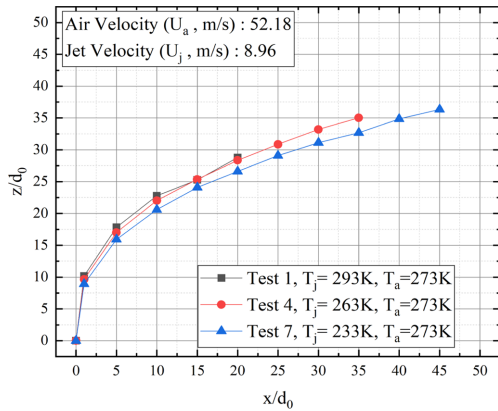
Fig. 5 Analysis process

## 3. 실험 결과 및 분석

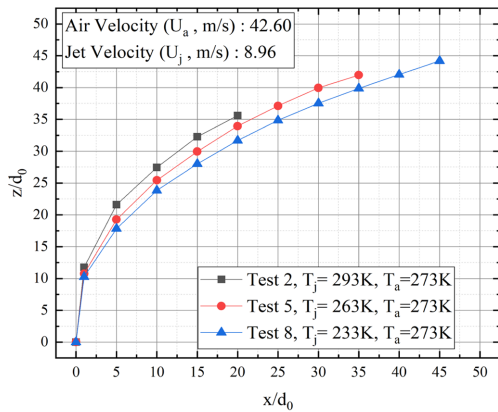
### 3.1 침투거리 결과 및 분석

#### 3.1.2 액체 온도( $T_l$ ) 감소에 따른 침투거리 변화

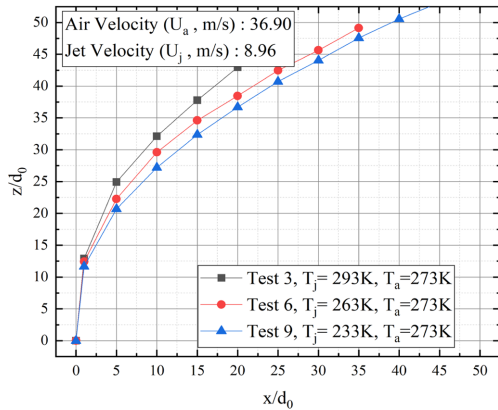
수직 분사  $T_j$  감소는  $\mu_l$ 와  $\sigma_l$ 의 증가를 가져온다.  $T_j$ 는 293 K에서 감소시키며 263, 233 K으로 공급하였으며 온도 감소에 따른 에탄올의 물성치 변화는 Table 3에 표기하였다. Fig. 6에  $T_j$  감소에 따른 침투거리의 변화를 확인하기 위해 동일한  $U_a, U_j$  조건에서의 비교 그래프를 나타내었다.



(a)  $U_a = 52.18$  m/s,  $U_j = 8.96$  m/s



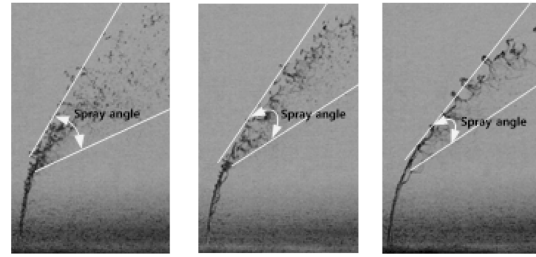
(b)  $U_a = 42.60$  m/s,  $U_j = 8.96$  m/s



(c)  $U_a = 36.90$  m/s,  $U_j = 8.96$  m/s

Fig. 6 Effects of liquid temperature between penetration height

Figure 6을 통해 공기와 액체가 동일한 속도 조건일 때, 액체 온도 감소에 따라 침투거리가 감소함을 확인할 수 있다. Fig. 7에 Test 3, 6, 9 조건에서의 분열 순간이



Test 3 Test 6 Test 9  
Fig. 7 Spray angle change (Test 3, 6, 9)

미지를 나타내었다. Fig. 7을 통해 에탄올 온도가 감소함에 따라 분무각이 좁아짐을 확인할 수 있다. 분무각이 좁아지는 현상은 에탄올 온도 감소에 따른 액체의 점도와 표면장력 증가의 영향으로 설명된다. 액체의 점도 상승은 분자간의 응집력 상승을 의미하며 분열이 잘 일어나지 않음을 뜻한다<sup>(9)</sup>. 동일한 속도에서 상온의 액체는 분무각이 넓어 침투거리 상승효과를 가져오고, 반면 극저온에 가까운 액체는 분무각이 좁아 상대적으로 침투거리가 낮게 나타난다. 위와 같은 이유로 수직 분사 액체 제트는 온도가 낮아짐에 따라 횡방향 공기유동장에 의한 분무각이 좁아지고, 공기와 평행한 유동을 하고자 빠르게 휘는 경향을 보이게 된다. 이러한 관점에서 Fig. 6의 액체 온도가 감소함에 따라 침투거리가 낮아지는 결과를 설명할 수 있다.

### 3.2 침투거리 도출 상관관계식

수행된 실험의 조건은 Table 4에 표기하였다. 전체 실험조건인 침투거리를 예측하기 위해 상관관계식을 도출하였으며 도출식은 식 (2)와 같다. 식 (2)의 도출을 위해 82개의 값을 사용하였으며 R-square 값은 0.998이다.

$$z/d_0 = 1.53(x/d_0)^{0.394} q^{0.495} V^{-0.050} S^{-0.354} \quad (2)$$

식 (1)은 액체와 그 온도 변화에 따른 점도 변화와 표면장력 변화를 고려하고자 293 K의 물을 기준으로 한 점도비( $V$ ), 표면장력비( $S$ )의 무차원수를 포함하였다. 도출된 상관관계식의 검증을 위해 상관관계식을 통해 계산된 값과 실험값을 Fig. 8에 나타냈다.

## 4. 결 론

본 논문의 실험은 냉간시동 조건에서의 저온 연료가 연소실 내로 분사될 때의 침투거리 변화를 규명하기 위

Table 4. Parameters according to the experimental conditions

Test number	$T_a$ [K]	$T_j$ [K]	$q$	$We_a$	$Oh$	$U_a$ [m/s]	$U_j$ [m/s]	$V_j$	$S$
Test 1	273	293	18	95.13	0.0027	52.18	8.96	1.487	0.305
Test 2	273	293	27	63.42	0.0021	42.60	8.96	1.487	0.305
Test 3	273	293	36	47.56	0.0019	36.90	8.96	1.487	0.305
Test 4	273	263	18.66	85.34	0.0048	52.18	8.96	2.802	0.340
Test 5	273	263	27.99	56.89	0.0039	42.60	8.96	2.802	0.340
Test 6	273	263	37.32	42.67	0.0034	36.90	8.96	2.802	0.340
Test 7	273	233	19.28	76.37	0.0098	52.18	8.96	6.033	0.380
Test 8	273	233	28.93	50.91	0.0080	42.60	8.96	6.033	0.380
Test 9	273	233	38.67	38.19	0.0070	36.90	8.96	6.033	0.380

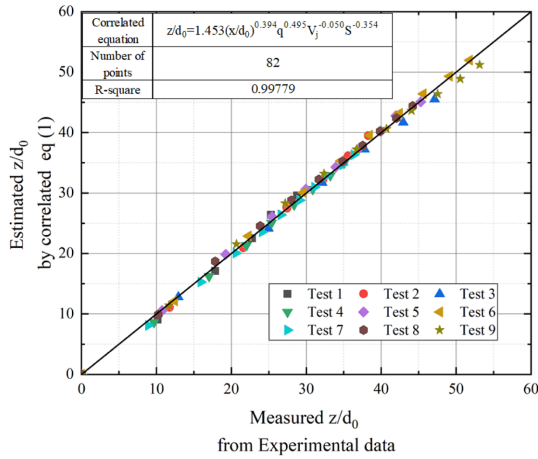


Fig. 8 Comparing experimental results with values obtained from correlation equation

해 수행되었다. 실험에는 273 K의 공기와 293, 263, 233 K의 에탄올을 사용하였으며 연료 분사장치의 지름은 0.6 mm이다. 실험을 통해 얻은 액체 온도 변화에 따른 침투거리 변화의 결론은 다음과 같다.

에탄올 온도가 극저온에 가까워짐에 따라 침투거리가 감소함을 확인하였다. 이는 온도가 감소함에 따라 점도와 표면장력이 상승하고 그로 인해 분무각이 좁아지며 상온의 액체 제트보다 침투거리가 감소하는 경향을 가져온다.

본 논문의 실험은 공기 온도 273 K, 액체 온도 233-293 K, 운동량 플럭스 비 18-38.67, 액체점도비 1.487-6.033, 표면장력비 0.305-0.380 조건에서 수행되었으며 제시된 조건에서의 침투거리를 식 (2)로부터 예측할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)의 지원을 받아 수행한 항공우주부품기술개발사업(No. 10067074)의 연구 결과입니다.

## 참고문헌

- (1) M. Broumand and M. Birouk, "Liquid jet in a subsonic gaseous crossflow: Recent progress and remaining challenges", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 57, 2016, pp. 1~29.
- (2) A. H. Lefebvre, "Fuel effects on gas turbine combustion-liner temperature, pattern factor, and pollutant emissions", *Journal of Aircraft*, Vol. 21, No. 11, 1984, pp. 887~898.
- (3) C. M. Reeves and A. H. Lefebvre, "Fuel effects on aircraft combustor emissions", *ASME 1986 International Gas Turbine Conference and Exhibit*. American Society of Mechanical Engineers, 1986.
- (4) K. K. Rink and A. H. Lefebvre, "Influence of fuel drop size and combustor operating conditions on pollutant emissions", *SAE Technical Paper 861541*, 1986.
- (5) P. K. Wu, R. F. Miranda and G. M. Faeth, "Effects of initial flow conditions on primary breakup of nonturbulent and turbulent round liquid jets", *Atomization and sprays*, Vol. 5, No. 2, 1995.
- (6) P. K. Wu, K. A. Kirkendall, R. P. Fuller and A. S. Nejad, "Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 13,

- No. 1, 1997, pp. 64~73.
- (7) J. Becker & C. Hassa, "Breakup and atomization of a kerosene jet in crossflow at elevated pressure", *Atomization and Sprays*, Vol. 12, 2002, No. 1~3.
- (8) J. N. Stenzler, J. G. Lee, D. A. Santavicca and W. Lee, "Penetration of liquid jets in a cross-flow," *Atomization and Sprays*, Vol. 16, No. 8, 2006
- (9) A. H. Lefebvre and V. G. McDonell, "Atomization and sprays", CRC press, 2017. pp 6~9.
- (10) Type Certificate Holder, "Type-certificate data sheet EASA. E. 036 for Trent 1000 series engines", European Aviation Safety Agency, E.036-12, 2018.
- (11) Ouellette and Christian, "Low temperature environment operations of turbo engines", In AGARD, *Low Temperature Environment Operations of Turboengines (Design and User's Problems)*, 1990, 3p (SEE N 91-31144 23-07).
- (12) D. W. Naegeli and G. D. Lee, "Effects of fuel properties and atomization on Ignition in a T63 Turbine Combustor", Southwest Research Inst San Antonio Tx Belvoir Fuels And Lubricants Research Facility, No. Bflrf-235, 1987.
- (13) N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms", *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, Vol. 9, No. 1, 1979, pp. 62~66.
- (14) Z. P. Tan, O. Bibik, D. Shcherbik, B. T. Zinn & N. Patel, "The regimes of twin-fluid jet-in-crossflow at atmospheric and jet-engine operating conditions", *Physics of Fluids*, Vol. 30, No. 2, 2018, 025101.
- (15) M. D. Sirignano, V. Nair, B. Emerson, J. Seitzman and T. C. Lieuwen, "Nitrogen oxide emissions from rich premixed reacting jets in a vitiated crossflow", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 37, No. 4, 2019, pp. 5393~5400.
- (16) R. S. Prakash, A. Sinha, G. Tomar & R. V. Ravikrishna, "Liquid jet in crossflow-Effect of liquid entry conditions", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 93, 2018, pp. 45~56.