

Research Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2021.25.4.053>

초임계 탄화수소계열 혼합유체의 이중 층돌 제트 분무 가시화

송주연^a · 최명환^b · 안정우^b · 구자에^{c,*}

Visualization of Doublet Impinging Jet Spray in Supercritical Mixed Hydrocarbon Fluid

Juyeon Song^a · Myeung Hwan Choi^b · Jeongwoo An^b · Jaye Koo^{c,*}

^aDepartment of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea

^bDepartment of Smart Drone Convergence, Korea Aerospace University, Korea

^cSchool of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea

*Corresponding author. E-mail: jkoo@kau.ac.kr

ABSTRACT

Based on surrogate model, a hydrocarbon mixture was analyzed by visualizing the impinging break up mechanism in subcritical and supercritical conditions. Decane and methylcyclohexane with different critical pressures and temperatures were selected as experimental fluids. The impinging injector was installed inside the chamber, and the spray was visualized through a speed camera in subcritical and supercritical conditions. The injection condition of the mixture and chamber was kept constant at $Pr(P/P_c) = 1$, and $Tr(T/T_c)$ was increased from 0.48 to 1.02. As Tr increased, the spray angle increased, and the sheet length decreased as the properties of the mixture reached each critical point. In addition, when the mixture approached the near critical point, it was shown that the change in density gradient was largely observed out of the impinging break up mechanism.

초 록

대체모델을 사용한 탄화수소계열 혼합유체를 아임계 및 초임계 상태에서 이중 층돌 분무를 통해 분무 메커니즘을 가시화하여 분석하였다. 임계압력과 온도가 다른 데칸과 메틸사이클로헥산을 대체 모델로 선정하였다. 챔버 내부에 이중 층돌 인젝터를 설치하여 아임계 및 초임계 상태에서 고속카메라를 통해 분무를 가시화하였다. 혼합유체의 분사 및 챔버 환산압력은 $Pr(P/P_c)=1$ 로 유사하게 유지하였으며 $Tr(T/T_c)$ 은 0.48에서 1.02까지 증가시켰다. Tr 이 증가할수록 혼합유체의 물성치가 각각의 임계점에 도달하여 분무각은 증가하고 시트분열길이는 감소하였다. 또한 혼합 유체가 모두 근임계점에 도달하였을 때 이중 층돌 분열 메커니즘에서 벗어나 밀도 구배의 변화가 크게 관측됨을 보였다.

Key Words: Supercritical Fluid(초임계 유체), Hydrocarbon Fuel(탄화수소연료), Doublet Impinging Jet(층돌 제트), Phase Change(상변화)

Nomenclature

Received 26 April 2021 / Revised 28 May 2021 / Accepted 4 June 2021

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Tr : Reduced temperature

Pr : Reduced pressure

1. 서 론

초임계 유체란 임계점 이상의 압력 및 온도 조건 하에 있는 유체를 의미한다. 초임계 유체는 액체와 비슷한 밀도와 기체와 유사한 점성의 특성을 가지고 있다. 이러한 초임계 유체의 특성은 열전도성 및 확산에 있어 액체와 기체의 장점을 모두 가지며 분무 시 침투성이 우수해지게 된다. 또한 표면장력이 기체와 같은 0에 수렴하기 때문에 높은 침투성을 가지게 되며 용매나 용질의 특정 성분을 추출하는데 매우 유리하다. 일반적인 유체가 아임계 조건에서 초임계 조건으로 압력 및 온도가 올라가게 되면 해당 유체의 물성치가 급격하게 변하는 구간이 존재한다. 이 구간을 천임계 구간이라 하며 임계점 근처의 구간은 근임계라고 한다. 천임계 및 근임계 구간에서는 열전도가 충분히 이루어지지 않을 수 있으므로 매우 불안정한 상태가 되며 이때 연소 반응이 일어나게 되면 연소불안정과 같은 현상이 일어날 수 있다. 초임계 유체는 액체 로켓 엔진, 가스 터빈엔진 및 물질 추출 등에 주로 활용되는데 액체 로켓의 경우 로켓의 연소실 내에서 추진제의 임계점 이상의 환경에서 분무 및 연소가 일어나게 되므로 해당 조건하에서 분무 특성이 중요하다.

본 연구에서는 액체 로켓에 주로 사용되는 이중 충돌 인젝터를 통해 아임계 및 초임계 환경에서 분무특성을 연구하였다. 실제 로켓의 경우 케로신이나 JP-4와 같은 항공유는 기본적으로 혼합물이므로 초임계 환경을 만들기 어려우며 취급성 또한 낮다. 그리하여 대체 모델(Surrogate model)을 기반으로 탄화수소계열의 유체를 선정하였으며 임계점의 온도와 압력이 비교적 낮지만 아임계 상태와 초임계 상태를 동시에 모사할 수 있고 취급성 및 경제성에 좋은 데칸(decane)과 메틸사이클로헥산(methylcyclohexane; MCH)을 사용하였다.

초임계 유체에 대한 선행 연구에 따르면 Dounghthip 등[1]과 Zeaton 등[2]은 초임계 유체가 제트의 형태로 초임계 환경으로 분사 되었을 때 단일 기체 제트와 매우 흡사하게 거동함을

보였다. 또한 초임계 유체 제트의 열역학적 상태량이 임계점에서 떨어질수록 초임계 유체와 기체 제트의 거동이 매우 비슷해지고 제트의 밀도 비율이 기체 제트의 밀도비와 점점 유사해지는 것을 알아내었다. 이러한 특성은 이중 충돌 분무에서 중요한 인자로 작용하며 아임계에서 액체로 거동하는 이중 충돌 분무가 초임계로 변함에 따라 액체 분열 메커니즘이 다르게 작용할 수 있음을 보여준다. 이에 따라 대체 모델을 사용하여 아임계 및 초임계 환경에서 이중 충돌 분무의 변화를 가시화 및 이미지 기법을 통해 분석하였다[3-7].

2. 본 론

2.1 실험장치

실험장치는 Fig. 1과 같다. 실린더 형태의 챔버는 직경 80 mm이다. 석영유리 두께 30 mm를 사용하여 가시화를 진행하였다. 유체를 가압할 때 유량을 측정하기 위하여 유체 탱크 이후에 터빈 유량계를 설치하였다. 터빈 유량계의 측정 범위는 0~170 g/s이다. 2 kW 밴드형 세라믹 밴드 히터를 사용하여 실린더를 감싸며 챔버를 가열하였으며 유체를 가열하기 위하여 2.8 kW 세라믹 밴드 히터를 사용하였다. 인젝터의 출구 직경은 각각 1 mm이다. 충돌각은 45°이며 충돌점은 출구면으로부터 약 2.9 mm 아래에 있다.

실험장치에 쓰인 열전대는 K-Type이며 실시간 데이터 수집을 위하여 온도 데이터 수집용

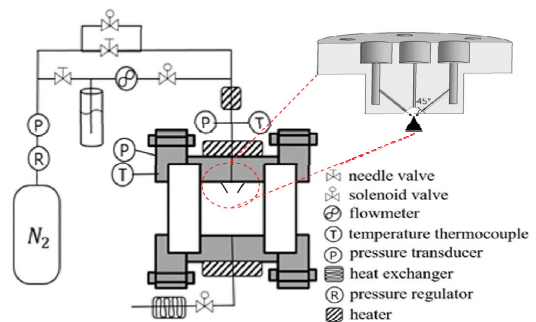


Fig. 1 Schematic of impinging jets injection.

Labview 9211 NI 모델과 압력 데이터 수집용 Labview 9201 NI 모델을 이용하였다. 이중 층돌 분무 가시화를 위하여 그림자기법을 사용하였다. 가이드라인을 설치하여 고속카메라, 챔버, 컨벡스 렌즈(convex lens), 광원 순으로 설치하였다.

2.2 실험방법

그림자기법 가시화 이미지는 유체가 상변화함에 따라 변하는 굴절률과 빛의 투과율에 따라 밀도 구배 변화를 나타낸다. 이를 기반으로 분무되는 유체와 주변 환경과의 열전달에 따른 밀도 구배를 명확히 구분하기 위하여 이미지 후처리를 실시하였다. 512(가로)×512(세로) 해상도와 3000 FPS, 1/50,000 s 셔터스피드로 촬영한 RGB 형식의 원본 이미지를 8 bit 형식의 회색조 이미지로 변환하였다. 변환된 픽셀 값을 x 방향과 y 방향 각각의 밀도 구배를 계산하여 크기 값으로 변환하여 이미지 처리를 하였다. 결과값은 검은색과 흰색으로 256 등분하여 표현된다. 검은색은 밀도 구배 변화가 작음을 나타내며, 흰색 부분은 밀도 구배 변화가 크게 일어남을 의미한다.

Fig. 2는 분무 순간 이미지를 나타낸다. 상대 길이를 이용하여 시트 길이를 계산하였다. 분무각은 Fig. 3의 평균화 이미지를 이용하여 계산하였다. 그림자기법을 통한 원본 이미지 중 일정 구간의 이미지를 선택하여 평균화하는 방식이다 [3]. 평균화 이미지 과정은 분무의 보편적 유동을 확인할 수 있으며, 분무각 시작점을 지정 후 11 mm 아래 경계면에 다른 두 지점이 정해져 픽셀값 검증을 통하여 θ 값을 구하였다.

추진제로 쓰이는 탄화수소계 혼합물인 케로신은 구성 성분이 다양하며 임계점이 높아 다른 유체와 여러 조합으로 혼합되어 접근성을 높인다. 하지만 실험 유체로 선정하기에 구성 성분이 많고, 임계점이 683 K, 21.7 bar로 위험성이 높아 대체모델(surrogate model)에 의하여 단일 물질 중 비율이 높고, 경제성, 접근성이 쉬운 데칸과 메틸사이클로hex산을 실험 유체로 선정하였다.

물성치는 NIST의 SUPERTRAPP 프로그램을 이용하였다. STP 조건에서 데칸의 물질량은 144 g/mol, 임계온도 617.3 K, 임계압력 21 bar, 밀

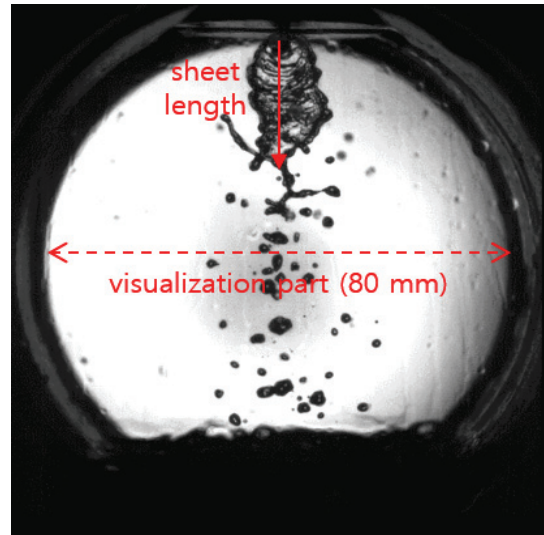


Fig. 2 Sheet length measurement.

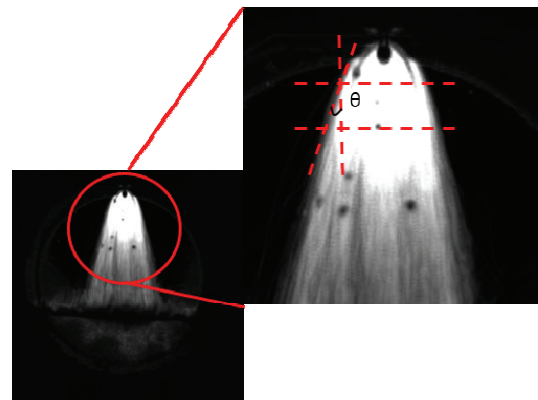


Fig. 3 Spray angle measurement.

도 730 kg/m^3 이다. 메틸사이클로hex산의 물질량은 98.2 g/mol, 임계온도 572.1 K, 임계압력 34.8 bar, 밀도 773 kg/m^3 이다. 실험 유체는 데칸과 메틸사이클로hex산을 물분을 기본 50 %로 혼합하였으며 물분을 116.1 g/mol, 임계온도 599 K, 임계압력 26 bar, 밀도 739 kg/m^3 이다.

Table 1은 초임계 환경으로 분무되는 이중 층돌 분무 실험 조건으로 챔버와 유체에 대한 압력, 온도, 환산압력, 환산온도, 유량을 나타낸다. 환산 압력과 환산 온도는 임계 온도, 압력에 대한 시스템의 압력, 온도의 비이다. 챔버 환경은 임계 압력 이상으로 일정하며 온도는 아임계에

Table 1. Experimental condition.

	P_{ch} [bar]	Pr_{ch}	T_{ch} [K]	Tr_{ch}	T_f [K]	Tr_f	Q [g/s]
case 1	30	1.03	289	0.48	288	0.48	7.05
case 2	32	1.10	402	0.67			3.64
case 3	28	0.97	487	0.81			6.82
case 4	34	1.17	578	0.96			3.64
case 5	34	1.17	585	0.98			6.82
case 6	32	1.10	608	1.02			4.55
case 7	30	1.03	498	0.83			673

서 초임계 조건으로 변한다. 이에 따른 유량 범위는 3.64 g/s~7.05 g/s이다. Case 1, 2, 3은 아임계 상태, case 4, 5는 아임계 상태에서 초임계 상태로 진입하는 천임계 구간이며 case 6는 초임계 상태이다. Case 7은 근임계 환경으로 분무되는 초임계 유체를 나타내며, 유체 가열 시 상온의 유체 분무와 대비되는 변화를 확인할 수 있다.

2.3 실험결과

Fig. 4는 혼합 탄화수소계 연료의 초임계 환경 이중 충돌 분무 순간 이미지를 나타낸다. Case 1은 $Pr=1.03$ 으로 초임계 압력 조건으로 $Tr=0.48$ 인 아임계 온도 조건이다. 시트 형상은 open rim으로 일정 구간 시트가 형성된 후 테두리에서 유량이 집중되며 짧은 구간으로 형상체를 형성한 후 액적으로 분열되는 유동을 보인다. 유량 7.05 g/s일 때 $Re=1.22 \times 10^5$ 이다. Re 수의 점도와 밀도는 분무되는 상온의 유체를 기준으로 계산하였다. 충돌제트는 난류인 상태로 충돌점에서 분열한다. Case 2는 $Tr=0.67$ 로 증가하며 open rim 형상이지만 시트 길이가 감소함을 보인다. Case 3은 $Tr=0.81$ 로 case 1, 2와 대조적인 완전 발달한 분열 형상을 보이고 시트 길이가 감소하였다. 테두리에서 분열되는 액적 직경이 감소하며 액적의 수는 증가하였다. Case 4는 $Tr=0.96$ 은 유량 감소로 open rim 형상을 보인다. Case 5의 경우 메틸사이클로hex산의 임계온도 572 K인 $Tr=0.98$ 의 실험 조건이기 때문에 초임계 유체로 상변화하는 과정에서 case 1보다 주변 액적의 흩어지는

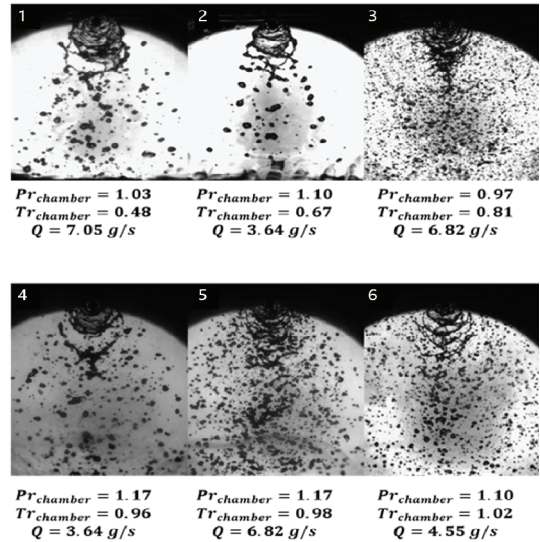


Fig. 4 Transcritical mixture impinging jet grayscale instantaneous images[4].

정도의 산란도와 분무각이 증가하였다. Case 6는 $Tr=1.02$ 로 혼합유체의 임계온도 이상이지만 데칸의 임계온도인 617 K 이하이기 때문에 액체와 기체의 상 경계면이 뚜렷하게 구분되며 case 5보다 액적 직경이 기화되어 감소하고 시트 길이가 감소함을 보인다.

Fig. 5는 이중 충돌 분무 형상의 시트 길이와 분무각, 유선의 변화를 계산하기 위하여 일정 구간의 순간 이미지를 평균화한 이미지이며 상단의 검은 원형은 충돌점이다. 시트 길이는 이미지에서 고정된 길이인 가시화 영역의 길이를 기준으로 상대 길이를 이용하여 계산하였으며, 분무각은 평균화 이미지에서 인젝터부터 경계면이 뚜렷한 지점을 정한 후 약 11 mm 아래 지점에서 좌우로 경계면의 밝기를 구분할 수 있는 지점을 찾아 두 점을 생성한 후 위치 값에 따른 $\tan \theta$ 를 이용하여 분무각을 계산하였다. 이를 Fig. 6에 수치화하여 나타내었다. 상온의 조건인 case 1은 분무각 29° , 시트 분열 길이는 18 mm이다. Case 2의 경우 $Tr=0.67$ 로 분무각은 26° , 시트 분열 길이는 16 mm이다. 분무각과 시트 분열 길이는 감소하였으나 유량 감소 영향이 지배적이라고 볼 수 있다. Case 3의 경우 $Tr=0.81$ 로

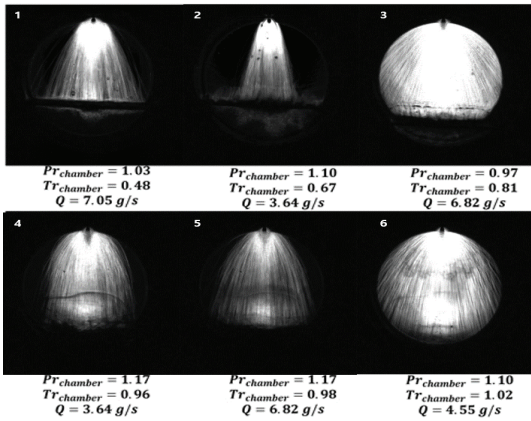


Fig. 5 Transcritical mixture impinging jet averaged images.

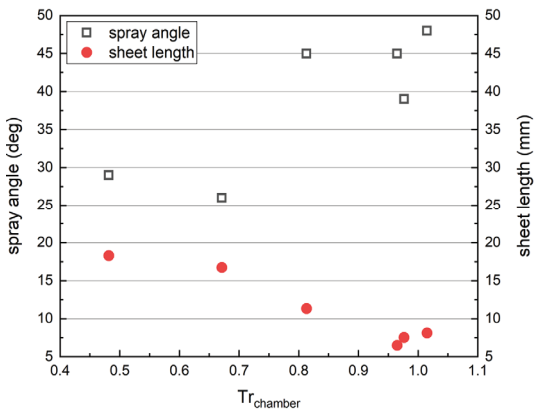
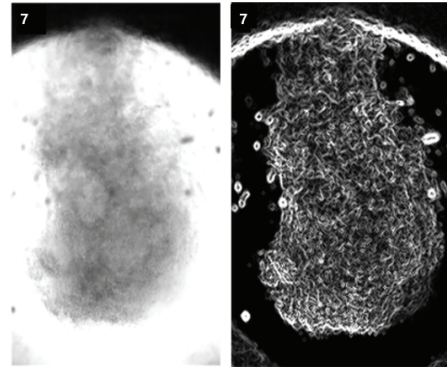


Fig. 6 Spray angle and sheet length with different reduced temperature[4].

주변 환경 가열에 따라 혼합유체 중 단위 질량 당 가열 시 에너지 소모가 적은 메틸사이클로헥산의 기화 영향으로 분무각이 증가하였으며 혼합유체의 기화에 따른 시트 분열 길이가 감소한 것으로 볼 수 있다. Case 4의 경우 분무각 39°, 시트 분열 길이 8 mm이나 case 3에 비하여 유량 감소가 변화에 지배적이라고 볼 수 있다. Case 5의 경우 $T_r=0.98$ 로 분무각은 45°, 시트 분열 길이 6 mm이다. 혼합유체의 임계온도에 근접하면서 기화 정도가 증가하여 분무각 증가와 시트 분열 길이 감소로 이어졌다고 판단된다. Case 6의 경우 $T_r=1.02$ 로 분무각 48°, 시트 분열



$P_{ch} = 30 \text{ bar}$
 $T_{ch} = 498 \text{ K}$
 $T_{fluid} = 673 \text{ K}$
 $Q = 6.82 \text{ g/s}$

$P_{r\text{ch}} = 1.03$
 $T_{r\text{ch}} = 0.83$
 $T_{r\text{fluid}} = 1.12$

(a) (b)

Fig. 7 Mixture impinging jet instantaneous images (case 7)[4]. (a) grayscale images (b) processed images.

길이 8 mm로 case 5와 같이 기화에 따른 변화로 일정 온도 이상에서 분무각이 크게 증가하며 시트 분열 길이가 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 7은 근임계 환경으로 분무되는 초임계 유체 분무 이미지를 나타낸다. Fig. 7(a)의 회색조 순간 이미지에서 상의 경계가 뚜렷하지 않아 확실한 유동 구분이 까다롭다. 초임계 유체의 유동을 가시화하고 밀도 구배 변화를 명확히 하기 위하여 Fig. 7(b)와 같이 이미지 후처리를 하였다. 이미지 후처리에서 흰색은 밀도 구배 변화가 크음을 의미하며 검은색은 밀도 구배 변화가 작음을 의미한다. 초임계 혼합유체의 이중 층돌은 open rim이나 완전 발달 등과 같은 시트 분열 과정 없이 초임계 유체로 상변화하여 연속적인 덩어리 형태의 유동 형상을 보인다. 경계면이 깃털 형상과 같이 열리는 변화를 보인다. 질소 환경과의 상대 속도로 인하여 유동의 경계가 인젝터의 출구면 방향과 수직인 방향으로 흩어지는 형상이 관측되며, 유동의 끝부분이 밀도 구배 변화가 크게 관측되었다. 이는 질소 환경과 맞닿을 때 열교환이 활발히 일어나 밀도 변화가 일어남으로 판단된다.

3. 결 론

본 연구에서는 액체 로켓에 사용되는 대체 모델을 이용하여 초임계 및 아임계 환경에서 이중 층돌 분무를 시행하여 열역학적 상태량에 따른 분열 메커니즘을 압력 챔버와 고속카메라를 통해 가시화하고 해당 이미지를 분석하였다. 탄화 수소계열 연료의 대체 모델은 서로 임계점이 다른 데칸과 메틸사이클로이드헤кс산을 이용하여 아임계, 근임계, 초임계의 상태량을 환산 압력과 환산 온도로 표현하였다. 이중 층돌 형상이 유체와 챔버 환경의 압력, 온도 조건이 근임계로 변화하는 구간인 천임계 구간에선 open rim이나 완전 발달과 같은 이중 층돌 분무 형상을 보이며 분무각 증가와 시트 길이 감소 경향성을 보였다. 하지만 임계점과 초임계 조건을 가진 이중 층돌 분무는 기존의 이중 층돌 분무 형상과는 달리 덩어리진 형태로 분무되며 유동의 끝부분에서 밀도 구배 변화가 큼을 보였다. 이는 온도 증가로 인한 표면장력 감소, 밀도 증가, 점도 감소로 기존의 이중 층돌 형상 분무에서 벗어나 단일 제트 분무 형상과 유사하게 분무되는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 개인기초연구지원사업(2016R1D1A1B04934852)의 지원 및 한국연구재단의 4단계 두뇌한국21 사업(과제번호: 5199990714521)의 지원을 받아 작성되었습니다.

References

1. Dounghthip, T., Ervin, J.S., Williams, T.F. and Bento, J., "Studies of Injection of Jet Fuel at Supercritical Conditions," *Industrial & Engineering Chemical Research*, Vol. 41, No. 23, pp. 5856-5866, 2002.
2. Zeaton, G., Crook, L., Guildenbecher, D. and Sojka, P.E., "An Experimental Study of Supercritical Fluid Jets," *Proceedings of the 19th European Conference on Liquid Atomization and Spray System*, Toronto, Ontario, Canada, 2005.
3. Kim, D., Lee, I. and Koo, J., "Macroscopic Spray Characteristics of a Porous Injector," *Atomization and Sprays*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-22, 2014.
4. Song, J., "Spray Characteristics of Supercritical Mixed Hydrocarbon Fluid," Master's Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Korea Aerospace University, 2021.
5. Song, J., Song, W. and Koo, J., "Visualization of Supercritical Mixed Hydrocarbon-Fuel Droplet," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 48, No. 9, pp. 711-716, 2020.
6. Yang, V., Nienchuan, N. and Shuen, J.S., "Vaporization of Liquid Oxygen (LOX) Droplets in Supercritical Hydrogen Environments," *Combustion Science and Technology*, Vol. 97, Issue 4-6, pp. 247-270, 1994.
7. Wang, N., Zhou, J., Pan, Y. and Wang, H., "Experimental Investigation on Flow Patterns of RP-3 Kerosene under Sub-critical and Supercritical Pressures," *Acta Astronautica*, Vol. 94, No. 2, pp. 834-842, 2014.