



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 48(9), 711-716(2020)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2020.48.9.711

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

혼합 탄화수소계 초임계 상태 연료의 액적 거동 가시화

송주연¹, 송우석², 구자예³

Visualization of Supercritical Mixed Hydrocarbon-Fuel Droplet

Juyeon Song¹, Wooseok Song² and Jaye Koo³Graduate School, Korea Aerospace University^{1,2}School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University³

ABSTRACT

Injection visualization of heated mixed simulant droplets based on hydrocarbon fuel was performed under supercritical state environment. Mixed simulant consisted of Decane and Methylcyclohexane with different critical pressure and critical temperature. Flows injected into the supercritical state environment created droplet by Rayleigh breakup mechanism, and the Oh number and Re number were determined to confirm the breakup area. The temperature of the mixed simulant varied from $Tr=0.49$ to $Tr=1.34$. The flow rate was maintained at 0.7 to 0.8 g/s. Droplet became shorter in breakup length as heated and into a lumped form. Second droplet was formed and when $Tr=1.34$, the phase was not visible in the supercritical state with local unsteady flow.

초 록

탄화수소계열 연료를 기반으로 혼합모사추진체를 사용하여 액적을 생성하고 열에너지를 가하면 초임계 환경으로 분무되는 거동을 가시화하였다. 혼합모사추진체는 임계압력과 임계온도가 상이한 데칸과 메틸사이클로헥산을 선정하였다. 초임계 환경으로 분무되는 유동은 Rayleigh 분열로 액적을 생성하며 Oh 수와 Re 수를 구하여 Rayleigh 분열영역임을 확인하였다. 혼합모사추진체의 온도는 $Tr=0.49$ 에서 $Tr=1.34$ 까지 변화를 주었다. 유량은 0.7~0.8 g/s로 유지하였다. 액적은 열에너지를 가할수록 분열 길이가 짧아지며 덩어리진 형태로 떨어진다. 액체 상을 가시화하는 장치에서 2차 액적(second droplet)이 형성되는 것을 확인하였고 $Tr=1.34$ 일 때 부분적으로 불안정한 상태의 초임계 상태로 액상이 보이지 않는다.

Key Words : Supercritical Fluid(초임계 유체), Hydrocarbon Fuel(탄화수소연료), Shadowgraph Technique(그림자기법), Phase Change(상변화)

1. 서 론

임계점 이상의 열역학적 상태를 가지는 유체를 초임계 유체라고 한다. 이 상태에서 초임계 유체는 액

체와 같은 밀도와 기체와 같은 점성을 가지는 특성이 있으며, 유체의 온도와 압력이 임계점에 근접할수록 물성치들은 급격하게 변하는 현상이 보여진다. 아임계에서 초임계로 변화하는 천임계 구간에서 정압

† Received : July 6, 2020 Revised : August 11, 2020 Accepted : August 25, 2020

^{1,2} Graduate Student, ³ Professor

³ Corresponding author, E-mail : jykoo@kau.ac.kr, ORCID 0000-0002-7001-3275

© 2020 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

비열은 급격히 증가한다. 임계점을 넘어선 초임계 유체는 낮은 점도와 0에 수렴하는 표면장력과 빠른 열 유동으로 인하여 우수한 침투성을 가진다.

추진제로 취급성과 경제성이 비교적 좋은 케로신이 많이 사용되지만 엔진 운영의 용이성을 위하여 RP-1, JP-1과 같은 액체 로켓에 맞는 연료를 만들어 사용한다. Fig. 1의 표시와 같이 임계점이 낮은 질소 및 이산화탄소를 이용한 초임계 조건의 제트를 분무하여 경계면의 불안정 패턴을 연구한 바가 있으며 [1,2], 임계점 부근에서 열에너지로 인하여 유체 경계면의 기화가 일어날 때 그림자기법으로 촬영한 이미지에서 임계단백광 현상이 관측되며 이에 대한 연구가 진행되었다[3]. 선행 연구를 기반으로 환경이 초임계이면서 분무가 진행되는 유체에 대한 연구는 진행되었지만[4-8] 실험 유체 또한 초임계인 액적 거동의 분열 매커니즘에 대한 다양한 연구가 요해진다.

초임계 유체를 이용한 가스터빈, 로켓 연소 상황 등은 고온·고압 환경에서 초임계 유체의 부분적 불안정 유동으로 인하여 연소불안정을 일으키기도 한다. 임계점이 낮은 유체의 실제 로켓 연소 상황을 모사한 제트 분무실험은 선행 연구되었지만[9,10], 혼합탄화수소계열 액적 스케일에서 일어나는 분무 특성과 유체 자체에 열에너지를 가하여 초임계 환경으로 분무하였을 때 일어나는 상황에 대한 연구는 미미하다.

본 연구에서는 탄화수소계 연료이며 임계점이 상이한 데칸(decane)과 메틸사이클로헥산(methylcyclohexane; MCH)을 이용하여 혼합 모사추진제를 제작하였다. 또한 유체에 직접 열에너지를 가하여 유체의 상태가 아임계부터 초임계까지 변하는 Rayleigh 분열의 액적에서 일어나는 상변화를 초임계 환경에서 확인하였다.

II. 본 론

2.1 실험장치 및 실험방법

2.1.1 실험장치

실험장치는 Fig. 2와 같다. 실린더 형태의 챔버는 직경 70mm, 내부 용적은 257mL이다. 석영유리(quartz) 두께 30mm를 사용하여 가시화를 진행하였다. 고온·고압 환경을 이루기 때문에 흑연 가스켓(graphite gasket)을 이용하여 석영 유리와 챔버 간 결합에 사용하였다. 챔버 환경을 조성하는 질소와 유체 가압을 위한 라인도 질소 탱크에서 같은 라인을 통하여 이루어진다. 유체를 가압할 때 유량을 측정하기 위하여 유체 탱크 후에 터빈 유량계를 설치하였다. 터빈 유량계의 측정 범위는 실험 유체 기준 0~170g/s이다. 챔버를 가열하기 위하여 2,000W 밴드형 세라믹히터를 사용하였으며 유체를 가열하기 위하여 1,600W의 밴드형 세라믹 히터를 사용하였다.

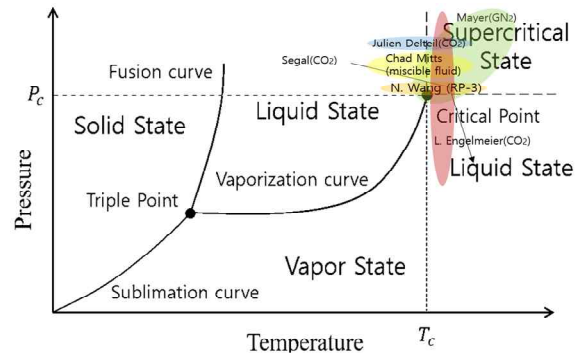


Fig. 1. Pressure-Temperature saturation curve

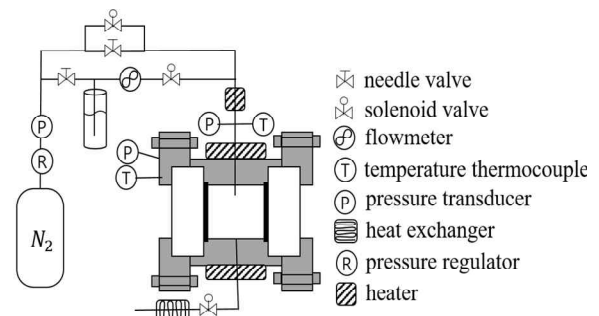


Fig. 2. Schematic of droplet injection

인젝터의 출구 직경은 0.5mm이며 고온의 실험 유체는 발화점 이상의 상태이므로 열교환기를 통하여 상온의 상태로 처리된다. 실험 장치에 쓰인 열전대는 1/16 inch, K-Type이며 Wika의 압력 트랜스듀서를 사용하였다. 실시간 데이터 수집을 위하여 온도 데이터 수집용 Labview 9211 NI 모델과 압력데이터 수집용 Labview 9201 NI 모델을 이용하였다. 가시화 장치는 챔버와 동일 선상에 고정시키기 위하여 가이드라인을 이용하였다.

액적 분무 가시화를 위하여 shadowgraph 기법을 사용하였다. Fig. 3과 같이 가이드 라인 중간에 챔버를 설치하여 고속카메라와 LED, 컨벡스 렌즈(convex lens)를 설치하였다.

Shadowgraph 이미지는 유체가 상변화 함에 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(폭)×(높이) 해상도와 3000 FPS, 1/50,000s 셔터스피드로 촬영한 RGB 형식의 원본 이미지를 8 bit 형식의 회색조(gray scale) 이미지로 변환하였다. 변환된 픽셀 값을 이용하여 x 방향과 y 방향 각각의 밀도 구배를 계산하여 크기 값으로 변환하여 이미지 처리를 하였다. 결과 값은 검은색과 흰색으로 256 등분하여 표현된다. 검은색은 밀도 구배 변화가 작음을 나타내며, 흰색 부분은 밀도 구배 변화가 크게 일어남을 의미한다.

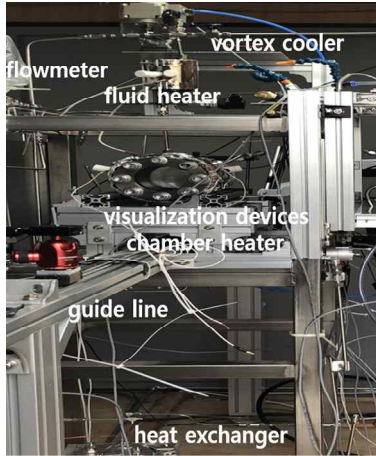


Fig. 3. Droplet injection experimental setup

2.1.2 실험방법

추진제로 쓰이는 케로신은 탄화수소계 화합물이며 구성 성분이 다양하다. 또한 임계점이 비교적 높아 실험 유체로 선정하기에 위험성이 존재한다. 따라서 케로신 대체 모델(surrogate model)에 의하여 단일 물질 중 구성 비율이 높으면서 접근성, 경제성, 취급성이 용이한 데칸과 메틸사이클로hex산을 실험 유체로 선정하였다. 데칸과 메틸사이클로hex산은 케로신을 구성하는 물질 중 몰분율이 높으며 케로신과 물리 화학적 유사성이 높음이 수치적으로 선행 연구되었다[11]. 단일 물질 각각의 임계점에 따른 제트 분무는 진행되었지만[12], 화합물인 케로신에 대한 유사성을 높이기 위하여 임계점이 상이한 두 물질을 혼합하였으며 몰분율 기준으로 50% 혼합물을 만들어 실험을 진행하였다.

챔버 환경을 이루는 유체는 질소이며 실험에 사용된 유체는 데칸과 메틸사이클로hex산이다. 두 유체를 몰분율 기준 50%로 혼합하여 사용하였다. Table 1과 같이 질소의 임계 온도는 126.19 K, 임계 압력은 34 bar이며 데칸의 임계 온도는 617.3 K, 임계 압력은 21 bar이고 메틸사이클로hex산의 임계 온도는 572.1 K, 임계 압력은 34.8 bar이다. 혼합물의 임계점은 NIST의 SUPERTRAPP을 이용하여 대응상태원리(principle of corresponding state)를 기반으로 계산하였으며 임계 온도 599 K, 임계 압력 26 bar이다[13].

액적을 생성하는 방법으로 자체의 에너지를 소시하여 자연 분열되는 방법을 차용하였다. 이 분열 방식은 Rayleigh 분열로 볼 수 있다. Fig. 4와 같이 액적 분열 매커니즘 I, II, III 영역에 따라 Oh 수(ohnesorge number)와 Re 수(reynolds number)를 나타낼 수 있다. I 영역에서는 액적의 분출 속도가 아주 낮은 저 Re 수이고, 축대칭과를 형성하며 분열한다.

Table 1. Fluid property

Fluid	MW [g/mol]	T_c [K]	P_c [bar]	ρ [kg/m ³]
Decane	144	617.3	21	730
MCH	98.2	572.1	34.8	773
Decane 50% + MCH 50%	116.1	599	26	739

Rayleigh 분열 매커니즘이 작용하는 영역이며 표면장력의 영향 때문에 액체표면에 발생한 파가 성장하여 불안정성이 커져 분열에 이르게 되는 영역이다. II 영역에서는 분출속도가 증가함에 따라 Re 수도 증가한다. 액류가 주위 공기의 영향을 받기 시작하여 진동이 일어나 Fig. 5의 II와 같이 나선형 또는 비대칭인파를 형성하고 그에 대한 진동으로 분열된다. 진동의 크기는 완전 분열까지 공기저항과 더불어 증가한다. III 영역에서는 Re 수가 높고 액류의 미립화가 분무류로 일어나는 영역이다. 액체 체트와 주위 공기 사이의 상대적인 운동에 의한 공기역학적인 힘이 지배한다[14,15].

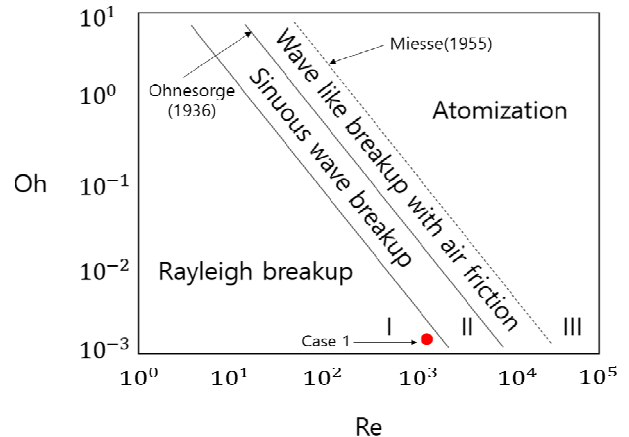


Fig. 4. Mechanism of drop breakup in the three regime [16,17]

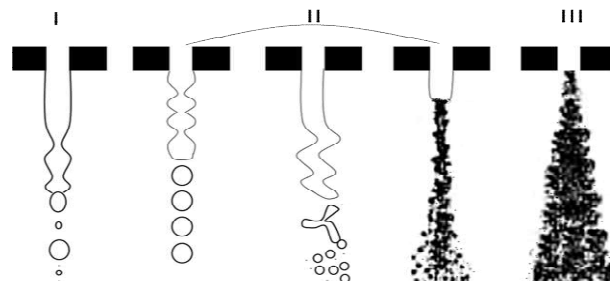


Fig. 5. Example of jets in the three breakup regimes [16,17]

Rayleigh가 제안한 분열 매커니즘은 Oh 수와 Re 수에 따라 표현된다. Oh 수는 액체의 점성 효과를 기반으로 나타내는 무차원 변수이다. 액체의 점도를 밀도와 표면장력, 인젝터 출구 직경으로 나눈 비이며 식 (1)과 같다. Re 수는 관성력을 점도 기반으로 나눈 무차원 변수이며 식 (2)와 같다. 이 때 특성길이는 인젝터 출구 직경으로 볼 수 있다. 인젝터 출구 직경은 0.5 mm이다.

$$Oh = \frac{\sqrt{We_l}}{Re_l} = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l \sigma D}} \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho_l V_l D}{\mu_l} \quad (2)$$

2.1.3 실험조건

실험 조건은 Table 2와 같다. 챔버의 온도와 압력은 유체의 임계점 기준으로 환산압력(reduced pressure; Pr)과 환산온도(reduced temperature; Tr)로 나타내었으며 식 (3)과 식 (4)를 사용하여 계산하였다. 유체온도는 T_r 이 0.49부터 1.34까지 변화한다. 이 때 유량 Q 는 0.7~0.8로 유지되었다. 챔버는 유체를 기준으로 환산 온도와 환산 압력을 나타내었으며 초임계 환경으로 볼 수 있다. 유체의 상태(phase)가 열에너지를 가한 정도에 따라 변하게 된다. 유체의 상태는 case 1에서 아임계, case 2와 case 3에서 근임계, case 4와 case 5에서 초임계 유체로 볼 수 있으며 case 2에서 case 4로 변할 때 천임계 구간이므로 분열 형상에 온도가 어떠한 영향을 미치는지 알 수 있다.

$$Tr = \frac{T}{T_c} \quad (3)$$

$$Pr = \frac{P}{P_c} \quad (4)$$

Table 2. Experimental condition

#	P_{ch} [bar]	$P_{r, ch}$	T_{ch} [K]	$T_{r, ch}$	$T_{r, fluid}$	Q [g/s]
case 1	29	1.12	599	1.0	0.49	0.7
case 2					0.80	0.7
case 3					0.91	0.75
case 4					1.01	0.8
case 5					1.34	0.7

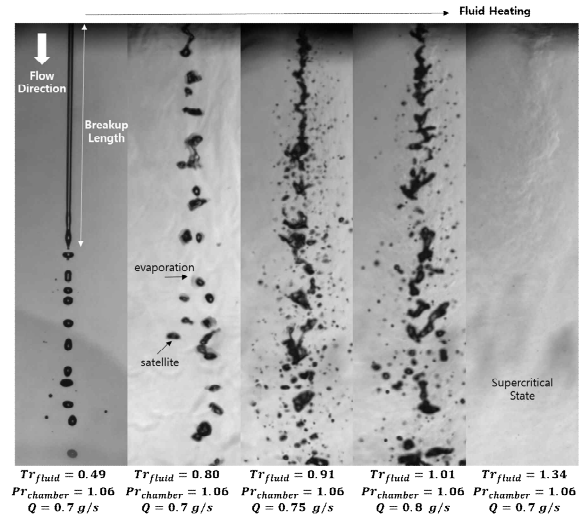


Fig. 6. Images of droplet transition depending on fluid temperature

2.2 실험결과

실험결과와 Fig. 6과 같다. 유동의 방향은 Fig. 6의 화살표 방향과 같다. 실험 조건 case 1에서 Oh 수는 1.86×10^{-3} 이며 Re 수는 2.261×10^3 이다. 이는 Rayleigh breakup 분열경계선인 $Oh^{0.12} Re^{0.39} = 10$ 이내[18]이기 때문에 Rayleigh breakup 분열영역으로 볼 수 있다. 액주가 형성된 뒤 액적으로 분열되는 형상이며 과분열로 인한 2차 액적(second droplet)도 볼 수 있다. 가시화 이미지에서 액주와 액적이 명확히 구분되어 보인다. 액주 길이를 계산하기 위하여 회색조(gray-scale)로 처리된 이미지를 이원화 이미지로 변환하여 도출하였다. 검증을 위하여 이미지에서 알고 있는 길이인 가시화 영역 직경을 기준으로 액주 길이를 계산하였고 28 mm로 일치하였다. 액적 생성 방법으로 외부 가진 형태의 방법과 자연분열이 있는데 이 영역은 앞서 언급한 바와 같이 유체 자체의 에너지 소실에 의하여 분열되는 경우에 해당된다. Tr_{fluid} 가 0.80으로 증가한 case 2에서 case 1과 달리 액주가 급격히 짧아졌다. 유동방향뿐만 아니라 반경방향으로도 액적이 흩어지는 satellite 형상을 보인다. 분무되는 유체는 일정한 형상의 액적이 아닌 덩어리 형태(lump)로 떨어지며 액적이 하강하면서 유체의 밀도 감소 및 주변 환경의 부력으로 인하여 액적들끼리 뭉치게 되는 현상을 볼 수 있다. 또한 가열로 인하여 액적 주변의 기화 흔적이 관측되며 열대류로 인하여 챔버 환경의 유동이 관찰되었다. 미립화가 진행되며 액적이 증가하는 경향이 case 3에서 보인다. 이 때 case 2와 달리 유동은 액주와 액적으로 구성된 형태에 벗어나고 띠 형상체(ligament)를 보인다. 이는 Tr_{fluid} 가 0.91에 도달하였을 때 혼합물을 이루는 구성 성분 중 메틸사이클로hex산의 임계온도에 근접하면서 유체가 기화되어 유체 속도가 증가하고, 그에

따라 주변 환경과의 상대 속도가 증가함에 따라 유체 표면의 불안정성이 커져 미립화가 진행된 것으로 볼 수 있다. 실험 조건이 case 4인 경우 혼합물의 임계 온도이지만 구성 성분인 데칸의 임계 온도 환경이 아니기 때문에 상이 보이는 형태이고 case 3과 다르게 유체가 더욱 덩어리지면서 하강한다. 직경이 작은 주변 액적들 또한 기화되어 적어짐을 볼 수 있다. Tr_{fluid} 가 혼합물의 임계 온도를 넘은 case 5는 초임계 상태이다. 이 경우 유체의 임계 온도와 임계 압력을 넘었기 때문에 기화가 일어나지 않고 상이 보이지 않으며 그림자기법을 통하여 밀도구배의 차로 유동의 흐름을 대략적으로 볼 수 있다. 이 때 유동에서 불안정성이 보이는데 분무 초기에 분무 외곽은 상이 존재하지 않는 형태로 나오며 분무 중심은 기화가 진행되는 상태로 상이 보인다. 이는 초임계 상태로 진입할 때 열전달이 완전히 일어나지 않은 불안정한 형태로 분무 중심의 상이 존재하며 후에 정상 상태로 상이 없는 분무가 지속된다. 회색조로 변환된 이미지에서 밀도구배를 보다 명확히 보기 위하여 이미지 처리를 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이 흰색일수록 밀도구배변화가 크고 검은색일수록 밀도구배변화가 작다. Fig. 7의 case 1에서 액주 경계면과 액적의 경계면이 밝은 것을 볼 수 있다. 고온의 환경에 닿아있는 부분인 만큼 열교환이 빠르게 일어남에 따라 밀도 변화도 크다. Tr_{fluid} 가 0.8로 상승한 case 2는 case 1과 같이 액적의 경계면에서 흰색이 나타나며 밀도 변화가 큼을 알 수 있다. 이 때 유체를 분무하면서 챔버 직전의 파이프관 속에서 기화된 유체와 챔버를 이루는 질소가 섞이면서 액적 주변의 내부 유동이 일어남을 알 수 있다. 이 부분이 액적 주변의 밀도 구배가 큰 흰 아지랑이 형태들로 나타난다.

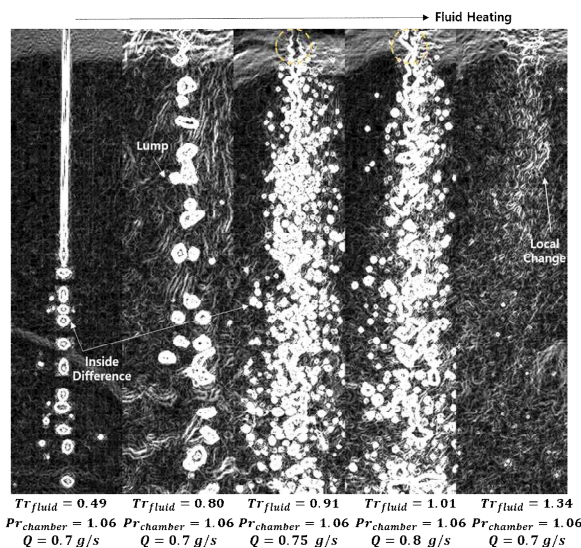


Fig. 7. Density gradient images of droplet transition depending on temperature

이미지 후처리 된 case 1의 경우 액적의 경계면만 밝고 내부는 중심만 밝거나 내부 전체가 어두운 경향이 있는 반면에 가열된 유체를 분무하는 case 2의 경우 액적 경계면뿐만 아니라 액적 내부 전체까지 흰색인 경우를 볼 수 있다. 하지만 유체 임계점 이하의 온도로 가열되었기 때문에 분무된 모든 액적이 내부까지 흰색인 경우는 드물다. 유체의 임계점에 가까운 조건인 case 3과 case 4에서 분무되는 액적 직경은 case 1과 case 2에 비하여 작아지고 경계면과 내부 모두 흰색을 띄는 액적들이 증가함을 볼 수 있다. 실험 조건 case 3에서 혼합물을 이루는 유체 중 메틸사이클로hex산의 임계점에 가까워졌기 때문에 액적 내부까지 기화가 일어나 흰색을 보임을 알 수 있다. 유체 온도가 증가한 case 4에서 혼합물의 임계온도를 넘었지만 구성분 중 데칸의 임계점 근처이기 때문에 경계면만 흰색이고 내부는 어두운색을 띄는 덩어리 (lump) 형태가 보이기도 한다. 유체의 온도가 달라짐에 따라 case 3은 근임계 조건의 온도를 case 4는 초임계 조건의 온도를 가진다. 환산 온도가 1을 넘었음에도 case 4는 혼합물의 구성분 중 데칸의 임계 온도 이하이므로 액체와 기체의 상이 뚜렷이 구분된다. 온도 증가로 표면장력이 감소하여 case 3에 비하여 case 4에서 덩어리 형태로 유체가 하강한다. 주변 액적의 수는 case 4가 case 3에 비하여 감소함을 보였지만 전체적인 유동의 현상은 큰 차이를 보이지 않는다. 후처리 된 이미지에서 두 분무의 인젝터 출구 근처 부분은 case 3과 case 4 모두 분무 직후 짧은 구간에서 경계면만 흰색을 보이고 내부는 검은색인 현상을 볼 수 있다. 그 후에 챔버 내의 질소와 열교환을 이루고 미립화되어 분무가 진행됨에 따라 액적의 크기도 작아져서 경계면뿐만 아니라 내부까지 흰색을 보이는 현상이다. 열에너지를 가함에 따라 case 3과 달리 작은 액적들은 기화되어 없어지고 유동 주변의 기화에 따른 아지랑이 같은 형태가 넓어졌음을 알 수 있다. 유체가 임계점 이상의 온도인 case 5의 경우 때문에 초임계 유체로 볼 수 있다. 초임계 유체의 분무는 Fig. 6의 Tr_{fluid} 가 1.34일 때와 같이 상이 보이지 않지만 0.7 g/s로 유량이 존재함을 알 수 있다. 이는 이미지 후처리 후 Fig. 7에서 Tr_{fluid} 가 1.34일 때를 보면 초임계 상태여서 기화가 일어나지는 않지만 챔버 환경과 열교환을 이루어 국소적인 부분에서 밀도 구배 변화가 존재함을 알 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 탄화수소계열 추진제를 모사하는 혼합물을 이용하여 초임계 환경으로 유동하는 초임계 액적 분무를 가시화하였다. 액적을 생성하기 위하여 주변 환경과의 상대 속도로 인한 경계면의 불안정성 증가로 유체 자체의 에너지를 소실하여 분열되

는 Rayleigh 분열 방법을 이용하였다. Tr_{fluid} 가 0.49 일 때 액주와 액적의 구분이 뚜렷하며 경계면에서 밀도 구배 변화가 큼을 확인하였다. Tr_{fluid} 가 0.80일 때 액주가 급격히 짧아졌으며 덩어리(lump) 형태가 관측되었다. 주변 환경과의 열교환으로 경계면뿐만 아니라 내부 중심도 밀도 구배 변화가 일어남을 확인하였다. Tr_{fluid} 가 0.9와 1.01일 때 미립화가 진행된 분무 형상을 보였으며 이는 혼합물을 구성하는 메틸 사이클로hex산의 임계점 근처의 온도 조건이기 때문에 기화로 인한 유동 속도 증가로 볼 수 있다. 유체의 경계면뿐만 아니라 내부 전체 모두 밀도 구배 변화가 큼을 확인하였으며 두 경우 모두 분무 초기에 주변 환경과의 열교환이 적어 내부는 밀도 구배 변화가 작음을 알 수 있다. Tr_{fluid} 가 1.34일 때 혼합물의 임계점 이상의 온도 조건이기 때문에 유량 0.7 g/s로 분무되지만 상이 보이지 않음이 관측되었다. 이미지 후처리를 하였을 때 초임계 유체는 기화가 일어나지 않지만 질소와의 열교환으로 국소적인 밀도 구배 변화가 일어나는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 개인기초연구지원사업(2016R1D1A1B04934852)의 결과입니다.

References

- 1) 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, 1994, pp. 247~270.
- 2) Segal, C. and Polikhov, S. A., "Subcritical to supercritical mixing," *Physics of Fluids*, Vol. 20, Issue 5, 2008, 052101.
- 3) 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, 2014, pp. 834~842.
- 4) Mayer, W., Telar, J., Brannam, R. and Schneider, G., "Characterization of Cryogenic Injection at Supercritical Pressure," *Proceeding of the 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, July 2001.
- 5) Mayer, W., Schik, A., Schweitzer, C. and Schaffler, M., "Injection and Mixing Processes in High Pressure LOX/GH2 Rocket Combustors," *Proceeding of the 32nd Joint Propulsion Conference and Exhibit*, July 1996.
- 6) Smith, J., Klimenko, D., Clau, W. and Mayer, W., "Supercritical LOX/Hydrogen Rocket Combustion Investigations Using Optical Diagnostics," *Proceeding of the 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, July 2002.
- 7) Deposit formation in Hydrocarbon Rocket Fuels-Executive Summary Report, NASA Contractor Report 165492.
- 8) Zhong, F. Q., Fan, X. J., Wang, J., Yu, G. and Li, J. G., "Characteristics of Compressible Flow Of Supercritical Kerosene," *Acta Mechanica Sinica*, Vol. 28, No. 1, 2012, pp. 8~13.
- 9) Roback, R., Szetela, E. J. and Spadaccini, L. J., "Deposit formation in hydrocarbon rocket fuels," 1981.
- 10) Engelmeier, L., Pollak, S. and Weidner, E., "Investigation of superheated liquid carbon dioxide jets for cutting applications," *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 132, 2018, pp. 33~41.
- 11) Xu, K. and Meng, H., "Analyses of surrogate models for calculating thermophysical properties of aviation kerosene RP-3 at supercritical pressures," *Science China Technological Sciences*, 2015, Vol. 58, No. 3, pp. 510~518.
- 12) Yang, J. C., Chien, W. and King, M., Grosshandler, W. L., "A simple piezoelectric droplet generator," *Experiments in fluids*, Vol. 23, No. 5, 1997, pp. 445~447.
- 13) Huber, M. L., Nist Thermophysical Properties of Hydrocarbon Mixtures Database (SUPERTRAPP) Version 3.2 Users' Guide, NIST, 2007.
- 14) Mitts, C., Talley, D. and Poulikakos, D., "A fundamental study of supercritical droplet deformation and breakup through a miscible fluid analog," *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1996, p. 2858.
- 15) Delteil, J., Vincent, S., Erriguible, A. and Subra-Paternault, P. "Numerical investigations in Rayleigh breakup of round liquid jets with VOF methods," *Computers & Fluids*, 2011, Vol. 50, No. 1, pp. 10~23.
- 16) Ohnesorge, W. V., "Die building von tropfen an düssen und die auflösung flüssiger strahlen," ("Formation of Drops by Nozzles and the Breakup of Liquid Jets") *ZAMM Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, Vol. 16, No. 6, 1936, pp. 355~358.
- 17) Miesse, C. C., "Correlation of experimental data on the disintegration of liquid jets," *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 47, No. 9, 1955, pp. 1690~1701.
- 18) Reitz, R. D., "Mechanism of breakup of round liquid jets," *Encyclopedia of fluid mechanics*, October 1986.