



근임계 환경으로 분사되는 탄화수소 제트의 임계점이 분사거동에 미치는 영향

윤태경^a · 신동수^a · 이건웅^a · 구자에^{b,*}

Influence of Critical Point of Hydrocarbon Jet Injected into Near-Critical Environment on Injection Behavior

Taekyung Yoon^a · Dongsoo Shin^a · Keonwoong Lee^a · Jaye Koo^{b,*}

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

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

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

ABSTRACT

Supercritical injection behavior of liquid hydrocarbon compounds, which are used as main components of propellant fuel, was analyzed. Decane and Methylcyclohexane (MCH) with different critical points were selected as experimental fluid and Shadowgraphy technique was used. Decane and MCH behave differently in the initial state under the subcritical condition. However, near the critical point, the enthalpy of evaporation became close to 0, so that phase change into supercritical fluid occurred, not vaporization process, and no breakup of both fluids occurred.

초 록

추진기관 연료의 주 성분으로 사용되는 액체 탄화수소 화합물의 초임계 분사 거동 특성을 분석하였다. 임계점의 차이가 있는 Decane과 Methylcyclohexane (MCH)를 실험 유체로 선정하였으며 Shadowgraphy 기법을 사용하였다. 아임계 조건의 동일한 인젝터 초기상태에서 Decane과 MCH는 서로 다른 거동을 보였다. 하지만 임계점 부근에서 증발엔탈피가 0에 가까워져 기화과정이 아닌 초임계 유체로의 상변화가 일어나고, 급격한 밀도변화가 없어 두 가지 유체 모두 분열이 발생하지 않았다.

Key Words: Supercritical Injection(초임계 분사), Hydrocarbon Compound(탄화수소화합물), Phase Changing(상변화), Shadowgraphy(그림자기법)

Received 5 June 2017 / Revised 23 January 2018 / Accepted 27 January 2018

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2017년도 춘계학술대회(2017. 5. 31-6. 2, 라마다프라자 제주호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것입니다.]

Nomenclature

Pr : reduced pressure

P_C : chamber pressure

P_{inj} : injection pressure
 T_r : reduced temperature
 ΔT : temperature variation

1. 서 론

로켓 엔진의 연소과정동안 연소실내의 온도와 압력은 급격히 상승한다. 이 때 추진제는 초임계 상태가 되며 표면장력과 열확산, 밀도와 비열 같은 열역학적 상태량의 급격한 변화를 보이게 된다. 초임계 유체의 밀도는 액체에 가깝고 점성은 기체에 가까워 표면장력이 거의 사라져 침투성이 우수해진다[1]. 앞서 초임계 제트 분사 거동과 그 특성에 대해 이해하기 위하여 수많은 관련 연구가 진행되어 왔다[1-4]. 선행연구로 대기압 상태로의 아임계, 천임계, 초임계 분사에 대한 연구가 진행되었으며, 모사 추진제를 사용한 초임계분사 가시화 연구도 진행되었다[5, 6]. 초임계 연소에 관한 연구는 국내, 국외에서 활발히 진행되었지만[7- 11], 로켓 연료로 사용되는 탄화수소 계열 유체의 초임계 분사에 관한 연구는 아직 미비하다. 선행 연구로 미루어 볼 때 아임계 조건에서 초임계 조건으로 진행되는 탄화수소 계열 유체의 분사를 가시화 하여 경계면에서의 상변화와 거동 특성을 관찰할 필요가 있다.

이 연구를 통해 근임계 환경으로 분사되는 제트의 임계점이 상변화에 미치는 영향을 보고자 하였다. 분사과정에서의 두 액체 탄화수소 화합물의 거동 차이를 고속 카메라 데이터를 통해 확인하였으며, 정상상태에서의 순간이미지를 구배이미지로 변환하여 밀도의 변화를 분석하였다. 평균이미지의 명도를 수치화 하여 각 Case마다의 거동 특성을 분석하였다.

2. 시험방법 및 장치구성

2.1 시험 장치 구성

Fig. 1의 가시화 챔버는 스테인리스 스틸 304

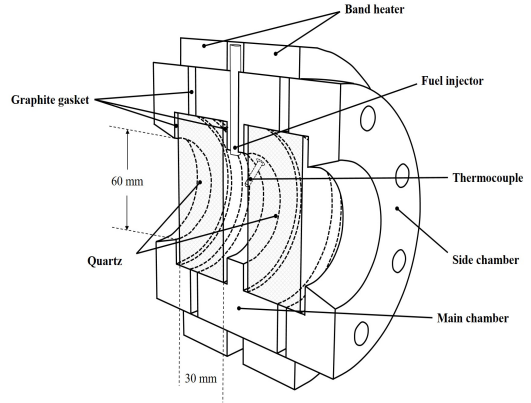


Fig. 1 Schematic of pressure chamber module.

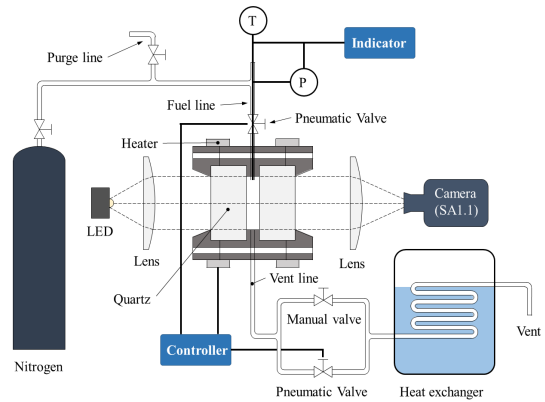


Fig. 2 Schematic of experimental system.

로 제작되었으며, 중앙의 메인 챔버와 양 옆의 사이드 챔버 한 쌍으로 구성된다. 직경 60 mm 가시화 영역에 두께 30 mm의 석영유리(quartz)를 양쪽 각각 하나씩 사용하였다. 고온 고압 환경에서 밀폐된 상태를 유지하기 위해 SSTC사의 3 mm 두께 흑연 가스켓(graphite gasket)을 챔버와 석영유리 중간에 삽입하였다. 챔버 내의 온도를 고온으로 유지하기 위하여 450 W 스테인리스 밴드 히터 2개를 설치하였다. 온도 및 압력을 측정하기 위해 메인챔버 상부에 열전대(1/16 inch K-Type, Ground Type)와 Wika의 압력 트랜스듀서를 사용하였다.

Fig. 2는 분무 가시화 실험장치의 전반적인 구성을 나타낸다. 연료분사 시스템은 연료공급라인

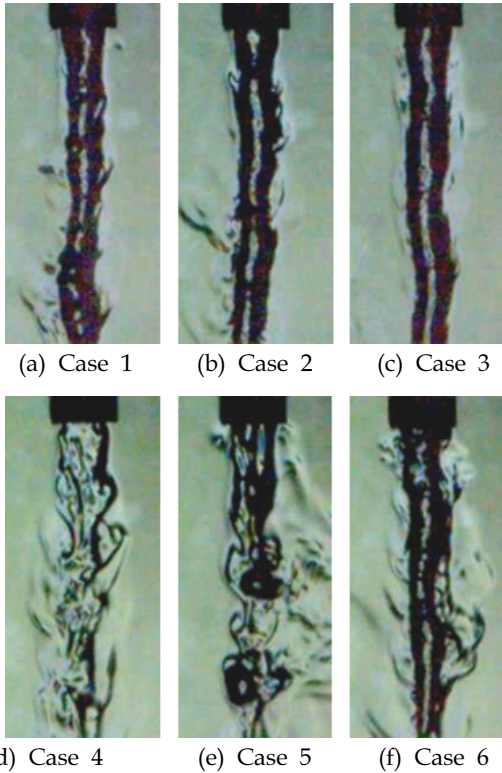


Fig. 3 Instant image of Decane (a, b, c) and MCH (d, e, f).

내부에 연료가 주입된 상태에서 챔버 내부 온도는 임계온도, 압력은 실험 조건으로 조정된 뒤 노즐 상단의 밸브를 닫고 인젝션 라인과 챔버 내부의 차압을 발생시켜 직경 1 mm의 인젝터에서 0.05 MPa의 압력으로 챔버 내부에 분사되도록 설계하였다. 챔버 내의 온도와 압력은 LABview로 수집하였으며 제어기로 매 Case마다 챔버 내의 상변화 된 잔류 연료를 배출시키고 불활성 기체인 질소로 가압하였다. Case 사이에 충분한 시간을 두어 챔버와 인젝터를 동일 조건으로 유지하였다.

2.2 시험 방법

챔버와 배관을 불활성 기체인 질소로 충전한 후 챔버의 압력과 온도를 시험 조건과 동일하게 유지하였다. 연료 공급 라인의 purge 후 연료를 주입하고 차압 0.05 MPa 상태로 분사 조건을 형

Table 1. Properties of hydrocarbon compounds.

Material	Decane	MCH*
Critical Pressure(MPa)	2.10	3.48
Critical Temperature(K)	617.58	572
Critical Density(kg/m ³)	228	267
Molecular Weight(g/mol)	144	98.2

*Methylcyclohexane

Table 2. Experimental conditions of Decane and MCH* under variable reduced pressure.

Material		Case		
		Case 1	Case 2	Case 3
Decane	P_r	0.60	0.80	1.03
	P_c (MPa)	1.26	1.68	2.16
	P_{inj} (MPa)	1.31	1.73	2.21
Material		Case 4	Case 5	Case 6
MCH*	P_r	0.60	0.80	1.00
	P_c (MPa)	2.10	2.80	3.48
	P_{inj} (MPa)	2.16	2.85	3.53

*Methylcyclohexane

성하였다.

분사 시 유체와 분사 경계면에서의 밀도 구배를 관찰하기 위한 방법으로 Shadowgraphy 기법을 이용하였다. 렌즈와 SST-90 LED, CMOS카메라(Fastcam-APX RS)를 사용하여 연료가 분사되는 순간을 촬영하였다. 초당 프레임 수, 셔터 속도, 그리고 해상도는 각각 30,000 fps, 1 μ s, 그리고 128 x 256 pixel이다.

탄화수소계열 유체로는 Decane Methylcyclohexane (이하 MCH)를 사용하였다. Decane과 MCH는 탄화수소화합물로 각각의 물성치는 Table 1에 나타났다. 또한 챔버 내압을 연료의 임계압력으로 나눈 환산압력(reduced pressure, P_r)과 챔버 내부온도를 연료의 임계온도로 나눈 환산온도(reduced temperature, T_r)를 정의하였고, Table 2에 나타낸 조건 하에서 실험 결과 값을 얻었다.

2.3 이미지 후처리 방법

Shadowgraphy 기법으로 획득한 이미지를 이미지 후처리(image processing)를 통해 분석하였다. 정상상태에서의 분사 순간 이미지 2,000장으로 평균 이미지를 도출하였다. 얻어진 평균 이미지는 밝기에 따라 값을 도출하였고 무차원화 된 변수로 나타내었다.

3. 실험 결과

3.1 순간 이미지 분석

Fig. 2는 Decane과 MCH의 정상상태 순간 이미지이며, Fig. 3은 Fig. 2의 구배 이미지 (gradient image)를 나타낸다.

Fig. 2와 Fig. 3의 (a), (b), (c)는 Decane의 환산압력에 따른 분사의 순간이미지를 나타낸다. Decane의 경우 환산압력이 0.6, 0.8인 아임계 조건에서의 분사와 1.0인 초임계 조건에서의 분사

가 유사한 패턴을 보이는 것을 알 수 있다. 빛의 굴절에 의해 액주의 형태는 중앙이 밝은 형태를 띄며, 연료와 질소의 경계면과 액주의 중앙에서 큰 밀도구배를 관측할 수 있다.

Fig. 2와 Fig. 3의 (d), (e)는 MCH의 분사 순간이미지를 나타낸다. 환산압력이 0.6, 0.8인 아임계 조건에서의 분사 이미지는 액주가 분열되고 기화하여 급격한 팽창에 의해 불규칙한 분사 패턴을 보인다. 반면 초임계 상태인 Fig. 2(f)와 Fig. 3(f)에서는 Decane의 경우와 유사한 중앙이 밝은 형상의 액주를 관측할 수 있다.

3.2 평균 이미지 분석

Fig. 4는 MATLAB을 이용하여 Decane과 MCH의 각 케이스 별 정상상태(steady state) 평균이미지를 도출해낸 것이다. 평균이미지에서 세로축을 x , 가로축을 y 라 정의하고, 인젝터 직경 D 를 기준으로 각각 x/D , y/D 의 값으로 무차원

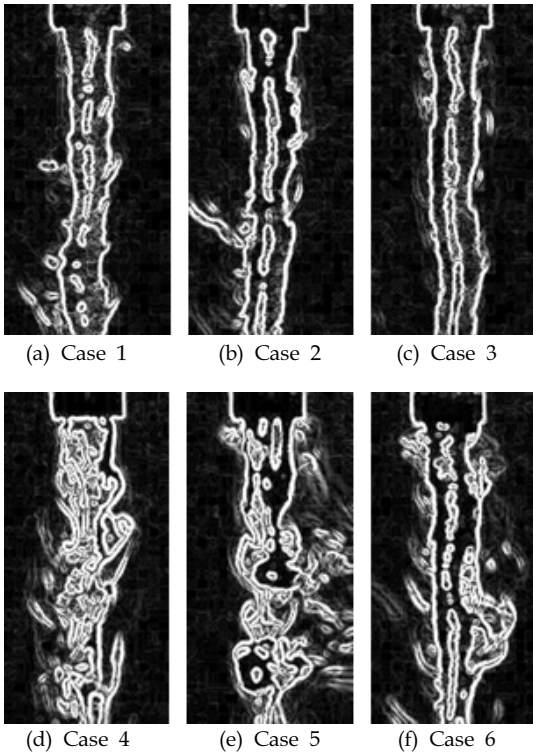


Fig. 4 Instant gradient image of Decane (a, b, c) and MCH (d, e, f).

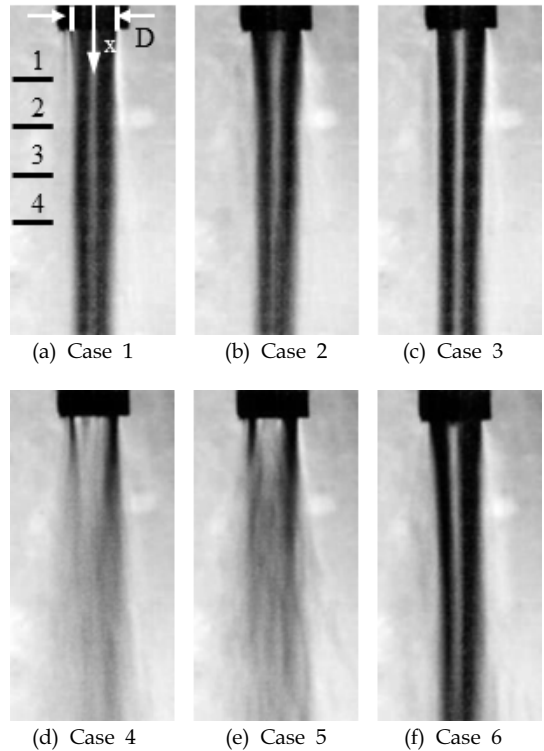


Fig. 5 Average image of Decane (a, b, c) and MCH (d, e, f) in steady state.

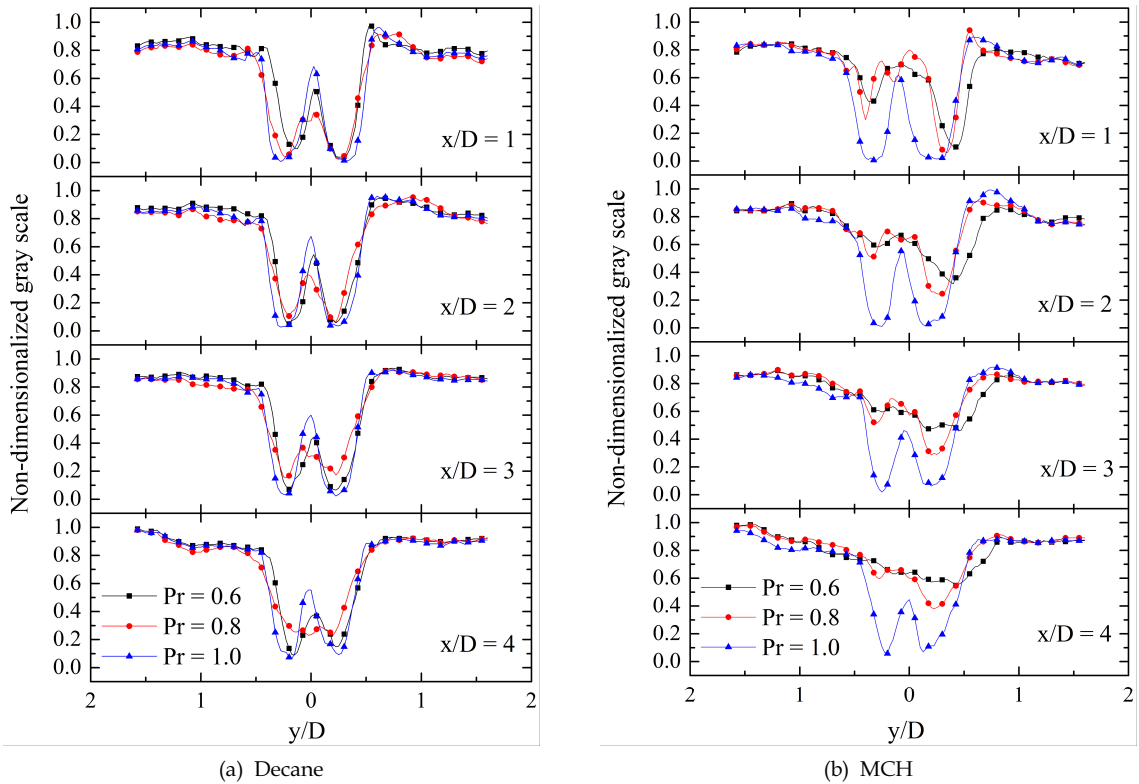


Fig. 6 Non-dimensionalized gray scale along y/D at various axial position.

화 하였다. 그래프는 x/D 의 값이 1~4인 지점에서 평균이미지를 명도에 따라 무차원화 된 값으로 나타낸 것으로 명도가 높을수록 1에 가까운 값을 가진다.

환산압력이 0.6, 0.8인 아임계 조건에서 Decane과 MCH는 다른 거동을 보인다. 그래프 환산압력 0.6 조건의 Decane은 값이 가장 작은 두 지점 사이의 y/D 값이 약 0.475로 x/D 값에 관계없이 동일한 패턴을 보이는데 반해, MCH의 경우 y/D 값이 x/D 값이 1일 때 0.775, 2일 때 0.7로 나타났고 x/D 값이 3, 4의 지점에서는 관측이 불가하였다. 환산압력 0.8 조건에서도 유사한 경향을 확인 할 수 있다. Decane의 경우 최소값 사이의 y/D 값이 약 0.3으로 네 지점에서 유사한 값을 갖는 반면 MCH의 경우 x/D 값이 1, 2, 3인 지점에서 약 0.7의 y/D 값을 가지며 4의 지점에서는 관측이 불가하였다.

Table 3. Temperature and C_p change from initial injection condition to vaporization of Decane and MCH.

Case	$\Delta T(K)$	$C_{P@ \Delta T} (kJ/kg \cdot K)$
Case 1	280	2.09 - 3.57
Case 2	300	2.09 - 3.98
Case 3	319	2.09 - 5.77
Case 4	233	1.83 - 3.39
Case 5	258	1.83 - 4.06
Case 6	283	1.83 - 19.52

환산압력 1.0의 초임계 조건에서 Decane은 아임계 조건과 유사한 형상을 보이며, MCH는 확연히 다른 경향을 보인다. Decane의 경우 환산압력 0.6, 0.8 조건과 동일하게 y/D 값은 네 구간 유사하게 0.45의 값을 나타낸다. MCH의 경우 아임계 조건과는 달리 x/D 값이 1~4인 구간에서

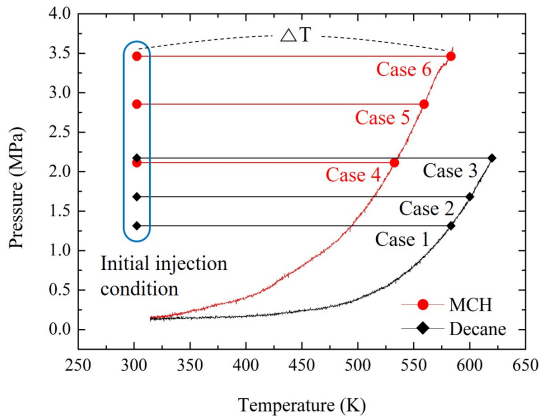


Fig. 7 Phase diagram of Decane and MCH.

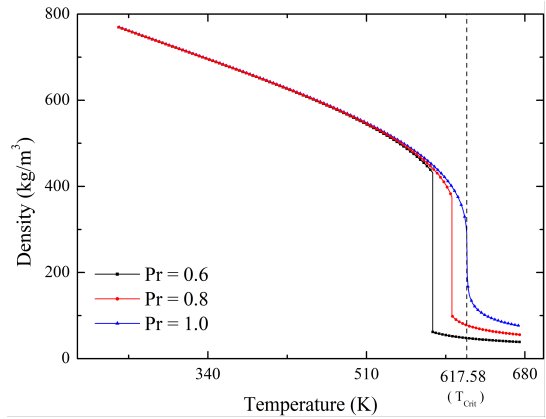


Fig. 9 Density change of Decane with temperature change.

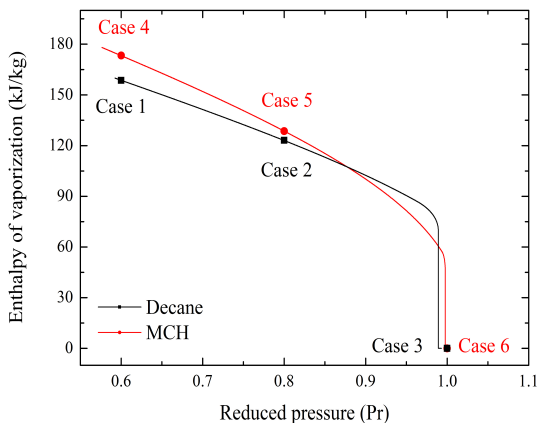


Fig. 8 Change of evaporation enthalpy of Decane and MCH.

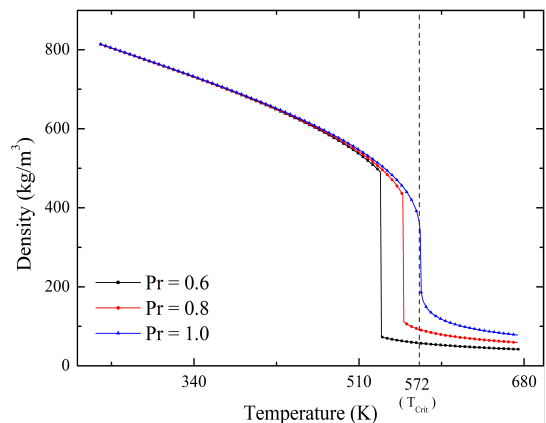


Fig. 10 Density change of MCH with temperature change.

모두 최소값 사이의 거리를 측정할 수 있으며, y/D 값이 약 0.45로 Decane과 유사한 거동을 보인다. 이를 토대로 초입계 상태에서는 아입계 상태에서 관측되었던 액주 주변의 상변화 과정이 나타나지 않는다는 것을 확인 할 수 있다.

3.3 상선도(Phase diagram) 분석

동일한 환산압력과 환산온도 조건 하에서 MCH와 Decane의 거동은 차이를 보인다. MCH의 경우에는 아입계 조건과 초입계 조건에서 분사 이미지가 확연히 다른 것을 확인할 수 있는 반면, Decane의 경우에는 아입계 조건과 초입계 조건의 이미지가 유사하게 나타난다.

각 케이스별로 초기 인젝션 상태에서 상변화가 일어나기까지의 온도변화량이 Fig. 6에 나타나 있다. Case 1-3은 Decane의 실험조건이며, Case 4-6은 MCH의 실험조건이다. Decane의 경우 분사 후 경계면에서 상변화가 일어나기 까지 필요로 하는 온도변화량이 큰 반면, MCH의 경우는 Decane에 비해 상대적으로 적은 온도변화량이 필요하다.

Table 3은 초기 인젝션 온도(300 K)로부터 기화되기까지의 온도와 정압비열의 변화량을 나타낸 자료이다. MCH와 Decane의 아입계 조건 실험에서 초기 인젝션 온도와 실험조건 사이의 정압비열의 차는 약 1.5 - 2.2 (kJ/kg · K)이다.

Decane의 초임계 조건 실험인 Case 3에서 초기 인젝션 온도와 실험조건 사이의 정압비열의 차는 $3.68 \text{ (kJ/kg} \cdot \text{K)}$ 로 아임계 조건과 큰 차이가 없음을 볼 수 있다. 반면 MCH의 초임계 조건 실험인 Case 6의 경우 정압비열의 차는 $17.69 \text{ (kJ/kg} \cdot \text{K)}$ 로 아임계 조건 실험과 크게 차이가 난다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 Decane과 MCH의 온도변화에 따른 밀도변화의 그래프이며 아임계 조건에서 상변화 시 급격한 밀도변화가 일어남을 알 수 있다[12].

Case 1, 2의 이미지에서 보이는 중앙이 밝은 형상의 액주는 경계면에서의 기화현상이 거의 발생하지 않는다는 것을 의미하며, Case 4, 5의 급격한 팽창에 의해 불규칙한 분사패턴을 보이는 액주 이미지는 연료와 질소사이 경계면에서의 활발한 기화현상이 발생한다는 것을 의미한다. 초임계 상태에서 유체는 액체상태와 유사한 밀도를 가지며 표면장력이 거의 사라져 초임계 유체의 특성에 의해[1] Case 3, Case 6과 같은 중앙이 밝은 형상의 액주를 형성한다.

4. 결 론

본 실험에서는 케로신 연료의 주성분 중 서로 다른 임계점을 가진 탄화수소 유체인 Decane과 MCH(methylcyclohexane)을 사용하여 임계점 차이가 근임계 주위환경으로 분사되는 제트의 상변화에 미치는 영향을 연구하였다. 고속카메라를 활용하여 Shadowgraph 이미지를 촬영하였으며, 분사 순간이미지와 평균이미지, 상선도 분석을 수행하였다.

두 유체 모두 공통적으로 초임계 조건에서 연료와 질소 사이 경계면의 밀도변화가 적어 중앙이 밝은 형상의 액적을 나타낸다는 것을 확인하였다.

아임계 조건에서 기화되기까지 상대적으로 적은 온도변화량이 필요한 MCH는 임계온도 조건에서 분사 시 경계면의 기화작용이 활발해 제트가 축 방향으로 진행할수록 불규칙한 분사패턴

을 보이며 급격히 분산되는 형태의 액주 형상을 보인다. 필요한 온도 변화량이 큰 Decane은 상대적으로 액주 표면에서의 기화량이 적어 액주의 경계가 제트 후방에서 뚜렷하게 나타나는 특징을 보인다. 하지만 같은 온도변화량이 필요하다더라도 임계점 부근에서는 증발엔탈피가 0에 가까워져 기화과정이 아닌 초임계 유체로의 상변화가 일어나고 아임계 조건과 같은 급격한 밀도변화가 없어 중앙이 밝은 형상의 액주가 유지된다. 임계점이 다른 두 유체의 거동은 혼합물의 거동에도 영향을 있을 것이라 생각된다.

5. 후 기

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 개인기초연구지원사업(2016R1D1A1B04934852) 및 선도도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구결과입니다.

References

1. 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, pp. 8-13, 2012.
2. Shin, B.C., Kim, D.H., Son, M., Lee, K.W., Song, W.S., Koo, J.Y. and Kwon, O.C., "Macroscopic Analysis on Supercritical Transition of Liquid Hydrocarbon Fuel," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 4, pp. 26-33, 2016.
3. Shin, B.C., Kim, D.H., Son, M. and Koo, J.Y., "Effect of Supercritical Environment on Hydrocarbon-fuel Injection," *Journal of Thermal Science*, Vol. 26, No. 2, pp. 183-191, 2017.
4. Fan, X., Yu, G., Li, J., Zhang, Z. and Sung, C.J., "Investigation of Vaporized Kerosene

- Injection in a Supersonic Model Combustor," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 22, No. 1, pp. 103-110, 2006.
5. Branam, R. and Mayer, W., "Characterization of Cryogenic Injection at Supercritical Pressure," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 3, pp. 342-355, 2003.
 6. Kim, D.H., Lee, K.W., Son, M. and Koo, J.Y., "Visualizations of Gas-centered Swirl Sprays in Sub to Super Critical Conditions," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 18, No. 3, pp. 26-33, 2014.
 7. Mayer, W., Schik, A., Schweitzer, C. and Schaffler, M., "Injection and Mixing Processes in High Pressure LOX/GH2 Rocket Combustors," *32nd Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Lake Buena Vista, F.L., U.S.A., AIAA 1996-2620, July 1996.
 8. Smith, J., Klimenko, D., Clauss, W. and Mayer, W., "Supercritical LOX/Hydrogen Rocket Combustion Investigations Using Optical Diagnostics," *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Indianapolis, I.N., U.S.A., AIAA 2002-4033, July 2002.
 9. Kim, T.H., Kim, Y.M. and Kim, S.K., "Modeling for Gaseous Methane/Liquid Oxygen Combustion Processes at Supercritical Pressure," *Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference*, Jeju, Korea, pp. 85-88, Nov. 2010.
 10. Kang, J.S., Hu, J.Y., and Sung, H.K., "Analysis on Flame Structure of Surrogate Kerosene/GOx and Numerical Simulation of Combustion in a Coaxial Shear Injector under Supercritical Conditions," *The Korean Society of Propulsion Engineers Spring Conference*, Seoul, Korea, pp. 330-335, May 2014.
 11. Salgues, D., Mouis, G., Lee, S.Y., Kalitan, D., Pal, S. and Santoro, R., "Shear and Swirl Coaxial Injector Studies of LOX/GCH4 Rocket Combustion Using Non-Intrusive Laser Diagnostics," *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, N.V., U.S.A., AIAA 2006-757, Jan. 2006.
 12. Kim, K.J., Heo, J.Y., Kim, J.C., Koo, J.Y. and Sung, H.G., "A Comparative Study of Single Component Thermophysical Properties using the Real Gas Equation of State at Supercritical Conditions," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 39-51, 2010.