

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2018.22.1.001>

아임계 및 초임계에서 액체 질소 분류의 온도 분포

이현창^a · 김해솔^a · 조성호^a · 성홍계^b · 윤영빈^{a,c,*}

Temperature Distribution of Liquid Nitrogen Jet at Sub- and Supercritical States

Hyunchang Lee^a · Haisol Kim^a · Seongho Cho^a · Hong-Gye Sung^b · Youngbin Yoon^{a,c,*}

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

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

^cInstitute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

ABSTRACT

Temperatures of cryogenic nitrogen jet inside an injector and at three different downstream positions (0.9, 10.6, and 28.1d) were measured with thermocouples in sub- and supercritical states. The jet temperature decreased while cooling the supply line and injector. The jet experienced from flash boiling, boiling and then no boiling according to decreasing temperature. As an analogy to flash-boiling at the subcritical state, pseudo-flash boiling has been assumed considering the existence of pseudo-boiling at the supercritical state. By showing an area where the temperature did not increase downstream, the plausibility of pseudo-flash boiling is proposed.

초 록

아임계 및 초임계에서 액체질소 분류의 온도가 분사기 내부와 세 개의 축방향 하류 위치(0.9, 10.6, 28.1d)에서 열전대를 이용하여 측정되었다. 액체질소는 공급라인과 분사기를 냉각하며 분사되므로, 분류의 온도는 시간에 따라 감소한다. 이때 챔버와 분사기 사이에 분사 차압이 존재하므로, 아임계에서 분류는 감압비등에서 비등 그리고 비등이 일어나지 않는 상태로 변화한다. 초임계에서 가짜끓음이 존재함에 착안하여, 가짜 감압비등의 존재에 대해 가정하였으며, 실제로 초임계에서도 아임계와 유사하게 일정 온도 영역에서 하류에서 온도의 변화가 없는 구간이 확인되었으며, 이를 바탕으로 가짜 감압비등이 존재할 수 있음을 보였다.

Key Words: Pseudo-boiling(가짜끓음), Liquid Nitrogen Jet(액체질소분류), Supercritical Fluids(초임계 유체), Flash Boiling(감압비등)

Received 15 March 2017 / Revised 30 June 2017 / Accepted 5 July 2017

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

로켓 엔진에서 연소는 초임계 환경에서 이루어진

다. 이때, 연료와 산화제의 농도 분포를 이해하고 예측하는 것은 연소기 설계에서 매우 중요하며, 이를 위한 초임계 분무 연구가 필수적이다. 그동안 초임계 분무 분류(jet)의 연구가 많이 이루어졌는데, 이는 분류가 유체역학적으로 비교적 단순하여 초임계 현상의 특징을 살펴보기 위해 적합하기 때문이다.

Mayer 등[1], Branam과 Mayer[2], Chehroudi 등[3]이 back light imaging, 라만 산란 측정 등을 통해 초임계 분류의 특징을 연구해 왔고, 관련 연구는 Oschwald 등[4]에 잘 정리되어 있다. 이 논문에 따르면, 초임계 분무의 특징은 첫째 표면장력이 존재하지 않으므로, 아임계에서와는 외관이 다르게 나타난다. 아임계에서는 액주로부터 분열되어 나오는 액적을 확인할 수 있지만, 초임계에서는 액적의 형성 없이 마치 밀도가 다른 두 기체가 섞이는 것처럼, 빗(comb)과 같은 형상으로 분류가 떨어져 나와 주변 대기와 혼합되는 것을 볼 수 있다. 둘째, 초임계 분무에서 가짜끓음(pseudo boiling)을 고려해야 한다. 초임계에서는 액상과 기상의 차이가 존재하지 않으므로, 상변화도 일어나지 않지만, 일정구간(가짜끓음 온도)에서 열용량이 매우 크게 증가하며, 이때 작은 온도변화에 의해 밀도가 크게 변화하는데, 이를 가짜끓음이라 한다. 가짜끓음 온도를 기준으로 초임계 유체는 액체 같은 (liquid-like) 영역과 기체 같은 (gas-like) 영역으로 나뉘며, 이에 대한 증거로, 분류에서 관찰되는 출구온도에 따라 크게 변화하는 밀도분포, visual length scale의 횡축방향 비율의 변화, fractal dimension의 변화, 마지막으로 주변 기체와의 혼합정도의 차이를 들었다.

Banuti[5]는 가짜끓음 온도를 열용량이 최대가 되는 온도로 정의하고, 가짜끓음이 일어나는 전이온도를 액상의 엔탈피 변화와 이상기체의 엔탈피 변화로 정의하였다. 이때 현열증가에 사용되는 에너지와 상태변화에 사용되는 에너지를 구분하여 비교함으로써, 임계압력의 3배가 되는 영역까지는 초임계유체에서도 이러한 가짜끓음을 고려해야함을 주장하였다. 이에 더해, Banuti와 Hannemann[6]은 기존 라만산란을 이용한 액체분류의 밀도 측정[1,2]에서 jet core가 없는 것을 유체역학적 분열기구만으로는 설명할 수 없음을 들어, thermal disintegration이라는 분열 기구를 제안하였는데, 이는 분사기를 냉

각하며 들어온 열에 의해 분류의 중심부가 팽창해서 주변 대기와 혼합되지 않은 jet core 영역에서 밀도가 지속적으로 감소했다는 주장이다. 그들은 분사기 내부와 분류를 수치해석 하였고, 이때 분사기 내부의 경계조건으로 단열조건과 등온조건을 각각 적용하여 비교함으로써, 자신들의 주장을 뒷받침하였다. 이때, 분사기와 챔버 사이에는 필연적으로 분사차압이 존재하나, 이들은 이를 고려하지 않았으며, 본 연구에서는 그들 연구의 연장선에서, 아임계 및 초임계에서 분사 차압이 인젝터 출구에서의 분류의 온도 분포, 나아가 열역학적 상태에 미치는 영향을 온도 측정을 통해 살펴보고자 한다. 이를 통해, 라만 산란을 이용한 밀도 측정[1,2]에서 jet core가 없는 원인으로, Banuti와 Hannemann[6]이 제안한 thermal disintegration 외에 다른 분열기구를 추가적으로 제안하고자 한다.

2. 실험장치의 구성

본 연구에 사용된 실험장치에 대해 Fig. 1에 간략한 process diagram, 분사기 형상, 그리고 열전대 위치를 도시하였다.

고압 챔버는 증발되는 액체질소 또는 기체 질소를 통해 가압되었으며, 일정한 압력으로 유지하기 위해 솔레노이드 밸브로 개폐를 반복하였다. 챔버 내부의 압력이 목표한 값에 도달하면, 런탱크에 분사차압에 해당하는 압력을 가하여 분사를 시작하였고, 압력과 온도가 기록되었다. 분사기와 챔버 내부의 압력이 압력계 (Valcom, VPRQ-A3-100K-4C)를 통해 DAQ (National Instrument, USB 6212)를 이용하여 초당 10회 기록하였다. 온도측정을 위해 T-type 열전대가 분사기 표면으로부터 1 mm 위 (Fig. 1b에 점으로 도시, T_{in}), 분사기 출구로부터 0.9d (1.5 mm, T_1), 10.6d (17 mm, T_2), 28.1d (45 mm, T_3)에 놓였으며, 보호관의 직경은 1.6 mm, 노출된 점점의 직경은 0.5 mm 내외이다. 다만, 분사기 내부에 적용된 열전대는 장착상의 문제로 보호관으로 덮여있는 열전대를 사용하였다. 열전대는 대략 2 K 정도 높게 측정하는 것으로 보이며, DAQ (National Instruments, USB 9211)로 초당 2회 기록되었다. 분

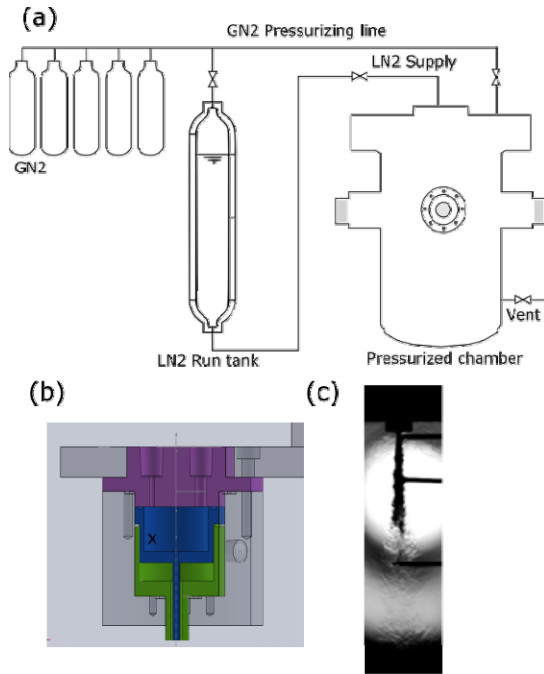


Fig. 1 Experimental setup. (a) Simplified process diagram (b) the drawing of the injector and the position of thermocouple (marked with x). The injector was designed for shear coaxial jet, but only center jet was used. (c) the position of thermocouples for downstream temperature measurement.

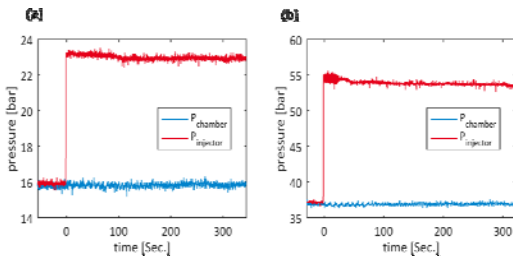


Fig. 2 Temporal pressure variance of injector and chamber at sub- and supercritical states.

사기의 내경(d)은 1.6 mm이며 직선구간은 26 mm이다.

본 연구에서는 아임계와 초임계 상태의 두 가지 경우에 대해 실험을 진행하였는데(질소의 임계점은 126.192 K, 33.958 bar), 이때 측정된 분사기와 챔버 내부의 압력변화가 Fig. 2에 나타나 있으며, 관련된 물성치를 Table 1과 Table 2에 요약하였다.

Table 1. Experiment condition at subcritical case.

	Chamber	Injector
Pressure ¹⁾ [bar]	15.8±0.11	23.0±0.13
Sat. temp. ²⁾ [K]	111.31	118.27
Meas. temp. [K]	113.71 ⁴⁾	120.26 ³⁾
Liq. enthalpy ²⁾ [kJ/kg]	-44.953	-23.979
Vap. enthalpy ²⁾ [kJ/kg]	85.062	77.468

1) Average and standard deviation of temperature from 6855 to 7200 Sec. 2) From Nist Web data [7] 3) Averaged temperature of Tinj from 6886 to 6929 Sec. 4) Averaged temperature of T₃ from 6960 to 7200 Sec.

Table 2. Experiment condition at supercritical case.

	Chamber	Injector
Pressure ¹⁾ [bar]	36.9±0.16	54.0±0.32
Pseudo. boil temp. ²⁾ [K]	128.1	136.72
Meas. temp. [K]	128.91 ⁴⁾	138.32 ³⁾
Enthalpy [kJ/kg]	38.207	41.230

1) Average and standard deviation of temperature from 3978 to 4279 Sec. 2) Cp max point from Nist Web data [7] 3) Injector temperature at 4016 Sec. where variance of gradient was small 4) Averaged temperature of T₂ from 4032 to 4399 Sec.

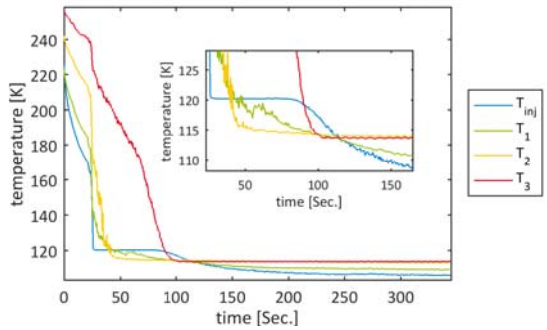


Fig. 3 Temporal variation of temperature in subcritical case. Enlarged graph is in inbox.

3. 결과 및 토의

아임계에서 온도 측정 결과를 분사가 시작된 시점을 원점으로 하여 Fig. 3에 나타내었다.

분사를 위해 런탱크에 압력을 가하면 초기에는 공급관과 분사기 등을 냉각하므로 분사기에 위치한

열전대로부터 측정되는 온도(T_{inj})는 기체의 온도에서 분사기 압력에 해당하는 포화온도로 유지되다가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이 때, 포화온도에 처음 도달한 27초 근처에서는 100% 기체로 나오다가, 포화온도 이하로 떨어지는 80초 직전에는 100% 액체로 나올 것임을 예상할 수 있다. 이 구간에서 액체분율이 증가함에 따라, 모멘텀이 증가하고, 따라서 jet core가 증가하여 하류에서 온도가 점점 감소함을 확인할 수 있다. 여기서 특이한 점은 T_1 과 T_2 가 40초 근처에서 역전되며, 이후에는 두 온도 모두 분사기의 온도보다 낮아 하류로 갈수록 온도가 감소하는 것이다. 측정되는 온도는 유입된 열과 손실된 열의 합에 의해 결정이 되는데, 열유입으로는 분사기에서 출구까지(T_{inj} 에서 T_1 까지)는 아직 덜 냉각된 분사기 벽면으로부터의 열유입을 들 수 있고, 분사기 출구부터 하류로는 주변 뜨거운 대기와의 혼합을 통한 열유입을 들 수 있다. 열손실로는 분사기와 챔버간의 분사차압에 의한 감압비등(flash boiling)이 T_{inj} 부터 하류까지 발생함을 들 수 있다. 감압비등에 의해 손실되는 열은 액체분율이 증가할수록 증가할 것이므로 시간이 지남에 따라 액체분율이 증가하므로 T_1 이 더욱 감소하는 것을 설명한다. 이러한 감압비등은 T_2 지점에 이를 때까지 지속되어, T_1 보다 더 낮은 온도에 도달하게 된다. 감압비등은 T_{inj} 이 챔버의 압력에 해당하는 포화온도에 이르는 114초 부근까지 계속되며, T_{inj} , T_1 , T_2 , T_3 의 온도가 모두 같으므로, 측정되는 전체 하류영역(약 30d까지)에서 유체가 끓고 있는 상태임을 알 수 있다.

이러한 관계는 상태도를 통해 더 확연하게 확인할 수 있으므로 이를 Fig. 4에 나타내었다. 실선은 vapor liquid equilibrium line이며, CP는 임계점이다.

상태도는 15.8 bar와 23 bar에서의 포화점 A, B를 기준으로 I, II 두개의 영역으로 나눌 수 있다. T_{inj} 가 I 영역에 해당하는 $1,2$ 번점($T_{sat,inj} \geq T_{inj} > T_{sat, ch}$ 여기서 아래첨자 sat는 포화상태를, inj와 ch는 각각 분사기와 챔버를 의미한다.) 또는 3번점($T_{inj} = T_{sat, ch}$)에서 분사될 때, 분사기 출구에서 감압비등 또는 비등에 의한 끓음이 발생하여 온도가 하류에서 더 감소하거나 챔버의 포화온도로 유지된다. 그러나 II 영역에 이르면, 즉 4번점($T_{inj} < T_{sat, ch}$)에 해당하면 분사기 출구에서 끓음이 바로 일어나지 않고, 일단 온

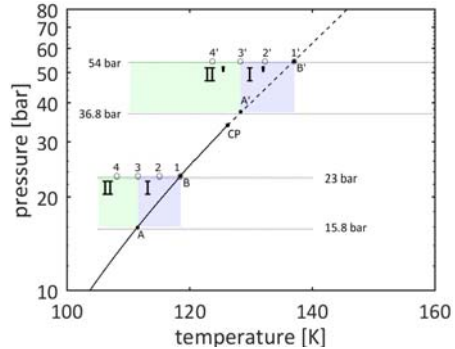


Fig. 4 Phase diagram of nitrogen.

도가 증가하게 되고, 이후 끓음이 발생한다. 끓음이 발생하는 영역(I)에서는 급격한 밀도 변화를 예측할 수 있고, 먼저 현열이 증가하는 영역(II)에서는 상대적으로 밀도변화가 덜할 것임을 예측할 수 있다.

이 때, 유념할 것은 이러한 상변화를 위해 필요한 열은 어디에서 오느냐 하는 점이다. Table 1에 요약되어 있듯, 23 bar에서 액체의 엔탈피는 15.8 bar에서 액체와 기체의 엔탈피를 기준으로 계산했을 때, 주변의 열유입이 없더라도 약 16%는 기체로 변화할 수 있음을 보인다. 뿐만 아니라, Fig. 3에서도 측정되었듯, 상평형에 의해 액체는 자신의 온도를 낮추더라도 상변화에 에너지를 사용한다. 그러므로 외부의 열유입이 없더라도(주변 대기와의 혼합), 상변화는 일어나며, 이로 인한 밀도 감소, 즉 팽창이 발생할 수 있다는 점이 중요하다.

이러한 상태가, 즉 분사차압에 의한 감압비등이, 가짜끓음 온도를 기준으로 초임계에도 유사하게 존재할까?

Fig. 5에 초임계 상태에서 온도변화를 분사가 시작된 시점을 원점으로 나타냈다. 분사가 시작되고 냉각이 이루어짐에 따라 T_{inj} 가 급격히 감소하다가 31에서 42초 영역에서 그 기울기가 완만해지고, 이후 다시 급격해짐을 알 수 있다. 이 때 기울기가 완만한 영역에서 평균온도는 대략 138.32 K 근처인데, 이는 분사기 내부 압력에 해당하는 가짜끓음 온도임을 알 수 있다(Table 2 참고, 열전대의 오차 고려). 뿐만 아니라, 48초 이후에 T_2 는 128.9 K으로 유지되는데, 이는 챔버의 가짜끓음 온도에 해당한다. 그러

므로 이전 연구[4]에서 밝혀진 바와 같이, 초임계 상태에서 가짜끓음이 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

여기서 주목할 점은 43초 근방에서 T_{inj} 부터 T_2 까지 온도가 유사하다는 점이다. T_2 가 10d에 위치해 있고, 50초 이후에서는 T_1 보다 더 높은 온도를 유지함을 감안할 때, 43초 근방에서 하류에서 온도가 일정하다는 것은 주변 대기와의 혼합을 통한 열유입을 상쇄할 열손실이 있음을 의미한다. 이는 다시 Fig. 4의 상태에서 확인할 수 있다. Fig. 4에서 파선은 Banuti [5]에 의해 제안된 가짜끓음이 발생하는 widom line ([5]에서 식(2), $\frac{p_{pb}}{p_{cr}} = \exp\left[A\left(\frac{T_{pb}}{T_{cr}} - 1\right)\right]$), 여기에서 p는 압력, T는 온도 아래첨자 pb와 cr은 각각 가짜끓음과 임계상태를 나타내며 A는 유체에 따라 주어지는 상수인데, 질소에는 5.6을 사용하였다) 이다. 아임계에서와 마찬가지로, 분사기와 챔버의 압력에 해당하는 가짜끓음 온도로부터 A'점과 B'점을 정할 수 있으며, 이를 바탕으로 가짜 감압비등이 일어나리라 예상하는 I'영역과 액체같은 초임계 유체가 분사되어 먼저 온도가 증가하고 이후 가짜끓음이 일어나리라 예상하는 영역에 도달하는 II'영역으로 나눌 수 있다. I'영역에서는 가짜 감압비등이 발생하므로 밀도변화가 심한 반면 온도의 변화는 적고, II'영역에서는 가짜감압비등의 발생 없이 액체같은 초임계 유체로 유지되므로, 밀도변화가 심하지 않아 jet core의 관측이 예상된다.

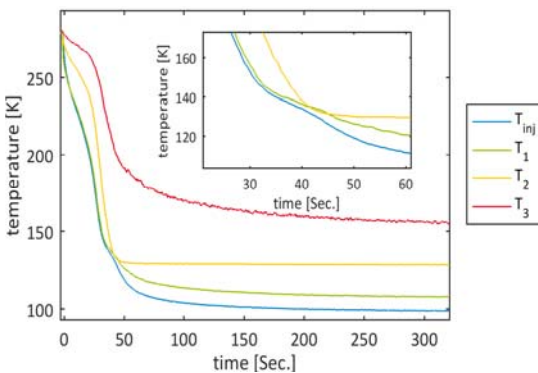


Fig. 5 Temporal variation of temperature in supercritical case. Enlarged graph is in inset.

Fig. 5에서 T_{inj} 또는 T_1 이 분사기와 챔버의 압력에 해당하는 가짜끓음 온도, $T_{pb,inj}$ 와 $T_{pb,ch}$ 사이에 위치하는 31초부터 42초 영역에서 Fig. 4의 I'영역에 해당하는 1',2',3'번점을 지나게 된다. 이때 온도의 변화가 매우 적은데, 이는 해당 온도에서 비열이 크게 증가하였기 때문이다. 이러한 비열의 증가는 Banuti가 제안하는 가짜끓음 관점에서 주변 대기와의 혼합을 통한 입열의 대부분을 현열 증가 보다는 밀도 팽창을 위해 사용했기 때문이라 유추할 수 있다. 따라서 비열의 증가로 인한 작은 온도 변화에서 큰 입열이 존재하고, 과잉된 입열은 팽창에 사용되었다. 대략 50초 이후에는 T_{inj} 가 충분히 냉각되어, 하류에서 온도가 증가하고, T_2 가 가짜끓음 영역에 존재하는, 그래서 밀도의 변화가 적은 구간이 존재하여, jet core 영역에서 밀도가 일정한 구간이 존재할 것임을 예측할 수 있다. 이는 아임계에서 상평형에 해당하는 힘이 초임계에도 존재하며, 따라서 가짜 감압비등의 존재가 있음을 암시한다.

4. 결 론

초임계 상태는 액체와 기체의 구분이 없는 균일한 상태로 이해되지만, 이전 연구들은 임계압력과 온도 이상에서 유체는 액체와 기체 간에 존재하던 불연속적인 경계는 사라지더라도, 여전히 액체처럼 또는 기체처럼 행동하는 영역이 있음을 보였고, 그 중 하나가 가짜 끓음이었다. 본 연구에서는 초저온 액체 분사시, 분사기에서 필연적으로 존재하는 분사차압과 초저온 유체에 의한 시스템의 냉각이 있음에 착안하여, 아임계에서 감압비등이 발생함을 보였고, 이와 유사한 현상이 초임계에서도 가짜끓음 온도를 기준으로 발생할 수 있는지를 밝히고자 했다. 측정된 하류에서의 온도를 바탕으로, 아임계에서와 마찬가지로 초임계에서도 가짜 감압비등이 발생할 수 있음을 하류에서 증가하지 않는 온도로 제안하고자 한다.

후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861) 및 산업통상자원부의 산업기술혁신사업의 지원을 받아 수행된 연구(No.10067074)이며, 이에 감사 드립니다.

References

1. Mayer, W., Telaar, J., Branam, R., Schneider, G. and Hussong, J., "Raman measurements of cryogenic injection at supercritical pressure," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 8-9, pp. 709-719, 2003.
2. 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.
3. Chehroudi, B., Cohn, R. and Talley, D., "Cryogenic shear layers: experiments and phenomenological modeling of the initial growth rate under subcritical and supercritical conditions," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 23, No. 5, pp. 554-563, 2002.
4. Oswald, M., Smith, J., Branam, R., Hussong, J., Schik, A., Chehroudi, B. and Talley, D., "Injection of fluids into supercritical environments," *Combustion Science and Technology*, Vol. 178, No. 1-3, pp. 49-100, 2006.
5. Banuti, D., "Crossing the Widom-line- Supercritical pseudo-boiling," *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 98, pp. 12-16, 2015.
6. Banuti, D.T. and Hannemann, K., "The absence of a dense potential core in supercritical injection: A thermal break-up mechanism," *Physics of Fluids (1994-present)*, Vol. 28, No. 3, 035103, 2016.
7. "Thermophysical Properties of Fluid Systems" retrieved 01 Mar. 2017 from <http://webbook.nist.gov>.