

## 초임계에서 액체 질소 분류의 역광 사진

이현창\* · 윤영빈\*\*†

### Backlight image of liquid nitrogen jet at supercritical state

Hyunchang Lee\* · Youngbin Yoon\*\*†

#### ABSTRACT

Liquid nitrogen jet has been imaged by using backlight method. In addition to the images, simultaneously measured temperature by thermocouples has been used to investigate the role of 'Pseudo-flash-boiling' in breakup of the supercritical jet. The backlight image can provide qualitative appearance of the jet, but not the density profile for the high density of injected fluid.

#### 초 록

극저온 액체 질소가 초임계 상태에서 분사될 때 역광기법(backlight method)을 이용하여 사진을 얻었다. 이 때, 유체의 온도를 함께 측정하였고, 이를 바탕으로 가짜 감압비등이라는 새로운 분열기구를 제안하고자 하였으나, 역광기법은 정성적인 분무의 외관은 보여주지만 분사되는 유체의 큰 밀도로 인하여 밀도 변화를 보여줄 수 없었다.

Key Words: Supercritical jet, Pseudo-flash-boiling, backlight image

#### 1. 서 론

로켓엔진의 고압 환경은 초임계 연소가 일어나게 하고, 따라서 초임계 분무에 대한 이해가 선행되어야 한다. 미국과 독일에서 비교적 간단한 형상인 분류에서 극저온 질소를 분사하고 이를 역광 사진(backlight image)이나 라만 산란광의 측정을 통해 관련 연구가 이루어졌는데, 이는 Oswald 등[1]에 의해 잘 정리되어 있다. 위 논문[1]에 따르면, 초임계에서 액체와 기체의 경계

가 사라지기 때문에 사진으로 보이는 외관이 다르며, 분류는 마치 서로 밀도가 다른 두 기체가 혼합되는 것처럼 빛(comb)과 같은 형상으로 섞인다. 또 다른 중요한 발견으로 가짜끓음(Pseudo-boiling)을 들었다. 초임계에서 액체와 기체가 존재하지 않지만, 액체같은(liquid-like) 유체와 기체같은(gas-like) 유체가 존재하여 아주 작은 온도 범위에서 밀도가 크게 변화한다고 설명하였다. 가짜끓음에 대한 연구는 이후 Banuti[2]와 Banuti와 Hannemann[3]에 의해 추가적으로 이루어졌다. 이들은 기체같은 그리고 액체같은 유체의 경계를 의미하는 widom line을 제시하였고[2], Oswald의 논문[1]에 정리되어

\* 서울대학교 차세대우추진연구센터

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

† 교신저자, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

있는 기존 라만산란광의 측정을 통한 질소 분류의 밀도 측정에서 존재하지 않던 jet core의 원인으로 thermal disintegration이라는 새로운 분열기구를 제안하였다[3]. 우리는 이들 연구의 연장선에서 그들이 고려하지 않았던 분사차압에 주목하여, 가짜감압비등(Pseudo-flash-boiling)이라는 새로운 분열기구를 제안하였다[4]. 본 논문에서는 같은 조건에서 측정된 역광 사진을 분석하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 가짜 감압비등

질소의 상태를 Banuti[2]가 제안한 widom line과 액체같은 유체에서 기체같은 유체로 전이되는 온도와 함께 Fig.1에 도시하였다.

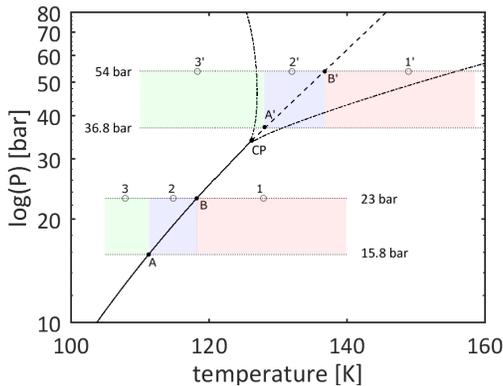


Fig. 1 Phase diagram of nitrogen.

실선은 액상과 기상의 상평형을 나타내고 CP는 임계점, 두 개의 1점 쇄선은 전이온도, 파선은 widom line이다. 극저온 액체를 분사할 때 시스템 냉각에 필요한 열에 의해 유체는 초기에 기체로 분사되다가 액체로 분사된다. 분사기의 압력이 23bar이고 챔버의 압력이 15.8bar라 가정할 때, 분사기 내부 유체의 상태가 1번 상태일 때 일반적인 기체 분류이다. 반면 분사기 내부 압력에 해당하는 포화온도보다는 낮지만, 챔버 내부 압력에 해당하는 포화온도보다 높을 때(Fig.1의 2번점) 감압비등(flash boiling)이 일어난다. 마지막으로 유체의 온도가 챔버 내부 압력에 해당하

는 포화온도보다 낮아지면(3번점) 일반적인 액체 분류의 형상을 띠게 된다. 감압비등이 일어나게 되면 급격한 비등과 이로 인한 밀도감소가 일어난다. 이와 비슷한 형상이 초임계에서도 일어날 것이라 추측할 수 있다. Fig.1에서 분사기의 압력이 54bar 챔버의 압력이 36.8bar라 할 때, 1' 상태는 기체같은 유체의 분사, 3'는 액체같은 유체의 분사, 마지막으로 2'는 가짜 감압비등이 발생할 것으로 예상되는 부분이다.

### 2.2 측정 장치(Experimental setup)

자세한 실험장치에 대한 설명은 [4]에 나와 있으며, 여기에서는 역광 사진을 측정하기 위한 장치만 설명한다.

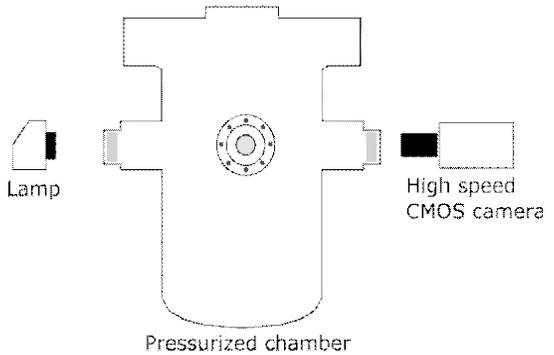


Fig. 2 Measurement setup.

광원으로는 metal-halide 램프(Photron, HVC-SL)를 사용하였고, 고속 CMOS 카메라(Photron, SA5)와 렌즈(Canon, 180mm f#3.5 macro)를 사용하였다. 초당 125회 촬영하였고, 노출시간은 1  $\mu$ s였다. 분사기 내부와 하류에서(0.9d, 10.6d, 28.1d, 여기서 d는 분사기 내경이며 1.6 mm였다.) 열전대를 이용하여 온도를 측정하였다.

### 2.3 온도측정결과

열전대를 통해 측정한 분사기 내부( $T_0$ )와 하류에서 분사시점(0초)이후 온도( $T_1, T_2, T_3$ )의 변화를 Fig. 4에 도시하였다. 먼저  $T_{inj}$ 가 분사이후 급격히 감소하다가 분사기의 압력(54bar)에 해당하는 가짜 끓음온도인 138 K 근처에서 완만하다가 다시 감소하는 것을 볼 수 있고,  $T_2$ 가 챔버의 압력

(36.9 bar)에 해당하는 가짜끓음 온도인 129 K 근처에서 유지되고 있는 것을 확인 할 수 있다. 특히 대략 20-40초 영역에서 분사기 내부에서 T2의 위치까지 온도가 일정한 것을 확인할 수 있는데, 이는 본 연구에서 그 존재를 규명하고자 하는 가짜 감압비등에 의한 급격한 팽창으로 인해 분사기 내부에서 들어오는 열과 대기와 혼합으로 인한 열유입이 있음에도 온도가 일정하게 유지되는 것으로 생각되는 영역이다.

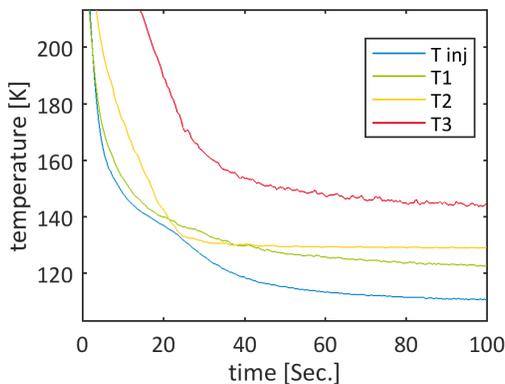


Fig. 3 Temporal variation of temperature in supercritical state.

### 3. 역광 이미지

초임계 상태에서 열전대를 이용하여 온도를 측정하면서 역광 이미지를 함께 촬영하였고, 몇 장의 사진이 측정된 시간 및 분사기 내부 온도와 함께 Fig.4에 도시되었다.

먼저 분사기 내부에서 측정된 액체의 온도가 감소함에 따라 jet core가 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 온도 감소에 따른 밀도의 증가로 인한 모멘텀의 증가로 이해할 수 있다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯, 20-40초 영역에서 가짜 감압비등에 의한 급격한 밀도 변화가 분류의 하류 10d 근처까지 예상된다. 그러나 Fig. 4에서 유체의 밀도는 이미 충분히 커서 들어오는 빛이 투과되지 못하고, 따라서 밀도 변화로 인한 이미

7.2 Sec 15.2 Sec 23.2 Sec 31.2 Sec 39.2 Sec  
154.4 K 141.1 K 133.8 K 124.6 K 118.8 K

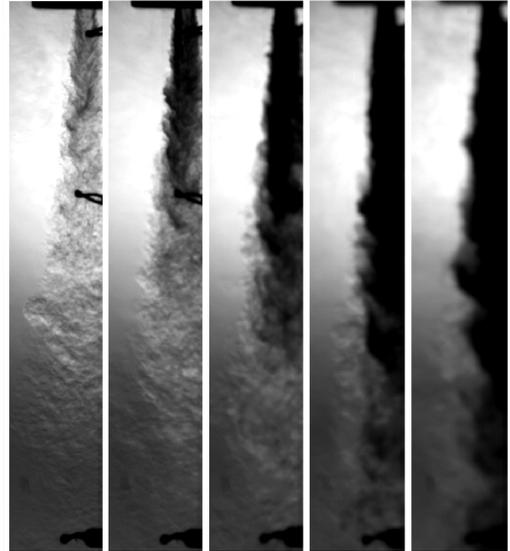


Fig. 4 Backlight image of nitrogen jet at supercritical state  
지의 변화도 관찰되지 않았다.

### 4. 결론

본 연구에서는 질소 분류의 초임계 상태의 분사에서 새로운 분열기구로 가짜 감압비등의 존재를 규명하고자 했다. 열전대를 통한 온도 측정을 통해 어느 정도 가짜 감압비등의 존재를 유추할 수 있지만, 이때 급격하게 변화하는 밀도 변화의 측정이 필요하다. 역광 이미지로는 유체의 큰 밀도로 인해 상기의 목적을 이룰 수 없고, 대안으로 라만 산란 신호의 측정을 통한 밀도장의 측정이 본 연구실에서 진행 중이다.

### 참고 문헌

- OSCHWALD\*, M., Smith, J., Branam, R., Hussong, J., Schik, A., Chehroudi, B., & Talley, D. (2006). Injection of fluids into supercritical environments. *Combustion Science and Technology*, 178(1-3), 49-100.

2. Banuti, D. (2015). Crossing the Widom-line - Supercritical pseudo-boiling. *The Journal of Supercritical Fluids*, 98, 12-16.
3. Banuti, D. T., & Hannemann, K. (2016). The absence of a dense potential core in supercritical injection: A thermal break-up mechanism. *Physics of Fluids* (1994-present), 28(3), 035103.
4. Lee, H., Kim, H., Cho, S., Sung, H., Yoon, Y., "Temperature distribution of liquid nitrogen jet at sub- and supercritical states" Submitted to *journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 2017.