

감압 비등에 의한 상압 환경에서의 압력식 와류 노즐의 분무 특성

김원호* · 윤웅섭**†

Spray Characteristics of a Pressure Swirl Nozzle for an Ambient Condition due to Flash Boiling

Wonho Kim* · Woongsup Yoon**†

ABSTRACT

Flash boiling takes place when the thermodynamic state of the liquid deviates from its saturation limit over which the liquid temperature exceeds by a certain degree of superheat. The liquid jet introduced into the lower pressure zone than the liquid saturation pressure experiences a sequence of the atomization and disintegrated into numerous faster and smaller droplets. In the present study spray characteristics for a flash swirl spray were experimentally investigated. Injectant temperature is raised by a high frequency dielectric heating method and local spray characteristics are instantly measured by Global Sizing Velocimetry (GSV, TSI Inc.). Dependence of dimensionless superheat degree and injection pressure on total and local SMDs and mean droplet size is quantitatively examined. The flash swirl spray has the relation in the injection pressure and nozzle diameter in order to determine the spray quality, including the dimensionless superheat degree. Small droplets occur in the void core and local droplet size distributions largely depend on the dimensionless superheat degree and the injection pressure.

Key Words: Flash Boiling (감압 비등), Dimensionless Superheat Degree (무차원 과열도), Pressure Swirl Nozzle (압력식 와류 노즐), Spray Characteristics (분무 특성)

1. 서 론

최근 화석 연료의 대안으로서 고 에너지 밀도를 가지는 금속 입자(Al, Mg등)가 제시되고 있다[1]. 이러한 금속 입자의 연소에 있어 감압 비

등과정을 통하여 과열된 유체를 산화제로 분사하는 것은 부가적인 열역학적 분열원을 공급함으로써 분무 특성을 개선 할 수 있기에 상온의 유체를 분사하는 경우에 비해 유리하다[2]. 또한 액막에서 기화 과정을 통하여 생성되는 수증기는 금속 입자에 보다 큰 열에너지를 전달하여 접착이 용이하게 하고, 2상 핵 응축 과정에서 접촉 면적을 증대시킨다는 점에서도 유리하다. 여기서 감압 비등이란 특정 온도의 액체를 포화

* 연세대학교 기계공학과

** 연세대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

압력보다 낮은 곳으로 분사시 급격한 감압 현상에 의해 과열된 유체가 보유한 에너지의 일부를 상변화에 필요한 에너지로 소비하여 액막 표면에서 분열 (Micro-explosion)을 통하여 발생하는 2차 미립화의 한 현상이다.

감압 비등은 1960년대부터 다양한 실험 조건에서 연구되었다[3]. Nagai등[4]에 의하여 무차원 과열도가 정의되고, 무차원 과열도의 증가로 인한 Sauter mean diameter (SMD)의 감소가 관찰되었다. 내부 유동의 변화에 따라 외부 분무 특성과의 관련성이 연구되었고[5], 에멀전과 같은 2유체에서의 감압 비등에 관한 연구 또한 수행되었다[6]. 최근에는, Vincent등에 의해 감압 비등 단계 이전 천이 영역에 대한 연구가 진행되고 있다[7]. 이처럼 감압 비등에 관한 연구는 다양한 조건하에서 수행되어 왔으나, 그 대부분이 제작 및 분무 특성을 분석하는데 있어서의 용이성으로 인해 대부분 단공 노즐의 경우로 국한되었다. 그러나 과열된 단일 유체 분무는 비록 감압 비등의 도움에도 액주 분열 양상으로 인해 미세한 분무를 얻는데 한계를 지닌다. 또한 미소 폭발을 통하여 발생하는 수증기가 액적과 분무 내에서 혼합되어, 국소 지역에서의 분무 특성을 구분하여 조사하기 어렵다. 최근 Laser induced exciplex fluorescence (LIEF) 기법[8]을 사용하여 기-액간 구분에 대한 시도가 이루어지고 있으나, 침투 깊이나 분무각 등의 거시적 특성을 조사하는 것으로 한정될 뿐이다. 반면에 중공 원추형 와류 분무는 액막 분열의 결과로 인하여 단공 노즐의 경우에 비해 미립화가 개선된다[9]. 또한 액막 내부 공동의 존재로 인하여 분무 액적과 수증기간의 상변화를 구분하기가 상대적으로 용이하다. 따라서 본 연구에서는 급속 입자 연소시 산화제 분사의 한 방법으로 과열 유체의 중공 원추형 와류 분무(이하 감압 와류 분무)의 분무 특성에 관한 연구를 수행할 것이다.

2. 연구 방법 및 절차

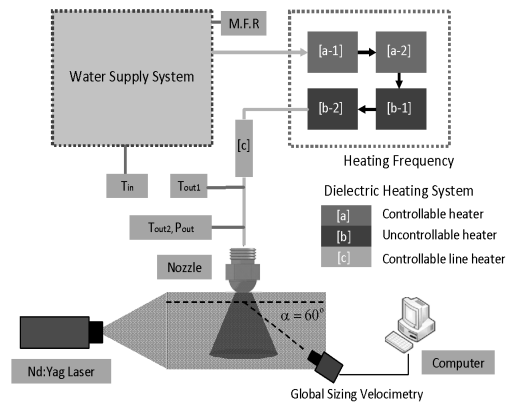


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Figure 1은 실험 장치의 개략도이다. 실험 장치는 기능적으로 네 단계 (공급, 가열, 유체 분사 및 측정 장치)로 구분되어 있다. 원치 않는 기포의 발생을 막기 위하여 간접 가열 방식의 일종인 고주파 유전 가열방식 (High frequency dielectric heating)을 사용하였다[10]. 과열 유체의 액적 크기 및 크기 분포는 GSV를 사용하여 측정하였다. 액적 측정 결과로부터 SMD가 98% 이상의 신뢰도를 갖는 최소한의 액적의 수는 약 15만개이며, 여타의 실험조건에서의 결과 또한 해당 개수의 액적에서 2% 미만의 오차 정도를 보였다. 따라서 해당 개수의 액적을 획득하기 위하여 각 실험 조건에서 4,000장의 이미지를 획득하여 분석하였다.

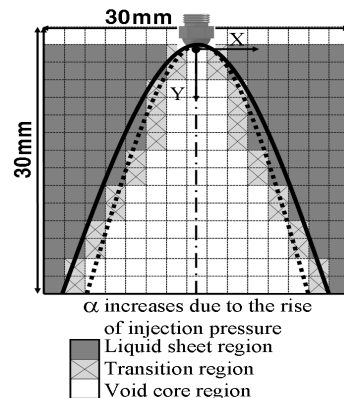


Fig. 2 Categorization of lattice cell

한편 액막과 공동 영역에서 분무 특성을 구분하기 위하여, Fig. 2에서와 같이 수직 방향의 2차원 단면(30×30mm²)에 걸쳐 총 125개의 격자(2mm×2mm)로 구분하여 액적 크기를 구하였다. 그 결과를 통하여 분무 특성을 대표하는 SMD 및 크기 분포 등을 전체, 액막 및 공동으로 구분하여 분석하였다. 0.6, 0.75 및 0.85mm의 직경을 갖는 압력식 와류 노즐에서 물을 분사 유체로 하여 실험을 수행하였으며, 실험 조건은 Table 1에 요약하였다. 여기서 무차원 과열도의 정의는 다음과 같다.

$$\Delta T^* = \frac{\Delta T}{\Delta T_{crit}} = \frac{T_{inj} - T_{sat}(P_o)}{T_{sat}(P_{inj}) - T_{sat}(P_o)}$$

여기서 과열도 ΔT 는 분사 유체의 온도와 외기압에서 포화 수증기 온도와의 차로 정의된다. 무차원 과열도 ΔT^* 는 이러한 과열도를 분사압의 영향을 고려하여 해당 분사압에서 최대 과열 온도인 ΔT_{crit} 로 나눈 값으로서 정의에 의하여 비등 현상이 발생할 경우 무차원 과열도는 1이 된다[4].

한편으로, 액주 분열의 과정을 겪는 단공 노즐의 경우와 달리 압력식 와류 노즐의 경우 상대적으로 두께가 얇은 액막에서 분열이 발생하며 또한 공동 영역에 수증기가 존재하기 때문에 분사압의 분무 특성에의 영향 또한 조사하였다.

Table 1 Injection conditions

P_{inj} (MPa)	T_{inj} (K) and ΔT^*		
0.196	385	388	341
	0.63	0.78	0.94
0.245	390	394	398
	0.64	0.79	0.94
0.294	394	399	404
	0.64	0.79	0.94
0.343	397	403	409
	0.65	0.78	0.94
0.392	401	407	411
	0.65	0.79	0.88

3. 연구 결과 및 토론

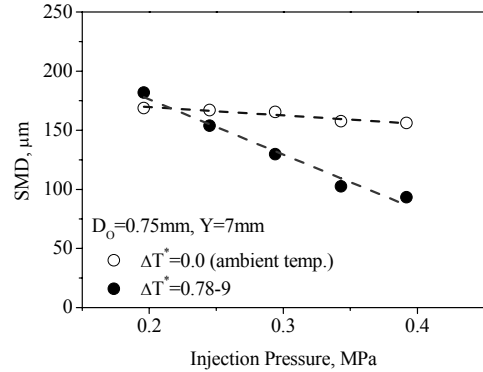


Fig. 3 Comparison of mean SMD for cold and flash swirl spray in the lateral cross-section

Figure 3은 0.75mm 직경의 압력식 와류 노즐에서 상온 조건에서의 와류 분무(이하 상온 와류 분무)와 감압 와류 분무의 분사압 증가에 따른 분무 하류 7mm에서의 횡단면 평균 SMD를 비교한 그림이다. 여기서 횡단면 평균 SMD는 해당 분무 하류에서 횡방향 격자 전체(총 15개)에 대하여 계측된 액적들의 SMD를 의미한다.

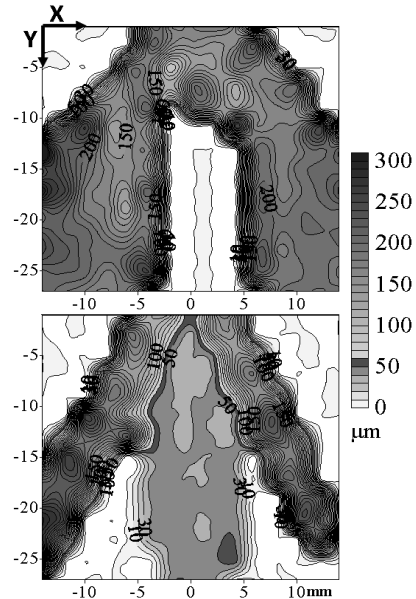


Fig. 4 Contours of SMD due to cold (upper) and flash swirl spray (lower)

Figure 4의 경우에는 Fig. 3에서 상온 및 감압 와류 분무에 관한 국소 SMD 등고선을 나타낸 것이다. 감압 와류 분무에서 횡단면의 평균 SMD는 분사압이 증가함에 따라 상온 분사 조건에서의 경우에 비하여 급격히 감소한다. 상온 와류 분무의 경우, 분무 특성은 관내 난류 등의 수력학적 요인이나 공기 역학적 상호작용 등의 기계적 분열에 크게 영향 받으며, SMD는 분사압력의 0.28-0.44승에 비례하여 감소한다고 알려져 있다[9]. 이에 반하여 감압 와류 분무에서의 급격한 횡단면 평균 SMD 감소는 Fig. 4에서 감압 와류 분무의 경우 분사 축 중심을 따라 수십 μm 의 2차 액적 제트가 존재한다는 점에서 기계적 분열 메커니즘은 동일하므로 액막 내부에서 발생하는 열역학적 현상 때문으로 여겨진다. 이러한 2차 액적 제트 지역은 실험에 사용한 세 가지 직경의 노즐 모두에서 분사 압력 및 무차원 과열도가 증가함에 따라서 관찰되었다. 과열된 단일 유체 분무에서 횡단면 평균 SMD가 과열도에 의존하는 경향은 이전의 다른 연구들을 통하여 확인되었으나[2], 분사 압력에 관한 관련성은 관찰되지 않았다. 과열된 단일 유체 분무에서 분사 압력은 오직 포화 수증기 온도를 결정하는 데만 반영된다[4].

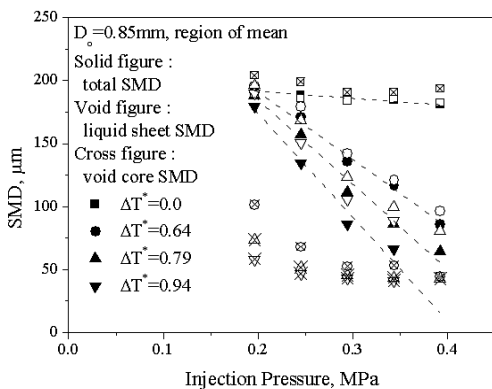


Fig. 5 Dependence of the injection pressure on total and local SMDs

이에 반하여 감압 와류 분무의 경우 횡단면 평균 SMD를 결정하는 데 있어서 무차원 과열도

뿐만 아닌, 분사 압력에의 영향이 관찰된다. 이러한 분사 압력에 대한 횡단면 평균 SMD의 의존성은, 노즐 끝에서부터 분무 하류 방향으로 액막과 공동 영역으로 구분된 종단면 평균 SMD의 결과인 Fig. 5를 통하여 보다 명확히 나타난다. 상온 와류 분무의 경우 공동 영역에서의 종단면 평균 SMD는 액막 및 전체 영역에서의 값들과 큰 차이를 보이지 않으며, 분사압이 증가함에 따라서 그 감소 정도는 미미하다. 이는 Fig. 4의 국소 SMD 등고선과 비교하였을 때, 공동 영역에 수십 μm 의 2차 액적 제트 지역이 존재하지 않음을 의미한다. 여기서 공동 영역에서 측정된 액적들은 해당 분사 압력에서 완전 발달하지 못한 분무의 결과이거나, 비록 완전 발달 했더라도 과열 유체의 경우에 비해 줄어든 분무각으로 인한 액막에서의 분열 때문이다.

반면에 감압 와류 분무의 경우 분사압의 증가에 비례하여 액막 및 전체 영역에서의 평균 SMD는 감소하고, 공동 영역에선 수십 μm 의 액적 제트 지역이 존재한다. 이러한 전체 평균 SMD 감소의 기울기는 보다 높은 무차원 과열도에서 더욱 크게 나타나는데, 이는 액막에서 과열도의 증가로 인하여 분무 특성이 개선되고, 공동 영역에서 2차 액적들의 평균 SMD가 감소하였기 때문이다. 이에 더하여, 0.34 MPa 이상의 분사압과 0.94의 무차원 과열도에서는 액막 영역의 평균 SMD가 완만하게 감소함에도 불구하고, 전체 평균 SMD는 여전히 분사압의 증가에 대하여 선형적으로 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 점으로부터 감압 와류 분무의 경우에는 분사압이 증가함에 따라서 공동 영역에서의 2차 액적 제트의 존재가 종단면 전체 SMD를 결정하는데 더욱 큰 영향을 주는 것으로 생각된다. 이러한 경향은 상대적으로 낮은 분사압 조건에선 분사 온도에 비하여 분사 압력을 조절, 유지하는 것이 상대적으로 용이하다는 면에서 이점을 지닌다. 이에 더하여 비록 논문에는 나타내지 못했지만 무차원 과열도 또는 노즐 직경이 증가함에 따라서도 분사압의 경우와 유사한 평균 SMD의 개선이 횡단면 및 종단면에서 또한 관찰되었다.

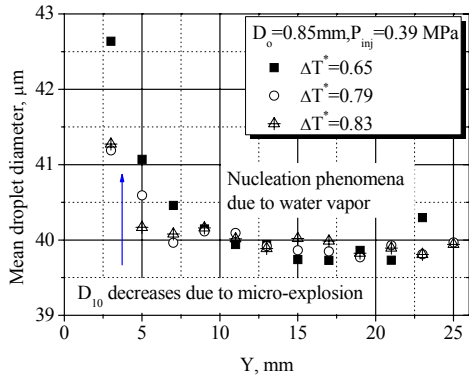


Fig. 6 Vertical distributions of mean droplet size on the vicinity of central axis in the void core

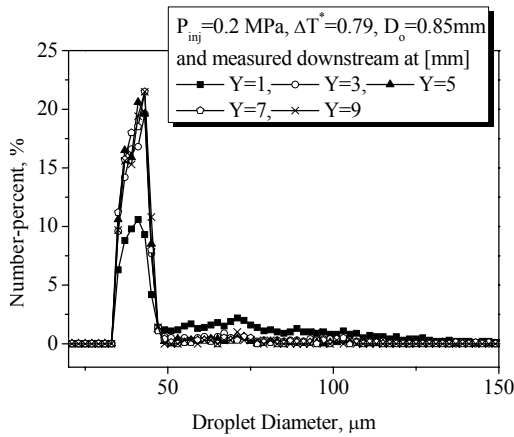


Fig. 7 Number-percent distributions in terms of droplet size downstream in the void core

이처럼 감압 와류 분무에서 무차원 과열도, 분사압 및 노즐 직경에 관한 평균 SMD의 의존성은 액막 영역에서의 미소 폭발에 의한 열역학적인 분열과 더불어 공동 영역에서의 현상과 관련되므로, 공동 영역에서의 2차 액적 제트의 거동에 관하여 조사할 필요가 있다. Figure 6은 공동 영역의 분사 축 중심에서의 평균 액적 직경 변화를 나타낸 것이다. 분무 하류 약 12mm까지는 평균 액적 직경이 줄어드는 것을 확인 할 수 있는데, 이는 액막에서 미소 폭발을 통하여 미립화한 액적들이 주변 대기의 유입 효과[11]에 의하여 들어온 뒤 2차 미립화를 겪기 때문으로 보인다. Figure 7은 분무 하류 방향으로 진행함에 따

른 공동에서의 액적 직경별 액적 수밀도 분포를 나타낸 그림이다. 분무 하류 방향으로 진행함에 따라서 40 μ m 범위의 액적들 중에서 수밀도의 정점이 우측으로 이동하는 점으로부터 응축의 영향 또한 존재함을 확인 할 수 있다.

3. 요약 및 결론

감압 와류 분무는 과열된 단일 유체 분무의 경우와 달리 분사 압력에 관한 평균 SMD의 의존성이 관찰된다. 또한 상온 와류 분무의 경우와 달리 유량 증가에 대한 영향도 관찰된다.

지배 변수 (무차원 과열도, 분사압 및 노즐 직경)가 증가함에 따른 평균 SMD의 개선은 공동에 존재하는 2차 액적 제트 때문으로 여겨진다. 지배 변수의 값이 증가함에 따라 공동에서의 2차 액적 제트는 2차 미립화 및 응축을 겪는다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. (계약 번호 UD070027AD)

참 고 문 헌

1. Lee S.H. and Yoon W.S., "Combustion of Nano-scale Aluminum and Liquid Water for Pressure Sensitivity," KSPE Spring Conference, 2010
2. Solomon A.S.P et al., "Flow and Atomization in Flashing Injectors," Atomization and Spray Technology, Vol. 1, 1985, pp 53-76
3. Brown R. et al., "Spray Formed by Flashing Liquid Jets," Journal of American Institute of Chemical Engineers, Vol. 8, No. 2, 1962, pp. 149-153

4. Nagai N. et al., "Atomization Characteristics of Superheated Liquid Jets," International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, London, UK, July ,1985
5. Park B.S. and Lee S.Y., "An Experimental Investigation of the Flash Atomization Mechanism," Atomization and Sprays, Vol. 4, 1994, pp. 159-179
6. Oza R.D., "On the Mechanism of Flashing Injection of Initially Sub-cooled Fuels," Journal of Fluid Engineering, 1984, pp. 105-109
7. Cleary V. et al., "Flashing Liquid Jets and 2phase Droplet Dispersion: 1. Experiments for Derivation of Droplet Atomization Correlations," Journal of Hazardous Materials, Vol.142, No.3, 2007, pp. 788-796
8. Zhang G. et al., "Macroscopic Characteristics of Flash Boiling Sprays using Laser Induced Exciplex Fluorescence from a Multi-Hole DI Injector," ILASS-2010, 2010
9. Lefebvre A.H., Atomization and sprays, 2nd Ed. Hemisphere, Philadelphia, USA ,1989
10. Choo Y.G. et al., "Design of High-Frequency Dielectric Heating System with Oscillation Generator and Power MOSFET," Proceedings of KIISS Spring Conference, Vol. 20, No. 1, 2010, pp 438-441
11. Moon S.S. , Abo-Serie et al., "Static Pressure Distribution Inside the Swirl Spray," ICLASS-2006, 2006