

응축이 심플렉스 와류 노즐의 분무 특성에 미치는 영향

고광웅* · 이상용*

Effect of Condensation on Spray Characteristics of Simplex Swirl Nozzle

Kwang Uoong Koh, Sang Yong Lee

Key Words: condensation(응축), spray characteristics(분무특성), simplex swirl nozzle(단순와류노즐), drop size(입경)

Abstract

The effect of ambient gas(steam) condensation on swirl spray characteristics were studied experimentally for low subcooling condition of the liquid. The configuration of the liquid(water) sheet and the breakup modes were examined. Also variation of the discharge coefficient, breakup length, local and the cross-sectional area-averaged SMD of droplets with the liquid flow(injection) rate were obtained. The perforation breakup mode appears dominant with condensation while the aerodynamic wave breakup mode is dominant without condensation(in the air environment). The discharge coefficient, breakup length and the mean drop sizes decrease in a same manner with increasing of the liquid flow rate for both cases(with and without condensation). The condensation effects are insignificant with the discharge coefficient. However, the local and cross-sectional area-averaged SMD are larger and the breakup length becomes shorter in the steam environment. The spray angle predicted from the volumetric flux distribution along the radial direction of the sprays in the steam environment becomes larger with condensation.

1. 서 론

응축성 기체 내의 분무는 관 벽 등과 같은 중간 매질 없이 두 매질이 직접 열과 물질을 교환하는 직접 접촉식 열교환기의 장점을 갖고 있다. 그리고 분열을 통해 표면적이 증가하여 열/물질 전달이 촉진되는 분무의 장점⁽¹⁾ 또한 갖고 있다. 이와 같은 장점으로 인해 응축성 기체 내의 분무는 화학 공정에서부터 공기 조화 분야의 가습 그리고 지열발전소의 직접 접촉식 열교환기, 원자력 발전소의 비상 노심 냉각 계통 등에 이르기 까지 다양한 분야에서 응용된다. 응축성 기체 내 분무와 관련된 연구들은 관심 영역에 따라 열전달과 관련된 연구들과 분무 거동과 관련된 연구

들로 구분될 수 있다. 열전달과 관련된 연구들에서는 응축이 일어날 때의 액적의 운동과 액적의 성장, 액주 및 액막에서의 열전달 계수 측정 등이 수행되었다. 분무 거동에 관한 연구들로서 Weinberg⁽²⁾는 와류분무 노즐을 이용하여 실험적으로 분열 길이와 입경을 살펴보았다. 이후에 Lee와 Tankin⁽³⁾은 상용 풀콘(full cone) 와류분무 노즐을 사용하여 분무의 거동을 관찰하였다. Lee⁽⁴⁾와 김인구⁽⁵⁾가 여러 가지 종류의 노즐에서 분사되는 액막의 거동을 분사 액체의 과냉도에 따라 살펴보았다. Mayer와 Chavez⁽⁶⁾는 임계점(critical point) 부근의 응축성 기체 내 와류분무의 특성을 R-113을 이용하여 살펴보았다.

그러나 전술한 선행 연구들에도 불구하고 응축성 기체 내에서 사용되는 노즐을 선택하거나 설계하기 위한 분무의 거동 및 특성에 관한 실험 자

* 한국과학기술원 기계공학과

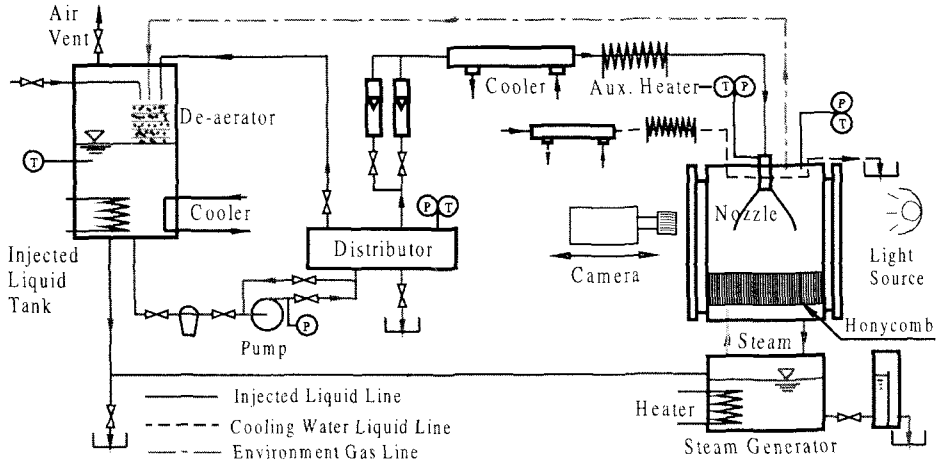


Fig. 1 Schematic diagram of Experimental setup.

료들은 아직 부족하다.

본 연구에서는 응축이 분부에 미치는 영향을 파악을 위한 초기 연구 결과로서 낮은 과냉도 조건에서의 분부 특성에 관한 자료를 제시하고자한다. 분부 특성 중 액막 영역에서의 열/물질전달량 예측에 필요한 액막의 형상(분열 형태)과 분열 길이를 살펴보았다. 그리고 액적 영역에서의 기초 자료인 액적들의 국소 평균 입경, 국소 체적 유속과 전체 분부 단면 평균 입경을 제시하였다. 그리고 유출 계수를 제시하였고 주위 기체 환경(응축성 기체 환경 및 비응축성 기체 환경)에 따른 분부 특성의 변화를 살펴보았다. 노즐은 단순 와류 분부 노즐을 사용하였다.

2. 실험장치

2.1 실험장치 및 실험 조건

분사 액체로는 물을 사용하였다. 응축성 기체로 포화 수증기를, 비응축성 기체로는 공기를 사용하였다. 시험부 내의 주위 기체 압력은 대기압(1기압)을 유지했다

실험 장치는 가시창이 있는 정육면체(600×600×600mm)의 증기 챔버(steam chamber), 전기 가열기(electrical heater, 4kW×5, 5kW×1)가 설치되어 있는 증기 발생기(steam generator), 분사 액체의 온도 조절을 위한 각종 냉각기와 가열기 그리고 측정 장비 및 노즐로 구성되어 있다.(Fig. 1) 분사 액체 탱크(injected liquid tank)에서 액체 속에 포함되어있는 비응축성 기체(공기)를 제거하기 위해

분사액체의 온도를 80°C이상으로 유지시켰다.

노즐부는 Fig. 2와 같이 상부와 하부 노즐 고정구 구성되어 있다. 상부 노즐 고정구에서 분사액체 온도 및 압력을 측정한다. 노즐 고정구들의 워터재킷(water jacket)에 분사 액체와 동일한 온도의 냉각수를 공급하여 노즐 벽면을 통해 전달된 열이 분부 거동에 주는 영향을 줄였다. 하부 노즐 고정구 밀면에는 노즐 고정구 외벽에 생기는 응축수로 인한 우산 효과⁽⁷⁾를 막기 위해 스킨트(skirt)를 설치하였다.

본 연구에서 사용한 단순와류분부 노즐의 출구 오리피스 직경은 1.2mm이다. 분사액체는 지름 1.1mm인 2개의 공급관을 통해 직경이 9.8mm인 와류실로 공급된다. 본 연구의 분사액체 유량 범위는 $(3.3\sim 9.2)\times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ 이며, 분사액체의 온도는 80°C이다.

2.2 입경 측정

입경은 영상 처리 기법을 이용하여 측정하였다. 광학 시스템의 사양은 고풍용 등⁽⁸⁾과 동일하다. 빠르게 이동하는 액적의 정지된 상을 얻기 위해서 셔플 시간이 50ns이하인 광원을 사용하였다. 영상처리 알고리즘⁽⁹⁾과 초점면 존재 판단기준⁽⁸⁾을 영상에 적용하였으며, 초점면 존재 판단 기준 설정 시 배경명도의 영향⁽¹⁰⁾도 고려하였다.

노즐 출구에서 30mm 떨어진 지점에서 입경을 측정하였다. 단순 와류분부는 축대칭이므로 분부 중심축에서 반경 방향으로 측정위치를 이동시키면서 액적들의 영상을 얻었다. 반경에 따른 입경의 변화가 큰 영역에서는 2mm, 비교적 입경의

변화가 작은 영역에서는 4mm 간격으로 액적들의 영상을 얻었다. 각 위치에서 1500~2000장의 영상을 입경 측정에 사용하였다.

전체 분무 단면 평균 입경은 각 측정 위치에서의 측정 횟수와 측정위치에 따라 측정값이 대표 하는 분무 면적이 다른 것을 고려해야 한다. 전 분무 단면 평균 입경(cross-sectional area- averaged SMD, SMD_t)은 아래와 같이 표현된다.

$$SMD_t = \frac{\sum_{r=0}^R \left(\frac{\sum n_i \times d_i^3}{NF_r} \right) 2\pi r \Delta r}{\sum_{r=0}^R \left(\frac{\sum n_i \times d_i^2}{NF_r} \right) 2\pi r \Delta r} \quad (1)$$

여기서 r 은 중심축에서 입경 측정 위치까지의 거리, R 은 분무 최외각 반경, n_i 는 i -그룹의 액적수, d_i 는 i -그룹의 입경이다. 그리고 NF_r 은 r 측정 위치에서 입경을 측정하기 위해 사용한 영상의 수이다.

3. 결과

유출계수는 아래식과 같이 정의된다.

$$C_d = \frac{\rho_L Q_L}{A_o (2\rho_L \Delta p_L)} = \frac{Q_L}{A_o U_L} \quad (2)$$

여기서 Q_L 은 분사 액체 체적유량, A_o 는 노즐 출구 오리피스 단면적, ρ_L 은 액체의 밀도, Δp_L 은 분사 압력을, U_L 은 분사액체의 노즐 출구에서의 총 속도를 의미한다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 와류 분무노즐의 유출

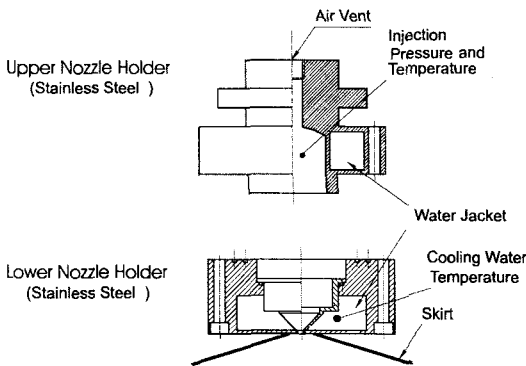


Fig. 2 Schematic diagram of nozzle holder.

계수는 단공노즐이나 선형 노즐에 비해 작다. 분사유량이 증가하면 분사압력은 급격히 증가한다. 반면에 유출계수는 그 기울기는 작지만 감소한다. 이런 경향은 와류분무 노즐의 일반적인 특성이다.⁽¹⁾ 유출 계수와 분사압력은 노즐 내부에서 형성되는 기체 코어(gas core) 등 노즐 내부 유동에 영향을 크게 받는다. 주위 기체 환경에 따라 유출계수와 분사압력의 변화가 작은 것은 주위 기체 환경에 따른 노즐 내부의 유동 형태의 변화가 크지 않음을 의미한다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 주위 기체가 공기와 수증기 일 경우 액막의 형상이다. 공기 중으로 분사된 액막은 공기 역학적인 파에 의한 분열형태(aerodynamic wave breakup mode)^(4, 5)를 보인다. 반면에 수증기 내 액막은 액막 위에 생긴 천공에 의한 분열형태(perforation breakup mode)^(4, 5)를 보인다. 수증기 내에서는 공기보다 낮은 수증기의 밀도와 액막에서의 응축 등의 원인으로 공기역학적인 파의 성장은 억제된다. 천공의 원인은 아직 밝혀지지 않았다. 다만 유출계수가 주위 기체 환경에 따라 변화하지 않는 것을 볼 때 주위기체를 부유하는 액적과 액막의 충돌⁽¹¹⁾, 액막 속에 있는 작은 비응축성 기체 방울에 의해 액막이 스스로 유지하지 못할 만큼 얇아져 구멍이 생기는 것⁽¹²⁾ 등 노즐 외부에 그 원인이 있을 것으로 생각된다.

Fig.4 (a)와 같이 분사 유량이 작은 경우 공기 중에서의 액막은 분열이 일어나기 전에 워터벨(water bell)을 형성한다. 분사 유량이 증가하면 액막 속도가 빨라져 워터벨이 형성되기 전에 분열이 일어나 Fig. 4 (b)와 같이 액막 하부가 열린

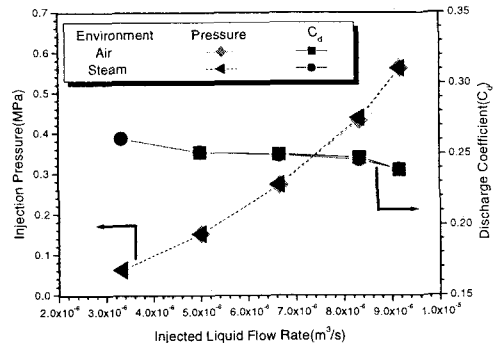
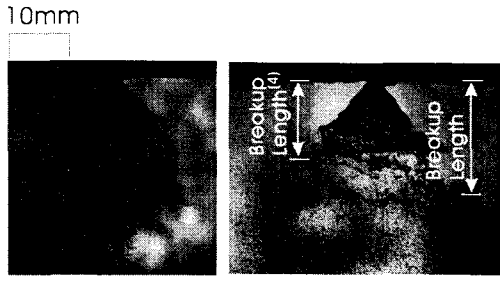
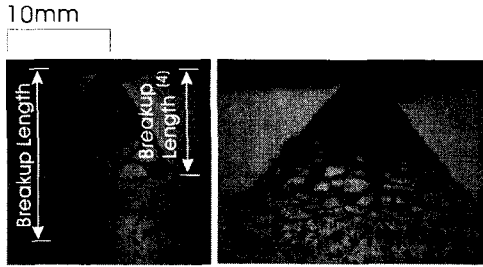


Fig. 3 Variation of injection pressure and discharge coefficient.



(a) $Q_L=3.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $Q_L=9.2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
 Fig. 4 Liquid sheet shape in air.



(a) $Q_L=3.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $Q_L=9.2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
 Fig. 5 Liquid sheet shape in steam.

원추형의 액막이 형성된다. 수증기 내 분무의 경우 분열이 일찍 일어나 본 연구의 실험 영역에서는 워터벨이 관찰되지 않았다.

분열길이는 각 조건마다 50장의 사진을 이용하여 측정하였다. 분열길이의 정의는 노즐 끝단으로부터 분사 액체가 연결된 가장 먼 지점까지의 거리로 정의하였다.(Fig. 4(b), Fig. 5(a)) 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 사용한 We수(Weber No.)의 정의는 다음과 같다.

$$We = \frac{\rho_L U_L^2 D_o}{\sigma} \quad (3)$$

여기서 U_L 는 액막의 총속도로 식 (2)의 유출계수로부터 계산할 수 있다. ρ_L 은 분사 액체의 밀도, D_o 는 노즐 출구 오리피스 직경, σ 는 표면장력을 의미한다.

분열길이는 분무가 수증기 내로 분사되었을 경우 확연히 짧아진다. 또한 분사유량이 증가하면 주위 기체 환경과 상관없이 분열길이가 감소하는 경향을 보인다. 분사유량이 증가하면 공기 중의 액막은 속도가 증가하여 파의 발생과 성장이 빨라 분열길이가 짧아진다. 수증기 내 분무의 경우는 천공 현상이 활발해져 분열길이가 감소하게 된다.(Fig. 4, Fig. 5)

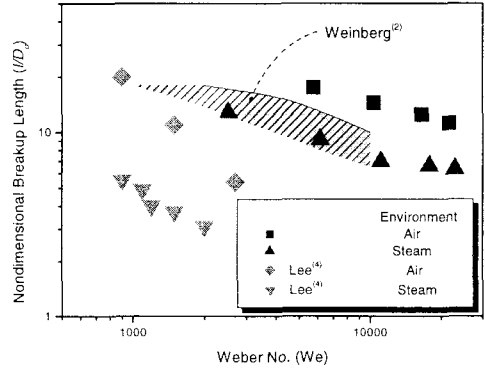


Fig. 6 Breakup length of water sheet.

본 연구에서 측정된 분열길이는 Weinberg⁽²⁾의 결과와는 유사하고 Lee⁽⁴⁾가 제시한 분열길이에 비해 길게 나타난다. 이는 각 연구마다 분열길이 정의가 서로 다르기 때문이다. Weinberg⁽²⁾가 측정된 분열길이는 본 연구의 분열길이의 정의와 동일하다. 반면에 Lee⁽⁴⁾는 공기 중에서는 분열이 일어난 액막의 끝단 중 노즐출구에서 가장 가까운 지점까지의 거리로 분열길이를 정의하였다.(Fig. 4(b)) 그리고 수증기 내 분무의 경우에는 노즐 끝단에서 구멍에 의해 액막의 형상(곡률)이 바뀌는 지점까지의 거리로 정의하였다.(Fig. 5(a)) 정의에 따라 그 결과가 다르므로 응용 목적에 알맞은 정의의 선택이 중요하다.

분사유량에 따른 반경방향(r)의 액막의 분열에 의해 발생한 액적들의 국소 평균 입경(SMD)과 국소 체적 유속(volumetric flux)의 변화는 Fig.7에 나타내었다. 분사 유량에 따른 전체 분무 단면의 평균 입경을 Fig.8에 나타내었다. 분사유량(Q_L)이 $3.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 일 때의 공기 중 분무에 대한 실험 자료가 없는 것은 이 조건에서는 Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 액막의 분열이 충분히 일어나지 않았기 때문이다.

반경 방향에 따른 국소 체적 유속은 주위 기체 환경과 관계없이 분무 중심에서 작은 값을 갖고 분무 외각으로 갈수록 증가하여 최대값이 나타난 후 다시 감소하는 형태를 보인다. 분사유량이 증가하면 최대 체적 유속이 나타나는 지점이 반경 방향으로 이동한다. 이런 경향은 분무 중심에서 존재하는 액적의 개수가 적고(중공) 분사유량에 따라 분무각이 증가하는 단순와류 분무의 일반적인 특징이다.

분사유량이 동일할 때 공기 중 분무의 국소 체

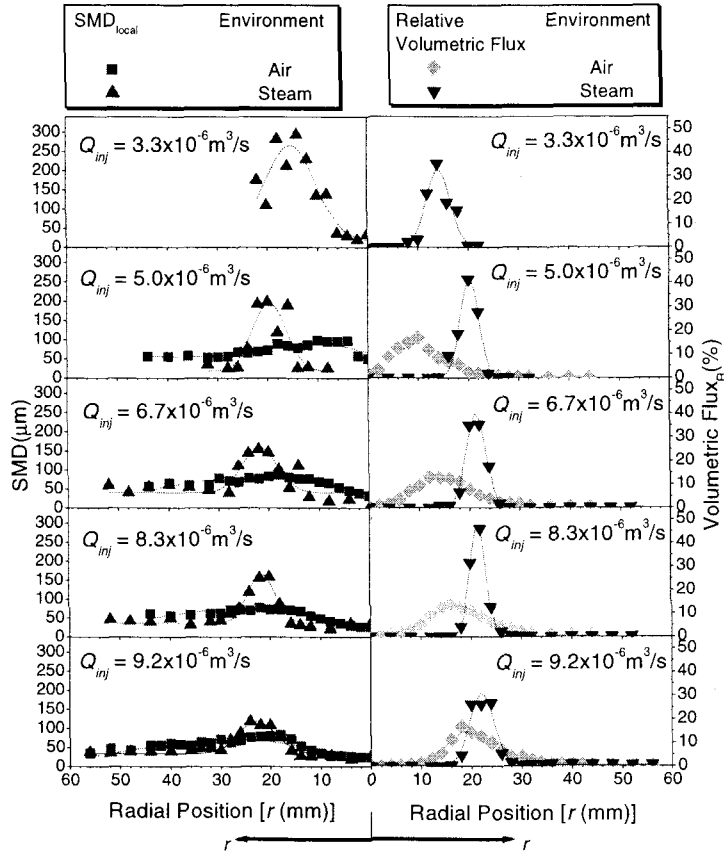


Fig. 7 Local mean drop size(SMD) and local volumetric flux along the radial direction.

적 유속의 최대값이 나타나는 지점이 수증기 내 분무일 경우에 비해 중심에서 가깝게 위치한다. 이는 공기 중 분무의 분무각이 수증기 내의 분무보다 작다는 것을 의미한다. 이런 결과는 공기 중 분무각이 수증기 내의 분무각보다 크다는 기존의 연구 결과들⁽³⁾과 상반되는 경향이다. 단순 와류 노즐에서의 분무각은 노즐 출구에서의 분사 액체의 속도, 분사 액체의 표면 장력, 액막을 중심으로 한 분무 내부와 외부 사이의 응축에 의한 압력차에 의해 결정된다. 그러나 분사유량이 동일하다면 유출계수가 주위 기체 환경과 상관없이 일정하므로 노즐 출구에서 분사 액체 속도는 동일하다. 따라서 표면장력과 분무 내부와 외부 사이의 응축에 의한 압력차의 변화가 분무각을 결정한다. 본 연구에서 분사액체 온도는 80°C로 높아(과냉도가 낮아) 응축에 의한 분무 내부와 외부의 압력차가 작다. 그리고 공기 중의 액막 표면 온도보다 수증기 중에서 액막의 표면 온도가 높

기 때문에 표면 장력은 수증기 내 분무인 경우가 작다. 이와 같이 응축에 의해 액막이 수축하는 효과는 작고 표면장력의 감소로 인해 액막은 동일한 분사 속도에서 쉽게 팽창하여 분무각이 커지게 된다. 분사유량이 증가할수록 공기 중과 수증기 중 분무의 분무각의 차이는 감소한다.

분무 중심에서 반경 방향에 따라 국소 평균 입경도 반경 방향을 따라 증가하여 최대값을 갖고 감소하는 경향을 보인다. 분사유량이 증가하면 평균 입경의 최대값이 감소하는 일반적인 와류분무 노즐의 특성을 주위 기체 환경과 상관없이 보인다. 그러나 수증기 내로 분사된 분무의 반경 방향에 따른 평균 입경의 최대값은 공기 중의 분무에서의 값보다 크다. 그 차이는 분사유량이 증가할수록 감소한다.

전체 분무 단면의 평균 입경도 수증기 내 분무의 경우가 공기 중 분무일 때 보다 크게 나타난다. 분사유량이 증가할수록 전체 분무 단면 평균

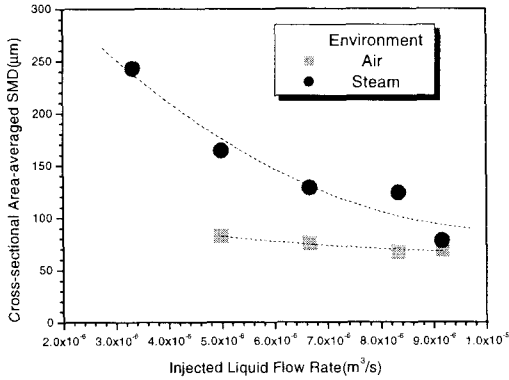


Fig. 8 Variation of cross-sectional area-averaged SMD with injected liquid flow rate.

입경도 감소하는 일반적인 경향을 보인다.

4. 결론

공기 중 분무의 분열은 공기역학적인 파에 의한 분열이 주된 분열기구인 반면 수증기내 분무는 천공 형상에 주된 분열 기구이다.

분사유량 증가에 따른 유출 계수, 분열길이, 반경 방향으로의 국소 평균 입경과 국소 체적 유속의 분포와 전체 단면 평균 입경은 일반적인 와류분무의 경향을 따른다.

주위 기체 환경에 따른 유출 계수의 변화는 작다. 그러나 분열길이는 수증기 내 분무의 경우가 공기 중의 분무보다 짧고, 평균 입경은 크다. 분열길이의 경우 정의에 따라 그 결과가 달라지므로 응용 목적에 알맞은 정의의 선택이 중요하다. 국소 체적 유속의 분포로부터 예측되는 분무각은 수증기 중의 분무가 더 크다.

후기

본 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 중점 국가연구개발사업(온실가스저감기술연구)과 한국 과학재단의 특정기초연구사업(98-0200-03-01-3) 그리고 두뇌한국-21의 일부 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) 이상용, 1996, 액체의 미립화, 민음사.

(2) Weinberg, S., 1952, "Heat Transfer to Low Pressure Sprays of Water in a Steam Atmosphere," *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, Vol. 1B, pp. 240-258.

(3) Lee, S. Y. and Tankin, R. S., 1984, "Study of Liquid Spray(water) in a Condensable Environment(steam)," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, No. 3, pp. 363-374.

(4) Lee, S. Y., 1985, "Effect of Condensation on the Breakup of Liquid Sheet Experimental Observation," *Proc. ICLASS-85*, VIB2/1-VIB/2/7, AD/1/1-AD1/2.

(5) 김 인구, 1985, 응축 기체 내에서 분사되는 액막의 분산 현상에 관한 실험적 연구, 석사 학위 논문, 한국과학기술원.

(6) Mayinger, F. and Chavez, A., 1992, "Measurement of Direct-contact Condensation of Pure Saturated Vapour on an Injection Spray by Applying Pulsed Laser Holography," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 3, pp. 691-702.

(7) Block, J. A., 1980, "Condensation Driven Fluid Motion," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 6, pp. 113-129.

(8) 고헌용, 김주연, 이상용, 1999, "입경측정을 위한 영상처리기법에서 입자 초점면 존재 판단 기준의 설정," 대한기계학회 논문집 B 권, 제23권, 제3호, pp. 398-407.

(9) Kim, J. Y., Chu, J. H. and Lee, S. Y., 1999, "Improvement of Pattern Recognition Algorithm for Drop Size Measurement," *Atomization and Sprays*, Vol. 9, pp. 313-329.

(10) 고헌용, 이상용, 2000, "영상처리 기법을 이용한 입경 측정 시 배경 명도가 측정 정밀도에 미치는 영향," 대한기계학회 논문집B 권, 제24권, 제4호, pp. 599-607.

(11) Fraser, R. P., Eisenklam, P., Dombrowski, N. and Hasson, D., 1962, "Drop Formation from Rapidly Moving Liquid Sheet," *A.I.Ch.E. Journal*, Vol. 8, No. 5, pp. 672-680.

(12) Spielbauer, T. M and Aidun, K., 1994, "The Cause and Effects of Perforations in a Liquid Sheet from a Splash-plate Spray Nozzle," *Atomization and Spray*, Vol. 4, pp. 405-436.