대한기계학회 2001년도 추계학술대회논문집 B pp. 693~698 KSME 01F260

내부혼합형 2유체 미립화기의 분무 특성에 관한 실험적 연구

김규철† · 하만호* · 남궁정환* · 이삼구** · 노병준*** · 강신재***

An Experimental Study on the Spray Characteristics of Internal Mixing Atomizer for Twin Fluid

K. C. Kim, M. H. Ha, J. H. Namkung, S. G. Lee, B. J. Rho, and S. J. Kang

Key Words: PDPA(위상 도플러 입자 분석기), SMD(체적-표면적 평균직경), ALR(공기-액체 질량비), T.K.E.(난류 운동 에너지), half-width(분무 반폭)

Abstract

An experimental study was carried out with an aerated nozzle. This nozzle was well known that the performance of the atomization is better than other ones even though the supplied air pressure is lower than that of them. The purpose of this investigation is to provide the essential information of the aerated nozzle from the nozzle exit. The experimental work was performed in order to analyze the characteristics of the overall flow field from the nozzle exit. The 2-D PDPA system was used to acquire the data in the concerned region. The characteristics of the mean velocity distribution, half-width, and SMD were mainly analyzed. Also the correlation between turbulent kinetic energy and SMD was described with ALR.

1. 서 론

최근 산업사회의 급속한 발전과 더불어 연소기기, 내연기관 등으로부터 배출되는 배기가스에 의한 대기 환경오염의 문제가 전 세계적인 관심사로 부각되고 있으며, 이들 배출가스를 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 즉, 연소기기 및 내연기관의 연소조건을 최적의 조건으로 하여 열 및 물질 전달이 활발하게 이루어지도록 한 후 연소 후기에 배출되는 배기가스를 저감시키려는 기술이 한창 개발 중에 있다. 일반적으로 유체의 미립화 성능을 개선하기 위해 지금까지 많은 연구자들에 의해 수행된 연구로는 단공 노즐, 다공 노즐, 노즐의 분공 위치 변경 실험, 노즐의 형상비(aspect ratio, L/d ratio) 변경, 공기와 유체의 혼합 기구(mechanism) 변경 즉, 공기와 유체의 노즐내로의 도입시 선회성분 유/무에 따른 미립화 특성 연구 등이 주로 이루어졌으며, 현재 대부분의 연구는 외부에서 공기와 유체가 혼합되는 외부 혼합형 2 유체 혼합 유동에 초점이 맞춰져 연구가 진행되고 있는 실정이다. 반면에, 내부 혼합형 노즐에 대한 미립화 특성 및 난류 유동에 관한 연구는 외부 혼합형 노즐에 관한 자료에 비해 그 양이 비교적 적기 때문에 이에 대한 유동 특성 규명, 내부에서의 액적의 분열 mechanism의 이해 및 model화, 분열 현상에 대한 물리적인 현상 연구, 노즐 출구 이후의 유동장에서의 거시적 유동특성 현상 규명, 공기 및 유체의 질량 공급율이 난류 특성 및 액적의 미립화 특성에 미치는 영향 연구, 난류강도와 액적의 미립화 등의 상관관계 연구는 절실히 요구되는 분야이다.

본 연구에서는 공기주입형 노즐(aerated nozzle)을 사용하여 노즐 출구 이후의 분무 특성을 고찰하였으며, 이에 관련된 형상의 노즐에 대

† 전북대학교 대학원, 정밀기계공학과
E-mail : 817kkc@hanmail.net
TEL : (063)277-7308 FAX : (063)277-7308
* 전북대학교 대학원, 정밀기계공학과
** 전북대학교 자동차신기술연구소
*** 전북대학교 기계항공시스템공학부 교수, 자동차신기술연구소

한 연구로는 Chen 등[1]은 effervescent 미립화기를 사용하여 액체의 물리적 성질, 특히 점성(viscosity)과 표면장력(surface tension)과 주위 공기 압력(ambient air pressure)을 변화시키면서 미립화기의 특성을 연구한 바 있으며, Whitlow와 Lefebvre[2]는 effervescent 미립화기 작동 조건 및 분무 특성에 관한 연구를 수행하여 그 결과를 발표하였다. 즉, ALR 변경 및 미립화기의 작동 압력을 변화시키면서 분무되는 액적의 크기분포 및 Rosin-Rammler 변수 q에 대한 작동 조건의 영향에 관한 특성을 연구하였다. Whithlow의 연구는 표준대기압 상태에서 공기중으로의 물분사에 한정되는 연구였다. 또한 Luong 등[3]은 effervescent 미립화기를 사용하여 분무의 정상상태 및 비정상 상태의 특성을 최초로 연구하였다. 이들은 3가지 서로 다른 작동유체를 사용하여 실험하였으며, 질량유동율과 ALR비도 변경하여 실험하였으나, 이 연구에서는 분무 축방향의 어느 특정 위치에서만 분무 액적의 크기 등을 측정하였기 때문에 노즐 출구 이후의 전유동장(overall flow field)에서의 분무액적의 미립화 특성 및 난류 유동 특성을 이해하는데는 많은 정보가 부족하다고 사료된다. Santangelo와 Sojka[4]는 내부 혼합형 effervescent 미립화기를 이용하여 노즐 출구 바로 근방에서의 분무 특성을 FIH(Focused-Image Holography) 기법을 적용하여 연구하였다. 더나가 Rüger 등[5]은 액적의 충돌 및 합착 효과를 연구하기 위해 Euler/Lagrange 방법을 사용하였다. 이 방법은 2상 유동의 복합 분열 현상을 예측하는데 있어 유용한 수치해석 도구이다.

또한, Malvern 2600 HSD 입자크기 분석기를 이용한 연구로는 Schmidt 등[6]은 공기 보조형 압력 선회 미립화기에 대한 연구를 수행하였으며 분무된 액적의 체적-표면적 평균직경(SMD)과 ALR과의 상관 관계를 분석하였으며, Buckner와 Sojka[7,8]는 뉴튼유체와 비뉴튼유체(Newtonian liquids and non-Newtonian liquids)를 사용하여 고점성 유체의 미립화 특성을 연구한 바 있다.

따라서, 본 연구에서는 PDPA 장비를 이용하여 내부 혼합형 노즐의 출구 이후의 전 유동장에 대한 기본적인 분무 특성 및 미립화 특성을 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 미립화기 제작

실험에 사용된 미립화기의 외관 및 주요 제원은 Fig. 1과 같으며 이의 주요한 구성 부품은 ① 노즐 ② 혼합관 ③외부관 그리고 3개의 공기 공급 구멍이 뚫려 있는 상부커버로 이루어지며, 노즐 출구부의 오리피스 직경은 d=1.6mm, L/d=0.6으로 가공하였다. 특히, 혼합관에서는 유체에 공기가 잘 혼합되도록 혼합관 주위에 공기 유입 구멍을 0.8mm로 가공하여 유체와 공기의 혼합을 조장하였다. 또한, 미립화기 제작에 사용된 재질은 작동유체로서 물을 사용하기 때문에 표면에서 녹이 발생하지 않게 하기 위해 황동(bronze)을 사용하여 제작하였다.

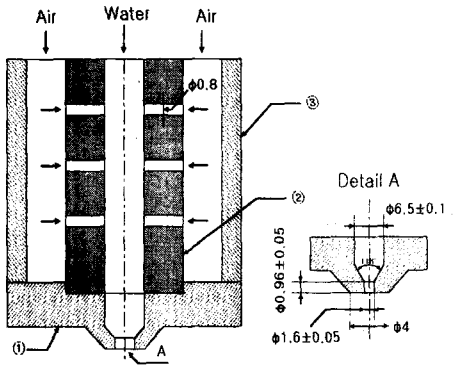
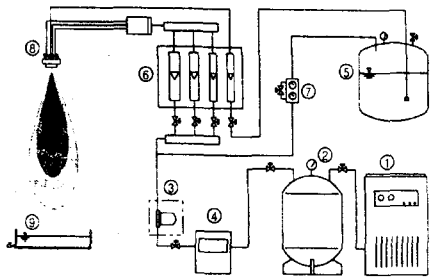


Fig. 1 Nozzle configuration

2.2 실험장치 구성

본 실험을 수행하기 위한 실험 장치의 구성을 Fig. 2에 나타낸다. 공기 압축기에 의해 압축된 공기는 저장탱크 ②에 저장된 후 공기 필터 ③을 통과하여 유량계 ⑥을 통과한 후 미립화기의 혼합실에서 유체(물)에 혼합되도록 공급되며, 이때 유체(물)의 공급은 압력 조절기 ⑦을 지나 유량계 ⑥에서 정확하게 유량이 조절되어 미립화기의 혼합실에서 공기와 혼합된 다음 노즐 출구를 통해서 정지 대기 중으로 분사된다. 특히, 공기 공급 관로의 중간에 공기의 공급압력의 부조화에 의한 맥동(pulsation)현상을 방지하기 위해 surge tank ④를 설치하여 실험에서 얻어지는 data의 신뢰도를 높였다.



① air compressor ② air storage & pressure gauge ③ air filter ④ surge tank ⑤ water storage tank ⑥ flowmeter for the air & liquid ⑦ pressure regulator ⑧ nozzle ⑨ spray demister

Fig. 2 Experimental set-up

2.3 분무 실험

2.3.1. 작동유체 공급량 결정

혼합관에 공급되는 유체(물)의 공급량은 실험시 발생하는 변수를 최대한 줄이고 실험에서 얻어지는 data의 정확도 및 신뢰도를 높이기 위해 1.8g/s로 일정하게 하였으며, 이 공급량의 최종 결정은 노즐출구로부터 나오는 액주의 상태 즉, 액주 유동에서의 dripping, 정맥류형 파동(축대칭 파동), 사인곡선형 파동 생성 형태를 고찰해 가면서 수십 번의 실험을 통하여 결정하였다.

2.3.2 공기 공급량 결정

공기의 공급량은 ALR의 선정에 따라 변경되었다. 즉, ALR의 선정은 ALR = 0.1256, 0.1448, 0.1774, 0.2048, 0.2289, 0.2508, 0.2709, 0.2896, 0.3072, 0.3238의 10가지로 정하여 실험했으며, 유체의 질량 유동율을 일정하게 하였기 때문에 공기의 질량 유동율도 ALR 값에 따라 10가지를 선정하여 실험했다.

2.3.3 분무 액적 grid 작성

노즐 선단으로부터 분무 중심축 z 방향으로 10개의 단면을 선정하여 측정 grid를 작성하였다. 즉, z=5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 30mm, 50mm, 80mm, 120mm, 170mm, 250mm의 10개의 단면을 정하여 계측 그리드를 작성하였다. 이는 노즐 출구로부터 분무되는 분무 형상을 사진 촬영한 후 분무 선단과 외곽 부분, 분무 중심 부분, 분무 선단 부근 등의 분무 profile을 각 ALR에서 측정한 후, 측정점이 부족하여 원하는 분무 profile을 얻지 못할 경우를 배제시켰다. 하나의 단면에서 최대 51개의 점을 측정하도록 측정 program을 작성하였으며, 분무 중심축을 따라서는 액적의 수밀도가 높을 것으로 예상하여 분무 중심축 근방에서는 분무의 가장자리 보다 많은 점에서 액적이 sampling 되도록 측정 간격을 조밀하게 선정하여 실험을 진행했다.

2.3.4 계측 시스템의 구성

본 실험에 사용된 계측 시스템의 구성은 Fig. 3과 같다. 주요 구성품으로는 source로서 공랭식 Ar-ion laser(750mW) ①이 사용되며, 송광부 ②, ③과 수광부 ④, ⑤로 구성된다. 이때 사용된 송광부 렌즈의 초점거리는 310mm 이며 수광부 렌즈의 초점거리는 600mm 이다. 측정체적은 ⑩에서 형성되며 이 부분을 통과하는 구형의 액적만이 검출되어 유효 data로서 축적된다. 이외에 주요한 측정장비로는 오실로스코프 ⑦, 신호처리 장치 ⑧ 및 자동 이송장치 ⑨가 있으며, 이들 장치가 진동을 발생하지 않도록 test bench에 견고하게 고정한 후 실험을 수행하였다.

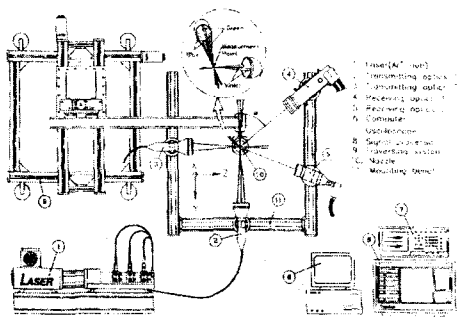


Fig. 3 PDPA system

2.3.5 측정 sample 수

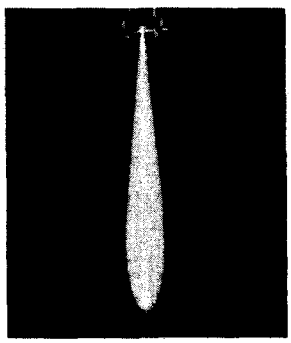
계측시 1개의 point당 측정된 sample 수는 10,000개로 하였으며, 액적의 수밀도가 높아 10,000개의 sample이 검출되지 않을 시는 1개의 측정 point당 최대 60초의 측정시간을 limits로 설정하여 이 시간이 경과하면 자동으로 다음 측

정점으로 자동으로 이동하도록 조건을 설정했다. 본 실험의 경우는 대기 중에 연속적으로 분사하기 때문에 측정에 요하는 시간은 그다지 많이 소요되지 않을 것으로 사료되나, 스월 유동이 아니기 때문에 노즐 출구에서의 평균 유속은 선회유동의 경우에 비해 비교적 높게 측정될 것으로 예상되어 1개의 측정점에 대하여 최대 60초의 한계시간을 설정했다. 측정 point간의 이동은 3차원적으로 자동 이송되는 3차원 auto traversing system에 의해 이루어졌으며, 이 이송 system의 위치 정확도는 ±0.2mm로 매우 정교한 정확도를 가지고 있기 때문에 계측된 data에 대한 신뢰도에 있어서는 문제가 되지 않을 것으로 사료된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무 가시화

분무의 거시적인 특성을 알아보기 위해 공기공급 압력 0.15bar-0.6bar(ALR=0.1256 - 0.3238)인 경우의 분무 사진을 코닥사의 디지털 카메라를 사용하여 촬영하였다. ALR이 증가함에 따라 Fig. 4의 분무 사진에서 백색으로 나타나는 부분이 길어지는 것이 확인되었는데 이는 ALR이 증가함에 따라 그에 상응하는 운동량이 증가하고 있음을 암시한다. 또한, ALR의 증가와 더불어 분무 반경방향으로의 폭이 넓어지고 있음을 관찰할 수 있었다. Fig. 4는 ALR=0.2508에서 분무되는 분무 형상을 일례로 나타낸 것으로 분무 형상이 거의 좌우 대칭으로 발달하고 있음을 쉽게 알 수 있다.



ALR = 0.2508

Fig. 4 Photo for visualization

3.2 평균속도

3.2.1 분무 중심축 방향의 평균속도

Fig. 5는 분무 중심축 상에서의 최대 평균속도를 알아보기 위해 ALR=0.2508의 경우 각 단면에서의 평균 속도를 나타낸 그림이며, 여기서 r은 반경방향 거리이다. 그림에서 알 수 있듯이 최대 평균 속도는 분무 중심축에서 얻어지고 있으며, 분무 중심축의 연직 하방향으로 내려가면서 점차로 그 값이 작아지고 있다. 평균 속도($\bar{u}$)는 z=15mm 인 단면에서 최대 약 75m/s 정도로 측정되었다. 이 속도분포 형상으로부터 알 수 있는 중요한 점은 본 실험에 사용된 노즐이 선회유동을 하지 않는 내부 혼합형 공기주입 노즐이기 때문에 분무 중심축 상에서의 최대속도가 선회유동에서 얻어지는 값보다 크게 얻어지고 있다고 사료된다.

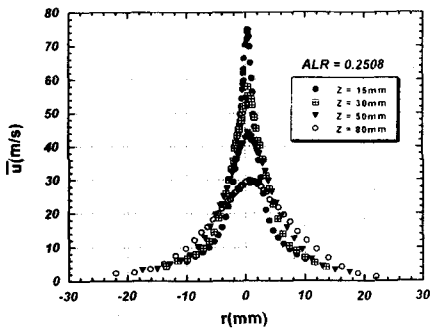


Fig. 5 Mean velocity profiles

Fig. 6은 최대 평균속도($\bar{u}_m$)를 비교하기 위해 공기공급압력에 따른 각각의 단면에서의 최대 속도를 알아보기 위해 얻어진 값을 이해하기 쉽도록 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 공급압력이 증가함에 따라 모든 단면에서 최대 평균속도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 각 단면별로 최대 평균속도가 증가하는 양상을 보면 z=15mm 단면의 경우는 공기공급압력이 낮은 값에서 높은 값으로 증가함에 따라 최대 속도 값이 완만하게 증가하는 양상을 보이지만 이외의 단면 위치, 즉 z=30, 50, 80mm 인 단면에서는 공기공급압력이 0.4bar(ALR=0.2048)까지는 급격하게 최대 평균속도가 증가한 후 이 이후의 공기공급압

력에서는 그 값이 완만하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한, 최소 및 최대 평균속도 값은 각각 약 17m/s와 79m/s로 평가되었다.

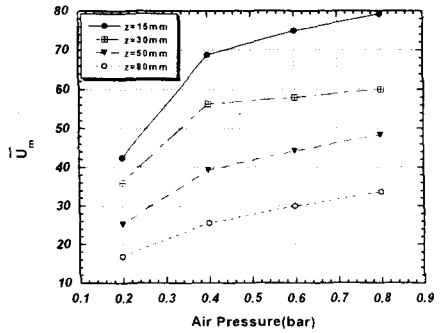


Fig. 6 Comparison of max. mean velocities

3.2.2 분무 반폭(half-width) 비교

다음 Fig. 7은 본 실험에 사용된 공기 주입 노즐의 분무 특성을 고찰하기 위해 유동 특성을 고찰할 때 자주 이용되는 분무 반폭을 각 공기공급 압력에 따라 각각의 분무 단면에서 얻어지는 분무 반폭을 나타낸 그림이다. 분무 반폭은 일반적으로 축 방향 최대 평균속도의 1/2 값에 대응하는 분무 반경방향의 거리를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 공급압력이 증가함에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 보이고 있으나, z=50mm인 단면의 경우, 공기공급압력이 0.6bar(ALR=0.2508) 이후에서 급격하고 상승하고 있으며, 동일 압력에 있어서 분무 반폭은 z=80mm인 단면이 가장 큰 것을 알 수 있고 전체 압력에 있어서 분무 반폭이 가장 큰 값은 z=80mm에서 나타나고 있다.

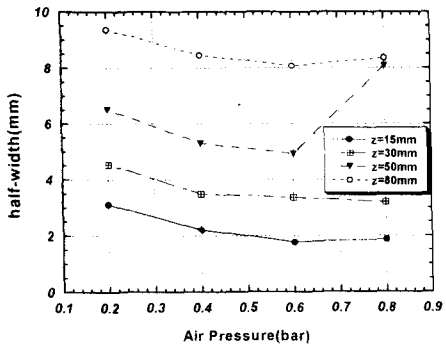


Fig. 7 Comparison of half-widths

3.2.3 체적-표면적 평균 직경(SMD) 비교

다음 Fig. 8은 ALR=0.1448에 있어서의 각 단면에서의 SMD 분포를 나타낸 그림이다. 분무 중심에서 가장 작은 분무 액적들이 포집되고 있음을 알 수 있으며, 분무 중심축 z=15mm에서 가장 큰 액적들이 포집되고 있는데 이는 노즐 출구로부터 가장 가까운 단면이기 때문에 아직 구형 액적으로 완전하게 분열되지 않은 입자들이 포집되거나, 또는 이 단면에서의 최대 평균 속도가 가장 크기 때문에 주분무류의 주위로부터 부유하는 입자들이 분무 주류로 빨려 들어가 액적들의 흡착 등으로 인해 보다 큰 액적들이 얻어지고 있다고 사료된다. 분무 중심축으로부터 반경방향으로 점차 멀어짐에 따라 액적의 크기는 증가하는 양상을 보이며, z=15mm에서 80mm로 단면이 이동해 감에 따라 액적의 크기 증가율(기울기)이 감소하고 있는데 이는 분무가 반지름 방향으로 넓어지고 있음을 나타낸다. 특히, z=15mm 단면에 있어서 r이 증가함에 따라 액적의 크기가 급격하게 증가하다가 갑자기 감소하는 경향을 보이는데 이는 분무 외곽에 부유하고 있는 액적들이 측정된 것으로 사료된다

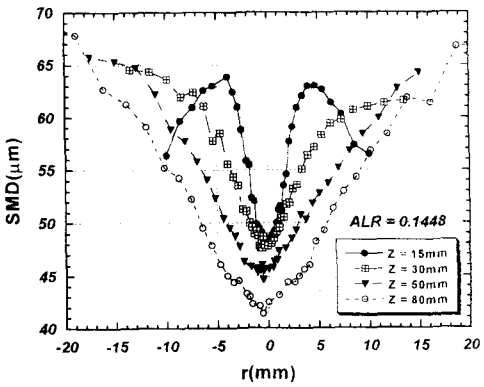


Fig. 8 SMD distributions

3.2.4 SMD와 난류 운동 에너지와의 상관 관계

Fig. 9는 단면위치 z=30mm에서의 SMD와 난류운동에너지 T.K.E와의 상관관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 쉽게 알 수 있는 바와 같이 가장 작은 분무 액적이 측정되는 분무 중심축선 상에서 난류 운동에너지는 가장 작게 나타나고 있으며, 분무 외곽으로 갈수록 난류 운동에너지는

SMD에 역비례하여 거동하고 있음을 알 수 있다. 이 현상으로 미루어 보아 이 노즐의 경우 SMD와 난류 운동 에너지는 상관관계가 아주 좋음을 알 수 있다.

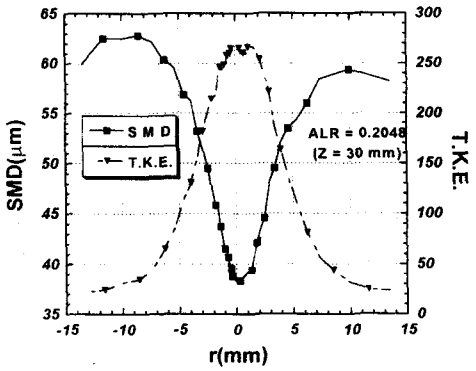


Fig. 9 Correlation between SMD and T.K.E.

4. 결 론

내부 혼합형 공기주입 노즐의 노즐 출구 이후의 분무장에서의 분무 특성을 고찰하기 ALR비 변경에 따른 각 단면에서의 분무 특성 미립화 특성 및 난류운동에너지와 SMD와의 상관관계 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 분무 중심축 상에서 최대 평균속도를 얻었으며 공기의 공급압력이 증가함에 따라(ALR비의 증가) 최대 평균속도도 크게 되었다.

2) 전반적으로 공기 공급압력이 증가함에 따라 분무 반폭이 감소되고 있다.

3) 공기 공급 압력이 증가함에 따라 분무 콘각이 약간 퍼지는 양상을 보였으며, 분무 내부의 혼합영역에서의 분무길이가 크게 나타났다.

4) SMD와 난류운동에너지와의 상관관계는 아주 강하게 나타났다.

참고문헌

(1) S. Kevin Chen and Arthur H. Lefebvre, "Spray Cone Angles of Effervescent Atomizers," *Atomization and Sprays*, vol. 4, pp. 270-301, 1994.

(2) J. D. Whitlow and A. H. Lefebvre, "Effervescent Atomizer Operation and Spray Characteristics," *Atomization and Sprays*, vol. 3, pp. 137-155, 1994.

(3) John T. K. Luong and Paul E. Sojka, "Unsteadiness in Effervescent Sprays," *Atomization and Sprays*, vol. 9, pp. 87-109, 1999.

(4) Phillip J. Santangelo and Paul E. Sojka, "A Holographic Investigation of the Near-Nozzle Structure of an Effervescent Atomizer-Produced Spray," *Atomization and Sprays*, vol. 5, pp. 137-155, 1995.

(5) M. Rüger, S. Hohmann, A. Sommerfeld, and G. Kohnen, "Euler/Lagrange Calculations of Turbulent Sprays : The Effect of Droplet Collisions and Coalescence," *Atomization and Sprays*, vol. 10, pp. 47-81, 2000.

(6) U. T. Schmidt and P. E. Sojka, "Air-Assist Pressure-Swirl Atomization," *Atomization and Sprays*, vol. 9, pp. 173-192, 1999.

(7) Harry N. Buckner and Paul E. Sojka, "Effervescent Atomization of High-Viscosity Fluids : Part I. Newtonian Liquids," *Atomization and Sprays*, vol. 1, pp. 239-252, 1994.

(8) Harry N. Buckner and Paul E. Sojka, "Effervescent Atomization of High-Viscosity Fluids : Part II. Non-Newtonian Liquids," *Atomization and Sprays*, vol. 4, pp. 157-170, 1994.