

가솔린 송유관에서의 수액적 거동 특성

김정현* · 김승규** · 배충식* · 신동현***

Characteristics of Water Droplets in Gasoline Pipe Flow

J.H. Kim* · S.G. Kim** · C. Bae* · D.H. Sheen***

Abstract

Liquid fossil fuel contaminated by water can cause trouble in the combustion processes and affect the endurance of a combustion system. Using an optical sensor to monitor the water content instantaneously in a fuel pipeline is an effective means of controlling the fuel quality in a combustion system. In two component liquid flows of oil and water, the flow pattern and characteristics of water droplets are changed with various flow conditions. Additionally, the light scattering of the optical sensor measuring the water content is also dependent on the flow patterns and droplet characteristics. Therefore, it is important to investigate the detailed behavior of water droplets in the pipeline of the fuel transportation system.

In this study, the flow patterns and characteristics of water droplets in the turbulent pipe flow of two component liquids of gasoline and water were investigated using optical measurements. The dispersion of water droplets in the gasoline flow was visualized, and the size and velocity distributions of water droplets were simultaneously measured by the phase Doppler technique. The Reynolds number of the gasoline pipe flow varied in the range of 4×10^4 to 1×10^5 , and the water content varied in the range of 50 ppm to 300 ppm.

The water droplets were spherical and dispersed homogeneously in all variables of this experiment. The velocity of water droplets was not dependent on the droplet size and the mean velocity of droplets was equal to that of the gasoline flow. The mean diameter of water droplets decreased and the number density increased with the Reynolds number of the gasoline flow.

Key Words: Water contamination of liquid fossil fuel(액체연료의 물 오염), Two-component fluid flow(이성분유체 유동), Droplet dispersed flow(액적분산유동), Droplet characteristics(액적특성), Phase Doppler measurement technology(위상 도플러 계측법)

1. 서론

액체연료에 있어서 물은 가장 일반적인 오염물질이며 연소 시스템의 성능과 내구성에 많은 영향을 미치므로 수분의 농도는 연료의 품질을 결정하는 또 하나의 중요한 인자이다. 연료의 품질 관리에 있어서 수분의 허용치는 통상 약 100

ppm 정도로 극히 미소한 양이므로 신뢰성 있는 품질의 관리를 위해서는 수분의 양을 정확하고도 효과적으로 측정하는 것이 무엇보다 중요하다.

미량의 수분측정에 사용되는 적외선 분광 분석법이나 Karl-Fisher 전기량 분석법 등은 높은 정확도를 가지고 수분의 농도를 측정할 수 있지만 채취한 연료로부터 수분을 추출하여 실험실에서 측정하여야 하기 때문에 수분오염에 즉각적으로 대응하기가 어려운 단점이 있다. 따라서 연료의 품질을 효과적으로 관리하기 위하여는 송유관과 같은 연료수송의 물류단계에서 수분의 농도를 실

* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

*** SK 주식회사 제품기술연구팀

시간으로 측정하여 감시할 수 있는 수분감지 센서의 개발이 요구되고 있다.

물은 액체연료에 용해되지 않으며 연료의 유동 조건에 따라 물의 거동 특성이 변화되므로, 유동하는 연료의 수분감지센서를 개발하기 위해서는 이를 충분히 고려할 필요가 있으며, 특히 광학적 원리를 이용하는 경우에는 수액적의 유동양식과 입경 및 수밀도 등의 액적 특성이 산란광 특성에 미치는 영향을 고려하여야 한다^(1,2). 따라서 수분에 오염된 가솔린의 송유관에서의 수액적 거동 특성을 파악하려는 본 연구는 수분의 농도를 감지하는 광센서 시스템의 개발에 앞서 선행되어야 할 중요한 과제라고 할 수 있다.

물이 혼합된 액체연료의 연소에 있어서 수분의 농도에 따른 연소특성은 배기가스의 질소산화물(NO_x) 저감을 목적으로 비교적 많이 수행되었다^(3,4). 또한 이와 관련하여 물이 혼합된 액체연료의 미립화 및 분무에 관해서도 연구되어 왔다^(5,6). 그러나 관내를 흐르는 물과 가솔린의 이성분유체 유동에서 수액적의 미세 특성을 유체역학적으로 해명하려는 연구는 그다지 이루어지지 않고 있는 실정이다⁽⁷⁾.

본 연구에서는 가솔린의 송유관 유동을 상정한 가솔린과 물의 난류 관유동에서 가솔린의 유동조건과 수분농도에 따른 수액적의 특성을 실험적으로 규명하였다. CCD 가시화법을 이용하여 가솔

린 유동에서의 물의 분열과정과 유동형태를 관찰하였으며 위상 도플러 계측법에 의한 수액적의 입경분포와 속도분포의 동시 계측으로 수액적의 특성을 정량화하였다.

2. 실험 장치 및 계측 방법

2.1 실험 장치 및 조건

실험장치는 물에 오염된 가솔린의 송유관 유동을 모사하여 Fig. 1과 같이 정상상태의 관유동 실험장치가 제작되었다. 실험장치는 기능별로 대별하여 가솔린 공급부, 물 공급부, 가솔린과 물의 혼합부, 수액적의 계측부 등으로 구성되었다. 가솔린은 오일용의 정속형 로터리펌프(Toshiba社)를 이용하여 공급되었으며, 가솔린의 유량은 바이패스 관(By-Pass Pipe)과 유량조절 밸브로 제어되었다. 가솔린 공급 펌프의 후단에는 기포의 분리 및 제거를 위한 밸브가 설치되었다. 펌프의 기동초기에는 약간의 기포가 발생하였지만 일정 시간이 지난 후의 정상상태에서는 기포의 발생은 없었다.

물은 질소의 압력으로 가압되어 가솔린 공급펌프의 후단에 설치된 내경이 0.2 mm인 노즐을 사용하여 공급되었으며 물의 유량은 질소압력으로 제어되었다. 실제의 송유관에서는 가솔린에 함유된 물이 펌프를 통과하면서 작은 수액적으로 분

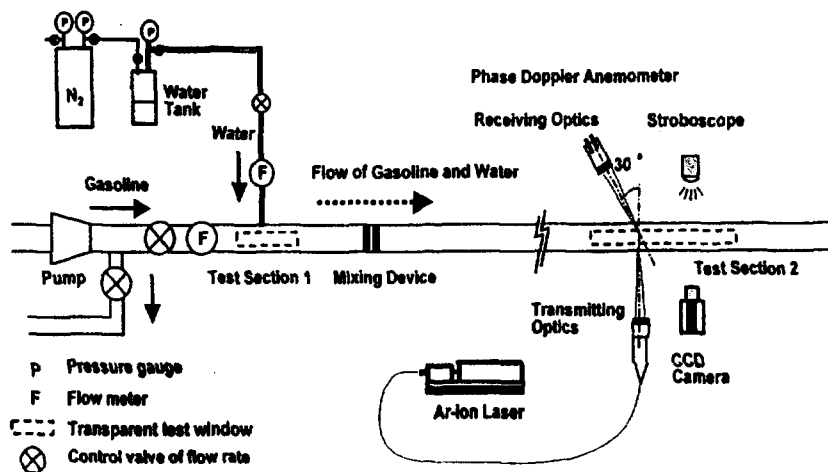


Fig. 1 Experimental set-up for two-component liquid pipe flow of gasoline and water.

열되면서 충분한 혼합이 이루어진다. 본 실험에서는 이러한 현상을 고려하여 물이 충분히 작은 크기로 분열되고 가솔린과의 충분한 혼합이 이루어지면서도 정량적인 제어와 계측이 가능하도록 하기 위하여, 노즐 하류에 메쉬(Stainless Mesh, #200, 74 μm cell) 2매를 증첩하여 제작한 혼합기를 설치하였다.

가솔린의 유동관은 광학 계측의 용이성을 위하여 정사각(28mm \times 28mm)관이 이용되었다. 가시화 창은 아크릴 재질로 제작되었으며 가솔린 유동 중에 물을 주입하는 물 공급부와 유동이 충분히 발달된 하류의 정상유동 계측부 등 2개소에 가시화 창을 설치하였다. 정상유동 계측부는 유동의 충분한 발달을 고려하여 혼합기로부터 관수력직경(D_h)의 약 70배인 2 m 하류에 설치하였다.

본 실험에서는 수분농도의 조건은 가솔린의 품질관리에 있어서 수분오염의 허용 한계치가 약 100 ppm 수준인 점을 감안하여 약 300 ppm까지의 범위로 하였다.

가솔린의 유동조건은 송유관의 단면적에 대한 가솔린의 평균속도(U_g)로부터 다음의 식(1)과 같이 정의되는 관유동의 레이놀즈 수(Reynolds Number)로 나타내었다.

$$Re_g = U_g D_h / \nu_g \quad (1)$$

여기서 D_h 는 송유관의 수력직경이며, ν_g 는 가솔린의 동점성계수이다. 가솔린의 유동조건은 주유소에서 사용되는 송유관의 유동조건을 고려하여 약 $Re_g = 4 \times 10^4$ 에서 약 $Re_g = 1 \times 10^5$ 까지의 범위로 하였다.

2.2 가시화 및 위상 도플러 계측

가솔린 유동에서의 물의 분열과정과 수액적의 거동특성을 관찰하기 위하여 CCD 카메라(Toshiba社)를 이용하여 가시화하였다. CCD 카메라의 화소(Pixel) 수는 640 \times 480이었으며 줌렌즈(Zoom Lens)를 장착하여 사용하였다. 광원은 10 μs 의 발광 지속시간을 갖는 방전관 펄스 스트로보스코프(Electric Pulse Optical Fiber Stroboscope)이었으며 확산지(Diffusion Paper)를 부착하여 이용하였다.

위상 도플러 계측법을 이용하여 수액적의 크기와 유동방향의 속도를 동시에 계측하였다. 액적 유동과 같은 이상유동에서 액적의 속도와 입경의 상호상관성은 액적의 거동과정에 대한 중요한 정

보를 제공하기 때문에 속도와 입경의 동시계측은 매우 중요하다⁽⁸⁾. 위상 도플러 계측법은 액적의 속도분포와 입경분포를 동시에 계측할 수 있는 매우 유용한 수단이다^(9,10). 두개의 레이저 광선이 교차되어 만들어지는 간섭호를 통과하는 액적으로부터의 산란광을 측정하는 도플러 신호의 주파수와 서로 다른 각도에 설치된 두개의 수광소자에서 측정된 도플러 신호의 위상차로부터 액적의 속도와 크기를 동시에 측정하는 위상 도플러 계측에서는 액적들이 일정한 굴절율을 갖는 구형체로 가정된다. 또한 측정값은 광학계의 특성과 기하학적 배열구조에 의존하므로 광학적 변수들의 최적화가 요구된다.

본 실험에서는 1차원 위상 도플러 계측시스템(TSI社)이 사용되었으며 예비실험을 통하여 다음과 같이 광학계를 설정하였다. 광원은 아르곤 레이저(Ar+ Laser)이었으며 광학 파이버(Optical Fiber)를 통하여 전송된 두개의 레이저 광선은 적절한 산란광을 확보하기 위하여 각각의 강도가 70 mW로 동일하게 조정되었다. 산란광의 측정각은 물과 가솔린의 상대굴절율 및 편광 등을 고려하여 30 $^\circ$ 로 설정하였다. 송광렌즈(Transmitting Lens)는 입경의 측정범위와 측정체적을 고려하여 초점거리가 250 mm의 렌즈를 사용하였으며, 수광렌즈(Receiving Lens)는 입경 분해능의 향상을 위하여 초점거리가 310 mm인 렌즈를 사용하였다.

Table 1 Optical set-up for phase Doppler measurements.

Transmitting optics	
Ar+ wavelength:	514.5 nm
Focal length:	250 mm
Spot diameter:	233 μm
Fringe spacing:	3.21 μm
Fringe number:	72
Receiving optics	
Focal length:	310 mm
Receiver aperture height:	2.0 mm
where	
Frequency shift:	40 MHz
Scattering angle:	30 degree
Phase to diameter conversion factor:	0.955 $\mu\text{m} / \text{deg}$.

이때 입경 분해능은 $0.956 \mu\text{m}/\text{deg}$ 이었다. 위상 도플러 계측시스템의 광학계에 대한 구체적인 설정치는 Table 1과 같다.

위상 도플러 계측은 혼합부로부터 충분히 떨어진 하류지점의 관중심에서 이루어졌으며, 각각의 실험조건에서 5×10^4 개 이상의 액적을 측정하여 분석하였다. 가시화를 통하여 이 지점에서 수액적이 구형이고 공간적으로 균일하게 분포됨을 확인하였으며, 따라서 위상 도플러 계측이 유효하다고 판단되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 노즐 근방의 수액적 거동

가솔린 유동의 레이놀즈 수(Re_g)와 물의 공급 유량(Q_w)에 따른 물의 분열과 수액적의 거동을 파악하기 위하여 가솔린 유동방향과 수직으로 설치된 노즐로부터 분출되는 수액적의 거동을 Fig. 2 및 Fig. 3과 같이 가시화하였다. Fig. 2는 가솔린의 유동이 정체되어 있는 경우이고 Fig. 3은 가솔린 유동의 레이놀즈 수가 $Re_g = 4.14 \times 10^4$ 인

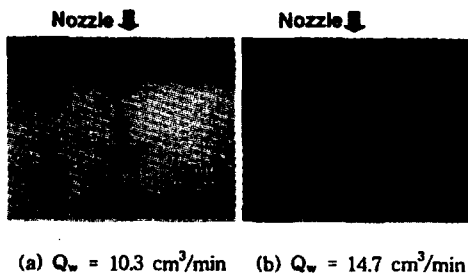


Fig. 2 Break-up of water droplets in gasoline flow of $Re_g = 0$.

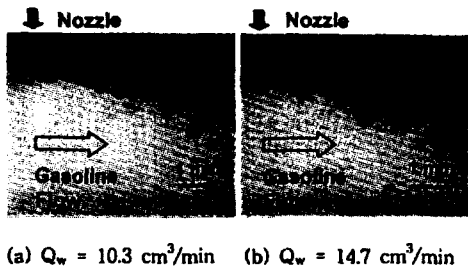


Fig. 3 Break-up of water droplets in gasoline flow of $Re_g = 4.14 \times 10^4$.

경우이다. 이때 가솔린의 평균유동속도는 $U_g = 0.64 \text{ m/s}$ 이었으며, 가솔린의 동점성 계수는 $\nu_g = 4.31 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 이었다. 물의 공급유량이 작은 Fig. 2(a)와 Fig. 3(a)의 조건에서는 물이 액적류(Dripping Flow)로 분출되었으며, 노즐 오리피스(Orifice) 직경의 2배인 약 0.4 mm 정도의 크기를 갖는 비교적 큰 수액적들이 생성되었다. 또한 불규칙한 모양으로 분출된 수액적이 시간이 경과되어 하류로 흐르면서 완전한 구형의 액적으로 변화되었다. 물의 공급량이 증가된 Fig. 2(b)와 Fig. 3(b)의 조건에서는 노즐 오리피스의 직경보다 작으면서도 다양한 크기의 수액적들이 다량으로 생성되어 분무류(Spray Flow)를 형성하였다. 이는 노즐을 통과하는 물의 유속이 증가됨으로써 물의 미립화가 촉진된 결과라 할 수 있다. 또한 가솔린 유동의 Re_g 가 증가되면 Fig. 3에서와 같이 수액적들은 가솔린 유동방향으로 흐르면서 혼합이 촉진됨을 알 수 있었다.

Fig. 2와 Fig. 3에서와 같이 물이 공급되는 노즐 근방에서는 가솔린의 속도변화에 따른 수액적의 입경 변화가 크게 나타나지 않았지만 하류에 설치된 혼합기에서 수액적의 분열과 혼합이 더욱 촉진되어 하류에서는 수액적들의 유동이 균일하게 되도록 하였다.

3.2 정상상태 유동에서의 수액적 거동

정상상태로 흐르는 가솔린 난류 관유동에서 수액적의 거동특성을 파악하기 위하여, 혼합부로부터 관 수력직경(D_h)의 약 70배 떨어진 하류지점의 관 중심부에서 수액적을 가시화하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 물의 농도가 각각 $C_w = 100 \text{ ppm}$ 과 $C_w = 200 \text{ ppm}$ 으로 일정한 조건에서 가솔린 유동의 변화에 따른 수액적의 거동을 나타낸다. 육안으로는 우유와 같이 탁한 색을 띠며 마치 수분이 가솔린에 용해되어 흐르는 것으로 관찰되었지만 확대 가시화를 통하여 구형상의 액적으로 이루어진 수액적들이 공간적으로 균일하게 분포하는 액적분산유동(Droplet Dispersion Flow)을 하고 있음을 알았다. Fig. 4 및 Fig. 5의 가시화 사진들로부터 가솔린 유동의 Re_g 가 증가함에 따라 수액적의 크기는 전체적으로 작아지고 수밀도는 증가함을 알았다. 이는 가솔린 유동의 Re_g 가 증가함에 따라 메쉬로 구성된 혼합부에서 수액적의 교란이 증가하여 분열이 촉진된 결과라 할 수 있

다. 또한 Fig. 4에서 보다는 물의 농도가 상대적으로 큰 Fig. 5에서 수액적의 크기가 다소 작게 나타났다. 이는 앞에서 살펴본 바와 물의 공급량이 증가함에 따라 노즐에서 물의 분열이 촉진되었기 때문이다.

가솔린과 물의 경우와 같이 밀도가 서로 다른 이성분유체의 유동양식은 이상유동의 경우와 비슷한 경향을 나타내며 Fig. 6에서와 같이 크게 세 가지의 유동양식으로 구분된다^(11,12). 첫 번째는 물의 농도가 크고 가솔린 유동의 Re_g 가 작은 층류유동의 경우로서, Fig. 6(a)와 같이 물과 가솔린이 밀도차 때문에 서로 분리되어 흐르는 유동 형태가 되는데 이를 성층유동(Stratified Flow)이라 한다. 두 번째는 물의 농도가 작고 가솔린 유

동의 Re_g 가 큰 난류유동의 경우로서, Fig. 6(c)와 같이 미세한 수액적들이 균일하게 분포되어 흐르는 유동이 되며 이를 액적분산유동(Droplet Disperse Flow)이라 한다. 세 번째는 성층유동과 액적분산유동의 천이영역으로서, Fig. 6(b)와 같이 불규칙한 크기의 액적들이 불균일한 분포로 부유하는 유동이 되고 이를 천이유동(Transient Flow)이라 한다. 본 실험에서의 조건은 가솔린 유동의 레이놀즈 수가 $Re_g = 4 \times 10^4$ 이상으로 매우 크며 물의 농도는 $C_w = 300$ ppm이하로 가솔린 유량에 비하여 매우 작기 때문에 모든 실험영역에서 수액적의 유동형태는 Fig. 4와 Fig. 5에서와 같은 액적분산유동을 하였다.

3.3 수액적의 입경 및 속도 특성

가솔린과 물의 액적분산유동에 있어서 가솔린 유동의 레이놀즈 수 Re_g 에 따른 수액적의 입경특성을 위상 도플러 계측법으로 측정하였다. 측정 위치는 Fig. 4와 Fig. 5의 경우와 동일한 지점으로써 혼합부로부터 2 m 떨어진 하류지점의 관 중심부에서 이루어졌다.

Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 물의 농도가 $C_w = 100$ ppm인 조건에서 가솔린 유동의 레이놀즈 수가 각각 $Re_g = 4.14 \times 10^4$ 과 $Re_g = 8.28 \times 10^4$ 일 때의 수액적 입경분포를 나타낸다. Re_g 가 상대적으로 작은 Fig. 7(a)의 입경분포도는 여러 개의 피크를 갖고 분산 범위가 넓은 분포를 보이고 있으나, Re_g 가 증가되면서 액적의 미립화가 촉진되어 Fig. 7(b)와 같이 큰 입경의 분포가 줄어들고 작은 입경의 분포가 증가하였으며 한 개의 피크를 갖는 정규분포의 입경분포가 되었다. 여러 개의

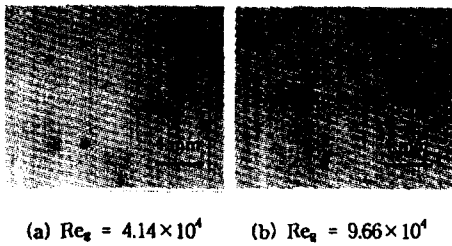


Fig. 4 Water-droplet dispersion at water content of $C_w = 100$ ppm.

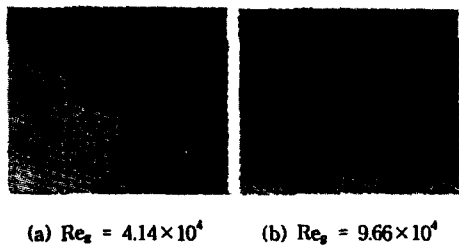


Fig. 5 Water-droplet dispersion at water content of $C_w = 200$ ppm.

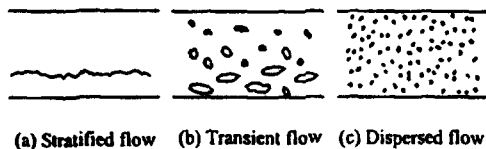


Fig. 6 Flow patterns of two-component liquid flow of gasoline and water.

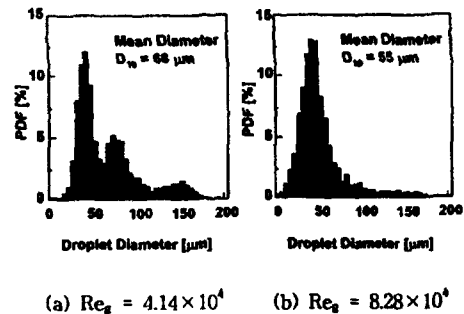


Fig. 7 Size distributions of water droplets at water content of $C_w = 100$ ppm.

피크를 갖는 Fig. 7(a)의 입경분포는 가솔린 유동의 속도가 증가함에 따라 작은 액적들보다 상대적으로 분열되기 쉬운 큰 액적들이 우선적으로 미립화되어 작은 액적으로 변하기 때문에 Fig. 7(b)와 같은 입경분포가 되었다고 사료된다.

Fig. 8은 가솔린 유동의 Re_g 및 수분의 농도 C_w 에 따른 수액적 입경의 산술평균값을 나타낸다. 모든 영역에서 가솔린 유동의 Re_g 가 증가하거나 수분의 농도 C_w 가 증가함에 따라 수액적의 크기는 비례적으로 감소하였다. 가솔린 유동의 레이놀즈 수가 $Re_g = 4.14 \times 10^4$ 에서 $Re_g = 8.28 \times 10^4$ 로 두배 증가함에 따라 평균입경은 약 25% 감소하였으며, 수분의 농도가 $C_w = 50$ ppm에서 200 ppm으로 증가함에 따라 평균입경은 약 15%가 감소하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 수액적들의 속도와 입경의 상호상관성을 나타낸다. Fig. 9는 수분의 농도와 가솔린의 레이놀즈 수가 각각 $C_w = 100$ ppm과 $Re_g = 4.14 \times 10^4$ 인 경우의 상관분포도이다. 수액적들의 속도는 수액적의 크기와는 무관한 분포를 보여주고 있다. Fig. 9는 가솔린의 Re_g 에 따른 수액적의 평균속도와 입경의 상호상관성을 속도 변동치의 RMS(Root Mean Square)값과 함께 나타낸 것이다. 여기서 액적들은 50 μm 의 입경단위로 분류된 각 입경군 별로 1×10^4 개의 액적들에 대하여 평균 속도와 속도 변동치의 RMS값을 분석(Size Classified Technique)하였다.

모든 유동조건에서 수액적의 평균속도와 속도 변동치의 RMS값은 모두 가솔린의 Re_g 에 따라서 비례적으로 증가하였다. 그러나 입경에 따른 변화는 매우 미소하였다. 본 실험에서는 레이놀즈 수가 $Re_g = 4 \times 10^4$ 이상으로 매우 크며 액적들의 크기는 250 μm 이하로 매우 작았다. 또한 공기 중에 액적이 존재할 때와는 다르게 상대적으로 밀도차가 적은 가솔린 유동 내에서는 충분한 운동량 교환이 이루어지기 때문에 가솔린의 유동에 대한 수액적의 추종성이 매우 크다고 할 수 있다. 따라서 액적의 속도 특성은 수액적의 크기와는 무관하게 나타난다고 사료된다.

4. 결론

송유관의 유동을 모사한 가솔린 난류 관유동에서 유동조건 변화에 따른 수액적의 특성 변화

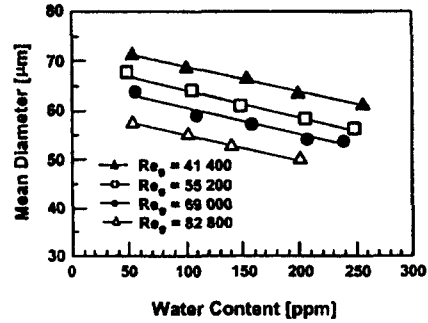


Fig. 8 Effects of flow conditions on mean diameter of water droplets.

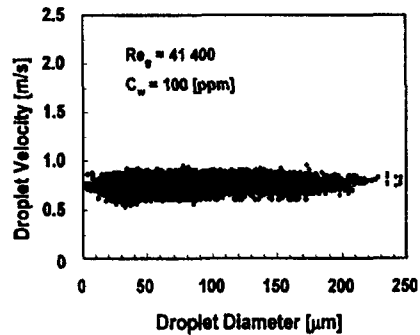


Fig. 9 Velocity-size correlation of water droplets in gasoline pipe flow.

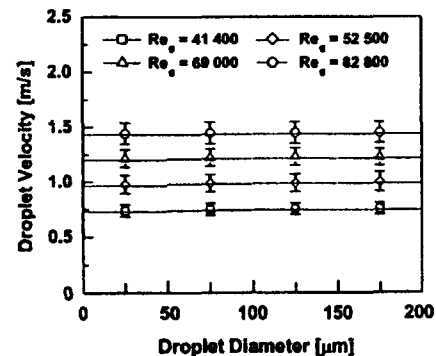


Fig. 10 Velocity-size correlation of size-classified droplets at water content of $C_w = 100$ ppm.

물 가시화 및 위상 도플러 측정법으로 계측한 결과로부터 다음과 같은 내용을 알 수 있었다.

(1) 가솔린의 관유동에 분사된 물은 충분히 발달된 하류에서 구형의 액적이 균일하게 분포하는 액적분산유동의 거동을 하였다.

(2) 가솔린의 유동에 대한 수액적의 추종성이 매우 커서, 수액적의 속도특성은 입경의 변화에는 거의 무관하였으며, 단지 가솔린 유동의 속도에 의존하였다.

(3) 수액적의 미립화는 가솔린의 유동속도에 의존하였으며, 가솔린 유동의 레이놀즈 수가 두배 증가함에 따라 수액적의 평균입경은 약 25% 감소하였다.

(4) 수액적의 크기는 물의 공급유량의 영향을 받았으며, 물의 농도가 두배 증가함에 따라 수액적의 평균입경은 약 4%가 감소하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실(NRL) 사업과 SK 주식회사의 지원을 받았습니다. 이에 관계기관에 사의를 표합니다.

참고문헌

- (1) R.W. Wood, Physical Optics, Dover Publication, Inc., New York, pp. 423~443, 1967.
- (2) L. Levi, Applied Optics, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 75~146, 1980.
- (3) J. M. Ballester, N. Fueyo and C. Dopazo, Combustion Characteristics of Heavy Oil-Water Emulsions, Fuel, Vol. 75, No. 6, pp. 695~705, 1996.
- (4) G. Greeves, I.M. Khan and G. Onion, Effects of Water Introduction on Diesel Engine Combustion and Emissions, Sixteenth Symposium (Int.) on Combustion, pp. 321~336, 1977.
- (5) A. Kufferath, K. Ehrardt, C. Heyse and W. Leuckel, Continuous Generation and Air-Assisted Atomization of Fuel Oil-Water-Emulsions, Combustion Science and Technology, Vol. 148, No. 1-6, pp. 17~26, 1999.
- (6) K. Takasaki, T. Fukuyoshi, M. Otsubo and S. Abe, Improvement of diesel combustion using a fuel-water-fuel injection system, JSME international, Series B, Fluid thermal Engineering, Vol. 41, No. 4, pp. 975~982, 1998.
- (7) 김정현, 배충식, 김승규, 신동현, 수분이 함유된 가솔린 에멀션 유동의 수액적 특성, 한국액체미립화학회 2000년도 학술강연회 논문집, pp. 175~179, 2000.
- (8) J.H. Kim, Y. Ikeda and T. Nakajima, Characteristic Measurements of Electrostatic Fuel Spray, Proc. Ninth International Symposium of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, pp. 21.5.1~21.5.6, 1998.
- (9) F. Durst and M. Zare, Laser Doppler Measurements in Two-Phase Flows, Proceedings of the LDA-Symposium, Copenhagen, pp. 403~429, 1975.
- (10) W.D. Bachalo and M.J. Houser, Phase Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurements of Drop Size and Velocity Distributions, Optical Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 583~590, 1984.
- (11) G.F. Hewitt, Measurement of Two Phase Flow Parameters, Academic Press, London, 1978.
- (12) J.G. Collier and J.R. Thome, Convective Boiling and Condensation, Oxford University Press, Oxford, pp. 8~33, 1996.