

이멀션유 정적믹서의 혼합특성 연구

김기성* · 박상규**

(여수대학교)

Mixing Characteristics of Static Mixers for Emulsion Oil

Ki Seong Kim, Sang Kyu Park

(Yosu National Univ.)

Abstract: The fuels of water-in-oil emulsion have a potential of reducing PM(Particulate Matter) and NOx emissions, and increasing combustion efficiency in the furnaces and the burners. For making the most of the beneficial of the secondary atomization due to the microexplosion, the water droplets distributed in the oil must have the optimal sizes. The purpose of this paper is to investigate the water droplet size distribution characteristics of the different types of the static mixers. For analysing the size distribution characteristics efficiently, image analysis system was constructed and an appropriate image processing algorithm was developed. Two kinds of static mixers: Kenics type and RF type, were tested. As a results, RF type static mixer shows a better characteristics in the mean drop sizes, particularly in the condition of high water content.

Key Words: Water-in-Oil Emulsion(유중수적형 유화연료), Static Mixer(정적믹서), SMD(Sauter Mean Diameter, 평균입경), Image Processing(화상처리)

1. 서론

최근 수 십년 동안의 기하급수적인 화석연료의 사용량 증가에 따라 야기된 이산화탄소 배출량 및 유해배출물 증가는 지구온난화와 환경오염 문제를 심각하게 하기에 이르렀다. 따라서 최근에는 화석 연료를 이용하는 전분야에 걸쳐서 이산화탄소 배출량 감소와 유해배출물 감소를 위해 연료를 고효율로 청정연소시킬 수 있는 여러 가지 기술들이 연구되고 있다.

이러한 연구의 한 분야로서 유중수적

형 유화연료(water-in-oil emulsified fuel)는 20세기초부터 거론되어 왔으나 최근에 와서야 유화유의 안정성과 질에 대한 제어기술이 발전함에 따라 산업용이나 발전용 연소기에 그 이용 가능성을 넓혀가고 있다^{1,2,3)}. 유중수적형 유화연료를 연소기에 적용할 경우 기대할 수 있는 장점은 열효율 증가, 입자상물질(particulate matter)의 감소, NOx 감소 등과 아울러 연소로의 파울링(fouling)을 저감시켜 유지보수를 용이하게 하는 것을 들 수 있다. 이러한 결과를 가능하게 하는 것은 미세

* 여수대학교 기계공학과

** 여수대학교 기계공학과

폭발(microexplosion)현상에 주로 기인한다. 미세폭발은 연소로에 분사되는 연료입자 내에 함유되어 있는 수적(water droplet)들이 연소로의 고온 분위기에 노출되면서 급격히 증발함으로 인해 폭발 분열하는 2차미립화를 뜻하는 것이다^{4,5}. 미세폭발을 효과적으로 이용할 경우 중유와 같은 점도가 높고 휘발성이 낮은 연료를 단순히 압력식 분사노즐이나 2유체 분사노즐을 통해 분사할 때에 비해 미립화 특성이 크게 개선될 수 있고, 따라서 입자상물질의 배출이 크게 감소할 수 있는 잠재력이 있는 것으로 알려져 있다.

미세폭발에 의한 2차미립화의 효율성은 이멀션유 내에 분포하는 수적의 크기 분포에 지대한 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 수적의 직경이 $1\mu\text{m}$ 이하로 너무 작게 되면 증기에 의한 폭발에너지가 너무 적어 효과적인 미립화가 되지 못하고, 수십 μm 이상으로 크게 되면 연료액적 내의 수적수가 크게 감소되어 연료액적의 급격한 분열효과가 떨어지게 된다. 미세폭발이 효과적으로 일어나기 위한 수적의 직경은 연소로에 분사되는 연료액적의 직경에 따라 다르며, 일반적인 연소로에서 연료액적의 평균직경이 $50\sim 200\mu\text{m}$ 정도인 것을 감안할 때 이멀션유 내에 분포하는 수적의 크기가 직경으로 $5\sim 20\mu\text{m}$ 정도일 때 2차미립화 효과가 큰 것으로 알려져 있다.

물을 미립화하여 이멀션유 내에 안정적으로 미립화시키는 방법으로써 flow jet mixer, mechanical agitator, colloid-mill, homogenizer, ultrasonic mixer 등과 Kenics type의 정적믹서(static mixer) 등이 시도되고 있다⁶. 이 중에서 운동부위가 없고 안정적이며, 제작단가가 상대적으로 저렴한 정적믹서가 가장 장점이 많기 때

문에 이를 개발하여 상업화하기 위한 연구가 진행되고 있으나 형태 및 운전 조건에 따른 성능 즉, 수적의 입경분포에 관한 구체적인 데이터 발표는 소수에 그치고 있다. 이에 대한 데이터가 적은 것은 제작회사가 기술 노출을 꺼려하는 부분도 있겠지만, 이멀션유 내 수적의 입경분포를 측정할 수 있는 방법이 효율적이지 못하다는 것도 큰 이유가 되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 먼저 C중유와 물을 섞은 이멀션유에 대해 이멀션유 내 수적의 입경분포를 효율적으로 측정할 수 있는 방법을 개발하였으며, 이를 수적 직경이 효과적인 2차미립화를 하기에 적합한 특성을 갖는 정적믹서 개발에 응용하였다. 본 연구에서는 2가지 형태의 정적믹서에 대해 시험하여 그 특성을 분석하였는데, 산업적으로 응용도가 높은 Kenics형 믹서와 당 연구실에서 이멀션유에 적합하게 개발한 Radial-Fin형 믹서의 특성을 비교 분석하였다.

2. 시험장치 및 시험조건

2.1 수적 입경분석장치 H/W

Fig.1은 이멀션유의 수적 입경분석을 위해 구성한 이미징 시스템의 구성을 나타낸 것이다. 광학시스템은 $4\mu\text{m}$ 크기의 수적까지도 측정이 가능하도록 back-lighting에 의한 이미징이 되도록 하였으며, 광원은 30W 백열전구를 이용하였다. 영상획득은 디지털 CCD 카메라(LaVison社의 Imager3S)를 이용하였는데, 이 카메라의 대표적인 사양은 픽셀수: $1280(H)\times 1024(V)$, 픽셀 크기: $6.7\mu\text{m}\times 6.7\mu\text{m}$, Dynamic Range: 12bit이고, dark charge 영향을 줄이기 위해 Peltier cooling을 적

용해서 CCD 센서 온도를 -12°C 로 유지하는 고정도 CCD 카메라이다. 카메라 렌즈는 초점길이가 50mm인 Nikon 렌즈를 이용하였으며, 배율은 6.4배로 하였다. 이미징 시스템의 캘리브레이션은 유리판에 크롬 도금한 reticle을 이용하여 행했다.

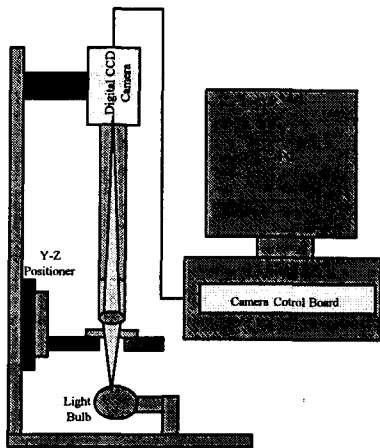


Fig.1 Layout of the image analysis system.

2.2 정적믹서의 형태 및 시험 조건

정적믹서는 운동부위가 없는 믹서로서 광범위한 점성의 유체에 대해서 효과적이며, 특히 서로 다른 액체간의 혼합에 적합해서 주로 화학플랜트의 프로세스에 많이 이용되며, 여러 형태가 이용되고 있다. 본 연구에서는 단순히 물과 C중유를 혼합하기 위한 것이 아니라 물을 적절한 크기의 입자로 분할하여 균일하게 분산시키는 것이 목적이므로 기존의 여러 형태 중에서 Fig.2와 같은 Kenics형 믹서에 대해 수적 입경분포 특성을 시험하였다. Kenics형 믹서는 외경이 4mm인 믹서요소를 8단 직렬로 연결하여 원형 파이프에

장착한 구조로서 믹서요소를 지나는 유체는 강한 스월유동을 하게 되고 각 단을 통과할 때마다 스월유동이 분할되도록 되어 있다. 프리믹서에서 물이 큰 입자로서 분포하면서 조약하게 혼합된 물과 C중유가 여러 단으로 이루어진 믹서요소를 통과하면서 강한 스월유동으로 인한 전단력과 단의 경계 부위에서의 충격분할로 인해 수적이 작은 입자로 분할되는 원리이다. 이 때의 시험 조건은 Table 1과 같다. C중유의 온도는 저장 탱크에 설치한 히터와 온도제어 장치에 의해 60°C 정도 유지한 상태에서 시험을 행하였다.

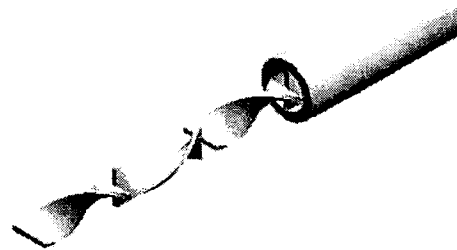


Fig.2 Shapes of Kenics type static mixer

Table 1 Test conditions of Kenics type static mixer.

Water contents (% by volume)	10, 20, 30
Upstream Pressure (bar)	4, 6, 8

앞서 언급한 바와 같이 이멀션유체의 제조에 있어서 중요한 것은 물을 직경이 $5\sim 20\mu\text{m}$ 의 크기로 미립화하여 오일 내에

분산시키는 것인데, Kenics형 믹서를 비롯한 대부분의 믹서가 믹서 내의 유체 유동에 대한 충돌빈도가 작아 물을 미립화하는 측면에서는 효과적이지 못하도록 되어 있다. 따라서, 믹서 내의 유체 유동에 대한 충돌빈도가 큰 형상을 고안하였는데, Fig.3과 같은 형상을 갖으며, Radial Fin형(이하 RF형으로 약칭함) 믹서로 명명하였다. RF형 믹서에 대한 특성 시험방법은 Kenics형 믹서의 시험 방법과 같으며 시험 조건은 Table 2와 같다.

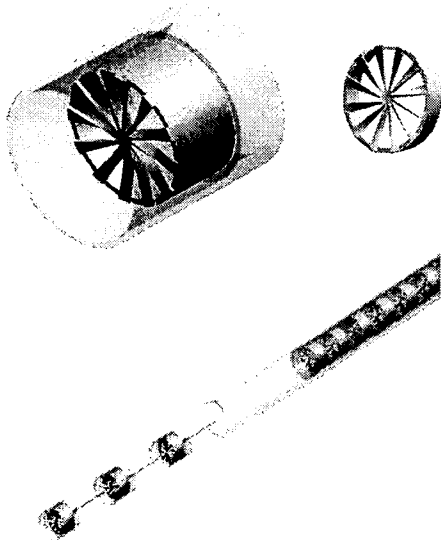


Fig.3 Shapes of RF type static mixer

Table 1 Test conditions of RF type static mixer.

Water contents (% by volume)	10, 20, 30
Upstream Pressure (bar)	4, 6, 8
Number of Elements	21, 45, 65

정적믹서 특성시험시 이멀션유 내에 함유되어 있는 수분의 함량을 정확히 측정하는 것은 쉽지 않은 문제인데, 여러 가지 방법을 시도해본 결과 제조된 이멀션유 샘플을 bomb calorimeter로 열량측정하는 것이 가장 정확해서 이 방법을 이용하였다. 이멀션유 샘플에 대해 열량을 측정하여 물이 함유되어 있지 않은 순수한 C중유에 대한 열량과 비교하면 물이 함유되어 있는 양만큼 열량이 적게 나오기 때문에 물함유량 측정이 가능하다.

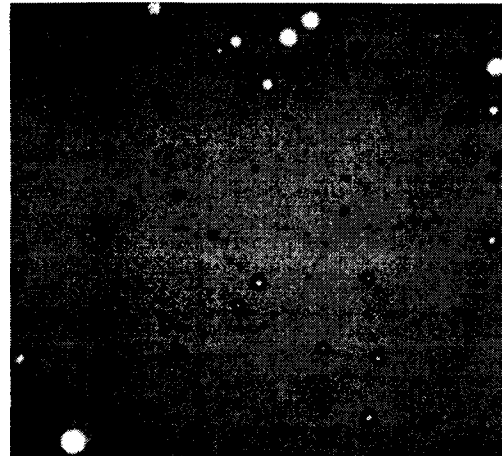


Fig.4 Typical image of water droplets in water-in-oil emulsion

3. 수적 입경분석 방법 및 알고리즘

제조된 이멀션유 내의 수적 입경분포 특성을 효율적으로 측정하기 위해 앞서 언급한 방식으로 H/W를 구성하였다. 이 멀션유 샘플을 OHP용 필름에 얇게 퍼지도록 해서 이미지를 찍으면 Fig.4와 같이 수적 입자가 명확하게 보이는 디지털 사진이 얻어진다. 이 수적 이미지의 특징은

back-lighting이므로 수적 부위는 빛이 잘 통과하여 밝게 나타나며, C중유의 탁도(opacity)가 높기 때문에 C중유만 얇게 도포 되어있는 영역은 어둡게 나타난다.

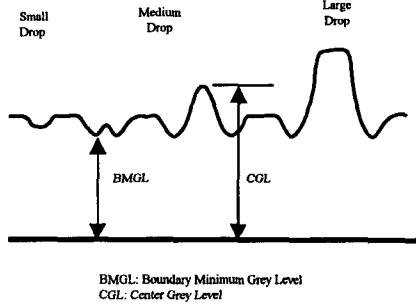


Fig.5 Droplets image characteristics with respect to the drop sizes

입자크기에 따라 이미지 특성이 다르게 나타나는데, 큰 입자는 중심 부위가 밝고 경계부근이 주위배경보다 어두우며, 아주 작은 입자는 중심부도 주위배경보다 어둡게 나타난다. 이는 수적이 일종의 투명한 구(sphere)이기 때문에 중심부를 통과하는 빛은 굴절이 적지만 경계부근으로 갈수록 빛이 굴절되어 중심부로 모이거나 입사각이 임계값보다 크기 때문에 투과하지 못하게 되기 때문이다. 아주 큰 입자의 중심부 화상소자에서는 포화현상이 일어난다, 본 시험에 이용한 CCD가 12비트 dynamic range를 갖고 있음에도 불구하고 수 μm 크기의 입자까지 측정할 수 있도록 빛의 강도 즉, CCD 축적시간을 정했기 때문에 큰 입자에서는 중심부위에서 포화현상이 일어나 앞서 언급한 바와 같이 수적 경계부위에서의 빛이 차단되어 어둡게 나타나기 때문에 측정에 큰 오류를 주지는 않는다. 아주 작은 수적(약 $13\mu\text{m}$ 이하)의 경우 입자의 중심부가 밝게 나타나

지 않은 것은 빛의 회절에 기인한 이미지 시스템의 공간분해능 한계로 인한 것이다. Fig.5는 이러한 특징을 도시한 것이며, 이미지 프로세싱에 의해 자동적으로 수적을 찾아내고, 그 크기를 정하는 S/W 작성시 이러한 특징들을 이용하였다.

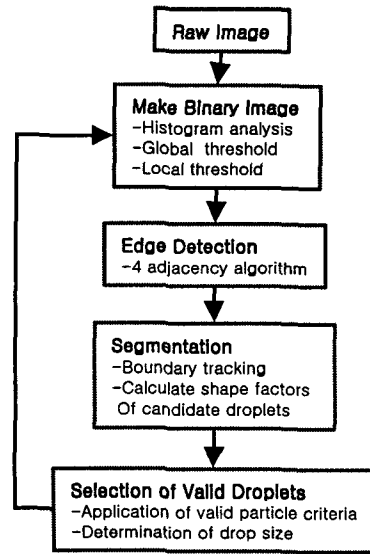


Fig.6 Image processing algorithm for automatic calculation of water drop sizes

Fig.6은 한 프레임의 이미지에서 수적 영상을 추출하는 이미지 프로세싱 알고리즘을 나타낸 것이다. 알고리즘의 특징은 여러 단계에 걸쳐서 입자후보를 추출하며, 각 단계는 히스토그램 분석을 통한 배경 휘도 결정, 각 단계별 TGL(threshold grey level)에 따른 2진 이미지 작성, 4 adjacency algorithm에 의한 입자후보의 경계선 결정 및 입자후보의 크기, 위치 및 형상 정보 계산, 수적입자 선정 및 크기 계산 등으로 이루어져 있다. 앞서 언급한 바와 같이 입자 크기에 따라 이미지 특성

이 다르므로 입자후보 추출방법과 입자선택 방법이 각 단계별로 다르게 하였다.

4. 정적믹서의 수적 입경분포 특성 시험 결과

4.1 Kenics 믹서의 수적분포특성

Kenics형 믹서의 이멀션유 제조용 믹서로서의 적용 적합성을 판단하기 위해 이 믹서의 수적분포특성을 측정하였다. 본 논문에는 믹서관의 내경(믹서 요소의 외경)이 4mm에 대한 데이터만 제시하였으나 적정 크기 선정을 위한 예비시험에서는 8mm와 12mm에 대한 시험도 행했다. 예비 시험 결과 직경이 큰 경우 상당량의 물이 작은 수적으로 분열되지 않고 따로 분리되는 현상을 보였다. 4mm의 경우는 물 함량 20%까지는 이러한 현상이 없었으나 물함량 30%에서는 이러한 현상이 나타났다. 이러한 결과를 볼 때 Kenics형 믹서의 경우 직경을 작게 하여 반경방향에 대한 속도구배를 크게 해야만 효과가 있는 것으로 간주할 수 있다.

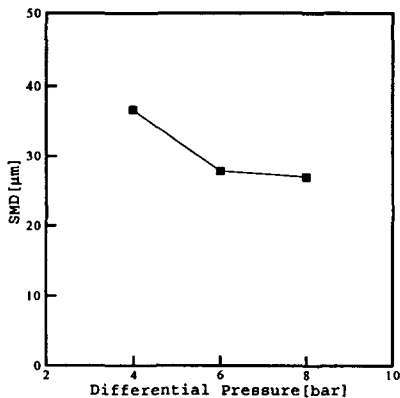


Fig.7 Effects of upstream pressures on mean drop sizes in Kenics type mixer

직경4mm(8단)인 Kenics형 믹서에 대해서 물함량과 상류부 압력이 수적분포에 미치는 영향을 조사하였다. Fig.7은 물함량 20%인 조건에서 믹서 상류부 압력을 변화시켰을 때의 수적의 SMD(Sauter Mean Diameter)를 도시한 것이다. 압력이 4bar에서 6bar로 증가될 때는 SMD가 감소하나 8bar일 때는 6bar일 때와 비슷한 특성을 보이고 있다. Fig.8은 물 함량 변화에 대한 SMD 변화를 도시한 것이다. 물함량이 10%일 때가 20%에 비해 SMD가 크게 작아짐을 알 수 있다.

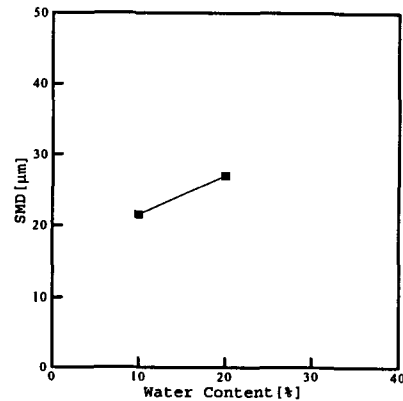


Fig.8 Effects of water contents on mean drop sizes in Kenics type mixer

4.2 RF형 믹서의 수적분포 특성

이멀션유 제조용 믹서로서 개발한 RF형 믹서의 운전조건에 따른 수적분포특성을 조사하였다.

Fig.9는 상류부 압력을 변화시켰을 때 SMD 변화를 나타낸 것인데, 압력이 증가함에 따라 SMD가 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있다. Kenics형 믹서와는 반대되는 경향을 보이는데, 그 이유는 Kenics형

믹서의 경우 수적이 분열이 되는 주요 기구(mechanism)가 속도구배에 의한 변형이기 때문에 상류부 압력이 증가하면 속도가 증가하여 속도구배가 커지기 때문에 상류부 압력 증가에 따라 SMD가 작아지는 반면에 RF형 믹서는 주요 분열기구가 편에 부딪칠 때의 충격이기 때문에 압력이 증가하여 유량이 증가하면 오히려 SMD가 증가하는 경향이 있다.

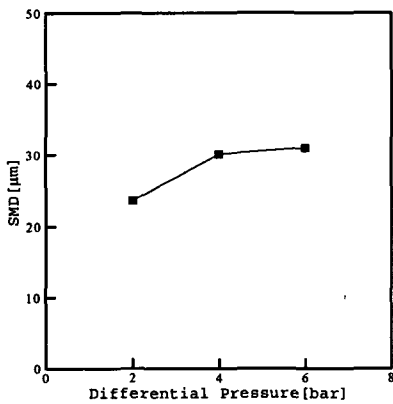


Fig.9 Effects of upstream pressures on mean drop sizes in RF type mixer.

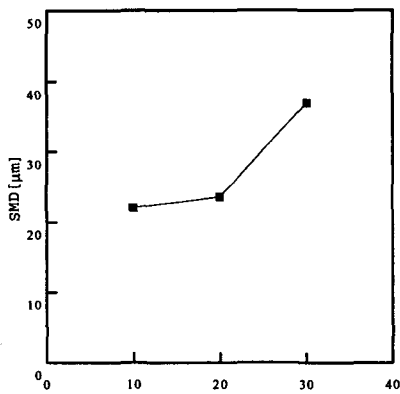


Fig.10 Effects of water contents on mean drop sizes in RF type mixer.

Fig.10은 물 함량에 따른 SMD 변화를 나타낸 것으로 물 함량이 20%에서

30%로 증가하면 SMD가 크게 증가하나 20%에서 10%로 감소하면 SMD가 약간 줄어든다. 물함량에 따른 특성은 Kenics형 믹서와 같은 경향이다. Fig.11은 RF형 믹서의 단수에 따른 SMD 변화를 나타낸 것인데 단수가 적어질수록 SMD가 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

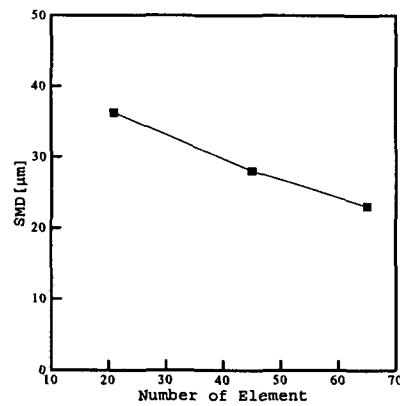


Fig.11 Effects of element number on mean drop sizes in RF type mixer.

위의 결과들로부터 Kenics형 믹서와 RF형 믹서의 특성을 비교해 보면 다음과 같은 특징이 있다. 동일 유량 조건일 때 즉, Kenics형 믹서의 상류부 압력 6bar, RF형 믹서의 상류부 압력 2bar 조건을 비교해 보면 RF형 믹서의 미립화특성이 다소 좋게 나타난다. 관내 유속이 압력차의 제곱근에 비례한다는 것과 RF형 믹서의 관단면의 유효면적이 4mm Kenics형 믹서에 비해 약4배 크다는 것을 이용하여 두 경우의 압력손실을 대략적으로 비교해보면 RF형 믹서가 요소 수에 있어서 훨씬 많음에도 불구하고 압력손실이 적음을 알 수 있다. 그리고, 물함량이 많을 때에도 RF형 믹서는 따로 분리되는 물이 없는 반면 Kenics형 믹서의 경우는 물이 따로 분리되는 문제점이 있다.

5. 결론

미소폭발을 극대화하기에 적합한 수적 크기분포를 갖는 이멀션유 제조용 정적믹서를 개발하기 위해서 화학 프로세스에 널리 이용되는 Kenics형 믹서의 수적분포특성을 조사하였고, RF형 믹서를 고안, 제작하여 그 특성도 함께 조사하였다. 그리고, 이멀션유 수적분포를 효율적으로 측정할 수 있는 분석시스템을 구성하였고, 이에 적합한 이미지 프로세싱 알고리즘을 개발하였다. 시험결과 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1. Kenics형 믹서의 경우 요소직경이 크면 물함량이 많을 경우 상당량의 물이 따로 분리되며, 수적크기를 작게 하기 위해서는 요소직경이 작아야 한다.
2. Kenics형 믹서의 경우 상류압력을 크게 하거나 물 함량을 적게 하면, 평균수적입경은 작아진다.
3. RF형 믹서는 상류압력을 크게 하면 평균수적입경이 커지며, 단수를 많거나 물함량이 적으면 평균분무입경은 작아진다.
4. 이멀션유 제조시 대용량 믹서로서는 RF형 믹서가 Kenics형 믹서에 비해 적합하다.

참고문헌

- (1)R.E.Hall, "The Effect of Water/Residual Oil Emulsions on Air Pollutant Emissions and Efficiency of Commercial Boilers", Journal of Engineering for Power, Trans. of the ASME, pp.425-433, 1976
- (2)J.T.Beard, and R.E.Hall, "Performance and Air Pollutant Emissions of an

- Experimental Water/Residual Oil Emulsion Burner in a Commercial Boiler, Journal of Engineering for Power, Trans. of the ASME, Vol. 103, pp.788-796, 1981
- (3)F.D.A.Souza, L.S.Messias, M.M. Santos, and R.Kunert, 2nd European Conference on Industrial Furnace and Boilers, Algarve, Portugal, pp. 1-5, April, 1990
- (4)C.K.Law, C.H.Lee, and N.Srinivasan, Combustion and Flame Vol.37, pp.125-143, 1980
- (5) M.Tsue, T.Kadota, D.Segawa, and H.Yamasaki, 26th Symp.(Int'l) on Combustion. The Combustion Institute, pp.1573-1578, 1992
- (6)N.Nagai, T.Kumazawa, Y.Hayakawa, and H.Okazaki, 2nd International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Madison, USA, pp. 215-219, 1982