

## 이멀션유용 방사상 핀 정적믹서 개발

김 기 성\* · 박 상 규\*

### Development of Radial Fin Static Mixers for Emulsion Oil

K-S Kim · S-K Park

**Key words** : Water-in-oil emulsion(유중수적형 이멀션유), Static mixer(정적믹서), SMD (Sauter mean diameter, 평균입경), Image processing(화상처리)

#### 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.

#### 서 론

최근 화석연료 및 저질유의 사용량 증가로 야기된 이산화탄소 배출량 및 유해 배출물 증가는 지구 온난화와 환경오염 문제 등을 제기하고 있다. 따라서 화석연료 및 저질유를 사용하는 분야에서 이산화탄소, SOx, NOx 등의 유해배출물 감소를 위해 연료를 고효율, 청정 연소시킬 수 있는 여러 가지 연소방법들이 연구되고 있다.<sup>1,2,3)</sup>

이러한 연구의 한 분야로서 유중수적형 이멀션유(water-in-oil emulsified fuel)는 20세기초부터 거론되어 왔으나, 최근에 이르러서야 유해배출물 감소를 위한 이멀션유의 안정성과 제어기술이 발전함에 따라 산업용이나 발전용 연소기에 이용 가능성을 넓혀가고 있다. 유중수적형 유화연료를 연소기에 적용할 경우 기대할 수 있는 장점은 열효율 증가, 입자상물질(particulate matter)의 감소, NOx 감소 등과 아울러 연소로의 파울링(fouling)

\* 여수대학교 기계자동차공학부(원고접수일 : 2001년 7월)

을 저감시켜 유지보수를 용이하게 하는 것을 들 수 있다. 이러한 효과들은 유중수내의 수적입자의 미세폭발(micro explosion)현상에 주로 기인한다. 미세폭발은 연소로에 분사되는 연료입자 내에 함유되어 있는 수적(water droplet)들이 연소로의 고온 분위기에 노출되면서 급격히 증발함으로 인해 폭발 분열하는 2차 미립화를 뜻하는 것이다.<sup>45)</sup>

미세폭발을 효과적으로 이용할 경우 증유와 같이 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 장점이 있는 것으로 알려져 있다.

미세폭발에 의한 2차미립화의 효율성은 이멸선유 내에 분포하는 수적의 크기분포에 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  $\mu\text{m}$  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 이멸선유 내에 분포하는 수적의 크기가 직경으로  $5\sim 20\mu\text{m}$  정도일 때 2차 미립화 효과가 큰 것으로 알려져 있다.

물을 미립화하여 이멸선유 내에 안정적으로 미립화시키는 방법으로써 flow jet mixer, mechanical agitator, colloid-mill, homogenizer, ultrasonic mixer 등과 Kenics type의 정적믹서(static mixer) 등이 시도되고 있다. 이 중에서 운동부위가 없고 안정적이며, 제작단가가 상대적으로 저렴한 정적믹서가 가장 장점이 많기 때문에 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, 이멸선유 내 수적의 입경분포를 측정할 수 있는 방법이 효율적이지 못하다는 것도 큰 이유가 되고 있다.

지금까지의 연구 동향을 살펴보면 유화연료의 미세폭발, 증발, 분무화염에 대해서 중점적으로 연구되고 있다.<sup>6)~9)</sup> 이러한 연료의 이용은 산업현장에서 자동차용 및 발전용 디젤엔진, 가스터빈<sup>10)</sup>, 연소로 등에 이용되고 있다. Nagai<sup>11)</sup> 등은 이유체노즐과 공동유체 분산기를 조합하여 유화연료의 미립화에 관한 연구를 하였으며, Zhou<sup>12)</sup>와 Thorp<sup>13)</sup> 등은 이론적 연구를 통하여 연료의 연소에 미치는 유화연료 미립화의 영향을 연구하였다.<sup>14)</sup>

따라서, 본 연구에서는 먼저 B-C증유와 물을 섞은 유중수적형 이멸선유의 물의 함유량에 의한 발열량을 조사하고, 이 연료에 대해 수적의 입경분포를 효율적으로 측정할 수 있는 알고리즘을 개발하였으며, 효과적인 2차미립화를 하기에 적합한 수적 직경을 만들 수 있는 정적믹서 개발을 하였다. 본 연구에서는 기존의 제품인 Kenics형 믹서와 새로 개발한 Radial-Fin형 믹서의 특성을 비교 분석 하였다.

## 2 실 험

### 2.1 실험장치

#### 2.1.1 유중수 제조장치

Fig. 1은 유중수를 만드는 제조장치의 개략도이

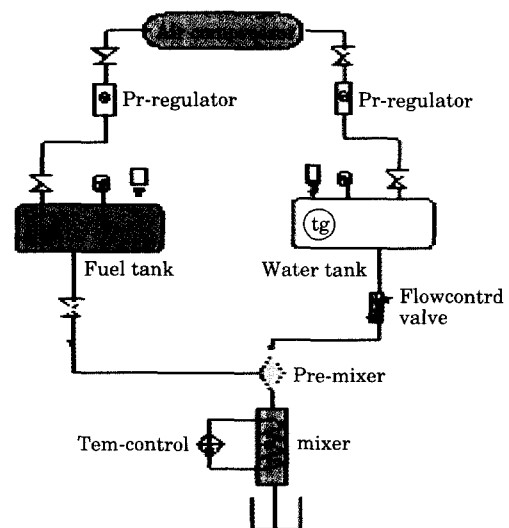


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

다. 콤푸레샤로 부터 압축된 공기는 연료탱크와 물 탱크로 연결하여 프리믹서를 거쳐 정압믹서에 연결하였다. 이멀션유 제조를 위해서 본 실험에서 사용한 B-C유는 비중, 동점도는 각각 0.97, 50cst(mm<sup>2</sup>/s)이다. 연료탱크 및 물탱크에 압력은 4.6 bar, 2bar로 유지하여 유량조정밸브를 통과하여 프리믹서로 유입되게 하였다. 프리믹서는 B-C유가 유입되는 중앙에 위치한 직경2mm 1개의 홀과 물이 유입되는 직경8mm 홀 8개가 방사상으로 구성되어 프리믹서내에서 1차혼합이 이루어져 정압믹서를 통과하게 하였다. 상부의 일정한 압력은 레귤레이터에 의해 상부의 압력을 일정하게 유지하였다. 프리믹서에서 혼합이 이루어진 이멀션유는 정압믹서를 둘러싼 히터에 의하여 이멀션유의 온도가 60°C가 일정하게 유지되도록 하여 이멀션유를 제조하였다.

2.1.2 유중수 분석장치

Fig. 2는 이멀션유의 수적 입경분석을 하기 위하여 제작한 이미지 분석시스템을 나타낸 그림이다. 광학시스템은 4μm 크기의 수적까지도 측정이 가능하도록 back-lighting에 의해서 이멀션유내의 수적의 이미지를 얻도록 하였다. 광원은 30W 백열 전구를 이용하였으며, 영상획득을 위해서는 디지

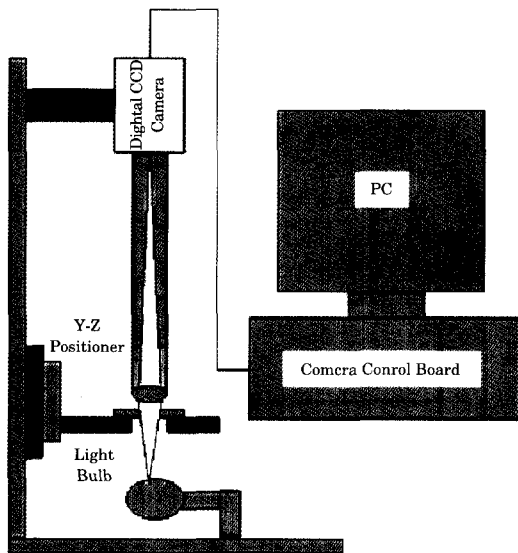


Fig. 2 Layout of the image analysis system

털 CCD 카메라( LaVison社의 Imager3S)를 이용하였으며, 카메라로부터 얻어진 데이터는 본 실험실에서 제작한 분석 알고리즘에 의해서 분석한다. 카메라의 대표적인 사양은 픽셀수: 1280(H)×1024(V), 픽셀 크기: 6.7μm×6.7μm, Dynamic Range: 12bit이고, dark charge 영향을 줄이기 위해 Peltier cooling을 적용해서 CCD 센서 온도를 -12°C로 유지하는 고정도 CCD 카메라이다. 카메라 렌즈는 초점길이가 50mm인 Nikon 렌즈를 이용하였으며, 배율은 6.4배로 하였다. 이미지 분석시스템의 캘리브레이션은 유리판에 크롬 도금한 reticle을 이용하였다.

2.1.3 Kenics 믹서

정적믹서는 일반적으로 믹서내의 요소들의 운동부위가 없어 반영구적으로 사용 가능한 장점을 지니고 있다. 광범위한 점성유체에 대해서 효과적이며, 특히 서로 다른 액체간의 혼합유동을 만드는 화학플랜트의 프로세스에 많이 이용되고 있다. 본 연구에서는 단순히 물과 B-C중유를 혼합뿐만 아니라 중유속에 물이 적절한 크기의 입자로 분할되어 균일하게 분산시키는 것이 목적이므로 기존의 여러 형태 중에서 Fig. 3과 같은 Kenics형 믹서를 채택하여 유화연료를 만들어 수적 입경분포 특성을 시험하였다.

먼저 Kenics형 믹서는 외경 4, 8, 12mm의 3종으로 제작하였다. 각각의 믹서요소를 8단 직렬로 연결하였으며, 원형 파이프에 장착한 구조로서 믹서요소를 지나가는 유체는 강한 스윙유동을 하게 되고 각 단을 통과할 때마다 스윙유동이 먼분할 되도록 되어있다. 프리믹서를 통과한 물과 B-C중유

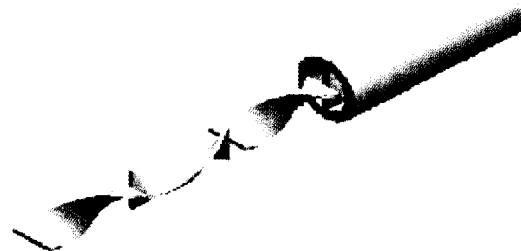


Fig. 3 Shapes of Kenics type static mixer

**Table 1 Test conditions of Kenics type static mixer.**

Water contents (% by volume)	10, 20, 30
Upstream pressure(bar)	4, 6, 8
Number of elements	8
Outer diameter of elements(mm)	4 (8, 12)

의 이멀션유는 물이 큰 입자로서 분포되어 여러 단으로 이루어진 믹서요소를 통과하면서 강한 스윙 유동으로 인한 전단력과 단의 경계 부위에서의 충격분할로 인해 수적이 작은 입자로 분할되어 진다. 이 때의 Kenics형 정적믹서시험 조건은 Table 1과 같다.

이멀션유의 물 함유량은 10, 20, 30%로 설정하였으며, 상부 압력의 조건은 4, 6, 8bar로 변화하며 Kenics형의 믹서의 직경4, 8, 12mm 변화에 따른 이멀션유를 제조하였다. 예비 실험과정에서 Kenics형 믹서의 직경 8, 12mm인 경우는 믹서내의 유체유동에 대한 충돌빈도가 작아 수적입자의 직경이 5~20 $\mu$ m의 크기로 미립화시키는 측면에서 효과적이지 못하여 이멀션유를 제조하지 못했다. 직경이 커지게 믹서요소들의 면분할과 직경과의 상관관계의 원인으로 유수가 분리되어 본 연구 조건에서는 유중수적형 이멀션유를 만들지 못해 직경 4mm인 경우 한가지에 의해 제조하였다.

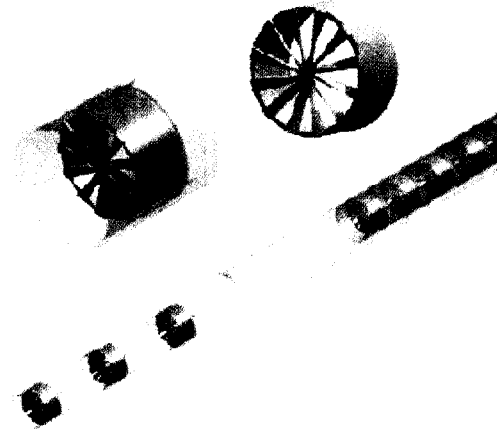
2.1.4 개발된 Radial fin 믹서

Fig. 4는 본 실험에서 개발한 Radial Fin형(이하 RF형으로 약칭함) 믹서이다. RF형 믹서에 대한 특성 시험방법은 Kenics형 믹서의 시험 방법과 같으며 시험 조건은 Table 2와 같다.

이멀션유의 물 함유량은 10, 20, 30%로 Kenics형과 같은 조건이나 상부 압력의 조건은 2, 4, 6bar로 변화시켰다. RF형 믹서의 직경은 8mm이며, RF형 믹서내의 요소 수를 21, 45, 65개로 3종으로 변화시켜 이멀션유를 제조하였으나, 본 연구에서는 요소수가 많아질수록 수적분포가 좋은 경향을 보여 65개인 경우만 측정하여 이멀션유를 제조하였다.

2.2 실험방법

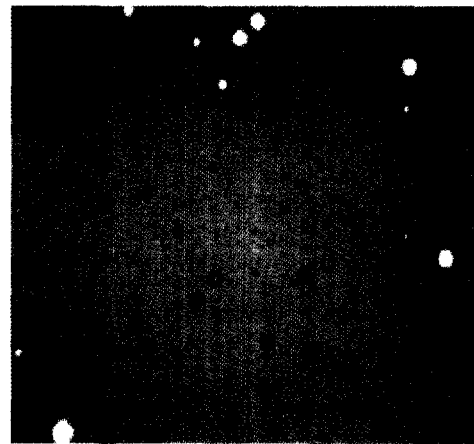
제조된 이멀션유내의 수적 입경 분포특성은 유



**Fig. 4 Shape of RF type static mixer**

**Table 2. Test conditions of RF type static mixer**

Water contents (% by volume)	10, 20, 30
Upstream pressure (bar)	2, 4, 6
Number of elements	21, 45, 65



**Fig. 5 Typical image of water droplets in water-in-oil emulsion**

중수분석장치를 사용하여 분석하였다. 여러조건에 의한 유중수 이멀션유를 만들어 OHP용 필름에 얇게 이멀션유가 묻어서 퍼지도록 해서 이미지를 CCD카메라를 통하여 알고리즘 분석에 의해 수적 입자가 정확하게 보이는 디지털 사진이 얻어진다. Fig.5가 디지털 사진이다.

수적 이미지는 back-lighting으로 데이터를 받기 때문에 수적 부위는 빛이 잘 통과하여 밝게 나

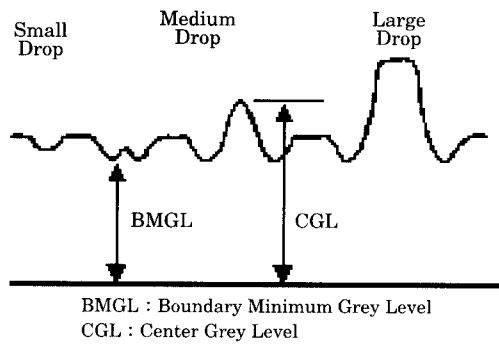


Fig. 6 Droplets image characteristics with respect to the drop sizes

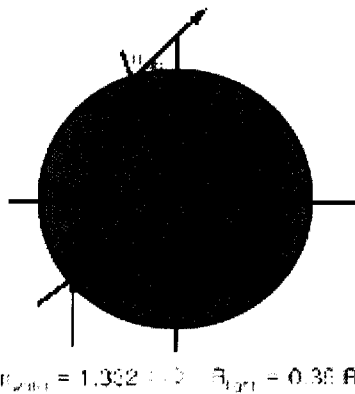


Fig. 7 Characteristics of Light Refraction in Water Droplet

타나며, B-C중유는 탁도(opacity)가 높기 때문에 B-C중유만 얇게 도포 되어있는 영역은 어둡게 나타난다. Fig.6은 수적의 이미지 특성을 그림으로 나타낸 것이다.

Fig.7은 수적의 빛굴절의 특성을 나타낸 그림이다. 이는 수적이 일종의 투명한 구(sphere)이기 때문에 중심부를 통과하는 빛은 굴절이 적지만 경계 부근으로 갈수록 빛이 굴절되어 중심부로 모이거나 입사각이 임계값보다 크기 때문에 투과하지 못하게 되기 때문이다. 아주 큰 입자의 중심부 화상 소자에서는 포화현상이 일어난다. 본 연구에서 사용한 CCD가 12비트 dynamic range를 갖고 있음에도 불구하고 수  $\mu\text{m}$  크기의 입자까지 측정할 수 있도록 빛의 강도 즉, CCD 측정시간을 정했기 때문에 큰 입자에서는 중심부위에서 포화현상이 일

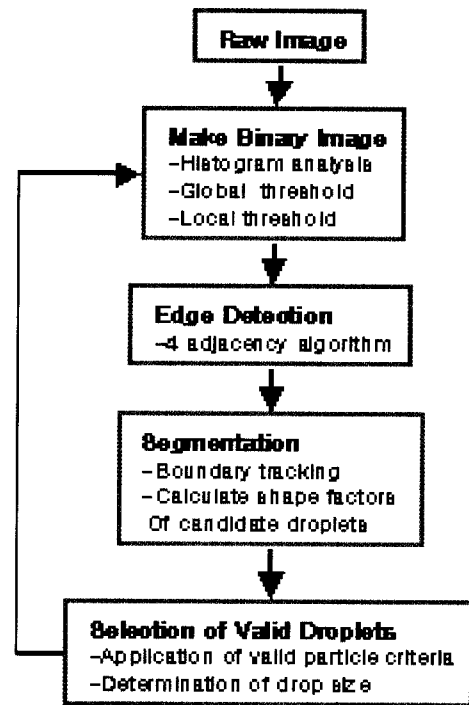


Fig. 8 Image processing algorithm for automatic calculation of water drop sizes

어나나 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 나타나지 않은 것은 빛의 회절 시스템에 따른 공간분해능력 한계로 인한 것이다. 이미지 프로세싱에 의해 자동적으로 수적을 찾아내고, 그 크기를 정하는 S/W 작성시 이러한 특징들을 이용하였다. 입자크기에 따라 이미지 특성이 다르게 나타나는데, 큰 입자는 중심 부위가 밝고 경계부근이 주위배경보다 어두우며, 아주 작은 입자는 중심부도 주위배경보다 어둡게 나타난다.

Fig.8은 한 프레임의 이미지에서 수적영상을 추출하는 이미지 프로세싱 알고리즘을 나타낸 것이다. 알고리즘의 특징은 여러 단계에 걸쳐서 입자후보를 추출하며, 각 단계는 히스토그램 분석을 통한 배경휘도 결정, 각 단계별 TGL(threshold grey level)에 따른 2진 이미지 작성, 4 개의 인접알고리즘에 의한 입자후보의 경계선 결정 및 입자후보의

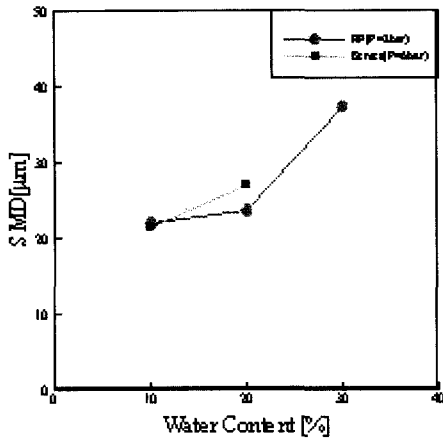


Fig. 9 Effects of Water Content

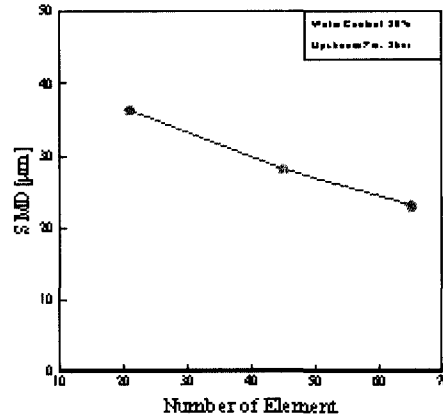


Fig. 11 Effects of Element Number (RF type mixer)

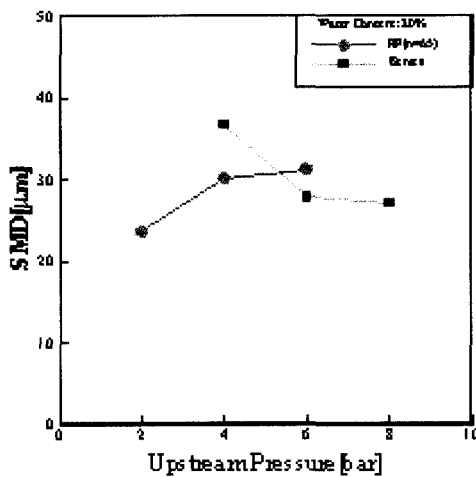


Fig. 10 Effects of Upstream Pressure

크기, 위치, 형상 정보 계산, 수적입자 선정 및 크기 계산 등으로 이루어져 있다. 앞서 언급한 바와 같이 입자 크기에 따라 이미지 특성이 다르므로 입자후보 추출방법과 입자선정 방법이 각 단계별로 다르게 하였다.

### 3 결과 및 고찰

Kenics형과 본 연구에서 개발한 RF형 정적믹서가 이멸선유 제조용 믹서로서의 타당성을 판단하기 위하여 2가지(유량, 상압) 조건에 따른 수적분포 특성을 비교, 분석하였다. Kenics형과 RF형의 믹

서의 직경의 차이로 인하여 유량의 차이가 커서 본 연구에서는 유량이 일치하는 조건에서의 결과를 비교, 검토하였다. Kenics형 믹서의 제조 수적 입경의 적정 크기 선정을 위한 예비시험에서는 8mm와 12mm에 대한 시험도 이루어졌으나 예비시험 결과 직경이 큰 경우 상당량의 물이 작은 수적으로 분열되지 않고 따로 분리되는 현상을 보여, 본 연구에서는 내경이 4mm에 대한 데이터만 제시하였다.

Fig.9은 동일 유량하에서 Kenics형과 RF형 믹서의 물함유량에 의한 SMD(Sauter Mean Diameter)를 나타낸 그림이다. Kenics형 믹서는 내경이 4mm인 경우라도 물함유량이 10%, 20%로 증가함에 따라서 SMD값이 약 21µm에서 27µm로 증가하다가 물함유량이 30%가 되면 유수분리가 되어 유화연료가 만들어지지 않았다. 이는 Kenics형 믹서의 경우 직경을 작게 하여 반경방향에 대한 속도구배를 크게 해야만 이멸선유 제조의 효과가 있을 것으로 사료된다. 반면에 RF형 믹서는 물함유량이 10%, 20%, 30%로 증가할수록 10%에서 20%까지는 SMD값의 차이가 약 3µm의 차이로 완만하게 상승되다가 30%의 물 함유량인 경우에는 SMD값이 약 36µm로 급상승하게 된다. 물함유량에 따른 SMD값의 경향은 Kenics형 믹서와 같은 정성적인 경향을 보이고 있다. Fig.10은 물함유량 20%인 조건에서 믹서 상류부 압력을 변화시켰을 때의 수적의 SMD를 도시한 것이다. Kenics형 믹서는 상부 압력이 4bar에서 6bar로 증가될 때는 SMD가 감

SMD가 감소하나 8bar일 때는 6bar일 때와 차이가 완만한 하강 특성을 보이고 있다. 반면에 RF형 믹서는 상류부 압력을 2bar, 4bar, 6bar로 변화시켰을 때 SMD 변화를 나타낸 것으로 압력이 증가함에 따라 SMD가 23 $\mu$ m에서 29 $\mu$ m로 완만하게 증가하며 6bar에서는 31 $\mu$ m의 SMD를 나타내고 있다. 이는 Kenics형 믹서와는 반대되는 경향을 보이는데, 이것은 Kenics형 믹서의 경우 수적이 분열이 되는 주요 기구(mechanism)가 속도구배에 의한 변형이기 때문에 상류부 압력이 증가하면 속도가 증가하여 속도구배가 커지기 때문에 SMD가 작아지는 반면에 RF형 믹서는 주요 분열기구가 핀에 부딪칠 때의 충격 때문에 압력이 증가하여 유량이 증가하면 오히려 SMD가 증가하는 경향을 보이는 것으로 사료된다.

Fig.11은 RF형 믹서인 경우에 물 함유량이 20%이고 상부압력이 2bar인 조건에서의 방사상 핀의 단수변화에 따른 SMD 변화를 나타낸 그림이다. 단수가 21개인 경우는 SMD가 37 $\mu$ m, 단수가 45개인 경우는 SMD가 28 $\mu$ m이며 단수가 65개인 경우는 SMD가 약21 $\mu$ m로 감소 되는 것을 알 수 있다. 단수가 작아 질수록 SMD가 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 위의 결과들로부터 Kenics형 믹서와 RF형 믹서의 특성을 비교해 보면 다음과 같은 특징이 있다. 동일 유량조건일 때 Kenics형 믹서의 상류부 압력 6bar, RF형 믹서의 상류부 압력 2bar 조건을 비교해 보면 RF형 믹서의 미립화 특성이 다소 좋게 나타난다. 관내 유속이 압력차의 제공근에 비례한다는 것과 RF형 믹서의 관단면의 유효면적이 4mm Kenics형 믹서에 비해 약4배 크다는 것을 이용하여 두 경우의 압력손실을 대략적으로 비교해보면 RF형 믹서가 요소수에 있어서 훨씬 많음에도 불구하고 압력손실이 적음을 알 수 있다. 물함량이 많을 때에도 RF형 믹서는 따로 분리되는 유중수의 분리가 없는 반면 Kenics형 믹서의 경우는 유중수가 분리되는 문제점을 규명하였다.

#### 4 결 론

산업용으로 널리 이용할 수 있는 유중수적형 이

멸선유를 제조하기 위한 Kenics형과 본 연구에서 개발한 RF형 믹서 2종의 정압믹서를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Kenics형 믹서는 직경이 커지고, 물함유량이 30%이상이 되면 유수가 분리된다.
2. Kenics형 믹서는 상부압력을 크게 하거나 물함량을 적게 하면 이멸선유의 평균수적입경은 작아진다.
3. RF형 믹서는 상부의 작은 압력으로 이멸선유를 제조할 수 있으며, 방사상 핀의 단수에 의해서도 수적입경을 조절할 수 있다.
4. RF형 믹서는 이멸선유를 온라인으로 제조가 가능하고, 대용량 이멸선유 제조가 용이하다.

#### 후 기

본 연구는 여수대학교 설비자동화 및 정보시스템연구개발센터의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

#### 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) S. H. Chung and J. S. Kim, 23rd Symp.(Int'l) on Combustion., The Combustion Institute. pp.1431~1435, 1990
- (7) M. T. Jaoques, J. B. Jordan, A. Williams, and L.Hadley~Coates, 16th Symp.(Int'l) on Combustion, The Combustion Institute, pp.307~319, 1976
- (8) C. H. Hwang and C. K. Law, Combust. Flame 59: pp.53~62, 1985
- (9) M. Mattiello, L. Cosmai, L. Piston, F. Beretta, and P. Massoli, 24th Symp.(Int'l) on Combustion, The Combustion Institute, pp.1573~1578, 1992
- (10) H. Jahani, and S. R. Gollahalli, Combust, Flame 37 : pp.145~154, 1980
- (11) N. Nagai, T. Kumazawa, Y. Hayakawa, and H.Okazaki, 2nd International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Madison, USA, pp. 215~219, 1982
- (12) P. Zhou and I. Thorp. IMechE Seminar on Diesel Fuel Injection System, Birmingham, 14~15 April, pp.35~44, 1992
- (13) P. L. Zhou and I. Thorp, 16th Annual Energy-Sources Technology Conference and Exhibition, Jan. 31-Feb. 4, Houston, Texas, 1993
- (14) 임정현, 노수영, "압력선화 노즐에서 물-기름 유화 연료의 분무특성," 한국액체미립화학회지, 제 5권, 제 1호, 2000, pp.5~12

## 저 자 소 개



### 박상규 (朴相圭)

1960년 5월생, 1981년 조선대학교 공과대학 정밀기계공학과 졸업, 1983년 인하대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1991년~현재 여수대학교 기계공학과 부교수. 당학회 증신회원



### 김기성 (金基成)

1960년 6월생, 1987년 부산대학교 기계설계학과 졸업, 1994년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사). 1994~1998 현대자동차 중앙연구소, 1998~여수대학교 기계공학과 조교수