

고체분말/액체연료의 과도혼합 농도 분포 측정

도덕희^{1†} · 염주호² · 조경래¹ · 민성기³ · 김명호³ · 유경원³ · 유남현⁴

¹한국해양대학교 기계에너지시스템공학부, ²한국해양대학교 대학원, ³국방과학연구소 제1기술연구본부 5부, ⁴경남대학교 해양시스템융합기술연구센터

Measurements of Transient Mixing Concentrations between Solid Powder and Liquid Fuel

DEOGHEE DOH^{1†}, JOOHO YUM², GYEONGRAE CHO¹, SEONGKI MIN³, MYUNGHO KIM³,
GYONGWON RYU³, NAMHYUN YOO⁴

¹Div. of Mech. and Energy Systems Eng., Korea Maritime Univ., 1 Dongsam-dong, Youngdo-gu, Busan 606-791, Korea

²Graduate School of Korea Maritime Univ., 1 Dongsam-dong, Youngdo-gu, Busan 606-791, Korea

³Agency for Defense Development, The 1st R&D Institute-5, Yuseong P.O.Box 35, Daejeon, 305-500, Korea

⁴Ocean System Convergence Technology Research Center(KOSTEC), Kyungnam Univ.,
Gyeongsangnam-do, 631-791, Korea

Abstract >> Concentration fields of solid powder in a liquid fuel were quantitatively measured by a visualization technique. The measurement system consists of a camcorder and three LCD monitors. The solid powder (glass powder) were filled in a head tank which was installed over a main mixing tank (D x H, 310 x 370 mm). The main mixing tank was filled with JetA1 fuel oil. With a sudden opening of the upper tank by pressurized nitrogen gas with 1.9 bar, the solid powder were poured into the JetA1 oil. An impeller type agitator was being rotated in the mixing with 700 rpm for the enhancements of mixing. Uniform visualization for the mixing flow field was made by the light from the three LCD monitors, and the visualized images were captured by the camcorder. The color images captured by the camcorder The color information of the captured images was decoded into three principle colors R, G, and B to get quantitative relations between the concentrations of the solid powder and the colors. To get better fitting for the strong non-linearity between the concentration and the color, a neural network which has strong fitting performances was used. Analyses on the transient mixing of the solid powders were quantitatively made.

Key words : Solid powder-liquid fuel(고체분말-액체연료), Concentration(농도), Transient mixing(과도 혼합), Color information(색상정보), Neural Network(신경망), Concentration(농도)

Nomenclature

D : tank diameter, mm

E : error in the output layer

H : tank height, mm

H : hue

I : intensity

S : saturation

r,g,b : normalized color

v, w : connection weights

[†]Corresponding author : doh@hhu.ac.kr

[접수일 : 2012.9.28 수정일 : 2012.12.24 게재확정일 : 2012.12.31]

Copyright © 2012 KHNES

δ : error in the hidden layer
 θ, γ : bias

Subscripts

i, j : number of neuron
 k : pattern number

1. 서 론

글로벌 산업화는 에너지수요의 급증을 낳고 있다. 에너지 부족문제를 해결하기 위한 일환으로 에너지 효율을 향상시키는 연구가 주목받아 왔다. 연료의 연소효율을 향상시키기 위한 일환으로 액체연료에 고체연료를 혼합 또는 첨가하거나 하는 연구가 진행되고 있다¹⁾. 이중연료의 연소효율을 향상시키기 위해서는 양질의 혼합을 달성시킬 필요가 있는데, 이를 위하여 사용되는 것이 교반기이다. 교반기내부 유동은 매우 복잡한 유동특성을 지닌 관계로 분석과 예측이 용이하지 않지만, 혼합유동의 시간에 따른 농도 변화를 알 수 있다면 혼합시간 단축과 보다 완벽한 혼합이 가능하므로 교반기내의 혼합농도에 대한 연구가 이어져 왔다.

최근에는 전산유체해석(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 이용한 연구와 더불어 가시화기법과 같은 실험적 연구가 진행되고 있다. Hu²⁾는 고체/액체 이상유동의 교반기 내부에 대한 CFD연구를 통하여 교반기 내부의 고체입자의 분포를 예측한 바 있다. Ochieng et al.³⁾은 물과 니켈입자의 혼합을 CFD를 이용하여 고체입자의 크기에 따른 고체입자의 분석연구를 수행한 바 있다.

고체/액체 교반기내부 유동장 해석을 위한 실험적 연구로서 LDV(Laser Doppler Velocimetry)법, ET(Electrical Tomography)과 ERT(Electrical Resistance Tomography)법, Radioscopic법, Ultrasonic법, Endoscope법, PIV(Particle Image Velocimetry) 등이 있다. LDV를 이용한 교반기 내부 이상유동 해석법³⁾은 1점에 대한 속도정보를 제공하게 되므로 유동장 전체에 대한 시간변화를 제공하지 못한다. ET법 또는 ERT법⁴⁾,

Radioscopic법⁵⁾과 Ultrasonic법⁶⁾은 교반기 탱크가 불투명이라도 내부유동장의 농도분포 측정이 가능한 장점이 있으나 장치가 매우 복잡할 뿐만 아니라 실시간 측정이 어렵다. Endoscope법⁷⁾은 교반기탱크 내부에 내시경을 수십개(69개)를 설치하여 고체입자의 분산을 분석하였는데, 실험장치가 매우 복잡하여 실험공간의 제약을 받는다. PIV법에 의한 측정법은 최근에 각광을 받고 있는 기술인데, PIV를 이용한 액체/액체 혼합에 관한 연구⁸⁾는 있으나 실험장치의 광학적 제약상으로 그다지 많지 않다. 본 연구에서는 PIV법을 이용한 고체/액체 혼합의 과도상태에서의 농도 분포를 측정해석 하는 것을 연구의 목적으로 삼고 있다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 고체분말-액체 혼합을 위한 교반기 제원이다. 유리재질로 되어 있는 원통형 탱크(310 x 370mm, D x H)내부에 JetA1유가 채워져 있고 탱크 상부 고체분말 저장탱크에는 384g의 고체분말과 JetA1유가 채워져 있다. 이때 고체분말은 JetA1 대비 1.05vol%의 농도를 가진다. 혼합을 촉진시키기 위해

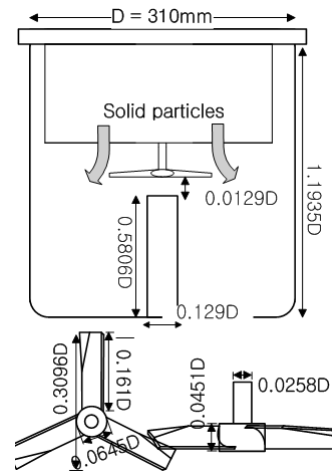


Fig. 1 Agitator geometry

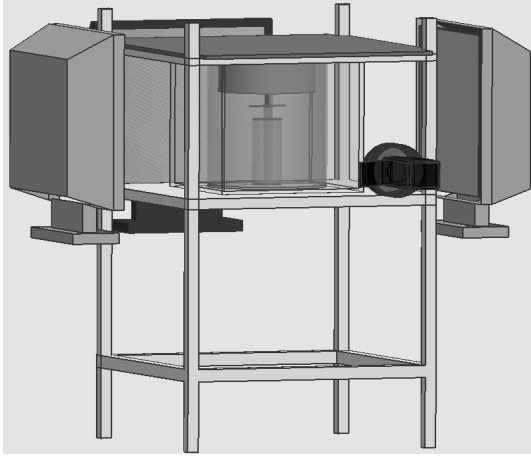


Fig. 2 Measurement system for concentration

여 Fig. 1과 같이 탱크중심축에 교반용 임펠러가 설치되어 있다. 탱크 바닥 중앙부에 교반을 활성화시키기 위하여 40×180mm (D×H)의 크기의 원형 봉이 설치되어 있다. 이 원형 봉과 임펠러의 간격은 4mm이며, 실험에 사용된 임펠러는 직경이 120mm이며 HE-3 type이다.

탱크상부에 설치된 고체분말 저장탱크에는 질소가스가 1.9bar의 압력으로 가해지도록 되어 있고 고체분말과 JetA1유 사이에는 얇은 격막판(rupture disc, 두께는 500 μ m)이 설치되어 있다. 이 얇은 격막판은 고체분말 저장탱크 상부로부터 가해지는 질소가스의 압력에 의하여 순간적으로 파열되도록 되어 있다. 과도상태는 질소가스통 출구에 설치된 전자밸브의 순간적인 개방으로 시작된다.

Fig. 2는 전체 실험장치를 나타낸다. 고체분말과 JetA1유와의 과도혼합 상태를 가시화하기 위하여 위한 광원으로서 LCD모니터를 사용하였으며, 이는 측정영역에 일정한 빛의 조사를 위함이다. 모니터는 원통의 최외각 표면에서부터 약 150mm떨어진 곳에 총 3대를 설치하였으며 바탕화면을 초록색으로 하여 사용하였다. 광원에 의하여 가시화된 혼합유동장의 영상을 기록하기 위하여 Fig. 2에 있는 캠코더 카메라를 반대쪽 벽면으로부터 약 300mm위치에 설치하였다. LCD모니터 외의 빛의 영향을 없애기 위하여 암

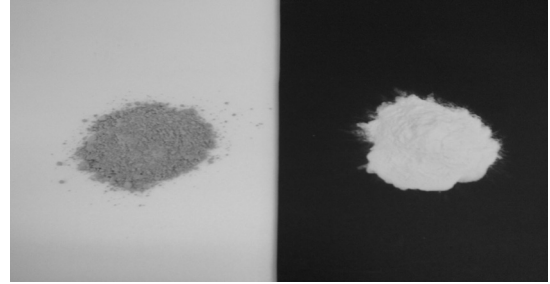


Fig. 3 Dust powder(left) and glass powder(right)

막실에서 실험을 실시하였다. 고체분말의 농도에 따른 색상의 변화를 기록하기 위하여 사용된 캠코더 카메라의 프레임수는 60fps이며, 얻어진 캠코더 영상을 이용하여 호스트컴퓨터상에서 색상정보를 정량화하였다.

Fig. 3은 혼합에 사용된 고체분말(glass powder, right)의 사진을 나타낸다. 교반의 실제 혼합해석 대상의 분말은 dust powder(Fig. 3의 왼쪽 사진, 비중 2.46)이지만, 유동장의 가시화를 위하여 동일 수준의 비중을 가지고 있는 glass powder(비중 2.56)를 사용하였다. 또한, 두 고체입자 분말의 성분은 glass powder의 경우 SiO_2 가 70~75%, dust의 경우는 68%~76%이며 입자의 크기 또한 1-50 μ m로 비슷하였기 때문에, 본 연구에서의 혼합대상인 JetA1 연료유와의 혼합에 있어서 물리적 특성이 다르지 않을 것으로 보아, dust powder 대신으로 glass powder를 사용하였다.

Table 1은 혼합실험에 사용된 JetA1과 고체분말(glass powder)의 물성을 나타낸다. JetA1의 경우 무색이며 고체분말의 경우 흰색이고, 혼합 시 두 물질은 서로 반응하지 않는다. 한편, 본 연구에서는 레이저의 2차원 단면 광원을 이용하여 단면상의 확산과

Table 1 Used fuel oil & solid particles properties

Physical properties	JetA1 fuel oil	Solid particle (glass powder)
specific gravity	0.808	2.46
(bulk) density kg/m^3	808	1500~1600
micro range μm	-	1~45
viscosity (cp)	1.313	-

정을 정량화하는 것과 달리 Fig. 2에서는 보이는 바와 같이 LCD모니터의 광원에 의하여 가시화된 depth of field방향 전체에 대한 가시화결과를 정량화하는 데 초점을 맞추고 있는데, 이는 본 연구의 혼합 유동장은 원통형 탱크 내에서 교반기(agitator)가 이미 700rpm으로 회전하고 있는 정상상태 (steady) 유동장인 관계로 혼합되는 과정이 매크로(macro)하게는 축대칭으로 볼 수 있기 때문이다.

2.2 실험 방법

실험은 크게 두 가지 순서로 진행하였다. 먼저 고체분말의 혼합농도에 따른 색상의 변화를 정량화 하는 교정 실험(color-to-concentration calibration)을 실시하였고, 이어서 격막판의 파열을 통한 과도혼합 실험을 실시하였다. 교정실험에서는 고체분말의 농도에 따른 색깔의 변화를 캠코더에 저장하였고, 이 영상을 3원색(R: red, G: green, B: blue) 영상으로 분리하였다. R, G, B 각각의 영상값은 픽셀당 8bit의 칼라 정보를 가지므로 0~256 사이의 값을 가지게 된다. 이들 값을 이용하여 색상(H: hue), 채도(S: saturation), 밝기(I: intensity)의 값을 각각 구하였다. 가시화를 위하여 사용된 LCD모니터의 빛은 교반기 탱크의 상부와 하부 그리고 좌우전후로 반사광이 균일하지 않는 관계로 동일한 농도라 할지라도 탱크의 위치별로 색의 정보(R, G, B, H, S, I)가 다르게 나게 되므로 추출한 이미지의 각 격자에 대한 RGB, HSI 값을 summation한 후 Color-to-Concentration Calibration Curve를 완성하였다. 이러한 혼합영상에서의 색과 농도의 관계(color-to-concentration calibration)는 완전한 비선형성을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 색-농도 정량화를 위하여 비선형성 맵핑(mapping)에 우수한 성능을 지닌 신경망(neural network)을 이용하였다.

2.2.1 교정 실험

교정 실험에서는 고체분말의 농도에 따른 색의 변화 관계(color-to-concentration calibration)를 얻어낸

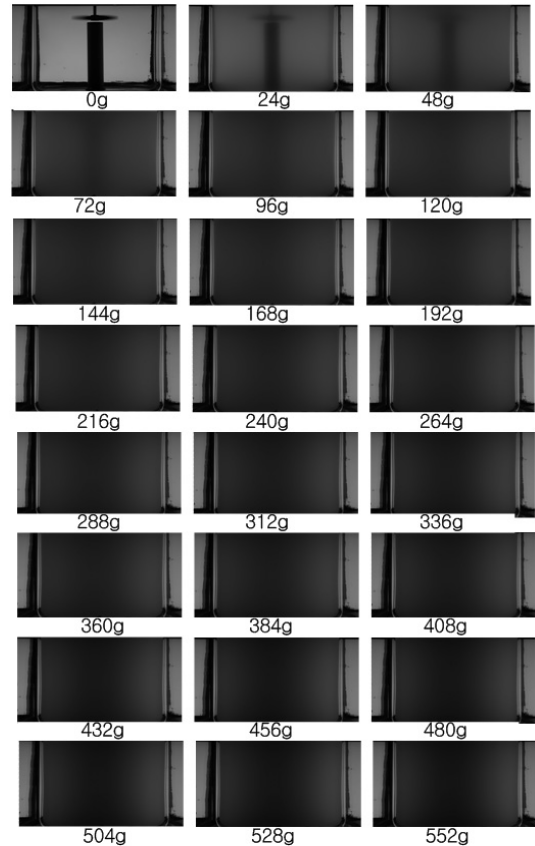


Fig. 4 Images used for color-to-concentration calibration

다. 유리재질의 원통 내부에 JetA1유 24.9ℓ를 가득 채우고 고체분말(glass powder)을 0 vol%(부피농도)부터 24g씩 증가시키며 캠코더를 이용하여 영상을 기록하였다.

이러한 방식으로 총 24개의 색-농도 관계를 나타내는 영상을 얻었다. Fig. 4는 색-농도 관계를 얻기 위한 교정실험 영상을 나타낸다. 탱크내의 모든 영역에서 고체분말과 JetA1유에 균일하게 혼합되도록 임펠러를 장시간(30초 이상) 700rpm으로 교반시켰다.

각 농도별 영상은 탱크내 혼합상태가 균일상태로 판단되는 시점에서부터 약 5초간 총 200장의 영상을 평균한 영상을 교정용 영상으로 사용하였다. 균일상태의 판단기준은 탱크내의 각 위치별 색의 정보를 비교하여 차이를 보이지 않을 때를 균일한 것으로

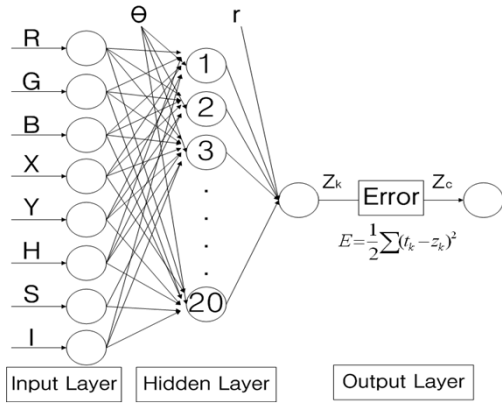


Fig. 5 Application of Neural Network

간주하였다. 총 200장의 평균영상의 색의 정보(R, G, B, H, S, I)를 이용하여 전술한 바와 같이 신경망을 이용하여 색-농도 관계를 구하였다.

2.2.2 신경망을 이용한 색-농도 정량화

전술한 바와 같이 동일한 고체분말(glass powder) 농도라 할지라도 탱크의 위치별로 색의 정보(R, G, B, H, S, I)가 다를 수 있는 관계로 색과 농도의 관계는 비선형성을 가지게 된다. 비선형성을 지닌 색-농도 관계에 대하여 정량적 평가를 위하여 비선형성 맵핑(mapping)에 많이 이용되는 신경망(neural network⁹)을 이용하였다. Fig. 5는 본 연구에 신경망을 나타낸다. 신경망은 입력층, 중간층, 출력층으로 구성되어 있으며 입력층에는 총 8개의 정보(R, G, B, H, S, I 및 영상에서의 위치 X, Y)가 입력되고 중간층은 20개, 출력층은 1개로 구성하였다. 즉, 입력층은 8개의 뉴런(neuron), 중간층은 20개의 뉴런, 출력층은 1개의 뉴런으로 구성하였다.

이하에 색과 농도 관계를 구하기 위하여 적용된 신경망의 계산과정을 기술한다. 색을 정량적으로 나타내기 위해서는 캠코더로부터 받은 컬러 영상을 색의 3원색인 R(Red), G(Green), B(Blue)로 구분하여 각각 0에서 255까지의 밝기 정보로 변환하였고, H(Hue, 색상), S(Saturation, 채도), I(Intensity, 명도)의 관계는 아래 식 (1), (2), (3)으로 구하였다.^{10,11)}

$$H = \cos^{-1}(2r - g - b) / (6c)^{1/2} \text{ when } (g > b) \text{ and } (g = b) \tag{1}$$

$$H = 2\pi - \cos^{-1}(2r - g - b) / (6c)^{1/2} \text{ when } (g < b) \tag{2}$$

$$S = 1 - \min(r, g, b) \tag{3}$$

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \tag{3}$$

이 때, $r = \frac{R}{R + G + B}$,

$$g = \frac{G}{R + G + B}$$

$$b = \frac{B}{R + G + B}$$

$$c = \left[\left(r - \frac{1}{3}\right)^2 + \left(g - \frac{1}{3}\right)^2 + \left(b - \frac{1}{3}\right)^2 \right]^{1/2}$$

각 뉴런은 다른 뉴런으로부터 신호를 받아들이는 형태의 모델로 표현될 수 있는데 그 관계식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다⁹⁾.

$$out = f\left(\sum v_i x_i + bias\right) = f(net) \tag{4}$$

여기서, v_i는 결합계수, bias는 각 뉴런에 주어지는 오차값을 나타낸다. 각 뉴런(neuron)의 출력값에 대하여 연결망값(net value)에 신경망의 임계 함수적인 동작을 잘 표현할 뿐만 아니라 미분가능하고 수학적으로 편리한 특성을 가지고 있는 것으로 알려져 있는 식 (2)와 같은 시그모이드함수(Sigmoid function)를 사용하여 구하였다.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-(ax - b)}} \tag{5}$$

여기서 a, b는 임의의 상수인데 본 연구에서는 학습의 포화(saturation)구간에서의 계산능력을 향상시키기 위하여 Fig. 6와 같이 출력값에 바이어스(0.166666)를 둔 형태의 함수를 사용하였다.

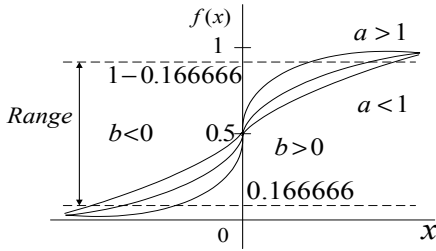


Fig. 6 Used Sigmoid function

이 값은 함수값의 상부와 하부에서의 포화상태 (saturation) 영역에서 반복학습을 위한 계산시간이 가장 짧게 되는 곳에 cut-off한 값이다. 신경망은 반복학습에 의해서 원하는 지식을 습득하는 것인데, 본 연구에서는 학습 오차가 원하는 수준으로 감소할 때까지 결합하중(connection weight)과 바이어스(bias)를 조정하는 방식인 오류 역전파 알고리즘 (back-propagation algorithm: 이하 BP법)⁹⁾을 사용하였다. 식 (6)은은 입력층에서의 입력데이터($x_i, i=1\sim 8$)와 결합하중(v) 및 바이어스(θ)의 합을 나타낸 것이며, 이를 시그모이드 함수로 전이하여 식 (7)과 같이 중간층에서의 출력데이터가 구해진다. 다음으로 중간층의 출력(y)과 결합하중(w) 및 바이어스(γ)의 합으로 되는 식 (8)이 재차 시그모이드 함수로 전이되어 식 (9)로 표현된 출력층에서의 출력데이터(z)가 구해지게 된다. 마지막으로 식 (10)와 같이 표현될 수 있는 출력데이터와 원하는 출력데이터 (t : teaching)와의 오차가 감소되도록 입력층과 중간층, 중간층과 출력층사이의 결합하중(w_{kj}, v_{ji}) 및 바이어스계수(θ_j, γ_k)를 식 (11)과 같이 갱신하여 반복계산을 수행하면서 오차가 가장 작은 최적화된 결합하중과 바이어스가 구해지면 학습을 종료시키게 된다.

$$H_i = \sum_{j=1}^{20} x_j v_{ij} + \theta_j \quad (6)$$

$$y_j = f(H_j) = \frac{1}{1 + \exp(-H_j)} \quad (7)$$

$$I_k = \sum_{j=1}^{20} y_j w_{kj} + \gamma_k \cdot 1 \quad (8)$$

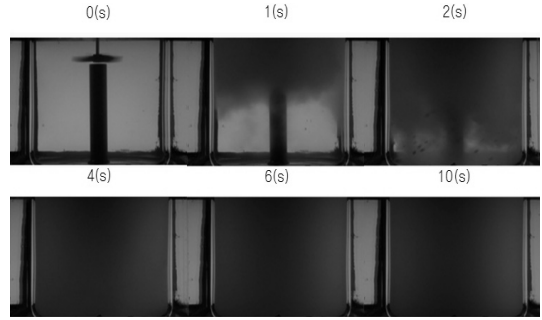


Fig. 7 Images captured after breaking the rupture disc

$$z_k = f(I_k) = \frac{1}{1 + \exp(-I_k)} \quad (9)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_k \delta_k^2, \quad \delta_k = (t_k - z_k) \quad (10)$$

$$w_{kj} = w_{kj} + \Delta w_{kj}, \quad v_{ji} = v_{ji} + \Delta v_{ji} \\ \gamma_k = \gamma_k + \Delta \gamma_k, \quad \theta_j = \theta_j + \Delta \theta_j \quad (11)$$

2.2.3 과도 혼합 실험

과도(transient) 혼합 실험을 위하여 얇은 격막(rupture disc)를 파열시킨 순간부터의 고체분말과 JetA1 유에 혼합과정을 캠코더 카메라로 영상화하였다. 유리재질의 원통내부에 JetA1유 384g을 담은 상태에서, Fig. 1과 같은 교반용 임펠러를 700rpm으로 회전시켰다. 특정 회전수 700rpm을 선정할 이유는 임펠러의 회전 베어링부가 마찰열에 의한 온도상승이 되기 직전이기 때문이다.

임펠러가 회전중에 고체분말이 들어 있는 상부탱크를 1.9bar의 질소가스로 가압함으로써 격막을 파열시켰다. 상부탱크에는 고체분말이 384g(1.05vol%)의 농도가 들어 있으며 격막이 파열되는 순간부터 JetA1유와 혼합되기 시작한다. Fig. 7은 격막이 파열된 순간부터 고체분말이 JetA1유에 혼합되어 가는 과도 혼합상태의 시간연속의 영상을 나타낸다. 이 영상에 대하여 앞서 교정실험에서 구한 색-농도 교정 데이터를 이용하여 실시간의 농도변화를 구하였다.

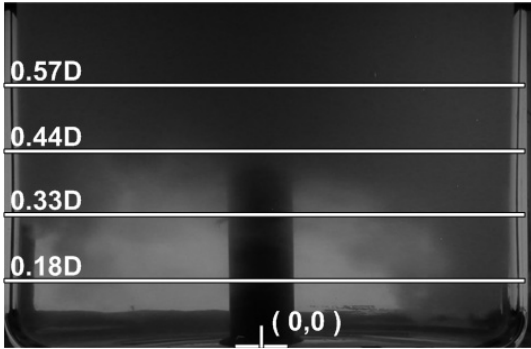


Fig. 8 Images captured 1.5(s) after breaking the rupture disc

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 8은 격막(rupture disc)을 파열시켜 상부탱크에 들어 있던 384g (1.05vol%의 농도에 상당)의 고체분말이 교반탱크로 유입되기 된 시점으로부터 1.5초 후의 영상이며, 이 영상에 대하여 앞에서 기술한 신경망을 이용한 색-농도 교정데이터를 이용하여 얻어낸 농도 분석 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 가로축은 DMF유의 농도를 나타내고 임펠러의 하단부 위치를 Y=0mm로 하여 교반기 탱크바닥까지의 깊이(mm)를 나타낸다.

Fig. 9의 그래프는 Fig. 8에 나와 있듯이 교반기탱크 중심으로부터 반경방향 위치가 각각 56mm(0.18D),

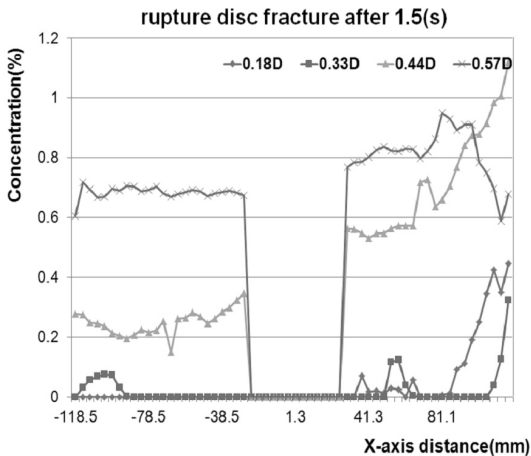


Fig. 9 Concentration distributions at horizontal lines along the X-axis at the time 1.5(s) after breaking the rupture disc

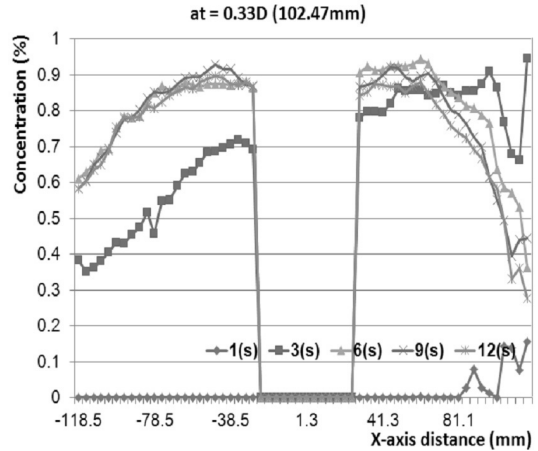


Fig. 10 Concentration distributions at horizontal line (at Y=102.47mm) along the X-axis with time changes

102mm(0.33D), 137mm(0.44D), 175mm(0.57D) 위치에서의 수직선상의 농도변화를 나타내는데 격막파열 시점에서 1.5초 후의 농도 분포를 나타낸다. 수직선상에 총 60개의 데이터를 fitting하여 얻어 낸 것으로서 1개 데이터당 간격이 3.22mm 정도이며 이 간격은 전체 측정영역 높이(148mm)의 2.1%에 지나지 않는 관계로 농도분포 곡선은 분포특성을 잘 나타낸다고 할 수 있다. 혼합이 아직 진행 중인 관계로 좌우비대칭으로 나타나 보인다. Fig. 8로부터 교반탱크의 상단부, 즉 고체분말이 들어 있었던 상부탱크의 바로 아래에는 X위치에 상관없이 약 0.7vol%이상의 고체분말이 존재하고 있음을 알 수 있었다. 교반기탱크 아래쪽에는 고체분말의 농도가 0.1vol%미만으로 낮음을 알 수 있다. 특히 137mm(0.44D)의 농도 변화를 보면 좌우의 농도가 비대칭적이며 Fig. 8을 통하여 보듯이 격막 파단과 동시에 좌측 보다는 우측으로 고체분말이 쏟아져 내리는 것을 알 수 있다. 이는 임펠러에 의하여 유입된 고체분말이 격막파열 시점으로부터 1.5초 후에 이 지점137mm(0.44D)을 통과하고 있음을 의미한다.

Fig. 10은 탱크의 중간 지점인 0.33D (Y=102.47 mm)의 위치에서의 시간 변화(1, 3, 6, 9, 12초)에 따른 농도분포 변화를 나타낸다. 3초 미만일 때 농도분포는 탱크중심선을 기준으로 비대칭 분포가 되는데

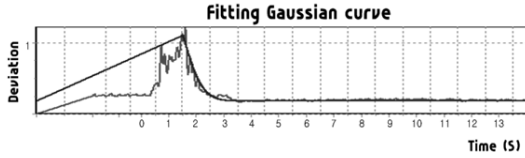


Fig. 11 Fitting Gaussian curve for time of steady state

이는 충분한 혼합시간이 되지 않았기 때문이다. 격막이 파열된 시점으로부터 시간이 지날수록 농도 값은 커지고 4초 이후에는 약 0.8vol%의 농도가 수평방향으로 균일하게 분포하고 있음을 알 수 있는데, 이는 원래 투입된 고체분말의 량 1.05vol%에는 못 미치지만 6초부터 전반적인 농도변화가 없는 것으로 보아 정상상태(steady state)가 되었다고 볼 수 있다. 최대 농도분포 값이 0.9vol%에 가까운 것으로 보아 부족한 0.15vol%(=1.05%-0.90%) 가량은 고체분말이 미세한 관계로 저장탱크사이의 벨로우즈 부분에 끼여 혼합이 안 된 것으로 판단된다. 혼합이 정상상태임에도 불구하고 탱크중앙부와 벽쪽부와의 농도 차이는 고체분말과 작동유체(JetA1 유)와의 밀도차에 의한 분리현상에 의한 것으로 볼 수 있다. 또한 본 실험에서는 정상상태까지 걸린 시간 계산을 통한 교반기의 성능분석을 하고자 gaussian 함수와 fitting하였다.

Fig. 11을 통해 격막 파열 후 교반의 상태를 Table 2와 같이 표시 하였다. gaussian 함수와의 fitting결과를 보면 3초 이후에는 90%, 4초 이후 98%의 혼합이 진행됨을 알 수 있다. 이는 고체분말과 JetA1유가 혼합이 되기 위해서는 임펠러와 같은 기구로 강제적 혼합이 필요함을 시사하며 임펠러의 혼합성능에 따라 혼합시간을 단축시킬 수 있음을 의미한다.

Table 2 Concentration with time changes

state	time (s)
open	0
50%	2.22
75%	2.8
90%	3.35
95%	3.72
98%	4.14
99%	4.42

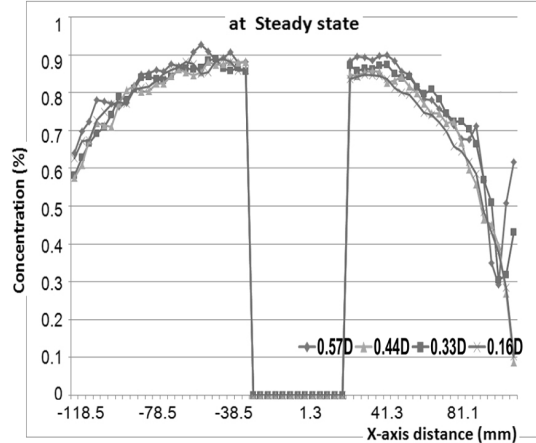


Fig. 12 Concentration distributions at horizontal lines along the X-axis at the steady state

이러한 결과를 비교하기 위하여 steady state 이후에 다음과 같이 농도 값을 분석하였다. 특히, 이러한 결과의 분석은 합성수지를 이용하여 새로운 연료를 생성하여 에너지를 절약하고자 하는 연구(Park 등)⁶⁾가 진행되어 왔으나 본 연구에서는 고체연료와 액체연료와의 혼합을 통한 연료성능의 향상을 도모함으로써 에너지를 절약하고자 하는 연구에 해당된다고 볼 수 있다.

Fig. 12을 보면 대부분의 위치에서 전반적으로 농도 값이 0.8 ~ 0.9 vol%을 가지고 있지만 원통 유리 교반기의 중심으로부터 외각으로 갈수록 농도 값의 차이가 커지며 고체분말이 이분화 되는 것을 알 수 있다. 이는 교반기 임펠러에 의하여 생성되는 강한 제트류가 탱크중심부에 형성되며, 탱크내 외곽부보다 중심부가 상대적으로 낮은 압력이 형성되는 것과 관련한다. 그리하여 중심부에 높은 농도의 고체분말이 분포하게 된다.

Fig. 13는 축 중심에서 -42mm(-0.14D), -74mm(-0.24D), -106mm(-0.34D)의 위치에서 농도 값을 나타낸 것이다. 그림에서 -0.14D(축 주변)와 -0.34D(용기 외각)의 평균농도는 0.89vol%, 0.7vol%로써 그 차는 0.19vol%이다. 이를 통하여 축 중심부의 농도가 가장 높고, 축에서 멀어질수록 농도 값이 낮음을 알

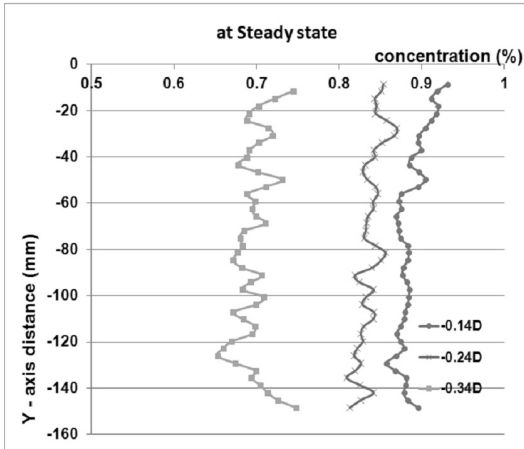


Fig. 13 Concentration distributions at vertical lines along the Y-axis at the steady state

수 있다.

이와 같은 현상은 탱크내의 원심력 작용으로 인하여 중심부가 벽면쪽보다 상대적으로 낮은 압력대가 형성됨으로써 고체분말이 탱크중심부 쪽으로 쏠리게 되는 현상에 기인하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

고체분말/액체연료 혼합시 고체분말의 혼합 상태를 정량적으로 평가할 수 있는 가시화기술을 구축하였다. 그 과정에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

0.15vol% 가량의 고체분말은 rupture disc가 파단되더라도 저장탱크사이의 벨로우즈 부분에 끼여서 혼합이 안 되는 것으로 나타났다.

혼합탱크 중심부와 바깥쪽에서는 0.19vol% 가량의 농도분포 차이를 지니는 분리현상이 나타났다. 이는 원심력에 의하여 생성된 탱크중심부의 낮은 압력 분포에 기인하는 것으로 나타났다.

rupture disc가 파단된 시점에서는 고체분말과 액체연료(JetA1)와의 밀도차로 인하여 일시적으로 탱크 벽면쪽에 고체연료가 분포되는 현상이 나타났으나, 이후, 정상상태에 가까워지면 임펠러 하단 중심부에 형성된 저압영역의 존재로 중심부에 가까울수록 높은 농도의 고체분말이 존재하였다.

본 방법으로 농도 변화를 측정하여 과도시간에서 정상상태까지의 추정 시간을 알 수 있으며 본 연구에서는 약 4초로 추정되었다.

본 실험을 통하여 교반기 임펠러의 높은 회전수와 고체분말의 낮은 농도에서의 혼합이 짧은 시간 내에 균일한 혼합을 이루어 낼 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 너무 높은 회전수는 회전부 베어링의 온도상승에 따른 열의 발생이 있게 된다. 본 연구에서 특정의 회전수인 700rpm은 교반용 임펠러 회전부의 베어링 온도가 상승되기 직전의 최대 회전수에 해당된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 도약과제(2008-0060153)와 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Y. C. Pak, J. H. Choi and S. H. Oh, "The Effects of Silica-Alumina Type Inorganic Compounds on the Pyrolysis Reaction of EVA to Produce Fuel-Oil", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, 2011, Vol. 22, No. 5, pp. 706-713.
2. H. H. Hu, "Direct Simulation of Flows of Solid-liquid Mixtures", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 22, No. 2, 1996, pp. 335-352.
3. A. Ochieng, A. E. Lewis, "Nickel Solids Concentration Distribution in a Stirred Tank", Minerals Engineering, Vol. 19, 2006, pp. 180-189.
4. S. Hosseini, D. Patel, F. Ein-Zozaffari, M. Mehrvar, "Study of Solid-liquid Mixing in Agitated Tanks Through Electrical Resistance Tomography", Chemical Engineering Science, Vol. 65, 2010, pp. 1375-1384.
5. Y. Hongbin, J. N. Koster, "Radioscopic Visualization of Melting, Alloying and Solidification of Pure Al and Al-u, Journal of Alloys and Compounds", Vol. 352, 2003, pp. 175-189.
6. T. Kobayashi, H. Tai, S. Kato, "Measurement

- Method of Particle Concentration and Acoustic Properties in Suspension using a Focused Ultrasonic Impulse Radiated from a Planoconcave Transducer”, *Ultrasonics*, Vol. 44, 2006, pp. e491-e496.
7. R. Angst, M. Kraume, “Experimental Investigations of Stirred Solid/Liquid Systems in Three Different Scales: Particle Distribution and Power Consumption”, *Chemical Engineering Science*, 2006, Vol. 61, pp. 2864-2870.
 8. E. H. Jeong and K. C. Kim, “A Study on the Mixing Characteristics in a Rushton Turbine Reactor by a Laser Induced Fluorescence Method”, *KSME(B)*, Vol. 26, No. 8, 2002, pp. 1145-1152.
 9. D. E. Rumelhart, G. E. Hinton and R. J. Williams, “Learning Representations by Back-Propagating Errors”, *Nature*, 1986, pp. 323-333.
 10. D.H. Doh, T. Kobayashi, and T. Saga, “Particle Imaging Thermometry and Velocimetry using Liquid Crystal; A Color-to-Temperature Calibration Method using a Neural Network, SEISAN-KENKYU, Institute of Industrial Science and Tech. Univ. of Tokyo, 1995, Vol. 47, No. 9, pp. 20-23.
 11. J. H. Yum, D. H. Doh, G. R. Cho, S. K. Min, M. H. Kim, G. W. Ryu, “Measurements on Transient Mixing Concentrations of Two Fuel Oils using a Quantitative Flow Visualization Technique”, *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 23, No. 4, 2012, pp. 354-372.