Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 29, No. 5, 2018, pp. 523~529
DOI: https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.5.523

인공지능을 이용한 이종액체 정상 상태 혼합의 혼합과정 해석

공대경[1] · 염주호[2] · 조경래[3] · 도덕희[3,†]

[1]한국해양대학교 대학원 냉동공조공학과, [2]한국해양대학교 대학원 냉동공조공학과, [3]한국해양대학교 기계공학부

Analyses of Steady State Mixing Process of Two-Liquids Using Artificial Intelligence

DAEKYEONG KONG[1], JUHO YUM[2], GYEONGRAE CHO[3], DEOGHEE DOH[3,†]

[1]Division of Refrigeration & Air-conditioning Eng., Graduate School of Korea Maritime & Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea
[2]Division of Refrigeration & Air-conditioning Eng., Graduate School of Korea Maritime & Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea
[3]Division of Mechanical Eng., Korea Maritime & Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea

[†]Corresponding author : Doh@kmou.ac.kr

Received 3 September, 2018
Revised 1 October, 2018
Accepted 30 October, 2018

Abstract >> Two liquids which are generally used as fuels of rockets are mixed and their mixing process is quantitatively investigated by the use of particle image velocimetry (PIV). As working fluids for the liquid mixing, Dimethylfuran (DMF) and JetA1 oils have been used. Since the specific gravity of DMF is larger than that of JetA1 oil, the DMF oil has been set at the lower part of the JetA1 oil. For better visualization of the mixing process, Rhodamin B powder has been blended into the DMF oil. An agitator having 3 blades has been used for mixing the two liquids. For quantitative visualization, a LCD monitor has been used as a light source. A color camera, camcoder, has been used for recording the mixing process. The images captured by the camcoder have been digitized into three color components, R, G, and B. The color intensities of R, G, and B have been used as the inputs of the neural network of which hidden layer has 20 neurons. Color-to-concentration calibration has been performed before commencing the main experiments. Once this calibration is completed, the temporal changes of the concentration of the DMF has been quantitatively analyzed by using the constructed measurement system.

Key words : Two liquids(이종액체), PIV(입자영상유속계), Dimethylfuran oil(디메칠푸란오일), JetA1(제트유), Color-to-concentration calibration(색상대비 농도 교정), Steady state mixing(정상 상태혼합)

2018 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

1. 서 론

두 가지 이상의 물질 혼합에 있어서 성분의 균일화, 물질전달 속도 증대, 물리적·화학적 변화 촉진 이 목표가 되는 경우가 허다하다. 따라서 혼합을 여하히 향상시킬 수 있는 인자를 찾느냐가 혼합에 관한 연구 목표이기도 하다. 일반적으로 혼합기 내부는 비정상 복잡한 난류유동 특성을 지니는데, 이와 관련한 연구가 수행되고 있다. 선행 연구로는 Chapple과 Kresta[1]는 3개의 임펠러를 가지는 혼합기에 의한 혼합유동 안정성을 연구하였고, Costes와 Couderc[2]는 레이저 도플러 유속계(laser doppler velocimetry)를 이용하여 난류 구조와 농도에 대한 연구를 하였다. Guild 등은 PLIF 기법을 이용하여 혼합탱크 내의 순간적인 농도장을 측정하였고[3], Jeong과 Kim[4]은 LIF 기법과 PIV 기법을 이용하여 교반기 내의 속도장과 농도장을 동시 측정하였다. 대부분의 선행 연구에서는 PLIF 기법 혹은 LIF 기법을 이용하여 혼합유동의 특성을 분석해 왔다. 한편, 혼합탱크내 상부에서 비중이 큰 액체가 탱크 내부로 흘러나왔을 때의 혼합과정을 분석한 연구사례[5]가 보고되어 있으나, 본 연구에서는 탱크 하부에 정체되어 있는 큰 비중의 연료가 상부의 저비중 연료로의 혼합되는 과정을 분석하는 것을 목적으로 삼고 있다.

혼합과정 분석을 위하여 인공지능을 이용한 이종액체의 혼합분석법[5]을 적용하였다. 혼합을 위하여 비중이 서로 다른 액체(dimethylfuran [DMF], JetA1 oil)를 사용하였다. 이들 액체는 폭발성이 있고, 로켓의 추진연료로 사용되는데 이들 두 액체의 혼합과정에 따라 연료의 연소성능이 좌우되는 관계로, 혼합에 관한 특성분석이 필요하다. 본 연구는 이러한 맥락에서 수행되었다.

2. 실험 장치와 절차

2.1 실험 장치

Fig. 1은 실험에 사용한 혼합기의 임펠러와 원통형 용기의 개략도이다[5]. 원통형 용기는 유리재질로 제작 되었으며 크기는 내경 기준으로 310×370 mm 이며 체적은 26.14 L이다. 유리 원형 용기 바닥 중앙에는 40×180 mm의 원형 봉이 교반작업을 위하여 존재한다. 원형 봉과 임펠러의 거리는 4 mm이며, 실험에 사용한 임펠러는 HE-3 타입이며, 직경은 120 mm 이다. 용기 내의 혼합향상용봉 때문에 실제 체적은 약 24.9 L이다.

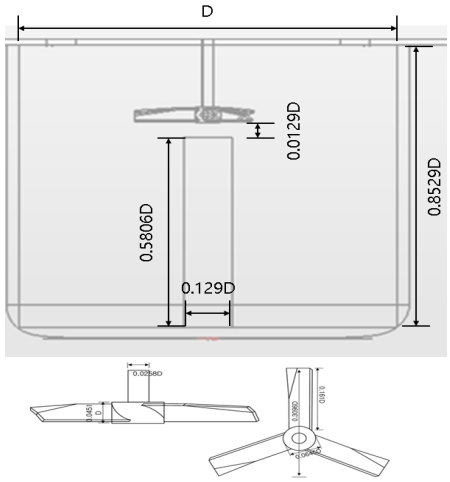

Fig. 1. Agitator geometry

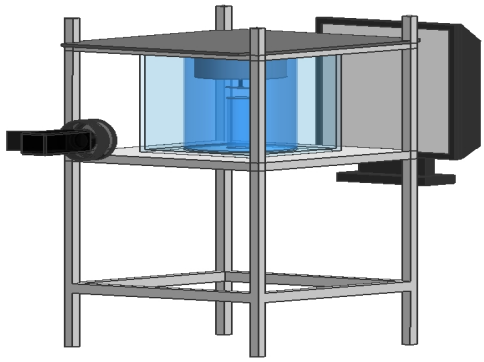

Fig. 2. Measurement system for concentrations

Fig. 2는 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 촬영을 위하여 사용된 캠코더는 60 FPS이며 촬영 영역과의 거리는 300 mm이다. 균일한 배경 빛을 주기 위해서 LCD 모니터의 백색(R:255, G:255, B:255)을 촬영 영역 뒤편에서 조사하였다. 또한 LCD 이외의

빛의 영향을 없애기 위해서 암막실 내부에서 실험을 진행하였고 촬영된 동영상을 각 이미지로 분할하여 색상정보를 정량화 하여 농도값을 측정하였다.

2.2 실험 절차

Table 1은 실험에 사용된 두 가지 액체의 물성을 나타낸다. 두 가지 액체가 모두 투명하기에 혼합과정 가시적으로 관찰이 불가하다. 때문에 DMF유에 Rhodamin B(진분홍색)를 착색시켜 혼합과정을 가시화하였다.

실험은 교정 실험과 혼합 실험으로 구분이 되어 있다. 먼저 교정 실험은 DMF유의 농도에 따른 RGB 색상 값을 정량화시키는 교정 실험으로 농도에 따라 RGB 및 HSI값[5]을 측정하였다.

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

$$S=0,\ \text{if}(C\max-C\min)=0,\ \text{or}$$
$$S=\frac{(C\max-C\min)}{1-|2L-1|},\ \text{if}(C\max-C\min)\neq 0 \tag{2}$$

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

$$r=\frac{R}{R+G+B}\quad g=\frac{G}{R+G+B}\quad b=\frac{B}{R+G+B}$$
$$C\max=\max(r,g,b),\ \ C\min=\min(r,g,b)$$
$$L=(C\max+C\min)/2$$

한편, 측정되지 않은 color-to-concentration(농도-색상 관계)에 대해서는 비선형 맵핑(nonlinear mapping)의 외삽방식을 통하여 구하였고, 이때 비선형 매핑에 좋은 결과를 보이는 인공지능알고리듬인 인공신경망(artificial neural network)을 적용하였다.

Table 1. Liquid properties

	Density (kg/m^3)	Viscosity (cp)
JetA1	808	1.313
DMF	994	0.92

2.2.1 교정 실험

색상과 농도와의 관계를 구하기 위하여 본 실험을 수행하기 전에 교정 실험을 수행하였다. 교정 실험에서는 DMF가 JetA1에 충분히 혼합되는 정상 상태(steady state)에서의 색상과 농도관계를 구하게 된다.

유리재질의 원통 내부에 JetA1유 24.9 L를 가득 채운 뒤 DMF의 부피 비율을 0 vol%에서 2 vol%씩 증가하여 50 vol%까지 변화시켜, 혼합기(agitator)에 의하여 충분히 혼합이 되었다고 판단되었을 때 (본 연구에서는 혼합개시 후 더 이상 색상의 변화가 없을 때까지) 색상과 농도관계를 구하였다. 이때, 54 vol%부터는 4 vol%씩 증가시켜 색상과 농도관계를 구하였다. 총 30개의 농도-색상데이터를 구하였으며 Fig. 3은 농도를 변화시켜 완전히 혼합이 종료되었다고 판단되었을 때의 색상의 변화를 나타낸다.

탱크 내부의 전체 영역에서 JetA1유와 DMF유가 균일하게 혼합되도록 임펠러를 700 rpm에서 30초 이상(더 이상 색상의 변화가 보이지 않을 때까지) 회전시켜 혼합시켰다. 탱크 내부에 혼합 상태가 균일하다고 판단되는 시점으로부터 200장의 영상에서 추출되는 RGB값을 평균한 영상을 교정용 영상으로 사용하였다. 균일 상태의 판단기준은 탱크 내부의 각 위

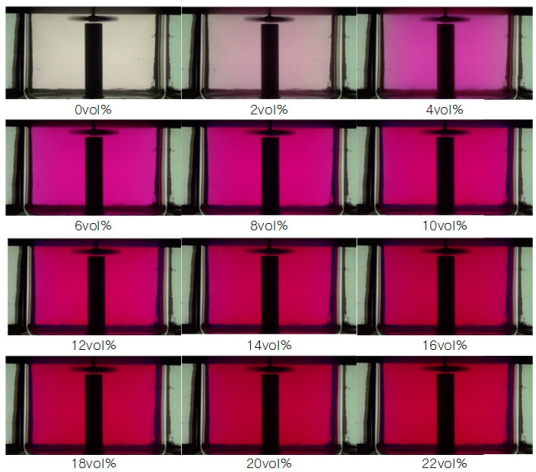

Fig. 3. Image used for color-to-concentration calibration

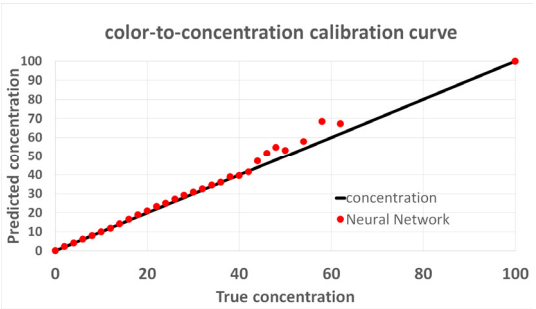

Fig. 4. Color to concentration calibration

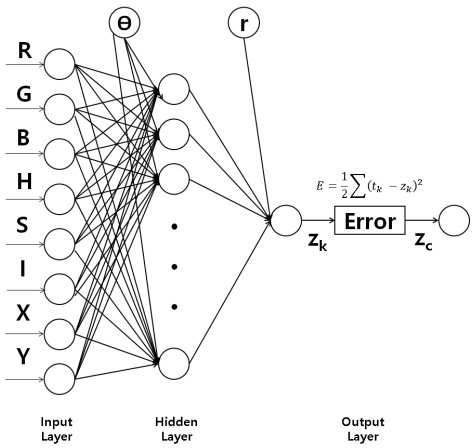

Fig. 5. Application of Neural Network

치별 색상정보를 서로 비교하였을 때 차이를 보이지 않을 때 균일한 것으로 간주하였다. Fig. 4는 Fig. 3를 통하여 만든 농도-색상 교정곡선[5]을 나타낸다.

2.2.2 신경망을 이용한 색-농도 정량화

전술한 바와 같이 동일한 DMF유 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 농도-색상 관계에 대하여 정량적 평가에는 인공신경망[5,6]을 적용하였다. 이하는 인공신경망을 이용한 이종액체 혼합의 정량화 과정을 정리한 내용을 간략히 기술한다.

Fig. 5는 본 연구에 사용한 인공신경망을 나타낸다. 인공신경망은 입력층, 중간층, 출력층으로 구성되어 있으며 입력층에는 총 8개의 정보(R, G, B, H, S, I 및 영상에서의 위치 X, Y)가 입력되고 중간층은 20개의 뉴런(neuron)을 가지는 1개의 층으로 구성되어 있으며, 출력층은 농도값을 나타내는 1개의 뉴런으로 구성하였다.

각 뉴런은 신경망이 연결된 다른 뉴런으로부터 신호를 받아들이는 형태의 모델로 표현될 수 있으며 그 관계식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, v_i는 결합하중, bias는 각 뉴런에 주어지는 오차값을 나타낸다. 각 뉴런의 출력값에 대한 함수로는 임계적 특징을 지니며 미분이 가능하고 수학적으로 단층 학습에 유리한 것으로 알려진 시그모이드함수(sigmoid function)를 사용하여 구하였다.

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

여기서 a, b는 임의의 상수이며, 본 연구에서는 학습포화(saturation)구간을 회피하기 위하여 Fig. 6과 같이 출력값에 바이어스(bias, 0.166666)를 둔 형태의 함수를 적용하였다.

인공신경망의 결합하중(connection weight)을 구하기 위하여 예측 오차가 원하는 수준에 도달할 때까지 반복계산을 수행하였고, 과 바이어스(bias)를 조정하는 방식인 오류 역전파 알고리즘(back-propagation algorithm, BP법)을 사용하였다[7]. 식 (3)에서 H_i는 입력층에서의 입력데이터(x_i, i=1~8)와 결합하중(v) 및 바이어스(θ)의 합을 나타낸 것이다, 이를 식 (7)의 출력데이터(y_j)와 같이 시그모이드 함수(sigmoid function)를 이용하여 중간층에서의 출력데이터를 구한다. 다음으로 중간층의 출력(y)과 결합하중(w) 및 바이어스(γ)의 합으로 되는 식 (8)의 I는 신호합을 의미하며 재차 시그모이드 함수에 적용되어 식 (9)로 표현된 출력층에서의 출력데이터(z)를 구하였다. 마지막으로 식 (10)과 같이 표현될 수 있는 출력데이터와 원하는 출력데이터(t: teach-

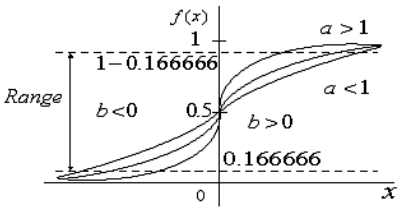

Fig. 6. Used Sigmoid function

ing)와의 오차가 감소되도록 입력층과 중간층, 중간층과 출력층 사이의 결합하중(w_{kj}, v_{ji}) 및 바이어스 계수(θ_j, γ_k)를 식 (11)과 같이 갱신하여 반복계산을 수행하면서 오차가 원하는 수준 이하(본 연구에서는 0.001 이하)로 되면 학습을 종료시켰다.

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

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

$$I_k = \sum_{j=1}^{20} y_j w_{kj} + \gamma_k \bullet 1 \tag{8}$$

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

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

$$\begin{aligned} w_{kj} &= w_{kj} + \Delta w_{kj}, \quad v_{ji} = v_{ji} + \Delta v_{ji} \\ \gamma_k &= \gamma_k + \Delta\gamma_k, \quad \theta_j = \theta_j + \Delta\theta_j \end{aligned} \tag{11}$$

2.2.3 정상 상태 혼합 실험

혼합기(agitator)가 회전하기 직전의 영상인 Fig. 7의 0(s)에 보이는 바와 같이 DMF는 JetA1보다 밀도가 높기 때문에 탱크 하부에 위치하고 있다. 정상 상태 혼합(steady state mixing)이란 이를 의미한다.

혼합기가 회전하기 시작하면 이로 인하여 DMF가 탱크 내부에서 혼합되기 시작하는데, Fig. 7은 각 시간에 따른 혼합과정 영상을 나타낸다. 혼합기 임펠러 회전수를 각각 500 rpm, 600 rpm, 700 rpm로 하였을 때와 실제 사용되는 DMF 농도인 14.5 %에서 실험을 진행하려 하였으나 실험 장치의 실링 문제로 인하여 DMF의 농도가 각각 12%, 16%에서 진행하였다. Table 2는 혼합 실험을 수행의 case를 나타낸다. 각 실험에 대하여 영상기록 시간은 임펠러가 회전하는 시점부터 20초이다.

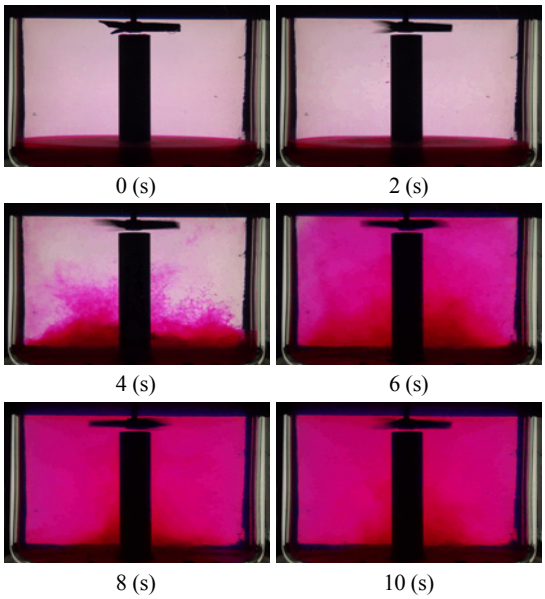

Fig. 7. Temporal variations image of case 1

Table 2. Experimental cases

	12 vol%	16 vol%
500 rpm	Case 1	Case 4
600 rpm	Case 2	Case 5
700 rpm	Case 3	Case 6

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 정상 혼합 실험 결과

Fig. 8은 농도 변화 분석을 위한 위치(Y=–12.26 mm)를 나타내며 이는 농도 변화가 가장 클 것으로 보이는 구간이다. Fig. 9는 DMF 농도가 12 vol%일 때, Y=–12.26 mm에서의 혼합개시로부터 시각 5초, 10초, 15초에서의 농도분포 변화를 나타낸다. Fig. 10은

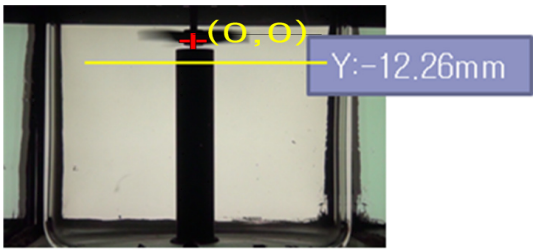

Fig. 8. Calculate region

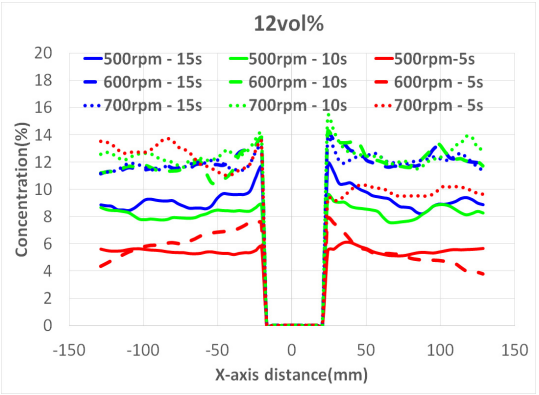

Fig. 9. Result of case 1, 2, and 3

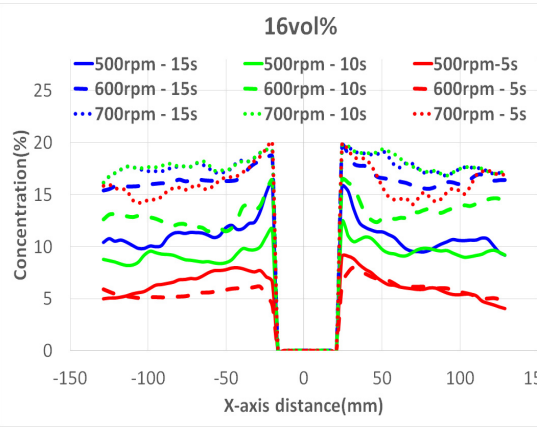

Fig. 10. Result of case 4, 5, and 6

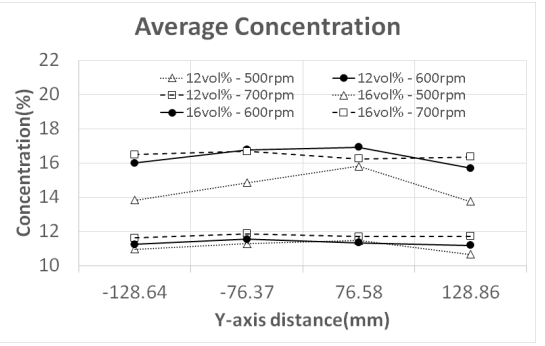

Fig. 11. Average concentration (y-axis)

DMF 농도가 16 vol%일 때, 같은 위치에서의 혼합개시로부터 시각 5초, 10초, 15초에서의 농도분포 변화를 나타낸다.

두 가지 농도 모두 500 rpm에서 15초가 지남에도 불구하고 예상농도인 12 vol%와 16 vol%에 도달하지 못하는 것이 확인되었다. 이는 정상 상태에 도달하는 데에는 15초 이상이 필요함을 의미한다.

Fig. 11은 탱크 내부의 유동이 정상 상태(혼합이 완료되었다고 판정되는 약 17초 이후에의 상태)일 때의 영상에서의 좌표(X, Y) 위치에 따른 농도값을 나타낸다. 정상 상태의 기준은 시간 및 위치에 따라 색상의 변화가 일정수준 이하(3% 미만의 색상변화)일 때를 정의하였다.

Fig. 11은 모든 경우에 대해 Y축과 측정위치의 거리에 대한 농도의 평균값을 나타내며 농도가 12%인 case 1, case 2, case 3의 경우 혼합 목표치인 12%에 근접한 분포를 보임을 알 수 있다. Case3의 경우 농도 분포가 매우 안정적임을 확인하였다. 반면에 농도가 16%인 case 4, case 5, case 6의 중 가장 낮은 회전수를 가진 case 4 (500 rpm)의 경우에 혼합 목표치인 16%에 도달하지 못하는 것을 확인하였다. 또한 case 4 (500 rpm, DMF 16%)에서 축과 가장 멀리 떨어진 지점에서의 혼합 농도는 목표치의 약 86.4%인 13.8% 임을 확인하였다. 이는 혼합용 임펠러의 회전수가 낮을 때에는 16%까지 도달하지 못함을 의미한다.

Fig. 12는 X축과 평행한 모든 수직축 상에서의 농도 평균값을 나타낸 그래프를 표시하고 있다. 그래프의 X축 상에서 –160 mm의 위치는 탱크바닥부를 의미하고, –10 mm의 위치는 상층부를 의미한다. 500 rpm인 case 1, case 4의 경우 회전력의 부족으로 인하여 탱크 하부에 있는 DMF가 상부에 비하여 높은 값을 보인다. 600 rpm인 case 2, case 5의 경우 500 rpm의 경우와 달리 탱크상부가 하부보다 약간 높은 농도를

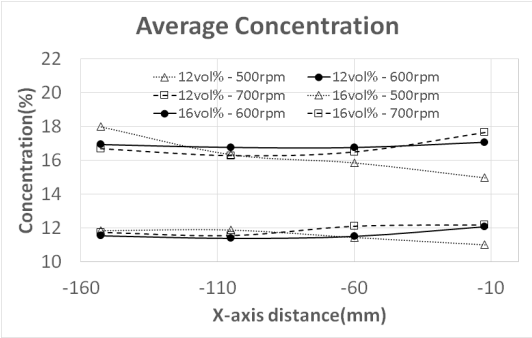

Fig. 12. Average concentration (x-axis)

보였다. 700 rpm인 case 3, case 6의 경우도 600 rpm의 경우와 유사한 농도분포를 보였다.

4. 결 론

인공신경망과 영상정보(R, G, B, H, S, I, X, Y)를 이용하여 혼합탱크 내 비중이 서로 다른 두 연료유의 혼합 농도분포 측정을 수행하는 과정에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 인공신경망을 이용한 이종 연료유의 혼합 상태를 정량화할 수 있는 측정기술을 정립하였다.

2) 연료유(DMF)가 낮은 농도(12 vol%)일 때는 혼합기의 회전수에 무관하게 목표한 농도값까지 혼합이 용이하게 진행됨을 확인하였다.

3) 연료유(DMF)가 높은 농도(16 vol%)일 때는 혼합기의 회전수가 낮을 경우, 혼합시간을 장시간으로 늘려도 균일한 혼합이 달성되지 않음을 확인하였다.

4) 혼합기의 회전수가 임의의 회전수 이상(본 연구에서는 700 rpm 이상)으로 유지되면 DMF의 농도에 무관하게 탱크 내에서 균일한 혼합을 달성할 수 있음을 확인할 수 있었다.

5) 이를 이용하여 향후 로켓 내부 설계에 있어 이종 액체의 농도에 따른 최적 rpm 설계가 가능하다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 중견연구(No. 2017R1A2B-10603, 2018R1A2B6009387)의 지원으로 수행되었다. 또한, 중소기업 월드클래스 R&D과제(S2415805)와 산업통상자원부 취업특화산업육성기술개발사업(R0006323)과 비즈니스협력형R&D사업(R0006261, RFP No. 17-102-006)의 지원으로 수행되었다.

References

1. D. Chapple and S. Kresta “The Effect of Geometry on the Stability on the Stability of Flow Patterns in Stirred Tanks”, Mixing XIV, Santa Barbara, CA, June 20-25, 1993.
2. J. Costes and J. P. Couderc, “Study by Laser Doppler Anemometry of the Turbulent Flow Induced by a Rushton Turbine in Stirred Tank: Influence of the Size of the Units – Mean Flow and Turbulence”, Chemical Engineering Science, Vol. 43, No. 10, 1988, p. 2751-2764.
3. F. Guillard and C. Tragardh “A Study of Turbulent Mixing in a Turbine-Agitated Tank Using a Fluorescence Technique”, Exp. in Fluids, Vol. 22, 2000, pp. 96-102.
4. 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, pp. 1145-1152.
5. J. H. Yum and D. H. Doh, “A study on the Characteristics of Two Fuels Mixing”, Division of Refrigeration & Air-conditioning Eng., Graduate School of Korea Maritime & Ocean University.
6. D. H. Doh and J. H. Yum, “Measurements of Mixing Concentrations between Solid Powder and Liquid Fuel”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 23, No. 6, 2012, pp. 678-687.
7. D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams, “Learning Representations by Back-Propagating Errors”, Nature, Vol. 323, 1986, pp. 323-333.