

물/n-데칸 에멀전 연료의 제조 및 유변학적 안정성 평가

김혜민^{1,†}¹한국교통대학교 항공기계설계학과

Production of Water/n-decane Emulsion Fuel and Evaluation of Rheological Stability

Hye Min Kim^{1,†}¹Department of Aeronautical Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation

Abstract

In this study, the production of proper emulsion fuel and the evaluation of its rheological stability in various experimental conditions were carried out. The W/O (water-in-oil) emulsion fuel was made using n-decane, pure water, and Span 80 was used as a surfactant. Increments of water volume ratio and fuel temperature were the factors, which boosted the phase separation of the emulsion fuel. Rheological characteristics for different water/oil volume ratio, temperature, and elapsed time after the fuel production were examined. As the water volume ratio in the fuel increased, the behavior of non-Newtonian fluid was observed. Viscosity declined as the fuel temperature increased due to the cohesion of water droplets in the fuel. The effect of elapsed time on viscosity was not severe for lower water ratio. However, gradual decrease of viscosity 3 hours after fuel production, in the case of ratio of 3:7, was clearly observed.

초 록

본 연구에서는 n-데칸과 물을 혼합한 에멀전 연료를 제조하고, 연료의 유변학적 안정성을 측정하였다. 에멀전 연료는 n-데칸과 순수, 유화제로 Span 80을 혼합하여 제조되었다. 연료 내부 물 부피비 및 연료 온도 증가는 연료의 상분리를 촉진시키는 요소로 확인되었다. 연료의 물 부피비, 온도 및 제조시간 경과에 따른 유변학적 변화를 관찰하였을 때, 물 부피비가 증가할수록 연료의 비뉴턴 유체거동이 확인되었으며, 온도가 높아질수록 연료 내부 물액적 응집으로 인한 점도감소가 관찰되었다. 낮은 물 부피비에서는 연료 제조시간에 따른 점도변화가 크지 않았으나, 혼합비가 3:7 인 경우 3시간 이후부터 점도의 점진적인 감소가 관찰되었다.

Key Words : Emulsion fuel(에멀전 연료), n-decane(n-데칸), Rheological stability(유변학적 안정성), Ultrasonication(초음파 교반), Viscosity(점도), Phase separation(상분리), Cohesion(응집)

1. 서 론

에멀전 연료(Emulsion fuel)는 기존의 액체연료에 연료와 혼합되지 않는 물, 알코올 등을 혼합하여 제조한 연료이다 [1]. 에멀전 연료는 연소 시 혼합 액체의

끓는점 차이로 인한 미소폭발(Micro-explosion) 현상 등 기존의 연료에서 발생하지 않는 연소특성을 보여주므로 많은 연구자들에 의해 주목을 받았으며, 에멀전 연료를 기존 열기관에 적용하기 위한 다양한 연구가 진행되었다 [2-4].

에멀전 연료를 이용한 다양한 연구 중 한 분야는 에멀전 연료의 안정성 및 유변학적 특성에 관한 연구이다. 일반적으로 혼합되지 않는 두 개의 액체를 혼합시킨 에멀전 연료는 연료의 혼합 방법, 보관 방법 및 시

Received: July. 03, 2017 Revised: July. 18, 2017 Accepted: July. 19, 2017

† Corresponding Author

Tel: +82-43-841-5838, E-mail: enok2695@ut.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

간에 따른 물리적/유변학적 변화가 발생하므로, 이를 확인하기 위한 연구가 진행되었다.

김용국 등은 초음파를 이용하여 유화연료를 제조하였으며, 함수량 및 초음파 교반 시간에 따른 점도 및 표면장력의 변화에 대한 연구를 수행하였다 [5]. 최민형은 그의 논문에서 실리콘계 계면활성제를 이용하여 W/O 에멀전을 제작하였으며 계면활성제의 농도, 함수량 등에 따른 분산상 입자 직경 및 연료의 유변학적 특성을 확인하였다 [6]. Chen 과 Tao 는 그들의 연구에서 함수량, 교반속도, 유화제 첨가량 등 다양한 유화연료 제조 조건에 따른 연료의 안정성에 관한 연구를 진행하였다. 연료의 안정성은 연료의 물리적 상 분리율로 평가하였다 [7].

기존의 연구 결과들을 통해 연료의 혼합 및 함수량 등 다양한 조건에 따라 에멀전 연료의 유변학적 특성 변화 및 연료의 상분리 현상이 발생함을 확인하였다. 이러한 현상들은 에멀전 연료의 열기관 적용을 위해서는 반드시 확인되어야 하는 연료 특성들이다. 대부분의 열기관의 경우 연료 충전 후 연소기에서 연소가 발생하기 까지 시간이 소요되며, 연료계통을 통한 연료 공급 도중 엔진열로 인한 연료온도 상승이 발생한다 [8, 9]. 이러한 조건은 에멀전 연료 유변학적 특성 변화 및 상분리를 발생시키는 요인이므로 연료 저장시간, 온도 등에 따른 연료의 유변학적 특성 변화를 확인하는 것이 필요하다. 특히 연료의 상 분리 현상은 연료의 균질성을 떨어뜨려 전반적인 연료 미립화 및 연소성능을 저하시키므로 이를 방지하기 위한 전략이 필요하다.

본 연구의 주요 목적은 물/n-데칸 에멀전 연료를 제조하고 이를 혼합비, 온도 및 제조 후 시간 경과에 따른 유변학적 변화를 관찰하여 연료의 안정성을 정량적으로 평가하는 것이다. 다양한 조건에서 연료의 점도 변화를 측정하여 연료의 안정성과 점도 간의 상관관계를 확인하고자 한다.

2. 실험 장치 및 조건

2.1 에멀전 연료 제조

본 연구에 사용된 에멀전 연료는 증류수와 n-데칸을 혼합하여 제조하였다. 물과 연료의 혼합비에 따른 연



Fig. 1 Ultrasonicator (left), and Rheometer (right)

료 특성을 확인하기 위해 물과 연료의 부피비를 1:9, 2:8 및 3:7 로 설정하였다. 연료의 상분리를 방지하고 안정적인 연료 제작을 위해 유화제 (Span 80) 을 전체 연료 부피 대비 2% 혼합하였다. Span 80은 친유성 (HLB 값 : 4.3)을 나타내는 유화제이므로 Water-in-oil 연료를 만들기에 적절하다.

연료는 Fig.1 의 초음파 교반기 (Ultrasonicator, VCX-130)를 사용하여 혼합하였다. 10ml 의 연료를 50 W 의 출력으로 20 분간 혼합하였으며, 교반 시 연료의 온도 상승 방지를 위해 차가운 물 수조 내부에서 5초 간격 On/off 사이클로 교반하였다. 연료 제조에 관한 더 자세한 설명은 참고 논문에서 확인할 수 있다 [3].

2.2 점도 측정장치

물/n-데칸 에멀전 연료의 점도를 측정하기 위해 많은 연구자들에 의해 사용되고 있는 Fig. 1 의 회전형 점도계(RheoStress, RS6000)를 사용하였다 [10].

본 연구에서 연료의 점도는 전단율 (Shear rate) 1 ~ 200 1/s 범위에서 측정하였다. 특히 실제 인젝터의 작동범위인 전단율 100 1/s 이상에서 연료의 점도를 평가하기 위해 전단율 100~200 1/s 구간 값을 Linear fitting 하여 상호 비교하였다 [10].

에멀전 연료 온도는 점도 측정 시 회전형 판의 온도를 조절함으로써 변화시켰다.

2.3 실험 조건

본 실험에서는 에멀전 함수량, 연료의 온도 및 제조 후 경과시간에 따른 연료의 점도 변화를 측정하였다.

Table 1 Density and viscosity of water and n-decane

	Density (kg/m ³) (15 °C)	Viscosity (Pa*s) (10 °C)	Viscosity (Pa*s) (40 °C)	Viscosity (Pa*s) (70 °C)
water	999.1	0.0128	0.0066	0.0038
n-decane	730	0.0102	0.0070	0.0047

물과 연료의 부피 혼합비 1:9, 2:8 및 3:7 조건에서 연료를 제조하고, 각 연료의 제조 직후, 3시간, 6시간 및 9시간마다 점도를 측정하였다. 온도에 따른 연료의 점도 변화를 관찰하기 위해 모든 실험 조건에서 점도 측정 시 연료 온도를 10, 40 및 70 °C로 변화시켜 측정을 수행하였다.

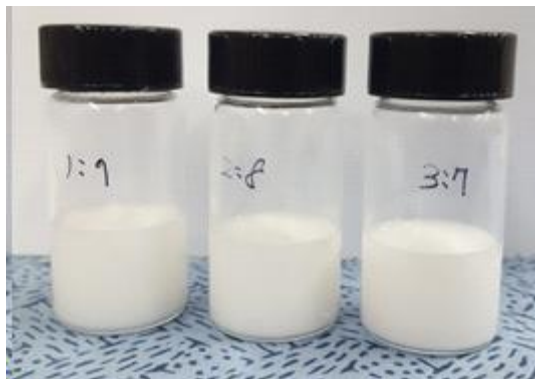
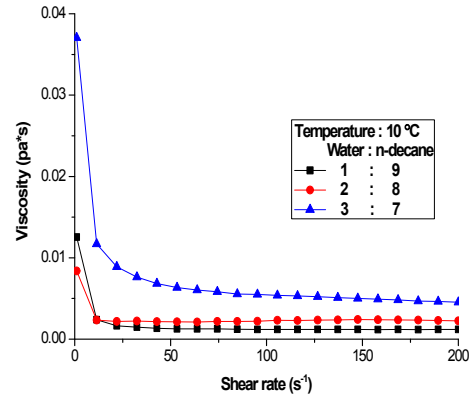
시간이 진행될수록 일부 연료의 상분리가 발생하였으며, 이 경우 연료 채집 위치에 따라 점도가 변화하는 현상이 발생하였다. 이를 방지하기 위해 각 연료는 점도 측정 직전 가볍게 혼합하여 연료를 균일화 한 후 측정을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 연료의 제조 및 기초 특성

2.1 절에서 설명한 방법으로 W/O 에멀전 연료를 제조하였고, 제조된 에멀전의 겉보기 모습 관찰 및 점도 측정을 수행하였다.

제조된 에멀전 연료의 겉보기 모습은 Fig. 2 와 같이 함수량을 구별할 수 없는 불투명한 우유색을 나타내었다. 제조 직후에는 연료 밑부분에 가라앉은 액체상이 존재하지 않았으며, 이를 통해 연료가 적절히 교

**Fig. 2** Emulsion fuel with various W/O ratios**Fig. 3** Change of viscosity in different W/O ratio

반되었음을 확인하였다. 그러나 시간 경과에 따라 액체 상 분리가 발생하였으며, 연료의 불균일성이 시간 경과에 따라 증가하였다.

에멀전 연료의 점도를 측정하였으며 결과는 Fig. 3 으로 나타났다. 이때 연료 온도는 10 °C 로 유지하였다. 점도 측정 결과 에멀전 연료는 낮은 전단율에서 물 액적간의 인력으로 인해 높은 점도를 가지다 전단율이 증가함에 따라 일정한 값으로 낮아지면서 수렴하는 특성을 보여주었다. 에멀전 연료 내부의 함수량이 증가할수록 모든 전단율 구간에서 점도가 증가하였는데, 이는 연료 내부에서 반데르발스 인력으로 알려진 물 액적간의 상호 작용 때문이다 [6].

물/n-데칸 부피비가 1:9 및 2:8 인 경우 전단율이 약 20 정도에 도달함에 따라 전단율 크기와 상관없이 점도가 일정하게 유지되는 전형적인 뉴턴 유체 특성을 보여주었다. 이는 낮은 함수량에서 에멀전 연료가 일반 연료와 유사한 특성을 가진다고 할 수 있다. 반면 물/n-데칸 부피비 3:7 인 경우 전단율 40 1/s 이후 변화 폭은 감소하지만 전단율 증가에 따른 지속적인 점도 감소 특성을 보여주었다. 이러한 특성은 타 연구자의 연구 결과를 통해서도 확인 가능하며, 이는 연료 내부 물 액적간의 상호작용으로 인해 발생하게 된다 [11].

3.2 연료 온도에 따른 특성 변화

열기관에서 연료 계통을 통해 연료가 이송되는 도중 연료의 온도가 상승하는 경우가 많으므로 이러한 상황을 가정하여 연료의 온도 변화에 따른 에멀전 연료의

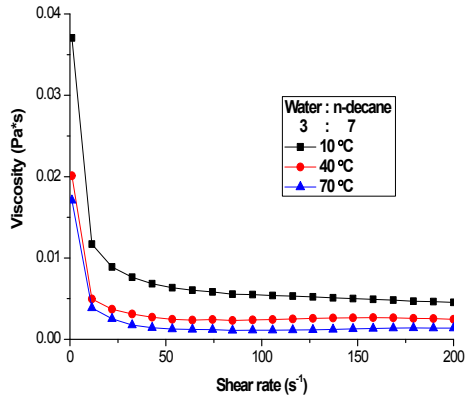


Fig. 4 Change of viscosity in different fuel temperature

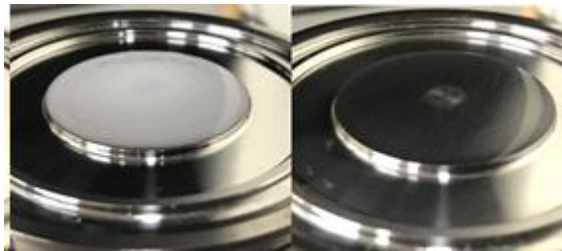


Fig. 5 Change of Transparency of emulsion fuel at 10 °C (left), and 70 °C (right)

특성변화를 관찰하였다.

Fig. 4 는 물/n-데칸 부피비 3:7에서 연료의 온도변화에 따른 점도를 나타낸 그래프이다. 결과를 통해 연료 온도가 증가 할 때 점도가 감소함을 확인할 수 있다. 점도 감소의 원인으로서는 온도가 증가하면 점도가 감소하는 유체의 특성이 주요한 원인 중 하나이며, 에멀전 연료에서는 연료 내부의 물 액적의 응집현상도 점도변화에 큰 영향을 미친다.

Fig. 5 에서 확인 가능하듯 측정 시 연료 온도가 10 °C 인 경우 에멀전 연료가 불투명한 색으로 유지되나, 온도가 70 °C 로 증가함에 따라 연료 색깔이 수십초 내에 불투명한 색에서 투명한 색으로 변화함을 확인할 수 있다. Segawa 등에 의해 진행된 연구에 따르면 연료 온도 증가에 따라 에멀전 연료 내부의 물 입자의 운동성이 증가하게 되고 이러한 물 액적들이 응집하여 연료상과 물상의 분리가 촉진된다고 보고하였다 [12]. 이러한 상의 분리가 연료의 점도 감소를 발생시키게 된다.

연료의 온도가 높아짐에 따라 물/n-데칸 부피비 3:7에서 나타났던 높은 전단력에서 점도감소 특성이 점차

사라짐을 Fig. 4를 통해 확인할 수 있다. 특히 연료 온도가 70 °C 조건에서 전단력이 50 1/s 이상일 경우 연료 점도가 일정하게 유지되는 뉴턴 유체의 특성을 보여주었다. 이를 통해 상 분리로 인한 연료 점도 특성 변화를 확인할 수 있다. 한편 70 °C 수렴된 연료의 점도는 약 0.001 Pa*s 로써 이 값은 동일한 온도에서 물과 n-데칸의 점도인 0.0004 Pa*s 에 비해 여전히 높은 수치이다. 이는 연료 내부의 물이 상당부분 응집되었으나, 점도에 여전히 영향을 미치는 것으로 파악된다.

본 연구결과를 통해 에멀전 연료 온도 증가는 연료의 물리적 상분리 뿐만 아니라 이를 통한 점도의 감소를 촉진시킴을 확인하였다. 따라서 에멀전 연료의 보관 및 연료 이송과정에서 연료의 균질성을 유지시키기 위해서는 낮은 온도 유지가 중요한 요소 중 하나임을 알 수 있다.

3.3 연료 제조 경과시간에 따른 특성 변화

에멀전 연료 제조 후 시간이 경과함에 따라 Fig. 6 에서 관찰 가능하듯 일부 실험 연료에서 물/기름의 상분리가 관찰되었다. 에멀전 연료의 상 분리는 연료의 물리적 불안정성에 의한 것으로 많은 연구자들에 의해 확인되었다 [7, 12]. 본 연구에 사용된 에멀전 연료는 연료 내부의 물 성분이 증가할수록 분리 시간이 단축되어 물/n-데칸 부피비가 1:9 와 2:8 인 경우 연료의 상분리가 관찰되지 않았으나, 3:7인 경우 연료의 상분리가 연료 제조 후 6시간부터 육안으로 관찰되기 시작하였다. 이러한 에멀전 연료의 상분리는 연료의 균질성을 떨어뜨려 열기관의 연소 성능을 저하시킨다.

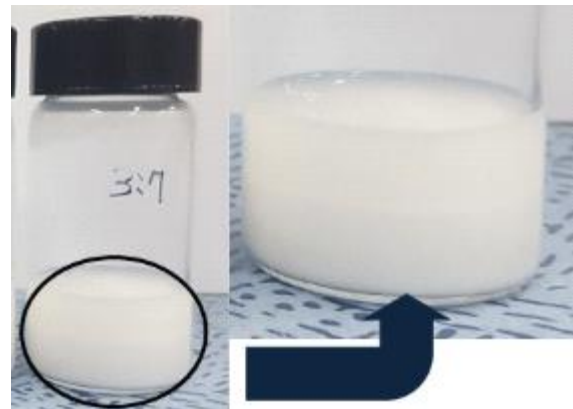
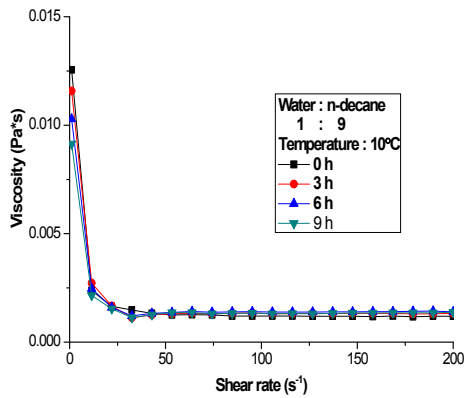
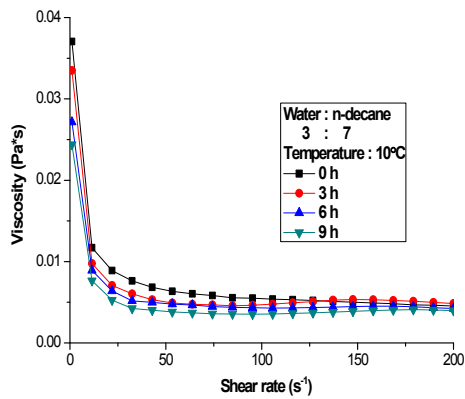


Fig. 6 Phase separation of emulsion fuel



(a)



(b)

Fig. 7 Change of viscosity with elapsed time for water/n-decane volume ratio 1:9 (a) and 3:7 (b)

본 연구에서는 제조 시간 경과에 따른 에멀전 연료의 점도 변화를 확인하였다. 앞서 확인한 바와 같이 연료 온도가 높아지게 되면 연료내부 물 액적의 응집으로 에멀전이 유지되지 못하므로, 점도 변화는 에멀전 연료 구조가 가장 잘 유지되는 연료 온도 10°C 에서 관찰하였다.

Figure 7은 물/n-데칸 부피비가 각각 1:9와 3:7 일 때 연료 제조 시간 경과에 따른 에멀전 연료 점도 변화를 나타낸 그래프이다. 물/n-데칸 부피비 1:9 연료의 경우 육안상으로 연료의 상분리가 관찰되지 않았는데 점도의 경우도 Fig.7-(a) 에서 확인 가능하듯 보관 시간에 관계없이 거의 일정하게 유지되었다. 본 결과를 통해 물/n-데칸 부피비 1:9 연료는 제조 후 9시간

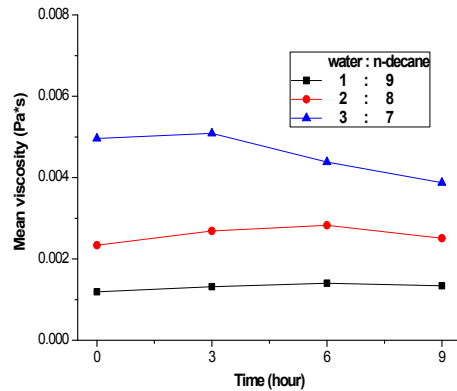


Fig. 8 Mean viscosity variation of emulsion fuel in different W/O ratio

까지 물리적/유변학적 변화 없이 안정적인 상태를 유지함을 확인하였다.

반면 물/n-데칸 부피비 3:7 로 제작된 연료는 제조 6시간 정도부터 육안으로 관찰 가능한 뚜렷한 상분리가 Fig. 6과 같이 발생하였다. 연료의 점도 측정을 위해 연료를 가볍게 혼합하였을 때 연료 제작초기와 같이 고른 불투명한 상을 나타내어 걸보기 모습은 이전 연료와 차이가 없었다. 그러나 Fig. 7-(b)에서 보여주는 바와 같이 연료 제조 경과시간이 증가할수록 연료의 점도가 감소함을 확인할 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 연료 내부의 물 액적간의 응집으로 인해 물 액적간 인력이 줄어들었기 때문으로 생각된다. 본 실험결과는 기존의 주된 에멀전 연료 안정성 평가 방식인 걸보기 관찰만으로는 연료의 특성을 정확히 평가할 수 없다는 점을 시사한다.

스프레이 분사 시 연료에 작용하는 전단력은 100 1/S 가량으로 알려져 있으며, 에멀전 연료의 스프레이 분사 성능을 예측하기 위해 해당 구간의 점도 값을 비교할 필요가 있다 [10]. 본 연구에서는 전단력 100~200 1/s 구간에서 연료 점도의 Linear fitting 값을 물/n-데칸 부피비 및 연료 제조 경과 시간으로 나타내어 그 값을 비교하였으며, 결과는 Fig. 8 의 그래프와 같다. 물/n-데칸 부피비가 1:9 와 2:8 인 경우 시간에 따른 점도의 변화가 거의 일정하게 유지됨을 그래프를 통해 확인할 수 있다.

반면 물/n-데칸 부피비가 3:7 인 경우 3시간까지는 점도가 일정하게 유지되었으나, 3시간 이후부터는 지

속적으로 감소하였다. 이를 통해 물/n-데칸 부피비가 3:7 인 에멀전 연료의 경우 앞서 설명한 물 액적의 응집 영향이 3시간 이후부터 주요하게 발생함을 확인할 수 있다.

본 실험 결과를 통해 에멀전 연료 내 물 부피비가 증가할수록 연료 제조시간 경과에 따른 물리적 상분리와 점도 감소가 발생하게 되며, 이러한 결과는 연료의 물 액적 응집 등의 불안정성에 기인한 것임을 확인하였다. 에멀전 연료의 열기관 적용 시 이러한 불균질성은 연료 스프레이 성능을 시간에 따라 변화시켜 열기관의 성능을 저하시킬 수 있으므로 에멀전 연료 보관 시 적절한 교반이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 물/n-데칸 에멀전 연료를 제작하고 연료의 함수량, 연료 온도 및 제조 경과시간에 따른 연료의 안정성 및 유변학적 변화에 대해 고찰하였다. 결론은 다음과 같다.

- 연료 내 함수량이 증가할수록 연료의 점도는 증가하였다. 특히 부피비 2:8 과 3:7 사이에서 큰 변화가 발생하였으며, 부피비 3:7 에서는 뉴턴 유체 특성에서 벗어난 점도특성을 나타내었다.
- 연료의 온도 증가는 연료 내부 물 액적의 응집을 촉진시켰으며, 이로 인해 연료의 점도가 감소하였다.
- 연료 제조 경과시간이 증가할 경우 물/n-데칸 부피비 1:9 와 2:8 에서는 걸보기 특성 및 점도에서 큰 차이를 보이지 않았으나, 물/데칸 부피비 3:7에서는 상분리가 발생하였고 점도가 감소함을 확인하였다.
- 상분리가 발생하였을 때 가벼운 교반을 통해 걸보기 특성을 원래대로 만들 수는 있었지만 이 경우에도 점도는 감소하였다.

후 기

이 성과는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1C1B5016130).

References

- [1] T. X. Li, -Q. Zhang, B. Wang, T. Guo, Q. Shi, and M. Zheng, "Characteristics of Non-Evaporating, Evaporating and Burning Sprays of Hydrous Ethanol Diesel Emulsified Fuels," *Fuel*, vol. 191, pp. 251-265, Mar 2017
- [2] J. K. Park, J. M. Oh, H. I. Kim, C. H. Lee and K. H. Lee, "Combustion Characteristics of MDO and MDO Emulsion in Automotive Diesel Engine," *Transactions of KSME : B*, vol. 36, no. 9, pp. 945-951, Jul 2012.
- [3] H. Kim and S. W. Baek, "Combustion of a Single Emulsion Fuel Droplet in a Rapid Compression Machine," *Energy*, vol. 106, pp. 422-430, Jul 2016.
- [4] S. -S. Kee, A. Mohammadi, H. Hirano, Y. Kidoguchi, and K. Miwa "Experimental Study on Combustion Characteristics and Emissions Reduction of Emulsified Fuels in Diesel Combustion using a Rapid Compression Machine," *SAE Technical Papers*, May 2003.
- [5] Y. Kim and J. Ryu, "Atomization Characteristics for Various Injection Nozzle Type and Property Changes," *Transactions of KSAE*, vol. 18, no. 4, pp.62-67, Nov 2009.
- [6] M. H. Choi, "The Rheology of Decamethylcycl-opentasiloxane (cyclomethicone) Emulsion System," *M.S Thesis*, Inha University, Feb 2004.
- [7] G. Chen, and D. Tao, "An Experimental Study of Stability of Oil-water Emulsion," *Fuel Processing Technology*, vol. 86, no. 5, pp. 499-508, Feb 2005.
- [8] H. J. Lee, J. Park, M. Kwon, K. and Hwang, "A Study on a Conceptual Design Process of Fuel Feeding Systems for High-Speed Vehicles," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 7, no. 3, pp. 7-14, Sep 2013.
- [9] D. Kim, S. Kang, C. Kim, and B. Wu, "Study on The Propulsion System Flight Test of KC-100 Small Airplane," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 7, no. 2, pp 15-22, Jun 2013.

- [10] J. Kim, D. Jun, T. Kang, S. P. J, J. Koo and H. Moon, "Rheological Characteristics of Kerosene Gel Fuel with SiO₂ Gellant Derivatives," *Transactions of KSPE*, vol. 16, no. 6, pp. 23-31, Dec 2012.
- [11] M. T. Ghannam and M. Y. E. Selim, "Rheological Properties of Water-in-diesel Fuel Emulsions," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 24-28, Jan 2014.
- [12] D. Segawa, D., T. Kadota, H. Tanaka, and H. Enomoto, T. Kadota, H. Tanaka, and H. Enomoto, "Water-coalescence in an Oil-in-water Emulsion Droplet Burning under Microgravity," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 28, no. 1, pp. 985-990, Apr 2000.