

Carbon-slurry 연료의 제조에 있어서 첨가제의 효과

조민호 · 이대엽* · 한정식** · 이익모†

인하대학교 화학과, *인하대학교 기계공학과, **국방과학연구소
(2006년 10월 31일 접수, 2007년 1월 22일 채택)

Additive Effect in the Preparation of Carbon-slurry Fuel

Min-Ho Cho, Dae-Yeop Lee*, Jeong-Sik Han**, and Ik-Mo Lee†

Department of Chemistry

*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Yonghyun-dong, Namgu, Incheon 402-751, Korea

**Agency for Defense Development, Jochiwongil 462, Yuseong, Daejeon, Korea

(Received October 31, 2006; accepted January 22, 2007)

분산성이 우수한 carbon-slurry 연료의 제조와 특성 분석을 하였다. Carbon-slurry 연료는 액체연료(Jet A-1)와 탄소 입자 그리고 적당한 첨가제를 혼합하여 얻었다. Carbon-slurry 연료의 분산성은 교반 온도, 탄소 입자의 특성 그리고 첨가제의 양과 종류 등에 따라서 달라진다. 특히 첨가제의 종류가 slurry 연료의 안정성에 가장 중요하였다. 다양한 음이온성, 양이온성, 비이온성 형태의 첨가제를 사용하여 carbon-slurry 연료의 분산성을 분석하였고, 이 결과 나트륨 염의 형태를 가진 음이온성 첨가제를 사용하였을 경우 carbon-slurry 연료의 분산성이 가장 우수하였음을 확인하였다. Carbon-slurry 연료의 분산성은 빛이 투과되는 광도 값을 측정하여 분석하였다.

Preparation and characterization of carbon-slurry fuel with high dispersion have been carried out. Carbon-slurry fuel was obtained by mixing Jet A-1 liquid fuel with appropriate carbon powders and additives. Dispersion of carbon in Jet A-1 was affected by various factors such as mixing temperature, characteristics of carbon powders, and type and amount of additives. Among these factors, the stability of the slurry fuel was most dependent on the type of additive. A variety of additives such as anionic, cationic, and nonionic additives was tested for the dispersion of carbon in Jet A-1. It was found that anionic additives based on sodium salts showed the highest dispersion of carbon-slurry fuels. The degree of dispersion could be monitored by measuring the luminosity.

Keywords: carbon-slurry fuel, dispersion, additives, luminosity, carbon powder

1. 서 론

세계적으로 매장량이 풍부한 석탄에너지의 유용한 이용을 위해서 coal-oil 혼합물 또는 coal-water 혼합물 형태의 새로운 연료를 미국과 일본 등지에서 개발하고 있다[1-7]. 이러한 새로운 연료의 개발동기를 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 석유의 열량 당 가격에 비하여 석탄가격이 저렴하다.
- 2) 석유보일러 및 일부 공업용 노가 석탄용으로 대체가 곤란하다.
- 3) 주 에너지인 석유와 석탄의 동시사용에 의한 에너지원의 균형이 필요하다.
- 4) 특수용도로서 액체연료의 단위부피당 발열량을 증가시킬 목적 등 이다.

뿐만 아니라 석유에 석탄을 혼합한 연료는 기존의 액체용 연소장치(석유보일러, 공업용 노 또는 특수 연소기)의 일부를 개조하면 사용가

능하다는 특징이 있고, 석탄은 고체이므로 운반, 저장, 연소가 불편한 데 반하여 앞에서 언급한 고체-액체 혼합연료는 액체상으로 취급이 가능하고 높은 열량을 얻을 수 있는 장점이 있다.

한편 액체에 단순히 분산된 고체분말은 시간이 경과함에 따라서 엉김, 침강 등의 과정에 의하여 액체와 분리되는 현상이 발생하여 이송, 저장 및 연소 시에 문제를 발생한다. 따라서 고체-액체 혼합연료는 장시간 저장 시에도 구성 성분이 분리되지 않고 균일한 분산 상태를 유지하는 것이 이 연료의 실용화에 있어 가장 중요한 기술적 요소이다.

고체입자의 분리현상은 고체입자의 크기가 작을수록 침강속도가 작게 되나 제조상의 경제성 문제가 발생하게 되고, 또한 작은 크기의 고체입자를 이용하면 혼합물의 점도가 상승하여 펌프를 이용 시 펌프 압력이 높아지게 되어 이송 및 분무 등에 어려움이 발생하고 노즐에서 분사 시 액체와 고체의 분리현상이 발생하기도 한다. 고체입자의 안정화에는 크게 고체와 액체의 종류에 따라서 많은 영향을 받지만 같은 액체성분에서 같은 종류의 고체일지라도 고체입자의 특성, 즉

† 주 저자 (e-mail: imlee@inha.ac.kr)

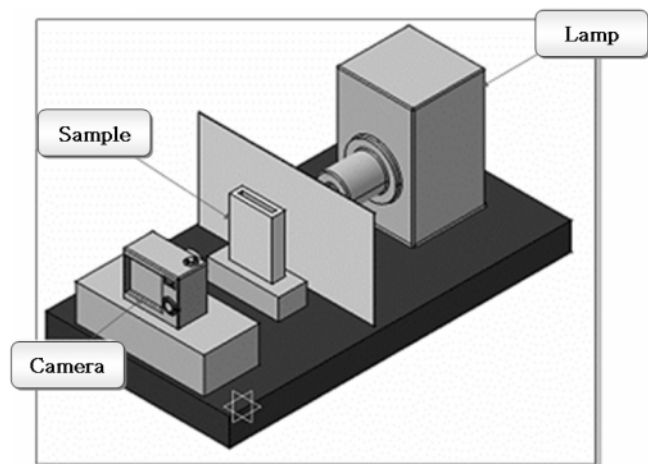


Figure 1. The device for measuring luminosity.

고체입자의 크기, 모양, 순도, 미량 포함된 불순물의 성분 등에 의하여 서도 안정화가 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

고체입자의 영감을 방지하여 침강으로 인한 고체입자의 분리현상을 방지하는 방법으로 가장 많은 연구와 노력의 대상은 첨가제를 이용하는 방법으로써 미국을 비롯한 선진국에서의 결과가 많이 축적된 것으로 알려져 있으며 몇몇 공개된 문헌에 일부가 발표되고 있지만 대부분은 정확한 조성이 알려지지 않고 있다.

이 중에서 몇 가지 결과를 살펴보면 미국특허[8]에서 2.3% 질소가 함유된 oligomeric succinimide (Hitec E-645), barium sulfonate, calcium sulfonate, imide type pigment 등을 단독으로 혹은 혼합하여 사용하여 특수 연료에 함유된 탄소입자의 안정화에 좋은 결과를 얻은 것으로 보고되어있다. 또한, 일본특허[9]에 의하면 석탄과 물의 혼합물에 alkylene oxide가 첨가된 탄소수 12 이상의 지방족 아민화합물 단독으로 또는 alkylene oxide가 첨가된 탄소수 12 이상의 지방족 아민화합물과 카복실산의 혼합물을 이용하면 고체입자의 안정화에 매우 효과적임을 기술하고 있다. 이외에도 첨가제에 대한 연구결과가 다수 있으나 첨가제의 구조 및 성분에 대한 상세한 기술내용이 감추어져 있거나 고체입자의 성분이나 특성 등이 다른 부분이 많고, 구조를 자세히 언급한 경우에는 구입하거나 획득하는데 어려움이 따르는 현실이다.

본 연구에서는 순수한 액체연료에 탄소와 첨가제를 혼합하여 carbon-slurry 연료를 제조하였으며, 탄소 입자의 분산 및 안정화에 미치는 다양한 요소인 원료의 물리화학적 상태, 제조방법, 첨가제의 효과 등을 알아보았다. 이를 바탕으로 향후 우수한 물성을 가진 slurry 연료의 제조 및 관련기술의 개발에 활용하고자 한다.

2. 실험

황성탄소(이하 C (Alaska)로 표기)와 액체연료로 사용된 Jet A-1는 국방과학연구소로부터 제공받았으며, 카본블랙(carbon black) N550S와 N326A는 (주)동양제철화학으로부터 제공받아서 채처리 없이 사용하였다. TEAB (tetraethylammonium bromide), TOAB (tetrabutylammonium bromide), 그리고 DDAB (didodecyltrimethylammonium bromide)는 Aldrich 사에서 구입하였으며, 그 외 모든 첨가제는 TCI에서 구입하여 더 이상의 정제 없이 구입한 상태로 사용하였다. 교반장치로는 교반기(MS-3060, TOPS)를 사용하였으며 광도측정 장치는 자체

제작한 장치를 사용하였다. 본문에서 carbon-slurry 연료의 제조에 사용되는 탄소입자와 첨가제에 대한 백분율(%)은 액체연료 Jet A-1에 대한 상대적인 질량분율을 의미한다.

2.1. Carbon-slurry 연료의 제조

250 mL 삼각플라스크에 Jet A-1 30 g과 첨가제 3 g를 넣고 기계적 교반장치를 이용하여 800 RPM으로 15 min간 혼합하고 이 혼합 용액에 탄소 입자 3 g를 추가로 넣고 같은 조건으로 2 h 동안 혼합하였다. 모든 탄소 입자는 106 °C 오븐에서 24 h 이상 건조 후 사용하였으며, 탄소 입자는 액체연료에 쉽게 분산되지 않고 침전되므로 이를 분산시키기 위하여 다양한 형태의 첨가제를 사용하였다.

2.2. 분산성의 측정

다양한 조건에서 제조된 carbon-slurry 연료의 침전여부는 Figure 1에 도시된 장치를 이용하여 사진 촬영 후 Photoshop 7.0.1를 이용하여 광도(luminosity)를 측정하여 분석하였다. 광원에서 나오는 빛은 제조된 carbon-slurry 연료가 담긴 측정 셀을 투과하게 되고, 이때 탄소의 침전이 일어나면 투과되는 빛의 양의 증가로 광도 값이 증가하게 된다. 침전되지 않고 분산이 잘 되어 있는 carbon-slurry 연료는 시간이 지나도 광도 값이 0인 그래프만을 얻을 수 있다. 광원으로는 제논램프(Xenon-lamp)를 사용하였다. 광도는 아래와 같이 측정 셀의 종류에 따라서 두 가지 방법을 통해 측정하였다. 특별한 언급이 없는 한 제조한 carbon-slurry 연료는 방법 1)을 통해 광도를 측정하였다.

* 광도를 측정하는 방법

- 1) 1.5 mm 두께의 측정 셀을 사용하는 방법
- 2) 3 mL vial (직경 10 mm)을 사용하는 방법

3. 결과 및 고찰

Carbon-slurry 연료에서 탄소 입자의 분산은 어떠한 요인에 의해 영향을 받는지를 파악하기 위해서 교반 시간, 교반 온도 그리고 첨가제의 양과 구조 등을 변화시키면서 carbon-slurry 연료를 제조한 후, 시간에 따른 광도의 변화를 통해 탄소 입자의 분산성을 측정하는 실험을 수행하였다.

3.1. 분산성 측정 장치의 개발

3.1.1. 광도측정 장치

제조한 carbon-slurry 연료의 농도를 비접촉의 방식으로 측정하기 위해 몇 가지 방법을 고안하고 실험을 수행하였다. 초기에 고려되었던 방식은 광투과식 매연 측정장치를 이용하는 방법으로 carbon-slurry 연료를 용기(이하 셀)에 담은 후에 광투과식 매연 측정 장치를 이용하여 광투과도를 측정하고자 하였다. 그러나 이 장치를 이용할 경우 1% 미만의 탄소입자 농도만을 판별할 수 있었다. 본 실험에서 다루고자 하는 탄소입자의 농도 범위는 낮게는 1%에서부터 높게는 50% 정도이다. 이와 같은 이유로 인하여 다른 방법을 채택하기로 하였다. 다음은 사진 촬영을 하여 보쉬-스모크 미터로 판별하는 방법을 사용해 보았다. 보쉬-스모크 미터는 명암 판별이 비교적 정확하고 휴대성도 좋기 때문에 유용한 방법이라고 판단되었다. 그러나 보쉬-스모크미터로 농도를 측정하기 위해서는 농도를 파악하고자 하는 부분의 사진을 촬영한 후 출력할 필요가 있었다. 보쉬-스모크미터의 명암 판별성은 비교적 정확하지만, 사진이 출력되는 인쇄기나 해상도 등에 따라 보쉬-스모크미터로 측정되는 값에 차이가 있어 재현성 있

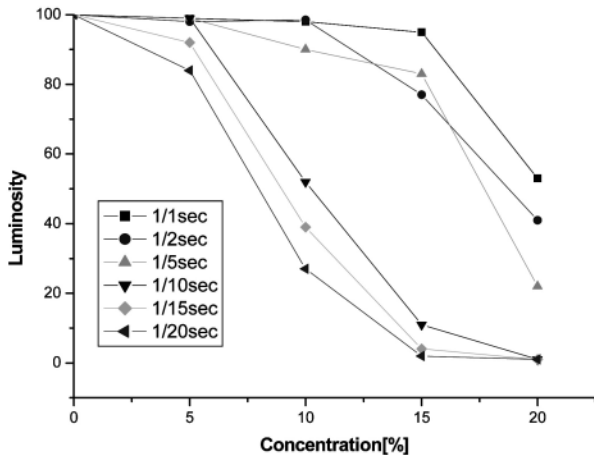


Figure 2. Experimental luminosity results with the change of the shutter speeds with a camera on F3.5 using C (Alaska) (No additives, room temperature).

는 자료를 얻기가 힘들었기 때문에 다시 다른 방법을 찾아야만 했다. 그 후 고안된 방법은 동일한 조건에서 촬영된 사진의 광도(luminosity)를 측정하는 것이었다. 이 수치는 비교적 정확한 기준과 값을 가지기 때문에 실험에서 높은 재현성을 얻을 수 있었다.

광도측정 장치는 크게 광원장치와 시편 그리고 카메라로 구성된다. Carbon-slurry 연료의 농도 판별 범위를 좀 더 실용적인 범위로 확대하기 위하여 광원을 이용하였다. 광원의 경우 파장이 짧을수록 투과력이 강하기 때문에 할로겐램프에서 파장이 짧은 제논램프로 변경하였다. 할로겐램프는 가격이 저렴하고 구하기 쉬운 장점이 있으나 제논램프를 이용했을 때, 판별할 수 있는 농도 범위가 더 넓어질 것으로 예상하고 제논램프를 사용하였다. 파장이 짧을수록 투과도가 높기 때문에 제논램프가 할로겐램프 보다 carbon-slurry 연료의 시료가 담긴 측정 셀을 잘 통과하여 카메라까지 도달하게 되고, 이로 인해 농도가 높은 영역까지 판별이 가능한 것이다. 그러나 예상과 달리 농도 판별에 거의 변화가 없어 제논램프를 사용하되 카메라의 감도를 높이는 방향으로 방법을 변경하였다.

3.1.2. 카메라 최적 조건

본 연구에서 carbon-slurry 연료의 농도 판별은 사진을 촬영한 후 사진의 광도를 측정하여 환산함으로써 얻는다. 그렇기 때문에 사진의 전체적인 밝기, 초점 등이 농도 판별에 영향을 줄 수 있다. 이와 같은 이유로 사진 촬영 시 카메라의 설정은 매우 중요하며, 카메라의 설정을 조절함으로써 판별할 수 있는 농도 범위를 변화시킬 수 있다. 즉 카메라를 최적의 상태로 설정하면, 판별할 수 있는 농도의 범위가 최대가 된다는 것이다.

카메라 설정 값으로 셔터 스피드와 조리개 수치를 고려하였다. 셔터 스피드와 조리개 수치만으로 사진의 전체적인 밝고 어두운 정도를 조절할 수 있었기 때문이다. 이 두 가지 요소를 적절하게 조절하여 판별할 수 있는 농도 범위가 최대인 조건을 얻었다. 침전되는 입자들의 움직임을 선명하게 포착하려면 셔터 스피드를 빠르게 해야 한다. 그러나 셔터 스피드가 빨라짐에 따라 어두워지게 되는 사진의 명암을 보상하기 위해 조리개 수치를 낮게 설정하였다. 최적점이라고 판단되는 설정 값은 뒤에 나올 결과에 명시된 바와 같이 셔터 스피드 1/10 sec, 조리개 수치 F3.5에서 얻을 수 있었다. 이러한 결과로부터 비교적

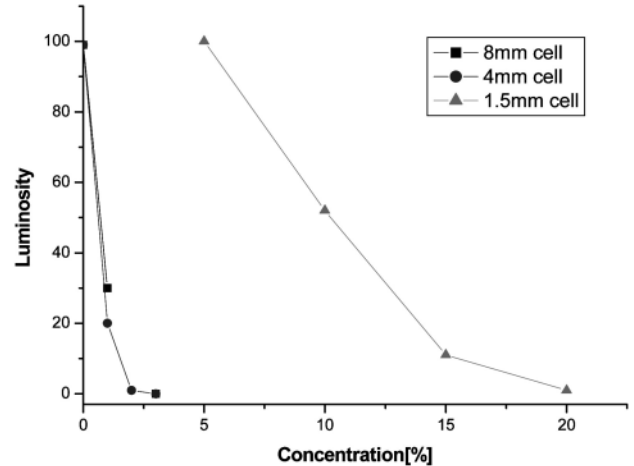


Figure 3. The relationships between luminosity and concentration with the change of thickness of cells (1.5, 4, and 8 mm) using C (Alaska). (No additives, room temperature).

선형적인 관계의 광도-농도 값을 얻을 수 있었다.

제논램프를 사용할 경우 농도의 최적 분해도를 갖는 카메라 설정은 Figure 2에서 보여 지는 바와 같이 조리개 수치 F3.5, 셔터스피드 1/10 sec 일 때이다. Figure 2는 조리개 수치는 F3.5로 고정하고 셔터 스피드만을 변화시켜 가면서 탄소 입자 농도에 따라서 측정한 광도 값을 그래프로 나타낸 것이다. 조리개 수치가 너무 낮은 경우 전체적으로 밝게 촬영되어 농도 판별이 탄소입자 15% 이상부터 가능한 형태로 나타났었고, 조리개 수치가 너무 클 경우 전체적으로 어둡게 나타나서 탄소입자 10% 미만의 농도에서는 농도 판별이 용이하였으나 탄소입자 10% 이상의 농도는 판별하기 어려웠다. 조리개 수치를 F3.5로, 셔터 스피드를 1/10 sec로 할 때 그래프 기울기는 농도변화에 따라 매우 선형적으로 나타남을 알 수 있다.

3.1.3. 셀 두께에 따른 차이

초기에는 화학시험 장비를 참고하여 두께가 8 mm인 셀을 제작하였다. 그러나 8 mm 두께의 셀은 carbon-slurry 연료를 넣었을 때 빛이 투과되는 양이 너무 적어서 농도에 따른 광도 측정이 어려웠다. 이후 4 mm 두께의 셀을 제작하여 실험을 수행한 결과 8 mm 셀보다 좋은 결과를 얻을 수 있었으나, 여전히 높은 농도의 시료를 판별하기에는 어려움이 있었다. 8 mm 두께의 셀과 4 mm 두께의 셀을 이용하여 측정한 결과를 분석하고 난 후, 셀이 더 얇아지면 보다 더 정확한 측정이 가능할 것으로 판단되어 1.5 mm 셀을 제작하여 광도를 측정하였다. Figure 3은 C (Alaska)를 이용하여 제조한 carbon-slurry 연료를 각각 8 mm와 4 mm, 그리고 1.5 mm 두께의 셀에 넣어 광도를 측정한 결과이다. 4 mm나 8 mm 셀의 경우보다 1.5 mm 두께 셀의 경우 판독된 광도를 통하여 농도를 판별하기 쉽다는 것을 알 수 있다. 1.5 mm 셀을 이용하여 작성한 curve fitting 그래프는 광도와 농도의 관계가 1차식으로 회귀되어 광도를 통한 농도 환산이 비교적 정확하다. 그러나 1.5 mm 두께 셀의 경우 실용적인 영역의 농도측정을 하기 위해 광원의 세기를 조절하여 5% 이상의 농도부터 판별이 가능하도록 설정하였다.

3.1.4. 측정 위치에 따른 광도 변화

Carbon-slurry 연료를 셀에 넣어 분산성을 측정할 때, 윗부분이 먼

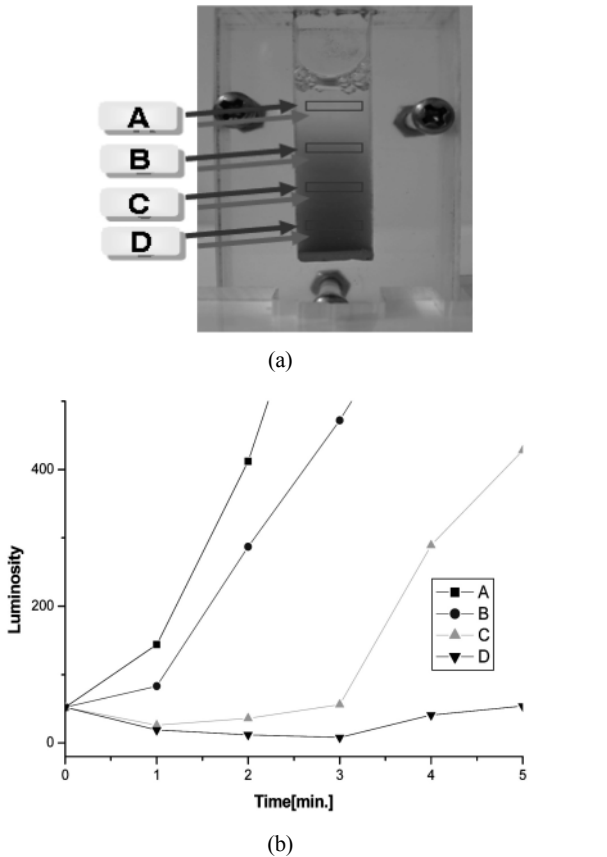


Figure 4. (a) Measurement sites for luminosity and (b) The relationships between luminosity and time at different measurement sites. (C (Alaska) 10%, stearic acid 10%, room temperature).

저 침전하여 밝아지고 점점 아래로 침전이 진행되어가기 때문에 광도 측정부분의 위치가 다르면 농도의 환산에 오차가 생기게 된다. 이러한 요인들을 파악하기 위하여 셀을 네 부분으로 나누어 각 부분에서 시간에 따라 광도 변화를 관찰하였다(Figure 4).

셀의 위치에 따른 분산성 측정결과 전체적으로 침전이 진행되나 윗부분의 입자가 먼저 침전되면서 아래로 내려오기 때문에 위치에 따라 농도차이와 침전속도가 차이남을 알 수 있다.

3.2. 첨가제의 종류 영향

본 연구의 목적인 액체연료에 탄소 입자를 잘 분산시키기 위해서 첨가제의 어떠한 특성이 필요한지를 이해하기 위하여 다양한 구조의 첨가제를 동일한 조건하에서 사용하여 carbon-slurry 연료를 제조하였다.

음이온성, 양이온성, 비이온성의 첨가제를 사용한 결과, N550S 10%와 비이온성 첨가제인 stearic acid, lauric acid 또는 n-dodecanoyl chloride 10%를 혼합하여 제조한 carbon-slurry 연료는 6 min 안에 모두 침전되었으며(Figure 5), 사슬 내에 이중결합을 가지는 oleic acid 10%를 N550S 10%와 혼합하여 제조한 carbon-slurry 연료의 분산성 역시 위의 경우와 큰 차이가 없었다. 또한 새로운 관능기인 -SH, -NH₂, NHR₂, PR₃를 가지는 비이온성 첨가제 역시 10 min 안에 탄소 입자의 침전이 이루어졌다. 이러한 현상은 탄소 종류에 상관없이 모두 같은 현상을 나타내었다. 한편, N550S 10%와 -COONa 작용기를 가지고 있는 음이온성 첨가제인 sodium oleate 또는 sodium stearate 10%를 사용하여 carbon-slurry 연료를 제조하였을 경우, 탄소 입자의

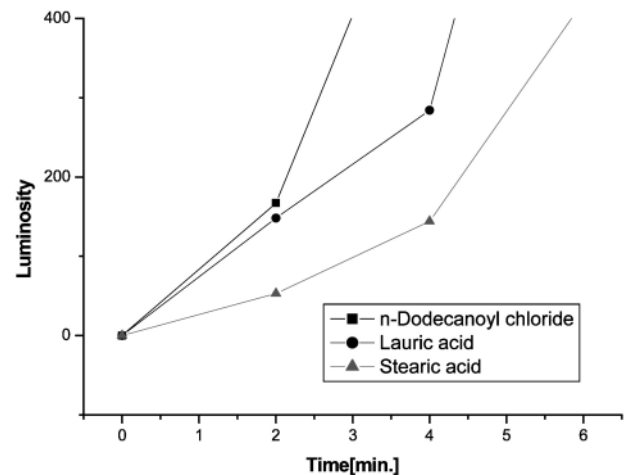


Figure 5. Dispersion of carbon-slurry fuels with change of non-ionic additives (10%) using N550S (10%) at room temperature. (3 mL vial was used for measurement of luminosity).

분산성이 좋았으며, 암모늄 염 형태의 TEAB, TOAB 또는 DDAB와 같은 양이온성 첨가제 또한 액체연료에 탄소 입자를 잘 분산시키는 것으로 나타났으나 본 연구에서 사용한 시간범위에서는 이 첨가제들의 우열을 구별하기가 쉽지 않았다. 분산성이 우수한 첨가제를 사용하여 carbon-slurry 연료를 제조하면 30일 이상 지나도 광도 값의 변화가 없다.

본 연구에서 확인한 음이온계 첨가제의 상대적으로 우수한 분산효과는 종류는 다르지만 이미 보고된 문헌에서도 확인할 수 있다. 미국 특허[8]에서는 다양한 음이온계 첨가제를 사용하여 좋은 효과를 확인하였으며, 일본특허[9]는 아민과 카르복실산의 혼합물을 제안하고 있다. 이는 주어진 조건하에서 이 두 물질이 반응하여 양이온계 암모늄 염과 음이온계 첨가제가 생성되는 것으로 추정할 수 있다. 본 연구에서도 이러한 점을 착안하여 양이온이 금속이온이 아닌 긴 사슬을 가진 암모늄 염을 가지는 첨가제 구입 또는 합성을 계획하였지만 구입이 불가능하거나 순수한 형태로 얻을 수 없는 문제점 때문에 더 이상의 연구를 할 수는 없었지만 이러한 형태의 첨가제가 가용하고 비용문제를 도외시한다면 매우 효과적인 첨가제가 될 것으로 추정하고 있다.

이러한 이온성 첨가제가 비이온성 첨가제에 비하여 효과가 좋은 것은 탄소 입자 표면의 극성 관능기와의 결합력이 증가되어 입자간의 응집이 효과적으로 차단되는 것으로 추정된다.

3.3. 교반 시간 영향

Jet A-1 30 g, N550S 6 g, 그리고 sodium oleate 0.03 g을 사용하여, 2 h과 12 h 동안 각각 교반하였다. 이렇게 제조한 carbon-slurry 연료의 시간에 따른 광도 값의 변화를 Figure 6에 나타내었다.

교반 시간을 2 h과 12 h으로 변화를 주어 제조한 carbon-slurry 연료는 시간에 따른 광도 값의 변화가 큰 차이가 없다. 이것을 통해 탄소 입자의 분산은 주어진 조건 내에서 교반 시간에 큰 영향을 받지 않는다고 추정된다. 다만 Ball Mill과 같이 본 연구에서 사용한 기계적 교반 장치와는 다른 혼합 시스템을 사용할 경우 어떠한 결과를 보일지를 예측하기 어렵기 때문에 이러한 연구도 계획하고 있다.

3.4. 교반 온도 영향

Jet A-1 30 g, N326A 6 g, 그리고 sodium oleate 0.3 g를 사용하여,

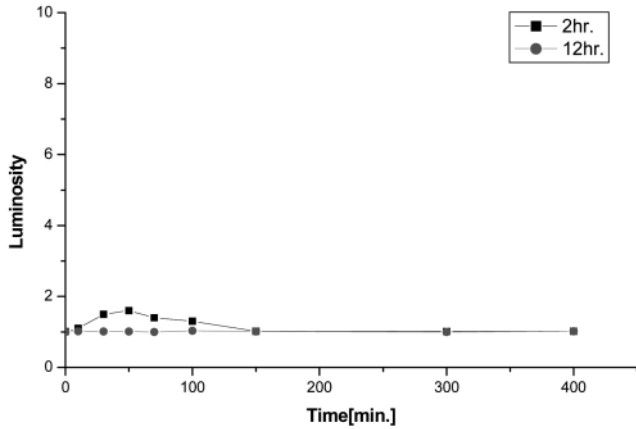


Figure 6. The relationship between dispersion of carbon and mixing time in the carbon-slurry fuel (N326A 20%, sodium oleate 0.1% and Jet A-1 at room temperature).

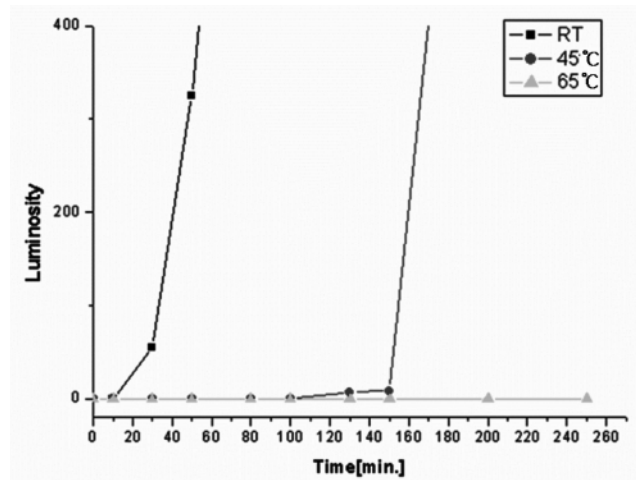


Figure 7. Dispersion of carbon-slurry fuels with the change of mixing temperature using N326A (20%) and sodium oleate (1%) at room temperature.

교반 온도를 각각 상온(RT), 45 °C, 그리고 65 °C로 하여 carbon-slurry 연료를 제조하였다.

상온에서 제조한 것은 25 min, 45 °C에서 제조한 것은 180 min이 지나면 광도 값이 변하는 것이 관찰된다(Figure 7). 교반 온도가 증가할수록 탄소 입자의 침전되는 속도가 더 느려지는 것을 알 수 있으며, 높은 온도에서 carbon-slurry 연료를 제조하는 것이 탄소 입자의 분산에 도움이 된다는 것을 알 수 있다. 그러나 65 °C 이상에서는 현재 정확하게 이해되지 않은 겔화가 진행되었다. 일단 겔화가 진행되면 그 상태가 그대로 유지되지만 연료 전체에 퍼져 있지 않기 때문에 바람직하지 않은 상태이며 이 상태가 나타나는 이유를 이해하기 위해 현재 연구 중 이다. 지금까지는 카본블랙의 성질 중 DBP (Dibutyl-phthalate) 흡유량으로 표시되는 구조의 특성과 관련이 되어 있을 가능성이 있을 것으로 추정하고 있다.

3.5. 첨가제의 양 영향

탄소 입자의 분산성과 첨가제의 양의 상관관계를 알아보기 위하여 sodium oleate의 양을 변화시키면서 Jet A-1 30 g과 C (Alaska) 3 g을

Table 1. Characteristics of C (Alaska)

C (Alaska)		
Mean diameter	7 μm	
Element (wt.%)	C	85.14
	O	11.93
	Al	0.9
	Si	1.12
	Ca	0.94

Table 2. Characteristics of N550S and N326A

	N550S	N326A	
Iodine Adsorption No.	g/kg	42	82
DBP Absorption No.	cm ² /100g	123.4	72
BET(N2SA)	m ² /g	40	84
Residue on Mesh	US #325	0.0001	0.0011
pH Value	-	8.6	8.4
Pour Density	kg/m ³	369	468

Note) DBP : dibutyl phthalate

혼합하여 carbon-slurry 연료를 제조하였다. Sodium oleate의 양이 증가할수록 탄소 입자가 분산이 잘 되는 것을 Figure 8(a)를 통해 확인할 수 있다. Figure 8(b)는 sodium oleate의 양을 변화시키면서 N326A 6 g을 사용하여 제조한 carbon-slurry 연료의 시간에 따른 광도 값의 변화를 나타내는 그래프이다.

첨가제 양이 증가하면 탄소입자 주위를 둘러싸게 될 가능성이 높아지고 입자간 응집을 방해할 가능성이 증가하여 분산성이 높아질 것으로 추정되며 실험결과도 이러한 추정을 뒷받침하고 있다.

3.6. 탄소입자의 특성 영향

똑같은 첨가제를 사용해도 탄소 입자의 종류가 달라지면 carbon-slurry 연료의 분산성이 달라진다. 위에서 알 수 있듯이 N550S 10%와 음이온성 또는 양이온성 형태의 첨가제 10%를 혼합하여 제조하면 분산성이 우수한 carbon-slurry 연료를 제조할 수 있다. 그러나 N326A 10%를 사용하여 제조한 carbon-slurry 연료의 경우, sodium oleate와 sodium stearate 그리고, DDAB를 제외한 첨가제로 제조한 carbon-slurry 연료(첨가제 10% 사용)는 5 min 이내에 침전되어 광도 값이 크게 증가하였다(Figure 9). DDAB의 경우에는 50 min 후 광도 값이 증가하였으며, sodium oleate와 sodium stearate로 제조한 carbon-slurry 연료는 30일이 지나도 0의 광도 값을 유지하였다.

C (alaska)의 특성은 Table 1에 N550S와 N326A의 입자의 특성은 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 가장 중요한 카본블랙의 특성은 요오드 흡착량, 질소비 표면적 그리고 DBP 흡유량이다. 요오드 흡착량과 질소비 표면적은 카본블랙을 형성하는 일차탄소입자의 크기를 나타내며, 수치가 높을수록 입자크기는 작다. 그러나 이 입자들은 작은 나노크기의 입자들의 집합체로 구성되어 있어 SEM 등을 통한 입자분포가 의미가 없는 것으로 알려져 있다. DBP 흡유량은 카본블랙의 구조 발달 정도를 의미한다. 수치가 높은 카본블랙일수록 가지가 많은 구조로 되어 있다는 것을 의미하며, slurry 연료 형성 시 점도가 증가할 가능성이 커진다.

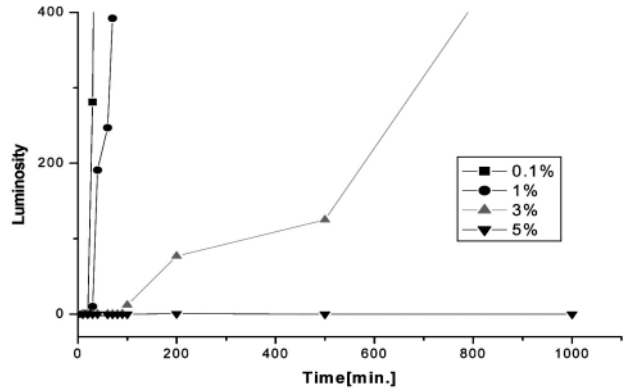
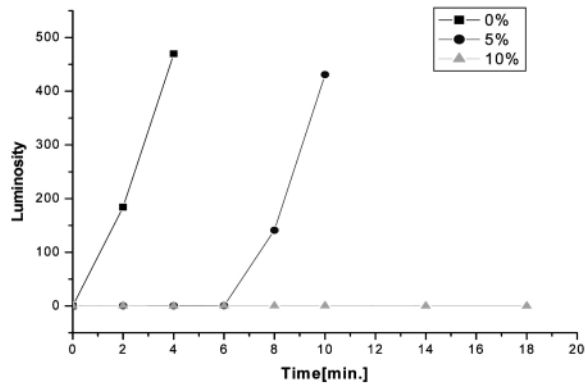


Figure 8. Dispersion of carbon-slurry fuels with the change in the amount of sodium oleate, using (a) C(Alaska) (10%) and (b) N326A (20%) at room temperature. (3 mL vial was used for measurement of luminosity).

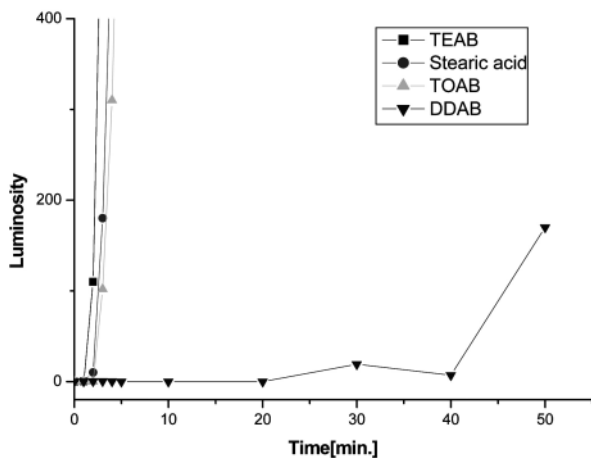


Figure 9. Dispersion of carbon-slurry fuels with the change of additives (10%), using N326A (10%) at room temperature. (3 mL vial was used for measurement of luminosity).

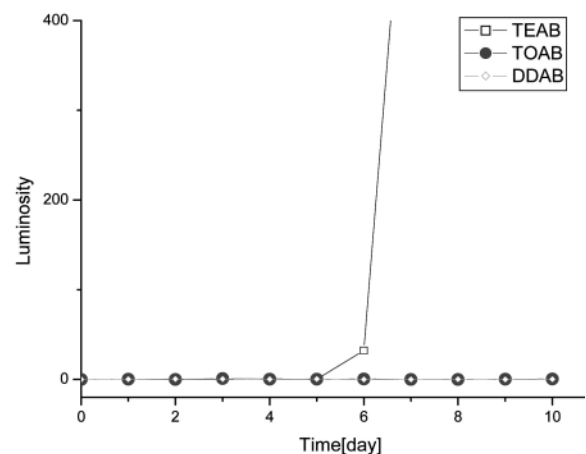


Figure 10. Dispersion of carbon-slurry fuels with the change of additives (10%), using N550S (10%) at room temperature. (3 mL vial was used for measurement of luminosity).

3.7. 광도측정 방법 영향

위에서 언급했듯이 광도 측정은 1.5 mm 두께의 셀을 이용하는 방법과, 3 mL vial을 이용하는 방법이 있다. 이 두 방법에 따라서도 분산성의 차이가 관찰되어진다.

Figure 8(b)는 sodium oleate의 양을 변화시키면서 Jet A-1 30 g과 N326A 6 g을 혼합하여 제조한 carbon-slurry 연료를 3 mL vial을 이용하여 시간에 따른 광도 값을 측정하였다. 그러나 이것을 1.5 mm 두께의 셀을 이용하여 광도측정을 하면 수일이 지나도 광도 값이 0으로 변화가 없다. 뿐만 아니라 N550S 10%와 DDAB, TEAB 또는 TOAB 10%를 사용하여 제조한 carbon-slurry 연료의 경우 1.5 mm 두께의 셀을 이용하여 광도를 측정하면 동일한 결과를 얻을 수 있지만 3 mL vial을 이용하면 Figure 10과 같은 결과가 나타난다. 이와 같이 1.5 mm 두께에서 측정된 carbon-slurry 연료의 분산성은 실제의 carbon-slurry 연료의 분산성과 큰 차이를 보인다. 즉, 정확한 carbon-slurry 연료의 분산성을 파악하기 위해서는 1.5 mm 두께의 측정 셀이 아닌 3 mL vial을 사용해야만 한다. 그러나 3 mL vial을 이용하여 광도를 측정하면 넓은 농도 범위(적어도 15%)에서 광도 값과 직선 관계를 얻을 수 없으므로 시간에 따른 농도 변화는 관찰할 수 없다 (1.5 mm 두께의 셀을 이용하면 탄소입자 15%까지 농도 판별 가능

(Figure 3)). 이 방법은 단지 carbon-slurry 연료의 침전이 일어나는 시간, 즉 분산을 유지하는 시간만을 알 수 있다.

4. 결 론

액체연료 Jet A-1에 탄소 입자와 첨가제를 혼합하여 carbon-slurry 연료를 제조하였으며, 첨가제는 탄소 입자를 액체연료 Jet A-1에 고르게 분산시키기 위해서 사용하였다. 제논램프를 광원으로, 제조한 carbon-slurry 연료에 빛을 입사시켜서 투과되는 빛의 양을 측정하는 방법(광도 측정)으로 탄소 입자의 분산성을 파악하였다. 광도측정은 1.5 mm 두께의 측정 셀을 이용하는 방법과 3 mL vial을 이용하는 방법으로 측정하였다. 전자의 경우에는 탄소입자 15%까지 농도 판별이 가능하였으나 경우에 따라서 carbon-slurry 연료의 정확한 분산성을 측정하기 어려운 경우가 있었다. 3 mL vial을 이용하면 농도판별은 3%까지 밖에 안 되지만 carbon-slurry 연료의 침전이 일어나는 시간, 즉 분산을 유지하는 시간은 알 수 있었다.

Carbon-slurry 연료의 분산성은 교반시간에는 많은 영향을 받지 않지만, 첨가제의 양과 종류, 교반 온도 그리고 탄소 입자의 종류에 따라서는 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 첨가제의 양이 증가할수

록 탄소 입자는 잘 분산되었다. N550S를 탄소 입자로 사용한 경우, 음이온성 및 양이온성 첨가제의 사용이 탄소 입자를 잘 분산시키는 것으로 나타났으며 N326A으로 제조한 carbon-slurry 연료는 음이온성 첨가제를 사용했을 경우에만 분산이 잘 되었다. 교반 온도가 증가하면 침전되는 속도는 느려지지만, 65 °C에서 제조한 carbon-slurry 연료는 겔과 같은 형태로 존재하여 slurry 연료로 사용하기에는 부적합하다. N550S와 N326A에 따른 carbon-slurry 연료의 분산성의 차이는 요오드 흡착량, 질소비 표면적 그리고 DBP 흡유량 수치와 관련이 있는 것으로 판단되어지나, 정확한 원인을 파악하기 위해 현재 연구 중이다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원에 의하여 진행되었으며 저자들은 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. A. Atal and Y. A. Levendis, *Combust. Flame*, **98**, 326 (1994).
2. A. Atal and Y. A. Levendis, *Combust. Flame*, **93**, 61 (1993).
3. L. L. Baxter and Z. G. Habib, *Combust. Flame*, **90**, 199 (1992).
4. S. C. Yao, P. Manwani, G. J. Germane, and L. D. Smoot, *Combust. Flame*, **66**, 87 (1986).
5. E. T. Mchale, R. S. Scheffee, and N. P. Rossmeissl, *Combust. Flame*, **45**, 121 (1982).
6. G. A. Szekely, Jr., S. R. Turns, and G. M. Faeth, *Combust. Flame*, **58**, 31 (1984).
7. Douglas C. Rawlins, *Combust. Flame*, **74**, 255 (1988).
8. U. S. Patent 4,305,729 (1981).
9. Japan Patent 57-50512 (1982).