

# 알루미늄 슬러리 연료의 분산안정성 연구

조민호 · 양문규 · 정병훈<sup>1\*</sup> · 한정식<sup>1</sup> · 이익모\*

## A Study on the Dispersion Stability of Aluminum Slurry Fuel

Min-Ho Cho · Mun-Kyu Yang · Byung-Hun Jeong<sup>1\*</sup> · Jeong-Sik Han<sup>1</sup> · Ik-Mo Lee\*

### ABSTRACT

For the preparation of Aluminum-slurry fuel, the effects of process parameters on the aluminum dispersion stability in the liquid fuel have been investigated. The dispersion stability of aluminum-slurry fuels could be monitored by measurements through Turbiscan using the scattering of the Laser. Through the application of various additives, TPAB (Tetrapropyl ammonium bromide) showed more reasonable performance than others.

### 초 록

알루미늄슬러리 연료 제조 시 알루미늄의 분산안정성에 미치는 공정변수의 영향을 조사하였다. 알루미늄슬러리연료의 분산안정성은 Laser의 산란 현상을 이용하여 물질의 분산 안정성을 파악하는 Turbiscan을 이용하여 확인하였다. 여러 종류의 첨가제 적용시 시간 경과에 따른 입자 크기 및 농도 변화를 측정된 결과, TPAB (Tetrapropyl ammonium bromide) 사용시 다른 첨가제보다 좋은 결과를 나타내었다.

**Key Words:** Aluminum-slurry fuel (알루미늄슬러리 연료), Dispersion stability (분산안정성), Dispersion additives (첨가제), Aluminum contents (알루미늄 함량), Paste mixer (페이스트 혼합기), Turbiscan(터비스칸), Nano Alumnium (나노 알루미늄)

### 1. 서 론

일반적으로 슬러리연료는 액체연료에 고체입자를 균일하게 분산시켜 순수 액체연료만으로는 얻을 수 없는 고밀도와 고발열량의 특성을 나타낸다.[1]

이러한 장점은 연료 운반을 위해 작은 부피

를 가지게 됨으로써 비용을 절약할 수 있고, 운용 범위 또한 증가시킬 수 있다. 그러나 실제 적용이 가능한 슬러리연료 개발을 위해서는 고체입자의 균일한 분포 및 분산안정성 유지가 가장 우선적으로 해결되어야 한다[2].

이를 위해서 액체연료의 표면장력을 줄임으로써 분산안정성에 기여하고, 특히 가속 또는 감속되는 외력 하의 환경에서도 슬러리연료 내 고체입자와 액체연료와의 분리를 줄여줌으로써 분산안정성을 유지시켜주는 첨가제의 적절한 사용이 요구된다.[3]

인하대학교 화학과

<sup>1</sup> 국방과학연구소

이익모, imlee@inha.ac.kr;

정병훈, myoungoh@unitel.co.kr

또한 사용되는 고체입자(카본, 알루미늄, 보론 등)에 따라 슬러리연료의 발열량과 밀도가 영향을 받을 뿐만 아니라 분산특성도 달라지므로 적절한 분산용 첨가제의 선정이 요구된다.

본 연구에서는 이전의 카본슬러리 연구결과[4]를 바탕으로 하여 Jet A-1 연료에 고체 알루미늄 입자를 분산시킨 알루미늄슬러리 연료 제조시 알루미늄의 분산안정성에 미치는 알루미늄 및 첨가제 종류, 함량, 슬러리연료 제조 후 경과 시간에 따른 분산안정성의 영향을 분석하였다.

## 2. 실험

액체연료로 사용된 Jet A-1은 국방과학연구소로부터 제공받아 사용하였고, 나노알루미늄 입자는 (주)나노기술로부터 구입하여 사용하였다.

분산용 첨가제로 Tween 85(Polyethylene glycol sorbitan trioleate), Sodium oleate, TPAB(tetrapropylammonium bromide)는 Aldrich에서 구입하였으며, polyolefin alkene-amide계 첨가제인 NB463S84는 국방과학연구소에서 제공받아 사용하였다.

혼합장치로는 Paste Mixer(PDM-150, Kmtech)를 이용하였고, 측정 장치로는 Turbiscan(Lab expert, fomulation)을 이용하여 관찰하였다. 본문에서 사용되는 카본입자와 첨가제에 대한 백분율 (%)은 액체연료 Jet A-1에 대한 상대적인 질량분율을 의미한다.

### 2.1. 나노 알루미늄의 특성

국산 나노 알루미늄은 (주)나노기술에서 선-폭 발법으로 제조되고 비활성가스 하에서 환원된 제품으로 입자의 크기는 50 ~ 200 nm 정도이다.

나노 알루미늄 입자의 겉보기 밀도는 1.25 kg/L 이며 TEM 분석시 표면 알루미늄 두께가 약 3.0 nm 정도로 균일하였으며 SEM으로도 비교적 균일한 형상이 관찰되어 취급시 비교적 안전하다고 판단되었고, 구입이 용이하여 국산 나노 알루미늄을 선정하였다.

### 2.2. Turbiscan 이용 분산안정성 측정

Turbiscan은 Laser의 산란을 이용하여 물질의 안정성을 파악하는 장치로서 슬러리연료의 시간 경과에 따른 고체입자 크기 및 농도 변화 측정함으로써 분산안정성을 파악한다.

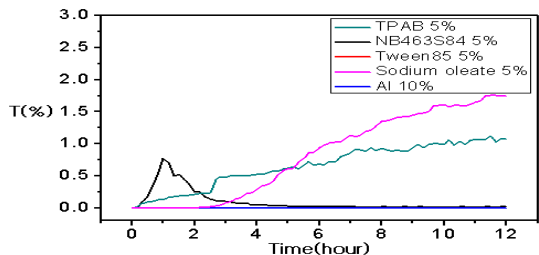
측정한 결과는 자체 프로그램을 통해 Mean Value Kinetics(투광도 및 산란도)로 변환하여 변화를 확인한다. 산란도의 변화가 투광도의 변화보다 관찰하기가 쉽기 때문에 보통은 산란도의 변화로서 분산안정성을 관찰한다.

## 3. 결과 및 고찰

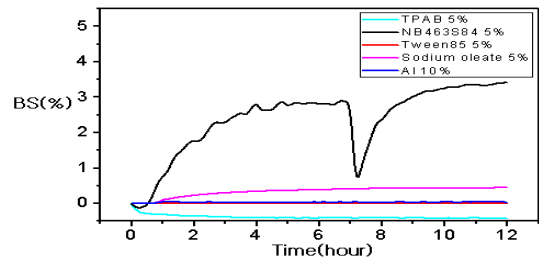
알루미늄슬러리 연료에서 알루미늄입자의 분산에 영향을 주는 요인을 파악하기 위해서 알루미늄 및 첨가제 종류, 함량, 측정 시간을 변화시키면서, 첨가제에 의한 분산안정성 및 알루미늄 자체의 분산안정성을 Turbiscan 장치를 이용하여 정량적으로 관찰하였다.

### 3.1. 첨가제 종류의 영향

Tween 85, Sodium oleate, NB463S84, 또는 TPAB를 첨가제로 사용 시 제조한 알루미늄슬러리 연료의 Turbiscan 분석을 실시하였다.



(A) Mean Value Kinetics (Transmission vs Time)



(B) Mean Value Kinetics (Backscattering vs Time)

Fig. 1. The dispersion stability of aluminum-slurry fuels with the change of additives.

Fig. 1에서 Mean Value의 의미는 관찰을 시작한 시점과 비교하여 투광도와 산란도의 변화를 말하며 이 값이 변화하지 않는 것이 분산안정성 유지를 나타낸다. 위의 결과에서 볼 수 있듯이 첨가제를 사용하여 알루미늄슬러리 연료를 제조한 경우 대부분의 첨가제에서 침전이 관찰되었다. 그러나 첨가제를 사용하지 않은 경우에는 변화가 관찰되지 않았다. 이러한 현상의 정확한 이유는 분석 중이지만, 첨가제를 사용하면 점도가 낮아지게 되면서 나타나는 형상으로 관찰되고 있다.

또한, 카본슬러리 제조에 있어서 좋은 분산안정성을 보인 NB463S84는 알루미늄의 경우 가장 좋지 않은 분산안정성을 보여 입자의 특성에 따라 첨가제가 달라져야 함도 확인할 수 있다.[4] 따라서 입자의 어떠한 특성이 분산안정성에 가장 중요한 요소인지를 이해하기 위해 추가적 조사가 진행 중이다.

### 3.2. TPAB 사용 시 알루미늄 함량의 영향

앞의 실험에서 알루미늄슬러리 연료 제조에서는 좋은 분산안정성을 가지는 첨가제를 관찰하지 못하였다. 그 중에 TPAB와 Tween 85가 좁은 범위에서 변화가 관찰되어 알루미늄 함량에 따른 변화를 확인하였다. 알루미늄의 함량을 15%로 하여 Tween 85와 TPAB의 분산안정성을 비교하여 보았다. Fig. 2에서의 결과로 TPAB가 Tween 85 보다 좋은 결과를 보였으며, 10%의 결과와는 차이가 나는 결과를 관찰하였다.

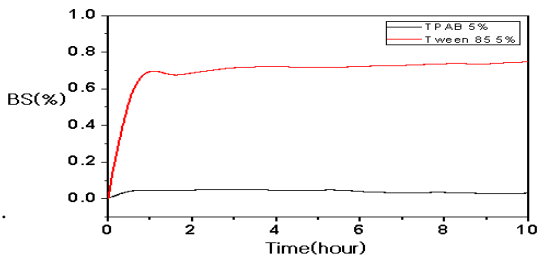
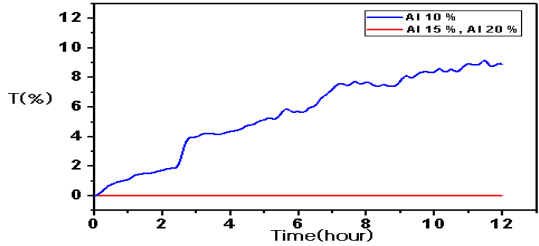


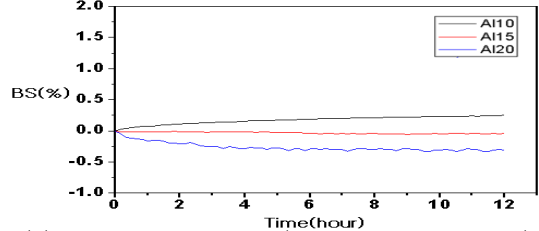
Fig. 2. The dispersion stability of aluminum-slurry fuels with TPAB or Tween 85.

Fig. 3.에서 보는 것과 같이 알루미늄 함량변화의 영향을 확인한 결과, 10% 경우 침전이 관

찰되지만 15%, 20%의 경우 변화를 보이지 않고, 산란도 변화에서 살펴보면 15%의 경우가 더 좋은 분산안정성을 보이는 것으로 관찰되었다.



(A) Mean Value Kinetics (Transmission vs Time)



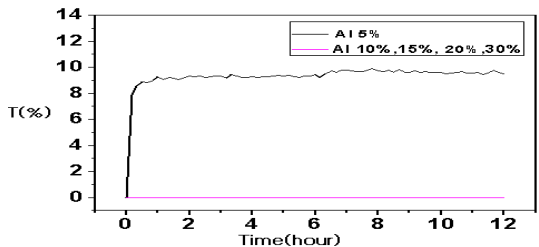
(B) Mean Value Kinetics (Backscattering vs Time)

Fig. 3. The effect of aluminum contents on the dispersion stability of aluminum-slurry fuels with TPAB as an additive.

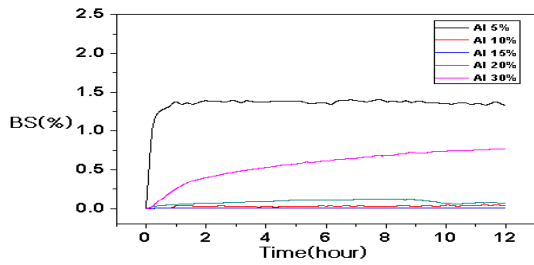
### 3.3. 첨가제가 없는 경우 알루미늄 함량의 영향

위 실험에서 알루미늄 함량에 따른 분산성이 증가됨을 설명하기 위하여 추가적 실험을 시행하였다. 즉, TPAB 없이 알루미늄 함량을 변화시켜 기준 값을 설정하기 위한 실험 결과를 Fig. 4에 도시하였다.

투광도에서는 알루미늄 함량 5%의 경우에만 변화가 관찰되지만, 산란도에서는 10%, 15%, 20%의 경우 변화가 없고 30% 이상에서만 점도 변화 때문에 침전이 관찰되는 것으로 나타났다. 결론적으로 12시간 동안은 첨가제 없이 10 ~ 20%의 경우에 분산안정성을 유지하는 것으로 나타났다.



(A) Mean Value Kinetics (Transmission vs Time)



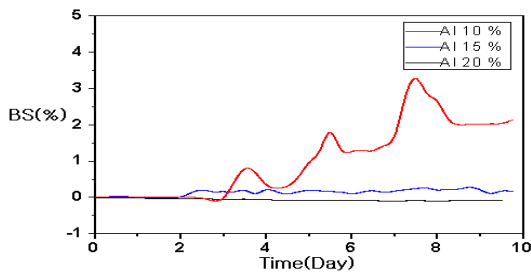
(B) Mean Value Kinetics (Backscattering vs Time)

Fig. 4. The dispersion stability of aluminum-slurry fuels with the change of aluminum contents

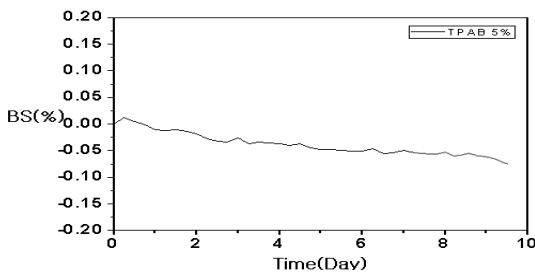
### 3.4. 10일 간 Turbiscan 측정 결과.

알루미늄 슬러리 연료를 오랜 기간 동안 보관하기 위해서는 12시간의 실험 결과로는 부족하다. 그래서 10일 동안 Turbiscan을 이용하여 변화를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 도시하였다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 알루미늄의 함량이 증가할수록 그 변화폭은 작지만 변화가 있으며, 육안으로도 침전이 관찰된다. 또한 가장 효과적인 첨가제인 TPAB를 사용한 경우에도 변화를 보여 침전이 관찰되는 것을 알 수 있다.



(A) Measurement of aluminium-slurry fuel with no additives



(B) Measurement of aluminium-slurry fuel with TPAB

Fig. 5. The change of dispersion stability of aluminum-slurry fuels for 10 days

## 4. 결 론

본 연구에서는 단위 부피당 발열량이 높고 분산안정성이 우수하며, 장기보관이 가능한 알루미늄슬러리 연료를 제조하기 위한 연구를 실시하였다.

액체연료 Jet A-1, 나노 알루미늄, 그리고 다양한 첨가제를 사용하여 알루미늄슬러리 연료를 제조하고 알루미늄의 분산안정성을 Turbiscan 사용하여 정량적으로 측정하였다. 그 결과, TPAB가 가장 가능성 있는 첨가제로 확인되었다. 또한 첨가제 없이 사용한 실험에서도 분산안정성이 유지되는 것을 알 수 있었다.

그러나 10일간의 측정에서 살펴본 것과 같이 침전이 관찰되어 장기적인 분산안정성을 갖는 알루미늄슬러리 연료를 제조할 수 있는 첨가제 선정 및 적용에 관한 추가적인 연구가 진행 중이다.

## 감사의 글

본 연구는 방위사업청이 지원하는 고에너지물질 특화센터 연구결과 중의 일부입니다.

## 참 고 문 헌

1. 변도영, 조주형, 백승욱, 안국여 "Al/액체연료 슬러리 액적의 연소와 미세 폭발 -실험적 연구, 대한기계학회논문집(B) 제21권 제12호, pp 1576~1585, 1997
2. R.H. Salvesen et al, "Carbon Slurry Fuels for Volume Limited Missiles", AFAPL-TR-79-2122, AFWAL, 1979.
3. L.E. Fink, "Slurry fuels and associated methods", USP 20070056212A1, 2007
4. 조민호, 양문규, 이익모, 조준현, 권태수, 정병훈, 한정식, "카본슬러리 연료의 분산안정성 개선 및 scale up 제조," 제31회 한국추진공학회지 추계학술대회논문집, 2008, pp.459~462.