

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2018.22.1.007>

HTPB/AP/AOT 고체 추진제의 특성 연구

김미리^a · 최재성^a · 김정은^a · 홍명표^a · 이형진^{b,*}

Characteristics of HTPB/AP/AOT Solid Propellant

Miri Kim^a · Jaesung Choi^a · Jeongeun Kim^a · Myungpyo Hong^a · Hyoungjin Lee^{b,*}

^aPGM G&C/HILS/Propulsion Project 1team, LIG Nex1 Co., Ltd., Korea

^bDepartment of Aerospace Engineering, Inha University, Korea

*Corresponding author. E-mail: hyoungjin.lee@inha.ac.kr

ABSTRACT

In this study, AOT that is used as a surfactant in various industries was applied to an HTPB/AP solid propellant. AOT is one of the anionic surfactants, and there have been cases where AOT was reported to induce self-extinguishable properties in propellants overseas. In this study, solid propellants using AOT were prepared, and their properties and combustion characteristics were investigated. The combustion rate of the AOT-applied propellant drops sharply when the pressure reaches a certain value during combustion. Further, the density and hardness of the propellant are lower than those of conventional HTPB/AP propellants.

초 록

본 연구에서는 다양한 산업에서 계면활성제로 적용되는 AOT를 HTPB/AP 고체추진제에 적용하였다. AOT는 음이온 계면활성제 중 하나로, 해외에서는 AOT가 추진제의 소화특성을 유도한다고 보고된 사례가 있다. 본 연구에서는 이러한 AOT를 적용한 고체추진제를 제조하였고, 물성과 연소특성을 고찰하였다. AOT를 적용한 추진제는 연소 시 일정 압력에 도달하게 되면 연소속도가 급격히 떨어지는 특성을 나타내며, 물성 특성에서도 밀도와 경도가 일반 HTPB/AP 추진제에 비하여 낮게 나타난다.

Key Words: AOT(음이온계 계면활성제), Surfactant(계면활성제), Solid Propellant(고체추진제), Self-extinguishment (소화성)

1. 서 론

로켓 모터용 고체 추진제는 주로 연료, 산화제로 구성 되어있다. 연료로는 추진제 형상을 구성하는 바인더가 있고, 비추력을 증강시키기 위하여 금속 연료를 적용하기도 한다. 이때 기타 필요한 물성과 특성을 위하여 원료의 종류와 함량을 고려하고, 필요한 경우 기타 연소 촉매제 등 다양한 첨가제를 선

정하여 적용한다[1].

고체 추진제를 적용한 고체 추진기관의 장점은 시스템이 간단하고 유지비용이 저렴한 것에 있다. 하지만 단점으로는 액체 또는 하이브리드 추진기관과 비교하여 추력 제어가 힘들고 일단 추진기관이 작동하게 되면 연소 중지가 어렵다. 최근에는 추력 제어가 가능한 고체 추진기관에 대한 필요성이 점차 요구됨에 따라 그에 대한 연구도 다양한 방법으로 진행되고 있다. 대표적인 방법으로 Pintle을 적용한 추진기관을 이용하여 추력제어를 유도하거나, 추진제의 소화를 유도하여 연소를 중지시킨 후 필요한 시점에 재점화를 가능하게 하여 조절하는 방법이 있으며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이중 소화성 추진기관 개발 연구에는 급격한 압력 강하를 발생시켜 연소를 중지시키는 TCO (Thrust Cut-Off) 시스템과 추진제의 원료를 이용하여 추진기관 내에서 연소를 중지시키는 방법이 있다[2, 3].

본 연구에서는 추력 중단을 위한 소화성 추진제를 개발하고 이를 통해 고체 추진제의 연소 소화를 유도하기 위한 방법으로 소화 특성을 나타내는 원료로 알려진 AOT (Aerosol-OT, Sodium bis (2-ethylhexyl) Sulfosuccinate) 계면활성제를 적용하여 추진제를 제작하고 그 특성을 분석하고자 하였다. Anionic Surfactant인 AOT는 계면활성제로서 다양한 산업 분야에서 적용되고 있지만, 고체 추진제 연구 분야에서는 적용된 사례는 보고된 바가 드물다. AOT 계면활성제를 적용한 연구는 University of Central Florida Research Foundation 연구팀이 유일한 것으로 알려져 있으며, HTPB/AP 추진제에 대해 작은 입도 크기의 원료들이 혼화과정에서 뭉치는 것을 방지하기 위한 목적으로 계면활성제를 적용하였고, 그 과정에서 발현된 추진제의 소화 특성을 보고한 바 있다[4,5].

Fig. 1은 AOT의 기본 구조를 나타낸다. 구조에 보이는 바와 같이 계면활성제는 Hydrophobic한 구조와 Hydrophilic 한 구조가 함께 있어 서로 다른 성질의 계면이 잘 어울릴 수 있는 특성을 갖고 있다. 구조상 Head 부분에 Hydrophilic, Tail 부분에 Hydrophobic의 형태로, Reverse Micelle을 형성할 수 있으며 이러한 특성이 소화성을 유발하는 원인인 것으로 추정된다. 마찬가지로 일반적인 HTPB/

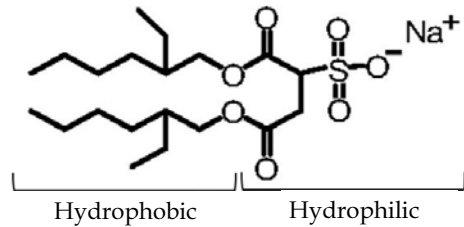


Fig. 1 structure of AOT.

AP 추진제 내에서 산화제 주변에 Reverse Micelle을 형성하여 Wetting성을 향상시킴으로써 소화 특성을 발현할 수 있을 것으로 보이지만 실제 추진제 적용한 연구 사례에 대한 보고는 극히 드물다.

이에 본 연구에서는 현재 유도무기용 추진기관에 널리 적용되고 있는 HTPB/AP 추진제에 AOT 계면활성제를 적용하여 추진제를 제조하고 추진제에 대한 물리적 특성 및 추진제의 연소/소화 특성을 살펴보고자 하였다. 또한 추진제 제조 시 경화가 잘 되지 않는 문제가 발견되어, 추진제 연구에 앞서 HTPB 바인더와의 상호작용 관계를 분석하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 HTPB/AP 추진제에 AOT를 적용하여 추진제 시편을 제작하고 물리적 특성과 연소 특성을 분석하였으며 그 결과를 정량적으로 제시하였다.

2. 추진제 예비 조성 실험

2.1 추진제 원료

본 연구에 적용된 추진제의 원료로는 프리폴리머로 Hydroxyl terminated Polybutadiene (HTPB), 가소제로는 Dioctyl Adipate (DOA), 경화제로는 Isophorone Diisocyanate (IPDI), 산화제로 Ammonium Perchlorate (AP)를 기본 원료로 사용하였다. 프리폴리머로 사용된 HTPB는 삼양화학사의 OH index 0.76 meq/g이고, 경화제로 사용된 IPDI는 Evonik사의 NCO index는 8.92 meq/g이다. AP는 Herakles사에서 제조한 품목으로 입도 사이즈는 400/200/9 μm 를 혼용하였고, 가소제로 사용된 DOA는 애경유화에서 제조한 것을 적용하였다. 또한 본 연구에서 소화특성을 연구하기 위하여 사용한 AOT는 Sigma Aldrich사

의 순도 97% 이상의 제품을 사용하였으며 각 원료들은 특별한 정제 없이 사용하였다.

2.2 AOT 적용 바인더 특성 실험

AOT를 고체 추진제에 적용하기 전에 바인더 내에서의 특성에 대한 실험을 수행하였다. 바인더 특성 실험은 고체 추진제에 AOT를 적용한 경우, 추진제의 경화가 잘 이루어지지 않는 것으로 확인 되어, AOT가 우레탄 반응에 미치는 영향을 분석하였고 이를 통해 바인더의 경화 여부 및 경화 속도를 확인하였다. 바인더 샘플은 AOT의 함량을 각각 0, 1, 5, 10, 20 wt.%로 제작하였고, 당량비는 1.0과 1.2의 경우로 총 10개의 샘플을 핸드믹싱 방법으로 제조하였다. 바인더 샘플의 제작 방안은 다음과 같다. 실험에 사용된 FT-IR은 Bruker사의 Vertex 70을 이용하였고 ATR 방법으로 분석하였다.

- (1) AOT를 Benzene에 용해시켜 66.67 wt.% AOT 용액을 제조한다.
- (2) 조성에 따라 AOT 용액과 HTPB를 혼합한다.
- (3) 진공 오븐에 각 샘플을 넣고 감압하여 Benzene을 제거한다.
- (4) 각 조성에 적합한 양의 IPDI를 혼합한 후 FT-IR을 측정한다.
- (5) 60°C 항온 오븐에서 7일간 경화시키면서 약 24시간 간격으로 FT-IR을 측정한다.

2.3 추진제 조성 실험

추진제 조성 실험은 AOT를 적용한 바인더 실험과 마찬가지로 조성에 따른 추진제의 경화성을 확인하고, 추진제 조성에 AOT를 적용하였을 경우 최적의 산화제 함량을 확인하기 위하여 수행하였다. 실험에 적용된 추진제의 조성은 AOT 함량 0~20%에 대해 가스제의 함량은 고정하고 산화제와 바인더의 함량을 조정하여 결정하였으며 Table 1에 제시하였다. 추진제 역시 핸드믹싱 방법으로 제조하였으며 제조 방법은 다음과 같다. 실험에 사용된 경도하중계는 쇼어 A type을 이용하여 분석하였다.

- (1) AOT를 DOA에 용해시켜 70 wt.% AOT 용액을 제조한다.

Table 1. Test of the propellant formulations. (Equivalent Ratio : NCO/OH=1.0)

No.	AOT (wt.%)	DOA (wt.%)	HTPB/IPDI (wt.%)	AP (wt.%)
P1-1	5	3	5	87
P1-2			10	82
P1-3			20	72
P2-1	10	3	5	82
P2-2			10	77
P2-3			20	67
P3-1	20	3	5	72
P3-2			10	67
P3-3			20	57

- (2) Table 1의 조성에 맞추어 AOT 용액과 HTPB, DOA, AP를 혼합한다.
- (3) 진공 오븐에 각 샘플을 넣고 감압하여 바인더 원료와 산화제를 혼합한다.
- (4) 각 조성에 적합한 양의 IPDI를 혼합한 후 다시 진공 오븐에 넣어 감압 공정을 수행한다.
- (5) 각 추진제 샘플을 60°C 항온 오븐에서 7일간 경화시킨다.
- (6) 각 샘플을 오븐에서 꺼내 상온으로 식힌 후 경도를 측정한다.

3. 추진제 제조

3.1 추진제 제조

실제 추진제 제조는 앞서 수행한 바인더 특성 실험 및 추진제 조성 실험 결과를 기반으로, 혼화 및 경화 공정을 통해 수행되었다. 혼화 공정은 Vertical Mixer (1 Gal.)를 이용하였다. 추진제 제조는 먼저 60°C 조건 하에서 바인더 프리믹스를 감압 혼합한 후 AP를 소분하여 투입하고 상압 혼합 및 감압 혼합을 수행하였다. 이후 나머지 경화제 및 기타 촉매제를 넣고 50°C 조건 하에서 상압 혼화 및 감압 혼화를 진행하였다. 혼화된 추진제는 50°C 항온 오븐에서 7일간 경화시켜 제작을 완료하였다.

3.2 추진제 물성 및 연소 특성 분석

추진제 점도 측정은 Brookfield Viscometer (RVT Type)를 이용하여 50°C 분위기 하에서 샘플별로 EOM부터 4시간동안 각각 측정하였다. Viscometer의 조건은 Helipath Spindle F Type, RPM은 2.5로 수행하였다. 추진제의 경도 분석은 쇼어 A-type 경도 시험기를 이용하였으며 밀도는 Mettler Toledo사의 XSE104V 밀도 측정기를 이용하여 측정하였다. 밀도 측정할 때 사용되는 실리콘 오일은 DC-200을 적용하였다. 각 샘플과 실리콘 오일을 20°C에서 안정화 시킨 후 밀도를 측정하였다. AOT를 적용한 HTPB/AP계 추진제의 연소 특성은 연소속도 분석을 위해 Strand Burner를 이용하여 측정하였다. 샘플은 경화된 추진제를 직경 6 mm, 길이가 130 mm가 되도록 재단 후 샘플 표면에 인히비터를 도포하여 건조시켜 제작하였다. 제작된 샘플을 Strand Burner를 이용하여 각 요구 압력에서 연소속도를 측정하였다.

4. 연구 결과 및 고찰

4.1 바인더 특성 실험

바인더 특성 실험은 HTPB/AP/AOT 추진제의 경화 특성을 분석하고자 선행하여 수행하였다. 이는 AOT의 적용이 경화를 방해한다는 가정을 하고 그 원인을 명확히 분석하기 위해 수행한 실험으로, 경화의 어려움이 AOT 적용에 따른 흡습성에 기인한 것인지를 살펴보고, 경화 속도를 비교하여 추진제 설계 제작에 적합한 당량비를 도출하는 것을 목적으로 하였다. 경화 속도 비교는 FT-IR로 경화제를 투입한 각 샘플의 NCO peak를 24시간 주기로 측정하여 NCO의 감소 경향을 비교하였으며 이에 대한 결과는 Fig. 2과 Fig. 3에 제시하였다. 각 샘플의 NCO peak 높이가 시간이 지남에 따라 HTPB의 OH기와와 부가 중합으로 인하여 점차 감소하는 경향을 Fig. 2를 통하여 확인할 수 있다. 각 샘플의 NCO peak 높이를 측정한 후 그 변화량을 정량화한 그래프를 Fig. 3에 제시하였다. 샘플을 제조한 후 2일 째 되는 날의 peak 감소량이 가장 크고 그 이후의 감소량은 미미하였다. 이후 4일 동안의 결과를

통하여 각 샘플의 경화 속도를 최소자승법을 이용하여 산출하였다. 이 결과를 바탕으로 각 데이터의 기울기를 비교하였으며 그 결과를 Table 2에 제시하였다.

AOT로 인하여 경화 반응에 영향을 미치는 경우는 크게 두 가지로 추측해 볼 수 있다. 첫째, AOT로 인하여 흡습성이 증가하여 추가적으로 발생한 우레아 반응이 원인인 경우, 둘째, AOT의 구조적 또는 화학적 특성으로 인하여 우레탄 반응 자체가 방해되는 것이다. 전자의 경우, NCO peak 높이가 급격히 줄어들어 상대적으로 큰 기울기를 나타낼 것이고, 후자의 경우에는 반대로 반응 빈도가 줄어들어 상대적으로 작은 기울기를 나타낼 것이라 예측할 수 있다. 하지만 비교 결과, AOT의 함량으로 인한 기울기의 차이는 거의 없었으며, 이를 통해 AOT 자체가 우레탄 반응에 직접 관여하여 경화를 방해한다고 보기는 어려운 것으로 판단된다.

특히 AOT 원료 자체의 수분 규격은 2 wt.% 이하, 실측값은 약 1.22 wt.%였으나 충분히 감압 혼합한 프리믹스의 수분 함량은 약 0.05 wt.%로 수분에 의한 우레아와 같은 부반응이 원인인 것은 아닌 것으로 판단된다. 또한 육안검사 결과 AOT 함유량이 많은 샘플일수록 점도가 높고 더 단단함을 확인하였다. 이 역시 AOT 함유가 우레탄 반응을 억제한다고 보기는 어려운 것으로 판단된다. 따라서 AOT가 바인더에 직접적인 영향을 미쳐 경화에 어려움이 있기 보다는, 다른 원료들과의 상호 작용이 원인인 것으로 예측되며 향후 추가적인 연구가 필요하다.

4.2 추진제 조성 설계

추진제 조성 실험은 HTPB/AP계의 추진제에 AOT를 적용 시 적합한 바인더의 함량과 산화제의 함량을 도출하기 위해 수행하였다. 추진제 경화 후 샘플의 양상을 Fig. 4에 나타내었다. 바인더 함량에 비하여 산화제가 함량이 큰 P1-1, P1-2, P2-1 샘플들은 성상이 고르게 섞이지 못하는 것으로 확인되고, 바인더가 많은 샘플일수록 고무의 성질이 많이 있음을 육안으로도 확인하였다.

경도 측정 결과를 Table 3에 제시하였으며, 육안 검사 결과와 동일한 경향성을 보였다. 경화 완료된 추진제의 경도 분석 역시, 대체적으로 산화제가 가

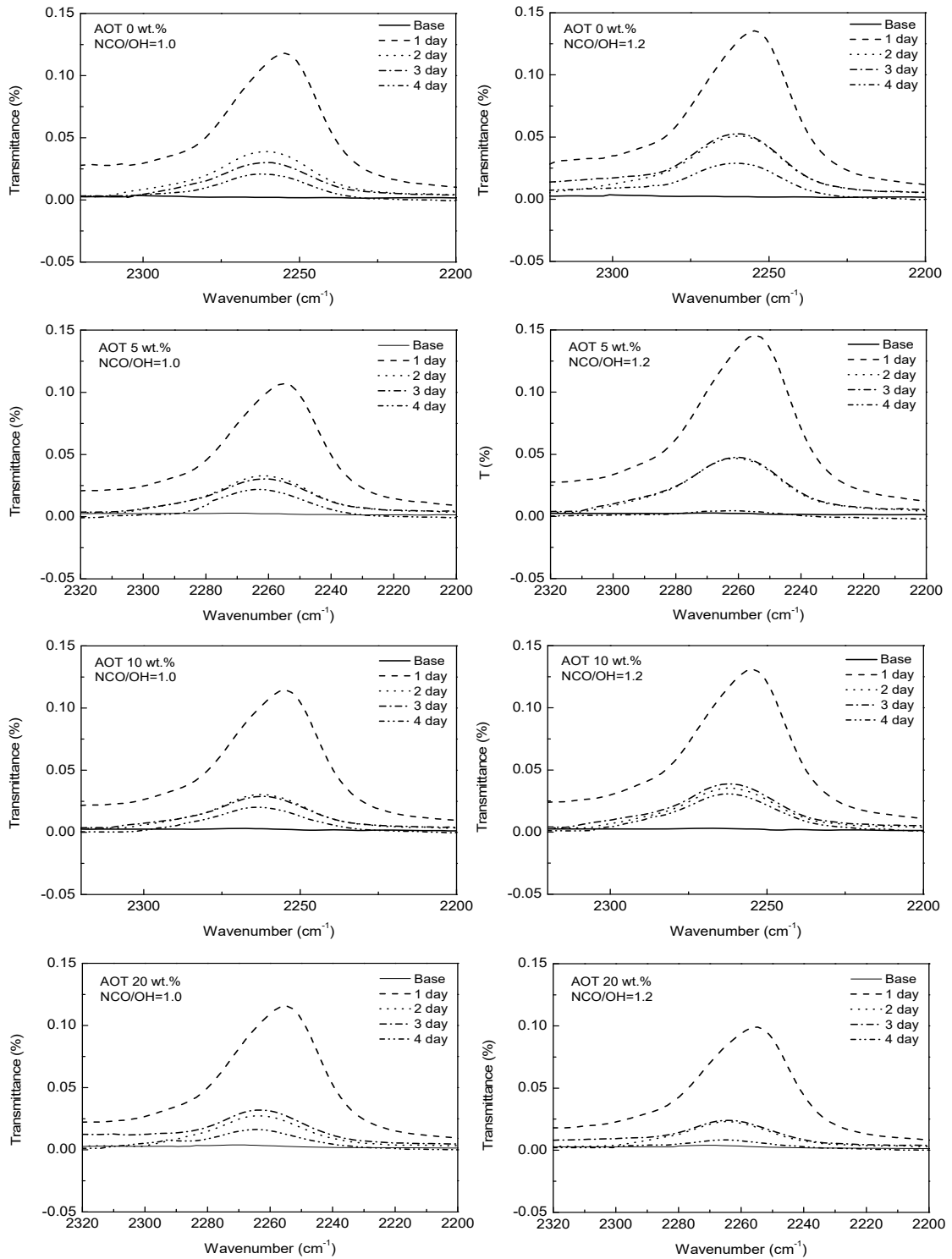


Fig. 2 The FT-IR graph of NCO peak according to the time.

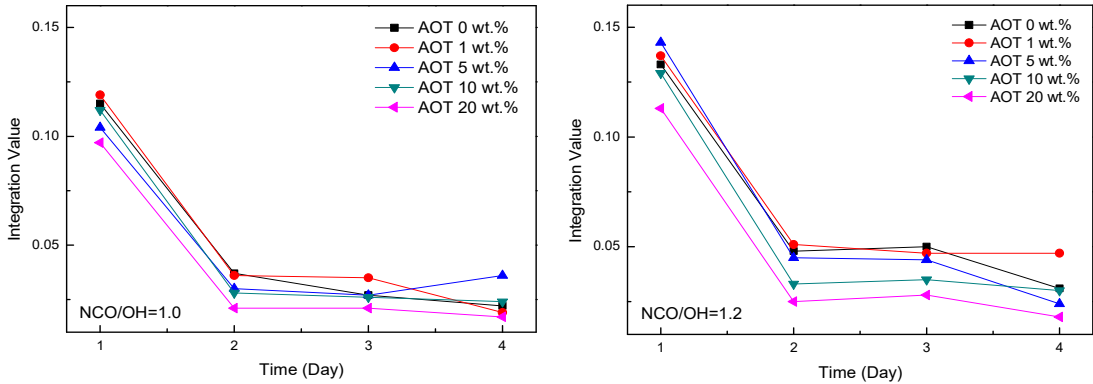


Fig. 3 Comparison of variations in integral value.

Table 2. Cure velocities of binders with AOT.

AOT (wt.%)	Slope	
	Equivalent Ratio (NCO/OH)	
	1.0	1.2
0	-0.029	-0.030
1	-0.030	-0.027
5	-0.021	-0.036
10	-0.027	-0.030
20	-0.024	-0.028

Table 3. Hardness of propellant samples.

No.	Hardness (Hs)
P1-1	-
P1-2	-
P1-3	9
P2-1	-
P2-2	21
P2-3	12
P3-1	11
P3-2	12
P3-3	22

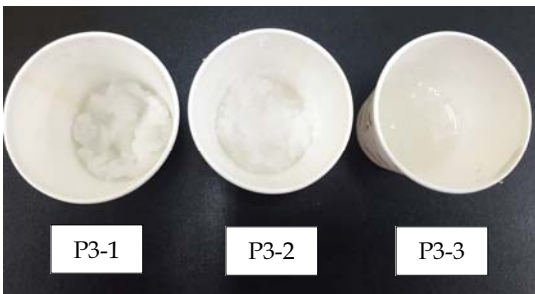


Fig. 4 Propellant with AOT of 20%.

Table 4. Components of propellant.

Materials	Ratio (wt.%)
Binder	10
AP	77
DOA	3
AOT	10

장 많이 들어간 샘플은 성상이 퍼석거리 정도 측정에서 어려움이 있었고 바인더가 많이 들어간 샘플은 추진제로 보이기보다는 고무 형상에 더 가까웠다. 경도 측정 결과상으로는 P2-2 샘플과 P3-3 샘플이 가장 좋은 결과를 나타내었으나 위와 같은 이유로 P2-2의 조성을 적용하여 연소 특성을 확인하기 위한 추진제를 제조하였으며, 그 조성은 Table 4에 제

시하였다. 또한 연소 특성 확인을 위한 실제 추진제 제작 시 추진제 당량비는 NCO/OH=1.3으로 조정하였다. 앞서 언급한 바인더 실험에서도 경화 특성을 고려하여 당량비를 각각 1.0과 1.2로 일반 HTPB/AP 추진제 보다 높게 조정하였다. 실험 결과 AOT가 우레탄 반응에 영향을 미치는 것으로 판단하기는 어려웠으나 추진제 조성 실험의 경도 분석 결과

를 통해 확인할 수 있듯이 바인더의 함량이 적어 추진제의 형태를 형성하지 못한 P1-1, P1-2, P2-1를 제외 하더라도, 대체로 경도 값이 일반적인 추진제에 비하여 낮은 편이다. 따라서 추진제 형상이 만들어질 수 있도록 바인더의 경화 밀도를 높여 매트릭스를 더욱 견고히 하고자 당량비를 1.3으로 조정하여 제작하였다.

4.3 추진제 제조 특성

앞서 언급한 바와 같이 AOT는 계면활성제로써 분자 구조의 한 부분은 Hydrophilic, 나머지 한 부분은 Hydrophobic한 성질을 갖는다. 또한 일정 농도와 표면장력의 조건이 갖추어지면 Foam을 형성하게 되는데 이에 대한 상관관계는 참고 문헌[6]에 제시되어 있다. AOT의 이러한 성질 때문에 추진제 제조 공정 중 Foam이 형성 되어있는 것을 상압 혼화 후에 확인할 수 있다.

이밖에 촉감도 계면활성제가 투입되지 않은 추진제에 비하여 다른 샘플들이 상대적으로 부드러움을 확인할 수 있었다. 이는 추진제 슬러리 내의 수분 때문이 아닌 Hydrophilic한 AP나 기타 첨가제의 영향으로 인하여 그 주변에서 Foam을 형성하게 되는 것으로 보인다. 하지만 이후에 감압 혼화를 진행한 후에 추진제를 확인해보면 진공으로 인하여 표면장력이 깨져 Foam들이 제거됨을 확인할 수 있었다.

4.4 추진제 점도 분석

AOT 10 wt.%를 투입하여 제조한 추진제의 점도 상승을 Fig. 5에 나타내었다. 대체적으로 점도가 낮은 편이며 육안으로 확인했을 때 흐름성 역시 매우 우수하였다. 이는 AOT의 계면활성제 역할 때문이 아닌, 일반 HTPB/AP 추진제에 비하여 AP의 함량이 줄어들어서 점도가 낮아진 것으로 보인다. AP의 함량을 10 wt.%나 줄여 일반 HTPB/AP 추진제와 유사한 점도를 나타낸다면 AOT가 추진제의 점도에 긍정적인 효과를 나타내는 것으로 보이지는 않는다. 마찬가지로 Table 5을 통하여 AOT의 점도 영향을 확인할 수 있다. Table 5에 따르면 AOT를 다른 프리 폴리머나 가소제 등에 용해시키면 점도는 상승하게 된다. 따라서 AP의 함량을 조정하지 않고 AOT를 첨가한 추진제는 EOM (End of Mixing) 점도부터

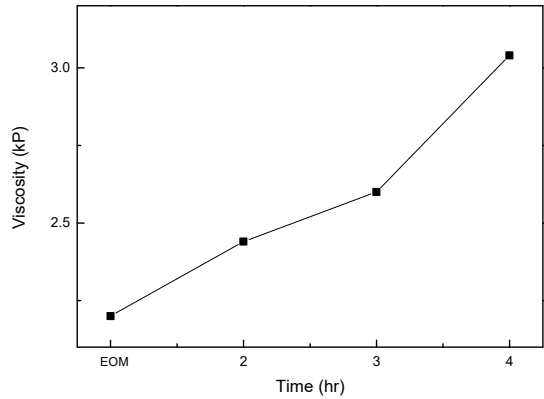


Fig. 5 Viscosity build-up of propellant.

Table 5. Viscosity comparison of AOT solution with DOA.

	AOT in DOA	DOA
Viscosity at 20°C (Poise)	180	80

Table 6. Hardness and density of cured propellant.

	Value
Hardness (Hs)	23
Density (g/cc)	1.60

높았을 것으로 추정된다.

4.5 추진제 경도 및 밀도 분석

본 연구에서 제조한 추진제의 경도와 밀도는 Table 6과 같다. 추진제의 당량비를 1.3으로 높였음에도 불구하고 경도는 23으로 50이상의 값을 나타내는 일반적인 HTPB 추진제의 경도에 비하면 현저히 낮은 값을 나타낸다. 또한 밀도 값 역시 이론 밀도값 (1.59 g/cc)과는 유사한 값을 갖지만, 1.7 g/cc 이상의 값을 갖는 일반적인 HTPB 추진제보다는 낮은 값을 갖는다. 이는 AOT의 밀도가 1.1 g/cc로, 밀도 1.95 g/cc의 AP에 비하면 많이 낮은 편이기 때문이다. 그러나 실측된 밀도값은 이론 밀도 값과 유사하였으며, 이는 제조공정 중에 나타났던 기포들이 완전히 제거되었으며 완성된 추진제에 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다.

4.6 추진제 연소 특성

AOT를 함유한 추진제와 AOT가 함유되어 있지 않은 추진제의 연소속도를 측정된 값을 Fig. 6에 나타내었다. AOT를 함유하지 않은 추진제는 일반적인 HTPB/AP계 추진제의 연소 특성과 마찬가지로 압력이 증가함에 따라 연소속도가 증가하는 경향을 나타낸다. 반면에 AOT를 10 wt.% 함유하고 있는 추진제는 상대적으로 AP의 함량이 적어 초기의 연소속도 및 압력지수도 낮고 연소 압력이 약 1200 psig 정도 되는 지점을 기점으로 하여 압력지수가 마이너스로 전환하는 것을 확인할 수 있다.

이는 AP의 열분해와 관련이 있다고 보인다. 일정 압력 이상으로 압력이 상승하게 되면 AOT로 인하여 AP의 열분해가 방해받을 것이라고 이해할 수 있다. 일반적인 AP의 분해과정은 식(1)과 같으며 245°C에서 1차분해(Dissociative sublimation)가, 330~450°C에서 2차분해(Decomposition reaction)가 일어나고 이 과정을 통해서 연소에 필요한 산소가 발생된다. 그리고 특히 압력이 증가하면 1차 분해는 지연되고 2차 분해는 빨라진다고 알려져 있다[7].



따라서 AOT로 인하여 AP의 분해가 방해받을 것으로 추측할 수 있다. 추진제 혼화 시 AOT의 Hydrophilic한 Head 부분이 AP를 에워싸는 Reverse

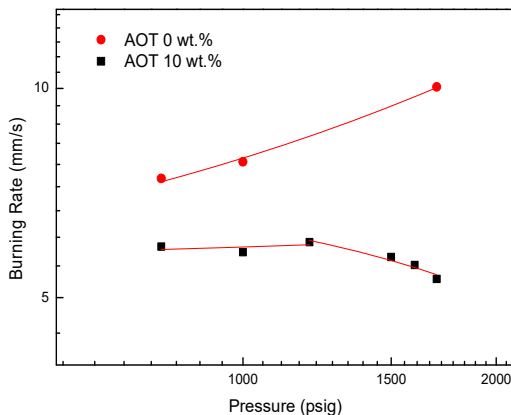


Fig. 6 The Comparison of Combustion Characteristics with HTPB Propellant and AOT/HTPB Propellant.

Micelle 구조를 형성하며 이러한 구조가 원인일 것으로 추측된다. AOT의 특성으로는, 녹는점은 약 155°C 정도이며 AOT의 분해 온도나 연소 특성에 대한 보고된 자료가 없고 자연발화 등은 불가능하다고 알려져 있다. 이러한 AOT가 HTPB/IPDI로 이루어진 폴리우레탄 폴리머와 섞여 AP를 둘러싸고 있고, AOT를 분해하기 위하여 많은 에너지 소모가 필요하며 이는 AP의 분해를 방해하기에 조건으로 보여진다.

5. 결 론

본 연구에서는 HTPB/AP계의 추진제에 AOT 계면활성제를 적용하여 추진제를 제작하고 이에 대한 물리적 특성과 연소 특성을 관찰하였다.

AOT를 적용한 추진제의 경화 특성을 살펴보기 위해 바인더 실험을 수행한 결과 AOT 자체가 우레탄 반응을 저해하는 것은 아닌 것으로 분석되었으며 나머지 다른 원료들과의 상호작용이 물리적 특성에 영향을 미친 것으로 추측되며 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 추진제 제작에 있어서는 추진제 조성 실험을 통해 AOT를 적용한 경우, 추진제를 형성하는데 필요한 경도 수준을 유지하기 위해 당량비 1.3 이상이 적당한 것으로 확인되었다.

연소 특성에 있어서는 일정 압력 이상 조건에서는 연소속도가 감소하는 기존의 연구결과와 유사한 결과를 도출함으로써 AOT를 적용하여 소화성 추진제의 개발 가능성을 확인하였으나, 완전한 소화 특성을 확인하지는 못했다. AOT를 적용한 완전한 소화성 추진제 개발을 위해서는 향후 실험 방법의 보완을 포함하여 AOT 자체의 열분해 특성 분석 등 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

1. Oberth, A.E., *Principles of Solid Propellant Development*, CPIA Publication, Baltimore, M.D., U.S.A., Ch. 1, pp. 1-19, 1987.

2. Hwang, Y.S., "Experimental Study on the Extinction Characteristics of the Solid Propellant," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 8, No. 3, pp. 61-67, 2004.
3. Min, B., Kim, C., Yoo, J., "A Study on the High Performance Solid Propellant for Variable Thrust Solid Rocket Motor," *KSPE Fall Conference*, Jeju, Korea, pp. 317-320, Nov. 2010.
4. Petersen, E.L., Seal, S., Stephens, M., Reid, D.L., Carro, R., Sammet, T., and Lepage, A., "Self-Extinguishable Solid Propellant," US 8114229 B1, 2012.
5. Petersen, E.L., Seal, S., Stephens, M., Reid, D.L., Carro, R., Sammet, T., and Lepage, A., "Solid Propellant Rocket Motor Having Self-Extinguishing Propellant Grain and Systems Therefrom," US 8336287 B1, 2012.
6. Pugh, R.J., *Bubble and Foam Chemistry*, Cambridge University Press, Cambridge, England, U.K., Ch. 2, pp. 54-65, 2016.
7. Baek, G., Yim, Y.J., "Coolant Effect on Gas Generator Propellant," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 9, No. 2, pp. 1-8, 2005.