

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.5.020>

블렌딩 기법을 적용한 과산화수소 추진제의 저장성 및 재료 적합성 평가

이정섭* · 장동욱* · 권세진**†

Storability and Material Compatibility Test of Blended Hydrogen Peroxide Propellant

Jeongsub Lee* · Dongwuk Jang* · Sejin Kwon**†

ABSTRACT

Blending method was applied to increase the performance of hydrogen peroxide which is called green propellant. 90 wt.% hydrogen peroxide was blended with ethanol which is less toxic fuel, and there was no storability decrease due to fuel addition. Inconel X750 and Tophet A showed good compatibility and high heat resistance, and SUS 316L was compatible. Al_2O_3 , Y_2O_3 , and ZrO_2 , were coated on the material to improve heat resistance, and it was proved from endurance test that Y_2O_3 coating is not suitable and adhesive strength between coating and material is related with allowable temperature of material. Thruster test was performed to confirm the performance increase by blending method, and chamber temperature was $870^\circ C$ which is higher than $760^\circ C$ that is adiabatic chamber temperature of 90 wt.% hydrogen peroxide.

초 록

친환경 추진제인 과산화수소의 성능 향상을 위해 블렌딩 기법을 적용하였다. 90 wt.% 과산화수소에 독성이 낮은 에탄올을 블렌딩 하였으며, 저장성 평가 결과 연료에 의한 저장성 저하는 나타나지 않았다. 재료 적합성 및 내열 평가 결과 Inconel X750과 Topheat A가 높은 적합성과 내열 특성을 보였으며, SUS 316L 역시 적합성이 우수하였다. 내열 특성 향상을 위해 Al_2O_3 , Y_2O_3 , ZrO_2 를 코팅 후 내구성 평가를 수행한 결과, Y_2O_3 코팅은 사용이 부적합하였으며, 재료의 사용 가능 온도가 코팅의 접착성과 관련이 있음을 확인하였다. 블렌딩 기법을 통한 성능 향상을 확인하기 위해 추력기 실험을 진행하였으며, 실험 결과 반응기 온도가 $870^\circ C$ 로, 90 wt.% 과산화수소의 단일 분해 온도인 $760^\circ C$ 보다 높음을 확인하였다.

Key Words: Blending Method(블렌딩 기법), Hydrogen Peroxide(과산화수소), Storability(저장성), Material Compatibility(재료 적합성), Heat-resistance Coating(내열 코팅)

접수일 2011. 11. 29, 수정완료일 2012. 9. 10, 게재확정일 2012. 9. 14

* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

** 종신회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: trumpet@kaist.ac.kr

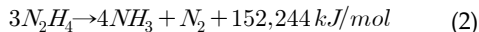
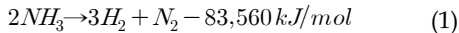
[이 논문은 한국추진공학회 2011년도 추계학술대회(2011. 11. 24-25, 부산 노보텔 엠베서더) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

추력기는 인공위성에 기동성을 부여할 수 있기 때문에 소형 인공위성의 편대 비행에 필수적

인 요소기술 중 하나이다. 소형 인공위성은 기존의 대형 위성에 비해 단가가 저렴하며 다양한 연구를 진행할 수 있는 장점이 있어 다수의 연구 그룹에서 개발을 진행 중이다. NASA는 Space Technology 5 프로젝트를 통해 2006년 3월 25 kg급 소형 위성 3대를 편대로 운용하였으며, 냉가스 추력기를 통해 자세제어 및 궤도 변경을 수행하였다[1]. 영국에서는 Dera space, Surry Satellite Technology Ltd., Rutherford Appleton Laboratory, LinfoTerra Ltd.가 참여한 연구 그룹이 지구 저궤도에서 통신 및 지상 촬영 임무를 수행한 125 kg급 Topsat을 개발하였다[2].

현재 위성의 자세제어를 위해서 가장 널리 사용되는 추력기는 하이드라진을 추진제로 사용하고 있다. 하이드라진이 분해되면 아래 Eq. 1, 2와 같은 발열 반응과 흡열 반응이 일어나게 되며, 이 중 흡열 반응인 암모니아 해리 반응을 제어함에 따라 추력기의 성능을 조절할 수 있다.



하이드라진은 높은 비추력을 낼 수 있으면서도 상대적으로 반응기 온도가 낮다. 암모니아 해리도가 50%일 경우 진공비추력은 약 246 초이며 이 때의 단열 분해 온도는 약 1344 K이다[3]. 98 wt.% 과산화수소의 진공비추력이 약 187 초이며 단열 분해 온도가 약 1225 K인 것과 비교하면 상대적으로 낮은 온도에서 높은 비추력을 갖고 있는 것이다. 반응기 온도가 낮을수록 별도의 냉각장치를 필요로 하지 않기 때문에 구조적인 측면에서 유리한 장점이 있다.

하지만 하이드라진은 독성이 매우 강하여 흡입 제한 농도가 0.2 ppb 수준이다[4]. 또한 대기 중의 이산화탄소와 반응하는 문제점을 갖고 있기 때문에 취급과 보관을 위해서 특수한 설비가 필요하다[5]. 또한 일부 금속과의 적합성이 좋지 못하기 때문에 재료의 선택에 있어서도 제약을 받는다. 이러한 단점들로 인해 하이드라진을 대체할 수 있는 차세대 친환경 추진제에 대한 연

구가 활발히 진행되고 있다.

여러 친환경 추진제 중 과산화수소는 1900년대 초반 널리 사용되어 온 추진제 중 하나이다. 과산화수소는 비록 하이드라진에 비해 비추력이 낮지만 밀도가 높아 전체 시스템 관점에서 보면 동일 탱크 부피에 더 많은 양의 추진제를 함유할 수 있고, 밀도비추력을 계산하면 하이드라진과 큰 차이를 보이지 않는다. 또한 다른 추진제에 비하면 독성이 거의 없다고 할 수 있으며 보관 및 취급이 용이하다. 또한 상온에서 촉매를 통해 쉽게 분해가 되기 때문에 추진제 분해를 위한 촉매의 예열이 필요 없다. 다른 친환경 추진제인 이온성 액체의 경우 분해를 위해서 촉매의 예열이 필요한 것으로 알려져 있다[6].

과산화수소는 추진제로서 여러 장점을 지니고 있지만 결정적으로 그 성능이 낮기 때문에 성능이 최우선시 되는 우주 산업에서 배제되어 왔다. 그러나 미량의 연료를 첨가하는 블렌딩 기법(blending method)을 통해서 과산화수소의 비추력을 증가시킬 수 있으며, 이러한 블렌딩 기법은 이온성 액체 추진제에 이미 널리 적용된 방식으로, 스웨덴의 SSC에서 제작한 HPGP 추력기가 Prisma 위성에 탑재되 비행 시험을 수행하였다[7]. 따라서 과산화수소에도 연료를 혼합하는 블렌딩 기법을 적용해 그 성능을 증가시킬 수 있을 것으로 기대하였다.

과산화수소에 연료를 블렌딩하였을 경우 추진제로 사용하기 이전에 추진제로서 적합한지 파악하여야 한다. 따라서 블렌딩한 과산화수소 추진제의 저장성 평가와 재료 적합성 평가를 통해 추진제로서 사용하기에 적합한지를 판단하였다. 또한 높은 반응기 온도를 견뎌야 하기 때문에 재료의 내열성 평가를 실시하였으며, 내열 특성 증가를 위해 내열 코팅을 적용한 후 내구성 평가를 실시하였다. 그 후 블렌딩 기법을 통한 성능 향상 가능성을 실험적으로 파악하기 위해 추력기 실험을 수행하였다.

2. 블렌디드 과산화수소의 선정

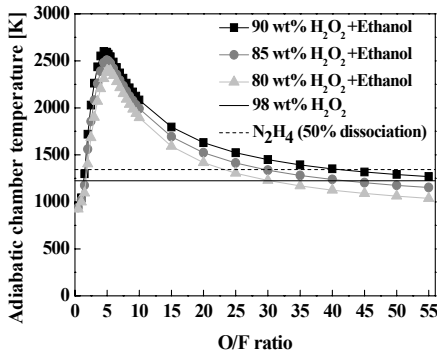


Fig. 1 Adiabatic chamber temperature of blended H_2O_2 propellant according to O/F ratio

과산화수소에 블렌딩할 연료로는 안정적이며 독성이 적은 에탄올을 선정하였다. 또한 과산화수소와 잘 섞이기 때문에 블렌딩하기에 적합하다고 판단하였다. 메탄올의 경우 상대적으로 독성이 강하고 알루미늄과 같은 특정 금속을 부식시키는 단점이 있다. 또한 증기압이 13.02 kPa로, 에탄올보다 2.2배 높아 휘발성이 강하기 때문에 저장성이 떨어지며 이에 대한 결과는 3절에서 자세히 다루도록 하겠다. 과산화수소와 에탄올을 연료혼합비(O/F ratio)를 달리하며 단일 분해 온도와 진공 비추력을 계산하여 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었으며, 이론 당량비에서 온도와 비추력이 최대이다. 이 때 당량비는 물과 과산화수소의 질량과 에탄올 질량의 비이다. 각각 그래프는 비교를 위해 98 wt.% 과산화수소와 하이드라진의 값을 함께 표시하였다.

연료 과잉 상태에서 O/F ratio가 1.5인 경우 하이드라진과 비슷한 성능을 지니면서 단일 분해 온도 역시 크게 다르지 않았다. 하지만 연료 과잉 상태는 촉매 분해 반응보다 연소 반응이 더 우세하기 때문에 단일 추진제보다는 이원 추진제의 특성을 갖게 된다. 또한 잔존 연료에 의한 촉매 피독 현상과 재사용시 불안정성 증가로 인해 연료 과잉 조건은 추력기로 사용하기에는 부적합하다. 이 경우 블렌디드(blended) 추진제라고 명명하기 보다는 예혼합(premixed) 추진제라고 명명하는 것이 더 적합하다. 따라서 산화제 과잉 상태의 혼합비를 갖는 경우에만 블렌디드

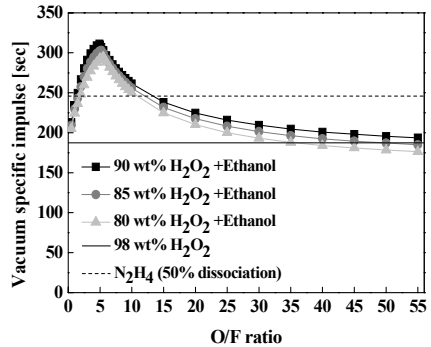


Fig. 2 Vacuum specific impulse of blended H_2O_2 propellant according to O/F ratio

Table 1. Comparison of 98 wt.% H_2O_2 and 90 wt.% H_2O_2 blended with ethanol (o/f ratio is 50)

Property	90 wt.% H_2O_2 /Ethanol	98 wt.% H_2O_2
Vac. Isp, m/s	195	187
Ad. chamber temp., k	1448	1225
density, kg/m^3	1386	1438
Viscosity, cp	1.154	1.158
Molecular weight	31.44	33.48
Freezing point, $^{\circ}C$	-12.2	-2.5

추진제라고 부를 수 있다. 산화제 과잉 상태에서 하이드라진과 비슷한 성능을 갖는 경우 단일 분해 온도가 2000 K 근처로 매우 높다. 따라서 추진제의 성능을 높이기 위해서는 추력기와 촉매의 내열 특성 증가가 매우 중요시 된다.

연료 혼합비의 선정 기준은 98 wt.% 과산화수소보다 높은 성능을 지니면서 연료의 양을 최소로 제한하였다. 과산화수소에 연료를 블렌딩하게 되면 연료와 산화제가 함께 공존하기 때문에 처음부터 많은 양의 연료를 블렌딩하여 실험하는 것은 위험할 수 있다. 따라서 초기 연구에서는 연료의 양을 최소로 하면서도 단일 추진제의 최대 성능을 뛰어넘을 수 있는 연료 혼합비를 선

정해 블렌디드 과산화수소 추진제에 대한 기술을 확보해야 한다. 따라서 연료 혼합비를 50으로 선정하였으며, 사용하는 과산화수소의 농도는 90 wt.%로 정하였다. Table 1은 90 wt.% 과산화수소에 연료 혼합비 50으로 에탄올을 블렌딩한 추진제와 98 wt.% 과산화수소의 성능을 비교한 것이다[8, 9]. 미량의 에탄올 첨가로 인해 98 wt.% 과산화수소보다 훨씬 높은 성능을 발휘할 수 있는 점은 과산화수소 농축에 소요되는 경비와 시간을 절감할 수 있어 매우 경제적인 방법이라고 할 수 있다.

3. 블렌디드 과산화수소의 저장성 평가

블렌디드 과산화수소가 추진제로 사용되기 위해서는 저장성 평가가 반드시 수행되어야 한다. 추진제의 주 사용처인 인공위성의 경우 짧게는 수개월에서 길게는 수년간 임무를 수행하기 때문에 추진제의 높은 저장성이 요구되고 있다. 블렌디드 과산화수소의 저장성 평가는 에탄올 혼합으로 인한 저장성 저하에 초점을 두고 진행하였으며, 과산화수소 추진제의 저장성 평가 방법과 기준을 적용하였다[8]. 저장성 평가를 위해 추진제를 보관하는 용기는 각각의 재료에 맞게 전처리를 해주어야 한다. 유리 용기를 사용할 경우 다음과 같은 전처리 과정을 거쳐 세척 및 패시베이션(passivation)을 수행한다.

- 1) 10% NaOH 수용액에 상온에서 1 시간 노출 후 세척
- 2) 10% HNO₃ 수용액에 상온에서 최소 3시간 노출 후 DI water로 세척
- 3) 70% 이상의 H₂O₂로 컨디셔닝

Table 2. Storability test results in summer

보관기간	AOL, %		
	O/F=50	O/F=30	O/F=10
42 days	-0.670	-0.037	0.111

4) DI water로 세척 후 건조

용기의 준비가 끝난 뒤 연료 혼합비 10, 30, 50인 세 종류의 추진제 30 g을 용기에 담은 뒤 상온에서 장기간 보관하며 저장성 평가를 수행하였다. 저장성 평가 지표로는 활성 산소 저하(Active Oxygen Loss)를 사용하였으며, Eq. 3을 통해 계산할 수 있다.

$$AOL = \frac{w_{initial} - w_{final}}{c \cdot w_{initial} \times 0.470} \times 100 (\%) \quad (3)$$

Equation 3에서 c는 처음 상태의 과산화수소 무게 비율이며 w는 추진제의 무게를 나타낸다. 분해되는 추진제의 양이 적을수록 무게 변화가 작기 때문에 분자 값이 작아 AOL 값이 작다. 또한 블렌딩 연료의 기화로 인한 질량 감소 역시 AOL 값을 증가시키기 때문에, AOL 값이 작을수록 저장성이 좋다고 할 수 있다. 따라서 O/F ratio에 따른 블렌디드 과산화수소의 저장성 비교에 AOL 값을 사용할 수 있다. Table 2는 저장성 평가 결과를 정리하여 보여주고 있다.

저장성 평가 결과 대기 중의 습도로 인해 AOL이 음의 값을 지니고 있다. 보관 중 습도에 의한 영향을 최소화하기 위해 최소한의 봉인을 하였으나 여름철 높은 습도로 인한 미량의 질량 증가가 발생하였다. 하지만 이는 90 wt.% 과산화수소만을 보관하였을 때도 동일하게 나타나는 현상이었다. 습도에 의한 영향을 최소화하기 위해서 겨울동안 저장성 평가를 다시 수행하였으며, 에탄올뿐만 아니라 메탄올에 대한 결과를

Table 3. Storability test results in winter during 42 days

O/F ratio	AOL, %		
	Ethanol	Methanol	none
50	0.431	0.459	0.387
30	0.283	0.383	0.387
10	0.462	2.932	0.387

Table 3에 요약하였다. 저장성 평가 결과, 메탄올이 에탄올에 비해 다소 높은 AOL 값을 갖는다. 순수한 90 wt.% 과산화수소와 AOL을 비교할 시 큰 차이를 보이고 있지 않기 때문에 에탄올 혹은 메탄올 혼합으로 인한 과산화수소의 저장성 저하 내지는 블렌딩 연료의 휘발성에 따른 저장성 저하가 심각하지 않다고 할 수 있다.

4. 블렌디드 과산화수소와의 재료 적합성 평가

추진제를 보관하는 탱크 및 각종 밸브와 추력기에 사용되는 재료는 추진제와의 적합성이 높은 금속을 사용해야 한다. 적합성이 낮은 금속을 사용하게 될 경우 부식과 같은 손상이 발생할 수 있으며, 추진제의 분해를 촉진시켜 안정성과 저장성이 떨어지게 된다. 따라서 몇 가지 금속에 대한 재료 적합성 평가를 실시하였다. 재료 적합성 평가를 시행하는 금속은 내열 특성이 높은 금속들 중에서 선정하였으며, 실험 시스템의 주 재료인 SUS 316L과 EM 추력기 재료로 널리 사

용되는 SUS 304 역시 포함되어 있다. 다음 Table 4는 선정된 재료의 특성을 보여주고 있다.

모든 금속은 재료 적합성 평가를 시행하기 이전에 다음과 같은 전처리 과정을 거쳐 세척 및 페시베이션을 진행한다.

- 1) Trichloroethylene으로 비벼서 불순물 제거 후 흐르는 물에 세척
- 2) 상온에서 70 wt.% HNO₃ 수용액에 4~5 시간 노출
- 3) 정제수로 세척 후 DI water로 세척

전처리 과정이 끝난 금속의 재료 적합성 평가는 연료 혼합비 50인 블렌디드 과산화수소 75 ml에 1/2" 직경의 시편을 담가 놓은 뒤 7일간 AOL 측정을 통해 수행하였다. Table 5는 재료 적합성 평가 결과를 보여주고 있다.

금속은 AOL 값과 특이사항을 고려해 Class 1에서 Class 4로 분류된다. FM 추력기에 사용되는 금속은 AOL 값이 0.2% 이하인 Class 1에 속해야 한다. EM 추력기와 실험 시스템은 AOL 값이 6% 이상이며 표면의 큰 변화가 없는 Class 2를 만족해야 한다. 이외의 Class 3과 4는 시스

Table 4. Properties of selected materials

금속 종류	용융 점 K	사용 가능 온도 K	밀도 kg/m ³	열전도도 W/mK
Inconel 625	1563	1366	8440	9.8
Inconel X750	1663	1363	8280	14.8
Inconel 800	1623	1143	7940	12.2
Hastelloy C276	1543	1363	8940	11.3
Tophet A	1673	1423	-	13.4
SUS 304	1673	1033	8000	21.4
SUS 316L	1644	1033	7990	21.4

Table 5. Material compatibility test results after 7 days

금속 종류	AOL, %	Class	특이사항
Inconel 625	0.732	3	추진제 색 변화
Inconel X750	2.170	2	-
Inconel 800	0.073	1	-
Hastelloy C276	3.240	4	표면 부식
Tophet A	-0.099	1	-
SUS 304	1.258	2	-
SUS 316L	0.242	2	-



Fig. 3 Discoloration of propellant after material compatibility test (Left : Inconel 625, Right : Hastelloy C276)

템뿐만 아니라 추력기 재료로도 적합하지 않다. 실험 결과 Inconel 800, Tophet A의 경우 Class 1을 만족하고 있어 적합성이 매우 우수하였고, SUS 304와 SUS 316L은 EM 추력기와 시스템에 사용하기에 큰 무리가 없다. Inconel 625의 경우 실험 종료 후 Fig. 3과 같이 추진제의 색이 옅은 분홍색으로 변하였는데, 이는 금속의 부식으로 인한 영향으로 보여 사용하기에 부적합하다고 판단하였다. Hastelloy C276의 경우 Fig. 4에서 알 수 있듯이 심각한 표면 부식이 발생하였기 때문에 사용이 부적절하였으며, 용액 역시 Fig. 3에 나타나 있듯이 색이 변하였다.

5. 재료의 내열 특성 평가 및 내열 코팅 적용

금속의 재료 적합성 평가를 시행한 후 내열 특성 평가를 실시하였다. 과산화수소에 혼합된 에탄올이 연소하면서 반응기 온도가 증가하므로 금속의 내열 특성 역시 금속 선택에 있어 중요한 요소 중 하나이다. 내열 특성 평가는 재료의 사용 가능 온도를 고려해 노(furnace)를 사용하여 1173 K, 1373 K의 공기에 5 분간 노출 후 재료의 질량 변화 및 표면 상태를 관찰하였으며, 이때 공기는 흐르지 않는 상태이다. 이 후 1773 K의 공기에 순간적으로 5 초간 노출 후 질량 변화 및 표면 상태를 관찰하였다. Table 6은 각각의 질량 변화 결과를 정리하여 보여주고 있다.

실험 결과 1173 K와 1373 K에서는 내열 특성이 좋은 금속에서는 질량 변화가 측정오차범위인 ±0.002 g 이내이지만 SUS 304와 SUS 316L의 경우 미세한 질량 감소가 발생하였다. 이는 사용

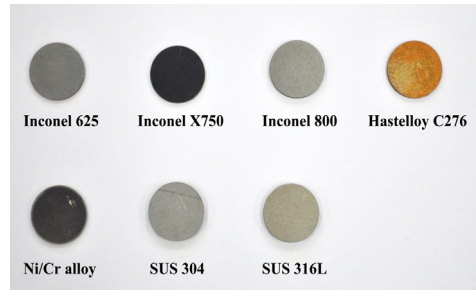


Fig. 4 Picture of materials after compatibility test

Table 6. Mass variation after high temperature exposure test

Material	Mass variation, g		
	1173 K	1373 K	1773 K
Inconel 625	0.000	0.002	0.009
Inconel X750	0.001	0.002	0.006
Inconel 800	0.001	0.001	0.003
Hastelloy C276	0.000	0.001	-0.026
Tophet A	0.001	0.001	0.003
SUS 304	-0.008	-0.021	-
SUS 316L	-0.010	-0.015	-

가능 온도 이상에서 장시간 노출되어 표면의 산화 및 박리현상으로 인해 감소한 것이다. Fig. 5는 1373 K 노출 후 각각 SUS 304와 SUS 316L의 표면을 보여주고 있으며, 눈으로 확인할 수 있는 표면 손상이 발생하였다. 따라서 SUS 304와 SUS 316L은 EM 추력기 재료로 사용은 가능하지만 작동 시간에 제약이 따르게 된다. 1373 K에서 손상이 심한 두 재료를 제외하고 실시한 1773 K 실험에서는 Hastelloy C276 금속이 박리현상으로 인해 질량이 감소하였다. 또한 표면 확인 결과 Fig. 6과 같이 Inconel 625의 표면에 미세한 상처가 발생하였다. 따라서 Hastelloy C276과 Inconel 625는 연료 혼합비가 50인 추진제를 사용할 경우에는 문제가 없지만 더 낮은 연료 혼합비, 즉 에탄올 첨가량이 증가해 반응기 온도가 상승하게 될 경우 사용하는 데 무리가 있다.

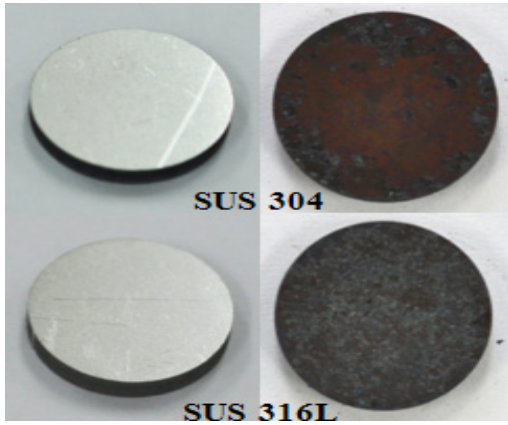


Fig. 5 Damaged surface after high temperature exposure test at 1373 K. Left is before the test, right is after the test

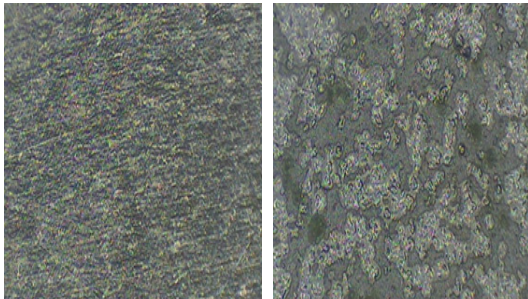


Fig. 6 Damaged surface of Inconel 625 after high temperature exposure test at 1773 K. Left is before the test, right is after the test

재료의 내열 특성 평가 실험 결과를 종합하면 Inconel X750과 Tophet A만이 1400 K의 온도까지 사용하는 데 무리가 없다고 판단되며 나머지 금속은 적합성 및 내열 특성이 좋지 않아 사용에 어려움이 있다. 금속의 내열 특성만으로도 1400 K의 높은 반응기 온도를 견딜 수 있지만, 반응기 내벽에 내열 물질 코팅을 통해 반응기 내벽을 보호하고 내열 특성을 향상시키는 방안이 검토되었다. 내열 물질로는 Al_2O_3 , Y_2O_3 , ZrO_2 를 선정하였으며, 금속 시편에 코팅한 후 내열 평가를 통해 코팅의 내구성 및 금속과의 접착성에 대한 평가를 수행하였다. 코팅은 플라즈마 스프레이 공법을 통해 수행하였으며 코팅 두께는 $120 \pm 10 \mu m$ 이다. 코팅의 내구성 및 접착성

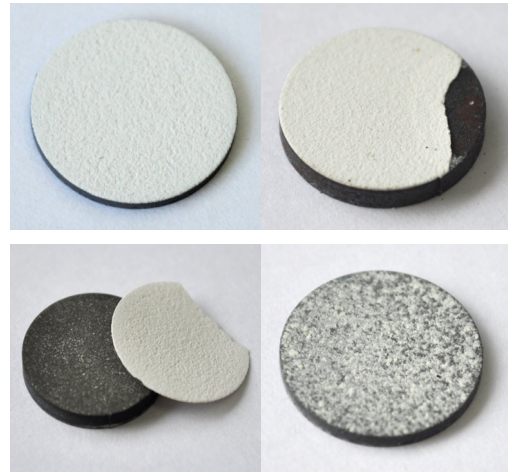


Fig. 7 Pictures of the original coating, cracked coating, separated coating, removed coating

Table 7. Coating condition after high temperature exposure test

코팅 종류	노출 온도	
	1173 K	1373 K
Al_2O_3	전 시편 - 이상 없음	SUS 304, 316L - 코팅 탈락
Y_2O_3	전 시편 - 코팅 균열	전 시편 - 코팅 분리
ZrO_2	전 시편 - 이상 없음	SUS 304 - 코팅 균열 SUS 316L - 코팅 탈락

평가는 내열 평가와 마찬가지로 1173 K, 1373 K의 공기에 각각 5 분간 노출 후 이상 여부를 파악하였으며, Table 7에 그 결과를 요약하였다.

코팅 균열은 코팅의 균열 발생으로 일부 코팅이 떨어져 나간 것을 의미하며, 코팅 분리는 코팅 물질끼리의 접착력 약화로 인해 코팅이 금속과 분리되는 것을 의미한다. 코팅 탈락의 경우 코팅 물질과 금속간의 접착력이 약화되어 코팅

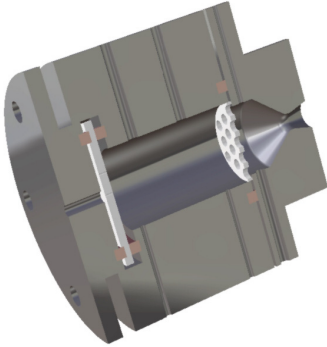


Fig. 8 Configuration of 10 N class thruster

이 떨어져나간 것이다. 코팅 탈락의 경우 코팅 분리와 달리 금속 표면에 남아있는 코팅 물질이 매우 적지만, 코팅 분리의 경우 금속 표면에 코팅 물질이 남아 있다. 실험 결과 Y_2O_3 코팅은 내구성이 약해 추력기에 적용할 수 없다. 또한 재료의 사용 가능 온도 이상에 장시간 노출할 경우 SUS 304와 SUS 316L에서 표면의 박리 현상 등으로 인해 코팅 물질과의 접착성이 떨어져 코팅이 탈락되는 경우가 발생하였다. 즉, 금속의 기본적인 내열 특성이 높지 않을 경우 코팅과의 접착성에 문제가 발생할 가능성이 높다. Fig. 7은 왼쪽 위쪽부터 시계방향으로 코팅 된 금속, 코팅 균열, 코팅 분리, 코팅 탈락의 모습을 보여주고 있다.

6. 추력기 실험을 통한 블렌딩 기법의 가능성 파악

블렌딩 기법을 통한 성능 향상을 확인하기 위해서 추력기 실험을 진행하기로 하였다. 성능 향상 확인은 온도 측정을 통해 이루어 졌으며, 90 wt.% 과산화수소의 단일 분해 온도인 $760^{\circ}C$ 이상의 반응기 온도가 나타날 경우 연소 반응에 의한 것이며, 이로 인한 성능 향상이 이루어졌다고 판단할 수 있다. 추력기 실험을 위한 10 N급 추력기를 제작하였으며, 그 형상은 Fig. 8과 같다. 실험 결과 추력기의 위치에 따른 온도 그래프를 Fig. 9에 나타내었다. T1부터 T4는 촉매 상단에서부터 하단까지 반응기 벽면에서 측정된

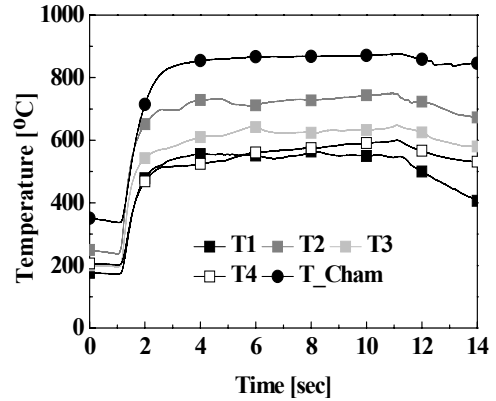


Fig. 9 Temperature graph of blended hydrogen peroxide (O/F ratio = 50) thruster test

온도를 나타내며 T_cham은 촉매 이후 반응기 중심에서 측정된 반응기 온도이다. 실험 결과 반응기 온도가 약 $870^{\circ}C$ 로서 90 wt.% 과산화수소의 단일 분해 온도인 $760^{\circ}C$ 보다 약 $100^{\circ}C$ 높은 것으로 나타났다. 즉, 블렌딩 기법을 적용해 과산화수소의 성능을 향상시킬 수 있는 가능성을 실험적으로 확인하였다. 온도 그래프에서 T3와 T4가 T2보다 낮은 것은 T2 위치에서 추진제의 분해 및 연소가 모두 일어나, 그 이후 촉매에서 열손실로 인해 온도가 낮아졌기 때문이다.

7. 결 론

하이dra진 추력기를 대체할 수 있는 친환경 추진제 추력기의 개발을 위해 과산화수소에 에탄올을 블렌딩하여 성능을 향상시키는 방법을 적용하였다. 블렌딩 기법을 통해 과산화수소의 비추력을 향상시킬 수 있으며, 이는 과산화수소 농축에 소요되는 시간과 비용을 절감할 수 있어 매우 경제적이다 할 수 있다.

블렌디드 과산화수소의 저장성 평가 결과 에탄올 블렌딩으로 인한 저장성 저하는 우려할 수준이 아닌 것으로 판단되며, 재료 적합성 평가 및 내열 평가 결과 Inconel X750, Tophet A 금속이 높은 적합성과 내열 특성을 보이고 있었으므로 FM 추력기에 적합하였으며, SUS 316L 재

료 역시 적합성이 우수하여 실험 시스템에 사용하는데 문제가 없었다. 또한 짧은 시간 실험을 하는 경우에 있어서 SUS 304와 SUS 316L을 사용해 EM 추력기를 제작하는데 무리가 없다고 판단하였다. 내열 특성 향상을 위해 세 가지 코팅을 적용해 내구성 및 접착성 평가를 실시하였으며 실험 결과 Al_2O_3 , ZrO_2 코팅은 큰 문제가 없었으나, 재료의 사용 가능 온도 이상에 장시간 노출될 경우 코팅의 접착성에 문제가 발생할 소지가 있다. 블렌딩 기법을 통한 성능 향상을 확인하기 위해 추력기 실험을 진행하였으며, 반응기 온도를 측정해 90 wt.% 과산화수소의 단열 분해 온도보다 높은 $870^\circ C$ 를 기록하였다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-20065-0)

참 고 문 헌

1. Jaime Esper, Steven Neeck, James A. Slavin, Jesse Leitner, Warren Wiscombe, and Frank H. Bauer, "Nano/Micro Satellite Constellations for Earth and Space Science," *Acta Astronautica*, Vol. 52, No. 9-12, 2003, pp.785-791
2. Wallace K., Brooks P., Waston C., Levett W., Morris N., Gray P., Waltham N., Harrison J., Phipps A., and Child S., "The Topsat Satellite," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 74, No. 4, 2001, pp.380-382
3. Stacy Christofferson and Wucherer E. J., "Demonstration of Hydrazine Propellant Blend Capabilities for Small Satellites," 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-2000-3880, 2000
4. Tapley B. D., Bettadpur S., Watkins M., and Reigber Ch., "The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission Overview and Early Results," *Geophysical Research Letter*, Vol 31, L09607, doi:10.1029/2004GL019920, 2004
5. 이정섭, 안성용, 권세진, "하이드라진 추력기의 특성 및 연구사례 조사," 제 14차 유도무기 학술대회, 2007, pp.682-686
6. Olwen M. Morgan and Dennis S. Meinhardt, "Monopropellant Selection Criteria-Hydrazine and Other Options," 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-1999-2595, 1999
7. K. Anflo, S. Persson, P. Thormahlen, G. Bergman, and T. Hasanof, "Flight Demonstration of an ADN-Based Propulsion System on the PRISMA Satellite," 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-2006-5212, 2006
8. Air Force Rocket Propulsion Laboratory, Hydrogen Peroxide Handbook, Technical Report AFRPL-TR-67-144, 1967
9. James McCormick, Hydorgen Peroxide Rocket Manual, FMC Corporation, 1965