

마이크로 반응기를 이용한 접촉점화 추진제의 비점화 평가 방법

이경환^a · 박성현^a · 강홍재^b · 이종광^{a,*}

Non-ignition Evaluation Method for Hypergolic Propellant Using Microreactor

Kyounghwan Lee^a · Seonghyeon Park^a · Hongjae Kang^b · Jongkwang Lee^{a,*}

^aDepartment of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Korea

^bPlasma Engineering Laboratory, Korea Institute of Machinery and Materials, Korea

*Corresponding author. E-mail: jongkwang@hanbat.ac.kr

ABSTRACT

Hypergolic propellant ignited spontaneously when fuel and oxidizer contact without ignition system. Due to this characteristic, the risk of accidents is high when new propellants are evaluated. Prevention of accidents is very important because the damage can be large when the accident occur. In this work, we proposed non-ignition evaluation method which can replace conventional ignition evaluation method by using microreactor. The reactor was fabricated by MEMS. The heat of reaction as according to fuel and NaBH_4 was estimated. At the condition of highest heat of reaction ignition was observed by drop test.

초 록

접촉점화 추진제는 별도의 점화장치 없이 연료와 산화제의 접촉만으로 점화한다. 이러한 특성으로 새로운 추진제 개발에 있어 점화 가능성을 평가하는 것만으로도 사고의 위험이 높다. 사고가 발생할 경우 피해의 규모가 크고 대형 인명사고로 이어질 수 있기 때문에 사고의 방지가 매우 중요하다. 이 연구에서는 추진제 개발에 있어 안전한 평가 장치로 마이크로 반응기를 제작하여 점화 실험을 대체할 수 있는 비점화 실험을 제안하였다. 마이크로 반응기는 MEMS 공정으로 제작되었으며, NaBH_4 혼합 농도에 따른 추진제 간의 반응열을 측정하였다. 액적 낙하 실험 결과, 반응열이 가장 높은 조건에서 점화현상이 관찰되었다.

Key Words: Hypergolic Propellant(접촉점화 추진제), Hydrogen Peroxide(과산화수소), Reactive Fuel(반응성 연료), Microreactor(마이크로 반응기), Ignition Delay(점화지연)

1. 서 론

Received 22 February 2022 / Revised 28 March 2022 / Accepted 5 April 2022

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

접촉점화 추진제란 연료와 산화제의 접촉만으로 자연발화 현상이 일어나는 추진제 조합을 의미한다. 접촉점화 특성으로 인해 외부 열원 또는

점화 장치가 필요하지 않아 추진 시스템을 간소화할 수 있으며, 높은 점화 신뢰성을 갖는 메커니즘을 구현할 수 있다[1]. 대표적인 접촉점화 추진제인 하이dra진 계열의 연료와 사산화이질소의 조합은 우수한 점화성능을 기반으로 소모형 발사체, 우주 왕복선, 인공위성 등 다양한 우주 추진 시스템에 사용되고 있다[2]. 하지만 1990년대에 들어 저비용, 친환경적인 개발이 대두되면서 독성 추진제인 하이dra진과 사산화이질소를 대신하여 과산화수소를 기반으로 한 접촉점화 추진제가 관심을 받고 있다[3].

과산화수소 기반의 접촉점화 추진제에 사용되는 연료는 산화제와의 작용 유형에 따라 반응성 연료와 촉매성 연료, 이온성 연료로 구분할 수 있다. 반응성 연료는 점화제를 혼합하여 과산화수소와의 산화-환원 반응을 일으켜 점화를 유도한다. 촉매성 연료는 연료 내 포함되어 있는 촉매가 과산화수소를 촉매 분해하여 고온의 발열 반응을 일으키는 연료이다. 이온성 연료는 금속 양이온과 비금속 음이온으로 이루어진 이온성 염 화합물로 점화제 없이 과산화수소와 접촉점화가 가능한 연료이다[4]. 그러나 이온성 연료는 현재 연료 개발 단계로 생산성과 비용 측면에서 한계가 있다. 또한 촉매성 연료는 저장성과 이온 성능이 다소 낮다는 단점이 있다. 이에 로켓 시스템 적용을 위한 연구 사례는 반응성 연료가 가장 지속적으로 이루어지고 있는 상황이다[5].

반응성 연료는 미국 및 유럽에서 많은 연구가 진행되었으며, 고 에너지 연료에 강 환원제를 혼합한 반응성 연료를 이용하여 점화특성을 확인하는 연구가 주로 이뤄지고 있다[6,7].

접촉점화 추진제는 물리적, 화학적 요소들이 복합적으로 반응하기 때문에 추진제의 종류에 따라 점화지연시간, 점화현상과 같은 점화특성이 차이가 있다. 이를 평가하기 위해서 액적 낙하 실험, 액주 충돌 실험 등이 수행되고 있다.

액적 낙하 실험은 액주 충돌 실험에 비해 실험의 난이도 및 위험성이 낮은 실험이다. 하나의 반응물 액적을 다른 반응물이 있는 하부로 낙하시켜 접촉점화 현상을 관찰하는 비교적 간단한 실험 방법으로 주로 초고속 카메라를 이용하여

점화지연시간을 측정하며 연료를 선별하는 실험이다. 하지만 미지의 연료를 선별하는 단계에서 폭발이 관측되는 위험성이 있다. Fig. 1은 본 연구팀이 새로운 아민 계열의 연료를 평가하면서 관측된 폭발 사진이다.

최근 이 같은 위험성을 사전에 배제하기 위하여 마이크로 반응기를 이용한 반응 실험이 제안되고 있다. 마이크로 반응기는 MEMS 기술로 제작된 초소형 반응기를 의미하며 매우 작은 크기로 인해 환경에 대한 정밀 제어가 가능하다. 또한 미량의 반응물을 사용하기 때문에 폭발성 물질에 대한 평가가 상대적으로 안전하다. Fig. 2는 펜실베니아 주립 대학교에서 사용한 마이크로 반응기의 형상이다. MEMS 공정을 통해 60 μm 크기의 채널을 형성하고 내부에 연료와 산화제를 주입하며 생성물의 온도를 측정하여 연료와 산화제 조합에 따른 반응성을 상대 비교하였다. 또한, 산화제 농도에 따른 생성물의 온도의 경향성을 확인하는 실험을 진행하여 산화제의 농도가 마이크로 반응기에서 발생하는 화학작용에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 검증하였다. 하

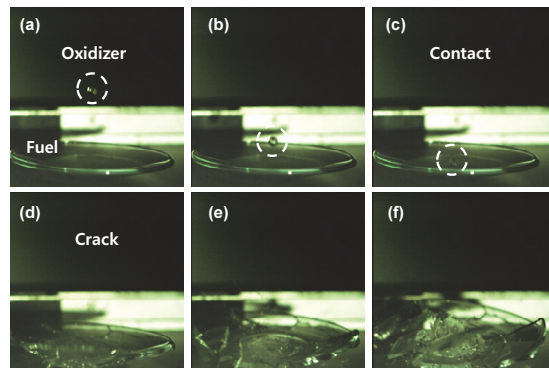


Fig. 1 Explosive reaction of amine derivative.

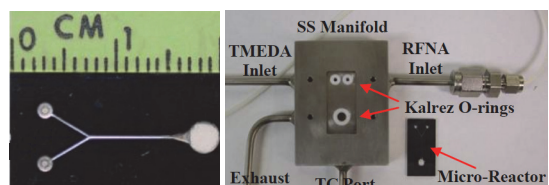


Fig. 2 Fabricated microreactor with manifold setup[8].

지만 이 연구에서 사용된 마이크로 반응기는 내부에서 유체의 Re 수가 15~120으로 매우 낮기 때문에 연료와 산화제간 혼합 효율이 좋지 않았을 것으로 판단된다[8].

이 연구에서는 새로운 접촉점화 추진제 평가에 있어 위험 요소를 가능한 줄일 수 있는 방법으로 마이크로 반응기를 이용한 비점화 평가 방법을 확립하려 한다. 접촉점화 추진제 평가에 적합한 마이크로 반응기를 설계 및 제작하고 이를 이용하여 반응성 연료를 평가하고, 액적 낙하 실험의 점화 지연 결과와 비교 분석을 통해 실험의 적절성을 검증하려 한다.

2. 접촉점화 추진제

실험에 사용된 연료는 반응성 연료이며, 환원제를 점화제로 사용하여 산화제인 과산화수소와 산화-환원 반응을 유도하였다. 점화제는 연료가 화학반응을 하는데 필요한 활성화 에너지를 낮추어 연료와 산화제 간의 화학반응을 촉진시키는 역할을 한다. 그로 인해 일반적으로 점화가 되지 않는 반응성 연료도 점화제 혼합 여부와 농도에 따라 점화 여부가 달라진다. 이 연구에서는 점화제 농도에 따른 마이크로 반응기 실험을 통해 점화 가능할 것으로 예측되는 농도를 예측해보고 이를 액적 낙하 실험을 통해 검증하려 한다.

반응성 연료로는 저독성 이원추진제이며, 과산화수소와의 접촉점화 특성이 좋은 것으로 알려

진 피리딘(pyridine)과 글라임(glyme) 계열의 용매를 선정하였다[9]. 선정된 용매는 화학물질의 유해성분류 및 표시에 대한 국제 조화 시스템인 GHS(Global Harmonized System) 구분 4의 용매로서 저독성 연료로 구분된다. 점화제는 수소화붕소나트륨(sodium borohydride, NaBH_4)을 이용하였으며 점화제의 농도를 0, 1, 2, 3, 4, 5 wt.%로 달리하며 용매와 혼합하였다. 용매와 점화제는 교반기를 이용하여 4시간 혼합 후 사용하였다.

Table 1은 용매에 점화제를 혼합 후 측정된 밀도와 점도 값이다. 점화제 혼합 농도에 따라 밀도는 크게 변화하지 않았으나, 점도의 변화가 크게 나타난 것을 확인할 수 있었다.

산화제는 마이크로 반응기 실험의 안전성을 확보하기 위하여 30%의 저농도 과산화수소를 사용하였으며, 물성은 Table 2와 같다.

3. 마이크로 반응기 설계 및 해석

3.1 마이크로 반응기 설계

마이크로 반응기는 일반적으로 ml/h~l/h의 유량으로 운영되며, 혼합되는 유로의 특성 길이가 짧기 때문에 낮은 레이놀즈 수를 가지며 확산에 의한 혼합이 지배적이다. 확산에 의한 혼합은 혼합 효율이 매우 낮기 때문에 혼합을 촉진하기 위한 다양한 방법들이 제시되고 있다.

이 연구에서는 반응기의 혼합 성능을 향상시키기 위해 다수의 입구 채널을 이용한 다적층

Table 1. Properties of fuels.

Tetraglyme		Pyridine		
NaBH_4 [wt.%]	Density [g/cm^3]	Viscosity [$\text{mPa} \cdot \text{s}$]	Density [g/cm^3]	Viscosity [$\text{mPa} \cdot \text{s}$]
0	1.010	4.0	0.982	0.88
5	1.020	14.6	0.990	1.85

Table 2. Properties of H_2O_2 (30 wt.%).

Density [g/cm^3]	Viscosity [$\text{mPa} \cdot \text{s}$]
1.108	1.085

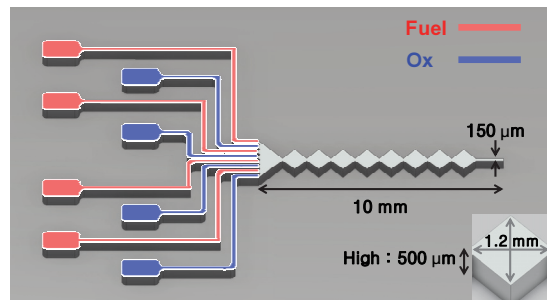


Fig. 3 Schematic of microchannel shape.

(multilamination) 방식과 대류 혼합 방식을 이용하였다[10]. 다적층 방식이란 다수의 공급 채널에서 엇갈리게 두 유체를 공급한 후 이들을 하나의 채널로 수축시켜 유체의 확산 면적을 증가시키는 방법이다. 대류 혼합 방식은 유체가 흐르는 채널을 수축-확장하여 와류를 발생시켜 혼합 효율을 향상시키는 방법이다. Fig. 3과 같이 마이크로 채널은 2×4 의 공급 채널을 가지며, 8개의 재순환 공간을 가지고 있다. 마이크로 채널의 폭은 $150 \mu\text{m}$ 이며, 높이는 $500 \mu\text{m}$, 수력 지름은 $230 \mu\text{m}$ 이다.

3.2 마이크로 반응기 수치 해석

제한한 마이크로 반응기의 성능을 검증하기 위하여 수치 해석을 통한 혼합 성능을 검증하였다. 반응기 내부의 유동장을 계산하기 위하여 질량 보존식과 운동량 보존식을 계산하였으며, 혼합 성능 확인하기 위하여 종 보존 방정식을 계산하였다. 해석은 상용 프로그램인 Fluent를 사용하였다. 혼합 성능은 Eq. 1과 같은 식을 이용하여 계산하였다[10].

$$\eta_N = \left(1 - 2 \times \sqrt{\frac{1}{A} \sum (c_i - 0.5)^2 A_i} \right) \times 100\% \quad (1)$$

이 식에서 η_N 는 계산된 혼합 효율이고, c_i 는 i 번째 요소의 질량 분율이며, A_i 는 i 번째 요소의 면적이고, A 는 혼합 성능을 평가하는 단면의 면적이다. 계산은 연료 물성으로는 Table 1과 같이

테트라글라이미과 피리딘에 점화제가 각각 0%와 5% 추가된 조건들을 사용하였으며, 산화제 물성으로는 Table 2와 같이 30% 농도의 과산화수소 물성을 사용하였다. 유량은 연료와 산화제 각각 2 ml/min 으로 하였다.

Fig. 4는 피리딘에 점화제가 5% 들어간 경우의 계산 결과이다. 다적층으로 유입된 연료와 산화제가 재순환 공간들을 지나며 혼합이 되는 것을 확인할 수 있다. 테트라글라이미에 점화제를 혼합하지 않은 경우 레이놀즈 수는 74이고, 혼합 효율은 84%였으며, 점화제가 5% 혼합된 경우 레이놀즈 수는 20이고, 혼합 효율 70%로 계산되었다. 피리딘에 점화제를 혼합하지 않은 경우 레이놀즈 수는 326이고, 혼합 효율은 92%였으며, 점화제가 5% 혼합된 경우 레이놀즈 수는 155이고, 혼합 효율은 89%로 계산되었다. 모든 계산 결과에서 혼합 효율 70% 이상의 높은 혼합 효율을 가짐을 확인할 수 있었으며, 접촉점화 추진제의 비점화 실험에 적용할 수 있을 것이라 판단하였다.

4. 마이크로 반응기 제작 및 실험

4.1 마이크로 반응기 제작

마이크로 반응기의 재료로는 내화확성이 우수한 감광 유리(photosensitive glass)를 선택하였다. 감광 유리는 비결정 구조를 가지기 때문에 등방성 식각이 되는 성질을 가지고 있다. 하지만

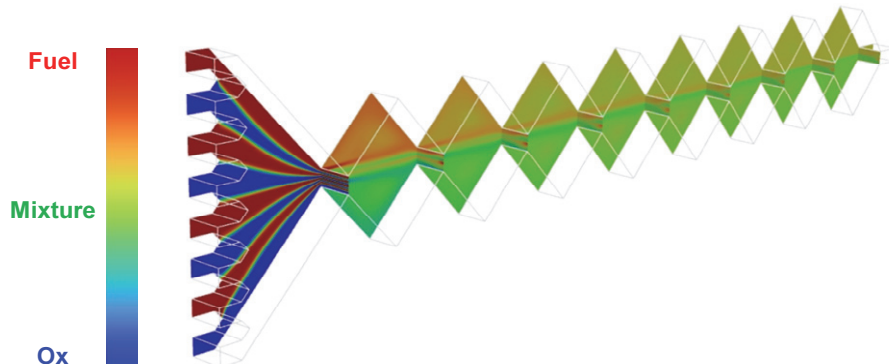


Fig. 4 Mixing efficiency results of fuel mixed with pyridine and NaBH_4 5%.

감광 유리를 UV에 노광하게 되면 내부에 은 원자가 형성되어 고 종횡비를 갖는 이방성 식각이 가능하게 된다[11]. 이러한 기법을 이용하여 고 종횡비를 가지는 정밀한 마이크로 구조체를 가공하였다. Fig. 5는 감광 유리의 공정도이며 자세한 공정 순서는 다음과 같다. 우선 쿼츠 웨이퍼에 크롬 마스크를 제작한 후 (a), 감광 유리를 310 nm 파장의 UV에 노광을 한다. 이 때, 노광 에너지는 2.5 J/cm²을 사용하였으며, UV에 노광된 감광 유리는 내부에 은 원자가 형성되게 된다(b). 노광 공정 후, 감광 유리를 585℃에서 열처리하게 되면 은 원자 주위로 결정화가 이뤄지며 유리-세라믹으로 물성이 변하게 된다(c). 이와 같은 공정을 거친 후 감광 유리를 불산 용액에 식각하게 되면 결정화가 이뤄진 부분으로 비등방성 식각이 이뤄지게 되어, 원하는 마이크로 구조체를 만들 수 있게 된다(d)[10,12]. 마지막으로

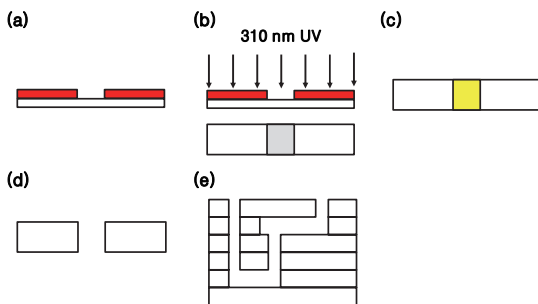


Fig. 5 Manufacturing process of micro reactor (a) Cr patterning on Quartz wafer, (b) UV exposure, (c) Heat treatment, (d) Anisotropic etchin HF:DI=1:10), (e) Thermal bonding.

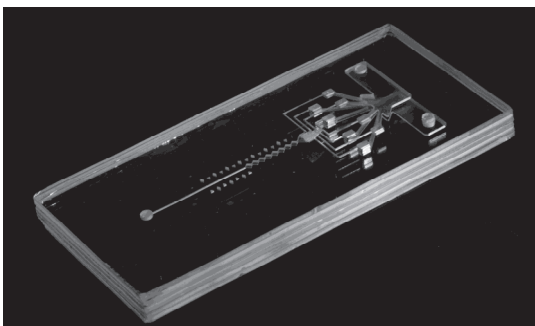


Fig. 6 Fabricated microreactor.

각각 제작된 마이크로 구조체를 열 접합하여 마이크로 반응기를 제작한다(e). Fig. 6은 제작된 재순환 마이크로 반응기이다.

4.2 마이크로 반응기 실험 방법

마이크로 반응기를 이용하여 추진제의 화학반응을 정량적으로 계측하기 위해 Fig. 7과 같이 비점화 실험 장치를 구성하였다. 실험 장치는 실린지 펌프(CheMyx Inc, Fusion 400), 마이크로 반응기, 열전대(K-Type), 데이터로거(GRAPH TEC Inc, GL-240)로 구성되며 입구에 연료와 산화제를 주입시켜 마이크로 채널에서 화학반응을 유도하였다. 실린지 펌프는 연료와 산화제의 유동 제어를 용이하게 하며, 마이크로 반응기 입구에 추진제를 주입하는 역할을 한다. 연료와 산화제가 마이크로 반응기 내부에서 반응하여 생긴 생성물은 출구로 나오며, 생성물의 온도를 열전대와 데이터로거가 측정, 기록한다. 실험에 사용된 추진제는 연료와 산화제 각각 2 ml/min의 유량으로 공급하였다. 연료는 테트라글라이미과 피리딘에 점화제가 각각 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5% 추가된 조건들을 사용하였으며, 산화제는 30% 농도의 과산화수소를 사용하였다.

4.3 마이크로 반응기 실험

Fig. 8은 점화제 혼합 농도에 따른 마이크로 반응기 실험 결과이다. 온도의 측정온도는 온도가 정상상태에 도달 후 측정하였다. 실험 연료 모두 점화제의 혼합 농도가 증가할수록 생성물의

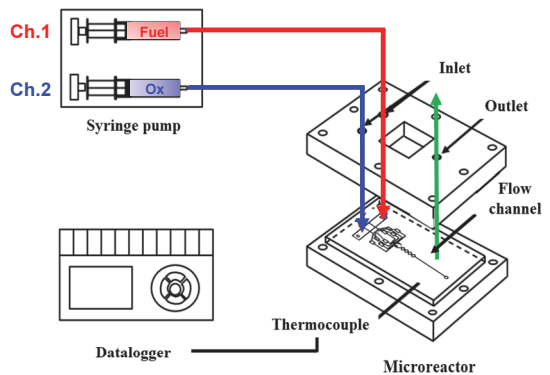


Fig. 7 Schematic drawing of the microreactor test.

온도가 선형적으로 증가하다가 최고 반응열에 도달하였다. 테트라글라임은 점화제 혼합 농도 1 wt.% 당 생성물의 온도가 약 20℃씩 증가하였으며 3 wt.%부터는 약 100℃에 도달하였다. 피리딘의 경우, 점화제 혼합 농도 1 wt.% 당 생성물의 온도가 약 15℃씩 증가하였으며 4 wt.%부터는 약 96℃에 도달하였다.

생성물의 온도가 높다는 것은 화학반응이 보다 활발하게 발생한 것을 의미하며, 그로 인해 점화가능성이 높다고 판단할 수 있다. 반대로 생성물의 온도가 낮다는 것은 화학반응이 잘 발생하지 않는 조건이라는 것으로 점화가 되지 않을 것으로 판단할 수 있다. 이러한 점에서 테트라글라임은 점화제 3 wt.%부터, 피리딘은 점화제 4 wt.%부터 점화 가능할 것으로 예측할 수 있다.

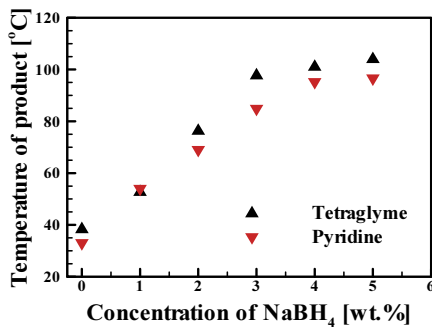
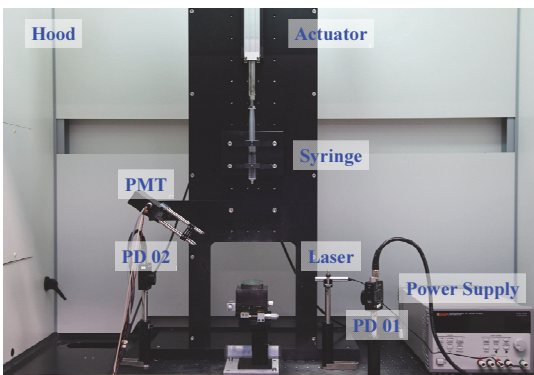


Fig. 8 Results of the microreactor test with NaBH₄ concentration in Fuel.



* PD = Photodiode
* PMT = Photo Multiplier Tube

Fig. 9 Configuration of the drop test apparatus[13].

5. 액적 낙하 실험

5.1 액적 낙하 실험 장치

마이크로 반응기 실험 결과로 예측되었던 점화 가능성을 확인하기 위해 액적 낙하 실험을 통해 점화 여부와 점화지연시간을 측정하였다.

액적 낙하 실험은 Fig. 9와 같이 초고속 카메라와 광 센서를 이용한 액적 낙하 실험 장치를 이용하였다[13]. 실험 장치는 액적의 낙하 조건을 제어하는 액적 낙하 시스템과 점화지연시간 계측 시스템으로 구성된다. 액적 낙하 시스템은 선형 액추에이터(RD-35T, Coolmuscle), 실린지, XYZ 스테이지로 구성되며, 선형 액추에이터에 전기 신호를 가해 실린지 내부에 있는 연료(또는 산화제) 액적을 XYZ 스테이지로 낙하시키는 방식이다. 점화지연시간을 측정하는 계측 시스템은 532 nm 레이저, 광 센서와 오실로스코프로 구성된다. 532 nm 레이저로 연료(또는 산화제) 액적이 하부 있는 산화제(또는 연료) 액적과 접촉하는 신호를 계측하고, 광 센서를 통해 접촉점화시 발생하는 특정 라디칼을 측정하였다. Fig. 10은 측정된 점화지연시간 데이터의 분석법을 나타낸 그림이다. PD(photodiode)는 레이저의 산란 신호를 관측할 수 있는 장치로 연료와 산화제 액적이 충돌하는 시간을 알 수 있다. 광전자 증폭관(photomultiplier, PMT)은 OH 라디칼의

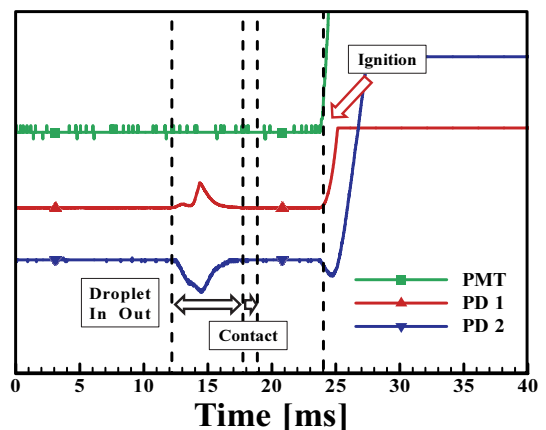


Fig. 10 Representative results of the drop test with optic sensors.

고유 파장인 308 nm를 감지할 수 있는 장치로 연료와 산화제의 화학반응에서 생성되는 OH 라디칼을 측정한다.

5.2 액적 낙하 실험 결과

반응성 연료는 점화제 혼합 농도에 따라 점화 여부가 달라진다. 이 실험에서는 점화제 혼합 비율에 따른 점화지연시간을 측정하여 점화 가능한 최소한의 혼합 비율을 확인하였다. 마이크로 반응기 실험과 달리 실제 점화를 유도해야하기 때문에 액적 낙하 실험에서는 90% 농도의 과산화수소를 산화제로 사용하였다.

Table 3은 실험 조건에 따른 액적 낙하 실험 결과이다. 90% 과산화수소 액적을 낙하시키고 6회 반복 실험을 수행하여 평균값과 표준편차를 나타내었다. 실험 연료 모두 점화제의 농도가 증가할수록 점화지연시간이 짧아지는 경향을 보였다. 테트라글라이미는 점화제 혼합 농도 3 wt.%부터 점화가 가능하였으며, 피리딘의 경우 4 wt.%부터 점화가 가능하였다.

이는 마이크로 반응기 실험에서 최고 반응열에 도달하는 점화제의 농도와 유사한 경향성을 나타낸다. 테트라글라이미는 점화제 농도 3 wt.%부터 생성물의 온도가 100°C에 도달하여 점화 가능할 것으로 예측되었고, 피리딘은 점화제 농도 4 wt.%부터 생성물의 온도가 96°C에 도달하여 점화 가능할 것으로 예측되었다. 이러한 두 실험 결과를 통하여 새로운 접촉점화 추진제 평가에 있어 위험 요소를 최소화할 수 있는 방법으로 마이크로 반응기를 이용한 비점화 평가 방법을 확립하였다고 판단할 수 있다.

Table 3. Results of the Droplet test with NaBH_4 concentration in Fuel.

Fuel	Tetraglyme				Pyridine			
	3	4	5	6	3	4	5	6
NaBH_4 [wt.%]	3	4	5	6	3	4	5	6
ID [ms]	20	9.3	5.0	4.3	N	76	14	7.2
STD*	4.0	0.8	0.6	0.5	A	21	1.0	0.6

*standard deviation

6. 결 론

새로운 접촉점화 추진제의 선별 과정에서 접촉점화 가능성을 파악하는 것은 필수적이다. 접촉점화 추진제는 물리적 접촉만으로 점화가 일어나기 때문에 접촉점화성을 파악하는 데에 사고의 위험성이 동반된다. 이 연구에서는 점화 실험의 위험성을 배제할 수 있는 비점화 실험으로 마이크로 반응기 실험 방법을 제안하였다. 접촉점화 추진제의 화학반응을 관찰하는데 적합한 마이크로 반응기를 제작하고 수치해석을 통해 혼합 성능을 계산하였다. 내화학성이 우수한 감광 유리를 이용하였고, 다적층 방식과 대류 혼합 방식을 이용하여 최소 70% 이상의 높은 혼합 효율을 가지는 마이크로 반응기를 제작하였다.

제작된 마이크로 반응기를 이용하여 추진제의 화학반응을 통한 반응열을 측정하고, 이 결과를 바탕으로 액적 낙하 실험을 통해 점화 가능성을 파악하였다. 마이크로 반응기 실험 결과, 점화제의 농도가 증가할수록 생성물의 온도가 선형적으로 증가하다가 최고 반응열에 도달 후 수렴하는 경향을 보였다. 테트라글라이미의 경우, 점화제 농도 3 wt.%부터 생성물의 온도가 약 100°C에 도달해 수렴하였고, 피리딘은 점화제 농도 4 wt.%부터 생성물의 온도가 약 96°C로 수렴하였다. 액적 낙하 실험 결과, 글라이미 계열의 연료는 점화제 농도 3 wt.%부터 점화가 가능하였고, 피리딘은 4 wt.%부터 점화가 가능하였다. 이는 마이크로 반응기 실험에서 최고 반응열에 도달하는 점화제의 농도와 유사한 경향성을 나타낸다. 이를 바탕으로 마이크로 반응기를 통해 새로운 추진제의 점화가능성을 사전에 평가할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2021 학년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았습니다.

References

1. Kang, H.J. and Kown, S.J., "Foundational Study and Performance Evaluation of Non-Toxic Hypergolic Propellants," *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Jeju, Korea, pp. 268-271, 2013.
2. Jang, Y.H. and Lee, K.H., "Numerical Study of Chemical Reaction for Liquid Rocket Propellant Using Equilibrium Constant," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 44, No. 4, pp. 333-342, 2016.
3. Lee, K.H., Park, S.H., Kang, H.J. and Lee, J.K., "Pre-Evaluation Method of Hypergolic Propellants Using Micro Reactors," *56th KSPE Spring Conference*, Jeju, Korea, pp. 77-80, May 2021.
4. Park, S.H., Kang, H.J., Park, Y.C. and Lee, J.K., "A Review of the Technical Development on Green Hypergolic Propellant," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 24, No. 4, pp. 79-88, 2020.
5. Mahakali, R., Kuipers, F.M., Yan, A.H., Anderson, W.E. and Pourpoint, T.L., "Development of Reduced Toxicity Hypergolic Propellants," *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, San Diego, C.A., U.S.A., AIAA 2011-5631, July 2011.
6. Pourpoint, T.L. and Anderson, W.E., "Hypergolic Reaction Mechanisms of Catalytically Promoted Fuels with Rocket Grade Hydrogen Peroxide," *Journal of the Combustion Science and Technology*, Vol. 179, No. 10, pp. 2107-2133, 2007.
7. Rarata, G. and Florczuk, W., "Novel liquid compounds as hypergolic propellants with HTP," *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 23, No. 1, pp. 271-278, 2016.
8. Pulkit, S., "Study of Condensed Phase Reactions Between Hypergolic Propellants Using Microreactors," Ph.D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, P.S., U.S.A., 2014.
9. Rang, S.M., Kim, K.S. and Kown, S.J., "Experimental Ignition Delay Assessment of H₂O₂ Based Low Toxic Hypergolic Propellants with Variation of Reactive Additive Concentration," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 24-31, 2020.
10. Lee, J.K. and Kwon, S.J., "Mixing efficiency of a multilamination micromixer with consecutive recirculation zones," *Chemical Engineering Science*, Vol. 64, No. 6, pp. 1223-1231, 2009.
11. Cho, S.J., "Micromachining technology using photosensitive glass," *Journal of the Korean Society of Laser Processing*, Vol. 14, No. 1, pp. 25-29, 2011.
12. Dietrich, T.R., Ehrfeld, W., Lacher, M., Kramer, M. and Speit, B., "Fabrication Technologies for Microsystems Utilizing Photosensitive Glass," *Journal of the Microelectronic Engineering*, Vol. 30, Issues. 1-4, pp. 497-504, 1996.
13. Park, S.H., Kang, H.J., Lee, K.H., Park, Y.C. and Lee, J.K., "Experimental Method for the Drop Test of Hypergolic Propellants," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 45, No. 7, pp. 357-364, 2021.