

## 기상조절용 하이브리드 로켓의 실험 설계 및 활용연구

차주완<sup>1)\*</sup> · 김부요<sup>1)</sup> · Belorid Miloslav<sup>1)</sup> · 노용훈<sup>1)</sup> · 고아름<sup>1)</sup> · 김선희<sup>2)</sup> ·  
박동오<sup>1)</sup> · 박지만<sup>3)</sup> · 구해정<sup>1)</sup> · 장기호<sup>1)</sup> · 이용희<sup>1)</sup> · 김수종<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>국립기상과학원 기상응용연구, <sup>2)</sup>항공기상청, <sup>3)</sup>부산지방기상청, <sup>4)</sup>(주)이노스페이스

(접수일: 2023년 11월 21일, 수정일: 2024년 1월 9일, 게재확정일: 2024년 4월 4일)

## Study on Weather Modification Hybrid Rocket Experimental Design and Application

Joo Wan Cha<sup>1)\*</sup>, Bu-Yo Kim<sup>1)</sup>, Miloslav Belorid<sup>1)</sup>, Yonghun Ro<sup>1)</sup>, A-Reum Ko<sup>1)</sup>, Sun Hee Kim<sup>2)</sup>,  
Dong-Ho Park<sup>1)</sup>, Ji Man Park<sup>3)</sup>, Hae Jung Koo<sup>1)</sup>, Ki-Ho Chang<sup>1)</sup>, Hong Hee Lee<sup>1)</sup>, and Soojong Kim<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Research Applications Department, National Institute of Meteorological Research, Jeju, Korea

<sup>2)</sup>Aviation Meteorological Office, Incheon, Korea

<sup>3)</sup>Forecasting Department, Regional office of Busan Meteorology,  
Korean Meteorological Administration, Busan, Korea

<sup>4)</sup>Innospace Inc., Sejong, Korea

(Manuscript received 21 November 2023; revised 9 January 2024; accepted 4 April 2024)

**Abstract** The National Institute of Meteorological Sciences in Korea has developed the Weather Modification Hybrid Rocket (WMHR), an advanced system that offers enhanced stability and cost-effectiveness over conventional solid-fuel rockets. Designed for precise operation, the WMHR enables accurate control over the ejection altitude of pyrotechnics by modulating the quantity of oxidizer, facilitating specific cloud seeding at various atmospheric layers. Furthermore, the rate of descent for pyrotechnic devices can be adjusted by modifying parachute sizes, allowing for controlled dispersion time and concentration of seeding agents. The rocket's configuration also supports adjustments in the pyrotechnic device's capacity, permitting tailored seeding agent deployment. This innovation reflects significant technical progression and collaborations with local manufacturers, in addition to efforts to secure testing sites and address hybrid rocket production challenges. Notable outcomes of this project include the creation of a national framework for weather modification technology utilizing hybrid rockets, enhanced cloud seeding methods, and the potential for broader meteorological application of hybrid rockets beyond precipitation augmentation. An illustrative case study confirmed the WMHR's operational effectiveness, although the impact on cloud seeding was limited by unfavorable weather conditions. This experience has provided valuable insights and affirmed the system's potential for varied uses, such as weather modification and deploying high-altitude meteorological sensors. Nevertheless, the expansion of civilian weather rocket experiments in Korea faces challenges due to inadequate infrastructure and regulatory limitations, underscoring the urgent need for advancements in these areas.

**Key words:** Hybrid rocket, Weather modification, Cloud seeding

\*Corresponding Author: Joo Wan Cha, Research Application Department, National Institute of Meteorological Research, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.  
Phone: +82-64-780-6665, Fax: +82-64-738-6515  
E-mail: jwcha@korea.kr

## 1. 서론

최근 들어 기후변화에 의한 가뭄과 홍수 등 자연재해가 증가하고 있다(Hong and Hwang, 2006; Koh, 2009; Kim et al., 2010). 이에 대한 이해와 적극적인 대응을 위해 기상항공기, 지상실험기, 지상대포 등을 이용한 기상조절기술개발이 전세계적으로 수행되고 있다(Pokharel et al., 2017; WMO, 2018; Cha et al., 2019). 우리나라에서는 현재 기상청 국립기상과학원에서 기상항공기와 지상실험기를 활용하여 다양한 목적(산불예방, 가뭄 저감, 안개 소산 등)으로 기상조절실험을 수행해오고 있다. 이러한 기상조절실험은 환경문제를 최소화하면서 비교적 적은 비용으로 대응 효과를 극대화시킬 수 있다. 많은 나라에서 다양한 관측 캠페인과 연구활동 지원을 통해 인공증우 효과와 증우에 따른 경제 효과를 제시하고 있다(Bangsund and Leistriz, 2019; Tessendorf et al., 2019). 국립기상과학원에서도 이러한 기상조절기술을 기반으로 국내 기상조절에 대한 경제성 분석(Lee et al., 2010a; Kim et al., 2020a)과 인공강우 가능성에 대한 평가(Kim et al., 2020b; Jung et al., 2022; Ro et al., 2024)를 수행하며 기상조절에 대한 과학적 근거를 마련하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

기상조절실험에는 인공강우(증우 및 증설), 안개 저감, 우박 억제 등 다양한 기술분야가 있고, 이러한 기상조절을 위해 다양한 방법으로 인공강우물질을 살포한다. 일반적으로는 항공기, 지상실험기, 로켓 등을 활용한다. 이 방법들 중 항공기는 효율적이지만 운영 비용이 상대적으로 높고 지상실험기는 지형효과를 이용해야만 하는 한계가 있다. 로켓은 어떤 구름의 형태이든 인공강우물질의 살포가 가능하지만 낙하물의 위험성 때문에 한정된 지역이나 인적 물적 손실이 없는 지역을 대상으로 운영이 가능하다. 로켓을 이용한 기상조절실험을 하는 국가는 중국, 러시아, 몽골, 태국, 인도네시아가 대표적이다.

기상조절용 로켓은 러시아와 동유럽 지역의 우박에 의한 농작물 피해 저감을 위해 많이 사용된다. 중국, 몽골, 인도네시아에서는 지역적으로 발생하는 대류성 강우의 인공증우를 위해 기상조절 로켓이 사용되고 있다. 그러나 국내에서는 로켓을 이용한 인공강우기술이 매우 부족한 상황이며, 따라서 기상청 국립기상과학원에서 국내 처음으로 기상조절용 로켓의 원천기술개발을 2019년부터 시작하여 2021년에 기반기술을 확보하게 되었다. 일반적으로 기상조절용 로켓은 고체 화약을 사용하기 때문에 폭발의 위험성과 법적 문제가 있어 대부분의 국가에서 기상조절용 로켓은 국가기관이나 군에서 개발 및 활용 연구를 추진하고 있다.

국내에서 기상조절을 위한 로켓 개발은 고체·액체

연료의 사용에 따라 다양한 도전에 직면해 있다. 고체연료 추진로켓의 경우, 연료와 산화제가 섞여 있어 제조 및 취급 시 폭발 위험이 존재한다. 이러한 로켓은 제작비용은 낮지만, 추진력이 약하고, 출력조절 및 재시동이 어렵다는 단점이 있다. 또한, 고체연료 연소 과정에서 발생하는 독성 가스와 폭발 위험성은 개발을 복잡하게 만든다. 반면, 액체연료 로켓은 높은 제작비용과 복잡한 설계에도 불구하고 강력한 추진력과 출력조절, 재시동의 가능성을 제공한다. 액체연료의 연소가스는 비독성이지만, 폭발 위험성은 여전히 존재하여 민간업체의 개발에 제한을 둔다. 이러한 상황은 액체연료 로켓 기술의 발전에도 불구하고 안전성과 환경 적합성을 확보하는 데 중요한 과제를 제시한다. 고체·액체연료 로켓기술은 각각의 장단점을 가지고 있으며, 이들의 효율적인 개발과 활용은 기술적 성숙도, 안전 규제, 환경 기준의 고려를 필요로 한다.

이러한 고체연료 또는 액체연료 로켓의 위험성 및 민간 활용 문제 때문에, 폭발 위험성이 없고 무독성 추진제를 사용하는 하이브리드 로켓을 민간업체에서 더 선호하고 있다(Marxman et al., 1964; Gordon and McBride, 1994; Brian et al., 2006; Kevin et al., 2006; Dyer et al., 2007; Kim et al., 2008; Kim et al., 2009; Lee et al., 2010b; Moon et al., 2012; Schmierer et al., 2019). 이에 국립기상과학원에서는 하이브리드 방식의 기상조절용 로켓을 세계 최초로 시도하여 원천기술을 확보하고자 하였다.

본 연구논문에서는 세계 최초로 시도된 기상조절용 하이브리드 로켓(Weather Modification Hybrid Rocket, WMHR)의 제작부터 실제 사례 적용과정까지 원천기술을 확보하기 위한 과정과 기술적 노하우를 공유하고자 한다. 국내에서 전무했던 최신 하이브리드 로켓 기술 기반 기상조절용 로켓 개발은 국내 로켓 제작업체의 발굴, 국내 환경에 적합 로켓의 설계, 국내 첫 기상조절용 로켓의 실험 방안, 로켓 실험 가능지역 확보를 위한 노력, 하이브리드 로켓 제작에 필요한 다양한 부품, 로켓발사 실험 시 필수적으로 주의해야 할 요소, 실제 로켓 실험 현장에서 위험성, 기상조절용 로켓과 항공기와 연계 방안, 기상조절용 로켓을 이용한 다양한 구름씨 살포기술 등 많은 기술과 경험 포함하고 있다. 향후 하이브리드 로켓은 인공강우뿐만 아니라 다양한 기상 연구에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

## 2. 기상조절용 하이브리드 로켓기술 개요

하이브리드 로켓을 개발하기 위한 핵심기술인 하이브리드 연소기술은 연소실 내에서 고체연료에서 기화되어 발생하는 기체상의 연료와 산화제 분사기를 통

해 유입된 기체상 또는 액체상의 산화제가 화학반응을 하는 전형적인 난류 확산 연소기술이다. 이때 발생된 고온·고압의 연소가스가 노즐을 통해 고속 분사됨으로써 추진력을 발생시키는 일련의 연소 및 열 유동 특성을 제어하는 기술이 하이브리드 로켓 연소기술이다. 이런 연소기술은 보다 넓게는 로켓추진기관의 추진력 발생과 관계된 산화제의 공급과 유량제어 기술, 점화기술을 포함한다(Kim, 2012).

하이브리드 로켓은 산화제의 공급량에 따라 추진력을 자유롭게 제어할 수 있어 과학용 로켓 추진체로도 활용도가 높으며 안정성과 경제성이 우수하여 민간에서 활용하기에도 좋은 기술이다. 특히 하이브리드 로켓은 고체·액체연료 로켓에 비해 폭발성이 없고, 연료 및 연소 후 배출물질이 무독성이다. 기존 고체·액체연료 로켓은 HCL,  $Al_2O_3$  등과 같은 독성이 있고 환경오염물질을 배출하는데 하이브리드 로켓은 파라핀 같은 고분자화합물질을 사용하기에 환경적으로 무해하다. 경제적으로는 하이브리드 로켓의 단순한 구조 때문에 개발, 생산, 안전관리 비용이 저렴하고, 개발 및 제작기간이 짧다. 하이브리드 로켓의 출력제어는 산화제 유량 통제가 가능하기 때문에 로켓의 추진력 증단, 재시동 등이 고체·액체연료 로켓에 비해 손쉽게 이루어진다는 장점이 있다. 그리고 하이브리드 로켓은 소형과학로켓부터 중소형 위성 탑재 로켓까지 다양한 크기의 시스템 설계가 가능하며, 연료 및 재료가 일반 산업 재료를 사용하기 때문에 로켓 제조와 공급이 매우 안정적이다.

하이브리드 로켓추진기관의 연구는 전세계 10여개 국가에서 연구가 이루어지고 있으며 그 중 미국과 일본에서 가장 활발한 연구가 진행되고 있다. 미국에서는 이미 상업화에 성공한 Scaled Composites사의 Space Ship-Two를 포함해 Lockheed Martin사, SpaceDev사가 대형 프로젝트를 진행 중에 있으며 상용화에 근접해 있다(Kim, 2012). 국내 로켓 발사체연구는 대부분 고체추진체에 기반한 중대형 로켓 개발에 집중되어 있다. 고체·액체연료 로켓 추진기관에 대한 연구는 국가 주도로 활발히 수행되고 있으나, 경제성과 안전성 면에서 많은 장점이 있는 소형 위성발사체 시장에 유리한 하이브리드 로켓추진기관에 관한 연구는 거의 이루어지고 있지 않고 있다. 현재 국내에서는 중소기업 및 대학 실험실 수준의 연구가 이루어지고 있을 뿐 응용연구나 실용 단계에 이르지 못하고 있다. 최근 (주)이노스페이스에서 이러한 하이브리드 로켓 추진체에 대한 기술을 확보하여 다양한 형태의 하이브리드 로켓을 개발하고 있으며, 기상청 국립기상과학원에서는 (주)이노스페이스와 공동 연구를 통해 처음으로 하이브리드 로켓기술을 이용한 기상조절용 로켓의 설계, 제작 및 활용을 위한 원천기술을 확보하였다.

## 2.1 기상조절용 하이브리드 로켓 제작방법 및 구성

### 2.1.1 기상조절용 하이브리드 로켓 제작방법

WMHR 개발을 위해 필요한 주요 기술은 국립기상과학원과 (주)이노스페이스가 공동으로 개발하였으며 주요 개발 내용 및 방법은 아래와 같다.

1) 연소탄 연소실험을 위해 연소탄의 점화 및 연소 특성을 파악하고 고압 연소기를 제작하여 연소 속도 관계식 도출한 후, 이 연소탄 탑재부를 로켓설계에 반영한다.

2) 고정식 지상연소 시험을 위해 로켓 모터의 추진 특성시험, 사출 장치시험, 연소탄 작동 특성시험 등을 수행에 기반한 지상 수직형 거치대의 제작 및 시스템 검증을 수행한다.

3) 비행고도 3 km, 비행거리 7 km의 성능을 가지는 로켓을 위해 로켓과 발사각 조절을 위한 발사각 조절형 발사대를 제작하였다.

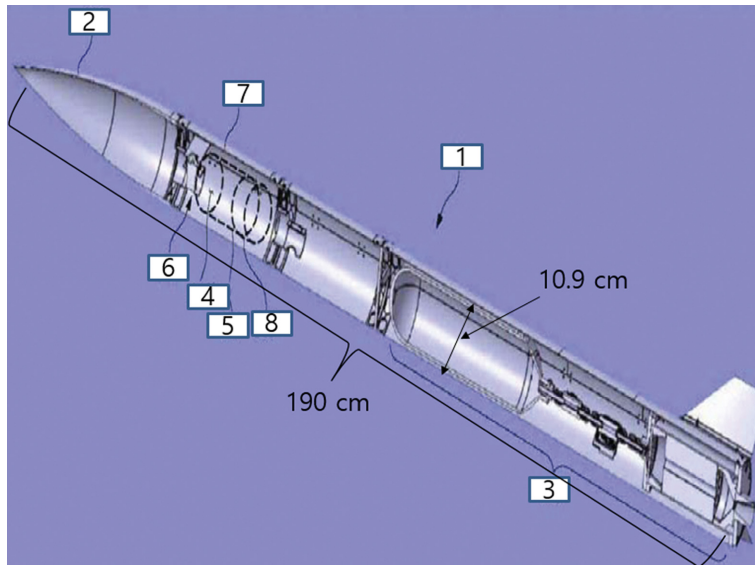
4) 기상조절실험 가능성을 위한 시험로켓 비행을 위해 적은 양의 연소탄(약 160 g)을 탑재한 시험로켓의 비행고도 1 km와 비행거리 0.5 km급 시험로켓 비행을 실시하였다. 이 시험로켓은 기상조절실험을 위한 하이브리드 로켓 활용의 가능성을 평가하였다. 이 시험로켓 비행에서 WMHR의 비행 안정성, 비행 제어 및 데이터 송수신, 사출장치 작동, 연소탄 작동 특성 검증 등 이 로켓의 비행성능을 종합 분석을 하였다.

5) 시험로켓 비행실험 후 개발로켓의 비행체 비행 시험은 600 g의 연소탄을 탑재한 비행고도 3 km, 비행거리 7 km급 하이브리드 로켓의 비행시험을 실시하였다. 이 로켓의 안정성, 비행제어 및 데이터 송수신, 사출 장치작동, 연소탄 점화특성을 검증하고 로켓의 성능에 대한 종합분석과 기상조절 적용 가능성을 알아보았다.

이와 같이 하이브리드 로켓을 기상조절에 활용하면 기존 고체·액체연료 로켓 보다 간단한 방법으로 그 지역에 발생하는 구름의 형태와 높이에 맞춘 최적화된 로켓 추진체계를 제작 할 수 있다. 이는 전세계에 처음으로 하이브리드 로켓을 기상조절에 적용한 첫 사례이며, 이 연구를 통해 습득한 다양한 경험과 노하우는 향후 국제적으로 민간에서 기상조절용 로켓 개발의 나아가야 하는 방향을 제시한 것에 대해 큰 의미 있는 결과이다.

### 2.2.2 기상조절용 하이브리드 로켓 주요 구성내용

Figure 1은 연소탄 사출식 WMHR 구성도를 나타낸 것이다. 본 연구를 통해 개발된 기상조절용 로켓은 산화제의 양을 조절하여 비행 및 연소탄이 사출되는 고도를 조절할 수 있으므로, 다양한 구름층에 대응이 가능하며, 원하는 고도에서 연소탄을 사출하여 효율적으로 기상조절의 대상구름층에 집중적으로 구름씨 살포



**Fig. 1.** Design of weather modification hybrid rocket (WMHR) (1: body, 2: nose cone, 3: propellants, 4: outlet for exhaust of flare, 5: eject type flare, 6: eject system, 7: cover of eject type flare, 8: parachute of flare).

가 가능하다. 또한, 연소탄에 장착되는 낙하산의 크기 조절을 통하여 연소탄 낙하 속도를 조절할 수 있으며, 그에 따라 구름씨 물질의 살포시간 및 살포 농도를 조절할 수 있는 장점이 있다. 사출식 연소탄의 구조는 필요에 따라서 용량을 용이하게 조절할 수 있게 구성하였고, 필요에 따라서 구름씨 물질의 살포량과 살포시간 등을 조절할 수 있다. 이 로켓의 특징은 기존 로켓 본체에서 연소탄을 사출하여 원하는 구름층에 구름씨 살포가 용이하게 하였고, 사출된 연소탄에 낙하산이 있어 최대한 연소탄의 낙하 속도를 늦추어 최대한 오래 동안 구름씨가 목표로 하는 구름 내부에서 살포가 잘 이루어지도록 설계하였다. 로켓본체는 상하로 긴 원통 구조를 가지며, 상단에는 노즈콘이 결합된다. 이러한 로켓본체는 하단으로부터 추진력을 제공하는 로켓추진부 즉, 로켓모터와 로켓회수용 낙하산, 사출식 연소탄, 통신모듈이 순차적으로 수용되어 설치될 수 있다.

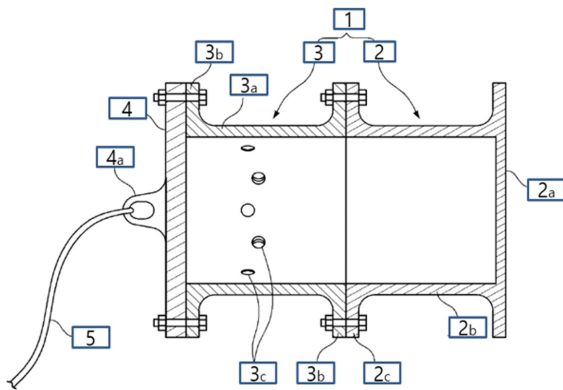
사출식 연소탄의 수용부에는 연소탄 사출을 위한 연소탄 배출용 출구가 있다. 그리고, 연소탄 수용부의 상부에는 통신모듈 지지부가 설치되었고 이는 로켓본체의 내주에 밀착되어 원형 메인프레임의 중앙에서 하부로 연장되는 중심프레임과 연결하였다. 이때 중심프레임과 작동모터를 지지하는 지지브라켓이 결합된다. 또한 연소탄 배출용 출구에는 출구 덮개가 외측에서 덮도록 결합되며, 출구 덮개는 복수의 자석에 의해서 로켓본체의 외측에 밀착 결합되어 연소탄 배출용 출구를 덮은 상태를 유지할 수 있게 하였다. 특히, 이 연소탄은 구름씨 물질이 내부에 채워지는 챔

버 구조를 가지며, 연소탄용 낙하산이 로프에 의해 연결되게 하였고 이 연소탄의 구름씨 물질의 착화를 위한 연소탄 점화기와 연소탄의 낙하궤적을 추적하기 위한 연소탄용 GPS 모듈을 설치하였다. 연소탄 점화기는 연소탄이 로켓 본체에서 분리될 때, 자동으로 점화되도록 설정되었다. 이를 위해 연소탄이 로켓 본체와 분리 상태를 감지하는 감지 스위치(센서)를 포함하였다. 이 감지 스위치의 감지 신호에 따라서 연소탄 점화기의 점화 동작이 수행되도록 설정하였다.

로켓모터는 점화 시 연소하면서 추진력을 발생시킬 수 있는 연료와 연소실로 구성했고, 고분자물질인 고체연료가 사용될 수 있다. 이 경우 연소실 및 고체연료의 상부에 산화제 탱크가 설치되며, 점화 동작 시 산화제 탱크의 산화제를 연소실로 공급하여 연소실의 고체연료를 점화시켜 추진력을 얻을 수 있게 하였다.

### 2.3 기상조절용 하이브리드 로켓의 구름씨 연소탄 제작기술

Figure 2의 WMHR의 구름씨 연소탄은 국내 (주) GBM에서 개발하였다. 기본적으로 연소탄을 점화하여 연소과정이 이루어질 수 있게 로켓에 알맞은 연소실 챔버를 제작하였다. 이 챔버 내에서는 연소되면서 구름씨를 살포할 수 있게 하였다. 구조적으로는 메인 챔버와 연장챔버로 나누어 향후 연소탄의 구름씨를 추가할 수 있게 하였다. WMHR의 연소탄 점화를 위해 점화기를 설계 제작하였다. 점화 형식을 파이로테크닉(불꽃점화) 방식, 점화제는 KNSB ( $KNO_3$ -Sorbitol),



**Fig. 2.** Design of cloud seeding flare of weather modification hybrid rocket (WMHR) [1: flare body, 2: main chamber of flare (2a: main chamber of flare bottom, 2b: main chamber of flare outside, 2c: main chamber of flare combined flange), 3: extended chamber of flare (3a: extended chamber of flare outside 3b: extended chamber of flare combined flange, 3c: extended chamber of flare outlet), 4: flare body entrance cover of flare body, 5: connected rope between flare body and parachute].

점화원은 NiCr 발열선과 배터리 타입으로 구성하였다. 점화 지연 시간은 100 ms로 제작하였고 로켓의 고압

연소기는 내열온도 2500 K, 연소시간은 60 s, 내열재 소재는 카본, 연소기 길이는 300 mm, 내경은 13 mm, 분사 노즐 개수는 8개로 설계 제작하였다.













새로 개발된 WMHR의 연소탄을 실험하기 위해 연소탄 점화와 연소특성 실험을 하였다. 연소탄 연소속도는 약  $1\sim 4\text{ mm s}^{-1}$ , 연소 분사량은  $5\sim 20\text{ g s}^{-1}$ , 연소실 압력에 따른 연소탄 점화 특성실험을 하였다. Table 1은 연소탄 연소실 직경에 따른 연소시험 결과이다. 연소탄 연소실 노즐 직경이 18 mm인 경우 9.1 s, 16 mm인 경우 8.3 s, 14 mm인 경우 7.0 s의 연소시간을 보였다. 약 600 g의 구름씨 물질을 살포하기 위해서는 최대 120 s에서 최소 30 s 시간이 필요하여 WMHR의 비행시간, 연소탄의 낙하시간 등을 고려하여 분사노즐의 직경은 14 mm로 하고 5개의 노즐홀로 구성하였다.

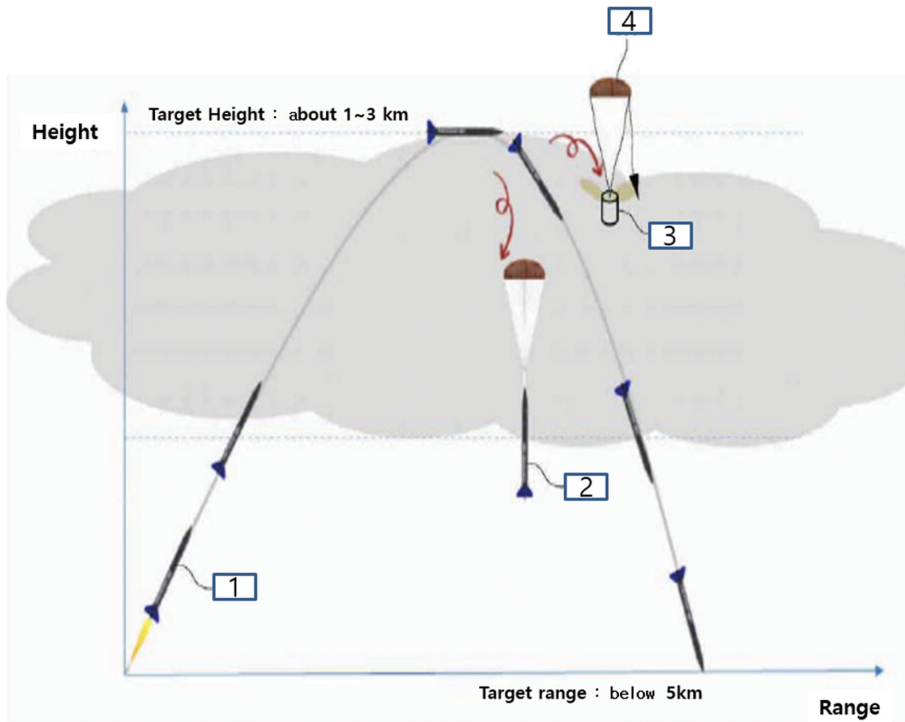
### 3. 기상조절용 하이브리드 로켓 실험결과

#### 3.1 기상조절용 하이브리드 로켓 성능테스트

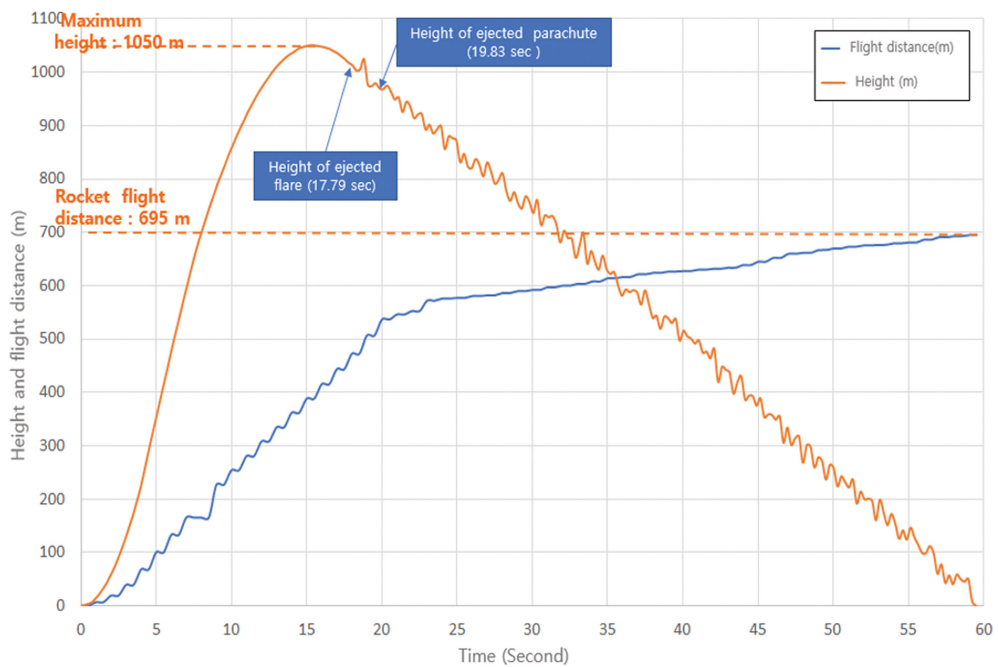
Figure 3은 WMHR을 이용한 기상조절실험 개념도이다. 이 개념도처럼 표적이 된 구름에 도달하면 구름씨 물질 살포를 위해 연소탄을 사출하게 하였다. 이때 구름씨 물질 살포 연소탄과 로켓에 연결된 낙하산에 의해 체공시간이 길어져 안전하게 지면에 도달할

**Table 1.** Results of combustion of cloud seeding flare for weather modification hybrid rocket (WMHR).

Diameter of nozzle	Combustion test result of cloud seeding flare				Combustion time [Second (s)]
Nozzle Diameter 18 mm					9.1
Nozzle Diameter 16 mm					8.3
Nozzle Diameter 14 mm					7.0

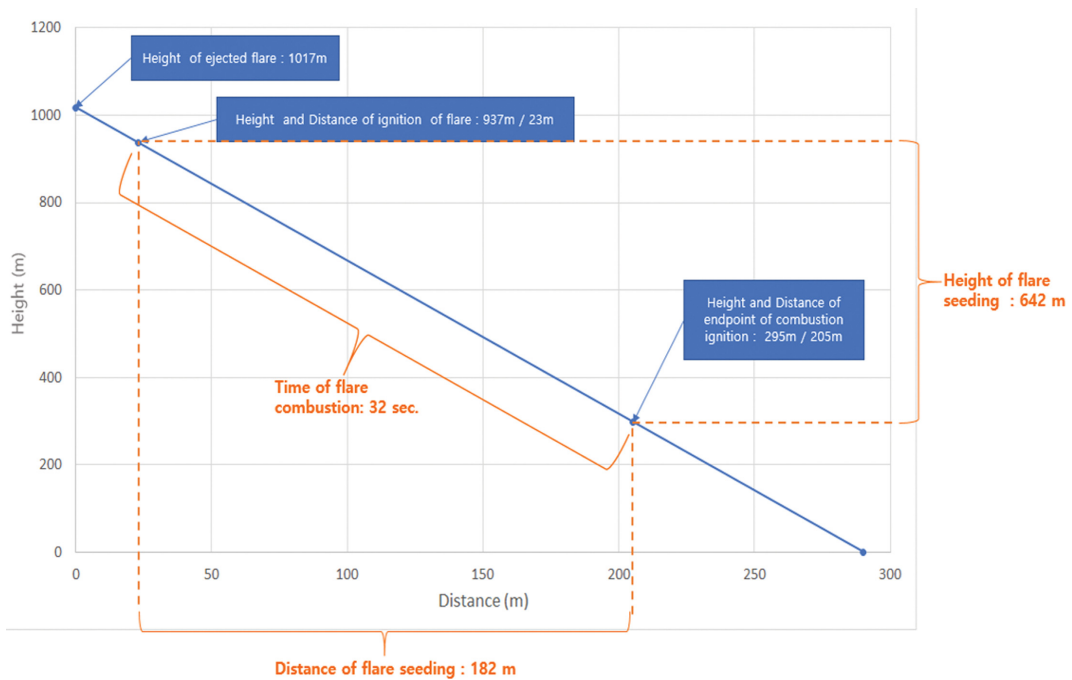


**Fig. 3.** Experiment conception of weather modification hybrid rocket (WMHR; 1: eject rocket, 2: rocket body, 3: eject type flare, 4: parachute of flare).



**Fig. 4.** Observational trajectories of weather modification hybrid rocket (WMHR) for cloud seed experiment by parachute at Saemangeum in 21 Dec. 2019 (sec: second).





**Fig. 5.** Calculation of the distance of the ejected cloud seeding flare from weather modification hybrid rocket (WMHR) for cloud seed experiment at Saemangeum in 21 Dec. 2019 (sec: second).

수 있으며 로켓은 회수하여 재사용할 수 있다. Figure 4는 WMHR에서 연소탄 사출을 통한 구름씨 물질 살포실험 비행 궤적 결과이다. 이 실험은 2019년 12월 21일 전라북도 새만금지역에서 수행되었다. 이 시험 로켓은 최고 1,050 m 고도까지 도달하였고 낙하산과 연소탄이 약 1 km에서 원활히 사출되었다. 비행거리는 695 m이었고, 로켓 비행시간은 약 60 s 정도였다. 연소탄 사출 시점은 발사 후 17.79 s였고, 낙하산 사출시점은 19.83 s였다.

Figure 5는 WMHR의 시험에서 연소탄 사출고도 및 사출된 연소탄의 이동거리, 연소 시간을 나타낸 것이다. 이 시험 로켓 실험에서 고도 약 1,017 m에서 연소탄이 사출되었고, 연소탄 점화지점은 고도 937 m 이고, 약 32 s 간 구름씨 살포 후 고도 295 m에서 연소가 종료되었다. 사출된 연소탄의 수평 이동거리는 약 182 m, 수직이동거리는 642 m였다.

### 3.2 기상조절용 하이브리드 로켓을 이용한 인공강우 실험 사례 연구

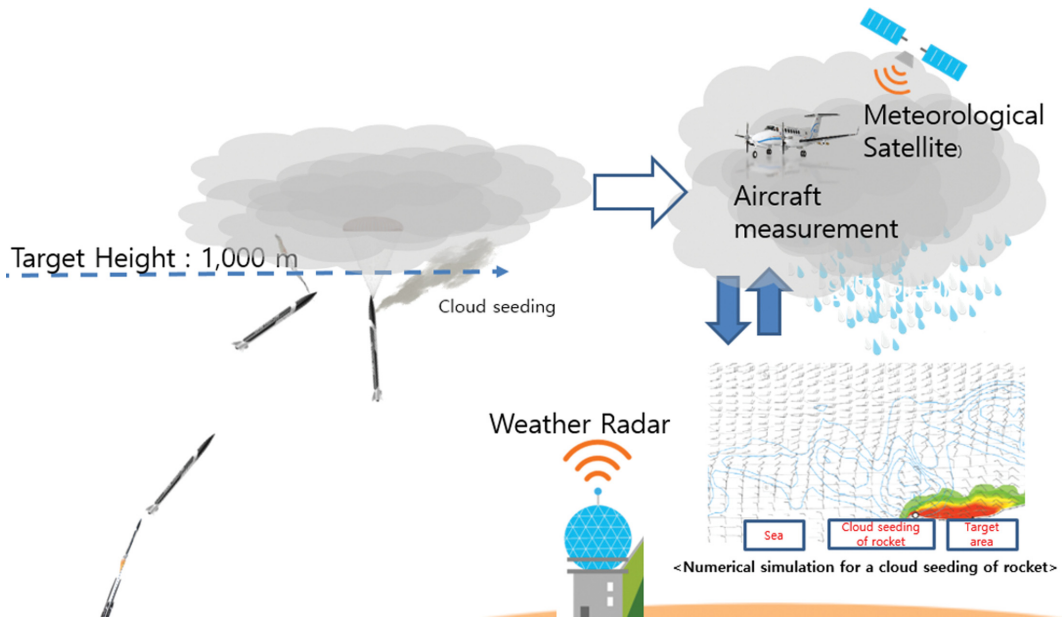
#### 3.2.1 인공강우 실험 장소 선정 방법

3.1절의 Fig. 3과 같은 방식으로 새만금지역에서 시험로켓을 성공적으로 수행했지만 낙하산에 매달린 연소탄이 바람에 의해 민가쪽으로 떨어져 화재가 발생할 수 있는 가능성이 시험로켓 실험에서 파악되었다.

따라서 국내 실험지역 화재예방을 위해 연소탄을 사출하지 않고, 로켓본체 내 연소탄을 점화하여 구름씨 물질을 살포하는 기술을 다시 개발하였다(Fig. 6). 즉 낙하산에 매달린 로켓이 낙하하면서 구름씨 물질을 살포하는 실험기술을 설계하여 실험하였다. 낙하산 기반 로켓본체 내 연소탄 점화를 통한 구름씨 물질의 살포설계에서도 풍속이 강할 경우에 로켓의 낙하지점이 넓어져서 국내 실험 장소를 찾을 수가 없었다. 로켓 운용고도 1 km로 풍속에 따른 도착 지점의 낙하거리를 사전 계산하였다. 수평적으로 최대 반경 639 m의 범위가 필요하였다. 국내에서 이러한 조건의 로켓 실험을 할 수 있는 장소는 새만금 외에 찾을 수 없어 새만금지역을 대상으로 로켓 허가 신청을 하였으나 새만금 지역의 개발사업 추진에 따라 최종적으로 로켓 실험 승인을 받지 못하였다. 이에 타 지역을 섭외하던 중 한국항공우주연구소와 협의하여 전라남도 고흥 지역에 있는 항공우주연구소 비행시험장 내 활주로에서 로켓 실험의 수행에 대한 승인을 받았다.

#### 3.2.2 인공강우 실험방법 및 기상현황

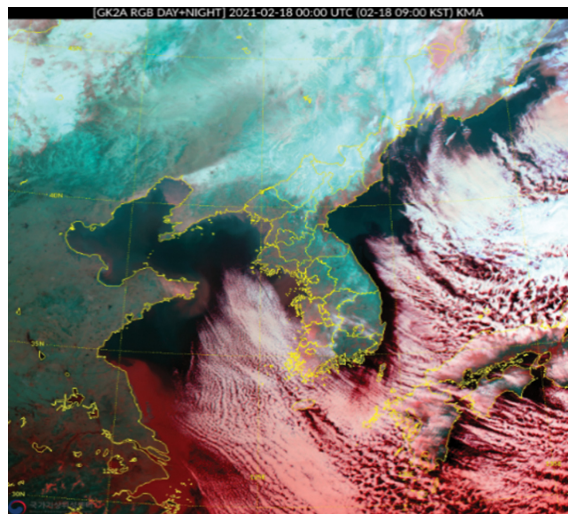
Figure 6은 한국항공우주연구소의 고흥항공센터에서의 로켓 실험 수행방법을 간략하게 모식화 하였다. 이 고흥항공센터는 해안가에서 위치하고 있고 활주로의 길이가 약 700 m였다. 그래서 사전 로켓 실험 시물



**Fig. 6.** Design of cloud seeding experiment by weather modification hybrid rocket (WMHR) with aircraft measurement at Goheoung in Feb. 18 2021.

레이션에서 최대 639 m의 실험 범위에 만족하여 고흥항공센터에서 실험 할 수 있게 되었다. 단 로켓이 바다로 빠지지 않게 하기 위해 풍향을 고려한 실험 수행되었다. 또한 이번 로켓 실험에서는 기상항공기와 연계하여 지상에서는 로켓 실험을 수행한 후 시차를 두고 항공관측을 연속적으로 수행하였다. 이는 국내에서 처음 시도하는 방법이었다. 로켓발사와 기상항공기 운항시간의 차이를 두어 같은 지역 내 로켓발사 실험이 항공기 운항에 영향이 없게 하였다.

2021년 2월 18일 전라남도 고흥지역을 대상으로 항공기와 로켓과의 연계실험을 수행하였다. 실험기간은 2021년 2월 18일 8시 25분에서 11시 53분 사이에 이러한 연계 실험이 실시되었다. 운저고도는 약 1 km 였다. 구름은 약한 층적운형이었고, 지상에서 관측한 운량은 6할이었다. 항공기는 로켓발사지역이 아닌 목표지역인 고흥 부근의 풍하지역 상공을 9시 30분에 도착하였고, 로켓은 9시 33분에 발사하였다. 이후 로켓을 회수하였고 항공기는 11시 53분까지 고흥 및 고흥 앞 바다를 관측 후 회항하였다. 실험일인 2월 18일에는 한반도가 동고서저의 기압배치를 이루고 있었고, 북서풍에 의한 한기 유입이 발생하였다. Figure 7은 2월 18일 9시 위성 구름사진이다. 서해상의 해기차에 의해 생성된 운정고도는 1~2 km 사이였고, 층적운계열의 구름대가 남동진하고 있음을 보여주고 있다. 해기차에 의해 하층운에서 발달하는 구름이라 운량은 적었다.



**Fig. 7.** Image of meteorological satellite (GK2A) of Korean Meteorological Administration (KMA) for cloud seeding experiment by weather modification hybrid rocket (WMHR) with the aircraft measurement at Goheoung in Feb. 18 2021.

**3.3 인공강우 실험결과 및 원인분석**  
**3.3.1 인공강우 구름씨 확산 수치모의**

Figure 8은 WMHR에서 구름씨 물질살포 후의 이 물질의 확산경로를 수치모의한 결과이다. 북서풍의 영



OUTPUT FROM WRF V3.8 MODEL + MORRISON MP

IN/BO data: LDAPS analysis from 2021-02-17\_21:00:00 to 2021-02-18\_09:00:00 UTC

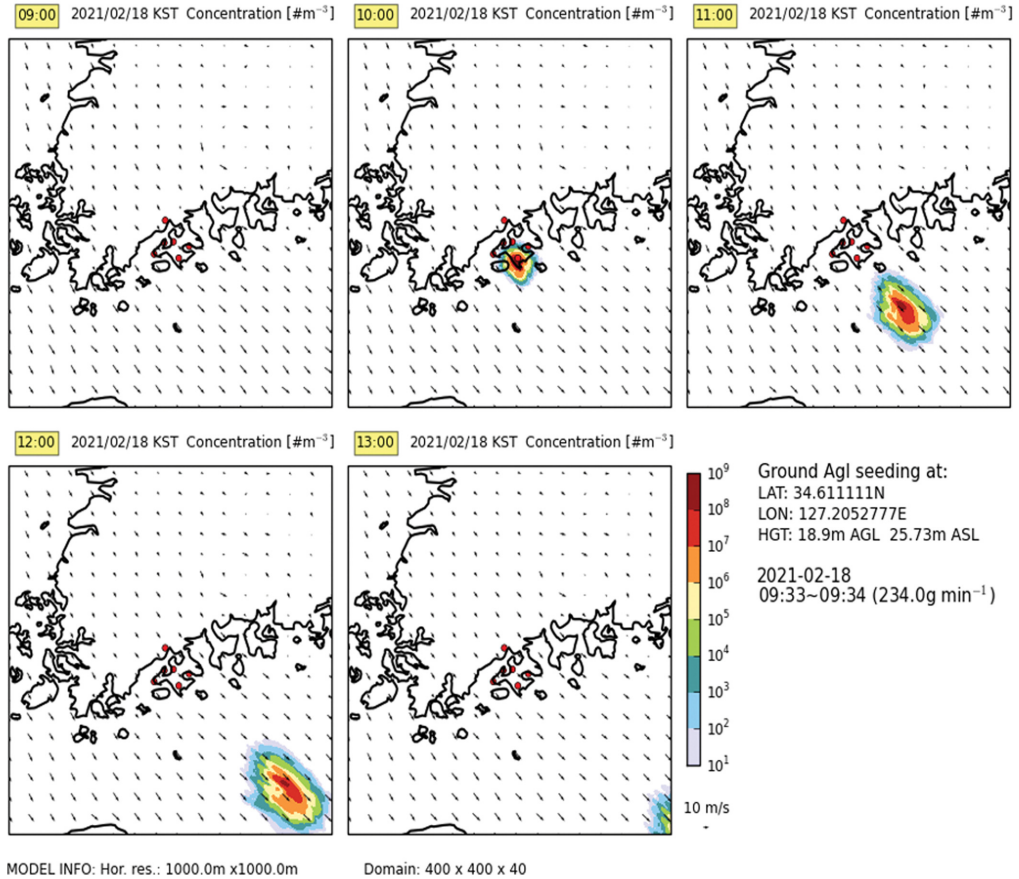


Fig. 8. Dispersion of cloud seeding material by numerical model for cloud seeding experiment by weather modification hybrid rocket (WMHR) at Goheung in Feb. 18 2021. [red dot: main auto weather station (AWS) around WMHR launch area].

향으로 구름씨 물질이 바다로 확산되었음을 보여준다. Figure 9는 전라남도 고흥지역에서의 로켓 실험 당시 지상 강우관측 현황이다. 구름씨 살포범위내에서는 지상에 강수가 관측되지 못하였다. 현장실험 시 수치모델에서 예상했던 것 보다 운량이 많이 적어서, 로켓에 의해 뿌려진 구름씨 물질에 의한 빙정핵화가 거의 이루어지지 않은 것으로 사료된다. 하지만 전라남도 고흥지역의 주변에 실험효과로 여겨지는 약한 레이더 반사도가 관측되었다. 이 레이더 반사도는 약 500 m 고도에서 관측되었고 약한 눈구름의 형태를 유지하고 있었다.

3.3.2 기상항공기를 이용한 인공강우 실험검증

레이더에 의해 원격으로 관측된 구름을 대상으로 기상항공기가 직접 현장에서 관측이 이루어졌다. Figure

10은 기상항공기가 전라남도 고흥 지역의 이동한 향로이다. 내륙에서의 이동경로는 하늘색이고, 해안가에서의 이동경로는 보라색, 바다 위의 이동경로는 청색으로 나타내었다. 기상항공기의 관측방법은 내륙지역과 해안가에서는 약 800 m에서 1,000 m 사이의 고도에서 지그재그로 관측하였고, 먼 바다로 나가서는 약 1,200 m에서 1,400 m 사이의 고도에서 관측하였다. 이는 내륙에서 최대한 로켓에 의해 구름씨인 요오드화은의 확산 범위 내에서 관측하고자 한 것이고, 해상으로 갈수록 높은 고도에서 구름 및 빙정의 변화를 관측하고자 하였다.

Figure 11(left)는 기상항공기에서 관측된 구름응결핵의 수농도를 관측한 자료이다. 구름응결핵 수농도는 내륙과 해상에서 300 cm<sup>-3</sup> 이하로 관측되었고 반면, 해안가에서는 500~700 cm<sup>-3</sup>으로 상대적으로 높은

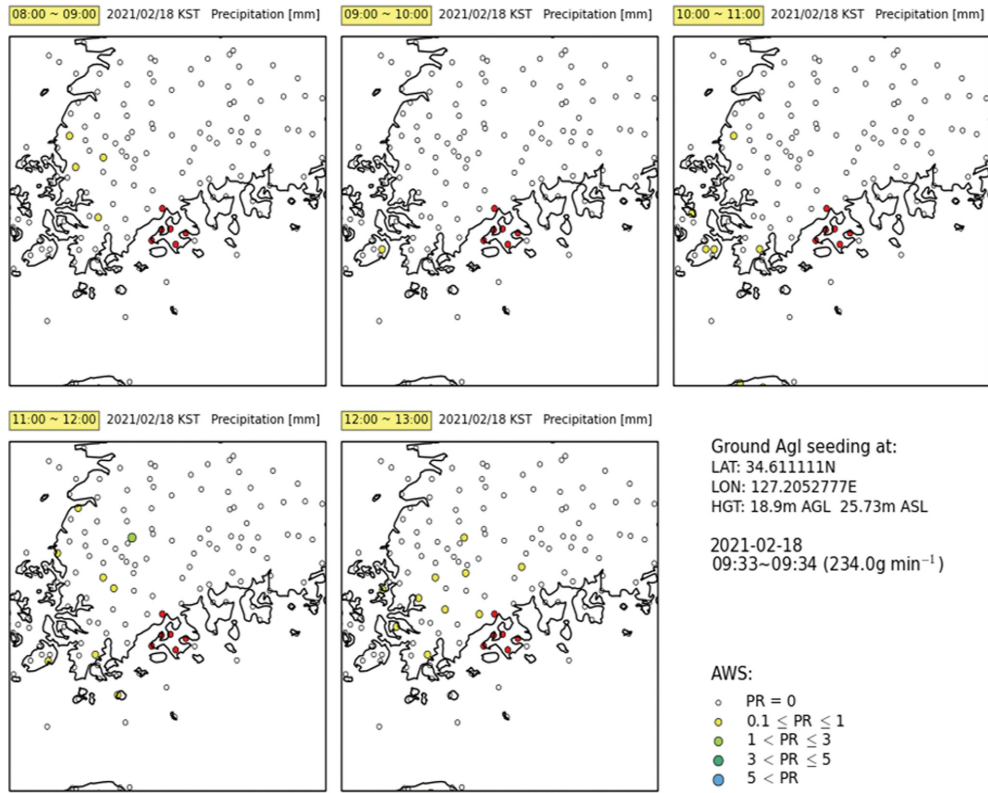


Fig. 9. Rainfall observation after cloud seeding experiment by weather modification hybrid rocket (WMHR) at Goheung in Feb. 18 2021. [red dot: main auto weather station (AWS) around WMHR launch area].

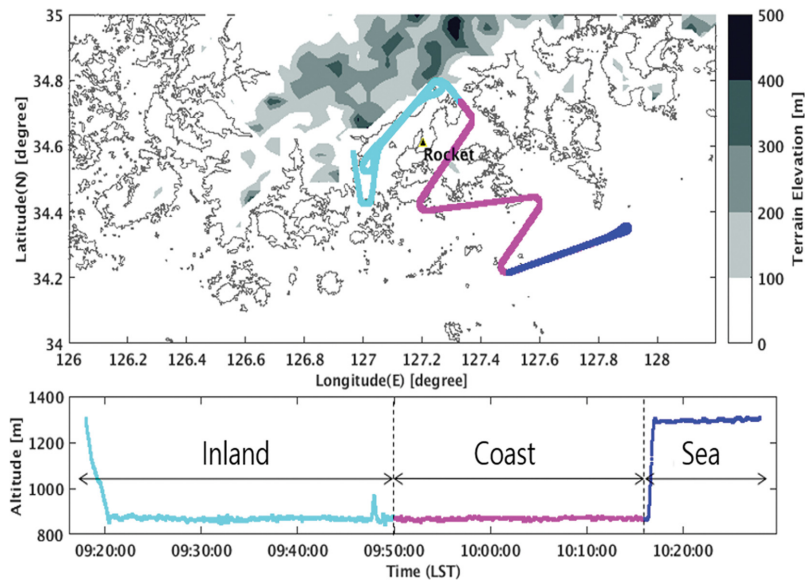
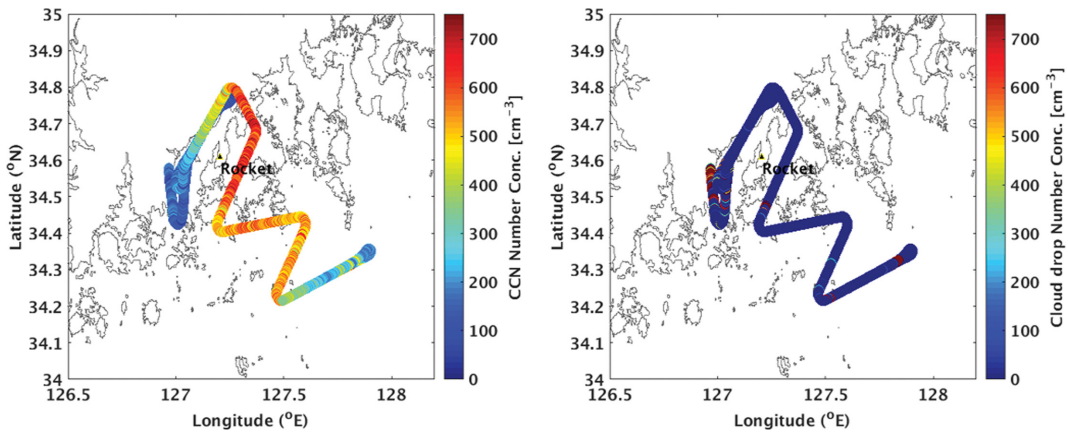
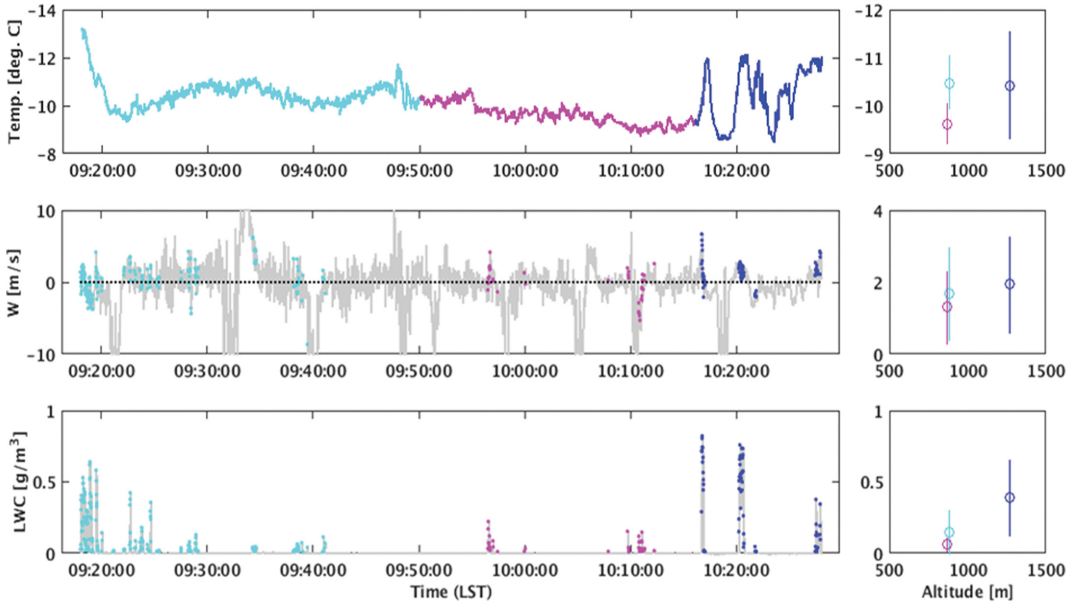


Fig. 10. Trajectories of the aircraft measurement during a cloud seed experiment by weather modification hybrid rocket (WMHR) at Goheung in Feb. 18 2021 (sky blue color: inland area, purple color: coast area, and blue color: sea area).



**Fig. 11.** Cloud nuclei (left) and drop (right) number concentration of the aircraft measurement during a cloud seed experiment by weather modification hybrid rocket (WMHR) at Goheoung in Feb. 18 2021.



**Fig. 12.** Temperature (top panels), vertical velocity (middle panel), and liquid water concentration (bottom panel) of the aircraft measurement during a cloud seed experiment by weather modification hybrid rocket (WMHR) at Goheoung in Feb. 18 2021 (sky blue color: inland area, purple color: coast area, and blue color: sea area).

수농도로 나타났다. 로켓발사 주변에서 구름응결핵 수농도가 약  $700 \text{ cm}^{-3}$ 이 관측되었다. 그리고 먼 바다로 나갈수록 구름응결핵 농도가 작아지는 경향이 보였다. 특히 해상에서 급격히 구름응결핵 수농도가 줄어드는 것은 기상항공기 고도를 약 1,200 m로 상승시켜서 그 수농도가 낮게 관측된 것이다. Figure 11(right)는 기상항공기에서 구름입자의 수농도( $\text{cm}^{-3}$ )를 관측한 자료이다. 고흥지역에서 관측된 구름입자 수농도는 전

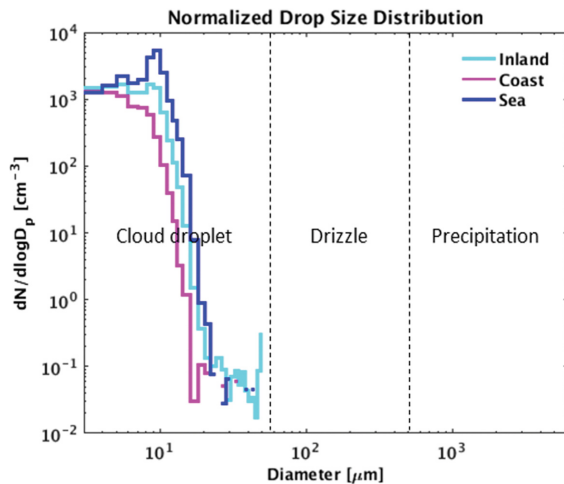
체 구간에서  $100 \text{ cm}^{-3}$  이하로 낮은 수농도가 관측되었다. 이는 로켓 실험 기간 동안에 운량이 적었음을 잘 보여주는 결과이다.

Figure 12는 기상조절용 로켓 실험 시 기상항공기로 관측된 기온(상), 상승속도(중), 액체수함량(Liquid Water Contents; 하)이다. 하늘색은 내륙이고, 분홍색은 해안가, 파랑색은 해상 지역을 나타내고 있으며, 육상과 해상에서 구름의 액체수함량이 상대적으로 많

**Table 2.** Temperature, wind speed, wind direction, vertical velocity, and liquid water content at different operating altitudes of the aircraft observed inland, coast, and sea during a cloud seed experiment of weather modification hybrid rockets (WMHR) at Goheoung in Feb. 18 2021.

Location of aircraft	Inland	Coast	Sea
Altitude (m)	833 ( $\pm 60$ )	868 ( $\pm 4$ )	1,272 ( $\pm 90$ )
Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	-10.5 ( $\pm 0.56$ )	-9.6 ( $\pm 0.43$ )	-10.4 ( $\pm 1.13$ )
Vertical velocity ( $\text{m s}^{-1}$ )	1.68 ( $\pm 1.31$ )	1.31 ( $\pm 1.01$ )	1.94 ( $\pm 1.35$ )
Liquid water contents ( $\text{g m}^{-3}$ )	0.15 ( $\pm 0.16$ )	0.06 ( $\pm 0.05$ )	0.39 ( $\pm 0.27$ )

았음을 알 수 있다. Table 2는 기상조절용 로켓 실험 시 기상항공기로 내륙, 해안가, 해상에서 관측된 기상항공기 운항고도별 기온, 풍속, 풍향, 상승속도, 액체수함량의 관측기간별 평균값이다. 풍향과 풍속은 기상항공기의 일시적인 관측장비의 오류로 측정되지 못하였다. 상승속도는 해상에서 평균  $1.94 \text{ m s}^{-1}$ 였고 액체수함량은  $0.39 \text{ g m}^{-3}$ 이었다. 상대적으로 지상보다 해상에 구름의 액체수함량이 많았다. 하지만 그 구름의 액체수함량이 인공강우 실험을 하기에는 절대적으로 운량이 적어 로켓에 의한 구름씨 살포효과는 나타나기 어려웠다. Figure 13은 구름, 이슬비, 강수 크기별 수농도 분포를 보여주고 있다. 구름입자의 최대 수농도는 약  $10 \mu\text{m}$  부근에서 관측되었고 그 이상의 입자크기에서는 급격히 수농도가 줄어들었음을 알 수 있다. 이는 로켓 실험의 효과를 얻을 수 있는 조건의 구름이 아니었음을 알 수 있다.



**Fig. 13.** Cloud droplet, drizzle, and precipitation number concentration at different operating altitudes of the aircraft observed inland, coast, and sea during a cloud seed experiment by weather modification hybrid rocket (WMHR) at Goheoung in Feb. 18 2021 (sky blue color: inland area, purple color: coast area, and blue color: sea area).

### 3.3.3 인공강우 실험결과에 대한 원인분석

이 로켓을 이용한 인공강우실험 검증결과가 미흡하였다. 그 원인으로 첫째, 구름씨 살포 범위내 현장에서의 기상상황이 수치모델에서 예상 했던 것 보다 운량이 많이 적어서 로켓에 의해 뿌려진 구름씨 물질에 의한 빙정핵화가 거의 이루어지지 않은 것이다. 이는 목표지역으로의 예상된 구름의 유입이 적어서 실제적인 실험이 이루어지지 않았다. 즉, 운량 자체가 적어서 실험에 적합한 조건이 되지 않아 실험검증이 미흡한 가장 중요한 원인이다. 둘째로 운량이 적더라도 목표하는 구름의 구름입자 수농도가 많을 경우 인공강우 실험의 결과가 잘 검증이 될 수 있다. 하지만 이번 실험의 경우 목표지역의 구름에 대한 기상항공기에서 관측된 구름입자 수농도는 전체 비행구간에서 비해 낮은 수농도가 관측되었고 이는 구름씨가 작용 할 구름입자 수농가 매우 적어서 목표구름 자체가 인공강우실험에 미흡하였다. 이러한 로켓을 이용한 인공강우실험은 지상 인공강우실험 보다 효과적으로 구름 내 구름씨를 살포 할 수 있지만 목표지역의 구름 유입과 구름 내 구름입자 수농도에 대한 사전예측이 실패 할 경우 인공강우실험이 잘 이루어질 수 없었다.

로켓기술의 활용측면에서 부족한 점은 로켓을 원하는 고도에서 충분히 지속적으로 구름씨를 살포가 되지 않았다. 적은 운량의 구름이 유입되고 있고, 목표로 하는 구름에 대한 로켓의 발사 시간과 구름씨 살포고도에 대한 정확한 정보를 결정하는 것이 현장에서 매우 어려웠다. 따라서 이에 대한 적절한 현장 기상관측기술이 확보되어야 보다 활용도 높은 로켓실험이 이루어질 수 있을 것이다.

전체적으로 요약하면, 로켓을 이용한 인공강우실험을 효과적으로 수행 방법은 아래와 같다.

1) 구름씨 물질의 선택과 특성분석: 효과적인 응결핵 또는 얼음핵 형성 능력을 가진 물질을 선택해야 한다. 요오드화은과 같은 빙정을 만들 수 있는 물질의 최적온도와 과냉각수적 등에 대해 현장에서 적절히 관측할 수 있는 기술이 있어야 한다.

2) 구름씨 살포 타이밍: 구름의 발달 단계와 기상



조건을 고려하여 적절한 타이밍에 로켓을 발사해야 한다. 예를 들어, 구름이 충분히 발달했는지에 대한 객관적 구름물리 분석기술이 있어야 이러한 적절한 로켓 실험 타이밍을 선택할 수 있다.

3) 구름씨 살포 위치와 고도: 로켓을 통해 살포되는 물질이 구름 내의 적절한 위치와 고도에 도달해야 한다. 구름의 상부에 물질을 살포하여 구름 전체에 물질이 퍼질 수 있도록 하는 것이 중요한데 이를 위해서는 고해상도의 구름관측이 필요하다.

4) 기상 조건: 기상 조건, 특히 구름의 온도와 습도, 지상의 기온 및 바람 패턴 등을 잘 고려해야 한다. 이러한 기술은 수치모의기술과 현장관측기술이 종합적으로 잘 이루어질 때 가능하므로 이를 위한 전문적인 기술을 개발해야 한다.

5) 로켓 기술: 로켓의 발사 및 제어의 정확성, 구름씨 살포시스템의 효율성, 그리고 사용하는 물질의 살포능력도 중요하다. 현재 보다 더 정밀한 살포와 효율성이 높은 로켓기술개발이 이루어지면 더 효과적인 로켓기반 인공강우실험이 이루어질 것이다.

#### 4. 결 론

기상청 국립기상과학원에서는 국내에서 처음으로 기상조절용 하이브리드 로켓(WMHR)을 독자적으로 개발하였다. 러시아, 중국 등 기상조절용 로켓을 주로 사용하는 국가에서는 고체연료 로켓을 사용하기에 민간에서 활용하기에 많은 위험성이 있다. 이번 연구를 통해 확보된 기술은 하이브리드 로켓 특성상 안정적이고 대량생산이 될 경우 경제성을 확보 할 수 있음을 보였다. 국내에서 첫 개발된 WMHR의 구조, 제작, 연구실 내 실험, 현장실험 등을 체계적으로 수행하여 그 가능성을 확인하였다. 특히 로켓 내 인공강우 구름씨 물질을 살포하는 방법에 있어 낙하산을 로켓본체에 달아 인공강우 구름씨 물질을 살포하는 방법을 택하여 기상청 기상항공기와 협업하여 실험을 수행하였으나 운량 및 기상조건이 예측과 달라 뚜렷한 인공강우 효과를 보지 못하였다. 하지만 국내에서 처음으로 WMHR과 기상항공기의 협업을 통한 인공강우실험 방법 등에 대한 많은 경험과 현장에서의 노하우 등을 확보할 수 있었다. 향후에 기술이 더 향상될 경우 WMHR 뿐 만 아니라 기상관측 센서를 높은 고도에 낙하 할 수 있어 많은 기상, 기후 및 구름물리연구 분야(Cha et al., 2023)에 응용이 가능할 것이다. 한편, 국내에서는 민간인이 로켓 실험을 할 수 있는 지역이 없어 이러한 로켓기술 개발을 위해서는 민간인 로켓 실험을 위한 기초 인프라가 확보되어야 향후 더 많은 로켓활용기술이 민간에서 개발될 수 있을 것으로 기대한다.

#### 감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 기상조절 및 구름물리 연구(KMA2018-00224)의 지원을 받았습니다. 또한 기상조절용 하이브리드 로켓의 연소탄을 제작해주신 (주) GBM과 로켓 실험에 협조해주신 한국항공우주연구원의 고흥항공센터에 감사드립니다.

#### REFERENCES

- Brian, E., N. A. Favorito, and K. K. Kuo, 2006: *Oxidizer-type and aluminum-particle addition effects on solid-fuel burning behavior*. 42nd AIAA/ ASME/SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 4676, doi:10.2514/6.2006-4676.
- Bangsund, D. A., and F. L. Leistriz, 2019: *Economic impacts of cloud seeding on agricultural crops in North Dakota*. North Dakota Atmospheric Resource Board, 52 pp.
- Cha, J. W., and Coauthors, 2019: Analysis of results and technics about precipitation enhancement by aircraft seeding in Korea. *Atmosphere*, **29**, 481-499, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.4.481 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, H. J. Koo, B. Y. Kim, M. Belorid, H. J. Hwang, M. H. Kim, K.-H. Chang, and Y. H. Lee, 2023: Analysis of rain drop size distribution to elucidate the precipitation process using a cloud microphysics conceptual model and in situ measurement. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **59**, 257-269, doi:10.1007/s13143-022-00299-w.
- Dyer, J., E. Doran, Z. Dunn, K. Lohner, C. Bayart, A. Sadhwani, G. G. Zilliac, B. Cantwel, and A. Karabeyoglu, 2007: *Design and Development of a 100 km Nitrous Oxide/Paraffin Hybrid Rocket Vehicle*. Joint Propulsion Conference and Exhibit, 5362 pp.
- Gordon, S., and B. J. McBride, 1994: Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications. NASARP-1311, 64 pp [Available online at <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19950013764/downloads/19950013764.pdf>].
- Hong, J.-H., and J.-H. Hwang, 2006: Analysis on the change of regional vulnerability to flood. *J. Environ. Policy*, **5**, 1-18 (in Korean with English abstract).
- Jung, W. S., K.-H. Chang, J. W. Cha, J. M. Ku, and C. K Lee, 2022: Estimation of available days for a cloud seeding experiment in Korea. *J. Environ. Sci. Int.*, **31**, 117-129, doi:10.5322/JESI.2022.31.2.117 (in Korean with English abstract).
- Kevin, L., J. Dyer, E. Doran, Z. Dunn, and G. Zilliac, 2006:

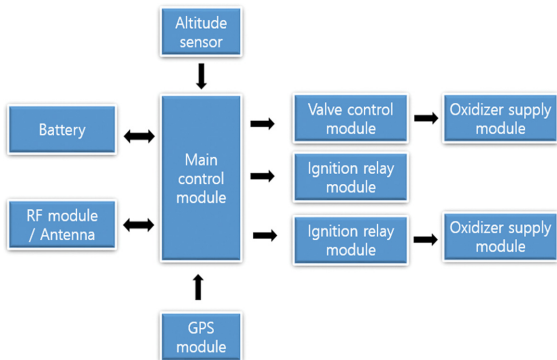


- Fuel regression rate characterization using a laboratory scale nitrous oxide hybrid propulsion system.* 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 16 pp.
- Kim, B.-S., S.-J. Kim, H.-S. Kim, and H.-D. Jun, 2010: A impact assessment of climate and landuse change on water resources in the Han River. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **43**, 309-323, doi:10.3741/JKWRA.2010.43.3.309 (in Korean with English abstract).
- Kim, B.-Y., J.-W. Cha, W. Jung, and A.-R. Ko, 2020a: Precipitation enhancement experiments in catchment areas of dams: Evaluation of water resource augmentation and economic benefits. *Remote Sens.*, **12**, 3730, doi:10.3390/rs12223730.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, A. R. Ko, W. S. Jung, and J. C. Ha, 2020b: Analysis of the occurrence frequency of seedable clouds on the Korean peninsula for precipitation enhancement experiments. *Remote Sens.*, **12**, 1487, doi:10.3390/rs12091487.
- Kim, H. C., S. J. Kim, J. P. Lee, G. H. Kim, H. J. Moon, H. G. Sung, and J. K. Kim, 2009: A local regression rate measurement technique for hybrid rocket fuel. *Asia-Pac. Int. Symp. Aerospace Technol.*, 23-25.
- Kim, J. G., 2012: Development of combustion technology of the hybrid rocket propulsion systems. Bridging researcher program report of National Research Foundation of Korea, 163 pp (in Korean).
- Kim, S.-J., and Coauthors, 2008: Ground Firing Test Facility of Hybrid Rocket Engine. *J. KSPE*, 251-254 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, J.-T. Cho, G.-H. Kim, H.-C. Kim, K.-J. Woo, J.-P. Lee, H.-J. Moon, H.-G. Sung, and J.-K. Kim, 2009: Combustion characteristics of the paraffin-base hybrid rocket fuel. *J. KSPE*, 251-254 (in Korean).
- Koh, J. K., 2009: A study on vulnerability assessment to climate change in Gyeonggi-Do. *Policy Research*, 170 pp (in Korean).
- Lee, C. K., and Coauthors, 2010a: Estimation for the Economic Benefit of weather modification (Precipitation Enhance -ment and Fog Dissipation). *Atmosphere*, **20**, 187-194 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-P., G.-H. Kim, S.-J. Kim, H.-C. Kim, H.-J. Moon, H.-G. Sung, and J.-K. Kim, 2010b: A study in combustion characteristic with the variation of oxidizer phase in hybrid rocket motor using PE/N<sub>2</sub>O. *J. KSPE*, **14**, 46-53 (in Korean with English abstract).
- Marxman, G. A., C. E. Wooldridge, and R. J. Muzzy, 1964: Fundamentals of Hybrid Boundary Layer Combustion Progress in Astronautics and Aeronautics. 15th, AIAA, 485-522, doi:10.2514/5.9781600864896.0485.0522.
- Moon, K. H., J. S. Oh, S. J. Rhee, W. J. Choi, H. C. Kim, J. P. Lee, H. J. Moon, H. G. Sung, and J. K. Kim, 2012: Development of Hybrid Rocket (KHyrOc-II) with 1000 kgf Thrust level. *2012 KSPE spring conference*. 58-62 (in Korean).
- Pokharel, B., B. Geerts, X. Jing, K. Friedrich, K. Ikeda, and R. Rasmussen, 2017: A multi-sensor study of the impact of ground-based glaciogenic seeding on clouds and precipitation over mountains in Wyoming. Part II: Seeding impact analysis. *Atmos. Res.*, **183**, 42-57, doi:10.1016/j.atmosres.2016.08.018.
- Ro, Y. H., K.-H. Chang, Y.-K. Lim, W. S. Jung, J. W. Kim, and Y. H. Lee, 2024: Analysis of available time of cloud seeding in South Korea using radar and rain gauge data during 2017-2022. *J. Environ. Sci. Int.*, **33**, 43-57, doi:10.5322/JESI.2024.33.1.43 (in Korean with English abstract).
- Schmierer, C., M. Kobald, K. Tomilin, U. Fischer, and S. Schlechtriem, 2019: Low cost small-satellite access to spaceusing hybrid rocket propulsion. *Acta Astronautica*, **159**, 578-583.
- Tessendorf, S. A., and Coauthors, 2019: A transformational approach to winter orographic weather modification research: The SNOWIE Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **100**, 71-92, doi:10.1175/BAMS-D-17-0152.1.
- WMO, 2018: Peer Review Report on Global Precipitation Enhancement Activities. World Meteorological Organization, WWRP 2018-1, 129 pp.

## SUPPLEMENTARY

### 1. 기상조절용 하이브리드 로켓 통신/제어 모듈

Figure S1은 기상조절용 하이브리드 로켓을 제어하고 연소탄을 원하는 고도에 착화 시켜 사출하기 위한 제어기술과 산화제 양의 조절 및 제어를 통하여 로켓을 원하는 고도에서 원활히 운영하게 하는 H/W의 제어기술에 대한 각 모듈별 흐름도를 나타낸 것이다. 통신모듈은 전원공급을 위한 배터리, 지상국과의 교신을 위한 RF (Radio-Frequency) 모듈 및 안테나로 구성되며, 이 밖에도 산화제 공급밸브를 제어하기 위한 밸브 제어모듈, 로켓 모터의 점화기 착화 신호를 전달하기 위한 착화 릴레이 모듈, 고도 측정을 위한 고도센서, 연소탄 사출장치를 제어하기 위한 사출 릴레이 모듈, 로켓의 비행 궤적을 추적할 수 있는 GPS 모듈 및 메인 제어모듈을 구성하였다.

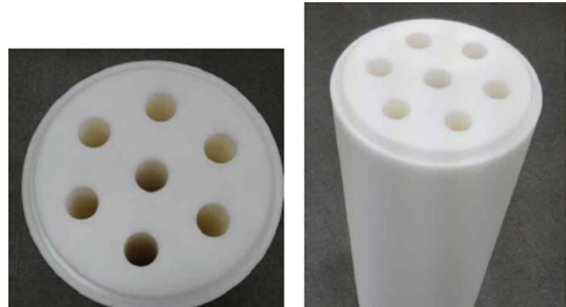


**Fig. S1.** Design of modules for controlling the weather modification hybrid rocket (WMHR).

### 2. 기상조절용 로켓 주요 부품

#### 2.1 기상조절용 하이브리드 로켓 추진연료 및 구조

기상조절용 하이브리드 로켓의 추진연료는 고분자 화학물질을 활용할 수 있게 설계하였다. 이번 로켓에 사용된 추진연료는 평균 출력 1 kN, 연소시간 5~10 second (s) 이상, 고체연료형식은 멀티포트 타입이었다. 이 때 사용된 산화제는 아산화질소( $N_2O$ )로 하였고, 고체연료는 Fig. S2와 같은 고분자화학물질로 설계 및 제작을 하였다. 연소실 온도는 3,500 K, 연소실 구조체 소재는 알루미늄으로 하였고, 내열재 소재는 카본이며, 연소실 엔진 전·후에 Pre-chamber, Post-chamber로 설계하였다. 그리고 효율적으로 하이브리드

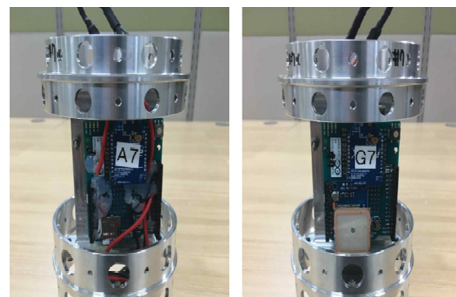


**Fig. S2.** Polymer chemicals as fuel for weather modification hybrid rocket (WMHR).

드 로켓의 고분자화학물질을 저장하기 위한 산화제 탱크를 설계하고 제작하였다. 산화제 탱크의 최대압력을 7 MPa였고, 이 탱크의 알루미늄 또는 복합재로 하였으며, 산화소제는 앞에서 언급한 것과 같이 액체 아산화질소( $N_2O$ ) 사용하였다.

#### 2.2 기상조절용 하이브리드 로켓 통신/제어 및 연소탄 사출장비 개발

기상조절실험을 위해서는 하이브리드 로켓의 통신/제어와 사출장치의 설계 및 제작을 하였다. 로켓의 통신/제어 채널을 4개로 구성하였고, 제어채널의 응답시간은 100 milli second (ms)로 설정하였고, 통신 샘플링 비율(Sampling rate)은 10 Hz로 하였다. 통신 형식은 RF 방식을 채택하였고, 전원은 리튬 폴리머 배터리를 이용하였다. 연소탄을 사출하기 위한 사출장치의 응답시간은 100 ms, 구동기 형식은 전기모터와 스프링을 사용하였다. 또한 연소탄 사출 시 덮개는 자기력으로 부착하여 연소탄의 사출이 원활히 이루어지도록 하였다(Fig. S3).



**Fig. S3.** Rocket controller (left) and ejection equipment of cloud seeding flare (right).