

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2026.34.3.191>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

항공우주용 산화제 N_2O 의 폭발 위험요인 분석 및 안전 운용 방안

신재혁*, 이정표**

Explosion Risk Analysis and Safe Operation Strategies for Aerospace
 N_2O Oxidizer

Jaehyeok Shin*, Jungpyo Lee**

ABSTRACT

Nitrous oxide (N_2O) is widely used across automotive, medical, and food industries, and has more recently gained attention as a potential environmentally friendly propellant for aerospace propulsion systems. However, explosion incidents involving N_2O have been reported in various fields. In this study, accident cases were collected and analyzed to identify the causes reported in the literature, including thermal decomposition, water hammer, and system fouling. Furthermore, the potential overpressure hazard associated with subcooled liquid N_2O was examined. Based on these findings, safety measures were discussed to mitigate the identified hazards. This study systematically elucidates the complex risks inherent in N_2O operations, and the results are expected to support the development of effective safety strategies for industries utilizing N_2O .

Key Words : Nitrous Oxide Explosion(아산화질소 폭발), Aerospace Oxidizer(항공우주용 산화제), Heat Decomposition(열분해), Subcooled Liquid N_2O (냉각액체 N_2O), Safe Operation(안전 운용)

1. 서 론

아산화질소(nitrous oxide, N_2O)는 강력한 산화력, 마취 및 진통 효과, 무독성 등의 특성이 있어 자동차용 NOS 시스템, 의료용 마취제, 식품 산업 등 다양한 분야에서 폭넓게 활용되고 있다. 특히 N_2O 는 산소와 질소로 분해될 때 높은 열을 방출하여 항공기의 순간적인 추력 보강을 위한 보조 추진 시스템으로 적용되고

있고, 상온(300K)에서 약 60bar의 자발 가압 특성으로 추진 시스템에서 항공우주용 산화제로도 사용된다(Conners, 1997; Bettella et al., 2013; NIST, 2025). 그러나 N_2O 는 항공우주 분야를 비롯한 다양한 산업에서 활용되고 있음에도 불구하고, 운용 과정에서 폭발 사고가 지속적으로 보고되고 있다. 항공우주 분야에서 N_2O 를 산화제로 적용한 추력기 시험 중 폭발 사고가 다수 발생하였으며, 기타 산업 분야에서도 취급 과정에서의 폭발 사고 사례가 확인되고 있다. 그럼에도 불구하고, 이러한 사고에 대한 명확한 원인 규명과 폭발 조건에 대한 체계적인 해석은 아직 충분이 이루어지지 않은 실정이며, 이에 대한 정량적이고 종합적인 분석이 요구된다(Munke, 2001; Berger, 2007; CSB, 2016).

본 논문에서는 N_2O 폭발 사고 사례를 체계적으로

Received: 24. Sep. 2025, Revised: 31. Aug. 2026,
Accepted: 7. Sep. 2026

* 경북대학교 기계공학과 석사과정

** 경북대학교 기계공학부 교수

연락처자 E-mail : jungpyo@knu.ac.kr

연락처자 주소 : 대구광역시 북구 대학로 80 공대 6호관
319호

조사하여 기존에 보고된 원인을 분석하고, 기존 연구에서 규명되지 않았던 항공우주용 산화제 운용 조건, 특히 냉각 액체 상태에서의 잠재적 과압 가능성을 위험요인으로 제시하고자 한다. 그리고 이러한 분석 결과를 토대로 N_2O 안전 운용 대책을 제시한다.

II. 본 론

2.1 N_2O 폭발 사고 사례 및 원인

2.1.1 항공우주 시험 사고 사례

Fig. 1은 Virgin Galactic이 민간 우주여행을 위해 개발한 SpaceShipTwo로 N_2O 산화제를 적용한 공중 발사형 유인 준궤도 발사체이다(Virgin Galactic, 2023). 2007년 Mojave Air and Space Port에서 SpaceShipTwo 추진체 엔진 인젝터 검증용 지상 비연소 시험 도중 폭발 사고로 인명 피해가 발생하였다(Fig. 2). 조사에 따르면, N_2O 가 산화제 공급배관 내부 유기물에 의해 오염되었고, 관내 발생한 수격작용이 유기 혼합물을 점화시켜 N_2O 저장 탱크가 폭발한 것으로 보고되었다. Fig. 3은 2000년 Surrey Space Centre에서 수행된 N_2O 촉매 추력기 연소 시험 중 발생한 사고사례이다. 사고는 고온 환경에 지속적으로 노출된 N_2O 가 열분해 반응을 일으켜 발생한 것으로 보고되었으며, 이로 인해 연소기가 폭발하여 구조적 파손



Fig. 1. SpaceShipTwo (Virgin Galactic, 2023)



Fig. 2. N_2O explosion at Mojave Air and Space Port (Berger, 2007)



Fig. 3. N_2O explosion at University of Copenhagen (Zakirov et al., 2000)

이 발생하였다. 2005년에는 University of Copenhagen에서 N_2O /Alcohol 로켓엔진 연소 시험 중 폭발 사고가 발생하였고, N_2O 공급 라인 내부에서 발생한 수격작용에 의해 인젝터 및 밸브가 파손된 것으로 확인되었다. 또한 Pratt & Whitney(미국), Troy Prideaux(호주) 등 여러 항공우주 실험에서 N_2O 를 산화제로 사용하는 실험이 진행되었으며, 이 과정에서 크고 작은 폭발 사고가 다수 보고된 바 있다(Berger, 2007; Zakirov et al., 2000; Munke, 2001; Choi et al., 2015). 국내 항공우주 분야에서도 N_2O 운용 과정에서 발생한 사고 사례가 보고되었다. 2015년 한 국항공대학교에서 N_2O /Ethanol 액체로켓 연소시험 중 연소기 내부 폭발이 발생한 사례가 보고되었다. 해당 사고는 고온의 연소 가스가 탱크 내부로 유입되면서 N_2O 의 열분해를 유발하였고, 그 결과 탱크 내부 압력이 급격히 상승하여 폭발이 발생한 것으로 알려져 있다. 그러나 다양한 사고 보고서가 제시되었음에도 불구하고, N_2O 폭발의 직접적인 원인은 현재까지 명확하게 규명되지 않았다.

2.1.2 타 산업 분야의 사고 사례

Fig. 4는 2001년 네덜란드 에인트호벤에서 약 7,500kg의 N_2O 를 충전 중인 탱크 트럭이 폭발한 사고이다. 조사 결과, 예냉되지 않은 원심펌프가 고온 상태에서 작동한 것이 폭발 원인으로 보고되었다. 이 과정에서 N_2O 의 열분해와 역화가 발생하였고, 화염이 N_2O 저장 탱크 내부로 전파되어 폭발로 이어졌다고 알려졌다. Fig. 5는 2012년과 2016년에 Airgas에서 발생한 N_2O 폭발 사고를 각각 보여준다. Fig. 5(a)는 2012년 제조·저장 시설 탱크 내 저장 중이던 N_2O 폭발 사고, Fig. 5(b)는 2016년 탱크 충전 과정에서 폭발 사고를 보여주며, 폭발의 주요 원인은 N_2O 의 자발적 열분해로 인한 것으로 보고되었다. 이외에도, 1980년



Fig. 4. Eindhoven N_2O explosion accident (Berger, 2007; Munke, 2001)



(a) 2012 Explosion (b) 2016 Explosion

Fig. 5. Airgas N_2O explosion accidents (CSB, 2016)

Puritan-Bennett사, 1987년 AmeriGas사 등 산업 플랜트 분야에서 열분해로 인한 폭발 사례가 다양하게 보고되고 있다(CSB, 2016).

2.2 보고된 N_2O 폭발 원인

항공우주 및 타 산업 분야에서 보고된 N_2O 폭발 사고 사례를 분석한 결과, 고온 환경에서의 자발적 열분해, 수격작용, 그리고 배관 내 유기 오염물과의 반응이 주요 원인으로 확인된다. N_2O 자발적 열분해는 500~600°C에서 열원에 노출된 N_2O 가 스스로 분해되며 많은 열을 방출하고, 이 열이 다시 N_2O 분해를 촉진해 반응이 통제되지 않은 상태로 급격히 증폭되는 현상이다 (Yong et al., 2009). 수격작용은 배관 속을 흐르던 비압축성 유체가 갑작스럽게 정지할 경우, 배관 내 순간 압력이 유체의 관성에 의해 급격히 상승하는 현상이다. 배관 내 유기 오염물과의 반응은 N_2O 와 배관 내 유기물과의 화학 반응 현상이다. 그러나 N_2O 를 적용하는 항공우주 분야에서 공급계 라인에서 일반적으로 온도가 500°C를 넘지 않고 배관 내 2상 유동으로 비압축성이 아닌 점에서, 이러한 원인들을 항공우주용 산화제로 사용되는 N_2O 폭발의 주요 요인으로 단정하기에는 한계가 있다. 본 논문에서는 냉각 액체 상태에서 온도 변화에 대한 압력의 높은 민감성이 항공우주용 산화제 N_2O 저장 시스템에서 과압을 유발할 수 있

는 잠재적 위험 요인으로 작용할 수 있음을 제시한다.

2.3 온도 변화에 따른 N_2O 압력 특성

N_2O 저장 온도에 따른 압력 변화를 알아보기 위해 탱크에 N_2O 를 채워 온도와 압력을 측정할 실험을 수행하였다. Fig. 6은 실험에 사용된 내부 체적 1.0L 알루미늄 실린더의 형상이며, 제조사에서 수행한 해당 실린더의 허용 운용 압력은 190bar이고 내압 시험 압력은 207bar이다. 실린더와 N_2O 가 충전된 배관 및 연결부의 내부 체적을 포함한 전체 시스템 체적은 1.1L임을 확인하였으며, 이를 해석 연구의 기준 체적으로 적용하였다. 실린더에는 K-type 열전대와 Valcom사의 VKVQ 압력센서를 부착하여 온도 및 압력을 계측하였다. 사용된 K-type 열전대의 온도 측정 범위는 -200~1,250°C이며, 본 실험에서 측정 온도 구간에서의 측정 오차는 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 이다. 압력센서의 정격 측정 범위는 0~100bar이며, 제조사 사양에 따른 측정 오차는 $\pm 0.8\text{bar}$ 이다. 허용 과부하 압력은 150%(정격 용량 100bar)이며, 실험에서 120bar 이상에서 센서 출력 신호가 측정 범위를 초과하여 클리핑되는 현상이 관찰되었다. Sampling rate 1Hz로 설정하였으며, 안전을 위해 릴리프 밸브는 Farris Engineering사의 2600L series를 설치하였으며, 설정 압력은 130bar이다. Fig. 7은 bombe 탱크 압력 60bar 조건에서 Fig. 6의 탱크에 N_2O 1kg을 충전한 후, 주간 기온이 15~20°C인 환경에서 하루 동안 보관하면서 측정한 N_2O 의 온도 및 압력 변화를 나타낸다. 본 실험은 주변 온도 변화에 따른 N_2O 의 압력 민감성을 확인하기 위해 수행하였으



Fig. 6. Schematic of 1 L experimental cylinder

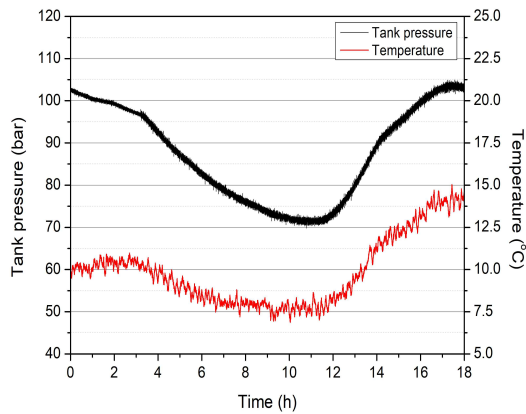


Fig. 7. Temperature and tank pressure variation with time

며, 1회에 한하여 실시하였다. 일주기적 대기 온도 변화에 따라, 탱크 내 N_2O 의 압력은 온도에 크게 의존하는 특성이 확인된다. 유체 온도가 약 $7.5^\circ C$ 에서 $15^\circ C$ 로 증가함에 따라 압력은 약 70bar에서 100bar로 증가하고, 따라서 탱크 내 N_2O 가 작은 온도 상승에도 큰 압력 증가를 유발할 수 있음을 확인하였다. 이러한 압력 민감도는 고온 환경에 노출된 N_2O 에서 더욱 크게 나타날 수 있으며, 특히 항공우주 분야에서 연소기가 높은 열을 발생시키는 점을 고려할 때 N_2O 의 폭발 위험성이 더욱 증가할 수 있다.

그러나 N_2O 가 액체와 기체가 공존하는 포화 상태로 저장된 경우, 온도 변화에 따른 압력 민감도는 폭발을 유발할 수준으로 크지 않다. Fig. 8은 N_2O 의 압력 - 비체적 선도를 나타내고, 포화 상태에서 N_2O 의 임계압력은 약 72.45bar임을 확인할 수 있다. 따라서 2상

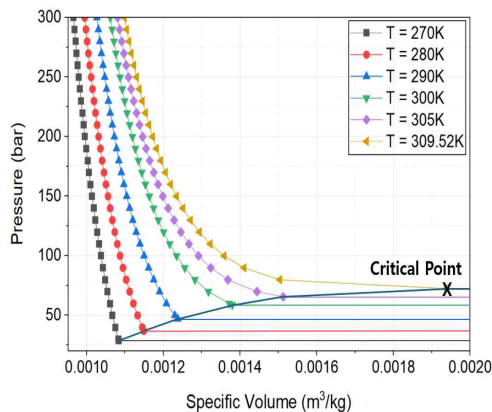


Fig. 8. Pressure change vs. temperature under subcooled liquid conditions for N_2O

로 저장된 산화제 탱크 운용 조건을 고려할 때 포화 상태에서 폭발 가능성은 매우 낮은 것으로 판단된다.

2.4 냉각액체 상태 잠재적 과압 위험성

냉각액체(압축액)는 특정 압력에서 포화온도보다 낮은 온도의 액체 상태를 의미하며, 이 상태에서는 작은 온도 변화에도 압력 민감도가 매우 크다. 또한 포화 상태로 탱크에 초기 저장된 경우에도 미소한 열전달에 의해 냉각액체 상태로 전이될 수 있으며, 이때 온도의 미소한 상승만으로도 압력이 급격히 증가할 수 있다. 일반적으로 탱크 내 액체 N_2O 를 충전할 때, N_2O 의 높은 증기압과 잠열 흡수로 인해 충전 직후 외부 온도보다 낮은 온도로 저장된다. 따라서 초기 저장 후 탱크 외부에서 내부로 열전달로 인해 N_2O 의 온도가 상승하게 된다. Table 1에서와 같이 포화 액체 N_2O 의 밀도는 감소하고 포화 기체 N_2O 의 밀도는 증가하기 때문에, 고정된 탱크 체적에서 열유입에 의해 N_2O 의 기상 공간이 사라지고 액체 충전 상태, 즉 냉각액체 상태가 될 수 있다.

Fig. 9는 1.1L 용기에 N_2O 1kg을 저장한 조건에서

Table 1. Thermodynamic characteristic of N_2O

Temperature (K)	sat. Liquid density (kg/m^3)	sat. Vapor density (kg/m^3)
270	923	78
280	870	104
290	808	142
300	725	203
305	661	256

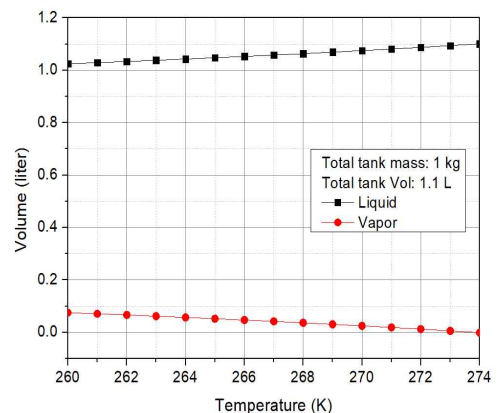


Fig. 9. Phase volume variation with temperature

온도 증가에 따른 액상 및 기상의 체적 변화를 예측한 값을 보여준다. 온도에 따른 상전이를 계산하기 위해 NIST에서 제공하는 포화 밀도 등 열역학적 물성값을 이용하였다. 계산 결과, 온도 상승에 따라 기상 체적 분율은 감소하고 액상 체적 분율은 증가하는 것을 볼 수 있고, 약 274K에서 용기 내 N₂O는 완전히 액상으로 상전이 되었음을 확인할 수 있다. Fig. 8에서 보는 것처럼 냉각액체 영역에서는 온도의 작은 상승에도 압력이 급격히 증가함을 확인할 수 있다. 예로 Fig. 8에 비체적 0.0011m³/kg인 조건을 보면, 온도가 270K에서 305K(≈13% 증가)로 상승할 때 압력은 약 29bar에서 265bar(≈814% 증가)로 약 9배 증가한다. 이에 따라, 냉각액체 상태로 저장된 N₂O는 작은 온도 상승에도 내부 압력이 급격히 증가하며 용기의 구조적 손상으로 인한 사고 위험을 증가시킬 수 있다. N₂O 추진제 탱크의 설계 조건과 비교하였을 때, 냉각액체 상태에서의 압력 상승은 저장탱크의 구조적 위험요인으로 작용할 수 있다. Buccellato et al.(2018)의 연구에서 N₂O 추진제 탱크는 약 55bar의 운용압력으로 설계되었으며, 설계 안전율 2.0이 적용되었다(Buccellato, 2018). 이를 기준으로 탱크 최고 압력은 110bar이며, Fig. 8에 일반적인 운용조건에서 나타나는 냉각액체 압력은 해당 문헌에서 제시된 추진제 탱크 설계 압력을 초과하는 것을 볼 수 있다. 따라서 냉각액체 상태에서 저장은 열분해, 수격작용, 파울링 등 기준에 보고된 요인들과 함께 N₂O 폭발의 위험 인자로 고려될 수 있다.

2.5 N₂O 안전 운용 대책

N₂O의 안전한 사용을 위해서 폭발 원인에 따라 안전 대책이 차별적으로 마련되어야 하고, 저장, 충전, 이

송, 사용에 이르는 전 과정에서 체계적인 관리와 예방 대책이 필수적이다. Table 2는 N₂O 운용 시 발생하는 주요 위험요인과 압력 급상승 유발 과정, 안전 운용 대책을 요약한 것이다.

냉각액체 상태에서의 과압 위험을 방지하기 위해, 저장 조건에서 탱크를 액체로 완전히 충전하지 않는 것이 중요하다. 기체 공간 소멸에 따른 급격한 압력 상승을 방지하기 위해, 탱크 체적 대비 20~30%의 기체 공간을 확보하는 것을 권장하고 있다(Berger, 2007). 그러나 이러한 분율 기준은 주로 경험적으로 제시된 것으로, 안전 운용을 위한 정량적 기체 공간 분석이 필요하다. 본 연구실에서는 향후 외부 열유입 조건을 고려하여 N₂O의 온도, 압력 및 기상-액상 비율 변화를 분석하고, 이를 통해 기체 체적 확보 기준의 타당성을 검증할 계획이다. Fig. 10은 N₂O의 충전 질량과 온도에 따른 임계 탱크 체적을 나타낸다. 임계 탱크 체적은 충전 후 탱크 내부의 N₂O가 기상 공간 없이 전부 냉각액체 상태로 존재하는 체적을 의미한다. 실제 탱크 체적이 임계 탱크 체적 이하일 경우, 탱크 내부가 냉각액체로 완전히 채워져 미소한 온도 상승에도 압력이 급격히 증가할 수 있다. 따라서 실제 저장 탱크의 체적은 해당 온도 및 질량 조건에서의 임계 탱크 체적보다 크게 설계되어야 한다. 또한 Fig. 10의 임계 탱크 체적은 안전 기상 공간이 포함되어 있지 않으므로, 실제 운용 조건을 고려한 적정 탱크 체적을 정량적으로 평가하기 위한 추가 연구가 필요하다.

N₂O의 자발적 열분해는 고온 조건에서 개시되므로, N₂O 저장 및 공급계는 고온 환경에서의 운용을 지양해야 한다. 이와 함께 열분해로 이어질 수 있는 이상

Table 2. Safe operation strategies by risk factor

위험 요인	압력 상승 유발 메커니즘	안전 운용 대책
냉각액체 상태	온도 상승에 따른 급격한 압력 증가	기상 공간 확보
자발적 열분해	고온 노출에 의한 발열성 분해 반응 촉진	고온 운용 지양
수격작용	급격한 밸브 개폐로 인한 압력 증가	완충 장치 설치
유기물 오염	유기물로 인한 분해 반응	청정 관리

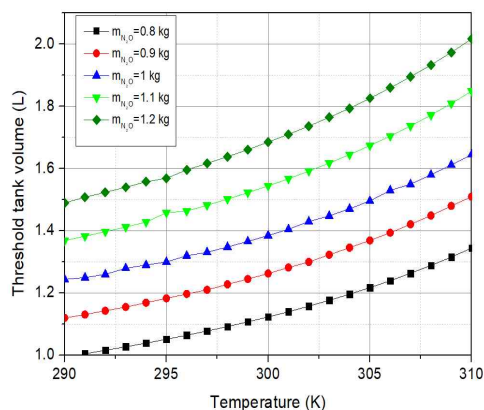


Fig. 10. Threshold tank volume for subcooled liquid N₂O storage

온도 상승을 조기에 감지하기 위해 온도 모니터링 기반의 관리 시스템을 구축할 필요가 있다. 수격작용에 따른 압력 상승이 배관 및 연결부의 손상으로 이어질 수 있으므로, 이를 완화하기 위해 유연 커넥터 및 바이패스 밸브 등의 완충용 안전장치를 적용할 필요가 있다. 또한 순간 압력 상승, 운용 중 발생할 수 있는 비정상적인 과압에 대비하여 안전밸브와 파열판을 설치하는 것이 요구된다. 아울러 배관 내 잔류 유기물은 N_2O 와의 반응을 유발할 수 있으므로, 배관 내부 및 공급계는 질소 등 불활성 가스로 퍼지하여 잔류 유분 및 입자를 제거해야 하며, 전체 시스템은 N_2O 와 반응하지 않는 비반응성 재질로 구성하는 것이 바람직하다 (CSB, 2016).

III. 결 론

본 논문에서는 다양한 N_2O 사고 사례를 바탕으로 폭발 사고의 원인을 분석하였으며, 특히 항공우주 분야의 N_2O 저장 과정에서 온도 변화와 기상 공간의 감소에 따라 발생할 수 있는 잠재적 과압 위험을 제시하였다. 기존 사고 사례들을 종합하면, N_2O 폭발은 고온·고압 조건에서의 자발적 열분해, 펌프 및 배관 운용 과정에서 발생하는 수격작용, 그리고 불순물이나 유기물 오염 등에 의해 발생한 것으로 보고되었다. 본 논문에서는 N_2O 냉각액체 상태에서 온도 상승에 따른 급격한 압력 상승이 저장 탱크 폭발을 유발할 수 있음을 제시하였다. 이러한 요인은 연소기로부터 열전달이 발생할 수 있는 항공우주 분야에서, N_2O 폭발의 잠재적 요인이 될 수 있음을 시사한다. 또한 각 폭발 요인에 대해 N_2O 의 안전한 운용 방안을 체계적으로 제시하였다. 본 논문에서 제시한 논의는 자발 가압 특성, 친환경성, 무독성 및 경제성 등의 장점으로 미래 추진제로 주목받고 있는 N_2O 를 활용하는 항공우주 추진 시스템의 안전성 평가를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 대한민국 교육부의 재원으로 지원받은 BK21 사업의 지원을 받아 수행되었음(This study was supported by the BK21 funded by the Ministry of Education, Korea 4199990314305).

References

1. NIST, "Saturation properties of dinitrogen monoxide", NIST Chemistry WebBook, SRD 69, 2025, Available from: https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?TLow=300&THigh=&TInc=1&Digits=5&ID=C10024972&Action=Load&Type=SatP&TUnit=K&PUnit=bar&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fkg&WUnit=m%2Fs&VisUnit=uPa*s&STUnit=N%2Fm&RefState=DEF
2. Bettella, A., Moretto, F., Geremia, E., Bellomo, N., Pavarin, D., and Petronio, D., "Development and flight testing of a hybrid rocket booster for UAV assisted take off", 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, San Jose, CA, USA, 2013, AIAA 2013-4140.
3. Conners, T. R., "Predicted performance of a thrust-enhanced SR-71 aircraft with an external payload", NASA Technical Memorandum 104330, NASA Dryden Flight Research Center, Edwards, CA, USA, 1997, pp.3-15.
4. Berger, B., "Is nitrous oxide safe?", Swiss Propulsion Laboratory, 2007, Available from: https://www.ibb.ch/publication/N2O/N2O_safety_e.pdf
5. Munke, K., "Nitrous Oxide Trailer Rupture", CGA Seminar on Safety and Reliability of Industrial Gases, Equipment and Facilities, St. Louis, USA, 2001, pp.1-24.
6. U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), "Nitrous Oxide Explosion", U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), Washington, DC, USA, 2016, pp.13-105.
7. Virgin Galactic, "SpaceShipTwo", Virgin Galactic, 2023, Available from: <https://www.virgingalactic.com/gallery>
8. Choi, S., Park, S., Lee, D., Kim, D., and Koo, J., "Explosive accidents and safe handling of an experimental liquid rocket engine using

- nitrous oxide as oxidizer", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, 19 (2), 2015, pp.46-54.
9. Zakirov, V., Sweeting, M., Goeman, V., and Lawrence, T., "Surrey research on nitrous oxide catalytic decomposition for space applications", 14th AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah, USA, 2000.
10. Yong, S. J., Park, D. I., and Kim, T., "Study on the characteristics of nitrous oxide catalytic decomposition", 2009 KSPE Fall Conference, 2009, pp.58-61.
11. Buccellato, C., Corson, B., Daniels, E., et al., "Michigan aeronautical science association liquid bi-propellant rocket", IREC, Spaceport America, New Mexico, USA, 2018.