

케로신 내 용존질소 측정 및 제거 방법 연구

이원구^a · 김성룡^b · 안규복^{a,*}

A Study on Measurement and Elimination Methods of Dissolved Nitrogen in Kerosene

Wongu Lee^a · Seong Lyong Kim^b · Kyubok Ahn^{a,*}^aSchool of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Korea^bPropulsion Test and Evaluation Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea^{*}Corresponding author. E-mail: kbahn@cbnu.ac.kr

ABSTRACT

To improve the performance of a launch vehicle, kerosene, a launch vehicle fuel, undergoes a densification process. Liquid nitrogen injection cooling is an effective densification method which has a simple system and is inexpensive. During the cooling process, however, nitrogen may dissolve in the kerosene, possibly resulting in changes to fuel properties. Therefore, it is essential to measure and eliminate the amount of dissolved nitrogen in the kerosene. In this study, the vacuum extraction principle is introduced to measure the content of dissolved nitrogen in the kerosene. In addition, the experimental results, which used a designed/manufactured nitrogen sampling device, are described. From the results, the validity of the nitrogen sampling device and the dissolved nitrogen measurement/elimination methods was demonstrated.

초 록

발사체 연료 케로신은 발사체의 성능 향상을 위해 고밀도화 과정을 거치게 된다. 고밀도화 방법 중 액체질소 주입 냉각법은 시스템이 간단하고 비용이 저렴한 효과적인 방법이다. 하지만 냉각과정 중 질소가 케로신에 용해되어 물성을 변화시키는 원인이 되기도 한다. 따라서 냉각 후 케로신 내 용존질소의 양을 측정하고 제거하는 작업이 필수적이다. 본 연구에서는 케로신 내 용존질소 함유량을 측정할 수 있는 진공추출 원리를 소개하였다. 또한 질소 샘플링 장치를 설계/제작하여 수행한 실험 결과를 설명하였다. 실험결과로부터 질소 샘플링 장치와 용존질소 측정법/제거법의 유효성을 입증하였다.

Key Words: Launch Vehicle(발사체), Kerosene(케로신), Nitrogen Sampling Device(질소 샘플링 장치), Liquid Nitrogen Cooling(액체질소 냉각), Dissolved Nitrogen(용존질소)

Received 1 February 2018 / Revised 9 April 2018 / Accepted 16 April 2018

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

우주발사체에 사용되는 추진제를 고밀도화 하

는 것은 많은 이점이 있다. 추진제의 밀도가 증가하면 추진제 탱크의 부피를 줄일 수 있어 탱크의 중량이 감소하게 된다. 결국 발사체 중량이 줄어든 만큼 위성 등 탑재량(payload)을 더 많이 실을 수 있게 되어 발사체의 성능이 향상된다 [1-8]. 추진제의 고밀도화는 일반적으로 추진제의 냉각과정으로 얻어진다. 또한 추진제가 냉각과정을 거치게 되면 낮은 탱크 가압압력이 요구되고 이는 터보펌프의 회전속도를 낮추어 안정성과 신뢰성이 향상되는 부가적인 효과를 얻게 된다 [2,7].

추진제의 냉각방법은 크게 내부방법(internal method)과 외부방법(external method)으로 구분할 수 있다. 내부방법에는 helium bubbling, thermodynamic vent system, low pressure sink 등이 있으며, 외부방법에는 refrigeration, slush LH₂/LO₂, thermodynamic vent system, LHe/LN₂ coolers, helium bubbling 등이 있다. 추진제 고밀도화 방법을 Fig. 1에 간단하게 나타내었다[1].

Jung 등[2]은 극저온 추진제에 기체헬륨을 주입하여 냉각하는 helium bubbling 방법을 전산 해석으로 연구하였다. 기체헬륨이 액체산소에 주입되면 액체산소와 헬륨 기포 사이의 국부적인 압력차로 인하여 액체산소가 증발하게 되고 증발의 잠열효과로 인하여 액체산소는 과냉하게 된다. 액체산소는 주입되는 기체헬륨의 온도가 낮을수록 더욱 효과적인 냉각이 가능하였다. 또한 추진제 탱크의 압력이 포화 압력에 가까워질수록 냉각 효과가 증가하는 것을 입증하였다. 하

지만 액체산소가 냉각되면 액체산소의 증기압이 감소하게 되고, 그에 따라 냉각효과가 감소하여 더욱 많은 양의 기체헬륨이 필요하다는 것을 확인하였다. Friedlander 등[3]은 연료로 기준 끓는점의 액체수소 대신 슬러시(slush) 수소를 사용함으로써 얻는 이점에 대하여 연구하였다. 슬러시 수소를 사용하는 것은 일정한 탑재량에서의 초기 질량 감소, 일정한 탱크 부피에서의 탑재량 증가 및 연료 저장시간 증가 등의 장점이 있다고 보고되었다.

한국형발사체는 액체산소/케로신을 추진제로 사용한다[9]. 액체산소/케로신을 추진제로 사용하는 발사체 선진국에서는 케로신에서 황 성분을 제거하고 밀도를 높인 RP-1, RP-2(미국), RG-1, T-1(러시아)을 독자적으로 개발하여 사용하고 있다[10]. 하지만 한국형발사체는 동일한 압력/온도 조건에서 로켓 케로신에 비해 상대적으로 밀도가 낮은 민간 항공용 케로신(Jet A-1)을 연료로 사용할 예정이다. 케로신은 액체인 하지만 온도에 따라 밀도가 약간씩 변하게 된다. Fig. 2는 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 데이터를 이용하여 대기압 하에서 온도에 따른 Jet A-1의 밀도 변화를 나타낸 그래프이다[11]. 온도가 감소함에 따라 Jet A-1의 밀도가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2에서와 같은 케로신 밀도 증가를 위해 나로호 발사에서도 액체질소 주입 냉각법(LN₂

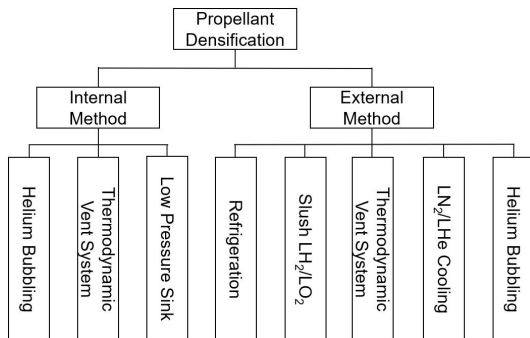


Fig. 1. Propellant densification methods.

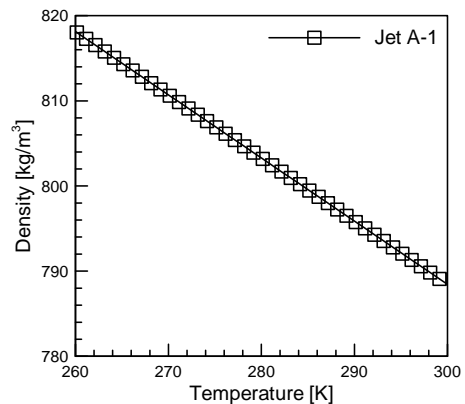


Fig. 2 Density of Jet A-1 as a function of temperature.

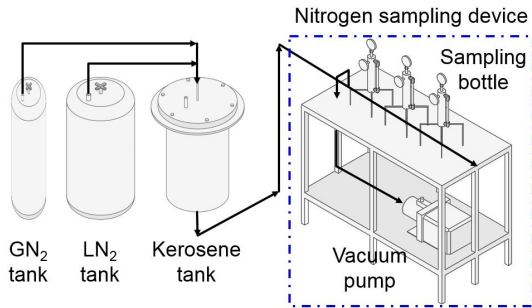


Fig. 3 Schematic of the nitrogen sampling device and experimental apparatus.

cooler)을 이용하여 지상 케로신 저장탱크의 상온 케로신을 발사체 탱크에 충전 전 영하 이하로 냉각하였다. 이러한 냉각과정 중 케로신 내에 질소가 용해되게 되는데 용존질소로 인하여 터보펌프의 캐비테이션 특성에 영향을 줄 수 있기 때문에, 기체질소를 다시 케로신에 공급하여 요구조건 이하로 용존질소를 제거하는 탈질작업을 수행하였다. 따라서 이러한 작업을 위해서는 케로신 내 용존질소의 함유량을 정량적으로 분석할 수 있는 방법이 필요하게 된다.

하지만 나로호 발사 당시 케로신 내 용존질소 분석은 러시아 연구원들이 수행하여, 현재 국내에서는 케로신 내 용존질소 측정법 및 제거법이 체계화되어 있지 않은 상태이다. 본 연구에서는 케로신 내 용존질소의 함유량을 측정할 수 있는 진공추출 방식의 질소 함유량 분석방법을 이용하여 질소 샘플링 장치(NSD, nitrogen sampling device)를 설계/제작하였다. 또한 NSD를 이용하여 액체질소로 냉각 전/후, 기체질소로 퍼지 후, 케로신 내 용존질소의 함유량을 분석하여 용존질소 측정법 및 제거법의 가능성을 살펴보았다.

2. 질소 샘플링 원리 및 실험장치 제작

2.1 케로신 내 용존질소 샘플링 원리

케로신 내 질소 함유량을 측정하는 장비들(TS-100V, Mitsubishi chemical corporation)은 판매가 되고 있으나, 이는 기체질소를 측정하는 것이 아니라 케로신 내 녹아있는 질소화합물의

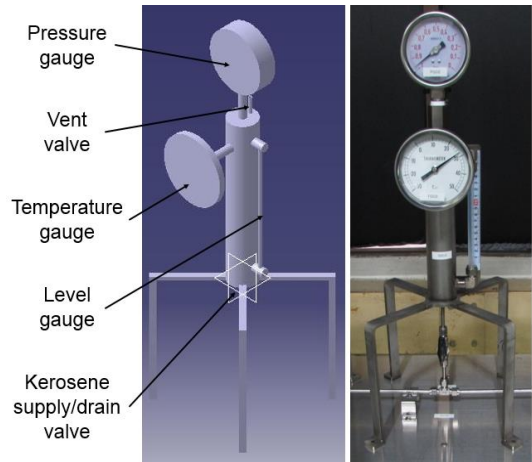


Fig. 4 3D modeling and picture of the sampling bottle.

양을 측정하기 위한 것으로 연소를 통한 방법을 사용하고 있다. 따라서 이러한 범용 장비들은 용존질소를 측정하는 본 목적에 맞지 않으며, 나로호 발사 과정에서 수행된 진공추출 방식의 측정법을 검토해 보았다.

진공추출 방법은 다음과 같은 과정으로 수행되었다. 먼저 진공펌프를 이용하여 질소 샘플링 장치(Fig. 3)를 0 bara까지 진공 상태로 만든 후, Fig. 4와 같은 샘플링 용기(SB, sampling bottle)에 케로신을 약간 충전하여 케로신 레벨, 기체 공간의 압력/온도를 측정한다. 샘플링 용기를 NSD에서 분리하여 흔들어주면, 큰 진동에 의해 용존질소가 케로신에서 배출되며 진공이었던 기체 공간의 압력이 증가하게 된다. 이는 탄산음료를 흔들어서 용해된 탄산을 제거하는 것과 동일한 방법이다. 초기 압력 대비 증가한 압력을 비교함으로써 용해되어 있던 질소량(케로신에서 빠져나온 질소량)을 측정하게 된다. 만약 SB 내 진공 정도가 충분하지 않으면 내부 압력이 높아서 용존질소가 기체 공간으로 완전히 배출되지 못하는 원인이 되기 때문에 초기 SB를 완벽히 진공상태로 만드는 것이 중요하다.

용존질소 샘플링 원리를 수식으로 살펴보았다. NSD를 진공 상태로 만들어 SB에 일정량의 케로신을 채운 후, 레벨 게이지로부터 SB 내 케로신 질량(m_k), 기체 공간의 부피(V_f)를 계산하고, 압

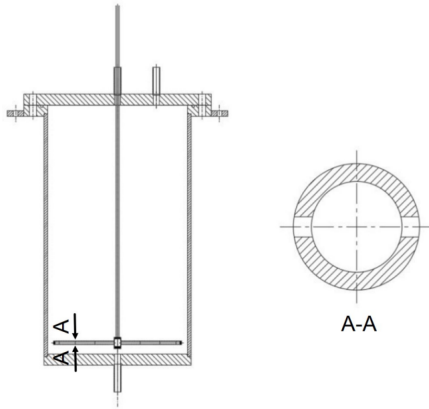


Fig. 5 Schematic of the kerosene tank.

력/온도 게이지로부터 초기 압력(P_1), 온도(T_1)를 측정한다. 측정값을 이용하여 Eq. 1의 이상기체 방정식(R_u : 일반 기체상수)으로부터 초기 기체의 몰수(n_1)를 구할 수 있다.

$$P_1 V_1 = n_1 R_u T_1 \quad (1)$$

SB를 NSD에 분리하여 수 분을 흔들어주면, 용해되어있던 질소가 기체 공간으로 배출되면서 압력, 온도, 부피가 변하게 된다. 게이지들로부터 다시 부피(V_2), 압력(P_2), 온도(T_2)를 측정하여, Eq. 2 및 Eq. 1의 n_1 값으로부터 케로신에서 빠져나온 질소의 몰수(n_{N_2})를 구할 수 있다.

$$P_2 V_2 = n_2 R_u T_2 = (n_1 + n_{N_2}) R_u T_2 \quad (2)$$

흔들림에 의해 용해되어있던 질소가 모두 배출되었다고 가정하면, 최종적으로 Eq. 3(MR_{N_2} : 질소의 기체상수)으로부터 케로신 내 용존질소 함유량(ppm)을 계산할 수 있다.

$$ppm_{N_2} = \frac{n_{N_2} MR_{N_2}}{m_k} \times 10^6 \quad (3)$$

2.2 질소 샘플링 장치 및 실험장치 제작

Fig. 3은 질소 샘플링 장치 및 실험장치의 개략도를 나타낸다. NSD는 진공펌프, 튜브 및 밸

Table 1. Sampling results of the cooled kerosene at PSTC.

	SB01	SB02	SB03
Level [mm]	14	12	17
V_k [cm ³]	101.20	97.33	104.82
V_1 [cm ³]	297.53	298.05	293.91
T_1 [K]	297.2	297.2	297.2
P_1 [bara]	0.060	0.060	0.099
T_2 [K]	300.2	300.2	299.2
P_2 [bara]	0.065	0.065	0.106
T_k [K]	278.2	278.2	278.2
n_1 [m·mol]	0.7226	0.7238	1.1777
n_2 [m·mol]	0.7750	0.7763	1.2525
n_{N_2} [m·mol]	0.0524	0.0525	0.0748
N_2 [mg]	1.4680	1.4705	2.0971
m_k [g]	81.28	78.18	84.20
ppm_{N_2}	18.06	18.81	24.91

브, 그리고 샘플링 용기들로 구성된다. 본 연구에서는 동일한 조건에서 3번의 반복 실험을 위해 3개의 SB가 설치되었다. 발사대 케로신 저장탱크를 모사하기 위해 22.9 l 용량의 모사 케로신 저장탱크를 Fig. 5와 같이 제작하였으며, 케로신 온도 측정을 위해 K형 열전대를 바닥으로부터 100 mm 위치에 배치하였다. 액체질소 및 기체질소는 십자 모양의 튜브들로부터 내경 2 mm를 갖는 24개의 구멍을 통해 탱크 하단 15 mm 위치에서 분배되어 케로신에 공급되었다.

샘플링 용기는 Fig. 4에서와 같이 실린더, 사각 받침대, 압력 게이지, 온도 게이지, 레벨 게이지, 밸브, 튜브들로 구성된다. 압력 게이지는 대기압부터 진공 압력까지 측정해야하기 때문에 0 ~ 1 bara의 범위를 갖는 게이지를 사용하였다. 실험 중 SB의 진공이 깨지게 되면 실험결과에 큰 오차가 발생하기 때문에, SB 제작 후 30분간 진공도 시험을 수행하여 압력의 증가가 없음을 확인하였다. 레벨 게이지의 값을 이용하여 SB 내 케로신 질량 및 기체 공간의 부피를 계산하게 된다. 이를 위해 레벨 게이지에 따른 SB의 질량 변화를 측정하여 함수화하였다.

3. 실험결과 및 분석

진공추출 방식의 질소 샘플링 방법은 쉽게 이해가 될 수 있으나, 케로신 내 용존질소 샘플링 측정법/제거법을 질산화하기 위해 상당히 많은 실험을 수행하였다. 구체적으로 실험은 Fig. 3의 모사 케로신 탱크에서 60회, 한국항공우주연구원 추진기관시스템 시험설비(PSTC, propulsion system test complex) 케로신 저장탱크에서 9회 수행되었다. Table 1은 PSTC에서 케로신을 액체 질소로 냉각 후 측정한 예를 나타낸다.

냉각된 케로신 온도, SB 내 케로신 질량, 기체 질소 퍼지 시간 등 실험변수가 다양하였고, 동일한 조건에서 동일한 방식으로 수행한 세 SB의 결과값도 Table 1에서와 같이 측정오차 등에 의해 편차가 발생하였다. 따라서 실험결과를 모두 나열하지 않고 유사한 조건에서 수행한 결과들만을 정리하였으며, 동일한 조건에서 수행한 세 SB의 결과값 중 편차가 가장 심한 값을 제외한 평균값을 사용하였다. 이는 SB를 NSD에서 분리하는 과정이나 SB를 크게 흔드는 과정에서 SB 내 진공이 깨져서 3개의 데이터 중 1개는 상당히 다른 값을 나타내는 경우가 많았기 때문이다.

3.1 액체질소 냉각 전 케로신 샘플링 결과

Table 1에서와 같이 앞 장에서 설명한 방법을 이용하여, 케로신을 액체질소로 냉각하기 전에 케로신 내 용해되어 있는 기체량을 측정하였다. 세 번의 실험 평균값에서 용존기체 함유량은 0, 0, -1.49 ppm으로 분석되었으며, 이로부터 액체 질소 냉각 전 초기 케로신에는 용해된 기체가 없음을 확인할 수 있었다. 또한 SB에 케로신을 레벨 게이지 기준으로 10 ~ 120 mm까지 채워가며 측정하였으나 결과에는 차이가 없었다.

3.2 액체질소 냉각 후 케로신 샘플링 결과

모사 케로신 탱크의 케로신에 액체질소를 공급하여 263 ~ 273 K 범위로 냉각하였다. 냉각시간은 실험마다 약간씩 달랐지만 대략 1시간이 소요되었다. 냉각된 케로신을 레벨 게이지 기준으로 20 mm까지 SB에 채운 후 질소 샘플링 측

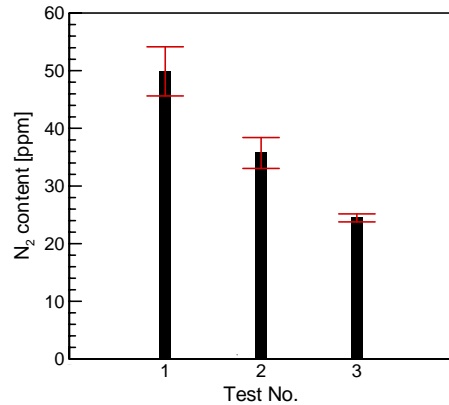


Fig. 6 Measurement results of dissolved nitrogen in the kerosene after LN₂ injection.

정을 수행하였으며, 대표적인 세 번의 실험 평균값과 표준편차를 Fig. 6에 정리하였다.

케로신 내 용존질소 함유량은 24 ppm에서 50 ppm 사이로 측정되었다. 이러한 결과로부터 액체질소로 케로신을 냉각하게 되면 케로신 내에 질소가 용해되어 있다는 것을 알 수 있었으며, 진공추출 방식의 이러한 용존질소 측정법이 유효하다는 것을 확인할 수 있었다. Table 1에서 예측할 수 있듯이 SB 내에 케로신을 많이 채울수록 용기 내 압력은 높아지게 된다. 초기 연구에서는 레벨 게이지 기준으로 132 mm까지도 케로신을 채워서 실험을 해 보았는데, 많이 채울수록 P₁ 압력은 높아지고 용존질소의 ppm 값은 낮게 계산되었다. 이러한 결과로부터 용기 내 압력이 높아지면 케로신 내의 용존질소가 기체 공간으로 쉽게 배출되지 않는다는 것을 알 수 있었으며, 진공추출의 의미를 이해할 수 있었다.

3.3 탈질작업 후 케로신 샘플링 결과

3.2절의 냉각작업 후 탈질작업을 수행하였다. 탈질작업은 Fig. 3에서와 같이 레귤레이터 기준 3 bara의 압력으로 기체질소를 600초 동안 케로신에 공급하였다. 기체질소를 케로신 탱크에 넣어줌으로써 SB를 흔들어주는 것과 유사한 방법으로 용해된 질소를 기체 공간으로 배출한다. 배출된 질소는 탱크의 벤트 밸브를 통하여 대기중으로 빠져나가게 된다.

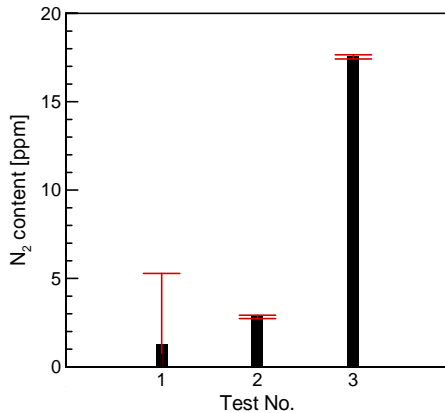


Fig. 7 Measurement results of dissolved nitrogen in the kerosene before and after LN₂ injection and after GN₂ purge.

탈질작업 후 샘플링한 세 번의 실험 평균값과 표준편차를 Fig. 7에 나타내었다. 케로신 내 용존질소 함유량은 1 ppm에서 18 ppm 사이로 측정되었다. Fig. 6의 액체질소 냉각 후 보다 확실히 용존질소 함유량이 낮아진 것을 알 수 있었으며, 기체질소를 이용한 용존질소 제거법의 유효성을 확인할 수 있었다.

3.4 PSTC 케로신 샘플링 결과

실험실에서 모사 케로신 탱크를 이용한 실험을 수행한 후에, 최종적으로 우주센터 PSTC 케로신 탱크에서 검증을 수행하였다. PSTC 케로신 탱크가 워낙 대형이고 냉각작업 시 케로신이 벤트 밸브를 통해 지상으로 유출될 가능성이 많았기 때문에, 냉각작업은 8시간 정도로 매우 천천히 진행되었다.

PSTC 케로신 탱크의 액체질소 냉각 전/냉각 후, 탈질작업 후 질소 샘플링 결과를 Fig. 8에 정리하였다. 용존질소 함유량은 냉각작업 전 - 2.1 ppm, 냉각작업 후 18.4 ppm, 탈질작업 후 - 0.2 ppm으로 측정되었다. 냉각작업 후 질소 함유량은 모사 케로신 탱크에서의 실험에 비해 낮게 측정되었는데, 이는 냉각작업이 매우 천천히 수행되어 액체질소의 일정 부분이 기화되어 탈질작업과 같은 효과가 발생했기 때문으로 예

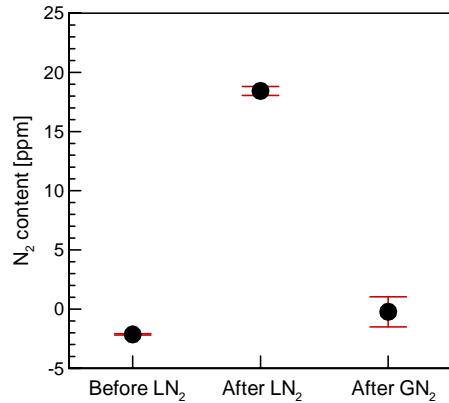


Fig. 8 Measurement results of dissolved nitrogen in the kerosene after LN₂ injection and GN₂ purge.

측되었다. 하지만 PSTC 실험에서도 질소 샘플링 측정법 및 제거법의 타당성을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

액체질소 주입법을 통한 케로신 고밀도화는 우주발사체의 성능을 향상시키는 장점이 있으나 케로신 내에 질소가 과도하게 녹아있게 되면 엔진의 캐비테이션 문제를 야기할 수도 있다. 따라서 액체질소 주입 후 케로신 내에 용해된 질소를 제거하고, 제거작업 후 측정된 값이 기준값 이하인지 확인하는 과정이 꼭 필요하게 된다.

본 연구에서는 케로신 내 용존질소 함유량 검사법 및 제거법에 대해 살펴보았으며, 질소 함유량을 정량적으로 측정하기 위한 질소 샘플링 장치를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험실의 모사 케로신 탱크에서 검사법 및 제거법에 대한 절차를 체계화한 후, 실제 우주센터 PSTC 케로신 저장탱크에서 실험을 수행하여 이러한 방법의 유효성을 최종적으로 확인하였다. 본 연구를 통해 체계화된 질소 함유량 검사법 및 제거법은 한국형발사체 개발에 도움이 될 것으로 예상된다.

하지만 SB를 혼드는 강도 및 시간에 따라 용

존질소 함유량은 각 SB 마다 다소 큰 편차를 보이고 있다. 이러한 오차를 감소시키기 위해서는 측정자의 힘에 의존하는 방식이 아닌, 일정한 강도와 시간으로 SB 내 케로신을 흔들어줄 수 있는 자동화된 장치가 필요하다고 판단된다. 이를 위해 SB 내 프로펠러를 설치하여 SB를 NSD에서 분리하여 흔들어주지 않아도 케로신 자체를 흔들어 용존질소를 배출할 수 있는 방법을 추가적으로 연구할 계획이다.

후 기

본 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2018M1A3A3A02065683, NRF-2017R1A1A1A05001237, NRF-2017M1A3A1A02014278)을 받아서 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 실험장치 및 방법에 대해 정보를 제공해주신 한국항공우주연구원 임병직 선임연구원 및 PSTC 실험에 도움을 주신 발사체추진기관체계팀 분들께 감사를 드립니다.

References

1. Fazah, M.M., "STS Propellant Densification Feasibility Study Data Book," NASA TM 108467, 1994.
2. Jung, Y.S., Seo, M.S. and Kim, Y.C., "Helium Injection Modeling for Cryogenic Propellant Densification," *The 2015 World Congress on ANBRE15*, Incheon, Korea, Aug. 2015.
3. Friedlander, A., Zubrin, R. and Hardy, T.L., "Benefits of Slush Hydrogen for Space Missions," NASA TM 104503, 1991.
4. Partridge, J.K., Tuttle, J.W., Notardonato, W.U. and Johnson, W.L., "Mathematical Model and Experimental Results for Cryogenic Densification and Sub-cooling Using a submerged Cooling Source," *Cryogenics*, Vol. 52, No. 4-6, pp. 202-267, 2012.
5. Ramesh, T. and Thyagarajan, K., "Investigation Studies on Sub-cooling of Cryogenic Liquids Using Helium Injection Method," *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 11, No. 5, pp. 707-716, 2014.
6. Lak, T., Lozano, M. and Neary, D., "Propellant Densification Without Use of Rotating Machinery," *38th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Indianapolis, I.N., U.S.A., AIAA 2002-3599, Jul. 2002.
7. Cho, N., Han, S., Kim, Y. and Jeong, S., "Review of Cryogenic Propellant Densification Technology," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 9, No. 3, pp. 133-144, 2005.
8. Tomsik, T.M. and Meyer, M.L., "Liquid Oxygen Propellant Densification Production and Performance Test Results With a Large-Scale Flight-Weight Propellant Tank for the X33 RLV," NASA TM 2010-216247, 2010.
9. Yeo, I., Kang, S., An, J., Lee, J. and Seo, J., "Critical Design of Kerosene Filling System for KSLV-II Launch Complex," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 3, pp. 76-83, 2017.
10. Edwards, T., "Liquid Fuels and Propellants for Aerospace Propulsion: 1903-2003," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 6, pp. 1089-1107, 2003.
11. Lemmon, E.W., Huber, M.L. and McLinden, M.O., "NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties – REFPROP V9.1," NIST, Gaithersburg, M.D., U.S.A., Apr. 2013.