

나로우주센터의 발사체 연료유 품질관리 과정 소개

김성룡^{1,†}¹한국항공우주연구원 우주추진연구부

Introduction to Quality Management System of Rocket Fuel at NARO Space Center

Kim Seong-Lyong^{1,†}¹Space Propulsion Research Division, Korea Aerospace Research Institute

Abstract

The Korean launch vehicle (KSLV-II) has used commercial aviation jet fuel, Jet A-1. Fuel specifications were introduced from Jet A-1 specifications. However, specifications and inspection methods of moisture and particulate matters were changed digitally for convenience and accuracy. To control fuel quality, a fuel management system was established to determine suitability by inspecting it at each stage of warehousing, storage, and application. An analysis room was then established at the Naro Space Center. The possibility of fuel mixing was blocked by warehousing inspection. Long-term component changes were then observed by storage inspection. Finally, suitability of the engine test or the launch vehicle test was determined through application inspection. Long-term analysis verified that the space center's fuel oil storage method was appropriate and that the quality management system was able to handle hundreds of engine tests and several flight tests.

초 록

한국형발사체(KSLV-II, 누리호)는 상용의 항공유를 발사체 연료로 사용한다. 한국형발사체에 적용된 연료유 규격은 항공유 규격에서 도입하였지만, 수분과 미립 협잡물 규격과 분석 방식은 편의성과 정확성을 위해 디지털 방식으로 변환하였다. 연료유 관리를 위해 입고, 저장, 사용 단계마다 검사하여 적합성을 판단하는 연료유 관리시스템을 구축하였으며, 이를 위해 나로우주센터에 분석실을 구축하였다. 입고 검사로 연료유의 혼유 가능성을 차단하고, 저장 검사로 장기간 성분 변화를 관찰했으며, 사용 전 검사를 통해 엔진 시험이나 발사체 시험의 연료유 적합성을 판단하였다. 장기간의 분석 결과로 우주센터의 연료유 저장 방식이 적절함을 확인하였고, 관리시스템으로 수백 번의 엔진 시험과 여러 차례의 비행 시험에 대응할 수 있었다.

Key Words : Naro Space Center(나로우주센터), Launch Vehicle(발사체), KSLV-II(한국형발사체), Kpetro(한국석유관리원), Management System of Rocket Fuel(연료품질관리)

1. 서 론

한국형발사체 누리호는 국내에서 생산되는 항공유를

연료로 사용한다. 항공유는 쉽게 구할 수 있고, 품질관리가 보장된다는 장점이 있어서 한국항공우주연구원에서 로켓 엔진 개발 초기부터 20년 넘게 사용됐다. 초기에는 소량의 항공유를 구매하여 사용했으며, 업체에서 제공하는 성적서를 이용하여 엔진 성능을 분석하였지만, 한국형발사체 개발을 진행하며 대량의 항공유를 소비하며 단순한 성적서 관리는 한계를 맞게 되었다.

Received: Jun. 20, 2023 Revised: Dec. 07, 2023 Accepted: Dec. 18, 2023

† Corresponding Author

Tel: +82-42-860-2712, E-mail: saintl@kari.re.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

나로우주센터에 발사체 연료를 사용하는 시험설비는 연소기/터보펌프/엔진/추진기관/발사대 시스템이 있으며 연료 저장설비는 연소기, 터보펌프, 추진기관, 발사대에 각각 갖춰져 있다. 연소기와 엔진은 연료 저장설비를 공유하지만, 시험을 위한 런탱크가 별도로 있다. 터보펌프시험설비는 연료를 연소하지 않기 때문에 회수하여 재사용하고, 나머지 설비는 시험에서 연료를 사용한다. 발사체 엔진 시험이나 발사체 시험은 일정한 주기로 시험을 하는 것이 아니라 시험이 집중되거나 한동안 시험이 없는 경우가 빈번하다. Figure 1은 2018년도 나로우주센터에 입고된 항공유를 보여준다. 엔진 시험 주기에 맞추어 3월과 7월에 빈번하게 입고되었지만 그렇지 않은 달도 있다. 시험의 비주기적 특징은 항공유의 장기 보존이 발생할 수 있으며 필연적으로 여러 생산 주기에 걸친 항공유를 혼합하여 사용할 수밖에 없다. 외부 성적서만으로 엔진 시험에 사용하는 연료의 특성을 파악할 수 없을뿐더러 연료의 이송이나 보관, 그리고 사용 중 연료의 품질관리가 필수적이다. 항공유는 생산 주기별로 밀도나 황 함유량 등 발사체 연료로서 알아야 하는 물리화학적 특성이 조금씩 다르므로 시험에 사용하는 연료의 정확한 물리화학적 특성을 파악하는 것이 엔진 시험에 앞서 필수적으로 수행되어야 한다.

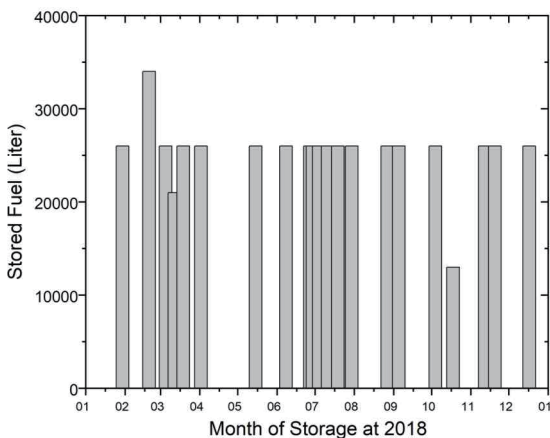


Fig. 1 Incoming record of aviation turbine fuel at Naro Space Center, 2018

항공유는 여객기 안전에 직결되기 때문에 품질관리가 엄격하다. 생산 단계의 검사뿐만 아니라 공항의 저장소 검사, 최후의 항공기 급유 직전까지 검사를 받

복한다[1]. 나로우주센터도 공항과 급유 단계의 품질 관리에 버금가는 시스템을 구축하고자 하였으며, 특히 이송과 사용 과정에서 오염과 변질의 우려를 불식시키고자 나로호 개발 경험과 한국형발사체 엔진 시험의 축적된 경험을 바탕으로 가스류, 액체류 및 연료유를 포함한 추진제 전체에 대한 품질 규격을 설정하였고 [2], 이를 수행할 수 있는 품질관리시스템을 구축하였다. 본 논문은 품질관리시스템의 일부인 연료관리시스템에 대한 소개와 더불어 활동에 관한 결과를 기술하였다.

기술에 앞서 혼란을 방지하고자 발사체 연료에 대한 명칭을 정리한다. 발사체 액체 연료는 수소, 메탄, 하이드라진 등이 있고, 이중 연료유는 다른 연료와 구분하여 원유의 정제를 통해 생산하고 상온에서 보관이 가능한 탄화수소 혼합물을 칭하며 일반적으로 케로신, 또는 로켓 케로신을 의미한다.

2. 연료유 품질관리 규격

2.1 항공유 규격과 로켓유 규격

항공유는 ASTM D1655 규격[3]을 따른다. 반면 로켓유는 발사체 개발국마다 규격이 다르고 알려진 것은 미국의 RP-1,2 규격[4]이 전부이다. 항공유와 로켓유 규격은 케로신 연료를 대상으로 한다는 점에서 공통점이 많지만, 증류성상을 비롯한 몇몇 물리 화학적 특성이 다르다. 특히 로켓유가 항공유보다 고온 고압에서 작동하기 때문에 미국 로켓유 규격의 3.2절에서 정한 것과 같이 항공유보다 압력과 온도를 높여서 연료의 안정성을 시험하는 것이 특별하다. 한국형발사체는 항공유를 고온 고압에서 안정성 시험을 하지 않았지만 작동 온도와 압력이 높아지는 차세대발사체에서는 고려할 필요가 있다.

한국형발사체(누리호)에 앞서 러시아와 협력이 이루어진 나로호는 케로신 연료가 사용되는 1단을 러시아가 제작하였고 러시아 연료인 RG-1이 사용되었다. 러시아 연료의 특성은 공식적으로 알려지지 않았고 외부 문헌을 통해 RG-1의 특성이 알려져 있다[5]. 나로호의 연료유 품질관리는 러시아 연구원이 직접 수행하였고, 사용하는 장비와 검사방법 등은 알려지지 않았다. 다만 디지털 장비보다 아날로그 장비를 이용한 수동

측정과 육안 검사가 많았다는 점이 확인되었다.

정유회사에서 생산된 항공유는 항공유 규격을 만족하고 이를 검증된 분석 프로세스를 통해 자체 성적서를 발행하는데, 이 과정은 국제적인 인증을 받기 때문에 신뢰할 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 발사체 시험에서 사용하는 연료는 여러 생산 주기에 걸친 연료이므로 성적서로 특성을 파악할 수 없으므로 나로우주센터의 연료 분석은 필수적이다.

2.2 나로우주센터 연료유 규격 검사

항공유를 발사체 연료유로 사용하지만 적용되는 규격이 실제 항공유 규격에서 달라진 점이 있기 때문에 나로우주센터에서 사용되는 항공유를 발사체 연료유로 부르겠다. 어떤 형태의 연료이든 연료에 대한 규격 검사는 정유 공장에서 실시하지 최종 소비자가 모든 항목에 대하여 다시 검사하지 않는다. 전 세계 공항이나 우주센터 등도 마찬가지이다. 다만 항우연은 차세대발사체에서 발사체 전용 연료유를 적용할 계획이기 때문에 전용 연료유에 대한 품질관리가 안정화되기 전까지 전 항목 검사를 수립할 것으로 계획하였다.

연료유에 대한 전 항목 검사는 분석기와 분석 전문가가 요구된다. 나로우주센터의 연료유 검사는 간헐적이고 횟수가 적기 때문에 전 검사 설비와 전문 인력을 배치하는 것은 비효율적이라 판단하여 연료 분석 전문기관인 한국석유관리원 미래기술연구소(구 석유기술연구소)와 협력하는 과정을 밟았다. 한국석유관리원과 MOU 및 장기계약을 통해 입고되는 탱크로리마다 항공유 전체 항목 검사를 시행하였으며, 나로우주센터의 분석기와 분석 결과에 대한 교차 검증을 수행하였다. 또한 한국석유관리원은 국내에서 유일하게 모든 정유회사 생산품에 대해 검사할 수 있는 권한이 있고 생산하는 석유화학제품에 대한 분석 기록이 있어 추후 발사체 전용유를 개발할 때 도움을 받을 수 있다.

나로우주센터의 연료유 품질관리 과정은 공항의 과정과 비슷하다. 공항 검사는 입고, 출고, 저장 검사로 구분되는 데, 입고 및 출고는 외관, 미립 협잡물, 수분, 밀도 등을 측정한다. 저장 검사는 입출고 검사 항목에 중류점, 인화점, 어는점, 현존검, 전기전도도, 물분리도, 부식 등이 추가된다. 나로우주센터의 연료유 저장 탱크는 대부분 질소 가압되어 있어서 대기에 노출된

공항 저장소와 다르기에 검사 항목도 달라져야 한다. 연료유 오염에 대한 검사가 필수적이며, 엔진 성능 및 작동에 민감한 영향을 끼치는 항목을 우선하였다. 엔진 성능에 가장 중요한 물성치는 밀도로서 발사체의 탑재량 및 엔진 성능 계산에 민감한 영향을 끼치므로 매 단계 측정하여야 한다. 15 ℃만 측정하는 항공유 규격과 0 ℃에서 15 ℃까지 측정하였다. 오염 항목은 항공기도 중요하게 취급하는 수분 검사가 필수적이며, 보관이나 이송 중에 발생할 수 있는 미립 협잡물 검사를 포함하였다.

항공유 규격 검사는 검사자의 숙달 여부가 상당히 중요하다. 시료 채취에서 시료의 이동, 분석기기로의 투입 및 작동 과정에서 많은 경험이 필요하고 실제로 검사자의 숙달 여부에 따라 측정치 오차가 달라진다. 나로우주센터에 전문 분석 인력이 상주하기 어렵기 때문에 연구 인력이 검사를 병행할 수밖에 없다. 이에 숙달 여부에 비교적 자유로운 디지털 장비를 최대한 이용하는 방식을 채택하였다. 이에 대해서 다음 절에서 설명하겠다. 또한 분석 오류를 이끄는 큰 원인 중 하나인 샘플링 오류를 방지하고자 샘플링 방법을 표준에[6] 맞추어 수행하였다. 최종적으로 밀도, 수분, 미립 협잡물 측정을 수행하였고 연료유의 성분 변화와 혼유의 가능성이나 오배송을 방지하기 위해 가스크로마토그래피를 이용한 증류성상 검사를 수행하였다. 자세한 내용은 다음 절에서 설명한다.

2.3 발사체 사용을 위한 연료 규격검사

2.3.1 연료유 미립 협잡물 검사

항공유에는 정제 과정에서 걸러지지 않은 수많은 고체의 미립 협잡물이 포함되어 있다. 고체입자의 크기 커지면 필터나 밸브 등의 작동을 저해하기 때문에 규제하여야 하고, 항공유 규격에는 Fig. 2 좌측과 같이 4 리터의 시료를 필터링하여 전체 무게를 재는 중량식 검량법을 채택한다[7]. 중량식 검량법은 필터 공극보다 큰 고체 입자를 모두 거르기 때문에 정확해 보이지만, 필터를 처리할 때 숙련된 작업자가 필요하고 처리 시간이 2시간 이상 걸리는 문제점이 있다.

미 육군은 처리시간 단축을 위해 중량식과 비교하여 Fig. 2의 우측과 같은 적은 시료량과 분석 시간이 매우 짧은 파티클카운터 방식[8]을 병행해서 사용하고

있다[9]. 파티클카운터 방식은 시료만 준비되면 처리 과정이 없어서 분석자의 숙달 여부에 의존적이지 않은 장점이 있다. 나로우주센터도 분석자의 숙달 여부에 비교적 자유로운 파티클카운터 방식을 도입하였다. 파티클카운터 방식은 소량의 시료만 필요하고 수 분 만에 결과가 나오기 때문에 긴급한 검사에 대응할 수 있다. 검사 규격도 미 육군이 추천하는 값으로 설정하였다.

Particle Count ISO 4406 Code[10]에 따라 19/17/14/13 한계를 설정했으며 각각 4 μm , 6 μm , 14 μm , 30 μm 의 코드를 의미한다. 보통 유체에 대한 ISO 코드는 4, 6, 14 μm 입자 크기를 기준으로 세 개의 숫자로 코드를 정하나 미국 국방부는 30 μm 를 추가하여 4개의 코드를 적용하였다.

Table 1 ISO Code for fluid particles

ISO Code	No. of Paticles /cc
19	2500 < And \leq 5000
17	640 < And \leq 1300
14	80 < And \leq 160
13	40 < And \leq 80



Fig. 2 Particle measurement devices (left) gravimetric method (right) particle counter

측정 장비는 Seta AvCount Particle Counter SA1000-2를 사용했으며, 4.0 - 200 μm 크기의 고체 입자를 측정한다. 측정 카운트는 4.0, 6.0, 14.0, 25.0 30.0 μm 크기를 측정하여 ISO 코드를 출력한다.

2.3.2 연료유 수분 검사

연료 사용에 수분은 공식 규격에 없지만 일반적인 유류 저장소나 공항에서 가장 중요한 체크 항목으로 Fig. 3의 좌측과 같이 보통 Shell사의 수분 감지기 (water detector)를 사용하지만[11], 나로우주센터는 탈수 과정 전후의 정밀한 측정을 위해 Fig. 3의 우측과 같은 칼피셔 방식[12]을 채택하였다. 수분은 엔진 시험에서 매우 치명적인 위험을 초래하기 때문에[13] 매 단계 관리가 필요하며 공항 항공유도 모든 단계에서 수분 검사를 한다.

연료의 수분은 자유 수분(free water), 에멀전 수분(emulsified water), 용해 수분(dissolved water)로 구분된다. 자유 수분은 연료와 완전히 구분되어 육안으로 구분되는 층을 이루어 존재하는 수분이며, 저장탱크의 바닥이나 레벨게이지 바닥 등에서 발견된다. 에멀전 수분은 수분과 연료가 서로 섞여있는 상태이며 외관상으로 뿌연 상태이다. 에멀전 수분은 함도가 낮을 경우 연료와 구분이 어려우며 높을 경우 뿌연 상태로 보인다. 용해 수분은 연료에 완전히 녹아있는 수분으로 육안으로 구분할 수 없으며 대기에 노출될 경우 대기 습도에 따라 증가하거나 감소한다. 보통 100 ppm 미만으로 나타난다.

저장소의 자유 수분은 저장소 바닥의 고인 부분의 일정량을 주기적으로 배출하는 방법으로 해소할 수 있으므로 문제가 되는 것은 에멀전 수분과 용해 수분이다. 탱크로리로 항공유를 이송할 경우 나로우주센터에서 수분을 측정하면 20 - 50 ppm 미만으로 측정되어 탱크로리 충전이나 이송 과정에서 수분 오염은 없는 것으로 판단된다. 공항에서 이송 단계마다 필터를 거치며 미립 험잡물과 수분을 제거한다[14]. 우주센터는 허용 수분을 항공기보다 낮게 유지할 목적으로 필터 외에 저장소 내부에 탈수 설비를 갖추고 있다.

항공기 연료는 수분의 최대 허용량이 30 ppm으로 알려져 있다. 발사체는 항공기와 운용 환경이 다르므로 수분의 최대 허용량이 항공기와 다를 수 있으나 외국의 문헌에서도 허용치를 찾을 수 없었다. 이에 항공기와 같이 30 ppm 이하로 설정하되 탈수 설비를 가동한 후의 최대 허용량을 20 ppm 이하로 유지하도록 하였다. 나로우주센터의 연료 저장소는 대부분 질소 가압 상태로 보존하기 때문에 외부의 수분 유입은 거의 없다고 볼 수 있으나 어떠한 경로인지 몇 달의 기간이

지난 후 측정하면 수분함유량이 30 ppm을 초과할 때도 있다. 따라서 실제 시험에 앞서 연료의 탈수 과정은 필수적이다.



Fig. 3 water measure devices (left) Shell water detector[11] (right) Karl Fischer coulometer

2.3.3 연료유 밀도 검사

밀도는 연료유 규격 중 발사체 성능 계산에 가장 중요한 요소로서 규격은 15 °C에서 775 - 840 kg/m³으로 65 kg/m³의 큰 변화를 허용한다. 밀도의 큰 허용범위는 전 세계 공항에서 급유하는 항공기의 특성 때문이며 정유회사마다 정제되는 원유가 다르고 정유 과정의 미세한 차이에 기인한 것으로 추정된다[15]. Figure 4는 나로우주센터에 입고되는 항공유의 밀도 변화로, 최대 약 20 kg/m³의 차이이므로 규격 범위 안에 있지만, 발사체 입장에서는 무시할 수 없는 변화이다.

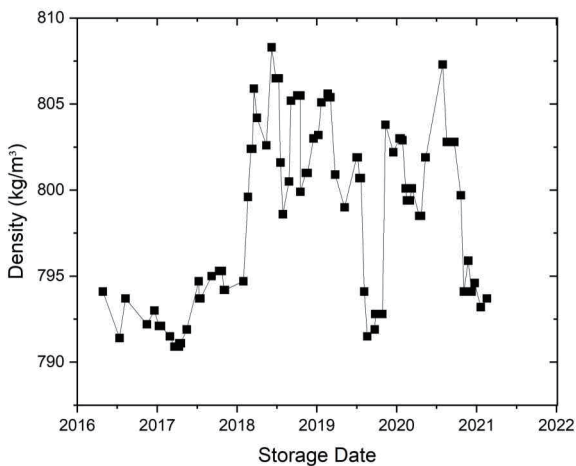


Fig. 4 Density variation of Aviation turbine fuel imported at NARO Space Center

나로우주센터에는 Fig. 5와 같은 디지털 밀도계[16]

를 이용하여 성적서의 일치 여부를 판단하고, 엔진 시험이나 발사체 시험 전후에 밀도를 측정하고 특히 엔진 시험 이후에는 엔진의 잔류 연료를 채취하여 시험 전후의 밀도를 측정하였다. 밀도는 3회 측정하여 중앙값을 취한다. 밀도는 15 °C 측정이 기본이지만 밀도계는 대부분 0 °C까지 측정할 수 있다. 그러나 발사체는 연료의 탑재량을 증가시키기 위해 밀도를 높이는 것이 효과적이며, 이를 위해 영하의 온도로 충전할 수도 있다. 따라서 품질관리뿐 아니라 탑재량 계산을 위해 충전 온도까지 밀도를 측정할 수 있어야 한다. 이에 대비하여 영하의 온도에서도 밀도를 측정할 수 있도록 장비를 보완할 예정이다.



Fig. 5 Digital density meter

2.3.4 증류성상 검사

증류 성상은 정유 과정에서 연료의 종류가 결정되는 과정이자 판별할 수 있는 가장 기본적인 방법이다. 소규모 실험실에서 증류과정을 직접 재현할 수 없기 때문에 대부분 가스크로마토그래피를 이용한 모사법, SIMDIS(Simulated Distillation)을 적용하는 데, 이를 규격화한 것이 ASTM D2887[17]이다. 나로우주센터에 Fig. 6과 같은 Agilent 7890을 이용한 SIMDIS 장비가 설치되어 입고되는 항공유의 증류성상을 검사한다. SIMDIS 장비를 이용하여 증류점과 함께 연료의 카본 수 분포를 파악한다. 나로우주센터에서 증류성상 분석은 일차적으로 시험에 사용되는 항공유의 특성을 데이터베이스화하여 시험결과 분석에 사용하는 목적이며 이차적으로 입고되거나 다른 유류와의 혼합을 확인

하려는 데 있다. 다만 극소량이 혼합될 경우 미처 파악하지 못할 수 있다.

Figure 7은 2017년과 2018년 입고된 연료유의 SIMDIS 결과로서 카본 수 분포를 나타낸다. 긴 시간 간격에도 불구하고 카본수 분포는 거의 일치하는 것이 확인된다. 수치로 나오는 증류성상과 달리 카본 수 분포는 항공유를 다른 연료와 확연히 구분시킬 수 있기 때문에 탱크로리에 다른 유종이 들어오거나 혼유의 가능성을 차단할 수 있다.

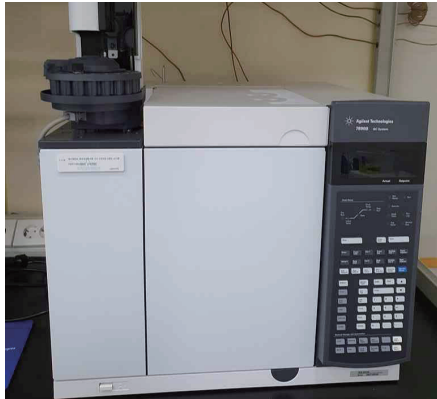


Fig. 6 SIMDIS (simulated distillation)

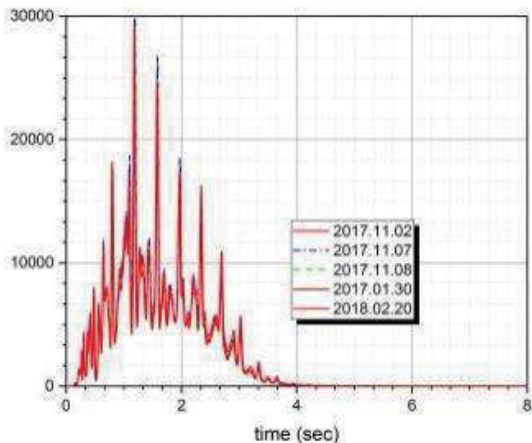


Fig. 7 SIMDIS plot of Aviation fuel supplied to Naro Space Center

3. 연료유 품질관리 절차 및 검증

3.1 품질관리 절차

우주센터에서 수행하는 연료유 품질관리 절차를 Fig. 8에 도시하였다. 탱크로리로 운반된 연료유는 저

장소에 저장하기에 앞서 입고 검사를 받는다. 입고 검사를 통해 충전이 승인되면 저장소에 충전한다. 저장소에 충전된 연료유는 장기 저장될 경우 주기적 저장 검사를 실시한다. 엔진이나 발사체 시험에 앞서 저장소의 바닥에서 채취된 시료를 통해 사용 검사를 받는데, 엔진 시험은 자체적으로 검사를 수행하고 발사체 시험은 자체 검사 이외에 한국석유관리원의 전 항목 검사를 받는다. 항공유 규격과 오염 항목에 대한 자체 규격을 만족하게 되면 사용이 승인되어 시험에 사용하게 된다.



Fig. 8 Procedure of request, inspection and approval of fuel use

3.2 입고 검사

탱크로리로 운송되는 항공유는 적재 과정의 품질은 보증될 수 있지만, 탱크로리가 개인사업자일 경우 혼유의 가능성이 존재하며 미량이지만 실제로 발생한 적이 있다. 입고절차는 이송된 항공유가 성적서에 부합하는지와 혼유 가능성, 수분과 미립 험잡물 검사로 오염 여부를 판단한다. 성적서와의 일치 여부는 밀도를 측정하여 성적서 상의 밀도와 같은지 검사한다. 혼유 가능성은 SIMDIS 장비를 이용하여 증류성상을 분석한 후 과거 입고된 항공유와 비교하여 판단한다. 모든 검사가 정상이면 연료 저장소에 충전한다.

엔진 시험설비의 저장소는 입고 분석이 여기에서 끝나지만 발사대 저장소는 모든 탱크로리의 항공유를 샘플링하여 한국석유관리원 미래기술연구소에서 정밀 규격 검사를 수행하여 성적서 일치 여부를 판단한다 [18]. 이 때 발사체에서 중요한 온도에 따른 밀도 변

화도 같이 측정한다.

3.3 사용 검사

사용 검사 또는 출고 검사는 연료유가 엔진 시험이나 발사체 시험에 앞서 시행되는 검사이다. 시험에 앞서 저장소의 연료유는 냉각 및 탈수 과정을 거치고 검사를 수행하는데, 공통적으로 밀도와 증류성상을 측정하고, 수분과 미립 혼합물의 오염 검사를 수행한다. 연료유 시료는 저장소와 엔진 입구에서 채취한다. 엔진 시험의 경우 시험 후 엔진 내부의 잔유를 채취하여 밀도 검사를 추가한다. 발사체 시험은 위 항목에 추가하여 한국석유관리원에 의뢰하여 항공유 전 항목에 대한 규격 검사를 수행한다. 엔진 시험에서 시료는 시험 당일 채취하며 발사체 시험은 2주 전에 채취한다. 다만 오염 검사는 시험 전날 채취한 시료로 검사한다. 발사체 시험은 연료 주입이 시험 과정의 일부라서 엔진 입구 시료 채취는 불가능하다. 이에 저장소 출구의 시료 채취로 대체하였다.

3.4 저장 검사

발사체 시험은 자주 있는 것이 아니라 연료 일부는 장기 저장 상태로 보관되기도 한다. 특히 터보펌프실 매질 시험은 연료를 연소시키지 않고 회수하여 재사용하기 때문에 10년 이상 보관하여 사용한다. 항공유의 탄화수소 분자는 공기에 노출되면 산화되기 때문에 장기 보관에 따른 특성 변화나 장기 안정성을 평가하여야 한다. 참고로 질소 가압 상태로 보관되는 우주센터와 달리 공항의 항공유 저장시설은 대기 노출 상태로 보관되므로 수분 관리가 매우 중요하다. 연료의 장기 안정성은 주기별 규격 검사와 함께 산화 안정성을 평가하여야 한다. 항우연 자체적으로 분석하기 어렵기 때문에 한국석유관리원과 함께 약 5년에 걸쳐 주기적으로 검사하였다[19]. Figure 9와 10에 각각 밀도와 전기전도도의 변화를 도시하였다.

Figure 9에서 빨간색 수평선은 입고 당시의 성적서상의 밀도이며 검정색 실선이 측정된 밀도이다. 성적서와의 차이가 최대 0.6 kg/m³ 정도로 대부분 오차 범위 안에 있으므로 변화가 없다고 판단한다. 발생할 수 있는 작은 밀도의 차이는 저장탱크 내의 연료유의 증류화로 인한 영향이지만 전반적인 밀도는 성적서와 유

사한 것을 알 수 있다.

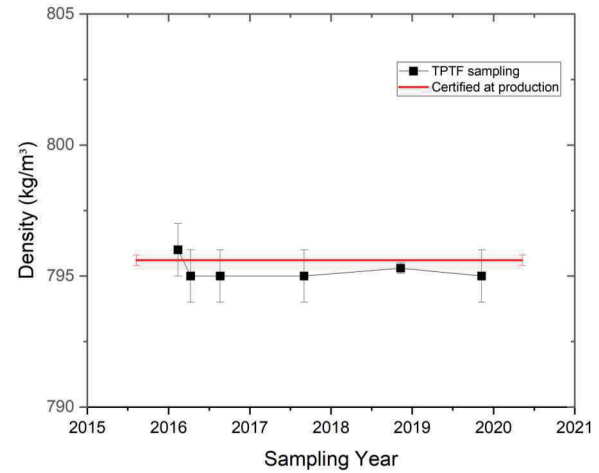


Fig. 9 Density variation of aviation turbine fuel of Turbopump Test Facility

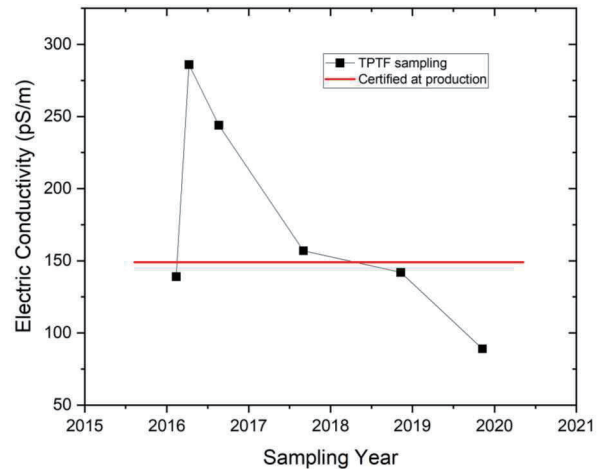


Fig. 10 Variation of electric conductivity of aviation turbine fuel of Turbopump Test Facility

항공유의 전기전도도 규격은 50~600 pS/m으로 저장소의 전기전도도가 Fig. 10과 같이 규격은 만족하지만 서서히 감소한다. Figure 10에서 성적서와 측정값의 차이는 시료의 채취 위치나 방법 등에 기인한 것으로 보인다. 항공유는 정전기 누적을 막기 위해 전기전도도를 높여주는 물질을 첨가하는데, 보관 기간이 오래되면 첨가제가 휘발되어 농도가 서서히 감소한다고 볼 수 있다. 일정한 연료의 전기전도도는 정전기가 쌓이는 것을 방지하지만, 발사체는 전기전도도 규격을 가지고 있지 않다[4]. 전기전도도를 높이기 위해 첨가제를 넣으면 황 함유율이 높아져 로켓유 규격을 벗어

나기 때문이다.

4. 결 론

나로우주센터는 한국형발사체에 사용하는 연료유의 입고, 저장, 사용 단계의 품질을 검사하는 관리시스템을 구축하였다. 각 단계의 품질 검사를 위해 별도의 분석실을 갖추었으며, 정밀한 분석을 위해 한국석유관리원과 협업 체계를 갖추어 분석 업무의 정확성을 향상했다. 항공유를 발사체 연료로 사용하면서 단계마다 품질을 검사하였으며 이를 통해 엔진 시험 및 발사체의 비행 시험을 성공적으로 마칠 수 있었다. 차세대발사체에서 사용될 새로운 로켓 전용유의 규격은 항공유 규격과 달라지겠지만 품질관리 방법은 크게 벗어나지 않을 것으로 보인다. 다만 새로운 규격 요소가 도입되면 그에 따른 시험 방법과 관리 방안을 찾아야 할 것이다.

References

- [1] Joint Inspection Group Issue 12, Aviation Fuel Quality Control & Operation Standards for Airport Depots & Hydrants (JIG 2), 2016
- [2] S.-L. Kim, L2-SP-00050 Specifications for propellants and gases of KSLV-II, Internal Documents of Korea Aerospace Research Institute, 2018.
- [3] ASTM D 1655 Standard Specification for Aviation Turbine Fuel
- [4] MIL-DTL-25576E PROPELLANT, ROCKET GRADE KEROSENE
- [5] G. Mehta, W. Stone, C. Ingram, S. D. Bai, and T. Sanders, "Comparative Testing of Russian Kerosene and RP-1", AIAA Paper 95-2962. 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1995
- [6] ASTM D 4057 -12 Standard Practice for Manual Sampling of Petroleum and Petroleum Products
- [7] ASTM D6331 Standard Test Method for Mass Concentration of Particulate Matter from Stationary Sources at Low Concentrations (Manual Gravimetric Method)
- [8] ASTM D7619 Standard Test Method for Sizing and Counting Paerticles in Light and Middle Distillate Fuels, by Automatic Particle Counter
- [9] J. Schmitigal, "Particle Count Limits Recommendation for Aviation Fuel," International Symposium on Stability, Handling and Use of Liquid Fuels, 5 October 2015
- [10] ISO 4406:2021, Hydraulic fluid power - Fluids - Method for coding the level of contamination by solid particles.
- [11] <https://www.shell.com/business-customers/aviation/aviation-fuel/shells-water-detector-tool.html>
- [12] ASTM D 6304 Standard Test Method for Determination of water in Petroleum Products, Lubricating oils, and Additives by Coulometric Karl Fischer Titration.
- [13] C. Hwang, I. Kim, J. Park, S.-L. Kim, B. Yoo, N. Cho, and Y. Han, "Pressure Drop Change at Engine Fuel Inlet Filter according to Water Contents Management of KSLV-II Liquid Rocket Fuel," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 24, No. 6, pp. 120-125, 2020
- [14] API/IP 1581, Specifications and qualification procedures for aviation jet fuel filter/separators, 5th ed.
- [15] T. Edwards, "Liquid Fuels and Propellants for Aerospace Propulsion: 1903-2003", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 6, pp. 1089-1107, 2003
- [16] ASTM D4052 Standard Test Method for Density, Relative Density of Liquid by Digital Density Meter
- [17] ASTM D2887 Standard Test Method for Boiling Range Distribution of Petroleum Fractions by Gas Chromatography
- [18] S.-L. Kim, L2-TR-03007 "Comparison Report for aviation turbine fuel specifications between the test certificates of tank lorry and the test report of Kpetro," Internal Documents of Korea Aerospace Research Institute, 2020

- [19]S.-L. Kim, L2-TR-03008 “Long term evaluation of the aviation turbine fuel of TurboPump Test Facility,” Internal Documents of Korea Aerospace Research Institute, 2020