Check for updates

Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers
Vol. 24, No. 6, pp. 120-125, 2020

Technical Paper
DOI: https://doi.org/10.6108/KSPE.2020.24.6.120

한국형발사체 액체로켓 연료의 수분관리에 따른 엔진 연료입구필터 차압의 변화

황창환[a,*] · 김인호[b] · 박재영[a] · 김성룡[a] · 유병일[a] · 조남경[a] · 한영민[a]

Pressure Drop Changes at Engine Fuel Inlet Filter according to Water Contents Management of KSLV-II Liquid Rocket Fuel

Changhwan Hwang[a,*] · Inho Kim[b] · Jaeyoung Park[a] · Seonglyong Kim[a] · Byungil Yoo[a] · Namkyung Cho[a] · Yeoungmin Han[a]

[a]*Engine Test and Evaluation Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea*
[b]*GnL Inc., Korea*
[*]*Corresponding author. E-mail: chhwang@kari.re.kr*

ABSTRACT

75 tonf liquid rocket engine combustion test was performed at Naro space center Engine Combustion Test Facility for KSLV-II. A gradual pressure drop was observed during off-design combustion test turbopump inlet condition using cooled kerosene at 271 K. It was found that the water content inside kerosene could cause pressure drop at 40 ㎛ grade filter through the water contests analysis of kerosene, kerosene cooling test and dehydration of kerosene.

초 록

한국형발사체 액체로켓엔진의 개발을 위해 나로우주센터에 구축/개발된 엔진 연소 시험설비에서 75톤급 액체 로켓엔진의 연소시험을 수행하였다. 연료온도 271 K 의 탈설계점 연소시험 중 터보펌프 연료입구압력 저하가 발생하여 시험을 중지하였다. 연료의 수분함유량분석, 연료 런탱크 냉각설비를 이용한 냉각시험, 탈수시험을 수행한 결과 해당 현상이 발생한 원인이 연료 내 수분이었다고 결론을 내렸다. 향후 본 논문의 연구에서 도출된 결과를 적용하여 케로신 연료의 수분관리를 하여 액체 로켓엔진 개발시험을 수행할 예정이다.

Key Words: KSLV-II(한국형발사체), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Kerosene(케로신), Dehydration(탈수화), Pressure Drop(압력강하)

1. 서 론

한국형 발사체의 75톤, 7톤 액체로켓엔진은 연료로 케로신(Kerosene)을 사용하고 산화제로 액

Received 3 September 2020 / Revised 13 October 2020 / Accepted 16 October 2020
Copyright Ⓒ The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

체산소(LOx)를 사용한다. 케로신을 사용하는 미국의 RP-1, 러시아의 RG-1 과는 다르게 발사체를 위한 케로신을 개발하여 사용하지 않고 Jet-A1 규격의 항공유를 사용하며 납품된 연료의 품질관리를 수행하고 있다[1,2]. 기존 연구[1,3]에서 언급하였듯이 연료 내 수분함유량에 대한 명확히 수치화된 규격이 없어 이에 대한 관리를 별도로 수행하지 않은 상태로 엔진 개발을 위한 여러 시험들을 수행하였다. 그 중 엔진의 정격 입구조건이 아닌 연료온도 271 K의 탈설계점 입구조건 연소시험을 수행하다가 비정상 상황이 발생하여 시험을 중지하였고 해당 현상이 발생한 원인이 연료 내 수분함유량이었다고 추정하였다[4]. 본 논문에서는 확인된 원인을 바탕으로 연료의 수분함유량과 온도에 따른 연료의 변화와 연료 내 수분을 제거하는 탈수공정[5]을 적용한 연소시험결과에 대하여 분석하고자 한다.

2. 시험 설비 및 엔진시험 비상종료

2.1 시험설비

나로우주센터에 75톤급 액체로켓 지상/고공엔진의 연소시험을 수행할 수 있는 엔진 지상/고공 연소시험설비를 구축하였고 해당설비에는 시험 준비 과정에서 런탱크(Runtank)의 연료의 온도를 가열/냉각하여 시험할 수 있는 열교환기를 갖추고 있다[4,6].

연소기 연소시험설비의 연료저장탱크는 연소기, 엔진 시험설비의 각 런탱크로 이송하기 위한 설비가 갖추어져 있다[6]. 연료의 탈수공정은 각 설비의 런탱크에 연료를 충전하기 전에 연소기 연소시험설비의 저장탱크에서 수행한다[5,7].

엔진 지상/고공 연소시험설비에서는 연료/산화제 설비배관과 터보펌프의 입구가 만나는 지점에 40 ㎛ 등급의 필터를 설치하여 이물질 유입을 방지하고 있다[4]. Fig. 1 에 터보펌프 연료 입구배관 필터의 설치현황을 나타내었다.

2.2 엔진시험 비상종료

75톤 엔진 연소시험 프로그램 중 탈설계점 시험조건의 연소시험을 수행하기 위하여 열교환기를 이용하여 연료의 온도를 271 K 로 냉각하였다. 1회의 연소시험에서 여러 개의 탈설계점 시험을 수행하기 위하여 터보펌프 입구압력제어를 시험프로그램에 포함하였는데 이는 서보밸브를 조합한 돔 작동 레귤레이터를 이용한 런탱크 압력 제어를 통해 가능하다[8].

Fig. 2에 시험프로그램에 따른 연소시험 결과를 나타내었다. 시험시간 100 초까지는 엔진 입구압력이 시험프로그램에 따라 제어가 잘 되었지만 이후로는 입구압력이 감소하기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 120 초부터는 입구압력을 내리는 제어를 수행하였는데 133 초에 터보펌프 연료입구조건 1 barA 이하 조건이 발생하여 시험을 비상종료 하였다[4].

엔진입구압력 감소와 필터차압 증가는 필터가 무엇인가에 막혔기 때문이라고 판단하여 엔진입

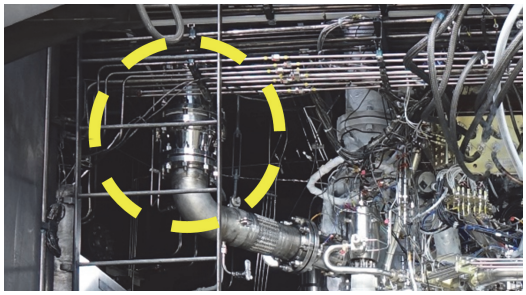


Fig. 1 Filter Installation Location (Engine Turbopump Fuel Inlet) [4].

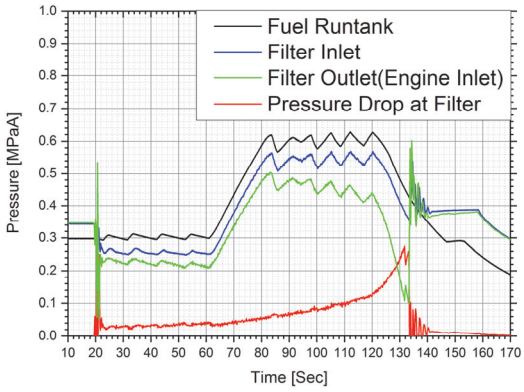


Fig. 2 Pressure Changes during Engine Combustion Test using 271 K Kerosene [4].

구 연료배관필터를 탈거하여 필터를 확인하였다. Fig. 3 에 좌굴로 손상된 필터(왼쪽)와 정상필터(오른쪽)를 비교하였다. 손상된 필터는 필터 내부의 구조물이 좌굴되어 필터의 전장이 줄어들었고 구조물과 필터부분이 밖으로 튀어나온 상태를 확인할 수 있었다. 하지만 필터 구조물이 손상되었을 뿐 필터에서 차압을 증가시킬만한 대량의 이물질은 발견할 수 없었다. 또한 해당 필터는 수십 회의 연소시험을 수행하는 동안 Fig. 2 그래프의 20 초에 보이는 엔진 시동 전/후에 나타나는 급격한 압력섭동을 견디었고 이전 시험데이터를 분석한 결과 필터차압이 증가하는 등의 필터 손상 징후가 없었다. 따라서 수격에 의해 필터 손상이 시작되지 않았다고 판단하였고 Fig. 3 의 좌굴 손상은 시험 중에 필터를 무언가가 지속적으로 막아 차압이 증가한 상황에서 수격에 의한 것이라고 판단하였다.

위에서 살펴본 정황과 데이터, 해당 시험의 연료온도 271 K 시험조건을 고려하였을 때 필터차압 증가의 원인으로 얼음이 필터에 쌓였을 것이라는 가설을 제시하였다. 이를 뒷받침하기 위한 분석 및 연료 냉각시험을 선행연구에서 수행하였고 충분히 가능성이 있는 원인인 것으로 파악되었다[4].

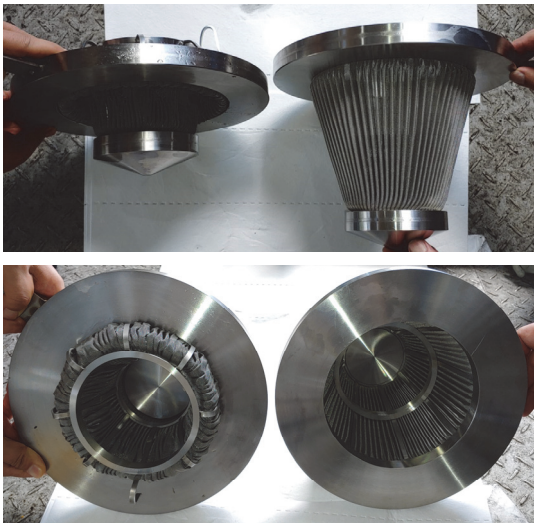


Fig. 3 Comparison of Damaged Fuel Filter(Left) and Normal Fuel Filter(Right).

3. 연료의 수분관리

3.1 입고연료 수분분석 및 탈수공정 결과

연료함유 수분에 대한 관리를 하기 위하여 2018, 2019 년에 연료저장탱크로 입고된 연료 탱크로리 샘플의 수분 분석결과를 Fig. 4 에 정리하였고 같은 달에 여러 번 입고된 경우에는 최고값을 그래프에 나타내었다. 연료의 입고는 엔진 연소시험 계획에 따라 이루어지므로 시험이 없거나 사용량이 적었기 때문에 입고가 이루어지지 않은 시기가 있다. 2년 동안의 연료 내 수분 경향을 살펴보면 우리나라의 연중 기후변화에 따라 연료 내 수분이 증가/감소하고 있음을 확인할 수 있다. 연료필터 손상 연소시험이 있었던 2019년 7월의 입고연료의 최대 수분함유량은

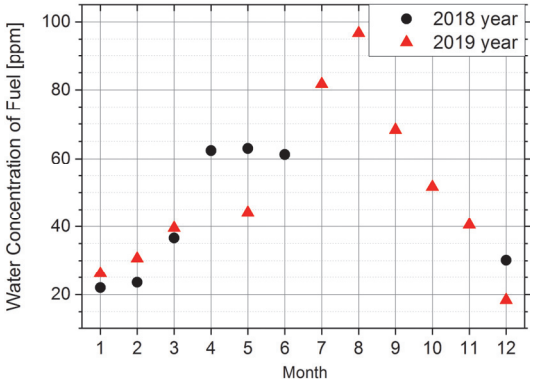


Fig. 4. Water Contents Analyses of Inbound Kerosene by Tank Lory.

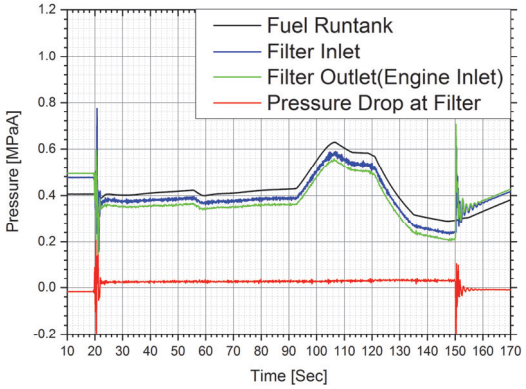
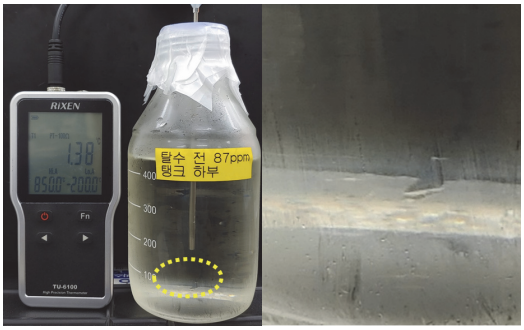


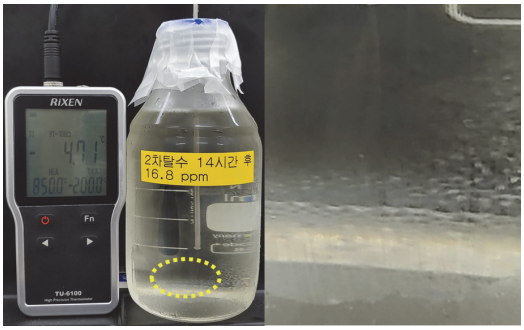
Fig. 5. Pressure Changes during Combustion Test using 271 K Kerosene at 2018 December.

81.71 ppm 이었고 시험에 사용된 연료의 입고 시 수분함유량은 75 ppm 이었다[4].

(1) Before Dehydration Treatment & Under Freezing Temperature of Water



(2) Before Dehydration Treatment & Over Freezing Temperature of Water



(3) After Dehydration Treatment & Under Freezing Temperature of Water

Fig. 6 Comparison of Ice Crystals Inside Kerosene Samples with respect to Dehydration Treatment and Temperature.

Fig. 5 의 연소시험 결과는 2018년 12월에 수행한 연료온도 271 K 시험이었고 이때 입고된 연료는 30.15 ppm 이었다. 2018년 12월의 연소시험 결과와 당시 입고된 연료의 수분함유량 분석결과를 바탕으로 연료 수분함유량이 30 ppm 수준이면 연료 내 얼음생성에 의한 문제가 발생하지 않을 것이라고 판단하였다. 이에 연료 내 수분을 제거하기 위한 탈수시험을 2019년 8월에 수행하였고 연료저장탱크로 입고된 96 ppm 의 연료를 16.8 ppm 까지 낮추어 수분을 제거할 수 있었다[5].

탈수시험 과정에서 채취한 연료를 273 K 이하로 냉각했을 때 온도에 따른 연료의 육안검사 결과를 Fig. 6에 정리하였다. 탈수 시험을 수행하기 전 87 ppm 의 연료가 273 K 이하 온도일 때는 (1)에 보이는 것처럼 육안으로 확인되는 수 mm 크기의 결정 다수가 연료샘플 내에 생성이 되어 바닥에 가라앉아 있었고 유리병을 흔들면 결정은 부유했다가 다시 가라앉았다. 이 상태에서 온도가 273 K 이상이 되면 결정은 다시 연료에 녹아들어가 육안으로 확인이 불가능했다. 이것으로 미루어보아 273 K 이하의 온도에 연료내부에 생성된 결정은 얼음인 것으로 결론내릴 수가 있다.

탈수공정을 거친 후 채취한 16.8 ppm 의 연료를 같은 방법으로 살펴보았을 때 (3)에 보이는 것처럼 273 K 이하의 온도임에도 불구하고 (1)에서처럼 육안으로 확인되는 수 ㎜ 크기의 얼음 결정을 관찰할 수가 없었고 ㎛ 정도의 크기로 짐작되는 소량의 부유물질을 육안으로 확인할 수 있었다. 이 부유물질은 (2)에서처럼 273 K 이상의 온도가 되자 관찰할 수가 없었다.

Fig. 2의 연소시험 시 입고된 연료의 수분함유량은 75 ppm 이었는데[4] 이정도의 수분함유량이 해당 연소시험에서 어느 정도의 물을 걸러냈는지 간단한 계산을 통해 추정해볼 수 있다.

연소시험 시 연료유량 80 kg/s, 필터면적 0.21 ㎡, 물(얼음) 의 밀도는 계산의 편의를 위해 1000 kg/㎥ 으로 계산하였을 때 Fig. 2 시험의 연소시작부터 필터차압이 급격하게 증가하기 시작하는 120초 까지 필터를 통해 걸러졌을 것으

로 예상되는 얼음의 양은 0.6 kg 이며 이를 필터 면적으로 나누어 계산된 얼음결정의 두께는 약 2.86 mm 이다. 이는 Fig. 6에서 관찰한 수 mm 크기의 얼음결정을 고려하였을 때 납득할만한 수치이다. 따라서 271 K 로 냉각된 연료 내부에 부유하고 있던 수십 ㎛~수 ㎜ 크기의 얼음결정이 40 ㎛ 등급의 필터에 지속적으로 걸러져 차압을 증가시켰다고 결론내릴 수 있다.

3.2 탈수공정 후 연소시험 결과

상기에 언급한 수분분석 및 모사시험결과[4]와 탈수시험결과[5]를 바탕으로 터보펌프 연료입구 온도 271 K 조건의 75톤 액체로켓엔진 연소시험을 계획하였다. 2019년 8월 96 ppm 으로 연료저장탱크에 입고되어 16.8 ppm 으로 탈수공정을 거친 연료를 엔진 연소시험설비의 런탱크로 이송한 후 측정한 연료의 수분함유량은 25.3 ppm 이었다. Fig. 2 시험결과를 보인 2019년 7월에 수행한 연소시험계획에서 120초에 압력감소 모드를 제외한 모든 조건을 동일하게 시험조건을 설정하였고 그 결과는 Fig. 7 의 압력변화 그래프에 나타내었다.

Fig. 7 의 그래프에서 필터차압은 시동구간인 20초 부근에서 발생하는 섭동구간과 입구압력을 증가시키는 압력증가 모드 초기를 제외하면 일정한 값을 유지하는 것을 확인할 수가 있다. 이는 30 ppm 이하의 수분함량을 가진 연료를 273 K 이하로 냉각시켰을 때 40 ㎛ 등급의 필터가 적용된 연소시험설비에서 연료에 함유된 얼음입자에 의한 필터차압 증가문제를 발생시키지 않음을 보여주는 결과이다.

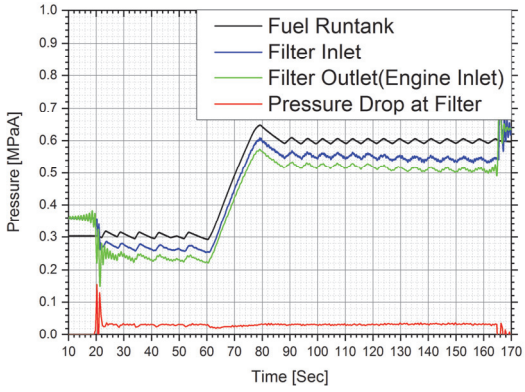


Fig. 7. Combustion Test Result after Dehydration Treatment of 271 K Kerosene @ 25 ppm

4. 결 론

케로신을 연료로 사용하는 한국형발사체 75톤급 액체 로켓 엔진의 개발시험프로그램 중 엔진 입구 연료온도 271 K 조건의 시험을 수행하였다. 시험결과 2018 년 12월에는 이상이 없었으나 2019년 7월에 수행한 연소시험에서는 터보펌프 연료 입구 전단에 설치한 40 ㎛ 등급의 설비필터에서 차압이 증가하여 입구압력이 낮아지는 현상으로 시험을 중단하였다. 본 논문에서 제시한 다각도의 분석과 검증시험을 통해 연료 내 수분함유량이 30 ppm 이하일 때 273 K 이하 냉각시험에서 이상이 없음을 2019년 8월의 연소시험을 통해 확인하였다. Jet-A1 규격을 만족하는 연료의 수분함유량이 문제를 일으키는 경우는 273 K 이하의 냉각연료를 사용하는 연소시험이므로 향후 액체로켓 엔진의 개발시험에서 해당 조건의 시험을 하고자 할 때는 반드시 연소시험 전 탈수공정을 수행하여 30 ppm 이하로 수분함량을 낮추어야 한다.

References

1. Kim, S.L., Youn, J.M., Hwang, I.H. and Han, Y.M., "An Comparison of physical and chemical characteristics of Aviation and Rocket Fuels using their specifications," *Proceeding of the 2016 KSPE Fall Conference*, pp. 1250-1255, Nov. 2016.
2. Kim, S.L., Kim, I.H., Youn, J.M. and Han, Y.M., "Introduction of Quality Control of Rocket Fuel at Naro Space Center," *Proceeding of the 2018 KSPE Spring Conference*, pp. 172-173, May 2018.
3. Mehta, G., Stone, W., Ingram, C., Don Bai,

S. and Sanders, T., "Comparative Testing of Russian Kerosene and RP-1," *AIAA 95-2962, 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE. Joint Propulsion Conference and Exhibit*, July 10-12, 1995/San Diego, CA.

4. Hwang, C.H., Kim, I.H., Park, J.Y., Kim, S.L, Yoo, B.I., Cho, N.K. and Han, Y.M., "Investigation of Fuel Pump Inlet Filter Blockage by using Cooled Jet-A1," *Proceeding of the 2020 KSAS Spring Conference*, pp. 776-777, Jul. 2020.
5. Hwang, C.H., Kim, I.H., Park, J.Y., Kim, S.L, Yoo, B.I., Cho, N.K. and Han, Y.M., "Dehydration result of Kerosene for KSLV-II Liquid Rocket Engine Combustion Test," *Proceeding of the 2019 KSAS Fall Conference*, pp. 1260-1261, Nov. 2019.
6. Lee, J.H., Jeon, J.S., Yoo, B.I., Kim, C.H., Lee, K.J. and Han, Y.M., "Performance Evaluation of Kerosene Supply System in 75-tonf Engine Ground Test Facility for KSLV-Ⅱ," *Proceeding of the 2016 KSPE Spring Conference*, pp. 849-853, May 2016.
7. Jeon, J.S., Wang, S.W., Chung, Y.G., Yoo, B.I., Lee, K.J. and Han, Y.M., "Fuel Supply System in the Combustion Chamber Test Facility for KSLV-II," *Proceeding of the 2015 KSPE Spring Conference*, pp. 783-786, May 2015.
8. Im, J.H., Yu, B.I., Kim, S.H. and Han, Y.M., "Comparative Study on Oxidizer Supply Characteristics with Pressurization System in Engine Test Facilities," *Proceeding of the 2019 KSAS Fall Conference*, pp. 1236-1237, Nov. 2019.