

다단연소 사이클 엔진 재점화 시험 시 밸브 작동순서에 따른 퍼지가스 유입에 대한 연구

황창환^{a,*} · 이정호^a · 김채형^a · 진준수^a · 박재영^a ·
이광진^a · 조남경^a · 김승한^a · 한영민^b

A Study on Purge Gas Inflow according to Valve Operation Sequence during Staged Combustion Cycle Engine Reignition Test

Changhwan Hwang^{a,*} · Jungho Lee^a · Chaehyeong Kim^a · Jun-Su Jeon^a · Jae-Young Park^a
· Kwang-Jin Lee^a · Nam-Kyung Cho^a · SeungHan Kim^a · Yeoungmin Han^b

^aEngine Test and Evaluation Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea

^bEngine Development Division, Korea Aerospace Research Institute, Korea

*Corresponding author. E-mail: chhwang@kari.re.kr

ABSTRACT

For the development of an improved upper-stage engine, research on a staged combustion cycle liquid rocket engine is in progress. A cold flow test, ignition test, and combustion test plans were established and performed to develop reignition combustion technology. In order to solve the problem of purge gas flowing into the fuel line, which may cause cavitation in the turbo pump during reignition, the test results of each stage were analyzed. Based on the analysis results, the purge gas inflow problem was solved by reducing the overlapping time between the operation of the bubble removal valve and the opening of the purge valve and the engine fuel valve. Based on this, the reignition combustion test was successfully performed.

초 록

개발된 성능의 상단엔진 개발을 위해 다단연소 사이클 액체로켓엔진의 연구가 진행 중이다. 재점화 기술을 개발하기 위한 수류시험, 점화시험, 연소시험을 계획하여 수행하였다. 재점화 시 터보펌프에서 캐비테이션 현상을 발생시킬 수 있는 연료라인으로의 퍼지가스 유입문제를 해결하기 위해, 각 단계의 시험결과를 분석하였다. 분석결과를 바탕으로 기포제거 밸브의 작동, 퍼지밸브와 엔진 연료밸브의 열림 중첩시간 줄임을 통해 퍼지가스 유입문제를 해결하였다. 이를 바탕으로 재점화 연소시험을 성공적으로 수행하였다.

Key Words: Staged Combustion Cycle(다단연소사이클), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Reignition(재점화), Cold Flow Test(수류시험), Purge Gas(퍼지가스)

Received 2 June 2022 / Revised 1 August 2022 / Accepted 8 August 2022

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

발사체에 탑재한 위성의 임무궤도 혹은 비행 목적에 따라서 발사체 상단엔진의 기능으로 재점화기능이 요구된다. 이에 상단엔진 성능 개량을 위해 개발 중인 다단 연소사이클 액체로켓엔진에[1-4] 재점화 기술을 적용하기 위한 연구가 진행 중이다[5-9].

재점화 기술을 구현하기 위해 구성된 다단연소 사이클 액체로켓엔진의 수력학적 특성을 파악하기 위하여 연료, 산화제 수류시험을 각각 수차례 반복 수행하였다. 연료수류시험에서 연료배관 내에 퍼지가스가 유입되었음을 확인하였고, 시험데이터 분석과 밸브 작동 시퀀스를 조정하여 퍼지가스 유입문제를 해결할 수 있었다[9].

본 논문에서는 유입된 퍼지가스를 제거할 수 있는 개선된 밸브 작동 시퀀스를 적용한 재점화 연소시험 결과에 대하여 분석하고자 한다.

2. 시험 구성 및 수류시험 분석

2.1 시험설비 및 엔진

다단연소 사이클 액체로켓엔진 개발시험은 나로우주센터에 구축된 7톤급 액체로켓 지상/고공엔진의 연소시험을 수행할 수 있는 3단 엔진 연소시험설비에서 수행하였고 해당 설비에는 연소

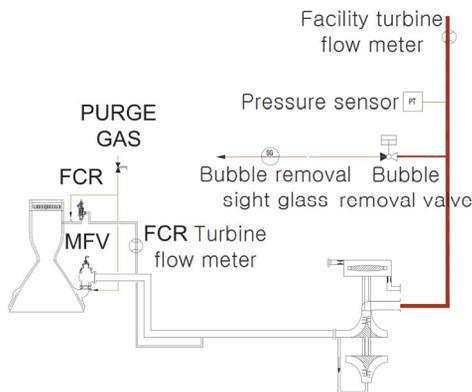


Fig. 1 Simplified schematic of staged combustion cycle liquid rocket engine.

시험 준비 시 연료라인의 기포제거상태를 확인할 수 있는 관측창과 흐름감지센서가 구성되어 있다[9-11].

Fig. 1에 본 논문의 결과 분석을 위해 사용된 엔진 및 설비 장치들을 연료라인 위주로 간략하게 나타내었다.

2.2 수류시험 분석

Table 1과 Fig. 2~4에 지난 연구의 수류시험 2 결과[9]를 추가분석하기 위하여 수정/추가하여 제시하였다. Fig. 2에서는 주연료밸브(MFV, Main Fuel Valve), 막냉각링(FCR, Fuel Cooling Ring) 밸브의 열림 시간이 수류시험 1[9]의 열림 시간보다 1.8초 짧았기 때문에 설비, FCR 유량계의 31.2초 이후의 상승 신호가 짧게 유지되었다.

Table 1. Valve sequences of cold flow test 2.

	Valve command sequence	
	Open	Close
Main fuel valve	30.48 s	31.5 s
Film cooling ring valve	30.72 s	
Purge valve	0 s open -> 31.0 s close 33.3 s open	

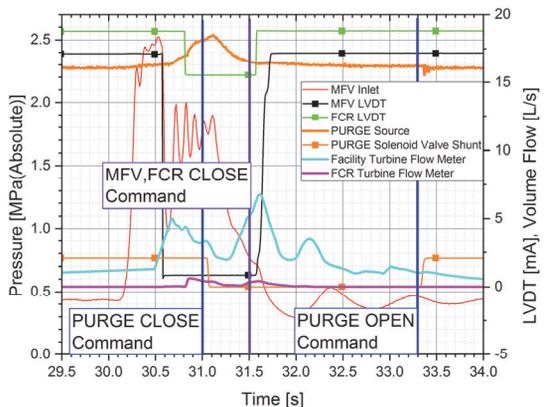


Fig. 2 Pressures, flow meter, valve LVDT in cold flow test 2 [9].

그리고 엔진 전단에 위치한 기포제거밸브를 작동할 때, CCTV를 통해 실시간으로 감시하고 있는 기포제거 관측창에 기포가 보이는 현상과 기포제거밸브 전단에 위치한 압력신호의 흔들림이 일치함을 확인하였다[9].

이에 Fig. 3에 엔진입구, 기포제거 밸브후단의 압력과 그 때 측정되는 엔진입구 설비 유량계 신호를 같이 제시하였다. 기포제거밸브를 10초 열림 유지 한 번, 10초 간격을 두고 40초 열림 유지 네 번 작동하도록 하여 재점화 대기시간 동안 유입된 퍼지가스를 제거할 수 있었다.

위의 결과는 MFV, FCR 밸브의 열림 시간을 줄여서 퍼지가스 유입시간을 줄인 것으로, 31.0초에 퍼지밸브를 닫았음에도 불구하고 퍼지가스가 유입되는 원인을 본 논문에서 추가로 분석하였다.

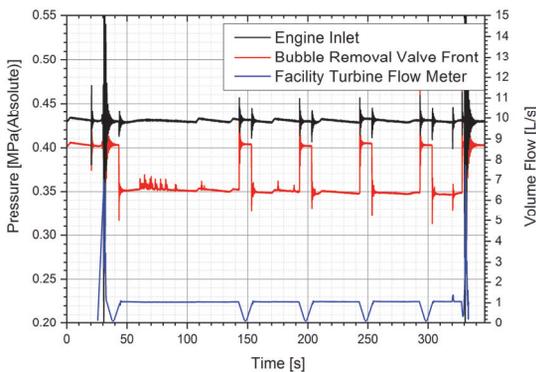


Fig. 3 Pressures, flow meter in cold flow test 2 for purge gas elimination [9].

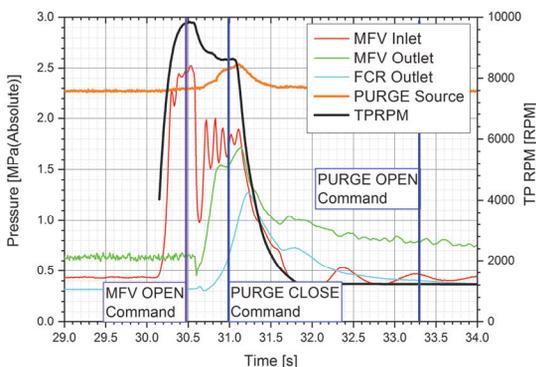


Fig. 4 Pressures and TPRPM in cold flow test 2.

Fig. 4에서 터보펌프회전수(TPRPM)는 값이 증가하다가 MFV가 개방되면서 8,200 RPM을 약 0.2초 유지하며, 이후 하락함을 확인할 수 있다. MFV 입구압력의 증가는 TPRPM의 상승발달과 일치하였다가 밸브가 열리는 시점에 일시적으로 압력 하강을 보이고, 1.8~2.0 MPaA을 유지하다가 감소한다. MFV와 FCR의 실제 열림 시점은 Fig. 2에서 선형 가변 변위 변환기(LVDT, Linear Variable Differential Transformer) 신호의 변화를 통해 확인할 수 있고, 각각 30.58, 30.82초에 완전히 열렸으며, 명령대비 열림 지연시간은 10 ms이다.

퍼지가스는 각 밸브의 출구 후단에서 공급되기 때문에 TPRPM과 MFV 입구압력이 발달하여도 각 밸브가 열리기 전, 특히 MFV가 열려 출구압력이 발달하기 전까지는 주황색 실선의 퍼지가스 공급압력(가스공급 없을 때 절대압력 4.0 MPa 설정)은 변화가 없다. 그리고 30.58초에 MFV가 완전히 열린 후, 30.67초에 MFV 출구압력이 발달함에 따라, 퍼지밸브 닫힘 명령 전 시점(31.0초)임에도 퍼지가스 공급이 줄어들게 되고 퍼지가스 공급압력은 서서히 상승한다.

하지만 31.0초에 퍼지가스 밸브 닫힘 명령이 실행되어 퍼지가스 솔레노이드밸브의 구동전류(Fig. 2 네모기호 주황색 실선)가 31.08초에 소멸하였음에도 퍼지밸브가 닫히지 않았기 때문에, 31.1초 TPRPM이 감소하여 엔진의 각 연료라인의 압력이 감소하자 퍼지가스 공급량이 다시 증가한다. 이는 퍼지가스 공급압력이 감소함을 통해 확인할 수 있다.

그리고 설비유량계 측정 결과에서 터보펌프 동력으로 인한 최대 유량(설비유량계: 약 5 L/s, FCR유량계: 약 0.6 L/s)보다 더 큰 유량(설비유량계: 약 6.8 L/s, FCR유량계: 약 0.3 L/s)이 터보펌프 회전이 1,800 RPM까지 감소한 시점에 나타났다. 이는 유체의 흐름방향과 관계없는 터빈유량계의 신호변환 특성을 고려할 때, 다량의 가스가 역류하여 터빈유량계를 지나가며 신호를 발생시킨 것으로 판단하였다.

두 유량계 값의 차이가 나는 이유는 MFV와 FCR 밸브의 유량계수 차이가 약 3.6배, 퍼지 오

리피스의 유량계수 차이 또한 약 3.2배 나기 때문이다. 또한 닫힘 지연시간도 MFV는 0.18초, FCR은 0.02초로 FCR 이 빠르게 작동하기 때문에 FCR 밸브를 통한 가스유입량이 훨씬 적게 나타나게 되고, 설비유량계에서는 MFV와 FCR을 통한 가스유입이 모두 계측되기 때문이기도 하다.

따라서 Fig. 2의 분홍, 하늘색 실선의 터빈유량계에서 31.2초 이후에 유량신호가 증가하는 현상은, MFV, FCR LVDT 신호를 보았을 때 아직 열려있는 MFV, FCR을 통해 퍼지가스가 역류하여 발생했다고 해석하였다.

이와 같은 상세분석을 통해 수류시험에서 발생한 연료라인의 퍼지가스 역류는

- ① 시동터빈의 동력과 예연소기로부터의 터빈 동력이 이어지지 않음
- ② 흐름이 있는 상태에서 닫히지 않는 퍼지밸브(솔레노이드밸브) 작동 특성

현상에 기인한 것으로 연소시험을 수행할 때에는 이와 같은 퍼지가스 역류현상이 발생하지 않을 것이라 판단하고 연소시험을 준비하였다.

3. 연소시험 결과

2장에서와 같이 수류시험을 완료한 후 연소시험은 다음과 같이 구성하였다.

- ① 점화시험 2.5초
- ② 연소시험(30초) + 대기(370초) + 재점화 연소시험(10초)

점화시험을 통해 수류시험에서 확인하였던 퍼지가스 역류현상에 대한 확인 및 분석 후 재점화를 포함한 연소시험을 수행하였다.

3.1 점화시험 결과

점화시험은 점화기밸브 열림 후 MFV 닫힘 명령시간 기준으로 2.5초를 수행하였다. Table 2

에 수류시험 대비 달라진 밸브들의 작동시간을 정리하였다. 수류시험에서와 같이 퍼지가스 공급 중단은 닫힘 명령 이후가 아닌 MFV, FCR 밸브 후단의 압력이 형성된 후에 퍼지가스 공급이 중단된다. 그리고 연소압 형성 이후 32.5초에 퍼지

Table 2. Valve sequences of ignition test.

	Valve command sequence	
	Open	Close
Main fuel valve	30.48 s	32.8 s
Film cooling ring valve	30.72 s	
Purge valve	0 s open -> 31.0 s close 32.5 s open	

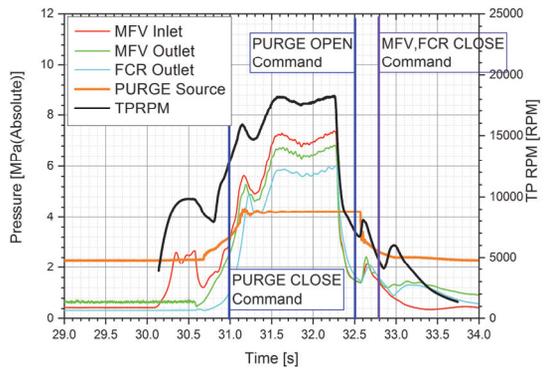


Fig. 5 Pressures and TPRPM in ignition test.

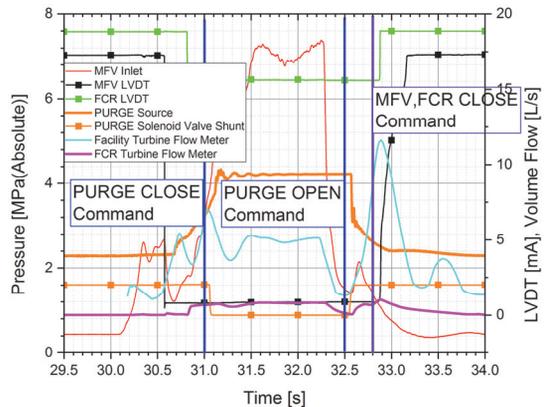


Fig. 6 Pressures, flow meter, valve LVDT in ignition test.

밸브 열림 명령이 내려져 퍼지가스가 재공급되기 전까지, 퍼지가스 공급압력이 설정압력 값으로 유지되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 5, 6).

MFV, FCR 밸브는 32.8초에 닫힘 명령이 내려져서 각각 33.17, 32.88초에 완전히 닫혔으며, 퍼지밸브는 32.5초에 명령이 내려지고 32.58초에 퍼지가스 공급이 시작된다(Fig. 6).

엔진동력 공급이 종료되어 TPRPM 감소시점에서, 퍼지가스 공급과 동시에 연소구간에서보다 더 큰 유량 값을 보이는 유량계 신호의 증가현상이 발생하였다. 이는 수류시험에서도 관찰된 퍼지가스 유입에 따른 유량계 신호 특성으로, 퍼지가스 유입이 엔진연소 종료과정에서 발생하였다고 판단하였다.

점화시험을 통해 수류시험에서 확인한 엔진시동 시 퍼지밸브의 닫힘 특성이 연소시험에서는 문제가 되지 않음을 확인하였지만 연소 종료 시 퍼지가스 유입문제는 해결되지 않았음을 확인하였다. 엔진 연소 종료 시에 퍼지가스의 공급은 분사기/추진제 공급다기관(manifold)으로 연소가스의 역류, 연소가 되지 않은 연료/산화제의 혼합물의 내부폭발을 방지하기 위함이기 때문에 퍼지가스의 공급은 엔진을 보호하기 위한 필수사항이다. 본 연구의 재점화 연소시험에서는 퍼지가스 유입량의 최소화와 엔진보호 두 가지 목적을 모두 달성하기 위해 밸브 작동순서를 조절하여 재점화 연소시험에 적용하였다.

3.2 재점화 연소시험 결과

재점화 연소시험은 한 번의 자동시퀀스 진행으로 ① 30초 연소 ② 370초 대기 ③ 10초 재점화 연소가 연속적으로 진행이 되도록 시험구성을 하였다.

앞서 점화시험의 연소 종료 시에는 퍼지밸브가 MFV, FCR 밸브 닫힘 명령보다 0.3초 일찍 열림 명령이 내려지게 구성하였지만 엔진보호와 퍼지가스 역류를 최소화하기 위하여 동시에 명령이 내려지도록 구성하였고 Table 3에 그 내용을 정리하였다.

Fig. 7, 8에 1차 30초 연소시험의 결과를 나타내었다. 점화 후 예연소기 연료라인의 유량제어

밸브를 이용한 엔진제어를 통해[2,4], 약 10초 동안 엔진 추력이 상승하는 구간을 지나, 약 20초 동안 정상상태를 유지 후 연소를 종료하였다. 연

Table 3. Valve sequences of reignition combustion test.

	Valve command sequence	
	Open	Close
Main fuel valve	30.48 s	60.3 s
Film cooling ring valve	30.72 s	
Purge valve	0 s open → 31.0 s close 60.3 s open	

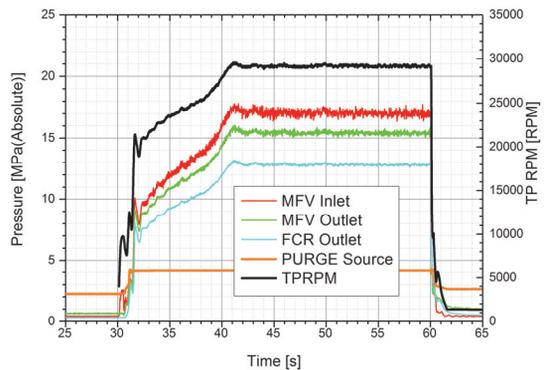


Fig. 7 Pressures and TPRPM in 30 seconds combustion test - 1st ignition.

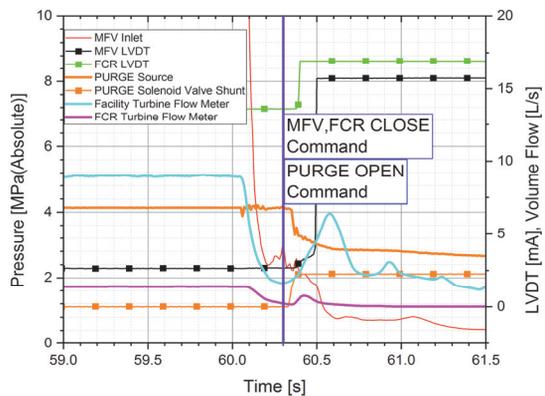


Fig. 8 Pressures, flow meter, valve LVDT in 30 seconds combustion test - 1st ignition.

소 종료 시에 3.1 절에서의 퍼지밸브와 MFV, FCR 밸브 작동시간의 겹침을 최소화하기 위해 60.3초에 퍼지밸브 열림, MFV, FCR 밸브 닫힘

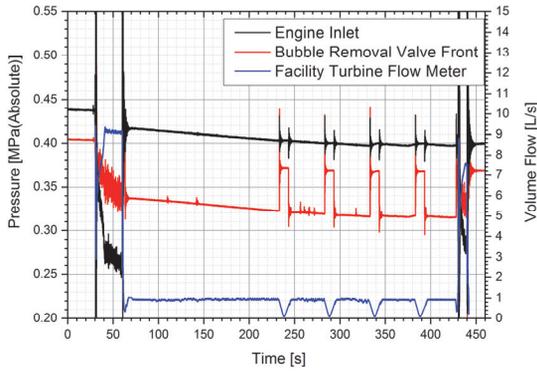


Fig. 9 Pressures, flow meter during reignition combustion test for purge gas elimination.

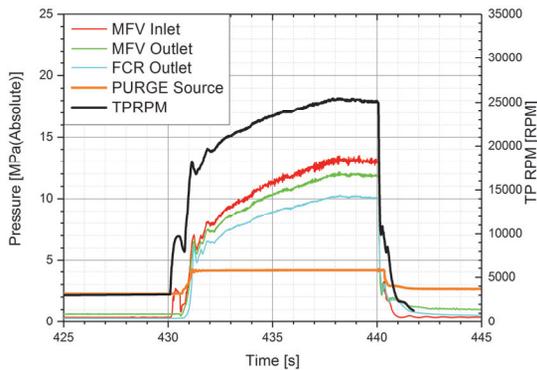


Fig. 10 Pressures and TPRPM in 10 seconds combustion test - reignition.

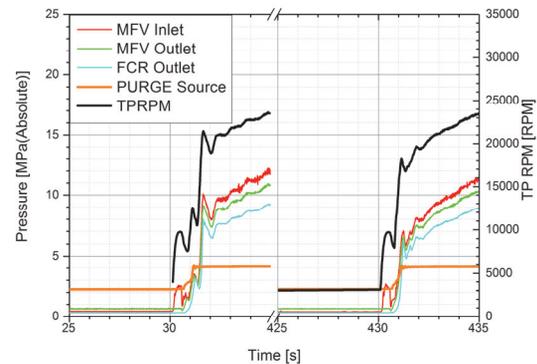


Fig. 11 Comparisons of pressures and TPRPM developing between 1st ignition and reignition.

명령이 수행되었다. 퍼지밸브는 60.38초에 바로 열려 퍼지가스가 공급이 되었고 MFV는 60.50초, FCR 밸브는 60.40초에 완전히 닫혔다.

따라서 MFV는 0.20초, FCR 밸브는 0.10초 동안 퍼지밸브와 열림 겹침이 있었고, 퍼지가스가 역류하여 유입되었음을 엔진입구와 FCR 연료라인의 터빈유량계 신호를 통해 확인할 수 있다. 하지만 이 시험에서 나타난 퍼지가스 유입은 3.1 절의 점화시험대비 그 양이 적었음을 데이터를 통해 확인할 수 있다.

그에 대한 근거로 0.3초의 밸브 작동 시간 간격을 둔 3.1절 점화시험에서, 퍼지밸브 열림 이후 엔진입구 유량계의 최대값은 11.6 L/s를 보인 반면 Fig. 8에서 퍼지밸브 열림 이후 엔진입구 유량계의 최대값은 6.4 L/s 로 나타났다.

이는 1차 연소 종료 후 재점화를 위해 대기하는 동안 기포제거밸브를 작동한 결과인 Fig. 9에서 63~427초 구간 기포제거 관측창 전단압력의 섭동이, Fig. 3에서 43~327초 구간 기포제거 관측창 전단압력 섭동보다 더 작은 모습을 보이는 결과를 통해 퍼지가스의 유입현상이 더욱 감소하였음을 확인할 수 있다.

이와 같이 퍼지가스의 역류를 줄이고, 유입된 퍼지가스를 기포제거밸브 작동을 통해 제거하여 연료라인에 연료 채움 상태를 최상으로 유지하였고, 430초에 재점화연소를 시작하여 10초 동안 연소한 후에 정상적으로 시험을 종료한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 재점화연소 구간에서는 재점화 성공여부와 재점화 시동 시 초기 출력발달을 확인하고자 하였다.

Fig. 11에서는 첫 번째 점화에서 연소 초기 압력, TPRPM 발달 상태와 두 번째 점화에서의 그 결과들을 같은 시간간격으로 비교하였다. 비교 결과 첫 번째 점화 후 1.17초 지난 뒤에 나타나는 작은 톱이 재점화 시에는 나타나지 않는 것이외에는 큰 차이점이 없이 성공적으로 재점화 연소시험을 수행하였다. 점화 후 1.17초 지점의 차이점은 엔진 산화제 라인의 냉각상태에 따른 산화제 공급시점 차이에 의한 것으로 추정되며 이는 별도의 연구를 통해 그 원인을 파악할 예정이다.

4. 결 론

상단엔진 고성능화를 위하여 다단연소 사이클 액체로켓 엔진을 개발하였고 임무 다각화, 궤도 투입 성능향상을 위한 재점화 연소 기술을 개발하였다. 엔진 및 재점화 기술 개발을 위한 과정으로 추진제 수류시험, 점화시험, 재점화 연소시험 순서로 시험프로그램을 구성하였다. 그 과정에서 엔진연소 종료퍼지는 연료배관 내에 퍼지 가스 유입을 발생시킬 수밖에 없음을 확인하였고, 이를 해결하기 위해 재점화 대기 구간 중에 연료배관으로 유입된 퍼지 가스를 제거하기 위한 밸브 작동법과 밸브 작동순서를 개발하였다.

개발한 밸브 작동순서를 연소시험에 적용시킨 재점화 연소시험을 수행하였고, 시험결과를 분석하여 재점화 연소기술을 성공적으로 개발하였음을 확인하였다.

상기의 과정을 통해 개발된 재점화 연소시험 기술을 향후 개발될 다단연소 사이클 액체로켓 엔진 운용 기술로 확장하여 재점화에 적합한 엔진 시퀀스를 개발하는데 활용할 예정이다.

References

1. Woo, S.P., Lee, K.J., Lee, J.H., Im, J.H., Jeon, J.S., Hwang, C.H. and Han, Y.M., "The Design of Technology Demonstration Model for Tests of Staged Combustion Cycle Engine," *Proceeding of the 2016 KSPE Fall Conference*, Jeongseon, Korea, pp. 934-937, Dec. 2016.
2. Hwang, C.H., Lee, K.J., Woo, S.P., Im, J.H., Jeon, J.S., Lee, J.H., Yoo, B.I. and Han, Y.M., "Pressure Control of Staged Combustion Liquid Rocket Engine," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 22, No. 4, pp. 18-23, 2018.
3. Kim, C.H., Lee, J.H., Woo, S.P., So, Y.S., Yi, S.J., Lee, K.J., Cho, N.K., Han, Y.M and Kim, J.H., "Development Status of Technology Demonstration Model for Staged Combustion Cycle Engine," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 23, No. 4, pp. 104-111, 2019.
4. Hwang, C.H., Kim, C.H., Park, J.Y., Woo, S.P., So, Y.S., Lee, K.J., Yi S.J., Lee, J.H., Im, J.H., Jeon, J.S., Lee, J.H. and Han, Y.M., "Multi Operating Point Combustion Test of Staged Combustion Liquid Rocket Engine," *Proceeding of the 2019 KSAS Spring Conference*, Byeonsan, Korea, pp. 673-674, Apr. 2019.
5. Lee, J.H., Kim, C.H., Woo, S.P., So, Y.S., Jeon, J.S., Hwang, C.H., Lim, J.H., Yi, S.J., Lee, K.J. and Han, Y.M., "Briefing of Engine Development Status and Reignition System of Staged Combustion Cycle Engine," *Proceeding of the 2019 KSAS Spring Conference*, Byeonsan, Korea, pp. 677-678, Apr. 2019.
6. Jeon, J.S., Lee, J.H., Lee, K.J. and Han, Y.M., "Design of the Supply System for an Independent Test for Reignition System of a Staged Combustion Cycle Engine," *Proceeding of the 2020 KSPE Fall Conference*, Busan, Korea, pp. 738-738, Nov. 2020.
7. Lee, J.H., Jeon, J.S., Woo, S.P., Yi, S.J., Hwang, C.H., So, Y.S., Kim, C.H., Lee, K.J., Kim, S.H. and Han, Y.M., "Firing Test of Staged Combustion Cycle Engine using Re-ignition Bottle," *Proceeding of the 2021 KSPE Fall Conference*, Busan, Korea, KSPE 2021-2256, Nov. 2021.
8. Jeon, J.S., Lee, J.H., Lee, K.J., Kim, S.H. and Han, Y.M., "A verification test of ignition agent charging characteristics for reignition system of a staged combustion cycle engine," *Proceeding of the 2021 KSAS Spring Conference*, Samcheok, Korea, pp. 904-905, Nov. 2021.
9. Hwang, C.H., Lee, J.H., Jeon, J.S., Woo,

- S.P., So, Y.S., Kim, C.H., Lim, J.H., Yi, S.J., Park, J.Y., Kim, S.H., Lee, K.J., Yoo, B.I., Kim, S.H., Cho, N.K. and Han, Y.M., "Influx and Elimination of Purge Gas in Fuel line during Staged Combustion Cycle Engine Cold Flow Test," *Proceeding of the 2022 KSAS Spring Conference*, Goseong, Korea, pp. 803-804, Apr. 2022.
10. Hwang, C.H., Lee, J.H., Yoo, B.I., Kim, S.H. and Han, Y.M., "Vacuuming and Filling of Liquid Rocket Combustion Facility Fuel Line using Auto Control Algorithm," *Proceeding of the 2021 KSAS Spring Conference*, Samcheok, Korea, pp. 902-903, Jul. 2021.
11. Kim, S.H., Jung, Y.G., Wang, S.W., So, Y.S. and Han, Y.M., "Development of 3rd Stage Engine Test Facility for KSLV-II Propulsion System," *Proceeding of the 2013 KSPE Spring Conference*, Busan, Korea, pp. 451-455, May 2013.