

오리피스 결합형 릴리프 밸브의 적용을 통한 연료공급용 펌프시스템 연료 온도상승 저감 기술 개발

박창규^{a,*} · 이창섭^a · 박희승^a

Development of A Method for Reducing Temperature of a Fuel Supply Pump System Using Orifice-combined Relief Valve

Chang Kyoo Park^{a,*} · Chang Seop Lee^a · Hee Seung Park^a

^aMissile Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: ckpark@add.re.kr

ABSTRACT

The fuel supply pump system using a turbo pump operates with high-pressure fuel pressurized by the turbo pump. The system is a fuel circulating system and the fuel temperature increases continuously due to the heat generated by the turbo pump. The high temperature fuel causes various component malfunction. We develop and analyze an orifice-combined relief valve to reduce the fuel temperature.

초 록

연료공급용 펌프시스템은 터보펌프를 통해 승압된 고압의 연료를 활용하는 시스템이다. 연료공급용 펌프시스템은 연료를 순환시켜 사용하는 시스템으로, 터보펌프에서의 출력손실에 의해 열이 발생하여 연료의 온도가 지속적으로 상승한다. 고온의 연료는 시스템의 운용 환경을 가혹하게 만들며 구성품의 오작동을 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 오리피스 결합형 릴리프 밸브를 적용하여 연료 온도상승량을 저감시켰다.

Key Words: Turbo Pump(터보펌프), Relief Valve(릴리프 밸브), Fuel Supply System(연료 공급 시스템), Cooling Flowrate(냉각유량), Pump Efficiency(펌프효율)

1. 서 론

터보펌프를 사용하는 연료공급용 펌프시스템은 고압의 연료를 엔진의 연료분사기(injector)와

작동기(actuator)에 공급하는 역할을 수행한다. 연료공급용 펌프시스템은 필연적으로 펌프 출력 손실에 따라 열이 발생하여 연료 온도를 상승시키고, 높은 연료온도는 부품 고장 및 오작동을 유발할 수 있다. 이를 해소하기 위해 오리피스 결합형 릴리프 밸브를 고안하여 연료공급용 펌프시스템 연료 온도상승 저감 기술을 개발하였

으며, 이에 대한 해석 및 시험을 수행하여 성능을 검증하였다.

2. 연료공급 시스템 개요

일반적으로 터보펌프를 사용하는 연료공급 시스템은 Fig. 1과 같이 연료탱크, 연료공급배관, 연료 터보펌프, 유압 터보펌프, 릴리프 밸브, 작동기, 연료분사기로 구성된다. 연료탱크에서 공급된 연료는 연료 터보펌프와 유압 터보펌프로 공급되어 각각의 펌프에서 압력이 올라간 후, 각각 연료 분사기와 작동기로 공급된다. 유압 터보펌프 출력은 입/출구 간 기체 압력과 유량에 의해 결정되는데, 입구 기체 압력이 높고 입출구 기체압력비가 큰 조건에서는 터보펌프 출력이 커지고 입구 기체 압력이 낮고 입출구 기체압력비가 작은 조건에서는 터보펌프 출력이 낮아진다. 또한 같은 터보펌프 출력에서도 펌프유량이 많아지면 펌프압력이 낮아지고 반대의 경우에는 펌프압력이 높아지는 경향을 보인다. 입출구 공기 압력은 Fig. 2와 같이 비행 조건에 따라 지속

적으로 변화한다. 유압 터보펌프 출력이 높고 유량이 작으면 유압 터보펌프 토출압력이 높아져 작동기에 과도한 압력이 작용할 수 있다. 이러한 경우를 방지하기 위하여 유압 터보펌프 후단과 연료 터보펌프 전단을 연결하는 릴리프 밸브가 적용된다. 릴리프 밸브의 유량만큼 유압 터보펌프의 유량이 증가하므로 압력 상승이 제한되어 유압 연료 터보펌프 및 작동기 안정성을 확보할 수 있다.

3. 기존 시스템의 문제점 및 개선방안

유압 터보펌프에서 압력이 상승된 후 작동기 구동에 활용된 연료는 연료탱크로 귀환되어 재사용 되는데, 이 과정에서 연료온도가 상승한다. 유압 터보펌프는 원심펌프로, 압력 상승에 사용된 에너지를 제외한 에너지는 대부분 열로 전환되어 연료의 온도를 상승시킨다. 원심펌프는 상대적으로 효율이 낮아 연료온도가 많이 상승하는 특성이 있기 때문에 작동 시간이 길어질수록 연료 온도는 지속적으로 상승하게 되어 시스템 운용 환경을 가혹하게 만든다. 이러한 악영향을 제거하기 위해 연료 온도 상승을 저감시키는 방안이 필요하다.

원심펌프는 비속도가 큰 펌프로서 저압, 대유량의 운용 조건에 유리하다. 유압작동기를 작동시킬 수 있는 고압을 토출하기 위해서는 펌프 직경을 키워야 하는데, 원심펌프의 압력은 펌프 직경의 제곱에 비례하지만 유량은 직경의 제곱에 펌프폭을 곱한 값에 비례하므로 펌프가 커질 경우 유량이 더 급격히 증가한다. 작동기에 사용되는 펌프는 고압을 요구하며 최고효율점보다 훨씬 소유량 조건으로 운용된다. 터보펌프를 소유량 조건에서 운용하면 적은 냉각유량과 낮은 펌프 효율때문에 온도상승량이 커지게 된다. 따라서 유압 터보펌프의 경우 유량을 키우면 온도상승량을 줄이는 효과를 볼 수 있다.

Fig. 3은 기존에 사용되던 릴리프 밸브(좌)와 오리피스 결합형 릴리프 밸브(우)의 개념도이다 [1]. 기존의 릴리프 밸브(Fig. 3의 왼쪽 그림)는

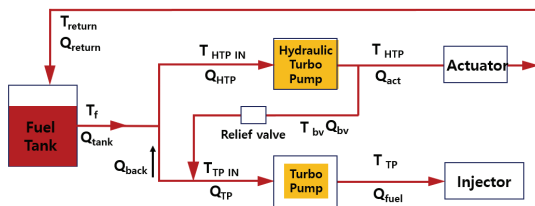


Fig. 1 Fuel supply system configuration.

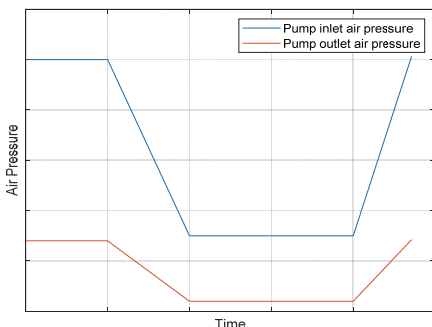


Fig. 2 Pump inlet / outlet air pressure.

유압 터보펌프 후단 압력이 릴리프 밸브 열림 압력 이상일 때만 작동하므로 유압 터보펌프 토출압력이 낮을 경우, 릴리프 밸브를 통과하는 유량이 존재하지 않는다. 이로 인해 유압 터보펌프의 전체 토출유량이 감소하면 적은 냉각유량과 낮은 펌프효율 때문에 연료온도가 크게 증가하는 문제가 발생한다. 이에 반해 오리피스 결합형 릴리프 밸브(Fig. 3의 오른쪽 그림)처럼 릴리프 밸브에 오리피스를 결합한 경우 압력이 낮은 경우에도 오리피스를 통과하는 유량이 존재한다.

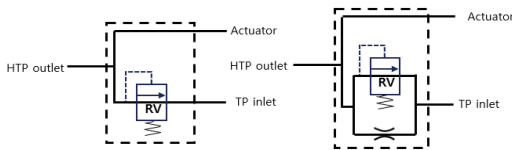


Fig. 3 Relief valve(left), orifice-combined relief valve(right).

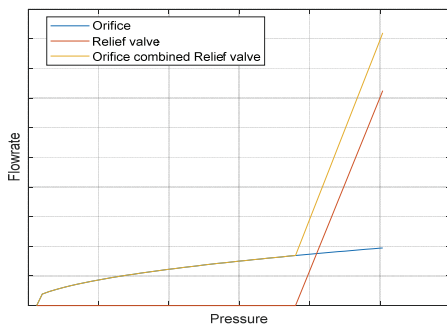


Fig. 4 Relief v/v, orifice-combined relief v/v flowrate.

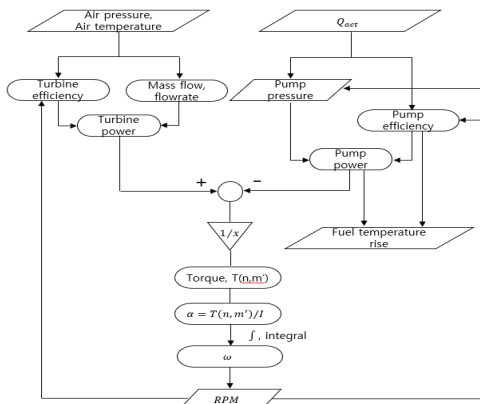


Fig. 5 Hydraulic turbo pump simulation flowchart.

전단의 압력에 따른 오리피스, 릴리프 밸브, 오리피스 결합형 릴리프 밸브의 유량을 Fig. 4에 나타내었으며, 오리피스 결합형 릴리프 밸브를 적용하면 펌프 냉각유량을 늘리고 펌프효율을 상승시켜 연료 온도상승량을 저감할 수 있다.

4. 성능 시뮬레이션

오리피스 결합형 릴리프 밸브 적용을 통한 연료공급용 펌프시스템의 연료 온도상승 저감효과를 확인하기 위하여 연료공급용 펌프시스템 거동을 계산할 수 있는 성능해석 모델을 고안하였고, 이를 통해 유압 터보펌프 성능 및 연료 온도 시뮬레이션을 수행하였다[1].

4.1 유압 터보펌프 성능해석

연료 온도 시뮬레이션을 위해 유압 터보펌프 성능해석 모델을 고안하였다. 터보펌프는 기체 압력에너지를 유체(연료) 압력에너지로 전환시키는 장치로 크게 노즐, 터빈, 펌프로 구성된다. 노즐 전단의 기체가 노즐을 통과하면서 가속되어 기체 압력에너지가 속도에너지로 변환되고, 이 속도에너지로 터빈이 회전하며 터빈과 한 축으로 연결된 펌프를 회전시켜 펌프가 유체에 압력 에너지를 공급하게 된다. 유압 터보펌프 성능해석 순서도를 Fig. 5에 도식화하였다. 유압 터보펌프는 터빈 출력과파워가 구동력으로, 펌프 입력과파워가 제동력으로 작용하여 구동력과 제동력에 의한 가속을 통하여 결정된 회전수에서 운용된다. 성능해석 모델에서는 입/출구 공기압력, 공기온도 및 펌프 유량(Q_{act})을 입력변수로 사용하여 회전수, 토출압력, 연료온도 상승량 등의 상태값을 계산하였다.

4.2 유압 터보펌프로 인한 발열량 계산

성능해석 모델에서 터보펌프로 인한 연료 온도 상승량은 터보펌프 손실 출력의 80%를 발열량이라고 가정하여 계산하였다. 이는 실제 시험에서 측정한 온도 데이터를 토대로 선정한 값이다. 터보펌프의 손실 출력(N_{loss})은 Eq. 1과 같이

나타낼 수 있으며, 연료 온도 상승량($\Delta T_{HTPloss}$)은 Eq. 2와 같이 계산할 수 있다.

Eq. 1, 2에서 N_p , η_p , \dot{m} , ρ , 및 Q 는 각각 터보펌프 입력 파워, 펌프 효율, 펌프 질량유량, 연료 밀도, 그리고 펌프 부피유량을 의미한다.

$$N_{loss} = N_p(1-\eta_p) \quad (1)$$

$$\dot{m} C_P \Delta T_{HTPloss} = \rho Q C_P \Delta T_{HTPloss} = 0.8 N_{loss} \quad (2)$$

$$\Delta T_{HTPloss} = \frac{0.8 N_{loss HTP}}{\rho Q C_P HTP} \quad (3)$$

4.3 연료 온도 계산

연료 혼합과 열용량을 고려한 연료온도(T) 계산 모델을 Fig. 6에 도식화하였다. 출구온도(T_3)는 입구온도(T_1 , T_2), 입구유량(\dot{m}_1 , \dot{m}_2), 입구 정압비열(C_{p1} , C_{p2}), 및 출구 정압비열(C_{p3})과 연료 질량 m 에 해당하는 열용량을 고려하여 계산할 수 있다. Eq. 4와 5는 출구온도의 변화율과 이를 적분하여 출구온도를 구하는 수식을 나타낸다.

$$\frac{dT_3}{dt} = \frac{C_{p1} \dot{m}_1 (T_1 - T_3) + C_{p2} \dot{m}_2 (T_2 - T_3)}{C_{p3} m} \quad (4)$$

$$T_3 = \int \Delta T_3 dt \quad (5)$$

연료공급 시스템의 연료 온도는 각 지점에서 연료의 혼합과 배관, 장비의 열용량을 고려하여 계산하였으며, 위치별 유량 및 연료온도의 정의를 Fig. 1에 나타내었다. 연료 터보펌프에서 토출되는 연소유량이 릴리프 유량보다 작은 경우 ($Q_{fuel} \rho_{TP} \leq Q_{bv} \rho_{bv}$) 연료탱크에서 연료 터보펌프로 공급되는 연료($Q_{tank TP}$)는 Eq. 6과 같이 0이 되고 연료 터보펌프 입구에서 유압 터보펌프 입구로 역류하는 Q_{back} 유량이 발생한다.

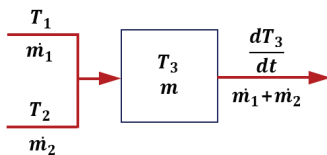


Fig. 6 Fuel mixing simulation model.

$$Q_{tank TP} = 0 \quad (6)$$

$$Q_{back} \rho_{bv} = Q_{bv} \rho_{bv} - Q_{fuel} \rho_{TP} \quad (7)$$

연소 유량이 릴리프 유량보다 큰 경우 ($Q_{fuel} \rho_{TP} \geq Q_{bv} \rho_{bv}$) 연료 탱크에서 연료 터보펌프로 공급되는 연료는 Eq. 8과 같고 Eq. 9와 같이 역류유량은 0이 된다.

$$Q_{tank TP} \rho_{TF} = Q_{fuel} \rho_{TP} - Q_{bv} \rho_{bv} \quad (8)$$

$$Q_{back} = 0 \quad (9)$$

연료탱크에서 유압 터보펌프로 공급되는 연료는 Eq. 10과 같다.

$$Q_{tank HTP} \rho_{TF} = Q_{act} \rho_{HTP} + (Q_{bv} - Q_{back}) \rho_{bv} \quad (10)$$

이를 이용하여 유압 터보펌프의 입구 연료온도(T_{HTPIN})를 구하기 위한 개념도는 Fig. 7과 같고 입구 연료온도의 변화율은 Eq. 11과 같다. 이 변화율을 적분하여 유압 터보펌프의 입구 연료온도를 구할 수 있다.

$$\frac{dT_4}{dt} = \frac{C_{p1} Q_1 \rho_1 (T_1 - T_4) + C_{p6} Q_6 \rho_6 (T_6 - T_4)}{C_{p4} m_{in HTP}} \quad (11)$$

유압 터보펌프의 출구 연료온도를 구하기 위한 개념도는 Fig. 8과 같고 출구 연료온도 변화율은 Eq. 12와 같다. 이 변화율을 적분하여 유압 터보펌프의 출구 연료온도를 구할 수 있다.

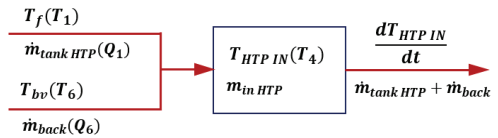


Fig. 7 HTP inlet fuel temperature simulation model.

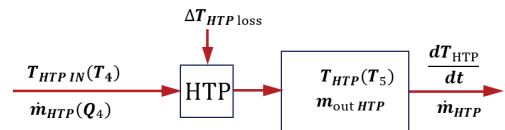


Fig. 8 HTP outlet fuel temperature simulation model.

$$\frac{dT_5}{dt} = \frac{C_{p4} Q_4 \rho_4 (T_4 + \Delta T_{HTPloss} - T_5)}{C_{p5} m_{out HTP}} \quad (12)$$

연료 터보펌프 입출구 등 다른 지점 연료온도도 동일한 방식으로 구할 수 있으며, 실제 시험에서 계측한 결과와 비교하여 모델의 정확성을 검증하였다.

4.4 시뮬레이션 결과

성능해석과 연료온도 계산을 통해 오리피스 결합형 릴리프 밸브의 온도 상승량 저감 효과를 확인하였다. Fig. 9는 Fig. 2와 같은 입출구 기체 압력 조건에서 릴리프 밸브를 통해 흐르는 유량을 나타낸 그래프이다. 기존 릴리프 밸브를 적용할 경우 터보펌프 압력이 낮은 구간에서 릴리프 유량이 없지만, 오리피스 결합형 릴리프 밸브를 적용한 경우 일정량의 유량이 흐르는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 릴리프 밸브와 오리피스 결합형 릴리프 밸브를 적용했을 때 유압 터보펌프 출구 연료온도를 비교한 그래프이다. 출구 연료온도의 최대값이 감소하고, 특히 릴리프 밸브 유량이 급격히 감소하는 구간에서 연료 온도의 급격한 상승/하강현상이 없어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 터보펌프 압력이 낮은 조건에서도 릴리프 유량이 흐르도록 하여 일정 수준의 냉각유량을 유지하고 유압 터보펌프 효율을 높은 수준으로 유지하였기 때문이다. 높은 연료온도와 급격한 연료온도의 변화는 작동기의 고장과 오작동을 유발하고 운용조건을 가혹하게 만들기 때문에 오리피스 결합형 릴리프 밸브를 적용하여 작동기의 가혹한 운용조건을 회피할 수 있다.

오리피스 결합형 릴리프 밸브를 적용하면 유압 터보펌프 유량을 오리피스 유량만큼 증가시키기 때문에 토출 압력이 감소할 가능성이 있다. 하지만 Fig. 11에서 확인할 수 있는 바와 같이 펌프 자체 효율이 상승함으로써 감소한 압력을 보상하여 펌프 후단 압력은 유사하게 유지되었다.

유압 터보펌프에서 가열된 연료는 연료탱크로 회수되어 재사용된다. 유압 터보펌프의 입구 연료온도는 연료탱크 연료온도와 거의 유사한 값

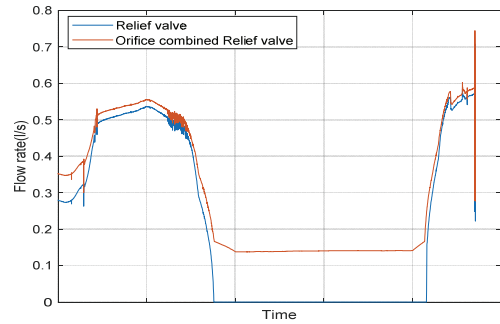


Fig. 9 Relief valve flowrate (simulation).

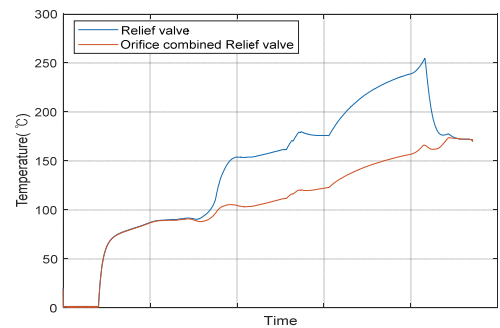


Fig. 10 Pump outlet fuel temperature (simulation).

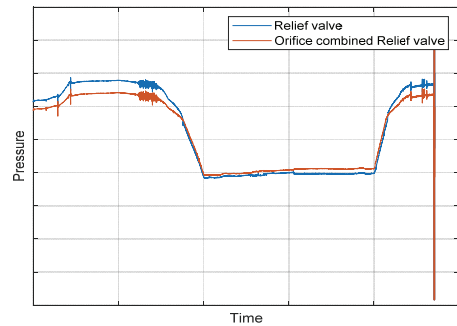


Fig. 11 Pump outlet fuel pressure (simulation).

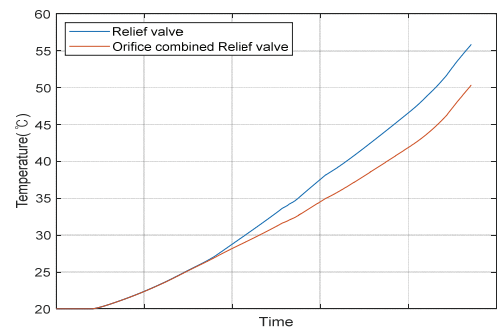


Fig. 12 Fuel tank fuel temperature (simulation).

을 가지는데, 오리피스 결합형 릴리프 밸브를 적용하면 유압 터보펌프의 발열량이 줄어들어 Fig. 12와 같이 연료탱크의 연료온도가 감소한다[2].

Fig. 13은 연료 터보펌프의 입구 연료온도를 나타낸다. 릴리프 밸브가 연료 터보펌프의 입구에 연결되어 있으므로 오리피스 유량이 존재하는 구간에서는 오리피스 결합형 릴리프 밸브를 적용했을 때의 연료온도가 더 높지만, 최고 연료온도가 낮아지고 급격한 온도변동이 완화되는 것을 확인할 수 있다.

연료공급용 펌프시스템에서는 터보펌프의 캐비테이션을 방지하기 위해 연료를 가압하여 터보펌프 입구단에 공급한다. 캐비테이션을 방지하기 위한 최소압력은 원심펌프 특성에 기인한 캐비테이션 발생압력과 연료 포화증기압을 더한 압력이다. 오리피스 결합형 릴리프 밸브를 적용하여 연료 온도상승량을 저감하면 포화증기압이 낮아지므로 원심펌프의 캐비테이션을 방지하기 위한 압력을 낮출 수 있다.

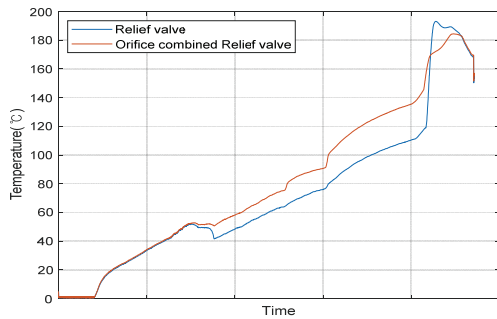


Fig. 13 TP inlet fuel temperature (simulation).

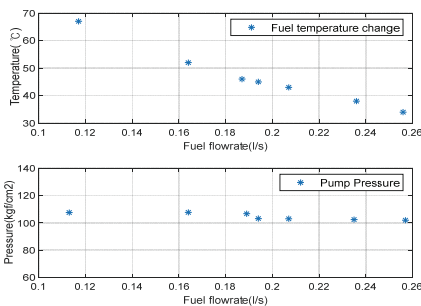


Fig. 14 Pump pressure, fuel temperature change.

5. 유압 터보펌프 단품 시험

오리피스 결합형 릴리프 밸브의 적용 가능성을 확인하기 위하여 유압 터보펌프 단품 시험을 수행하여 유압 터보펌프의 유량이 증가할 때 연료의 온도상승량 및 토출압력을 확인하였다[3].

Fig. 14는 유압 터보펌프 유량에 따라서 유압 터보펌프의 연료 온도상승량 및 토출압력을 확인한 그래프이다. 유압 터보펌프로 흐르는 유량을 증가시키면 연료 온도상승량을 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 유량이 약 0.11 liter/s에서 약 0.26 liter/s로 2배 이상 증가했을 때, 온도상승량은 약 67°C에서 34°C로 감소함을 확인하였다. 이 때 유압 터보펌프 토출압력은 약 108 kgf/cm²에서 102 kgf/cm²로 미미하게 감소하였다. 이는 유량 증가에 따라 펌프 효율이 증가하여 펌프 출력이 증가하였기 때문이다. 이 결과를 통해 유압 터보펌프 유량을 증가시키면 연료 온도상승량은 감소시킬 수 있으며, 터보펌프 주요 성능인 토출 압력은 거의 감소하지 않는 것을 확인하였다.

6. 통합 성능 시험

오리피스 결합형 릴리프 밸브가 적용된 연료 공급용 펌프시스템 성능을 확인하기 위하여 Fig. 1과 같은 시스템을 구성하여 통합 성능시험을 수행하였다. 시험은 지상에서 수행되었으며, 기존 릴리프 밸브 및 오리피스 결합형 릴리프 밸브를 각각 적용하여 모두 시험을 수행하여 그 결과를 비교하였다.

시험 중 유압 터보펌프 전단 기체 압력은 Fig. 15와 같이 변화하였다. 지상 시험이므로 유압 터보펌프 후단의 기체 압력은 대기압이다. Fig. 16은 유압 터보펌프 출구연료 온도상승량을 비교한 그래프이다. 기존의 오리피스가 없는 릴리프 밸브를 사용한 시스템과 오리피스 결합형 릴리프 밸브를 사용한 시스템을 비교하면 최대온도가 절반 이하로 감소하고 급격한 온도가 상승/하강하는 구간에서의 온도변동량도 절반 이하로

감소한 것을 알 수 있다.

Fig. 17은 유압 터보펌프 토출압력을 비교한 그래프이다. 시뮬레이션에서 예측하였던 바와 같이 기존의 릴리프 밸브를 사용하였을 때 대비 오리피스 결합형 릴리프 밸브를 사용하는 경우 토출 압력은 거의 감소하지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 오리피스 결합형 릴리프 밸브를 사용한 연료공급용 펌프 시스템은 특별한 성능 감소 없이 연료 온도상승을 적절하게 저감할 수 있다.

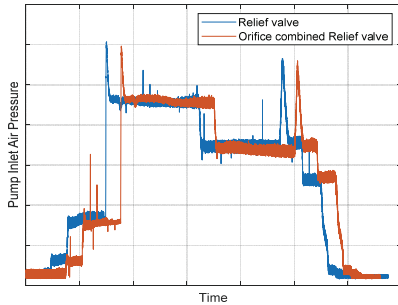


Fig. 15 Pump inlet air pressure (ground test).

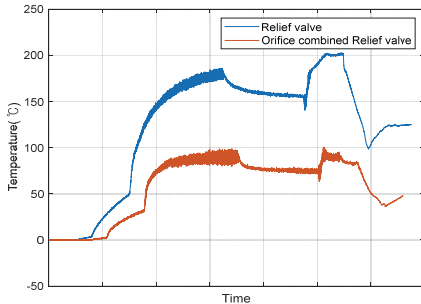


Fig. 16 Pump outlet fuel temperature (ground test).

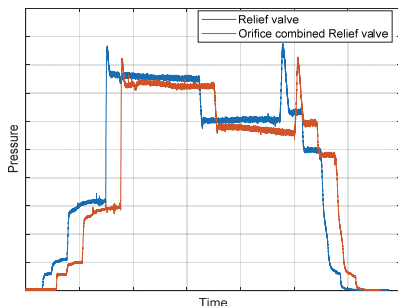


Fig. 17 Pump outlet fuel pressure (ground test).

7. 결 론

본 연구에서는 터보펌프를 사용하는 연료공급용 펌프시스템의 연료 온도상승량을 저감하기 위해 오리피스 결합형 릴리프 밸브를 적용하였다. 이를 통해 터보펌프 토출압력이 낮은 조건에서 냉각유량 증가와 터보펌프 효율 증가로 터보펌프에서 발생하는 온도상승량을 저감하였다. 개발된 시스템은 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였으며, 최종적으로 시험을 통해 효과를 확인하였다.

후 기

이 논문은 2019년 정부의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. Park, C.K. and Lee, C.S, "Study on the fuel temperature reduction of fuel supply pump system using orifice- combined relief valve," *50th KSPE Spring Conference*, Jeju, Korea, pp. 125-127, May 2018.
2. Park, C.K. and Lee, C.S, "A study on fuel supply turbo pump system with orifice-combined relief valve," *2019 KIMST Spring Conference*, Jeju, Korea, pp. 1097-1098, June 2019.
3. Park, C.K. Lee, C.S and Park, H.S., "Verification of a method for reducing temperature of a fuel supply system using orifice-combined relief valve," *57th KSPE Fall Conference*, Busan, Korea, pp. 173-177, Nov. 2021.