

저속항공기 탑재시험을 통한 부력식 연료공급밸브 작동 분석

정성민^{a,*} · 박정배^a

Performance Analysis of a Float-Type Fuel Supply Valve through Flight Tests

Sungmin Jung^{a,*} · Jeong-Bae Park^a

^aThe 4th R&D Institute, Agency for Defense Development, Korea

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

ABSTRACT

At negative-g condition, a float-type valve can open the passage of fuel in order to it flows continuously through a pressurized fuel tank system. Since specialized test conditions and high-cost supports are required, it is truly difficult to test the valve in a real high-speed test. Therefore, this paper contains performance analysis of a float-type fuel supply valve through flight tests conducting roll and negative-g maneuvers.

초 록

부력을 이용한 연료공급밸브는 고속 비행체의 가압식 연료탱크 내 연료가 역 중력 상태에서 한 방향으로 이동하는 것을 쫓아 유로를 열어주어 지속적으로 흐르게 한다. 가혹한 시험조건과 고비용 등의 문제로 이 연료공급밸브를 실제 고속으로 시험하는 것은 쉽지 않은 일이다. 따라서 본 연구는 고속 시험 전에 저속항공기에 탑재해 기본적인 회전기동 및 역중력 시험(Negative-g test)을 수행한 내용을 포함하고 있다. 시험 결과를 바탕으로 각 기동에서 밸브의 작동 특성을 파악하고 분석하였다.

Key Words: Float-Type(부력식), Fuel Supply Valve(연료공급밸브), Negative-g(역 중력), Buoyancy(부양력), Flight Test(항공기 비행시험)

1. 서 론

고속 비행체는 그 특수한 구조와 운용 특성에 따라 다수의 탱크로 이루어진 가압식 연료공급 장치를 채택하게 되는데, 이런 시스템은 역 중력과 같은 조건 시 연료가 한 쪽으로 몰려 공급이 중단되는 것을 막기 위해 특별한 장치가 필요하다[1]. 이런 장치는 현재까지 가속도추종방식 개

Received 1 December 2015 / Revised 6 January 2016 / Accepted 11 January 2016

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2015년도 추계학술대회(2015. 11. 25-27, 경주 현대호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

방장치와 부력식 연료공급밸브의 두 가지 형태로 개발되었다[2].

본 논문에는 부력식 연료공급밸브를 저속 항공기에 탑재해 기본적인 회전 및 역중력 시험을 수행하고 그 결과를 이론적으로 도출한 성능 곡선과 비교, 분석해 보았다[3,4].

2. 본 론

2.1 연료공급밸브의 형상과 작동원리

부력식 연료공급밸브의 사용 목적은 여러 탱크로 나누어진 가압식 연료이송시스템에서 특정 가속도 방향에서 연료의 위치가 변할 때 그 위치에 따라 적절히 통로를 열어 이송이 잘 되도록 하는 것이다. Fig. 1에는 연료탱크 내에 장착된 밸브의 측면 형상과 구성품들의 명칭이 잘 나타나 있다.

밸브의 구성은 우선 내부가 빈 2개의 부유체가 한 조를 이루어 각각 상하가 반대로 조립된다. 이 부유체에 의해 생성된 부력은 로드를 통해 다른 구성품으로 전달된다. 무게추는 부유체 무게에 의해 발생하는 회전 모멘트를 상쇄하고 진동의 영향을 감소시키는 역할을 하여, 밸브가 온전히 부력과 스프링 힘에 의해서만 작동할 수 있게 한다. 포펫은 마개와 같은 것으로, 부력이 없을 시에는 가스가 지나가지 않도록 유로를 막고 있다가, 부력이 발생하면 그 힘을 전달 받아 유로를 개방한다. 스프링은 부력이 없을 때 포펫이 열리지 않도록 밀어준다. 스프링을 선정할 때 주의할 점은 그 힘이 너무 강하여 부력을 거스르지 않도록 한다. 하우징은 포펫과 스프링을 감싸고 여러 방향으로 구멍이 나있어 입구 배관을 통해 들어온 연료가 탱크 안으로 들어올 수 있게 해준다. 구성품들의 재질은 대부분 Stainless steel이며, 무게추만 구리와 텅스텐의 합금이다.

밸브의 작동 원리는 Fig. 2를 통해 쉽게 파악할 수 있다. 앞서 언급하였듯이 이 밸브는 2개가 한 조가 되어 연료이송통로 개방의 목적을 달성한다. 정상상태, 즉 +g 상태일 때 유로를 개방하는 밸브를 +g 열림밸브라 하고, 역중력상태, 즉

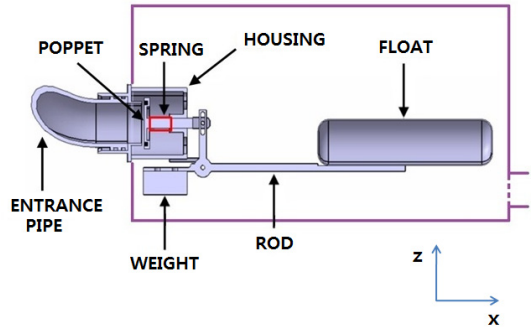


Fig. 1 Side view of fuel supply valve.

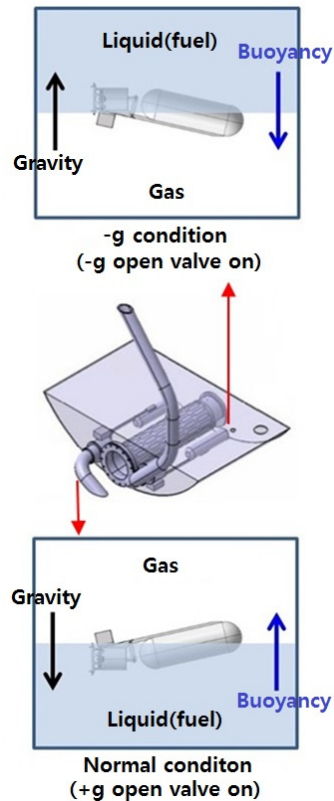


Fig. 2 Valve operation at each condition.

-g 상태일 때 유로를 개방하는 밸브를 -g 열림밸브라 한다. 먼저 정상상태일 경우 연료는 탱크의 아래쪽에 상주하게 되며 부력은 위쪽으로 생성된다. 따라서 +g 열림밸브에 장착된 부유체가 위쪽으로 뜨면서 로드를 통해 전달된 힘이 입구를 개방하게 된다. 반대로 역중력상태일 경우 연

료는 위로 뜨게 되고 부력은 아래쪽으로 생성되어 -g 열림밸브에 장착된 부유체가 밑으로 눌러로드를 통해 전달된 힘이 입구를 개방하게 된다.

연료공급밸브의 기본 설계 개념과 각 변수에 따른 +g/-g 열림밸브의 작동 조건 관계식은 앞선 논문에 잘 나타나 있다[4].

2.2 저속 항공기 탑재 시험 결과 - 회전기동 시험

이 밸브의 작동 성능을 알아보기 위해서는 고속 비행시험을 통해 알아보는 것이 제일 정확하고 신뢰성 있는 방법이나, 고속으로 실제 시험을 하는 것은 가혹한 조건을 맞추기 어렵고 비용이 많이 드는 등의 이유로 실현하기 힘들다. 따라서 본 논문은 저속의 항공기에 밸브를 탑재해 회전 및 역 중력기동에서 어떻게 작동하는지 확인하고 개념적인 설계와 비교하는 내용을 담고 있다.

시험에 사용한 연료는 항공유(Jet A-1)이며, 밸브 입구에 접촉센서를 장착해 밸브의 작동 유무를 확인하였다.

앞선 연구에서 밸브의 작동에 영향을 미치는 변수는 스프링힘, 진행방향(x축) 및 수직(z축) 가속도, 연료탱크 내의 연료량 등으로 예상하였는데, 진행방향 가속도와 연료탱크 연료량에 의한 영향은 크지 않은 것으로 분석하였다[4]. 따라서 이 분석에서는 스프링힘을 주요 변수로 하며, 0.6 kgf, 0.4 kgf, 0.2 kgf, 스프링없음으로 나누어 시험하고 그 결과를 비교하였다.

먼저 회전기동에서 밸브의 작동 결과를 알아볼 것이다. 회전기동 시험에서는 항공기가 90도, 180도, 360도 회전을 하여 연료공급밸브의 작동 유무를 확인하였다. Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는 각각 90도, 180도, 360도 회전기동 시 밸브가 작동한 결과들 중 한 가지 예를 보여준다. 아래 가로축은 경과시간(초), 왼쪽 세로축은 항공기가 회전한 각도를 나타내며, 오른쪽 세로축은 밸브가 작동하며 센서가 감지한 신호(입구가 닫히면 0 V, 열리면 5 V)를 나타낸다.

결과를 보면 밸브는 스프링힘의 영향과는 무관하게 90도와 360도 회전기동에서 거의 작동하지 않았고, 180도 회전에서는 항공기가 뒤집어지며 각각의 밸브가 서로 반대로 열리고 닫히는

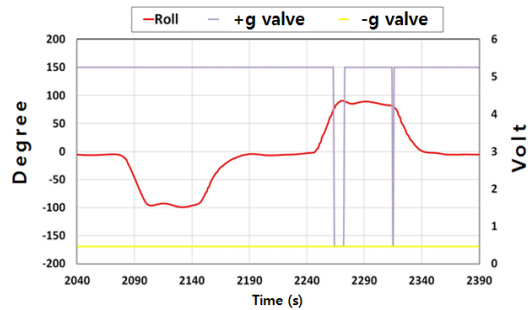


Fig. 3 Result of 90 degree roll test with 0.6 kgf spring force.

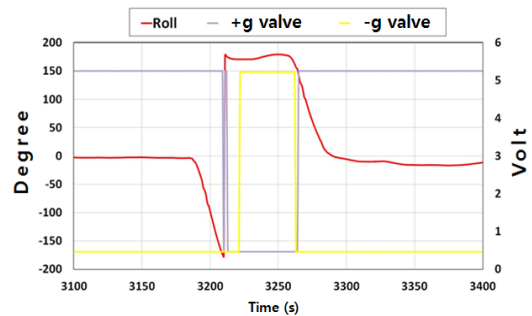


Fig. 4 Result of 180 degree roll test with 0.6 kgf spring force.

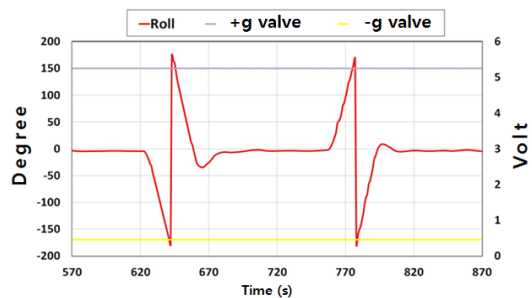


Fig. 5 Result of 360 degree roll test with 0.6 kgf spring force.

예상된 작동 형태를 보여주었다.

2.3 저속 항공기 탑재 시험 결과 - 역 중력 시험

다음은 역 중력 기동에서 밸브의 작동 결과를 분석할 것이다. 이미 언급하였듯이 스프링힘을 주요 변수로 하며, 0.6 kgf, 0.4 kgf, 0.2 kgf, 스프링 없음으로 나누어 시험하였다.

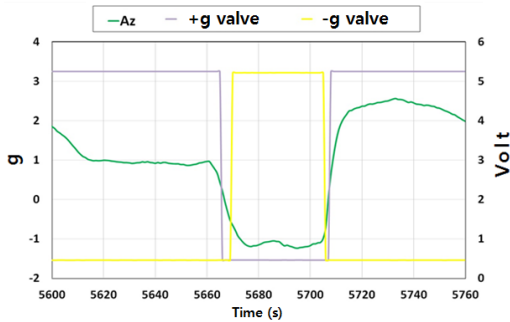


Fig. 6 Result of -1.0 g negative-g test with 0.6 kgf spring force.

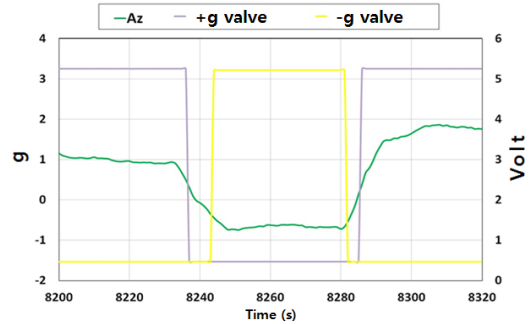


Fig. 8 Result of -0.6g negative-g test with 0.4 kgf spring force.

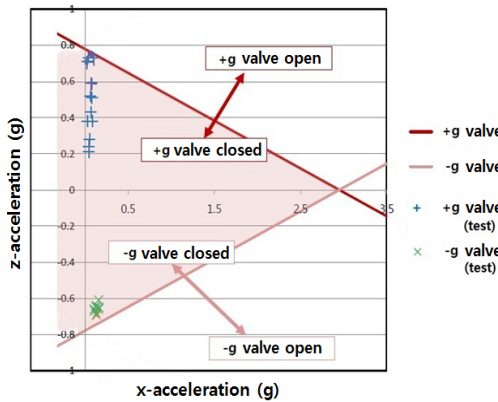


Fig. 7 Characteristic curve with test results (0.6 kgf spring force).

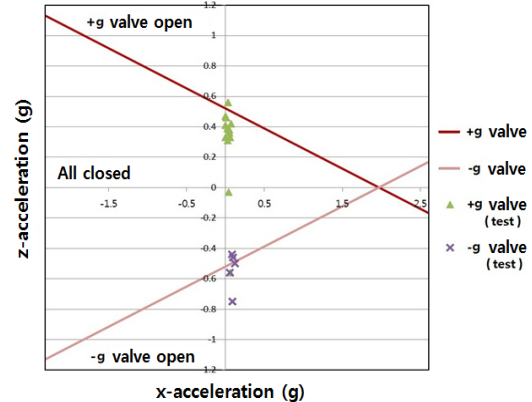


Fig. 9 Characteristic curve with test results (0.4 kgf spring force).

먼저 Fig. 6에 스프링힘이 0.6 kgf인 스프링을 장착한 밸브의 시험결과 중 가속도가 -1.0 g일 때 작동 경향이 나타나 있다. 다른 축은 이전과 동일하고, 왼쪽 세로축은 항공기의 g가속도를 나타낸다. 결과를 보면 -1.0 g 기동일 때 +g 열림 밸브는 0.38 g에서 닫히고, -g 열림 밸브는 -0.61 g에서 열린다. 작동은 +g 열림 밸브 닫힘/-g 열림 밸브 열림/-g 열림 밸브 닫힘/+g 열림 밸브 열림의 순서를 보인다. 연료의 경우 대략 -0.3 g ~ -0.5 g 사이에서 탱크 내의 뒷방향으로 이동하므로 순간적으로 밸브가 이동시키지 못하는 구간이 존재한다.

Fig. 7에 스프링힘이 0.6 kgf인 시험의 성능곡선과 실제 시험값을 비교한 그래프가 그려져 있다. 그림에서 가로축은 x축 방향 하중 가속도(g)

를, 세로축은 z축 방향의 하중 가속도(g)를 의미한다. 성능곡선으로 나누어진 각각의 영역은 밸브들의 열림과 닫힘, 또는 모두 닫힘으로 구분된다. 비교 그래프에서 +g 열림 밸브가 닫히는 시험값(가속도 값)은 성능곡선 안쪽으로 넓게 분포해 있고, -g 열림 밸브의 열리는 시점은 성능곡선에 어느 정도 수렴하는 현상을 나타낸다. 이런 현상의 이유는 -g 열림 밸브의 경우 -g 값이 일정한 값에 이르렀을 때 한 번에 열리지만, +g 열림 밸브는 닫히기 시작하더라도 완전히 닫히는 순간이 각 기동마다 달라질 수 있기 때문이다.

스프링힘이 0.4 kgf인 시험에서 가속도가 -0.6 g일 때 밸브의 작동 경향이 Fig. 8에 나타나 있다. 그림에서 +g 열림 밸브는 0.31 g에서 닫히고, -g 열림 밸브는 -0.44 g에서 열린다. 0.6 kgf

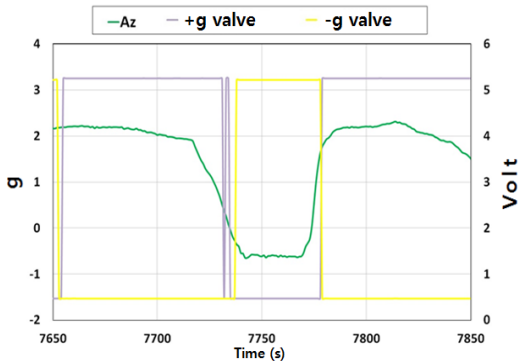


Fig. 10 Result of -0.5 g negative-g test with 0.2 kgf spring force.

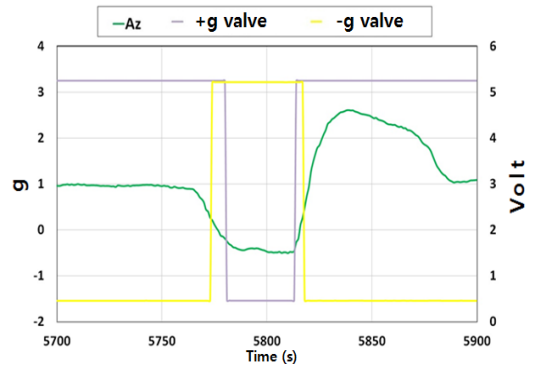


Fig. 12 Result of -0.4 g negative-g test without spring force.

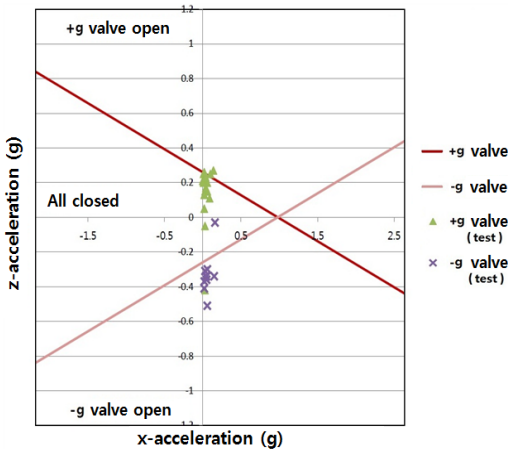


Fig. 11 Characteristic curve with test results (0.2 kgf spring force).

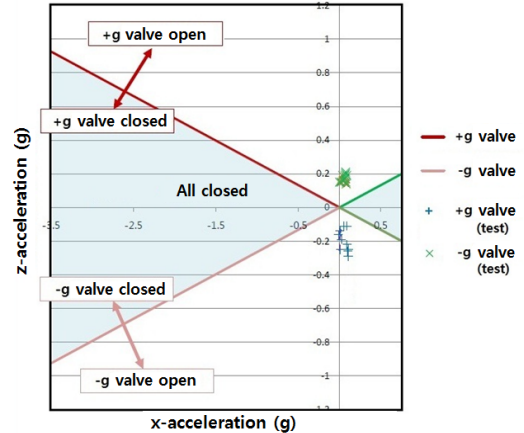


Fig. 13 Characteristic curve with test results (no spring force).

인 경우와 비교해 작동 형태에 크게 차이가 없으며, 작동순서도 동일하다.

Fig. 9를 통해 0.4 kgf일 경우의 성능곡선과 시험값을 비교해 보면 0.6 kgf의 결과와 거의 유사한 경향을 볼 수 있고, 다만 두 밸브 모두 닫히는 영역이 좌측으로 조금 이동한 것을 알 수 있다.

Fig. 10에는 스프링힘이 0.2 kgf인 시험에서 가속도가 -0.5 g일 때 밸브의 작동 경향이 그려져 있다. +g 열림밸브는 -0.05 g에서 닫히고, -g 열림밸브는 -0.36 g에서 열린다. 이전 시험들과 비교해 보면 +g 열림밸브는 천천히 닫히고 -g 열림밸브는 조금 빨리 열린다. 이것은 스프링힘

이 작아서 생기는 현상으로 보인다. 작동순서는 이전과 동일하다.

Fig. 11을 보면 0.2 kgf일 경우에도 -g 열림밸브의 시험값이 성능곡선보다 다소 아래쪽에 분포하는 것외에는 이전과 유사한 결과를 보이며, 두 밸브 모두 닫히는 영역은 좌측으로 더 많이 이동한 것을 알 수 있다.

스프링을 제거한 시험에서는 이전과 상당히 다른 양상이 나타났다. Fig. 12를 보면 가속도가 -0.4 g일 때 두 밸브의 작동시점이 +g 열림밸브는 -0.25 g에서 닫히고, -g 열림밸브는 0.21 g에서 열린다. 작동순서도 -g 열림밸브 열림/+g 열림밸브 닫힘/+g 열림밸브 열림/-g 열림밸브

단힘으로 바뀌었다. 이것은 밸브를 닫아주는 스프링힘이 없어 온전히 부유체에 가해지는 부력과 무게추와의 균형으로 작동하기 때문이다.

Fig. 13에 나타나 있듯이 스프링이 없을 경우 +g/-g 열림밸브의 성능곡선은 '0'에서 교차되어 모두 닫히는 영역이 x방향 하중가속도의 '0'을 기준으로 좌측으로 생성된다. 성능곡선과 시험데이터 간에 생기는 편차(offset)는 무게추와 부유체 간의 모멘트를 '0'으로 가정한 계산법 때문임을 확인하였다. 일정한 값을 가지는 이 모멘트는 각 밸브를 실측하여 얻을 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 고속 비행체의 가압식 연료시스템에서 가속도의 방향에 따라 연료를 적절히 이송해주는 부력식 연료공급밸브를 저속 항공기에 탑재해 시험하고 분석한 내용을 담고 있다.

회전 기동의 시험 결과를 보면 90도와 360도 기동에서 거의 작동하지 않았고, 180도 회전에서는 밸브의 작동원리에 맞게 각각의 밸브가 서로 반대로 열리고 닫히는 작동 형태를 보여주었다.

역 중력 시험에서는 스프링힘을 0.6 kgf, 0.4 kgf, 0.2 kgf, 스프링없음으로 바뀌가며 시험하였는데, 0.6 kgf, 0.4 kgf, 0.2 kgf, 이 세 가지 경우는 작동 경향이 비슷하였고 스프링힘이 줄어들수록 +g 열림밸브는 천천히 닫히고 -g 열림밸브는 조금 빨리 열리는 차이를 볼 수 있었다. 스프링을 제거한 시험에서는 스프링힘이 없어 작동 경향과 순서가 이전 시험들과 많이 다르고, -g 열림밸브가 빨리 열리고 천천히 닫히는 것을 확인할 수 있었다. 이 스프링힘을 무차원화하면 현

재의 밸브시스템뿐만 아니라 다른 다양한 시스템에도 적용 가능할 것으로 예상하였다.

위 시험들을 통해 여러 기동 조건에서 연료공급밸브의 작동 경향과 성능을 확인하였으며, 실제 고속시험을 수행하기 전 참고할 수 있는 데이터를 확보하였다. 이 결과들을 바탕으로 밸브의 성능을 더욱 개선하고 검증하며, 응용영역을 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. Langton, R., Clark, C., Hewitt, M. and Richards, L., *Aircraft Fuel Systems*, 1st Ed., John Wiley & Sons. Ltd, Wiltshire, UK, 1989.
2. Park, J., Min, S., Kim, Y. and Park, B., "Development of Flow Path Opening Device using Weight Momentum," *2012 Conference of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Gyeongju, Korea, pp. 1875-1878, June 2012.
3. Jung, S., Kim, Y., Park, J. and Jun, P., "Analysis of a Flow Passage Opening Device using RecurDyn," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 18, No. 3, pp. 78-83, 2014.
4. Jung, S., Park, J., Byun, Y., Kim, E., Kim, J. and Park, S., "Development of fuel supply valve using buoyancy," *2014 KSPE Fall Conference*, Jeongsun, Korea, pp. 735-740, Dec. 2014.