

技術論文

연료탱크 진공주유절차 개발

박정배* · 민성기** · 이세영*** · 김영신*** · 이종철*** · 장기원****

Development of Vacuum Refueling Process for Fuel Tank

Jeongbae Park* · Seongki Min** · Seyoung Lee*** · Youngshin Kim*** · Jongchul Lee*** · Kiwon Jang****

ABSTRACT

The air in the fuel tank could cause oxidation of fuel during storage, and it also reduced the fuel transfer performance. To find better procedure for refueling of aircraft fuel tank, the vacuum refueling process was proposed to reduce the air in the fuel tank. In this study, the vacuum refueling process was established and tested, it could be helpful to find out what happened during vacuum refueling. Also the revised vacuum refueling process was proposed to reduce the air and refueling time.

초 록

연료탱크 내부에 존재하는 공기는 저장 중 연료의 산화를 유발하고, 연료 이송성능을 저하시킬 수 있다. 따라서 항공기 연료탱크의 주유절차를 개선하기 위하여 연료탱크 내부에 존재하는 공기를 줄이는 방안으로 진공주유방식을 제안하였다. 본 논문에서는 진공주유 절차를 수립하여 실제 시험을 수행해 보았고, 이를 통해 진공 주유 중 발생하는 현상을 관찰할 수 있었다. 또한 탱크 내부의 기포 및 주유시간 절감을 위하여 다른 개선된 방안을 제안하였다.

Key Words: Vacuum Refuel(진공주유), Fuel Tank(연료탱크)

1. 서 론

항공기의 주유는 크게 2가지 방식으로 이루어

진다[1]. 첫 번째는 수두차를 이용한 중력 급유 방식으로 비교적 주유 방식이 단순하지만 주유 완료에 걸리는 시간이 길다는 단점이 있어 대용량의 연료 탱크에는 부적합한 방식이다.

또 다른 방식으로 주유 방법 중에서 가장 널리 이용되는 방식으로, 펌프 등을 이용하여 가압한 후 주유하는 가압식 주유방법이 있다. 이 방법은 비교적 주유 시간이 빠르며, 대용량의 연료 탱크에도 적용할 수 있다는 장점이 있다[2].

그러나 이러한 주유 방식에는 연료 탱크 내부

접수일 2011. 5. 11, 수정완료일 2011. 6. 10, 게재확정일 2011. 6. 15

* 정회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 5부

** 중신회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 5부

*** 정회원, (주)한화 항공우주/기계연구소 기계항공사업부

**** 중신회원, (주)한화 항공우주/기계연구소 기계항공사업부

† 교신저자, E-mail: jetpro@korea.com

[이 논문은 한국추진공학회 2011년도 춘계학술대회(2011. 4. 28-29, 현대 로템(주) 기술연구소) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

의 잔여 공기를 고려하지 않고 주유하였기 때문에 문제점이 발생할 수 있다. 탱크내부에 남아있는 공기가 연료와 함께 이송되면서 연료 공급계통 및 이송계통의 성능을 저하시킬 수 있으며, 탱크내부의 잔여 공기는 장기 저장시 연료의 산화를 유발하여 연료의 품질 저하를 초래하게 된다. 특히 고속항공기의 경우 빠른 속도와 급격한 자세 변화 및 고기동으로 인한 -G기동 등으로 인해 연료의 위치가 순간적으로 급격하게 변하게 된다. 이러한 경우 부력에 의해 상부에 포집되어 있던 기포가 순간적으로 연료와 위치가 바뀌게 되어 엔진 등으로 공급될 수 있으며 이러한 경우 고도의 성능을 요구하는 엔진에 치명적 결함으로 작용할 수도 있다.

따라서 주유시 이러한 문제점을 사전에 제거하게 되면, 연료계통의 성능 및 장기 저장성 등을 향상시킬 수 있게 된다.

기존의 주유 방식의 이러한 문제점을 극복하고자, 본 논문에서는 진공주유방식을 제안하게 되었다. 이 방식은 기체 내부를 진공 펌프 등을 이용하여 진공으로 만든 후 주유하는 방식으로, 가장 큰 장점은 탱크 내부의 잔여 공기량이 적기 때문에, 연료 공급계통의 이송성능 및 장기 저장성능을 크게 향상시킬 수 있다는 것이다[3].

그러나 진공주유를 하기 위해서는 몇 가지 고려해야 할 사항이 있다. 우선 탱크내부의 진공도를 유지하기 위하여 구조적인 검증이 필요하며, 탱크 내부 구조물이 복잡하게 되면, 진공 도달시간이 길어지게 되고 이는 결과적으로 주유시간이 증가됨을 의미하게 된다.

본 논문에서는 실제 항공기 연료탱크에 진공주유를 수행할 수 있도록 주유절차를 수립해 보았다. 모의 탱크를 통해 진공주유 모사시험을 실시하였으며, 이에 따라 주유 소모시간 및 진공주유시 탱크 내부에서 발생하는 현상을 관찰해 보았다. 또한 진공주유의 가장 큰 단점인 주유시간을 단축할 수 있는 방안을 고려한 시험을 통해 주유시간 단축 여부를 확인해 보았다.

2. 진공주유 모사시험

2.1 진공주유 모사시험 #1

2.1.1 시험 절차

진공주유 절차를 확립하기 위해 관련 시험을 수행하였다. 소형 연료탱크를 이용하여 기포저감 방법을 고려하여 시험하였으며 관련 Schematic은 아래 Fig. 1과 같다.

본 시험에서는 실제 주유를 모사하기 위해서 항공유를 시험 유체로 사용하였으며 다음과 같이 시험절차를 수립한 후 진공주유를 수행하였다. 연료 챔버는 실제 주유시 항공기의 연료탱크를, 서비스탱크와 연료탱크는 지상주유장비라고 볼 수 있으나 본 연구는 개념 연구단계로 추후 연구를 통해 관련 장비 설정을 하도록 하겠다.

- (1) 연료 챔버와 연료탱크 사이에 연결된 밸브는 잠근 채 연료탱크와 서비스 탱크, 진공펌프 사이의 밸브는 모두 열어둔다.
- (2) 진공펌프를 작동시켜 연료탱크와 서비스 탱크 내부를 진공으로 만든다.
- (3) 연료 탱크의 내부 압력이 원하는 진공도에 도달한 것을 확인한 후, 서비스탱크와 연료 탱크 사이의 밸브를 잠근다.
- (4) 진공펌프는 계속적으로 작동시켜 서비스 탱크의 압력을 연료 탱크 내부 압력보다 더 낮게 유지하도록 한다.
- (5) 연료 탱크와 연료 챔버 사이의 밸브를 열어 주유를 시작한다. 이때 연료는 연료챔버와 연료탱크의 압력차이로 주유된다.
- (6) 주유가 완료된 후, 서비스 탱크와 연료 탱크 사이의 밸브를 열어 탱크내부의 기포가 서비스 탱크 쪽으로 넘어가는 것을 확인한다.

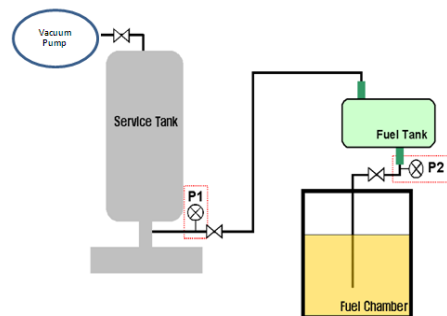


Fig. 1 Vacuum Refueling Schematic

- (7) 충분한 시간을 두고 기포를 제거한 후, 서비스 탱크와 연료탱크 사이의 밸브를 잠근다. 이때 진공펌프의 작동을 중지시킨다.

2.1.2 시험 결과 및 분석

위의 절차대로 수행한 진공주유 진행과정을 관찰한 사진을 아래 Fig. 2에 나타냈다. 이때 탱크 초기의 진공 압력은 약 0.4 psia로 유지하였고, 주유 후 탱크 압력은 약 12.5 psia로 증가하였다.

Figure 3은 주유가 완료된 후 탱크내부에 남아 있는 기포를 관찰한 사진이다. 연료탱크 윗면에 넓게 기포가 분포하였으며, 탱크내부의 단이 있는 곳이나 탱크의 가장자리 부분에 기포가 많이 모여 있는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 기포들은 탱크내부에 남아있던 기포로써 연료가 주유되면서 상부로 모이게 된 것으로 보여진다. 상부에 포집된 기포들은 정상 운용시에는 문제가 발생되지 않으나 항공기의 급격한 자세변화 등이 발생하게 되면 상부에 있던 기포들이 순간적으로 엔진으로 공급될 수 있기 때문에 연료 이송성능 향상을 위해서는 기포를 최대한 제거해주는 것이 유리하다.

따라서 서비스 탱크를 지속적으로 진공을 유지 시킨 후, 시험 절차에 따라 서비스 탱크와 연료탱크 사이의 밸브를 열어 탱크 내부에 남아있던 기포가 서비스 탱크 쪽으로 흘러 갈 수 있도록 하였다. 지속적으로 서비스 탱크의 진공압을 유지하자 연료탱크 상부 및 모서리 부근에 분포되어 있던 상당량의 기체가 탱크의 벤트 홀을 통해 서비스 탱크 쪽으로 흘러들어가는 것을 관찰할 수 있었다.

2.2 진공주유 모사시험 #2

2.2.1 시험절차

2.1절에서 수행되었던 진공주유 모사시험에서는 진공 주유를 했음에도 불구하고 주유 완료 후에 탱크 내부에 기포가 존재하였다. 이는 연료 챔버 내부에 남아 있던 기포가 연료탱크로 유입되었기 때문으로 보이며, 본 시험에서는, 기존 진공주유 방식과 달리 연료 챔버까지 진공으로

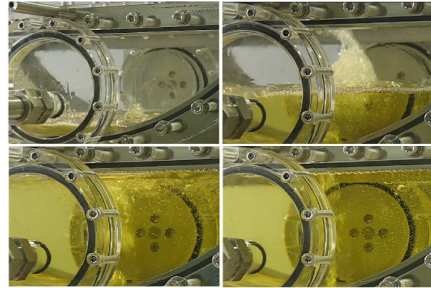


Fig. 2 Vacuum Refueling Process

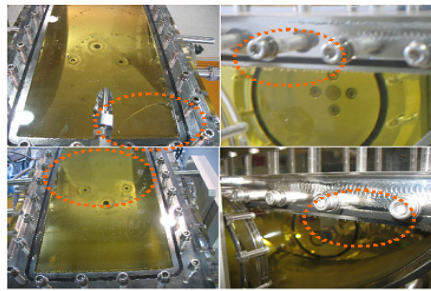


Fig. 3 Remained and Trapped Air

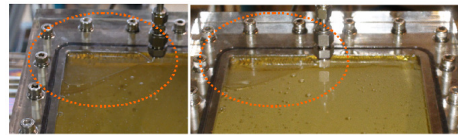


Fig. 4 Removal Air after Refueling

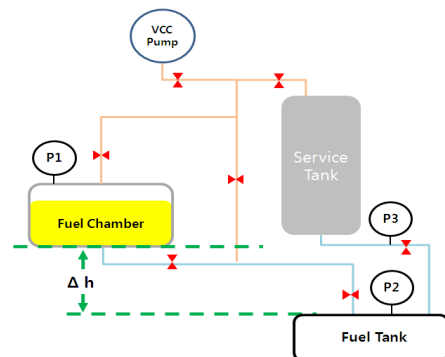


Fig. 5 Vacuum Refueling Schematic with Pressure Head

만든 후 연료 챔버와 연료 탱크의 수두차에 의한 압력으로 주유하여 탱크 내부의 기포를 최소

화 하는 방식으로 시험을 수행하였다.

실제 항공기에서는 연료탱크의 높이가 일정하기 때문에 실제 주유시에는 연료챔버의 높이를 변경해야 될 것으로 보인다. 그러나 본 시험은 개념 연구 단계로써 진행되었기 때문에 추후 상세한 시험을 통해 주유 높이 등을 결정하도록 하겠다.

시험을 수행하기 전, 수두차에 의한 주유 예상 시간을 아래와 같이 예측해 보았다. 계산에 필요한 조건은 아래와 같으며 연료 챔버와 연료탱크의 내압 차이에 따른 주유 시간을 계산해 보았다. 단, 아래의 식은 관의 길이나 내부 거칠기에 따른 유량 손실 등에 대한 고려가 없는 이론값이므로 실제 시간과 차이가 발생 할 수 있다.

주유과정은 2.1절과 동일하게 진행되었으며 탱크 내압은 Table 1과 같이 연료 챔버 0.3 psia, 연료탱크 0.1 psia를 유지하였다. 연료탱크 및 연료 챔버의 내부압력은 너무 높은 진공도를 결정하면 진공유지 시간이 오래 걸리고 탱크의 구조적 강도가 더 커져야 하므로 실험실에서 구현할 수 있는 저 진공도로 결정하였다.

Table 1. Calculation for Refueling Time

항목	값	비고
연료밀도	809 kg/m ³	JP-8/@상온
수두차(Δh)	20 cm	
주유 관직경	1/4"	
연료탱크 부피	10.5 L	
연료챔버 진공압	0.3 psia	
연료탱크 진공압	0.1 psia	
예상 주유 시간	8min 53sec	



Fig. 6 Tank Pressure before Refueling

2.2.2 시험결과 및 분석

수두차에 의한 진공주유는 Fig. 7과 같이 진행되었다. Fig. 2에 비해 주유 중에도 현저히 기포가 줄어들었음을 육안으로도 확인할 수 있다. 또한 주유 완료 후에도 연료탱크와 연료 챔버의 내부 압력이 각각 0.3 psia 및 0.6 psia로 상승했으나 2.1절에서는 연료탱크 내부 압력이 1.2 psia까지 상승한 것에 비해 매우 적은 압력 상승이 발생했음을 알 수 있다.

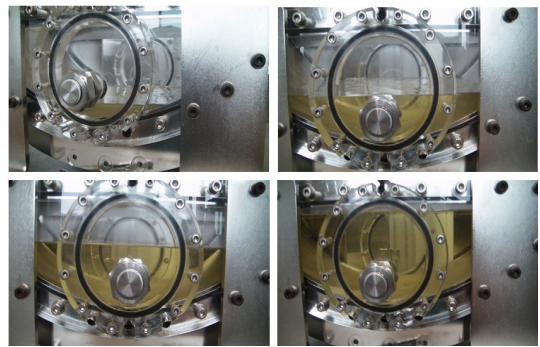


Fig. 7 Vacuum Refueling Process



Fig. 8 Tank Pressure after Refueling

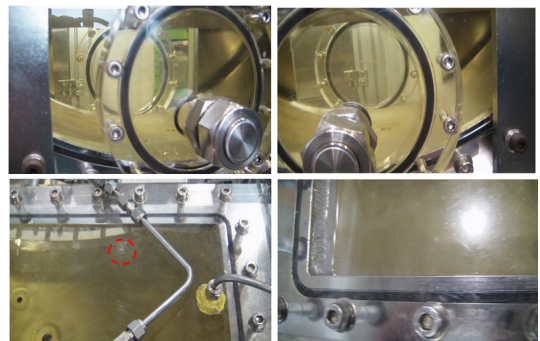


Fig. 9 Remained and Trapped Air

그러나 본 시험방법으로 주유했을 때, 주유 완료까지 걸린 시간은 총 1시간 12분으로 표 1을 통해 예측한 주유시간과 많은 차이가 발생하였다. 이는 예상 주유시간이 배관의 손실 등을 고려하지 않았고, 지속적으로 연료탱크와 연료 챔버의 압력차가 유지되는 것으로 가정하여 계산되었으나, 실제 주유에서는 주유가 진행될수록 연료 챔버와 연료탱크 사이의 압력차가 줄어들게 되므로 주유 소모시간이 길어지게 되었다.

2.3 진공주유 모사시험 #3

2.3.1 시험절차

수두차를 이용한 진공주유 방식은 기포절감에는 효과적이거나 주유 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 따라서 2.2절에서 실시한 수두차를 이용한 진공주유 방식에 Fig. 10과 같이 주유라인에 기어펌프를 설치하여 그 영향성을 확인하는 시험을 실시하였다.

주유 과정은 주유 시작시 기어펌프를 작동시킨다는 것만 다를 뿐 2.1절과 모두 동일하다.

2.3.2 시험 결과 및 분석

Figure 11은 기어펌프를 이용한 진공주유 진행 과정을 촬영한 사진이다. 기어펌프 작동에 따라 기포가 연료표면으로 유입되는 것을 볼 수 있다.

Figure 12는 기어펌프를 이용하는 진공주유 과정 중 탱크의 제일 윗부분을 촬영한 사진이다. 기어펌프가 작동되고 있을 때에는 Fig. 12의 ①에

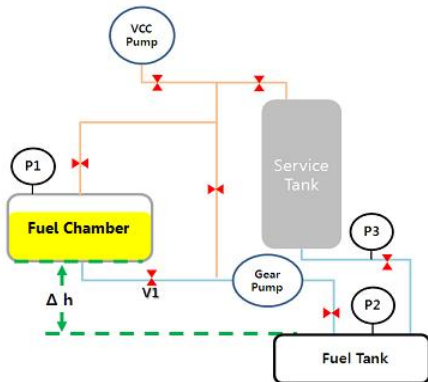


Fig. 10 Vacuum Refueling Schematic with Gear Pump

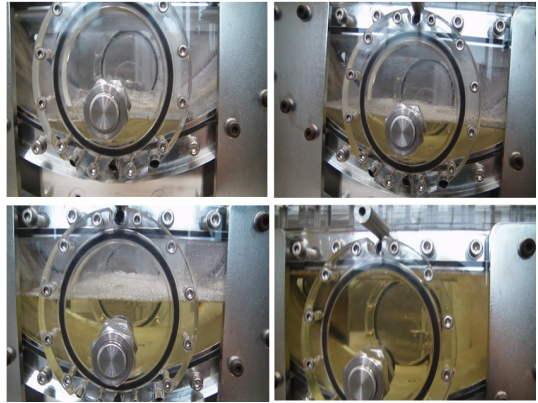


Fig. 11 Vacuum Refueling Process with Gear Pump

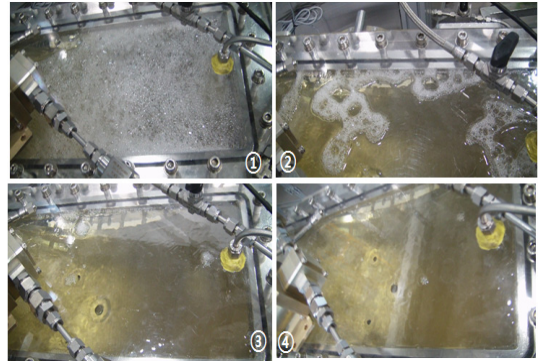


Fig. 12 Remained Air after Gear Pump Stopped

서 보다시피 연료에 거품 같은 다량의 기포가 유입되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 주유가 완료됨에 따라 기어펌프의 작동을 중지시키게 되면 ②,③과 같이 기포가 자연스레 사라지며 ④에 이르게 되면 기포가 완전히 제거된다. 이때 발생하는 기포는 기어펌프에 의한 캐비테이션으로 인해 발생하는 것으로 추측되며, 육안으로 기포의 발생과 제거를 확인하였다.

기존의 진공주유에서는 주유가 진행됨에 따라 탱크 내부압력이 서서히 상승한 것과는 달리, Fig. 13과 같이 기어펌프가 작동할 때에 급격하게 탱크 내부압이 상승했다가 ①,② 기어펌프의 작동이 종료되면 탱크 내부압이 하강하는 것 ③, ④을 볼 수 있다. 이러한 내부압의 변화에 따라 탱크 표면에 급격히 많이 발생했던 기포가 순식간에 사라진 것으로 보인다.

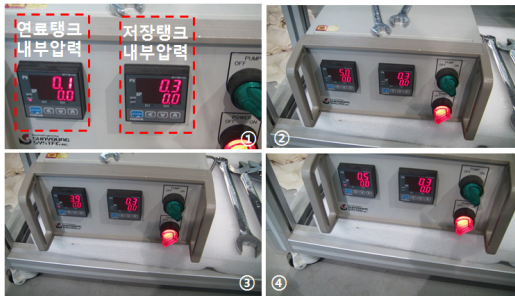


Fig. 13 Tank Pressure during Refueling

수두차만을 이용한 진공주유에서 발생했던 주유 시간의 문제도 기어펌프를 이용함으로써 해결할 수 있었다. 1시간 12분이었던 주유 시간이 6분 41초로 줄어들었다. 이로써 기어펌프를 이용한 진공주유는 주유 시간 감소에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다.

2.4 진공주유 모사시험 시험결과 분석

Table 2에 진공주유 시험 3가지의 결과를 정리하였다. 각각 진공전/후의 연료탱크 내압과 그에 따른 주유시간을 정리하였다.

#1 시험은 연료탱크만 진공으로 만들어 주유하였고, #2와 #3은 연료가 저장된 연료 챔버까지 진공으로 만들어 시험하였다. 이때 #1의 시험 결과, #2나 #3의 시험 결과보다 더 많은 기포가 탱크 내부에 잔여 했던 것을 육안으로 확인하였다. #2는 수두차만을 이용하여 주유하였는데 기포 저장효과는 뛰어나나 주유시간이 오래 걸리는 것을 확인하였다. 이를 위해 #3 시험에서는 기어펌프를 사용하였으며, 시험결과 주유시간을 대폭 감소하였으며 탱크 내 잔여기포도 #1에 비해 현저히 감소한 것을 확인하였다. 따라서 향후 진공주유 절차 수립시 기어펌프를 적용할 수 있을 것으로 보인다.

Table 2. Test Data

Case	진공압	주유 후 압력	주유 시간
#1	0.4psia	12.5psia	-
#2	0.1psia	0.3psia	1h 12min
#3	0.1psia	0.5psia	6min 41sec

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 가압식 혹은 중력식 주유 방법이 갖고 있던 문제점을 해결하기 위해 진공주유 방식을 제안하였다. 소형 연료탱크를 이용하여 진공주유 절차를 확립하는 시험을 실시하였다.

그러나 탱크 내부에 여전히 존재하는 기포의 제거를 위하여 연료 저장탱크도 진공으로 유지한 후 수두차만을 이용하여 주유를 수행하였으며, 이를 통해 연료탱크 내부의 기포가 감소되었음을 확인할 수 있었다. 다만, 이 방식으로 주유를 하게 되면 주유시간이 너무 길어지는 단점이 있어서 추가적으로 기어펌프를 장착, 주유하여 같은 시험을 재수행한 결과 매우 효과적으로 주유 시간을 단축시킬 수 있었다.

그러나 본 연구는 현재 진공주유에 대한 개념적 연구로써 몇 가지 해결해야할 문제점이 있다. 우선 주유 후 연료탱크가 진공의 저압으로 유지되기 때문에 탑재된 연료펌프를 위한 수두를 맞춰주어야 할 필요성이 있다. 또한 현실적으로 연료 챔버까지 진공으로 만들려면 지상에서 연료 챔버에 연료를 충전한 후 진공을 만들어야 하는데 절차상 복잡해지며 필요장비가 더 늘어나는 문제점이 발생한다. 또한 현재 연구에서는 기포의 발생 및 제거 여부를 단순히 육안으로만 확인하였다. 이러한 몇가지 문제점들의 해결방안을 연구하여 적용할 예정이다. 추후, 실제 항공기의 대형 연료탱크에 좀 더 구체적인 진공주유 방식 및 절차를 검토하여 최적의 주유조건을 수립할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Roy Langston, Aircraft Fuel System, John Wiley and Son, 2008
2. Ian Moir, Aircraft Systems, John Wiley and Son, 2008
3. 이정훈, 김정찬, 최재필, 진공 주유시 변압기 탱크의 소성발생 예측, 전기학회 논문지, 제 54C권, 2005, pp.515-522