Technical Paper
Journal of Aerospace System Engineering
Vol.16, No.1, pp.70-80 (2022)
EISSN 2508-7150
http://dx.doi.org/10.20910/JASE.2022.16.1.70

고정익 항공기 공중급유 유형 및 Boom-Receptacle 시스템 비행시험 평가 방안 연구

김대욱† · 김찬조

한국항공우주산업㈜

A Research on Aerial Refueling Type and Flight Testing of Boom-Receptacle Systems for a Fixed-wing Aircraft

Dae-wook Kim† and Chan-jo Kim

Korea Aerospace Industries, LTD.

Abstract

An aerial refueling provides for extension of operational time and range for aircraft and enhances mission effectiveness, hence it application by most military aircrafts. The receiver aircraft should have the aerial refueling clearance that is established by performing technical and operational compatibility assessments to certify it for aerial refueling with a specific tanker model. The compatibility assessment includes aerial refueling handling qualities, functional, fuel, lighting system testing and it is finally verified through flight testing. However, since aerial refueling compatibility assessments have never been performed in Korea, there is no experience to determine the test requirements and the scope and size of the test program for a new development aircraft. This paper therefore introduces the common techniques of aerial refueling and aerial refueling flight test methods to understand the aerial refueling FCS (Flight Control System), OFP (operational flight program) and system validation, and aerial refueling envelope clearance of a fixed wing aircraft for a boom and receptacle refueling system that is being introduced into Korea Air Force.

초 록

공중급유 능력은 항공기의 임무시간 증대와 운용영역 확장을 제공함에 따라 많은 군용기에 적용 및 운영되어왔다. 피급유기가 지정된 급유기로부터 공중급유를 받기 위해서는 기술 및 운용호환성평가를 통해 공중급유허용을 확보해야 한다. 적합성 평가에는 공중급유 조종성, 기능성, 연료, 조명시스템 평가를 포함하고 있으며 비행시험을 통해 최종 검증된다. 그러나 한국에서는 신규개발항공기에 대한 공중급유 적합성 평가를 수행한 사례가 없기 때문에 시험 요구도, 범위 및 프로그램 규모를 결정하기 위한 경험이 없는 상황이다. 본 논문에서는 공중급유 유형 소개와 한국 공군에 도입된 Boom & Receptacle 시스템에 대한 고정익 항공기 공중급유 FCS (Flight Control System) OFP (operational flight program) 검증, 시스템 검증 및 영역 허용 관련 공중급유 비행시험 방법을 연구하였다.

Key Words : Aerial Refueling (공중급유), Boom & Receptacle Refueling System (Boom Receptacle 급유 시스템), Flight Test (비행시험)

1. 서 론

공중급유 시스템은 공중에서 추가연료 공급을 가능하게 함에 따라 항공기의 임무시간 및 거리를 증가시켜준다. 특히 군용기에서는 장착된 무장의 추가중량으로 인한 임무 거리 손실 없이 무장운용을 가능하게 함으로써 적의 공대공, 공대지 무기에 대한 공격 및 파괴를 할 수 있는 추가 체공시간을 제공해준다[1~2]. 또한 현대 민간 항공기에서의 대륙간 이동 시, 중간 기착지 없이 공중급유기를 이용하여 운영하는 방법도 고려되고 있다[3]. 그러나 본 시스템 적용을 위해서는 공중급유 형상에 대한 이해와 실제 사용 전 운영장비의 적합한 성능과 안정성에 대한 검증이 필요하며 최종적으로 비행시험을 통해 실제 운용영역에 대한 영역 확장을 수행해야 한다. 모든 공중급유 시험 요구도에 대한 입증은 비행시험으로 검증하는 것이 가장 이상적

Received: May 02, 2021 Revised: Oct. 18, 2021 Accepted: Oct. 31, 2021

† Corresponding Author
Tel: +82-55-851-2892, E-mail: wookness@koreaaero.com

© The Society for Aerospace System Engineering

이나 많은 시간, 비용, 인력이 소요되며 사고 발생 시 개발사업에 지대한 영향을 미치기 때문에 비행시험에 해당되는 필수 요구도를 선정하여 검증을 수행해야 한다.

공중급유 검증 시 국가별 상이한 검증 항목과 방법으로 인해 상호간 합동 운영에 많은 문제가 발생함에 따라 검증 관련 다양한 현안를 해결하고 연합군 간 협력 증진을 위해 ARSAG (aerial refueling systems advisory group)가 운영되고 있다. 해당 그룹은 공중급유 전문가로 구성된 20여개 국가의 군과 산업체 대표들이 모여 공중급유 시스템 개발, 상호운용성, 주요 검증방법에 대한 체계적인 검증 계획 및 평가 방법을 수립하고 있다.

본 논문에서는 대표적으로 운용되는 공중급유 형상인 Probe & Drogue와 Boom & Receptacle 유형에 대한 소개와 2가지 형상 중 고정익 항공기의 Boom & Receptacle 공중급유 비행시험 검증 방법에 대해 ARSAG에서 제시한 비행시험 평가에 대해 고찰하고자 한다. 또한 안전을 고려한 공중급유 영역확장 계획 수립과 필수 시험조건 도출 및 효율적인 비행시험 수행 방안 연구를 통해 소티 최적화를 도출할 계획이다.

2. 공중급유 시스템 및 급유기 Boom 영역

2.1 공중급유 유형

2.1.1 Boom & Receptacle 방식

Boom and Receptacle 방식은 “Figure 1”과 같이 공중급유기 후방동체 아래에 큰 원형 막대호스를 장착하여 후방의 타 기체 급유점에 연결하는 방식이다. 본 방식은 단시간에 다량의 연료 급유가 가능하며, 악기상의 상태에서도 급유가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 한번에 피급유기 한 대에만 급유가 가능하며 시스템이 복잡하고 비싸다는 단점이 있다. 현재 해당 시스템은 미국공군에서 운용[1] 중이며 한국공군에서도 도입 및 운용 중에 있다.

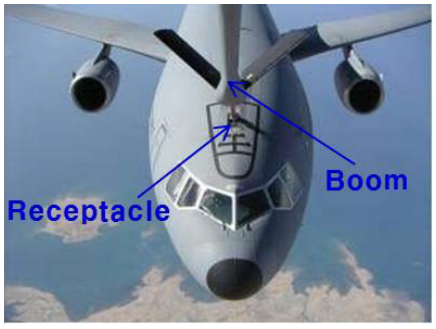

Fig. 1 Boom & Receptacle Type [4]

2.1.2 Probe & Drogue 방식

Probe and Drogue 방식은 “Figure 2”와 같이 공중급유기의 급유 호스 끝에 깔때기 모양의 급유구을 부착하여 급유하는 방식이다. 본 방식의 장점으로는 2대 이상의 피급유기에 동시 급유가 가능하고 급유 시스템이 저렴하며 단순하다는 것이다. 그러나 급유속도가 느리기 때문에 대형 피급유기에 연료 공급 시, 시간이 많이 소요된다. 또한 악기상의 영향을 받아 임무환경에 제한이 발생할 수 있으며 Boom & Receptacle 방식에 비해 조종사의 업무 부하가 높다는 단점이 있다. 현재 해당 시스템은 미국 해군 및 유럽 대부분 국가에서 운영 중이다[1]. 공중급유 유형별 비교는 “Table1”과 같다.

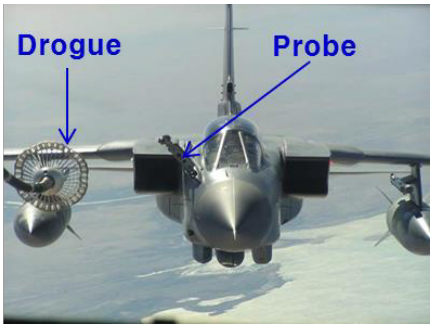

Fig. 2 Probe & Drogue Type [4]

Table 1 Aerial Refueling Type Summary

Cat.	Boom & Receptacle	Probe & Drogue
Type	• Have a rigid boom at the rear of the tanker and insert into a receptacle on the receiver.	• Have a funnel-shaped drogue at the end of the hose for the receiver being refueled, which inserts a probe into the hose.
Strong	• Offer higher fuel transfer rate. • Capable of operating in bad weather.	• Able to refuel two receivers simultaneously. • Able to refuel rotary wing aircraft.
Weak	• Refuel one receiver at a time. • Require a dedicated ARO (Aerial Refueling Operator). • More complicated to implement	• Require a slow airspeed. • Difficult to refuel in bad weather. • Higher workload on the receiver pilot
Case	• ROK Air Force and US Air Force	• US Navy, US Marine, UK Royal Air Force, French Air Force, etc.

2.2 Boom & Receptacle 주요장비

Boom & Receptacle 방식의 공중급유 비행시험 및 검증방안에 대해 연구할 계획에 따라 관련 주요장비에 대해 조사하였다.

2.2.1 급유기(Tanker) 급유 주요장비

공중급유를 위한 공중급유기의 주요 구성요소로는 Boom, Boom Ruddervator, PDL (pilot direction lighting) 등이 있다. Figure 3에 표현된 Boom Nozzle은 Boom의 끝단으로 피급유기의 Receptacle에 삽입되어 체결되며 Nozzle 내부에는 Induction Coil이 있어 피급유기의 Receptacle에 체결 및 분리시 Amplifier를 통해 Contact 및 Disconnect 신호가 시현되게 된다.

Boom의 Ruddervator는 Pitch와 Azimuth 방향을 조절한다. 또한 Boom은 Extendable Boom으로 임무시 Boom 길이를 조절하며 급유가 가능하다. PDL은 공중급유기 배면에 장착되어 있으며 피급유기가 급유기의 Pre-contact 및 Contact 지역에 안전한 접근을 유도하는 방향 지시등 역할을 한다.

Fig. 3 Boom Nozzle & Ruddervator [5]

2.2.2 피급유기(Receiver) 주요장비

공중급유를 위한 피급유기의 주요 구성요소로는 Receptacle, AR (Aerial Refueling) Lights, Receptacle Marking 등이 있다. Receptacle은 항공기에 공중급유를 위해 장착되는 연료 주입구로 일정 위치에 근접하게 되면 마그네틱의 영향으로 Boom Nozzle을 끌어당겨 Contact를 도와준다. 피급유기의 Receptacle 내부에는 Induction Coil이 있어 급유기의 Nozzle 체결 및 분리 시 Amplifier를 통해 Contact 및 Disconnect 신호가 시현 된다. 또한 해당시스템을 통해 Boom 통신이 가능하다.

피급유기 Receptacle 유형은 Drop Door, Clam Shell, Roll Over와 UARRSI (universal aerial refueling receptacle slipway installation) 유형 등이 있다. 조명은 AR Flood Light와 Slipway light가 있으며 Receptacle Marking은 Triple, Two Bar가 일반적으로 적용된다.

급유기와 피급유기는 “Figure 4”에 표현된 것과 같이 각 공중급유 제어 시스템을 통해 공중급유 신호인 Ready, Contact, Disconnect 신호가 각 화면창에 시현되며 Amplifier를 통해 Boom 음성 통신 기능 또한 제공된다.

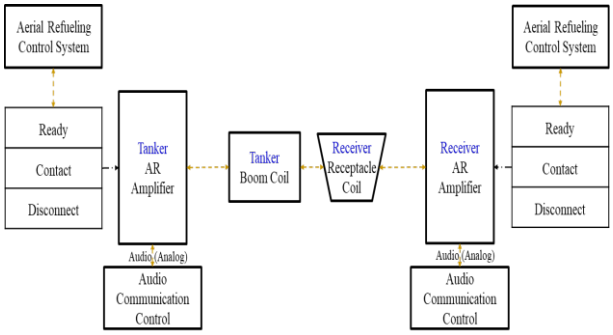

Fig. 4 Aerial Refueling System Diagram

2.3 급유기 Boom Envelope

NATO Standard ATP 3.3.4.5에 따르면 Boom 시스템을 장착한 공중급유기는 급유가 가능한 모든 속도 및 고도 영역에서 각 Boom 운용영역의 요구사항을 만족시켜야 한다. Contact Envelope은 급유기 Boom이 완전히 조종 가능한 가능한 영역을 의미하며 Disconnect Envelope은 해당 영역 초과 시 분리가 되어야 하는 영역을 의미한다. 제시된 Boom Contact & Disconnect 운용범위는 “Table 2”와 같으며 운용범위의 Pitch와 Azimuth 범위는 Boom Ruddervator의 해당 Envelope 제어 범위를 의미하며 Inner와 Outer Length는 Extendable Boom의 관련 Envelope의 내/외부 확장 길이이며 Travel은 boom 확장 가능 길이를 의미한다.

해당 범위를 상세 도식화하면 Disconnect Envelope이 Contact Envelope을 입체적으로 품고 있는 “Figure 5”와 같이 표현될 수 있다.

Table 2 Minimum Boom Operation Range [6]

Type	Azimuth	Pitch		Length(m)	
		Upper	Lower	Inner	Outer
Contact Envelope	± 8º	25º	35º	12.1	13
Disconnect Envelope	± 15º	20º	40º	10.3	14

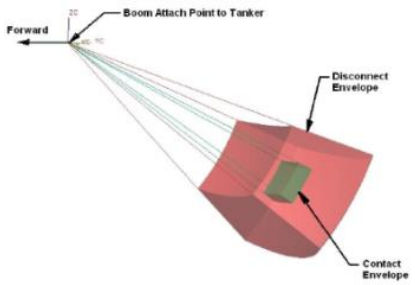

Fig. 5 Contact & Disconnect Envelope [6]

Boom의 일반적 운용영역을 보면 "Figure 6", "Figure 7"과 같다.

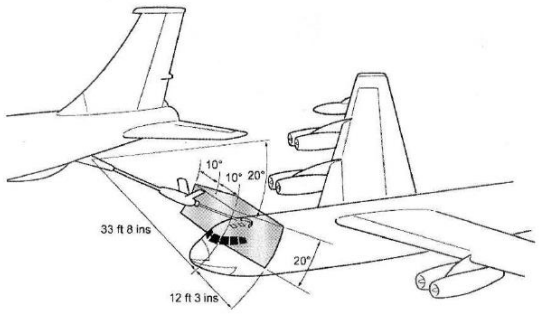

Fig. 6 Normal Yawing Boom Operating Envelope [6]

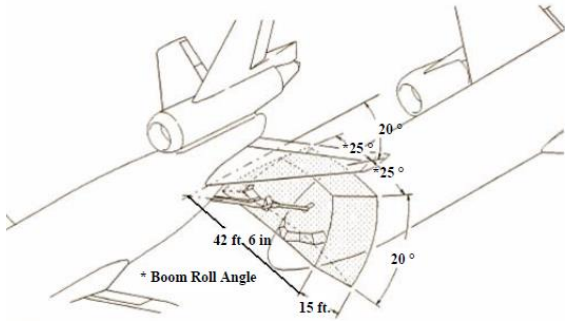

Fig. 7 Normal Rolling Boom Operating Envelope [6]

3. 공중급유 비행시험 평가방안

3.1 공중급유 비행시험 분야 및 항목

국제적 공중급유 자문그룹인 ARSAG에서는 연합군간 공중급유 시스템 검증 방법의 체계화를 위해 Aerial Refueling Test Methods 문서를 작성하였으며 필수적인 비행시험 평가 항목과 방법에 대한 가이드를 제공하고 있다[7].

공중급유 비행시험 구성은 크게 공중급유 비행제어 평가, 공중급유 시스템 기능 및 물리적 적합성 평가, 공중급유 연료시스템 평가로 분류할 수 있으며 상세 구성은 "Table 3"과 같다.

Table 3 Aerial Refueling Flight Testing [7]

Category	Test Items
AR HQ	• Receiver AR FLCS OFP Evaluation • Boom Tracking • Simulated Emergency Separation • Boom HQ • Station Keeping (Uncoupled & Coupled)
AR System Functional & Physical Compatibility	• Boom Signal System Function • Disconnect Delay Evaluation • Contact Disconnect Envelope Expansion • Slipway Assisted Contacts • First Fuel Transfer/Fuel Transfer • Independent disconnect • Tension Disconnect
AR Fuel System	• First Fuel Transfer/Fuel Transfer • Pressure Disconnect Evaluation • Pressure Refueling Evaluation

공중급유 비행제어 (HQ, handling qualities) 평가는 피급유기에 장입된 공중급유 FCS (flight control system) OFP (operational flight program)에 대한 평가로 급유기 후류 영향성에 대한 피급유기의 OFP 적절성을 확인하게 된다. 공중급유 OFP 검증 후 공중급유 시스템 검증을 수행하게 되며 주 시험 평가 목적은 급유기와 피급유기의 공중급유 신호, 연료 시스템 기능, 물리적 적합성을 확인하게 된다.

3.2 공중급유 HQ 비행시험 평가

공중급유 FCS OFP 검증을 위해서는 공중급유 관련 로직을 추가 반영한 비행제어 OFP 평가를 통해 공중급유 모드 운용의 확인 및 검증이 필요하다. 안전한 HQ 평가를 수행하기 위해서는 "Figure 8"과 같이 피급유기 자체 공중급유 FCS OFP 검증시험, Pre-contact HQ, Contact HQ 순으로 단계적인 검증을 진행해야 한다.

Fig. 8 AR HQ Flight Testing

공중급유 HQ 평가는 공중급유 비행시험에서 가장 먼저 수행되는 분야로 비행시험 착수 전 안전에 대한 검토가 필수적이다. 다양한 Airflow가 공중급유 HQ 비행시험에 영향을 주며 특히 Tanker의 Wake와 배기가스 연기는 Pitot-Static Errors 또는 엔진 Inflow 교란을 유발하여 비행안전에 큰 영향을 줄 수 있다. 그에 따라 비행시험을 위한 안전계획 및 위험 완화방안을 수립해야 한다. C-5, C-17 및 E-4와 같은 대형 수송기의 경우 상당한 Bow Wave를 발생시켜 급유기와 피급유기 모두에게 큰 Trim 변화를 유발시킬 수 있으며 근접 시 피급유기에 정체현상과 급유기에 Pitch Down Moment를 발생시킬 수 있다[8].

추가 확인 필요사항으로는 피급유기의 Receptacle 장착 위치 및 조종실 시야 간섭 사항이 있다.

Receptacle 장착 위치의 경우, B-1과 A-10은 피급유기 조종사의 전방에 Receptacle이 장착되어 있으며 F-15의 경우 항공기 중앙에서 상당히 벗어난 위치에 Receptacle이 장착되어 있다. 이러한 Receptacle 장착 위치는 공중급유 HQ에 영향을 미치는 중요한 요소가 될 수 있다. 또한 피급유기 캐노피에 Dorsal 안테나가 장착된 경우, HQ 문제가 발생하여 Boom 운용 영역을 상당히 축소시킬 수 있다[9].

조종실 시야 간섭의 경우, “Figure 9”와 같이 F-2 Canopy Frame 장착 위치에 의한 전방시야 제한으로 인해 KC-767 급유기 Boom 관측에 문제가 있었다[9].

Fig. 9 F-2 Contact Position View with KC-767 [9]

해당 시험은 근접비행, Wake Investigation, Tracking 평가, Station Keeping 및 모의 비상 분리를 포함한 편대 비행 과제를 통해 평가가 수행된다.

공중급유 HQ 평가 시험항목 중 Cooper-Harper Evaluation 수행이 필요한 시험은 “Figure 10” 기준을 활용하여 평가를 수행하며 개발요구도 기준을 미충족 시 공중급유 FCS OFP를 보완하여 재평가 및 조종 특성 요구도 기준 충족을 확인 후 다음 시험단계로 진행된다.

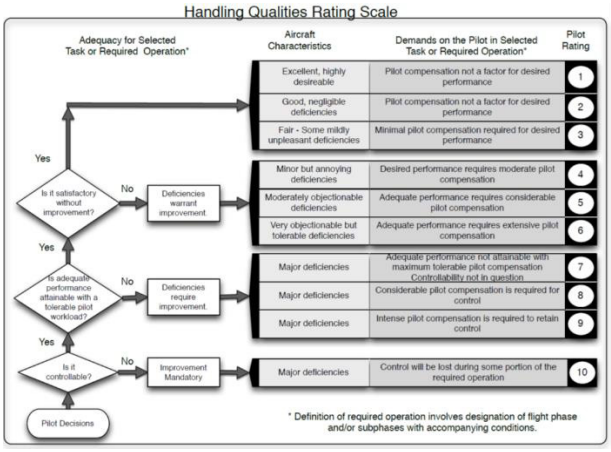

Fig. 10 Cooper-Harper Handling Qualities Rating Scale [10]

3.2.1 피급유기 공중급유 FCS OFP 시험

피급유기 공중급유 FCS OFP 시험은 피급유기의 공중급유 비행제어 OFP의 적절성 확인을 위해 수행되며 급유기 없이 피급유기 단독으로 개별 평가를 수행한다. 관련 비행시험 절차는 아래와 같다.

1. 피급유기 공중급유 FCS 모드 선택
2. 피급유기 도어 개방
3. 각 조종면 조작 및 반응 확인

해당 시험 후 OFP 평가를 위해 피급유기 조종사 Comments 확인 및 필요 시 OFP를 업데이트하여 재평가를 수행한다.

3.2.2 Boom Tracking

공중급유 미 검증 피급유기는 급유기와 Contact 거리에 바로 접근할 수 없으며 안전성 확보를 위해 접근 단계별 평가 후 Contact 지점으로 접근해야 한다. 첫 편대 HQ 평가는 300ft에서 수행되며 이후 100ft 검증 후 Pre-contact (또는 Astern) 위치인 50ft까지 접근하여 안정성을 평가하게 된다. 급유기 Boom의 위치에 따른 피급유기의 HQ (Handling Qualities) 평가를 위해 “Figure 11”과 같이 급유기가 Box 패턴을 만들면 피급유기는 패턴을 추적하여 편대를 유지할 수 있는지 평가하게 된다.

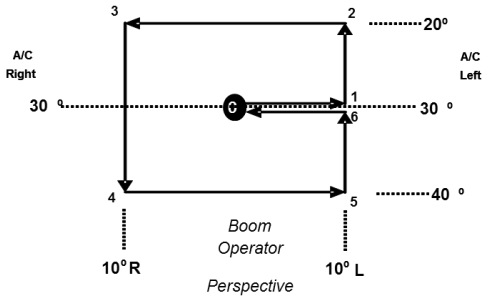

Fig. 11 Boom Box Tracking Pattern [7]

관련 비행시험 시험 절차는 아래와 같다.

1. 공중급유 FCS 모드 선택, Boom 300ft 후방에서 피급유기 안정
2. (급유기) Boom 영역 내에서 “Fig. 11” Box Pattern으로 Boom을 이동 (Slow 1~2deg/sec, Speed)
3. (피급유기) Boom 이동에 따라 Boom의 끝단을 추적 및 유지
4. 급유통제사 & 피급유기 조종사 Comments (피급유기 조종사 Cooper-Harper Evaluation)
5. 절차 2~4 반복 (Fast Speed, 3deg/sec)
6. 절차 2~5 반복 (Boom 100ft 후방)
7. 절차 2~5 반복 (Boom 50ft 후방)

해당 시험 후 편대 유지에 대한 급유통제사와 피급유기 조종사 Comments 및 피급유기 조종사의 Cooper-Harper Evaluation 수행이 필요하다.

3.2.3 Simulated Emergency Separation

단계별 접근 비행시험 평가 시 주변환경 및 인적요인으로 인해 급유기-피급유기 간 충돌 발생이 가능함에 따라 모의 비상 분리 검증을 Pre-contact 영역 이전부터 수행해야 한다. 관련 비행시험 절차는 아래와 같다.

1. Pre-contact 영역 이전의 후방에서 피급유기 유지
2. 약 10초 후 급유통제사가 “Breakaway” 방송하며 Simulated Emergency Separation 시도
3. 피급유기 조종사 Power 감속, Speed Brake를 사용하여 급유기와 Visual Separation 확인 및 급유기와 분리된 안전한 위치 확인 (1kft 고도 분리, 1/4 mile 후방 위치)
4. 급유통제사 시험 종료 선언 “Terminate Simulated Emergency Separation”

앞서 언급한 것과 같이 두 항공기 간 근접 비행은 불안정한 상황을 발생시킬 수 있기 때문에 비상 분리 절차에 대한 친숙화가 필요하며 안전하고 효율적으로 분리가 가능한 지 공중급유 고도/속도/형상별 반복 검증이 필요하다. 또한 기본 절차에 추가로 Speed Brake 와 같은 Drag Devices 사용에 대한 평가도 필요하다. 최근 시험 경향을 보면 피급유기의 추력을 Idle로 감소시키는 것 만으로는 충분한 초기 분리가 되지 않기 때문에 실제 Drag Devices 사용이 요구되고 있다[8].

해당 시험은 특정 데이터 확보 및 Cooper-Harper 평가가 필요하지 않으며 모의 분리 시의 위치 정보가 요구될 수 있다.

3.2.4 Boom HQ

Contact 영역에서는 피급유기 움직임에 대한 Boom Flying Qualities와 피급유기의 Bow Wave에 대한 정성적인 평가가 필요하다. 급유기 Boom 운용 영역 내에서 “Figure 12”과 같은 Bowtie 패턴을 피급유기에 지시하여 Boom 운용 특성과 피급유기 Bow wave에 대한 영향성을 확인하게 된다. 해당 시험 시 급유기와 피급유기 상호간 영향으로는 급유기의 Boom 자세 유지 불가 및 진동이 발생할 수 있으며 대형 피급유기가 빠른 접근율로 접근 시 급유기 Auto Pilot에 의한 충분한 자세 보상이 불가 시 급격한 Pitch 변화가 발생할 수 있다.

Bowtie 패턴의 운용 영역은 피급유기 유형에 따라 변할 수 있다. 예를 들어 KC-10의 경우 좌/우 (Roll) 운용 제한이 타 급유기 보다 더 넓고, 전투기 유형의 경우 캐노피 Clearance 로 인해 Elevation이 25도이며 그에 따라 Upper Limits가 축소될 수 있다.

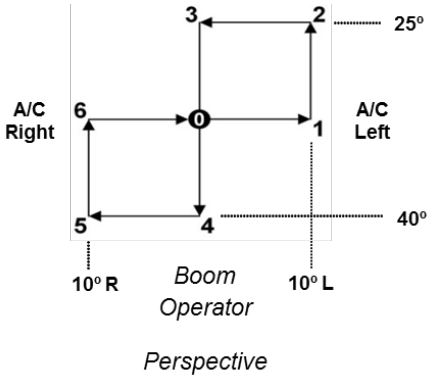

Fig. 12 Boom Bowtie Pattern [7]

관련 비행시험 절차는 아래와 같다.

1. Contact-uncoupled (약 2 ft) 위치에서 피급유기 안정
2. 급유통제사가 피급유기에게 Boom 영역 내 특정 위치로 이동 지시, Boom Nozzle과 Receptacle 2ft

이내 유지
3. 급유통제사가 “Fig. 12” Bowtie Pattern 조작을 수행하며 피급유기 조종사는 2ft 이내에서 붐 노즐 추적
4. 급유통제사 & 피급유기 조종사 Comments (Cooper-Harper Evaluation)

해당 시험 후 편대 유지에 대한 급유통제사와 피급유기 조종사 Comments 및 피급유기 조종사의 Cooper-Harper Evaluation 수행이 필요하다.

3.2.5 Station Keeping Uncoupled & Coupled

급유기 Boom과 피급유기의 Receptacle 실 체결 상태가 아닌 근접 상황에서 선회를 먼저 수행한 후 예상 선회 가능 각도에 대한 평가를 수행한다. 이후 실 체결 상태에서 급유기-피급유기 선회를 수행하여 공중급유 최대 선회각을 본 시험을 통해 결정한다. 관련 비행시험 절차는 아래와 같다.

1. 피급유기 Contact Uncoupled 위치 (Boom과 receptacle 2ft 이내)에서 안정 유지 (Uncoupled Test 시) 또는 급유통제사 Contact 수행 (Coupled Test 시)
2. 피급유기에서 급유기 PDI (pilot director indicator) 조명과 자세유지를 위한 적절한 Visual 참조점 확인
3. Boom 영역 중앙에 가능한 가깝게 자세 유지하며 2분 동안 직진 수평 비행
4. 급유기 선회 (10~15도) 및 안정, 피급유기 자세 유지한 후 HQ 평가
5. 급유기 최대 선회각까지 점진적으로 증가, 4항 반복 평가. 최대 유지 가능한 선회각이 정해지면 최소 180도 선회 후 직진 수평 비행
6. 선회, 직진 수평 비행 평가 후 급유기/피급유기 Pre-contact 위치로 복귀
7. 급유통제사 & 피급유기 조종사 Comments (Cooper-Harper Evaluation)

해당 시험 후 선회 유지에 대한 급유통제사와 피급유기 조종사 Comments 및 피급유기 조종사의 Cooper-Harper Evaluation 수행이 필요하다.

3.3 공중급유 시스템 비행시험 평가

공중급유 시스템 비행시험 구성은 “Figure 13” 과 같이 시스템 기능/성능 및 물리적 적합성 평가, 연료 시스템 평가로 구성된다.

Fig. 13 AR System Flight Testing

급유 수행 전 수행되는 Dry Contact 평가는 시스템 기능/성능 및 물리적 평가 분야 검증시험으로 연료공급을 위한 공중급유 모드인 Normal과 Override 모드를 시험 목적에 맞게 설정한 후 시험을 진행하게 된다. 급유기 Boom과 피급유기 Receptacle의 체결 및 분리 시 급/피급유기 시스템 신호 확인과 Boom 통신 등 상호 시스템의 적절성을 검증하며 피급유기의 Slipway 설계 적합성 평가와 Receptacle 장착 위치에 따른 급유기 Boom 운용영역평가를 수행하게 된다.

Boom 운용평가는 Contact-Disconnect 영역확장 시험을 통해 운용영역을 확정한다. 해당시험 수행 시 PDI나 특정 지침이 없기 때문에 피급유기 조종사의 경험과 급유통제사의 음성 지시에 따라 임무를 수행하며 그에 따라 급유통제사와 피급유기 조종사의 높은 업무 집중력이 요구된다. 또한 지속적으로 근접 거리에서 Contact와 Disconnect를 반복 수행해야 하기 때문에 안전을 고려하여 Boom 영역확장 계획을 수립해야 한다. 본 시험이 어렵더라도 공중급유 허용에 매우 중요한 요소이기 때문에 필수적으로 검증이 필요하며 확장 및 축소된 Boom 길이에 대한 평가도 필요하다. 또한 F-15와 같이 Receptacle이 Off-center 위치에 장착되어 있으면 공중급유 전 영역에서 검증이 필요하다 [8].

일반 체결 분리가 안될 시를 고려한 비상 분리 평가는 Tension Disconnect과 IDS (independent disconnect system) 검증이 있으며 일정 인장력 및 해당 시스템 작동 시 비상 분리가 가능함을 확인한다.

Dry Contact 평가 이후 실제 급유기/피급유기 간 연료 시스템 적절성을 평가하기 위해 Wet Contact 평가를 수행하며 급유기로부터의 연료 이송률과 이송량 확인, 제한 압력 이상에서의 분리 능력을 검증, 비상상황에서 공중급유를 위한 Pressure Refueling 능력을 확인한다.

3.3.1 Boom Signal System Function

공중급유 모드에서 실 Contact시 Boom 신호, 통신 시스템 기능 및 호환 적절성과 원활한 분리 평가를 위해 해당 시험을 수행하며 관련 비행시험 절차는 아래와 같다.

1. 피급유기 Contact 위치에서 안정한 자세 유지

(Boom Envelope 중앙/예 : 30도 Elevation, 0도 Azimuth)
2. 급유통제사 Contact 수행
3. 피급유기에서 급유기 PDI 조명과 자세유지를 위한 적절한 Visual 참조점 확인
4. 급유통제사 Disconnect 수행
5. 절차 2~4 반복(피급유기 조종사 Disconnect 수행)

3.3.2 Disconnect Delay Evaluation

공중급유 Disconnect Command와 실제 Boom Nozzle이 풀리는 사이 시스템 Delay 시간 확정을 위해 해당시험을 수행하며 관련 비행시험 절차는 아래와 같다.

1. 피급유기 Contact 위치에서 안정한 자세 유지 (Boom Envelope 중앙/예 : 30도 Elevation, 0도 Azimuth)
2. 급유통제사 Contact 수행
3. 급유통제사 400~600 pounds of force 하중을 Nozzle에 가함.
4. 급유통제사 Disconnect 수행

3.3.3 Contact-Disconnect Envelope Expansion

Boom 운용영역 설정 및 검증을 위해서는 "Figure 14"와 같이 안전을 고려하여 최초 Middle Size Boom 길이에서 피급유기에 대한 Contact-Disconnect 영역 중심부터 Azimuth 축으로 확장 후 Low 또는 High Elevation 영역으로 단계적 (Build-up) 확장을 수행한다. 이후 동일한 방식으로 Long, Short Size Boom 길이 순으로 최대 운용영역 검증을 수행한다. 또한 관련 시험을 통해 Nozzle Cocking, Binding 또는 부적합한 Boom 하중이 가해지는 지 확인하게 된다.

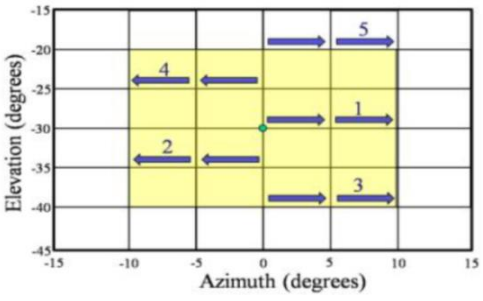

Fig. 14 Boom Envelope Expansion Example [8]

관련 비행시험 절차는 아래와 같다.

1. 피급유기 Contact 위치에서 안정한 자세 유지 (Boom Envelope 중앙/예 : 30도 Elevation, 0도 Azimuth)
2. 급유통제사 Boom Contact를 수행 Boom 영역 시험 조건별 5초 유지 후 Disconnect 수행
3. Boom Nozzle의 정상 분리와 걸리는 하중 적절성을 확인한 후 Boom 길이 축소를 위한 Disconnect Clearance가 충분한지 확인
4. 급유통제사가 피급유기에 다음 시험조건 위치로 이동을 지시하고 계획한 붐 영역확장 순서 ("Fig. 14" 예) 참조)에 따라 평가 수행
5. 절차 2를 반복하여 수행하며 Boom Envelope Edges 부위에서는 피급유기가 Contact를 위해 중앙으로 이동 후 Disconnect를 위해 시험 조건 위치로 이동함. 특별한 이유가 없는 한 Edge 영역은 Contact를 시도하지 않고 Disconnect만 수행함.

본 시험 수행 시 Boom 운용영역 내 Edge 조건들은 추가 재수행을 요구하기도 하며 공중급유 영역 고도/속도에서 Boom 인장 길이 별 상당한 비행시험 소티가 요구되기 때문에 시험조건 최적화가 필수적이다.

3.3.4 Slipway Assisted Contacts

급유기 Boom Contact 시도 시 "Figure 15"와 같이 피급유기 Slipway가 적절히 정렬되어 가이드 역할을 할 수 있는지를 검증하기 위해 본 시험을 수행하며 Slipway 앞에 표기된 Slipway Marking을 활용하여 Slipway Assisted Contact 시나리오를 수립, 시나리오별 반복 검증이 필요하다. 관련 비행시험 절차는 이래와 같다.

1. 피급유기 Contact 위치에서 안정한 자세 유지 (Boom Envelope 중앙/예 : 30도 Elevation, 0도 Azimuth)
2. 급유통제사가 Boom Nozzle을 Slipway Leading Edge 부근에 위치시키고 볼 조인트에서 Nozzle을 기울이기 위한 충분한 Down Force를 발생시킴.
3. 급유통제사는 Boom의 Down Pressure를 유지하며 Boom을 확장시켜 경사로를 통해 Boom이 피급유기의 Receptacle로 들어가는 것을 확인

Fig. 15 F-16 Slipway [11]

3.3.5 First Fuel Transfer/Fuel Transfer

공중급유 시 피급유기의 연료 이송 특성을 평가하기 위해 수행한다. 관련 비행시험 절차는 아래와 같다.

1. 급유기/피급유기 Normal Contact 수행
2. 급유 Pump를 작동하여 피급유기에 첫 연료 이송 수행
3. 급유통제사 Disconnect 수행
4. 피급유기 조종사 및 임무통제실에서 이송 연료량 확인
5. 급유기/피급유기 Normal Contact 수행
6. 급유기의 급유 Pump를 작동하여 연료 만재 또는 설정 연료량 이송 도달시까지 피급유기에 연료 공급
7. 피급유기 조종사 및 임무통제실 이송 연료량 확인

NATO ATP 56(B)에 따르면 급유기의 급유 운용 Pump는 총 4개로 구성되며 피급유기의 수유 Line의 허용 가능 관압을 고려하여 총 운용 Pump 수를 조절한다[4]. 수송기급과 같은 큰 사이즈의 피급유기는 4개의 Pump를 모두 운용하여 급유 수행이 가능 하지만 전투기급 피급유기의 경우, 총 2개의 Pump만으로도 허용 가능 관압 초과가 가능하기 때문에 최대 2개의 급유 Pump를 운용한다. 따라서 검증받는 피급유기의 특성에 따라 급유기의 급유 Pump 수를 조절하여 평가를 수행한다.

3.3.6 Pressure Disconnect Evaluation

급유기로부터 연료 이송을 받은 피급유기의 만재 도달에 따른 반응과 Pressure Disconnect 시스템 작동 상태를 평가하기 위해 수행한다. 관련 비행시험 절차는 아래와 같다.

1. 급유기/피급유기 Normal Contact 수행
2. 급유 Pump를 작동하여 피급유기에 연료 이송 및 Pressure Disconnect 상태에 도달할 때까지 계속 급유

3.3.7 Pressure Refueling Evaluation

본 시험을 통해서는 급유기/피급유기 간 Normal Contact가 불가하거나 Receptacle Toggles가 Boom Nozzle에 체결되지 못 할 경우를 모사하여 피급유기가 Pressure Refueling이 가능한지를 확인하게 된다. 관련 비행시험 절차는 아래와 같다.

1. 급유기 시스템을 요구된 공중급유 모드로 설정
2. 피급유기는 Contact를 위한 Latch를 불가하게 만들고 공중급유시스템을 요구된 공중급유모드로 설정
3. 피급유기 Contact 위치로 이동 후 안정상태 유지
4. 급유통제사는 Boom Nozzle을 Receptacle 안에 위치시키고 No Contact 지시 확인
5. 급유통제사는 Boom을 확장하여 Nozzle과 Receptacle에 Positive Pressure를 유지시키고 Emergency Contact 스위치를 통해 급유 Pump를 작동시켜 연료 이송
6. 설정한 연료량 이송 시까지 Fuel Flow 유지
7. 급유통제사는 Disconnect 후 Boom을 축소시키고 피급유기는 후방으로 이동 Pre-contact 위치로 이동

Pressure Refueling 평가 수행 시에는 Latch가 걸리지 않은 상태에서 급유를 받기 때문에 고압의 Fuel이 피급유기에 분사될 수 있다. 분사된 Fuel이 항공기 전장 시스템 라인이나 엔진 흡/배기구 방향으로 이동할 경우 발화 가능성이 있기 때문에 해당 시험에서 함께 확인하며 분사 후에도 계속적으로 피급유기 조종사 시야 확보에 문제를 주는지도 확인한다.

3.3.8 Independent Disconnect

급유기에는 Normal Disconnect가 안될 시 사용하는 비상 기능인 IDS 기능이 있으며 평가 피급유기에 적합하게 작동하는 지 검증이 필요하다. 해당 시험에서는 IDS 운용 중 Boom Nozzle의 Receptacle 분리와 Boom Stresses가 허용 제한치 이내임을 확인하게 된다. 관련 비행시험 절차는 아래와 같다.

1. 급유통제사 IDS 정상 작동 확인
2. 피급유기는 요구된 공중급유 모드 설정
3. 급유기/피급유기 Normal Contact 수행
4. 급유통제사 Independent Disconnect 수행 후 피급유기 Receptacle에서 Boom Nozzle 분리 확인

앞서 언급했던 것과 같이 IDS는 정상 분리가 안될 시 사용하는 비상 기능으로 초기 적합성 확인에서는 수행하지 않는다.

3.3.9 Tension Disconnect

현대 급유기/피급유기 시스템에는 다양한 Back-up 모드가 반영되어 있지만 모든 시스템의 작동 불가 상태가 발생할 수 있기 때문에 Tension Disconnect 기능 검증이 필요하다. 해당 시험은 운용할 수 있는 Boom 확장 길이 초과 시 피급유기 Receptacle에서 Boom Nozzle 분리 여부와 Boom Stresses가 허용 제한치 이내임을 확인하게 된다. 관련 비행시험 절차는 아래와 같다.

1. 급유기/피급유기 Normal Contact 수행
2. Contact 안정화 이후 피급유기는 Power를 줄여 급유기로부터 약 1ft/sec로 멀어짐
3. Boom이 완전히 확장되면 Receptacle 내 Toggle이 Boom Nozzle을 분리
4. 급유기에서 Boom과 Nozzle에 가해지는 Tension Disconnect 하중을 평가하기 위해 Boom 하중 모니터링

Tension Disconnect 시험은 고위험 시험으로 Boom Nozzle 분리가 되지 않으면 피급유기의 후퇴 운동량으로 인해 급유기 Boom Nozzle과 피급유기 Receptacle 모두에 손상을 줄 수 있기 때문에 급유기와 피급유기의 적절한 이격 속도 유지가 매우 중요하다.

3.4 공중급유 영역확장계획수립

급유기의 공중급유 운용영역 내 피급유기의 공중급유 목표영역에 공통영역을 설정 후 해당 고도/속도별 공중급유 HQ(3.2장) 및 시스템(3.3장) 시험 항목별 검증을 수행해야 한다. 공중급유 영역확장 계획은 시험 안전성과 효율성을 고려하여 수립되어야 하며 일반적으로 “Figure 16”와 같이 가장 안정한 공중급유 조종특성이 예상되는 지점인 중고도/중속 비행시험 조건부터 시작되며 중고도/저속 수행 이후 고속조건으로 이어진다. 중고도 영역확장 이후 같은 순서로 고고도와 저고도 영역을 확장한다[7].

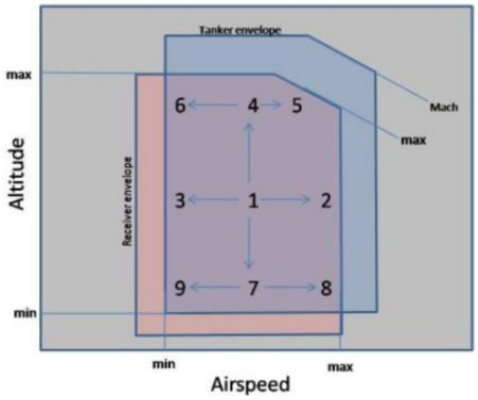

Fig. 16 AR Envelope Expansion Example [7]

공중급유 영역 내 고속 영역은 피급유기에 Pitch Oscillation을 유발할 수 있으며 저속 영역은 Low Roll Response가 발생할 수 있다. 일반적으로 피급유기의 공중급유 운영 시 7~9번 저고도 영역은 10kft 근방이지만 임무 필요에 따라 1kft 근방까지 검증이 필요한 경우도 있다.

1kft 근방의 저고도 영역에서는 지상의 Turbulence로 인해 고고도 보다 더 고도 유지와 시스템 조작이 어려워진다. 급유통제사의 경우, Boom Nozzle이 피급유기에 충돌하는 것을 막기 위해 계속적으로 Ruddervator와 Boom 확장 Lever 조작이 필요하며 그로 인해 급유기 계측 파라미터 모니터링이 힘들다. 또한 피급유기와 Contact Coupled 급유 중에도 Light Turbulence가 계속적으로 발생하여 Disconnect가 발생하고 다시 편대를 유지, Contact를 수행하는 등 평균 급유 시간 보다 더 많은 시간이 소요될 수 있다. 피급유기 조종사의 경우, 급유통제사의 Boom 조작에 대응하여 Contact 간격을 유지해야 하기 때문에 피급유기 추력 조절이 필요하다. 급유 완료 후에도 계속되는 Light Turbulence에서는 피급유기 조종사가 Disconnect 버튼을 조작하는 것도 쉽지 않다. 저고도 공중급유 비행시험 수행은 급유기조종사, 급유통제사, 피급유기 조종사 모두에게 높은 업무 강도가 요구되며 쉽게 피로해진다. 뿐만 아니라 착시현상과 Bird Strike 발생 가능성에 대한 위험 완화 방안 수립이 필요하다[12].

상기와 같은 사유로 모든 영역의 검증 후 마지막에 저고도 공중급유 영역확장을 계획한다. 특히 저고도 저속 9번 영역의 경우, 지상 Turbulence에 가장 큰 영향을 받으며 사고 발생 시 대응 시간이 적기 때문에 가장 마지막에 수행한다. 그러나 “Fig. 16”에 제시된 영역확장 순서는 사업에서 요구한 고도, 속도 영역범위와 피급유기급에 따라 그 순서가 달라질 수 있다.

추가적으로 공중급유 영역확장에서는 피급유기의 항공기 중량, 형상 및 CG (center of gravity) 조합 검증에 대한 고려가 필요하다. 일반적으로 안전을 고려하여 하기와 같은 순으로 점진적 검증을 수행하나 항공기 유형 및 사업 범위에 따라 해당 조건이 축소 및 제외될 수 있다.

- 중량 : 중/저중량 → 중중량 → 고중량
- 형상 : Clean 형상 → 외장이 많이 장착된 형상
- CG : MID → FWD → AFT

4. 결 론

고찰된 공중급유 비행시험 항목, 절차 및 영역확장 방안은 정부 당국의 비행시험 착수 승인/허가를 받은 후 공중급유기와의 비행시험 검증 착수가 가능하며 평가 완료 후 공식적으로 공중급유허용 (Aerial Refueling Clearance)을 확보할 수 있다.

본 논문에서는 공중급유 시스템 소개와 고정익 항공기 공중급유 비행시험 평가 방안에 대해 연구를 수행하였다. 해당 연구를 통하여 실제 비행시험 항목 및

검증 시 필요한 비행시험 절차에 대해 이해할 수 있었고 안전한 Boom 영역확장 및 공중급유 영역확장 방안을 확인하였다. 이로써 향후 Receptacle 유형의 고정익 피급유기 신규 개발 및 개조 개발을 위한 공중급유 비행시험 평가 시 본 연구가 활용될 수 있을 것이다.

References

[1] Joseph P. Nalepka and Jacob L. Hinchman., "Automated Aerial Refueling Extending the Effectiveness of UAVs," AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, AIAA-2005-6005, pp. 1-2, Aug. 2005.

[2] Ba T. Nguyen and Lt Tong Lin., "The Use of Flight Simulation and Flight Testing in the Automated Aerial Refueling Program," AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, AIAA-2005-6007, pp. 1-2, Aug. 2005.

[3] Dr R. K. Nangia., Logistics for Air to Air Refueling in Civil Aviation, Step Jump in Fuel Weight Cost Efficiency & Smaller Tankers Needed," 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, AIAA-2016-3903, pp. 1-2, June 2016.

[4] NATO (North Atlantic Treaty Organization), ATP-56(B)-Air to Air Refueling, pp. ZE.1.2-ZE.5.52, Jan. 2010.

[5] KC-135 Boom, https://airrefuelingarchive.wordpress.com/tag/boom/

[6] Aerial Refueling System Advisory Group (ARSAG), "Aerial Refueling Boom/Receptacle", Doc. No. 20-08-17, pp. 33-36, July 2017.

[7] Aerial Refueling System Advisory Group (ARSAG), "Aerial Refueling Test Methods", Doc. No. 41-09-15, pp. 5-A19, Apr. 2015.

[8] James H. Spencer, Jon D. Rowland, Mark J. O'Connor, "Air-to-Air Refueling Qualification Testing", 54th SETP (The Society of Experimental Test Pilots) Symposium, pp.7-16, Sep. 2009.

[9] Maj. Kazuhiko Kakoi, Capt. Koji Miyoshi and Maj. Satoshi Hiratsuka, "Optimization of F-2 AIR to AIR Refueling Control Laws", 58th SETP Symposium, pp.2-4, Sep. 2014.

[10] George E. Cooper and Robert P. Harper Jr, The Use of Pilot Rating in The Evaluation of Aircraft Handling Qualities, NASA TN D-5153, USAF Test Pilot School, pp. 12, Apr. 1969.

[11] F-16 Refueling, https://airrefuelingarchive.wordpress.com/category/f-16/

[12] Larry Roberts, "KC-135R Low Altitude Air Refueling Flight Test Program", AIAA Orbital Debris Conference: Technical Issues and Future Directions, AIAA-1990-1265, pp.60-65, 1990.