

군용항공기 열교환기 윤활유 유입포트 균열개선 연구

박성재^{1*}, 최재호¹, 최길규², 이동기²
¹국방기술품질원, ²한국항공우주산업

The quality improvement study on the crack of heat exchanger lubricating oil port in military aircraft

Sung-Jae Park^{1*}, Jae-Ho Choi¹, Gil-Gyu Choi², Dong-Ki Lee²

¹Defence Agency for Technology and Quality

²Korea Aerospace Industries, LTD

요약 군용항공기에 장착되는 연료/오일 열교환기는 연료의 저온을 이용하여 항공기 탑재부품 구동장치나 유압펌프와 같은 다른 장치에 공급되는 윤활유를 냉각시키는 장치로 항공기 탑재부품 구동장치로 연결되는 윤활유 유입포트에 균열이 발생되었다. 만일 열교환기의 균열이 발생될 경우 다른 장치에 공급되는 윤활유 냉각이 이루어지지 않아 더 이상 비행을 할 수 없기 때문에 해당 결함은 항공기 가동률 저하에 큰 원인이 된다. 본 연구에서는 군용항공기 연료/오일 열교환기 항공기 탑재부품 구동장치 오일포트 균열 현상을 개선하기 위해 오일 포트 균열부위 파단면에 대한 비파괴 검사와 현미경 검사를 수행하여 균열에 대한 경향성을 분석하였으며, 열교환기 오일포트에 연결되는 오일 배관은 티타늄 재질의 배관으로 열교환기에 장착 시 과도한 토크로 체결되어 열교환기 균열의 주된 원인으로 확인되어 유한구조해석을 통해 장착 토크 적용 시 열교환기에 과도한 힘이 전달되는 것을 검증하였다. 해당 결함에 대한 개선 방안으로는 항공기 탑재부품 구동장치 오일 포트에 장착되는 배관의 재질과 직경을 변경시켜 적용 토크 값을 열교환기 오일 포트에서 견딜 수 있는 값으로 조정하였으며, 또한 맥동압력으로 인한 피로누적을 최소화시키기 위해 배관의 굽힘값을 조정하였다. 결과적으로, 동일한 조건에서 개선된 배관을 장착하여 지상시험을 통해 열교환기에 균열이 발생되지 않는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract The fuel oil/heat exchanger installed in military aircraft is a device that cools the lubricant oil supplied to other devices, such as an AMAD, and a hydraulic pump using the low temperature of the fuel is cracked at the AMAD lubricant inlet port. If a crack in the heat exchanger occurs, the lubricant oil supplied to other equipment is not cooled. Therefore, the flight can no longer be performed. In this study, non-destructive inspection and microscopic examination of the fracture surface of the oil port were performed to analyze the crack tendency. The oil pipe connected to the oil port is a titanium pipe, which is fastened with over torque and has been identified as the leading cause of heat exchanger oil port cracks. In addition, it was verified as the main reason for cracking by finite element analysis. The material and diameter of the pipe were changed to improve this defect, and the applied torque was adjusted. In addition, the bending value of the pipe was adjusted to minimize the fatigue accumulation due to pulsating pressure. As a result, no cracks occurred on the heat exchanger via the ground test after the installation of an improved pipe under the same conditions.

Keywords : Military Aircraft, Heat Exchanger, Fatigue Striation, Crack, Nondestructive Inspection

*Corresponding Author : Sungjae Park(Defence Agency for Technology and Quality)

email: sjpark@dtaq.re.kr

Received January 6, 2020

Accepted April 3, 2020

Revised January 28, 2020

Published April 30, 2020

1. 서론

군용항공기에 장착되는 연료/오일 열교환기는 엔진으로 유입되는 연료의 낮은 온도를 이용하여 항공기 유압계통과 항공기 탑재부품 구동장치(Airframe Mounted Accessory Drive, 이하 AMAD)에 공급되는 윤활유를 냉각시킨다. 열교환기를 통해 공급되는 윤활유는 기어의 마모방지와 온도를 감소시키는 역할로

비행 시 반드시 정상적으로 공급되어야 한다. 그러나 열 교환기에서 AMAD로 공급되는 윤활유 배관 연결 포트(Port) 부위에 균열이 발생되어 열교환기 사용이 불가능한 상태가 되었으며, 이는 항공기 가동률 저하와 운용 비용 상승 및 수명주기 비용에 영향을 미치게 된다[1]. 본 연구는 군용항공기에 장착되는 연료/오일 열교환기 균열에 대한 문제점을 해결하기 위해 고장탐구와 원인분석을 수행하였으며, 열교환기 균열에 대한 개선방안에 대한 연구를 수행하였다.

2. 본론

2.1 열교환기

군용항공기 열교환기는 미국으로부터 구매하는 국외 도입품이며 T-50계열 항공기에 각 한 대씩 장착된다. 주요 기능은 엔진으로 유입되는 연료를 이용하여 유압펌프 공급되는 유압유 냉각, AMAD 및 발전기 기어류의 오일 냉각 기능이 있으며, 장착위치는 항공기 중앙동체 벌크헤드 전방연료탱크 부위에 장착된다. 열교환기 균열은 지상 점검 수행 중 식별되었으며, 결함 발생 후 원제작사로 입고되어 AMAD 윤활유 공급 배관과 연결되는 포트 주위를 용융하여 열교환기 본체와 포트를 용접하는 방식으로

수리 후 항공기에 재장착 되었으나, 운용 중 동일한 균열이 발생되었다. 열교환기의 형상과 균열 발생부위의 위치는 Fig. 1과 같다.

2.2 원인분석

본 결함에 대한 원인분석을 위해 육안검사, 비파괴 검사, 현미경 검사 및 전산구조해석을 수행하였으며, 각 항목에 대한 특징 및 분석 항목은 Table 1과 같다.

2.2.1 육안검사

본 결함은 열교환기 AMAD 오일 포트 균열 현상으로, 균열 현상에 대한 원인분석을 위해 열교환기 균열 부위에 대한 육안검사를 수행하였다. 육안검사 결과, 결함 발생 열교환기는 수리 후 재 입고되었으나 동일결함이 지속적으로 발생되었다. 오일 포트 수리는 균열 발생 시 균열 부위를 용융하여 용접하는 방식으로 수리되었으며, 반복된 수리로 균열 주변부가 취약하게 된 것으로 추정되었다. 열교환기의 주요 균열부위 및 동일한 균열 형상은 Fig. 1과 같다.

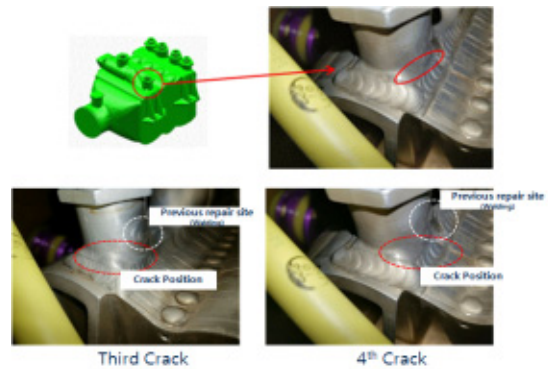


Fig. 1. Crack position of Heat exchanger

Table 1. Characteristics by analysis type

Contents	Characteristic	Check Point
Visual Inspection	· Visually Check, Low Cost, Simple	· Check for crack in heat exchanger (Cracked or not)
Fluorescent Penetrant Inspection	· Type of dye penetrant inspection · Highly sensitive fluorescent penetrant is ideal for even the smallest imperfections	· Examination for tendency of cracks and direction of crack growth in heat exchanger
Micro Examination	· At high magnification (×20~2000)	· Examination for heat exchanger's direction of crack growth and progression at ×30 magnification for crack surface
Finite Element Method	· Method for solving problems of engineering and mathematical models	· Impact in heat exchanger when installed titanium tube · Check location of damage in heat exchanger when installed titanium tube

2.2.2 비파괴검사

육안검사 실시 후 균열부위 형상을 보다 명확하게 식별하기 위해 비파괴 검사 중 하나인 형광 침투 검사를 수행하였으며, 검사 결과 Fig. 2와 같이 내·외측 모든 부위에서 균열이 발생된 것을 확인할 수 있었다. 또한 균열 성장이 나사선 방향으로 진행되었으며, 용접되어 수리된 부위에서도 균열이 지속적으로 성장되는 것을 확인할 수 있었다[2].

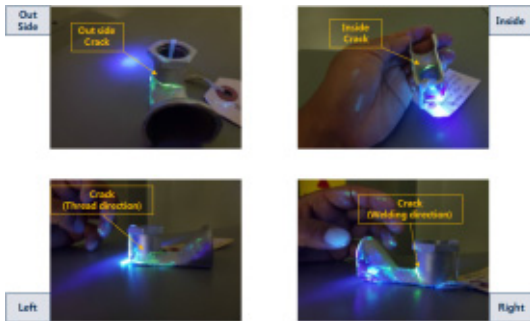


Fig. 2. FPI results of Crack position

2.2.3 현미경검사

균열 부위에 대한 정확한 분석을 위해 현미경을 통해 열교환기 포트 파단면을 확인하였으며, 거시 분석 결과 외표면에서 초기 균열이 발생된 것을 확인하였다. Fig. 3의 A 영역을 확대해 보면 Fig. 4와 같으며, Zone A에서 Fatigue Striation을 통해 균열 진전 방향이 외표면에서 내표면으로 진행되는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 Zone B에서도 Zone A와 같이 동일하게 진행되는 것을 확인 할 수 있었다. 이를 통해 외부 응력에 의해 균열이 발생된 것으로 추정하였다.

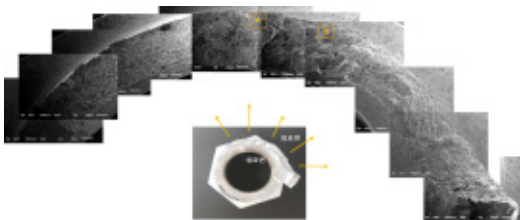


Fig. 3. Micro analysis results(x30)

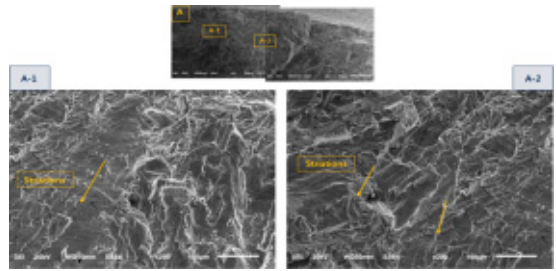


Fig. 4. Picture of Zone

2.2.4 전산구조해석

열교환기에 외부 응력을 받을 수 있는 요소는 유입포트에 배관 장착 시 발생하는 토크 값으로 추정되었으며, 윤활유 유입포트에 배관 장착 시 열교환기에 주는 영향을 분석하기 위해 전산구조해석을 수행하였다. 열교환기 AMAD 윤활유 유입포트에 장착되는 배관의 토크 값은 570~630 in-lbs[3] 이며, 해석 시 600 in-lbs를 적용하였다. 전산구조해석 결과 Fig. 5와 같이 약 600 in-lbs 적용 시 윤활유 유입포트 아래 부위에 전단피로가 누적되는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 전단피로가 누적되는 부위는 형광 침투 검사 시 확인된 균열 부위와 동일하였다. 이와 같은 현상은 배관을 장착시키기 위한 토크값 적용 시 열교환기에 과도한 토크가 전달되어 발생된 것으로, 비파괴 검사와 전산구조해석을 통해 확인할 수 있었다. 열교환기에 장착되는 배관은 티타늄 재료의 배관으로 570 in-lbs 이하로는 장착이 불가능하다. 또한 열교환기의 AMAD 포트에 적용되는 최대 토크 값을 해석한 결과 최대 240 in-lbs 로 확인되었다. 따라서 열교환기 윤활유 포트 균열에 대한 주원인은 티타늄 재료의 배관 사용으로 과도한 토크 적용과 이로 인한 전단피로 누적으로 균열이 가속화 되어 발생 된 것이다.

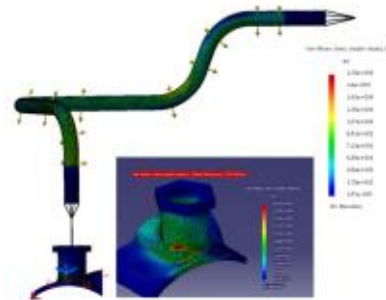


Fig. 5. Interpretation results of Deflection

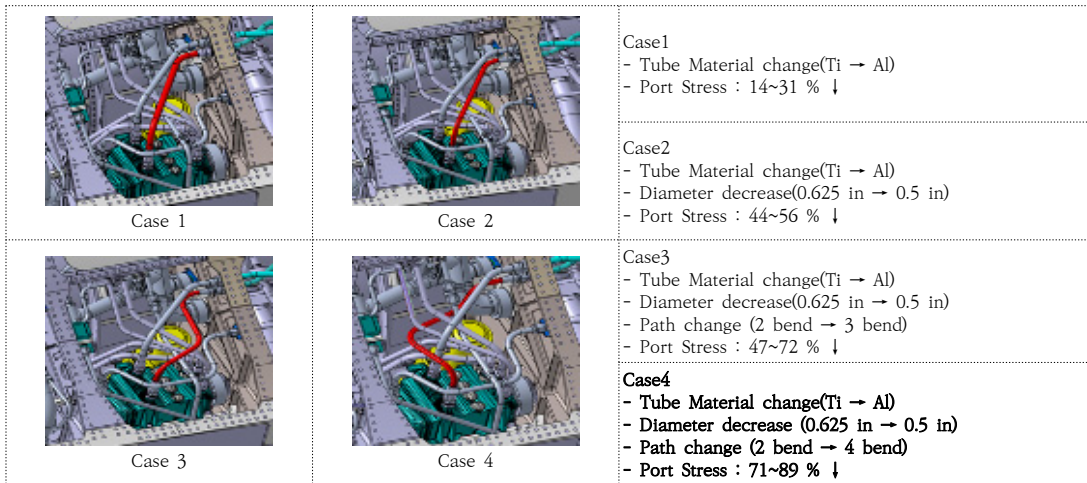


Fig. 6. Four Cases by oil tube paths

2.3 개선 방안 도출

열교환기의 균열부위 분석과 유한해석 기반을 통해 열교환기에 가해지는 과도한 토크와 열교환기와 배관사이의 비 정렬 및 맥동 2가지 관점에서의 개선안을 도출하고 검증 수행하였다.

2.3.1 개선안 도출

주요 이슈 사항으로 과도한 토크, 비 정렬 및 맥동의 2가지를 분류하였으며 개선안을 도출하기 위해 열교환기, 배관 및 피팅과의 연관관계를 검토한 결과 총 10개의 고려사항이 도출되었다.

우선 배관 장착 토크 값 감소를 위해 배관을 티타늄 재질에서 알루미늄 재질로 변경하였으며, 알루미늄 배관의 스웨이징 작업성 문제로 피팅 재질도 함께 변경하였다. 열교환기 AMAD 포트에서 견디는 최대 토크 값은 240 in-lbs로 배관 체결 토크 값을 240 in-lbs 이하로 하기 위해 배관의 직경을 감소시켰다. 기존 배관의 직경은 0.625 inch이며, 재질은 티타늄 재질로 요구되는 토크 값은 최대 750 in-lbs 값으로 열교환기 오일 포트가 버틸 수 있는 240 in-lbs를 초과한다. 따라서 알루미늄 재질의 배관을 적용하여 직경 0.50 inch로 할 경우 최대 값 240 in-lbs를 초과하지 않으므로 티타늄 재질을 알루미늄으로 변경하고, 최종 직경 값을 0.50 inch로 변경하는 개선안을 도출하였다. 또한 열교환기 원인분석을 통해 도출된 장착 시 비 정렬되는 현상과 맥동에 대한 피로 누적 값을 줄이기 위해 배관의 4가지 경로 방안을 검토하였다. 열교환기 AMAD 오일 포트 균열과 관련하여 배관

의 재질 및 형상 별 응력 분포 해석을 수행하였으며, 배관의 재질, 직경, 굽힘 수에 따른 배관 및 포트에 발생한 응력을 분석하였다. 분석 결과는 Fig. 6과 같으며, 경우에 따른 응력 감소 값은 Table 4와 같다.

2.3.2 냉각성능 분석

열교환기에 장착되는 배관 설계변경으로 인한 AMAD 냉각성능 영향성을 확인하기 위해 전산해석을 수행하였다. 우선 AMAD는 온도 175°F 에서 60 psid 으로 압력강하가 발생되어도 10 gpm의 유량을 공급할 수 있도록 설계되었다. 따라서 설계 변경된 배관을 적용하였을 경우 동일한 온도 조건에서 최대 압력강하 조건인 60 psid 이하의 압력강하가 발생되어야 10 gpm 이상의 유량을 공급시킬 수 있다. 본 연구에서 제시하는 배관 설계 개선안을 적용하여 전산해석을 수행하였으며 해석결과는 Table 5와 같다. 기존 배관을 적용할 경우 배관에서 15.64 psid의 압력강하가 발생되며, 열교환기에서 18.9 psid의 압력강하가 발생됨에 따라 총 34.54 psid의 압력강하가 발생된다. 이는 AMAD에서 요구되는 압력강하 조건 범위에 들어온다. 이 값을 기준으로 변경되는 배관의 압력강화를 분석한 결과 기존 대비 약 5 psid의 압력강하가 발생되며, 열교환기에서 동일하게 압력강하가 발생됨에 따라 약 39.54 psid의 압력강하 발생이 예상된다. 이 값은 AMAD에서 요구되는 설계조건을 충족시켜 배관 설계변경에 의한 AMAD 냉각성능에는 영향성이 없음을 확인하였다.

Table 2. Frame Work of Improvement process

Main Issues		Considerations for Improvement		Final Improvement
Over Torque	Heater Exchange	● What is maximum torque of heat exchange AMAD port	▶	<ul style="list-style-type: none"> ● Tube Material change (Involve fitting) ● Tube Diameter change ● Tube Path change
		● Can the tube withstand the applied torque?		
	Tube & Fitting	● What is material of tube and fitting?		
		● Is it easy to mount?		
Mis Align	Heater Exchange	● Is there excessive torque during install?		
		● Is it easy to install tube and fitting?		
		● Is alignment easy for tool application?		
	Tube & Fitting	● Do I need to use a backing wrench?		
		● Is there excessive torque when mounting?		
		● Is there any pressure loss when changing tube?		

Table 3. Requirements of Improvement for change torque value

Contents	Requirement	Original tube	Improvement
Torque for Install	Max 240 in-lbs	570~630 in-lbs	210 in-lbs
Material	N/A	Titanium Tube	Aluminium
Diameter	N/A	0.625 inch	0.500 inch
Bending (Path)	N/A	2	4

Table 4. Tube port stress interpreted results - By Load direction

Option	Stress/ Δ	Tube Stress (ksi)						Port Stress (ksi)					
		FWD	AFT	RH	LH	Up	Down	FWD	AFT	RH	LH	Up	Down
Original	Stress	56.8	55.4	44	45.7	20.2	21.4	29	32.3	20.8	23.2	7.85	6.58
	Δ	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Case 1	Stress	38.9	37.5	29.8	31.4	14.1	15.4	21.6	24.9	17.9	16	6.3	5.39
	Δ	-32%	-32%	-32%	-31%	-30%	-28%	-26%	-23%	-14%	-31%	-20%	-18%
Case 2	Stress	31.3	28.6	22.5	24.9	10.4	8.78	14	16.2	11.6	10.2	4.07	3.4
	Δ	-45%	-48%	-49%	-46%	-49%	-59%	-52%	-50%	-44%	-56%	-48%	-48%
Case 3	Stress	29.5	32.7	30.8	27.6	15.1	13	11	9.04	9.31	9.68	3.35	3.52
	Δ	-48%	-41%	-30%	-40%	-25%	-39%	-62%	-72%	-55%	-58%	-57%	-47%
Case 4	Stress	17.8	18.1	10.5	9.46	8.05	7.34	5.32	4.79	2.23	2.69	1.97	1.9
	Δ	-69%	-67%	-76%	-79%	-60%	-66%	-82%	-85%	-89%	-88%	-75%	-71%

* Δ : Original / Stress decrease

Table 5. Pressures drop test Analysis results

Contents	Temp'	Tube (paid)	H/X (paid)	Total (paid)	Requirement	Interpreted Value
					Flow (GPM)	
Requirement		N/A		60	10	N/A
Before Improvement	175°F	15.64	18.9	34.54	N/A	Up to 10
After Improvement		20.64	18.9	39.54		Up to 10

2.4 개선 검증 결과

기존 장착 형상 대비 최종 개선안에 대한 장착 형상은 Fig.7과 같으며 장착 적용 토크 값은 변경된 값인 210 in-lbs로 적용되었다. 개선 사항에 대한 검증을 위해 시험 검증 절차를 수립하였으며, 시험절차 개념도는 Fig. 8과 같다.

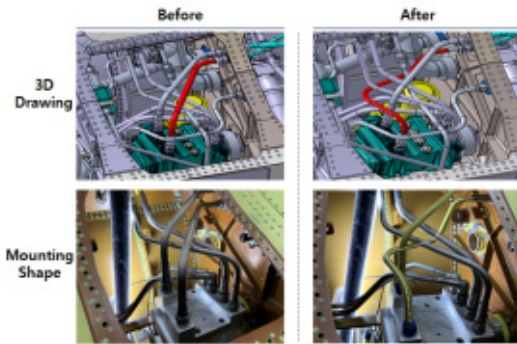


Fig. 7. Final Improvement Plans (Before and After)

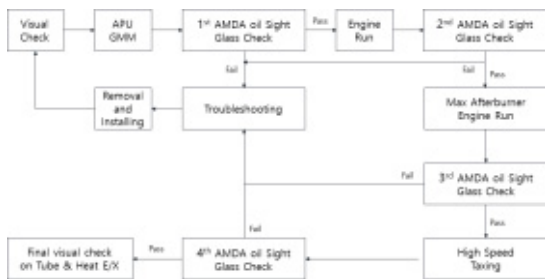


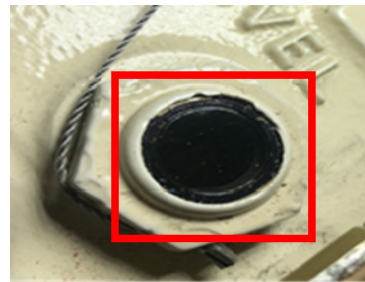
Fig. 8. Final Test Procedure

2.4.1 AMAD 내부 연료유입 판단 기준

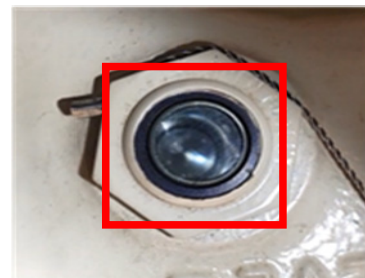
열교환기 균열 등으로 인하여 AMAD 내부 연료 유입 시 AMAD Oil Sight Glass를 통해 Table 6과 같이 확인 할 수 있다. 본 연구에서는 개선안을 검증하기 위해 항공기 기능점검, 항공기 Max AB, 항공기 1차/2차 Ramp Taxi, 최종적으로 육안검사를 수행하였으며 결과는 다음과 같다.

Table 6. Pass/Fail Fuel Inflow Criteria

No Internal Fuel Inflow



Internal Fuel Inflow




2.4.2 기능점검

항공기 기능점검은 지상점검모드 (Ground Maintenance Mode, 이하 GMM) 2회, 엔진점검모드 2회, 총 4회 실시하였으며, 기능점검 결과 Table 7과 같이 연료유입 없으며, 특이사항 없는 것을 확인 할 수 있다.

Table 7. Function Check Process

Function Check
1. APU GMM - AMAD rpm : 53%
2. APU GMM - AMAD rpm : 53%
3. Main Engine Run - AMAD rpm : 63.5 ~ 80%
4. Main Engine Run - AMAD rpm : 63.5%



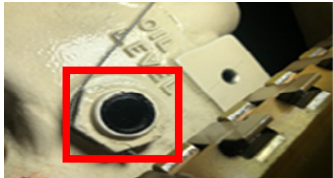
AMAD Oil Slight Glass

2.4.3 최대출력 점검

GMM 및 엔진점검모드 확인 후 엔진 최대출력 점검을 수행하였으며, 엔진 RPM을 단계적으로 변경하여 연료유입 여부를 확인하였다. 확인 결과 기능점검 결과와 Table 8과 같이 특이사항 이 없는 것을 확인 할 수 있다.

Table 8. MAX AB Check Process

Max AB
Power on → IDLE → 80% → MIL→ Max AB → IDLE



AMAD Oil Slight Glass

2.4.4 택싱 점검

항공기 지상점검 후 램프 택싱(Ramp Taxing)점검을 수행하였으며, 수행결과 아래 Table 9와 같이 특이사항 없는 것을 확인할 수 있다.

Table 9. Ramp Taxi Process

Function Check	
First Check	1. Left and Right 12°, 40°, 90°, 180° Turning @ 5~10 Knots
	2. Left and Right 360°, Minimum Radius Turning @ 5 Knots
Second Check	1. Left and Right 12°, 40°, 90°, 180° Turning @ 5~10 Knots
	2. Left and Right 360°, Minimum Radius Turning @ 5 Knots

2.4.5 최종 육안검사

항공기 장착 시험 이후 배관을 분리하여 육안검사를 실시한 결과 빔실 및 피팅 등 손상 미 발생된 것을 확인 하였다.

Table 10. Final Visual Check

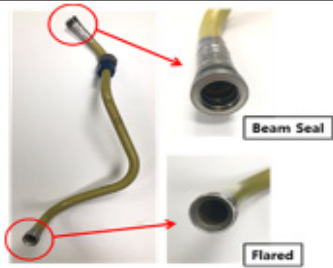
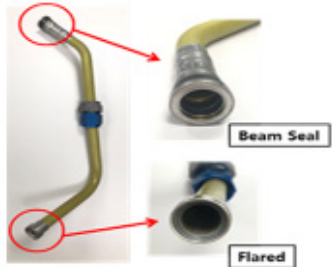
Before the test

After the test


Table 11. Result of before and after of improvement

Before Improvement	After Improvement
<ul style="list-style-type: none"> · Excessive torque value applied to heat exchanger by installed titanium tube · Heat exchanger cracks due to excessive torque · Fuel inflow into AMAD due to heat exchanger crack 	<ul style="list-style-type: none"> · Installing torque value by changing pipe material, diameter and path · Preventing excessive torque values applied to heat exchanger by installed aluminium tube · No crack of heat exchanger after ground and high speed taxing test

3. 결론

본 연구에서는 군용항공기 연료/오일 열교환기 AMAD 오일 포트 균열 현상을 개선하기 위해 오일 포트 균열부 위 파단면 및 응력의 경향성을 분석하고, 결합 현상에 대한 고장탐구를 통해 개선안을 제시하였다. 열교환기 AMAD 오일 포트에 연결되는 오일 배관은 티타늄 재질의 배관으로 열교환기에 장착 시 과도한 토크로 체결되어 열교환기 균열의 주된 원인으로 확인하였으며, 유한구조해석을 통해 장착 토크 적용 시 열교환기에 과도한 힘이 전달되는 것을 검증하였다. 또한 높은 토크 체결 상태에서 유체 이동 시 발생하는 맥동압력까지 발생되면서 피로가 지속적으로 누적되는 것을 확인하였다. 이에 따라 열교환기 AMAD 오일 포트에 장착되는 배관의 재질과 직경을 변경시켜 적용 토크 값을 열교환기 오일 포트에서 견딜 수 있는 값 이하로 낮췄으며, 알루미늄 재질의 배관을 열교환기에 장착하기 위해 CRES 재질의 스웨이징 피팅도 교체하였다. 또한 맥동압력으로 인한 피로누적을 최소화시키기 위해 4번의 배관 굽힘을 적용시켜 맥동압력을 감소시켰다. 최종 개선안에 대한 항공기 운용시험 결과 열교환기 균열 현상이 발생되지 않았으며, AMAD의 냉각 효율에도 영향성이 없음을 확인하였다.

본 연구는 고장분석 및 개선안 도출을 통해 열교환기의 단순 교체비용 절감효과를 얻을 수 있었으며, 품질 신뢰성 및 비행 안전성 향상에 기여할 수 있었다. 본 연구 결과를 통해 품질개선에 대한 노하우 확보와 향후 KF-X 사업과 같은 관련 분야로 확대 적용 시킬 것으로 기대된다.

References

[1] I. H. Song, *Reliability improvement method in weapon systems through field failure data analysis*, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 2018, vol 19, No 12 pp110-117.
DOI : <https://10.5762/KAIS.2018.19.12.110>

[2] S. J. Park, J. W. Lee, D. K. Lee, G. G. Choi, *The quality improvement study on the crack of heat exchanger lubricating oil port in military aircraft*, Journal of the Society for Aerospace System Engineering, Spring conference, 2019

[3] KDS85TM1202, Torque Value of Tube and Hose Installation, Defense Acquisition Program Administration

[4] KDS1510-4004, Specification for airplane, Attack(FA-50), Defense Acquisition Program Administration

[5] Kwon, J. H. Aircraft structure design. Kyungmoonsa, Korea.

박 성 제(Sung-Jae Park)

[중신회원]



- 2012년 2월 : 한국항공대학교 항공기시스템공학과 (공학학사)
- 2014년 8월 : 일리노이주립대학교 MBA (경영학석사)
- 2011년 8월 ~ 2013년 8월 : 캐세이퍼시픽항공 항공정비사
- 2014년 12월 ~ 현재 : 국방기술품절원 선임연구원

<관심분야>

항공공학, 체계공학, 경영전략

최 재 호(Jae-Ho Choi)

[정회원]



- 2013년 8월 : 한성대학교 산업공학과 (공학학사)
- 2015년 8월 : 연세대학교 산업공학과 (공학석사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 국방기술품절원 연구원

<관심분야>

품질경영, 항공우주

최 길 규(Gil-Gyu Choi)

[정회원]



- 2015년 2월 : 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 (공학학사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 한국항공우주산업(주) 선임연구원

<관심분야>

항공공학

이 동 기(Dong-Ki Lee)

[정회원]



- 2015년 2월 : 울산대학교 항공우주공학과 (공학석사)
- 2016년 1월 ~ 현재 : 한국항공우주산업(주) 연구원

<관심분야>

항공공학