

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(6), 512-519(2016)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.6.512>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

항공기 보조동력장치 입구안내익 구동기어의 품질개선에 관한 연구

박성제*, 박선욱**, 서재경***

Studies on the improvement of driving gears quality at Inlet Guide Vane of aircraft auxiliary power unit

Sungjae Park*, Sunwook Park** and Jaekyoung Suh***

Defense Agency for Technology and Quality*

Korea Aerospace Industries**, Hanwha Techwin LTD***

ABSTRACT

Auxiliary Power Unit of FA-50 which provides energy other than propulsion is an important element to maintain airworthiness on aircraft. Also Inlet Guide Vane of Auxiliary Power Unit is a device that supplies appropriate airflow into the Auxiliary Power Unit after adjusting influent airflow into the load compressor. This report, based on the problems occurred the driving gears of Inlet Guide Vane, deals with cause of occurrence, troubleshooting, design improvement and result of test flight verification for FA-50 aircraft Auxiliary Power Unit lifespan

초 록

FA-50 항공기 보조동력장치는 추력을 제외한 항공기의 동력을 생성하는 장치로 항공기 감항성 유지를 위해 매우 중요한 요소이다. 또한, 보조동력장치의 입구안내익은 로드압축기로 유입되는 공기 유량을 조절하여 적절한 공기량이 보조동력장치 내부로 공급되도록 유도하는 장치이다. 본 논문에서는 FA-50 항공기 보조동력장치 입구안내익 구동기어에서 발생한 문제점을 바탕으로, 발생원인, 고장탐구결과, 설계개선 내용을 기술하였으며, 개선된 연구에 대해 비행시험검증 결과를 함께 소개한다.

Key Words : APU(보조동력장치), Inlet Guide Vane(입구안내익), Quadrant Gear(쿼드런트 기어)

I. 서 론

FA-50 항공기는 국내 T-50계열 항공사업의 일환으로 공군의 노후화된 전투기를 대체하고 독자적으로 항공무기체계를 확보하기 위해 국내에서 개발된 전투기이다. FA-50 APU(Auxiliary Power Unit, 보조동력장치)는 추력을 제외한 항공기의

동력을 생성하는 장치로 항공기 비행안전성 향상을 위해 매우 중요한 요소이다. 본 연구는 T-50계열 항공기 운용중 발생한 APU IGV(Inlet Guide Vane, 입구안내익)의 정상궤도 이탈현상에 대한 원인을 분석하여 FA-50 항공기 APU의 수명향상을 위한 IGV 설계개선에 대해 정리하였으며, 검증시험을 통해 본 개선사항을 확인하였다.

† Received : January 21, 2016 Revised : May 2, 2016 Accepted : May 10, 2016

* Corresponding author, E-mail : sjpark@dtq.re.kr

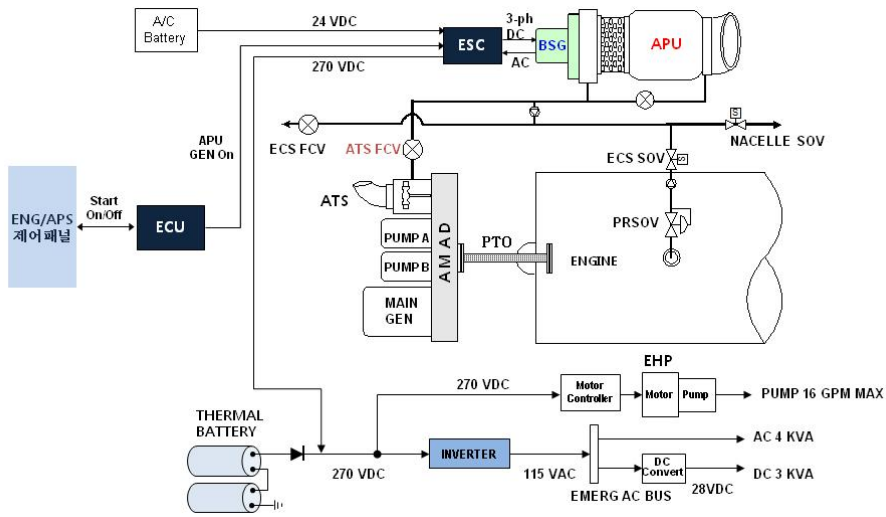


Fig. 1. Schematic Diagram of FA-50 Secondary Power System

II. 본 론

2.1 보조동력장치

APU는 이차동력계통의 구성품 중 하나이며 [1], APU와 다른 이차동력계통간의 계통 구성도는 Fig. 1과 같다[2]. 보조동력장치는 소형가스터빈 엔진으로 항공기 엔진 자체 시동과 모터링을 수행하며, 지상과 공중에서 압축공기와 유압, 전기 동력을 공급한다.[3,4] APU의 구성은 Fig. 2와 같이 크게 4가지의 주요 조립체로 구성되어

있다. 기어박스 조립체는 터빈 조립체에서 오일펌프 축 동력을 전달하며, 로드압축기는 본 논문에서 다루게 될 IGV가 장착되어 있는 조립체로 주변의 대기 공기를 압축하여 ESC(Electronic Starter Controller)와 엔진 구동에 필요한 압축 공기를 ATS(Air Turbine Starter)로 공급한다. 터빈 조립체는 로드압축기와 기어 박스 조립체를 구동시키며 연소기 조립체는 공기와 연료를 혼합시키는 역할을 한다[5,6,7,8]. Table 1은 APU %rpm 별 주요작동사항에 대한 항목으로 IGV를 포함한 %rpm별 각 파트의 작동시기를 알 수 있다.

Table 1. APU start and operating

%rpm	주요사항
0%	IGV Full Open, BSG(Brushless Starter Generator, 시동발전기) 작동 연료부스터펌프 및 연료차단밸브 작동
3%	점화계통, 연료서보밸브, 시동연료밸브 작동
5%	IGV Close, EGT(Exhaust Gas Temperature) 상승 및 Acceleration Control 시작
25%	SCV(Surge Control Valve) 열림
55%	점화계통 동작 멈춤 BSG 동작 멈춤
70%	Start Fuel Valve 닫힘 Main Valve 열림
80%	Steady State Control 시작
100%	RTL (Ready to Load) 상태 도달 IGV 및 SCV 제어 시작 ※ 실제 운용 RPM : 100 ~ 105%

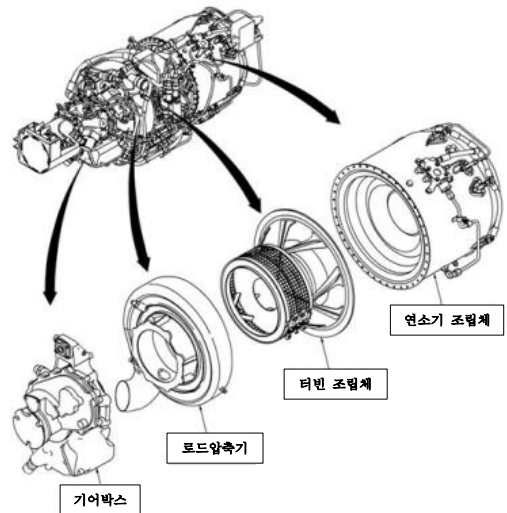


Fig. 2. Assembly of APU

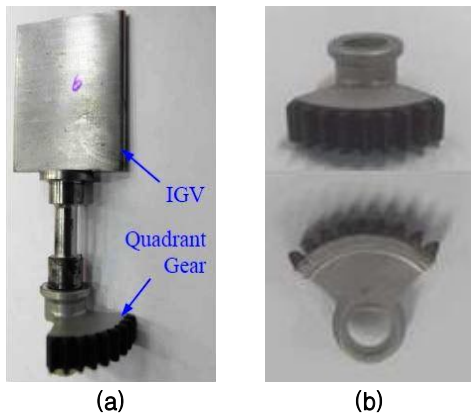


Fig. 3. IGV and Quadrant Gear (a) IGV
(b) Quadrant Gear



Fig. 4. Synchronous Ring Gear and Tooth

2.2 IGV 형상 및 기능

IGV는 항공기 APU의 로드압축기 조립체에 장착되어 있다. IGV는 로드압축기로 유입되는 공기 유량을 조절하여 적절한 공기량이 보조동력장치 내부로 공급되도록 유도하는 장치로 [9,10] 항공기 날개골 모양의 IGV와 Quadrant Gear(Fig. 3 참조) 25개, Synchronous Ring Gear(Fig. 4 참조) 1개, IGV Actuator(Fig. 6 참조) 1개로 구성되어 있다. IGV 형상은 Fig. 3의 (a)와 같으며 Quadrant Gear와 결합되어 있다. Quadrant Gear의 형상은 Fig. 3의 (b)와 같이 부채꼴 모양의 톱니바퀴로 이루어져 있다. Synchronous Ring Gear의 형상은 Fig. 4와 같이 원형형상에 안쪽으로 기어가 형성되어 있으며 Quadrant Gear와 Synchronous Ring Gear는 Fig. 5와 같이 각각의 두 기어가 서로 맞물려 결합·장착되어 있다. IGV가 각 기어들과 장착되어 공기유량을 조절하기 위해 전부 펼쳐진 형상은 Fig. 6의 (a)와 같고, 전부 닫힌 형상은 Fig. 6의 (b)와 같다.

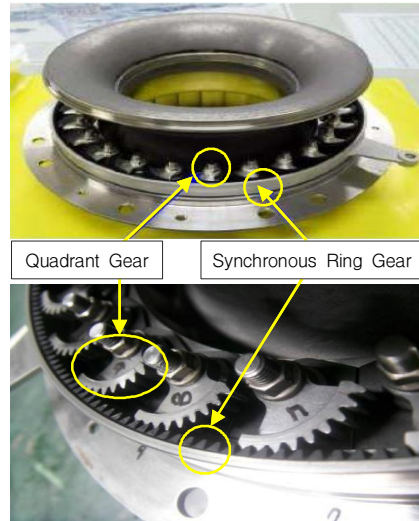
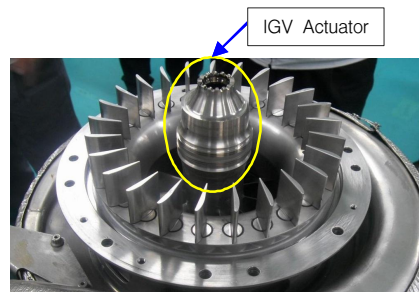


Fig. 5. Synchronous Ring and Quadrant Gears



(a)



(b)

Fig. 6. IGV Assembly (a)Open (b)Close

2.3 설계개선 요구사항

기존에 장착된 APU의 IGV 조립체는 내구성 문제로 운용신뢰성에 대한 문제점이 제기되었으며, 발생한 문제점은 IGV의 정상궤도 이탈현상이다. 따라서 이를 개선시키기 위한 설계개선이 요구되었으며, IGV가 정상궤도를 이탈한 현상에 대한 구체적인 원인을 파악하기 위해 고장탐구를 실시하였고 내용은 다음과 같다.



Fig. 7. IGV deviation from normal track

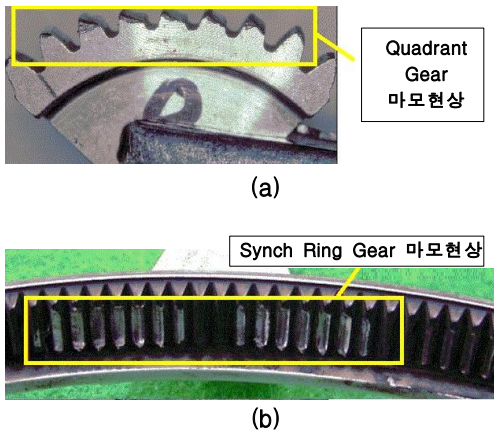


Fig. 8. Gears Wear (a)Quadrant Gear (b) Synchronus Ring Gear

2.3.1. 마모발생

Figure 7의 IGV 조립체를 살펴보면 몇몇의 IGV가 정상궤도를 이탈한 현상을 확인할 수 있다. IGV는 25개가 동시에 움직이기 때문에 하나라도 궤도를 이탈 하게 되면 공기흡입량 손실로 인해 APU가 자동으로 꺼지는 현상이 발생된다. 따라서 이 현상에 대한 근본원인을 분석하기 위해 정상궤도를 이탈한 APU를 분해하여 고장 탐구를 실시하였으며, 그 결과 Fig. 8의 (a), (b)와 같이 IGV 회전운동을 담당하는 Quadrant Gear와 Synchronus Ring Gear가 마모되어 기어의 형상이 변형된 것을 확인할 수 있었다. 기어의 마모로 Quadrant Gear와 Synchronus Ring Gear가 서로 맞물려 있지 않았으며, 이로 인해 IGV가 정상궤도를 이탈한 후 스스로 헛도는 현상이 발생된 것이다. 또한, 기어가 마모되며 생긴 유격으로 기어간의 진동이 증가하여 기어의 침식과 공진현상이 발생할 가능성이 있음에 따라 기어가 외부 환경이나 운용중 쉽게 마모가

발생되지 않도록 기어의 내구성 강화를 위한 설계 개선이 필요하였다.

2.3.2. 고착현상

IGV 정상궤도 이탈현상은 IGV 회전운동을 담당하는 Quadrant Gear와 Synchronus Ring Gear의 마모현상으로 발생되었음을 앞서 언급하였다. 그러나 두 기어의 마모현상과 동시에 Fig. 9와 같이 Quadrant Gear가 고착되는 현상이 발생됨에 따라 추가적인 고장탐구를 실시하였다.

Quadrant Gear와 Synchronus Ring Gear의 정상운동은 원형 모양인 Synchronus Ring Gear에 25개의 Quadrant Gear가 장착되어 IGV 회전운동을 위해 모든 Quadrant Gear가 균일하게 작동되어야 한다. 하지만 Fig. 10과 같이 Synchronus Ring Gear와 하우징 간의 간격으로 인해 APU 작동시 Synchronus Ring Gear의 흔들림이 발생되었으며, 이로 인해 Quadrant Gear가 Synchronus Ring Gear로부터 이탈 후 인접해 있던 다른 Quadrant Gear 위로 타고 올라가는 현상이 발생된 것이다.

또한, 이 간격으로 인해 진동이 발생할 가능성이 있음에 따라 APU의 운용신뢰성 향상을 위하여 마모 및 고착 현상 개선을 위한 IGV 설계 변경이 요구되었다.



Fig. 9. Stuck of Quadrant Gear

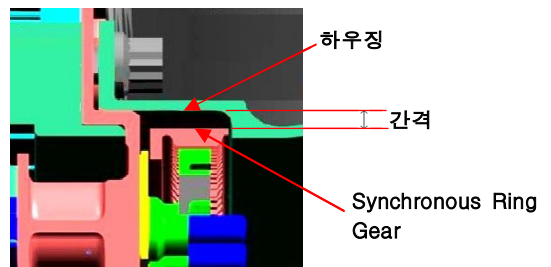


Fig. 10. The gap between Synchronus Ring gear and housing

2.4 설계개선 검토

2.4.1. 마모현상 개선

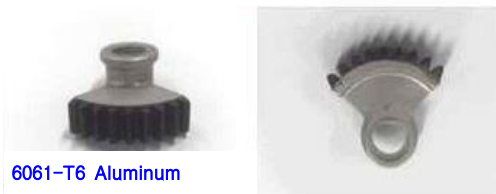
우선 Quadrant Gear와 Synchronous Ring Gear의 마모현상을 개선하기 위하여 기존의 알루미늄 합금인 6061-T6[11,12,13]을 보다 내구성이 강한 스테인리스강 15-5PH[14,15] 재질로 변경하였다. Table 2는 기존에 사용했던 알루미늄 합금과 스테인리스강의 물성치를 비교해 놓은 것이다.

Table 2를 통해 알 수 있듯이, 기존 알루미늄 합금 재질에 비해 스테인리스강의 강도와 경도가 약 3.5배가량 높은 것을 알 수 있다. 따라서 마모현상 개선을 위하여 Quadrant Gear와 Synchronous Ring Gear에 스테인리스강을 적용하여 마모에 대한 저항력을 증가시켰다.

Table 2. Material Property of Al and Steel

Contents	6061-T6 Aluminum	15-5 PH Stainless Steel	Steel/Al
Hardness	95 HB	332 HB	3.49
Yield Strength	40 ksi	150 ksi	3.75
Ultimate Strength	45 ksi	165 ksi	3.67

기존형상

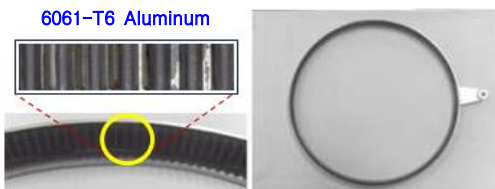


신규형상



Fig. 11. Old & New Quadrant Gear

기존형상



신규형상

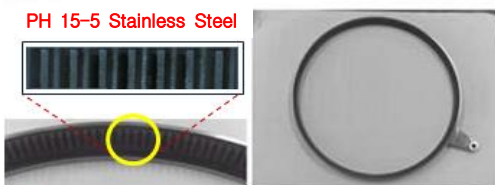


Fig. 12. Old & New Ring Gear

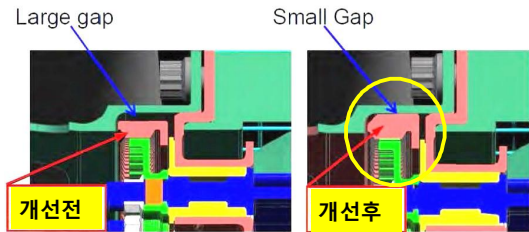


Fig. 13. Existing & New Ring Gear Design

Table 3. Dimension Inspection of Ring Gear

Item	Limit (inch)	개선전 (inch)	개선후 (inch)
Thickness	-	0.1654	0.2362
Roundness	Max. 0.005	0.0011	0.0017
Flatness	Max. 0.005	0.0006	0.0009

Figure 11과 12는 각각 Quadrant Gear와 Synchronous Ring Gear의 신규형상 모습이다.

2.4.2. 고착현상 개선

Synchronous Ring Gear와 하우징 간의 간격으로 인해 Synchronous Ring Gear의 흔들림이 발생되었고, 이로 인해 발생된 Quadrant Gear의 이탈 및 고착현상 개선을 위해 Synchronous Ring Gear의 두께를 증가시켜 하우징과의 간격을 줄이기로 하였다. 또한, 하우징과의 마찰로 인해 추가적인 마모가 발생되지 않도록 하우징 내부에 DFL(Dry Film Lubrication)코팅 처리를 진행하였다. Fig. 13은 Synchronous Ring Gear와 하우징 간의 개선 전·후의 비교모습으로 개선 전에 비해 하우징과의 간격이 줄어든 모습을 확인할 수 있다. Table 3은 Synchronous Ring Gear의 개선 전·후의 치수 값이다.

2.5 설계개선 검증

신규형상에 대한 설계마진확보 검증을 위해 우

Table 4. Analysis of Yield Strength

Contents	6061-T6 Aluminum	15-5 PH Stainless Steel	Unit
Torque	0.509	0.703	in-lbf
Quad Gear Radius	0.547	0.547	in
Force on Gear	0.931	1.285	lbf
Assumed Contact	0.0002	0.0002	in ²
Yield Strength	4.657	6.427	ksi

선 공기유량조절시 IGV에서 구동축이 입구 유동에 의해 걸리는 최대 토크값을 재질별로 각각 측정하였다.

최대 토크값을 측정한 결과 Table 4와 같이 알루미늄 합금 0.509 in-lbf, 스테인리스강 0.703 in-lbf 로 측정되었으며, 하중이 걸리는 Quadrant Gear의 반지름은 0.547 in로 식 (1)~(2)인 토크 공식에 적용하면

$$T = F \cdot r \tag{1}$$

$$F = T/r \tag{2}$$

각 기어의 걸리는 하중은 알루미늄 합금 0.931 lbf, 스테인리스강 1.285 lbf 로 정의된다.

또한, 기어의 응력을 받는 부분의 단면적은 0.0002 in² 로 식 (3)인 응력 공식에 적용하면

$$\sigma = P/A \tag{3}$$

알루미늄 합금 4.657 ksi, 스테인리스강 6.427 ksi로 해석된다. 따라서 Table 2의 재질별 항복강도 값을 대입하여 안전율(Safety Factor)을 적용하면, 알루미늄 합금은 7.59(40/4.657)인데 반해 스테인리스강은 23.3(150/6.427) 수준으로 스테인리스강의 안전율이 약 3배 이상 증가하여 안정성이 확보되었음을 알 수 있다.

개선된 설계 형상에 대해 기어의 내구성 검증을 위하여 지상시험과 비행시험을 각각 진행하였다. 우선 지상시험은 APU 시동 후 IGV를 작동시켜 기어의 손상 여부를 확인하였다. 지상시험은 APU를 1번 시동시킬 때(APU Rotor 속도는 약 103.5% 유지) IGV를 10번씩 작동시키는 방식으로 진행 하였으며, 규격의 요구사항을 충족시키기 위해 총 100번의 APU 시동과 1000번의 IGV 작동시험을 수행하였다. Fig. 14는

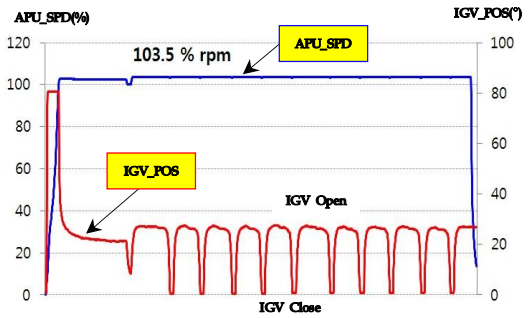


Fig. 14. APU & IGV Test Cycle Result

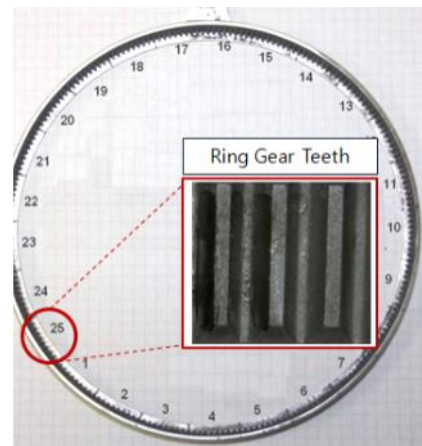


Fig. 15. New Ring Gear Inspection

APU 1번 시동시 IGV가 10번 작동하는 시험 결과 값으로 지상시험 결과 APU 시동시 IGV가 정상적으로 작동 하는 것을 확인 할 수 있으며, APU 작동 시 IGV가 정상적으로 열리고 닫힘을 그래프를 통해 확인 할 수 있다.

APU의 지상시험이 끝난 후 최종 분해 검사를 실시하였으며, 이를 통해 기어의 마모현상에 대해 확인해 보았다. 우선 Fig. 15와 같이 Synchronous Ring Gear는 원형 그대로 유지하여 형상에 변형이 일어나지 않았으며, 기어 tooth 부분에도 마모가 발생하지 않았다. 또한 기존 Quadrant Gear는 마모가 발생하여 기어 tooth가 손상되었지만 스테인리스강 재질로 변경된 Quadrant Gear는 Fig. 16과 같이 기어의 마모나 손상이 없는 것을 확인 할 수 있다.

지상시험이 끝난 후 시험비행을 통해 추가검증을 진행하였다. 시험비행은 개선된 APU를 항공기에 장착하여 운영시간 1차 200시간, 2차 400시간으로 진행하였으며, 시험비행 후(APU 운영시간 400시간 후) 지상에서 내구성 검증을

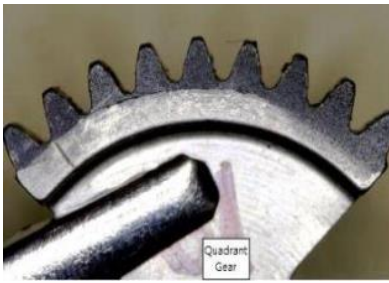


Fig. 16. New Quadrant Gear Inspection

Table 5. Post-test hardware Inspection

품목	항목	기준	결과	판정
IGV 조립체	간극 검사	최소 0.008"	최소 0.011" (평균 0.012")	정상
	모션 검사	Smoothly and Free of Binding	Smoothly and Free of Binding	정상
IGV	육안 검사	변색 손상	변색 및 손상 없음	정상
Quad Gear	육안 검사	변색 손상	변색 및 손상 없음	정상
	표면 검사	기어 깨짐 마모 0.002"	깨짐 없음	정상
Sync Ring Gear	치수 검사	진원도 Max 0.005" 평면도 Max 0.005"	진원도 Max 0.0006" 평면도 Max 0.0003"	정상
	육안 검사	변색, 손상	변색 및 손상 없음	정상
	표면 검사	기어의 깨짐 마모 0.002"	깨짐 없음 마모 없음	정상



(a)



(b)

Fig. 17. Flight-test New Gears Inspection
(a) 200 hours (b) 400 hours

위해 분해검사를 실시하였다. 검사결과는 Table 5와 같이 기준 항목에서 모두 정상으로 판정되었으며, 기존에는 운영시간 60시간 안에 기어의 마모와 고착현상이 발생된 반면, 개선된 기어는 운영시간 200시간 및 400시간 후에도 Fig. 17과 같이 Quadrant Gear와 Synchronous Ring Gear의 마모 흔적이나 고착현상이 발생되지 않았음을 확인 할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 APU와 IGV의 기능 및 작동원리에 대해 소개하고, APU의 구성품인 IGV의 수명향상을 위한 설계개선에 대해 연구하였다.

기존에 발생된 IGV 정상궤도 이탈현상을 해결하기 위해 원인분석, 고장탐구, 설계개선, 검증시험의 과정을 거쳐 문제점을 해결하였다. Quadrant Gear와 Synchronous Ring Gear의 마모현상은 새로운 재질을 적용함으로써 내구성 강화와 사용수명주기를 증가시켰으며, Quadrant Gear의 고착현상은 Synchronous Ring Gear의 두께를 증가시켜 하우징과의 간격을 줄여 흔들림이나 진동으로 인해 Quadrant Gear가 이탈되어 고착되지 않도록 개선하였다.

본 연구는 T-50계열 항공기의 비행안정성과 품질신뢰성 향상에 많은 기여를 할 수 있었으며, 국방력 증진과 항공기 가동률 향상이라는 큰 성과를 가지고 올 수 있었다. 또한, 기술적 현안사항을 해결함으로써 고객만족도 함께 실현해 낼 수 있었다.

향후 FA-50 항공기 후속양산에 추가적으로 적용할 예정이며, 국내 차세대 전투기 KF-X 사업과 항공기술 분야에 중요한 참고자료로 활용될 수 있기를 기대해 본다.

후 기

본 논문은 국내 경공격기 사업의 일환으로 수행되었습니다. 관련 기관의 도움에 감사드립니다.

References

- 1) Kang-Yi Lee, Si-Woo Lee, Seung-Woo Kim, "Conceptual Design Procedure of APU and Market Trend," KSAS 24(5), Oct. 1996
- 2) 85AEI-49-0105, "Functional Description/Installation/Checkout, Auxiliary and Emergency

Power System(A/EPS)," *Korea Aerospace Industries, LTD*, Feb. 2013

3) Byong-Ho Rhee, Chang-Ik Ma, Dae-Up Kim, "A Study on the Brazed Joint of Duplex Stainless Steel with Ni Base Insert Metal," *KSAS 30(8)*, Dec. 2002

4) KSAS "Cause and Effect Diagram Analysis on FA-50 APU Surge Fault," *KSAS*, Apr. 2013, pp1075-1078

5) K85ZP0034 "Auxiliary/Emergency Power System," *Defence Acquisition Program Administration*, Apr. 2006

6) K85ZP0036 "Electronic Control Unit, A/EPS," *Defence Acquisition Program Administration*, Apr. 2006

7) K85ZP0037 "Electronic Starter Controller," *Defence Acquisition Program Administration*, April. 2006

8) 85FT651, "Secondary Power System Test Procedure," *Defence Acquisition Program Administration*, Oct. 2011

9) Kyoungwook Bae, Sangjo Kim, Dongin

Han, Chanoh Min, Daewoo Lee, "Surge Control of Turbofan Engine Compressor with the Variable Inlet Guide Vane," *KSAS 41(7)*, Jul. 2013

10) Kyoungwook Bae, Chanoh Min, Bongkyu Cheon, Changyong Lee, Daewoo Lee, "Control System of Turbofan Engine with Variable Inlet Guide Vane," *KSAS 42(3)*, Mar. 2014

11) MIL-A-22771D, "Aluminum Alloy Forgings, Heat Treated"

12) ASTM B308/B308M, "Aluminum Alloy 6061-T6 Standard Structural Profiles," May.2010

13) AMS4027, "Aluminum Alloy, Sheet and Plate," May. 2014

14) AMS5659, "Steel, Corrosion-Resistant, Bars, Wire, Forgings, Rings, and Extrusions," Aug. 2013

15) AMS5862, "Steel, Corrosion-Resistant, Bars, Wire, Forgings, Rings, and Extrusions," July. 2013