

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2019.27.4.021>

ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

항공기 가스터빈엔진 터빈블레이드의 고장률 예측에 관한 연구

김천용*, 최세종**

A Study on Failure Rate Prediction of
Aircraft Gas Turbine Engine Turbine Blade

Chun-Yong Kim*, Se-Jong Choi**

ABSTRACT

The purpose of this study is to suggest a method for the efficient preventive maintenance of aircraft gas turbine engine turbine blades. For this study, the types and characteristics of gas turbine engines and its turbine blades were studied, the turbine blade defect types that caused an In-Flight Shut Down(IFSD) were analyzed, the blade failure rate according to the blade life cycle was analyzed through the Weibull distribution, one of the statistical techniques. Through these research results, it is possible to supplement the problems of the life cycle management and maintenance method of the turbine blade, and to suggest the measures to strengthen the preventive maintenance of the turbine blade. In this analysis, when total cycle of turbine blade exceeds 18,000 cycles, the failure rate is over 98%, and then the special management measures are required.

Key Words : Aircraft Gas Turbine Engine(항공기 가스터빈엔진), Failure Rate(고장률), Turbine Blade(터빈블레이드), Weibull Distribution(와이블 분포) Exhaust Gas Temperature (EGT: 배기가스온도), In-Flight Shut Down(IFSD: 비행 중 엔진정지)

1. 서 론

항공정비는 항공기와 엔진 및 장비를 사용할 수 있는 상태, 즉 감항성을 유지하는 것으로 일반적으로 유지(Maintenance), 수리 (Repair), 오버홀(Overhaul), 개조(Modification), 검사(Inspection) 등으로 구분할 수 있다. 유지, 오버홀, 개조 및

검사 등 대부분의 정비활동은 항공기와 엔진 및 장비품의 고장이 발생하지 않도록 사전에 조치를 하는 예방정비 활동이고, 수리는 일반적으로 고장이 발생된 후 다시 작동할 수 있도록 결함을 해소하는 수정정비 활동이다[1].

항공기에 대한 정비방식은 예방 정비개념이 주류를 이루었으나, 점차 신뢰성 관리에 중점을 두고 있다. 따라서 MSG-2 정비기법의 기반인 하드 타임(Hard Time: HT), 온 컨디션(On-Condition: OC), 컨디션 모니터링(Condition Monitoring: CM)과 B747-400을 비롯하여 A380, A330, B777, B737 등의 항공기는 신뢰성이 크게 향상됨에 따라 경제적인 운용을 고려하여 MSG-3 정비기법

Received : 28. Oct. 2019. Revised : 24. Nov. 2019.

Accepted : 03. Dec. 2019

* 세한대학교 항공정비학과 교수

** 한서대학교 항공융합학부 항공정비전공 교수

연락처 E-mail : cykim@sehan.ac.kr

연락처 주소 : 충남 당진시 신평면 세한대길 33

인 윤활/서비스(Lubrication & Servicing), 작동 점검(Operational Check), 육안점검(Visual Check), 검사(Inspection), 기능점검(Functional Check), 환원(Restoration) 및 폐기(Discard)등의 정비작업으로 병행하여 운영하고 있다[2].

엔진정비(Engine Maintenance)는 엔진이 항공기에 장착되어 있는 상태에서는 하나의 순환품목으로 취급되지만, 다른 장비품과는 달리 정비방식을 구별하여 실시하여야 하는데, 엔진 제작사의 권고사항을 기준으로 MSG-2 또는 MSG-3로 설정하여 운영할 수 있다.

소형엔진들은 MSG-2 정비기법을 적용하여 Hard Time으로 운영하고 있으나, 최근에 개발된 대형엔진들은 진보된 MSG-3 정비기법을 적용하여 운영하고 있다. 즉, 엔진이 항공기에서 장탈된 경우 해당 공장으로 입고가 되며, 엔진형식에 따라 HSI(Hot Section Inspection), 오버홀(Overhaul), SVM(Shop Visit Minimum), LM(Light Maintenance), GPR(Gas Path Restoration) 및 HM(Heavy Maintenance)작업 등으로 구분하여 실시한다[2].

본 연구에서는 최신의 정비기법으로 관리하고 있는 K 항공사의 B747-400 화물기가 20XX년 10월 11일 운항 중 NO. 4 엔진의 2단계 터빈 블레이드(2nd stage turbine blade)의 손상으로 배기가스온도(Exhaust Gas Temperature: EGT)가 운운한계치까지 상승하고, 엔진진동(Vibration)이 증가하여 NO.4 엔진을 비행 중 정지(In-Flight Shut Down)시킨 상태로 인천공항까지 비행한 사례를 기반으로 유사사례 재발방지를 위해 터빈 블레이드의 고장률을 예측하여 효율적인 예방정비를 위한 방안을 강구하고자 한다.

이를 위해 B747-400 항공기뿐만 아니라, A300-600 및 MD-11 항공기 등에 사용되는 PW4000-94" 엔진의 특징을 살펴보고, 비행 중 또는 예방정비 중 발견된 블레이드 손상 형태를 분석하여 발생원인 등을 규명하고, 유사 결함을 발생시킨 블레이드의 사용주기 자료를 토대로 와이블 분포를 이용하여 적절한 수명주기를 산정하고, 이를 예방정비에 적용하고자 한다.

II. 터보 팬 엔진(Turbo Fan Engine)

2.1 PW4000-94" 엔진일반

대부분의 대형항공기에 사용되는 터보 팬 엔진은 기본적으로 터보 제트와 터보 프롭의 가장 좋은 특징들을 절충하여 개발되었다. 즉, 터보팬은 터보 제트의 순항속도 능력과 터보 프롭의 단거리 이륙성능을 약간 유지하고 있으며, 본 연구대상인 B747-400 항공기에 사용되는 Pratt and Whitney사의 PW4056 엔진의 경우, 팬 지름이 94인치(238.76cm)이며, 팬에서 제공되는 추력이 80%이고, 코어 엔진에서 제공되는 추력이 단지 20%인 5:1의 고 바이패스 비(High Bypass Ratio)를 가지고 있다[3].

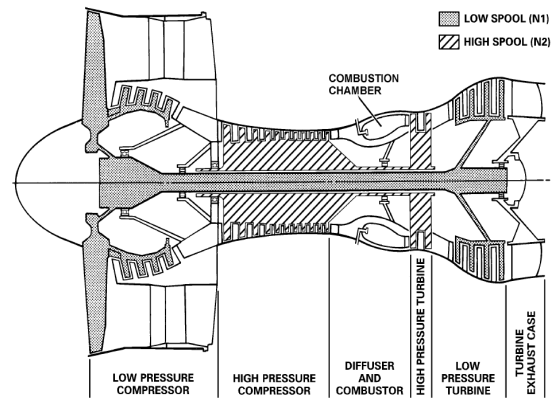


Fig. 1. PW4000-94" Gaspath configuration[4]

또한 엔진 장탈 및 분해를 용이하게 위하여 다음과 같이 12개의 모듈로 구성되어 있다.

- 압축기 입구 콘(inlet cone)과 팬(fan)을 포함한 저압압축기(Low Pressure Compressor: LPC)
- 저압압축기 허브(LPC hub)와 저압터빈 축(LPT shaft)을 연결해 주는 LPC/LPT 커플링(coupling)
- 팬 블레이드를 감싸고 엔진 입구 덮개(Engine Inlet Cowl)를 지지해 주는 팬 케이스(fan case)
- 엔진의 주요 구조물이 장착되어 엔진의 1차 구조물이라고 할 수 있는 인터미디에이트 케이스(intermediate case)
- 저압압축기로부터의 일차공기를 가압하여 디퓨저(diffuser)로 보내주는 고압압축기(High Pressure Compressor: HPC)
- 압축기로부터의 일차공기(Primary Air)를 일

- 직선으로 흐르게 하고, 압력은 증가시키고 속도는 감소시키며, 연소실 주변으로 공기를 보내주는 디퓨저 및 연소실(Diffuser and combustor)
- 연소실에서 연소된 뜨거운 가스를 유효한 각도와 속도로 터빈블레이드로 유도하는 터빈 노즐(turbine nozzle)
 - 고압압축기(HPC)를 구동하는 고압터빈(High Pressure Turbine: HPT)
 - 저압압축기(LPC)를 구동하는 저압터빈(Low Pressure Turbine: LPT)
 - 터빈 가스를 배출하는 터빈 배기케이스(Turbine exhaust case)
 - 엔진 구동축과 주 기어박스(main gearbox) 동력을 전달하는 앵글기어박스(angle gear box)
 - 엔진과 항공기에 관련된 보기류를 구동시키는 주 기어박스(main gearbox)

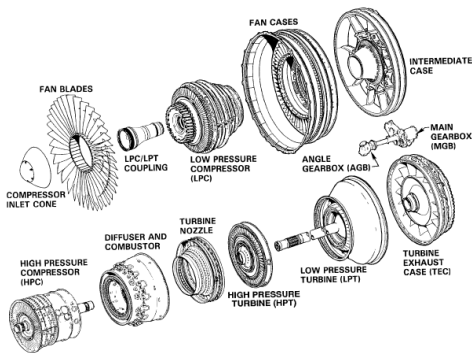


Fig. 2. PW4000 engine sections[4]

2.2 PW4000-94" 엔진 고압터빈특성

고압터빈은 고압압축기를 구동시켜주는 힘을 발생시키는 부분으로서 2단으로 구성되어 있으며, 연소실과 저압터빈 사이에 위치하고 있다.

블레이드 끝단(blade tip) 주변에는 연마 가능한 세라믹 공기시일 세그먼트(abradable ceramic outer air seal segments)가 있으며, 하나의 케이스에 베인 어셈블리(vane assembly)와 2개의 허브(hub) 및 로터 어셈블리(rotor assembly)로 구성되어 있다.

고압터빈 1단계 디스크(disk)와 블레이드(blade)는 압축기 15단계의 공기로 냉각되고, 2단계 디스크와 블레이드는 12단계와 15단계의 혼합공기

에 의해 냉각된다.

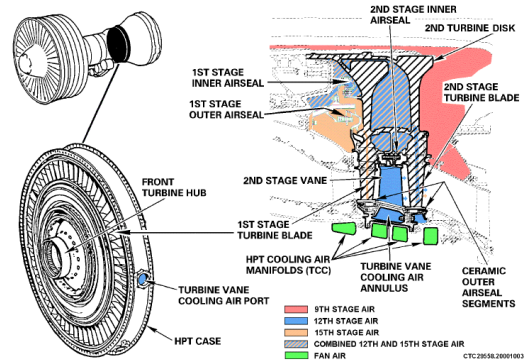


Fig. 3. PW4000-94" high pressure turbine

III. 터빈 블레이드 손상 사례분석

3.1 QAR 및 지상점검 결과

항공기 운항 중 배기가스온도가 운용한계치까지 상승하고 엔진진동(Vibration)이 한계치를 초과하여 비행 중 엔진정지(In-Flight Engine Shut Down)시킨 B747-400 화물기 NO.4 엔진의 결함 원인 분석을 위해 QAR (Quick Access Recorder) 자료를 분석하였다.

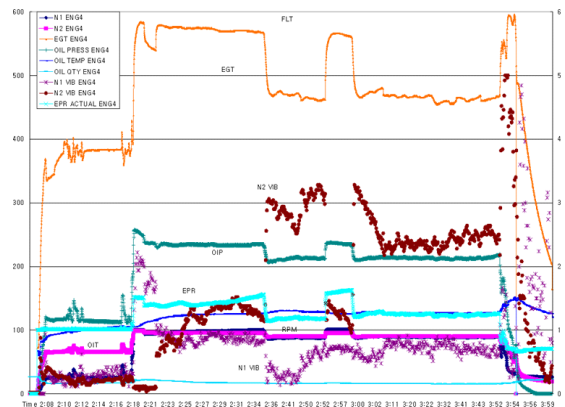


Fig. 4. QAR data

이륙 시에는 배기가스온도가 574℃, 고압스플린 N2 진동(Vibration)이 0.1로서 정상적이었으나, 이륙 후 16분 경과시점에서 N2 진동이 3.0 unit로 한계치인 2.5unit를 초과하였으며, 1시간

28분 후에는 엔진 진동 5.0unit 및 배기가스온도 급상승으로 서지(surge)가 감지되고, 이륙 후 1시간 30분 경과시점에서 낮은 오일압력(low oil pressure)으로 엔진을 정지한 것으로 분석되었다.

지상점검 결과, 배기관(Tail Pipe)에서 작은 금속조각들(Small Metal Debris)이 발견되었으며, 내시경검사(Borescope Inspection)를 실시한 결과, 고압터빈 2단계 블레이드(HPT 2nd Blade) 3개가 파단(Broken)되었으며, 다수의 블레이드 팁(Blade Tip)이 떨어져 나간 것(Metal Missing)이 발견되어 항공기로부터 엔진을 장탈하여 엔진분해검사를 실시하였다.

3.2 엔진분해 검사 결과

고압터빈(HPT)을 분해한 결과, 2단계 터빈블레이드 3개가 소실(Fracture)되고, 2개는 에어포일 스팬(Airfoil Span)의 90%에서 소실되었으며, 1개는 60%에서 소실되었다. 또한, 나머지 블레이드에서도 홈집과 패임(Nick & Dent)등이 발견되었으며, 덕트 세그먼트(Duct Segment)도 심하게 파열(Spallation)되었다.

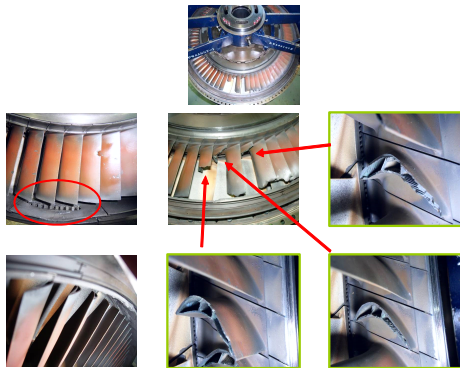


Fig. 5. Fractured HPT 2nd turbine blade

3.3 자기비파괴 검사 결과

소실된 블레이드와 인접한 12개 블레이드에 대해 자기강도 투자율 측정기(MAGNETOSCOP)를 이용하여 자기비파괴검사를 실시한 결과, 8개의 블레이드가 한계치(μ) 1.060을 초과한 것으로 나타났다.

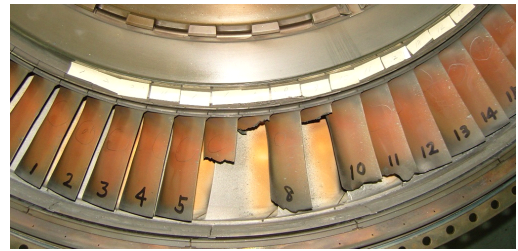


Fig. 6. MAGNETOSCOP inspected blades

Table 1. Result of inspection LIMIT(μ):1.060

No.	Convex	Concave	Remarks
1	1.170	1.150	REJECT
2	1.002	1.004	ACCEPT
3	1.140	1.158	REJECT
4	1.083	1.121	REJECT
5	1.033	1.061	REJECT
6	BROKEN		N/A
7	BROKEN		N/A
8	1.119	1.090	REJECT
9	BROKEN		N/A
10	1.007	1.016	ACCEPT
11	1.055	1.059	ACCEPT
12	1.093	1.118	REJECT
13	1.027	1.022	ACCEPT
14	1.151	1.053	REJECT
15	1.069	1.052	REJECT

3.4 블레이드 손상 원인

엔진 제작사인 PWA사 조사팀의 협조를 받아 원인을 추정한 결과, 2단계 터빈 블레이드 3개(Span 90% 2개 & 60% 1개)가 소실(Fracture)되어 엔진진동이 발생됨에 따라 #3 Bearing Outer Race Retaining Nut가 Loose되어 #3 Bearing이 Heavy Damage되고, 이로 인해 고압압축기 로터 후방(HPC Rotor Rear)과 고압터빈 전방 허브(HPT Front Hub)가 Damage된 것으로 추정할 수 있다.

추정 가능한 원인은 소실된 3개의 블레이드 중 첫 번째 블레이드(#1 Blade) 전방부위의 안쪽 리브(Internal Rib)에서 외부 오목면 벽(Concave Side Wall) 방향으로 피로(Fatigue)가 발생하고, 내부 부식(Internal Corrosion)에 의해 블레이드

내부 빗살무늬 형태인 트립 스트립(Trip Strips)이 유실(Loss)되어 블레이드가 얇아진(Thin Wall) 상태에서 과도한 응력(Overstress)에 의해 소실(Fracture)되었으며, 나머지 소실된 두 번째와 세 번째(#2 & 4) 블레이드는 2차적인 손상과 과도한 응력으로 소실된 것으로 분석할 수 있다.

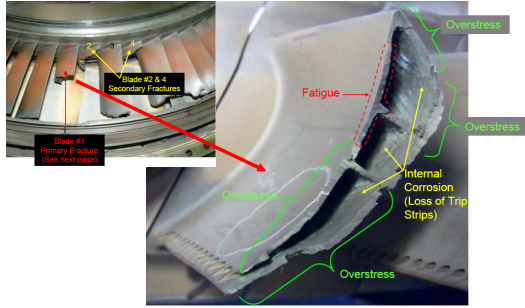


Fig. 7. Possible cause analysis result[5]

IV. 터빈블레이드 고장을 분석

4.1 와이블 분포(Weibull Distribution)

고장률 산출에 관한 연구는 과거부터 많은 기간 국내외에서 진행되어 왔으며, 가장 많이 사용되는 확률분포는 와이블 분포일 것이다[6]. 항공정비품질분야에서도 고장률 및 신뢰도 추정에 와이블 분포를 많이 사용하고 있다.

와이블 분포는 형상모수(β), 척도모수(α), 위치모수(γ) 모수를 갖는 연속형 확률분포로 시간의 경과에 따라 감소($\beta < 1$), 일정($\beta = 1$), 증가($\beta > 1$)하는 고장률을 표현할 수 있다. 본 논문에서는 위치모수를 0으로 가정한다. 따라서 와이블 분포의 고장밀도함수 $f(t)$, 신뢰도 $R(t)$, 불신뢰도 $F(t)$, 고장률 $h(t)$ 는 각각 식 (3)~식 (6)과 같이 정의된다[7].

$$f(t) = \alpha \beta t^{(\beta-1)} e^{-(\alpha t)^\beta} \quad (3)$$

$$R(t) = e^{-(\alpha t)^\beta} \quad (4)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-(\alpha t)^\beta} \quad (5)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\alpha \beta t^{(\beta-1)} e^{-(\alpha t)^\beta}}{e^{-(\alpha t)^\beta}} = \alpha \beta t^{(\beta-1)} \quad (6)$$

4.2 와이블 분포 분석 결과

동종 엔진 중 2단계 터빈블레이드 관련 결함으로 장탈된 엔진 3대의 2단계 터빈블레이드 자료를 통계프로그램 MINITAB을 이용하여 Weibull 분포 분석을 실시하였다.

통계분석결과, 2단계 터빈 블레이드의 Time Cycle 8,998일 경우에는 고장확률이 0.3%미만이지만, 13,305의 경우에는 15%로 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

Table 2. Probability of unfailure 95.0% 정규 CI

2T BLADE TC	확률	하한	상한
8998	0.997218	0.976480	0.999674
10018	0.991595	0.960504	0.998233
13305	0.853877	0.514031	0.963196

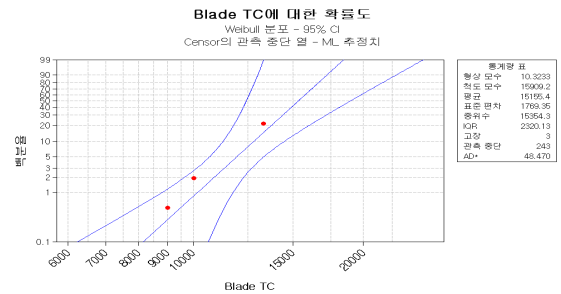


Fig. 8. Probability for Blade TC

특히 형상모수가 10.3($\beta > 1$)으로 고장률 증가형(IFR : Increase Failure Rate)형태를 보이고 있으며, 생존율 95%(고장률 5%)로 관리시 블레이드 Total Cycle은 11,931로 나타났다. 또한, Weibull 분포의 블레이드 Total Cycle이 18,000 초과시에는 고장률은 98%이상으로 특별관리 대책이 요구되는 것으로 분석되었으며, 누적 고장 곡선에서도 2단계 터빈 블레이드의 TC 12,793(고장률 10%)시점부터 고장률이 급격히 증가하여 TC 15,000에서는 약 45%의 고장률로 나타났다.

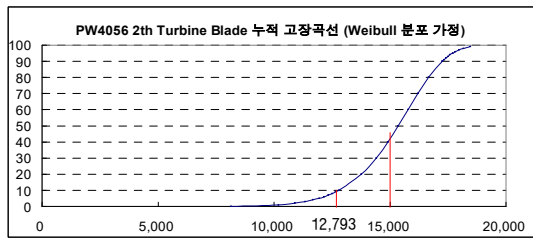


Fig. 9. Cumulative failure curve

V. 결 론

본 연구에서는 B747-400 항공기에 사용되는 PW4056 엔진의 2단계 터빈 블레이드에 대해 결함형태를 분석하고, 수명주기 통계기법 중의 하나인 와이블 분포를 이용하여 실제 유사결함 터빈 블레이드의 데이터를 기반으로 블레이드의 수명주기를 예측하였다.

연구 결과, 고장률이 급격히 증가하여 약 45%의 고장률로 나타나는 TC 15,000 이상의 블레이드가 장착된 항공기 엔진에 대해서는 내시경 검사(BSI) 수행 시 Video Scope장비 등을 활용하여 정밀검사를 실시하여야 하며, Total Cycle이 18,000을 초과한 블레이드에 대해서는 내시경검사(BSI)실시 주기를 단축하여 블레이드에 결함 발견 시 항공기로부터 엔진을 조기장탈하여 비행 중 엔진정지와 같은 위험한 상황을 예방할 필요가 있다.

특히 PW1484와 같은 일부 재질의 블레이드는 마그네토스코프 검사한계(MAGNETOSCOP Inspection Limit)를 제작사(PW) 권고안[8]에 따라 1.03μ 이하로 강화할 필요가 있으며, 터빈 에어포일의 수리(Repair)횟수 및 Time/Cycle 관리를 강화하는 방안 등이 과제로 식별되었다.

본 연구 결과는 항공기 가스터빈 엔진의 터빈 블레이드의 고장률 예측이 필요한 항공사를 비롯한 항공기 운용기관에서 응용하여 적용할 때 항공기 안전운항에 기여할 수 있으므로 다른 기종의 엔진으로의 확대 적용이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 2019년도 세한대학교 교내연구비

지원에 의하여 씌어진 것이며, 한국항공운항학회 2019 춘계학술대회 발표내용을 수정 보완하였음.

References

- [1] Choi, S., and Kim, W., "A study on the selection of aircraft MRO using AHP", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 23(4), 2015, pp.82-88.
- [2] Kim, C. Y., "Aviation maintenance science introduction", Node Media, Seoul, 2015, pp.252-270.
- [3] Kim, C. Y., "Aircraft gas turbine engine", Node Media, Seoul, 2016, pp.24-26.
- [4] Pratt and Whitney, "PW4000-94"(747) line and base maintenance-level III", Customer Training Center, PWA, 2001.
- [5] Pratt and Whitney, PW ANSWER# C9309-A41530, "P717677(KAL IFSD engine), TB2 fracture", PWA, 2010.
- [6] Chai, H., Shin, J., Lim, T., and Kim, J., "Failure rate calculation using the mixture Weibull distribution", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers 66(3), 2017, pp.500-506.
- [7] Kim, J., and Chung, Y., "Reliability analysis of multi-functional multi-state standby system using Weibull distribution", J. Soc. Korea Ind. Syst. Eng 40(3), 2017, pp.138- 147.
- [8] Pratt and Whitney, HPT 2nd Stage Blade Internal Sulfidation, 2005, PWA.