

Ti 합금을 이용한 항공기용 Flexible PTO 샤프트 개발 시험

이주홍* · 강보식* · 유현석* · 이지만** · 조해용***†

* 한국기계연구원 신뢰성평가센터, ** 아이원스(주), *** 충북대학교 기계공학부

Development Test for Flexible PTO Shaft Made of Ti Alloy for Aircraft

Joo Hong Lee*, Bo Sik Kang*, Hyun Seok Yu*, Ji Man Lee**
and Hae Yong Cho***†

* Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials, ** Iones Co., Ltd.,
*** Dept. of Mechanical Eng., Chungbuk Nat'l Univ.

(Received April 15, 2016 ; Revised June 15, 2016 ; Accepted June 15, 2016)

Key Words: PTO(동력인출), Flexible Shaft(플렉시블 샤프트), High Cycle Fatigue Test(고주기 피로 시험), Ball Joint(볼 조인트), Membrane(멤브레인)

초록: 항공기 등에 사용되는 Flexible PTO(Power Take-Off) 샤프트는 스프링 특성을 좋게 하기 위해 여러 장의 얇은 멤브레인을 용접한 형태로 1950년대에 이미 개발됐으며, AMAD(Aircraft Mounted Accessory Drive) 기어박스과 EMAD(Engine Mounted Accessory Drive) 기어박스 사이에서 회전동력을 전달한다. 이런 종류의 샤프트는 가볍고 특히 스프링 특성이 좋기 때문에 축 정렬이 틀어진 고속회전 상태에서도 안정적으로 회전동력을 전달할 수 있어 대부분의 전투기에 사용된다. 이번 연구에서 티타늄 합금으로 개발된 Flexible PTO 샤프트의 구조해석을 통해 제품의 안전성을 확인하였고, 실제 실험실에서 진행된 고속회전 시험에서 굽힘과 비틀림 부하를 동시에 인가하여 샤프트의 고주기 피로에 대한 내성을 실증하였다. 또한, 고주기 피로 시험 조건에서 항공기용 볼 조인트의 마모 특성 분석을 통해 수명을 예측하였다.

Abstract: The PTO (Power Take-Off) shaft for aircraft, with welded construction using multiple thin membranes, was developed in the 1950s to improve the elasticity of the part. As it is lightweight, stable at high speeds, and has good flexibility, it is used in most of the fighter aircraft. It connects the AMAD (aircraft mounted accessory drive) gearbox with the EMAD (engine mounted accessory drive) gearbox and transmits the rotational power between them. It operates in the high speed range of 10,000-18,000 rpm. In this study, the safety of the PTO shaft made of Ti alloy was investigated using finite element analysis, and the ability to transmit power was demonstrated through a high-cycle fatigue test conducted in a laboratory. Further, the life of the ball joints of the aircraft under high-cycle fatigue test conditions was predicted, and the wear characteristics were analyzed.

1. 서 론

항공기는 동체를 구성하는 단순 구조물에서 부터 각종 첨단 전자장비에 이르기까지 수많은 부품들로 만들어진다. 대형 항공기는 약 400~500만 개의 부품으로 이루어져 있고, 전투기에는 약

20~30만 개의 부품들이 사용된다.

AMAD 기어박스는 항공기에서 엔진의 동력을 추출하여 수많은 전자장비와 유압기기에 동력을 공급하기 위한 PTO 기어박스의 일종이다. 항공기 엔진에 연결되어 AMAD 기어박스로 회전동력을 전달하는 축이 PTO 샤프트이다. PTO 샤프트는 스프링 특성이 좋고 가벼워야 하며 높은 신뢰성이 요구된다. 하지만 항공기에서 사용되는 부품

† Corresponding Author, hycho@chungbuk.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

들은 운용환경이 열악하고 고속으로 운용되기 때문에 시험을 통해 신뢰성을 입증하기란 여간 어려운 일이 아니다. 또한 항공용 부품 시험은 실제 기체 이외에는 운용환경 재현이 불가능한 경우가 많고, 소음, 진동 및 열 발생 등으로 인해서 실험실에서 재현하는 것은 쉽지 않다.

항공용 부품의 고강도 경량화는 항공 산업의 필수 요건으로 비철금속을 이용한 경량합금 소재의 개발이 활발한 가운데, Singermann 등⁽¹⁾은 티타늄 합금 소재를 항공부품에 적용하려는 연구를 하였다. 한편 Jothi 등⁽²⁾은 PTO 샤프트의 modal 해석 등을 이용하여 공진 주파수를 계산하였고, 이를 이용해 임계속도를 피하기 위한 연구를 했으며, Nagesh 등⁽³⁾은 실험실에서 고속 Flexible 커플링의 굽힘 응력에 관한 연구를 했으나 실제 항공기의 운용상태에서 발생하는 비틀림과 굽힘의 복합응력 상태의 실험적 연구는 거의 없는 실정이다.

본 논문에서는 실험실에서 고속의 부하 시험이 가능한 시험장비의 개발과 이 장비를 이용하여 항공기용 PTO 샤프트에 굽힘과 비틀림 부하를 동시에 인가하는 고주기 피로 시험을 하였으며, 이를 통해 해당 샤프트의 복합 응력상태에서 피로에 대한 안전성을 검증하고자 하였다.

2. PTO 샤프트 설계 요구조건

2.1 PTO 샤프트 개요

항공기의 엔진 동력은 비행을 위해 사용될 뿐만 아니라, 비행에 필요한 각종 전자장비에 전력을 공급하는 발전기 및 유압펌프, 연료펌프 등과 같은 부대장치들의 구동에 사용된다. 이런 부대장치들은 AMAD라고 불리는 기어박스에 장착되어 각각 일정 기어비로 회전하게 된다. 또한 엔진에 장착된 EMAD는 일종의 기어박스로 엔진의 고압 압축기와 맞물려 회전한다. 이 EMAD와 AMAD를 연결하여 회전동력을 전달하는 것이 본 논문에서 다루는 항공기용 PTO 샤프트이다. 항공기 엔진에서 각 부대장치로 동력이 전달되는 메커니즘을 Fig. 1에 도시하였다.

항공기용 PTO 샤프트는 Fig. 2와 같이 동력을 전달하는 본체와 양쪽 끝에서 샤프트를 잡아주는 볼 조인트로 구성된다. 볼 조인트는 샤프트에 발생하는 추력의 완화 및 축선이 틀어져 각도 오정렬이 발생할 경우 볼과 탄소 고체윤활제의 접촉

Table 1 Material properties

Material	Elastic modulus	Density	Yield strength	Tensile strength
Maraging Steel(250)	205 GPa	7850 kg/m ³	1724 MPa	1758 MPa
Titanium Alloy	114 GPa	4430 kg/m ³	880 MPa	950 MPa

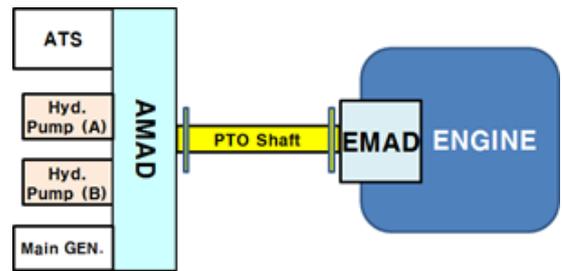


Fig. 1 General arrangement of aircraft drive mechanism

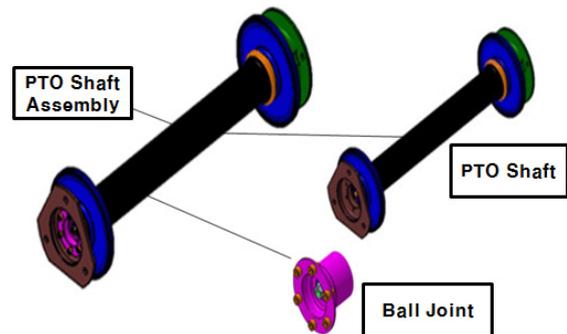


Fig. 2 PTO shaft components

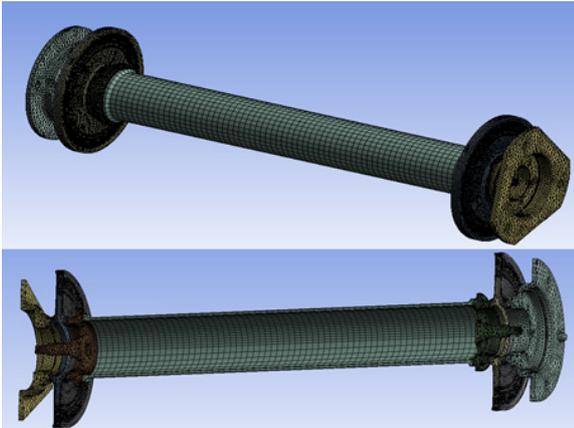
마찰을 이용해 축이 원활하게 회전할 수 있도록 한다. 탄소 고체윤활제는 볼과 고속으로 마찰하기 때문에 내열성과 내마모성이 우수한 특성을 가져야 한다. 만약, 고속회전에서 탄소 고체윤활제가 마찰열에 의해 소손이 되면 샤프트에 진동이 발생하는 원인이 된다. 샤프트 본체는 강을 소재로 해서 만든 제품이 주로 사용되고 있으나, 전투기에서는 무게와 강도 면에서 유리한 티타늄 소재 제품의 사용이 증가하고 있다. 현재 항공기용 PTO 샤프트의 소재로 사용되는 강과 본 논문에서 다루는 티타늄 합금의 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다.

2.2 PTO 샤프트 설계 요구조건

항공기에 장착된 PTO 샤프트는 협소한 공간과 가혹한 운용 조건으로 인하여 재질 및 형상에 많

Table 2 Design requirements for PTO shaft

Engine	F404-GE-102
Static max. torque	1,356 Nm
Dynamic max. torque	125 Nm
Rated speed	16,810 rpm
Critical speed	21,000 rpm
Max. angular misalignment	2°

**Fig. 3** Mesh of PTO shaft

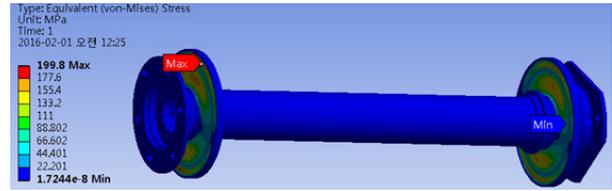
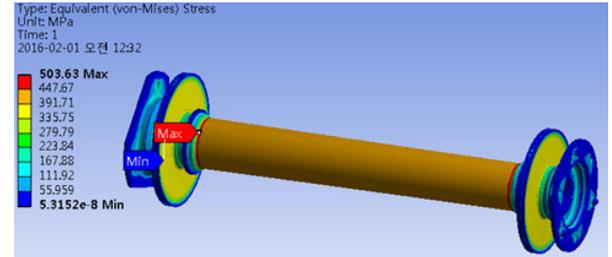
은 제약이 따른다. 그리고 이 샤프트는 항공기에서 회전동력을 전달할 뿐만 아니라, 과부하 및 충격으로부터 다른 부품을 보호하고 축 방향 및 반경 방향의 정렬불량이 발생한 경우에도 안정적으로 회전동력을 전달할 수 있어야 한다.⁽²⁾

PTO 샤프트의 축 방향 변형은 엔진의 열 상승에 의해 발생되고, 샤프트의 각도 오정렬 현상은 항공기의 과도한 기동에 의해 동체가 순간적으로 틀어지면서 EMAD와 AMAD 간의 축선이 어긋나게 되면서 발생한다.⁽³⁾ 이런 최악의 상태에서도 PTO 샤프트는 EMAD에서 AMAD로 동력을 전달할 수 있는 강성과 샤프트 양쪽의 멤브레인은 축선이 어긋난 상태에서도 휠 수 있는 충분한 탄성 복원력을 가져야 한다. 항공용 PTO 샤프트에 요구되는 설계요구조건⁽⁴⁾을 Table 2에 나타내었다.

3. 유한요소해석

비틀림 강도 해석을 위해 ANSYS Workbench를 이용하였고, 해석에는 볼 조인트를 제거하고 샤프트 본체만으로 진행하였다. 해석에 사용된 메쉬의 형태를 Fig. 3에 나타내었다.

고주기 피로 시험의 경계조건인 축 어긋남 각

**Fig. 4** Stress analysis in the high cycle fatigue test**Fig. 5** Stress analysis in the static torque test

도를 맞추기 위해 AMAD 플랜지 면을 수직 이동시켜 각도 2°를 만들었다. 또한 EMAD 플랜지의 축 방향 움직임을 구속하고, AMAD 플랜지는 축 방향 이동을 자유롭게 하여 실제 장착되는 조건을 모사했다. 그리고 회전속도 16,810 rpm와 전달토크 125 Nm를 인가했으며, 이 때의 회전 동력은 220 kW에 해당된다.

고주기 피로 시험 조건을 적용한 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 EMAD 쪽의 멤브레인은 비틀림 토크와 축 어긋남 각도 2°에 의한 굽힘 응력을 동시에 받는다. 이로 인해 멤브레인의 목 부분에서 최대 응력(206.7 MPa)이 발생한 것으로 생각된다. PTO 샤프트 멤브레인 소재인 티타늄 합금의 항복응력은 880 MPa이고, 등가응력에 의한 MS(Margin of safety: 안전 여유)는 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$MS = \frac{\sigma_y}{\sigma_r} - 1 \quad (1)$$

$$= S - 1$$

여기서, σ_y 는 항복응력, σ_r 은 적용응력이고, S 는 안전계수를 나타낸다. 따라서, MS는 3.26으로 고주기 피로 시험 조건에서 샤프트는 안전할 것으로 판단된다.

정적 비틀림 해석은 PTO 샤프트의 축 어긋남 각도가 0°인 상태에서 EMAD 축 플랜지를 고정하고, AMAD 축 플랜지에 토크 1,356 Nm를 인가했다. 해석 결과는 Fig. 5와 같으며, 그림에서

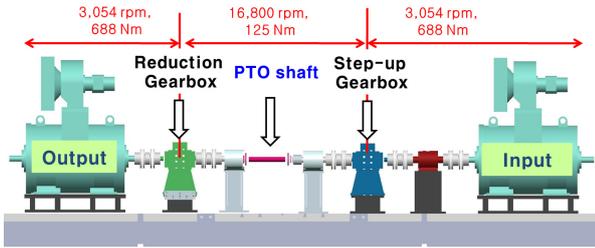


Fig. 6 Test bench of high cycle fatigue test

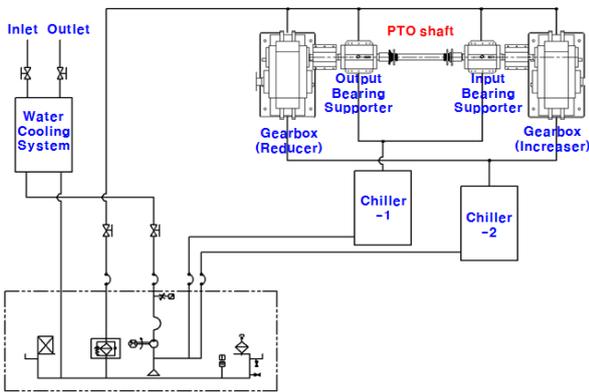


Fig. 7 Cooling circuit diagram for high cycle fatigue test

최대 응력은 튜브의 가장자리에서 504 MPa이 작용하는 것을 확인할 수 있다. 티타늄 합금의 항복응력 대비 등가응력에 의한 MS 값은 0.75로 해석결과 튜브는 정적 비틀림 토크에서 영구변형 없이 안전할 것으로 판단된다.

고주기 피로시험과 정적 비틀림의 구조해석 결과 샤프트는 구조적으로 안전한 것으로 확인되었고, 실제시험을 통해 이를 검증하고자 하였다.

4. 시험장비 및 고장 재현

4.1 고주기 피로 시험장비

항공용 부품은 실제 비행기에 장착하여 시험하는 것이 바람직하지만, 이번 시험은 실내에서 PTO 샤프트의 요구사항과 시험 평가기준을 이용하여 진행하였다.

항공기내에서 PTO 샤프트의 조립거리는 짧지만, 고주기 피로 시험을 위한 장비는 입력과 출력 다이내모미터 사이의 센서와 각종 유닛의 추가로 Fig. 6과 같이 일련의 장비배치 형태를 갖는다. 이처럼 축간거리가 길고 고속 회전하는 장비는 축 정렬과 밸런싱이 중요한 요소이며, 10,000 rpm 이상으로 고속 회전하는 유닛들 간의 축 정

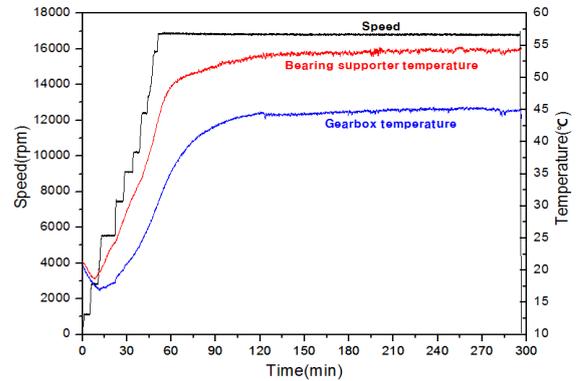


Fig. 8 Thermal saturation of each unit

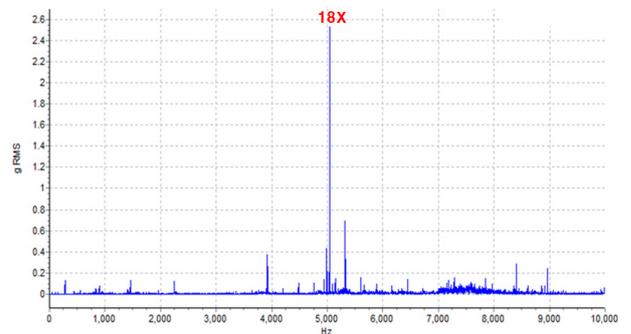


Fig. 9 Frequency spectrum of the step-up gearbox

렬은 0.02 mm 이내, 1,800 rpm 이상 회전하는 유닛들 간의 축 정렬은 0.05 mm 이내⁽⁵⁾로 설치하여 유닛들의 연결에 의한 진동을 최소화하였다.

또한, 시험 동력이 220 kW인 고속회전 시험에서 회전 유닛의 열 발생의 억제를 위해 유냉식 강제유회환 방식을 적용하였으며, 시험장비의 냉각 회로도를 Fig. 7에 나타냈다. 그림과 같이 칠러 2대와 수냉식 열교환기를 이용해 냉각시스템을 구성하였고, 고주기 피로 시험동안 기어박스과 베어링 서포터의 하우징 표면온도는 Fig. 8과 같이 55 °C 이하로 유지되었다.

고속 회전시험에서는 일반적으로 고장여부의 확인과 열화현상을 측정하기 위해 FFT(Fast Fourier Transform) 방법을 활용한다.⁽⁶⁾ 이를 위해 시험장비의 기어박스과 베어링 서포터 각각의 출력 베어링에 축방향과 반경방향으로 진동 가속도 센서를 설치하여 실시간으로 감시하였고, 시험경과에 따라 입력측 기어박스의 진동이 다른 유닛에 비해 크고, 지속적으로 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 해당 기어박스의 오더분석(Order Analysis) 결과, 최대 진동 가속도가 발생한 주파수(5,040 Hz)의 차수(회전 주파수의 배수)가 기어박스 피니

Table 3 Failure of PTO shaft during development

Primary Components	Function	Failure Modes	Failure Causes
PTO shaft	Transmit power	Destruction	Incorrect heat treatment
		Vibration	Mass unbalance
		Noise	Welding defects
Ball joint	Support PTO shaft	Over-heat	Incorrect carbon material
		Excessive wear	

**Fig. 10** Damaged teeth of pinion**Fig. 11** Broken membrane

언의 이빨수(18개)와 정확히 일치하였으며, 이때의 주파수 스펙트럼을 Fig. 9에 나타내었다.

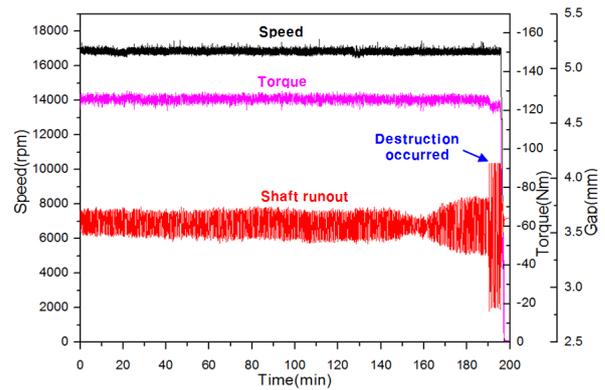
시험 종료 후 해당 기어박스를 분해하여 확인한 결과, Fig. 10과 같이 피니언의 치면이 손상된 것을 확인할 수 있었다. 따라서 실시간 진동 모니터링과 FFT 분석이 고속 회전시험에서 고장진단의 신뢰성을 높일 수 있는 방법임을 확인할 수 있었다.

4.2 시제품 고장 재현

PTO 샤프트는 항공기에서 소모성 부품으로 분류되며, 고장이 발생하기 전에 교체되기 때문에 고장자료를 구하기란 쉽지 않다. 따라서 본 PTO 샤프트의 개발과정에서 발생한 고장현상을 정리

Table 4 High cycle fatigue test conditions

Rotational speed	16,810 rpm
Transmit torque	125 Nm
Angular misalignment	2 °
Required test time	100 hours

**Fig. 12** Failure sensing of shaft

하여 Table 3에 나타내었다.

제품의 고장은 대부분 고주기 피로 시험에서 발생하였으며, 유한요소해석 결과와 일치하는 고장모드가 나타났다. 고주기 피로 시험 조건을 적용한 유한요소해석에서 멤브레인의 목부위에서 가장 큰 응력이 발생하는 것으로 나왔으며, 실제 고주기 피로 시험에서 고장을 재현한 결과 멤브레인의 목부위에서 파손이 발생하였다. 파손된 멤브레인을 Fig. 11에 나타내었다.

고장 시점 파악과 시험의 안전성 확보를 위해 샤프트 중간에 갭 센서를 설치하여 축의 흔들림으로 이상여부를 확인할 수 있도록 하였다. 실제 시험에서 고속회전 시험 중 멤브레인이 피로에 의해 파손되는 현상이 나타났고, 이로 인해 축의 과도한 흔들림 현상이 Fig. 12와 같이 발생하였다. 따라서 이러한 진동현상을 통하여 고장을 인지할 수 있었다.

5. 시험 및 고찰

5.1 고주기 피로 시험

개발과정의 수많은 오류와 설계변경을 통해 개발된 티타늄 소재의 PTO 샤프트를 Table 4의 시험조건으로 고주기 피로 시험 하였다. 시험은 요구 시험 시간인 100시간을 10여 차례로 나눠서

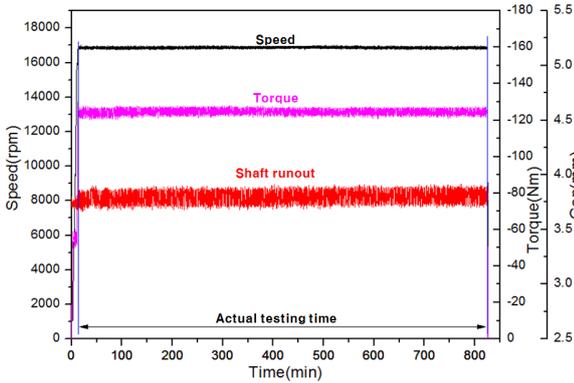


Fig. 13 High cycle fatigue test of PTO shaft



Fig. 14 Static torsional test rig

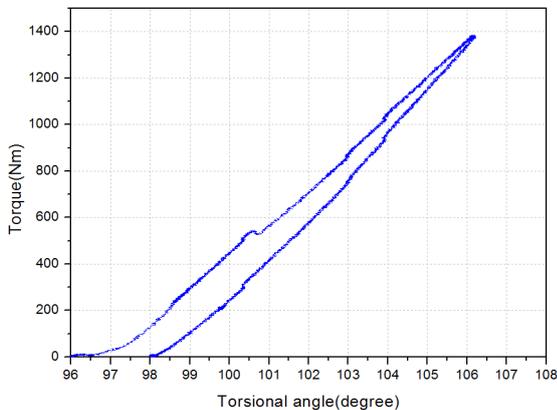


Fig. 15 Hysteresis curve of static torsional test

실시하였다. 실제 시험시간은 사전 준비시간과 사후 정리시간으로 인해 요구 시험시간 보다 약 5% 추가됐으며, 전체 시험 100시간 중 일부인 13.5시간 동안 시험한 그래프를 Fig. 13에 나타내었다.

고주기 피로 시험의 요구 시험시간인 100시간 완료 후 제품의 외관손상이 없었고, 제품 성능 확인을 위해 같은 시료로 Fig. 14와 같이 정적 비틀림 시험을 하였다. 시험은 PTO 샤프트에 순수

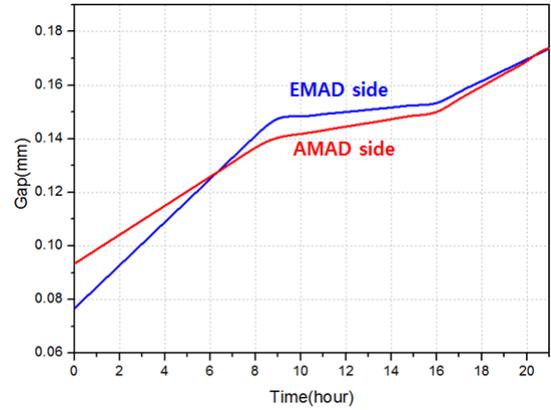


Fig. 16 Gap of ball joint caused by wear

비틀림 토크 1,356 Nm를 최소 5초간 인가하는 것으로, 이때의 비틀림 토크와 비틀림 각의 히스테리시스 그래프를 Fig. 15에 나타냈다. 그림에서 토크 500~1000 Nm 사이에서의 히스테리시스 곡선 기울기는 약 151 Nm/°로 시험 전과 큰 차이가 없었으며, 따라서 고주기 피로 시험 후의 샤프트 성능 저하는 없고, 설계사양을 만족하는 것으로 판단된다.

5.2 볼 조인트 마모 특성

PTO 샤프트의 또 다른 구성품 중 하나인 볼 조인트는 항공기가 정상 운행 상태에서는 마모가 잘 발생하지 않는다. 하지만 축이 어긋나고 축에 토크가 걸린 상태에서는 볼 조인트 내의 볼과 탄소 고체윤활제의 상대속도로 인해 마모가 발생하게 된다. 이렇게 발생한 마모로 인해 볼과 탄소 고체윤활제 사이의 갭이 커지고, 이는 샤프트 진동을 증가시키는 요인이 되기 때문에 주기적인 관리가 필요하다. 그래서 항공기용 볼 조인트는 1,000시간마다 또는 볼 조인트의 갭이 0.2 mm 이상이 되면 교환하는 소모품으로 관리되고 있다.⁽⁷⁾ 이런 이유로 이에 대한 실험 데이터와 연구보고서가 거의 없어 추가적인 실험과 연구가 필요한 실정이다.

볼 조인트의 마모 특성을 확인하기 위해 고주기 피로 시험 조건에서 3쌍의 볼 조인트를 시험하였다. 7~8시간의 고주기 피로 시험 후에 볼 조인트 내의 볼과 탄소 고체윤활제 사이의 갭을 측정하였으며, 이렇게 측정된 3쌍의 볼 조인트 갭의 평균값을 Fig. 16에 나타내었다. 그림에서 시험 초기 8~9시간까지는 EMAD 측의 볼 조인트가 AMAD 측의 볼 조인트에 비해 마모 속도가 빠르

지만, 이후로는 마모되는 속도가 현저히 느려져 약 20시간 이후에 양쪽 볼 조인트의 갭이 비슷해지는 것을 볼 수 있다. 또한 이 시험을 통해 볼 조인트의 볼과 탄소 고체윤활제 사이의 갭이 교체 기준인 0.2 mm가 되는 시간을 예측할 수 있고, 따라서 볼 조인트의 수명은 분석결과 신뢰수준 95%에서 B₁₀ 20.92시간으로 추정된다.

6. 결 론

본 연구에서는 항공기용 PTO 샤프트의 시험을 위해 고속 부하 시험장비의 개발과 해당 샤프트의 안전성 검증을 위해 실험실에서 진행한 고주기 피로 시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 항공기용 PTO 샤프트의 강 소재 제품을 보완하기 위해 기존 제품에 비해 무게가 약 20% 가벼운 티타늄합금 소재의 샤프트를 개발 하였고, FEM 해석을 통하여 구조적 안전성을 확인하였다. 해당 제품을 고주기 피로 시험 조건에서 해석한 결과 MS는 3.26, 정적 비틀림 토크 시험 조건에서의 MS는 0.75로 해석결과 안전한 것으로 판단된다.

(2) 실험실에서 고속 부하 시험이 가능한 시험장비를 개발하였다. 이를 이용하여 실시간 진동 모니터링과 FFT 분석은 고속 회전시험에서 고장을 진단할 수 있는 방법임을 제시하였다. 이를 응용하여 다양한 고속 회전부품의 시험에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

(3) 항공기용 PTO 샤프트의 고주기 피로 시험을 통해 PTO 샤프트의 실제 고장 모드인 멤브레인의 파단 현상을 재현하였으며, 이 때 발생하는 축의 흔들림으로 고장을 인지할 수 있음을 확인하였다.

(4) Ti 합금으로 개발된 Flexible PTO 샤프트를 고주기 피로 시험의 요구 시간인 100시간 동안 시험한 후, 성능 저하가 없음을 확인하였다. 따라서 본 샤프트는 고주기 피로 시험의 요구 사양을

만족한 것으로 판단된다. 또한, 고주기 피로 시험 조건하에서 볼 조인트의 수명은 95%의 신뢰수준에서 B₁₀ 수명 20.92시간으로 추정된다.

참고문헌

(References)

- (1) Singermann, S. A. and Jackson, J. J., 1996, "Titanium Metal Matrix Composite for Aerospace Applications," *Superalloys 1996. Proceedings of Eighth Int. Symposium on Superalloys*, pp. 579~586.
- (2) Jothi, S., Balamurugan, V. and Ganesan, S., 2005, "Design and Development of Light Weight Flexible Power Transmission Shaft for High Speed Fighter Aircraft Application," SAE Technical Paper 2005-26-340.
- (3) Nagesh, S. and Abu, M. J. B., 2012, "Effects of Misalignment of High Speed Flexible Coupling on the Fighter Aircraft Transmission Characteristics," *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 5, No. 2, pp. 91~99.
- (4) Jung, J. H., Lee, S. H., Park, S. W., Jeong, I. M. and Lee, S. B., 2006, "T-50 Engine Airstart Test," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 34, No. 2, pp. 90~95.
- (5) Essinger, J. N., 1995, "Shaft Alignment," *Proceedings of the Twelfth International Pump Users Symposium, Turbomachinery Laboratory The Texas A&M University System*, pp. 163~187.
- (6) Chong, U. P., Cho, S. J. and Lee, J. Y., 2006, "Fault Diagnosis for Rotating Machine Using Feature Extraction and Minimum Detection Error Algorithm," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 27~33.
- (7) KAI, 2000, Critical Item Development Specification for the KTX-2 Power Take-Off Shaft.