

풍력발전기용 피치/요 베어링의 시험절차 개발

남주석^a, 한정우^{a*}

Development on Test Procedure of Pitch and Yaw Bearings for Wind Turbine

Ju Seok Nam^a, Jeong Woo Han^{a*}

^a Department of System Reliability, Korea Institute of Machinery & Materials,
156, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	16	January	2015
Revised	16	March	2015
Accepted	18	March	2015

Keywords:

Design verification
Pitch bearing
Test procedure
Wind turbine
Yaw bearing

ABSTRACT

Test procedure for the design verification of wind turbine pitch and yaw bearings has been developed. Test items were selected to evaluate operational reliability of pitch and yaw bearings by considering loading and operational conditions, and by analyzing the design criteria of pitch and yaw bearings. The developed test items consisted of preliminary test, fatigue load test, extreme load test, low temperature environmental test and dismantling inspection after all the test were completed. Because it reflects the actual operational conditions of the pitch and yaw bearings, the developed test procedure has high reliability and can verify the basic design considerations in the international standard and guidelines.

1. 서론

풍력에너지는 환경오염이 없고 반영구적이며 기술발달과 더불어 에너지 생산단가가 낮아지고 있어 세계적으로 각광받고 있는 에너지원이다^{1,2}. 풍력에너지를 이용하여 전기를 생산하기 위해 풍력발전기가 사용된다. 국내외적으로 많은 풍력발전기가 운용되고 있으며 육상 부지의 공간적인 제약으로 인해 풍력발전기의 설치장소는 해상으로 옮겨지고 있는 추세이다. 해상용 풍력발전기는 육상용에 비해 접근성이 낮고 해파 및 염류 성분 등이 포함되어 있는 가혹한 환경에서 작동하므로 신뢰성이 중요한 문제로 대두되고 있다³.

풍력발전기는 풍력에너지를 전기적 동력으로 변환시켜주기 위한 다양한 기계 및 전기적 장치들로 구성된다. 그 중 풍력발전기용 피치 베어링은 블레이드와 허브사이에 장착되어 풍속에 따라 블레이

드의 피치각을 조절하며, 풍력발전기용 요 베어링은 타워와 나셀 사이에 장착되어 풍향에 따라 나셀을 회전시켜 주어진 바람조건에서 풍력발전기의 효율을 극대화 시켜준다⁴. 주축에 장착되는 메인 베어링과 함께 이 두 베어링은 풍력발전기의 정상적인 작동을 위해 필수적인 기계요소이다.

대형 해상용 풍력발전기에서 피치/요 베어링이 속한 피치 시스템과 요 시스템의 가격 구성비는 전체 풍력발전기 가격의 약 4% 수준이다⁵. 그러나 피치/요 베어링의 고장이 발생하면 풍력발전기의 제어 시스템이 정상적으로 작동하지 못하여 에너지 생산이 중단된다. 풍력발전기에서는 이러한 제어 시스템의 고장으로 인한 정지기간이 매우 길다⁶. 또한 피치/요 베어링은 풍력발전기의 높은 고도에 장착되므로 고장 시 많은 수리비용이 소요된다. 수리기간에 따라서는 수리비용 및 발전중단에 따른 손실이 베어링의 단가보다

* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7432
Fax: +82-42-868-7418

E-mail address: jwhan@kimm.re.kr (Jeong Woo Han).

높아지는 경우도 있다. 이러한 손실들은 풍력에너지의 상용화에 가장 큰 영향을 미치는 에너지 생산단가를 악화시키는 원인이 된다.

가격 구성비는 낮지만 고장 발생 시 많은 손실이 발생하는 피치/요 베어링과 같은 요소들에는 보증수명을 안전하게 만족시킬 수 있는 강건설계 및 검증시험이 필수적으로 요구된다. 그 중 설계의 경우 관련된 여러 국제규격^[7,8] 및 가이드라인^[9]이 있어 많은 부분 통일된 방법을 따르고 있다. 그러나 검증시험의 경우 아직까지 가이드라인이나 국제규격이 없으며 관련된 연구도 거의 없어 충분한 설계검증이 이루어지지 못하고 있다.

본 연구에서는 풍력발전기용 피치/요 베어링의 설계에 대한 국제규격 및 가이드라인을 분석하여 설계 고려사항들을 파악하고 설계검증을 위한 기초 시험절차를 개발하였다. 본 연구의 결과는 피치/요 베어링의 설계 검증시험의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 설계 관련 규격 및 가이드라인

2.1 산업용 구름 베어링

산업용 구름 베어링의 수명 및 성능을 규정한 규격으로는 ISO76^[7]과 ISO281^[8]이 있다. ISO281은 동적 수명(dynamic life), ISO76은 정적 안전계수(static safety factor) 계산을 위한 규격이다.

동적 수명은 하중을 받으며 고속으로 회전하는 베어링의 내, 외륜 구름면 중 한 곳에서 일정 크기 이상의 피로 균열(fatigue crack)이 발생하는 순간까지의 회전수 또는 소요시간으로 정의된다. 이 때 작용하는 하중의 종류는 피로하중이며, 방향은 축방향 하중과 반경방향 하중을 고려해준다. 접촉각, 전동체 수, 구름면의 곡률, 전동체 직경 등의 베어링 제원을 이용하여 기본 동정격 하중(basic dynamic load rating)을 도출하고, 작용하는 반경방향 및 축방향 하중의 크기를 이용하여 동등가 하중(dynamic equivalent load)을 도출하여 두 하중비의 지수승으로써 90% 신뢰도의 기본 수명(basic rating life)을 계산한다. 또한 신뢰도 수준, 정정도, 윤활특성, 재료특성 등의 여러 작동조건이 미치는 영향을 보정하여 최종적인 동적 수명(modified rating life)을 도출한다. 이 때 기본 동정격 하중은 베어링이 90%의 신뢰도에서 10^6 회전의 수명을 가지게 하는 하중을 의미하며 동등가 하중은 반경방향 및 축방향 하중이 동시에 작용하는 것과 동일한 손상을 가지게 하는 한 방향의 등가하중을 의미한다(레이디얼 베어링의 경우 반경방향 하중, 스톱스트 베어링의 경우 축방향 하중).

정적 안전계수는 정하중에 대한 안전계수를 의미하며 기본 정정격 하중(basic static load rating)과 베어링에 작용하는 정등가 하중(static equivalent load)과의 비로써 정의된다. 작용하는 하중의 종류는 극한하중이며, 방향은 축방향 하중과 반경방향 하중을 고려

해준다. 기본 정정격 하중은 베어링의 여러 전동체 중 최대 응력이 발생하는 전동체와 구름면의 접촉부에서 전동체 직경의 0.01%의 소성변형을 유발하는 하중의 크기를 의미하며 접촉각, 전동체 수, 구름면의 곡률, 전동체 직경 등의 베어링 제원을 이용하여 계산한다. 정등가 하중은 반경방향 및 축방향 하중이 동시에 작용하는 것과 동일한 손상을 가지게 하는 한 방향의 등가하중으로 작용하는 반경방향 및 축방향 하중의 크기를 이용하여 계산한다. 산업용 구름 베어링은 작동환경 하에서 요구되는 동적 수명 및 정적 안전계수 조건을 만족시키도록 설계되어야 하며, 검증시험도 이 두 항목에 초점을 맞춰 수행되어야 한다.

2.2 풍력발전기용 피치/요 베어링

풍력발전기용 피치/요 베어링은 블레이드 또는 나셀의 축방향으로 장착되는 스톱스트 베어링으로써 볼 또는 롤러를 이용하여 하중을 지지하는 구름 베어링 타입이 일반적으로 사용된다. 풍력발전기용 피치/요 베어링의 수명 및 성능을 규정한 가이드라인으로는 NREL DG03^[9]이 있다. 이 가이드라인은 풍력발전기용 피치/요 베어링의 동적 수명, 정적 하중계수(static load factor), 심부 파괴 모델 등의 내용을 포함하고 있다.

가이드라인의 동적 수명은 ISO281의 동적 수명과 동일한 개념으로 ISO281 등 일반적인 산업용 베어링에 사용되는 규격의 내용을 대부분 인용하였다. 기본 동정격 하중 계산식 및 기본 동정격 하중과 동등가 하중을 이용하여 90% 신뢰도의 기본 수명을 도출하는 방법은 ISO281에서와 동일하다. 다만 동등가 하중의 경우 축방향 하중, 반경방향 및 모멘트를 모두 포함한 계산식을 제공하며 풍력발전기용 피치/요 베어링은 산업용 베어링과 구분되는 특성이 있으므로 관련 계수 및 인자들의 크기도 풍력발전기용 피치/요 베어링에 맞도록 변경하여 사용하고 있다.

정적 하중계수는 ISO76의 정적 안전계수와 동일한 개념으로, 베어링의 전동체가 지지할 수 있는 최대하중과 전동체에 실제로 작용하는 등가 하중과의 비로써 정의된다. 가이드라인에서는 작용하는 반경방향 하중, 축방향 하중 및 모멘트를 고려한 외부하중과 접촉각, 전동체 수, 구름면 곡률 및 전동체 직경 등의 베어링 제원을 이용하여 정적 하중계수를 도출할 수 있는 계산식을 제공한다.

심부 파괴 모델의 경우 매우 큰 하중을 지지해야 하는 작동환경으로 인한 요구기준이며, 베어링 심부에 작용하는 실제 응력과 허용 응력을 비교하여 심부 파괴에 대한 안전성을 판단하는 모델이다. 일반적으로 피치/요 베어링은 표면 경화(case-hardening) 처리를 하여 HRC 58 수준의 구름면 경도를 가지게 된다. 구름면 표면에서 심부로 들어갈수록 점진적으로 경도가 감소하며 HRC 50에 도달한 이후에는 경도가 급격히 감소하게 된다. 표면으로부터 HRC 50 정도 지점까지의 깊이를 유효 경화 깊이(effective case

depth)로 정의하며, 유효 경화 깊이의 110%인 지점에서의 허용 전단응력(allowable shear stress)과 실제 전단응력을 비교하여 심부 파괴에 대한 안전성을 판단한다. 가이드라인에서는 심부의 정도에 따라 허용 전단응력을 결정할 수 있는 표와, 외부 하중조건 및 베어링의 제원을 이용하여 실제 전단응력을 도출할 수 있는 계산식을 제공한다. 피로하중과 극한하중에서의 심부 안전성을 모두 검증해야 한다.

풍력발전기용 피치/요 베어링의 규격과 산업용 베어링의 규격에서 가장 큰 차이점은 피치/요 베어링의 경우 외부 하중조건으로 반경방향 하중과 축방향 하중뿐만 아니라 굽힘 모멘트도 고려해 주며, 또한 심부 파괴에 대한 안전성도 중요한 고려사항이라는 점이다. 따라서 풍력발전기용 피치/요 베어링은 모멘트가 추가적으로 작용하는 작동환경 하에서 요구되는 동적 수명, 정적 하중계수, 심부 파괴 모델 조건을 만족시키도록 설계되어야 하며 검증시험도 이들에 초점을 맞춰 이루어져야 한다.

3. 시험절차 개발

3.1 하중 조건

작동환경에서 풍력발전기용 피치/요 베어링에 작용하는 하중은 크게 극한하중과 피로하중으로 구분된다. 극한하중은 작동 조건 별로 베어링이 사용기간 동안 받게 되는 하중 중 가장 큰 하중을 의미하며 짧은 시간 동안 작용하는 정하중이다. 피로하중은 베어링이 사용기간 동안 지속적으로 받는 반복하중으로 LDD (load distribution duration) 또는 DEL (damage equivalent load)로 표현된다. LDD는 베어링이 작동기간 동안 받게 되는 하중을 수준별로 나누어 작용시간과 함께 나타낸 것이고, DEL은 손상 등가하중으로서 베어링이 작동기간 동안 받게 되는 모든 하중에 의한 손상과 동일한 손상 수준을 가지게 하는 하나의 등가 하중을 의미한다. 경우에 따라 LDD에는 하중 수준별 작용시간 뿐만 아니라 회전각 (oscillation amplitude) 및 회전 속도(oscillation speed)도 함께 기재된다. 또한 DEL에는 등가 하중의 작용 빈도인 기준 싸이클 (reference cycle)이 함께 기재된다.

Fig. 1 및 2는 각각 전형적인 피치 베어링과 요 베어링의 좌표시스템을 보여주고 있다. 여기서 X와 Y방향(F_x, F_y, M_x, M_y)이 반경방향, Z방향(F_z, M_z)이 축방향을 나타낸다. 하중 성분별로는 세 방향의 힘(F_x, F_y, F_z)과 세 방향의 모멘트(M_x, M_y, M_z)로 나누어진다.

M_z 는 피치/요 베어링의 구동 토크로 베어링에 작용하는 하중이 아니라 베어링을 구동시켜주는 감속기^{10,11)}가 지지하는 하중이므로 M_z 를 제외한 다섯 가지 하중 성분이 실제 작동 환경에서 피치/요 베어링에 가해지는 하중이다. 따라서 피치/요 베어링에 작용하

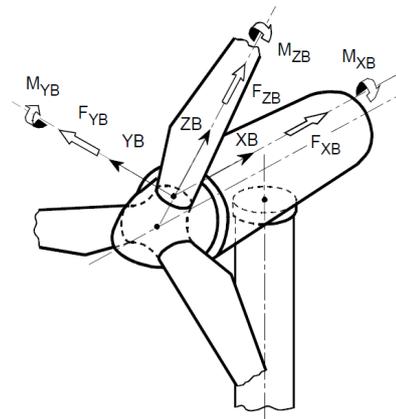


Fig. 1 Coordinate system for pitch bearings

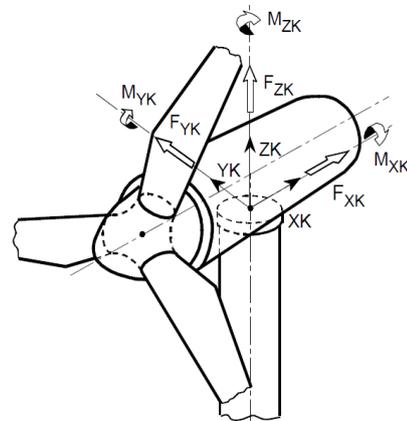


Fig. 2 Coordinate system for yaw bearings

Table 1 Example form of extreme load

Load Component	Magnitude, kN or kNm	Remarks
F_x	100	Radial direction
F_y	150	Radial direction
F_x	200	Axial direction
M_x	250	Radial direction
M_y	300	Radial direction

는 하중은 각각 다섯 가지 성분의 피로하중과 극한하중이다. 피로 하중으로는 DEL이 흔히 사용되며 이 경우 극한하중과 피로하중의 형태는 각각 Table 1, Table 2에서와 같다¹²⁾.

DEL로 표현되는 피로하중의 경우 평균과 진폭이 존재하므로 시간에 따른 하중 이력은 정현파로 나타나며 하중 위상이 존재하게 된다 (Fig. 3). 따라서 다섯 개의 피로하중 성분에 대한 위상이 각각 존재하며 이러한 위상들의 조합에 따라 베어링의 손상 수준이 달라지므로 DEL을 이용한 피로하중시험 시 하중 성분별 위상조건을 반드시 반영해 주어야 한다. 하중의 위상 조합에 관한 정보는 베어링 제조사가 제공해야 하며 시험조건에 명시되어야 한다.

Table 2 Example form of fatigue load (DEL)

Load Component	Mean value, kN or kNm	Amplitude, kN or kNm
F _x	100	150
F _y	200	250
F _z	300	350
M _x	400	450
M _y	500	550

Reference cycle: 10⁶ cycles

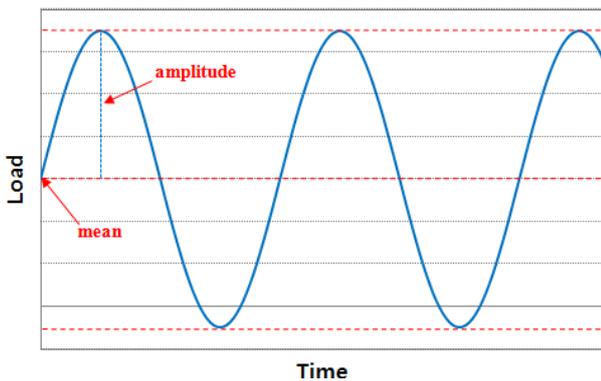


Fig. 3 Time history of damage equivalent load

3.2 운전 조건

풍력발전기용 피치/요 베어링은 평균 1 rpm 이하의 저속으로 회전하며, 회전 주기 및 회전 각도도 바람에 따라 불규칙적이고 비연속적이다. 또한 매우 큰 하중이 작용하는 환경으로 인해 피치/요 베어링은 회전요소로서의 성격과 함께 작용하는 하중을 지지하는 구조물로서의 성격도 가지므로 시험에서는 두 가지 측면에 대한 작동 신뢰도를 모두 평가할 수 있어야 한다. 또한 기온이 낮은 높은 고도에서 작동하므로 저온환경에서의 작동 신뢰도도 평가해야 한다.

피치/요 베어링의 내륜 혹은 외륜은 기어치와 일체형으로 제작되어 내륜에 기어치가 있는 경우 내치형 베어링, 외륜에 기어치가 있는 경우 외치형 베어링으로 구분된다^[13] (Fig. 4, 5). 구동 모터와 감속기, 피니언으로 구성된 드라이브 시스템을 이용하여 내륜 또는 외륜의 기어치를 회전시킴으로써 피치/요 베어링을 구동한다 (Fig. 6). 이 때 베어링의 마찰 토크는 회전의 원활성과 연관되는 파라미터로, 베어링의 작동 효율에 영향을 미치며 베어링의 기능성을 나타내는 가장 중요한 성능 지표가 된다. 마찰 토크가 작아지면 베어링의 구동을 위해 필요한 하중이 작아지고 작동 효율이 높아지는 장점이 있으므로 마찰 토크는 작은 값을 가지는 것이 좋다. 동일한 크기의 베어링이라도 설계 사양에 따라 마찰 토크의 크기가 달라지며, 작동 중 베어링이 고장나면 마찰 토크의 크기도 또한 변화하므로 반드시 전체 수명 기간을 통해 요구되는 마찰 토크 조건을 만족시켜야 한다.

피치/요 베어링은 큰 하중을 지지하므로 하중 지지부인 전동체와

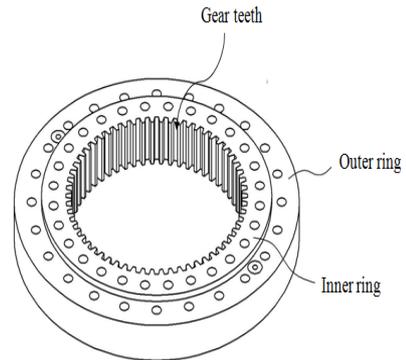


Fig. 4 Internal-gear type bearing

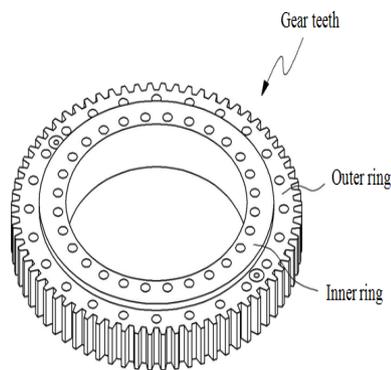


Fig. 5 External-gear type bearing

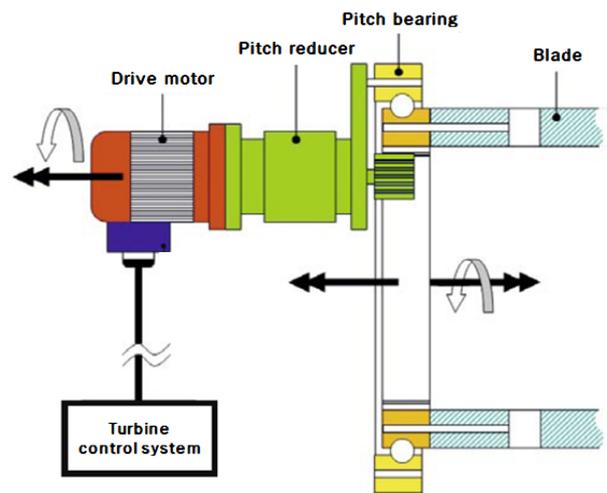


Fig. 6 Driving system for pitch and yaw bearings

구름면 사이에 높은 접촉 압력이 발생하여 구름면 온도가 증가하게 된다. 구름면의 온도가 기준치 이상으로 증가하면 전동체와 구름면 사이의 윤활유가 기화되어 윤활막이 파괴되고 이는 구름면의 크랙 발생 및 전체 베어링의 파손으로 이어질 수 있다. 실제로, 큰 하중을 지지하는 풍력발전기용 기어박스에서는 하중 지지부인 기어치들에서의 윤활 관련 문제들이 파손의 주원인이 되고 있다^[14]. 따라서 피치/요 베어링의 작동 시 구름면 온도는 윤활유의 작동 온도

범위 내에 존재해야 한다.

3.3 정상작동 기준

앞서 언급했듯이, 동적 수명의 기준은 구름면에서 발생하는 일정 크기 이상의 피로 균열이며 정적 하중계수의 기준은 전동체와 구름면의 접촉부에서 발생하는 일정 크기 이상의 소성변형이다.

심부 파괴 모델의 경우도 심부에서 시작된 파손이 구름면으로 확장되어 구름면의 피로 균열로 나타나게 된다. 이와 같이 동적 수명, 정적 하중계수, 그리고 심부 파괴 모델에서 파손의 기준은 구름면에서 발생하는 일정 크기 이상의 피로 균열 또는 소성변형이다. 이러한 형태의 파손이 발생하는 경우 구름면의 국부 형상이 뒤틀리고 린아웃 오차가 증가하여 마찰 토크가 증가하게 된다. 또한 피로 균열이나 소성변형이 발생하지 않은 구름면 부분에 하중이 집중되어 전체적인 구름면 온도가 증가하게 된다. 따라서 베어링의 정상작동 여부를 판단하기 위한 파라미터로써 마찰 토크와 구름면 온도를 사용할 수 있다.

가이드라인에서는 피치/요 베어링의 마찰 토크를 수식적으로 도출할 수 있는 계산식을 제공하며, 형태는 식 (1)에서와 같다^[9].

$$T_t = \mu \frac{d_m}{2} \left[\frac{4.4(M_X + M_Y)^{0.5}}{d_m} + 2.2(F_X + F_Y)^{0.5} + F_Z \right] \quad (1)$$

여기서, T_t 는 이론적 마찰 토크, μ 는 베어링의 마찰계수, d_m 은 베어링의 피치원 직경이며 F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y 는 베어링에 작용하는 각 방향의 힘 및 모멘트를 의미한다. 식 (1)은 많은 시험 및 경험을 통해 도출된 마찰토크 계산식으로써 이를 이용하면 피치/요 베어링의 마찰 토크를 전반적으로 잘 예측할 수 있다^[13]. 그러나 실제 작동환경에서는 여러 변수들에 의해 오차가 발생할 수 있으므로 마찰 토크에 대한 정상치 범위를 식 (1)로부터 계산된 값의 $\pm 50\%$ 수준으로 설정하는 것이 타당할 것으로 생각된다. 즉, 실제 작동 시 측정된 마찰 토크가 이론적 마찰 토크를 50% 이상 초과하는 경우 베어링에 파손이 발생한 것으로 간주한다.

구름면 온도의 경우 윤활유 작동에 영향을 미치는 요인이므로 사용된 윤활유의 작동온도 범위를 고려하여 구름면 온도에 대한 정상치 범위를 설정할 수 있다. 즉, 측정된 구름면 온도가 사용된 윤활유의 작동온도 범위를 초과하는 경우 베어링에 파손이 발생한 것으로 간주한다.

그러나 이들은 모든 경우에 적용 가능한 절대적인 기준은 아니며, 세부 기준은 베어링 제조사의 설계 및 운전경험, 사용자의 요구 사항 등에 따라 가변적으로 설정될 수 있다.

3.4 시험절차

풍력발전기용 피치/요 베어링의 설계 가이드라인, 하중 조건 및

운전 조건을 고려하여 아래와 같은 항목을 포함한 피치/요 베어링의 검증시험을 수행할 수 있다. 피치/요 베어링의 설계 기준 중 심부 파괴 모델의 경우 피로하중 및 극한하중이 작용할 때의 심부 파손 여부를 나타내므로 피로하중시험 및 극한하중시험으로 대체될 수 있다.

3.4.1 예비시험

본시험 전에 시험장비 및 베어링의 작동상태를 확인하기 위한 예비시험을 수행한다. 시험 베어링에 일정수준의 정하중(극한하중의 10% 수준)을 가력한 후 베어링을 시계방향과 반시계방향으로 일정 시간동안(1시간 내외) 구동한다. 구동 중 누유, 베어링과 시험장비의 연결 상태 불량 등의 현상이 발생하지 않는지 확인한다. 만약 이상 현상이 발생하면 베어링과 시험장비의 상태를 다시 한번 점검한 후 본시험을 수행해야 한다.

3.4.2 피로하중시험

피로하중시험은 피치/요 베어링의 설계기준 중 동적 수명과 심부 파괴 모델을 만족시키는지의 여부를 확인하기 위한 시험이다. 피치/요 베어링의 제조사 또는 풍력발전기 제조사로부터 시험하중 등의 시험조건을 제공받아 시험을 수행해야 한다.

3.4.2.1 정지 가력시험

작용하는 하중을 지지하는 구조물로서의 작동 신뢰도를 평가하기 위한 시험이다. 베어링을 정지시킨 상태에서 DEL 형태의 피로하중을 기준 싸이클만큼 가력해주고 베어링의 마찰 토크와 구름면 온도 변화를 확인한다. 시험이 완료될 때까지 정상작동 기준치 내의 값들이 계속되어야 한다.

3.4.2.2 구동시험

회전요소로서의 작동 신뢰도를 평가하기 위한 시험이다. LDD 형태의 피로하중을 가력해 주면서 베어링을 정격속도로 시계방향과 반시계방향으로 구동시킨다. 베어링의 마찰 토크와 구름면 온도 변화를 확인하여 시험이 완료될 때까지 정상작동 기준치 내의 값들이 계속되어야 한다.

Fig. 7, Fig. 8은 각각 구동시험에서의 마찰 토크와 구름면 온도 변화를 보여준다^[15]. 외경 2,620 mm, 내경 2,411 mm인 3 MW급 풍력발전기용 피치 베어링에 대해 10^6 구동 싸이클의 주기로 측정된 값이다. 마찰 토크의 경우 베어링을 회전시키는 구동 모터의 소요동력과 회전속도를 이용하여 식 (2)에서와 같이 도출하였다. 베어링의 1회전 시의 평균 마찰 토크를 대푯값으로 사용하였으며 시계방향(CT)과 반시계방향(CCT) 회전에 대해 구동 싸이클의 증가에 따라 마찰 토크가 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다.

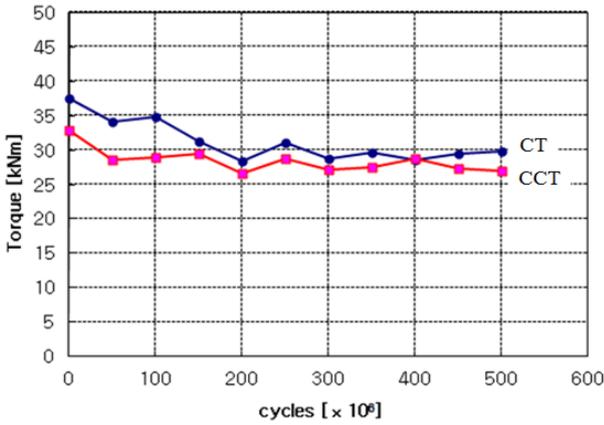


Fig. 7 Friction torque changes during fatigue load test

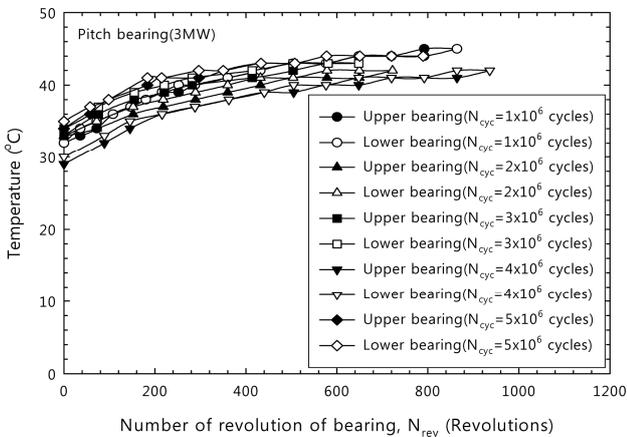


Fig. 8 Temperature changes during fatigue load test

$$T_c = \frac{9.55iP_m}{n_m} \quad (2)$$

여기서, T_c 는 측정된 마찰 토크, P_m 은 구동 모터의 소요동력, n_m 은 구동 모터의 회전속도, 그리고 i 는 감속기와 피니언에서의 총 감속비를 의미한다. 구동 모터에서 베어링으로 동력이 전달될 때 발생하는 손실은 무시하였으며, 구동 모터를 포함한 드라이브 시스템의 모습은 Fig. 9에서와 같다.

구름면 온도는 윤활유 유입구를 통해 열전대를 삽입하여 측정하였다 (Fig. 10). 열전대의 경우 장착부의 온도에 비례하는 전압을 출력해 주므로 열전대로부터 출력된 전압을 이용하여 직접 구름면 온도를 도출하였다. 베어링이 시계방향으로 900회전하는 동안의 구름면 온도를 연속적으로 계측하였으며 마찰 토크와 마찬가지로 구름면 온도도 일정한 값으로 수렴하는 경향을 확인할 수 있다.

또한 구동시험에서는 시험시간을 줄이기 위한 가속수명시험 컨셉을 적용할 수 있다. 회전체의 경우 일반적으로 회전속도 또는 하중을 증가시켜 가속수명시험을 수행한다. 그러나 베어링의 경우 공진에 의해 발생하는 고주파 변형이 주요 고장 메커니즘의 하나이며^[6] 이러한 공진은 회전속도와 밀접한 관계가 있다. 따라서,

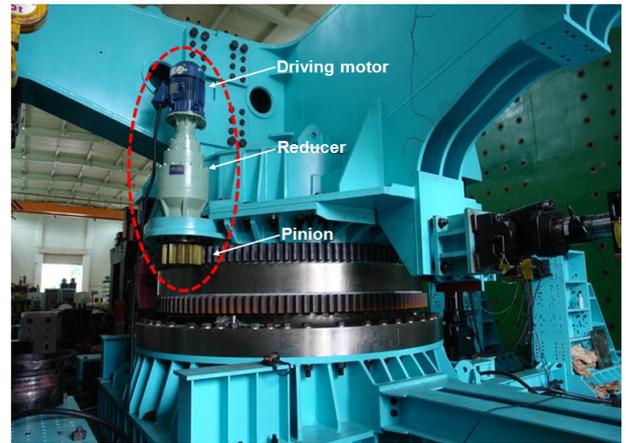


Fig. 9 Photo of driving system for the bearing test



Fig. 10 Raceway temperature measurement using thermocouple

고주파 변형에 관계된 고장 메커니즘이 반영될 수 있도록 회전속도는 정격속도로 고정하고 하중만을 증가시킨 가속수명시험을 수행해야 한다.

피치/요 베어링의 동적 수명은 식 (3) 및 (4)를 통해 계산된다^[9].

$$L = k \left(\frac{C_a}{P_{ca}} \right)^n \quad (3)$$

$$P_{ca} = 0.75(F_X + F_Y)^{0.5} + F_Z + \frac{2(M_X + M_Y)^{0.5}}{d_m} \quad (4)$$

여기서, L 은 베어링의 동적 수명, k 는 신뢰도 수준, 청정도, 윤활특성, 재료특성 등에 따라 결정되는 계수, n 은 전동체의 종류에 따라 결정되는 지수(볼 베어링에서는 3, 롤러 베어링에서는 10/3), C_a 는 기본 동정격 하중, 그리고 P_{ca} 는 동등가 하중을 의미한다. 기본 동정격 하중은 베어링의 재원에 의해서만 결정되는 값으로 대상 베어링이 정해지면 상수가 된다. 계수 k 도 베어링과 작동 환경이 정해지면 상수가 되므로 베어링의 동적 수명은 동등가 하중의 크기에 따라 달라진다. 동등가 하중은 작용하는 개별 하중들(F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y)의 크기에 영향을 받으며 개별 하중이 증가하면 베어링의 손상도가 증가하여 동적 수명이 감소된다. 따라서 식 (3)과 (4)를 이용하면, 동일한 손상을 가지게 하는 시험시간을 줄일 수 있다.

3.4.3 극한하중시험

극한하중시험은 피치/요 베어링의 설계기준 중 정적 하중계수와 심부 파괴 모델을 만족시키는지의 여부를 확인하기 위한 시험이다. 피치/요 베어링의 제조사 또는 풍력발전기 제조사로부터 시험하중 등의 시험조건을 제공받아 시험을 수행해야 한다. 특히 우리나라의 경우 태풍의 영향을 많이 받으므로 태풍이 작용할 때의 환경이 시험조건에 반드시 포함되어야 한다.

극한하중을 가력해 준 상태에서 베어링을 정격속도로 시계방향과 반시계방향으로 구동시키며 시험을 수행한다. 베어링 마찰 토크와 구름면 온도 변화를 확인하여 시험이 완료될 때까지 정상작동 기준치 내의 값들이 계측되어야 한다.

3.4.4 저온환경시험

저온환경시험은 저온환경에서 베어링의 구동특성을 확인하는 시험으로 통상 산업기계부품의 내환경시험에 사용되는 규격인 MIL-STD-810F^[17]의 “Low temperature”를 따른다. 저온환경시험을 위해서는 Fig. 11에서와 같이 환경챔버 내에서 베어링 구동이 가능하고 -40°C 이하까지 주변 온도를 조절하고 유지할 수 있는 장비가 필요하다. 챔버 내 모든 위치의 온도를 균일하게 저온으로 유지하기 위한 장치로써 액화질소와 공기순환 팬 등이 사용될 수 있다. 베어링의 중량 및 표면적에 따라 온도를 유지하는 시간이 달라지며, 저온환경에서 무부하 구동토크를 측정하여 시험이 완료될 때까지 정상작동 기준치 내의 값들이 계측되어야 한다.

3.4.5 분해시험

상기의 모든 시험을 수행한 후 전체 베어링 구성요소들의 상태를 종합적으로 판단하기 위해 분해검사를 실시한다. 전동체와 구름면을 포함하여 기어치, 씌일 등 모든 요소들의 상태를 확인하고 평가한다. 일반적으로 통용되는 요소 파괴 기준과 비교하여 모든 요소들이 정상적인 상태에 있다면 피로하중, 극한하중 및 저온환경 하

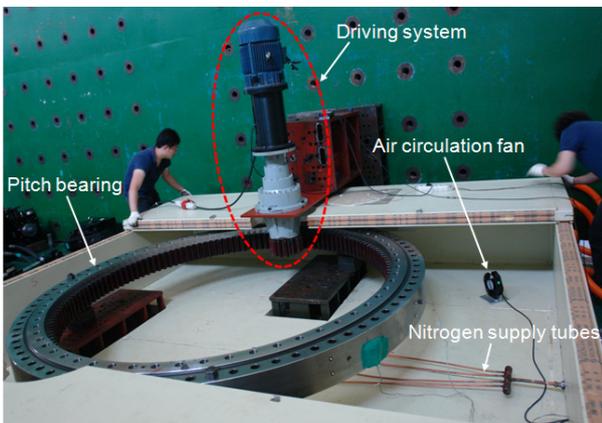


Fig. 11 Low temperature environmental test of pitch bearing

에서 베어링이 신뢰성 있게 작동한 것으로 판단할 수 있다.

전체적으로, 피치/요 베어링은 수명 기간 동안 피로하중과 극한하중이 모두 작용하는 환경에 있으므로 피로하중시험과 극한하중 시험은 하나의 시험 프로세스에 포함되어야 한다. 극한하중이 더 가혹한 환경이므로 가혹도가 낮은 시험으로부터 높아지는 방향으로 구성하여 피로하중시험을 먼저 수행하고 이후 극한하중시험을 수행하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 또한 환경시험은 부하시험 이후 수행하는 것이 타당할 것으로 생각된다. 이상의 시험절차를 요약하면 Fig. 12에서와 같다.

4. 결론

본 연구에서는 풍력발전기용 피치/요 베어링의 설계기준을 분석하고 하중 및 운전 조건을 고려하여 설계 검증시험의 절차를 개발하였다. 시험 항목은 시험장비 및 베어링의 작동상태를 확인하기 위한 예비시험, 동적 수명과 심부 파괴 모델에 대한 작동 신뢰도를 검증하기 위한 피로하중시험, 정적 하중계수와 심부 파괴 모델에 대한 작동 신뢰도를 검증하기 위한 극한하중시험, 저온환경에서의 작동 신뢰도를 검증하기 위한 저온환경시험, 모든 시험이 완료된 후 베어링 구성요소들의 상태를 확인하고 평가하기 위한 분해시험으로 구성된다.

시험 순서는 예비시험, 피로하중시험, 극한하중시험, 저온환경시험, 분해시험 순이다. 개발된 시험절차는 피치/요 베어링의 실제 작동 환경을 반영하여 높은 신뢰도를 가지며 국제 규격 및 가이드라인에서 요구하는 설계 고려사항들에 대한 검증이 가능하다.

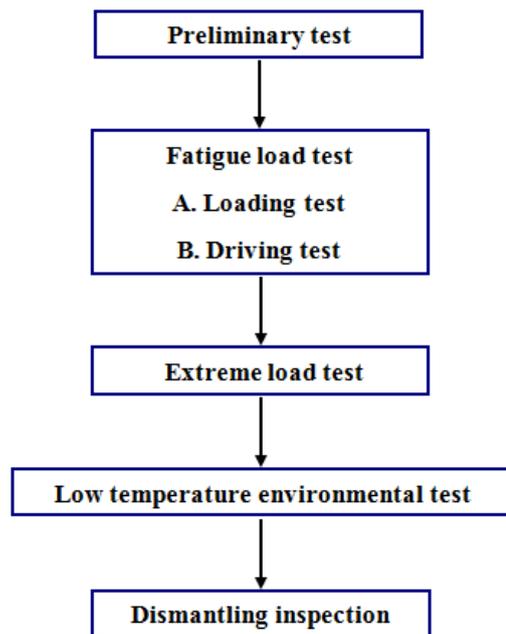


Fig. 12 Developed test procedure

References

- [1] Zahidi, A., 2012, Current Status and Future Prospects of the Wind Energy, Proc. of Power & Energy Conference, 54-58.
- [2] Thresher, R., Robinson, M., Veers, P., 2008, Wind Energy Technology: Current Status and R&D Future, Conference Paper NREL/CP-500-43374, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA.
- [3] Kaldellis, J. K., Kapsali, M., 2013, Shifting Towards Offshore Wind Energy – Recent Activity and Future Development, Journal of Energy Policy, 53 136-148.
- [4] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., 2001, Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons Inc, West Sussex, England.
- [5] IRENA, 2012, Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series(Wind Power), IRENA Working Paper Volume 1 Issue 5/5, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, United Arab Emirates.
- [6] Ribrant, J., Bertling, L. M., 2007, Survey of Failures in Wind Power Systems with Focus on Swedish Wind Power Plants During 1997-2005, IEEE Transactions on Energy Conversion, 22:1 167-173.
- [7] ISO, 2006, Rolling Bearings-static Load Ratings, ISO76:2006(E), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [8] ISO, 2007, Rolling Bearings-dynamic Load Ratings and Rating Life, ISO281:2007(E), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [9] NREL, 2009, Yaw and pitch rolling bearing life, Wind Turbine Design Guideline DG03, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA.
- [10] Park, Y. J., Lee, G. H., Kim, J. K., Song, J. S., Park, S. H., 2011, Analysis of Load Distribution and Sharing on the Planetary Reducer for Wind Turbines, Journal of Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 20:6 830-836.
- [11] Kim, J. K., Park, Y. J., Lee, G. H., Kim, J. H., 2013, Effects of Bearing Internal Clearance on the Load Distribution and Load Sharing in the Pitch Reducer for Wind Turbines, Journal of Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 22:1 29-35.
- [12] GL, 2010, Guideline for the Certification of Wind Turbine, GL2010, Germanischer Lloyd, Hamburg, Germany.
- [13] Nam, J. S., Han, J. W., Park, Y. J., Nam, Y. Y., Lee, G. H., 2014, Development of Highly Reproducible Test Rig for Pitch and Yaw Bearings of Wind Turbine, Journal of Mechanical Science and Technology, 28:2 705-712.
- [14] Errichello, E., Muller, J., 2012, Gearbox Reliability Collaborative Gearbox 1 Failure Analysis Report, Subcontract Report NREL/SR-5000-53062, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA.
- [15] Nam, J. S., Kim, H. S., Lee, Y. S., Han, J. W., 2012, Loading Test Results of Wind Turbine Pitch/Yaw Bearing, Journal of Wind Energy, 3:1 61-67.
- [16] Holweger, W., Loos, J., 2011, Interaction of Rolling Bearing Fatigue Life with New Material Phenomenons of Special Applications, Proc. of the 14th Heavy Drive Train Conference, 223-238.
- [17] MIL, 2000, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, MIL-STD-810F, US Department of Defense, Washington, D.C., USA.