

통합설계프로그램을 이용한 2MW 풍력발전시스템용 기어박스의 최적설계에 관한 연구

최 응혁¹⁾, 박 구하²⁾, 조 준행³⁾, 이 인우⁴⁾, 오 세웅⁵⁾

A Study on Optimum Design of 2MW Wind Turbine Gearbox Using a Integrated Design Software

Younghyuk Choi, Koocha Park, Joonhaeng Jo, Inwoo Lee, Seiwoong Oh

Key words : Wind turbine(풍력발전기), Gearbox(기어박스), Optimum design(최적설계), Gear(기어), Bearing(베어링), Misalignment(정렬불량)

Abstract : Wind turbine gearbox is a complex mechanical system that includes gear trains, shafts, bearings, and gearbox housings. All these component are interacting with each other therefore changing certain design parameter will affect other components. RomaxDesigner enables a reduction in development period by simulating the full gearbox system. The gear pairs, bearings and shafts are represented as analysis objects and the complex components are modelled by means of reduced stiffness matrices. The software allows durability analysis and advanced contact analysis including the effects of system misalignments in gear and bearing. In this paper, the 2MW wind turbine gearbox was modelled and a study on optimum design was conducted.

1. 서 론

풍력발전시스템용 기어박스(gearbox)의 경우 타워 위의 높고 협소한 공간에 설치되는 특징으로 인하여 고장시 수리 및 교체에 많은 어려움이 있어 기어박스의 신뢰성 및 최적설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 풍력발전시스템용 기어박스의 최적설계 관점에서 중요한 문제 중에 한 가지는 베어링과 기어의 정렬불량(misalignment)이다. 현존하는 많은 기법들은 기어박스(gearbox) 시스템 전체의 정렬불량을 고려하지 못하여 부품들 사이의 상호작용에 의하여 발생하는 정렬불량이 베어링 및 기어의 수명 및 강도에 미치는 영향을 정확히 평가하기가 어려웠다.

풍력발전시스템용 기어박스는 유성치차열(planetary geartrain), 헬릭컬치차열(helical geartrain), 축, 베어링 및 하우징(housing)등의 구성부품을 포함하는 복잡한 기계시스템이다. 이러한 구성부품들은 기어의 물림(meshing), 베어링 설치(mounting) 및 기타 연결방법에 의하여 서로 연결되어 있으며 하우징은 일반적으로 비틀림 하중(torsional load)만을 받는 토크암

(torque arm)에 연결된다. 이러한 구성부품들은 서로에게 영향을 주고받으며 어떤 부품의 설계 파라메타(design parameter)가 변경되면 변경된 설계 파라메타로 인한 영향은 다른 부품에도 전달된다. 따라서 설계 파라메타의 변화에 의한 영향을 고려하여 기어박스 시스템 전체의 설계를 최적화하는 것은 반드시 고려되어야 하는 매우 중요한 문제이다.

이러한 관점에서 기어박스를 최적화하여 신뢰성을 높이기 위하여 지금까지는 기어와 하우징을

- 1) (주) 효성 중공업연구소
E-mail : remy75@hyosung.com
Tel : (055)268-9922 Fax : (055)268-9926
- 2) (주) 효성 중공업연구소
E-mail : koochapark@hyosung.com
Tel : (055)268-9922 Fax : (055)268-9926
- 3) (주) 효성 중공업연구소
E-mail : onjoon@hyosung.com
Tel : (055)268-9922 Fax : (055)268-9926
- 4) (주) 효성 중공업연구소
E-mail : inlee@hyosung.com
Tel : (055)268-9921 Fax : (055)268-9926
- 5) Romax Technology
E-mail : seiwoongo@romaxtech.com
Tel : +44(0115)951-8800 Fax : +44(0115)951-8801

각각 해석하고 기어의 물림과 베어링의 정렬불량에 대한 하우징의 유연성(flexibility)을 여러 가지 가정과 함께 고려하는 기법이 주로 사용되었다. 위의 기법에서 하우징의 유연성을 기어의 물림과 베어링의 정렬불량 해석에 고려하기 위하여 선형 베어링(linear bearing)과 강체 하우징(rigid housing) 등과 같은 가정들을 사용하였으며 이러한 가정들은 해석의 정확성을 감소시키는 요인으로 작용하였다.

전체 기어박스 시스템에 대한 FE 모델(finite element model)의 사용은 앞에서 설명한 해석기법의 정확성 높이기 위한 대안으로서 등장하였으나 매우 복잡한 유한요소모델, 많은 경험과 시간 및 해석비용을 필요로 하면서도 결과에 대한 보증이 어려웠다.

본 논문에서는 Romax Technology에 의하여 개발된 Gearbox 통합설계프로그램인 Romax Designer를 사용하여 2MW급 풍력발전시스템용 기어박스 모델을 구성하고 해석 작업을 수행할 것이며 해석결과에 대한 분석결과를 바탕으로 최적설계에 관한 연구를 수행할 것이다.

RomaxDesigner는 전체 기어박스를 모델링하기 위하여 개체지향기법(object-oriented approach)을 사용하며 전체 기어박스에 대한 모델링 및 해석이 가능하도록 하였으며 모든 기어의 물림점(mesh point), 하중(load) 및 하중분포(load distribution)에 대한 계산이 가능하며 모든 연결방법에 대한 고려가 가능하다. Fig. 1은 2MW급 기어박스의 RomaxDesigner 모델을 나타낸다.

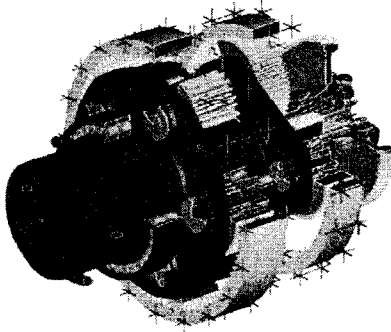


Fig. 1 2MW wind turbine gearbox model

2. Shaft Modeling

기어축(gear shaft)은 보 요소(beam element)를 사용하여 모델링되며 외경, 내경, 축의 위치에 대한 간단한 정보의 입력만으로 축의 모델링이 수행되며 축에 작용하는 하중의 크기, 방향 및 위치 등의 정보에 대해서도 모델링이 가능하고 기어, 축 및 베어링 등의 요소 또한 추가가 가능하다. 축의 연결과 상호작용은 축에 연결된

기어들 사이의 물림과 베어링 등으로 모델링이 되고 축의 위치는 특성값에 대한 간단한 입력만으로 가능하다. Fig. 2는 RomaxDesigner에서 모델링된 축의 모습을 나타낸다.

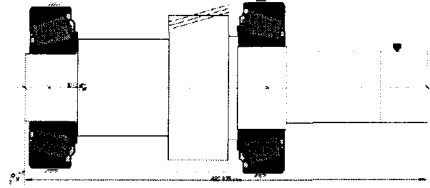


Fig. 2 Shaft component modelled in Romax Designer

3. Bearing Modeling

축의 변형(deflection)에 대한 정확한 해석을 위하여 일반적으로 사용되는 단순지지보(simply supported beam)는 사용되지 않는 대신에 요소의 실제 접촉각(actual contact angle)에 대하여 작용하는 하중에 대한 내부 형상(internal geometry)의 반력뿐만 아니라 작용하중(applied load), 내부 형상, 내부 틈새(internal clearance)를 고려하는 방법에 기초를 둔 베어링의 비선형 강성행렬(stiffness matrix)에 의하여 계산된다. 각 베어링은 6x6 강성행렬은 실제운전 조건에 근접한 베어링의 비선형거동(non-linear behaviour)의 선형화에 의하여 얻어진다.

Fig. 3은 RomaxDesigner에 의하여 모델링된 베어링의 예를 나타낸다.

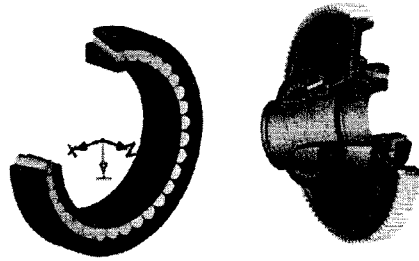


Fig. 3 3D bearings model and its mounting on the shaft

4. Gear set modeling

RomaxDesigner에서 기어는 개체(object)로 다루어지며 치차열(geartrain)의 일부로서 모델링이 된다. RomaxDesigner에서 기어의 모델링은 크게 두 단계로 이루어져있으며 첫 번째 단계는 개념설계(concept design)이고 두 번째 단계는 상세설계(detailed design)이다.

개념설계단계에서는 잇수(tooth number), 모듈(module), 중심거리(center distance), 압력각(pressure angle) 및 치폭(face width)의 기본적

인 데이터만 입력되며 중심거리는 기어의 위치에 의하여 결정이 되며 기어의 물림은 각 기어의 물림에 의하여 각각 정의된다.

상세설계단계에서는 개념설계단계의 치차열이 상세설계단계의 치차열로 변환이 이루어진다. 이 단계에서 치차열의 기준랙(basic rack), 이두께(tooth thickness), 이끝원직경(Tip diameter), 이뿌리원직경(root circle diameter) 전위계수(profile modification coefficient) 등과 같은 상세한 내용의 기어 형상에 대한 정보를 비롯하여 재료, 가공등급과 같은 가공과 관련된 상세한 정보가 입력되게 된다.

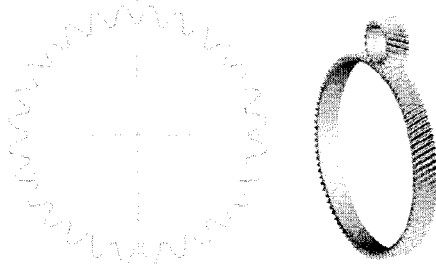


Fig. 4 Helical gear representation and helical gear train modelled in RomaxDesigner

5. Modelling the gearbox housing

기어박스의 하우징은 설치된 베어링의 변형(deformation)에 영향을 주기 때문에 치차열의 물림에도 영향을 주게 된다. 기어와 베어링의 내구성(durability), 기어의 전달오차(transmission error) 등의 정확한 평가를 위하여 하우징의 영향은 반드시 고려되어야 한다.

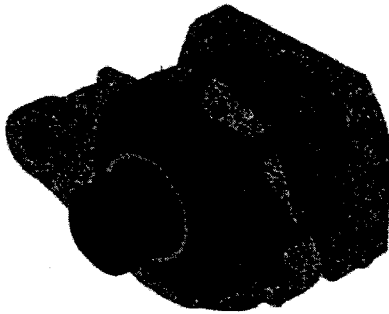


Fig. 5 Illustration of combining housing FE component and internal gearbox components

기어박스 하우징은 매우 복잡한 형상을 가지고 있어 RomaxDesigner의 간단한 구성요소에 의하여 모델링 될 수 없기 때문에 상용 FE 소프트웨어로부터 생성된 환원강성행렬(reduced stiffness

matrix)을 사용하여 하우징을 모델링하고 하우징의 변형이 각 구성부품(shaft, gear, bearing)에 끼치는 영향을 평가할 수 있다.

또한 유성치차열의 캐리어(carrier) 및 링기어(ring gear)와 같은 구성부품에 대해서도 앞에서 언급한 환원강성행렬(reduced stiffness matrix)을 사용하여 구성부품의 변형이 기어, 베어링 및 축의 여러 가지 특성에 미치는 영향에 대한 고려가 가능하다.

6. Duty cycle application

RomaxDesigner에 의하여 구성된 모델은 기어박스의 듀티사이클(duty cycle)을 사용하여 누적손상이론(cumulative damage theory)에 근거하여 기어박스 전체 수명 및 가속된 DC를 시뮬레이션 할 수도 있다. 2MW급 풍력발전시스템용 기어박스의 경우 총 111개 하중조건(load case)의 20년 내구수명에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 8은 2MW급 풍력발전시스템용 기어박스의 듀티사이클을 나타낸다.

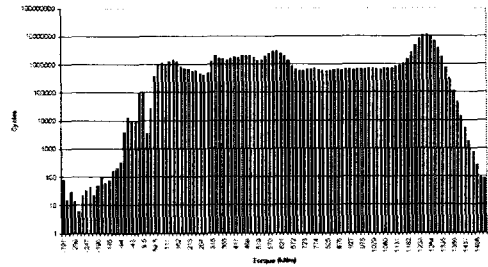


Fig. 8 2MW wind turbine gearbox duty cycle

7. Bearing analysis results

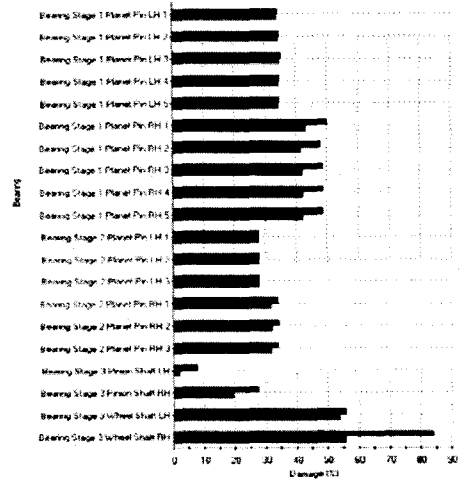


Fig. 9 Damage summary and effect of bearing pre-load against cumulative damage duty cycle

RomaxDesigner에서 베어링의 내구수명해석(durability analysis)은 ISO 수명, Adjusted 수명, Advanced 수명 및 DIN ISO 281 수명 총 4가지의 기법에 의하여 평가되어 진다. Fig. 9는 2MW급 풍력발전시스템용 기어박스 베어링의 내구수명해석결과를 나타내며 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 기어박스의 모든 베어링이 풍력발전시스템용 기어박스의 내구수명인 20년을 만족함을 알 수 있다.

8. Gear analysis results

기어의 내구성(Durability)은 ISO6336을 사용하여 계산되어 졌다. 굽힘응력(bending stress), 접촉응력(contact stress) 및 각각에 대한 안전계수와 누적 듀티사이클(duty cycle)에 대한 손상률 등이 결과값으로 출력된다. Fig. 10은 2MW급 풍력발전시스템용 기어박스의 안전계수를 나타내며 모든 기어에서 기준 안전계수를 만족함을 알 수 있다.

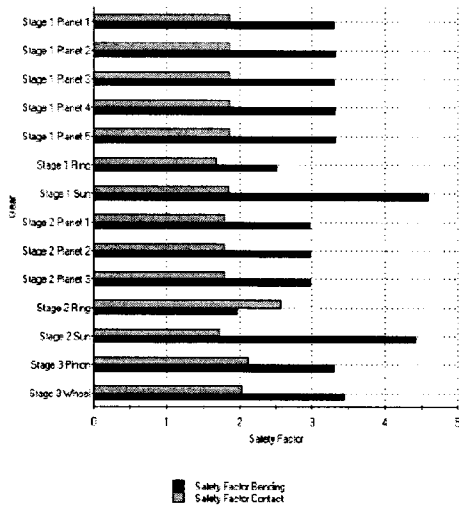


Fig. 10 Gear contact and bending safety factor against cumulative duty cycle

9. Dynamic response

기어의 전달오차에 의한 시스템 가진(system excitation)으로부터 기어박스 시스템과 하우징의 응답모드(response mode)를 알아낼 수 있으며 진동모드(vibration mode)는 하우징의 어떤 위치에서도 측정이 가능하다. Fig. 11은 유성치차열의 전달오차에 의하여 발생한 가진(excitation)에 대한 하우징의 진동응답(vibration response)을 나타낸다. 전달오차에 의하여 256Hz에서 유성기어의 핀을 가진함을 알 수 있으며 이 주파수에서 하우징의 응답을 확인할 수 있다. 또한 부상(bushing)에 전달되는 진동은 토크암(torque arm)의 체결위치에서 측정될 수 있다.

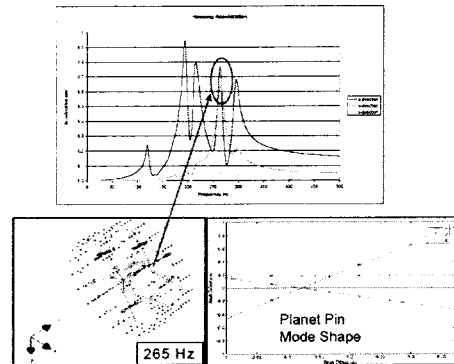


Fig. 11 Dynamic vibration of housing showing excited mode shape

10. 결론

본 논문에서는 RomaxDesigner를 사용하여 2MW급 풍력발전시스템용 기어박스의 모델링과 해석에 대한 새로운 접근방법을 제시하였고 최적설계를 위한 방안을 제시하였다. 본 논문에서 제안된 RomaxDesigner를 사용한 접근방법을 통하여 복잡한 풍력발전시스템용 기어박스의 모델링 및 해석에 소요되는 시간을 줄일 수 있었으며 일반적인 유한요소법을 사용하는 해석방법에 비하여 정확도를 줄이지 않으면서도 축, 기어, 베어링의 수명을 정확하게 계산할 수 있었다. 또한 전체 기어박스 시스템을 모델링 함으로써 전체 기어박스 시스템의 변형(deflection)을 계산할 수 있었다. 이것은 설계자가 정렬불량이 기어와 베어링의 수명에 미치는 영향에 대하여 고려할 수 있게 하였다. 또한, 소음의 원인으로 작용하는 전달오차(transmission error)를 최소화하기 위한 치형수정량(tooth micro-geometry)을 결정할 수 있도록 하여 주었다.

References

- [1] Robb D, 2005, "The Role of Bearing in Gearbox Failure," Wind Power Monthly, Vol. 21, No.11, pp.53-58
- [2] ANSI/AGMA, 1988, "Design Manual for Enclosed Epicyclic Metric Module Gear Drives," ANSI/AGMA 6123-A88
- [3] Allan R K, 1954, "Rolling Bearings," Sir Issac Pitman & Sons, Ltd, London
- [4] Romax Technology, 2003, "Romax Designer User Manual," Romax Technology Ltd
- [5] International Standard Organization, 1990, "Roller Bearings-Dynamic load ratings and rating life"
- [6] International Standard Organization, 1996, "Calculation of load capacity of spur and helical gears"