

풍력터빈 요 베어링의 유한요소모델링 기법에 관한 연구

이동환* · 고우식** · 이형우†

(원고접수일 : 2007년 9월 17일, 심사완료일 : 2007년 11월 13일)

A Study on Finite Element Modeling Method of Yaw Bearing for Wind Turbine

Dong-Hwan Lee* · Woo-Sick Ko** · Hyung-Woo Lee†

Abstract : Recently, the interest for renewable energy producing system is increasing rapidly. Among these, the wind turbine is most highlighted. It is installed at severe environment and generated electricity for a long time to exceed twenty years. Components of wind turbine are required high reliability. Therefore, structural strength analysis for wind turbine is needed for an accurate FE model. This paper is to provide reliable fine element modeling method of yaw bearing for wind turbine.

Key words : Wind turbine(풍력터빈), Yaw bearing(요 베어링), Stiffness curve(강성곡선), Roark's fomular(로크 식)

Nomenclature

R_1 : Groove radius, m
 R'_1 : Raceway radius, m
 $R_2 = R'_2$: Bearing ball radius, m
 E : Modulus of elasticity, N/m²
 ν : Poisson's ratio
 y : Combine deflection, m
 P : Total load, N
 K : Stiffness, N/m
 A : Cross section area of Link10, m²
 L : Length of Link10, m
FEA : Finite element analysis

1. 서 론

최근 지구 온난화, 이상기후 현상, 유가 급등 등의 문제로 화석연료를 대체할 친환경에너지에 대한 관심이 증가하고 있다. 그리고 이산화탄소 (CO₂) 발생량을 제한한 교토의정서의 발표로 세계 각국들은 풍력에너지, 수소/연료전지, 태양열, 해양에너지 등과 같은 신·재생에너지 기술개발에 더 많은 심혈을 기울이고 있다. 우리나라도 1990년 초부터 신·재생에너지의 하나인 풍력터빈(Wind Turbine)에 대한 연구개발과 선진 제품의 도입 및 설치가 활발히 진행되고 있다^{(1), (2)}.

풍력터빈은 풍력에너지를 전기에너지로 변환하는

† 교신저자(부산대학교 기계공학부), E-mail: leehwoo@pusan.ac.kr, Tel: 051) 510-2598

* 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

** (주)효성 중공업연구소

기기로서 풍량이 풍부한 지역에 설치가 된다. 이런 지역의 풍속은 평소에는 10m/s 내외로 불지만, 태풍이나 돌풍이 불면 풍속은 수십 m/s까지 올라가 안전상의 문제가 발생한다.

풍력에너지를 전기에너지로 변환하기 위하여 풍력터빈은 증속기(Gearbox), 타워(Tower), 발전기(Generator), 블레이드(Blade) 및 각종 제어기(Control) 등의 고가의 장비를 갖춘 기기이다. 또한 풍력단지에는 수십 기의 풍력터빈을 필요하므로 전력생산량에 비하여 초기 설치비가 높으므로 20년 이상 장기간 전력생산을 해야만 경제성이 있다.

가혹한 환경조건에서 20년이 넘는 장기간 사용을 위하여 풍력터빈의 구성품들은 높은 구조적 건전성과 고 신뢰성이 필요하다. 그러므로 풍력터빈 인증기관인 GL(Germanischer Lloyd)에서도 풍력터빈에 대한 구조해석 시 강도해석 뿐만 아니라 피로해석까지 요구한다. 신뢰성 높은 풍력터빈의 건설을 위해서 신뢰성 높은 유한요소해석(FEA)이 필요하고 이것을 위해서는 각 구성품에 대한 정확한 FE 모델링이 필요하다.

풍력터빈의 구성품 중의 하나인 요 베어링(Yaw Bearing)은 타워와 메인 프레임(Main Frame) 사이에 설치되어 풍력터빈의 상부(블레이드, 증속기, 발전기, 프레임 등)를 지지하며, 풍향에 따라 상부가 회전이 가능토록 하는 역할을 한다. 2MW 풍력터빈의 상부는 100ton 이상이고, 바람은 최고 70m/s로 불기 때문에 요 베어링에는 큰 하중 및 모멘트가 작용한다.

일반적으로 구조강도 해석 시 베어링의 강성이나 변형은 고려하지 않고 해석을 수행하지만, 풍력터빈과 같이 높은 하중을 받으며 요(Yaw) 운동을 하는 경우는 고신뢰성 해석을 위해서 베어링 강성 및 변형을 고려해야 한다.

본 연구에서는 베어링 강성과 변형을 고려한 풍력터빈 요 베어링에 대한 유한요소모델링 기법의 제안과 이론적 결과와 비교를 통해서 모델의 타당성을 확인하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 구조

Fig. 1은 2MW 풍력터빈용 요 베어링의 구성도로서 타워와 메인 프레임 사이에 설치되며, 일반적으로 구름요소베어링(Rolling Element Ball Bearing)이 사용된다. 베어링 볼(Ball), 내륜(Inner raceway), 외륜(Outer raceway)으로 구성되며, 내륜은 메인 프레임과 연결이 되고, 외륜은 타워에 볼트로 체결이 된다.

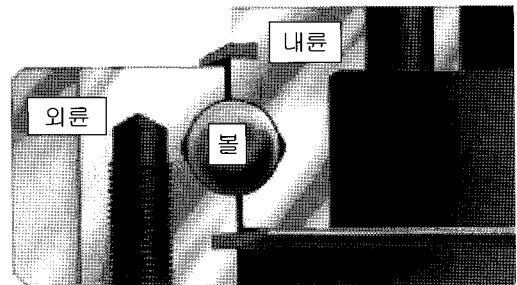


Fig. 1 Yaw bearing for 2MW wind turbine

풍력터빈에서 요 베어링은 증속기, 발전기, 블레이드, 프레임 등을 지지하는 역할과 풍향의 변화에 따라 풍력터빈을 회전시킨다.

2.2 이론식

강성(Stiffness)이란 재료에 외력이 가해질 때 그 재료가 주어진 변형에 저항하는 정도를 수치화한 것이다. 탄성 스프링에 외력(F)이 가해지면 변형(x)이 발생하는데, 이때 외력과 변형의 비가 강성이 되며, 식(1)과 같이 정의한다^[3].

$$K = \frac{F}{x} \quad [\text{N/m}] \quad (1)$$

즉, 강성은 외력에 대한 변형의 정도를 알면 계산할 수가 있다.

요 베어링과 같은 탄성체인 두 물체간의 접촉에 의한 변형이나 응력에 관한 연구는 많은 과학자에 의해서 연구 되었고, Hertz는 곡률을 가진 두 물

체간의 접촉압력에 의한 응력과 변형에 대하여 이론식을 정립하였으며, 실험을 통하여 이를 증명하였다.

본 연구에서는 Hertz의 이론식을 기반으로 한 Roark's formula를 사용하여 베어링 볼과 내외륜 간의 변형을 계산하여 베어링 강성을 구했다.

Fig.2는 곡률을 가진 두 탄성체가 하중 P를 받을 때 접촉상태를 나타내고 있다.

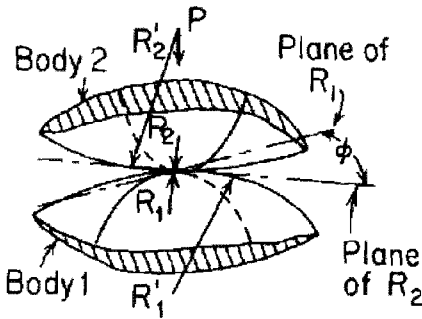


Fig. 2 Contact condition of two elastic body

하중 P에 의해 두 탄성체간의 변형 (Deflection)이 발생되고, 변형의 크기는 식 (2)와 같다⁽⁴⁾.

$$y = \lambda \sqrt[3]{\frac{P^2 C_E^2}{K_D}} \quad [m] \quad (2)$$

C_E 는 두 탄성체의 재료물성치인 탄성계수(E), 프와송비(ν)에 의해서 결정되며, 식 (3)과 같이 정의한다.

$$C_E = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (3)$$

K_D 는 두 탄성체의 기하학적 형상에 의해서 결정이 되며, 식 (4)와 같다.

$$K_D = \frac{1.5}{1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_1' + 1/R_2'} \quad (4)$$

식 (2)의 λ 는 상수로서 Table 1과 같이 $\cos \theta$ 의 함수로 표현된다.

Table 1 Value of constant " λ "

$\cos \theta$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
λ	0.75	0.748	0.743	0.734	0.721	0.703
$\cos \theta$	0.6	0.7	0.8	0.9	0.94	0.99
λ	0.678	0.644	0.594	0.51	0.452	0.288

$\cos \theta$ 는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\cos \theta = \frac{K_D}{1.5} \sqrt{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'}\right)^2} + 2\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'}\right)\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'}\right)\cos \phi \quad (5)$$

ϕ 는 Fig. 2에서 두 탄성체가 접촉 시 두 평면이 이루는 각이다.

본 연구에 사용된 풍력터빈의 요 베어링의 제원과 식 (2)의 변수 값들은 Table 2와 같다.

Table 2 Parameters for yaw bearing

Parameters	Value	Units
ball radius (R_2)	0.03	m
raceway radius (R_1')	0.03125	m
groove radius (R_1)	1.2785	m
No. of ball	115	ea
Poisson ratio (ν)	0.3	-
Young's modulus (E)	2.1E11	N/m ²
C_E	8.667E-12	-
K_D	0.0442	-
λ	0.4790	-

식 (2)에 Table 2의 요 베어링의 제원과 변수를 대입하여 접촉 하중에 따른 요 베어링의 변형을 계

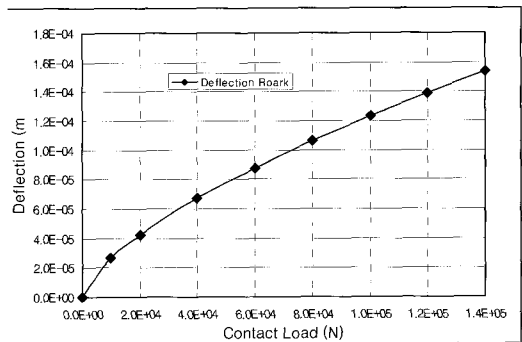


Fig. 3 Stiffness curve of yaw bearing

산하여 강성곡선(Stiffness curve)을 그리면 Fig. 3과 같다.

3. 요 베어링의 유한요소 모델

유한요소프로그램인 ANSYS의 Link10 요소를 사용하여 요 베어링의 볼을 FE 모델링 하였다. Link10 요소는 3D 요소로서 두개의 노드(Node)와 단면적(Cross section area), 초기 변형률(Initial Strain), 탄성계수, 프와송비 등에 의해 유한요소모델링이 된다. Link10 요소의 초기 변형률과 단면적 계산은 다음과 같다.

3.1 초기 변형률

Link10의 초기 변형률은 베어링 볼과 내·외륜과의 기하학적 형상에 의해서 결정된다.

요 베어링은 풍력터빈의 자중에 의하여 어떤 초기 변형이 발생될 것이며, 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 X축을 기준으로 ± 45도 위치의 4군데에서 접촉이 발생한 것으로 가정하였다.

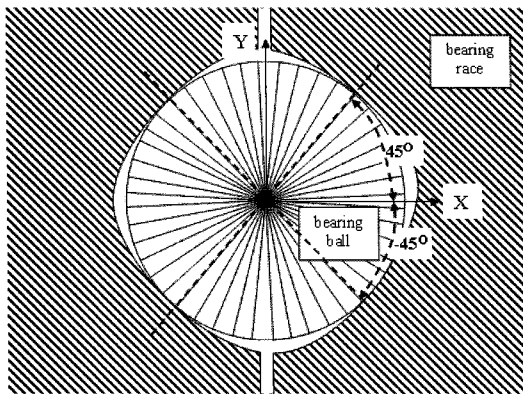


Fig. 4 Initial contact position of Yaw Bearing

볼과 내·외륜은 ± 45도 위치를 제외한 나머지 부분에서 기하학적 갭(Gap)을 가질 것이다. 갭의 크기는 접촉각 45도에서 볼에 내·외륜을 외접하여 계산한다. Table 3은 각도에 따른 갭의 크기와 초기 변형률을 나타내고 있다.

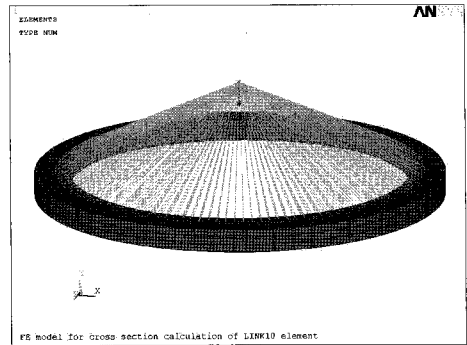
Table 3 Initial strain of Link 10 element

Angle(Deg)	Initial Gap (m)	Initial Strain
36	1.478E-05	4.7296E-04
45	0.000E+00	0.0000E+00
54	1.478E-05	4.7296E-04
63	5.879E-05	1.8813E-03
72	1.311E-04	4.1949E-03
81	2.301E-04	7.3629E-03

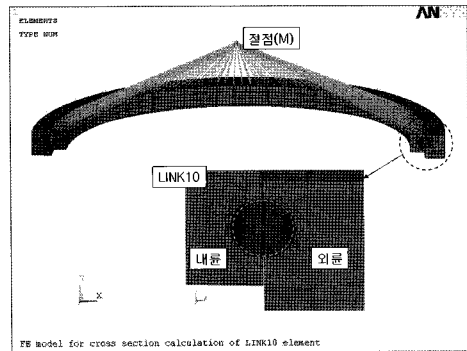
3.2 단면적 계산

ANSYS에서 Link10 요소의 강성행렬식은 식 (6)과 같다⁽⁵⁾.

$$[K_e] = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_1 & 0 & 0 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$



(a) FE model 01



(b) FE model 02

Fig. 5 FE model for cross Section area calculation of Link10 element

여기서, E는 탄성계수, L은 Link10을 구성하는 두 노드간의 거리, A는 단면적이다. C_1 은 상수로 서 조건에 따라서 0, 1, $1E-6$ 의 값을 가지며, 요 배어링의 경우 "1"의 값을 가진다. 그러므로 Link10의 단면적(A)만 알면 구할 수가 있다.

Fig. 5는 Link10 요소의 단면적을 계산하기 위한 FE 모델이다. 초기 FE 모델에는 Table 3에서 구한 초기 변형률과 초기 단면적은 $1.0E-5m^2$ 으로 모델링 하였다.

절점(M) 수직하중을 인가하여 절점의 처짐을 계산하고, Fig. 3의 Roark's formula의 강성곡선과 일치 할 때까지 Link10 요소의 단면적을 변경하여 해석을 반복 수행하였다. Fig. 6은 단면적이 $1.3E-4m^2$ 이고 하중이 $1.4E5N$ 일 때 해석결과이며, 절점에서 처짐 크기는 $1.47E-5m$ 이다.

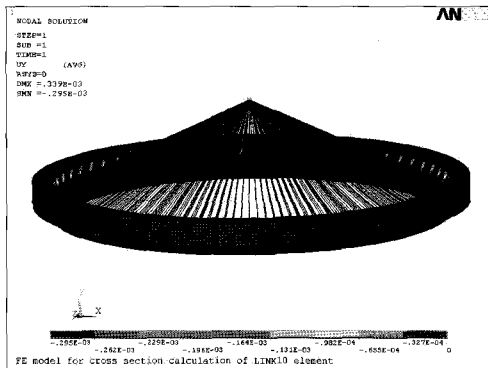


Fig. 6 FEA result example

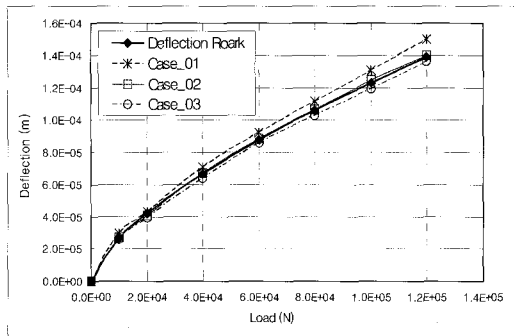


Fig. 7 Comparison of Roark's formula and FE analysis

Fig. 7은 Roark's formula와 FEA의 강성곡선

을 보여주고 있다. Link10의 단면적이 $1.1e-4m^2$ (Case_02)일 때 Roark's formula의 강성곡선과 일치 하였다.

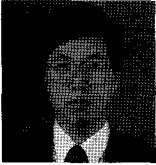
4. 결 론

풍력터빈용 요 배어링에 대한 유한요소해석모델링에 관한 기법을 제안하였다. Roark's formula로 요 배어링의 볼과 내-외륜 간의 접촉에 의한 변형을 계산하였고, 유한요소프로그램인 ANSYS를 사용하여 배어링의 볼을 LINK10 요소로 FE 모델링 하여 LINK10의 초기 변형률(Initial strain)과 단면적(Cross section area)을 기하학적 형상과 FEA를 통하여 계산하였다. 요 배어링의 강성을 Roark' formula와 FEA로 계산하였고, 요 배어링에 대한 유한요소해석모델링 기법의 타당성을 검증하였다.

참고문헌

- [1] 이현주, 최원호, 이승구, "Vortex Shedding 을 고려한 Tower Flange 설계", 한국신-재생 에너지학회 춘계학술대회 논문집, 2005.
- [2] Germanisher Lloyd, "Rules and regulations, IV - Non-marine, Part 1 - Wind Energy, Regulation for the certification of the Wind Energy Conversion Systems, Chapter 1-11", 2003.
- [3] 임재규, 조규중, 김영석, 김영수, "Mechanical of Solid" 시그만프레스, 1996.
- [4] Warren C Young, Richard G Budynas, "Roark's Formulas for Stress and Strain", Seventh edition, Mc Graw Hill, 2002.
- [5] ANSYS Finite Element Analysis Compute Program, Rev. 10.0, ANSYS, Inc., Carlonsburg. PA. USA.

저 자 소 개



이동환(李東桓)

1958년생, 1980년 부산대학교 화학기계 공학과 졸업, 1999년 부산대학교 대학원 생산기계공학과 졸업(공학박사), 2007년 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부 책임연구원



고우식(高佑植)

1971년생, 1994년 부산대학교 생산기계 공학과 졸업, 2006년 부산대학교 대학원 기계설계공학과 졸업(공학박사), 1996년 (주)효성 중공업연구소 풍력발전 기술팀 수석연구원



이형우(李炯佑)

1966년생, 1991년 부산대학교생산기계 공학과 졸업, 1999년 부산대학교 대학원 생산기계공학과 졸업(공학박사), 2007년 부산대학교 기계공학부 NURI BEAM 사업단 교수