

# 중형 풍력발전기 피치 드라이브의 유성기어 경량화에 관한 연구

## A Study on Mass Reduction of Planetary Gear in Pitch Drive of Medium-sized Wind Turbine

박성규\* · 신유인\*\* · 김동명\*\*\* · 송철기\*\*\*\*†

Seong-Gyu Park\*, Yoo-In Shin\*\*, Dong-Myoung Kim\*\*\*  
and Chul-Ki Song\*\*\*\*†

(Received 04 July 2016, Revised 16 February 2017, Accepted 16 February 2017)

**Abstract:** Pitch drive system in wind turbine is composed by the planetary gear system to satisfied its required performance such as long life and light weight for gear train. When the planetary gear system can reduce its volume and weight, the power consumption of the wind turbine can be reduced. In this study, the planetary gear system of the pitch drive system in medium-sized wind turbine is obtained for weight reduction by shape optimization method. And the planetary gear system is verified for their strength by the structural analysis.

**Key Words :** Planetary Gear System, Shape optimization, Pitch Drive, Wind Turbine

### 1. 서 론

풍력발전은 풍력 에너지를 기계적 에너지로 변환시켜 발전기를 가동하여 전기를 생산하는 것을 의미하며, 신재생에너지 중 풍력발전은 급속한 산업 발전과 함께 시장 확대를 가져온 분야이다.<sup>1)</sup>

GWEC(Global Wind Energy Council)는 2030년까지 풍력발전으로 생산되는 전력량은 2,000 GW에 도달할 수 있을 것이며, 이는 전 세계 전기 공급의 17-19%에 달한다고 예측하고 있다.<sup>2)</sup>

한편 국내 풍력발전 연구동향으로는 2030년까지 200 MW급 설비에 대한 연구개발을 목표로 하고 있다.

1988년부터 시작된 풍력발전에 대한 연구는 중소형 풍력발전기 위주였으며, 최근 설치 환경이 육상에서 해상으로 변화함에 따라 MW급의 발전기 연구에 집중되는 추세이다. 이에 따라 풍력발전 관련 연구들은 시스템의 대형화에 집중되고 있다.

피치 드라이브(pitch drive)는 블레이드의 각도를 조절하여 풍속에 따라 블레이드가 일정한 회전속도를 유지할 수 있는 역할을 한다.<sup>3)</sup> 피치 드라이브의 구성품 중 감속기는 풍력발전기용 기어트레인과 동일하게 20년 이상의 수명과 소형화, 경량화 등의 성능에 부합하여야 하며, 피치 드라이브 내 유성기어의 부피 및 무게를 줄여 동적 특성에 대한 요구 성능

\*\*\*\*† 송철기(교신저자) : 경상대학교 기계공학부, 공학연구원

E-mail : cksong@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-1633

\*박성규 : 경상대학교 기계항공공학부

\*\*신유인 : 경상대학교 공학연구원

\*\*\*김동명 : 한국남동발전(주)

\*\*\*\*† Chul-Ki Song(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, ERI, Gyeongsang National University.  
E-mail : cksong@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-1633

\*Seong-Gyu Park : Department of Mechanical Engineering, Gyeongsang University.

\*\*Yoo-In Shin : ERI, Gyeongsang National University.

\*\*\*Dong-Myoung Kim : Korea South-East Power Co.

을 만족할 수 있다.<sup>4,6)</sup>

따라서 본 연구에서는 중형 풍력발전기의 피치 드라이브 내 감속기의 유성기어 시스템에 대한 구조해석을 통해 설계의 타당성을 입증하고, 입증된 설계를 바탕으로 형상최적화 기법을 활용하여 최적설계 방안에 대한 연구를 수행하고자 한다.

## 2. 유성기어 설계 및 해석

### 2.1 유성기어 설계

본 연구에 적용된 유성기어 시스템은 링기어(ring gear)가 고정된 상태에서 전기모터로부터 전달되는 동력이 1차 선기어(sun gear)에 입력된 후 1차 캐리어(carrier)를 통해 출력되며, 1차 캐리어와 2차 선기어가 연결되고, 2차 캐리어와 3차 선기어가 연결되어 최종적으로 3차 캐리어를 통해 출력되는 3중 유성기어 시스템(triple planetary gear system)을 이루는 구조이다.

피치드라이브 감속기 내의 유성기어 시스템 모델은 아래 Table 1의 설계조건을 바탕으로 설계하였으며, Table 2는 설계조건을 얻기 위한 설계사양을 나타내었다.

Table 1 Operating conditions of the drive

Carrier speed	Motor speed	Power	Gear ratio
8.819 rpm (8 deg/s)	1666.7 rpm	80 kW	204.73

Table 2 Specifications of the planetary gear system

Gear system		1st	2nd	3rd
Number of teeth	Sun	22	22	22
	Planet	42	41	41
	Ring	109	107	107
Face width	Sun	27	52	114
	Planet	25	50	110
	Ring	27	52	114
Module		2.5	3.5	4.5
Pressure angle		21°	23°	25°
Gear ratio		5.955	5.864	5.864
Total gear ratio		204.7		

Table 3 Material properties

	Young's Modulus (GPa)	Yield Strength (MPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m <sup>3</sup> )
SCM 420H	207	792	0.3	7800
GCD 450	170	340	0.275	7200

Table 1과 Table 2의 유성기어 설계 조건 및 설계 사양은 김동영<sup>7)</sup>과 이인범<sup>8)</sup>의 연구를 참조하였다.

유성기어 감속기 기어에 사용된 재료는 SCM420H이며, 캐리어의 재료는 GCD450을 적용하였다. 본 연구에 적용된 복합유성기어의 재질에 대한 기계적 성질은 Table 3에 나타내었다.

### 2.2 모델 형상 및 경계조건

Fig. 1과 같이 피치 드라이브 감속기의 유성기어는 3쌍의 유성기어세트와 유성기어세트를 이루는 주요 구성품들로 구성된다. 주요 구성품의 전체적인 부분을 바탕으로 유한요소를 생성하면, 절점(node) 수와 요소수가 기하급수적으로 증가한다. 요소수가 증가할 경우 해석결과와 정확성은 높아지는 반면 해석 시간이 증가하는 단점이 존재하기 때문에 해석결과와 정확성과 해석시간을 고려하여 적절한 수의 유한요소망의 생성이 필요하다. 따라서 3중 유성기어 각각의 열의 조합을 Table 4와 같이 3가지 경우로 나누어 연구를 진행하였다.

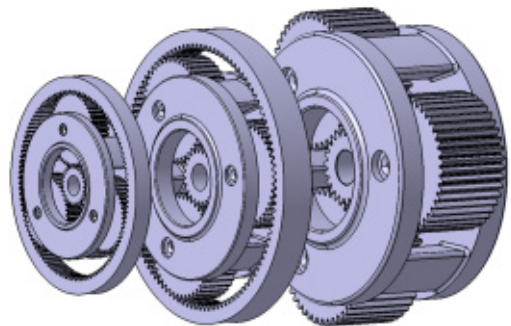


Fig. 1 CATIA modeling of the planetary gear system

Table 4 Set the cases for structural analysis of components in planetary gear system

Mark	Component
SP	sun gear + planetary gear(3EA)
SPR	sun gear + planetary gear(3EA) + ring gear
C	carrier

본 연구에서는 ANSYS Mechanical을 활용하여 모터에서 발생하는 동력이 선기어에 전달될 때 선기어 및 유성기어에서 발생하는 등가응력과 변형량에 대해 확인하고자 한다.

먼저 SP조합의 해석에 사용된 구속조건은 유성기어와 베어링이 결합되는 부분에 6자유도 구속을 하여 모든 방향을 고정시켰다. 하중조건으로는 유압모터의 출력이 전달되는 선기어에 최대토크를 입력하였으며, 그 값은 1열의 경우 460 Nm, 2열은 2,739 Nm 그리고 3열은 16,061 Nm를 적용하였다.

SPR조합의 경우에는 링기어가 조립시 고정되는 부분을 고정하고 각 열 유성기어부분 중 베어링으로 지지되는 부분을 접선 방향으로만 움직임이 가능하게 하였다. 또한 각 열에 적용된 최대토크는 선기어에 SP조합과 동일한 값이 적용되었다.

C조합은 각 열의 캐리어로 구성되어 있으며 캐리어는 드라이브 기어를 중심으로 회전하는 유성기어에 의해 같은 방향으로 회전하게 된다. 따라서 유성기어의 회전력을 계산하여 베어링 하중을 적용하였으며, 캐리어 출력부에 대해서 6자유도를 모두 구속하였다.

각 조합의 구속조건과 하중조건은 Fig. 2~Fig. 4에 나타내었으며, 베어링 하중은 Table 5에 나타내었다.

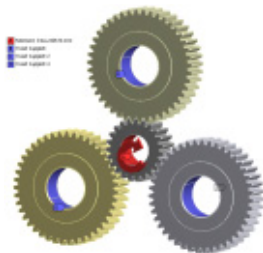


Fig. 2 Boundary and load condition for SP composition

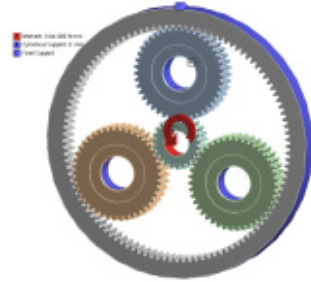


Fig. 3 Boundary and load condition for SPC composition

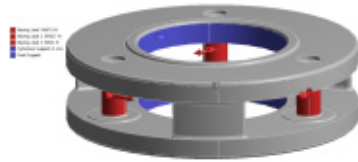


Fig. 4 Boundary and load condition for C composition

Table 5 Load conditions of bearings in a carrier

Mark		Force (N)		
		X	Y	Z
1st	A	5,467	-4,846	0
	B	-3,339	4,315	0
	C	5,870	531	0
2nd	A	-17,066	-11,153	0
	B	-5,722	22,921	0
	C	22,788	-11,767	0
3rd	A	-36,911	-31,493	0
	B	-9,444	52,155	0
	C	-46,355	-20,661	0

### 2.3 유성기어 시스템 해석결과

본 연구에서는 피치 드라이브 감속기 유성기어 시스템의 주요 구성품에 대해 등가응력 해석을 수행하였으며, 동력 전달 시 유성기어, 선기어 및 링기어가 맞물릴 때 접촉면에서 작용하는 최대 등가응력을 확인하였다. 그리고 동력전달시 유성기어 시스템의 각종 주요 구성품에 발생하는 최대 등가응력을 확인하고 분석하였다.

SP조합에 대한 최대 등가응력은 선기어의 이뿌리 부근에서 발생하였으며, 최대 변형은 선기어의 이 끝에서 나타난다. SPR조합에서는 앞선 경우에서 링기어를 포함할 경우를 분석하였으며, 선기어와 유성기어만을 조합하였을 경우보다 결과 값이 높게 나타난다.

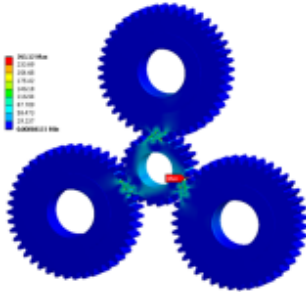


Fig. 5 Equivalent stress of the SP composition

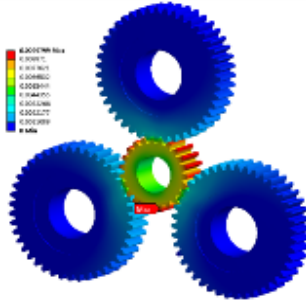


Fig. 6 Total deformation of the SP composition

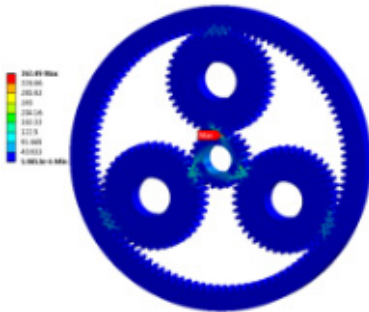


Fig. 7 Equivalent stress of the SPC composition

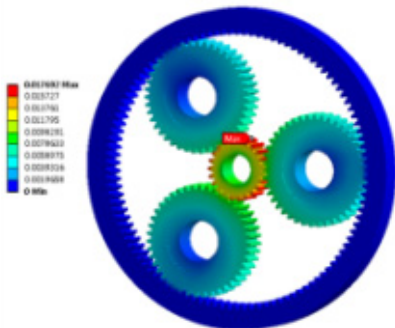


Fig. 8 Total deformation of the SPC composition

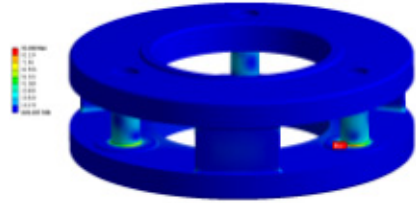


Fig. 9 Equivalent stress of the C composition

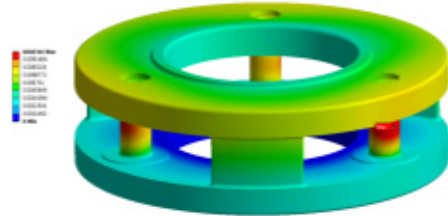


Fig. 10 Total deformation of the C composition

Table 6 Results of the analysis for equivalent stress, total deformation and safety factor

Mark	Equivalent stress (MPa)	Total deformation (mm)	Safety factor	
1st	SP	263.12	0.010	3.01
	SPC	367.49	0.018	2.16
	C	92.39	0.010	3.68
2nd	SP	454.68	0.002	1.74
	SPC	508.34	0.039	1.56
	C	144.46	0.018	2.35
3rd	SP	416.05	0.042	1.90
	SPC	448.39	0.075	1.77
	C	170.57	0.052	2.00

마지막으로 각 열의 캐리어에 대하여 해석을 진행한 결과, 베어링과 결합되는 편에서 최대 등가응력과 최대 변위가 발생하였다.

Fig. 5 ~ Fig. 10에 1번째 열의 결과를 나타내었으며, Table 6에 해석결과 값을 나타내었다.

### 3. 유성기어 시스템 형상개선

#### 3.1 유성기어 설계 변경

본 장에서는 다른 설계 변수는 모두 고정된 상태

에서 선기어 및 유성기어 그리고 링기어의 치폭을 기존 대비 50%와 75%로 변경하였을 경우 기어의 최대 등가응력과 안전율을 살펴보았다.

치폭을 변경한 유성기어 세트를 대상으로 앞서 진행된 프로세스와 동일하게 해석을 진행하였으며, 아래 Table 7에 각각의 경우에 대한 최대 등가응력 값을 나타내었다. 기존 대비 50%로 치폭을 수정하였을 경우에는 1열의 선기어 유성기어 조합을 제외한 모든 경우에서 재료의 항복응력인 792 MPa 이상의 최대 등가응력을 보였다. 기존 치폭 대비 75%로 기어를 설계하였을 경우에는 모든 경우에서 항복응력 이하의 값을 보인다.

Table 7 Variation of equivalent stress with face width

Mark		Equivalent stress (MPa)		
		Face width		
		50%	75%	100%
1st	SP	590.44	486.53	263.12
	SPC	908.99	723.34	367.49
2nd	SP	837.7	539.89	454.68
	SPC	984.62	580.21	508.34
3rd	SP	1107.6	712.52	416.05
	SPC	1126.9	718.29	448.39

Table 8 Result of applied shape optimization

Gear		Equivalent stress (MPa)	Total deformation (mm)	Safety factor	Mass (kg)
1st					
SP	standard	263.12	0.010	3.01	5.32
	modified	553.63	0.038	1.43	3.20
C	standard	92.39	0.010	3.68	6.42
	modified	113.21	0.013	3.00	4.71
2nd					
SP	standard	454.68	0.025	1.74	18.93
	modified	584.4	0.056	1.36	12.50
C	standard	144.46	0.018	2.35	22.60
	modified	161.21	0.040	2.11	16.48
3rd					
SP	standard	416.05	0.042	1.90	68.04
	modified	712.52	0.104	1.11	51.04
C	standard	170.57	0.052	2.00	69.26
	modified	194.35	0.052	1.75	50.92

따라서 기존 대비 75%인 기어 세트를 선정하고 다음 단계인 형상최적화 과정을 통하여 경량화된 설계안을 제시할 것이다.

### 3.2 형상최적화

형상최적화는 구조해석 결과를 바탕으로 ANSYS Mechanical을 활용하여 수행하였으며, 앞서 진행한 해석을 통하여 기존 치폭 대비 75%인 기어 세트를 대상으로 형상최적화 과정을 진행하였다. 형상최적화를 위한 감량의 최대 범위는 기존 모델의 질량에서 약 30% 범위 내·외로 설정하였다.

형상최적화 결과, 경량화가 가능한 부위는 주황색으로 표현되게 된다. 경량화 형상에 대한 구조해석 결과 초기 설계의 응력 분포와 비슷한 경향이 나타났다. 3열 유성기어 세트의 선기어와 유성기어가 조합된 경우에는 항복응력 이상의 값으로 경량화가 불가능한 것으로 나타났으며, 앞선 경우를 제외한 모든 경우에는 항복응력 이하의 결과가 나타났다.

경량화 설계된 유성기어 시스템은 기존 설계 242.11 kg 대비 약 21.4%의 질량을 감소시킨 190.39 kg의 결과를 도출하였다. 각각의 경우에 대한 모든 결과 값은 아래 Table 8에서 간략하게 나타내었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 풍력발전기의 피치 드라이브 감속기 유성기어 시스템의 주요 구성품들에 대한 유한요소 해석을 통해 설계의 타당성을 검증하였다. 또한 유성기어 세트의 치폭 변경 및 형상최적화 기법을 적용하여 경량화된 유성기어시스템의 설계안을 도출하였으며, 그 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

1) 유성기어의 경량화 설계를 위한 설계변수로는 첫 번째, 치폭을 기존 치폭 대비 75%와 50%를 선정하였으며, 이에 대한 구조해석 결과 기존 설계와 동일한 부위에서 최대응력이 발생하며, 기존 치폭 대비 75%로 설계할 경우까지 설계상 안전함을 확인할 수 있었다.

2) 두 번째로, 기존 대비 75% 치폭을 가지는 유성기어 세트를 대상으로 형상최적화 기법을 적용하였다. 형상최적화 결과를 바탕으로 모델링 수정 후 구조해석을 실시하여 경량화 모델의 안전성을 검토하

였다. 그 결과, 3열 SP(선기어+유성기어) 조합을 제외한 경우에서 최소 1.11에서 최대 3.00으로 안전함을 알 수 있었다.

3) 3열 SP조합을 제외한 나머지 유성기어 세트에 대하여 형상최적화 기법을 적용하여 경량화 설계안을 도출하였다. 그 결과, 기존 설계 242.11 kg 대비 약 21.4% 질량을 감소시킨 190.39 kg의 결과를 얻을 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 교육부 및 한국연구재단 “2013년 지역 혁신인력양성사업”의 지원과 지식경제부 및 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역신산업선도인력양성사업의 성과임(NRF-2016H1D5A1910421).

## References

1. G. S. Kim, J. H. Jeong, 2015, "A Classification on the Causes of Wind Turbine Accidents", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 76-81.
2. GWRC, 2014, "Global Wind Energy Outlook 2014", Global Wind Energy Council, Belgium.
3. Y. S. Min, H. W. Lee, 2015, "A study on the Design of Cycloidal Pitch Reducer for the 2MW-class Wind Turbine", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 39, No. 9, pp. 895-902.
4. Y. J. Park, G. H. Kim, J. G. Kim, J. S. Song and S. H. Park, 2011, "Analysis of Load Distribution and Sharing on the Planetary Reducer for Wind Turbines", Transactions of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 20, No. 6, pp. 830-836.
5. J. G. Kim, Y. J. Park, G. H. Lee, Y. Y. Nam and W. Y. Yang, 2014, "Optimum Design of Pitch Reducer for Wind Turbine Using Genetic Algorithm", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 38, No. 2, pp. 185-192.
6. Y. I. Shin, S. H. Shin, T. I. Oh, J. S. Suh, C. K. Song, 2012, "Mass Reduction of Transmission Gears for Commercial Vehicles", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 29, No. 3, pp. 319-323.
7. D. Y. Kim, I. B. Lee, L. J. Liang, S. K. Lyu, 2014, "A Study on Components Load of 5MW Wind Turbine Pitch Drive", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, pp. 115-120.
8. I. B. Lee, D. Y. Kim, Zhe-Zhu Xu, D. Y. Lee, S. K. Lyu, 2014, "A Study on Tooth Micro-geometry Optimization of Planetary Gear for 5MW Wind Turbine Pitch Drive", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, pp. 85-91.