

동력 분배형 유성기어열의 구조 특성 분석

*이 기훈¹⁾, 이 근호¹⁾, 배 인호²⁾, 이 정상³⁾, **정 태형³⁾

Analysis of Structural Characteristics of Power-Split Type Planetary Gear Train

*Kihun Lee, Geunho Lee, Inho Bae, Jongsang Lee, **Taehyong Chong

Key words : Wind-turbine gearbox(증속기), Planetary gear(유성기어), Gear ratio(기어비), Power-split type(동력분배형), Volume(체적), Weight(중량)

Abstract : The volume and size of the wind turbine gearbox has been increased with increasing transmitted power. The optimal sizing of gearbox is important due to limited space on the nacelle. The power-split type planetary gear train has been regarded as a better solution than conventional type from the point of view of the volume and weight. The purpose of this paper is to optimize the volume and weight of the gearbox by the analysis of structural characteristics and evaluation of strength of the power-split type planetary gear train.

1. 서론

풍력 발전 시스템이 대형화되어감에 따라 증속기(gearbox)의 크기도 함께 대형화되어가고 있다. 소형의 풍력 발전 시스템에서는 기어박스의 크기가 크게 고려되지 않았으나, 대형 풍력 발전 시스템에서는 타워 위의 높고 좁은 공간에 기어박스가 설치되는 특징으로 인하여 기어박스의 체적 및 중량을 줄이는 것이 설계에 있어서 필수적으로 적용된다. 따라서 기어박스의 체적 및 중량을 줄이고 강도를 유지하기 위해 여러 가지 기어열(gear train)이 제안되고 있다. 일반적으로 유성기어(planetary gear)를 포함하는 기어박스를 많이 활용하고 있고, 기어열의 설계 방법에 따라 여러 가지 형태를 구현할 수 있다.

저자의 이전 보고에서는 유성기어열을 이용한 설계 방법 중에 일반 형태의 유성기어열(conventional type)을 이용한 설계 방법과 동력 분배형 기어열(power-split type) 형태의 설계 방법에 대해서 비교한 연구⁽¹⁾를 진행한 바 있으며, 동력 분배형 기어박스가 일반 형태의 유성기어열보다 체적 및 중량에 있어서 좋은 결과를 얻을 수 있음을 보였다. 동력 분배형 유성기어열은 기어열의 특징으로 인해 원하는 기어비를 얻을 수 있는 동시에 유성기어의 수를 증가시켜 하중 분배효과를 크게 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 다른 특징은 1단과 2단의 동력 분배의 최적

화를 통해 링기어를 유사한 크기로 설계할 수 있어, 조밀한 구조로 설계가 가능하게 된다. 따라서 풍력 발전용 증속기의 체적 및 중량 특성을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 동력 분배형 증속기의 기어열 형태에 따라 갖는 특성에 대해서 분석하고 기어박스의 설계 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 동력 분배형 증속기에 대해 그 구조를 분석하고, 그에 따라 풍력 발전용 증속기에 활용 가능한 유성기어열의 구조에 대해서 강도 및 기어비에 대해서 분석하였다. 또한 동력 분배율에 따른 적용 가능한 기어비를 분석하였다. 증속기의 기어열의 설계는 1단과 2단은 유성기어열이며, 마지막 단은 원통기어로 설계하였다. 설계된 기어박스의 굽힘 강도 및 면압 강도는 GL(Germanisch Lloyd)에서 추천하는 값을 기준으로 하였고⁽⁸⁾, 활용 가능한 설계에 대해서는 기어비를 달리하며, 그에 따른 기어의 체적 및 중량을 비교하였다.

1) 한국기계연구원

E-mail : cguykh@kimm.re.kr

Tel : (042)868-7307 Fax : (042)868-7186

2) Stech&H

E-mail : bae.sth@gmail.com

3) 한양대학교

E-mail : thchong@hanyang.ac.kr

2. 동력 분배형 유성기어열의 구조

동력 분배형 유성기어열은 두 개의 입력 요소를 가지며, 1단과 2단의 입력 요소로 각각 동력을 분배하여 전달한다. 이 때, 기어비에 따라 동력 분배율이 달라지며, 단순 유성기어를 사용한 동일 증속기 기어트레인에 비해 각 단계에 대해서 적은 전달 토크를 받는 특징이 있다.

동력 분배형 유성기어열은 두 단의 단순 유성기어의 조합으로 이루어진다. 따라서 한 단의 단순 유성기어에서 증속비를 얻을 수 있는 구조는 3가지 타입이므로 동력 분배형 유성기어열은 9가지의 조합을 얻을 수 있다. 그러나 풍력발전용 증속기로 활용될 수 있는 구조는 기어비의 제한으로 인해 이 중 2가지만을 사용할 수 있다.

첫 번째 구조는 두 개의 입력 요소가 1단과 2단 모두 링기어로 동력이 전달되는 구조이며, 1단의 캐리어가 고정요소이다. 유성기어열의 구조는 Fig. 1, 속도 레버 해석법에 의한 각 요소의 속도 분석과 회전방향은 Table 1에 보인다.

두 번째 구조는 두 개의 입력 요소가 1단은 링기어, 2단은 캐리어로 동력이 전달되는 구조이며, 1단의 캐리어가 고정요소이다. 유성기어열의 구조는 Fig. 1, 속도 레버 해석법에 의한 각 요소의 속도 분석과 회전방향은 Table 1에 보인다.

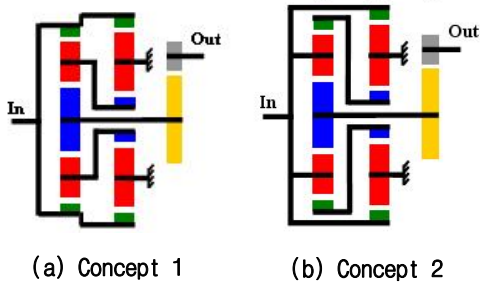
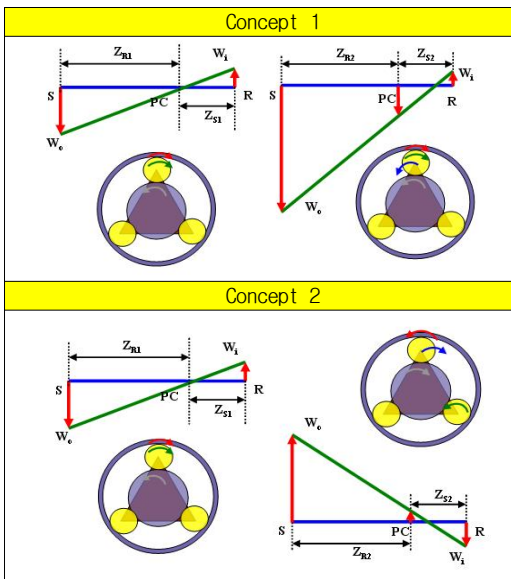


Fig. 1 Gear train of differential type

Table 1 Velocity lever method of gear train



각 단의 동력이 50:50으로 분배될 때, 가장 이상적일 수 있다. 그러나 동력 분배율을 이상적으로 가져가면, 원하는 기어비를 얻기 힘들다. 두 가지의 동력 분배형 유성기어열 구조의 동력 분배율과 전체 기어비를 분석하면 Fig. 2와 같은 그래프를 얻을 수 있다. 1단과 2단 모두 링기어로 입력동력을 전달하는 Concept 1 구조의 경우 Concept 2 구조와 비교하여 더 큰 기어비를 얻을 수 있다. Concept 1의 경우 기어비가 증가하면 동력 분배율이 작아지는 특징을 보이지만, Concept 2는 기어비가 증가하면 동력 분배율이 커지는 특징을 보인다. 그러나 Concept 2 구조가 동력 분배의 차이가 적은 영역에서 형성된다. 증속기의 입력 회전 속도를 14rpm으로 한정하고, 유성기어의 개수는 1단에서 7개를 사용하였고, 2단에서는 4개를 사용하여 얻은 결과이다. 입력 회전 속도에 따라 2단의 기어비가 변화할 수 있고, 각 단의 유성기어의 개수에 따라 얻을 수 있는 최대 기어비가 바뀌므로 전체 기어비는 변화할 수 있다.

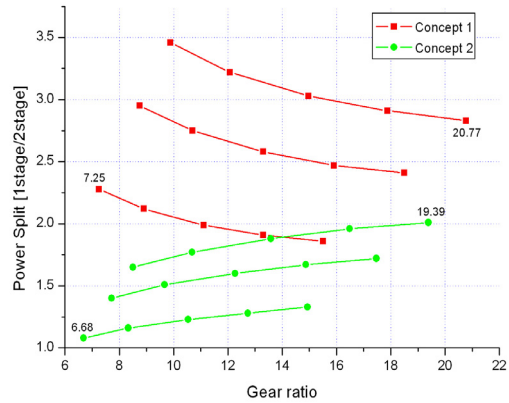


Fig. 2 Comparison of power-split and total gear ratio

3. 유성기어열의 설계 및 강도 평가

3.1 유성기어열의 설계

각각의 구조에 대하여 체적 및 중량을 비교하기 위하여 유성기어열을 설계하였다. Concept 1과 Concept 2에 대해서 전체 기어비가 90:1이 되는 설계와 120:1이 되는 설계 데이터를 얻었다. 고려한 동력 분배형 유성기어열의 적용 대상 풍력 발전기는 대형 해상 풍력용으로 적합한 약 3MW급이며, 입력 회전속도는 14rpm이다. 설계 수명은 약 20년에 해당하는 2×10^6 시간으로 하였다. 또한 풍력발전 시스템에서 요구하는 기어비를 얻기 위하여 동력 분배형 유성기어열과 한 단의 헬리컬 기어열로 구성하였다. 헬리컬 기어열은 각 기어비에 대해서 같은 제원으로 설계하여 동력 분배형 유성기어열의 비교하였다. 각 구조에서 얻어지는 기어비와 동력 분배율은 Table 2와 Table 3에 나타낸다.

Table 2 Power-split ratio

	Gear ratio	1 Stage	2 Stage
Concept 1	90	73.3	26.7
	120	74.1	25.9
Concept 2	90	65.5	34.5
	120	66.8	33.2

Table 3 Gear ratio

	Gear ratio	1 Stage	2 Stage	3 Stage	Total
Concept 1	90	-2.267	7.847	5.087	-90.46
	120	-2.387	8.095	6.250	-120.77
Concept 2	90	-2.267	-7.839	5.087	90.39
	120	-2.387	-8.081	6.250	120.57

3.2 기어의 강도 평가

ISO6336-2:2006⁽⁵⁾에 기준하여 기어의 접촉응력계산을 위한 물림피치원주상의 공칭 접촉 응력 (σ_{H0})과 시험기어에 대한 허용 접촉 응력수-접촉 내구 한도(σ_{Hlim})를 고려한 면압 강도의 허용 접촉 응력(σ_{HP})은 식(1)와 식(2)로 계산할 수 있다.

$$\sigma_{H0} = Z_H Z_E Z_\epsilon Z_\beta \sqrt{\frac{F_t}{d} \frac{u+1}{u}} \quad (1)$$

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim} Z_{NT}}{S_{Hmin}} Z_L Z_V Z_R Z_W Z_X \quad (2)$$

또한, 최대 접촉 응력(σ_H)과 허용접촉응력의 관계는 식(3)으로 표시된다.

$$\sigma_H = Z_B \sigma_{H0} \sqrt{K_A K_V K_{H\beta} K_{H\alpha}} \leq \sigma_{HP} \quad (3)$$

ISO6336-3:2006에 의한 기어의 굽힘강도계산을 위한 공칭이뿌리응력(σ_{F0})은 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{F0} = \frac{F_t}{b \cdot m_n} Y_F Y_S Y_\beta \quad (4)$$

또한, 굽힘강도의 허용 굽힘 응력(σ_{FP})은 시험기어에 대한 공칭 응력수 - 굽힘내구한도(σ_{Flim})를 고려하여 식(5)로 계산된다.

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Flim} Y_{ST} Y_{NT}}{S_{Fmin}} Y_{\delta rel T} Y_{Rel T} Y_X \quad (5)$$

최대 굽힘 응력(σ_F)과 허용 굽힘 응력(σ_{FP})의 관계는 식(6)으로 표시된다.

$$\sigma_F = \sigma_{F0} K_A K_V K_{F\beta} K_{F\alpha} \leq \sigma_{FP} \quad (6)$$

안전계수는 굽힘 강도에 대해서 1.5, 면압 강도에 대해서 1.2이상인 되도록 하였다. 이는 GL의 추천값이다. 또한 하중 분배 계수도 GL에서 추천하는 값을 사용하였다. GL에서 추천하는 하중 분배 계수는 Table 4에 보인다.

Table 4 Load distribution factor(GL)

	3	4	5	6	7
Load distribution factor	1.0	1.25	1.35	1.43	1.50

유성기어열의 설계에서 각 단의 유성기어의 개수는 7개(1단)와 4개(2단)로 결정하였다. 유성기어의 개수가 많을수록 각 유성기어의 하중 부담은 줄어들지만 기어비를 크게 가질 수 없다. 그러나 동력 분배형 유성기어열은 이러한 단점을 보완해 주는 구조이다. 유성기어의 개수를 적게 설계하면 기어비는 크게 할 수 있지만, 각 유성기어의 하중 부담이 커지게 되므로 기어박스의 크기의 동력 분배형에 비해 커지게 된다. 따라서 체적이 커지므로 최적의 설계가 되기 힘들다.

3. 유성기어열의 설계 및 강도 평가

3.1 유성기어열의 설계

풍력 발전 시스템용 기어박스의 크기를 비교하기 위해서 첫 번째 구조(Concept 1)와 두 번째 구조(Concept 2)에 대해서 체적 및 중량의 평가하였다. 체적은 1단과 2단의 경우에는 링기어의 피치원 지름에 대해서 체적을 결정하고 3단의 원통 기어열에서는 각 기어의 피치원 지름에 대해서 체적을 결정하였다. 중량은 체적의 결정방법과 다르게 각각의 기어에 대해서 그 값의 합으로 계산하였다. 따라서 체적은 기어박스의 크기의 지표가 되며, 중량은 기어박스의 제작에 필요로 하는 비용 및 유지 보수 문제의 지표가 된다.

일반적으로 Concept 1이 Concept 2에 비해 1단에 전달되는 동력이 크므로 1단의 체적 및 중량은 커지게 된다. 그러나 2단에서는 반대의 양상을 보인다.

Fig. 3와 4는 동력 분배형 유성기어열의 구조와 기어비에 대해서 설계된 데이터로부터 증속기의 체적과 중량을 비교한 것이다.

동력 분배율의 영향으로 인해 1단의 체적 및 중량은 Concept 1이 Concept 2보다 크고 무거운 것으로 나타났다. 그러나 2단에서는 Concept 1이 더 가볍고 작은 것을 확인하였다. 따라서 서로 가감이 발생하므로 전체(3단 제외) 체적 및 중량을 비교하였다.

기어비가 90:1인 경우에는 Concept 2가 Concept 1에 비해서 체적과 중량에 대해서 모두 유리한 설계 결과를 보였고, 기어비가 120:1인 경우에는 90:1인 경우와 반대로 Concept 1이 Concept 2보다 체적과 중량에 대해서 유리한 설계를 확인하였다.

또한 같은 유성기어열 구조에 대해서 기어비가 120:1인 경우에 비해서 90:1인 경우에 체적 및 중량 모두 작은 것으로 나타났다.

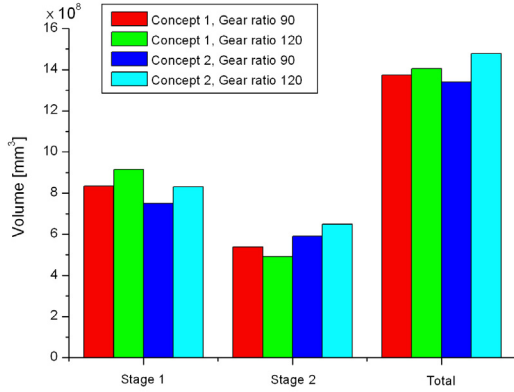


Fig. 3 Comparison of volume for gear ratio

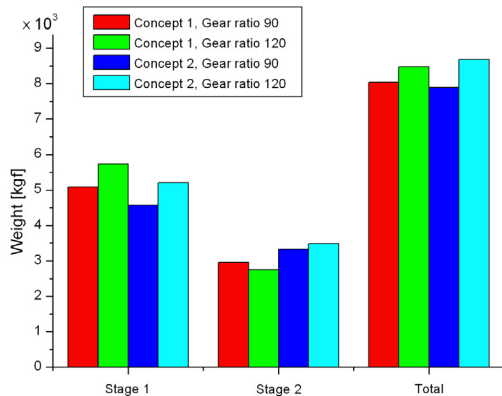


Fig. 4 Comparison of weight for gear ratio

5. 결론

대형 풍력발전용 증속기(동력 분배형 유성기어열)의 기어 강도와 체적 및 중량에 대한 구조 특성 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 1단과 2단 모두 링기어를 입력 요소로 갖는 구조는 큰 기어비를 가질 수 있으며, 링기어(1단), 캐리어(2단)를 입력 요소로 갖는 구조는 동력 분배율에서 좋은 특성을 보인다.

2. 증속기의 총 기어비가 클수록 체적 및 중량은 증가하는 것을 확인하였다.

3. 기어비가 90:1인 경우에 입력 요소가 1단(링기어), 2단(캐리어)인 구조가 체적 및 중량 특성에서 유리함을 보였고, 기어비가 120:1인 경우에는 입력 요소가 모두 링기어인 구조에서 유리한 설계임을 보였다.

따라서 위의 결과로부터 풍력발전용 증속기의 설계시 체적 및 중량을 고려할 때, 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구(결과물)는 지식경제부의 출연금으로 수행한 풍력핵심기술연구센터 사업의 연구결과입니다.

References

- [1] 이기훈, 박재희, 이근호, 남용윤, "기어열의 형태를 고려한 중대형 풍력 발전기용 기어박스의 설계 특성 연구" 2007 한국 신재생에너지 학회, 춘계학술대회 논문집
- [2] A, Heege, Y. Radovic, J. Betran, "Fatigue Load Computation of Wind Turbine Gearboxes by Coupled Structural, Mechanism and Aerodynamic Analysis," DEWI Marazin Nr. 28 pp.61-68, 2006.
- [3] J. Peeters, D. Vandepitte, P. Sas, "Flexible multibody model of a three-stage planetary gearbox in a wind turbine," Proceedings of ISMA2004, pp. 3924-3942, 2004.
- [4] Choi. Y. H, Park. G. H, Cho. J. H, Lee. I. W, Oh. S. U, "A Study on Optimum Design of 2MW Wind turbine Gearbox Using a Integrated Design Software." Spring Conference KSNRE, pp. 249-252, 2006.
- [5] ISO 6336, "Calculation of load capacity of spur and helical gears", 2006
- [6] AGMA 6123-A88, "Design Manual for Enclosed Epicyclic Metric Module Gear Drives", 1988
- [7] KISSsoft-hirware, rel 04/2006
- [8] Guideline for the Certification of Wind Turbines, Germanischer Lloyd, 2004