

기어열의 형태를 고려한 중대형 풍력 발전기용 기어박스의 설계 특성 연구

이 기훈¹⁾, 박 재희²⁾, 이 근호³⁾, 남 용운⁴⁾

Study on Design Characteristics of Gearbox for Wind Turbine Considering the Type of Gear Train

Kihun Lee, Jaehee Park, Geunho Lee, Yongyun Nam

Key words : Wind turbine(풍력발전기), Gear(기어), Volume(체적), Weight(중량), Planetary gear train(유성기어열)

Abstract : The gearbox for wind turbine have been increased the size by the wind turbine is needed to produce bigger power. The optimal sizing for gearbox is demanded because of limited space on the nacelle. The volume and weight for the gearbox are influenced especially for size of it. Therefore, the purpose of this study investigates the design characteristics considering types of gear train structure for optimizing the volume and weight of the gearbox.

1. 서 론

풍력 발전 시스템이 대형화 되어감에 따라 기어박스(gearbox)의 크기도 함께 대형화 되어가고 있다. 소형의 풍력 발전 시스템에서는 기어박스의 크기가 크게 고려되지 않았으나, 대형화됨에 따라 기어박스는 타워 위의 높고 좁은 공간에 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 제안이 되고 있다. 일반적으로 유성기어(planetary gear)를 포함하는 기어박스를 많이 활용하고 있고, 기어열의 설계 방법에 따라 여러 가지 형태를 구현할 수 있다.

본 연구에서는 일반 형태의 유성기어열(conventional type) 설계 방법과 디프렌셜 기어(differential type) 형태의 설계 방법에 대해서 비교하고 검토하였다. 또한 일반형과 디프렌셜 기어형 설계는 모두 3단의 기어열을 가지고 있고, 1단과 2단은 유성기어열이며, 마지막 단은 원통기어로 설계되었다. 비교된 풍력 발전 시스템용 기어박스는 일반형 기어박스과 디프렌셜형 기어박스에 대해서 발전 용량과 총 기어비의 변

화에 따라 이루어졌다. 허브를 통해 들어오는 동력은 일정한 값을 사용하였고, 하중 스펙트럼(load spectrum)을 사용하지 않았다. 위와 같은 과정에 의해서 얻어진 설계 결과로부터 기어박스를 구성하는 중요 요소인 기어의 체적(volume)과 중량(weight)을 비교하여 발전 용량에 따라 어떤 변화를 보이는지를 분석하였다. 기어열의 형태에 따라 갖는 특성에 대해서 분석하고 기어박스의 설계 방법을 제안하고자 한다.

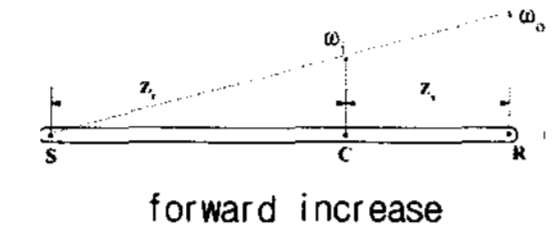
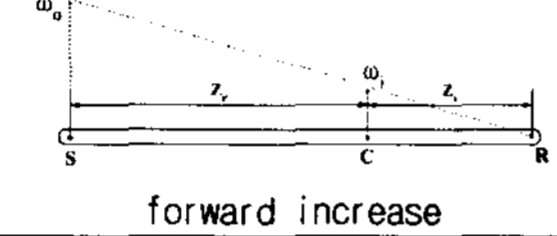
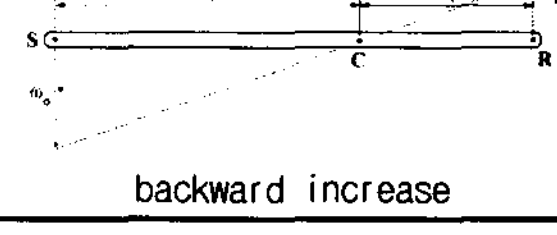
2. 유성기어열의 설계

유성기어열은 원통 기어열(cylindrical gear train)에 비해 같은 크기에서 많은 동력을 전달

-
- 1) 한국기계연구원
E-mail : cguykh@kimm.re.kr
Tel : (042)868-7307 Fax : (042)868-7186
 - 2) 한국기계연구원
E-mail : jhpark76@kimm.re.kr
Tel : (042)868-7993 Fax : (042)868-7186
 - 3) 한국기계연구원
E-mail : ghlee762@kimm.re.kr
Tel : (042)868-7161 Fax : (042)868-7186
 - 4) 한국기계연구원
E-mail : yynam@kimm.re.kr
Tel : (042)868-7413 Fax : (042)868-7418

할 수 있는 특징을 가지고 있다. 유성기어열은 선기어(sun gear), 유성기어(planet gear), 링기어(ring gear), 그리고 캐리어(carrier)로 구성되며, 각 요소의 입 출력 및 고정되는 요소의 결정에 따라 6개의 기어비를 가질 수 있다. 그 중 증속을 하는 풍력 발전 시스템용 기어박스에 사용될 수 있는 기어열은 3가지이며, Table 1에 보인다.

Table 1 Determination of gear ratio

Type	Lever Analogy
input:carrier fixed:sun gear $i = \frac{z_r}{z_r + z_s}$	 forward increase
input:carrier fixed:ring gear $i = \frac{z_s}{z_r + z_s}$	 forward increase
input:ring gear fixed:carrier $i = -\frac{z_s}{z_r}$	 backward increase

유성기어열의 종류는 일반적으로 4종류로 나뉘며, 첫 번째는 기본 유성기어열로서 선기어, 캐리어, 링기어가 모두 1개씩을 가지는 형태이다. 두 번째는 복합 유성기어열로서 2단의 기어열을 설계할 때, 한 개의 유성기어의 축에 크기가 다른 2개의 유성기어가 있다. 세 번째로 커플 유성기어열(coupled type)은 두 개 또는 이상의 유성기어가 서로 인접하여 배열을 가지는 것이 특징이다. 네 번째로 디프렌셜 유성기어열은 2단의 기어열에 2개의 입력을 가지며 2단에서는 고정되는 요소가 없는 것이 특징이다. 각각의 유성기어열에 대해서 Fig. 1에 나타낸다.

3. 풍력 발전 시스템용 기어박스의 설계

풍력 발전 시스템용 기어박스는 일반형 유성기어열의 설계와 디프렌셜형의 유성기어열의 설계에 대해 적용하였다. 체적과 중량을 비교하기 위하여 설계시 기어의 굽힘 강도와 면압 강도를 고려하였으며, 그 계산은 ISO 6336에 준하여 계산하였다. 굽힘 강도 및 면압 강도의 최소 요구 안전계수 기준은 GL에서 인증하는 값을 사용하였다. 기어의 재질은 침탄 처리된 강으로 가정하였고, 기어의 정밀도는 선기어와 유성기어에 대해서 ISO 6등급으로 설정하고, 링기어에 대해서 ISO 8등급으로 설정하였다. 요구되는 설계 수명은 2×10^6 시간으로 약 20년이다.

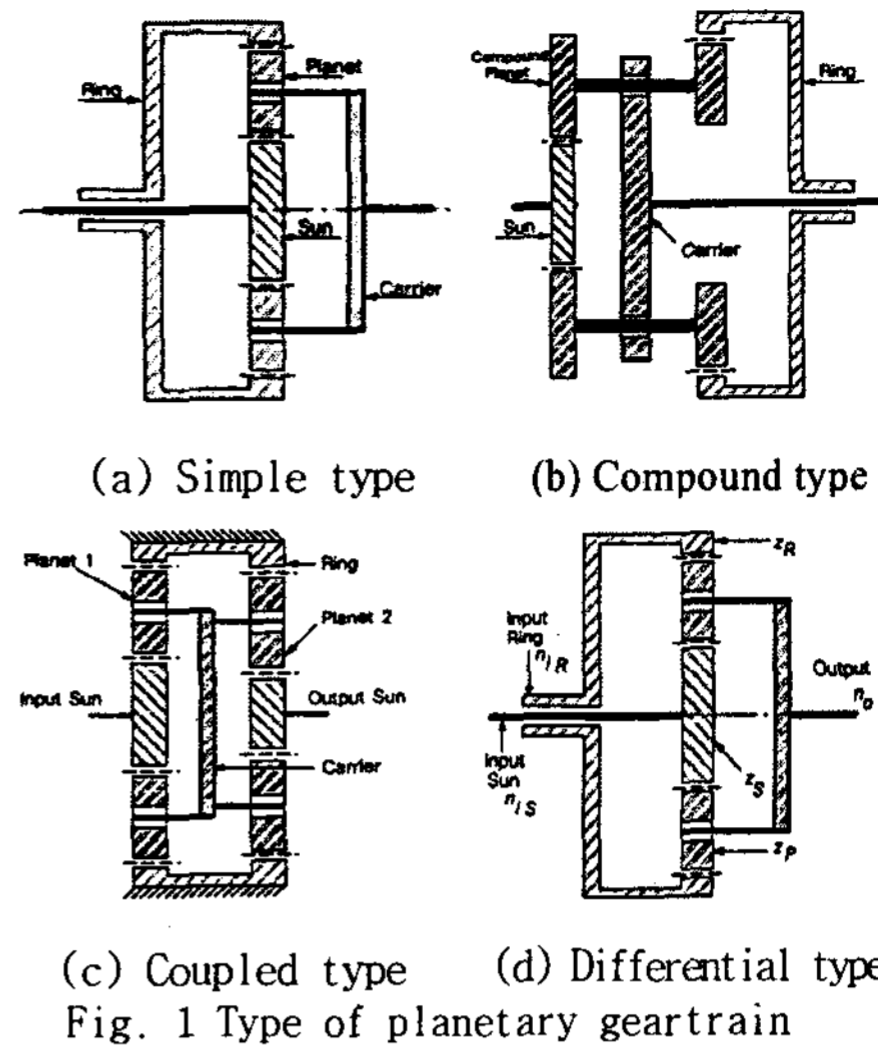


Fig. 1 Type of planetary geartrain

3.1 일반형 기어박스

일반형 기어박스(conventional type)는 1단과 2단은 유성기어열로 구성되며, 서로 독립적인 유성기어열이 연결된 형태이다. 1단과 2단 모두 캐리어로 입력동력을 받아 선기어로 동력을 출력하는 형태이며 유성기어의 개수는 1단은 5개, 2단은 3개로 풍력 발전 시스템용 기어박스 설계시 가장 많이 적용되는 것으로 결정하였다. 3단은 헬리컬 기어(helical gear)를 사용하였으며, 이러한 설계로 부터 얻은 기어 구조도는 Fig. 2와 같다.

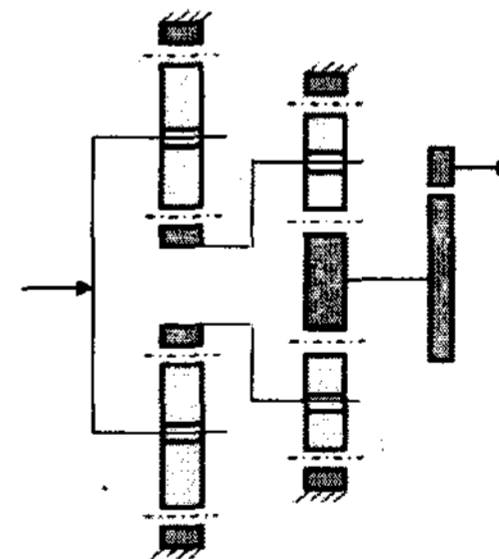


Fig. 2 Schematic of conventional type.

발전 용량에 따른 설계시 압력각(pressure angle), 비틀림각(helix angle), 각 기어의 잇수(number of teeth)는 고정 값으로 설정하였고, 강도에 많은 영향을 미치는 모듈(module)과 치폭(facewidth)을 가지고 강도를 만족시키도록 하였다. 총 기어비가 다른 경우에도 같은 방법으로 설계 제원을 찾았고, 기어비를 변화시키기 위해 각 기어의 잇수만을 조절하였다. 비틀림각의 경우, 각의 변화에 따라 크게 강도가 향상이 되지 않으므로, 비틀림각이 0° 인 평기어를 사용하였다.

3.2 디프렌셜형 기어박스

디프렌셜 유성기어열은 두 개의 단으로 하나의 기어열의 형태를 갖는 것이 특징이며, 입력을 받는 요소가 두 개이다. 따라서 하중을 분배하는 장점을 가진다. 허브로부터 받는 입력 동력은 1단의 링기어와 2단의 캐리어로 전달한다. 유성기어의 개수는 1단에서 7개, 2단에서 4개를 사용하였다. 디프렌셜 형태를 가지는 기어박스의 기어 구조도는 Fig. 3과 같다.

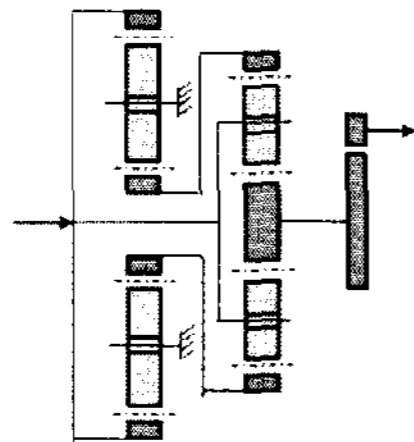


Fig. 3 Schematic of differential type

디프렌셜 형태의 기어박스의 설계시 압력각은 굽힘강도에서 좋은 성능을 가지기 위해 25° 를 사용하였고, 비틀림각은 단순 유성기어열과 같은 0° 를 사용하였다. 총 기어비에 따른 각 단의 기어 잇수는 같은 값을 사용하였다.

4. 기어박스의 체적 및 중량 평가

풍력 발전 시스템용 기어박스의 설계는 일반형 기어박스과 디프렌셜형 기어박스에 대해서 3가지의 기어비에 대해서 고려하였다. 각각의 기어열의 형태에 대한 3가지 경우의 총 기어비 (70:1, 90:1, 120:1)는 Table 2와 같이 분할하였다.

풍력 발전 시스템용 기어박스의 크기를 비교하기 위해서 체적 및 중량의 평가 하였다. 체적은 1단과 2단의 경우에는 링기어의 이뿌리원 지름에 대해서 체적을 결정하고 3단의 원통 기어열에서는 각 기어의 피치원 지름에 대해서 체적을 결정하였다. 중량은 체적의 결정방법과 다르게 각각의 기어에 대해서 그 값을 계산하였다. 따라서 체적은 기어박스의 크기의 지표가 될 수 있으며, 중량은 기어박스의 제작에 필요로 하는 비용의 지표가 될 수 있다. 그 결과는 Table 3-4와 Fig. 4-7에 정리하였다.

Table 2 Gear ratio

		1 Stage	2 Stage	3 Stage
Conventional type	70:1	3.27:1	4.61:1	4.78:1
	90:1	3.47:1	4.90:1	5.43:1
	120:1	3.77:1	5.21:1	6.05:1
Differential type	70:1	-2.18:1	-7.28:1	4.52:1
	90:1	-2.18:1	-7.95:1	5.30:1
	120:1	-2.32:1	-7.97:1	6.45:1

Table 3 Volume and weight of conventional type

	Volume [mm ³]		
	70:1	90:1	120:1
0.75MW	4.70×10^8	4.89×10^8	5.13×10^8
2MW	1.22×10^9	1.34×10^9	1.37×10^9
3MW	1.84×10^9	1.97×10^9	2.05×10^9
5MW	3.17×10^9	3.33×10^9	3.48×10^9
	Weight [kgf]		
	70:1	90:1	120:1
0.75MW	2.18×10^3	2.35×10^3	2.55×10^3
2MW	5.75×10^3	6.42×10^3	6.84×10^3
3MW	9.08×10^3	9.97×10^3	1.02×10^4
5MW	1.49×10^4	1.61×10^4	1.75×10^4

Table 4 Volume and weight of differential type

	Volume [mm ³]		
	70:1	90:1	120:1
0.75MW	3.77×10^8	3.86×10^8	3.76×10^8
2MW	1.01×10^9	1.04×10^9	1.00×10^9
3MW	1.51×10^9	1.56×10^9	1.53×10^9
5MW	2.55×10^9	2.62×10^9	2.55×10^9
	Weight [kgf]		
	70:1	90:1	120:1
0.75MW	2.17×10^3	2.24×10^3	2.28×10^3
2MW	5.81×10^3	6.03×10^3	6.07×10^3
3MW	8.67×10^3	9.03×10^3	9.28×10^3
5MW	1.46×10^4	1.51×10^4	1.54×10^4

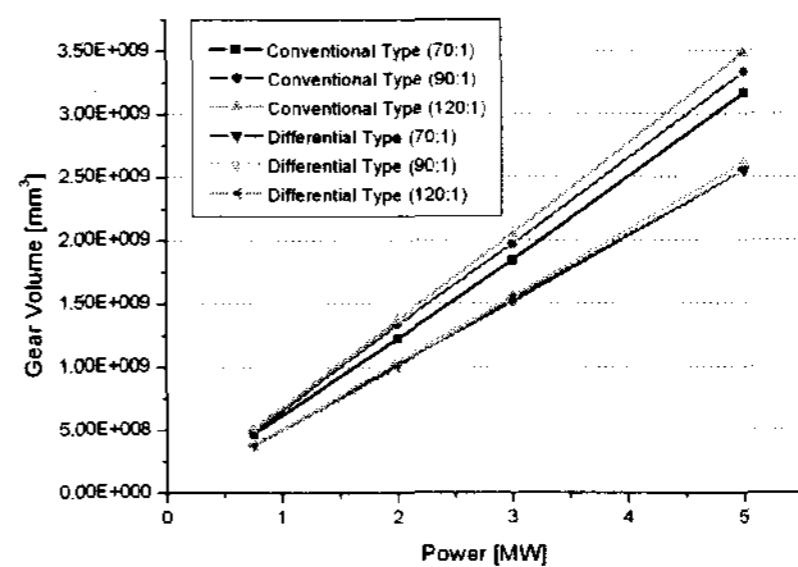


Fig. 4 Volume variation for transmitted power

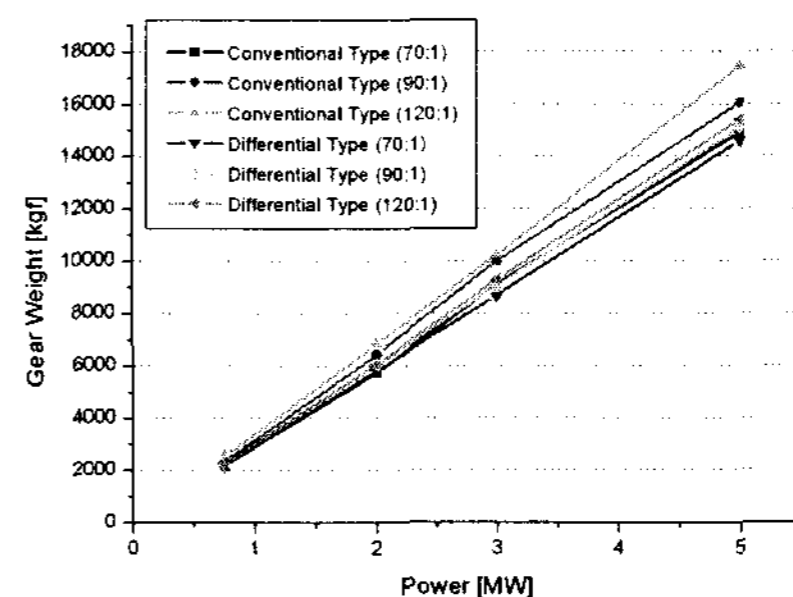


Fig. 5 Weight variation for transmitted power

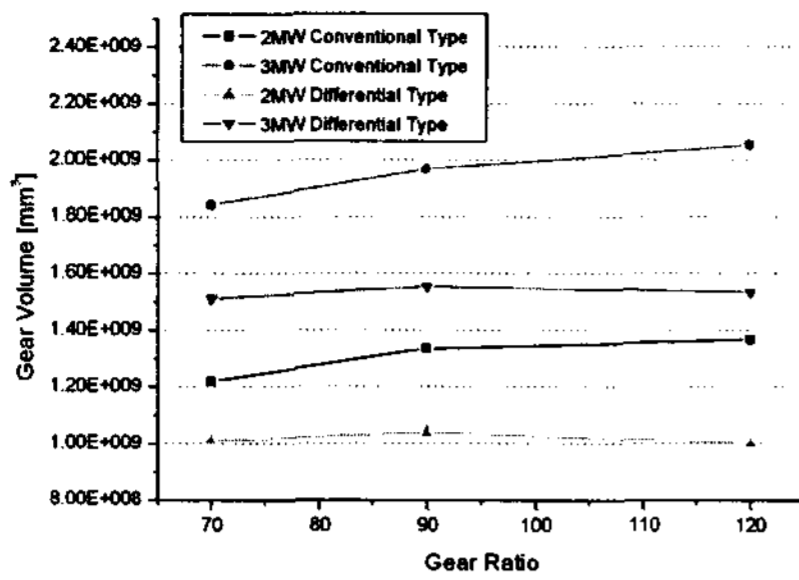


Fig. 6 Volume variation for gear ratio

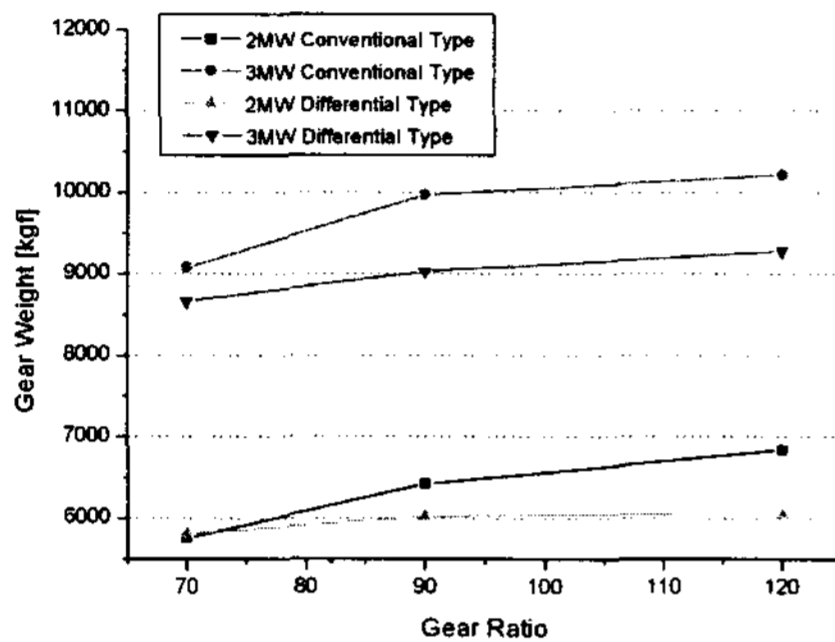


Fig. 7 Weight variation for gear ratio

결과를 살펴보면 발전 동력이 커짐에 따라 기어의 체적 및 중량이 모두 일정하게 증가함을 볼 수 있다. 기어비의 차이에 따라서 체적이 70:1의 기어비보다 90:1의 기어비에서 일반형 기어박스의 경우 6.48%, 120:1의 기어비에서 10.65% 정도 증가함을 보였다. 디프렌셜형 기어박스는 70:1의 기어비보다 90:1의 기어비에서 2.85% 정도 증가함을 보였다. 따라서 일반형 기어박스가 디프렌셜형 기어박스보다 많은 체적 변화를 보였다. 중량의 경우, 일반형 기어박스와 디프렌셜형 기어박스가 70:1의 기어비보다 90:1과 120:1의 기어비에서 각각 9.35%와 16.43%, 그리고 3.65%와 5.53%로 증가함을 보였다. 또한 일반형 기어박스와 디프렌셜형 기어박스를 비교 하였을 때, 체적은 22.16% 감소하였고, 중량은 6.27% 감소하였다. 그러나 기어비가 70:1과 120:1의 체적 및 중량 변화를 보면, 70:1의 경우 18.63%이고 120:1은 1.48%이다. 그리고 120:1에서는 26.45%와 10.73%로 기어비가 커짐에 따라 체적과 중량 변화가 큰 것으로 나타난다.

또한 체적 및 중량을 줄이기 위하여 플렉시블 핀을 사용하는 방법이 있다. 이러한 경우 유성기어들 사이의 하중 분포가 원활하여 기어의 강도 설계에 활용할 수 있다. 이러한 경우 하중 분포 계수는 유성기어의 개수에 따라 적용하는데, 7개일 경우 1.5 대신에 1.2의 값을 사용하고, 4개의 경우 1.2 대신에 1.08을 값을 사용한다. 이 때, 체적은 일반형 기어박스보다 플렉시블 핀을 사용한 디프렌셜형 기어박스가 32.1% 정도 감소하고 중량의 경우 21.5% 정도 감소하는 결과를 얻을 수 있다.

Table 5 Volume and Weight for flexible pin (3MW)

Type	Volume [mm ³]	Decrease	Weight [kgf]	Decrease
Conventional	1.97×10^9		9.97×10^3	
Differential	1.56×10^9	21.0%	9.03×10^3	9.39%
Differential (Flexible pin)	1.34×10^9	32.1%	7.82×10^3	21.5%

4. 결론

중대형 풍력 발전 시스템용 기어박스의 발전 용량 및 전체 기어비에 대하여 일반형 기어박스와 디프렌셜형 기어박스의 비교 분석하였다. 그 결론은 다음과 같다.

1. 기어비가 커짐에 따라 체적 및 중량이 증가하며, 발전 용량에 따라 체적 및 중량이 일정하게 증가함을 확인하였다.
2. 풍력 발전 시스템의 발전 용량이 커짐에 따라 일반형 기어박스와 디프렌셜형 기어박스의 체적 및 중량의 차이가 커짐을 확인하였다.
3. 일반형 기어박스와 비교하여 디프렌셜형 기어박스가 체적과 중량 면에서 더 좋은 결과를 보였고, 유성기어의 축을 플렉시블 핀을 사용할 경우 일반 유성기어열을 사용한 경우보다 감소량이 더 커지는 결과를 얻었다.

따라서 위의 결과로부터 풍력 발전 시스템용 기어박스의 설계시 체적 및 중량을 고려할 때, 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] A. Heege, Y. Radovicic, J. Betran, "Fatigue Load Computation of Wind Turbine Gearboxes by Coupled Structural, Mechanism and Aerodynamic Analysis," DEWI Marazin Nr. 28 pp.61-68, 2006.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] ISO 6336, "Calculation of load capacity of spur and helical gears", 1996
- [5] AGMA 6123-A88, "Design Manual for Enclosed Epicyclic Metric Module Gear Drives", 1988