

굴삭기 유압 주행시스템의 복합유성기어 시스템 설계개선 연구

Design Improvement for a Planetary Gear System in Hydraulic Drive System

신유인¹, 윤찬현², 한성길³, 박성규³, 송철기⁴✉
Yoo In Shin¹, Chan Heon Yoon², Sung Gil Han³, Seong Gyu Park³, and Chul Ki Song⁴✉

1 경상대학교 공학연구원 (Engineering Research Institute, Gyeongsang National University)

2 (주)영동테크 (Young Dong Tech Co. Ltd.)

3 경상대학교 대학원 기계설계학과 (Graduate School, Department of Mechanical Design and Production Engineering, Gyeongsang National University)

4 경상대학교 기계공학부, 공학연구원 (School of Mechanical Engineering, Engineering Research Institute, Gyeongsang National University)

✉ Corresponding author: cksong@gnu.ac.kr, Tel: +82-55-772-1633

Manuscript received: 2015.11.20. / Revised: 2016.3.11. / Accepted: 2016.7.11.

Planetary gear systems have several advantages over traditional gearboxes with parallel axis gear shafts. The planetary gearbox arrangement also creates greater stability due to the even distribution of mass and increased rotational stiffness. However, gears in planetary gear systems occasionally have a short-life due to wear and breakage by repetitive load during operation time. In this study, we evaluated variables of the strength design for each part and conducted structural analysis of seven cases of the planetary gear system. The result of structural analysis was applied to shape optimization method and obtaining the weight lightening designed value. Subsequently, the planetary gear system was performed to ensure the durability of gears during operation time with miner's rule.

KEYWORDS: Hydraulic drive system (유압주행시스템), Planetary gear system (유성기어 시스템), Shape optimization (형상최적화), Durability analysis (내구해석)

1. 서론

현재 건설 중장비 산업시장을 변화시키는 주요 원인은 소비자 환경변화, 시장의 환경변화, 환경 규제 및 에너지 문제를 들 수 있다. 특히 강화 되는 환경규제 및 에너지 문제는 기존 건설 중장 비의 동력전달 장치와 같은 동력계통에 대한 효율 증대와 경량화 등을 요구하고 있다.

건설 중장비 동력전달 장치는 Fig. 1과 같이 유압주행디바이스를 적용하며, 유압모터와 유성기어

시스템의 조합으로 구성되어 있다.

복합유성기어 시스템은 내부적으로 기계적인 동력전달이 복잡하고, 제한된 공간 내에서 높은 출력비를 요구하는 장치에 응용되는 기술이다. 하지만 아직 국내에서는 이렇다 할 연구가 진전 되지 않고 있다.

Wu와 Zhang의 연구에서 다물체 유한요소해석 기법을 이용하여 고속에서의 일반적인 기어해석과 유성기어 시스템에 대한 연구를 하였으나, 기어의 손상량에 대한 내구성 부분은 고려하지 않았다.^{1,2}

본 연구에서는 유압 주행시스템에 적용되는 복합유성기어 시스템의 기술적 수준을 향상시키고 경량화 및 효율이 높은 제품 개발에 따르는 해결 방법을 찾기 위해 기존의 일체형 해석방법을 구현하지 않고 구성품을 세분화하여 각각의 구조해석을 수행한다. 또한 구조해석 결과를 형상최적화 기법에 적용하고 경량화된 설계 값을 구한다. 마지막으로 요구수명에 대한 내구해석을 통해 복합유성기어 시스템의 개선된 설계 값을 도출한다.

2. 복합유성기어 시스템 구조해석

본 연구에 적용된 복합유성기어 시스템은 Fig. 2에서와 같이 총 2열의 복합유성기어 세트로 구성되어 있다.

1열 유성기어세트는 1개의 드라이브기어 (Drive Gear)와 1개의 링기어 (Ring Gear), 드라이브 기어와 링기어 사이 물리게 되는 3개의 유성기어 (Planetary Gear)의 조합으로 구성되어 있다. 또한 3개의 유성기어들은 캐리어 (Carrier)에 의해 고정되고, 이 캐리어를 통해 드라이브 기어를 중심으로 회전하게 된다.

2열 유성기어세트는 1개의 선기어와 4개의 유성기어, 1개의 링기어 조합으로 구성된다. 여기서 1열 유성기어세트와 2열 유성기어세트는 1개의 링기어를 공유한다. 또한 4개의 유성기어들은 플랜지홀더 (Flange Holder)의 앞부분에 고정되며, 이 플랜지홀더에 의해 4개의 유성기어들은 선기어를 중심으로 회전 한다.

Table 1에서 복합유성기어를 구성하는 각각의 기어의 명칭과 재료를 나타내고 있으며, Table 2에서 연구에 활용한 복합유성기어의 제원을 나타내고 있다.

복합유성기어의 구조해석은 각각의 조립형태에 따라 Case 1에서 Case 7까지 구성하여 해석을 수행하며, 각각의 조립형태는 아래 Table 3과 같다.

2.1 유한요소 생성 및 경계조건

구조해석을 위해 일반적으로 사용되는 솔리드 요소는 육면체 (Hexahedron), 오면체 (Pentahedron), 사면체 (tetrahedron)의 세가지 유형으로 나누어 진다. 육면체나 오면체가 요소망을 쉽게 생성할 수 있는 형상이나 기어에 대한 유한요소 생성에는 적합하지 않음으로 본 연구에서는 사면체 요소망으로 유한요소를 생성하였다.

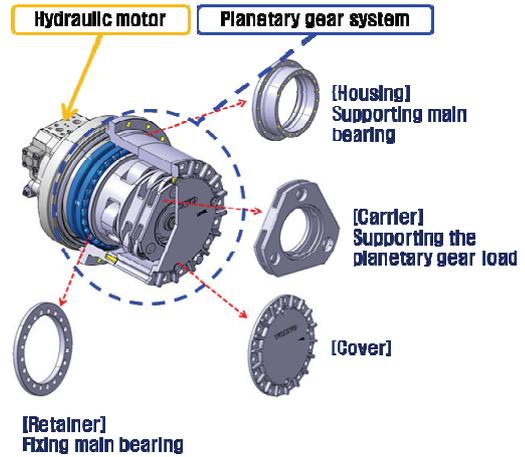


Fig. 1 Planetary gear system

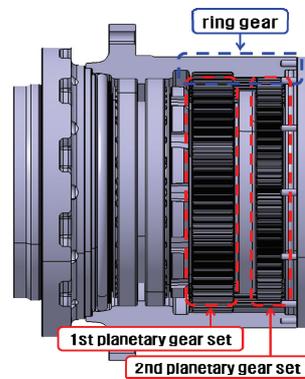


Fig. 2 Planetary gear system

Table 1 Primary components of the double planetary gear system

1 st planetary gear set		2 nd planetary gear set	
Component	Material	Component	Material
Drive gear	SCM420H	Flange holder	GCD500
Ring gear (Housing)	GCD700	2 nd planetary gear (4ea)	SCM420H
Carrier	GCD500	Sun gear	SCM420H
1 st planetary gear (3ea)	SCM420H	2nd trust plate	SPCC
1 st trust plate	SPCC		

또한 복합유성기어 시스템에 작용하는 토크는 유압모터에 의해 발생하는 최대 토크인 210.5 N·m이며, 각각의 구성형태에 따라 달라지는 기어 비를 적용하여 대입하였다. 그리고 기어 재료에 대한 물성 값을 Table 3에 나타내었다.

Table 2 Specifications of the planetary gear system

	1 st			2 nd		
	Sun	Planet	Ring	Sun	Planet	Ring
Number of teeth	10	35	83	14	33	83
Width of teeth (mm)	25	21.5	81.5	51	35	81.5
Module	2.75					
Pressure angle (°)	27					
Reduction gear ratio	53.706					

Table 3 Components of the case

Mark	Components
Case 1	Drive gear + 1 st planetary gear (3ea)
Case 2	Drive gear + 1 st planetary gear (3ea) + Ring gear
Case 3	Sun gear + Carrier + 1 st trust plate
Case 4	Sun gear + 2 nd planetary gear (4ea)
Case 5	Sun gear + 2 nd planetary gear (4ea) + Ring gear
Case 6	Flange holder + 2 nd trust plate
Case 7	1 st planetary gear (3ea) + Drive gear + Shaft drive

Table 4 Material properties

Material	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m ³)
SCM420H	207	792	0.3	7,800
GDC500	172	414	0.37	7,200

Table 5 Results of structural analysis

Mark	Maximum equivalent stress (MPa)	Total deformation (mm)	Safety factor
Case 1	376.95	0.13 (Drive gear)	2.1
Case 2	396.05	0.13 (Sun gear)	1.99
Case 3	400.31	0.047 (1 st trust plate)	1.03
Case 4	674.28	0.027(Sun gear)	1.17
Case 5	620.84	0.048 (Sun gear)	1.27
Case 6	283.31	0.04 (Flange holder)	1.46
Case 7	723.54	0.19 (Shaft drive)	1.09

2.2 복합유성기어 시스템 구조해석 결과

복합유성기어 시스템 구성품의 각각의 조립형태에 따른 구조적 안전성을 Table 5와 같이 등가응력과 변형량으로 확인하였으며, 또한 이를 안전율

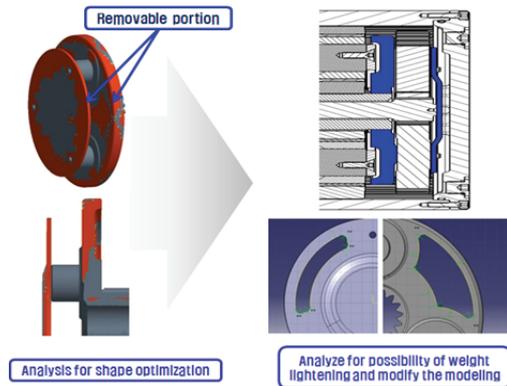


Fig. 3 Modified modeling using shape optimization

Table 6 Possibility of weight lightening

Mark	Possible to weight lightening	Impossible to weight lightening
Case 1	○	-
Case 2	-	○
Case 3	○	-
Case 4	-	○
Case 5	-	○
Case 6	○	-
Case 7	-	○

로 변환하여 해석하였다.

결과를 살펴보면 복합유성기어의 주요 구성품에 발생하는 최대 등가응력은 전반적으로 항복응력 이하인 것을 확인할 수 있다.

3. 복합유성기어 시스템 형상 최적화

3.1 형상최적화 경계조건

형상최적화 해석은 구조해석 결과를 이용하므로 모든 경계조건은 구조해석 때와 동일하다. 또한 경량화를 위한 최대 범위는 기존 질량에서 ± 30% 범위에서 가능하도록 설정한다.

3.2 형상최적화 해석 결과

형상최적화 해석을 통해 주어진 경계조건에 대하여 경량화가 가능한 부분은 Fig. 3에서와 같이 오렌지색으로 표시된다. 이 부분은 질량을 제거하여도 구조물의 구조적 안정성에 크게 영향을 주지 않는 부분이다. 또한 기계적 요소에 의해 경량화가 가능한지 Table 6과 같이 판단한다.

Table 7 Results of applied shape optimization

Mark		Equivalent stress (MPa)	Total deformation (mm)	Mass (kg)	Decreasing mass (kg)
Case 1	Standard	376.95	0.13	3.47	0.59 (17%)
	Modified	362.07	0.13	2.88	
Case 3	Standard	400.31	0.047	4.13	0.61 (14.7%)
	Modified	410.77	0.048	3.52	
Case 6	Standard	283.31	0.04	11.01	0.25 (2.4%)
	Modified	230.79	0.04	10.75	

이러한 과정을 거쳐 경량화된 형상에 대한 구조해석 결과 값을 살펴보면 초기 설계의 응력분포 값과 비슷한 경향을 나타남을 확인 할 수 있다. 결과 값은 Table 7에서 나타내었다. 또한 복합유성기어 시스템 형상최적화 결과 초기 모델질량 14.16 kg 대비 약 10% 감소시킨 12.74 kg의 경량화 설계 값을 구하였다.

4. 복합유성기어 시스템 내구해석

4.1 내구해석 경계조건

복합유성기어 시스템의 내구해석을 위한 구속 조건은 Fig. 4와 같으며, 유압모터로부터 동력을 전달받아 53.706의 감속비로 출력된다.

복합유성기어 시스템에 적용되는 유압모터의 1속과 2속의 성능은 Fig. 5와 같다.

또한 복합유성기어 시스템의 내구해석을 위해 소형 굴삭기용 주행구동 유니트³ 규격3을 적용하였으며, 연속부하내구시험에 적용 회전속도는 1속 최고속도에 대한 백분율 88%, 압력은 최고사용압력에 대한 백분율 88%로 설정하였다.⁴ 그리고 1속과 2속의 사용빈도가 1:1이므로 1속 500시간, 2속 500 시간으로 총 요구 작동시간 1,000시간으로 설정하였으며, Table 8에 정리하여 나타내었다.

4.2 내구해석 설계변수 선정

복합유성기어 시스템의 요구수명 1,000시간에 만족하는 설계 안을 찾기 위해 몇 가지 설계 변수를 Table 9와 같이 선정하였다. 설계 변수는 기어의 금형을 수정하지 않는 제약 범위 내에서 정해져야 한다. 이러한 제약 조건을 준수 하여 선정 할 수 있는 설계변수는 크게 기어의 소재(SCM420H, SCM822H) 변경과 치폭의 변화를 들 수 있다.

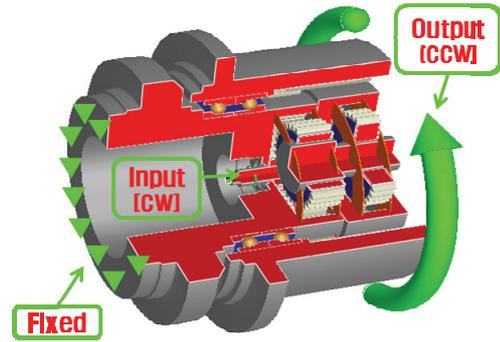


Fig. 4 Boundary conditions for durability analysis

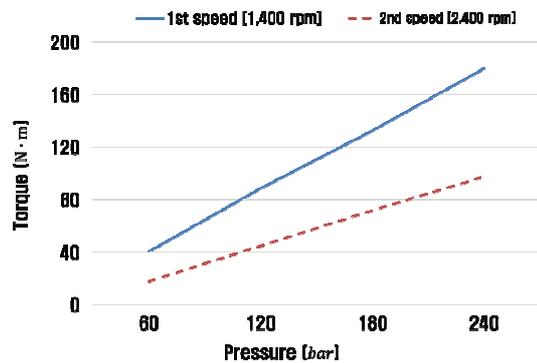


Fig. 5 Performance curves of hydraulic motor

Table 8 Load conditions in durability analysis

	Torque (N·m)	Speed (rpm)	Duration (hr)
1 speed	185.24	1,139	500
2 speed	107.13	2,117	500

Table 9 Design variables for the double planetary gear system

Mark	1 st planetary gear set		2 nd planetary gear set	
	Tooth width (mm)	Material	Tooth width (mm)	Material
Case 1 (Standard)	21.5	SCM420H	35	SCM420H
Case 2	21.5	SCM822H	35	SCM822H
Case 3	22.5	SCM420H	36	SCM420H
Case 4	22.5	SCM822H	36	SCM822H

4.3 내구해석 결과

복합유성기어 내구해석은 Miner의 누적손상법³을 적용하여 수행하였다. 내구수명 해석을 통해

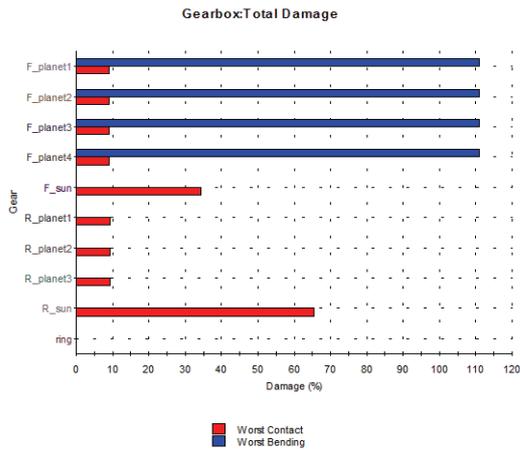


Fig. 6 Bending and contact stress damage of case 1

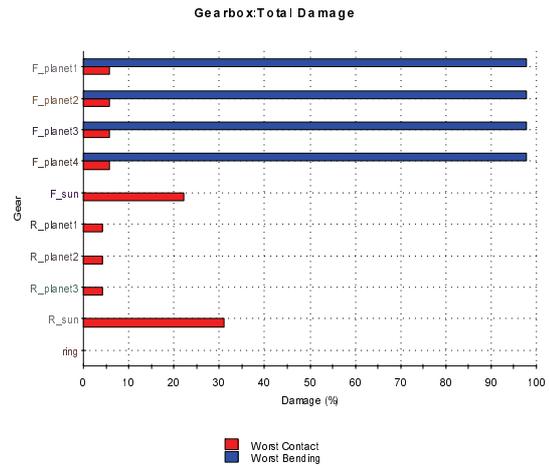


Fig. 9 Bending and contact stress damage of case 4

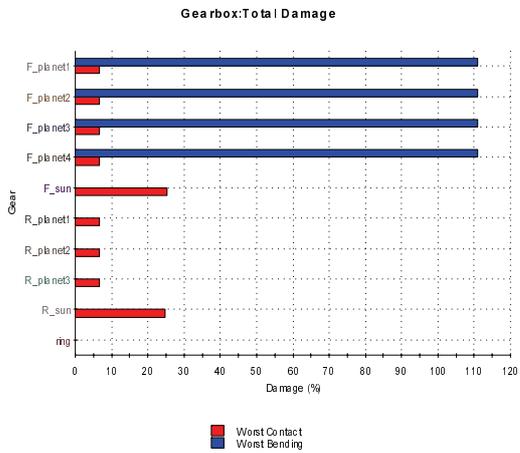


Fig. 7 Bending and contact stress damage of case 2

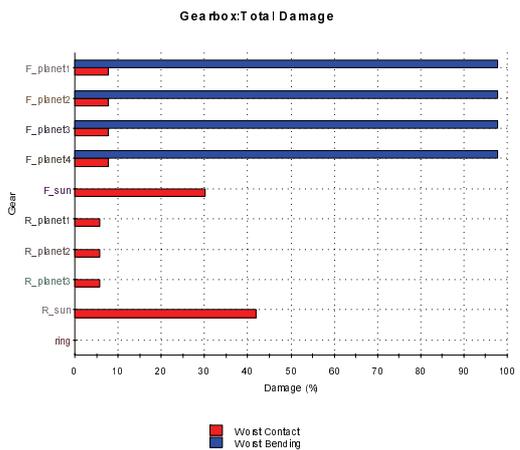


Fig. 8 Bending and contact stress damage of case 3

Table 10 Durability analysis results

Mark	Gear		Pass/Fail	Combined life (hr)
Case 1 (Standard)	1 st	Sun	Pass	1,526
		Planetary	Pass	1.1e4
	2 nd	Sun	Pass	2,909
		Planetary	Fail	901
Case 2	1 st	Sun	Pass	4,040
		Planetary	Pass	1.4e4
	2 nd	Sun	Pass	3,955
		Planetary	Fail	901
Case 3	1 st	Sun	Pass	2,385
		Planetary	Pass	1.7e4
	2 nd	Sun	Pass	3,328
		Planetary	Pass	1,023
Case 4	1 st	Sun	Pass	3,214
		Planetary	Pass	2.3e4
	2 nd	Sun	Pass	4,524
		Planetary	Pass	1,023

Figs. 6부터 9와 같이 각 기어별 손상량에 대한 결과 값을 도출하였다. Case 1의 결과를 나타낸 Fig. 6에서 행성기어의 손상량이 높은 것을 확인할 수 있다. 이것은 유성기어 시스템이 일반 기어 배열보다 더 많은 잇점을 가지고 내접과 외접의 기어 물림이 동시에 일어나기 때문으로 사료된다. Case 2부터 4에서도 Case 1과 동일한 손상량 양상을 가지는 것을 확인하였다.

각 기어별 데미지에 따른 예측 내구 수명은 Table 10에 정리하였다. 치폭 증가에 따른 2열 행

성기어의 손상량 감소로 내구 수명이 증가됨을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 복합유성기어 시스템의 개선된 설계 값을 도출하기 위하여 구성품을 세분화 하여 구조해석 하였다. 또한 형상최적화 기법을 적용하여 경량화된 설계 값을 구하였다. 개선된 설계안을 도출하기 위해 경량화된 설계 값에 대한 변수를 선정하고 내구수명 해석을 하였으며, 결론은 다음과 같이 요약 정리 할 수 있다.

(1) 복합유성기어 시스템의 구성 품을 7가지 형태로 구성하여 기본설계에 대한 안정성을 판단 하였으며, 형상최적화 기법을 적용하여 경량화된 값을 찾았다.

(2) 형상최적화 기법을 통해 경량화된 복합유성기어 시스템은 기존 14.16 kg 대비 약 10% 질량을 감소시킨 12.74 kg의 결과를 나타내었다.

(3) 경량화된 복합유성기어 시스템의 내구 수명을 확보하기 위해 4가지 설계모델을 선정하였으며, 요구수명 1,000시간을 확보 할 수 있는 개선된 설계 값을 도출하였다.

본 연구를 통해 유압주행시스템의 경량화 및 고효율화를 실현 할 수 있음을 확인하였으며, 아울러 안정성 있는 설계를 명확히 하였다. 또한 경량화된 설계의 안전율을 높이는 방법이 제시되었다.

후 기

본 연구는 2013년 지역혁신 인력양성사업과 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역 신 산업선도 인력양성사업 성과임 (NRF-2016H1D5A1910421).

REFERENCES

1. Wu, X., Meagher, J., and Sommer, A., "A Differential Planetary Gear Model with Backlash and Teeth Damage," Proc. of the 29th International Modal Analysis Conference, pp. 203-215, 2011.
2. Son, Y., Bae, H., Tak, S., Zhang, Q., and Lyu, S., "A Study on the Prediction and Measurement of Transmission Error for High Speed Gear," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 25, No. 12, pp. 20-26, 2008.

3. RS B 0095, "Track Drive Unit for Mini Excavator," 2005.
4. AGMA Standard, ANSI/AGMA 2001-D04, pp. 9-38, <http://wp.kntu.ac.ir/asgari/AGMA%202001-D04.pdf> (Accessed 25 September 2016)