

## 1.7톤급 소형 굴착기용 주행 감속기의 복합 유성기어류에 대한 강도 평가

남석주<sup>1</sup> · 배명호<sup>2</sup> · 조연상<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>(주)델릭스 대표이사

<sup>2</sup>창원문성대학교 항공정비학부 교수

<sup>3</sup>동아대학교 기계공학과 조교수

### Strength Evaluation of Complex Planetary Gear Train of Traveling Reducer for 1.7-Ton Grade Small Excavator

SeockJu Nam<sup>1</sup>, MyungHo Bae<sup>2</sup> and YonSang Cho<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>CEO, Dellics Co., Ltd.

<sup>2</sup>Professor, Aviation Maintenance, Changwon Moonsung University

<sup>3</sup>Assistant Professor, Dept. of Mechanical Engineering, DongA University

(Received February 22, 2022; Revised February 28, 2022; Accepted February 28, 2022)

**Abstract** – A 1.7-ton grade small excavator is a construction equipment that can perform various functions in limited spaces where heavy equipment cannot enter easily. Owing to the recent acceleration of urbanization, it has been used increasingly in drainage and gas pipes, as well as for road repair works in urban areas. The power train of a traveling reducer for a 1.7-ton grade small excavator utilizes a complex planetary gear system. Complex planetary gears are vital to the power train of a traveling reducer as it mitigates the fatigue strength problem. In the present study, the specifications of a complex planetary gear train are calculated; furthermore, the gear bending and compressive stresses of the complex planetary gears are analyzed to achieve an optimal design of the latter in terms of cost and reliability. In this study, the actual gear bending and compressive stresses of a planetary gear system are analyzed using a self-developed gear design program based on the Lewes and Hertz equation. Subsequently, the calculated specifications of the complex planetary gears are verified by evaluating the results with the data of allowable bending and compressive stress based on curves of stress vs. number of cycles of the gears.



© Korean Tribology Society 2022. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

**Keywords** – Excavator(굴착기), Travelling reducer(주행 감속기), Complex planetary gear train(복합 유성기어 트레인), Gear bending stress(기어 굽힘 응력), Gear compressive stress(기어 면압 응력)

#### Nomenclature

\*Corresponding author: YonSang Cho

Tel:\*\*\* - \*\*\*\* - \*\*\*\*

E-mail: bluecys@nate.com

<https://orcid.org/0000-0002-6802-4389>

$N_{S1,2}$  : No.1, 2 stage, rpm of sun gear

$N_{P1,2}$  : No.1, 2 stage, rpm of pinion gear

- $N_{Cl,2}$  : No.1, 2 stage, rpm of carrier
- $N_{Rl,2}$  : No.1, 2 stage, rpm of ring gear
- $T_{Sl,2}$  : No.1, 2 stage, torque of sun gear
- $T_{Pl,2}$  : No.1, 2 stage, torque of pinion gear
- $T_{Rl,2}$  : No.1, 2 stage, torque of ring gear
- $Z_{Sl,2}$  : No.1, 2 stage, No. of sun gear teeth
- $Z_{Pl,2}$  : No.1, 2 stage, No. of pinion gear teeth
- $Z_{Rl,2}$  : No.1, 2 stage, No. of ring gear teeth
- $P$  : actual gear compressive stress,  $N/mm^2$
- $S$  : actual gear bending stress,  $N/mm^2$
- $S_{ab}$  : allowable gear bending stress,  $N/mm^2$
- $S_{ac}$  : allowable gear compressive stress,  $N/mm^2$
- $T$  : torque on gear(N·m)
- $N_a$  : Contact length of action(mm)
- $F$  : Face width of gear(mm)
- $X$  : Lewes bending factor(mm)
- $Z$  : number of teeth in gear
- $N_f$  : Number of cycles
- $N$  : rotating speed, rpm
- $C_1, C_2$  : SN-curve Coefficient
- $\alpha$  : normal pressure angle
- $\Phi$  : transverse pressure angle
- $F_c$  : active face width in contact(mm)
- $T_S$  : torque of sun gear(N·m)
- $T_P$  : torque of pinion gear(N·m)
- $Z_S$  : number of teeth in sun gear
- $Z_P$  : number of Teeth in pinion gear
- $Z_R$  : number of teeth in ring gear
- $CD$  : operating center distance
- $OR$  : outside radius of gear
- $BR$  : base radius of gear

### 1. 서 론

소형 건설기계는 장비 중량이 3.5톤 미만인 굴착기, 지게차 및 5톤 미만의 불도저 로더를 말하며, 대형 중장비 진입이 어려운 비좁은 공간에 진입하여 다양한 기능을 수행하는 장비이다. 최근 도시화의 가속화에 따라 도심지의 배수관, 가스관, 도로보수 공사 등의 다양한 용도로 국내의 수요가 점차 증대하고 추세로 현재 국내 건설기계 생산 산업체에서 핵심 부품을 대부분 수입하여 양산 적용하고 있어 국산화 개발이 시급한 실정이다. 1.7톤급 소형 굴착기용 주행 감속기는 주행 유압모터와 일체

로 구성되어 있다. 따라서 핵심 부품인 복합 유성기어장치는 극한 조건에서의 요구 수명을 만족시키는 피로 내구 강도해석이 필요하다. 본 연구에서는 총 감속비가 36.964이고, 최대 출력 토크가 1682 N·m인 2열의 복합 유성기어로 구성된 1.7톤급 소형 굴착기용 주행 감속기의 국산화 개발과 관련하여 핵심 구성 부품인 복합 유성기어류에 대한 극한 조건에서의 요구 수명을 만족시키는 피로 내구 강도해석을 수행하였다.

## 2. 연구 방법 및 내용

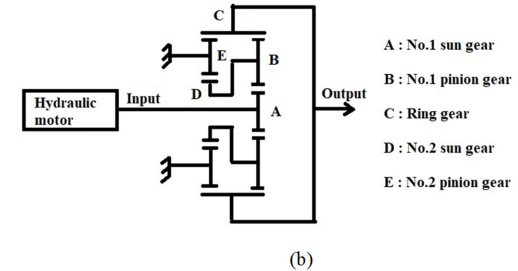
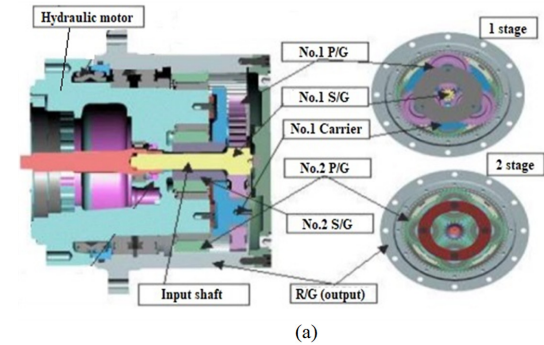
### 2-1. 주행감속기의 복합 유성기어

Fig. 1은 1.7톤급 소형 굴착기용 (a) 주행 감속기와 (b) 주행 감속기의 복합 유성기어의 구조도를 나타낸다. 그리고 Table 1에 주행 감속기의 제원을 각각 나타내었다.

본 연구에서는 D. W. Dudley[1]의 Gear Handbook을 근거로 복합 유성기어류 제원 계산 프로그램[3]을 개발하고, 1.7톤급 소형 굴착기용 주행 감속기의 복합 유성

**Table 1. Specifications of the travelling reducer**

Total gear ratio	Required life	Max. output torque/speed
36.964	1000 hrs	1682 Nm/35 rpm



**Fig. 1. Photograph of travelling reducer assembly and schematic diagram of complex planetary gears.**

기어류에 대한 제원을 산출한 뒤, Lewes[2] & Hertz equation[1]을 근거로 개발한 기어 강도 해석 프로그램[3]을 활용하여 복합 유성기어류의 강도를 해석하였다.

## 2-2. 기어의 강도 해석 이론

Fig. 1의 주행 감속기 구조도에서 산출한 감속비,  $\gamma$ 는 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{Z_R}{Z_{S1}} \left[ 1 + \frac{Z_{S1}}{Z_{S2}} + \frac{Z_R}{Z_{S2}} \right] \quad (1)$$

또한, 상대속도선도법[4]에 의한 1, 2열 유성기어류에 걸리는 회전수와 토크 산출 계산식은 다음과 같다.

$$N_{S_{1,2}} Z_{S_{1,2}} + N_R Z_{R_{1,2}} = N_{C_{1,2}} (Z_{S_{1,2}} + Z_R) \quad (2)$$

$$N_{P_{1,2}} = \frac{(N_{S_{1,2}} - N_{C_{1,2}}) Z_{S_{1,2}}}{Z_{P_{1,2}}} \quad (3)$$

$$N_{C_{1,2}} = \frac{(N_{S_{1,2}} Z_{S_{1,2}} - N_R Z_R)}{(Z_{S_{1,2}} + Z_R)} \quad (4)$$

$$T_{C_{1,2}} = T_{R_{1,2}} + T_{S_{1,2}} \quad (5)$$

$$T_{R_{1,2}} = (U/(1+U)) \times T_{C_{1,2}} \quad (6)$$

$$T_{S_{1,2}} = (1/(1+U)) \times T_{C_{1,2}} \quad (7)$$

$$\text{단, } U = Z_{R_{1,2}} / Z_{S_{1,2}}$$

식 (2)에서 식 (7)을 이용하여 구한 각 기어의 회전수는 각 기어에 걸리는 토크를 구하는데 사용이 되고, Lewes equation[2]을 근거로 한 유성기어류에 걸리는 실제 굽힘 응력은 식(8)을 통하여 구할 수 있다.

$$S = \frac{29,400\pi T}{N_a F X Z} \quad (8)$$

그리고 요구수명과 D. W. Dudley[1]의 Gear Handbook에서 제시된 S/N 곡선에서 산출된 유성기어류의 허용 굽힘 응력은 식(9)와 같다.

$$S_{ab} = \frac{C_1}{N_F^{20.8}} \quad (9)$$

여기서 미국 Borg Warner 사의 평기어 SN곡선으로부터

$C_1$ 은 132.317 이다. 외접물림 유성기어류인 선기어와 피니언 기어의 실제 면압 응력[5]  $P_s$  및  $P_p$ 는 선기어의 토크  $T$ 가 작용할 때 Hertz의 contact formula[1]에 의해 식 (10)과 식 (11)이 된다.

$$P_s = 19.43 \sqrt{\frac{2\pi T_s \times CD \sin \alpha}{A_s (CD \sin \Phi - A_s) \times F_c \times N_a \times Z_s}} \quad (10)$$

$$P_p = 19.43 \sqrt{\frac{2\pi T_p \times CD \sin \alpha}{A_p (CD \sin \Phi - A_p) \times F_c \times N_a \times Z_s}} \quad (11)$$

또한 내접물림 유성기어류인 피니언 기어와 링기어의 실제 면압 응력  $P_p$  및  $P_r$ 은 피니언 기어의 토크  $T_p$ 가 작용할 때 식 (12)와 식 (13)이 된다.

$$P_p = 19.43 \sqrt{\frac{2\pi T_p \times CD \sin \alpha}{A_p (CD \sin \Phi + A_p) \times F_c \times N_a \times Z_p}} \quad (12)$$

$$P_r = 19.43 \sqrt{\frac{2\pi T_p \times CD \sin \alpha}{A_r (A_r - CD \sin \Phi) \times F_c \times N_a \times Z_p}} \quad (13)$$

여기서  $A_s = \sqrt{OR_s^2 - BR_s^2}$ ,  $A_p = \sqrt{OR_p^2 - BR_p^2}$ ,  $A_r = \sqrt{OR_r^2 - BR_r^2}$  이다.

그리고 D. W. Dudley[1]의 Gear Handbook에서 제시된 허용 면압 응력을 구하기 위한 S/N 곡선으로부터 산출된 유성기어류의 허용 면압 응력 계산식은 식 (14)와 같다.

$$S_{ac} = \frac{C_2}{N_F^{6.8433}} \quad (14)$$

$$N_F = (\text{required life}) \times 60 \times N \quad (15)$$

여기서  $N_F$ 는 요구수명 동안 회전한 총 회전수로 식(15)와 같고, 미국 Borg Warner 사의 평기어 SN곡선으로부터  $C_2$ 는 2334.326이다.

## 3. 기어의 제원 산출 및 강도 해석 결과

Table 2는 기어 제원 계산 프로그램을 활용하여 구한 유성기어류의 상세 제원이다. 그리고 식 (2)-식 (7)을 활용하여 각 유성기어에 걸리는 회전수와 토크를 Table 3과 같이 구하였다.

요구수명이 1000시간인 1.7톤급 소형 굴삭기용 주행

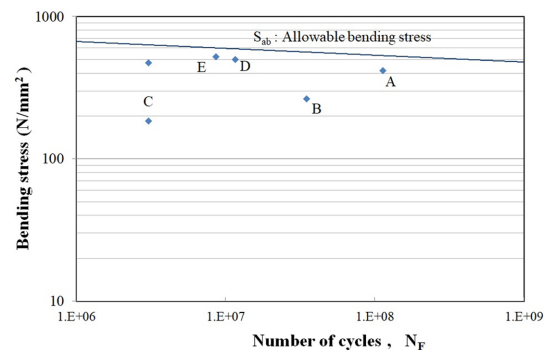
**Table 2. Specifications of the planetary gears**

Items	A (NO.1 S/G)	B (NO.1 P/G)	C (R/G)	D (NO.2 S/G)	E (NO.2 P/G)
Module	1.5	←	←	←	←
Press Angle	20°	←	←	←	←
Helix Angle	0°	←	←	←	←
No. of Gear Teeth	11	32	76	20	27
Tooth modification factor	0.3567	0.3487	0.4920	0.5589	0.5317
Outside Dia.	20.57	52.04	112.48	34.67	45.09
Face Width	16	11	16/21.5	21	16.5
Quantity	1	3	1	1	4

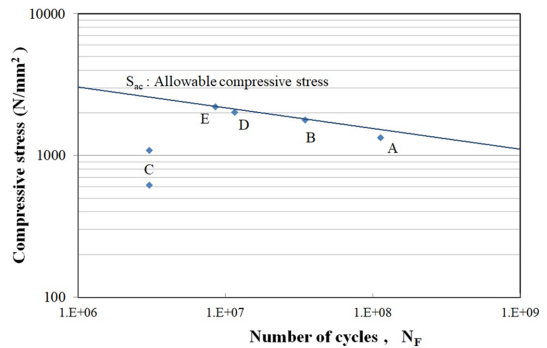
**Table 3. Torque and number of rotation (N·m/rpm)**

Items	No.1 stage	No.2 stage
	1882.5	193.5
	580.6	143.4
	50.9	50.9
	14.6	86.5
	42.4	116.8
	100.8	328.8

감속기의 복합 유성기어류의 굽힘 및 면압 응력 안전율은 S/N 곡선에서 산출된 유성기어류의 허용 굽힘 및 면압 응력을 실제 굽힘 및 면압 응력으로 나누어 산출한다. Fig. 2는 주행 감속기의 복합 유성기어류에 대한 굽힘 강도 해석 및 안전율 산출 결과를 나타내고, Fig. 3은 주행 감속기의 복합 유성기어류에 대한 면압 강도 해석 및 안전율 산출 결과를 각각 나타낸다. 주행 감속기의 복합 유성기어류에 대한 강도 해석 결과, 1열 유성기어류인 A, B, C의 굽힘 응력 안전율은 1.276~3.425, 면압 응력 안전율은 1.020~4.168이고 2열 유성기어류인 D, E,



**Fig. 2 Number of cycles and bending stress of the planetary gears.**



**Fig. 3 Number of cycles and compressive stress of the planetary gears.**

C의 굽힘 응력 안전율은 1.152~1.334, 면압 응력 안전율은 1.005~2.372 인데 건설기계 제조 산업체인 국내 D사의 요구 조건인 굽힘 응력 안전율은 1.15 이상, 면압 응력 안전율은 1.0 이상을 고려할 때, 1.7톤급 소형 굴삭기용 주행 감속기의 핵심 구성 부품인 복합 유성기어류의 피로 내구 강도는 안전하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 1.7톤급 소형 굴삭기용 주행 감속기의 핵심 동력전달 구성 부품인 복합 유성기어류의 선기어류, 피니언 기어류 및 링 기어류에 대한 굽힘 및 면압 응력을 계산하고, S/N 곡선에서 산출된 각 유성기어류별 허용 굽힘 및 면압 응력을 고려한 안전율을 산출한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 주행 감속기의 복합 유성기어류에 대한 강도 해석 결과, 1열 유성기어류인 A, B, C의 굽힘 응력 안전율은 1.276~3.425, 면압 응력 안전율은 1.020~4.168 산출되었다.

2. 2열 유성기어류인 D, E, C의 굽힘 응력 안전율은 1.152~1.334, 면압 응력 안전율은 1.005~2.372로 산출되었다.

3. 건설기계 제조 산업체인 국내 D사의 요구 조건을 고려할 때, 1.7톤급 소형 굴삭기용 주행 감속기의 핵심 구성 부품인 복합 유성기어류의 피로 내구 강도는 안전하다고 판단된다.

### Acknowledgements

본 논문은 중소벤처기업부, 지역특화산업육성+(R&D)의 지원과제(과제번호: S3094404, 과제명: 소형 중장비(1-1.7톤급 굴삭기)용 일체형 주행감속기 개발)와 관련하여 작성되었으며 지원에 감사드립니다.

### References

- [1] Dudley, D. W., *The Handbook of Practical Gear Design*, 2nd Edition, Mcgraw-Hill, pp.1.27-1.32, 2.1-2.12, 3.1-3.45, 3.78-3.112, 1984.
- [2] Wilfred, L., "Investigation of Strength of Gear Teeth", *Proc. Eng. Club, Philadelphia*, pp.38-55, 1893.
- [3] Kim, K. M., Bae, M. H., Cho, Y. S., "Fatigue Strength Analysis of Complex Planetary Gear Train of the Pitch Drive System for Wind Turbines", *Tribol. Lubr.*, Vol.37, No.2, pp.48-53, 2021, <https://doi.org/10.9725/kts.2021.37.2.48>
- [4] Bae, M. H., Jang, S. K., Lee, S. Y., *Automotive & Continuously Variable Transmission*, 2nd Edition, Sun-Hak publication, pp.37-44, 2009.
- [5] Bae, T. Y., Bae, M. H., Park, J. L., Lee, S. S., "The Bending Stress Analysis of Planetary Gears of Two Speed Reducer for Rotator System with Hybrid Function of the Piling Construction Work", *Journal of the Korean Society of Creative Engineers*, Vol.49, pp.25-32, April 2016.