

ENGINEERING

Effects of PTO gear face width on safety factors

Jeong-Hoon Jang¹, Sun-Ok Chung¹, Chang-Hyun Choi², Young-Jun Park³, Won-Ki Chun⁴, Seon-Il Kim⁴, Oh-Won Kwon⁵, Chang-Won Kim⁵, Soon-Jung Hong⁶, Yong-Joo Kim^{1*}

¹Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Department of Bio-mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Gyeonggi 16419, Korea

³Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM), Daejeon 34103, Korea

⁴R&D Center, Asia Technology Corporation Ltd, Daegu 43020, Korea

⁵Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM), Daegu 42994, Korea

⁶Smart Farming Education Team, Rural Human Resource Development Center, Jeonju 54874, Korea

*Corresponding author: babina@cnu.ac.kr

Abstract

Gears are components of transmission which transmit the power of an engine to a machine and offer numerous speed ratios, a compact structure, and high efficiency of power transmission. Gear train design in the automotive industry uses simulation software. However, PTO (Power Take-Off) gear design for agricultural applications uses the empirical method because of the wide range of load fluctuations in agricultural fields. The PTO is an important part of agricultural tractors which transmits the power to various tractor implements. Therefore, a simulation was essential to the optimal design of the PTO. When the PTO gear is optimally designed, there are many advantages such as low cost, reduced size, and light weight. In this study, we conducted the bending and contact safety factor simulation for the PTO gear of an agricultural tractor. The bending and contact safety factors were calculated on ISO 6336 : 2006 by decreasing the face widths of the PTO pinion and wheel gear from 18 mm at an interval of 1 mm. The safety factor of the PTO gear decreased as the face width decreased. The contact safety factors of the pinion and wheel gear were 1.45 and 1.53, respectively, when the face width was 18 mm. The simulation results showed that the face width of the PTO gear should be greater than 9 mm to maintain the bending and contact safety factors higher than 1. It would be possible to reduce the weight of the PTO gear for different uses and working conditions. This study suggests that the possibility of designing an optimal PTO gear decreases as its face width decreases.

Keywords: agricultural tractor, bending stress, contact stress, PTO gear, safety factor, simulation

Introduction

트랙터의 구성요소 중 동력전달 장치는 매우 중요한 역할을 한다. 기어는 동력전달용 기계요소 중 가격이 저렴하고 속도비가 정확하고 동력 전달 효율이 가장 높다(Lee et al., 2010).



 OPEN ACCESS

Citation: Jang JH, Chung SO, Choi CH, Park YJ, Chun WK, Kim SI, Kwon OH, Kim CW, Hong SJ, Kim YJ. 2016. Effects of PTO gear face width on safety factors. Korean Journal of Agricultural Science 43:650-655.

DOI: <https://doi.org/10.7744/kjoas.20160068>

Editor: Kyeong Hwan Lee, Chonnam National University, Korea

Received: September 5, 2016

Revised: September 24, 2016

Accepted: September 27, 2016

Copyright: ©2016 Korean Journal of Agricultural Science.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

해외의 트랙터 산업 분야에서는 시뮬레이션 소프트웨어를 이용한 동력 전달계의 최적설계가 활발하게 진행되고 있다. 시뮬레이션을 통한 분석을 이용하면 발생될 수 있는 문제를 예측하고 재설계 시 발생하는 또 다른 문제를 면밀히 검토할 수 있기 때문에 좀 더 효율적인 설계가 이루어질 수 있다(Kong et al., 2011). Kang et al. (2011)은 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하면 기어장치 제작에 따른 시간과 비용을 절약하면서 설계자가 원하는 기어장치의 특성을 예측 및 개선할 수 있다고 하였으며, Kim et al. (2016b)은 시뮬레이션을 이용하여 트랙터의 연비효율 평가에 관한 연구를 진행하였다. Shin et al. (2010)은 변속기를 최적 설계하여 경량화 하였으며, 변속기를 경량화함으로써 제품의 생산 원가를 절감할 수 있다고 하였다. Kim et al. (2016a)은 굴삭기 선회 시 기어 접촉에 의해 발생하는 전달오차에 의한 소음은 선회시스템의 품질에 영향을 주기 때문에 설계 단계에서 이를 정확히 평가할 필요가 있다고 판단하여 기어 치형 수정 및 설치조건에 따른 전달오차의 민감도 분석을 수행하였으며 저소음 기어설계를 위한 최적 치형을 제시하였다. 자동차 및 기계분야에서는 주로 시뮬레이션을 통하여 기어를 최적 설계하고 있으나 아직까지 농업기계 분야에서는 기어 설계를 주로 경험적인 실험방법에 의존하고 있으며, 시뮬레이션을 통한 기어의 최적 설계에 대한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구는 트랙터 동력 전달계 중 기어의 최적 설계를 위한 기초 연구로써, 트랙터의 작업기를 구동하는데 사용되는 PTO 기어의 안전율을 시뮬레이션 하였다. PTO 기어 시뮬레이션은 트랙터 기어 해석에 가장 많이 사용되고 있는 ISO 6336 국제규격(Standard ISO 6336, 2006) 기준으로 수행하였으며, PTO 기어의 치폭은 설계 사양인 18 mm에서 1 mm 간격으로 감소시키며, 이 때의 안전율을 분석하였다.

Materials and Methods

시뮬레이션 프로그램

본 연구에서 사용된 시뮬레이션 프로그램은 PTO 기어 설계 및 해석을 수행하기 위하여 기계요소를 모델링하고 설정한 환경에 따라 설계 및 시뮬레이션이 가능한 KISSsoft (Version 03/2014, KISSsoft AG, Switzerland)를 사용하였다.

시뮬레이션 항목

본 연구에서는 식 (1)과 같이 Lewis 식을 토대로 굽힘 안전율을 계산하였으며, 굽힘 안전율(S_F)은 기준 강도와 허용 굽힘 응력의 비로 나타낸다(Kong et al., 2011). 기준 강도는 재료의 종류, 하중 형태, 사용 조건에 따라 결정되며, 허용 굽힘 응력은 수정계수(K), 하중(F_t), 치폭(b)과 모듈(M_n)로 나타낼 수 있다. 이때, 수정계수는 기어의 사용조건에 따라 선정되며, 본 연구에서는 수정계수를 ISO 6336 : 2006 1 - 6 Method A, B 규격을 기반으로 0.88로 선정하였다.

접촉 안전율(S_H)은 식 (2)와 Hertz 식을 토대로 같이 계산하였으며, 기준 강도와 허용 접촉 응력의 비로 나타낸다(Kong et al., 2011). 허용 접촉 응력은 수정 계수(Z), 하중, 기어비(u), 치폭과 구동기어의 피치원 지름(d_1)으로 나타낼 수 있다. 수정 계수는 ISO 6336 : 2006 1 - 6 Method A, B 규격을 기반으로 0.88로 선정하였다.

$$S_F = \sigma_{FG} \left(\frac{KF_T}{bM_N} \right) \quad (1)$$

Where, S_F = Safety factor for bending stress

σ_{FG} = Limit bending stress (N/mm²)

K = Correction factor

F_t = Tangential load (N)

b = Face-width (mm)

M_n = Normal module (mm)

$$S_H = \sigma_{HG} / Z \sqrt{\frac{F_t}{d_1 b} \frac{(u+1)}{u}} \quad (2)$$

Where, S_H = Safety factor for contact stress

σ_{HG} = Limit flank contact stress (N/mm²)

Z = Correction factor

F_t = Tangential load (N)

d_1 = Pinion diameter (mm)

b = Face-width (mm)

u = Gear ratio

시뮬레이션 방법

시뮬레이션은 Fig. 1과 같이 엔진의 동력이 PTO축으로 직결되어 작업기에 전달되는 것을 고려하였으며, 시뮬레이션 조건은 엔진의 정격 회전 속도를 기준으로 하였다. 이 때, 100마력급 트랙터 엔진의 정격 회전 속도는 253.29 Nm@2150 rpm이다. PTO 기어는 단수가 높을수록 작업부하가 높아진다는 것을 고려하여 3단 기어(1,000 rpm)를 선정하여 치폭을 1 mm 간격으로 줄이면서 안전율을 시뮬레이션 하였다. PTO 3단 기어의 사양은 국내 농업기계 회사에서 일반적으로 사용하는 것을 기준으로 선정하였으며, 기어 치폭은 18 mm, 구동기어와 피동기어의 피치원지름은 각각 84.0, 178.5 mm이다.

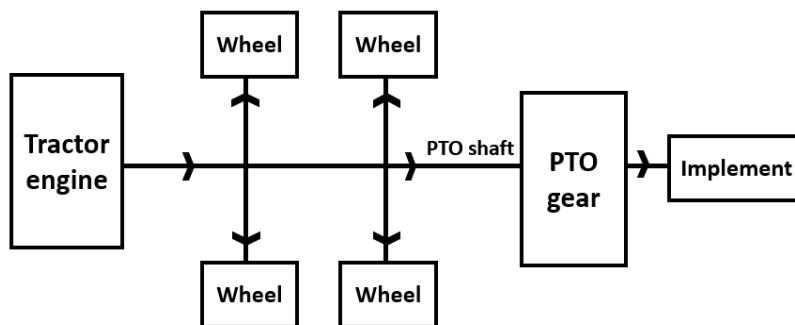


Fig. 1. Schematic diagram of the tractor power flow.

Results and Discussion

응력 시뮬레이션

PTO 기어 치폭 변화에 따른 구동기어와 피동기어의 응력 시뮬레이션 결과는 Fig. 2와 같다. 구동기어와 피동기어의 접촉 응력과 굽힘 응력은 모두 치폭이 줄어들수록 감소하였다. 이 때, 접촉 응력의 감소 비율이 굽힘 응력의 감소 비율보다 크게 나타났으며, 이는 접촉 응력이 치폭 변화에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

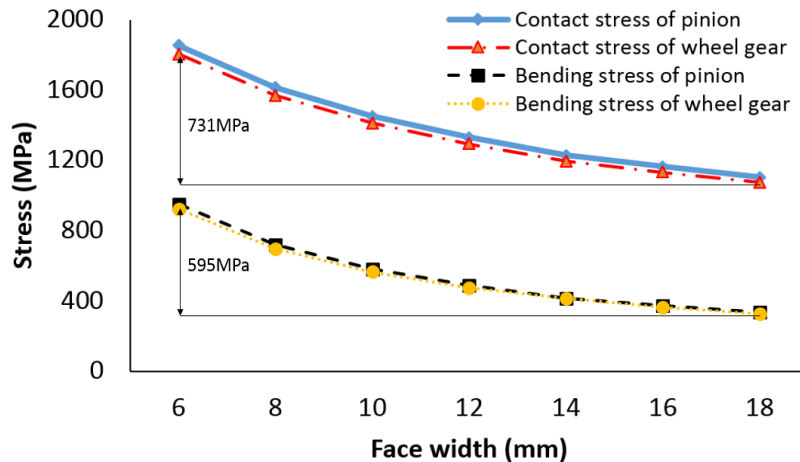


Fig. 2. Simulation results of contact and bending stresses of the PTO gear.

안전율 시뮬레이션

PTO 기어 치폭 변화에 따른 구동기어와 피동기어의 안전율 시뮬레이션 결과는 Fig. 3과 같다. PTO 기어의 안전율은 치폭이 줄어들수록 감소하였는데, 이는 치폭 감소에 따라 단위면적당 응력이 증가하였기 때문으로 판단된다. PTO 기어의 안전율 변화는 굽힘 안전율이 접촉 안전율보다 크게 나타나 접촉 안전율이 치폭 변화에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이는 접촉 응력이 굽힘 응력보다 치폭 변화에 더 큰 영향을 받기 때문으로 판단된다.

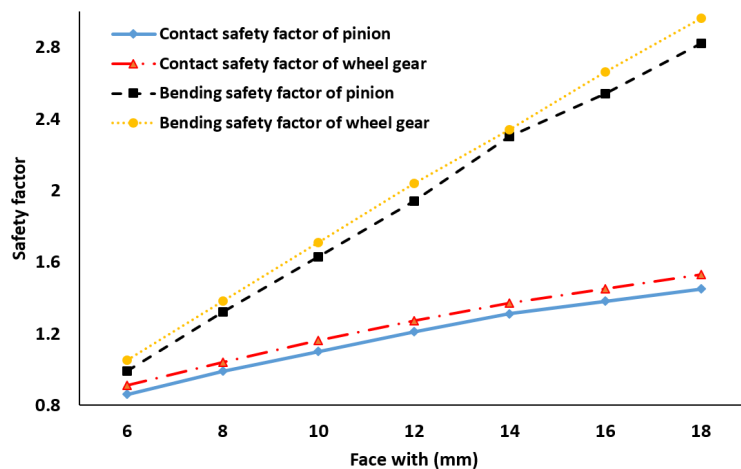


Fig. 3. Simulation results of contact and bending safety factors of the PTO gear.

치폭 변화에 따른 PTO 기어 안전율

치폭 변화에 따른 PTO 기어의 안전율을 시뮬레이션 한 결과는 Table 1과 같이 나타났다. 안전율은 치폭이 줄어들수록 감소하였고, 이는 잇면에 작용하는 응력이 증가하였기 때문임을 알 수 있다. 치폭이 18 mm 일 때, 구동기어와 피동기어의 접촉 응력은 각각 1,102, 1,073 MPa, 굽힘 응력은 각각 336, 326 MPa로 가장 작게 나타났다. 일반적으로 기계 설계 시 안전율은 사용 목적에 따라 다르게 선정하지만, 최소 안전율은 1 이상이어야 한다. 본 연구에서 시뮬레이션 결과, 굽힘 안전율은 시뮬레이션 구간에서 모두 1 이상을 유지하였으나 접촉 안전율은 1미만의 값을 보여 주었

다. 구동기어와 피동기어는 각각 치폭이 8 mm와 7 mm인 경우에 접촉 안전율이 1 미만으로 나타났으며, 치폭이 더 줄어들게 되면 더 낮은 안전율을 보여 주었다. 그러므로 본 연구에서 수행한 시뮬레이션 결과에 따라 최소 안전율 1 이상을 유지하기 위해서는 PTO 기어의 치폭을 9 mm 이상으로 설계 해야 함을 알 수 있다. 또한, 전체적으로 굽힘 안전율 보다 접촉 안전율이 더 높게 나와 PTO 기어 설계 시 접촉 응력에 의한 파손을 더 고려해야 함을 알 수 있다.

본 연구에서는 최소 안전율을 1로 하여 시뮬레이션 결과를 분석하였으나, 이는 PTO 기어의 최소 안전율로 실제 PTO 기어의 최적설계를 위해서는 트랙터 사용 조건과 환경에 적합하도록 안전율을 선정하여 시뮬레이션 결과를 분석하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

Table 1. Simulation results of PTO gear depending on the face width.

Face width (mm)	Contact stress (MPa)		Bending stress (MPa)		Contact safety factor		Bending safety factor	
	Pinion	Wheel gear	Pinion	Wheel gear	Pinion	Wheel gear	Pinion	Wheel gear
18	1,102	1,073	336	326	1.45	1.53	2.82	2.96
17	1,130	1,101	353	343	1.42	1.49	2.69	2.82
16	1,163	1,132	374	363	1.38	1.45	2.54	2.66
15	1,199	1,167	397	385	1.34	1.40	2.39	2.50
14	1,227	1,195	413	413	1.31	1.37	2.30	2.34
13	1,281	1,247	453	440	1.25	1.31	2.09	2.19
12	1,329	1,294	488	474	1.21	1.27	1.94	2.04
11	1,386	1,349	531	515	1.16	1.21	1.79	1.87
10	1,451	1,412	581	564	1.10	1.16	1.63	1.71
9	1,525	1,485	643	624	1.05	1.10	1.46	1.55
8	1,613	1,570	719	698	0.99	1.04	1.32	1.38
7	1,720	1,674	817	793	0.93	0.98	1.16	1.22
6	1,853	1,804	949	921	0.86	0.91	0.99	1.05

Conclusion

본 연구는 pto 3단기어의 치폭을 18 mm에서 1 mm 간격으로 감소시키며, 치폭변화에 따른 응력과 안전율을 시뮬레이션 하였다. 그 주요 결과는 다음과 같다.

1. 구동기어와 피동기어의 접촉 응력과 굽힘 응력은 치폭이 줄어들수록 감소하였으며, 접촉 응력이 굽힘 응력보다 큰 비율로 감소한 것으로 보아 접촉 응력이 치폭 변화에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.
2. 구동기어와 피동기어의 접촉 안전율과 굽힘 안전율은 치폭이 줄어들수록 구동기어와 피동기어의 접촉 응력과 굽힘 응력이 증가하기 때문에 감소였다. 이는 치폭 감소에 따라 단위면적당 응력이 증가하였기 때문임을 알 수 있다.
3. 구동기어와 피동기어의 접촉 응력과 굽힘 응력은 치폭이 18 mm일 때 가장 작았으며, 접촉 응력은 각각 1,102, 1,073 MPa, 굽힘 응력은 각각 336, 326 MPa로 나타났다.
4. 구동 기어와 피동 기어의 안전율은 치폭이 9 mm일 때까지 최소 안전율인 1 이상으로 나타났다. 그러므로 최소 안전율 1 이상을 유지하기 위해서는 PTO 기어의 치폭을 9 mm 이상으로 설계해야 함을 알 수 있다.

5. 본 연구에서는 최소 안전율을 1로 하여 시뮬레이션 결과를 분석하였으나, PTO 기어의 최적 설계를 위해서는 농기계의 사용 목적과 작업 환경에 적합하도록 안전율을 선정하여 시뮬레이션 결과를 분석하는 것이 필요하다. 또한, 이러한 방법으로 트랙터 PTO뿐만 아니라 관리기와 같은 농작업 기계의 최적설계에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgments

본 연구는 농림축산식품부 첨단생산기술개발사업(115037021WT021)으로 수행되었습니다.

References

- Kang DS, Song CK. 2011. Profile-shifted gears in multi-axial differential system. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* 28:632-637. [in Korean]
- Kim MS, Kim JS, Lim DH. 2016a. Gear design optimization for low noise slewing system of excavator. *Korean Society for Noise and Vibration Engineering*. 733-736. [in Korean]
- Kim WS, Kim YJ, Chung SO, Lee DH, Choi CH, Yoon YH. 2016b. Development of simulation model for fuel efficiency of agricultural tractor. *Korean Journal of Agricultural Science* 43:116-126. [in Korean]
- Kong MG, Song CK, Kim YD. 2011. Strength design evaluation of the multi-range transmission. *Journal of the Korean Society for Power System Engineering* 15:12-17. [in Korean]
- Lee JH, Lee DH, Lee KH. 2010. Contact stress analysis of a pair of mating spur gears. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* 9:59-65. [in Korean]
- Shin YI, Lee JY, Song CK, Park JW, Jeong JK, Shin HH. 2010. Lightning design for transmission gears. *The Korean Society of Mechanical Engineers* 292-295.
- Standard ISO 6336. 2006. Calculation of Load capacity of Spur and Helical Gears, International Standard Organization, Geneva.