

ENGINEERING

# Determination of safety factor for agricultural gear reducer using simulation software

Soon-Jung Hong<sup>1</sup>, Yong-Joo Kim<sup>2</sup>, Sun-Ok Chung<sup>2</sup>, Chang-Hyun Choi<sup>3</sup>, Soo-Bok Park<sup>4</sup>, Hyun-Seok Noh<sup>5</sup>, Jeong-Hoon Jang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Smart Farming Education Team, Rural Human Resource Development Center, Jeonju 54874, Korea

<sup>2</sup>Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

<sup>3</sup>Department of Bio-mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

<sup>4</sup>Chung-Oh Engineering Co., Ltd, Daejeon 34364, Korea

<sup>5</sup>HAN'A ESSE Co., Ltd, Gwangju 62412, Korea

\*Corresponding author: jjh911004@hanmail.net

## Abstract

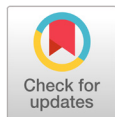
Agricultural gear reducers are used in a variety of agricultural machinery designs such as in agricultural tractors and transport cars, and even greenhouses. For greenhouses, a gear reducer is used to control windows on the side and the roof. Gear reducers for agricultural applications are designed using the empirical method because of the lack of a standard for experimentation. Simulation is necessary for the optimal design of an agricultural gear reducer. There are many advantages to this optimization such as low-cost maintenance, reduced size, and weight. In this study, bending and contact safety factor simulation for the gear reducer of a greenhouse was conducted by decreasing the face widths of helical gear shaft 2 and shaft 3 from 30.8 and 30 mm, respectively, at an interval of 4 mm. The bending and contact safety factors were calculated using AGMA standard. Simulation results showed that bending and contact safety factors decreased rapidly when the face width of the helical gear on shaft 2 was 30 mm and the face width of helical gear on shaft 3 decreased from 30.8 mm to 26.8 mm, suggesting that it would be safe to reduce the face width of the helical gear on shaft 3 to 26.8 mm. The reduction of the face width also reduced the weight of the agricultural gear. This study suggests that the agricultural gear reducer safety factor decreases as the face width decreases.

**Keywords :** AGMA, gear reducer, gear, safety factor, simulation

## Introduction

국내 농업이 대부분 기계화로 전환되면서 농업 기계 및 관련 부품의 사용이 증가하고 있다 (Jin et al., 2017). 그 중, 감속기는 모터로부터 회전력을 전달하면서 회전속도를 감속시키고 회전 토크를 증대시키는 장치로서 장비의 정밀도 및 효율 특성에 영향을 미치는 부품으로 기계적 구성장치의 중요한 역할을 담당하고 있다. 다양한 산업분야에서 감속기의 안전성 및 효율에 관한 연구가 활발히 진행 중이지만 농업기계분야에서는 감속기에 대한 연구가 미비한 실정이다.

농업기계분야의 기어 감속기는 주로 벤치마킹을 통한 경험적 방법에 의하여 설계되고 있으며 대부분 과잉 설계가 이루어져, 제품에 대한 신뢰성이 부족한 실정이다. 특히, 국내 시설재배의 규모가



### OPEN ACCESS

**Citation:** Hong SJ, Kim YJ, Chung SO, Choi CH, Park SB, Noh HS, Jang JH. 2018. Determination of safety factor for agricultural gear reducer using simulation software. Korean Journal of Agricultural Science. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20170064>

**DOI:** <https://doi.org/10.7744/kjoas.20170064>

**Editor:** Jong Soon Kim, Busan National University

**Received:** September 5, 2017

**Revised:** November 22, 2017

**Accepted:** November 28, 2017

**Copyright:** © 2018 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1979년 4,972 ha에 비해 2015년 90,468 ha로 약 18배 증가한 만큼 시설재배의 기계화가 절실하다(Chung et al., 2017). 또한, 국내 유리온실 창개폐기는 내구성, 안정성, 정밀도, 가격 등 전반적인 면에서 성능이 떨어진다. 내구성은 약 4-5년 수준으로 개선이 필요하다(Hong et al., 2017). 농업분야에서 농업기계에 대한 영향은 상당하며, 내구성, 고장 등에 대한 주의를 기울여야 한다(Afsharnia and Marzban, 2017). Park et al. (2011)은 풍력발전기용 감속기의 출력축 베어링이 기어 치면의 하중 분포에 미치는 영향을 평가하기 위하여 상용 소프트웨어를 이용하여 출력축 베어링의 조합이 서로 다른 2개의 모델을 구성하여 그에 따른 하중 분포를 분석하였다. Yoon (2015)은 감속기 설계 개선을 위하여 전차의 운용 조건에 대한 감속기의 기어축에 대해 유한 요소해석을 통해 기어축 파손 원인을 도출하였다. Kim et al. (2015)은 워밍기어 스윙 감속기 최적 설계를 하기 위하여 기존의 워밍기어 스윙 감속기에서 발생하는 조립성 문제와 경량화와 발열 저감을 고려한 워밍기어와 최적의 케이스 설계 및 해석을 수행하였다. Kim et al. (2013)은 감속기의 워밍기어에 대해 힘 해석을 통한 베어링 선정 및 구조해석을 수행하여 감속기의 구조적 안정성을 검토하였다.

최근 감속기에 대한 연구는 대부분 시뮬레이션을 통하여 해석하고 있으나 농업기계분야에서는 아직까지 감속기 설계를 위한 시뮬레이션에 대한 연구는 부족한 실정이다(Jang et al., 2016). Lee et al. (2016)은 농업용 기어 감속기의 표면 열처리 방법에 따른 부하 용량을 기어 해석 소프트웨어 Kisssoft를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 감속기 관련 연구는 대부분 시뮬레이션을 통하여 실험을 대체하고 이를 통하여 성능을 최적화하는 연구가 수월중이며, 이러한 연구는 농업기계 분야에서도 활용이 가능 할 것으로 판단된다.

본 연구는 시뮬레이션 소프트웨어를 이용한 농업용 감속기의 최적 설계를 위한 기초 연구로써, 농업용 감속기의 최적 설계를 위하여 치폭 변화에 따른 안전율 시뮬레이션을 하였다.

## Materials and Methods

### 시뮬레이션 해석 모델

시뮬레이션을 위한 농업용 감속기는 창 개폐 장치에 사용되는 감속기(COAM 8508, Chung-Oh Engineering, Daejeon, Korea)를 사용하여 개발하였으며, 감속기의 동력 흐름도는 Fig.1 과 같다. 농업용 감속기의 구성요소 중 시설 하우스 창 개폐 현장에서 가장 파손이 많이 발생하는 2축 헬리컬 기어와 3축 헬리컬 기어를 대상으로 수행 하였으며, 이때 2축 헬리컬 기어와 3축 헬리컬 기어의 설계 치폭은 38.8 mm 와 30 mm이다.

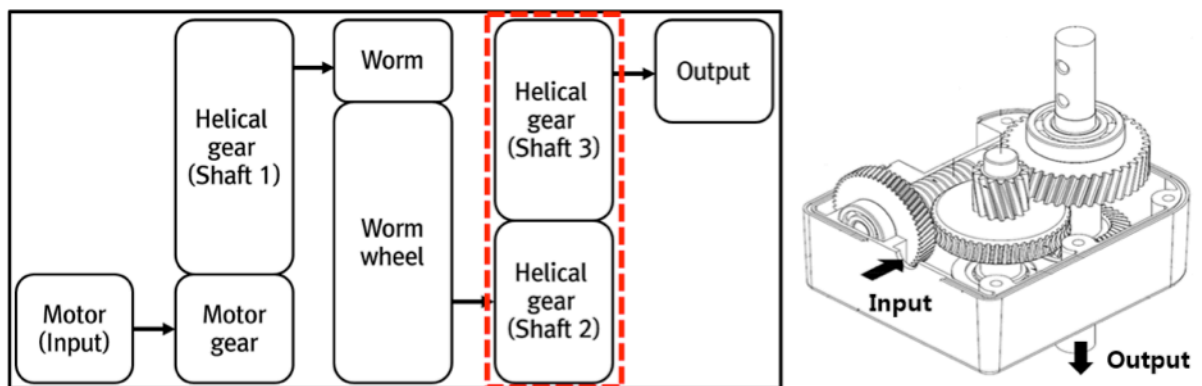


Fig. 1. Schematic diagram of a typical agricultural gear reducer for greenhouse window motors.

## 시뮬레이션 항목

감속기의 안전율 시뮬레이션을 위해서는 기어에 작용하는 응력에 대한 계산이 필요하다. 본 연구에서는 AGMA (AGMA, 2001) 규격을 기반으로 작용 응력과 안전율을 시뮬레이션 하였다.

## 응력

기어에 작용하는 응력은 모멘트에 의한 굽힘 응력 ( $\sigma_t$ )과 면압에 의한 접촉 응력 ( $\sigma_c$ )으로 구분할 수 있으며, 식 (1)과 식 (2)와 같이 계산할 수 있다. 굽힘 응력은 외팔판에서 굽힘 응력의 식으로 계산되며, 작용하는 하중에 정비례한다(Hwang, 2005). 그러므로 이 뿌리에서의 인장 굽힘 응력을 강도 기준식으로 사용하며, 기어의 이 표면에 발생하는 접촉에 대한 것을 마모 기준식으로 사용하였다. 이 뿌리에서의 굽힘 응력은 식 (1)과 같다. 이때, 수정 계수는 AGMA (2001) 규격집을 기준으로 선정하였다.

$$\sigma_t = W_t K_o K_v K_s \frac{P_d K_m K_B}{F J} \dots\dots\dots (1)$$

Where,  $\sigma_t$  = bending stress (N/mm<sup>2</sup>)

- $W_t$  = transmitted tangential load (N)
- $K_o$  = overload factor
- $K_v$  = dynamic factor
- $K_s$  = size factor
- $P_d$  = transverse diametral pitch (mm<sup>-1</sup>)
- $K_m$  = load distribution factor
- $K_B$  = rim thickness factor
- F = face width (mm)
- J = geometry factor for bending strength

접촉응력은 기어 이면에 작용하는 하중의 평방근에 비례하며, 이의 표면에 발생하는 접촉 현상에 의한 접촉 응력에 관한 식은 식 (2)와 같다. 굽힘 응력과 마찬가지로 수정계수는 AGMA (2001) 규격집을 참고하여 선정하였다.

$$\sigma_c = C_p \sqrt{W_t K_o K_v K_s \frac{K_m C_f}{d F I}} \dots\dots\dots (2)$$

Where,  $\sigma_c$  = contact stress (N/mm<sup>2</sup>)

- $C_p$  = elastic coefficient (N/mm<sup>2</sup>)<sup>0.5</sup>
- $C_f$  = surface condition factor for pitting resistance
- d = operating pitch diameter of pinion ( $\frac{2C}{m_G+1}$  for external gear) (mm)
- I = geometry factor for pitting resistance
- C = operating center distance (mm)
- $m_G$  = gear ratio

## 안전율

안전율은 기어의 강도 해석 시 중요한 지표로써, 기어를 설계할 때 굽힘 응력과 접촉 응력에 대하여 기어가 어느 정도 견딜 수 있는지를 나타낸다. 안전율은 작용 응력과 허용 응력의 비로 나타내며, 굽힘 안전율 ( $S_t$ ) 계산식과 접촉 안전율 ( $S_c$ ) 계산식은 식 (3), (4)와 같다. 안전율은 여러 변수들을 고려하여 결정되므로 일반적으로 통용되는 값으로 선정하기는 어렵다. 따라서, 안전율은 사용 목적과 방법에 따라 선정해야 한다(Lee et al., 2016).

$$S_t = \sigma_{at} / \sigma_t \dots\dots\dots(3)$$

Where,  $S_t$  = Safety factor for bending stress

$\sigma_{at}$  = allowable bending stress (N/mm<sup>2</sup>)

$$S_c = \sigma_{ac} / \sigma_c \dots\dots\dots(4)$$

Where,  $S_c$  = Safety factor for contact stress

$\sigma_{ac}$  = allowable contact stress (N/mm<sup>2</sup>)

## 시뮬레이션 방법

농업용 감속기의 치폭 변화에 따른 안전율에 대한 시뮬레이션은 기어 해석 소프트웨어 KISSsoft (Version 03/2017, KISSsoft AG, Switzerland)를 이용하여 시뮬레이션 해석 모델을 개발하였다. 안전율의 시뮬레이션은 2축 헬리컬 기어와 3축 헬리컬 기어 사양인 38.8 mm와 30 mm의 치폭을 기준으로 각각의 치폭을 4 mm 간격으로 줄이면서 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 감속기의 동력원인 400 W급 모터의 사양에 따라 2.15 Nm의 입력 토크와 1,750 rpm의 입력 회전속도로 설정하였으며, 시뮬레이션 시간은 창개폐 모터의 보증 시간인 20,000시간으로 설정하였다.

## Results and Discussion

### 굽힘 안전율

농업용 감속기의 2축 헬리컬 기어와 3축 헬리컬 기어 치폭 변화에 따른 굽힘 안전율의 시뮬레이션한 결과는 Fig. 2와 같이 나타났다. 2축 헬리컬 기어와 3축 헬리컬 기어 치폭이 각각 38.8 mm와 30 mm일때, 안전율은 2축 기어와 3축 기어에서 1.400, 1.601로 높은 안전율을 보여 경량화 설계가 필요할 것으로 판단되었다.

3축 헬리컬 기어의 치폭을 30 mm로 고정하고 2축 헬리컬 기어의 치폭을 34.8, 30.8, 26.8 mm로 감소시켰을 때의 안전율은 2축 헬리컬 기어에서 각각 1.396, 1.364, 1.219로 나타났으며, 3축 헬리컬 기어에서 각각 1.597, 1.599, 1.393으로 나타났다. 또한, 3축 헬리컬 기어의 치폭을 26 mm로 고정하고 2축 헬리컬 기어의 치폭을 34.8, 30.8, 26.8 mm로 감소시켰을 때, 안전율은 2축 헬리컬 기어에서 각각 1.174, 1.174, 1.140으로 나타났으며, 3축 헬리컬 기어에서 각각 1.332, 1.332, 1.304으로 나타났다. 3축기어의 치폭을 각각 22, 18 mm으로 고정하여 굽힘 안전율을 시뮬레이션 한 결과, 2축 헬리컬 기어와 3축 헬리컬 기어의 굽힘 안전율이 모두 1로 나타났다.

3축 헬리컬 기어의 치폭을 30, 26 mm으로 고정하여 굽힘 안전율 시뮬레이션을 진행하였을 때, 2축 헬리컬 기어의 치폭이 30.8 mm에서 26.8 mm으로 감소하면서 굽힘 안전율이 급격히 감소하였다. 이는 구동 기어인 2축 헬리컬 기어의

치폭이 피동 기어인 3축 헬리컬 기어의 치폭보다 작기 때문에 2축기어의 치폭을 30.8 mm까지 줄이면서 최적설계 하는 것이 안전하다고 판단되었다.

### 접촉 안전율

농업용 감속기의 2축 헬리컬 기어와 3축 헬리컬 기어 치폭 변화에 따른 접촉 안전율을 시뮬레이션한 결과는 Fig. 3과 같이 나타났다. 2축 헬리컬 기어와 3축 헬리컬 기어 치폭이 각각 38.8 mm와 30 mm일 때, 안전율은 2축 기어와 3축 기어에서 1.471, 1.560로 높은 안전율을 보여 경량화 설계가 필요한 것으로 판단되었다. 3축 헬리컬 기어의 치폭을 30 mm로 고정하고 2축 헬리컬 기어의 치폭을 34.8, 30.8, 26.8 mm로 감소시켰을 때, 안전율은 2축 헬리컬 기어에서 각각 1.469,

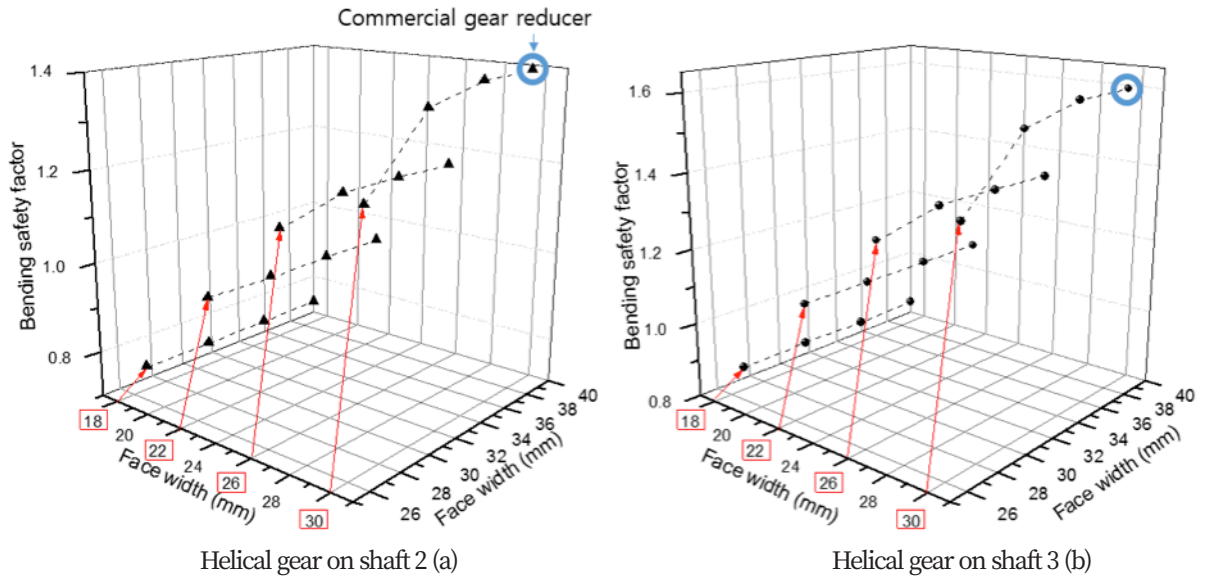


Fig. 2. Results of bending safety factor simulation for an agricultural gear reducer.

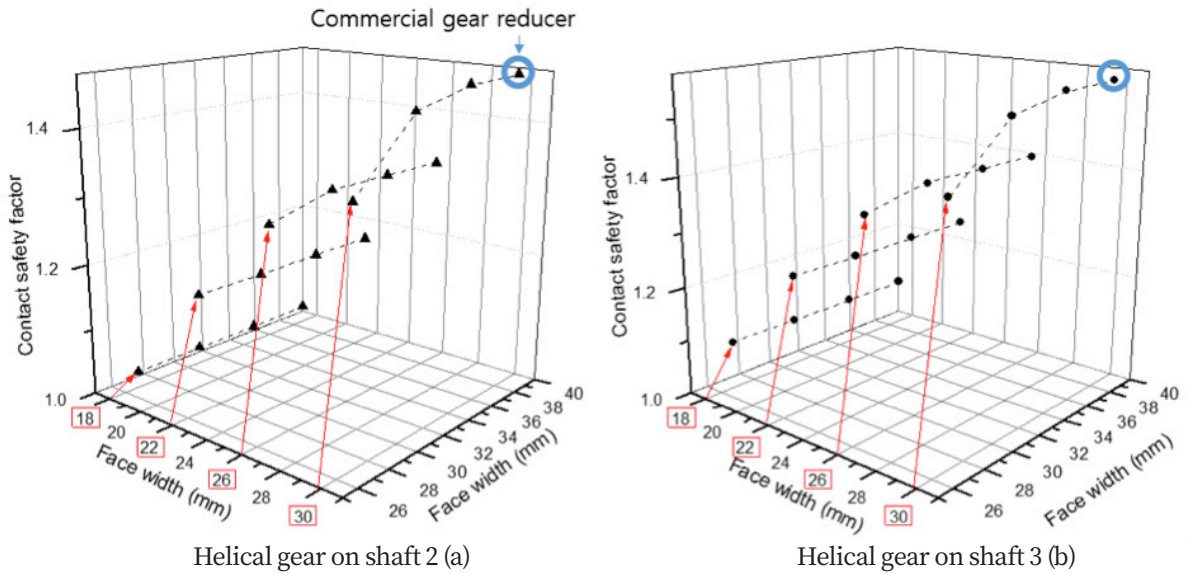


Fig. 3. Results of contact safety factor simulation for an agricultural gear reducer.

1.448, 1.355로 나타났으며, 3축 헬리컬 기어에서 각각 1.558, 1.536, 1.437으로 나타났다. 또한, 3축 헬리컬 기어의 치폭을 26 mm로 고정하고 2축 헬리컬 기어의 치폭을 38.8, 34.8, 30.8, 26.8 mm로 감소시켰을 때의 안전율은 2축 헬리컬 기어에서 각각 1.324, 1.324, 1.324, 1.303으로 나타났으며, 3축 헬리컬 기어에서 각각 1.404, 1.404, 1.404, 1.382으로 나타났다. 3축 헬리컬 기어의 치폭을 22 mm으로 고정하고 2축 헬리컬 기어의 치폭을 38.8, 34.8, 30.8, 26.8 mm로 감소시켰을 때의 안전율은 2축 헬리컬 기어에서 모두 1.177로 나타났으며 3축 헬리컬 기어에서 모두 1.248로 나타나 치폭 변화에 따른 안전율 변화가 없었다. 또한 3축 기어를 18 mm로 고정하고 2축 헬리컬 기어의 치폭을 줄였을 때에도 2축 헬리컬 기어와 3축 헬리컬 기어에서 각각 1.026, 1.088로 변화가 없었다.

굽힘 안전율과 마찬가지로 3축 헬리컬 기어의 치폭을 30, 26 mm으로 고정하여 접촉 안전율 시뮬레이션을 진행하였을 때, 2축 헬리컬 기어의 치폭이 30.8 mm에서 26.8 mm으로 감소하면서 접촉 안전율이 급격히 감소하였다. 이는 굽힘 안전율과 마찬가지로 구동 기어인 2축 헬리컬 기어의 치폭이 피동 기어인 3축 헬리컬 기어의 치폭보다 작기 때문에 2축기어의 치폭을 30.8 mm까지 줄이면서 최적설계 하는 것이 안전하다고 판단되었다.

### 안전율 시뮬레이션 결과

3축 헬리컬 기어의 치폭을 30 mm으로 고정하고, 2축 헬리컬 기어의 치폭을 30.8 mm에서 26.8 mm로 감소시켰을 때, 굽힘 안전율은 2축 헬리컬 기어에서 1.364에서 1.219로 약 10% 감소하였으며, 3축 헬리컬 기어에서는 1.559에서 1.393으로 약 10% 감소하였다. 또한 접촉 안전율은 2축 헬리컬 기어에서 1.448에서 1.355로 약 6% 감소하였으며, 3축 헬리컬 기어에서는 1.536에서 1.437로 약 6% 감소하여 감소하여 양산품이 보유하고 있는 안전율의 범위를 유지하고 치폭을 줄이기 위해서는 2축 헬리컬 기어의 치폭을 30.8 mm, 3축 헬리컬 기어의 치폭을 30 mm로 해야 하는 것을 알 수 있다.

또한, 2축 헬리컬 기어와 3축 헬리컬 기어를 각각 26.8과 26 mm로 감소시킨 경우의 굽힘 안전율은 2축 헬리컬 기어와 3축 헬리컬 기어에서 각각 1.140, 1.304이고 접촉 안전율은 2축 헬리컬 기어와 3축 헬리컬 기어에서 각각 1.303, 1.382로 모두 1 이상을 만족하여 최대 경량화 치폭은 2축 헬리컬 기어가 26.8 mm, 3축 헬리컬 기어가 26 mm 임을 알 수 있다.

그러나 안전율은 사용 환경과 사용 방법에 따라 다르므로 본 연구에서 진행한 시뮬레이션 결과값을 참고하여 적절한 안전율을 선정하여 최적설계를 진행하는 것이 중요하다고 판단되었다.

## Conclusion

본 연구는 농업용 감속기를 상용 소프트웨어를 이용하여 감속기의 치폭 변화에 따른 안전율을 시뮬레이션 하였으며, AGMA (2001) 규격을 기반으로 수행하였다. 그 주요 결과는 다음과 같다. 2축 헬리컬 기어와 3축 헬리컬 기어를 각각 26.8과 26 mm로 감소시킨 경우의 굽힘 안전율은 2축 헬리컬 기어와 3축 헬리컬 기어에서 각각 1.140, 1.304이고 접촉 안전율은 2축 헬리컬 기어와 3축 헬리컬 기어에서 각각 1.303, 1.382로 모두 1 이상을 만족하여 최대 경량화 치폭은 2축 헬리컬 기어가 26.8 mm, 3축 헬리컬 기어가 26 mm 임을 알 수 있다. 그러나, 양산품이 보유하고 있는 안전율의 범위를 유지하고 치폭을 줄이기 위해서는 2축 헬리컬 기어의 치폭을 30.8 mm, 3축 헬리컬 기어의 치폭을 30 mm로 해야 하는 것을 알 수 있다. 또한, 본 연구는 감속기의 구조, 사용목적과 사용방법 등을 고려하지 않고 사용 모터 환경에 적합한 시뮬레이션을 진행했으므로, 감속기의 구조, 사용목적과 사용방법에 적합하도록 안전율을 선정하여 최적 설계를 진행하는 것이 중요하다고 판단되었다.

## Acknowledgements

본 연구는 농림축산식품부 첨단생산기술개발사업(115059-2)으로 수행되었습니다.

## References

- Afsharnia F, Marzban A. 2017. The effect of usage and storing conditions on John deere 3140 tractor failures in Khouzeestan province, Iran. *Journal of Biosystems Engineering* 42:75-79.
- AGMA (American Gear Manufacturers Association). 2001. Fundamental rating factors and calculation methods for involute spur and helical gear teeth. In AGMA C95:2001.
- Chung SO, Kim YJ, Lee KH, Lee CH, Noh HK. 2017. Growth characteristics of chrysanthemum according to planting density. *Korean Journal of Agricultural Science* 44:604-612. [in Korean]
- Hong SJ, Park SB, Kang NR, Kim YJ, Chung SO. 2017. Performance evaluation of a 400 W precise window motor for glass houses. *Korean Journal of Agricultural Science* 44:595-603. [in Korean]
- Hwang JG. 2005. Robust design of spur and helical gears using AGMA. [in Korean]
- Jang JH, Chung SO, Choi CH, Park YJ, Chun WK, Kim SI, Kwon OW, Kim CW, Hong SJ, Kim YJ. 2016. Effect of PTO gear face width on safety factors. *Korean Journal of Agricultural Science* 43:650-655. [in Korean]
- Jin BO, Lee MH, Jo JS, Jung HJ, Kim CH, Kim HT. 2017. Analysis of the cutting shape as a function of feed rate and cutting speed of Korean and Japanese combines. *Journal of Biosystems Engineering* 42:80-85.
- Kim TH, Jang JH, Lee DG, Kim LS, Lyu SK. 2015. Study on optimal design and analysis of worm gear reducer for high place operation car. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* 14:98-103. [in Korean]
- Kim TW, Hwang YK, Lee CM. 2013. Design of a reduction gear using double-enveloping worm gear. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* 30:785-789. [in Korean]
- Lee PU, Chung SO, Choi CH, Joo JH, Rhee JY, Choi YS, Ha JW, Park YJ, Hong SJ, Kim YJ. 2016. Load capacity simulation of an agricultural gear reducer by surface heat treatment. *Korean Journal of Agricultural Science* 43:656-664. [in Korean]
- Park YJ, Lee GH, Kim JK, Song JS, Park SH. 2011. Analysis of load distribution and sharing on the planetary reducer for wind turbines. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers* 20:830-836. [in Korean]
- Yoon HJ. 2015. A study on the failure of reducer for the multi-smoke projectile launching system by impact load. *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology* 17:1085-1090. [in Korean]