

## 소형 전기자동차용 감속기 설계

이재구\*, 김성훈\*\*, 한성길\*\*, 신유인\*\*, 송철기\*\*,#

\*성화산업(주), \*\*경상대학교 기계공학부, ERI,

### Design of a Reducer Gear for Small Electric Vehicles

Jae-gu Lee\*, Sung-Hoon Kim\*\*, Sung-Gil Han\*\*, Yoo-In Shin\*\*, Chul Ki Song\*\*,#

\*SH Industrial Co. Ltd., \*\*School of Mechanical Eng., ERI, Gyeongsang National Univ.,

(Received 12 May 2020; received in revised form 09 June 2020; accepted 10 June 2020)

#### ABSTRACT

In recent times, fuel economy enhancement and environmental regulation compliance have become the main topics of interest in the automobile industry. Electric vehicles are desirable alternatives to the existing cars that employ internal combustion engines. Specifically, electric vehicles are equipped with inverters, motors, and a gearbox instead of engines and transmission mechanisms. The gearbox is a key component, used to transmit power from the electric motor to the wheel. Therefore, the design of the gearbox is critical. However, most engineers design gears based only on their experience because no standards pertaining to the design factor exist, other than those for the gear ratios. To overcome this problem, the structural stabilities must be examined considering the design factors of the gears. In this study, we considered the module and number of teeth as the main factors. The constraints corresponded to the final gear ratio and fixed distance between each axle of the shafts. Moreover, a structural analysis was conducted, and the variation trend of the maximum equivalent stress against changes in the gear module and number of teeth was examined. By performing such an analysis, the structural stability in the design of a gear system could be effectively investigated.

**Key Words :** Helical Gear(헬리컬 기어), Module(모듈), Gear Ratio(기어비), Reduction Gear(감속기), Structural Analysis(구조해석)

### 1. 서 론

최근 자동차 산업에서는 환경 규제 및 연료 효율 등이 최대 화두로 떠오르면서 내연기관 차량의 대안으로 전기자동차가 대두되고 있다. 전기자동차는 내연기관과 달리 고정된 기어비를 사용하는

감속기를 통해 동력이 전달되기 때문에 제품의 목표 가속능력, 출력 토크와 같은 뚜렷한 기준에 따라 선정된다. 하지만 감속기의 동력전달 매개체인 기어의 경우 뚜렷한 기준이 없어 과거의 경험에 의존하여 설계되고 있다. 또한, 감속기의 동력 전달 매개체로 사용되는 기어는 오랜 기간 기계 산업에서 매우 중요한 역할을 수행하고 있으며 최근에는 종래의 기어와는 다른 성능이 추가로 요구되고 있다<sup>[1-2]</sup>.

# Corresponding Author : cksong@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1633, Fax: +82-55-772-1577

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기어의 파손 유형으로는 기어 구동 간 마찰에 의해 접촉면이 뜯기거나(pitting), 이뿌리가 파손되는 경우이다. 이러한 기어의 파손 여부를 예측 및 회피하기 위하여 기어의 구조적 안정성 및 강도평가에 관한 많은 연구가 수행되고 있다<sup>[3-4]</sup>.

본 연구에서는 기어에 대한 구조해석을 통해 기어의 형상 설계 시 주로 고려되는 설계 인자가 구조적 안정성에 미치는 영향에 대해 파악하고자 한다. 일반적으로 기어는 감속기의 장착 크기와 목표 기어비가 정해진 상태에서 설계되는 경우가 많다. 따라서, 감속기의 최종 감속비가 선정된 경우, 동력 전달 과정에서 기어의 설계 인자에 따른 등가응력 경향을 분석하여 기어의 구조적 안정성에 대해 효율적으로 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 기어설계 변수 선정

### 2.1 감속기 기어 설계

해석 대상은 Fig. 1~ 2와 같이 3개의 축을 통해 동력이 전달되는데, 그 과정에서 2개의 기어쌍이 만난다. 기어 설계 시 사용된 조건은 Table 1과 같으며, 기어의 축간 거리는 다음 식 (1)과 같다.

$$L_1 = \frac{M_1(Z_1 + Z_2)}{2\cos\beta}, L_2 = \frac{M_2(Z_1 + Z_2)}{2\cos\beta} \quad (1)$$

위 식에서  $\beta$ 는 helix angle이며,  $L_1, L_2$ 는 각 기어쌍의 축간 거리,  $M_1, M_2$ 는 모듈,  $Z_1, Z_2$ 는 잇수이다. 기어 설계 시 검토해야 할 사항은 크게 기어비, 모듈, 축간 거리이다. 축간 거리는 기어비와

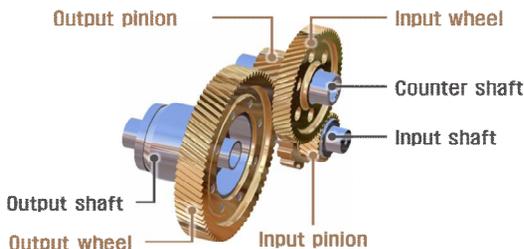


Fig. 1 The 3D modeling of the gear system

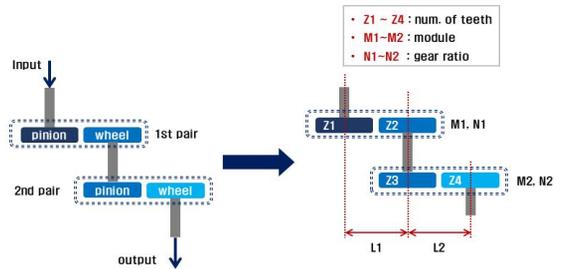


Fig. 2 A schematic diagram of the gear system

Table 1 Design specification of the reduction gear

Name	Value
Module	1.0 ~ 3.0
Pressure angle[°]	20
Helix angle[°]	20
Residual backlash	0.22
Clearance	0.20

모듈에 의해서 결정된다. 최종 감속비는 사전에 설정됐기 때문에 축간 거리도 자연스럽게 결정된다.

### 2.2 설계 변수

헬리컬 기어 치형의 주요 설계인자로써는 모듈, 잇수, 압력각, 피치원(pitch circle) 등이 있다. 피치원은 기어가 맞물리는 위치를 정하는 기준으로 모듈과 잇수의 곱으로 계산된다. 따라서 피치원은 기어의 맞물림과 기어간 거리를 결정짓는 요소로써 기어 설계에 지대한 영향을 미친다. 앞서 언급한 바와 같이 최종 기어비가 고정된 상태에서는 축간 거리도 결정되기 때문에 기어의 치형을 결정 짓는 변수는 모듈과 기어 잇수이다.

이에 따라 본 연구에서의 설계 변수를 모듈과 각 기어쌍의 기어비를 고려하여 감속기 구동 간 기어에 발생하는 응력 경향을 확인하고 이에 따른 감속기 기어의 구조적 안정성을 분석하고자 한다.

모듈에 따른 경향과 기어비에 따른 경향을 파악하기 위해 크게 2개 경우로 나눠 해석을 수행하였다. 먼저 모듈을 고려할 경우, 첫 번째 기어쌍의 조건을 고정한 상태에서 두 번째 기어쌍의 모듈 변화에 따른 응력 발생 경향을 분석하였다. 그리고 기어비에 따른 응력 발생 경향은 첫 번째 기어쌍의

**Table 2** The cases for structural analysis depends on gear module

Module Cases	the 1st pair			the 2nd pair		
	module	num. teeth		module	num. teeth	
		pinion	wheel		pinion	wheel
M-case 1	2	22	64	1.0	60	180
M-case 2				1.5	40	120
M-case 3				2	30	90
M-case 4				2.5	24	72
M-case 5				3.0	20	60

**Table 3** The cases for structural analysis depends on the gear ratio

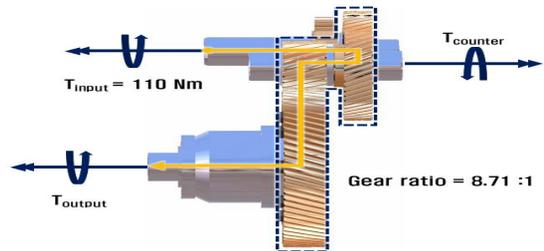
Gear ratio Cases	the 1st pair				the 2nd pair			
	module	num. teeth		gear ratio	module	num. teeth		gear ratio
		pinion	wheel			pinion	wheel	
G-case 1	2	22	64	2.91	2.5	24	72	3.00
G-case 2		23	63	2.74		23	73	3.17
G-case 3		25	61	2.44		21	75	3.57
G-case 4		26	60	2.31		20	76	3.80

기어비를 고정시킨 상태에서 두 번째 기어쌍의 기어비에 따른 등가응력을 분석하였다. 일반적인 기어 설계 시, 맞물리는 두 기어의 잇수는 서로소가 되도록 하는 것이 바람직하다. 이러한 설계의 이유는 서로 동일한 기어 이에만 물리는 것을 피하기 위함이다. 하지만 본 연구에서는 기어의 구조적 안정성 경향에 대해서만 파악하고자 하여 서로소를 고려하지 않았다. 설계 변수에 관한 내용은 Table 2, 3과 같다.

### 3. 구조해석

#### 3.1 구조해석 조건

해당 감속기의 최종감속비는 8.71:1이며, 적용되는 모터의 최대 토크는 110 Nm이다. 따라서 첫 번째 기어쌍의 하중 조건은 110 Nm를 적용하였으며 두 번째 쌍의 경우 기어비가 고려된 모멘트를 적용하였다. 모멘트는 베어링 결합부에 설정하였으며 구동 기어 및 피동 기어의 베어링 결합부에 레볼루트 조인트(Revolute joint) 조건을 설정하였다. 또한, 기어 접촉 조건은 비선형 마찰 조건을 부여하였으며, 마찰계수는 0.3으로 설정하였다.



**Fig. 3** A schematic diagram of the gear system

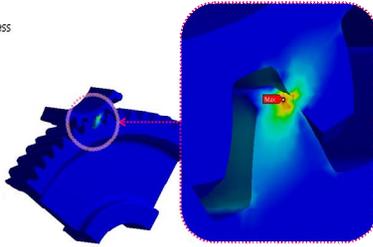
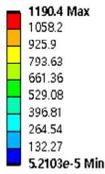
#### 3.2 구조해석 결과

해석은 모듈과 기어비 2개 변수, 총 9가지 경우에 대해 수행하였으며 각 변수에 따른 응력 경향과 케이스별 기어의 등가응력 분포를 Fig. 4~7에 나타냈다.

먼저, 모듈을 고려한 경우(M-case), 모듈이 증가함에 따라 등가응력이 감소했으나 모듈이 2.5 이상에서는 다시 증가했다. 즉, 모듈이 2.5일 때 등가응력이 최소임을 알 수 있다.

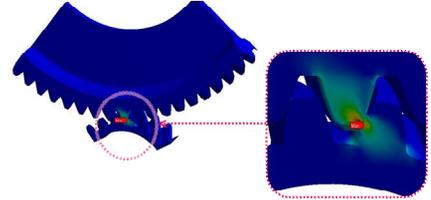
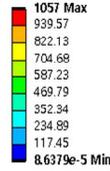
기어비를 고려한 경우(G-case), 기어비가 감소함에 따라 등가응력이 증가하는 경향이 나타났으나 기어비가 2.44일 때 최댓값을 가지고 다시 감소하였다. 또한, 첫 번째 기어쌍의 등가응력 변동 폭은

Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 5.e-002



(a) The 1<sup>st</sup> pair

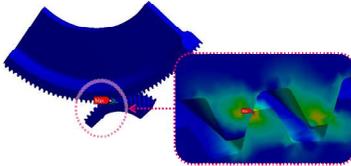
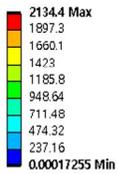
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 5.e-002



(f) The 2<sup>nd</sup> pair of M-case 5

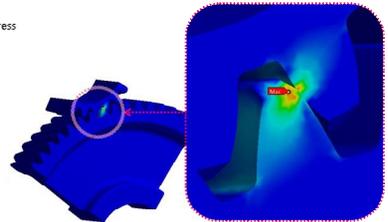
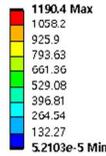
Fig. 4 The equivalent stress of each M-case

Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 5.e-002



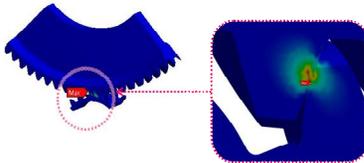
(b) The 2<sup>nd</sup> pair of M-case 1

Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 5.e-002



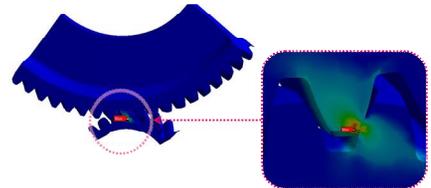
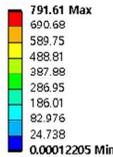
(a) The 1<sup>st</sup> pair of G-case 1

Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 5.e-002



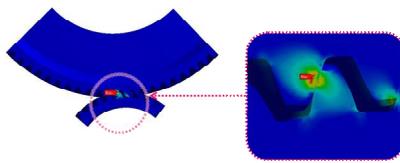
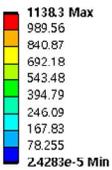
(c) The 2<sup>nd</sup> pair of M-case 2

Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 5.e-002



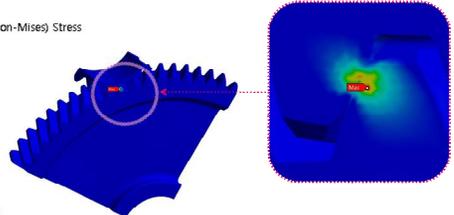
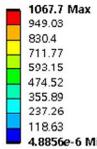
(b) The 2<sup>nd</sup> pair of G-case 1

Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 5.e-002



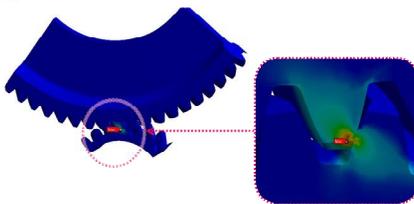
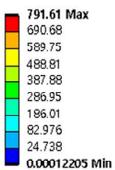
(d) The 2<sup>nd</sup> pair of M-case 3

Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 5.e-002



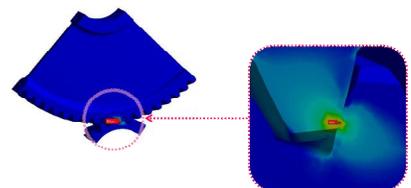
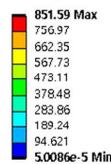
(c) The 1<sup>st</sup> pair of G-case 2

Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 5.e-002

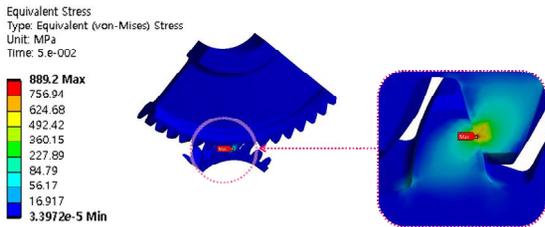


(e) The 2<sup>nd</sup> pair of M-case 4

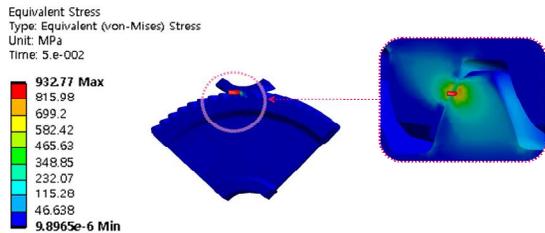
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 5.e-002



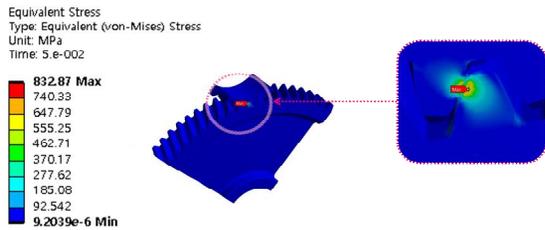
(d) The 2<sup>nd</sup> pair of G-case 2



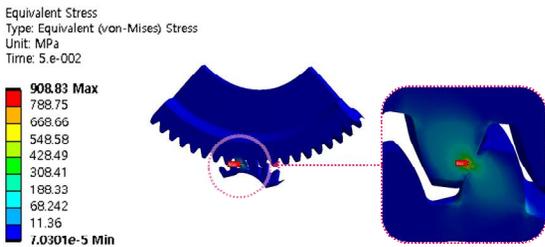
(e) The 1<sup>st</sup> pair of G-case 3



(f) The 2<sup>nd</sup> pair of G-case 3



(g) The 1<sup>st</sup> pair of G-case 4



(h) The 2<sup>nd</sup> pair of G-case 4

Fig. 5 The equivalent stress of each G-case

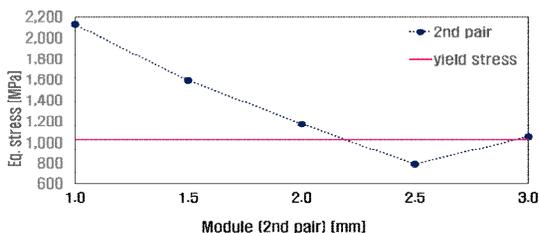


Fig. 6 The equivalent stress of each M-case

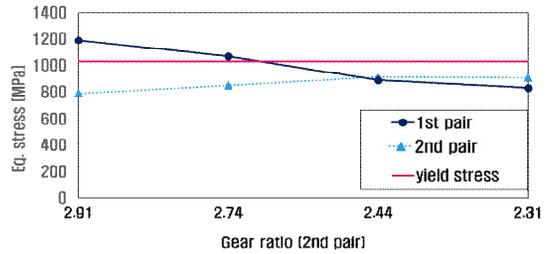


Fig. 7 The equivalent stress of each G-case

두 번째 기어쌍에 비해 크다는 것을 확인할 수 있다. 구조해석 결과를 토대로 9가지 경우 중 최적 기어 조건은 G-case 4로 도출되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 소형 전기자동차에 장착되어 모터의 동력을 감속시켜 토크를 증대시키는 감속기 기어에 대한 구조해석을 수행하였다. 본 연구에 대상인 감속기는 3개의 축과 2개의 기어쌍으로 구성되어 있다. 동력을 전달하는 과정에서 축 간 거리에서 기어의 설계 변경에 따른 안정성 추이를 분석하여 기어 설계의 구조적 안정성에 대하여 검토하였다. 기어 모듈과 잇수를 설계 변수로 총 9가지 기어쌍에 대한 구조해석을 수행한 결과, 축 간 거리가 동일한 경우 모듈이 커질수록 안전율이 증가하지만, 최댓값을 가지는 모듈값이 존재했다. 또한, 축간 거리가 동일할 경우 첫 번째 기어쌍의 기어비가 감소할수록 첫 번째 기어쌍의 안전율은 증가하지만 두 번째 기어쌍의 안전율은 감소한다. 본 연구에서는 첫 번째 기어쌍과 두 번째 기어쌍의 안전율을 모두 고려했을 때 G-case 4 조건이 최적의 기어 조건으로 판단된다.

차후 연구에서는 기어의 잇수를 서로소로 제한하고 축간 각도를 고려한 연구를 진행하여 실제 산업에 적용 가능한 최적의 감속기를 설계할 수 있을 것으로 사료된다.

#### REFERENCES

1. Karray, M., Chaari, F., Rincon, A., Viadoro, F.,

- and Haddar, M., “An experimental Investigation of the Dynamic Behavior of Planetary Gear Set”, Design and Modeling of Mechanical Systems, pp.199~206, 2013.
2. Balbayev, G. and Ceccarelli, M., “Design and Characterization of a New Planetary Gear Box”, Proceedings of the Second Conference MeTrApp, Vol. 17, pp. 91~98, 2014.
  3. Wang, C. Y., “Design of Planetary Gear Reducer with Double Circular-Arc Helical Gear”, Journal of AMM Vol. 152-154, pp. 1595-1600, 2012.
  4. Shin, Y. I., Shin, S. H., Oh, T. I., Suh, J. S. and Song, C. K., “Mass Reduction of Transmission Gears for Commercial Vehicles”, Korean Society for Precision Engineering, Vol. 29 No. 3, pp. 319~323, 2012.
  5. Kawalec, A., Wiktor, J. and Ceglarek, D., “Comparative Analysis of Tooth-Root Strength Using ISO and AGMA Standards in Spur and Helical Gears With FEM-based Verification”, Journal of ASME Vol.128, pp. 1141~1158, 2006.
  6. Kim, K. T. and Chung, J. S., Application and Technology of Basic Gear, YeMoon Press., 2003.
  7. Hong, J. P., Mechanical Design, Kyobo Press., 2008.
  8. Lim, J. K., Cho, K. J. and Kim, Y. S., Mechanics of Solids, Sigmapress, 1<sup>st</sup> Ed., pp.501~522, 1996.
  9. Choi, D. K., Introduction to tensor analysis, bumhanbook, 2003.
  10. Choi, C. K., Finite Element Method, Technopress, 1<sup>st</sup> Ed., pp.1~10, 2002.
  11. WB Mechanical Structural Nonlinearities, 2013.