

# 마이크로 지오메트리 방법을 이용한 크로스 드릴링/밀링 유닛 구동기어의 동력전달 최적화에 관한 연구

김동선\*, 진진\*, 백권인\*, 우위팅\*, 전남술\*\*, 류성기\*<sup>#,</sup>

\*경상대학교 대학원 기계항공공학부, 항공연, \*\*㈜금화테크 기술연구소

## Power Transmission Optimization Based on the Driving Gear of a Cross Drilling/Milling Unit using a Micro Geometry Method

Dong-Seon Kim\*, Zhen Qin\*, Gwon-In Beak\*, Yu-Ting Wu\*, Nam-Sul Jeon\*\*  
and Sung Ki Lyu\*<sup>#,</sup>

\*School of Mechanical & Aerospace Eng., ReCAPT, Gyeongsang national University,

\*\*Gyeumhwa Technology LTD, R&D Center

(Received 12 March 2019; received in revised form 28 March 2019; accepted 04 April 2019)

### ABSTRACT

A cross drilling/milling Unit is an important mechanical part which is widely used in many kinds of machining tool, and various gear trains with good accuracy and reliability features are widely used in power transmission systems. A study on a novel power transmission optimization method for driving gear trains in cross drilling/milling units is presented in this paper. A commercial program for gear system simulation, Romax Designer, was used in this research to intuitively observe the gear meshing and the load distribution conditions on the gear teeth. We obtained the optimal modification value through comparing the results of repeated experiments. For validation, optimized gears were fabricated and then measured with a precision tester.

**Key Words :** Cross Drilling/Milling Unit(크로스 드릴링/밀링 유닛), Profile Error (형상오차), Lead Error (리드 오차), Micro Geometry (마이크로 지오메트리), Gear Train(기어 트레인)

### 1. 서 론

고정밀 Cross Drilling/Milling Unit은 공작기계의 일종인 자동선반에 장착되어 소재를 가공하는 공구를 회전시키는 핵심기능을 수행하는 공작기계용 핵심구성품이다. 가공물의 형상에 따라 공구의 고속 회전 동작과 몸체의 틸트 동작을 동시에 실현시키

는 고정밀/고강성 회전공구 유니트는 가공정밀도의 향상을 위해 높은 회전정밀도와 저진동/저소음 특성이 요구되고 있다.

정밀기계 산업 분야의 관심도가 증가할수록 동력을 전달하는 정밀기어 시스템에 대한 관심도 또한 증가하고 있다. 이는 기어의 수명과 성능이 소음과 진동에 따라 큰 영향을 받기 때문이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 보다 최적의 기어설계가 필요하므로 기어의 지오메트리 치형설계에 관한 연

# Corresponding Author : sklyu@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1632, Fax: +82-55-772-1578

구를 많이 수행하고 있다.<sup>[1-6]</sup> 기어설계의 기본은 micro geometry 방식이며, 치형설계가 되지 않은 기어는 맞물림 구동시 기어치면에 불균일한 하중의 문제를 야기한다. 이로 인한 결과는 기어간의 충돌과 맞물림을 발생시키는 원인이 되며, 기어 치면의 방향과 축 방향에 부하가 걸리기 때문에 구동장치의 전체에 결함을 초래할 수 있으므로 정밀 기어 설계 기술개발의 관심과 연구가 진행되고 있는 상황이다. 치형 최적화를 위해 실제 모델을 통한 기어 지오메트리 수정으로 전달오차의 최소화 및 최적화 작업은 시간과 비용 측면에서 비효율적이다. 효율적인 최적화 작업을 위해 시뮬레이션 모델을 이용하여 지오메트리 최적화 작업을 수행하고, 기어 치형 설계 최적화를 이룰 수 있다.

컴퓨터 기술의 발달에 따라서 프로그램 해석 기술의 발달도 동시에 빠르게 발전하고 있다. Romax Designer는 기어표준의 제공된 여러 가지 공식에 의해서 최적 설계를 수행하는 프로그램이다.

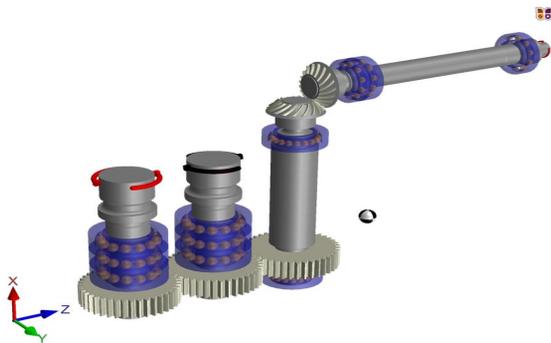


Fig. 1 3D modeling of driving gear system

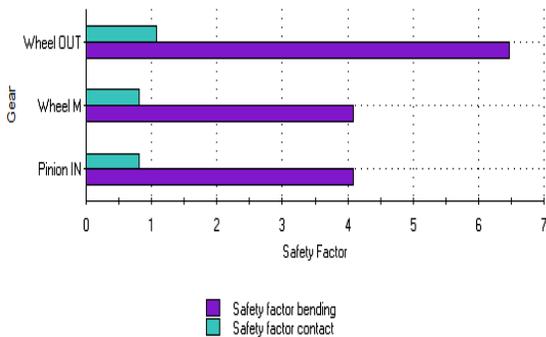


Fig. 2 Safety factor of drive gear set

본 논문은 cross drilling/milling unit의 구동부 기어박스에 대해 Romax Designer에 제공된 micro geometry방법을 이용하여 최적화 설계를 수행하였다. 기어의 치형을 수정하여 결과에 따른 응력분포와 transmission error를 반복확인을 통해 최적화된 기어치형 수정량을 찾는다. 최종적으로 수정된 스피어 기어를 제작하여 기어의 정밀도를 측정 및 결과 비교를 수행하였다.

## 2. 모델링 및 고찰

Cross drilling/milling unit의 구동부 시스템은 입력부의 shaft의 동력으로 스피어럴 베벨기어를 통하여 수직방향으로 동력전달이 이루어진다. 스피어기어 직렬 세 개의 구동방식으로 두 개의 출력으로 동력의 전달이 된다. 구동축의 입력 회전수 6000 rpm 이고 토크는 3.3 Nm 이다. Fig. 1은 해석을 위한 기어 시스템의 모델링을 나타낸 것이다.

그리고 기어 강도 계산결과 안전계수는 Fig. 2와 같이 나타났다. 입력은 실제가동시의 부하보다 세 배를 적용하였다. 안전계수를 분석한 결과 실제가동시 문제가 없을 것으로 판단되었다.

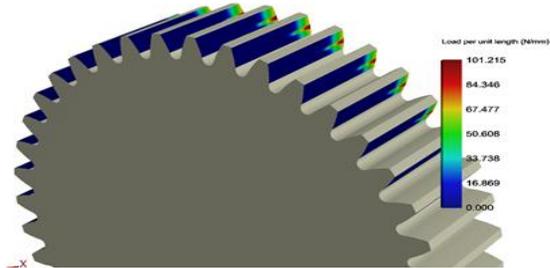
## 3. 치형 최적화 및 고찰

기어의 최적화 설계 방법은 크게 2가지 수정법으로 분류된다. 먼저 macro geometry방식은 기본적인 기어의 잇수, 직경, 압력각을 수정하고 변형하여 기어를 최적화시켜 성능을 향상시킬 수 있다. 하지만 규격화된 기어와 달리 제작이 필요해서 비용이 많이 소요된다는 단점을 가지고 있다. 반면 micro geometry방식은 기어 치면의 윤곽을 미세하게 수정함으로써 기어 전달효율을 향상시키고 제작 단가에 영향을 미치지 않는다는 장점을 가지고 있다.<sup>[7]</sup>

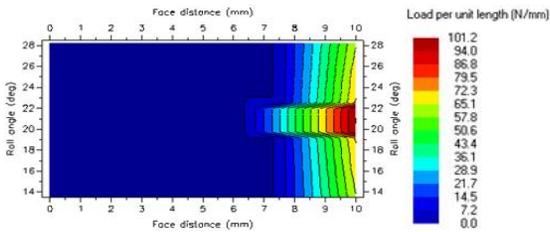
본 논문에서는 기어 최적화 설계를 수행함에 있어, 최소한의 수정을 필요로 하는 micro geometry 수정법을 선택하여 진행하였다. Micro geomtry 수정법은 기어 이의 프로파일 방향의 가공 및 리드 방향의 가공으로 기존의 치면을 윤곽을 미세하게 제거하거나 보충하는 방식으로 새로운 기어 이의 치

면을 생성한다.

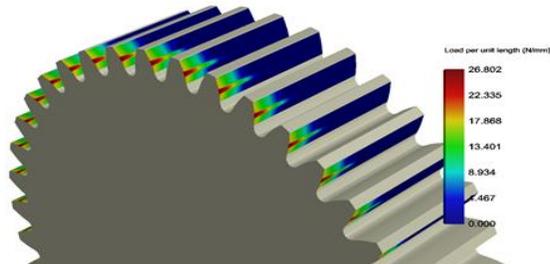
기어 이의 끝에서 응력집중현상은 기어의 수명에도 영향을 주게 된다. 또한 이러한 현상은 치면의 국부에서 마모 및 마찰을 야기하게 되고 이는 소음의 주요 원인이다.



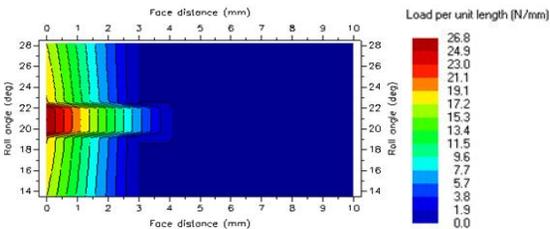
(a) 3D view of input pinion gear



(b) 2D view of input pinion gear

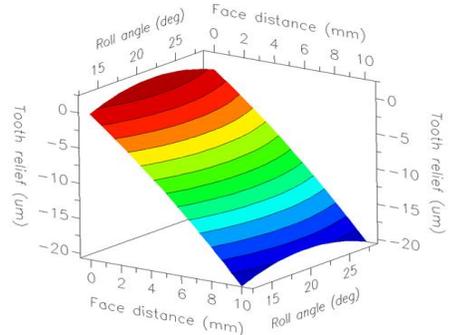


(c) 3D view of middle wheel gear

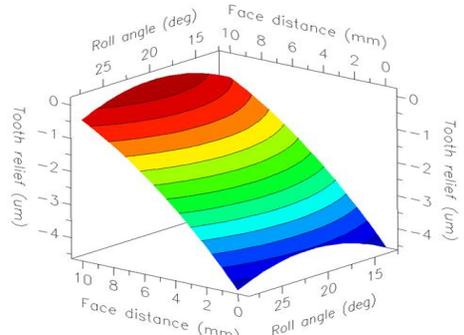


(d) 2D view of middle wheel gear

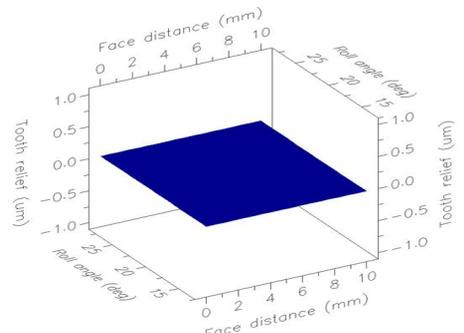
Fig. 3 Load distribution on meshing gear surface before micro geometry modification



(a) Input pinion flank



(b) Middle wheel gear flank



(c) Output wheel gear flank

Fig. 4 Gear flank form after modification

게다가 기어끝단은 중심부보다 취약하고 이는 쉽게 부러진다. 기어이의 맞물림에 따라서 기어끝단에서의 파손은 기어시스템 전체의 고장으로 이어지는 사례가 많다.

따라서 최대응력이 기어이의 중심부로 이동시키는 최적설계를 진행해야 한다. 수정대상에 따라 주요 프로파일 및 리드 방향의 수정 방법들로 나누어진다. 프로파일 방향의 치형 수정은 치 끝의 접촉

을 최소화하고 동적진동 및 소음을 개선할 수 있는 효과가 있다. 리드 수정의 방식으로 기어 치면적을 조절하여 치면에 하중이 불균일하게 분포되는 것을 방지하고 기어 축의 뒤틀림 방지할 수 있다. 최적화설계를 하기 전에 먼저 구동기어 모델에 대해 micro geometry analysis를 진행하였다.

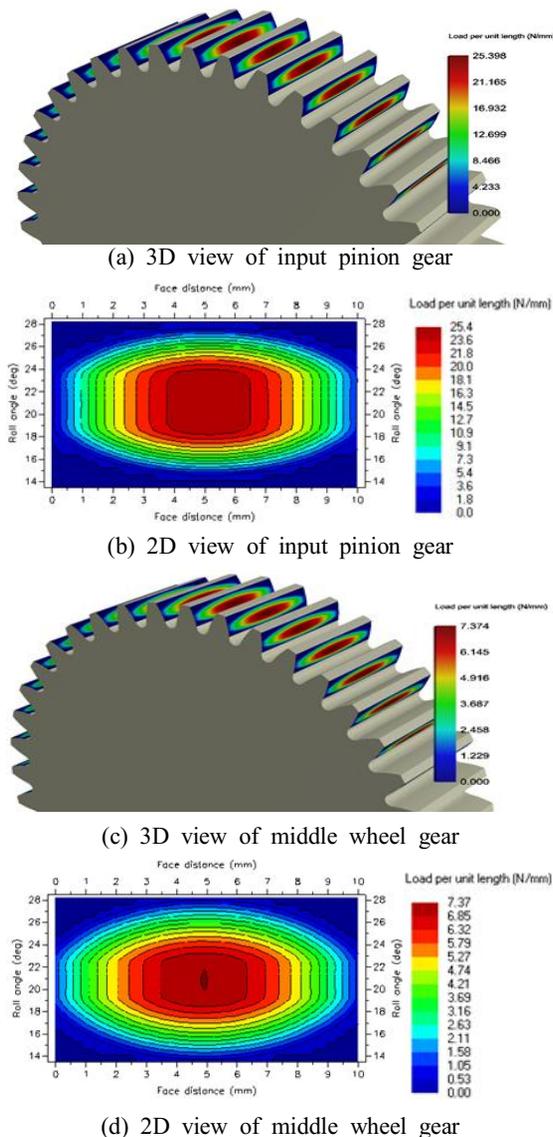


Fig. 5 Load distribution on meshing gear surface after micro geometry modification



Fig. 6 Spur driving gear product

Fig. 3 a), b)는 input pinion gear의 치면 응력분포 결과이고, Fig. 3 c), d)는 middle wheel gear의 치면 응력분포 결과이다. 응력이 기어의 한쪽으로 집중되어 있음을 확인할 수 있다. 최적의 치형 수정량을 선정하기 위해서 반복적인 치수 변경 및 micro geometry analysis를 수행하였다.

Fig. 4는 수정후의 최적화되는 기어의 치형을 나타냈다. 세 기어의 macro geometry parameter는 같지만 직렬위치에 따라서 서로 다른 부하를 받고 있기 때문에 micro geometry 수정량은 다르게 부여된다. 또한 원가절감을 위해서 최소한부품에 대해 수정을 진행해야 하므로 input pinion gear 및 middle wheel gear에서만 치형수정을 진행하였다. Input pinion gear의 리드수정은 크라운 0.5 $\mu\text{m}$ 만큼 수정하였고, 슬로프 -14.5 $\mu\text{m}$ , 인벌루트 수정량은 바렐링 2 $\mu\text{m}$ 만큼 수정하였다. Middle wheel gear의 리드수정은 크라운 0.2 $\mu\text{m}$ 만큼 수정하였고, 슬로프 2.92 $\mu\text{m}$ , 인벌루트 수정량은 바렐링 0.6 $\mu\text{m}$ , 슬로프 0.1 $\mu\text{m}$ 만큼 수정하였다. 최적화 이후의 input pinion gear 및 middle wheel gear의 응력분포는

Fig. 5와 같이 최대응력이 기어의 중심부로 이동한 것을 확인할 수 있다. 기어의 끝부분의 응력은 0에 가깝게 나타나고, 응력은 중심에서 끝단까지 균등하게 줄어드는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 측정결과 및 고찰

기어 정밀도 측정은 Tokyo Technical사 CNC기어 측정기를 사용하여 측정하였다. 스퍼 기어의 최적설계를 위해 고강도 기어강 소재인 SCM415를 사용

하여 기어를 제작하였으며, 소재를 국부 가열하고, 2차 성형을 수행하여 제품을 제작하였다. 스피어의 형상을 Fig. 6에 나타냈다. 그리고 기어소재로 사용한 SCM415 기계적 특성을 Table 1에 나타냈다. 기어의 표면경화처리는 침탄 방식으로 열처리를 하고, 표면경도는 55~60HRC 까지 확인되었다.

제작한 Driving Spur Gear의 기본 사양은 모듈 1.0 mm, 압력각 20°, 잇수 40개이다. 세 스피어 기어의 정밀도는 기어의 회전 중심을 측정기준으로 1, 11, 21, 31 번째 이에 대하여 좌우 양쪽 치면을 측정하였다.

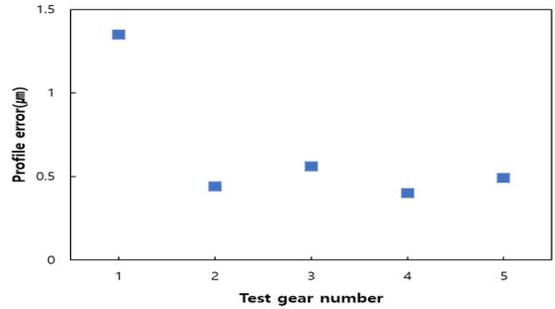
기어의 오차 측정은 5개의 시험기어를 가지고 측정기준에 따라 기어 1개 당 4개 기어 이의 오른쪽과 왼쪽으로 나누어 측정하여 평균값을 구하였다.

Fig. 7에 나타난바와 같이 왼쪽 치면의 프로파일 에러 평균값은 0.65  $\mu\text{m}$ , 오른쪽은 0.37  $\mu\text{m}$ 이며 평균값은 0.51  $\mu\text{m}$ 로 나타났다.

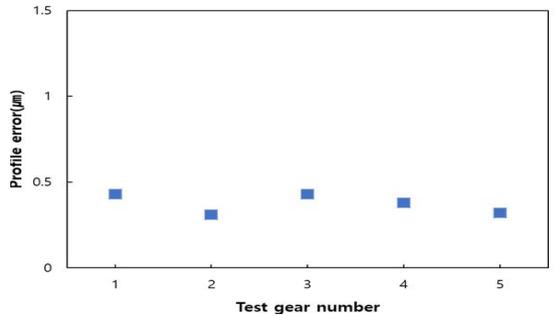
기어의 리드 오차 측정결과를 Fig. 8에 나타냈으며, 왼쪽 치면의 리드 에러 평균값은 0.69  $\mu\text{m}$ , 오른쪽은 0.73  $\mu\text{m}$ , 평균값은 0.71  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 리드 오차의 측정 기준에 따라 기어 1개 당 4개의 기어 이의 오른쪽과 왼쪽으로 나누어 측정하고 평균값을 구하였다. 피치 에러 측정 결과를 Fig. 9에 나타냈으며, 왼쪽 치면의 피치 에러 평균값은 10.12  $\mu\text{m}$ , 오른쪽은 10.16  $\mu\text{m}$ , 평균값은 10.14  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. Fig. 10은 런아웃 측정 결과이며, 런아웃 에러 평균값은 10.28  $\mu\text{m}$ 로 나타났다.

**Table 1 Spur gear materials**

Name	SCM415
-Young's modulus (GPa)	190-210
-Tensile strength (MPa)	1158
-Poisson's ratio	0.27-0.30
-Elongation (%)	15
-Yield strength (MPa)	1034
-Thermal expansion ( e-6/K)	16-17
-Thermal conductivity (W/m.K)	16
-Specific heat (J/kg.K)	500
-Melting temperature (°C)	1370-1400
-Density (kg/m3)	7700-8030

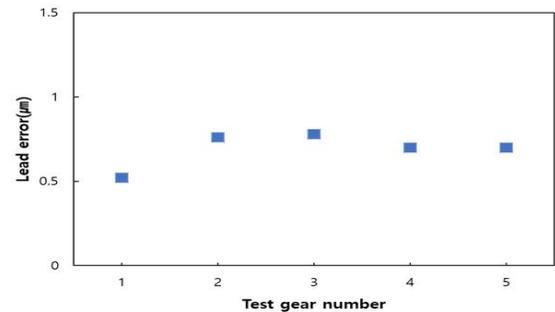


(a) Left tooth profile error

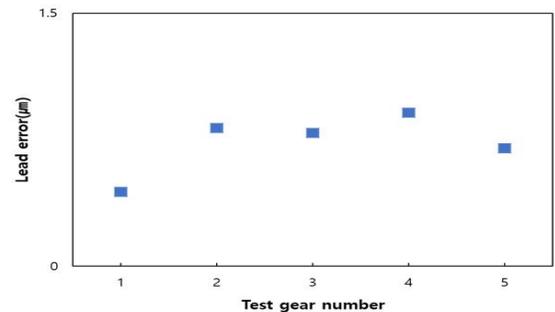


(b) Right tooth profile error

**Fig. 7 Result of profile error left & right**

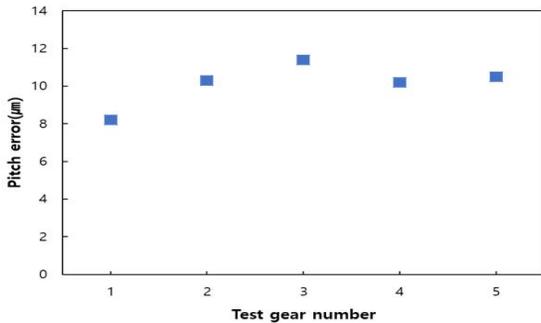


(a) Left tooth lead error

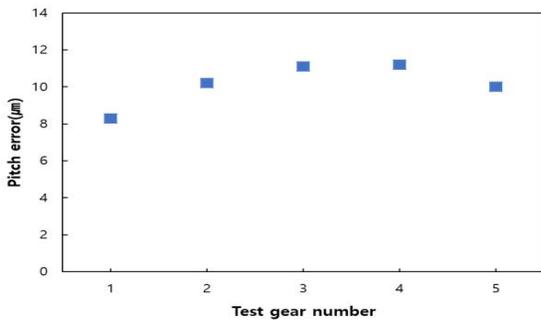


(b) Right tooth lead error

**Fig. 8 Result of lead error left & right**



(a) Left tooth pitch error



(b) Right tooth pitch error

Fig. 9 Result of pitch error left & right

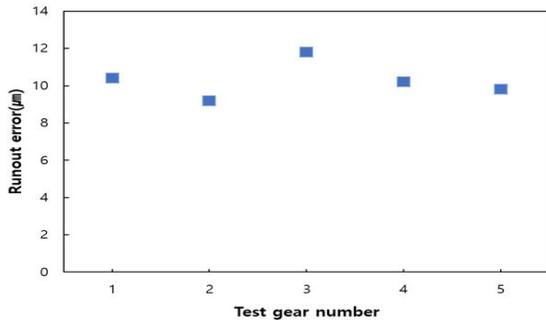


Fig. 10 Result of runout error

## 5. 결론

본 연구에서는 공작기계용 고정밀 Cross Drilling / Milling Unit의 구동부 기어박스에 대해 최적 설계를 수행하였다. 기어박스 설계 및 해석 전용 프로그램인 Romax Designer를 활용하여 기어트레인에 대해 모델링 후 micro geometry 시뮬레이션을 통해

치형 반복 수정을 수행하여 Profile 및 Lead 방향의 하중분포를 최적화하고 기어 내구성 향상 및 NVH 성능을 위해 전달오차를 최소화하는 치형 수정량을 파악하여 설계하였다. 최적화 해석 설계를 반영하여 실제 기어를 제작한 후에 기어의 정밀도에 대해 측정 및 결과 고찰을 진행하였다. 본 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

1. Romax Designer 프로그램을 활용하여 구동부의 기어트레인에 대해 모델링하고 치형 최적화를 위해 반복 Profile 및 Lead를 수정하고 micro geometry 시뮬레이션을 통해서 Unit의 기어박스 최적설계를 수행하였다.
2. Micro geometry 해석결과를 비교하여 수정 전 모든 스퍼기어의 응력분포가 기어 치면의 한쪽 끝단부에 집중되어 있는 반면 최적설계 이후에 응력분포가 한쪽 끝단부에서 치면의 중심부에 이동 되어있는 것을 확인하였다.
3. 치형수정 이후에 Input pinion gear 치면의 최대응력은 치형수정 전보다 75%를 줄였다. Middle wheel gear 치면의 최대응력도 73%를 개선된 것을 확인하였다. 이에 따라 기어 구동시 부하가 치면에 균등하게 분포된 것을 발견할 수 있다.
4. 최적화 설계된 시험 기어의 Profile Error 측정결과 좌측치면이  $0.65 \mu\text{m}$ , 우측치면이  $0.37 \mu\text{m}$ 로 나타났으며, 기어치면의 Profile Error 평균값은  $0.51 \mu\text{m}$ 으로 나타났다.
5. Lead Error 측정결과 좌측치면  $0.69 \mu\text{m}$ , 우측 치면  $0.73 \mu\text{m}$ 로 나타났고, 기어치면의 Lead Error 평균값은  $0.71 \mu\text{m}$ 으로 나타났다.
6. Pitch Error 측정결과 좌측치면이  $10.12 \mu\text{m}$ , 우측치면은  $10.16 \mu\text{m}$ 으로 나타났고, 기어치면의 Pitch Error 평균값은  $10.14 \mu\text{m}$ 으로 나타났다.
7. Runout Error 측정결과 Runout Error는  $10.28 \mu\text{m}$ 으로 나타났다.

## 후기

본 연구는 한국산업기술진흥원 지역주력산업육성사업(과제번호: P0002834)과 Romax Technology의 Romax Designer 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Zhang, Q., Zhang, J., Zhu, Z. G., Wang, Z. R., Xu, Z. Z., "Study on the Transmission Error Prediction for a Spur Gear Pair", J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 33, No. 2, pp. 109-114, 2016.
2. Zhang, Q., Wang, G. H., Lyu, S. K., "Study on Empirical Gear Profile Micro-modifications for Gear Transmission", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 3, pp. 54~62, 2017.
3. Kim, T. H., Jang, J. H., Lee, D. G., Kim, L. S., Lyu, S. K., Study on Optimal Design and Analysis of Worm Gear Reducer for High Place Operation Car, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 6, pp. 98-103, 2015.
4. Kim, H. J., Experimental Study on Production Characteristics of Straight Bevel Gear using a Polyjet Method 3D Printer, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 6, pp. 63-68, 2015.
5. Jung, J. W., Kim, K. P., Ji, H. C., Moon, T. S., Design Improvement of the Driving Bevel Gear in Transmissions of a Tracked Vehicle, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 2, pp. 1-6, 2015.
6. Kim, N. K., Bae, K. Y., Kim, N. H., Jang, J. H., Development of Jig Type Chuck for Roundness improvement in a Machining of High Stage Speed Gear, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers Vol. 15, No. 1, pp. 20-25, 2016.
7. Zhang, Q., Zhang, J., Yan, Y. L., Zhu, Q. W., Xu, Z. Z., Lyu, S. K., "A Study on the Design of a Gear Transmission Error Test Rig", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 1, pp. 14~19, 2016.