

마이크로 치형수정이 선회가공 유닛 구동기어의 동력전달 특성에 미치는 영향에 관한 연구

장정환*, 진진**, 김동선**, 우위팅**, 류성기**,#

*경남과학기술대학교 자동차공학과, **경상대학교 대학원 기계항공공학부, 공학연구원

Study on Effect of Micro Tooth Shape Modification on Power Transmission Characteristics based on the Driving Gear of Rotating Machining Unit

Jeong-Hwan Jang*, Zhen Qin**, Dong-Seon Kim**, Yu-Ting Wu** and Sung Ki Lyu**,#

*Department of Automotive Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology

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

(Received 26 March 2019; received in revised form 15 April 2019; accepted 13 May 2019)

ABSTRACT

Rotating machining unit is a revolutionary product that can process worm shaft or spiral shaft with fast and precise, a rotary type cutting tool, which is attached to automatic lathe and processes spiral groove on outer circumference of round bar. In this work, a study on micro tooth shape modification method of driving gear train in the rotating machining unit was presented. To observe the effect on power transmission characteristics of the driving gear pair, visualize the gear meshing condition and the load distribution on the gear teeth by using the professional gear train analysis program RomaxDesigner. By comparing the repeated analysis results, the effect of micro tooth shape modification on power transmission characteristics on driving gear can be summarized. The optimized gears were fabricated and measured by precision tester as a validation in this research.

Key Words : Rotating Machining Unit(선회가공 유닛), Profile Error(형상오차), Lead Error(리드오차), Micro Tooth Shape Modification (마이크로 치형수정), Driving Gear(구동 기어)

1. 서 론

자동선반에 부착하여 나선형 홈을 가공하는 회전형 절삭공구인 고정밀 선회가공장치는 워 샤프트나

나선축을 빠르고 정밀하게 가공할 수 있는 공구유니트다. 나선형 리드각에 따라 각도를 조절하고 나선형상에 따라 가공 인서트를 교환 할 수 있는 유연성을 가지고 있다. 다수의 인서트가 고속으로 회전하면서 연속적으로 홈을 가공함으로써, 통상의 선반용 바이트에 비하여 가공의 정밀도 및 속도 등을 혁신적으로 향상 할 수 있다. 가공물의 형상에

Corresponding Author : sklyu@gnu.ac.kr

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

따라 공구의 고속 회전 동작과 몸체의 틸트 동작을 동시에 실현시키는 고정밀선회가공 유닛은 가공정밀도의 향상을 위해 높은 회전정밀도와 저진동/저소음 특성이 필수로 요구된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기어의 마이크로 치형설계 및 정밀 부품설계관련 연구를 많이 수행하고 있다.^[1-13] 기어 설계는 설계대상에 따라 매크로 지오메트리과 마이크로 지오메트리방식으로 나눌 수 있다. 매크로 지오메트리 설계는 최초 설계단계에서 수행하고 마이크로 지오메트리는 매크로 요소를 결정한 후에 치면에 미소수정의 방식으로 수행한다.

본 연구에서는 기어쌍의 접촉조건과 동력전달시 치면에 있는 하중응력분포를 관찰하기 위해 기어박스 해석 전문프로그램 Romax Designer를 사용하였다. 기어표준의 제공된 여러 가지 공식에 의해서 최적 설계를 수행하는 프로그램이다. 본 논문은 선회가공 유닛의 구동기어에 대해 Romax Designer에 제공된 micro geometry방법을 이용하여 마이크로 치형수정 및 접촉해석을 수행하였다. 기어의 치형을 수정하여 결과에 따른 응력분포와 전달오차를 반복확인을 통해 기어 동력전달 특성에 최적화된 기어치형 수정량을 찾는다. 최종적으로 수정된 구동기어를 제작하여 기어의 정밀도를 측정하여 측정 결과를 고찰하였다.

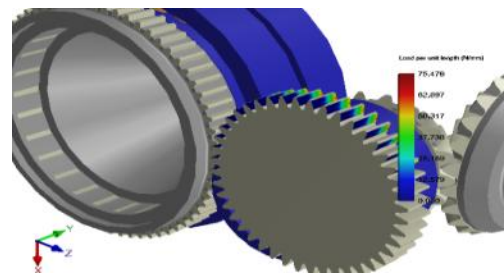
2. 모델링 및 기어 강도 고찰

선회가공 유닛의 구동부 시스템은 입력부 shaft의 동력으로 스파이럴 베벨기어를 통하여 수직방향으로 동력전달이 이루어진다. 스퍼기어 한 쌍의 구동방식으로 동력의 전달이 된다. 구동축의 입력 회전수는 6000 rpm 이고 토크는 7.5 Nm 이다. 매크로 지오메트리 설계단계에서 받은 제원을 이용하여 기어 시스템의 모델링을 수행하였다. ISO 6336 표준을 바탕으로 기어 강도계산을 실시하였다.

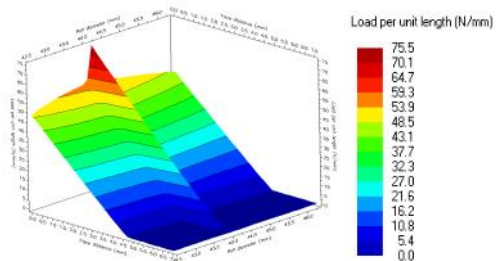
Root safety factor 와 Flank safety factor가 모두 1.0보다 큰 것으로 확인되었다. 이는 실제가동시 강도측면에서 문제가 없을것 이라고 판단되었다.

3. 치형 수정 및 동력전달 특성

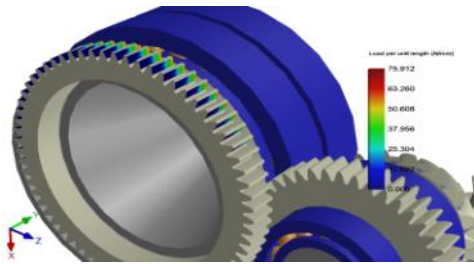
Micro geometry방식은 기어 치면의 윤곽을 미세하게 수정함으로써 기어 전달효율을 향상시키고 제작 단가에 영향을 미치지 않는다는 장점을 가지고 있다.^[14-23] 기어의 매크로 지오메트리 치형수정 방법은 수정대상에 따라 크게 Flank modification과 Profile modification 2가지 수정법으로 분류된다. 프로파일 방향의 가공 및 리드 방향의 가공으로 기존 치면의 윤곽을 미세하게 제거하거나 보충하는 방식으로 새로운 기어 이의 치면을 생성한다. 기어 이의 끝에서 응력집중현상은 기어의 수명에도 영향을 주게 된다. 또한 이러한 현상은 치면의 국부에서 마모 및 마찰을 야기하게 되고 이는 소음의 주요 원인이다. 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. 프로파일 방향의 치형 수정은 치 끝의 접촉을 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.



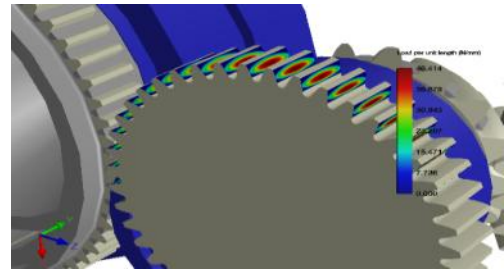
(a) 3D view of input pinion gear



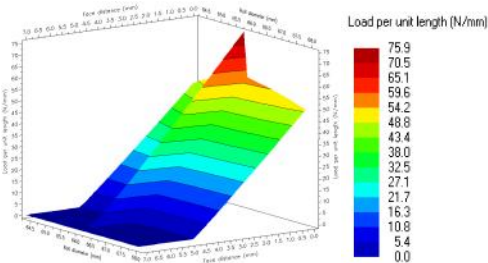
(b) 2D view of input pinion gear



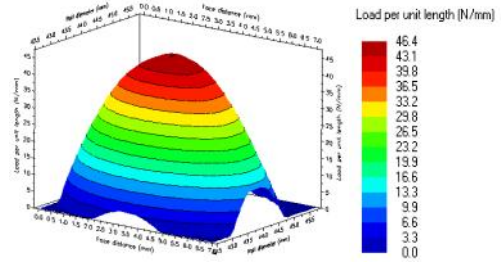
(c) 3D view of output wheel gear



(a) 3D view of input pinion gear

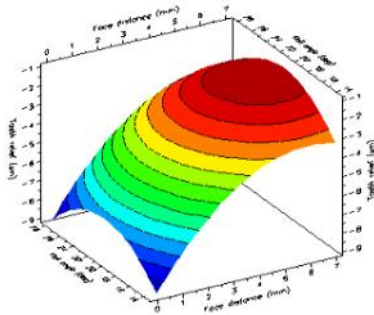


(d) 2D view of middle wheel gear

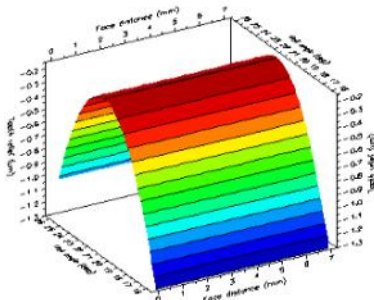


(b) 2D view of input pinion gear

Fig. 1 Load distribution on meshing gear surface before micro geometry modification

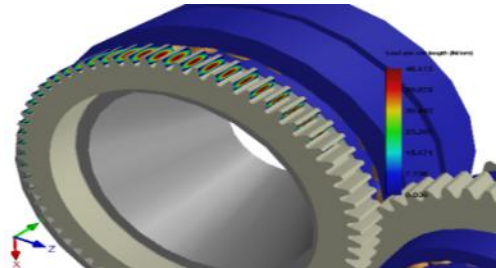


(a) Input pinion left flank

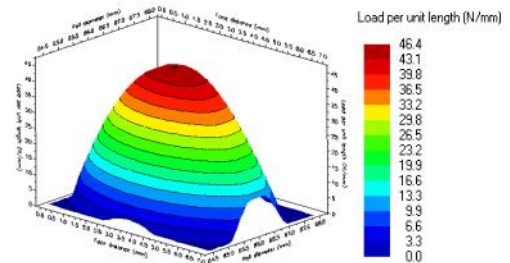


(b) Output wheel gear left flank

Fig. 2 Gear flank form after modification



(c) 3D view of output wheel gear



(d) 2D view of output wheel gear

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

본 연구에서 먼저 구동기어 표준치형의 모델에 대해 마이크로 접촉해석을 진행하였다. Fig. 1의 a), b)는 입력 피니언기어의 치면 응력분포 결과이고,

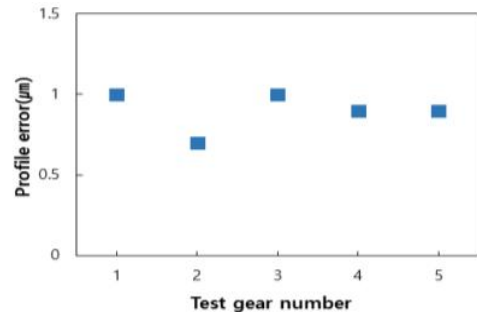
Fig. 1의 c), d)는 출력 휠기어의 치면 응력분포 결과이다. 두 기어의 전달하중이 기어의 한쪽으로 집중되어 있음을 확인 할 수 있으며, 최대응력은 77.1 N/mm로 나타났다.

최적의 치형 수정량을 찾기 위해서 반복적인 수정량 변경 및 마이크로 지오메트리 접촉해석을 수행하였다. 이 과정에서 동력전달시의 전달오차와 치면의 하중응력 분포 특성을 관찰하여 최적의 치형수정량이 선정되었다. Fig. 2는 수정후의 최적화되는 기어의 치형을 나타냈다. 가공시 양쪽방향으로 회전해야 하므로 각 기어 양쪽 치면에 같은 수정방식이 부여된다. 입력 피니언 기어의 리드수정은 크라운 1 μm 만큼 수정하였고, 슬로프 4 μm , 인벌루트 수정량은 바렐링 2 μm 만큼 수정하였다. 출력 휠기어의 인벌루트 수정량은 바렐링 1 μm , 슬로프 0.3 μm 만큼 수정하였다.

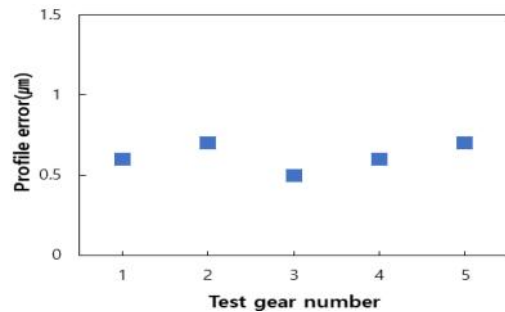
최적화된 치형의 전달오차는 0.135 μm 로 확인되었으며 기본치형의 전달오차 결과(1.42 μm)와 대비하여 90% 감소하였다. PPTE가 기어 동력 전달시에 진동에 영향을 미치는 가장 중요한 요소이다. Fig. 3은 최적화된 치면의 응력분포를 나타낸 것 이며 최적설계 이전과 비교할 때 최대응력(46.4 N/mm)은 기어의 중심부로 이동한 것을 확인 할 수 있다. 기어의 끝부분의 응력은 0에 가깝게 나타나고, 응력은 중심에서 끝단까지 균등하게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 해석결과를 통해 구동기어 동력전달시의 진동 및 전달부하의 응력분포 특성이 마이크로 치형수정량에 따라 변경하고 있는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 해석결과를 이용해 최적화된 동력 전달 특성을 가지고 있는 치형수정량을 찾았다.



Fig. 4 Spur driving gear product

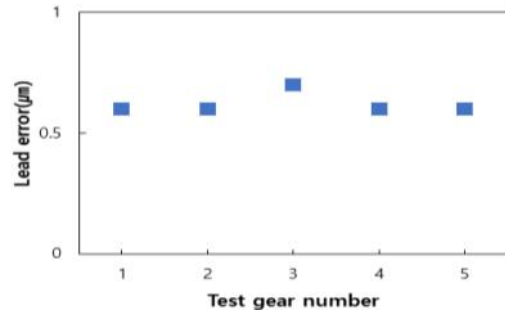


(a) Left tooth profile error

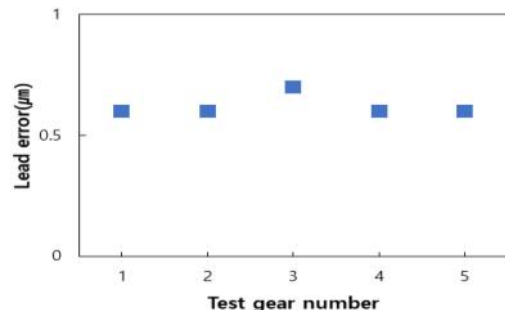


(b) Right tooth profile error

Fig. 5 Result of profile error left & right

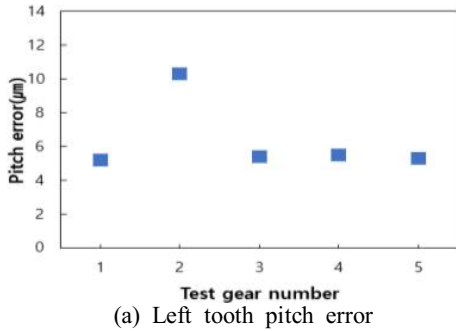


(a) Left tooth lead error

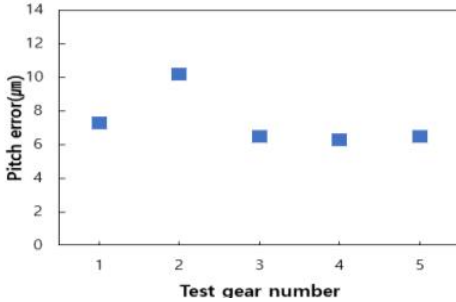


(b) Right tooth lead error

Fig. 6 Result of lead error left & right



(a) Left tooth pitch error



(b) Right tooth pitch error

Fig. 7 Result of pitch error left & right

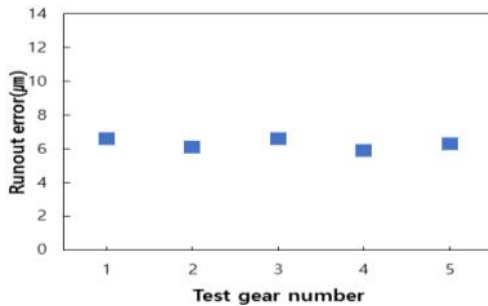


Fig. 8 Result of runout error

4. 정밀도 측정결과 및 고찰

기어의 정밀도는 동력전달의 특성에 영향을 미치는 중요 평가지표이며 가공기법을 검증하는 간편한 방식이다. 본 연구에서 Tokyo Technical사 CNC기어 측정기를 사용하여 기어정밀도를 측정하였다.

SCM415 소재는 높은 강도의 특성으로써 기어의 제작에 많이 사용하고 있다. 국부 가열 방식을 이용해 2차 성형을 수행하여 제품을 제작하였다. 제

작된 스피어 기어 시제품의 형상을 Fig. 4에 나타냈다. 기어의 표면경화처리는 침탄 방식으로 열처리를 하고, 표면경도는 55-60HRC 까지 확인되었다. 제작한 스피어 기어의 기본 사양은 모듈 1.0 mm, 잇수 44개, 압력각 20° 이다. 기어의 오차 측정은 5개의 시험기어를 가지고 측정기준에 따라 기어 1개 당 4개 기어 이의 오른쪽과 왼쪽으로 나누어 측정하여 평균값을 구하였다. 스피어기어의 정밀도는 기어의 회전 중심을 측정기준으로 1, 12, 23, 34 번째 이에 대하여 좌우 양쪽 치면을 측정하였다.

프로파일오차 측정결과는 Fig. 5에 나타난바와 같이 왼쪽 치면의 에러 평균값은 0.9 μm, 오른쪽은 0.62 μm이며 총 평균값은 0.76 μm로 나타났다. 기어의 리드오차 측정결과를 Fig. 6에 나타냈으며, 왼쪽 치면의 리드오차의 평균값은 0.62 μm, 오른쪽은 0.66 μm, 총 평균값은 0.64 μm로 나타났다. 리드오차의 측정기준에 따라 기어 1개 당 4개의 기어 이의 오른쪽과 왼쪽으로 나누어 측정하고 평균값을 구하였다. 피치에러의 측정 결과를 Fig. 7에 나타냈으며, 왼쪽 치면의 피치오차 평균값은 6.34 μm, 오른쪽은 7.36 μm, 총 평균값은 6.85 μm로 나타났다. Fig. 8는 런아웃오차의 측정 결과이며, 런아웃오차의 평균값은 6.3 μm로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 공작기계용 고정밀 선회가공 유닛의 구동부 기어박스를 기반으로 마이크로 치형수정이 기어 동력전달의 특성에 미치는 영향을 탐구하는 연구를 수행하였다. 기어트레인 모델링 및 해석 전용 프로그램인 Romax Designer를 활용하여 유닛의 구동 기어 시스템에 대해 모델링 후 마이크로 지오메트리 접촉 해석을 통해 치형 반복 수정을 수행하면서 Profile 및 Lead 방향의 하중분포 및 동력전달의 전달오차 특성을 관찰하고 기어 내구성 향상 및 NVH 성능을 위해 최적화된 기어의 치형을 파악하여 최종 기어설계를 정의하였다. 마이크로 지오메트리 시뮬레이션을 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 선회가공 유닛의 구동부의 기어 시스템에 대해 모델링을 수행하고 다른 치형 수정량이 기어 구동시 전달 특성을 관찰하기 위해 반복 Profile 및 Lead를 수정하고 마이크로 지오메트리 시뮬레이션을 통해서 선회가공 유닛의 최적화된 전달특성을 가진 기어박스 설계를 수행하였다.
- 2) 최적화된 치형의 전달오차는 $0.135\mu\text{m}$ 로 확인되었으며 기본치형의 전달오차 결과($1.42\mu\text{m}$)와 대비하여 90% 감소하였다. 이에 따라 최적화된 유닛의 기어트레인의 내구 및 소음/진동 효과가 표준 치형의 경우보다 많이 개선될 것으로 보일 수 있었다.
- 3) 마이크로 접촉 해석결과를 비교하여 수정 전 모든 스피기어의 응력분포가 기어 치면의 한쪽 끝단부에 집중되어 있는 반면 최적설계 이후에 응력분포가 한쪽 끝단부에서 치면의 중심부에 이동 되어있는 것을 확인하였다. 치형수정 이후에 입력 피니언 기어 치면의 최대응력은 치형수정 전보다 38.5%를 줄였다. 출력 휠 기어 치면의 최대응력도 38.8%를 개선된 것을 확인하였다. 이에 따라 기어 구동시 부하가 치면에 균등하게 분포된 것을 발견할 수 있다.
- 4) 최적화 설계된 시험기어의 프로파일 오차 측정 결과 좌측치면이 $0.9\mu\text{m}$, 우측 치면이 $0.62\mu\text{m}$ 로 나타났으며, 기어치면의 프로파일오차 총 평균값은 $0.76\mu\text{m}$ 으로 나타났다. 리드오차 측정결과, 좌측치면 $0.62\mu\text{m}$, 우측치면 $0.66\mu\text{m}$ 로 나타났고, 기어치면의 리드오차 총 평균값은 $0.64\mu\text{m}$ 으로 나타났다. 피치오차 측정결과, 좌측치면이 $6.34\mu\text{m}$, 우측치면은 $7.36\mu\text{m}$ 으로 나타났고, 기어 치면의 피치 오차의 총 평균값은 $6.85\mu\text{m}$ 으로 나타났다. 런아웃오차 측정결과, 런아웃 오차는 $6.3\mu\text{m}$ 으로 나타났다.

후기

본 논문은 산학협력기술개발(과제번호 S2598882: 2018-0809)과 한국연구재단 이공학개인지초연구지원사업(NRF-2016R1D1A1A09920105), 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. 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.
4. Yeom, J. S., Suh, H. K., "The Effect of Shaft Hole Length on the A-IMS Tubular Shaft Machining", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol, 20, No. 1, pp. 96~101, 2018.
5. Nam, J. H., Park, K. W., Kang, J. Y., "Study on Damping Stiffness Parameter of Steering Wheel Dynamic Damper", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol, 20, No. 1, pp. 120~126, 2018.
6. Lee, B. H., LEE, C. R., Jeong, Y. J., Kim, B. H., "A Study on the Structural Analysis of Electric", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol. 20, No. 2, pp. 154~159, 2018.
7. Hong, S. K., Choi, B. L., "Prediction of Backplate Contact Pressures of a Turbo Charger Coupling using Theoretical and Analytical Methods", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol. 20, No. 2, pp. 174~179, 2018.
8. Lee, Y. S., Yang, Y. J., "An Evaluation of Structural Stability on Mold Frame of Drawing Process System of SUS Hexagonal Bar", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol. 20, No. 3, pp. 279~286, 2018.
9. Kim, K. P., "Progressive Failure Analysis of OHT Laminate Composite Structures", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol. 20, No. 3, pp. 333~340, 2018.

10. Kim, B. S., "The Noise Information Database of Large and High Power Machine", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol. 20, No. 3, pp. 360~365, 2018.
11. Hong, S. K., Choi, B. L., "A Study on the Mechanical Behaviors of the Turbocharger's Coupling System Under Operation Condition", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol. 20, No. 4, pp. 407~412, 2018.
12. Hwang, S. K., Lee, J. H., Ryu, S. H., "A Study on Tool Wear and Surface Roughness Characteristics in Milling of AISI P20 mold steel with BN", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol. 20, No. 4, pp.420~426, 2018.
13. Kim, K. M., Park, J. C., Yin, J. J., "Optimization of Sheet Metal Forming Process Using Designer's Desirability Functionl", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol. 20, No. 5, pp.556~561, 2018.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Kim, S. J., Park, J. W., "A Study on Improvement of Durability According to Crack of Steering Gearbox Bracket of Military Light Trucks", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol. 20, No. 2, pp.253~260, 2018.
19. Ko, D. S., Myug, S. S., Kang, B. Y., Kim, M. S., "A Study on Thermal Characteristics of Adaptor Housing for Commercial Vehicles according to Molten Metal Condition", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol. 20, No. 6, pp. 745~750, 2018.
20. Kim, B. H., Jeong, Y. J., Lee, C. R., Lee, B. H., "A Study on the Optimum Design of a Motor Shaft in Electric Vehicle Using HEEDS", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol. 20, No. 6, pp. 751~756, 2018.
21. Kim, D. H., "Development of Automatic Gear Modeling Module Using Computer Aided Design(CAD)", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol. 20, No. 6, pp. 703~808, 2018.
22. Kim, B. H., Jeong, Y. J., Lee, C. R., "Optimum Design of a Tubular Link Chain Conveyor for Sludge Transport", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol. 20, No. 6, pp. 830~835, 2018.
23. Kim, D. H., "A Study on the Design Efficiency of Mold Design Using Design Automation Method in the CAD System", J. Korean Soc. Mech. Technol, Vol. 20, No. 6, pp. 824~829, 2018.