

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 IX

하이포이드기어 내장형 고속 인덱스 테이블의 형상최적화에 관한 연구

A Study on Shape Optimization of High-Speed Index Table with Hypoid Gear

이춘만^{1,✉}, 안종욱¹, 김동현¹
Choon Man Lee^{1,✉}, Jong Wook Ahn¹, and Dong Hyeon Kim¹

¹ 창원대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Changwon National University)
✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-213-6322

Manuscript received: 2014.12.3 / Revised: 2015.1.11 / Accepted: 2015.1.22

In the recent field of Machining, with the improving efficiency of processing, the index table is a key unit according to the increase of parts in available processing when working with the three axes at the same time. As an essential product of MCT, the index tables effect an influence on product quality of machined parts. Therefore, it is necessary to design the shape of index table with stability, high stiffness, lightweight structure. In this study, the optimal shape of index table was proposed using by design of experiment. The maximum displacement and stress analysis were carried out by using FEM software. The optimized shape was verified by using the statistical software. The results of shape optimization were confirmed that both displacement and stress were reduced in comparison with initial model.

Key Words: Index table (인덱스테이블), Taguchi method (다구찌 기법), Shape optimization (형상 최적화)

1. 서론

최근 공작기계 분야에서 머시닝센터(MCT)는 초고속, 고정밀화, 생산성 향상, 리드 타임 단축, 추가비용 절감의 지향 목표에 따라 필요성이 점차 증대되고 있는 실정이다. 또한 가공생산 시장의 수익확대와 맞물려 복합기능을 보유한 머시닝 센터의 수요가 증가하고 있고 부가가치가 높은 신제품 개발이 집중되고 있는 추세이다.

5축 머시닝센터는 멀티-태스킹(Multi-Tasking)기술 접목을 통해 보다 유연성 있는 가공 및 단시간

에 복합적인 가공을 위해 신개념 병렬기구 형태, 주축과 테이블의 틸팅(tilting), 터닝(turning) 형태로 제작되고 있다. 특히, 기존의 3축 머시닝 센터에 2축 틸팅 인덱스 테이블(index table)이 추가된 기계 시스템이 주를 이룬다.

경사축과 회전축을 추가함으로써 가공성능 및 투자효율을 높일 수 있는 머시닝센터의 핵심 유닛인 틸팅 인덱스 테이블은 로퍼, 소형항공부품, 임펠러, 캠부품 등 3개 이상의 축이 동시에 작동해야만 가공이 가능 한 부품 수요의 증가에 따라 필요성이 점차 대두되고 있다.¹

공작기계의 생산 환경의 추세에 따라 고정도, 고정밀한 제품생산을 얻기 위해 톨팅 인덱스 테이블에 대한 다양한 연구가 수행 되었다.

Kim 등²은 레이저 측정 실험을 통해 톨팅 인덱스 테이블의 성능 향상에 관한 연구를 수행했다. Choi 등³은 톨팅 인덱스 테이블의 정적 및 동적 해석을 실시하여 구조물의 설계 안전성을 평가하였다. Lee 등⁴은 DD(direct drive)모터 방식을 적용한 톨팅 인덱스 테이블의 구조해석을 통해 고정도화 및 경량화를 위한 형상 최적화에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 인덱스 테이블의 성능개선과 내구성향상을 위해서 형상 최적화를 수행하였다. 기어박스 가로폭, 바닥면 플레이트 높이, 기어박스 세로폭, 테이블부의 높이를 최적설계를 위한 파라미터로 선정하여 최적조건을 제시하였다. 초기모델과 최적화된 모델의 검증해석을 통해 최대응력과 변위에서 각각 향상됨을 확인하였다.

2. 고속 인덱스 테이블

2.1 인덱스 테이블 구조

본 연구에서 하이포이드기어(hypoid gear) 방식을 적용한 고속 인덱스 테이블은 Fig. 1과 같이 모터 하우징과 모터 커버(motor housing & motor cover), 스피들 시스템, 브레이크 시스템(brake system), 기어 박스로 구성된다. 하이포이드기어는 현재 선진 각국에서 각 중 산업의 고회전력 및 고토오크를 요구하는 분야에 사용되는 기어중의 하나이며, 독일 등에서는 정밀감속기에 적용하여 상용화 하고 있으며, 이밖에 국내외적으로 차량 및 기계용 동력 전달 장치로 그 적용 범위가 점차 확대되고 있다. 하이포이드 기어방식의 특징으로는 축간의 정밀한 중심잡기(alignment)요구와 가공의 어려움이 있지만 하이포이드 기어를 적용함으로써 스파이얼 기어(spiral gear)에 비해 기어 외경 증가 없이 큰 토오크 전달이 가능하고 웜기어(worm gear)보다 높은 효율과 베벨기어(bevel gear)보다 높은 감속비를 가진다. 피니언(pinion)과 기어 축의 양쪽 모두 지지할 수 있어 강성 면에서 큰 장점을 가진다.^{5,6}

고속 인덱스 테이블의 구성 부품들 중 내구성 및 정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 부분은 피니언기어와 하우징(pinion gear & housing), 브레이크 시스템, 기어박스, 스피들과 링기어(ring gear)부 이다.

본 연구에서는 고속 인덱스 테이블의 구조해석

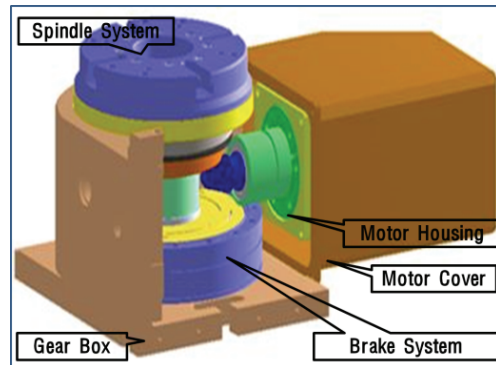


Fig. 1 Internal system of index table

Table 1 Mechanical properties of materials

Material	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	Density [kg/m ³]
Motor Housing	208	0.28	7,817
Motor Cover	205	0.29	7,850
Gear Box	172	0.275	6,604
Spindle System	124	0.22	7,150
Brake System	84	0.256	3,300

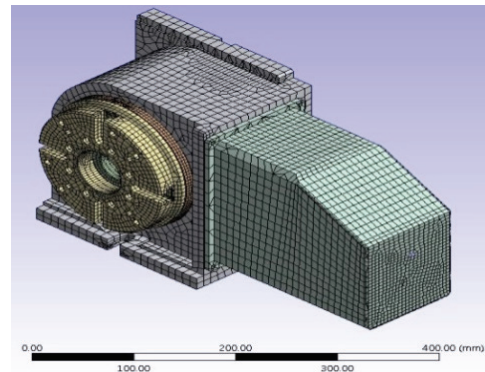


Fig. 2 Finite element model of the index table

을 수행 하였고 최대 응력과 변위를 확인 하였다. 결과값을 바탕으로 구조물 간섭을 고려한 설계 변경을 통해서 스피들 시스템과 기어박스의 설계 파라미터를 선정 하였다. 구조해석을 위해 사용된 물성치는 Table 1에 나타내고 있다.

2.2 유한요소모델

고속 인덱스 테이블 구조해석을 수행하기 위해 Fig. 2와 같이 756,822 개의 노드와 375,497 개의 요소수를 가지는 유한요소모델을 나타내었다.

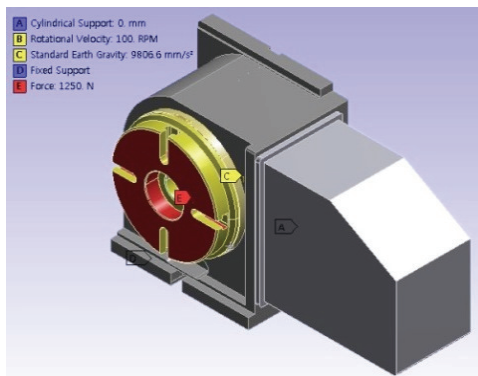


Fig. 3 Analysis setting of the index table

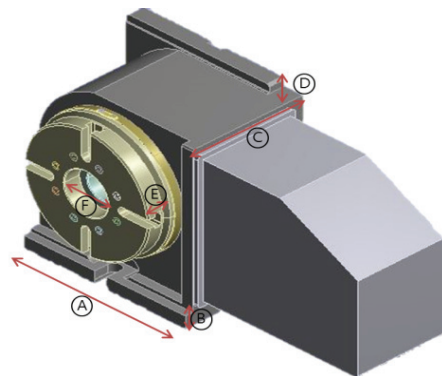


Fig. 6 The design factor for index table

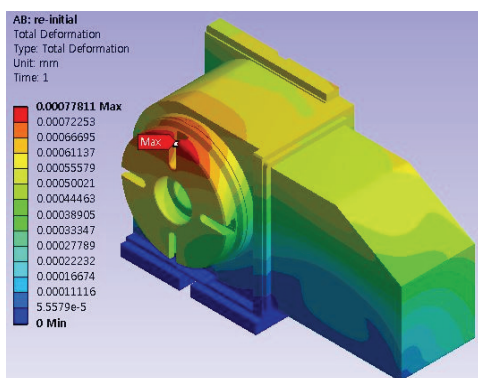


Fig. 4 Deformation distribution of the index table

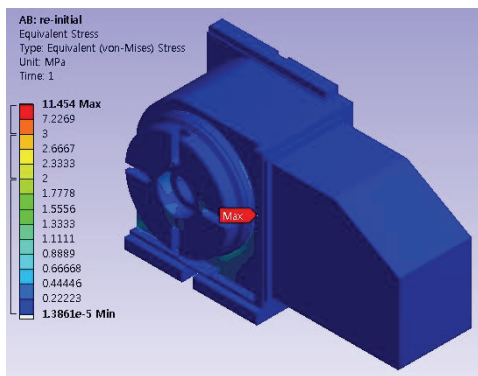


Fig. 5 Stress distribution of the index table

Fig. 3에 경계조건을 나타내었다. 각각의 경계조건으로 기어박스과 바닥 설치부에 접하는 4개면에 대해 모든 방향의 회전과 이동을 구속하였다.

하중조건은 인덱스 테이블의 최대 회전 능력 100 RPM을 회전부에 적용하였다. 그리고 자중을 고려하여 인덱스 테이블 구조물 전체에 중력을 적

용하였다. 최대 적정하중인 1,250 N을 테이블 부의 결합 위치에 적용하였다.

2.3 구조해석

해석모델에 대해 구조해석을 수행 하였다. 고속 인덱스 테이블의 최대 적정하중 1,250 N와 회전 능력 100 RPM을 적용한 결과 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 변위와 응력 분포를 나타내었다.

최대 변위는 0.77로 스피들 시스템의 테이블면 최상단부분에서 발생하였다. 이는 공작물 결합부 부분으로써 하중이 집중적으로 가해져 발생한 것으로 판단된다.

응력분포는 하이포이드 기어부에서 전체적으로 발생하였다. 최대 응력은 11.45 MPa로 피니언기어와 마스터기어의 맞물리는 면에서 발생했다. 마스터기어(master gear)의 항복강도 295 MPa를 고려했을 때 하이포이드 기어 면에서 발생한 최대응력에 대해 구조적 안전성을 확인했다.

3. 실험계획법을 이용한 형상최적화

3.1 부분요인실험

고속 인덱스 테이블의 내구성 향상 및 형상 최적화를 위해 구조해석 결과값을 바탕으로 6개의 파라미터를 선정하였다.

6개의 파라미터에 대해 특성치는 고속 인덱스 테이블의 변형으로 하였고 분석도 V의 1/4 fractional factorial design을 이용하여 실험설계 하였다. Fig. 6 과 Table 2에 6개의 파라미터와 범위를 각각 나타내었다. 6개의 파라미터에 대해서 수준을 모두 2수준으로 정의하고 Table 3에 부분요인 실험설계에 대한 결과를 나타내었다.

Table 2 Experimental range of the design factors

The design factors	Range
A	217 mm ≤ A ≤ 222 mm
B	14 mm ≤ B ≤ 20 mm
C	159 mm ≤ C ≤ 162 mm
D	7 mm ≤ D ≤ 12 mm
E	18 mm ≤ E ≤ 23 mm
F	56 mm ≤ F ≤ 66 mm

Table 3 Result of experiments for fractional factorial design

No.	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]	Deformation [μm]
1	217	20	162	12	18	66	0.720
2	222	20	162	7	23	56	0.759
3	217	20	162	7	18	56	0.750
4	217	20	159	7	23	66	0.716
5	217	20	159	12	23	56	0.744
6	217	14	162	12	23	56	0.706
7	217	14	159	12	18	66	0.715
8	222	14	159	12	23	66	0.690
9	222	14	162	7	18	66	0.681
10	222	20	159	7	18	66	0.739
11	217	14	162	7	23	66	0.710
12	217	14	159	7	18	56	0.709
13	222	20	159	12	18	56	0.759
14	222	14	159	7	23	56	0.760
15	222	14	162	12	18	56	0.684
16	222	20	162	12	23	66	0.692

Table 4 Level value of each parameter for Taguchi method

Level	A [mm]	B [mm]	C [mm]	E [mm]
1	217	14	159	18
2	220	17	159.5	20
3	222	20	162	23

Table 5 Results of experiments

No.	A [mm]	B [mm]	C [mm]	E [mm]	Maximum stress [MPa]	Deformation [μm]
1	217	14	159	18	6.271	0.785
2	217	17	159.5	20	11.771	0.795
3	217	20	162	23	5.978	0.815
4	220	14	159.5	23	8.302	0.816
5	220	17	162	18	5.616	0.738
6	220	20	159	20	4.813	0.779
7	222	14	162	20	8.09	0.770
8	222	17	159	23	5.616	0.806
9	222	20	159.5	18	4.764	0.747

Fig. 7에 각 변수들 간의 주효과도를 나타내었다. 변형을 특성치로 한 주효과를 분석해보면 E설계파라미터(테이블부의 높이)가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. D설계파라미터(기어박스 상단부)와 F설계파라미터(테이블부 내부직경)는 큰 영향이 없는 것으로 판단 할 수 있다. 부분요인실험 결과를 바탕으로 A(기어박스 가로폭), B(바닥면 플레이트 높이), C(기어박스 세로폭), E(테이블부의 높이)의 4개 파라미터를 최종 선정하였다.

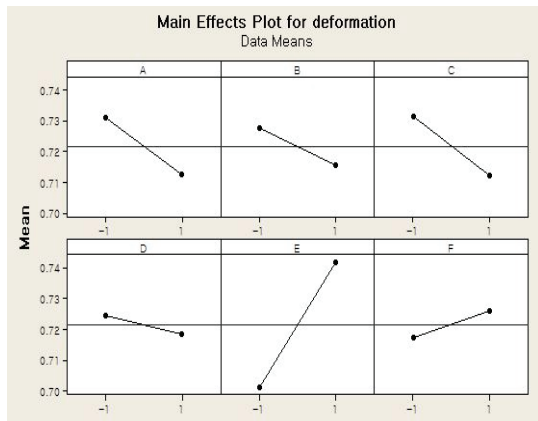


Fig. 7 Main effect plot for deformation

고속 인덱스 테이블의 변형에 미치는 6개의 파라미터에 대한 영향을 분석하기 위해서 상용 통계 소프트웨어 Minitab을 사용하였다.

3.2 다구찌(Taguchi) 기법을 이용한 최적형상 설계

다구찌 기법은 파라미터가 품질특성의 평균에 대해 가지는 효과뿐만 아니라 분산에 미치는 효과에 대해서도 초점을 맞추고 있어 제품 및 공정의 경제적설계 또는 개선에 있어 유용하며 선정된 파라미터들에 대하여 최적 조건을 구해준다.⁷⁻¹²

부분요인실험을 통해 선정된 A(기어박스 가로폭), B(바닥면 플레이트 높이), C(기어박스 세로폭), E(테이블부의 높이)의 4개 파라미터가 인덱스 테이블의 최대응력과 변위에 미치는 영향을 분석하고 최적형상을 위한 조건을 찾기 위해 다구찌 기법을 사용하였다.

각 파라미터의 3수준으로 정의 하였으며 Table 4에 나타냈고, Table 5에 L9의 다구찌 직교배열 설계에 의한 최대 응력과 변형을 나타내었다.

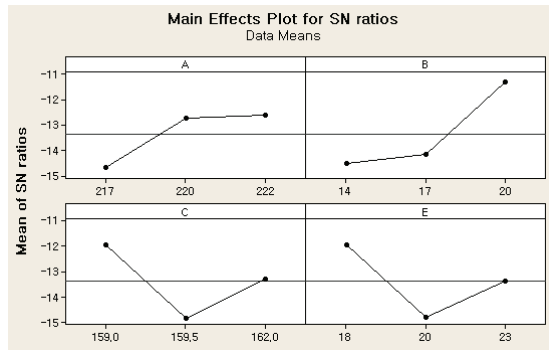


Fig. 8 Main effect plot of signal to noise according to deformation and maximum stress

Table 6 Response table for SN ratio

Factor Level	A	B	C	E
1	-14.68	-14.54	-11.94	-11.90
2	-12.74	-14.18	-14.83	-14.79
3	-12.64	-11.34	-13.28	-13.36
Delta	2.04	3.20	2.89	2.88
Rank	4	1	2	3

Table 7 Analysis results of the optimized model

	Maximum stress [MPa]	Deformation [μm]
Initial Model	11.464	0.778
Optimized Model	4.656	0.752

최적설계의 목적은 최대응력과 변위를 최소화하는 것이다. 최대 응력 및 변위 값이 작아야 하므로 계량특성치 중에서 식(1)과 같이 망소 특성을 (smaller-the better type)을 적용하였다.

$$\text{망소특성: } SN_i = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (1)$$

식(1)에서 y_i 는 목표치 해석 값을, n 은 3수준으로 정한 실험 반복 회수를 나타낸다.

Fig. 8에서 응력과 변위에 따른 SN비의 주효과 그래프를 나타내었고 Table 6에서 SN비에 대한 반응표를 나타냈다.

SN비에서 바닥면 플레이트 높이인 B파라미터 (Delta = 3.20, 순위1)가 가장 큰 영향을 주는 파라미터로 나타났으며, 바닥면 플레이트 높이인 A파라미터(Delta = 2.04, 순위4)가 가장 적은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

SN비와 반응표를 바탕으로 최적 조건은 A파라미터가 3수준, B파라미터가 3수준, C파라미터가 1수준, E파라미터가 1수준이다.

초기모델과 최적화모델의 비교결과를 Table 7에 나타내었다. 수행한 결과 최대 변위는 0.778 μm 에서 0.752 μm 로 감소하였고 최대 응력은 11.454 MPa에서 4.656 MPa로 각각 감소하였다.

4. 결론

공작기계 구성 요소 중 하나인 테이블은 제품 정밀도에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 테이블의 성능 및 내구성 향상은 매우 중요하다.

본 연구에서는 고속 인덱스 테이블의 성능 및 내구성 향상을 위해 실제 사용조건에서 변위와 응력을 최소화 할 수 있는 최적화 설계를 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고속인덱스 테이블의 구조해석을 수행하여 안정성을 평가하였고 이를 토대로 최적 형상을 위한 파라미터를 제안했다.
- 2) 제안된 파라미터에 대해 부분요인실험을 수행하였고, 변형을 특성치로한 주효과도를 분석하여 4개의 최종 파라미터를 선정하였다.
- 3) 다구찌 기법을 사용하여 각 파라미터들의 반응을 확인한 결과 파라미터 B에서 가장 많은 영향이 나타났다. 선정된 파라미터들을 통한 설계변경 후 초기 모델에 비해 최적화된 모델에서 응력 59%, 변위 4%가 각각 향상됨을 확인했다.

향후 하이포이드 기어부의와 브레이크 시스템의 발열 및 진동특성에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부와 한국 산업기술진흥원의 신뢰성산업체확산사업(N0000790)으로 수행된 연구 결과임.

REFERENCES

1. Kim, J. H. and Lee, C. M., "A Study on Thermal Analysis of Tilting Index Table," Proc. of KSPE

- Spring conference, pp. 459-460, 2010.
2. Kim, K. S., Lee, T. H., and Lee, C. M., "A Study on the Laser Measurement Experiment for Performance Advancement of Tilting Index Table," *Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 10, No. 5, pp. 26-30, 2011.
 3. Choi, C. H. and Lee, C. M., "A Study on the Characteristic Analysis of a Tilting Index Table For Machine Tools," *Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 10, No. 3, pp. 7-12, 2011.
 4. Lee, M. J. and Lee, C. M., "A Study on Structural Analysis and Optimum Shape Design of Tilting Index Table," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 27, No. 2, pp. 86-93, 2010.
 5. Kim, D. H., Ahn, J. W., Lee, J. W., Park, D. S., and Lee, C. M., "A Study on the Stability Evaluation of an Index Table with 5 μ m Repeatability through FE Analysis," *Proc. of KSPE Spring conference*, p. 614, 2014.
 6. Ahn, J. W. and Lee, C. M., "A Fundamental Study on the Deflection Improvement of a High-Speed Index Table," *Proc. of KSPE Spring conference*, p. 608, 2014.
 7. Kim, D. H., Park, S. J., and Lee, C. M., "A Study on the Determination of Bearing location for 45,000rpm Spindle by Taguchi Method," *Proc. of KSPE Autumn conference*, pp. 479-480, 2010.
 8. Tanabe, I., Sakamoto, H., and Miyamoto, K., "Development of Innovative Tool Using Taguchi-methods," *AASRI Procedia*, Vol. 9, pp. 107-113, 2014.
 9. Kim, H. K., Jeon, J. Y., Park, J. Y., Yoon, S. H., and Na, S. S., "Noise Reduction of a High-Speed Printing System using Optimized Gears based on Taguchi's Method," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 12, pp. 2383-2393, 2010.
 10. Senthil, P. and Amirthagadeswaran, K. S., "Optimization of Squeeze Casting Parameters for Non Symmetrical AC2A Aluminium Alloy Castings through Taguchi Method," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 4, pp. 1141-1147, 2012.
 11. Shin, W. G. and Lee, S. H., "Determination of Accelerated Condition for Brush Wear of Small Brush-Type DC Motor in using Design of Experiment (DOE) based on the Taguchi Method," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 317-322, 2011.
 12. Vankanti, V. K. and Ganta, V., "Optimization of Process Parameters in Drilling of GFRP Composite using Taguchi Method," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 3, No. 1, pp. 35-41, 2014.