

사이클 타임 단축을 위한 로터리 트랜스퍼 머신의 인덱스 테이블 구동부 설계에 관한 연구

허기석^{*,**}, 박용우^{***}, 김동선^{****}, 류성기^{****,#}

^{*}경상국립대학교 기계시스템공학과, ^{**}협성TECH, ^{***}경상국립대학교 융합기계공학과, ^{****}경상국립대학교 기계항공공학부

A Study on the Design of Index Table Drive of Rotary Transfer Machines to Reduce Cycle Time

Ki-Seok Huh^{*,**}, Yong-Woo Park^{***}, Dong-Seon Kim^{****}, Sung-Ki Lyu^{****,#}

^{*}Department of Mechanical System Eng., Gyeongsang National University, ^{**}Hyubsung TECH,

^{***}Department of Convergence Mechanical Engineering, Gyeongsang National University,

^{****}School of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

(Received 15 April 2022; received in revised form 19 April 2022; accepted 24 April 2022)

ABSTRACT

This study focuses on the driving control design of an index, which is a key component of a rotary transfer machine that is effective in improving productivity and reducing manufacturing costs by shortening cycle time. Although various index studies have been conducted on the rotation of workpieces such as general-purpose machine tools and tilting indices, the development of an index for rotary transfer machines for transfer is insufficient. The index consists of a body, table, hydraulic cylinder, motor, reducer, and curved coupling. The torque of the table for driving was selected, and the angular velocity and torque pattern were simulated using the motor manufacturer's program. The specifications of the drive motor were determined based on the selected torque.

Keywords : Index(인덱스), Rotary Transfer Machine(로터리 트랜스퍼 머신), Motor(모터), Torque(토크), Table(테이블)

1. 서 론

인덱스는 로터리 테이블(rotary table)이라고도 하며, 가공물이 고정되어 각 공정으로 이송을 수

행하며, 장비의 핵심 구성품이다. 소재의 크기, 가공방법 등에 따라 각도분할을 통해 6개에서 12개의 스테이션(station)이 적용되며, 가공물의 균일한 품질을 위해 반복 위치정밀도가 중요하다. 국내에서는 유정압 베어링(bearing)을 적용하여 고중량의 공작물을 회전할 수 있는 강성을 가진 대형 인덱스에 관한 연구들을 진행하였다.^[1-3]

Corresponding Author : sklyu@gnu.ac.kr

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

Lee^[4]와 Choi^[5] 등은 5축 가공기용 틸팅 인덱스의 구조해석을 통한 최적형상 설계 및 특성에 관한 연구를 하였다. Jeong^[6] 등은 임펠러(impeller)의 용접을 위한 인덱스를 연구하였고, Hwang^[7] 등은 자유곡면가공기용 인덱스에 관한 연구를 하였다. 인덱스관련 다양한 연구가 진행되고 있지만, 대부분 공작물의 회전을 위한 인덱스에 관한 연구이다. 용도 및 구조적인 문제로 인해 로터리 트랜스퍼 머신에는 적용이 어려우며, 이에 대한 연구도 미흡하다.

국외에서는 커빅 커플링(curvic coupling)과 유압 구동의 클램프(clamp) 및 언클램프(unclamp) 메커니즘(mechanism)을 사용한 밀링 머신용 인덱스에 관한 연구가 진행되었다.^[8] Krol^[9] 등은 웜 기어(worm gear)를 적용한 회전에 대한 연구를 하였고, 정밀도 향상을 위한 연구가 진행되고 있다.^[10] 본 논문에서는 사이클 타임을 단축하여 생산성 향상 및 제조원가 감소에 효과적인 로터리 트랜스퍼 머신의 핵심 구성요소인 인덱스의 구동제어 설계에 관한 연구를 하였다.

2. 설 계

2.1 인덱스 구성

Fig. 1은 인덱스의 구성도를 나타낸 것이고, 이것은 바디(body), 테이블, 유압 실린더(hydraulic cylinder), 모터(motor), 감속기 등으로 구성되어 있다. 바디는 유압 실린더, 감속기 및 모터가 조립되고, 테이블은 12대의 스피들(spindle)이 조립될 수 있도록

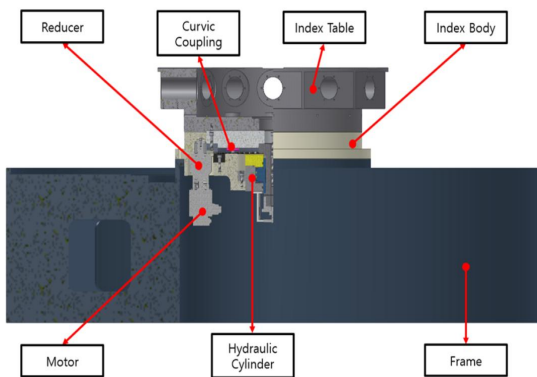


Fig. 1 Composition of index for rotary transfer machine

Table 1 Specification of index modeling

Item		Specification
Table	Diameter (mm)	1,300
	Height (mm)	320
	Estimated mass (kg)	1,200
Body	Diameter (mm)	1,100
	Height (mm)	280
	Estimated mass (kg)	800
Frame	Diameter (mm)	3,000
	Height (mm)	800
	Estimated mass (kg)	5,500
Assembled index without frame	Diameter (mm)	1,300
	Height (mm)	600
	Estimated mass (kg)	3,100

하였다. 조립 완료된 인덱스는 바디가 프레임에 조립될 수 있도록 설계하였다. Table 1은 모델링된 사양을 나타낸다.

인덱스는 각도 분할을 통해 12개의 공정이 동시에 수행되고, 공정이 완료되면 테이블이 30도 회전하는 방식이다. 동작은 유압 실린더가 상승하여 테이블을 상승시키고, 모터에서 발생한 동력은 감속기 및 스피어기어(spur gear)를 통해 전달되어 테이블이 회전된다. 회전이 끝나면 유압 실린더는 하강하고 테이블은 커빅 커플링(curvic coupling)으로 고정되고, 가공공정을 수행하였다.

2.2 인덱스 테이블 구동 토크

인덱스 구동을 위한 모터를 선정하기 위해서는 테이블의 토크가 결정되어야 한다. 테이블의 토크를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$T_{table} = a \times I_{table} \quad (1)$$

여기서, T_{table} 는 토크 [Nm], a 는 각가속도 [rad/s^2], I_{table} 는 관성모멘트 [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$] 이다. 테이블의 각가속도와 관성모멘트를 계산하는 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$a = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t} \quad (2)$$

$$I_{table} = \frac{1}{2} \times m \times r^2 \quad (3)$$

여기서, 식 (2)의 ω 는 각속도 [rad/s], Δt 는 가속 시간 [s]이며, 식 (3)의 m 은 테이블의 질량 [kg], r 은 테이블의 반지름 [m]이다.

2.3 인덱스 테이블 구동 모터

인덱스 구동을 위한 모터 선정은 감속비, 최소 출력토크 및 회전속도, 부하 관성모멘트가 결정되어야 한다. 감속비는 테이블의 질량, 회전반경, 회전속도, 각도분할 등을 고려하여 감속기는 30:1, 스퍼기어 12:1을 적용하여 총 감속비는 360:1이다. 최소 출력토크를 계산하는 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_{motor} = T_{table} \times \frac{1}{ratio_{\geq ar}} \times \frac{1}{S} \quad (4)$$

여기서, T_{motor} 는 모터의 필요 토크 [Nm], $ratio_{gear}$ 는 감속비, S 는 안전율이다. 회전속도를 계산하는 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$N_{motor} = N_{table} \times ratio \quad (5)$$

여기서, N_{motor} 와 N_{table} 은 모터와 테이블의 회전속도 [rpm]이다.

모터에 작용하는 부하 관성모멘트는 테이블의 회전 중심축과 모터의 회전 중심축이 다르며, 계산하는 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I = I_{table} + mh^2 \quad (6)$$

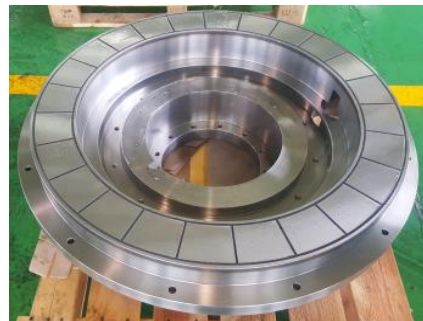
여기서, I 는 모터에 작용하는 부하 관성모멘트 [$kg \cdot m^2$], h 는 테이블과 모터 중심축 사이의 거리[m]이다. 이 값을 적용하여 테이블의 회전을 위한 모터의 로터(rotor) 관성모멘트를 계산할 수 있고, 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I_{rotor} \geq \frac{I}{ratio_{\geq ar}^2} \times \frac{1}{ratio_I} \quad (7)$$

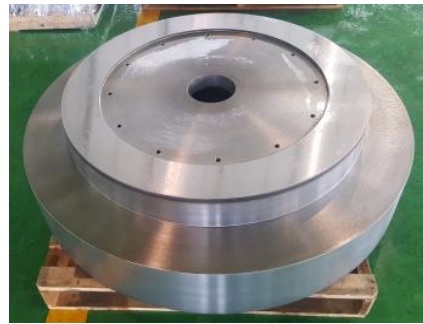
여기서, I_{rotor} 는 로터 관성모멘트 [$kg \cdot m$], $ratio_I$ 는 로터 관성모멘트에 대한 부하 관성모멘트의 비이며, 모터 제조사에서는 10배 이하기를 권장한다.

3. 인덱스 제작

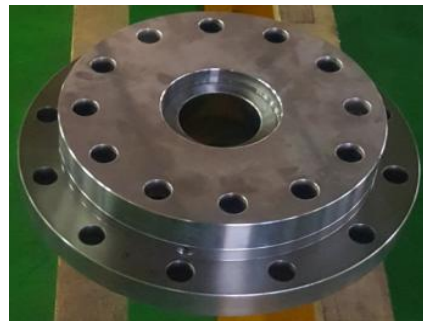
Fig. 2는 제작된 인덱스의 바디 (a)와 테이블 (b), 유압 실린더(c)를 나타내고 있다. 재질은 GC300으로 주조 후 어닐링(annealing)을 하여 잔류응력을 제거하고, 정밀가공을 통해 제작되었다. 바디와 테이블이 맞닿는 면은 고주파 열처리 후 연마를 진행하였다.



(a) Body



(b) Table



(c) Hydraulic cylinder

Fig. 2 Component of index

4. 결과 및 고찰

4.1 인덱스 테이블 구동 토크

가공물의 크기, 범위, 택 타임(tact time) 등을 종합적으로 고려하여 테이블의 30도 회전 소요시간은 1.5s, 가속시간 및 감속시간은 각 0.2s, 기타 부품을 포함한 질량은 2,300kg, 반지름은 0.65m로 결정하였다. 위 입력 값을 식 (2)와 식 (3)에 대입하여 계산하면, 각가속도는 2.014rad/s^2 , 관성모멘트는 $485.875\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 이 산출된다. 이 값을 식 (1)에 대입하여 계산하면, 테이블의 토크는 978.55Nm 가 구해진다. Fig. 3은 테이블의 운전에 따른 각속도 패턴의 시뮬레이션 결과를 나타내고, Fig. 4는 테이블의 운전에 따른 토크 패턴의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

4.2 인덱스 테이블 구동 모터

테이블의 토크, 감속비와 안전율 50%를 식 (4)에 대입하면, 인덱스를 구동하기 위한 모터의 최소 출력토크 산출은 5.44Nm 이 산출된다. 테이블의 회전 속도는 위에서 구한 각속도를 환산하면 3.846rpm 이다. 이 값을 식 (5)에 대입하면, 모터의 회전속도 1384.56rpm 이 산출된다. 설계된 거리 0.40625m 를 식 (6)에 대입하면, 부하 관성모멘트는 $865.465\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 이 산출된다. 식 (7)에 값을 대입하면, 로터 관성모멘트는 $6.68 \times 10^{-4}\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 이상이 되어야 한다. 위의 최소 출력토크, 회전속도, 로터 관성모멘트에 대한 결과 값을 적용한 모터의 최종사양은 Table 2와 같이 선정하였고, 인덱스에 적용하였다.

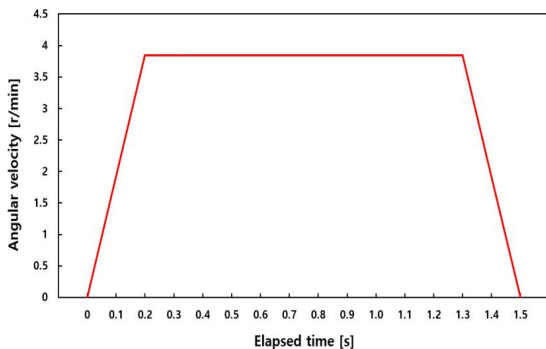


Fig. 3 Simulation of angular velocity patterns

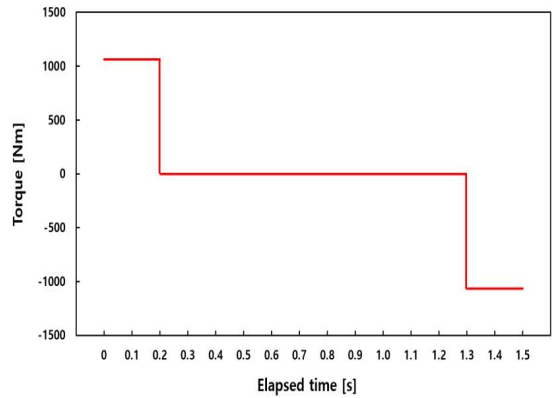


Fig. 4 Simulation of torque patterns

Table 2 Specification of motor for index driving

Item	Specification
Rated power (kW)	2.0
Rated torque (Nm)	9.55
Maximum torque (Nm)	28.6
Rated current (A)	11.5
Maximum current (A)	49
Rated speed (rpm)	2,000
Maximum speed (rpm)	3,000
Rotor's moment of inertia ($\times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$)	8.72

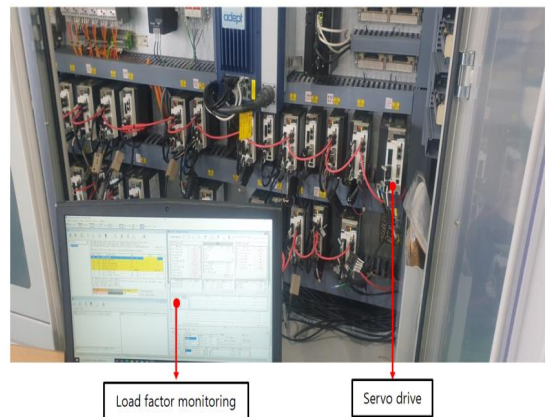


Fig. 5 Composition of load factor's measurement

Table 3 Measured value of Load factor

Elapsed time (s)	Load factor (%)		
	1st	2nd	3rd
0	78	81	77
0.1	76	77	74
0.2	71	75	76
0.3	59	62	61
0.4	51	56	52
0.5	46	49	46
0.6	41	45	43
0.7	42	46	45
0.8	44	41	42
0.9	45	43	47
1.0	42	46	45
1.1	43	41	46
1.2	47	46	41
1.3	81	82	79
1.4	75	78	77
1.5	77	79	80

부하율은 인덱스의 구동에서 모터가 받는 부하를 서보 드라이브와 제조사의 전용 프로그램(program)을 연결하여 모니터링(monitoring) 및 측정하였으며, Fig. 5는 부하율 측정 장치의 구성을 나타낸 것이다. Table 3은 시간에 따른 구동모터 부하율의 측정 값이며, Fig. 6은 부하율의 변화를 나타낸 것이다.

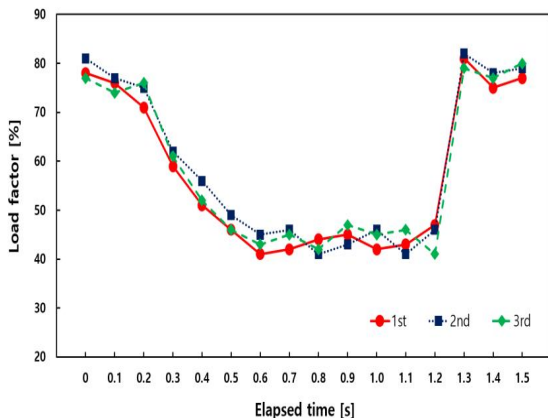


Fig. 6 Change of load factor for elapsed time

부하율은 최대 82%, 평균 58.25%가 측정되었으며, 가속도 패턴을 고려하면 가속 및 감속 구간에서 테이블의 관성에 의해 모터가 받는 부하가 크다.

일반적으로 모터 제조사에서는 모터의 수명을 위해 정격토크 이하로 사용하여야 하며, 인덱스 모터는 정격토크 이하로 구동하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 로터리 트랜스퍼 머신의 인덱스 구동부 설계를 토대로 인덱스를 제작하여 측정실험을 실시하였다. 인덱스 테이블 구동을 위한 설계값 및 구동모터의 부하율 등의 데이터를 기초로 성능 개선에 대한 검토가 가능할 것으로 본다.

1. 인덱스 테이블 구동을 위한 각가속도는 2.014rad/s², 관성모멘트는 485.875kg·m²로 나타났다.
2. 인덱스 테이블 구동을 위한 토크는 978.55Nm가 요구되었다.
3. 인덱스 테이블 구동을 위한 구동모터의 부하율은 가속 및 감속 시 최대 82%, 평균 58.25%로 나타났다.
4. 가속도 패턴을 고려할 시 가속 및 감속 구간에서 테이블의 관성에 의해 모터가 받는 부하가 크다는 것을 확인하였다.

후 기

본 논문은 협성TECH와 한국연구재단의 이공분야 기초연구사업 중견연구사업(과제번호: NRF-2020R1A2C1011958)의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Park, C. H., Hwang, J. H., Lee, C. H. and Cho, Y. J., "Performance Design of a Large Size Rotary Table Using the PM type Hydrostatic Bearing", Proceedings of KSPE 2012 Spring Conference, pp. 595-596, 2012.
2. Sim, J. Y., Oh, J. S., Park, C. H., Shin, H. C., Park, W. S., Kim, M. J. and Kim, M. S., "Performance

- Evaluation of Hydrostatic Bearing Guided Rotary Table for Large Volume Multi-tasking Vertical Lathe”, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 31, No. 7, pp. 635-642, 2014.
3. Jang, S. H., Lee, H. B., Oh, J. H., Oh, C. H. and Choi, Y. H., "The Sizing Optimization of a Rotary Table for the Super Size Floor Type Boring Machine”, Proceedings of KSPE 2012 Spring Conference, pp. 591-592, 2012.
 4. Lee, M. J. and Lee, C. M., "A Study on Structural Analysis and Optimum Shape Design of Tilting Index Table”, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 27, No. 2, pp. 86-93, 2010.
 5. Choi, C. H. and Lee, C. M., "A Study on the Characteristic Analysis of a Tilting Index Table for Machine Tools”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 3, pp. 7-12, 2011.
 6. Jeong, W. B. and Kim, J. W., "Development of Welding Index Table for FD Fan Impeller”, Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 19, No. 4, pp. 570-575, 2010.
 7. Hwang, J. H. and Park, C. H., "Design and Evaluation of an Ultra Precision Rotary Table for Freeform Machine Tools”, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 27, No. 7, pp. 94-100, 2010.
 8. FUNARU, MARIAN, STAN, GHEORGHE, MIHAILA, LUCIAN, PASCU, MARIUS, ANDRIOAIA and DRAGOS, "Precise Rotary Table Indexing System Used on Milling Machining Centres”, Journal of Engineering Studies and Research, Vol. 19, No. 1, 2016.
 9. Krol, O., & Sokolov, V., "Selection of Worm gearing optimal structure for Machine Rotary Table”, Diagnostyka, Vol. 22, No. 1, pp. 3-10, 2021.
 10. Dassanayake, K. M., & Tsutsumi, M., "High Performance Rotary Table for Machine Tool Applications”, International Journal of automation technology, Vol. 3, No. 3, pp. 343-347, 2009.