



상용해석 툴을 이용한 고강성 링 타입 자동공구교환장치의 최적 설계에 관한 연구

김영준^a, 김성재^{a*}, 이영춘^b, 강세찬^a

A Study on the Design of Ring-type Automatic Tool Changer

Young Jun Kim^a, Seong Jae Kim^{a*}, Young Choon Lee^b, Se Chan Kang^a^a Department of Mechanical Engineering, Dong A University^b Research & Development Center of Dae young CoreTech Co., Ltd.

ARTICLE INFO

Article history:

Received	18	October	2022
Revised	1	December	2022
Accepted	5	December	2022

Keywords:

ATC
Ring type
Static analysis
Dynamic analysis
MBD
M.C.

ABSTRACT

With the constant development of industrial technology, precision processing systems are required to be diversified, accelerated, and enlarged. Consequently, interest in machine tools for the high-speed processing of large workpieces is increasing. automatic tool changer (ATC) is an automatic tool change device for automatically changing tools during work and is important part of the machining center. The ring-type automatic tool exchange device is advantageous in terms of the number of tools and the size of the magazine owing to its faster operating time and higher space efficiency than before, and ability to use large-sized tools. In this study, seven cases improved according to the thickness of the ring magazine selected using finite element analysis (FEA), and the optimal design was evaluated by static structural and dynamic analysis and multibody dynamics analysis for each case.

1. 서론

산업기술이 나날이 발전해 가면서 정밀가공시스템은 다양화, 고속화, 대형화가 요구되고 있다. 이로 인해 대형 공작물의 고속 가공을 위한 공작기계에 대한 관심이 높아지는 추세이다^[3]. 그 중에서도 머시닝센터에서는 제품 가공 시 더 큰 규격의 공구사용이 요구되고 있으며, 이러한 고중량의 공구를 짧은 시간에 안정적이고 정확하게 교환하기 위한 기술이 필요하다. ATC(automatic tool changer)는 작업 도중에 자동으로 공구를 바꾸기 위한 자동공구교환장치로서 머시닝센터에서 가장 중요한 파트 중 하나이다. ATC는 공구를 직접 교환하는 캠 기어박스과 공구가 장착되는 매거진으로 나눌 수 있으며, ATC는 매거진의 형태에 따라 링 타입과 드럼 타입으로 구분할 수 있다. 링 타입 자동공구교환장치는 드럼

타입 자동공구교환장치에 비해 작동시간이 빠르고 공간효율이 높아 공구의 수와 매거진의 크기 측면에서 머시닝센터의 크기와 소비자의 요구사항에 맞춰 유연한 설계가 가능하며, 큰 규격의 공구의 사용이 가능하다. 링의 매거진 경우 전체 중량이 감소하지만, 60개의 공구가 장착되었을 때 드럼 타입과 비교하여 진동의 영향이 커지므로 링의 중량과 크기를 최소화 하면서 강성과 안정성을 확보하여야 한다.

본 연구에서는 유한요소해석(FEA)을 이용하여 링 매거진의 두께 및 지지부 형상을 중심으로 링 타입 ATC 설계에 대한 해석을 진행하고 최적의 설계를 선정하였다. 링 매거진의 두께에 따라 개선한 7개의 case를 선정하고 각 case에 대한 정적 및 동적 구조해석을 실시하였다. 정적 구조해석을 통해 링 매거진과 지지부의 최대 응력 및 변형을 평가하였고, 동적 구조해석을 통해 모달 특성과

* Corresponding author. Tel.: +82-51-200-7647

E-mail address: sjkim641@dau.ac.kr (Seong Jae Kim).

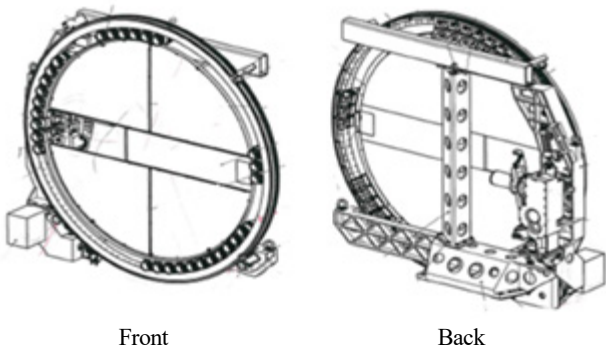


Fig. 1 Structure of ring type automatic tool changer

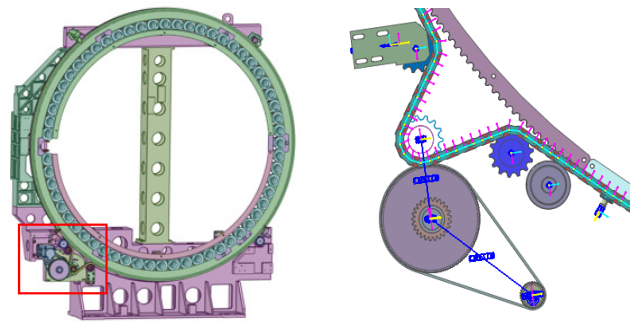


Fig. 2 3D model and constraints in the analytical model

조화 응답 특성을 분석하여 각 case에 대한 평가를 진행하였다.

2. 본 론

2.1 링 타입 자동공구교환장치의 구조

ATC는 캠 기어박스과 톨 매거진으로 구성된다(Fig. 1). 캠 기어 박스는 모터의 작동으로 구동 압이 회전하여 공구 매거진에 저장된 공구를 교환해주며, 주축의 장착된 공구가 다음 공구로 교체되면 매거진은 회전하여 다음 공구 위치로 이동한다. 본 연구의 링 타입 매거진은 60개의 공구와 공구가 보관되는 톨 포트, 그리고 공구를 교환하기 위해 회전하는 링 매거진으로 구성된다.

2.2. 해석방법

해석 시 60개의 공구 하중을 포함한 링 매거진의 3D 모델을 적용하였다. 유한요소모델을 이용하였으며 구조적 특성을 분석하기 위해 3차원 모델을 유한요소로 분할하는 메쉬가 사용되었다. 이는 요소 수가 많을수록 정확도가 높아지게 된다.

그러나 요소 수의 증가는 해석 시간을 증가시키고 하드웨어의 성능에 많은 영향을 받는다. 따라서 원활한 프로세스를 위해 전체 시스템 크기의 10% 이내로 요소 수를 설정하여 유한요소 모델을 생성하였다. ATC의 각 구성요소의 상시 하중을 고려한 구조해석 및 진동해석을 수행하여 구조의 개선을 통한 최적 형상을 검토한다.

동역학 해석에서는 회전력에 의해 발생하는 진동과 자중이 동시에 발생하는 시스템의 시뮬레이션을 수행한다. 회전체인 링 매거진은 주기적으로 발생하는 회전 가진력이 발생하며 회전력은 동역학적 해석을 통해 ATC의 작동을 시뮬레이션 하여 발생하는 회전 토크를 산출한다. 동역학 해석 시 구동 모터 및 스프로킷, 기어에는 회전 조인트를 할당하고 각 회전축의 정적 마찰계수와 동적 마찰계수를 0.1 및 0.08로 설정하였다. Table 1은 각 기어의 회전 비를 나타낸다. 구동부와 링 매거진에 연결된 체인을 따라 동력이 전달되기 때문에 고체 접촉을 설정하고, 댐핑 계수를 스프링 계수의

Table 1 Rotation ratio of drive pulley and gear

Distribution	Gear ratio
Motor pulley : Belt pulley	1 : 4
Gear : Chain sprocket	1 : 4

1/10,000로 설정하였다. 여기서 식 (1)을 통해 스프링 계수 K를 계산하였다. 식 (2)에서 R1, R2는 접촉면 1과 2의 반지름을 각각 의미하며, 식 (3)의 E1, E2는 각각 접촉면 1과 2의 포아송의 비를 의미한다.

$$K = \sqrt{\frac{16RE^2}{9}}, \quad (1)$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad (2)$$

$$E = \frac{E_1 E_2}{E_2(1 - \nu_1^2) + E_1(1 - \nu_2^2)} \quad (3)$$

동역학 해석으로 산출한 회전력을 통해 ATC의 작동 환경에서 진동 특성을 분석하고 설계를 평가하였다.

3. 해석 및 고찰

공구 교환 시 일반적으로 회전체인 링 매거진과 지지부의 톨러의 안정성의 확보가 우선된다. 해석을 위해 60개의 공구를 장착할 수 있는 크기의 링 매거진을 설계하였으며 두께와 지지부의 크기를 변경하여 7개의 case를 선정하여 해석을 수행하였다. 각 case의 제원은 Table 2에 나타내었다. 구조 및 진동 해석은 상용해석 톨인 Ansys Workbench 2022 R2를 사용하였고, 동역학 해석은 RecurDyn을 활용하였다.

링 매거진의 탄성계수, 인장강도, 밀도, Poisson's ratio는 각각 200,000 MPa, 241 MPa, 7.15E-09 ton/mm³, 0.2로 설정하였다. 또한 매거진, 캠 기어박스, 공구의 무게를 고려하여 하중 조건을

Table 2 Specifications of ring magazines by case

	Width	Diameter	Weight	Volume
	mm		kg	m ²
Case 1	70	2,600	309.3	43.253
Case 2	75		336.6	47.085
Case 3	77.5		350.3	49.001
Case 4	80		364.1	50.917
Case 5	82.5		377.8	52.834
Case 6	85		391.5	54.751
Case 7	90		418.8	58.583

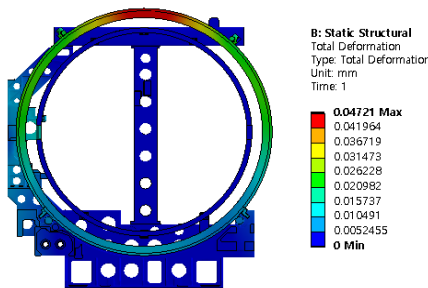


Fig. 3 Result of static structural analysis of the ring type ATC

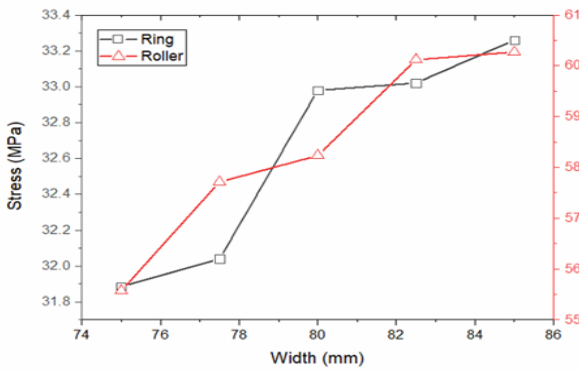


Fig. 4 Result of static analysis in ring magazine(stress)

설정하고 변위(UX, UY, UZ)가 하단 지지대에 고정된 절점에 구속하였다. 부하 조건은 매거진 베이스의 자중과 60개의 공구 무게를 고려하였다. 각 case의 링 매거진과 롤러의 구조해석 결과는 Fig. 4와 Fig. 5와 같다. 해석 결과 변형량은 두께가 증가할수록 감소하여 링의 폭이 직경의 3% 이상의 값을 가지는 80 mm에서 크게 개선되었으며, 고강성 확보를 위해서 80 mm 이상의 폭을 가진 링을 선택하는 것이 최적임을 알 수 있다. 이때 최대 응력은 34.3 MPa로 재료의 항복응력(241 MPa)의 14% 수준이며 6 이상의 안전계수를 가진다.

기존의 연구에 의하면 정적 구조해석을 통해 연구된 고강성 드럼 타입 자동공구교환장치의 경우 매거진 베이스의 하측에서 최대 변형이 0.356 mm, 최대 응력이 34.6 MPa이 발생하였으며, 7의 안전계수를 가진다. 본 연구에서 얻어진 결과는 기존 모델의 연구

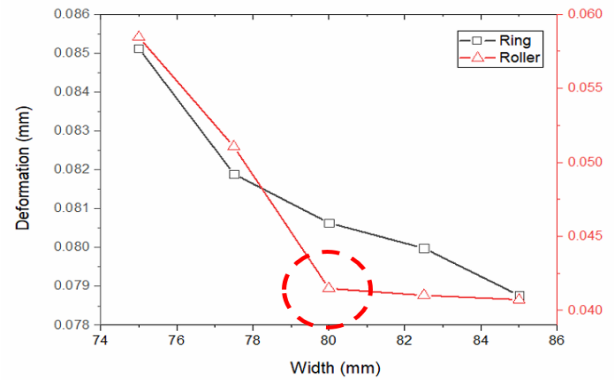


Fig. 5 Result of static analysis in ring magazine(deformation)

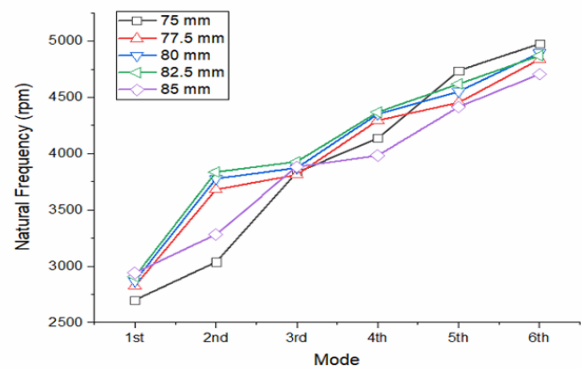


Fig. 6 Result of modal analysis in ring magazine

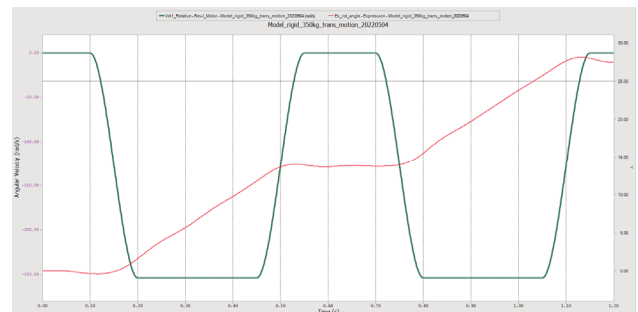


Fig. 7 Ring magazine rotation angle

결과와 비교하여도 유사한 수준으로 보이며 높은 안전율과 충분한 강성을 가지는 것으로 판단된다.

링 매거진의 모달 해석은 모드 해석은 6차 모드까지 수행하였다. 해석 결과는 Fig. 6과 같으며 공진주파수는 작동 회전수 이상의 값을 가질 경우 변형이 가장 일어나기 쉬운 1차 모드에서의 값이 클수록 동일한 구조에서는 유리하며, 77.5 mm 이상의 두께를 가진 case에서는 구조 설계변경에 따른 효과가 미미한 것으로 나타나고 있다. 공진주파수를 살펴보면 모든 구간에서 작동 주파수인 33.33 Hz에서 벗어난 범위에 존재하여 공진발생 위험도는 낮은 것으로 판단할 수 있다. 따라서 본 설계에서 링 매거진의 최적적인 구조는 중량과 크기를 최소화하면서도 안정성이 가장 개선되는 case 4를

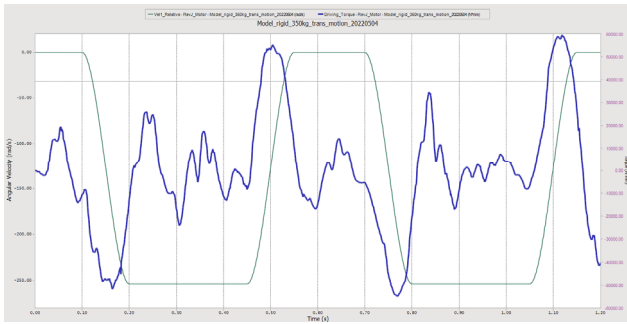


Fig. 8 Motor driving torque

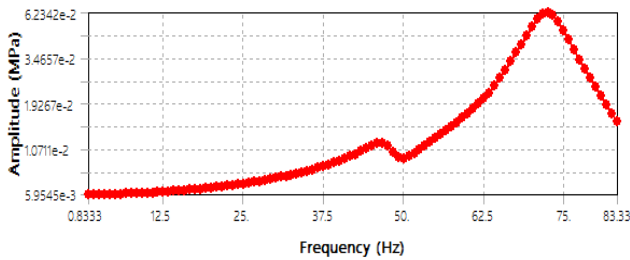


Fig. 9 Result of harmonic analysis in ring magazine(stress)

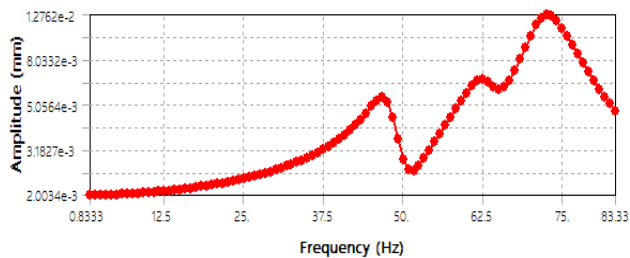


Fig. 10 Result of harmonic analysis in ring magazine(deformation)

최적의 구조로 결정하였다.

또한, 회전을 통한 진동이 발생할 경우 작동 주파수가 고유진동수에 근접하게 될 때의 공진을 확인하는 것이 중요하므로 앞선 모드 해석의 공진주파수를 참고로 하여 주기적으로 가해지는 회전 가진력에 대한 구조물의 진동 응답을 확인하는 하모닉 응답 해석이 이루어지며, 이때 회전 가진력은 동역학 해석을 통해 산출하여 입력 값으로써 사용한다.

동역학 해석을 위해 링 매거진이 공구 교환을 위해 2개의 톨 포트를 이동한 경우를 1 step으로 설정, 1 step 회전 후 정지, 다시 회전하여 총 2 step까지 연속적으로 회전하도록 해석을 진행하였다. 해석 결과는 Fig. 8과 9와 같이 나타난다. 구동 초기 2도의 역방향 회전을 고려하여 14도 회전한 경우가 1 step으로 설정되었으며 1.2초 동안 2 step을 진행하였다(Fig. 7). 공구 교환 시 필요한 최대 토크는 59,569 N·mm로 나타난다(Fig. 8).

하모닉 응답 해석을 위해 앞서 산출한 59,569 N·mm의 회전 토크를 가진력으로 링 매거진의 시계방향으로 적용하였으며 매거

진 베이스의 하단을 구속한 조건에서 해석이 이루어졌다. 모드 해석 결과의 1~6차 모드의 최솟값은 45.954 Hz, 최댓값은 91.12 Hz이므로 가진 상태의 주파수 응답 범위는 1~6차 모드가 포함된 0 ~ 83.33 Hz의 범위를 지정하여 해석을 수행하였다.

하모닉 응답 해석 결과는 Fig. 9와 Fig. 10과 같다. 링 매거진의 공진발생 주파수 영역은 44.665 Hz으로 1차 모드 근처에서 위험 속도에 도달함을 보인다. 이를 속도로 환산하면 2,679.96 rpm 수준으로 링 타입 ATC의 운전 시 안전속도 영역인 2,000 rpm보다 크게 나타나므로 가진 영역에서의 회전수는 공진으로부터 안전함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 링 매거진의 최종적인 구조를 case 4로 결정하였으며, 해석을 통해 최적의 링 매거진 구조를 설계하고 안전함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 국산화가 진행되고 있는 링 타입 자동공구교환장치의 초기설계 모델에 대하여 유한요소해석을 기반으로 하여 정적, 동적 구조해석을 통해 최적의 링 매거진 구조를 선정하였다. 이후 동역학 해석을 통해 구동 토크를 산출하고 이를 통해 하모닉 응답 해석을 진행하여 가진 상태에서의 안전성을 확인하였다. 본 연구결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 대형 공작물의 고속 가공을 위한 링 타입 자동공구교환장치의 설계를 제안하였다.

(2) 본 연구에서는 상용해석 툴을 이용하여 링 매거진의 폭과 무게에 따른 설계 시 최적 형상을 확인하고, 중량과 크기를 최소화 하면서도 안전성이 확보되는 링 타입 ATC의 설계를 제안하였다.

(3) 동역학 해석을 통한 운동예측과 구동 시 회전 가진력에 대한 하모닉 응답 해석을 통해 제안한 링 타입 ATC의 가진 영역의 회전수는 공진으로부터 안전함을 알 수 있었다.

(4) 본 연구에서 제시한 링 타입 ATC는 진동특성에서 안전한 설계가 이루어 졌으며, 이를 통해 필요이상의 크기나 제작 시 비용 상승을 방지할 수 있게 되었다.

후 기

본 연구는 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구과제의 일부입니다.(P0002092, 2022년 산업혁신인재성장지원사업)

References

[1] Choi, H. J., Lee, H. G., 2020, A Study on the Design of Drum Type

- Automatic Tool Changer, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., 19:7 52-59, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2020.19.07.052>.
- [2] Lee, S. B., Kim, S. J., Lee, Y. C., Jung, J. U., 2021, Impact Resistance of Safety Guard for Machine Tools Using Lamination Bonding Films, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 30:4 295-300, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.4.295>.
- [3] Kim, D. H., Chee, H. S., Lee, C. M., 2013, The Technical Trend and Future Development Direction of Machine Tools Automatic Tool Changer by Patent Mapping, J. Korean Soc. Precis. Eng., 30:3 266-270, <https://doi.org/10.7736/KSPE.2013.30.3.266>.
- [4] Kim, Y. S., Kim, J. T., Yang, S. Y., 2014, A Study on Design of Small Type Screw Decanter using Commercial Analysis Tool, Journal of Drive and Control, 11:4 46-52, <https://doi.org/10.7839/ksfc.2014.11.4.046>.
- [5] Han, H. W., Han, S. H., 2018, Static and Dynamic Stiffness Analysis for Supported Structure of Inner Race Track Grinding Machine, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, 42:10 925-930, <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2018.42.10.925>.



Young Jun Kim

M.Sc. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Donga University.
His research interest is Structural Analysis.
E-mail: hispa1131@naver.com



Seong Jae Kim

Professor in the Department of Mechanical Engineering Donga University.
His research interest is Fracture Mechanics.
E-mail: sjkim641@dau.ac.kr



Young Choon Lee

Chief in the Research & Development Center of Dea Young CoreTech Co., Ltd.
His research interest is Production Technology Engineering.
E-mail: lyc0202@empas.com



Se Chan Kang

M.Sc. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Donga University.
His research interest is Structural Analysis.
E-mail: rkdtpeks00@naver.com