

유연 다물체 동역학 해석을 이용한 4축 이적재 로봇의 주요 부품 선정

박일환*, 고아라*, 설상석*, 홍대선*[#]

*창원대학교 기계공학부

Selecting Main Parts of a Four-Axis Palletizing Robot Through Dynamic Analysis of Rigid-Flexible Multibody Systems

Il-Hwan Park*, A-Ra Go*, Sang-Seok Seol*, Dae-Sun Hong*[#]

*School of Mechanical Engineering, Changwon national UNIV.

(Received 12 November 2021; received in revised form 13 December 2021; accepted 19 December 2021)

ABSTRACT

Among the various industrial robots, palletizing robots have received particular attention because of their higher productivity in accordance with technological progress. When designing a palletizing robot, the main components, such as the servo motors and reducers, should be properly selected to ensure its performance. In this study, a practical method for selecting the motors and reducers of a robot was proposed by performing the dynamic analysis of rigid-flexible multibody systems using ANSYS and ADAMS. In the first step, the links and frames were selected based on the structural analysis results obtained from ANSYS. Subsequently, a modal neutral file (MNF) with information on the flexible body was generated from the links and frames using modal analysis through ANSYS and APDL commands. Through a dynamic analysis of the flexible bodies, the specifications of the major components were finally determined by considering the required torque and power. To verify the effectiveness of the proposed method, the analysis results were compared with those of a rigid-body model. The comparison showed that rigid-flexible multibody dynamic analysis is much more useful than rigid body analysis, particularly for movements heavily influenced by gravity.

Keywords : Palletizing Robot(이적재 로봇), Rigid-Flexible Multibody System(강체-유연 다물체 시스템),
Dynamic Analysis(동적 해석), Selection of Motors(모터 선정), ADAMS(아담스)

1. 서 론

다양한 산업용 로봇 중 특히 주목받고 있는 로봇은

이적재 로봇이며, 기술적 진보와 함께 산업계의 더 높은 생산성에 기여하고 있다. 이와 같은 이적재 로봇은 설계 시 서보 모터와 감속기가 적절하게 선정되어야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 유연 다물체 동역학 해석으로 이적재 로봇의 서보 모터와 감속기 선정에 대한 실제적인 방법을 제안하고자 한다.

Corresponding Author : dshong@changwon.ac.kr

Tel: 055-213-3627, Fax: 055-213-2854

유연 다물체 동역학 해석은 유연체의 유한 요소 모델과 결합하여 강체 및 유연체가 모두 포함된 시스템의 동역학적 거동을 해석하는 방법이다.

이와 같은 유연 다물체 동역학 해석에 대한 연구로 주파수 응답 해석과 관련하여 병렬 매니플레이이터^[1]에 대한 연구와 드럼 세탁기^[2], 스핀들^[3]에 대한 연구가 있다.

그리고 유연체로 인한 변위와 관련된 연구로 메카트로닉 시스템의 위치 해석^[4], 6-DOF 매니플레이이터의 경로 오차 해석^[5], 파괴 방수차의 슬라이드 붐의 변위 해석^[6]이 있다. 또한 위치 오차와 함께 3-RPS 병렬 로봇의 응력 해석^[7]과 6-DOF 로봇의 링크 변형 및 에너지 해석^[8]에 대한 연구가 있다.

이와 같이 유연 다물체 동역학 해석에 대한 연구는 주파수 응답 해석과 유연체로 인해 발생하는 위치 오차와 관련된 연구가 주를 이루고 있다.

그리고 본 연구와 관련된 논문인 이적재 로봇의 서보 모터와 감속기 선정에 대한 연구^[9]는 강체에 대한 다물체 동역학 해석으로 유연체에 대한 영향이 고려되지 않았다.

본 연구에서는 강체에서 유연체로 변환하기 위해 먼저 ANSYS를 이용하여 구조 해석을 수행하고, 그 결과를 이용하여 유연체로 변환할 링크 및 프레임을 선정한다.

선정된 링크 및 프레임은 ANSYS를 이용하여 MNF(Modal Neutral File)를 생성하고, 생성된 MNF는 ADAMS로 입력하여 유연 다물체 동역학 해석을 수행한다.

이와 같은 유연 다물체 동역학 해석을 통해 각 축의 가속 토크와 중력 토크를 구하고 이적재 로봇의 주요 부품 선정 방법에 따라 서보 모터와 감속기를 선정한다. 또한 강체에 대한 동역학 해석 결과와 유연 다물체 동역학 해석 결과를 비교하여 분석한다.

본 논문에서는 2장에 이적재 로봇의 정의 및 유연 다물체 동역학 해석 방법에 대해 기술하고, 3장에서는 이적재 로봇의 강체 및 유연체의 다물체 동역학을 해석하고 이를 비교 분석한다. 그리고 4장에서는 해석된 결과를 이용하여 이적재 로봇의 주요 부품을 선정하여 그 결과를 비교 분석한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

2. 이적재 로봇의 정의 및 유연 다물체 동역학 해석 방법

2.1 이적재 로봇의 정의

본 연구의 이적재 로봇은 그리퍼가 항상 일정한 자세로 유지되도록 평행사변형 링크 구조를 가지며, 이를 통해 이적재 기능인 픽 앤 플레이스 동작이 가능하다. Fig. 1은 3D CAD 프로그램인 SOLIDWORKS를 이용한 모델이며, 주요 부품인 서보 모터와 감속기는 총 4개의 세트로 구성된다. 여기서, 1축 서보 모터는 웨이스트 프레임을 회전시키고, 2축 서보 모터는 하부 암 프레임, 3축 서보 모터는 링크 1을 회전시킨다. 그리고 4축 서보 모터는 그리퍼를 회전시킨다.

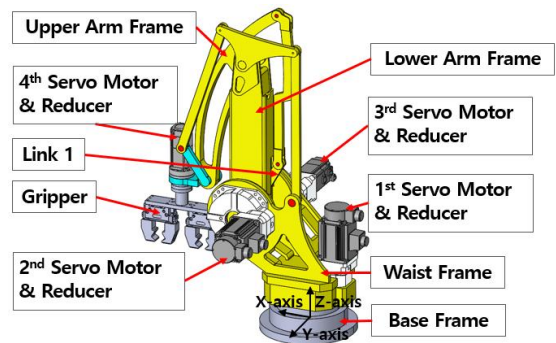


Fig. 1 Initial posture of a four-axis palletizing robot

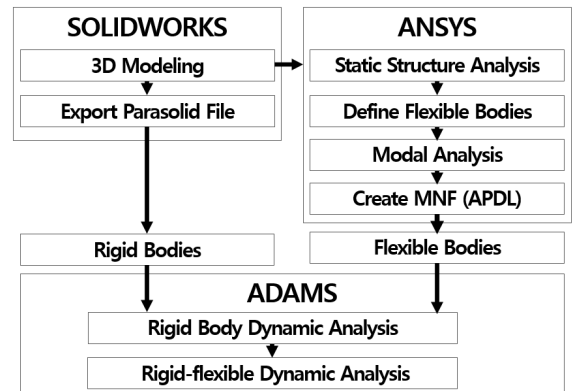


Fig. 2 The simulation flow of the rigid-flexible multibody dynamic analysis

2.2 유연 다물체 동역학 해석 방법

본 연구에서 강체 및 유연 다물체 동역학 해석에 대한 시뮬레이션 흐름도는 Fig. 2와 같으며, 동역학 해석 소프트웨어로는 ADAMS를 사용한다.

시뮬레이션 흐름도에 따라 먼저, 강체의 동역학 해석은 SOLIDWORKS를 이용하여 Parasolid 파일을 생성하고, 이를 ADAMS의 입력 모델로 사용한다.

다음으로 유연 다물체 동역학 해석은 ANSYS로 구조 해석을 하고 유연체 변환 대상을 선정한다. 선정된 링크 등은 ANSYS의 모달 해석과 APDL (Ansys Parametric Design Language) 명령어를 이용하여 유연체 정보를 가진 MNF(Modal Neural File)를 생성한다. 여기서 MNF는 각 절점의 위치 및 연결성, 질량, 관성, 모드 형상 등의 정보를 포함한다^[10]. 이렇게 생성된 MNF 파일은 ADAMS에 입력되어 강체의 링크 등을 유연체로 변환할 수 있으며, 이를 통해 유연 다물체 동역학 해석을 수행한다.

3. 이적재 로봇의 유연 다물체 동역학 해석

3.1 이적재 로봇의 구조 해석 및 유연체 선정

본 절에서는 이적재 로봇의 구조 해석을 통해 강체에서 유연체로 변환시킬 링크 및 프레임 선정한다. 여기서, Fig. 1의 2축과 3축 초기 자세에서 최대 응력이 발생하는 자세로 각각 75도, -35도 회전시킨다. 그리고 베이스 프레임을 고정하고 각 링크들을 회전 조인트로 설정한다. 회전 조인트 중 1축, 2축, 3축은 구조 해석을 위해 고정한다. 다음으로 모터 및 감속기 모델은 생략하고, 그리고 프레임에는 4축의 모터 및 감속기, 그리고, 강제 봉의 무게를 합산한 299N의 하중을 가한다. 재료의 물성치는 Table 1과 같으며, 상부암 프레임만 알루미늄이고 나머지 링크들은 강재로 설정한다.

전체 노드 수 945,834개, 요소 수 597,456개의 유한요소 모델을 생성한 후 구조 해석을 수행하면 Fig. 3과 같이 링크 1에서 최대 응력 70.2MPa, Fig. 4와 같이 그리고 프레임에서 최대 변형 1.5mm가 발생한다. 그리고 유연 다물체 동역학 해석의 계산 비용을 낮추고,

Table 1 Material Properties

Material	Density	Young's modulus	Poisson's ratio
Steel	7,850kg/m ³	2.0e+11MPa	0.3
Aluminum	2,700kg/m ³	7.1e+10MPa	0.33

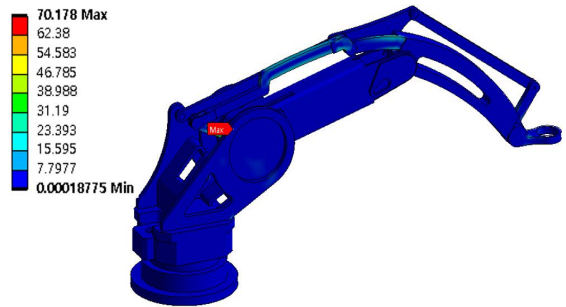


Fig. 3 Max. equivalent(von-Mises) stress of the palletizing robot

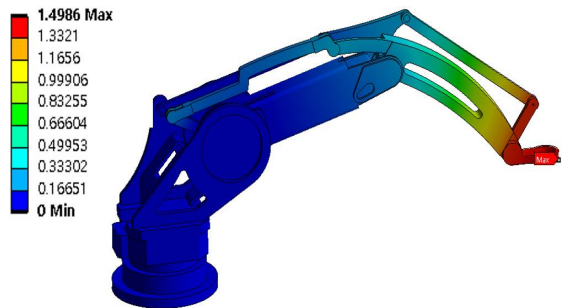


Fig. 4 Max. deformation of the palletizing robot

응력과 변형량이 작음으로써 유연체 영향이 적을 것으로 판단되는 베이스 프레임과 웨이스트 프레임은 강체로, 나머지 링크 및 프레임은 유연체로 변환하여 유연 다물체 동역학 해석을 진행한다.

3.2 이적재 로봇의 동역학 해석 조건

이적재 로봇의 동역학 해석은 구조 해석의 회전된 자세를 초기 자세로 해석한다. Table 2는 각 축의 회전 범위와 시뮬레이션 각도 R_d [°]를 보여준다. 여기서, 시뮬레이션 각도는 1축, 4축의 경우 중력의 영향이 없는 Z축 회전으로 각각 160도, 170도로 회전하는 50% 듀티 사이클(Duty Cycle)로, 2축, 3축은 중력의

Table 2 Range of rotation, rotated angle and simulation angle of each axis

Axis no.	1	2	3	4
Range of rotation [°]	-160~+160	0~+75	-80~0	-170~+170
Simulation angle, R_d [°]	+160	-75	-45	+170

Table 3 Velocity and time conditions used in ADAMS

Axis no.	1	2	3	4
Motor's rated velocity[rpm]	3,000	2,020	1,510	2,000
Reduction ratio, r_g	124.9	97.1	121.0	50
Max. angular velocity, ω_{max} [rad/s]	2.52	2.78	1.31	4.19
Acceleration t_a and deceleration t_d time [s]	0.6	0.6	0.6	0.2
Constant speed time, t_c [s]	0.510	0.001	0.001	0.508

영향이 있는 Y축 회전이기 때문에 각각 -75도, -45도 회전 후 원점으로 복귀하는 100% 듀티 사이클로 회전한다. 그리고 1축, 2축, 4축은 각각 단일 축으로 회전시키고, 3축은 회전 시 평행사변형 링크의 간섭이 발생하기 때문에 2축과 함께 회전한다.

동적 해석 시 시뮬레이션 각도 R_d [°]와 함께 가속 t_a [s], 등속 t_c [s], 감속 t_d [s] 시간의 정의가 필요하다. 이를 위해 Table 3과 같이 모터의 정격 속도와 감속비 r_g 를 고려한 최대 각속도 ω_{max} [rad/s]와 함께 가감속 시간을 정의하여 식(1)을 통해 등속 시간을 구한다. 가감속 시간 및 등속 시간을 통해 제어되는 동작 사이클의 시간 데이터는 ADAMS에서 최대 각속도와 함께 계단함수로 입력되어 동적 해석을 수행한다.

$$t_c = \frac{|R_d| \times \pi}{\omega_{max} \times 180} - \frac{t_a + t_d}{2} \quad (1)$$

3.3 이적재 로봇의 강체 및 유연 다물체 동역학 해석 및 결과

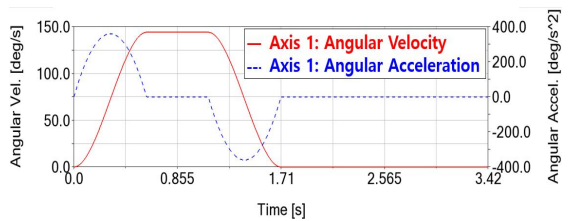
본 연구의 강체 및 유연 다물체 동역학 해석은 동일한 조건의 시뮬레이션 각도, 가감속 및 등속 시간, 최대 회전 속도로 동적 해석을 수행한다.

Fig. 5는 강체 및 유연 다물체 동역학 해석에서 동일한 해석 결과로 나오는 각속도 및 각가속도 곡선이다.

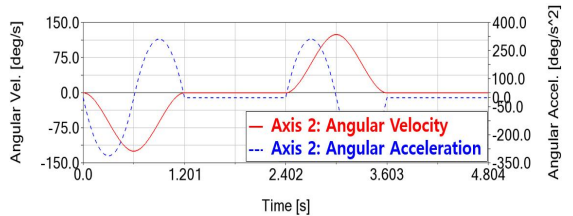
여기서 (a)와 (d)는 각각 1축과 4축의 50% 듀티 사이클, (b)와 (c)는 각각 2축과 3축의 100% 듀티 사이클의 운동 곡선을 보여준다.

본 연구에서는 ADAMS를 이용하여 이적재 로봇이 강체일 경우와 유연체일 경우 각각 동적 해석을 수행한다. 그리고 중력 조건이 포함되지 않은 경우와 포함된 경우로 동적 해석을 수행하여 각 축의 토크 결과를 비교한다.

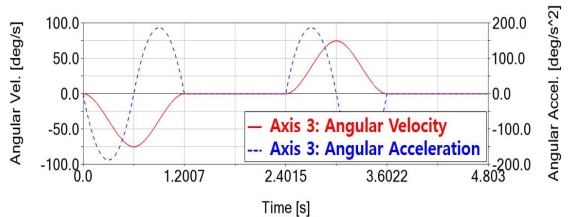
먼저, 강체에 대한 동적 해석 결과로 Fig. 6~8과



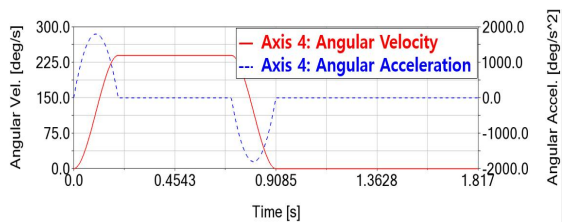
(a) Curves of axis 1 for 50% duty cycle



(b) Curves of axis 2 for 100% duty cycle



(c) Curves of axis 3 for 100% duty cycle

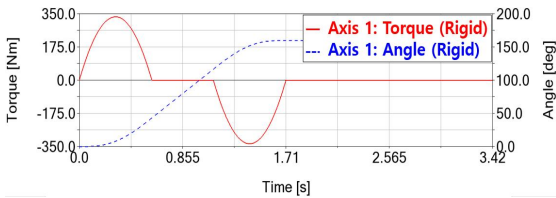


(d) Curves of axis 4 for 50% duty cycle

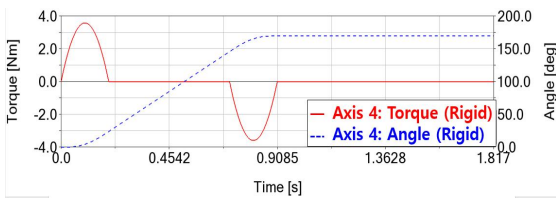
Fig. 5 Angular velocity and angular acceleration curve for each axis obtained from ADAMS

같으며, 각 축이 회전할 때 시간에 대한 토크 및 각도 곡선을 보여준다. 여기서 Fig. 6은 1축과 4축의 경우로 Z축 회전으로 중력의 영향이 없기 때문에 중력 조건이 포함되지 않은 경우와 포함된 경우가 동일한 결과로 해석된다.

반면 2축과 3축의 경우는 Y축 회전이기 때문에 중력의 영향이 발생한다. 따라서 Fig. 7과 Fig. 8과 같이 중력 조건이 포함되지 않은 경우와 포함된 경우로 동적 해석을 수행하여 비교한다.

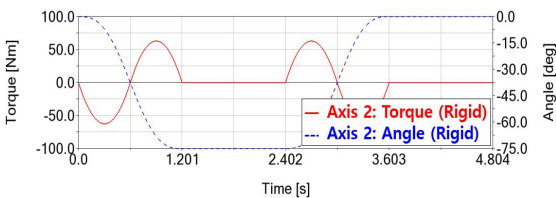


(a) Curve of axis 1 with and without gravity

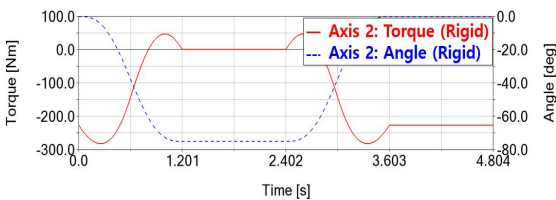


(b) Curve of axis 4 with and without gravity

Fig. 6 Torque and angle curve for axis 1 and axis 4 obtained from rigid dynamic analysis

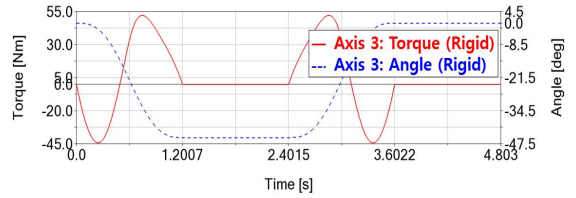


(a) Curve of axis 2 without gravity

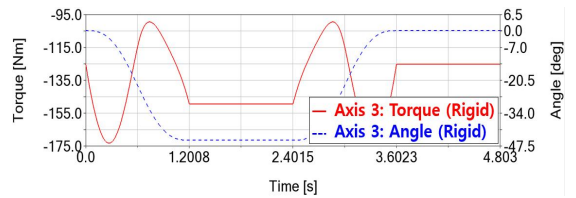


(b) Curve of axis 2 with gravity

Fig. 7 Torque and angle curve with and without gravity for axis 2 obtained from rigid dynamic analysis



(a) Curve of axis 3 without gravity



(b) Curve of axis 3 with gravity

Fig. 8 Torque and angle curve with and without gravity for axis 3 obtained from rigid dynamic analysis

Table 4 Max. acceleration torque with and without gravity, and gravity torque obtained from rigid dynamic analysis

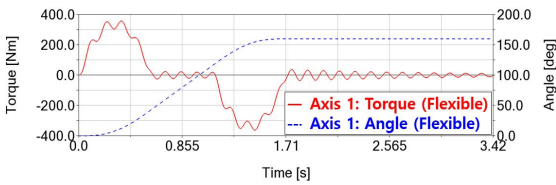
Axis no.	1	2	3	4
T_{ag-R} [Nm]	334.76	281.58	173.11	3.59
T_{a-R} [Nm]	334.76	63.01	52.16	3.59
T_{g-R} [Nm]	0	218.57	120.95	0

Table 4는 Fig. 6~8의 결과를 이용하여 강제에서 중력이 포함된 최대 토크 T_{ag-R} [Nm], 중력이 포함되지 않은 최대 가속 토크 T_{a-R} [Nm], 그리고 두 토크 결과값을 이용하여 계산되는 중력 토크 T_{g-R} [Nm]를 보여준다. 여기서, 2축과 3축의 경우 최대 가속 토크 보다 중력 토크의 영향이 크게 발생한다.

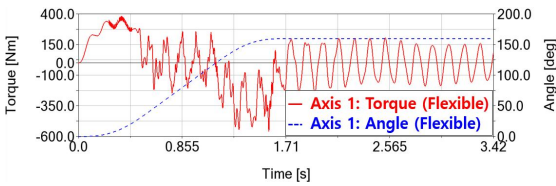
다음으로 유연 다물체 동역학 해석은 강제 해석과 동일하게 중력 조건이 포함되지 않은 경우와 포함된 경우로 해석하고, 그 결과로 Fig. 9~12와 같이 각 축이 회전할 때 시간에 대한 토크 및 각도 곡선을 구한다. 여기서, Fig. 9와 Fig. 12는 각각 1축과 4축의 유연체 해석 결과로 강제 해석과 다르게 중력이 영향이 발생한다. 그리고 Fig. 10과 Fig. 11은 각각 2축과 3축에 대한 유연체 해석 결과를 보여준다.

Table 5는 Fig. 9~12의 결과를 이용하여 유연체 에

서 중력이 포함된 최대 토크 T_{ag-F} [Nm], 중력이 포함되지 않은 최대 가속 토크 T_{a-F} [Nm], 그리고 두 토크의 결과를 이용한 중력 토크 T_{g-F} [Nm]를 보여준다. 여기서, 1축은 강체 해석과 다르게 중력 토크가 발생하고, 2축은 최대 가속 토크가 강체 해석과 유사한 결과가 나오지만 중력 토크가 크게 발생한다. 그리고 3축은 강체 해석 대비 최대 가속 토크와 중력 토크가 크게 발생한다. 마지막으로 4축은 강체 해석과 거의 유사한 결과로 유연체의 영향이 거의 발생하지 않는다.

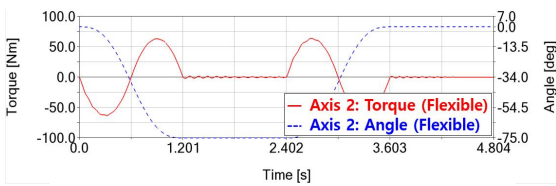


(a) Curve of axis 1 without gravity

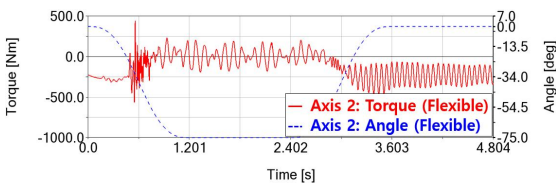


(b) Curve of axis 1 with gravity

Fig. 9 Torque and angle curve with and without gravity for axis 1 obtained from rigid-flexible dynamic analysis

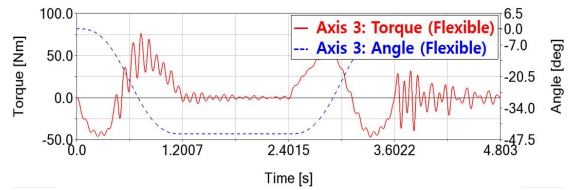


(a) Curve of axis 2 without gravity

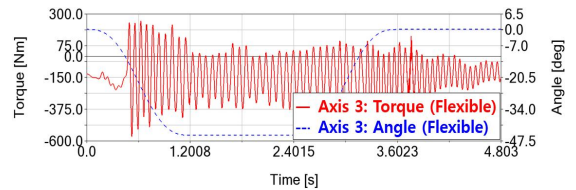


(b) Curve of axis 2 with gravity

Fig. 10 Torque and angle curve with and without gravity for axis 2 obtained from rigid-flexible dynamic analysis

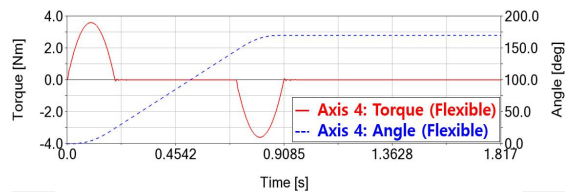


(a) Curve of axis 3 without gravity

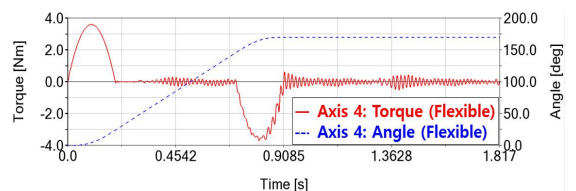


(b) Curve of axis 3 with gravity

Fig. 11 Torque and angle curve with and without gravity for axis 3 obtained from rigid-flexible dynamic analysis



(a) Curve of axis 4 without gravity



(b) Curve of axis 4 with gravity

Fig. 12 Torque and angle curve with and without gravity for axis 4 obtained from rigid-flexible dynamic analysis

Table 5 Max. acceleration torque with and without gravity, and gravity torque obtained from rigid-flexible dynamic analysis

Axis no.	1	2	3	4
T_{ag-F} [Nm]	559.03	565.52	570.02	3.71
T_{a-F} [Nm]	362.06	64.05	76.43	3.60
T_{g-F} [Nm]	196.97	501.47	493.59	0.11

4. 유연체를 갖는 이적재 로봇의 주요 부품 선정

4.1 이적재 로봇의 주요 부품 선정 방법

본 연구에서는 이적재 로봇의 주요 부품인 모터와 감속기 선정을 위해 먼저, 서보 모터에 필요한 총 토크의 정의가 필요하고 총 토크 T_m [Nm]은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$T_m = \frac{T_a + T_c + T_g}{\eta} \quad (2)$$

여기서, T_a [Nm]는 가속 토크, T_c [Nm]는 등속 토크, T_g [Nm]는 중력 토크이며, η 는 감속기의 동력전달 효율로 0.9로 정한다.

상세하게 가속 토크는 각 축의 부하와 감속기, 모터 축의 관성모멘트를 모두 고려한 모터 축 상당 관성모멘트 J [kg·m²]와 각가속도 α [rad/s²]를 이용하여 다음 식으로 구한다.

$$T_a = J\alpha \quad (3)$$

다음으로 등속 토크는 마찰 토크에 해당하며 실제 초기 설계 단계에서 이 값을 구하기 어렵기 때문에 등속 토크 상수⁹⁾를 이용하여 다음의 식으로 구한다.

$$T_c = \beta \times \max |T_a + T_g| \quad (4)$$

여기서 등속 토크 상수 β 는 초기 설계 단계에서 구조의 복잡성에 따라 0.3~0.5의 값을 갖도록 정하며, 본 연구에서의 이적재 로봇은 비교적 복잡하므로 0.5로 정한다.

동적 해석을 통해 구한 각 축의 토크 곡선 결과는 직접적으로 모터 선정 과정에 이용되고, 이를 위해 모터에 걸리는 최대토크인 기동 토크(Peak Torque)와 평균 토크 개념인 RMS 토크를 구한다. 먼저 기동 토크 T_p [Nm]는 다음과 같이 구한다.

$$T_p = \max |T_m| \quad (5)$$

다음으로 전체 시뮬레이션 시간 t_{cyc} [s] 동안 RMS 토크 T_r [Nm]는 다음 식으로 구할 수 있으며, 모터 선정 시 정격 토크를 결정에 이용된다.

$$T_r = \left(\frac{1}{t_{cyc}} \int_0^{t_{cyc}} T_m^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

이적재 로봇의 강체와 유연체에 대한 동적 해석을 통해 가속 토크와 중력 토크를 구할 수 있으며, 토크 곡선을 통해 RMS 토크를 구할 수 있다. 이를 이용하여 실제 이적재 로봇의 초기 설계 시 가선택된 모터와 감속기 선정이 적절한가를 다음 조건으로 평가한다.

(1) 서보 모터의 규격 분석

제안한 동적 해석의 결과로 모터 축의 최대 토크로 기동 토크와 RMS 토크를 구할 수 있으며 이 토크들을 고려하여 모터 선정 시 다음 조건을 만족하여야 한다.

조건 1 : 모터는 기동 시 과부하로 모터의 과열 및 소손이 발생되지 않도록 다음 식과 같이 가선택된 모터의 최대 토크 T_{max} [Nm]는 감속비 r_g 를 적용한 기동 토크보다 커야 한다.

$$T_{max} > T_p / r_g \quad (7)$$

조건 2 : 로봇 운동 시 해당 축의 모터에 과열이 발생되지 않도록 다음 식과 같이 가선택된 모터의 정격 토크 T_{rated} [Nm]는 감속비 r_g 를 적용한 RMS 토크 T_r 보다 커야 한다.

$$T_{rated} > T_r / r_g \quad (8)$$

동적 해석을 통해 구한 기동 토크와 최대 각속도를 이용하여 최대 출력 P_{max} [W]를 다음 식으로 구한다.

$$P_{max} = T_p \times \omega_{max} \quad (9)$$

조건 3 : 적정 모터 용량에 대한 평가로 가선택된 모터의 정격 출력 P_{rated} [W]은 다음 식과 같이 최대 출력의 0.5~1배 사이에 있어야 한다.

$$P_{rated} = (0.5 \sim 1) P_{max} \quad (10)$$

(2) 감속기 규격 분석

감속기는 감속기 규격상의 허용 토크와 정격 토크에 대해 다음 두 조건을 만족하여야 한다.

조건 4 : 감속기의 평가로 가선편된 감속기 허용 토크 T_{ga} [Nm]는 다음 식을 만족해야 한다.

$$T_{ga} > T_p \times \eta \quad (11)$$

조건 5 : 가선편된 감속기 정격 토크 T_{gr} [Nm]는 다음 식을 만족해야 한다.

$$T_{gr} > T_r \times \eta \quad (12)$$

4.2 이적재 로봇의 주요 부품 선정 및 분석

이적재 로봇의 주요 부품인 모터와 감속기의 선정을 위해 동적 해석 결과인 Table 4와 Table 5 그리고 토크 곡선을 이용하여 제안한 방법의 조건들을 구한다. 그리고 제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해 실제로 선정된 주요 부품들의 규격과 비교하여 분석한다.

Table 6~9은 1축에서 4축까지 가선편된 모터 및 감속기의 규격과 강체 및 유연 다물체 동역학 해석 결과를 이용하여 구한 조건들을 보여준다.

Table 6은 1축에 대한 가선편된 부품의 규격과 강체 및 유연체에 대한 동적 해석 결과를 이용한 조건들을 보여주며, 여기서 조건 1~5를 모두 만족하는 결과를 보인다.

다음으로 2축에 대한 비교 결과인 Table 7는 강체일 경우 모든 조건을 만족하지만 유연체 동적 해석 결과는 모터의 정격 출력과 감속기의 정격 토크 사양은 만족하지만, 조건 1, 2, 4를 만족하지 못한다. 따라서, 가선편된 모터와 감속기의 사양을 더 높여서 선정해야 한다.

Table 8은 3축에 대한 비교 결과로 강체일 경우 조건 3의 모터의 정격 출력은 189W에서 377W 사이에서 선정되어야 하므로 모터 용량을 더 낮춰서 선정할 수 있다. 그러나 유연체일 경우 2축과 동일하게 조건 1, 2, 4를 만족하지 못한다.

마지막으로 4축에 대한 비교 결과인 Table 9에서는

강체 및 유연체 경우 모두에서 모터와 감속기 규격이 과도하게 높게 선정되어 좀 더 낮은 규격의 제품으로 변경이 가능하다고 판단된다.

이상과 같이 로봇 링크 및 프레임은 유연체로 해석한 경우와 강체로 해석한 결과를 비교하면 유연체일 경우에 더 높은 규격의 모터와 감속기가 필요하고, 특히 중력이 영향이 크게 발생하는 2축과 3축의 경우 강체 해석이 아닌 유연 다물체 동역학 해석에 대한 고려가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 이적재 로봇의 모터 및 감속기 선정을 위한 실제적인 방법을 제안하고자 ANSYS와 ADAMS를 이용한 유연 다물체 동역학 해석을 수행하였다. 유연 다물체 동역학 해석은 먼저 ANSYS로 구조 해석을 수행하여 유연체 대상을 선정하고, 선정된 유연체는 ANSYS의 모달 해석과 APDL을 이용하여

Table 6 Comparisons between the specification and analysis results for axis 1

Specification		Analysis Results	Rigid Body	Flexible Body	
Units					
Motor					
Nm	T_{max}	9.55	T_p/r_g	4.47	5.90
Nm	T_{rated}	3.18	T_r/r_g	1.66	2.42
W	P_{rated}	1,000.0	P_{max}	1,403.8	1,853.3
Reduction gear					
Nm	T_{ga}	1,630.0	$T_p \times \eta$	502.1	662.9
Nm	T_{gr}	1,165.0	$T_r \times \eta$	186.8	272.0

Table 7 Comparisons between the specification and analysis results for axis 2

Specification		Analysis Results	Rigid Body	Flexible Body	
Units					
Motor					
Nm	T_{max}	9.55	T_p/r_g	4.83	9.70
Nm	T_{rated}	3.18	T_r/r_g	2.26	3.21
W	P_{rated}	1,000.0	P_{max}	1022.1	2,052.9
Reduction gear					
Nm	T_{ga}	625.0	$T_p \times \eta$	422.4	848.3
Nm	T_{gr}	625.0	$T_r \times \eta$	197.8	280.6

Table 8 Comparisons between the specification and analysis results for axis 3

Specification		Analysis Results	Rigid Body	Flexible Body	
Units	Motor				
Nm	T_{max}	7.10	T_p/r_g	2.38	7.85
Nm	T_{rated}	2.40	T_r/r_g	1.38	2.57
W	P_{rated}	750.0	P_{max}	377.1	1,241.7
Reduction gear					
Nm	T_{ga}	625.0	$T_p \times \eta$	259.7	855.0
Nm	T_{gr}	445.0	$T_r \times \eta$	150.4	279.9

Table 9 Comparisons between the specification and analysis results for axis 4

Specification		Analysis Results	Rigid Body	Flexible Body	
Units	Motor				
Nm	T_{max}	3.80	T_p/r_g	0.12	0.12
Nm	T_{rated}	1.30	T_r/r_g	0.04	0.04
W	P_{rated}	400.0	P_{max}	25.0	25.4
Reduction gear					
Nm	T_{ga}	44.0	$T_p \times \eta$	5.4	5.5
Nm	T_{gr}	21.0	$T_r \times \eta$	1.8	1.8

MNF로 변환하였다. 다음으로 변환된 MNF는 ADAMS로 입력하여 유연 다물체 동역학 해석을 수행하였다.

유연 다물체 동역학 해석과 함께 강체에 대한 해석 결과는 이적재 로봇의 모터 및 감속기 선정을 위해 기동 토크와 RMS 토크, 최대 출력의 계산에 사용되었다. 그리고 계산된 결과와 제안된 방법을 이용하여 가선택된 모터와 감속기의 규격과 비교 분석하였다.

이와 같이 실제 가선택된 모터와 감속기의 규격을 비교한 결과 강체와 유연체 해석의 차이가 발생하며, 이것은 가감속 시간이 짧고 중력의 영향이 큰 경우에는 유연체로 인한 관성과 컴플라이언스(Inertial and Compliance) 효과가 크게 발생하기 때문이다. 따라서 이러한 경우에는 강체 동역학 해석 대신에 제안한 유연 다물체 동역학 해석을 이용한 모터와 감속기 선정 방법이 보다 더 효과적임을 확인하였다.

후 기

“이 논문은 2021~2022년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구 결과임.”

REFERENCES

- Zhu, C., Wang, J., Chen, Z. et al., “Dynamic characteristic parameters identification analysis of a parallel manipulator with flexible links,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 28, No. 12 pp. 4833-4840, 2014.
- Ma, X., Hu, F., & Liu, J., “Dynamic Characteristic Simulation of Drum Washing Machine Rigid-Flexible Coupling Model,” International Journal of Control and Automation, Vol. 8, No. 5, pp. 167-176, 2015.
- Jung, H. H., et al., “Multi-Body Dynamic Modeling for a Flexible Rotor and Vibration Control using a Novel Phase Adjusting Technique,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 1, pp. 87-92, 2011.
- Hadas, Z., et al., “Simulation modelling of mechatronic system with flexible parts,” 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC). IEEE, 2012.
- Santos, T., Liu, Z., & Hazel, B., “Study and validation testing of the dynamics of a robotic system with flexible links and joints,” IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), pp. 1891-1897, IEEE, 2015.
- Kim, K. E., Chang, B. C., Kim, Y. K., No, Y. S., & So, S. H., “A Study of the Design on Multi-joint Demolition Water Vehicle with ADAMS/ ANSYS,” Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol, 15, No. 2, pp. 199-204, 2013.
- Luo, H. T., et al., “Rigid-flexible coupling dynamics simulation of 3-RPS parallel robot based on ADAMS and ANSYS,” Applied Mechanics and Materials. Vol. 290, pp. 91-96, Trans Tech Publications Ltd, 2013.
- Enescu, M., “Finite Element Analysis of an industrial robot within the MSC. ADAMS software,” Computer

Aided Design Vol. 9, No. 2, 2016.

9. Park, I. H., et al., "Dynamic Analysis to Select Main Parts of Four-Axis Palletizing Robots," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers Vol. 19, No. 12 pp. 62-69, 2020.
10. GANG, Xie, et al., "Modelling and Simulation of the Coupled Rigid-flexible Multibody Systems in MWorks," Proceedings of the 9th International MODELICA Conference, Munich, Germany, Linköping University Electronic Press, pp. 405-416, 2012.