

## 생산자동화 시스템을 위한 산업용 로봇의 운전특성 시뮬레이션에 관한 연구

### A Study on the Simulation of Operational Characteristics of Industrial Robot for Automated Manufacturing System

김진광<sup>1\*</sup>

Jin-Kwang Kim<sup>1\*</sup>

#### 〈Abstract〉

This paper deals with 3D simulation of industrial robot for automated manufacturing system. In order to evaluate the operational characteristics of the industrial robot system in the worst case motion scenario, flexible - rigid multibody analysis was performed. Then, the rigid body dynamics analysis was performed and the results were compared with the flexible - rigid multibody analysis. Modal analysis was also performed to confirm the dynamic characteristics of the robot system. In the case of the flexible-rigid multibody simulation, only the structural members of interest were modeled as elastic bodies to confirm the stress state. The remaining structural members were modeled as rigid bodies to reduce computer resources.

*Keywords : Automated manufacturing system, Industrial robot, Flexible-rigid multibody analysis, Rigid body dynamics analysis, Finite element analysis*

---

<sup>1\*</sup> 정회원, 교신저자, 타이코에이엠펜 코리아  
E-mail:jkkim@te.com

<sup>1\*</sup> corresponding Author, Tyco Electronics AMP Korea Co., Ltd.

### 1. 서론

최근 제조 선진국들을 중심으로 4차 산업혁명 시대를 맞아 이에 걸맞은 스마트 공장을 구축하고 운영하기 위한 기술개발에 범 정부차원의 관심이 집중되고 있다. 산업용 로봇은 산업현장에서 작업자가 수행하는 일을 대신하는 산업기계로 설치나 분해, 도장, 조립 등 로봇이 활용되는 분야는 상당히 광범위하다. 이러한 로봇이 향후 일자리를 위협할 것이라는 우려 속에서도 지난 몇 년간 산업용 로봇 시장은 4차 산업혁명의 시대흐름에 발맞춰 그 수요가 상당히 높은 증가세를 보이고 있고, 향후에도 지속적인 성장시장으로 자리매김할 것으로 예상되는 가운데, 로봇 선도국들 간의 각축전이 보다 치열해지고 있는 양상이다. 특히 자동차 산업분야에서 자동화의 핵심장치로 널리 사용되고 있으며, 제품이 다양화되고 그 모델이 급속하게 변경됨에 따라, 생산비 절감을 위해서 기존 컨베이어방식이 아닌, 차체와 같은 부품들을 이송할 수 있는 산업용 로봇을 활용한 생산라인의 구축이 빠르게 진행되고 있다.[1] 따라서 이러한 산업용 로봇의 시제품 제작에 앞서 그 운전특성을 가상으로 평가할 수 있는 시뮬레이션 방법이 널리 활용되고 있다.[2-5]

본 논문에서는 최대 10 kg의 중량물을 운용할 수 있는 산업용 로봇에 관해 동강성평가 시뮬레이션을 수행하여 각 링크 구성부품들의 구조적 안전성을 검토하였다. 먼저 강체 동역학해석으로부터 각 조인트에서 발생하는 최대반력 이력들을 계산하였고, 모드해석을 통해 로봇의 고유진동수를 검출하였다. 또한 로봇의 각 링크 구조부재들이 설계 한계성능을 참조한 가혹조건의 시나리오에 견딜 수 있는 기계적 강성을 확보하고 있는지를 평가하기 위해 변형체-강체 다물체 해석을 수행하였다. 이러한 해석들로부터 산업용 로봇이 충분한

기계적 강성을 확보하고 있음을 확인하였다.

### 2. 유한요소모델

해석대상 산업용 로봇의 유한요소모델을 Fig.1에 나타내었다. 각 링크 부재들의 요소망은 3차원 구조요소로 20절점에 의해 하나의 요소를 구성하도록 하였다. 각 링크 부재들의 질량과 재질은 Table 1에 표시하였고, 그에 대한 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다. 그리고 각 관절부의 연결은 회전 자유도를 1개만 갖는 회전조인트(Revolute-joint: RJ) 요소와 병진운동에 관한 1자유도를 갖는 병진조인트(Translational-joint: TJ) 요소를 사용하였다.[6]

Table 1. The masses materials of each part

Axis	Weight(kg)	Material
1	278	S45C
2	185	S45C
3-A	102	AL6061
3-S	50	S45C
4	50	S45C
5-A	25	AL6061
5-S	145	S45C
6	35	S45C
Total	870	-

Table 2. Material property (MPa)

Material	Elastic Modulus	Poisson's Ratio	Yield strength
Al6062	71 GPa	0.33	280
S45C	200 GPa	0.30	450

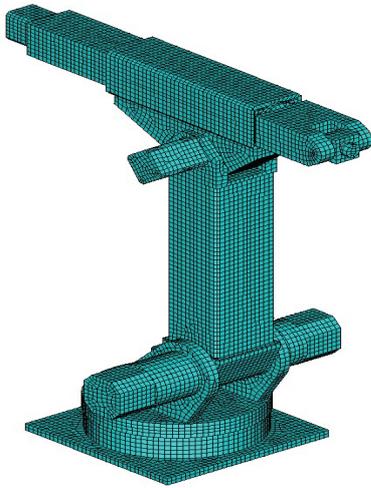


Fig. 1 Finite element model of robot system



Fig. 2 Joint elements for rigid dynamics analysis

### 3. 강체동역학해석

강체 동역학해석 모델은 Fig. 2에서와 같이 전체 링크수가 21개로 구성되어 있고, 회전조인트 3개, 병진조인트 3개 그리고 15개의 고정조인트로 이루어져 있다. 그 중에 베이스의 밑바닥은 그라운드(Ground)에 고정된다. 따라서 총 자유도 수는 126개이고 구속식의 수는 120개로 6개의 자유도만을 가지고 있는 강체 동역학해석 모델을 구성하였다. 6개의 자유도는 각각 조인트 1, 2, 5번의 회전운동과 조인트 3, 4A, 4B의 병진운동을 의미한다.

Fig. 3은 산업용 로봇의 설계제원에 근거하여 한계성능을 구현할 수 있도록 작성된 시나리오이다. 10 kg의 중량물을 설정된 시나리오 경로를 따라, 최고 각속도 112.5 deg/sec 로 작동하는 과정을 나타낸 것이다. 정자세로부터 조인트 2번은 -30 deg 만큼 1.0 sec 동안 회전운동하고, 조인트 3번은 1.0 sec 동안 400 mm 만큼 병진운동을 수행하며, 조인트 5번은 30 deg 만큼 1.0

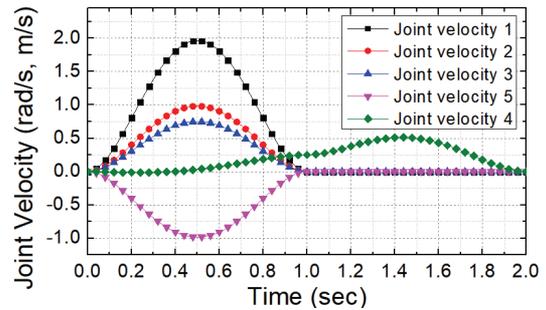


Fig. 3 Motion scenario

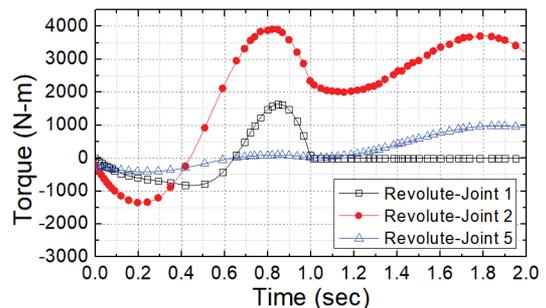


Fig. 4 Reaction torques of revolute-joints

sec 동안 회전운동을 하도록 작성하였다. 그리고 조인트 4번의 A, B는 각각 400 mm 만큼의 병진운동을 총 2.0 sec 동안 수행하여 최종자세를 취

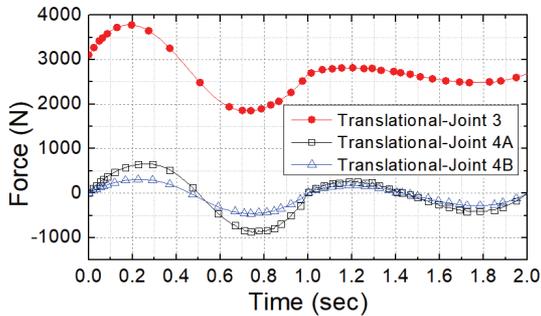


Fig. 5 Reaction forces of translational-joints

하도록 설정하였다. 또한 정자세로부터 최종자세 까지 이르는 동안 조인트 1번이 60도만큼 반시계 방향으로 회전하도록 하였다.

이와 같은 시나리오에 따라 동작하는 로봇에 관해 강제 동역학해석을 수행하였고, 각 조인트에서 발생하는 반력이력 값들을 계산하였다. Fig. 4는 회전 조인트 1번, 2번, 3번에서 발생하는 토크 이력을 도시한 것이다. 조인트 1번에서의 최대 토크 값은 1.64 kN-m으로 0.852 sec에서 발생하였다. 조인트 2번에서의 최대 토크 값은 3.922 kN-m으로 0.82 sec 부근에서 나타났고, 조인트 5번에서의 최대 값은 1.05 kN-m로 예측되었다. 그리고 Fig. 5는 조인트 3번과 조인트 4번의 A, B번에 작용하는 작동하중 값들을 나타낸 것이다. 조인트 3번의 병진운동의 최대 작용하중 값은 3.7 kN으로 나타났으며, 조인트 4번의 A, B에서의 최대 작용하중 값들은 각각 658 N과 323 N으로 예측되었다.

#### 4. 모드해석과 고유진동수 검출

로봇의 자중에 의한 잠재응력(Prestress)을 고려하고, Fig. 2에서 조인트 1, 2, 5번의 회전자유도 및 조인트 3, 4번의 병진자유도를 구속하여 정자세와 최종자세에 대한 모드해석을 수행하였다.

각 자세들에 관해 평가된 모드형상들은 모두 좌우, 상하의 복합적인 진동이었지만, 정자세의 경우는 1차 모드로 검출된 고유진동수가 31.695 Hz로 예측되었고, 로봇의 상하 떨림이 두드러지게 나타났다. 최종자세의 경우는 정자세보다 불안정한 구조형태를 취함에 따라 그 고유진동수가 23.125 Hz로 저 주파수임을 알 수 있었다. 또한 그 모드양상은 상하방향으로의 떨림이 두드러지게 나타났다. 이와 같이 로봇의 운용 중 1차 고유진동수는 최종자세의 23.158 Hz에서 가장 안정적인 정자세에서의 31.695 Hz의 대역폭 내에 존재할 것으로 평가되었다. 각 자세들의 2차 고유진동수들은 각각 37.239 Hz와 26.099 Hz로 좌우 떨림임을 확인할 수 있고, 또한 3차 고유진동수들은 로봇의 비틀림 모드형상을 나타내었으며, 각각 54.78 Hz와 54.701 Hz로 예측되었다. 그리고 각 자세들의 4, 5, 6차는 각각 상하, 좌우, 비틀림 모드들에 대한 고차모드들을 확인할 수 있었다. 따라서 23-55 Hz 대역폭 내의 고유진동수들이 로봇의 좌우와 상하 및 비틀림의 떨림에 크게 관여할 것으로 예측되었다. Table 3에 6차 모드까지 검출된 고유진동수 값들을 나타내었고, Fig. 6에 정자세에 관한 1, 2차 고유모드들을 도시하였고, Fig. 7에 최종자세에 대한 1, 2차 고유모드들을 나타내었다.

Table 3. Natural frequencies for industrial robot system

Set	Frequency (Hz)	
	Prime position	Final position
1	31.695	23.125
2	37.239	26.099
3	54.784	54.701
4	80.802	67.889
5	119.74	133.63
6	128.71	139.49

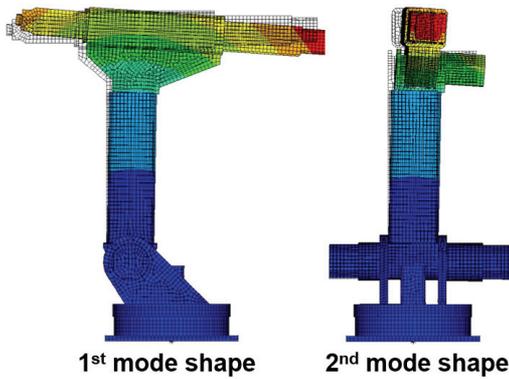


Fig. 6 Mode shapes for prime position (0 sec)

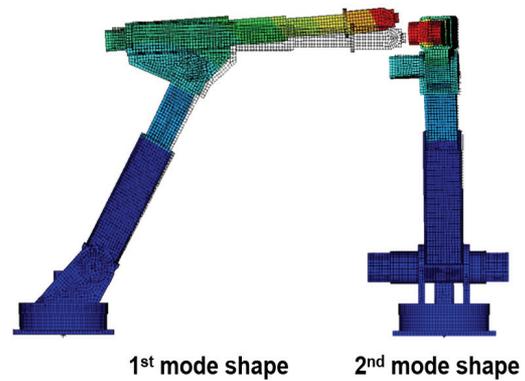


Fig. 7 Mode shapes for final position (2.0 sec)

### 5. 변형체-강체 다물체 해석

본 절에서는 로봇의 각 링크 구성부품들을 강체로 설정한 강체 동역학해석에 이어, 10 kg의 중량물의 운용 중에 산업용 로봇 구조물의 흔들림에 지배적인 영향을 미칠 것으로 판단되는 구조부재들만 탄성효과를 고려한 변형체로 가정하고, 나머지 부재들을 강체로 묘사한 변형체-강체 다물체 해석을 수행하였다. 로봇의 전체 링크 구조물들을 변형체로 가정하여 해석하면 격자망의 요소수가 너무 많이 생성되어 해석이 장시간 소요되므로 비교적 변형이 클 것으로 예상되는 링크 부재들만 탄성체로 모델링 하였다.

Fig. 4와 5에 도시한 강체 동역학해석 결과에서 가장 큰 작동토크를 받는 회전조인트 2번과 가장 큰 작동하중을 받는 병진조인트 3번에 관하여 변형체-강체 다물체 해석으로 도출된 두 조인트에서의 반력이력 값들을 Fig. 8과 9에 도시하였다. 변형체-강체 다물체해석에 의한 응답반력 값들이 강체 동역학해석에 의한 값을 기준으로 진동하고 있음을 알 수 있다. 변형체-강체 해석의 시간이력 중에 로봇의 링크 구조부재들에서 발생하는 최대 등가응력 값을 Fig. 10에 나타내었다. 최대 등가

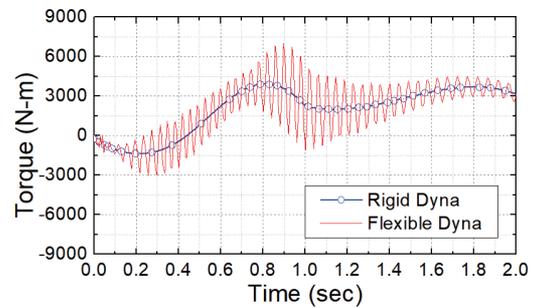


Fig. 8 Comparison of reaction torque in revolute-joint 2

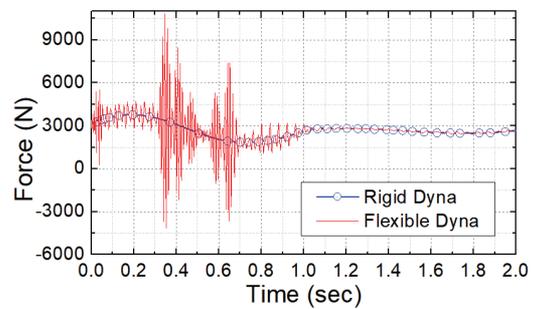


Fig. 9 Comparison of reaction force in translational-joint 3

응력 값은 약 18.3 MPa로 나타났으며 이는 Al6061 소재의 항복강도 280 MPa의 약 1/15에 해당하는 값으로 최악조건인 작동 시나리오에 로봇이 충분한 동강성을 확보하고 있음을 확인할 수

있었다. Fig. 11에 0.8577 sec에서 2축 리브 부근에서 18.3 MPa의 최대등가응력 값이 나타났다.

## 6. 결론

산업용 로봇에 관하여 자체 중량과 10 kg의 중량물을 고려한 운전특성 시뮬레이션으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

변형체-강체 다물체 해석으로부터 평가된 각 조인트에서의 반력이력들은 전체적으로 강체 동역학해석에 의한 반력이력 값 주위로 진동하는 것을 확인하였고, 그 절대치는 강체 동역학 해석결과 값보다 다소 크게 나타남을 확인하였다.

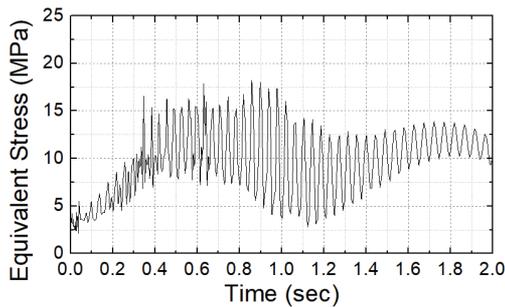


Fig. 10 Maximum equivalent stress curve

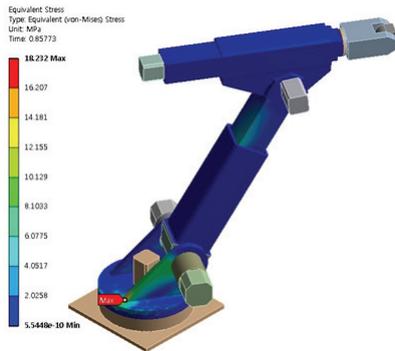


Fig. 11 Maximum equivalent stress contour at 0.8577 sec

로봇의 최악 동작조건으로부터 도출된 최대등가응력 값은 약 18.3 MPa로 나타났으며, 이는 소재의 항복강도 280 MPa의 약 1/15 수준으로 해석 대상 로봇은 작동조건 하에 충분한 동강성을 확보하고 있음을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] J. S. Park and K. S. Kang, “Strategies of smart factory building and Application of small & medium-sized manufacturing enterprises”, Journal of Korea Safety Management & Science, 19(1), pp. 227-236, (2017).
- [2] J. Y. Lee, M. Y. Kim, J. Y. Lim, C. H. Kim, and H. J. Yim, “Dynamic Stiffness Design of Inspection Robot Frame Using Multi-body Dynamic Simulation”, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 25, No. 3, pp. 169-175, (2015).
- [3] H. M. Do, C. H. Park, T. Y. Choi, and J. H. Kyung, “Design and control of dual-arm robot for cell manufacturing process”, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 1419-1423, (2013).
- [4] H. G. Choi, “CAE procedure of Engine Balance Shaft Housing for Prediction of Durability”, Transactions of the KSME, Vol. 15, No. 1, pp. 133-138, 2007.
- [5] C. J. Cho, D. J. Park, J. S. Yang, and Y. M. Koo, “A Study on Dynamic Modeling and Vibration Analysis of Gantry Robot”, Journal of the Korean Society of Industry Convergence, Vol. 17, No. 4, pp. 211-216, (2014).
- [6] ANSYS, ANSYS User’s manual Version 17.0, 2015.

(접수: 2017.09.30. 수정: 2017.11.13. 게재확정: 2017.11.20.)