

변형체-강체 다물체 해석을 이용한 초중량물 핸들링로봇의 평가

Estimation on Heavy Handling Robot using Flexible-Rigid Multibody Analysis

김진광¹, 고해주^{1,✉}, 박기범², 김태규³, 정윤교²
Jin Kwang Kim¹, Hae Ju Ko^{1,✉}, Ki Beom Park², Tae Gyu Kim³ and Yoon Gyo Jung²

¹ 창원대학교 MTIC (Mechatronics Technology Innovation Center, Changwon Univ.)

² 창원대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Changwon Univ.)

³ 부산대학교 나노메카트로닉스공학과 (Department of Nanomechatronics Engineering, Pusan Univ.)

✉ Corresponding author: hjko@changwon.ac.kr, Tel: 055-213-2860

Manuscript received: 2009.10.19 / Revised: 2010.1.11 / Accepted: 2010.2.2

A flexible-rigid multibody analysis was performed to examine the dynamic response of a heavy handling robot system under a worst motion scenario. A rigid body dynamics analysis was solved and compared with flexible-rigid multibody analysis. The modal analysis and test were also carried out to establish the accuracy and the validation of the finite element model used in this paper. For the flexible-rigid multibody simulation, stresses in several major bodies were interested, so that those parts are flexible and other parts are modeled as rigid body in order to reduce computer resources.

Key Words: Heavy Handling Robot (초중량물 핸들링 로봇), Flexible-rigid Multibody Analysis (변형체-강체 다물체 해석), Rigid Body Dynamics Analysis (강체 동역학 해석), Finite element Analysis (유한요소 해석)

1. 서론

산업용 로봇은 산업현장에서 작업자가 수행하는 일을 대신하는 산업기계이다. 공작물의 설치나 분해, 도장, 조립 등 로봇이 활용되는 분야는 상당히 광범위하며 그 수요가 증대되고 있다. 특히 자동차 산업분야에서 자동화의 핵심장치로 널리 사용되고 있으며, 제품이 다양화되고 그 모델이 급속하게 변경됨에 따라 생산비 절감을 위해서 기존 컨베이어방식이 아닌, 차체와 같은 초중량 부품들을 이송할 수 있는 로봇을 활용한 생산라인의 개혁이 요구되고 있다. 이러한 이유로 향후의 수요를 대비한 초중량물 핸들링 로봇의 개발이 필요하게 된다.^{1,2}

본 논문에서는 최대 600 kgf 중량물을 운용할 수 있는 산업용 로봇에 관해 동강성 평가, 시뮬레이션을 수행하여 각 링크 구성 품들의 구조적 안

정성을 검토하였다. 먼저 강체 동역학 해석^{3,4} 으로부터 각 조인트에서 발생하는 최대반력 이력들을 계산하였고, 모드해석을 통해 로봇의 고유진동수를 검출하였으며, 모드시험 결과 값과 비교·검토하여 유한요소모델의 타당성을 확인하였다. 또한 초중량물 핸들링 로봇의 각 링크 구조부체들이 설계제원을 참조한 가혹조건의 시나리오에 견딜 수 있는 강성을 확보하고 있는지를 평가하기 위해 변형체-강체 다물체 해석을 수행하였다.⁵⁻⁷ 이러한 동강성평가 해석들로부터 초중량물 핸들링 로봇이 충분한 기계적 강성을 확보하고 있음을 확인하였다.

2. 유한요소 모델

초중량물 핸들링 로봇의 유한요소 모델을 Fig. 1에 나타내었다. 각 링크 부체들의 요소망은 3 차원

구조요소로 20 절점에 의해 하나의 요소를 구성하도록 하였다. 각 링크 부재들의 질량과 재질은 Table 1 에 표시하였고, 그에 대한 기계적 성질을 Table 2 에 나타내었다. 그리고 각 관절부의 연결은 회전 자유도를 1 개만 갖는 회전조인트(Revolute-joint: RJ)요소와 회전 및 병진운동에 관한 2 자유도를 갖는 실린더조인트(Cylindrical-joint: CJ)요소 및 2 개의 병진자유도만 구속한 일반조인트(General-joint: GJ)요소를 사용하였다. 또한 2 축 모터부하를 경감시켜주는 역할을 담당하는 스프링 밸런스(Spring balancer)를 묘사하기 위해서 스프링 요소를 1 축 포스트(Post)와 2 축 로어 암(Lower arm)의 상부 사이에 설정하여 그 기능을 구현하도록 하였다.⁸ 이 스프링 요소의 길이방향 강성은 2.15 N/mm 이다. Fig. 2 에 각 관절에 적용된 조인트의 요소들을 도시하였다.

Table 1 The masses materials of each part

Part name	Weight(kg)	Material
Base	344	GC250
Post assy	686	GCD450
Lower arm	214	GCD450
Motor assy	350	GCD450
Lever	158	GCD450
Balance weight	598	GC250
Parallel link	40	GCD450
Frame assy	172	GCD450
Upper arm assy	135	GCD450
5 axis housing assy	55	GCD450
6 axis housing assy	70	GCD450
Cylinder assy	63.467	STEEL
Total	2885.467	

Table 2 Material property (MPa)

Material	Elastic Modulus	Poisson's Ratio	Tensile Strength
GC250	110	0.29	252
GCD450	163	0.30	420
STEEL	200	0.29	-

3. 강체 동역학해석

강체 동역학 해석모델은 Fig. 2 에서와 같이 전체 링크수가 18 개로 구성되어 있고, 회전조인트 7

개, 실린더조인트 2 개, 일반조인트 3 개 그리고 9 개의 고정조인트로 이루어져 있다. 그 중에 베이스의 밑바닥은 그라운드(Ground)에 고정된다. 따라서 총 자유도 수는 108 개이고 구속식의 수는 103 개로 5 개의 자유도만을 가지고 있는 강체 동역학해석 모델을 구성하였다. 5 개의 자유도는 각각 조인트 1, 2, 3 번의 회전운동과 2 개의 실린더들에 대한 병진운동을 의미한다. 또한 조인트 2 번 축부분의 모터부하 경감을 위한 실린더 기능을 묘사하기 위해서 스프링 요소를 사용하였다.

Table 3 은 초중량물 핸들링로봇의 설계 제원에 근거하여 한계성능을 구현할 수 있도록 작성된 시나리오이다. 600 kgf 의 최대 중량물을 최대 작업영역 경로를 따라, 최고 각속도 70 deg/sec 에 근접한 66.841 deg/sec 로 작동하는 과정을 나타낸 것이다. 1 단계로 정자세에서 2.095 sec 에 작동 임계점 1 번 위치에 도달하도록 설정하였고, 5.087 sec 에 로봇이 수직방향으로 최고점에 도달하는 2 단계과정을 거쳐, 3 단계로 6.433 sec 에 최대수평 도달 거리인 3 번 자세를 취하도록 설정하였다.

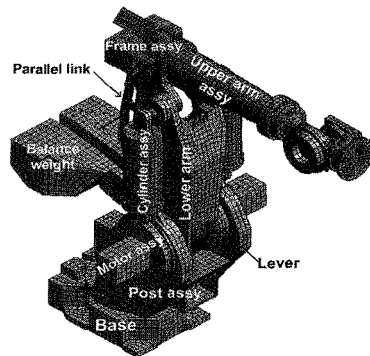


Fig. 1 Finite element model of heavy handling robot

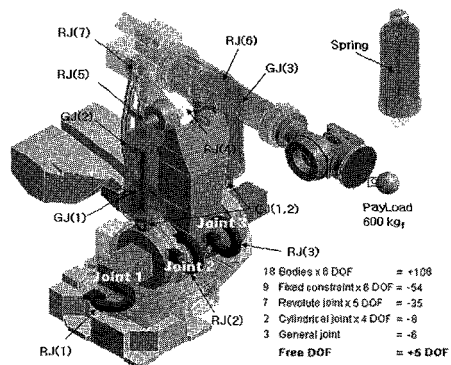


Fig. 2 Joint elements for rigid dynamics analysis

그리고 정자세로부터 3 번 자세까지 이르는 동안 조인트 1 번이 90 도만큼 시계방향으로 회전하도록 하였다.

이와 같은 시나리오에 따라 동작하는 로봇에 관해 강제 동역학 해석을 하였고, 각 조인트에서 발생하는 반력이력 값들을 계산하였다. 동 하중에 취약할 것으로 판단되는 평행링크(Parallel link)와 로어 암 및 프레임의 각 조인트들에서의 반력이력 값들을 추출하였다. Fig. 3(a)는 평행링크와 프레임 사이의 RJ(7)에서 발생하는 반력이력을 도시한 것이다. 최대반력의 합력 값은 23.717 kN 으로 5.087 sec 에서 발생하였다. Fig. 3(b)는 로어 암과 프레임 사이의 RJ(4)에서의 값들을 나타낸 것이다. 최대반력 값은 33.048 kN 으로 역시 5.087 sec 에서 나타났다. 그리고 Fig. 3(c)와 (d)는 프레임과 스프링 밸런스 사이의 우측과 좌측의 RJ(5), RJ(6)에서의 반력이력 값들을 나타낸 것이다. 최대반력 값들은 각각 786.01 N 과 760.18 N 이었다.

Table 3 Motion scenario

Time	Angle velocity (rad/sec)		
	Joint 1	Joint 2	Joint 3
0	0	0	0
1.047	0.749	1.166	0.499
2.095	0	0	0
3.590	0.525	-1.166	0
5.087	0	0	0
5.760	1.166	-1.166	-1.166
6.433	0	0	0

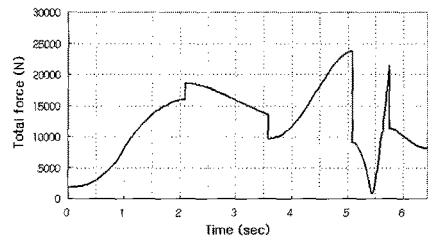


Fig. 3(a) Reaction force of Revolute-Joint, RJ(7)

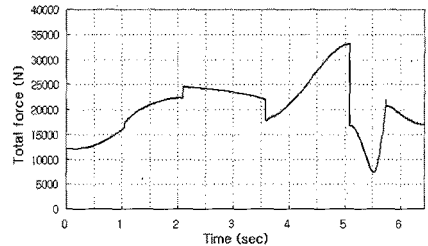


Fig. 3(b) Reaction force of Revolute-Joint, RJ(4)

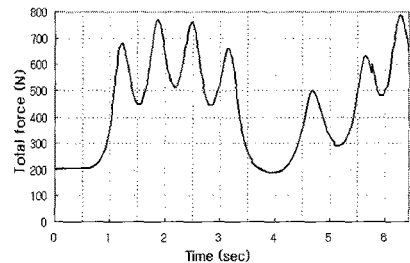


Fig. 3(c) Reaction force of Revolute-Joint, RJ(5)

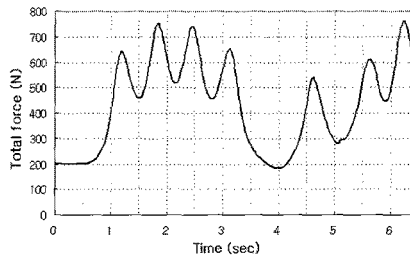


Fig. 3(d) Reaction force of Revolute-Joint, RJ(6)

4. 모드해석과 고유진동수 측정실험

초중량물 핸들링 로봇의 자중에 의한 잠재응력 (Prestress)을 고려하고, Fig. 2 에서 조인트 1, 2, 3 번의 회전 자유도만 구속하여 정자세, 1 번 자세, 2 번 자세 및 3 번 자세들에 대한 모드해석을 수행하였다.

각 자세들에 관해 평가된 모드형상들은 모두 좌우상하의 복합적인 진동이었지만, 정자세의 경우는 1 차 모드로 검출된 고유진동수가 18.05 Hz 로 예측되었고 평형추(Balance weight)와 로봇의 좌우 떨림이 두드러지게 나타났다. 1 번 자세는 17.294 Hz 로 정자세와 비슷한 모드양상을 나타내었지만, 2 번과 3 번 자세의 경우는 정자세와 1 번 자세보다 불안정한 구조형태를 취함에 따라 그 고유진동수가 각각 15.631 Hz 와 14.873 Hz 로 저 주파수임을 알 수 있었다. 또한 그 모드양상은 상하방향으로의 떨림이 두드러지게 나타났다. 이와 같이 초중량물 핸들링 로봇의 운용 중 1 차 고유진동수는 가장 불안정한 3 번 자세의 14.87 Hz 에서 가장 안정적인 정자세 18.05 Hz 의 대역폭 내에 존재할 것으로 평가되었다. 각 자세들의 2, 3, 4, 5, 6 차 고유진동수 들은 17.35~36.164 Hz 대역폭 내에서 좌우상하의 대각선 방향으로 흔들리는 모드드림을 알 수 있었다. 그리고 7 차 모드에서는 평형추만 심하게 요동치는 모드가 나타났으며, 이후 고차 고유

진동 수들에서는 링크 구조부재들이 뒤틀어지는 모드들이 검출되었다. 따라서 14.873~36.164 Hz 대역폭 내의 고유진동수들이 초중량물 핸들링 로봇의 좌우와 상하방향으로 흔들림에 크게 관여할 것으로 예측되었다. Table 4 에 11 차 모드까지 검출된 고유진동수 값들을 나타내었고, Fig. 4 에 각 자세들에 관한 1, 2 차 고유모드들을 도시하였다.

각 자세들 중에서 정자세의 초중량물 핸들링 로봇에 대한 고유진동수를 실험으로 측정하기 위하여 Fig. 5 에서와 같이 가속도계 센서를 프레임, 로어 암 및 포스트의 수평면 3 개소에 설치하였고, 충격해머를 이용하여 로봇의 5 개소 지점을 타격하였다. 실험으로부터 측정된 고유진동수 값은 차례로 약 21 Hz, 26 Hz, 38 Hz 로 나타났지만 26 Hz 의 경우는 특정 타격위치에서만 검출되었다. 그 측정결과 중에서 대표적인 주파수응답 그래프를 Fig. 6 에 나타내었다. 이는 정자세의 모드해석에 의한 1, 2, 3 차 고유진동수 18.05~21.51 Hz 대역폭 내에 실험에 의한 1 차 고유진동수 21 Hz 가 존재함을 확인할 수 있다. 그리고 4 차 고유진동수 28.52 Hz 와 실험에 의한 2 차 고유진동수 26 Hz 가 대응됨을 알 수 있었고, 5, 6 차 고유진동수 33.94~35.19 Hz 와 실험에 의한 3 차 고유진동수 38 Hz 가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

Table 4 Natural frequencies of heavy robot system

Set	Frequency (Hz)				
	Prime position		1 st position	2 nd position	3 rd position
	FEA	Test	FEA	FEA	FEA
1	18.05	21	17.29	15.63	14.87
2	19.95	26	21.70	19.77	17.35
3	21.51	38	23.48	21.16	19.51
4	28.52	-	30.49	31.97	31.44
5	33.94	-	32.16	34.68	36.16
6	35.19	-	34.27	44.25	46.86
7	63.94	-	62.32	64.36	64.34
8	80.00	-	72.87	87.14	73.25
9	90.49	-	84.51	97.83	91.08
10	126.2	-	132.3	110.8	119.4
11	147.4	-	141.7	120.3	125.1

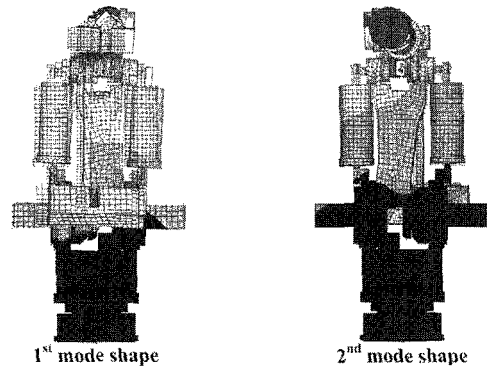


Fig. 4(a) Mode shapes for prime position (0 sec)

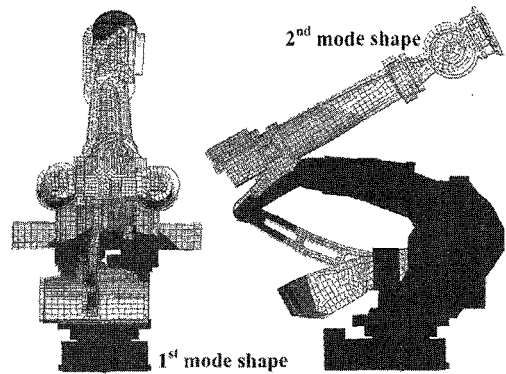


Fig. 4(b) Mode shapes for 1st position (2.094 sec)

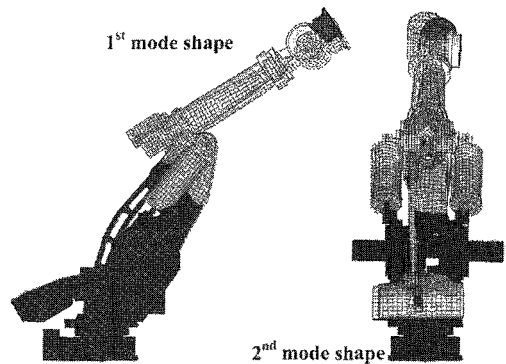


Fig. 4(c) Mode shapes for 2nd position (5.087 sec)

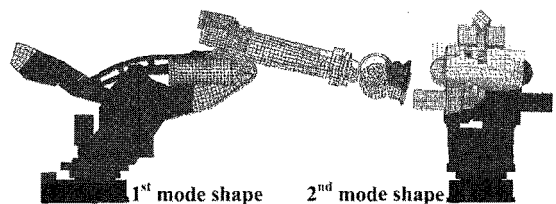


Fig. 4(d) Mode shapes for 3rd position (6.433 sec)

5. 변형체-강체 다물체 해석

정자세에 대한 모드해석과 모드시험 결과 값들의 비교·분석을 통해 유한요소모델의 타당성을 확인하였다. 본 절에서는 초중량물 핸들링 로봇의 각 링크 구조부품들을 강체로 설정한 강체 동역학 해석에 이어, 600 kgf의 최대 중량물의 운용 중에 로봇 구조물의 흔들림에 지배적인 영향을 미칠 것으로 판단되는 로어 암, 어퍼 암, 프레임, 평행링크 및 레버 등의 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.

강체 동역학 해석과 변형체-강체 다물체 해석으로부터 도출된 각 조인트에서의 반력이력 값들을 Fig. 7에 도시하였다. 변형체-강체 다물체 해석에 의한 응답반력 값들이 강체 동역학 해석에 의한 값을 기준으로 진동하고 있음을 알 수 있다.

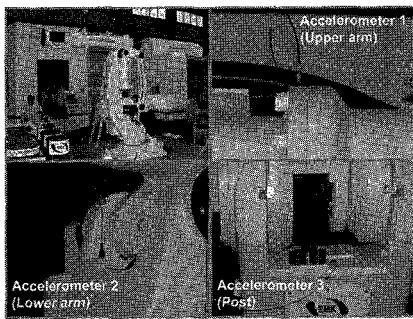


Fig. 5 Positions of accelerometers

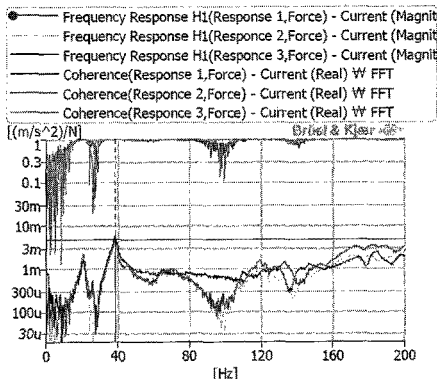


Fig. 6 Frequency spectrum by modal test

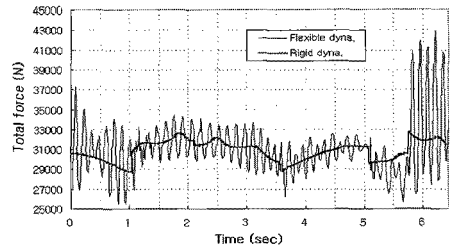


Fig. 7(a) Reaction force of Revolute-Joint, RJ(1)

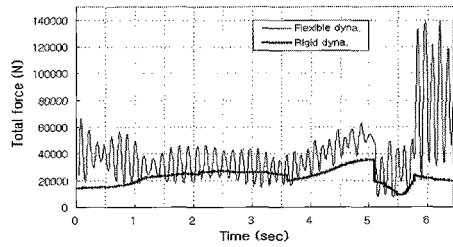


Fig. 7(b) Reaction force of Revolute-Joint, RJ(2)

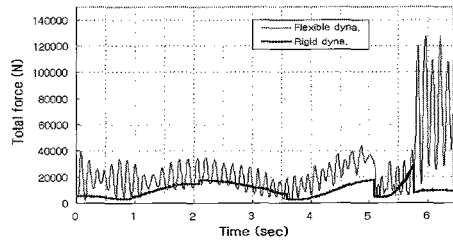


Fig. 7(c) Reaction force of Revolute-Joint, RJ(3)

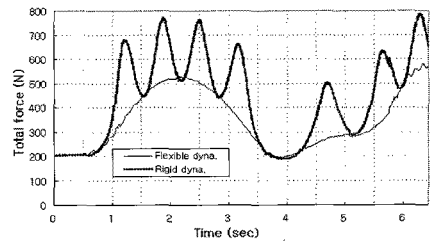


Fig. 7(d) Reaction force of Revolute-Joint, RJ(5)

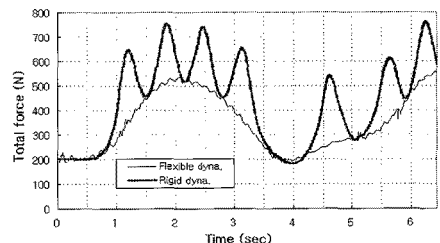


Fig. 7(e) Reaction force of Revolute-Joint, RJ(6)

Fig. 7(a)는 베이스와 포스트 간 RJ(1)에 대한 것으로 강체 동역학해석과 변형체-강체 해석에 의

한 두 결과 값들이 비교적 잘 일치하고 있다. 하지만 Fig. 7(b)와 (c)의 RJ(2)와 RJ(3)에서는 변형체-강체 해석에 의한 반력 값이 강체 동역학해석의 값보다 다소 높게 나타났으며, 로봇 팔이 최대수평 임계 점까지 도달하기 위한 3 단계과정의 5.76~6.433 sec 구간에서 두 결과 값들의 차이가 더욱 커졌다. 또한 반력 이력들의 진동 수는 약 6.67 Hz 로 평가되었다. 앞서 검토된 로봇의 1 차 고유진동수가 14.873~18.05 Hz 대역폭 내에 존재함에 따라, 로봇의 운용 중에 공진현상은 발생하지 않을 것으로 예측되었다.

스프링 요소가 설치된 실린더 부재와 로어 암 사이의 회전조인트 RJ(5)와 RJ(6)의 반력벡터 이력들을 Fig. 7(d)와 (e)에 나타내었다. 그 결과는 Fig. 7(a)-(c)에서 나타난 경향과 반대의 응답특성이 나타났다. 즉 변형체-강체 해석결과가 강체 동역학 해석에 의한 결과값 보다 평균 값이 작았다.

변형체-강체 해석의 시간이력 중에 로봇의 링크 구조부재들에서 발생하는 등가응력 분포도를 Fig. 8 에 나타내었다. Fig. 8(a)는 로어 암으로 5.653sec 에서 RJ(5)와 연결되는 부분에서 최대등가응력 값이 163.1 MPa로 나타났으며, Fig. 8(b)와 (c)는 평행링크와 프레임으로 5.831 sec 에서 각각 208.76 MPa 과 141.06 MPa 의 최대등가응력 값이 발생하였다. 최대등가응력 값들은 로봇의 최대수평 도달을 위한 작동구간에서 발생하였다. 이는 Fig. 7 에 나타낸 반력 이력들에서 각 조인트에서의 최대반력 값이 도출된 시점과 일치한다. Fig. 8(d)는 로봇 팔이 최대수평 임계 점에 도달한 6.433 sec 에서의 등가응력 분포도를 나타낸 것이다. 로봇이 작동시나리오에 따라 동작할 때 최대응력 값은 평행링크에서 발생하였으며, 그 수준은 208.76 MPa 로 GCD450 재료의 인장강도 420 MPa 의 절반수준에 해당하는 값으로 로봇에 주어진 악조건의 작동시나리오에 충분한 기계적 강성을 확보하고 있음을 확인할 수 있었다.

6. 결론

초중량물 핸들링 로봇에 관하여 자체 중량과 600 kgf 의 최대 중량물을 고려한 동강성평가 해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 자체 중량에 의한 잠재응력을 고려한 모드 해석 결과와 실험결과가 비교적 잘 일치함을 확인하였고, 이러한 비교검토를 통해 변형체-강체 다물

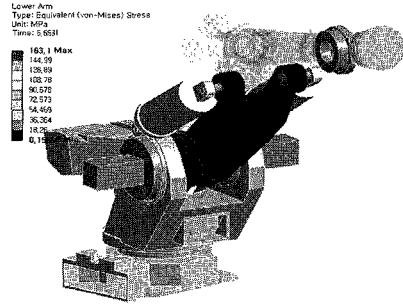


Fig. 8(a) Equivalent stress contour of lower arm at 5.653 sec

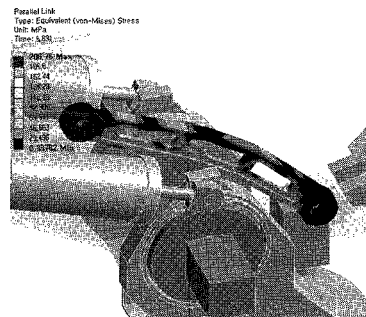


Fig. 8(b) Equivalent stress contour of parallel link at 5.831sec

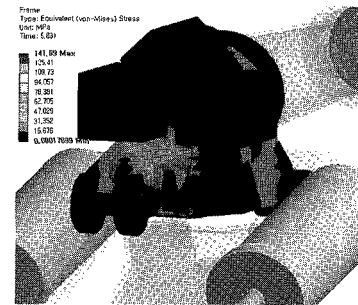


Fig. 8(c) Equivalent stress contour of frame at 5.831sec

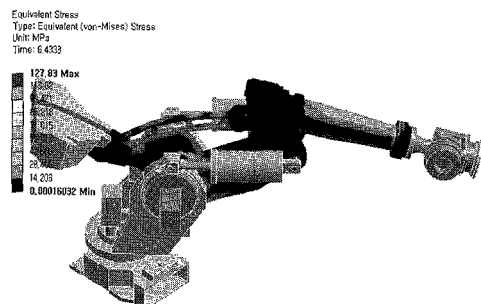


Fig. 8(d) Equivalent stress contour of flexible bodies at the end of final stage

체 해석을 위한 유한요소모델의 타당성을 확인하였다.

2) 변형체-강체 다물체 해석으로부터 평가된 각 조인트에서의 반력이력들은 전체적으로 강체 동역학 해석에 의한 반력이력 값 주위로 진동하는 것을 확인하였고, 그 절대치는 강체 동역학 해석 결과 값보다 다소 크게 나타남을 확인하였다. 따라서 강체 동역학 해석으로부터 확보한 반력의 최대값들을 각 링크 구조부재들의 강성평가에 입력하중으로 사용할 경우엔 많은 주의가 필요함을 알 수 있었다.

3) 변형체-강체 다물체 해석으로부터 평가된 반력이력들의 진동수는 약 6.67 Hz 로 나타났으며, 이는 모드해석에서 도출된 1 차 고유진동수 대역폭 14.873~18.05 Hz 와 그 진동수가 서로 상이함으로 공진현상에 의한 로봇의 과도한 떨림은 발생하지 않을 것으로 평가되었다.

4) 초중량물 핸들링 로봇의 설계 제원을 참조하여 작성된 시나리오로부터 도출된 최대등가응력 값은 평행링크 부에서 약 209 MPa 로 나타났으며, 이는 GCD450 소재의 인장강도 420 MPa 의 절반 수준으로 초중량물 핸들링 로봇은 주어진 시나리오에 충분한 기계적 강성을 확보하고 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kim, D. H., Chung, K. J. and Park, C. H., "Analysis of Heavy Duty Robot for Design," Proc. of KSMTE Spring Conference, pp. 125-130, 2007.
2. Wang, J. H. and Liou, M., "Experimental Identification of mechanical Joint Parameters," ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 113, No. 1, pp. 28-36, 1991.
3. Park, J. Y., Yoo, W. S., Hong, J. M. and Ko, K. E., "Three Dimensional modeling and Simulation of a Wheel Loader," Proc. of KSME Spring Conference, pp. 870-874, 2004.
4. Lee, W. S., Jeong, H. H., Kim, S. Y. and Kim, C. S., "A Study Vibration Characteristic of the Heavy

Machinery Seat Using Multibody Dynamic Analysis Method," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 115-116, 2007.

5. Imaoka, S., "CMS in Workbench Simulation," ANSYS.NET Tips and Tricks, 2007.
6. Park, J. Y. and Yoo, W. S., "Modeling and Simulation of an Excavator using Flexible Multibody Dynamics," Proc. of KSAE Fall Conference, pp. 909-914, 2003.
7. Choi, H. G., "CAE procedure of Engine Balance Shaft Housing for Prediction of Durability," Transactions of the KSME, Vol. 15, No. 1, pp. 133-138, 2007.
8. ANSYS, "ANSYS User's manual Version 11.0," 2007.