

산업용 로봇 손목의 동력 전달계에 대한 동특성 해석

Dynamic Analysis of the Power Transmission System in an Industrial Robot

김 우 형* · 정 진 태†

Woohyung Kim and Jintai Chung

(2008년 4월 7일 접수 ; 2008년 8월 29일 심사완료)

Key Words : Industrial Robot(산업용 로봇), Power Transmission(동력 전달), Vibration(진동)

ABSTRACT

Dynamic characteristics of a wrist power transmission of an industrial robot are studied. The wrist power transmission has complex structure characteristics, because it is composed with several shafts and gear system. We used an analytical method to investigate the dynamic characteristics. An analytical model is a rigid model which is composed with masses and springs. Both bearing and gear contact model represent equivalent stiffness springs which are determined by the experiment. In order to investigate the dynamic tendency of the robot wrist power transmission, we simulate the analytical model. There is a dynamic analysis tool which is called the RecurDyn. To verify the analytic results, we experiment a signal analysis which is an overall noise level of the robot. By the parametric study of the element of the robot, we study an improvement method of dynamic characteristics.

1. 서 론

산업의 발달로 자동화가 진행되면서 산업용 로봇의 수요가 지속적으로 증가하고 있으며, 국내외에서 고성능 로봇을 개발하기 위한 노력이 활발히 진행되고 있다. 특히, 산업용 로봇 중에서 모든 축이 회전하는 수직 다관절 로봇이 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 구동 특성을 향상시키기 위해 로봇 동력 전달계의 동특성은 성능 향상을 위해 규명되어야 하는 중요한 문제로 대두되고 있다.

일반적으로 산업용 로봇은 구동 특성에 따라 로봇의 자세를 결정하는 기본축과 작업 공구의 위치를 제어하기 위한 손목축으로 나눌 수 있다. 로봇의 모

든 축은 모터와 감속기로 구성되어 있는데, 기본축은 모터와 감속기가 일체형으로 구성되어 있지만, 손목축은 기구학적인 특성 때문에 모터의 동력이 감속기까지 전달하기 위해 복잡한 동력 전달 구조^(1,2)를 가지고 있다. 로봇의 각 축에 대한 소음특성 연구 결과 기본축 보다는 손목축에서 더 큰 소음이 발생⁽³⁾하였으며, 특정 위치로부터의 소음이 크게 발생하였기 때문에 이에 대한 명확한 규명이 필요하다. 로봇 손목축은 손목의 관절 운동을 구현하기 위해서 베벨기어, 스퍼기어, 축, 베어링 등 다수의 부품으로 구성되어 있기 때문에, 로봇 손목축의 동특성을 명확하게 규명하는 일은 쉽지 않다. 손목축에 대한 기구학적인 메커니즘의 특성은 기존의 연구를 통해 규명되었지만^(1,2) 이는 로봇의 거동 특성에 대한 것이기 때문에 이를 바탕으로 손목축의 동특성을 규명할 수 없다.

로봇 손목축의 구동 특성을 규명하기 위해서 시

† 교신저자: 정회원, 한양대학교 공학대학 기계공학과
E-mail : jchung@hanyang.ac.kr
Tel : (031)400-5287, Fax : (031)406-6964

* 한양대학교 일반대학원 기계공학과

시스템을 구성하고 있는 요소품에 대한 기구학적, 동적 거동 특성을 정확하게 고려해야 한다. 손목축의 주요 요소품인 기어나 베어링은 동력을 전달하거나 구조물을 구속시켜 주는 설계 요소로 작용할 뿐 아니라 요소품 자체가 강성으로 작용 할 수 있기 때문에 시스템의 동적 특성에 영향을 준다⁽⁵⁻⁷⁾. 손목축의 동특성을 분석하기 위해 시스템에서의 기어와 베어링의 등가강성을 규명해야 하는데, 등가강성을 추출하기 위해서는 베어링 및 기어에 작용하는 외적인 특성을 고려해야 하며, 이론적으로 손목축 시스템에서의 요소품의 특성을 찾는 것은 매우 어려운 일이다.

이 논문에서는 실험적 방법을 통해 로봇 손목축에서의 동력전달계의 동특성을 규명하였다. 로봇 손목의 동력전달계에 대한 동특성을 규명하기 위하여 시스템을 구성하는 요소품의 물성치를 측정하였으며, 이론적으로 구하기 힘든 베어링과 기어 접촉부의 등가강성을 실험과 단순화된 모델에 대한 매개 변수연구를 통해 추출 하였다. 이와 더불어 시스템의 동적 해석은 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn을 이용하여 해석 모델을 구성하였다. 동력전달계를 모델링하는데 있어서 축은 강체로 모델링하였으며 축을 지지하는 베어링과 기어 접촉부는 스프링으로 모델링 하였다. 그리고 모터로부터 발생하는 토크를 해석 모델의 가진력으로 하여 시스템의 진동을 분석하였다. 또한, 해석 모델에 대한 검증용 위해 로봇 손목축의 구동 상태에서의 소음 실험과 비교하였고, 동적 안정성을 확보하는 방안을 제시하였다.

2. 산업용 로봇

2.1 로봇의 구조

일반적인 산업용 로봇은 Fig. 1과 같이 6개의 축으로 구성되어 있다. 로봇 몸체를 구동하는 기본축이라 불리는 1축, 2축, 3축과 실제 작업을 수행하는 로봇 손을 구동하는 손목축인 4축, 5축, 6축으로 이루어져 있다. 기본축은 모터로부터 동력을 직접적으로 받을 수 있지만 손목축은 구조적 특성 때문에 모터로부터 직접적으로 동력을 전달 받지 못하고 기어를 이용한 동력 전달 메커니즘에 의해 구동된다. 이러한 이유로 산업용 로봇에서 동적 특성이 가장 불안정한 부분은 손목축이다.

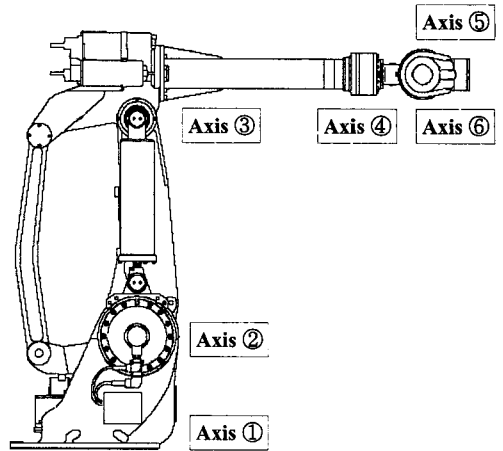


Fig. 1 Example of an industrial robot

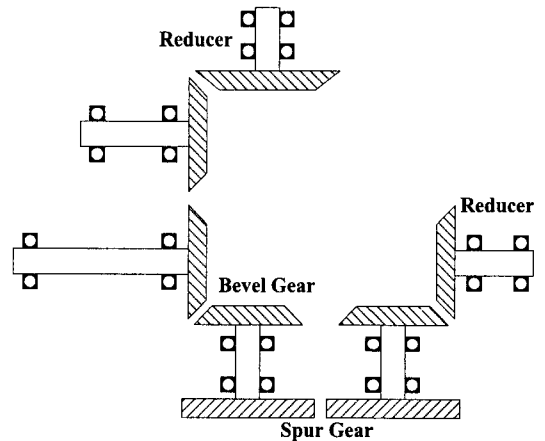


Fig. 2 Schematic diagram for axis 5 and 6

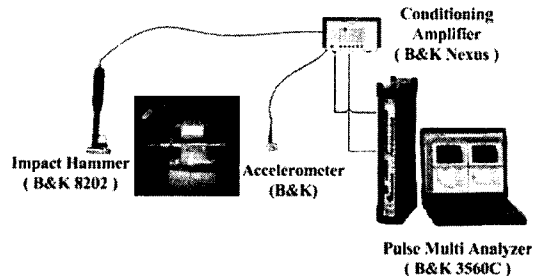


Fig. 3 Experimental setup for the system analysis

2.2 손목축의 구조

로봇 손목축은 Fig. 2와 같이 여러 개의 축과 기어 및 감속기로 구성되어 있으며, 축은 볼 베어링으로 지지되어 있다. 손목 관절의 특성을 구현하기 위하여 사용된 베벨 기어와 스피어 기어가 사용되며 모

터로부터 발생하는 동력을 감속기까지 전달하여 손목축이 구동된다. 베벨 기어를 통해 전달되는 모터의 동력은 반경방향의 회전력이 베벨 기어의 특성에 따라 축 방향과 반경 방향으로 힘이 분산되면서 손목 축 시스템에 가진력으로 작용하게 된다. 이는 손목축의 구조적 특성에 따라 과도한 진동이 유발되며 소음으로 발생하게 된다.

3. 진동 및 소음에 대한 실험

3.1 시스템 분석

시스템 분석은 어떤 시스템의 고유한 특성을 알아내는 기법으로 측정 가능한 힘으로 가진하고 진동 응답신호를 측정하여 입력 대 응답의 비, 즉 주파수 응답함수를 구하여 시스템의 동특성을 해석하는 방법이다. 이 연구에서는 축을 지지하는 베어링과 기어 접촉부를 강성이 있는 스프링으로 작용하는 것으로 가정하고, 각 요소가 어떠한 특성을 나타내는지 알기 위해서 시스템분석법을 이용하였다.

베어링 및 기어 접촉부의 고유한 특성을 파악하기 위해서는 구동상태에서의 실험을 해야 하지만, 실제로 로봇의 구조상 이러한 실험이 불가능하므로 관심이 되는 부분을 로봇에서 분리하여 실험을 수행하였다. 로봇 손목축의 단품은 하중 및 물림 조건을 재현하기 위해 구속조건은 자유단과 고정단 상태에서 실험하였다. 시스템을 가진하기 위하여 충격해머(B&K Type8202)를 이용하였고 가진에 대한 응답은 3축 가속도계(B&K Type4326)를 사용하였고 모드실험의 개략도는 Fig. 3과 같다.

3.2 소음 측정

운전상태에서 소음 측정을 통해 로봇 손목축의 구조적인 특성을 간접적으로 분석하는 것이 목적이다. 산업용 로봇에 대한 기존의 연구결과⁽³⁾ 손목축에서 발생하는 주요 소음은 치차에 의해 발생되기 때문에 손목축의 동력전달계의 특성을 분석하는데 소음 측정을 활용하였다.

운전중인 로봇의 소음을 객관적으로 판단할 수 있는 데이터를 얻기 위해서는 로봇 주위의 압소음을 측정해야 하므로 로봇을 기준으로 3m 간격으로 전후 및 좌우 방향으로 6m 거리까지 압소음을 측정하였다. 로봇의 소음 측정 시 구동부의 속도변화는 시

스템에 가진을 유발할 수 있고, 소음 발생에 중요한 변수로 작용하므로 각 단계를 15단계(모터 정격 rpm의 30~100%)로 나누어 속도를 5%씩 증가시켜 가면서 소음레벨을 측정하였다. 소음 측정은 정속 운전구간에서 실시하는 것이 일반적이지만 로봇을 한 방향으로 정속으로 운전하는 것이 불가능하기 때문에 가감속이 포함된 등속구간을 1사이클로 하는 운전구간에서 소음을 측정하였다. 소음계(LARSON-DAVIS system 824)는 전방향으로 3m위치에 설치하여 측정을 수행하였다.

4. 손목축 해석 모델

4.1 손목축 요소품의 물성치

로봇 손목축은 Fig. 4와 같이 5축 구동부와 6축 구동부로 구성되어 있다. 5축 구동부는 한 쌍의 축, 베어링 구조와 감속기로 구성되어 있으며 한 쌍의 베벨 기어를 통해 동력이 전달된다. 6축 구동부는 세 쌍의 축, 베어링과 감속기로 구성되어 있으며 두 쌍의 베벨 기어와 한 쌍의 스피기어로 구성되어 있다. 이와 같이 로봇 손목축은 6개의 단품과 네 쌍의 기어를 가지고 있으며 각 축은 베어링으로 지지되어 있다.

손목축에 대한 해석 모델을 구성하기 위해서는 각 요소품에 대한 물성치를 알아야 한다. 로봇 손목축의 단품에 대한 실험과 설계도면으로부터 질량 및 질량 관성모멘트를 추출하였으며, 이는 Table 1과 같다.

4.2 베어링의 등가 강성

로봇 손목축 시스템의 동특성을 규명하기 위해서는 요소품의 질량, 질량 관성 모멘트뿐 아니라 축계를 지지하는 베어링에 대한 특성을 알아야 한다. 축을 지지하는 베어링은 일반적으로 단순화 하여 스프링으로 볼 수 있으며, 축 방향과 반경 방향으로 구분할 수 있다. 베어링은 내륜, 외륜, 압력각 및 예압 등의 상호 복합적인 작용에 따라 다른 특성을 보이게 되는데, 이를 모두 고려하여 이론적으로 베어링이 작용하는 강성값을 추출하기는 쉽지 않다. 따라서 시스템 분석법의 실험적 방법을 통해 베어링의 등가 강성을 규명하였다.

6개의 요소품으로 구성되어 있는 로봇 손목축은 모두 볼 베어링으로 지지되어 있다. 각 단품의 베어

링의 특성을 분석하기 위해 축은 강체로 가정 하였으며, 베어링의 외륜을 구속하여 축 방향과 반경 방

Table 1 Mass properties of axis 5 and 6

		Mass (kg)	Inertia (kg·mm ²)
Axis 5	5-1	1.336	5470
	5 reducer	0.990	772
Axis 6	6-1	0.630	772
	6-2	0.934	1290
	6-3	0.440	3070
	6 reducer	0.445	285

Table 2 Equivalent stiffness for bearing of axis 5 and 6

		Equivalent stiffness(N/mm)	
		Axial	Radial
Axis 5	5-1	12060	119200
	5 reducer	9700	115400
Axis 6	6-1	9170	437400
	6-2	32300	341500
	6-3	5813	40000
	6 reducer	36800	193600

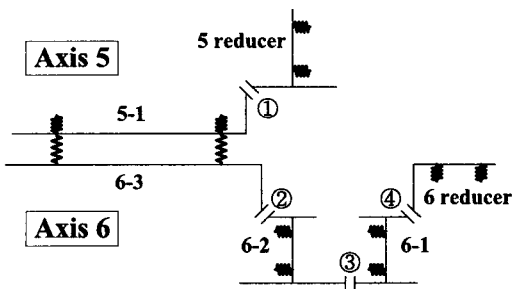


Fig. 4 Analytic model of a robot wrist

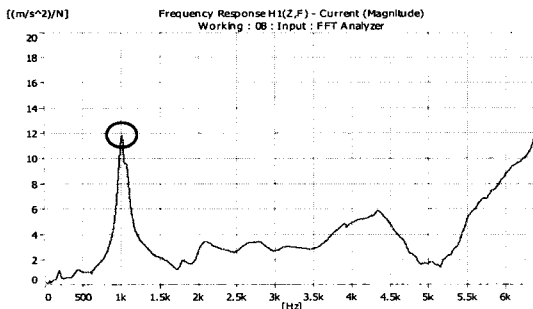


Fig. 5 Frequency response function of 6-3 axis in axial direction

향의 모드 해석을 수행하여 각 방향의 응답 특성을 추출하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 6-3축의 축 방향과 반경방향의 실험 결과이다. 축 방향에서는 한 개의 고유진동수(1002 Hz), 반경 방향에서는 세 개의 고유진동수(627 Hz, 1792 Hz, 2750 Hz)가 있다는 것을 알 수 있다. 축이 베어링에 의해 강체 운동을 하면, Fig. 7과 같이 축 방향, 반경 방향, 회전 방향의 세 개의 고유진동수가 존재한다. 축의 변형(Fig. 8)에 의해 발생하는 고유진동수 627 Hz를 제거하면, 축 방향의 1002 Hz, 반경 방향의 1792 Hz, 2750 Hz를 확인 할 수 있다. 단품에 대하여 Fig. 7과 같이 축, 베어링의 단순화한 모델과 Table 1의 물성치를 이용한 해석적으로 고유치 해석 결과가 시스템의 공진주파수를 발생 시키는 베어링의 축 방향, 반경 방향의 등가 강성을 추출 하였다. 각 축의 베어링에 대한 실험 결과는 Table 2와 같다.

4.3 기어 접촉부의 등가 강성

로봇 손목축의 해석 모델을 구성하기 위해서는 기

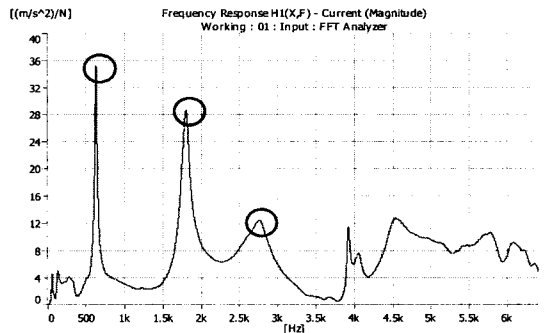


Fig. 6 Frequency response function of 6-3 axis in radial direction

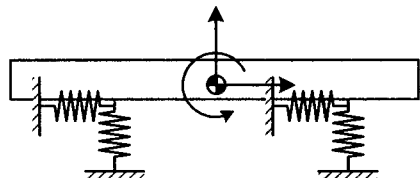


Fig. 7 Simplified model of a bearing system



Fig. 8 Flexible mode of 6-3 axis

어 접촉부의 특성을 규명해야 한다. 기어 접촉부에 대한 모델링을 단순화하기 위해 접촉부를 스프링으로 가정하여 모델을 수립하였다. 기어 접촉부에 대한 강성을 구하는 방법은 여러 가지가 있으나 이 논문에서는 베어링의 등가 강성을 추출한 방법과 동일하게 접촉부의 강성값을 추출하였다. 등가 강성을 추출하기 위한 모드 실험에서 구동 상태에서의 기어의 물림을 재현하기 위하여 부하 상태에서 실험을 수행하였다.

로봇 손목축의 기어 접촉부는 Fig. 4에서 보는 것과 같이 5축 동력 전달 구조의 베벨 기어 한 쌍, 6축 동력전달 구조의 베벨 기어 두 쌍과, 스피어 기어 한 쌍으로 구성되어 있다. 기어 접촉부에 대한 모드 실험은 물림 상태에서 치차의 수직 방향으로 가진하여 응답특성을 분석하였다. 기어 접촉부의 강성 추출을 위한 해석 모델은 치차 물림이 발생하는 축, 베어링의 등가 강성의 물성치를 이용하여 구성하였으며, 모델에 대한 고유치 해석 결과와 응답특성을 비교하여 기어 접촉부에서 발생할 수 있는 등가 강성을 추출하였으며 Table 3과 같다.

4.4 다물체 동역학을 이용한 해석 모델

(1) 해석 모델

로봇 손목축은 축, 기어와 베어링으로 구성되어 있다. 시스템에 대한 특성을 분석하기 위해서 동역학 해석 프로그램을 이용하였으며, 손목축의 요소품은 평면운동을 하는 것으로 가정하였다. 축은 강체로, 베어링은 스프링으로, 기어 접촉부 접촉 조건을 갖는 스프링으로 구성하였다. 축에 대한 질량과 질량 관성 모멘트는 Table 1의 값을 사용하였으며, 베어링의 등가 스프링은 지지 위치를 고려하여 한 개의 베어링에 대하여 축 방향과 반경방향의 스프링으로 모델을 수립하여 Table 2의 값을 사용하였으며, 기어 접촉부는 Table 3의 값을 해석 프로그램에 적용하였다.

Table 3 Equivalent stiffness for gear contact

		Equivalent stiffness(N/mm)
Axis 5	①	51600
	②	17700
Axis 6	③	1660
	④	15300

(2) 해석 모델의 가진력

손목축에 대한 동적 특성 분석을 하기 위해 가진에 대한 응답을 분석하였다. 손목축이 구동되기 위해서는 모터로부터의 회전력이 축계와 기어를 통해 동력이 전달되어야 한다. 이 과정에서 모터의 속도에 따라 기어 접촉부에서는 물림이 발생하면서 조화가 진이 발생하게 된다. 이 연구에서는 모터의 회전 속도에 의해 발생하는 입력 토크를 각 치차의 물림 주파수로 대응하여 가진하였다. 이는 손목축의 구동 속도가 증가하면서 발생하는 토크를 기어의 접촉 부분에 외력으로 작용시킨 것이다.

5. 해석 결과

5.1 해석 모델의 진동량 평가

해석 모델에 대한 평가는 손목축의 정격 출력 속도의 30%에서 100%까지 5%씩 속도를 증가 시키면서 진동 응답 특성을 분석하였다. 로봇 손목축의 소음 특성에 대한 기존 연구 결과 6축 구동부의 6-1축과 6축 감속기의 베벨 기어에서 가장 큰 소음이 발생하였다⁽³⁾. 이 연구에서는 베벨 기어의 물림 위치에서의 진동량을 평가하였다. 해석 모델의 기

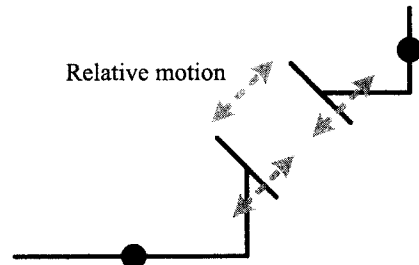


Fig. 9 Exciting model of the gear contacts

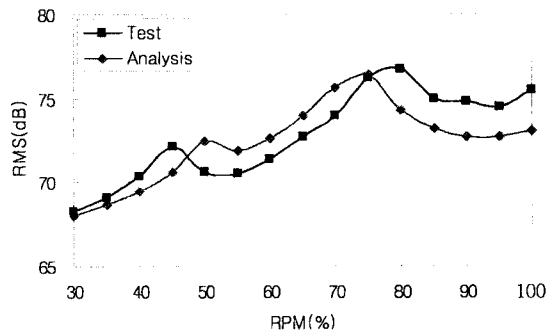


Fig. 10 Compare with experimental and analysis

어 물림의 운동은 Fig. 9와 같이 구속 조건에 따라 운동 할 것이며 이 논문에서는 두 기어의 상대 운동량을 진동량으로 간주하여 특성을 분석하였다.

5.2 모델에 대한 해석 결과와 검증 실험

구동 속도의 변화에 대한 해석 모델의 진동량과 로봇 구동 상태에서의 소음 측정 비교 결과는 Fig. 10이다. 해석 모델에 대한 진동량과 실험에 의한 소음의 값을 비교하기 위해 모두 dB로 표현하였다. 해석 결과와 소음 측정 실험 결과 모두 모터의 정격출력 속도의 45 ~ 50 %, 75 ~ 80 %에서 진동량 및 소음의 증폭현상을 볼 수 있다. 소음 측정 결과 구동 상태에서의 로봇 손목축의 시스템은 구조적인 공진에 의해 45 ~ 50 %, 75 ~ 80 %에서 소음의 증폭이 발생하는 것을 추정할 수 있다. 손목축의 요소품에 대한 특성을 고려한 해석 모델에 대한 해석 결과 또한 실험 결과와 유사한 영역에서 진동량의 증폭을 확인 할 수 있다. 따라서 해석 모델과 소음 실험 결과의 비교를 통해 해석 모델에 대한 타당성이 검증되었다.

5.3 구조 개선에 대한 진동 평가

소음 실험을 통해 검증된 해석 모델을 통해 로봇 손목축 시스템의 진동을 저감 시킬 수 있는 방안을 모색하였다. 해석 모델에서 기존의 설계 사항을 유지하면서 로봇 손목축의 특성을 변화 시킬 수 있는 요소품은 베어링이다. 축과 기어는 로봇의 제어 특성에 영향을 주기 때문에 설계 사항을 바꾸기가 쉽지 않다. 하지만 베어링의 경우 축을 지지 하는 것이 주요 목적이므로 동일한 내·외륜을 갖는 다른 타입의 베어링으로 교체가 가능하다. 이 경우 축계 시스템에서 스프링처럼 작용하는 베어링의 강성이

변하기 때문에 손목축 동력 전달 시스템의 동적 특성에 영향을 줄 수 있다⁽³⁾.

일반적으로 시스템의 동적 안정성을 위해서 스프링 강성을 높이면 된다. 높은 강성에 의해서 구조물의 고유진동수는 올라가는 현상을 볼 수 있는데, 에너지 관점에서 고주파의 진동량이 더욱 작기 때문에 시스템을 안정하게 된다. 이 연구에서는 손목축 해석 모델의 베어링의 축 방향 강성값을 기존보다 30 %를 증가시켜 해석하였고 기존의 결과와 비교하였으며 Fig. 11과 같다. 개선 전 해석 모델의 모터의 최고속도의 75 %의 구동 상태에서 가장 큰 진동량을 가지고 있었다. 베어링의 강성을 증가시킴으로써 피크 값이 이동하였으며 진동량도 약 30 %정도 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 개선 결과를 로봇 손목축에 적용하여 소음의 저감 효과를 볼 수 있을 것이다.

6. 결 론

이 연구를 통하여 산업용 로봇 손목축을 구성하는 각 단품의 물성치를 실험적 방법으로 획득하였고, 일부 물성치는 실험데이터를 바탕으로 이론적으로 규명하였다. 축을 지지하는 베어링과 동력을 전달하는 기어 접촉부는 스프링으로 구현 하였으며, 스프링의 강성값은 시스템 분석(system analysis)의 결과로부터 결정하여 로봇 손목축의 진동량 해석 모델을 수립하였다.

해석 모델은 동역학 해석 프로그램인 Recur-Dyn을 이용하였고, 이를 활용하여 로봇 손목축의 구동 속도에 따른 소음 경향을 해석한 결과 측정 소음의 경향과 약간의 차이는 발생하나 소음 레벨 변화 추이가 유사함을 알 수 있었다. 향후 산업용 로봇 손목축의 설계 사양 변경으로 발생할 수 있는 접촉부의 속도 진동량 변화 추이를 해석하여 로봇 손목축의 속도 변화에 따른 소음 분포 경향 예측에도 활용이 기대된다.

후 기

이 논문은 2008년도 2단계 두뇌한국21 사업에 의해 지원되었음.

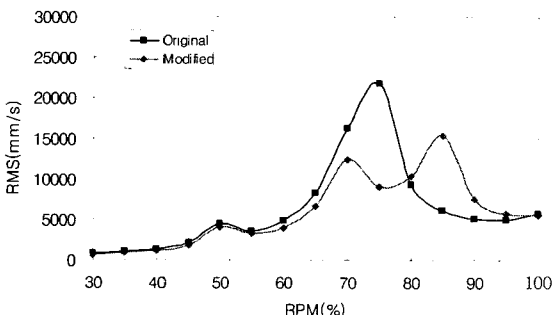


Fig. 11 Analysis result of an axial stiffness increase

참 고 문 헌

(1) Ma, R. and Gupta, K. C., 1989, "On the Motion of Oblique Bevel Geared Robot Wrists", *Journal of Robotic Systems*, Vol. 6, No. 5, pp. 509~520.

(2) Tsai, L. W., 1988, "The Kinematics of Spatial Robotic Bevel-gear Trains", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 4, No. 2, pp. 150~156.

(3) Lee, K. Y., Jung D. H., Chung J. T., Yim H. S. and Kim Y. H., 2003, "A Study on the Noise and Vibration Reduction of an Industrial Robot", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 13, No.

11, pp. 838~844.

(4) Lee, Y. D. and Lee, J. M., 1987, "A Study on the Vibration Characteristics of an Industrial Robot", *Proceedings of the KSME Spring Annual Conference*, pp. 546~551.

(5) James, I. T., "The Gear Analysis Handbook", Printed in the United States of America.

(6) Park, C. I. and Lee, J. M., 1996, "A Study on the Vibration Characteristics of Helical Gears with Tooth Errors", *Journal of the KSME*, Vol. 20, No. 5, pp. 1534~1542.

(7) NGAI, K. W. and NG. C. F., 2001, "Structure-bone Noise and Vibration of Concrete Box Structure and Rail Viaduct", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 255, No. 2, pp. 281~297.