

산업용 로봇 손목 동력 전달계의 동특성 해석 모델 연구

A Study on the Dynamic Analysis Modeling of Industrial Robot's Wrist Power Transmission

김우형* · 정두한** · 최영삼** · 정진태*** · 임홍순****

Woohyung Kim, Duhan Jung, Youngsam Choi, Jintai Chung and Heung Soon Yim

Key Words: Industrial Robot(산업용 로봇), Robot Wrist Power Transmission(로봇 손목 동력 전달장치), Parametric Study(매개 변수 연구), Bearing Equivalent Stiffness(베어링 동가 강성), Gear Contact Equivalent Stiffness(기어 접촉 상당 강성)

ABSTRACT

The dynamic characteristic of a wrist power transmission examine closely with mass property, to present the model which induce the vibration is ultimately the purpose. A robot wrist power transmission for analysis model got the mass property through the approach to be the experimental. A bearing equivalent stiffness which supports the axis and a gear contact equivalent stiffness are determined by the simplicity analysis model compared the result of the experiment. We calculate the vibration tendency of the robot wrist power transmission by an analysis tool which is called the RecurDyn. We compared it with a signal analysis experiment's which a robot operation happens which is based on the ambient noise.

1. 서론

산업용 로봇에서 가장 큰 소음 및 진동을 유발하는 곳은 로봇 손목축으로 기존의 연구로부터 규명된 바 있다. 산업용 로봇의 손목축은 기어, 축, 베어링으로 구성되어 있으며 동력을 전달하는데 있어 복잡한 메커니즘을 가지고 있다. 따라서 로봇 손목축의 동특성을 규명하기 위해서는 단품에 대한 물성치와 단품을 지지하고 있는 베어링의 동가 강성값, 동력을 전달하는 기어의 상호관계에 대한 모든 정보를 충분히 고려되어야 동특성을 규명할 수 있다. 하지만 베어링이나 기어에 대한 정보를 이론적으로 계산하기는 쉽지 않다. 베어링의 경우 동가 강성을 추출하기 위해서는 베어링의 압력각, 내륜, 외륜, 외부힘 등을 고려해야 하지만 압력각이나 외부 힘의 경우 로봇 시스템으로부터 정확하게 알 수 있는 값이 아니기 때문에 베어링 동가 강성을 고려하기 쉽지 않다. 기어 또한 베어링과 마찬가지로 치의 강성이나, 치형 오차등을 추출하여 동력 전달부의 특성을 분석하기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 베어링의 동가 강성과 기어 접촉부에 대한 상당강성을 실험에 근거하여 현장

에서 손쉽게 해석에 필요한 물성치를 획득하는 방법을 사용하였다.

실험 결과와 각 단품의 특성에 맞는 운동방정식으로부터 얻은 물성치를 이용하여 로봇 손목 동력 전달계의 동특성을 분석하기 위한 해석 모델을 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn 을 이용하여 구성하였다. 해석 모델의 입력 값으로 로봇 구동시 발생하는 가진 주파수를 해석 모델의 입력 값으로 하여 속도(가진 주파수)에 따른 진동경향을 보았다. 또한 이에 대하여 속도별 측정된 소음 실험 데이터와 비교하였다.

2. 손목축 해석 모델

2.1 연구 대상

산업용 로봇은 움직임을 자유롭게 하기 위하여 6 축으로 구성되어 있다. 보통 1,2,3 축은 로봇의 자세를 결정하기 위하여 구동하며 4,5,6 축은 미세조정을 위하여 움직이는 축이다. 본 연구는 산업용 로봇의 손목축에 해당하는 5,6 축에 대한 것이다. 손목축은 동력을 전달하는 구조는 여러 개의 단품으로 구성되어 있으며, 각 단품은 베어링으로 지지되어 있고 동력을 기어 접촉을 통하여 전달되고 있다. 로봇이 고출력으로 구동하기 위해서는 손목축 내부의 시스템은 고속으로 구동하는데 이 과정에서 손목축은 다른 구동축에 비하여 높은 소음이 발생한다.

* 한양대학교 일반대학원 정밀기계공학과
E-mail : woohyung@ihanyang.ac.kr
Tel : (031) 501-4590, Fax : (031) 501-4590

** 한양대학교 일반대학원 정밀기계공학과

*** 한양대학교 기계정보경영학과

**** 현대중공업 기계전기연구소 지능기계연구실

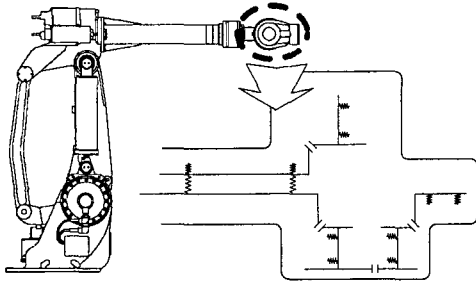
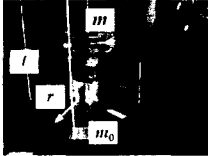


Fig.1 산업용 로봇 및 로봇 손목축 구성도



$$I = \frac{T^2(m+m_0)gr^2}{4\pi^2 l} - I_0$$

Fig.2 관성모멘트 실험

2.2 단품 모델 Parameter

로봇 손목축의 동특성을 규명하기 위해서는 손목축을 구성하는 각 단품의 물성치가 필요하다. 몇몇의 물성치는 쉽게 측정할 수 있지만 베어링, 기어 접촉부와 같은 부분은 해석 모델을 구성하기 위한 값을 쉽게 얻기 힘들다.

로봇 손목축의 해석모델을 구성하기 위해서는 다음과 같은 가정과 물성치가 필요로 한다. 각 단품의 축과 기어는 강제 운동을 하며, 각 단품의 질량, 질량관성모멘트와 단품을 지지하는 베어링의 등가강성, 기어 접촉부의 상당강성이 필요로 하다. 단품의 질량은 쉽게 측정할 수 있으며 질량 관성 모멘트는 Fig.2 와 같이 실험을 통하여 측정 하였으며 단품의 질량과 질량관성 모멘트는 다음과 같다.

Table.1 단품별 질량 및 질량 관성 모멘트

모델 파라미터		Shaft	
		질량(kg)	질량관성(kg mm ²)
5 축 구동계	5-1 축	1.336	5470
	5 축 입력축	0.990	772
6 축 구동계	6-3 축	0.440	3070
	6-2 축	0.934	1290
	6-1 축	0.630	772
	6 축 입력축	0.445	285

2.3 단품의 동특성 파악(베어링 등가 강성)

로봇 손목축 단품의 동특성을 파악하기 위해서는 질량, 질량관성모멘트뿐 아니라 단품을 지지

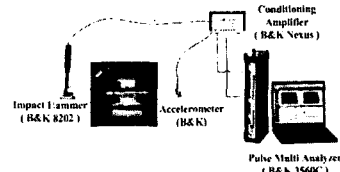


Fig.3 단품 System Analysis 실험 구성도

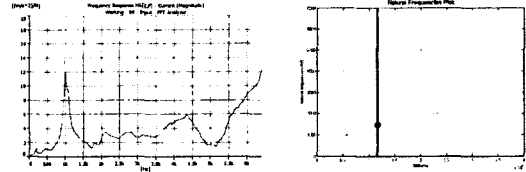


Fig.4 실험에 의한 FRF Plot 및 해석 모델 Plot

하는 베어링에 대한 정보를 알아야 한다. 베어링은 단품의 직경에 따라서 결정 되겠지만 베어링에 작용하는 압력각, 베어링 예압등 베어링에 작용하는 여러 가지 인자를 통해서 베어링의 특성을 알 수 있다. 하지만 현장에서 베어링의 특성을 파악하기 위하여 베어링에 작용하는 외부 조건을 평가하기는 쉽지 않기 때문에 시스템 분석 실험을 통하여 베어링에 작용하는 베어링 강성값을 추출하여 베어링을 스프링으로 가정하여 모델을 구성하였다. 베어링의 강성 추출을 위한 시스템 분석 실험방법은 Fig.3 과 같다.

단품의 시스템 분석을 통하여 Fig.4 와 같은 FRF Plot 을 통하여 단품의 강제 운동에 해당하는 고유진동수를 추출하여 강제 운동의 운동방정식을 Lagrange's Equation 을 이용하여 구성한 후 해석에 의한 결과와 실험의 결과를 비교하여 베어링의 강성값을 추출하였다.

$$\text{Kinetic Energy: } T = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m\dot{y}^2 + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2$$

$$\text{Potential Energy: } V = k_1x^2 + \frac{1}{2}k_2(y-a\theta)^2 + \frac{1}{2}k_2(y+b\theta)^2$$

$$\text{Lagrange's Equation: } \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial V}{\partial q} = 0$$

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2k_1 & 0 & 0 \\ 0 & 2k_2 & -(a-b)k_2 \\ 0 & -(a-b)k_2 & (a^2+b^2)k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

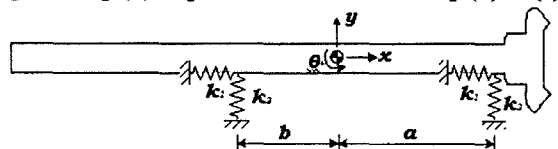


Fig.5 단품 해석 모델

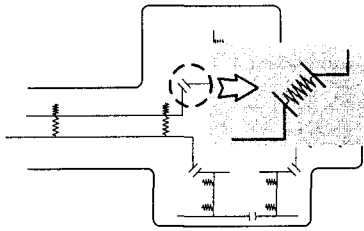


Fig.6 기어 접촉부 모델링

2.4 기어 접촉부 등가 강성

로봇 손목축의 해석 모델을 구성하기 위한 또 다른 Parameter 는 기어 접촉부에 대한 것이다. 기어 접촉부에 대한 모델을 간단히 하기 위하여 접촉부에 대한 모델을 스프링으로 구성하여 모델을 수립 하였다. 기어 이에 대한 강성을 구하는 방법은 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 베어링의 등가 강성을 추출한 방법과 동일하게 기어 접촉부의 강성값을 추출하였다.

일단 기어의 물림을 구현하기 위하여 로봇 선단에 부하를 장착하여 실험하였다. 실험은 베어링 등가 강성 추출 과정과 동일하게 System Analysis 를 이용하여 FRF Plot 을 추출하고 간단한 해석 모델을 통하여 기어 이에 대한 모델을 수립 할 수 있을 정도의 강성 값을 추출하였다.

로봇 손목축의 기어 접촉부는 5 축 구동부에 한곳, 6 축 구동부에 3 곳으로 총 4 부분의 기어 접촉이 일어난다. 5 축 구동부의 기어 접촉부에 대한 실험은 기어 이의 수직 방향으로 실험을 수행 하였으며, 6 축 구동부의 실험은 중간 부분의 간섭을 배제한 상태에서 양쪽 기어 접촉부에 대한 실험을 수행한 후 중간 부분의 기어 접촉부에 대한 실험을 수행하였다.

3. Recurdyn 해석 모델

3.1 모델링 개요

로봇 손목축을 구성하는 6 축 및 5 축계는 축, 기어 베어링으로 구성되어 있다. 축 및 기어는 Rigid body 모델로서 평면 강체 운동 (x, y, θ)을 하며, 축을 지지하는 베어링은 강성을 갖는 스프링 요소를 이용하여 모델링 하였다. 또한 각 기어 접촉부는 Contact Model 을 적용하였으며 하우징은 Ground 에 고정하였다. 5 축 및 6 축 끝단의 스플라인에는 강성이 매우 작은 스프링으로 지지되는 슬라이드 조인트로 구속 하였다.

3.2 모델 파라미터

손목축 계를 구성하는 기어 및 축 등의 Rigid Body Element 에는 앞서 단품의 해석 모델 수립시 사용한 Geometric 값을 활용하였다. 또한 강성을 갖는 스프링 요소는 실험적으로 구한 단품의 강성 값을 이용하였으며 접촉부 상당 강성값을 Contact Element 에 적용하였다.

가진력 입력에 필요한 기어 접촉부 작용력 및 주파수, 감속기 편심량 데이터는 업체로부터 제공 받았다. 특히 Recurdyn 해석 모델의 각 접촉부에서의 가진 주파수는 업체로부터 제공받은 Gear Mesh Frequency 데이터를 활용하였다.

3.3 가진력 입력 방법

손목축을 구성하는 5 축 및 6 축의 각 기어 접촉부에서 x, y 방향 Translation Force 로 가진 하였다. Translational Force 는 앞서 언급한 각 접촉부 작용력과 가진 주파수를 이용한 Harmonic Excitation 의 형태이다. 또한 5 축 및 6 축 감속기의 구동을 구현하기 위해 감속기 부분을 감싸는 Rigid Body 를 추가하여 Motion Input 을 주었다. Translational Force 와 같은 방법으로 가진력의 크기는 감속기 편심량 데이터를 사용하였다.

4. Recurdyn 시뮬레이션 결과

4.1 진동량 평가 지표

RecurDyn 해석 결과는 각 접촉부에서의 속도 진동량을 RMS 값으로 나타내었다. 저주파와 고주파의 진동은 진동 에너지 측면에서 똑같이 가중되기 때문에 속도의 크기가 주어진 에너지량에 대응한다. 이때 6 축 구동부는 접촉 기어의 상대 속도를 나타내고 5 축 구동부는 구동 속도를 평가 하였다.

5 축의 주요 관심 접촉부는 Fig.7 과 같이 Recurdyn 모델에서 동력이 전달되는 스플라인의 경계조건인 모호성 때문에 실제 시스템을 정확하게 반영하지 못하고 있다. 그러므로 5 축 구동부에

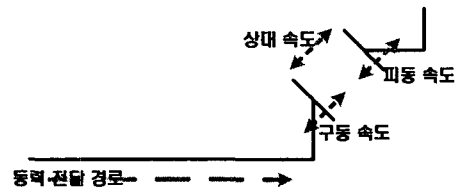


Fig.7 기어 접촉부 모델링

서의 진동량 보다 오히려 5 축 감속기 부분의 피동부의 크기가 더 크게 평가되어 소음 실험의 경향성을 따르지 못하고 있다. 한편 6 축 구동축의 주요 관심 접촉부는 비교적 동력이 전달되는 불분명한 경계조건의 영향이 적어 구동부의 진동량이 크게 평가 된다. 또한 복잡한 구조를 가진 감속기의 영향도 무시 못할 변수이다. 이러한 여러가지 주요 영향 인자들을 고려한다면 5 축 구동축도 6 축과 유사하게 구동부의 진동량이 크게 평가 될 것이다.

4.2 6 축 구동축 가진 해석 결과 및 소음 실험

로봇 손목축 끝단에 부하 상태와 무 부하 상태의 RecurDyn 해석결과와 6 축 구동시 측정한 소음 실험 결과를 비교해 보면 Fig.8 에서 보는 것처럼 유사한 경향을 보이고 있다.

4.3 5 축 시뮬레이션

RecurDyn 해석 결과와 소음 실험 결과를 비교 해 보면 55%~60%와 75%~80%에서 증폭되는 것을 알 수 있다. 부하시에는 증폭 구간과 그 값에 있어서 약간의 차이가 있으나 무 부하시에는 증폭 구간의 이동 현상만 나타나고 소음 실험과 유사한 경향을 보이고 있다. 해석 결과와 실험의 비교 데이터는 Fig.9 에서 제시하고 있다.

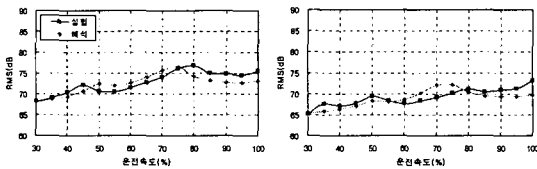


Fig.8 6 축 구동축 부하 상태와 무 부하 상태의 해석 결과 및 실험

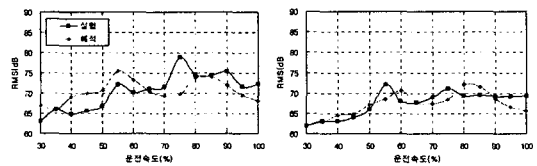


Fig.9 6 축 구동축 부하 상태와 무 부하 상태의 해석 결과 및 실험

5. 결론

본 연구를 통하여 산업용 로봇 손목축을 구성 하는 각 단품의 물성치를 실험적 방법으로 획득하였고, 일부 물성치는 실험데이터를 바탕으로 이론적으로 규명하였다. 축을 지지하는 베어링과 동력을 전달하는 기어 접촉부는 스프링으로 구현 하였으며, 스프링의 강성값은 System Analysis 의 결과로부터 결정하여 로봇 손목축 진동량 해석 모델을 작성하였다.

해석 모델은 동역학 해석 상용 Tool 인 RecurDyn 을 이용하였고, 이를 활용하여 로봇 손목축의 Rpm 에 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 예측에 활용이 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) 이광열 등, 2003, "산업용 로봇의 소음·진동 저감 연구", 한국소음진동공학회 논문집 13 권 11 호, pp.838-844.
- (2) D.J.Ewins, "Modal Testing: Theory, Practice and Application", Research Studies Press LTD.
- (3) Maia, Silva, "Theoretical and Experimental Modal Analysis", Research Studies Press LTD.
- (4) Leonard Meirovitch, "Methods of Analytical Dynamics", McGraw-Hill.
- (5) James I. Taylor, "The Gear Analysis Handbook", Printed in the United States of America
- (6) 박찬일 등, 1996, "치형오차를 가진 헬리컬 기어의 진동특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집(A), 제 20 권, 제 5 호, 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