

산업용 로봇의 소음·진동 저감 연구

A Study on the Noise and Vibration Reduction of an Industrial Robot

이 광 열* · 정 두 한* · 정 진 태† · 임 흥 순** · 김 영 환**

Kwangyal Lee, Duhan Jung, Jintai Chung, Heung Soon Yim and Young Hwan Kim

(2003년 3월 17일 접수 : 2003년 10월 27일 심사완료)

Key Words : Industrial Robot (산업용 로봇), Noise Reduction (소음저감), Vibration Reduction (진동저감), Parametric Study (매개변수연구)

ABSTRACT

The noise and vibration reduction schemes of an industrial robot are studied. Experimental procedures are employed to examine the sources of robot noise. A parametric study is undertaken to observe the effects of each part such as gear, shaft and housing on the sound pressure level. After the part which mainly effects on the noise is proved, we propose countermeasures for reducing the noise and vibration of the robot system.

1. 서 론

우주 혹은 원자력 산업과 같은 특수환경 및 생산 자동화와 관련하여 산업용 로봇의 수요가 지속적으로 증가하고 있으며, 국내외에서 고성능 로봇을 개발하기 위한 노력이 활발히 진행되고 있다. 이러한 산업용 로봇의 성능을 향상시키기 위하여 소음 및 진동의 저감은 반드시 해결하여야 할 중요한 문제로 대두되고 있다.

일반적으로 산업용 로봇에서 발생하는 소음 및 진동의 주요 원인은 내부 동력전달계를 구성하는 기어, 축, 베어링 등의 형상, 관성, 강성, 감쇠, 마찰, 가공공차, 조립공차 등 다양하다. 특히, 동력전달계 시스템에서 가장 문제시 되는 소음은 기어치의 강성변화, 치형오차, 조립오차 등에 의해 발생한 기어소음이 축

과 베어링을 지나 하우징을 통해 외부로 방사되는 구조전달소음이다. 그러나 지금까지 대부분의 연구는 기어만을 모델링하여 치의 강성변화나 치형오차를 고려한 운동방정식을 유도하여 진동과 소음을 평가하여 치형수정량을 제시하는 연구에 국한되어 있다.^(1~3) 그러나 산업용 로봇에서 발생하는 소음을 정확하게 평가하기 위해서는 기어 소음뿐만 아니라 모터 소음, 회전축의 어긋남에 의해 발생하는 진동, 하모닉 가진 성분과 소음 경로 공진의 연성에 의하여 가진원이 증폭되는 구조소음(structure-borne noise), 브랏켓의 공진 등 축, 베어링, 하우징에 의한 영향을 고려하여야 한다.^(4~6)

본 연구의 목적은 산업용 로봇에서 발생하는 소음을 원인별로 규명하고 축, 베어링 등에 대한 소음 저감 대책을 강구한 후 전체 로봇 시스템의 소음/진동 저감 방안을 수립하는 것이다. 이를 위하여 여러 가지 실험적인 방법을 통해 로봇에서 발생하는 소음을 측정하고, 측정된 시간영역 혹은 주파수영역의 데이터로부터 기어, 축, 베어링, 브랏켓, 하우징 등의 소음원을 규명할 것이다. 또한 이들 각 부품이 로봇 시스

† 책임저자, 정희원, 한양대학교 기계공학과

E-mail : jchung@hanyang.ac.kr

Tel : (031) 400-5287, Fax : (031) 406-6964

* 정희원, 한양대학교 일반대학원 정밀기계공학과

** 현대중공업 지능기계연구실

템의 전체 음압에 끼치는 영향을 차등화하여 각 부품이 발생시키는 소음의 주파수 범위와 크기를 정량적으로 평가할 것이다. 동시에 로봇의 부하변동 및 회전축의 속도에 따른 전체 음압에 끼치는 기어소음의 영향을 평가할 것이다. 다음으로 소음의 발생요인을 기어소음, 축계소음, 구조소음 등으로 분류하고 소음을 줄일 수 있는 대책을 강구할 것이다. 마지막으로 로봇의 요소품에 대한 동특성 변화를 이용한 소음/진동 저감 방안을 강구하고 고효율의 저소음 로봇을 개발하기 위한 설계 방안을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 소음 측정

운전중인 로봇의 소음을 객관적으로 판단할 수 있는 데이터를 얻기 위해서는 먼저 로봇 주위의 암소음을 측정해야 하므로 로봇을 기준으로 3m 간격으로 전후 및 좌우 방향으로 6m 거리까지 암소음을 측정하였다. 로봇의 소음 측정시 속도와 하중의 변화는 로봇 소음발생에 중요한 변수로 작용하므로 하중과 속도의 영향을 고려하기 위해서 하중을 네 단계(0 kg ~ 100 kg)로 나누고 각 단계에서 속도를 여섯 단계(50% ~ 100%)로 나누어 일정한 하중에서 속도를 10%씩 증가시켜가면서 소음레벨을 비교 측정하였다. 소음측정은 정속 운전영역에서 실시하는 것이 일반적이지만 로봇을 정속으로 운전하는 것은 불가능하기 때문에 가감속이 포함된 등속구간을 1사이클로 하는 운전구간에서 소음을 측정하였다. 그리고 로봇의 자세는 로봇의 운전특성을 고려하여 기준자세를 정의하고 이 기준자세에서 발생하는 소음을 측정하였다. 소음계(LARSON-DAVIS system 824)는 로봇의 작업반경을 고려하여 로봇을 기준으로 정방향으로 3m 위치에 설치하여 측정을 수행하였다.

2.2 신호분석

신호분석은 일반적으로 알려지지 않은 가진 입력에 의한 시스템의 응답을 분석하여 시스템의 동적 거동을 평가하는 방법이다. 본 실험에서는 신호분석을 통하여 로봇에서 발생하는 소음원을 규명하고 속도 및 하중 변화에 따른 소음 레벨을 비교 분석함으로써 주 소음 발생 메커니즘을 추정할 것이다.

(1) Frequency Analysis

로봇에서 발생하는 소음 및 진동 신호의 주파수 성분을 분석할 때 하중과 속도의 영향을 고려하기 위하여 기준자세에서 하중을 4단계로 구별하고 각 단계에서 속도를 6단계로 나누어 실험을 수행하였다. 개략적인 실험장치는 Fig. 1과 같으며 마이크로폰(Cirrus Type MK224)의 위치는 각 축 운전시 소음이 가장 높게 발생하는 곳에-가능한 로봇에 근접하게-부착하였다. 채집된 소음 및 진동 신호는 전치증폭기(pre-amplifier)를 통해 증폭되고 증폭된 신호는 BNC cable을 통해 주파수분석기(HP35670A)에 전송되고 FFT에서 분석하고 저장하였다. 일반적으로 소음은 진동과 밀접한 관련이 있으므로 진동 신호를 동시에 채집해야 한다. 원칙적으로 하우징과 내부부품의 진동 신호를 직접적으로 측정하여야 하지만 회전축에 가속도계를 부착할 수 없고 비접촉 센서도 로봇의 구조상 적용이 불가능하므로 소음이 가장 크게 발생하는 외부 하우징에 가속도계(B&K 4383)를 부착하여 신호를 측정하였다.

(2) Order Tracking

로봇을 정속으로 운전하여 소음 및 진동 신호를 측정하여 주파수 분석을 수행하여야 하지만 정속으로 운전하는 것이 불가능하기 때문에 가감속이 존재하는 일정한 사이클 동안 신호를 측정하였다. 그러나 이러한 방법으로는 관심구간에서 정확한 주파수 정보를 얻기가 쉽지 않기 때문에 보다 정밀한 신호를 얻기 위하여 order tracking 방법을 적용하였다. Order tracking 분석을 하기 위해서는 회전하는 축에 대한 속도 정보가 필요하지만 로봇의 구조상 축에 대한 직접적인 속도 측정은 불가능하기 때문에 제어를 통해 모터로 전달되는 신호를 이용하여 각 축의 회전속

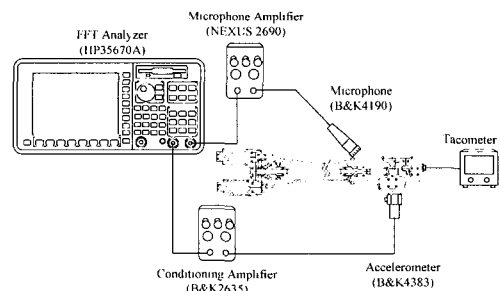


Fig. 1 Experimental setup for the noise/vibration signal analysis of a robot arm

도를 계산하여 실험을 수행하였다. 제어기에서 신호를 검출할 때 연결 케이블 길이에 따라 심한 노이즈(noise)가 발생하므로 최대한 짧은 거리를 유지하여 노이즈의 영향을 최소화하였다. Order tracking 실험은 주파수 해석을 통해 소음이 가장 많이 발생되고 문제가 되는 5, 6축에 대하여 수행하였으며, 실험 조건과 센서 부착위치는 주파수 분석 실험과 동일하게 실시하였다.

2.3 시스템 분석

시스템 분석은 어떤 시스템의 고유한 특성을 알아내는 기법으로 측정 가능한 힘으로 가진하여 응답/입력의 비를 연구하는 방법이다. 대부분의 소음과 진동 문제들은 공진현상과 매우 밀접한 관계가 있고 이번 실험 대상인 로봇도 구조소음과 밀접한 관계가 있다. 따라서 기어에서 발생한 소음을 증폭시키는 부품을 규명하기 위하여 가장 높은 소음이 발생하는 5, 6축 부품에 대한 동특성을 파악하는 것이 시스템 분석의 목적이다.

(1) Modal Testing

로봇을 구성하는 부품에 대한 고유한 특성을 파악하기 위해서는 로봇이 동작하고 있을 때 실험을 해야 하지만 실제 로봇의 구조상 이러한 실험이 불가능하므로 관심이 되는 부분을 로봇에서 분리하여 실험을 수행하였다. 시스템을 가진하기 위하여 충격해머(B&K 8202)와 가진기(B&K 4808)를 이용하였으며, 충격해머를 이용한 모드실험의 개략도는 Fig. 2와 같다. 그리고 가진기로 가진하기 위하여 스틱거(stinger)를 제작하여 연결하고 힘변환기를 부착하여 시스템에 전달되는 가진력을 측정하였다. 실험시 경계 조건은 자유단과 고정단의 두 경우에 대하여 모두 수행하였고, 가진에 대한 응답신호는 3축 가속도계

(B&K 4326)를 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 소음측정 결과

산업용 로봇에 작용하는 하중의 변화에 따른 소음의 크기는 Table 1과 같다. 측정 결과로부터 하중이 증가할수록 5축과 6축의 소음이 급격히 커짐을 알 수 있으며, 로봇의 손목부를 구성하는 5, 6축에서 가장 큰 소음이 발생함을 알 수 있다. 이는 하중을 지지하고 있는 부분이 손목축이기 때문에 무부하 때보다 부하가 있을 경우에 5, 6축을 구성하는 기어에 큰 하중이 작용하여 소음이 증가하는 것으로 추정할 수 있다. 따라서 로봇의 주 소음 발생 축이 손목축이며 하중이 소음에 중요한 영향을 준다는 사실을 확인할 수 있으므로 전체 로봇 시스템의 소음을 저감하기 위해서는 손목축의 소음을 저감하는 것이 가장 효과적이다.

3.2 신호분석 결과

(1) Frequency Analysis

산업용 로봇의 손목부에서 발생하는 소음원을 규명하기 위하여 주파수 분석 실험을 수행하였다. 실험실 주위의 암소음은 60 dB 미만으로 로봇 시스템의 5, 6축에서 발생하는 소음을 측정하고 분석할 때 암소음의 영향은 무시하였다. 실험 대상 로봇의 손목부는 일련의 기어열로 구성되어 있으며 Table 2는 5축과 6축에 대한 기어 번호와 기어의 물림주파수(gear mesh frequency) 정보를 나타낸다.

로봇의 손목부에 있는 5축의 회전속도를 최대 운전속도의 80%와 90%로 구동할 경우에 측정된 소음 스펙트럼 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 가장

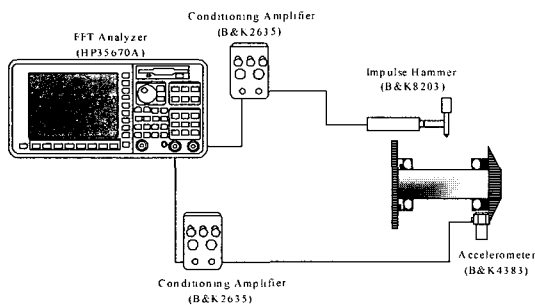


Fig 2. Experimental setup for the modal testing

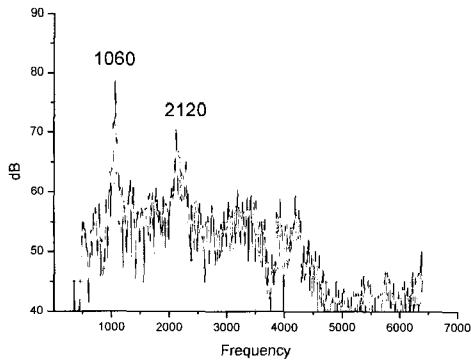
Table 1 Measurement of robot noise(dBA)

	0 kg	40 kg	70 kg	100 kg
1 th-shaft	66	66	67	67
2 th-shaft	64	64	65	65
3 th-shaft	61	62	66	64
4 th-shaft	68	69	70	70
5 th-shaft	70	72	74	75
6 th-shaft	70	73	74	77

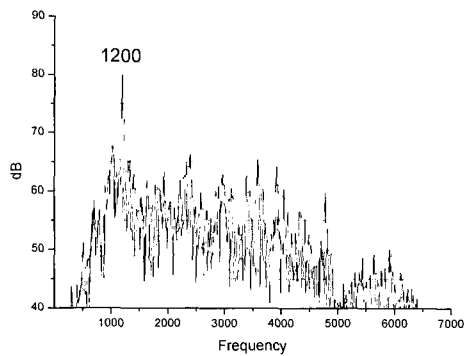
큰 소음을 발생시키는 주파수 성분은 80 % 속도에서 1060 Hz이고 90 % 속도에서 1200 Hz이다. 이 주파수는 5축의 3, 4번 기어 물림주파수 성분과 일치하는 성분이다. Fig. 4는 6축을 최대 속도의 80 %와 90 %

Table 2 Gear mesh frequency(Hz)

Gear	5 th shaft		6 th shaft	
	80 %	90 %	80 %	90 %
Z1	3157	3551	2877	3236
Z2	3157	3551	2877	3236
Z3	1062	1195	672	759
Z4	1062	1195	672	759
Z5			1560	1755
Z6			1560	1755
Z7			1000	1125
Z8			1000	1125



(a) Shaft rotation speed 80 %



(b) Shaft rotation speed 90 %

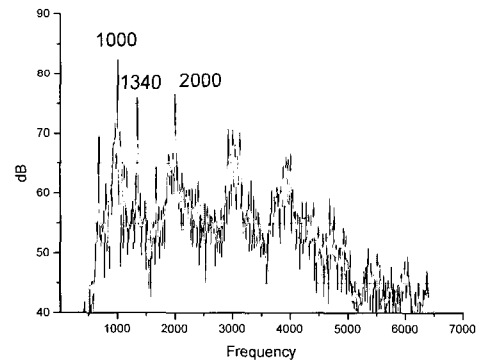
Fig. 3 Frequency analysis according to speed of 5th-shaft

로 구동할 경우의 소음 측정 결과를 나타낸다. 주 소음성분은 7, 8번 기어의 물림주파수 성분과 일치하는 80 % 속도에서 1000 Hz와 90 % 속도에서 1120 Hz이다. 또한 6축의 7, 8번 기어 회전속도의 2배수 성분에 해당하는 소음이 높게 나타나고 있으므로 그 원인을 규명하여야 할 것이다.

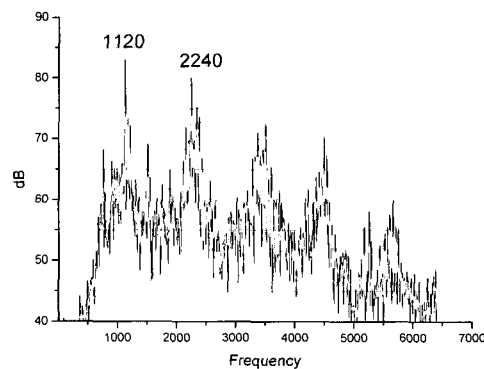
이상의 주파수 분석 실험을 통하여 5축은 최대 운전 속도에서 방사되는 소음보다 90 % 운전 속도에서 더 큰 소음이 방사되고 소음원은 3, 4번 기어의 물림 주파수 성분임을 확인하였다. 또한 6축은 최대 운전 속도에서 방사되는 소음과 90 % 운전 속도에서 방사되는 소음의 크기가 비슷함을 관찰하였고 소음원은 7, 8번 기어의 물림주파수 성분임을 확인하였다.

(2) Order tracking

산업용 로봇은 정속 운전이 불가능하므로 가감속에 의한 주파수 왜곡 현상을 최소화하기 위하여 order



(a) Shaft rotation speed 80 %

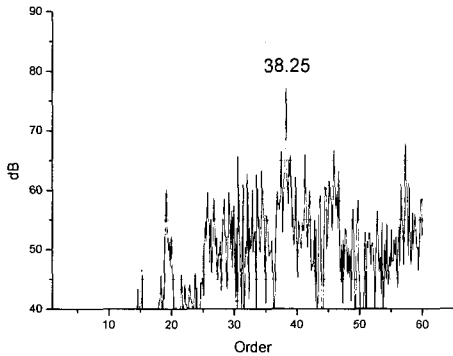


(b) Shaft rotation speed 90 %

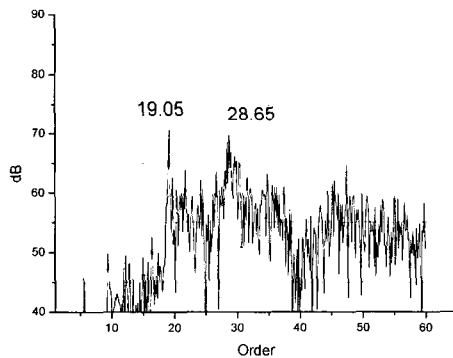
Fig. 4 Frequency analysis according to speed of 6th-shaft

tracking 실험을 실시하였다. 차수(order)는 간단하게 주파수($\text{Hz} = \text{order} \cdot \text{rpm}$) 성분으로 변환할 수 있으며 명확하게 서술하기 위하여 차수와 주파수를 혼용하여 기술할 것이다.

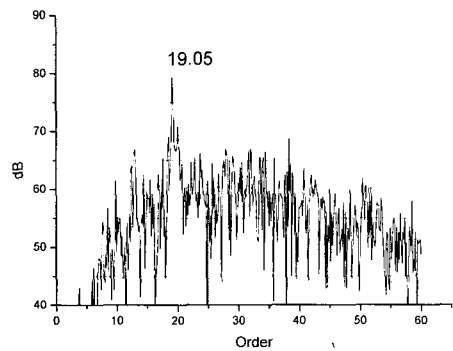
5축에 대한 order tracking 측정 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 45 % 운전속도에 대한 소음 측정 결과로서 38.25(1234 Hz) 성분이 지배적으로 방



(a) Shaft rotation speed 45 %



(b) Shaft rotation speed 60 %



(c) Shaft rotation speed 90 %

Fig. 5 Order tracking according to speed of 5th-shaft

사되고 있다. 38.25 차수 성분은 5축의 3, 4번 기어 물림주파수의 2배수(2X) 성분이다. Fig. 5(b)는 60 % 운전속도에서 측정된 소음 신호로서 19.05(823 Hz) 성분과 28.65(1237 Hz) 성분이 소음에 크게 기여함을 알 수 있다. 여기서 19.05 차수 성분은 3, 4번 기어의 물림주파수이지만 28.65 성분은 회전주파수의 배수 성분이 아님을 주목해야 한다. 따라서 1230 Hz와 인접한 주파수에서 기어의 회전속도와 일치하는 구조공진이 있음을 추정할 수 있다. Fig. 5(c)는 90 % 운전속도에서 측정된 소음 신호로서 3, 4번 기어의 물림주파수에 해당하는 19.05(1229 Hz) 성분이 피크를 보여 가장 높은 소음을 방사함을 알 수 있다. 주파수 분석 실험시 90 % 운전속도에서 3, 4번 기어의 물림주파수는 1200 Hz로 나타났으나 제어기 오차로 인하여 약 30 Hz 정도 차이가 발생하였다. 이러한 실험 결과로부터 산업용 로봇의 손목부에 있는 5축을 구동할 때 3, 4번 기어의 물림으로 발생하는 소음은 1200 Hz 대의 공진으로 인하여 증폭되어 90 %의 운전속도 영역에서 최대 소음을 방사함을 알 수 있다.

Fig. 6은 6축에 대한 order tracking 측정 결과를 나타내고 있다. 50 % 운전속도에서 피크를 나타내는 38.25(1250 Hz) 차수 성분은 7, 8번 기어 물림주파수의 2배수 성분이다. 운전속도가 70 %로 증가하면 19.05(871 Hz) 성분과 27.65(1264 Hz) 성분이 피크를 보이고, 운전속도 100 %에서 19.05(1244 Hz) 성분이 가장 높은 소음을 방사함을 알 수 있다. 5축과 마찬가지로 위 실험 결과로부터 산업용 로봇의 6축을 최대속도로 구동할 때 7, 8번 기어의 물림주파수인 1250 Hz 대의 소음이 내부 시스템에 의해 증폭됨을 알 수 있다. 따라서 로봇의 손목부를 구동할 경우 1200 Hz 및 1250 Hz 영역에서 소음이 증폭되는 메커니즘을 분석하여 적절한 대책을 수립하여야 한다.

3.3 시스템 분석 결과

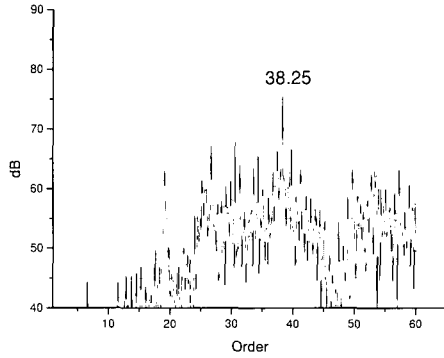
Fig. 7은 5축을 구성하고 있는 2, 3번 기어의 물림축에 대한 축방향 시스템 분석 결과이다. 실험결과 고유진동수가 1220 Hz 부근에서 존재하는 것을 알 수 있고 이 주파수는 5축 신호분석을 통해 소음 신호를 증폭시키는 주파수 범위와 일치한다. 따라서 5축에 대한 소음은 3, 4번 기어에서 발생하여 2, 3번 물림축 시스템 공진에 의해 증폭되고 외부로 전달된다.

Fig. 8은 6축을 구성하는 6, 7번 기어의 물림축에

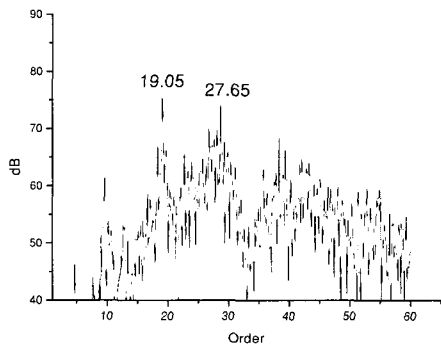
대한 축방향 고유진동수 측정 결과를 나타낸다. 5축과 유사하게 고유진동수가 1272 Hz 부근에 존재하며 이 주파수는 6축 신호분석을 통해 소음을 증폭시키는 주파수 범위와 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 로봇 손목부의 6축 소음도 측정 시스템 공진에 의해 7, 8번 기어의 물림으로 발생한 소음이 증폭되고 있다.

Fig. 9는 6축을 감싸고 있는 하우징에 대한 모드

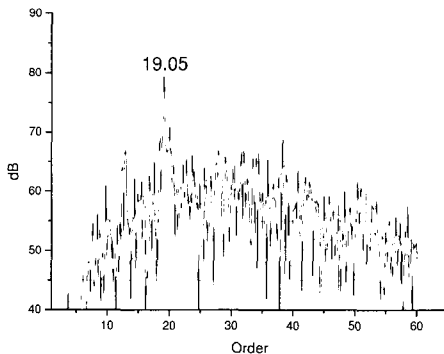
해석 결과로서 2256 Hz에서 1차 모드에 대한 고유진동수가 존재하고 있다. 이 주파수는 6축을 90%의 회전속도로 운전할 경우 7, 8번 기어의 2X 성분과 일치하고 있다. 따라서 90% 운전속도에 대한 주파수 분석 결과에서 나타난 6축의 2X 소음이 증폭되는 이유는 하우징의 공진에 의한 것으로 추정된다. 즉 6축은 90% 운전속도에서 주 소음원인 7, 8번 기어 물림에



(a) Shaft rotation speed 50 %



(b) Shaft rotation speed 70 %



(c) Shaft rotation speed 100 %

Fig. 6 Order tracking according to speed 6th-shaft

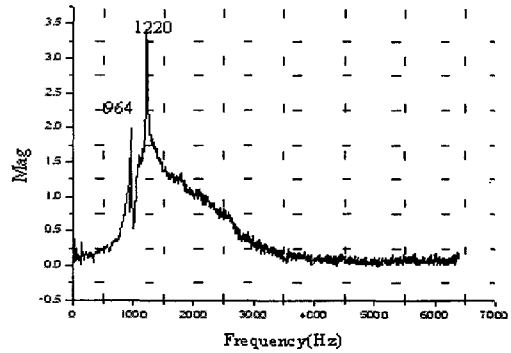


Fig. 7 Modal testing for 5th-shaf

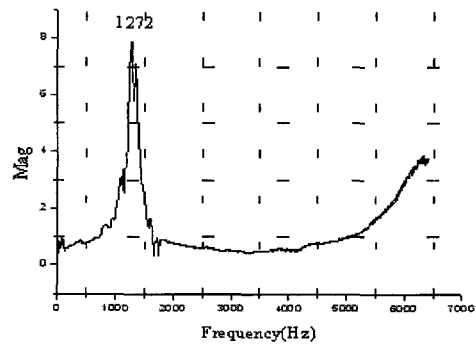


Fig. 8 Modal testing for 6th-shaf

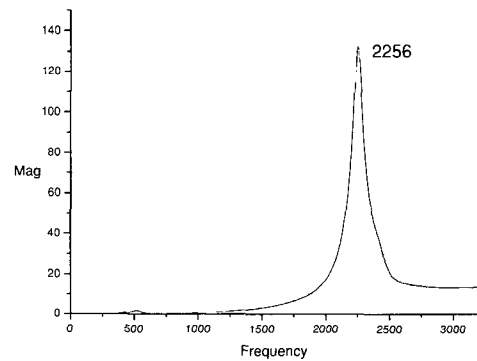


Fig. 9 Modal testing for cap

의한 1X, 2X성분이 구조 공진에 의해 증폭되고 최대 운전속도에서 축계 시스템과의 공진에 의해 증폭되고 있다.

시스템을 구성하는 부품의 축방향 강성을 증가시키는 방법을 적용하여 시스템의 고유진동수를 가진 성분보다 높게 설계하여야 한다.

4. 결 론

본 연구에서 실험적인 방법을 이용하여 산업용 로봇에서 발생하는 소음을 원인별로 규명하고 저감하는 것을 목적으로 신호분석 실험과 시스템 분석 실험을 실시 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

(1) 산업용 로봇은 손목부에 해당하는 5축과 6 축에서 가장 높은 소음을 발생하고 부하가 증가할수록 5, 6축을 구성하는 내부 동력전달계에 하중이 가해져 소음 레벨이 무부하 운전보다 5 dB~7 dB 정도 증가한다.

(2) 로봇 손목부의 5축에서 발생하는 소음은 기어 물림주파수와 베어링, 스프링으로 구성된 축계 시스템과의 공진으로 인하여 90 % 운전속도에서 가장 높은 소음을 방사한다.

(3) 로봇 손목부의 6 축에서 발생하는 소음은 90 % 운전속도에서 외부 하우징과의 공진이 발생하고 최대 운전속도에서 축계시스템과 공진이 발생하여 높은 소음을 방사한다.

(4) 산업용 로봇의 소음과 진동을 저감하기 위하여 문제가 발생하는 기어 물림주파수 성분과 축계 시스템의 고유진동수를 회피할 수 있는 설계 변경을 하여야 한다.

(5) 설계 개선 방향으로 기어의 잇수를 변경하여 가진 성분을 낮추는 방법과 베어링 및 스프링 등 시

참 고 문 헌

(1) Özgüven, H. N. and Houser, D. R., 1988, "Mathematica Models Used in Gear Dynamics-A Review," Journal of Sound and Vibration, Vol. 121, No.3, pp. 383~411.

(2) 박찬일, 이장무, 1996, "치형오차를 가진 헬리컬 기어의 진동특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집(A), 제 20 권, 제 5 호, pp. 1534~1542.

(3) Park, C.I. and Lee, J.M. 1996, "Vibration Transmission Characteristics of Helical Gear System with Lead Error," ASME International Mechanical Engineering Congress, Georgia, Atlanta USA, pp. 109~116.

(4) 박찬일, Karl Grosh, 1998, "축방향력에 의한 축 플레이트계의 방사 소음," 한국소음진동학회논문집, 제 8 권, 제 5 호, pp. 908~913.

(5) 최창완, 임상규, 1999, "자동차 조향 유압 시스템의 주파수분석 및 음향인텐시티 측정을 통한 소음원 분석에 관한 연구," 한국소음진동공학학회논문집, 제 9 권, 제 4 호, pp. 761~768.

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