

산업용 로봇의 기어소음 특성 고찰 Identification of Gear Noise for Industrial Robots

김동해*·이종문**

Dong-Hae Kim, Jong-Moon Lee

Key Words : Robot(로봇), Gear Noise(기어소음), Signal Processing (신호처리), Sound Quality

ABSTRACT

An industrial robot noise has various noise sources such as gears, motors, bearings, and controller fans. Among these, gears are the most dominant source for noise. The gear noise, caused by tooth profile, elastic deformation, machining error and wear, is directly correlated with the transmission error of mating gear. Due to the fact that has several axis and many gears, it is difficult to understand the characteristics of the vibration and noise of robots. In this study, some advanced analysis techniques based on digital signal processing such as power spectrum, time spectral map, RPM map, and etc., were applied for locating the dominant frequency components of the robot noises and identifying their sources. In addition, sound quality analysis was performed in order to evaluate the operator's annoyance. The noise and vibration measurements were carried out at several points during the operation of each axis considering the effect of load and posture of the robot. Based on the results, proper countermeasures to reduce excessive noise level have been suggested considering the characteristics of sources.

1. 서론

산업용 로봇의 작동은 모터의 회전이 각 회전축을 구성하고 있는 여러 가지 기어를 통해 다수의 회전축에 전달되어 이루어지게 되며, 작동 시 소음은 이들 기어나 베어링 등에서 발생하는 기계적 소음과 모터 등에서 발생하는 소음, 그리고 이 두 성분의 부적합 (mismatching)에 의한 소음 등으로 구성되어 있다. 이중 기어에 의한 기계적 소음은 여타의 다른 소음원에서 발생하는 소음의 크기보다 더 큰 값을 가지며 전체 소음도에 있어서 지배적인 소음원이 된다. 따라서 저소음 고품질의 모델을 생산하기 위해서는 기어로부터 발생하는 소음 수준을 저감시킬 필요가 있으며 이와 관련하여 기어의 가공정밀도를 높이거나 기어의 종류를 바꾸는 방법과 같은 여러 가지 제어 기법들을 사용하게 된다⁽¹⁾. 그러나 각 축을 구성하고 있는 기어의 개수가 많게는 10 개 이상이 되므로 모든 기어를 수정하는 것은 경제성 측면에서 문제가 있다고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 비정상 신호 (non-stationary signal)인 로봇 소음 특성을 파악하기

위하여 다양한 신호처리 기법(power spectrum, RPM spectral map, spectrogram 등)을 이용하여 분석을 시도하였으며, 작업자의 소음에 대한 느낌을 평가하기 위하여 sound quality 해석도 수행하였다. 이를 위하여 하나의 회전축만을 구동시켰을 경우, 각각의 회전축에 대한 작동 부하별, 자세별 소음 및 진동을 계측하고 이를 분석하였으며 각 축의 회전시 발생하는 소음 특성을 확인하였다⁽²⁾.

2. 로봇의 진동소음 계측

본 연구에서는 가반중량 150 kg 급 6 축 수직 다관절 산업용 로봇의 소음과 진동 특성을 살펴보기 위하여 근접장에서의 소음과 로봇 표면에서의 진동 및 소음을 계측하였다. 계측한 로봇들의 경우, 6 축 운동을 하지만 계측과 분석의 편의, 기어 요소의 전반적인 소음 기여도를 파악하기 위하여서는 하나의 축만 구동하는 상태에서 계측을 수행할 필요가 있었으며 특정한 자세로 로봇을 고정시킨 뒤, 한 축만을 회전시키는 방법을 사용하였다. 계측을 위하여 1 개의 마이크로폰은 작업자에 미치는 소음영향을 파악하기 위하여 로봇 회전축에서 3 m 떨어진 위치에서 계측을 실시하였고 2 개의 마이크로폰과 6 개의 가속도계를 각축의 기어

* 현대중공업㈜ 선박해양연구소
E-mail : dhk@hhi.co.kr
Tel : (052) 230-5558, Fax : (052) 230-5495

** 현대중공업㈜ 선박해양연구소

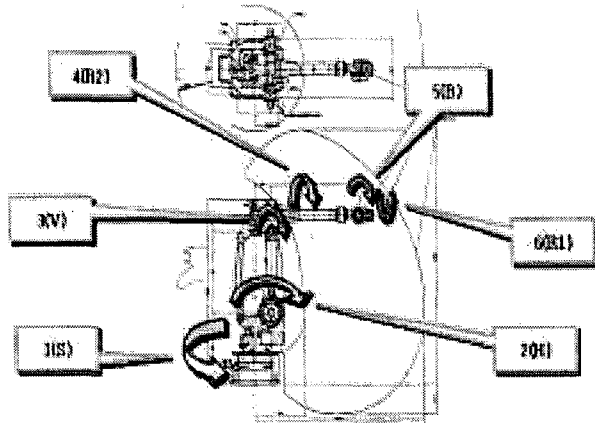


Figure 1: 6-axis industrial robot

박스 주위에 설치하였다. 시험장의 여건상 encoder 신호는 계측하지 못하였다.

계측에 사용된 가속도계는 charge 형으로 charge amp 를 통해 분석기에 연결되며 마이크로 폰은 power supply 를 지나 분석기에 연결된다. 소음계로부터의 신호는 직접 연결을 통해 분석기로 들어가도록 연결하였다. 위와 같이 센서를 설치한 후, 계측된 자료는 실시간 주파수 분석기로 분석하는 동시에 digital tape recorder 에 신호를 저장하여 실험실에서 분석할 수 있도록 하였다.

3. 로봇의 진동소음 특성파악

3.1 1차원 주파수 영역 해석

주파수 영역해석(Frequency domain analysis)에서 가장 많이 사용되는 기법은 spectral analysis 이지만 해석하고자 하는 신호의 특성에 대한 검토가 선행되어야 한다.

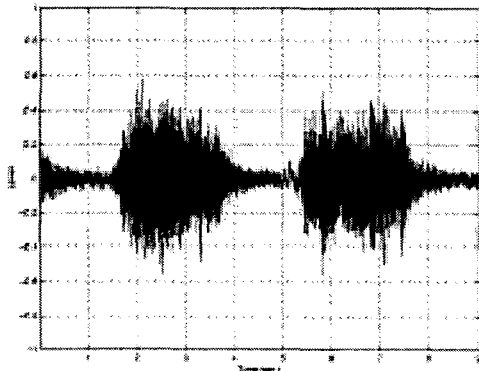


Figure 2: Time signal of S(1) axis

대상 로봇의 진동 소음 신호의 경우는 감가속 운동을 계속하므로 Figure 2 에서 보는 바와 같이 stationary 로 볼 수 없지만 비교적 등속운동을 하는 구간만 고려한다면 stationary 로 가정할 수 있다.

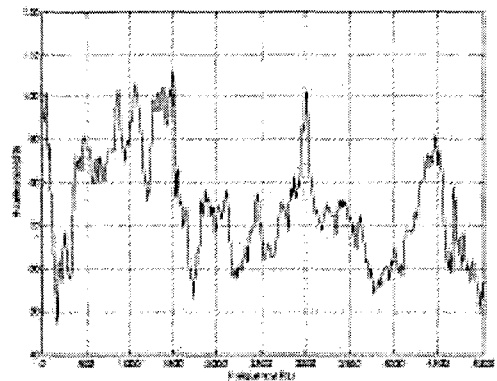


Figure 3: Vibration spectrum of S(1) axis

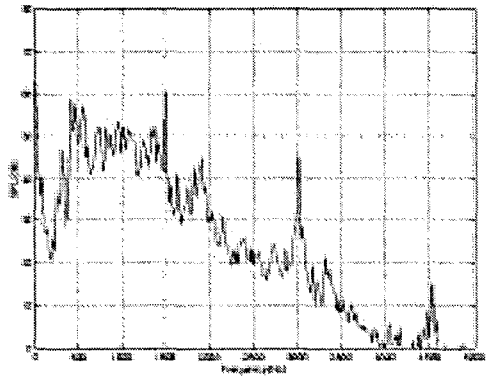


Figure 4: Noise spectrum of S(1) axis

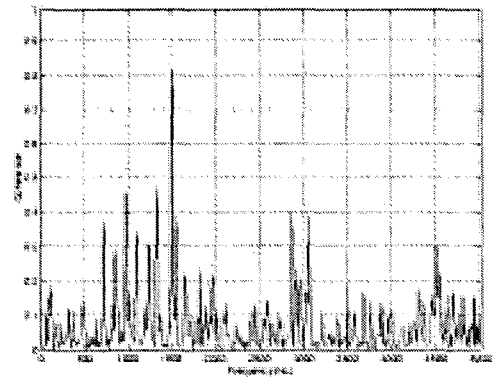


Figure 5: Coherence function of S(1) axis

또한 진동과 소음신호의 연관성을 보기 위하여 Figure 3, 4, 5 와 같이 진동 및 소음 spectrum 과 coherence function 을 구하였다. 계측결과를 보면 진동소음의 spectrum 이 매우 유사함을 알 수 있으며, 1 차 성분 gear meshing frequency (GMF)에서의 coherence 는 1 에 근접하며 그 외 대부분의 peak 에서도 coherence 가 매우 크다는 것을 확인할 수 있다. 또한 각 peak 들은 그에 대응하는 GMF 의 조화성분들임을 알 수 있다.

3.2 2차원 주파수 영역 해석

일반적으로, RPM spectral map 은 등간격으로 변화하는 모터의 회전속도에 따른 spectrum 의 변화를 2 차원 또는 3 차원으로 나타낸 것을 말하는데, 가로축은 주파수를 나타내고 수직축은 모터 회전수를 나타내고 있다.

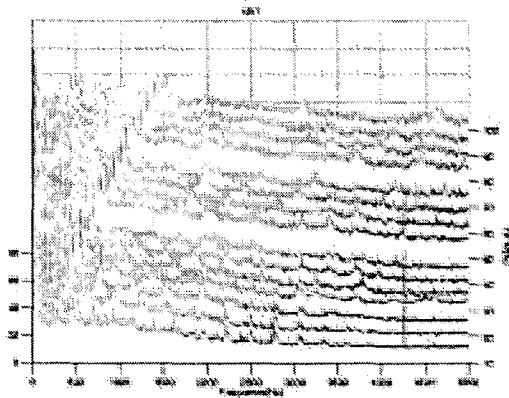


Figure 6: RPM-spectral map of noise

Figure 6 과 7 에는 모터 회전수를 10%부터 100%까지 5% 등간격으로 변화시키면서 진동과 소음의 spectrum 을 보여주고 있다. 기어 소음의 특성 주파수는 spectrum 만으로 확인하는 것은 어렵고 waterfall 도표를 같이 분석하여야 한다. Waterfall 선도를 보면 속도 비율의 증가에 따라 점차 증가하는 기어의 차수 (order) 성분과 속도에 관계없이 항상 일정한 peak 로 분리가 된다. Figure 6 과 7 의 결과를 보면 각 기어의 GMF 에 해당되는 차수 성분들이 속도 증가에 따라 잘 나타나고 있으며, 중심 되는 차수는 기어의 1 차 성분이고 2 차 성분까지 약하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 또한 속도에 따라 변하지 않는 성분은 공진에 의한 영향이거나 배경소음에 의한 영향으로 볼 수 있는데, Figure 6 과 7 을 살펴보면 420 Hz 에서 공히 peak 가 잘 나타나고 있으므로 공진에 의한 것으로 판단할 수 있다. 만일 진동 spectral map 에서 peak 가 보이지 않는다면 배경소음에 의한 영향으로 판단할 수 있다.

3.3 시간-주파수 영역 해석

로봇의 주축(S 축)에 대하여 좌우 회전을 반복시키면서 계측을 수행하였기 때문에 Figure 2 에서 보는 바와 같이 감, 가속 부분과 정속도 구간이 있으므로 전구간을 분석하기 위해서는 시간-주파수 영역 해석이 필요하다. Figure 8 에서 보는 바와 같이, Time-spectral map 은 시간의 변화에 따른 spectrum 의 변화를 가로축은 시간, 세로축을 주파수로 하여 3 차원으로 표현한 것이다. 좌우 회전에 따른 spectrum 양상이 약간 다르게 나타나고 있으며 GMF 성분의 변화를 알 수 있으며 공진주파수의 존재도 확인할 수 있다.

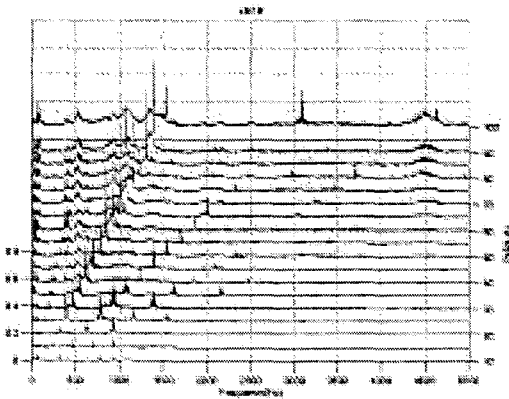


Figure 7: RPM-spectral map of vibration

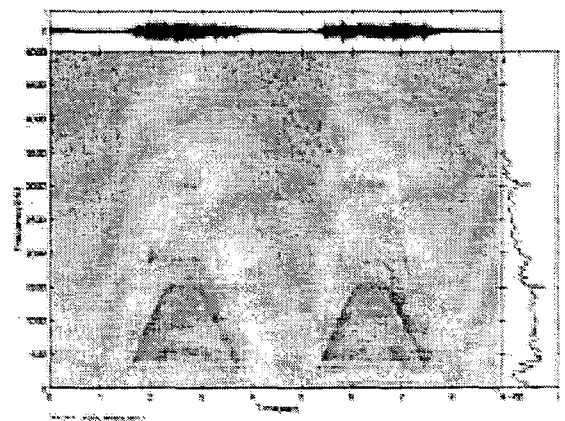


Figure 8: Time-spectral map of noise

4. 로봇소음의 평가

일반적으로 제품의 소음수준을 평가하기 위하여 dB(A) 수준을 측정하여 비교한다. 그러나 로봇소음의 경우 dB(A) 수준만을 상대 평가하여 비교하는 것은 작업자 및 구매자가 느끼는 소음의 정도와는 차이가 나게 된다. 로봇소음의 경우에는 기어소음의 영향으로 사람의 귀에 거슬리는 순음에 가까운 성분이 크게 나타나고 있어 이에 대한 고려가 필요하다. Figure 9 에는 로봇소음이 시간에 따라 변화가 심하므로 1(S)축의 회전에 대한 각 순간의 A-weighted octave analysis 를 수행한 결과를 보이며 1, 2, 4 kHz 밴드의 성분이 지배적임을 알 수 있다.

정확한 소음 평가를 위해서는 실제 작동중인 로봇에 대하여 녹음된 소음신호를 여러 사람들에게 들려주고 평가를 하여야 하지만 sound quality 해석에서 많이 사용되는 loudness 나 sharpness

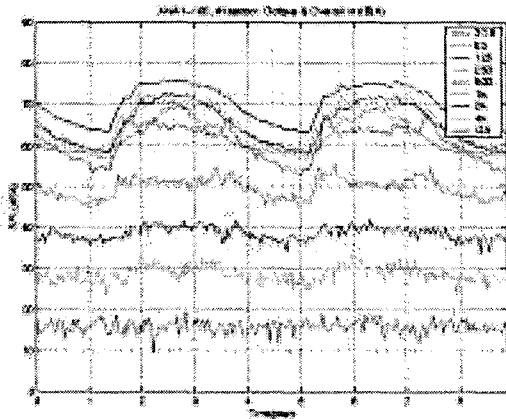


Figure 9: A-weighted octave analysis vs time

Table 1. Sound quality metrics for robot noise

Axis	1 (S)	2 (H)	3 (V)	4 (R2)	5 (B)	6 (R1)
SPL dB(A)	76	75	74	71	72	77
Loudness (sone)	36	39	41	31	32	41
Sharpness (acum)	1.03	1.10	0.99	0.96	1.33	1.82
Fluctuation Strength(vacil)	1.12	1.56	1.46	1.52	0.98	0.85
Roughness (asper)	0.15	0.19	0.15	0.13	0.13	0.17
Unbiased Annoyance(au)	141	178	177	124	131	201

등으로부터 계산된 unbiased annoyance 를 이용하여 간접적으로 평가할 수 있다⁽³⁾. 여기에서는 각 축만을 작동할 경우, 작업자 위치에서의 dB(A) 소음수준, loudness, sharpness, roughness, fluctuation strength 및 unbiased annoyance 를 계산하고, 그 결과를 Table 1 에 나타내었다. Table 1 에서 보는 바와 같이 1 축과 6 축의 경우에 dB(A) 수준은 1 dB 밖에 차이가 나지 않지만 sound quality 관점에서는 차이가 많이 나는 것을 확인할 수 있다. Sound quality 관점에서 6 축의 소음이 가장 거슬리는 것으로 나타나고 있으며 2 축과 3 축의 소음도 저감 대상인 것으로 판단된다.

5. 결론

산업용 로봇의 소음 특성 파악을 위한 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 시간영역과 주파수영역의 해석기법과 함께 시간-주파수영역에 대한 신호처리기법의 적용을 통하여 로봇의 진동/소음원에 대한 규명을 성공적으로 수행할 수 있었다.
2. 각각의 축만 구동하였을 경우, 가장 큰 소음 원인 기어의 소음 특성을 전체 소음수준과 기어의 개수에 근거하여 문제가 되는 축을 결정하였으며 그 축에서 가장 큰 소음을 방출하는 기어를 찾아내었다. 이들 기어에 대한 가공정밀도 및 설치정확도를 높이거나 헬리컬 기어로 교체하는 등의 기어에 대한 소음 저감 대책이 필요하다.
3. 로봇소음에 대한 sound quality 해석을 통하여 간접적으로 소음평가를 시도하였으며, 대상 로봇의 경우 6 축의 소음이 가장 거슬리고 2 축과 3 축의 소음도 거슬리는 소리로 계산되었다.

참고문헌

- (1) D. W. Dudley, *Dudley's Gear Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1991.
- (2) D. H. Kim and S. Y. Cho, "Identification of Noise for Four Different Industrial Robots", *HMRI's Technical Report (in Korean)*, 2002.
- (3) E. Zwicker and H. Fastl, *Psychoacoustics*, Springer-Verlag, 1990.