

진동신호를 이용한 LCD 반송로봇의 상태감시 파라미터 선정[§]

장준혁* · 정원영* · 이규호* · 정진태*[†]

* 한양대학교 기계공학과

Parameter Selection for Condition Monitoring of LCD Conveyance Robot by Using Vibration Signals

Jun Hyuk Jang^{*}, Wonyoung Jung^{*}, Kyu Ho Lee^{*} and Jintai Chung^{*†}

^{*} Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received May 24, 2011; Revised November 10, 2011; Accepted November 10, 2011)

Key Words : Condition Monitoring(상태감시), Conveyance Robot(반송로봇), Frequency Analysis(주파수 분석)

초록: 본 연구의 목적은 LCD 공정에서 사용되는 반송로봇의 상태감시 파라미터를 선정하고 이를 이용하여 상태감시 방법을 제안하는데 있다. LCD 반송로봇의 주행부 진동특성을 파악하기 위하여 주행부 감속기의 기어물림주파수(GMF)를 구하고, 주파수분석을 통해 이를 확인하였다. 취득데이터의 재연성을 확보하기 위하여 데이터 취득 운행 패턴을 선정하고 실험을 통해 재연성을 확인하였다. 무선데이터 취득 시스템을 구축하고 이를 이용하여 반송로봇의 상태를 감시하기 위한 기어물림 주파수를 중심으로 파라미터로 선정하였다. 취득된 데이터의 표준편차를 이용하는 상태감시 방법과 진폭의 배수를 이용하는 상태감시 방법을 제안하였다.

Abstract: The purpose of this study is to perform parameter selection and develop a method for the condition monitoring of an LCD conveyance robot. To determine the vibration characteristics of the driving part of the robot, the gear mesh frequency (GMF) of the speed-reducing gearbox is calculated and confirmed by frequency analysis. In order to ensure reproducibility of the measured data, an appropriate working pattern is selected and experiments are carried out. For condition monitoring of the robot, a wireless measurement system is constructed and used in parameter selection, with the GMF as the center. A method involving the use of the standard deviation of the measured data and another method involving the use of multiple value of amplitude are proposed.

1. 서론

최근 로봇 및 제어기술의 발전에 따라 제조공정의 자동화가 빠른 속도로 이루어지면서, 많은 제조업체들은 자동화 설비를 구축하여 생산성을 향상시키고 있다. 특히 다른 제조업 보다 더 생산성에 크게 영향을 받는 LCD 제조 회사들은 생산을 높이기 위하여 자동화 설비에 많은 투자를 하고 있다.

LCD 반송로봇은 LCD 제조공정의 자동화 장비로써 Fig. 1은 LCD 반송시스템의 개념도이다. Fig. 1에서 다수의 LCD 유리를 담아 두는 것을 카세트

(Cassette)라고 하며, 카세트를 임시로 보관하는 장소를 스토커(Stocker)라고 한다. 이 스토커에 저장된 카세트를 공정장비로 수납 및 취출하는 설비를 LCD 반송로봇이라 한다. LCD 반송로봇에 고장 및 결함이 발생할 경우 스토커에서 다음 공정으로 연결되는 포트(Port)로 카세트를 공급하지 못하기 때문에 생산을 진행할 수 없게 된다. 이처럼 생산을 저하로 직결되는 자동화 설비의 고장을 막기 위하여 설비의 유지 및 보수에 대한 관심 또한 높아지면서 고장을 진단하고, 미리 감지할 수 있는 상태감시에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

김도현 등⁽¹⁾은 양자화된 진동신호를 이용하여 베어링의 고장을 진단하는 기법을 제안하였으며, 최영철 등⁽²⁾은 베어링의 초기결함 검출방법을 제안하였다. 또한 김용민 등⁽³⁾은 전류신호를 이용하여 BLDC 모터의 고장진단 알고리즘을 개발하였으

[§] 이 논문은 2011년도 대한기계학회 동역학 및 제어부 문 춘계학술대회(2011.5.25-27, BEXCO) 발표논문임

[†] Corresponding Author, jchung@hanyang.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

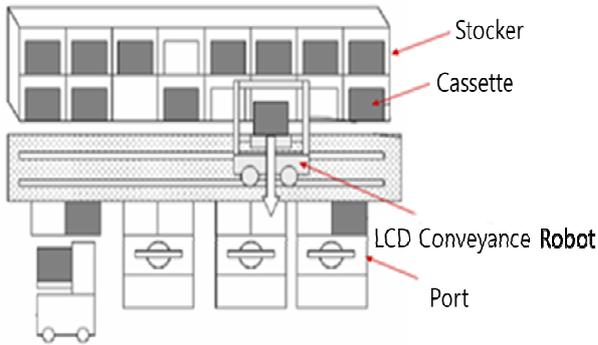


Fig. 1 Schematic diagram of LCD conveyance system

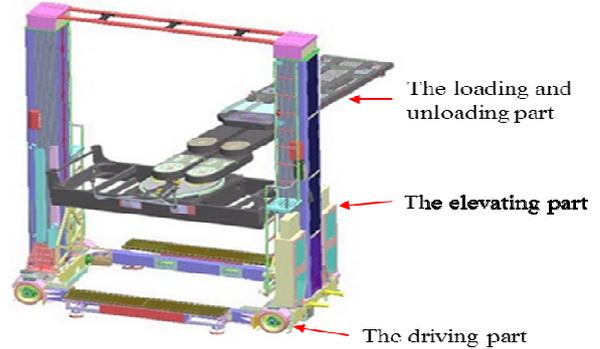


Fig. 2 Picture of LCD conveyance robot

며 박성태 등⁽⁴⁾은 웨이브렛 변환을 이용하여 기어 결함을 진단 할 수 있는 방법을 제시하였고, 이상권등⁽⁵⁾은 파워스펙트럼과 신경망회로를 이용한 기어박스의 결함진단 방법에 대하여 연구하였다. 이와 같이 베어링과 기어, 모터 등과 같은 기계부품의 상태감시 및 고장진단에 대한 연구는 많이 이루어지고 있다. 이러한 기계부품들뿐만 아니라 기계시스템의 상태감시와 고장진단에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 김영일 등⁽⁶⁾은 통계적 분석기법을 이용하여 선박 디젤기관의 고장진단 방법에 관한 연구를 수행하였으며, 천정환등⁽⁷⁾은 모터의 출력토크를 이용하여 핵연료교환기 브리지의 고장진단에 대한 연구를 수행하였다. 특히 이와 같이 기계시스템의 정지에 따른 경제적 손실이 큰 시스템에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

따라서 본 논문에서는 LCD 반송로봇 정지에 따른 경제적 손실을 최소화하기 위한 LCD 반송로봇의 감시 파라미터를 선정하고 이를 이용한 상태감시 방법에 대한 연구를 수행하였다.

2. LCD 반송로봇의 구조

Fig. 2는 LCD 반송로봇의 구조를 나타낸다. LCD 반송로봇은 주행부, 이재부, 승강부로 구성되어있다. 주행부는 모터로 바퀴를 회전시켜 주행하는 역할을 하며, 이재부는 로봇의 암(Arm)을 펼쳐 스토커에서 카세트를 추출하는 역할을 한다. 승강부는 스토커의 1 단에서 추출한 카세트를 2 단으로 이동하기 위하여 승강시키는 역할을 한다. 이 중에 고장빈도가 가장 높은 부분은 주행부로서 모터와 감속기로 구성되어있다. Fig. 3는 주행부 감속기의 개념도를 나타낸다. 감속기는 2 단으로 감속되며 1 단감속부는 유성기어감속, 2 단감속부는 베벨감속기어으로 구성되어있다. 1 단감속부의

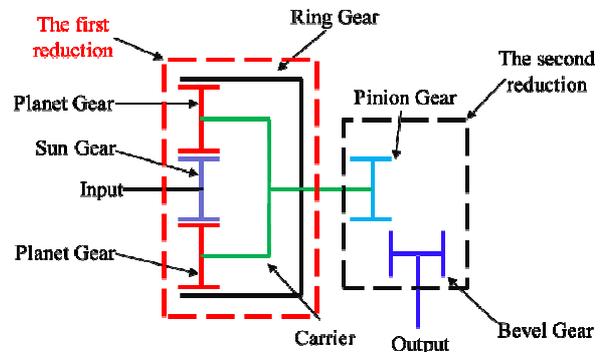


Fig. 3 Schematic diagram of the reducer

선기어(sun gear), 유성기어(planet gear), 링기어(ring gear)의 이수는 각각 36, 54, 144 개로 구성되어있다. 2 단감속부의 피니언 기어(pinion gear)와 베벨 기어(bevel gear)의 이수는 각각 10, 35 개로 이루어져 있다. 주행부 감속기의 전체감속비는 17.5:1 이다.

3. 주행부 감속기의 진동특성 분석

LCD 반송로봇 중 고장 빈도수가 가장 높은 주행부 감속기에 대한 진동특성을 분석하였다. 감속기는 기어 열로 구성되기 때문에 기어의 물림에 의해서 가진되며 이를 기어물림주파수(gear mesh frequency, GMF)로 나타낸다. 우선 주행부 감속기 1 단과 2 단에 대한 기어물림주파수를 각각 구하였다. 두 기어물림주파수의 이론 식은 다음과 같다.

$$GMF_1 = |(\omega_c - \omega_s)| N_s \tag{1}$$

$$GMF_2 = \omega_c N_{pi} \tag{2}$$

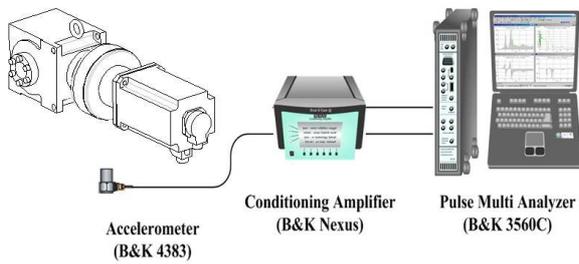


Fig. 4 Experimental setup for the analysis of the conveyance robot vibration

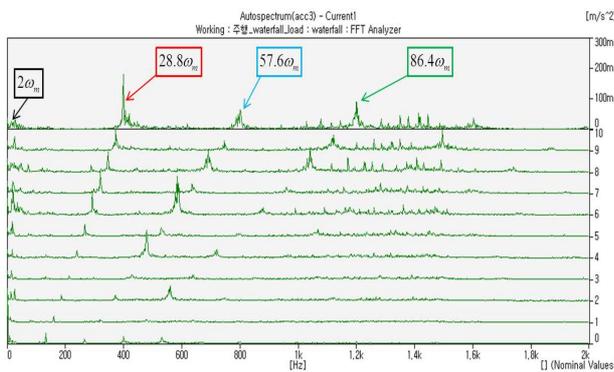


Fig. 5 Waterfall plot of vibration signal

여기서 GMF_1 와 GMF_2 은 각각 1 단감속부와 2 단감속부의 기어물림주파수를 나타내며 N_s , N_{pi} , ω_c , ω_s 는 순서대로 선기어(sun gear) 이수, 피니언 기어(pinion gear) 이수, 캐리어(carrier)의 회전속도, 선기어(sun gear)의 회전속도를 나타낸다. 감속기의 제원을 대입한 결과 1 단감속부와 2 단감속부의 기어물림주파수는 각각 $28.8\omega_m$ 과 $2\omega_m$ 이며 이를 확인하기 위하여 주행부 감속기에 대하여 실험을 수행하였다. 주행부 감속기의 전면부에 가속도계 (B&K 4383)를 부착하여 신호를 측정하였으며 주파수 분석은 주파수 분석기(B&K 3560C)를 이용하여 수행하였다. Fig. 4 는 개략적인 실험 장치도이다.

실험은 LCD 반송로봇의 운행속도를 25 m/min 에서 75 m/min 까지 5 m/min 의 간격으로 수행하였다. 또한 주파수 영역에서 모터의 속도를 기준으로 기어물림주파수를 확인하기 위하여 LCD 반송로봇 바퀴의 원주길기와 감속비를 이용하여 LCD 반송로봇의 속도에 대한 주행모터의 속도를 구하였다.

실험결과 주파수영역에서 1 단감속부의 기본 차수 성분인 $28.8\omega_m$ 과 그 배수성분, 그리고 2 단 감속부의 기본 차수 성분인 $2\omega_m$ 이 나타나는 것을 확인하였다. 이와 같은 방법으로 25 m/min 부터 75 m/min 까지의 푸리에 스펙트럼(Fourier spectrum)을

Table 1 Comparison between fixed pattern driving and variable pattern driving

	Fixed Pattern Driving		Variable Pattern Driving	
	RMS (m/s ²)	Variance	RMS (m/s ²)	Variance
1 st Speed reducer	1.56	0.00297	1.45	0.0253
2 nd Speed reducer	1.46	0.00270	1.48	0.0191
3 rd Speed reducer	1.57	0.00535	1.50	0.0175
4 th Speed reducer	2.02	0.00926	1.89	0.0647

쌓아서 Fig. 6 와 같이 Waterfall 선도 형태로 나타내고 이를 분석하였다. Waterfall 해석을 통해 25m/min 뿐만 아니라 모든 운행속도에서 기어물림 주파수의 기본 성분과 그의 차수성분을 확인 할 수 있었다.

4. 데이터 취득 조건 선정

진동신호의 경우 주변환경에 따라 매우 민감하게 변하므로 진동신호를 이용하여 시스템의 상태를 감시하기 위해서는 데이터 취득 환경을 일치시켜 실험의 재연성을 높이는 것이 중요하다. LCD 반송로봇의 상태감시를 위한 데이터 취득에 있어서 고려하여야 하는 요인으로는 로봇의 운행거리, 운행방향, 로봇의 카세트 유/무이다. 특히, 반송로봇의 운행속도는 고정되어 있으므로 운행거리가 짧을 경우 충분한 등속구간을 확보하지 못해서 정확한 푸리에 스펙트럼(Fourier spectrum)을 취득할 수 없기 때문에 충분히 긴 거리의 운행을 선정하여야 한다. 뿐만 아니라 LCD 반송로봇이 카세트를 적재하고 운행할 경우와 그 반대의 경우 진동량이 현저히 다르게 나타나므로 이를 구분해야 한다. Table 1 은 4 개의 감속기에 대하여 2 초이상의 등속구간을 갖는 모든 운행에 대한 진동과 운행방향, 거리, 카세트 유/무를 일치시킨 한가지 운행패턴에 대해 취득한 진동의 실효값과 분산(variance)비교한 것이다. 비교결과 운행패턴을 고정하고 취득한 데이터의 분산이 더 낮게 나타났다.

따라서 LCD 반송로봇의 총 운행 중 충분한 등속구간을 갖는 운행 중 운행빈도수가 가장 많은 운행패턴을 선정하여 데이터 취득 운행으로 선정하고 이를 레퍼런스 신호로 받아서 데이터 취득 운행이 일어날 경우에만 데이터를 취득함으로써

데이터간의 재연성을 확보하였다.

5. 무선데이터 취득 시스템 구축

카세트를 임시로 보관하는 장소인 스토커 (Stocker)의 총 길이는 짧게는 50m 에서 길게는 100m 로 규모가 크기 때문에 LCD 반송로봇에서 취득하는 진동신호를 관리자가 있는 곳까지 유선으로 연결하는 방법의 계측 시스템 구축에는 많은 문제점이 존재한다. 따라서 Fig. 6 과같이 무선 계측 시스템을 구축하였다. 가속도계는 ICP 타입을 사용하였으며 3.2kHz 까지의 주파수대역을 확인하고 주파수 왜곡을 막기 위해 나이퀴스트 이론 (Nyquist Theorem)을 적용하여 샘플링주파수를 8192Hz 로 적용하였다. 또한, 상태 감시를 위한 센서부착은 반영구적으로 부착 해야 하기 때문에 자석 베이스를 사용하였다. 무선 통신방법은 현재 가장 사용빈도가 많은 무선 랜 (wireless Lan)을 사용하였다.

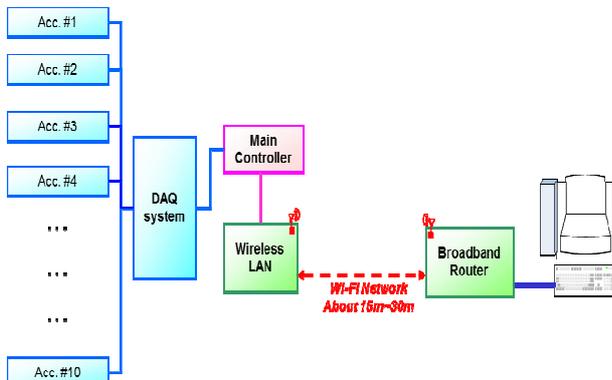


Fig. 6 Configuration of the wireless measurement system

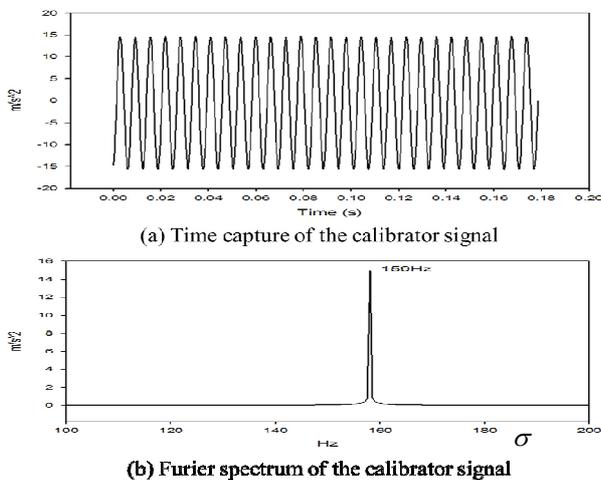


Fig. 7 Time capture and fourier spectrum of the calibrator signal

무선 랜 구축시 외부 간섭을 최소화하여야 한다. 사용 주파수 대역인 2.4GHz 와 5GHz 대역에 유사 주파수 대역이 있으면 간섭이 발생하기 때문에 이를 주의해야 한다. B&K 4294 가진기를 사용하여 무선데이터 취득 시스템을 검증하였으며 그 결과는 Fig. 7 에 나타내었다. 검증실험 결과 가속도의 실효값(RMS)는 10.3m/s², 주파수는 159Hz 로 가진기의 오차범위를 만족하였다

6. 상태감시 파라미터 선정

실제 양산 작업중인 LCD 반송로봇을 대상으로 실험을 수행하였다. Fig. 8 과 Fig. 9 는 각각 주행부 감속기에 대한 시간응답과 주파수 스펙트럼이다. Fig. 8 과 같은 시간응답의 경우 기어 열에서 발생하는 진동뿐만 아니라 모든 대역에서의 진동을 포함하므로 감시 파라미터에서 배제하고 주파수영역을 확인하였다. LCD 반송로봇의 실제 작업시 운행 속도는 150 m/min 으로 이때 모터의 회전속도는 27.86Hz 이다. 따라서 Fig. 9 에서 1 단감속부의 기어물림 주파수인 801Hz 와 2 단감속부 기어물림

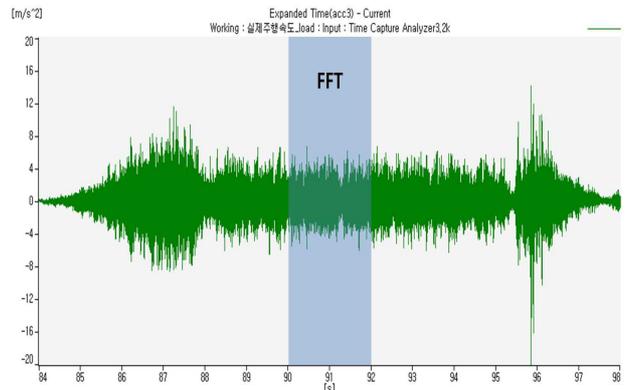


Fig. 8 Time capture of the LCD conveyance robot under actual working condition

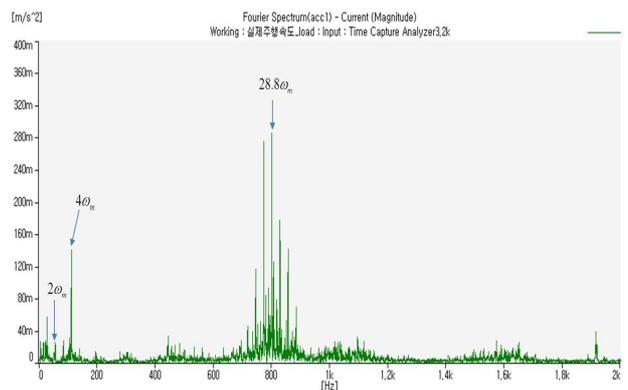


Fig. 9 Fourier spectrum of the LCD conveyance robot under actual working condition

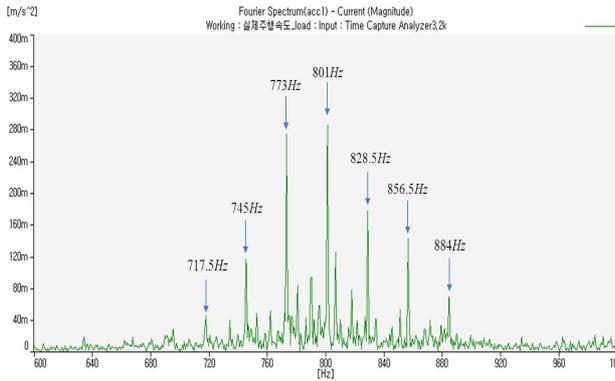


Fig. 10 Zoom in from 600Hz to 1000Hz of the Fourier spectrum of Acc. 1

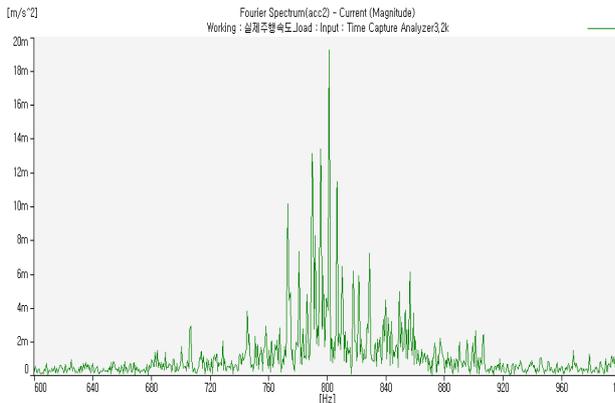


Fig. 11 Zoom in from 600Hz to 1000Hz of the Fourier spectrum of Acc. 2

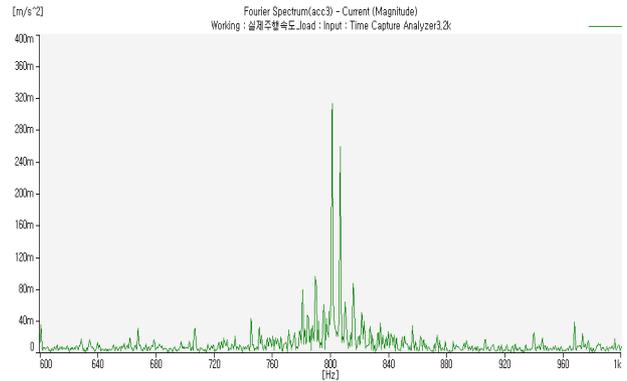


Fig. 12 Zoom in from 600Hz to 1000Hz of the Fourier spectrum of Acc. 3

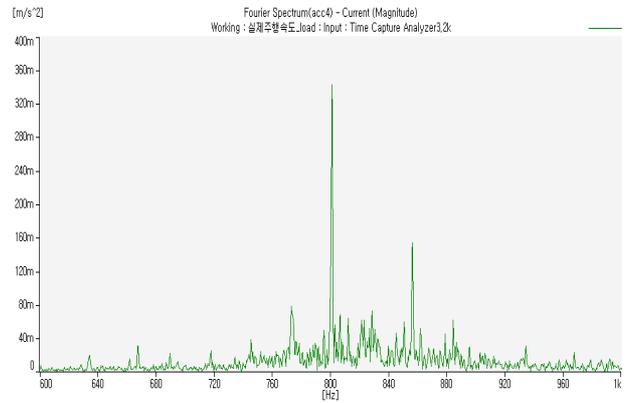


Fig. 13 Zoom in from 600Hz to 1000Hz of the Fourier spectrum of Acc. 4

주파수에 해당하는 55Hz 와 이들의 배수성분들이 나타났다. 뿐만 아니라 801Hz 를 중심으로 여러 개의 측대역(Side band)성분들이 나타났다. Fig. 10 은 Fig. 9 를 600Hz 부터 1000Hz 까지 확대한 그림이다. Fig. 10 에서 1 단감속부의 기어물림 주파수인 801Hz 와 모터의 회전주파수가 측대역 성분으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 같은 주행에 대하여 나머지 주행부 감속기 세 곳에서도 Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13 같이 레벨의 크기는 다르지만 같은 주파수를 갖는 값들을 확인하였다. 이는 기어 결함에 의해 발생하는 진동의 변화 중 맞물림 진동 성분과 관련된 것으로서 마멸, 피칭, 이의 손상 등의 결함 유형에 따라 기어 이의 주변에 강성 변화를 유발시키고 이에 따라 진폭 변조나 주파수 변조와 함께 측대역 성분들이 나타난다. 이러한 결함 특징을 이용하여 이상권⁽⁸⁾은 기어박스의 결함진단 및 결함형태 분류에 관한 연구를 수행하였다. 이러한 기존 연구와 같이 기어 이의 고장 특징인 기어물림 주파수를 중심으로 측대역 성분을 포함하는 밴드(Band)를 선정하고 밴드에 포함된 값들의

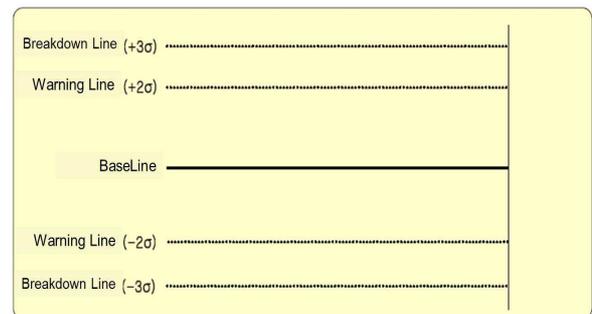


Fig. 14 Methods for condition monitoring of LCD Conveyance Robot

평균을 고장 감시 파라미터로 선정하였다.

7. 상태감시 방법 제안

본 연구대상과 같이 실제 제조공정에서 운행되고 있는 LCD 반송로봇의 경우 노후정도를 평가하기 어려울 뿐만 아니라 같은 사양의 LCD 반송로봇에서도 주변환경 등에 의해 진동경향이 상이하게 나타나므로 파라미터의 절대적인 값이 아닌 파

라미터 값의 상대적인 경향감시를 통해 상태를 감시하는 것이 일반적이다. LCD 반송로봇에 적절한 상태감시 시스템을 구축하기 위해서는 경향감시 제한선을 설정하는 것이 중요하다. 밴드의 진폭값을 이용하여 제한선을 설정하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫번째는 안정된 정상 상태에서 취득된 진폭값을 기준으로 진폭의 2 배 또는 3 배등으로 제한선을 설정하는 방법이다. 또 다른 방법은 Fig. 14 와 같이 정상 상태에서 일정기간 동안 취득된 데이터의 평균값을 기준으로 표준편차의 $\pm 2.5 \sim 3$ 배를 제한선으로 설정하는 방법이다.^(9,10) 이렇게 설정된 제한선을 기준으로 상태감시 시스템을 구축한 후 향후에 취득되는 데이터를 제한선과 비교하여 경향 관리를 실시하여 상태감시를 수행할 수 있다.

8. 결 론

이 연구는 LCD 제조공정에 사용되는 LCD 반송로봇의 주행부 감속기의 상태감시를 위한 파라미터를 선정하는 것이 목적이다. 실험을 통해 주행부 감속기에 대한 특성을 계측하였으며 이로부터 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

(1) LCD 반송로봇의 경우 운행에 따라 실험값이 매우 민감하게 변하므로 모든 운행에 대해 감시하기 보다는 데이터 취득 운영을 선정하고 이 운행만을 감시함으로써 재연성을 확보하는 것이 중요하다.

(2) 기어 열로 구성되어 있는 감속기의 경우 기어물림 주파수 뿐만 아니라 이를 중심으로 모터의 회전속도에 해당하는 측대역 주파수가 나타나므로 이를 포함하는 파라미터를 선정하였다.

(3) 경향감시를 위하여 파라미터 값의 배수를 적용하여 제한선을 설정하는 방법과 파라미터 값의 평균값과 표준편차를 이용하여 제한선을 설정하는 방법을 제안하고, 이를 이용하여 경향 관리를 실시하여 상태감시를 수행할 수 있는 방법을 제안하였다.

후 기

본 연구는 2011 년도 2 단계 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었으며, 중소기업청(S1074488) 지원으로 수행하는 기술혁신개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Kim, D. H. and Choi, Y. S., 2006, "Bearing Fault Diagnosis Using Automaton Through Quantization of Vibration Signals," *Transaction of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 495~502.
- (2) Choi, Y. C. and Kim, Y. H., 2000, "Early Detection of Faults in a Ball Bearing System," *Proceedings of the KSNVE fall conference*, pp. 1102~1107.
- (3) Kim, Y. M., Kwon, M. J., Lee, D. J. and Chun, M. G., 2008, "A Development of Fault Diagnosis Algorithm for BLDC Motor Using Component Analysis," *Proceedings of KISS fall conference*, Vol. 18, No. 2, pp. 216~219.
- (4) Park, S. T., Gim, J. W. and Yang, J., 2002, "The Detection of Gear Failures Using Wavelet Transform," *Proceedings of KSNVE fall conference*, pp. 784~787.
- (5) Kim, H. S. and Lee, S. K., 2002, "Bearing Fault Diagnostics in a Gearbox," *Proceedings of KSNVE fall conference*, pp. 611~616.
- (6) Kim, Y. I., Oh, H. K. and Yu, Y. H., 2006, "The Fault Diagnosis Method of Diesel Engines Using a Statistical Analysis Method," *Transaction of Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 247~252.
- (7) Cheon, J., Chai, J., Kim, T., Kim, Y., Hong, S. and Seo, U., 2001, "Development of a Diagnostic System for a Fuelling Machine," *Proceedings of the KSNVE spring conference*, pp. 596~602.
- (8) Lee, S. K., 2003, "Fault Detection and Damage Pattern Analysis of a Gearbox Using the Power Spectra Density and Artificial Neural Network," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 27, No. 4, pp. 537~543.
- (9) Yang, B. S., 2006, *Machinery Vibration Monitoring and Diagnosis*, Inter Vision, pp. 261~263.
- (10) Logan, K., 2003, "Prognostic Software Agents for Machinery Health Monitoring," *Proceedings of IEEE aerospace conference*, pp. 3213~3225.