

자동차 Power Seat 용 DC Motor의 소음 진동 자동 평가에 대한 연구 Automatic Measurement of Noise and Vibration for Power seat DC motor in the vehicle

한형석* · 정의봉** · 김진혁* · 송도훈*
H.S.Han, W.B.Jeong, G.H.Kim and D.H.Song

Key Words : Kurtosis, I.O.S., A_M (Current Monitoring Coefficient).

ABSTRACT

For the evaluation of the DC motor noise and vibration, usually it is rely on human feeling because some kinds of noise are not definitely represented by measurement instrument such as sound meter. But when we consider time signal of the noise and vibration, it is possible to represent them. And in this paper, it is suggested to study output current shape of the motor because it is the source to make speed and torque variation of the motor. If the current shape is not stable, it makes operating state of the motor unstable and produces noise and vibration. By analyzing signal at time and frequency of noise and vibration and current shape, it is possible to automation of the noise and vibration measurement in the production line.

1. 서론

최근 자동차의 소음, 진동에 대한 연구가 활발히 이루어지면서 이에 대한 규제가 계속 엄격해 지고 있다. 이러한 규제는 자동차의 동력부나 샤시부 뿐만 아니라 내부 편의 시설에까지 확대되어가고 있다. 특히 자동차 내의 각종 장치들에 DC 전동기 사용이 늘어나면서 이를 소음,진동원으로 보고 이들의 소음,진동값을 줄이기 위한 노력이 계속되고 있는 실정이다. 이 때문에 대부분의 모터 업체에서는 생산된 모든 제품에 대해서 소음 및 진동 검사를 수행하고 있다. 하지만 이들 생산량이 대량화되면서 제품의 소음 진동 평가를 수행하는 평가원의 업무가 과다해 지고 이 때문에 평가원의 평가 정확도가 떨어지게 되었다. 또한 음압 레벨은 높지 않지만 사람이 들었을 때 듣기 싫은 음을 내는 제품에 대한 평가를 수행해야 하므로 이러한 부정확성이 있음에도 불구하고 소음진동 평가 공정은 자동화하기가 어려운 실정이었다.

본 논문에서는 Power seat 용 DC Motor에 대해서 소음, 진동 특성을 주파수 및 시간 역에서 분석하고 이들 소음 진동 신호에 따른 이음(annoying noise)의 평가를 다루고자 하며 이들 진동 및 소음을 일으키는 전

자기력(Electro magnetic Force)의 Source인 전류 신호를 분석함으로써 이들의 평가를 다루고자 한다. 또한 이러한 분석을 토대로 평가 알고리즘을 만들고 이를 생산라인에 적용한 소음 진동 평가의 자동화 사례를 소개하고자 한다.

2. DC Motor의 소음 진동

일반적으로 자동차용 Seat actuator의 경우 그림 1과 같은 소형 Motor를 사용하며 주로 기어를 통해서 감속을 시킨다. 이러한 기어의 사용은 모터에서 발생하는 진동, 소음과 couple 되어 음압 및 진동을 불안정하게 하며 이 때문에 듣기 싫은 이음(annoying noise)을 일으키게 된다. 그림 2에서는 이러한 감속기형 DC motor에서 발생하는 소음의 대표적인 원인을 보여주고 있다.

본 논문에서는 그림 1과 같은 자동차용 Power Seat Lift Motor에 대해서 소음 진동 특성을 시간 및 주파수 역에서의 분석을 통하여 그림 2와 같은 대표적인 모터의 소음 진동을 평가하는 알고리즘을 적용하여 무인 자동 소음 진동 측정 장치를 개발하였다.

* 대우정밀 (주)

** 부산대학교 기계공학부

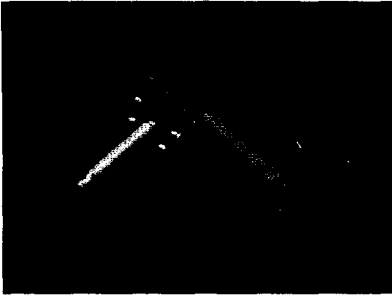
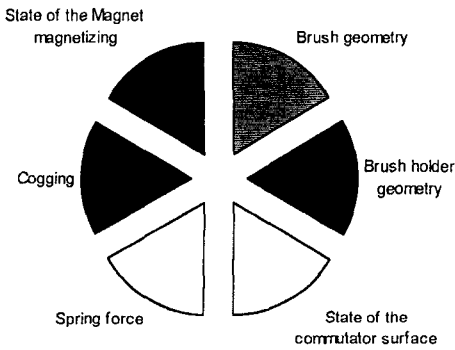
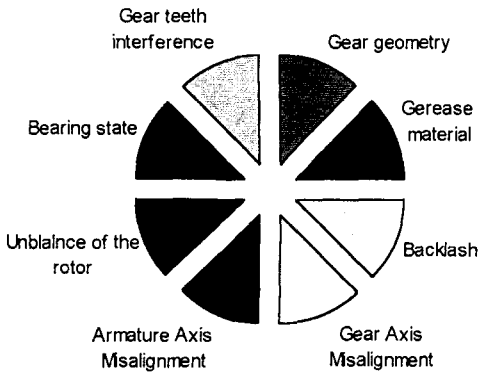


Fig 1. Power Seat Shift Motor



(a) Noise from Electrical cause



(b) Noise from Mechanical cause

Fig 1. Noise and Vibration of the DC Motor

2.1 DC Motor 소음 진동의 시간 분석

일반적으로 이음(annoying noise)을 동반한 Motor의 경우 시간에 대한 음압 및 진동의 변화

가 심하다. 흔히 사용하는 주파수 분석은 Averaging을 하기 때문에 이러한 변화를 보기가 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 이러한 신호에 대해서 Kurtosis 및 I.O.S(Integral of the output signal)를 도입함으로써 시간축에서 변화하는 진동, 소음에 대한 평가 기준으로 설정했다.

(1) Kurtosis Analysis

일반적으로 Kurtosis는 Impact 신호를 평가하는데 주로 사용되며 이는 식 1과 같다.

$$KURTOSIS = \sum \frac{(X - X_{MEAN})^4}{N\sigma^4} \quad (1)$$

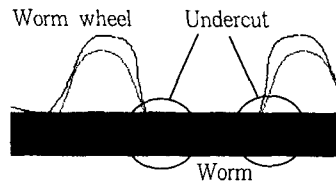
X = Input Signal

X_{MEAN} = Mean value of the time signal X

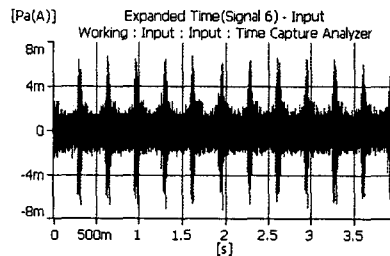
N = Total number of the Sampling Data

σ = Standard Deviation of X

이는 감속기의 기어간 치형 간섭이나 Armature Clearance등의 Impact signal에 의해서 발생하는 진동 및 소음을 평가한다. 플라스틱 기어의 경우 대부분이 사출 성형으로 만들어지므로 사출 시 수축과정에서 피치 원의 형상이 진원이 되지 않고 타원형상을 가지는 경우가 많다. 이 때문에 기어 회전시 기어의 피치 원 반경은 변화하게 되고 최대 피치 원에서 그림 2와 같이 언더컷을 일으키며 이음을 수반하는 경우가 많으며 이 경우 큰 값의 Kurtosis를 가지게 된다.



(a) Undercut between worm and worm wheel



(b) Time signal when undercut is happened (Kurtosis = 8.13)

Fig 2. Noise and vibration when undercut is happened

(2) Integral of the Output Signal(I.O.S) Analysis

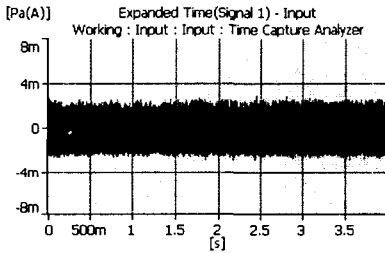
Kurtosis의 경우 Impact signal에 대해서는 평가가 가능하지만 Gear Misalignment와 같이(그림 3) 전체적으로 변하는 신호에 대해서는 평가하기가 힘들다. 그림 3의 신호에 대해서 Kurtosis를 구해보면 신호와 평균 신호간의 편차도 클 뿐더러 또한 표준 편차가 크기 때문에 Kurtosis는 낮게 나오게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 Gear 축의 Misalignment로부터 발생하는 신호의 Fluctuation 양을 측정하기 위해서 식 2와 같이 얻어진 Signal을 Normalizing 시키고 이들의 면적을 구하여 이를 평가 기준으로 정하였다.

$$I.O.S = \sum \sqrt{\frac{X^2}{X_{MAX}^2}} \times \Delta t \quad (2)$$

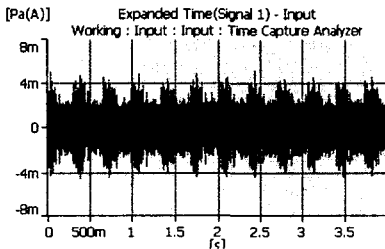
X = Output Signal

X_{MAX} = Maximum Input Signal

Δt = Sampling rate(Time interval)



(A) Good Sound Signal (Kurtosis = 2.58, I.O.S = 0.67)



(B) Bad Sound Signal (Kurtosis = 3.53, I.O.S = 0.38)

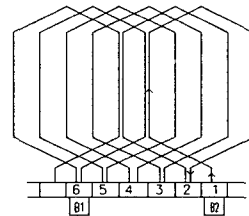
Fig 3. Good and Bad noise by gear misalignment

(3) Current monitoring

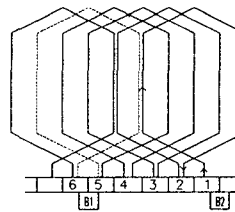
영구 자석형 Brush type DC Motor의 회전은 주어진 자계에 전류를 발생시켜 얻은 전자기력(Magnetic Motive Force)으로 회전력을 얻는다.

이러한 전류의 공급은 브러쉬(Brush)와 정류자(Commutator) 간의 Switching에 의해서 일어난다. 그림 4는 모터의 전기자(Armature)에 감은 코일의 형상을 도식적으로 나타낸 그림이다. 그림 4의 (A)의 경우 전류는 전기자(Armature) 코일(coil)을 따라 한 방향으로 흐르게 된다. 이때 이들 전류가 흐르는 코일과 자석 사이에는 힘이 작용하게 되고 전기자가 회전하여 정류자(Commutator)와 브러쉬(Brush)의 위치가 (B)와 같이 된다. 이때 5번 편(slot)과 6번 편 사이에 감겨져 있는 코일은 Short Circuit이 되고 이 회로(Blue Wire)에서 흐르는 전류는 +Ia 에서 -Ia로 변환되는데 이와 같은 일련의 Switching 과정을 정류(Commutation)라 한다.

일반적으로 이상적인 경우 모터에 흐르는 전류는 그림 5의 (a)와 같지만 실제로 Short circuit 내의 전류는 비 선형적으로 변하기 때문에 그림 5의 (a)와 같은 선형적인 형태가 아니라 그림 5의 (b)와 같은 비 선형적인 형상을 가지게 된다. 이러한 비 선형적인 형태는 브러쉬와 정류자편 사이에 Short Circuit이 형성되면 Lenz law에 따라서 이들 Circuit은 Inductive Circuit이 되어 역기전력이 발생하고 이러한 역기전력은 전류를 반대방향으로 흘려서 원래 전류의 흐름을 방해하기 때문에 그림 5의 (b)와 같이 형성되게 된다.

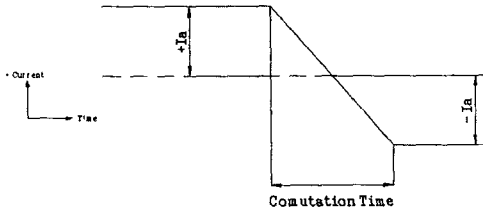


(a) Normal Circuit

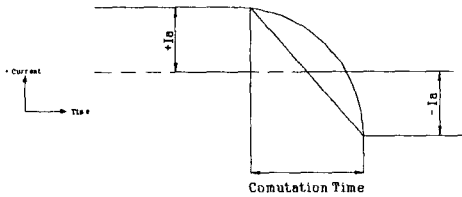


(b) Short Circuit

Fig.4. Armature Winding diagram (Simplex Lap winding)



(a) Ideal Commutation



(b) Actual Commutation

Fig. 5 Current in coil X

DC Motor의 경우 작동 중에 이러한 Short Circuit의 생성과 소멸을 반복하면서 전류의 전체적인 회로가 그림 5의 (a)와 (b)로 순차적으로 변화하기 때문에 전류의 형태는 10 slot, 2 pole Motor의 경우 회전주파수의 10배의 주기로 생성되게 된다. 모터에 발생하는 회전 토크는 식 3에서와 같이 전류에 비례하기 때문에 그림 5와 같은 정류 과정으로 모터의 회전력은 변하게 되고 이는 곧 진동 원인이 된다.

$$T = Fr$$

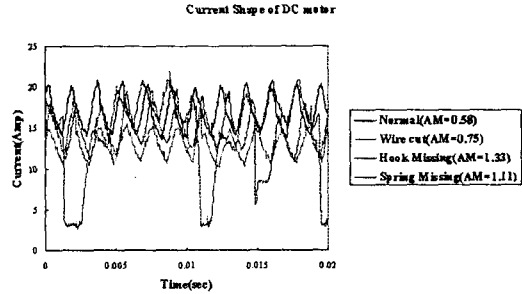
$$T = Blir = K_t \times I \quad (3)$$

K_t = Torque Constant(=Blir, N-m/A)
 B = Flux density of the field
 l = Length of the conductor
 i = Current through the conductor
 F = Total force
 T = Total Torque

따라서 이들 전류를 분석하는 것을 통해서 모터의 전계가 모터의 진동에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 그림 6은 대표적인 전류 파형의 불량을 보여주며 이는 식 4의 A_M (Ampere Monitoring Coefficient)에 의해서 판단이 가능하다.

$$A_M = \frac{(|CURRENT_{MAX} - CURRENT_{MIN}|)}{|CURRENT_{AVERAGE}|} \quad (4)$$

A_M : Current Monitoring Coefficient



$CURRENT_{MAX}$: Maximum Current for 0.5sec
 $CURRENT_{MIN}$: Minimum Current for 0.5sec
 $CURRENT_{AVERAGE}$: Average Current for 0.5sec

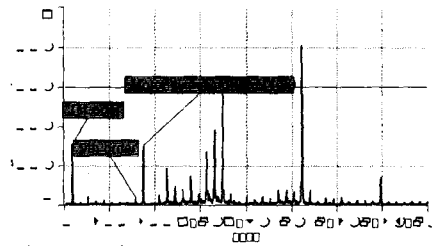
Fig 6. Current of the bad motor

2.2 DC Motor 소음 진동의 주파수 분석

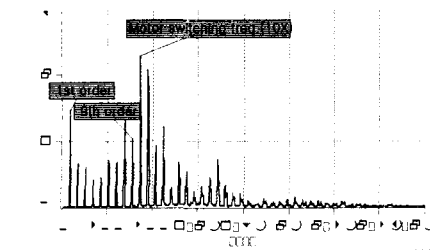
(1) 진동

본 논문에서 적용하고자 하는 Seat Motor의 기어 구조는 워프와 워프 기어이며 기어 비는 1:23이다. 1줄 워프를 사용하므로 기어의 Mesh Frequency는 rotor의 회전 주파수와 일치하므로 회전주파수(1X) 성분을 검출하여 기어 이의 상태를 파악하도록 하였다. 또한 회전 주파수의 경우 언밸런스의 평가 기준이므로 언밸런스에 의한 진동을 평가할 수 있다.

또한 rotor 및 기어축의 축 어긋남(Misalignment)에 의한 진동을 평가하기 위해서 회전 주파수의 9배 차수까지 측정하여 overall값을 평가 기준으로 삼았다. 그림 7은 이들 진동 특성에 따른 주파수 영역에서의 신호 형태를 보여주고 있다.



(a) Vibration of the Good Motor



(b) Vibration of the Bad Motor

Fig 7 Motor vibration at and frequency

(2) 소음

소음의 경우 음압 레벨(dBA)뿐만 아니라 등청감 곡선을 토대로 계산된 Loudness를 측정함으로써 같은 음압 레벨이라 할지라도 사람이 들었을 때 보다 거슬리는 음에 대해서 평가할 수 있도록 하였다.

3. 자동 소음 진동 장비

(1) 장비 구성

소음 진동 측정은 컨베이어를 통해서 무향실 내로 모터가 공급되고 소음실은 상하 개폐식으로 구성하였다. 마이크론은 모터에서 50cm 상단에 설치하고 가속도 센서(3축 센서)는 피아노 선에 걸쳐 장착시킴으로써 최대한 구속력을 받지 않도록 하였다. 그림 8은 자동 소음실의 내부와 가속도 센서 부착 방식을 보여주고 있다. 모터에 흐르는 전류는 Spectrum Analyzer에서 소음 진동 신호와 동시에 측정하여 Monitoring 하도록 하였다.

(2) 평가 알고리즘

소음 및 진동의 평가는 아래 항목에 대해서 이루어지며 평가 Flow chart는 그림9와 같다.

1) 소음

- Sound level(dBA)
- Loudness(phone)
- Kurtosis & I.O.S (3.2kHz low pass filter)

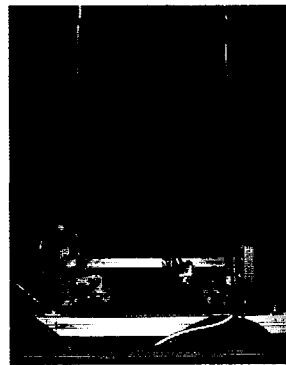
2) 진동(X, Y, Z 3축 가속도계)

- 회전 주파수 진동(1st order - 63Hz 1/3 octave)

- RMS from 1st order to 9th order
- Kurtosis and I.O.S (3.2kHz low pass filter).

3) 전류

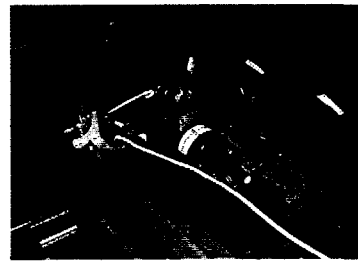
- A_M
- Current RMS value



(a) Acoustic chamber



(b) Location of the accelerometer



(c) DUT(Device Under Test)

Fig 8. Automatic noise and vibration test system

4. 결론

DC Motor에서 발생될 수 있는 소음 및 진동 특성을 파악하여 소음, 진동 및 전류 신호를 가지고 시간 및 주파수 분석을 통하여 작업자가 수행하던 소음, 진동 불량품 선별을 자동화 할 수 있었다. 또한 시간 분석 및 주파수 분석을 동시에 함으로써 음 및 진동의 절대적인 평가뿐만 아니라 시간에 따른 변화(Variation)를 측정할 수 있었으며 이를 통해서 사람이 들었을 때 기분 나쁜 음(annoying noise)에 대한 무인 평가가 가능하였다.

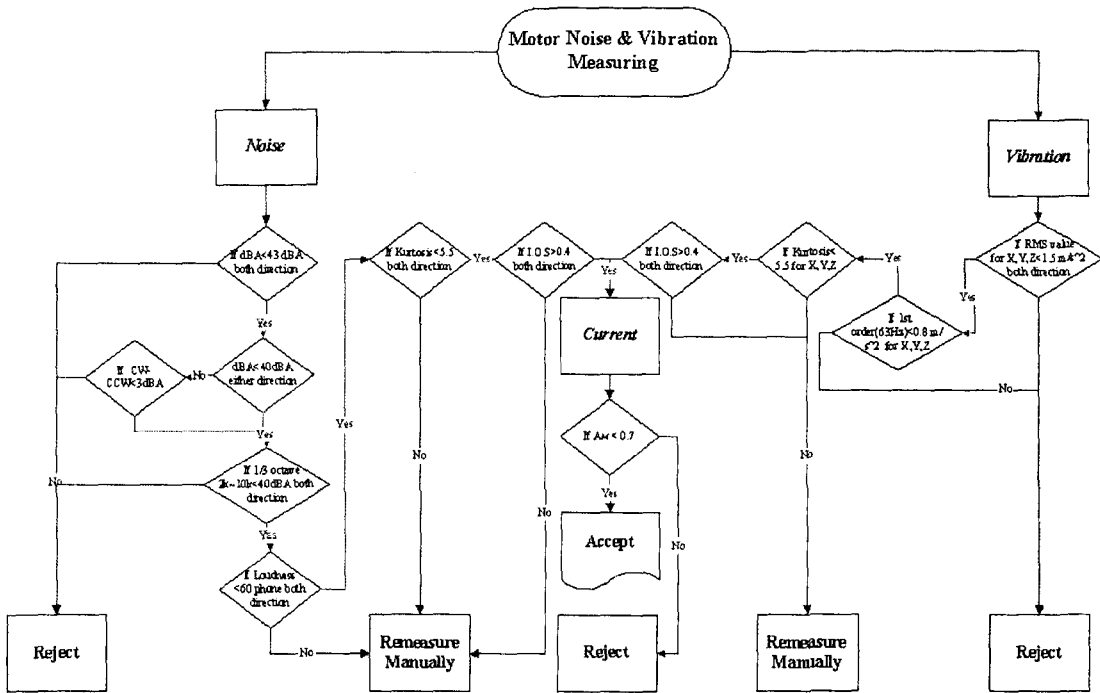


Fig 9. Flow chart of the Automatic Noise and Vibration Test System

참 고 문 헌

- (1) J.R. Hassall, M.Sc. and K. Zaveri, M.Phil., 1998, Acoustic Noise Measurement, Bruel and Kjaer Ltd..
- (2) James I. Taylor, 2000, The Gear Analysis Handbook, VCI Inc.
- (3) Jacek F. Gieras and Mitchell Wing, Permanent Magnet Motor Technology design and application, Marcel Dekker, Inc New York.
- (4) 大天洗佑, 2001, 페라이트 자석 회전기의 설계, 동아 출판사.
- (5) Don Richards and Darryll J. Pines, 2000, "The Effect of Tooth Damage on Spur Gear Vibration", Proceeding of SPIE vol.3985
- (6) Subhasis Nandi and Hamid A. Toliyat, 1999, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machine - A Review", IEEE
- (7) Tae-Jong Kim, Sang-Moon Hwang, and No-Gill Park, 2000, "Analysis of Vibration for Permanent Magnet Motors Considering Mechanical and Magnetic Coupling Effect", IEEE