

정밀연삭시 발생하는 채터진동 실시간 감시에 대한 연구

Study on the real time chatter detection method during the high accurate grinding process

김 인 웅† · 이 선 표* · 최 현**

InWoong Kim, SunPyo Lee, Hyun Choi

Key Words : Grinding, Bearing, Chatter, Resonance, Kurtosis, Detection

ABSTRACT

The chatter vibration in the machining process plays bad role in machining quality such as high roughness as well as tool life and machine failure. And the grinding process under this risk in the fully automated factory is exposed to the unexpected mass machining quality problem.

Studying the vibration signal of the hub bearing grinding process, the reason of chatter vibration was explained with the specific machining pattern of chatter. And this study suggests the chatter detecting method in the production line, which is monitoring the peak acceleration level around the natural frequencies of the specimen, and calculating kurtosis value by assuming the chatter is related to the resonance of the specimen. The suggested method was applied to the vehicle hub bearing grinding process and proved good to detecting the chatter induced machining quality problem.

1. 서 론

자동차 서스펜션의 주요 부품인 허브 베어링은 차의 무게와 외부 충격으로부터 차체를 지탱하고 구동시 바퀴축의 마찰을 최소한으로 줄여 바퀴의 회전을 원활하게 하는 역할을 한다. 허브 베어링은 자동차의 하중을 모두 받으며 고속으로 회전하기 때문에 고강도 재질로 제작되며, 마찰력을 최소화하기 위한 정밀연삭 가공공정이 이루어지는 부품이다. 주요 마찰 부위로는 바퀴축과 연결되는 내륜궤도, 서스펜션

에 고정되는 외륜궤도, 궤도 사이에서 회전운동을 하는 볼 등이 있고, 베어링 궤도면의 마찰력 증가시 회전피로파손이 발생하기 때문에 차량의 성능 및 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 베어링 궤도면을 매끄럽게 가공하기 위해 고속으로 회전하는 연삭숫돌을 이용한 연삭공정이 필요하며, 가공 치수의 정확도를 높이기 위해 수 마이크로미터 단위의 정밀제어가 요구되어 진다.

이러한 정밀연삭 가공시 다양한 원인으로 인하여 가공불량이 발생하게 되며, 그 원인으로는 연삭기 제어의 오류로 인한 치수불량, 소재 클램핑(clamping)이나 이송시 찍힘, 가공 중 공구 휠과 소재간의 상대진동이 원인이 되어 나타나는 궤도면 채터링(chattering) 불량 등이 있다. 이중 채터링 불량은 생산현장 작업자가 불량을 바로 인지하기 어려워 대량불량이 발생되기 쉽고 발생원인을 밝혀내

† 교신저자; 정회원, 시그널링크(주)
E-mail : iwkim@signallink.co.kr
Tel : 042-934-5082, Fax : 042-934-5083
* 경기대학교 기계공학부
** 시그널링크(주)

바로 조치하기도 어렵다. 채터진동은 가공 소재의 표면거칠기 상승으로 인한 품질에 심각한 악영향을 미치는 요소일 뿐만 아니라 슷돌손상에 의한 공구수명단축, 가공기계자체 손상 등을 유발시키는 인자이기도 하다.

본 연구는 차량용 허브 베어링 외륜 궤도면 정밀연삭시 발생하는 진동신호에 대한 시간영역 및 주파수 영역 분석을 수행하였으며 이를 토대로 연삭기내부에서 채터진동이 발생 할 수 있는 원인에 대한 고찰과 더불어 정밀연삭 가공라인에서의 실시간 채터진동 감지로 대량가공불량을 사전에 예방 할 수 있는 감시방안을 마련하였다.

2. 정밀연삭기 가공 특성

2.1 연삭공정 진동 특성

Fig.1은 차량용 허브베어링의 외륜 궤도를 연삭가공하는 연삭기 구성을 나타내며, 공구인 연삭스돌, 소재인 허브베어링 및 이를 고정하기 위한, 클램프 장치 등으로 구성되어 있다. 소재가 연삭기에 투입되면 클램프 장치가 소재를 고정하고 시계반대방향으로 저속 회전(300~600rpm)시키며, 연삭스돌은 시계방향으로 고속회전(14,000~24,000rpm)하며 소재 내경측 축방향으로 이동한다. 연삭스돌의 이동이 완료되면 소재의 대각선방향 이동이 시작되고 슷돌면과 소재 내경이 닿는 순간부터 연삭이 시작된다.



Fig.1 Schematics of grinding machine

정밀연삭 공정의 세부 작업으로는 황삭(rough grinding)과 사상(finish grinding)이 있으며 이를 한

번의 가공 사이클로 하여, 황삭은 궤도면을 12초간 150 μ m정도 많은 양을 연삭하고 사상은 5초간 10 μ m 정도를 정밀 연삭한다. 또한 2cycle 마다 연삭스돌 성능을 유지하기위한 드레싱(dressing) 작업으로 슷돌 표면의 무더진 입자를 제거하고 일정량의 새로운 슷돌 입자를 생성시킨다.

Fig.2는 정밀연삭기의 소재 클램핑 부위에 마그네틱을 사용하여 반경방향(radial direction)과 축방향(axial direction)으로 가속도센서를 부착하고 2개의 소재를 가공하였을 때 시간영역(time domain) 진동 가속도신호를 나타낸다. 첫 번째 소재는 투입 후 드레싱 7초의 과정을 거쳐 연삭 가공이 20초간 이루어져 33초의 사이클타임을 보이며, 두 번째 소재는 투입 후 드레싱 과정없이 연삭 가공 20초가 수행되어 26초의 사이클타임을 보이고 있다. 진동성분 중 붉은색으로 표시된 반경방향의 피크진동가속도가 약 60 m/s^2 이고, 파란색으로 표시된 축방향 피크진동가속도가 약 20 m/s^2 로 반경방향진동 크기가 약 3배 정도 크다는 것을 알 수 있고, 황삭구간에서 진동이 커졌다가 사상구간에서 진동이 작아지는 형태로 나타나고 있다.

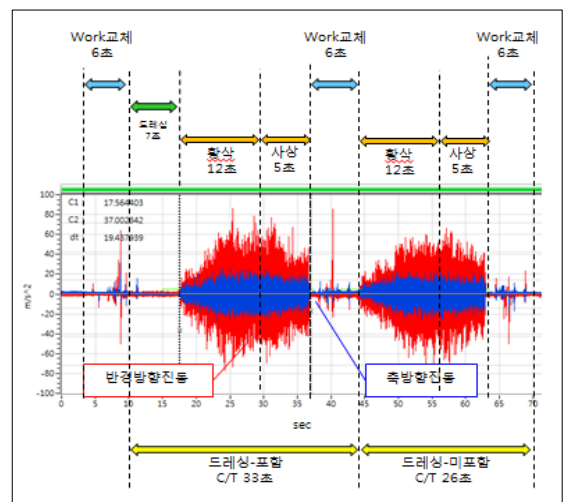


Fig.2 Acceleration signal of radial and axial direction in two cycle grinding process

Fig.3은 Fig.2의 황삭 초기 0~2sec 부분을 확대한 것으로서 연삭스돌이 궤도면에 닿는 힘이 증가함에 따라 진동크기가 점점 커지는 것을 볼 수 있으며 일정간격으로 맥동성분이 나타나고 있다. 이는

전동체의 공전주파수에 의해 진폭변조가 일어나는 경우로서 맥동간격은 0.165sec이고 회전수로 환산하면 약 360rpm이 된다. 이는 초기 언급했던 소재의 회전수와 일치하고 있다.

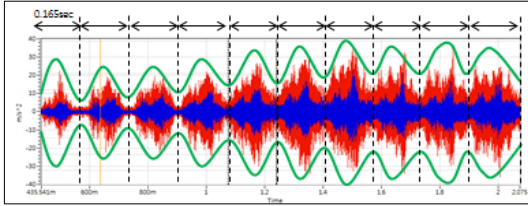


Fig.3 Pulsation wave pattern of work rotation

Fig.4는 위의 황삭 및 사상 가공구간을 주파수 분석한 결과이며 전체적인 성분을 나타내기 위해 dB스케일로 변환하여 표현하였다. 연삭숫돌 회전 속도는 14,400rpm으로 회전주파수는 240Hz이고, 황삭과 사상 두 구간 모두 회전주파수를 기준으로 배수(X)에 해당하는 조화성분(harmonics)들이 피크형태로 나타나고 있다. 진동 분석방법에 있어 회전성분에 대한 조화성분이 배수로 나타나는 경우는 베어링 마모(bearing wear), 공차초과(excessive clearance), 헐거움(looseness) 등이 있으며 이를 토대로 연삭가공시 채터진동에 대한 원인을 유추할 수 있다.

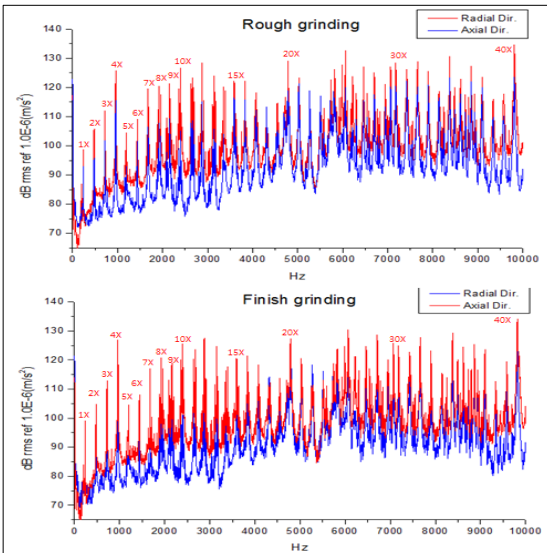


Fig.4 Acceleration frequency spectrum of grinding process

2.2 채터진동 원인 추정

베어링 외륜 궤도면의 연삭시 나타나는 진동의 특성으로 앞서와 같이 시간영역에서는 진폭변조에 따른 맥동성분과 주파수 영역에서는 회전주파수의 조화성분들이 주를 이루고 있음을 알 수 있었다.

시간영역에서의 맥동성분으로 채터진동의 발생 여부를 알 수 있게 하기 위하여 통계적 분석방법인 첨도(Kurtosis)도 적용할 수 있다. 첨도는 식(1)과 같이 정규분포 그래프가 얼마나 뾰족한지를 나타내는 지수이고, Fig.5와 같이 맥동성분의 진폭 Peak to Peak 값이 작아질수록 뾰족한 형태의 분산을 나타내고 Peak to Peak 값이 커질수록 넓은 형태의 분산을 나타내게 된다.

$$kurtosis = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^4}{(N-1)s^4} \quad (1)$$

여기서, \bar{Y} 는 평균, s 는 표준편차, N 은 데이터 수이다.

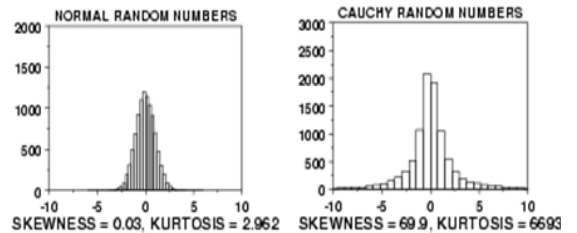


Fig.5 Kurtosis histogram

Fig.6은 연삭가공시 주요 요소에 대한 단순화된 1 자유도계 진동모델을 나타내며, 소재가 연삭기 내부에 투입되어 상하좌우 면이 고정되면 시계반대방향으로 저속 회전하게되고 연삭숫돌은 시계방향으로 소재 내부에서 고속 회전하게 된다. 이 진동 모델을 기초의 조화진동으로 인한 감쇠계의 응답으로 가정하여 $y(t)$ 를 연삭숫돌의 기초진동 변위라 하고 $x(t)$ 를 소재의 변위라고 하면 식(2)와 같은 운동방정식으로 정의할 수 있다.

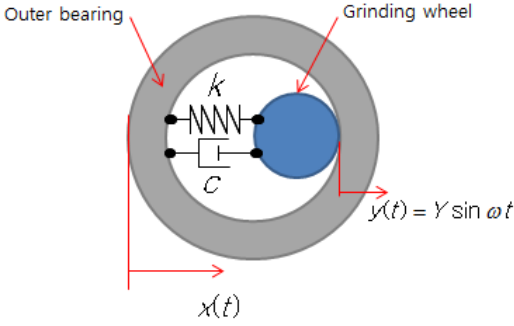


Fig.6 Single DOF vibrational model of grinding part

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = -m\ddot{y} \quad (2)$$

여기서 $z = x - y$ 로 하고 $y(t) = Y \sin \omega t$ 를 적용하면 식(3)과 같다.

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = m\omega^2 Y \sin \omega t \quad (3)$$

식(3)의 정상상태 해는 식(4)과 같고,

$$z(t) = \frac{m\omega^2 Y \sin(\omega t - \psi)}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} = Z \sin(\omega t - \psi_1) \quad (4)$$

여기서 진동수비를 $r = \omega/\omega_n$, $\zeta = c/c_c$ 로 하고 $z(t)$ 의 진폭 Z 를 구하면 식(5)와 같다.

$$Z = Y \frac{r^2}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (5)$$

식(5)에서 Fig.7과 같이 $r = 1$ 인 경우는 공진(resonance)의 영향으로 동적응답비 Z/Y 는 급격히 커지게 되고, $r > \sqrt{2}$ 인 경우 동적응답은 작아지게 된다. 연삭시 연삭숫돌의 회전주파수 240Hz를 가진 주파수 ω 로 하고, 소재의 고유진동수 ω_n 를 구하여 동적응답에 의한 체터진동 발생여부를 검출할 수 있도록 적용하였다.

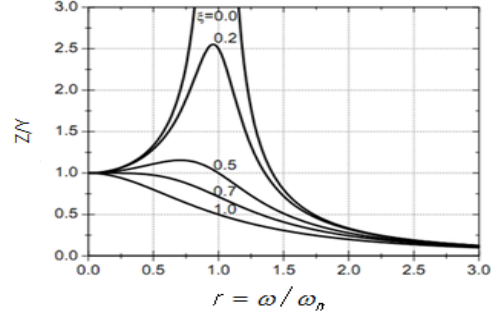


Fig.7 Dynamic Amplification factor of frequency ratio

3. 실험결과

3.1 주파수응답 특성 실험

연삭소재의 공진주파수 측정을 위해 Fig.8과 같이 원주방향과 축방향으로 주파수응답(Frequency response function) 실험을 하였다. 가속도센서를 소재에 마그네틱으로 부착하고 충격해머(Impact Hammer)로 가격하여 5회 평균으로 측정하였다.

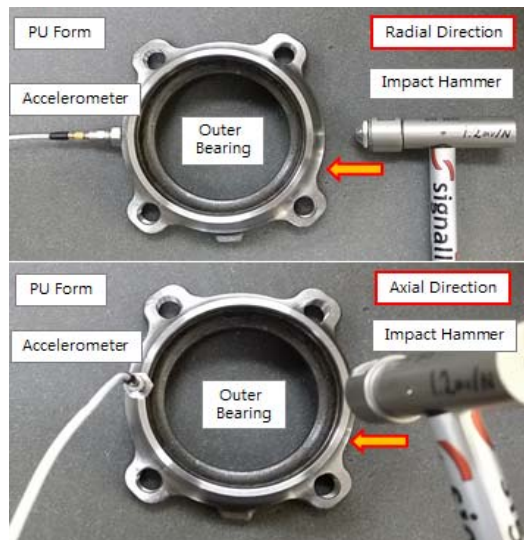


Fig.8 Impact hammer test of the hub housing specimen

측정결과 Fig.9와 같이 원주방향에서는 4,117Hz에서 명확한 1차 고유진동수가 측정되었고, 5,221Hz에서는 작은 2차 고유진동수가 측정되었다. 축방향

에서도 마찬가지로 4,125Hz와 5,286Hz에서 고유진동수가 측정되었고 5,286Hz성분이 약간 더 크게 측정되었다.

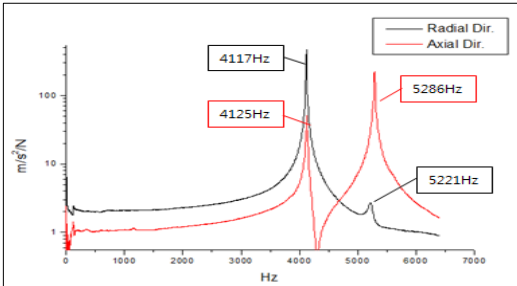


Fig.9 Frequency response function of the impact hammer test

3.2 채터진동 검출방안

채터진동을 검출하기위한 방안으로 앞서 언급했던 바와 같이 시간영역에서는 침도를 적용하여 맥동성분에 대한 검출을 설정하였고, 주파수 영역에서는 FRF 실험을 통한 공진발생가능 주파수에 $\pm 500\text{Hz}$ 대역을 설정하여 Table.1과 같이 설정하였다.

Table.1 Frequency range setting

	Start Frequency	Stop Frequency	Code
1st Resonance frequency	3,500	4,500	Peak
2nd Resonance frequency	4,700	5,700	Peak

위와같은 검출방안 설정 후 실제 생산라인에서 가동되고 있는 허브베어링 외륜 연삭기에 적용하였다. 채터진동은 인위적으로 발생시키기 어렵고 정확한 원인을 알 수 없을뿐더러 발생하는 시점도 알 수 없기 때문에 약 7일간 데이터를 수집하였다.

3.3 실험결과

Fig.10은 시간영역에서 설정한 침도 값에 대한 시간별 데이터이다. 측정기간은 2013년 8월 13일부터 21일 까지이며 이중 8/21일 오전 7시 37분경 특별히 큰 값을 나타내는 데이터가 검출되었다. 이 데이터와 정상적으로 측정된 시간영역 데이터를 비교하여 Fig.11에 나타내었고 예측했던 바와 같이 맥동성분이 크게 나타나, 계산된 침도 값도 일반적인 데이터보다 약 2.6배가량 높게 측정되었다.

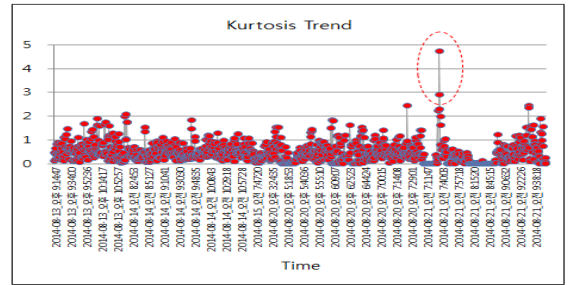


Fig.10 Kurtosis trend

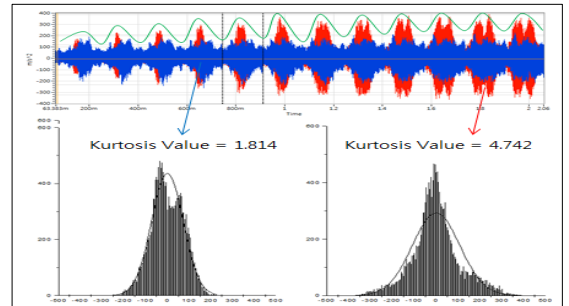


Fig.11 Pulsation wave and kurtosis histogram

Fig.12는 주파수영역에서 설정한 범위내의 Peak 값에 대한 시간별 데이터이다. 시간영역 데이터와 마찬가지로 8월 21일 오전 7시 37분경 특별히 큰 값이 측정되었다.

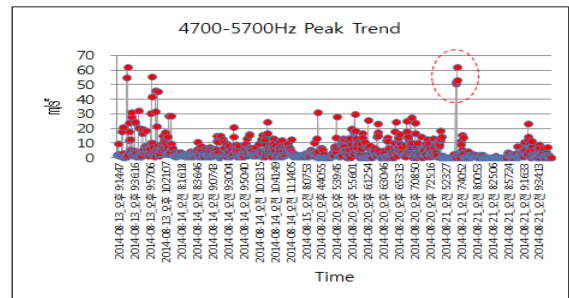
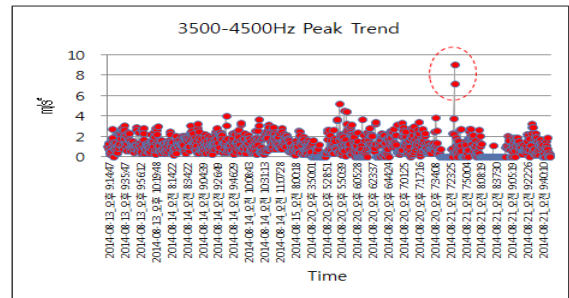


Fig.12 Frequency peak trend

Fig.13은 측정된 일반데이터와 채터진동으로 추정되는 데이터를 주파수 분석한 결과이다. 연삭숫돌의 회전주파수의 10, 20, 30배에 해당하는 성분들이 우세하게 나타났고, Table.2에 정리된 바와 같이 10배에 해당하는 성분은 일반적인 데이터가 더 컸으며, 20, 30배에 해당하는 성분은 채터진동으로 추정된 데이터가 더 크게 나타났다.

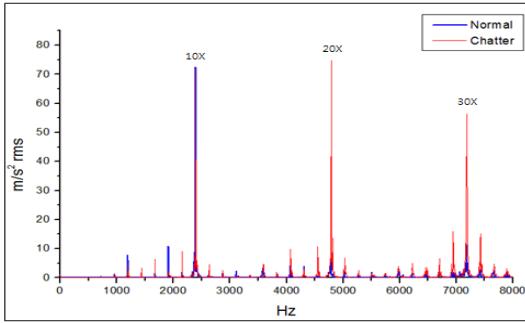


Fig.13 Frequency spectrum of the normal vs chattered machining vibration

Table.2 Harmonic peak acceleration value

	10X	20X	30X
Normal	73.457	6.253	12.790
Chatter	72.140	75.055	57.510

이것으로 보아 채터진동 발생원인은 소재의 반경 방향 고유진동수와 회전주파수의 20배에 해당하는 4,800Hz 성분과의 공진현상으로 진동이 증가하면서 나타나게 되는 것으로 사료된다.



Fig.14 Normal vs chatter face after grinding process

Fig.14는 허브베어링 연삭공정 후 정상품과 채터

진동이 발생된 불량품 가공면을 보여주고 있다. 채터 진동이 발생된 소재는 7일간 측정된 데이터를 기반으로 생산일시를 역 추적하여 찾아내었다.

4. 결론

1) 차량용 허브베어링 정밀연삭공정시 발생하는 진동특성 분석결과, 시간영역 진동신호에서는 소재의 공전주파수로 진폭변조가 일어나 맥동파형의 경향을 보이고 있으며 주파수영역에서는 연삭숫돌의 회전주파수 조화성분(harmonic)이 주된 진동성분으로 나타나고 있다.

2) 채터진동의 실시간 감시를 위하여 시간영역에서는 맥동파형을 검출할 수 있는 통계적 분석방법인 첨도(Kurtosis)를 사용하였고, 주파수 영역에서는 소재의 고유진동수와 회전주파수의 조화성분이 공진(resonance)을 발생시킬 수 있음을 가정하여 1차 및 2차 공진영역에 피크값을 측정하도록 하였다.

3) 7일간의 데이터 수집결과 특정일시에 채터진동이 나타난 것으로 추정되는 데이터가 측정되었으며, 실제 가공된 소재와 비교한 결과 일치함을 보여주었다.

참 고 문 헌

- (1) R. Gasch, H.Pfutzner, p.128-130, "Rotor dynamics"
- (2) Singiresu S. Rao, 1984, "Mechanical vibrations", p. 136-138.
- (3) Tomas G. Beckwith, Roy D. Marangoni, John H. Lienhard, 5th edition, Addison Wesley, 1983, "Mechanical measurements"
- (4) Daniel J. Inman, 2nd edition, Prentice Hall, 2000, "Engineering vibration"
- (5) Georgia institute of technology, Prof.J.S Colton ver1, 2009, "Machining Cutting Fluids, Vibration, Chatter"