

구리합금 나노분말을 혼합한 윤활제가 디젤기관의 축계안정성 및 토크에 미치는 영향

박권하[†] · 김영남^{*} · 김영일^{*}

(원고접수일 : 2008년 1월 18일, 심사완료일 : 2008년 5월 9일)

The Effect of Lubricant Containing Copper Alloy Nano-powder on Shafting Stability and Torque of a Diesel Engine

Kweon-Ha Park[†] · Young-Nam Kim^{*} · Young-il Kim^{*}

Abstract : Many research works for improving a boundary lubrication performance have been executed by using solid lubricants, and been tried to apply an engine lubrication. However those general lubricants have not been applied on engines due to the extreme conditions such as very high temperature and pressure during combustion process in a cylinder. In this study a lubricant containing copper alloy nano-powder is applied on a diesel engine driven by an electric motor. Torques and shaft vibrations are measured, then an engine friction loss and rotating stability are assessed. The results show that the frequency of the vibration is about the same as that of a general lubricant, but the amplitudes in the both X and Y direction are reduced as well as the friction loss is reduced.

Key words : Solid lubricant(고체윤활제), Copper Alloy Nano-powder(나노구리합금분말), Diesel Engine(디젤기관)

1. 서 론

내연기관의 마찰은 회전운동, 왕복운동, 충돌, 고온, 저온, 연소, 오염 등 다양한 환경에서 이루어진다. 마찰손실의 크기 및 특성에 따라 흡·배기 밸브계통, 실린더와 피스톤계통, 회전축계통으로 나누어지는데, 캠축의 회전에서 시작되는 흡·배기 밸브계통은 고속으로 움직이며 밸브의 개폐를 위한 캠과 로커암 부위의 충격운동에 의한 경계마찰특성

을 갖고 있다. 고온의 연소에 노출되어 있는 실린더와 피스톤사이의 마찰은 윤활유의 연소와 연소생성물에 의한 오염을 동반하며 동시에 피스톤의 왕복운동에 의한 불연속 마찰특성을 갖는다. 또한 실린더와 피스톤의 비정상적인 마멸로 인한 배기누출의 문제가 있기 때문에 높은 밀봉작용이 요구된다. 비교적 손실이 적은 크랭크축 회전부위는 일반적인 연속윤활상태에 있다.

다양한 극한 조건에 노출되어 있는 내연기관의

[†] 교신저자(한국해양대학교 기계정보공학부), E-mail: khpark@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4367

^{*} (주)엔피씨

마찰특성을 만족하기 위한 엔진윤활에 대한 많은 연구들이 이루어지고 있다. 이런 연구의 한 분야로 경계윤활성과 밀봉작용을 동시에 향상시킬 수 있는 고체윤활제에 대한 연구들이 진행되고 있다. Bartz와 Oppelt^[1]는 광유에 MoS₂를 분산시킨 윤활유의 경계윤활성 향상을, Reick^[2]은 폴리테트라플루오르에틸렌(PTFE)를 포함한 고효율 윤활유를 발표하였다. Cusano와 Sliney^[3]는 연속되는 그들의 논문에서 흑연과 몰리브덴을 분산시킨 윤활유의 동적 특성을 분석하였다. 이후에도 Lind^[4]은 Al/graphite 고체윤활제의 연구를, Hisakado^[5], Gupta와 Bhushan 등^[6]은 경계윤활성향상과 윤활성능향상을 위한 연구를 수행하였다. 주로 MoS₂, PTFE, 흑연 등의 분말을 오일에 분산시켜 제조하는 고체윤활제는 고온에서 산화되어 윤활성을 상실하여 엔진 실린더내의 고온조건에서는 그 효과를 발휘할 수 없게 된다. 따라서 연소를 동반한 고온고압의 엔진조건에 적용하기 위한 고체윤활제의 개발이 이루어지고 있는데 주로 구리합금 미세 분말을 이용하고 있다. Spalvins^[7]는 엔진환경에서의 구리 및 아연 디알킬 디티오포스페이트(ZDDP) 미립자의 영향을 연구하였으며, Kuzharov와 Fisenko^[8]는 사구실험에 의한 극압하중과 용착하중의 향상을, Nazarenko 등^[9]은 고온특성향상을 Gonsel과 Lockwood^[10]는 산화와 부식방지효과를 발표하였다. 또한 니켈분말에 대한 연구도 진행되었는데 흡착과 촉매작용에 의하여 마찰, 마모감소 등의 효과가 월등하게 향상됨을 밝혔다. Astakhov와 Mouratov^[11], Wu 등^[12]은 두 가지의 장점을 동시에 적용하기 위하여 구리와 니켈합금을 윤활첨가제로 사용하여 마찰 마모의 효과를 연구하였으며, Shpenkov^[13]는 구리와 함께 니켈도 연한 금속층을 형성하여 마찰저감 및 마모에 효과가 있음을 보여주었다. 안 등^[14]은 구리와 니켈합금 미세분말 윤활제의 엔진적용을 위해 왕복동시험기를 사용하여 마찰과 마모특성에 대한 연구를 하였다. 왕복동시험결과에 의하면 구리합금입자에 의해 형성된 화학적 유기 금속피막에 의해 마찰계수와 마모직경의 감소를 가져오며, 기어시험에서는 미세한 구리입자가 손상부위를 메워 치료하는

효과가 있다고 발표하였다. 그러나 엔진에 적용하여 마찰특성을 분석한 연구는 매우 부족하다.

본 연구에서는 나노구리합금분말이 첨가된 윤활유를 엔진연소 없이 전기모터에 의하여 구동되는 디젤기관을 이용하여 윤활특성과 영향을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 조건

Fig. 1은 본 실험에 사용된 나노구리니켈합금 분말의 주사전자현미경(SEM) 사진 분석결과 형상은 구형이며 크기는 10nm에서 100nm 사이에서 주로 분포하고 있음을 보여준다.

Fig. 2는 엔진마찰특성을 분석하기 위한 실험장치도이다. 4기통 디젤기관에서 연소에 의한 동력전달의 영향을 제거하기 위해 분사밸브와 예열플러그를 분리하였으며 엔진구동에 따른 마찰특성의 평가를 위해 모터를 사용하여 강제 구동한다.

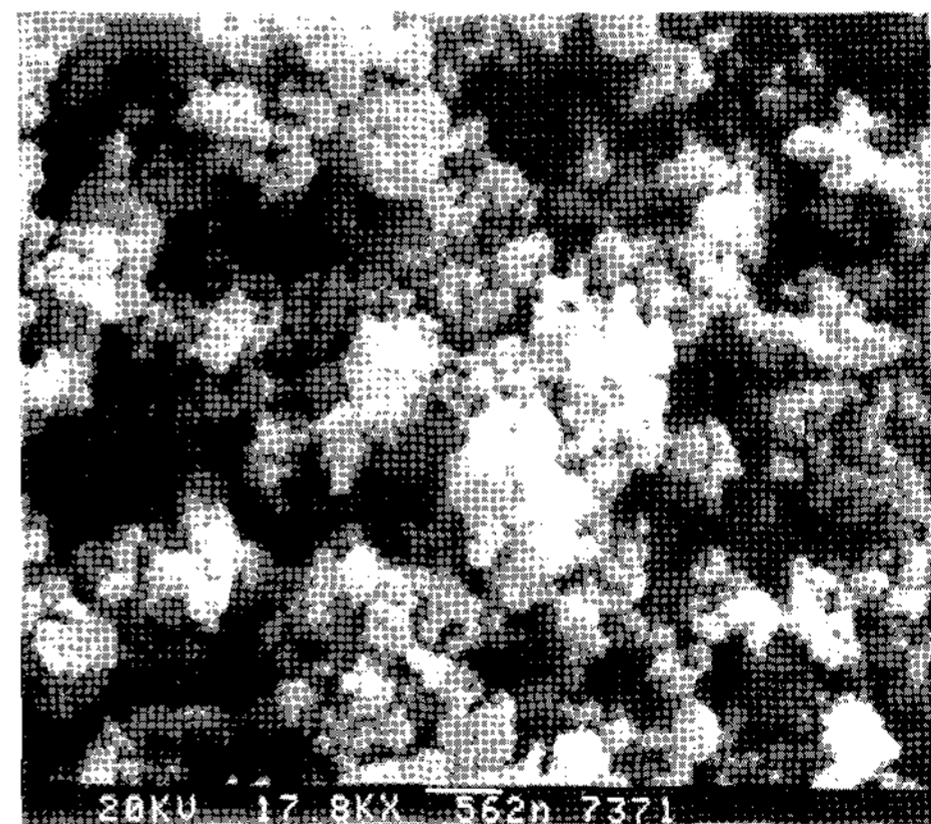


Fig. 1 SEM micrograph of NiCu nano-powder

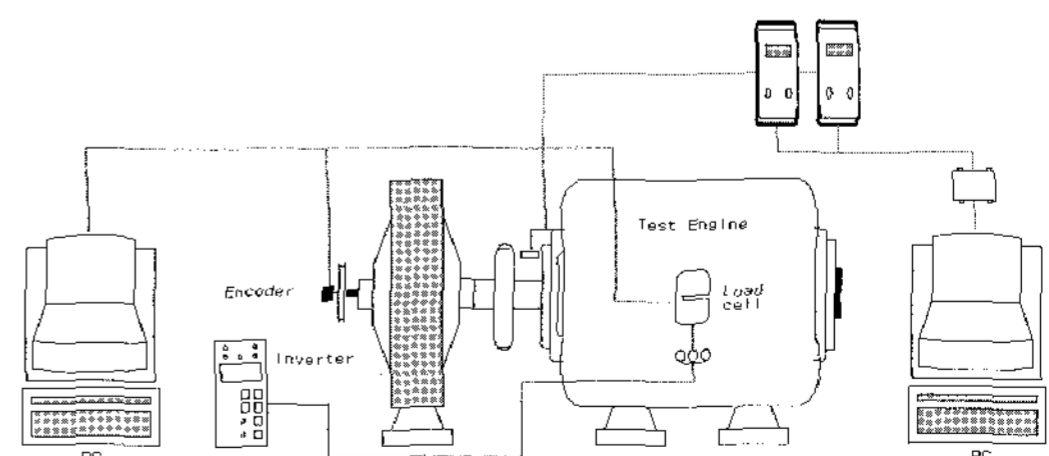


Fig. 2 Experimental setup for assessment of engine lubricants

Table 1 Nominal properties of the used common diesel engine oil

| | Nominal properties |
|--------------------------|--------------------------|
| SAE Viscosity Grade | 10W/40 |
| Kinematic Viscosity(cSt) | 98.41@40°C 14.5@100°C |
| Viscosity Index | 154 |
| Flash Point(°C) | 242 |
| Pour Point(°C) | -35 |
| Density(g/cm³) | 0.8582@15°C |

Fig. 2는 엔진마찰특성을 분석하기 위한 실험장치이다. 4기통 디젤기관에서 연소에 의한 동력전달의 영향을 제거하기 위해 분사밸브와 예열플러그를 분리하였으며 엔진구동에 따른 마찰특성의 평가를 위해 모터를 사용하여 강제 구동한다.

Table 1은 실험에 사용한 상용디젤엔진오일의 물성치를 나타내고 있다. 토크, 진동수 및 진동모드는 로드셀 및 갭센서의 전기적 신호를 받아 처리하며, 엔진속도는 엔코더와 인버터의 입력을 제어하여 조절한다.

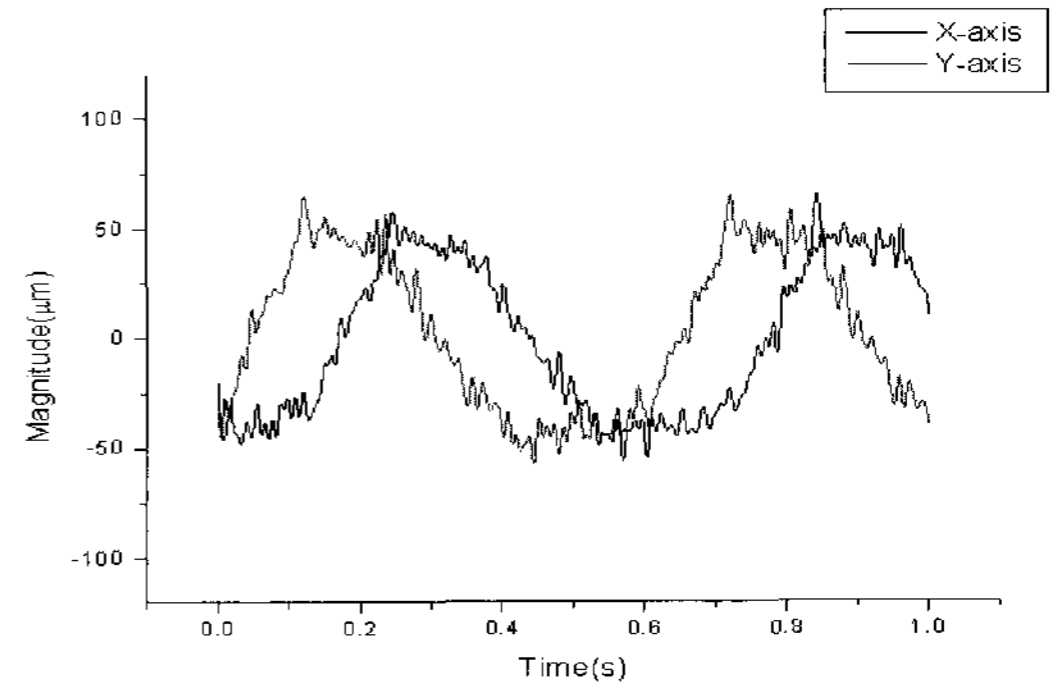
3. 실험결과 및 고찰

3.1 기관진동특성

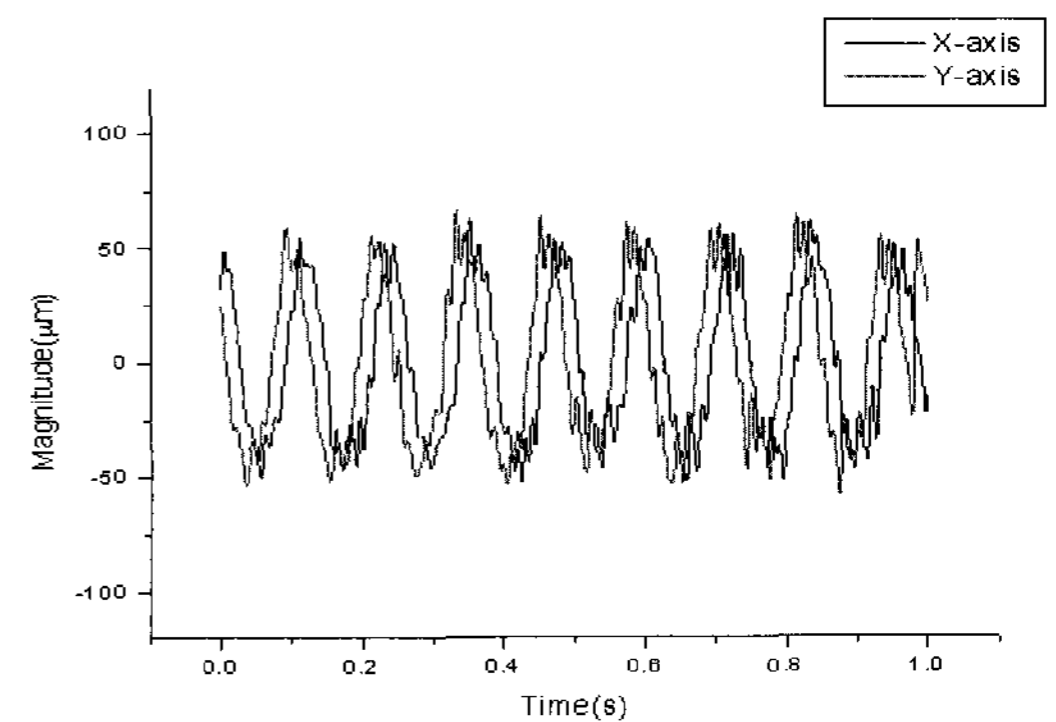
Fig. 3 (a), (b), (c)는 일반디젤엔진오일을 사용한 디젤엔진의 rpm증가에 따른 축의 진동응답을 나타내고 있다. 각각 저속(100rpm), 중속(500rpm), 고속(1000rpm)에서 측정된 진동응답을 나타내고 있으며 rpm 증가에 따라 주기의 감소를 보여주고 있다.

Fig. 4는 축의 X-Y 궤도 선도를 보여주는데 엔진내부의 축길이가 비교적 짧고 많은 저널 베어링이 내장되어 있어 다소 불규칙적인 궤도를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 5 (a), (b), (c)는 일반디젤엔진오일을 사용한 경우의 각 rpm에 따른 Y방향에 대한 고속 푸리에 변환(FFT)분석 그래프이다. 각각의 그래프에서 볼 수 있듯이 1차 고유진동수가 모두 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히

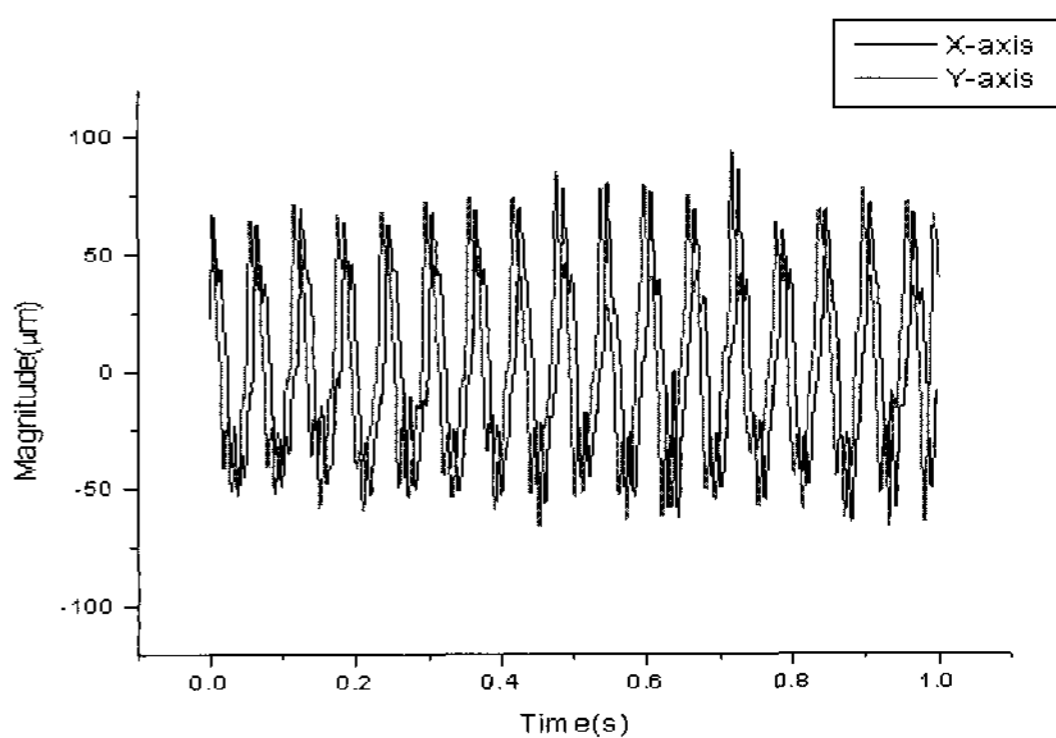
Fig. 5 (a)는 저속인 100rpm의 초기시동으로 인한 토크변동의 급격한 변화로 1차고유진동수지점에서 높은 진폭값(45.0812 μ m)을 나타나고 있다. Fig. 3 (b), (c)의 경우 2차, 3차, 4차 고유진동수 지점으로 의심할 수 있는 구간이 차례로 나타나고



(a) 100 rpm



(b) 500 rpm



(c) 1000 rpm

Fig. 3 Vibration response of shaft without nano-powder

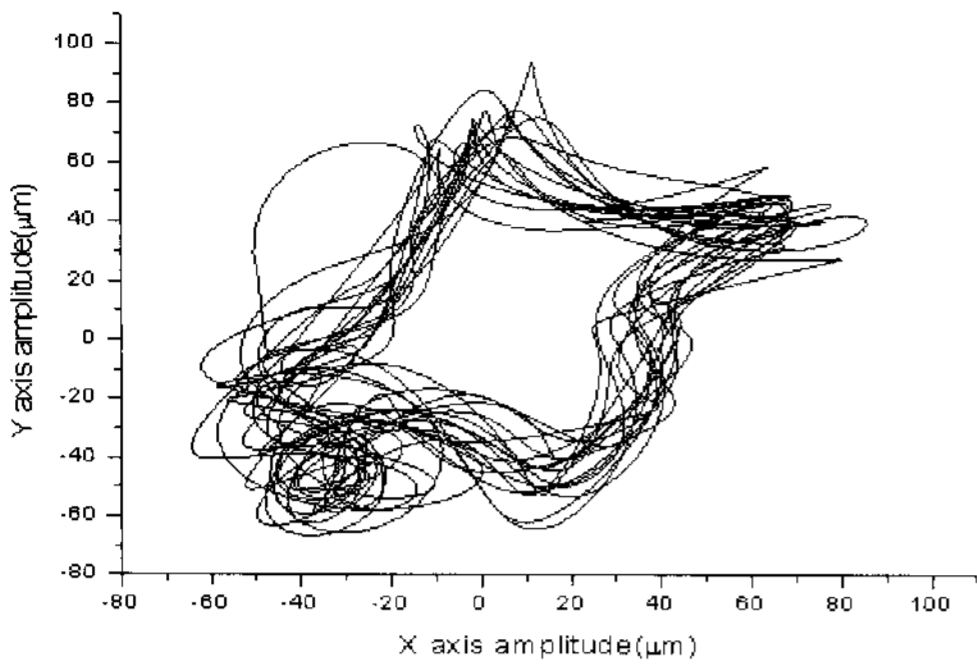


Fig. 4 Measured X-Y amplitude on the shaft without nano-powder at 1000rpm

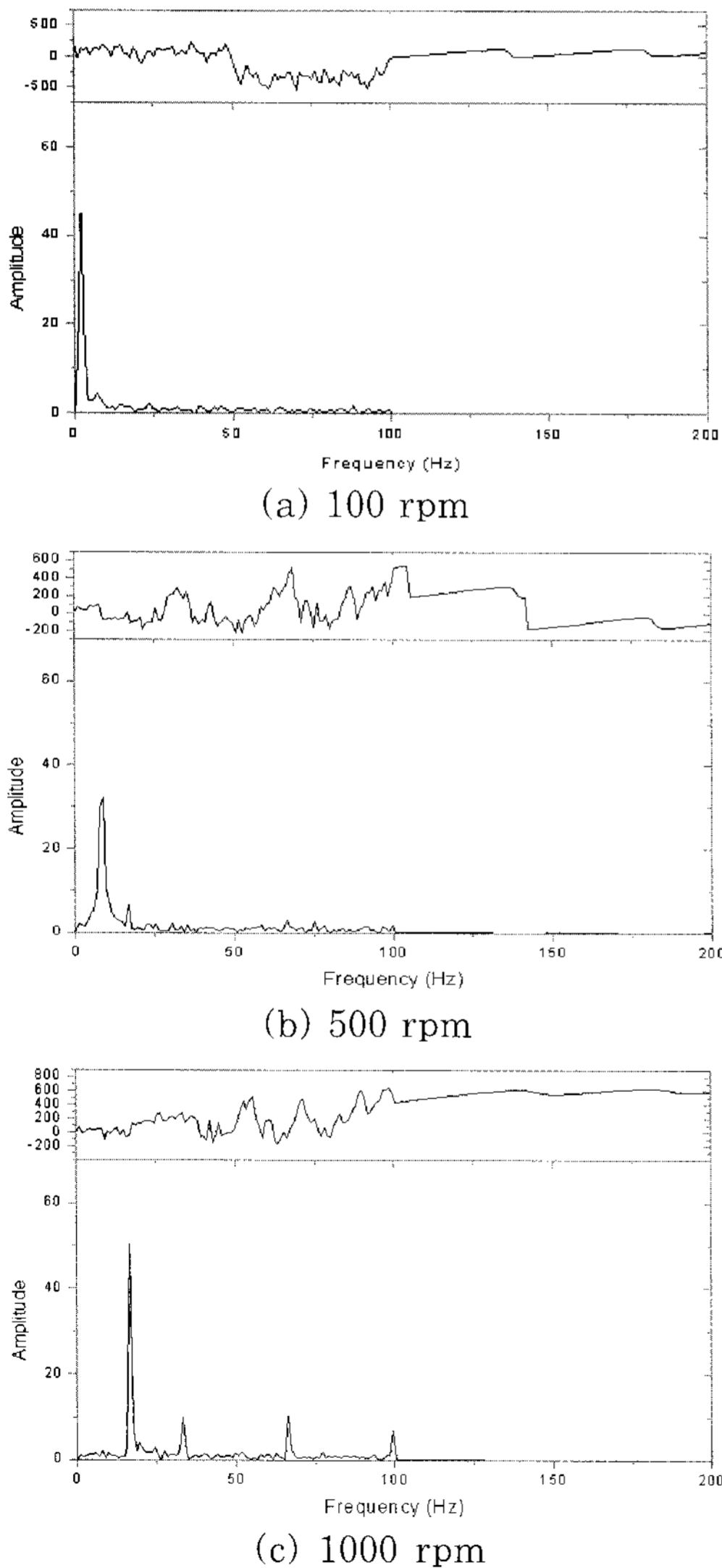


Fig. 5 Measured FFT on the shaft without nano-powder

있으며 비교적 고속인 1000rpm에서는 2차, 3차, 4차 고유진동수가 뚜렷이 나타나고 있다. 또한 rpm이 증가할수록 진폭값의 주기적인 증가와 감소를 보여주고 있다.

Fig. 6 (a), (b), (c)는 일반디젤엔진오일에 첨가제를 첨가한 엔진의 rpm 증가에 따른 축의 진동

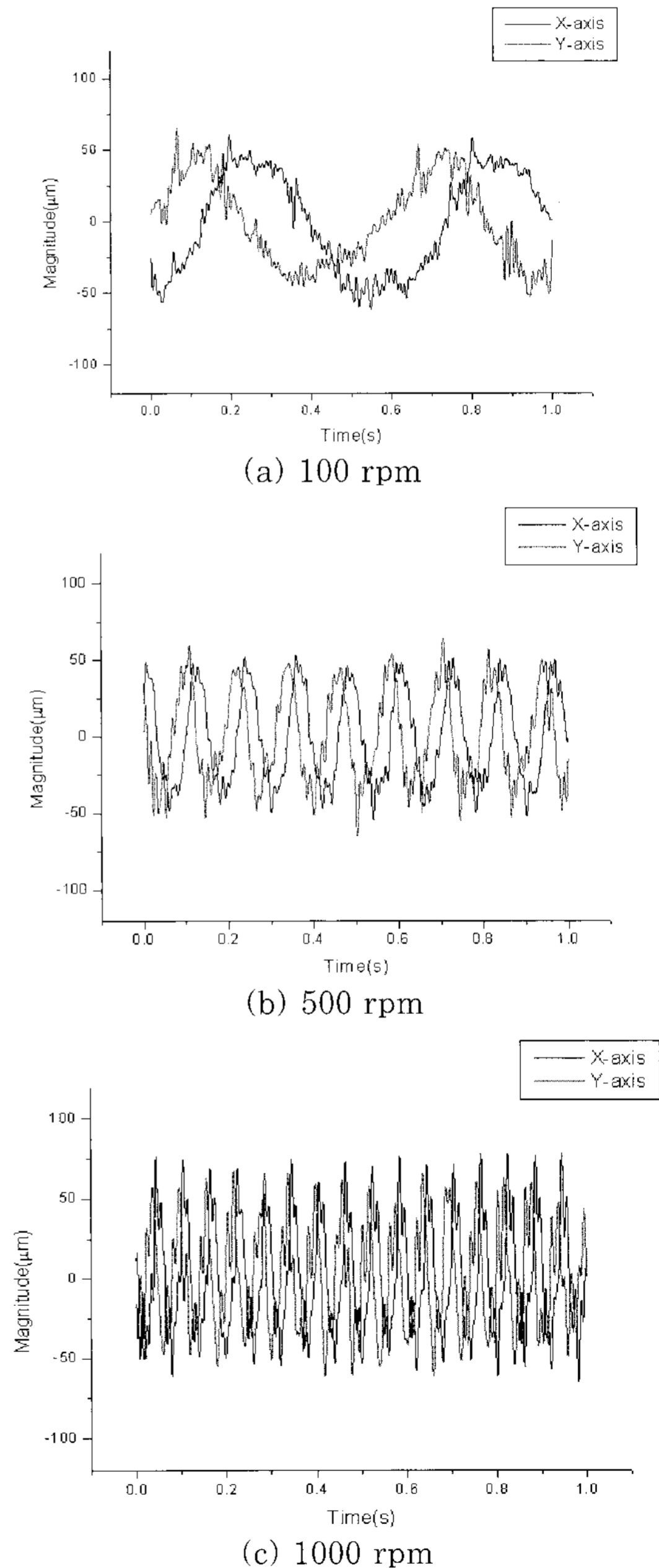


Fig. 6 Vibration response of shaft with nano-powder

응답을 나타내고 있다. 일반디젤엔진오일과 비교하여 주기와 형태는 크게 변하지 않았다. 하지만 X방향과 함께 Y방향의 진폭의 감소를 보여주고 있다. Fig. 7은 첨가제를 주입한 축의 X-Y 궤도 선도를 나타내고 있다. 첨가제를 주입하지 않은 경우와 비교해 볼 때 역시 X방향과 Y방향으로의 진폭이 비교적 미세한 양이지만 줄어들고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8 (a), (b), (c)는 첨가제를 주입한 경우의 각 rpm에 따른 FFT분석 그래프이다. 첨가제를 주입전과 비교하여 저속인 100rpm에서는 역시 높은 진폭값(35.73 μm)을 나타내고 있으며 전체적으로 첨가제 주입전과 비슷한 형태로 증가와 감소의 반복을 보여주고 있다. 또한 1차, 2차, 3차, 4차 고유진동수가 나타나는 구간은 변화가 없었지만, Y방향에 대한 진폭값은 뚜렷한 감소를 나타내고 있다.

Fig. 9는 X방향에 대한 첨가제의 주입전, 후의 진폭변화를 나타내고 있으며, Fig. 10은 Y방향에 대한 진폭변화를 나타내고 있다. Fig. 9는 첨가제를 사용하기 전과 비교하여 첨가제를 사용한 경우 X방향으로 0.87%~11.91%의 진폭값의 감소를 보여주고 있다. Fig. 10은 Y방향의 진폭변화가 X방향의 진폭변화에 비하여 비교적 큰수치인 14.15%~30.53% 감소하고 있다. Fig. 9, 10을 비교할 때 저속인 50rpm 과 100rpm에서 매우 큰 진동감소를 볼 수 있는데 이 결과는 저속에서 기관 진동을 감소시키는데 큰 효과를 기대할 수 있다.

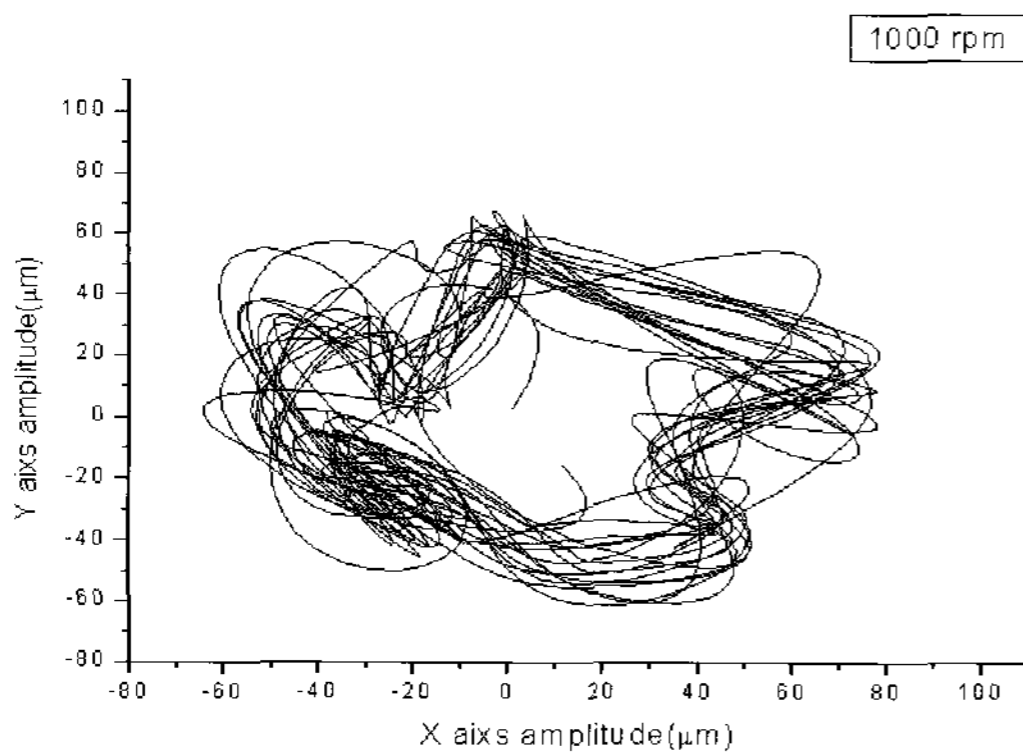


Fig. 7 Measured X-Y amplitude on the shaft with nano-powder at 1000rpm

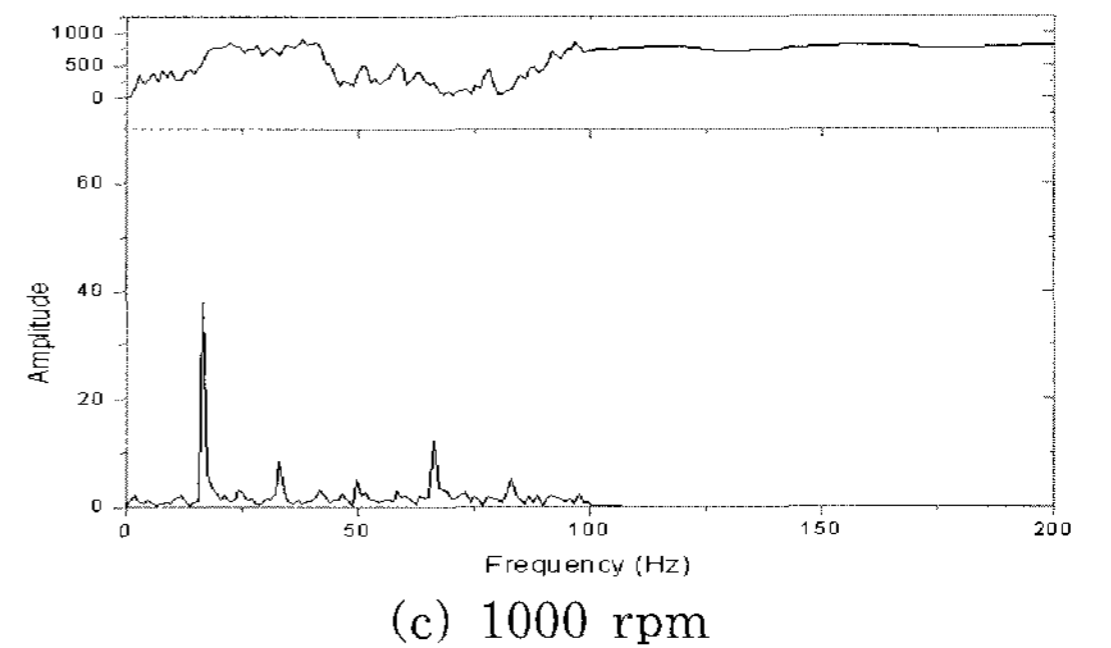
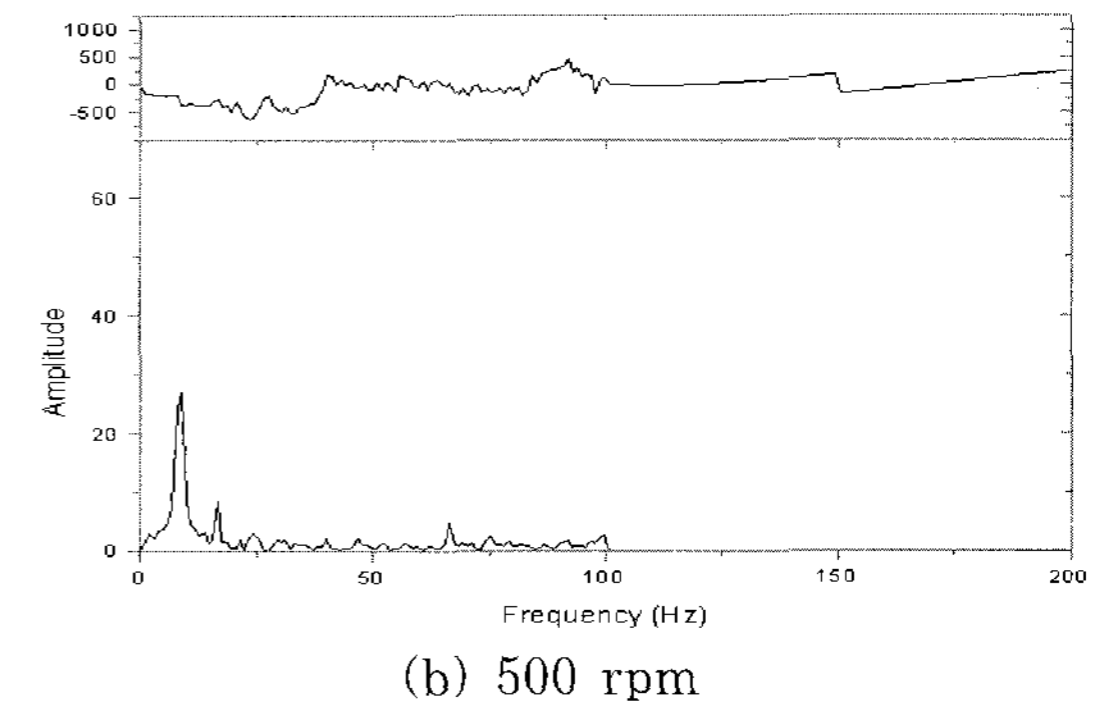
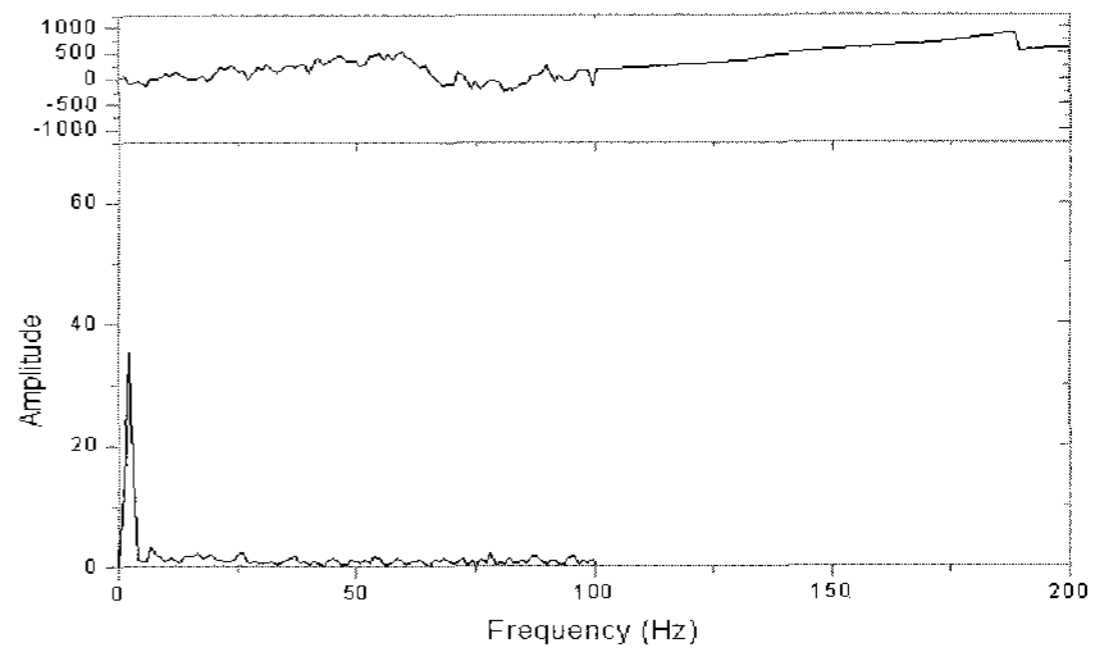


Fig. 8 Measured FFT on the shaft with nano-powder

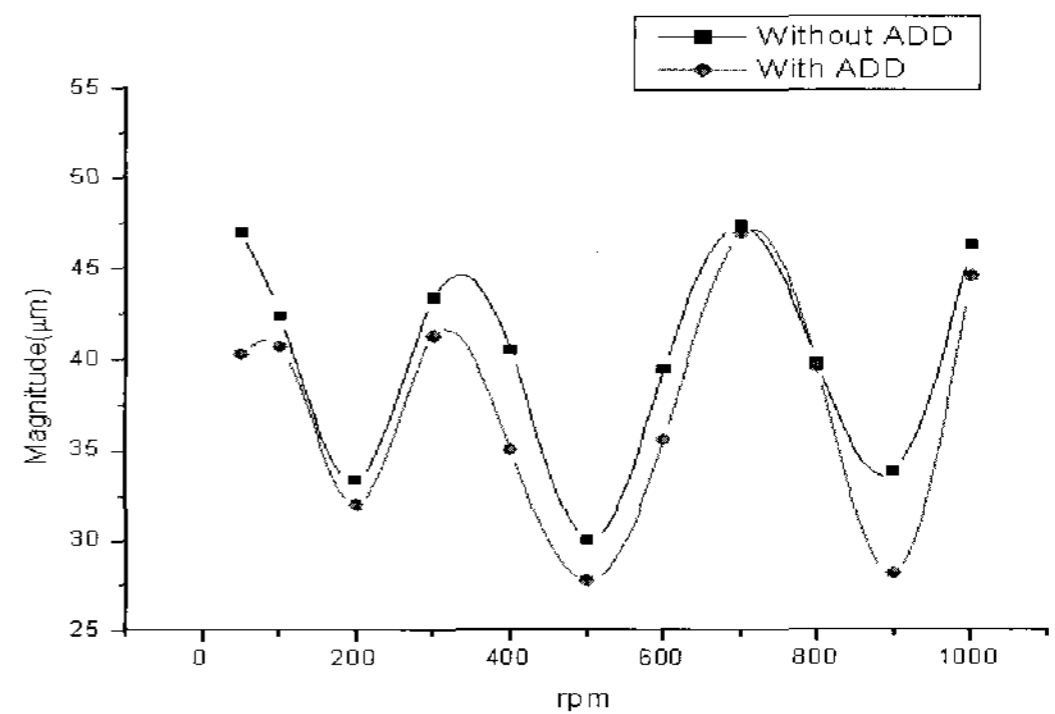


Fig. 9 Measured amplitude on the shaft (X-axis)

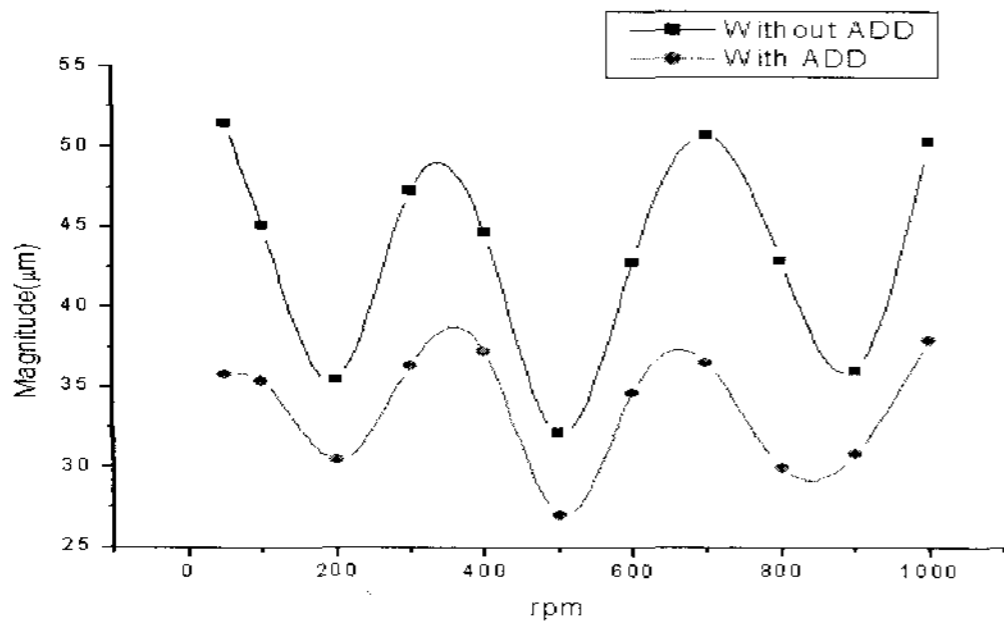


Fig. 10 Measured amplitude on the shaft (Y-axis)

3.2 윤활특성

Fig. 11은 엔진을 정지 상태에서 최대 부하까지 또 최대 부하에서 정지상태까지 구동모터의 전류를 변화시킬 때 변화되는 과도상태의 엔진토크를 보여 준다. 모터전류를 급속히 최대로 올리게 되면 최대 토크까지 상승한 후 정상상태가 되어 동일한 토크가 계속된다. 이때 모터전류를 급속히 0의 상태로 내리게되면 토크가 떨어지게 되고 마지막에는 역시 심한 진동과 함께 정지운동을 하게된다. 특성에 따라서 5개의 구간으로 나눌 수 있는데, 시작구간(A), 가속구간(B), 정상구간(C), 감속구간(D) 그리고 정지구간(E)이다. 가속구간(B)는 동일 입력에 대한 엔진의 가속상태를 보여주는데, 일반오일의 경우와 비교할 때 첨가제를 주입한 경우에 더 급한 기울기, 즉 빠른 가속을 보여준다(2.24%). 정상구간(C)는 최대입력구간으로 계속적으로 동일한 입력을 했을 경우의 토크변화를 보여주는데 첨가제를 사용한 경우 2.36%의 토크절감을 나타낸다. 감속구간(D)에서는 모터에 의한 외부입력이 제로로 된 상태에서 엔진구동기구 및 마찰에 의한

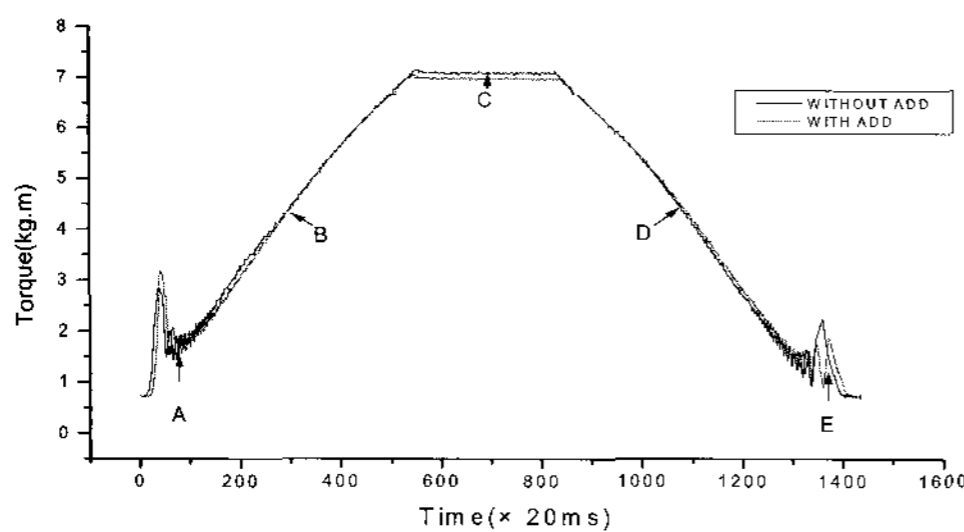


Fig. 11 Torque variations at engine start

자연감속을 보여주기 때문에 감속기울기가 급하면 마찰소모율이 크다는 것을 말한다. 첨가제 사용의 경우가 2.34% 완만한 것을 나타낸다. 구간(E)는 정지시의 토크변동을 보여주는데 엔진의 구동기구를 살펴보면 1, 4번 실린더와 2, 3번 실린더가 항상 180°의 위상차를 가지고 왕복운동을 하기 때문에 큰 마찰 부분과 적은 마찰부분이 180° 주기를 가지고 반복된다. 즉 토크변동이 180°의 주기를 갖는다는 것을 알 수 있다. 일반윤활유의 경우 토크변동이 점점 커지다가 마지막에 매우 큰 피크치를 보인 후 정지한 반면, 첨가제사용의 경우, 정지 초기에는 동일해지며 마지막에는 비교적 작은 피크치를 두 번 보인 후 정지한다(4.5%감소). 이는 저속의 경우 구동의 관성력보다는 마찰에 의한 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다. 과도상태의 윤활특성을 살펴보면 모든 구간에서 첨가제의 윤활성 향상을 말해주고 있는데 특히 매우 저속구간에서 큰 효과가 기대된다.

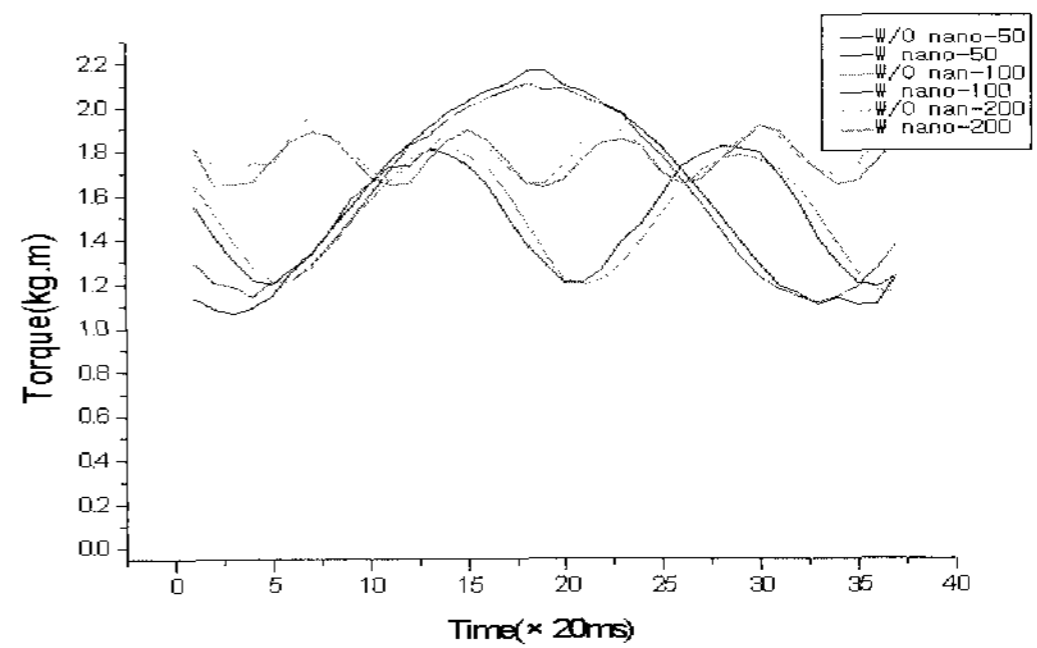


Fig. 12 Comparison of torque variations at 50, 100, 200rpm

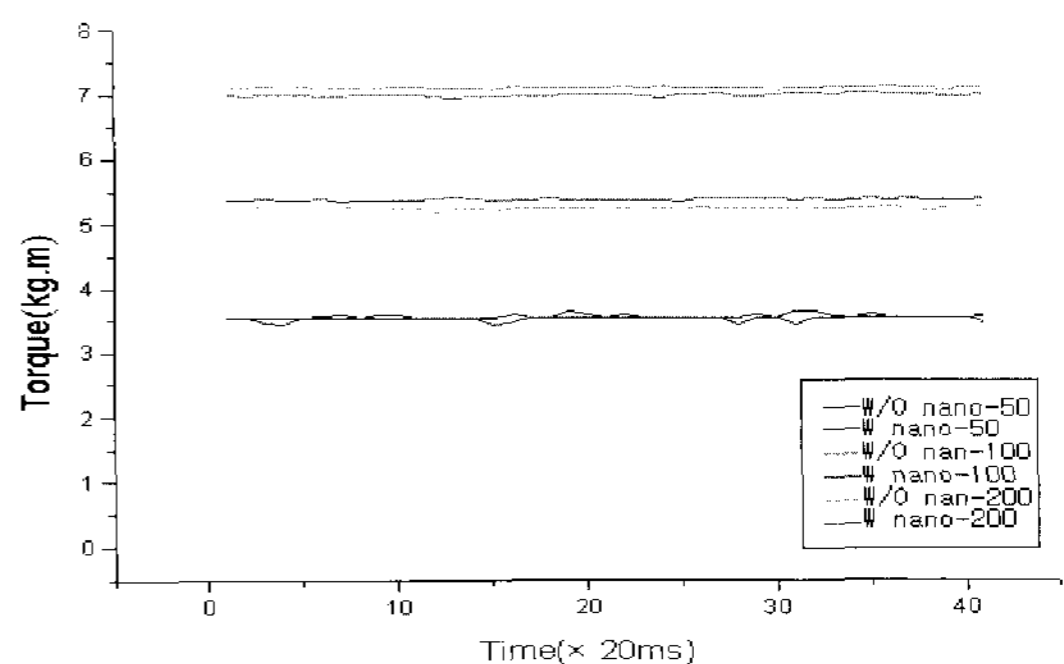


Fig. 13 Comparison of torque variations at 500, 800, 1200rpm

Fig. 12, 13은 저속구간 50, 100, 200rpm일 때와 고속구간 500, 800, 1200rpm일 때의 토크 변동을 보여준다. 저속인 경우 모든 경우에 180° 주기의 토크변동을 나타내는데, 50rpm 의 경우에 큰 차이를 나타내는 반면 속도의 증가와 함께 차이가 줄어들고 있다. 500rpm이상의 고속인 경우에는 180° 주기가 명확하게 나타나지는 않지만 작은 변동은 볼 수 있다. 500rpm의 경우는 아직 위 아래로 토크변동을 나타내며 1200rpm에서는 거의 일정한 토크를 보여준다.

4. 결 론

구리합금나노분말을 이용한 특수 윤활유를 디젤 기관에 적용한 결과는 다음과 같이 요약된다.

(1) 1차 고유진동수의 위치는 변함이 없으며 진폭은 첨가제 사용전에 비하여 사용후가 X방향 및 Y방향 모두 감소한다.

(2) 기관진동의 X 및 Y방향으로의 진폭감소로 인해 기관진동의 감소에 크게 기여할 것으로 사료되나, X방향으로의 진폭감소가 Y방향에 비하여 비교적 작게 나타나고 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다.

(3) 과도운전상태: 급가감속성은 2.29% 정도의 향상을 가져오며 정지시 토크변동이 작음을 보여준다.

(4) 정상운전상태: 엔진속도 50rpm에서는 3.95%, 1200rpm에서는 2.36% 마찰손실감소를 나타낸다.

참고문헌

- [1] W.J. Bartz, J. Oppelt, "Lubricating Effectiveness of Oil-Soluble Additives and Molybdenum Disulfide Dispersed in Mineral Oil," *Lubr. Eng.*, Vol.36, pp.579-585, 1980.
- [2] G.F. Reick, "Energy-Saving Lubricants Containing Colloidal PTFE," *Lubr. Eng.*, Vol.38, pp.635-645, 1982.
- [3] C. Cusano and H.E. Sliney, "Dynamics of Solid Dispersions in Oil During the Lubrication of point Contacts, part I-Graphite," *ASLE Trans.*, Vol.25, No.2, pp.183-189, 1982.
- [4] Jen Fin Lin, Ming Guu Shih, Yih Wei Chen, "The tribological performance of 6061 aluminum alloy/graphite composite materials In oil lubrications with EP additives", *Wear* Vol.198, pp.58-70, 1996.
- [5] T. Hisakado T. Tsukizoe H. Yoshikawa, 'Lubrication Mechanism of Solid Lubricants in Oils', *Journal of Lubrication Technology* APRIL, Vol.105, 1983.
- [6] B.K. Gupta and B. Bhushan, "Fullerene Particles as an Additive to Liquid Lubricants and Greases for Low Friction and Wear," *Lubr. Eng.*, Vol.52, pp.524-528, 1994.
- [7] T. Spalvins, "A review of recent advances in solid film lubrication", *American Vacuum Society J.*, Mar/Apr 1987.
- [8] A.S. Kuzharov and O.V. Fisenko, "Copper Containing Additives and Tribological Behavior of Chiatim-201 Grease," *Soviet Jr. of Friction and Wear*, Vol.13, pp.73-77, 1992.
- [9] T.I. Nazarenko, N.N. Lozentsova, G.G. Shchegolov and Yu.P. Toporov, "On Lubricating Properties of Oil with Copper-Containing Additives", *Soviet Jr. of Friction and Wear*, Vol.13, No.2, pp.78-81, 1992.
- [10] S. Gunsel and F. Lockwood, "The Influence of Copper-Containing Additives on Oil Oxidation and Corrosion," *Tribology Trans.(STLE)*, Vol.38, No.3, pp.485-496, 1995.

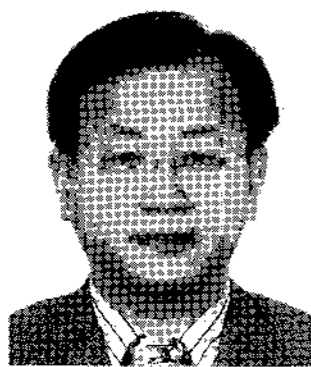
- [11] M.V. Astakhov and V.A. Mouratov, "Nickel Fine Particle's Adsorptive Catalytic Mechanism," *Wear*, Vol.176, pp.61-65, 1994.
- [12] Yun Xin Wu, Fuxing Wang, Yinqian Cheng, Nanping Chen, "A study of the optimization mechanism of solid lubricant concentration in Ni/MoS₂", *Self-lubricant in composite Wear*, 205, pp.64-70, 1997.
- [13] G.P. Shpenkov, *Physical Chemistry of Friction*, Minsk, in Russian, 1991.
- [14] 안효석, 이성철, "첨가제에 함유된 미세한 구리합금입자의 마찰 및 마모 특성," *한국윤활학회지*, 제12권 제2호, pp.32-40, 1996.

저 자 소 개



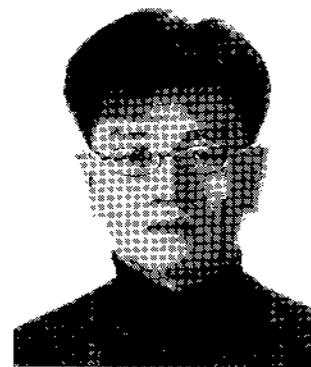
박권하(朴權夏)

1995년 UMIST(맨체스터대학) 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1995-1998년 한국기계연구원 엔진환경연구부 선임연구원, 1998-현재 한국해양대학교 부교수, 내연기관 연구



김영남(金永南)

2005년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 현재 (주)엔피씨 대표이사



김영일(金永日)

1985년 성균관대학교 졸업, 현재 (주)엔피씨 이사