

工學碩士 學位論文

나노구리합금 윤활제의 극압윤활특성과 엔진동특성

The Characteristics of Extreme Lubrication and Engine Dynamic
Movement of Lubricant Containing Copper Alloy Nano-powder

指導教授 鄭 在 鉉

2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機 械 工 學 科

吳 昇 佑

本 論 文 을 吳 昇 佑 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

委 員 長 工 學 博 士 崔 在 星 ㉠

委 員 工 學 博 士 金 義 珩 ㉠

委 員 工 學 博 士 鄭 在 鉉 ㉠

2006年 2月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

機 械 工 學 科

吳 昇 佑

목 차

List of table	iii
List of figures	iv
Abstract	x
제1장. 서 론	
1.1 연구배경	1
1.2 본 논문의 연구목적 및 내용	4
제2장. 이론적 고찰	
2.1 마찰의 종류	5
2.2 기관윤활유 첨가제의 기능과 특성	6
2.3 윤활유의 물리·화학적 성질	11
2.4 기관의 윤활제	13
2.5 엔진유의 분류기준	15
2.6 고체윤활제	16
2.7 극압윤활특성	19
제3장. 실험장비 및 실험조건	
3.1 나노구리합금윤활제	21
3.2 마찰마모시험기	23
3.3 모터 구동 디젤기관	28
제4장. 실험결과 및 고찰	
4.1 일반극압제와 나노윤활제	35

4.2 나노윤활제의 극압특성실험	50
4.3 밸브계 포함 축계 진동특성	52
제5장. 결 론	71
참고문헌	72

List of Tables

Table 2.1	SAE Viscosity grade (SAE J300, 1995. 12.)
Table 2.2	Air temperature & SAE standard
Table 3.1	Specification of wear test machine
Table 3.2	Test conditions
Table 3.3	Test conditions
Table 3.4	Specification of experimental engine
Table 3.5	Specification of test motor
Table 3.6	Specification of test rig instruments
Table 3.7	Specification of load cell
Table 4.1	Abrasion weight
Table 4.2	Specimen height variation

List of Figures

- Fig. 2.1 Schematic of Graphite
- Fig. 2.2 Schematic of WS₂ coating Layers on Substratum
- Fig. 2.3 Schematics of substratum and coated WS₂ layer
- Fig. 2.4 Schematic diagram for the behavior of lubricant molecules
- Fig. 2.5 Schematic diagram of the behavior of nano-particles for lubrication
- Fig. 3.1 SEM/TEM micrographs of CuNi nano-powder
- Fig. 3.2 Schematic diagram and photo of wear test machine
- Fig. 3.3 Test specimen
- Fig. 3.4 Photo of disc and pin
- Fig. 3.5 Model of experiment engine
- Fig. 3.6 Experimental setup for assessment of engine lubricants
- Fig. 4.1 Friction force variation at 100rpm
- Fig. 4.2 Friction force variation at 500rpm
- Fig. 4.3 Friction force variation at 1000rpm
- Fig. 4.4 Friction force variation at contact force of 172N and 500rpm
- Fig. 4.5 Abrasion weights with speed and load variation
- Fig. 4.6 Specimen height variation
- Fig. 4.7 Specimen width variation
- Fig. 4.8 Comparison of disc wear scar
- Fig. 4.9 Friction and abrasion comparison for all the cases
- Fig. 4.10 Friction force by time lapse
- Fig. 4.11 Max allowance load in Volume percent(%)
- Fig. 4.12 Friction force with temperature increase
- Fig. 4.13 Max running load with volume percent variation
- Fig. 4.14 Power supplied to driving motor
- Fig. 4.15 Engine Torque with Transient condition
- Fig. 4.16 Comparison of torques with additive's volume percent

- Fig. 4.17 Comparison of vibrations with additive's volume percent
- Fig. 4.18 Vibration response of shaft without nano-metal alloy powder
- Fig. 4.19 Vibration response of shaft with nano-powder of 0.0075vol%
- Fig. 4.20 Vibration response of shaft with nano-powder of 0.015vol%
- Fig. 4.21 Vibration response of shaft with nano-powder of 0.03vol%
- Fig. 4.22 Vibration response of shaft with nano-powder of 0.06vol%
- Fig. 4.23 Vibration response of shaft with nano-powder of 0.12vol%
- Fig. 4.24 Measured X-Y amplitude with nano-metal alloy powder
- Fig. 4.25 Measured X-Y amplitude with nano-powder of 0.0075vol%
- Fig. 4.26 Measured X-Y amplitude with nano-powder of 0.015vol%
- Fig. 4.27 Measured X-Y amplitude with nano-powder of 0.03vol%
- Fig. 4.28 Measured X-Y amplitude with nano-powder of 0.06vol%
- Fig. 4.29 Measured X-Y amplitude with nano-powder of 0.12vol%

ABSTRACT

The Characteristics of Extreme Lubrication and Engine Dynamic Movement of
Lubricant Containing Copper Alloy Nano-powder

Seung Woo Oh

Department of Mechanical Engineering, Graduate School

Korea Maritime University

Busan, Korea

(Supervised by Professor Jaehyun Jeong)

Lubricant is the material to reduce the friction between two contacting surfaces, which occurs for a moving machinery. Recently the size of machinery becomes reduced without losing performance in order to satisfy the economic requirement. The friction load per area is extremely increased when the performance is increased and the contact area decreased. The traditional lubricant does not meet the severe condition. But, there are many severe conditions, like high temperature, combustion, impact in engine. So, the new development of the improved lubricant is required. The engine lubrication has to satisfy not only the requirement of the high density of the friction load but also the extreme conditions peculiar to the engine.

Many research works for improving a boundary lubrication performance have been studied by using solid lubricants, and have been tried to apply solid lubricants to an engine. However, those general lubricants like MoS₂ or

PTFE have not been applied on engines due to the extreme conditions such as very high temperature and pressure by combustion process in a cylinder.

Now, nano particles with lubricant additives is developing at many country. Especially, nano particle's volume percentage is important as economy and efficiency. The characteristic of a lubricant is important under severe running condition. On diesel engines, the better lubrication performance is required due to the extreme condition such as high temperature and pressure by combustion process in a combustion chamber.

Recently, the solid lubricant containing a copper nickel alloy has been introduced and studied.

In this thesis, the lubricant containing the alloy particles is applied on a high speed rolling contact wear test machine and a diesel engine. That particle is changed volume percentage. The lubricant is assessed by mechanical characteristic test and by engine performance test. The results by mechanical characteristic test show the decrease of the coefficient of friction and oil temperature. The results by engine test show the decrease of X-axis and Y-axis amplitude which strongly effect on engine vibration and the decrease of torque related strongly to the engine efficiency as well as the improvement of the engine lubrication performance.

It is clear that the lubricant containing the copper nickel alloy nano-powder decreases friction and wear, and it is also expected the increase of the sealing effect between a cylinder and piston rings.

제1장 서론

1.1 연구배경

두 물체가 상호 접촉한 상태에서 이들 사이에 상대 운동이 발생하면 상기 운동에 저항하려는 힘, 즉 마찰력이 발생하며, 이와 같은 접촉운동의 결과로써 표면으로부터의 재료손실, 즉 마모가 초래된다. 미끄럼 운동을 하는 두 물체 사이에서 발생하는 마찰력의 법칙과 발생원인은 17~18세기의 Coulomb의 연구 이래로 많은 과학자들에 의하여 Roughness theory[1-3], Adhesion theory[4] 및 Roughing theory[5] 등 대표적인 이론들이 정립되어 왔다.

엔진 내에서 자체적으로 에너지를 소산하는 요소는 여러 가지가 있으며, 그 중 가장 대표적인 것이 피스톤과 실린더 벽간의 마찰운동과 밸브 구동계에서의 접촉운동이다. 이전의 여러 연구에 의하면 피스톤·실린더 계에 의해 소모되는 에너지는 엔진 전체의 기계적 에너지 소모 중에서 약 75%를 차지한다고 보고된 바 있으며, 이중 상당부분은 실린더벽과 피스톤간의 마찰이 주요 원인으로 지적되고 있다. 또한 밸브 트레인 시스템의 마찰 손실은 엔진 전체 마찰 손실 중 약 7.5~21%에 해당하는 양으로[6] 밸브 트레인 시스템의 마찰 저감은 엔진의 효율 증대에 상당한 부분을 차지할 것으로 생각된다.

밸브 트레인 시스템은 캠과 태핏, 밸브와 밸브 스프링, 밸브 가이드 그리고 밸브 시트(seat)로 구성되어 있다. 이중 캠과 태핏은 상대적으로 작은 유막을 유지하면서 고속, 고하중하에서 작동하는 부품으로 밸브트레인 시스템에서 발생하는 마찰 및 마모의 대부분을 차지하는 영역이다. 따라서 밸브 트레인 시스템의 마찰 특성에 대한 연구의 대부분은 캠과 태핏 사이의 마찰 특성에 집중되었으며[7-11], 마찰 마모를 줄이기 위한 여러 방안이 연구되어 실제 차량에 적용되고 있다.

상대운동을 하는 기계요소들은 하중조건에 따라 유체윤활(Hydrodynamic lubrication) 또는 경계윤활 상태에서 운전되어지고 있다. 최근에는 기계의 고출력화, 고속화, 소형화를 추구하기 때문에 단위 면적당 하중이 증가하여 운전조건이 가혹

해지고 있다. 이러한 고압상태의 접촉면의 윤활성을 유지하기 위해서는 향상된 성능을 가진 윤활제가 요구된다.

Hardy 등[12]은 상대운동을 하는 두 금속면이 윤활막에 의하여 분리될 때 마찰은 미끄럼면과 윤활막 사이에서의 물리, 화학적인 작용 때문에 감소된다는 경계윤활 메커니즘을 제시하였고, 이에 따라서 윤활유의 분자구조, 환경조건, 경계온도 그리고 고체면에서 윤활유의 물리, 화학적 흡착을 지배하는 변수들에 대한 연구가 활발해 졌다.

Bowden and Tabor[13]의 윤활메커니즘에 의하면, 윤활상태의 금속을 접촉시키면서 하중을 가하면 접촉면은 작용하중에 의하여 소성변형을 일으키며, 이러한 변형 때문에 윤활막은 두 금속면 사이에서 큰 압력을 받게 되지만, 이 압력은 전 접촉영역에서 같지 않기 때문에 압력이 최고가 되는 부분에서 국부적인 파단 및 금속의 용착이 일어난다. 결국 경계윤활면 사이에서의 윤활유 분자구조와 윤활막의 물리적 성질이 마찰에 중요한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

경계윤활성 향상을 위하여 고체윤활제에 대한 연구들이 많이 진행되고 있는데 Bartz와 Oppelt[14]는 광유에 MoS_2 를 분산시킨 윤활유의 경계윤활성 향상을, Reick[15]은 PTFE를 포함한 고효율 윤활유를 발표하였다. Cusano와 Sliney[16]는 연속되는 그들의 논문에서 graphite와 molybdenum을 분산시킨 윤활유의 동적 특성을 분석하였다. 이후에도 Lin[17] 등은 Al/graphite 고체윤활제의 연구를 Hisakado[18], Gupta와 Bhushan[19] 등은 경계윤활성향상과 윤활성능향상을 위한 연구를 계속 진행하고 있다. 주로 MoS_2 , PTFE, graphite 등의 분말을 오일에 분산시켜 제조하는 고체윤활제들은 종류에 따라 약간의 차이는 있으나, 약 300°C 이상의 고온에서 열분해 되어 상온에서의 고유성질을 상실하게 되며, 그때의 반응생성물이 고온마찰특성으로 나타나게 된다.[20, 21] 즉, 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[22]는 엔진환경에서의 구리 및 ZDDP 미립자의 영향을 연구하

였으며, Kuzharov와 Fisenko[23]는 사구실험에 의한 극압하중과 용착하중(critical and welding load)의 향상을, Nazarenko 등[24]은 고온특성향상을 Günsel과 Lockwood[25]는 산화와 부식방지효과를 발표하였다. 또한 니켈분말에 대한 연구도 진행되었는데 흡착과 촉매작용에 의하여 마찰, 마모감소 등의 효과가 월등하게 향상됨을 밝혔다. Astakhov와 Mouratov[26], Wu등[27]은 두 가지의 장점을 동시에 적용하기 위하여 구리와 니켈합금을 윤활첨가제로 사용하여 마찰 마모의 효과를 연구하였으며, Shpenkov[28]는 구리와 함께 니켈도 연한 금속층을 형성하여 마찰저감 및 마모에 효과가 있음을 보여주었다. 안효석과 이성철[29]은 구리와 니켈합금 미세분말 윤활제의 엔진적용을 위해 왕복동시험기를 사용하여 마찰과 마모특성에 대한 상세한 연구를 하였다. 왕복동시험결과에 의하면 구리합금입자에 의해 형성된 화학적 유기 금속피막에 의해 마찰계수와 마모직경의 감소를 가져오며, 기어시험에서는 미세한 구리입자가 손상부위를 메워 치료하는 효과가 있다고 발표하였다.

나노구리합금윤활제의 마모·마찰 특성에 관한 많은 연구들이 수행되었지만, 실제기관에서의 윤활특성과 성능에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 부족하다.

1.2 본 논문의 연구목적 및 내용

본 연구에서는 나노구리합금 윤활제가 첨가된 윤활유를 고속마찰마모시험기에 주입하여 일반적인 기계적 윤활 특성을 분석하고, 모터링상태의 실험장치가 설치된 4행정 엔진을 사용하여 윤활유의 윤활특성과 기관에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

연구내용은 크게 3가지로 구분된다. 마찰마모시험기에 일반극압제와 나노윤활제를 적용하여 나노윤활특성을 일반극압특성과 비교분석하고, 나노윤활첨가제의 체적첨가비율을 변화시키면서 하중, 온도 조건에 대한 윤활특성을 분석하며, 나노윤활첨가제를 실엔진에 적용시킬 경우의 윤활과 진동특성을 분석한다. 첫 번째 실험에서는 현재 사용되고 있는 일반극압제를 실질적으로 성분 분석하여, 최적의 성분조합에 의해 샘플을 제조하여, 샘플과 나노구리합금 분말과의 윤활특성 비교를 한다. 두 번째 실험에서는 나노윤활제의 체적첨가율을 0, 0.0075, 0.015, 0.03, 0.06, 0.12로 변화시키고, 하중과 온도 조건을 달리 하면서, 제반특성을 분석한다. 세 번째 실험에서는 실제 디젤엔진에서 피스톤을 제거하고, 밸브계통의 윤활성을 나노구리윤활제의 첨가비율에 따라 실험한다. 엔진을 회전시키는 모터를 로드셀로 고정시켜 엔진 회전에 소요되는 토크를 측정하며, 구동축에 x,y방향으로 갭센서를 설치하여 축진동을 측정한다. 로드셀에 의한 토크 측정에 의해서 윤활성능을, 크랭크축과 구동모터 사이의 주축에다가 갭센서를 설치하여, 이에 의한 갭(gap)을 측정하여 진동특성을 분석한다.

제2장 이론적 고찰

2.1 마찰의 종류

윤활의 형태에 따라 유체마찰을 유체윤활(Fluid Lubrication), 경계마찰을 경계윤활(Boundary lubrication)이라 부르고, 고체마찰은 건조마찰로서 Coulomb의 마찰법칙이 성립하고, 각 마찰의 특성은 다음과 같다.

(1) 유체마찰(Fluid friction)

하중과 점도가 적당하고 활동속도가 빠른 경우로서, 마찰면에 두꺼운 유막이 생성될 때 발생한다. 또한 유체마찰은 윤활제 자신의 내부마찰, 즉 점성에 의해서 발생하므로 유체역학적인 설명이 가능하고, 마찰계수는 0.01~0.001정도에 불과하다.

(2) 경계마찰(Boundary friction)

마찰면에 윤활제가 있으나 고하중, 저속 등을 유막이 액체적 성질을 잃을 정도로 얇아 졌을 때 발생하며, 이 때의 유막을 경계유막이라 한다. 마찰계수는 0.1~0.01정도이고, 유막의 두께는 $0.1\mu\text{m} \sim 0.01\mu\text{m}$ 이다. 그리고 경계마찰은 유막이 있으나 액체적 성질이 없을 때 발생하는 것으로 점성의 중요성이 점점 없어지고, 그 유성과 극압성이 문제가 된다.

(3) 고체마찰(Solid friction) 또는 건조마찰(Dry friction)

완전히 청결한 건조고체 표면이 직접 접촉해서 움직일 때 생기는 마찰로서, 고체 표면간의 요철, 표면분자력에 의한 응착 등의 진실접촉면의 현상으로 설명된다. 여기에서 청결한 고체표면이란 엄밀한 뜻에서는 고체표면상의 산화물피막이나 수증기피막까지도 없는 고체표면을 말하나, 실제에는 그러한 상태가 거의 없으므로 실제 문제에서는 윤활제가 없는 것으로 규정하고 있다. 마찰계수는 0.1~10정도이며, 기계, 기관의 시동시 혹은 고체마찰에 가까운 상태가 존재한다.

2.2 기관유허유 첨가제의 기능과 특성

유허유 첨가제는 오일 중에 고허입자로 부유하거나 용해된 상태의 유·무기 화합물을 의미한다. 전체 부피의 약 0.1~30%를 차지한다.

유허유 첨가제의 역할을 크게 나누면 물리적 역할과 화학적 역할로 나눌 수 있는데, 기유의 기능을 억제 또는 향상시키는 부분이 물리적 역할이라 할 수 있고, 기유에 없는 성질을 추가시키는 부분이 화학적 역할이다. 기유의 기능을 향상시키는 첨가제로는 산화억제제, 부식방지제, 소포제, 향유화제가 있으며, 기유의 단점을 억제시키는 첨가제로는 유동점 강하제, 점도지수 향상제가 있다. 그리고 새로운 성질을 부여하는 첨가제로는 극압제, 청정제, 금속 비활성제, 점착성 부여제가 있다.

특히 자동차용 유허유는 마찰, 열, 그리고 마모를 감소시키는 그들의 기초적인 작용들뿐만 아니라 많은 다른 작용들을 수행토록 요구된다. 광유 단독으로는 어떤 중요한 시기에 대한 그러한 요구사항들을 만족시킬 수 없기 때문에 유허유 첨가제의 역할은 매우 중요하며, 그들의 성능을 향상시키기 위해 엔진의 개발과 함께 꾸준히 개발되고 있다.

(1) 마모방지제 (Wear inhibitors)

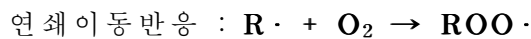
극압제나 내마모첨가제는 마찰금속표면상에 보호막을 형성하고 마모를 방지한다. 실제로 현재의 엔진오일에는 ZnDTP의 처방이 신뢰받고 있다. 산화방지제의 목적뿐만 아니라 부식이나 극압마모 방지제로서도 사용되고 있다. ZnDTP는 우수한 산화방지제 및 마모방지제의 특성을 유지시켜 주며, 일반적으로 Alcohol 또는 Alkylphenol 과 5황화인을 반응시켜 얻은 산을 산화아연으로 중화시켜 아연염을 형성한다.

(2) 산화억제제(Anti-oxidants)

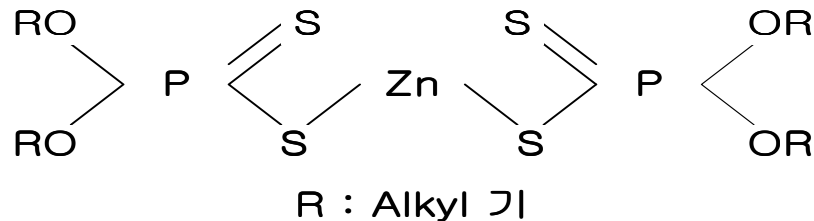
석유계 유허유의 탄화수소성분을 파라핀, 나프텐 및 방향족의 3족의 2종의 주성분으로 나눌 수가 있으나, 이들의 탄화수소는 모두 공기중의 산소에 의해서 쉽게

산화가 된다.

엔진오일이 산화되면 점성증가 및 엔진 내의 Deposit 및 부식의 원인이 된다. 이에 대해, 산화억제제는 산화를 일으키는 과산화물과 자유라디칼(Free Radical)을 분해시킨다. 일반적인 형태로 광유계 산화억제제엔 ZDDP와 Hindered phenol이 있고, 합성유 산화억제제엔 방향족 Amine가 있다. 윤활유의 산화는 다음과 같은 연쇄반응으로 진행된다.



RH는 탄화수소이고 R·, ROO·는 활성유리기이며 열, 빛, 촉매에 의해서 촉진된다. 엔진유는 산화가 진행되면 점도상승 및 전산가의 증가로 인하여 윤활유는 겔(Gel) 상태로 되어 베어링의 부식마모를 일으킨다. 대표적인 산화방지제인 Zn-DTP의 분자구조 식은 아래와 같다.



Zn-DTP의 또다른 중요한 역할은 엔진 내에서 마모를 억제하는 작용을 들 수 있다. 산에 의한 부식마모에 청정분산제가 유효한 것은 앞에서 이미 밝혔지만, Zn-DTP는 마모표면에 직접 반응하여, 극압성피막을 만들므로 마모를 억제한다. 이 피막구조에 관하여는 P계, S계, 폴리머 형태의 화합물 등 많은 설이 있다. 피막은 Zn-DTP가 금속표면에서 분해하여, 형성되기 때문에 열분해 하기 쉬운 것일수록 높은 극압성을 보인다. 알칼기의 구조에서는 2급 알칼기가 가장 내마모성이 좋지만, 열안정성이 뒤떨어지기 때문에 사용 시에는 청정성의 영향을 충분히 고려할 필요가 있다.

산화억제제로 산화를 지연시킬 뿐 예방할 수는 없다는 점을 알아야 한다.

(3) 부식방지제

부식방지제는 구리, 주석, 납이 주성분인 베어링 금속을 물과 부식성 산성물질로부터 보호하고 산성물질을 중화시킨다. 일반적인 부식방지제로는 과염기성 청정제, 물을 부유시키는 분산제 및 이미다졸, 벤조트리아졸, ZDDP의 킬레이트형 화합물이 있다.

(4) 소포제(Anti-foam agents)

윤활유의 개량에 따라서 각종 첨가제의 사용 또는 고속운전에 의한 발포현상이 많아지고 있다. 예컨대 고속버스의 디젤엔진유, 극압첨가제가 첨가된 터어빈유, 철도차량용 토크컨버터유, 비행기의 엔진유, 유압작동기의 발포가 대표적이다. 발포가 심하면 윤활유의 압축성 증대에 따라서 실린더의 작동이 불규칙하게 되고, 유압펌프의 효율이 저하되며, 마찰부예의 급유 부족분예 의한 마모, Seizure현상이 발생하게 된다. 또한 윤활유와 공기와의 접촉면적이 넓어져서 기름의 산화가 촉진되고, 거품을 함유한 윤활유의 Over flow가 발생한다. 소포제로서는 액상의 오르가노폴리실록산 즉 실리콘과 오르가노실리케이트가 대단히 유효함이 발견되었으나, 실리콘은 윤활유에 1~100ppm의 미량을 첨가하므로 우수한 소포작용을 나타내어, 윤활유의 특징을 손상하지 않는 특징을 가지나, 실리케이트류는 안정성에 난점이 있어서 탄화로서는 실리콘만이 소포제로 쓰이고 있다.

(5) 유동점 강하제(Pour Point Depressants)

n-파라핀을 거의 함유하지 않는 나프텐계 원유에서 정제한 나프텐계 윤활유 기유는 그대로라도 49℃의 낮은 유동점을 나타내나, 파라핀계 원유에서 정제한 파라핀계 윤활유 기유는 탈납온도(보통은 -10~-15℃)에 따라서 유동점이 변하게 된다. 즉 탈납온도를 낮춤으로서 낮은 유동점의 기름을 얻을 수 있으나, 윤활유의 수율이 현저하게 빠진다. 따라서 요즈음에는 가급적 높은 온도에서 탈납을 해서 기름의 수율을 될 수 있는 대로 떨어지지 않도록 유동점 강하제의 첨가로 유동점을 보완하는 방식이 취해지고 있으며, 이 방법이 가장 경제적으로 되어 있다.

(6) 점도지수향상제(Viscosity index improvers)

윤활유는 저온에서 고온까지 넓은 온도범위에 걸쳐서 점도가 가급적 변하지 않는 것이 실용상 바람직하다. 통상 윤활유 지수-온도의 관계를 나타내는 척도로서 점도 지수(Viscosity Index, VI)가 쓰이나, 용제정제법에 의한 경제적으로 가능한 석유계 윤활유의 VI는 100전후가 한도가 되며, 이것보다 큰 VI의 제품을 얻으려면 첨가제에 의존해야 한다. 그러한 목적으로 첨가되는 것이 점도지수향상제이며 보통 분자량 10,000이상의 유용성 고분자화합물이 쓰인다.

Multigrade(다급점도) 엔진오일은 저온에서 점도(SAE 10W30경우)가 -20°C 에서 측정하는 저온상에서의 규격(Max 3500 cP)범위 내에 있고, 한편 100°C 에서 측정하는 고온상에서의 점도도 규격범위 내에 있다. Multigrade를 오일에 첨가하면, 모든 온도 범위내에서 오일의 점도는 증가하며 이 점도 증가의 비율은 고온측이 저온측보다 크다. 따라서, 온도변화에 따라 점도변화를 최소화시켜 주는 매개체가 점도지수향상제이다. 이런 역할로 연료소비의 저감, 오일소모량 감소 및 저온시동성 향상 등의 효과를 낸다. 분자량 20,000~1,000,000 범위의 유용성 Polymer로 구성되어 있으며, 측쇄와 주쇄의 차이에 의해 많은 종류가 있고, 일반적으로 비분산형과 분산형이 있다. 엔진유, 기어유 모두 멀티그레이드화가 더욱 진전될 것이 예상되기 때문에 점도지수향상제의 역할이 보다 중요하게 되고 있다. 각각의 형에 의해서 증점성, 저온성능, 고온성능에 특징이 있기 때문에 금후에도 어느 화합물도 적재적소의 형태로 사용될 것이 예상된다.

(7) 극압첨가제(Extreme pressure additive, EP additives)

극압제는 하중이 커져서 금속간의 요철부끼리 흡착막을 뚫고서 접촉해 표면온도가 상승하면 흡착유막은 파괴되어서 타붙거나 Scuffing을 일으키게 된다. 이러한 윤활조건에서 가급적 마모를 줄이고, 윤활불능이 되지 않도록 작용한다.

Terpene 혹은 α -pinen이나 불포화지방산의 황화물등의 황계 화합물과 염소 및 옥소의 유기화합물인 할로겐계 화합물이 주로 사용되고 있다.

(8) 청정분산제(Dispersants / Detergents)

청정분산제는 슬러지, 카본, 연료나 엔진오일의 일부가 산화되어 발생하는 슬러지핵(Precursor)을 유중에 분산시켜 엔진의 내구수명에 영향을 미치는 퇴적물이나 마모를 억제하는 작용을 한다. 퇴적물 생성을 억제하기 위해 여러 가지 청정제나 분산제가 사용되고 Phenate나 Sulfonate의 금속계 청정제 외에 최근에는 호박산아미드류계나 폴리머형의 점도지수향상제(유용성 폴리머)와 같은 무회분산제가 사용되고 있다. 무회분산제의 화학구조는 일반적으로 분자량 700~3000의 Polybutene등의 유용성기와 Polyamine 또는 Polyol에서 유도된 극성기로 이루어져 있다. 무회분산제 중에는 호박산아미드계가 가장 많이 제조되고 있으며 Polybutene Succinimide가 대표적인 것이다. 유용성기의 Polybutene은 분자량 700~3000 사이로 조정하고 통상은 분자량 약 1000정도이다.(C 원자수 50이상) 또한 Succinate ester 와 Polyalkylenepolyamine 등이 있다. Ca sulfonate는 가장 많이 이용되고 있는 금속계 청정제이며 윤활유 정제과정에서 부생하는 유용성 Mahogany sulfonate나 합성 Alkylbenzene의 sulfonate로 제조된다. 가장 간단한 구조로는 중성 Alkylbenzene sulfonate에서 유용성의 Alkyl기 부분은 C18~C20 내지 그 이상이다. 오일에 대하여 충분한 용해성을 가지는 Sulfonic acid 의 분자량은 통상 450이다.

2.3 윤활유의 물리·화학적 성질

(1) 점도

윤활유의 선정에 있어서 가장 중요한 항목 중의 하나이다. 액체가 유동할 때 나타나는 내부저항의 척도로 일정량의 시료가 일정한 온도에서 일정한 거리를 통과하는데 걸리는 시간을 측정하여 구한다. 윤활유에서는 절대점도를 밀도로 나눈 동점도를 이용한다.

-절대점도:Poise(g/cm · sec)

-동점도:Stokes(cm²/sec), 동점도를 CGS단위로 표시한 것을 Stokes라 하며 그 1/100을 Centistokes(cSt)라 한다.

-일반적으로 산업용윤활유의 제품 번호는 40℃ 일 때 동점도를 나타낸다.

(2) 점도지수

점도지수는 온도의 변화에 따른 윤활유의 점도변화를 나타내는 수치로 값이 큰 경우가 온도변화에 대한 점도의 변화가 작다.

(3) 전산가

윤활유의 산화정도를 예측하는 수치이며 열, 공기, 배기가스와 접촉함으로써 산화가 일어나고 이로 인해 이 값이 증가한다.

(4) 색상

시료의 색을 기준으로 색도의 등급에 따라 구분하여 숫자로 표시한다. 윤활유 제품의 색상이 서로 다른 이유는 각종 색깔을 띠는 첨가제들이 포함되어 있기 때문이며 색상이 밝거나 어둡다고 해서 품질에 차이가 있는 것은 아니다. 즉 윤활유의 색상은 특별한 경우를 제외하고는 품질과는 전혀 무관하다.

(5)비중

표준물질의 밀도에 대한 어떤 물질의 밀도의 비이다. 윤활유에서 사용될 때에는 규정된 윤활유인지 또는 이물질이 혼합되었는지를 알기 위한 것이다.

(6)유동점

오일이 흐를 수 있는 가장 낮은 온도, 즉 유동성을 잃기 직전의 온도를 말한다. 크게 파라핀 왁스가 결정화됨과 동시에 결정격자 중에 유분을 흡수함에 따라 전체가 고화되는 현상이 일어나는 Wax pour point와 온도가 하강함에 따라 점도가 극단적으로 커져서 일정온도하에서는 유동되지 않는 현상이 발생하는 Viscosity pour point가 있다.

(7)비점

윤활유는 다수의 화합물로 이루어진 혼합물이기 때문에 일정한 비점을 갖지 않는다. 또한 증질유이므로 상압에서는 분해를 일으켜 증류할 수 없으므로 감압증류하여 얻은 분류성상에 따라 비점 범위를 나타낸다.

(8)인화점

오일을 가열해서 발생한 증기에 불꽃을 접근시켰을 때 순간적으로 증기에 불이 붙는 온도이다.

(9)연소점

오일을 가열하여 증기의 발생이 심해지고 불꽃을 접근시켰을 때 연소가 계속되는 온도이다.

2.4 기관의 윤활제

자동차에 사용되는 윤활유는 크게 엔진오일 (가솔린 엔진 오일, 디젤 엔진 오일), 기어오일(수동 기어오일, 자동변속기 오일), 브레이크 오일로 분류될 수 있다. 엔진은 연료를 연소시켜 자동차를 움직이게 하는 원동력인 만큼 가장 많은 양의 오일을 필요로 하며 엔진의 효율적인 운전은 엔진오일의 제 기능을 충분히 발휘할 수 있는가의 여부에 좌우된다. 여기서는 가장 큰 비중을 차지하고 있는 엔진오일을 이해하기 위해서 엔진내에서 엔진오일의 역할 및 기능을 알아본다.

2.4.1 엔진오일의 역할

(1) 윤활작용 - 엔진의 마찰부위에 액상의 윤활유가 개입되어 금속-금속접촉을 막고 마찰을 줄이는 기본적인 역할이다.

(2) 냉각작용 - 엔진의 연소열을 일차적으로 냉각하는 역할을 하는 것이 바로 엔진오일이지만 냉각수와 방열판의 존재로 간과되기 쉽습니다. 따라서 엔진유의 열산화 안정성이 매우 중요한 요건이며 오늘날의 고효율 엔진은 고도로 정제된 기유가 필요하다

(3) 세정작용 - 오늘날의 엔진은 열부하가 매우 큽니다. 이로 인하여 엔진에는 탄화, 산화물이 다량 생성되는데 이를 미세하게 분산시켜 기계부품에 퇴적되지 않도록 하는 기능이 더욱 필요하다. 이를 위하여 기계와 원재료에 맞도록 최적화된 배합식 설계가 필요하다

(4) 밀봉작용 - 폭발하는 가스의 팽창하는 힘을 낭비없이 구동에 사용하려면 금속 접촉면 사이의 간극으로 달아나는 기체를 잡아 주어야 한다. 이를 담당하는 것이 바로 윤활유이며 이를 위하여 적절한 점도를 항상 유지하여야 한다.

(5) 시동보조작용 - 엔진의 시동시는 충분한 유막이 형성되지 않아 엔진부품의 마모가 일어나기 쉬우므로 적절한 마모방지 첨가제의 처방과 엔진유의 저온유동성 개선이 필요하다.

2.4.2 엔진오일이 갖추어야 할 요건

(1) 산화안정성

오늘날의 엔진은 출력이 높고(DOHC, TURBO) 공기저항을 극소화 하였으며 방음설계로 인하여 엔진유에 대한 열부하가 극도로 높아져 엔진유가 열분해, 산화되기 쉽습니다. 이를 방지하기 위하여 극도로 정제된 기유를 사용하고 우수한 성능의 산화방지제를 처방합니다.

(2) 극압 내마모성능

고속, 고출력 엔진에서는 캠 등의 접촉면에서 하중이 극도로 높아져 엔진의 마모를 보호하고 마찰을 줄여주는 극압첨가제 및 마찰조정제의 처방이 매우 중요합니다.

(3) 청정분산성

오늘날의 엔진은 고온의 열에 의한 탄화, 산화 퇴적물이 엔진의 주요부품에 퇴적되어 윤활작용 및 윤활유의 공급을 방해하지 않도록 하며 산성산화물을 빠르게 중화하는 기능이 필요하기 때문에 안정성이 높은 기유의 사용과 청정제와 분산제의 첨가제 처방기술이 중요한 요건입니다.

(4) 저온시동성 및 고온유막 유지성능

요즈음의 엔진유는 사계절 사용하므로 겨울철에는 시동이 잘 걸릴 수 있도록 저온유동성이 우수하고 한여름에는 방열효율이 높지 않아 엔진이 과열되기 쉬우므로 고온 점도가 충분히 높은 제품이 요구됩니다.

(5) 증발안정성

엔진이 고온상태에서 오랜 시간 운전하면 윤활유의 저분자유분이 증발하여 윤활유가 소모됩니다. 이를 방지하기 위하여 고온증발 안정도가 높은 특별한 기유가 필요합니다.

2.5 엔진유의 분류기준

점도와 SAE점도번호의 관계는 Table 2.1와 같다.

Table 2.1 SAE Viscosity grade (SAE J300, 1995. 12.)

SAE viscosity grade	Low temperature viscosities		High temperatyre viscosities		
	Cranking (cP) max at temp °C	Pumping(cP) max with no yield stress at temp °C	Kinematic (cSt) at 100°C		High shear (cP) at 150°C and 10 ⁶ /s min
			min	max	
0W	3250 at-30	60,000 at-40	3.8	-	-
5W	3500 at-25	60,000 at-35	3.8	-	-
10W	3500 at-20	60,000 at-30	4.1	-	-
15W	3500 at-15	60,000 at-25	5.6	-	-
20W	4500 at-10	60,000 at-20	5.6	-	-
25W	6000 at-5	60,000 at-15	9.3	-	-
20	-	-	5.6	< 9.3	2.6
30	-	-	9.3	< 12.5	2.9
40	-	-	12.5	< 16.3	2.9(0W/40,5W/40,1 0W/40)
40	-	-	12.5	< 16.3	3.7(15W/40,20W/40 ,25W/40,40)
50	-	-	16.3	< 21.9	3.7
60	-	-	21.9	< 9.3	3.7

외기온도와 적절한 SAE 점도등급은 Table 2.2 과 같다.

Table 2.2 Air temperature & SAE standard

SAE	Air temperature(°C)
SAE 10W	-20°C ~ -10°C
SAE 20W	-10°C ~ -25°C
SAE 30W	5°C ~
SAE 40W	10°C ~
5W/20, 5W/30	-25°C ~ 40°C
10W/30, 10W/40	-20°C ~ 40°C
15W/40	-15°C ~ 40°C
20W/40, 20W/50	-10°C ~

2.6 고체윤활제(Solid lubricants)

고체윤활제는 액체윤활제를 사용할 수 없는 극저온이나 고온의 조건 하에서 윤활 효과를 나타내어 마찰계수를 감소시키고 내마모성을 향상시켜 기계부품의 수명 및 성능을 증대시키는 장점을 가지고 있다. 고체윤활제의 미끄러운 윤활효과는 대표적인 고체윤활제인 흑연의 결정구조에서 알 수 있듯이 층상구조 또는 lamella 구조에 기인한다. 즉 육각판상의 층상 결정구조를 가지고 있으며 한축과 평행한 층 내에서는 강한 공유결합에 의해서 그 축과 수직인 다른 축으로는 약한 Van der Waals 결합에 의해 결정을 형성하고 있으며 이 층과 층사이의 약한 결합력에 의해서 미끄러짐이 유발된다. 자기윤활성을 가지고 있는 층상 Dichalcogenide계 무기물질이란 IVB나 VB족 전이금속, 즉 Mo, W, Nb, Ta 등과 VIA족의 S, Se, Te이 결합한 화합물을 일컫는다. 흑연 이외에 보편적인 고체윤활제인 MoS₂, WS₂, TeS₂ 등의 MX₂ 계의 결정구조는 Fig. 2.1에서 보여준 바와 같이 흑연의 결정구조와 유사하다. 고체윤활제는 금속 부재에 코팅시 판상형의 적층결정구조 분말이 Fig. 2.2와 같이 표면에 배열된다. 이 때 S층과 S층간의 약한 Van der Waals 결합에 의해 윤활특성을 나타나게 된다(Fig. 2.3).

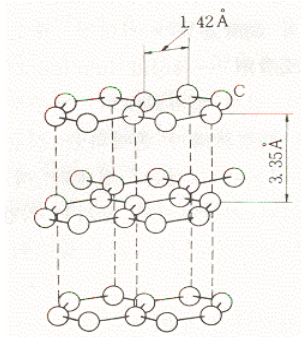


Fig. 2.1 Schematic of Graphite

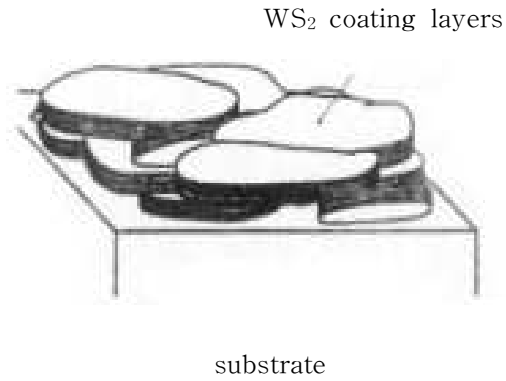


Fig. 2.2 Schematic of WS₂ coating Layers on Substratum

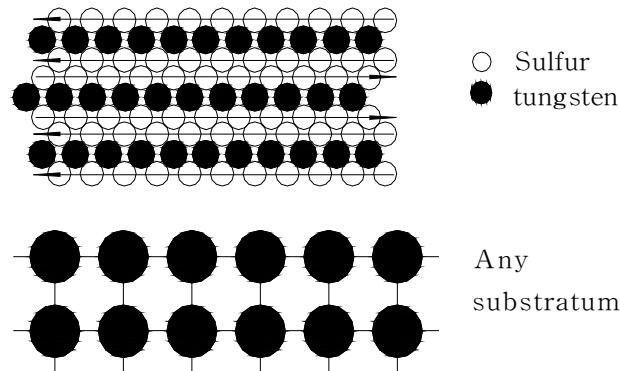


Fig. 2.3 Schematics of substratum and coated WS₂ layer

가장 대표적인 고체윤활제인 Graphite는 상온, 습도 분위기에서는 매우 낮은 마찰 계수 (약 0.06~0.1)를 나타내지만 500°C 이상의 고온 산화분위기에서는 산화에 의해 마찰계수가 급격히 상승하고 진공에서 윤활특성이 낮으므로 항공기 등의 접동부품의 윤활제로는 적용이 힘들다. MoS₂는 상온에서는 Graphite나 WS₂와 대등한 마찰계수를 나타내지만 내산화성이 낮아서 250°C 이상의 온도에서 MoS₂가 MoO₃으로 전이될 뿐 아니라 마찰계수도 급격히 높아지며 습도, 온도, 등의 작동환경에 따라 마찰계수가 민감하게 변한다. MoS₂는 250°C 이하의 온도에서는 적용 가능한 비교적 염가의 고체윤활제로 알려져 있다. WS₂ 고체윤활제는 graphite나 MoS₂에 비하여 내산화성이 크고, 가혹 환경에서의 윤활특성이 우수할 뿐 아니라, 최저온도 -27

3°C부터 최고온도 650°C까지 Graphite보다 낮은 마찰계수를 나타내며 진공상태에서는 1000°C까지 처리표면의 변형 없이 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한 상온에서 건식코팅하여 부재와 결합강도가 큰 얇은 코팅층을 얻을 수 있으므로 금속, 플라스틱, 세라믹스 등의 부재에 코팅이 가능하다. 이러한 장점을 가지는 WS₂의 양산 합성방법에 관하여는 문헌상 구체적으로 보고된 바 없다. 다만 WS₂ 제조 공정이 MoS₂ 제법과 매우 유사할 것이라는 판단하에 다음의 제조 공정을 고려할 수 있다. 즉, W와S 분말의 진공 내에서의 반응, WO₃ 고상과 CS₂나 H₂S 가스와의 기상-고상 반응, 텅스텐 산화물을 수용성염으로 전환시켜 sulfur를 포함하는 염과 반응시킨 후 침전시키는 방법, WS₃의 화학분해, 전기증착, 화학증착 등이 고려되어질 수 있다.

2.7 극압유희특성

유희상태는 표면거칠기에 대한 유막두께의 비($\Lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2}}$)에 따라 유희유희와 경계유희로 구분된다. 나노유희제를 사용하는 가장 큰 이유는 경계유희성을 향상시키고자 하는 것이며, 부수적인 큰 효과는 열전달율을 높여서 마찰면의 냉각효과를 향상시키는 것이다. Λ 값이 1보다 크면 유희유희상태를 나타내며 1보다 작으며 경계유희상태가 된다. Fig. 2.4는 경계유희상태에서 금속과 금속이 접촉되는 부분을 확대한 것으로 유희제가 더 이상 유희작용하지 못하는 것을 알 수 있다. 극압유희제는 이러한 상태에서 유희성을 유지하는 데에 있으며 금속표면에 강하게 접촉되어 금속과 금속의 직접접촉을 방지하는 역할을 한다. Fig. 2.5는 경계유희상태에서 나노금속분말의 역할을 도식적으로 나타낸다. 나노분말은 표면이 unpaired electron 등에 의하여 불안정한 상태이며 주위 유희의 분자를 끌어들이는 역할을 한다. 따라서 일반유희유의 분자를 표면에 끌어 들어서 2-3겹의 층을 형성하며 이러한 클러스터는 금속마찰표면에 그림과 같이 부착된다. 이때 상부 이동면이 높은 하중으로 미끄럼운동을 하면 부드러운 나노구리합금의 분말이 금속면사이에 끼어들어 하중의 크기에 따라 구름마찰이나 유희마찰 특성을 유지한다.

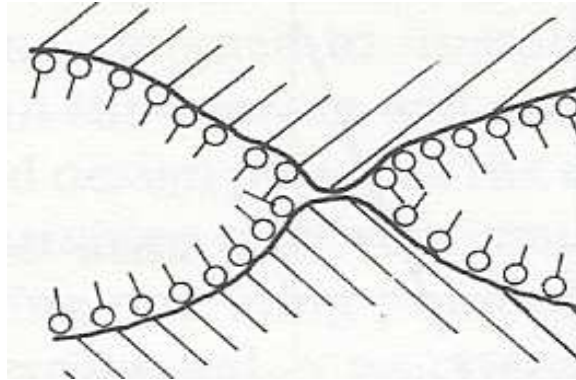


Fig. 2.4 Schematic diagram for the behavior of lubricant molecules

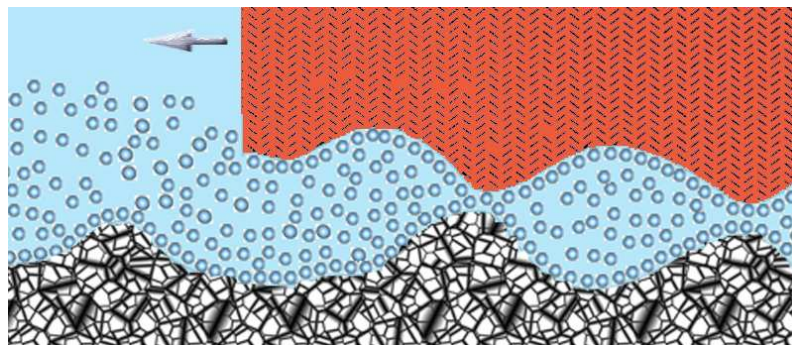
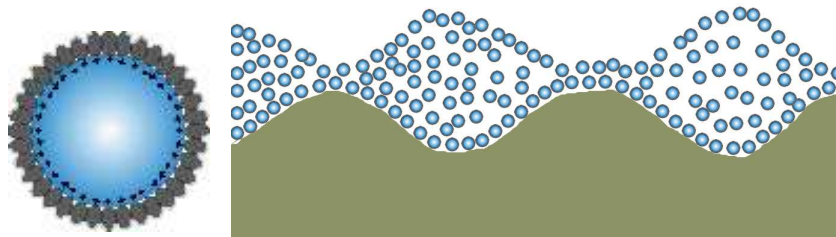


Fig. 2.5 Schematic diagram of the behavior of nano-particles for lubrication

제3장 실험장치 및 실험조건

3.1 나노구리합금윤활제

기관은 고온·고압 및 극압윤활상태를 피할 수가 없기 때문에, 기존의 윤활유 및 윤활유 첨가제로서는 이를 충분히 만족할 만한 성능을 기대할 수 없다. 현재 금속 재료 중 윤활성 및 극압, 마모방지에 뛰어난 성질을 가지는 구리합금에 대한 연구가 많은 나라에서 활발히 진행되고 있으며, 그 동안 발표되었던 많은 문헌에 의하면, 구리합금 윤활제가 기관을 포함한 기계요소에서 발생할 수 있는 극압윤활상태를 향상시키는 효과를 보이고 있음을 증명하고 있다. 특히, 러시아 중앙 자동차 및 자동차 엔진연구소(NAMI)의 연구보고서에 의하면 구리합금 윤활제가 극압성이 매우 우수하며 손상된 마찰부위에 치료효과도 기대할수있는것으로 판명되었으며, 안효석과 이성철의 연구보고서에서는 마찰·마모 저감과 손상 부위 치료효과가 있음이 확인되었다.

본 실험에서는 나노구리합금첨가제를 포함한 윤활유가 디젤기관의 윤활특성에 미치는 영향을 모터링상태의 실험장치를 이용하여 파악하고 동시에 고속마찰마모시험기로 나노구리합금첨가제의 일반적인 특성을 분석하고자 한다.

본 실험에서 사용되는 첨가제는 구리니켈합금 나노분말이 함유되었으며, Fig. 3.1은 본 실험에 사용된 나노구리니켈합금분말의 전자주사현미경(SEM)사진으로 형상은 구형이며 크기는 10nm에서 100nm 사이에서 주로 분포하고 있음을 보여준다.

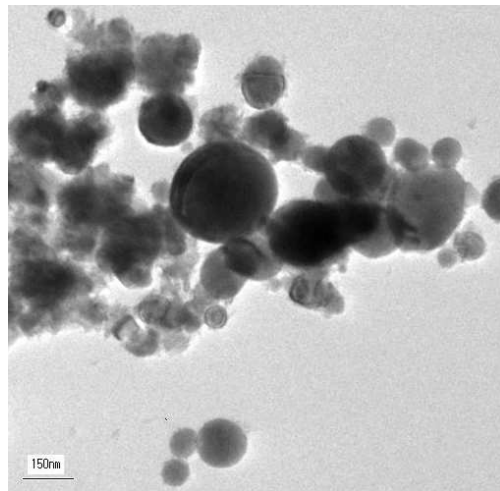
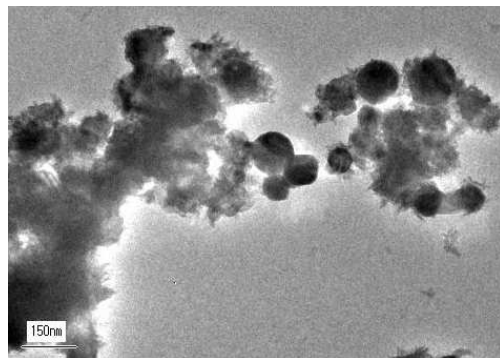
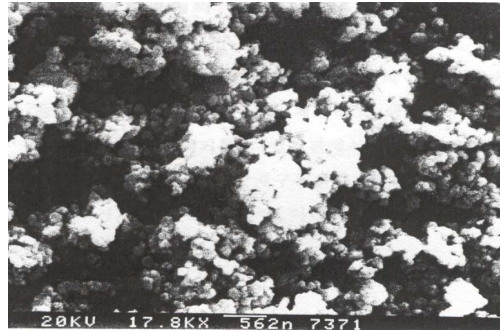


Fig. 3.1 SEM/TEM micrographs of CuNi nano-powder

3.2 마찰마모시험기

Fig. 3.2은 실험에 사용된 pin on disc wear test machine 장치의 구성도이며 Table 3.1은 장치의 사양을 보여 준다. 실험장치는 디스크 회전 및 마찰 부분과 데이터 취득부분으로 구성되어 있다. 회전 및 마찰 부분에 미리 가공된 시편을 설치하여 필요한 회전속도 및 부하를 적용하여 구동을 시킨다. 디스크 회전동력은 MMC 1kW 서보모터를 사용하여 2000rpm까지 변환할 수 있으며 마찰면의 하중은 1000N, 가열한계는 150℃까지 가능하며 원하는 하중과 온도를 유지할 수 있다. 데이터 취득은 로드셀에서 마찰력신호를 온도센서에서 온도신호를 전압신호로 받아들이 컴퓨터에서 처리한다. 고속에서 접촉면의 윤활상태 유지를 위하여 오일 순환펌프를 가동하여 항상 마찰면 바로 전에 오일이 공급되도록 하고 있다.

Table 3.1 Specification of wear test machine

	Specifications
Speed range of revolution (rpm)	0~2000
Load range (N)	0~1000
Heat range(℃)	0~150
Measurement Variables	Friction force, Temperature

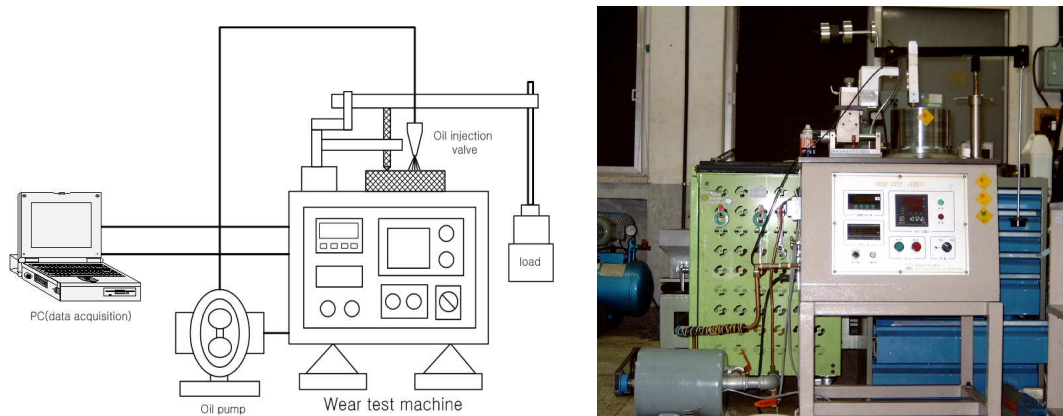


Fig. 3.2 Schematic diagram and photo of wear test machine

사용되는 디스크와 핀은 Fig. 3.3 및 4와 같다.

시편은 시험재(디스크)와 상대재(핀)로 나누어 제작되었으며, 재질은 마찰을 극대화시키면서, 상대재에 대한 마모가 크게 일어날 수 있도록 상대재는 SM45C, 시험재는 SK3로 제작하였다.

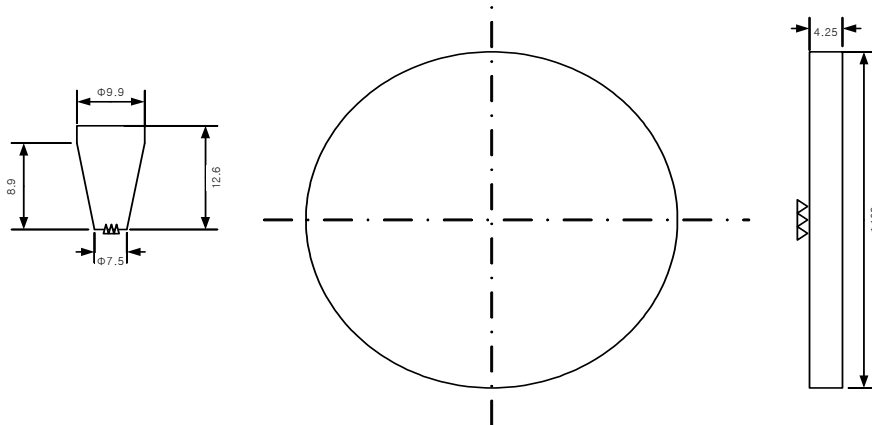


Fig. 3.3 Test specimen



Fig. 3.4 Photo of disc and pin

Table 3.2는 일반극압제와 나노유탄제를 비교하기 위한 실험조건으로서, 실험은 5가지 종류에 대하여 수행하였으며, 이는 Base oil(비중 : 0.81)와 Base oil에 첨가제 (1,10-Dichlorodecane 2.4ml + Amide 0.16g+ Ethylene Glycol 2ml + MgSO4 0.01g)를 25ml, 50ml, 75ml 첨가한 3가지 경우와 나노분말에 첨가제 50ml를 혼합한 sample로 구분할 수 있다. 전체실험에서의 유탄유 공급압력은 온도에 따른 점도의 변화에 따라 변동적으로 적용하였으며, 유탄유는 시편이 장착되는 부분에 1ℓ를 저장하였으며 저장된 유탄유는 필터를 통하여 오물이 제거되어 시편의 마찰부분에 공급된다. 마찰실험의 경우 회전원판의 속도를 100rpm, 500rpm, 1000rpm의 3가지 조건에서 하중을 기본하중(22N)에다가 10초의 간격을 두고 100N, 200N, 200N을 늘리고, 이후 하중을 줄여나가는 방법으로 총 70초간의 실험을 행하였다.

마모실험의 경우엔 회전원판의 속도를 500rpm으로 고정시키고, 하중을 총 172N을 가하여, 600초간의 시간을 두고 마모를 측정하였다. 그리고 마지막 실험 조건인 나노분말과 샘플의 조합용은 시편의 마찰부분에 나노분말이 이온 결합해야 하기 때문에 길들이기 작업을 각각 3시간 후에 마찰실험을 행하였다.

Table 3.2 Test conditions

sample	rpm & Load & time	Temperature (°C)
Base oil	100rpm : 22N → +100N → +200N → +200N → -200N → -200N → -100N (총 70초간) 500rpm : 22N → +100N → +200N → +200N → -200N → -200N → -100N (총 70초간) 1000rpm : 22N → +100N → +200N → +200N → -200N → -200N → -100N (총 70초간) 500rpm : 172N (총 600초간)	50
additive 25ml added		
additive 50ml added		
additive 75ml added		
Nano powder + additive 50ml		

Table 3.3는 나노윤활제의 극압특성을 비교하기 위한 실험조건을 나타내고 있다. 총 2가지의 나노구리합금 샘플을 사용하였고, 비교대상으로서 Base oil(비중 0.81)을 선정하였다. 첫번째 샘플과 두번째 샘플은 구리, 니켈, 은으로 구성되어 있고, 입자 크기가 각각 35nm, 20nm이다. 첨가제로서의 첨가 체적 비율을 표와 같이 변화시켰으며, 온도는 80~140까지이며, 하중도 13에서 530N까지로 설정되었다.

Table 3.3 Test condition

Nano material	Averaged nanoparticle dia(mm)	Revolution speed(rpm)	Volume percent(%)	Temp Range(℃)	Test Load range(N)
CuNi+Ag	35	600	0.06	80, 90, 120, 130, 140	530
CuNi+Ag	20	600	0.0075 0.015 0.03 0.06 0.12	80, 90, 120, 130, 140	13~530

3.3 모터 구동 디젤기관

3.3.1 실험장치

실제의 엔진에 대한 윤활유의 효과를 확인하기 위하여 기존의 실제 4기통 디젤기관을 이용하였으며 연소에 의한 동력전달의 영향을 제거하기 위해 분사밸브와 예열플러그를 분리하여 엔진구동에 따른 마찰특성과 주축의 진동특성의 평가를 위해 모터를 사용하여 강제 구동하는 형식의 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 엔진의 사진은 Fig. 3.5와 같으며 엔진의 기본사양은 Table 3.4와 같다.



Fig. 3.5 Model of experiment engine

Table. 3.4 Specification of experimental engine

	Specifications
Type	Vertical 4stroke cycle
Number of cylinder	4
Number of valve	2
Piston displacement(cc)	2209
Compression ratio	21.0
Maximum power(ps)	45 at 2600 rpm
Maximum torque(kg · m)	13.8 at 2400 rpm
Built tear	1981

3.3.2 구동장치

엔진의 주 구동축은 속도제어기가 부착된 AC서버모터와 직접적으로 연결되어 구동되어진다. 모터는 엔진의 토크만을 검출할 수 있도록 베어링을 사용하여 마찰력이 없이 고정되었다. 모터의 정격회전수는 1750rpm이며 실제실험은 1200rpm까지 수행되었다. 구동모터의 기본사양은 Table 3.5와 같다.

Table 3.5 Specification of test motor

	Specifications
Model	TEFC
Allowed voltages(V)	220~380
Allowed current(A)	2.5~44
Maximum power(kw)	10
Maximum rpm(rpm)	1750
Frequency	60
Number of pole	4
Maker	HYOSUNG Industrial co.

3.3.3 계측장치

본 실험에서는 나노구리합금 윤활제의 기관 내에서의 실제적인 효과를 파악하기 위하여, 엔진주축의 진동모드, 진동수, X-Y orbit선도와 엔진토크를 각각의 운전조건별로 측정하였다. 엔진주축의 진동모드, 진동수 및 X-Y orbit선도는 엔진주축의 변위를 변위센서(Eddy current type displacement transducer)를 통하여 측정하였으며 이렇게 측정된 신호는 증폭기(Amplifier)를 거쳐 적절한 크기로 증폭된 후 A/D 변환기를 거쳐 컴퓨터에 저장되어진다. 엔진토크를 계측하기 위해, 엔진좌우측에 로드셀(Load cell)을 설치하였으며, 로드셀로 입력된 신호는 또 다른 저장용 컴퓨터로 저장되어 2차 데이터정리가 가능하다. 엔진회전수는 모터로 연결되어있는 인버터(Inverter)의 입력을 제어하여 조절하였으며, 엔진의 회전속도는 모터에 설치된 엔코더(Encoder)로 인해 처리된다.

Fig. 3.6은 각종 데이터를 수집하기 위해 설치된 실험장치도를 나타낸다.

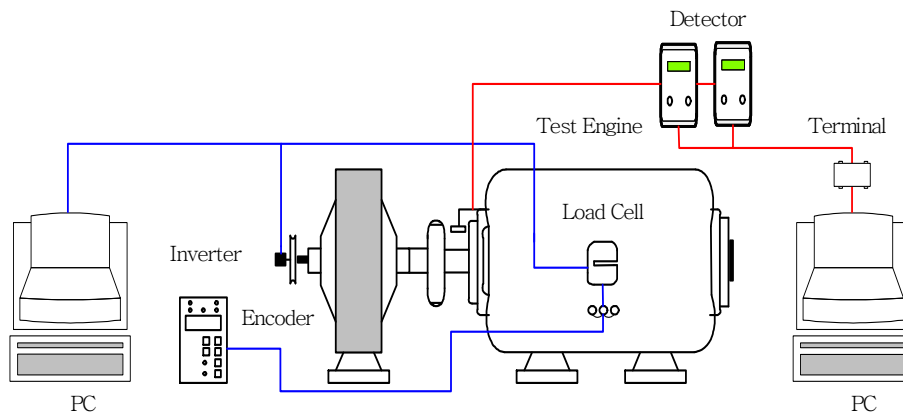


Fig. 3.6 Experimental setup for assessment of engine lubricants

1)진동 및 부하측정장치

기계의 진동은 진동을 전기신호로 변환시켜 주는 센서에 의해서 측정된다. 전기 신호의 단위로는 주로 밀리볼트(mV)를 사용하지만 때때로 볼트(V)를 사용한다. 볼트와 밀리볼트의 관계는 1,000mV/V이다. 말하자면, 밀리볼트값을 볼트값으로 변환하기 위해서는 소수점을 세자리 왼쪽으로 이동하거나 1,000으로 나누어 계산하여준다. 전압형태로 측정된 신호는 계측기, 오실로스코프, 분석기로 전달되며 이 전기신호를 mV/ μ m, mV/mm/s, mV/g, mV/deg 또는 사용되는 센서에 관련된 mV/[공학 단위]의 척도로 나눔으로써 계산된다. 회전체 시스템의 진동측정에 이용될 수 있는

일반적인 센서는 주로 비접촉 변위계(Proximity probe)와 접촉식 변위계(Shaft rider), 속도 센서, 가속도계로 나누어진다. 비접촉식 와전류 변위계(Non-contacting eddy current displacement transducer)로도 불려지는, 비접촉 변위계는 베어링 등 하우징에 부착되며, 변위계가 설치된 위치에 대한 상대적인 축진동을 측정한다. 일반적으로 두 개의 센서가 각각에 대해서 90° 각도로 설치되며 기계의 구동축 단에서 볼 때에 수평 변위계가 항상 수직 변위계의 90° 오른쪽에 있도록 설치된다.

접촉식 변위계는 직접적으로 축에 접촉되어 축의 절대 진동을 측정하는 장치이다. 속도센서들은 베어링 하우징에서 절대진동을 측정한다. 적분기에서는 전자적으로, FFT(Fast fourier transfer)스펙트럼 분석기에서는 수학적으로, 속도는 변위로 적분이 가능하다. 가속도계들은 g's의 절대 진동을 측정한다. 이 가속도 진동은 속도, 또는 변위로 적분이 될 수가 있다. 또한 기계진동의 크기 또는 양을 평가하는데 사용되는 측정 변수는 크게 변위, 속도, 가속도로 나누어진다.

변위(Displacement)는 저주파수 영역에서 지배적인 측정변수이며, 변형된 요소에 작용되는 응력에 관련된다. 일반적인 기계운동이 “+” 피크값과 “-” 피크값이 다른, 비조화 진동이기 때문에 변위는 피크-피크값으로 표시된다. 변위는 하우징과 구조물에 대해서, 10Hz(600CPM)이하의 진동을 측정하는 것에 이용된다. 그리고, 일반적으로 변위는 베어링과 그 저널 혹은 기계 케이싱과 축 간의 상대운동을 측정하는 것에 사용된다. 신호내의 노이즈에 비해서 변위의 진폭이 작기 때문에, 고주파대역에서 측정하는 것은 어렵다.

속도(Velocity)는 변위의 시간에 대한 변화율이다. 변위와 주파수 양쪽에 좌우되며, 피로와 관련된다. 진동의 변위 그리고 /또는 주파수가 커질수록, 측정 위치에서 기계진동의 심각도는 커진다. 10Hz(600CPM)부터 60,000(1000Hz)까지의 주파수 범위에서 기계상태를 평가하는 것에는 속도가 사용된다.

가속도(Acceleration)는 고주파 영역에서 지배적으로 측정된다. 가속도는 기어와 같은 기계 요소에 작용하는 힘에 비례하며, 발생하는 주파수들이 1,000Hz(60,000CPM)이상을 초과할 때에 기계상태를 평가하기 위해 사용된다. 신호의 강도가 낮기 때문에, 저주파 측정에는 가속도 측정이 부적절하다.

조화운동에 대해서는 변위, 속도, 가속도의 피크값을 다음과 같은 관계식으로 변환하여 구할 수 있다.

$$Velocity=2\pi fD$$

$$Acceleration=2\pi fV \text{ and } (2\pi f)^2 D$$

D=Displacement of peak (μm), f=Frequency (cycle/sec),

V=Velocity (mm/sec)

A=Acceleration (mm/sec²)

본 실험에서는 비접촉 와전류 변위센서인 GAP센서를 사용하였으며, 실험에 사용된 GAP센서는 구동모터와 연결되는 엔진주축에 90°의 위상차를 가질 수 있도록 설치하였다.

변위계에 대한 제원은 Table 3.6과 같다.

Table 3.6 Specification of test rig instruments

Instrument		Specifications
Gap sensor (eddy current type)	Model	VS-021
	Maker	ono sokki co.
	Measurement range(mm)	0.02 ~ 2.05
	Linearity	0.4%/F.S or below
	Operating temperature(°C)	-10 ~ +120
	Output	Voltage output
	Output content	Displacement, Amplitude
Gap detector	Model	VT-120
	Maker	ono sokki co.
	Measurement items	Gap between the detector and material under measurement
	Response frequency	DC to 10KHz
	Displacement output	0 ~ 5V
	Amplitude output	0 ~ 5V
	Monitor	digital display 0 ~ 100%

연소에 의한 동력전달의 영향을 완전히 제거한 기관의 부하는 엔진의 좌우측에 설치된 로드셀(Load cell)로 측정되며 사양은 Table 3.7과 같다.

Table 3.7 Specification of load cell

	Specifications
Model	JW U2SB
Maker	JUNGWOO co.
Rated capacity	200kg _f
Rated output	2mV/V±0.2%

3.3.4 실험조건 및 실험방법

본 실험에 사용된 조건은 Base oil(비중: 0.81)을 사용하였을 경우와 나노구리 합금 윤활제를 체적%별로 0.0075, 0.015, 0.03, 0.06, 0.12로 변화시켰을 때의 윤활특성과 진동특성을 알아보았다. 실험에 선행하여 기관 내에서 윤활유의 제 성능을 발휘할 수 있도록 500rpm의 회전속도로 72시간의 예비구동을 실시하였다.

전체실험에서 윤활유는 오일팬내로 6ℓ를 주입하였으며 별도의 윤활유 공급장치를 설치하지 않고 기관자체의 윤활유 공급방식에 따라 윤활유를 기관내로 공급하였다. 오일팬 내의 윤활유는 엔진외부에 설치되어있는 오일필터를 통하여 오물이 제거되어 엔진내부로 공급된다. 기관의 토크·진동특성의 실험에서는 엔진주축의 속도를 각각 저속, 중속 및 고속을 대표할 수 있는 50, 100, 200rpm과 400, 500, 600, 그리고 900, 1000, 1200rpm의 회전속도에서 데이터를 취득하였다.

데이터의 개수는 1s 동안 1200개로 일정하게 유지하였다.

제4장 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 윤활유 첨가제로 구리나켈 나노분말을 사용하였으며 첨가제의 일반적인 특성을 확인하기 위한 고속마찰마모실험에서 일반극압제와 나노윤활제와의 특성, 그리고 나노윤활제의 극압특성을 비교하였고, 실용 디젤기관에서 피스톤을 제거하여 밸브계통의 윤활 및 진동특성을 분석하였다.

4.1 일반극압제와 나노윤활제

4.1.1 마찰특성

1) 100rpm일 때

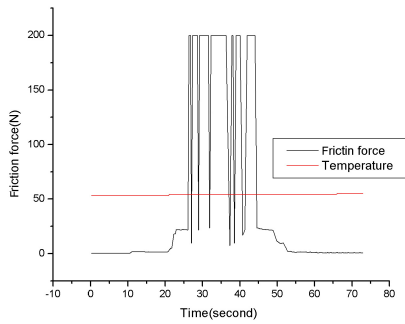
Fig.4.1은 마모시험기 회전속도가 100rpm, 즉 시험재와 상대재의 상대속도가 0.278m/s일 때 Base oil과 sample 25~75ml, 나노윤활제 50ml를 첨가한 경우의 하중 증감시험의 마찰력 변화를 나타낸다. 기유의 경우 하중 22N일 때 마찰력 0.24N, 122N일 때 1.65N으로 증가되었으며 322N이 되었을 때 2s동안은 23.2N의 마찰력을 유지하였지만 이후 고체마찰이 발생되면서 본 실험장치의 검출한계인 200N을 초과하였다. 하중이 522N으로 증가되고 다시 322N으로 감소될 때까지 마찰력이 200N을 초과하였으며 122N으로 감소되었을 때 1.43N, 22N일 때 0.63N이 되었다.

Sample 25ml 첨가시에는 하중이 22N일 때 0.19N, 122N일 때 1.47N, 322N일 때 4.11N, 522N일 때 6.25N으로 순차적으로 증가하였으며 이후 하중감소에 따라 3.97N, 2.38N, 1.83N으로 감소하였다. sample 50ml, 75ml, 나노첨가의 경우 모두 sample 25ml인 경우와 동일한 변화 경향을 보였다. 75ml인 경우가 가장 낮은 마찰력을 유지하였다. sample 50ml인 경우와 sample 50ml에 나노윤활제 50ml를 첨가한 경우를 비교하면 하중이 가장 낮은 22N에서는 sample 50ml인 경우 0.14N, 나노첨가의 경우 0.19N의 마찰력으로 sample 50ml 첨가의 경우가 나노분말의 경우보다 더 낮은 마찰력을 나타내었고, 하중의 증감에 따라 sample 50ml의 경우는 122N일 때 1.31N, 322N일 때 4.37N, 522N일 때 6.68N으로 증가하였고, 나노첨가의 경우는 1.21N, 3.26N, 6.79N이었으며, sample 50ml의 경우 하중이 322N, 122N, 22N이 감소

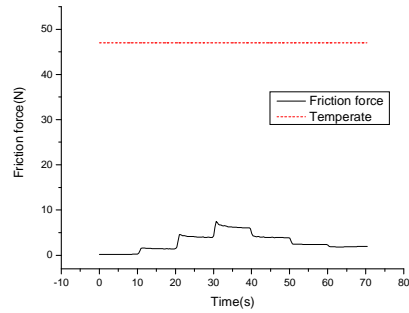
할 때 3.62N, 168N, 1.23N이었고, 나노첨가의 경우는 4.22N, 2.44N, 1.52N으로, 나노 첨가의 경우가 마찰력이 높게 나왔다.

Sample 75ml의 경우는 하중의 증감소에 따라 0.13N, 2.43N, 2.87N, 4.15N, 1.88N, 0.75N, 0.08N으로 가장 좋은 윤활특성을 보였다.

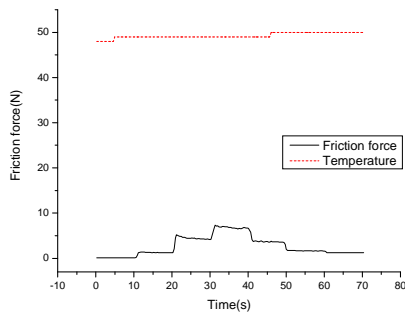
이상에서 극압특성을 살펴보면, base oil은 322N의 극압 상태에서 윤활성을 상실하고 고체마찰이 발생하였지만, 극압제를 첨가한 경우는 모두 윤활성을 유지함을 알 수 있다. 극압마찰력을 최소로 하는 첨가 비율은 75ml임을 알 수 있다.



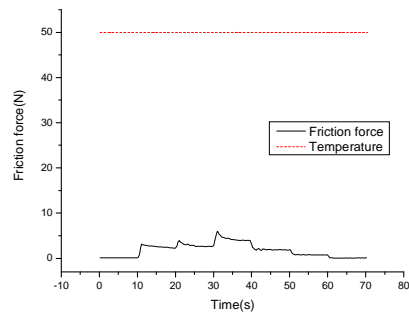
(a) Base oil



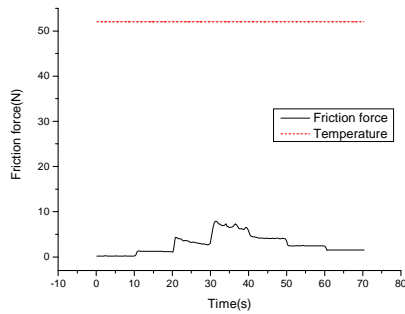
(b) Sample 25ml added



(c) Sample 50ml added



(d) Sample 75ml added



(e) Nano powder 50ml & sample 50ml added

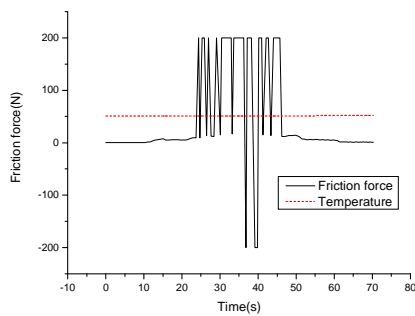
Fig. 4.1 Friction force variation at 100rpm

2) 500rpm일 때

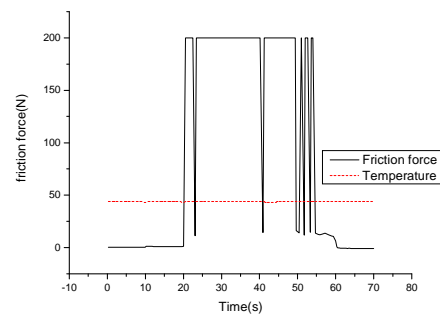
Fig. 4.2는 마찰마모시험기 회전속도가 500rpm, 즉 시험재와 상대재의 상대속도가 1.39m/s일 때 Base oil과 sample 25~75ml, 나노유탄활제 50ml를 첨가한 경우의 하중 증감소 시험의 마찰력 변화를 나타낸다. 기유의 경우 하중 22N일 때 마찰력 0.15N, 122N일 때 5.86N으로 증가되었으며 322N이 되었을 때부터 고체마찰이 발생되면서 본 실험장치의 검출한계인 200N을 초과하였다. 하중이 522N으로 증가되고 다시 322N으로 감소될 때까지 마찰력이 200N을 초과하였으며 122N으로 감소되었을 때 5.84N, 22N일 때 1.21N이 되었다.

Sample 25ml 첨가시에는 하중이 22N일 때 0.18N, 122N일 때 0.93N, 322N일 때 부터 고체마찰이 발생되면서 본 실험장치의 검출한계인 200N을 초과하였다. 하중이 522N으로 증가되고 다시 322N으로 감소될 때까지 마찰력이 200N을 초과하였으며 122N으로 감소되고 5s가량 지난 뒤 11.72N, 22N일 때 0.12N이 되었다. sample 50ml의 경우 25ml와 동일한 경향을 보이며, 75ml의 경우엔, 하중이 122N이 될 때부터 검출한계인 200N을 초과해서, 122N으로 하중이 감소될 때, 비로소 하중이 0.13N으로 측정되었다. 나노첨가의 경우 하중 증감소 시험동안 지속적인 유체윤활을 보였다. 22N의 경우 0.48N, 122N일 때 1.14N, 하중이 322N일 때 2.08N, 가장 높은 하중인 522N을 주었을 때, 6.77N으로 유체윤활을 유지한다. 그리고 322N으로 감소

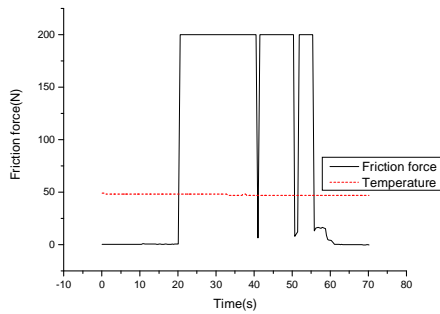
될 때 2.52N, 122N · 22N으로 감소될 때 0.76N, 0.21N의 낮은 마찰력을 유지하였다. sample 50ml인 경우와 sample 50ml에 나노윤활제 50ml를 첨가한 경우를 비교하면 나노윤활제가 첨가되면서, 322N에서 윤활성을 상실한 sample와 달리, 전체적인 유체윤활을 유지하는 것을 알 수 있다.



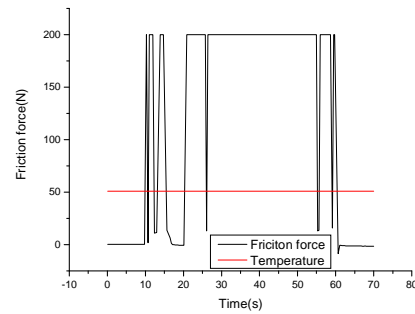
(a) Base oil



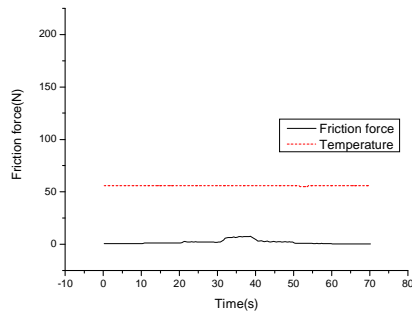
(b) Sample 25ml added



(c) Sample 50ml added



(d) Sample 75ml added



(e) Nano powder 50ml & sample 50ml added

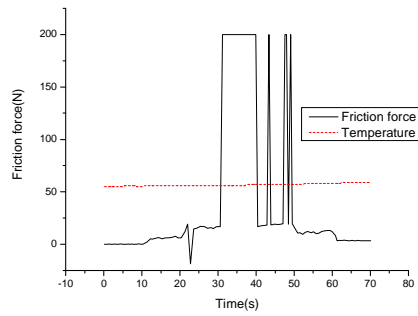
Fig. 4.2 Friction force variation at 500rpm

3) 1000rpm일 때

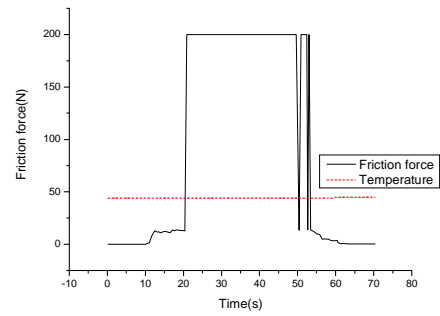
Fig. 4.3은 마찰마모시험기 회전속도가 1000rpm, 즉 시험재와 상대재의 상대속도가 2.7814m/s일 때 Base oil과 sample 25~75ml, 나노윤활제 50ml를 첨가한 경우의 하중 증감소 시험의 마찰력 변화를 나타낸다. Base oil의 경우 하중 22N일 때 마찰력 0.16N, 122N일 때 6.17N, 322N이 되었을 때 12.985N의 하중으로 증가되었으며, 522N이 되었을 때부터 고체마찰이 발생되면서, 본 실험장치의 검출한계인 200N을 초과하였다. 하중이 322N으로 감소되면서 부분적인 고체마찰력을 나타내며, 122N이 되면서 11.53N, 22N으로 감소되면서 3.539N의 마찰력을 유지한다.

Sample 25ml 첨가시에는 하중이 22N일 때 0.11N, 122N일 때 12.16N, 322N일 때부터 고체마찰이 발생되기 시작해서, 322N으로 감소되고 3s뒤부터 0.35N을 나타낸다. sample 50ml, 75ml, 나노첨가의 경우 모두 sample 25ml인 경우와 동일한 변화 경향을 보였다.

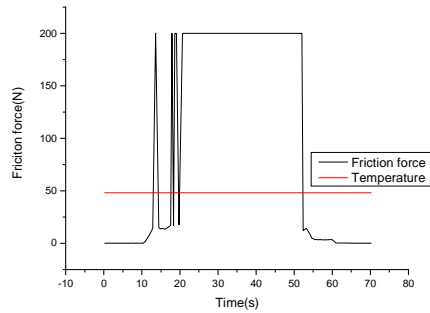
1000rpm에서는 500rpm에서와 유사하지만 특이하게 Base oil이 322N까지 윤활상태를 유지하고 있다. 이것은 고rpm이 되면서, 시편의 미세한 거칠기 부분에 의한 영향인 것으로 고려된다.



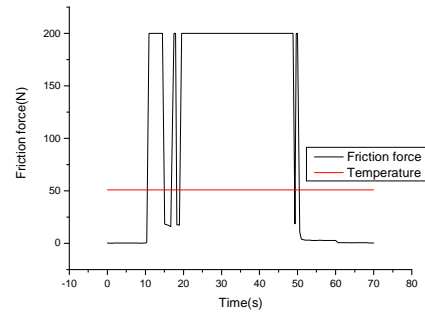
(a) Base oil



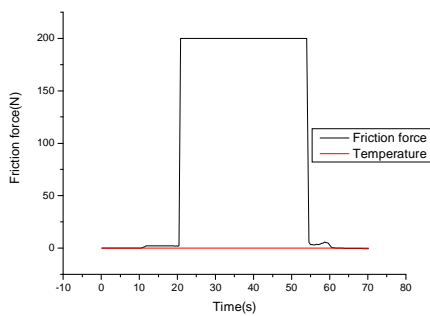
(b) Sample 25ml added



(c) Sample 50ml added



(d) Sample 75ml added

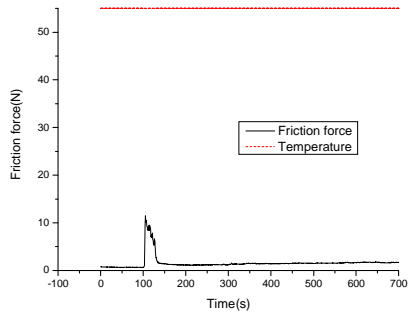


(e) Nano powder 50ml & sample 50ml added

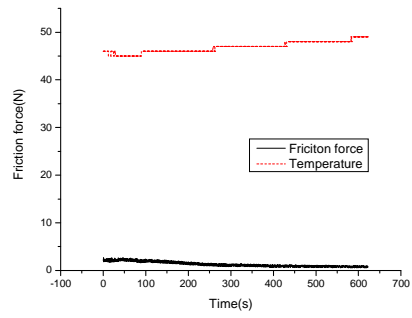
Fig. 4.3 Friction force variation at 1000rpm

4.1.2 마모특성

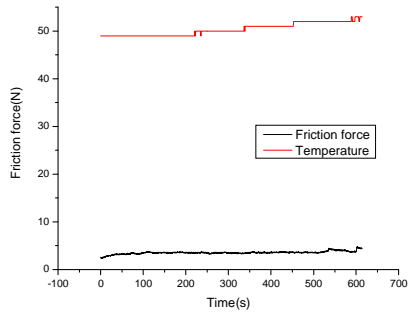
마모특성시험은 172N의 하중상태에서 600초간 계속된다. 마모시험 동안의 마찰상태를 관찰하기 위하여 마찰력을 측정하였다.(Fig. 4.4) 기유의 경우는 운전초기에 갑자기 마찰력이 증가되는 현상이 있었는데 이는 불안정한 하중의 작용에 의한 것으로 생각된다. 모든 경우가 유체윤활상태에 있음을 알 수 있으며 회전 중에 하중의 작은 불안정이 마찰력의 변화를 주도하고 있다.



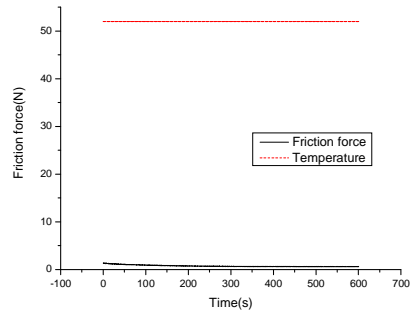
(A) Base oil



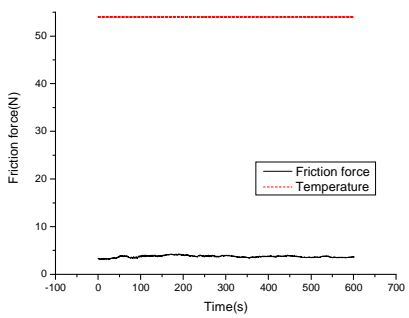
(b) Sample 25ml added



(c) Sample 50ml added



(d) Sample 75ml added



(e) Nano powder 50ml & sample 50ml added

Fig. 4.4 Friction force variation at contact force of 172N and 500rpm

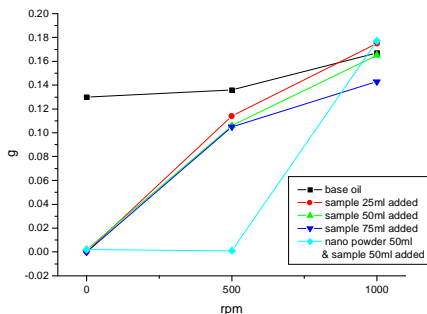
4.1.3 시편마모특성

Table.4.1은 마찰·마모시험에 의한 시편의 마모량의 변화 측정치를 나타내고 있다. Fig. 4.5는 마찰속도의 증가에 따른 마모량의 변화를 나타낸다. rpm의 증가에 따른 (a)의 그래프를 보게 되면, Base oil와 비교해서 첨가제의 양이 증가할수록 마모중량의 감소를 보였고, 나노분말과 첨가제의 혼합 sample 같은 경우엔 500rpm에선 좋은 유효성능이 나타났지만, 1000rpm에선 Base oil보다도 나쁜 유효성능을 나타내었다. (b)의 그래프는 10분간의 마모시험에서의 시편의 중량감소를 나타낸 그래프로써, 첨가제 50ml·75ml 그리고 나노분말과 첨가제의 혼합 sample에서 중량의 변동이 없었다.

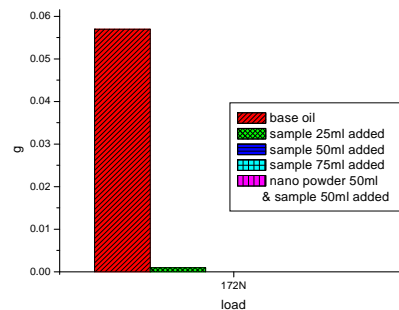
Table 4.1 Abrasion weight

(unit : g)

	100rpm	500rpm	1000rpm	172N
Base oil	0.13	0.136	0.167	0.057
Sample 25ml added	0	0.114	0.175	0.001
Sample 50ml added	0.002	0.106	0.165	0
Sample 75ml added	0	0.105	0.143	0
Nano powder 50ml & sample 50ml added	0.002	0.001	0.177	0



(a) the change of specimen's weight in friction experiment



(b) the change of specimen's weight in abrasion experiment

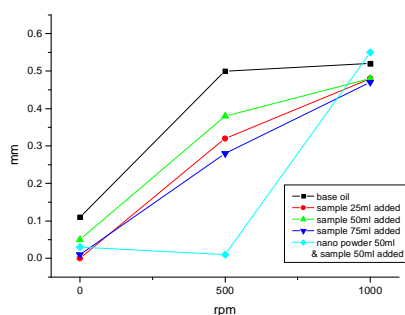
Fig. 4.5 Abrasion weights with speed and load variation

Table 4.2와 Fig. 4.6은 시험재의 전체길이의 변화를 나타낸 것이다. (a)의 그래프에서 보면, Base oil와 비교해서 첨가제의 양이 증가할수록 마모길이의 감소를 보였고, 나노분말과 첨가제의 혼합 sample 같은 경우엔 500rpm에선 가장 적은 변화를, 1000rpm에선 Base oil보다도 많은 길이변화를 나타내었다.

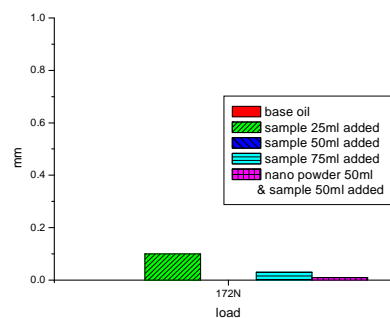
(b)의 그래프는 10분간의 마모실험에서의 시험재의 마모길이 감소를 나타낸 그래프로써, 첨가제 50ml일 때 좋은 유효성능을 나타내었다.

Table 4.2 Specimen length variation

	100rpm	500rpm	1000rpm	172N
Base oil	0.11	0.5	0.52	0
Sample 25ml added	0	0.32	0.48	0.1
Sample 50ml added	0.05	0.38	0.48	0
Sample 75ml added	0.01	0.28	0.47	0.03
Nano powder 50ml & sample 50ml added	0.03	0.01	0.55	0.01



(a) the change of specimen's length in friction experiment



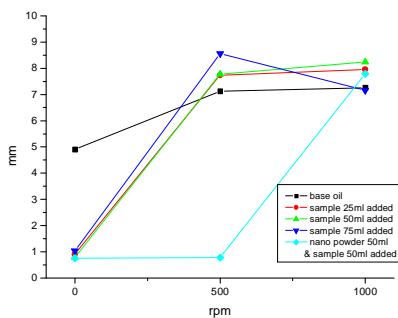
(b) the change of specimen's length in abrasion experiment

Fig. 4.6 Specimen length variation

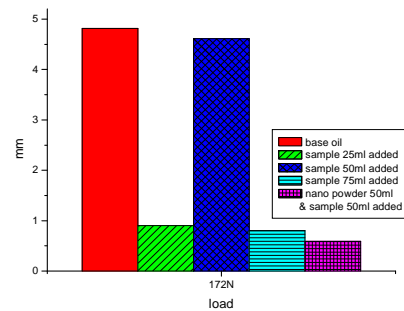
Table 4.3과 Fig. 4.7은 상대재의 마모폭의 변화를 나타낸 것이다. (a),(b)의 그래프에서 보면, sample와 첨가제가 포함되었을 때가 Base oil와 비교해서 마모폭이 줄어들었으며 500rpm에서는 나노분말이 첨가된 sample, 1000rpm에서는 큰변화가 없으며, 172N의 하중을 준 마모실험에서는 나노분말이 첨가된 sample이 좋은 윤활성능을 보였다.

Table 4.3 Specimen width variation

	100rpm	500rpm	1000rpm	172N
Base oil	4.91	7.13	7.26	4.82
Sample 25ml added	0.91	7.74	7.96	0.9
Sample 50ml added	0.79	7.77	8.24	4.61
Sample 75ml added	1.04	8.56	7.16	0.8
nano powder 50ml & sample 50ml added	0.76	0.78	7.79	0.59



(a) the change of specimen's width in friction experiment



(b) the change of specimen's width in abrasion experiment

Fig. 4.7 Specimen width variation

Fig 4.8은 본 실험 후의 상대재 판의 마모정도를 base oil, sample 25ml, sample 50ml, sample 75ml, Nano powder 50ml+sample 50ml의 순으로 비교한 것이다. (a), (b), (c)는 하중증감시험으로 각각 100rpm, 500rpm, 1000rpm일 때의 시험체에 나타난 마모흔이며, (d)는 500rpm, 172N으로 600s 연속실험한 후의 사진이다.



(a) Load increase and decrease test at 100rpm



(b) Load increase and decrease test at 500rpm



(b) Load increase and decrease test at 1000rpm



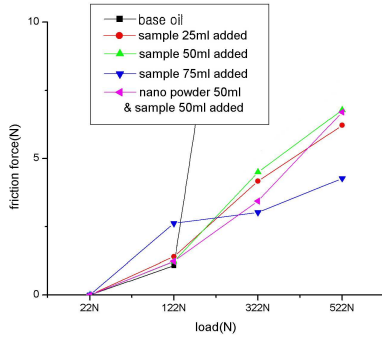
Base oil 25ml 50ml 75ml 50ml+nano

(d) Steady state wear test of 500rpm and 172N

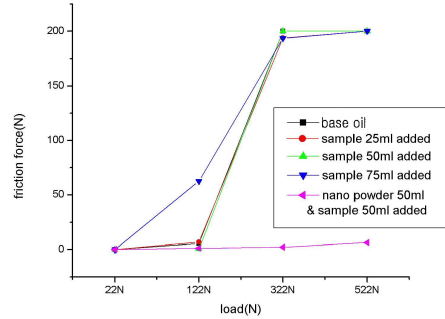
Fig. 4.8 Comparison of disc wear scar

100rpm의 경우에 기유는 사용했을 때 큰 마모흔을 보여주며 나머지는 거의 흔적이 없다. 회전속도가 증가하여 500rpm이 되면 모든 경우에 유사한 마모폭을 나타내며 1000rpm으로 더욱 증가하면 더욱 명확히 모든 경우에 마모흔적을 보인다. 500rpm에서 일정한 하중 172N을 작용시킨 (d)의 경우는 전반적으로 하중 증가감소 시험의 경우보다 작은 흔적을 보이지만, 75ml 첨가시와 50ml+nano의 경우가 다른 경우보다 더욱 작은 흔적을 나타낸다.

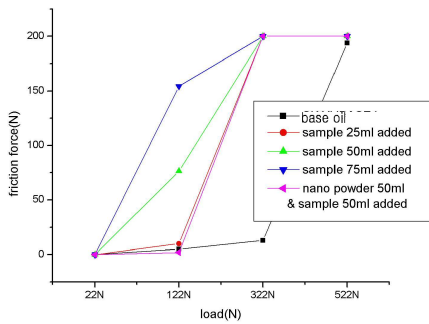
4.1.4 종합비교분석



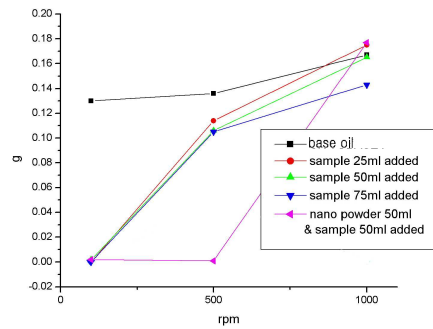
(a) Friction forces at 100rpm



(b) Friction forces at 500rpm



(b) Friction forces at 1000rpm



(d) Amount of wears with speed

Fig. 4.9 Friction and abrasion comparison for all the cases

Fig. 4.9는 100rpm, 500rpm, 1000rpm에서의 마찰력 비교, 그리고 rpm에 따른 마모량을 나타낸 그림이다. 100rpm에서 접촉하중이 22N일때 기유를 포함하여 모든 경우 완전유체마찰상태에 있음을 알 수 있으며 마찰력은 거의 없다. 하중 122N에서도 유체마찰 상태에 있으며 점도에 의존하는 마찰특성을 나타낸다. 점도가 가장 낮은 base 오일이 가장 낮은 마찰력을, 75ml를 첨가한 경우가 가장 높은 마찰력을 보임을 알 수 있는데, 이는 유체마찰의 점도에 따른 마찰력의 발생결과의 전형성을 나타낸다. 322N이 되면 윤활제에 따라서 부분적인 고체마찰 즉 경계마찰상태에 있

음을 알 수 있다. Base oil은 매우 높은 마찰력을 가지며 윤활성을 상실하게 된다. 다른 윤활제는 아직 미세한 경계마찰상태라 할 수 있고 극압제가 가장 많이 포함된 75ml의 경우가 가장 낮은 마찰력을 보인다. 하중이 더욱 증가하여 522N이 되었을 때에도 322N과 유사한 특성을 나타낸다.

500rpm에서는 하중을 걸어 주는 레버의 진동이 상당히 발생하기 때문에 실제 마찰면에 작용하는 압력은 100rpm에 비하여 2배 이상 증가할 것으로 생각된다. 일반적으로 고속에서 마찰특성이 우수하지만 이러한 이유에 의하여 100rpm 보다 더욱 악화된 결과를 나타낸다. 122N까지는 유체마찰의 특성을 그대로 나타내고 있으며 322N이 되면 나노윤활제만 유체윤활상태에 있고 나머지는 윤활성을 상실한다. 522N에서는 나노윤활제만이 윤활상태에 있음을 알 수 있다.

1000rpm에서는 500rpm에서와 유사하지만 특이하게 Base oil이 322N까지 윤활상태를 유지하고 있다.

마모량은 일반적으로 마찰력과 비례하지만, 본 실험에서는 Base oil의 마모량이 마찰력과 상관없이 가장 큰 것을 알 수 있다. 100rpm에서는 base oil를 제외하면 마모량이 매우 적으며 500rpm에서는 나노윤활제가, 1000rpm에서는 75ml의 경우가 마모량이 가장 적다. 디스크의 마찰흔 역시 이러한 특성을 보여준다.

4.2 나노윤활제의 극압특성실험

Figs. 4.10과 11은 하중증가에 따른 마찰력의 변화와 나노첨가율에 따른 마찰력변화율을 나타낸다. 마찰마모시험기에 일정시간 비율로, 하중을 수동으로 조작하였다. 하중이 증가하면서 마찰력도 증가함을 알 수 있다. 기유(base oil)의 경우에는 하중이 79.68N이 되면 마찰력이 크게 증가하면서 경계윤활상태에 들어가게 되고 결국 윤활성을 잃어버리고 실험이 중단된다. 나노윤활제가 0.0075vol% 일 때는 거의 효과가 없으며 0.015vol%가되면 극압성이 약간 향상되어 118.192N까지 윤활성을 유지하며 0.03vol%에서는 464.8N까지, 0.12vol%에서는 531.2N까지 윤활성을 유지하였다. 마찰력은 0.03vol%까지는 마찰력이 기유에 비하여 낮아지는 경향을 나타내지만 0.06vol%에서는 오히려 마찰력이 증가된다. Fig. 4.12는 온도증가에 따른 마찰력변화를 나타낸다. 온도의 영향을 조사하기 위하여 하중을 동일하게 유지하면서 윤활온도를 증가시키면서 실험하였다. 기유의 경우에는 온도의 증가와 더불어 마찰력이 증가하였으며 130도에서 경계윤활상태에 도달하고 실험이 중단되었다. 나노분말이 첨가된 경우는 모든 경우에 본 실험장치의 최대온도인 140도까지 무리 없이 윤활상태를 유지하였다. 온도의 증가는 윤활유의 점도를 저하시키기 때문에 하중이 적은 경우에는 일반적으로 마찰이 줄어들지만 높은 하중의 경우에는 경계윤활상태에 접근하면서 금속간의 마찰이 증가되어 마찰력이 오히려 증가된다. 본 실험의 경우를 살펴보면 기유의 경우에는 후자의 경우가 되어 마찰력이 증가 되었으며 나노윤활제의 경우에는 어느 정도 증가된 후에 다시 감소되었다.

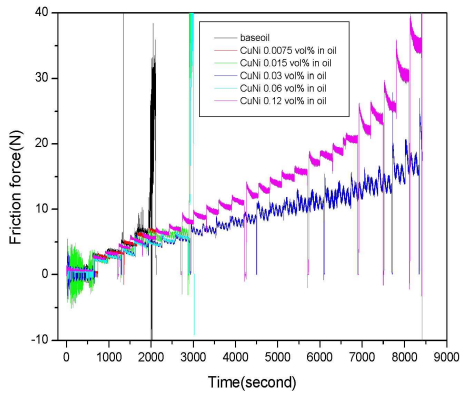


Fig. 4.10 Friction force by time lapse

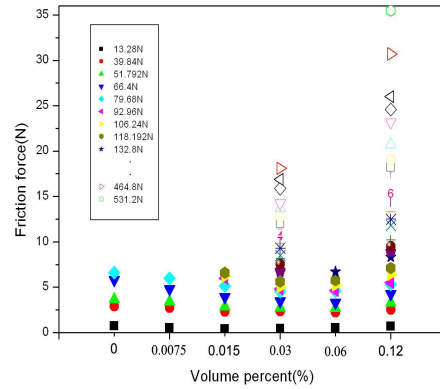


Fig. 4.11 Max allowance load in Volume percent(%)

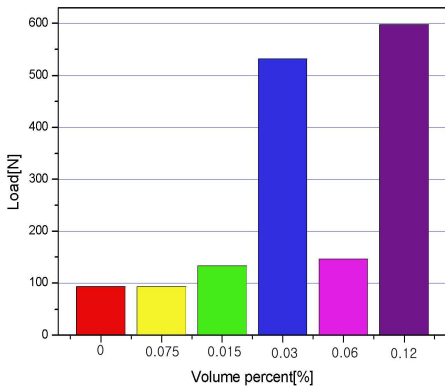


Fig. 4.12 Friction force with temperature increase

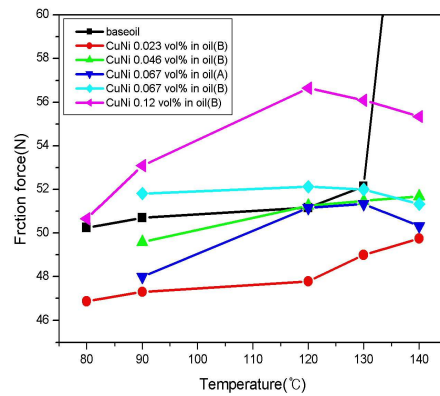


Fig. 4.13 Max running load with volume percent variation

4.3 벨브계 포함 축계 윤활 · 진동특성

4.3.1 축계 과도윤활특성

Fig. 4.14은 구동모터에 공급되는 출력의 변화를 보여주며, Fig. 4.15는 이때의 엔진 토크 변동을 나타낸다. 모터전류를 급속히 최대로 올리게 되면 최대토크까지 상승한 후 정상상태가 되어 동일한 토크가 계속된다. 이때 모터전류를 급속히 0의 상태로 내리게 되면 토크가 떨어지게 되고 마지막에는 역시 심한 진동과 함께 정지운동을 하게 된다. 특성에 따라서 5개의 구간으로 나눌 수 있는데, 시작구간, 가속구간, 정상구간, 감속구간 그리고 정지구간이다.

모터를 구동하기 시작한 시기를 시작구간이라 할 수 있는데, 모터전류의 급속한 입력에 의한 심한 진동현상이 나타나지만, 초기조건외 상이로 분석에서 제외한다. 점점 모터의 속도를 올리기 시작한 가속구간은 동일 입력에 대한 엔진의 가속상태를 보여주는데, 나노윤활첨가제 0.06vol% 첨가시는 Base oil의 경우와 비교할 때, 별다른 토크의 변동이 없으며, 모터의 속도에 따라 진동이 잦아지고 있음을 보여주며, 0.0075, 0.015, 0.03, 0.12vol%일 때는 보다 낮은 토크를 가지고 가속되고 있음을 보여준다.

모터의 최대전류를 지속시킨 정상구간은 계속적으로 동일한 입력을 했을 경우의 토크변화를 보여주는데 base oil과 비교할 때, 나노윤활첨가제 0.06vol%시에는 10.75%의 토크절감을 나타내며, 0.015, 0.03, 0.0075순으로 토크가 더욱더 작아지며, 나노윤활첨가제 0.12vol%시에는 34.17%의 토크절감을 보여준다. 모터전류를 급속히 줄이는 감속구간에서는 base oil의 심한 진동에 비해서, 나노윤활첨가제 첨가시엔, 보다 작은 진동을 보여준다. 모터전류가 0이 될 때의 정지구간은 base oil의 경우 토크변동이 점점 커지다가 마지막에 매우 큰 피크치를 보인 후 정지한 반면, 첨가제사용의 경우 비교적 작은 피크치를 보인 후 정지한다. 과도상태의 윤활특성을 살펴보면 모든 구간에서 나노윤활첨가제의 윤활성 향상을 말해주고 있다.

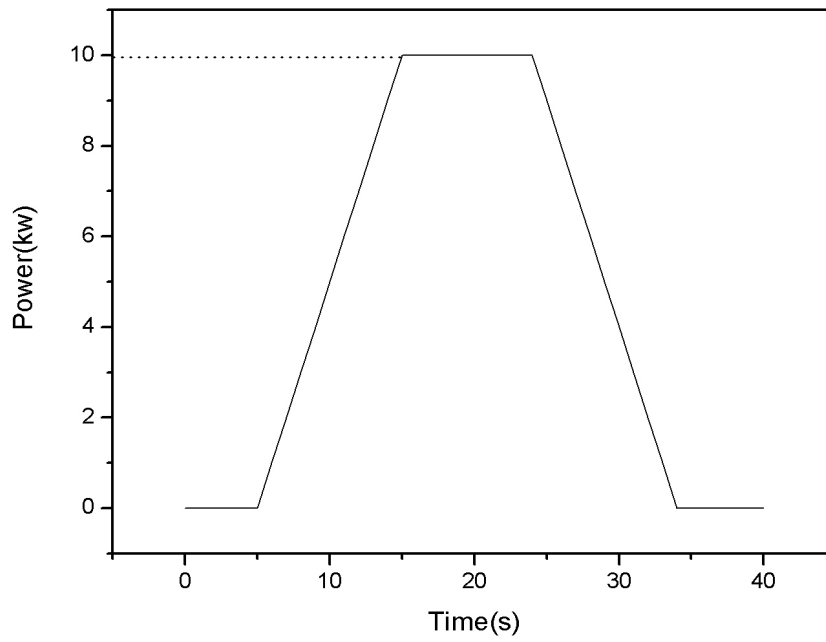


Fig 4.14 Power supplied to driving motor

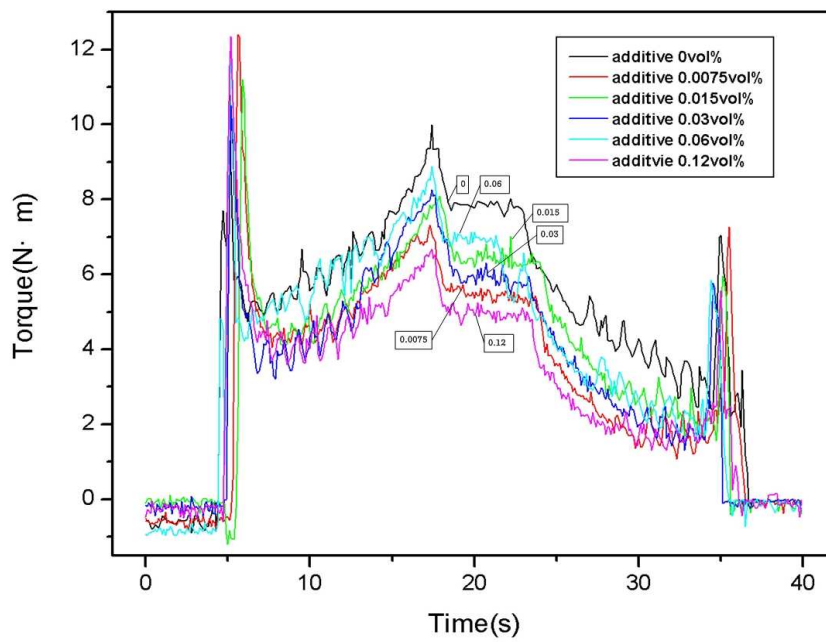


Fig. 4.15 Engine Torque with Transient condition

4.3.2 축계 정상운행특성

정상상태에서 나노윤활첨가제를 주입한 경우와 아닌 경우에 대한 최대토크비교를 50rpm에서 1200rpm까지 Fig. 4.16에 나타낸다.

나노분말을 포함하지 않은 기유의 경우 엔진속도가 낮은 50rpm에서 토크가 5.83N·m로 매우 높은 값을 보이며 엔진속도의 증가와 함께 낮아져서 200rpm에서 3.82N·m로 최소값을 보인 뒤 속도가 더욱 증가하면 토크도 비례적으로 증가하여 1200rpm에서 6.57N·m가 된다. 이러한 변화특성은 나노를 첨가한 모든 경우에 동일하다. 엔진속도가 낮은 50rpm의 경우 나노첨가율이 0.12vol%일 때 가장 높은 값을 나타내며, 0.015vol%일 때 가장 낮은 값을 나타낸다. 이 속도에서는 일관성이 없는 결과를 보여준다. 100rpm 이상이 되면 나노를 첨가한 경우가 기유만의 경우에 비하여 마찰토크가 낮게 되고 이는 회전속도의 증가와 함께 더욱 명확해진다. 기유와 나노 0.12vol%를 비교하면 50rpm에서는 기유의 경우가 16.4% 낮은 마찰토크를, 100rpm에서는 나노의 경우가 6.46% 낮은 마찰토크를, 200rpm부터는 나노가 20.61~25%의 토크절감을 보이며, 1200rpm에서는 18.1%의 토크절감을 나타낸다. 이는 저속의 경우 초기모터전류에 의한 구동력과 크랭크축과의 마찰에 의한 영향 때문으로, 기유의 경우가 높게 측정된 것으로 판단된다. 고rpm으로 갈수록, 엔진의 운동관성력에 의한 나노구리합금분말의 효과를 보여주고 있다.

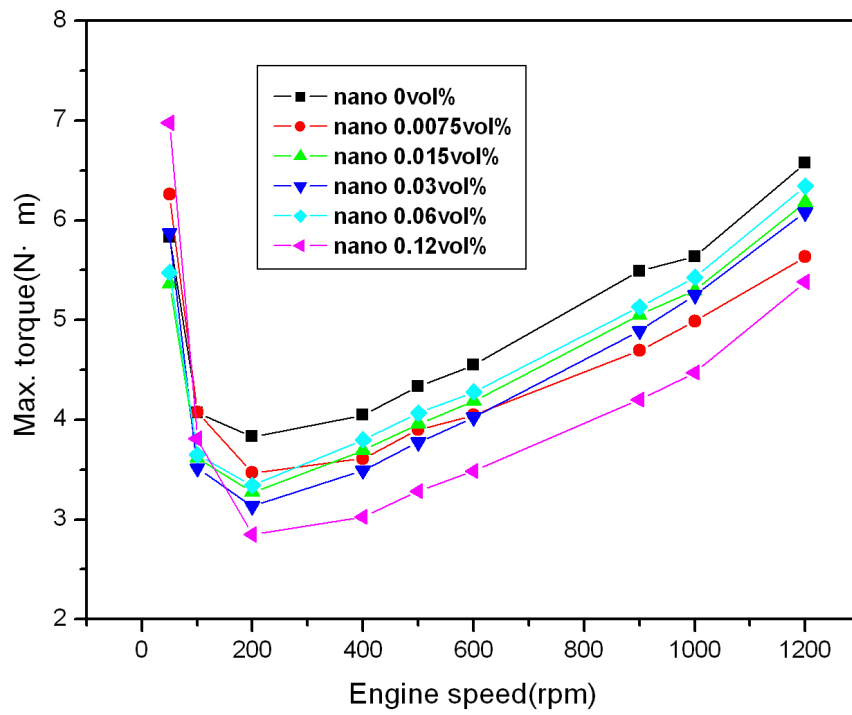
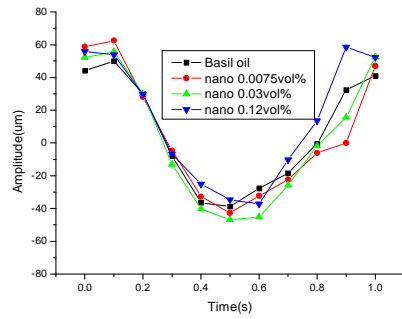


Fig. 4.16 Comparison of torques with additive's volume percent

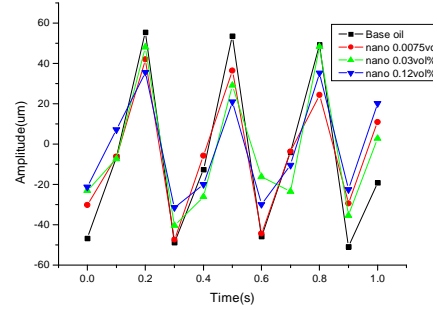
4.3.3 축계 진동특성

Fig. 4.17은 50, 200, 600, 1200rpm에서의 Base oil, 나노윤활첨가제 0.0075, 0.03, 0.12vol%일 때의 1sec에 대한 X축 및 Y축에 대한 진동을 비교하였다. 50rpm에서는 구동모터의 원활치 못한 전류공급에 의한 상이로, Base oil의 진폭이 가장 작게 나왔다. 200rpm, 600rpm, 1200rpm에서는 나노윤활첨가제 0.12vol%의 진폭이 가장 작으며, 0.0075vol%, 0.03vol%의 순으로 진폭의 크기가 작다. 이는 Fig. 4.16의 축계정상운황에서의 토크 비교와도 동일하다.

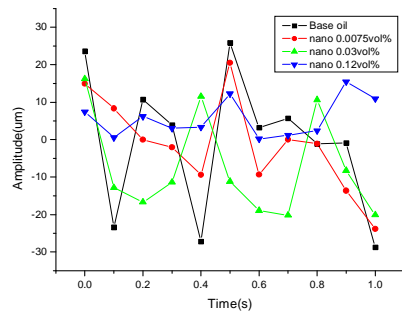
Fig. 4.18~4.23은 Base oil과 나노첨가율(vol%)이 변화할 때, 엔진의 rpm 증가에 따른 축의 진동응답을 나타내고 있다. 각각 1sec에 대한 X축 및 Y축에 대한 진동응답을 50~1200rpm을 9개의 구간으로 나누어 나타내었다. 질량 불평형을 가진 기계진동의 가장 기본적인 주기운동(periodic motion)의 형태는 흔히 조화운동으로 불리는 사인파 형태의 운동을 보여주어야 하나, 기관과 같은 대부분의 기계들에서는 여러 가지 주파수 성분들이 포함된 복잡한 형태의 진동이 발생되며, 아래 그림과 같이 비조화적이지만 주기적인 파형으로 나타난다. 아래 그림은 rpm 증가에 따른 진동응답의 최대치 및 최고치에 대한 주기의 감소를 확연히 보여주고 있으며, Y축의 진동응답이 X축에 비하여 90°의 위상차를 가지면서 변화하는 것을 보여주고 있다.



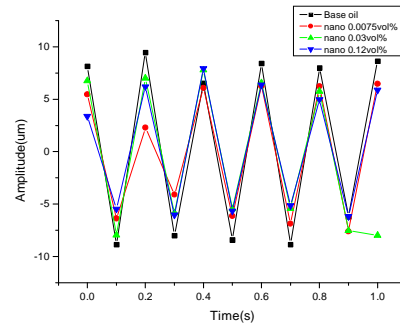
(a) Vibration comparison at 50rpm



(b) Vibration comparison at 200rpm



(c) Vibration comparison at 600rpm



(d) Vibration comparison at 1200rpm

Fig. 4.17 Comparison of vibrations with additive's volume percent

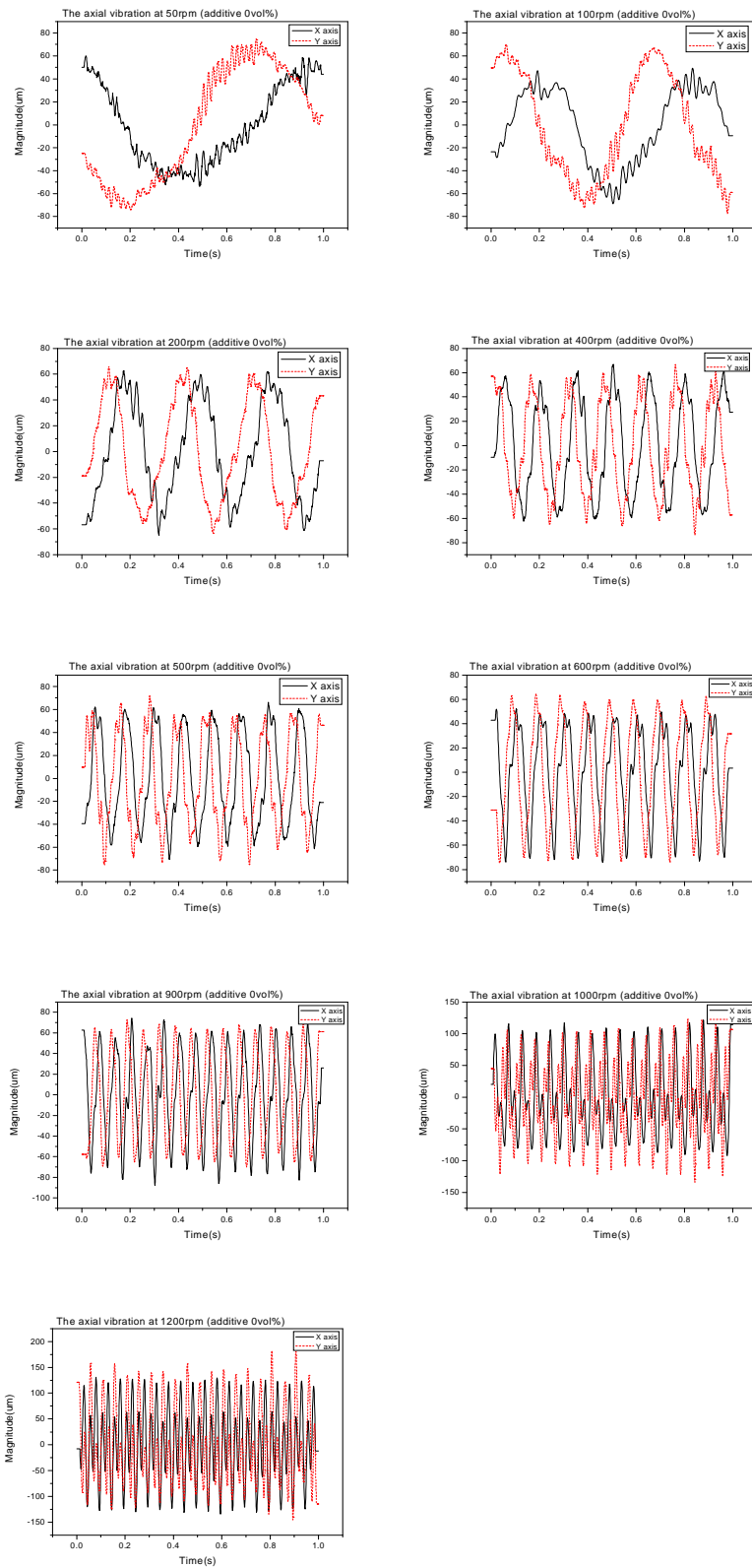


Fig. 4.18 Vibration response of shaft without nano-metal alloy powder

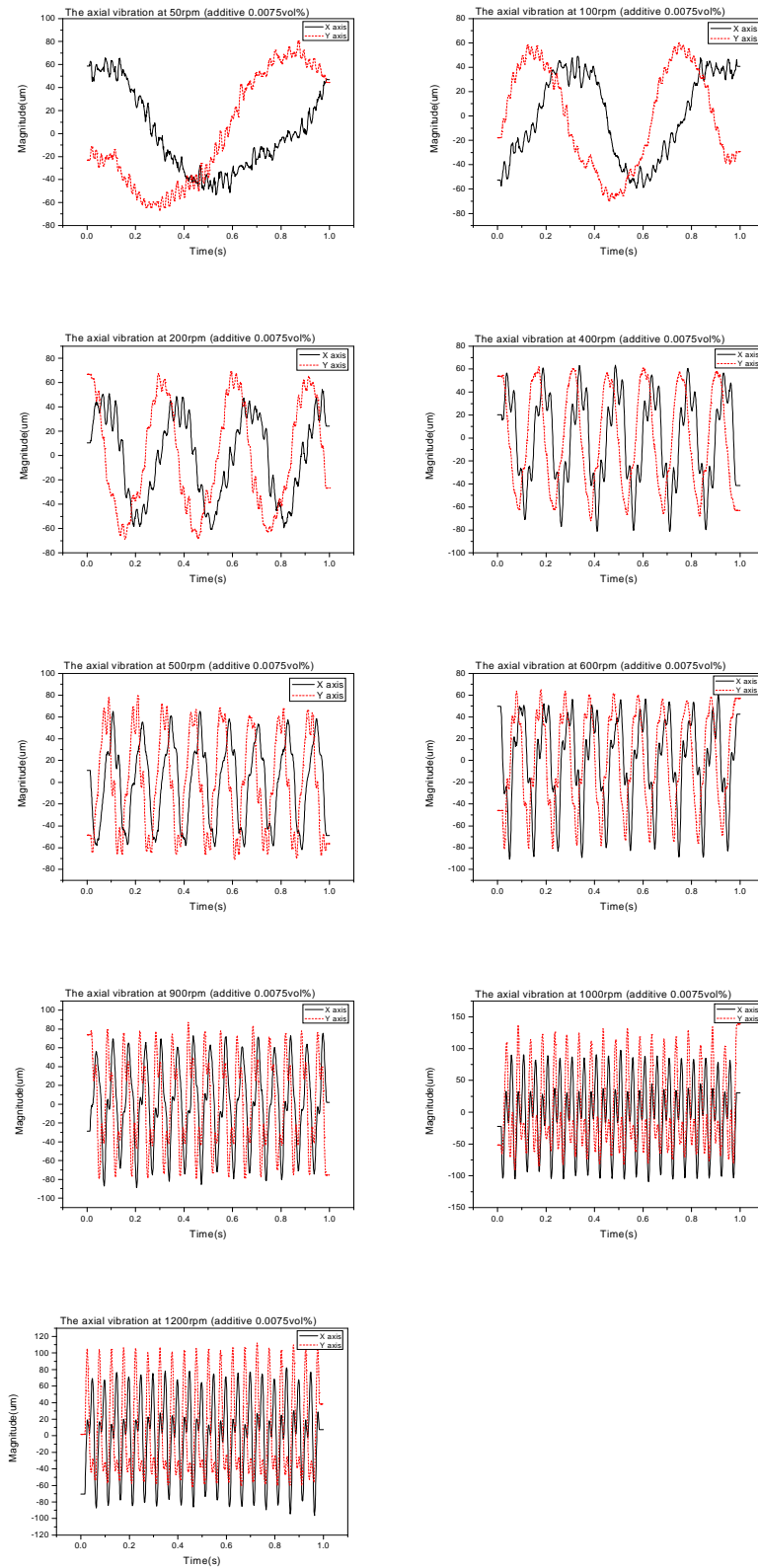


Fig. 4.19 Vibration response of shaft with nano-powder of 0.0075vol%

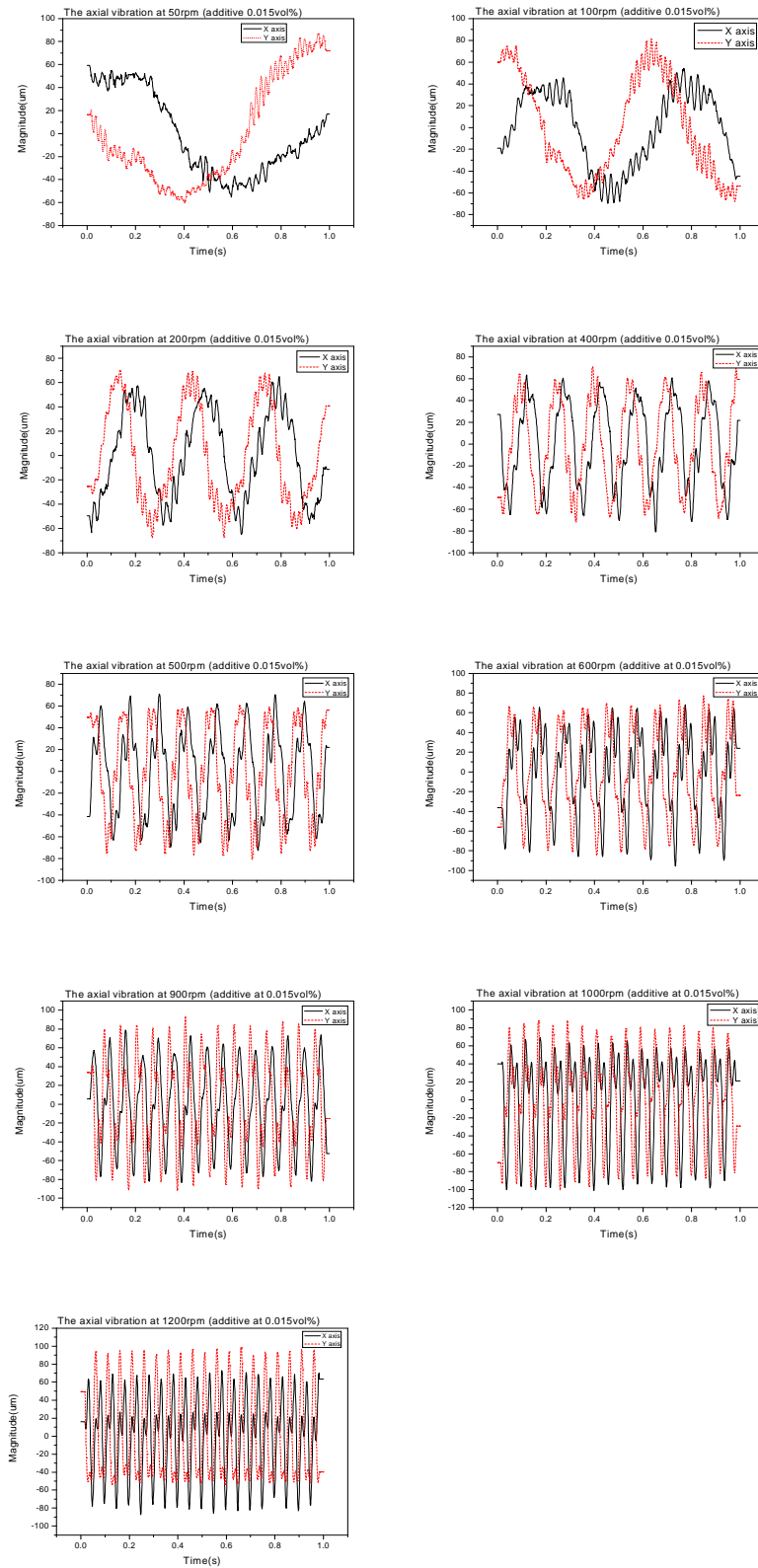


Fig. 4.20 Vibration response of shaft with nano-powder of 0.015vol%

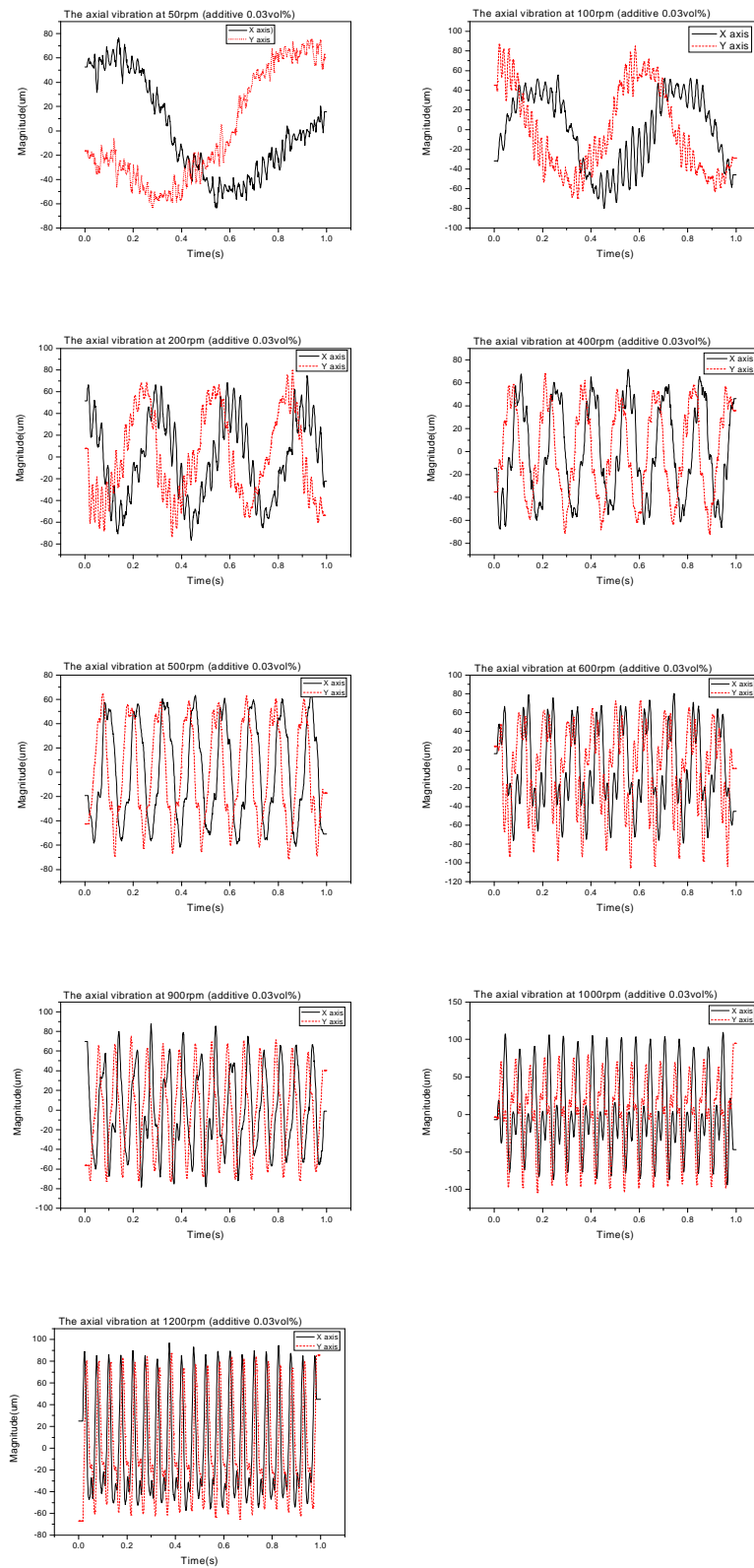


Fig. 4.21 Vibration response of shaft with nano-powder of 0.03vol%

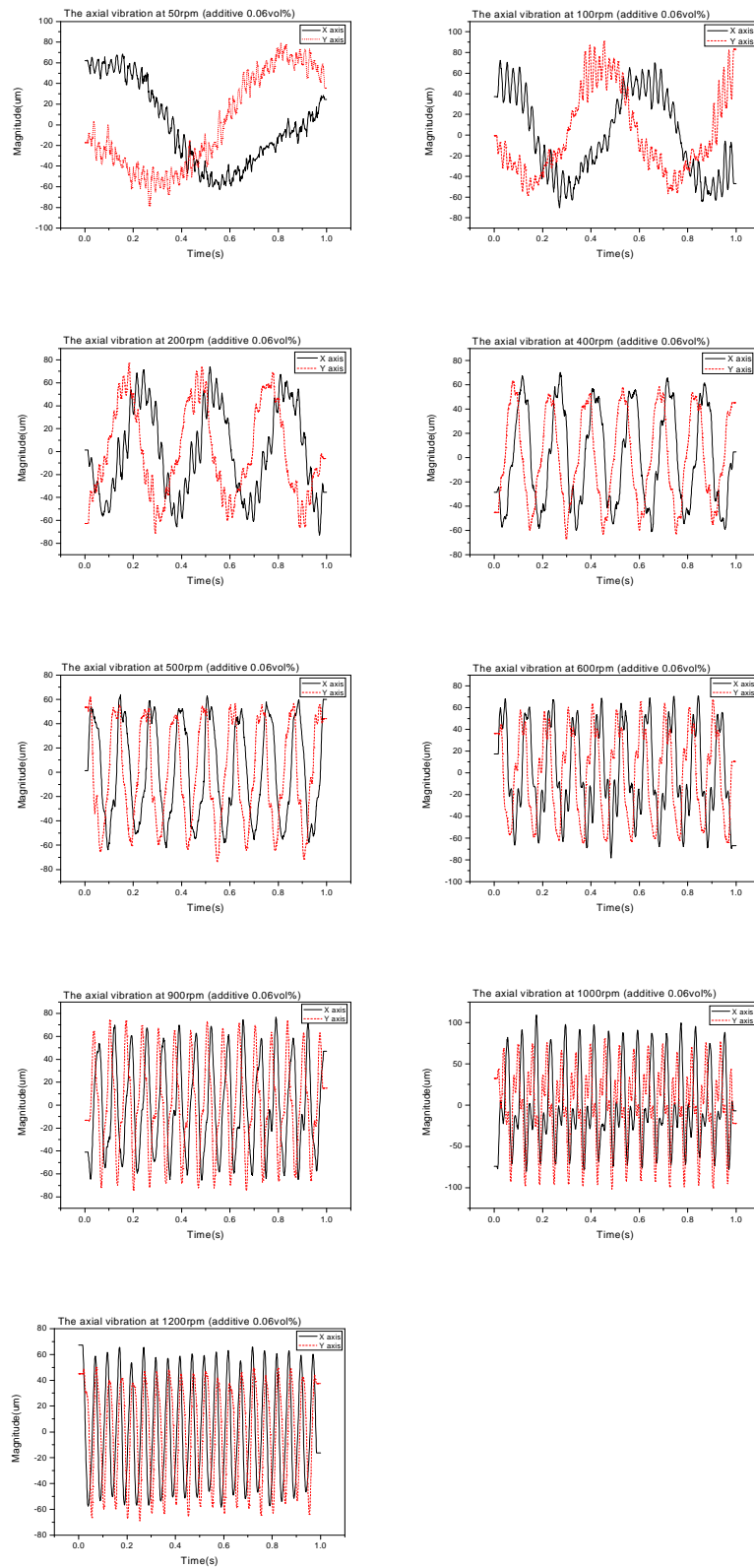


Fig. 4.22 Vibration response of shaft with nano-powder of 0.06vol%

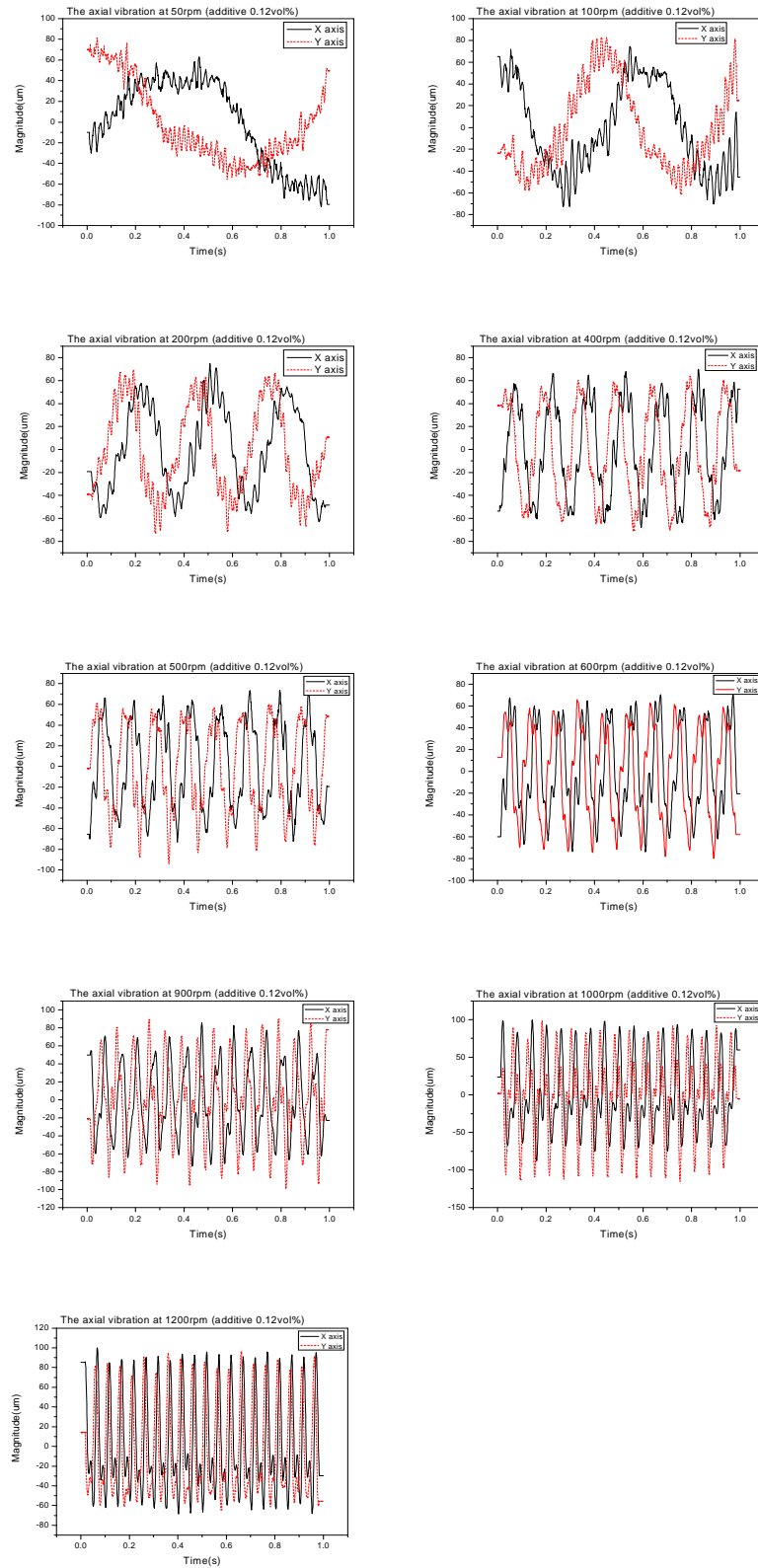


Fig. 4.23 Vibration response of shaft with nano-powder of 0.12vol%

Fig. 4.24~4.29은 Base oil과 첨가제를 체적%별로 첨가했을 시의 엔진주축의 X축 및 Y축에 대한 X-Y orbit 선도를 각 rpm별로 나누어 보여주고 있다. 일반적으로 축의 orbit선도를 보여주기 위해서 제작되는 실험용 축은 축길이가 매우 길고 축지름을 작게 하여 제작하기 때문에 X-Y orbit 선도가 거의 원에 가깝게 나타나나 본 실험에 사용된 축은 실제 사용되었던 디젤기관의 주축이기 때문에 축길이가 비교적 짧고 엔진내부에 많은 저널 베어링이 내장되어 있고 짧은 축길이에 비하여 축지름이 크기 때문에 다소 불규칙적인 궤적을 나타내고 있다. 특히 50rpm, 100rpm과 200rpm에서는 상당히 불규칙적인 궤적을 나타내고 있는데, 이는 시동초기 및 저속에 의한 토크변화에 의한 것으로 판단된다. 그에 반하여 rpm이 증가할수록 규칙적인 궤적을 나타내고 있으며, 특히 고속을 나타내는 900, 1000, 1200rpm에서는 첨가제의 vol%가 높아질수록 일정한 규칙적인 궤적을 나타냄을 알 수 있다.

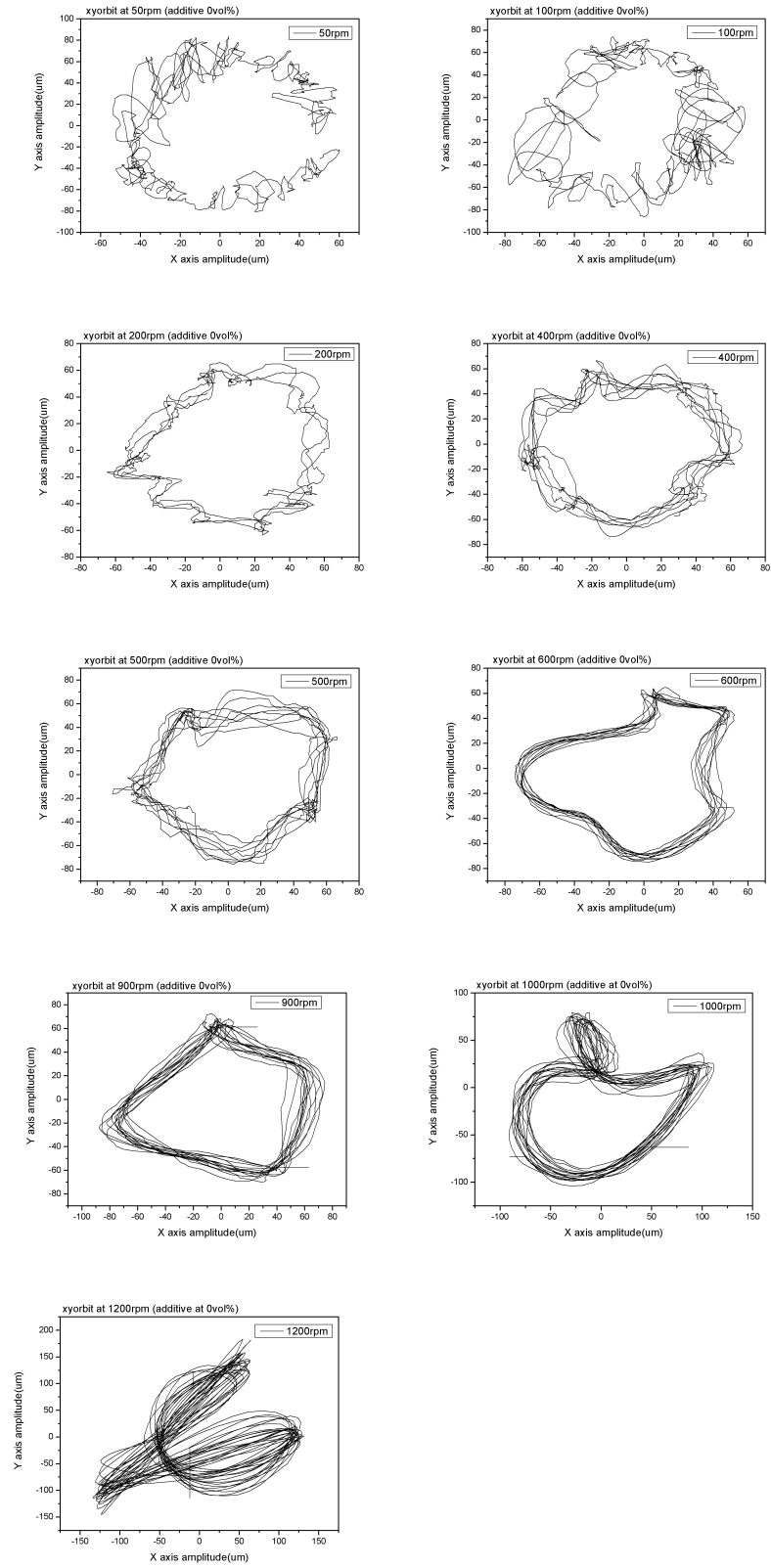


Fig. 4.24 Measured X-Y amplitude with nano-metal alloy powder

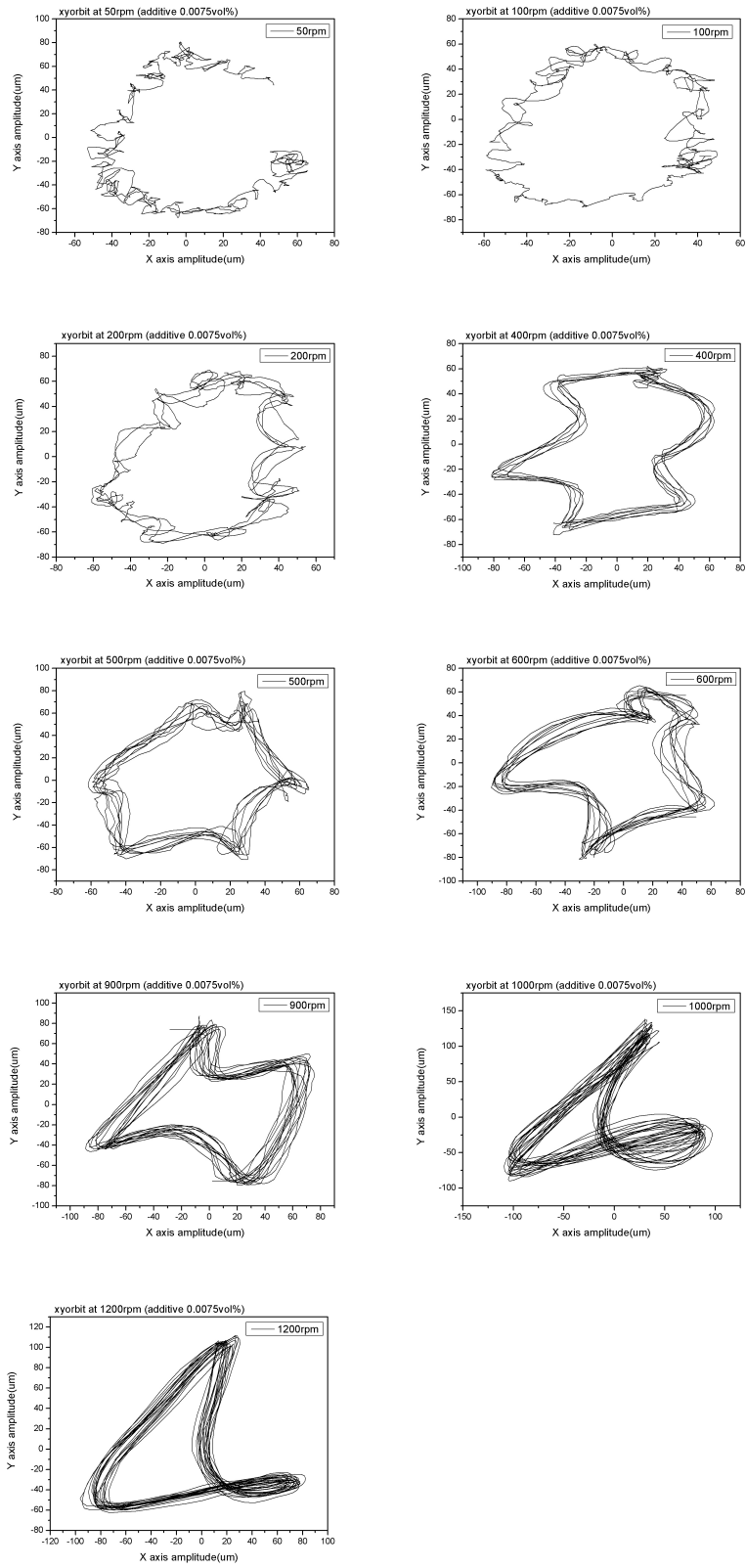


Fig. 4.25 Measured X-Y amplitude with nano-oo powder of 0.0075vol%

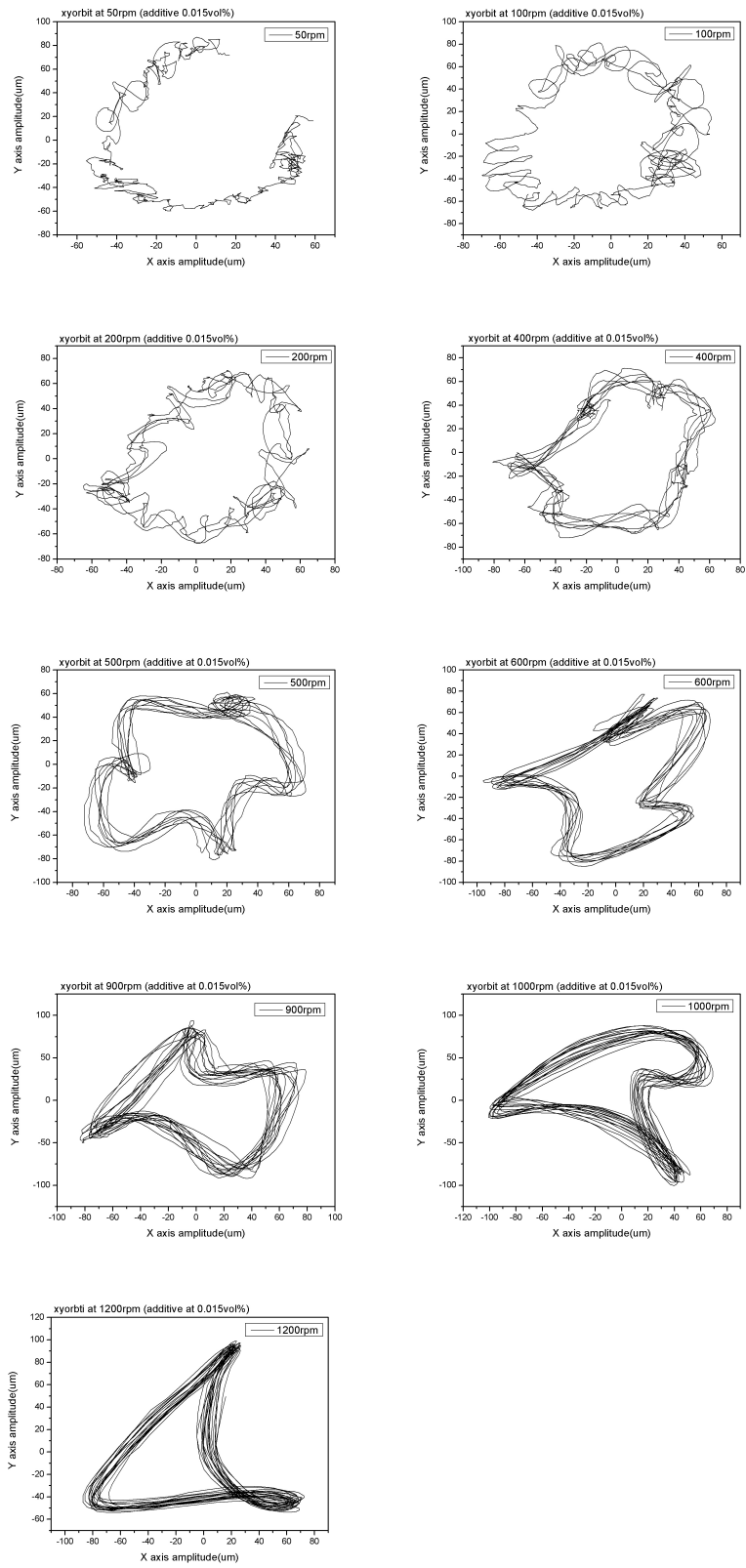


Fig. 4.26 Measured X-Y amplitude with nano-powder of 0.015vol%

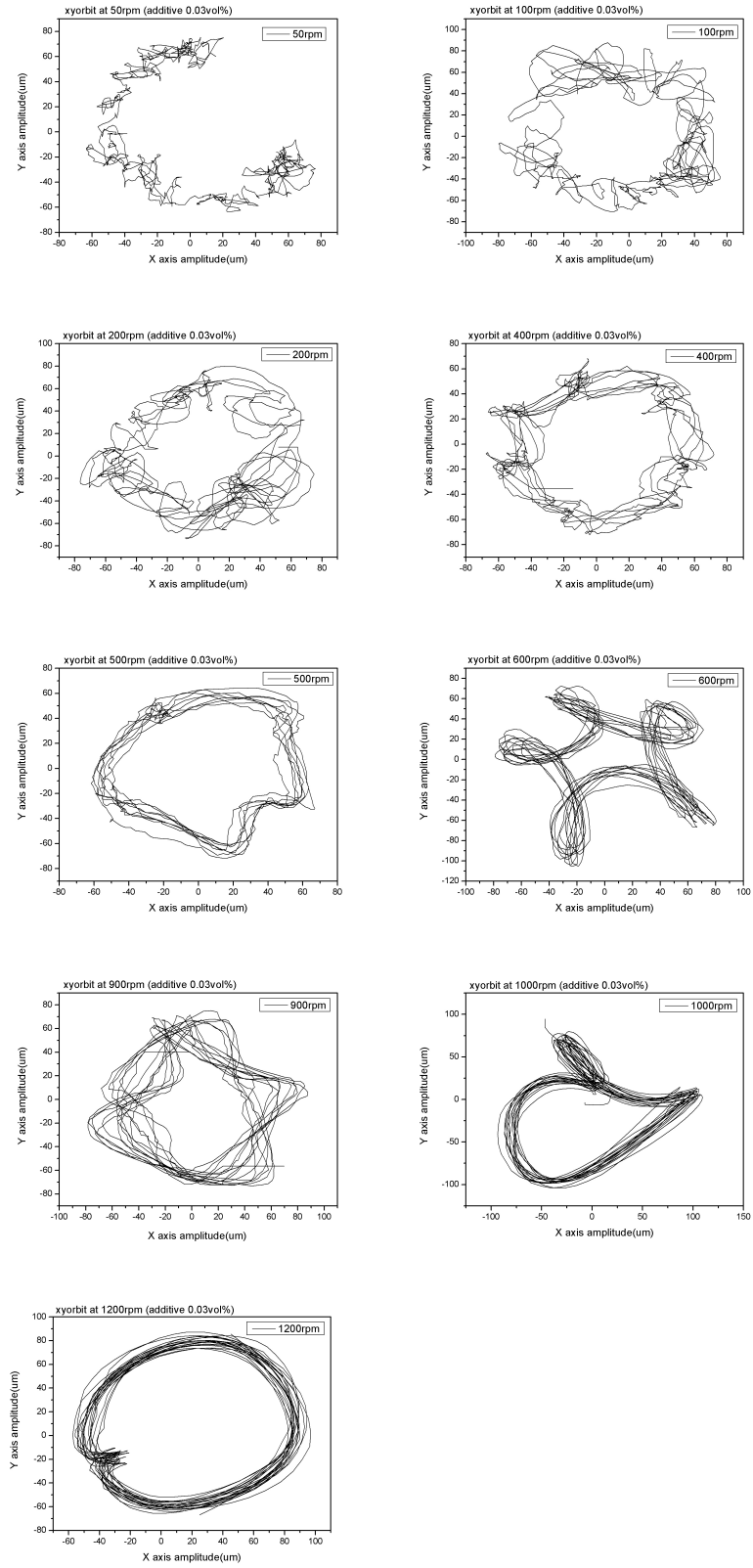


Fig. 4.27 Measured X-Y amplitude with nano-powder of 0.03vol%

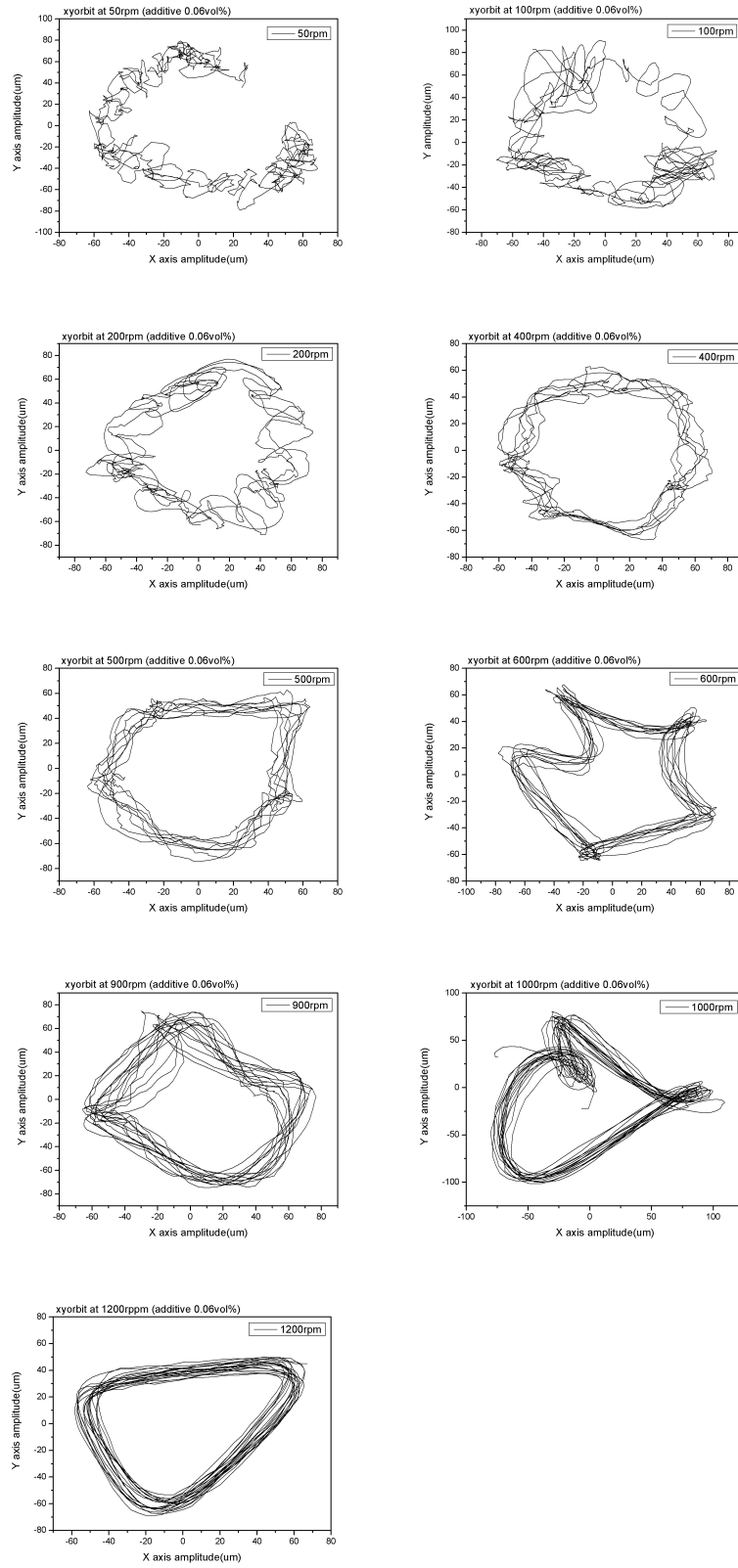


Fig. 4.25 Measured X-Y amplitude with nano-powder of 0.06vol%

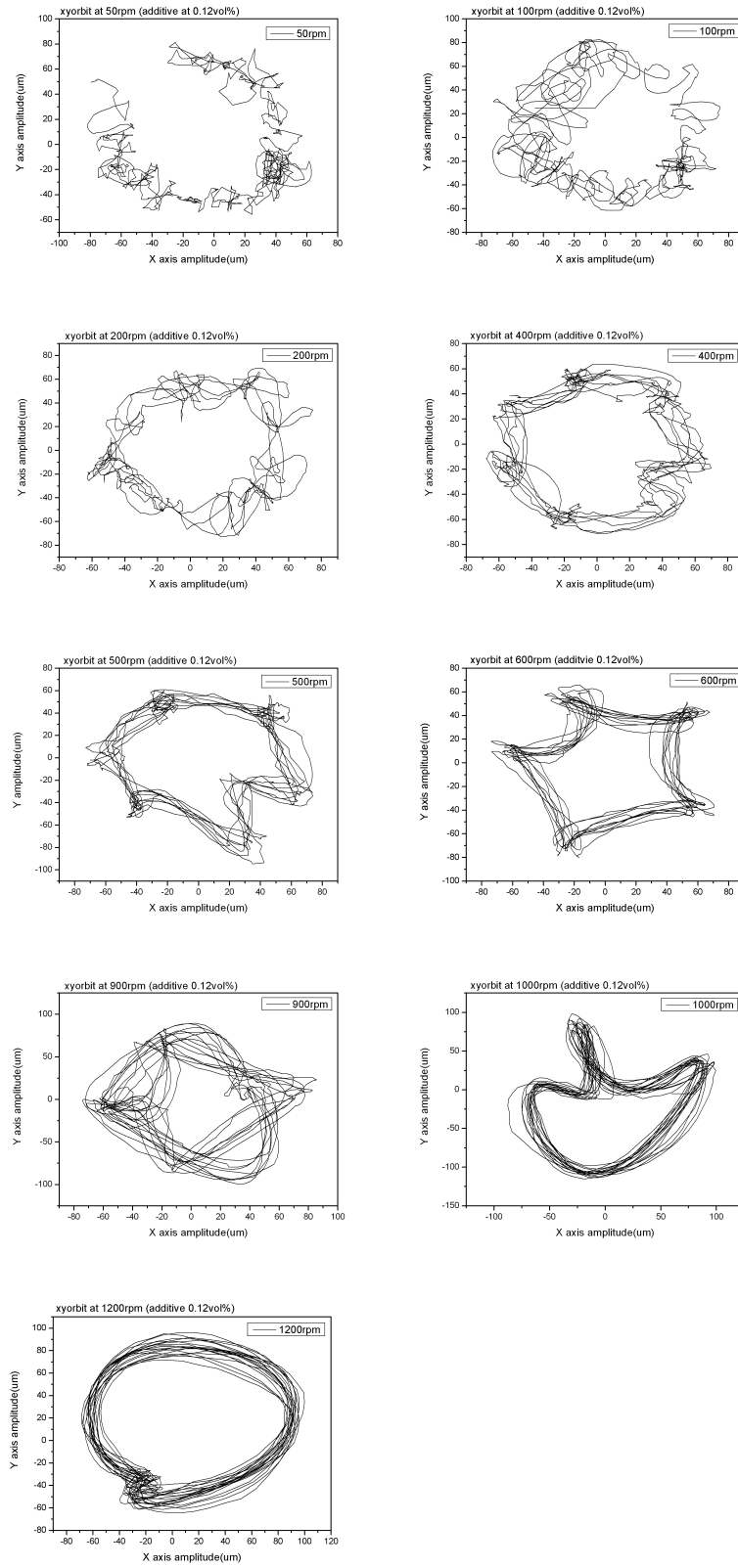


Fig. 4.26 Measured X-Y amplitude with nano-powder of 0.12vol%

제5장 결 론

이상에서와 같이 나노구리합금첨가 윤활제가 기관성능에 미치는 효과를 파악하기 위하여 마찰마모시험기를 이용한 기초윤활성능과 실엔진을 이용한 엔진동특성을 실험 계측하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 실험실제조 윤활제의 첨가량은 25ml에서 50ml 즉 기유량에 대하여 체적비로 2.5%에서 5%를 초과하지 않는 것이 적당할 것으로 판단된다.
2. 나노구리합금 첨가제의 첨가비율이 증가함에 따라 윤활성능이 향상된다. 즉, 0.015vol%일 때는 기유와 비교하여 1.5배의 하중에서도 윤활성을 유지하였고, 0.03vol%일 때는 5.8배의 하중, 0.12vol%일 때는 6.7배의 하중에서도 경계윤활 특성을 유지한다.
3. 밸브계 포함 축계 윤활시험에서는 나노분말의 체적%가 증가할수록 좋은 윤활성을 나타내는 것을 알 수 있다. 즉, 첨가제 0.06vol%시에는 10.75%의 구동토크의 감소를, 0.12vol%시에는 34.17%의 구동토크의 감소를 보여준다.
4. 밸브계 포함 축계 진동시험에서는 엔진속도 및 첨가제의 비율이 높아질수록 진동진폭특성이 줄어들고, 엔진주축의 규칙적인 궤도를 나타낸다.

참고문헌

- [1] J.A. Greenwood and J.B.P. Williamson, "Contact of nominally flat surfaces", Proc. R. Soc. London, Ser. A 295, pp. 300-319, 1966.
- [2] I.V. Kragelski and N.B. Demkin, "Contact area of rough surfaces", Wear, Vol. 3, pp. 170-187, 1960.
- [3] E. Rabinowicz, Friction and wear of materials, Wiley, New York, 1965.
- [4] J.F. Archard, "Contact and rubbing of flat surfaces", J. Of Applied Physics, Vol. 24, pp. 981-988, 1953.
- [5] N.P. Suh and H.C. Sin, "The genesis of friction", Wear, Vol. 69, pp. 91-114, 1981.
- [6] C. M. Taylor, "Engine Tribology", Tribology Series 26, Elsevier Science Publishers, 1993.
- [7] Michael E. Crane and Roy C. Meyer, "A process to Predict Friction in an Automotive Valve Train", SAE 901728.
- [8] Han, D. C. and Cho, M. R., "The Characteristics of Friction in Direct Acting OHC valve Train System", J. of KSTLE, Vol. 14, No. 1, pp. 23-27, 1998.
- [9] A.P. Pisano, "Coulomb Friction in High-Speed Cam System", Transactions of ASME, Journal of Mechanics. Transmissions, and Automation in Design, pp.1-5, 1984.
- [10] Staron. J. T. and Willermet. P. A, 1995, "An Analysis of Valve Train Friction in Terms of Lubrication Principles", SAE trans., Vol. 1, pp. 1625-1639.
- [11] Taylor. C. M., 1995, "Valve Train Lubrication Analysis", Tribology Series, 18 Vehicle Tribology, pp. 119-131.

- [12] Hardy, w. b. and Doubleday, I., "Boundary Lubrication-The Para-affin Series", Proc. Roy. Soc. A, Vol. 102, pp.550-547, 1922.
- [13] Bhushan, B. and Gupta, B. K., *Handbook of Tribology*, McGraw Hill, 1991.
- [14] W. J. Bartz and J. Oppelt, "Lubricating Effectiveness of Oil-Soluble Additives and Molibdenum Disulfide Dispersed in Mineral Oil", Lubr. Eng.,Vol.36, pp579-585, 1980.
- [15] G. F. Reick, "Energy-Saving Lubricants Contaning Colloidal PTFE", Lubr. Eng.,Vol.38, pp.635-65, 1982.
- [16] C. Cusano and H. E. Sliney, "Dynamics of Solid Dispersions in Oil Du-ring the Lubr-ication of point Contacts, partI-Graphite", ASLE Trans.,Vol.25,No.2, pp.183-189, 1982.
- [17] Jen Fin Lin, Ming Guu Shih, Yih Wei Ch-en, *The tribological performance of 6061 aluminum alloy/graphite composite materials in oil lubrications with EP additives*, Wear pp.58-70, 1996.
- [18] T.Hisakado T.Tsukizoe H.Yoshikawa, "Lubrication Mechhanism of Solid Lubricants in Oils", Journal of Lubrication Technology APRIL, Vol.105, 1983.
- [19] B.K.Gupta and B.Bhushan, "Fullerene Particles as an Additive to Liquid Lubricants a-nd Greases for Low Friction and Wear", Lubr.Eng., Vol.52, pp.524-528, 1994.
- [20] D. H. Buckley, "Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication", Tribology Series 5, Elsevier, 1981.
- [21] F. J. Calauss, "Solid Lubricants and Self-Lubricationg Solids", Academic Press, 1972.
- [22] T.Spalvins, "A review of recent advances in solid film lubrication", American Vacuum Society J.Vac. Sci. Technol. A 5(2), Mar/Apr 1987.
- [23] 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.
- [24] T.I.Nazarenko, N.N.Lozentsova, G.G.Shchegolov and Yu.P.Toporov, "On Lubrication Properties of Oil with Copper-Containing Additives", Soviet Jr. of Friction and Wear, Vol.13, No.2, pp.78-81, 1992.
- [25] 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.
- [26] M.V.Astakhov and V.A.Mouratov, "Nickel Fine Particle's Adsorptive Catalytic Mechanism", Wear, Vol.176, pp.61-65, 1994.
- [27] YunXin 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.
- [28] G.P.Shpenkov, *Physical Chemistry of Friction*, Minsk, 1991 in Russian.
- [29] 안효석, 이성철, "첨가제에 함유된 미세한 구리합금입자의 마찰 및 마모특성," 한국윤활학회지, 제12권 제2호, pp.32-40, 1996.

감사의 글

이제 어느덧, 대학원 졸업이란 시간을 앞두고 있습니다. 학부를 졸업하면서, 대학원을 진학할지, 취업을 할지 많은 고민을 했던 거 같습니다. 하지만, 자동차에 대해, 조금더 알고 싶은 열망 하나로, 박권하 교수님의 지도하에 대학원을 시작하였습니다. 학부4학년부터 시작된 실험실 생활. Tribology란 과제를 앞에 두고, 교수님의 많은 도움을 통해, 마무리 할 수 있는 시간을 접하게 된 거 같습니다. 학생들을 항상 우선적으로 생각해 주시는 모습들은 무덤 저편까지 간직하려 합니다. 정말 감사합니다. 비록, 마지막 순간에 미국 미주리대학교에 과견근무를 가셨지만, 온라인상을 통해서나마, 신경 써 주시고 마무리해주신 점 감사드립니다. 심사위원장을 맡아 주신 최재성 교수님, 1년간의 어학연수 후에 지도교수님을 해 주셔서, 석사논문을 마무리 할 수 있게 해주신 정재현 교수님, 석사 마지막 학기에 많은 조언과 도움을 주신 김의간 교수님, 모두에게 짧은 지면이나마 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 그리고, 인생이란 기나긴 여정 속에서의 소중한 만남을 계속 유지하고 싶습니다. 아직 부족한 점이 많지만, 사회에 나가서, 지도교수님의 이름을 더욱 빛낼 수 있는 일꾼이 되도록 하겠습니다.

저희 실험실을 통해, 소중한 만남을 가졌던 송영호 이사님, 박홍일 원장님께도 항상 감사드립니다. 특히, 많은 시간을 가졌기에 기억에 남습니다.

이미 졸업해서, 사회의 역군으로 활동하고 계신 실험실 멤버들. 대학원 실험실 초기부터, 많은 실험실 생활을 가르쳐 주시고, 인생에 대한 도움을 주신 형들이 기억이 납니다. 엔진동력계 관련 실험중, 많은 지원을 해주셨던 임희성형, 잠시나마 얼굴을 접했던 사교계의 선구자 광인석형, 유난히 음주가무를 좋아하시고, 많은 추억거리를 만들었던 조현철형, 정신적인 지주였던 소병두형, 윤활공학 자료를 무지 많이 주셨던 한진희형, 최고의 전공박사이자 농구계의 지존 정석민형, Arizona에서의 룸메이트이자 나의 mentor인 전재혁형, 다들 잘 되시길 기원합니다.

대학원 입학동기인 장인선, 학부 동기이자 실험실 관리인 김영환, 이제는 어엿한 기계과 최초의 농협인 최창우, 항상 밝은 느낌을 가진 김혜민과 그의 boyfriend인

류호훈, 부산대에서 수학중인 김은영, 대학원 재학중 더욱 친하게 된 소음진동실험실 멤버인 김철우, 오태만, 김명수, 나의 소중한 친구 박태균, 정철우, 김정훈 모두에게 감사의 말을 전하고자 합니다.

비록 다른 실험실이지만, 많은 인생 이야기를 공유했던 진창렬형, 김종명형, 문경록형. 그리고 상담업무 동안 동생이지만 많은 의지가 되던 강정훈, 첫인상과는 너무나 다른 따뜻한 마음의 소유자 김경구 모두들 좋은 일만 생기시길 바랍니다. 그리고, 기계연구회 멤버이자 훌륭한 청년들인 권정현과 김성환도 언급을 하고 싶네요. 형들에게 받은 도움을 전달해주고자 했던 후배들인데, 생각만이 되지 않았나 싶기에 더욱더 챙겨주고 싶은 그들..

원래 주인공은 마지막에 등장하지 않던가요? 오랜 시간동안 정신적·물질적으로 너무나 많은 도움을 주신 아버지, 어머니께 형언할 수 없는 감사의 마음이 전달되었으면 합니다. 사랑합니다. 새로운 가족이 되신 울 자형, 그리고 항상 편안한 느낌을 전달해주는 누나, 인생을 더욱더 열심히 살아야겠다는 의지를 엄청 생기게 해주는 울 조카 여승연에게도 이 논문을 바칩니다.

비록, 논문에 언급되지는 않았지만, 저와의 기억을 공유하신 모든 분께 감사드립니다.

2006년 2월

오승우 배상