

## 인덕턴스 측정에 의한 윤활유 내 자성입자 정량적 평가

구희조<sup>1</sup> · 안효석<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>한국시험인증산업협회, <sup>2</sup>서울과학기술대학교 기술경영융합대학 MSDE 전공

### Monitoring Inductance Change to Quantitatively Analyze Magnetic Wear Debris in Lubricating Oil

HeeJo Koo<sup>1</sup> and Hyo-Sok Ahn<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>The Korea Testing Inspection Certification Association

<sup>2</sup>Manufacturing Systems and Design Engineering Programme, Seoul Tech

(Received date October 6, 2016; Revised date November 10, 2016; Accepted November 11, 2016)

**Abstract** – Wear debris in lubricating oil can be indicative of potential damage to mechanical parts in rotating and reciprocating machinery. Therefore, on-line or in-line monitoring of lubricating components in machinery is of great importance. This work presents a device based on inductive measurement of lubricating oil to detect magnetic wear particles in a tested volume. The circuit in the device consists of Maxwell Bridge and LVDT to measure inductance differences between pure and contaminated oil. The device detects the passage of ferrous particles by monitoring inductance change in a coil. The sensing principle is initially demonstrated at the micro-scale using a solenoid. The device is then tested using iron particles ranging from 50  $\mu\text{m}$  to 100  $\mu\text{m}$ , which are often found in severely worn mechanical components. The test results show that the device is capable of detecting and distinguishing ferrous particles in lubricating oil. The design concept demonstrated here can be extended to an in-line monitoring device for real-time monitoring of ferrous debris particles. A simulation using the CST code is performed to better understand the inductive response in the presence of magnetic bodies in the oil. The CST simulation further verifies the effectiveness of inductance measurement for monitoring magnetic particles within a tube.

**Keywords** – inductance(인덕턴스), magnetic wear debris(자성 마모입자), oil monitoring(윤활유 검측), CST Analysis(자기장 해석)

### 서 론

윤활되는 기계설비 및 부품의 예기치 않은 고장 또는 부품파손에 의한 가동중단은 심각한 경제적 손실을 초래할 수 있다. 이를 예방하기 위해 기계설비의 운전상태를 지속적으로 또는 정기적으로 감시하여 이상현상을 사전에 예측하여 사고를 예방하고 적절한 보수유지 계획을 세우는 기계상태 진단기술에 많은 발전이 이루어져 왔다. 현재 가장 지배적으로 활용되

는 보수유지 방법은, 장비를 주기적으로 정지시키고 가동부를 해체해 기계부품의 이상유무를 확인하는 정기적 유지보수 방법이다. 그러나 이러한 방식은 가동 정지로 인한 비용과 검사 단계 전후로 장치를 개폐하는 등 부수적인 비용의 발생원인이 되며 지속적인 가동이 필수적인 사업장의 경우 가동기계의 검사를 위해 동종의 기기를 예비시켜야 하는 등 안정적인 장치 운용을 위하여 과다한 비용이 발생할 수 있다. 이러한 문제에 대응하기 위해 구동장치의 윤활라인에 검측장비를 함께 구성하여 마멸입자를 실시간으로 측정하는 방식에 대한 관심과 연구가 늘어나고 있다. 특히 윤활유 내 마멸입자를 정량적으로 실시간 측정

\*Corresponding author : [hsahn@seoultech.ac.kr](mailto:hsahn@seoultech.ac.kr)  
Tel: +82-2-970-6307, Fax: +82-2-974-5388

하여 해당 마멸입자를 발생시키는 부품의 상태를 간접적으로 모니터링하는 진단기술이 일부 기계시스템에 실제 적용되고 있으나 활용 대상이 제한적이다 [1,2].

본 연구에서는 오일 내 마멸입자를 정량 또는 정성적으로 측정할 수 있는 다양한 기술 중 인덕턴스의 변화를 측정하는 검사장비를 구성하여 활용 가능성을 평가하였다[3~5]. 또한 자성 마멸입자에 의한 오일파이프 안의 인덕턴스 변화를 이해하기 위해 상용 전자기파 시뮬레이션 코드를 사용해 분석하였다.

## 2. 윤활유 내 인덕턴스 측정실험 및 3차원 전자기장 해석

### 2-1. 측정원리

튜브 둘레를 감은 코일의 양단에 전압을 가하면 전자기장이 발생한다. 이때 코일 내부의 튜브에 존재하는 매체들의 투자율(permeability)에 따라 인덕턴스 값  $L$ 은 식 (1)과 같이 여러 인자의 영향을 받는다.

$$L = \frac{N^2 S \mu}{l} \tag{1}$$

$N$ 은 코일의 감긴 수,  $S$ 는 코일의 단면적,  $l$ 은 코일의 길이,  $\mu$ 는 코일 내부에 흐르는 유체의 투자율이다. 이때 자성체 입자들이 튜브를 채운 오일에 존재할 경우 용기 내에 존재하는 매체의 투자율  $\mu_{est}$ 는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mu_{est} = \mu_{oil} + (\mu_p - \mu_{oil})C_v \tag{2}$$

여기에서  $\mu_{oil}$ 은 청결한 상태의 윤활유의 투자율,  $\mu_p$ 는 자성체 입자의 투자율,  $C_v$ 는 자성입자들의 총 체적 비율을 나타낸다.

위의 식 (1)과 (2)로부터 인덕턴스 값( $L$ )과 변화량( $dL$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \frac{N^2 S [\mu_{oil} + (\mu_p - \mu_{oil})C_v]}{l} \tag{3}$$

$$dL = \frac{N^2 S (\mu_p - \mu_{oil}) dC_v}{l} \tag{4}$$

따라서 식 (4)로부터 코일 내의 인덕턴스 값의 변화는 코일 내의 자성입자들의 오염도 변화와 선형적 비례관계를 지니고 있음을 알 수 있다.

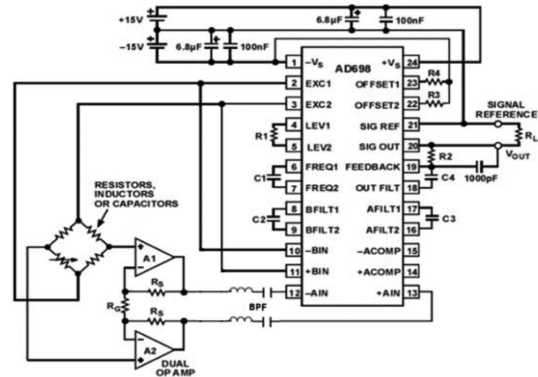


Fig. 1. Circuit consisted of Maxwell Bridge and LVDT to measure the difference of inductance between pure and contaminated oil.

### 2-2. Maxwell bridge와 LVDT를 이용한 회로

본 실험에서는 깨끗한 오일과 오염된 오일의 인덕턴스 차이를 측정하기 위해 Maxwell bridge를 활용하였다. 코일 두 개를 각각 Maxwell bridge 회로 양단에 연결하였고 전압 신호는 증폭기를 통과 후 100배 증폭된다. 이후 약 15 kHz의 3 dB 대역폭을 갖는 Band Pass Filter(BPF)를 지나면서 10~20 kHz의 신호를 남기고 노이즈는 제거된다. BPF에 대한 타당성을 검증하기 위해 오실로스코프를 이용하여 신호를 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform(FFT))하였다. FFT된 신호를 정리하여 Fig. 2에 나타내었다. (a)와 (b)는 회로에 BPF를 설치하기 전의 신호이다. 반면에 (b)와 (d)는 증폭기를 통과한 후, 두 개의 코일 중 하나에 지름 8 mm인 철 막대를 집어넣었을 때 발생한 인덕

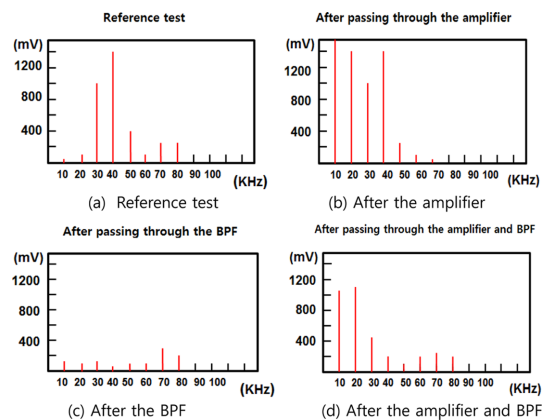


Fig. 2. Signals expressed by FFT.

턴스의 변화에 대한 신호이다. Fig. 2의 (a)는 두 코일의 차이가 없어 평형을 이루어 신호가 0으로 나와야 한다. 하지만 30~40 kHz 대역에서 많은 양의 노이즈가 발생하였다. 이 신호에 철 막대를 이용하여 인덕턴스의 변화를 주면 10~20 kHz 구간의 신호가 증폭된다. 하지만 여전히 노이즈 신호인 30~40 kHz 대역의 신호가 높게 검출되고 있다. 반면에 BPF를 회로에 설치한 후 나오는 신호인 (c)를 보면 기존에 발생하던 30~40 kHz 구간의 노이즈가 대폭 감소한 것을 확인할 수 있다. 증폭기를 통해 (c)의 신호를 증폭시켰을 때 (d)에서 보는 바와 같이 15 kHz가 포함된 10~20 kHz 대역에서 신호는 증폭이 되고 나머지 구간에서는 상대적으로 현저히 적은 양의 노이즈가 발생하였다. 따라서 자성입자의 영향을 효과적으로 검출하는 신호처리 체계를 구축하였음을 확인하였다.

LVDT, AD698은 입력된 AC 신호의 세기에 비례하여 DC 신호를 출력해주는 소자이다. LVDT로 입력된 AC신호는 50배 증폭되며 AC to DC변환을 통해  $V_{out}$ 을 DC 전압 값으로 출력한다. LVDT는 실험이 진행되는 동안 많은 양의 열을 받는데, 그 영향으로 출력값이 점점 낮아졌다. 이를 방지하기 위해 LVDT외부에 방열 판과 팬을 설치하였다. 블록 다이어그램으로 신호의 이동과정을 Fig. 3에 나타내었다. OSC(오실로스코프)에서 나오는 15 kHz의 신호는 Maxwell bridge에서 인덕턴스 변화에 대한 값을 나타내게 된다. 너무

작은 변화이기 때문에 증폭기를 통해 신호가 증폭되고, BPF에서 15 kHz 주변의 신호만을 남기고 노이즈가 제거된다. 이후 LVDT에서 다시 한번 증폭과 LPF를 통과 후 DC값으로 출력된다.

2.3. 오일 구동장치 및 코일

오일 구동 장치는 크게 오일탱크, 펌프, 코일, 회로와 디스플레이로 구성하였으며 Fig. 4에 개략도로 표현하였다. 오일탱크에 쓰이는 윤활유 1 kg에 철 입자 0.01 g을 넣었을 때 10 ppm이다. 철 입자는 실제 기계장치에서는 제어된 입자 크기의 마모입자(wear particle)를 구할 수 없으므로 완전구형(sphere)을 가정하여, 지름 기준 50~100  $\mu\text{m}$ 인 입자를 구입하여 대신 사용하였다. 실제 시스템에서 발생하는 마모입자의 주가 되는 크기 범위인 20~100  $\mu\text{m}$  크기 범위에 포함되며 특히 절삭마모입자(cutting wear particle)와 구름피로형 마모입자(laminar rolling fatigue particle)의 크기가 50~100  $\mu\text{m}$ 인 것을 감안할 때 적절한 크기의 샘플 철입자를 실험에 사용하였다[6]. 실험에 이용한 윤활유는 상용 윤활유인 5W-30를

이용하였다. 오일탱크에 2 L의 오일을 담고 0.1 g의 철 입자를 첨가하여 50 ppm씩 증가시키며 이에 대응한 결과값을 측정하였다. 또한 진동 믹서를 활용하여 실험 중 입자가 단위부피당 일정한 양을 지속적으로 유지하도록 하였다. 본 실험에서는 자계의 세기 H가

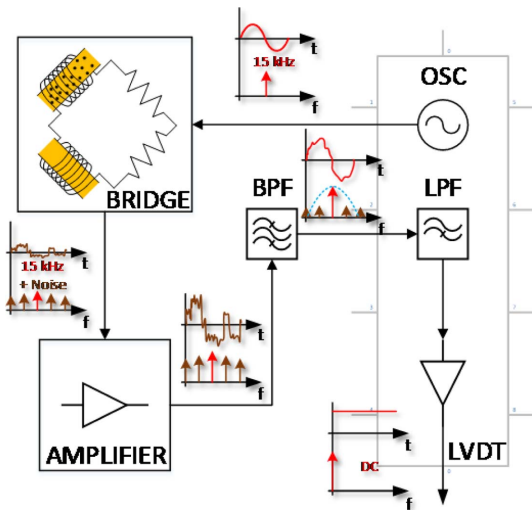


Fig. 3. Block diagram of signal of each section. Signal expressed by time domain and Fourier Transformed domain.

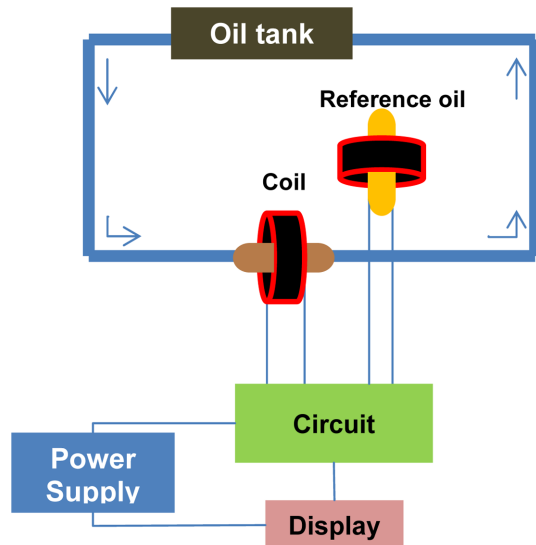


Fig. 4. Schematics of oil debris monitoring system using inductance sensor.

일정할 때 자성입자가 자속밀도에 미치는 영향에 따라 변화되는 인덕턴스의 변화를 감지하는 시스템을 구현하였다. 코일의 너비는 20 mm이고, 0.15 mm 두께의 에나멜선을 3,000번 감아 두 개를 제작하였다. 코일의 내부 지름은 10 mm이다. 한 개의 코일은 오일펌프 라인에 연결하여 농도를 조정할 수 있게 하였고, 나머지 한 개의 코일은 유리관으로 된 샘플용기에 순수한 윤활유만을 채워 넣어 기준오일(Reference Oil)로 사용하였다. 오일 탱크에 순수한 오일을 넣고 순환시켰을 때(양쪽 코일에 순수한 오일이 가득 차 있을 때) 가변저항을 이용하여 출력 값을 0으로 맞춰놓고 실험을 진행하였다.

출력 값은 자체 제작한 LCD 서킷에서 DC 전압을 mV단위로 4자리 정수를 표시하였다. 미세한 변화에도 영향을 받는 인덕턴스 값의 변화를 줄이기 위하여, 코일외부를 알루미늄 호일로 감싸 외부 전자기 변화로부터 생기는 영향을 최소화하였다. 이 외에도 펌프로부

터 생기는 진동으로 인해 계속 측정값이 바뀌었다. 이러한 측정오류를 줄이기 위해 1초간 등 간격으로 10회 측정하였고 그 값을 평균하여 결과값을 도출하였다. 아울러 실험의 정확도를 높이기 위해 5회 반복하여 측정하여 그 평균값을 최종으로 사용하였다.

#### 2-4. CST (Computer Simulation Technology)를 이용한 자속밀도 해석

튜브 안을 흐르는 오일의 오염에 의한 자속밀도의 변화를 이론적으로 이해하기 위해 CST 코드를 이용하여 코일 내부의 자속밀도 변화를 조사하였다. 자속밀도는 자속의 방향과 수직인 단위 면적당 자속선의 수를 말하며 자계의 세기를 측정하는데 사용된다. 자속밀도  $B$ 는 자계의 세기  $H$ , 투자율  $\mu$ 와의 사이에  $B = \mu H$ 의 관계가 있다[4]. 튜브의 재질을 유리로 지정하여 지름 15 mm인 튜브 안에 깨끗한 오일이 있는 경우와 200 ppm의 농도로 자성입자가 존재하는 경우

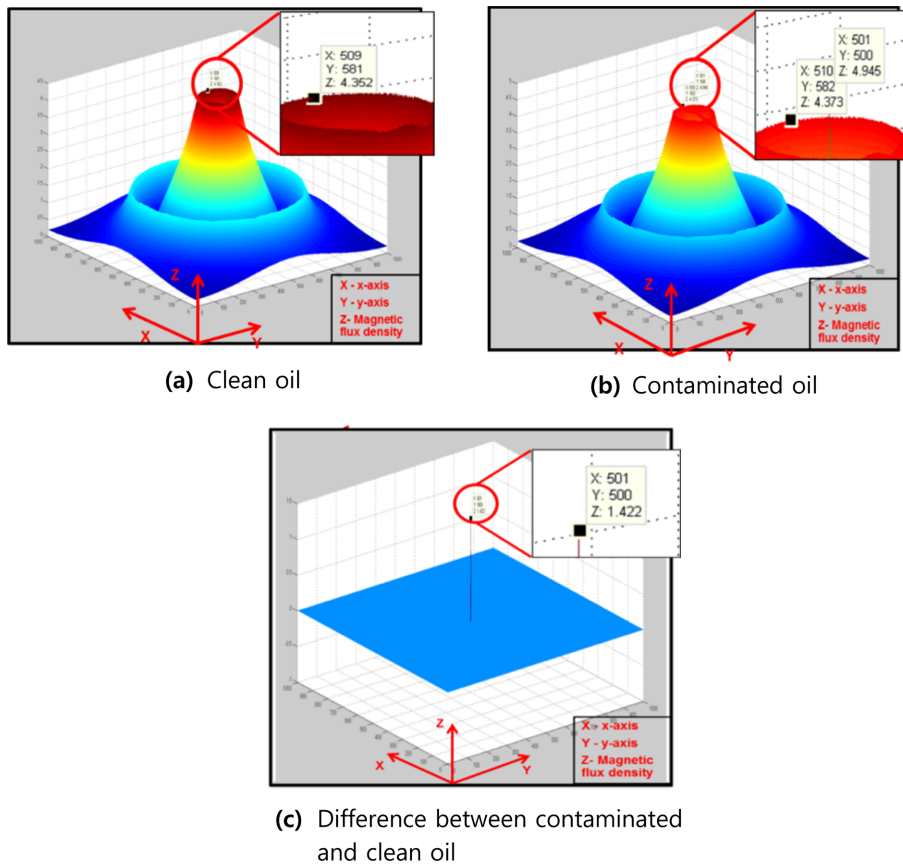


Fig. 5. Simulation of magnetic flux density for clean and contaminated oil in a glass tube.

**Table 1. Comparison of magnetic flux density between clean and contaminated oil (Unit: wb/m<sup>2</sup>)**

Location	Clean oil	Contaminated oil	Difference
Center	4.523	4.945	1.422

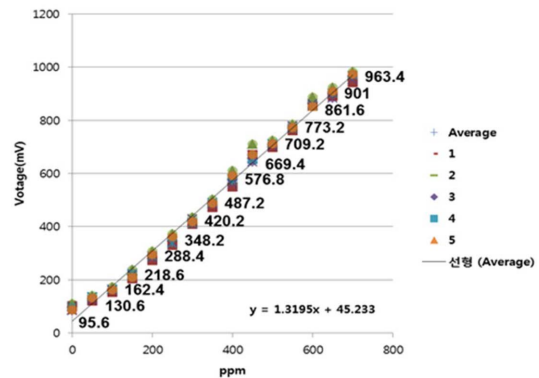
에 대해 분석하였다. 깨끗한 오일이 담겨있는 코일 내부의 자속밀도의 경향은 Fig. 5(a)와 같으며, 자성입자가 포함된 코일 내부의 자속밀도의 경향은 Fig. 5(b)와 같다. 자성 입자가 미치는 영향을 알아보기 위해 두 결과의 차이 값을 뽑아 Fig. 5(c)에 표현하였다. 자성 입자가 위치한 대략적, 좌표인 X=501, Y=500 위치의 자속밀도를 편의상 Table 1에 제시하였다. 자속밀도의 차이값은 1.422 wb/m<sup>2</sup>로 나타났으며, 이 값은 자성입자가 코일 내부에 미치는 영향에 기인한 것임을 알 수 있다.

### 3. 실험결과

Table 2에는 50 ppm씩 철 입자를 증가시켜 700 ppm에 이르기까지 인덕턴스의 변화를 측정된 결과를 보이고 있다. 측정 결과값을 살펴 보면 대략 50 ppm

**Table 2. Inductance variation as a function of ferrous debris (Unit: mV)**

Number ppm	1	2	3	4	5	Average
0	101	109	83	97	88	95.6
50	120	141	124	136	132	130.6
100	152	173	160	165	162	162.4
150	203	239	218	224	209	218.6
200	272	307	281	288	294	288.4
250	329	372	342	336	362	348.2
300	408	435	429	410	419	420.2
350	472	503	482	491	488	487.2
400	550	611	560	572	591	576.8
450	670	710	642	653	672	669.4
500	698	723	702	711	712	709.2
550	761	785	778	769	773	773.2
600	855	886	862	853	852	861.6
650	890	923	882	901	909	901
700	942	982	952	967	974	963.4



**Fig. 6. Relationship between voltage due to the change of inductance and level of contamination as expressed by ppm.**

당 50~60 mV 정도 증가한다는 것을 알 수 있다. Table 1은 5회의 반복 실험 결과를 제시한 것이다. 각 측정치 간의 차이는 심하지 않아 5회 측정값의 평균값으로 측정 결과를 대변해도 무리가 없으므로 평균값을 이용해 선형 추세선을 작성하여 변화 추이를 확인하였다(Fig. 6). 해당 추세선의 선형 방정식은  $y=1.3195x + 45.233$ 으로 나타났다. 그래프의 기울기는 ppm당 전압을 의미하므로 민감도(Sensitivity)는 1.3195 mV/ppm이다. Fig. 7의 측정결과를 보면 100 ppm에서 350 ppm구간까지는 일정하게 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 미량의 철 입자를 포함한 0 ppm~100 ppm까지는 매우 완만히 증가하는 모습을 보였다. 이 구간에서의 추세선의 방정식은  $y=0.668x+95.6$ 으로 위의 추세선과는 크게 차이가 있었으며 민감도의 변화가 크지 않았다.

### 4. 결론

본 연구에서는 Maxwell bridge와 코일을 활용하고 BPF 필터를 통해 노이즈를 제거하여, 오일 내 마모입자 양의 미세한 변화를 인덕턴스 값으로 효과적으로 측정하는 검측장비를 구축하였다. 구성된 센서의 민감도는 1.3195 mV/ppm이었고 100~350 ppm 구간에서 명확한 선형 특성을 보이거나 미량의 철 입자가 존재하는 100 ppm 이하의 구간에선 민감도의 변화는 크지 않았다.

튜브 안을 흐르는 오일에 존재하는 자성 입자가 자속밀도에 미치는 영향을 이론적으로 확인하기 위해 상

용 전자기와 시뮬레이션 코드(CST)를 사용해 전산해석하였으며 코일 내부에 자성입자가 존재할 경우 자속 밀도가 증가함을 확인하여 인덕턴스 변화를 이용한 오일 내 마모입자 감지기술의 활용 가능성을 제시하였다.

### Acknowledgements

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다

### References

- [1] Ahn, H. S., Yoon, E. S., Sohn, D. G., Kwon, O. K., Shin, K. S., Nam, C. H., "Practical contaminant analysis of lubricating oil in a steam turbine generator", *Tribology International*, Vol. 29, pp. 161-168, 1991.
- [2] Kong, H. S., Han, H. G., Kwak, J. S., Chang, W. S., Im, G. G., "Case Study on Intergrated In-line Oil Monitoring Sensor for Machine Condition Monitoring of Steel Making Industry", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 26, No. 1, pp. 73~77, 2010.
- [3] Du, L., Zhe, Z., "A high throughput inductive pulse sensor for online oil debris monitoring", *Tribology International* Vol. 44, pp. 175-179, 2011.
- [4] Whittington, H. W., Flynn, B. W., Mills, G. H., "A novel on-line wear debris monitor based on an inductive transducer", *Condition Monitoring '91*, Ed. Jones Erding, May 1991.
- [5] Han, L., Hong, W., "The Key Points of Inductive Wear Debris Sensor", *IEEE (FPM 2011)*, pp. 809-815, 2011.
- [6] Roylance, B. J., Hunt, T. M., *The Wear Debris Analysis Handbook*, Coxmoor Publishing Company, Oxford, 1999.