엔진 오일의 열화 감지를 위한 드레인 밸브 일체형 센서

김재화¹ · 박세광^{2,*}

A Study on the Sensor Integrated of Drain Valve for Degradation Detecting of Engine Oil

Jaehwa Kim¹ and Sekwang Park^{2,*}

Abstract

In this study, the oil degradation measuring for integrated sensor of drain valve was fabricated. A sensor used in the experiments was integrated with drain valves and installed in oil pan without requiring additional space. As a result of the experiments, the capacitances changed with two inflection points in accordance with an after in mileage. The first inflection point indicated the exhaustion of oil additives, and after the second inflection point, the oil degradation was completed, which increased the viscosity and disabled the functions of oil. Thus, this section was determined as the time of oil exchange.

Keywords : Oil degradation, Engine oil, Integrated sensor

1. 서론

삶의 질이 향상되면서 국내외 자동차 시장은 지속적인 성장을 거듭하였고 친환경, 지능형 기능을 강조한 차세대 자동차 시장이 형성되고 있다. 자동차에서 발생하는 탄소를 줄이기 위해 친환경, 저공해 자동차가 등장하고 있으며, 각속도와 가속도 센서, 위치 센서 등을 이용한 지능형 자동차의 개발과 상용화가 진행 중이다.

엔진의 보호와 성능강화를 위해 사용되는 엔진 오일은 엔진의 상대접촉 운동부에 발생하는 마찰 저항력을 줄이고, 마멸 요소 발생을 차단하여 엔진의 원활한 작동과 내구성을 확보한다. 그러나 주행거리와 사용기간의 증가, 가혹한 운전환경 등의 요인으로 첨가제의 기능이 저하되어 최후에는 윤활유에 용해하지 않는 수지상의 물질을 생성하게 된다. 윤활유 제조 기업에서는 일정 주행이나 사용기간에 따른 엔진 오일의 교환을 추천하고 있으나 차종과 사용 환경 등이 상이하여 오일 교환의 기준이 불분명하다. 사용자가 오일의 열화를

판단하지 못한 상태에서 추가적인 주행으로 인한 엔진의 손상이 발생한다면 인명 피해를 야기할 수 있어 적절한 시기의 엔진 오일의 교환은 매우 중요하다.

오일의 열화를 판단하는 주요 방법으로는 물리적인 분석법과 화학적 분석법으로 구분된다. 물리적 분석법은 엔진 내 피스톤 운동에 의한 금속 입자 생성량을 측정하는 방법으로 주로 점도의 변화를 측정하여 열화를 판단하며[1, 2], 화학적 분석법은 자동차의 주행거리에 따른 오일 내 산성성분의 감지를 위해 오일 유전율과 정전용량 등을 측정하여 분석한다[3-9]. 종래의 연구에서는 오일 필터와 일체형으로 제작된 오일열화센서를 이용해 정전용량을 측정하고 오일의 유전상수를 구해 오일의 퇴화를 감지하는 방법[3, 4]과 프로브의 반사계수를 이용하여 오일의 열화를 판단하는 방법[5], 이중 코일형 센서를 이용한 정전용량 측정 방법[6] 등이 연구되었다. 그러나 종래에 연구된 센서들은 사용자의 운행 습관과 운전 환경, 센서의 부착 위치 등의 변수에 대응하지 못하였으며, 구체적이고 체계적인 오일 교체시기에 대한 판단 기준을 마련하지 못하였다.

현재 국내외의 꾸준한 차량증가로 오일의 소비가 증가하고, 무분별한 오일의 교체로 인한 경제적 낭비가 가중되어 이에 발생하는 폐오일 처리로 환경오염 문제가 지속됨으로 정확한 엔진 오일 교체시점의 모니터링을 위한 연구의 필요성이 증대되고 있다.

이 논문에서는 드레인 밸브 일체형 센서를 제작하여 자동차 주행거리의 증가로 진행되는 오일의 열화 측정하여 오일 교체시기를 결정하기 위한 연구를 수행하였다. 센서는 범용 드레인 밸브와 일체형으로 제작되어 설치가 편리하고 별도의 설치공간을 요구하지 않는

¹경북대학교 전자전기컴퓨터학부(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

²경북대학교 IT대학 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Kyungpook National University)

*Corresponding author: skpark@knu.ac.kr

(Received : Aug. 7, 2012, Revised : Nov. 5, 2012, Accepted : Nov. 7, 2012)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

장점이 있다.

2. 열화 감지 센서의 제작과 실험

2.1 엔진 오일의 열화 측정 이론

엔진 오일은 주행거리와 사용기간, 사용환경 등에 의해 화학적, 물리적 변화를 거쳐 열화가 발생하며, 산화, 탄화, 희석, 유화가 대표적이다. 열화는 오일의 기능향상을 위해 첨가하는 여러 첨가제들이 소진한 이후 서서히 발생하며, 열화가 완료된 이후에는 원활하지 못한 엔진의 동작을 유발하여 엔진의 수명을 단축시킨다.

무극성 분자의 탄화수소로 이루어진 엔진 오일이 열화가 진행되어 유용성의 산소화합물이 생성되고, 이 물질들은 카복실산과 산소산 등의 유기산 물질로 변화한다. 이 생성물들은 산성을 띠는 극성 분자들이며, 유전체에 인가된 전계 강도 E 와 분극 P 의 관계는 식(1)와 같이 유도된다.

$$P = \epsilon_0 \chi_e E \quad (1)$$

그리고 물질의 비유전율 ϵ_r 과 전기 감수율 χ_e 은 식(2)와 같은 관계를 가진다.

$$\epsilon_r = \chi_e + 1 \quad (2)$$

무극성으로 열화 되지 않은 오일보다 극성분자를 가지는 열화된 오일이 보다 큰 전기 감수율을 가지게 되고, 부식마모로 증가된 금속입자와 금속이온의 수 역시 전기 감수율의 증가를 가져오는 하나의 요인이 된다. 따라서 엔진 오일이 열화 할수록 오일의 유전율은 증가하는 것으로 분석 할 수 있다. 식(3)은 전기전도도 σ 와 캐리어의 전하량 q , 단위 체적당 캐리어 수 n , 캐리어 이동도 μ 와의 관계를 나타낸다.

$$\sigma = qn\mu \quad (3)$$

오일 열화에 의한 부식마모의 결과로 생성되는 금속이온과 화학반응에서 생성되는 이온들은 단위 체적당 캐리어 수의 증가 원인이 된다. 그러므로 열화에 의해 엔진 오일의 전기 전도도는 증가한다. 그리고 여러 연구결과들을 통해 오일이 열화 할 때 오일의 유전율과 전기 전도도가 증가한다는 결과가 실험으로 입증되었다[5, 6].

2.2 드레인 밸브 일체형 센서의 설계와 제작

엔진 오일의 전기적 특성인 정전용량의 변화를 측정하기 위해 드레인 밸브 일체형 엔진 오일 열화 감지 센서를 제작하였다. 전극은 엔진 내 고온(70~150℃)에 따른 휨 현상을 방지하기 위해 전자회로

기판 제작에 사용되는 내열성 종이 에폭시 적층 판을 선정하였으며, 기판 양면에 35 μm 두께로 도금하여 전극을 형성하였다. 센서 구조물에는 우수한 내열성을 가지는 테플론을 사용하여 엔진 내 고온에 의한 센서의 파손을 방지하였다. 그리고 센서는 범용 드레인 밸브의 제한된 공간(직경 14 mm)에 설치하며, 오일펌프와의 충돌을 방지하기 위해 L형 구조의 센서를 제작하였다. 그리고 측정 물질의 온도에 따라 변화하는 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 온도센서를 구조물이 패키징 하였다. Fig. 1은 측정 전극 구성도이며, Fig. 2는 패키징 완료된 드레인 밸브 일체형 열화 감지 센서이다.

Fig. 1. Configuration of the sensor electrodes.

Fig. 2. Design of sensor for measurement of oil degradation.

2.3 실험조건

자동차의 주행 시 오일의 온도는 70~110℃이며, 120℃ 이상이면 엔진에 중대한 손상이 발생한다[7]. 표본 오일을 추출한 차량과 실장실험에 사용된 차량의 오일 온도는 운행 중 78~84℃의 온도범위를 유지하는 것으로 확인되었다. 이를 고려하여 80℃의 일정한 온도에서 데이터를 수집하였으며, 실험 중 오일 부식물의 침전을 방지하고 오일 팬 내부의 오일 순환 환경에 들어맞도록 500 rpm으로 교반하여 실험하였다. 센서와 측정기기간의 연결 도선은 15 cm를

넘지 않게 하였으며, 이는 도선의 저항과 기생 정전용량에 의한 측정 오류를 줄이기 위함이다.

정전용량 측정에 사용되는 계측기기인 LCR meter는 V_{p-p} 1 V의 교류 정현파를 센서에 인가하여 센서 전극 양단에 충전되는 전하를 분석하여 정전용량을 측정한다. 따라서 측정 값은 전극 사이에 유입되는 매질의 유전율 변화에 의존하며 유전율은 인가 주파수에 따라 반응 크기가 달라지기 때문에 0.1–100 kHz의 주파수 대역에서 실험하여 주파수에 따른 출력 감도의 변화를 확인하였다.

각종 변수를 제어하는 프로그램은 LabVIEW 프로그램을 이용하였으며, LCR meter와 digital voltage meter에서 측정된 데이터는 GPIB 케이블을 통하여 PC로 전송된다. 로거 프로그램은 측정 온도, 주파수, 측정 횟수, 측정 주기를 사용자가 설정하고 측정 값을 실시간으로 모니터링 하도록 작성되었다. 그리고 측정된 데이터의 유효성을 위해 측정 횟수는 오류를 포함하여 각 실험에 따라 500회 이상으로 하고, 샘플링 주기는 5초로 설정하였다. 표본 오일 실험과 실장 실험 결과를 비교하여 오일의 열화 경향을 확인하고, 실장 실험을 통해 차량 적용 가능성을 확인한다.

2.4 실험용 엔진 오일과 차량의 선정

2대의 차량에서 오일을 추출하여 연구실 실험을 하였으며, 1대의 차량에 센서를 설치하여 실장 실험을 하였다. Table 1은 표본오일의 추출과 실장 실험에 이용된 자동차의 사양이다. 실험에 사용된 오일은 SK lubricants에서 제조된 ZIC XQ 5W40제품이며, 엔진 오일 교환소에서 구매가 가능한 가솔린/LPG겸용의 합성유이다. 엔진 오일은 가솔린/LPG 엔진과 디젤 엔진에 사용되는 오일로 구분되며, 이 연구에서는 디젤 엔진용 오일에 비해 상대적으로 많이 사용되는 가솔린/LPG 엔진 겸용 오일의 열화를 연구하였다. 실험에 이용된 차량은 중거리 주행을 주로 하며, 1회 주행에서 30분 이상의 주행시간을 가진다. 단거리 주행이나 짧은 주행시간으로 인한 수분의 발생은 측정 에러 요인으로 작용할 수 있어 수분의 영향을 배제하기 위해 중·장거리 주행을 주로 하는 차량을 선정하여 수분이 증발된 이후 오일을 추출하고 실험하여 데이터의 신뢰성을 확보하였다.

Table 1. Specification of automobiles and oil used experiments

	Sample A	Sample B	Field Test
Manufacturer	Hyundai motors	Kia motors	Daewoo motors
Model	EF sonata (2005)	Morning (2009)	Matiz II (2001)
Engine type	4-cylinder, 2.0 DOHC engine	4-cylinder, 1.0 LPI engine	3-cylinder, 0.8 M-TEC engine
Fuel	LPG	LPG	Gasoline

3. 실험 결과

3.1 표본 오일 실험

Fig. 3은 표본 A을 이용한 주행거리와 입력주파수의 변화에 따른 정전용량의 변화이다. 5 종류의 입력주파수 중 0.1 kHz를 제외한 4 종류의 입력주파수에서 안정된 출력을 나타내었으며, 입력주파수 0.12 kHz에서 측정 감도가 가장 우수하였다. 입력주파수가 낮을 경우 상대적으로 감도가 상승 할 것으로 예상되었으나, 0.1 kHz의 입력주파수에서는 출력이 안정적이지 못해 데이터의 신뢰성을 가지지 못하였다. 입력주파수의 변화에 따라 감도가 상이한 이유는 매질에 가해진 주파수에 의해 유전율의 변화에 의한 것이며, 분극현상과 관련을 가진다. 분극현상은 원자력 혹은 분자력에 의해 발생하며 물질 내에 존재하는 전하들이 상대변위를 발생하여 나타난다. 분극현상은 전자분극, 원자분극, 배향분극, 공간전하분극으로 발생되며, 외부로부터 가해진 전자기장에 대해 반응하는 시간이 각각 달라 유전율 발현에 기여하는 분극현상은 주파수의 증가로 인해 감소한다[8].

주행거리 증가에 따른 정전용량의 변화는 처음의 변곡점 이후 연속적으로 상승하는 경향을 보인다. 이는 오일의 화학적인 변화에 기인한 것으로 산성물질의 증가와 관련을 가지며 정전용량 값의 증가를 나타낸다. 그러나 2,000 km를 주행한 오일에서는 신유에 비해 낮은 정전용량을 보이는데, 이는 오일의 성능개선을 위해 투입된 첨가제의 영향으로 분석되며 이들의 작용으로 전산가가 감소했기 때문이다. 일반적으로 첨가제가 소진되는 시점 이후에는 기유만 남기 때문에 유전율은 점진적으로 증가하는 경향을 보인다[7, 9]. 오일 첨가제 반응 이후 10,000 km를 주행한 오일에서 측정된 정전용량은 첨가제 반응시점에 비해 19.86 pF 상승하였고 오일 내 산성성분 증가에 의한 열화가 진행 되었음을 확인하였다.

Fig. 3. Change of oil capacitance according to mileage and frequency (sample A).

2000년 이전까지는 일반적으로 5,000 km 내외의 주행거리에서 교환하도록 오일 제조사에 의해 장려되었으나, 2012년 한국소비자원과 한국석유관리원의 조사결과 현재 국내 유통되는 엔진 오일은

10,000 km 이상의 주행거리에도 성능에 문제가 없음이 확인되었다. 그리하여 10,000 km 이상의 표본 오일을 이용한 실험을 위해 표본 B를 추가 추출하였다. 표본 B는 초기에 3 l 을 주입하여 계획된 거리를 주행한 후 1 l 의 오일을 레벨 게이지 투입 부분을 이용하여 추출하고 다시 계획된 거리를 주행 후 오일 팬을 통해 나머지 오일을 추출하는 방법을 사용하였다.

Fig. 4는 표본 B를 이용한 정전용량 측정결과이다. 표본 A의 결과와 같이 0.12 kHz의 입력주파수에서 감도가 가장 우수하였고, 0.1 kHz의 입력주파수에서는 출력이 안정되지 못하였다. 신유에서 오일 첨가제 소진 시점까지 정전용량은 11.7 pF의 감소를 보이며, 이후 10,534 km의 주행거리까지 8.51 pF 증가하였다. 13,576 km의 주행거리 오일에서는 10,534 km의 오일에 비해 4.19 pF의 감소가 측정되었다.

오일의 열화는 3단계로 나눌 수 있는데 (a)의 첨가제 활성화/소진구간, (b)의 오일의 열화 진행구간, (c)는 오일의 기능 수행 불능 또는 오일의 교체구간이다. (c)지점에서의 엔진 오일은 이미 열화와 산성화가 완료된 상태이며, 빠르게 점도가 증가하는 것으로 알려져 있다[6]. 점도의 증가는 오일의 기능을 수행하지 못하는 상태이므로 이 지점을 오일의 교체시점으로 선정하는 것이 타당하다.

Fig. 4. Change of oil capacitance according to mileage and frequency (sample B).

3.2 실장 실험

표본 오일을 이용한 실험결과를 바탕으로 보다 정확한 오일의 교체시점을 확인하기 위해 Fig. 5와 같이 센서를 차량에 설치하여 실장실험을 하였다. 센서는 오일 팬 최하부에 설치되어 센서가 오일에 항상 잠겨있는 상태에서 오일의 열화를 측정하도록 장착되었다. 실험 시 측정매질에 가해진 주파수는 100 kHz이었으며, 일정한 주파수를 입력한 이유는 전자기장의 주파수에 의해 측정되는 유전율이 변화하기 때문이다. 또한 기생 정전용량에 의한 측정 오차를 줄이고자 오일 팬 외부 배선을 15 cm 이내로 하였으며, 측정기기를 근접하게 배치하여 실험하였다.

실험에 사용된 차량은 중, 장거리 주행을 주로 하는 3 기통의 휘

발유 엔진으로 배기량은 796 cc이며, 초기 엔진 오일 주입량은 약 3.5 l 이다. 실험에 사용된 오일은 표본들과 동일한 SK lubricants 의 ZIC XQ 5W40이며, API SL 등급의 광물유계 오일로 휘발유/LPG 겸용으로 사용된다. 그리고 이전 사용 오일에 대한 영향을 배제하고자 오일 교체 때 잔유 제거 작업과 오일 팬을 교체한 후 신유를 주입하였다. 신유 주입 후 차량은 14,477 km를 주행하였고, 약 300 km의 주행거리 간격으로 출력을 확인하였다. 엔진을 시동하고 30분 이상 주행 후 실험하였으며, 이는 엔진이 완전히 가열된 상태에서 측정하여 측정 오일의 온도에 대한 오차를 줄이고, 오일 내 수분 영향에 따른 에러 요인을 제거하기 위함이다. 측정 시 오일의 온도는 약 84.54℃이며, $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 변화하였다.

Fig. 5. Sensor installed to oil pan.

Fig. 6은 실장실험의 결과이다. 주행거리 2,477 km에서 측정된 정전용량은 45.52 pF으로 가장 낮은 측정결과를 나타내며 오일 내 초기 첨가제의 반응에 의한 산성성분의 감소로 분석된다. 이후 주행거리의 증가로 정전용량은 9,843 km까지 연속적인 상승을 나타낸다. 이 구간에서 측정되는 정전용량은 선형적이지는 않으나, 일정한 증가 경향을 나타낸다. 오일 열화가 진행되는 시점인 이 구간에서 정전용량은 최고 53.72 pF까지 측정되었으며, 이후 급격한 하락을 나타낸다. 오일 열화가 완료되고 산성화 진행이 끝난 시점인 약 10,000 km의 주행거리 이후 정전용량의 변화 경향은 일정한 경향을 나타내지는 않으나, 약 50 pF의 경계선에서 상승하였다.

Fig. 6. Change of oil capacitance according to mileage (automotive experiment).

실장 실험의 결과와 표본 오일 실험 결과 모두 동일한 경향성을 보이며 운전조건에 따라 상이하나 10,000 km의 주행거리 전후에서 오일의 교체구간이 확인되었다. 제작된 오일 드레인 밸브 일체형 센서를 이용하여 오일 열화를 측정할 경우 두 번째 변곡점, 즉 오일 열화 진행이 완료된 시점 이후의 정전용량 하락을 검출한다면 이 시점을 오일의 교체시점으로 선정할 수 있으며, 차량에 설치하여 실험을 진행한 결과 차량 적용에도 문제가 없음을 확인하였다.

4. 결론

이 논문에서는 드레인 밸브 일체형 센서를 제작하고 표본 오일 실험과 실장 실험을 진행하여 오일 열화에 따른 전기적 특성 변화를 측정하였고, 실험결과를 통해 적절한 오일의 교체시점을 선정하기 위한 연구를 수행하였다.

주행거리의 증가에 의한 오일의 열화를 측정하기 위해 2종의 표본 오일을 추출하여 실험과 실장 실험하였으며 실험 결과, 오일의 열화는 첨가제 활성화/소진구간, 오일의 열화 진행구간, 기능 수행불능 또는 오일의 교체구간의 총 3구간으로 구분되었다. 정전용량은 주행거리의 증가에 따라 두 번의 변곡점을 가지고 변화하였다. 첫 번째 변곡점에서는 오일 첨가제의 소진을 나타내며, 두 번째 변곡점 이후에는 오일의 열화가 완료되어 점도가 증가하고 오일의 기능을 수행하지 못한 이 지점을 오일의 교환시점으로 볼 수 있다. 오일의 열화 정보를 사용자에게 알려주어 엔진관련 사고를 미연에 방지할 수 있음을 연구와 실험을 통해 확인하였다.

이 연구를 통해 드레인 밸브 일체형 센서를 이용하여 오일 열화의 측정이 가능하며, 차량에 설치하여 실험을 진행한 결과 차량 적용에도 문제가 없음을 확인하였다. 상용화 가능한 수준의 패키징 기술과 금형기술을 이용한 낮은 제작단가의 대량생산 프로세스를 더한다면 우수한 시장성과 기술경쟁력을 가질 것이다.

REFERENCES

- [1] A. Agoston, C. Otsch, and B. Jakoby, "Viscosity sensors for engine oil condition monitoring-application and interpretation of results", *Sens. Actuators A: Physical*, Vol. 121, pp. 327-332, 2005.
- [2] E. Irion, K. Land, T. Grtaer, and M. Klein, "Oil-quality prediction and oil-level detection with the Temic QLT-sensor leads to variable maintenance intervals", *SAE, Tech. Paper* 970 847.
- [3] S. M. Chun, "Development of an engine oil quality monitoring system", *Journal of the Korean Society of Tribologist and Lubricant Engineers*, Vol. 27, No. 3, pp.125-133, 2011.
- [4] S. Kim, H. K. Kang, T. Y. Lim, J. S. Kwon, J. G. Kim, D. S. Choi, D. K. Kim, and C. S. Jung, "A study on lubrication characteristics of automotive engine oil merchandised in domestic", *Journal of the Korean Society of Tribologist and Lubricant Engineers*, Vol. 25, No. 6, pp. 432-437, 2009.
- [5] Y. Kim, "Implementation of the probe system with respect to the engine oil states inspection", *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 25-29, 2012.
- [6] W. T. Kim, M. Y. Choi, H. W. Park, and J. H. Park, "Study on deterioration measurement sensor in the automobile engine oil", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 61-66, 2007.
- [7] S. S. Wang, "Road tests of oil condition sensor and sensing technique", *Sens. Actuators B: Chemical*, Vol. 73, pp. 106-111, 2001.
- [8] M. H. Oh, S. Y. Bang, H. B. Park, J. H. Lee, S. H. Lee, and K. H. Ahn, "Complex dielectric constant of soil contaminated by landfill leachate with measured frequency", *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 9, No. 3, pp. 1-11, 2004.
- [9] S. Raadnui and S. Kleesuwana, "Low-cost condition monitoring sensor for used oil analysis", *Wear*, Vol. 259, pp. 1502-1506, 2005.
- [10] J.-M. Kim, Y.-S. Song, S.-Y. Yi, and S.-W. Kim, "The design of capacitance variation detector for the obstacle detection system", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 13, No. 2, pp. 133-138, 2004.

김 재 화 (Jaehwa Kim)

- 2010년 경북대학교 전자전기공학부(공학사)
- 2012년 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부(공학석사)
- 주관심분야: MEMS 기술, Engine oil degradation and level detecting sensor

박 세 광 (Sekwang Park)

- 1998년 미국 Case Western Reserve Univ. 전기전자공학(공학 박사)
- 1984년 미국 Case Western Reserve Univ. 전기전자공학(공학석사)
- 1976년 서울대학교 전기공학과(공학사)
- 1989년 ~ 현재 경북대학교 IT대학 전기공학과 교수
- 2008년 ~ 현재 IEC(국제전기기술위원회) MEMS분과 의장
- 2005년 ~ 2008 IEC SMB(표준화 관리이사회) 한국대표 정위원
- 1995년 ~ 현재 IEC(국제전기기술위원회)센서분과 의장
- 주관심분야: MEMS 기술, 반도체 센서 (압력센서, 유속/유량센서, 온/습도센서), Micro FACS, Bio chip