

자동차 연료펌프의 오염민감도 실험 연구

이재천#, 장지현*, 신현명**

An Experimental Investigation on The Contamination Sensitivity of An Automotive Fuel Pump

Jae-Cheon Lee#, Ji-Hyun Jang*, Hyun-Myung Shin**

ABSTRACT

This study addresses the contamination sensitivity test of a typical fuel pump for automotive vehicle. The objective of the study is to find the contamination sensitivity coefficient of fuel pump on specific contaminant particle sizes so that optimal fuel filter could be selected. To achieve the objective, the degradation of discharge flow rate of fuel pump was measured under the experiments of various contaminants size ranges of ISO test dust up to $80\mu m$. The fundamental theory of contamination sensitivity was introduced and the contamination sensitivity coefficients were estimated using the experimental data. Maximum contamination sensitivity coefficient of $5 \times 10^{-6} L/min \cdot Ea$ was found on the contaminant size range of $40\mu m \sim 50\mu m$. The magnified picture of the surface of vane disc revealed that the abrasive wear was the principal cause of discharge flow rate degradation. Hence, this study revealed that high efficiency filter on the contaminant particle size range of $30\mu m \sim 70\mu m$ especially should be used to maintain the service life of the fuel filter.

Key Words : Fuel pump(연료 펌프), Contamination sensitivity coefficient(오염민감도계수), Contamination tolerance(오염공차), Discharge flow rate(토출유량), Internal leakage(내부누유)

1. 서론

유압펌프의 트라이볼로지(tribology)적 수명은 펌프의 구조, 제원, 공차 등의 설계 매개변수와 압력, 유량, 온도 등의 운전 매개변수, 그리고 산화 및 부식안정성, 내마모성 등과 같은 오일 매개변수 외에, 오일의 오염에 의해 영향을 받는다. 오염물에 의한 펌프의 성능은, Fig. 1에서 보듯이, 오일의 오

염도를 나타내는 오염수준(contamination level)과 오염에 대한 펌프의 특성을 가리키는 오염공차(contamination tolerance)로 결정된다.¹ 오염수준은 단위오일체적 당 오염입자의 크기별 개수인 오염농도(contamination concentration)로 나타내며, 오염공차는 오염민감도(contamination sensitivity) 실험으로 확인할 수 있다.

오염민감도란 기계부품이 특정한 오염환경에 놓

접수일: 2003년 10월 12일; 게재승인일: 2004년 4월 9일

교신저자: 계명대학교 기계자동차공학부

E-mail: ljeds@kmu.ac.kr, Tel: (053) 580-5921

* 계명대학교 대학원 기계공학과

** 계명대학교 기계자동차공학부

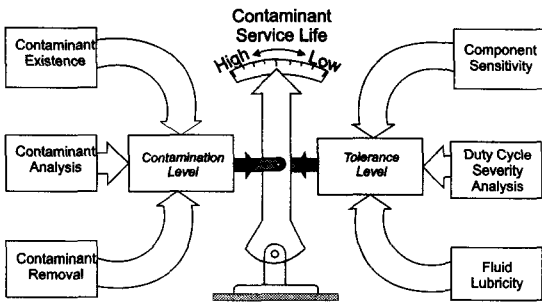


Fig. 1 Contamination control balance¹

였을 때 발생하는 성능저하를 일컬으며, 단위 오염물에 대한 성능 저하량을 가리켜 오염민감도계수(contamination sensitivity coefficient)라 부른다.¹ 일반적인 유압펌프의 오염민감도에 대한 연구는 1970년대 이후 미국 오클라호마 주립대학교의 유공압연구소를 중심으로 진행되었다.^{2,3,4} 그러나 연료펌프에 대한 오염민감도 연구는, 연료의 특성상 고가의 내부식성, 내폭성 소재의 실험장비가 요구되는 관계로 미국 Delco, Visteon사와 같은 일부 선진업체에서만 진행되어 국내에 소개된 바가 없다.

연료 내의 고형 오염물은 연료펌프의 상대운동면의 마모를 촉진하여 내부누유(internal leakage)를 증가시킴으로써 토출 유량을 감소시킨다. 또한 인젝터의 침식으로 인한 수명 감소뿐 아니라,⁵ 연료분무 특성에도 영향을 미쳐 엔진의 연비와 공해물질에 악 영향을 끼친다.⁶ 따라서 자동차의 연비향상과 배기가스 저감을 위해, 연료펌프의 오염민감도에 따른 연료필터의 성능과 연료의 청정도 유지가 요구된다. 이에 계명대학교에서는 '연료장치 오염성능 시험기(Fuel Components' Contamination Performance Test Stand)'를 개발하여 자동차 연료필터에 대한 일련의 연구를 진행하여 왔다.^{7,8,9} 본 연구의 목표는 대표적인 국산 자동차 연료펌프에 대한 오염민감도 실험을 통해 오염민감도계수를 파악함으로써, 향후 연료필터의 목표수명 달성을 위한 최적의 필터의 선정에 응용하는 것이다.

2. 오염민감도 이론

유압펌프의 마모 및 오염물로 인해 저하되는 중요성능 매개변수(critical performance parameter)로는

내부누유와 관련하여 체적효율(volumetric efficiency)을 들 수 있다. 유압펌프의 오염민감도 이론은 오일 내 모든 크기의 오염입자가 펌프의 토출 유량 감소에 기여한다는 가정에서 출발한다.¹⁰ 따라서, 시간 경과에 따른 토출유량의 저하율은 오염민감도 계수와 오염입자 노출율(exposure rate)의 곱이며, 오염입자 노출율은 유량(flow rate)과 오염입자 농도의 곱이므로 특정 크기의 오염입자로 인한 토출유량 저하율은 다음 식 (1)과 같다.

$$\frac{dQ_j(t)}{dt} = -S_j Q_j(t) n_j(t) \quad (1)$$

식 (1)에서, Q 는 펌프의 토출유량 (ml/min), S 는 오염민감도계수 ($ml/min \cdot 개$), n 은 오염농도 ($개/ml$)를 나타내며, 아래기호 j 는 오염입자 크기의 간격(contaminant size interval) 순을 가리킨다. 즉, $j=1, 2, 3, \dots, 9$ 는 각각 $0 \sim 5\mu m$, $5 \sim 10\mu m$, $10 \sim 20\mu m$, \dots , $70 \sim 80\mu m$ 를 의미한다.

또한 실험실에서 실험 중 특정크기의 오염입자는 펌프의 상대운동면 사이에서 분쇄되어 그 농도는 식 (2)와 같이 지수적으로 변화한다.¹⁰

$$n_{j(t)} = n_{o,j} e^{-t/\tau_j} \quad (2)$$

여기서 τ 는 실험으로 구한 시상수(time constant, min)이며, 아래기호 o 는 초기 값(initial value)를 뜻한다.

식 (2)를 식 (1)에 대입하면 다음 식 (3)을 얻는다.

$$\frac{dQ_j(t)}{Q_j(t)} = -S_j n_{o,j} e^{-t/\tau_j} dt \quad (3)$$

식 (3)을 적분하여 정리하면 다음과 같다.

$$S_j = \frac{-1}{\tau_j n_{o,j}} \ln \left(\frac{Q_{f,j}}{Q_{o,j}} \right) \quad (4)$$

여기서 아래 부호 f 는 필드(field) 값을 뜻한다.

오염민감도 실험¹¹은 통상적으로 $0 \sim 5\mu m$, $0 \sim 10\mu m$, $0 \sim 20\mu m$, \dots , $0 \sim 80\mu m$ 의 9가지 크기의 ISO시험먼지(test dust)¹²를 이용하여, 작은 크기의

시험면지부터 실험 실시한다. 시험면지의 주성분은 실리카(silica)로써 1g의 시험면지를 1L의 청정오일에 섞었을 때, 각 크기 구간별 입자의 개수 분포는 아래 Table 1과 같다.

Table 1 Test dust distribution Number of particles per milliliter in size interval (I, μm) in one milligram per liter of size range (R μm)

	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
	3167.3	2167.1	1692.1	1452.2	1357.4	1308.5	1282.7	1288.2	1257.9
0	653.99	510.65	438.56	409.64	394.89	387.10	382.73	379.61	
0	0	162.33	139.33	130.14	125.46	122.98	121.59	120.60	
0	0	0	21.153	19.758	19.046	18.670	18.406	18.309	
0	0	0	0	5.0930	4.9097	4.8130	4.7583	4.7197	
0	0	0	0	0	1.6723	1.6396	1.6213	1.6082	
0	0	0	0	0	0	66602	65845	65308	
0	0	0	0	0	0	0	30249	30005	
0	0	0	0	0	0	0	0	15088	

오일 내 모든 크기의 오염입자가 펌프의 토출유량 감소에 기여한다는 가정 하에, 각 오염입자 크기 간격 별 오염민감도 계수(S_j , $j=1,2,..$)를 제일 작은 오염입자 크기 간격인 S_1 부터 연쇄적으로 구할 수 있다. 예를 들어 $0\sim 10\mu\text{m}$ 오염입자에 의한 펌프 토출유량 감소는 $0\sim 5\mu\text{m}$ 오염입자와 $5\sim 10\mu\text{m}$ 오염입자에 의한 유량감소의 합과 같다.

즉, $0\sim 5\mu\text{m}$ 크기의 오염입자에 의한 오염민감도 계수는

$$S_1 = \frac{-1}{\tau_1 n_{o,1}} \ln \left(\frac{Q_{f,1}}{Q_{o,1}} \right) \quad (5)$$

이며, 그 이상 크기 간격의 오염입자에 대한 민감도 계수는 다음 식 (6)과 같이 구해진다.¹⁰

$$S_j = \frac{-1}{\tau_j n_{o,j}} \ln \left[\frac{Q_{f,j^*}}{Q_{o,j^*}} - \sum_{i=1}^{j-1} (e^{-S_i n_{o,i} \tau_i} - 1) \right] \quad (6)$$

$j=2,3,\dots,9$

식 (6)에서, 아래 기호 j^* 는 j 번째 오염입자 크기 간격($0\sim 5\mu\text{m}, 5\sim 10\mu\text{m}, \dots, 70\sim 80\mu\text{m}$)의 오염민감도를 구하기 위한 실험의 시험면지의 순서

를 가리킨다. 즉, $j^*=1,2,3,\dots,9$ 는 각각 $0\sim 5\mu\text{m}, 0\sim 10\mu\text{m}, 0\sim 20\mu\text{m}, \dots, 0\sim 80\mu\text{m}$ 의 오염면지를 이용한 실험순서이다.

식 (6)은 펌프 오염민감도계수가 입자분쇄 시상수(τ), 초기 오염입자농도(n_o), 토출유량의 저하율(Q_f/Q_o)의 함수임을 나타낸다. 오일 내 모든 오염입자에 의한 유량 저하율의 누계는 곧 펌프의 체적효율을 의미한다. 입자분쇄 시상수 τ 는, Fitch가 약 200대의 펌프를 대상으로 실험한 결과, 종류와 크기에 상관없이 약 9분임을 밝혔으며,¹⁴ 초기 오염입자 농도는 실험조건으로 조정할 수 있고, 펌프 토출유량의 저하율은 실험에 의해 측정할 수 있으므로, 각 오염입자 크기 간격에 대한 펌프 오염민감도계수를 산출할 수 있다.

3. 실험

3.1 실험 장치

Fig. 2는 펌프 오염민감도 실험장치의 구성도를 보여준다. 주요 구성품으로는 저유기(reservoir), 시험 펌프, 펌프 드라이브, 오염물 인젝션 시스템, 열교환기, 유량계, 압력계이지, 온도계, 클린업(clean-up) 제어 필터 등이다.

본 연구에서의 연료펌프 오염민감도 실험은 Lee가 소개한^{7,8,9} '연료장치 오염성능시험기'로 진행하였으며, 인젝터의 용량은 500ml이고, 길이와 내경의 비율(L/D)은 10이었다. 실험용 연료펌프는 현대자동차 아반떼 승용차의 인-탱크(in-tank) 연료 펌프로서, 전동모터로 구동되는 베인 타입(valve type)의 고정유량형 펌프이다. 정격전압은 12V이며 부하압력 200kPa에서 최소 50 l/hr의 유량을 토출하여야 한다. 실험용 오일은 Stoddard Solvent¹²로서 시험 중 온도는 $20\pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 유지되었다. 입자계수분석기는 Spectro Inc.의 LaserNet Fines-C¹³로써 시험 전 ISO 11171¹⁴ 규격에 의해 검교정(calibration)되었다.

Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 각각 연료펌프의 절개도와 연료장치 오염성능시험기에 장착된 모습을 보여준다.

3.2 실험 순서

1) 저유기에 4L의 실험유를 채운다.

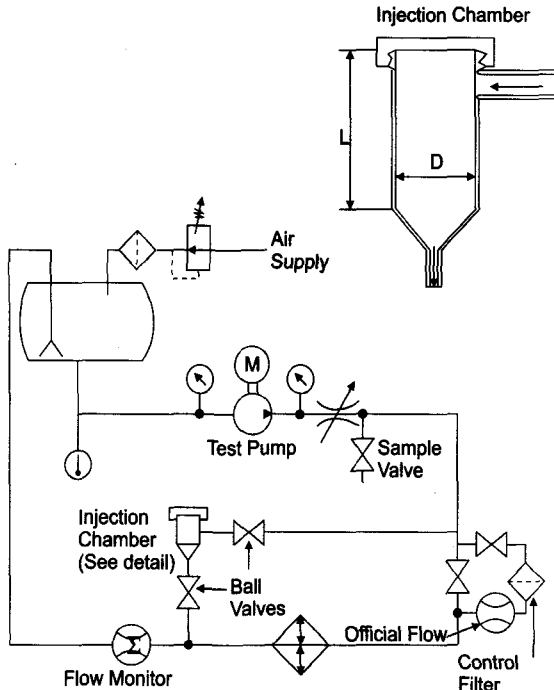
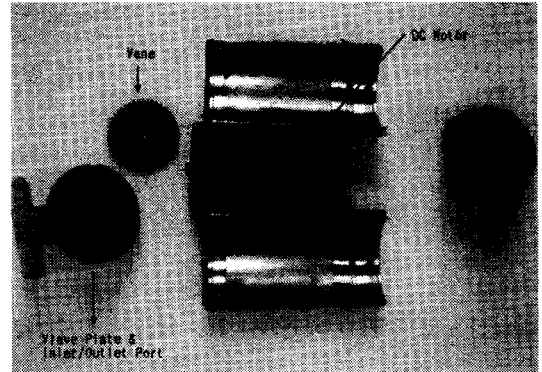
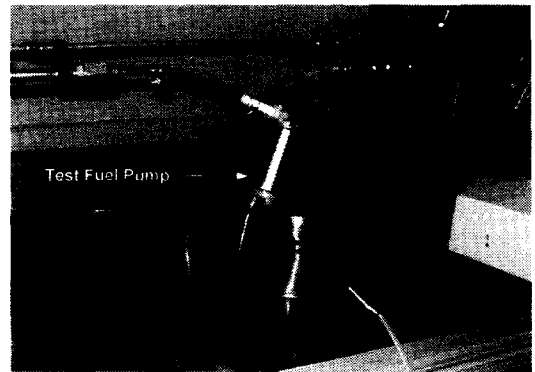


Fig. 2 Schematic of contamination sensitivity test stand for a fixed-displacement pump

- 2) 오일순환 펌프를 작동시켜 5 L/min의 유량을 순환시킨다.
- 3) 클린-업 필터로 유체를 순환시키며 오염도가 10mg/L (10 μ m 보다 큰 입자의 수가 1ml당 약 1,440개)가 될 때까지 플러싱한다.
- 4) 클린-업 필터를 우회시켜 펌프오염민감도시험방향으로 유량을 전환한다.
- 5) 연료 펌프를 설치한다.
- 6) 연료 펌프에 정격직류전압 12V를 공급하여 구동시킨다.
- 7) 연료펌프의 정격 토출압력은 200kPa로 한다. 스톱 밸브를 이용하여 토출압력을 조정하며 아래와 같이 연료펌프를 구동한다. 즉, 오염민감도시험을 실시하기 전에 우선 연료펌프 길들이기 시험(break in test)을 진행한다.
 - 정격압력의 25%에서 15분
 - 정격압력의 50%에서 15분
 - 정격압력의 75%에서 15분
 - 정격압력의 100%에서 60분



(a) Section view of test fuel pump



(b) Fuel pump in test stand

Fig. 3 Configuration of test fuel pump

- 8) 7)항의 실험이 종료된 후 펌프 토출유량(참조 유량, Q_r)을 측정 기록한다. 이것이 곧 식 (4)에서의, 오염민감도시험을 실시하기 직전의 초기유량 $Q_{o,1}$ 이다.
- 9) 각 인젝션 오염물의 농도는 300mg/L를 기준으로 한다. 따라서 각 크기 간격 별 오염먼지의 중량은 다음과 같다.

$$g_j = 0.3g/L \times 4L = 1.2(g)$$
- 10) 오염먼지 크기 간격 별(0~5 μ m, 0~10 μ m, 0~20 μ m, ..., 0~80 μ m) 혼탕액(slurry)을 준비한다: 깨끗한 병(clean bottle)¹⁵에 50ml의 시험유와 1.2g의 시험먼지를 넣고 흔들어 혼합한다.
- 11) 펌프를 정격 토출압력 140kPa에서 구동한다.

- 12) 볼 밸브를 열고 0~5 μm의 혼탕액을 1분에 걸쳐 시스템에 혼합한다.
- 13) 30분 동안 연료펌프를 구동, 실험하며 5분 간격으로 유량을 측정한다.
- 14) 30분 후 최종 펌프 토출유량(Q_f)을 측정하여 기록한다.
- 15) 저유기에 4L의 실험유를 확인 보충하고, 클린업 필터로 유체를 순환시키며 오염도가 10mg/L 가 될 때까지 플러싱(flushing)한다.
- 16) 9)항으로 돌아가 다음 번 크기의 오염먼지 혼탕액을 이용하여, 가장 큰 오염먼지(0~80μm)까지 반복 실험한다.

3.3 실험 결과 및 검토

Fig. 4는 오염민감도시험의 진행 시간에 따른 연료펌프 토출유량의 변화를 보여준다. Fig. 4에서 보듯이 연료펌프의 토출유량은 시험이 진행됨에 따라 민감도 시험 전 초기유량 1.403 L/min 으로부터 실험 종료 시 유량 0.534 L/min 까지 감소한다. 특히 0~50μm의 오염입자 실험구간에서 가장 큰 기울기로 유량이 감소함을 보여준다. 이것은, 신제품 연료펌프 베인의 외경과 밸브 내경의 간극이 약 40μm인 점을 고려할 때, 40~50μm 크기의 오염입자가 다른 크기의 오염입자보다 상대운동면의 절삭마모(abrasive wear)를 가장 많이 유발함으로써 내

부누유를 증가시켰기 때문으로 판단된다.

Fig. 5(a), Fig. 5(b)는 오염먼지 크기 간격 별 (0~5μm, 0~10μm, 0~20μm, ..., 0~80μm) 오염민감도시험 결과의 실험종료유량($Q_{f,j}$)과, 실험초기유량 대 실험종료유량의 비($Q_{f,j}/Q_{o,j}$)를 각각 나타낸다. Fig. 5(a)에서 보듯이 실험종료유량은 큰 사이즈의 오염입자를 사용하여 실험을 진행할수록 계속 감소한다. 그러나 실험초기유량 대 실험종료유량의 비($Q_{f,j}/Q_{o,j}$)는 Fig. 5(b)에서 보듯이 오염입자 크기 구간이 커질수록 점점 줄어들어 0~50μm($j^*=6$)의 오염입자 실험구간에서 최저점에 이른 후 약간 상승한다. 이것은 Fig. 4의 경우에서 살펴보았듯이 50μm보다 큰 오염입자는 연료펌프 베인의 외경과 밸브 내경 사이의 간극(약 40μm)보다 커서 상대운동면의 절삭마모량이 크지 않기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 Fig. 4의 실험 데이터와 Table 1의 오염입자 개수를 식 (5), (6)에 적용하여 연료펌프 오염민감도계수를 계산한 결과이다. Fig. 6은 앞에서 살펴본 바와 같이, 본 연구의 연료필터는 40μm~50μm 크기의 오염입자 영역에서 최대 오염민감도계수가 5×10^{-6} L/min · 개임을 나타낸다.

Fig. 7(a), Fig. 7(b)는 연료펌프 오염민감도시험 전, 후의 베인 디스크 판의 모습을 각각 보여준다.

시험 전 베인의 외경은 30.00 mm이었으나 시험 후에는 29.93 mm으로 약 70 μm 감소하였다. 이것은 Fitch와 Hong,⁴ Lee¹⁶가 기어펌프의 오염민감도시험에서 밝힌 바대로, 오염입자의 마모에 의한 상대운동면의 간극은 최대 오염입자크기와 같다는 결과와 거의 일치한다.

또한 Fig. 8(a), Fig. 8(b)는 실험 후 디스크 측면을 각각 8배, 20배 확대 촬영하여 마모흔적을 확인한 결과이다. 그림에서 보듯이, 본 연구에서의 마모는 시험먼지의 디스크 표면 스크래칭(scratching)에 의한 절삭마모(abrasive wear)임을 알 수 있다

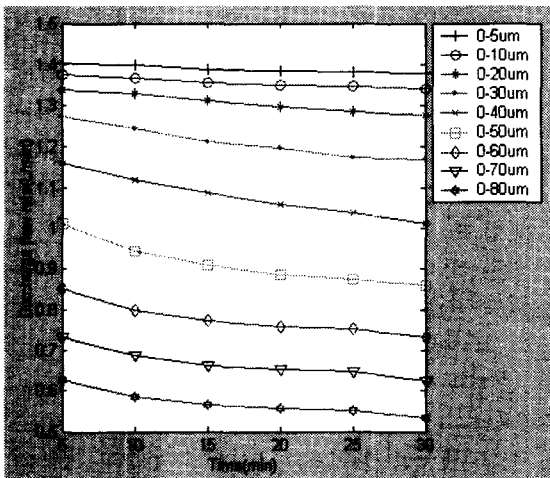
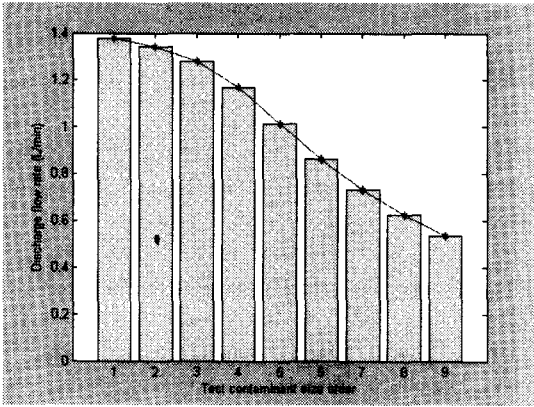
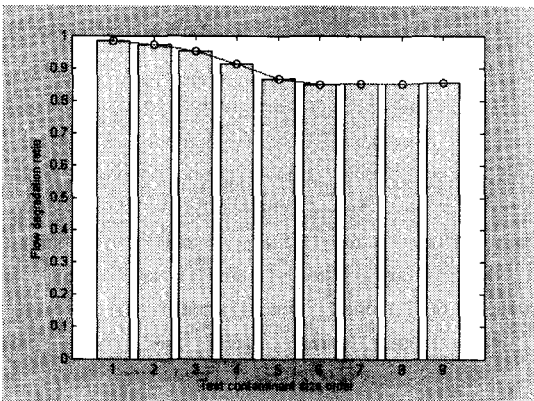


Fig. 4 Discharge flow rate variation in fuel pump contamination sensitivity test



(a) Flow degradation curve, $Q_{f,j}$



(b) Flow degradation ratio curve, $Q_{f,j} / Q_{o,j}$

Fig. 5 Contamination sensitivity test result

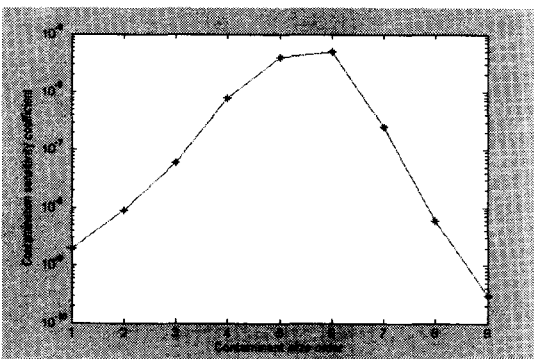
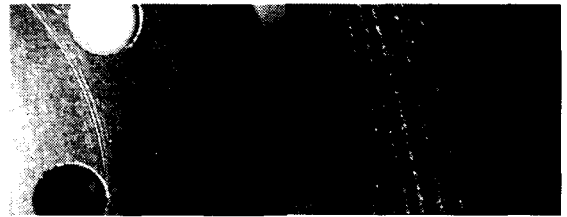


Fig. 6 Contamination sensitivity coefficient of fuel pump



(a) Before the test (b) After the test

Fig. 7 Vane disc before & after the test



(a) x8 (b) x20

Fig. 8 Disc surface pictures after the test

4. 결론

본 연구에서는 대표적인 국산 연료펌프에 대한 오염민감도실험을 진행하였다. 크기별 ISO 시험먼지를 실험유에 혼합하여 오염입자 크기 구간별 연료펌프의 토출유량을 측정하였으며, 실험결과를 근거로 오염민감도계수를 산출하였다.

연료펌프의 토출 유량은 실험이 진행됨에 따라 실험 전 초기유량 1.403 L/min 으로부터 실험 종료 시 유량 0.534 L/min 까지 감소하였다. 특히 0~50μm의 오염입자 시험구간에서 가장 큰 기울기로 유량이 감소하였으며, 최대 오염민감도계수는 40μm~50μm 오염입자 크기 구역에서 5 x 10⁻⁶ L/min · 개이었다.

실험 후 베인의 외경은 최대 시험입자크기 (80μm)에 가까운 70μm 감소하였다. 토출유량의 감소, 즉 내부 누유의 증가 원인은 시험먼지 오염입자에 의한 상대운동면 사이의 절삭마모 때문임을 베인 디스크 표면의 확대 사진을 통해 확인할 수 있었다.

따라서 연료펌프의 오염에 의한 토출유량의 감소를 방지하고 수명을 보장하기 위해서는 적정필터의 선정이 요망된다. 본 연구의 연료필터의 경우, 30~70 μm 의 오염입자에 대한 여과효율(배타율)¹이 높은 필터가 요구된다. 본 연구팀은 그간의 필터연구^{7,8,9}를 바탕으로 연료펌프 목표수명을 위한 연료필터의 사양에 대한 연구를 진행 중이다.

후 기

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Fitch, E. C., Fluid Contamination Control, FES, Inc., Stillwater, OK, 1988.
2. Bensch, L. E., "A New Theory for the Contamination Sensitivity of Fluid Power Pumps," Paper No. 72-CC-6, The BFPR Program, Oklahoma State University, 1972.
3. Inoue, R., Fitch, E. C., "The Omega Pump Rating System," The BFPR Journal, Vol.12, pp.141-144, 1979.
4. Fitch, E. C., Hong, I. T., "Pump Contaminant Sensitivity-Part 1: An Overview of the Omega Theory," The FRH Journal, Vol.6, pp.83-87, 1986.
5. Lee, J.-C., Kim, S.-H., "An Experimental Investigation of Particle Impingement Erosion in Hydraulic Systems," J. KSAE, Vol.10, No.2, pp.117-122, 2002.
6. Lee, G.-H., Lee, C.-H., "Development of Spray Optimization Technique for a GDI Engine," Proceeding of 9th Next Generation Vehicle Workshop, KATECH, pp.97-104, 2000.
7. Lee, J.-C., Jang, J.-H., "Performance Evaluation of an Automotive Fuel Filter by Multi-Pass Filtration Test," J. KSAE, Vol.10, No.6, pp.219-226, 2002.
8. Lee, J.-C., "A Study on Filtration System Model and Comparative Performance Tests of Automotive Fuel Filters", J. KSPE, Vol.20, No.3, pp.194-201, 2003.
9. Lee, J.-C., "A Study on Hydraulic Drawdown Test Model and Experimental Estimation of Desorption Rate Ratios of Fuel Filters," J. KSPE, Vol.20, No.9, pp.205-213, 2003.
10. Fitch, E. C., Hong, I. T., Hydraulic System Design for Service Assurance, BarDyne Inc., pp. 161-164, 2001.
11. NFPA Standard T3.9.18 R1-1978¹, Method of Establishing The Flow Degradation of Fixed Displacement Hydraulic Fluid Power Pumps When Exposed to Particulate Contaminant, NFPA, Inc., Milwaukee, WI, 1978.
12. White Spirit, Mobil Product Data Sheet, Mobil Oil Australia Pty Ltd., 1997.
13. Laser Net Fines-C, Particle Counter and Particle Shape Classifier, Instruction Manual, Spectro Inc., 2001.
14. ISO 11171, Hydraulic Fluid Power-Calibration of Automatic Particle Counters for Liquids, 1999.
15. Roberts, G. A., "Quality Control of Sample Container Cleanliness," The BFPR Journal, Vol.21, pp.129-148, 1988.
16. Lee, J. C., "A Study on Contamination Sensitivity and Condition Monitoring for a Pump," Proc. 27th Spring Conference KSTLE, pp.124-130, 1998.