

유압 저하시험 모델과 자동차 연료필터의 토설을 측정 실험 연구

이재천[#], 계중읍^{*}

A Study on Hydraulic Drawdown Test Model and Experimental Estimation of Desorption Rate Ratios of Fuel Filters

Jae-Cheon Lee[#], Joong-Eup Keh^{*}

ABSTRACT

This study describes the mathematical equation of drawdown test model and introduces the experimental test apparatus and procedure to estimate the desorption rate ratio of a filter. The characteristics of a hydraulic filtration system of drawdown test were demonstrated by numerical simulation for various properties of filters and operation conditions. Experiments for three kinds of fuel filters were conducted according to the proposed test method. And the test results of desorption rate ratio were compared with those values anticipated in precedent multipass filtration tests.

Experimental results revealed the validation of drawdown test method proposed in this study. Domestic fuel filter yielded high desorption rate ratio comparing with other foreign products, which means that the Beta ratio decreases a lot during the test. The results also showed that filtration system model could be developed including desorption rate ratio to estimate the variable Beta ratio in service life.

Key Words : Drawdown test(저하시험), Desorption rate ratio(토설율), Filtration efficiency(여과 효율), Beta ratio(베타율), Fluid turnover time(유체순환시간), Multipass filtration test(다순환여과시험)

기호설명

A, B, C = Constants

M = number of particles of size greater than a given size in the filter at a designated time ($Ea.$)

N = system concentration of particles of size greater than a given size at a designated time ($Ea./cc$)

Q = volumetric flow rate through filter (L/min)

R = particle ingress rate ($Ea./min$)

V = fluid circulating volume (L)

t = time (min)

Δt = a small time step (min)

β = filtration ratio

δ = desorption rate ratio (particles released per particles in the filter per unit process time) ($/min$)

^{접수일}: 2003년 2월 27일; ^{게재승인일}: 2003년 7월 11일

[#] 교신저자: 계명대학교 기계자동차공학부

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

^{*} 국방품질관리소

η = particle capture efficiency
 τ = fluid turnover time (= V/Q)
 χ = number of particles of size greater than $10 \mu m$
 in test dust per unit weight (= $Ea./\mu g$)
 ω = test dust weight (mg)

하첨자

d = downstream of filter
 s = system(upstream) of filter
 o = initial or unload(clean) condition

1. 서론

유압시스템 고장의 주원인은 오일 내 고형 이물질 및 공기, 수분, 과도한 에너지 등과 같은 오염물 때문인 것으로 밝혀져 있으며, 따라서 유압시스템 보존(Maintenance)의 핵심은 오일의 청결도(Cleanliness) 관리에 있다.^{1,2} 이와 같이 오일의 청결도 유지를 위해 유압 필터는 기공물질이나 금속망을 이용하여 Fig. 1에서와 같이 오일 속에 포함되어 있는 이물질을 여과함으로써 각종 유압부품의 침식 및 오작동을 방지해야 한다.^{3,4} 아울러 적절한 압력강하(Pressure drop) 조건에서 시스템의 요구 유량을 통과시킬 수 있어야 한다. 따라서 입자 제거 효율(Filtration efficiency)과 시스템의 압력 및 유량 사이의 관계를 고려한 필터 성능평가에 대한 연구가 필요하다.

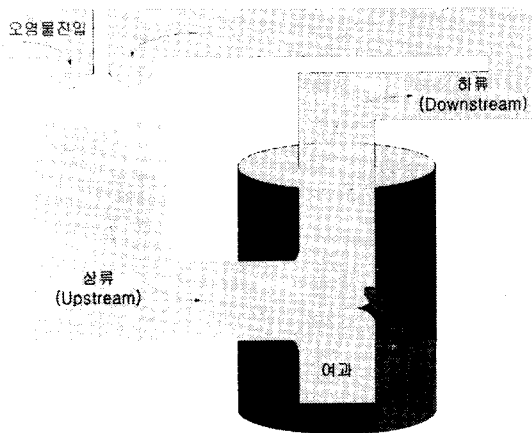
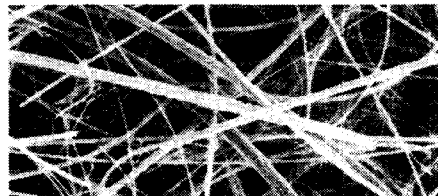


Fig. 1 Schematic of filtration mechanism

여과 메커니즘으로는, 오염입자의 크기가 필터 여과지 기공(Pore)보다 클 때 걸러지는 체거름(Sieving), 무거운 입자가 유선을 벗어나 여과 섬유질(Fiber)과 부딪치는 관성충돌(Inertial impaction) 및 중력(Gravity), 비 구형의 입자 형상과 비 균일한 유동장으로 인한 유체구동(Hydrodynamic) 효과, 미세 입자들의 브라운 확산(Brownian diffusion), 오염입자와 여과 섬유질의 전하용량 차이로 인한 정전기 끌림(Electrostatic attraction)등을 들 수 있다.¹ 토설은 필터 입출구의 압력과 유량이 변화함에 따라 여과되었던 입자에 대한 유지력을 상실하는 것이므로 토설을 줄이기 위해서는, 입자 유지력이 극대화 되도록, 상기한 여과 메커니즘과 필터 여과지 섬유소의 성분, 크기, 형상 및 여과지 구멍의 분포도, 통로 등에 대한 세밀한 연구가 요구된다. 한 예로써, 필터 전문생산 업체인 미국의 Pall Inc.에서는, Fig. 2에서 보듯이 여과지 섬유기공 통로의 출구가 입구보다 작은 경사형 기공(Tapered pore)구조를 갖도록 하여 차압력 증가 시 발생하는 토설을 억제하고 있다.⁵

상류측 사진 : 500X



하류측 사진 : 500X

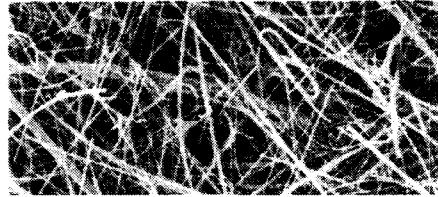


Fig. 2 View of tapered pore filter

필터의 성능평가 방법으로는 공기방울시험법(Bubble point test method), 정상필터등급법(Nominal filter rating method), 절대필터등급법(Absolute filter rating method) 등이 있으나, 현재는 베타여과율(이하 베타율로 약칭)에 의한 평가방법이 국제적으로 통용되고 있다.

베타율이란 필터 상·하류 간, 단위 시료 체적당 오염입자의 크기별 누적갯수비(Cumulative number ratio)로 정의되며, 따라서 필터의 여과효율은 다음 식(1)과 같다.

$$\beta = \frac{\text{필터상류의 } x \mu\text{m보다 큰입자의 갯수, } N_s}{\text{필터하류의 } x \mu\text{m보다 큰입자의 갯수, } N_d}$$

$$\eta = \frac{N_s - N_d}{N_s} = 1 - \frac{1}{\beta} \quad (1)$$

다순환여과시험(Multipass filtration test)은 국제 규격(ISO4572,⁶ ISO16889⁷)으로 공인된, 베타율에 의한 필터의 여과성능평가시험이다. 다순환여과시험의 핵심은, Fig. 1에서 보듯이, ISO표준 시험먼지(Test dust)⁸를 용해한 용액으로써 필터의 상류에 일정한 농도의 오염물을 진입(Ingression)시키며 시스템의 오일을 다순환시킴으로써 실제 유압여과시스템의 상황을 재현하는 것이다.

이와 같은 유압여과시스템과 오염제어(Contamination Control)에 대한 연구는 1970년대 이후 미국 오콜라호마 주립대학의 유공압연구소를 중심으로 활발하게 진행되었으나,^{1,9,10,11} 국내에서는 관련 연구가 전무하였다. 이에 계명대학에서는 자동차의 연료공급 시스템을 대상으로 다순환여과시험을 진행할 수 있는 '연료장치 오염성능 시험기(Fuel Components' Contamination Performance Test Stand)'를 개발하였으며, 국내외 연료필터의 성능을 비교 평가하였다.^{12,13}

Lee¹³의 시험결과, 일제필터는 전 시험기간에 걸쳐 베타율의 변동이 작은 반면, 국산필터는 초기 베타율은 일제보다 우수하면서도 시험시간이 경과함에 따라 베타율이 극히 감소함으로써 시험종료시에는 여과효율이 약 60%에 불과하였다. 따라서 Lee¹²는 국산업체에서 이제껏 적용하고 있는, 필터 사양인 최대 차압과 여과용량 외에 필터 수명기간 중의 여과 효율도 함께 규제해야함을 보였다.

그러나 Lee^{12,13}가 지적하였듯이 ISO의 다순환여과시험법^{6,7}은 필터의 베타율이 전 수명기간 중 일정하다는 가정을 전제함으로써 여과효율의 이론적 예측치와 실험 결과가 상이하였다. 이것은 다순환여과시험법의 시스템 모델에서는 Fig. 1의 토설율(Desorption ratio)를 무시하는 반면 실제 유압필터에서는 유량맥동 등으로 인한 토설이 존재하기 때문

이다. 이에 Lee¹³는 토설율을 고려하였을 때, 필터의 시험기간 중 여과효율의 이론적 계산과 실험결과가 근사할 수 있음을 보인 바 있다.

본 연구는 Lee^{12,13}의 연구결과를 바탕으로 유압 필터의 토설율을 측정하기 위한 저하시험(Drawdown test)의 이론적 모델을 제시하고, 필터 상, 하류 오염농도의 해석적 답을 구하였다. 또한 실제 실험을 통해 Lee¹³가 사용하였던 자동차용 연료필터들을 포함하여 3종의 국내외 연료필터에 대한 토설율을 측정함으로써 이론적 모델의 타당성을 제시하였다.

2. 저하시험의 이론적 모델

여과시스템의 성능은 신제품 청정(Clean)필터의 베타율 β_0 과 포집한 오염물에 대한 유지력(Retention capacity)에 의해 결정된다. Fig. 1에서 보듯이 여과 시스템은 시스템 내 오염물질의 균형에 관한 식으로 아래와 같이 표현할 수 있다.^{11,14}

$$\begin{aligned} \text{필터상류(시스템) 입자수} &= \text{초기 입자수} - \\ &\text{필터여과 입자수} + \text{토설 입자수} + \\ &\text{시스템진입 입자수} \end{aligned} \quad (2)$$

즉, 필터 상류의 오일의 오염입자수는, 초기 입자수에 외부로부터 연료시스템으로 진입하는 입자수 및 유량맥동으로 인해 필터에서 토하는(토설) 입자수를 더하고, 필터에 여과되는 입자수를 뺀 것이다. 여과시스템의 오염물이 균일하게(Homogeneous) 분포되어 있으며, 일정한 토설율을 갖는다고 가정하면, 식 (2)는 식 (3)과 같이 표시된다.¹⁴

$$\begin{aligned} N_s(t + \Delta t) \cdot V &= N_s(t) \cdot V - \eta_o N_s(t) Q \cdot \Delta t + \\ &\delta[\eta_o N_s Q \cdot \Delta t + M(t)] \Delta t + R \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (3)$$

또한 필터 내부에 포집된 오염물질의 평형에 대한 식은 아래와 같다.

$$M(t) = N_o \cdot V + M_o - N_s(t) \cdot V + R \cdot t \quad (4)$$

임의의 시간에 필터에 누적된 오염물의 갯수가

시간간격 Δt 동안에 추가된 오염물 갯수보다 훨씬 많다고 가정한다. 즉 $M(t) \gg \eta_o N_s Q \cdot \Delta t$. 또한 시험 전 시험필터는 깨끗하다고 가정한다. 즉, $M_o=0$. 이와 같은 가정 하에 식 (3)과 식 (4)는 아래와 같이 표시된다.

$$\frac{dN_s}{dt} = -\left(\frac{\eta_o}{\tau} + \delta\right) N_s(t) + \frac{\delta \cdot R}{V} t + \delta N_o + \frac{R}{V} \quad (5)$$

식 (5)의 미분방정식의 해는 식 (6)과 같다.

$$N_s(t) = (N_o - A) e^{-\alpha t} + Bt + A \quad (6)$$

식(6)에서,

$$A = \left(\delta N_o + \frac{R}{V}\right) \frac{\tau}{\eta_o + \delta\tau} - \frac{\tau}{(\eta_o + \delta\tau)^2} \frac{\delta R}{V}$$

$$B = \frac{\delta R}{V} \frac{\tau}{\eta_o + \delta\tau}$$

$$C = \frac{\eta_o + \delta\tau}{\tau}$$

외부에서의 오염물 진입이 없을 경우, 즉 $R=0$ 일 때 식 (6)의 상수 A, B 는 각각 다음과 같다.

$$A = -\frac{\delta\tau}{\eta_o + \delta\tau} N_o, \quad B = 0 \quad (7)$$

또한 필터 하류의 오염입자의 농도는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$N_d(t) = \frac{N_s(t)}{\beta_o} + \frac{\delta M(t)}{Q} \quad (8)$$

이와 같이, 저하시험은 다순환여과시험과 달리 외부에서의 오염물 진입 없이 진행하며, 식 (6), (7), (8)에서 보듯이 시험유의 초기 오염입자농도 N_o 와 필터 초기 여과효율 η_o , 그리고 시험 중의 필

터 상, 하류의 오염농도 측정 데이터를 이용하여 토설율 δ 를 구할 수 있다.

3. 자동차 연료필터의 저하시험

3.1 시험장치

Fig. 3은 저하시험을 위한 유압회로의 개략도이다. 다순환여과시험 회로가 필터 상류에 일정한 농도의 오염물 진입을 위한 오염물 인젝션시스템 (Contaminant injection system)과, 일정한 유량을 시험용 필터로 순환시키는 필터시험시스템(Filter test system)의 두 부분으로 구성¹³되는 반면, 저하시험 회로는 필터시험시스템만으로 구성된다. 시험먼지는 종전의 ACFTD(Air Cleaner Fine Test Dust, ISO 4402) 계열 대신, 1999년부터 적용된 ISO 오염도 규격(ISO 11171⁸)에 따른 ISO Test Dust를 사용하였다.

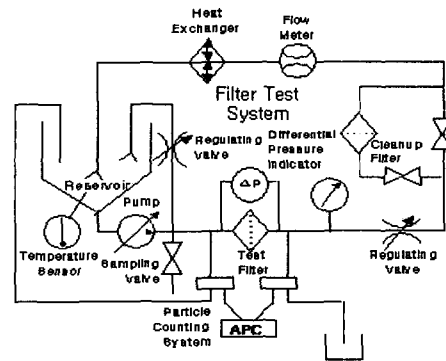


Fig. 3 Schematic of drawdown test circuit

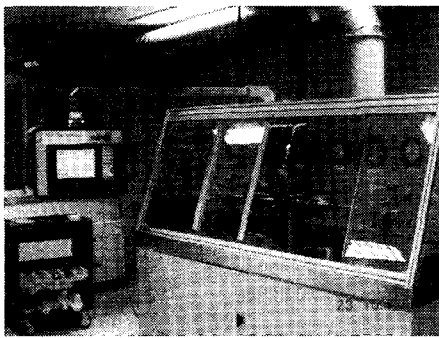
Fig. 4(a)는 각종 연료장치 부품의 오염에 대한 성능시험, 평가를 위해 개발한 연료장치 오염성능 시험기¹³의 외관이며, Fig. 4(b)는 저하시험을 위해 시험기 내 시험용 필터가 장착된 모습이다.

시험장치의 주요 사양은 Lee¹³가 소개한 바와 같다. 모든 시험의 입출력 데이터는 시험기 본체와 회전암(Swivel arm)으로 연결된 제어판넬에서 접촉 펜(Touch pen)으로 조정하였다. 유량은 5L/min $\pm 3\%$, 온도는 $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내에서 PID로 제어하였다.

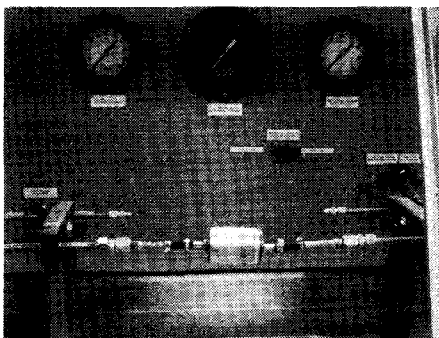
입자계수(Particle counting)를 위한 분석기는 Spectro Inc.의 LaserNet Fines-C¹⁵로써, 시험전 ISO 11171⁷ 규격에 의해 검교정(Calibration)되었다. 일반적인 광학(Optical)입자계수기는 시료 중의 수분을

고형입자로 오인하는 약점을 갖는 반면, 본 장비는 레이저에 의해 오염물질 형상을 스캐닝하여 물방울에 빛이 투과된 형상을 파악하여 고형 오염물과 구분함으로써, 시료에 포함된 수분을, 별도의 전처리 없이, 자동 보상할 수 있다.

본 시험에서 사용한 연료필터는 가솔린 승용차용 인-탱크(In-tank) 필터로써, Lee¹³가 사용하였던 국산품과 일본제품 외에 미국 Delco사 제품을 각각 1종씩 사용하였다. 국산과 일산 제품의 형상은 Lee¹³의 논문¹³에 소개하였으며, Fig. 4(b)는 Delco사 연료필터를 보여준다. 사용된 시험유는 Stoddard Solvent¹⁶이었다.



(a) Overview of test stand



(b) View of test filter installation

Fig. 4 Configuration of the test stand

3.2 시험절차

시험 전 준비사항과 시험절차는 다음과 같다.

3.2.1 시험 전 준비사항

1) 필터 시스템 저유기 내 시험유체적 $V=10 L$ (분당 0.2회전 순환체적)을 채운다. 이것은 본 시험

기의 필터시험 저유기(Reservoir) 용량 12 L를 고려한 것이다.

2) 유체순환속도는 다순환여과시험이 $\tau=4 min$ 의 속도로 실시되는 반면, 저하시험은 그 이하의 저속으로 실시한다.¹⁴ 본 연구에서의 순환유량은 시험 중 시료의 샘플링 시간과 주기를 고려하여 $Q = 2 L/min$ ($\tau=0.2$) 로 정하였다.

3) 시험온도(30°C)에 맞추고, 클린-업 필터를 이용하여, 유체를 순환시키며 시험유 1cc당 10 μm 보다 큰 입자의 갯수가 10개 이하가 될 때까지 플러싱(Flushing)한다. 목표 수준에 도달 한 후 클린-업 필터를 우회시킨다.

4) 필터시험시스템의 초기 오염농도(N_o)는 NAS12 등급을 이용하였다. 오염도에 관한 미항공규격인 NAS1638코드²는 1950년대 제정된 이후 1980년대 ISO코드⁶가 제정되기까지 세계적으로 널리 사용되어 왔으며, 국내 산업계에서는 아직도 주로 적용하고 있다. NAS12 등급은 NAS오염도 규격의 최하청결도로써 ISO21/18등급에 해당하며, 1cc당 10 μm 보다 큰 입자의 개수가 약 4,500개이다² (즉, $N_o = 4500 Ea./cc$).

5) 시험에 사용한 시험먼지인 ISO FTD는 1 μg 당 평균 143.9개의 10 μm 보다 큰 입자수를 갖는다^{1,8} (즉, $\chi = 143.9 \text{ 개}/\mu g$), 따라서 시스템에 혼입할 시험먼지의 총중량(ω)은 다음과 같이 구해진다.

$$\omega = \frac{N_o (Ea./cc) \cdot V(L) \cdot 1,000(cc/L)}{\chi (Ea./\mu g) \cdot 1,000(\mu g/mg)}$$

$$= 313(mg)$$

6) ISO FTD 313mg을 필터시험 저유기에 혼합한 후, 시스템 내 유체를 최소 15분간 순환시켜 시험먼지가 균일하게 퍼지도록 한다.

7) 시험 필터 상,하류 샘플용 모세관 튜브를, 상류는 $0.3 \pm 0.05 L/min$, 하류는 상류의 5%가 되도록 선정하여 설치한다. 하류 샘플 유량은 별도 수거하여 보충유로 사용한다.

3.2.2 필터 저하시험

- 1) 시험용 필터를 설치한다.
- 2) 시험유 온도를 맞추고 저유기의 유체적(Oil volume)을 확인한다.
- 3) 필터 시험 시스템의 정격 시험유량(2 L/min)

으로 유체 순환시킨다.

4) 시험 필터 상, 하류의 샘플을 채취하여 시스템의 초기 청정도를 측정한다.

5) 시험 시작 후 매 5분마다(즉, 유체적의 매 순환마다) 상, 하류 샘플을 시간 차이 30초 이내에 채취한다. 샘플은 ISO규격¹⁷의 100cc 청정용기에, 2병씩 채취한다.

6) 저유기 내의 오일체적을 필터를 통해 6회 순환시킨다. 즉, 30분간 시험한다.

7) 시험 필터 시스템의 유체 순환을 중지하고, 시험 종료한다.

3.3 데이터 분석 및 계산

1) 채취한 시료를 자동입자계수기로 분석한다.

2) 각 샘플 당 최소 3번씩 입자계수를 하여 입자크기별 평균값을 기록한다. 특히, 유체적의 매순환(Pass)마다 10 μm보다 큰 입자의 농도 변화를 그래프에 표시한다.

3) 10 μm보다 큰 입자의 초기 베타율 β_o와 여과효율 η_o를 계산한다.

4) 2)에서 구한 실험데이터를 보간법으로 근사하여, 식 (6), (7)의 토설율 δ를 구한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 시뮬레이션

식 (6)-(8)로 표현되는 저하시험 모델의 특성을 시뮬레이션을 통해 살펴보면 아래 Fig. 5와 같다.

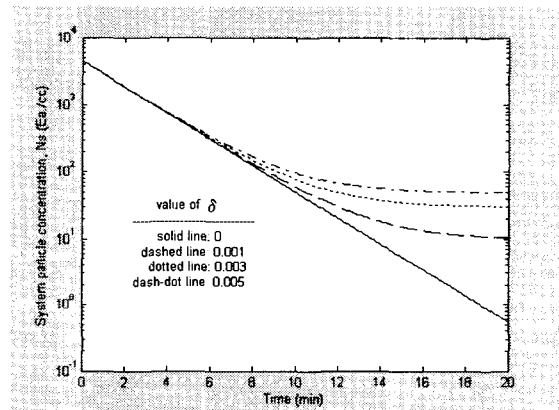
Fig. 5(a)는 $N_o = 4500 Ea. / cc$, $\eta_o = 0.9$,

$V = 10L$, $Q = 5 L/min$ (즉, $\tau = 2min$)일 때, 여러 가지 토설율(δ)의 필터에 대해 저하시험 시간에 따른 필터상류의 10μm보다 큰 오염입자의 농도 변화를 나타낸다. Fig. 5(a)에서 보듯이 토설이 없는 필터의 경우, 시험시간 20분(즉, 10회 유체적 순환)이면 1cc당 1개 이하 수준으로 여과된다. 그러나 토설율이 증가할수록, 더 이상 여과할 수 없는 임계 오염농도(Critical contaminant concentration)가 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 임계 오염농도는 Lee⁴가 유압시스템의 롤-오프 플러싱에서 보인 바와 같이, 일정한 유량으로 유체 순환하는 필터 여과시스템에서, 여과시간을 증가시키더라도 더 이상 청정도가 증가하지 않는 임계값이 존재하는 것과 유사하다.

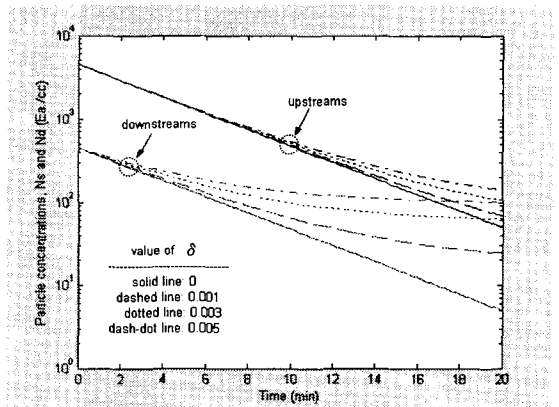
Fig. 5(b)는 $N_o = 4500 Ea. / cc$, $\eta_o = 0.9$,

$V = 20L$, $Q = 5 L/min$ (즉, $\tau = 4min$)일 때, 여러 가지 토설율(δ)의 필터에 대해 시험시간에 따라 필터상류(시스템)와 하류의 10μm보다 큰 입자의 오염농도 변화를 나타낸다. Fig. 5(b)에서 보듯이 토설율이 클수록 시험시간에 따라 베타율과 여과효율이 크게 줄어들고 있다. 이것은 Lee¹³가 밝혔듯이 실제 필터의 사용기간 중 변동하는 여과효율을 산출하기 위해서는 토설율을 고려하여야 함을 뜻한다.

한편 Fig. 6은 $N_o = 4500 Ea. / cc$, $\eta_o = 0.9$, $V = 10L$, $\delta = 0.001/min$ 일 때, 여러 가지 유체순환 속도에 대한 필터 상, 하류의 오염농도의 변화를 보여준다. Fig. 6에서 보듯이 유체순환속도가 느릴수록, 즉 유체순환시간(Fluid turnover time) 이 길



(a) System particle concentration



(b) particle concentration of upstream and downstream
Fig. 5 Variation of particle concentrations on various desorption rate ratios (δ)

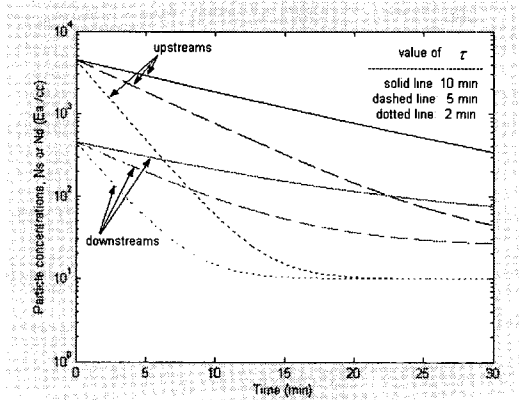


Fig. 6 Variation of particle concentrations on various fluid turnover times (τ)

수록 베타율의 시간변화율은 작으며 임계 오염농도는 높아지는 것을 알 수 있다.

또한 Fig. 7은 $N_o = 4500 Ea./cc$, $\tau = 2min$, $V = 10L$, $\delta = 0.001/min$ 일 때, $10 \mu m$ 보다 큰 오염입자에 대한 초기 베타율의 여러 가지 필터에 대한 저하시험 중 오염농도 변화를 보여준다. Fig. 7에서 보듯이 초기 베타율이 클수록 시험시간에 따른 베타율의 변동이 크며 임계오염농도는 낮아지는 것을 볼 수 있다.

4.2 실험결과 및 분석

3절의 시험장치 및 절차에 의거 3종의 국내의 연료필터에 대한 저하시험 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 사각형과 원형의 점들은 각각 필터 상하류에서의 오염농도 실험 측정값이며, 곡선은 식 (6), (7), (8)을 이용하여 보간법에 의해 δ 를 구한 결과의 그래프이다.

Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)에서 보듯이 국산필터와 일제 혼다 필터의 토설율은 각각 0.0025와 0.0008로써 Lee¹³가 다순환여과시험에서 예측한 0.003과 0.001에 근접한 결과가 나왔다. 이것은 본 연구에서 제시한 실험 방법에 의해 필터의 토설율을 유효하게 측정할 수 있음을 뜻한다.

Fig. 8에서 보듯이 국산 연료필터는 일제 혼다 필터나 미제 델코 필터에 비하여 초기 베타율(즉, 여과효율)은 상대적으로 우수하나, 토설율이 높음으로써 시험시간이 경과함에 따라 여과효율이 급격

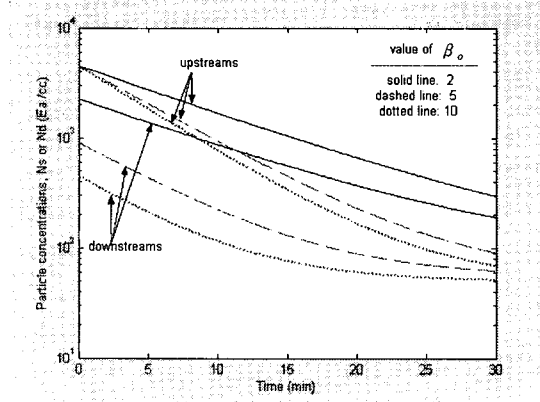
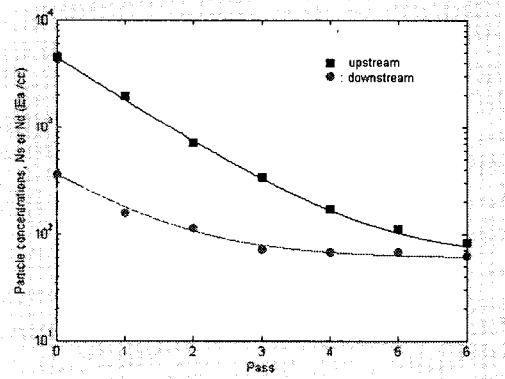
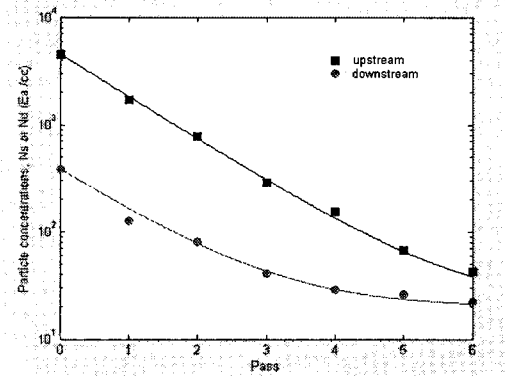


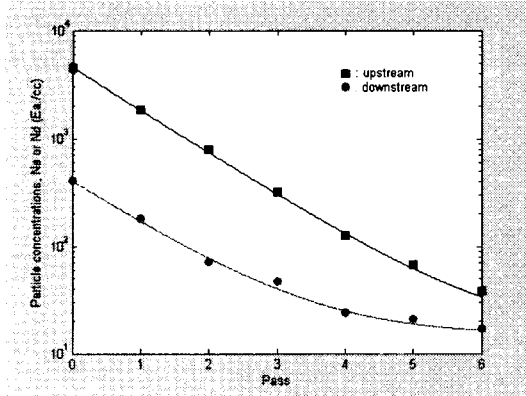
Fig. 7 Variation of particle concentrations on various β_o filtration ratios



(a) Made in Korea ($\beta_o = 12.3, \delta = .0025$)



(b) Made by Honda ($\beta_o = 11.8, \delta = .0008$)



(c) Made by Delco ($\beta_o = 11.2, \delta = .0006$)

Fig. 8 Drawdown Test results of three kinds of filters

히 감소한다. 예를 들어 유체적 6회 순환시 국산필터의 여과효율은 약 25%인 반면, 혼다필터와 델코필터의 여과효율은 각각 약 48%와 55%이었다. 따라서 국산 연료필터가 전 수명기간 중 높은 여과효율을 유지하기 위해서는 토설율을 낮추는 방안을 강구해야한다.

한편 다순환여과시험¹³에 비하여, 본 연구의 저하시험에서 시험시간에 따른 베타율이 낮아지는 것은, 다순환여과시험에서는 인젝션시스템에 의해 소량의 오염물을 필터시험 시스템에 혼합하는 반면, 본 저하시험에서는 오염도가 높은 NAS12등급의 시험 유체를 여과함으로써 필터내부의 급격한 여과오염입자 증가로 인해 토설량이 증가했기 때문으로 판단된다. 또한 Fig. 8의 결과는 유체적 순환횟수(Pass)가 증가함에 따라 오염농도에 대한 실험 측정치가 이론적 계산치보다 큰 것을 보여준다. 이것은 실제 필터에서는 토설율이 일정하지 않으며, 여과오염입자가 증가할수록 토설율이 증가하고 있음을 뜻한다.

5. 결론

본 연구에서는 필터의 토설율을 측정하기 위한 저하시험의 수학적 모델과 시험방법을 제시하였다. 제시된 모델 식의 시뮬레이션을 통해 여러 가지 필터 성분과 시험조건에 따른 여과 특성을 살펴보았다. 또한 국내외 3종의 연료펌프를 대상으로 저하시험을 실시하였다.

저하시험 결과에 의해 초기 베타율과, 보간법으로 근사한 모델 식 그래프를 구함으로써 토설율을 측정하였다. 국산과 일산 연료필터의 토설율 측정 시험 결과, 국산필터와 일제 혼다 필터의 토설율은 각각 0.0025와 0.0008로써 Lee¹³가 다순환여과시험에서 예측한 값들인 0.003과 0.001에 근접한 결과가 나왔다. 이것은 본 연구에서 제시한 실험 방법에 의해 필터의 토설율을 유효하게 측정할 수 있음을 뜻한다.

국내의 3종의 연료펌프 중, 국산 필터는 외제에 비해 초기 베타율은 뛰어났으나 토설율이 높음으로써 시험시간에 따른 여과효율이 급격히 감소하였다. 즉, 유체적 6회 순환시 국산필터의 여과효율은 약 25%인 반면, 혼다필터와 델코필터의 여과효율은 각각 약 48%와 55%이었다. 이것은 Lee¹³가 다순환여과시험에서 제시한 바와 같이, 국산필터가 수명기간 중 일정한 여과효율을 유지하기 위해서는 토설율을 낮추어야 함을 뜻한다.

상기의 연구결과를 바탕으로 본 연구팀은 변동 베타율에 의한 연료필터 수명 중의 여과효율 예측 모델에 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., 1988.
2. Fitch, J. C. and Troyer, D., Learning Oil Analysis II, Noria Co., 1999.
3. Lee, J.-C., Kim, S.-H., "An Experimental Investigation of Particle Impingement Erosion in Hydraulic Systems," J. of KSAE, Vol. 10, No. 2, pp. 117-122, 2002.
4. Lee, J.-C., "A Theoretical Investigation of Roll-Off Cleanliness for Hydraulic System and Application to a Tractor," J. of KSAE, Vol. 8, No. 5, pp. 207-215, 2000.
5. Korea Pall LTD, Contamination Control and Filtration Technology, 1996.

6. ISO Standard 4572, Hydraulic Fluid Power-Filters-Multi-pass Method for Evaluating Filtration Performance, 1981.
7. ISO Standard 16889, Hydraulic Fluid Power Filters-Multi-pass Method for Evaluating Filtration Performance of a Filter Element, 1999.
8. ISO Standard 11171, Hydraulic Fluid Power-Calibration of Automatic Particle Counters for Liquids, 1999.
9. Fitch, E. C., Encyclopedia of Fluid Contamination, FES Inc., 1980.
10. Fitch, E. C., Proactive Maintenance for Mechanical Systems, FES Inc., 1992.
11. Fitch, E. C. and Hong, I. C., Hydraulic System Design for Service Assurance, BarDyne Inc., pp. 182-195, 1999.
12. Lee, J.-C., Chang, J.-H., "Performance Evaluation of an Automotive Fuel Filter by Multi-Pass Filtration Test," J. KSAE, Vol. 10, No. 2, pp. 219-226, 2002.
13. 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.
14. Hong, I. T., "The Beta Prime-A New Advanced Filtration Theory" Contamination Control in Hydraulic Systems, Proc. Institution of Mechanical Engineering, C250/84, pp.83-88, 1984.
15. LaserNet Fines-C, Particle Counter and Particle Shape Classifier, Instruction Manual, Spectro Inc., 2001.
16. White Spirit, Mobil Product Data Sheet, Mobil Oil Australia Pty Ltd., 1997.
17. ISO Standard 3722, Qualifying and Controlling Cleaning Methods for Fluid Sample Container, 1980.