

펌프의 오염 민감도와 성능 감시에 대한 연구
A Study on Contamination Sensitivity and Condition
Monitoring for a Pump

이 재 천
계명대학교 자동차공학과
ljcds@kmucc.keimyung.ac.kr

Abstract

A mathematical model describing gear pump flow degradation in the presense of abrasive particles is presented. The model considers the operating parameters as Sommerfeld number, so that contamination sensitivity test results could be conversed to field application to predict contamination service life. A method to estimate the volumetric efficiency and the contamination level of a pump is proposed by measuring the temperature differences in the fluid. Test results show the validity of the theoretical establishments.

Key Words: 오염 민감도(Contamination Sensitivity), 체적효율(Volumetric Efficiency), 입자 농도(Particle Concentration), 유량 감소비(Flow Degradation Ratio)

부호	T : 오염 수명, hr
C_d, C_s : 펌프의 감쇄계수 및 슬립계수	$T_{1,2,3}$: 위치 1, 2, 3 에서의 온도, $^{\circ}C$
D : 오염 입자 크기, μm	b : 치차의 폭, mm
K_d, K_s : 펌프 설계 매개변수 및 Sommerfeld 수	c_h, c_s : 기어와 하우징, 기어와 측면 플레이트 사이의 간극, mm
N_i : 오염입자 농도(단위 유체 체적 당 일정한 크기 이상의 입자 수), 개/cc	d : 펌프의 단위 회전당 토출 유량, cc/rad
P : 압력, Pa	l : 누유 간극의 통로 길이, mm
Q : 유량, cc/sec	n_i : 오염입자 농도 ($n_i = N_i - N_{i+1}$), 개/cc
S_i : 오염 민감도계수, cc/min,개	r : 기어 반경, mm
	t : 시간, sec
	μ : 점도, $Kg_f sec / m^2$

$\eta_{oa}, \eta_v, \eta_m$: 펌프의 전체 효율,
체적 효율, 기계 효율

τ : 시간 상수, min

ω : 펌프 회전 각속도, rad/sec

아래문자

i : 오염입자 크기 간격

f, T : 최종 값

o : 초기 값

in, out : 펌프 토출구, 흡입구

서론

유압 펌프의 트라이볼로지적 수명은 펌프의 구조, 제원, 공차등의 설계 매개변수(Parameter)와 압력, 유량, 온도등의 운전 매개변수 및 내마모성, 산화/부식 안정성 등의 유압유 매개변수와 함께 오일오염에 의해 영향을 받는다. 오염물에 의한 유압 펌프의 성능은 오염수준(Contamination Level)과 오염공차(Contamination Tolerance)에 의해 결정되는데, 오염 수준은 오염입자의 분포로써, 오염 공차는 실험실에서의 오염 민감도 시험으로 확인할 수 있다. 그러나 오염 민감도 시험은 오염 입자 크기를 제외한 각종 운전, 유압 유 및 오염물 매개변수들이 고정된 표준 시험조건 아래에서 실시되므로, 오염 민감도 시험 결과를 현장에 적용키 위해서는 운전조건을 반영할 수 있는 방법이 개발되어야 한다.

또한 펌프의 마모 및 오염정도를 확인키 위해 일반적으로 사용 중인 시료 채취 및 입자계산기(Particle Counter)등의 오일 해석용 계기들은 매우 고가이므로 펌프의

성능 감시를 위해 산업현장에서 사용하기에는 실용적이지 못하다.

따라서 본 논문에서는 기어 펌프에 대해 오염 민감도 이론을 다양한 운전조건에 적용할 수 있는 모델을 제시하고, 펌프 시스템의 온도를 측정하여 체적효율(Volumetric Efficiency)을 계산하고, 펌프의 오염정도 및 수명을 예측할 수 있는 실용적 방안을 제시한다. 또한 제시된 이론에 대해 실험으로써 그 효용성을 입증한다.

펌프의 오염 민감도

“오염 민감도”란 기계부품이 특정한 오염환경에 놓였을 때 발생하는 성능 저하를 일컬으며, 단위 오염물에 대한 성능 저하량을 가리켜 오염 민감도계수(Contamination Sensitivity Coefficient)라 부른다. 1970년대 이 후 오클라호마 주립대학에서 개발된 유압 펌프의 오염 민감도의 해석적 모델을 요약하면 다음과 같다 [1, 2, 3, 4].

펌프의 마모 및 오염물로 인해 저하되는 펌프의 중요성능 매개변수(Critical Performance Parameter)로는 체적효율(Volumetric Efficiency)을 들 수 있다. 펌프의 오염 민감도 이론은 모든 오염입자에 의해 펌프의 토출 유량이 조금씩 줄어든다는 가정에서 출발한다. 시간에 따른 토출 유량의 저하율은 오염 민감도계수와 오염입자 노출율(Exposure Rate)의 곱의 집계이며, 오염입자 노출율은 유량과 오염입자 농도의 곱이므로 특정 크기의 오염 입자로 인한 토출유량 저하율은 다음과 같다.

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = -S_i Q_i(t) n_i(t) \quad (1)$$

실험실에서 시험 중 특정 크기의 오염 입자는 펌프의 입계 간격 사이에서 파손되어 그 농도는 식 (2)와 같이 지수적으로 줄어든다.

$$n_i(t) = n_{o,i} e^{-t/\tau_i} \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$\frac{dQ_i(t)}{Q_i(t)} = -S_i n_{o,i} e^{-t/\tau_i} dt \quad (3)$$

식 (3)의 양변을 적분하면 다음과 같다.

$$S_i = \frac{-1}{\tau_i n_{o,i}} \ln(Q_{f,i}/Q_{o,i}) \quad (4)$$

특정한 입자 크기 간격의 유량 저하는 보다 작은 간격의 모든 오든 오염입자로 인하여 발생하므로, 식 (4)의 여러 가지 입자 크기 간격에 대한 오염 민감도 계수는 가장 작은 크기 간격(통상 0-5 μm)에 대한 민감도 계수 S_1 로 부터 다음과 같이 구할 수 있다.

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

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

$$i=2,3,\dots,max$$

식 (6)은 펌프 오염 민감도계수가 입자 분쇄 시간상수, 초기 입자농도, 유량 감소비(Flow Degradation Ratio)의 함수임을 나타낸다. 모든 입자크기 간격에 대한 유량 감소비의 누계는 곧 펌프의 체적 효율이다. 입자분쇄 시간상수 τ 는 펌프의 종류와 크기에 상관 없이 약 9분임이 밝혀졌으며, 초기 입자농도는 시험 전에

결정할 수 있고, 유량감소비는 측정할 수 있으므로 각 입자 크기 간격에 대한 펌프 오염 민감도계수를 얻을 수 있다.

특히 산업현장에서는 유압 시스템의 오염물의 침투, 생성, 여과 과정이 정상 상태 이르러 오염물의 분포가 일정한 값을 갖게 된다. 즉,

$$n_i(t) = n_{f,i} \quad (7)$$

이며, 단위 시간 당 전체 오염입자 분포에 대한 펌프의 토출유량 감소는 모든 입자 크기 간격에 대한 유량 감소의 집계이므로 다음 식을 갖는다.

$$Q(t+dt) = Q(t) - \sum_{i=1}^{max} [n_i(t)Q(t)dt] S_i \quad (8)$$

식 (8)을 초기 시간부터 $t=T$ 까지 적분하여 펌프의 오염 수명(Contaminant Service Life)을 나타내는 다음 관계식을 얻는다.

$$T = \frac{\ln(Q_T/Q_o)}{\sum_{i=1}^{max} S_i n_{f,i}} \quad (9)$$

식 (9)는 운전 중인 펌프의 체적 효율과 오염민감도 계수 및 오염 입자의 농도가 주어졌을 때, 펌프의 오염 수명을 예측할 수 있음을 보여준다.

마모 및 운전 조건에 따른 기어 펌프의 토출 유량

유압펌프의 이상적인 토출유량에 대해 실제 토출유량은 다음과 같이 표시된다.

$$Q_f = Q_t - Q_l - Q_r \quad (10)$$

식 (10)의 이론적인 이상적 토출유량 Q_t 는 펌프 단위 회전당 토출량 d 와

회전속도 ω 의 곱이며, Q_i 은 내부 틈새로 인한 누유량, Q_c 은 캐비테이션으로 인한 유량손실이다. 캐비테이션으로 인한 유량 손실을 무시하고, 고정유량 기어 펌프의 내부누유를 치차와 펌프 하우징 사이의 누유 Q_{lh} 와 치차와 측면 플레이트 사이의 누유 Q_{ls} 로 나누어, 뉴토니안 유체에 대한 Hagen- Poiseuille 원칙을 적용하면 식 (10)은 다음과 같다.

$$Q_f = d\omega - Q_{lh} - Q_{ls} \quad (11)$$

$$Q_{lh} = b c_h^3 \frac{P_{out} - P_{in}}{12\mu l} \quad (12)$$

$$Q_{ls} = r c_s^3 \frac{P_{out} - P_{in}}{6\mu l}$$

Bensch[1]는 기어의 마모(Abrasive Wear)로 인한 내부누유 틈새는 오염입자의 최대크기 D 와 일치함을 실험으로 입증하였다. 따라서 펌프 흡입구 압력을 대기압으로 가정하고, 이상적 토출유량을 참조유량 Q_R 로 하여 식 (11)을 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{Q_f}{Q_R} = 1 - K_d K_s D^3 \quad (13)$$

식 (13)의 $K_d (= (b/2 + r)/6dl)$ 는 펌프 설계 매개변수이고, $K_s (= P/\mu\omega)$ 는 Sommerfeld 수로써 펌프 운전 매개변수이다.

즉, 식 (4)에서 기어 펌프의 오염민감도는 유량 감소비의 함수이고, 각 입자 크기 간격에 대한 유량감소비의 누계 즉 체적효율은 식 (13)에서 보듯이 Sommerfeld 수의 함수이므로, 오염 민감도 결과를 현장의 운전조건에 따라 기어 펌프 오염 수명을 예측하는 데 적용할

수 있다.

펌프 체적효율과 오염 수준의 간접 측정

앞에서 설명한 대로 펌프의 오염민감도 해석 및 오염 수명의 판정을 위해 체적 효율 및 오염입자 농도를 먼저 측정하여야 한다. 이와 같은 계측장비인 정밀한 유량계와 오일 분석 및 입자계산기 등은 매우 고가이고 정숙한 환경을 요구하므로 현장에서 사용하기에는 실용적이지 못하다. 본 논문에서는 Balawender[5]가 제시한 펌프의 온도 측정에 의한 전체효율(Overall Efficiency) 측정법을 응용하여, 마모 오염으로 인한 펌프의 성능 감시를 위해 체적효율 및 오염수준을 간접적으로 측정하는 방법을 제시한다.

Balawender[5]는 그림 1과 같은 펌프 시스템에 Witt[6]의 열동역학적(Thermodynamic) 방법을 응용하여 다음과 같이 온도 차이의 비를 측정함으로써 펌프의 전체효율(Overall Efficiency)을 간접적으로 측정할 수 있음을 제시하였다.

$$\eta_{oa} = \frac{(T_3 - T_2)_{II}}{(T_3 - T_1)_I} \quad (14)$$

식 (14)의 아래문자 I, II는 각각 그림 1의 방향제어 벨브가 작용한 방향을 가리킨다.

한편, 펌프의 전체효율은 체적효율과 기계효율의 곱으로써, 기어 펌프의 효율은 다음과 같이 표시할 수 있다 [7].

$$\eta_{oa} = \eta_v \eta_m = \frac{1 - C_s K_s}{1 + C_d / K_s} \quad (15)$$

식 (15)에서 Sommerfeld 수 K_s 는 운전 조건에 따른 것이고, 감쇄계수 C_d 는 제조업체의 설계 데이터로 주어진다. 결국 식 (14)에 의해 펌프의 온도 차이에 의한 전체효율을 측정하면 체적효율 $\eta_v = 1 - C_s K_s$ 을 계산할 수 있으며, 식 (13)과의 관계 $C_s = K_d D^3$ 로부터 최대 마모 입자 크기를 산정할 수 있다. 따라서 펌프 오염 입자 분포도에 의해 오염 농도를 산출하거나 최대 입자 크기에 의한 펌프 수명도(Omega Service Life Profile)[4]에 의해 운전 중인 기어 펌프의 오염 수명을 예측할 수 있다.

실험

기어 펌프 실험을 위한 유압회로는 그림 2와 같다. 세계의 동일한 기어 펌프에 대해 시스템 압력 10, 15, 20 MPa에서의 각 오름입자 크기에 대한 체적효율을 측정하였다. 펌프 회전 속도는 2,000rpm이었으며, 유압유는 MIL-L-2104 오일, 오염농도는 lower cut ACFTD 규격의 150 mg/L이었다. 시험 절차는 펌프 오염 민감도 시험의 표준 규격인 OSU-P-7/NFPA T3.9.18,1976을 적용하였으며 시험 결과는 표 1에 요약하였다.

표 1의 측정값 열에는 각 운전조건에서 식 (14)의 온도 측정과 식 (15)를 이용하여 펌프 효율을 측정한 값들이 기록되어 있다. 표 1의 계산 값들은 시스템 압력 15 MPa에서의 펌프 체적효율을 식 (13)에 의하여 구하고, 그 계산 값들을 기준으로 20 MPa 및 25 MPa로 압력을 변화시켜 계산한 값들이다. 각 압력에서

체적 효율의 측정값과 계산값의 RMS오차는 약 5% 이내로써 제시된 이론적 모델의 활용성을 입증한다. 식 (14), (15)에 의한 체적 효율의 간접 계산은 주어진 운전 조건 하에서 유량계를 이용한 정밀 측정 결과와 비교하여 2% 이내의 오차를 갖고 있었다. 그림 3은 표 1의 결과를 그래프로 옮긴 것이다.

결론

실험실에서의 펌프 오염민감도 해석 결과를 산업현장에 적용하여 운용 중인 펌프의 오염 수명을 예측하기 위해, 기어 펌프의 마모 입자 및 운전조건을 고려한 체적효율 모델을 제시하였다. 또한 간단한 온도 측정으로써 펌프의 체적 효율 및 오염수준을 실용적으로 측정하기 위한 방법을 제시하였다. 제시된 모델과 방법에 대한 계산값과 실제 측정값 사이의 오차는 약 5% 이내의 정확성을 갖는 것으로 밝혀졌다.

참고 문헌

1. Bensch, L. E., and E. C. Fitch, "A New Theory for the Contamination Sensitivity of Fluid Power Pumps", Paper No. 72-CC-6, The BFPR Program, Oklahoma State University, 1972.
2. Inoue, R., and E. C. Fitch, "The Omega Pump Rating System", The BFPR Journal, 1979, Vol. 12, pp. 141-144.
3. Fitch, E. C., and I. T. Hong, "Pump Contaminant Sensitivity-Part 1: An

Overview of the Omega Theory”,
The FRH Journal, 1986, Vo. 6.

4. Fitch, E. C., Fluid Contamination Control, FES, Inc., Stillwater, OK, 1988.
5. Balawender, A., and Zielinski, M., “Overall and Volumetric Efficiency Monitoring of Hydraulic Pumps and Monitors”, Proceedings of the 3rd International Conference,

Windsor, UK, pp. 26-34, October 1990.

6. Witt, K., “Thermodynamisches Messen in der Olhydraulik”, Olhydraulik & Pneumatik, No. 6, 1976.
7. Merritt, H. E., Hydraulic Control Systems, John Wiley and Sons, Inc., 1967.

압력, MPa	10			15			20		
초기유량, l/min	43.2			46.5			44.7		
입자크기, μ	측정값	계산값	오차, %	측정값	계산값	오차, %	측정값	계산값	오차, %
0 - 5	1.0	0.987	1.32	1.0	0.987	1.32	1.0	0.987	1.32
0 - 10	1.0	0.974	2.67	1.0	0.974	2.67	1.0	0.974	2.67
0 - 20	0.987	0.946	4.15	0.991	0.944	4.74	0.990	0.939	5.15
0 - 30	0.987	0.917	7.09	0.954	0.908	4.82	0.943	0.903	4.24
0 - 40	0.867	0.876	1.04	0.887	0.863	2.71	0.873	0.855	2.06
0 - 50	0.804	0.828	2.99	0.842	0.809	5.70	0.792	0.794	0.25
0 - 60	0.720	0.771	7.08	0.769	0.740	3.77	0.710	0.704	0.85
0 - 70	0.661	0.700	5.90	0.715	0.676	5.45	0.646	0.625	3.25
RMS 오차			4.63			4.15			2.94

표 1 운전조건 및 마모 입자 크기에 따른 기어 펌프의 체적 효율

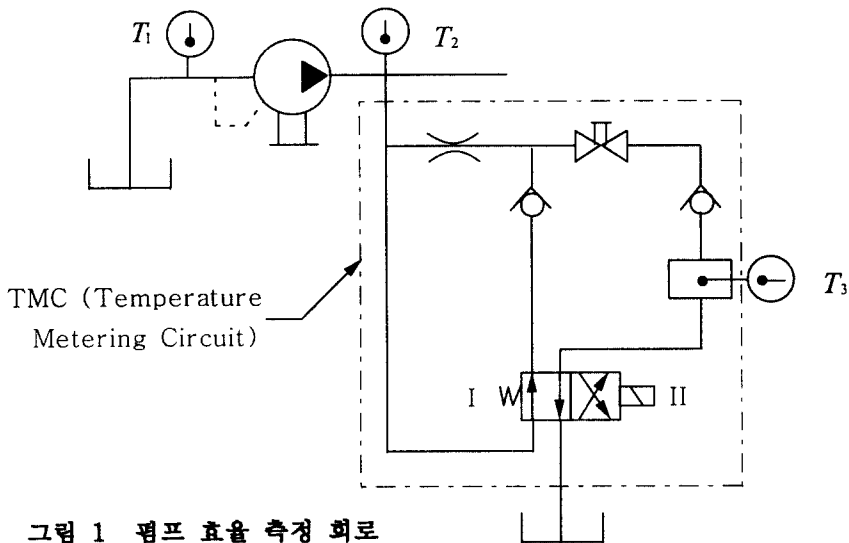


그림 1 펌프 효율 측정 회로

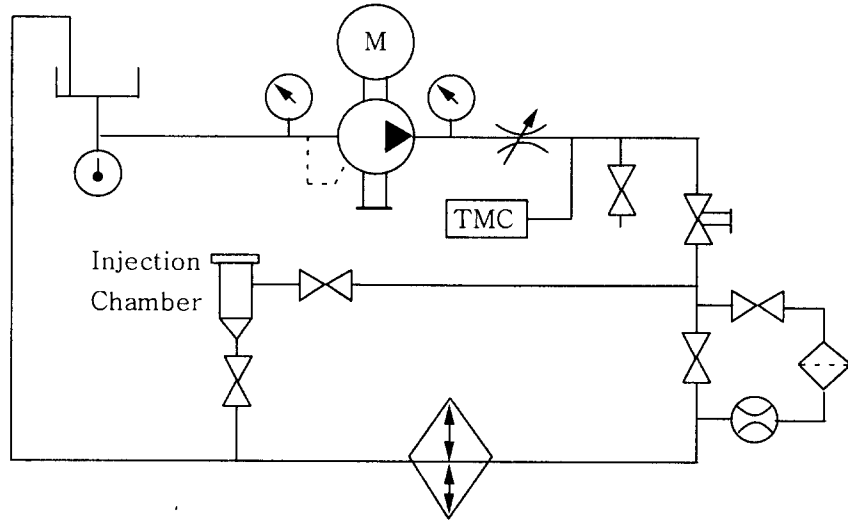


그림 2 펌프 오염민감도 실험 회로

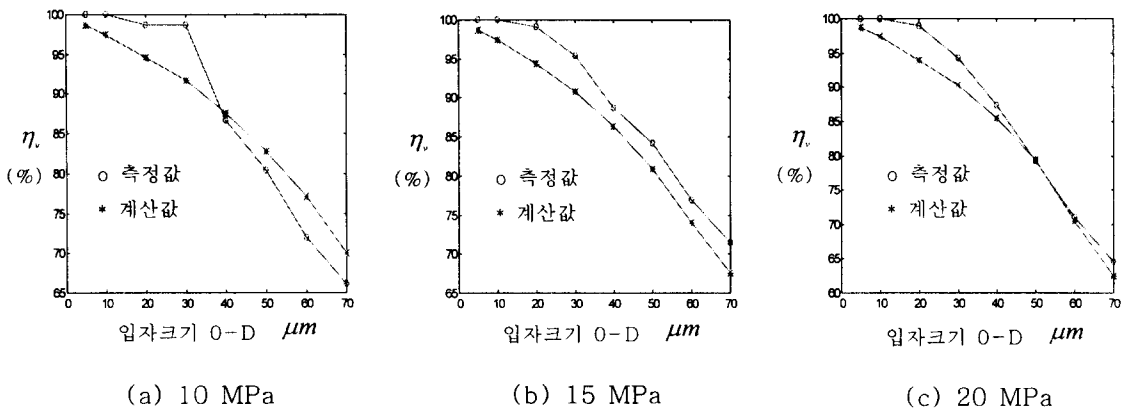


그림 3 마모 입자 및 시스템 압력 변화에 따른 기어펌프 효율