

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0105

유압시스템 롤_오프 청정도의 이론적 고찰 및 트랙터에의 응용

A Theoretical Investigation of Roll-Off Cleanliness for Hydraulic System and Application to a Tractor

이 재 천*
Jae-cheon Lee

ABSTRACT

This study theoretically investigated the roll-off cleanliness operation to eliminate the built-in contaminants which are primarily the result of manufacturing and assembly procedures first. A rigorous analytical examination of the cleaning process associated with hydraulic systems was performed by developing the general filtration process equations. The sloughing process by which built-in contaminant is entrained in the system fluid was examined during the development of a general analytical expression for sloughing rate. This sloughing rate expression in conjunction with the filtration process equations have lead to a relationship which describes the flushing and clean-up operation for the hydraulic systems. The effects of the primary roll-off cleanliness factors was discussed and illustrated on the figures. Then, the analytical results was shown to be usefully applied into the design of roll-off flushing equipment for the hydraulic system of a tractor.

주요기술용어 : Roll-Off Cleanliness (롤-오프 청정도), Sloughing Rate (탈피율), Multi-Pass Filtration (다순환 여과), Cumulative Particle Concentration (누적 오염입자농도), Ingression Rate (진입률), Beta Ratio (베타율), 플러싱 (Flushing)

Nomenclature

N_u, N_d : 필터 상, 하류에서 $x \mu m$ 보다

큰, 누적 오염입자농도(개/cc)
 N_o : 초기 시스템 내 $x \mu m$ 보다 큰, 누적 오염입자농도 (개/cc)

N_g : 시스템의 세정 목표 청정도

* 회원, 계명대학교 자동차 공학부

($x \mu m$ 보다 큰, 누적 오염입자농

- 도, 개/cc)
- Q : 필터순환 유량 (cc/분)
- R : 시스템내 $x \mu m$ 보다 큰 오염입자
진입률 (개/분)
- V : 시스템 순환유량 체적 (cc)
- z_1, z_2 : $x \mu m$ 보다 큰 오염입자의 초기
탈피율 상수 (개/분 · cc)
- k_1 : 시스템에 기 주입된 오염물 배출과
관련된 시상수 (분)
- k_2 : 시스템의 복잡성과 관련된
시상수 (분)
- β_x : 베타율 (= N_u / N_d)
- γ : 오일 순환 속도 (= Q/V , 사이클/분)
- η : 필터 효율 (= $\frac{\beta_x - 1}{\beta_x}$)

1. 서론

롤-오프 청정도란 유압시스템을 첫 제작, 조립 혹은 분해, 검사 후 출고할 때의 오염 수준을 뜻한다.¹⁾ 유압시스템 출고시의 청정도는 단품 제작 및 시스템 조립시의 기 주입된 잔류 오염물 및 자체 발생하는 오염물의 양에 의해 결정된다. 기 주입된 오염물 및 시스템을 길들이는 기간(Break-In Period) 동안에 발생한 오염물은 적절한 필터링 조건에 의해 제거되지 않는 한 핵심적 부품의 손상, 급속한 부품 마모, 시스템의 오작동 및 작동불능 상황을 초래할 수 있다. 그럼에도 불구하고 지금까지 롤-오프 청정도는 유압시스템의 설계, 제조 및 시운전 중 그 중요성이 간과되어 온 오염관리 한 분야이다.

제조 잔류물질의 제거는 유압시스템 조립 공정의 한 중요한 부분이다. 플러싱이란 유압시스템 내부로부터 오염물질을 제거하기

위해 고안된 유체 순환과정을 뜻하며, 유압시스템의 목표수명을 만족시키기 위한 오염수준 확보를 목표로 한다.²⁾ 플러싱에 의해, 기 주입된 오염물질의 효과적인 제거를 위해서는 세정작업에 영향을 주는 요소들의 상관관계를 파악해야 한다. 이를 위해 다순환 여과 성능 시험^{3,4)}의 해석결과로부터 유도된 일반적인 세정 관련식들을 이용하여 롤-오프 청정도 관련 요소들을 파악할 수 있다.

본 논문에서는 일반적 유압시스템의 세정 관련식에 시스템 길들이기 과정 중의 오염물 탈피율⁵⁾에 대한 해석 결과를 연계함으로써 유압시스템의 롤-오프 청정도 관리를 위한 롤-오프 플러싱 관계식을 유도한다. 또한 그 관계식의 해석 결과에 의해 롤-오프 청정도와 관련된 플러싱 요소들의 상호 관계를 제시한다. 그리고 그 결과를 트랙터 유압시스템의 롤-오프 플러싱에 적용함으로써, 본 논문에서 제시된 해석 결과가 일반 유압시스템의 롤-오프 청정도 관리를 위한 플러싱기 사양 결정 및 플러싱 공정 설계등에 응용될 수 있음을 보여준다.

2. 유압시스템의 롤-오프 플러싱모델

Fig. 1은 필터의 여과 메커니즘을 보여준다. 필터의 여과성능은 필터 상,하류 간 오염입자의 갯수에 따라 아래 식과 같이 베타율로써 나타낸다.

$$\beta_x = \frac{\text{필터상류에서 } x\mu m \text{보다 큰입자의갯수, } N_u}{\text{필터하류에서 } x\mu m \text{보다 큰입자의갯수, } N_d} \quad (1)$$

Fig. 1에서 보듯이 유압시스템의 필터 세정에 대한 기본적 수학모델은 시스템 내 오염

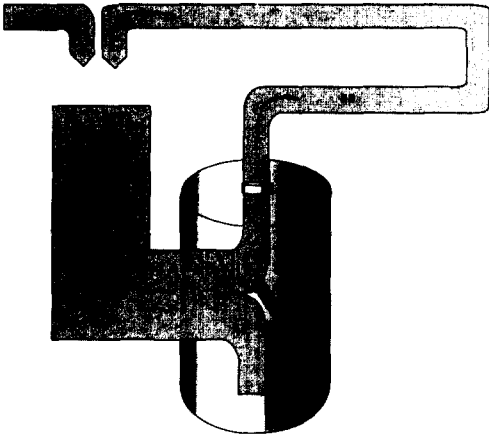


Fig. 1 유압 필터링 시스템

$$\frac{d}{dt} N_u + \eta \frac{Q}{V} N_u = \frac{R}{V} \quad (4)$$

식 (4)는 전체 유압시스템의 여과에 의한 오염입자 균형에 대한 식으로써, R, V, β_x, Q 등이 주요 변수임을 알 수 있다. 특히 롤-오프 청정도와 관련하여 주목되는 변수는 시스템내 오염입자 입장률인 R 이다. 유압시스템의 유효사용 기간 중, 외부로부터 시스템 내 침투 혹은 자체 생성하는 오염물의 양은 거의 일정하다.⁶⁾ 그러나 시스템을 첫 출고 후, 길들리는 기간 중의 오염물의 입장률은 일정하지 않다. 즉, 단품 가공 제작, 저장/운송 및 시스템 조립시에 주위 환경으로부터 기 주입된 잔류 오염물들은 시스템 시운전 초기에 유압유와 섞여 순환된다. 실제 일반 유압시스템의 길들이기 기간 중의 오염물은 대부분 이와 같이 시스템 제작 중에 기 주입된 오염물이 탈피된 것으로 나타났다.⁵⁾ 유압시스템의 초기 탈피율에 영향을 주는 또 다른 요인은 각종 부품의 내부 표면에 점착되어 유압유의 순환과 함께 서서히 씻겨지는 오염물으로써, 유압부품의 수, 배관의 길이, 내부 표면의 상태, 유속등과 같은 시스템의 복잡성(Complexities)에 따라 오염도가 좌우된다. 따라서, 유압시스템의 전체 오염물 탈피율은 아래 식과 같이 두 개의 항의 합으로 표시된다.⁵⁾

물질의 균형에 관한 식으로 표현할 수 있으며, 필터의 베타율이 항상 일정한 베타 모델⁶⁾과, 필터에 여과된 오염물의 토설(Desorption)과 시간에 따른 변동 베타율을 사용하는 회피(Elutivity) 모델⁷⁾로 구분된다. 회피 모델은 유압시스템의 서지 압력 및 유량 변동에 따른 필터의 토설과 필터에 여과된 오염물질에 의한 차압력을 고려함으로써, 필터의 전 수명에 대해 베타 모델보다 정확하다. 그러나 베타 모델 또한 정상적인 필터의 유효사용 기간 동안 적용할 수 있으며 여러 가지 유압시스템의 다순환 여과성능 시험에 의해 그 정확성이 입증되었다.³⁾ 따라서 본 연구에서는 유압시스템 세정 관련하여 아래와 같은 베타모델을 적용한다.

$$\frac{R}{V} = z_1 e^{-t/k_1} + z_2 e^{-t/k_2} \quad (5)$$

$$\text{필터상류 입자수} = \text{초기입자수} + \text{시스템진입 입자수} - \text{필터제거입자수} \quad (2)$$

식 (5)를 식 (4)에 대입하여 미분방정식의 해를 구하면 다음과 같이 된다.

식 (2)를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$N_u V = N_o V + \int R dt - \int (N_u - N_a) Q dt \quad (3)$$

$$N_u(t) = \left[\frac{z_1}{\eta\gamma - 1/k_1} \right] (e^{-t/k_1} - e^{-\eta t}) +$$

식 (1)을 식 (3)에 대입하여 정리하면 다음 식 (4)를 얻는다.

$$\left[\frac{z_2}{\eta\gamma - 1/k_2} \right] (e^{-t/k_2} - e^{-\eta t}) + N_o e^{-\eta t}$$

(6)

상기 식 (6)은 유압시스템의 길들이기 기간 중의 롤-오프 청정도 관리를 위한 세정 모델이다. 식 (6)에서 보듯이, 시운전 초기 몇분 동안은 초기 오염도 N_0 , 탈피율 상수

z_1, z_2 등이 큰 영향을 미치나, 전체적인 롤-오프 세정 공정의 주요 변수는 필터의 효율 η (즉, 베타율 β_x), 시스템의 복잡성 k_2 , 오일순환시간 γ 등이다.

3. 세정 요소들의 상관관계 해석

아래 Fig. 2는 $\beta_{10}=2, 5, 10$ 및 50인 네 종류의 필터에 의한 전형적인 유압시스템의 롤-오프 플러싱의 해석 결과를 보여준다. 일반적인 운송작업용 유압시스템의 경우 $\gamma \approx 0.5 \sim 4$ (사이클/분), $k_1 < 1$ (분)이며, 시스템 출고시의 오염정도는 ISO code의 25/23 등급에 해당하는 $N_0 = 10^5$ 이라고 가정하였다 (Table 1 참조). Fig. 2에서 보듯이, 플러싱 초기에 유압 시스템의 오염수준은 급격히 줄어든다. 그러나 시스템 조립공정에서 기 주입된 오염물이 일단 여과된 후에는 세정효과는 현저히 감소한다. 이는 시스템이 복잡할수록 유압부품 내부에 접촉된 오염물이 오일 순환시 오일과 함께 배출되기 어렵기 때문이다. Fig. 2의 시스템은 $\beta_{10}=10$ 이상의 필터에 의해 약 10분간 플러싱하여 $N_0=1,000$ (ISO 19/16, NAS 10등급) 수준의 청정도를 얻을 수 있음을 알 수 있다. ISO 19/16 등급은 10 MPa 미만의 베인/기어 펌프, 압력/유량제어 밸브, 솔레노이드 밸브 및 압연유압시스템, 트랙터 유압시스템 등의 요구 청정도 수준에 해당한다.¹⁰⁾

롤-오프 청정도 관리를 위한 플러싱 작업에서, 생산성과 관련된 중요한 요소는 목표 청정도에 도달하기까지의 소요 플러싱 시간이다. 이와 관련하여 롤-오프 플러싱을 위한

외부 여과장치(Off-Line Filtering System) 설계시 세정 필터의 성능 및 오일 순환속도와 연관된 펌프 토출유량의 선정이 중요 변수가 된다.

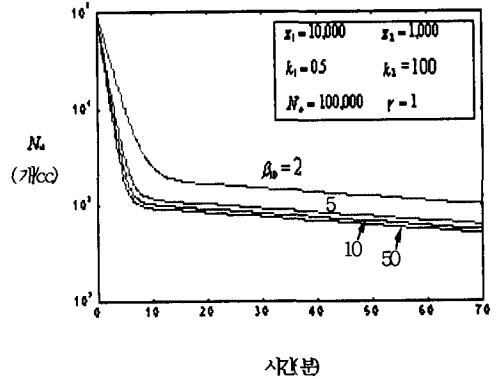


Fig. 2 롤-오프 플러싱의 예

Table 1 오염도 규격⁹⁾

ISO Code	Approximate # of particles >10 microns per ml	Approximate weight of contaminant - Mg/L (gravimetric level)	NAS 1638 Codes	Old SAE 749 Classes (gravimetric)
26/23	140,000	1,000		
25/23	85,000			
23/20	14,000	100		
21/18	4,500		12	
20/18	2,400			
20/17	2,300		11	
20/16	1,400	10		
19/16	1,200		10	
18/15	580		9	
17/14	280		8	6
16/13	140	1	7	4
15/12	70		6	3
14/12	40			
14/11	35		5	2
13/10	14	.1	4	1
12/9	9		3	0
11/8	5		2	
10/8	3			
10/7	2.3		1	
10/6	1.4	.01		
9/6	1.2		0	
8/5	.6		00	
7/5	.3			
6/3	.14	.001		
5/2	.04			
2/1.8	.01			

Fig. 3은 주어진 시스템의 목표 청정도 $N_g = N_u = 1,000$ ($10\mu m$ 보다 큰 오염입자가 1cc 오일 당 1,000 개)에 이르기까지의 소요시간을 세정필터의 성능(베타율) 및 시스템의 복잡성에 대비하여 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보듯이 필터의 베타율이 감소할수록, 또한 시스템의 복잡성이 증가할수록,

특히 저효율 필터의 영역에서, 블-오프 청정도를 위한 세정 소요시간이 급증함을 알 수 있다. 또한 Fig. 3은 시스템에 따라, 고효율 필터만으로는 더 이상 줄일 수 없는, 목표 청정도를 위한 최소 세정시간을 보여준다.

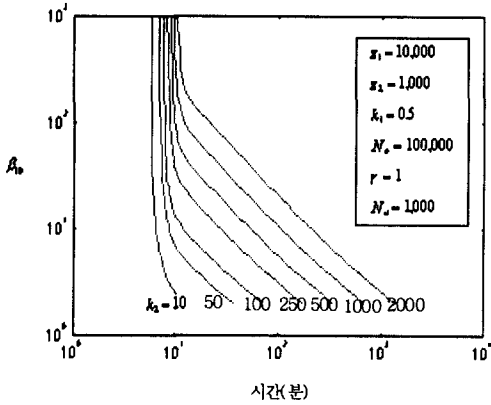


Fig. 3 유압시스템의 복잡성에 따른 필터 성능과 세정소요시간

Fig. 4는 $N_g = N_u = 1,500$ 부터 $N_g = N_u = 50$ 까지의 목표청정도에 대한 세정필터의 성능(베타율) 및 세정 소요시간의 관계를 나타낸다. Fig. 4에서 보듯이 주어진 유압시스템이 목표 청정도에 이르기 위해서는, 고효율 필터를 사용한다 하더라도, 더 이상 줄일 수 없는 최소 블-오프 플러싱 시간이 있음을 보여준다.

그러나 일반적으로 저효율 필터보다 고효율 필터를 사용함으로써 목표 청정도에 이르기 위한 플러싱 시간을 크게 감소시킬 수 있다. 그 예로써, Fig. 4의 시스템에서 $N_u = 1,000$ 의 청정도에 도달하기 위해 $\beta_{10} = 10$ 의 필터로는 100분이 소요되나 $\beta_{10} = 100$ 의 필터로는 약 12분이 소요될 뿐이다.

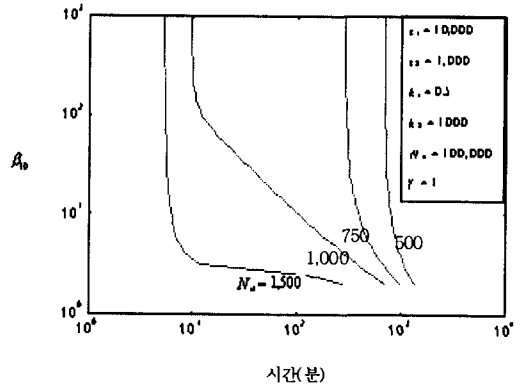


Fig. 4 목표청정도에 따른 필터성능과 세정 소요시간

Fig. 5는 또한 플러싱 오일 순환속도에 따른 필터성능과 세정소요시간의 관계를 보여준다. Fig. 5에서 보듯이 동일한 필터에 대해 플러싱 오일 순환속도를 증가시킴으로써 목표 청정도에 이르기 위한 세정시간을 대폭 감소시킬 수 있다. 즉, Fig. 5의 $\beta_{10} = 10$ 필터 시스템의 경우, 오일 순환속도를 $\gamma = 0.5$ 에서 $\gamma = 1$ 로 증가시킴으로써 세정소요시간을 약 90분에서 10여분으로 줄일 수 있다.

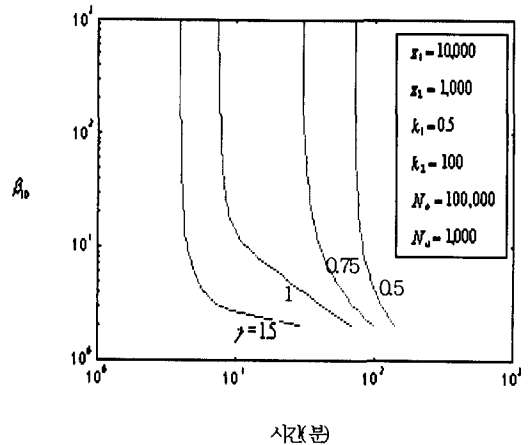


Fig. 5 플러싱 오일 순환속도에 따른 필터성능과 세정소요시간

4. 트랙터 유압시스템의 롤-오프 플러싱

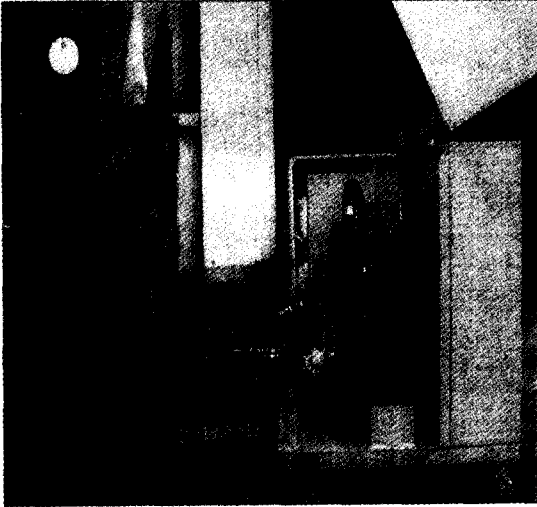


Fig. 6 트랙터 유압시스템 플러싱 장면

농업용 트랙터는 비포장도로 차량(Off-Road Vehicle)의 대표적인 예로써, 작업환경상 오염물이 진입하기 쉬운 조건에 노출되어 있어, 각종 고장원인의 대부분이 유압시스템의 오염에 기인한다. 따라서 트랙터의 생산, 출고 직전이나 수리보수 조립직후, 롤-오프 플러싱에 의한 유압시스템의 청정도 관리가 요구되었다.

Fig. 6과 Fig. 7은 롤-오프 플러싱을 위해 외부 여과장치를 부착한 전형적인 트랙터 유압시스템을 나타낸다. Fig. 6의 트랙터 유압시스템은 변속기와 오일탱크를 공유하며, 기어펌프의 토출 압유에 의해 조향장치, PTO 외부 작업기, MLS 밸브에 의한 승강장치등을 구동한다. 롤-오프 플러싱 용 외부 여과장치는 변속기 오일탱크의 배유구로부터 흡입된

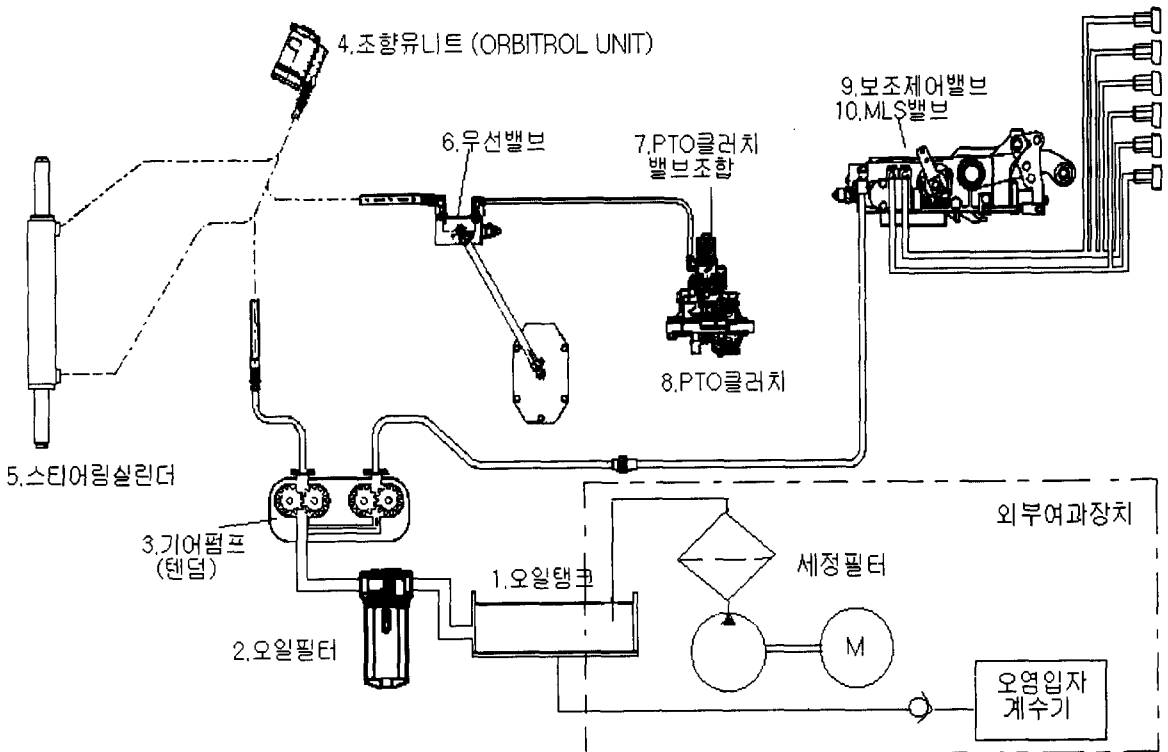


Fig. 7 트랙터 유압시스템 및 외부여과장치의 개략도

오일이 기어펌프에 의해 플러싱 세정필터 (Clean-Up Filter)를 거쳐 오일탱크로 회유토록 구성되었다.

오염입자계수기(Contamination Particle Counter)는 HYDAC FCU 2110-1-M으로써 오일탱크 배유구에 설치한 샘플링 포트로부터 실시간 계수분석이 가능하였다.

트랙터 유압시스템의 플러싱기 사양결정을 위해 외부 여과장치를 탈착한 상태에서 트랙터 유압시스템의 오염입자 진입률을 실험과 이론적 모델에 의해 측정하였다. Fig. 7의 트랙터 유압시스템의 오비틀롤 유닛과 PTO 클러치 및 파워리프트 조합을 동시에 작동시켜 최대 분당 19 리터의 오일을 순환시키며 2분 간격으로 오염입자를 계수하였다. 오일은 대동 TF65 오일이었으며 실험 시작전 오일의 청정도는 약 $\beta_{10} = 2500$ 이었다.

Fig. 8의 각 점들은 5대의 트랙터 운전시간에 따른 오염입자 계수 결과를 나타낸다.

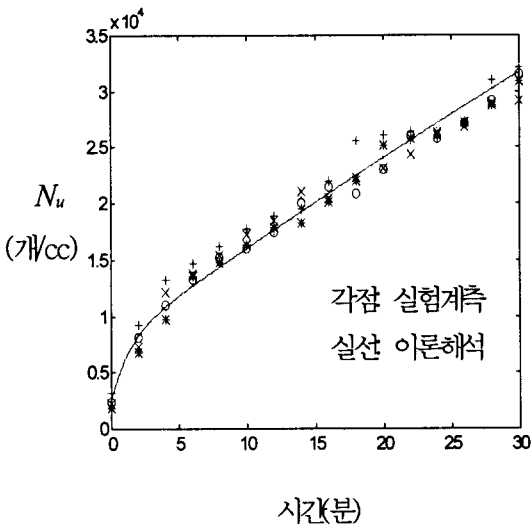


Fig. 8 트랙터 유압시스템의 오염입자 진입률

한편 Fig. 7의 트랙터 유압시스템의 오일 필터는 $70\mu\text{m}$ 의 정상(Normal) 필터(즉, $\beta_{70} = 5$)로써 $\beta_{10} \approx 1$ (즉, $\eta = 0$)이다. 따라서 식 (6)으로부터 다음의 식을 얻는다.

$$N_u(t) = N_o + z_1 k_1 (1 - e^{-t/k_1}) + z_2 k_2 (1 - e^{-t/k_2}) \quad (7)$$

Fig. 8의 실선은 식 (7)의 이론적 모델에 아래 식(8)의 매개변수 값들을 적용한 시뮬레이션 결과로써 실험 결과와 근사한 결과를 보여준다.

$$k_1 = 1.3, k_2 = 250, z_1 = 4000, z_2 = 850, N_o = 2500 \quad (8)$$

한편 롤-오프 플러싱을 위한 외부여과기 순환펌프의 최대유량은 흡입구의 캐비테이션에 의해 제한된다.¹¹⁾ 즉, 여과기 순환펌프의 흡입구와 연결된 트랙터 변속기 오일탱크 배유구의 크기(직경 12.7mm)의 제한으로 인해 순환펌프의 토출유량은 분당 29리터로 제한하였다. 본 연구에서 고려한 트랙터 유압시스템의 순환오일체적은 총 58리터로써 최대 오일 순환속도는 $\gamma = 0.5$ 사이클/분이다.

Fig. 9은 식 (8)과 $\gamma = 0.5$ 로 주어진 외부 여과기가 부착된 트랙터 유압시스템이 여러 가지 롤-오프 플러싱 목표 청정도에 도달하기 위한 필터성능과 세정 소요시간과의 상관관계를 나타낸다. Fig. 9에서 보듯이 본 트랙터 유압시스템은, 생산성을 고려한 세정소요시간 한계인 15분 이내에서는 세정필터의 성능에 상관없이 $N_g < 1600$ (NAS 11 ~ 12등급) 이상의 청정도를 얻을 수 없음을 알 수

있다. 따라서 외국 선진사 트랙터 제품 수준인 NAS 9등급의 청정도를 얻기 위해서는 단품의 청정도 및 조립공정의 개선으로 초기 오염도(N_0) 수준을 낮추고, 캐비테이션을 방지하기 위해 부스터펌프를 사용하는 등, 롤-오프 외부여과기의 오일순환속도를 늘리는 방안을 강구해야 한다.

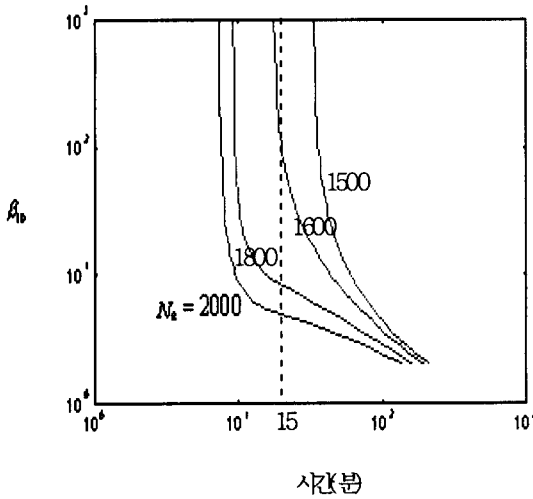


Fig. 9 트랙터 유압시스템의 목표 청정도를 위한 필터성능과 세정소요시간

Fig. 10는 $\beta_{10}=250$ 의 절대(Absolute) 필터를 외부여과기의 세정필터로 설치하여 트랙터 유압시스템을 롤-오프 플러싱한 결과를 나타낸다.

실험 중 트랙터 유압시스템은 Fig. 8의 경우와 마찬가지로 조향유닛과 PTO 클러치 및 파워리프트 조합을 동시에 작동시켜 최대 오일을 순환시켰으며, 이론해석을 위해 매개변수 값들은 식 (8)과 $\gamma=0.5$ 를 사용하였다. Fig. 10에서 보듯이 플러싱 초기에 오염도가 증가한 것은 시스템 조립시 진입한 오염물질이 오일 순환과 함께 부유하여 대량 배출되었기 때문이며 실험결과가 이론해석 결과보다 지연된 것은 트랙터 유압시스템 내

진입한 오염물질이 오일탱크의 복잡한 구조로 말미암아 외부여과기로 순환되기까지 시간 지연되었기 때문으로 판단된다.

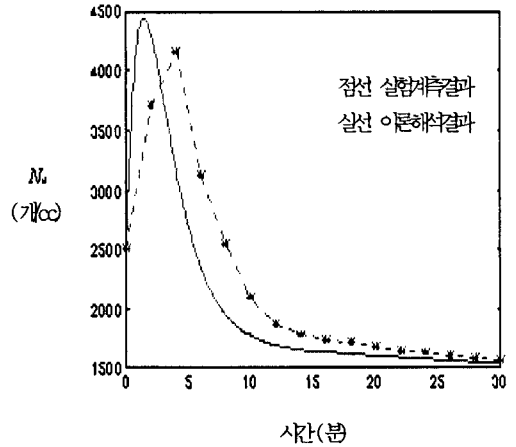


Fig. 10 트랙터 유압시스템의 롤-오프 플러싱 결과

4. 결 론

본 논문에서는 일반적인 유압시스템의 세정관련식에 오염물 탈피율에 대한 해석 결과를 연계함으로써 롤-오프 플러싱 관계식을 유도하였으며, 관계식상의 플러싱 요소들의 상관관계를 제시하였다. 이론적 해석 결과는 트랙터 유압시스템의 롤-오프 플러싱에 적용하여 실험하였다. 실험 계측 결과는 본 논문에서 제시된 이론식이 실제 유압시스템의 롤-오프 플러싱에 유효하게 적용될 수 있음을 보여준다.

참 고 문 헌

- 1) ANSI Standard B93.54M, *Hydraulic Fluid Power-Assembled Systems-Method for Achieving Roll-Off Cleanliness* (NFPA/T2. 9.8-1979), American National Standards

- Institutes, 1979.
- 2) F. D. Norvelle, "Hydraulic system flushing" ,*The FRH Journal, The Fluid Power Research Center, Oklahoma State University*, Vol. 4, No. 1, pp.63-68, 1984.
 - 3) ISO/DIS 4572, ISO/TC 131, *Hydraulic Fluid Power-Filters-Multipass Method for Evaluation Performance*, International Standard Organization, 1979.
 - 4) E. C. Fitch, *Fluid Contamination Control*, FES Inc., 1988.
 - 5) J. M. Karhnak, "A realistic roll-off cleanliness procedure for fluid power systems", *29th National Conference on Fluid Power*, pp. 25-27, 1973.
 - 6) E. C. Fitch and R. K. Tessmann, "Practical and fundamental descriptions for fluid power filters", *SAE Technical Paper No. 730796*, 1973.
 - 7) E. C. Fitch and I. T. Hong, *Hydraulic System Design for Service Assurance*, BarDyne, Inc., 1999.
 - 8) R. K. Tessmann, "OSU contamination control theorems", *Basic Fluid Power Research Program Annual Report*, No. 6, Paper 72-CC-1, 1972.
 - 9) ISO 4402, *ISO Solid Contaminant Code*, International Standard Organization, 1970.
 - 10) J. C. Fitch, *Learning Oil Analysis*, Noria Co., 1999.
 - 11) E. C. Fitch and I. T. Hong, *Hydraulic Component Design and Selection*, BarDyne, Inc., 1999.