

원심 오일필터 유동 해석을 통한 필터링 효율 분석

방광현† · 김경규* · 송영이* · 김평수**

(원고접수일 : 2009년 3월 11일, 원고수정일 : 2009년 6월 3일, 심사완료일 : 2009년 8월 10일)

Numerical Analysis of Fluid Flow and Filtering Efficiency in Centrifugal Oil Filter

Kwang-Hyun Bang† · Kyung-Kyu Kim* · Younga Song* · Pyung-Su Kim**

Abstract : In centrifugal oil filters particles are forced to move toward the filter casing wall by centrifugal force in the rotating oil flow and the particles are trapped and removed on the filter paper installed at the wall. In the present study, flow field of oil and particle motion in a centrifugal oil filter has been numerically calculated in order to estimate the filtering efficiency for various operating conditions. Fluent code was used for the numerical calculations. Uncoupling the oil flow and the particle motion and the use of particle tracking trajectory enabled the estimation of filtering efficiency for various particle sizes, particle density and the filter rotational speed. Higher filtering efficiency was observed for heavier and larger particles as well as higher filter rotational speed. For the typical case of the particle density of 6000 kg/m^3 and the particle size of $10 \mu\text{m}$ at 3500 RPM, the calculated filtering efficiency per passage was 0.31.

Key words : Oil filter(오일필터), Centrifugal filter(원심필터), Filtering efficiency(필터링효율), CFD(전산 유체역학)

1. 서 론

현재 사용되는 디젤엔진의 full-flow 오일 필터는 거의 대부분 element type을 채용하고 있다. 그러나 이러한 element 필터는 엔진에 대략 수십 μm 이상의 비교적 큰 불순 입자들이 유입되는 것을 방지할 뿐이며 그 이하의 작은 입자들은 여전히

일정량이 엔진으로 유입되어 엔진 구성품의 마모의 원인이 된다^[1]. 만약 이에 대비해 매우 작은 pore 크기의 필터를 사용할 경우 작은 입자의 여과는 가능하지만 단시간에 윤활유 압력이 큰 폭으로 떨어지는 문제가 있다. 또한 element type은 대부분 1회용으로 주기적인 교체 비용과 이의 폐기에 따른 환경오염 문제 등이 따른다. 따라서 이에 대한 대

† 교신저자(한국해양대학교 기계정보공학부, E-mail: khbang@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4365)

* 한국해양대학교 대학원 냉동공조공학과

** (주)한조

책으로 오일 유량의 10% 정도 바이패스하여 원심 오일필터를 거쳐 미세 dirt를 제거하고 필터 교환이 경제적이고 친환경적인 방안이 보편화되고 있다.

엔진 윤활유 세정 목적의 원심필터는 필터 케이싱 내에서 윤활유를 고속으로 회전시켜 불순물 입자가 원심력을 받아 케이싱 외벽 쪽으로 이동하게 되어 벽에 흡착시킴으로써 불순물 입자를 제거하는 원리를 기반으로 한다. 이때 회전 동력은 원심필터 출구 측에 설치된 두 개의 회전 접선방향의 노즐에서 서로 반대 방향으로 윤활유가 분출되는데서 발생하는 회전 운동량으로 제공되므로 윤활유 공급 펌프 외에는 별도의 동력장치를 필요로 하지 않는다. 세계적으로 독점하고 있는 Mann+Hummel사의 원심필터 내부 구조는 Fig. 1의 개략도와 같다. 환상형 필터 드럼의 내부 주요 크기는 외경 179 mm, 내경 73 mm, 높이 215 mm이며 오일의 입·출구로 직경 19 mm의 구멍이 각각 4개씩 사용된다.

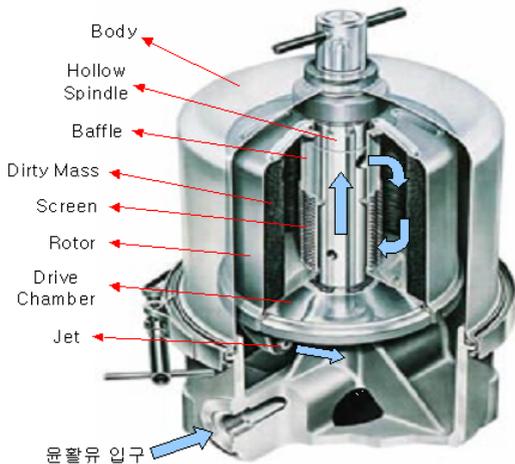


Fig. 1 Internal view of centrifugal oil filter

윤활유와 불순물 입자간의 운동량 전달은 입자의 밀도, 입자의 크기 및 케이싱 내의 유동장(fluid flow field)에 의해 지배되며, 따라서 불순물의 외벽으로의 이동 정도, 즉 각 입자의 필터링 정도를 분석하기 위해서는 회전하는 원통형 케이싱 내부에서 오일과 불순물 입자의 유동장을 해석할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 원심필터 케이싱 내부

의 회전하는 3차원 유동장을 열유체 범용코드인 Fluent 코드^[2]를 사용하여 해석하였으며, 입자 유동 해석을 통해 불순물 입자의 필터링 효율에 대해 분석하였다.

2. 이론적 모델

2.1 유동장 지배방정식

비압축성 점성유체에 대한 연속방정식 및 운동량 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \tag{3}$$

원심필터 내부의 회전하는 유동장에 대해서는 rotating reference frame을 사용하는 것이 유리하며, 상대속도는 다음과 같이 정의된다.

$$v_r = v - \omega \times r \tag{4}$$

여기서 v_r 은 상대속도, v 는 절대속도, 그리고 ω 는 회전각속도(angular velocity)이다.

운동량 방정식 식(2)의 왼쪽 변은 inertial reference frame에서 relative velocity에 대해 표현하면

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \nabla \cdot (\rho v_r v_r) + (2\Omega \times v_r + \Omega \times \Omega \times r) + \rho \frac{\partial \Omega}{\partial t} \times r \tag{5}$$

과 같으며 여기서 $2\Omega \times v_r + \Omega \times \Omega \times r$ 는 coriolis force (centrifugal force)를 나타낸다.

2.2 입자에 대한 운동방정식

유동장 내에서 운동하는 입자에 대한 힘 평형 방정식은 Lagrangian 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{dv_p}{dt} = F_D(v - v_p) + g(\rho_p - \rho)/\rho_p \quad (6)$$

$F_D(v - v_p)$: drag force per unit particle mass

v : fluid phase velocity

v_p : particle velocity

μ : molecular viscosity of the fluid

ρ : density of the fluid

ρ_p : density of the particle

g : gravitational constant

여기서, 항력 F_D , Reynolds 수, 항력계수 C_D 는 다음과 같이 정의된다.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (7)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |v_p - v|}{\mu} \quad (8)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (9)$$

위 식에서 d_p 는 입자의 직경이며 항력계수에 대한 식(9)는 Morsi and Alexander⁽³⁾에 의해 제안된 구형 입자에 관한 식이다. 계수 a들은 Re 수의 함수로 주어진다.

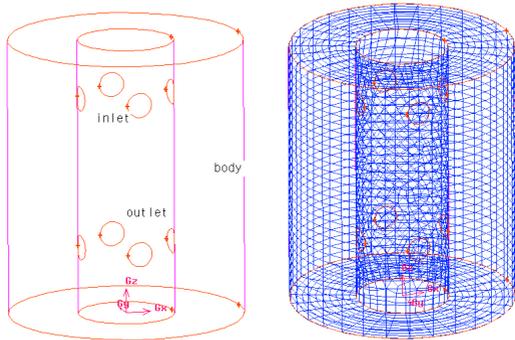


Fig. 2 Centrifugal filter model for numerical calculation

2.3 수치해석 모델

해석 대상의 원심필터의 구조는 수치해석의 단순

화 목적으로 Fig. 2와 같이 두 개의 동심 원통으로 구성되어 있으며, 내경 73 mm, 외경 179 mm, 높이 215 mm이다. 그리고 안쪽 원통 상부에 4개의 입구 (직경 d=19 mm), 하부에 4개의 출구 (직경 d=19 mm)가 위치한다. Gambit을 사용하여 Fig.2의 오른쪽 그림과 같이 mesh를 작성하였으며 총 셀 개수는 33000개 정도이다. 격자 크기에 대한 영향을 검토하기 위해 167000여개의 fine mesh에 대해 해석한 결과 동일함을 확인한 후 계산 시간의 단축을 위해 대부분의 계산은 coarse mesh로 수행하였다.

원심필터의 입구 유량은 4개의 입구 각 입구 당 3500 RPM 기준 0.99 kg/s의 유량을 설정하였으며, 따라서 총 유량은 3.96 kg/s이다. RPM에 따른 유입 오일 유량의 변화는 아래와 같은 요구 회전 운동량과 회전속도와의 관계에서⁽⁴⁾ RPM과 유입 유량은 선형 비례적임을 알 수 있다.

$$V_2 = V_o i - R\omega i$$

회전 운동량(angular momentum)은

$$\sum M_o = (r_2 \times V_2) \dot{m}_{out} - (r_1 \times V_1) \dot{m}_{in} = 0 \quad (10)$$

연속방정식에서, $\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} = \rho Q$

$$r_2 \times V_2 = Rj \times (V_o - R\omega) i = (R^2\omega - RV_o) k$$

$$r_1 \times V_1 = 0j \times V_o k = 0$$

$$R^2\omega = RV_o \Rightarrow \omega = \frac{V_o}{R} \quad (11)$$

여기서,

$$V_o : \text{유입속도}, \quad V_1 = V_o k$$

$$V_2 : \text{유출속도}$$

$$R : \text{중심에서 입구(출구) 까지 거리}$$

$$\omega : \text{회전 각속도}$$

본 원심필터 유동해석에 사용한 오일의 물성치는 다음과 같다⁽⁵⁾.

Engine oil : 밀도 $\rho = 853.9 \text{ kg/s}$

$$\text{점도 } \mu = 0.00356 \text{ kg/s} \cdot \text{m}$$

입자에 대한 물성치로 입자의 밀도가 요구되는데

윤활유 불순물의 종류는 금속 또는 금속산화물, 연소에 따른 유기물 등으로 이들의 밀도가 크게 다르므로 1000~6000 kg/m³ 범위에서 입자 밀도의 영향을 해석하였다.

이상의 원심필터 내의 오일 유동 및 입자의 운동에 대한 수치 해를 Fluent 코드를 사용하여 구하였다. 원심필터의 경우 입자들의 분포가 오일 유동 자체에 비해 매우 적은 체적을 차지하므로 수치해석 방법은 Uncoupled, 즉 오일의 유동장 해석을 수행하고 이 유동장을 바탕으로 입자들의 운동을 계산하여 입자들의 원심필터 벽에 닿을 경우 제거되는 것으로 하고, 출구를 통해 오일과 함께 나가는 입자들은 필터링 되지 않은 경우로 하였다. 난류 모델은 k-ε 모델을, 원심력에 대비하여 압력 식차분법에 PRESTO!를 적용하였다.

원심필터 내부 오일의 유동이 계산된 후 이 유동장을 이용하여 입자의 운동을 계산하기 위해 Fluent의 Discrete Phase Model을 사용하였다. 입자의 직경은 Injection 변수에서, 입자의 밀도는 Material type에서 Inert particle로 정의하여 입력하고 Discrete phase에 대한 경계조건으로 오일 입구에서는 'Reflect', 필터 벽면에서는 'Trap'으로 정하여 벽에 부딪치는 입자는 필터에 의해 제거되는 것으로 정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해석 조건

원심필터의 필터링 효율에 영향을 주는 변수로 회전 속도, 입자 크기, 입자 밀도를 들 수 있다. 따라서 유동장 및 입자들의 필터링 효율을 계산하기 위해 다음과 같은 조건에 대해 해석을 수행하여 비교 분석하였다.

- 회전 속도 = 1750, 2625, 3500 RPM
- 입자 크기 = 10, 20, 30, 50, 75, 100 μm
- 입자 밀도 = ρ=1000, 3000, 6000 kg/m³

여기서 회전속도 범위는 설계 정격속도가 3500 RPM이며 엔진 RPM에 따른 윤활유 압력 또는 유

량에 따라 오일필터 회전수 변화의 영향을 관찰하고자 한 것이며, 입자크기는 10 μm 이상의 크기에 대해, 그리고 입자밀도는 불순물 물질의 종류가 가벼운 유기물질부터 금속산화물 등 다양하므로 대표되는 3가지의 밀도를 선택하였다.

입자의 필터링 효율(η_f)은 샘플로 유입된 입자수에 대한 필터 측면 벽에 도달한 입자수의 비로 표시하였다.

$$\eta_f = \frac{\text{측면벽에도달한입자수}}{\text{샘플유입된총입자수}} \quad (12)$$

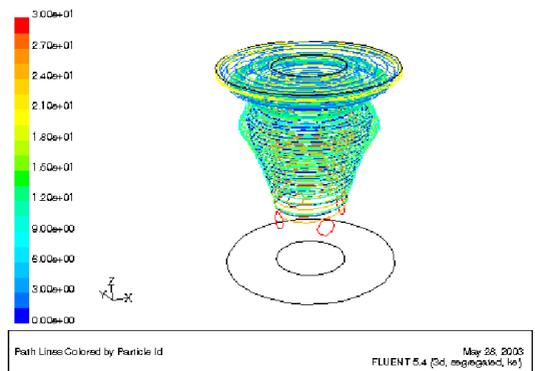


Fig. 2 Pathline of fluid flow in centrifugal filter (3500 RPM)

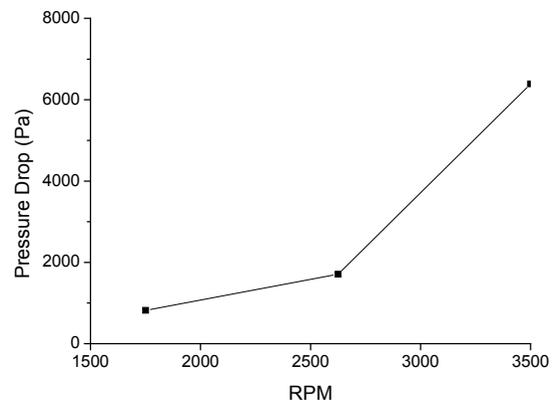


Fig. 3 Pressure drop v.s. RPM

3.2 유동장 및 압력손실

입구에서 유입된 오일은 회전하는 필터 본체에 의해 회전 운동량을 얻게 되며 하부에 위치한 출구로 나가기까지 많은 회전을 하게 된다. 이 회전하

는 유동장에 의해 불순물 입자는 원심력을 얻어 바깥 벽 쪽으로 이동하게 된다. 바깥벽에 가까이 이동된 입자들은 벽에 흡착될 확률이 높게 된다. 원심력이 충분하지 않아 오일과 같이 흘러가는 입자들은 결국 출구로 오일과 함께 배출된다. 입자들이 받는 원심력의 크기는 RPM이 크거나, 입자의 크기가 클수록, 그리고 입자의 밀도가 클수록 높아진다.

입구에서 들어와 출구까지 나가는 동안의 유동의 궤적을 나타내는 하나의 방법이 입자 하나가 움직이는 pathline을 그려보는 것이다. Fig. 2는 4개의 입구에서 각각 그린 유동의 pathline 들을 보여주고 있다.

한편, 입구부터 출구까지의 압력손실은 RPM이 높을수록 크게 되며 본 해석에서 계산한 필터의 입구에서 출구까지의 압력손실은 Fig. 3과 같다. RPM이 증가할수록 증가가 가속되는 경향을 보이며, 3500 RPM 및 3.96 kg/s의 오일 유량에서 6.39 kPa 정도의 압력손실을 보이고 있다.

3.3 필터링 효율

원심필터의 경우 입자들의 분포가 오일 유동 자체에 비해 매우 적은 체적을 차지하므로 오일의 유동장 해석을 먼저 수행하고 이 유동장을 바탕으로 입자들의 운동을 계산하여 입자들이 원심필터 벽에 닿을 경우 필터링 되는 것으로 하고, 출구를 통해 오일과 함께 나가는 입자들은 필터링 되지 않는 경우로 구분하였다. 필터링 효율에 영향을 주는 변수로 회전 속도, 입자 크기, 입자 밀도를 들 수 있다. 입자의 필터링 효율(η_f)은 식(12)와 같이 샘플로 유입된 입자 수에 대한 필터 측면 벽에 도달한 입자수의 비로 정의하였다.

입자 크기, 입자 밀도 및 RPM의 변화에 따른 필터링 효율 계산 결과를 Fig. 4~6에 나타내었다. 먼저 전체적인 경향은 입자 밀도가 클수록, 입자 크기가 클수록, 그리고 RPM이 클수록 필터링 효율이 높다. Fig. 4에서 보면 설계 RPM 3500의 경우에 대해 입자밀도 6000 kg/m³의 경우 50 μ m 이상 크기의 입자는 1회 순환으로 전량 필터링되며, 입자밀도 3000 kg/m³의 경우 75 μ m 이상 크기의 입자가 1회 순환으로 전량 필터링되며, 오

일 밀도와 유사한 입자 밀도 1000 kg/m³의 경우는 100 μ m 이상 크기의 입자만이 1회 순환으로 전량 필터링 됨을 볼 수 있다. 또한 설계 RPM 3500 및 입자밀도 6000 kg/m³의 경우 10 μ m 크기의 1회 순환 필터링 효율은 0.31 정도이다.

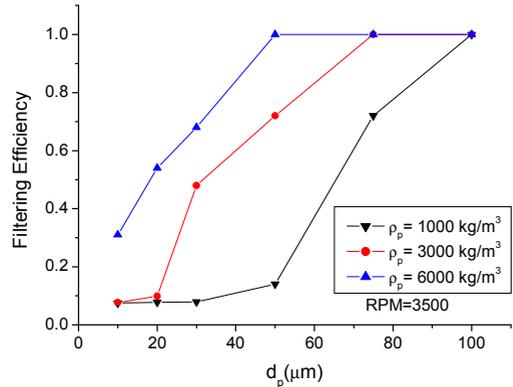


Fig. 4 Filtering Efficiency v.s. Particle Size at Various Particle Density

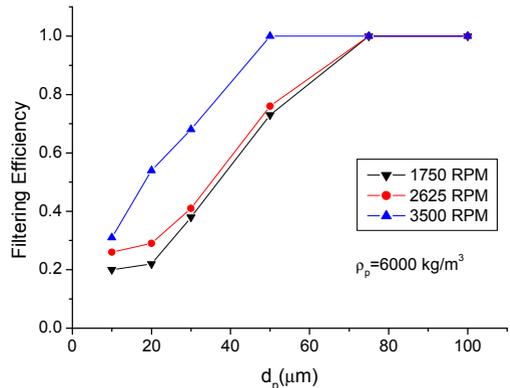


Fig. 5 Filtering Efficiency v.s. Particle Size

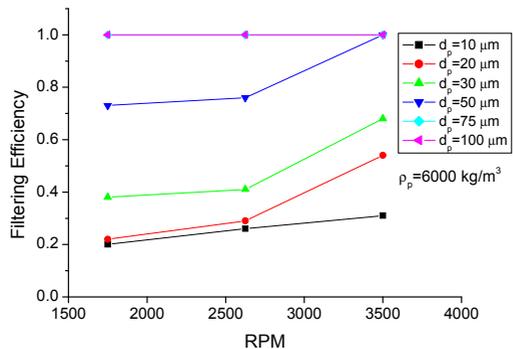


Fig. 6 Filtering Efficiency v.s. RPM

필터링 효율의 원심필터 RPM에 대한 경향은 Fig. 5에 표시한 바와 같다. 위에 이미 기술한 내용과 유사하게 입자 밀도 6000 kg/m^3 에 대하여 RPM이 클수록 필터링 효율이 높지만 설계 회전수 3500 RPM의 경우 입자 크기 $50 \mu\text{m}$ 이상에서만 필터링 효율이 1이고 그 이하 크기에서는 효율이 낮아짐을 볼 수 있다. 한편, 각 입자 크기에 있어 RPM에 따른 필터링 효율은 입자 밀도 6000 kg/m^3 에 대하여 Fig. 6에 표시한 바와 같다.

4. 결 론

이상의 원심 필터 유동장 해석 및 원심 필터 필터링 효율 분석에 대한 결과를 토대로 원심 필터 설계에 대한 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 원심 필터와 같은 고속 회전체의 유동장 해석 방법론을 상용코드인 Fluent 코드를 기반으로 구축하였다. 핵심 모델은 rotating reference frame 모델, 불순물 입자에 대한 discrete phase modeling 등이다.

(2) 원심 필터 입출구 간의 압력손실은 설계 회전수 3500 RPM, 오일 유량 3.96 kg/s 일 때 6.39 kPa 이었다.

(3) 원심 필터 필터링 효율은 입자 밀도가 클수록, 입자 크기가 클수록, 그리고 RPM이 클수록 높게 나타났다. 설계 RPM 3500 기준에서 입자 밀도 6000 kg/m^3 의 입자는 입자 크기 $50 \mu\text{m}$ 이상에서, 입자 밀도 3000 kg/m^3 의 입자는 $75 \mu\text{m}$ 이상에서, 그리고 입자 밀도 1000 kg/m^3 의 입자는 $100 \mu\text{m}$ 이상 크기의 입자가 1회 순환으로 전량 필터링 될 수 있음을 보였다.

후 기

본 연구는 지식경제부(정보통신산업진흥원) 대학 IT 연구센터 지원사업 및 공통핵심기술개발사업 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] W.S. Robertson, Lubrication in Practice, 2nd ed., Marcel Dekker, 1984.
- [2] FLUENT 5 User's Guide, Fluent Inc., 1998.
- [3] S.A. Morsi and A.J. Alexander, "An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems," J. Fluid Mechanics, Vol. 55, No. 2, pp. 193-208, 1972.
- [4] F.M. White, Fluid Mechanics, 2nd ed., McGraw-Hill, 1979.
- [5] F.P. Incropera and D.P. Dewitt, Introduction to Heat Transfer, 3rd ed., John Wiley & Sons, 1996.

저 자 소 개



방광현 (房光炫)

1958년 6월생, 1981년 서울대학교 원자핵공학과 졸업(학사), 1985년 미국 퍼듀대 핵공학과 졸업(석사), 1989년 미국 위스콘신대 핵공학과 졸업(박사), 현 한국해양대학교 기계정보공학부 교수.



김경규 (金慶奎)

1978년 10월생, 2003년 한국해양대학교 냉동공조공학과 졸업(학사), 2007년 동대학원 냉동공조공학과 졸업(석사), 현 동대학원 박사과정, (주)한조 연구원.



송영아 (宋榮娥)

1980년 3월생, 2003년 한국해양대학교 냉동공조공학과 졸업(학사), 현 (주)DSEC 근무.



김평수 (金平洙)

1961년 10월생, 1985년 한국항공대학교 전자공학과 졸업(학사), 2008년 한국해양대학교 기계시스템공학과 졸업(석사), 현 (주)한조 부장.