J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng., Vol. 32, No. 3, June 2016, pp. 101~105 ISSN 1229-4845(Print) · 2287-4666(Online)
Journal of the Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers http://Journal.kstle.or.kr

DOI http://dx.doi.org/10.9725/kstle.2016.32.3.101

그루브의 Trap 효과에 대한 CFD 해석: 제 1부 – 그루브 단면 형상의 변화

홍 성 호†

현대중공업 엔진기계사업본부

CFD Analysis of Trap Effect of Groove in Lubricating Systems: Part I – Variation in Cross-Sectional Shape of Groove

Sung-Ho Hong†

Engine & Machinery Division, Hyundai Heavy Industries

(Received March 29, 2016; Revised May 10, 2016; Accepted May 12, 2016)

Abstract – Trap effect of groove is evaluated in a lubricating system using computational fluid dynamics (CFD) analysis. The simulation is based on the standard k-ε turbulence model and the discrete phase model (DPM) using a commercial CFD code FLUENT. The simulation results are also capable of showing the particle trajectories in flow field. Computational domain is meshed using the GAMBIT pre-processor. The various grooves are applied in order to improve lubrication characteristics such as reduction of friction loss, increase in load carrying capacity, and trapping of the wear particles. Trap effect of groove is investigated with variations in cross-sectional shape and Reynolds number in this research. Various cross-sectional shapes of groove (rectangular, triangle, U shaped, trapezoid, elliptical shapes) are considered to evaluate the trap effect in simplified two-dimensional sliding bearing. The particles are assumed to steel, and defined a single particle injection condition in various positions. The "reflect" boundary condition for discrete phase is applied to the wall boundary, and the "escape" boundary condition to "pressure inlet" and "pressure outlet" conditions. The streamlines are compared with particles trajectories in the groove. From the results of numerical analysis in the study, it is found that the cross-sectional shapes favorable to the creation of vortex and small eddy current are effective in terms of particle trapping effect. Moreover, it is found that the Reynolds number has a strong influence on the pattern of vortex or small eddy current in the groove, and that the pattern of the vortex or small eddy current affects the trap effect of the groove.

Keywords – groove(그루브), cross-sectional shape(단면 형상), particle trajectory(입자 궤적), CFD(전산유체역학)

Nomenclature

H : Dimensionless depth of groove (d/c) (무차원 그루브 깊이)
K : Aspect ratio of groove (w/d) (그루브의 형상 비)
Re : Reynolds number ($\rho u(c+d)/\eta$) (레이놀즈 수)
c : Clearance (m) (틈새)
d : Depth of groove (m) (그루브의 깊이)
l_1 : Length to the groove from the left side (m) (좌측에서 그루브 까지의 거리)
l_2 : Length to the groove from the right side (m) (우측에서 그루브 까지의 거리)
u : Velocity (m/s) (속도)
w : Width of groove (m) (그루브의 폭)
p_1 : Pressure condition in left boundary (Pa) (좌측 경계에서의 압력 조건)
p_2 : Pressure condition in right boundary (Pa)

†Corresponding author : hrdragon@hhi.co.kr
Tel: +82-52-203-4930, Fax: +82-52-202-7350
◎ 이 논문은 한국윤활학회 2016년도 춘계학술대회 (2016.04.14~15/한남대학교 공과대학) 발표논문임.

(우측 경계에서의 압력 조건)

η : Viscosity of working fluid (Pa.s)
(작동 유체의 점도)

ρ : Density of working fluid (kg/m^3)
(작동 유체의 밀도)

1. 서 론

그루브 가공은 각종 베어링, 유압밸브, 시일면 등에 적용하여 윤활특성을 개선하는 방법으로 사용되고 있다. 그루브의 형태는 그 기능에 따라 Fig. 1과 같이 다양한 형태로 가공되고 있다. 그루브의 주된 기능은 유체윤활측면에서는 부하지지력 향상 또는 압력 불균일 완화이다. 그 외에도 마모입자나 불순물을 그루브 내에 가두어 세물체 연삭마모(three body abrasive wear)에 의한 손상을 방지하는 기능을 한다. 본 연구에서는 그루브의 마모입자 또는 불순물에 대한 포집(trap) 효과 측면에서 살펴보았다.

Fig. 1. Various groove types.

스풀밸브 시스템에서 스풀에 적용된 그루브의 가공에 대해 그 폭과 깊이는 틈새보다 적어도 10배 이상이 되어야 하고 그루브의 측면은 수직으로 가공이 되어야 한다고 보고되고 있다[1]. 그 외에 하수(sewer) 처리, 광산 산업(mining industries), 화학 산업(chemical industries), 강 역학(river mechanics)등에서 고체 물질 등을 유체의 흐름에서 분리하기 위해 침전물 포집 구조에 대하여 연구를 수행하고 있다. 주로 액체와 고체의 2가지 상(phase)의 유동에 대해 DPM(Discrete Phase Model) 또는 DEM(Discrete Element Model)을 이용하여 연구를 수행하였다[2-5].

DPM 모델은 Lagrangian 방법으로 입자의 궤적을 계산하는 particle tracking 이 가능하며 유체와 운동량, 에너지, 질량을 서로 교환할 수 있으며 개별 입자들간의 영향력은 고려되지 않는다. 따라서 원칙적으로 공급되는 질량유량에 관계없이 입자의 체적분율이 10% 미만인 경우 적용할 수 있는 모델이다. 연속상인 유체와 입자상의 연계 해석은 크게 두 가지 방법론으로 나눠진다. 유체의 영향이 입자의 거동에 영향을 미치지만 입자는 유체에 영향을 주지 않는 경우, 1-way coupling 방법을 통해 액상의 항력과 난류 효과를 입자의 운동량에 전달할 수 있다. 하지만 입자의 온도변화, 상변화에 의한 질량변화, 또는 파이프 라인 내 입자에 의한 마모/축적(erosion/accretion)에 대한 해석의 경우는 2-way coupling 방법을 통해 유체는 항력과 난류 효과를 통해 입자에 영향을 주고, 입자는 질량, 운동량, 에너지 방정식 등의 소스항을 통해 유체에 영향을 주도록 계산을 수행하게 된다[6].

선박용 엔진의 경우 자동차 디젤유와 유사한 LDO (Light Diesel Oil)부터 HFO(Heavy Fuel Oil)까지

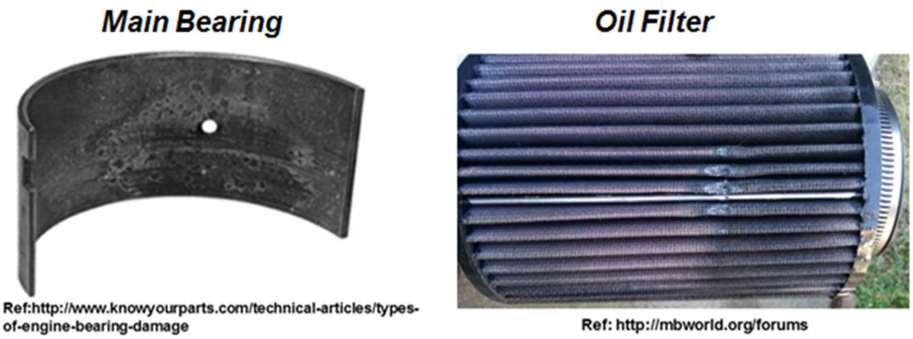

Fig. 2. Damage of machine components by foreign materials.

다양한 연료를 사용하고 있다. 저유가 시대임에도 불구하고 경기 불황으로 인해 저급유 중에서도 불순물의 함량이 많은 연료의 사용이 빈번해지고 있다. 이로 인해 Fig. 2와 같이 예전에는 자주 발생하지 않았던 이물질에 의한 기계부품의 손상이 발생한다. 따라서 그루브의 포집 효과를 활용하여 이물질에 의한 기계부품의 손상을 방지할 수 있는 설계 기술이 필요하다.

본 연구에서는 기초적인 연구로 2차원 sliding bearing을 대상으로 그루브의 단면 형상의 변화에 대한 입자의 포집효과에 대해 DPM 모델을 이용하여 분석하였다.

2. 본 론

2-1. 해석 모델

Fig. 3과 같이 간단한 2차원 sliding bearing에 대해서 해석을 수행하였다. 아래면은 고정되어 있고 윗면이 u의 속도로 움직이며 양쪽 끝의 경계압력은 p_1과 p_2이다. 그루브의 폭(w)과 깊이(d)는 동일하게 하였으며 길이 및 레이놀즈 수에 대해 식 (1)와 같이 무차원화와 정의를 하였다.

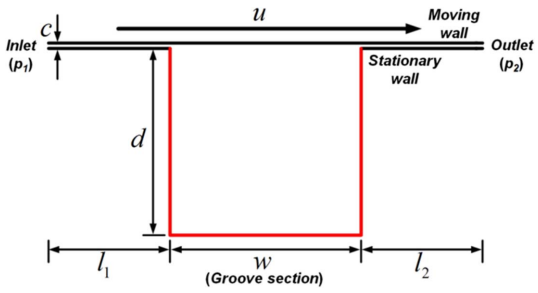

Fig. 3. Schematic of numerical model.

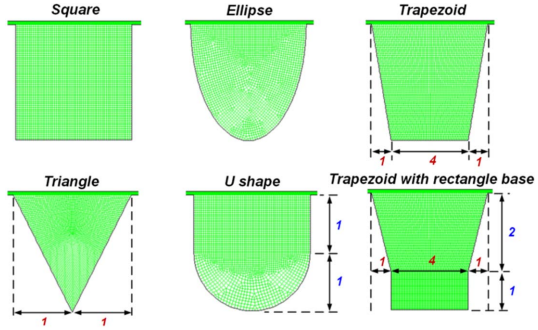

Fig. 4. Cross-sectional shapes of groove.

Table 1. Geometries and working conditions

p_1 (kPa)	p_1 (kPa)	Re	K	H
20	20	173~1384	1	30

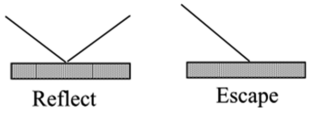

Fig. 5. Particle boundary conditions.

$$K=\frac{w}{d},\ H=\frac{d}{c},\ \mathrm{Re}=\frac{\rho u(c+d)}{\eta} \tag{1}$$

해석은 그루브의 단면 형상이 Fig. 4와 같이 정사각형(square), 타원형(ellipse), 사다리꼴(trapezoid), 이등변 삼각형(isosceles triangle), U자형(U shape), 아래는 직사각형이고 위는 사다리꼴이 조합된 형태(trapezoid with rectangle base)에 대해서 수행하였다.

2-2. 해석 방법

그루브의 포집 효과에 대해 상용 CFD 해석 프로그램인 FLUENT를 사용하였고 고체입자와 유체입자 사이의 유동에 대해서는 DPM 및 k-ε 난류모델을 이용하였다. 해석 대상 및 작동 조건은 Table 1에 나타나 있다. 해석에서는 유체의 영향이 입자의 거동에 영향을 주지만 입자는 유체에 영향을 주지 않는 경우에 대한 1-way coupling 방법을 사용하였다. 그리고 입자 경계조건으로는 Fig. 5와 같이 벽면(wall)에서는 입자가 반사되는 reflect 경계조건을 적용하였고 inlet과 outlet에서는 입자가 소멸하는 escape 경계조건을 적용하였다. 또한 입자의 주입(injection) 방법은 한 점의 위치에서 하나의 입자가 분사되는 single point injection 조건을 사용하였다. 입자는 철분입자로 밀도(density)는 8030 kg/m^{3}이고 형상은 구형으로 가정을 하였으며 입자의 지름은 10 μm이다.

2-3. 해석 결과

그루브의 단면 형상 변화에 의한 입자 포집효과에 대해 입자 궤적을 통해 살펴보았다. Fig. 6(a)는 단면 형상이 U자형과 삼각형, 정사각형인 경우에 대한 입자 궤적(particle trajectory)을 나타낸다. 빨간색 화살표는 입자가 주입된 시작시점 부근의 궤적을 나타내고 분홍색 화살표는 수치적 계산 종료 시점의 입자 궤적을 나

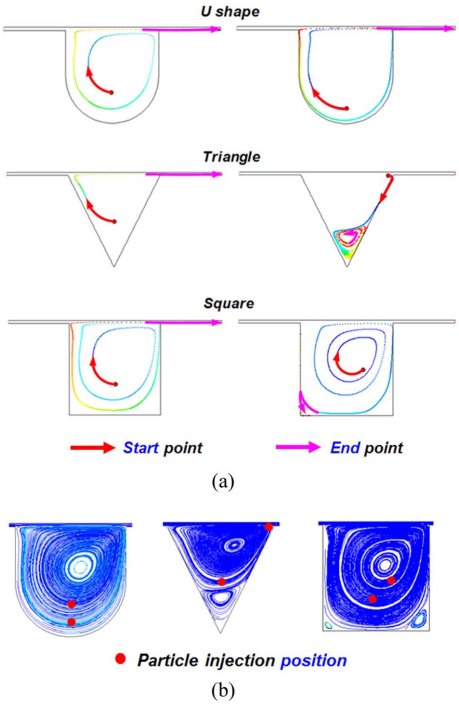

Fig. 6. Particle trajectories and streamlines (Re=691) (a) particle trajectories (b) streamlines.

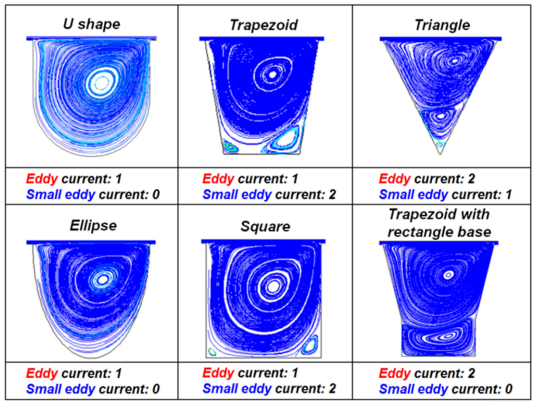

Fig. 7. Streamlines with cross-sectional shape (Re=691).

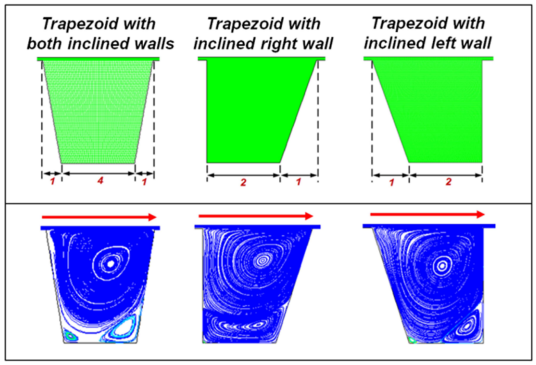

Fig. 8. Streamlines with inclined wall and moving direction of wall (Re=691).

타낸다. 단면 형상이 U자형인 경우에는 어떤 위치에 입자를 주입하더라도 출구쪽으로 입자가 빠져나가서 포집효과가 없음을 확인할 수 있다. 하지만 단면 형상이 삼각형과 정사각형인 경우에는 입자가 주입되는 위치에 따라 입자가 출구쪽으로 빠져 나가지 못하고 포집되는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 Fig. 6(b)와 같이 유선(streamline)을 통해 확인할 수 있다. 그림에서 빨간색의 점은 입자가 주입된 위치를 나타낸다. U자형의 단면 형상에는 1개의 와류(eddy current)만 발생하고 작은 와류(small eddy current)나 다른 와류는 발생하지 않으나 삼각형과 정사각형의 단면 형상에서는 2개 이상의 와류나 모서리에 작은 와류가 발생한다. 주입된 입자가 작은 와류나 다른 와류에 갇히게 되면 입자가 빠져 나오지 못하게 된다. 이런 측면에서 Fig. 7을 통해 단면 형상의 변화에 의한 유선의 변화를 살펴보았다. 단면 형상이 유선형인 U자형과 타원형의 경우에는 작은 와류가 발생하지 않으나 사다리꼴과 정사각형인 경우에는 모서리에서 작은 와류가 발생하며 삼각형과 조합형인 경우에는 다른 와류가 발생한다. 즉 단면 형상이 유선형인 경우보다는 작은 와류나 2개 이상의 와류가 발생되는 것이 입자의 포집효과 측면에서 효과적이다.

다음으로 윤활면의 운동 방향과 그루브의 경사진 벽면과의 관계에 대해 단면 형상이 사다리꼴인 경우에 대해 확인해 보았다. Fig. 8와 같이 위쪽 윤활면이 왼쪽에서 오른쪽으로 이동할 경우, 왼쪽 벽면은 수직으로 가공을 하고 오른쪽 벽면은 경사지게 가공을 하면 아래쪽에 다른 와류가 발생하여 포집효과 측면에서 효과적이다. 즉 윤활면의 주된 운동 방향에 따라 그루브의 경사진 벽의 방향을 적절히 적용을 한다면 그루브의 포집 효과를 향상 시킬 수 있다. 이 부분에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

이제까지의 결과는 레이놀즈 수가 691인 경우에 대한 해석이다. Fig. 9는 레이놀즈 수의 변화에 의한 유동의 변화를 나타낸다. 그림에서 빨간색의 십자는 상부쪽에 형성된 와류의 중심을 나타낸다. 단면 형상이 삼각형과 정사각형인 경우에는 레이놀즈 수의 변화에

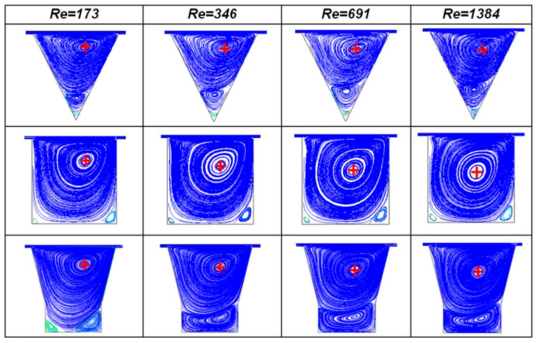

Fig. 9. Streamlines with cross-sectional shape and Reynolds number.

의해 와류의 중심이 단면의 중심으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 관성력의 증가로 인해 나타나는 현상으로 판단된다[7-8]. 아래가 직사각형이고 위가 사다리꼴로 조합된 단면 형상의 경우에도 레이놀즈 수의 증가에 의해 상부쪽 와류의 중심이 단면의 중심으로 이동하며 작은 와류들이 발달하여 새로운 와류를 발생시킨다.

즉 단면의 형상뿐만 아니라 레이놀즈 수의 변화가 입자 포집효과에 영향을 준다.

이물질 및 마모입자를 효과적으로 포집하는 그루브를 실제 제품에 적용하기 위해서는 해석으로 얻어진 최적의 그루브 단면 형상뿐만 아니라 운전 조건에 적합한 그루브의 개수와 그루브의 위치 등이 선정되어야 한다. 앞으로 이런 설계요소들을 고려하여 이물질에 의한 고착 및 마모가 발생하는 연료분사펌프 시스템에서 그루브의 포집효과를 최적화하는 연구를 수행할 예정이다.

3. 결 론

본 연구에서는 그루브의 단면 형상의 변화에 의한 입자 포집효과에 대해 DPM 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 입자 궤적과 유선을 통해 그루브의 포집효과를 평가할 수 있었다. 단면 형상이 U자형, 타원형과 같이 유선형인 경우에는 입자가 그루브 내에 포집되지 않는다. 그러나 삼각형이나 정사각형인 경우에는 2개 이상의 와류와 모서리 부근에서의 작은 와류의 발생으로 인해 입자가 포집되는 것을 확인하였다. 그 외에 레이놀즈 수, 그루브의 경사진 벽면과 운동 방향과의 관계도 입자의 포집효과에 영향을 준다. 이 연구를 바탕으로 3차원 형상에 대한 그루브의 포집효과에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

References

[1] Merritt, H. E., “Hydraulic Control Systems”, *John Wiley & Sons, Inc*., pp. 108-111, 1967.

[2] Kaushal, D. R., Thinglas, T., Tomita, Y., Kuchii, S., Tsukamoto, H., “Experimental Investigation on Optimization of Invert Trap Configuration for Sewer Solid Management”, *Powder Technology*, Vol. 215-216, pp. 1-14, 2012.

[3] Buxton, A., Saul, A., Stovin, V., Tait, S., “Developments in a Methodology for the Design of Engineered Invert Traps in Combined Sewer Systems”, Water Science and Technology, Vol. 45, No. 7, pp. 133-142, 2002.

[4] Daoyin, L., Changsheng, B., Xiaoping, C., “Development and Test of CFD-DEM Model for Complex Geometry: A Coupling Algorithm for Fluent and DEM”, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 58, pp. 260-268, 2013.

[5] Kharoua, N., Alshehhi, M., Khezzar, L., “Prediction of Black Powder Distribution in Junctions using the Discrete Phase Model”, Powder Technology, Vol. 286, pp. 202-211, 2015.

[6] FLUENT, FLUENT 15.0 Manual, 2013.

[7] Hong, S. H., Son, S. I., and Kim, K. W., “Study on Lubrication Characteristics of Spool Valve with Various Cross-sectional Groove Shapes”, *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 29, No. 3, pp. 149-159, 2013.

[8] Park, T. J., Hwang, Y. G., “Lubrication Analysis of Hydraulic Spool Valve with Groove Cross Sectional Shapes”, *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 25, No. 1, pp. 13-19, 2009.