

## 그루브의 Trap 효과에 대한 CFD 해석: 제2부 – 그루브 모서리의 곡률반경 변화

홍성호<sup>†</sup>

동국대학교 창의융합공학부 기계시스템공학전공 조교수

### CFD Analysis of Trap Effect of Groove in Lubricating Systems: Part II – Variation in Radius of Curvature of Groove Edge

Sung-Ho Hong<sup>†</sup>

Assistant Professor, Dept. of Mechanical System Engineering, Dongguk University-Gyeongju

(Received October 27, 2020 ; Revised November 12, 2020 ; Accepted November 16, 2020)

**Abstract** – Numerical investigation of the groove trap effect with variation in the groove-edge radius of curvature is presented here. The trap effect is evaluated in a two-dimensional sliding bearing using computational fluid dynamics (CFD). This simulation is based on the discrete phase model (DPM) and standard  $k - \epsilon$  turbulence model using commercial CFD software, FLUENT. The numerical results are evaluated by comparisons with streamlines and particle trajectories in the grooves. Grooves are applied to various lubrication systems to improve their lubrication characteristics, such as load carrying capacity increment, leakage reduction, frictional loss reduction, and preventing three-body abrasive wear due to trapping effect. This study investigates the groove trapping effect for various groove-edge radius of curvature values and Reynolds numbers. The particle is assumed to be made of steel, with a circular shape, and is injected as a single particle in various positions. One-way coupling is used in the DPM model because the single particle injection condition is applied. Further, the “reflect” condition is applied to the wall boundary and “escape” condition is used for the “pressure inlet” and “pressure outlet” boundaries. From the numerical results, the groove edge radius is found to influence the groove trap effect. Moreover, the groove trap effect is more effective when applying the groove edge radius.



© Korean Tribology Society 2020. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

**Keywords** – CFD(전산유체역학), edge(모서리), groove(그루브), trap effect(포집 효과)

#### Nomenclature

$K$  : Aspect ratio of groove ( $L_3/L_2$ ) (그루브 형상비)  
 $L_1$  : Length to the groove from the left and right side (mm) (좌, 우측 경계로부터 그루브까지 거리)

$L_2$  : Depth of groove (mm) (그루브의 깊이)  
 $L_3$  : Width of groove (mm) (그루브의 폭)  
 $P_1$  : Pressure condition in the left boundary (Pa) (좌측 경계에서의 압력 조건)  
 $P_2$  : Pressure condition in the right boundary (Pa) (우측 경계에서의 압력 조건)  
 $R_1$  : Radius of curvature of groove edge (mm) (그루브 모서리의 곡률반경)  
 $Re$  : Reynolds number ( $(\rho u(c+L_2+R_1)/\eta)$ ) (레이놀즈 수)

<sup>†</sup>Corresponding author: Sung-Ho Hong

Tel: +82-54-770-2211, Fax: +82-54-770-2870

E-mail: hongsh@dongguk.ac.kr

<https://orcid.org/0000-0002-3445-0646>

- $c$  : Clearance (mm) (틈새)
- $u$  : Velocity (m/s) (속도)
- $\eta$  : Viscosity of working fluid (Pa·s) (작동 유체의 점도)
- $\rho$  : Density of working fluid (kg/m<sup>3</sup>) (작동 유체의 밀도)

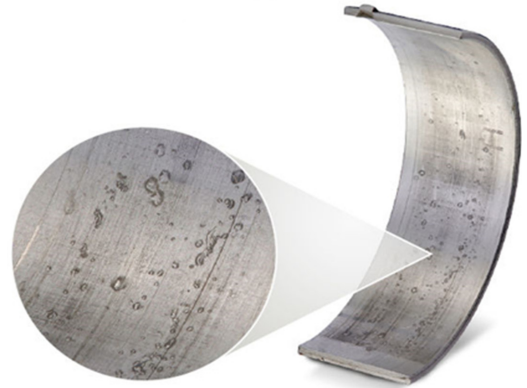
## 1. 서 론

베어링, 펌프, 유압 밸브 같은 기계요소 또는 시스템에서 윤활특성을 개선하기 위해 Fig. 1과 같이 다양한 형태의 그루브가 적용된다. 그루브의 주된 기능은 유체윤활측면에서 부하지지력 향상 또는 압력 불균형 완화이다[1]. 그 외에도 그루브는 마찰력을 줄이고 윤활유를 원활하게 공급하며 마모 입자나 불순물을 그루브에 가두어 둠으로써 Fig. 2와 같은 세물체 연삭마모(three body abrasive wear)를 방지하는 기능[1]도 있다. 본 연구에서는 그루브가 마모입자 또는 불순물을 가두어 두는 효과 측면에서 살펴보았다. 스푼 밸브(spool valve) 시스템에서 유체 고착(hydraulic lock)을 방지하기 위해 스푼의 원주방향으로 그루브를 가공하고 있으며 그루브의 폭과 깊이는 틈새보다 적어도 10배 이상이 되어야 하고 그루브의 측면은 수직으로 가공되어야 한다고 보고되고 있다[2]. 그 외에도 하수(sewer) 처리 분야, 화학이나 광산 산업에서 큰 이물질이나 침전물을 처리하는 분야, 강물의 흐름에서 돌 또는 자갈을 분리하는 분야에서 이 연구는 진행되고 있다. 이 분야에서는 유체의 흐름에서 이물질을 분리, 수거 하기 위한 포집 장치의 형상에 대하여 CFD 해석이 수행되었다[3-6]. 저자는 2차원 미끄럼 베어



Ref: <https://www.machinedesign.com/motors-drives/article/21831746/bearing-killers-preventing-the-top-causes-of-bearing-damage>

(a)



Ref: <https://www.ms-motorservice.com/en/technipedia/post/damage-to-engine-bearings-due-to-the-influence-of-particles/>

(b)

**Fig. 2. Wear particle and damage of machine component by foreign materials. (a) wear particle in the roller bearing (b) damage in the journal bearing**



**Fig. 1. Various types of groove.**

링을 대상으로 그루브의 단면 형상의 변화에 의한 마모 입자를 포집(trap)하는 효과에 대해 CFD 해석을 수행하였다. 이때 그루브 내에서 큰 와류(vortex)나 작은 와류(small eddy current)가 많이 발생하는 형상이 마모입자의 포집 효과가 뛰어남을 보였다. 즉 유선형의 단면형상은 작은 와류의 발생을 방지하여 그루브 내의 원활한 유동을 발생시켜 마모입자나 불순물에 대해 포집 효과가 현저히 떨어졌다[1]. 그루브의 포집 효과에 대해서는 주로 액체와 고체의 2가지 상(phase)을 가진 유동에 대해 DPM(Discrete Phase Model) 또는 DEM(Discrete Element Model)을 이용하여 연구를 수행하였다[1, 3-6].

이 연구에서 사용한 DPM은 Lagrangian 방법으로 입자의 궤적을 계산하는 것이 가능하며 유체와 고체 물질 간의 운동량, 에너지를 서로 교환할 수 있으며 개별 입자들 간의 영향력이 고려되지 않는다. 그리고 DPM은

입자와 유동 간의 상호 작용 측면에서 유체가 입자의 거동에 영향을 주지만 입자는 유체의 유동에 영향을 주지 않는 one-way coupling 방법을 사용하였다. 본 해석은 지정된 곳에서 하나의 입자를 주입(injection)하는 방법을 사용하였기에 one-way coupling이 적절하다. 그리고 그루브 내의 유동을 평가하기 위해 난류 모델인  $k - \epsilon$  모델을 적용하였다[1,7].

선박유와 같이 불순물이 많이 함유된 저급유를 사용하는 선박용 엔진 뿐만 아니라 기계 사용 중 발생한 마모입자를 제거하거나 적절하게 처리하지 못하면 또 다른 마모를 발생시키거나 큰 손상으로 이어질 수 있으므로 기계시스템의 신뢰성 향상 측면에서 마모입자를 포집하는 그루브의 설계가 필요하다. 따라서 본 연구는 그루브의 포집 효과에 대한 연구의 일환으로 그루브 모서리의 곡률이 포집 효과에 어떠한 영향을 미치는지 살펴 보았다. 또한 기존 문헌[2] 중, 스폴밸브에 적용된 그루브에 관한 서술에서 그루브의 측면이 수직으로 가공되어야 한다고 명시되었는데 이 부분에 대한 결과 비교를 하고자 한다.

2-1. 해석 모델

해석 모델은 Fig. 3과 같이 2차원 미끄럼 베어링이며 이때 윗면은  $u$ 의 속도로 병진운동을 하고 아래면은 고정되어 있다. 그루브의 모서리에  $R_1$ 의 곡률 반경을 가지 고 양쪽 끝의 경계압력은  $P_1$ 과  $P_2$ 이다. 그루브의 깊이와 폭은  $L_2$ ,  $L_3$ 이며 길이비를 나타내는 무차원수와 레이놀즈 수는 식 (1)과 같다. 여기서  $K$ 는 그루브의 폭과 깊이의 길이비를 나타내며  $Re$  수는 관성력과 점성력의 비를 나타내는 무차원 수이다.

2-2. 해석 방법

해석에서는 상용 CFD 해석 프로그램인 FLUENT 18.0 version [7]을 사용하였으며 고체 입자와 유체의 유동에 대해서는 DPM 및  $k - \epsilon$  난류 모델을 적용하였다. DPM

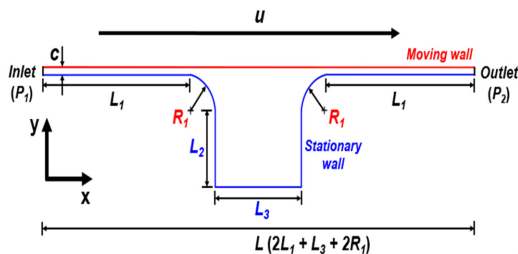


Fig. 3. Schematic of numerical model [8].

Table 1. Specification of solid particle

Material	Shape	Size ( $\mu\text{m}$ )
steel ( $\rho = 8030 \text{ kg/m}^3$ )	Sphere	10

Table 2. Geometries and working conditions

$c$ (mm)	$L_1$ (mm)	$L_2$ (mm)	$L_3$ (mm)	$R_1$ (mm)
0.1	4.5~6	2~6	3~6	0~2
$P_1$ (kPa)	$P_2$ (kPa)	$u$ (m/s)	$K$	$Re$
20	20	0.312~31.2	0.5~2	69~6900

의 유체와 고체 입자간의 상호 영향성 측면에서 유체는 고체 입자에 영향을 주지만 고체 입자는 유체에 영향을 주지 않는 경우에 대한 1-way coupling 방법을 사용하였다. 그리고 입자의 경계조건으로 벽면에서는 입자가 반사되는 reflect 조건을 적용하였고 양쪽 경계인 inlet과 outlet에서는 입자가 소멸하는 escape 조건을 적용하였다. 고체 입자의 주입은 지정된 하나의 위치에서 입자를 분사하는 single point injection 조건을 사용하였다[1]. 해석에 사용된 입자는 Table 1과 같다. 그리고 해석에 사용된 베어링의 형상과 작동 조건은 Table 2와 같다. 양쪽 경계의 압력 조건은 동일하게 하고 그루브의 폭과 깊이의 길이비를 나타내는  $K$  값을 0.5~2로 다양하게 변화 하여 해석을 수행하였다. 그리고 그루브 모서리의 곡률 반경은 0~2 mm까지 변화시키면서 곡률이 가공되지 않은 경우와 가공된 경우에 대해서 비교 해석을 수행하였다.

$$K = \frac{L_3}{L_2}, Re = \frac{\rho u (C + L_2 + R_1)}{\eta} \quad (1)$$

2-3. 해석 결과

그루브 모서리에 곡률이 가공된 경우와 가공되지 않은 경우에 대한 포집 효과에 대해 살펴보았다. Fig. 4는 그루브 내에 9개의 지점에서 입자를 주입 했을 때 그루브 모서리의 곡률 유무에 따라 포집 효과가 어떻게 변화 하는지를 입자 궤적(particle trajectory)으로 표시하였다. 왼쪽 의 그림들은 그루브 모서리의 곡률 반경이 1 mm 인 경우에 입자의 주입 위치에 따른 입자 궤적을 보여주고 오른쪽의 그림들은 그루브 모서리에 곡률이 없는 경우에 대한 입자 궤적을 보여준다. 이때 그루브의 형상을 나타내는  $K$ 는 2이고  $Re$ 수는 690으로 일정하다. 그림에서 파란색 점선원은 그루브의 오른쪽 모서리 부분을 나타낸다. 입자 궤적을 살펴보면 왼쪽 그림들에서 입자들이 빠져 나가지 못하는 반면에 오른쪽 그림에서는 빨간색 실선원 부분에서 나타나듯이 입자들이 빠져 나가는 것을 확인할 수 있다. 이는 그루브 모서리에 곡률이 가

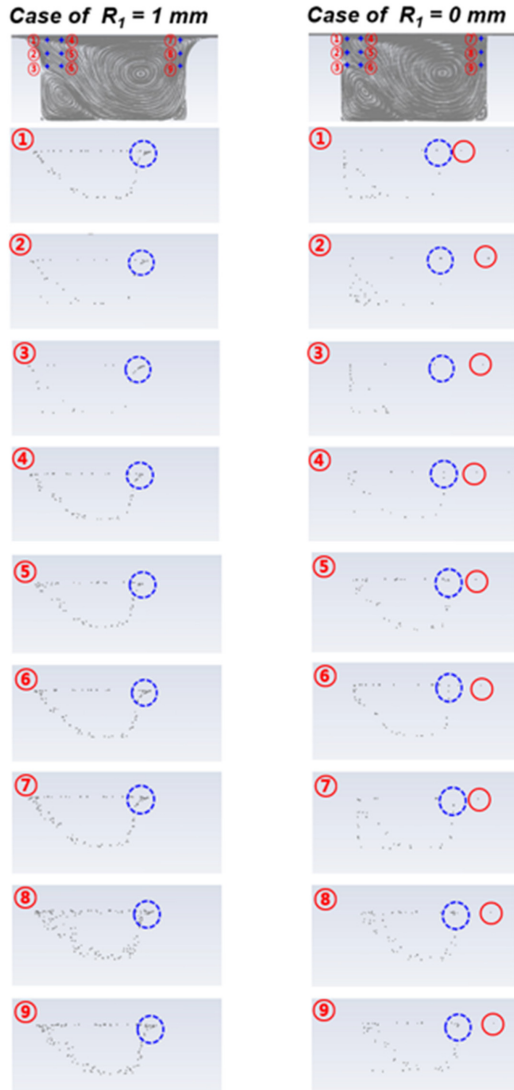


Fig. 4. Particle trajectories ( $K = 2$ ,  $R_1 = 0\sim 1\text{mm}$ ,  $Re = 690$ ).

공된 경우에서 모서리 부분의 곡률로 인해 그루브 상부의 유동이 활성화되어 입자들이 빠져나가지 못하게 되는 것을 Fig. 5의 streamline을 통해 확인된다. Fig. 6은  $Re$ 수가 690이고  $K$ 가 2인 경우, 그루브 모서리 곡률 반경의 변화에 따른 유선과 입자 궤적을 나타낸다. 곡률 반경이 증가하면 곡률이 가공된 그루브의 상부 유동에 약간의 변화는 있지만 포집효과에는 거의 차이가 없다. 즉 어느 범위의 곡률이 그루브의 모서리에 가공될 경우, 가공을 하지 않은 경우에 비해 포집 효과가 양호하다는 것을 의미한다. Fig. 7은  $Re$ 수의 변화에 따라 그루브 모서리에 곡률 반경이 가공된 경우와 가공되지 않은 경우에

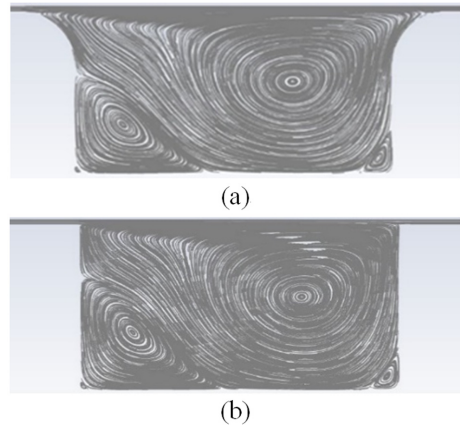


Fig. 5. Streamlines ( $K = 2$ ,  $R_1 = 0\sim 1\text{ mm}$ ,  $Re = 690$ ). (a)  $R_1 = 1\text{ mm}$  (b)  $R_1 = 0$

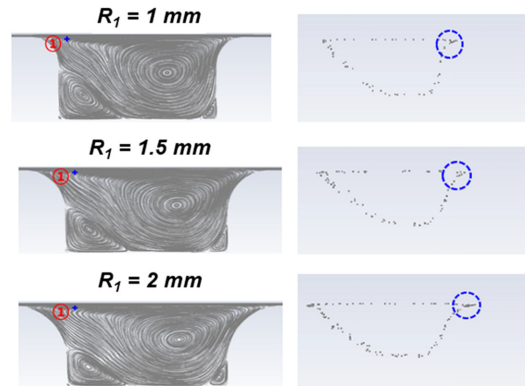


Fig. 6. Streamlines and particle trajectories with radius of curvature in groove edge ( $K = 2$ ,  $R_1 = 1\sim 2\text{ mm}$ ,  $Re = 690$ ).

대해 입자 궤적을 나타낸다. 곡률 반경이 가공된 경우는  $R_1$ 이 1 mm로 일정하다. 그리고 모든 경우에  $Re$ 수도 690으로 일정하다. 그림에서 파란색 점선원은 그루브의 오른쪽 모서리 부분을 나타내고 빨간색 실선원은 그루브를 빠져나간 입자를 나타낸다. 빨간색 실선원이 표시되어 있는 경우는 그루브의 포집 효과가 양호하지 않다는 것을 의미한다.  $Re$ 수가 69, 690이고 그루브 모서리에 곡률이 가공된 경우에는 입자의 포집 효과가 있지만 곡률이 가공되지 않은 경우에는 입자의 포집 효과가 나타나지 않는다.  $Re$ 수가 6900으로 상대적으로 큰 경우에는 그루브 모서리에 곡률이 가공되어 있어도 입자가 빠져나가는 것을 확인할 수 있다. 즉 유동의 유동 속도 같은 관성력이 증가하면 그루브 모서리의 곡률에 의한 포집 효과의 기능을 상실함을 알 수 있다. Fig. 8은 그루브의 폭

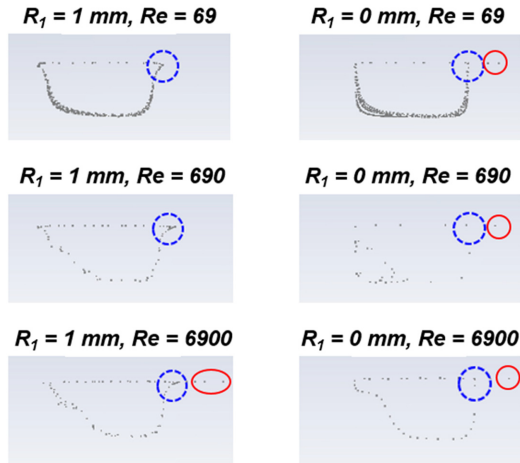


Fig. 7. Particle trajectories with radius of curvature in groove edge and Reynolds number ( $K=2$ ,  $R_1=0, 1$  mm,  $Re=69\sim 6900$ ).

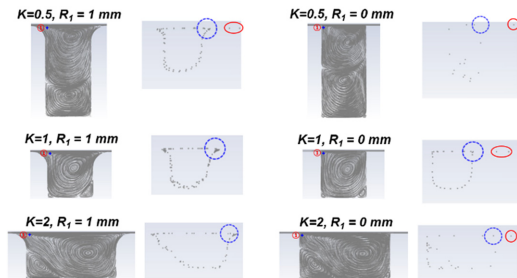


Fig. 8. Streamlines and particle trajectories with radius of curvature in groove edge ( $R_1=1\sim 2$  mm,  $Re=690$ ).

과 깊이의 비를 나타내는  $K$ 의 변화에 의한 유선과 입자 궤적을 나타낸다.  $K$ 가 1인 경우는 그루브의 폭과 깊이의 길이가 같은 경우이고 1보다 작은 경우는 그루브의 깊이가 긴 경우이며 1보다 큰 경우는 그루브의 폭이 큰 경우이다. 여기에서도 파란색 점선원은 그루브의 오른쪽 모서리 부분을 나타내고 빨간색 실선원은 그루브를 빠져나간 입자를 나타낸다.  $K$ 가 1보다 작은 형상에서는 그루브 모서리의 곡률 가공 유무와 상관없이 포집 효과가 떨어진다는 것을 알 수 있다. 그러나  $K$ 가 1이상인 경우에는 그루브 모서리에 곡률이 가공되지 않은 경우보다 곡률이 가공된 경우에 입자의 포집 효과가 뛰어나다. 그루브의 형상이 깊이보다 폭이 큰 경우에 그루브의 모서리에 곡률이 가공됨으로써 입자의 포집 효과가 나타난다. 이는 그루브의 형상이 세로로 긴 형상일 때는 그루브 내 상부 와류의 크기가 커짐에 따라 입자의 포집 효과가 현

저히 떨어지고 또한 그루브 모서리의 곡률이 가공되더라도 유동에 큰 변화를 주지 못하기 때문이다.

기존 문헌[2]에서는 그루브의 측면을 수직으로 가공되어야 한다고 되어 있지만 본 연구 결과에서는 그루브 모서리를 수직으로 가공하는 경우보다는 모서리에 적당한 곡률로 가공함으로써 입자의 포집 효과가 뛰어난을 확인하였다. 물론 3차원 해석과 간단한 실험을 통해 추가적으로 확인할 필요가 있어 앞으로 이와 관련된 해석과 실험을 수행할 예정이다.

### 3. 결 론

본 연구는 2차원 미끄럼 베어링을 대상으로 CFD 해석을 수행하여 그루브 모서리의 곡률 반경( $R_1$ ) 변화에 의한 입자의 포집 효과에 대해 살펴보았다. 그 외에도 그루브의 형상비( $K$ ),  $Re$  수의 변화에 대해서도 그루브의 포집 효과를 평가하였다.  $Re$  수가 크지 않은 경우에는 그루브 모서리의 곡률이 있는 경우에 입자 포집 효과는 뛰어나지만  $Re$  수가 큰 경우에는 그루브 상부 유동의 발달로 그루브 모서리에 곡률이 가공되더라도 입자의 포집 효과가 떨어진다. 그래서  $Re$  수가 큰 경우에 그루브의 포집 효과를 개선하기 위해서는 그루브의 개수나 형상의 변화 같은 추가적인 연구가 필요하다. 그리고 그루브의 형상이 깊이보다 폭이 긴 형상인 경우, 그루브 모서리에 곡률이 가공되면 그루브의 입자 포집 효과가 뛰어나다.

### Acknowledgements

본 연구는 한국연구재단 기초연구사업연구비 (2018 R1C1B5046698) 지원으로 이루어졌음.

### References

- [1] Hong, S. H., "CFD analysis of trap effect of groove in lubricating systems: Part I – variation in cross-sectional shape of groove", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.32, No.3, pp.101-105, 2016, <https://doi.org/10.9725/kstle.2016.32.3.101>
- [2] Merritt, H. E., "Hydraulic Control Systems", *John Wiley & Sons, Inc.*, pp.108-111, 1967.
- [3] 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.
- [4] Buxton, A., Saul, A., Stovin, V., Tait, S., "Develop-

- ments 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] FLUENT, FLUENT 18.0 Manual, 2019.
- [8] Cho, J. I., Hong, S. H., “CFD analysis of trap effect of groove in lubrication systems-variation in radius of curvature of groove edge”, Proc. Autumn Conf. Korean Tribol. Soc., Pusan, Korea, October 2019.