

연료분사펌프의 윤활 특성 개선: 제2부 - 그루브의 적용

홍성호^{1*} · 이보라² · 조용주²

¹현대중공업 엔진기계사업본부, ²부산대학교 기계공학부

Improvement of the Lubrication Characteristics of Fuel Injection Pump for Medium-Speed Diesel Engines: Part II - Application of Grooves

Sung-Ho Hong^{1*}, Bora Lee² and Yongjoo Cho²

¹Engine & Machinery Division, Hyundai Heavy Industries

²Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received August 18, 2015; Revised September 21, 2015; Accepted September 25, 2015)

Abstract – This study evaluates the effect of grooves on the stem part of a plunger on the lubrication characteristics of a fuel injection pump (FIP) by using hydrodynamic lubrication analysis. The current study uses the two-dimensional Reynolds equation to evaluate the changes in lubrication characteristics with variations in clearance, viscosity, and grooves for a laminar, incompressible, and unsteady state flow. This study investigates the lubrication characteristics by comparing the dimensionless minimum film thickness or the film parameter, which is the ratio of the minimum film thickness to surface roughness. The analysis method for the groove section differs depending on the depth of the groove. For instance, in the case of a shallow groove, the film thickness equation considers the depth of the groove, while in the case of a deep groove, it considers the flow continuity. The lubrication characteristics of the FIP are more sensitive to changes in the groove width than to changes in other design variables. Moreover, the application of a groove is more effective under low viscosity conditions. The smaller the distance from the edge of the stem part to the first groove in the case of shallow grooves, the better are the lubrication characteristics of the FIP. In contrast, in the case of deep grooves, the lubrication characteristics of the FIP improve as the distance increases. The application of shallow grooves is more effective for improving the lubrication characteristics than the application of deep grooves.

Keywords – medium-speed diesel engine(중속 디젤 엔진), fuel injection pump(연료분사펌프), groove(그루브), clearance(간극), minimum film thickness(최소유막두께)

Nomenclature

A : Dimensionless clearance of stem part
(stem 부의 무차원 간극)
 B : Dimensionless clearance of head part
(head 부의 무차원 간극)

C : Dimensionless clearance (c/c_0) (무차원 간극)
 H : Dimensionless film thickness (h/c_0)
(무차원 유막두께)
 H_m : Dimensionless minimum film thickness (h_m/c_0)
(무차원 최소유막두께)
 H_2 : Dimensionless groove depth (h_2/c_0)
(무차원 그루브 깊이)
 L_1 : Dimensionless distance from edge of stem part to the first groove (l_1/l_0) (Stem 부의 선단으로부터 첫번째 그루브까지의 무차원 길이)

*Corresponding author : hdragon@hhi.co.kr

Tel: +82-52-203-4930, Fax: +82-52-202-7350

© 이 논문은 한국윤활학회 2015년도 추계 학술대회 (2015.10.14~16/대명리조트 경주) 발표논문임.

- L_2 : Dimensionless width of groove (l_2/l_0)
(무차원 그루브의 폭)
- L_3 : Dimensionless distance between grooves (l_3/l_0)
(그루브와 그루브 사이의 무차원 간격)
- N : Number of groove (그루브 개수)
- \bar{Q} : Dimensionless flow rate (Q/Q_0) (무차원 유량)
- Q_1 : Inlet flow rate (m^3/s) (그루브에 유입되는 유량)
- Q_2 : Outlet flow rate (m^3/s)
(그루브에서 유출되는 유량)
- R : Dimensionless plunger radius (r_0/l_0)
(무차원 플런저 반경)
- R_q : Root mean square deviation (m) (표면 조도)
- R_{q1} : Root mean square deviation of plunger (m)
(플런저의 표면 조도)
- R_{q2} : Root mean square deviation of barrel (m)
(배럴의 표면 조도)
- Z : Dimensionless axial direction (z/c_0)
- c : Clearance (m) (간극)
- e : Eccentricity (m) (편심량)
- h : Fluid film thickness (m) (유막두께)
- h_2 : Depth of groove (m) (그루브의 깊이)
- h_m : Minimum film thickness (m) (최소유막두께)
- l_1 : Distance from edge of stem part to the first groove (m) (Stem 부의 선단으로부터 첫번째 그루브 까지의 길이)
- l_2 : Width of groove (m) (그루브의 폭)
- l_3 : Distance between grooves (m)
(그루브와 그루브 사이의 간격)
- p : Fluid film pressure (Pa) (유막압력)
- p_0 : Atmospheric pressure (Pa) (대기압)
- z : Axial direction (m) (축 방향)
- ε : Eccentricity ratio (e/c) (편심률)
- λ : Film parameter (h_m/R_q) (유막계수)
- θ : Circumferential direction (원주 방향)

1. 서 론

발전 또는 선박의 추진용으로 사용되는 중속 디젤 엔진에서 연료분사펌프는 핵심적인 요소이다. 연료분사펌프는 연료탱크로부터 공급된 연료를 압축하여 인젝터로 공급하는 장치이다. 참고문헌[1]에서 언급한 바와 같이 최근 선박용 디젤 엔진에서는 연소 효율 및 스모크 발생 저감을 위하여 연료분사압력의 고압화가

되어 가는 추세이고 고유가에 따른 저질유 사용의 확대에 의해 연료분사장치의 내구수명이 크게 감소되는 문제가 발생되고 있다[2-4]. 또한 부적절한 간극 설계나 락커의 발생으로 고착(stick)이 발생하고 있다고 보고하고 있다[5].

기존의 연료분사펌프에 대한 윤활해석 연구에 대해서는 참고문헌[1, 6-8]에 나타나 있다.

본 연구에서는 윤활시스템에서 윤활특성을 개선하는 방법들 중의 하나인 그루브를 연료분사펌프에 적용하고자 한다. 그루브는 열전달 특성의 개선[9], 베어링의 마찰저감 및 부하지지력 향상을 위한 방안[10-13]으로 활용되고 있다. 그 외에도 실린더 라이너 및 시일 면에 적용되어 점성 마찰력의 감소 및 동적 안정성의 확보에 기여한다[14-15]. 또한 탄성유체윤활을 하는 시스템에서도 그루브를 적용함으로써 토크(torque) 및 마찰감소의 효과를 얻게 된다[16-17]. 연료분사펌프와 유사하게 왕복 운동을 하는 스톱 밸브, 피스톤 펌프, 리니어 압축기에서도 윤활특성을 개선하고자 그루브를 적용하고 있다[18-21]. 스톱 밸브에서 원주상 그루브는 스톱 주위의 불균일한 압력을 균일하게 하기 위한 오일의 통로 역할과 함께 불순물을 저장하는 역할을 수행한다[22].

연료분사펌프의 내구성을 확보하기 위해서는 적절한 유막이 확보되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 연료분사펌프의 고착 방지 및 윤활특성을 개선하기 위한 방안으로 그루브가 적용된 시스템에 대해 최소유막두께 측면에서 윤활특성을 평가하였다.

2. 본 론

2-1. 연료분사펌프의 윤활특성 평가

연료분사펌프에서 그루브가 적용된 플런저에 대해 유체윤활해석을 수행하여 윤활특성을 파악하였다. 그루브의 깊이가 얇은 경우와 깊은 그루브로 나누어 해석을 수행하였으며, 점도, 간극, 그루브의 위치 및 형태의 변화에 의한 최소유막두께 및 유막계수의 변화를 살펴보았다.

2-1-1. 유체윤활해석

배럴과 플런저 사이의 윤활영역에 대하여 참고문헌[1]과 동일한 해석방법으로 비정상상태 2차원 레이놀즈 방정식과 레이놀즈 경계조건을 이용하여 해석을 수행하였다. 이때 윤활면의 탄성변형은 고려하지 않았으

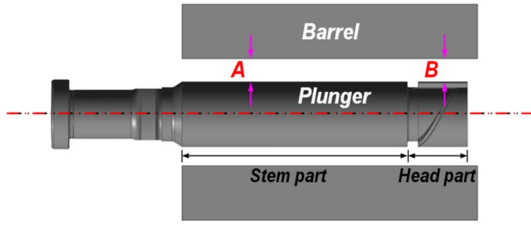


Fig. 1. Dimensionless clearance of stem part (A) and head part (B) [1, 4].

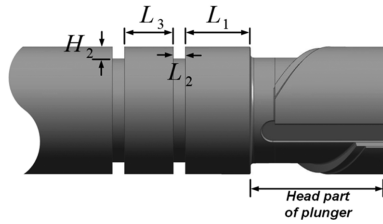


Fig. 2. Groove geometry of plunger.

며 시간에 따른 플런저의 속도 변화 및 연료의 압력변화를 고려하였다. 그리고 spill port의 압력변화 및 배럴 그루브의 위치 및 압력 조건을 고려하여 해석을 수행하였다.

1) 해석 모델

윤활해석을 수행한 모델 및 기하학적 형상 및 경계 조건은 참고문헌[1]에 나타나 있다. 간극은 Fig. 1과 같이 플런저의 stem부(A)와 head부(B)로 구분하여 해석을 수행하였다. 플런저의 stem부에 그루브를 가공한 모델은 Fig. 2와 같으며 주요설계 인자는 stem부의 선단으로부터 첫번째 그루브까지의 거리 (\$L_1\$), 그루브의 폭과 깊이 (\$L_2, H_2\$), 그루브와 그루브 사이의 거리 (\$L_3\$), 그리고 그루브의 개수 (\$N\$)이다.

해석에 사용된 지배방정식과 무차원 파라미터는 참고문헌[1]과 동일하다.

플런저 상단 중심의 좌표가 Fig. 3와 같이 (\$e, \theta\$)일 때, 플런저 최하단으로부터 길이 \$z\$이고 \$x\$축으로부터 원주 방향으로 \$\phi\$인 위치에서의 무차원 유막 두께식은 식 (1)와 같다.

$$H(Z, \theta) = 1 + \varepsilon(Z)\sin(\phi - \theta) + H_2 \quad (1)$$

여기서 \$\varepsilon\$는 플런저 상부 끝단의 편심률을 의미한다. 편심률은 head부의 간극에 대한 편심량(\$e\$)의 비를 의미한다. 그리고 \$H_2\$는 그루브가 가공된 영역에서 그루브의 무차원 깊이를 나타낸다. 그루브의 깊이가 얇은 경우는 식 (1)과 같이 기존의 유막두께에 그루브의 깊

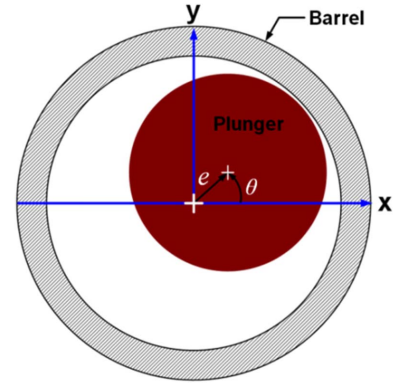


Fig. 3. Plunger position in the barrel [1].

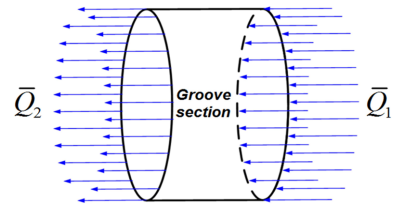


Fig. 4. Continuity of flow rate.

이를 더하는 방식으로 계산을 수행하였으나 그루브의 깊이가 깊은 경우는 Fig. 4와 같이 그루브의 양쪽 경계에서 유입되는 유량과 유출되는 유량이 같다는 유량의 연속성(식 2)을 이용하여 그루브 내의 압력을 계산하였다.

$$\int \bar{Q} dX = \bar{Q}_1 - \bar{Q}_2 = 0$$

$$\bar{Q}_1 = \bar{Q}_2 = \int_0^{2\pi} \left(-\frac{H\partial P}{2\partial Z} + \frac{1}{H} \right) d\theta dz \quad (2)$$

2) 해석 결과

그루브가 가공된 연료분사펌프의 윤활특성은 무차원 최소유막두께 또는 식 (3)와 같이 한 주기에서의 최소 유막두께와 표면조도의 비율인 유막계수로 평가를 하였다. 표면조도는 식 (4)와 같이 플런저와 배럴의 조도에 의해 구해지는 합성의 표면조도(\$R_q\$)를 사용한다. 여기서 \$R_{q1}\$와 \$R_{q2}\$는 플런저와 배럴의 표면 조도를 각각 의미한다[1, 4].

$$Film \ parameter(\lambda) = \frac{Minimum \ film \ thickness(h_m)}{Surface \ roughness(R_q)} \quad (3)$$

$$R_q = \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2} \quad (4)$$

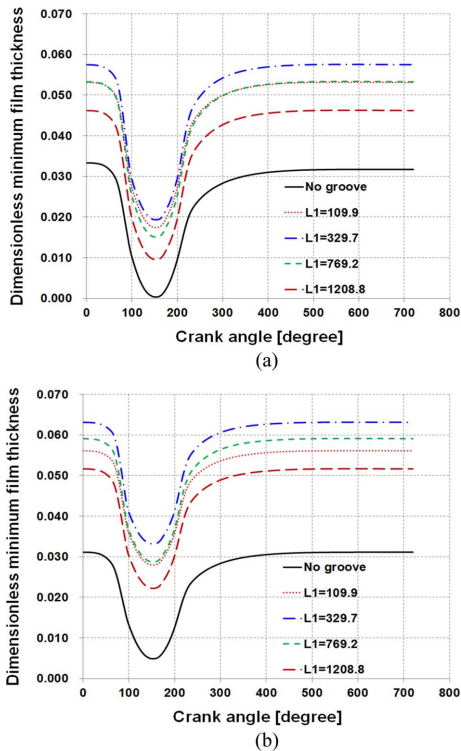


Fig. 5. Dimensionless minimum film thickness with L_1 and crank angle. A=0.36, B=0.58 (b) A=0.30, B=0.36.

그루브의 효과에 대해 그루브의 깊이가 얇은 경우와 깊은 경우로 구분하여 해석을 수행하였다.

a. 얇은 그루브의 적용

우선 그루브의 깊이가 얇은 경우에 그루브의 설계 인자의 변화에 의한 윤활특성의 변화를 살펴보았다. Fig. 5는 무차원 그루브의 폭(L_2)과 무차원 그루브의 깊이(H_2)가 각각 109.9, 0.1099이고 그루브의 개수(N)가 하나인 경우에 대한 해석결과로, 크랭크 각도의 변화에 대한 무차원 최소유막두께를 플런저 stem부 선단으로부터 첫번째 그루브까지의 무차원 거리(L_1)에 따라 나타낸 것이다. 이때 무차원 점도는 0.143으로 일정하다. 해석 결과중에 무차원 점도가 표시되어 있지 않은 경우에는 무차원 점도 조건은 0.143으로 저점도 조건이다. 그루브가 가공되지 않은 경우보다 그루브가 가공된 경우 최소유막두께가 크다. 그리고 L_1 이 증가하면 무차원 최소유막두께는 증가하다가 감소하는 경향을 보인다. 무차원 간극 A, B가 0.36, 0.58인 경우보다 0.30, 0.36인 경우에 그루브에 의한 윤활특성의 개선효

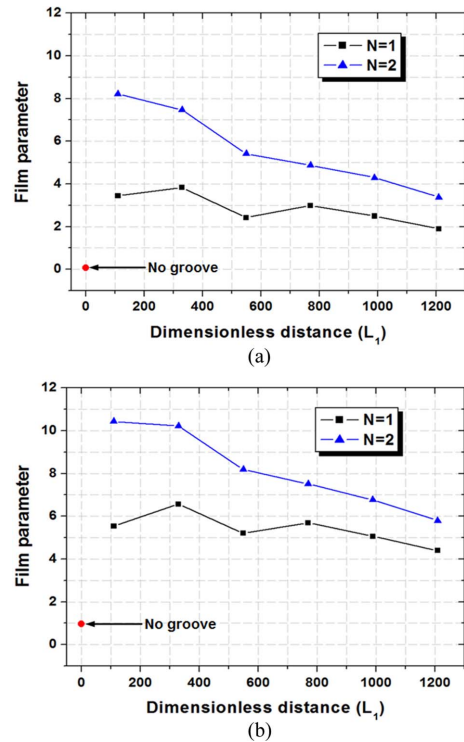


Fig. 6. Film parameter with L_1 , N and crank angle. (a) A=0.36, B=0.58, (b) A=0.30, B=0.36.

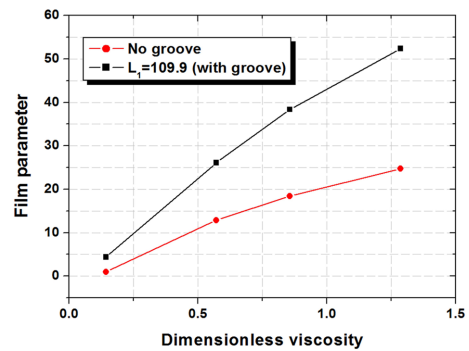


Fig. 6. Film parameter with L_1 , N and crank angle. (a) A=0.36, B=0.58, (b) A=0.30, B=0.36.

과가 뚜렷하다.

Fig. 6은 그루브의 개수가 1, 2개인 경우에 L_1 의 변화에 의한 윤활특성의 변화를 나타낸다. 이때 그루브가 2개인 경우에 그루브와 그루브 사이의 무차원 간격 (L_3)은 219.8이다. 그루브의 깊이가 얇은 경우에는 L_1 이 작은 경우에 윤활특성이 개선된다.

Fig. 7은 무차원 간극이 A, B가 0.30, 0.36이고 그

Table 1. Dimensionless geometries of groove and number of groove (variable: dimensionless viscosity)

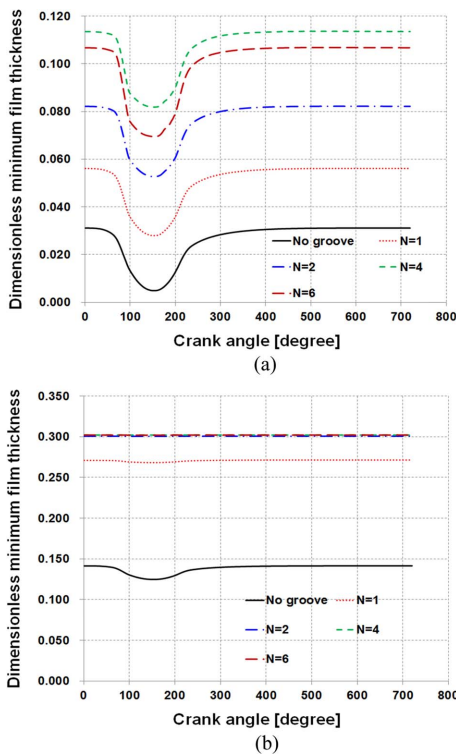
L_1	L_2	L_3	H_2	N
109.9	109.9	0	0.1099	1

Table 2. Dimensionless geometries of groove and number of groove (variable: number of groove)

L_1	L_2	L_3	H_2	N
109.9	109.9	219.8	0.1099	0~6

루브의 조건이 Table 1과 같은 경우에 대해 무차원 점도의 변화에 대한 유막계수를 나타낸다. 그루브가 없는

경우에 대한 결과와 비교를 해보면 무차원 점도가 증가하면 그루브에 의한 윤활특성의 개선 효과는 커진다.



무차원 점도가 0.143, 1.286인 경우에 그루브 개수의 변화에 의한 윤활특성은 Fig. 8과 9에 나타나 있다. 이때 해석에 사용된 그루브 조건은 Table 2와 같다. 무차원 점도가 0.143인 저점도 조건에서 그루브가 4개인 경우가 무차원 최소유막두께가 가장 크다. 그루브의 개수가 6개로 증가한 경우는 4개인 경우보다 무차원 최소유막두께가 감소한다. 반면에 무차원 점도가 1.286으로 고점도인 경우에는 그루브가 2개 이상에서 윤활특성의 변화가 아주 작다. Fig. 8의 결과를 유막계수로 평가한 내용이 Fig. 9와 같다. 저점도 조건뿐만 아니라 고점도 조건에서도 그루브를 가공하지 않은 경우와 비교를 해보면 그루브에 의한 윤활특성 개선 효과는 있다. 하지만 저점도 조건에서는 그루브의 개수의 증가에 의해 플런저 주위의 형성된 압력 불균형을 완화하는 효과도 증가를 하지만, 고점도 조건에서 그루브 개수의 증가에 의한 압력 불균형의 완화 효과는 아주 작다. 그 이유는 HFO와 같은 아주 고점도의 연료로 윤활이 되는 경우에는 그루브를 통한 원주 방향으로의 유동이 큰 점성 저항으로 인해 활성화되지 않으므로 압력불균형을 완화하는 효과가 작기 때문이다.

Fig. 8. Dimensionless minimum film thickness with number of groove (N). (a) Dimensionless viscosity (0.143), (b) Dimensionless viscosity (1.286).

Fig. 10은 Table 3과 같은 그루브 조건에서 그루브와 그루브 사이의 간격(L_3)의 변화에 의한 윤활특성의

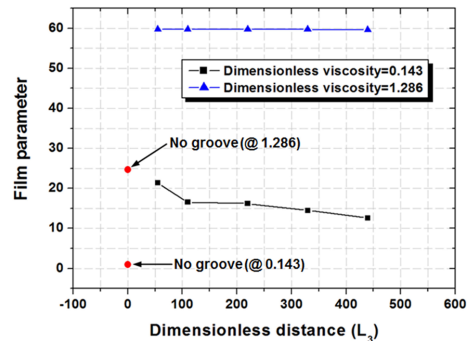
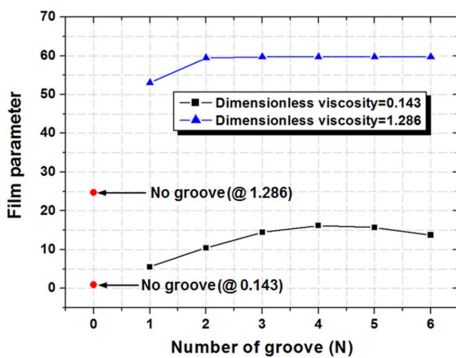


Fig. 9. Film parameter with number of groove (N).

Fig. 10. Film parameter with dimensionless distance (L_3).

Table 3. Dimensionless geometries of groove and number of groove (variable: L_3)

L_1	L_2	L_3	H_2	N
109.9	109.9	54.9~439.6	0.1099	4

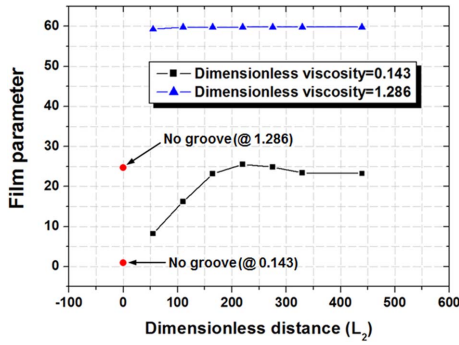


Fig. 11. Film parameter with dimensionless distance (L_2).

Table 4. Dimensionless geometries of groove and number of groove (variable: L_2)

L_1	L_2	L_3	H_2	N
109.9	54.9~439.6	54.9, 219.8	0.1099	4

결과를 나타낸다. 고점도 조건에서는 L_3 의 변화에 의한 유막계수의 변화는 거의 없지만, 저점도 조건에서는 L_3 가 작은 경우에 유막계수가 크다.

Fig. 11은 Table 4와 같은 그루브 조건에서 무차원 그루브의 폭 (L_2)의 변화에 의한 유희특성의 결과를 나타낸다. 고점도 조건에서는 L_2 의 변화에 의한 유막계수는 거의 변화하지 않지만, 저점도에서는 상대적으로 변화가 크다.

b. 깊은 그루브의 적용

Fig. 5에서 Fig. 11은 그루브의 깊이가 얇은 경우에 대한 해석 결과이다. Fig. 12는 그루브의 깊이가 깊은 경우에 대한 해석 결과이고, Table 5와 같은 그루브 조건에서 L_1 의 변화에 의한 유막계수를 나타낸다. L_1 이 약 550이하에서는 그루브가 가공되지 않은 조건보다 유막계수가 작다. 그 이유는 플런저 stem부의 선단으로부터 가까운 위치에 깊은 그루브를 가공할 경우, 플런저가 배럴 내벽으로 치우칠 때 squeeze effect에 의해 발생하는 압력이 작아 플런저가 배럴 중심으로 회복하는 힘이 작아지기 때문이다. 즉, 깊은 그루브가

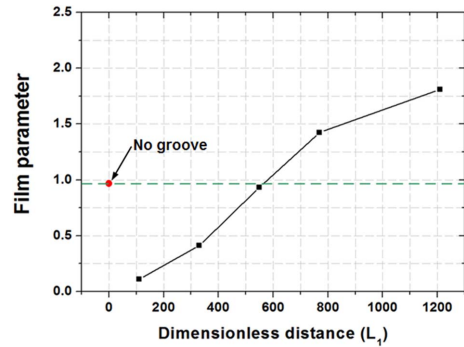


Fig. 12. Film parameter with dimensionless distance (deep groove, L_1).

Table 5. Dimensionless geometries of groove and number of groove (deep groove, variable: L_1)

L_1	L_2	L_3	H_2	N
109.9~1208.8	109.9	219.8	deep	2

stem부의 선단에 가깝게 위치하면 그루브내의 유동으로 인해 압력 발생을 저해한다. 그 결과 그루브의 깊이가 얇은 경우에는 L_1 이 작을수록 유희상태가 양호하지만, 그루브의 깊이가 깊은 경우에는 L_1 이 클수록 유희상태가 양호하다.

c. 얇은 그루브와 깊은 그루브의 비교

Fig. 13은 그루브의 깊이가 얇은 경우와 깊은 경우에 대해 무차원 점도의 변화에 의한 유막계수의 결과를 나타낸다. 이때 그루브의 조건은 Table 6과 같으며

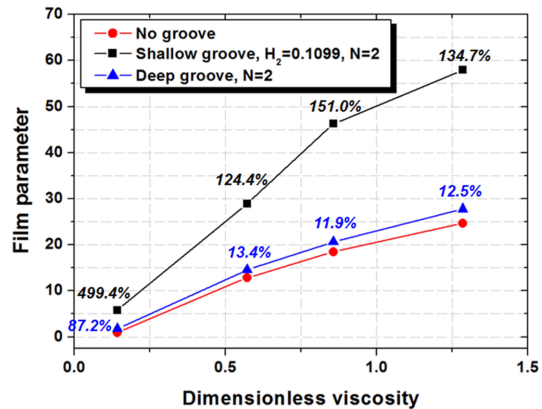


Fig. 13. Film parameter with dimensionless viscosity (no groove, shallow groove and deep groove).

Table 6. Dimensionless geometries of groove and number of groove (variable: dimensionless viscosity, H_2)

L_1	L_2	L_3	H_2	N
1208.8	109.9	219.8	0.1099, deep	2

그루브가 가공되지 않은 경우의 유막계수 결과와 비교하였다. 그루브의 깊이가 깊은 경우에는 그루브가 가공되지 않은 경우에 비해 유막계수가 약 12%~90%로 증가하지만, 그루브의 깊이가 얇은 경우에는 유막계수가 약 120%~500%로 증가한다. 유체윤활해석의 측면에서 그루브의 깊이가 깊은 경우보다는 얇은 경우에 윤활특성의 개선 효과가 크지만, 마모입자를 가두어 두어 세물체 연삭마모(three body abrasive wear)의 가능성을 줄이는 것은 깊은 그루브에 비해 효과적이지 못하다. 이런 측면에서 스톱 밸브에서도 그루브의 깊이가 적어도 간극의 10배 이상이 되어야 한다고 보고하고 있다[22]. 따라서 해석적인 방법으로 얻어진 그루브의 설계조건에 대해 깊은 그루브와 얇은 그루브가 각각 적용된 제품에 대해 실험적으로 비교 테스트를 할 필요성이 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 연료분사펌프의 윤활특성을 개선하고자 플런저 stem부에 그루브를 적용하였다. 그루브의 깊이에 따라 적합한 해석 방법을 적용하여 그루브, 간극 및 점도의 변화에 대한 해석을 수행하여 윤활특성을 파악하였다. 이를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 얇은 그루브의 경우, 플런저 stem부의 선단으로부터 첫번째 그루브까지의 거리가 작을 때 윤활특성의 개선 효과가 크지만, 깊은 그루브의 경우에는 그 거리가 클때 윤활특성의 개선 효과가 크다.
2. 유체윤활해석 측면에서 그루브의 깊이가 깊은 경우보다는 얇은 경우에 윤활특성의 개선에 효과적이다.

References

[1] Hong, S. H., "Improvement of Lubrication Characteristics in Fuel Injection Pump for Medium-Speed Diesel Engines: Part I - Application of Profile Shape", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, In-Print, 2015.
 [2] Park, T. Y., Kim, D. H., Ghal, S. H., "A Study on the Design Improvement to Increase Durability of Fuel

Injection Nozzle for HiMSEN", *Journal of Korean Society of Marine Engineering Autumn Conference*, pp. 231-232, 2010.
 [3] Yang, Y. J., "Study on Simulation of Fuel Injection Pump for Marine Medium Diesel Engine", *J. Korean Soc. of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 11, No. 6, pp. 123-129, 2012.
 [4] Hong, S. H., Lee, B. R., Cho, Y. J., Park, J. K., "Optimal Design of Clearance in Fuel Injection Pump", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 31, No. 4, pp. 148-156, 2015.
 [5] Jeon, H. J., Lee, D. C., "Marine Diesel Engines and Gas Turbines", *Dong Myeong Publishers*, pp. 728-729, 2012.
 [6] Lee, B. R., Cho, Y. J., "Hydrodynamic Lubrication Analysis of Plunger Motion for Reciprocating Pump", *Proc. Autumn Conference of the KSTLE*, pp. 255, 2014.
 [7] Lee, B. R., Cho, Y. J., "Numerical Analysis of the Plunger Motion in Reciprocating Pump", *Proc. Spring Conference of the KSTLE*, pp. 31-32, 2013.
 [8] Lee, B. R., Cho, Y. J., and Song, C. S., "The Effect of Partial Groove on Lubrication Property for Plunger Pump", *Journal of the Korean Soc. Precis. Eng.*, Spring Conference, pp. 564, 2014.
 [9] Bi, C., Tang, G. H., Tao, W. Q., "Heat Transfer Enhancement in Mini-Channel Heat Sinks with Dimples and Cylindrical Grooves", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 55, pp. 121-132, 2013.
 [10] Adatepe, H., Biyikioglu, A., Sofuoglu, H., "An Experimental Investigation of Frictional Behavior of Statically Loaded Micro-Grooved Journal Bearing", *Tribology International*, Vol. 44, pp. 1942-1948, 2011.
 [11] Adatepe, H., Biyikioglu, A., Sofuoglu, H., "An Investigation of Tribological Behaviors of Dynamically Loaded Non-Grooved and Micro-Grooved Journal Bearings", *Tribology International*, Vol. 58, pp. 12-19, 2013.
 [12] Kang, J. H., Kim, K. Y., "A Study on Design Parameters to Improve Load Capacity of Spiral Grooved Thrust Bearing", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 18, No. 3, pp. 181-186, 2002.
 [13] Park, S. S., Jang, W. Y., "Theoretical Analysis of Herringbone Grooved Air Thrust Bearings", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 27, No. 5, pp. 233-239, 2011.
 [14] Cho, M. R., Han, D. C., "An Analytical Study on the Lubrication Characteristics between the Piston Ring and Grooved Cylinder Liner", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 16, No. 2, pp. 114-120, 2000.
 [15] Lee, A. S., Kim, J. H., "Lubrication Performance Analysis of a Spiral Groove Dry Gas Seal for a High-Speed Flying Object", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*,

- Vol. 21, No. 1, pp. 8-15, 2005.
- [16] Ali, F., Kaneta, M., Krupka, I., Hartl, M., "Experimental and Numerical Investigation on the Behavior of Transverse Limited Micro-Grooves in EHL Point Contacts", *Tribology International*, Vol. 84, pp. 81-89, 2015.
- [17] Janakiraman, S., Klit, P., Jensen, N. S., Gronbaek, J., "Observation on the Effects of Grooved Surfaces on the Interfacial Torque in Highly Loaded Rolling and Sliding Tests", *Tribology International*, Vol. 81, pp. 179-189, 2015.
- [18] Hong, S. H., Son, S. I., Kim, K. W., "A Study on the Lubrication Characteristics of Spool Valve with Spiral Groove", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 28, No. 6, pp. 303-314, 2012.
- [19] Hong, S. H., Son, S. I., 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.
- [20] Kumar, S., Bergada, J. M., "The Effect of Piston Grooves Performance in an Axial Piston Pump", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 66, pp. 168-179, 2013.
- [21] Jeon, W. J., Lee, H., Kim, J. W., Kim, K. Y., "The Influence of Groove Location on the Lubrication Characteristic of a Piston", Proc. Spring Conference of the KSTLE, pp. 61-62, 2013.
- [22] Merritt, H. E., "Hydraulic Control Systems", *John Wiley & Sons, Inc.*, pp. 108-111, 1967.