

DOI <http://dx.doi.org/10.9725/kstle.2015.31.6.245>

연료 변경에 의한 연료분사펌프의 윤활 특성

홍성호[†]

현대중공업 엔진기계사업본부

Lubrication Characteristics in Fuel Injection Pump with Variation of Fuel Oils

Sung-Ho Hong[†]

Engine & Machinery Division, Hyundai Heavy Industries

(Received August 18, 2015; Revised October 18, 2015; Accepted October 19, 2015)

Abstract – This study investigates the lubrication characteristics of fuel injection pumps with reference to different fuel oils. Medium-speed diesel engines use fuel oils with various viscosities, such as heavy fuel oil (HFO, which is a high-viscosity fuel oil) and light diesel oil (LDO, which is a low-viscosity fuel oil). When fuel oil with a low viscosity is used, both fuel oil and lubricating oil lubricate the system. Thus, the lubrication of the fuel injection pump is in a multi-viscosity condition when the fuel oil in use changes. We suggest three cases of multi-viscosity models, and divide the fuel injection pump into three lubrication sections: *a*, the new oil section; *b*, the mixed oil section; and *c*, the used oil section. This study compares the lubrication characteristics with variation of the multi-viscosity model, clearance. The volume of Section *b* does not affect the lubrication characteristics. The lubrication characteristics of the fuel injection pump are poor when high-viscosity fuel oil transfers to low-viscosity fuel oil. This occurs because the viscosity in the new oil section (i.e., Section *a*) dominates the lubrication characteristics of the fuel injection pump. However, the lubricant oil supply in the used oil section (i.e., Section *c*) can improve the lubrication characteristics in this condition. Moreover, the clearances of the stem and head significantly influence the lubrication characteristics when the fuel oil changes.

Keywords – medium-speed diesel engine(중속 디젤 엔진), fuel injection pump(연료분사펌프), fuel oil(연료유), viscosity(점도), minimum film thickness(최소유막두께)

Nomenclature

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

B : Dimensionless clearance of head part
(head부의 무차원 간극)

C : Dimensionless clearance (c/c_0) (무차원 간극)

D1 : Dimensionless distance to the “*a*” section (d_1/l)

(새로운 연료가 유입되는 영역까지의 무차원 거리)

D2 : Dimensionless distance to the “*b*” section (d_2/l)
(혼합 점도가 형성되는 영역까지의 무차원 거리)

H : Dimensionless film thickness (h/c_0)

(무차원 유막두께)

H_m : Dimensionless minimum film thickness (h_m/c_0)

c : Clearance (*m*) (간극)

d₁ : Distance to the “*a*” section (*m*)

(새로운 연료가 유입되는 영역까지의 거리)

d₂ : Distance to the “*b*” section (*m*)

(혼합 점도가 형성되는 영역까지의 거리)

h : Fluid film thickness (*m*) (유막두께)

h_m : Minimum film thickness (*m*) (최소유막두께)

[†]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.

서 론

중속 디젤엔진은 선박 및 육상, 해상 플랜트용 주 기관과 보조기관, 발전기 등의 동력 발생 기관으로 주로 사용되고 있다. 중속 디젤엔진의 연료분사펌프는 적정량의 연료를 가압하여 정해진 시기에 일정시간 동안 분사노즐로 공급하는 장치로 연료탱크, 분사시기 조절장치등과 함께 디젤엔진의 최적화를 위한 분사량, 분사시기, 분사율 등을 제어하는 연료공급시스템의 핵심요소이다. 참고문헌[1,5]에 나타난 바와 같이 최근 선박용 디젤 엔진에서는 연소 효율 및 스모크 발생 저감을 위하여 연료분사압력의 고압화가 되어 가는 추세이고 국내, 국외에서 연료 분사의 고압화에 대한 연구가 진행되고 있다. 또한 고유가에 따른 저질유 사용의 확대로 연료분사장치의 내구수명이 크게 감소되는 문제가 발생되고 있다[3-4].

중속 디젤엔진에서는 HFO (Heavy Fuel Oil)와 같은 고점도(고황유)에서 저점도(저황유)인 LDO (Light Diesel Oil)까지 다양한 연료가 사용되고 있다. 그리고 사용되는 연료의 특성에 따라 연료분사펌프를 운용하는 방식도 다르다. 주로 고점도의 연료를 사용하는 경우에는 연료로만 운용을 하고 저점도의 연료를 사용하는 경우에는 연료와 윤활유를 함께 사용하여 운용을 하고 있다[5]. 그리고 중속 디젤엔진의 경우 운전중에 사용연료를 변경하는 경우가 있는데 이때 사용 연료의 변경에 의해 연료분사펌프의 고착문제가 발생할 수 있다. 따라서 운전중 연료변경에 의해 발생가능한 고착 문제에 대해 윤활특성을 파악하여 개선할 필요가 있다.

연료분사펌프의 고착과 관련한 기존 연구로는 참고문헌[1, 5]에 나타난 바와 같이 구조해석 및 윤활해석, 간극의 가공 한계 및 공차를 고려하여 연료분사펌프의 최적 간극을 설계하는 프로세스에 관한 연구[5-6]가 진행되었다. 그리고 플런저와 배럴사이의 간극 변경에 의한 윤활특성의 변화 및 부분 그루브가 적용된 플런저의 윤활특성 개선에 대한 연구가 있다[7-9].

연료분사펌프 외에 다른 윤활시스템에서 점도의 변화에 의한 윤활해석연구에는 편부시 베어링 및 스플 밸브를 대상으로 점도변화에 의한 윤활특성을 평가하였다[10-11].

연료의 변경에 의해 연료의 화학적 성분, 불순물의 양의 변화도 고착에 영향을 미치지만 본 연구에서는 윤활특성과 밀접한 점도가 가장 큰 영향요소라 판단하여 점도의 조건에 따른 연료분사펌프의 윤활특성을 평가하였다. 연료 변경시, 연료분사펌프의 윤활영역에서

는 몇가지 점도가 공존하므로 이를 적절히 모델링하여 다양한 조건에 대해 윤활특성을 평가하였다.

2. 본 론

2-1. 연료분사펌프의 윤활특성 평가

연료분사펌프에서 연료 변경 시, 점도 조건의 변화에 의한 윤활특성을 파악하기 위해 해석 모델을 제안하여 유체윤활해석을 수행하였다. 100%의 부하(load) 조건에서 윤활영역이 하나의 점도 조건과 다점도 조건에서의 윤활특성을 비교하였으며 간극의 영향도 살펴보았다.

2-1-1. 유체윤활해석

배럴과 플런저 사이의 윤활영역에 대하여 참고문헌[1-2, 5-6]과 동일한 해석방법으로 비정상상태 2차원 레이놀즈 방정식과 레이놀즈 경계조건을 이용하여 해석을 수행하였다. 이때 윤활면의 탄성변형은 고려하지 않았으며 시간에 따른 플런저의 속도 변화 및 연료의 압력변화를 고려하였다. 그리고 spill port의 압력변화 및 배럴의 그루브의 위치 및 압력 조건을 고려하여 해석을 수행하였다.

1) 해석 모델

연료분사펌프는 배럴안에서 플런저가 왕복 운동을 한다. 해석 모델 및 해석 모델의 기하학적 형상, 배럴 그루브의 압력조건 및 경계조건은 참고문헌[1, 2]의 내용과 동일하다. 간극은 Fig. 1와 같이 플런저의 stem부(A)와 head부(B)로 구분하여 해석을 수행하였다.

해석에 사용된 다점도(Multi viscosity)해석 모델은 Fig. 2와 같다. 다점도의 윤활영역은 세가지 영역(section)으로 구분된다. 변경된 연료가 유입되어 채워지는 영역은 “a” 이고 기존의 사용중인 연료나 연료와 윤활유의 혼합유체가 채워져 있는 영역은 “c”이며 “b” 영역은 기존의 연료 또는 연료와 윤활유의 혼합액이

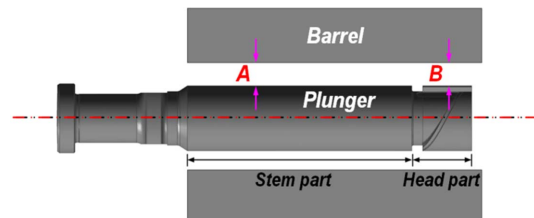


Fig. 1. Dimensionless clearance of stem part (A) and head part (B) [1-2, 5-6].

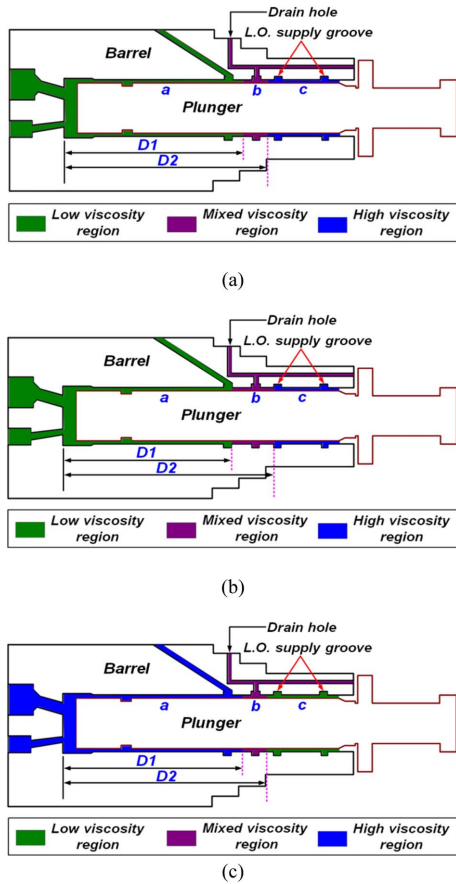


Fig. 2. Multi viscosity cases of fuel injection pump. (a) Case-1 (b) Case-2 (c) Case-3.

변경된 연료와 혼합되는 영역을 의미한다. Case-1은 높은 점도의 HFO에서 낮은 점도의 LDO로 변경될 때 L.O. supply groove에 윤활유가 공급되는 경우와 공급되지 않는 경우를 포함한다. Case-2는 Case-1와 연료 및 윤활유의 상황은 같으나 혼합영역인 “b” 영역이 Case-1 보다 약1.7배 큰 경우이다. Case-3은 Case-1과 반대의 상황으로 낮은 점도의 LDO에서 높은 점도의 HFO로 변경되는 경우를 의미한다. 다점도 윤활영역에서 윤활유 및 연료의 변경에 대한 자세한 사항은 Table 1에 나타나 있으며 “b” 영역 크기에 대한 사항은 Table 2에 나타나 있다. 연료분사펌프에 사용되는 연료 및 윤활유의 무차원 점도는 Table 3와 같다. 그리고 “a”와 “c” 영역뿐만 아니라 혼합영역인 “b” 영역의 크기에 대해 정확하게 파악하는데 어려움이 있다. 하지만 연료의 혼합에서 휘발성이나 점도에 따른 유체의 유동성을 고려하여 윤활유가 공급되는 경우와 공급

Table 1. Fuel oil(F.O.) and lubricant oil(L.O.) in multi-viscosity models

Case	F.O. and L.O. conditions	
Case-1	Without L.O. supply	HFO → LDO
	With L.O. supply	HFO + L.O. → LDO+L.O.
Case-2	Without L.O. supply	HFO → LDO
	With L.O. supply	HFO + L.O. → LDO+L.O.
Case-3	Without L.O. supply	LDO → HFO
	With L.O. supply	LDO + L.O. → HFO+L.O.

Table 2. D1 and D2 in multi-viscosity models

Case	“b” section
Case-1	D1=0.458, D2=0.524
Case-2	D1=0.436, D2=0.553
Case-3	D1=0.458, D2=0.524

Table 3. Dimensionless viscosity of fuel oil (F.O.) and lubricant oil (L.O.)

Fluid	Dimensionless viscosity
LDO (F.O.)	0.143~1.0
HFO (F.O.)	0.853~1.286
L.O.	1.957

Table 4. Dimensionless viscosity with volume ratio in the b section

Without L.O. supply		With L.O. supply	
Volume ratio (LDO: HFO)	Dimensionless viscosity	Volume ratio (LDO: HFO)	Dimensionless viscosity
1:1	0.714	1:1	1.050
2:1	0.521	2:1	0.750
3:1	0.429	3:1	0.60
4:1	0.371	4:1	0.507
5:1	0.336	5:1	0.443

되지 않은 경우에 대해 혼합비율에 따른 혼합 점도에 대해 Table 4와 같이 가정하여 해석을 수행하였다. 이 때 저점도유와 고점도유의 혼합비율이 $d : e$ 인 경우에

식 (1)을 이용하였다.

$$\text{Mixed viscosity} = \frac{\text{low viscosity} \times d + \text{high viscosity} \times e}{d + e} \quad (1)$$

2) 해석 결과

(1) Multi-viscosity model의 변화에 의한 윤활특성 비교

연료분사펌프에서 사용하는 연료가 변경되었을 때의

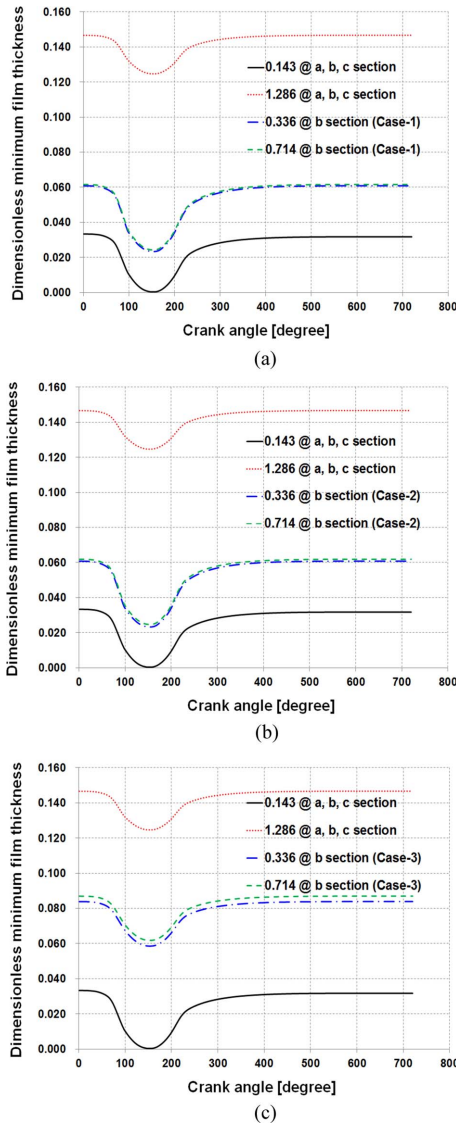


Fig. 3. Dimensionless minimum film thickness with crank angle and multi viscosity cases (A=0.36, B=0.58, without L.O. supply). (a) Case-1 (b) Case-2 (c) Case-3

윤활특성을 파악하기 위해 앞에서 제시한 다점도 해석 모델을 이용하여 유체윤활해석을 수행하였다. Fig. 3은 윤활유가 공급되지 않고 무차원 간극 A, B가 0.36, 0.58인 조건에서 윤활영역이 하나의 연료로 윤활되는 경우와 2가지 연료가 공존하는 상황에 대해 해석한 결과이다. Fig. 3(a)는 고점도 연료(HFO)에서 저점도 연료(LDO)로 변경되는 경우(Case-1)로 “a” 영역의 무차원 점도는 0.143이고 “c” 영역의 무차원 점도는 1.286이며 혼합영역인 “b” 영역의 무차원 점도는 혼합 비율에 따라 0.336에서 0.714까지 변화하는 상황에 대한 해석 결과이다. 다점도 조건의 윤활특성은 윤활영역이 하나의 저점도 연료(LDO)로 채워진 경우와 고점도 연료(HFO)로 채워진 경우의 윤활특성과 비교하였다. Case-1에 대한 무차원 최소유막두께는 하나의 고점도 연료로만 채워진 경우보다는 하나의 저점도 연료로만 채워진 경우의 무차원 최소유막두께의 결과와 상대적으로 차이가 작다. 그리고 혼합영역의 무차원 점도 조건이 변화더라도 무차원 최소유막두께의 변화는 거의 없다. Fig. 3(b)는 Case-1과 연료의 변경 상황은 같으나 혼합 점도 영역의 크기가 Case-1에 비해 1.7배가 큰 Case-2의 결과로 Fig. 3(a)와 비교해보면 무차원 최소유막두께의 차이가 없다. 혼합점도 영역의 크기가 전체 윤활영역에서 차지하는 비율이 작으므로 윤활특성에 미치는 영향이 아주 작다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(c)는 Case-1과 반대로 저점도 연료에서 고점도 연료로 변경되는 경우(Case-3)에 대한 결과이다. 무차원 최소유막두께 측면에서 Case-1의 결과와 비교를 해보면 Case-3의 윤활특성이 상대적으로 양호하다. 따라서 연료분사펌프의 윤활특성은 기존의 연료가 채워져 있는 영역(“c” section)보다는 새로운 연료가 공급되는 영역(“a” section)의 점도 조건이 더 지배적임을 알 수 있다.

배럴 그루브에 윤활유가 공급되지 않는 경우에 혼합영역에서의 무차원 점도는 0.336에서 0.714까지 변화하지만 윤활유가 공급되는 경우에는 0.443에서 1.050까지 변화한다. 그리고 배럴 그루브에 윤활유가 공급되는 경우에는 “c” 영역의 무차원 점도 조건은 1.957이다.

(2) 윤활유 공급 유무에 의한 윤활특성 비교

Fig. 4는 무차원 간극 A, B가 0.36, 0.58인 조건에서 윤활유의 공급 유무에 따라 윤활특성이 어떻게 변화하는지 Case-1와 Case-3에 대해 살펴본 결과이다. Case-1의 경우에 윤활유를 배럴 그루브에 공급을 하게

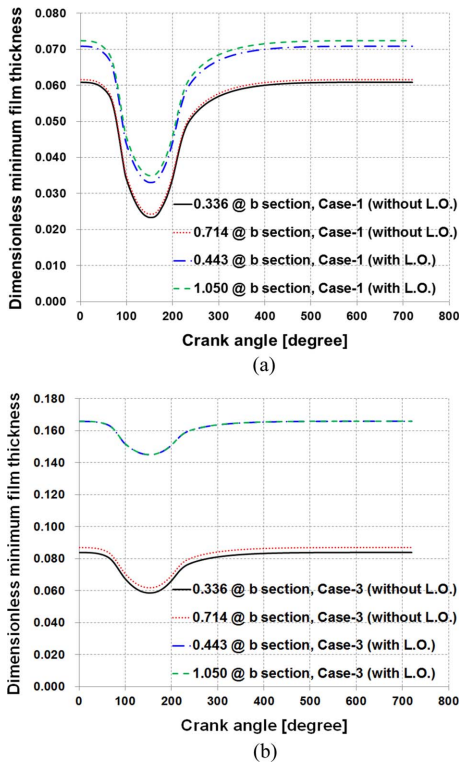


Fig. 4. Dimensionless minimum film thickness with crank angle and multi viscosity cases ($A=0.36$, $B=0.58$). (a) Case-1 (b) Case-3

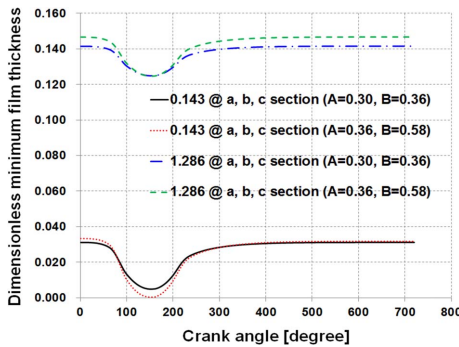


Fig. 5. Dimensionless minimum film thickness with dimensionless clearance and crank angle.

되면 하지 않은 경우에 비해 무차원 최소유막두께가 약 40% 이상 증가한다. 따라서 고점도 연료에서 저점도 연료로 변경될 때 배럴 그루브에 윤활유를 공급함으로써 윤활특성이 개선되는 것을 확인하였다.

Fig. 5는 하나의 점도 조건에서 간극의 변화에 의한 윤활특성을 나타낸다. 고점도 조건에서는 무차원 간극

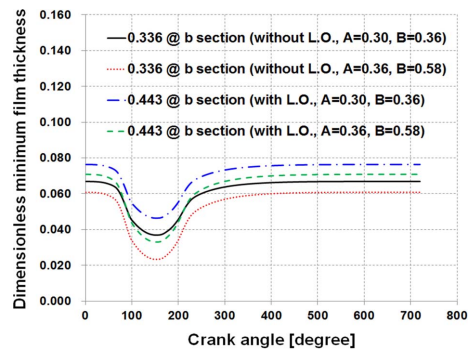


Fig. 6. Dimensionless minimum film thickness with crank angle, dimensionless clearance and multi viscosity cases (Case-1).

의 변화에 의한 윤활특성은 거의 변하지 않으나 저점도 조건에서는 무차원 간극 A , B 가 0.36, 0.58인 경우보다 0.30, 0.36인 경우에 윤활특성이 양호하다.

(3) 간극의 변화에 의한 윤활특성 비교

저점도 연료에서 고점도 연료로 변경되는 경우(Case-1)에 무차원 간극의 변화에 의한 윤활특성의 변화는 Fig. 6에 나타나 있다. 윤활유가 공급되지 않는 경우에 무차원 간극 A , B 가 0.30, 0.36인 경우의 무차원 최소유막두께는 무차원 간극 A , B 가 0.36, 0.58인 경우의 무차원 최소유막두께보다 약 58% 증가한다. 윤활유가 공급되는 경우에는 무차원 간극이 작은 경우보다 무차원 최소유막두께는 약 40% 증가한다. 즉, 윤활유 공급유무에 관계없이 무차원 간극 A , B 가 0.36, 0.58인 경우보다 0.30, 0.36인 경우에 윤활특성이 양호하다. 연료분사펌프의 간극이 다점도 조건(연료 변경)의 윤활특성에 미치는 영향이 크다는 것을 확인할 수 있다.

무차원 간극 A , B 가 0.30, 0.36인 경우에 윤활유가 공급되지 않는 조건보다 윤활유가 공급되는 조건에서의 무차원 최소유막두께는 약 26% 증가한다. 그리고 무차원 간극 A , B 가 0.36, 0.58인 경우에는 윤활유가 공급되지 않는 조건보다 윤활유가 공급되는 조건에서 무차원 최소유막두께는 약 42% 증가한다. 따라서 연료분사펌프에 연료변경시 배럴 그루브에 윤활유를 공급함으로써 윤활특성이 개선됨을 확인하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 연료분사펌프에서 연료를 변경하는

상황에 대한 윤활특성을 파악하고자 다점도 조건에서의 유체윤활해석을 수행하였다. 이를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 저점도 연료에서 고점도 연료로 변경되는 경우보다 고점도 연료에서 저점도 연료로 변경시에 상대적으로 윤활특성이 양호하지 않다. 이는 변경되는 연료가 채워지는 영역에서의 점도조건이 연료분사펌프의 윤활특성에 지배적이기 때문이다.

(2) 고점도 연료에서 저점도 연료로 변경되는 경우에 윤활유를 배럴 그루브에 공급함으로써 윤활특성이 개선된다.

(3) 연료분사펌프의 간극 조건이 다점도 조건(연료 변경)의 윤활특성에 미치는 영향은 크다. 따라서 다점도 조건에서 윤활특성을 개선하는데 간극의 최적화가 요구된다.

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.*, Vol. 31, No. 5, pp. 205-212, 2015.
- [2] Hong, S. H., "Improvement of Lubrication Characteristics in Fuel Injection Pump for Medium-Speed Diesel Engines: Part II – Application of Grooves," *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 31, No. 5, pp. 213-220, 2015.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Hong, S. H., Lee, B. R., Cho, Y. J., Park, J. K., "Optimal Design of Clearance in Fuel Injection Pump", *Proc. Spring Conference of the KSTLE*, pp. 153-154, 2015.
- [7] Lee, B. R., Cho, Y. J., "Hydrodynamic Lubrication Analysis of Plunger Motion for Reciprocating Pump", *Proc. Autumn Conference of the KSTLE*, pp.255, 2014.
- [8] 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
- [9] 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.
- [10] Park, T. J., "The effect of Pressure on Viscosity in Grooved Hydraulic Spool Valves," *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 22, No. 6, pp. 307-313, 2006.
- [11] Kim, C. K., Lee, B. K., "A Study on the Oil Film Behaviors of Pin Bush Bearings for Diesel Engines with Various Engine Oil Viscosities", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 24, No. 1, pp. 21-26, 2008.