



# L28/32H 중속 디젤엔진용 연료분사펌프의 성능 비교

## Comparison of Performance of Fuel Injection Pump for L28/32H Middle Speed Diesel Engine

김종환\* · 공경주\*\* · 정석호\*\*\* · 고대권\*\*\*\*†

Jong-Hwan Kim\*, Kyeong-Ju Kong\*\*, Suk-Ho Jung\*\*\*  
 and Dae-Kwon Koh\*\*\*\*†

(Received 21 March 2018, Revision received 10 April 2018, Accepted 03 May 2018)

**Abstract:** A fuel injection pump for L28/32H middle speed engine was manufactured by the domestic technology, then measured its major parts in order to analyze precisely its performance. The experimental apparatus had been made especially to evaluate the performance of fuel injection pumps manufactured by a domestic “P” corporation and a foreign “N” corporation and then the injection pressure and the injection quantity of those pumps had been investigated and compared with each other. As a result, principal dimensions, injection times, pressure delivery speeds, max. injection pressures and injection quantities of fuel which could affect the engine performances were very similar to each other. While residual pressures in fuel injection pump of P corporation was higher than that in N corporation due to the force of the delivery valve spring.

**Key Words :** Middle speed diesel engine, Fuel injection pump, Injection pressure, Injection quantity

### 1. 서 론

디젤엔진은 열효율이 높고 고출력을 낼 수 있기 때문에 자동차뿐만 아니라 산업기계와 선박 등에 탑재되어 추진용 또는 발전용으로 사용되고 있어 활용 범위가 상당히 넓다. 국내 선박용 디젤엔진을 생산하는 업체는 STX엔진(주), 두산엔진(주), 현대중공업(주) 등이 있으며, 이들 생산량은 전 세계 디젤엔진 생산량의 60% 이상을 차지하고

있다. 그러나 국내의 설계 기술 기반이 취약하여 주요 핵심부품의 국산화는 미비한 실정이다. 그 중 하나가 연료분사펌프이다.

MAN DIESEL & TURBO사에서 설계된 L28/32H 중속 디젤엔진은 STX엔진(주)과 두산엔진(주)에서 주로 생산하고 있으나, 탑재되는 연료분사펌프는 현재 일본 N사의 제품이 수입되어 사용되고 있다. 연료분사펌프의 국산화에 가장 큰 어려움은 캐비테이션 현상에 의한 플런저(Plunger)

\*\*\*\* 고대권(교신저자) : 부경대학교 기계시스템공학과  
 E-mail : dkkoh@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6195  
 \*김종환 : ㈜프리텍  
 \*\*공경주 : 부경대학교 나라호  
 \*\*\*정석호 : 부경대학교 기계시스템공학과

\*\*\*\* Dae-Kwon Koh(corresponding author) : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.  
 E-mail : dkkoh@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6195  
 \*Jong-Hwan Kim : Pretech Co., Ltd.  
 \*\*Kyeong-Ju Kong : Research Vessel Nara, Pukyong National University.  
 \*\*\*Suk-Ho Jung : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

와 배럴(Barrel)의 손상이다. 이러한 현상은 많은 연구<sup>1-7)</sup>를 통해 밝혀져 있다. Fig. 1에는 실제 디젤 엔진에 장착되어 1,000시간을 사용한 후 분해한 제품의 플런저의 모습을 나타내었다. 플런저 리드 각 주변부에 캐비테이션으로 인해 손상된 모습을 확인할 수 있다. 플런저와 배럴은 수 십  $\mu\text{m}$ 의 간극을 가지고 있기 때문에 조그만 손상에도 연료 분사펌프의 성능에 큰 영향을 미친다. 따라서 캐비테이션에 의한 플런저의 손상을 최소화시키며 국내 기술로 연료분사펌프를 생산하는 것이 최종 목표이다. 그러나 본 연구에서는 아직 개발단계이기 때문에 최종목표인 내구성을 위한 테스트까지 실시하는 것은 어렵고, 연료분사펌프의 국산화를 위해 국내 P사에서 제작한 연료분사펌프와 일본 N사의 연료분사펌프의 성능비교를 통하여 국산화의 가능성을 확인하고자 한다.



Fig. 1 Damage by cavitation in plunger of fuel injection pump

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 연료분사펌프 제작

연료분사펌프의 부품 중 배럴 및 플런저는 연료분사펌프의 수명과 밀접한 관계가 있어 기계적 특성이 매우 중요하다. Table 1은 배럴과 플런저의 기계적 특성을 도면에 명시한 내용이며, L32/40 중속 디젤엔진용 연료분사펌프에 있어서 MDT에서도 품질 기준으로 명문화하고 있다. 특히 소재의 비금속 개재물 관리는 DIN 20602 규격

Table 1 Mechanical properties of barrel and plunger

Item	Barrel	Plunger
Material	18CrNiMo6-7(DIN)	SUJ2(JIS)
Heat treatment	Carburizing	Quenching & Tempering
Hardness	H <sub>RC</sub> 60~64	H <sub>RC</sub> 60~64
Case harden depth	1.0 ~ 1.5 mm	-
Degree of purity	K1 < 10	K4 < 12
Retained austenite	-	< 1.5%

을 통하여 엄격하게 관리되고 있어 소재 선택시 주의가 요구된다.

배럴에 사용되는 18CrNiMo7-6(ESU) 소재는 제품에 강제로 탄소(C)를 주입함으로써 표면의 경도를 높일 수 있는 침탄열처리(carburizing)를 시행하며, 내구성 확보를 위하여 표면경도는 로크웰 경도로 60~64, 경화 깊이는 1.0~1.5 mm로 설정하였다. 이는 상부의 윤활유 홀에 의하여 전경화 및 크랙을 방지하기 위해서 경화 깊이를 낮게 설정할 수밖에 없었다.

플런저의 소재인 SUJ2(JIS)는 담금질과 뜨임 열처리를 주로 하고 자체 내 높은 탄소(0.95~1.10%)로 인하여 내부까지 경화되기 때문에 소재 심부에서도 높은 강도를 가질 수 있어 내구성 확보에 유리하다. 앞서 언급한 바와 같이 디젤엔진 내에서 작동하면서 남아 있는 오스테나이트 조직의 변형을 억제하여 치수 변화를 방지하고자 특수하게 영하 150℃에서 서브제로(sub zero) 처리를 한다. 모든 열처리 공정 후에는 로크웰 경도계로 경도를 측정하고, 전자 현미경을 사용하여 조직을 확인한 뒤, 비커스 경도계로 경화 깊이를 측정하여 합격 여부를 판단한다.

연료분사펌프 내 주요 치수 설계 인자는 배럴 내경 및 플런저 외경의 matching clearance(Ø22), 배럴과 딜리버리 밸브의 조립 단면 간격(1.7 mm), 딜리버리 밸브의 외경(Ø12) 등이 있다. 이 치수들은 연료가 이동하는 경로와 밀접한 연관성이 있

Table 2 Comparison of main part dimensions between P and N corporations

Item		P Corp.	N Corp.
Barrel	Inner dia. (mm)	22.014	22.019
	Inner dia. cylindricity (mm)	0.0007	0.0009
	Inner dia. roughness ( $\mu\text{m}$ )	0.06	0.07
Plunger	Out dia. (mm)	22.0035	22.0085
	Out dia. cylindricity (mm)	0.001	0.002
	Out dia. roughness ( $\mu\text{m}$ )	0.03	0.07
Delivery valve	Out dia. (mm)	$\varnothing 11.072$	$\varnothing 11.08$
	Out dia. roughness ( $\mu\text{m}$ )	0.06	0.08
Barrel & plunger matching clearance		0.0105	0.0105

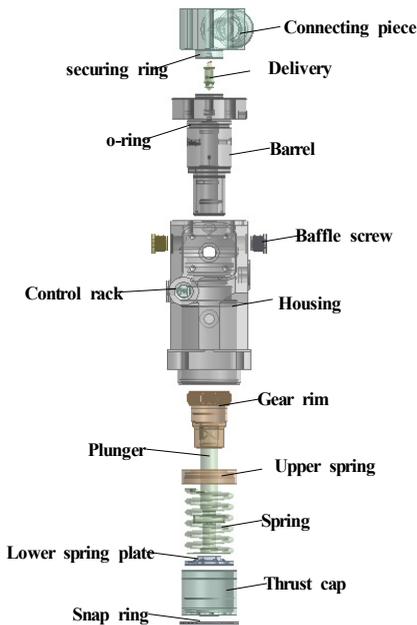


Fig. 2 3D exploded view of fuel injection pump manufactured by P corporation

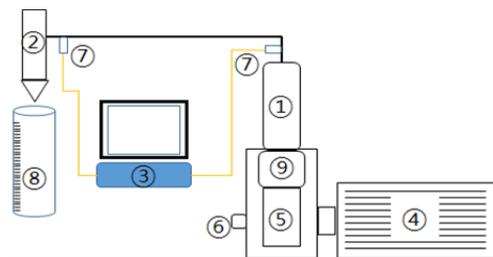
으며, 연료의 압축과정에 많은 영향을 미친다. 따라서 설계상 수  $\mu\text{m}$ 의 정밀공차를 가지고 있는 주요 치수들을 정밀 측정된 후 두 회사 제품을 비교

한다면 P사에서 개발된 연료분사펌프의 신뢰성을 확보할 수 있을 것이다. Table 2에 배럴, 플린저 및 딜리버리 밸브의 정밀 치수측정 결과를 나타내었다. 단품으로서의 치수는 P사 제품과 N사 제품 모두 큰 차이는 없었다. 오히려 P사 제품의 조도 및 원통도가 더 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 2에는 본 연구에 사용하기 위해 제작된 연료분사펌프의 3D 도면을 나타내었다. 이 연료분사펌프는 MAN DIESEL & TURBO의 L28/32H 디젤엔진용으로 국내 P사의 순수 기술로 만들었다.

### 2.2 실험장치

Fig. 3은 본 연구에서 이용한 성능평가용 실험장치의 개략도이다. 연료분사펌프가 디젤엔진에 장착하여도 성능이 동일할 수 있도록 연료분사펌프용 캠 샤프트, 고압파이프, 연료분사밸브 등은 실제 디젤엔진에서 사용하는 부품으로 설계하였다. 캠을 구동시키는 모터는 저압 3상 유도전동기로서 55 kW의 최대출력과 93.6%의 효율을 발휘할 수 있는 모델로 구축하였다. Fig. 3의 ⑦과 같이 고압 파이프 내의 송출압력을 측정하기 위해서 0~2000 bar 사이를 측정할 수 있는 피에조 방식의 센서(Kistler사, Type 4067A2000)를 사용하였다. Fig. 3의 ⑧은 연료분사밸브에서 분사된 연료의 분사량을 측정하기 위한 매스실린더로 100사이클의 분사량을 측정하였다.



- ① Fuel injection pump
- ② Fuel injection valve
- ③ Control system
- ④ Electricity rotary motor
- ⑤ Fuel cam
- ⑥ Rotary encoder
- ⑦ Pressure sensor
- ⑧ Measuring cylinder
- ⑨ Roller guide

Fig. 3 Experimental apparatus in order to analyze injection characteristics

### 2.3 실험방법

Table 3에 실험 조건에 대해서 나타내었다. 4행정 사이클 디젤엔진의 연료분사는 크랭크축 2회전에 1회가 이루어진다. 따라서 720 rpm의 엔진회전속도를 감안한다면 캠축의 회전속도는 360 rpm으로 설정하면 된다. 그러나 본 실험에서는 일본 N사의 데이터와 비교하기 위해서 일본 N사의 분사테스터와 같은 370 rpm으로 설정하였다. 탱크에서 나온 연료가 연료공급펌프를 지나 연료분사펌프로 이송되는 압력은 3.5 bar로 일정하게 유지하였다. 연료의 분사량은 분사노즐을 통해 100번 분사된 연료량을 매스실린더를 통해 체적으로 측정하였다. 시험 연료는 40℃에서 동점도 10.21 cst를 가지는 Fuchs사의 MR3를 사용하였고, 이 MR3 시험유는 Man diesel & turbo사에서 시험용으로 사용되고 있는 것이다. 컨트롤 랙의 위치는 실제 엔진에서 부하에 따라 달라지는 것으로 본 연구에서는 엔진 부하별 설정된 값으로, 14, 21, 28, 35 mm 위치를 설정하였다. 이는 엔진 부하로 약 25%, 50%, 75%, 100%에 해당한다고 보면 된다. 연료분사펌프의 송출압력은 캠축 1회전 시 파이프 내 압력 변화를 확인하기 위하여 연료분사펌프의 출구(pump outlet)와 연료분사밸브의 입구(valve inlet)에서 각각의 센서를 이용하여 캠축 0.25° 간격으로 압력을 측정하고, Fig. 3의 ③ 컨트롤 시스템으로 연결하여 압력 데이터를 저장하였다.

Table 3 Test conditions of fuel injection pump

Item	Condition
Rotation speed of motor	370 rpm
Supply pressure	3.5 bar
Plunger stroke	100 cycle
Nozzle opening pressure	320 bar
Nozzle hole (Diameter × No. × Angle)	0.39×10×148°
Test fuel	MR3 (10.21 cSt. at 40℃)
Pressure pipe (Diameter × Length)	5×770 mm
Control rack position	14, 21, 28, 35 mm

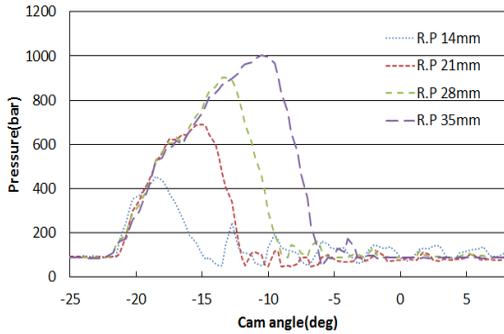
각각의 랙 포지션에서 3회 측정하여 평균을 나타내었다. 그리고 계측된 P사 개발 제품과 일본 N사에서 생산중인 제품의 데이터를 비교하였다.

## 3. 결과 및 고찰

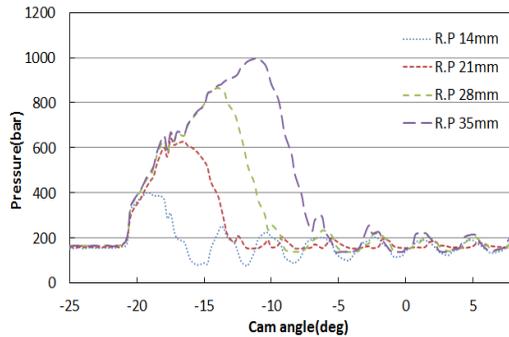
### 3.1 펌프 송출 압력

Fig. 4는 P사 제품과 N사 제품의 연료분사펌프의 출구 압력을 측정한 결과를 나타내고 있다. 가로축은 캠 각도를 나타내고 세로축은 분사압력을 나타낸다. 연료분사펌프의 출구 압력이 상승하기 시작하는 지점은 모든 랙 포지션에 있어서 P사 제품이 -20.75°CA, N사 제품은 -21.25°CA로 약 0.5°CA 정도 N사 제품이 빨랐다. Fig. 5는 P사 제품과 N사 제품의 연료분사노즐 입구의 압력을 측정한 결과를 나타내고 있다. 마찬가지로 가로축은 캠 각도를 나타내고 세로축은 분사압력을 나타낸다. 연료분사노즐의 입구 압력이 상승하기 시작하는 지점은 모든 랙 포지션에 있어서 P사 제품이 -19.75°CA, N사 제품은 -20.25°CA로 약 0.5°CA 정도 N사 제품이 빨랐고, 이는 연료분사펌프의 출구 압력과 같은 차이를 나타내었다. 즉, N사의 토출밸브가 연료의 분출에 더 응답성이 빠르다고 볼 수 있으나 연료의 이송 기간은 두 회사 제품이 같다고 볼 수 있다. 또한 이송 기간을 시간으로 나타내면 약 0.45 μs가 되고, 센서간 거리가 760 mm이기 때문에 연료의 압력 전파 속도는 1688 m/s가 된다.

Fig. 4의 랙 포지션 14 mm에 있어서 압력파형을 비교해보면, N사 제품의 최대압력은 약 440 bar에 캠축의 위치는 -17.00°CA이었고, P사 제품의 최대압력은 약 400 bar에 캠축의 위치는 -19.25°CA이었다. 마찬가지로 랙 포지션 35 mm에 있어서도 N사 제품의 최대압력은 약 1,010 bar에 캠축의 위치는 -10.00°CA이었고, P사 제품의 최대압력은 N사의 제품과 거의 같은 1,000 bar였지만 캠축의 위치는 -11.25°CA로 나타났다. 이는 P사 제품이 N사의 제품에 비해 급격한 압력상승을 보이면서 빠른 압력하강의 특성을 나타내고 있다. 이는 연료 분사량의 감소로 이어지는 것으로 사료된다. Fig. 5의 연료분사노즐 입구의 압력 파

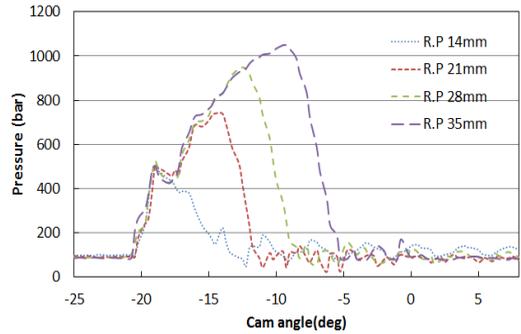


(a) N corporation

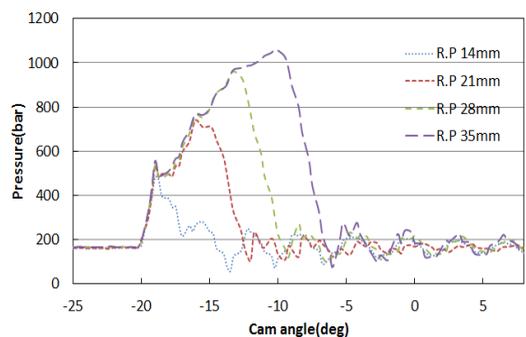


(b) P corporation

Fig. 4 Outlet pressure of fuel injection pump due to rack positions



(a) N corporation



(b) P corporation

Fig. 5 Inlet pressure of fuel injection nozzle due to rack positions

형도 연료분사펌프의 출구와 비슷한 형태를 나타내고 있다. 최대 압력은 P사는 1,062 bar, N사는 1,049 bar로 P사가 약간 높지만 거의 비슷한 성능을 나타내고 있다. 약간 높은 이유 중의 하나는 고압 관 내 남아있는 잔압 때문으로 사료된다. P사 제품의 잔압은 약 155 bar, N사 제품은 95 bar로서 P사가 N사보다 약 60 bar 높다. 같은 캠 형상일 때 잔압이 높으면 분사시기가 늦어지고 분사밸브가 닫힌 후의 압력변화 폭도 커지게 되어 분사 끝에 영향을 미칠 수 있다. 또한 두 제품의 잔압 차이는 토출밸브의 스프링 장력 때문으로 사료된다.

### 3.2 연료분사노즐 분사량

Fig. 6에는 랙 포지션에 따른 연료 분사량의 측정결과를 나타내었다. 랙 포지션의 증가에 따라 연료 분사량이 선형적으로 증가하는 것을 알 수

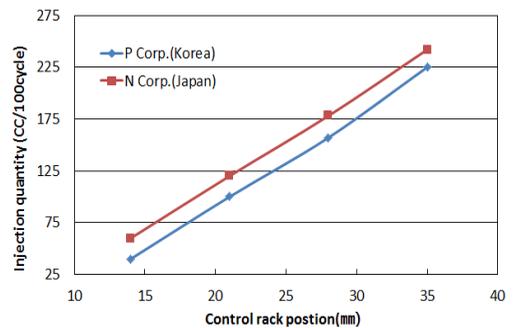


Fig. 6 Comparison of injection quantity due to rack positions

있다. 그래프의 기울기는 P사 연료분사펌프가 9.73, N사 연료분사펌프가 9.57로 거의 비슷한 경향을 나타내었다. 그러나 N사의 연료분사펌프가 P사의 연료분사펌프보다 모든 랙 포지션에서 약 20 cc 정도 연료 분사량이 많다. 연료분사펌프는

컨트롤 랙의 위치를 조정할 수 있는 포인터(pointer)가 있어 이 부분에 와셔(Washer)를 추가 또는 제거하여 분사량을 조절할 수 있다. 따라서 기올기가 비슷하기 때문에 얼마든지 같은 분사량이 될 수 있도록 조절할 수 있다고 판단된다.

결과적으로 P사의 연료분사펌프는 연료의 분사량 기올기가 N사의 연료분사펌프와 1.6% 오차 밖에 되지 않기 때문에 와셔 등을 통한 조절로 분사량을 동일하게 맞춘다면 P사 연료분사펌프는 N사 연료분사펌프와 동일한 성능을 발휘할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 잔압의 영향이 분사량 등에 큰 영향을 미칠 것으로 사료되어 앞으로 잔압과 관련된 추가 실험이 필요할 것으로 고려된다.

## 5. 결 론

국내 최초로 L28/32H 중속 디젤엔진용 연료분사펌프를 P사에서 개발하였고, 주요 치수와 조도를 정밀 측정하여 N사의 상용 제품과 비교하였다. 그리고 제품의 성능 평가를 위하여 실험 장치를 제작하여 연료분사펌프의 분사압력 및 분사량을 측정된 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 연료분사펌프의 성능평가를 위하여 분사압력을 측정한 결과 연료의 분사시기는  $-19^{\circ}\text{CA}$ , 연료 압력과의 전파속도 1,688 m/s, 최대 분사압력은 P사의 연료분사펌프 1,061 bar, N사의 연료분사펌프는 1,049 bar로 대부분의 성능평가 데이터가 유사하였다.

2) 매스실린더로 측정한 분사량은 모든 컨트롤 랙 위치에서 약 20 cc 정도 높았으나, P사 및 N사의 연료분사펌프 분사량 기올기 오차가 2% 이내로 조정할 수 있는 범위에 있었다.

3) P사 및 N사의 연료분사펌프는 성능에 영향을 줄 수 있는 성능 특성은 대부분 유사하게 평가되어 국내 제조 기술의 향상을 확인할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

## References

1. S. H. Ryu, D. H. Kim, B. S. Kim and T. H. Park, 2011, "Optical Observation of Cavitation Phenomena in Diesel Fuel Injection Pumps", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 35, No. 4, pp. 460-467. (DOI:10.5916/jkosme.2011.35.4.460)
2. G. W. Kim, 2012, "A Study on the Analysis of Fuel Injection Pump for Marine Diesel Engine", Master's thesis, Korea Maritime and Ocean University.
3. Y. J. Yang, 2012, "Study on Simulation of Fuel Injection Pump for Marine Medium Diesel Engine", The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 6, pp. 123-129.
4. Y. J. Yang, 2013, "Study on Simulation of Fuel Injection Nozzle for Marine Medium Speed Diesel Engine", The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 3, pp. 41-47.
5. H. K. Kim, 2003, "A Study on the Analysis of Fuel Oil Supply System and Configuration of Manufacturing Technology of Fuel Oil Injection Pump for 2-Stroke Marine Diesel Engine", Master's thesis, Pusan National University.
6. R. H. Park, 2015, "A study on the WCC Coating for injection pump plunger reduced by cavitation phenomena coated pump application to medium speed diesel engine", Master's thesis, Pusan National University.
7. S. H. Hong, B. Lee, Y. J. Cho and J. K. Park, 2015, "Optimal Design of Clearance in Fuel Injection Pump", Journal of the Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers, Vol. 31, No. 4, pp. 148-156. (DOI:10.9725/kstle.2015.31.4.148)