

〈논 문〉 SAE NO. 933734

간접분사식 디젤엔진의 실운전중 피스톤 Slap운동측정에
 관한 실험적 연구
 An Experimental Study on the Piston Slap Motion Measurement during
 Real Operation of an IDI DIESEL Engine.

박 승 일* 김 승 수**
 S. I. Park, S. S. Kim

ABSTRACT

Piston slap is one of the major sources of noise in a 4-cycle diesel engine. Piston slap is not only one of major sources of noise, but also a source of deterioration of engine performance, i.e. liner cavitation erosion, piston-liner wear, oil consumption and piston assembly friction.

Piston slap motion was measured from a 4-stroke IDI diesel engine by means of eddy current type gap sensors mounted near the top and bottom of the piston thrust and antithrust skirts. Effects of engine speed, load and coolant temperature on piston motion were investigated.

The measured piston motion showed 6 slaps per cycle resulting from the change of side force. Major piston slap timing was retarded as engine speeds became higher. The increase of engine load made large piston transverse movement toward thrust side of cylinder block. Piston transverse movement was due to reduced piston-liner clearance at higher coolant temperature.

주요기술용어 : Piston(피스톤), IDI Diesel(간접분사식디젤),
 Piston Slap(피스톤횡운동), Gap Sensor(변위센서), Side Force(측압력)

1. 서 론

자동차 소음의 주원인인 엔진의 소음저감대책으로 가장 중요한 것은 그 가진원에 대한 대책이다. 가진원 중에서 실린더 내의 연소압력과 함께 큰 비중을 차지하는 것이 엔진 운동부에 의한 충격적 가진이다. 이러한 충격적 가지는 특히 고주파 성분의 진동을 발생시켜 엔진 소음에의 기여가 크다. 충격적 가진중 주요한 것의

하나가 피스톤 slap이며 이것은 연소압력, 피스톤계의 관성력 등에 따라 피스톤이 왕복운동방향에 대하여 직각으로 이동하면서 실린더블록에 충돌하는 현상이다.

즉 피스톤에 가해지는 연소압력에 의한 힘과 관성력의 합력의 변화와 컨벡팅로드 경사각의 변화에 따라 실린더블록에 가해지는 측압력이 변동하면서 피스톤 slap을 야기시킨다. 엔진의 크랭크 기구는 본질적으로 피스톤 slap을 가지고

* 현대 자동차 마부리 연구소 엔진설계 3부

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

있으며 4사이클 엔진의 경우 통상 1사이클당 6 내지 8회의 피스톤 slap이 있다. 이 slap에 의한 엔진소음에의 기여는 많은 논문에서 지적되고 있으며^(1~6) 특히 예연소실식 디젤엔진에서 기여가 크다고 알려져 있다.⁽²⁾

이론적으로는 종래부터 많은 연구가 있으나^(7~9) 모델링시 피스톤계에 작용하는 마찰력 성분이나 엔진오일에 의한 댐핑효과, 연소압과 불균일한 열분포에 의한 피스톤의 변형 등을 정확히 모사하기 어렵고 소음 측면에서도 복잡한 경로를 통해 피스톤 slap이 외부로 전달되므로 정확한 계산은 어려운 실정이다.

피스톤 slap을 줄이기 위해서는 피스톤과 라이너의 간극을 줄이거나 핀오프셋을 주는 방법⁽²⁾ 등이 추천되나 이 경우 엔진 마찰력의 증가, 카본의 파다 퇴적 등 다른 문제를 발생시킬 소지가 있으므로 주의를 요한다. 피스톤 slap은 엔진의 소음 측면에서 뿐만 아니라 라이너 cavitation⁽¹⁰⁾, 피스톤-라이너 마모⁽¹¹⁾, 엔진오일소비⁽¹²⁾ 등에도 영향을 주며 엔진의 마찰손실⁽¹³⁾, 피스톤 소착, 피스톤링의 윤활 등에도 관련이 있다. 그러므로 피스톤의 운동측정을 통한 피스톤 slap기구의 이해는 엔진의 전반적인 신뢰성 향상을 위해 필요 불가결 하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 피스톤 운동을 여러 운전조건에서 측정하여 피스톤 slap기구를 이해하고 동시에 각 운전조건이 피스톤운동에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 이를 위해 피스톤에 eddy current type gap센서와 열전대를 장착하고 장착된 센서의 신호를 엔진밖으로 이끌어내기 위하여 grasshopper linkage가 설치되어 진다.

2. 실험 장치 및 실험방법

2.1 실험 엔진의 제원

Table 1은 본 실험에 사용된 엔진의 제원을 나타내며 Table 2는 피스톤의 제원을 나타낸다.

여기서 pin offset의 제원은 엔진을 전면에서 볼 때 핀의 중심이 피스톤중심축으로부터 0.5

Table 1. 실험 엔진의 제원

총 배기량	2476cc
점화 형태	압축착화(IDI)
실린더 내경X행정	91.1×95mm
압축비	21
출력	80PS/4200rpm

Table 2. 피스톤의 제원

피스톤-라이너 간극	0.03mm(직경기준)
Pin offset	0.5mm (anti-thrust side)

mm우측에 있다는 것을 말한다.

2.2 실험 장치

Fig.1은 엔진 실험을 위한 실험 장치의 개략도를 나타내고 있다. Grasshopper linkage가 크랭크케이스 내에 설치되어 있어 피스톤 스커트에 부착된 gap센서 신호와 열전대신호를 엔진밖으로 이끌어 내는 역할을 하며 냉각수 출구와 오일팬에 엔진작동온도를 알기 위하여 열전대를 설치하였다.

피스톤 스커트에 장착된 gap센서는 피스톤과 라이너간의 간극을 측정하며 gap센서 주위에 장착된 열전대는 gap센서에서 나오는 신호의 보상 및 실험 중의 동일한 작동조건을 맞추주기 위한 기준온도로 삼기위함이다.

데이터획득시스템은 크랭크샤프트에 부착된 등간격으로 360개의 홈을 낸 디스크와 광센서를 이용하여 크랭크각도 1°마다 실린더 압력데이

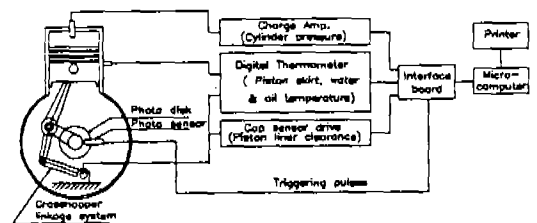


Fig.1 Overall data acquisition system including test engine and measuring system

타와 gap센서에서 나오는 신호를 interface card에서 받도록 되어 있으며 또한 interface card에 내장된 timer는 엔진 1회전 동안 걸리는 시간을 위의 데이터와 함께 컴퓨터에 전송하도록 되어 있다.

실린더 내의 연소실압력은 flush mounted type 압력센서(Kistler model 6061)에 의하여 읽혀지며 gap센서는 eddy current type(Kaman model KD2310-2UB)을 사용하였다. 피스톤 및 냉각수 온도, 오일 온도는 K type 열전대를 사용하여 digital thermometer에서 그 값을 읽었다.

2.3 Gap센서의 calibration

2.3.1 부하 효과(loading effect)

Eddy current type gap센서를 도체에 장착하는 경우에는 센서가 장착되는 도체 부위에도 eddy current가 유도될 수 있으며 이를 부하효과(loading effect)라 한다. 본 실험에서는 먼저 센서 장착부위의 부하효과를 알아보기 위하여 센서 장착부인 피스톤 스커트부의 살두께가 0.1mm 정도 차이가 나는 곳에 센서를 장착하여 센서의 sensitivity를 비교하였다. Fig.2에서 mounting 1이 mounting 2에 비하여 스커트부의 살두께가 얇으며 미소한 살두께의 변화에 의하여 센서의 선형성은 유지되나 sensitivity가 변화됨을 알 수 있다.

따라서 gap센서의 부하효과를 최소화하기 위하여 장착부의 구멍크기를 가능한 크게 하고 두께는 얇게 하는 것이 좋다. 본 calibration에서는 이 점을 감안하여 장착부의 구멍크기 및 살두께를 결정하였으며 센서와 장착부 사이에 절연체(bakelite)를 삽입하였다. 또한 calibration도 실험할 피스톤에 센서를 장착하여 실행하였다. Fig.3은 센서 장착 방법을 보인다.

2.3.2 상온에서의 calibration

상온에서의 calibration을 위하여 별도의 리그(rig)장치를 제작하였다. 리그장치는 피스톤과 피스톤을 움직이는 이송기구, 다이알게이지(dial gage) 그리고 피측정체로 구성되어 있다. 이송기구로 피스톤을 움직이고 다이알게이지 눈금으로 이송거리를 확인하면서 센서의 출력전압을

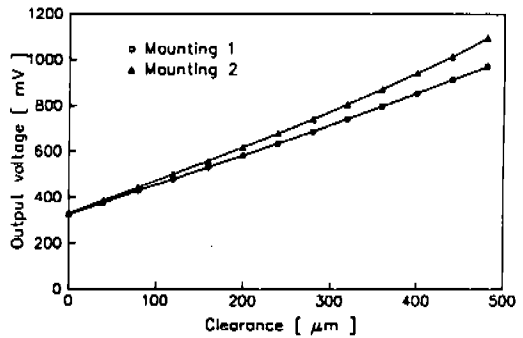


Fig.2 Loading effect on gap sensor output

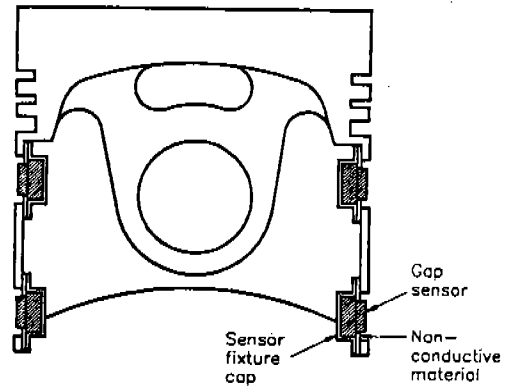


Fig.3 Installation of gap sensors

측정하여 상온에서의 calibration chart를 센서 4개에 대하여 구하였다. Calibration시 실사용 조건과 같은 조건에서 데이터를 얻기 위하여 실험할 피스톤에 gap센서를 설치하였고 피측정체는 라이너를 사용하였다. Fig.4는 4개 gap센서에 대한 calibration결과를 나타내며 모든 gap센서에 선형성이 있는 것을 알 수 있다.

2.3.3 실작동 온도에서의 calibration

실엔진 실험시 gap센서가 장착되어 있는 스커트부의 온도는 상온보다 최고 100°C정도 높으므로 고온에서의 calibration이 필요하다. 오븐에서의 gap센서 calibration시 piston과 liner(target)사의 간극을 주기 위하여 피스톤과 라이너 사이에 얇은 금속판을 끼운 후 클램프로 고정하여 오븐에서 피스톤 온도에 따른 출력전압의 변화를 측정하였다.

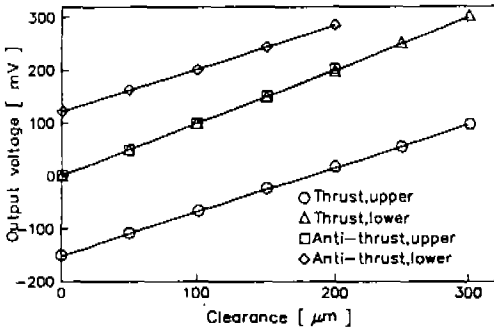


Fig.4 Sensor calibration curve at room temperature

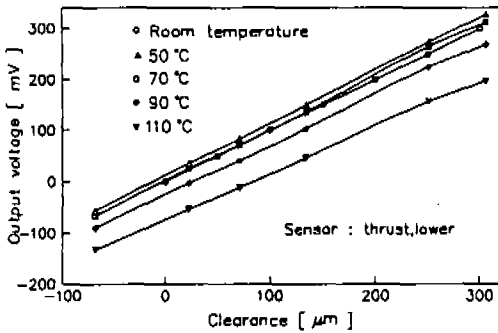


Fig.5 Sensor calibration curve at operating temperature

피스톤 온도는 스커트에 장착된 열전대를 이용하여 측정하였으며 온도범위는 상온에서 90~120°C까지 5°C단위로 하였다. Fig.5는 thrust축 스커트의 하부에 장착한 gap센서에서의 calibration 결과이다. 온도가 상승하면 센서의 sensitivity는 대체로 약간 떨어지며 calibration curve가 이동되나 선형성은 유지됨을 알 수 있다. 다른 gap센서도 모두 비슷한 경향을 보였다.

2.4 실험 방법

본 실험에서는 gap센서 선(wire) 4개를 함께 설치할 경우 한번 끊어지게 되면 4개 모두가 절단됨으로 이의 부담을 줄이기 위하여 먼저 피스톤의 thrust축 스커트에 gap센서를 2개 부착하여 실험한 후 anti-thrust축 스커트에 gap센서를 부착하여 실험을 행하였다. 4개의 gap센서에서 나온 신호가 동시에 받은 신호가 아니기

때문에 실험시 동일한 실험조건을 맞추는 것이 필요한데 이를 위한 기준으로서 피스톤의 thrust축 스커트의 상부에 부착된 열전대에서 나오는 온도로 그 기준을 삼았으며 냉각수 온도 및 오일 온도를 참고하였다.

피스톤 스커트부의 온도를 기준으로 한 것은 다른 부위의 측정온도보다 엔진 운전조건에 보다 민감하게 반응하기 때문이다. 실험은 엔진회전속도, 부하, 냉각수 온도 등을 변화시키면서 행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 피스톤의 운동

Fig.6은 2000rpm, 전부하상태에서 측정된 피스톤과 라이너의 간극을 나타내며 Fig.6에서 (a), (b), (c), (d)는 측정부위에 따른 데이터이다. 센서에서 측정된 값을 거리로 환산할 때는 가장 작은 값을 영(zero)으로 취하였고 센서의 선형성으로부터 간극을 계산하였다.

Gap센서데이터는 3사이클의 평균값을 취하였으며 사이클간의 편차는 매우 작아서 평균을 취함에 따른 오류는 없었다. 스커트하부에서의 데이터는 상부에서의 데이터와 달리 피스톤운동을 명확하게 나타내지 못하는데 이는 스커트하부에서 피스톤과 실린더의 간극이 상부에 비하여 작기 때문이며 하사점 $\pm 50^\circ$ 부근에서의 데이터값에 불연속이 있는 것은 하사점부근에서 센서가 장착된 스커트하부가 실린더밖으로 튀어나오기 때문이다. 피스톤 운동을 보면 Fig.6(b)에서 알 수 있듯이 운동 방향이 거시적으로 보아 실린더간극을 6번 오가는데 이는 피스톤 운동의 가장 큰 외력인 축압력의 방향이 1사이클당 6회 바뀌기 때문이다.

Fig.7은 측정된 데이터를 기초로하여 피스톤을 강체로 생각하고 간극과 피스톤의 경사각을 확장하여 크랭크각도 5° 마다 그린 것이다.

각 행정중의 피스톤 운동을 알아본다.

3.1.1 흡입 행정

0° 에서 thrust축 실린더벽을 이동하기 시작하

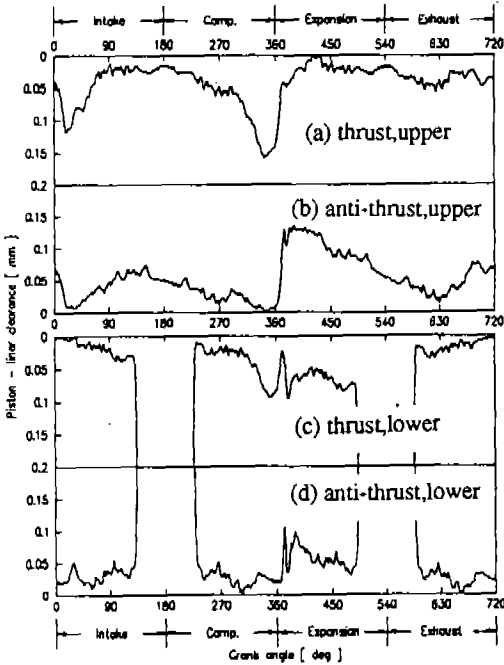


Fig.6 Piston motion at 2000rpm, full load

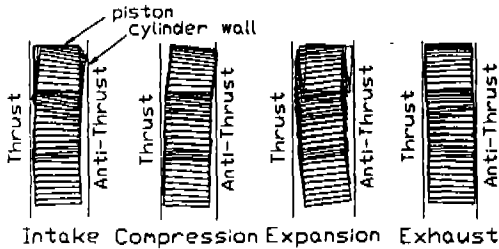


Fig.7 Animation of piston motion

여 20°~30°에서는 엔진회전과 같은 방향으로의 회전(이하(+)) tilting)이 생기며 30°~40°에서는 엔진회전과 반대 방향으로의 회전(이하(-)) tilting)이 생긴다. 40°이후 행정의 중반부까지는 thrust측으로 이동하고 행정의 후반부에서는 다시 anti-thrust측으로 이동한다.

3.1.2 압축 행정

압축 행정에서는 측압력이 항상 anti-thrust측으로 작용하게 되므로 거의 전구간에서 anti-thrust측으로 이동하며 340°부근에서 anti-thrust측에 도달한다. 행정 후반부에서는 (+) tilting이 보인다.

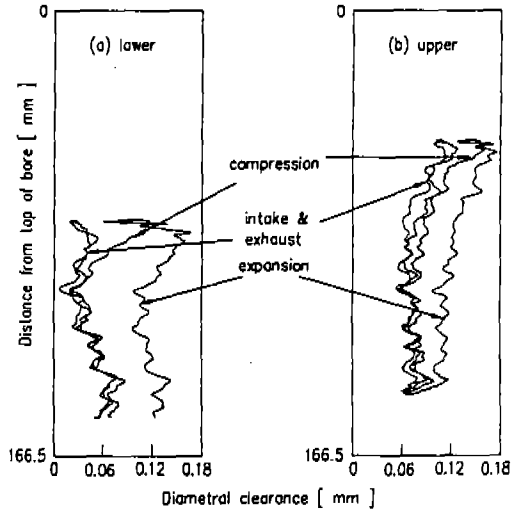


Fig.8 Piston-to-Bore diametral clearance at 2000rpm, full load

3.1.3 폭발 행정

연소압력에 의하여 측압력이 360°직후 최대치를 보이는 구간이다. 폭발 행정 초기부터 피스톤이 급격하게 thrust측으로 이동하여 370°부근에서 major slap이 발생한다. 편오프셋이 anti-thrust측에 있기 때문에 충돌점은 스커트상부에 있으며 따라서 편오프셋이 thrust측에 있어 스커트하부가 충돌하는 경우보다 slap에너지도 커져 slap소음측면에서는 좋지 않음을 알 수 있다. 충돌 직후 격렬한(-) tilting이 있으며 행정 후반에서는 anti-thrust측으로 이동한다.

압축과 폭발행정에서는 측압력과 폭발압력이 크므로 피스톤의 운동 뿐만 아니라 피스톤과 블록의 변형이 중요하게 된다. Fig.8은 스커트의 상부와 하부에서 측정한 값을 각각 더한 값으로 1사이클 동안의 피스톤과 실린더사이의 간극(diametral clearance)변화를 나타낸 것이다. 압축행정 후반부와 폭발행정에서 그 값이 매우 큼을 알 수 있으며 이는 피스톤 스커트의 변형이 주요한 인자로 판단된다. 또한 상대적으로 강성이 낮은 스커트 하부에서 변형도 크다는 것을 알 수 있다.

3.1.4 배기 행정

행정 전반부에서는 anti-thrust측으로 이동하

며 행정 후반부에서는 thrust측으로 이동한다.

3.2 엔진회전속도 변화에 의한 피스톤 운동

Fig.9는 엔진 회전속도 변화에 따른 no load에서의 실린더 압력 선도와 이를 토대로 하여 계산한 측압력 선도를 나타낸다. 측압력은 피스톤계 및 컨넥팅로드의 왕복질량에 의한 관성력과 실린더 압력의 합력을 컨넥팅로드 경사각에 따라 횡방향의 분력으로 나눈 값으로 양의 값의 측압력은 thrust측으로 힘이 작용할 때이며 음의 값의 측압력은 anti-thrust측으로 힘이 작용할 때이다.

엔진회전속도가 증가할수록 실린더의 최대압력은 약간 증가한다. 측압력은 실린더 압력이 작은 흡입과 배기 행정, 압축 행정 초반과 폭발 행정 후반에서는 관성력 증가에 따라 증가하며 실린더 압력이 높은 압축 행정 후반과 폭발 행정 전반에서는 증가된 관성력이 실린더압력을 상쇄하는 방향으로 작용하여 감소하게 된다.

Fig.10은 엔진회전속도변화에 따른 피스톤 운동을 나타낸다. 관성력이 지배적인 흡입과 배기 행정에서는 관성력 증가에 의한 측압력증가에 따라 피스톤이 thrust 방향으로의 측압력이 커지면 thrust측으로 이동이 커지고 anti-thrust 방향으로의 측압력이 커지면 anti-thrust측으로 이동이 커짐을 알 수 있다.

따라서 rpm이 상당히 증가하면 폭발행정에서의 major slap 외에도 흡입과 배기행정에서의 관성력에 의한 slap도 그 크기가 상당히 커지게 된다는 것을 예상할 수 있다. 압축 행정 후반에서는 anti-thrust측으로의 측압력이 감소하므로 anti-thrust측으로의 이동이 작아지며 폭발 행정에서는 major slap timing이 약간 지연된다.

또한 rpm증가에 의한 피스톤 운동의 변화는 스커트의 하부에서 좀더 잘 나타나며 스커트 하부가 major slap시 thrust측으로 이동이 많게 되는 것으로 보아 엔진회전속도증가시는 피스톤의 tilting이 감소하여 충돌점이 스커트 상부에서 아래쪽으로 내려오는 것으로 판단된다.

3.3 부하변화에 따른 피스톤 운동

Fig.11(a)는 부하변화에 따른 실린더 압력을

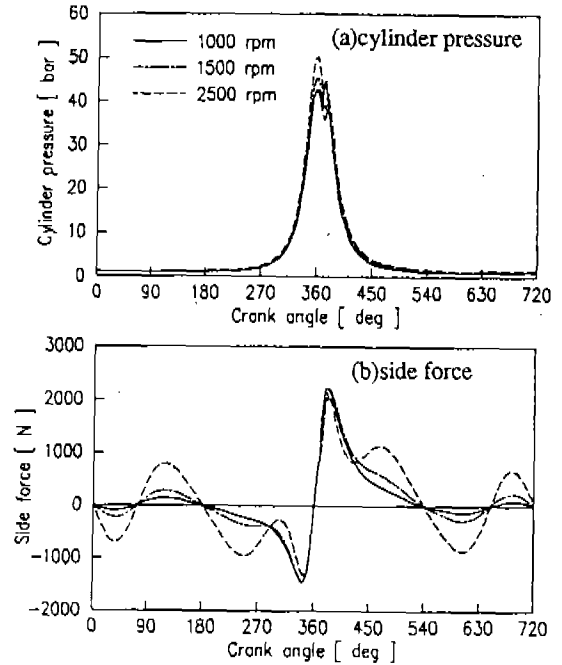


Fig.9 Cylinder pressures and side forces under various engine speeds and no load conditions

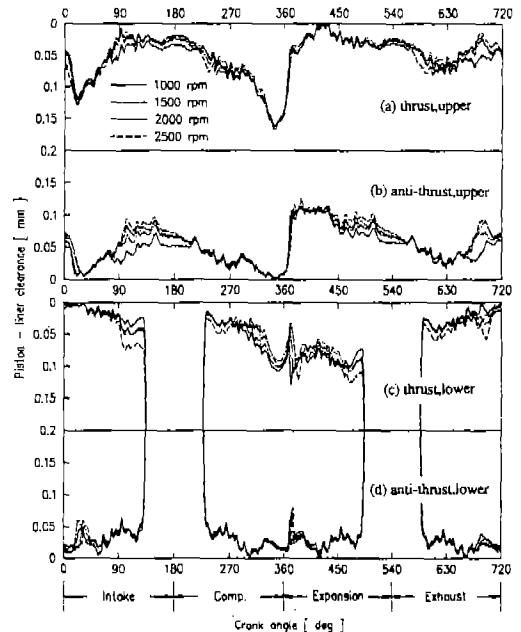


Fig.10 Piston motion under various engine speeds and no load conditions

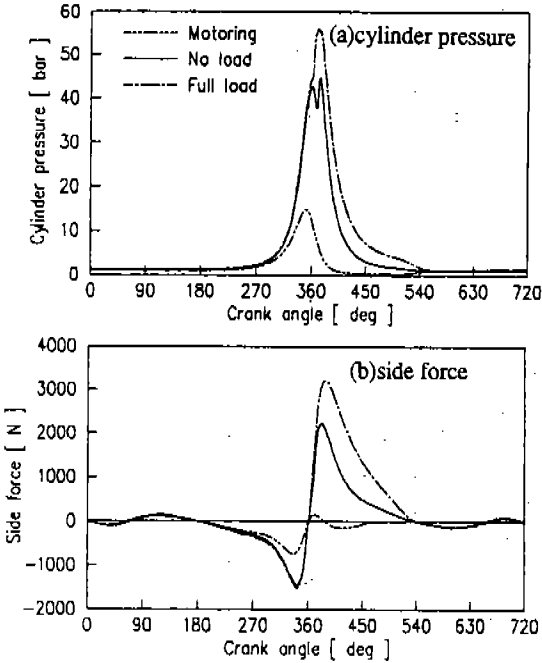


Fig.11 Cylinder pressures and side forces under various engine loads and 1000 rpm

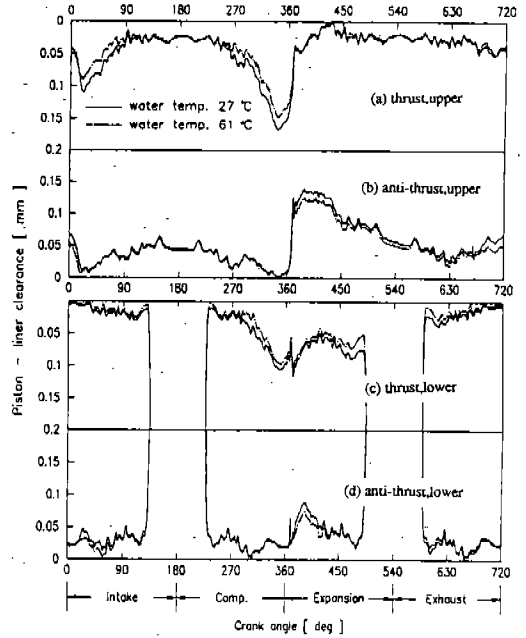


Fig.13 Effect of coolant temperature on piston motion

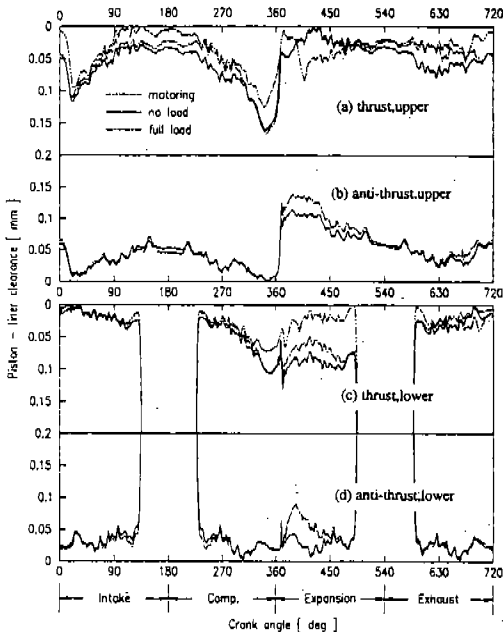


Fig.12 Piston motion under various engine loads and 1000rpm

나타내며 부하증가에 따라 360°이후에 압력유형과 최대압력이 모두 변함을 알 수 있다. Motoring실험시는 실린더헤드에 장착된 글로우플러그(glow plug)를 빼고 실험하여 주로 관성력에 의한 피스톤운동을 진행정에서 관찰하고자 하였다. Fig.11(b)는 부하변화에 따른 측압력 선도이며 motoring시는 회전속도에 의한 관성력의 영향이 현저하며 전부하에서는 폭발행정에서 측압력이 증가한다.

Fig.12는 부하변화에 따른 피스톤 운동을 나타낸다. 흡입과 배기 행정에서는 부하변화시 피스톤 운동에 차이가 거의 없을 것으로 예상하였으나 실험결과 차이를 나타내고 있다. 압축행정 후반부에서는 부하증가에 따라 큰 차이를 보이지 않으나 폭발 행정에서는 major slap발생 직후 anti-thrust측 스커트 상부와 스커트 하부에서 thrust측으로의 이동이 커진다. 이것은 실린더 압력과 측압력이 증가하면서 실제의 피스톤 이동 성분과 실린더와 피스톤의 변형이 복합적으로 나타나기 때문이라고 판단된다.

3.4 냉각수 온도변화에 따른 피스톤 운동

Fig.13은 냉각수 온도 변화에 따른 피스톤 운동을 나타낸다. 냉각수 온도가 상승하면 피스톤과 실린더벽의 열팽창계수차에 따라 피스톤과 라이너의 간극이 줄어들어 피스톤이 운동할 수 있는 거리도 짧아지게 된다. Fig.13에서는 그 영향이 확실히 드러나며 major slap시도 이동거리가 짧아짐을 알 수 있다. 결과적으로 slap이 진동측면에서 보다 중요한 엔진작동조건은 엔진 작동온도가 낮을 때임을 알 수 있다.

4. 결 론

Eddy current type gap센서를 이용하여 간접 분사식 디젤엔진에서 피스톤의 횡방향운동을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 피스톤 횡방향운동의 측정결과와 측압력을 비교한 결과 피스톤 운동의 주된 외력은 측압력임을 알 수 있었다. 결과적으로 피스톤이 측압력에 의해 1사이클동안 6번 횡운동 방향을 바꾸는 것이 관찰되었다.
- 2) 엔진 회전 속도가 증가하면 폭발 행정에서 실린더 압력과 반대방향으로 작용하는 관성력이 증가하여 major slap timing이 약간 지연되는 경향이 갖게 된다.
- 3) 피스톤은 부하가 증가함에 따라 major slap 직후 snti-thrust측 스커트상부와 스커트하부에서 thrust측으로 크게 이동하며 이것은 통상 부하증가에 따라 엔진블록진동이 커지는 현상과 일치한다.
- 4) 엔진운전온도가 증가되면 피스톤과 라이너의 열팽창계수의 차와 온도상승 폭의 차에 따라 피스톤과 라이너의 간극이 줄어들게 된다. 이로 인하여 피스톤의 횡방향 운동거리는 짧아지게 되므로 피스톤 slap으로 인한 문제가 덜 심각하게 된다.

REFERENCES

1. Yoshio Fujimoto, Toyohiko Suzuki, Yoshitaka Ochiai and Hiroshi Kageyama : “테이저럴 기관におけるピストンスラップの實驗的研究, “日本機械學會論文集(B編), Vol.51, No. 470(1985-10)
2. Takashi Usami, Shinji Wada and Shigero Sonoda : “Piston slap noise of indirect combustion diesel engine,” SAE 750801
3. W.Sander, W.Steidle and E.Wacker : “Piston movement and influence on noise of automotive engines”, SAE790272
4. S.d.Haddad and H.L.Pullen : “Piston slap as a source of noise and vibration in diesel engines,” Journal of Sound and Vibration(1974) 34(2), 249-260
5. Shoichi Furuhashi and Koji Hirukawa : “Piston slap motion and engine noise under low temperature idling operation of diesel engines,” SAE830066
6. Shoichi Furuhashi : “ピストンスラップ騒音とその対策,” 内燃機関, Vol.13, No.153, 1974, 7
7. Hiroshi Okamura, Masahiro Maekawa and Kazuhide Ohta : “ピストンスラップのメカニズムとエンジン騒音について, “自動車技術, Vol.42, No.12, 1988.
8. Kazuhide Ohta, Yoshihiko Irie, Kiichi Yamamoto and Hideyuki Ishikawa : “Piston slap induced noise and vibration of internal combustion engines(1st report, theoretical analysis and simulation),” SAE87099-
9. S.D.Haddad and D.A.Howard : “Analysis of piston-slap induced noise and assesment of some methods of control in diesel engines,” SAE80051
10. Tohru Yonezawa, Hiroshi Kanida and Kiyoshi Katsuragi : “シリグライナにおけるキャセーションエラーに關する研究,” 日本機械學會論文集(C編), Vol.50, No.49(1984-11)
11. Y.Ishizuki, F.Sato and K.Takase : “Effect of cylinder liner wear on oil consumption in heavy duty diesel engines,” SAE810931

12. 鳥居久直 et al.: “ピストン運動解析モデルの開發, “自動車技術, 學術講演會前刷集871, 昭和62-5.

13. Masaaki Takiguchi, Hidenori Kikuchi and Shoichi Furuhashi: “Influence of clearance between piston and cylinder on piston friction,” SAE881621