

피스톤 슬랩에 의한 엔진 진동 현상의 실험적 분석과 예측 방법에 관한 연구

A Study of Experimental Analysis and Prediction

Method of Vibration of Engines due to Piston - Slap

김 양한 * 오 권 기웅 **

Yang - Hann Kim Ki - Woong Kwon

1. 서론

자동차 관련 소음 및 진동중 엔진과 관련된 것은 흡배기계 소음과 엔진 자체의 각 구동 부위 및 연소실 소음으로 대별하여 볼 수 있다. 특히 연소실 소음의 경우에는 엔진 내부에서 발생하는 진동과 압력 파가 엔진을 진동 시키고, 이러한 엔진의 진동이 방사음을 발생시켜 형성되는 만큼 그 해석 및 공학적 접근 방법이 용이하지 않다. 연소실 소음은 압력의 갑작스런 변화에 의한 폭발소음과 피스톤 과 실린더 벽면의 충돌에 의한 피스톤 슬랩 (piston slap) 으로 크게 구분할 수 있으며 압력이 높지 않고 압력의 변화가 빠르지 않을 경우에는 피스톤 슬랩이 기계적 소음의 주 원인이 되는 것으로 알려져 있다. [1]

본 고에서는 피스톤 슬랩에 의한 진동현상을 예측하기 위한 이론적 접근 방법을 제시하고 이의 타당성을 검증하기 위한 실험적 방법을 제시하고자 한다. 또한, 피스톤과 실린더의 간극 진단을 위해 슬랩 신호를 이용하는 방법에 대해 살펴보고, 피스톤과 실린더의 충돌 속도를 통해 슬랩 신호를 줄이기 위한 엔진의 설계 방법에 대해 살펴보고자 한다.

2. 피스톤 슬랩의 이해

* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

피스톤 슬랩 현상의 이론적 해석을 가능하게 하는 보편적인 가정을 살펴보면 다음과 같다.

- i) 실린더내의 압력에 의해 피스톤에 작용되는 힘은 없다.
- ii) 크랭크 축의 각속도(ω)는 일정하다.
- iii) 피스톤의 회전 운동은 없으며, 피스톤과 실린더는 점 충돌 (point impact) 한다.
- iv) 접촉에 의해 발생된 응력파 (stress wave) 가 충돌 점으로로 반사되기 전에 충돌 현상은 완료된다.

피스톤 슬랩의 역학적 해석을 위해 Fig. 1의 o점에 대한 모우멘트 평형식을 생각하면 side - thrust force 는 다음과 같이 계산된다. [2]

$$F_y^o = \sin \theta \left\{ (M + m_p) \left(r \omega \frac{2r^2}{2l^2} \right) + m \left(k^2 - ab \right) \frac{r^2}{l^2} \right\} - \sin 2\theta \left\{ (M + m_p) r \omega \frac{2r}{2l} \right\} - \sin 3\theta \left\{ (M + m_p) r \omega \frac{2r^2}{2l^2} \right\} \quad (1)$$

그리고 엔진 변수가 side - thrust force 에 미치는 영향을 알아보기 위해 양변을 $Mr\omega^2\gamma$ 로 나누어 무차원화 하였다. 여기서 $Mr\omega^2$ 은 피스톤이 크랭크의 끝단에 가상으로 놓여있을 경우 작용하는 구심력이다.

$$\psi_s^y = -((1 + \mu \delta) \cos \theta + (1 + \mu \delta) \gamma \cos 2\theta - \frac{\mu}{\gamma} (\rho^2 - \delta + \delta^2) \sin \theta) \quad (2)$$

여기서, $\psi_s^y = \frac{F_s^y}{M r \omega^2 \gamma}$, $\gamma = \frac{r}{l}$, $\mu = \frac{m_p}{M}$, $\delta = \frac{a}{l}$, $\rho = \frac{k}{l}$ 를 나타낸다.

피스톤과 실린더의 간극에 의한 피스톤의 측면 운동은 피스톤에 작용하는 side-thrust force의 방향이 바뀔 때 시작된다. 측면 운동이 시작될 때의 크랭크 축의 각도를 θ_0 로 표시하면, θ_0 는 side-thrust force가 0이 되는 θ 의 값이 된다. 식 (2)로부터 엔진의 회전 속도에 관계없이 side-thrust force가 0이 되는 θ 의 값은 0° , 80.61° , 180° , 279.39° 가 됨을 알 수 있다. $\theta = 0^\circ$ 와 $\theta = 180^\circ$ 는 커넥팅 로드와 축 방향이 바뀔 때 따라 side-thrust force의 방향이 바뀔 것을 의미한다. 여기서 $\theta = 0^\circ$ 인 점을 TDC (Top Dead Center), $\theta = 180^\circ$ 인 점을 BDC (Bottom Dead Center)라 한다. 나머지 두 각은 피스톤과 커넥팅 로드와 관성력 합이 0이 될 때 (mid-stroke) side-thrust force의 방향이 바뀔 것을 나타낸다.

이제부터 TDC로부터 시작되는 피스톤 슬랩을 슬랩 1, 그리고 순서대로 슬랩 2, 슬랩 3, 슬랩 4라 하겠다.

슬랩 운동이 시작되어 피스톤과 실린더 벽면의 충돌이 발생할 때까지 피스톤의 측면 방향 운동 방정식은 다음과 같다.

$$(M + m_p) \frac{d^2 y}{dt^2} = F_s^y \quad (3)$$

피스톤 슬랩이 시작되는 각도 θ_0 에서 충돌되는 순간까지의 각도 변화량 (θ')과 충돌되는 순간의 피스톤의 속도는 위 식의 이차 적분에 의해 계산된다. 즉,

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{1}{(M + m_p) \omega^2} F_s^y$$

$$\frac{dy}{d\theta} = \int \frac{1}{(M + m_p) \omega^2} F_s^y d\theta + A \quad (4)$$

$$y = \int \int \frac{1}{(M + m_p) \omega^2} F_s^y d\theta d\theta + A\theta + B \quad (5)$$

적분과정에서 발생하는 상수 A, B는 슬랩이 시작되는 순간의 다음과 같은 초기 조건을 이용해서 구할 수 있다.

$$\left[\frac{dy}{d\theta} \right]_{\theta = \theta_0} = [y]_{\theta = \theta_0} = 0 \quad (6)$$

상수 A, B가 결정되면 충돌 순간의 변위 ($y=d$)를 식 (5)에 대입해서 θ' 을 구하고, 식 (4)으로부터 $\theta = \theta'$ 에서의 속도를 구할 수 있다. 표 (1)은 실험 엔진에서 크랭크 축의 회전속도가 1220 rpm일 경우에 한 주기당 반복되는 4개의 피스톤 슬랩에 대해 각각 계산된 값이다. 여기서 충돌하는 시간을 주기로 나눔으로써 무차원화 하였다.

슬랩에 의한 실린더의 진동 해석을 위해 실린더 내부의 각 충돌 점 (슬랩 1, 슬랩 2, 슬랩 3, 슬랩 4)에서 실린더 표면 위의 임의의 점 (점 A)으로의 전달 함수를 각각 $H_{A1}(\omega)$, $H_{A2}(\omega)$, $H_{A3}(\omega)$, $H_{A4}(\omega)$ 라 할 때, 점 A에서의 가속도는 다음과 같이 계산된다.

$$a_A(\omega) = H_{A1}(\omega) F_1(\omega) + H_{A2}(\omega) F_2(\omega) + H_{A3}(\omega) F_3(\omega) + H_{A4}(\omega) F_4(\omega) \quad (7)$$

여기서,

$$F_1(\omega) \propto \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} v_1 \delta(t-t_1) e^{-j\omega t} dt \quad (8)$$

이고, v_1, t_1 은 슬랩 1의 충돌 속도와 시간이며, $F_2(\omega)$, $F_3(\omega)$, $F_4(\omega)$ 도 같은 방법으로 계산된다. 시간 영역에서 가속도 신호는 식 (7)을 푸리에 역변환 (inverse Fourier transform) 하면된다. Fig. 2-(a)는 위와 같은 방법으로 계산된 가속도 신호이다.

식 (8)에서 알 수 있듯이 충돌량은 충돌시 피스톤의 속도에 비례한다. 피스톤 슬랩에 의한 엔진 진동을 줄이기 위해서는 충돌시 피스톤의 측면 방향 속도를 줄이는게 필요하다. Fig. 3은 무차원 엔진 변수의 변화에 따른 충돌시 피스톤의 속도를 나타낸다. 따라서 각 슬랩 점에서 신호 해석 점까지의 전달함수를 알고있을 경우, 전달함수가 크게 나타나는 충돌점에서 피스톤 충돌 속도를 줄이면 된다.

그리고, 피스톤 슬랩이 시작된 후 실제로 충돌이 일어나기 까지의 시간 변화는 피스톤과 실린더의 간극에 의해 정해진다. 따라서 피스톤 슬랩에 의한 진동 신호를 측정할 다음 역으로 피스톤과 실린더의 간극을 알 수 있다. Fig. 3은 실험 엔진에서 슬랩 1의 경우에 대해 피스톤과 실린더 사이의 간극 변화에 따라 슬랩이 일어나는 시간의 변화를 나타낸 것이다.

실제로 피스톤 슬랩에 의한 진동을 측정하기 위해 모터를 이용하여 실험 엔진을 일정한 각속도로 회전 시키면서 가속도 신호를 측정하였다. 실험 엔진에서는 피스톤 슬랩에 의한 신호를 크게하기 위해 실제 사용되는 엔진 보다 피스톤의 질량을 증가시켰고 간극도 크게하였다. 그리고 유연 연결체 (flexible coupling)를 이용해 모터의 진동을 차단했다. Fig. 2-(b)는 실제 측정된 슬랩 신호이다.

3. 결과

피스톤 슬랩 현상은 피스톤과 실린더 벽 사이의 간극에 의해 발생하는 만큼 슬랩에 의한 신호를 크게 하기 위해 실험 엔진에서는 실제 엔진 보다 간극을 크게 하였다. 하지만 간극이 너무 크면 피스톤이 실린더에 충돌하기 전에 side-thrust force의 방향이 바뀌거나, 피스톤 슬랩 운동이 시작되는 순간 피스톤이 초기조건을 만족하지 않기 때문에 측정 신호의 피크(peak) 위치가 일정하지 않았다. 이를 개선하기 위해 간극을 크게하는 대신에 피스톤의 질량을 증가시켜서 실험하였다.

그리고, 무차원화된 엔진 변수의 변화에 따른 충돌 속도의 변화를 살펴봄으로써 실제 엔진에서 피스톤 슬랩에 의한 진동을 줄이기 위한 엔진의 설계 방법을 제시하였고, 엔진에서 측정된 진동 신호와 이론적으로 예측된 진동 신호의 비교를 통해서 피스톤과 실린더의 간극 예측 방법에 대해 살펴보았다.

4. 참고 문헌

- [1] E. E. Ungar , D. Ross , "Vibrations and Noise due to Piston Slap in Reciprocating Machinery." J. Sound Vib. , 2(2) , 132-146 (1965)
- [2] W. J. Griffiths , J. Skorecki , "Some Aspects of Vibration of A Single Cylinder Diesel Engine." J. Sound Vib. , 1(4) , 345-364 (1964)
- [3] James W. Slack , "Piston Slap in Diesel Engine." , Ph. D Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, February 1982
- [4] Rechar H. Lyon, "Machinery Noise and Diagnostics", Butterworths 1987

Table. 1 Impact time and impact velocity

회전 속도 = 1220 (rpm)

	slap 1	slap 2	slap 3	slap 4
A	0.150E-2	0.165E-2	0.162E-2	0.165E-2
B	0	0.142E-3	0	-0.142E-3
θ (Deg.)	39.3	42.1	47.8	40.5
충돌시간비	0.1086	0.3396	0.6304	0.8852
충돌속도 (m/s)	0.197	0.181	0.170	0.195

(충돌 시간비 = TDC로부터의 충돌 시간 / 주기)

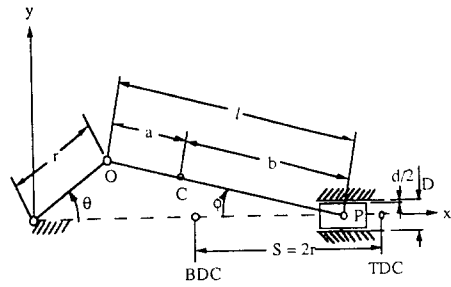
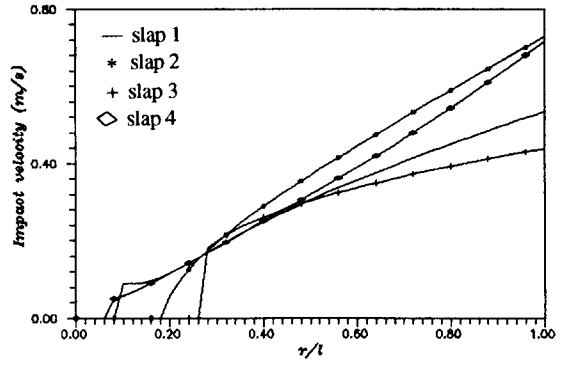
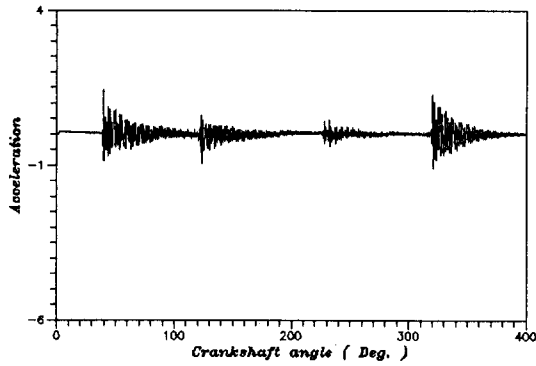


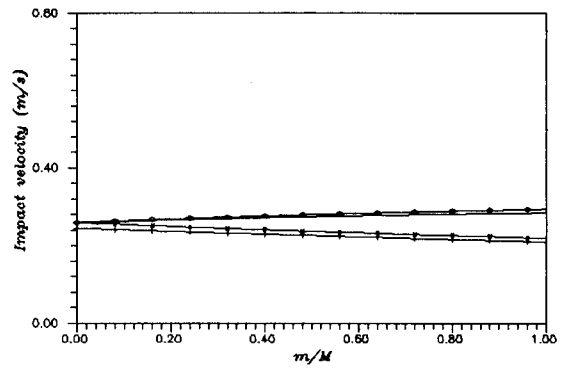
Fig. 1 Crankshaft, connecting - rod and piston



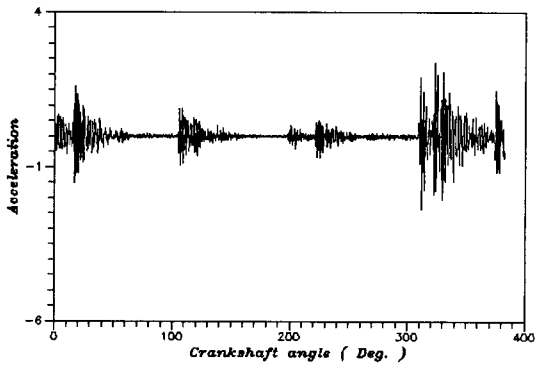
(a) Effect of r/l



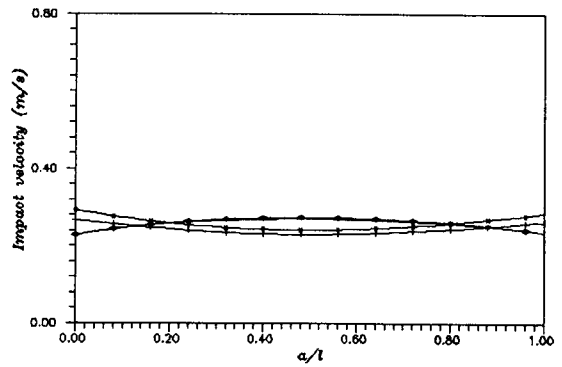
(a) analytic signal



(b) Effect of m/M

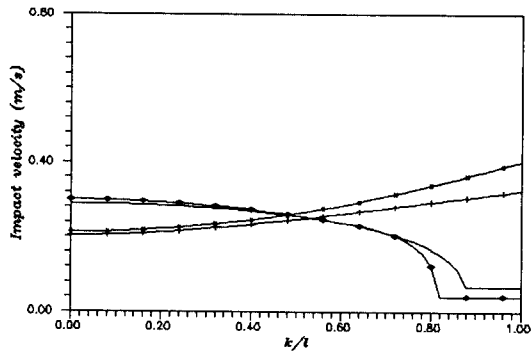


(b) experimental signal



(c) Effect of a/l

Fig. 2 Piston - slap signal



(d) Effect of k/l

Fig. 3 Engine parameter .vs. impact velocity

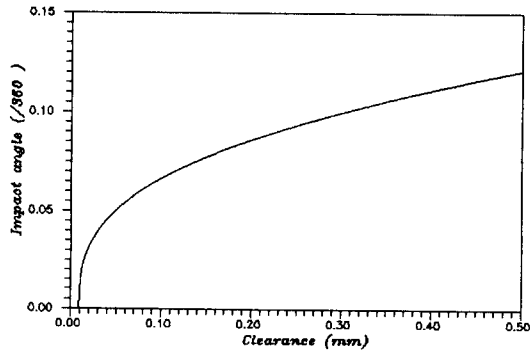


Fig. 4 Clearance .vs. impact angle