

<논 문> SAE NO. 96370037

사이클 내 크랭크축 각속도의 변동 해석

Analysis of the Crankshaft Speed Fluctuation in Intra-Cycle

배 상 수,* 임 인 건,* 김 세 응,** 김 응 서***
S. S. Pae, I. K. Lim, S. W. Kim, E. S. Kim

ABSTRACT

This paper presents the characteristics of the crankshaft speed fluctuations. To analyze them, the speed waveforms were measured both at the flywheel and at the front end of the engine. The speed waveform measured at the flywheel shows better result than at the front end one, because of the torsional vibration and the auxiliary components. And the patterns of the speed fluctuations are classified into three region, such as low load, middle load and high load region with the variations of the loads. Additionally, as the engine speeds increase and the loads decrease, the analysis of the speed becomes more difficult due to lower variation of the speed. And in all the regions, the main frequency component of the speed fluctuation is firing frequency.

주요기술용어 : Crankshaft(크랭크축), Flywheel(플라이휠), Speed Fluctuations(각속도 변동), Firing Frequency(점화 주파수)

1. 서 론

크랭크축 각속도는 기관의 불연속적인 연소에 의하여 한 사이클 내에서도 주기적인 가속과 감속에 의한 변동을 한다. 이러한 사실을 이용하여 기관의 연소 상태와 크랭크축 각속도의 변동과의 관계에 대한 여러 연구가 진행되고 있는데, 이러

한 연구에 있어 각속도 변동의 특성에 대한 파악이 가장 중요한 요소가 된다. 그런데 기존의 연구는 압력 복원이나 실화 판정³⁾등의 각속도 변동의 응용에 초점이 맞추어져 있고 각속도 변동 특성 자체에 관한 연구는 그것의 응용에 비해서 활발히 진행되고 있지 않았다^{1),2)}.

따라서, 본 연구에서는 기관 회전 속도와 부하 및 각속도 측정 위치를 변화시키면서 각속도 변동 특성을 고찰하였다. 이때 기관 회전속도는 공회전에서 3,500rpm까지 6단계로 나누어 변화시키고, 부하는 무부하에서 전부하까지 7단계로 나

* 정희원, 서울대학교 대학원

** 정희원, 금오공과대학교 기계공학과

*** 정희원, 서울대학교 기계공학과

누어 변화시켰다. 이와 동시에 측정 위치도 플라이휠과 풀리(pulley)쪽으로 다르게 하여 그 영향을 살펴보았다. 또한 각속도 측정시 1회전당 샘플링 데이터의 개수의 차이에 의한 영향을 살펴보기 위하여 플라이휠의 기어수를 변화시켰을 때의 각속도 변동도 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 4기통, 4행정, 12밸브인 전기 점화기관으로 배기 체적은 1495cc이다. 크랭크축 각속도는 기관의 두 부분에서 측정하였다. 기관 풀리쪽의 크랭크축에 설치된 로우터리 인코더와 플라이휠 링기어(flywheel ring gear)에 설치된 2개의 마그네틱 픽업으로부터 각속도를 측정하였다. 이때 플라이휠의 기어수는 각각 58개와 106개이다. 각 측정 장치의 제원은 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

크랭크축 각속도 변동을 측정하기 위해 데이터의 DMA(direct memory access) 전송이 가능한 타이머 보드를 사용하였고, 그 기준 클럭은 10MHz이다. Table 3은 사용한 보드의 제원이다. 통상 전기 점화 기관의 경우 기관 회전 속도는 800rpm~7,000rpm 정도인데, 이를 크랭크 각도 1° 단위로 측정하였을 때, 측정속도의 범위

Table 1 Specifications of rotary encoder

Item	Specifications
Manufacturer	Koyo
Model	TRD-J360-RZ
Detector output signal	360, 1 pulse/rev
Revolution range	60~5,000 rpm

Table 2 Specifications of magnetic pick-up sensor

Item	Specifications
Manufacturer	Line Seiki
Model	WS-02
Maximum counting pulse	3000 counts/second

Table 3 Specifications of CTM timer board

Item	Specifications
Model	KEITHELEY CTM-PER
Reference clock	10MHz
Measurement bit	28bit
Data acquisition mode	Programmed, interrupt or DMA

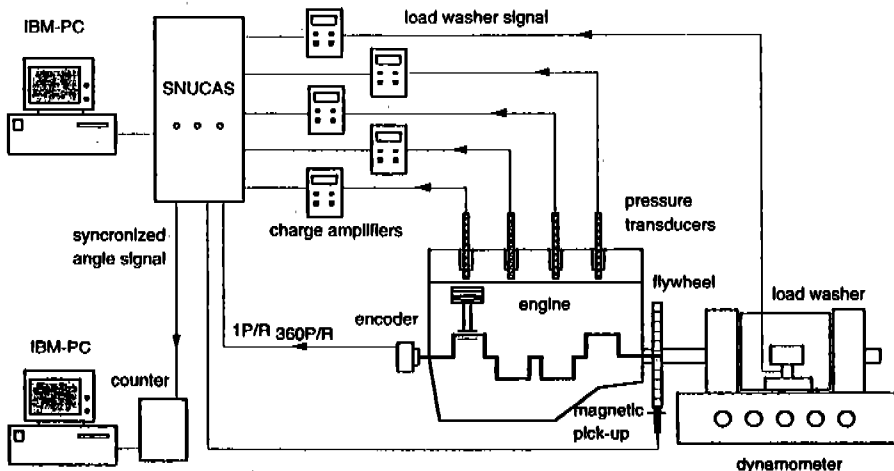


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

는 5kHz~42kHz이다. 그런데 연속 DMA 방식은 이론적으로 80kHz까지 데이터 전송이 가능하며 이는 PC의 하드웨어에 따라 그 차이가 있다. 본 실험에 쓰인 PC에서는 40kHz의 범위까지 안정된 측정이 가능하였으므로 기관 실험을 위해서 그 범위는 충분하였다. 전체 실험 장치의 개략도는 Fig.1에 표시하였다.

본 실험에서는 냉각수의 온도를 $80 \pm 1^\circ$ 로 일정하게 하고, 공연비는 이론 공연비로 유지하면서, 기관 회전속도와 부하를 각각 공회전에서 3500rpm, 무부하에서 전부하까지 변화시켰을 때의 각속도 변동을 플라이휠쪽과 풀리쪽에서 측정, 비교하였다.

3. 결과 및 해석

3.1 측정 위치에 따른 각속도 변동 고찰

크랭크축 각속도 변동의 측정 위치에 따른 영향을 살펴보기 위하여 Fig.1에 표시한 것처럼 기관 앞의 팬 풀리쪽에는 인코더를, 기관 뒤의 플라이휠쪽에는 마그네틱 픽업 센서를 장착하여 각속도를 측정, 비교하였다. 이때 각속도의 샘플 데이터수는 인코더인 경우 1회전당 360개이고, 마그네틱 픽업 센서는 플라이휠의 잇수와 같으므로 1회전당 106개와 58개이다. 이때 측정 각속도 성분에는 많은 잡음 성분(noise)이 포함되어 있는데, 플라이휠 링 기어의 불균일에 기인한 잡음과 각속도 신호를 디지털 신호로 변환하는 과정에서 발생하는 잡음 및 기관 진동에 의한 잡음 등이 있다^{1),2)}. 이러한 잡음을 제거하기 위하여 Fourier 수열로 전개하여 기관 1회전을 기본으로 했을때 16배 이상의 성분을 잡음으로 간주하였다³⁾.

Fig.2(a), (b), (c)는 2500rpm일 경우의 풀리쪽과 플라이휠쪽에서 측정한 각속도를 부하를 변화시키면서 비교한 것이다.

모든 경우 플라이휠에서 측정한 각속도 변동이 풀리쪽에서 측정한 각속도 변동에 비해 더욱 안정된 모습을 보이고 있으며, 특히 부하가 커짐에 따라 풀리쪽에서 측정한 각속도에 고주파 성분이 증가하여 두곳에서의 각속도 변동의 차이가 훨씬

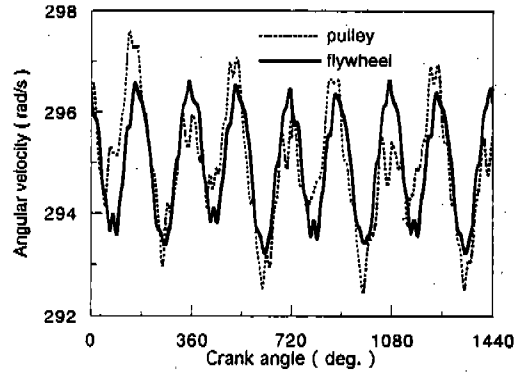


Fig.2 (a) Comparison of the angular velocities at two positions under the condition of no load and 3000rpm.

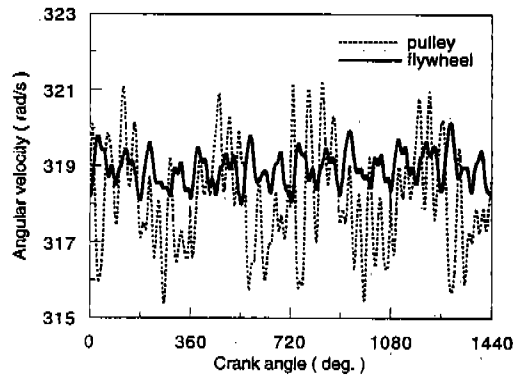


Fig.2 (b) Comparison of the angular velocities at two positions under the condition of intake pressure 75kPa and 3000rpm.

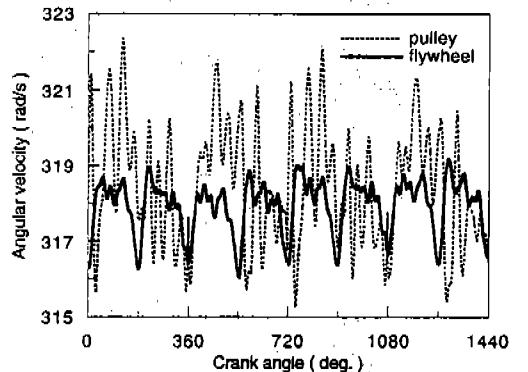


Fig.2 (c) Comparison of the angular velocities at two positions under the condition of intake pressure 100kPa (WOT) and 3000rpm.

커지게 된다. 이러한 경향은 기관 회전속도가 증가할수록 크게 나타난다. 이러한 이유는 크게 2가지로 생각될 수 있다. 먼저 가장 중요한 이유로, 기관 뒤쪽이 플라이휠의 관성에 의해 비틀림 진동(torsional vibration)에 영향을 적게 받을 뿐만 아니라, 기관 앞쪽과는 달리 발전기나 폴리 등의 기관 부속 장비들이 없기 때문에 이들에 의해 각속도의 왜곡 가능성이 적기 때문이다²⁾. 물론 샘플링 데이터 수의 차이와 측정 방법의 차이

가 측정 장비의 특성상 존재하지만, Fig.2에서처럼 상당히 큰 고주파 성분이 이러한 요인에 의해 발생되지는 않는다. 이러한 사실은 Fig.3(a), (b)에 표시하였다.

즉, Fig.3(a)에서 보듯이 동일한 위치에서 마그네틱 픽업을 이용하여 샘플링 데이터수가 1회전당 58개와 106개로 차이가 있더라도 각속도의 변동은 샘플링 데이터수가 적은 플라이휠에서 측정한 각속도에 더 많은 고주파성분이 포함되어 있지만, Fig.2처럼 큰 고주파 성분은 포함되어 있지 않다. 이러한 경향으로부터 1회전당 샘플링 데이터수가 많을수록 고주파 성분의 포함정도가 감소하므로, 속도 측정에 유리하며, 이러한 경향은 기관 회전속도가 증가할수록 더욱 증가한다. 또, Fig.3(b)에서 처럼 동일한 조건에서 측정 방법이 다르더라도 측정한 각속도 변동에는 큰 차이가 없다. 이상의 결과로부터 각속도의 변동 정보를 정확히 측정하기 위해서는 플라이휠 쪽에서 측정해야 되며, 이때 샘플링 데이터수는 많을수록 고주파 성분의 포함정도가 감소하므로 더 유리함을 알 수 있다.

또한 Fig.2(a), (b), (c)에서 플라이휠에서 측정한 각속도 변동을 살펴보면, 부하 변동에 따라 3가지의 양상으로 구분 할 수 있다. 이들은 각각 크랭크축 어셈블리의 왕복 및 회전운동에 의한 관성토크가 연소에 의한 압력토크에서 차지하는 상대적 크기에 따라 그 비율이 가장 큰 저

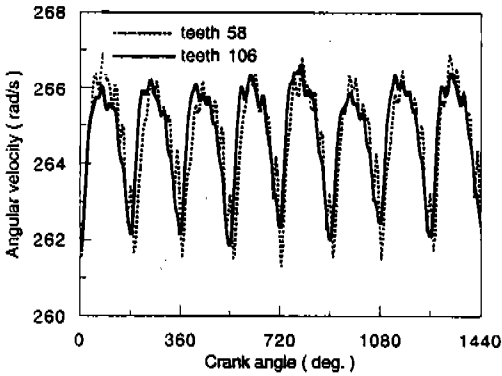


Fig.3 (a) Comparison of the angular velocities measured at two flywheels with 58 and 106 teeth, respectively, under the condition of WOT and 2500rpm.

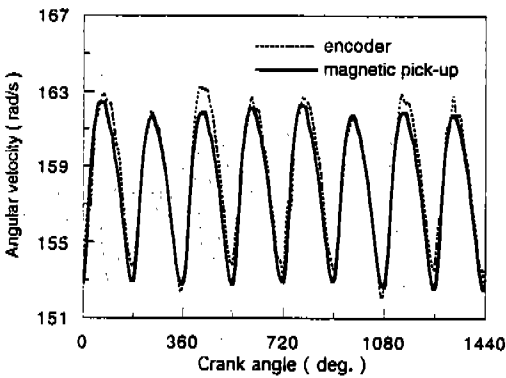


Fig.3 (b) Comparison of the angular velocities measured with the rotary encoder and the magnetic pick-up under the condition of WOT and 1500rpm.

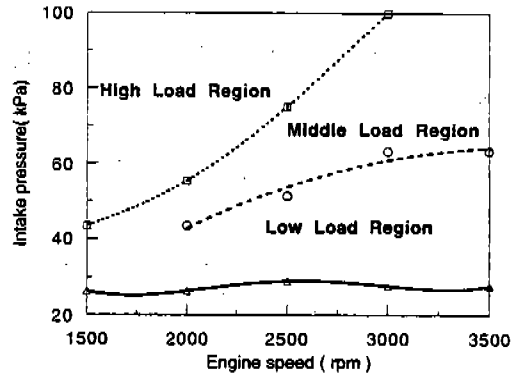


Fig.4 Angular velocity regions' classification with intake pressure and engine speed.

부하 영역과, 가장 작은 고부하 영역 및 이 두 영역의 경계로 중간 부하 영역으로 분류할 수 있다. 이러한 각속도 변동 특성을 부하와 회전속도에 따라 구별하여 표시한 것이 Fig.4이다. 기관 회전속도가 증가할수록 관성토크의 비중이 상대적으로 커서 연소 정보획득이 쉬운 고부하 영역이 감소하여, 3000rpm 이후에는 중간 부하 영역과 저부하 영역만 존재한다. 이렇듯 각속도 변동 양상이 각 회전속도와 부하에 따라 달라지므로 각속도를 이용한 해석을 수행할 경우 이에 대한 고려가 필요하다.

3.2 부하 및 회전속도 변화에 따른 각속도 변동 비교³⁾

앞서 언급한 각속도의 각 영역별 변동 특성을 이해하기 위해서 플라이휠에서 측정된 각속도를 평균 값으로 나누어 규준화(normalize)하여 비교하였다.

먼저 부하를 전부하로 고정시키고 회전속도를 변화시킬 때, 각속도 변동을 표시한 것이 Fig.5이다. 부하를 고정시켰기 때문에 압력 토크 값이 일정하므로 회전속도의 제곱에 비례하는 관성토크의 변화에 따른 각속도 변동을 알 수 있다. 그림에서 보듯이 회전속도가 증가할 수록 평균값을 기준으로 변동폭이 감소하는 데 그 변동폭은 2000rpm까지는 평균값을 기준으로 최대 7%까

지 변동하나, 회전속도가 증가하면 부하에 관계없이 1%이하가 된다. 또한 한 실린더내에서 각속도 변동속에는 1회의 연소주기 동안 점차로 2개의 최고점을 나타내게 된다. 그런데 그 중 앞의 최고점은 모든 회전속도에 대해서 거의 일정하므로 이는 압력 토크의 영향에 기인한 것이다. 따라서 회전속도가 증가할수록 나타나는 두번째 최고점은 관성 토크의 영향 때문이다. 따라서 각속도 변동은 동일한 실린더에서 초기에는 압력 토크의 영향이 지배적이며, 회전속도가 증가할수록 연소주기 후반부 각속도 변동에 미치는 영향이 감소하게 됨을 알 수 있다.

이번에는 회전속도를 2500rpm으로 고정시켰을 때 부하 변화에 따른 각속도 변동을 Fig.6에 표시하였다. 부하가 증가함에 따라 각속도의 변동폭은 증가하고 최고점의 위치도 점차 앞쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이는 초기 각속도 변동을 지배하는 압력 토크 값이 부하가 클수록 증가하고 또한 점화시기도 진각(advance)되기 때문이다.

이상의 결과를 종합해 보면 각속도 변동은 압력 토크의 영향이 지배적이므로, 회전속도 변화 보다는 부하 변화에 따라 그 양상이 크게 달라지고, 회전속도가 증가하고 부하가 작을수록 그 변동폭이 작다. 따라서 각속도를 이용하여 연소 정보를 얻기 위해서는 고부하 영역이 넓고 각속도

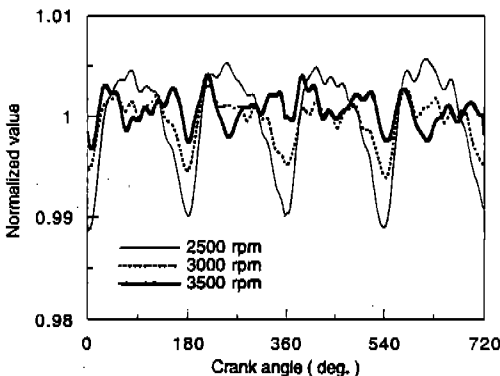


Fig.5 Normalized angular velocities by the mean value in case of the fixed load, WOT as the engine speeds varied.

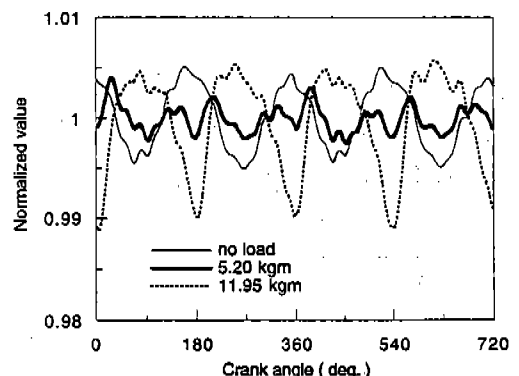


Fig.6 Normalized angular velocities by the mean value in case of the fixed engine speed, 2500rpm as the loads varied.

변동 폭이 큰, 부하가 크고 회전속도가 작을수록 유리하다.

3.3 주파수 해석⁵⁾

이번에는 각속도 변동을 주파수 영역에서 해석하였다. 이를 위하여 측정된 각속도를 Fourier 수열로 전개하여 수행하였다. 4행정 기관의 경우 2회전이 1사이클을 이루므로, 1사이클보다는 1회전을 주기로 하면 실제 적용에 있어 유리하다.

따라서 본 연구에서는 크랭크축 각속도의 필터링 주기를 크랭크축의 1회전으로 하였다. 또한 주파수 해석은 식 (1)을 이용하여 각속도를 Fourier 수열로 전개한 뒤 파워 스펙트럼인 C_n 을 구하여 최대값으로 나눈 표준화시킨 값을 비교하였다.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^m (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1)$$

$$= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^m C_n \sin n(\omega t + \phi) \quad (2)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{a_n}{b_n}\right) \quad (3)$$

여기서 n 은 기본 주파수의 배수(harmonics), ϕ 는 위상 이동, C_n 은 파워 스펙트럼을 표시한다.

먼저 저부하 영역에서의 스펙트럼일 때는 Fig. 7(a)에서 보듯이 지배적인 주파수 성분이 점화 주파수, 기본 주파수, 점화 주파수의 2배수 순이다. 또 중간 부하 영역에서는 Fig.7(b)처럼 점화 주파수의 2배, 점화 주파수, 기본 주파수 순이며, 고부하 영역에서는 Fig.7(c)처럼 점화 주파수, 점화 주파수의 2배, 기본 주파수 순으로 지배적인 주파수 성분을 구성한다. 즉 모든 경우에 있어서 점화 주파수의 정수배가 되는 주파수 성분이 중요하다. 이런 지배적인 주파수 성분이 각

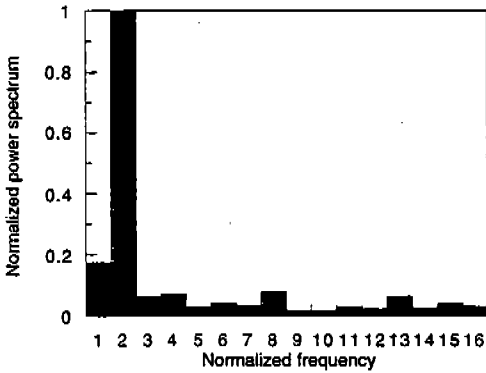


Fig.7 (a) The power spectrum of the angular velocity in case of 2500rpm and no load. (fundamental component frequency : 1 revolution)

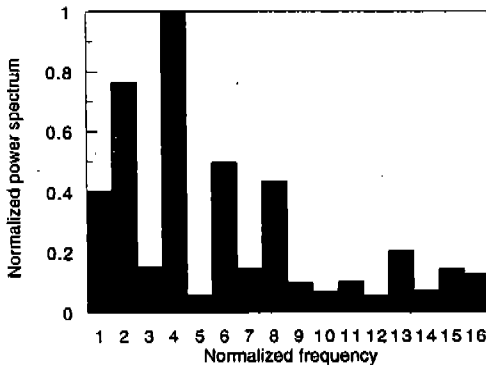


Fig.7 (b) The power spectrum of the angular velocity in case of 2500rpm and intake pressure 55kPa. (fundamental component frequency : 1 revolution)

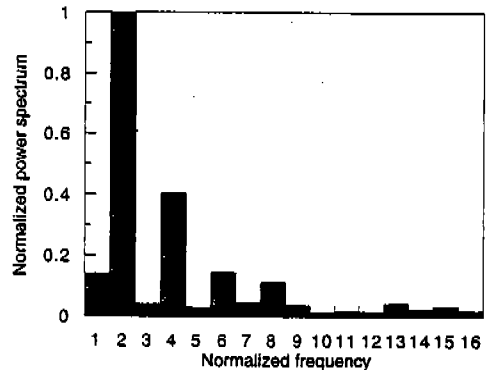


Fig.7 (c) The power spectrum of the angular velocity in case of 2500rpm and WOT. (fundamental component frequency : 1 revolution)

속도를 변화시키는 요인에 의해서 다르게 되어 실화 검출 등에 이용될 수 있다. 특히 중간 부하 영역에서는 점화 주파수 이외의 주파수 성분들이 상당한 부분을 차지하므로 이 영역에서의 각속도 해석시 상당한 주의가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서 크랭크축 각속도의 변동을 이용한 각종 연구의 기본이 되는 각속도 변동 특성을 파악하기 위하여 각속도의 측정 위치를 달리하며, 샘플링 데이터수와 기관 회전속도 및 부하를 변화시키면서 각속도 특성을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 크랭크축 각속도의 변동을 측정하는 위치는 기관 부속 장비나 비틀림 진동 때문에 기관 앞쪽인 플리쪽보다는 뒤쪽인 플라이휠쪽이 더 유리하다.
- 2) 1회전당 샘플링 데이터수가 많을수록 각속도 변동에 고주파 성분이 적게 포함되므로 그 해석이 더 유리하다.

- 3) 크랭크축 각속도의 변동 양상은 부하에 따라 크게 저부하, 중부하, 고부하 영역으로 구분될 수 있다.
- 4) 각속도의 변동폭은 부하가 증가할수록, 회전속도가 감소할수록 증가하고, 각속도 변동 양상은 회전속도 보다는 부하에 의한 영향이 더 크다.

참 고 문 헌

1. Jacques Davaine, "Measurement and Analysis of Intra-Cyclic PRM Changes", *SAE Paper No. 930397*, 1993.
2. Apostrolos N. Fragoulis, Angelo H. Nichols, Maeim A. Henein, "Error Analysis of Time-Dependent Frictional Torque in Reciprocating Engines: Effect of Angular Velocity Measurement", *Lubr. Eng.*, vol. 45, pp. 493~499, 1988.
3. 배상수, "크랭크축 각속도의 변동을 이용한 실화 판정", 서울대학교 기계공학과 석사학위논문, 1995.