

스파크 플러그형 압력센서에서 연결관로의 동적특성과 압력왜곡의 보상에 관한 연구

A Study on Dynamic Characteristics in Extension Tube and Correction of Pressure Distortion for a S/P Type Pressure Transducer

한 승 국*; 김 승 수**
S. K. Han, S. S. Kim

ABSTRACT

In SI engine research the pressure data in cylinder is the most important fundamental ones leading to engine efficiencies and performances. It is, therefore, necessary to obtain accurate pressure data and yet it is often impossible to install a reliable data producing, flush-mounted type pressure transducer in a cylinder of small and medium size multicylinder SI engines. When flush mounting the transducer is not possible, the spark-plug type pressure transducer is commonly used as an alternative. In this case, the transmission tube of spark-plug type pressure transducer introduces distortions in the pressure signal.

Efforts were made to understand the dynamic characteristics of spark-plug pressure transducer by shock tube tests and real engine experiments. In engine experiment the cylinder pressure data were simultaneously obtained by both flush mounted and spark-plug type pressure transducers of certain transmission tube geometry.

Those pressure data collected by spark-plug type pressure transducer were tested for correction to flush mounted ones by the application of transfer function. As a result of the calibration the IMEP difference between F/M data and improved S/P data was shown to be corrected about 75.98% from the original ones.

1. 서 론

엔진의 정확한 성능 예측 및 연소현상 분석을 위해서는 연소실내의 압력이 정확히 측정되어야 한다. 엔진의 연소실내의 압력측정에 이용되는 센서는 설치방법에 따라서 F/M형(flush mounted type)과 S/P형(spark plug type)으로 구분된다.

F/M형의 경우 센서의 다이아 프람(dia-phragm)이 실린더 헤드 표면과 거의 일치하도록 설치되는데, 이를 설치하기 위해서는 실린더 헤드에 압력 센서가 고정될 어댑터를 설치할 구멍을 뚫어야 하며, SI엔진의 경우 소형이며 밸브 기구들이 복잡하게 설치되어 있는 관계로 센서 자체의 설치에 어려움이 있다. 압력 변환기(pressure transducer)의 감도

* 한국과학기술원 기계공학과

** 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

(sensitivity)는 온도가 상승함에 따라 1%/100°C 감소하며, 실린더 헤드의 재료보다 열전도도(heat conductivity)가 상대적으로 나쁘다. F/M형은 센서의 설치위치가 실린더 헤드의 표면과 일치함으로 실린더 헤드의 표면보다 온도가 높아지며, 센서를 냉각하지 않을 경우 사용한도(operating limit)를 넘어설 수도 있다고 알려져 있고, 실린더 내에서 폭발 과정중 화염에 센서의 전면(front)이 그대로 노출되어, 센서가 큰 온도 변화로 인한 열부하(thermal load)에 의하여 감도에 악영향을 많이 미치게 된다.¹⁾

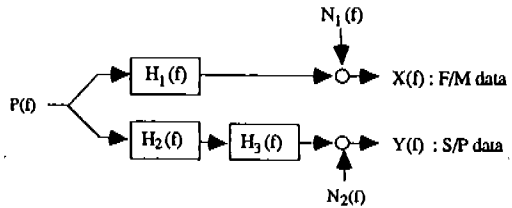
이에 반하여 S/P형은 스파크 플러그를 개조해서 가스 유동이 가능한 가스다란 통로를 만든후 그 끝에 센서를 설치한 것으로, 실린더 헤드를 수정하지 않고도 용이하게 연소실 압력을 측정할 수 있는 장점이 있지만, 연결관로내의 압력손실, 지연, 진동 등으로 압력 왜곡이 생길 수 있다는 단점이 있다. Evers에 의하면 상용되고 있는 S/P형 압력 센서(Kistler type과 AVL type)와 F/M형으로부터 측정된 압력 data로부터 엔진의 도시효율(indicated efficiency)을 계산하면 F/M형에 비하여 S/P형이 약 -3.2%에서 7.6%의 오차가 발생한다고 한다.²⁾ 이러한 S/P형의 압력 왜곡은 연결관로의 압력의 전달 지연, 공진 및 관의 마찰에 의해 발생한다고 생각되어진다. 이러한 현상과 관련하여 실험적, 해석적 방법으로 많은 연구가 행해졌다.^{3~12)}

따라서, S/P형으로 실린더내의 압력을 측정하였을 경우, 이러한 연결관로에 의한 압력 왜곡을 보정해 주어야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 설치의 용이함 때문에 많이 쓰이고 있는 S/P형 압력센서의 동적특성을 음향학적(acoustics) 특성과 flow에 의한 특성으로 나누어서 해석을 하였으며, 관내의 압력파의 진동과 관련하여 주 공진주파수(fundamental frequency)가 관의 길이, 관의 지름, 캐비티 체적(cavity volume)의 변화에 따라 어떻게 달라지는가를 알아보았다. 또 S/P형의 압력 왜곡의 보상을 위해 연결관로의 전달함수(transfer function) 개념을 사용하였다.

2. 시스템의 모델링

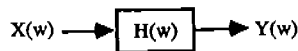
연결관로의 동적특성을 알아보기 위하여 아래와 같이 시스템을 모델링하였다.



여기서 $H_1(f)$, $H_2(f)$, $H_3(f)$ 은 각각 F/M형 압력 센서의 특성, S/P형 압력 센서의 특성 그리고 연결관로의 특성을 의미하는 전달함수이다. 진정한 압력신호 $P(f)$ 는 전달함수 $H_1(f)$, $H_2(f)$, $H_3(f)$ 를 거치고, 이에 외부 잡신호 $N_1(f)$ 과 $N_2(f)$ 가 더하여져서 각각 F/M형은 $X(f)$ 와 S/P형은 $Y(f)$ 에 의하여 측정이 된다. 이때 다음과 같은 2가지의 가정을 하면,

- 즉, 1) $H_1(f) = H_3(f) = 1$
- 2) $N_1(f) = N_2(f) = 0$

시스템의 block diagram은 다음과 같이 표현되어지며,



이때, 연결관로의 특성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (1)$$

보통의 데이터 처리기법(data processing technique)에서 전달함수는 PSD 함수(power spectral density function)를 이용한다. 이것을 이용하면 외부 잡신호의 영향을 최소로 하여 더 정확한 전달함수를 얻을 수 있다.¹³⁾

$$H(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_{xx}(f)} = \frac{G_{yy}(f)}{G_{yx}(f)} \quad (2)$$

3. 연결관로의 동적특성, 압력왜곡의 보상에 관련된 실험장치

실운전 상황에서 엔진의 실린더내 압력은 낮은 주파수 성분의 타력운전(motoring) 압력과 고주파수의 연소압력으로 이루어져 있다. 특히 연소압력은 짧은 순간에 급격히 발생후 소멸되며, 이때 이로 인해 발생하는 복잡한 충격파(shock wave)는 연소압력의 정확한 동적 특성을 파악하기 위해서는 연결관로의 공기 흐름의 영향(flow effect)과 아울러 음향학적 특성을 알아야만 한다.

3.1 S/P형 어댑터

그림 1은 S/P형 어댑터의 개략도인데 이것은 현재 가장 널리 사용되고 있는 S/P형 어댑터와 동일하며, 본 실험에서는 관의 길이를 변화시키기 위하여 개조한 것이다.

본 연구에서는 S/P형 압력센서를 어댑터에 설치할 때 센서앞에 생기는 작은 체적을 캐비티 체적이라고 했다. 그림 2는 압력 변환기가 설치되었을 때 캐비티 체적과 연결관로의 상태를 보여준 것이다.

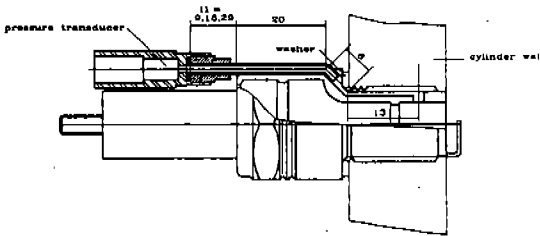


Fig. 1 Spark plug type adapter

Table 1 Dimension of S/P type adapters used in experiments

조 건	관의 길이 (mm)	관의 지름 (mm)	체 적 비 (Vc/Vd)
표 준 조 건	49	1	0.3
cavity volume 변화	49	1	1.17
관의 길이 변화	69	1	0.3
관의 지름 변화	49	1.5	0.3

그림 1에서 압력 센서가 부착이 되는 어댑터 부분은 분해가 가능하게 하여 관의 길이가 바뀌거나 관의 지름이 바뀌더라도 하나를 사용하므로써 가공상에 발생할 수 있는 캐비티 체적의 차이를 배제시켰다. 캐비티 체적은 압력 센서의 부착시에 사용되는 황동링의 갯수를 증감함으로써 변화를 시켰다. Table 1은 실험에 사용된 S/P형 어댑터의 종류를 나타낸다. 여기서 Vc/Vd = 체적비 (cavity volume/연결관로의 체적)이다.

3.2 음향학적(acoustics) 특성

연결관로의 음향학적 특성은 관의 길이에 따른 관내의 압력파의 공진(진동) 및 압력파의 전달지연과 관련된다. 연결관로의 음향학적 동특성만을 알아보기 위하여 임펄스에 가까운 충격파를 발생시켜 주는 단발성이며 저압부가 대기상태에 있는 충격관(open shock tube) 실험장치를 제작하였다. 그림 3은 이 실험장치를 보여준다. 평면파를 발생시키기 위해 관의 직경은 15cm, 저압부의 길이는 8cm로 했으며, 고압부의 길이는 5cm로 만

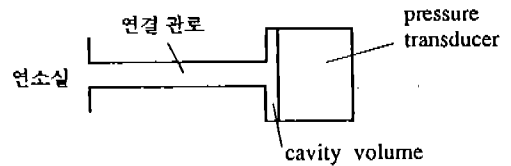


Fig. 2 Schematic drawing of cavity volume and extension tube

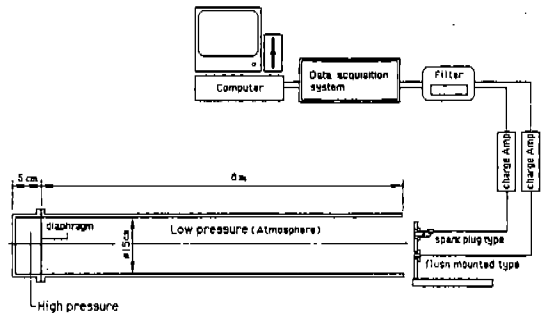


Fig. 3 Schematic diagram of open type shock tube

들었다. 트리거(trigger)에 의하여 다이어프램(diaphragm)이 터지면 충격파가 전파되며, 저압부의 개구부(開口部)로부터 1~2cm 떨어진 곳에서 F/M형과 S/P형 압력센서로 압력을 동시에 측정하게 된다. 이때 측정된 압력신호를 이용하여 연결관로의 음향학적 동특성을 구하였다.

3.3 공기흐름에 의한 동적특성

공기 흐름에 의한 연결관로의 동적특성은 유체가 연결관로를 지남으로 받게 되는 마찰과 관련이 된다. 흐름에 의한 동적특성을 알아보기 위해 엔진의 타력운전실험을 하였다. 사용한 엔진은 배기량 1415cc, 실린더 직경×행정이 75.5×82mm, 4기통, 기화기식이며 압축비 9.4의 가솔린 엔진이다. 이와같은 소형엔진의 경우 F/M형 압력센서를 설치하기가 상당히 어렵고, 본 연구에서도 4번 실린더 쪽에만 최소형의 냉각식 F/M형 압력센서를 장착할 수 있었다. 그림 4는 엔진 실험장치의 개략도이다.

실험에 사용된 압력센서는 S/P형은 Kistler 6001, F/M형은 AVL QC 31C-E를 사용하였다. 실험변수는 트로틀(throttle)을 거의 닫은 상태에서 기관 회전수를 600, 900, 1200, 1500rpm으로 WOT(wide open throttle)상태에서 600, 900, 1200, 1500 rpm으로 하였다.

3.4 S/P형의 압력왜곡 보상

압력왜곡의 보상방법으로 전달함수의 역푸리에 변환(inverse fourier transformation) 개념을 사용한다. 이를 위해 먼저 연결관로의 전달함수를 실험을 통하여 구하였다(식(2)를 사용). 이때 정확한 전달함수를 구하기 위하여 모든 경우 10번 이상의 반복 실험한 것의 평균을 취하였다. 이렇게 구한 전달함수를 사용하여 왜곡된 S/P형의 압력신호를 아래의 식을 이용하여 F/M형의 압력신호로 바꾸었다(I.F.T=inverse fourier transformation).

$$x(t) = I.F.T [Y(w) / H(w)] \quad (3)$$

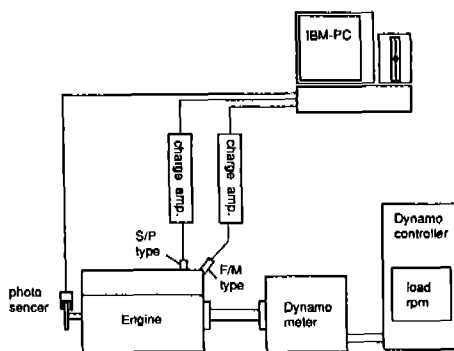


Fig.4 Schematic diagram of engine experiment

1) 타력운전 (motoring) 조건에서 압력왜곡의 보상

실험조건으로 표준조건 어댑터를 사용하였고, 1200 rpm, 전부하 조건에서의 압력 데이터를 동일조건에서 구한 전달함수를 이용하여 보상하였다.

2) 자력운전 (firing) 조건에서 압력왜곡의 보상

표준조건 어댑터를 사용하였고, 1500, 2000, 3000 rpm, 전부하 조건에서의 압력 데이터를 동일 조건에서 구한 전달함수를 이용하여 보상하였고, 또 3000 rpm, 전부하 조건에서 구한 전달함수를 이용하여 1500, 2000 rpm, 전부하 조건의 압력 데이터를 보상하였다.

4. 결과 및 고찰

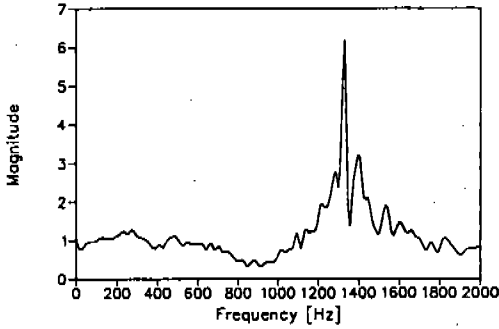
4.1 음향학적 동특성

그림 5는 음향학적인 특성을 갖는 전달함수(동적특성)의 한 예를 보여준 것으로, 데이터는 12번 반복 실험한 결과이며, 그림에서와 같이 연결관로의 경우 주 공진주파수가 1300Hz 부근에 존재함을 알 수 있다. 그림 6은 실험의 신뢰성을 보여주는 기여도 함수(coherence function)로서 실험결과는 상당한 신뢰성이 있음을 알 수 있다.

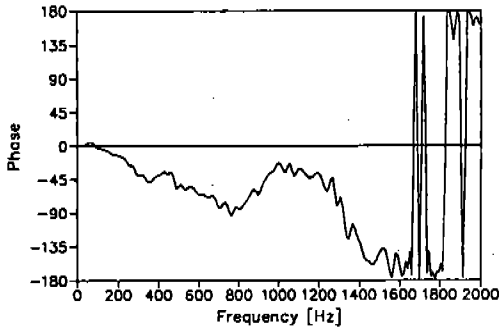
4.2 공기흐름의 영향에 의한 동적 특성

그림 7과 그림 8은 타력운전상태에서의 엔

진 회전수의 변화에 대한 전달함수의 경향을 보여준 것이다. 각각의 그림에서 진폭(magnitude)과 위상(phase)은 회전수가 증가할수록 고주파수 영역에서의 변화가 크게 나타나는 현상을 볼 수가 있는데, 이것은 어떤 회전수에서든지 변화가 큰 부분 이상의 고주파수 영역의 값은 압력 데이터에서 노이즈 레벨(noise level)이어서 노이즈 사이의 전달함수이기 때문에 별 의미를 갖지 못한다. 즉, 회전수가 증가할수록 고주파수의 압력 데이터가 얻어지기 때문에 심한 변동이 시작되는 주파수가 회전수의 증가와 함께 같이 증가하게 되는 것이다.



(a)



(b)

Fig. 5 Transfer function obtained by open shock tube experiment
(a) Magnitude (b) Phase

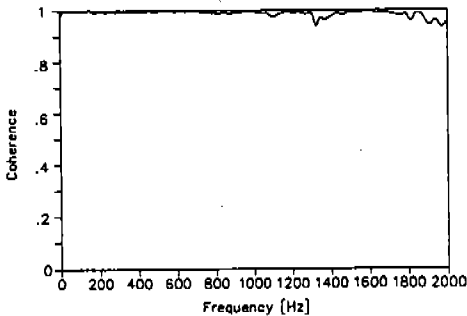


Fig. 6 Coherence of transfer function obtained by open shock tube experiment

그림 7은 트로틀이 거의 닫혀진 경우를 나타낸다. 모든 데이터는 10번 반복 실험한 결과로서 변동이 적은 부분의 경우 신뢰성을 보장할 수 있다. 신뢰성이 보장되는 구간내의 진폭 및 위상은 회전수의 증가와는 큰 상관관계가 없으며 거의 일정한 값을 유지함을 보여준다. 이것은 연결관로의 동특성이 공기흐름에 의한 영향보다는 음향학적 특성이 지배적임을 의미한다.

그림 7의 좌측 상단의 그림은 1200rpm의 진폭을 1 근처에서 확대한 것인데 주파수 0 Hz에서 진폭이 1보다 작음을 볼 수 있는데, 이는 S/P형 압력 데이터가 F/M형 압력 데이터에 비하여 압력의 한 사이클(cycle)당 평균값이 작다는 것으로 관의 마찰에 그 원인이 있는 것으로 여겨진다. 그림 7의 우측 하단의 그림은 역시 1200rpm에서의 위상을 확대한 것인데 위상이 완전히는 0이 아님을 볼 수 있다. 즉, 작지만 50Hz에서 120Hz 사이의 위상의 경우 S/P형이 F/M형에 비하여 뒤처짐을 보여준다. 그림 8은 WOT 상태의 전달함수를 보여주는데, 역시 비슷한 경향을 볼 수 있다.

4.3 엔진 자력운전실험을 통한 연결관로의 동적특성

엔진 자력운전실험을 통하여 구한 데이터의 경우는 음향학적 동특성과 공기흐름에 의한 영향이 동시에 고려될 것이다. 비교의 대상은 가능한 고주파수의 영역까지 에너지를 갖는 데이터를 비교하기 위하여 3000rpm, 전부하의 데이터를 사용하였다. 자력운전실험시 실린더내가 고온, 고압이므로 음속이 상온에서 보다는 더욱 커져 실험에 사용된 S/P형 어댑터의 주 공진주파수가 대략 3000rpm 정도에서 측정이 되었다. 주 공진주파수를 구

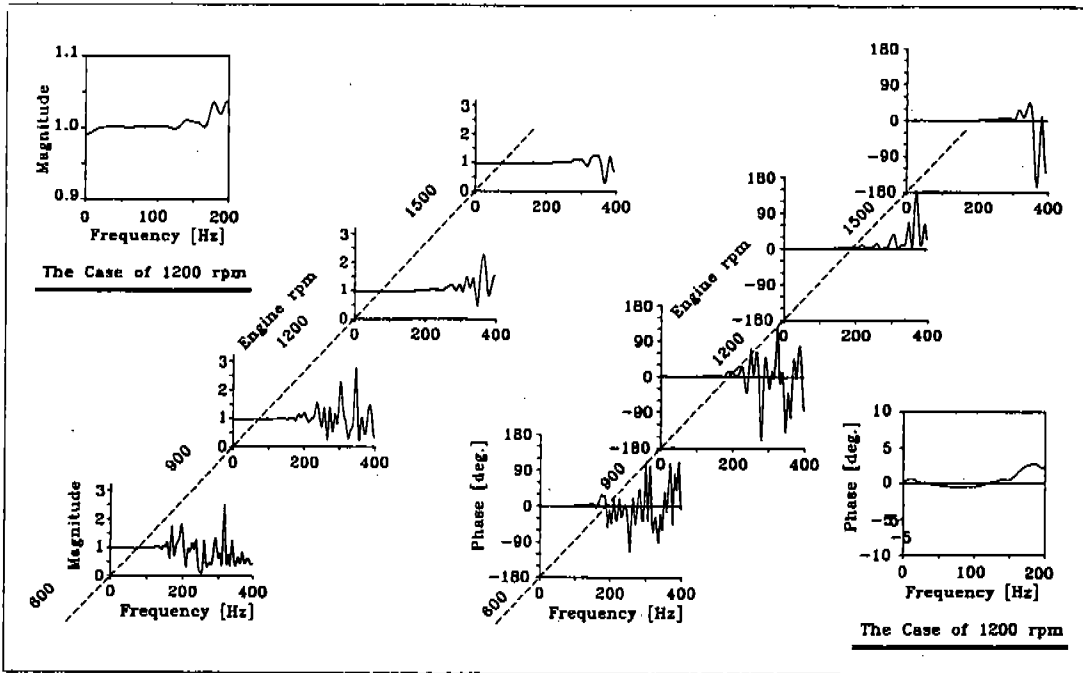


Fig.7 Trend of transfer function of connecting passage in a S/P type pressure adapter with respect to engine rpm (low load, motoring)

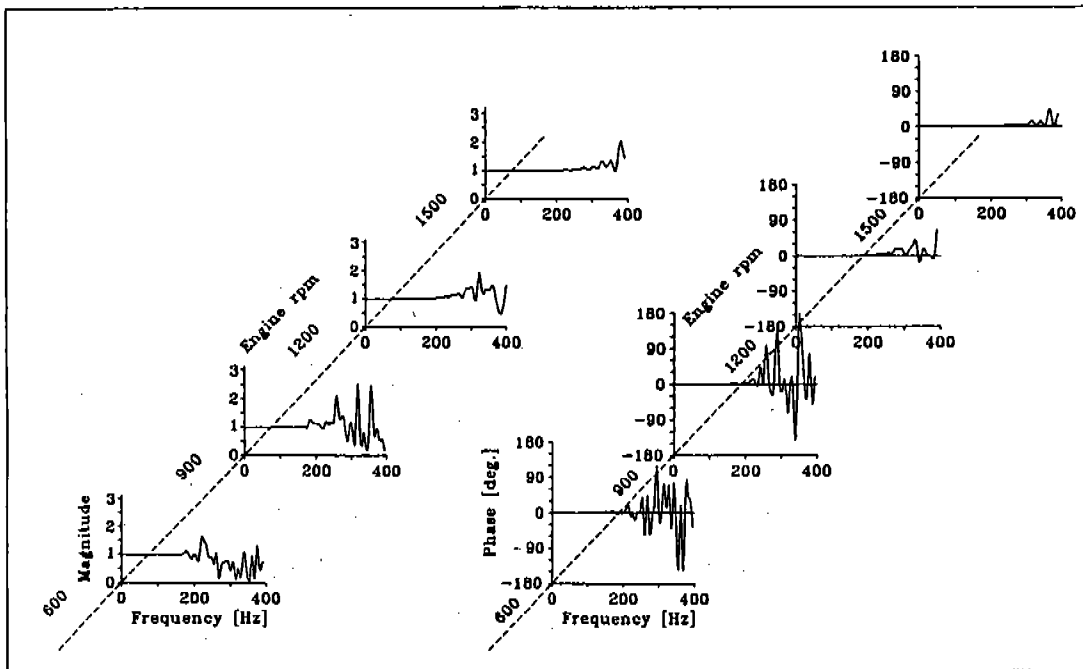


Fig.8 Trend of transfer function of connecting passage in a S/P type pressure adapter with respect to engine rpm (WOT, motoring)

하기 위하여 PSD 함수 $G_{xx}(f)$, $G_{yy}(f)$ 를 이용하였다.

그림 9는 어댑터 조건의 변화에 따른 PSD 함수 $G_{xx}(f)$, $G_{yy}(f)$ 를 그려놓은 것이다. (a)가 표준조건의 경우이고, (b)는 관의 지름을 변화시킨 경우, (c)는 관의 길이를 변화시킨 경우, (d)는 캐비티 체적을 변화시킨 경우이다.

그림 10은 그림 9를 이용하여 각각의 조건이 변할 때 기초 공진주파수의 변화를 그린 것이다. 이들을 정리하여 보면

1) 관의 지름 증가에 따른 효과

관의 지름이 증가하면 체적비가 감소하여

공진주파수가 커진다.

2) 관의 길이 증가에 따른 효과

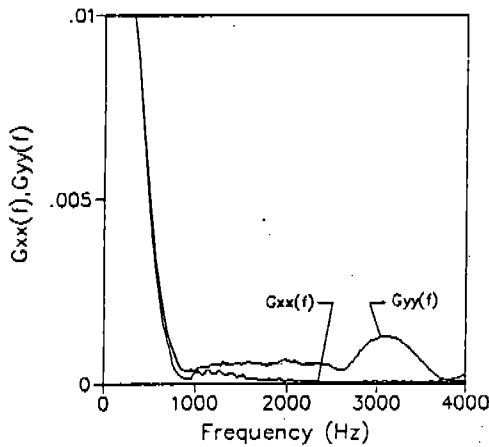
관의 길이가 증가하면 공진주파수가 낮아진다.

3) 캐비티 체적의 증가에 따른 효과

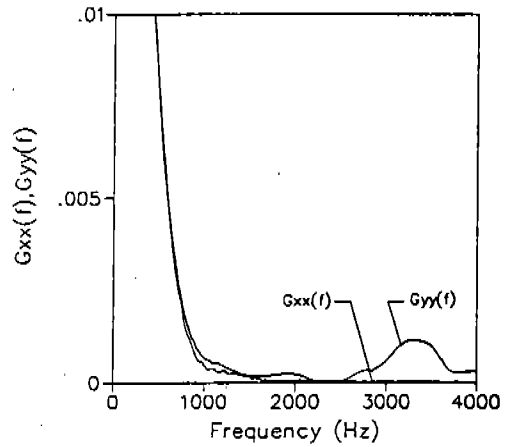
캐비티 체적이 증가하면 공진주파수가 낮아진다. 이는 캐비티 체적이 감쇠(damper)의 역할을 하여 공진주파수가 낮아지는 것으로 생각된다.

4.4 타력운전상태의 압력왜곡의 보상

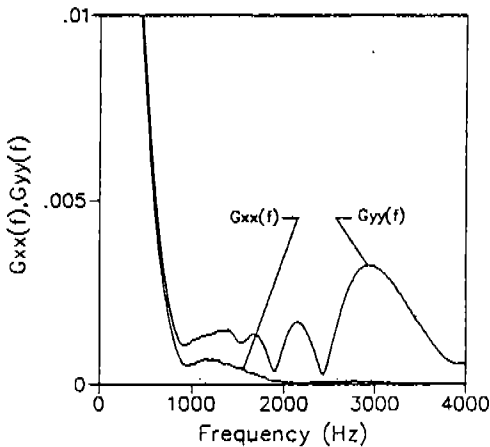
그림 11은 트로틀을 거의 닫은 상태에서



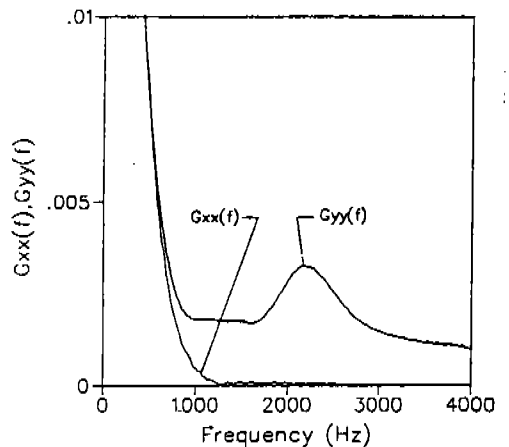
(a) standard adapter



(b) extension tube diameter changed

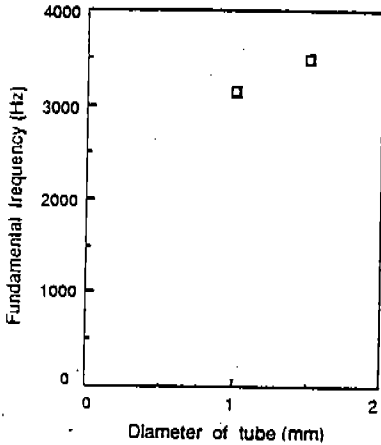


(c) extension tube length changed

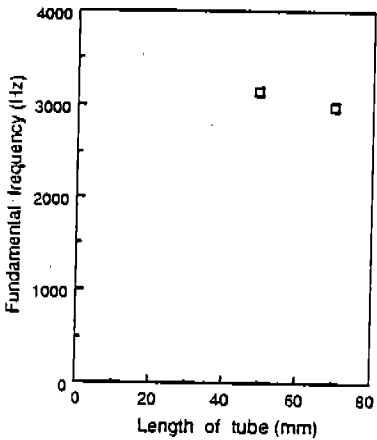


(d) extension tube cavity volume changed

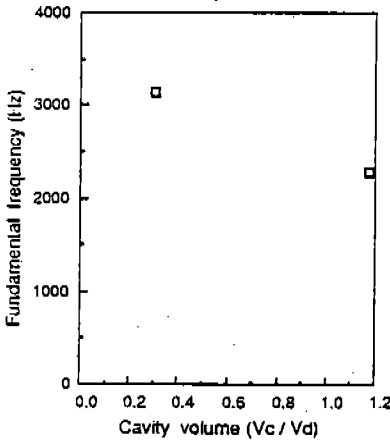
Fig. 9 Power spectral density function (firing, 3000 rpm, full load)



(a) extention tube diameter change



(b) extention tube length changed



(c) extention tube cavity volume changed

Fig.10 Trend of fundamental frequency of S/P adapter with respect to variation of passage geometry

1200 rpm의 경우에 F/M형 센서로 얻은 데이터와 S/P형 센서로 얻은 데이터를 전달함수를 이용하여 보정한 값과의 차(Pb) 또, F/M형 센서로 얻은 데이터와 보상없이 S/P형 센서로부터 구한 값과의 차(Pa)를 같이 보여준 것이다. 보상을 하지 않은 경우의 차이를 보면 max 0.1 kg/cm² 정도가 되며, 사이클 간에 거의 같은 형태로 차이가 발생하고 있음을 알 수 있으나, 보상하였을 경우의 차를 보면 max 0.01 kg/cm² 정도로 감소하여 90% 정도 보정이 되었음을 알 수가 있다.

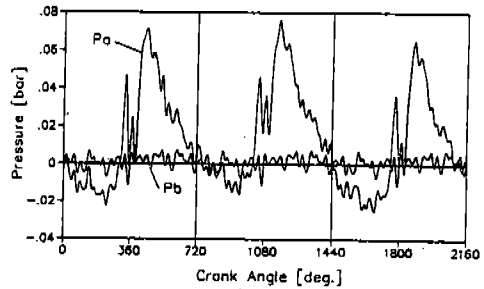


Fig.11 Pressure difference between F/M and S/P type

Pa=(Pressure measured by F/M type)-
(pressure measured by S/P type)

Pb=(Pressure measured by F/M type)-
(pressure measured by S/P type which
is calibrated by transfer function)

The engine was motored at 1200rpm
with throttle value closed

4.5 자력운전상태의 압력왜곡의 보상

자력운전 압력 데이터의 보정은 첫째로는 동일 회전수, 동일 부하의 조건에서 구한 전달함수를 이용하여 보상을 하였고, 둘째로는 3000 rpm, 전부하 조건에서 구한 전달함수를 이용하여 저 부하, 저 회전수에 적용하였다. 3000 rpm, 전부하 조건의 경우는 다른 조건과 비교하여, 회전수와 부하가 크므로 압력 데이터의 에너지가 높아서 전달함수의 신뢰성이 보장되는 주파수영역이 넓어진다.

그림 12는 3000 rpm, 전부하 조건에서 F/M 데이터와 S/P 데이터(보정하지 않은 것,

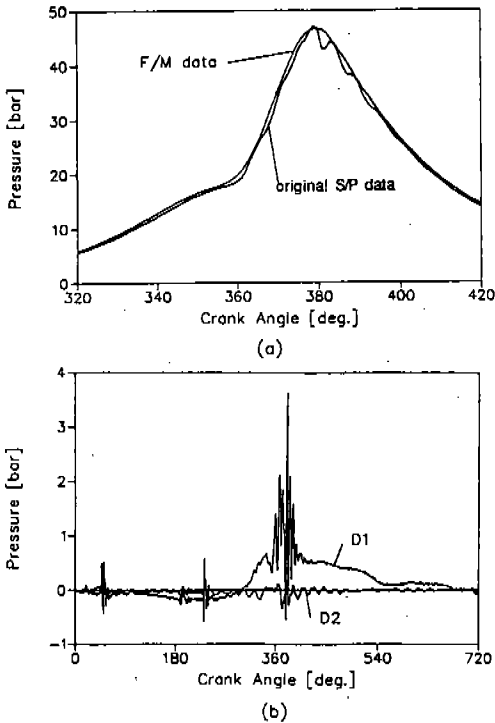


Fig.12 Source data and result of calibration (3000 rpm, Full Load)

- (a) F/M data and S/P data
- (b) Pressure difference between F/M and S/P type

$$D_1 = (\text{F/M data}) - (\text{S/P data})$$

$$D_2 = (\text{F/M data}) - (\text{transferred S/P from transfer function (3000, full)})$$

보정한 것)와 이들의 차이를 보여준다. 그림 13은 1500 rpm, 전부하 조건에서 F/M 데이터, 보정하지 않은 S/P 데이터, 동일조건에서 구한 전달함수를 이용하여 보정한 S/P 데이터, 3000 rpm, 전부하 조건에서 구한 전달함수를 이용하여 보정한 S/P 데이터와, 이들 데이터의 차이를 보여준다. 각각의 그림 12와 그림 13에서 (a)는 가장 압력의 왜곡이 심한 부분인 크랭크 각도 320°에서 420°까지를 확대한 것이고, (b)는 전 사이클의 F/M형 데이터와 S/P형 데이터의 차이를 보여준 것이다. 그림 12 및 그림 13에서 S/P형 데이터의 압력왜곡 정도가 아주 심함을 볼 수가 있으나, 전달함수를 이용하여 보상하므로 어느정도 보상이 이루어졌음을 볼 수 있다.

그림 14와 그림 15는 전부하에서 회전수가

1500, 2000, 3000인 경우에 동일조건에서 구한 전달함수를 이용하여 보상하였을 경우와 3000 rpm, 전부하에서 구한 전달함수를 이용하여 보상하였을 때 압력 차이(F/M형 데이터-보상된 S/P형 데이터)의 RMS 값(root mean square value)과 IMEP의 차이를 보상하지 않은 원 데이터(original data)의 그것과 비교하여 나타낸 것이다. RMS 값의 경우 60~80% 정도의 보상이 이루어졌고, IMEP의 경우 60~95%까지 보상이 이루어졌다.

이상과 같이 본 실험에서는 S/P형 압력센서를 이용하여 얻은 실린더내의 압력 데이터를 전달함수를 이용하여 보상하였다. 근본적

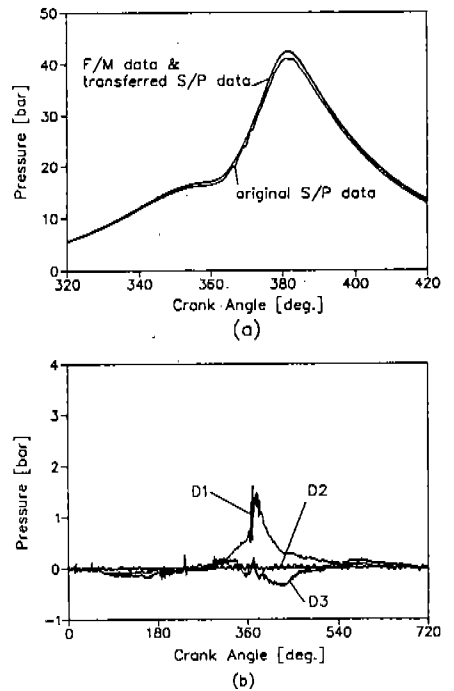


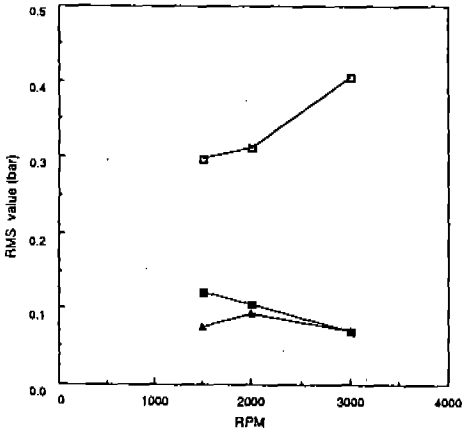
Fig.13 Source data and result of calibration (1500 rpm, Full Load)

- (a) F/M data and S/P data
- (b) Pressure difference between F/M and S/P type

$$D_1 = (\text{F/M data}) - (\text{S/P data})$$

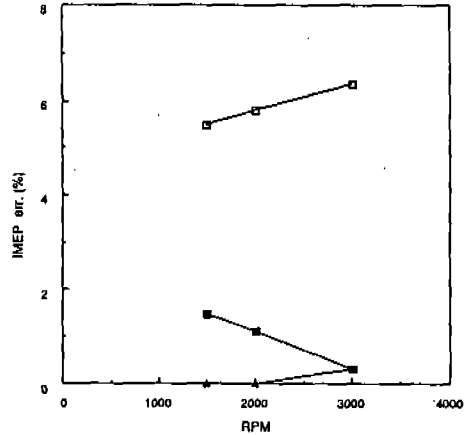
$$D_2 = (\text{F/M data}) - (\text{transferred S/P from transfer function (1500, full)})$$

$$D_3 = (\text{F/M data}) - (\text{transferred S/P from transfer function (3000, full)})$$



□ difference between original S/P & F/M data
 ▲ difference after S/P data compensated by transfer function obtained at same engine condition
 ■ difference after S/P data compensated by transfer function obtained at 3000 rpm, full load

Fig.14 Comparison of RMS value of difference in pressure data obtained by F/M and standard S/P adapters, and difference after S/P data were compensated in two ways as explained above



□ difference between original S/P & F/M data
 ▲ difference after S/P data compensated by transfer function obtained at same engine condition
 ■ difference after S/P data compensated by transfer function obtained at 3000 rpm, full load

Fig.15 Comparison of IMEP error of difference in pressure data obtained by F/M and standard S/P adapters, and differences after S/P data were compensated in two ways as explained above

으로 전달함수는 시스템의 요소(system parameter)가 시간에 대하여 불변인(time-invariable) 선형시스템에 대하여 적용하는 것인데 본 연구의 시스템은 연결관로내를 흐르는 유체(혼합기체)이므로 선형시스템이라고 할 수 없고 어느정도 비선형성(nonlinearity)을 내포하고 있다. 이러한 비선형성이 전달함수를 이용한 압력보상의 한계로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 실린더내의 압력을 측정할 때 S/P형 압력센서의 연결관로로 인하여 압력의 왜곡이 발생하며, 연결관로의 길이, 관의 지름 등에 따라 주 진동주파수가 어떻게 달라지는가를 보여 주었다. 또 이러한 압력의 왜곡을 전달함수를 이용하여 보상할 경우 어느정도 보상이 가능한 것을 보여주었으며, 아래와 같은 결론을 내렸다

1) 주어진(그림 1) 연결관로의 음향학적 동적특성의 경우, 상온에서 1300 Hz에서 주

공진주파수를 갖는다는 것을 보여 주었다.

2) 공기흐름의 영향에 따른 동적특성을 조사하기 위하여 엔진 타력운전실험을 600~1500rpm까지 실행한 결과, 이런 운전의 변화가 동적특성에 별다른 큰 영향을 미치지 않았다.

3) 자력운전실험으로부터 구한 연결관로의 동적특성은 관의 길이가 길어질수록, 관의 직경이 작을수록, 캐비티 체적(cavity volume)이 클수록 주공진주파수가 저주파수로 이동하는 경향을 보여 주었으며, 이는 압력 변환기로서는 바람직하지 못한 현상이다.

4) 전달함수의 개념을 도입하여 S/P 형의 압력신호를 보상했을 때 1200rpm 타력운전의 경우, 약 90% 정도의 보상이 이루어졌다.

5) 동일 조건에서 구한 전달함수를 이용하였을 경우 RMS 값이 65~82%, IMEP가 90~95% 정도 보상이 이루어졌고, 300rpm, 전부하에서 구한 전달함수를 이용할 경우 RMS 값이 60%, IMEP가 70% 정도 보상이 이루어졌다.

참 고 문 헌

1. H. J. Schafer, O. Krull, B. Maege, "Thermal Stress on a Piezoelectric Pressure Transducer in the Combustion Chamber of a SI-Engine", SAE Transactions, 1985, Paper 850375.
2. Lawrence W. Evers, "Spark Plug Pressure Transducers for Measuring Indicated Work", SAE Transactions, 1978, Paper 780148.
3. A. L. Ducoffe, F. M. White, "The Problem of Pneumatic Pressure Lag", ASME Transactions, Journal of Basic Engineering, June, 1964.
4. Junco Sato, "Settling Times of Pressure Measurements through Capillary Tubes" AIAA Transactions, 1979.
5. Shinichi Gato, "Improvement of the Dynamic Characteristics in the Connecting Passages for Measuring High Frequency Pressure Diagrams", SAE Transactions, 1986, Paper 861277.
6. Andrew L. Randolph, "Cylinder-Pressure-Transducer Mounting Techniques to Maximize Data Accuracy", SAE Transactions, 1990, Paper 900171
7. A. F. D'souza, R. Oldenburger, "Dynamic Response of Fluid Lines", ASME Transactions, Journal of Basic Engineering, Sept, 1964.
8. S. H. Tsang, "The Open and Blocked Distributed Air Transmission Lines By the Fast Fourier Transform Method", ASME Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, September, 1985.
9. J.H. Spurk, "Flow in a Gas-Operated Rifle", ASME Transactions, Journal of Applied Mechanics, March, 1972.
10. F. J. Tarantine, "Fluid Pressure Transients in a Tapered Transmission Line", ASME Transactions, Journal of Basic Engineering, March, 1967.
11. E. F. Moore, "A Transient Response Approximation for Noncircular Fluid Transmission Lines", ASME Transactions, Journal of Fluids Engineering, June, 1976.
12. A. K. Mitra, "Radial and Axial Variations in Transient Pressure Waves Transmitted Through Liquid Transmission Lines", ASME Transactions, Journal of Fluids Engineering, March, 1985.
13. Julius S. Bendat, "Random Data", John Wiley & Sons, 1986.