

## 부분기여도 함수를 이용한 직접분사 가솔린 엔진 부품의 진동원 분석

장지욱\* · 이상권\*† · 박종호\* · 김병현\*

\* 인하대학교 기계공학과

### Vibration Identification of Gasoline Direct Injection Engine Based on Partial Coherence Function

Ji uk Chang\*, Sang kwon Lee\*†, Jong ho Park\* and Byung hyun Kim\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received June 18, 2012 ; Revised July 26, 2012 ; Accepted July 30, 2012)

**Key Words:** Partial Coherence Function(부분 기여도 함수), Partial Coherence Output Spectrum(부분기여 출력 스펙트럼), Multiple Coherence Function(다중기여도 함수), Ordinary Coherence Function(일반 기여도 함수), Multi Dimensional Spectral Analysis(다차원 스펙트럼), Residual spectrum(잔차 스펙트럼)

**초록:** 본 논문에서는 직접분사 가솔린엔진 부품에 의해서 발생하는 진동에 대한 기여도를 분석하는 방법을 제시한다. 본 연구에서는 부분기여도함수를 적용하여 부품 상호간의 관련성에 대한 진동원을 규명 하는데 사용하였다. 직접분사 가솔린 엔진 부품의 진동원을 규명하는데 부분기여도함수 방법을 사용하기 위해서는 시스템의 모델링이 필요하며 본 연구에서는 진동 발생 경로를 2 입력과 단일 출력계로 시스템을 모델링하였다. 이 모델링을 증명 하기 위해서, 직접분사가솔린 엔진의 진동원인 고압펌프, 연료레일, 인젝터, 고압센서에 3 축 가속도계 센서로 각 부품의 진동을 측정했다. 이 모델링을 바탕으로 각각의 진동원에 대한 부분기여도 함수를 구했으며, 직접분사 부품들의 각각의 진동 기여도를 계산하였다. 부분기여도 함수를 바탕으로 한 모델링을 통해 각 부품들에서 발생하는 진동 출력 기여 값을 정량적으로 도출하였다.

**Abstract:** This paper presents a method for estimating the contribution of vibration sources in gasoline direct injection engine parts with a multiple-input system. A partial coherence function was used to identify the cause of the linear dependence indicated by an ordinary coherence function. To apply the partial coherence function to vibration source identification in the powertrain system of a gasoline direct injection engine, a virtual model of a two-input and single-output system is simulated. For the validation of this model, the vibration of the powertrain parts was measured by using triaxial accelerometers attached to the selected vibration sources—a high-pressure pump, fuel rail, injector, and pressure sensor. After calculating the partial coherence between each source based on the virtual model, the vibration contribution of the powertrain system is calculated. This virtual model based on the partial coherence function is implemented to determine the quantitative vibration contribution of each powertrain part.

- 기호 설명 -

$\gamma^2_{iy}$  : 일반 기여도함수

$\gamma^2_{iy,j}$  : 부분기여도 함수

$G_{y:i,j}$  : 부분 기여 출력 스펙트럼

$H_i(f)$  : 주파수 응답함수

### 1. 서론

최근 자동차 산업 발달로 인해 자동차의 고급화와 성능향상이 이루어지고 있다. 그에 따라 소비자들의 자동차에 대한 관심도 출력, 연비 등에서 진동, 소음, 승차감으로 옮겨가고 있다. 자동차의 가솔린 엔진의 경우는 많은 연구가 되고 있지만, 직접분사가솔린 엔진의 경우는 연구가 필요한 상황이다. 직접분사가솔린 엔진에서 발생하는 고압에 의한 연료 분사장치 의 진동 및 소음발생이 실내로 유입되어 고객의 불

† Corresponding Author, sangkwon@inha.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

만이 되고 있다. 따라서 기존 기술에서는 발생하지 않는 엔진 전장 부품의 진동 기여도 분석이 필요하다. 직접분사가술린 엔진의 경우에 고압펌프, 연료레일, 인젝터, 압력센서 등의 부품이 상호 합성되어 실내로 유입됨으로 각각의 부품의 실내 유입경로 및 기여도 분석이 필요하다. 직접분사가술린 엔진부품들을 보면 독자적으로 발생하는 것이 아니라 대부분 서로 결합된 형태로 존재하고 있어서 특정 진동원의 영향을 분석하거나 파악하고자 할 때는 각각의 진동 파워량을 해석하기에 까다로워진다.

독립적인 시스템일 경우 기존의 주파수 응답 함수법을 적용하여 스펙트럼을 통한 주파수 분석이 가능하나, 직접분사가술린 엔진 부품들과 같은 경우 부품들 사이에 상관성이 존재하기 때문에 분석 시 제약이 따른다. 이런 경우에는 입력원과 출력원과의 모델링을 통해서 각각의 상관관계를 알고 각각의 영향을 분석하는 부분기여도 함수를 사용하는 것이 유리하다.<sup>(1)</sup> 본 연구에서는 엔진전장부품들의 진동기여도를 알아보기 위함으로 출력 진동에 직접적으로 전달되는 진동 입력과 출력 자체 가진력 입력이 출력진동에 기여하기 때문에 2 입력/ 단일 출력 시스템<sup>(3,4)</sup>으로 모델링 할 수 있다. 2 입력 1 출력으로 다차원 스펙트럼 해석법인 부분기여도 함수를 적용한 후 전장 부품들의 진동기여도를 각 주파수 별로 규명하였다. 직접분사가술린 엔진부품들의 전달경로 간의 상호 간섭작용에 의해 출력으로 나타나는 경우에 부품간의 상관성분을 제거하여 각 부품들의 순수한 기여량을 알아 볼 수 있다.<sup>(3,4)</sup>

## 2. 다차원 스펙트럼 해석법

일반기여도 함수의 경우에는 입력원간에 상관관계가 없고 상호 독립적인 경우에 쓰는 방법이다. 하지만 본 연구에서의 직접분사가술린 엔진의 주요 부품들은 고압펌프, 인젝터, 연료레일, 고압 센서로 서로

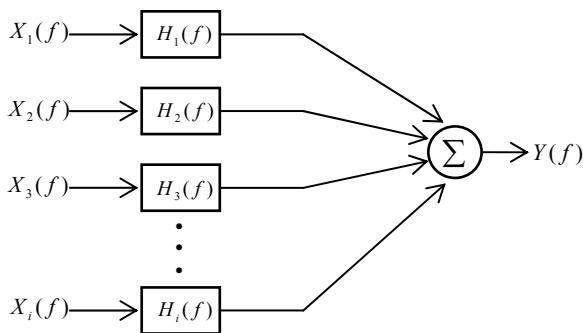


Fig. 1 Multi-input/single-output model of dynamic system for the vibration path analysis

간의 상관관계가 존재한다.<sup>(2)</sup> 즉, 직접분사가술린 엔진 부품들은 입력이 단일 입력이 아니라 Fig. 1 과 같이 다입력/단일 출력으로 모델링 해야하며, 다차원 스펙트럼 해석법으로 분석 하여야 한다. 그리고 다차원 스펙트럼 해석법의 하나인 부분기여도 함수를 통해 여러 개의 입력에 대한 각 기여도를 분석하였다.<sup>(5)</sup>

### 2.1 일반기여도 함수(Ordinary Coherence Function)

일반적으로 다 입력에 대한 단일 출력은 Fig. 1 과 같이 시스템을 모델링 한다. 이 모델링에서 단일출력에 대한 다중 입력의 각 입력이 차지하는 비중은 자기 스펙트럼(Auto spectrum)과 상호 스펙트럼(Cross spectrum)을 이용하여 식 (1) 같이 일반기여도 함수( $\gamma^2_{iy}(f)$ )로 나타낼 수 있다.<sup>(4,5)</sup>

$$\gamma^2_{iy}(f) = \frac{|G_{iy}(f)|^2}{G_{ii}(f)G_{yy}(f)} \quad i=1,2,\dots,q \quad (1)$$

여기서  $G_{iy}$ 는 i-번째 입력과 출력 y 에 대한 상호스펙트럼이며,  $G_{ii}$  와  $G_{yy}$ 는 입력과 출력 신호에 대한 자기스펙트럼이다. 본 연구에서는 엔진에 부착 되어 있는 대부분의 시스템을 2 입력/ 단일출력으로 모델링을 단순화하여 부분 기여도 함수와 스펙트럼 분석법을 적용하여 각 부품에 대한 지동 기여도를 구하고자 한다. 2 입력과 단일 출력의 경우는 Fig. 1 의 다입력 시스템을, Fig. 2 와 같이 2 입력으로 모델링 할 수 있다. Fig. 2 는 두 입력 입력  $X_1(f)$  과  $X_2(f)$  에 대한 단일 출력  $Y(f)$  에 관한 모델링이다. 여기서  $H_1(f)$  과  $H_2(f)$ 는 각 입력에 대한 전달함수 이다. 여기서  $X_1(f)$ 과  $X_2(f)$ 는 입력  $x_1(t)$  과  $x_2(t)$  에 대한 푸리에 변환이다. 입력  $X_1(f)$  과  $X_2(f)$  에 대한 출력  $Y(f)$  의 상관성을 나타내는 일반상관도를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며 이때  $i$  는 1,2 이다.

일반적으로 다 입력 상호 간의 입력 특성이 독립적인 경우, 일반 상관도 함수 만으로 각 입력의

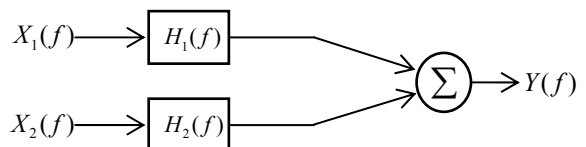


Fig. 2 Two-input/single-output model of a dynamic system with independent two sources

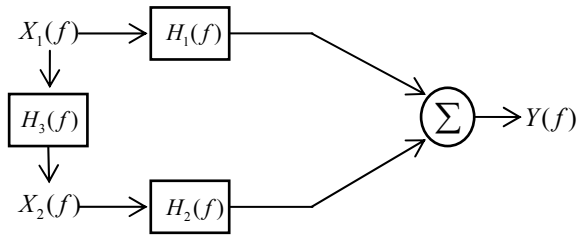


Fig. 3 Two-input/single-output model of a dynamic system with partially correlated sources.

출력에 대한 기여도를 구할 수 있다. 그러나 엔진 전장 부품의 진동은 엔진진동과 부품 자체 진동의 합으로 나타나는데 이 경우 엔진 진동이 전장 부품의 진동을 영향을 미침으로 엔진 진동과 전장 부품자체 진동의 입력이 상호 연관성이 존재한다. 이 경우에 2 중 입력 단일 출력시스템에 대한 입출력 모델은 Fig. 3 과 같이 모델링 된다. 따라서 입력  $X_1(f)$ 의 일반상관도는 다른 입력  $X_2(f)$ 에 의해서 영향을 받음으로 각 입력의 순수한 기여도를 파악하기는 힘들다. 이 경우 2 입력/ 단일 출력 시스템에서는 각 입력의 상관에 기여하는 부분을 제거한 각 입력의 순수 기여도를 예측하는 부분기여도 함수를 사용한다.

2.2 부분기여도 함수(Partial Coherence Function)

Fig. 1의 중 입력에 대한 단일 출력을 갖는 다입력/단일 출력 시스템의 파워 스펙트럼  $G_{yy}(f)$ 을 구하면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$G_{yy}(f) = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q H_i^*(f) H_j(f) G_{ij}(f) + G_m(f) \quad (2)$$

여기서  $H_j(f)$ 는  $j$  번째에 기여하는 주파수 응답함수이고,  $H_i^*(f)$ 는  $H_i(f)$  함수의 공액복소수이며,  $G_m(f)$ 은 노이즈 파워 스펙트럼이다. 이러한 경우에 출력에 대한 어떤 입력의 기여도를 구할 수 있다. 주파수 응답 함수법으로 계산할 경우에는 다입력 상호간의 상관성에 의한 값이 중복되어 출력에 영향을 미침으로 각각의 입력값이 출력값에 얼마나 기여하는 지를 파악하기 어렵게 된다. 따라서 각 입력이 출력에 기여하는 선형적인 효과를 구하기 위해서는 식 (3) 과 같이 입력 상호 상관성 영향을 제거한 잔차 스펙트럼을 이용한다.

$$G_{ij:r!} = G_{ij:(r-1)!}(f) - L_{rj}(f) G_{ir:(r-1)!}(f) \quad (3a)$$

$$L_{rj}(f) = \frac{G_{rj:(r-1)!}(f)}{G_{rr:(r-1)!}(f)} \quad (3b)$$

여기서  $L_{rj}(f)$ 는 입력간 및 입출력간의 상관성분을 제거시킨 경우의 입력간 및 입출력간의 최적 전달 함수이다. 식 (3)에서 본 연구에서 사용하고자 하는 2 입력/단일 출력시스템의 모델인 경우  $X_1(f)$ 의 영향을 제거한 입력  $X_2(f)$ 와 출력  $Y(f)$  사이의 잔차 스펙트럼을 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$G_{2y:1}(f) = E[X_2^*(f)Y(f)] = G_{2y}(f) - \left( \frac{G_{1y}(f)}{G_{11}(f)} \right) G_{12}^*(f) \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} G_{22:1}(f) &= E[X_2^*(f)X_2(f)] \\ &= G_{22}(f) - \frac{G_{12}(f)G_{12}^*(f)}{G_{11}(f)} \\ &= G_{22}(f)(1 - \gamma_{12}^2(f)) \end{aligned} \quad (4b)$$

$$G_{yy:1}(f) = G_{yy}(f)(1 - \gamma_{1y}^2(f)) \quad (4c)$$

위의 식을 이용하여 상관성  $X_1(f)$ 을 제거한  $X_2(f)$ 의 부분 기여도 함수를 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$\gamma_{2y:1}^2(f) = \frac{|G_{2y:1}(f)|^2}{G_{22:1}(f)G_{yy:1}(f)} \quad (5)$$

한편,  $X_2(f)$ 의 영향을 제거한 경우도 식 (4)와 식 (5)와 같은 유사 형태로 표현된다. Fig. 3은  $X_1(f)$ 과  $X_2(f)$ 의 입력이 출력  $y$ 에 기여하는 것을 모델링 하였다. Fig. 3은 Fig. 2와는 다르게 각 입력값이 상호연관성을 고려 하여 모델링 한 것이다. 즉  $X_1(f)$ 과  $X_2(f)$ 의 자체 가진력의 입력은  $Y(f)$ 의 출력 진동을 나타내며,  $X_1(f)$ 의 입력은 입력  $X_2(f)$ 를 거쳐서  $Y(f)$ 로 들어간다. 이 때  $X_1(f)$ 의 순수한 기여량을 알기 위해서는 상관성  $X_2(f)$ 를 제거한 스펙트럼으로 계산 되어야 하고, 부분기여도 함수를 통해서 순수한 기여량을 얻을 수 있다.

실제로 진동원을 검출하려면 입력원의 출력에 대한 순수한 기여량을 계산하는 기여출력스펙트럼을 구해야 한다. 입력값에 대하여 상관성 있는 선형적인 효과를 제거한 순수한 입력값에 의해 생기는 출력에서의 파워량을 알기 위해서 사용되는 것이 기여출력스펙트럼이다. 2 입력/단일출력 모델의 부분기여출력스펙트럼을 구하려면 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$G_{y:1:2}(f) = \gamma_{1y:2}^2(f) G_{yy:2}(f) \quad (6a)$$



**Fig. 4** Experiment set-up for identification of vibration path in Gamma gasoline direct injection (GDI) Engine

$$G_{y:2:1}(f) = \gamma^2_{2y:1}(f) G_{yy:1}(f) \quad (6b)$$

여기서  $G_{y:1:2}(f)$  는 입력  $X_1(f)$ 이 출력  $Y(f)$ 에 기여하는 순수한  $X_1(f)$ 의 기여 출력 스펙트럼이며, 상호 상관성이 있는 입력값  $X_2(f)$ 의 상관성분을 제거한 것이다.  $\gamma^2_{1y:2}(f)$ 은 입력값  $X_1(f)$ 의 부분기여도 함수이다. 즉, 상호상관성  $X_2(f)$ 성분을 제거한 순수한 상관도이다.  $G_{yy:2}$ 는  $Y(f)$ 출력 파워에 대한  $X_2(f)$ 의 상관성을 제거한 출력 파워이다.  $X_1(f)$ 의 기여 출력 스펙트럼은  $X_1(f)$ 의 부분 기여도 함수에 출력 파워인  $G_{yy:2}(f)$ 를 곱함으로써 구할 수 있다.

### 3. 실험적 응용

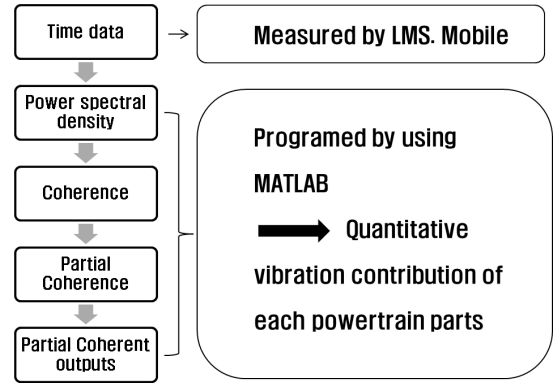
#### 3.1 실험 방법 및 장치

본 연구의 실험은 ㈜ 케피코 측의 샤시 다이내모에서 실험이 진행되었고, 실험에 이용된 차량의 엔진은 Gamma GDI 엔진이다. 실험은 Steady 상태로 Idle 에서 6000rpm 까지 1000rpm 씩 증가시키면서 10 초간 측정했고, 본 연구 논문에 나타난 실험 데이터는 5000rpm 기준으로 작성하였다.

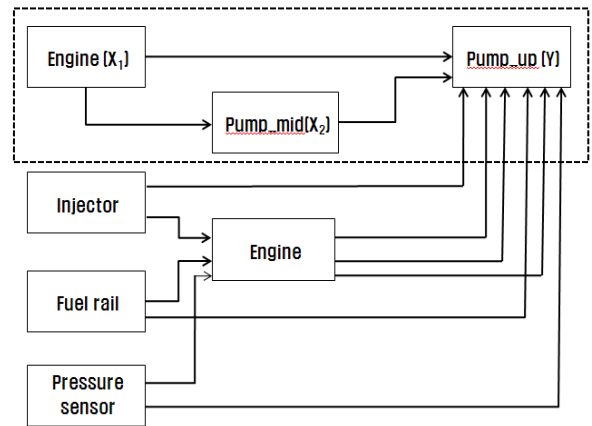
진동량을 측정하기 위해서 엔진과 고압펌프, 인젝터, 연료레일, 고압센서의 21 측정 포인트에 3축 가속도계(ENDEVCO Type 65-10)센서를 부착하여 입력신호를 측정하였다. 실험은 두 차례로 나누어서 실험이 진행되었고, 엔진 피스톤의 운동방향에 맞추어 Z축 방향의 데이터들을 적용하였다.

#### 3.2 데이터 처리 순서

Fig. 4에서 나타나는 것처럼 본 연구에 사용된 데이터는 LMS사에서 제작한 32 채널로 구성된 Test mobile에 의해서 측정하였다. 각각의 아날로그 신호



**Fig. 5** Flow chart for the calculation of partially correlated coherent outputs in GDI engine component



**Fig. 6** Multi-input/single-output modeling for vibration path analysis of a pressure pump



**Fig. 7** Position of sensors for measurement of pressure pump vibration

를 디지털 신호로 변환하였고, 이 데이터들은 Matlab을 이용하여 처리되었다. 데이터 처리 순서는 Fig. 5에서와 같이 각종 스펙트럼 밀도함수를 구하고 이를 이용하여 일반기여도 함수, 잔류 스펙트럼, 부분 기여도 함수, 기여출력스펙트럼을 계산하였다.

### 4. 실험 결과 및 고찰

#### 4.1 고압펌프의 기여도 분석

직접분사 가솔린 엔진부품들의 기여도 분석을 하기 위해서는 Fig. 3 과 같은 모델링이 필요하다. 각 입력 값이 서로간의 상호 연관성이 있기 때문에 Fig. 3 을 바탕으로 모델링 한 것이 Fig. 6 과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 6 은 엔진의 입력과 고압 펌프 자체 가진력의 입력은 고압 펌프의 출력 진동에 영향을 주며, 마찬가지로 아래에 열거된 인젝터, 연료레일, 압력 센서의 진동 입력값은 직접적으로 전달되는 입력값과 엔진을 거쳐서 고압펌프로 흘러 들어가는 입력값이 출력진동에 영향을 준다. 모든 모델링의  $X_2(f)$  입력은 가진력으로 설정하였다. 그렇기 때문에 각 전장 부품들이 고압펌프 출력에 기여하는 진동 기여도를 구하기 위해서는 엔진의 진동 입력값을 제외

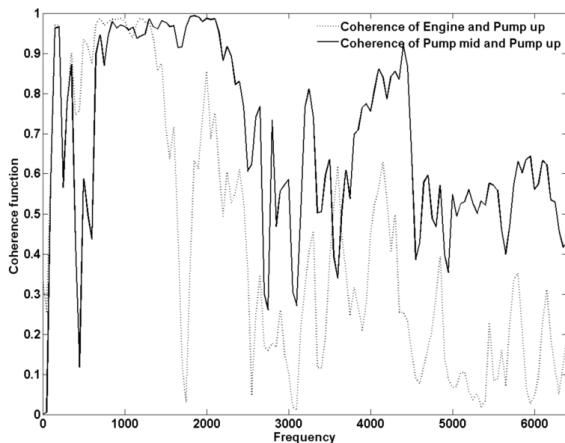


Fig. 8 Ordinary coherence between engine( $X_1$ ) and pressure pump\_up( $Y$ ) and ordinary coherence between pump\_mid( $X_2$ ) and pressure pump\_up( $Y$ )

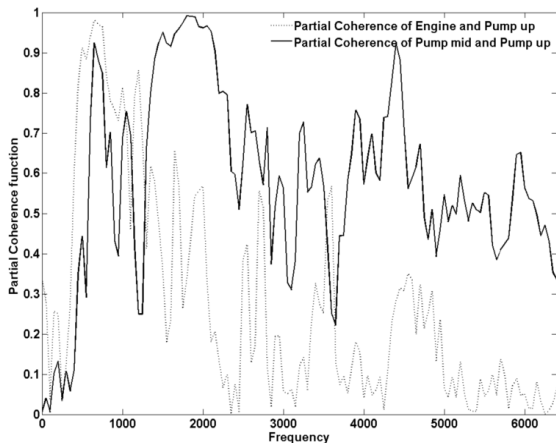


Fig. 9 Partial coherence between engine( $X_1$ ) and pressure pump\_up( $Y$ ) and partial coherence between pump\_mid( $X_2$ ) and pressure pump\_up( $Y$ )

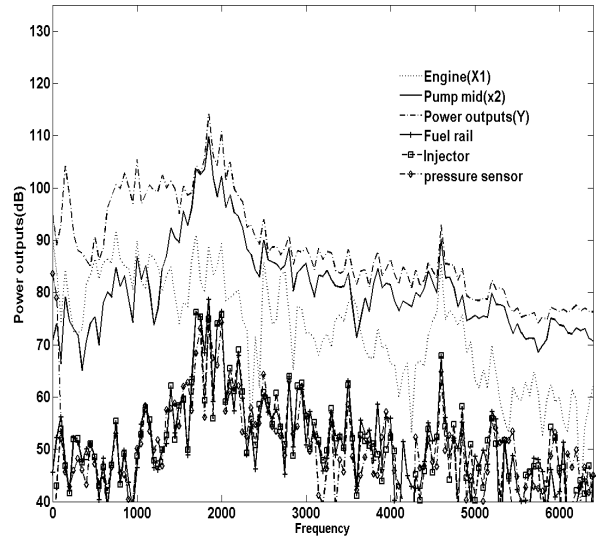


Fig. 10 Vibration contribution of gasoline direction injection components in pressure pump vibration

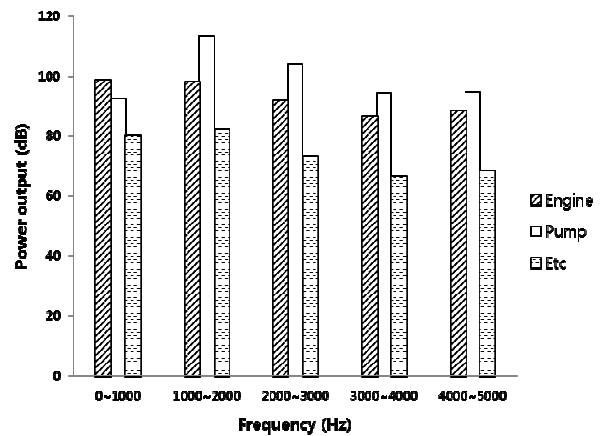


Fig. 11 Quantification of vibration contribution of gasoline direction injection components at frequency range in pressure pump vibration

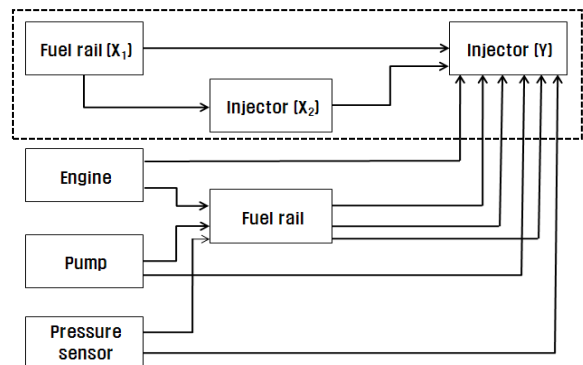


Fig. 12 Multi-input/single-output modeling for vibration path analysis of a fuel injector

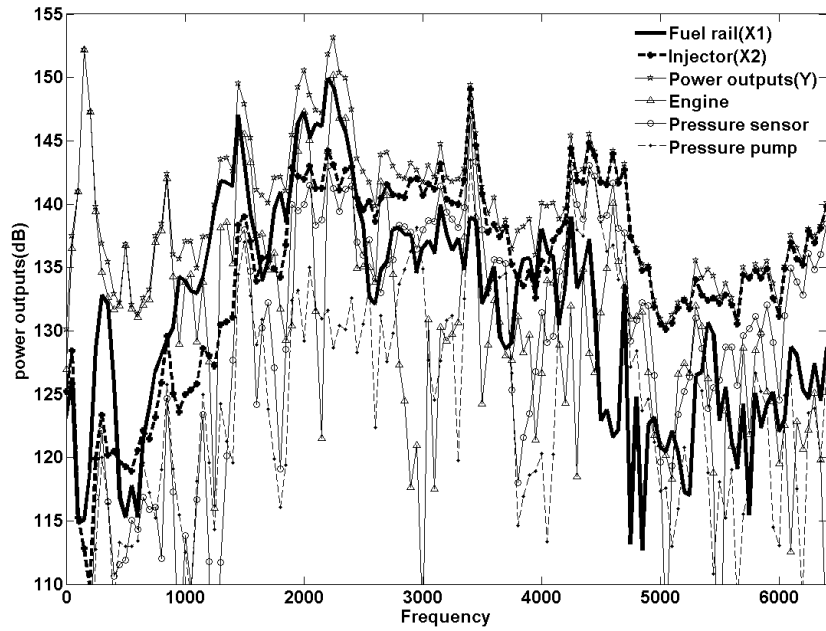


Fig. 13 Vibration contribution of gasoline direction injection components in a fuel injector

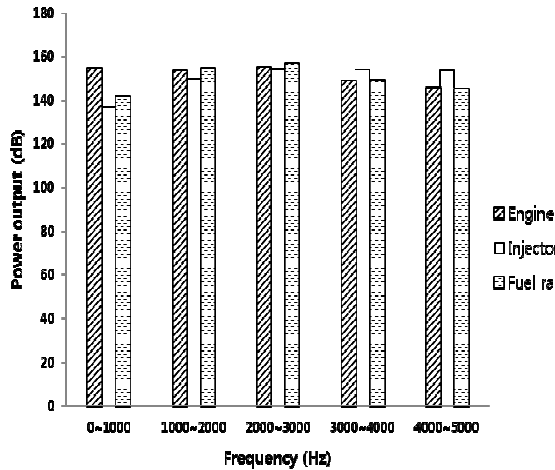


Fig. 14 Quantification of vibration contribution of gasoline direction injection components at frequency range in a fuel injector

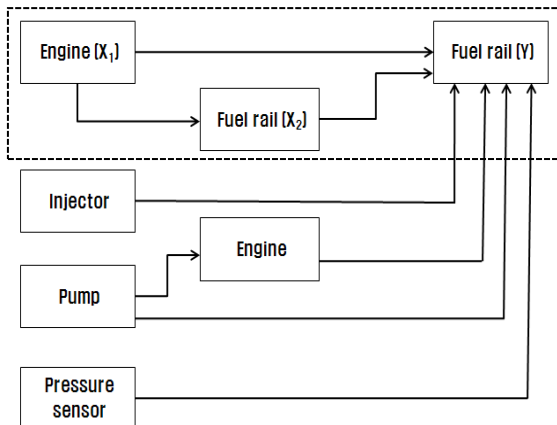


Fig. 15 Multi-input/single-output modeling for vibration path analysis of a fuel rail

시켜야 한다. 인젝터, 연료레일, 압력센서의 모델링도 각각 2 입력 1 출력으로 모델링 바탕으로 하며, 고압 펌프에 들어가는 엔진의 진동량을 제외한 엔진의 진동 입력값으로 계산된다. Fig. 6에서의 점선으로 표시된 것과 같이 각 전장 부품들을 2 입력 1 출력으로 모델링 하였다.

Fig. 6에서의 고압 펌프 실제 위치는 실제 실험 사진 Fig. 7를 통해 확인할 수 있다. Fig. 7은 고압 펌프에서 발생하는 출력과 위 Pump\_up 인  $Y(f)$ 에 대해서 엔진 입력원인  $X_1(f)$ 과 고압펌프 자체 가진원 Pump\_mid 인  $X_2(f)$ 를 나타낸 것이다. 이와 같은 모델링 바탕으로 일반기여도 함수와 부분기여도 함수의 차이점을 다음과 같이 규명하였다. Fig. 8은 고압 펌프 출력  $Y(f)$ 에 기여하는 엔진 입력원  $X_1(f)$ 과 고압 펌프 가진원  $X_2(f)$ 의 진동과 위를 상관관계로 나타내는 일반기여도 함수이다. 이 경우에는 서로간의 상호 입력을 고려하지 않았기 때문에 각 입력에 대한 순수한 기여도를 알 수 없다.

일반기여도 함수 만으로 엔진의 진동량과 고압 펌프 자체 가진원의 진동량을 구분하기는 어렵다. 반면 Fig. 9와 같은 부분기여도 함수를 적용한 결과 값을 보면, 일반기여도 함수와 부분기여도 함수의 차이를 알 수 있다. 부분 기여도 함수의 그래프에서 펌프의 기여량이 저주파 대역에서 차이가 나는 것을 확인 할 수 있는데, 이것은 고압 펌프 자체 가진원을 제거한 순수 엔진의 진동 기여도가 나타나기 때문이다. 즉, 각 입력원에 대하여 서로의 선형적인 상관성을 제거하여 각 입력이 순수하게 기여하는 양을



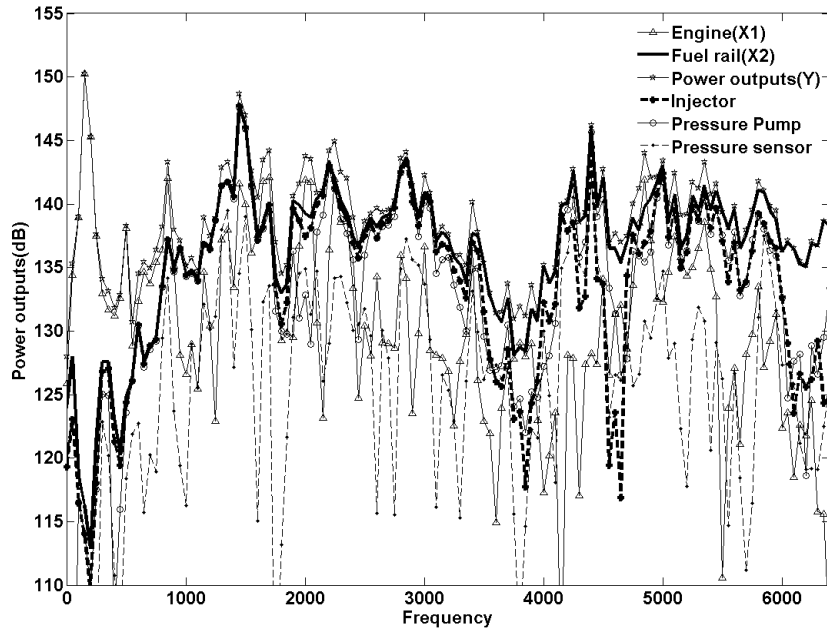


Fig. 16 Vibration contribution of gasoline direction injection components in a fuel rail

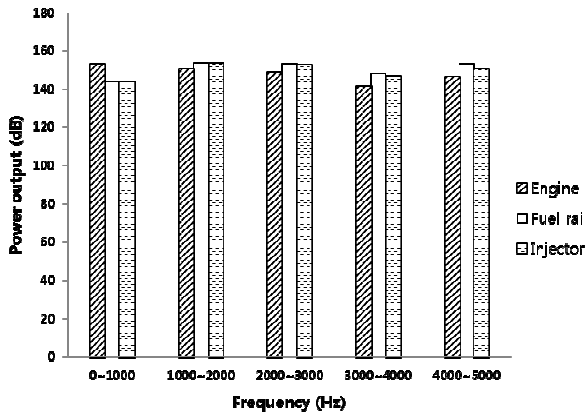


Fig. 17 Quantification of vibration contribution of gasoline direction injection components at frequency range in a fuel rail

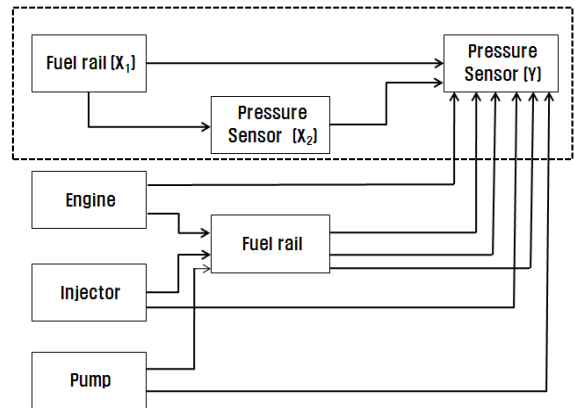


Fig. 18 Multi-input/single-output modeling for vibration path analysis of a pressure sensor

나타내는 것을 표현 해준 것이 부분 기여도 함수인 Fig. 9 이다.

이와 같이 일반 기여도 함수와 부분기여도 함수의 입출력간에 기여관계가 0.7 이상의 높은 값이 나타나고 있는데 이와 같은 결과로부터 입력간 및 입출력간에 상관관계가 존재하고 있는 것으로 생각 된다. 따라서 다차원 스펙트럼 해석이 GDI 파워트레인 진동원 검출에 적용이 가능하다는 것을 알 수 있다. 고압펌프로 흘러 들어가는 진동량에 대해서는 기계적 특성을 고려하여 Fig. 6 과 같이 모델링을 작성하였으며, 다차원 스펙트럼 바탕으로 출력에 대한 입력원들의 서로간의 상관관계를 해석적으로 고려하여 잔차 스펙트럼 각각 구한다. 잔차 스펙트럼 바탕으로

부분기여도 함수를 구하였으며, 각각의 부분기여도 함수에 특정 입력의 출력량과 파워를 나타내주어 각각의 기여 출력스펙트럼을 나타내준다. Fig. 10 은 펌프에 대한 부분 기여출력스펙트럼을 나타내는 결과이다. Fig. 11 은 펌프에 대한 부분 기여출력 스펙트럼을 막대 그래프로 표시한 것이다. 주파수 대역에 따라 각 파워트레인 부품들의 파워값을 확인할 수 있다. Fig. 11 에서 Etc 는 연료레일, 인젝터, 압력센서의 파워량을 나타내는 것이다. Fig. 10 과 같이 기여출력 스펙트럼을 통해 구한 파워량은 1000Hz 전후에서 엔진이 지배적이며, 2000Hz 전후에 가장 큰 진동 기여량을 가지는 것은 펌프이며 전체 파워량의 77~86% 까지 기여를 한다.

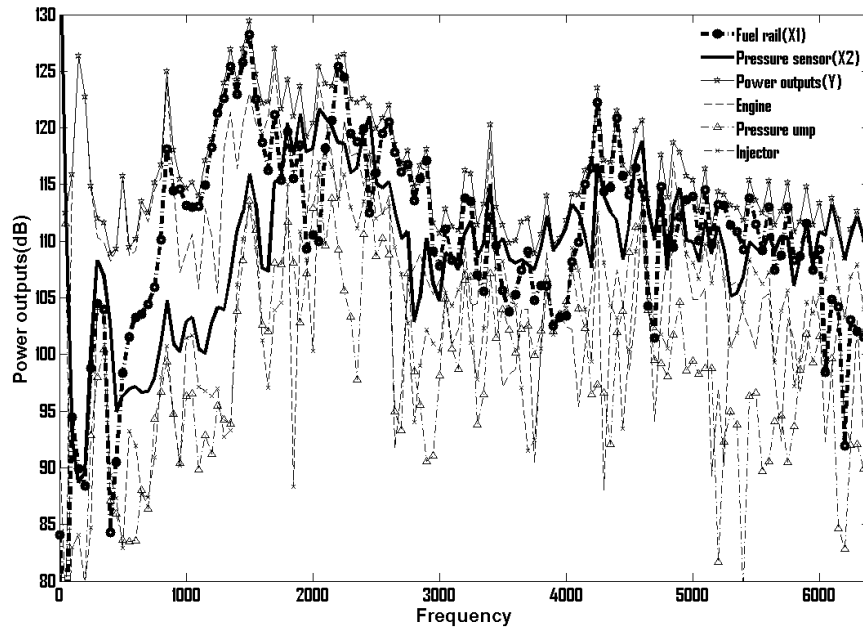


Fig. 19 Vibration contribution of gasoline direction injection components in pressure sensor

4.2 인젝터 기여도 분석

인젝터의 경우에는 연료레일에서 오는 진동과 위인 입력  $X_1(f)$ 과 인젝터의 자체 가진원인  $X_2(f)$ 가 인젝터 출력 진동량을 나타낸다. 인젝터의 기여도 분석을 위해서는 Fig. 12와 같이 모델링 하였다. 인젝터의 순수 진동량은 연료레일에서 오는 진동의 상관성을 제거한 진동량을 계산 한 것이며, 엔진, 펌프, 압력센서의 진동량은 연료레일이 직접적으로 인젝터까지 끼치는 진동량을 선형적으로 제거한 각 진동량을 나타내 준 것이다. 이 부분기여도 함수를 통해서 각 부품이 출력해내는 진동량인 부분 기여출력스펙트럼이 Fig. 13과 같이 구할 수 있었다. Fig. 14는 인젝터의 부분 기여출력 스펙트럼을 막대 그래프로 나타낸 것이다. 인젝터의 경우에는 1000Hz 전으로는 엔진의 진동기여도가 76%으로 지배적이며, 주파수 1500Hz~1700Hz 부근에는 연료레일 진동량이 다른 파워트레인 부품들 보다는 지배적인 것을 볼 수 있다. 5000Hz까지는 연료레일에서 인젝터로 가는 진동량과 인젝터의 자체 진동량이 지배적인 것을 알 수 있다.

4.3 연료레일 기여도 분석

연료레일의 경우에는 엔진에서 오는 진동과 위인 입력  $X_1(f)$ 과 연료레일 자체 가진원  $X_2(f)$ 가 연료레일 출력 진동량을 나타낸다. 엔진에서 오는 상관성을 제거한 연료레일의 부분기여 출력 스펙트럼 진동량과 인젝터, 고압 펌프, 압력 센서의 부분기여 출력 스펙트럼 진동량을 Fig. 15의 모델링 바탕으로 분석하였다. 펌프와 인젝터의 분석 방법과 동일하게 적용하였으며,

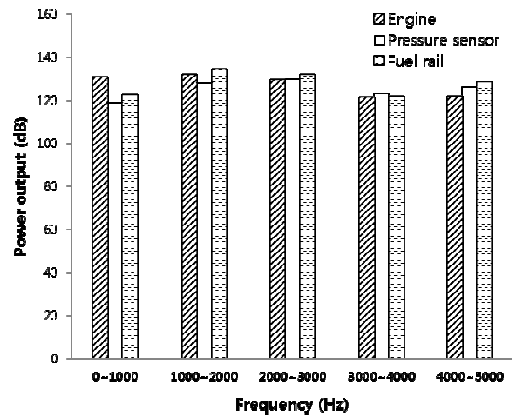


Fig. 20 Quantification of vibration contribution of gasoline direction injection components at frequency range in pressure sensor

부분기여도 분석기법을 적용하여 각 입력에 대한 기여도를 알아 볼 수 있었다. Fig. 16과 같이 부분 기여출력스펙트럼을 보면 엔진이 연료레일에 끼치는 진동 파워는 저 주파수 대역에서 지배적이며, 연료레일에 영향을 끼치는 진동량은 인젝터의 진동량과 자체적으로 진동하는 연료레일의 진동량으로 나눌 수 있다. 이를 Fig. 17과 같은 막대 그래프로 표현 함으로써 주파수 구간에서 어느 파워 트레인 부품이 지배적인지를 볼 수 있다. 그리고 Fig. 17은 연료레일 출력 진동량에 지배적으로 기여하는 부품들만 나타낸 것이다.

4.4 압력센서 기여도 분석

압력센서의 경우에는 연료레일에서 오는 진동과 위인 입력  $X_1(f)$ 과 압력센서 자체 가진원  $X_2(f)$ 가 압력



센서출력 진동량을 나타낸다. 부분 기여도 함수를 적용 시키기 위해서 Fig. 18 과 같이 모델링을 하였다. 앞에 분석한 것과 동일하게 다차원 해석법을 바탕으로 분석을 하였으며, 압력센서의 기여 출력 스펙트럼을 바탕으로 Fig. 19 의 결과 값을 도출 하였다. 압력센서의 순수 진동량은 연료레일에서 오는 진동의 상관성을 제거한 진동량을 계산 한 것이며, 엔진, 펌프, 인젝터의 진동량은 연료레일이 직접적으로 압력센서까지 끼치는 진동량을 선형적으로 제거한 각 진동량을 나타내 준 것이다. 이 부분기여도 함수를 통해서 각 부품이 출력해내는 진동량인 부분 기여출력 스펙트럼이 Fig. 19 와 같이 구할 수 있었다.

Fig. 20 과 같이 압력센서로 흘러들어가는 진동량을 본 결과 1000Hz 밑에서의 저주파 대역에서는 엔진의 진동량이 많이 차지 하였다. 2000Hz 부근에서는 연료레일의 진동량이 지배적이며, 3000Hz 에서 4000Hz 사이에서 압력센서의 진동 기여도가 지배적인 것을 볼 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 직접분사 가솔린엔진 부품들을 2 입력/ 단일 출력 시스템으로 구성하여 입력성분들의 진동기여도를 다차원 스펙트럼인 부분기여도 함수를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 직접분사 가솔린 엔진 부품들 처럼 상호 연관성을 가지고 있는 경우에는 입력간의 상관성을 제거하는 부분기여도 함수를 사용해야 한다.
- (2) 다차원 스펙트럼을 해석법을 이용한 부품 별

진동 경로 해석을 통해 엔진과 펌프 및 전장 부품들의 진동기여도를 각 주파수 별로 규명하였다.

- (3) 부분기여도 함수를 계산하여 직접분사 가솔린 엔진 부품들의 진동경로 분석과 기여도 분석을 시행하였다.

### 후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학 기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 MEST(No.2010-0014260).

### 참고문헌

- (1) Choi, K. S. and Jeong, W. B., 2009, "Noise Identification of Evaporator Using Partial Coherence Function," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 347~354.
- (2) Leclere, Q., Pezerat, C., Lualagnet, B. and Polac, L., 2005, "Application of Multi-Channel Spectral Analysis to Identify the Source of a Noise Amplitude Modulation in a Diesel Engine Operating at Idle," *Applied Acoustics*, 66 (7), pp. 779~798.
- (3) Bendat, J. S., 1980, "Modern Analysis Procedures Multiple Input/Output," *J. Acoust. Soc. Am.*, 68(2), pp. 498~503.
- (4) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1980, "Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis," John WilleySons, Inc. 2nd Edition.
- (5) Bendat, J. S. and Piesol, A. G., 1986, "Random Data," Analysis and Measurment Procedures, 2nd Edition, Wiley-Interscience, New York.