

지게차 부밍소음 저감에 대한 연구

오박석태*, 김경환**, 이종규**

Study on Reduction of Forklift's Booming Noise

Seok-Tae Park, Kyung-Hwan Kim, Jong-Kyu Lee

ABSTRACT

To identify forklift's booming noise in cabin under idling engine revolution, we discussed and applied conditioned input analysis. Acceleration signals at engine mounts and front window and rear window were considered as candidate input signals and output signal was sound pressure signal at driver's ear position in cabin. To reduce the numbers of the input signals, one idea were applied: Each one input signal from each input groups was selected, respectively because input signals in the same group were highly correlated. And Hilbert transform was used to determine the ordering of three selected inputs. Partial coherence functions, multiple coherence function and conditioned spectral density functions were investigate to the effects of booming noise by partial inputs.

1 서론

환경 친화적인 제품생산을 위한 연구가 여러 분야에서 활발히 진행되고 있으며 산업용 차량의 소음 진동 저감 연구도 일례가 되고 있다. 소음 진동 저감 방법으로는 소음 진동원을 근본적으로 개선하는 방법과 전달경로를 개선하는 방법 등이 사용되고 있다. 효과적인 개선안을 도출하기 위해서는 소음 진동원 및 전달경로에 대한 규명이 선행되어야 한다. 산업현장의 경우에는 현장 경험 및 소음 진동원이라 추정되는 위치에서의 소음 진동수준 데이터를 사용하여 소음 진동원과 전달경로에 대한 분석을 하여 개선안을 적용한다. 많은 경우에 비교적 좋은 결과를 얻고 있다. 그러나, 이러한 방법들을 사용하여 소음 진동원을 추정하여 개선안을 적용하였을 때 좋은 결과를 얻지 못할 때가 있으며 이것은 소음 진동원을 정확히 규명하지 못한 결과라 추정된다. 지게차 소음 저감 연구를 수행하면서 전반적인 소음수준은 개선하였으나 idle 상태에서의 캐빈내의 부밍

소음이 큰 문제로 나타났다. 이에 대해 소음/진동 전달경로라고 추정되는 엔진 마운트 부위에 대한 진동수준 데이터를 근거로 하여 엔진 마운트 계에 대한 개선안을 적용하였으나 만족할 만한 결과를 얻지 못하였다. 추정된 주요 전달 경로 규명에 문제가 있었다라는 판단이 되었다. 따라서, 본 연구에서는 부분 기여도 함수를 사용하여 지게차의 캐빈부밍 소음원을 찾는 방법을 기술하였다.

2 다중입력에 의한 소음원 규명 이론

소음 또는 진동을 저감하기 위해서는 소음원 또는 진동원을 정확히 찾는 것이 필요하며 이러한 소음원 또는 진동원을 규명하기 위해 여러 방법들이 사용되고 있다[1-8]. 입력들 사이의 상관관계(기여도)가 없을 때에는 주파수 응답함수를 이용한 방법이 널리 사용되고 있으며 입력들 사이에 기여도가 있을 때에는 기여도를 분석하여 각 입력들이 출력에 기여하는 정도를 파악하는 방법들이 사용되고 있다. 이러한 방법 중에는 부분 기여도(CIA, Conditioned Input Analysis)를 이용한 방법[2~5], 주성분 해석법(PCA, Principal

* 국민대학교 자동차공학 전문대학원

** 고등기술연구원

Component Analysis)[8]과 CSA[6](Conditioned Source Analysis)방법 등이 있다.

2.1 부분기여도 해석법[7]

부분 기여도 해석법은 입력들과 출력들 사이의 관계를 부분 기여도 함수로 나타내어 각 입력들이 출력에 기여하는 정도를 파악하는 방법이다[6]. 각 입력들의 출력에 대한 기여도는 입력들의 순서에 따라 다르므로 입력의 순서가 해석결과에 중요한 영향을 준다. 입력 순서를 결정하는 체계화된 방법이 연구 중에 있으며[1,3] 입력배열 순서를 정하는 방법으로 입력과 출력의 기여도의 크기 순서로 배열하는 방법[7]과 입력들 사이의 인과 관계를 분석하여 원인에 해당하는 입력을 우선 순위로 하는 방법 등이 시도되고 있다[3]. 한편, 입력들간의 인과 관계 분석을 위해서는 힐버트 변환법 이나 충격 응답법 등이 이용되고 있다. 입력순서가 정해지면 입력 배열을 입력들 사이의 기여도를 제거한 직교 배열 형태로 하여 주파수 응답 함수법을 사용한다. 단일입력 단일 출력계와 같은 형태로 계를 구성하여 입력들간의 기여도를 제거한 입력으로 출력에 대한 부분 기여도를 구하여 소음 진동원을 규명한다[7]. 일례로 q 개의 입력 x_i 와 출력이 y 인 계에서 입력들 사이에는 상관 관계가 있으나 입력과 출력 소음과는 상관 관계가 없다고 가정한다. 입력과 출력을 푸리에 변환한 결과를 각각 X_j 와 Y 라 하면 계의 입력과 출력관계는 식(1)과 같이 표현 된다. 입력과 출력의 교차 스펙트럼은 식(2)와 같고 기여도 함수는 식(3)과 같다.

$$Y = \sum_{j=1}^q H_j X_j + N \quad (1)$$

$$G_{iy} = \frac{2}{T} E[X_i^* Y] = \sum_{j=1}^q H_j G_{ij} \quad (2)$$

$$\gamma_{iy}^2 = \frac{1}{G_{ii} G_{yy}} \left| \sum_{j=1}^q H_j G_{ij} \right|^2 \quad (3)$$

한편, 출력과 출력소음의 자기 스펙트럼은 각각 식(4)와 식(5)로 표현할 수 있다.

$$G_{yy} = \frac{2}{T} E \left[\left(\sum_{i=1}^q H_i^* X_i + N^* \right) \left(\sum_{j=1}^q H_j X_j + N \right) \right] \\ = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q H_i^* H_j G_{ij} + G_{nn} \quad (4)$$

$$G_{nn} = G_{yy,q} = (1 - \gamma_{yy,(i-1)}^2) G_{yy,(i-1)} \\ = G_{yy} \prod_{i=1}^q (1 - \gamma_{yy,(i-1)}^2) \quad (5)$$

식(5)에서 부분 기여도 함수 $\gamma_{yy,(i-1)}^2$ 는 입력 x_i 에서 x_{i-1} 까지의 입력의 영향을 제거한 $x_{i,(i-1)}$ 와 출력 y 사이의 부분 기여도 함수를 나타내며 식(6)과 같다.

$$\gamma_{yy,(i-1)}^2 = \frac{|G_{yy,(i-1)}|^2}{G_{ii,(i-1)} G_{yy,(i-1)}} \quad (6)$$

입력 $x_{i,(i-1)}$ 와 출력 y 의 교차 스펙트럼은 식(7)과 같다.

$$G_{yy,(i-1)} = \sum_{j=1}^q H_{jy} G_{ij,(i-1)} \quad (7)$$

모든 입력들이 출력에 기여하는 정도를 나타내는 다중 기여도 함수 $\gamma_{yy,q}^2$ 는 식 (8)과 같다.

$$\gamma_{yy,q}^2 = 1 - \left(\frac{G_{yy,q}}{G_{yy}} \right) = 1 - \prod_{i=1}^q (1 - \gamma_{yy,(i-1)}^2) \quad (8)$$

한편, 원래의 배열을 직교배열로 재배치 하였을 때의 출력의 스펙트럼은 식(9)와 같다.

$$Y = \sum_{j=1}^q L_{jy} X_{j,(j-1)} + N \quad (9)$$

식(7)에서 재배열된 직교 입력과 출력 y 에 대한 전달함수 L_{jy} 는 식(10)과 같다.

$$L_{jy} = \frac{G_{iy,(i-1)}}{G_{ii,(i-1)}}, \quad i=1,2,\dots,q \quad (10)$$

또한, 원래의 배열에 대한 전달함수 H_{ij} 와 직교 배열로 얻은 전달함수 L_{ij} 의 관계는 식(7)을 $G_{ii(i-1)}$ 로 나누어 정돈하여 구하면 식(11)과 같다.

$$L_{ij} = \sum_{j=1}^q H_{ij} L_{ij} \quad (11)$$

여기서,

$$L_{ij} = \frac{G_{iy(i-1)!}}{G_{ii(i-1)!}}, \quad L_{ij} = \frac{G_{ij(i-1)!}}{G_{ii(i-1)!}} \quad (12)$$

$$H_{qv} = \frac{G_{qv(q-1)!}}{G_{qq(q-1)!}} = \frac{G_{qv.1.2.3\dots(q-1)}}{G_{qq.1.2\dots(q-1)}} \quad (13)$$

$$H_{ij} = \frac{G_{iy.1.2\dots(i-1)(i+1)\dots q}}{G_{ii.1.2\dots(i-1)(i+1)\dots q}} \quad (14)$$

식(11)에서 H_{ij} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_{qv} = L_{qv} \quad (15)$$

$$H_{ij} = L_{ij} - \sum_{j=i+1}^q L_{ij} H_{ij} \quad (16)$$

2.2 PCA 해석법 [6,8]

CIA방법을 사용하여 소음원을 규명할 때에는 출력에 대한 입력들의 기여도가 입력들 사이의 순서에 따라 큰 영향을 받게 된다. 이를 개선할 방법으로 개발된 것이 PCA법으로 입력들이 부분적으로 상관되어 있으며 어떤 특정한 종속 형태를 나타내지 않을 때 사용된다. 입력들을 등가의 직교 집합인 주성분(또는 가상 근원)들로 변환시켜 가상 기여도 함수를 구하여 가상 입력들이 출력에 기여하는 정도를 파악한다. 가상 입력인 주 성분들은 특이치 해법(SVD, Singular Value Decomposition)을 입력들에 적용하여 구한다. 가상 기여도는 주성분이 출력에 기여하는 정도를 나타낸다. 그러나, 실제의 입력들이 출력에 미치는 영향을 알 수 없으므로 물리적으로 해석하는 데에 어려움이 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다. q 개의 입력 x_q 의 스펙트럼은 식(17)과 같이 표현할 수 있고 입력의 자기 스펙트럼은 식(19)와 같다. 식(19)에서 G_{pp} 를 주성분 또는 가상원이라 하며 특이해법을

사용하여 구한다.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{11} \\ n_{21} \\ \vdots \\ n_{q1} \end{bmatrix} P_1 + \begin{bmatrix} n_{12} \\ n_{22} \\ \vdots \\ n_{q2} \end{bmatrix} P_2 + \dots + \begin{bmatrix} n_{1r} \\ n_{2r} \\ \vdots \\ n_{qr} \end{bmatrix} P_r \quad (17)$$

$$[X] = [N][P] \quad , \quad r \leq q \quad (18)$$

$$\begin{aligned} [G_{xx}] &= \frac{2}{T} E\{[X][X]^H\} = \frac{2}{T} E\{[N][P][P]^H[N]^H\} \\ &= [N][G_{pp}][N]^H \end{aligned} \quad (19)$$

한편, 다입력 다출력계의 출력은 식(20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[Y] = [H][X] \quad (20)$$

$$\begin{aligned} [G_{yy}] &= [H][G_{xx}][H]^H = [H][N][G_{pp}][N]^H[H]^H \\ &= [H_n][G_{pp}][H_n]^H \end{aligned} \quad (21)$$

여기서,

$[H_n] = [H][N]$ 는 가상 전달 함수로서 출력에 가상원과 가상 전달함수로 표현할 수 있다. 이렇게 하여 상관관계가 있는 입력들을 직교하는 입력들로 분리하여 단일 입력 단일 출력 계로 해석할 수 있다. 또한 가상 입력과 출력의 교차 스펙트럼은 식(22)와 같다.

$$[G_{py}] = [N]^H [G_{xy}] = [G_{pp}][H_p]^H \quad (22)$$

가상입력과 출력에 대한 기여도는 식(23)과 같다.

$$\gamma_{p,y}^2 = \gamma_{iy}^2 = \frac{G_p^2}{G_{ii}G_{yy}} \quad (23)$$

모든 가상 입력들에 의한 출력에 대한 다중 기여도 함수는 식(24)와 같다.

$$\gamma_{y,p}^2 = \sum_{i=1}^r \gamma_{iy}^2 \quad (24)$$

2.3 CSA 해석법 [6]

이 방법은 CIA와 PCA를 혼합한 특성을 갖고 있으나 기본적으로는 CIA법과 같다. 입력으로는 입력 배열을 사용하고 있으며 배열내의 입력들에 대해 특이해법을 사용하여 가상 입력을 구한다는 점에서는 PCA 기법을 따른다. 그런데, 입력 배열들에서 입력을 구하는 방법이 다른 마지막 입력들 보다 앞서 행해지면 CIA법과 같고 처음의 입력들보다 먼저 행해지면 PCA법과 같다.

3 지게차 부밍소음 실험 및 분석

3.1 입력의 우선순위 결정법

시험대상은 대우중공업에서 개발중인 지게차이며 idle 엔진 회전수 1000rpm에서 1100rpm으로 구동할 때에 35Hz 부근에서 캐빈 부밍 소음이 나타났다. 이 부밍 소음을 저감하기 위한 시도로서 원인 규명을 부분 기여도법을 이용하였다. 입력으로는 4점 지지된 엔진 마운트의 엔진쪽과 프레임쪽에서 각각 3방향의 진동 가속도 신호인 24개 신호와 운전석의 전방과 후방의 창문 중앙에서 3방향의 진동 가속도인 6개의 신호를 측정하였고 출력으로는 운전자 귀 위치에서 소음 신호를 택하여 총 31개의 신호를 동시에 측정하였다. 30개의 입력 데이터를 이용하여 부분 기여도 분석을 수행하는 데에는 어려움이 가중되므로 입력의 수를 줄이고자 하였다. 입력 배열순서에 따라 출력에 대한 입력의 기여도가 다르게 나타날 수 있으므로 본 논문에서는, 입력들의 배열순서를 정하기 위하여 두 가지를 고려하였다. 첫번째는 부밍 소음 주파수 근처의 진동 수준의 크기 순서로 입력 순서를 정했다. 두번째는 힐버트 변환법을 사용하여 배열 입력들 사이의 인과관계를 파악 하여 원인에 해당하는 입력들에 우선순위를 주었다. 대표적인 3개의 입력 군으로 엔진 마운트 계, 앞 창문 및 뒷 창문을 고려하여 각 군에서 부밍 소음 주파수에서의 진동 입력 수준이 큰 것을 하나씩 선정하여 3입력

1출력계를 구성하였다. 입력으로는 각입력 군에서 진동 수준이 큰 입력들인 후방좌측 엔진 마운트의 엔진쪽의 상하방향과 앞 창문의 전후방향 그리고 뒷 창문의 전후방향을 선정하였다. 선정된 3개의 입력의 순서는 실제 현실 가능한 선형계의 전달함수의 허수부와 실수부의 힐버트 변환은 같다는 조건을 사용하여 결정하였다. Fig.1은 힐버트 변환법을 이용하여 엔진 마운트와 앞 창문에서의 입력의 우선순위를 결정하는 것으로 엔진 마운트 부를 입력으로 하고 앞 창문을 출력으로 한 경우인 Fig.1(a)에서 전달함수의 허수부와 전달함수의 실수부를 힐버트 변환한 결과가 일치함을 보여준다. 따라서, 엔진 마운트 부가 우선 순위가 있음을 보여준다. 같은 방법으로 비교하여 우선순위는 엔진 마운트 부, 앞 창문 그리고 뒷 창문의 순서로 결정하였다.

3.2 실험결과 고찰

3입력 1출력계에서 3개의 입력이 서로 상관관계가 있는 계를 구성하였다. 즉, $q=3$ 인 계에서 전달함수 H_{iy} ($i=1,2,3$)를 식(2)에서 얻었고 결과를 Fig.2에 나타냈다. Fig.3에는 식(3)으로 구한 각 입력과 실내소음과의 기여도와 식(8)의 다중 기여도를 각각 순서대로 나타냈다. Fig.4(a)와 (b)는 엔진 마운트 입력 영향을 제거한 앞 창문이 기여한 입력을, 엔진 마운트의 기여와 앞 창문의 기여를 모두 제거한 뒷 창문만의 기여 입력을 각각 나타냈다. Fig.4(c)와 (d)는 Fig.4(a) 및 Fig.4(b)의 입력에 대한 기여 출력을 각각 나타냈다. Fig.5는 직교 배열한 입력의 기여도 함수를 나타냈다. Fig.5(a)는 다중 기여도 함수를 Fig.5(b)는 앞 창문 데이터에서 엔진 마운트 부의 영향을 제거한 신호와 실내 소음과의 부분 기여도를 나타냈다. Fig.5(c)는 뒷 창문의 입력신호에서 엔진 마운트와 앞 창문의 신호의 영향을 제거한 신호와 실내소음의 부분 기여도 함수를 나타냈다. 그러나, 부분 기여도 법을 사용하여 분석한 결과를 볼 때에 좀 더 고려해야 할 것이 있다. 첫째는 모든 입력을 고려하지 않았다는 점이다. 부밍 소음의 원인으로 엔진구동으로 인한 엔진 마운트 계 입력을 한 원인 군으로 잡았고 앞 창문과 뒷

창문을 다른 두개의 입력 군으로 가정한 것이 모든 입력을 고려한 것인가이다. 두번째는 부밍 소음 주파수인 엔진 회전수의 2차 성분이 지배적이어서 이 주파수 근처에서 입력들 간의 상관계수가 매우 커서 기여도 분석 방법이 타당한 것인가이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 비슷한 입력 특성을 갖는 입력들을 동일군으로 모으고 각 군에서 대표적인 입력을 다 입력계의 입력으로 선정하는 방법을 사용하였다. 그러나, 여전히 전체 입력 중에서 입력 군들을 선정하는 것과 입력 군에서 대표적인 입력들을 선정하는 문제 및 선정된 입력들의 배열 순서에 따른 분석의 정확성 문제에 대한 연구가 더욱 필요할 것으로 생각된다.

4 결론

부분 기여도법을 사용하여 지게차 부밍 소음원을 규명하였다. 출력으로는 캐빈내 운전자 위치의 소음을 정하고 입력원으로 3개의 입력 군을 택하여 각 군에서 하나 씩의 입력을 선정하였다. 각 군에서의 입력 신호들은 부밍 소음 주파수에서 서로 상관관계가 매우 크므로 각 군에서 진동수준이 큰 것을 주 입력으로 선정하였다. 부분 기여도 법을 사용할 때의 문제점인 입력 배열 순서를 정하기 위하여 힐버트 변환특성을 이용하여 입력 순서를 정하였다. 배열된 3 입력 1 출력 계의 부분 기여도 함수와 부분 기여도 입력과 출력들을 조사 하여 엔진 마운트 부가 부밍 소음원임을 보였다.

참고문헌

1. 박정석, 김광준, 1990, "부분 기여도 함수를 이용한 소음/진동원 검출에 있어서의 우선순위 결정에 대한 연구," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.3-8
2. 배병국, 김광준, 1994, "공회전 차량의 구조기인 소음분석," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.132-137
3. 김광준, 배병국, 1994, "소음원간의 우선순위

- 결정을 이용한 차량의 실내 소음원 규명," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.179-184
4. 임병덕, 최정현, 1996, "2 for 1 연사기 소음원 규명에 관한 연구," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.27-31
5. Jung-Seok Park and Kwang-Joon Kim, 1992, "Determination of priority among correlated inputs in source identification problems," J.Mech. Sys. And Signal Process., vol.6 no.6, pp.491-502
6. Michael F. Albright, "Conditioned Source Analysis, A Technique for Multiple Input System Identification with Application to Combustion Energy Separation in Piston Engines," SAE no 951376, pp.1165-1177
7. J.S.Bendat and A.G.Piersol, Random Data, 2nd edition, Wiley, 1991
8. LMS CADA-X Technical manual, "Ch2.Theoretical Consideration," pp.2.1-2.9

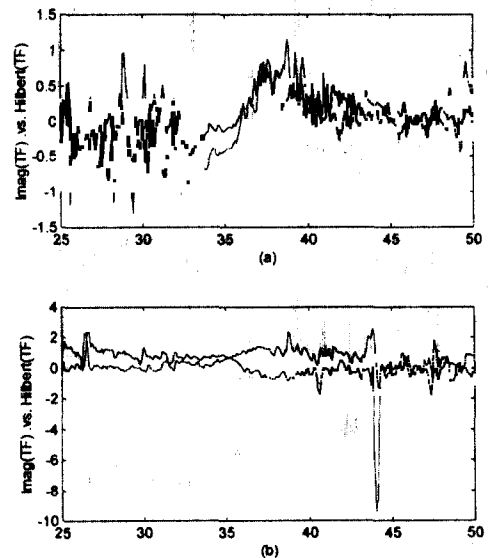


Fig.1 힐버트 법을 이용한 입력의 우선순위결정법, 실선: $Hilb(H_R)$, 점선: $Imag(H)$ (a)입력:엔진 마운트, 출력:앞창문(b)입력:앞창문, 출력:엔진마운트

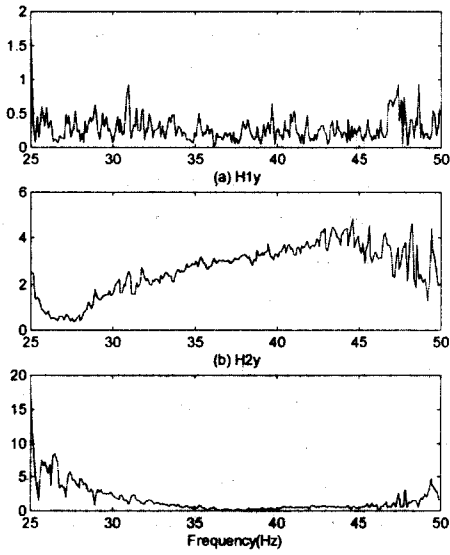


Fig.2 전달함수의 크기 (a)실내소음/엔진 마운트 (b)실내소음/앞 창문 (c)실내소음/ 뒷 창문

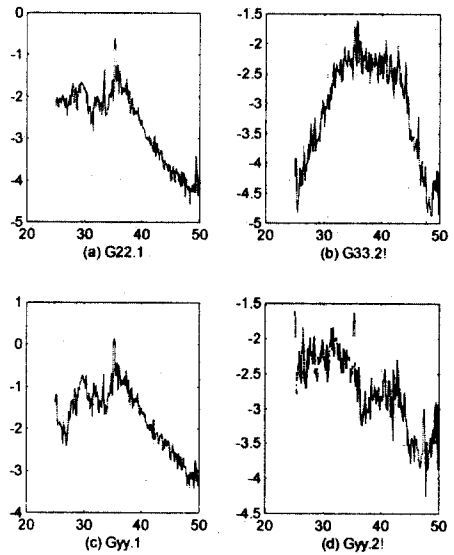


Fig.4 부분 입력과 부분 출력 비교 (a)입력:앞창문에서 엔진 마운트 영향제거 (b)입력:뒷창문에서 엔진 마운트와 앞창문의 영향제거 (c)(a)입력에 대한 출력 (d)(b)입력에 대한 출력

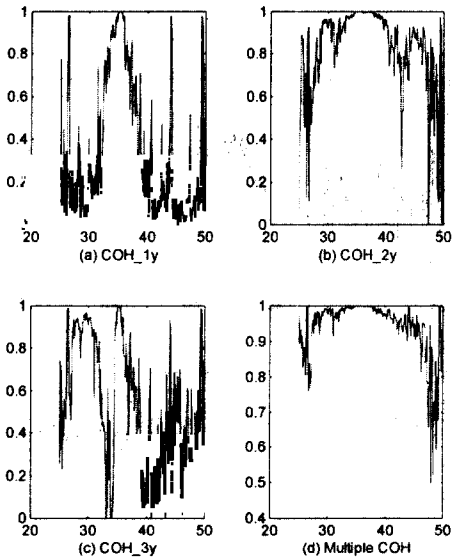


Fig.3 입력에 의한 기여도 함수 비교 (a)엔진 마운트 (b)앞 창문 (c)뒷창문 (d)다중 기여도 함수

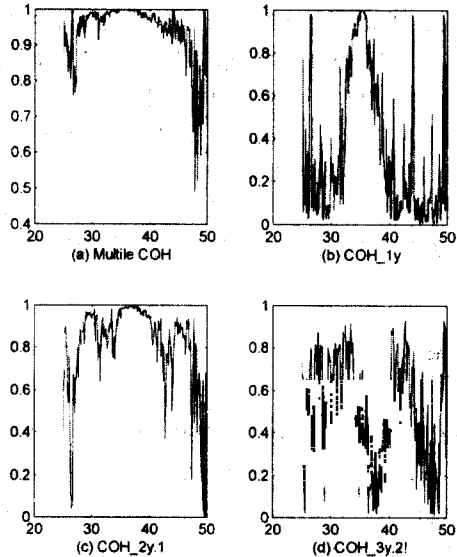


Fig.5 부분 기여도 함수 비교 (a)다중 기여도 (b)엔진 마운트 (c)앞창문에서 엔진 마운트 영향제거 (d)뒷 창문에서 앞창문과 엔진 마운트 영향제거