

엔진마운트의 전달경로해석을 통한 실내소음저감 시뮬레이션

Simulation on the Reduction of Interior Noise using the Transfer Path Analysis of the Active Engine Mount

이충휘† · 김영호* · 최현준* · 원종식*

Choonghwi Lee, Youngho Kim, Hyunjoon Choy, Jongsik Won

Key Words : Engine Mount(엔진 마운트), Transfer Path Analysis(전달경로해석), Active Engine Mount(능동형 엔진 마운트), Vibration Isolation(진동 절연), Reduction of Interior Noise(실내소음저감)

ABSTRACT

In this study, it proved that transfer path analysis is a proper technique to estimate the interior noise from comparing measured interior noise in case of 3 point supported engine mount system. And the simulation of the vibration isolation for active engine mount using FXLMS algorithm is performed. Also, it verified that reduction of estimated interior noise from transfer path analysis and simulation of the vibration isolation,

1. 서론

최근 생활수준의 향상으로 자동차의 기본적인 주행성능 이외에 편안함, 정숙성 등에 대한 소비자의 요구가 크게 증가하면서 차량의 진동 및 소음은 중요한 성능으로 부각되고 있다. 특히 차량의 실내소음의 경우 차실 내 소음에 영향을 주는 원인이 차량을 구성하는 부품 수만큼 다양하여 실내소음의 원인 파악 및 개선이 용이하지 않다. 따라서 Wyckaert 등은 차량에서 소음이 가진원으로부터 여러 개의 전달 경로를 통해 실내로 전달되는 것을 설명하였고 TPA (Transfer path Analysis), ASQ (Airborne source Quantification), SEA (Statistical Energy Analysis) 등 다양한 기법들을 적용하였다.

일반적으로 자동차 실내소음의 원인은 구조기인소음 (Structure-borne Noise)과 공기기인소음 (Airborne Noise)으로 구분할 수 있다. 공기기인소음은 주로 엔진 투과음, 흡·배기 소음 등에 기인하며 이를 해석하는 대표적인 해석 수단이 ASQ 이다. 공기기인소음의 경우 엔진 투과음을 방지하기 위해서는 흡·차음재의 설계가 중요하고, 흡·배기 소음을 저감하기 위해서는 머플러(muffler)와 공명기(resonator)의 설계가 중요하다. 구조기인소음의 경우 대표적인 해석 수단이 TPA 이며 소음의 원인이 매우 다양하며 그 원인을 규명하는 것이 간단하지 않다. 특히 구조기인소음의 가장 중요한 전달경로인 엔진마운트에 TPA 를 적용하여 엔진마운트에 대한 성능 파악이 가능하다.

엔진마운트는 차체와 엔진 사이에서 엔진을 지지하면서 엔진에서 발생한 진동이 차체로 전달되는 것

을 절연시키고 엔진구동에 의한 반력을 지지하는 역할을 한다. 소음·진동 입장에서 엔진마운트는 강성이 낮은 것이 유리하지만 엔진마운트의 내구성 확보와 엔진의 과도한 거동을 조절하기 위해서는 강성이 높은 것이 유리하다. 이처럼 엔진을 지지하기 위한 마운트의 특성과 엔진 진동이 전달되는 것을 줄이기 위한 마운트의 특성이 상반되어 일반적인 고무의 수동형 마운트(Conventional Mount)로는 위 두 목적을 만족시키는데 한계가 있다. 따라서 보다 효과적인 엔진 진동절연을 위하여 액체봉입형 마운트(Hydraulic Mount)가 개발되었고 여기에 전자제어 개념을 추가로 고려하여 엔진의 작동조건이나 도로로부터의 다양한 입력조건에 대해서도 능동적인 진동절연효과를 얻기 위해 능동형 마운트 (Active Mount)에 대한 연구가 진행되어 왔다. 능동형 엔진 마운트에는 별도의 센서 및 제어기를 가지고 엔진마운트에 직접적으로 제어력을 작용시키는 방식과 엔진마운트의 강성을 여러 단계로 조절하여 진동을 제어하는 방식, ER/MR 등의 지능재료(Smart Material)을 이용하여 진동을 절연시키는 방식 등이 있다.

본 연구에서는 엔진마운트에 대한 전달경로해석을 수행하여 실내소음을 예측한 후 제어 알고리즘으로써 FXLMS 알고리즘을 이용한 가상적인 능동형 엔진마운트를 고려하여 이에 대한 능동진동제어 시뮬레이션을 수행하고 전달경로해석을 통하여 실내소음저감을 확인하였다.

2. 이론

본 연구에서 적용된 가상적인 능동형 엔진마운트의 개요를 Fig. 1 에 나타내었다.

† GM 대우 오토&테크놀로지

E-mail : choonghwi.lee@gmdat.com

Tel: (320) 590-6445, Fax: (032) 590-6002

* GM 대우 오토&테크놀로지

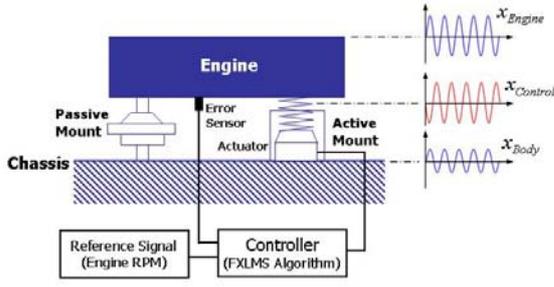


Fig.1 Schematic representation of Active Engine Mount

오차센서에서 계측된 엔진 진동과 엔진 rpm 으로부터 계산된 참조신호를 입력으로 하여 엔진 진동과 위상이 180° 인 신호를 액추에이터를 통해 출력함으로써 엔진 진동 및 차시 진동을 절연시킨다.

2.1 FXLMS 알고리즘

FXLMS 알고리즘의 블록선도를 Fig. 2 에 나타내었다. 부가경로 전달함수 $S(z)$ (오차 센서와 액추에이터 사이의 전달함수)는 오프라인(Off-line) 또는 온라인(On-line)으로 모델링 되며 그 예측치는 $\hat{S}(z)$ 로 표시한다.

주음원(Primary noise)으로부터 발생하는 원하지 않는 신호 x_k 는 참조신호 센서에 의해 계측되고 적응필터 $W(z)$ 를 통과하여 오차신호 e_k 을 최소화하기 위한 제어신호 y_k 을 발생시킨다. 또한 참조신호는 적응필터 $W(z)$ 의 필터계수를 갱신하기 위해 사용되는 참조신호 x'_k 을 얻기 위하여 부가경로 전달함수의 예측치 $\hat{S}(z)$ 에 의해 필터링 된다. 여기서 부가경로 전달함수의 예측치 $\hat{S}(z)$ 와 적응필터 $W(z)$ 는 유한응답필터(FIR filter)로 구현된다.

시간 k 에서의 오차신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} e_k &= d_k - y'_k = d_k - s_k * y_k \\ &= d_k - s_k * [w_k^T x_k] \end{aligned} \quad (1)$$

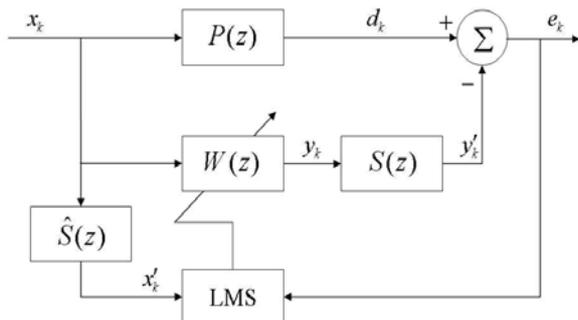


Fig. 2 Block diagram of FXLMS Algorithm

s_k 는 시간 k 에서의 부가경로 전달함수 $S(z)$ 의 충격응답이며 *은 선형 중첩(convolution)을 나타낸다. 시간 k 에서 주제어 필터 $W(z)$ 의 계수 벡터와 참조신호는 다음과 같다.

$$w_k = [w_{0k} \quad w_{1k} \quad w_{2k} \quad \cdots \quad w_{L-1k}]^T \quad (2)$$

$$x_k = [x_k \quad x_{k-1} \quad x_{k-2} \quad \cdots \quad x_{k-L+1}]^T \quad (3)$$

여기서, L 은 주제어 필터의 차수이다.

적응 필터의 목적은 순간 자승오차($\hat{\xi}_k = e_k^2$)를 최소화시키는데 있다. 따라서 LMS 알고리즘은 다음과 같이 정의 된다.

$$w_{k+1} = w_k - \frac{\mu}{2} \nabla \hat{\xi}_k \quad (4)$$

$\nabla \hat{\xi}_k$ 는 시간 k 에서의 평균 자승 오차의 순간 예측치 값이며 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \hat{\xi}_k = \nabla e_k^2 = 2[\nabla e_k] e_k = -2x'_k e_k \quad (5)$$

식(5)를 식 (4)에 대입하면 FXLMS 알고리즘의 필터계수 갱신식은 다음과 같다.

$$w_{k+1} = w_k + \mu x'_k e_k \quad (6)$$

여기서, μ 는 수렴 계수이며 이론적으로 안정하기 위해 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$0 < \mu < \frac{2}{LP_x}$$

2.2 전달경로해석

전달경로해석 이론은 다음 식과 같다.

$$P = \sum_i p_i = \sum_i \left(\frac{p}{f_i} \right) \times F_i + \sum_i \left(\frac{p}{q_i} \right) \times Q_i \quad (7)$$

P = Total Interior Noise (실내소음)

p_i = Partial Pressure (부분음압)

F_i = Mechanical source

(주행 중 전달경로에 작용되는 진동원)

Q_i = Acoustical source

(주행 중 전달경로에 작용되는 음향원)

$\frac{p}{f_i}$ = Vibro-acoustic FRF

(진동-음향 전달함수)

$$\frac{P}{q_i} = \text{Acoustic-acoustic FRF}$$

(음향-음향 전달함수)

여기서 첫 번째 항은 구조기인소음이고 두 번째 항은 공기기인소음이다. 구조기인소음은 각 전달경로에서 차체에 작용하는 진동 가진력과 가진력이 작용하는 점에서부터 실내 소음 측정점까지의 진동-음향전달함수에 의해서 결정된다. 또한 주행 중 전달 경로에 작용되는 힘은 각 전달경로에서 주행 중 측정된 엔진마운트 전후의 진동과 측정된 마운트의 동강성 계수를 이용하여 결정된다.

$$F_i = k_i \times (x_{i_Engine} - x_{i_Body}) \quad (8)$$

k_i = Dynamic stiffness (동강성 계수)

또한 능동형 마운트가 적용되어 진동절연에 의한 예측되는 부분음압은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p_{i_c} = \left(\frac{P}{f_i} \right) \times (F_i - k_i x_c) \quad (9)$$

$k_i x_c$ = Control Force

(진동 절연을 위한 제어력)

3. 시뮬레이션

3.1 전달경로해석 시뮬레이션

본 연구에서는 다음과 같이 실험을 통하여 전달경로해석 및 진동절연 시뮬레이션을 위한 data 를 확보하였다.

실험에 사용된 차량은 3 점 지지 마운팅 시스템을 가진 4 기통 엔진이 탑재된 승용차로 왼쪽의 트랜스미션 부 마운트(LH mount)는 액체봉입형 마운트(Hydraulic mount)이며 오른쪽의 엔진 부 마운트(RH mount)와 뒤쪽의 토크 리액션 마운트는(TRR mount)는 수동형(Conventional) 마운트이다.

Fig. 3 에서와 같이 각 엔진 마운트대해 엔진 측과 바디(샤시) 측의 2 지점에 3 축 가속도 센서를 설치하고 차 실내 운전자석의 왼쪽 부근에 마이크로폰을 설치하여 2 단 기어 전부하(Wide Open throttle)조건에서 18 지점의 가속도와 1 지점에서의 실내음압을 측정하였다.

또한 바디(샤시) 측에 부착한 가속도 센서의 위치와 차 실내 소음 측정을 위한 마이크로 폰 사이에서 진동-음향 전달함수 9 개를 측정하였다.

Fig. 3 에 2 단 기어 전부하 (WOT)시의 실내음압을 나타내었다. 그럼으로부터 실내소음의 2 차 성분이 오버올 레벨에 크게 영향을 주고 있음을 알 수

있다. 따라서 본 연구에서는 2 차 성분만을 고려하여 전달경로해석을 수행하였다.

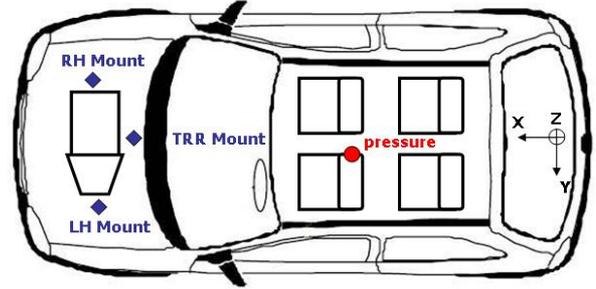


Fig. 3 measuring point for the transfer path analysis and active vibration control simulation.

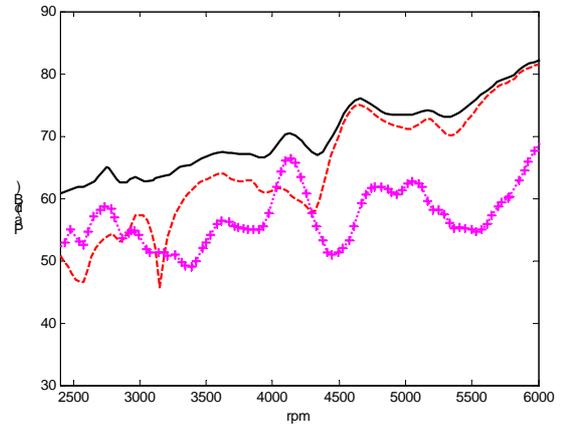


Fig. 4 Measured interior noise
(— : overall, - - - : 2nd order, + + + : 4th order)

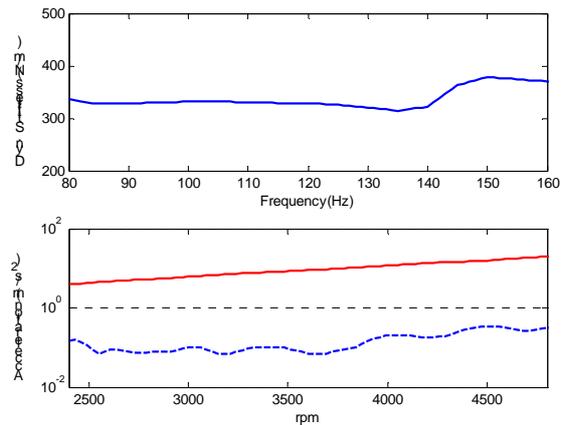


Fig. 5 Measured dynamic stiffness and measured acceleration on LH mount Z-direction
(— : Engine-side, - - - : Body-side)

전달경로해석을 위하여 엔진마운트의 9 개의 전달경로 중에서 대표적으로 왼쪽 마운트의 Z 방향(LH mount, Z-direction)에 대해 측정된 동강성계

수와 마운트 전후에서의 가속도를 Fig. 5 에 나타내었다. 왼쪽 마운트는 액체봉입형 마운트이기 때문에 동강성계수가 주파수 증가에 따라 선형적으로 증가하지 않는 것을 볼 수 있다.

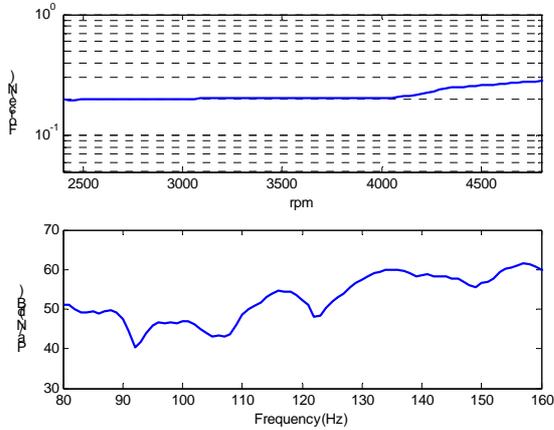


Fig. 6 Calculated force and measured vibro-acoustic FRF on LH mount Z-direction

식 (8)을 이용하여 계산된 전달경로상에서 차체를 가진하는 기진력을 Fig. 6 에 나타내었다. 또한 이 전달경로에서 진동-음향 전달함수를 측정된 결과를 나타내었다.

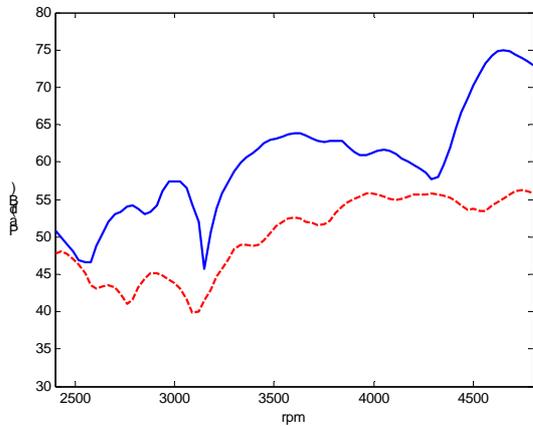


Fig. 7 Comparison of interior noise between the measured and estimated from the transfer path analysis (— : measured, - - - : estimated)

식 (1)로부터 예측된 실내소음의 2 차 성분과 실험으로 구한 실내소음의 2 차 성분을 Fig. 7 에 나타내었다. 소음 레벨이 일치하지는 않은 것은 구조기인 소음 외에 공기기인소음에 대한 영향이 있을 것으로 추정된다. 소음 레벨에서 차이는 있지만 2400rpm ~4800rpm 에서 소음의 경향이 유사함을 확인할 수 있다. 따라서 능동형 엔진마운트 적용 시 진동절연을 통한 실내소음 저감을 이 전달경로해석을 통하여 평가할 수 있다.

Table 1 Overall level of partial pressure for each transfer path (unit: dB)

Mount Direction	LH Mount	RH Mount	Torque Reaction Mount
X	67.8	60.2	68.4
Y	52.7	59.8	56.5
Z	86.9	81.7	80.5

각 9 개의 전달경로로부터 구해진 음압의 오버올레벨을 Table 1 에 나타내었다. 능동형 엔진마운트를 적용하여 엔진 진동이 실내소음으로 전달되는 것을 효과적으로 저감하기 위해서는 능동형 엔진마운트는 실내 소음에 큰 영향을 미치는 전달경로상에 설치되어야 할 것이다. 따라서 위 결과로부터 왼쪽 마운트의 Z 방향에 가상적인 능동형 마운트를 적용하는 것을 결정하였다.

3.2 능동형 엔진마운트 진동 절연 시뮬레이션

위에서 결정된 왼쪽 마운트에서의 진동 절연 시뮬레이션을 위하여 부가경로는 모델링 하지 않고 임의의 값을 사용하였다. 또한 참조신호는 제어대상인 엔진 진동의 2 차 성분을 추출하여 사용하였다. 따라서 참조신호의 크기가 시간에 따라 변하기 때문에 수렴계수는 정규화시킨 값을 사용하였고 필터차수는 100 을 사용하였다..

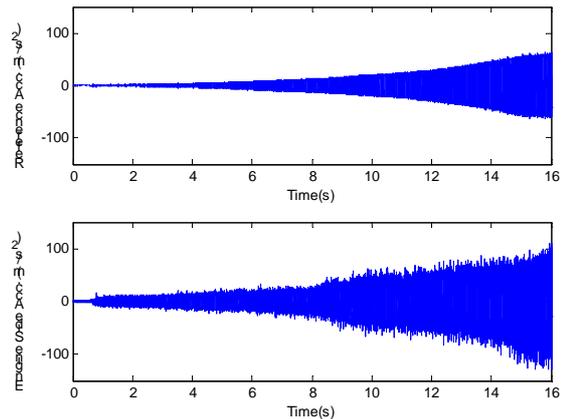


Fig. 8 Reference signal and desired signal for the vibration isolation of active engine mount (Upper: reference signal, lower: desired signal)

진동 절연 시뮬레이션에 필요한 참조신호와 목적신호를 Fig. 8 에 나타내었다. 목적신호는 왼쪽 마운트의 Z-방향의 엔진 축에서 2 단 기어 전부하 조건에서 측정된 가속도 신호이며 참조신호와 함께

FXLMS 알고리즘의 입력되어 적응필터를 업데이트 시키는데 사용된다.

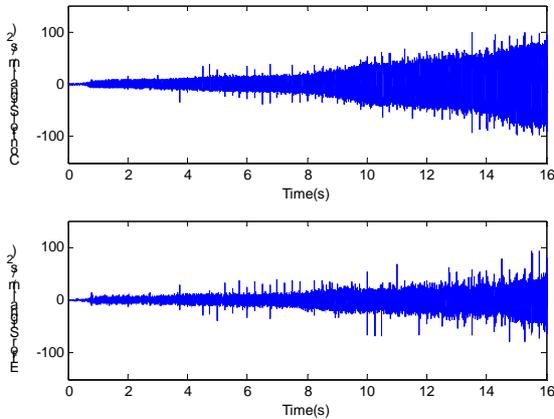


Fig. 9 Result of the simulation of vibration isolation (upper: control signal, lower: error signal)

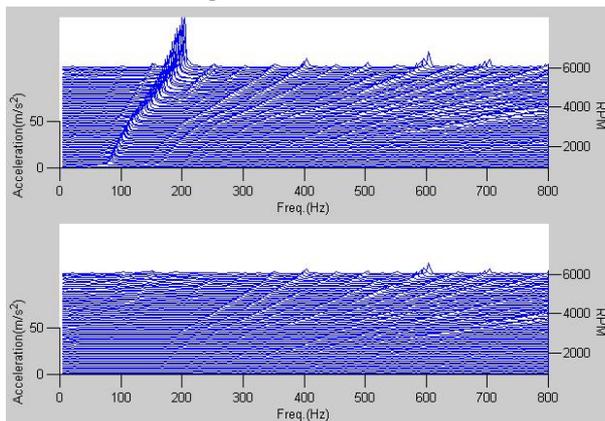


Fig. 10 Result of the simulation of vibration isolation (upper: desired signal, lower: error signal)

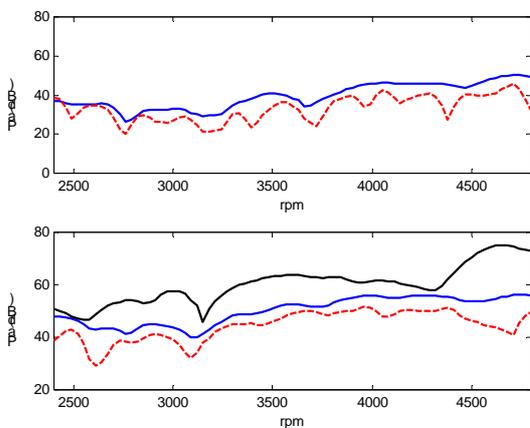


Fig. 11 Comparison of the noise level between conventional mount and active mount (upper: partial pressure at LH mount Z-dir, lower: interior noise, —: measured —: conventional, - - -: active)

능동형 엔진마운트의 진동 절연 시뮬레이션 결과를 Fig. 9 와 Fig. 10 에 나타내었다. 그림으로부터 엔진 가속도 신호의 2 차 성분이 저감된 것을 확인할 수 있다. 여기서 제어신호는 식(9)에서 와 같이 진동 절연 시 전달경로해석에 적용된다.

능동형 마운트의 적용에 의해 진동 절연된 경우의 전달경로해석을 통해 예측된 음압을 Fig. 11 에 나타내었다. 왼쪽 엔진마운트 Z-방향을 통해 실내소음에 영향을 미치는 부분음압은 진동 절연에 의해 10dB 이상 감소했으며 전체 실내소음에서도 저감을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 구조기인소음 (structure-borne noise)의 가장 중요한 전달 경로인 엔진마운트에 대해서 전달경로해석을 수행하여 자동차 실내소음의 평가기법으로서의 타당성을 입증하였다. 또한 가장 크게 실내소음에 영향을 미치는 왼쪽 엔진마운트 Z-방향에 대하여 가상적인 능동형 엔진마운트를 고려하여 진동 절연 시뮬레이션을 수행하고 여기에 다시 전달경로해석을 통하여 진동 절연에 의한 실내소음 저감을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Wyckaert. K and Van der Auweraer, 1995, "Operational Analysis, Transfer path Analysis, Modal analysis : Tools to Understand Road Noise Problem in Cars," SAE paper, 951752
- (2) Wyckaert. K, Gielen L., Linden P. and Auweraer H., 1996, "An Integrated Approach to Vehicle NVH Optimization," SAE paper, 962489
- (3) Y. W. Lee and C. W. Lee, 1997, "Vibration Isolation Performance of Active Engine Mount with Filtered-X LMS Algorithm," Proceedings of the KSAE Annual Spring Conference, 97380115
- (4) Jee Taehan and Choi Youn Bong, 1999, "Transfer Path Analysis on the Passenger Car interior Noise," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol.9, No.1, pp.97~102
- (5) Sang-Kwon, Woo Seok Hwang and Joong-Hee Kim, 2000, "Improvement of Sound Quality of vehicle Through reduction of Interior Noise Using Noise Transfer Path Analysis and Running Modal Analysis," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol.10, No.5, pp.806~810
- (6) Konrad Kowalczyk, 2006, "Rapid Control Prototyping of Active Vibration Control Systems in Automotive Applications," Proceedings of the 2006 IEEE, Conference on Computer Aided Control System Design, pp. 2677~2682