

구동중인 자동차 배기계의 진동 특성 측정

Vibration Measurement of an Automobile Exhaust System in Operation

김 성 국* · 이 종 남* · 한 순 우** · 정 태 진*** · 이 신 영*** · 장 강 원†

Sung Kook Kim, Jong Nam Lee, Soon Woo Han, Tae-Jin Chung,

Sin-Young Lee and Gang-Won Jang

(2006년 12월 28일 접수 ; 2007년 2월 6일 심사완료)

Key Words : Exhaust System(배기 시스템), Magnetic Sensor(자기센서), ODS(운전 중 변형 형상), Non-contact Vibration Measurement(비접촉 진동 측정)

ABSTRACT

In this work, the operational deflection shape(ODS) of an automobile exhaust system is measured by using a recently-developed magnetic sensor. The magnetic sensor is composed of a solenoid and two pairs of permanent magnets generating an antisymmetric magnetic field in the lateral direction inside the solenoid. Lateral movement of a ferromagnetic pipe inside the magnetic field of the suggested sensor induces an electromotive force in the solenoid corresponding to the lateral velocity of the pipe. Due to the simplicity and non-contact characteristics of the magnetic sensor, dynamic behaviors of the structures operating under high temperature such as an exhaust pipe can be efficiently observed. It is shown that the lateral ODS of an exhaust system can be successfully measured by the suggested sensors.

1. 서 론

자동차 설계 및 제작 기술의 전반적인 향상은 차실 소음/진동에 대한 소비자들의 눈높이를 높은 수준으로 향상시켰다. 이는 최근 들어 보다 더 정숙한 차실 환경에 대한 요구로 연결되고 있다. 차실 환경의 주요한 요소인 차실 진동에 영향을 주는 인자는 여러 가지를 들 수 있는데, 배기계(exhaust system) 또한 그 중 하나이다. 배기계는 차량 하부에 부착되어 있어서 엔진 진동이 차실에 전달되는 또 다른 경로를 형성한다.

배기계의 진동이 차실 진동에 미치는 영향에 대해

서는 많은 연구가 이루어져 왔다. 이는 주로 배기계의 정확한 해석을 위한 모델링 기법의 수립^(1~3), 배기계 진동 해석을 통한 지지부 위치의 선정^(4, 5), 모달 테스팅을 통한 배기계의 유한요소 모델 검증^(6, 7) 등으로 정리할 수 있다. 주로 해석 분야의 연구 결과가 많은 것은 배기계가 한번 설계되어 실차에 장착되면 이를 변경하기가 어려움에 기인한다.

이러한 배기계의 해석에 못지않게 실차에 장착된 배기계의 진동 특성의 실험적 평가 또한 중요하다. 배기계의 모달 테스팅에 대해서는 전술한 연구들에서도 많이 다루고 있으나, 실제 구동중인 상태에서 배기계의 진동 특성을 측정한 사례는 찾기가 힘들다. 배기계에 엔진 진동 등에 의한 외력이 입력될 때의 진동 특성이 어떠한지를 살펴보는 것은 매우 중요하다. 예를 들어 엔진 구동시 배기계의 운전중 변형 형상을 파악할 수 있다면, 배기계의 진동 변위가 가장 작은 지점에 지지점을 설정하여 차실에 전

* 교신저자; 정희원, 군산대학교 기계공학부

E-mail : gangwon@kunsan.ac.kr

Tel : (063)469-4725, Fax : (063)469-4727

** 군산대학교 대학원 기계공학부

*** 철도기술연구원

**** 군산대학교 기계공학부

달되는 진동이 최소화하도록 할 수 있을 것이다. 또 한 실 주행 중에 배기계의 진동 양상을 관찰함으로써 배기계의 내구성 향상 등에 활용할 수도 있다.

배기계의 진동 특성 파악에 대한 해석적인 연구에 비해 실험적인 접근이 부족한 이유는 여러 가지를 들 수 있겠으나 무엇보다도 실제 구동중인 배기계의 진동을 측정할 만한 방법이 많지 않았음에 기인한다. 높은 온도에 노출되는 배기계의 특성상 실험적 평가를 위해 가속도계, 스트레인 게이지 등의 접촉식 센서를 쓰는 것은 매우 어렵다. 최근 들어 레이저 진동계가 상용화되어 비접촉 진동 측정 분야에서 쓰이고 있으나⁽⁸⁾, 고가의 장비이며 실차에 장착된 배기계와 같이 복잡한 형상을 가진 구조물의 진동을 측정하기에는 많은 숙련도가 요구된다.

이 연구에서는 실차에 장착된 배기계의 진동을 실험적으로 평가할 수 있는 새로운 방안을 제시하고자 한다. 최근 자성체의 굽힘 진동을 비접촉으로 측정할 수 있는 새로운 형태의 자기 센서(이하 자기 센서)가 제안되었는데⁽⁹⁾, 이 연구에서는 이를 이용하여 실제 구동중인 배기계의 진동을 비접촉으로 측정하였다. 이 센서는 구조가 간단하여 경제적으로 제작할 수 있으며, 레이저 속도계 등에 의해 배기계에 장착하기가 상대적으로 용이한 장점이 있다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 자기 센서의 원리를 간략하게 설명하였다. 이후 이를 이용하여 실제 구동중인 배기계의 진동을 비접촉으로 측정하여 센서의 측정 성능을 검증하였다. 최종적으로는 공회전 중인 배기계의 운전중 변형 형상(operational deflection shape: 이하 ODS)을 주요한 진동 주파수 대역에서 실험적으로 관찰하고 그 결과를 분석하였다.

2. 자기 센서의 원리

Fig. 1에 자기 센서의 구조를 나타내었다. 비금속 원통의 상/하부에 각각 1쌍의 영구 자석을 설치하였다. 이 자석들에 의해 원통의 내부에는 Fig. 2와 같이 축 방향으로 선형 비대칭 자속 밀도(magnetic flux density)를 갖는 자기장이 형성된다. 원통의 중앙에는 코일을 솔레노이드 형태로 감아서 신호 감지부를 형성하였다. Fig. 3의 실선은 이러한 자기장 분포 하에서 솔레노이드 내부의 중심축과 자성 배관의

중심축이 일치하도록 배관을 위치시킨 경우의 자속 밀도 분포를 ansys를 이용하여 계산한 결과이다 (case A). 만일 자성체가 연직 방향으로 운동하여 솔레노이드 중심에서 벗어나 있다면 자속 밀도 분포는 점선과 같이 변화한다(case B). Fig. 4는 비대칭 자기장 하에서 자성 배관이 연직 방향으로 ± 2 mm의 변위를 갖고 운동할 경우 솔레노이드내부의 자속 변화를 계산한 결과이다. 이 계산 결과로부터 자속이 변위에 대해 선형적으로 변화하는 것을 예측할 수 있으므로 아래 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi = av \quad (1)$$

여기에서 Φ 는 자성체의 y 방향 변위 v 에 따른 자속값을, a 는 선형 계수를 의미한다.

한편, 코일이 있는 공간 주변에서 자속이 시간에 따라 변화하면 코일에는 다음과 같이 패러데이-렌츠(Faraday-Lenz) 법칙에 의한 유도 기전력(electromotive force) ε 이 발생된다.

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (N: \text{코일 턴 수}) \quad (2)$$

자성체 변위 v 를 다음과 같이 시간에 대한 조화 함수(harmonic function) $v = V e^{i\omega t}$ (V : 변위 크기)로 나타낸 후 식 (1)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\varepsilon = -N \frac{d(aV e^{i\omega t})}{dt} = -Na(i\omega)V e^{i\omega t} = -Na(i\omega)v \quad (3)$$

식 (3)은 비대칭 자기장 하에서 자성 배관이 연직 방향으로 운동하면 그 속도에 비례하는 신호를 얻을

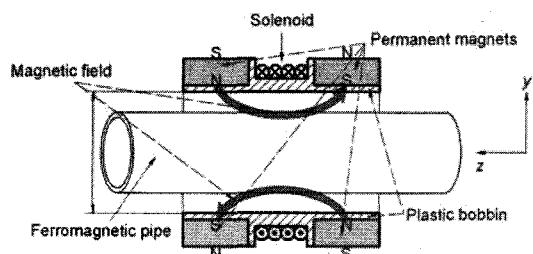


Fig. 1 Schematic diagram of the suggested magnetic sensor used in the work

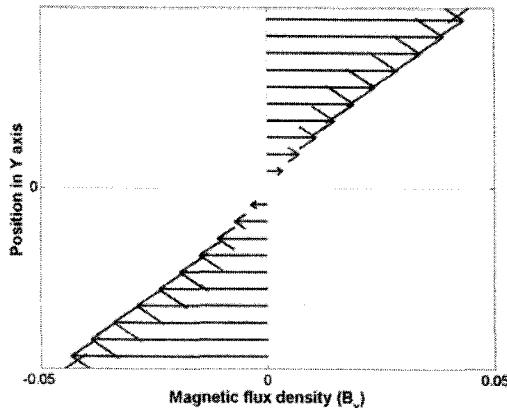


Fig. 2 Antisymmetric magnetic flux density generated inside the suggested sensor

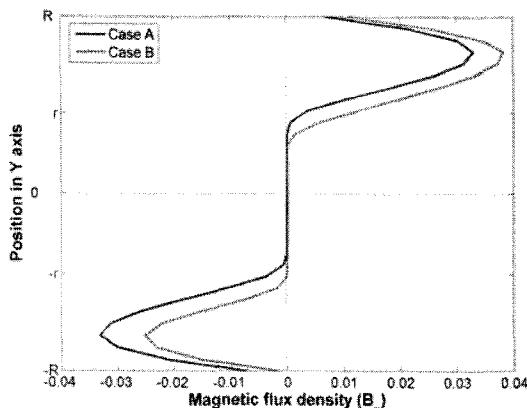


Fig. 3 Change of magnetic flux density according to the movement of the ferromagnetic pipe (Case A: before movement, Case B: after movement)

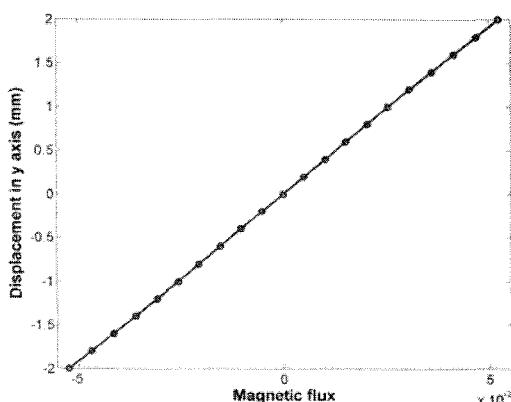


Fig. 4 Variation of magnetic flux inside the sensor according to the displacement of a ferromagnetic pipe

수 있음을 의미한다. 따라서 제안한 센서를 이용하여 자성체의 연직 방향 진동을 측정할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이, 제안된 센서는 자기장과 자성체 배관의 연성 관계를 이용하므로 비접촉으로 신호를 측정할 수 있다. 따라서 자동차 배기계 등과 같은 고온의 측정 대상에도 문제없이 적용 가능함을 알 수 있다.

Fig. 1에서 제시한 영구 자석 배치와 다른 자기장 하에서는 자성체의 연직 방향 변위 또는 속도에 비례하는 출력을 얻기 어렵다. 만일 자기장의 배치가 Fig. 1과는 반대로 상하부에서 모두 같은 방향으로 향하게 되면 자성 배관의 속도와 센서의 출력은 2차 함수로 표현되어 선형적 신호를 얻을 수 없으며 신호의 위상 정보 또한 사라지게 된다⁽⁹⁾.

3. 엔진 구동시 배기계의 진동 측정

3.1 실험 장치의 구성

Fig. 5에 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 측정 대상은 Fig. 6에 나타낸 바와 같은 자동차의 배기관으로서, 평균 외경은 80 mm이다. 신호 측정용 솔레노이드는 직경 0.3 mm의 솔레노이드를 외경 130 mm,

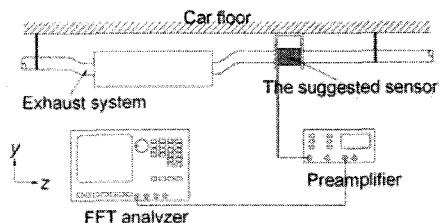


Fig. 5 Experimental setup diagram

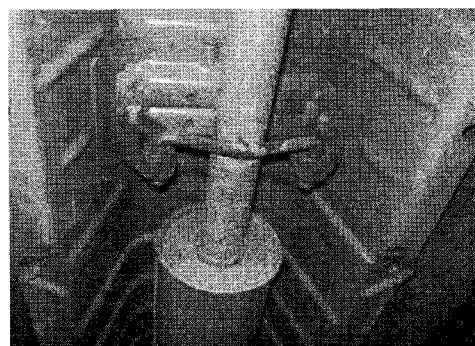


Fig. 6 The exhaust system of a tested passenger car

내경 112 mm의 비금속 원통에 총 150회 감아서 제작하였다. 또한 원통의 상/하부에 각각 1쌍씩의 10 mm × 20 mm × 3 mm의 Nd-Fe-B 영구자석을 설치하여 원통 내부에서 배기관 축 방향의 자기장을 발생시켰다. 제작된 센서들은 Fig. 5에서와 같이 차량의 하부와 연결하여, 배기계와 접촉하지 않도록 설치하였다. 센서의 영구자석들은 지면을 기준으로 센서의 상하쪽에 위치하여 배기관의 지면 수직방향 진동을 측정하도록 하였다. Fig. 7은 13개의 센서를 실차에 장착한 사진으로서 사진 위가 엔진 방향이다. 솔레노이드에서 측정한 신호는 전치증폭기 SRS SR 560에서 증폭한 후, 주파수 분석기 Agilent 35670A를 이용하여 주파수 분석하였다.

주행 시 노면으로부터 유입되는 진동의 영향을 배제하고 배기계의 진동 양상만을 관찰하기 위해 차량은 정지시킨 상태에서 신호를 측정하였다. 측정 중 엔진은 공회전 상태를 유지하였다. 차량이 주행하지

않으므로 센서가 부착된 부위로부터 센서로 유입되는 진동은 매우 미미하였다. 이 상태에서 제안한 센서에 의해 측정된 배기계의 진동 신호를 시간 영역에 대해 나타내면 Fig. 8과 같다. 엔진이 약 810 rpm의 공회전 상태이므로 배기계에 전파하는 진동은 엔진 크랭크 축의 회전에 의한 진동인 13.5 Hz (= 810 rpm / 60 sec) 와 4기통 엔진의 실린더 내 폭발 행정에 의한 진동인 27 Hz (= 폭발 행정 / 2 회전 · 1기통 * 4기통 * 13.5 회전/초) 및 그의 조화(harmonic) 성분들로 이루어져 있을 것으로 예상된다. 이는 위의 진동 신호를 주파수 분석할 경우 그대로 나타난다(Fig. 9 참조). 이로부터 제안한 센서를 이용할 경우 배기계의 진동을 문제없이 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

3.2 측정한 신호의 분석 및 ODS의 추출

이 절에서는 자기 센서를 이용하여 측정한 진동 신호로부터 배기계의 ODS를 측정한 결과를 제시한다.

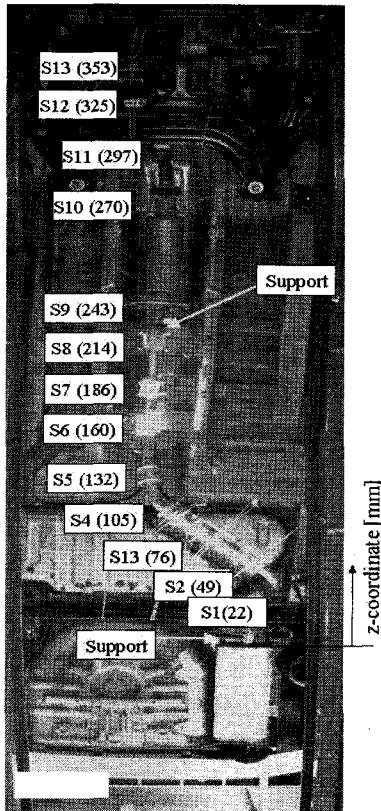


Fig. 7 The magnetic sensors installed on the exhaust system(The numbers in parenthesis denote z-coordinates of the sensors)

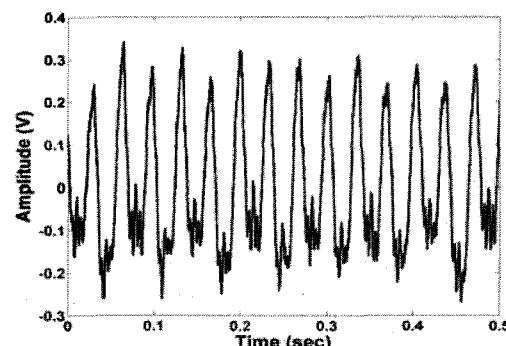


Fig. 8 Vibration signal measured by the suggested sensor under idling condition

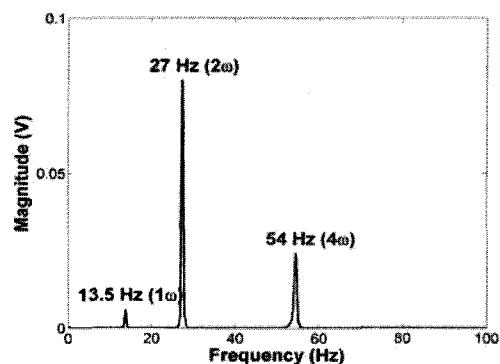


Fig. 9 FFT of the vibration signal measured by the suggested sensor

ODS는 전통적으로 특정 주파수에서의 구조물의 변형 형상으로 정의하며, 최근 들어서는 강제 진동 하에 놓여 있는 구조물의 서로 다른 2개 이상 지점의 운동 형상을 의미하는 것으로 많이 쓰인다.

어떤 시스템이 외력 $\{F\}$ 에 의해 강제 진동할 때 이 시스템의 주파수 ω 에서의 변형 형상 $\{X\}$ 은 다음의 식으로 기술된다⁽¹⁰⁾.

$$\frac{\{X\}}{\{F\}} = \sum_{r=1}^N \frac{\{\phi\}_r^T \{\phi\}_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta_r \omega_r} \quad (4)$$

여기에서 $\omega_r, \{\phi\}_r, \eta_r$ 은 각각 r 번째 고유진동수, 모드 백터 및 모달 감쇠비를 의미한다. 식 (4)에서 알 수 있는 바와 같이 주파수 ω 에서의 변형 형상은 인접한 모드의 모드 형상에 영향을 받게 된다.

전술한 바와 같이 ODS를 알기 위해서는 두 개 이상 지점의 운동을 측정하는 것이 필요하다. 이 경우, 두 지점 사이의 상대 운동에 의해 ODS를 기술할 수 있다. 만일 3개소 이상의 진동을 측정하여 ODS를 살펴보자 하면 특정 지점을 기준점으로 설정하여 다른 지점들과 이 기준점 사이의 상대 운동을 살펴보는 것이 필요하다. 이 연구에서는 배기계의 공회전 시 ODS를 측정하기 위하여 총 13곳의 측정점을 설정하여 Fig. 7과 같이 측정점 별로 센서를 설치하였다. 실험에 사용한 배기계는 중단에 두 개의 머플러가 있으며 끝단 머플러는 센서 1번 뒤쪽에 위치해 있고 중앙머플러는 센서 9번과 10번 사이에 위치해 있다. 센서 13번은 엔진 배기파이프(exhaust pipe)에 연결된 벨로즈(bellows)의 바로 뒤에 설치되어 있다. 또한 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 배기계를 지지하기 위하여 센서 8번과 9번 사이, 센서 1번과 끝단 머플러 사이에는 연성 고무를 사용하여 배기계가 차체와 연결되어 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 ODS를 살펴보기 위해서는 하나의 기준점이 필요하다. 이 연구에서는 13번 센서의 측정 신호를 기준 신호로 잡았다. Fig. 7에서 괄호 안의 숫자는 끝단 머플러를 기준으로 했을 때 차량 종방향으로의 좌표값(z-coordinate)을 의미한다.

ODS를 계산하기 위해서는 각 지점별 측정 신호의 자기 파워 스펙트럼(auto power spectrum)을 계산하여 이로부터 지점마다의 주파수 별 진동 신호의 크기를 구한다. 이후, 측정점과 기준점 사이의 상호

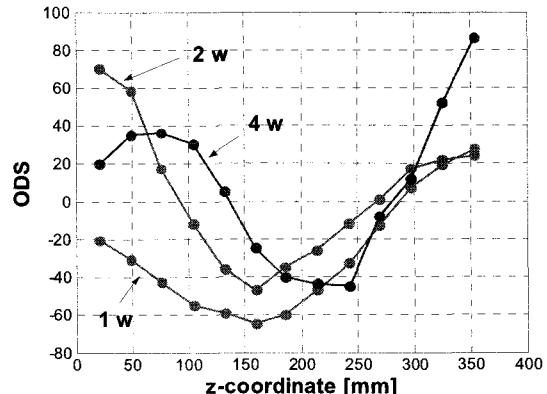


Fig. 10 ODS at 1ω (13.5 Hz), 2ω (27 Hz) and 4ω (54 Hz)

파워 스펙트럼(cross power spectrum)을 구하여 이로부터 기준점에 대한 각 측정점의 상대 위상을 구하면 ODS를 구할 수 있게 된다. 이 연구에서는 주파수 분석기를 이용하여 각 파워 스펙트럼을 계산하고, STAR-MODAL을 이용하여 ODS를 얻어내었다.

실험으로 구한 배기계의 ODS를 Fig. 10에 나타내었다. 여기에서 z축은 Fig. 7에 표시한 바와 같이 끝단 머플러를 기준으로 한 차량의 종방향 좌표를 의미한다. 측정된 ODS 형상은 양단 자유단 상태의 직선 보의 1, 2차 굽힘 모드 형상과 유사함을 알 수 있다. 이는 다른 방향에 비해 종방향이 긴 배기관의 특성에서 예측 가능한 부분이다. 끝단 머플러 쪽 진동은 크랭크축 회전 진동수(1ω) 보다 폭발 진동수(2ω)에서 배기관의 진폭이 크고 밸로즈 쪽 진동은 고주파수(4ω)에서 커짐을 알 수 있다. 한가지 주의 할 점은 중앙 지지부가 위치한 229 mm 지점의 진폭이 작지 않다는 점이다. 따라서 배기계의 진동이 중앙 지지부를 통하여 차실로 유입될 가능성이 있는 것으로 판단된다. 이 부위의 진동은 Fig. 6과 같이 지지부의 고무에 의해서 감소되기는 하나 본질적으로 지지부의 위치변경이나 배기관의 형상변경 등의 설계 변경이 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 고온에서 작동하는 특성상 기존의 접촉식 센서로는 측정이 어려운 자동차 배기계의 차량 상하 방향 진동을 비접촉으로 측정하는 새로운 방식을 제안하였다. 이 연구에서 사용한 센서는 자

성체 배관이 특정 자기장 구조 하에서 연직 방향의 운동을 할 경우 자속이 변화하는 현상을 이용하여 비접촉으로 신호를 측정할 수 있다. 이 센서는 매우 단순한 구조를 가지고 있으며 저렴하게 제작할 수 있다. 제안한 방식을 이용하여 엔진 공회전 시 배기계의 진동을 측정하여 아직까지 시도되지 않았던 배기계의 운전중 변형 형상을 측정할 수 있었다. 이 연구에서 제안하는 결과를 바탕으로 공회전시의 배기계 진동 특성을 실험적으로 파악할 수 있으리라 판단된다. 또한 이 방식을 확장할 경우 주행중인 차량에 장착되어 있는 배기계의 실시간 거동 또한 실험적으로 파악해 낼 수 있으리라 생각된다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, B. S. and Kang S. J., 1992, "Study on Idling Vibrational Characteristics of Engine Exhaust System", Proceedings of the KSAE 1992 Fall Annual Meeting, pp. 497~505.
- (2) Kim, Y. Y., Lee, C. M., Kim, Y. H. and Kim, J. H., 1995, "The Bend Modeling Technique in the Vibration Analysis of the Exhaust System", Transactions of the KSME A, Vol. 19, No. 2, pp. 597~610.
- (3) Yoon, K. R., 2002, "A Study on the Method of Vibration Analysis for the Exhaust System in Car Model", Proceedings of the KSAE 2002 Spring Annual Meeting, pp. 760~765.
- (4) Oh, J. E., Im, D. G., Lee, J. Y., Cho, J. H. and Kim, M. B., 1992, "Dynamic Characteristics Identification of Automobile Exhaust System and Determination of Hanger Optimal Position", Transactions of the KSAE, Vol. 14, No. 3, pp. 58~70.
- (5) Lee, S. S. and Lee, C. M., 1993, "A Study on Determining Hanger Positions of Exhaust System and the Effect of Bellows", Proceedings of the KSAE 1993 Spring Annual Meeting, pp. 315~321.
- (6) Cho, M. and Jung, H., 2001, "Verification of the Finite Element Model of an Automobile Exhaust System Using Modal Testing", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 665~670.
- (7) Lee, C. M., Park, S. T. and Kim, S. H., 1997, "Application of Frequency Response Function for Verification of the FEM Model of the Exhaust System", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 7, No. 6, pp. 1049~1058.
- (8) Rothberg, S. J. and Bell, J., 2004, "On the Application of Laser Vibrometry to Translational and Rotational Vibration Measurements on Rotating Shaft", Measurement 35, pp. 201~210.
- (9) Han, S. W., 2005, Development and Application of Magnetic Sensor for the Non-contact Measurement of Bending Vibration, Ph. D. Theses, Seoul National University.
- (10) Ewins, D. J., 2000, Modal Testing : Theory, Practice and Application, Research Studies Press Ltd., Baldock, England.