

레이저 도플러 진동보상 신호처리 연구

이 재 식*, 안 남 호*, 장 태 규*, 김 호 성*, 강 민 식**
 *중앙대학교 전자전기공학부, **경원대학교 기계설계학과

A Laser Doppler Vibrometer Featured with the In-housed Mechanism for Adaptive Compensation of Body Vibration

Jae-Sik Lee, Nam-Ho Ahn, Tae-Gyu Chang, Ho-Seong Kim, Min-Sig Kang
 *School of Electrical Engineering, Chung-Ang University
 **Department of mechanical Engineering, Kyung-Won University

Abstract - This paper presents an auxiliary beam-assisted adaptive compensation technique applied to alleviate the problem of LDV's body vibration. The LMS algorithm is applied to adaptively compensate the body vibration utilizing the reference signal provided by the auxiliary beam. The usefulness of the proposed technique is verified via computer simulations performed for diverse types of target signals and body vibration.

1. 서 론

기존의 레이저 도플러를 이용한 진동계측은 제한된 범위에서의 진동에 대한 정밀 계측이 주된 응용이라 할 수 있으며, 이 경우 보정의 정밀성, 측정환경의 안정성 등 중요한 요구사항이 수반되어야 한다[1]. 특히 측정환경의 안정성이 보장되지 않는 상황, 즉 레이저 도플러 계측 시스템 자체가 진동하는 환경에서는 자체진동이 계측오차요인으로 작용하게 된다. 이러한 경우 중전의 레이저 계측 시스템에서는 기준면에 상대적인 진동변위를 측정하여 계측 시스템 자체의 진동을 보상하는 구조를 가진다. 그러나 레이저 도플러 계측 시스템 자체가 진동하는 환경에서 진동보상을 위한 기준면을 확보하지 못하는 경우 보정이 올바르게 이루어지지 않게 되면서 심각한 계측오차를 유발하게 된다[2].

이에 본 논문에서는 레이저 도플러 계측 시 측정방향으로 계측 시스템이 진동하는 경우 발생하는 계측오차를 진동 기준면과는 관계없이 자체적으로 보상하여 대상물의 진동을 측정하는 메커니즘으로 보조 빔을 이용한 자체진동 보상 구조를 제시하였다. 이에 필요한 진동보상 신호처리 기법으로 LMS(least mean squared) 알고리즘[3]을 기반으로 하는 적응잡음제거 기법을 적용하여 자체진동을 보상하는 시뮬레이션을 수행하였으며, 정립한 시스템 모델링을 기반으로 설계한 시스템을 직접 구성하여 제작한 결과를 기술하였다.

2. 자체진동 보상 레이저 도플러 계측 시스템

보조 빔을 이용한 자체진동 보상 기법은 기본 계측시 소실되는 여분의 빔을 이용하여 자체 진동을 계측하고, 이를 이용하여 자체진동에 의해 왜곡된 대상진동을 보상하는 기술이다. 본 절에서는 본 논문에서 제시한 보조 빔을 이용한 자체진동 보상 시스템의 구조와 이에 이용된 주 빔 및 보조 빔의 신호를 포함한 기능부위별 모델링에 관한 내용을 기술한다.

2.1 보조 빔을 이용한 자체진동 보상 시스템

자체진동 보상 레이저 도플러 계측 시스템은 그림 1에 나타난 바와 같이 보조 빔으로 계측 시스템 자체진동을 측정하여 대상진동의 계측 시 오차요인으로 작용하는 시스템 자체의 진동을 보상하는 구조를 가진다.

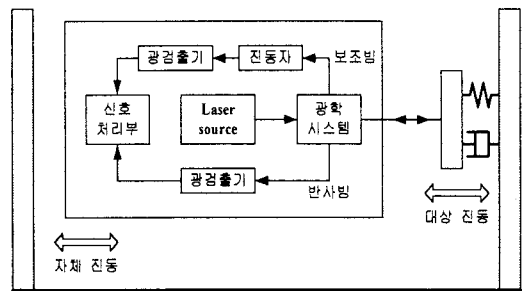


그림 1. 본 연구에서 제안한 자체진동 보상 레이저 계측 시스템의 구성도

그림 1과 같은 방식은 계측 시스템 내에 자체의 진동을 반영하는 자체진동자를 설계하여 부착하고, 보조 빔을 이용하여 진동자를 측정하여 시스템 자체의 진동을 추정하고, 이를 통해 진동오차를 보상할 수 있는 구조이다. 이 기법은 기존에 계측 시스템이 자체진동을 보상하기 위해서 진동하지 않는 절대 기준면을 확보해야 하는 기법과는 달리 별도의 절대 기준면이 필요없게 되므로 응용의 제약을 줄일 수 있는 특징을 가진다. 그림 1의 블록도를 살펴보면, 레이저 원으로부터 발진된 레이저 신호는 광학 시스템을 거친후 대상 진동을 계측하는 주빔과 계측 시스템 자체의 진동을 계측하기 위한 보조빔으로 나뉘어 진다. 주 빔은 계측 대상면으로부터 반사되어 다시 광학부를 통해 광 검출기로 입력되어 신호처리부에서 복조되며, 보조 빔은 진동자에 반사되어 또다른 광 검출기로 입력되어 신호처리 부에서 복조되어 계측신호의 오차를 보상하는데 사용된다. 신호처리부에서는 주빔과 보조 빔에서 검출되는 신호를 PLL(phase locked loop) 회로 등을 이용하여 독립적으로 복조하여 각각의 진동변위에 대한 속도를 얻어 내고, 이를 이용하여 보상을 수행한다. 본 논문에서는 진동보상 알고리즘으로 복조된 보조 빔 신호를 기준 신호로 하는 LMS 기반의 적응알고리즘을 이용한 잡음제거 기법을 적용하였으며, 이의 시뮬레이션 수행을 통해 동작을 확인하였다.

2.2 레이저 계측 시스템 기능부위별 모델링

본 연구에서는 레이저 계측 시스템 개발에 필요한 시

물레이션 모델을 정립하였는데, 모델링에 있어서는 시스템의 성능과 기능을 결정하는 주요 부분들에 대해 시스템의 물리량과 특성을 최대한 반영시켰다. 그림 2에 레이저 진동 계측 시뮬레이터의 구성도를 보이고 있다. 시뮬레이터는 크게 신호 발생부와 복조부로 구성되며 신호 발생부에서는 FM변조, 채널연방, LDV body 진동 모델 적용등의 기능을 수행하고, 복조부에서는 신호 발생부에서 생성한 레이저 변조신호에 대해 PLL방식의 FM변조, 진동보상, 잡음제거의 기능을 수행하여 진동신호를 복원하는 구조를 가진다.

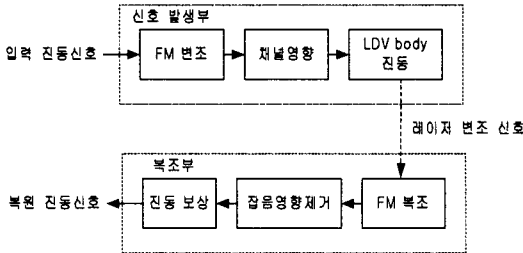


그림 2. 레이저 진동 계측 시뮬레이터의 구성도

3. 진동보상처리

본 논문에서는 레이저 도플러 계측 시 측정 방향으로 계측 시스템이 진동하는 경우 발생하는 계측오차를 진동 기준면과는 관계없이 자체진동으로 보상하기 위한 진동보상 신호처리 기법으로 LMS(least mean squared) 알고리즘[3]을 기반으로 하는 적응잡음제거 기법을 적용하였다. 본 절에서는 진동보상에 적용한 알고리즘에 관한 내용을 기술하였다.

주 빔에서 측정되는 신호는 계측대상 진동신호에 계측 시스템 자체의 진동이 부가된 신호모델로 나타나기 때문에 계측 시스템 자체 진동에 의해서 생기는 오차를 적절하게 보상해야 한다. 자체진동자를 레이저 도플러 계측 시스템에 부착하여 보조 빔으로 측정함으로써 부가되는 자체진동 오차를 추정하여 계측대상 진동신호를 보상하였고, 이를 위해 적응 알고리즘인 LMS기법을 이용하였다.

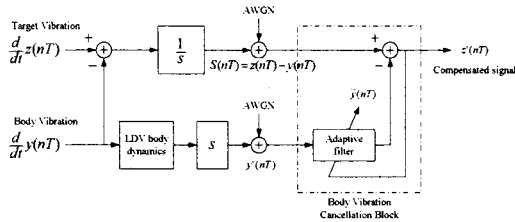


그림 3. LMS 기반의 자체진동 보상 기법의 구성도

그림 3은 이러한 개념을 적용한 진동보상 시뮬레이션 구성도이다. 진동보상 시뮬레이션은 계측대상 진동신호 및 계측 시스템 자체진동 신호는 PLL의 일정한 capture range 안에서 이상적으로 복조하는 등가적인 모델로 가정하였다.

자체진동자에서 반영되는 계측 시스템 자체의 진동신호 $y'(nT)$ 는 자체진동자 dynamics에 의해 크기의 위상이 변형된 sine신호들의 조합에 가속도 성분을 반영하도록 미분기를 통과한 신호로 나타낼 수 있다. 자체진동자 dynamics에 의해 변형된 신호는 보조빔을 복조하여 얻을 수 있다. 진동보상은 자체진동 신호 $y'(nT)$ 에 자체진동자 dynamics의 역에 해당하는 필터를 통과시켜 보상

해 줄 수 있으나, 역필터가 불안정하기 때문에 구현의 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자체진동신호 $y'(nT)$ 를 기준 신호로 하는 LMS 알고리즘에 의한 적응필터 기법을 적용하였다[3].

$$\tilde{y}(nT) = w(n) \cdot y'(nT) \quad (1)$$

$$e(nT) = S(nT) - \tilde{y}(nT) \quad (2)$$

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(nT) \cdot y'(nT) \quad (3)$$

$w(n)$: 필터 계수 벡터

$y'(nT)$: 보조 빔에 의해 복조된 신호

$\tilde{y}(nT)$: 추정된 신호

μ : step size parameter

신호 $y'(nT)$ 를 적응필터를 통과시켜 주 빔에서부터 복조된 계측대상 진동과 계측 시스템 자체진동 신호의 합으로 된 신호 $S(nT)$ 와의 오차 $e(nT)$ 로 필터계수를 갱신한다. 오차신호 $e(nT)$ 와 보조 빔에서 복조되는 자체진동 신호 $y'(nT)$ 사이의 상관성이 제거될 때 필터계수 $w(n)$ 은 더 이상 갱신되지 않고, 필터계수에 의해 추정된 신호 $\tilde{y}(nT)$ 는 계측 시스템 자체진동과 동일하게 되어 결과적으로 오차신호 $e(nT)$ 는 계측대상 진동신호 $z'(nT)$ 가 된다. 이의 적응알고리즘을 이용하여 자체진동을 보상하는 구조를 가진다.

4. 자체진동 보상 시스템 제작

본 절에서는 앞에서 제시한 시스템의 모델링을 통해 얻은 설계상수들을 표 1과 같이 설정하여 자체진동 보상 시스템을 제작에 관한 내용을 기술하였다.

표 1 실제 시스템 제작에 이용한 설계상수

시스템 상수	제작에 적용한 값
보조질량(M)	67.63[g]
스프링계수(K)	5802.88[N/m]
고유진동주파수(ω_n)	292.922[rad/s]
댐핑상수(C)	0

LDV 결합 진동센서가 그림 7과 같은 주파수 특성을 갖기 위해서는 LDV 몸체의 주파수 ω 에 비해 큰 고유진동수 ω_n 를 갖고, 댐핑비 $\zeta=0.707$ 가 되도록 설계하였다. 진동환경에서 LDV에 전달되는 진동은 LDV 장치대가 놓이는 부분에 전달되며, 이 부분의 진동은 50Hz 미만의 비교적 낮은 주파수 성분을 가진다. 따라서 진동센서에서 측정되는 신호가 비교적 LDV 몸체의 가속도에 비해 하는 특성이 잘 유지되도록 센서의 고유진동수는 46Hz가 되도록 설계하였다.

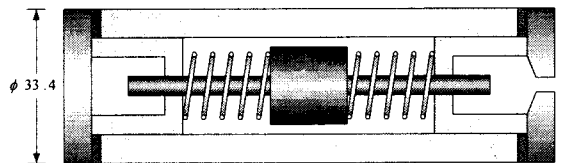


그림 4. LDV 결합 진동 센서의 형태

그림 4는 설계한 LDV 결합 진동 센서의 개략적인 형태를 보이고 있다. 그림 8에서 원통형의 실린더 내부는 점성을 갖는 유체로 충진되어 있고, 보조질량은 피스톤

형태이며, pre-stress를 받는 2개의 코일스프링으로 양측이 지지된다. 센서의 고유진동수는 보조질량과 지지스프링의 탄성에 의해 결정되며, 댐핑비는 실린더 내벽과 피스톤 형태의 보조질량의 외벽 사이의 간격과 그 틈을 통해 유동하는 유체의 점성에 의해 결정된다. 이때 진동계의 물리적 양은 다음 식(4)의 관계를 갖는다.

$$\omega_n = \sqrt{k/m}, \quad c = 2\pi\mu L / \left\{ \ln R + \frac{1-R^2}{1+R^2} \right\} \quad (4)$$

식(22)에서 μ 는 유체의 점성계수, L 은 실린더 내벽과 피스톤 외벽의 길이, $R = b/a$ 로서 b 는 피스톤의 반경, a 는 실린더 내벽의 반경에 해당된다. 설계된 치수는 보조질량 $m=30g$, 코일 스프링의 탄성계수 $k=11.84N/mm$, $L=20mm$, $a=0.87mm$, $b=0.7mm$, $\mu=800mpa \cdot s$ 이며, 코일스프링의 재질은 경강선으로 코일직경=1.6mm, 유효지름=12mm, 6-turn 형태로 설계하였다.

그림 9는 본 연구를 통해 설계, 제작된 자체진동자의 센서의 결합도로서 좌측의 뚜껑의 중앙부위 나사는 유체의 충전 및 충전 후 밀폐에 사용하는 유체 주입구이고, 반대편 뚜껑은 투명 아크릴 재질을 사용하여 레이저빔이 통과할 수 있도록 하여 내부 보조질량의 진동속도를 측정할 수 있도록 구성하였다. 제작한 자체진동자의 전체 크기는 $82 \times 33.4 \times 34mm$ 이다.

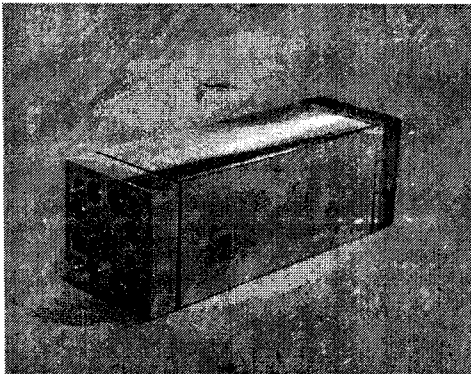


그림 5 본 연구에서 제작한 자체진동자

제작된 센서의 고유진동수 측정을 위해 제작한 자체진동자에 Impulse Test를 수행한 결과로 얻어진 응답의 스펙트럼은 그림6과 같이 나타난다. 그림 6의 결과를 통해 임펄스 응답에서 시스템의 고유주파수에 해당하는 46Hz의 응답이 결과로 얻어지는 것을 알 수 있다. 이에 시스템이 동작하는 것을 확인할 수 있다.

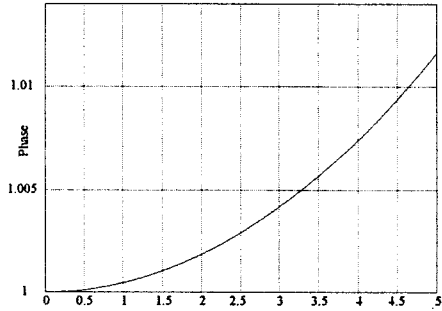
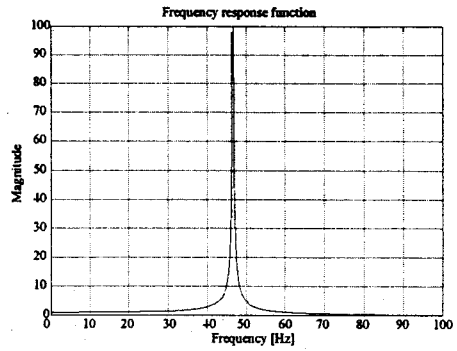


그림 6. Magnitude and phase response of

$$G(j\omega) = \frac{1}{\omega_n^2} \frac{1}{\{1 - (\omega/\omega_n)^2\}}$$

5. 결론

본 논문에서는 레이저를 이용한 진동 계측 시에 계측 시스템 자체 진동의 영향을 보상하기 위해 기본 계측 시스템에 사용되는 여분의 빔으로 측정된 진동 신호를 기준 신호로 하는 LMS 기반의 적응 잡음 제거 알고리즘을 제시하였다. 자체진동을 측정하기 위한 자체진동자를 설계 제작하였으며 이의 dynamics 및 주 빔과 보조 빔에 의해 측정되는 신호를 모델링하고, 진동환경을 고려한 주파수 대역으로 계측대상 진동 신호와 계측시스템의 자체진동을 설정하여 이들에 대한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 LMS 기반의 적응 진동보상 알고리즘을 개발하였다. 개발한 자체진동 보상 적응 알고리즘을 10Hz 부터 가청주파수대역인 20KHz의 주파수범위의 진동신호를 대상으로 적용하여 이 범위에서 진동계측을 정확히 수행하여 자체진동을 보상하여 주는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

본 논문에서 제시한 레이저 도플러 계측 시스템의 진동보상 기법은 기준면을 확보하지 않더라도 계측 시스템 자체진동에 따른 왜곡을 비교적 우수하게 보상할 수 있으며, 또한 기본적인 측정 시 발생하는 여분의 빔을 이용할 수 있으므로 구현상과 경제적인 측면에서도 매우 유용할 것으로 기대된다.

(참고 문헌)

- [1] R. F. Strean, L. D. Mitchell, and A. J. Barker, "Global noise characteristics of a laser doppler vibrometer part I: theory," SPIE vol. 2868, pp. 2-11, 1996.
- [2] 김성훈, 김호성, "레이저 도플러 진동계를 이용한 진동변위와 주파수 측정방법 연구", 98년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1824~1827, 1998
- [3] Simon Haykin, Adaptive Filter Theory, Prentice-Hall, 1996.