

LMS 기반 Multirate 적응 필터를 이용한 LDV 자체진동 보상 기법

김정근, 안병호, 장태규
중앙대학교 / NPTC

A In-housed Compensation Mechanism of Body Vibration In a Laser Doppler Vibrometer Based on Multirate LMS Filter

Jung-Keun Kim, Nam-Ho Ahn, Tae-Gyu Chang
Chung-Ang University / NPTC

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.

2. LMS기반의 자체 진동 보상 기법

레이저 도플러 계측은 고 분해능의 계측이 가능하여 고해상도, 고 정밀도를 요구하는 응용분야에 적용된다. 이의 응용을 위해서는 계측 시스템 자체가 진동하지 않는 엄밀한 요구조건을 충족하여야 한다. 실제 응용의 경우 계측 시스템 자체가 진동하지 않는 환경의 구성은 매우 어려운 편이어서 자체 진동을 측정하고 이를 사용하여 계측 대상 신호에서 보상해주는 기법의 적용이 필요하다. 그러나, 자체진동의 측정하기 위한 진동하지 않는 별도 기준면을 확보하는 것 또한 힘들고, 이의 구성은 계측 시스템자체의 복잡도를 높히게 되어 효율적인 레이저 도플러 계측 시스템 구현에 장애요인이 되고 있다. 본 논문에서 제시하는 진동보상구조는 계측 시스템에 장착된 자체진동자의 진동을 기본 계측시 발생하는 보조빔을 사용하여 측정하고 이를 기준신호로 LMS 기반의 적응 신호처리 알고리즘을 통하여 자체 진동에 의해 왜곡된 대상 신호의 진동신호를 보상한다. 본 절에서는 보조빔과 자체 진동자를 이용한 자체 진동 측정 기법과 진동 보상을 위한 적응 신호처리 기법에 대하여 서술하였다.

1. 서 론

레이저를 이용한 진동 계측은 고 정밀도 계측이 주된 분야이어서 이의 응용을 위해서는 계측오차영향을 줄이기 위한 계측 시스템 자체의 안정성 및 보정의 정밀성의 보장이 필수적이다 할 수 있다. 이를 충족하기 위해서는 자체 진동이 없는 계측 환경 또는 자체 진동을 보정하기 위한 절대 기준면의 확보하여 자체 진동을 보상해 주어야 한다. 그러나 실제 응용의 경우 진동이 없는 계측 환경을 구축하기는 대단히 힘든 일이고, 자체 진동을 보정하기 위한 절대 기준면의 확보 또한 어려운 실정이며 레이저 진동 계측의 응용 범위는 제한되어 있다.

본 논문에서는 레이저 진동 계측시 계측 시스템의 진동으로 인한 계측 오차를 보상해주기 위하여 별도의 절대 기준면을 이용하지 않고 자체의 진동을 측정하여, 적응 신호처리 알고리즘을 통하여 보상하여 주는 기법을 제시하였다. 자체 진동의 측정은 계측 시스템 진동을 반영하는 자체 진동자의 진동을 대상 진동 계측시 소실되는 여분의 빔을 사용하여 측정하였다. 계측 시스템의 자체진동은 측정된 자체 진동자의 진동신호를 자체 진동자 dynamics의 역필터를 사용하여 추정할 수 있으나, 역필터의 stability를 만족시키기가 힘들고, 오차영향으로 인하여 구현이 어려운 실정이다.[1] 이에 본 논문에서는 측정된 자체 진동자의 신호를 LMS기반의 적응 신호처리 기법을 사용하여 자체 진동을 추정하고 이를 대상 계측신호에서 보상해주는 적응 진동보상 신호처리 기법을 제시하였다. 적응 진동보상 신호처리는 오차 영향의 개선 성능과 구현의 효율성을 높이기 위하여, 계측 시스템의 진동 및 대상 진동을 진동 주파수에 따라 분류하고, multirate filter구조를 적용하여 주파수대별로 적응 보상처리를 수행하는 구조로 설계하였다.

본 논문에서 시도한 기법은 레이저 계측 시스템의 적용 범위를 확장하기 위한 새로운 형태의 시도로서 자체 진동을 측정하기 위한 매커니즘과 함께 진동으로 인한 계측 오차를 줄이기 위한 신호처리 기법을 적용하여 자체 진동을 보상해준다. 본 논문에서는 제시된 적응 자체 진동 보상 기법을 적용한 시뮬레이션 결과와 함께 자체 진동자를 적용한 LDV 시스템을 제작하고 실제 측정된 실험적 결과를 보임으로써 본 논문에서 제시하는 기법을 통하여 자체 진동이 보상 가능함을 보였다.

2.1 자체 진동측정 및 보상 기능을 가지는 LDV 시스템

레이저 도플러 계측 시스템은 레이저원에서 발생한 광을 광학 시스템을 통하여 계측 대상체에 발사하여 반사되는 광을 측정하는 구조를 가지고 있다. 대상체에 의해 반사되는 신호는 대상체의 진동만큼 변위가 발생하여 FM 변조된 신호로 모델링될 수 있으며, 계측 시스템에서는 반사된 광신호를 FM 복조하여 대상체의 진동신호를 추정할 수 있다. 레이저 계측시 계측 시스템 자체가 측정방향으로 진동하는 경우 계측 시스템과 대상체 사이의 진동 변위가 발생하여 대상체의 진동신호에 계측 오차를 유발하게 된다. 계측 대상의 진동 신호에서 자체 진동으로 인한 영향을 보상하기 위해서는 계측 시스템에 자체진동을 측정하고 추정하는 매커니즘이 필요하다. 기존의 자체 진동을 추정, 보상하기 위한 기법은 진동하지 않는 절대 기준면에 대해 광을 발사하여 반사된 신호를 측정하여 자체 진동을 추정한다. 이 기법의 적용을 위해서는 계측 시스템 외부의 진동하지 않는 절대 기준면을 필요로 하게 된다. [2]

본 논문에서는 계측시스템 자체 진동을 측정하기 위한 새로운 시도로서, 계측시스템에 장착된 자체 진동자의 진동을 기본 계측시 소실되는 여분의 빔을 사용하여 측정하고, 자체 진동을 추정하는 기법을 적용하였다. 이 기법은 기존의 계측 시스템이 자체 진동을 보상하기 위해 절대 기준면을 확보하여야 하는 것과는 달리 별도의 기준면을 필요로 하지 않으므로 기존 시스템이 가지는 응용의 제약 줄일 수 있는 특징을 가진다. 그림1의 블록도를 보면 레이저원으로부터 발진된 레이저 신호는 광학 시스템을 거친 후 대상 진동을 측정하기 위한 주빔과 계측 시스템 자체의 진동을 측정하기 위한 보조빔으로 나뉘어진다. 주빔은 계측 대상면에서 반사되어 다시 광학시스템을 통하여 광검출기로 입력되어 신호처리부에서 복조되며, 보조빔은 자체진동자에 발사되어 또 다른 광검출기로 입력되

어 복조된다.

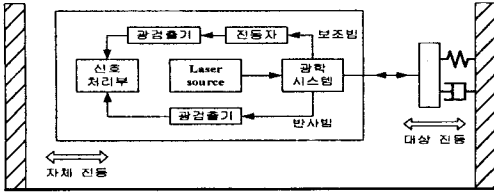


그림 1. 본 연구에서 제안한 자체진동 보상 레이저 계측

시스템의 구성

신호처리부에서는 주빔과 보조빔에서 검출되는 신호를 PLL(Phase Locked Loop) 회로등을 이용하여 각각 독립적으로 복조하고, 각각의 진동변위에 의한 속도를 얻어낸다. 본 논문에서 제시하는 진동 보상을 위한 신호처리 알고리즘은 보조빔의 복조신호를 기준신호로 LMS기반의 적응 진동 보상을 수행하여 대상 진동의 계측신호인 주빔 복조신호의 오차영향을 제거하는 구조를 가지고 있다.

2.2 LMS 기반의 적응 진동 보상 신호처리

본 논문에서는 레이저 도플러 계측 시 측정 방향으로 계측 시스템이 진동하는 경우 발생하는 계측오차를 진동 기준면과는 관계없이 자체적으로 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.

2.2.1 적응 진동보상 알고리즘

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.

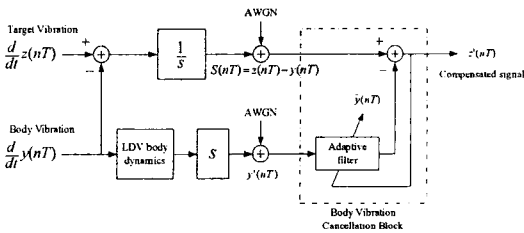


그림 2. LMS 기반의 자체진동 보상 기법의 구성

그림 2는 이러한 개념을 적용한 진동보상 기법의 구성도이다. 본 논문에서 제시하는 진동보상구조에서는 계측대상 진동신호 및 계측 시스템 자체진동 신호를 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 보상을 줄 수 있으나, 역필터가 불안정하기 때문에 구현이 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자체진동신호 $y'(nT)$ 를 기준 신호로 하는 LMS 알고리즘에 의한 적응필터 기법을 적용하였다(3).

$$\hat{y}(nT) = w(n) \cdot y'(nT) \tag{1}$$

$$e(nT) = S(nT) - \hat{y}(nT) \tag{2}$$

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

- $w(n)$: 필터 계수 벡터
- $y'(nT)$: 보조 빔에 의해 복조된 신호
- $\hat{y}(nT)$: 추정된 신호
- μ : step size parameter

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

2.2.2 다단계 진동 보상 알고리즘

본 논문에서는 레이저 계측 시스템에 영향을 주는 진동 신호를 주파수 대역별로 따라 구분하고, 각각의 주파수 대역에 따라 진동보상을 해주는 다단 적응 신호처리 구조를 적용하였다. 계측대상 진동 및 자체 진동 신호는 주파수 대역별로 표 1과 같이 구분하였다.

표 1. 진동신호의 주파수 대역에 따른 진동의 종류구분

진동대상 주파수 대역	계측대상 진동	계측기 자체의 진동
10 Hz 이하	계측대상 이동	계측기 자체의 이동
10 ~ 100 Hz	기계적 진동	기계적 진동
0.1 ~ 20 KHz	오디오 진동	
20 KHz 이상	초음파	

일반적으로 이동계측 환경에서와 같이 계측 대상체나 계측기 자체가 이동하는 경우의 진동은 10Hz 이하의 저주파 신호로 생각할 수 있으며, 이러한 진동들은 계측기를 운반하거나 계측 대상이 차량 등에 의해 이동하는 원인을 고려한 상황이다. 기계적 진동은 10 Hz에서 100Hz 사이의 진동으로 구분할 수 있으며, 엔진 등과 같은 시스템 구동 시 발생하는 60 Hz 전후의 주파수 대역을 가지는 진동을 범위로 설정하였다. 오디오 진동은 음성이나 오디오 신호에 의해 진동하는 대상체의 주파수 대역을 100 Hz에서 20KHz까지의 가청주파수 영역으로 설정하였으며, 20KHz 이상의 주파수 대역은 초음파에 의한 대상체의 진동으로 구분하였다.

본 논문에서는 Multirate filter 구조를 적용하여 앞서 기술한 바와 같이 구분한 주파수 대역별로 진동을 보상하였다. 본 논문에서 제시하는 다단 적응 필터 구조는 측정 대상 범위 및 자체 진동원에 따라 적응 신호처리를 수행하므로, 진동 보상 성능을 향상시키고, 실제 적용에서 효율적인 구현구조로 구현이 가능하다. 그림 3에 다단계 진동 범위에 대한 적응 신호처리 시스템의 구조를 나타내었다.

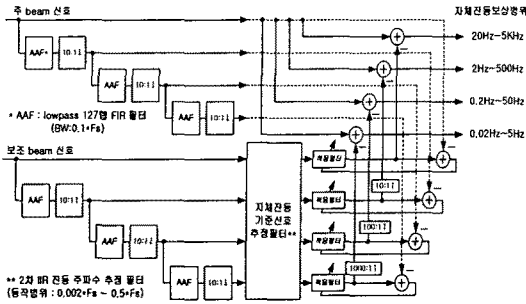


그림 3 다단계 진동 범위에 대한 적응 보상 신호처리 시스템 구성도

진동범위에 따른 보상 신호처리를 위하여 주빔 및 보조빔 신호에 다단 decimation filter와 디지털 anti aliasing filter를 적용하였다. 그림 3의 블록도를 살펴 보면 10KHz로 sampling된 주빔 및 보조 빔 신호에서 단계마다 10:1의 decimation을 거치도록 하여, 각각 1KHz, 10Hz, 1Hz대의 신호로 각각 down-sampling 하였다. 각 단계의 Decimation filter를 적용하기 전에는 127탭의 FIR 필터를 사용하여 sampling과정에서 발생할 수 있는 aliasing 영향을 방지하였다. 이러한 multirate filter의 적용은 실제적으로 구현하기 힘든 범위의 필터링을 디지털 필터로 효율적인 구현이 가능하며, 시스템의 구현 복잡도를 줄여주는 효과를 줄 수 있다.

3. 동작 시험

본 절에서는 본 논문에서 정립한 레이저 계측 시스템의 시뮬레이션 모델을 토대로 제작한 실제 보상시스템에 적용한 결과에 대해 기술하였다. 그림 14에는 자체진동 보상 알고리즘을 적용한 실제 측정 신호를 나타내었다.

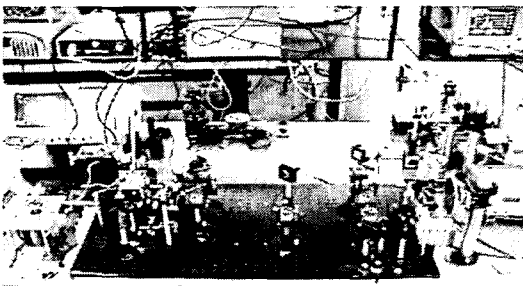


그림 4. 제작된 프로토타입 LDV시스템

그림 4-(a)에서는 차례대로 주 빔 신호, 보조빔 신호, 자체 진동 예측 신호, 진동 보상 신호를 보여 주고 있다. 보조 빔 신호에서 10Hz 이하 저주파대의 진동신호를 예측하고 이를 적용 진동 보상 처리한 결과 그림 4-(b)에서 보는 바와 같이 자체 진동이 보상되었음을 확인할 수 있다.

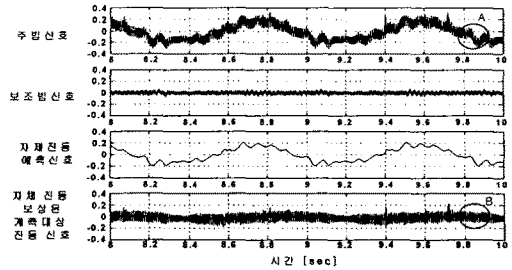


그림 4-(a) 제작한 LDV 시스템을 사용하여 실제 측정된 결과 (대상 진동신호 100Hz, 자체 진동신호 1.5Hz + 저주파 harmonics)

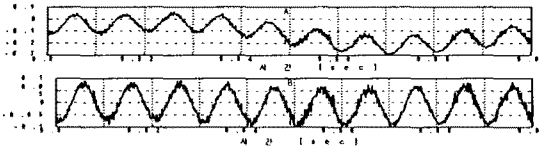


그림 4-(b). (a)에서 A,B 부분을 확대한 그림 (A의 자체 진동 신호가 B에서 보상된 모습을 보여준다)

4. 결론

본 논문에서는 레이저를 이용한 진동 계측 시에 계측 시스템 자체 진동의 영향을 보상하기 위해 기본 계측시 소모되는 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 진동예측을 정확히 수행하여 자체진동을 보상하여 주는 것을 시뮬레이션 및 실측 시험을 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.

본 논문은 한국과학재단 지정 우수 연구센터인 명지대학교 차세대 전력기술 연구센터의 지원을 받아 수행한 결과입니다.

(참고 문헌)

- [1] Tae-Gyu Chang, Yong-Gi Son, Jae-Hwa Kim, Ho-Seung Kim, and Min-Shik Kang, "A Laser Doppler Vibrometer Featured with the In-housed Mechanism for Adaptive Compensation of Body Vibration," Proc. of IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS), Vol 2, pp. 535-536, NOV. 2000.
- [2] R. F. Streaun, 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.
- [3] Simon Haykin, Adaptive Filter Theory, Prentice-Hall, 1996.