

자체진동의 보상을 위한 레이저 도플러 계측 신호 적응 진동보상 기법 연구

論 文
50D-8-5

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

李在植* · 張泰奎** · 金載和*** · 金鎬成§ · 姜珉植§§
(Jae-Sik Lee · Tae-Gyu Chang · Ho-Seong Kim · Min-Sig Kang)

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.

Key Words : LDV, In-housed vibration compensation, LMS

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 종전의 레이저 계측 시스템에서는 기준면에 상대적인 진동변위를 측정하여 계측 시스템 자체의 진동을 보상하는 구조를 가진다. 그러나 레이저 도플러 계측 시스템 자체가 진동하는 환경에서 진동 보상을 위한 기준면을 확보하지 못하는 경우 보정이 올바르게 이루어지지 않게 되면서 심각한 계측오차를 유발하게 된다[2].

이에 본 논문에서는 레이저 도플러 계측 시 측정 방향으로 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 소

실되는 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.

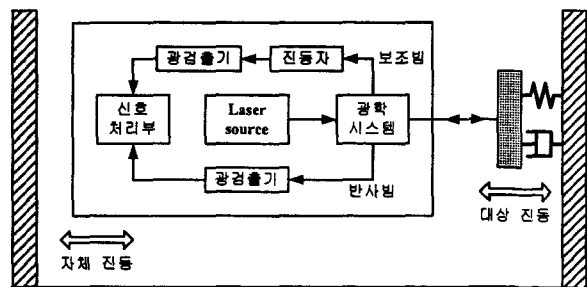


그림 1. 본 연구에서 제안한 자체진동 보상 레이저 계측 시스템의 구성도

Fig 1. Functional block diagram of the LDV showing the in-housed mechanism for vibration compensation

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

* 正 會 員 : 중앙대 電氣電子工學部 博士課程

** 正 會 員 : 중앙대 電氣電子工學部 教授

*** 正 會 員 : 삼성전자 工博

§ 正 會 員 : 중앙대 電氣電子工學部 副教授

§§ 非會 員 : 경원대 機械工學科 副教授

接受日字 : 2001年 5月 28日

最終完了 : 2001年 7月 26日

진동을 계측하는 주 빔과 계측 시스템 자체의 진동을 계측하기 위한 보조빔으로 나뉘어 진다. 주 빔은 계측 대상면으로부터 반사되어 다시 광학부를 통해 광 검출기로 입력되어 신호처리 부에서 복조되며, 보조 빔은 진동자에 반사되어 또다른 광 검출기로 입력되어 신호처리 부에서 복조되어 계측신호의 오차를 보정하는데 사용된다. 신호처리부에서는 주 빔과 보조빔에서 검출되는 신호를 PLL(phase locked loop) 회로 등을 이용하여 독립적으로 복조하여 각각의 진동변의에 대한 속도를 얻어 내고, 이를 이용하여 보상을 수행한다. 본 논문에서는 진동보상 알고리즘으로 복조된 보조 빔 신호를 기준 신호로 하는 LMS 기반의 적응오프리츠를 이용한 잡음제거 기법을 적용하였으며, 이의 시뮬레이션 수행을 통해 동작을 확인하였다.

2.2 레이저 계측 시스템 기능부위별 모델링

본 연구에서는 레이저 계측 시스템 개발에 필요한 시뮬레이션 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, 채널모델 적용, LDV body 진동 등의 기능을 수행하고, 복조부에서는 신호 발생부에서 생성한 레이저 변조신호에 대해 PLL방식의 FM변조, 진동보상, 잡음제거의 기능을 수행하여 진동신호를 복원하는 구조를 가진다.

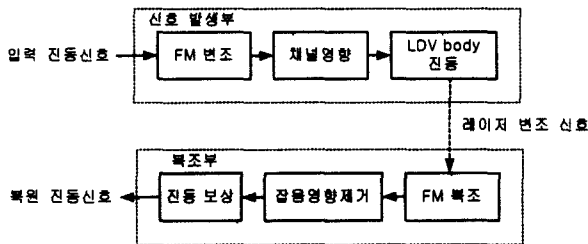


그림 2. 레이저 진동 계측 시뮬레이터의 구성도
Fig 2. Functional blocks of the simulator for laser vibration measurement

2.2.1 신호발생부

신호발생부는 주 빔 신호와 보조 빔 신호를 발생시키는 기능을 한다. 주 빔은 계측 대상 진동 신호와 진동계 자체 진동 신호가 복합되어 변조된 신호이고 보조 빔은 계측기 자체 진동 신호가 계측센서를 거쳐 변조되는 신호로써 이들의 신호를 그림 3에 해당하는 구조로 나타냈다.

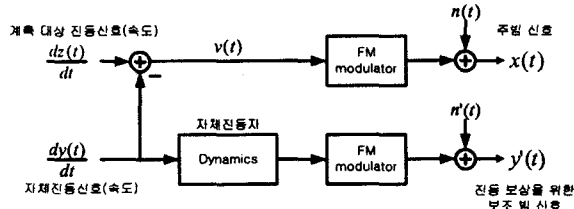


그림 3. 레이저 계측신호 모델 구조도
Fig 3. Modeling of the measured laser signals for LDV

그림 3에서 $\frac{dz(t)}{dt}$ 는 대상체의 절대진동 속도이고, $\frac{dy(t)}{dt}$ 는 진동계 자체의 절대진동 속도이며, $v(t)$ 는 진동계와 대상체의 상대진동 속도이고, $n(t)$ 와 $n'(t)$ 는 부가잡음을 나타내고, $x(t)$ 는 대상체 진동 레이저 변조 신호, 즉 주빔을 나타내고, $x'(t)$ 는 자체 진동 레이저 변조 신호 즉, 보조빔을 나타낸다.

레이저 변조 신호는 도플러 효과에 의해 입력 신호의 속도에 의한 주파수 천이량을 고려한 FM 신호로 취급할 수 있으며 식(1)로 표현할 수 있다[4].

$$x(t) = A \sin\left(2\pi f_c t + \frac{4\pi}{\lambda} \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau\right) + n(t) \quad (1)$$

계측진동 신호 $v(t)$ 는 계측 대상면의 절대 진동 변위 신호 $z(t)$ 와 진동계 자체의 절대 진동변위 신호 $y(t)$ 가 함께 반영된 신호로서 진동계와 진동면 간의 상대적인 속도이며 주 빔에서 복조를 통해 얻어지는 실제 계측신호이다. 식(2)는 계측진동 신호이고, 이때 $S(t)$ 는 계측진동의 변위를 나타낸다.

$$v(t) = \frac{dS(t)}{dt} = \frac{dz(t)}{dt} - \frac{dy(t)}{dt} \quad (2)$$

본 연구의 시뮬레이터에서는 진동 레이저 변조 신호 $x(t)$ 를 식(3)과 같이 샘플링하여 아날로그 이산 신호로 시뮬레이션 하도록 하였다. 이 때 중심 주파수는 실제 계측시스템의 IF 주파수로 설정하였으며 샘플링 비율은 aliasing을 고려하여 IF 주파수의 8배가 되도록 하였다. 식(1)의 아날로그 적분 항에서는 입력 신호를 진동신호의 변위로 하여 cosine 함수의 위상으로 입력시킴으로서 속도를 적분할 경우 발생하는 dc offset에 의한 불안정성을 피하였다. 식(3)에서 중심주파수는 $f_c=1\text{MHz}$ 이고, 샘플링 주기는 $T_s=1/8 \mu\text{sec}$ 이며, 레이저 파장의 길이는 $\lambda=632.8\text{nm}$ 을 사용한다.

$$x[n] = A \sin\left(2\pi f_c T_s n + \frac{4\pi}{\lambda} S(T_s n)\right) + n(T_s n) \quad (3)$$

일반적으로 기계적 진동이나 외부 환경 등에 영향을 받아 발생하는 진동은 주기성을 일정시간 동안 유지하는 파형으로 생각할 수 있으므로 계측 시스템 자체 진동 신호들을 몇 개의 주파수 성분을 가지는 sine 함수들의 조합으로 모델링하였다.

$$y(t) = \sum_{k=1}^N A_k \sin(2\pi f_k t + \theta_k) \quad (4)$$

식(4)의 신호 모델은 실제 진동계에 인가되어 주 빔에 부가되는 신호를 모델링한 것이고, 보조 빔에서 측정되는 진동 신호는 자체진동자를 통해 측정되는 신호인데, 이는 보조 빔의 진동 신호를 자체진동신호가 자체진동자의 dynamics를 통과하여 발생하는 신호로 모델링한 것이다. 자체진동자의 dynamics를 반영한 보조 빔의 진동신호 모델은 정상상태를 가정하여 $y(t)$ 의 각 sine함수 성분에서 크기와 위상을 식(5)와 같이 변환하여 적용하였다.

$$y'(t) = \sum_{k=1}^N A_k |G(j2\pi f_k)| (2\pi f_k)^2 \sin(2\pi f_k t + \theta_k + \angle G(j2\pi f_k)) \quad (5)$$

식(5)에서 $G(s)$ 는 입력이 진동의 가속도이고 출력이 진동센서의 상대적 변위로 정의된 전달함수이므로, 각 sine함수의 크기에 $(2\pi f)^2$ 의 가속도 성분을 반영하여 적용한다.

$G(s)$ 는 고유주파수가 100Hz이고 감쇄지수가 0.707인 2차 프로토타입 시스템으로 설계되어 있으며, 이러한 시스템의 특성은 고유주파수 이하의 주파수 영역 신호에 대하여서 주파수 성분별 이득이 $(1/2\pi f_n)^2$, 위상각이 $\sqrt{2}f/f_n$ 으로 비교적 일정한 특성을 가지고 있어서 입력 가속도 신호에 대하여 일정한 크기의 이득과 시간지연을 가지는 변위 신호를 얻을 수 있는 가속계로서 기능을 수행할 수 있다. 이러한 특성을 반영하여 주파수 성분이 고유주파수 100Hz 이하의 진동신호에 대하여서는 식(6)으로 근사하여 적용할 수 있다. 이때 고유주파수는 $f_n = 100$ Hz에 해당한다.

$$y'(t) \approx \sum_{k=0}^{N-1} A_k \left(\frac{f_k}{f_n} \right)^2 \sin \left(2\pi f_k \left(t - \frac{\sqrt{2}}{2\pi f_n} \right) + \theta_k \right) \quad (6)$$

앞에서 열거한 사항들을 종합적으로 고려하여 보조범의 변조신호를 정리하면 식(7)과 같이 쓸 수 있다.

$$x'[n] = A \sin \left(2\pi f_c T_s n + \frac{4\pi}{\lambda} y'(T_s, n) \right) + n'(T_s, n) \quad (7)$$

2.2.2 복조부

복조부의 주된 기능은 변조된 레이저 신호로부터 PLL 복조를 통해 진동신호를 복원하는 기능이다. PLL은 크게 VCO(voltage controlled oscillator), phase detector, loop filter로 구성되어 있다[5]. 본 연구에서는 이들 각 기능 블록들을 실제 아날로그 회로와 등가인 이산 신호 모델로 변형하여 시뮬레이션에 적용하였다. 그림 4는 적용한 PLL 복조 회로의 전체 시뮬레이션 모델이다.

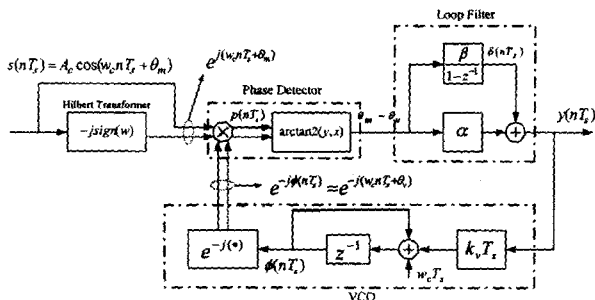


그림 4. 레이저 FM-변조신호의 복조를 위한 PLL 회로의 시뮬레이션 모델의 구성

Fig 4. Simulation model of the PLL module for demodulation of FM-modulated laser signal

입력 신호 위상을 입력신호의 위상과 같은 복소수 지수함수를 만들기 위해 식(8)과 같은 입력 신호에 Hilbert transform을 취하여 cosine 성분을 추출하고 이의 실수 성분을 택한 보조신호 $x[n]$ 을 얻는다.

$$x[n] = A \exp(j\theta_x), \theta_x(n) = 2\pi f_c T_s n + \phi_x(nT_s) \quad (8)$$

$$x_{i1}[n] = A \sin \left(2\pi f_c T_s n + \frac{4\pi}{\lambda} S(T_s, n) \right) + n(T_s, n)$$

$$x_{i2}[n] = A \cos \left(2\pi f_c T_s n + \frac{4\pi}{\lambda} S(T_s, n) \right) + n'(T_s, n)$$

$h[n]$: Hilbert transform filter

위상검출기(phase detector)는 레이저 변조신호와 VCO 출력신호의 위상 차이를 검출하는 기능블록이다. 실제 아날로그 위상검출기는 두 신호를 곱하고 저역통과 필터를 통과시켜 위상오차의 sine 함수를 출력으로 내줌으로써 위상오차를 구하게된다. 본 논문의 시뮬레이터에서는 위상오차를 얻기 위해 VCO의 출력신호에 sine 항에 해당되는 허수성분 신호를 만들어 가상의 복소수 지수함수 $u[n]$ 을 만들어 사용하였다. 식(9)는 $u[n]$ 을 나타내고 있다.

$$u[n] = A_v \cos(\theta_v(n)) + A_v \cdot j \sin(\theta_v(n)) \quad (9)$$

$$\theta_v(n) = 2\pi f_c T_s n + \phi_v(nT_s)$$

VCO의 이산신호 모델은 연속신호 모델의 적분항을 누적기 형태인 식(10)으로 모델링하여 cosine의 입력으로 취함으로써 이루어진다.

$$\phi((n+1)T_s) = \phi(nT_s) + 2\pi k_v v(nT_s) T_s \quad (10)$$

$$\Rightarrow \phi(nT_s) = \phi(0) + 2\pi k_v T_s \sum_{s=0}^{n-1} v(nT_s)$$

$$u[n] = A_v \cos(2\pi f_c T_s n + \phi(nT_s))$$

$$= A_v \cos \left(2\pi f_c T_s n + \phi(0) + 2\pi k_v T_s \sum_{s=0}^{n-1} v(nT_s) \right)$$

VCO의 출력을 $u(t)$, 입력 신호를 $v(t)$ 로 했을 때 입력력 관계를 식(11)과 같이 쓸 수 있다.

$$u(t) = A_v \cos(2\pi f_c t + \phi(t)), \phi(t) = 2\pi k_v \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau \quad (11)$$

VCO출력신호 $u(t)$ 의 주파수는 식(12)에서 나타나듯이 중심 주파수 f_c 를 중심으로 하여 입력 신호에 대하여 k_v 배의 주파수 천이가 발생하는 시스템임을 알 수 있다.

$$f_u(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} (2\pi f_c t + \phi(t)) = f_c + k_v \cdot v(t) \quad (12)$$

복소수 지수함수인 $u[n]$ 과 $x[n]$ 의 곱레 복소수를 곱하면 식(13)와 같이 두 신호의 위상차이만을 가지는 복소수 지수함수가 나오게 되는데, 이의 위상각을 구함으로써 위상검출기를 구현한다.

$$p[n] = A e^{j(2\pi f_c T_s n + \phi_x(nT_s))} A_v e^{-j(2\pi f_c T_s n + \phi_v(nT_s))} = AA_v e^{j(\phi_x(nT_s) - \phi_v(nT_s))} = AA_v e^{j\phi_e(nT_s)} \quad (13)$$

$$\phi_e[n] = \phi_x(nT_s) - \phi_v(nT_s) = \angle p[n]$$

Loop 필터는 PLL의 동작 특성을 조절하는 필터로써 lag 필터, PI 제어 필터 등이 흔히 사용되며 본 연구에서는 넓은 holding range를 갖는 PI 제어기를 적용하였다. 아날로그 PI 필터의 전달함수는 식(14)과 같은 특성을 가진다.

$$H(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (14)$$

K_p : 비례기 이득(proportional gain)

K_I : 적분기 이득(integrator gain)

아날로그 PI 필터의 등가 이산신호 모델은 비례기는 아날로그 비례기 이득과 같이 구현하고, 필터의 적분항을 누산기로 변환하여 구현한다. 누산기는 식(15)과 같이 이산 시스템으로 모델링하였고 적분기이득과 샘플링 간격을 고려한 이득 β 를 도입하여 표현하였다.

$$\begin{aligned} \delta(T_s n) &= \delta(T_s(n-1)) + K_I \cdot T_s \cdot \phi_e(T_s n) \\ &= \delta(T_s(n-1)) + \beta \cdot \phi_e(T_s n) \quad (15) \\ \beta &= K_I \cdot T_s \end{aligned}$$

누산기와 비례기를 합한 등가의 PI 필터의 전달함수는 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L(z) &= a + \frac{\beta}{1-z^{-1}} \quad (16) \\ a &= K_p \quad : \text{비례기 이득} \\ \beta &= K_I \cdot T_s \quad : \text{누산기 이득} \end{aligned}$$

3. 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.

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.

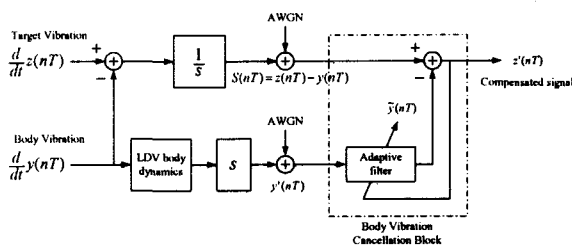


그림 5. LMS 기반의 자체진동 보상 기법의 구성
Fig 5. Modeling of the LMS-based self-compensation mechanism

그림 5는 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 식(5)와 같이 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 구현의 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자체진동 신호 $y'(nT)$ 을 기준 신호로 하는 LMS 알고리즘에 의한 적응필터 기법을 적용하였다[3].

$$\hat{y}(nT) = \mathbf{w}(n) \cdot \mathbf{y}'(nT) \quad (17)$$

$$e(nT) = S(nT) - \hat{y}(nT) \quad (18)$$

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu e(nT) \cdot \mathbf{y}'(nT) \quad (19)$$

$\mathbf{w}(n)$: 필터 계수 벡터

$\mathbf{y}'(nT)$: 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 $\mathbf{w}(n)$ 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.

4. 자체진동 보상 시스템 제작

본 절에서는 본 논문에서 정립한 레이저 계측 시스템의 시뮬레이션 모델을 토대로 제작한 실제 보상시스템에 대해 기술하였다. 자체진동 보상 시스템을 제작하기 위한 시스템 모델링 및 설계상수 도출과정을 이들 결과를 바탕으로 직접 제작한 시스템에 대해 기술하였다.

4.1 자체진동 보상 시스템 모델링

헤테로 방식에 기인하는[4][6] LDV 시스템에서 LDV 자체가 진동하는 측정환경에서는 측정 대상물의 절대 진동량을 추출하기 위해서 LDV 자체의 진동량을 측정하여 LDV 검출신호에서 제거하여야 함으로써 오차가 없는 측정치를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 자체진동을 측정하기 위해 LDV 몸체에 가속도계를 부착하여 LDV의 절대 가속도를 측정하기 위해 측정 대상물의 절대 진동량을 검출할 수 있는 LDV 측정장치를 개발하였다. LDV의 사용하지 않는 여유분 레이저빔을 이용하는 가속도계 형태의 센서인 LDV 결합 진동센서를 이용하여 이를 가능케하였다. LDV 결합 진동센서가 결합된 LDV 진동측정장치의 구조는 아래 그림 6과 같다.

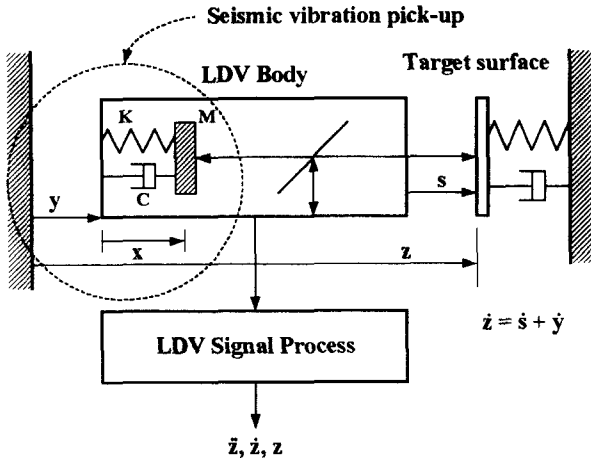


그림 6. LDV 측정시스템 구조
Fig 6. Structure of the LDV measurement system

그림 6에서 좌측 부분의 보조질량(M), 스프링(K), 댐퍼(C) 및 보조질량의 변위를 측정하는 레이저빔으로 구성된 부분이 LDV 결합 진동센서에 해당한다. \dot{s} 는 LDV 신호로써 LDV 몸체와 측정 대상물과의 상대속도에 해당되며, \dot{y} 는 LDV 자체의 절대진동속도를, \dot{z} 는 측정 대상물의 절대진동속도를 나타낸다. 따라서 LDV 신호가 나타내는 속도는 다음 식 (20)과 같다.

$$\dot{s} = \dot{z} - \dot{y} \quad (20)$$

측정 대상물의 절대진동속도 \dot{z} 만을 추출하기 위해서는 \dot{y} 을 측정하여 LDV 신호 \dot{s} 에 합해주어야 한다. 좌측 부분의 LDV 결합 진동센서에서 보조질량 M은 LDV 몸체의 진동에 따라 진동하게되며, 이때의 보조질량의 LDV 몸체 기준 진동속도 \dot{x} 은 여유분 레이저로 측정한다. LDV 결합 진동센서를 사용하는 목적은 정밀한 LDV 자체의 진동속도 \dot{y} 를 측정하는 것이므로, 측정된 \dot{x} 로부터 정밀하게 \dot{y} 를 계속할 수 있어야 된다. 이러한 요구조건을 만족하도록 LDV 결합 진동센서를 설계하여 적용해야 한다. 그림 6의 운동방정식은 식 (21)과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\dot{y} \quad (21)$$

이때 LDV 몸체의 가속도 $\ddot{y}(t)$ 와 보조질량의 상대변위 $x(t)$ 와의 주파수 응답함수는 식 (22)와 같다. 이때 $\frac{C}{M} = 2\zeta\omega_n$ 이고, $\frac{K}{M} = \omega_n^2$ 이며, ζ 와 ω_n 은 각각 댐핑비와 고유진동수를 나타낸다.

$$\frac{X(j\omega)}{Y(j\omega)} = G(j\omega) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\} + j2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}} \quad (22)$$

식 (21)의 주파수 응답특성은 그림 7과 같이 댐핑비가 $\zeta = 0.707$ 이면 LDV 몸체의 진동 주파수 ω 가 고유진동수

ω_n 에 비해 작은 범위에서 이득은 상수 $1/\omega_n$ 에 가까우며, 위상은 주파수에 비례하는 즉, $\phi = \sqrt{2}\omega/\omega_n$ 인 관계를 갖게 된다. 따라서 보조질량의 변위를 측정하여 LDV 몸체의 가속도를 알 수 있다. 단, 측정된 변위는 LDV 몸체 가속도에 대해 $r = \sqrt{2}/\omega_n$ 만큼의 시간지연을 갖는다.

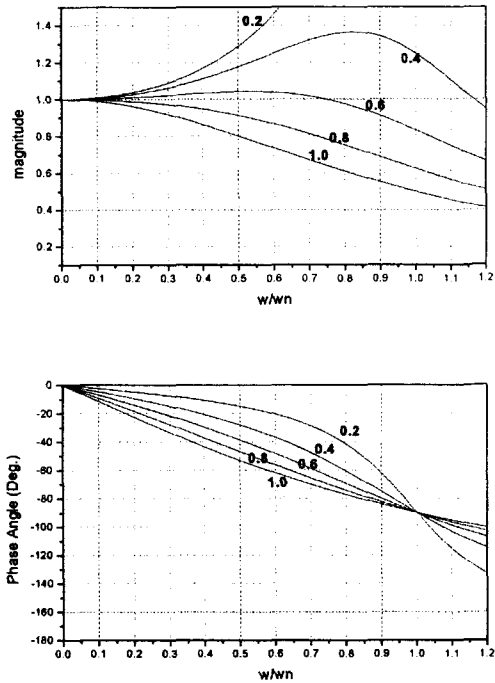


그림 7. 진동 센서의 진폭 및 위상 응답
Fig 7. Amplitude and phase response of the vibration sensor

4.2 자체진동 보상 시스템 제작

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

표 1 실제 시스템 제작에 이용한 설계상수
Table 1. Values of the design parameters for the LDV system

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 7와 같은 주파수 특성을 갖기 위해서는 LDV 몸체의 주파수 ω 에 비해 큰 고유진동수 ω_n 을 갖고, 댐핑비 $\zeta = 0.707$ 가 되도록 설계하였다. 진동환경에서 LDV에 전달되는 진동은 LDV 장치대가 놓이는 부

분에 전달되며, 이 부분의 진동은 50Hz 미만의 비교적 낮은 주파수 성분을 가진다. 따라서 진동센서에서 측정되는 신호가 비교적 LDV 몸체의 가속도에 비례하는 특성이 잘 유지되도록 센서의 고유진동수는 46Hz가 되도록 설계하였다.

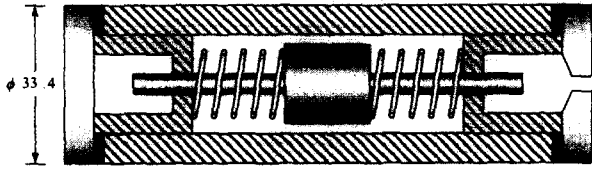


그림 8. LDV 결합 진동 센서의 형태
Fig 8. Shape of the LDV vibration measurement sensor

그림 8은 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 지지 스프링의 탄성에 의해 결정되며, 댐핑비는 실린더 내벽과 피스톤 형태의 보조질량의 외벽 사이의 간격과 그 틈을 통해 유동하는 유체의 점성에 의해 결정된다. 이때 진동계의 물리적량은 다음 식(22)의 관계를 갖는다.

$$\omega_n = \sqrt{k/m}, \quad c = 2\pi\mu L \left\{ \ln R + \frac{1-R^2}{1+R^2} \right\} \quad (22)$$

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, 코일 스프링의 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 충진 및 충진 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 82×33.4×34mm이다.



그림 9. 본 연구에서 제작한 자체진동자
Fig 9. Photograph of the fabricated damper

제작된 센서의 고유진동수 측정을 위해 제작한 자체진동

자에 Impulse Test를 수행한 결과로 얻어진 응답의 스펙트럼은 그림10과 같이 나타난다.

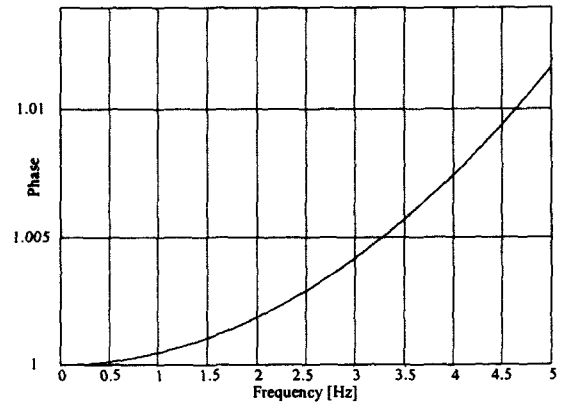
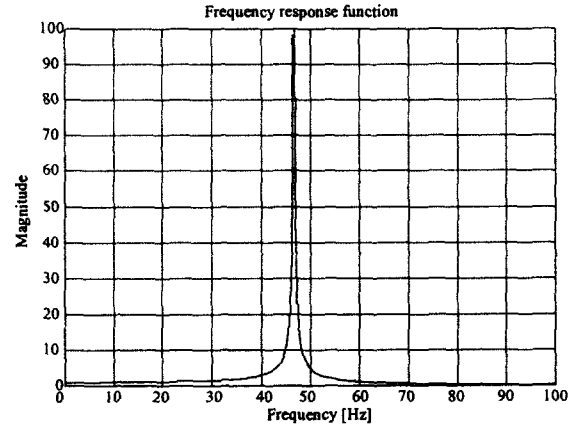


그림 10. 자체진동자의 진폭 및 위상 응답
Fig 10. Magnitude and phase response of damper

그림 10은 $G(j\omega) = \frac{1}{\omega_n^2} \frac{1}{\{1 - (\omega/\omega_n)^2\}}$ 의 임펄스 응답을 나타내는데 시스템의 고유주파수에 해당하는 46Hz의 응답이 결과로 얻어지는 것을 알 수 있다. 이를 통해 시스템의 동작을 확인하였다.

5. 시뮬레이션 및 결과

본 절에서는 본 논문에서 정립한 레이저 계측 시스템 모델링에 이용하는 시스템의 물리량과 특성을 구하기 위해 수행한 시뮬레이션 결과를 기술하였다.

표 2. 진동신호의 주파수 대역에 따른 진동의 종류 구분
Table 2. Classification of vibration according to the range of frequency bands

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	-

앞에서 제시한 진동보상 시스템을 대상으로 하여 시뮬레이션 수행하기 위해 진동의 응용에 따른 진동의 종류를 다음과 같이 계측대상 진동 및 자체 진동 신호를 주파수 대역별로 표 2와 같이 구분하였다.

일반적으로 이동계측 환경에서와 같이 계측 대상체나 계측기 자체가 이동하는 경우의 진동은 10Hz 이하의 저주파 신호로 생각할 수 있으며, 이러한 진동들은 계측기를 운반하거나 계측대상이 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. 이와 같이 구분한 진동신호들을 대상으로한 진동보상 시뮬레이션 결과들을 다음에 제시하였다.

그림 11, 12, 13은 시뮬레이션 결과를 나타내며, 공통적으로 (a)는 대상진동, (b)는 간섭으로 작용하는 자체진동신호, (c)는 대상진동 신호와 자체진동 신호가 복합되어 복조된 신호이며, (d)는 보상된 결과를 나타낸다. LMS 알고리즘을 적용한 진동보상 시뮬레이션 조건은 샘플링 주파수를 50KHz로 설정하였고, 필터 차수는 256개이다. 이때 각 신호들은 변위신호에 해당한다.

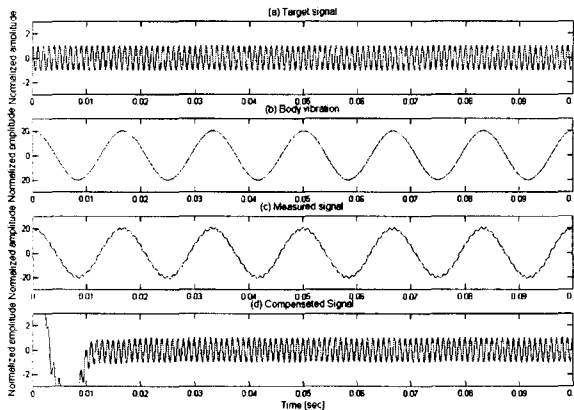


그림 11. 60 Hz 하나의 자체진동하에서 1 KHz 대상진동을 보상한 결과

Fig 11. Simulation results of the vibration compensation (Target signal : 1 KHz tone signal Body vibration signal : 60 Hz tone signal)

그림 11은 1KHz의 대상신호에 기계적 간섭 진동에 해당하는 60Hz의 자체진동이 오차로 작용하는 경우를 보상 기법을 적용한 결과를 나타내었다. 이때 스텝 사이즈는 $4e-7$ 으로 적용하였다.

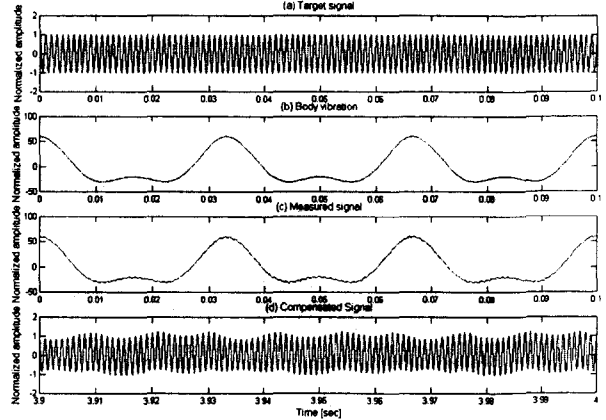


그림 12. 30Hz 와 60 Hz가 결합된 자체진동하에서 1 KHz 대상진동을 보상한 결과

Fig 12. Simulation results of the vibration compensation (Target signal : 1 KHz tone signal Body vibration signal : 30, 60 Hz tone signals)

그림 12는 1KHz의 대상진동에 두 개의 기계적 간섭진동에 해당하는 30Hz와 60Hz의 자체진동이 복합적인 오차로 작용하는 경우에 대하여 보상 기법을 적용한 결과를 보이고 있다. 이때 스텝 사이즈는 $1e-7$ 으로 적용하였다.

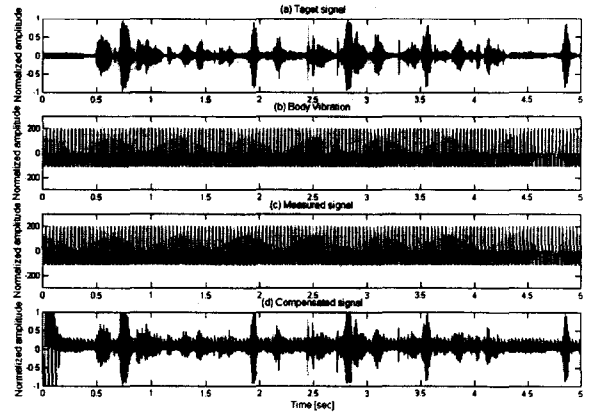


그림 13. 30 Hz 및 60 Hz 두 개의 자체진동하에서 음성신호의 대상진동을 보상한 결과

Fig 13. Simulation results of the vibration compensation (Target signal : Voice signal Body vibration signal : 30, 60 Hz tone signal)

그림 13은 두 개의 간섭신호가 있는 음성에 대하여 보상 기법을 적용한 결과를 나타내었다. 간섭진동에 의해 왜곡된 신호를 스피커를 통해 확인한 결과 진동잡음만 나타났고, 보상된 음성신호는 비교적 양호한 음질을 결과로 보였다. 다양한 입력신호에 대한 시뮬레이션 결과를 통해 제시한 알고리즘이 우수하게 자체진동보상을 수행함을 알 수 있다.

6. 결 론

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. 자체 진동을 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 자체 진동을 보상하여 주는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

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

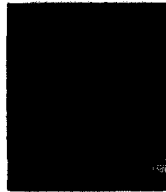
감사의 글

본 논문은 한국과학재단 특정기초 연구 지원에 의해 수행한 연구결과입니다. 관계부처의 지원에 감사드립니다. (과제 번호 : 1999-2-302-015-3)

참 고 문 헌

- [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. 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.
- [3] Simon Haykin, Adaptive Filter Theory, Prentice-Hall, 1996.
- [4] J. Wilson and J. F. B. Hawkes, Lasers Principles and Applications, Prentice-Hall, 1992.
- [5] John G. Proakis, "Digital Communications", McGraw-Hill, 1995
- [6] L. D. Mitchell, K. Kochersberger, and R. L. West, "Measurement of an One-Dimensional Mobility Using a Laser-Doppler Velocimeter," Proceedings of The Society of Experimental Mechanics Spring Conference, Milwaukee, Wisconsin, pp. 846-853, 1991.

저 자 소 개



이 재 식 (李在植)

1975년 7월 1일 생. 1998년 중앙대 제어계측 공학과 졸업. 2000년 중앙대 전자전기공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사 과정.

Tel : 02-820-5318, Fax : 02-812-1293

E-mail : ultrapink@joins.com



장 태 규 (張泰奎)

1955년 11월 13일 생. 1979년 서울대 전기 공학과 졸업. 1981년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1981년-1982년 현대엔지니어링(주). 1982년-1984년 현대전자산업(주). 1987년 University of Florida 전기공학과

졸업(공학). 1987년-1990년 Tennessee State University, Assistant Professor. 1990년-현재 중앙대 전자전기공학부 교수.

Tel : 02-820-5318, Fax : 02-812-1293

E-mail : tgchang@jupiter.cie.cau.ac.kr



김 재 화 (金載和)

1974년 2월 18일 생. 1996년 중앙대 제어계측공학과 졸업. 1998년 동 대학원 제어계측학과 졸업(석사), 2002년 동대학원 제어계측학과 졸업(공학). 2002년~현재 삼성전자(주).

Tel : 031-200-3675, Fax : 031-200-3147

E-mail : jamsoon@intizen.com



김 호 성 (金鎬成)

1957년 10월 4일 생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1992년 SUDY at Buffalo(공학). 1983년~1986년 rmda성전기 기술연구소. 1993년~현재 중앙대 공대 전자전기공학부 부교수

Tel : 02-820-5292, Fax : 02-825-9210

E-mail : hkim@cau.ac.kr



강 민 식 (姜珉植)

1980년 서울대 기계공학과 졸업. 1983년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1987년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학). 1987년-1998년 국방과학연구소 책임연구원. 1998년-현재 경원대 기계공학과 조교수

Tel : 031-750-5524, Fax : 031-750-5273

E-mail : mskang@mail.kyungwon.ac.kr