

광섬유 가속도계 센서의 동적구간 조절을 위한 신호처리 알고리즘 개발

Signal Processing Algorithm for Controlling Dynamic Bandwidth of Fiber Optic Accelerometer

김 대 현

Dae-Hyun Kim

초 록 본 논문은 단자유도 동적 센서 시스템의 동적 구간을 조절할 수 있는 새로운 신호 처리법을 소개한다. 또한 본 논문에서는 무아래 현상을 응용한 신개념의 광섬유 가속도계를 사용하여 신호 처리법을 검증하였다. 신개념의 광섬유 가속도계는 단일 질량, 단일 탄성자 그리고 단일 감쇠자로 이루어진 단자유도 동적 시스템으로서 동적 구간이 작아 이를 증가시키기 위해서는 질량이나 탄성자 상수를 조절하는 등의 기계적 조절이 필요하다. 그러나 본 논문에서 제안한 신호처리 방법을 적용한다면 센서를 다시 제작하지 않고도 동적 구간을 쉽게 조절할 수 있게 된다. 본 논문에서는 여러 모의실험과 실제 실험을 통해 본 신호 처리 알고리즘의 성능을 검증하였으며 결과적으로 이러한 신호처리 알고리즘이 광섬유 가속도계의 동적 구간을 손쉽게 조절할 수 있는 효과적인 방법임을 보여주었다.

주요용어: 구조 건전성 모니터링, 무아래 프린지 응용 광섬유 가속도계, 동적 구간, 신호 처리 알고리즘

Abstract This paper presents a signal processing algorithm to control the dynamic bandwidth of a single-degree-of-freedom (SDF) dynamic sensor system. An accelerometer is a representative SDF sensor system. In this paper, a moire-fringe-based fiber optic accelerometer is newly used for the test of the algorithm. The accelerometer is composed of one mass, one damper and one spring as a SDF dynamic system. In order to increase the dynamic bandwidth of the accelerometer, it is needed to increase the spring constant or decrease the mass. However, there are mechanical difficulties of this adjustment. Therefore, the presented signal processing algorithm is very effective to overcome the difficulties because it is just adjustment in the signal processing software. In this paper, the novel fiber optic accelerometer is introduced shortly, and the algorithm is applied to the fiber optic accelerometer to control its natural frequency and damping ratio. Several simulations and experiments are carried out to prove the performance of the algorithm. As a result, it is shown that the presented signal processing algorithm is a good way to broaden the dynamic bandwidth of the fiber optic accelerometer.

Keywords: Structural Health Monitoring, Moire Fringe Based Fiber Optic Accelerometer, Dynamic Bandwidth, Signal Processing Algorithm

1. 서 론

최근 교량, 고속도로, 대형 빌딩, 및 파이프라인과 같은 산업기반 시설 및 구조물의 상시 감시를

위해 구조물의 진동 특성을 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있으며 또한 이를 위한 새로운 센서 시스템의 개발 연구, 특히 가속도계와 같은 진동형 센서 개발 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 그러나

실제 토목 구조물에 감시 센서를 적용하기 위해서는 토목 구조물이 갖고 있는 거친 환경에서의 생존성을 보장할 수 있어야 하고 실제 가설이 용이해야 한다. 특히 전자기적 환경이 열악한 발전소와 철도 설비들은 기존의 전자기반 센서로는 접근이 용이하지 못하다. 또한 실제 대형 기간 구조물의 경우, 설치되는 센서의 수가 상당히 많고 센서를 연결하는 전선의 길이도 상당히 길어 전자파 차단을 하지 못할 경우 신호 잡음 문제가 심각하다. 따라서 이러한 어려움을 극복하기 위해 최근에는 무선 센서(wireless sensor) 나 광섬유를 이용한 센서 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만 무선 센서의 경우, 전력의 안정적인 공급이 다소 어렵고 신호 전달의 안전성이 떨어져 장시간 감시 시스템으로 제약점이 있다. 반면 광섬유를 이용한 광 센서의 경우, 전자기적 잡음에 영향을 받지 않고 원거리 신호의 전달이 효율적이며 나노 크기의 정밀한 측정이 가능하다[2]. 따라서 토목 구조물과 같은 대형 구조물에 센서 설치가 기존의 전자기 센서에 비해 용이하며 신호의 안정성 및 정밀도가 높아 최근 토목 구조물의 광섬유 센서 적용 연구가 활발히 진행되고 있다[3]. 하지만 대부분의 토목 구조물용 광섬유 센서 연구들은 변형률과 같은 정적 물리량에 치중되어 있으며, 진동과 같은 동적 물리량의 측정 연구는 상대적으로 미비한 실정이다[4,5]. 최근에는 무아래프린지 현상을 이용한 신개념의 광섬유 가속도계 센서가 연구 개발되고 대형 토목 구조물에 적용되어 구조물의 건전성 모니터링 연구에 성공적으로 사용되고 있다[6,7]. 그러나 본 센서의 경우, 동적구간(dynamic bandwidth)이 넓지 않아 소형 구조물이나 고차의 진동모드를 측정하는데 한계점이 있다. 이러한 한계점을 극복하기 위해서는 센서 내부의 질량 혹은 진동자 상수의 조절이 필요하다. 그러나 이러한 기계 부품의 조절은 기존 센서의 설계 변경 및 재제작이라는 비경제적인 요소를 포함한다. 따라서 보다 효과적이고 경제적인 방법으로 신호처리 알고리즘의 개발이 필요하다. 본 논문에서는 신개념의 광섬유 가속도계 센서 및 일반적인 단자유도 시스템의 동적구간을 효과적이고 경제적으로 조절할 수 있는 신호처리 알고리즘을 제안하였다. 또한 새롭게 제한된 신호처리 알고리즘을 앞서 설명한 무아래 현상을 이용한 광섬유 가속도계 센서에 적용하여 신호처리 알고리즘의 효율성 및 성능을 검증하였다.

2. 단자유도 센서 시스템

일반적으로 동특성 값을 측정하는 센서의 경우 질량(mass), 탄성자(spring) 그리고 감쇠기(damper)로 그 내부가 구성된다. 특히 대표적인 동특성 측정 센서인 가속도계의 경우, 단자유도계 진동자 시스템으로서 단일 질량, 단일 탄성자 그리고 단일 감쇠기로 센서 내부가 구성된다. 본 논문에서는 단자유도 시스템으로 구성된 센서의 동적구간을 조절할 수 있는 신호보상 알고리즘을 새롭게 제안하고 이를 이용해 가속도계 센서의 동적구간을 조절해 보고자 한다. 이를 위해 최근 활발히 연구되고 있는 신개념의 무아래 현상 응용 광섬유 가속도계 센서를 이용하였으며 그 센서의 측정원리와 신호처리 방법 그리고 동적구간 측정 실험은 다음과 같다.

2.1. 측정원리

기본적으로 가속도계는 단자유도 동적 시스템으로서 단일 질량 m , 단일 탄성자 k 그리고 단일 감쇠기 c 로 구성된다. 그리고 이러한 단자유도 시스템의 동적 지배방정식은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_0 \quad (1)$$

여기서 u 는 Fig. 1에서 표현된 것과 같이 센서 내부의 진동자 질량과 센서 케이스 사이의 상대 변위 $u_1 - u_0$ 를 나타내며, \ddot{u}_0 는 센서 외부에서 가해지는 가속도이다. 센서 케이스가 측정하려는 구조물에 완벽하게 부착된다면 \ddot{u}_0 는 센서에 의해 측정되는 가속도가 된다.

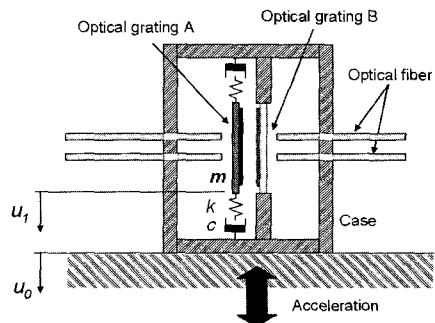


Fig. 1 Conceptual design of novel fiber optic accelerometer

식 (1)은 센서 감지부 내의 질량 m 과 탄성자 k 에 의해 결정되는 고유진동수 ω_0 와 감쇠자의 감쇠 계수 ζ 에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\ddot{u} + 2\omega_0\zeta\dot{u} + \omega_0^2u = -\ddot{u}_0 \quad (2)$$

여기서 $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 이고 $\zeta = \frac{c}{2m\omega_0}$ 이다.

외부로부터 입력되는 진동 ω 에 의해 표현되는 외부의 가속도를 $\ddot{u}_0 = A_{excited}e^{i\omega t}$ 로 가정한다면, 센서 감지부 내부 질량의 상대변위는 $u = D_{response}e^{i\omega t}$ 와 같이 표현 된다. 이때 이론적으로 $D_{response}$ 와 $A_{excited}$ 의 비는 아래와 같은 관계식을 만족 시켜야 한다.

$$\frac{D_{response}}{A_{excited}} = \frac{-1}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\omega_0\omega\zeta} \quad (3)$$

따라서, 센서로 가해지는 가속도와 센서 내부에서 발생하는 진동자 질량의 상대변위 사이에는 일정한 관계가 성립되며, 그 관계는 식 (4)에 표현된 변형 반응 계수 (deformation response factor, R)와 위상 차이 (ϕ)로 다시 표현될 수 있다.

$$R = \left| \frac{D_{response}}{A_{excited}} \right| \cdot \omega_0^2 = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (4)$$

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{2\zeta r}{1-r^2}\right)$$

여기서, 변수 r 은 $r = \frac{\omega}{\omega_0}$ 와 같은 관계에 의해 구해진다.

따라서 센서 감지부 내의 진동자 질량을 작게 하고 탄성자의 탄성계수를 크게 한다면 진동자의 고유진동수 ω_0 을 높게 설계할 수 있다. 이런 상태에서 측정하려는 진동의 주파수가 센서 진동자의 고유진동수에 비해 상대적으로 많이 작다면 식 (4)의 변형 반응 계수 R은 1에 가까워진다. 따라서 측정하려는 외부의 가속도 \ddot{u}_0 는 센서 내부 진동자의 상대변위 u 와 비례관계를 갖게 되어 결국 진동자의 상대변위를 측정함으로써 외부의 가속도를 쉽게 측정할 수 있게 된다. 본 논문에서도 센서 내부 진동자의 상대변위를 측정함으로써 외부의 가속도를 측정할 수 있도록 센서를 설계하였으며, 특히 이

상대변위를 측정하기 위해 새롭게 무아레 측정법과 광섬유 광학 기술이 적용되었다.

Fig. 1은 본 논문에서 제안한 광섬유 가속도계 센서 감지부의 계략도를 보여준다. 그림에서와 같이 센서는 단일 질량, 단일 탄성자 그리고 단일 감쇠자로 구성된 단자유도 시스템이다. 하지만, 기존의 일반적인 가속도계와 다르게, 광섬유 가속도계 센서는 두 개의 광격자판 (optical grating panel)이 센서의 진동자와 센서 케이스에 각각 부착된다. 그리고 네 개의 다중모드 광섬유를 두 개씩 짝을 지어 광격자판에 수직이 되게 정렬시켰다. 두 개의 광섬유는 빛을 내보내는 광원과 나머지 두 개는 광검출기에 각각 연결된다. 결국, 센서 내부 진동자의 상대 변위를 측정하기 위한 새로운 방법으로 광격자판에 의한 무아레 측정법이 적용되고, 이러한 무아레 프린지 변화를 보다 안정적이고 정밀하게 측정하기 위한 방법으로 광섬유 광학 시스템이 새롭게 적용된 것이다.

Fig. 1에서와 같이 두 광격자판 사이의 상대변위는 진동자와 센서 케이스 사이의 상대변위와 동일하므로, 두 광격자판 사이의 상대변위를 측정함으로써 외부로 들어오는 가속도를 측정할 수 있게 된다. 이론적으로 Fig. 2에서와 같이 동일 피치 간격 d 를 갖는 두 개의 광격자판이 미소의 어긋남 각도 θ 를 갖고 서로 평행하게 겹치면 빛이 통과되는 부분과 그렇지 못한 부분이 일정한 주기 D 를 갖고 반복적으로 발생한다[8].

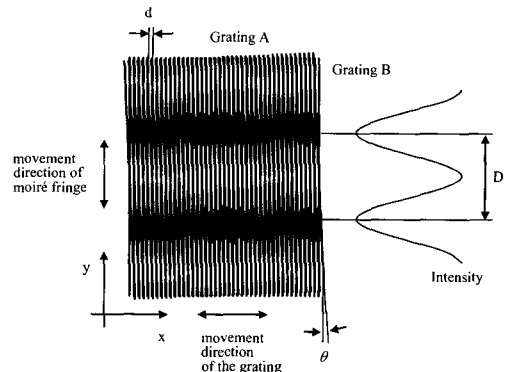


Fig. 2 Moire fringe phenomena with two grating panels

이때 x 방향으로 두 격자판 사이의 상대변위가 발생하면 무아레 프린지는 일정 간격 D 를 유지하며 y 방향으로 이동하게 된다. 이론적으로 x 방향

으로의 상대 변위가 격자판의 피치 간극인 d 만큼 발생하면 무아레 프린지는 프린지 간극인 D 만큼 이동하게 된다. 결과적으로 x 방향의 미소 변위를 y 방향의 대변형으로 인식할 수 있게 된다. 또한 프린지 간극 D 는 관계식 $D=d/\theta$ 와 같이 격자판의 피치 간극 d 와 어긋남 각도 θ 에 의해 결정된다. 따라서 어긋남 각도를 작게 하면 할수록 D 는 점점 커져 더욱 정밀한 측정이 가능하게 되며 이는 센서의 정밀도 향상에 영향을 준다.

결국, 두 격자판 사이의 무아레 프린지 패턴의 변화를 측정함으로써 두 격자판 사이의 상대변위는 측정된다. 그러나 이 상대변위의 방향 변화에 대한 정보는 얻기 힘들다. 따라서 본 논문에서는 상대변위의 크기와 방향을 동시에 검출하기 위해, y 방향으로 $D/4$ 만큼의 사이 간극을 갖는 두 지점에서 동일한 무아레 프린지 패턴의 변화를 동시에 검출하도록 센서 감지부를 설계하였다. 이를 위해 Fig. 1에서와 같이 두 개의 광섬유를 $D/4$ 만큼의 사이 간격을 두고 위치시킨다. 또한 광격자판 반대쪽 역시 두 개의 광섬유를 앞서 설명한 두 광섬유와 정확히 마주하도록 정렬시킨다. 이 경우, 한쪽 광섬유에서 발진한 광원은 무아레 프린지 패턴이 형성된 두 광격자판을 통과하고 광검출기에 연결된 다른 광섬유로 입사되어 광격자판에서 발생한 무아레 프린지 패턴의 변화를 감지하게 된다. 마지막으로 본 논문에서 제안한 신호처리 알고리즘을 이용해 측정된 두 개의 신호를 진동자의 상대변위 크기와 방향 정보로 변환시킨 후, 식 (4)를 이용해 최종의 가속도가 측정된다.

2.2. 센서 기준신호의 가속도 변환 신호처리

Fig. 2에서 처럼 두 광격자판의 상대변위가 한쪽 방향으로 일정하게 증가하면 광섬유로 측정된 빛의 세기는 광섬유의 초점 영역이 유한한 크기를 갖고 있기 때문에 정현파 형태의 신호로 검출된다. 그리고 앞서 설명했듯이 본 논문에서는 Fig. 1에서와 같이 두 개의 광섬유를 사용하기 때문에 동일한 변위 변화에 대해 두 개의 무아레 프린지 변화 신호를 동시에 취득할 수 있게 된다. 이때 두 광섬유의 사이 간극은 무아레 프린지 간극의 4분의 1이 되도록 설계하기 때문에 두 광섬유를 통해 취득된 두 신호는 위상차가 90도 만큼 발생하는 동일한 신호가 된다. 결과적으로 두 신호는 다음의 식 (5)와 같

이 광격자판의 피치간극 d 와 x 방향의 상대 변위 $u(t)$ 를 이용해 사인(sine)과 코사인(cosine) 함수로 표현 된다.

$$\begin{aligned} s_1(t) &= C_1 \sin\left(\frac{2\pi u(t)}{d}\right) + C_2 \\ s_2(t) &= C_3 \sin\left(\frac{2\pi u(t)}{d} + \frac{\pi}{4}\right) + C_4 \\ &= C_3 \cos\left(\frac{2\pi u(t)}{d}\right) + C_4 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 C_1 와 C_2 는 비례상수이며 C_3 와 C_4 는 신호의 DC(direct current) 레벨 값들이다. 식 (5)의 신호들은 정규화(normalization)를 통해 다음의 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{s}_1(t) &= \frac{s_1(t) - C_2}{C_1} = \sin\left(\frac{2\pi u(t)}{d}\right) \\ \bar{s}_2(t) &= \frac{s_2(t) - C_4}{C_3} = \cos\left(\frac{2\pi u(t)}{d}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

상대변위 $u(t)$ 는 식 (6)에 표현된 두 신호를 식 (7)과 같은 관계식에 적용하여 계산될 수 있다.

$$u(t) = \frac{d}{2\pi} \text{unwrap}\left(\arctan\left(\frac{\bar{s}_1}{\bar{s}_2}\right)\right) \quad (7)$$

여기서 함수 unwrap 은 arctangent 함수 결과의 위상각 불연속점들을 서로 연결해 주는 역할을 하게 된다. 결국, 식 (7)을 통해 얻어진 상대변위 $u(t)$ 는 식 (4)에 나타난 것과 같이, 센서의 동적 인자(parameter)인 고유진동수와 감쇠 계수를 이용해 최종적인 외부의 가속도로 변환 될 수 있다.

2.3. 동적구간 측정 실험

2.1절 측정 원리에서 설명했듯이 센서로부터 측정된 상대변위를 실제 가속도로 변환해 주기 위해서는 센서 내부 단자유도 시스템의 고유진동수와 감쇠계수를 이용해야 한다. 따라서 본 연구에서 개발한 시제품 센서 감지부 역시 실제 가속도계 센서로 사용되기 위해서는 우선 센서 자체의 고유진동수와 감쇠계수를 측정해야 한다. 본 연구에서는 이들 두 개의 센서 인자(parameter)를 측정하기 위해 진동테이블(shaking table) 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 기준 가속도계 센서와 개발된 광섬유 가속도계 센서를 동시에 사용하여 2.1절에서 설명

한 $|D_{response}/A_{excited}|$ 를 측정하였다. 이를 통해 얻어진 $|D_{response}/A_{excited}|$ 값과 식 (4) 이용해 얻을 수 있는 두 변형 반응 계수 값을 서로 잘 일치시킬 수 있는 고유진동수와 감쇠계수를 trial and error 방법을 이용해 찾아냈다.

2.3.1. 실험 과정

Fig. 3에서처럼, 본 연구에서 개발된 시제품 광섬유 가속도계 센서와 기준 센서 (Tokyo Sokushin Co., Servo Accelerometer AS-3257)를 진동테이블 (Shaker: APS-Dynamics, model 113)에 부착하였다.

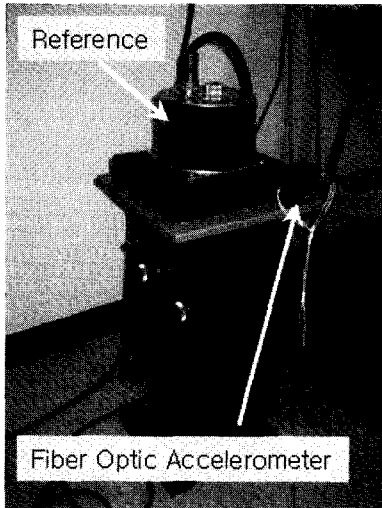


Fig. 3 Performance test of FOA with shaking table

본 연구에서 사용한 기준 센서는 진동자 서보 (servo) 제어 방식의 센서로서 동적구간이 DC-250 Hz로 충분히 큰 센서이다. 그림에서와 같이 두 센서를 장착한 후에 신호 발전기 (function generator)를 이용해 여러 주파수대의 정현파 신호를 진동 테이블에 입력시켜 센서에 진동을 가하였다. 본 실험에서 사용한 주파수는 1.0 Hz, 5.0 Hz, 10.0 Hz, 15.0 Hz, 20.0 Hz, 22.0 Hz, 24.0 Hz, 30.0 Hz, 40.0 Hz, 50.0 Hz 그리고 60.0 Hz로 진동테이블을 다양한 주파수로 가진 시켰다. 각각의 주파수에서 5회의 반복 실험을 수행하였으며, 실험을 통해 각 주파수에 따른 $|D_{response}/A_{excited}|$ 을 측정하였다. 참고로 정밀한 실험을 위해 고성능 오

실로스코프(Tektronix, TDS5034B)를 이용해 센서의 신호를 취득하였다.

2.3.2. 실험 결과와 토의

Fig. 4는 실험과 이론식을 통해 얻어진 주파수의 변화에 따른 센서의 변형 반응 계수 R의 변화를 보여주고 있다. 개발된 광섬유 가속도계 센서의 고유진동수와 감쇠계수를 찾기 위해 실험을 통해 구해진 변형 반응 계수와 식 (4)를 통해 구해진 이론식을 비교하였다. 두 개의 결과를 얻기 위해 임의의 고유진동수와 감쇠계수를 이용하였으며 trial and error 방법을 통해 실험 값과 이론 값을 서로 잘 일치시킬 수 있는 고유진동수와 감쇠계수를 찾아냈다. Fig. 4에서 보는 것과 같이, 고유진동수 22.23 Hz 와 0.06 의 감쇠계수를 이용할 경우, 실험 결과와 이론 값이 정확히 일치함을 확인할 수 있었다. 이 같은 실험을 통해, 본 연구를 통해 개발된 광섬유 가속도계 센서의 고유진동수와 감쇠계수를 성공적으로 찾아낼 수 있었다. 또한 각 주파수에 따른 5회의 반복 실험을 통해 최대 표준편차가 1% 이내임을 확인하였으며 이를 통해 실험의 재현성을 검증하였다.

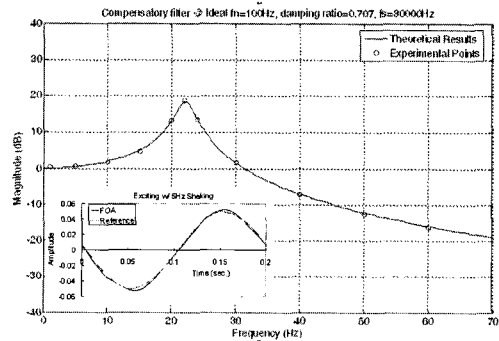


Fig. 4 Comparison of measured and theoretical deformation response factors

Fig. 4를 통해 변형 반응 계수가 1에 가깝고 동시에 선형성이 보장되는 동적구간을 측정된 결과, 5 Hz 미만의 범위에서 실제 가속도와 개발된 광섬유 가속도계로 측정된 가속도 사이의 오차가 5% 미만으로 발생하고 선형성 또한 보장됨을 확인하였다. 결과적으로 개발된 광섬유 가속도계 센서가 5 Hz 미만의 임의의 가속도를 5% 미만의 오차를 갖고 정확히 측정할 수 있음을 검증하였다. 이 같

은 동적구간은 5 Hz 미만의 고유 진동수를 갖는 매우 큰 토목 기간구조물의 모니터링을 위해 적당하다고 할 수 있다. 그러나 보다 다양한 구조물에 개발된 광섬유 가속도 센서를 적용하기 위해서는 측정된 동적구간이 충분하지 않다. 따라서 이러한 동적구간을 늘리기 위해 선서 내부의 질량을 줄이거나 스프링상수를 늘려야 한다. 그러나 이러한 물리적 방법은 많은 비용과 시간이 필요하다. 본 논문에서는 실시간 주파수 보상 알고리즘을 개발하여 보다 효율적으로 동적구간을 조절하였다.

3. 주파수 보상 알고리즘

3.1. 주파수 보상 필터 설계

본 논문에서 개발한 광섬유 가속도계 센서 시스템은 단자유도 진동자 시스템으로서 내부 질량의 상대 변위(U_n)를 일정한 시간 간격 (ΔT)으로 측정할 경우, 아래와 같이 상대변위를 표현할 수 있다.

$$U_1, U_2, \dots, U_{n-1}, U_n, U_{n+1}, \dots$$

그리고 본 논문에서 제안한 필터를 통과한 후의 가상의 상대변위 (V_n)도 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$V_1, V_2, \dots, V_{n-1}, V_n, V_{n+1}, \dots$$

여기서 두 변위는 단진자 단자유도 시스템에 의해 결정되므로 아래와 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{U} + 2\omega_0\zeta_0\dot{U} + \omega_0^2 U &= -\ddot{U}_0 \\ \ddot{V} + 2\omega_1\zeta_1\dot{V} + \omega_1^2 V &= -\ddot{U}_0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 ω_0 와 ζ_0 는 필터 통과 전 단진자 시스템의 고유진동수와 감쇠계수를 나타낸다. 그리고 ω_1 와 ζ_1 는 필터 통과 후의 고유진동수와 감쇠계수를 나타낸다. 식 (8)은 수치 해석의 방법을 이용하여 아래와 같이 변환될 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{U_n - 2U_{n-1} + U_{n-2}}{\Delta T^2} + 2\omega_0\zeta_0 \frac{U_n - U_{n-2}}{2\Delta T} + \omega_0^2 U_n \\ = \frac{V_n - 2V_{n-1} + V_{n-2}}{\Delta T^2} + 2\omega_1\zeta_1 \frac{V_n - V_{n-2}}{2\Delta T} + \omega_1^2 V_n \end{aligned}$$

(9)

여기에 다음의 식 (10)에 정의한 매개변수들을 식 (9)에 대입하면 식 (11)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \omega_0 \cdot \Delta T, \quad \lambda_1 = \omega_1 \cdot \Delta T \\ K_0 &= \frac{\zeta_0}{\lambda_0}, \quad L_0 = \frac{\zeta_1}{\lambda_1} \end{aligned} \quad (10)$$

$$K_1 = \frac{1}{\lambda_0^2}, \quad L_1 = \frac{1}{\lambda_1^2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_0^2}{\Delta T^2} [(1 + K_0 + K_1) U_n - 2k_1 U_{n-1} \\ + (K_1 - K_0) U_{n-2}] \\ = \frac{\lambda_0^2}{\Delta T^2} [(1 + L_0 + L_1) V_n - 2L_1 V_{n-1} \\ + (L_1 - L_0) V_{n-2}] \end{aligned} \quad (11)$$

또한 식 (11)에 상대변위와 가속도의 관계식인 $X=U^*\omega_0^2$ 와 $Y=V^*\omega_1^2$ 을 대입하면 아래의 같은 식 (12)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} (1 + K_0 + K_1) \cdot [X_n - \frac{2k_1}{1 + K_0 + K_1} X_{n-1} \\ + \frac{K_1 - K_0}{1 + K_0 + K_1} X_{n-2}] \\ = (1 + L_0 + L_1) \cdot [Y_n - \frac{2L_1}{1 + L_0 + L_1} Y_{n-1} \\ + \frac{Y_1 - Y_0}{1 + L_0 + L_1} Y_{n-2}] \end{aligned} \quad (12)$$

최종적으로 위의 식 (12)를 Y_n 으로 정리하면 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_n &= -a_1 \cdot Y_{n-1} - a_2 \cdot Y_{n-2} \\ &+ \varphi \cdot [X_n + b_1 \cdot X_{n-1} + b_2 \cdot X_{n-2}] \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 매개변수 a_1, a_2, b_1, b_2 , 그리고 φ 는 식 (14)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{-2L_1}{1 + L_0 + L_1}, \quad a_2 = \frac{L_1 - L_0}{1 + L_0 + L_1} \\ b_1 &= \frac{-2K_1}{1 + K_0 + K_1}, \quad b_2 = \frac{K_1 - K_0}{1 + K_0 + K_1} \\ \varphi &= \frac{1 + K_0 + K_1}{1 + L_0 + L_1} \end{aligned} \quad (14)$$

결국, 식 (14)에서와 같이 주파수 보상을 위한 실시간 처리 필터를 정의할 수 있다. 또한 이렇게 정의된 필터를 이용할 경우, 필터 통과 후의 값 (Y_n)은 그 이전의 값들 (Y_{n-1} , Y_{n-2})과 필터 통과 전에 취득한 값들 (X_n , X_{n-1} , X_{n-2})을 이용해 수치 해석적으로 계산된다. 따라서 가상의 고유진동수와 가상의 감쇠계수를 이용해 가상의 단자유도 진동자 시스템으로의 변환이 가능해진다. 본 논문에서도 이미 결정된 광섬유 가속도계의 고유진동수와 감쇠계수에 식 (14)의 필터를 적용하면 사용자가 원하는 고유진동수와 감쇠계수를 갖는 가속도계 시스템으로 변환이 가능하다. 이는 센서의 동적구간을 보다 쉽게 조절할 수 있음을 의미한다. 그러나 본 알고리즘은 inverse filter로서 시스템을 완벽하게 알고 있고 그것이 전혀 변동이 없을 때에는 잘 작동할 수 있으나 약간의 동특성이 변하거나 노이즈가 개입되면 문제가 많을 수 있는 제약점을 갖고 있다.

3.2. 컴퓨터 모의실험을 통한 신호처리 알고리즘 검증

3.1절에서 정의된 식 (14)를 이용해 컴퓨터 모의 실험을 수행해 보았다. 본 논문에서는 상용 프로그램 Matlab을 이용해 3.1절에서 설명한 알고리즘을 이용한 필터를 제작하였으며 본 필터에 사용된 가상의 고유진동수와 감쇠계수는 100 Hz 와 0.707로 정하여 사용하였다. 이들은 제작된 광섬유 가속도계가 22.23 Hz 의 고유진동수와 0.06 의 감쇠계수 값을 갖고 있어 동적구간이 매우 작아 이를 30 Hz 정도로 확장하기 위해 결정된 가상의 값들이다.

수치해석의 특성상 제작된 광섬유 가속도계로부터 취득하는 가속도의 시간 간격 즉 취득 속도 (sample rate)에 최종 결과가 영향을 받게 된다. Fig. 4는 취득 속도 300 Hz, 3 kHz 그리고 30 kHz 에 따라 필터를 통과한 보상 값들이 어떠한 차이를 발생시키는 지 보여주고 있다. 정확한 비교를 위해 실제 100 Hz의 고유진동수와 0.707의 감쇠계수를 갖는 이상 가속도계 (ideal accelerometer)의 결과 값과 비교하였다. Fig. 5에서와 같이 취득 속도가 커짐에 따라 보상 값들이 이상 가속도계의 값들에 점점 더 근접함을 알 수 있다. 최종적으로 30 kHz의 취득 속도에서 보상 필터를 사용한 결과가 이상 가속도계의 결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 보상 필터의 성능이 우수함을 나타낸다.

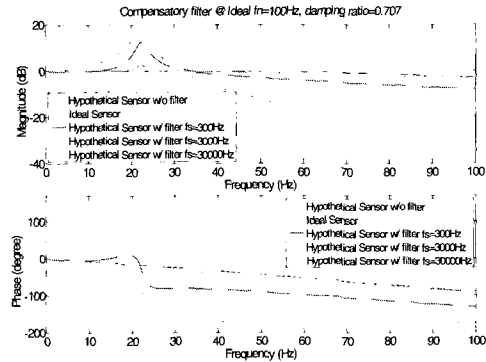


Fig. 5 Simulation of compensatory algorithm filter w.r.t sample rate

3.3. 실험을 통한 신호처리 알고리즘 검증

3.2절에서의 결과를 통해, 본 논문에서 새롭게 제안한 신호처리 알고리즘이 단자유도 센서 시스템의 동적구간을 어느 정도 효과적으로 조절할 수 있는지 확인하였다. 이러한 성능을 보다 확실히 검증하기 위해 실제 광섬유 센서의 신호처리 부분에 동적구간을 조절할 수 있는 신호 처리부를 추가하였다. 그리고 이렇게 작성된 신호 처리부를 이용하여 2.3절의 실험을 다시 수행하였고 이전의 실험결과와 비교해 보았다. 다음의 Fig. 6에서와 같이, 본 논문에서 새롭게 제안한 신호처리 알고리즘을 사용할 경우 센서의 동적구간이 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 또한 실험 결과 값들이 이론값들에 매우 근접함을 확인할 수 있다. 결론적으로 본 논문에서 새롭게 제안된 신호처리 알고리즘이 센서의 동적구간을 성공적으로 조절한다는 사실을 검증할 수 있었다.

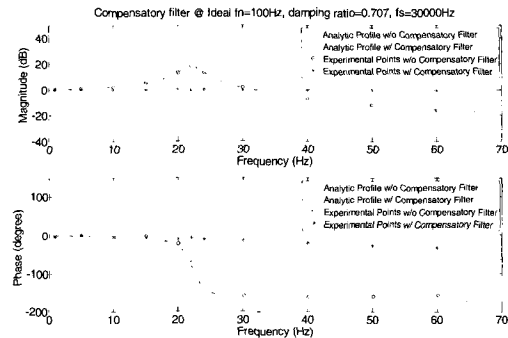


Fig. 6 Comparison of experimental results with simulations

4. 결론

본 논문에서는 대형 기간 구조물 및 토목 구조물의 건전성 모니터링을 위한 신개념의 광섬유 가속도계 시스템을 소개하였다. 제안된 가속도계 시스템의 센서 헤드부는 단진자 단자유도 시스템으로 구성되며 센서의 특성 값인 동적구간 역시 단진자 시스템의 기계적 특성 값에 의해 결정된다. 특히 본 논문에서는 이러한 기계적 특성 값의 변경 없이 센서의 동적구간을 조절할 수 있는 신호처리 알고리즘을 새롭게 제안하였다. 본 논문에서 사용된 센서의 경우, 22.23 Hz의 고유 진동수 그리고 0.06의 감쇠 계수를 갖고 있었으며 새롭게 제안한 신호처리 알고리즘을 이용해 100 Hz의 고유진동수 그리고 0.707의 감쇠 계수를 갖는 가상의 센서로 변환시킬 수 있다. 이를 통해 5 Hz 정도의 초기 동적구간을 기계적 장치의 교체 없이 30 Hz 까지 성공적으로 확대시킬 수 있었다. 또한 주파수 보상 시스템의 구현과 이때 사용되는 취득 주파수와 보상 시스템의 성능의 상관관계를 다양한 컴퓨터 모의실험을 통해 성공적으로 검증하였다.

후 기

본 연구는 서울산업대학교 신임교수연구지원사업의 지원을 받아 진행되었습니다. 그리고 저자는 본 연구를 수행할 수 있는 기회를 주신 University of California Irvine 의 Maria Q. Feng 교수에게 감사드리며 실제 소프트웨어를 구현하기 위해 많은 도움을 준 Yoshio Fukuda 박사에게 감사를 전합니다.

참고문헌

- [1] M. Q. Feng and J. M. Kim, "Identification of a dynamic system using ambient vibration measurements," *Journal of Applied Mechanics (ASME)*, Vol. 65, No. 2, pp. 1010-1023, (1998)
- [2] 박상욱, 김대현, 김천곤, "광섬유 EFPI 센서를 이용한 나노 이송장치의 개발", *센서학회지*, 제 14권, 제5호, pp. 302-307, (2005)
- [3] Hong-Nan Li, Dong-Sheng Li and Gang-Bing Song, "Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering," *Engineering Structures*, Vol. 26, pp. 1647-1657, (2004)
- [4] Dae-Hyun Kim, Bon-Yong Koo, Chun-Gon Kim and Chang-Sun Hong, "Damage detection of composite structures using a stabilized extrinsic fabry-perot interferometric sensor system," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 13, No. 3, pp. 593-598, (2004)
- [5] Kazuro Kageyama, Hideaki Murayama, Isamu Ohsawa, Makoto Kanai, Keiichi Nagata, Yuichi Machijima and Fumio Matsumura, "Acoustic emission monitoring of a reinforced concrete structure by applying new fiber-optic sensors," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 14, S52S59, (2005)
- [6] 김대현, Maria Q. Feng, "토목구조물 건전성 모니터링을 위한 무아레 프린지 기법 광섬유 가속도계 시스템 개발", *한국센서학회지*, 제15권, 제1호, pp. 40-46, (2006)
- [7] 김대현, "Ambient vibration-measurement of real building structure by using fiber optic accelerometer system," *한국비파괴검사학회지*, 제26권, 제6호, pp. 373-379, (2006)
- [8] Daniel Post, Bongtae Han and Peter Ifju, *High Sensitivity Moire*, Springer-Verlag., New York, (1994)