

주행 하중에 의한 교량 변위 계측에서 영상 변위와 가속도 이중 적분의 조합에 관한 연구

A Study on the Combination of Vision-Based Displacement and Double Integration of Acceleration in Displacement Measurement of Bridge under Moving Load

이형진*

Hyeong-Jin Lee*

〈Abstract〉

Recently, vision-based displacement(VBD) has been attracting attention as a convenient and economical method. VBD has the advantage of being easy to install and operate, but it also has the disadvantage of being difficult to obtain results that reflect high-frequency characteristics well. On the other hand, indirect displacement measurement through double integration of acceleration may in some cases result in distortion in the low-frequency region, making integration itself impossible. Therefore, neither can be a suitable method alone for measuring the dynamic displacement of bridges under moving loads. In this context, this paper studies how to obtain more accurate dynamic displacement responses of bridges over the entire frequency range by combining two methods, VBD and acceleration integration. The practical applicability was examined through simulation and model experiments. The simulation results show that both basic methods have fundamental limitations in each frequency range, while the combined method can be an good alternative to overcome these limitations. The applicability of the combination method through model experiments also showed relatively good results, but the results were inferior to those in the theoretical case. The reason is that errors in each basic measurement methods are transferred to the combined method. In other words, it is important that the basic measurement method also secures sufficient accuracy at least in each advantageous

* 교신저자, 정회원, 창원대학교 공과대학 스마트 그린공학부
건설시스템공학전공, 교수
E-mail: leehjn@changwon.ac.kr

* Dept. of Civil Engineering, School of Smart & Green
Engineering, Changwon National University
E-mail: leehjn@changwon.ac.kr

frequency band. In conclusion, combining the strengths of different methods to create a better alternative is always a good approach, and the method in this paper is meaningful in that it demonstrates one such alternative.

Keywords : Displacement Measurement, Bridge, Moving Load, Vision-Based Displacement, Double Integration, Acceleration

1. 서론

사회 기간 시설물의 유지관리와 보수, 보강의 역할이 커짐에 따라 계측을 통한 보다 정확한 현장 데이터 확보의 필요성도 증대되고 있다.

사회 기간 시설물 중에서도 교량은 모니터링(Monitoring)이 필요한 대표적인 핵심 구조물이다. 교량 모니터링에서 계측되는 응답으로는 변형율, 변위(Displacement), 가속도(Acceleration) 등이 있고, 이 중에서 변형율과 변위는 교량의 정적, 강성 특성 분석에 적합하며 가속도는 교량의 동적, 관성력 특성 분석에 더 적합한 특징이 있다.

또한 교량 모니터링에서의 핵심 항목 중 하나가 주행 하중(Moving load, Vehicle load)에 대한 것이다[1-3]. 주행 하중에 따른 변위, 가속도의 응답 해석과 계측은 교량의 실제 상태 분석에서 매우 중요한 사항이라 할 수 있다. 특히 변위 계측은 구조 강성(안전성) 분석 측면에서 더욱 중요한 데이터라 할 수 있다. 변위 계측은 고전적인 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer) 방법[3] 외에도 레이저, 영상 변위(Vision-based displacement)[4-5], GPS(Global Positioning System) [6-7] 등의 다양한 계측법이 사용되고 있다. LVDT 방법은 전문 변위 계측기로서 정확도가 우수하나 변위 영점에서 계측 점까지 추가 시설이 필요하다는 등의 단점으로 간편한 사용이 어려운 측면이 있다. 이에 따라 영상 변위 등의 광학적 계측이 편의성 측면에서 주목받고 있으나 이들 계

측도 정밀 계측의 경우에는 장비 비용이 급격히 커지는 문제와 적절한 광학 환경이 전제되어야 한다는 문제점이 있다. GPS 방법 또한, 구조 변형 수준의 정밀도 확보에 어려움이 있고, 수직 변형 계측에서는 추가 장비가 필요하다는 등의 문제점이 있다고 알려져 있다. 영상 변위와 GPS 변형 계측의 공통된 문제로는 고속, 고해상도 계측의 어려움이 있어 저주파수 영역 위주의 계측이 주를 이루고 있다는 점이다.

직접 변위 계측 방법들이 가지는 작업 난이도 문제나 불편성, 비용 문제 등에 대한 대체 방안으로 가속도 계측 후 이를 이중 적분(Double integration)하는 간접적인 변위 계측법이 있다[5-11]. 이 방법은 직접적인 변위 계측이 어려운 지진 변형 계측 분야 등에서 주목을 받는 연구이기도 하다[5, 11]. 그러나, 이 방법도 이론적 타당성과는 별개로 실제 작업에는 많은 어려움이 있다. 특히 주행 하중 변위와 같이 준 정적 성분(Quasi-static, 저주파수 성분)이 지배적인 경우는 더욱 많은 문제점이 있는 것이 현실이다. 그 이유는 이중 적분은 저주파수 영역을 크게 증폭시키는 과정으로, 저주파수 잡음(Noise)도 같이 증폭되어 구해진 변위의 저주파수 영역이 크게 왜곡되기 때문이다. 즉, 저주파수 성분이 지배적인 주행 하중 변위의 주된 변위 성분을 왜곡시킨다는 뜻이 된다. 이런 문제로 주행 하중 변위 계측에서는 가속도 적분법은 변위 획득의 유일한 방법으로 사용하기는 어렵다는 뜻이다.

이런 배경에서 이 논문에서는 비교적 사용이 편리하고 고주파수 계측에는 어려움이 있는 영상 변위 계측을 저주파수 변위 확보를 위한 방법으로 사용하고, 가속도 적분을 통해 영상 변위 계측에 부족한 고주파수 성분을 보충하는 방식에 관해 연구하였다.

논문의 검증에 위해 단경간 교량을 대상으로 모의실험(Simulation) 결과를 이용하여 이론적 특성을 분석하였고, 모형실험으로 실제 적용에 따른 문제점도 검토하였다.

2. 동적 변위 계측 방법들에 대한 고찰

일반적으로 변위 계측은 직접 변위를 계측하는 직접법과 가속도 계측 후 이를 이용하여 변위를 구하는 간접법으로 나눌 수 있다. 이 논문의 전개를 위해 이를 간략히 정리하였다.

2.1 직접 변위 계측법의 종류 및 특성

변위 계측법으로 가장 보편적인 방법이 LVDT를 이용하는 방법이다. LVDT는 전문적인 변위 계측기로 계측 자체의 정확도는 우수하나, 변위 영점에서 계측 위치까지의 장치가 필요하다는 설치의 어려움이 있다.

LVDT의 단점인 직접 접촉 방식을 탈피하여 원거리 영점으로부터 레이저를 쏘아 그 반사파를 이용하는 방식이나 영상 촬영을 이용하는 방식인 광학 계열 변위 계측은 최근 주목 받는 방법으로 실제 사용 사례도 늘고 있다[4-5]. 영상 변위 계측법의 가장 큰 장점은 비접촉식 계측이라 복잡한 설치 작업이 필요 없다는 점이지만, 계측 광학 환경과 장비의 기능에 크게 영향을 받는다는 단점도 있다. 광학 환경에 따라 계측의 편차가 크고, 정밀 장비일수록 비용이나 작업의 어려움이 급격히

상승할 수 있다.

관성항법장치(INS; Inertial Navigation System)가 자이로(Gyro)와 가속도 계측 후 이를 적분하여 위치(변위)를 찾아내는 큰 단위의 간접적 변위 계측이라 하면, GPS 방법은 위성을 이용한 직접 변위 계측법으로 비유될 수 있다[6-7]. 단점은 큰 단위의 계측법이라 교량의 변위 계측과 같은 정밀 작업에 부족함이 있을 수 있고, 수직 변위 계측에 따른 문제 등도 있다.

2.2 가속도 적분을 통한 간접 변위 계측법

직접 변위 계측을 위한 다양한 고정밀 계측기기의 개발이 진행됨과 더불어, 간편법으로 가속도를 계측하고 이를 이중 적분하여 변위로 산정하는 방법도 꾸준히 연구되고 있다[5-11]. 그러나 이 방법은 주행 하중과 같이 준 정적 성분(저주파수 성분)이 지배적인 경우는 수치 적분에 큰 문제가 발생할 가능성이 있다.

이중 적분(변위 계측)은 기본적으로 Fig. 1에서와 같이 저주파수 영역을 크게 증폭하는 과정이고 이중 미분(가속도 계측)은 고주파수 영역을 증폭하는 과정이라 할 수 있다.

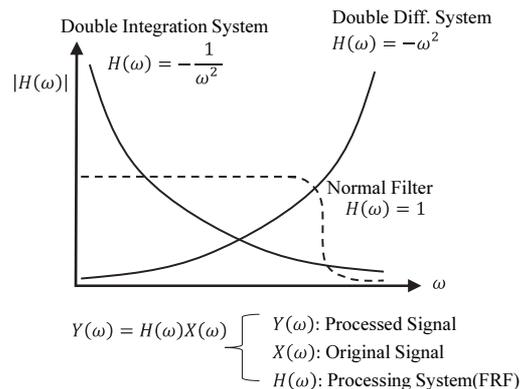


Fig. 1 FRFs(Frequency Response Functions) of double integration, differentiation and normal Filter

즉, 계측 가속도는 저주파수 영역에서 상대적으로 주 신호가 작은 상태라 신호 대 잡음비(SNR, S/N ; Signal-to-Noise Ratio)가 작은, 잡음이 큰 상태가 된다. 이것이 이중 적분으로 저주파수가 크게 증폭 되면(OHz 경우, $1/0=\infty$) 주행 하중 변위의 가장 주된 신호 부분을 크게 왜곡하는 결과가 된다.

더 정확히 표현하면, 모든 주파수 대역에서 일정한 잡음(백색잡음; White noise)에 대해서는 가속도 저주파수 영역에서도 상대적으로 주 신호가 커서 그나마 왜곡이 작을 수도 있다. 그러나 실제 계측에서의 가속도 저주파수 잡음은 크기가 더 크고 별도의 경향성이 있는 유색잡음(Colored noise) 형태를 가지기 때문에 회피하기 어려운 문제가 된다.

대표적인 저주파수 영역의 유색잡음으로는 실제 계측에서 종종 목격되는 상수(Constant)나 선형 오프셋(Linear offset, $at + b$)이 있다. 보통 이런 오프셋은 신호처리를 통해 걸러내어 문제를 줄이게 되어 큰 문제를 유발하지 않지만, 저주파수 성분이 지배적인 주행 하중의 경우에는 주된 신호와 뒤섞여 걸러내기 어려운 잡음이 된다.

이런 문제는 시간영역 적분에서는 종종 초기치 오류의 문제로 취급되기도 한다[8-10]. 상수나 선형 오프셋은 주파수 함수에서 0 주파수 주변의 값으로 시간 함수로는 가속도 초기치나 속도 초기치가 되니, 초기치 오류의 문제와 일맥상통한다고 할 수 있다.

이런 문제에 대한 대응으로, 저주파수 특성이 더 좋은 가속도계를 사용하거나, 적분 알고리즘의 개선을 통해 해결하려는 연구가 이루어져 왔으나 아직은 한계가 있어 보인다.

2.3 효과적 주행 하중 변위 계측을 위한 영상 변위 및 가속도 적분법의 조합법

앞의 설명과 같이 변위 계측은 저주파수 특성

이 좋고, 가속도 계측은 고주파수 특성이 좋으며 적분 후에도 고주파 영역의 왜곡은 적은 편이다. 반면 영상 변위나 GPS 변위는 저주파 특성은 대체로 우수하나, 저속 촬영의 문제로 고주파수에서는 성능이 상당히 떨어지는 문제가 있다. 이런 점은 고속 주행에 의한 변위에서와 같이 상당한 고주파수 성분을 취급해야 하는 경우 매우 곤란한 문제가 된다.

영상 장비 저해상도에 기인한 오차는 일반적으로 잡음으로 취급하여 고주파수 필터링을 통해 어느 정도 걸러낼 수 있다. 이 경우 영상 변위도 변위이기 때문에 특성이 있어 저주파수가 지배적인 상태이므로, 고주파수 필터링으로 남게 되는 저주파수 잡음은 상대적으로 작아 충분히 의미 있는 변위를 획득할 수 있다. 다만, 이렇게 잘려 나간 고주파수 변위에는 동적 증폭이나 구조물 손상 정보 등의 중요 정보가 포함되어 있을 수 있다는 것이 문제이다. 따라서, 좀 더 정교한 변위를 획득할 필요가 있는 경우에는 고주파수 정보를 보충할 방법이 필요하다.

그러므로 저주파수에서는 이 영역에서 우수성을 가진 편리한 변위 계측을 직접 이용하고, 고주파수에서는 가속도 이중 적분을 사용하면 보충하면

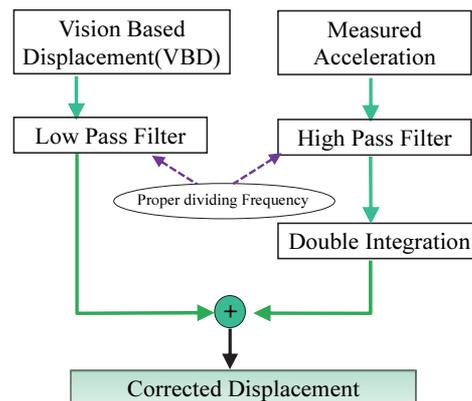


Fig. 2 Combination flow of vision based displacement and integrated acceleration

전 주파수 대역에서 정확도가 우수한 변위를 구할 수 있다고 생각되었다.

주행 하중의 경우는 아니지만, 고속 계측이 어려운 영상 변위나 GPS를 가속도 적분과 서로 보완적으로 이용한 연구 사례도 볼 수 있다[5-7].

제안된 영상 변위 및 가속도 적분의 조합법의 흐름도는 Fig. 2과 같다.

3. 예제 해석(Example analysis)

제안된 조합법의 특성 및 효율성, 실제 문제에 대한 적용성을 보기 위해서, 모의실험과 축소 모형을 이용한 실험적 연구가 수행되었다. 수치해석을 통한 모의실험에서는 제안된 방법의 개념적 타당성에 대한 검토를 진행하고, 모형을 이용한 실제 계측에서는 실제 적용에 따른 문제를 분석하였다.

3.1 모의실험을 통한 조합법 변위 계측의 특성 검토

3.1.1 주행하중 교량 모형 및 운동방정식

먼저 여러 문헌[1-3]에 근거하여 교량의 주행 하중 해석을 위한 운동방정식을 구성하였다. 교량

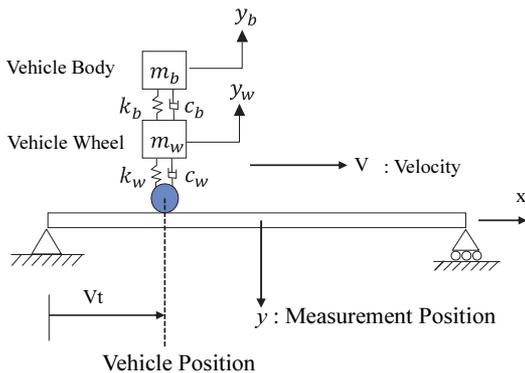


Fig. 3 Moving mass model (2 DOFs Vehicle model)

은 보로 단순화된 모형을 사용하였고, 주행 하중은 이동 질량 모형(Moving mass model)을 채택하였다. 이동 질량 모형은 이동하중에 비해 차량과 교량의 관성력 상호작용(Interaction)이 고려되어 좀 더 실제적이라는 장점이 있다.

이동 질량의 차체(Body)와 차륜(Wheel)은 각 부분을 형상화한 2 자유도 차량을 채택했으나, 편의를 위해 차축은 1개만 사용하였다(Fig. 3).

구성된 운동방정식은 식(1)~(4)와 같다.

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + C \frac{\partial y}{\partial t} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F(x, t) \quad (1)$$

$$m_w \ddot{y}_w + m_b \ddot{y}_b + c_w (\dot{y}_w + \dot{y}) + k_w (y_w + y) = 0 \quad (2)$$

$$m_b \ddot{y}_b + c_b (\dot{y}_b - \dot{y}_w) + k_b (y_b - y_w) = 0 \quad (3)$$

여기서, EI는 보의 휨강도(Flexural rigidity)이고, C는 감쇠계수, m은 단위 길이당 질량이다. 또한, m_b, c_b, k_b 및 m_w, c_w, k_w는 각각 차체와 차륜의 질량, 감쇠 및 강성이다. 또한, y, y_b, y_w는 교량, 차체 및 차륜의 수직 변위이다. 차량의 주행에 따른 교량에의 하중은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(x, t) = \{(m_w + m_b)g + m_w \ddot{y}_w + m_b \ddot{y}_b\} \delta(x - Vt) \quad (4)$$

여기서 $\delta(x - Vt)$ 는 Dirac's delta 함수이다.

3.1.2 수치해석 및 조합법 적용

제시된 수식을 기반으로 이동 질량 하중에 대한

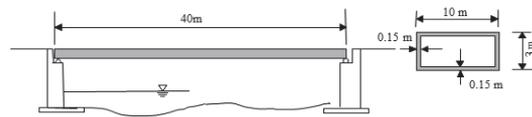


Fig. 4 Bridge model for numerical analysis

Table 1. Material and section properties

Elastic modulus (E)	33.030 <i>GPa</i>
Poisson ratio (ν)	0.2
Unit mass (ρ)	3,852 <i>kg/m³</i>
Section area (A)	3.810 <i>m²</i>
2nd moment of Sec. (I)	6.590 <i>m⁴</i>
Damping ratio (ξ)	5.0 %

Table 2. Calculated natural frequencies (Hz)

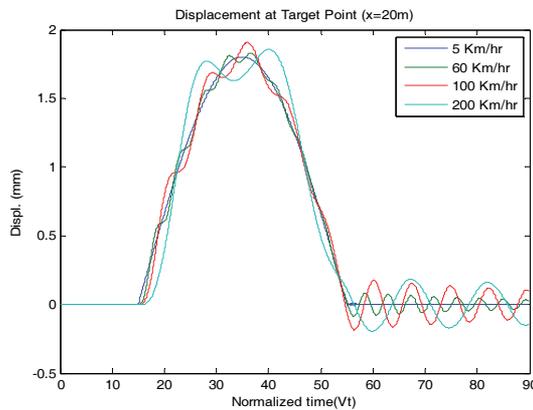
Mode	1	2	3	4	5	6
f_i	3.8	15.1	34.0	60.5	94.5	136.1

교량의 구조해석을 수행하였다. 수치 모형은 Fig. 4와 같은 PC 박스형 단면의 단경간 교량을 채택하였고, 예제 구조물의 제원은 Table 1과 같다.

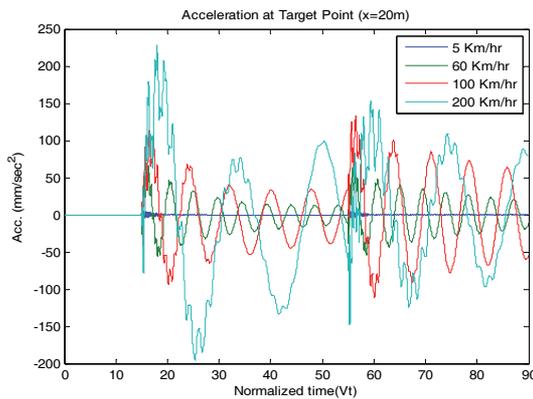
또한, 차량과 철의 강성은 강체에 가깝게 설정하였고, 총중량은 30 tonf로 설정하였다. 교량 부분(Beam 부분)의 고유진동수는 Table 2와 같다.

이 모의실험에서는 5, 60, 100, 200km/h 4가지 속도를 적용하였으며, 속도별 변위, 가속도 해석 결과는 Fig. 5에, 이들의 주파수 함수는 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 5, 6에서 속도에 따라 고주파수로 영향이 확대되는 경향을 확인할 수 있고, 변위에 매우 큰

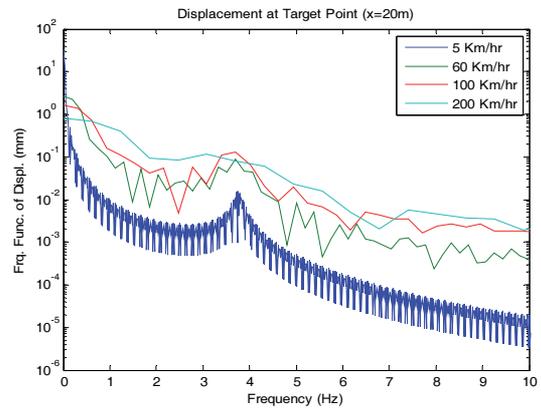


(a) Displacements according to velocities

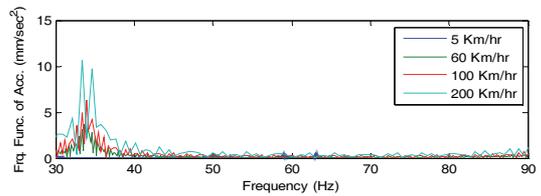
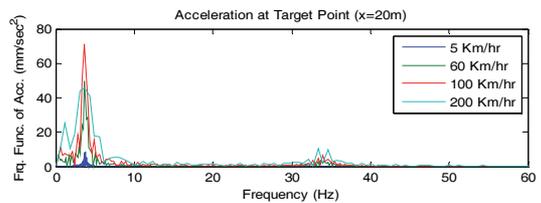


(b) Accelerations according to velocities

Fig. 5 Simulated displacements and accelerations (at midspan)



(a) Displacements (low frequency range)



(b) Accelerations (to middle frequency range)

Fig. 6 Frequency functions of simulated time histories according to velocities (at midspan)

저주파수(준 정적) 성분이 있는 것도 볼 수 있다. 여기서 정규 시간(Normalized time)은 시간(time)에 속도(V)를 곱해 속도별 시간 이력을 비교할 수 있도록 구성한 것이다.

다음은 잡음에 따른 특성을 보기 위하여 잡음 수준(Level)별 변위, 가속도를 생성하고 주파수 합수도 보였다(Fig. 7).

주 신호가 작은 변위의 고주파수 구간에서는 잡음이 상대적으로 크고(Fig. 7(b)), 가속도의 저주파수 구간은 주 신호가 작아 원래 잡음 영향이 큰 구역이지만 백색잡음에 의한 왜곡은 크지 않다는 점도 볼 수 있다(Fig. 7(d)). 주행 하중에 의한 진동은 저주파수에 집중되어 가속도 저주파수에서도 상당

한 크기의 주 신호가 있어 백색잡음만의 영향은 작을 수 있기 때문이다. 역설적으로 이것은 실제 계측을 이용한 가속도 적분의 어려움이 백색잡음이 아니라 유색잡음 때문이라는 증거라 할 수 있다.

이 모의실험 결과를 이용하여 기존의 각종 수치 적분법(Normal integration: 사각형, 사다리꼴 방식)을 적용하여 정확한 변위 이력과 비교하였다(Fig. 8(a)).

Fig. 8(a)에서 볼 수 있듯이 가속도의 저주파수 왜곡이 작은 경우(백색잡음만 있는 경우는) 일반 적분법에 따른 결과와 정확한 변위의 차이가 크지 않음을 볼 수 있다. 또한, 샘플링 주파수 ($F_s = 1/\Delta t = 5.6\text{kHz}$)가 매우 커 일반 적분법들 간

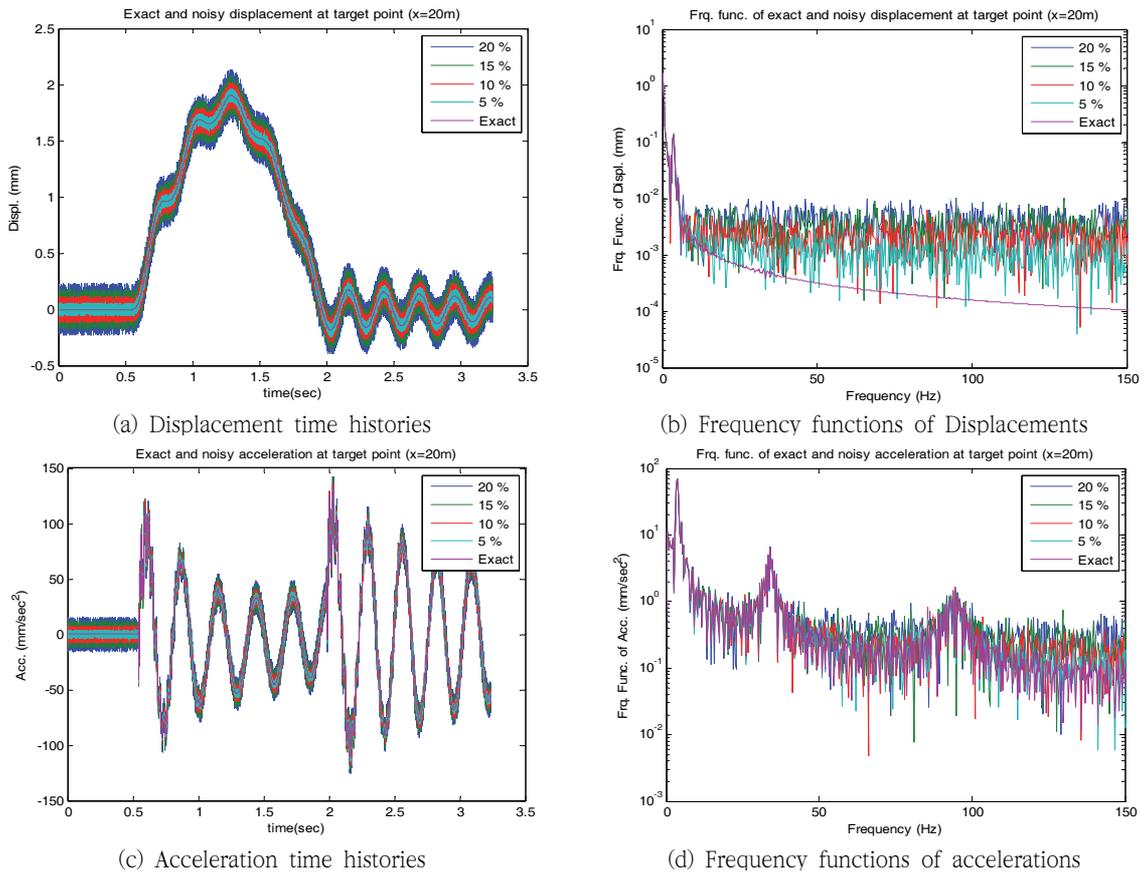
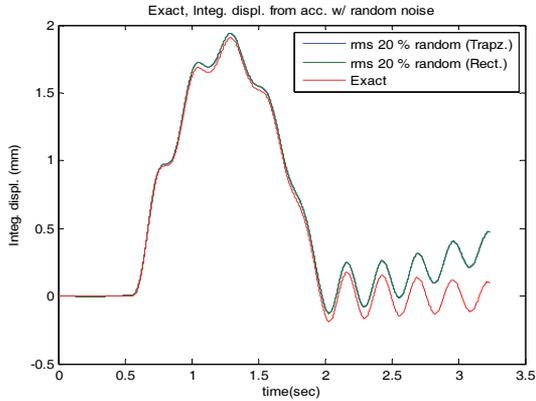
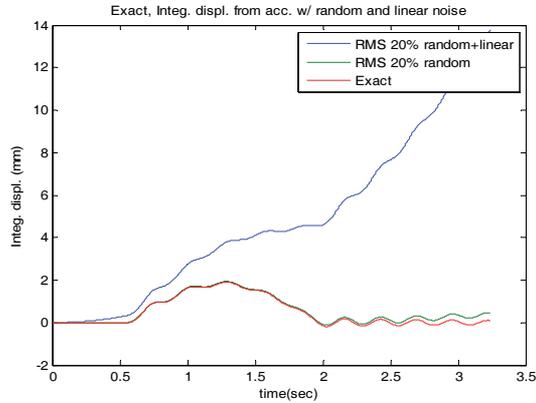


Fig. 7 Simulated histories and frequency functions according to rms noise level (100 km/h)



(a) Normal numerical integrations (only rms 20% random noise)



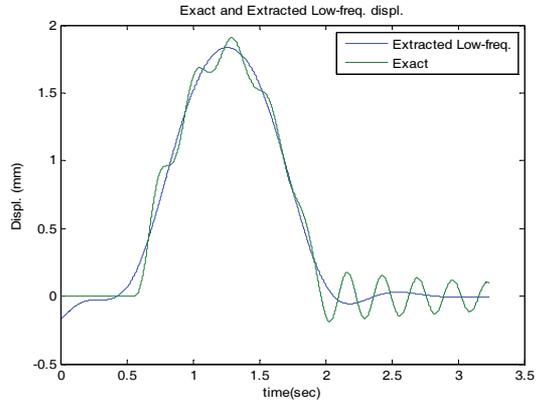
(b) w/o linear offset vs. w/ linear offset

Fig. 8 Displacements according to basic integration methods (100 km/h, acceleration with rms 20% noise+linear noise)

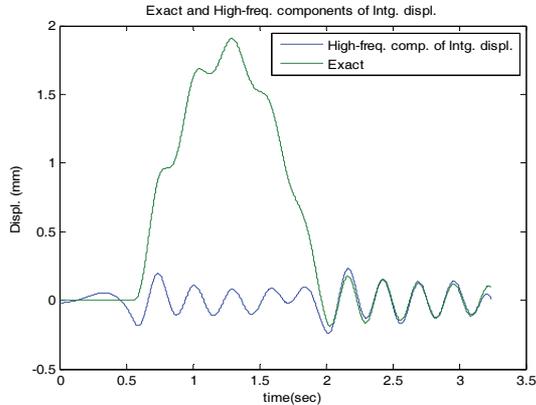
의 차이도 거의 없음을 볼 수 있다.

그러나 가속도에 미세한 선형의 오프셋(저주파 유색잡음)을 추가한 경우, 일반 적분법의 결과는 실제 계측의 적분에서와 같은 발산하는 형태의 오류를 관찰할 수 있다(Fig. 8(b)).

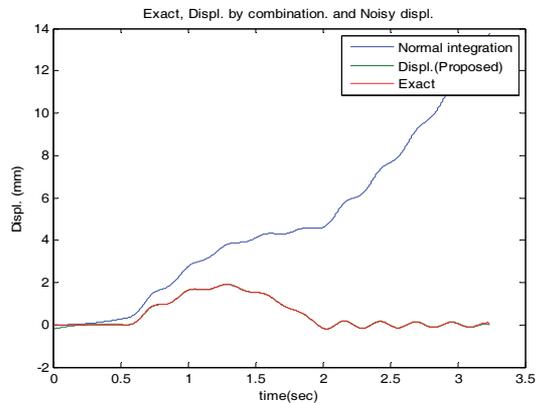
이에 기초해 제안한 방법에 대한 비교를 수행하였다(Fig. 9). 적분법은 사다리꼴 규칙으로 통일하고, 가속도에는 20% 백색잡음과 선형 오프셋 잡음이 모두 사용된 경우를, 영상 변위로는 20% 잡음을 가진 변위를 채택하였다.



(a) Extracted low freq. of displacement



(b) High freq. displ. from noisy acceleration



(c) Proposed and normal integration

Fig. 9 Comparison of displacements from proposed and normal integration method (100 km/h)

Fig. 9(c)에서도 Fig. 8(b)에서도 같이, 일반 적분

법 결과는 심하게 발산하는 것에 비해, 제안된 방법의 결과는 정확한 변위와 거의 차이가 없음을 볼 수 있다. 이때 저주파수와 고주파수 구간 경계주파수로는 샘플링 주파수의 반의 0.1 % (5.56Hz)로 결정하였고, Butterworth 필터를 이용하여 필터링되었다.

모의실험 결과로부터, 제안된 방법이 상당한 고주파수 영역까지 정확도가 우수한 변위를 구하고 있어, 이 방법이 효율적이고 실용적인 방법임을 알 수 있다.

3.2 모형실험을 통한 실제 적용성 검토

모의실험에서의 이론적 분석 결과와 더불어, 실제 계측에서의 적용성 및 문제점 분석을 위한 모형실험이 수행되었다.

실험에 사용된 모형은 아크릴로 제작된 H 단면으로 복부판이 슬라브인 단경간 교량이다. 교량의 제원, 차량 및 사용된 계측기기는 Fig. 10~11와 같다.

실험은 준비된 차량 모형을 최대한 등속도로 운행하며 1종류의 가속도와 2종류의 변위(LVDT, 영상변위)를 계측하는 방식으로 이루어졌다.

영상 촬영은 60fps(frames per second), 1280×720 해상도로 이루어졌다. 이때 60fps는 샘플링 주파수로 60Hz에 해당하고, 이론적 유효 주파수 대역은 30Hz이다. 일반적으로 실제 유효 주

파수는 이보다 훨씬 좁다. 즉, 영상 변위에서 계측할 수 있는 주파수는 최대 30Hz 이하라는 뜻이다.

LVDT와 가속도계 데이터는 100Hz, 200Hz 2가지 경우의 샘플링으로 이루어졌으므로, 영상 변위는 이들 데이터와 동기화 작업을 통해 비교가 가능하도록 조정하였다.

계측된 LVDT 변위와 영상 변위 그리고 가속도 계측값은 Fig. 12에 보였다.

전체적으로 저해상도인 영상 변위는 LVDT 계측에 비해 잡음이 많고, 최대 크기의 오차도 상당하며 상당히 완만한 파형인 것을 볼 수 있다(Fig. 12(a)).

잡음이 많은 것은 주어진 영상 변위가 저속, 저해상도 영상에서 추출한 것에 기인한 것이며, 최대 크기 오차는 사전 조정(Calibration)이 이루어진 광학 환경이 실제 실험 환경과 달라서 발생한 문제

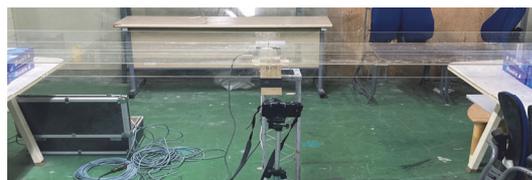


(a) Bridge span and section (cm)



Weight : 5 kgf
Size : 40×60 (cm)
Wheel Distance : 22×40(cm)

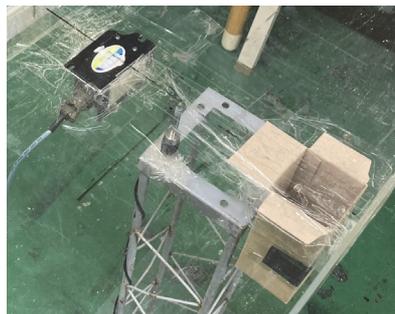
(b) Used vehicle



(a) View of model bridge



(b) Used measurement devices



(c) View of installed measurement devices

Fig. 10 Model bridge for experiment

Fig. 11 Experimental setup

라 생각된다. 크기 오차나 파형이 다른 점은 영상 변위 계측에서 종종 발견되는 고질적인 문제점으로, 이 또한 저속 촬영(60fps)과 저해상도에 따른 저가 영상기기의 한계 문제라 생각되었다. 이런 오차는 결국 조합법 결과의 오차로 나타나게 될 것이다. 따라서 이 실험 결과는 원칙적으로 불완전한 계측이라 할 수 있다. 그러나, 이 또한 실제 계측 환경에서 발생할 수 있는 문제로 논평의 가치가 있다 판단되어 그 결과를 그대로 사용하였다.

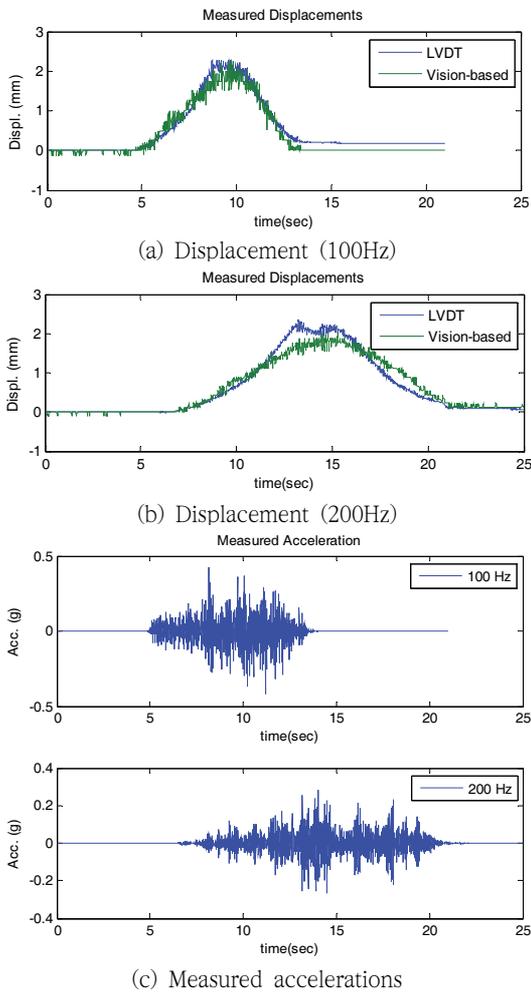


Fig. 12 Measured LVDT, vision based displacements and accelerations

모의실험에서와 같이, 이 신호들에 일반적인 모의실험 적분과 제안된 조합법을 적용하여 비교 검토하였다(Fig. 13). 이때, 변위의 기준은 LVDT 결과를 이용하였다.

저주파, 고주파 구간 경계주파수로는 영상 변위의 유효 주파수(60/2 Hz)의 1/4인 7.5Hz를 사용하였다. 필터링에는 주파수 영역의 직접 필터링 방법이 적용되었다. 이론적 모의실험에 비해 실제 계측을 이용한 이 작업에서는, 필터링의 수치 오류로 경계주파수를 충분히 작게 설정하지는 못하였다.

Fig. 13의 결과로부터 단순 가속도 적분이나 영상 변위(VBD) 만의 결과에 비해 제안된 방법이 우수한 성능을 가진다는 사실은 다시 한번 확인할 수 있다. 그러나 실험적 상황에 기인한 미흡한 점도 관찰할 수 있다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이 LVDT의 결과와 제안된 방법의 결과는 상당한 차이를 보인다. 이것은 영상 변위 계측의 오류(특히 저주파 구간, 파형이나 크기에서)(Fig. 12(a))가 제안된 조합법의 결과도 왜곡(Fig. 13(c), (d))시키기 때문으로 보인다. 또한 계측 가속도에서도 적분된 고주파 변위의 일관성이 떨어지는 경우도 관찰할 수 있었다. 이것은 가속도 계측의 고주파수에도 상당한 잡음이 존재하고 있기 때문이라 생각된다.

이로부터, 제안된 방법의 결과는 각각의 영상 변위 계측이나 가속도 계측의 정확도에 크게 영향을 받는다는 사실을 확인할 수 있다. 따라서 영상 변위는 저주파수에서, 가속도는 고주파수에서 적절한 정확도를 보일 수 있도록 기기 선정과 셋업 작업이 이루어질 수 있도록 준비하는 것은 조합법을 위해서도 필수적인 문제라 할 수 있다고 판단된다.

결과를 수치로 비교하기 위하여 Table 3에서 최대 크기를 비교하였다. 여기서 정적(Static) 신호는 이동평균(Moving average)을 이용하여 매끄럽게(Smoothing) 만든 신호를 의미한다.

최대 크기는 대체로 영상 변위의 크기를 따라가

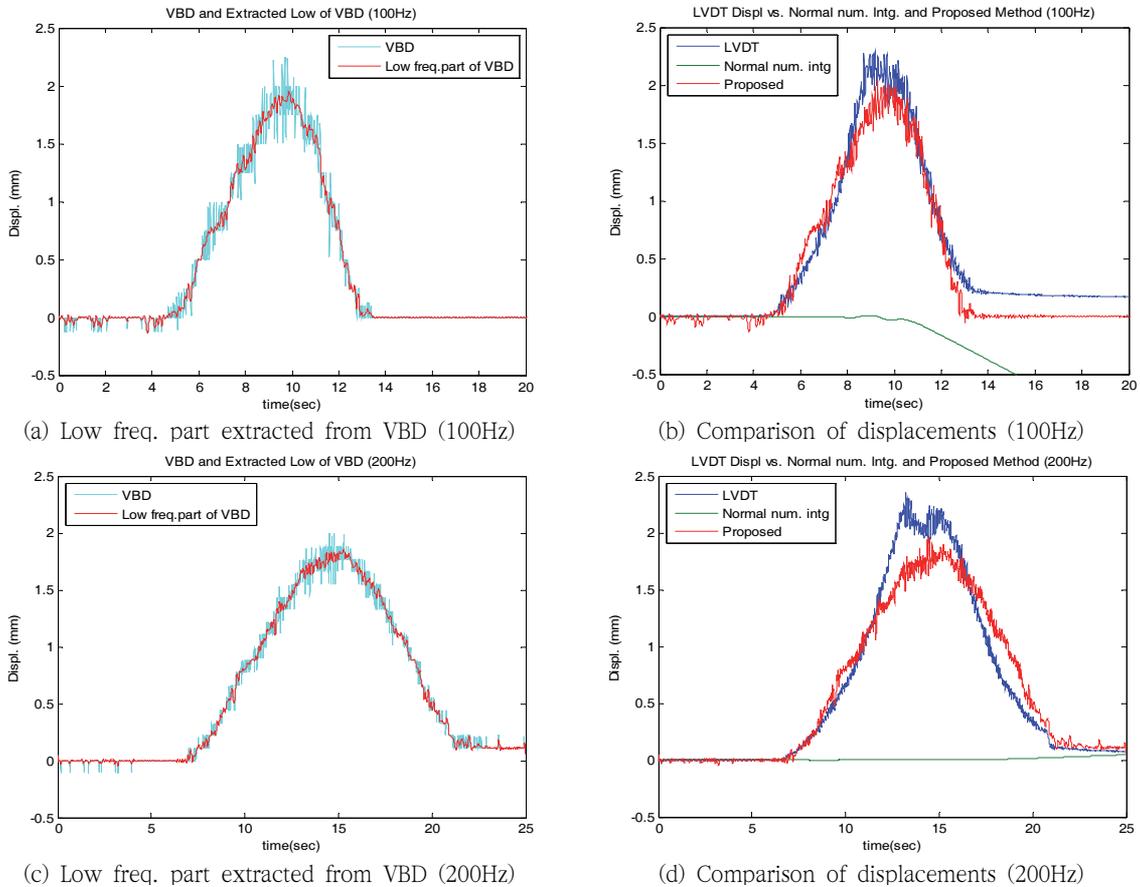


Fig. 13 Comparisons of LVDT and integrated displacements

Table 3. Comparison of maximum displacements

unit : mm	100 Hz		200 Hz	
	Static	All	Static	All
LVDT	2.1175	2.2899	2.1795	2.3568
Vision-based	1.8719	2.2481	1.8169	1.9915
Proposed	1.8736	2.0498	1.8149	1.9610

고 있어, 왜곡된 영상 변위로는 조합법의 결과도 왜곡될 수밖에 없음을 보여준다. 즉, 조합법이 각 방법에서 불완전한 주파수 영역의 정보는 서로 보완해 줄 수 있지만, 각각의 강점 주파수 영역 정확도 확보는 목적에 부합되는 수준의 장비 및 계측을 통해 이루어져야만 한다는 사실을 확인할 수 있다.

4. 결론

이 논문에서는 정밀한 직접 변위 계측이 어려운 경우에 사용할 수 있는 방법으로, 저주파수 변위 계측으로 영상 변위를 사용하고, 가속도 적분을 이용한 변위로 고주파수 변위를 보충하는 방식의 조합법에 관한 연구를 수행하였다. 그 결과를 아래에 정리하였다.

1. 이론적(모의실험), 실험적(모형실험) 결과로부터, 제안된 영상 변위 및 가속도 적분 조합법은 각각의 계측법이 가진 한계를 극복하고, 효율적으로 목적에 부합되는 유효 변위

를 구할 수 있는 방법임을 확인하였다.

2. 그러나 조합법의 정확도는 여전히 근간이 되는 영상 변위 및 가속도 계측의 정확도에도 큰 영향을 받고 있으므로, 영상 변위는 저주파수에서, 가속도 계측은 고주파수에서 각각의 정확도가 보장되어야 LVDT 수준 이상의 변위 계측이 가능하다는 점도 확인할 수 있었다.
3. 차후 연구 과제로는 기본이 되는 계측 자료의 정확도 향상 방안, 저주파와 고주파 영역 구분에 관한 부분, 적절한 필터링 및 신호처리 기법 등이 있다. 추가로 가속도 적분법 자체의 연구도 큰 도움이 되리라 생각한다.

결론적으로, 제안된 방법을 통해 영상 변위와 가속도 적분의 근본적 문제점들을 상당 부분 해결할 수 있었으나, 실제 계측에서의 오류로 인한 문제는 여전히 보완이 필요한 문제라 생각된다.

또한 직접적인 변위 계측법에 관한 연구들 외에도 이 논문의 연구와 같은 보완적, 보충적 방법을 이용한 해결 방안도 충분히 실용성이 있는 연구라는 점을 확인하였다는 것도 큰 성과의 하나라 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2023~2024년도 창원대학교 자율연구과제로 수행되었음.

참고문헌

- [1] Wu, J. F., Zhang, Z. J., Li, X. Z., "Analysis of Dynamic Response of Simply-Supported Girder Bridge in High-Speed Railway Based on the Moving Rows Mass-Spring Model", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 193-194, No. 2, pp. 919-924 (2012)
- [2] 민동주, 정명락, 박성민, 김문영, "이동질량을 고려한 단순지지된 교량의 진동수 및 공진현상 분석", *한국소음진동공학회 논문집*, 제26권, 제1호, pp. 27~38 (2016)
- [3] Bilello, C., Bergman, L. A., Kuchma, D., "Experimental Investigation of a Small-Scale Bridge Model under a Moving Mass", *ASCE J. of Structural Engineering*, Vol. 130, No. 5, pp. 799-804 (2004)
- [4] Lee, J. J., Shinozuka, M., "Real-Time Displacement Measurement of a Flexible Bridge Using Digital Image Processing Techniques", *Experimental mechanics*, Vol. 46, No. 1, pp. 105-114 (2006)
- [5] Choi, Jaemook, Chung, Junyeon, Kim, Kiyong, Sohn, Hoon. "Seismic-induced permanent displacement estimation combining acceleration and computer vision measurements", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 200, No.-, (2023)
- [6] Li, X., Ge, L., Ambikairajah, E., Rizos, C., Tamur, "Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system", *GPS Solutions*, Vol. 10, No. 4, pp. 233-247 (2006)
- [7] 정운철, *가속도계와 GPS를 사용한 변형 모니터링의 정확도 향상*, 석사학위논문, 성균관대학교 (2008)
- [8] Zheng, Wenhao, Dan, Danhui, Cheng, Wei, Xia, Ye, "Real-time dynamic displacement monitoring with double integration of acceleration based on recursive least squares method", *Measurement*, Vol. 141 No.-, pp. 460-471, (2019)
- [9] 정범석, 이외득, "응답변환알고리즘을 이용한 동적변위응답의 추정", *대한토목학회 논문집*, 제20권, 제4-A호, pp. 535-544 (2000)
- [10] Thong, Y. K., Woolfson, M. S., Crowe, J. A., Hayes, "Numerical double integration of acceleration measurements in noise", *Measurement*, Vol. 36, No. 1, pp. 73-92 (2004)
- [11] Hirai, Takashi, "Estimation of Ground Displacement from Seismic Acceleration Record by Spectral Fitting to Trapezoidal Function", *AIJ(日本建築學會) Journal of Structure and Construction Engineering*, Vol. 83, No. 9 (2018)