J Korean Soc Disaster Secur 15(3): 79-88, 2022
https://doi.org/10.21729/ksds.2022.15.3.79

Print ISSN: 2466-1147 Online ISSN: 2508-285X
www.dssms.org

KSDS

Original Article

특수교 계측 데이터 자동 통계 분석 툴 개발

김재환 · 박상기 · 정규산 · 서동우*

한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원

Development of Automated Statistical Analysis Tool using Measurement Data in Cable-Supported Bridges

Jaehwan Kim, Sangki Park, Kyu-San Jung, and Dong-Woo Seo*

Senior Researcher, Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요 약

특수교는 중요한 대형 시설물로 장기적이고 체계적인 유지관리 전략을 필요로 한다. 특히, 시설물 부재별 및 위치별로 다양한 센서를 설치하고 계측 항목별 관리 기준치 설정과 같은 시설물의 안전 확보를 위해 여러 방안들이 제시되고 있다. 이 중 지속적으로 증가하는 특수교의 수와 여러 센서에서 수집되는 데이터를 효율적으로 관리하기 위한 전략적인 방안을 제시해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 특수교 계측 시스템에서 수집되는 광범위한 데이터를 효율적으로 분석하기 위한 목적으로 자동적으로 이상신호를 처리하고 통계 결과를 산출할 수 있는 분석 툴을 개발하고자 한다. 분석 툴 개발을 위해 우선 특수교에 설치된 주요 센서 종류 및 수량과 같은 기본적인 정보와 수집된 데이터에 대한 신호 특성을 분석하였다. 이후 험펠 필터 기법을 활용 신호의 이상 유무를 판별하고 필터링하여 통계 결과를 산출하였다. 마지막으로 개발된 분석 툴의 성능 검증을 위해 현재 공용 중인 사장교와 현수교 형식의 교량을 각 1개소씩 성능검증 대상 교량으로 선정하여 신호처리 및 자동 통계 분석 성능을 실시하였고, 기존의 통계 작업 결과와 유사한 결과를 산출할 수 있었다.

핵심용어: 특수교, 센서, 계측 데이터, 험펠 필터, 통계 분석

ABSTRACT

Cable-supported bridges, as important large infrastructures, require a long-term and systematic maintenance strategy. In particular, various methods have been proposed to secure safety for the bridges, such as installing various types of sensor on members in the bridges, and setting management thresholds. It is evidently necessary to propose a strategic plan to efficiently manage increasing number of cable-supported bridges and data collected from a number of sensors. This study aims to develop an analysis tool that can automatically remove abnormal signals and calculate statistical results for the purpose of efficiently analyzing a wide range of data collected from a long span bridge measurement system. To develop the tool, basic information such as the types and quantity of sensors installed in long span bridges and signal characteristics of the collected data were analyzed. Thereafter, the Humpel filtering method was used to determine the presence or absence of an abnormality in the signal and then filtered. The statistical results with filtered data were shown. Finally, one cable-stayed bridge and one suspension bridge currently in use were chosen as the target bridges to verify the performance of the developed tool. Signal processing and statistical analysis with the tool were performed. The results are similar to the results reported in the existing work.

Keywords: Cable-supported bridge, Sensors, Measurement data, Humpel filter, Statistical analysis

***Corresponding author:** Dong-Woo Seo, dwseo@kict.re.kr **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-0412-7389

Received: 1 September 2022, **Revised:** 1 September 2022, **Accepted:** 19 September 2022

© Korean Society of Disaster & Security. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

국내에는 약 100개 내외의 특수교(현수교와 사장교를 포함한 계측시스템이 구축되어 있는 케이블지지교량을 지칭함)가 현재 건설되어 운용하고 있는데, 국내 지형적 특성상 주로 해안가 및 해상에 위치하고 있어 구조물의 구조적, 재료적 성능 유지에 불리한 환경에 노출되어 있다. 이는 특수교량 건설기술 개발뿐만 아니라 유지관리에도 지속적인 관심이 필요하다고 할 수 있다. 특히 목표 수명이 100년 이상으로 계획되어 관리되고 있는 특수교는 일반적인 중·소규모 교량의 유지관리와는 차별화된 관리가 요구된다. 다시 말해서 사회 기반 시설물 중에서 규모나 지리적 위치를 고려하였을 때 특수교는 가장 우선시 되는 시설물로 장기적이고 체계적인 유지관리 전략을 수립할 필요가 있다(Kim and Song, 2016; Chung et al., 2014). 특수교에 해당되는 교량은 대부분 케이블 교량 형식으로 시공되어 복잡한 구조적 특성을 가지고 있어 이에 대한 효율적인 유지관리 대책이 필요하다(Ko et al., 2020).

현재 특수교는 대형 토목구조물로써 다양한 센서를 설치하고, 계측된 데이터를 기반으로 유지관리를 하고 있다. 계측 항목별 관리기준치를 설정하여 시설물의 안전 확보 등을 위해 활용하고 있지만, 관리 대상 교량이 지속적으로 증가하고, 계측 데이터의 양이 광범위해지면서 통계 처리 및 분석의 효율화가 필요한 실정이다(Hong, 2015; KISTEC, 2019). 특수교에서 계측된 데이터들은 매년 통계분석을 실시하여 중·장기적 관점의 교량의 이상 유무를 평가하고 있는데 현재는 인력에 의해 수행되고 있어 분석 시 오류 발생 가능성 및 관리 대상 교량의 증가와 함께 분석 업무가 많아지고 있다. 이러한 오류 발생을 최소화하고, 통계분석 결과의 정확도 및 신뢰도를 상승시키기 위하여 계측 데이터의 이상 신호 처리를 자동화하고 결과를 자동으로 산출하여 유지관리의 효율성을 높일 필요가 있다(KALIS, 2020).

본 연구에서는 이러한 통계분석의 자동화를 위한 분석 툴(Tool)을 개발하는데 주목적을 두고 있다. 분석 툴 개발을 위해서 우선 2개 대상 교량을 선정하고, 대상 교량으로부터 수집된 데이터를 기반으로 계측 데이터의 신호 특성을 정의하고 분류하였다. 이상 데이터 분류를 위한 필터링 기법으로는 중앙값 필터링 방식의 험펠필터(Hampel Filter)기법을 선정하여 이상 신호를 검지 및 필터링하여 해당 데이터 구간의 통계분석 결과를 산출할 수 있도록 구현하였다.

2. 국내 특수교 계측시스템 운영 및 대상 교량 계측 시스템

2.1 계측 시스템 운영 현황

본 연구에서 개발되는 자동통계분석 신호처리 분석 툴은 각각의 특수교에 설치된 센서로부터 계측되는 다양한 데이터로부터 신호의 이상 유무를 판단하고 필터링된 결과를 바탕으로 자동 통계 분석 결과를 산출하고 궁극적으로는 특수교 유지관리에 필요한 자료로 활용하는 것이다. 분석 툴 개발에 앞서 기존에 운영 중인 특수교 계측시스템 현황을 파악하고 자동통계분석 툴 개발에 필요한 요소들을 수집 하였다. 특수교 계측시스템 현황을 파악하기 위하여 수집된 자료에는 특수교 교량 위치, 교량 형식, 구축된 계측 센서 현황 등을 파악하여 계측신호의 특성 및 분석이 필요한 센서의 종류 등을 확인하였다.

Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 일반국도 상에는 특수교 총 29개가 설치되어 있다. 특수교 구조물에는 대략 14종의 센서가 설치되어 있으며 Table 1에는 설치된 주요 센서에 대해서 교량 당 평균 설치 개수를 나타내었다. 센서를 통해 구조물의 거동을 실시간으로 계측하고 있다. 계측센서를 통해 얻어지는 데이터는 교량별, 센서 별로 통계처리 하여 분석하고 있다. 각각 교량 거동 분석을 위해서 데이터 계측 간격은 10분 단위로 최대, 최소, 평균값 및 필요에 따라 표준편차, 고유진동수, 케이블 장력 등의 변화데이터를 분석 자료로 활용하여 특수교의 장, 단기적 거동분석을 수행하고 있다.

Bridge structure types	Number	Note
Suspension bridge	5	
Cable-stayed bridge	24	
Others	4	Arch:3, Steel-box : 1

Fig. 1. Status of cable-supported bridges in national highway of South Korea

Table 1. Status of main sensors installed in cable-supported bridges

Bridge types	Types and averaged numbers of main sensors installed in a cable-supported bridge					
	Temperature	Seismograph	Tensiometer	Accelerometer	Static strain	Dynamic strain
Suspension bridge	20.6	12.2	5	5.6	10.4	8
Cable-stayed bridge	16.9	8.3	8.6	5.2	4.2	3.9

2.2 대상 교량 주요 계측 시스템 상세

본 연구에서 개발된 자동 통계분석 툴 성능검증을 위해서 설치된 센서의 종류와 수량이 충분하고 현재까지 계측시스템이 정상적으로 운영되고 있는 교량을 대상 교량으로 선정하여 검증을 실시하였다. 교량 형식에 따라 사장교와 현수교 형식의 교량을 각 1개소씩 성능검증 대상 교량으로 선정하였다.

2.2.1 현수교(A bridge)

현수교 중 대상 교량은 2016년부터 계측 시스템이 구축되어 현재까지 상시로 계측을 수행하고 있다. 대상 교량에는 온도계, GNSS, 신축 변위계, 경사계, 구조물 가속도계, 케이블 가속도계, 풍향풍속계, 지진 가속도계 등 총 9종의 센서로 구성되어 있으며, 대상 교량 부재별 주요 형식들을 Table 2에 나타내었다.

2.2.2 사장교(B bridge)

시스템 검증을 선정된 대상 교량은 사장교로 2006년부터 계측 시스템이 구축되어 현재까지 상시로 계측을 수행하고 있다. 대상 교량 부재별 정보는 Table 2에 제시하였다. 계측 시스템 구성은 온도계, 가속도계, 처짐계, 경사계, 신축이음계, 케이블 가속도계, 정적변형률계, 풍향풍속계, GNSS(Global Navigation Satellite System), 지진계, 지진가속도계 등 총 11종의 센서

로 구성되어 있다.

Table 2. Types of main members in Ttargeted bridge specificationss

Bridges types	Superstructure				Substructure	
	Type	Stiffening Girder	Pylon	Cable	Abutment	Pier
Suspension bridge (A bridge)	Earth anchored suspension bridge	Streamline steel composites	Concrete	2 PWS* cable	Caisson, spread foundation	
Cable-stayed bridge (B bridge)	Three-span steel-box girder cable-stayed bridge	Streamlined steel-box girder	A-shaped steel pylon	Pre-Fabricated wire	Gravity type	Hollow pier

* PWS : Parallel Wire Strand

3. 계측데이터 분석 및 자동통계기법

3.1 기존 계측 데이터 분석

자동 통계분석 툴 개발을 위하여 특수교에 설치된 센서별 계측 데이터에 대한 기존 관리 방법을 확인하였다. 일반적으로는 수집된 연간 데이터를 수동으로 필터링한 후 기존 데이터들에 추가되어 다년간의 데이터 추이를 분석하는 방식을 적용하고 있다. 자동 통계분석은 상시 계측 데이터의 신호 특성을 반영하기 위한 것으로 이를 위해 우선 대상 교량에 설치된 센서별 계측 결과 데이터들의 신호 특성을 본 연구에서는 다양한 센서 중 대표적인 센서(온도계, GNSS, 정적변형률계)에 대한 신호 특성에 대해서 Fig. 2와 같이 나타내었다.

A 교량(현수교)에서 온도는 신호 누락 및 이상치 발생 없이 연간 온도변화를 정상적으로 반영하여 계측되고 있음을 확인할 수 있다. 반면, B 교량(사장교)에서 온도 계측 원본 데이터는 실제 데이터 통계분석 결과에 영향을 미칠 정도의 큰 이상치 값이 분석 기간 전반에 걸쳐 반복적으로 발생하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 경우 통계 결과 정확도를 보장할 수 없으므로 사전 데이터 필터링을 통한 신호 품질 확보가 필수적이다. GNSS 계측 데이터 신호를 살펴보면, 두 교량 모두 비교적 정상적으로 신호취득이 이루어지고 있음을 확인할 수 있지만, 계측데이터 분석 기간 전반에 걸쳐 간헐적 이상치가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이에 대한 신호 품질 개선이 필요할 것으로 판단된다. 대상 교량들 대한 정적 변형률에서는 A 교량의 경우 전반적으로 데이터가 정상적으로 계측되는 것을 확인할 수 있지만, B 교량의 경우에는 빈번하게 계측된 정적 변형률에서 이상치가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이상치로 인해 통계 분석에 영향을 미칠 수 있으므로 데이터 필터링을 할 필요가 있다.

3.2 계측 데이터 필터링

자동통계 분석을 위하여 데이터 필터링이 필요하다는 것을 기존 계측 데이터로부터 확인하였고, 이를 위하여 본 연구에는 중앙값 필터의 일종으로 특정 구간의 이상 수치를 해당 구간을 중심으로 하는 윈도우 내의 중앙값으로 대체하는 필터로서 무작위로 발생하는 데이터 이상치를 제거하는데 효과적인 험펠 기법을 사용하여 계측 데이터 필터링을 수행하였다. 험펠 기법은 우선 다른 필터링 방법(가우시안 필터, Sgolay 평활화 보정, Z-score등)에 비해 시계열이 촘촘하고 진폭이 큰 데이터 형태에서 적용성이 높은 장점이 있다. 험펠 기법은 Fig. 3에서와 같이 해당 이상치 구간에서 중간값과 중간값 절대편차를 이용하여 이상치 데이터가 발생하면 이상 데이터를 중앙값으로 대체하는 것을 기본 원리로 한다(Kim et al., 2021; The Math Work, 2021). 이 필터 기법을 활용하여 데이터 학습을 수행하게 되면 특정 구간에서의 중간값(Median)과 중간값 절대편차(Median Absolute Deviation)를 자동으로 산출해내고 해당 구간 전후의 다른 구간들과 중첩분석을 통해 절대편차를 벗어나는 이상 신호를 노이즈로 간주한다. 검출된 노이즈는 중간값으로 교체된다. 이상치 필터링 결과값에 영향을 주는 변수는 Window 길

이(Window length)와 표준편차의 배수(Threshold level)이다. 센서에서 계측되는 데이터를 최적화하기 위해서는 센서 특성, 센싱 환경, 데이터 상태 등을 고려하여 요구되는 최적계수를 도출해야 한다.

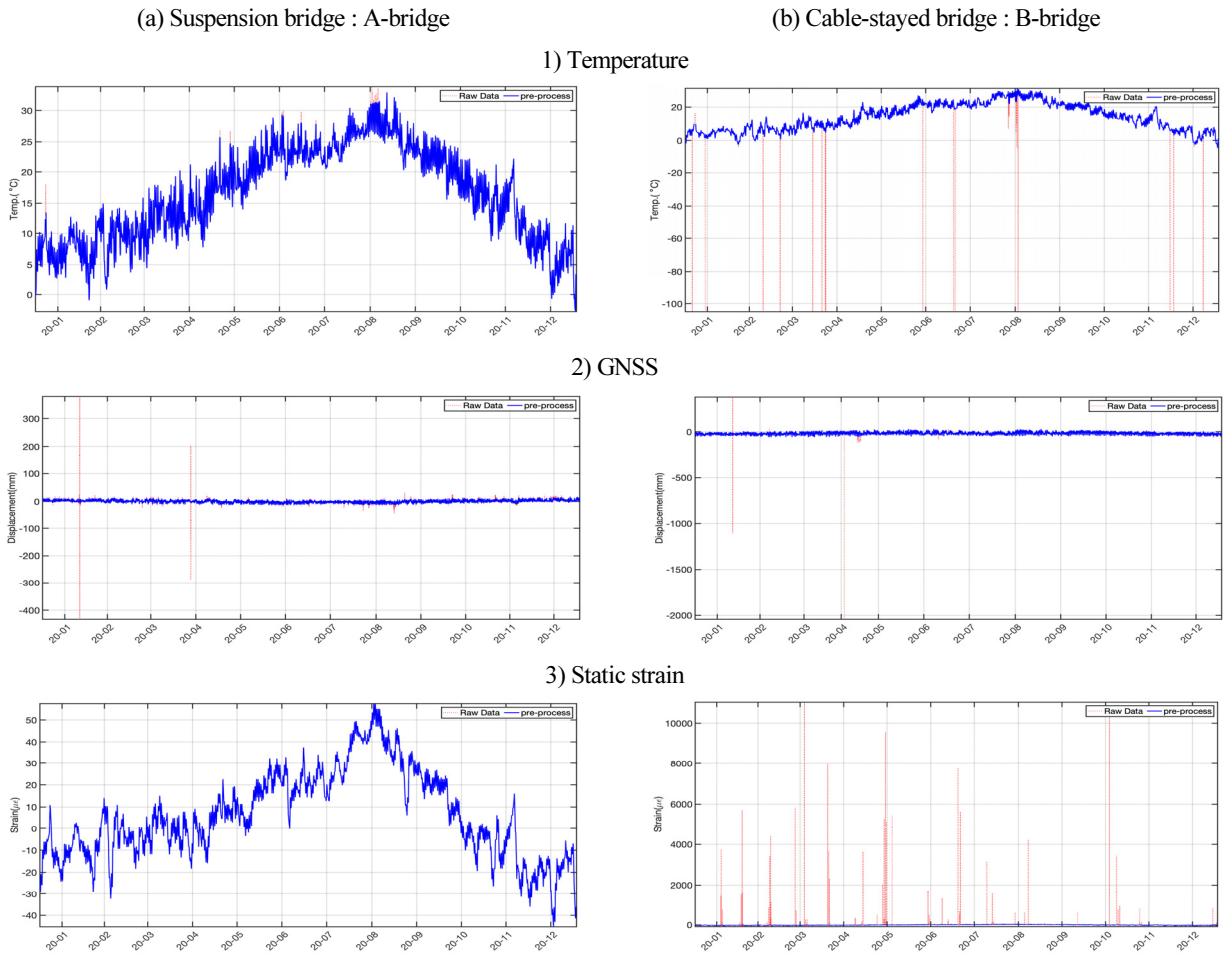


Fig. 2. Monitoring data from temperature, GNSS and static strain sensors

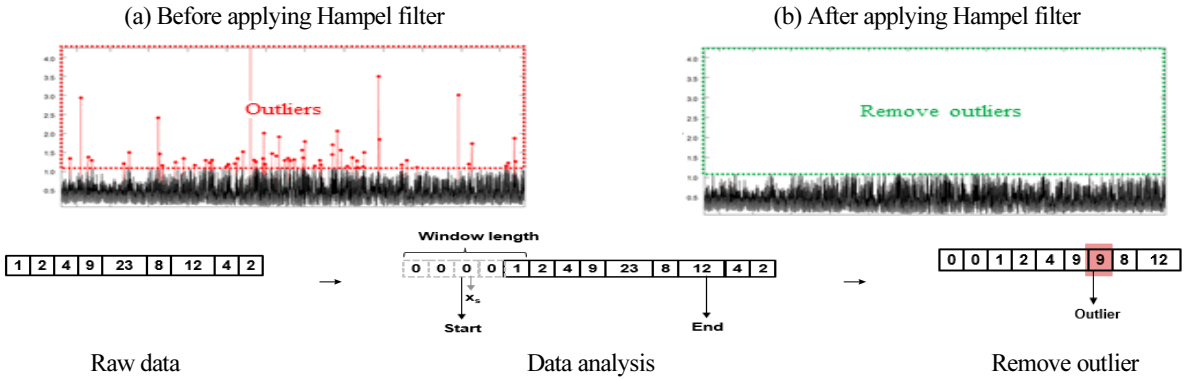
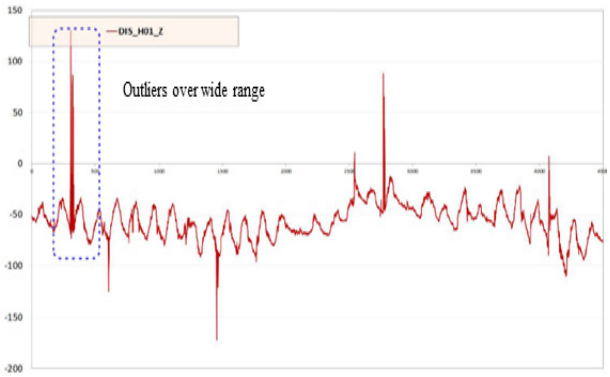


Fig. 3. Principle of Hampel filter

본 연구에서는 험펠 필터링 기법의 이상치 제거 및 데이터 복원 성능을 분석하기 위하여 기존 계측데이터를 활용하였다. 이상치가 존재하는 데이터에 대해 험펠 필터 기법을 적용, 원본데이터 와 이상신호 처리 후 데이터를 비교하여 제시한 험펠 기법의 이상신호 처리 성능이 유효한지 확인하였다. 사용된 데이터는 대부분 1~2개월 계측 기간 동안의 10분 평균 데이터를

이용하였다. Fig. 4에서는 처짐 데이터에 대해서 험펠 필터 기법 적용 전 후 데이터를 예시로 나타내었다. 필터링 전 계측데이터에서는 구조물의 거동을 반영한 신호 외에 통상적 발생치를 초과한 이상치(Outlier)가 다수 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 험펠 기법을 적용할 경우 아래의 결과에서 보는 바와 같이 필터링 후 이상치가 분명하게 제거되는 것을 확인 할 수 있다.

(a) Before applying Hampel filter



(b) After applying Hampel filter

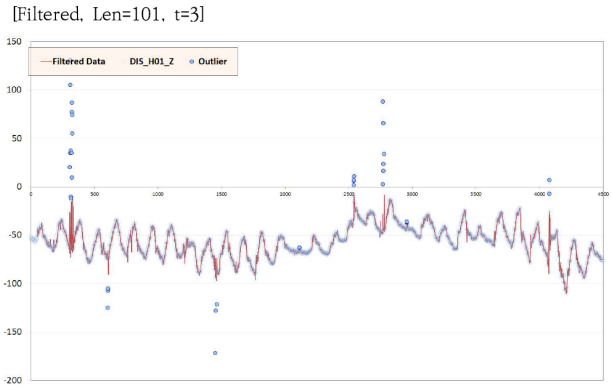


Fig. 4. Example for data applying Hampel filter

한편, 이상치 필터링 결과값에 영향을 주는 변수들에 대해서 센서별 최적 필터링 조건 값을 실제 데이터 필터링 결과에 따라 분석하였으며 Table 3에 나타내었다. 특수교 계측데이터에 대해서 이상치 감지 및 복구함에 험펠 기법이 효과적인 필터 중 하나임을 확인하였고, 최종적으로는 특수교 계측데이터 기반 자동통계 분석 툴에서 연간 계측데이터 처리 및 자동통계화 알고리즘에 적용하였다.

Table 3. Optimized values for data filtering using Hampel filter

Types of sensor	Window length	Threshold value
Accelerometer (Pylon, Girder)	21	3
Accelerometer (Cable)	21	3
Displacement meter	51 or 101	3
GNSS	21	3
Dynamic strain	21	3
Static strain	21	3
Anemometer	21	3

3.3 계측 데이터 기반 자동통계분석 및 적용 결과

계측데이터 기반 자동통계 분석 툴은 객관적이고 정량화된 통계자료를 도출하여 특수교 계측관리 고도화에 주목적을 두고 있다. 이를 위해 개발 툴에는 기본적으로 수집된 모든 종류의 계측데이터가 적용이 가능하도록 구현하였다. 또한 사용자 편의를 위해 GUI기반으로 개발하여 원활한 운용이 가능하도록 하였고, 센서로부터 수집되는 데이터를 필터링하여 통계분석 결과를 자동으로 산출할 수 있는 인터페이스를 개발하였다. 인터페이스는 Matlab을 통해 구현하였으며 험펠 기능을 탑재하여 신호처리 자동통계 인터페이스를 GUI 기반으로 구현하였다. Fig. 5에서와 같이 데이터를 업로드하여 이를 기간별로 분석할 수 있도록 하였다. Table 4는 개발한 자동통계 인터페이스의 기능을 정리한 표이다.

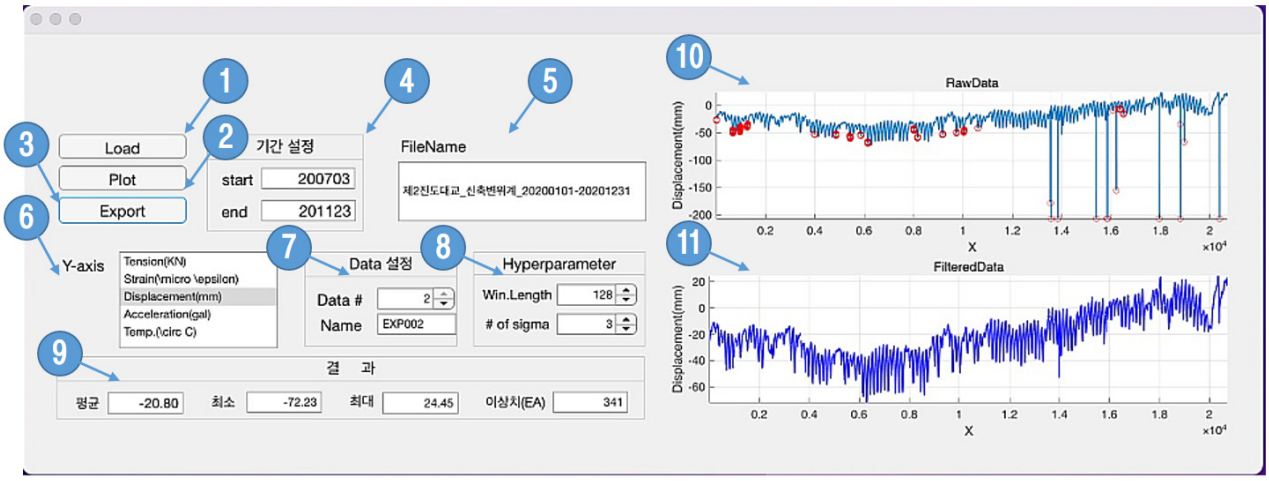


Fig. 5. Layout for automated statistical analysis tool

Table 4. Details in function in automated statistical analysis tool

No	Function	Description
1	Upload	Input command for data upload
2	Plot	Execution command for data analysis
3	Export	Output command after filtering and analysis
4	Set date	Setting target period for analysis (YYMMDD)
5	FileName	Display Filename
6	Set Y-axis	Setting Y-axis legend
7	Set data	Setting data column within up-loaded data
8	Hyperparameter	Setting values for window length and threshold value
9	Output	Min., max. and average values after filtering
10	Graph before filtering	Display graph before filtering
11	Graph after filtering	Display graph after filtering

Fig. 6과 Fig. 7에서는 대상 교량 데이터를 자동통계 분석 툴에 적용하여 얻어진 결과를 기존의 데이터와 비교 검증하였다. 우선, 필터링 결과 데이터의 정상 대역으로 산출된 영역을 벗어나는 이상치를 험펠 기법에서 자동으로 제거되는 것을 확인할 수 있었으며 전체적인 센서 파형이 집중도 있게 정제된 것을 확인할 수 있었다. 한편 험펠 기법 특성상 조건값에 따라 신호처리 결과가 큰 폭으로 변화할 수 있어 추가적인 비교분석을 위해서는 수동 필터링 작업에서 얻어진 조건값을 비교할 필요가 있다.

자동통계 분석 툴에 의해 산출된 데이터를 살펴보면, 전반적으로 기존의 통계분석 결과를 대체 가능한 신뢰도 있는 데이터를 산출하는 것으로 판단된다. 하지만, 오류 구간이 넓은 범위로 형성될 경우에 험펠 기법을 적용하면 중앙값을 제대로 산출하지 못하여 장기적인 데이터 분석에서는 필터링 효과가 다소 떨어지는 경향을 확인할 수 있었고 경험치 적인 필터링 조건값(Window length, Threshold level)을 통해서만 유의미한 필터링 결과를 도출해 낼 수 있는 등의 기법적 한계를 발견하였다. 추후 이를 보완할 수 있는 추가적 필터링 기법을 선정해야 할 것이다.

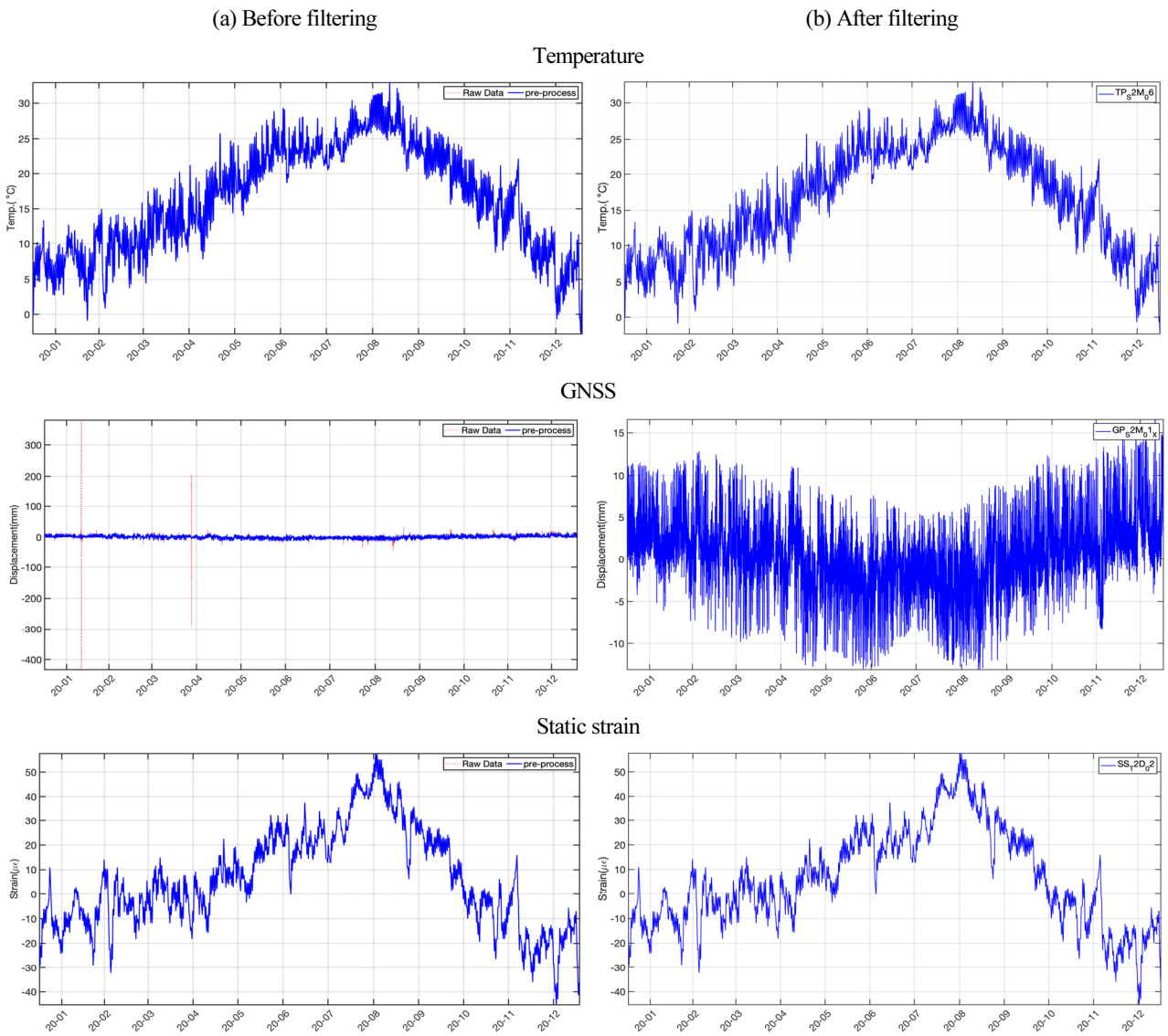


Fig. 6. Comparing data before and after applying Hampel filter (Suspension bridge: A bridge)

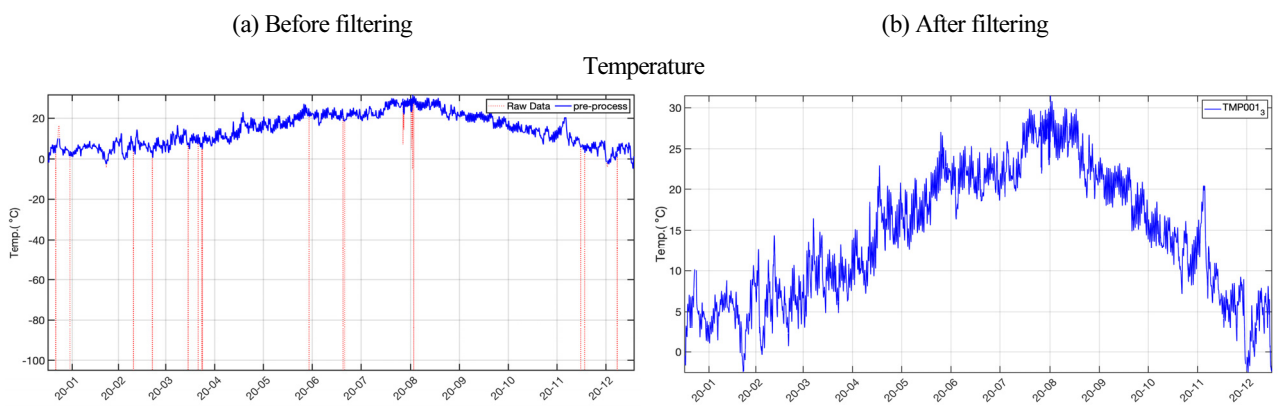


Fig. 7. Comparing data before and after applying Hampel filter (Cable-stayed bridge: B bridge)

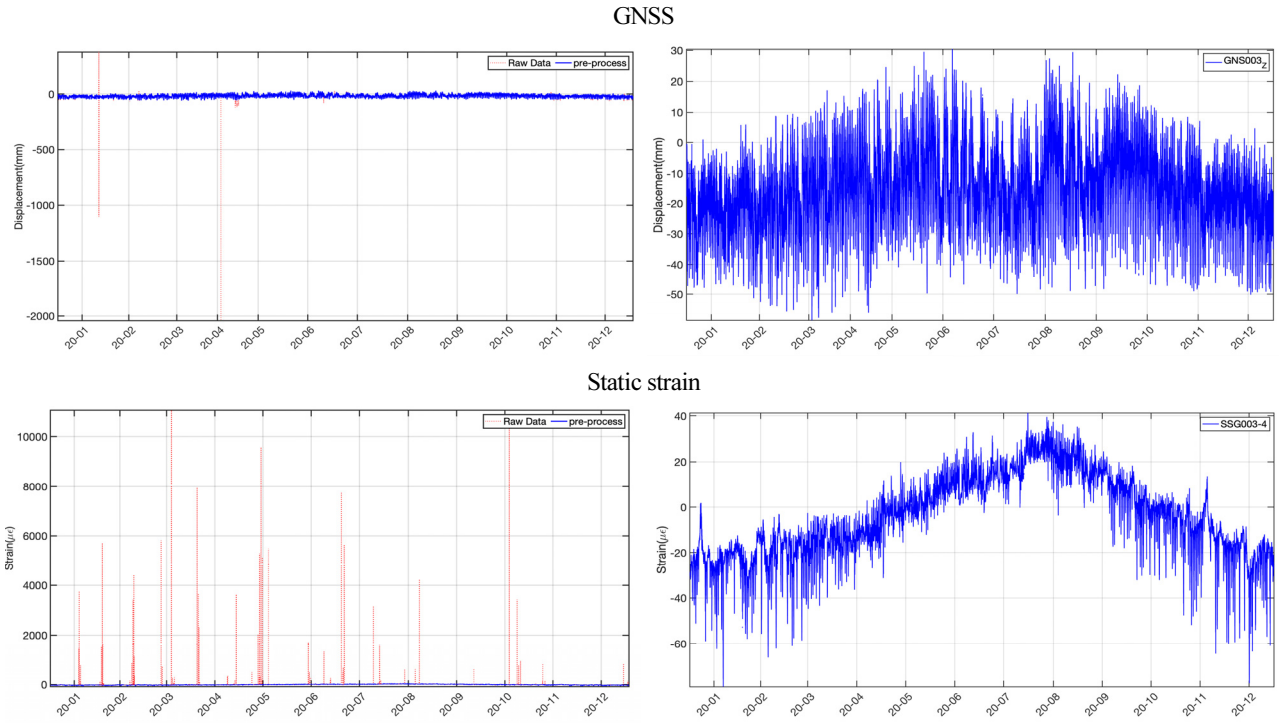


Fig. 7. Comparing data before and after applying Hampel filter (Cable-stayed bridge: B bridge) (Continue)

4. 결 론

본 연구에서는 특수교 계측 데이터 분석 과정에서 인력 기반의 작업을 최소화하고, 객관적인 통계분석 자료를 작성할 수 있도록 이상신호 처리 및 자동통계 분석 툴 개발을 목표하였다. 이를 위해 현재 공용 중인 특수교 중 사장교와 현수교 각 1개소를 선정하여 대상 교량에서 취득한 계측 신호를 이용해 개발한 계측데이터 분석 및 자동통계 분석 성능을 평가하였다. 결론은 다음과 같이 요약하였다.

(1) 이상신호 처리를 위해 기존의 계측데이터에서 발생하고 있는 센서별 데이터 경향을 확인하기 위하여 신호특성을 분석하였다. 온도계의 경우 명확한 이상치의 발생 경향 없이 양호한 계측이 이루어지고 있는 것을 확인하였고 정적 변형률계는 관리기준치 내에서 대부분의 신호 거동이 이뤄지고 있으나 데이터 전반에 걸쳐 간헐적인 이상치의 발생을 확인하여 데이터 분석 결과에 영향을 미칠 가능성이 있음을 확인하였다.

(2) 험펠 기법을 특수교 계측데이터 신호처리 기법으로 선정하였다. 센서별 계측데이터 샘플을 정하여 험펠 기법이 실제 데이터 상에 존재하는 이상치를 효과적으로 검지, 처리 및 복구할 수 있는지 성능을 평가하였다. 성능평가 결과 험펠 기법을 통해 대다수의 계측데이터 상에 존재하는 이상치를 효과적으로 검출 및 복구 할 수 있음을 확인하였고, 각 센서별 최적의 필터링 결과산출이 가능한 센서별 필터링 조건값들을 제시하였다.

(3) 자동통계분석 툴은 MATLAB을 이용 험펠 필터 및 통계분석 기능을 구현하였으며 사용자 편의를 고려한 GUI 인터페이스를 개발하였다. 개발된 툴을 통해 특수교에서 얻어지는 센서별 데이터의 이상치 감지 및 복구 할 수 있으며 개선된 데이터로부터 신뢰도 높은 통계분석 결과를 도출해 낼 수 있도록 기능을 구현하였다.

(4) 대상교량에서 수집된 실제 계측데이터를 이용하여 실제 신호처리 및 자동통계 분석 성능을 평가한 결과, 개발한 툴을 통해 이상치를 제거 후, 자동 산출된 통계치가 실제 기존의 인력에 의한 통계 작업 수행 결과와 유사한 대역의 결과를 산출해 낸 것을 확인하였다.

Acknowledgments

This work was carried out in the Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (project no. 20220064) funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Republic of Korea.

References

Chung, C.-H., An, H.-H., Shin, S.-B., and Kim, Y.-H. (2014). Reset of Measurement Control Criteria for Monitoring Data through the Analysis of Measured Data, Journal of the Korea Institute for structural Maintenance and Inspection. 18(6): 105-113.

Hong, S.-S. (2015). Guideline for Installation and Operation of Health Monitoring System for Cable Supported Bridges. Journal of the Korean Society of Civil Engineers. 63(11): 25-29.

KISTEC (2019). Development of AI-based Dynamic Response Evaluation Model using Big Data to Secure the Reliability of Accelerometer Frequency Analysis, Technical Report, Korea. JinJu: KISTEC.

KALIS (2020). Optimization of Maintenance Measurement System using Long-Term Measurement Data, Technical Report, Korea. JinJu: KALIS.

Kim, H.-B. and Song, J.-H. (2016). Study for Determination of Management Thresholds of Bridge Structural Health Monitoring System based on Probabilistic Method. Journal of the Korea Institute for structural Maintenance and Inspection. 20(3): 103-110.

Kim, K.-H., Choi, G.-H., Jung, H.-M., Joo, D., Na, R., Choi, E.-H., Kwon, J.-H., and Yoo, S.-H. (2021). Quality Control on Water-level Data in Agricultural Reservoirs Considering Filtering Methods. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers. 63(5): 83-93.

Ko, B.-C., Heo, G.-H., Park, C.-R., Seo, Y.-D., and Kim, C.-G. (2020). Development of Damage Evaluation Technology Considering Variability for Cable Damage Detection of Cable-stayed Bridges. Journal of the Korea Institute for structural Maintenance and Inspection. 24(6): 77-84.

The Math Work, Inc. (2021). Matlab (Version 2021b). https://kr.mathworks.com/help/dsp/ref/hampelfilter.html

Korean References Translated from the English

고병찬, 허광희, 발채린, 서영득, 김충길 (2020). 사장교의 케이블 손상 검출을 위한 변동성이 고려된 손상평가 기술 개발, 24(6): 77-84.

국토안전관리원 (2020). 장기계측데이터를 활용한 유지관리 계측시스템 최적화 방안. 진주: KALIS.

김경환, 최규훈, 정형모, 주동혁, 나라, 최은혁, 권재환, 유승환 (2021). 필터링 기법을 이용한 농업용저수지 수위자료의 품질관리 방안. 한국농공학회논문집. 63(5): 83-93.

김형배, 송재호 (2016). 확률론적 방법에 의한 교량계측시스템의 관리기준치 설정에 관한 연구. 한국구조물진단유지관리공학회 논문집. 20(3): 103-110.

정철헌, 안호현, 신수봉, 김유희 (2014). 계측데이터 분석을 통한 모니터링 데이터의 계측관리기준 재설정. 한국구조물진단유지관리공학회 논문집. 18(6): 105-113.

한국시설안전공단 (2019). 가속도센서 주파수분석 신뢰성 확보를 위한 빅데이터 활용 인공지능기반 동적응답 평가모델 개발. 진주: KISTEC.

홍성수 (2015). 특수교 계측시스템 설치 및 운영 지침(안) 소개. 대한토목학회지. 63(11): 25-29.