

영상처리기법을 이용한 구조물 동특성 분석 시스템 프로토타입 개발

Development of Structure Dynamic Characteristics Analysis System Prototype using Image Processing Technique

조병완*, 이윤성*, 김정훈*, 김도근*, 윤광원**
한양대학교 건설환경공학과*, 서울시 안전총괄본부 안전총괄과**

Byung-Wan Jo(joycon@hanmail.net)*, Yun-Sung Lee(nikeshoo@nate.com)*,
Jung-Hoon Kim(junghoon3301@hotmail.com)*, Do-Keun Kim(dk76kim@nate.com)*,
Kwang-Won Yoon(ykwabc@nate.com)**

요약

최근 건축물과 교량 등 사회기반시설물들의 노후화로 인해 변위센서, 가속도센서 등 첨단 기술을 이용한 구조물 안전관리 기법이 중요한 이슈로 부각되고 있다. 일반적으로 구조물의 안전관리를 위한 구조 건전성 모니터링 기술은 IT와 계측센서 기반으로 이러한 시스템을 구축하기 위해서는 많은 비용이 소요된다. 본 논문에서는 기존 계측센서 기반의 구조 건전성 모니터링 시스템에 비해 보다 경제적이고 효과적인 방법으로 구조물의 변위와 고유진동수를 추정하여 손상도를 평가하는 영상 기반의 구조물 동특성 분석 시스템을 개발하였다. 본 논문에서 개발한 시스템은 디지털 카메라와 같은 영상장치를 이용하여 구조물의 영상을 촬영하고, 영상처리를 위해 주로 사용되고 있는 정규상호상관기법인 NCC연산을 통해 변위와 고유 진동수를 분석하고, 구조물의 손상전후의 주파수응답비를 비교분석하여 손상도를 판별하여 문제가 발생 시 관리자에게 경보하는 기능을 지원한다. 본 시스템은 기존의 구조물에 부착하거나 고정해서 사용하는 계측 센서에 비해 설치 및 이동이 간편하고, 시스템이 단순하여 경제적이며 활용성이 높은 장점이 있다.

■ 중심어 : | 건설구조물 | 안전관리 | 영상 | 동특성 | 정규상호상관기법 |

Abstract

Recently, structure safety management techniques using cutting-edge technology(Displacement sensor, sensor of acceleration) has emerged as an important issue owing to the aging of infrastructure such as bridge and building. In general, the structural monitoring system for structure safety management is based on IT technology and it is expensive to install. In this paper developed an image-based structure dynamic characteristic analysis system prototype to assess the damage of structure in a more cost-effective way than traditional structure health monitoring system. The inspector can take a video of buildings or other structures with digital camera or any other devices that is passible to take video, and then using NCC calculation for image processing technique to get natural frequency. This system is analysis of damage of the structure using a compare between the frequency response ratio and functions when problems are occurs send alarm to administrator. This system is easier to install and remove than previous monitoring sensor in economical way.

■ keyword : | Construction Structure | Safety Management | Image | Dynamic Characteristic | NCC |

I. 서론

최근 기술의 고도화 및 산업발달의 영향으로 도시 주거 밀집지역의 증가 및 고도화, 사회기반시설의 대형화 등으로 인해 붕괴 사고 발생 시 대형 인명피해를 유발할 수 있는 고위험 대상 구조물이 급격히 증가하고 있다. 시공 후 구조물의 기능을 보전하고 이용자의 편의와 안전성을 향상시키기 위해서는 체계적인 점검과 보수를 통해 최적의 상태를 유지시켜 주어야 하며, 이를 위해 지속적으로 구조물을 모니터링 하는 것이 중요하다. 일반적으로 변위와 고유진동수 같은 동특성은 구조물의 상태를 평가하는데 유용한 정보를 제공하며, 이를 분석함으로써 구조물의 건전성과 손상 상태를 파악할 수 있어, 구조물의 동특성 응답을 정확하게 계측하는 것은 시설물의 유지관리에 있어 매우 중요한 부분이다 [1].

현재 국내외에서 구조물의 동특성을 계측하기 위해서 변위센서 및 가속도센서와 같은 접촉식센서를 주로 사용하고 있으며 보다 정밀한 계측을 위해서는 레이저의 도플러 효과 및 GPS방식을 주로 사용하고 있다.[2] 그러나 레이저의 도플러 효과 방식은 정확도가 높으나 매우 고가의 장비로 많은 구조물에 적용하기에는 현실적 제약이 따르며, GPS방식은 수직 처짐에 대한 계측 정밀도가 낮은 단점이 있다. [2][3] 또한 변위센서나 접촉식 가속도센서는 구조물과 일체화시키기 위해 접근성의 용이함이 필요하며 정확히 고정하기 어려워 이로 인한 계측 값의 오차발생 여부, 케이블 등의 부가적인 장비의 추가 설치 및 측정지점마다 매번 이동하여 반복적인 설치 작업이 필요해 번거로운 단점이 있다.

이에 반해 영상처리기법은 휴대성이 좋은 디지털 카메라와 같은 영상장비로 촬영한 영상을 사용하여 구조물의 변위 및 고유진동수를 계측하는 방식으로, 추가적인 부착장비나 케이블 배선이 필요하지 않아 다중 위치의 측정을 비교적 짧은 시간에 수행할 수 있다. 따라서 부가적인 장비 설치 및 복잡한 현장실험을 동반해야 하는 기존 센서에 의한 방식보다 인력과 시간을 줄일 수 있어 구조물의 동특성 분석을 위한 측정 당 소요비용을 줄일 수 있다. 또한 원격에서 비접촉에 의한 측정

을 할 수 있어 접근성이 확보되지 못한 구조물의 동특성 분석에도 적합하다.

과거 영상을 이용한 구조물의 안전진단 활용은 주로 도장상태나 균열 검출 분야에 국한되었으나 최근 IT기술의 비약적인 발전으로 구조물의 다양한 구조응답 계측 분야로 점차 확대되고 있는 추세이다[4].

영상처리기법을 이용한 구조물 동특성 분석에 관한 연구를 살펴보면, 김정용 등은 이미지프로세싱기법을 이용하여 균열비를 산출하는 알고리즘을 개발하였고 [5], 조준상 등과 박종철 등은 CCTV나 산업용 카메라를 이용하여 교량교좌받침의 정적변위와 긴장재의 동적변위 계측 프로그램을 개발하였다[4][6]. 이준화 등은 측정판을 활용하여 카메라의 각도에 상관없이 임의의 위치에서 구조물의 변위를 계측하는 방법을 발표하였으며[1], 조수진 등은 영상기반 변위 계측시스템의 현장 적용 성능 평가를 수행하여 그 실효성을 입증하였다[7]. 이와 더불어 김성완 등은 1995년 Lewis[8]가 제안한 sum-table방식을 적용하여 영상처리를 위한 데이터 처리량을 줄이는 방식을 제시하였고[3], 이진학 등은 기존의 2차원에서 실행되던 영상처리 기술을 확장하여 3차원 운동을 하는 구조물의 동적변위 계측 기법을 제안하여 적용 영역을 확장하였다[2].

기존에 많은 연구자들에 의해 수행된 영상처리기법은 대부분 변위 측정이나, 교량 케이블의 동적 계측에 한정되어 있으며, 획득한 영상자료를 통해 구조물의 동특성을 단순 분석하는 방식으로 손상 상태를 판단하기 위해 전문가에 의해 측정된 동특성 데이터를 분석하는 단계를 거쳐야하므로 현장에서 구조물의 안전성을 평가할 수가 없다. 또한 객체 인식방법으로는 마커를 부착하여 마커의 움직임을 추적하는 방식을 적용하고 있으며, 이러한 방식은 표적의 탐지를 쉽게 할 수 있는 장점이 있지만 측정하고자 하는 모든 부위에 마커를 부착해야 하는 문제로 인해 적용범위에 제약이 따른다. 더불어 장애물로 인해 마커의 일부가 가려지면 표적 탐지가 어렵고, 바람이나 비 등에 의해 마커에 손상이 발생하면 재사용이 불가능해 실내 환경에서 주로 사용된다 [9]. 비마커방식은 이러한 단점을 보완하기 위해 개발된 기술로 주로 물체의 점, 선, 에지 등과 같은 특징정보들

을 추출하여 마커처럼 활용하는 방법이다. 비마커방식은 일부 이미지가 가려져도 표적의 추적이 가능하며, 이미지를 그대로 사용할 수 있어 실외환경에서 폭넓게 활용이 가능하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 센서 기반 시스템보다 경제적이며 간편하게 동특성을 추정할 수 있으며, 기존 영상처리기법을 이용한 구조물 정적, 동적 계측 시스템의 단점을 개선한 영상기반 구조물 동특성 분석 시스템을 개발하였다. 본 시스템은 실외 환경에서 제약을 받지 않고 폭넓게 활용할 수 있는 비마커방식을 사용하였으며, 구조물 안정성평가 알고리즘을 적용하여 취득한 영상자료에서 추출한 동특성을 기반으로 시스템에서 자동으로 손상도를 파악하여 이상 징후 발생 시 현장실무자와 관리자에게 정보하여 신속하게 대처할 수 있도록 하였다.

II. 시스템 개발환경

1. 영상장치 요구 성능

영상처리기법을 통해 교량의 동특성을 분석하기 위해서는 영상장치의 프레임의 수를 결정하는 것이 중요하다. 나이키스트와 샤논의 표본화 정리이론에 의하면 계측된 신호를 정확하게 처리하기 위해서는 측정된 최대주파수의 2배 이상의 초당 프레임 수가 필요하다[10]. 본 논문에서는 영상처리기법을 이용하기 위한 영상장치의 최소 요구 성능을 확인하기 위해 사회기반시설물

중 구조건전성 모니터링이 중요한 교량과 건축물을 대상으로 고유진동수를 조사하였다.

일반적으로 서해대교, 인천대교 등과 같은 일정규모 이상의 교량의 경우 구조건전성 모니터링 시스템의 구축이 의무화 되고 있으며, 부식센서, 변형률센서, 가속도센서, 온도센서, 풍향센서 등 수많은 계측 센서들을 설치하여 체계적으로 관리하고 있다[11]. 본 논문에서 개발한 영상기반 구조물 동특성 분석 시스템은 장대교량과 같이 구조건전성 모니터링 시스템을 통해 관리되지 않는 중소규모의 교량관리에 초점을 두고 있으며, 다양한 교량형식에 폭넓게 적용할 수 있도록 콘크리트교, 강박스교, PSC교 등을 조사대상으로 선정하였다[11]. 건축물의 경우에는 풍진동에 취약하여, 풍하중으로 인한 안정성과 사용성에 대한 유지관리가 중요한 고층 건물을 조사대상으로 선정하였다. 국내의 고층 건물들은 교량과 달리 구조물 건전성 모니터링 시스템이 대부분 구축되지 못한 실정이기 때문에 주기적인 진동계측을 통한 관리가 필요하다.

[표 1]은 국내의 공용중인 29개의 고속도로 일반 교량의 고유진동수를 조사한 것이며, 2.75-11.94 Hz 사이에 형성되어 있는 걸 알 수 있다[12]. 건축물의 경우 구조와 부위에 따라 고유진동수가 매우 상이하게 나타나는 경향이 있으나 일반적으로 10Hz 부근에서 형성된다. 관련 연구를 보면 윤성원 등이 서울시 철골조 및 철골콘크리트조 고층건물 21동을 대상으로 수행한 연구에 따르면 1.39-5.85 Hz사이로 고유진동수가 나타났으며

표 1. 국내 교량 고유진동수

교량	교량형식	경간	고유진동수(Hz)	교량	교량형식	경간	고유진동수(Hz)
A	콘크리트 I빔	15	9.55	P	3연속강박스	34	4.18
B	콘크리트 I빔	12	10.89	Q	2연속강박스	30	3.41
C	콘크리트 I빔	15	9.40	R	3연속강박스	32	4.28
D	콘크리트 I빔	15	7.59	S	2연속강박스	47.5	3.95
E	콘크리트 I빔	12	11.94	T	5연속강박스	60	2.75
F	단순 강판형	40	3.80	U	3연속강박스	50	3.50
G	단순 강판형	30	4.15	V	3연속강박스	35	2.00
H	단순 강판형	20	6.57	W	4연속강박스	30	4.10
I	단순 강판형	20	3.63	X	단순PSC I	30	3.30
J	단순 강판형	50	2.80	Y	단순PSC I	25	6.14
K	3연속 강판형	33	4.71	Z	3연속 PSC I	30	5.55
L	3연속 강판형	35	3.70	AB	2연속 PSC I	20	7.40
M	3연속 강판형	26	5.35	AC	2연속 PSC I	26	3.79
N	단순 강박스	40	4.47	AD	3연속 PSC I	30	6.59
O	단순 강박스	35	3.40				

[13], 국내의 주요시설물과 고층 건축물에 대한 고유진동수 조사 결과 0.2~1.0 Hz 사이에 분포되어 있는 것을 확인할 수 있었다[14][15]. 조사 결과 영상처리를 위해서는 최소한 30의 초당프레임 수가 필요하며, 영상장치 선정 시 더 광범위한 구조물 계측을 위해 그 이상의 성능이 요구된다.

표 2. 주요 시설물 및 고층 건축물 고유진동수

대상	고유진동수(Hz)	대상	고유진동수(Hz)
A	0.24	Y	3.80
B	0.30	Z	4.15
C	0.33	AB	6.57
D	0.39	AC	3.63
E	0.34	AD	2.80
F	0.28	AE	4.71
G	0.29	AF	3.70
H	0.25	AG	5.35
I	0.23	AH	4.47
J	0.23	AI	3.40
K	0.18	AJ	4.18
L	0.23	AK	3.41
M	0.84	AL	4.28
N	0.96	AM	3.95
O	0.70	AO	2.75
P	0.45	AP	3.50
Q	0.37	AQ	2.00
R	0.66	AR	4.10
S	0.75	AS	3.30
T	9.55	AT	6.14
U	10.89	AU	5.55
V	9.40	AV	7.40
W	7.59	AW	3.79
X	11.94	AX	6.59

2. 영상처리 알고리즘 구현 프로그램

본 시스템에 적용된 영상처리 알고리즘은 인텔사에서 개발한 공개용 컴퓨터 비전 C 라이브러인 OpenCV-2.4.9 버전을 사용하였다. OpenCV는 윈도우, 리눅스 및 맥 OS X 등 다양한 플랫폼에서 사용할 수 있으며, 실시간 컴퓨터 영상처리에 중점을 두어 객체 인식·모션 추적 등의 응용 프로그램 개발에 많이 사용된다. OpenCV는 기본적인 영상처리부터 고급 수준의 영상처리까지 가능한 많은 수의 컴퓨터 비전 알고리즘 함수를 포함하고 있으며 C++, C#환경에서 주로 사용되었으나, Java환경에서도 사용할 수 있도록 개발되었다 [16].

OpenCV를 이용한 영상처리 알고리즘을 PC에서 사

용하기 위한 프로그램으로 구현하기 위해서는 개발도구가 필요하며 본 논문에서는 Visual Studio 2013을 사용하였다. Visual Studio는 마이크로소프트사에서 개발한 IDE로서 C, C++, C#, 비주얼 베이직 등 다양한 프로그래밍 언어와 안정적인 개발 환경을 제공한다.

III. 구조물 동특성 분석을 위한 영상처리 기법

현재 영상처리를 위해 가장 많이 사용되는 방법은 상호상관법(Cross-Correlation)으로, 상호상관을 이용한 영상처리 계산방법에는 Wilert et al이 제시한 상호상관법(CCW)[17], Ritter et al 이 제안한 상호 상관법(CCR)[18]과 정규상호상관계수를 이용한 방법(NCC-Normalized Cross Correlation)[19] 등이 있으며, 변형 전후의 영상간의 상관성을 이용하여 영상처리를 하는 방법이다. Fincham et al[20]은 두 영상의 일치 분석을 하는데 정규상호상관방법이 가장 적합하다는 연구결과를 발표하였고, 류권규 등[21] 역시 신속하고 정확한 FFT알고리즘 기법에 관한 연구에서 앞선 3가지 방법을 통한 입자영상유속계(PIV)분석의 정확성 검토를 통해 정규상호상관방법이 다른 두 방법에 비해 효과적임을 입증하였다.

따라서 본 논문에서는 영상처리 기법으로 정규상호상관을 사용하였다. 정규상호상관을 사용한 영상처리 방법은 시간에 따라 변화하는 물체의 움직임 추적을 위한 변형 전후의 영상을 매칭 할 경우 단위 픽셀을 사용하지 않고 관심영역인 ROI(Region of Interest)를 설정하고, 설정한 관심영역의 픽셀 집합을 사용하여 계산한다. 정규상호상관은 영상처리 중 특히 템플릿 매칭에 주로 이용하며 연산은 식(1)과 같다.

$$R_{u,v} = \frac{\sum_{xy}(I_1(x,y) - \bar{I}_{1,u,v}) \times (I_2(x-u,y-v) - \bar{I}_2)}{\sqrt{\sum_{xy}(I_1(x,y) - \bar{I}_{1,u,v})^2 \sum_{xy}(I_2(x-u,y-v) - \bar{I}_2)^2}} \quad (1)$$

식(1)에서 I_1 은 원이미지의 픽셀집합을 I_2 는 표적 이미지의 픽셀집합을 뜻하며, $R_{u,v}$ 는 I_1 과 I_2 이미지 사이의 상호상관 결과로서 -1~1사이의 실수 값이다. x와

y 는 이미지 전체 좌표계에서의 가로, 세로 픽셀 값이며, $I_1(x,y)$ 과 $I_2(x,y)$ 는 좌표에서의 명암 값이며, u 와 v 는 x,y 방향으로의 변화량을 나타낸다. \bar{I}_1 과 \bar{I}_2 는 이미지 I_1, I_2 의 평균 명암 값을 나타낸다.

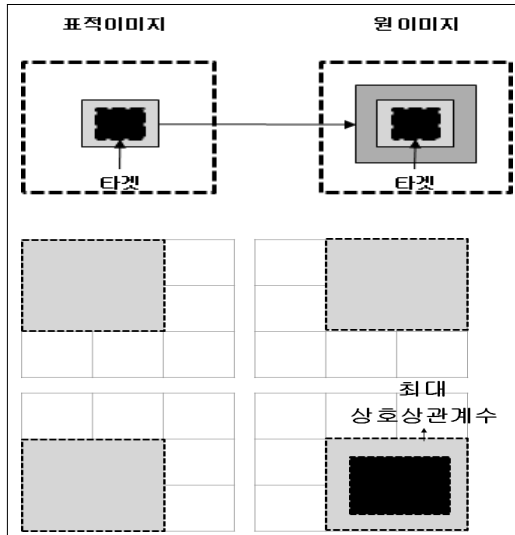


그림 1. 정규상호상관을 이용한 템플릿 매칭 개념

정규상호상관을 이용하여 변형 전후의 이미지를 매칭하여 관계맵을 형성하는 방법은, [그림 1]과 같이 단순히 4*4 픽셀크기의 원이미지와 2*2 픽셀크기의 표적 이미지를 고려할 경우, 표적이미지는 원이미지와 매순간 모든 위치에서 (u,v) 만큼 이동하여 상관성에 관한 연산을 수행하여, R_{max} 을 찾아낸다. 이러한 정규상호상관연산에서 주의할 점은 관심영역의 설정이며, 관심영역은 정규상호상관연산을 수행하기 위한 이미지의 탐색 크기이다. 예를 들면, 표적이미지의 크기가 10*10 픽셀크기이고 관심영역의 크기가 100*100 픽셀크기라면 10*10*100*100번의 연산을 수행해야 한다. 이는 정규상호상관연산에서 모든 픽셀을 비교하기 위해 필요한 연산이다. 따라서 관심영역을 너무 크게 설정하면 계산량이 늘어나게 되어 처리속도가 느리게 되는 단점이 있으나 너무 작게 설정할 경우에는 연산의 정확성이 떨어지기 때문에 주의해서 설정해야 한다. 관심영역의 설정은 측정하고자하는 구조물의 예상움직임을 예측하여 변형된 상태에서도 구조물이 관심영역 내에 포함될 수 있는

최소한의 크기로 적합하게 설정하면 된다, [그림 2]는 관심영역 설정에 대한 개념을 나타내며 1번의 경우 너무 큰 영역설정으로 계산량 증가를 불러오고 3번의 경우 관심영역을 너무 작게 설정하여 정확한 매칭을 불가능하게 한다.

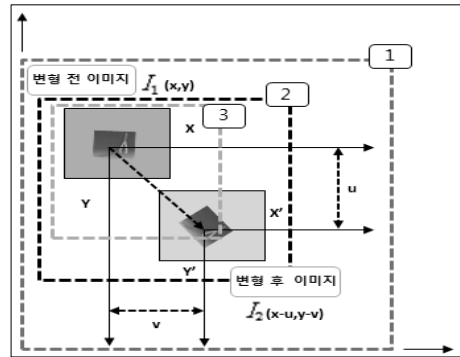


그림 2. 관심영역 설정 기본 예

정규상호상관방법은 이미지 간 선형적인 밝기변화에도 강한 특성을 보이며 두 영상의 적합성을 찾는 데 매우 효과적인 방법이다. 하지만 정규상호상관연산 자체의 복잡한 연산과정과 아무리 적절한 관심영역을 설정하여도 표적이미지를 추적하기 위해 관심영역내의 모든 위치에서 매칭작업을 수행하기 때문에 매우 방대한 양을 계산해야하는 단점이 있다. 이러한 정규상호상관연산 속도를 개선하기 위한 방법으로는 Box-Filtering 방식과 Sum-Table을 활용한 방법이 있으며, Box-Filtering 방식은 이미지의 연산결과를 재사용할 수 없거나 순차적으로 이동하지 않을 경우 연산속도의 개선을 기대할 수 없다[19]. 반면 Lewis[8]가 제시한 Sum-Table 방식은 이미지의 크기와 위치에 상관없이 연산속도를 향상시킬 수 있으며, 본 논문에서는 정규상호상관의 연산속도 향상을 위한 방법으로 Lewis의 Sum-table 계산식을 적용하였다.

IV. 구조물 안정성평가 알고리즘

최근 구조물의 안전성을 확보하고 대형 사고를 미연에 방지하기 위하여 구조 건전성 모니터링(SHM;

Structural Health monitoring)기법에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 구조 건전성 모니터링 기술 중 진동 기반 기법은 보통 구조물에서 발생하는 진동 특성을 분석하여 구조물의 안전성을 평가하는 기술로 진동 응답은 질량(Mass), 감쇠(Damping), 강성(Rigidity)에 영향을 받는다는 것을 기초개념으로 한다[22]. 이러한 진동 기반의 구조 건전성 모니터링 기술을 통해 구조물의 손상을 알 수 있으며, Bendat and Piersol[23]은 진동 특성을 이용하여 구조물의 손상도를 추정하기 위해 두 개의 독립된 주파수응답함수간의 상관계수를 도출하였고, Marwala and Heyns[24]는 주파수응답함수의 환산계수를 제안하고 주파수응답함수보증기준을 제시하였다. 국내에서는 김정태 등[22]이 PSC거더교의 하이브리드 모니터링 경보시스템에 관한 연구에서 주파수응답비보증지수를 이용한 구조물 손상추정방법을 제시하였다. 이정미[25]는 PSC 거더의 휨 진동응답특성 및 정착부 임피던스응답특성에 관한 실험적 연구에서 긴장력 감소에 따른 주파수응답비보증지수 변화를 실험적으로 분석하였으며, 홍동수와 김정태[26]는 실물 콘크리트 교량의 구조건전성 모니터링에 관한 연구에서 주파수응답비보증지수를 이용한 손상추정의 실효성을 입증하였다.

본 논문에서는 영상으로부터 동특성을 분석하여, 구조물의 전역적인 손상여부를 판별하기 위한 방법으로 최근 국내에서 김정태 등에 의해 제안된 주파수응답비보증지수(FRRAC ; Frequency Response Ratio Assurance Criterion)기법을 사용하였다[22]. 주파수응답비보증지수기법은 구조물의 손상전후의 주파수응답비를 비교분석하여 손상유무를 판단하는 기법이다.

$$FRRAC(b,d) = \frac{[FRR_b^T FRR_d]^2}{[FRR_b^T FRR_b][FRR_d^T FRR_d]} \quad (2)$$

식(2)는 주파수응답비보증지수를 나타내며 FRR_b 는 손상 전, FRR_d 는 손상상태의 주파수응답비로, 주파수응답비보증지수(FRRAC)는 1.00을 기준으로 손상이 발생하면 감소한 값을 나타낸다[22][26].

식(2)를 이용하여 관리하고자하는 구조물의 초기 설

계 값을 고려하여 기준값을 설정하고 주파수응답비보증지수가 기준치 이하로 떨어지게 되면 경보를 발생하여 관리자가 신속하게 대처할 수 있도록 한다. Sohn and Farrar[28], Michael et al[29]은 관리도 분석기법을 구조건전성 모니터링에 적용하여, 구조물의 손상유무를 통계적 방법에 의해 관리 할 수 있도록 하였는데, 본 논문에서는 공정관리 및 구조물 모니터링 연구에서 검증된 식(3)과 같은 관리기준을 적용하였다[22][29-31].

$$FRRAC_{LCL} = FRRAC_M - 3FRRAC_\sigma \quad (3)$$

$FRRAC_{LCL}$, $FRRAC_M$, $FRRAC_\sigma$ 은 각각 주파수응답비보증지수 관리기준, 평균, 표준편차를 나타낸다. [그림 3]은 영상처리기법을 이용하여 구조물의 안전관리를 하는 전체적인 흐름도를 나타낸다.

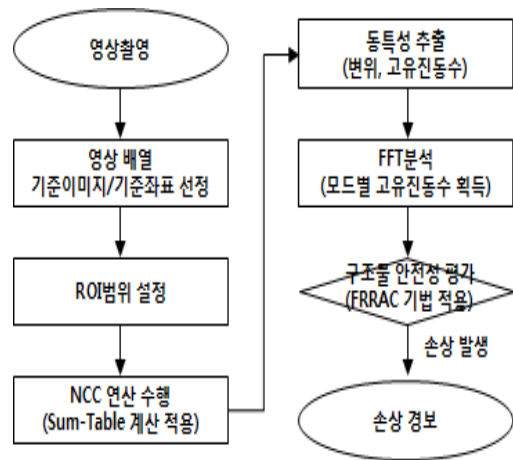


그림 3. 구조물 안전성 평가 흐름도

V. 영상처리기법을 이용한 구조물 안전관리 시스템 구현

본 시스템은 영상장치로부터 관리하고자 하는 구조물의 영상을 촬영하고, 영상처리기법을 이용하여 동특성을 추출하고, 추출한 동특성을 이용하여 구조물 안전성평가를 실시하여 구조물에 중대한 결함이나 이상 징

후가 발생하였을 경우 관리자에게 경보하고 신속하게 대처하여 대형 사고를 미연에 방지하는 데 그 목적이 있다. 본 시스템은 [그림 4]와 같이 영상장치, 메인서버 및 동특성 분석 프로그램으로 구성되어 있다.

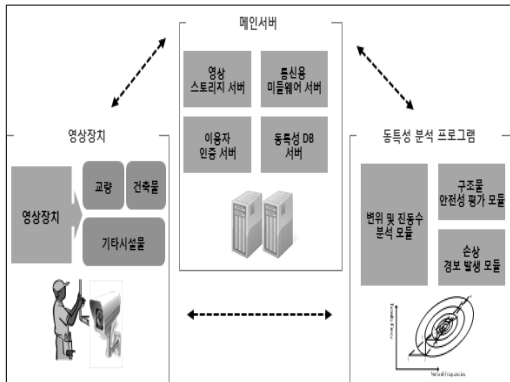


그림 4. 영상처리기법을 이용한 구조물 안전관리 시스템 구성 요소

구조물 영상자료 획득을 위한 영상장치는 디지털카메라나 캠코더 등을 활용할 수 있다. 메인서버는 데이

터를 더욱 효율적으로 관리하기 위해 세분화하였으며, 영상장치로부터 촬영된 영상자료를 관리하는 영상 스토리지서버, 이용자 관리를 위해 정보를 저장하고 권한을 설정하는 이용자 인증 서버, 구조물의 동특성과 손상정보를 관리하기 위한 동특성 DB서버와 원격의 관리자에게 경보를 발송하고 정보를 송수신하기 위한 미들웨어 서버로 구성하였다. 마지막으로 동특성 분석 프로그램은 영상장치로부터 수집한 영상자료를 처리하여 변위와 고유진동수를 분석하고 구조물의 손상을 평가하여 이상징후 발생 시 시스템에 등록된 관리자에게 경보를 발송하는 기능을 수행한다.

동특성 분석 프로그램은 영상처리기법을 이용하여 구조물의 변위와 진동수를 추정하는 동특성 분석 모듈, 주파수응답비보중지수기법을 이용하여 구조물의 손상을 판별하는 구조물 안정성 평가 모듈 및 손상 발생 시 경보메시지를 발송하는 손상 경보 발생 모듈로 구성되어 있다. 동특성 분석프로그램은 기본적으로 Windows 64bit 운영환경에서 작동하도록 설계하였으며 사용자가 간편하게 조작할 수 있도록 GUI환경으로 구현하였

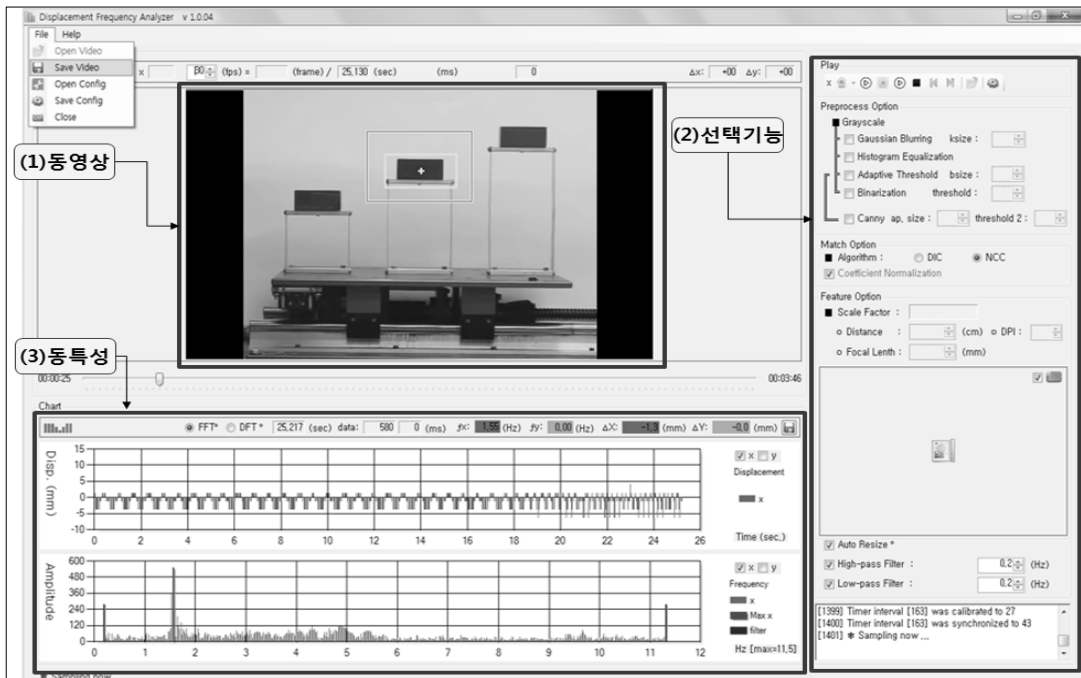


그림 5. 동특성 분석 프로그램 기본 화면

고, [그림 5]는 동특성 분석 프로그램의 기본 화면을 나타낸다. 동특성 분석 프로그램을 이용한 구조물 영상처리 방법은 케이블로 연결된 영상장치를 통해 실시간으로 처리하거나, 외부에서 미리 촬영한 영상 자료를 불러와서 동특성을 분석할 수 있다. 동특성 분석 시 불필요한 주파수대역을 제거하기 위해 주파수 필터링 기능을 추가하였으며, 표적이미지 및 관심영역 설정을 편리하게 할 수 있도록 [그림 5]의 (1)에서와 같이 불러온 동영상상을 화면에 표시하여 마우스를 이용해 사파박스 모양으로 영역을 선택하도록 하였고, 또한 필요한 구간의 데이터만 취득하여 저장할 수 있도록 하여 효율적인 DB관리가 가능하도록 하였다.

또한 촬영된 영상 자료는 초점거리와 촬영한 위치에 따라 피사체의 크기가 달라지므로 이로 인해 동특성 분석 프로그램에서의 분석 값이 달라질 수 있다. 예를 들어, Gauss의 렌즈 방정식에 따르면 피사체의 크기는 식 (4)와 같이 초점거리(f)와 피사체에서 렌즈까지의 거리(d)에 따라 달라진다[32].

$$S = \frac{S^* \times d}{f} \quad (4)$$

만일 서로 다른 위치에서 구조물을 촬영할 경우 화면상에 나타나는 구조물의 크기도 달라지며, 이로 인해 변형된 움직임도 다른 값을 갖게 된다. 따라서 [그림 5]의 (2)의 선택기능에서 영상장치와 구조물과의 거리, 초점거리를 입력하여 환산계수를 통해 이러한 부분을 조정할 수 있도록 하였다. [그림 6]은 동특성 분석 프로그램의 선택기능 부분을 확대한 모습이다.

마지막으로 동특성 분석 프로그램을 통해 분석한 구조물의 동특성은 [그림 5]의 (3)과 같이 한눈에 파악할 수 있도록 구성하였으며, 횡 방향(X)과 수직 방향(Y)의 변위와 고유진동수를 동시에 확인 가능하다. 또한 선택기능에서 입력한 저주파와 고주파 필터링 구간과 1차모드의 고유진동수를 빨간색 막대바로 나타나도록 하였고, 식(2)와 (3)을 이용하여 관리자가 정한 기준치 이하로 떨어지면 시스템에 등록된 현장, 사무실 및 외부 안전 관리자에게 경보메시지를 발송하게 된다.

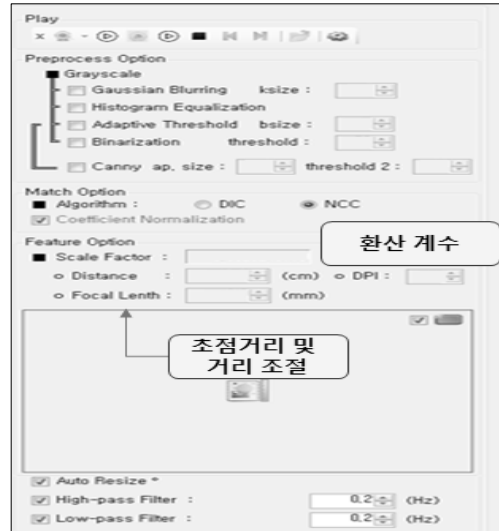


그림 6. 동특성 분석 프로그램 선택 기능

VI. 결론

본 논문에서는 기존 계측센서에 비해 보다 경제적이고 효과적인 방법으로 영상처리기법을 이용한 구조물 동특성 분석 시스템을 개발하였다.

영상처리기법을 이용한 구조물 동특성 분석 시스템은 디지털카메라와 같은 영상장비, 메인서버 및 동특성 분석 프로그램으로 구성되어있으며, 구조물의 동특성을 측정하기 위해, 부가적인 장비 설치 및 복잡한 현장 실험이 필요하지 않아 기존 센서에 의한 방식보다 인력과 시간을 줄일 수 있어 측정 당 소요비용을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 우선적으로 구조물 동특성분석을 위해 필요한 영상장치의 요구 성능을 확인하기 위해 구조 모니터링이 중요한 국내 공용교량과 고층건축물의 진동대역을 조사하여 최소 30의 초당 프레임수가 요구됨을 확인하였다.

본 시스템에 적용된 영상처리기법은 실외환경에서 폭넓게 활용이 가능한 비마커 방식과 템플릿 매칭에 효과적인 정규상호상관방법을 사용하였으며, 연산속도가 느린 단점을 개선하기 위해 Sum-Table 기법을 적용하였고, 기존 방식에 비해 약 1/8 수준으로 영상처리에 소

요되는 시간을 줄일 수 있다.

또한 기존의 영상처리를 이용한 구조물 동특성 분석 방법은 단순한 측정기술로서, 구조물의 손상 상태를 판단하기 위해 전문가에 의한 분석 단계가 필요해 현장에서 제대로 된 손상 평가를 할 수 없는 단점이 있었다. 본 시스템은 이러한 부분을 보완하기 위하여 구조물의 손상전후의 주파수응답비를 이용하여 구조물의 손상도를 추정하는 주파수응답비보증지수와 관리도 분석기술을 활용한 구조물 안전성 평가 알고리즘을 적용하여 현장에서 바로 구조물의 손상평가를 수행할 수 있는 장점이 있다.

이처럼 본 논문에서 개발한 영상기반의 구조물 동특성 분석 시스템은 기존의 구조물에 부착하거나 고정해서 사용하는 계측 센서에 비해 설치 및 이동이 간편하고, 현장에서 바로 구조물의 손상도를 평가할 수 있으며 시스템이 단순하여 향후 구조물 안전관리에 폭넓게 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] J. H. Lee, S. J. Cho, and S. H. Sim, "Vision-Based Displacement Measurement System Operable at Arbitrary Positions," *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.18, No.6, pp.123-130, 2014.
- [2] J. H. Lee, J. H. Kim, W. M. Jeong, and J. W. Chae, "Vision-Based Dynamic Motion Measurement of a Floating Structure Using Multiple Targets under Wave Loadings," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.32, No.14, pp.19-30, 2012.
- [3] S. W. Kim and N. S. Kim, "Multi-point Dynamic Displacement Measurements of Structures Using Digital Image Correlation Technique," *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.13, No.3, pp.11-19, 2009.
- [4] J. C. Park, J. S. Cho, H. B. Gil, and J. I. Shin, "Vision-Based Technology for Structural Health Monitoring of Bridge," *Magazine of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.18, No.2, pp.10-16, 2014.
- [5] J. Y. Kim and Y. H. Cho, "Development of Crack Detection Program on Asphalt Pavement," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.22, No.4-D, pp.639-647, 2002.
- [6] J. S. Cho and Y. Huh, "Image Processing Technique for Measuring the Static Displacement of Bridges from General Inspection Photograph," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.31, No.3A, pp.173-180, 2011.
- [7] S. J. Cho, S. H. Sim and E. S. Kim, "On-Site Performance Evaluation of a Vision-based Displacement Measurement System," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.15, No.9, pp.5854-5860, 2014.
- [8] J. P. Lewis, "Fast Normalized Cross-Correlation," *Vision Interface*, pp.120-123, 1995.
- [9] T. W. Choi, H. C. Lee, G. T. Hur, and E. S. Kim, "Robust Threshold Determination on Various Lighting for Marker-based Indoor Navigation," *Journal of the Korea Contents Association*, Vol.12, No.1, pp.1-8, 2012.
- [10] C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," Reprinted with corrections from *The Bell System Technical Journal*, Vol.27, pp.379-423, pp.623-656, 1948.
- [11] J. M. Ko and Y. Q. Ni, "Technology Developments in Structural Health Monitoring of Large-Scale Bridges," *Journal of the Engineering Structures*, Vol.27, No.12, pp.1715-1725, 2005.
- [12] S. S. Ahn and I. K. Lee, "Consideration of Dynamic Serviceability Assessment of Bridges," *Magazine of Korean Society of Steel Construction*, Vol.15, No.4, pp.84-89, 2003.
- [13] S. W. Yoon and Y. K. Ju, "Natural Frequency of Tall Building Through Ambient Vibration

- Measurement,” Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.15, No.2, pp.117-124, 2003.
- [14] S. W. Yoon and Y. Park, “Comparison of Natural Frequency of Domestic and Foreign Long-Spanned Structure,” Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.9, No.1, pp.79-85, 2009.
- [15] J. H. Jeong, H. J. Kim, and S. Y. Choi, “Comparison of Design Code Damping Formulae and Measured Damping Ratios of Tall Buildings under Wind Loads,” Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.29, No.4, pp.11-18, 2013.
- [16] Y. J. Kim and D. H. Kim, “Smart Phone Based Image Processing Methods for Motion Detection of a Moving Object via a Network Camera,” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.19, No.1, pp.65-71, 2013.
- [17] C. E. Willer and M. Gharib, “Digital Particle Image Velocimetry,” Journal of Experiments in Fluids, Vol.10, No.4, pp.181-193, 1991.
- [18] G. X. Ritter and J. N. Wilson, “Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra,” CRC Press, 2000.
- [19] S. Kwon, C. H. Lee, J. H. Lee, B. I. Moon, and Y. H. Lee, “Efficient Hardware Architecture for Fast Image Similarity Calculation,” Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, Vol.48, No.4, 2011.
- [20] A. M. Fincham and G. R. Spedding, “Low cost, High Resolution DPIV for Measurement of Turbulent Fluid Flow,” Journal of Experiments in Fluids, Vol.23, Issue 6, pp.449-462, 1997.
- [21] K. K. Yu, D. S. Kim, and B. M. Yoon, “Development of Fast and Exact FFT Algorithm for Cross-Correlation PIV,” Journal of the Korea Water Resources Association, Vol.38, No.10, pp.851-859, 2005.
- [22] J. T. Kim, J. H. Park, D. S. Hong, and W. B. Na, “Hybrid Damage Monitoring Scheme of PSC Girder Bridges using Acceleration and Impedance Signature,” Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol.28, No.1A, pp.135-146, 2008.
- [23] J. S. Bendat and A. G. Piersol, “Engineering applications of correlation and spectral analysis,” Wiley, USA, 1993.
- [24] T. Marwala and P. S. Heyns, “New Criteria comparing frequency response functions,” R&D Journal, Vol.14, No.3, pp.49-55, 1998.
- [25] J. M. Lee, *An Experimental Study on Bending Vibration Response and Impedance Response of Anchor Plate Characteristics on PSC Girder by Prestress-loss*, Master’s Degree Thesis, Pukyong National University, 2008.
- [26] D. S. Hnng and J. T. Kim, “Structural Health Monitoring of Full-Scale Concrete Girder Bridge using Acceleration Response,” Magazine of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.14, No.1, pp.165-174, 2010.
- [27] H. Sohn and Charles R. Farrar, “Statistical Process Control and Projection Techniques for Structural Health Monitoring,” Proceedings of the European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, Madrid, Spain. 2000.
- [28] M. L. Fugate, H. Sohn, and C. R. Farrar, “Vibration-based damage detection using statistical process control,” Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.15, No.4, pp.707-721, 2001.
- [29] D. S. Hnng and J. T. Kim, “Vibration-based Damage Monitoring Scheme of Steel Girder Bolt-Connection Member by using Wireless Acceleration Sensor Node,” Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol.25, No.1, pp.81-89, 2012.

[30] J. H. Park, J. T. Kim, and S. Y. Le, "Performance Evaluation of Imote2-Platformed Wireless Smart Sensor Node for Health Monitoring of Harbor Structures," Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol.23, No.1, pp.26-33, 2011.

[31] J. B. Lee, *A Study on the Improvement for the INSERT NUT Insertion of Cellular Phone Cases Injection using 6 Sigma Method*, Master's Degree Thesis, Inha University, 2010.

[32] M. G. Hwang, D. M. Kim, and D. W. Har, "Extraction of Subject Size in Still Image Using Floor Pattern," Journal of the Korea Contents Association, Vol.11, No.4, pp.11-17, 2014.

저 자 소 개

조 병 완(Byung-Wan Jo)

정회원



- 1979년 : 한양대학교 토목공학과 (공학사)
 - 1985년 : Ohio. University 토목공학과(공학석사)
 - 1988년 : University of Florida 토목공학과(공학박사)
 - 1993년 ~ 현재 : 한양대학교 건설환경공학과 교수
- <관심분야> : ICT기반컨텐츠, 시설물 유지관리, 무선 센서 네트워크, ICT기반재난관리컨텐츠

이 윤 성(Yun-Sung Lee)

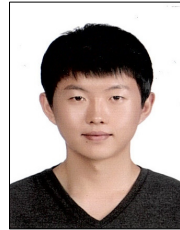
정회원



- 2009년 : 한양대학교 토목공학과(공학사)
 - 2011년 : 한양대학교 건설환경공학과(공학석사)
 - 2014년 : 한양대학교 건설환경공학과(박사수료)
- <관심분야> : ICT기반컨텐츠, 구조건전성모니터링, ICT기반재난관리컨텐츠

김 정 훈(Jung-Hoon Kim)

준회원



- 2015년 : Rensselaer Polytechnic Institute, Civil Eng.(공학사)
- 현재 : 한양대학교 건설환경공학과(석사과정)

<관심분야> : 에너지 하베스팅, 구조건전성모니터링, 안전관리, ICT기반컨텐츠

김 도 근(Do-Keun Kim)

정회원



- 2003년 : 조선대학교 토목공학과(공학사)
- 2005년 : 한양대학교 토목공학과(공학석사)
- 2007년 : 한양대학교 토목공학과(박사수료)

<관심분야> : 교량 유지관리, 시설물 자산관리, 센서 네트워크, 안전관리

윤 광 원(Kwang-Won Yoon)

정회원



- 2015년 : 한양대학교 토목공학과(공학박사)
- 2015년 : 서울시 안전총괄본부 안전총괄과

<관심분야> : 교량 유지관리, 시설물 자산관리, ICT기반재난관리컨텐츠