

El-centro 지진파형을 이용한 CAFB의 최적화 및 교량 지진응답실험에 관한 연구

A Study on the Optimization and Bridge Seismic Response Test of CAFB Using El-centro Seismic Waveforms

허광희¹⁾ · 이진옥²⁾ · 서상구³⁾ · 박진용⁴⁾ · 전준용^{5)*}

Heo, Gwang Hee¹⁾ · Lee, Chin Ok²⁾ · Seo, Sang Gu³⁾ · Park, Jin Yong⁴⁾ · Jeon, Joon Ryong^{5)*}

¹⁾건양대학교 해외건설플랜트학과 교수, ²⁾충남대학교 토목공학과 교수, ³⁾충남도립대학교 건설정보과 교수, ⁴⁾건양대학교 재난안전공학과대학원 석사과정, ⁵⁾건양대학교 재난안전공학과대학원 연구교수

¹⁾Professor, Department of International Civil and Plant Engineering, Konyang University, ²⁾Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University, ³⁾Professor, Department of Civil Engineering and Informatics, Chungnam State University, ⁴⁾Researcher, Department of Disaster Management Engineering, Konyang University, ⁵⁾Research Professor, Department of Disaster Management Engineering, Konyang University

/ A B S T R A C T /

This study aims to optimize the cochlea-inspired artificial filter bank (CAFB) using El-Centro seismic waveforms and test its performance through a shaking table test on a two-span bridge model. In the process of optimizing the CAFB, El-Centro seismic waveforms were used for the purpose of evaluating how they would affect the optimizing process. Next, the optimized CAFB was embedded in the developed wireless-based intelligent data acquisition (IDAQ) system to enable response measurement in real-time. For its performance evaluation to obtain a seismic response in real-time using the optimized CAFB, a two-span bridge (model structures) was installed in a large shaking table, and a seismic response experiment was carried out on it with El-Centro seismic waveforms. The CAFB optimized in this experiment was able to obtain the seismic response in real-time by compressing it using the embedded wireless-based IDAQ system while the obtained compressed signals were compared with the original signal (un-compressed signal). The results of the experiment showed that the compressed signals were superior to the raw signal in response performance, as well as in data compression effect. They also proved that the CAFB was able to compress response signals effectively in real-time even under seismic conditions. Therefore, this paper established that the CAFB optimized by being embedded in the wireless-based IDAQ system was an economical and efficient data compression sensing technology for measuring and monitoring the seismic response in real-time from structures based on the wireless sensor networks (WSNs).

Key words: Compression sensing technique, Cochlea-inspired artificial filter bank, Band-pass filter optimizing algorithm, Peak-picking algorithm, Reconstruction error, Compressive ratio, Spectrum error, Vibration-based structural health monitoring

1. 서론

건설구조물은 시공 후에도 다양한 외력과 환경적 요소에 지속적으로 노출되어 유사 시 대형사고가 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 최근 건설 분야에서는 시설물의 안전 및 유지관리를 위한 건전도 모니터링(Structural Health Monitoring; SHM)에 대한 기술이 대두되고 있다[1-5]. 이때 기존

건설구조물의 건전도 모니터링을 위한 구조응답의 계측은 대부분 유선계측 시스템에 의존하고 있다[6-9]. 하지만 유선계측 시스템은 설치, 이동에 제약이 따르고, 특히 획득하고자 하는 구조응답의 종류에 따라 서로 다른 데이터 로거를 개별적으로 사용할 경우 구조응답의 동기화가 어렵다[10, 11]. 또한, 이들 데이터 로거는 계측 채널이 제한적이기 때문에 복잡하고, 다양한 건설구조물에서 서로 다른 센서를 이용한 많은 채널의 구조응답을 효과적으로 획득하는데 한계가 있다[12-15]. 이러한 기술적 한계를 극복하고자 최근에는 현격히 발전한 IT 및 무선통신 기술을 접목해 WSNs(Wireless Sensor Networks)를 이용한 SHM에 관한 연구가 활발하다[3], [10-11], [16-18]. WSNs를 이용한 SHM 기술은 상대적으로 저렴하게 계측 시스템

*Corresponding author: Jeon, Joon Ryong

E-mail: jrjeon@konyang.ac.kr

(Received January 2, 2020; Revised January 15, 2020; Accepted January 21, 2020)

을 구성/확장할 수 있다. 또한, 무선을 활용하기 때문에 비효율적인 유선 케이블링 없이 센서의 설치, 이동이 자유롭다는 장점을 갖는다[11], [19-20]. 이때 WSNs를 이용한 SHM 기술은 제한된 RF 성능범위 내에서 다량의 구조응답을 실시간 획득할 수 있어야 한다[3, 21]. 특히 구조물의 동적특성을 평가하기 위해서는 동적응답(가속도 등)의 획득이 요구되는데, 정적응답에 비해 상대적으로 많은 데이터량이 요구되는 동적응답을 무선으로 획득, 전송함에 있어 병목현상에 따른 데이터 손실과 대용량 DB(Data Base) 구축, 관리에 따른 비용이 증가될 수 있다[22].

이때 압축센싱(CS) 기술은 무선통신의 환경에서 대용량의 데이터를 처리(송신-수신)하기 위한 기술적 대안이 될 수 있다. 이를 위하여 정보통신 및 신호처리분야에서는 고전적으로 Nyquist 샘플링 이론과 웨이블릿 이론을 이용한 압축센싱 기술이 연구되었다[23, 24]. 하지만 이들 연구는 CS 기술에 대한 수치적인 연구가 대부분이고, 실제 구조물 환경에서 무선통신 기반 실시간 계측(시스템)을 통한 실험적인 연구는 부족하다. 이러한 맥락에서 최근 건설분야에서는 WSN 기반 SHM을 위하여 H/W 기반 필터뱅크를 개발하여 실험적으로 평가하였다[25, 26]. 여기서 필터뱅크(filter bank)란, 신호처리분야에서 정의되는 대역통과필터의 배열이다. 이는 전체 입력 신호중에서 관심 주파수 대역의 신호(정보)만을 선택적으로 표본화(resampling)하여 획득할 수 있기 때문에, 데이터의 압축센싱의 효과를 기대할 수 있다. 따라서 필터뱅크는 제한된 속도를 갖는 무선통신환경에서 데이터의 병목현상을 줄이고, 효율적으로 데이터를 획득할 수 있다. 하지만 필터뱅크는 대상 구조물이 변경(즉, 관심 주파수 대역의 변화)될 경우, 새롭게 설계/제작되어야 한다. 따라서 이 경우에 필터뱅크를 H/W적으로 새롭게 설계/개발하기 위해서는 많은 시간과 비용이 요구된다. 또한 새롭게 설계/개발된 H/W 기반 필터뱅크를 계측시스템에 채용/결합하기 위해서는 인터페이스의 설계 및 H/W간 충돌(호환 등)과 같은 시스템의 안정성 검증이 요구된다. 결국 H/W 기반 필터뱅크를 이용한 SHM 시스템은 실무에서의 활용성 측면에서 비효율/비경제적일 수 있다.

이러한 H/W 기반 필터뱅크의 단점을 극복하자, 선행연구에서는 구조물의 동적응답을 압축센싱하기 위하여 달팽이관 원리를 이용한 S/W 기반의 필터뱅크를 개발하고, 이를 CAFB라고 명명하였다[27]. CAFB는 필터뱅크의 최적화 조건을 프로그램 언어를 이용해 S/W적으로 쉽고 빠르게 수정/작성하고, 이를 임베디드 S/W 기술[28, 29]을 이용하여 계측 시스템에 정확히 적용(FPGA 기반 embedded)할 수 있는 장점이 있다. 하지만 이러한 장점에도 불구하고 선행연구에서 개발된 CAFB가 WSN 기반의 SHM에 활용되기 위해서는 다양한 실험적 검증이 요구된다. 특히 대상 구조물의 변화(즉, 관심 주파수 대역의 변화)에 따라 CAFB는 달리 최적화되어야 하기 때문에, 필터뱅크의 최적화를 위한 기준신호의 변화에 따른 효과를 평가해야 한다. 그리고 CAFB는 구조물의 SHM을 위해서 평상시의 구조(동적)응답 뿐만 아니라 지진과 같은 예측하기 어려운 위험/돌발 상황에서도 올바르게 작동해야 한다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 선행연구된 CAFB의 실험적 검증을 위해 다음 두 가지 목적으로 후속연구를 진행하였다: 첫 번째 목적은 건설분야의 대표적인 랜덤(지진)파형을 이용하여 최적화된 CAFB의 데이터 압축 성능과 효과를 평가하였다. 두 번째 목적은 지진상황에서 구조물의 동적응답을 포함한 지진응답을 CAFB가 실시간으로 압축하여 획득할 수 있는지 검증하였다. 이를 위해 먼저 건설분야의 대표 랜덤파형(EI-centro 지진파

형)으로 CAFB를 최적화하였고, 최적화된 CAFB를 무선기반의 IDAQ 시스템에 임베디드하였다. 다음, 지진응답 실험을 위해 가진대에 설치된 2경간 교량을 이용하여 EI-centro 지진파형으로 가진하였고, 동시에 2경간 교량의 동적응답을 무선기반 IDAQ 시스템을 이용해 실시간 획득하였다. 지진응답 실험으로 획득된 압축신호를 원신호와 상호 비교하여 CAFB의 성능을 정량적으로 평가하였다. 실험 결과로부터, 본 논문에서 EI-centro 지진파형으로 최적화된 CAFB는 측정대상 구조물의 동적응답을 관심된 주파수 대역(10 Hz 미만)을 중심으로 압축하여 획득하는데 타당하였다. 또한, 지진상황에서는 지진응답을 포함하면서도 SHM을 위한 대상 구조물의 동적응답을 효과적으로 압축센싱할 수 있었다. 최종적으로, 이상의 결과로부터 본 논문에서 평가된 CAFB는 WSNs 기반의 SHM을 수행하기 위한 경제적이고 효율적인 구조물 동적응답 압축센싱 기술임을 실험적으로 확인하였다.

2. 달팽이관 원리기반의 인공필터뱅크(CAFB)

2.1 CAFB 개념과 특성

인체의 달팽이관은 소리를 뇌에 전달하기 위하여 가청주파수 대역(Audio frequency band)을 중심으로 여러 개의 유모세포(Hair cells)에서 소리의 특정 주파수를 수집하는 원리로 작동한다. 이러한 인체의 달팽이관 원리를 이용한 CAFB는 구조물의 전체 동적응답 중에서 관심 주파수 대역의 신호만을 압축센싱하기 위하여 S/W 기반으로 고안(설계)된 대역통과필터들의 배열(즉, S/W 기반의 필터뱅크)이다[27]. S/W 기반으로 고안(설계)된 CAFB는 다음 두 가지 장점이 있다. 첫 번째 장점은 필터뱅크의 최적화 조건을 상용프로그래밍 언어를 이용해 S/W적으로 쉽고 빠르게 수정/작성할 수 있다. 두 번째 장점은 S/W 기반으로 수정/작성된 필터뱅크는 EST(Embedded Software Technique)을 이용하여 계측 시스템에 오류없이 정확하게 적용(FPGA 기반 임베디드)할 수 있다.

한편, 필터뱅크는 Fig. 1의 Step.1~3과 같이 입력신호(Step.1)를 주파수 대역별로 분해(Step.2)하고, 이를 다시 재구성(합성)(Step.3)하여 출력하는 과정을 수행한다. 이러한 신호의 분해 및 합성과정을 수행하는 필터뱅크는 설계자의 목적 정보 및 관심 주파수에서 따라 달리 설계될 수 있다. 이때 필터뱅크 내의 대역통과필터의 수가 많고, 그 간격이 조밀할수록 입력신호 대비 출력신호는 정확도가 높아지는 특성을 갖는다. 하지만, 대역통과필터

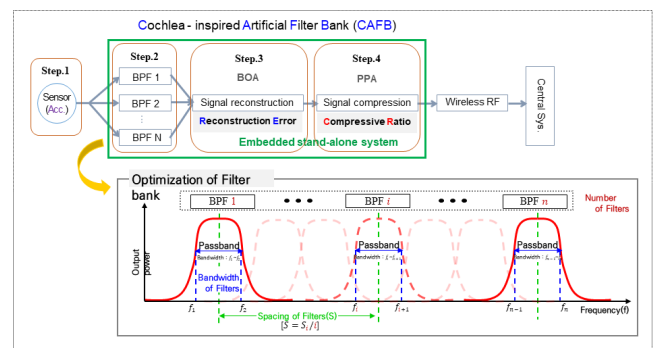


Fig. 1. Concept and Characteristic of CAFB

터의 수가 많아질수록 데이터 연산, 처리 효율은 감소하게 되므로, 결국 필터뱅크의 최적화가 요구된다. 필터뱅크의 최적화를 위해서는 Fig. 1에 나타난 대역통과필터의 (i) 개수(Number of Band Filters, red), (ii) 대역폭(Bandwidth, blue), (iii) 간격(Spacing, green) 등을 결정해야 하며, 이러한 3가지 설계요소를 동시에 만족시킬 수 있는 조건을 찾기 위해 수치적/반복적인 연산이 요구된다.

또한, 한편, 필터뱅크 내의 대역통과필터를 통해 분해-합성된 출력신호는 입력신호 대비 관심된 특정성분(정보)만을 포함하므로, 목적 데이터의 취득관점에서는 유효할 수 있지만, 이때 출력신호는 대역통과필터의 특성상 입력신호의 샘플링 간격과 동일한 크기를 갖는다. 결국 필터링 전과 후의 데이터 크기는 동일하므로, 데이터의 획득, 전송, 관리 측면에서는 이점을 포함하지 못한다. 특히, 제한된 통신속도 범위를 갖는 WSNs 기반으로 구조물의 동적응답을 효율적으로 획득하기 위해서는 데이터의 압축기술이 요구된다. 이를 위해 선행연구에서 개발된 달팽이관 원리기반의 인공필터뱅크(CAFB)는 Fig. 1의 Step.2~4와 같이 입력신호를 분해(Step.2)-합성(Step.3)-압축(Step.4)할 수 있도록 대역통과필터 최적화 알고리즘(BOA)과 침두치 색출 알고리즘(PPA)으로 구성하였다[27].

2.2 대역통과필터 최적화 알고리즘(BOA)

대역통과필터 최적화 알고리즘(BOA)은 건설구조물의 SHM을 위하여 요구되는 목적 모드를 결정하는데 적합하도록 관심 주파수 대역을 중심으로 필터뱅크를 구성하고, 이것으로부터 재건신호를 산출하도록 개발하였다[27]. 이때 BOA는 대역통과필터의 개수, 대역폭, 간격을 반복적으로 변경하며 재건신호를 산출한다. BOA에서 산출된 재건신호는 대상 구조물로부터 획득한 원시신호(raw(original) signal)와의 비교를 통해 원시신호 대비 재건신호의 추종능력을 평가한다. 본 논문에서는 원시신호 대비 BOA에서 산출된 재건신호의 추종능력을 평가하기 위하여 Fig. 2 및 식(1)로부터, 식(2)의 재건오차(Reconstruction Error; RE)를 이용하였다.

$$y(t) \approx x(t) = \sum_{i=1}^N x_i(t) \quad (1)$$

$$RE = \frac{\int_0^T ||y(t)| - |x(t)|| / |y(t)|}{T} = \frac{\int_0^T |\delta_i| / |y(t)|}{T} \quad (2)$$

여기서, $y(t)$ 는 응답시간 별 원시신호, $x(t)$ 는 응답시간 별 재건신호, $x_i(t)$ 는 응답시간 별 필터뱅크로부터 i 번째 출력된 재건신호, T 는 응답시간의 전체 길이(sec.)이다. 식(2)에 정의한 재건오차는 원시신호와 재건신호의 상대적인 차이를 절대값으로 나타낸 것으로, 재건오차가 0에 가까울수록 재건능력이 우수한 것으로 판단할 수 있다.

2.3 침두치 색출 알고리즘(PPA)

침두치 색출 알고리즘(PPA)은 식(1)을 통해 결정된 재건신호를 기준으로 전체신호의 침두치(peak values)만을 찾아서 해당 시간정보와 가속도

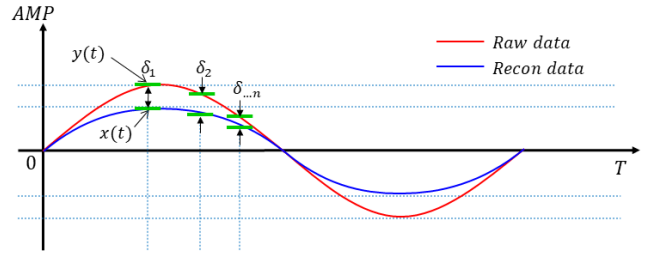


Fig. 2. Concept of reconstruction error (RE)

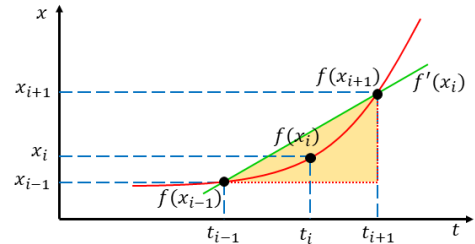


Fig. 3. Concept of central difference method for CR

신호값을 재-표본화(re-sampling)하여 압축신호를 산출하도록 개발하였다[27]. 이때 침두치 판별은 현재 신호를 기준으로 이전 단계의 신호와 이후 단계의 신호의 변화율을 Fig. 3 및 식(3)의 중앙차분법을 이용해 계산하고, 변화율의 부호변화가 발생되었을 경우 바뀌기 전의 신호값을 색출하였다. 재건신호 대비 압축신호의 상대적인 데이터의 크기(Size)는 식(4)의 압축률(Compressive Ratio; CR)을 이용하여 평가하였다.

$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad (3)$$

$$CR = \frac{NS_0 - NS_C}{NS_0} \quad (4)$$

여기서, x 는 재건신호, t 는 재건신호 x 의 샘플링 간격(시간), $f(x)$ 는 재건신호 x 의 함수이다. Fig. 3으로부터 현재 기준의 i 번째 재건신호 x_i 에 대한 도함수 $f'(x_i)$ 는 식(3)과 같다. 또한, 식(4)의 압축률에서 NS_C 는 압축신호의 데이터 개수, NS_0 는 원시신호의 데이터 개수이다. 이때 식(4)의 압축률이 0에 가까워지면 압축효과는 우수한 것으로 판단할 수 있다. BOA와 PPA로 구성된 CAFB는 3.1절의 필터뱅크 최적화와 3.2절의 IDAQ 시스템에 적용을 위해 Matlab으로 코딩하였다.

3. CAFB 기반 IDAQ 시스템

3.1 El-centro 지진파형을 이용한 CAFB의 최적화

앞서 2장에서 나타난 CAFB는 대역통과필터 최적화 알고리즘 및 침두치 색출 알고리즘으로 구성하였다. 이들 알고리즘은 일련의 연산과정을 통해 구조물로부터의 원시신호를 최적의 조건으로 분해-재건-압축한다. 본 장에서는 상대적으로 유연한 건설구조물의 동적응답을 압축센싱하기 위해

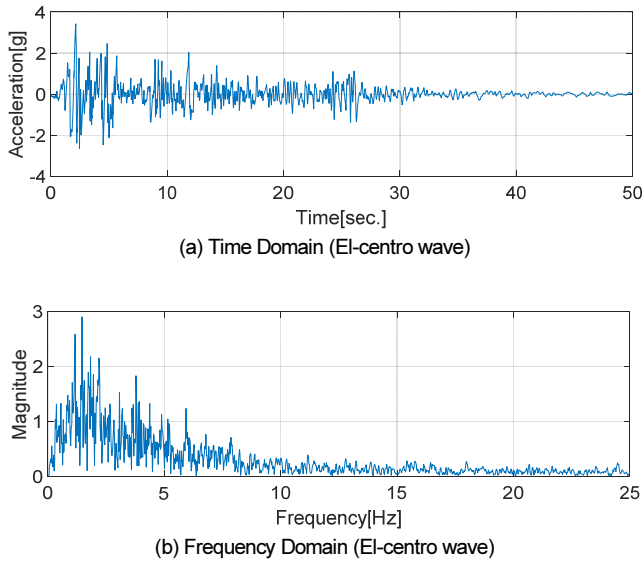


Fig. 4. El-Centro Seismic Waveform for Reference Signal of CAFB

여 건설분야에서 대표되는 랜덤지진파형이면서, 서로 다른 주파수 영역을 가지고 있는 El-centro(1940, SE)을 이용하여 CAFB를 최적화 하였다.

Fig. 4는 인공필터뱅크의 최적화를 위해 기준신호로 사용된 El-centro 지진파형을 시간 및 주파수 영역(FFT 분석을 통한 magnitude spectrum)으로 각각 나타낸 것이다. 여기서 Fig. 4(b)의 El-centro 지진파형의 주파수 영역을 살펴보면, 10 Hz 미만에 스펙트럼 성분이 집중되어 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 El-centro 지진파형으로 CAFB를 최적화 할 경우, CAFB는 10 Hz 미만의 관심주파수 대역을 중심으로 신호를 필터링 할 수 있다. 또한, 일반적으로 건설분야의 장대형 구조물은 상대적으로 유연한 거동특성을 갖기 때문에 전진도 모니터링을 위해 요구되는 목적 모드의 분포 범위는 10 Hz 미만의 특정 주파수 대역에 국한될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 상대적으로 유연한 건설구조물의 동적응답을 선별적으로 압축하여 획득하고자 10 Hz 미만에 스펙트럼 성분이 집중되어 있는 특성을 갖는 지진파형으로 CAFB의 최적화 연구를 진행하였다. 본 논문에서는 이러한 주파수 특성을 갖는 El-centro 지진파형을 가정하였고, 이때 대형 건설구조물의 동적응답을 획득하고자 El-centro 지진파형으로 CAFB를 최적화하였다. 이때 CAFB의 최적화를 위해서 크게 대역통과필터의 개수(numbers), 대역폭(bandwidth) 그리고, 간격(spacing) 등을 결정해야 한다. 먼저 대역통과필터의 개수를 결정하기 위하여 BOA를 이용해 필터의 개수를 1개부터 20개까지(총 20개의 경우) 변경하면서 식 (2)의 재건오차(RE)를 산출하였다.

Fig. 5는 El-centro 지진파형에 대한 대역통과필터의 개수 변화에 따른 재건오차를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 보면, 대역통과필터의 개수가 6개 미만일 경우에는 재건오차의 변화율이 크게 나타났으며, 반면 대역통과필터의 개수가 6개 이상일 경우에는 재건오차의 변화율이 상대적으로 작게 나타났다. 이때 El-centro 지진파형을 이용한 재건신호의 오차는 대역통과필터의 개수가 11개일 때 최소값을 보였다. 따라서 본 논문에서는 El-centro 지진파형을 이용하여 CAFB를 최적화하기 위한 대역통과필터의 개수를 11개로 결정하였다.

한편, 앞서 결정된 대역통과필터의 개수(11개)는 CAFB의 응답성능을

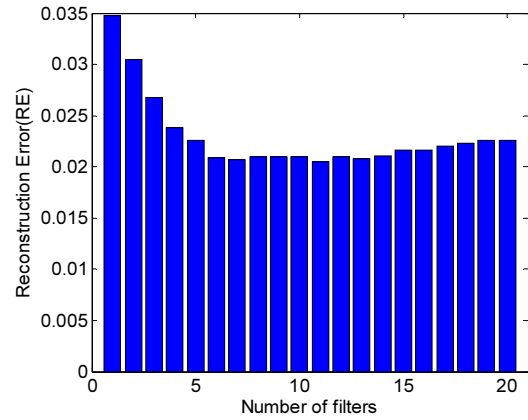


Fig. 5. Reconstruction Error results of Number of Filters

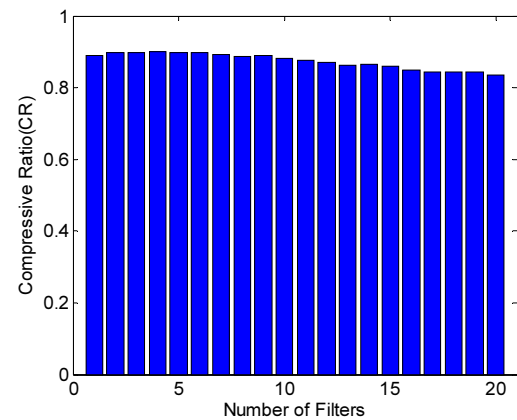


Fig. 6. Compressive Ratio results of Number of Filters

최대로 보이기 위하여 재건오차가 최소값을 갖는 조건으로 결정하였다. 하지만, 필터의 개수가 많아지면 H/W 또는 S/W적으로 필터뱅크를 설계/구성에 있어서 시간과 비용이 추가될 수 있으며, 특히 SHM을 위해 필요한 대용량의 동적 데이터를 필터링하기 위해서는 많은 계산량을 요구하기 때문에 실시간으로 데이터를 획득하는데 제약이 따를 수 있다. 따라서 본 논문에서는 대역통과필터의 개수를 결정함에 있어서 식 (4)의 데이터의 압축률(CR)을 함께 고려하였다. Fig. 6은 El-centro 지진파형에 대한 대역통과필터의 개수 변화에 따른 압축률을 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 보면, El-centro 지진파형을 이용한 경우 대역통과필터의 개수 변화에 따른 데이터 압축률은 모두 0.8 이상으로 상호 유사하게 나타났으며, 대역통과필터의 개수 변화에 따른 데이터 압축률의 영향은 미미한 것으로 나타났다. 따라서 El-centro 지진파형을 이용한 경우 CAFB를 최적화하기 위해 앞서 결정된 11개의 대역통과필터의 개수는 타당하였다.

다음으로, 대역통과필터의 설계요소인 대역폭과 간격을 결정하기 위하여, 본 논문에서는 앞서 결정된 11개의 대역통과필터의 개수를 이용하여 대역폭과 간격의 변화에 따른 재건오차를 산출하였다. 이때 대역통과필터의 대역폭과 간격은 모두 0.1 Hz에서부터 1.0 Hz까지 0.1 Hz씩 증가시켜, 총 100개의 경우에 대한 재건오차를 산출하였다. Table 1은 El-centro 지진파형을 이용하여 산출된 대역통과필터의 대역폭과 간격의 변화에 따른 재건오차를 나타낸 것이다.

Table 1의 El-centro 지진파형을 이용한 경우, 대역통과필터의 대역폭

Table 1. RE values for a Filter Bank with 11 filters

Filter Spacing (Hz)	Bandwidth of Filters (Hz)										
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
0.1	0.02871	0.02536	0.02624	0.02902	0.03295	0.03753	0.04172	0.04527	0.04869	0.05162	
0.2	0.02802	0.02365	0.02603	0.03089	0.03696	0.04341	0.04985	0.05567	0.06165	0.06647	
0.3	0.02781	0.02148	0.02177	0.02694	0.03361	0.04121	0.04846	0.05555	0.06251	0.06933	
0.4	0.02808	0.02057	0.01841	0.02176	0.02773	0.03466	0.04202	0.04893	0.05572	0.06229	
0.5	0.02998	0.02263	0.01785	0.01724	0.02045	0.02554	0.03143	0.03788	0.04444	0.05038	
0.6	0.02968	0.02316	0.01816	0.01604	0.01679	0.02018	0.02468	0.02990	0.03527	0.04067	
0.7	0.02994	0.02444	0.01959	0.01619	0.01538	0.01691	0.02020	0.02442	0.02919	0.03415	
0.8	0.03096	0.02582	0.02138	0.01760	0.01523	0.01483	0.01690	0.02017	0.02422	0.02869	
0.9	0.03171	0.02679	0.02232	0.01814	0.01504	0.01370	0.01421	0.01662	0.02006	0.02387	
1.0	0.03284	0.02820	0.02398	0.02004	0.01674	0.01448	0.01368	0.01428	0.01640	0.01934	

Table 2. H/W and S/W of IDAQ system based on CAFB

Category		Property
H/W	data logger	NI-cDAQ-9139
	OS for embedded	WES7 (Windows Embedded Standard7)
	measurement module	NI9263, NI9233, NI9237
	accelerometer	Dytran 3134D series
S/W	Driver program	Labview (DAQmx)
Two-way wireless comm.		AWK-3121

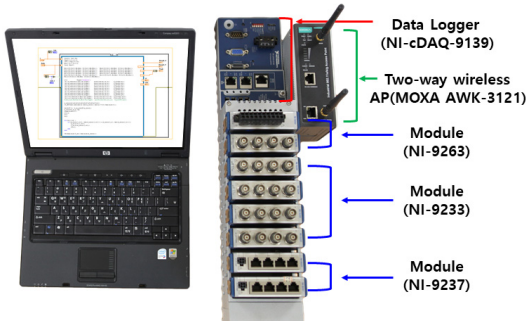


Fig. 7. H/W for the IDAQ system

은 0.7 Hz, 필터의 간격은 1.0 Hz에서 재건오차가 최소로 평가되었다. 따라서 본 논문에서는 재건오차가 최소로 평가된 대역통과필터의 대역폭과 간격을 CAFB를 위한 최적설계조건으로 결정하였다.

3.2 CAFB 기반 IDAQ 시스템

앞서 3.1 절에서는 EI-centro 지진파형을 이용하여 CAFB의 조건을 최적화하였다. 이렇게 S/W기반으로 개발/설계된 CAFB는 계측 시스템에 임베디드하여 온전한 기능구현은 물론, 차후 필터의 수정/재적용의 편리성을 제공할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 Table 2 및 Fig. 7과 같이 RTOS(Real-Time Operating System) 기반의 디지털 소프트웨어 디자인 방식으로 IDAQ 시스템을 구성하였다.

IDAQ 시스템 구성요소 중 데이터 로깅 및 컨트롤러는 NI사의 cDAQ-

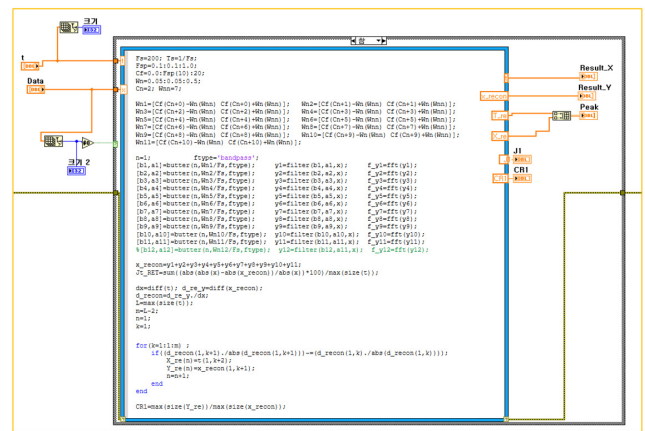


Fig. 8. S/W for the IDAQ system (EI-centro wave)

9139를 사용하였다. 또한, 다채널 고속도 계측은 Piezo 센서를 사용할 수 있는 NI-9233 모듈을 사용하였고, 양방향 RF 통신은 Moxa사의 AWK-3121 모듈을 사용하였다. 이때 관리자 PC 즉, 중앙관리 시스템은 실시간 다채널 고속도 응답을 획득, 분석, 저장할 수 있도록 Labview를 활용해 GUI(Graphical User Interface)를 완성하였다. 한편 앞서 3.1 절에서 최적화 설계된 CAFB는 Fig. 8과 같이 IDAQ 시스템에 임베디드(embedded)하였다.

4. 2경간 교량을 이용한 지진응답실험

4.1 대상 구조물(2경간 교량)

본 논문에서는 EI-centro 지진파로 최적화된 달팽이관 원리 기반 인공필터뱅크(CAFB)의 응답성능을 실험적으로 평가하였다. 이를 위하여, 실험실 규모의 2경간 교량을 제작, 활용하였다. 2경간 교량은 단경간(2300×1800×400 mm(B×L×H))과 장경간(6000×1800×400 mm(B×L×H)) 2개의 가진 테이블에 길이 방향으로 배치하였으며, 좌측 및 우측 단에는 구조물 손상을 방지하기 위하여 충격받침을 설치하였다. 또한 각 경간의 하부에는 서로 다른 강성의 LRB(Lead Rubber Bearing)를 활용하여 각 경간의

형 방향(X-direction) 1차 고유진동수가 10 Hz 미만인 되도록 설계하였다.

2경간 교량의 외부 가진(external excitation)은 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크의 최적화를 위해 기준응답으로 사용된 Fig. 4의 EI-centro 지진파형을 이용해 가진 테이블의 수평방향으로 가진하였다. 마지막으로 가진실험으로부터 Fig. 10과 같이 구조응답은 단경간 수평방향 가속도(A-SA), 장경간 수평방향 가속도(A-SB), 가진 테이블의 수평방향 가속도 응답(T-A 또는, T-B)을 가진조건(EI-centro 지진파형) 별로 획득하였다. Fig. 9은 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크(CAFB)의 응답성능을 실험적으로 평가하기 위하여 준비된 2경간 교량의 배치 및 구조응답 획득을 위한 가속도 센서들의 위치(총 3곳)를 나타낸 것이다. 이렇게 준비된 실험세트는 여러 개의 경간을 갖는 연속 슬래브 교량이 외부의 랜덤한 지진하중(EI-centro 지진 발생조건 등)을 받을 때, 실시간으로 획득될 수 있는 가진 대 및 구조응답(가속도 등)의 획득조건을 표현한 것이다.

앞서 3절에서는 관심 모드가 10 Hz 미만인 유연한 건설구조물의 동적응답을 압축센싱 할 수 있도록 CAFB를 최적화하였다. 이렇게 최적화한 CAFB의 응답성능을 실험적으로 평가하기 위해서 본 논문에서는 2경간 교량을 사용하였다. 이때 2경간 교량은 관심된 고유진동수가 10 Hz 미만일 때 EI-centro 지진파로 최적화된 CAFB의 응답성능을 기대할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 동적응답 실험에 앞서 Fig. 10과 같이 2경간 교량의 수평방향 고유진동수를 평가하였다. 2경간 교량의 다경간과 장경간의 고유진동수는 각각 약 4.5 Hz와 2.2 Hz 내외로 평가되었다. 결국 2경간 교량은 10 Hz 미만의 동적응답을 압축센싱 하도록 최적화한 CAFB의 응답성능을 평가하기 위한 대상 구조물로 타당하였다.

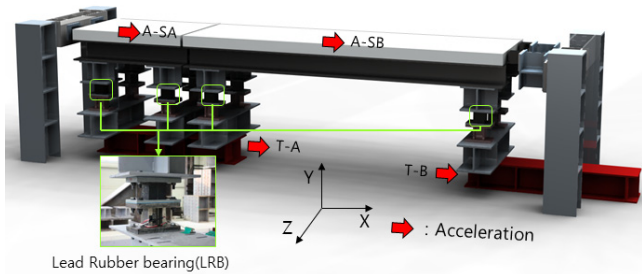


Fig. 9. Setup of 2-Span Bridges and Measurement Points (Horizontal Acceleration)

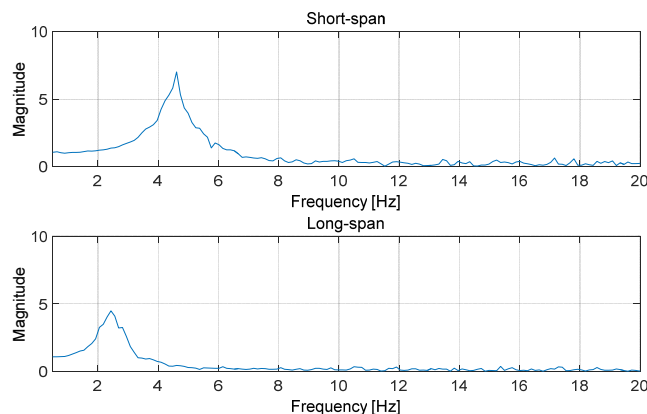


Fig. 10. Natural Frequency of 2-Span Bridges

4.2 EI-centro 지진파형을 이용한 지진응답실험

달팽이관 원리기반 인공필터뱅크가 적용된 동적 무선계측 시스템의 성능을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 유선계측 시스템을 병용하여 동적응답 실험을 수행하였으며, 이때 총 50초 동안 200 Hz의 샘플률을 이용해 가속도 응답을 획득하였다. 동적 무선계측 시스템에 임베디드된 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크는 앞서 3절에서 도출된 최적화 조건 즉, EI-centro 지진파형을 기준으로 총 11개의 대역통과필터 개수, 0.7 Hz의 필터 대역폭, 1.0 Hz의 필터 간격으로 설계하였다. Fig. 11은 2경간 교량의 EI-centro 지진파형의 가진조건에 대한 동적응답 획득을 위한 지진모사실험의 전경이다.

EI-centro 지진파형을 이용한 지진모사 실험을 위하여 부산대학교 지진방재연구센터(Korea)에서 실험을 진행하였고, 이때 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크가 임베디드된 무선계측 응답의 비교를 위해 요구된 비교군(유선계측 응답) 데이터는 지진방재연구센터(Korea)에서 계측, 제공하였다.

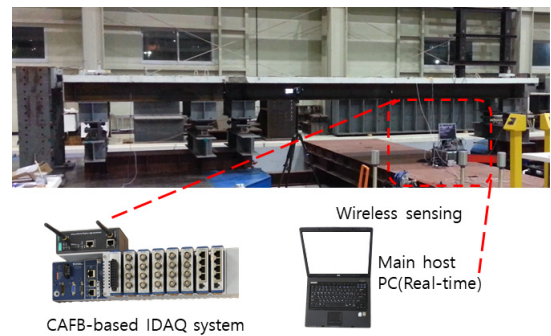


Fig. 11. Acquiring Dynamic Response of Model Structures (2-Span Bridges)

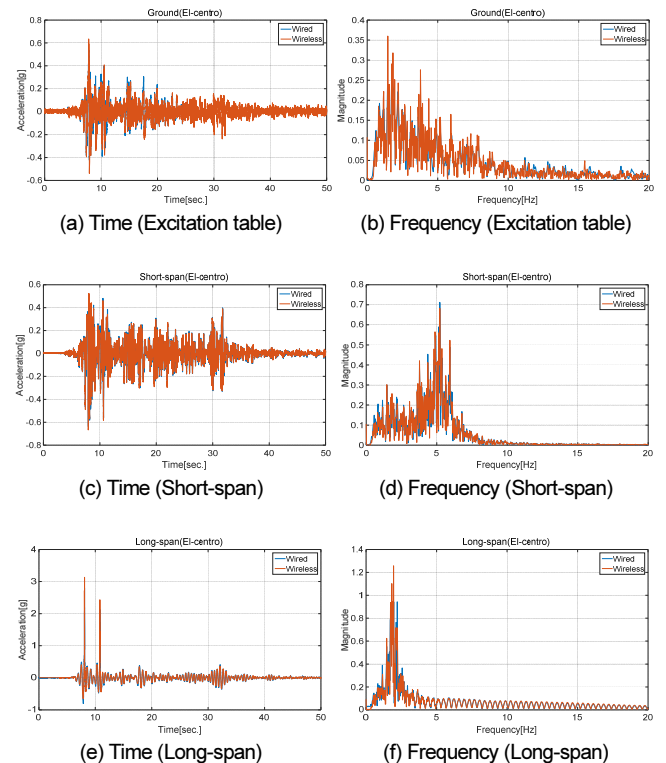


Fig. 12. Dynamic responses of a 2-span bridge under EI-centro wave

Fig. 12는El-centro 지진파형을 이용한 가진조건에서 각각 실시간 계측된 유선계측 응답과 무선계측 응답의 원시신호(original signal)를 시간과 주파수 영역으로 나타낸 것이다.

먼저 Fig. 12(a)와 Fig. 12(b)는El-centro 지진파형 가진조건에 대한 가진대에서 계측된 가속도의 시간과 주파수 응답을 나타낸 것이다. 이들 각 영역에 대한 응답은 Fig. 4의 설계기준 응답에 대한 경향을 충분히 반영하였고, 특히 무선계측 시스템으로 획득한 원시신호가 유선계측 시스템의 신호를 온전히 추종함에 따라, 본 논문에서 구성한 무선계측 시스템이 타당함을 확인하였다. 다음 Fig. 12(c)~(f)는 El-centro 지진파형 가진조건에 대한 단경간과 장경간의 시간과 주파수 응답을 구분하여 나타낸 것이다. 이들 응답을 보면, 우선 무선계측 시스템으로 획득한 원시신호가 유선계측 시스템의 신호를 온전히 추종함을 확인할 수 있고, 특히 단경간과 장경간의 고유진동수 대역을 함께 확인할 수 있다. 더불어 Fig. 12(e)에서 보면, 구조물의 주기성에는 영향을 주지 않지만, 이들 두 경간의 충돌에 따른 정보를 급격한 가속도 상승으로 확인할 수 있었다. 중국적으로 본 논문에서 IDAQ 시스템을 이용하여 실시간으로 획득한 무선 동적응답은 전체 시간 및 주파수 영역에서 유선 동적응답과 상호 우수한 일치도를 보였으며, IDAQ 시스템은 무선기반으로 SHM에 필요한 동적응답을 실시간 획득하는데 타당함을 확인하였다. 이를 근거로 본 논문에서는 획득된 무선 동적응답(원시신호)을 개발된 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크의 응답성능을 평가하기 위한 비교신호로 활용하였다.

5. CAFB의 지진응답성능평가

5.1 지진응답에 대한 CAFB의 재건효과

본 논문에서는El-centro 지진파형을 이용해 최적화 설계된 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크의 데이터 재건성능을 실험적으로 평가하였다. 이를 위하여, 앞서 4절에서 평가된 IDAQ 시스템으로 계측된 동적응답을 기준신호(원시신호)로 설정하여 원시신호 대비 재건신호의 추종능력을 평가하였다. 이때 재건신호는 최적화된 인공필터뱅크를 통과한 필터링 신호를 의미한다. Fig. 13은 Fig. 12의El-centro 지진파형 가진조건에서 무선계측을 통해 획득한 원시신호 대비 시간 및 주파수 영역의 재건신호를 비교해 나타낸 것이다.

Fig. 13에서 보면, El-centro 지진파형을 이용해 최적화 설계된 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크는 재건신호가 원시신호의 모드정보를 충분히 재현하였다. 결국, 대역통과필터 최적화 알고리즘은 CAFB의 최적화 조건으로부터 10 Hz 미만의 주파수 범위 내에서 목적모드를 온전히 표현할 수 있도록 적절히 설계되었음을 확인하였다.

Table 3은 Fig. 13(a),(c),(e)에 나타난 원시신호 대비 재건신호의 오차율(RE)을 나타낸 것이다. Fig. 13(a),(c),(e) 및 Table 3으로부터 El-centro 지진파형 가진조건에 대한 재건오차는 가진 테이블에서 0.00411507(재건효과는 약 99.589%), 단경간에서 0.00492642(재건효과는 약 99.507%), 장경간에서 0.00275122(재건효과는 약 99.725%)으로 각각 나타났다. 결국 본 논문에서 El-centro 지진파형으로 최적화된 인공필터뱅크는 2경간 교량의 목적응답을 획득하도록 적절히 설계되었다.

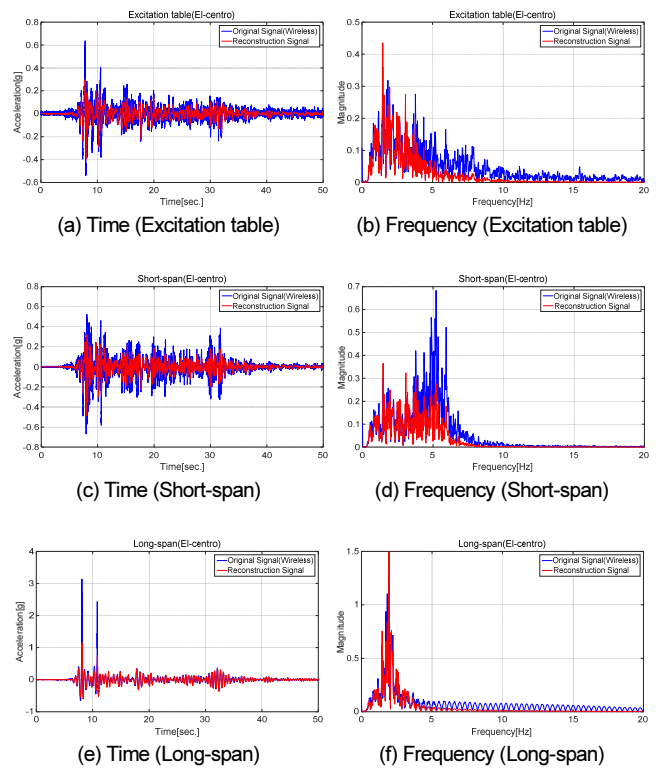


Fig. 13. Reconstruction signal vs. Original signal

Table 3. Reconstruction Effect

	RE	Effect [%]
Excitation table	0.00411507	99.589
Short-span	0.00492642	99.507
Long-span	0.00275122	99.725

5.2 지진응답에 대한 CAFB의 압축효과

다음으로, 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크의 데이터 압축성능을 평가하기 위해, 앞서 Fig. 13(a),(c),(e)의 재건신호를 기준으로 PPA를 이용해 시간 및 주파수 영역의 침두치 신호만을 추출하였다. Fig. 14는 Fig. 13(a),(c),(e)의El-centro 지진파형 가진조건에서 무선계측을 통해 획득한 원시신호 대비 시간 및 주파수 영역의 재건신호와 압축신호를 상호 비교하여 나타낸 것이다.

Table 4는 Fig. 14(a),(c),(e)에 나타난 원시신호 및 재건신호 대비 압축신호의 압축율(CR)을 나타낸 것이다. Fig. 14(a),(c),(e) 및 Table 4에서 보면, 침두치 추출 알고리즘이 재건신호에 대한 시간영역의 침두치만을 온전히 추출하였다. El-centro 지진파형 가진조건에 대한 압축신호는 50초의 측정시간 동안 총 10,000개의 획득데이터 중 가진 테이블에서 1,753개의 침두치 값을, 단경간에서 896개 침두치 값을, 장경간에서 430개의 침두치 값을 각각 획득하였다. 이때 데이터 압축율(CR)은 가진 테이블에서 0.17528247(데이터 압축효과는 약 82.472%), 단경간에서 0.08959104(데이터 압축효과는 약 91.041%), 장경간에서 0.04299570(데이터 압축효과는 약 95.701%)으로 각각 나타났다.

다음으로 IDAQ 시스템에 내장된 CAFB로부터 산출된 신호(재건신호

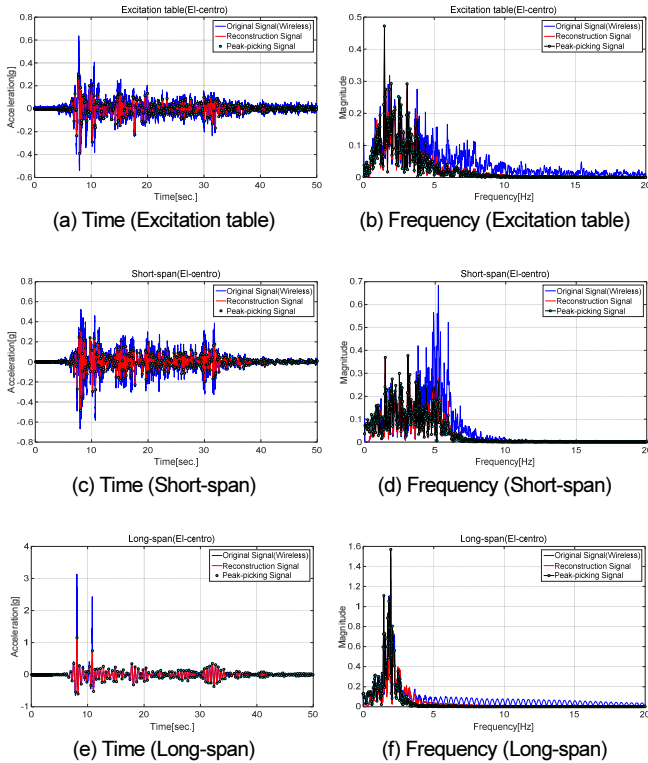


Fig. 14. Compressive vs. Reconstruction vs. Original signal

Table 4. Compression Effect

	CR	Effect [%]
Excitation table	0.17528247	82.472
Short-span	0.08959104	91.041
Long-span	0.04299570	95.701

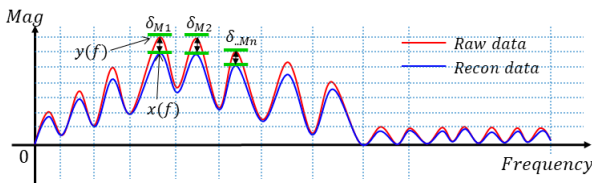


Fig. 15. Concept of spectrum error (SE)

및 압축신호)는 시간응답 성능뿐만 아니라 당초 최적화된 주파수 대역의 모드 정보를 함께 반영해야 한다. 본 논문에서는 선행연구[27]에서 정의한 Fig. 15 및 식 (5)의 스펙트럼 오차(Spectrum Error, SE)를 이용하여 재건설신호 및 압축신호의 주파수 응답성능 즉, 스펙트럼 효과를 정량적으로 평가하였다.

$$SE = \frac{\int_0^F |y(f) - x(f)| / |y(f)|}{F} \quad (5)$$

여기서, $y(f)$ 는 원신호의 주파수 응답, $x(f)$ 는 재건설 또는 압축신호의 주파수 응답, 그리고 F 는 FFT 해석을 통해 산출된 스펙트럼의 전체 길이(Hz)이다. Table 5는 원신호 대비 재건설신호 및 압축신호의 스펙트럼 효과를

Table 5. Spectrum Effect

	Recon. signal		Comp. signal	
	SE	Effect [%]	SE	Effect [%]
Excitation table	0.00653055	99.347	0.00810412	99.189
Short-span	0.00691804	99.308	0.00743593	99.256
Long-span	0.00554943	99.445	0.01335445	98.665

나타낸 것이다.

Table 5로부터 Fig. 13(b),(d),(f)의 재건설신호에 대한 스펙트럼 오차(SE)는 전체적으로 0.005~0.007(스펙트럼 효과는 약 99.367%)으로 나타났다. 또한 Table 5로부터 Fig. 14(b),(d),(f)의 압축신호에 대한 스펙트럼 오차(SE)는 전체적으로 0.007~0.014(스펙트럼 효과는 약 99.037%)으로 나타났다. 결국 인공필터뱅크의 침투치 색출 알고리즘은 침투치 색출을 통해 데이터의 압축과 더불어 정확한 주파수 정보를 나타내는데 효과적이었다.

6. 결론

본 연구에서는 EI-centro 지진파형을 이용해서 CAFB를 최적화를 하고, 최적화된 CAFB를 이용한 2경간 교량(모델 구조물)의 지진응답실험을 수행해 CAFB의 지진응답 성능을 실험적으로 평가하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) EI-centro 지진파형으로 최적화된 CAFB는 관심된 주파수 영역(10 Hz 미만)에 대한 유효 동적응답을 압축된 크기로 획득하는데 타당하였다. 따라서 사용자의 요구 또는 대상구조물의 관심주파수 대역이 10 Hz 미만일 경우라면 본 논문에서 평가된 EI-centro 지진파형으로 최적화된 CAFB를 사용하여 동적응답을 압축센싱할 수 있을 것으로 사료된다.
- 2) 또한, CAFB는 지진상황에서도 구조물의 지진응답을 효과적으로 실시간 압축센싱 할 수 있었다. 따라서 CAFB는 실무적인 관점에서 구조물의 SHM을 위한 일반(운영)상태는 물론 위험상태에서도 모두 활용 가능함을 실험적으로 입증되었다.
- 3) 결국, EI-centro 지진파형으로 최적화된 CAFB는 상대적으로 유연한 구조물(케이블 교량, 초고층건물, 기타 저주파 거동 구조물 등)의 동적응답을 관심된 주파수 대역(10 Hz 미만)을 중심으로 압축하여 획득하는데 타당하였다.
- 4) 무선 기반의 지능형 데이터 획득 시스템(Intelligent Data Acquisition system, IDAQ 시스템)은 압축센싱기술인 달팽이관 원리 기반 인공필터뱅크(CAFB)를 적용(임베디드)함으로써, WSNs 기반 SHM 시스템의 제한된 RF 성능으로 인한 병목현상을 피하면서 효율적으로 동적응답을 획득하여 SHM을 수행할 수 있을 것으로 사료되며, 본 논문에서의 CAFB 뿐만 아니라 S/W 기반의 다양한 계측 및 분석함수(논리)를 적용한다면 사용자의 편리성을 제공할 것으로 판단된다.
- 5) 특히, IDAQ 시스템은 본 논문에서의 CAFB 뿐만 아니라, SHM을 위해 사용자 중심으로 개발된 S/W 기반의 다양한 함수와 논리를 시스템에 빠르고 정확하게 임베디드(H/W적 시스템화)하고, 이를 실시간 운영할 수

있어 새로운 개념의 계측기술로 활용될 수 있는 가능성을 확인하였다.

- 6) 향후 10 Hz 미만의 관심 주파수를 갖는 구조물뿐만 아니라, 여러 다른 관심 주파수 대역을 갖는 구조 및 시스템(기계, 항공, 시설 등)의 구조응답을 무선기반을 실시간 획득할 수 있도록 CAFB의 최적화에 관한 후속연구를 진행할 계획이다.

/ 감사의 글 /

이 논문은 2017년도 및 2018년도 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2017 R1A2B4001836, NRF-2018R1A 6A1A03025542).

/ REFERENCES /

- Sohn H, Farrar R, Hemez H, Czarnecki J. A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001. Los Alamos National Laboratory. 2002 Apr;7–12.
- Wong KY. Instrumentation and Health Monitoring of Cable-supported Bridge. *Structural Control and Health Monitoring*. 2004 Apr/Jun; 11(2):91–124.
- Jang S, Jo H, Mechtov K, Rice JA, Sim SH, Jung HJ, Yun CB, Spencer Jr BF, Agha G. Structural Health Monitoring of a Cable-stayed Bridge using Smart Sensor Technology: Deployment and Evaluation. *Smart Structures and System*. 2010 Jul;6(5–6):439–459.
- Na WS, Baek J. Impedance-Based Non-Destructive Testing Method Combined with Unmanned Aerial Vehicle for Structural Health Monitoring of Civil Infrastructures. *Applied Sciences*. 2017 Jul;7(1): 15–23.
- Lee YJ, Cho S. SHM-Based Probabilistic Fatigue Life Prediction for Bridges Based on FE Model Updating. *Sensors*. 2016 Mar;16(3):317–331.
- Abe M, Fujino Y. Bridge Monitoring in Japan. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. John Wiley and Sons. c2009.
- Koh HM, Lee HS, Kim S, Choo JF. Monitoring of Bridge in Korea. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. John Wiley and Sons. c2009.
- Baptista FG, Budoya DE, Almeida VAD, Ulson JAC. An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring. *Sensors*. 2014 Jan; 14(1):1208–1227.
- Salmanpour MS, Khodaei ZS, Aliabadi MH. Impact Damage Localisation with Piezoelectric Sensors under Operational and Environmental Conditions. *Sensors*. 2017 May;17(5):1178–1195.
- Lamonaca F, Sciammarella PF, Scuro C, Carni DL, Olivito RS. Synchronization of IoT Layers for Structural Health Monitoring. 2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT. 2018 Apr; 89–94.
- Scuro C, Sciammarella PF, Lamonaca F, Olivito RS, Carni DL. IoT for Structural Health Monitoring. *IEEE Instrumentation and Measure-*
- ment Magazine. 2018 Dec;21(6):4–14.
- Aktan AE, Catbas FN, Grimmelsman KA, Pervizpour M. Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges. Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Institute. c2003.
- Peeters B, Couvreur G, Razinkov O, Kundig C. Continuous Monitoring of the Oresund Bridge: System and Data Analysis. In Proceedings of IMAC 21, International Modal Analysis Conference, Kissimmee, Florida, USA. c2003.
- Ko JM, Ni YQ. Technology Developments in Structural Health Monitoring of Large-scale Bridges. *Engineering Structures*. 2005 Oct;27(12):1715–1725.
- Ko JM, Ni YQ. Structural Health Monitoring and Intelligent Vibration Control of Cable-Supported Bridge: Research and Application. *KSEC Journal of Civil Engineering*. 2003 Nov;7(6):701–716.
- Carni DL, Scuro C, Lamonaca F, Olivito RS, Grimaldi D. Damage Analysis of Concrete Structures by Means of Acoustic Emissions Technique. *Composites Part B: Engineering*. 2017 Apr;115(15):79–86.
- Lamonaca F, Carrozzini A, Grimaldi D, Olivito RS. Improved Monitoring of Acoustic Emissions in Concrete Structures by Multi-triggering and Adaptive Acquisition Time Interval. *Measurement*. 2015 Jan;59:227–236.
- Lamonaca F, Carrozzini A, Grimaldi D, Olivito RS. Improved Accuracy of Damage Index Evaluation in Concrete Structures by Simultaneous Hardware Triggering. *Metrology and Measurement Systems*. 2014 May;21(2):341–350.
- Heo G, Jeon J. A Smart Monitoring System Based on Ubiquitous Computing Technique for Infra-Structural System: Centering on Identification of Dynamic Characteristics of Self-Anchored Suspension Bridge. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2009 Sep;13(5): 333–337.
- Lynch PJ. An Overview of Wireless Structural Health Monitoring for Civil Structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2006 Dec;365(1851):345–372.
- Zhang J, Tian GY, Marindra AMJ, Sunny AI, Zhao AB. A Review of Passive RFID Tag Antenna-Based Sensors and Systems for Structural Health Monitoring Applications. *Sensors*. 2017 Feb;17(2):265–297.
- Park JW, Sim SH, Jung HJ, Spencer BF. Development of a Wireless Displacement Measurement System Using Acceleration Responses. *Sensors*. 2013 Jul;13(7):8377–8392.
- Hao J, Zhang B, Jiao Z, Mao S. Adaptive Compressive Sensing Based Sample Scheduling Mechanism for Wireless Sensor Networks. *Pervasive and Mobile Computing*. 2015 Sep;22:113–125.
- Huang Y, Beck JL, Wu S, Li H. Bayesian Compressive Sensing for Approximately Sparse Signals and Application to Structural Health Monitoring Signals for Data Loss Recovery. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2016 Oct;46:62–79.
- Peckens CA, Lynch JP. Utilizing the Cochlea as a Bio-inspired Compressive Sensing Technique. *Smart Materials and Structures*. 2013 Sep;22(10):105027.
- Peckens CA, Lynch JP, Heo G. Resource-efficient Wireless Sensor Network Architecture Based on Bio-mimicry of the Mammalian

- Auditory System, *Intelligent Material Systems and Structures*, 2015 Feb;26(1):79–100.
27. Heo G, Jeon J. A Study on the Data Compression Technology–based Intelligent Data Acquisition (IDAQ) System for Structural Health Monitoring of Civil Structures. *Sensors*, 2017 Jul;17(7):1620.
28. Angrisani L, Schiano Lo Moriello R, Bonavolonta F, Gallucci L, Menna C, Asprone D, Fabbrocino F. An Innovative Embedded Wireless Sensor Network System for the Structural Health Monitoring of RC Structures, 2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry(RTSI), Conference Proceedings, c2017.
29. Gallucci L, Menna C, Angrisani L, Asprone D, Lo Moriello RS, Bonavolontá F, Fabbrocino F. An Embedded Wireless Sensor Network with Wireless Power Transmission Capability for the Structural Health Monitoring of Reinforced Concrete Structures. *Sensors* .2017 Nov;17(11):2566.