

효율적인 SHM을 위한 압축센싱 기술 - Kobe 지진파형을 이용한 CAFB의 최적화 및 지진응답실험 중심으로

허광희¹, 이진옥², 서상구³, 정유승⁴, 전준용^{5*}

Compression Sensing Technique for Efficient Structural Health Monitoring - Focusing on Optimization of CAFB and Shaking Table Test Using Kobe Seismic Waveforms

Gwang-Hee Heo¹, Chin-Ok Lee², Sang-Gu Seo³, Yu-Seung Jeong⁴, Joon-Ryong Jeon^{5*}

Abstract: The compression sensing technology, CAFB, was developed to obtain the raw signal of the target structure by compressing it into a signal of the intended frequency range. At this point, for compression sensing, the CAFB can be optimized for various reference signals depending on the desired frequency range of the target structure. In addition, optimized CAFB should be able to efficiently compress the effective structural answers of the target structure even in sudden/dangerous conditions such as earthquakes. In this paper, the targeted frequency range for efficient structural integrity monitoring of relatively flexible structures was set below 10Hz, and the optimization method of CAFB for this purpose and the seismic response performance of CAFB in seismic conditions were evaluated experimentally. To this end, in this paper, CAFB was first optimized using Kobe seismic waveform, and embedded it in its own wireless IDAQ system. In addition, seismic response tests were conducted on two span bridges using Kobe seismic waveform. Finally, using an IDAQ system with built-in CAFB, the seismic response of the two-span bridge was wirelessly obtained, and the compression signal obtained was cross-referenced with the raw signal. From the results of the experiment, the compression signal showed excellent response performance and data compression effects in relation to the raw signal, and CAFB was able to effectively compress and sensitize the effective structural response of the structure even in seismic situations. Finally, in this paper, the optimization method of CAFB was presented to suit the intended frequency range (less than 10Hz), and CAFB proved to be an economical and efficient data compression sensing technology for instrumentation-monitoring of seismic conditions.

Keywords: Compression Sensing(CS), Cochlea-inspired Artificial Filter Bank (CAFB), Band-pass Filter Optimizing Algorithm (BOA), Peak-picking Algorithm (PPA), Reconstruction Error (RE), Compressive Ratio (CR), Spectrum Error (SE), Structural Health Monitoring (SHM)

1. 서론

국내외적으로 지진 및 태풍과 같은 자연재해와 더불어 다양한 인적 부주의로 인해 대형 건설구조물의 피해사례가 증가하고, 또한 시민의 안전인식이 높아짐에 따라 건설분야에서는 구조물의 안전확보 및 유지관리, 그리고 내구연한 동안의 구조적 성능을 다하도록 구조물의 상태를 상시 관리하는 구조건전도 모니터링(structural health monitoring; SHM)에 대한 연구가 활

발하게 수행되고 있다[1-5]. 그럼에도 불구하고 기존 건설구조물의 SHM을 위한 구조응답의 계측은 대부분 유선 계측시스템에 크게 의존하고 있는 실정이다[6-9]. 이러한 유선 계측시스템은 여러 장점에도 불구하고 계측을 위한 센서의 설치와 이동이 제한적이고, 경우적으로 장거리의 케이블링으로 인한 노이즈(noise)의 영향도 고려해야 한다. 또한, SHM을 위해 요구된 구조응답의 종류에 따라 각각 구분된 데이터 로거를 현장에 배치하여 사용할 경우 유사시 전원공급의 대책과 더불어 구조물의 전체응답을 일괄-동시적으로 획득하여 관리하는데 많은 노력과 시간이 필요하다[10-11]. 특히, 이들 데이터 로거는 대부분 고가임에도 불구하고 한정된 계측채널만을 포함하므로 복잡, 다양한 건설구조물에서 많은 채널의 구조응답을 효과적으로 획득하는데 한계가 있고, 이를 해결하고자 별도의 I/O 보드를 사용하여 계측채널을 확장할 경우에는 계측시스템의 크기가 커지고 초기 시스템 구성을 위한 가격이 높아지므로, 시스템의 운영·관리 차

¹정희원, 건양대학교, 해외건설플랜트학과, 교수

²정희원, 충남대학교, 토목공학과, 교수

³정희원, 충남도립대학교, 건설정보학과, 교수

⁴학생희원, 건양대학교, 재난안전공학과대학원, 석사과정

⁵정희원, 건양대학교, 재난안전공학과대학원, 연구교수

*Corresponding author: jrjeon@konyang.ac.kr

Konyang University, 121 Daehak-ro, Nonsan, Chungnam 32992, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

원에서 많은 주의가 요구된다[12-15]. 이러한 기술적 한계를 극복하고자 최근에는 현격히 발전한 IT 및 무선통신 기술을 접목해 무선 센서 네트워크(wireless sensor networks; WSNs)를 이용한 SHM에 관한 연구가 활발하다[3, 10-11, 16-18]. WSNs를 이용한 SHM 기술은 무선을 활용하기 때문에 비효율적인 유선 연결 없이 센서의 설치, 이동이 자유롭고, 또한 최근 H/W 기술의 발달로 상대적으로 저렴하게 계측시스템을 구성·확장할 수 있다는 장점을 갖는다[11, 19-20]. WSNs를 이용하여 SHM을 수행하기 위해서는 우선적으로 무선통신의 제한된 성능범위 내에서 다량의 구조응답을 실시간 획득할 수 있어야 한다[3, 21]. 특히 구조물의 동특성을 분석·평가하기 위해서는 정적응답에 비해 상대적으로 많은 데이터 량(data-size)의 동적응답(가속도 등)을 실시간 획득해야 한다. 결국, WSNs를 이용한 SHM을 수행하기 위해서는 병목현상으로 인한 데이터 손실없이 요구된 동적응답을 무선으로 온전히 획득하고, 대용량 DB(data-base)의 구축·관리 차원에서 비용과 노력을 최소화할 수 있는 기술적 대안이 요구된다[22].

압축센싱(CS) 기술은 무선통신의 환경에서 대용량의 데이터를 처리(송신·수신)하기 위한 기술적 대안이 될 수 있다 [23-26]. 이러한 맥락에서 최근 건설분야에서는 WSNs 기반 SHM을 위하여 인체 소리(청각) 기관인 달팽이관의 원리를 기반으로 개발된 인공필터뱅크(cochlea-inspired artificial filter bank; CAFB)를 이용하여 구조물로부터의 동적응답의 실시간 압축센싱할 수 있는 기술이 소개되었다[27]. CAFB는 필터뱅크의 최적화 조건을 프로그래밍 언어(M-code 등)를 이용해 S/W적으로 쉽고 빠르게 수정/작성하고, 이를 임베디드 소프트웨어 기술(embedded software technique; EST)을 이용하여 계측시스템에 정확히 적용(FPGA 기반 embedded)할 수 있는 장점이 있다[28-29]. 하지만 이러한 장점에도 불구하고 선행연구에서 개발된 CAFB가 WSNs를 이용한 SHM을 위해 실무적인 관점에서 활용되기 위해서는 다양한 조건(구조물 조건, 외부환경 조건 등)에서 실험적 검증이 요구된다. 특히 대상 구조물의 변화(또는, 관심 주파수 대역의 변화)에 따라 CAFB는 달리 최적화될 수 있기 때문에, 최적화를 위한 기준 신호의 선택과 이를 통해 최적화된 CAFB의 성능/효과가 평가되어야 한다. 또한, CAFB는 SHM을 위해서 구조물의 평상(공용)시의 구조응답 뿐만 아니라 지진과 같은 예측하기 어려운 위험/돌발 상황에서도 구조물의 유효한 구조응답을 효율적으로 압축할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 상대적으로 유연한 구조물의 효율적인 구조건전도 모니터링을 위하여 관심 주파수 범위를 10Hz 미만으로 설정하고, 이를 위한 CAFB의 최적화 방법과 지진상황에서 CAFB의 지진응답성능을 실험적으로 평가하였다. 이를 위해 먼저 Kobe 지진파형을 이용하여 CAFB를 최적화하였고,

이를 자체 개발한 무선 IDAQ 시스템에 임베디드 하였다. 그리고 Kobe 지진파형을 이용하여 2경간 교량에 대한 지진응답 실험을 수행하였다. 마지막으로 CAFB가 내장된 IDAQ 시스템을 이용하여 실시간으로 2경간 교량의 지진응답을 무선으로 획득하고, 획득된 압축신호는 원시신호와 상호 비교하였다. 실험의 결과로부터 압축신호는 원시신호와 대비하여 우수한 응답성능과 데이터 압축효과를 보였고, 또한 CAFB는 지진상황에서도 구조물의 유효한 동적응답을 효과적으로 압축센싱할 수 있었다. 최종적으로 본 논문에서 평가된 CAFB는 관심 주파수 대역(10Hz 미만)을 중심으로 최적화되었고, 유사시 구조물로부터의 지진응답을 효율적으로 압축하여 획득할 수 있는 기술로 타당하였다.

2. 달팽이관-모방형 인공필터뱅크(CAFB)

2.1 CAFB의 개념과 구성

선행연구에서 개발한 CAFB는 구조물의 전체 동적응답 중에서 특정 주파수 대역의 신호만을 취득하고 이를 출력하기 위하여 고안(설계)된 대역통과필터들의 배열(즉, 필터뱅크)이다[20]. 이러한 필터뱅크는 관심 주파수에서 따라 달리 최적화 될 수 있으며, 최적화를 위해서는 크게 대역통과필터의 개수(number), 대역폭(bandwidth), 간격(spacing) 등을 결정해야 한다. 또한, 필터뱅크로부터의 출력신호(즉, 재건신호)는 대역통과필터의 특성상 입력신호(즉, 원시신호)의 샘플링 간격과 동일(즉, 데이터 크기(size)는 동일)하다. 따라서 제한된 통신속도 범위를 갖는 WSNs 기반으로 구조물의 동적응답을 효율적으로 획득하기 위해서는 데이터의 압축기술이 요구된다. 이를 위해 선행연구에서 개발된 CAFB는 최적 필터뱅크 구성을 위해 Fig. 1과 같이 대역통과필터 최적화 알고리즘(band-pass filter optimizing algorithm; BOA)와 데이터 압축을 위한 첨두치 색출 알고리즘(peak-picking algorithm; PPA)으로 구성하였다[27].

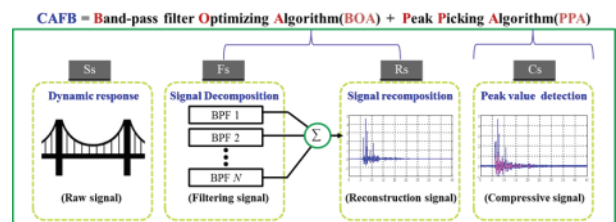


Fig. 1 Concept and component of CAFB

2.2 대역통과필터 최적화 알고리즘(BOA)

대역통과필터 최적화 알고리즘(BOA)은 대상 구조물의 SHM을 위하여 요구되는 목적 모드(target-mode)를 판단하는데 적합하도록 관심 주파수 대역을 중심으로 필터뱅크를 구성하고, 이것으로부터 재건신호를 산출한다. 이때 BOA는 대역통과필터의 개수, 대역폭, 간격 등을 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[27].

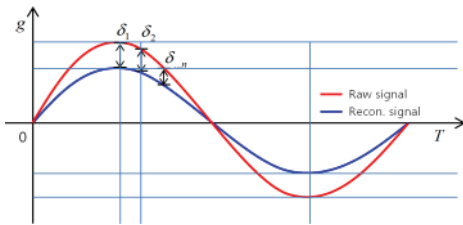


Fig. 2 Concept of reconstruction error (RE)

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

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

$$= \frac{\int_0^T |\delta_i| / |u(t)|}{T}$$

여기서, $u(t)$ 는 응답시간 별 원시신호, $y(t)$ 는 응답시간 별 재건신호, $y_i(t)$ 는 응답시간 별 필터뱅크로부터 i 번째 출력된 재건신호, T 는 응답시간의 전체 길이(sec), N 은 응답 수이다.

2.3 첨두치 색출 알고리즘(PPA)

첨두치 색출 알고리즘(PPA)은 식(1)을 통해 결정된 재건신호를 기준으로 전체신호의 첨두치(peak-values)만을 찾아서 해당 시간정보와 가속도 신호값을 재-표본화(re-sampling)하여 압축신호를 산출하도록 개발하였다[27]. 이때 첨두치 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. 이렇게 색출된 압축신호는 재건신호 대비 상대적인 데이터 크기(data-size)를 비교하기 위해서 식(4)의 압축률(compressive ratio; CR)을 이용하여 평가하였다[27].

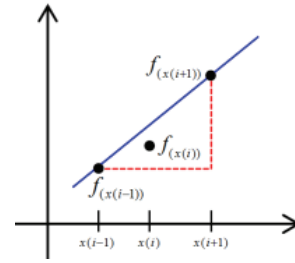


Fig. 3 Concept of central difference method for CR

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

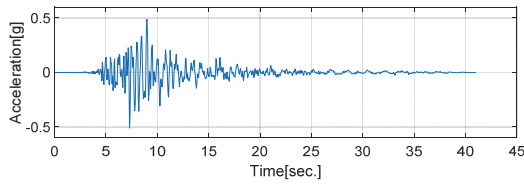
$$CR = \frac{NS_0 - NS_C}{NS_0} \quad (4)$$

여기서, $f'(x(i))$ 는 중앙차분법을 이용한 현재 기준신호 $x(i)$ 의 도함수, NS_C 는 압축신호의 데이터 개수, NS_0 는 원시신호의 데이터 개수이다.

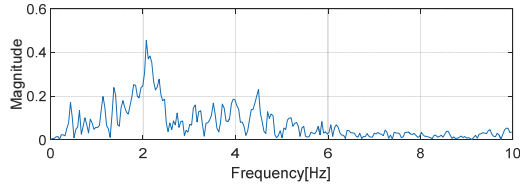
3. CAFB 기반 IDAQ 시스템

3.1 Kobe 지진파형을 이용한 CAFB의 최적화

앞서 2장에서 나타난 CAFB는 대역통과 필터 최적화 알고리즘 및 첨두치 색출 알고리즘으로 구성되며, 이들 알고리즘은 일련의 연산과정을 통해 구조물로부터의 원시신호를 최적의 조건으로 분해-재건-압축한다. 본 장에서는 상대적으로 유연한 건설구조물의 동적응답을 압축센싱하기 위하여 신호의 주파수 영역이 10 Hz 미만에 집중되어 있는 Kobe(1995, JMA, NS)을 이용하여 CAFB를 최적화 하였다. 본 논문에서 CAFB의 최적화를 위해 기준신호로 사용된 Kobe 지진파형의 시간 및 주파수 영역은 Fig. 4와 같다. 여기서 Fig. 4(b)의 Kobe 지진파형의 주파수 영역을 살펴보면, 10Hz 미만에 스펙트럼 성분이 집중되어 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 Kobe 지진파형으로 CAFB를 최적화 할 경우, CAFB는 10Hz 미만의 관심 주파수 대역을 중심으로 신호를 필터링 할 수 있도록 대역통과필터의 개수, 대역폭 그리고, 간격 등이 결정될 수 있다. 또한, 일반적으로 건설분야의 장대형 구조물은 상대적으로 유연한 거동특성을 갖기 때문에 전전도 모니터링을 위해 요구되는 목적 모드의 분포범위는 10Hz 미만의 특정 주파수 대역에 국한될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 상대적으로 유연한 건설구조물의 동적응답을 선별적으로 압축하여 획득하고자 10Hz 미만에 스펙트럼 성분이 집중되어 있는 특성을 갖는 Kobe 지진파형으로 CAFB의 최적화 연구를 진행하였다.



(a) Time domain(Kobe)



(b) Frequency domain(Kobe)

Fig. 4 Kobe seismic waveforms for optimizing of CAFB

다음으로, CAFB의 최적화를 위해서 크게 대역통과필터의 개수(number), 대역폭(bandwidth) 그리고 간격(spacing) 등을 결정해야 한다. 먼저 대역통과필터의 개수를 결정하기 위하여 BOA를 이용해 필터의 개수를 1개부터 20개 까지(총 20개의 경우) 변경하면서 식(2)에 나타난 재건오차(RE)를 산출하였다. Fig. 5는 Kobe 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 Kobe 지진파형을 이용한 재건신호의 오차는 대역통과필터의 개수가 11개 일때 최솟값을 보였다. 따라서 본 논문에서는 Kobe 지진파형을 이용하여 CAFB를 최적화하기 위한 대역통과필터의 개수를 11개로 결정하였다.

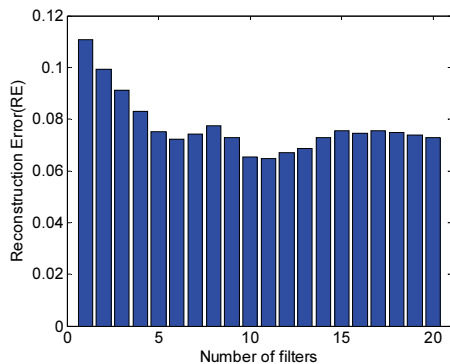


Fig. 5 Plot of RE values (Kobe)

한편, 앞서 결정된 대역통과필터의 개수(11개)는 CAFB의

응답성능을 최대로 보이기 위하여 재건오차가 최솟값을 가질 조건으로 결정하였다. 하지만, 필터의 개수가 많으면 H/W 또는 S/W적으로 필터뱅크를 설계/구성함에 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)에 보인 데이터 압축률(CR)를 함께 고려하였다. Fig. 6은 Kobe 지진파형에 대한 대역통과필터의 개수 변화에 따른 압축률(CR)을 나타낸 것이다.

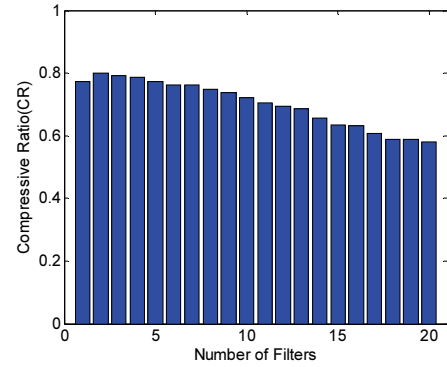


Fig. 6 Plot of CR values (Kobe)

Fig. 6에서 보면, Kobe 지진파형을 이용한 경우 대역통과필터의 개수에 따른 데이터 압축률의 변화폭은 0.6~0.8 범위인 것으로 나타났으며, 적정하다고 판단되는 압축률이 0.7 내외에서 대역통과 필터의 개수는 11개로 평가되었다. 따라서 앞서 Kobe 지진파형을 이용하여 CAFB를 최적화하기 위해 결정된 11개의 대역통과필터의 개수는 타당하였다.

다음으로, 대역통과 필터의 설계요소인 대역폭과 간격을 결정하기 위하여, 본 논문에서는 앞서 결정된 11개의 대역통과필터의 개수를 이용하여 대역폭과 간격의 변화에 따른 재건오차를 산출하였다. 이때 대역통과 필터의 대역폭과 간격은 모두 0.1Hz에서부터 1.0Hz까지 0.1Hz씩 증가시켜, 총 100

Table 1 RE values for a filter bank with 11 filters (Kobe)

		Bandwidth of Filters (Hz)									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Filter Spacing (Hz)	0.1	0.096067	0.084236	0.080077	0.082365	0.087837	0.094984	0.102483	0.109345	0.116136	0.121995
	0.2	0.095633	0.08176	0.07732	0.082198	0.091912	0.102962	0.115322	0.126398	0.138912	0.151859
	0.3	0.091655	0.075071	0.074938	0.083112	0.097074	0.115053	0.133659	0.151348	0.168486	0.186931
	0.4	0.084667	0.064194	0.064858	0.078022	0.098218	0.119631	0.142064	0.162638	0.183067	0.203075
	0.5	0.090779	0.069007	0.055638	0.054312	0.06462	0.082086	0.101667	0.123018	0.144793	0.16486
	0.6	0.090381	0.069556	0.054696	0.049381	0.05618	0.068812	0.0848	0.103019	0.121652	0.140129
	0.7	0.089742	0.070533	0.055998	0.047675	0.050395	0.060625	0.073092	0.088175	0.104443	0.121059
	0.8	0.091335	0.073134	0.057185	0.045402	0.04377	0.04854	0.057511	0.07127	0.087238	0.10383
	0.9	0.092537	0.076502	0.060853	0.04571	0.055046	0.033989	0.040913	0.052939	0.067468	0.082595
	1.0	0.095675	0.079609	0.06516	0.051377	0.039153	0.0315	0.032037	0.040796	0.052226	0.064903

개의 경우에 대한 재건오차를 산출하였다. Table 1은 Kobe 지진파형을 이용하여 산출된 대역통과필터의 대역폭과 간격의 변화에 따른 재건오차를 나타낸 것이다.

Table 1의 Kobe 지진파형을 이용한 경우, 대역통과 필터의 대역폭은 0.6Hz, 필터의 간격은 1.0Hz에서 재건오차가 최소로 평가되었다. 따라서 본 논문에서는 재건오차가 최소로 평가된 대역통과 필터의 대역폭과 간격을 CAFB를 위한 최적조건으로 결정하였다.

3.2 CAFB 기반 IDAQ 시스템

앞서 3.1절에서는 Kobe 지진파형을 이용하여 CAFB의 대역통과필터 조건을 최적화하였다. 이렇게 S/W 기반으로 개발/설계된 CAFB는 무선 계측시스템에 임베디드(embedded)하여 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[27].

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

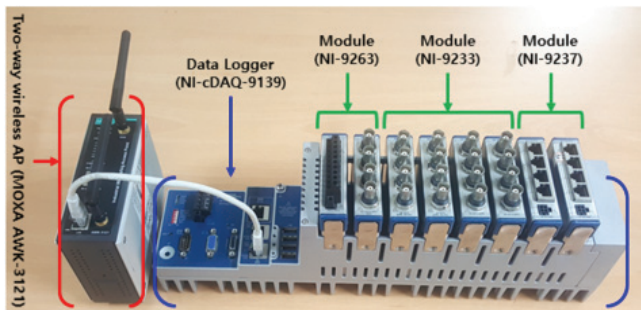


Fig. 7 H/W for the IDAQ system

IDAQ system 구성요소 중 데이터 로깅 및 컨트롤러는 NI사의 cDAQ-9139를 사용하였다. 또한, 다채널 가속도 계측은 Piezo 타입 센서를 사용할 수 있는 NI-9233 모듈을 사용하였고, 양방향 RF 통신은 Moxa 사의 AWK-3121 모듈을 사용하였다. 이때 관리자 PC 즉, 중앙관리 시스템은 실시간 다채널 가속도 응답을 획득, 분석, 저장할 수 있도록 Labview를 활용

해 GUI(graphical user interface)를 완성하였다[27]. 마지막으로 본 논문의 3.1절에서 최적화 설계된 CAFB는 Fig. 8과 같이 IDAQ 시스템에 임베디드(embedded) 하였다.

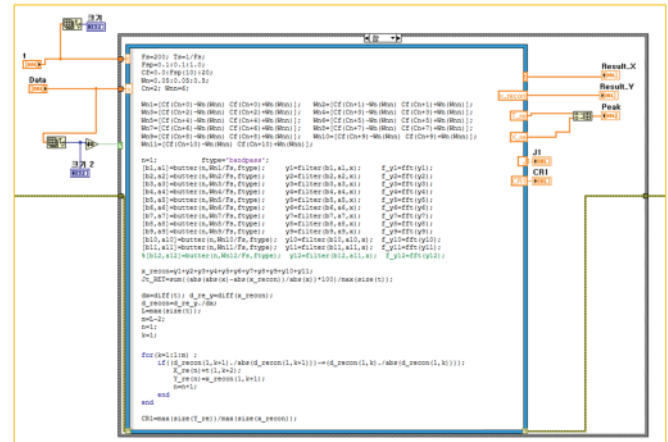


Fig. 8 S/W for the IDAQ system(Embedded CAFB)

4. 2경간 교량을 이용한 지진응답실험

4.1 대상 구조물(2경간 교량)

본 논문에서는 Kobe 지진파로 최적화된 CAFB의 응답성을 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))을 2개의 가진 테이블에 길이방향으로 배치하였으며, 좌측 및 우측 단에는 구조물 손상을 방지하기 위하여 충격받침을 설치하였다. 또한, 각 경간의 하부에는 서로 다른 강성을 갖는 LRB(lead rubber bearing)를 활용하여 각 경간의 횡 방향(X-direction) 1차 고유진동수가 10Hz 미만인 되도록 설계하였다.

Fig. 7은 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크(CAFB)의 응답성을 실험적으로 평가하기 위하여 준비된 2경간 교량의 배치 및 구조응답 획득을 위한 가속도 센서들의 위치(총 3곳)를 나타낸 것이다. 2경간 교량의 동적가진(dynamical excitation)은 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크의 최적화를 위해 기준 응답으로 사용된 Fig. 4(a)의 Kobe 지진파형(시간이력 신호)을 이용해 가진 테이블의 수평방향으로 가진하였다. 마지막으로 가진실험으로부터 구조응답은 짧은경간의 수평방향 가속도(A-SA), 긴경간의 수평방향 가속도(A-SB), 가진 테이블의 수평방향 가속도 응답(T-A 또는, T-B)을 가진조건(Kobe 지진파형) 별로 획득하였다. 이렇게 가진 테이블을 이용해 준비된 지진응답 실험셀은 여러 개의 경간을 갖는 연속 슬래브 교량이 외부의 랜덤한 지진하중(Kobe 지진 발생조건 등)을 받을 때,

실시간으로 획득될 수 있는 바닥 및 각 경간의 구조응답(가속도 등)의 획득조건을 표현한 것이다.

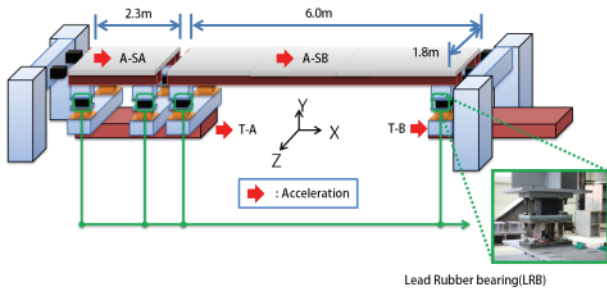


Fig. 9 Test setup of 2-span bridges and measurement Points

앞서 3절에서는 관심 모드가 10Hz 미만인 유연한 건설구조물의 동적응답을 압축센싱할 수 있도록 CAFB를 최적화하였다. 이렇게 최적화된 CAFB의 응답성능을 실험적으로 평가하기 위해서 본 논문에서는 2경간 교량을 사용하였다. 이때 2경간 교량은 관심된 고유진동수가 10Hz 미만일 때 Kobe 지진파형으로 최적화된 CAFB가 타당할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 지진응답실험에 앞서 Fig. 10과 같이 2경간 교량의 수평방향 고유진동수를 평가하였다. 2경간 교량의 짧은경간과 긴경간의 첫 번째 고유진동수는 각각 약 4.5Hz와 2.2Hz 내외로 평가되었다. 결국 2경간 교량은 10Hz 미만의 동적응답을 압축센싱하도록 Kobe 지진파형으로 최적화된 CAFB의 응답성능을 평가하기 위한 대상 구조물로 타당하였다.

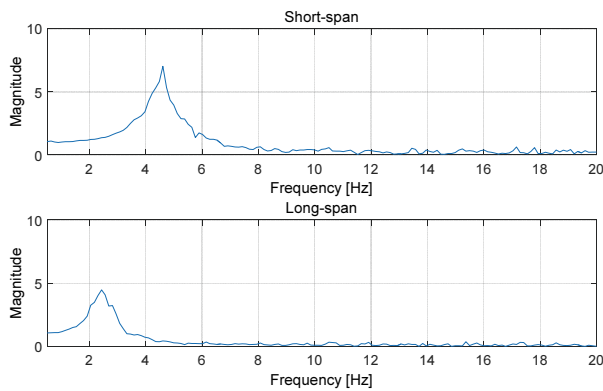


Fig. 10 Natural frequency of 2-span bridge(Horizontal)

4.2 Kobe 지진파형을 이용한 지진응답실험

CAFB가 적용된 동적 무선계측 시스템의 성능을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 유선계측 시스템을 병용하여 동적응답 실험을 수행하였으며, 이때 총 50초 동안 200Hz의 샘플링을 이용해 가속도 응답을 획득하였다. 동적 무선계측 시스템에 임베디드된 CAFB는 앞서 3절에서 도출된 최적화 조건 즉,

Kobe 지진파형을 기준으로 총 11개의 대역통과필터, 0.6Hz의 필터 대역폭 그리고, 1.0Hz의 필터 간격으로 각각 설계하였다. Fig. 11은 2경간 교량의 Kobe 지진파형의 가진조건에 대한 동적응답 획득을 위한 지진모사 실험의 전경이다.

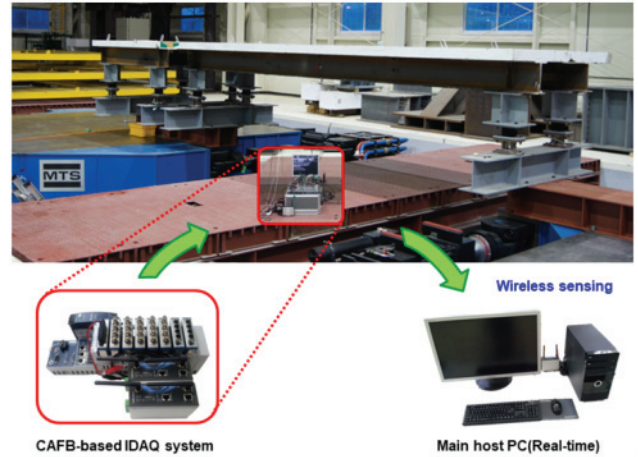


Fig. 11 Acquiring dynamic response of 2-span bridges

Kobe 지진파형을 이용한 지진모사 실험을 위하여 부산대학교 지진방재연구센터에서 실험을 진행하였고, 이때 달팽이관 원리 기반 인공필터뱅크가 임베디드된 무선계측 응답의 비교를 위해 요구된 비교군(유선계측 응답) 데이터는 지진방재연구센터에서 계측, 제공하였다. Fig. 12는 Kobe 지진파형을 이용한 가진조건에서 각각 실시간 계측된 유선 계측응답과 무선계측 응답의 원시신호(original signal)를 시간과 주파수 영역으로 나타낸 것이다.

Fig. 12(a)와 Fig. 12(b)는 Kobe 지진파형 가진조건에 대한 가진 테이블에서 계측된 가속도의 시간과 주파수 응답을 나타낸 것이다. 이들 각 영역에 대한 응답은 모두 Fig. 2의 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 Kobe 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 충돌(이벤트)에 따른 정보를 급격한 가속도 상승으로 확인할 수 있었다. 종국적으로 본 논문에서 IDAQ 시스템을 이용하여 실시간으로 획득한 무선 동적응답은 전체 시간 및 주파수 영역에서 유선 동적응답과 상호 우수한 일치도를 보였으며, IDAQ

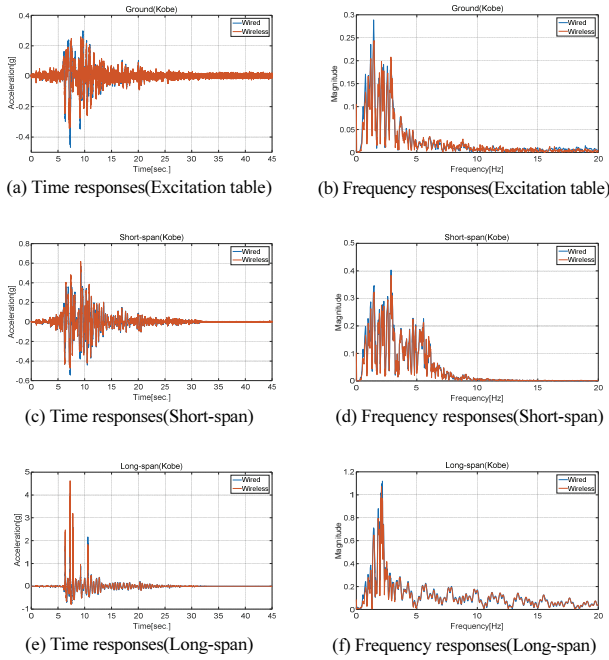


Fig. 12 Seismic responses of 2-span bridges under Kobe wave

시스템은 무선기반으로 SHM에 필요한 동적응답을 실시간 획득하는데 타당함을 확인하였다. 이를 근거로 본 논문에서는 획득된 무선 동적응답(원시신호)을 개발된 달팽이관 원리 기반 인공필터뱅크의 응답성능을 평가하기 위한 비교신호로 활용하였다.

5. CAFB의 지진응답성능평가

5.1 지진응답에 대한 CAFB의 재건효과

본 논문에서는 Kobe 지진파형을 이용해 최적화된 달팽이관 원리 기반 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. 12의 Kobe 지진파형 가진조건에서 무선 계측을 통해 획득한 원시신호 대비 시간 및 주파수 영역의 재건신호를 비교해 나타낸 것이다. Fig. 13에서 보면, Kobe 지진파형을 이용해 최적된 CAFB는 재건신호가 원시신호의 모드 정보를 충분히 재현하였다. 결국, 대역통과필터 최적화 알고리즘은 CAFB의 최적화 조건으로부터 10Hz 미만의 주파수 범위 내에서 목적모드를 온전히 표현할 수 있도록 적절히 설계되었음을 확인하였다.

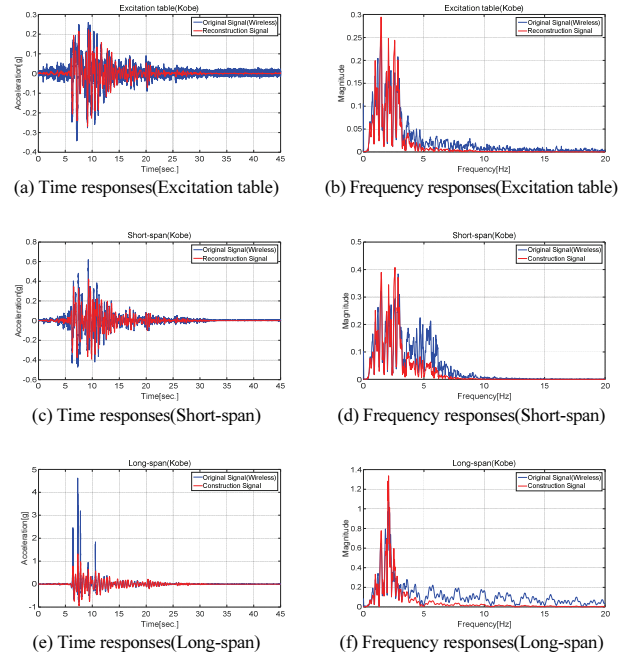


Fig. 13 Reconstruction vs. Original signal

Table. 4는 Fig. 13(a),(c),(e)에 나타낸 원시신호 대비 재건신호의 오차율(RE)을 나타낸 것이다. Fig. 13(a),(c),(e) 및 Table. 4로부터 Kobe 지진파형 가진조건에 대한 재건오차는 바닥(excitation table)에서 0.003283(재건효과는 약 99.671%), 단경간에서 0.003770(재건효과는 약 99.622%), 장경간에서 0.005278(재건효과는 약 99.472%)으로 각각 나타났다. 결국 본 논문에서 Kobe 지진파형으로 각각 최적화된 인공필터뱅크는 2-경간 교량의 목적응답을 획득하도록 적절히 설계되었음을 확인할 수 있었다.

Table 3 Reconstruction effect

Reconstruction effect	Excitation table	Short span	Long span
Kobe RE	0.00328348	0.00377063	0.00527802
Effect[%]	99.671	99.622	99.472

5.2 지진응답에 대한 CAFB의 압축효과

다음으로, CAFB의 데이터 압축성능을 평가하기 위해, 앞서 Fig. 13(a),(c),(e)의 재건신호를 기준으로 PPA를 이용해 시간 영역의 첨두치 신호만을 색출하였다. Fig. 14는 Fig. 13(a),(c),(e)의 Kobe 지진파형 가진조건에서 무선계측을 통해 획득한 원시신호 대비 시간 및 주파수 영역의 재건신호와 더불어 압축신호를 상호 비교하여 나타낸 것이다. 또한 Table 4는 Fig. 14(a),(c),(e)에 나타낸 원시신호 및 재건신호 대비 압

축신호의 압축율(CR)을 나타낸 것이다.

Fig. 14 및 Table 4에서 보면, 침두치 색출 알고리즘이 재건 신호에 대한 시간영역의 침두치만을 온전히 색출하였다. Kobe 지진파형 가진조건에 대한 압축신호는 45초의 측정시간 동안 총 9,000개의 획득데이터 중 바닥(excitation table)에서 3,235개의 침두치 값을, 단경간에서 1,568개 침두치 값을, 장경간에서 807개의 침두치 값을 각각 획득하였다. 이때 데이터 압축율(CR)은 바닥(excitation table)에서 0.359404(데이터 압축효과는 약 64.059%), 단경간에서 0.174202(데이터 압축효과는 약 82.579%), 장경간에서 0.089656(데이터 압축효과는 약 91.034%)으로 각각 나타났다.

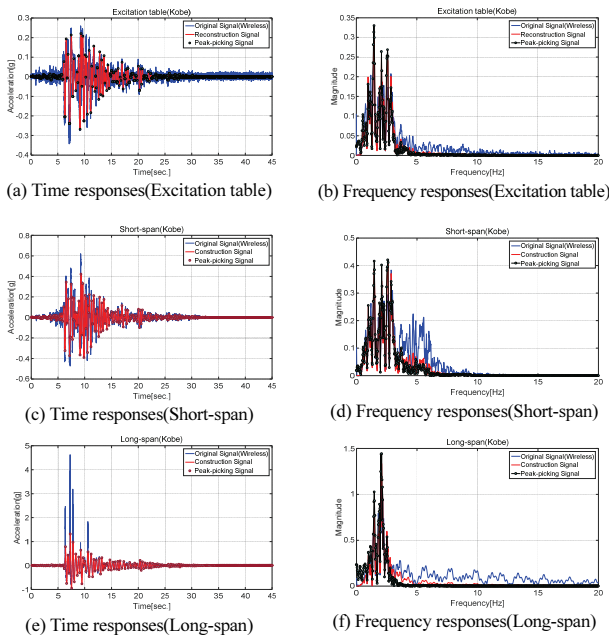


Fig. 14 Compressive vs. Reconstruction vs. Original signal

Table 4 Compressive effect

Compressive effect	Excitation table	Short span	Long span	
Kobe	CR	0.35940451	0.17420286	0.08965670
	Effect[%]	99.671	99.622	99.472

5.3 지진응답에 대한 CAFB의 스펙트럼효과

다음으로, IDAQ 시스템에 내장된 CAFB로부터 산출된 신호(재건신호 및 압축신호)는 시간응답 성능뿐만 아니라 당초 최적화된 주파수 대역의 모드 정보를 함께 반영해야 한다. 본 논문에서는 Fig. 15 및 식(5)의 스펙트럼 오차(Spectrum Error, SE)를 정의하고, 원시신호 대비 재건신호 및 압축신호의 주파수 응답성능 즉, 스펙트럼 효과를 정량적으로 평가하였다.

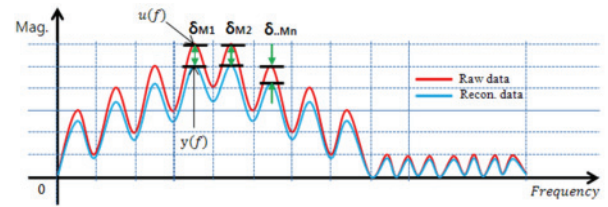


Fig. 15 Concept of spectrum error(SE)

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

여기서, $u(f)$ 는 원시신호의 주파수 응답, $y(f)$ 는 재건 또는 압축신호의 주파수 응답, 그리고 F 는 FFT 해석을 통해 산출된 스펙트럼의 전체 길이(Hz)이다. Table 5는 원시신호 대비 재건신호 및 압축신호의 스펙트럼 효과를 나타낸 것이다.

Table 5 Spectrum effect

Spectrum effect	Excitation table	Short span	Long span	
Kobe	Recon. SE	0.00624964	0.00474390	0.00805394
	Signal Effect[%]	99.376	99.526	99.195
	Comp. SE	0.00668556	0.00509212	0.01561914
	Signal Effect[%]	99.332	99.491	98.439

Table 5로부터 Fig. 13(b),(d),(f)의 재건신호에 대한 스펙트럼 오차(SE)는 전체적으로 0.004~0.008 (스펙트럼 효과는 약 99.366%)으로 나타났다. 또한, Fig. 14(b),(d),(f)의 압축신호에 대한 스펙트럼 오차(SE)는 전체적으로 0.005~0.016 (스펙트럼 효과는 약 99.087%)으로 나타났다. 특히 Fig. 14(b),(d),(f)의 압축신호는 원시신호 대비 약 9~36%의 침두치신호만으로도 목적된 모드정보를 명확히 표현할 수 있었다. 결국 인공필터뱅크의 침두치 색출 알고리즘은 침두치 색출을 통해 데이터의 압축과 더불어 정확한 주파수 정보를 나타내는데 효과적이었다.

6. 결론

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

- 1) Kobe 지진파형으로 최적화된 CAFB는 관심된 주파수 영역(10Hz 미만)에 대한 유효 동적응답을 압축된 크기

로 획득하는데 타당하였다. 따라서 사용자의 요구 또는 대상 구조물의 관심 주파수 대역이 10Hz 미만일 경우라면 본 논문에서 평가된 Kobe 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 수행하기 위한 다양한 외력 환경 조건(정상시 일반(운영)상태 및 위험상태)에서 충분히 활용가능함을 실험적으로 입증되었다.
- 3) 결국, Kobe 지진파형으로 최적화된 CAFB는 상대적으로 유연한 구조물(케이블 교량, 초고층 건물, 기타 저주파 거동 구조물 등)의 동적응답(가속도 등)을 관심된 주파수 대역(10Hz 미만)을 중심으로 압축하여 획득하는데 타당하였다.
- 4) 무선 기반의 지능형 데이터 획득 시스템(Intelligent Data Acquisition system; IDAQ 시스템)은 압축센싱기술인 CAFB를 적용(FPGA 기반 embedded)함으로써, WSNs 기반 SHM 시스템의 제한된 RF 성능으로 인한 병목현상을 피하면서 효율적으로 동적응답을 실시간 획득하여 SHM을 수행할 수 있으며, 본 논문에서의 CAFB 뿐만 아니라 S/W 기반의 다양한 계측 및 분석함수(논리)를 EST 및 RTOS 기반에서 운용되도록 적용한다면 사용자의 편리성을 제공할 것으로 판단된다.
- 5) 향후, 10Hz 미만의 관심 주파수를 갖는 구조물뿐만 아니라, 다양한 관심 주파수 대역과 외력 환경을 갖는 구조 및 시스템(기계, 항공, 기타)의 동적응답을 무선-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-2017R1A2B4001836, NRF-2018R1A6A1A03025542).

References

1. Sohn, H.; Farrar, R.; Hemez, H.; Czarnecki, J. (2002), A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001. Los Alamos National Laboratory.

2. Wong, K.Y. (2004), Instrumentation and Health Monitoring of Cable-supported Bridge. *Structural Control and Health Monitoring*, 11, 91-124.
3. Jang, S.; Jo, H.; Mechitov, K.; Rice, J.A.; Sim, S.H.; Jung, H.J.; Yun, C.B.; Spencer, Jr., B.F.; Agha, G. (2010), Structural Health Monitoring of a Cable-stayed Bridge using Smart Sensor Technology: Deployment and Evaluation. *Smart Structures and System*, 6, 439-459.
4. Na, W.S.; Baek, J. (2017), Impedance-Based Non-Destructive Testing Method Combined with Unmanned Aerial Vehicle for Structural Health Monitoring of Civil Infrastructures. *Applied Sciences*, 17, 15.
5. Lee, Y.-J.; Cho, S. (2016), SHM-Based Probabilistic Fatigue Life Prediction for Bridges Based on FE Model Updating. *Sensors*, 16, 317.
6. Abe, M.; Fujino, Y. (2009), Bridge Monitoring in Japan, Encyclopedia of Structural Health Monitoring. *John Wiley and Sons*, 5.
7. Koh, H.M.; Lee, H.S.; Kim, S.; Choo, J.F. (2009), Monitoring of Bridge in Korea, Encyclopedia of Structural Health Monitoring. *John Wiley and Sons*, 5.
8. Baptista, F.G.; Budoya, D.E.; Almeida, V.A.D.; Ulson, J.A.C. (2014), An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring. *Sensors*, 14, 1208-1227.
9. Salmanpour, M.S.; Khodaei, Z.S.; Aliabadi, M.H. (2017), Impact Damage Localisation with Piezoelectric Sensors under Operational and Environmental Conditions. *Sensors*, 17, 1178.
10. Lamonaca, F.; Sciammarella, P.F.; Scuro, C.; Carni, D.L.; Olivito, R.S. (2018), Synchronization of IoT Layers for Structural Health Monitoring. *2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT*, 8428329, 89-94.
11. Scuro, C.; Sciammarella, P.F.; Lamonaca, F.; Olivito, R.S.; Carni, D.L. (2018), IoT for structural health monitoring. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 21, 4-9 and 14.
12. Aktan, A.E.; Catbas, F.N.; Grimmelman, K.A.; Pervizpour, M. (2003), Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges. *Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Institute*.
13. Peeters, B.; Couvreur, G.; Razinkov, O.; Kundig, C. (2003), Continuous Monitoring of the Oresund Bridge: System and Data Analysis. In Proceedings of IMAC 21, International Modal Analysis Conference, Kissimmee, Florida, USA.
14. Ko, J.M.; Ni, Y.Q. (2005), Technology Developments in Structural Health Monitoring of Large-scale Bridges. *Engineering Structures*, 27, 1715-1725.
15. Ko, J.M.; Ni, Y.Q. (2003), Structural Health Monitoring and Intelligent Vibration Control of Cable-Supported Bridge: Research and Application. *KSEC Journal of Civil Engineering*, 7, 701-716.
16. Carni, D.L.; Scuro, C.; Lamonaca, F.; Olivito, R.S.; Grimaldi, D. (2017), Damage analysis of concrete structures by means of acoustic emissions technique. *Composites Part B: Engineering*, 115, 79-86.
17. Lamonaca, F.; Carrozzini, A.; Grimaldi, D.; Olivito, R.S. (2015), Improved monitoring of acoustic emissions in concrete structures

- by multi-triggering and adaptive acquisition time interval. *Measurement*, 59, 227-236.
18. Lamonaca, F.; Carrozzini, A.; Grimaldi, D.; Olivito, R.S. (2014), Improved accuracy of damage index evaluation in concrete structures by simultaneous hardware triggering. *Metrology and Measurement Systems*, 21, 341-350.
 19. Heo, G.; Jeon, J. (2009), 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*, 13, 333-337.
 20. Lynch, P.J. (2007), An Overview of Wireless Structural Health Monitoring for Civil Structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365, 345-372.
 21. Zhang, J.; Tian, G.Y.; Marindra, A.M.J.; Sunny, A.I.; Zhao, A.B. (2017), A Review of Passive FRID Tag Antenna-Based Sensors and Systems for Structural Health Monitoring Applications. *Sensors*, 17, 265.
 22. Park, J.-W.; Sim, S.-H.; Jung, H.-J.; Spencer, B.F. (2013), Development of a Wireless Displacement Measurement System Using Acceleration Responses. *Sensors*, 13, 8377-8392.
 23. Hao, J.; Zhang, B.; Jiao, Z.; Mao, S. (2015), Adaptive compressive sensing based sample scheduling mechanism for wireless sensor networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 22, 113-125.
 24. Huang, Y.; Beck, J.L.; Wu, S.; Li, H. (2016), Bayesian compressive sensing for approximately sparse signals and application to structural health monitoring signals for data loss recovery. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 46, 62-79.
 25. Peckens, C.A.; Lynch, J.P. (2013), Utilizing the Cochlea as a Bio-inspired Compressive Sensing Technique. *Smart Materials and Structures*, 22, 105027.
 26. Peckens, C.A.; Lynch, J.P.; Heo, G. (2015), Resource-efficient Wireless Sensor Network Architecture Based on Bio-mimicry of the Mammalian auditory System. *Intelligent Material Systems and Structures*, 26, 79-100.
 27. Heo, G.; Jeon, J. (2017), A Study on the Data Compression Technology-based Intelligent Data Acquisition (IDAQ) System for Structural Health Monitoring of Civil Structures. *Sensors*, 17, 1620.
 28. Angrisani, L.; Schiano Lo Moriello, R.; Bonavolonta, F.; Gallucci, L.; Menna, C.; Asprone, D.; Fabbrocino, F. (2017), 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*, 8065969.
 29. Gallucci, L.; Menna, C.; Angrisani, L.; Asprone, D.; Lo Moriello, R.S.; Bonavolontá, F.; Fabbrocino, F. (2017), An embedded wireless sensor network with wireless power transmission capability for the structural health monitoring of reinforced concrete structures. *Sensors*, 17, 2566.

Received : 12/30/2019

Revised : 02/03/2020

Accepted : 03/30/2020

요 지 : 압축센싱 기술인 CAFB는 대상 구조물의 원시신호를 목적된 주파수 범위의 신호로 압축하여 획득하도록 개발되었다[27]. 이때 압축센싱을 위해 CAFB는 대상 구조물의 목적된 주파수 범위에 따라 다양한 기준신호로 최적화 될 수 있다. 또한, 최적화된 CAFB는 지진과 같은 돌발/위험상황에서도 대상 구조물의 유효한 구조응답을 효율적으로 압축할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 상대적으로 유연한 구조물의 효율적인 구조 건전도 모니터링을 위하여 목적된 주파수 범위를 10Hz 미만으로 설정하고, 이를 위한 CAFB의 최적화 방법과 지진상황에서 CAFB의 지진응답성능을 실험적으로 평가하였다. 이를 위해 본 논문에서는, 먼저 Kobe 지진파형을 이용하여 CAFB를 최적화하였고, 이를 자체 개발한 무선 IDAQ 시스템에 임베디드 하였다. 그리고, Kobe 지진파형을 이용하여 2경간 교량에 대한 지진응답실험을 수행하였다. 마지막으로 CAFB가 내장된 IDAQ 시스템을 이용하여 실시간으로 2경간 교량의 지진응답을 무선으로 획득하고, 획득된 압축신호는 원시신호와 상호 비교하였다. 실험의 결과로부터 압축신호는 원시신호와 대비하여 우수한 응답성능과 데이터 압축효과를 보였고, 또한 CAFB는 지진상황에서도 구조물의 유효한 구조응답을 효과적으로 압축센싱할 수 있었다. 최종적으로 본 논문에서는 목적된 주파수 범위(10Hz 미만)에 적합하도록 CAFB의 최적화 방법을 제시하였고, CAFB는 지진상황의 계측-모니터링을 위해 경제적이고 효율적인 데이터 압축센싱 기술임을 증명하였다.

핵심용어 : 압축 센싱 (CS), 달팽이관-원리기반 인공필터뱅크 (CAFB), 대역통과필터 최적화 알고리즘 (BOA), 침투차-색출 알고리즘 (PPA), 재건오차 (RE), 압축율 (CR), 스펙트럼오차 (SE), 구조 건전도 모니터링 (SHM)
