

압축센싱을 위한 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크의 실험적 검증

An Experimental Study of the Cochlea-inspired Artificial Filter Bank(CAFB) for Compressed Sensing

허 광 희* · 전 준 용† · 전 승 곤**

Gwanghee Heo, Joonryong Jeon and Seunggon Jeon

(Received October 16, 2015 ; Revised November 16, 2015 ; Accepted November 16, 2015)

Key Words : Structural Health Monitoring(구조 건전도 모니터링), Cochlea-inspired Artificial Filter Bank(달팽이관 원리기반 인공필터뱅크), Band-pass Filter Optimizing Algorithm(대역통과필터 최적화 알고리즘), Peak-picking Algorithm(첨두치 색출 알고리즘), Wireless Multi-measurement System(무선 다중 계측 시스템), Compressed Sensing(압축센싱)

ABSTRACT

In this paper, a cochlea-inspired artificial filter bank(CAFB) was developed in order to efficiently acquire dynamic response of structure, and it was also evaluated via dynamic response experiments. To sort out signals containing significant modal information from all the dynamic responses of structure, it was made to adopt a band-pass filter optimizing algorithm(BOA) and a peak-picking algorithm(PPA). Optimally designed on the basis of El-centro and Kobe earthquake signals, it was then embedded into the wireless multi-measurement system(WiMMS). In order to evaluate the performance of the developed CAFB, a vibration test was conducted using the El-centro and Kobe earthquake signals, and structural responses of a two-span bridge were obtained and analyzed simultaneously by both a wired measurement system and a CAFB-based WiMMS. The test results showed that the compressed dynamic responses acquired by the CAFB-based WiMMS matched with those of the wired system, and they included significant modal information of the two-span bridge. Therefore this study showed that the developed CAFB could be used as a new, economic, and efficient measurement device for wireless sensor networks(WSNs) based real time structural health monitoring because it could reconstruct the whole dynamic response using the compressed dynamic response with significant modal information.

1. 서 론

최근 건설분야에서는 과거 관심된 구조물의 설계와 시공의 기술에서 벗어나 유지 및 관리를 위한 건전도 모니터링(structural health monitoring; SHM)

에 대한 기술이 대두되고 있다^(1,2,12,14-16). 이때 기존 건설구조물의 건전도 모니터링을 위한 구조응답의 계측은 대부분 유선 계측시스템에 의존하고 있다^(3,4). 여기서 유선 계측시스템은 설치와 이동에 제약이 따르고, 특히 구조응답의 종류에 따라 독립 또는 개별된 데이터 로거를 사용해야하기 때문에 구

† Corresponding Author ; Member, Civil Eng., Konyang University
E-mail : jrjeon@kyu.ac.kr

* Member, Civil Eng., Konyang University

** Civil Eng., Chungnam National University

‡ Recommended by Editor Hyung Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

조응답의 동기화(synchronization)가 어려우며, 데이터 로거의 한정된 계측채널을 사용해야 하는 만큼 복잡하고 다양한 건설구조물의 구조응답을 충분히 확보하는데 한계를 내포하고 있다^(5-7,13).

이러한 기술적 한계를 극복하고자 최근에는 현격히 발전한 IT 기술 및 무선통신(radio frequency; RF)기술을 접목해 WSNs(wireless sensor networks)를 이용한 구조물의 건전도 모니터링에 관한 연구가 진행되고 있다^(8,9,12). WSNs를 이용한 건전도 모니터링 기술은 상대적으로 저렴하게 시스템을 구성 또는 확장할 수 있고, 특히 무선 센서노드를 활용하기 때문에 비효율적인 유선 케이블링 없이 센서의 설치와 이동이 자유롭다는 장점을 갖는다. 이때 WSNs를 이용한 건전도 모니터링 기술은 제한된 RF 성능범위 내에서 다량의 구조응답을 실시간 획득할 수 있어야 한다. 특히 구조물의 거동특성을 평가하기 위해서는 가속도 등의 동적응답이 요구되는데, 일반적으로 정적응답에 비해 상대적으로 많은 데이터량이 요구되는 동적응답을 무선으로 획득하고 전송함에 있어 병목현상에 따른 데이터 손실과 대용량 DB(database) 구축, 관리에 따른 비용이 증가될 수 있다. 결국 WSNs를 이용한 건설구조물의 동적응답을 실시간-안정적으로 획득하고 관리하기 위한 기술적 대안이 요구된다^(10,11).

이 논문에서는 기존 WSNs를 이용한 건전도 모니터링의 기술적 대안으로 달팽이관 원리기반의 압축 센싱기술(compressed sensing; CS)을 인공필터뱅크(artificial filter bank; AFB) 개념으로 개발하고, 실험실 규모의 2-span 교량을 대상으로 실시간 구조응답실험을 수행하였다. 이때 달팽이관 원리기반의 인공필터뱅크는 건설구조물에서 발생한 실시간 유효 동적응답을 선별하여, 효율적으로 획득하고자 대역통과필터 최적화 알고리즘(band-pass filter optimization algorithm; BOA)과 첨두치 색출 알고리즘(peak-picking algorithm; PPA)으로 구성된 인공필터뱅크(afb)를 개발하고, 이를 실시간 무선 다중 계측시스템(wireless multi-measurement system; WiMMS)에 온전히 적용(임베디딩)하였다. 구조응답 실험은 El-centro 및 Kobe 지진파형을 규모화하여 2-span 교량을 가진하였고, 이때 기존 유선 계측시스템과 개발된 무선 계측시스템으로 동시 획득된 구조응답을 상호 비교하였다. 최종적으로 이 논문에서 인공

필터뱅크 개념으로 개발된 달팽이관 원리기반의 인공필터뱅크는 건설구조물의 건전도 모니터링을 위해 요구되는 대용량의 구조 동적응답을 경제·효율적 측면에서 실시간 획득하고 관리할 수 있는 기술임을 실험적으로 확인하였다.

2. 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크

2.1 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크의 개념

신호처리분야에서 정의되는 필터뱅크는 입력신호를 기준으로 관심된 특정성분(정보)만을 취득하고 이를 출력하기 위하여 고안(설계)된 대역통과필터들의 배열이다. 이러한 필터뱅크는 입력신호를 주파수 대역별로 분해하고, 이를 다시 재구성하여 출력하는 일련의 과정을 수행한다. 이때 필터뱅크의 신호분해 과정은 서브-밴드 즉, 각기 설계된 대역통과필터들의 관점에서 “신호의 분해”이며, 또한 분해된 신호의 출력을 위해 수행되는 신호-재결합은 필터링 과정에서 “신호의 합성”이 된다. 이러한 신호의 분해 및 합성과정을 수행하는 필터뱅크는 설계자의 목적 정보 및 관심 주파수에서 따라 달리 설계될 수 있으며, 이때 필터뱅크 내의 대역통과필터의 수가 많고, 그 간격이 조밀할수록 입력신호 대비 출력신호는 정확도가 높아진다. 하지만, 대역통과필터의 수가 많아질수록 데이터 연산과 처리 효율은 감소하게 되므로, 결국 필터뱅크의 최적화가 요구된다. 이때 필터뱅크의 최적화를 위해서 크게 대역통과필터의 개수(number of filters), 대역폭(bandwidth) 그리고, 간격(spacing) 등이 주된 설계요소로 고려될 수 있다. 여기서 필터뱅크의 최적화는 기 결정된 입력신호를 기준으로 위의 3가지 설계요소를 동시에 만족시킬 수 있는 상태를 결정하는 것이며, 이때 최적화를 위해 수치, 반복적인 연산이 요구된다.

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. 달리 표현하면, 입력신호 대비 출력신호의 선택적 정보력은 향상되었지만, 이때 획득 데이터의 크기는 동일하므로, 데이터의 획득, 전송, 관리 측면에서는 이점을 포함하지 못한다. 결국, 제한된

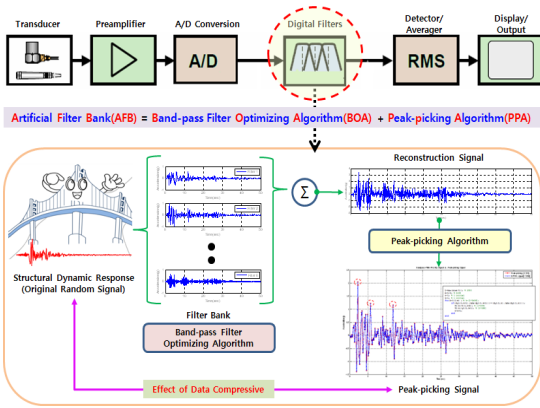


Fig. 1 Concept of CAFB

통신속도 범위를 갖는 WSNs 기반으로 구조물의 동적응답을 효율적으로 획득하기 위해서는 데이터의 압축기술이 요구된다. 이때 동적응답에 대한 데이터 압축기술을 구현함에 있어 가장 큰 주안점은 앞서 필터뱅크와 마찬가지로 관심된 특정성분(정보) 즉, 동적응답의 동특성(주기성 등)을 반영해야 한다는 것이다. 이 논문에서는 위의 여러 설계요소와 고려 조건을 바탕으로, 최적 필터뱅크 구성을 위한 BOA와 데이터 압축을 위한 PPA를 이용해 AFB를 개발하였다. Fig. 1은 건설구조물의 동적응답 획득을 위해 이 논문에서 개발한 인공필터뱅크의 개념도이다.

2.2 대역통과필터 최적화 알고리즘(BOA)

건설구조물의 동적응답을 효율적으로 얻기 위해 개발한 인공필터뱅크는 대역통과필터 최적화 알고리즘(BOA)과 첨두치 색출 알고리즘(PPA)을 사용하였다. 먼저 대역통과필터 최적화 알고리즘은 건설구조물의 동적 거동상태를 평가하기 위하여 요구되는 목적 모드를 결정하는데 적합하도록 대역통과필터를 설계하고, 이때 대역통과필터의 개수, 대역폭, 간격 등을 반복적으로 변경하며 재건설신호(reconstruction signal)를 산출한다. 재건설신호와 대상 구조물로부터 획득한 원시신호(original signal)의 비교를 통해 BOA의 원시신호 추종능력을 평가하였으며, 이때 전체 주파수 대역 대비 관심 주파수 대역은 장대형 건설구조물의 거동특성을 고려하여 10 Hz 미만으로 결정하였다. 원시신호 대비 산출된 재건설신호의 추종능력은 식 (1)로부터 식 (2)의 재건설오차(reconstruction error; RE)를 이용하여 평가하였다.

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

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

$u(t)$ 는 응답시간별 원시신호, $y(t)$ 는 응답시간별 재건설신호, $y_i(t)$ 는 응답시간별 필터뱅크로부터 i 번째 출력된 재건설신호, T 는 응답시간의 전체 길이(sec)이다.

2.3 첨두치 색출 알고리즘(PPA)

첨두치 색출 알고리즘은 식 (1)을 통해 결정된 재건설신호를 기준으로 전체신호의 첨두치(peak values)만을 찾아서 해당 시간정보와 가속도 신호 값을 재표본화(re-sampling)하도록 개발하였다. 이때 첨두치 판별은 현재 신호를 기준으로 이전 단계의 신호와 이후 단계의 신호의 변화율을 다음 식 (3)을 이용해 계산하고, 이때 변화율의 부호변화가 발생되었을 경우 바뀌기 전의 신호 값을 색출하였다. 재건설신호 대비 압축신호의 상대적 데이터 크기(size)는 다음 식 (4)의 압축률(compressive ratio; CR)을 이용하여 평가하였다.

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

$$CR = \frac{NS_c}{NS_o} \tag{4}$$

여기서, $f'(x(i))$ 는 중앙차분법을 이용한 현재 기준신호 $x(i)$ 의 도함수, NS_c 는 압축신호의 데이터 개수, NS_o 는 원시신호의 데이터 개수이다. 이때 압축률이 0에 가까워지면 압축효과는 우수하다. 이들 BOA와 PPA를 결합한 AFB는 동적 무선 계측시스템에 적용을 위해 MATLAB으로 프로그래밍 하였다.

3. CAFB 설계 및 무선 계측시스템

3.1 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크 설계

앞서 2장에서는 건설구조물의 효율적인 동적응답 획득을 위하여 인공필터뱅크를 개발하였다. 이때 인공필터뱅크는 대역통과 필터 최적화 알고리즘 및 첨

두치 선택 알고리즘으로 구성되며, 이들 알고리즘은 일련의 연산과정을 통해 구조물로부터의 원시신호를 최적의 조건으로 분해-재건-압축한다. 이 장에서는 건물 구조물의 설계, 시공, 유지관리에 수반되는 돌발적 이벤트 상황을 고려해 임의 랜덤파형(El-centro(1940, SE) 및 Kobe(1995, JMA, NS))을 기준으

로 개발된 인공필터뱅크를 최적으로 설계하였다.

Fig. 2는 설계 기준신호 즉, 원시신호로 사용된 El-centro 및 Kobe 지진파의 시간 및 주파수 응답을 나타낸 것이다. 여기서 Fig. 2(a) 및 (b)의 El-centro 및 Fig. 2(c) 및 (d)의 Kobe 지진 상황을 가정하면, 이때 대상 구조물의 동적응답은 기존 지진파의 랜덤

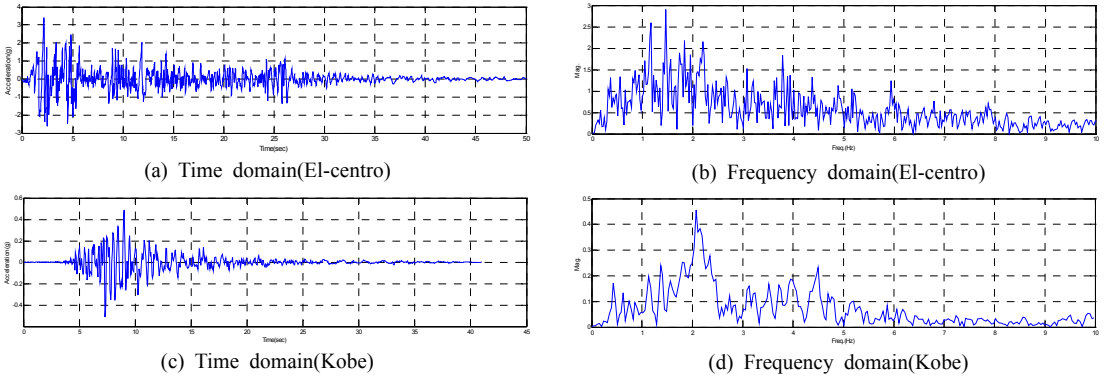


Fig. 2 El-centro and Kobe earthquake wave for original(raw) signal of CAFB

Table 1 Reconstruction error(RE) for a filter bank with 10 filters(using El-centro earthquake wave)

| | | Bandwidth of filters(Hz) | | | | | | | | | | |
|--------------------|-----|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 |
| Filter Spacing(Hz) | 1.0 | - | 0.199 30 | 0.164 97 | 0.133 78 | 0.109 31 | 0.093 47 | 0.087 13 | 0.090 36 | 0.102 78 | 0.123 73 | 0.152 50 |
| | 0.9 | - | 0.195 15 | 0.158 96 | 0.128 16 | 0.106 92 | 0.097 05 | 0.098 93 | 0.112 14 | 0.135 88 | 0.169 20 | 0.211 18 |
| | 0.8 | - | 0.193 74 | 0.157 11 | 0.128 10 | 0.111 25 | 0.108 70 | 0.120 73 | 0.146 50 | 0.184 74 | 0.234 06 | 0.293 20 |
| | 0.7 | - | 0.189 70 | 0.156 31 | 0.133 87 | 0.127 19 | 0.137 62 | 0.164 62 | 0.206 88 | 0.262 90 | 0.331 24 | 0.410 53 |
| | 0.6 | - | 0.183 96 | 0.148 14 | 0.133 60 | 0.141 71 | 0.171 14 | 0.219 86 | 0.285 83 | 0.367 19 | 0.462 29 | 0.569 57 |
| | 0.5 | - | 0.183 57 | 0.148 61 | 0.144 43 | 0.173 45 | 0.232 17 | 0.316 12 | 0.421 41 | 0.544 84 | 0.683 78 | x |
| | 0.4 | - | 0.192 40 | 0.178 90 | 0.210 53 | 0.284 28 | 0.392 77 | 0.529 62 | 0.689 71 | x | x | x |
| | 0.3 | - | 0.197 45 | 0.216 61 | 0.298 17 | 0.427 97 | 0.593 87 | 0.787 41 | x | x | x | x |
| | 0.2 | - | 0.230 26 | 0.296 89 | 0.422 03 | x | x | x | x | x | x | x |
| | 0.1 | - | 0.250 73 | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 0.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |

Table 2 Reconstruction error(RE) for a filter bank with 10 filters(using Kobe earthquake wave)

| | | Bandwidth of filters(Hz) | | | | | | | | | | |
|--------------------|-----|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 |
| Filter Spacing(Hz) | 1.0 | - | 0.004 51 | 0.003 54 | 0.002 64 | 0.001 92 | 0.001 43 | 0.001 19 | 0.001 21 | 0.001 46 | 0.001 95 | 0.002 64 |
| | 0.9 | - | 0.004 28 | 0.003 24 | 0.002 36 | 0.001 75 | 0.001 44 | 0.001 45 | 0.001 77 | 0.002 38 | 0.003 26 | 0.004 38 |
| | 0.8 | - | 0.004 41 | 0.003 39 | 0.002 60 | 0.002 14 | 0.002 07 | 0.002 37 | 0.003 04 | 0.004 04 | 0.005 34 | 0.006 92 |
| | 0.7 | - | 0.004 12 | 0.003 15 | 0.002 57 | 0.002 44 | 0.002 76 | 0.003 50 | 0.004 64 | 0.006 14 | 0.007 97 | 0.010 10 |
| | 0.6 | - | 0.004 16 | 0.003 22 | 0.002 81 | 0.003 00 | 0.003 76 | 0.005 07 | 0.006 86 | 0.009 09 | 0.011 73 | 0.014 72 |
| | 0.5 | - | 0.004 39 | 0.003 54 | 0.003 44 | 0.004 28 | 0.005 99 | 0.008 46 | 0.011 57 | 0.015 23 | 0.019 34 | x |
| | 0.4 | - | 0.004 90 | 0.005 54 | 0.007 28 | 0.009 94 | 0.013 37 | 0.017 41 | 0.021 95 | x | x | x |
| | 0.3 | - | 0.005 33 | 0.006 18 | 0.007 94 | 0.010 51 | 0.013 76 | 0.017 58 | x | x | x | x |
| | 0.2 | - | 0.005 51 | 0.006 50 | 0.008 32 | x | x | x | x | x | x | x |
| | 0.1 | - | 0.005 72 | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 0.0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |

주파수 성분에 대상 구조물의 고유 주파수 성분이 포함된 형태로 측정된다. 결국 구조물의 건전도 모니터링을 위해서는 랜덤주파수 성분에 포함된 대상 구조물의 고유 주파수 성분을 온전히 찾아야 한다. 일반적으로 건설분야의 장대형 구조물은 상대적으로 유연한 거동특성을 갖기 때문에 건전도 모니터링을 위해 요구되는 목적 모드의 분포범위는 특정 주파수 대역(10 Hz 미만)에 국한될 수 있다. 따라서 이 논문에서는 인공필터뱅크의 대역통과필터 최적화 알고리즘(BOA)을 위해 관심 주파수 범위를 10 Hz 미만으로 선택하였고, 이때 대역통과필터의 개수는 최적화 작업의 효율성을 위해 10으로 가정하였다. 여기서 선택된 관심 주파수 범위는 공용중의 장대형 건설구조물에 통상적으로 해당되며, 이때 대역통과필터의 개수는 BOA의 연산과정에서 최적화되므로 임의로 가정하였다. Table 1 및 Table 2는 앞서 Fig. 2의 El-centro 및 Kobe 지진응답을 기준으로 선택된 10 Hz 미만의 관심 주파수 범위에서 초기 가정된 10개의 대역통과필터 개수를 고려했을 때, 식 (1)을 통해 산정된 재건오차(RE)의 결과이다. 이때, 대역통과필터의 대역폭과 간격은 각각 0 Hz ~ 1 Hz 범위에서 0.1 Hz씩 증가시켜, 최종적으로 총 100가지 경우에 대한 재건오차를 산정하였다. Table 1 및 Table 2에서 보면, 필터뱅크의 초기 대역통과필터의 개수가 10인 조건에서 재건오차가 최소가 되었다. 이때 El-centro 및 Kobe 지진응답 조건에서 모두 대역통과필터의 대역폭은 0.6 Hz, 간격은 1.0 Hz로 평가되었고, 여기서 평가된 대역폭과 간격은 BOA를 위한 최적조건으로 결정하였다.

다음으로 이 논문에서는 앞서 Table 1 및 Table 2에서 결정된 대역통과필터의 대역폭과 간격을 기준으로 최적의 대역통과필터의 개수를 결정하고자, 대역통과필터의 수를 1개에서 20개까지 1개씩 증가시키며 재건오차 및 데이터 압축률을 산출하였다. 이때 El-centro 및 Kobe 지진응답을 기준으로 대역통과필터의 수를 변경하며 산출한 재건오차 및 데이터 압축률은 Table 3 및 Table 4와 같다.

Table 3을 보면, 재건오차 및 데이터 압축률은 서로 상반된 관계를 보였고, 이때 대역통과필터의 개수가 최적이 되는 조건은 재건오차와 데이터 압축률의 상대적인 차이가 최소가 되는 6개로 평가되었다. 한편, Table 4를 보면, 재건오차 및 데이터 압축률은

서로 상반된 관계를 보였고, 이때 대역통과필터의 개수가 최적이 되는 조건은 재건오차와 데이터 압축률의 상대적인 차이가 최소가 되는 5개로 평가되었다. 최종적으로 이 논문에서는 El-centro 지진파형을 기준으로 최적화된 달팽이관 원리 기반 인공필터뱅크의 설계조건으로 대역통과필터의 개수는 6개, 대역폭은 0.6 Hz, 그리고 간격은 1.0 Hz를 결정하였고, Kobe 지진파형을 기준으로 최적화된 달팽이관 원리 기반 인공필터뱅크의 설계조건으로 대역통과필터의

Table 3 Optimization of number of filters(using El-centro)

| No. of filters | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| RE | 0.210 870 | 0.199 710 | 0.179 200 | 0.157 130 | 0.136 690 |
| | 0.080 818 | 0.073 299 | 0.069 403 | 0.065 025 | 0.060 550 |
| CR | 0.1000 | 0.0952 | 0.0992 | 0.1080 | 0.1160 |
| | 0.1768 | 0.1872 | 0.1944 | 0.2000 | 0.2008 |
| No. of peak values | 250 | 238 | 248 | 270 | 290 |
| | 442 | 468 | 486 | 500 | 502 |
| No. of filters | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| RE | 0.128 920 | 0.122 280 | 0.107 200 | 0.096 502 | 0.087 137 |
| | 0.054 518 | 0.051 687 | 0.048 923 | 0.047 368 | - |
| CR | 0.1248 | 0.1368 | 0.1480 | 0.1600 | 0.1696 |
| | 0.2040 | 0.2008 | 0.2056 | 0.2136 | - |
| No. of peak values | 312 | 342 | 370 | 400 | 424 |
| | 510 | 502 | 514 | 534 | - |

Table 4 Optimization of number of filters(using Kobe)

| No. of filters | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| RE | 0.005 121 | 0.005 108 | 0.005 087 | 0.004 517 | 0.002 999 |
| | 0.000 978 | 0.000 848 | 0.000 748 | 0.000 698 | 0.000 655 |
| CR | 0.191 46 | 0.221 95 | 0.231 71 | 0.253 66 | 0.278 05 |
| | 0.452 44 | 0.467 07 | 0.474 39 | 0.486 59 | 0.493 90 |
| No. of peak values | 157 | 182 | 190 | 208 | 228 |
| | 371 | 383 | 389 | 399 | 405 |
| No. of filters | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| RE | 0.002 680 | 0.002 440 | 0.002 021 | 0.001 483 | 0.001 199 |
| | 0.000 622 | 0.000 605 | 0.000 599 | 0.000 586 | - |
| CR | 0.304 88 | 0.353 66 | 0.380 49 | 0.413 41 | 0.436 59 |
| | 0.506 10 | 0.506 10 | 0.501 22 | 0.503 66 | - |
| No. of peak values | 250 | 290 | 312 | 339 | 358 |
| | 415 | 415 | 411 | 413 | - |

개수는 5개, 대역폭은 0.6 Hz 그리고, 간격은 1.0 Hz 을 결정하였다.

3.2 인공필터뱅크 기반 무선 계측시스템 (WiMMS)

앞서 2절에서 개발된 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크는 3.1절에서 최적화 조건으로 설계되었다. 이렇게 소프트웨어 기반으로 개발, 설계된 인공필터뱅크는 계측시스템에 임베디딩을 통해 기능구현과 더불어, 차후 필터의 수정, 적용의 편리성을 제공할 수 있다. 이를 위해 이 논문에서는 RTOS(real-time operating system) 기반의 디지털 소프트웨어 디자인 방식으로 동적 무선 계측시스템을 구성하였다. 시스템 구성요소 중 데이터 로깅 및 컨트롤러는 미국 NI사의 cDAQ-9139를 사용하였다. 또한, 다채널 가속도 계측은 Piezo 센서를 사용할 수 있는 NI-9233 모듈을 사용하였고, 양방향 RF통신은 Moxa사의 AWK-3121 모듈을 사용하였으며, 이때 관리자 PC 즉, 중앙관리 시스템은 실시간 다채널 가속도 응답을 획득, 분석, 저장할 수 있도록 Labview를 활용해 GUI(graphical user interface)를 완성하였다.



Fig. 3 Setup of CAFB-based WiMMS

Table 5 H/W & S/W of CAFB-based WiMMS

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

4. 2-SPAN 모형교량 및 동적응답 실험

4.1 2-SPAN 모형교량

El-centro 및 Kobe 지진파로 최적화된 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크의 응답성능을 실험적으로 평가하기 위하여, 이 논문에서는 실험실 규모의 2-span 교량을 제작하여 활용하였다. 2-Span 교량은 short-span (2300 mm × 1800 mm × 400 mm(B × L × H))과 long-span(6000 mm × 1800 mm × 400 mm(B × L × H))을 2개의 가진 테이블에 길이방향으로 배치하였으며, 좌측 및 우측 단에는 구조물 손상을 방지하기 위하여 충격받침을 설치하였다. 또한 각 span의 하부에는 지진이 발생할 경우의 이벤트 상황을 모사하기 위해, 서로 다른 강성의 LRB(lead rubber bearing)를 활용하여 각 span이 상호 충돌(이벤트) 상황을 발생시킬 수 있도록 설정하였다. 마지막으로 구조물의 가진은 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크의 최적화에 기준응답으로 사용된 Fig. 2의 El-centro 및 Kobe 지진파형을 규모화 하여 가진 테이블을 수평가진 하였고, Fig. 4와 같이 구조응답은 short-span 수평방향 가속도(A-SA), long-span 수평방향 가속도(A-SA), 가진 테이블의 수평방향 가속도(T-B)를 가진조건별로 획득하였다.

Fig. 4는 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크의 응답성능을 실험적으로 평가하기 위하여 설계된 2-span 교량의 배치와 구조응답 획득을 위한 가속도 센서들의 위치를 나타낸 것이다.

4.2 모형교량의 동적응답 실험

달팽이관 원리기반 인공필터뱅크가 적용된 동적 무선 계측시스템의 성능을 평가하기 위하여, 이 논문

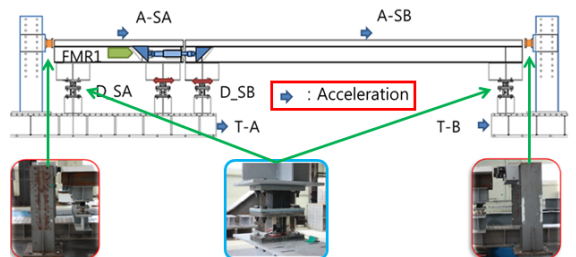


Fig. 4 Plan of the two-span bridge model and point of measurement(El-centro & Kobe)

에서는 유선 계측시스템을 병용하여 동적응답 실험을 수행하였으며, 이때 총 50초 동안 200 Hz의 샘플률을 이용해 가속도 응답을 획득하였다. 동적 무선 계측시스템에 임베디드된 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크는 앞서 3절에서 도출된 최적화 조건 즉, El-centro 지진파형을 기준으로 총 6개의 대역통과 필터, 0.6 Hz의 필터 대역폭, 1.0 Hz의 필터 간격으로 설계하였고, 또한 Kobe 지진파형을 기준으로 총 5개의 대역통과필터, 0.6Hz의 필터 대역폭 그리고, 1.0 Hz의 필터 간격으로 각각 설계하였다. 다음 Fig. 5는 2-span 교량의 El-centro 및 Kobe 지진파형의 가진조건에 대한 동적응답 획득을 위한 지진모사 실험의 전경이다.

El-centro 및 Kobe 지진파형을 이용한 지진모사 실험을 위하여 부산대학교 지진방재연구센터(Korea)에서 실험을 진행하였고, 이때 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크가 임베디드된 무선계측 응답의 비교를 위해 요구된 비교 군(유선계측 응답) 데이터는 지진방재연구센터에서 계측하여 제공되었다. Fig. 6과 Fig. 7은 El-centro 및 Kobe 지진파형의 가진조건에서 각각 실시간 계측된 유선 계측응답과 무선 계측 응답의 원시신호(raw signal)를 시간과 주파수 영역으로 나타낸 것이다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 El-centro 지진파형 가진조건에 대한 가진 테이블에서 계측된 가속도의 시간과 주파수 응답을 나타낸 것이고, Fig. 7(a)와 Fig. 7(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 무선 계측시스템으로 획득한 원시신호가 유선 계측시스템의 신호를 온전히 추종함에 따라, 이 논문에서 구성한 무선



Fig. 5 Experiment setup for acquiring dynamic response of a two-span bridge(El-centro & Kobe)

계측시스템이 타당함을 확인하였다. Fig. 6(c)~(f)와 Fig. 7(c)~(f)는 El-centro 및 Kobe 지진파형 가진조건에 대한 short-span과 long-span의 시간과 주파수 응답을 구분하여 나타낸 것이다. 이들 응답을 보면, 우선 무선 계측시스템으로 획득한 원시신호가 유선 계측시스템의 신호를 온전히 추종함을 확인할 수 있고, 특히 short-span과 long-span의 고유 진동수 대역을 함께 확인할 수 있다. 여기서 short-span과 long-span의 고유 진동수는 각각 5 Hz 및 2 Hz 내외로 평가되었다. 더불어 Fig. 6(e) 및 Fig. 7(e)에서 보면, 구조물의 주기성에는 영향을 주지 않지만, 이들 두 span의 충돌(이벤트)에 따른 정보를 급격한 가속도 상승으로 확인할 수 있었다. 궁극적으로 이 논문에서 무선 계측시스템을 이용하여 실시간 획득한 무선 동적응답은 유선 동적응답과 상호 우수한 일치도를 보였으며, 이를 근거로 이 논문에서는 획득된 무선 동적응답(원시신호)을 개발된 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크의 응답성능을 비교평가하기 위한 기준(reference)신호로 활용하였다.

5. AFB 응답성능 평가

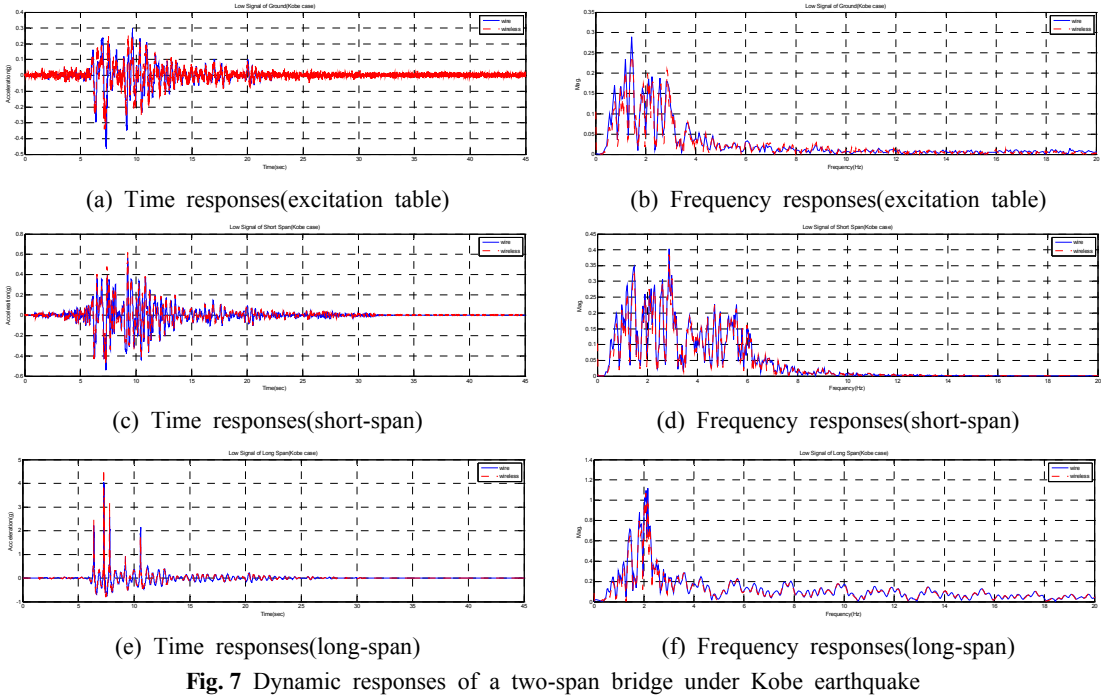
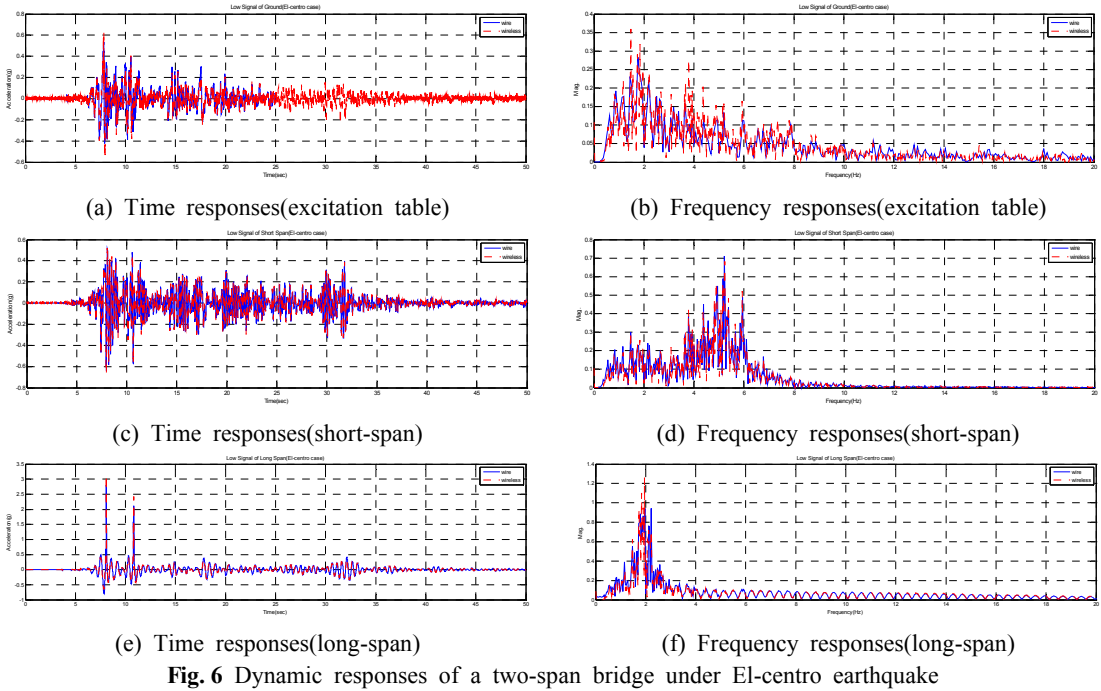
5.1 재건성능 평가

이 논문에서는 El-centro 및 Kobe 지진파형을 이용해 각각 최적화 설계된 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크의 데이터 재건성능을 정량적으로 평가하기 위하여, 앞서 4절에서 평가된 무선 계측시스템으로 계측된 동적응답을 기준신호(원시신호)로 설정하여 원시신호 대비 재건신호의 추종능력을 평가하였다. 이때 재건신호는 최적화된 인공필터뱅크를 통과한 필터링 신호를 의미한다. Fig. 8은 Fig. 6(e) 및 Fig. 6(f)의 El-centro 지진파형 가진조건에서 무선계측을 통해 획득한 원시신호 대비 시간 및 주파수 영역의 재건신호를 비교해 나타낸 것이고, Fig. 9는 Fig. 7(e) 및 Fig. 7(f)의 Kobe 지진파형 가진조건에서 무선계측을 통해 획득한 원시신호 대비 시간 및 주파수 영역의 재건신호를 비교해 나타낸 것이다.

Fig. 8 및 Fig. 9에서 보면, El-centro 및 Kobe 지진파형을 이용해 각각 최적화 설계된 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크는 재건신호가 원시신호의 모드 정보를 충분히 재현하였고 결국, 인공필터뱅크의 대역통과필터 최적화 알고리즘이 초기 설계조건인

10 Hz 주파수 범위 내에서 목적모드를 온전히 표현할 수 있음이 확인되었다. 이때 Fig. 8(a)와 Fig. 9(a)에 나타난 원신호 대비 재건설호의 오차율(RE)은

각각 0.005 292 3(재건설율은 약 99.5 %)과 0.018 079 (재건설율은 약 99 %)으로 나타났으며, 결국 이 논문에서 El-centro 및 Kobe 지진파형 조건으로 각각



설계된 인공필터뱅크가 목적응답을 획득하기에 온전히 최적화되었음을 확인할 수 있었다.

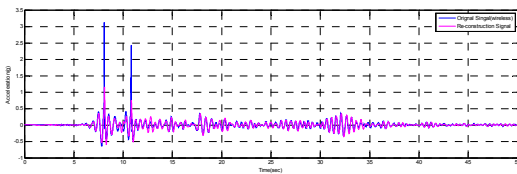
5.2 압축성능 평가

다음으로 달팽이관 원리 기반 인공필터뱅크의 데이터 압축성능을 평가하기 위해, 앞서 Fig. 8 및 Fig. 9의 재건신호를 기준으로 PPA를 이용해 시간 및 주파수 영역의 침두치 신호만을 색출하였다.

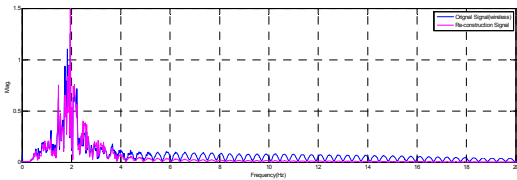
먼저 Fig. 10은 Fig. 8의 El-centro 지진파형 가진조건에서 무선계측을 통해 획득한 원시신호 대비 시간 및 주파수 영역의 재건신호와 압축신호를 상호 비교

하여 나타낸 것이고, Fig. 11은 Fig. 9의 Kobe 지진파형 가진조건에서 무선계측을 통해 획득한 원시신호 대비 시간 및 주파수 영역의 재건신호와 압축신호를 상호 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 10(a)에서 보면 침두치 색출 알고리즘이 재건신호에 대한 시간영역의 침두치만을 온전히 색출하였다. 이때 50초의 측정시간에 대한 총 10 000개의 획득데이터 중 총 399개의 침두치가 색출되었으며, 이때 데이터 압축률(CR)은 0.0399, 데이터의 압축효과는 약 96%로 평가되었다. 또한 Fig. 11(a)에서

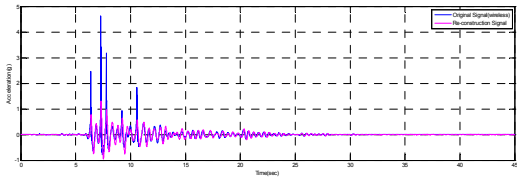


(a) Time responses

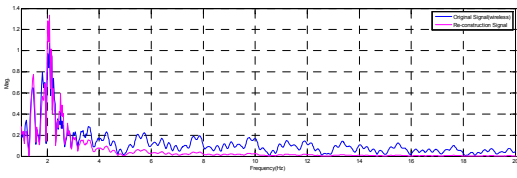


(b) Frequency responses

Fig. 8 Comparison of the reconstruction signal to the original signal under El-centro earthquake

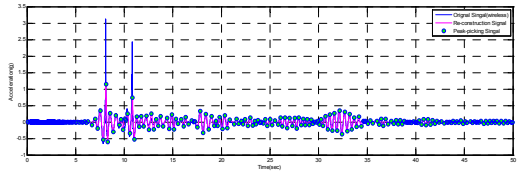


(a) Time responses

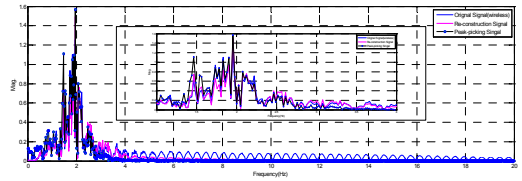


(b) Frequency responses

Fig. 9 Comparison of the reconstruction signal to the original signal under Kobe earthquake

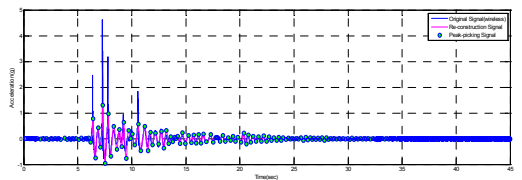


(a) Time responses

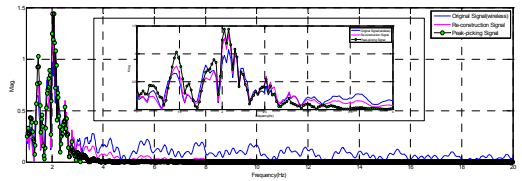


(b) Frequency responses

Fig. 10 Comparison of the reconstruction signal and compressive signal to the original signal under El-centro earthquake



(a) Time responses



(b) Frequency responses

Fig. 11 Comparison of the reconstruction signal and compressive signal to the original signal under Kobe earthquake

보면, Fig. 10(a)에서와 유사하게 침두치 색출 알고리즘이 재건설신호에 대한 시간영역의 침두치만을 온전히 색출하였다. 이때 45초의 측정시간에 대한 총 9000개의 획득데이터 중 총 715개의 침두치를 색출하였으며, 결국 데이터 압축률(CR)은 0.07944, 데이터의 압축효과는 약 92%로 평가되었다. 다음으로 Fig. 10(b)의 스펙트럼 분석결과를 보면, 전체 신호 중 약 4%의 침두치 신호만으로도, Fig. 11(b)의 스펙트럼 분석결과를 보면, 전체 신호 중 약 8%의 침두치 신호만으로도 목적된 모드정보를 명확히 표현할 수 있었다. 결국 인공필터뱅크의 침두치 색출 알고리즘은 침두치 색출을 통해 데이터의 압축과 더불어 정확한 모드정보를 나타내는데 효과적이었다.

6. 결 론

이 논문에서는 기존 WSNs를 이용한 건전도 모니터링의 기술적 대안으로, 달팽이관 원리기반의 인공필터뱅크를 개발하고, 이를 실험적으로 검증하였다. 이를 위해 달팽이관 원리기반의 인공필터뱅크를 El-centro 및 Kobe 지진파형으로 각각 최적화하였고, 각 지진파형의 조건으로 가진된 2-span 모형 교량을 대상으로 실시간 동적응답을 획득하고 분석하였다. 이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압축센싱을 위해 개발된 CAFB의 BOA는 랜덤신호의 광범위한 주파수 성분 중 관심모드(이 논문에서는 10 Hz 미만)에 대한 주파수 신호만을 집중적으로 부각시켜 표현하는데 효과적이었다.

(2) 압축센싱을 위해 개발된 CAFB의 PPA는 전체 신호 중 유효 모달정보를 포함한 침두치만을 선택적으로 재-표본화 할 수 있었고, 압축된 유효 동적응답을 색출하는데 타당하였다.

(3) 달팽이관 원리기반 인공필터뱅크가 적용된 무선 계측시스템(WiMMS)은 관심된 주파수 대역을 중심으로 압축된 크기로 유효한 동적응답을 실시간 획득할 수 있어, WSNs기반 SHM 시스템의 제한된 RF 성능으로 인한 병목현상을 피하면서 효율적으로 SHM을 수행할 수 있을 것으로 사료되었다.

(4) 특히 WiMMS는 이 논문에서의 CAFB 뿐만 아니라, SHM을 위해 사용자 중심으로 개발된 S/W

기반의 다양한 함수와 논리를 시스템에 빠르고 정확하게 임베딩(하드웨어적 시스템화)하고, 이를 실시간 운영할 수 있어 새로운 개념의 계측기술로 활용될 수 있는 가능성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부, 미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2013R1A2A1A01016192, No. NRF-2013R1A1A1063540).

References

- (1) Sohn, H., Farrar, R., Hemez, H. and 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, Vol. 11, No. 2, pp. 91~124.
- (3) Abe, M. and Fujino, Y., 2009, Bridge Monitoring in Japan, Encyclopedia of Structural Health Monitoring, Vol. 5, John Wiley and Sons.
- (4) Koh, H. M., Lee, H. S., Kim, S. and Choo, J. F., 2009, Monitoring of Bridge in Korea, Encyclopedia of Structural Health Monitoring, Vol. 5, John Wiley and Sons.
- (5) Aktan, A. E., Catbas, F. N., Grimmelsman, K. A. and Pervizpour, M., 2003, Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges, Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Institute.
- (6) Peeters, B., Couvreur, G., Razinkov, O. and 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.
- (7) Ko, J. M. and Ni, Y. Q., 2005, Technology Developments in Structural Health Monitoring of Large-scale Bridges, Engineering Structures, Vol. 27, No. 12, pp. 1715~1725.
- (8) Heo, G. and 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, *J. Civil Engineering*, Vol. 13, No. 5, pp. 333~337.

(9) Lynch, P. J., 2007, An Overview of Wireless Structural Health Monitoring for Civil Structures, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 365, No. 1851, pp. 345~372.

(10) Peckens, C. A. and Lynch, J. P., 2013, Utilizing the Cochlea as a Bio-inspired Compressive Sensing Technique, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, No. 10, pp. 105027.

(11) Peckens, C. A., Lynch, J. P. and Heo, G., 2015, Resource-efficient Wireless Sensor Network Architecture Based on Bio-mimicry of the Mammalian auditory System, *Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 26, No. 1, pp. 79~100.

(12) Jang, S., Jo, H., Cho, S., Mechitov, K., Rice, J. A., Sim, S.-H., Jung, H.-J., Yun, C. B., Spencer, B. F. Jr. and Agha, G., 2010, Structural Health Monitoring of a Cable-stayed Bridge using Smart Sensor Technology: Deployment and Evaluation, *Smart Structures and System*, Vol. 6, No. 5-6, pp. 439~459.

(13) Ko, J. M. and Ni, Y. Q., 2003, Structural Health Monitoring and Intelligent Vibration Control of Cable-supported Bridge: Research and Application, *KSEC Journal of Civil Engineering*, Vol. 7, No. 6, pp. 701~716.

(14) Lee, S. J., Kim, S. B., Choi, K. Y. and Lee, T. Y., 2007, Adaptation of Modal Parameter and Elastic Modulus Estimation Method of PSC Bridge Based on Ambient Vibration, *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, pp. 574~577.

(15) Lee, K. W., Jung, S. H. and Park, E. Y., 2008, Railway Structure Health Monitoring Using Innovative Sensing Technologies, *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 762~767.

(16) Kim, D. K., Kim, J. I. and Kim, D. H., 2001, Instrumentation and Structural Health Monitoring of

Bridges, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 11, No. 5, pp. 108~122.



Gwanghee Heo, He received a Ph.D. in Civil Engineering from the University of New Mexico in 1996. Currently, he is teaching at Konyang University. His research interests lie in structural health monitoring, vibration control, structural damage, wireless communication, earthquake engineering and so on. Recently, he is studying on a bio-inspired structural system based on bio-sensing and bio-actuating system.



Joonryong Jeon, He received a Ph.D. in Civil Engineering in 2011 from the Chungnam National University. Now, he is a research professor in the department of civil and environmental engineering at the Konyang University.

His main research areas are smart health monitoring, design of semi-active dampers, vibration control, wireless sensing and system identification of infrastructure in real-time.



Seunggon Jeon, He received the B.S. degree in Civil Engineering in 2009 from the Konyang University and the M.S. degree in Civil Engineering in 2011 from the Konyang University. Now, He is a Ph.D. candidate in Civil

Engineering from Chungnam National University. His main research areas are smart health monitoring and vibration control of infrastructure in real-time.